

TÁC ĐỘNG CÓ THỂ XẢY RA CỦA CO₂ VÀ NHIỆT ĐỘ CAO LÊN SỰ TĂNG TRƯỞNG VÀ PHÁT TRIỂN CỦA CÂY HỌ ĐẬU

Rajanna G. Adireddy^{1,2}, Saseendran S. Anapalli¹, Krishna N. Reddy¹, Partson Mubvumba¹ và Justin George³

1. Đơn vị nghiên cứu hệ thống sản xuất cây trồng, USDA ARS, Stoneville, MS 38776, Hoa Kỳ.
2. ICAR – Ban nghiên cứu cây đậu phộng, Trạm Regional, Ananthapur 515701, Ấn Độ.
3. Đơn vị nghiên cứu quản lý côn trùng miền Nam, USDA ARS, Stoneville, MS 38776, Hoa Kỳ.

TÓM TẮT

Carbon dioxide (CO₂) là khí nhà kính (GHG) dồi dào nhất trong khí quyển và là chất nền cho quá trình cố định carbohydrate quang hợp ở thực vật. Việc tăng GHG từ khí thải của con người đang làm nóng hệ thống khí quyển của Trái đất ở tốc độ đáng báo động và thay đổi khí hậu, có thể ảnh hưởng đến quá trình quang hợp và các phản ứng sinh hóa khác ở cây trồng theo hướng thuận lợi hoặc bất lợi, tùy thuộc vào loài thực vật. Đối với vai trò chất nền trong các phản ứng khử cacbon ở thực vật, nồng độ CO₂ ([CO₂]) trong không khí có khả năng tăng quá trình quang hợp. Tuy nhiên, hấp thụ N và khả năng tổng hợp protein có thể là yếu tố hạn chế tiềm ẩn trong quá trình tổng hợp sinh khối tăng trong điều kiện [CO₂] giàu ở các loài. Họ đậu là thực vật C₃ và là chất cố định N cộng sinh và dự kiến sẽ được hưởng lợi từ [CO₂] tăng trong không khí. Tuy nhiên, nhiệt độ không khí tăng đồng thời với [CO₂] tăng đòi hỏi phải nghiên cứu chi tiết hơn về tác động của việc tăng [CO₂] đối với sự phát triển và năng suất của cây họ đậu. Trong bài viết này, chúng tôi đã xem xét và trình bày một cách phê phán các tài liệu trực tuyến về sự tăng trưởng, vật lý học, tốc độ quang hợp, độ dẫn khí khổng, năng suất, sức khỏe đất và hành vi của côn trùng trong điều kiện [CO₂] và nhiệt độ cao. Bài đánh giá cho thấy trọng lượng riêng của lá, trọng lượng quả, số lượng và trọng lượng nốt sần tăng đáng kể trong điều kiện [CO₂] cao lên tới 750 ppm. Trong điều kiện [CO₂] cao, hai cơ chế bị ảnh hưởng là tốc độ quang hợp (tăng) và độ dẫn khí khổng (giảm), giúp tăng hiệu quả sử dụng nước ở cây họ đậu C₃ để đạt được năng suất cao hơn. Việc tiếp xúc với mức [CO₂] cao khi bị căng thẳng nước dẫn đến tăng 58% lượng hấp thụ [CO₂], 73% hiệu quả thoát hơi nước và 41% cacboxyl hóa rubisco và giảm độ dẫn khí khổng 15 – 30%. [CO₂] tăng cao làm tăng năng suất đậu tương 10 – 101%, đậu phộng 28 – 39%, đậu xanh 20 – 28%, đậu gà 26 – 31% và đậu bò câu 31 – 38% so với [CO₂] xung quanh. Tuy nhiên, các chất dinh dưỡng của hạt như protein, Zn và Ca giảm đáng kể. Nhiệt độ đất tăng kích thích hoạt động của vi sinh vật, làm tăng tốc độ phân hủy chất hữu cơ và giải phóng chất dinh dưỡng vào hệ thống đất. Nhiệt độ tăng cao ảnh hưởng đến hành vi của côn trùng thông qua tốc độ ăn của cây cao hơn, làm tăng nguy cơ sâu bệnh xâm lấn tấn công các loại cây họ đậu. Tuy nhiên, cần phải tiến hành thêm các cuộc điều tra về tác động tương tác tiềm tàng của [CO₂] và nhiệt độ tăng cao cùng các sự kiện khí hậu khắc nghiệt đối với sự phát triển, năng suất hạt giống và chất lượng dinh dưỡng, sức khỏe đất đai và hành vi của côn trùng để phát triển các biện pháp quản lý thích ứng với khí hậu thông qua việc phát triển các kiểu gen mới, công nghệ tưới tiêu và quản lý phân bón cho các hệ thống sản xuất cây họ đậu bền vững.

