NHỮNG CÔNG NGHỆ THỰC VẬT VÀ CẢI TIẾN GIỐNG CÂY TRỒNG ĐANG ĐÓNG GÓP VÀO THÍCH ỨNG VỚI BIẾN ĐỔI ĐỔI KHÍ HẬU

Diego Macall, Peter Phillips, David Castle & Stuart Smyth

15 THÁNG 9 NĂM 2022

Mục lục

Tóm tắt iii
1. Giới thiệu 1
1.1 Mục tiêu báo cáo 2
2. Vai trò của Đổi mới Nông Nghiệp trong việc Giảm thiểu Tác động của Biến đổi Khí hậu 2
2.1 Bảo tồn Đất trồng 2
2.2 Cô lập Carbon 3
2.3 Thay đổi trong Sử dụng/ Độc tính Hoá học 5
2.4 Thay đổi trong Phát thải Khí Nhà kính 10
2.5 Thay đổi trong Sử dụng Đất trồng 12
2.6 Thay đổi trong Sức Khoẻ Đất trồng 14
3. Phân thích bối cảnh nghiên cứu 16
4. Phương pháp Phân tích và Đánh giá 18
5. Kết luận 21
6. Tài liệu tham khảo 23

Bảng biểu & hình ảnh

Hình 1: Diện tích đất bỏ trống ở vùng thảo nguyên Canada, 1966 - 2022 11
Hình 2: Lượng phát thải khí nhà kính ròng/lưu trữ carbon tại khu vực trồng trọt Saskatchewan, 1985-2016 11

Bảng 1: Các nghiên cứu về việc sử dụng thuốc trừ cỏ trên cải dầu 6
Bảng 2: Ma trận đánh giá tác động trích dẫn (số bài viết/ trích dẫn trung bình mỗi năm 17
Bảng 3: Tổng quan các phương pháp đánh giá 20
Bảng 4: Phân tích trích dẫn 21

Tóm tắt

Mục tiêu của bản báo cáo này là tóm tắt kết quả của những nghiên cứu độc lập với những bằng chứng cho thấy việc ứng dụng những đổi mới và cải tiến trong công nghệ lai tạo giống cây trồng và bảo vệ thực vật (BVTV), bao gồm cả các giải pháp sinh học, đã và đang đóng góp tích cực trong việc thích ứng và hạn chế các tác động tiêu cực từ biến đổi khí hậu. Trong khi có hàng loạt các công nghệ và sản phẩm khác nhau giúp thích ứng và giảm thiểu tác động tiêu cực của biến đổi khí hậu, nhưng có rất nhiều nghiên cứu tập trung phân tích cụ thể về quá trình phát triển các tính trạng chuyển gen (GMO traits), hiện trạng áp dụng các tính trạng này trong sản xuất những cây trồng chính, mức độ ứng dụng toàn cầu và những thay đổi tương ứng trong thực hành canh tác nông nghiệp. Điều này một phần là có nhiều nghiên cứu công khai tập trung vào đánh giá về tác động và mức độ sử dụng từ khi công nghệ gây tranh cãi này được giới thiệu. Đồng thời, bản thân công nghệ và các sản phẩm này đang tạo ra những đóng góp đáng kể vào việc giảm thiểu và thích ứng với biến đổi khí hậu trong thực tế. Trên hết, nghiên cứu khoa học đang dần dần hướng tới những tác động tích luỹ của các công nghệ mới, đặc biêt là cây trồng BĐG, đối với tính bền vững của hoạt động trồng trọt. Phân tích bối cảnh nghiên cứu cho thấy việc nghiên cứu về lĩnh vực này vẫn đang tiến triển và ngày càng trở nên phức tạp hơn; những cải tiến trong phương pháp nghiên cứu định tính cũng đang nổi lên. Khi ngành nông nghiệp được xác định là cần có những đánh giá và định lượng chính xác hơn về các đóng góp của nó đối với mục tiêu giảm thiểu và thích ứng với biến đổi khí hâu, dường như áp lực lên ngành công nghiệp này để cải thiện chất lượng và số lượng các nghiên cứu được xuất bản ngày càng nhiều, vượt xa các nghiên cứu hiện nay đang tập trung vào các đổi mới của cây trồng BĐG.

1. Giới thiệu

Việc thương mại hoá cây trồng BĐG từ giữa những năm 90 của thế kỷ trước đã thu hút sự quan tâm mang tính học thuật về tác động rộng lớn của công nghệ này trong việc tạo ra những dấu ấn về kinh tế và sinh thái lên nông nghiệp khi chúng thích nghivà tiếp nhận những khả năng mới. Tài liệu nghiên cứu này đưa ra những bằng chứng nổi bật về nhiều lợi ích khác nhau, không chỉ dừng lại ở việc tăng năng suất và giảm mức độ sử dụng các chất hoá học trong canh tác nông nghiệp. Trong khi ngày càng có nhiều công nghệ và sản phẩm mới ra đời, đóng góp trực tiếp vào hệ thống nông nghiệp - thực phẩm của thế giới, thì hầu hết các bằng chứng từ các nguồn thông tin công khai lại đang tập trung nghiên cứu cụ thể vào việc chuyển đổi sang công nghệ này. Báo cáo này sẽ nêu bật những kết quả từ các nghiên cứu này, đồng thời bổ sung một cách phù hợp những bằng chứng của một số công nghệ khác.

Tổ chức Quốc tế về Tiếp nhận và Ứng dụng Cây trồng CNSH trong nông nghiệp (ISAAA) là đơn vị phát hành báo cáo thường niên về mức độ ứng dụng cây trồng BĐG trên toàn cầu. Theo báo cáo gần đây nhất với các dữ liệu được thu thập từ năm 1996 tới 2019, tổng diện tích cây trồng BĐG trên toàn cầu là 190 triệu ha, được gieo trồng tại 29 quốc gia và thêm 43 quốc gia khác đang sử dụng (ISAAA, 2020). Năm quốc gia canh tác cây trồng BĐG hàng đầu là Hoa Kỳ, Brazil, Argentina, Canada và Ấn Độ với khi chiếm tới 91% tổng diện tích canh tác trên toàn thế giới. Các loại cây trồng BĐG phổ biết nhất là đậu tương (92 triệu ha), ngô (61 triệu ha), bông (26 triệu ha) và cải dầu (10 triệu ha) - tương ứng với tỷ lệ của mỗi loại cây trồng thì diện tích các cây trồng biến đổi gen sẽ chiếm 79% đối với bông, 74% đối với đậu tương, 31% đối với ngô và 27% đối với cải dầu vào năm 2019.

Công nghệ cây trồng BĐG là ví dụ công nghệ được phổ biến và áp dụng nhanh nhất trong lịch sử ngành nông nghiệp (Khush, 2012). Các nghiên cứu độc lập trên hầu hết những loại cây trồng BĐG được thương mại hóa ở hầu hết các quốc gia canh tác đều cho thấy rằng cây trồng BĐG đang góp phần tăng năng suất và giảm đầu vào hóa học một cách đáng kể. Từ đó tác động lớn nhất đó là cây trồng BĐG tạo ra thu nhập nông hộ cao hơn, đơn giản hoá các phương thức quản lý đất trồng, giảm thiểu các biện pháp sử dụng hóa chất và mang lại lợi ích môi trường đáng kể.

Khi các chính phủ đang ngày càng quan tâm hơn vào các chiến lược nhằm giảm thiểu và thích ứng với biến đổi khí hậu, việc áp dụng đổi mới khoa học sẽ tiếp tục là chìa khoá để thành công đạt được những mục tiêu đã cam kết đưa ra trong các hiệp ước quốc tế. Là một công nghệ tiên tiến được sử dụng rộng rãi trong 25 năm qua, cây trồng BĐG có khả năng trở thành một công cụ không thể thiếu đối với cả hai mục tiêu là giảm thiểu và thích ứng với biến đổi khí hậu. Việc áp dụng cây trồng BĐG đã cho thấy bằng chứng rõ ràng về sự đóng góp từ đổi mới trong lai tạo cây trồng trồng có thể và đã và đang tạo ra. Việc tiếp tục chuyển đổi sang các công nghệ lai tạo giống cây trồng mới hơn, chẳng hạn như chỉnh sửa gen đang sẵn sàng và nâng cao lợi ích đã đạt được cho đến nay từ cây trồng BĐG.

1.1 Mục tiêu báo cáo

Mục tiêu của bản báo cáo này là tóm tắt kết quả từ nhiều nghiên cứu độc lập với những bằng chứng cho thấy việc áp dụng đổi mới và cải tiến trong công nghệ lai tạo giống cây và bảo vệ thực vật (BVTV), bao gồm cả các giải pháp sinh học, đã và đang đóng góp tích cực trong việc thích ứng và hạn chế các tác động tiêu cực từ biến đổi khí hậu.

2. Vai trò của Đổi mới Nông Nghiệp trong việc Giảm thiểu Tác động của Biến đổi Khí hậu

2.1 Bảo tồn Đất trồng

Những cây trồng cho năng suất cao hơn và có tính chống chịu tốt hơn giúp giảm bớt áp lực lên những vùng đất có thể bảo tồn thành đất rừng, đất cỏ hoang hoặc đất ngập nước. Mặc dù những loại cây trồng này hiếm khi được xếp vào là một chiến lược khí hậu, nhưng đây có lẽ là một trong những đóng góp quan trọng nhất mà việc những cây trồng đổi mới có thể tạo ra, hướng tới đạt được mục tiêu giảm thiểu tác động từ biến đổi khí hậu.

Trong một báo cáo tiến hành trước khi sự chuyển đổi công nghệ sinh học lớn diễn ra, Tilman (1999) đã báo cáo rằng bằng cách áp dụng các đổi mới trong hệ thống canh tác nông nghiệp truyền thống, có sự liên hệ giữa việc tăng gấp đôi sản lượng lương thực nông nghiệp trong 35 năm trước đó với việc lượng phân đạm tăng gấp 6,87 lần, lượng phốt pho tăng 3,48 lần và diện tích đất trồng được tưới tiêu tăng gấp 1,68 lần nhưng diện tích đất canh tác chỉ tăng 1,1 lần. Tuy nhiên, điều mà ông không tính đến là nếu không áp dụng thâm canh, thì diện tích đất trồng sẽ cần nhiều hơn, thường là cận biên, dẫn đến mất khả năng hấp thụ carbon trong hệ thống đất và nước. Mở rộng lập luận này, OECD đã cho rằng năm 1960 là thời điểm mà việc gia tăng sản xuất nông nghiệp không song hành với mức độ gia tăng sử dụng đất trồng. Tổ chức này xác nhận rằng từ năm 1960-2020, việc sử dụng đất đã tăng 1,1 lần, trong khi sản lượng lương thực tăng 3,9 lần (OECD, 2021).

Với sự ra đời và áp dụng rộng rãi cây trồng BĐG, chúng ta có một bối cảnh mới để đánh giá tác động từ những thay đổi công nghệ lớn. Barrow và cộng sự (2014) khi xem xét tác động của việc canh tác cây trồng BĐG đối với nguồn cung và mức độ sử dụng đất trồng, đã phát hiện ra rằng cây trồng BĐG đã giúp tiết kiệm được 13 triệu ha đất trồng trọt vào năm 2010. Một phân tích tương tự vài năm sau đó cho thấy nếu giả sử có một cuộc khủng hoảng khi áp dụng lệnh cấm cây trồng BĐG trên toàn cầu, thế giới sẽ cần thêm 3,1 triệu ha đất trồng trọt (Mahaffey và cộng sự, 2016). Trong tổng diện tích đất trồng cầm thêm đó, 2,5 triệu ha sẽ được chuyển đổi từ đất đồng cỏ trong khi 0,6 triệu ha còn lại sẽ được chuyển từ đất rừng - điều này sẽ tạo ra sự mất mát về sinh thái từ cây trồng.[1] Tương tự, Taheripour và cộng sự (2015) ước tính nếu Hoa Kỳ cấm thay vì trồng cây BĐG như hiện tại, một lượng đất trồng đáng

[1] *Chuyển đổi đất đồng đỏ và đất rừng sang đất trồng trọt sẽ không chỉ gây bất lợi đối với đa dạng sinh học, mà còn gia tăng đáng kể lượng khí nhà kính thải ra khí quyển.*

kể sẽ cần được chuyển đổi từ đất trồng các loại cây trồng khác, đất đồng cỏ trồng trọt, đất đồng cỏ và đất rừng để đáp ứng nhu cầu lương thực toàn cầu.

Báo cáo của Zhang và cộng sự (2016) đã chỉ ra sản lượng cây lương thực đã gia tăng hơn 370 triệu tấn trong giai đoạn 1996–2012 tại Hoa Kỳ, trong đó 1/7 sản lượng tăng lên là nhờ cây trồng BĐG. Để đạt được mức tăng sản lượng tương đương mà cây trồng BĐG mang lại, họ ước tính Hoa Kỳ sẽ cần thêm 300 triệu mẫu (Anh) đất để canh tác cây trồng thông thường. 300 triệu mẫu đất bổ sung này nhất thiết phải là những vùng đất cần thêm phân bón hoặc được tưới tiêu nhiều hơn - và điều này sẽ liên quan đến việc phá rừng và chuyển đổi đất, gây ra căng thẳng nghiêm trọng về sinh thái và môi trường. Một báo cáo của Graham Brookes và Peter Barfoot (2014) đã đưa ra kết luận tương tự: trong giai đoạn 1996–2013, họ ước tính rằng cây trồng công nghệ sinh học (CNSH)/ cây trồng BĐG đã giúp sản xuất thêm 138 triệu tấn đậu tương, 274 triệu tấn ngô, 21,7 triệu tấn bông và 8 triệu tấn cải dầu trên toàn cầu. Gziar sử những công nghệ cây trồng đó không được áp dụng, diện tích đất canh tác ở Hoa Kỳ sẽ cần tăng thêm 11% hoặc diện tích đất trồng ngũ cốc tại Châu Âu sẽ cần tăng lên 32% để duy trì mức sản lượng tương đương. Ước tính mức tăng năng suất hiện tại từ cây trồng BĐG trong giai đoạn 1996-2020 là 330 triệu tấn đậu tương và 595 triệu tấn ngô và mức tăng năng suất này tương đương với 261 tỷ USD (Brookes, 2022).

