



ISSN
1859 - 0802

TẠP CHÍ KHOA HỌC CÔNG NGHỆ CHĂN NUÔI
Số 150 (4/2025): 2 - 20

JOURNAL OF ANIMAL SCIENCE AND TECHNOLOGY
No. 150 (4/2025): 2 - 20

DOI: 10.70408/nias.i150-y2025-614

Cây thức ăn chăn nuôi là kho lưu trữ tính trạng đa dạng chức năng để thích ứng với khí hậu hiện tại và tương lai

Nguyễn Văn Quang

Viện Chăn nuôi

TÓM TẮT

Biến đổi khí hậu và hiện tượng nóng lên toàn cầu là những thảm họa do con người gây ra hiện đang thách thức trên toàn thế giới, đe dọa căn trở an ninh lương thực, môi trường và dinh dưỡng toàn cầu trong tương lai. Biến đổi khí hậu ảnh hưởng đến các dịch vụ hệ sinh thái và tương tác giữa các yếu tố sinh học và phi sinh học. Hậu quả nghiêm trọng nhất đã được quan sát thấy trong lĩnh vực nông nghiệp và chăn nuôi, với tiềm năng sản xuất và năng suất giảm sút. Nông nghiệp và các lĩnh vực liên quan góp phần đáng kể vào việc sản xuất khí nhà kính. Tuy nhiên, các biện pháp quản lý tổng hợp có thể được sử dụng để hạn chế khí thải nhà kính và những tác động tiêu cực của nó. Các loại cây thức ăn chăn nuôi và họ hàng hoang dã của chúng duy trì đa dạng sinh học và các dịch vụ hệ sinh thái và giảm thiểu những tác động nghiêm trọng của biến đổi khí hậu. Các loại cây thức ăn chăn nuôi thích nghi với môi trường khắc nghiệt có một số đặc điểm độc đáo như tính lâu năm, hệ thống rễ sâu, hiệu quả sử dụng tài nguyên cao (ánh sáng, chất dinh dưỡng và nước) và sản xuất ít khí mê-tan và N₂O, khiến chúng phù hợp để sử dụng trong tương lai trong điều kiện biến đổi khí hậu. Bài đánh giá này nêu bật những đặc điểm nổi bật của nhiều loại cây thức ăn chăn nuôi được trồng rộng rãi và chăn thả có thể đóng vai trò quan trọng trong việc hiểu được tác động của biến đổi khí hậu. Chúng tôi thảo luận về họ hàng hoang dã của các loại cây thức ăn chăn nuôi, thường thích nghi với nhiều áp lực và nêu bật cơ chế thích nghi của chúng trong điều kiện biến đổi khí hậu. Chúng tôi coi các công cụ lai tạo và công nghệ sinh học tiên tiến hữu ích cho việc phát triển các loại cây thức ăn chăn nuôi thông minh với khí hậu. Đánh giá này cung cấp cái nhìn sâu sắc mới về các loại cây thức ăn chăn nuôi và họ hàng hoang dã của chúng về mặt khai thác chúng trong các chương trình lai tạo chịu nhiều áp lực trong tương lai và các con đường để phát triển các loại cây trồng có khả năng chống chịu với khí hậu.

Từ khóa: sản xuất vật nuôi, biến đổi khí hậu, họ hàng hoang dã của cây trồng, lai tạo thức ăn chăn nuôi, hiện tượng nóng lên toàn cầu, khí nhà kính, cây lâu năm, hiệu quả sử dụng tài nguyên.

Giới thiệu

Sự mất mát nghiêm trọng toàn cầu của hệ sinh thái tự nhiên đang được thúc đẩy bởi biến đổi khí hậu do con người gây ra, làm tăng cường sự tái diễn và thời gian kéo dài của các sự kiện thời tiết khắc nghiệt bao gồm tình trạng thừa hoặc thiếu nước, đợt nắng nóng hoặc nhiệt độ xuống thấp và lốc xoáy (Weiskopf và cs., 2020). Biến đổi khí hậu của Trái đất chủ yếu do khí thải nhà

kính (GHG) gây ra, với hậu quả là làm ấm bầu khí quyển (Kweku và cs., 2018). Về mặt khí thải GHG, hơi nước và mây, carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), nitrous oxide (N₂O) và ozone (O₃) đóng góp đáng kể; tuy nhiên, CO₂ là tác nhân chính gây ra hiện tượng nóng lên toàn cầu (Sabagh và cs., 2020).

Các hoạt động đa dạng liên quan đến sản xuất nông nghiệp, chẳng hạn như chăn nuôi và bón

Tác giả liên hệ: Nguyễn Văn Quang; Tel: 0989637328

*Email: quangvcn@gmail.com

phân, đóng góp ~11,6% tổng lượng khí thải GHG (Mikhaylov và *cs.*, 2020). Trên toàn cầu, chăn nuôi đóng góp 44% CH₄, 53% N₂O và 5% lượng khí thải CO₂ (Gerber và *cs.*, 2013), cũng như thúc đẩy sự thoái hóa đất, ô nhiễm không khí, đất và nước, và suy giảm đa dạng sinh học nông nghiệp, dịch vụ hệ sinh thái và năng suất (Fatima và *cs.*, 2020). Các quy trình sản xuất động vật như quản lý tàn dư cây trồng, bón phân hữu cơ, cố định đạm sinh học, lên men đường ruột của gia súc nhai lại và chế biến và vận chuyển các sản phẩm động vật là nguồn phát thải khí nhà kính chính (Rojas-Downing và *cs.*, 2017). Các phát hiện thực nghiệm trong hơn 20 năm cho thấy 26% tổng lượng CH₄ được tạo ra bởi nông nghiệp và các ngành liên quan, trong đó trồng lúa đóng góp nhiều nhất (10%), tiếp theo là quản lý phân chuồng (6%), với các hoạt động khác đóng góp 10% (Yusuf và *cs.*, 2012). Hơn nữa, các tác giả đó cũng nêu rằng 53% CH₄ chủ yếu là do quá trình lên men đường ruột, tiếp theo là trồng lúa (18%) trong nông nghiệp.

Các sản phẩm chăn nuôi có vị trí quan trọng trong chế độ ăn của con người vì giá trị dinh dưỡng của chúng (Dumont và *cs.*, 2019) và nhu cầu về các sản phẩm như vậy đang tăng lên và dự kiến sẽ tăng gấp đôi vào năm 2050 (Rojas-Downing và *cs.*, 2017). Tuy nhiên, các tình huống liên quan đến biến đổi khí hậu tạo ra mối đe dọa đối với sản xuất chăn nuôi, tác động tiêu cực đến các thuộc tính về số lượng và chất lượng của thức ăn và sản phẩm chăn nuôi (Henry và *cs.*, 2018). Nồng độ CO₂ trong khí quyển tăng cao dẫn đến những thay đổi trong mô hình sinh trưởng của cỏ, và làm giảm chất lượng thức ăn chăn nuôi, tính đa dạng của đồng cỏ, tính khả dụng của chất dinh dưỡng và hiệu quả sử dụng tài nguyên (RUE), cuối cùng làm giảm hiệu quả sinh sản và làm gia tăng nhiều vấn đề sức khỏe khác nhau (Rojas-Downing và *cs.*, 2017). Do đó, việc quản lý các ngành chăn nuôi là điều bắt buộc để giảm thiểu các tác động bất lợi và duy trì năng suất vật nuôi, an ninh lương thực, dinh dưỡng động vật-con người và tính bền vững của môi trường.

Thức ăn chăn nuôi khác với cây lương thực vì chủ yếu được trồng làm thức ăn chăn nuôi và chúng đảm bảo sinh kế cho gần 800 triệu người trên toàn cầu. Các loại cỏ và cây họ đậu đóng vai trò đặc biệt trong thức ăn chăn nuôi và an ninh môi trường. Những loại cây trồng này rất quan trọng để duy trì đa dạng sinh học nông nghiệp, cung cấp môi trường sống cho động vật nuôi và động vật hoang dã, cô lập carbon, bảo tồn nước và đưa các đặc điểm chức năng của loại hoang dã vào cây trồng. Cây thức ăn chăn nuôi chủ yếu được phân loại thành hai nhóm: Nhóm cỏ trồng thu cắt và nhóm chăn thả (Rao và *cs.*, 2015). Các loại cỏ và cây họ đậu được trồng mà không có sự can thiệp của con người; do đó, chúng có một số đặc điểm riêng biệt giúp chúng tồn tại trong điều kiện khắc nghiệt và rất quan trọng để duy trì các loài hoang dã và giảm thiểu sự thoái hóa đất (Ergon và *cs.*, 2018). Ở đồng cỏ, các loại cỏ lâu năm và cây họ đậu chiếm ưu thế và có RUE cao hơn đối với ánh sáng, nước, quang đồng hóa và chất dinh dưỡng (Yang và Udvardi, 2018; Lal và *cs.*, 2022). Cây trồng làm thức ăn chăn nuôi trên đồng cỏ chăn thả có một số ưu điểm so với cây trồng làm thức ăn chăn nuôi thu cắt; đặc biệt, chúng có khả năng sinh sản sinh dưỡng, tiềm năng tái sinh trưởng, khả năng chịu đựng stresses, hiệu quả huy động lại chất dinh dưỡng và chuyển đổi sinh khối, cũng như cải thiện hiệu quả sử dụng nước, chất dinh dưỡng và năng lượng (Hall và *cs.*, 2020). Tiềm năng cô lập carbon của cây trồng có vai trò nổi bật trong các chương trình thích nghi và giảm thiểu biến đổi khí hậu. Ví dụ, các loại cây trồng thức ăn chăn nuôi lâu năm có thể làm tăng hàm lượng cacbon hữu cơ trong đất lên 20% ở độ sâu 0–30 cm và lên 10% ở độ sâu mở rộng (0–100 cm) sau khoảng 20 năm thiết lập thảm cỏ (Ledo và *cs.*, 2020). Tương tự như vậy, các loại cây trồng như vậy đã được chứng minh là tăng gấp đôi lượng hấp thụ carbon và giảm lượng phát thải N₂O xuống dưới một phần tư trong vòng 2 năm so với cây trồng hàng năm (Maas và *cs.*, 2013). Ngoài ra, cây thức ăn chăn nuôi lâu năm có hệ thống rễ sâu có thể hút nước từ đất sâu, trái ngược với cây thức ăn chăn nuôi hàng năm

(Lasisi và cs., 2018). Tương tự như vậy, cây thức ăn chăn nuôi C_4 cũng sẽ có vai trò quyết định trong các điều kiện khí hậu trong tương lai, có hiệu quả cố định carbon, hiệu quả sử dụng nước (WUE) và sản xuất sinh khối cao hơn, và hô hấp sáng và sản xuất N_2O và metan thấp hơn so với cây C_3 (Ning và cs., 2020; Reddy và cs., 2020; De Haan và cs., 2021). Do đó, cả cây thức ăn chăn nuôi C_4 và cây thức ăn chăn nuôi lâu năm đều có tiềm năng lớn để thích nghi với các tình huống khí hậu biến động.

Các chiến lược thích ứng đóng vai trò trung tâm trong việc tăng cường khả năng phục hồi của cây trồng và năng suất vật nuôi trong điều kiện biến đổi khí hậu (Polley và cs., 2013), và các biện pháp giảm thiểu có thể được sử dụng để làm giảm bớt hậu quả cấp tính của nó. Các chiến lược thích ứng bao gồm việc sửa đổi các hệ thống sản xuất và quản lý (đa dạng hóa, tích hợp và thay đổi thời gian và địa điểm hoạt động trang trại), các chiến lược nhân giống (giới thiệu hoặc chuyển các gen mong muốn và chịu được căng thẳng từ cây trồng hoang dã sang cây trồng bằng các phương pháp nhân giống truyền thống và phân tử), các thay đổi về thể chế và chính sách, tiến bộ khoa học và công nghệ, và thay đổi nhận thức và khả năng thích ứng của nông dân (Henry và cs., 2012; Jones và cs., 2013; EL Sabagh và cs., 2021; Sabagh và cs., 2021; Chand và cs., 2022a). Mô hình hóa cây trồng có vai trò quan trọng trong việc phát triển các loại cây trồng có khả năng phục hồi trước biến đổi khí hậu. Việc áp dụng mô hình mô phỏng hệ thống sản xuất nông nghiệp (APSIM) trong cây lương thực dựa trên quản lý đặc điểm chức năng của hiệu quả sử dụng bức xạ và vật lý học cây trồng đã giúp cải thiện năng suất theo thời gian trong điều kiện biến đổi khí hậu (Akinseye và cs., 2020). Tuy nhiên, có rất ít mô hình cây trồng được thiết kế cho cây thức ăn chăn nuôi và cần phải phát triển các mô hình như vậy để đẩy nhanh quá trình phát triển các loại cây thức ăn chăn nuôi có khả năng chống chịu với biến đổi khí hậu. Các biện pháp quan trọng để thích ứng và giảm thiểu hậu quả của biến đổi khí hậu thông qua cỏ chăn nuôi và cây

họ đậu có thể bao gồm quản lý nông học tốt hơn, khai thác tiềm năng di truyền thông qua các chương trình nhân giống được cải thiện và các thay đổi lý hóa học của cây trồng ở cấp độ tế bào (Indu và cs., 2021; Javed và cs., 2022; Chand và cs., 2022b).