Từ khóa: CO₂ tăng cao; buồng sinh trưởng; tốc độ quang hợp; độ dẫn khí khổng; hàm lượng dinh dưỡng của hạt; thụ phấn

1. GIỚI THIỆU

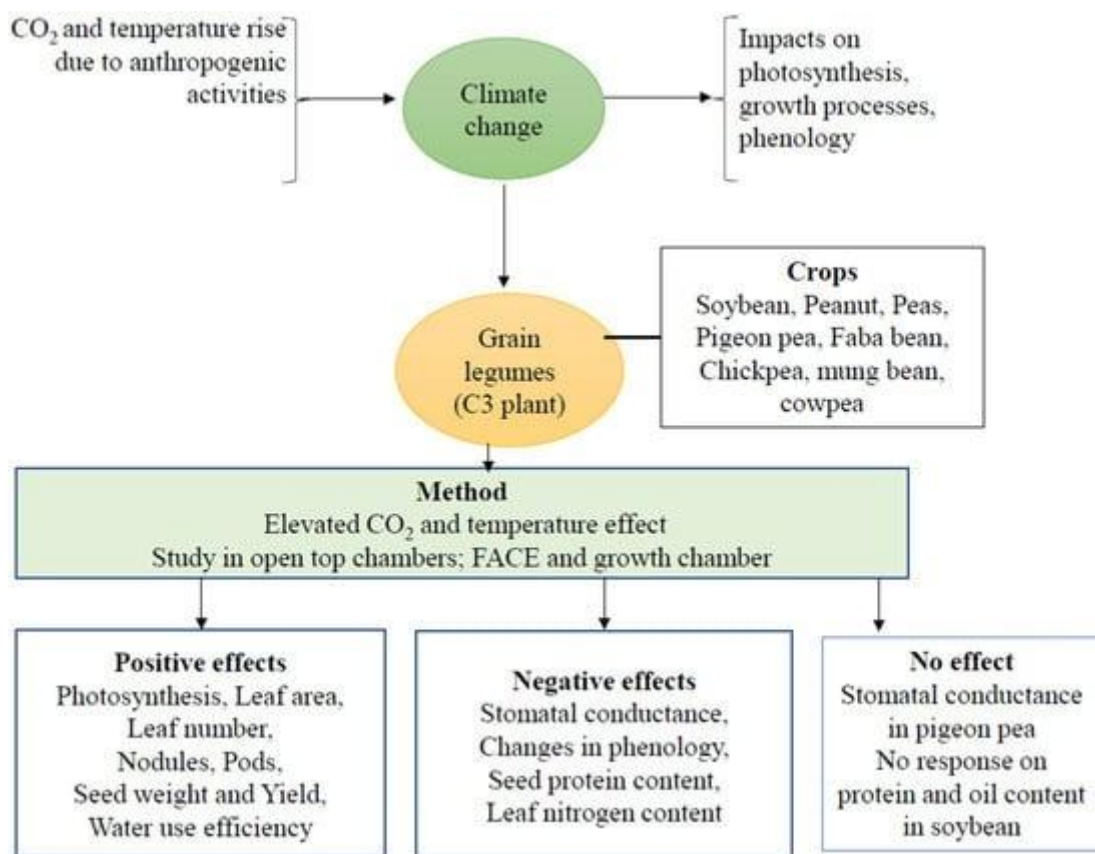
Các khí nhà kính (GHG) chính làm ấm hệ thống khí quyển của Trái đất là CO₂, metan (CH₄) và nitơ oxit (N₂O). GHG thải ra từ các hoạt động của con người hấp thụ và giữ lại nhiều năng lượng nhiệt mặt trời hơn trong khí quyển, làm ấm bề mặt Trái đất nhiều hơn bình thường và gây ra hậu quả không mong muốn cho khí hậu toàn cầu. Được gọi là “biến đổi khí hậu”, những thay đổi như vậy có thể có cả tác động có lợi và bất lợi đối với hệ thống sản xuất lương thực và cây trồng trên toàn thế giới do nhiệt độ không khí tăng cao và các hiện tượng thời tiết khắc nghiệt khác [1,2]. [CO₂] trong khí quyển dự kiến sẽ tăng đáng kể từ 421 ppm vào năm 2024 lên khoảng 550 – 700 ppm vào năm 2050 và 670 – 940 ppm vào năm 2100 [2,3]. Những thay đổi trong hành vi khí khổng của thực vật và hiệu quả quang hợp là những yếu tố chính ảnh hưởng đến cách nồng độ CO₂ trong khí quyển tăng cao ảnh hưởng đến quá trình chuyển hóa carbon và nước ở thực vật. Do tác động thụ tinh [CO₂] nổi tiếng, [CO₂] tăng cao thường liên quan đến sinh khối và năng suất cây trồng cao hơn. Tuy nhiên, về mặt địa lý, nhiệt độ không khí trong mùa sinh trưởng của cây trồng gần đường xích đạo đã ở mức, gần hoặc cao hơn mức tối ưu trên thuận lợi cho sự sinh trưởng của cây trồng so với những nơi ở phía Bắc và phía Nam đường xích đạo. Do đó, các khu vực gần đường xích đạo phải đối mặt với tình trạng giảm sản lượng và các khu vực xa đường xích đạo dự kiến sẽ tăng sản lượng do nhiệt độ tiếp tục tăng [4,5]. Lượng carbohydrate tăng cường được tạo ra từ hiệu ứng bón phân [CO₂] ảnh hưởng đáng kể đến thành phần dinh dưỡng và chất lượng tổng thể của cây lương thực [6]. Do đó, nhiệt độ không khí và [CO₂] tăng cao gây ra một mối đe dọa lớn khác đối với an ninh lương thực toàn cầu bằng cách làm tăng thêm sự không chắc chắn về chất lượng dinh dưỡng của thực phẩm có nguồn gốc thực vật. Ở cây họ đậu, với [CO₂] tăng cao, tốc độ quang hợp cao hơn và sản lượng tăng lên ở đậu tương và đậu phộng đã được báo cáo [7,8]. Nghiên cứu cho thấy rằng sự gia tăng tốc độ quang hợp cũng làm tăng tốc độ dịch chuyển từ nguồn đến bồn chứa, dẫn đến năng suất hạt cao hơn [9]. Tuy nhiên, nồng độ nitơ trong mô (N) và nồng độ protein trong hạt cũng giảm ở các cây họ đậu tiếp xúc với [CO₂] tăng cao, ảnh hưởng đến chất lượng hạt [10].