2.2 Cô lập Carbon

Những lợi ích này góp phần đạt được các mục tiêu môi trường khác. Ví dụ, Phelan và công sự (2011) đã thử nghiệm các phương án quản lý trang trại thâm canh cũng như các phương án "chia sẻ đất trồng" ít thâm canh hơn và kết luận rằng các loài chim, là một ví dụ, sẽ bị ảnh hưởng tiêu cực bởi cả hai phương pháp đã nêu, trong đó ít bị tổn hại hơn bởi phương án thâm canh. Khi việc áp dụng cây trồng BĐG được mở rộng từ cuối những năm 1990 đến đầu những năm 2000, nông dân bắt đầu trải nghiệm hiệu quả vô song trong việc kiểm soát cỏ dại. Trước khi cây trồng BĐG với tính trạng chống chịu thuốc trừ cỏ ra đời, các lựa chọn trong việc kiểm soát cỏ dại hiệu quả trên cây trồng bị hạn chế, dẫn đến việc nông dân chủ yếu áp dụng phương án bỏ hoang đất để kiểm soát cỏ dại hiệu quả. Tại các khu vực canh tác nông nghiệp trên vùng đất khô hạn, việc áp dụng biện pháp bỏ hoang đất trồng đã dẫn đến xói mòn và mất đất đáng kể, cũng như giảm khả năng bảo tồn độ ẩm. Cây trồng BĐG chống chịu thuốc trừ cỏ (HT) đã thúc đẩy quá trình chuyển đổi từ việc áp dụng phương pháp làm đất như một hình thức kiểm soát cỏ dại chính sang các biện pháp canh tác không làm đất liên tục.

Những tác động này đã được ghi nhận trong loạt báo cáo hàng năm về việc áp dụng cây trồng CNSH do PG Economics tiến hành.[2] Nghiên cứu này đã được xuất bản trong các bài nghiên cứu phản biện độc lập của Graham Brookes và Peter Barfoot trong đó bài viết gần nhất đã ước tính rằng 2,4 tỷ kg CO_2 đã bị cô lập từ việc canh tác cây trồng BĐG vào năm 2018 (Brookes và Barfoot, 2020). Các tác giả ước tính điều này tương đương với việc loại bỏ hơn 1,6 triệu phương tiện khỏi đường trong một năm.

[2] *Để tra cứu tài liệu xuất bản trước năm 2005, truy cập: https://pgeconomics.co.uk/publications.*

Bài báo cũng ước tính thêm rằng việc giảm các biện pháp làm đất và áp dụng phương pháp canh tác không làm đất đã khiến hơn 5,6 tỷ kg carbon được cô lập vào năm 2018 (tương đương với 20,6 tỷ kg CO^2 không thải ra vào bầu khí quyển toàn cầu). Lượng cô lập này tương đương với việc loại bỏ 13,6 triệu ô tô trên đường trong một năm. Kể từ năm 1996, thêm 302 tỷ kg CO2 đã được cô lập dưới dạng carbon trong đất.

Sutherland và cộng sự (2021) đã khảo sát nông dân ở Saskatchewan, xác định rằng việc kiểm soát cỏ dại bằng glyphosate là động lực công nghệ hàng đầu cho phép nông dân hầu như loại bỏ việc làm đất khỏi hoạt động canh tác của họ; xác nhận rằng diện tích đất bỏ hoang đã giảm từ 46% trong giai đoạn 1991-1994 xuống 1% ha trong giai đoạn 2016-2019. Kết quả tính toán carbon cho thấy vào các năm 1991-1994, một hecta đất trung bình của Saskatchewan - là nguồn phát thải carbon ròng - đã giải phóng 0,03 tấn/năm từ việc làm đất. Đến năm 2016-2019, một ha đất trung bình đã trở thành một bể chứa carbon ròng với mức lưu trữ 0,12 tấn/năm - điều này có được từ cả việc hạn chế carbon không bị giải phóng ra khi làm đất và việc gia tăng khả năng lưu trữ carbon khi canh tác sản cây trồng liên tục. Tương tự như vậy, khả năng lưu trữ carbon trong đất từ việc giảm lượng đất bỏ hoang đã tăng từ 0,02 tấn/ha/năm trong giai đoạn 1991-1994 lên 0,42 tấn/ha/năm trong giai đoạn 2016-2019. Giảm thời gian bỏ hoang đất đã giúp gia tăng mức SOC bằng cách giảm phát thải đất do phân hủy và tăng dư lượng cây trồng do cắt xén liên tục.

Áp dụng các giá trị này cho tổng sản lượng cây trồng của Saskatchewan (15,2 triệu ha) cho thấy rằng việc giảm lượng đất canh tác trong giai đoạn 1991-1994 và 2016-2019 đã khiến đất trồng chuyển từ dạng nguồn phát thải carbon ròng 0,4 triệu tấn/ năm sang thành bể lưu trữ carbon 1,9 Mt/năm. Từ việc giảm việc bỏ hoang đất, lượng carbon lưu trữ của Saskatchewan đã tăng từ 0,3 triệu tấn/năm lên 6,4 triệu tấn/năm. Nông nghiệp Canada thải ra khoảng 73 triệu tấn CO_2 tương đương, hoặc 20 triệu tấn carbon mỗi năm. Kết quả tính toán carbon cho thấy từ năm 2016-2019, đất của Saskatchewan hàng năm lưu trữ được khoảng 9 - 32% tổng lượng khí thải nông nghiệp do giảm làm đất và bỏ hoang. Ngoài ra, đất của Saskatchewan hiện đang lưu trữ được khoảng 3 - 11% lượng giảm phát thải cần thiết của Canada, tương đương với khoảng 219 triệu tấn CO_2 theo thoả thuận tại Hiệp định Paris mỗi năm.

Có rất nhiều tài liệu về những thay đổi trong sử dụng đất, giảm phát thải khí nhà kính (GHG) và tăng khả năng cô lập carbon, nhưng rất ít trong số tài liệu đó có thể định hình được cụ thể những thay đổi đó liên quan đến việc áp dụng cây trồng BĐG. Chẳng hạn, Awada và cộng sự (2021) đã xây dựng một mô hình với các phương thức canh tác khác nhau (ví dụ: thông thường, làm đất tối thiểu, không làm đất, bỏ hoang đất, luân canh cây trồng và lưu lại tàn dư cây trồng) và tỷ lệ sử dụng vật tư nông nghiệp đầu vào (tức là phân bón và nhiên liệu) để ước tính mức độ ảnh hưởng đến phát thải nhà kính của chúng ở các vùng khí hậu thổ nhưỡng khác nhau và các tỉnh trong khu vực Canada Prairies. Việc áp dụng các biện pháp canh tác bền vững đã giúp giảm 80% lượng phát thải khí nhà kính từ canh tác nông nghiệp từ năm 1985 đến năm 2016. Mặc dù đóng góp của cây trồng BĐG chưa được khám phá rõ ràng nhưng chúng được ghi nhận là yếu tố quan trọng trong cơ hội sử dụng các phương pháp bảo tồn đất tiên tiến, giảm lượng sử dụng phân bón và nhiên liệu.

Hầu hết các học giả đều đồng ý rằng việc tăng cường hấp thụ carbon và lợi ích của việc này gắn bó chặt chẽ với việc áp dụng cây trồng BĐG và dẫn đến những thay đổi trong thực hành canh tác và quản lý đất đai. Rất ít bài viết phân tích cụ thể về vai trò của cây trồng BĐG; do đó, không thể ước tính phần nào của lợi ích được đo lường hoàn toàn là do cây trồng BĐG. Ví dụ, Rattan Lal[3] tại Đại học bang Ohio, một chuyên gia hàng đầu về hấp thụ carbon, đã công bố rộng rãi về việc tăng cường hấp thụ carbon từ những thay đổi trong sử dụng đất và tăng cường thâm canh cây trồng. Tuy nhiên, rất ít nghiên cứu của ông tập trung vào tác động của việc áp dụng cây trồng BĐG mặc dù đã có những công nhận rộng rãi trong các nghiên cứu chỉ ra rằng nếu không có cây trồng BĐG thì hầu hết các lợi ích đo được sẽ không tồn tại.

Kern và cộng sự (2012) đã tiến hành nghiên cứu nhằm định lượng cân bằng ròng của CO_2 thải ra và đồng hóa do áp dụng các biện pháp xử lý thuốc BVTV tại các nông trại. Cân bằng CO_2 cuối cùng là tích cực và có thể đạt tới bội số của gần 2000 khi so sánh lượng phát thải khí nhà kính thải ra do phun thuốc BVTV tại nông trại so với tổng lượng CO_2 lưu trữ trong sinh khối bổ sung, CO_2 được bảo vệ liên quan tới đầu vào kỹ thuật nông nghiệp, đất trồng và CO_2 tiết kiệm được do áp dụng những thay đổi sử dụng đất toàn cầu có liên quan. Phát hiện của họ chỉ ra rằng các sản phẩm thuốc BVTV đặc biệt góp phần vào phát thải và giảm thiểu khí nhà kính trong nông nghiệp.

2.3 Thay đổi trong Sử dụng/ Độc tính Hoá học

Mục tiêu của hạt giống BĐG là ghép gen di truyền cây trồng với các hóa chất ít độc hại hơn (trong trường hợp quản lý cỏ dại), giảm hóa chất (trong trường hợp các tính trạng kháng sâu Bt) hoặc để quản lý bệnh do virus có thể gây hại cho năng suất. Tùy theo từng cây trồng và mục tiêu cụ thể mà các cánh đồng trồng cây BĐG sử dụng các loại hóa chất khác nhau, sử dụng ít hóa chất hoặc không sử dụng hóa chất. Ở một số ít các nước đang phát triển, kết hợp một số phương pháp đã dẫn đến việc sử dụng hóa chất nhiều hơn, nhưng chủ yếu là do hiện việc quản lý áp lực của cỏ dại hoặc sâu bệnh có thể tiến hành hiệu quả và tiết kiệm chi phí hơn - điều mà các phương thức canh tác trước không thể đạt được.

Một loại cây trồng đã được nghiên cứu rộng rãi là cải dầu. Có một sự đồng thuận chung rằng lượng hoạt chất thuốc trừ cỏ cần dùng trên mỗi ha đất để sản xuất cải dầu GM ở Canada đã giảm, thuốc tỷ lệ phun thuốc trừ cỏ giảm, dẫn đến các tác động môi trường (EI) thấp hơn và mức độ phơi nhiễm của người trồng với thuốc trừ cỏ giảm *(xem Bảng 1).* Hội đồng Cải dầu Canada (2001) đã đánh giá tác động của cá phương thức canh tác khác nhau trong giai đoạn 1999-2000, khi khoảng ba phần tư diện tích canh tác cải dầu là các giống BĐG kháng thuốc trừ cỏ. Nghiên cứu ước tính rằng lượng thuốc trừ cỏ sử dụng thấp hơn trên các cánh đồng cải dầu BĐG ở vùng Tây Canada tương đương khoảng 6.000 tấn vào năm 2000.

[3] Xem website của ông để tra cứ các ấn phẩm xuất bản gần đây tại: https://senr.osu.edu/our-people/rattan-lal.

Bảng 1: Các nghiên cứu về việc sử dụng thuốc trừ cỏ trên cải dầu

Nghiên cứu	Địa điểm	Giai đoạn nghiên cứu	Lượng thuốc trừ cỏ	Thay đổi EI/ha
CCC 2001	Canada	1999/2000	- 40%	na
Brimner và cộng sự 2005*	Canada	1995-2000	- 20%	- 37%
Kleter và cộng sự 2007*	Hoa Kỳ	2004	- 30%	- 42%
Brookes & Barfoot 2010*	Canada & Hoa Kỳ	1996-2008	- 8%	- 16%
Leeson và cộng sự 2006	Canada	1995-2003	- 12%	- 22%

Ghi chú: (*) nghiêu cứu độc lập

Brimner và cộng sự (2005) đã tiến hành kiểm tra những thay đổi trong việc sử dụng thuốc trừ cỏ từ canh tác cải dầu BĐG chống chịu thuốc trừ cỏ từ năm 1995 đến 2000. Họ phát hiện ra rằng việc sử dụng thuốc trừ cỏ trên cải dầu thông thường tăng 30% trong khi sử dụng thuốc trừ cỏ trên cải dầu BĐG giảm 20%. Họ kết luận rằng chỉ số tác động môi trường khi canh tác cải dầu BĐG đã giảm 37%, nhưng tăng 56% đối với cải dầu thông thường. Các tác giả lưu ý rằng nghiên cứu của họ giả định rằng nông dân chỉ phun những loại thuốc trừ cỏ được chỉ định trên cải dầu BĐG chống chịu thuốc trừ cỏ và không trộn lẫn với các loại thuốc diệt cỏ khác, điều này có thể dẫn đến việc ước tính sẽ thấp hơn so với tỷ lệ thực tế; ngược lại, họ bỏ qua bất kỳ loại thuốc trừ cỏ nào phun trên cải dầu thông thường như đốt cỏ cháy trước khi gieo hạt. Kleter và cộng sự (2007) đã so sánh giữa cải dầu thông thường và cây cải dầu BĐG ở Hoa Kỳ trong hơn 4 năm và phát hiện ra rằng việc sử dụng thuốc trừ cỏ đối với cây cải dầu BĐG thấp hơn 30% so với cây cải dầu thông thường. Tổng EI trên mỗi ha thấp hơn 42%, tác động sinh thái thấp hơn 39% và tác động đến nông dân thấp hơn 54%. Brookes và Barfoot (2010) đã so sánh và tổng hợp các giá trị chỉ số tác động môi trường (EIQ) giữa cây trồng BĐG và cây trồng thông thường ở Canada và Hoa Kỳ. Họ kết luận rằng từ năm 1996 đến 2008, tổng lượng hoạt chất phun trên cây cải dầu đã giảm 13,7 triệu kg tương đương với tỷ lệ giảm 18% và tác động môi trường giảm tương ứng là 24%. Nghiên cứu giả định rằng nông dân đã sử dụng thuốc trừ cỏ ở mức tối đa được khuyến nghị, điều này tạo ra khả năng ước tính cao hơn so với mức phun thực tế và do đó ước tính thấp hơn mức giảm cũng như lợi ích ròng tổng thể. Leeson và cộng sự (2006) đã xem xét xu hướng sử dụng thuốc trừ cỏ trong canh tác cải dầu, so sánh các cuộc điều tra cỏ dại từ ba tỉnh Prairie vào năm 1995 - 1997 với các cuộc điều tra tương tự từ tiến hành vào năm 2001 -2003, kết luận rằng việc sử dụng thuốc trừ cỏ đã giảm 12% và tác động môi trường giảm 22% trên mỗi ha.

Những thay đổi đáng kể trong việc sử dụng và phun thuốc trừ cỏ đã xảy ra trong thực tiễn quản lý cỏ dại ở Tây Canada (Smyth và cộng sự, 2011). Độc tính của thuốc trừ cỏ phun trên cải dầu đã giảm 53% khi so sánh dữ liệu canh tác cải dầu vào năm 1995 với năm 2006, mức độ tiếp xúc với hóa chất của người trồng đã giảm 55% và 1,3 triệu kg hoạt chất hóa học đáng lẽ cần để phun trên cải dầu thông

thường đã không phải sử dụng. Tác động môi trường tích lũy trên mỗi ha (EI/ha) từ việc sử dụng năm loại thuốc trừ cỏ hàng đầu vào năm 1995 là 46.715, trong khi con số này vào năm 2006 là 29.458. Nếu cây cải dầu BĐG chống chịu thuốc trừ cỏ không được phát triển và nông dân trồng cải dầu Canada tiếp tục sử dụng giống và công nghệ trước đây, thì lượng hoạt chất trừ cỏ được phun để kiểm soát cỏ dại trong năm 2007 sẽ cao hơn 38% so với con số thực tế. Trong báo cáo của Brookes và Barfoot (2020) về tình hình canh tác cải dầu ở Canada, ước tính mức giảm hoạt chất hóa học là 34,3 triệu kg, tương ứng với mức giảm 35% tác động đến môi trường.