Việc xác định các gen hữu ích mong muốn (khả năng chịu đựng điều kiện khắc nghiệt, hiệu quả sử dụng tài nguyên, năng suất cao trong điều kiện chịu ảnh hưởng của biến đổi khí hậu) và khai thác tiềm năng di truyền như vậy của cây trồng hoang dã thông qua các phương pháp lai tạo truyền thống và các công cụ sinh học phân tử tiên tiến ở các loài được trồng có thể rất quan trọng đối với chương trình cải tiến cây trồng (Lal và cs., 2019; Lal và cs., 2021; Yadav và cs., 2022; Chand và cs., 2022b). Sự khác biệt về mặt di truyền, đặc điểm ngủ đông mùa hè và các thuộc tính dẻo dẹo có thể hữu ích trong việc giảm thiểu tác động của biến đổi khí hậu và phát triển các loại cây thức ăn chăn nuôi lý tưởng (Münzbergová và cs., 2017). Tăng mức năng suất là mục tiêu chung của các chương trình cải tiến cây trồng truyền thống và đã được thực hiện theo thời gian. Tuy nhiên, các khía cạnh về chất lượng vẫn chưa đã được khai thác đến tiềm năng mục tiêu. Do đó, cải thiện năng suất kết hợp với nâng cao chất lượng, sử dụng các phương pháp lai tạo giống cải tiến và các công cụ sinh học phân tử để truyền đạt tiềm năng thích ứng tốt hơn trong các kịch bản biến đổi khí hậu, nên là mục tiêu tương lai của các chương trình cải tiến cây trồng ở các loài thức ăn chăn nuôi trên đồng cỏ.

Đặc điểm nổi bật của cây thức ăn chăn nuôi

Cây thức ăn chăn nuôi chủ yếu được phân loại thành hai nhóm: Cây trồng và thức ăn chăn nuôi trên đồng cỏ. Cây thức ăn chăn nuôi được trồng là cây được trồng trên đồng ruộng của người nông dân để làm thức ăn cho động vật. Chúng có thể là cây hàng năm (trồng và thu hoạch trong một mùa) hoặc cây

lâu năm (có năng suất thức ăn chăn nuôi lên đến 2–3 năm). Những loại thức ăn chăn nuôi được trồng này được phân loại thêm là ngũ cốc hoặc đậu. Ngũ cốc chủ yếu được nhóm theo họ hòa thảo (*Gramineae* hoặc *Poaceae*). Thân cây họ cỏ rỗng ngoại trừ ở các đốt và có lá mọc so le hẹp. Phần dưới của mỗi lá được giới hạn trong thân, tạo thành bẹ lá. Lá mọc từ gốc phiến lá và phát triển về phía phần chóp (Gibson, 2009; Younger, 2012). Loại thức ăn chăn nuôi thứ hai là cây họ đậu, thuộc họ *Leguminosae* hoặc *Fabaceae*, có khả năng cố định nitơ trong khí quyển. Do đó, nhu cầu phân đạm ở những loại cây này ít hơn nhiều (Amiri và cs., 2012). Ngoài ra, thức ăn chăn nuôi họ đậu có hàm lượng protein cao hơn, trong khi ngũ cốc có tỷ lệ carbohydrate cao hơn. Do đó, việc trộn cả cây ngũ cốc và cây thức ăn chăn nuôi làm thức ăn chăn nuôi cung cấp dinh dưỡng hoàn chỉnh và rất quan trọng để duy trì năng suất chăn nuôi (Tessema và Feleke, 2018). Ở cây họ đậu làm thức ăn chăn nuôi, giai đoạn sinh dưỡng và sinh sản phát triển cùng nhau, trong khi ở ngũ cốc, giai đoạn sinh sản diễn ra sau giai đoạn sinh dưỡng.

Đồng cỏ bao gồm đồng cỏ, sa mạc, đất ngập nước, đất cây bụi và các khu vực rừng được chăn thả gia súc. Những khu vực này chủ yếu được trồng từ thảm thực vật bản địa và được quản lý bằng cách chăn thả, không áp dụng bất kỳ biện pháp canh tác nông nghiệp nào. Cây thức ăn chăn nuôi ở đồng cỏ cũng được phân loại thành ngũ cốc và cây họ đậu; tuy nhiên, những khu vực này thường chủ yếu có cây thức ăn chăn nuôi lâu năm. Các loại ngũ cốc quan trọng trên đồng cỏ là *Cenchrus ciliaris* L. (cỏ anjan), *Heteropogon contortus* (L.) P.Beauv. ex Roem & Schult. (cỏ giáo đen), *Cenchrus setigerus* Vahl. (cỏ dhaman) và *Dichanthium annulatum* (Forssk.) Stapf (cỏ marvel). Tương tự như vậy, *Clitoria*, *Atylosia* và *Dolichos* là các chi họ đậu nhiệt đới quan trọng trên đồng cỏ (Heady và Child, 2019).

Đặc điểm của cỏ hàng năm và cỏ lâu năm cho hiệu quả sử dụng tài nguyên cao hơn

Cây trồng hàng năm có tuổi thọ rất ngắn, dao động từ một tháng đến vài tháng. Trong giai đoạn này, chúng hoàn thành vòng đời từ khi hạt nảy mầm đến khi trưởng thành và tạo ra hạt giống cho thế hệ tiếp theo trước khi chết. Thông thường, cây lâu năm mất nhiều thời gian hơn để hoàn thành vòng đời của chúng (từ 1 năm đến 4 hoặc 5 năm). Hầu hết các cây lâu năm sinh sản thông qua nhân giống sinh dưỡng như giâm cành (Hall và cs., 2020). Cây hàng năm phải đối mặt với tình trạng lão hóa hoàn toàn sau giai đoạn sinh dưỡng, trong khi cây lâu năm biểu hiện tình trạng lão hóa của các cơ quan sau đó là trẻ hóa vào mùa tiếp theo (Yang và Udvardi, 2018). Sự lão hóa toàn bộ cây ở cây hàng năm có liên quan đến việc kích hoạt các gen liên quan đến lão hóa (SAG), tương tác của các tín hiệu nội tiết tố và tình trạng thiếu hụt chất dinh dưỡng. Ngược lại, các loại cây trồng lâu năm đã phát triển một hệ thống để ngăn ngừa tình trạng lão hóa của toàn bộ cây thông qua việc huy động chất dinh dưỡng đến các cơ quan dưới lòng đất, giảm biểu hiện SAG và kích hoạt các cơ chế truyền tín hiệu và nội tiết tố (Yang và Udvardi, 2018). Cây lâu năm có hiệu quả sử dụng chất dinh dưỡng cao hơn cây hàng năm. Cây trồng hàng năm và cây lâu năm khác nhau về cách sử dụng tài nguyên thiên nhiên như nước và chất dinh dưỡng, cũng như về hiệu quả năng lượng và chuyển đổi sinh khối. Nhìn chung, cây trồng thức ăn chăn nuôi lâu năm có khả năng hấp thụ carbon lớn hơn cây trồng thức ăn chăn nuôi hàng năm. Ledo và cs. (2020) đã chỉ ra rằng cây trồng lâu năm có hiệu quả hấp thụ carbon cao hơn do cô lập carbon hữu cơ nhiều hơn. Tuy nhiên, tỷ lệ cô lập carbon cao hơn trong những năm đầu và giảm chậm trong những năm sau. Tương tự như vậy, việc trồng cây thức ăn chăn nuôi lâu năm là cỏ linh lăng (*Medicago sativa* L.) và cỏ timothy (*Phleum pratense* L.) ở Red River Valley, Manitoba, Canada đã tạo ra lượng hấp thụ carbon gấp đôi và lượng phát thải N₂O bằng một phần tư lượng phát thải N₂O của cây trồng hàng năm là lúa mì và mù tạt trong

vòng 2 năm sau khi trồng (Maas và cs., 2013). Các loại cỏ như *Brachiaria* spp., *Cenchrus ciliaris*, *Chrysopogon fulvus* (Spreng.) Chiov. và *Cenchrus clandestinus* (Hochst. ex Chiov.)

Cỏ Morrone được trồng trong các hệ thống đồng cỏ, rừng-đồng cỏ và vườn-đồng cỏ có tiềm năng to lớn trong việc cải thiện quá trình cô lập carbon và đất bị thoái hóa (Thornton và Herrero, 2010; Ghosh và cs., 2021; Kumar và cs., 2022). Sau 9 năm, tổng hàm lượng cacbon hữu cơ trong các lớp đất mặt được tăng cường lần lượt là 84%, 91% và 77% ở đồng cỏ *Cenchrus ciliaris*, *Cenchrus clandestinus* và *Chrysopogon fulvus* so với đất bỏ hoang (Ghosh và cs., 2021), đóng vai trò quan trọng trong việc phục hồi sinh thái.

Một nghiên cứu được tiến hành ở phía bắc Victoria, Úc, so sánh các loại cây trồng thức ăn gia súc hàng năm và lâu năm vào mùa đông về năng suất nước tưới đã xác nhận rằng các loại cây trồng hàng năm có năng suất nước cao hơn (Lawson và cs., 2009). Một nghiên cứu kéo dài 3 năm đã được tiến hành bằng cách sử dụng 22 loài cây thức ăn gia súc hàng năm và lâu năm và kết luận rằng khả năng hút nước phụ thuộc vào hệ thống rễ (Neal và cs., 2012). Các loại cỏ lâu năm như *Cenchrus clandestinus*, *Phalaris aquatica* L. và *Festuca arundinacea* Schreb. (cỏ đuôi chồn) có thể tạo ra hệ thống rễ sâu tới 2 m ở các đồng cỏ phân bố ở Úc và có khả năng tiếp tục hút nước từ đất ở mức độ ẩm đất thấp, một yếu tố quan trọng để tồn tại trong điều kiện thời tiết kéo dài hạn hán. Rõ ràng, tầng độ sâu rễ cũng có thể cải thiện tốc độ tăng trưởng và sản lượng đồng cỏ do khả năng tiếp cận độ ẩm và chất dinh dưỡng của đất tốt hơn, và tránh mất nước khi thiếu nước (Volaire và Lelièvre, 2001; Nie và cs., 2008). Do đó, cỏ thức ăn lâu năm chiếm ưu thế ở những vùng thiếu nước (Neal và cs., 2012).

Một nghiên cứu về hệ thống canh tác hàng năm (cải dầu + lúa mạch) và lâu năm (*Phleumpratense* L. (timothy) + *Dactylis glomerata* L. (cỏ vườn)) chỉ ra rằng sinh khối rễ và hấp thụ nitơ của rễ được nâng cao trong hệ thống lâu năm. Lượng nitơ hấp thụ cao hơn này ở cỏ lâu năm có nghĩa

là NO_3 bị rửa trôi ít hơn so với hệ thống hàng năm và do đó, canh tác lâu năm có thể là một giải pháp thay thế ở những vùng bị ô nhiễm NO_3 (Lasisi và cs., 2018). Tương tự như vậy, Ojeda và cs. (2018a) báo cáo rằng hiệu quả sử dụng lượng mưa thấp hơn 30% trong hệ thống *Medicago sativa* so với hệ thống cây trồng hàng năm yến mạch và ngô. Một nghiên cứu về các hệ thống xen canh hàng năm, lâu năm, ngô-yến mạch và ngô/yến mạch-đậu nành cho thấy năng suất vật chất khô, WUE và RUE cao hơn đối với các loại cỏ thức ăn chăn nuôi hàng năm (Ojeda và cs., 2018b). Việc kết hợp hệ thống thức ăn chăn nuôi lâu năm vào hệ thống cây trồng hàng năm giúp cải thiện hiệu quả sử dụng chất dinh dưỡng, ngăn ngừa xói mòn đất và hạn chế việc sử dụng phân bón hóa học (Liu và cs., 2014). Hơn nữa, các loài cây lâu năm phát triển nhanh hơn cây trồng hàng năm sau khi thiết lập và làm giảm cường độ cỏ dại. Do đó, cây lâu năm có thể được ưu tiên trong một hệ thống quản lý cỏ dại tích hợp (Meiss và cs., 2010).