Tác động của [CO₂] tăng cao lên cây trồng thay đổi tùy theo các con đường quang hợp khác nhau như C₃ so với C₄ hoặc CAM (chuyển hóa axit crassulacean), giống và cây trồng, vị trí địa lý, độ phì nhiêu của đất và khí hậu. Nhìn chung, cây trồng C₃ được hưởng lợi từ hiệu ứng bón phân [CO₂] trong các phản ứng cố định cacbon do Rubisco xúc tác trong chu trình quang hợp Calvin–Benson–Bassam. Ngược lại, tác động của cơ chế tăng [CO₂] không khí do enzyme phosphoenolpyruvate trung gian trước khi không khí đi vào vị trí quang hợp trong các tế bào bao bó mạch ở thực vật C₄ cản trở cơ hội của chúng để thu được lợi ích tương đương từ [CO₂] khí quyển tăng như các loài C₃. Kết quả báo cáo cho thấy cây trồng C₃ có thể cải thiện năng suất từ 20 – 35%, trong khi cây trồng C₄ có thể cải thiện năng suất từ 0 – 15% [11]. Do đó, ngày càng có nhu cầu hiểu sâu hơn về tác động của các yếu tố biến đổi khí hậu, cụ thể là nhiệt độ không khí và [CO₂] tăng lên, đối với quá trình đồng hóa cacbon quang hợp và sản xuất cây trồng. Sự hiểu biết này rất quan trọng để dự đoán cách các yếu tố này ảnh hưởng đến sự tăng trưởng và năng suất của các giống cây trồng mới nổi nhằm nâng cao giá trị dinh dưỡng và sản xuất bền vững.

Khoảng 28 triệu km² đất được phân loại là vùng khô hạn và 46 triệu km² được phân loại là vùng bán khô hạn [12,13]. Nhiệt độ không khí liên quan đến sự tích tụ GHG trong khí quyển ảnh hưởng đáng kể đến tình trạng thiếu nước ở những vùng khí hậu thường xuyên xảy ra hạn hán [14,15,16]. Ở những vùng khí hậu đó, mặc dù khả năng chống chịu khí khổng với [CO₂] tăng cao có thể cải thiện nhu cầu nước tiêu thụ của cây trồng, nhưng

nhệt độ không khí tăng kết hợp với tình trạng hạn hán hiện tại thường dẫn đến phản ứng không chắc chắn của cây trồng [14,17,18,19,20]. Cây họ đậu nói chung là cây lương thực quan trọng vì chúng có vai trò quan trọng trong việc làm giàu đất thông qua quá trình cố định cộng sinh N trong khí quyển [21,22,23]. Trên toàn cầu, các loại đậu hạt được trồng theo phương pháp nông sinh thái không cần nước thường bị hạn chế nước và dễ bị ảnh hưởng tiêu cực của hạn hán hơn so với các loại cây ngũ cốc, đặc biệt là khi nhiệt độ tăng [5]. Trong điều kiện hạn hán, cây họ đậu có lợi thế hơn các loại cây không phải họ đậu có điều kiện [CO₂] cao vì chúng có khả năng cố định N trong khí quyển tương ứng với nhu cầu ngày càng tăng đối với chu trình Calvin [24,25,26,27,28].