Các loại cây trồng khác cũng có tác động tương tự. Trong nghiên cứu gần đây nhất về tác động môi trường của cây trồng BĐG, Brookes và Barfoot (2020) kết luận rằng việc sản xuất đậu tương BĐGở Canada trong giai đoạn 1997-2018 đã giảm 4,56 triệu kg lượng hoạt chất hóa học cần sử dụng, tương đương với tác động môi trường giảm 23% từ việc sử dụng hóa chất trong canh tác đậu tương. Áp dụng đánh giá tương tự cho sản xuất đậu tương ở Brazil trong giai đoạn 1997-2018 đã xác định được mức tăng 24 triệu kg hoạt chất hóa học, tuy nhiên, tác động môi trường từ việc phun hoá chất đã giảm 7,2%. Về sản xuất đậu tương toàn cầu, các tác giả xác định lượng hoạt chất hóa học tăng thêm 5 triệu kg, tức là tăng 0,1%, tương đương mức giảm 12,9% tác động đến môi trường. Một lưu ý rất quan trọng liên quan tới sự thay đổi lượng sử dụng hoá chất toàn cầu đó là Brookes và Barfoot không tính đến những thay đổi về số liệu sản xuất đậu tương trong giai đoạn này, vì chỉ riêng tại Hoa Kỳ, diện tích canh tác đậu tương ở Hoa Kỳ đã tăng thêm 20 triệu mẫu (Anh).[4] Việc diện tích sản xuất đậu tương gia tăng sẽ giải thích cho việc tại sao lượng hoá chất sử dụng ra tăng mà không nhất thiết tiết lộ tỷ lệ sử dụng thấp hơn. Sản lượng đậu tương toàn cầu đã tăng đáng kể kể từ năm 1995, tăng từ 25 triệu tấn lên 240 triệu tấn.[5] Sản lượng đậu tương ở Mỹ Latinh từ năm 1990 đến 2016 đã tăng trưởng đáng ngạc nhiên khi tỷ lệ tăng tại Argentina là 286%, Brazil là 248% , Paraguay là 281% và Uruguay là 3,474%.

Để đánh giá tốt hơn bản chất và tác động của những thay đổi trong việc sử dụng thuốc BVTV, một đánh giá về việc sử dụng hóa chất của nông dân trồng ngô và đậu tương Hoa Kỳ từ năm 1998 đến 2011 đã được tiến hành bởi Perry và cộng sự (2016). Trung bình, những người trồng đậu tương BĐG chống chịu glyphosate (GT) sử dụng thuốc trừ cỏ nhiều hơn 28% (0,30 kg/ha) so với những người trồng đậu tương thường; những người trồng ngô BĐG GT sử dụng ít thuốc trừ cỏ hơn 1,2% (0,03 kg/ha) so với những người trồng ngô thường; những người trồng Ngô BĐG kháng sâu sử dụng thuốc trừ sâu ít hơn 11,2% (0,013 kg/ha) so với người trồng ngô thường. Tuy nhiên, đánh giá chỉ số EIQ liên quan tới sử dụng thuốc BVTV, các nhà nghiên cứu đã xác định rằng (so với người trồng cây trồng thường) những người trồng cây BĐG đã sử dụng lượng thuốc trừ cỏ tương đương trên đậu tương, sử dụng thuốc trừ cỏ ít hơn 9,8% trên ngô và sử dụng thuốc trừ sâu ít hơn 10,4% trên ngô.

Một báo cáo đánh giá mức độ sử dụng atrazine cho sản xuất ngô ở Wisconsin đã đánh giá tác động của việc hạn chế sử dụng atrazine đối với phạm vi thực hành quản lý cỏ dại (Dong và cộng sự,

[4] *Xem https://www.agri-pulse.com/ext/resources/AgSummit/2017-SoyStats.pdf.*
[5] *Xem: https://aei.ag/2017/07/24/global-soybean-production/*

2017). Các nhà nghiên cứu đã tiến hành khảo sát đối với nông dân tại cả những khu vực áp dụng hạn chế atrazine và những khu vực không áp dụng hạn chế. Kết quả cho thấy rằng việc hạn chế sử dụng atrazine đã làm gia tăng mức độ áp dụng các giống ngô chống chịu thuốc trừ cỏ (HT), sau đó góp phần làm tăng các biện pháp làm đất bảo tồn. Sự kết hợp giữa việc hạn chế atrazine và tăng mức độ sản xuất ngô BĐG chống chịu thuốc trừ cỏ đã góp phần làm giảm việc sử dụng thuốc trừ cỏ với nhiều cơ chế tác động khác nhau. Họ kết luận rằng việc giảm tính đa dạng trong việc lựa chọn các biện pháp kiểm soát cỏ dại có thể góp phần làm tăng khả năng kháng thuốc ở cỏ dại. Các học giả nhấn mạnh rằng những nỗ lực về pháp lý nhằm hạn chế atrazine trong nước ngầm có thể có tác động ngược trong việc kích thích cỏ dại kháng thuốc phát triển - điều này có thể kiểm soát thông qua làm đất, từ đó làm tăng xói mòn đất và suy giảm chất lượng nước.

Bông cũng là cây trồng mục tiêu và việc thương mại hóa bông BĐG đã giúp giảm đáng kể việc sử dụng hóa chất. Trong giai đoạn 1996-2018, Brookes và Barfoot (2020) đã xác định việc sản xuất bông BĐG chống chịu thuốc trừ cỏ đã dẫn đến mức giảm toàn cầu 40 triệu kg hoạt chất hóa học, giảm 12,2% tác động môi trường từ việc sử dụng hóa chất. Bông BĐG kháng sâu đã giúp giảm 331 triệu kg hoạt chất, tương đương với mức giảm 34% về tác động đến môi trường.

Việc thương mại hóa bông Bt năm 2002 ở Ấn Độ, với hàng triệu chủ nông hộ nhỏ, đã tạo cơ hội cho các nhà nghiên cứu đánh giá tác động việc áp dụng cây trồng BĐG cho nông dân ở các nước đang phát triển. Dựa trên các nghiên cứu thực địa, Qaim (2003) đã đánh giá việc áp dụng bông BĐG kháng sâu (Bt) ở Ấn Độ. Ông lưu ý rằng trước khi thương mại hóa bông BĐG, nông dân đã mất khoảng 50-60% sản lượng bông thu đwocj do côn trùng gây hại. Phân tích cho thấy bông BĐG đã khiến năng suất tăng trung bình 58% và chi phí thuốc trừ sâu giảm 50%. Subramanian và Qaim (2010) đã mở rộng nghiên cứu này và báo cáo rằng sau 4 năm sản xuất, năng suất bông Bt cao hơn 37% và việc sử dụng thuốc trừ sâu giảm 41%. Các lợi ích kinh tế xã hội bổ sung cũng được đánh giá trong đó với tác động đáng chú ý nhất đó là mức độ lao động nữ được trả lương gia tăng do sản xuất bông BĐG. Subramanian và Qaim ước tính rằng các hộ gia đình canh tác bông BĐG Bt có thu nhập tăng lên 82% và các hộ gia đình được FAO xác định là dễ bị tổn thương (nghĩa là thu nhập <2 đô la Mỹ/ngày) có thu nhập tăng lên 134%.

Nghiên cứu sâu hơn của Qaim (2014) cho thấy rằng việc sử dụng thuốc BVTV trên bông BĐG đã giảm từ 0,95-1,3kg hoạt chất /mẫu (Anh). Điều này giúp nôgn dân tiết kiệm chi phí khoảng từ 879 đến 1284 rupee (tương đương 13-19 đô la Mỹ) trên mỗi mẫu. Ở Ấn Độ, nông dân thường đi bộ trên đồng ruộng để phun thuốc BVTV bằng bình bơm đeo vai, trong hầu hết các trường hợp có rất ít hoặc gần như không có nông dân nào mặc quần áo bảo hộ khi phun thuốc. Hàng triệu trường hợp ngộ độc thuốc BVTV cấp tính được báo cáo hàng năm. Việc áp dụng bông Bt đã làm giảm số ca ngộ độc thuốc BVTV, ước tính khoảng từ 2,4 triệu đến 9 triệu ca hàng năm. Điều này đã tiết kiệm cho Bộ Y tế Ấn Độ khoảng 14-51 triệu USD/ năm (Kouser và Qaim, 2011). Không chỉ môi trường và sức khỏe của nông dân được hưởng lợi mà năng suất và lợi nhuận của những người trồng bông Bt cũng được gia tăng. Mặc dù người trồng sẽ phải chấp nhận trả giá cao hơn cho hạt giống bông BĐG, nhưng chi phí này được bù đắp nhiều hơn nhờ năng suất tăng 24% so với bông không BĐG. Lợi nhuận thậm chí còn tăng mạnh hơn, ước tính khoảng 1877

rupee (28 đô la Mỹ) trên một mẫu, tương đương với mức tăng 50%. Năm 2012, người ta ước tính có khoảng 27 triệu mẫu bông BĐG, chiếm 95% diện tích trồng bông tại Ấn Độ - điều này đã tạo ra lợi nhuận ròng cho nông dân là 1 tỷ đô la Mỹ. Sản xuất bông ở Ấn Độ đã tăng và đưa nước này hiện là nhà sản xuất bông hàng đầu thế giới.[6]

Trung Quốc đã đầu tư mạnh vào cây trồng CNSH và là quốc gia áp dụng mạnh mẽ bông BĐG Bt. Dựa trên một cuộc khảo sát năm 1999 đối với nông dân trồng bông ở miền bắc Trung Quốc, Pray và Huang (2003) đã đưa ra báo cáo đánh giá đầu tiên về tác động của bông BĐG tại quốc gia này. Nghiên cứu của họ đo lường các tác động về kinh tế, tỷ lệ thu nhập, môi trường và sức khỏe. Mặc dù không dễ để định lượng các tác động này do hoạt động mua bán tiến hành giữa nông dân với nông dân và thói quen sử dụng lại hạt giống từ năm này sang năm khác, nhưng các nhà nghiên cứu ước tính tỷ lệ áp dụng ban đầu dao động từ 8-27%. Tác động đáng kể nhất từ việc áp dụng bông BĐG Bt là lợi ích về môi trường và sức khỏe do giảm sử dụng thuốc BVTV. Việc áp dụng bông BĐG Bt cho phép nông dân ít phun thuốc thường xuyên hơn, trong một số trường hợp số lần phun giảm từ 30 lần mỗi mùa xuống còn 3 lần, nhưng tỷ lệ phổ biến hơn là từ 12 lần xuống 3-4 lần.

Huang và cộng sự (2010) đã cập nhật kết quả trồng bông BĐG Bt của Trung Quốc sau một thập kỷ sản xuất thương mại. Họ đã ghi nhận sự mức độ sâu đục quả phá hoại đã giảm, không chỉ trên các cánh đồng trồng bông BĐG mà còn trên tất cả các cánh đồng trồng bông khác ở các vùng của Trung Quốc. Ở một số cánh đồng bông không BĐG, lượng thuốc BVTV sử dụng đã giảm từ trên 40 kg/ha xuống dưới 10 kg/ha. Trên toàn bộ khu vực lấy mẫu, lượng thuốc BVTV đã giảm từ 14 kg/ha xuống còn 4 kg/ha.

Mức giảm tương tự cũng được ghi nhận đối với canh tác ngô BĐG chống chịu thuốc trừ cỏ khi việc ứng dụng cây trồng này đã giúp giảm giảm 242 triệu kg hoạt chất hóa học tương đương với mức giảm 12,1% về tác động đến môi trường (Brookes và Barfoot 2020). Ngô BĐG kháng sâu (Bt) đã giúp giảm 112 triệu kg thuốc hoá học sử dụng tương đương với mức giảm 63% tác động đến môi trường.

Các loại cây trồng khác chỉ được nghiên cứu thưa thớt. Việc thương mại hóa cà tím BĐG Bt kháng sâu ở Bangladesh đã dẫn đến lượng hóa chất cần sử dụng giảm, tương ứng mức EI giảm. Ahmed và cộng sự (2021) nhận thấy cà tím Bt ở Bangladesh đã giúp tăng năng suất lên 20%, giảm 38% chi phí cần cho thuốc BVTV và làm giảm 76% độc tính từ việc sử dụng thuốc BVTV. Macall và cộng sự. (2020) phát hiện ra rằng 84% nông dân trồng ngô Bt ở Honduras không sử dụng BVTV, trong khi năng suất đạt được cao hơn 50%.

Trong một đánh giá các tài liệu nghiên cứu rộng hơn về bao gồm các bài báo khoa học, báo cáo của chính phủ cũng như báo cáo của tổ chức ngành và nhiều tổ chức có liên quan, bản phân tích tổng hợp bao gồm 147 nghiên cứu của Klümper và Qaim (2014) đã chỉ ra việc sử dụng hóa chất đã giảm 37%, sản lượng tăng 22% và lợi nhuận của nông dân tăng 68% từ việc ứng dụng cây trồng BĐG.

[6] *Xem: https://www.ers.usda.gov/topics/crops/cotton-and-wool/cotton-sector-at-a-glance/#:%7E:text=The%20top%20two%20cotton%20producers,of%20cotton%2C%20surpassing%20China%20recently*

Một nghiên cứu đã được thực hiện để xem xét các tác động kinh tế và môi trường tiềm ẩn sẽ phát sinh nếu áp dụng các chính sách hạn chế sử dụng glyphosate dẫn đến việc thế giới không còn trồng cây trồng BĐG chống chịu thuốc trừ cỏ được nữa (Brookes và cộng sự 2017). Nghiên cứu chỉ ra rằng, thu nhập trang trại toàn cầu sẽ thiệt hại khoảng 6,76 tỷ đô la và sản lượng đậu tương, ngô và cải dầu toàn cầu sẽ giảm tương ứng là 18,6 triệu tấn, 3,1 triệu tấn và 1,44 triệu tấn. Những tổn thất về môi trường hàng năm liên quan đến mức độ gia tăng thực tế trong việc sử dụng thuốc trừ cỏ sẽ là 8,2 triệu kg hoạt chất diệt cỏ (tăng 1,7% so với hiện nay) và tác động tiêu cực lên môi trường tiêu cực sẽ lớn hơn, tương đương với mức tăng EIQ là 12,4%. Ngoài ra, lượng khí thải carbon phát sinh sẽ nhiều hơn do gia tăng sử dụng nhiên liệu và giảm khả năng cô lập carbon trong đất, tương đương lượng khí thải của việc có thêm 11,77 triệu ô tô lưu thông trên đường mỗi năm.