Đặc điểm của đồng cỏ và cỏ được canh tác

Như đã thảo luận trước đó, thức ăn chăn nuôi ở đồng cỏ có bản chất thuần hóa và không có hoạt động nhân sinh nào liên quan đến việc canh tác chúng. Thức ăn chăn nuôi ở đồng cỏ chủ yếu bao gồm cỏ lâu năm và một số loại cỏ hàng năm, và cây họ đậu. Thức ăn chăn nuôi được chọn làm cây thức ăn chăn nuôi quan trọng, được trồng trên cánh đồng của nông dân để làm thức ăn cho động vật (Becchetti và cs., 2016; Alemayehu và cs., 2017). Ở đồng cỏ, thức ăn chăn nuôi lâu năm chiếm ưu thế và chúng có hiệu quả sử dụng cao các nguồn tài nguyên như ánh sáng, nước và chất dinh dưỡng. Vì những loại cây trồng này phát triển mà không cần bổ sung nước và chất dinh dưỡng nên chúng có hệ thống rễ phát triển tốt và hiệu quả để khai thác nước và chất dinh dưỡng ở các lớp đất sâu hơn. Cỏ đồng cỏ đóng vai trò là thức ăn chính cho động vật ở các nước kém phát triển nhất. Phân tích giá trị dinh dưỡng của thức ăn chăn nuôi và đặc điểm đất ở đồng cỏ Uganda cho

thấy tính chất đất (pH, chất hữu cơ, N, P, K) và giá trị dinh dưỡng (protein thô, chất xơ trung tính, Ca, P, K) đều thấp hơn mức khuyến nghị (Kyoshabire và cs., 2018). Các tác giả đó cũng kết luận rằng độ phong phú của loài rất thấp và *Panicum maximum* L là loại cỏ có nhiều dinh dưỡng nhất ở vùng đồng cỏ này. Do đó, việc lai tạo các loại cây trồng có hiệu quả cao và giàu dinh dưỡng ở vùng đồng cỏ là rất quan trọng để phục hồi các vùng đồng cỏ bằng cách tăng của các loài cỏ và hạn chế tải trọng chăn thả gia súc. Ngoài các yếu tố này, cháy rừng tự nhiên ảnh hưởng đến các đặc điểm dưới đất và trên mặt đất ở các khu vực đồng cỏ tự nhiên. Các giá trị pH, nitơ, photpho, kali, cacbon, độ dẫn điện và khả năng trao đổi cation được phát hiện cao hơn ở khu vực bị cháy so với khu vực đối chứng; tuy nhiên, mức độ phong phú về loài và đa dạng sinh học cao hơn ở khu vực đối chứng (Sheidai Karkaj và cs., 2019).

Cây trồng làm thức ăn chăn nuôi đóng vai trò quan trọng đối với sự tăng trưởng và sinh sản của động vật. Thức ăn chăn nuôi chủ yếu bao gồm các loại cây trồng hàng năm bao gồm cả thức ăn chăn nuôi và mục đích kép (thức ăn chăn nuôi + ngũ cốc), ngũ cốc và cây họ đậu. Các loại cây trồng làm thức ăn chăn nuôi này được trồng cùng với các loại cây lương thực chính và có giá trị dinh dưỡng cao hơn các loại cây trồng trên đồng cỏ. Tuy nhiên, các loại cây trồng làm thức ăn chăn nuôi này cũng được trồng ở những vùng kém năng suất hơn so với các loại cây lương thực. Chiều cao cây lớn hơn, sinh trưởng nhanh, cắt nhiều lần, số nhánh cao hơn, diện tích lá tối ưu, hệ thống rễ phát triển tốt, bề mặt lá nhẵn và chín muộn là những đặc điểm hình thái quan trọng ở thức ăn chăn nuôi được trồng. Tương tự như vậy, chúng có hàm lượng protein thô, chất xơ trung tính, chất dinh dưỡng (N, P, K, Z, Fe, Zn) và vitamin cao hơn so với cỏ đồng cỏ (Grander và cs., 2009; Novoselec và cs., 2018). Các loại cây trồng làm thức ăn chăn nuôi cũng có độ ngon miệng, khả năng tiêu hóa và giá trị dinh dưỡng cao hơn để động vật phát triển sinh sản bình thường (Bekuma, 2019). Ngày nay, các nhà nghiên cứu đang tập

trung vào các loại cây trồng này và cố gắng cải thiện WUE, quá trình hấp thụ chất dinh dưỡng và RUE (Jha và cs., 2016). Một vấn đề lớn của cây trồng thức ăn chăn nuôi là các yếu tố kháng dinh dưỡng, ảnh hưởng đến năng suất vật nuôi (Ramteke và cs. 2019). Do đó, việc lai tạo các loại cây trồng thức ăn chăn nuôi có đặc điểm cụ thể là rất quan trọng để cải thiện năng suất thức ăn chăn nuôi trong điều kiện biến đổi khí hậu.

Đặc điểm cây trồng thức ăn chăn nuôi C_3 và C_4 cho các kịch bản biến đổi khí hậu

Cây trồng thức ăn chăn nuôi cũng có thể được phân loại dựa trên enzyme cố định cacbon ban đầu, sản xuất ATP, tế bào bao bó mạch, giải phẫu Kranz và hô hấp sáng (Islam và Adjesiwor 2018; Ning và cs., 2020). Ở cây trồng thức ăn chăn nuôi C_4 , quá trình cacboxyl hóa ban đầu xảy ra ở các tế bào bao bó mạch, đây là một đặc điểm độc đáo của thực vật C_4 (giải phẫu Kranz) (Islam và Adjesiwor, 2018); Ở cây trồng thức ăn chăn nuôi C_3 , bao bó mạch có mặt nhưng không có chức năng trong tự nhiên. Quá trình cacboxyl hóa thứ hai xảy ra ở các tế bào trung mô, giống như cây trồng thức ăn chăn nuôi C_3 . Ở cây trồng thức ăn chăn nuôi C_3 , hô hấp sáng có liên quan đến chu trình Calvin và 25% cacbon cố định bị lãng phí trong quá trình chuyển hóa phosphoglycolate (Volenc và Nelson, 2020). Cây trồng thức ăn chăn nuôi C_4 duy trì tốc độ quang hợp cao hơn trong điều kiện bình thường và căng thẳng so với cây trồng thức ăn chăn nuôi C_3 ; do đó, cây trồng thức ăn chăn nuôi C_4 cho thấy sinh khối cao hơn trong cả môi trường kiểm soát và môi trường đầy thách thức (Shoko và cs., 2018). Phát thải CH_4 có vai trò quan trọng trong biến đổi khí hậu và phát thải cao hơn được ghi nhận khi động vật gặm cỏ C_4 so với cây trồng thức ăn chăn nuôi C_3 (Archimède và cs., 2011). Tuy nhiên, cỏ C_4 cũng dẫn đến giảm 13,4–26,5% lượng phát thải N_2O trên mỗi đơn vị sản xuất cỏ khô và protein thô ở các vùng khô hạn, mặc dù tổng lượng phát thải cao hơn (Ning và cs., 2020). Cây họ đậu khí hậu ẩm dẫn đến phát thải CH_4 thấp hơn cỏ C_4 , nhưng không

tìm thấy sự khác biệt nào như vậy đối với cây họ đậu khí hậu lạnh và cỏ C_3 (Archimède và cs., 2011). Điều kiện nhiệt độ cao và hạn hán làm giảm khả năng tiêu hóa và các đặc điểm chất lượng, đồng thời ảnh hưởng đến lượng khí thải CH_4 từ các loại cây thức ăn chăn nuôi (Habermann và cs., 2019). Tuy nhiên, các loại cây thức ăn chăn nuôi C_4 thích nghi với khí hậu nhiệt đới do điểm bão hòa ánh sáng cao hơn và độ dẫn khí không thấp hơn (WUE cao hơn); những đặc điểm này giúp các loại cây thức ăn chăn nuôi C_4 chịu được ánh sáng gắt và hạn hán (Druille và cs., 2019; Marín và cs., 2020).

Cây trồng làm thức ăn chăn nuôi và các nguồn tài nguyên hoang dã đối với các stress sinh học và phi sinh

Người ta nhận thấy rằng các loại cây thức ăn chăn nuôi chủ yếu được trồng trên đất kém năng suất hoặc trên đất thoái hóa và ít đầu tư hơn. Do đó, các loại cây này phải đối mặt với nhiều loại stress kết hợp hoặc riêng lẻ trong các giai đoạn sinh trưởng khác nhau. Các loại cây thức ăn chăn nuôi có khả năng là những loại cây khỏe mạnh và có khả năng chịu được nhiều loại stress. *Medicago sativa* là loài mô hình cho nghiên cứu cây trồng làm thức ăn chăn nuôi, và một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng nguồn gen *Medicago sativa* chịu mặn mang các gen được đánh giá là có khả năng phòng vệ các loài oxy phản ứng (ROS), truyền tín hiệu Ca, sinh tổng hợp phytohormone và vận chuyển Na^+/K^+ (Lei và cs., 2018). Cỏ Signalgrass (*Brachiaria* spp.) là một loại cỏ quan trọng của vùng nhiệt đới và có tiềm năng sống sót trên đất nghèo dinh dưỡng và trong điều kiện hạn hán, lũ lụt và các điều kiện khắc nghiệt khác; để chịu được căng thẳng do ngập lụt, thực vật phát triển mô khí rỗng để vận chuyển oxy từ rễ lên chồi. Ngoài ra, trong điều kiện căng thẳng do hạn hán, một số loài *Brachiaria* cải thiện chiều dài rễ, WUE, chuyển động của khí khổng và diện tích lá xanh, giúp chống chịu được các điều kiện bất lợi (Rao và cs., 2011). Hơn nữa, cỏ đã tiến hóa một số cơ chế phòng vệ như tính dẻo kiểu hình,

điều chỉnh thẩm thấu, điều hòa khí khổng, sản xuất chất chuyển hóa và các gen và protein chịu đựng căng thẳng, để thích nghi tốt hơn trong điều kiện khắc nghiệt (Barker và Caradus, 2001; Ma và cs., 2017). Các đặc điểm chức năng như gấp lá (*Dactylis glomerata*, *Themeda* spp.), cuộn lá (*Austroanthonia caespitosa* (Gaudich.) H.P.Linder, *Eragrostis* spp.), rụng lá (*Bothriochloa* spp., *Phalaris* spp.) và tích tụ sáp biểu bì (*Austroanthonia racemosa* và *A. caespitosa*) cũng là các cơ chế hình thái ở cỏ để tránh hạn hán (Bolger và cs., 2005). Các loại cỏ lâu năm như *Dactylis glomerata*, *Cenchrus* spp., *Megathyrsus maximus* (Jacq.) B.K.Simon & S.W.L.Jacobs (cỏ Guinea) và *Dichanthium annulatum* cho thấy trạng thái ngủ đông vào mùa hè, cho phép thoát khỏi điều kiện nóng và hạn hán (Reed và cs., 2004). Các loại cỏ này sẽ cho thấy trạng thái ngủ đông một phần đến hoàn toàn vào mùa hè và tạo ra năng suất thức ăn xanh cao hơn sau mùa hè. Các carbohydrate hòa tan trong nước (WSC) như fructan trong các loại cỏ lâu năm là nguồn năng lượng có sẵn nhất (Smith và cs., 1998) và phản ứng với căng thẳng hạn hán. Trong thời gian hạn hán, fructan được phát hiện tăng lên ở *Lolium perenne* L. (cỏ lúa mạch đen), *Festuca arundinacea* và *Dactylis glomerata* (Volaire và Lelièvre, 1997). WSC đóng vai trò là chất nền dự trữ trong thời kỳ hạn hán. *Lolium perenne* cv. Aurora cho thấy sự ổn định về năng suất và tăng trưởng mạnh trong thời gian hạn hán và tăng trưởng trở lại tốt sau hạn hán do mức WSC cao (Amin và Thomas, 1996).