Nhìn chung, người ta thấy rằng [CO₂] tăng có thể thúc đẩy sự phát triển bằng cách tăng tốc độ quang hợp ở các loài cây trồng. Tuy nhiên, sự phân bố của sinh khối bổ sung được tạo ra trên các cơ quan thực vật khác nhau thay đổi trong và giữa các loài [29,30]. Các nghiên cứu được tiến hành trong các buồng hở và thí nghiệm làm giàu [CO₂] không khí tự do (FACE) đã báo cáo rằng tác động bất lợi của nhiệt độ cao hơn đối với sự phát triển của cây trồng có thể được bù đắp bằng tác dụng bón phân của [CO₂] cao [31,32]. Phản ứng của cây họ đậu đối với [CO₂] và nhiệt độ cao, như đã báo cáo trong tài liệu, được minh họa và tóm tắt trong Hình 1. [CO₂] cao ảnh hưởng đến sinh lý và năng suất cây trồng và tác động đến đất như một thành phần quan trọng của chuỗi liên tục đất-cây-khí quyển.



Hình 1. Phản ứng của cây họ đậu đối với [CO₂] và nhiệt độ cao được đo từ các buồng hở, các thí nghiệm làm giàu [CO₂] không khí tự do (FACE) và các buồng tăng trưởng trong nhà và ngoài trời được kiểm soát.

Đất là một khối không đồng nhất về mặt không gian và bao gồm các khoáng chất, chất hữu cơ, không khí, vi sinh vật và nước [33,34,35]. Nhiệt độ và [CO₂] cao sẽ ảnh hưởng trực tiếp và gián tiếp đến hoạt động của vi sinh vật đất, tính đa dạng, sự phát triển, chu

trình dinh dưỡng và các đặc tính vật lý, tất cả đều rất quan trọng đối với sức khỏe và năng suất của đất. Do đó, nhiệt độ đất tăng sẽ kích thích hoạt động của vi sinh vật, làm tăng tốc độ phân hủy chất hữu cơ và giải phóng chất dinh dưỡng vào hệ thống đất và khí quyển. Ví dụ, điều này có thể làm tăng tốc độ nitrat hóa đất [36] và gây ra tình trạng mất cacbon hữu cơ trong đất (SOC) cao hơn [37], ảnh hưởng tiêu cực đến các đặc tính sinh học, hóa học và vật lý của đất [38]. Tương tự như vậy, biến đổi khí hậu có thể tác động đến sự xuất hiện của sâu bệnh, tương tác vật chủ-bệnh, sự phân bố và sinh thái của côn trùng, quần thể thiên địch, sự di cư của côn trùng và thói quen ăn của côn trùng, có thể làm giảm đáng kể sản xuất nông nghiệp [39]. Tuy nhiên, có rất ít hoặc không có bằng chứng trong tài liệu về tác động của sức khỏe đất như các hoạt động vật lý, hóa học và sinh học của đất, sự tái sinh của sâu bệnh và hành vi ăn của côn trùng trên cây họ đậu trong điều kiện $[CO_2]$ và nhiệt độ cao. Trước đây, các nghiên cứu đã báo cáo rằng thiếu các cuộc điều tra tập trung vào việc làm sáng tỏ cách cây họ đậu phản ứng về mặt sinh lý, về mặt sinh trưởng và phát triển, với $[CO_2]$ cao và nhiệt độ trong các môi trường khác nhau với các điều kiện nước, nhiệt độ và độ ẩm khác nhau [40,41]. Các nghiên cứu về tác động kết hợp của $[CO_2]$ tăng và nhiệt độ liên quan đến sự nảy mầm của hạt, khí hậu thực vật học và năng suất ở cây họ đậu cũng được báo cáo là thiếu [42,43]. Trong bối cảnh này, bài đánh giá này tóm tắt các tài liệu hiện có về tác động của $[CO_2]$ và nhiệt độ tăng đối với độ dẫn khí khổng của cây họ đậu, tốc độ quang hợp, tăng trưởng sinh khối, khí hậu thực vật học, năng suất, chất lượng dinh dưỡng của hạt, sức khỏe đất và hành vi của côn trùng. Do đó, mục tiêu của bài đánh giá này là xác định cách khí hậu trong tương lai với nhiệt độ và $[CO_2]$ cao kết hợp sẽ ảnh hưởng đến cây họ đậu như thế nào. Công trình được tiến hành dựa trên bộ sưu tập các bài báo, báo cáo và bài đánh giá được bình duyệt ngang hàng trên web khoa học bằng cách sử dụng các thuật ngữ tìm kiếm “cây họ đậu”, “ CO_2 tăng cao”, “nhiệt độ”, “buồng tăng trưởng”, “tốc độ quang hợp”, “độ dẫn khí khổng”, “hàm lượng dinh dưỡng của hạt”, “sức khỏe đất”, “trạng thái dinh dưỡng của đất”, “hành vi của côn trùng” và “phản ứng của loài thụ phấn”. Dựa trên các mục tìm kiếm, 167 bài báo nghiên cứu và đánh giá đã được tìm thấy và bằng chứng từ 142 bài báo đã được sử dụng trong bài báo đánh giá này. Bài đánh giá có thể giúp các nhà nghiên cứu phát triển các chiến lược nông học để giảm thiểu tác động của biến đổi khí hậu đồng thời hỗ trợ các nhà chọn giống phát triển các kiểu gen mới thích nghi hơn với tác động của biến đổi khí hậu.