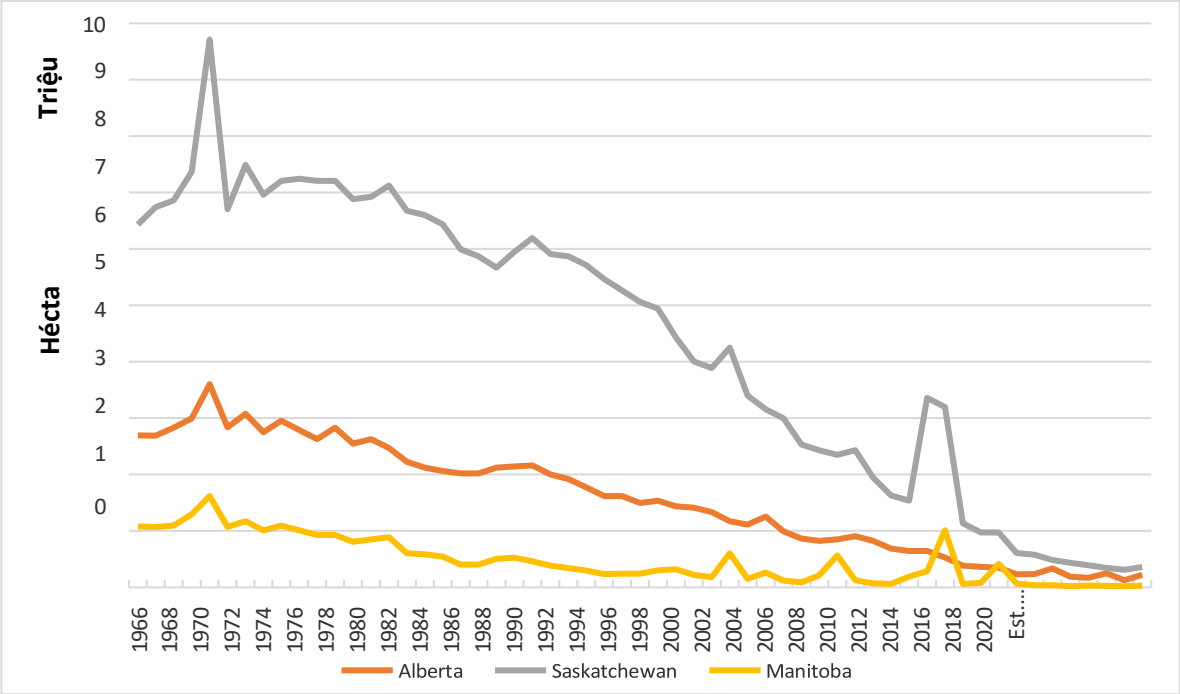
Cuối cùng, khía cạnh tác động gián tiếp liên quan tới việc giảm lượng thuốc hoá học sử dụng đó là đổi mới các lựa chọn cơ giới hoá. Walsh và cộng sự (2012) đã nghiên cứu tác động của đối mới như vậy, Harrington Seed Destructor, phát hiện ra rằng hạt cỏ dại sống sót đã giảm hơn 95% khi thu hoạch lúa mì, lúa mạch và đậu lupin. Sự phát tán của hạt cỏ dại khi thu hoạch bằng cách sử dụng máy gặt và máy gặt đập thông thường sẽ ảnh hưởng tới mức độ sử dụng thuốc trừ cỏ cần thiết cho mùa sau. Việc sử dụng cơ chế seed destructor sẽ khiến giảm đáng kể hạt cỏ dại khi thu hoạch, tạo cơ hội giảm sử dụng thuốc trừ cỏ trong các vụ tiếp theo.

2.4 Thay đổi trong Phát thải Khí Nhà kính

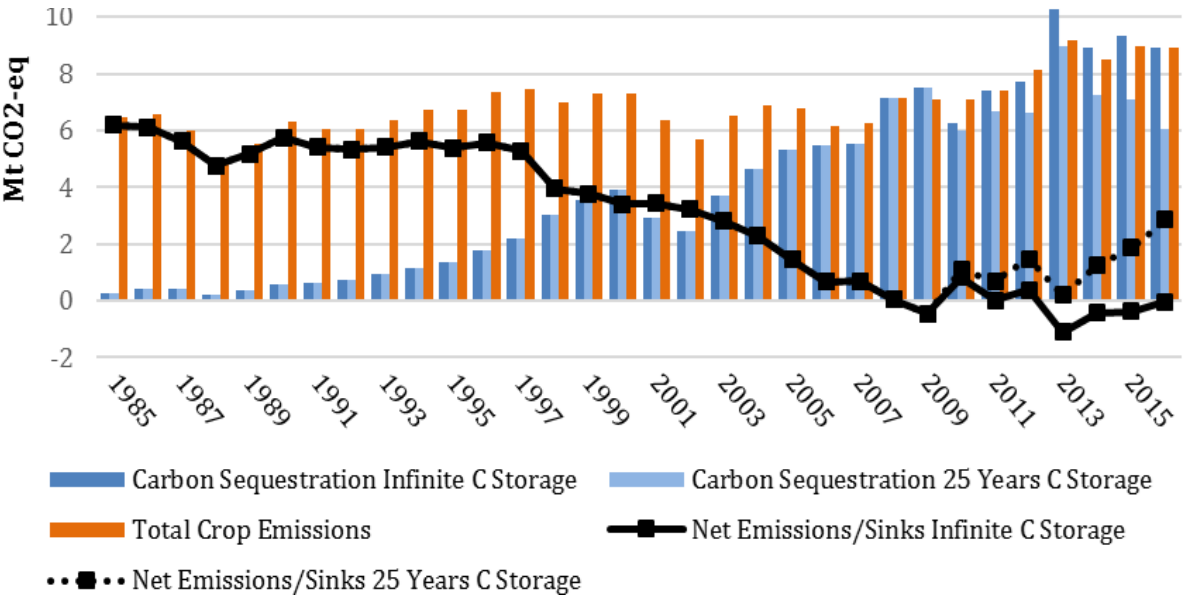
Khả năng kiểm soát cỏ dại được cải thiện đã dẫn đến việc nông dân chuyển đổi việc bỏ đất hoang như một phần của chiến lược luân canh cây trồng, sang loại bỏ gần như hoàn toàn các biện pháp bỏ hoang này. Hình 1 (dưới đây) minh họa mức độ giảm đáng kể trên khắp các tỉnh thảo nguyên của Canada là Alberta, Saskatchewan và Manitoba. Năm 1995, năm đầu tiên canh tác cải dầu BĐG, có 6,8 triệu ha đất canh tác cây cải dầu bị bỏ hoang trên ba tỉnh. Đến năm 2022, diện tích này giảm xuống còn 613.000 ha, giảm 91%.

Việc giảm thời gian bỏ hoang đất trồng đã làm gia tăng diện tích sản xuất cây trồng, làm thay đổi lượng phát thải khí nhà kính. Tùy thuộc vào từng khu vực canh tác, máy móc đi qua cánh đồng sẽ ít hơn khi một vùng đất đang dùng để trồng trọt so với đất bỏ trống. Ở các khu vực khác có thể có sự khác biệt nhỏ. Một ước tính (Smyth và Awada, 2018) về lượng phát thải khí nhà kính ở Saskatchewan đã chỉ ra rằng kể từ năm 2008, hoạt động trồng trọt đã giúp tích trữ carbon ròng *(xem Hình 2).* Từ năm 2013 đến năm 2016, lượng khí thải vẫn tương đối ổn định, khi phương thức canh tác không làm đất được áp dụng liên tục, dẫn đến tăng khả năng cô lập carbon, do đó lượng khí nhà kính ròng giảm xuống.

Hình 1: Diện tích đất bỏ trống ở vùng thảo nguyên Canada, 1966 - 2022



Hình 2: Lượng phát thải khí nhà kính ròng/lưu trữ carbon tại khu vực trồng trọt Saskatchewan, 1985-2016



Các nghiên cứu kinh tế mô hình hóa tác động của việc áp dụng canh tác bảo tồn đối với tính chất của đất cũng cho thấy tác động tích cực đến quá trình cô lập carbon. Một nghiên cứu của Grant và cộng sự (2004) đã điều tra những thay đổi trong thực tiễn quản lý ảnh hưởng như thế nào đến phát thải khí nhà kính, phát hiện ra rằng mức giảm phát thải ròng trung bình từ việc chuyển đổi sang phương thức canh

tác không làm đất là tương đương 0,61 Mg CO_2/ ha, mỗi năm ở Canada.7 Như đã lưu ý ở trên, Awada và cộng sự (2021) đã nhận thấy các phương pháp canh tác bền vững kết hợp cả việc thực hành làm đất tốt hơn và áp dụng công cụ di truyền mới sẽ dẫn đến mức giảm 80% lượng phát thải khí nhà kính từ trồng trọt tại các vùng thảo nguyên của Canada từ năm 1985 đến năm 2016. Kể từ năm 2005, lượng khí thải đã giảm 53%, nhiều hơn mức cần thiết để đáp ứng mục tiêu đặt ra tới năm 2030 tại Hiệp định Paris. Ở Alberta, hoạt động trồng trọt đã là ngành giúp giữ lại phát thải nhà kính ròng trong giai đoạn từ năm 2013 đến 2016 và giai đoạn từ năm 2006 đến 2016 ở Saskatchewan.

Shrestha và cộng sự. (2014) đã tiến hành phân tích thống kê về phát thải khí nhàu kính đối với sản xuất cải dầu của Canada trong giai đoạn 1986–2006, phát hiện ra rằng việc giảm thời gian để trống đất trồng đã giúp cô lập được tương đương 0,4 Mg CO_2/ ha mỗi năm, trong khi đó, việc áp dụng canh tác bảo tồn đã cô lập được lượng tương đương 0,2 Mg CO_2/ha/ năm. MacWilliam và cộng sự (2016) chỉ ra rằng lượng khí nhà kính phát thải từ sản xuất một tấn cải dầu đã giảm trên tất cả các vùng đất đồng cỏ của Canada do những thay đổi trong sử dụng và quản lý đất trồng từ năm 1990 đến 2010.

Tác động của việc chậm chễ áp dụng sản xuất cải dầu BĐG ở Úc đã được nghiên cứu bởi Biden và cộng sự (2018). Các nhà nghiên cứu nhận thấy rằng sự chậm trễ tích lũy đã dẫn đến việc phải gia tăng sử dụng thêm 6,5 triệu kg hoạt chất hóa học và để phun lượng hoạt chất hoá học này, đã có thêm 7 triệu lần di chuyển trên đồng ruộng và tiêu tốn 8,7 triệu lít dầu diesel. Tác động môi trường từ việc sử dụng gia tăng hoá chất tăng thêm 14% so với khi cây cải dầu BĐG được ứng dụng canh tác. Cuối cùng, không canh tác cải dầu BĐG đã tăng tổng lượng khí nhà kính thải ra môi trường, ước tính khoảng 24 triệu kg.

Một đánh giá về phát thải khí nhà kính từ canh tác nông nghiệp của Châu Âu đã kết luận rằng nếu châu lục áp dụng cây trồng BĐG kịp thời như Bắc Mỹ, tổng lượng phát thải từ canh tác nông nghiệp sẽ giảm 7,5% (Kovak và cộng sự, 2021). Con số tương đương với 33 triệu tấn CO_2 hàng năm.

2.5 Thay đổi trong Sử dụng Đất trồng

Tính trạng chống chịu thuốc trừ cỏ (HT) của cây trồng BĐG cho phép nông dân sử dụng các phương pháp quản lý cỏ dại phổ ruộng, phun trùm thuốc trừ cỏ mà không gây hại cho cây trồng. Nông dân trồng cải dầu BĐG HT có thêm cơ hội để áp dụng các biện pháp làm đất bảo tồn (Hudson và Richards, 2014; Hội đồng Nghiên cứu Quốc gia, 2010). Kết quả tương tự đã được tìm thấy trong sản xuất đậu tương BĐG HT. Năm 1997, ngay sau khi các giống đậu tương này được đưa vào sử dụng, diện tích đất trồng không cày xới được sử dụng để trồng đậu tương BĐG đã cao gấp đôi so với diện tích trồng đậu tương thông thường ở Mỹ (Fernandez-Cornejo, 2009). Kết quả từ một cuộc khảo sát tiến hành năm 2006 với 1.195 nông dân Hoa Kỳ tại 6 tiểu bang (Iowa, Illinois, Indiana, Mississippi, North Carolina và Nebraska) đã cho thấy mối quan hệ tương hỗ giữa việc áp dụng biện pháp làm đất bảo tồn và trồng cây BĐG. Trong số những nông dân tham gia khảo sát mà trước đây áp dụng phương pháp làm đất thông thường có 56%

[7] Một Mg đạ diện cho 1 mega-gram, tương đương với 1 tấn

trong số họ đã chuyển sáng áp dụng phương pháp làm đất tối thiểu hoặc không làm đất sau khi áp dụng trồng các loại cây BĐG HT và 25% những người trước đó đã thực hành làm đất tối thiểu sau đó chuyển sang không làm đất (Givens và cộng sự, 2009). Những kết quả tương tự cũng được đưa ra từ một cuộc khảo sát năm 2009 đối với nông dân Hoa Kỳ, trong đó 80% số người được hỏi khẳng định rằng canh tác cây BĐG HT đòi hỏi làm đất ít hơn so với sản xuất cây trồng thông thường (Harrington và cộng sự, 2009). Mối quan hệ tương hỗ giữa những công nghệ này cũng đã được nghiên cứu bằng cách sử dụng các kỹ thuật mô hình hóa kinh tế và kinh tế lượng. Kết luận từ các nghiên cứu này cũng khẳng định mối quan hệ này (ví dụ: Fernandez-Cornejo và cộng sự, 2002; Fernandez-Cornejo và cộng sự, 2013; Perry và cộng sự, 2016b).

Để kiểm soát cỏ dại đầy đủ vào khoảng thời gian đất bỏ trống, cần thực hành tối thiểu 3-4 lần làm đất hàng năm ở phía Tây Canada (Molberg và cộng sự, 1967) và số lần làm đất có thể lên tới 8 tùy thuộc vào mỗi khu vực khác nhau (Carlyle, 1997). Bỏ hoang ruộng cũng khiến hoạt động của vi sinh vật tiếp diễn và phân hủy tàn dư có sẵn trong đất nhưng không phân huỷ dư lượng của vật tư đầu vào - một yếu tố quan trọng làm tăng trữ lượng carbon hữu cơ (SOC) trong đất, dẫn đến giảm chất hữu cơ trong đất (SOM) (Boehm và cộng sự, 2004; Mikha và cộng sự, 2010). Tác động kết hợp của việc làm đất thường xuyên và thiếu tàn dư cây trồng dẫn đến xói mòn đất gia tăng và trong nhiều trường hợp, độ ẩm của đất suy giảm ngoài ý muốn. Do đó, trữ lượng SOC thường giảm trong những năm đất bị bỏ hoang (Ogle và cộng sự, 2005). Do đó, việc giảm diện tích đất bị bỏ trống góp phần làm tăng mức SOC bằng cách giảm phát thải đất và bằng cách tiến hành trồng trọt liên tục, tàn dư cây trồng sẽ tăng lên.