Thuần hóa tiếp theo là chọn lọc nhân tạo đối với các đặc điểm hữu ích ở các cây họ đậu được trồng gây mất nhiều gen hữu ích cần thiết để thích nghi trong điều kiện khí hậu khắc nghiệt (Pourkheirandish và cs., 2020). Các loài họ đậu hoang dã tiếp xúc với áp lực chọn lọc tự nhiên đối với nhiều loại căng thẳng phi sinh học và sinh học đã tồn tại trong tự nhiên hàng triệu năm thông qua sự tích lũy các gen cho phép chúng tránh, chịu đựng hoặc chống lại hạn hán, lũ lụt, độ mặn, nhiệt độ khắc nghiệt, sâu bệnh và côn trùng gây hại, cũng như bị động vật gặm nhấm

(Jensen và cs., 2012). Các họ hàng hoang dã của cây trồng cung cấp một số dịch vụ hệ sinh thái nông nghiệp và cung cấp nguồn vật liệu di truyền phong phú để giảm thiểu tác động bất lợi của khí hậu thay đổi trong các loại cây họ đậu làm thức ăn chăn nuôi được trồng (Brozynska và cs., 2016). Việc sử dụng các loài họ hàng hoang dã của cây trồng đã tăng đáng kể trong hai thập kỷ đầu của thế kỷ 21 và sẽ tiếp tục tăng do có sẵn các công cụ công nghệ sinh học khả thi. Các loại cây họ đậu hoang dã như *Trifolium uniflorum* L., *Trifolium hirtum* L., *Trifolium subterraneum* L., *Trifolium globosum* L., *Lablab purpureus* L., *Macroptilium atropurpureum* (DC.) Urb. và *Canavalia ensiformis* (L.) D.C. có hiệu quả sử dụng photpho cao, điều này là do chiều dài rễ, đường kính rễ, mật độ rễ và số lượng lông hút lớn hơn (Haling và cs., 2016; Nichols và Crush, 2016; Becquer và cs., 2021). Một số loài cây họ đậu hoang dã được báo cáo là có khả năng chịu đựng cao với khí hậu khắc nghiệt. Việc thu thập thêm các họ hàng hoang dã của cây họ đậu từ các vùng khí hậu khắc nghiệt, tiếp theo là xác định các đặc điểm mục tiêu và gen chịu trách nhiệm, là rất quan trọng đối với các chương trình phục hồi khí hậu. Các đặc điểm chức năng này là đóng vai trò then chốt trong việc hiểu các cơ chế chịu đựng căng thẳng và cơ bản cho các chương trình nhân giống trong tương lai.

Cũng giống như căng thẳng phi sinh học, sự gia tăng các vấn đề về sâu bệnh là mối quan tâm chính liên quan đến biến đổi khí hậu. Một số nghiên cứu đã kết luận rằng, với biến đổi khí hậu, có khả năng xuất hiện các loại sâu bệnh mới có thể đe dọa đến an ninh lương thực (Chakraborty và Newton, 2011; Das và cs., 2011; Juroszek và cs., 2020). Các loại cây thức ăn chăn nuôi và họ hàng hoang dã của chúng là nguồn gen kháng bệnh tốt vì chúng đã thích nghi với môi trường địa phương từ lâu. Khả năng chịu bệnh gỉ sắt, gỉ thân, bệnh phấn trắng, đốm lá, bệnh than, bệnh bông và thối gốc đã được xác định ở các loài thức ăn chăn nuôi hoang dã (Gurung và cs., 2002; Chandra, 2009; Chen và cs., 2013; Niazi và cs., 2014). Có khả năng các loài thức ăn chăn nuôi hoang dã cũng cho thấy khả năng

kháng sâu keo, rệp, sâu đục thân và một số loại vi-rút và tuyến trùng (Kaushal và cs., 2005; de Lange và cs., 2014; Serba và cs., 2017).

Công cụ sinh học phân tử và công nghệ sinh học tiên tiến cho biến đổi khí hậu

Các giống hiện đại có cơ sở di truyền hẹp, có thể gây ra tình trạng tắc nghẽn khi cố gắng phát triển các giống mới có cơ sở di truyền rộng hơn. Để phát triển nông nghiệp bền vững, cần có các giống có năng suất cao, khả năng chống chịu với khí hậu, RUE được cải thiện và khả năng hoạt động tốt hơn trong điều kiện biến đổi khí hậu. Họ hàng hoang dã của cây trồng là kho báu để lai tạo các giống cây trồng có khả năng chống chịu với khí hậu. Việc đưa các loài cây trồng họ hàng hoang dã vào quá trình lai tạo thông qua các phương pháp thông thường rất phức tạp do phải liên kết và yêu cầu về thời gian, ngoài ra còn kém hiệu quả hơn, với khả năng thu được hạt giống có khả năng sinh sản thấp, và cây khỏe mạnh. Về mặt này, lai tạo phân tử, đặc biệt là lai tạo ngược có hỗ trợ đánh dấu (MABB), có thể đóng góp đáng kể vào sự phát triển của cây trồng chống chịu với khí hậu bằng cách sử dụng họ hàng hoang dã của cây trồng thông qua việc loại bỏ liên kết cản trở trong một số ít thế hệ (Dempewolf và cs., 2017). Khi các hạn chế sinh học tạo ra rào cản trong việc truyền đặc điểm quan tâm ở cây cho, thì chuyển gen có thể là một phương pháp được lựa chọn. Việc kiểm tra tài liệu cho thấy việc sử dụng tối đa họ hàng hoang dã của cây trồng đã đạt được ở hoa hướng dương để chống chịu căng thẳng sinh học kèm theo việc xác định nguồn sinh sản để phát triển hạt hữu thụ thông qua bất thụ đục tế bào chất, trong khi ở lúa mì và khoai tây, việc khai thác đáng kể họ hàng hoang dã của cây trồng để chống chịu căng thẳng phi sinh học đã xảy ra trong những thập kỷ qua. Các phương pháp tiếp cận phân tử như nghiên cứu liên kết toàn bộ hệ gen (GWAS) hoặc phân tích các vị trí đặc điểm định lượng (QTL) rất hữu ích trong việc xác định, nhắm mục tiêu và lập bản đồ các gen mong muốn trong hệ gen cây trồng hoang

đã. Gần đây hơn, các công cụ lập bản đồ bổ sung đã được triển khai để tăng hiệu quả và độ chính xác của việc lập bản đồ gen, chẳng hạn như quần thể lai thể hệ trước đa cha mẹ (MAGIC) và lập bản đồ liên kết lồng nhau (NAM) (Nice và cs., 2016; Dempewolf và cs., 2017).

Các gen/QTL/chất vận chuyển được xác định ở họ hàng hoang dã của cây trồng đối với môi trường stress

Hạn hán là một stress lớn đối với các hệ thống sản xuất nông nghiệp, đặc biệt là trong bối cảnh biến đổi khí hậu toàn cầu. Nhiều QTL/gen chịu hạn đã được xác định trong các họ hàng hoang dã của cây trồng như lúa mạch (Suprunova và cs., 2007); tuy nhiên, việc sử dụng chúng trong cây trồng không thành công như mong đợi. Điều này có thể là do thực tế là khả năng chịu hạn là một đặc điểm đa gen được điều chỉnh bởi nhiều QTL, mỗi QTL có ảnh hưởng nhỏ. Tương tự như vậy, việc tạo ra các thư viện chuyển gen ngược cải tiến có thể cung cấp một phương pháp tiếp cận thay thế khả thi để chuyển gen chịu hạn. Tương tự như vậy, các gen chịu hạn đã được xác định trong các họ hàng hoang dã của cây cao lương, *Sorghum macrospermum* E.D.Garber và *S. brachypodium* Cao lương *macrospermum* E.D.Garber và *S. brachypodium* Lazarides, và được chuyển sang lúa miến trồng trọt, do đó cho thấy sự tăng trưởng và tốc độ quang hợp được cải thiện ở các dòng lúa miến ngoại lai du nhập (Cowan và cs., 2020).

Đã có những tiến bộ đáng kể trong khả năng chịu hạn của lúa mạch bằng cách sử dụng các dòng du nhập có họ hàng hoang dã (*Hordeum spontaneum* (K.Koch) Thell) (Honsdorf và cs., 2014; Naz và cs., 2014). Trong các thí nghiệm thực địa, các dòng du nhập chứa các QTL chịu hạn cụ thể đã cho thấy khả năng chịu hạn theo các cuộc điều tra tiếp theo (Honsdorf và cs., 2014; Arbelaez và cs., 2015). Tương tự như vậy, việc xây dựng các dòng du nhập và việc loại bỏ các gen 'kéo liên kết' đòi hỏi nhiều chu kỳ lai ngược tiếp theo là chọn lọc. Bất chấp những thách thức này, nếu không có cách khả

thi nào khác có sẵn các lựa chọn nhân giống, kỹ thuật này có thể là lựa chọn tốt nhất.

Trong số họ hàng hoang dã của cây cao lương, bộ gen của *S. propinquum* (Kunth) Hitchc. là bộ gen đầu tiên được giải trình tự (Mace và cs., 2013). Con đường C_4 có cơ chế tập trung carbon tiên tiến và việc biểu hiện quá mức các gen liên quan đến phosphoenolpyruvate carboxylase, pyruvate phosphate dikinase và enzyme NADP-malic ở thực vật C_3 không chỉ cho thấy tốc độ quang hợp cao hơn mà còn ổn định dưới nhiều loại stresses phi sinh học (Yadav và Mishra, 2020). Ngoài ra, GWAS ở cây linh lăng cho thấy khả năng chịu mặn có liên quan đến 53 đa hình nucleotide đơn (SNP) nằm trên 49 locus và tám nhiễm sắc thể. Các SNP này chủ yếu liên quan đến sinh khối tươi và khô chiều cao cây, hàm lượng nước tương đối và độ dẫn khí khổng (Liu và cs., 2019). Ở cây cao lương ngọt, quá trình biến đổi sau phiên mã N_6 -methyladenosine điều chỉnh các bản sao chịu mặn (Zheng và cs., 2021).

Trong đất, các quá trình nitrat hóa và khử nitrat không được kiểm soát, gây ra sản xuất quá mức các khí có khả năng gây hại (N_2O , NO và N_3O), và cuối cùng dẫn đến những tác động có hại đến hệ sinh thái (Kong và cs., 2016). Do đó, việc xem xét dinh dưỡng nitơ đã chuyển sang 'tất cả các dạng nitrat', chủ yếu là để tính đến lượng nitơ bị mất và giảm hiệu quả sử dụng nitơ (Subbarao và cs., 2015, 2017, 2021). Ở nhiều loại cây trồng khác nhau, chất ức chế nitrat hóa tổng hợp đã được xác định để hạn chế phát thải N_2O và mất nitơ mặc dù tăng cường hiệu quả sử dụng. Tuy nhiên, việc sử dụng chúng trong các hệ thống nông nghiệp bị hạn chế do chi phí, tính biến động trên đồng ruộng, hiệu quả thấp ở vùng khí hậu nhiệt đới và nguy cơ đưa vào chuỗi thức ăn (Edet và cs., 2018; Sarr và cs., 2020). Các loại cỏ đồng cỏ nhiệt đới như *Brachiaria* spp., thông qua quá trình ức chế quá trình nitrat hóa sinh học, ngăn chặn hoạt động của vi khuẩn nitrat hóa bằng cách giải phóng chất ức chế từ rễ, do đó làm giảm quá trình nitrat hóa đất (Subbarao và cs., 2007, 2009; Edet và

cs., 2018). *Brachiaria humidicola* (Rendle) Schweick và *B. decumbens* Stapf. cho thấy khả năng ức chế nitrat hóa sinh học cao nhất trong số các loại cỏ đồng cỏ nhiệt đới (Subbarao và cs., 2007). Các loại cỏ thức ăn chăn nuôi có khả năng ức chế nitrat hóa sinh học cao sẽ cải thiện nền kinh tế nitơ của đất dưới các loại cây trồng hàng năm với luân canh đồng cỏ-cây trồng.