2. Cơ chế phản ứng của thực vật đối với căng thẳng $[CO_2]$ và nhiệt độ tăng cao

Nhiệt độ cao hơn và $[CO_2]$ tăng có thể ảnh hưởng đến sự phát triển, quá trình trao đổi chất và năng suất cây trồng. Sự hình thành các loài oxy phản ứng (ROS) tăng lên như superoxide (O_2^-), hydrogen peroxide (H_2O_2) và các gốc hydroxyl (OH^-) có thể là kết quả của nhiệt độ cao. Các ROS này có thể gây tổn hại oxy hóa cho các cấu trúc tế bào ở thực vật [44]. Tương tự như vậy, căng thẳng nhiệt ảnh hưởng đến hệ thống quang hợp II (PSII) nhiều hơn hệ thống quang hợp I (PSI). Phức hợp giải phóng oxy (OEC) liên quan đến quá trình phân tách nước và giải phóng oxy trong PSII có thể bị tổn hại do nhiệt độ cao [45]. Do đó, tốc độ quang hợp giảm và hiệu quả vận chuyển điện tử giảm là kết quả của tổn thương này. Tuy nhiên, thực vật sử dụng các cơ chế thích nghi thông qua các biện pháp phòng vệ sinh lý, sinh hóa và phân tử, chẳng hạn như điều chỉnh thẩm thấu, tích tụ protein, thay đổi biểu hiện gen và phòng vệ chống oxy hóa, để giải quyết những thách thức này. Những phản ứng này có thể khác nhau tùy thuộc vào loại cây trồng, loài, cường độ căng thẳng và thời gian tiếp xúc. Do đó, phản ứng chính đối với căng thẳng nhiệt và tổn thương do ánh sáng là phục hồi trung tâm phản ứng PSII, đặc biệt là protein D1.

Nhiệt độ cao thường dẫn đến sự phân hủy protein D1 trong PSII, gây ra tình trạng ức chế quang. Khi phục hồi, thực vật tăng tốc độ luân chuyển của protein D1 để khôi phục hoạt động của PSII [46]. Tương tự như vậy, thực vật tổng hợp protein sốc nhiệt (HSP) để đáp ứng với nhiệt độ cao, giúp tái tạo protein, ổn định và sửa chữa [47]. Tuy nhiên, các cơ chế phòng vệ này đã được nghiên cứu kỹ lưỡng trong điều kiện căng thẳng nhiệt độ cao ở thực vật. Cần phải khám phá các tác động kết hợp của [CO₂] và nhiệt độ cao đối với các cơ chế phản ứng của thực vật.

Thực vật sử dụng các chất chống oxy hóa không phải enzyme như ascorbate và glutathione cũng như các chất chống oxy hóa enzyme như superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) và peroxidase (POD) để làm giảm tác hại của ROS [48]. Các hệ thống này hỗ trợ bảo vệ tính toàn vẹn của tế bào và giải độc ROS [49]. Tương tự như vậy, một số gen mã hóa cho protein thường được điều hòa tăng lên trong điều kiện căng thẳng nhiệt. Trong những điều kiện như vậy, thực vật được bảo vệ bằng cách sản xuất HSP [50,51]. Người ta đều biết rằng proline, một loại axit amin, tích tụ để đáp ứng với một số tác nhân gây căng thẳng về môi trường, chẳng hạn như nhiệt độ và [CO₂] cao. Bằng cách ổn định protein và màng tế bào, proline hoạt động như một chất bảo vệ thẩm thấu, bảo vệ thực vật khỏi căng thẳng thẩm thấu [52,53]. Do đó, sự tích tụ proline có thể được kích thích bởi [CO₂] tăng lên, có thể đóng vai trò là phản ứng thích nghi để giảm căng thẳng nhiệt. [CO₂] tăng cao thường kích thích sản xuất carbohydrate và kết hợp với căng thẳng nhiệt độ, thực vật có thể tích tụ đường và polyol, đóng vai trò là chất thẩm thấu và bảo vệ tế bào khỏi tình trạng mất nước [54]. Tuy nhiên, những phản ứng này có thể phức tạp do sự tương tác giữa [CO₂] cao và căng thẳng nhiệt độ. Các cơ chế này đã được xác định rõ ràng khi thực vật tiếp xúc với các căng thẳng một yếu tố như nhiệt hoặc căng thẳng [CO₂]. Hơn nữa, các cơ chế này cần được xác định với các nghiên cứu [CO₂] tăng cao trong tương lai và nhiệt độ cao ở cây họ đậu.