Các nghiên cứu xem xét tác động của việc giảm tình trạng bỏ hoang đất trồng đã được tiến hành bằng cách sử dụng các kỹ thuật lập mô hình. Ví dụ, Grant và cộng sự (2004) đã mô hình hóa tác động của những thay đổi trong phương thức quản lý lượng khí thải của Canada trong giai đoạn 1979-2029. Họ dự đoán rằng mức giảm phát thải ròng từ việc loại bỏ thực hành bỏ hoang đất trồng sẽ là 0,56 Mg CO2 mỗi ha mỗi năm. Trong một nghiên cứu về tác động lâu dài của quản lý trang trại đối với SOC, Sprow (2016) đã sử dụng các ước tính của IPCC năm 2006 cho các yếu tố SOC để nghiên cứu tác động của việc giảm tình trạng bỏ hoang đất trồng. Kết quả nghiên cứu của ông cho thấy tác động khiêm tốn của việc loại bỏ phương thức thực hành này khi gia tăng trữ lượng SOC lên 0,16-0,24 Mg C mỗi ha, mỗi năm và đóng góp khoảng 3% tổng lượng carbon cô lập tiềm năng từ tất cả các hoạt động được nghiên cứu. Gần đây hơn, Rosenzweig và Schipanski (2019) đã sử dụng dữ liệu vệ tinh để nghiên cứu các mô hình trồng trọt ở Colorado, Kansas và Nebraska, nhận thấy việc thực hành bỏ hoang đất trồng đã giảm từ 48% xuống 33% tổng diện tích đất trồng trọt ở vùng đất khô hạn. Các tác giả đã đánh giá tác động của việc thâm canh cây trồng này đối với quá trình cô lập carbon, kết luận rằng quá trình cô lập đã tăng 38% do áp dụng luân canh cường độ trung bình và liên tục thay cho việc bỏ trống đất.

Áp dụng luân canh cây trồng liên tục làm tăng tồn dư cây trồng trong đất, góp phần làm tăng tích lũy SOC (Campbell và cộng sự, 2002). Tồn dư cây trồng bao gồm bất kỳ rễ, thân hoặc vật liệu thực vật nào khác còn sót lại trên đồng ruộng sau khi thu hoạch. Khối lượng tồn dư cây trồng bị ảnh hưởng bởi năng suất cây trồng và sinh khối. Đầu thế kỷ 20, tồn dư cây trồng được coi là bất lợi và nông dân đã áp

dụng nhiều phương pháp để loại bỏ ra khỏi cánh đồng của họ. Thông thường, phần tồn dư sẽ bị đốt cháy hoặc sử dụng làm thức ăn gia súc và chất độn chuồng. Tuy nhiên, đến năm 1980, giá trị của việc cô lập carbon và đóng góp có ích của tồn dư cây trồng để giảm phát thải khí nhà kính ròng bắt đầu được công nhận.

Mặc dù nhiều nghiên cứu trước đây cho rằng tỷ lệ đầu vào carbon trong đất là tương tự nhau giữa các loại cây trồng, nhưng các nghiên cứu gần đây đã chỉ ra rằng sinh khối cây trồng trên và dưới mặt đất là khác nhau đáng kể giữa các loại cây trồng. Tỷ lệ carbon/nitơ cũng tác động đến những thay đổi về mức SOM và SOC. Ví dụ, đậu tương có tỷ lệ carbon/ nitơ tương đối thấp và dẫn đến tỷ lệ đầu vào carbon cho đất ở cây đậu tương thường thấp hơn (Hall và Russell, 2019). Do đó, xem xét từng loại cây trồng cụ thể là một yếu tố quan trọng khi ước tính các thay đổi trong SOC. Gan và cộng sự (2009) đã tính toán các hệ số phân bổ carbon đối với các loại cây trồng khác nhau, bằng cách tính lượng carbon được trả lại đất từ mỗi bộ phận của cây so với tổng khối lượng carbon. Trung bình, họ nhận thấy rằng các loại cây họ đậu có hệ số phân bổ lớn nhất cho sản xuất hạt giống và ngược lại, hạt có dầu có hệ số phân bổ lớn nhất đối với rơm rạ. Đối với tất cả các loại cây trồng, hệ số phân bổ cho rễ thấp hơn so với hạt hoặc rơm.

Giảm bớt hoặc loại bỏ dần việc xáo trộn các lớp đất trong hệ thống thực hành làm đất tối thiểu hoặc không làm đất cũng mang lại lợi ích kinh tế cho nông dân bằng cách giảm xói mòn đất, điều này có tác động đáng kể đến hiệu suất nông học. Bakker và cộng sự (2007) ước tính rằng trong nông nghiệp cơ giới hóa, cứ 0,1 m đất bị mất đi, năng suất cây trồng giảm 4% ở khu vực Châu Âu và Bắc Mỹ. Không có hệ thống làm đất nào để lại phần lớn tàn dư cây trồng trên bề mặt đất, thay vào đó cần kết hợp chúng vào mặt cắt của đất, giúp tăng hàm lượng SOM và giảm tác động tiêu cực của xói mòn. Ngoài ra, tồn dư cây trồng trên bề mặt đất sẽ phản chiếu ánh sáng mặt trời và bảo tồn độ ẩm bằng cách hạ thấp nhiệt độ của đất và bảo vệ đất khỏi tình trạng bốc hơi cao (Jarecki và Lal, 2003; Sauer và cộng sự, 1996). Tất cả những tác động này đều có ảnh hưởng đến chất lượng đất, ảnh hưởng đến hiệu suất nông học và năng suất cây trồng.

Carpenter (2011) đã xem xét các tác động đa dạng sinh học do việc áp dụng cây trồng BĐG và đã kết luận rằng cây trồng BĐG làm giảm tác động tiêu cực của canh tác nông nghiệp đối với đa dạng sinh học. Bài báo xem xét các tài liệu quan trọng về tác động của cây trồng BĐG đối với đa dạng cây trồng, sinh vật đất không phải mục tiêu, cỏ dại, mức độ sử dụng đất trồng, sinh vật trên mặt đất không phải mục tiêu và khả năng kiểm soát dịch hại trên toàn khu vực. Đánh giá bao gồm bằng chứng từ các nghiên cứu đã được thực hiện ở Trung Quốc, Đan Mạch, Đức, Bồ Đào Nha, Thụy Sĩ và Hoa Kỳ.

2.6 Thay đổi trong Sức Khoẻ Đất trồng

Một yếu tố quan trọng của việc giảm phát thải khí nhà kính nông nghiệp ròng là cải thiện mức độ hấp thụ carbon của đất. Quá trình cô lập carbon bù đắp lượng khí thải tích cực bằng cách chuyển carbon từ khí quyển vào lưu trữ an toàn trong đất thông qua quá trình quang hợp. CO_2 được thực vật thải ra khí quyển và chuyển vào đất trở thành carbon hữu cơ của đất; do đó, sự gia tăng SOC thể hiện sự cô lập

carbon tăng lên. Mỗi tấn carbon trong đất tương đương với khoảng 3,67 tấn CO_2 được cô lập trong quá khứ (McConkey và cộng sự, 2020). Sức chứa carbon trong đất được ước tính gấp bốn lần khả năng chứa carbon ở thực vật và ba lần trong khí quyển (Olson và cộng sự, 2017) – trong đó, sức chứa carbon sẽ còn phụ thuộc vào cấu tạo của đất, lượng mưa và khí hậu (Lal, 2004). Mặc dù dung lượng lưu trữ car bon trong đất là rất lớn, nhưng nhiều nghiên cứu trước đây cũng đã chỉ ra rằng chúng là hữu hạn (Powlson và cộng sự, 2011), khi có một số nghiên cứu trước đây đã ước tính dung lượng tối đa sẽ đạt được sau 15-20 năm kể từ khi áp dụng các biện pháp quản lý đất trồng mới (Campbell và cộng sự, 2001; West and Post 2002). Tuy nhiên, những thay đổi nhỏ về tốc độ cô lập có thể gây ra những thay đổi đáng kể trong khung thời gian cân bằng carbon (Nemo và cộng sự, 2017; Wutzler và Reichstein 2006). Nhiều nghiên cứu gần đây cho thấy rằng việc áp dụng thực hành quản lý đất trồng cẩn thận sẽ giúp phát triển những chiến lược có để tăng khả năng cô lập carbon (Nath và Lal, 2017). Paustian (2000) xác định ba phương thức thực hành góp phần tăng mức độ SOC: 1) giảm thiểu xáo trộn và xói mòn đất; 2) tối đa hóa mức tồn dư cây trồng và 3) tối đa hóa hiệu quả sử dụng nước và phân bón. Cả ba điều này đều tương quan với việc áp dụng cây trồng BĐG, vì giảm tần suất làm đất và tăng cường tồn dư cây trồng bằng cách giảm thời gian bỏ đất trống là những chiến lược giúp đạt được những mục tiêu này.

Nhiều nghiên cứu khoa học về đất đã xem xét tác động của việc áp dụng phương pháp làm đất bảo tồn đối với quá trình cô lập carbon. Mặc dù mục tiêu của các nghiên cứu này không nhất thiết xác định những đóng góp của cây trồng BĐG, nhưng cây trồng BĐG thực tế đã làm giảm mức độ làm đất, do đó, kết quả của việc tăng cường thực hành bảo tồn đất có thể được quy một phần từ việc thực hành luân canh cây trồng và không làm đất khi canh tác cây trồng BĐG. Năm 2002, West và Post đã tiến hành rà soát mở rộng đối với các tài liệu khoa học về đất để định lượng tỷ lệ cô lập carbon, nhận thấy mức tăng trung bình 0,57 ± 0,14 Mg carbon/ha mỗi năm từ việc áp dụng phương pháp làm đất bảo tồn. McConkey và cộng sự (2003) đã tìm thấy mức tăng SOC dao động từ 0,067 – 0,512 Mg/ ha mỗi năm ở khu vực Saskatchewan, với các biến thể do loại đất và vị trí. Liebig và cộng sự (2005) đã nghiên cứu các chiến lược giảm thiểu phát thải đặc biệt ở Tây Bắc Hoa Kỳ và Canada và đưa ra kết luận rằng mặc dù tác động của quản lý cây trồng đối với SOC là khác nhau, nhưng việc áp dụng phương thức không làm đất trên những vùng đất khô hạn trồng trọt liên tục đã làm tăng mức SOC trung bình là 0,27 ± 0,19 Mg/ha mỗi năm. Gần đây hơn, Aziz và cộng sự (2013) đã nghiên cứu tác động của các biện pháp làm đất đối với chất lượng đất - được xác định dựa trên chỉ số được tạo ra từ một loạt các đặc tính sinh học, hóa học và vật lý của đất. Kết quả nghiên cứu của họ cho thấy rằng phương pháp không làm đất dẫn đến lượng carbon trong đất cao hơn 30% so với phương pháp làm đất thông thường. Tương tự, Nath và Lal (2017) đã nghiên cứu sự khác biệt trong tổng hợp đất và SOC do những thay đổi trong thực hành làm đất. Kết quả nghiên cứu của họ cho thấy canh tác ngô áp dụng phương pháp không làm đất có thể cô lập nhiều carbon hơn 35-46% so với thực hành canh tác ngô theo phương pháp làm đất thông thường.

Những tác động tích cực của việc chuyển sang phương thức canh tác không làm đất có thể thay đổi tùy theo khoảng thời gian và độ sâu của đất được sử dụng để phân tích. Một phân tích tổng hợp của Angers và Eriksen-Hamel (2008) cho thấy rằng trong ngắn hạn, các hệ thống không làm đất có thể không

có đóng góp tích cực ròng đối với trữ lượng SOC do tích tụ carbon ở bề mặt đất. Tuy nhiên, kết quả của họ cho thấy lợi ích của hệ thống không làm đất có thể tăng theo thời gian (trên 10-15 năm). Các kết quả tương tự từ Blanco-Canqui và Lal (2008) chỉ ra rằng việc tăng SOC do giảm làm đất chỉ giới hạn ở các lớp đất bề mặt. VandenBygaart và cộng sự (2011) đã báo cáo SOC tăng ở cả độ sâu 0-15 và 15-30 cm trong đất phía Tây Canada từ việc áp dụng phương pháp không làm đất, nhưng sự cải thiện lại cao hơn ở độ sâu 0-15 cm. Mặc dù các hệ thống làm đất bảo tồn có thể phân phối lại carbon dư thừa trong toàn bộ cấu trúc đất tốt hơn so với áp dụng không làm đất trong thời gian ngắn, nhưng lượng carbon ròng thu được từ hệ thống không làm đất trong dài hạn sẽ bù đắp cho sự phân phối lại carbon này tới các tầng đất sâu hơn (Yanni và cộng sự, 2018).

Một nghiên cứu đánh giá và phân tích tổng hợp các tài liệu khoa học của Lee và cộng sự (2014), cho thấy mối tương quan giữa thu nhập tăng lên mà nông dân thu lại được do canh tác cây trồng BĐG và áp dụng phương thức làm đất bảo tồn với mức độ ứng dụng cây trồng BĐG. Việc áp dụng kết hợp cả hai công nghệ đã hạn chế bớt các tác động tiêu cực từ canh tác nông nghiệp lên môi trường và giúp cải thiện chất lượng đất và nước. Cải thiện chất lượng đất có liên quan đến việc giảm làm đất, giảm xói mòn và tăng khả năng hấp thụ carbonl trong khi cải thiện chất lượng nước có liên quan đến việc sử dụng nhiều hơn thuốc trừ cỏ hậu nảy mầm để hạn chế tiếp xúc với đất và dòng chảy sau đó.