Một số gen đã được chuyển từ cây trồng thức ăn chăn nuôi sang cây trồng được trồng trọt và cung cấp khả năng chịu đựng nhiều loại stresses. Ví dụ, *Hsdr4* từ *H. spontaneum* sang lúa mạch (Suprunova và cs., 2007), *SgDREB_{2C}* từ *Stylosanthes guianensis* (Kunth) Vogel sang *Arabidopsis* (Han và cs., 2022) và *MruGST₃₉* từ *Medicago ruthenica* (L.) Trautv. sang cỏ linh lăng để chịu hạn (Wang và cs., 2022). *HvBADH₁* đã được chuyển từ *H. vulgare* sang lúa mì (*Triticum aestivum* L.) và cung cấp khả năng chịu mặn (Li và cs., 2019).

Các gen/QTL/chất vận chuyển được xác định ở họ hàng hoang dã của cây trồng để chịu được stress sinh học

Củ cải đường (*Beta vulgaris* L.) cũng đã được xác định là nguồn thức ăn hữu ích cho chăn nuôi. Ở củ cải đường, khả năng kháng bệnh đốm lá *Cercospora* và bệnh rỉ sắt đã được phát triển bằng cách sử dụng họ hàng hoang dã của củ cải đường biển (*Beta vulgaris* subsp. *maritima* (L.) Arcang.) (Zhang và cs., 2017). Ở cây cao lương, một quần thể NAM đã được phát triển bằng cách sử dụng cho hai cây bố mẹ được trồng thương mại và chín cây hoang dã với một số cây cao lương ngoại lai làm cây bố mẹ. Các cây bố mẹ cho hoang dã là từ *S. bicolor* subsp. có thể giảm tới 50% do bệnh cháy lá ngô phương Bắc. Vấn đề này được khắc phục bằng cách đưa gen kháng bệnh cháy lá (*htn1*) vào các dòng ngô thương mại từ một họ hàng hoang dã của ngô Mexico (*Tripsacum dactyloides* L.) (Zhang và cs., 2017). Các công nghệ chỉnh sửa gen như nuclease ngón tay kềm (ZFN), nuclease giống như chất kích hoạt phiên mã (TALEN) và lắp lại palindromic ngắn xen

kẽ đều đặn (CRISPER) đã được sử dụng để cải thiện thức ăn chăn nuôi trong điều kiện stresses phi sinh học (Miladinovic và cs., 2021). Việc nhắm mục tiêu vào các tổn thương cục bộ gây ra trong bộ gen (TILLING) đã được sử dụng để xác định các đột biến mới trong một quần thể không đồng nhất và để xác định các đột biến có khả năng chịu đựng căng thẳng phi sinh học (Manzanares và cs., 2016).

Phương pháp tiếp cận Omics cho khả năng chống chịu khí hậu

Các phương pháp tiếp cận Omics (ví dụ như proteomics, transcriptomics và metabolomics) cung cấp các cách thay thế để mô tả gen, protein và chức năng của chúng cũng như các con đường điều hòa ở họ hàng hoang dã của cây trồng (Kumar và Bhat, 2014). Bằng cách sử dụng các công cụ omics để đánh giá họ hàng hoang dã của cây trồng trong các phương pháp xử lý khác nhau, nhiều gen chịu đựng căng thẳng khác nhau ở họ hàng hoang dã khác nhau đã được phát hiện, chẳng hạn như gen dehydrin ở lúa mạch hoang dã (*Hordeum spontaneum*) và một gen (*Hsdr4*) chịu hạn (Suprunova và cs., 2007). Ở cỏ lúa mạch đen hàng năm (*Lolium multiflorum* L.), dữ liệu omics tích hợp cho thấy các kiểu gen chịu hạn cho thấy hàm lượng catalase, superoxide dismutase, hàm lượng nước tương đối và hàm lượng diệp lục cao hơn trong thời gian hạn hán kéo dài (Pan và cs., 2018). Hơn nữa, sự điều hòa phiên mã và sau phiên mã của các yếu tố phiên mã làm thay đổi các enzyme liên quan đến quá trình chuyển hóa axit béo và axit amin, cuối cùng làm tăng khả năng chịu hạn. Trước đây, rất khó để xác định các gen, protein hoặc chất chuyển hóa gây ra đặc điểm mong muốn. Tuy nhiên, khi các phương pháp omics được tích hợp với các chiến lược khác như lập bản đồ liên kết, điều này là có thể. Ví dụ, một khuôn khổ nghiên cứu tích hợp kết hợp hệ gen, sinh lý học và lai tạo đã góp phần cải thiện sản lượng cây họ đậu trong điều kiện CO₂ tăng cao (Palit và cs., 2020). Các phương pháp omics như giải trình tự thế hệ tiếp theo,

xác định SNP, phân tích kiểu gen bằng giải trình tự, GWAS, transcriptomics, proteomics và chỉnh sửa bộ gen ở cỏ linh lăng đã giúp làm sáng tỏ các gen và vùng liên quan đến khả năng chịu đựng stress và trong quá trình phát triển nguồn gen chịu đựng stress (Hrbáčková và cs., 2020). Mặc dù các nghiên cứu omics ít được sử dụng hơn trong các loại cây trồng làm thức ăn chăn nuôi, nhưng chúng có thể là một phương pháp hữu ích để xác định và phát triển các loại cây trồng làm thức ăn chăn nuôi có khả năng chống chịu với khí hậu.

Kết luận

Biến đổi khí hậu trong những năm gần đây đã dẫn đến tình trạng giảm năng suất trong nông nghiệp và các ngành liên quan. Hơn nữa, nó đã làm tăng khả năng xảy ra các hiện tượng thời tiết khắc nghiệt, làm giảm thêm tiềm năng năng suất. Một số hộ hàng hoang dã của cây trồng ít bị ảnh hưởng hơn và cho thấy năng suất tốt hơn trong những trường hợp này. Do đó, một nghiên cứu sâu về cơ chế chịu đựng ở các loại cây trồng làm thức ăn chăn nuôi là rất quan trọng để hiểu được cơ chế thích nghi với biến đổi khí hậu. Hộ hàng hoang dã thường có hệ thống rễ, kiến trúc tán cây, tính linh hoạt kiểu hình, hiệu quả sử dụng chất dinh dưỡng và hiệu quả sử dụng nước (WUE) tiên tiến, cũng như các đặc điểm hiệu quả sử dụng tài nguyên (RUE) tốt hơn, có thể được sử dụng cho các chương trình lai tạo trong tương lai. Ngoài ra, hộ hàng hoang dã có gen kháng một số loại sâu bệnh, có thể được sử dụng để chịu đựng căng thẳng sinh học. Tuy nhiên, cho đến nay, các loại cây trồng làm thức ăn chăn nuôi trên đồng cỏ vẫn chưa được nghiên cứu nhiều và cơ chế chịu đựng căng thẳng vẫn chưa rõ ràng. Do đó, cần phải sử dụng các công cụ lai tạo, omics, chỉnh sửa bộ gen và công nghệ sinh học tiên tiến để hiểu được cơ chế của các loại cây trồng làm thức ăn chăn nuôi nhằm giảm phát thải mê-tan và nitrat, có thể củng cố sự hiểu biết của chúng ta về biến đổi khí hậu và phát triển các loại cây trồng có khả năng chống chịu với khí hậu trong tương lai.

Tài liệu tham khảo

- Akinseye, F.M., Ajeigbe, H.A., Traore, P.C.S., Agele, S.O., Zemadim, B., and Whitbread, A. 2020. Improving sorghum productivity under changing climatic conditions: a modelling approach. *Field Crops Research* 246, 107685. doi:10.1016/j.fcr.2019.107685
- Alemayehu, M., Gezahagn, K., Getnet, A., and Fekede, F. 2017. Descriptions and characteristics of cultivated forage crops growing under different agro-ecological zones in Ethiopia. *International Journal of Agriculture and Biosciences* 6, 238–247.
- Amin, M.R., and Thomas, H. 1996. Growth and water relations of diverse populations of *Lolium perenne* exposed to drought in field, glasshouse and controlled environment. *Journal of Agricultural Science* 126, 15–23. doi:10.1017/S0021859600088778
- Amiri, F., Rashid, A., and Shariff, M. 2012. Comparison of nutritive values of grasses and legume species using forage quality index. *Songklanakarin Journal of Science & Technology* 34, 577–586.
- Arbelaez, J.D., Moreno, L.T., Singh, N., Tung, C.W., Maron, L.G., Ospina, Y., Martinez, C.P., Grenier, C., Lorieux, M., and McCouch, S. 2015. Development and GBS-genotyping of introgression lines (ILs) using two wild species of rice, *O. meridionalis* and *O. rufipogon*, in a common recurrent parent, *O. sativa* cv. Curinga. *Molecular Breeding* 35, 81. doi:10.1007/s11032-015-0276-7
- Archimède, H., Eugène, M., Marie Magdeleine, C., Boval, M., Martin, C., Morgavi, D.P., Lecomte, P., and Doreau, M. 2011. Comparison of methane production between C₃ and C₄ grasses and legumes. *Animal Feed Science and Technology* 166–167, 59–64. doi:10.1016/j.anifeedsci.2011.04.003
- Barker, D.J., and Caradus, J.R. 2001. Adaptation of forage species to drought. In 'Proceedings International Grassland Congress'. Sao Paulo, Brazil. Vol. 19, pp. 241–246. (International Grassland Congress)
- Becchetti, T., George, M., McDougald, N., Dudley, D., Connor, M., Flavel, D., Vaughn, C., Forero, L., Frost, B., Oneto, S., Larsen, R., Striby, K., Davy, J., Doran, M., and Markegard, G. 2016. Rangeland management series: annual range forage production. eScholarship, University of California, CA, USA. Available at <https://escholarship.org/uc/item/7kt9s61c>.
- Becquer, A., Haling, R.E., Warren, A., Alden Hull, R., Stefanski, A., Richardson, A.E., Ryan, M.H., Kidd,