3. [CO₂] tăng cao và tác động của nhiệt độ lên sự tăng trưởng và phát triển của cây trồng

3.1. Khí hậu thực vật học

Trước đây, người ta đã báo cáo rằng các loại cây họ đậu phản ứng với mức [CO₂] tăng cao tùy thuộc vào giai đoạn tăng trưởng của chúng. Các nghiên cứu của Srivastava và cs [55], Das và cs [56] đã báo cáo những tác động rõ rệt hơn trong giai đoạn tăng trưởng sớm (0 – 20 ngày sau nảy mầm) so với giai đoạn trưởng thành. Nhìn chung, cây họ đậu liên tục tiếp xúc với [CO₂] cao cho đến khi trưởng thành, với sự tăng trưởng của cây do tăng quang hợp. Điều này được cho là do hô hấp tối giảm trong giai đoạn sinh trưởng đầu của cây, nhưng các cơ chế liên quan vẫn chưa được giải thích. [CO₂] cao ở đậu gà dẫn đến quá trình phát triển sinh sản được đẩy nhanh và thúc đẩy quá trình ra hoa sớm hơn 3 – 4 ngày [57]. Tuy nhiên, khi [CO₂] cao kết hợp với mức ozon (O₃) tăng, người ta quan sát thấy giai đoạn bắt đầu hình thành quả giảm 2 – 3 ngày, do chuyển dịch đến lá tăng.

Tác động của [CO₂] và nhiệt độ đến vật lý học của cây họ đậu, như đã báo cáo trong tài liệu, là không nhất quán. Một số nghiên cứu báo cáo rằng cây tiếp xúc với mức [CO₂] 700 ppm không có bất kỳ tác động nào đến vật lý học của đậu Faba [58] và đậu mắt đen [59]. Tuy nhiên, các nghiên cứu khác báo cáo rằng [CO₂] tăng làm tăng thời gian ra hoa ở đậu tương và giảm thời gian phát triển quả [60,61,62]. Do đó, các cây họ đậu biểu hiện hiện tượng vật lý chậm cũng bị giảm tốc độ sinh trưởng của cây trồng khi tiếp xúc với [CO₂] cao hơn.

Nhiệt độ tăng từ 29°C/23°C lên 32°C/29°C (chu kỳ ngày-đêm) làm giảm thời gian sinh trưởng của cây trồng đi bảy ngày ở các kiểu gen đậu tương khác nhau [20]. Renato và cs [63] đã báo cáo rằng chu kỳ sinh trưởng của đậu đồng giảm 11 ngày khi chỉ riêng nhiệt độ không khí tăng 5°C. Tương tự như vậy, mức nhiệt độ cao hơn làm giảm 14 và 23 ngày sinh trưởng của đậu mắt đen [20,63]. Tóm lại, phản ứng của cây họ đậu đối với [CO₂] và nhiệt độ tăng trong các nghiên cứu được báo cáo khác nhau ở các địa điểm và loại cây họ đậu khác nhau. Các cơ chế chính xác dẫn đến sự khác biệt quan sát được về thời gian sinh trưởng của cây trồng để đáp ứng với [CO₂] ở các giai đoạn phát triển khác nhau của cây vẫn chưa rõ ràng.