Đất thiếu các chất dinh dưỡng thích hợp thường là yếu tố chính hạn chế năng suất, đặc biệt là nitơ và phốt pho. Sự phát triển của vi khuẩn thúc đẩy tăng trưởng thực vật (PGPB) đã được chứng minh là làm tăng tốc độ tăng trưởng và sinh khối thực vật, giảm mất nước ở lá cây, tăng cường sự phát triển của rễ và tăng hiệu quả quang hợp (Fiodor và cộng sự, 2021). Những cải tiến cây trồng này đã được xác định trong sản xuất đậu nành, ngô, gạo, cà chua, ớt, hoa hướng dương, cải dầu, bông, đậu phộng, yến mạch, mía và đậu xanh. Bằng việc cải thiện khả năng hấp thụ chất dinh dưỡng cho cây trồng, giảm bớt căng thẳng cho cây sẽ giúp giảm bớt sự phụ thuộc vào phân bón tổng hợp để cung cấp đủ chất dinh dưỡng, giúp giảm thiểu tác động của biến đổi khí hậu. Cho đến nay, việc áp dụng những đổi mới công nghệ này chỉ giới hạn trong các thí nghiệm trong phòng thí nghiệm cũng như tiến hành thử nghiệm diện hẹp và chưa được phê duyệt để thương mại hóa. Để định lượng tác động của các công nghệ này một cách tốt hơn, việc đánh giá ở quy mô áp dụng lớn sẽ là cần thiết.

3. Phân thích bối cảnh nghiên cứu

Có 5 lĩnh vực rà soát các tài liệu nghiên cứu chính đó là: hấp thụ carbon, thay đổi sử dụng hóa chất, thay đổi phát thải khí nhà kính, thay đổi trong việc sử dụng đất và sức khỏe của đất. Các lĩnh vực này có thể được đánh giá qua cá khía cạnh như: nông học, dữ liệu, di truyền và sử dụng đầu vào, cấu trúc/quy mô trang trại, cơ giới và chính sách *(xem Bảng 2)*. Tất cả những yếu tố này góp phần làm tăng năng suất - điều sẽ được nhấn mạnh như một phần của đánh giá đối với các yếu tố về nông học và di truyền học, bao gồm sự phát triển của các tính trạng như tăng khả năng chịu hạn, chịu nhiệt và chịu mặn. Để định lượng ma trận, một điểm trích dẫn sẽ được sử dụng làm thước đo chất lượng của các ước

tính. Hầu hết các bài báo đã xuất bản đều có điểm trích dẫn và tổng điểm tích luỹ của 10 bài báo được trích dẫn nhiều nhất trong mỗi ô cung cấp thước đo về độ sâu của nghiên cứu trong ma trận, cũng như mức độ công nhận rộng rãi của các ấn phẩm đó. Do các trích dẫn có xu hướng tăng theo thời gian nên phạm vi về ngày xuất bản cũng sẽ được điều chỉnh đưa vào cho phù hợp. Thực hiện rà soát và đánh giá tài liệu để đưa vào ma trận này sẽ là giai đoạn một của báo cáo.

Bảng 2: Ma trận đánh giá tác động trích dẫn (số bài viết/ trích dẫn trung bình mỗi năm

Yếu tố đánh giá	Khu vực	Thay đổi trong sử dụng/ độc tính hoá chất	Cô lập carbon	Phát thải khí nhà kính	Thay đổi trong sử dụng đất trồng	Sức khoẻ đất trồng
Nông học	1/6	15/36	3/9	5/6	2/4	9/6
Dữ liệu	--	3/47	1/5	--	1/6	2/6
Di truyền	--	13/12	1/3	3/13	2/10	--
Câu trúc nông trại	--	--	--	--	--	--
Cơ giới	1/15	1/15	--	--	1/45	3/21
Chính sách	3/7	1/1	--	2/8	--	--

Phân tích này đưa ra hàng loạt những nhận định chuyên sâu về mức độ sử dụng hoá chất.

a. Nghiên cứu về cô lập carbon xác định rằng gen di truyền được tạo ra bởi cây trồng BĐG chống chịu thuốc trừ cỏ cho phép những thay đổi về thực hành nông học, chủ yếu là loại bỏ việc làm đất như một hình thức kiểm soát cỏ dại. Dữ liệu còn hạn chế, nhưng một loạt ấn phẩm của Brookes và Barfoot đã chứng minh rằng có đủ dữ liệu có thể thu thập được ở cấp quốc gia về áp dụng cây trồng BĐG để ước tính khối lượng hấp thụ carbon quốc gia và toàn cầu.
b. Tới thời điểm hiện tại, không có bằng chứng nào cho thấy những thay đổi về cấu trúc nông trại đóng vai trò quan trọng. Điều này không có nghĩa rằng cấu trúc nôgn trại không có vai trò gì, chỉ là chưa có nghiên cứu tới thời điểm hiện tại có thể định lượng về mối quan hệ này.
c. Tương tự như vậy, những thay đổi đáng kể về công cụ gieo hạt trong suốt 30-40 năm qua đã góp phần giúp nông dân có thể gieo hạt trực tiếp tốt hơn vào gốc của vụ trước, nhưng cho tới nay, chưa có tài liệu nghiên cứu nào định lượng quan hệ chưa các công cụ này với việc tăng khả năng hấp thụ carbon.
d. Các nghiên cứu cho thấy rằng việc đổi mới và thay đổi di truyền trên những cây trồng mang tính trạng kháng sâu và chống chịu thuốc trừ cỏ đã tạo ra những tác động nông học đáng kể.
e. Khi so sánh việc sản xuất hàng hóa trước khi thương mại hóa các giống BĐG hoặc trong quá trình sản xuất không BĐG, ngày càng có nhiều bằng chứng xác nhận rằng cây trồng BĐG đã và đang làm giảm việc sử dụng các chất hoá học. Một phân tích tổng hợp đã định lượng lợi ích của cây trồng BĐG liên quan đến việc giảm sử dụng hóa chất dựa trên 147 tài liệu nghiên cứu khoa học riêng biệt. Ở nhiều nước đang phát triển, nơi các chủ nông trại nhỏ trồng cây BĐG – nơi việc phun thuốc thường được tiến hành thủ công – thì việc ứng dụng các giống cây trồng mới này đã hạn chế việc ngộ độc hoá chất. Ở các quốc gia công nghiệp, việc phun thuốc được cơ giới hoá, sử dụng máy

phun, việc giảm bớt mức độ sử dụng hoá chất góp phần giảm phát thải khí nhà kính.

f. Một lần nữa, không có tài liệu nghiên cứu nào liên quan giữa những thay đổi về cơ giới nông nghiệp với những thay đổi trong việc sử dụng hóa chất.

Bằng chứng về phát thải nhà kính thường có liên quan tới khả năng cô lập carbon. Bằng chứng đã kết luận rằng phát thải nhà kính giảm thì cô lập carbon tăng. Động lực hàng đầu của việc giảm phát thải đó là giảm các phương thức làm đất và phun thuốc BVTV trên cây trồng. Tăng khả năng hấp thụ carbon có thể đạt được từ việc loại bỏ phương thức bỏ trống đất trồng và chuyển sang quản lý đất trồng theo phương thức luân phiên cây trồng

Phần lớn các tài liệu tập trung nghiên cứu về lợi ích từ thay đổi sử dụng đất, đặc biệt liên quan đến việc tăng SOM và SOC. Ngày càng có nhiều xác nhận rằng việc ứng dụng cây trồng BĐG đang thúc đẩy những thay đổi tích cực trong sử dụng đất, đặc biệt là khi loại bỏ làm đất khỏi thực hành luân canh cây trồng. Các tài liệu hiện có tập trung vào các khía cạnh nông học và thu thập dữ liệu để định lượng mối liên quan. Bằng chứng duy nhất liên quan đến chính sách là ước tính về các tác động sẽ xảy ra nếu cây trồng BĐG bị loại bỏ khỏi các hoạt động canh tác nông nghiệp của Hoa Kỳ.

Có rất ít nghiên cứu về cải thiện sức khoẻ đất trồng, tuy nhiên những nghiên cứu hiện có đang cho thấy việc sản xuất cây trồng BĐG đang mang lại tác động tích cực cho sức khoẻ đất. Một phần trong các tài liệu nghiên cứu về sức khoẻ đất liên quan tới những cải thiện về đa dạng sinh học, đã kết luận rằng tác động tiêu cực từ canh tác nông nghiệp đối với đa dạng sinh học đã giảm sau khi ứng dụng cây trồng BĐG.

4. Phương pháp Phân tích và Đánh giá

Việc thực hành các đánh giá như thế này đã trở nên chuẩn hóa và bình thường hóa hơn. Thang đo Phương pháp Khoa học Maryland (Maryland Scientific Methods Scale - MSMS) được phát triển vào những năm 1970 và được giới thiệu tới các học giả, nhà hoạch định chính sách và các đơn vị ứng dụng theo cách đơn giản nhất có thể về chất lượng phương pháp luận của các nghiên cứu đánh giá khác nhau, bằng cách mã hóa chúng theo chất lượng phương pháp luận của chúng. Sử dụng phương pháp do Ratcliffe (2019) phát triển - một phương pháp cung cấp một hệ thống phân cấp bằng chứng chi tiết - sắp xếp từ những nỗ lực xác nhận đặc biệt (cấp độ 0) cho đến những đánh giá hệ thống có cấu trúc tốt, mà tại đỉnh của chúng sẽ bao gồm các phân tích tổng hợp về một tập dân số ngẫu nhiên lặp đi lặp lại thí nghiệm có kiểm soát. Giai đoạn 2 thứ hai của phân tích này bổ sung thêm vào tính mạnh mẽ của những bằng chứng được xác định trong Mục 2. Phân tích này định lượng tài liệu nào có lý thuyết, phương pháp và bằng chứng hoặc các thành phần của ba chỉ số này. Việc định lượng quy mô của nhóm bằng chứng sẽ cho phép phân biệt giữa những nơi chỉ có một vài nghiên cứu không liên kết cho thấy lợi ích so với những nơi có lượng bằng chứng xác định xác nhận chắc chắn hơn về lợi ích. Các mức độ khác nhau của bằng chứng bao gồm:

- Mức 0: Bản thân những nghiên cứu nhằm đánh giá và xác nhận có giá trị hạn chế. Các giai thoại, nghiên cứu tình huống và báo cáo chung được thiết kế để biện minh cho nỗ lực thường có ít giá trị chứng minh nếu chúng là bằng chứng duy nhất.
- So sánh cắt ngang trước và sau giữa các nhóm được can thiệp với các nhóm không được can thiệp hoặc so sánh trước và sau của một nhóm được can thiệp mà không có bất kỳ so sánh nào với nhóm không được can thiệp hoặc sử dụng bất kỳ biến kiểm soát nào. Các loại nghiên cứu này có thể xác định các mối tương quan nhưng thường không thể xác định quan hệ nhân quả, một phần vì không có bất kỳ phản chứng thực tế nào được kiểm soát chính thức, không có cách nào để chứng minh chắc chắn rằng thước đo gây ra bất kỳ kết quả quan sát nào.
- Mức 2: Các nghiên cứu ở mức độ này sử dụng các biến kiểm soát để so sánh cắt ngang hoặc so sánh trước sau, mặc dù vẫn không sử dụng nhóm đối chứng được can thiệp nào. Những loại nghiên cứu này có thể thiết lập một trật tự nhân quả nhưng không loại trừ được những rủi ro ảnh hưởng đến giá trị nội tại, trong đó có thể có những lời giải thích khác cho những gì được quan sát.
- Mức 3: Tiêu chuẩn tối thiểu để đánh giá thực chất là biện pháp đó được cấu trúc như một thực nghiệm, với một tập dân số đã được xác định nguồn rõ ràng, phù hợp với khu vực chính sách và ở đó cả đối tượng được can thiệp và không được can thiệp đều có thể được đánh giá về các phản ứng hành vi. Trên thực tế, những điều này có thể được coi là một nghiên cứu bán thực nghiệm hoặc thực nghiệm đối chứng ngẫu nhiên (RCT). Cả quan hệ nhân quả lẫn quy mô và phạm vi tác động của biện pháp đều có thể được xác định theo cách nghiên cứu như vậy.
- Mức 4: Mức độ bằng chứng này dựa trên việc sử dụng lặp đi lặp lại các RCT để kiểm soát các biến số khác. Điều này giúp loại bỏ khả năng xảy ra các mối tương quan giả mạo từ một đánh giá duy nhất về bất kỳ rủi ro nào.
- Mức 5: Bằng chứng cấp 3 và 4 được rút ra từ việc xây dựng có mục đích các đối tượng và biện pháp kiểm soát thực nghiệm. Các nghiên cứu cấp độ 5 loại bỏ hạn chế đó, áp dụng các phương pháp thử nghiệm tương tự cho các quần thể được chỉ định ngẫu nhiên, để các giả định nhân quả có thể được xác thực một cách tổng quát hơn.
- Mức 5*: Khi đã tích lũy được một lượng bằng chứng thông qua một loạt các nghiên cứu Cấp độ 3 và 4, đôi khi việc thực hiện nghiên cứu dựa trên các nghiên cứu sẽ có giá trị để phân biệt các kết quả tổng hợp và phân tích độ nhạy về ảnh hưởng của các phương pháp tiếp cận mô hình hóa khác nhau và các giả định đối với các kết quả thu được.

Chúng tôi đã sử dụng phiếu tự đánh giá này để mã hóa tất cả các tài liệu, thực hiện theo các bước sau:

- Để có một thứ tự hoàn chỉnh, chúng tôi đã đặt lại thang điểm MSI này thành mức 0 = 1, 1 = 2 và tiếp tục cho tới 5* = 7.
- Đầu tiên chúng tôi mã số mỗi bài viết nghiên cứu theo mức độ tác động của nó: khu vực, hoá chất, lưu trữ carbon, phát thải khí nhà kính, sử dụng và sức khoẻ đất trồng.
- Chúng tôi đã nhập vào tỷ lệ trích dẫn mới nhất của chúng.

- Sau đó, chúng tôi mã hóa mọi bài viết để biết nó phù hợp với thang điểm nào của MSI, từ 1-7.
- Chúng tôi chạy các báo cáo để hiểu bản chất và chất lượng của công việc bắt đầu được thực hiện.

Đánh giá của chúng tôi cho thấy rằng nghiên cứu về lĩnh vực này vẫn đang phát triển *(xem Bảng 3).* Chúng tôi đã tìm thấy 74 bài nghiên cứu đưa ra bằng chứng về tác động môi trường. Trong một số trường hợp, có những nghiên cứu xem xét nhiều hơn một khía cạnh (nông học, dữ liệu, di truyền, cấu trúc trang trại, cơ giới hoặc chính sách) và một số nghiên cứu đánh giá nhiều hơn một tác động (diện tích, hấp thụ carbon, hóa chất, phát thải khí nhà kính, sử dụng đất, sức khỏe của đất) và khi thích hợp, các nghiên cứu này đã được đưa vào nhiều hơn một lần.