- D.R., Lambers, H., Sandral, G.A., and Simpson, R.J. 2021. Critical phosphorus requirements of *Trifolium* species: the importance of root morphology and root acclimation in response to phosphorus stress. *Physiologia Plantarum* 173, 1030–1047. doi:10.1111/ppl.13500
- Bekuma, A. 2019. Nutritional benefit and economic value of hydroponics fodder production technology in sustainable livestock production against climate change: a mini-review. *Advances in Applied Sciences* 4, 23–25. doi:10.11648/j.aas.20190401.13
- Bolger, T.P., Rivelli, A.R., and Garden, D.L. 2005. Drought resistance of native and introduced perennial grasses of south-eastern Australia. *Australian Journal of Agricultural Research* 56, 1261–1267. doi:10.1071/AR₀₅₀₇₅
- Brozynska, M., Furtado, A., and Henry, R.J. 2016. Genomics of crop wild relatives: expanding the gene pool for crop improvement. *Plant Biotechnology Journal* 14, 1070–1085. doi:10.1111/pbi.12454
- Chakraborty, S., and Newton, A.C. 2011. Climate change, plant diseases and food security: an overview. *Plant Pathology* 60, 2–14. doi:10.1111/j. 1365-3059.2010.02411.x
- Chand, S., Indu, B., Chauhan, J., Kumar, B., Kumar, V., Dey, P., Mishra, U.N., Sahu, C., and Singhal, R.K. 2022a. Plant–environment interaction in developing crop species resilient to climate change. In ‘Plant abiotic stress physiology’. (Eds T Aftab, R Hakeem) pp. 1–24. (Apple Academic Press: Palm Bay, FL, USA)
- Chand, S., Indu, Singhal, R.K., and Govindasamy, P. 2022b. Agronomical and breeding approaches to improve the nutritional status of forage crops for better livestock productivity. *Grass and Forage Science* 77, 11–32. doi:10.1111/gfs.12557
- Chandra, A. 2009. Screening global *Medicago* germplasm for weevil (*Hyperapostica* Gyll.) tolerance and estimation of genetic variability using molecular markers. *Euphytica* 1693, 363–374 doi:10.1007/s10681-009-9969-5
- Chen, G., Liu, Y., Ma, J., Zheng, Z., Wei, Y., McIntyre, C.L., Zheng, Y.L., and Liu, C. 2013. A novel and major quantitative trait locus for *Fusarium* crown rot resistance in a genotype of wild barley (*Hordeum spontaneum* L.). *PLoS ONE* 8(3), e58040. doi:10.1371/journal.pone.0058040
- Cowan, M.F., Blomstedt, C.K., Norton, S.L., Henry, R.J., Møller, B.L., and Gleadow, R. 2020. Crop wild relatives as a genetic resource for generating low-cyanide, drought-tolerant *Sorghum*. *Environmental and Experimental Botany* 169, 103884. doi:10.1016/j. envexpbot.2019.103884
- Das, D.K., Singh, J., and Vennila, S. 2011. Emerging crop pest scenario under the impact of climate change: a brief review. *Journal of Agricultural Physics* 11, 13–20.
- De Haan, K., Khomik, M., Green, A., Helgason, W., Macrae, M.L., Kompanizare, M., and Petrone, R.M. 2021. Assessment of different water use efficiency calculations for dominant forage crops in the Great Lakes Basin. *Agriculture* 11, 739. doi:10.3390/ agriculture11080739
- de Lange, E.S., Balmer, D., Mauch-Mani, B., and Turlings, T.C.J. 2014. Insect and pathogen attack and resistance in maize and its wild ancestors, the teosintes. *New Phytologist* 204, 329–341. doi:10.1111/nph.13005
- Dempewolf, H., Baute, G., Anderson, J., Kilian, B., Smith, C., and Guarino, L. 2017. Past and future use of wild relatives in crop breeding. *Crop Science* 57, 1070–1082. doi:10.2135/cropsci2016.10.0885
- Druille, M., Oyarzabal, M., and Oesterheld, M. 2019. Radiation use efficiency of forage resources: a meta-analysis. *Agronomy Journal* 111, 1770–1778. doi:10.2134/agronj2018.10.0645
- Dumont, B., Ryschawy, J., Duru, M., Benoit, M., Chatellier, V., Delaby, L., Donnars, C., Dupraz, P., Lemauiel-Lavenant, S., Méda, B., Vollet, D., and Sabatier, R. 2019. Review: associations among goods, impacts and ecosystem services provided by livestock farming. *Animal* 13, 1773–1784. doi:10.1017/S₁₇₅₁₇₃₁₁₁₈₀₀₂₅₈₆
- Edet, O.U., Kim, J.S., Okamoto, M., Hanada, K., Takeda, T., Kishii, M., Gorafi, Y.S.A., and Tsujimoto, H. 2018. Efficient anchoring of alien chromosome segments introgressed into bread wheat by new *Leymus racemosus* genome-based markers. *BMC Genetics* 19, 18. doi:10.1186/s12863- 018-0603-1
- EL Sabagh, A., Islam, M.S., Skalicky, M., Ali Raza, M., Singh, K., Anwar Hossain, M., Hossain, A., Mahboob, W., Iqbal, M.A., Ratnasekera, D., Singhal, R.K., Ahmed, S., Kumari, A., Wasaya, A., Sytar, O., Brestic, M., Çig, F., Erman, M., Habib Ur Rahman, M., Ullah, N., and Arshad, A. 2021. Salinity stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) in the changing

- climate: adaptation and management strategies. *Frontiers in Agronomy* 3, 661932. doi:10.3389/fagro.2021.661932
- Ergon, Å., Seddaiu, G., Korhonen, P., Virkajärvi, P., Bellocchi, G., Jørgensen, M., Østrem, L., Reheul, D., and Volaire, F. 2018. How can forage production in Nordic and Mediterranean Europe adapt to the challenges and opportunities arising from climate change? *European Journal of Agronomy* 92, 97–106. doi:10.1016/j.eja.2017.09.016
- Fatima, A., Farid, M., Safdar, K., Fayyaz, A., Ali, S.M., Adnan, S., Nawaz, M., Munir, H., Raza, N., and Zubair, M. 2020. Loss of agro-biodiversity and productivity due to climate change in continent Asia: a review. In 'Plant ecophysiology and adaptation under climate change: mechanisms and perspectives I'. (Ed. M Hasanuzzaman) pp. 51–71. (Springer: Singapore)
- Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Faluccci, A., and Tempio, G. 2013. Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Ghosh, A., Kumar, R.V., Manna, M.C., Singh, A.K., Parihar, C.M., Kumar, S., Roy, A.K., and Koli, P. 2021. Eco-restoration of degraded lands through trees and grasses improves soil carbon sequestration and biological activity in tropical climates. *Ecological Engineering* 162, 106176. doi:10.1016/j.ecoleng.2021.106176
- Gibson, D.J. 2009. 'Grasses and grassland ecology.' (Oxford University Press: Oxford, UK)
- Grander, D., Singh, N.P., Dhiman, K.R., and Chhabra, A. 2009. Nutritional evaluation of cultivated fodder crops grown under agro-climate of Tripura. *Indian Journal of Animal Sciences* 79, 1143–1148.
- Gurung, A.M., Pang, E.C.K., and Taylor, P.W.J. 2002. Examination of *Pisum* and *Lathyrus* species as sources of ascochyta blight resistance for field pea (*Pisum sativum*). *Australasian Plant Pathology* 31, 41–45. doi:10.1071/AP₀₁₀₆₉
- Habermann, E., Dias de Oliveira, E.A., Contin, D.R., Delvecchio, G., Viciedo, D.O., de Moraes, M.A., de Mello Prado, R., de Pinho Costa, K.A., Braga, M.R., and Martinez, C.A. 2019. Warming and water deficit impact leaf photosynthesis and decrease forage quality and digestibility of a C₄ tropical grass. *Physiologia Plantarum* 165, 383–402. doi:10.1111/ppl.12891
- Haling, R.E., Yang, Z., Shadwell, N., Culvenor, R.A., Stefanski, A., Ryan, M.H., Sandral, G.A., Kidd, D.R., Lambers, H., and Simpson, R.J. 2016. Root morphological traits that determine phosphorus-acquisition efficiency and critical external phosphorus requirement in pasture species. *Functional Plant Biology* 43, 815–26. doi:10.1071/FP₁₆₀₃₇
- Hall, M.H., Newman, Y.C., and Williamson, J.A. 2020. Forage establishment and renovation. In 'Forages: the science of grassland agriculture'. Vol. 2. (Eds KJ Moore, M Collins, CJ Nelson, DD Redfearn) pp. 455–471. (John Wiley & Sons: New York, NY, USA)
- Han, Y., Xiang, L., Song, Z., and Lu, S. 2022. Overexpression of SgDREB₂C from *Stylosanthes guianensis* Leads to increased drought tolerance in transgenic *Arabidopsis*. *International Journal of Molecular Sciences* 23, 3520. doi:10.3390/ijms23073520
- Heady, H.F., and Child, R.D. 2019. 'Rangeland ecology and management.' 1st edn. (Routledge: Milton Park, UK)
- Henry, B., Charmley, E., Eckard, R., Gaughan, J.B., and Hegarty, R. 2012. Livestock production in a changing climate: adaptation and mitigation research in Australia. *Crop & Pasture Science* 63, 191–202. doi:10.1071/CP₁₁₁₆₉
- Henry, B.K., Eckard, R.J., Beauchemin, K.A. 2018. Review: adaptation of ruminant livestock production systems to climate changes. *Animal* 12, s445–s456. doi:10.1017/S₁₇₅₁₇₃₁₁₁₈₀₀₁₃₀₁
- Honsdorf, N., March, T.J., Berger, B., Tester, M., Pillen, K., and Zhang, T. 2014. High-throughput phenotyping to detect drought tolerance QTL in wild barley introgression lines. *PLoS ONE* 9, e97047. doi:10.1371/journal.pone.0097047
- Hrbáčková, M., Dvořák, P., Takáč, T., Tichá, M., Luptovčíak, I., Šamajová, O., Ovečka, M., and Šamaj, J. 2020. Biotechnological perspectives of omics and genetic engineering methods in alfalfa. *Frontiers in Plant Science* 11, 592. doi:10.3389/fpls.2020.00592
- Indu, Lal, D., Dadrwal, B.K., Saha, D., Chand, S., Chauhan, J., Dey, P., Kumar, V., Mishra, U.N., Hidangmayum, A., Singh, A., and Singhal, R.K. 2021. Molecular advances in plant root system architecture response and redesigning for improved

- performance under unfavourable environments. In 'Frontiers in plant-soil interaction. 29'. (Eds T Aftab, KR Hakeem) pp. 49–82. (Academic Press: Cambridge, MA, USA) doi:10.1016/ B978-0-323-90943-3.00013-4
- Islam, M.A., and Adjesiwor, A.T. 2018. Forage crops and their photosynthesis. In 'Handbook of photosynthesis'. (Ed. M Pessarakli) pp. 465–474. (CRC Press: Boca Raton, FL, USA)
- Javed, T., I I., Singhal, R.K., Shabbir, R., Shah, A.N., Kumar, P., Jinger, D., Dharmappa, P.M., Shad, M.A., Saha, D., Anuragi, H., and Siuta, D. 2022. Recent advances in agronomic and physio-molecular approaches for improving nitrogen use efficiency in crop plants. *Frontiers in Plant Science* 13, 877544. doi:10.3389/fpls.2022.877544
- Jensen, E.S., Peoples, M.B., Boddey, R.M., Gresshoff, P.M., Hauggaard-Nielsen, H., Alves, B.J.R., and Morrison, M.J. 2012. Legumes for mitigation of climate change and the provision of feedstock for biofuels and biorefineries. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 32, 329–364. doi:10.1007/s13593-011-0056-7
- Jha, A.K., Malla, R., Sharma, M., Panthi, J., Lakhankar, T., Krakauer, N.Y., Pradhanang, S.M., Dahal, P., and Shrestha, M.L. 2016. Impact of irrigation method on water use efficiency and productivity of fodder crops in Nepal. *Climate* 4, 4. doi:10.3390/cli4010004
- Jones, A.K., Jones, D.L., Edwards-Jones, G., and Cross, P. 2013. Informing decision making in agricultural greenhouse gas mitigation policy: a Best–Worst Scaling survey of expert and farmer opinion in the sheep industry. *Environmental Science & Policy* 29, 46–56. doi:10.1016/j.envsci. 2013.02.003
- Juroszek, P., Racca, P., Link, S., Farhumand, J., and Kleinhenz, B. 2020. Overview on the review articles published during the past 30 years relating to the potential climate change effects on plant pathogens and crop disease risks. *Plant Pathology* 69, 179–193. doi:10.1111/ppa.13119
- Kaushal, P., Malaviya, D.R., Roy, A.K., Tiwari, A., and Kumar, B. 2005. *Trifolium alexandrinum* × *T. resupinatum* – interspecific hybrids developed through embryo rescue. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* 83, 137–144. doi:10.1007/s11240-005-4442-1
- Kong, Q., Wang, Z-B., Niu, P-F., and Miao, M-S. 2016. Greenhouse gas emission and microbial community dynamics during simultaneous nitrification and denitrification process. *Bioresource Technology* 210, 94–100. doi:10.1016/j.biortech.2016.02.051
- Kumar, S., and Bhat, V. 2014. Application of omics technologies in forage crop improvement. In 'Omics applications in crop science'. (Ed. D Barh) pp. 523–548. (CRC Press: Boca Raton, FL, USA)
- Kumar, R.V., Roy, A.K., Kumar, S., Gautam, K., Singh, A.K., Ghosh, A., Singh, H.V., and Koli, P. 2022. Silvopasture systems for restoration of degraded lands in a semiarid region of India. *Land Degradation & Development* 35, 230. doi:10.1002/ldr.4359
- Kweku, D.W., Bismark, O., Maxwell, A., Desmond, K.A., Danso, K.B., Oti-Mensah, E.A., Quachie, A.T., and Adormaa, B.B. 2018. Greenhouse effect: greenhouse gases and their impact on global warming. *Journal of Scientific Research and Reports* 17, 1–9. doi:10.9734/JSRR/2017/39630
- Kyoshabire, C., Kizza, S., and Rollanda, K. 2018. Species richness and nutritive values of fodder and their relationship with soil characteristics in Ugandan rangelands. *American Journal of Agriculture and Forestry* 6(3), 38–43. doi:10.11648/j.ajaf.20180603.11
- Lal, M.K., Vengavasi, K., and Pandey, R. 2019. Interactive effects of low phosphorus and elevated CO₂ on root exudation and nutrient uptake in wheat is modified under sulphur nutrition. *Plant Physiology Reports* 24, 63–73. doi:10.1007/s40502-019-0433-9
- Lal, M.K., Tiwari, R.K., Gahlaut, V., Mangal, V., Kumar, A., Singh, M.P., Paul, V., Kumar, S., Singh, B., and Zinta, G. 2021. Physiological and molecular insights on wheat responses to heat stress. *Plant Cell Reports* 41, 501–518. doi:10.1007/s00299-021-02784-4
- Lal, M.K., Sharma, N., Adavi, S.B., Sharma, E., Altaf, M.A., Tiwari, R.K., Kumar, R., Kumar, A., Dey, A., Paul, V., Singh, B., and Singh, M.P. 2022. From source to sink: mechanistic insight of photoassimilates synthesis and partitioning under high temperature and elevated [CO₂]. *Plant Molecular Biology* 1–20. doi:10.1007/s11103-022-01274-9
- Lasisi, A.A., Akinremi, O.O., Tenuta, M., and Cattani, D. 2018. Below-ground plant biomass and nitrogen uptake of perennial forage grasses and annual crops fertilized with pig manures. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 268, 1–7. doi:10.1016/j.agee.2018.08.006
- Lawson, A.R., Greenwood, K.L., and Kelly, K.B. 2009. Irrigation water productivity of winter-growing