3.2. Quang hợp

[CO₂] tăng cao ảnh hưởng đáng kể đến sự phát triển và năng suất của cây trồng, đặc biệt là ở các loài cây trồng sử dụng con đường quang hợp C₃, bằng cách làm giảm tốc độ hô hấp sáng trong các phản ứng khử cacbon quang hợp của chu trình Calvin [6,20,64,65]. Nhìn chung, các loại cây họ đậu được biết đến là cây C₃. Phản ứng thích nghi [CO₂] quang hợp như vậy ở các loại cây trồng C₃ là do hiệu quả carboxyl hóa tăng lên và hiệu quả oxy hóa giảm xuống của enzyme oxy hóa carboxylase RuBP từ mức [CO₂] tăng cao trong không khí [66,67]. Trong bối cảnh này, các loại cây họ đậu như đậu phộng, đậu bắp, đậu tương, đậu xanh và đậu mắt đen được phát hiện là rất nhạy cảm với [CO₂] tăng cao [14,18,28,62,68,69,70,71,72]. Thông thường, một lượng lớn diệp lục a và b hấp thụ năng lượng từ bức xạ hoạt động quang hợp (PAR) để sử dụng trong các hoạt động khử cacbon quang hợp (PCR) [73]. Trong quá trình này, carotenoid có tác dụng bảo vệ trung tâm phản ứng khỏi ánh sáng quá mức và hỗ trợ thu giữ PAR bằng cách hướng nó đến các sắc tố phụ của diệp lục a. Do đó, sự thay đổi nồng độ sắc tố trong lá có liên quan chặt chẽ đến tình trạng sinh lý và do đó là sản lượng cây trồng [74]. Vì hầu hết các nghiên cứu đều được tiến hành trong điều kiện được kiểm soát, nên tác động của [CO₂] tăng cao lên sự phát triển và sinh trưởng của cây có thể không giống như những tác động xảy ra trong điều kiện đồng ruộng [75,76]. Ví dụ, sự phát triển hạn chế của rễ làm hạn chế khả năng phản ứng của cây với [CO₂] tăng cao. Một cơ chế chính khác thường được sử dụng để giải thích năng suất tăng lên trong điều kiện [CO₂] tăng cao là sự giảm độ dẫn khí không, giúp giảm mất nước do thoát hơi nước trong thời kỳ hạn hán [41,73,77,78,79].

Các tác động kết hợp của [CO₂] và nhiệt độ tăng cao lên độ dẫn khí không và tốc độ quang hợp trong điều kiện ánh sáng tối ưu cũng được báo cáo là rõ ràng hơn trong thời kỳ hạn hán [14]. Họ phát hiện ra rằng việc cây đậu phộng tiếp xúc lâu dài với mức [CO₂] tăng cao khi bị hạn hán dẫn đến sự gia tăng 58% trong quá trình hấp thụ [CO₂], 73% trong hiệu quả thoát hơi nước và 41% trong quá trình cacboxyl hóa rubisco (Bảng 1). Các loại đậu hạt phản ứng khác nhau với phân bón [CO₂] tùy thuộc vào loại đất, tính khả dụng của chất dinh dưỡng, tính khả dụng của nước và tương tác với các căng thẳng môi trường khác. [CO₂] cao có thể đẩy nhanh quá trình quang hợp, dẫn đến tăng sinh khối và có thể tăng năng suất nhưng làm giảm các chất dinh dưỡng quan trọng như vitamin, khoáng chất và protein. Khi phản ứng sinh lý và sinh hóa của cây trồng đối với [CO₂] cao thay đổi tùy thuộc vào con đường quang hợp của chúng, sắc tố quang hợp của lá và hệ thống chống oxy hóa cũng được đồng bộ hóa [17,80,81]. Ngoài việc giảm độ dẫn khí không, thực vật trải qua các quá trình thích nghi sinh lý để cải thiện khả năng chịu hạn bằng cách tạo ra isoflavone ở giai đoạn sinh dưỡng và sinh sản, như đã thấy ở đậu tương trong điều kiện [CO₂] cao [6]. Quá trình sản xuất isoflavone, theo con đường phenylpropanoid, sử dụng một lượng lớn carbon [82]. Do đó, thông qua cơ chế này ở cây

họ đậu, có thể cô lập được lượng carbon lớn hơn trong khí quyển ở mức $[CO_2]$ cao trong tương lai [83,84].

$[CO_2]$ tăng và nhiệt độ cao hơn có thể có tác động tích lũy làm tăng căng thẳng nhiệt, một phần là do giảm làm mát thoát hơi nước do sức cản khí khổng tăng lên [31,85]. $[CO_2]$ tăng ở mức 740 ppm đã được chứng minh là làm giảm độ dẫn khí khổng 13 – 30%, khiến nhiệt độ lá tăng $2^\circ C$ [73]. Nhiệt độ cao có thể gây hại trực tiếp cho bộ máy quang hợp, đặc biệt là PS-II [80]. Một số vị trí trong màng lục lạp dễ bị tổn thương do nhiệt đã được xác định [86,87,88]. Khi tiếp xúc với nhiệt độ cao hơn, cây phân phối lại tài nguyên của chúng từ chồi sang rễ [89,90,91]. Tác động bất lợi của nhiệt độ cao đối với cây trồng khác nhau tùy thuộc vào nhiệt độ tối ưu của chúng cho quá trình sinh trưởng và phát triển. Tác động của sinh trưởng và phát triển của cây họ đậu do căng thẳng nhiệt do tác động kết hợp của $[CO_2]$ tăng và nhiệt độ cần được nghiên cứu thêm.