Bảng 3: Tổng quan các phương pháp đánh giá

Mã hoá MSI	Đếm	Trích dẫn trung bình	Tuổi đời của nghiên cứu
1	4	42.5	16.5
2	25	103.4	10.9
3	21	129.3	9.1
4	10	163.5	11.2
5	5	77	7.0
6	0	na	na
7	9	547.5	11.8

Người ta có thể thấy rằng một số nghiên cứu cũ thực sự là nghiên cứu điển hình và bằng chứng giai thoại (MSI 1) và những nghiên cứu đó có tỷ lệ trích dẫn tương đối thấp. Các nhà điều tra đã sử dụng các phương pháp tiên tiến hơn (MSI 2-4) khi công nghệ đã hoàn thiện và nội dung nghiên cứu đó đang được tiếp nhận và trích dẫn. Các thử nghiệm đối chứng ngẫu nhiên (RCT) nâng cao với các kết quả phản thực (MSI 5) chỉ mới bắt đầu. Chúng tôi chỉ tìm thấy năm bài nghiên cứu có tuổi đời trung bình chỉ bảy năm và tương đối ít được trích dẫn. Chúng tôi không thể tìm thấy bất kỳ nghiên cứu nào đã được tiến hành đủ lâu để đủ điều kiện tham gia MSI 6, yêu cầu RCT lặp lại để loại bỏ sai lệch lấy mẫu. Chúng tôi đã tìm thấy một loạt các phân tích thống kê, nhưng cần phải nhớ rằng những khảo sát này chỉ có thể tốt bằng tài liệu cơ bản, vốn vẫn còn thiếu các RCT được tiến hành nghiêm ngặt đầy đủ.

Các tác động khác nhau đã được nghiên cứu khác nhau. Cho đến nay, các tác động về hóa chất, sức khỏe của đất và phát thải khí nhà kính đã được trình bày rõ ràng, mặc dù không có các thử nghiệm kiểm soát ngẫu nhiên đầy đủ, lặp đi lặp lại với các biến số gây nhiễu (sẽ mã hóa MSI = 6). Tuy nhiên, chúng tôi đã tìm thấy hơn 10 nghiên cứu trong mỗi lĩnh vực và ít nhất một nghiên cứu tổng hợp trong mỗi lĩnh vực *(xem Bảng 4).* Chúng tôi tìm thấy ít bài nghiên cứu hơn về cô lập carbon nhưng theo cách nào đó chúng tôi đã thấy phương pháp luận chặt chẽ và ít nhất một nghiên cứu tổng hợp (MSI = 7). Nói một cách tương đối, những nghiên cứu và tài liệu về diện tích và sử dụng đất yếu hơn một chút về phương pháp, không có bất kỳ kiểm soát ngẫu nhiên đầy đủ hoặc nghiên cứu tổng hợp nào. Trung bình, tài liệu có tuổi đời 11 năm, trong đó tài liệu cổ nhất có từ năm 2000. Ngoài tác động về diện tích, hầu hết tài liệu được phân bổ trong khoảng trung bình 11 năm.

Bảng 4: Phân tích trích dẫn

	Khu vực	Hoá chất	Cô lập Carbon	Phát thải khí nhà kính	Sử dụng đất trồng	Sức khoẻ đất
Số lượng bài viết tìm thấy	5	32	7	12	7	13
Số năm trung bình (năm)	8	11	11	10	12	11
Chỉ số MSI						
Thấp nhất	2	1	2	2	1	1
Cao nhất	4	7	7	7	4	7
Chỉ số trung bình	2.8	3.2	3.6	3.8	2.7	3.6
Các trích dẫn						
Ít nhất		0	3	0	24	11
Nhiều nhất		7,430	2,582	281	626	452
Trung bình	79	369	454	65	163	104
Trung bình/ năm	8	26	25	6	13	10
Trung bình đến trung bình/ năm	10	14	18	10	13	11
Trích dẫn trung bình/năm trên mỗi điểm MSI	2.9	8.0	7.0	1.7	2.9	2.9

So sánh các trích dẫn cho chúng ta thấy điều gì đó về sự trưởng thành của tài liệu. Tất cả những yếu tố khác đều bình đẳng, các nghiên cứu được trích dẫn nhiều hơn thường được công nhận là có nhiều giá trị hơn. Phương pháp so sánh liên tiếp cung cấp thêm một số hiểu biết. Hoàn toàn có nhiều tài liệu hơn về các tác động hóa học: tổng số trích dẫn cao hơn, số trích dẫn trung bình mỗi năm (điều chỉnh theo tuổi của tài liệu) gần như đứng đầu và số trích dẫn trung bình mỗi năm trên mỗi điểm MSI rất mạnh.

Cô lập carbon, phát thải khí nhà kính, sử dụng đất trồng và sức khỏe của đất đều có một số điểm mạnh, nhưng số liệu nghiên cứu hơi mỏng, điều này cho thấy chúng ta cần thận trọng khi đưa ra đánh giá về thông điệp của chúng. Theo định nghĩa, sự lặp lại là cần thiết để xác nhận các tác động.

5. Kết luận

Mục tiêu của báo cáo này là cung cấp tóm tắt các tài liệu nghiên cứu khoa học độc lập với bằng chứng cho thấy việc ứng dụng những đổi mới trong công nghệ lai tạo giống cây trồng và các sản phẩm bảo vệ thực vật, bao gồm cả sản phẩm sinh học, đã hoặc đang góp phần giảm thiểu tác động tiêu cực và thích ứng với biến đổi khí hậu. Đánh giá trong báo cáo cũng cho thấy một số yếu tố đang kết hợp với nhau như thế nào để tạo ra các tác động đáng kể về biến đổi khí hậu: sự phát triển của các tính trạng BĐG khác nhau; phát triển các tính trạng trên những cây trồng quan trọng; áp dụng rộng rãi cây trồng

BĐG trên toàn cầu và những thay đổi có lợi trong tập quán canh tác. Tóm lại, tổng hợp các tài liệu nghiên cứu đã cho thấy một xu hướng mạnh mẽ với nhiều bằng chứng tích lũy xác nhận rằng các công nghệ mới, đặc biệt là cây trồng BĐG đang đóng một vai trò quan trọng trong việc giảm thiểu và thích ứng với biến đổi khí hậu. Xu hướng này dự kiến sẽ tiếp tục phát triển và đẩy mạnh khi ngày càng có nhiều công nghệ mới hơn ra đời, phát triển và góp phần định hình lại nền nông nghiệp.

Mặc dù cơ sở bằng chứng được báo cáo trong tài liệu này là nổi bật và ngày càng tăng, nhưng bản thân các nghiên cứu khoa học có liên quan vẫn đang tiếp tục phát triển. Người ta dự đoán sẽ có thêm những cải tiến về chất lượng liên quan tới phương pháp nghiên cứu chứng minh tác động của cây trồng BĐG đối với việc giảm thiểu và thích ứng với biến đổi khí hậu khi các kỹ thuật đánh giá và đo lường mới được phát triển. Khi có thêm các đánh giá kỹ lưỡng về khả năng đóng góp vào biến đổi khí hậu từ các các ngành kinh tế khác nhau, sản xuất nông nghiệp được kỳ vọng sẽ giúp gia tăng sản lượng đồng thời giảm tác động tiêu cực đến môi trường. Các phương pháp nghiên cứu tốt hơn sẽ được vận dụng để cung cấp dữ liệu chính xác và có thể nhân rộng nhằm hỗ trợ các khung chính sách giảm thiểu và thích ứng. Trong các khung chính sách này, người ta có thể mong đợi áp lực lớn hơn lên ngành nông nghiệp để thể hiện khả năng đóng góp có ý nghĩa vào hiện tại và tương lai của ngành trong việc thích ứng và giảm thiểu biến đổi khí hậu.

Báo cáo này tóm tắt các tác động ở cấp độ nông trại và cấp độ hệ thống đã được định lượng của các đổi mới nông nghiệp và tác động của chúng đối với biến đổi khí hậu. Như đã xác định ở trên, đây là một phần nghiên cứu nhỏ. Tuy nhiên, có rất nhiều tài liệu nghiên cứu về những đổi mới trong lĩnh vực này, cũng như những đổi mới về chế phẩm, giải pháp sinh học, các cải tiến về cây trồng, hóa chất và phân bón khác - tất cả đã đưa ra báo cáo kết quả từ các thử nghiệm trong ống nghiệm, trong phòng thí nghiệm hoặc thử nghiệm đồng ruộng diện hẹp. Tài liệu lần này đưa ra những xác nhận về mặt khoa học liên quan tới tác động của những đổi mới này. Sẽ cần có thêm nghiên cứu với việc đánh giá tiến hành trên phạm vi sản xuất để có thẻ đo lường mối quan hệ với thích ứng hoặc giảm thiểu biến đổi khí hậu.

Hầu như tất cả các tài liệu nghiên cứu được xác định trong báo cáo này đều đề cập đến việc giảm thiểu biến đổi khí hậu. Tài liệu về thích ứng với biến đổi khí hậu còn ít. Tuy nhiên, phần lớn điều này có thể được giải thích bởi sở thích của nhà nghiên cứu khi sử dụng thuật ngữ giảm thiểu làm từ khóa, trong khi trên thực tế có thể nội dung nghiên cứu đề cập đến vấn đề thích ứng. Bằng chứng về việc giảm làm đất và tăng khả năng hấp thụ carbon là kết quả của việc nông dân thích ứng với biến đổi khí hậu. Các nghiên cứu nêu bật những tác động có lợi lâu dài của việc áp dụng cây trồng BĐG cuối cùng là nhằm thích ứng với biến đổi khí hậu, khi nông dân tiếp tục sử dụng các công nghệ tiên tiến cho phép họ đảm bảo năng suất cao hơn và do đó có lợi nhuận. Những đổi mới sáng tạo trong nông nghiệp ban đầu có thể được áp dụng trong nỗ lực giảm thiểu tác động tiêu cực của biến đổi khí hậu, nhưng việc sử dụng lâu dài (một thập kỷ hoặc lâu hơn) cho thấy mức độ thích nghi với biến đổi khí hậu của người sử dụng.

Dưới đây là tóm tắt một số kết luận quan trọng sau khi rà soát và đánh giá các tài liệu nghiên cứu:

1. Nếu không có những đổi mới về cây trồng BĐG, hóa chất và phân bón mang lại, thế giới sẽ cần

nhiều đất hơn để đạt được mức sản lượng lương thực hiện tại, ít nhất là cần thêm 10% diện tích đất trồng. Diện tích đất trồng gia tăng này sẽ phải chuyển đổi từ phần đất ngập nước, phá rừng hoặc từ các khu vực đất nhạy cảm với môi trường.

2. Đổi mới trong công nghệ hạt giống, ví dụ như bổ sung các tính trạng chống trị thuốc trừ cỏ và cải tiến trong phương pháp kiểm soát cỏ dại đã giúp cô lập/ tiết kiệm được trên 300 triệu tấn CO_2 thải ra môi trường, thông qua phương pháp không làm đất, trong suốt 25 năm qua.
3. Theo hầu hết nghiên cứu, tốc độ phát triển và thương mại hóa ngày càng tăng của các loại cây trồng chống chịu thuốc trừ cỏ và kháng sâu đã làm giảm mức độ sử dụng hóa chất để kiểm soát cỏ dại và côn trùng. Điều quan trọng, song song với việc giảm lượng hoá chất sử dụng, tác động môi trường từ việc sử dụng ít hóa chất hơn cũng giảm, đạt tới 50% ở một số loại cây trồng.
4. Sự gia tăng trữ lượng carbon trong đất là kết quả của việc triển khai cách tiếp cận mang tính hệ thống để cải thiện tính bền vững, không phải là đến từ một sự đổi mới đơn lẻ. Sự phát triển của các tính trạng được cải thiện thông qua công nghệ sinh học (ví dụ như tính trạng chống chịu thuốc trừ cỏ, kháng sâu, chị hạn) đang góp phần rất lớn vào việc giảm thiểu những căng thẳng sinh học và phi sinh học, cho phép người trồng sản xuất cây trồng liên tục mà không cần làm đất liên tục. Khả năng loại bỏ hoạt động làm đất một cách nhất quán ra khỏi các chương trình quản lý đất trồng đã tạo điều kiện cho việc lưu trữ carbon lâu dài.
5. Nhu cầu sử dụng đất canh tác giảm đã mang lại lợi ích môi trường đáng kể liên quan đến biến đổi khí hậu, trong đó hạn chế hay loại bỏ làm đất liên tục đã giúp giảm xói mòn, giảm sự hiện diện của dư lượng hóa chất và phân bón trong lưu vực sông. Ngoài ra, khả năng bảo tồn độ ẩm của đất tăng lên, cho phép thực vật cô lập một lượng lớn carbon trong những năm hạn hán.

6. Tài liệu tham khảo

Ahmed, A. U., Hoddinott, J., Abedin, N., & Hossain, N. (2021). The impacts of GM foods: results from a randomized controlled trial of Bt eggplant in Bangladesh. American Journal of Agricultural Economics, 103(4), 1186-1206.

Angers, D. A., & Eriksen-Hamel, N. S. (2008). Full-inversion tillage and organic carbon distribution in soil profiles: A meta-analysis. Soil Science Society of America Journal, 72(5), 1370-1374.

Awada, L., Nagy, C., & Phillips, P. W. (2021). Contribution of land use practices to GHGs in the Canadian Prairies crop sector. PloS one, 16(12), e0260946.

Aziz, I., Mahmood, T., & Islam, K. R. (2013). Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality. Soil and Tillage Research, 131, 28-35.

Bakker, M. M., Govers, G., Jones, R. A., & Rounsevell, M. D. (2007). The effect of soil erosion on Europe's crop yields. Ecosystems, 10(7), 1209-1219.

Barrows, G., Sexton, S., & Zilberman, D. (2014). The impact of agricultural biotechnology on supply and land-use. Environment and Development Economics, 19(6), 676-703.

Biden, S., Smyth, S. J., & Hudson, D. (2018). The economic and environmental cost of delayed GM crop adoption: The case of Australia's GM canola moratorium. GM crops & food, 9(1), 13-20.

Blanco-Canqui, H., & Lal, R. (2008). No-tillage and soil-profile carbon sequestration: An on-farm assessment. Soil Science Society of America Journal, 72(3), 693-701.

Boehm, M., Junkins, B., Desjardins, R., Kulshreshtha, S., & Lindwall, W. (2004). Sink potential of Canadian agricultural soils. Climatic Change, 65(3), 297-314.

Brimner, T. A., Gallivan, G. J., & Stephenson, G. R. (2005). Influence of herbicide-resistant canola on the environmental impact of weed management. Pest Management Science: formerly Pesticide Science, 61(1), 47-52.

Brookes, G. (2022) Farm income and production impacts from the use of genetically modified (GM) crop technology 1996-2020. GM Crops & Food 13 (1): 171-195.

Brookes, G. Barfoot P (2020) Environmental impacts of genetically modified (GM) crop use 1996– 2018: impacts on pesticide use and carbon emissions. GM Crops & Food 11 (4): 215–241.

Brookes, G., & Barfoot, P. (2014). Economic impact of GM crops. GM Crops Food Biotechnol. Agric. Food Chain, 5, 65-75.

Brookes, G., & Barfoot, P. (2010). Global impact of biotech crops: Environmental effects, 1996-2008. AgBioForum 13(1): 76-94.