- annuals is higher than perennial forages in northern Victoria. *Crop & Pasture Science* 60, 407–419. doi:10.1071/CP08243
- Ledo, A., Smith, P., Zerihun, A., Whitaker, J., Vicente-Vicente, J.L., Qin, Z., McNamara, N.P., Zinn, Y.L., Llorente, M., Liebig, M., Kuhnert, M., Don, A., Diaz-Pines, E., Datta, A., Bakka, H., Aguilera, E., and Hillier, J. 2020. Changes in soil organic carbon under perennial crops. *Global Change Biology* 26, pp. 4158–4168. doi:10.1111/gcb.15120
- Lei, Y., Xu, Y., Hettenhausen, C., Lu, C., Shen, G., Zhang, C., Li, J., Song, J., Lin, H., and Wu, J. 2018. Comparative analysis of alfalfa (*Medicago sativa* L.) leaf transcriptomes reveals genotype-specific salt tolerance mechanisms. *BMC Plant Biology* 18, 35. doi:10.1186/s12870-018-1250-4
- Li, P., Cai, J., Luo, X., Chang, T., Li, J., Zhao, Y., and Xu, Y. 2019. Transformation of wheat *Triticum aestivum* with the HvBADH₁ transgene from hullless barley improves salinity-stress tolerance. *Acta Physiologiae Plantarum* 41, 155. doi:10.1007/s11738-019-2940-8
- Liu, K., Elliott, J.A., Lobb, D.A., Flaten, D.N., and Yarotski, J. 2014. Nutrient and sediment losses in snowmelt runoff from perennial forage and annual cropland in the Canadian Prairies. *Journal of Environmental Quality* 43, 1644–1655. doi:10.2134/jeq2014.01.0040
- Liu, X.P., Hawkins, C., Peel, M.D., and Yu, L.X. 2019. Genetic loci associated with salt tolerance in advanced breeding populations of tetraploid alfalfa using genome-wide association studies. *The Plant Genome* 12, 180026. doi:10.3835/plantgenome2018.05.0026
- Ma, Q., Kang, J., Long, R., Zhang, T., Xiong, J., Zhang, K., Wang, T., Yang, Q., and Sun, Y. 2017. Comparative proteomic analysis of alfalfa revealed new salt and drought stress-related factors involved in seed germination. *Molecular Biology Reports* 44, 261–272. doi:10.1007/s11033-017-4104-5
- Maas, S.E., Glenn, A.J., Tenuta, M., and Amiro, B.D. 2013. Net CO₂ and N₂O exchange during perennial forage establishment in an annual crop rotation in the Red River Valley, Manitoba. *Canadian Journal of Soil Science* 93, 639–652. doi:10.4141/cjss2013-025
- Mace, E.S., Tai, S., Gilding, E.K., Li, Y., Prentis, P.J., Bian, L., Campbell, B.C., Hu, W., Innes, D.J., Han, X., Cruickshank, A., Dai, C., Frère, C., Zhang, H., Hunt, C.H., Wang, X., Shatte, T., Wang, M., Su, Z., Li, J., Lin, X., Godwin, I.D., Jordan, D.R., Wang, J. 2013. Whole-Genome sequencing reveals untapped genetic potential in Africa's indigenous cereal crop sorghum. *Nature Communications* 4, 2320. doi:10.1038/ncomms3320
- Manzanares, C., Yates, S., Ruckle, M., Nay, M., and Studer, B. 2016. TILLING in forage grasses for gene discovery and breeding improvement. *New Biotechnology* 33, 594–603. doi:10.1016/j.nbt.2016.02.009
- Marín, J., Yousfi, S., Mauri, P.V., Parra, L., Lloret, J., and Masaguer, A. 2020. RGB vegetation indices, NDVI, and biomass as indicators to evaluate C₃ and C₄ turfgrass under different water conditions. *Sustainability* 12, 2160. doi:10.3390/su12062160
- Meiss, H., Médiène, S., Waldhardt, R., Caneill, J., and Munier-Jolain, N. 2010. Contrasting weed species composition in perennial alfalfas and six annual crops: implications for integrated weed management. *Agronomy for Sustainable Development* 30, 657–666. doi:10.1051/agro/2009043
- Mikhaylov, A., Moiseev, N., Aleshin, K., and Burkhardt, T. 2020. Global climate change and greenhouse effect. *Entrepreneurship and Sustainability Issues* 7(4), 2897–2913. doi:10.9770/jesi.2020.7.4(21)
- Miladinovic, D., Antunes, D., Yildirim, K., Bakhsh, A., Cvejic', S., Kondic'-Špika, A., Marjanovic Jeromela, A., Opsahl-Sorteberg, H-G., Zambounis, A., and Hilioti, Z. 2021. Targeted plant improvement through genome editing: from laboratory to field. *Plant Cell Reports* 40, 935–951. doi:10.1007/s00299-020-02655-4
- Münzbergová, Z., Hadincová, V., Skálová, H., and Vandvik, V. 2017. Genetic differentiation and plasticity interact along temperature and precipitation gradients to determine plant performance under climate change. *Journal of Ecology* 105, 1358–1373. doi:10.1111/1365-2745.12762
- Naz, A.A., Arifuzzaman, M., Muzammil, S., Pillen, K., and Leon, J. 2014. Wild barley introgression lines revealed novel QTL alleles for root and related shoot traits in the cultivated barley (*Hordeum vulgare* L.). *BMC Genetics* 15, 107. doi:10.1186/s12863-014-0107-6
- Neal, J.S., Murphy, S.R., Harden, S., and Fulkerson, W.J. 2012. Differences in soil water content between perennial and annual forages and crops grown under deficit irrigation and used by the dairy industry. *Field Crops Research* 137, 148–162. doi:10.1016/j.fcr.2012.07.013

- Niazi, I.A.K., Rafique, A., Rauf, S., da Silva, J.A.T., and Afzal, M. 2014. Simultaneous selection for stem borer resistance and forage related traits in maize (*Zea mays* ssp. *mays* L.) × teosinte (*Zea mays* ssp. *mexicana* L.) derived populations. *Crop Protection* 57, 27–34. doi:10.1016/j.cropro.2013.10.026.
- Nice, L.M., Stettenson, B.J., Brown-Guedira, G.L., Akhunov, E.D., Liu, C., Kono, T.J.Y., Morrell, P.L., Blake, T.K., Horsley, R.D., Smith, K.P., and Muehlbauer, G.J. 2016. Development and genetic characterization of an advanced backcross-nested association mapping (AB-NAM) population of wild × cultivated barley. *Genetics* 203, 1453–1467. doi:10.1534/genetics.116.190736
- Nichols, S.N., and Crush, J.R. 2016. Developing nutrient efficient clovers for New Zealand farmers. In ‘Integrated nutrient and water management for sustainable farming’. (Eds LD Currie, R Singh) pp. 1–4. (Fertilizer and Lime Research Centre, Massey University: Palmerston North, New Zealand)
- Nie, Z.N., Miller, S., Moore, G.A., Hackney, B.F., Boschma, S.P., Reed, K.F.M., Mitchell, M., Albertsen, T.O., Clark, S., Craig, A.D., Kearney, G., Li, G.D., and Dear, B.S. 2008. Field evaluation of perennial grasses and herbs in southern Australia 2. Persistence, root characteristics and summer activity. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48, 424–435. doi:10.1071/EA₀₇₁₃₆
- Ning, J., He, X.Z., and Hou, F. 2020. C₃ and C₄ grass species: who can reduce soil nitrous oxide emissions in a continental arid region? *Atmosphere* 11, 958. doi:10.3390/atmos11090958
- Novoselec, J., Klir, Ž., Domac’inović, M., Lončarić, Z., and Antunović, Z. 2018. Biofortification of feedstuffs with microelements in animal nutrition. *Poljoprivreda* 24, 25–34. doi:10.18047/poljo.24.1.4
- Ojeda, J.J., Caviglia, O.P., Agnusdei, M.G., and Errecart, P.M. 2018a. Forage yield, water- and solar radiation-productivities of perennial pastures and annual crops sequences in the south-eastern Pampas of Argentina. *Field Crops Research* 221, 19–31. doi:10.1016/j.fcr.2018.02.010
- Ojeda, J.J., Caviglia, O.P., Irisarri, J.G.N., and Agnusdei, M.G. 2018b. Modelling inter-annual variation in dry matter yield and precipitation use efficiency of perennial pastures and annual forage crops sequences. *Agricultural and Forest Meteorology* 259, 1–10. doi:10.1016/j.agrformet.2018.04.014
- Palit, P., Kudapa, H., Zougmore, R., Kholova, J., Whitbread, A., Sharma, M., and Varshney, R.K. 2020. An integrated research framework combining genomics, systems biology, physiology, modelling and breeding for legume improvement in response to elevated CO₂ under climate change scenario. *Current Plant Biology* 22, 100149. doi:10.1016/j.cpb.2020.100149
- Pan, L., Meng, C., Wang, J., Ma, X., Fan, X., Yang, Z., Zhou, M., and Zhang, X. 2018. Integrated omics data of two annual ryegrass (*Lolium multiflorum* L.) genotypes reveals core metabolic processes under drought stress. *BMC Plant Biology* 18, 26. doi:10.1186/s12870-018-1239-z
- Polley, H.W., Briske, D.D., Morgan, J.A., Wolter, K., Bailey, D.W., and Brown, J.R. 2013. Climate change and North American rangelands: trends, projections, and implications. *Rangeland Ecology & Management* 66, 493–511. doi:10.2111/REM-D-12-00068.1
- Pourkheirandish, M., Golicz, A.A., Bhalla, P.L., and Singh, M.B. 2020. Global role of crop genomics in the face of climate change. *Frontiers in Plant Science* 11, 922. doi:10.3389/fpls.2020.00922
- Ramteke, R., Doneria, R., and Gendley, M.K. 2019. Antinutritional factors in feed and fodder used for livestock and poultry feeding. *Acta Scientific Nutritional Health* 3, 39–48.
- Rao, I.M., Miles, J.W., Wenzl, P., Louw-Gaume, A., Cardoso Arango, J.A., Ricaurte, J., Joisse Rincon, J.P., Hoyos, V., Frossard, E., Wagatsuma, T., and Horst, W.J. 2011. Mechanisms of adaptations of brachiaria grasses to abiotic stress factors in the tropics. In ‘Proceedings of the III International Symposium on Forage Breeding’. 7–11 November 2011, Bonito, MS, Brazil. (CGIAR: Montpellier, France)
- Rao, I.M., Peters, M., Castro, A., Schultze-Kraft, R., White, D., Fisher, M., et al. 2015. ‘LivestockPlus: the sustainable intensification of forage- based agricultural systems to improve livelihoods and ecosystem services in the tropics.’ CIAT Publication. (Centro Internacional de Agricultura Tropical: Cali, Colombia)
- Reddy, S.H., Singhal, R.K., DaCosta, M.V.J., Kambalimath, S.K., Rajanna, M.P., Muthurajan, R., Sevanthi, A.M., Mohapatra, T., Sarla, N., Chinnusamy, V., Gopala Krishnan, S., Singh, A.K., Singh, N.K., Sharma, R.P., Pathappa, N., and Sheshshayee, S.M. 2020. Leaf mass area determines