Brookes, G., Taheripour, F., & Tyner, W. E. (2017). The contribution of glyphosate to agriculture and potential impact of restrictions on use at the global level. GM crops & food, 8(4), 216-228.

Campbell, C. A., Zentner, R. P., Gameda, S., Blomert, B., & Wall, D. D. (2002). Production of annual crops on the Canadian prairies: Trends during 1976–1998. Canadian Journal of Soil Science, 82(1), 45-57.

Campbell, C. A., Zentner, R. P., Selles, F., Liang, B. C., & Blomert, B. (2001). Evaluation of a simple model to describe carbon accumulation in a Brown Chernozem under varying fallow frequency. Canadian Journal of Soil Science, 81(4), 383-394.

Canola Council of Canada (CCC). 2001. An Agronomic and Economic Assessment of Transgenic Canola. Online at: http://www.canola-council.org/gmo_toc.aspx.

Carlyle, W. J. (1997). The decline of summerfallow on the Canadian Prairies. Canadian Geographer/Le Géographe canadien, 41(3), 267-280.

Carpenter, J. E. (2011). Impact of GM crops on biodiversity. GM crops, 2(1), 7-23.

Dong, F., Mitchell, P. D., Davis, V. M., & Recker, R. (2017). Impact of atrazine prohibition on the sustainability of weed management in Wisconsin maize production. Pest Management Science, 73(2), 425-434.

Fernandez-Cornejo, J. (2009). First decade of genetically engineered crops in the United States. DIANE Publishing.

Fernandez-Cornejo, J., Hallahan, C., Nehring, R. F., Wechsler, S., & Grube, A. (2013). Conservation tillage, herbicide use, and genetically engineered crops in the United States: The case of soybeans. AgBioForum, 15(3), 231–241.

Fernandez-Cornejo, J., Klotz-Ingram, C., & Jans, S. (2002). Farm-level effects of adopting herbicide- tolerant soybeans in the USA. Journal of Agricultural and Applied Economics, 34(1), 149- 163.

Fiodor, A., Singh, S., & Pranaw, K. (2021). The contrivance of plant growth promoting microbes to mitigate climate change impact in agriculture. Microorganisms, 9(9), 1841.

Gan, Y. T., Campbell, C. A., Janzen, H. H., Lemke, R. L., Basnyat, P., & McDonald, C. L. (2009). Carbon input to soil from oilseed and pulse crops on the Canadian prairies. Agriculture, Ecosystems & Environment, 132(3-4), 290-297.

Givens, W. A., Shaw, D. R., Kruger, G. R., Johnson, W. G., Weller, S. C., Young, B. G., ... & Jordan, D. (2009). Survey of tillage trends following the adoption of glyphosate-resistant crops. Weed technology, 23(1), 150-155.

Grant, B., Smith, W. N., Desjardins, R., Lemke, R., & Li, C. (2004). Estimated N2O and CO2 emissions as influenced by agricultural practices in Canada. Climatic Change, 65(3), 315-332. Online at: https://doi-org.cyber.usask.ca/10.1023/B:CLIM.0000038226.60317.35.

Hall, S. J., & Russell, A. E. (2019). Do corn-soybean rotations enhance decomposition of soil organic matter?. Plant and Soil, 444(1), 427-442.

Harrington, J., Byrne, P. F., Frank, B., Nissen, S. J., Westra, P., Ellsworth, P. C., … Henry, W. B. (2009). Perceived Consequences of Herbicide-Tolerant and Insect-Resistant Crops on Integrated Pest Management Strategies in the Western United States: Results of an Online Survey. AgBioForum, 12(3&4), 412–421.

Huang, J., Mi, J., Lin, H., Wang, Z., Chen, R., Hu, R., ... & Pray, C. (2010). A decade of Bt cotton in Chinese fields: assessing the direct effects and indirect externalities of Bt cotton adoption in China. Science China Life Sciences, 53(8), 981-991.

Hudson, D., & Richards, R. (2014). Evaluation of the agronomic, environmental, economic, and coexistence impacts following the introduction of GM canola to Australia (2008-2010). AgBioForum, 17(1), 1–12.

International Panel for Climate Change. (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, … H. L. Miller, Eds.). Online at: https://doi.org/10.1007/s11270-007-9372-6.

International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications. (2020). Biotech Crops Drive Socio-Economic Development and Sustainable Environment in the New Frontier. ISAAA brief 55. Online at: https://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/55/executivesummary/default.asp.

Jarecki, M. K., & Lal, R. (2003). Crop management for soil carbon sequestration. Critical Reviews in Plant Sciences, 22(6), 471-502.

Kern, M., Noleppa, S. & Schwarz, G. (2012). Impacts of chemical crop protection applications on related CO_2 emissions and CO_2 assimilation of crops. Pest Management Science, 68(11): 1458-1466. https://doi.org/10.1002/ps.3328.

Khush, G. S. (2012). Genetically modified crops: the fastest adopted crop technology in the history of modern agriculture. Agriculture & Food Security, 1(1), 1-2.

Kleter, GA, R Bhula, K Bodnaruk, E Carazo, AS Felsot, CA Harris, A Katayama, HA Kuiper, KD Racke, B Rubin, Y Shevah, GR. Stephenson, K Tanaka, J Unsworth, RD Wauchope and S- S Wong. 2007. Altered pesticide use on transgenic crops and the associated general impact from an environmental perspective. Pest Management Science 63(11): 1107-15.

Klümper, W., & Qaim, M. (2014). A meta-analysis of the impacts of genetically modified crops. PloS one, 9(11), e111629.

Kouser, S., & Qaim, M. (2011). Impact of Bt cotton on pesticide poisoning in smallholder agriculture: A panel data analysis. Ecological Economics, 70(11), 2105-2113.

Kovak, E., Blaustein-Rejto, D., & Qaim, M. (2022). Genetically modified crops support climate change mitigation. Trends in Plant Science.

Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. science, 304(5677), 1623-1627.

Lee, S., Clay, D.E., Clay, S.A. (2014). Impact of Herbicide Tolerant Crops on Soil Health and Sustainable Agriculture Crop Production. In: Songstad, D., Hatfield, J., Tomes, D. (eds) Convergence of Food Security, Energy Security and Sustainable Agriculture. Biotechnology in Agriculture and Forestry, vol 67. Springer, Berlin, Heidelberg.

Leeson, JY, AG Thomas, HJ Beckie, CA Brenzil, LM Hall, T Andrews, KR Brown, and RC Van Acker. 2006. Herbicide-Use Trends in Prairie Canola Production Systems. 2006 Soils and Crops Workshop [CD-ROM], Extension Division, University of Saskatchewan, Saskatoon, SK, Canada, March 2–3, 2006, pp. 7.

Liebig, M. A., Morgan, J. A., Reeder, J. D., Ellert, B. H., Gollany, H. T., & Schuman, G. E. (2005). Greenhouse gas contributions and mitigation potential of agricultural practices in northwestern USA and western Canada. Soil and Tillage Research, 83(1), 25-52.

Macall, D. M., Trabanino, C. R., Soto, A. H., & Smyth, S. J. (2020). Genetically modified maize impacts in Honduras: production and social issues. Transgenic Research, 29(5), 575-586.

MacWilliam, S., Sanscartier, D., Lemke, R., Wismer, M., & Baron, V. (2016). Environmental benefits of canola production in 2010 compared to 1990: A life cycle perspective. Agricultural Systems, 145, 106-115.

Mahaffey, H., Taheripour, F., & Tyner, W. E. (2016). *Evaluating the economic and environmental impacts of a global GMO ban* (No. 333-2016-14338, pp. 1-34).

McConkey, B., Luce, M. S., Grant, B., Smith, W., Padbury, G., Brandt, K., & Cerkowniak, D. (2020). Saskatchewan Soil Conservation Association Prairie Soil Carbon Balance Project: Monitoring SOC Change Across Saskatchewan Farms from 1996 to 2018. Change in SOC at Field Level Component. February.

McConkey, B. G., Liang, B. C., Campbell, C. A., Curtin, D., Moulin, A., Brandt, S. A., & Lafond, G. P. (2003). Crop rotation and tillage impact on carbon sequestration in Canadian prairie soils. Soil and Tillage Research, 74(1), 81-90.

Mikha, M. M., Benjamin, J. G., Vigil, M. F., & Nielson, D. C. (2010). Cropping intensity impacts on soil aggregation and carbon sequestration in the central Great Plains. Soil Science Society of America Journal, 74(5), 1712-1719.

Molberg, E. S., McCurdy, E. V., Wenhardt, A., Dew, D. A., & Dryden, R. D. (1967). Minimum tillage requirements for summerfallow in western Canada. Canadian Journal of Soil Science, 47(3), 211-216.

Nath, A. J., & Rattan, L. A. L. (2017). Effects of tillage practices and land use management on soil aggregates and soil organic carbon in the north Appalachian region, USA. Pedosphere, 27(1), 172-176.

National Research Council. (2010). Environmental Impacts of Genetically Engineered Crops at the Farm Level. In The Impact of Genetically Engineered Crops on Farm Sustainability in the United States. National Academies Press.

Nemo, Klumpp, K., Coleman, K., Dondini, M., Goulding, K., Hastings, A., Jones, M., ... & Smith, P. (2017). Soil organic carbon (SOC) equilibrium and model initialisation methods: an application to the Rothamsted carbon (RothC) model. Environmental Modeling & Assessment, 22(3), 215-229.

Ogle, S. M., Breidt, F. J., & Paustian, K. (2005). Agricultural management impacts on soil organic carbon

storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions. Biogeochemistry, 72(1), 87-121.

Olson, K. R., Al-Kaisi, M., Lal, R., & Morton, L. W. (2017). Soil ecosystem services and intensified cropping systems. Journal of Soil and Water Conservation, 72(3), 64A-69A.

Organisation for Economic Cooperation and Development. (2021). Making Better Policies for Food Systems. Online at: https://doi.org/10.1787/ddfba4de-en.

Paustian, K. (2000). Modelling soil organic matter dynamics - global challenges. In R. M. Rees, B. C. Ball, C. D. Campbell, and C. A. Watson (Eds.), Sustainable Management of Soil Organic Matter (pp. 45–53). Oxon, UK: CABI Press.

Perry, E. D., Ciliberto, F., Hennessy, D. A., & Moschini, G. (2016a). Genetically engineered crops and pesticide use in US maize and soybeans. Science advances, 2(8), e1600850.

Perry, E. D., Moschini, G., & Hennessy, D. A. (2016b). Testing for complementarity: Glyphosate tolerant soybeans and conservation tillage. American Journal of Agricultural Economics, 98(3), 765-784.

Phalan, B., Onial, M., Balmford, A., & Green, R. E. (2011). Reconciling food production and biodiversity conservation: land sharing and land sparing compared. science, 333(6047), 1289-1291.

Powlson, D. S., Whitmore, A. P., & Goulding, K. W. (2011). Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false. European Journal of Soil Science, 62(1), 42-55.

Pray, C., & Huang, J. (2003). The impact of Bt cotton in China. In The economic and environmental impacts of Agbiotech (pp. 223-242). Springer, Boston, MA.

Qaim, M. (2014). Agricultural biotechnology in India: Impacts and controversies. Chapter 9 in S. J. Smyth, P. W. B. Phillips and D. Castle (eds.) Handbook on Agriculture, Biotechnology and Development, 126-137. Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing Ltd.

Qaim, M. (2003). Bt cotton in India: Field trial results and economic projections. World Development, 31(12), 2115-2127.

Radcliffe, J. (2019). Reducing Crime: A Companion for Police Leaders. Accessed at: http://reducingcrime.com.

Rosenzweig, S. T., & Schipanski, M. E. (2019). Landscape-scale cropping changes in the High Plains: economic and environmental implications. Environmental Research Letters, 14(12), 124088.

Sauer, T. J., Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (1996). Corn residue age and placement effects on evaporation and soil thermal regime. Soil Science Society of America Journal, 60(5), 1558- 1564.

Shrestha, B. M., Desjardins, R. L., McConkey, B. G., Worth, D. E., Dyer, J. A., & Cerkowniak, D. D. (2014). Change in carbon footprint of canola production in the Canadian Prairies from 1986 to 2006. Renewable Energy, 63, 634-641.

Smyth, S. J. and Awada, L. 2018. Assessment of Saskatchewan Agricultural Greenhouse Gas Emissions: Sources, Sinks and Measures. Report submitted to the Global Institute for Food Security.

Smyth, S. J., Gusta, M., Belcher, K., Phillips, P. W., & Castle, D. (2011). Changes in herbicide use after adoption of HR canola in Western Canada. Weed Technology, 25(3), 492-500.

Sperow, M. (2016). Estimating carbon sequestration potential on US agricultural topsoils. Soil and Tillage Research, 155, 390-400.

Subramanian, A., & Qaim, M. (2010). The impact of Bt cotton on poor households in rural India. The Journal of Development Studies, 46(2), 295-311.

Sutherland, C., Gleim, S., & Smyth, S. J. (2021). Correlating genetically modified crops, glyphosate use and increased carbon sequestration. Sustainability, 13(21), 11679.

Taheripour, F., Mahaffey, H., & Tyner, W. E. (2015). Evaluation of Economic, Land Use, and Land Use Emission Impacts of Substituting Non-GMO Crops for GMO in the US (No. 330-2016- 13790).

Tilman, D. (1999). Global environmental impacts of agricultural expansion: the need for sustainable and efficient practices. Proceedings of the national Academy of Sciences, 96(11), 5995-6000.

VandenBygaart, A. J., Bremer, E., McConkey, B. G., Ellert, B. H., Janzen, H. H., Angers, D. A., ... & McKenzie, R. H. (2011). Impact of sampling depth on differences in soil carbon stocks in long-term agroecosystem experiments. Soil Science Society of America Journal, 75(1), 226- 234.

Walsh, M. J., Harrington, R. B., & Powles, S. B. (2012). Harrington seed destructor: a new nonchemical weed control tool for global grain crops. Crop Science, 52(3), 1343-1347.

West, T. O., & Post, W. M. (2002). Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. Soil Science Society of America Journal, 66(6), 1930-1946.

Wutzler, T., & Reichstein, M. (2007). Soils apart from equilibrium–consequences for soil carbon balance modelling. Biogeosciences, 4(1), 125-136.

Yanni, S., Rajsic, P., Wagner-Riddle, C., & Weersink, A. (2018). A Review of the Efficacy and Cost-Effectiveness of On-Farm BMPs for Mitigating Soil-Related GHG Emissions. Working Paper Series - WP 18-05. Institute for the Advanced Study of Food and Agricultural Policy. Department of Food, Agriculture, and Resource Economics. University of Guelph. Online at: http://ageconsearch.umn.edu/record/276270/files/Synthesis of GH.

Zhang, C., Wohlhueter, R., & Zhang, H. (2016). Genetically modified foods: A critical review of their promise and problems. Food Science and Human Wellness 5: 3: 116-123.