- water use efficiency through its influence on carbon gain in rice mutants. *Physiologia Plantarum* 169, 194–213. doi:10.1111/ppl.13062
- Reed, K.F.M., Clement, S.L., Feely, W.F., and Clark, B. 2004. Improving tall fescue (*Festuca arundinacea*) for cool-season vigour. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 44, 873–881. doi:10.1071/EA₀₃₁₇₃
- Rojas-Downing, M.M., Nejadhashemi, A.P., Harrigan, T., and Woznicki, S.A. 2017. Climate change and livestock: impacts, adaptation, and mitigation. *Climate Risk Management* 16, 145–163. doi:10.1016/j.crm.2017.02.001
- Sabagh, A.E.L., Hossain, A., Islam, M.S., Iqbal, M.A., Raza, A., Karademir, Ç., Karademir, E., Rehman, A., Rahman, M.A., Singhal, R.K., Llanes, A., Raza, M.A., Mubeen, M., Nasim, W., Barutçular, C., Meena, R.S., and Saneoka, H. 2020. Elevated CO₂ concentration improves heat-tolerant ability in crops. In ‘Abiotic stress in plants’. (Eds S Fahad, S Saud, Y Chen, C Wu, D Wang) (IntechOpen: London, UK)
- Sabagh AEL, Islam MS, Hossain A, Iqbal MA, Habib-ur-Rahman M, Mansour F, Wasaya A, Ahmed S, Singhal RK, Kumari A, Kassahun M, Danish S, Hossain MA, Raza MA, Ratnasekera D, Arif M, Fahad S, Laing AM, Skalicky M, Brestic M. 2021. Advances in input management for food and environmental security. In ‘Input use efficiency for food and environmental security’. (Eds R Bhatt, RS Meena, A Hossain) pp. 157–198. (Springer: Singapore)
- Sarr PS, Ando Y, Nakamura S, Deshpande S, Subbarao GV. 2020. Sorgoleone release from sorghum roots shapes the composition of nitrifying populations, total bacteria, and archaea and determines the level of nitrification. *Biology and Fertility of Soils* 56(2), 145–166. doi:10.1007/s00374-019-01405-3
- Serba DD, Perumal R, Tesso TT, Min D. 2017. Status of global pearl millet breeding programs and the way forward. *Crop Science* 57, 2891–2905. doi:10.2135/cropsci2016.11.0936
- Sheidai Karkaj E, Jafari I, Jahdi R. 2019. The effect of fire on some characteristics of rangeland ecosystem in the Southern part of Golestan National Park, Iran. *Journal of Range and Watershed Managment* 72, 755–767. doi:10.22059/JRWM.2019.245647.1185
- Shoko C, Mutanga O, Dube T, Slotow R. 2018. Characterizing the spatio-temporal variations of C₃ and C₄ dominated grasslands aboveground biomass in the Drakensberg, South Africa. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 68, 51–60. doi:10.1016/j.jag.2018.02.006
- Smith, K.F., Simpson, R.J., Oram, R.N., Lowe, K.F., Kelly, K.B., Evans, P.M., and Humphreys, M.O. 1998. Seasonal variation in the herbage yield and nutritive value of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) cultivars with high or normal herbage water-soluble carbohydrate concentrations grown in three contrasting Australian dairy environments. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 38, 821–830. doi:10.1071/EA₉₈₀₆₄
- Subbarao, G.V., Rondon, M., Ito, O., Ishikawa, T., Rao, I.M., Nakahara, K., Lascano, C., and Berry, W.L. 2007. Biological nitrification inhibition (BNI): is it a widespread phenomenon? *Plant and Soil* 294, 5–18. doi:10.1007/s11104-006-9159-3
- Subbarao, G.V., Nakahara, K., Hurtado, M.P., Ono, H., Moreta, D.E., Salcedo, A.F., Yoshihashi, A.T., Ishikawa, T., Ishitani, M., Ohnishi-Kameyama, M., Yoshida, M., Rondon, M., Rao, I.M., Lascano, C.E., Berry, W.L., and Ito, O. 2009. Evidence for biological nitrification inhibition in *Brachiaria* pastures. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106, 17302–17307. doi:10.1073/pnas.0903694106
- Subbarao, G.V., Yoshihashi, T., Worthington, M., Nakahara, K., Ando, Y., Sahrawat, K.L., Rao, I.M., Lata, J.-C., Kishii, M., and Braun, H.J. 2015. Suppression of soil nitrification by plants. *Plant Science* 233, 155–164. doi:10.1016/j.plantsci.2015.01.012
- Subbarao, G.V., Arango, J., Masahiro, K., Hooper, A.M., Yoshihashi, T., Ando, Y., Nakahara, K., Deshpande, S., Ortiz-Monasterio, I., Ishitani, M., Peters, M., Chirinda, N., Wollenberg, L., Lata, J.C., Gerard, B., Tobita, S., Rao, I.M., Braun, H.J., Kommerell, V., Tohme, J., and Iwanaga, M. 2017. Genetic mitigation strategies to tackle agricultural GHG emissions: the case for biological nitrification inhibition technology. *Plant Science* 262, 165–168. doi:10.1016/j.plantsci.2017.05.004
- Subbarao, G.V., Kishii, M., Bozal-Leorri, A., Ortiz-Monasterio, I., Gao, X., Ibba, M.I., Karwat, H., Gonzalez-Moro, M.B., Gonzalez-Murua, C., Yoshihashi, T., Tobita, S., Kommerell, V., Braun, H.-J., and Iwanaga, M. 2021. Enlisting wild grass genes to combat nitrification in wheat farming: a nature-based solution. *Proceedings of the National*

- Academy of Sciences of the United States of America 118, e2106595118. doi:10.1073/pnas.2106595118
- Suprunova, T., Krugman, T., Distelfeld, A., Fahima, T., Nevo, E., and Korol, A. 2007. Identification of a novel gene (Hsdr4) involved in water- stress tolerance in wild barley. *Plant Molecular Biology* 64, 17–34. doi:10.1007/s11103-006-9131-x
- Tessema, Z.K., and Feleke, B.S. 2018. Yield, yield dynamics and nutritional quality of grass-legume mixed pasture. *JAPS: Journal of Animal & Plant Sciences* 28(2), 155–164.
- Thornton, P.K., and Herrero, M. 2010. Potential for reduced methane and carbon dioxide emissions from livestock and pasture management in the tropics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107, 19667–19672. doi:10.1073/pnas.0912890107
- Volaire, F., and Lelièvre, F. 1997. Production, persistence, and water-soluble carbohydrate accumulation in 21 contrasting populations of *Dactylis glomerata* L. subjected to severe drought in the south of France. *Australian Journal of Agricultural Research* 48, 933–944. doi:10.1071/A97004
- Volaire, F., and Lelièvre, F. 2001. Drought survival in *Dactylis glomerata* and *Festuca arundinacea* under similar rooting conditions in tubes. *Plant and Soil* 229, 225–234. doi:10.1023/A:1004835116453
- Volenc, J.J., and Nelson, C.J. 2020. Carbon metabolism in forage plants. In 'Forages: the science of grassland agriculture'. Vol. 2. (Eds KJ Moore, M Collins, CJ Nelson, DD Redfearn) pp. 65–84. (Wiley-Blackwell: New York, NY, USA)
- Wang, T., Zhang, D., Chen, L., Wang, J., and Zhang, W.H. 2022. Genome-wide analysis of the Glutathione S-Transferase family in wild *Medicago ruthenica* and drought-tolerant breeding application of *MruGSTU₃₉* gene in cultivated alfalfa. *Theoretical and Applied Genetics* 135, 853–864. doi:10.1007/s00122-021-04002-x
- Weiskopf, S.R., Rubenstein, M.A., Crozier, L.G., Gaichas, S., Griffs, R., Halofsky, J.E., Hyde, K.J., Morelli, T.L., Morissette, J.T., Munoz, R.C., Pershing, A.J., Peterson, D.L., Poudel, R., Staudinger, M.D., Sutton-Grier, A.E., Thompson, L., Vose, J., Weltzin, J.F., and Whyte, K.P. 2020. Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Science of The Total Environment* 733, 137782. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137782
- Yadav, S., and Mishra, A. 2020. Ectopic expression of *C₄* photosynthetic pathway genes improves carbon assimilation and alleviate stress tolerance for future climate change. *Physiology and Molecular Biology of Plants* 26, 195–209. doi:10.1007/s12298-019-00751-8
- Yadav, M.R., Choudhary, M., Singh, J., Lal, M.K., Jha, P.K., Udawat, P., Gupta, N.K., Rajput, V.D., Garg, N.K., Maheshwari, C., Hasan, M., Gupta, S., Jatwa, T.K., Kumar, R., Yadav, A.K., and Prasad, P.V.V. 2022. Impacts, tolerance, adaptation, and mitigation of heat stress on wheat under changing climates. *International Journal of Molecular Sciences* 23, 2838. doi:10.3390/ijms23052838
- Yang, J., and Udvardi, M. 2018. Senescence and nitrogen use efficiency in perennial grasses for forage and biofuel production. *Journal of Experimental Botany* 69, 855–865. doi:10.1093/jxb/erx241
- Younger, V (Ed.). 2012. 'The biology and utilization of grasses.' (Elsevier: Amsterdam, Netherlands)
- Yusuf, R.O., Noor, Z.Z., Abba, A.H., Hassan, M.A.A., and Din, M.F.M. 2012. Methane emission by sectors: a comprehensive review of emission sources and mitigation methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 5059–5070. doi:10.1016/j.rser.2012.04.008
- Zhang, H., Mittal, N., Leamy, L.J., Barazani, O., and Song, B-H. 2017. Back into the wild: apply untapped genetic diversity of wild relatives for crop improvement. *Evolutionary Applications* 10, 5–24. doi:10.1111/eva.12434
- Zheng, H., Sun, X., Li, J., Song, Y., Song, J., Wang, F., Liu, L., Zhang, X., and Sui, N. 2021. Analysis of *N₆*-methyladenosine reveals a new important mechanism regulating the salt tolerance of sweet sorghum. *Plant Science* 304, 110801. doi:10.1016/j.plantsci.2020.110801

ABSTRACT**Forage crops are a reservoir of functional trait diversity for adaptation to current and future climates**

Climate change and global warming are the foremost anthropogenically accelerated catastrophes that are already causing world-wide challenges, but threaten to thwart global food, environmental and nutritional security in the future. Climate change affects ecosystem services and interactions between biotic and abiotic factors. The most drastic consequences have been observed in the agricultural and livestock sector, with diminished production and productivity potential. Agriculture and allied sectors contribute markedly to the production of greenhouse gases; however, integrated management practices can be used to curtail greenhouse gas emissions and its adverse impacts. Forage crops and their wild relatives maintain biodiversity and ecosystem services and minimise the drastic effects of climate change. Forage crops adapted to harsh environments have certain unique features such as perenniality, deep root system, high resource-use efficiency (light, nutrients and water), and low production of methane and N₂O, making them suitable for future use under climate change. This review highlights the prominent features of various cultivated and rangeland forage crops that may be crucial to understanding impacts of climate change. We discuss the wild relatives of forage crops, which are often adapted for multiple stresses, and highlight their mechanisms for adaptation under climate change. We consider the advanced breeding and biotechnological tools useful for developing climate-smart forage crops. This review provides novel insight into forage crops and their wild relatives in terms of their exploitation in future stress breeding programmes and paths for developing climate-resilient crops.

Keywords: *animal production, climate change, crop wild relatives, forage breeding, global warming, greenhouse gases, perennial crops, resource use efficiency.*