Hệ thống quang hợp II (PSII) và hệ thống quang hợp I (PSI) là các phức hợp protein-sắc tố lớn được nhúng trong màng thylakoid thúc đẩy quá trình quang hợp, đây là một quá trình quan trọng đối với sự phát triển của thực vật. Nhiệt độ cao và $[CO_2]$ cao có thể ảnh hưởng đến chức năng của PSII và PSI theo những cách phức tạp. Để tăng khả năng chống chịu của thực vật đối với các điều kiện khí hậu thay đổi, điều cần thiết là phải hiểu cách hai hệ thống quang hợp này phản ứng với những thách thức như vậy. PSII đặc biệt dễ bị căng thẳng nhiệt do sự phân hủy của OEC [45]. Tương tự như vậy, protein D1, một phần quan trọng của PSII, cực kỳ nhạy cảm với nhiệt và có thể bị phân hủy nhanh hơn ở nhiệt độ cao hơn, điều này có thể làm suy yếu chức năng của PSII và gây ra tình trạng ức chế quang hợp [92]. Để sửa chữa PSII, thực vật phản ứng bằng cách tăng tốc độ luân chuyển của D1, nhưng nhiệt độ quá cao có thể ảnh hưởng đến hệ thống sửa chữa này. Mặc dù PSI ổn định hơn một chút so với PSII, nhưng nó vẫn có thể kém hiệu quả hơn trong điều kiện căng thẳng nhiệt. Do đó, hiệu quả tổng thể của PSI có thể giảm do nhiệt độ cao ảnh hưởng đến chuỗi vận chuyển điện tử [93]. Mặc dù thiệt hại do nhiệt gây ra đối với PSI thường không tệ như đối với PSII, nhưng nó vẫn có thể làm giảm hiệu quả quang hợp tổng thể, đặc biệt là khi tiếp xúc với nhiệt trong thời gian dài. Vì có nhiều CO_2 hơn để cố định cacbon, nên quá trình quang hợp thường trở nên hiệu quả hơn trong điều kiện $[CO_2]$ cao hơn. $[CO_2]$ cao thường làm tăng hoạt động của PSI bằng cách tăng hiệu quả tổng thể của quá trình quang hợp vì nhiều electron hơn được hướng qua PSI để giảm $NADP^+$ [94]. Điều này đặc biệt có lợi cho thực vật C3, vì quá trình quang hợp thường bị cản trở bởi sự hạn chế $[CO_2]$ trong điều kiện môi trường xung quanh [95]. Tuy nhiên, nếu nhiệt độ cao kéo dài, quá trình phục hồi hiệu quả quang hợp có thể mất nhiều thời gian hơn, đặc biệt là ở các loài nhạy cảm với nhiệt [96]. Do đó, tác động có hại của nhiệt có thể bù đắp cho tác động có lợi của việc làm giàu $[CO_2]$ đối với chức năng PSI trong những tình huống khắc nghiệt khi $[CO_2]$ cao và căng thẳng nhiệt độ đồng thời xảy ra. Do đó, tác động có hại của nhiệt có thể bù đắp cho tác động có lợi của việc làm giàu $[CO_2]$ lên chức năng PSI trong những tình huống khắc nghiệt khi $[CO_2]$ cao và ứng suất nhiệt độ xảy ra đồng thời. Hơn nữa, các cơ chế này cần được thiết lập bằng cách kết hợp các nghiên cứu $[CO_2]$ cao trong tương lai và nhiệt độ cao ở các loại cây họ đậu.

3.3. Sinh trưởng và năng suất

Trong điều kiện $[CO_2]$ cao, sức sống của hạt và tỷ lệ nảy mầm đã được báo cáo là tăng, giảm hoặc không thay đổi [42,43,97]. Trong các nghiên cứu này, tác động đến nhiều khía cạnh khác nhau của sự phát triển thực vật ở đậu phộng [14,28,68,72], đậu xanh [31,45,71,98,99], đậu Hà Lan [19,24], đậu tương [6,79], đậu bồ câu [70], đậu răng ngựa [16], đậu mắt đen [20,69], đậu gà [46] và đậu đen [100] đã được nghiên cứu, đo các

thông số tăng trưởng của cây trồng như diện tích lá, kích thước lá, số lượng nốt sần, khối lượng riêng của lá, khối lượng chồi, số lượng quả và năng suất hạt. $[CO_2]$ tăng nói chung đã được báo cáo là có tác dụng có lợi đối với sự tăng trưởng, phát triển và năng suất của cây họ đậu (Bảng 1). Madhu và Hatfield [62] nhận thấy số lượng lá đậu tương giảm 14 – 23% và diện tích lá giảm 9,7 – 11,7% chỉ trong điều kiện $[CO_2]$ tăng. Hơn nữa, nhiệt độ cao làm giảm quá trình quang hợp và độ dẫn khí khổng, tạo ra những chiếc lá nhỏ hơn ở thực vật [89,101,102]. Ở cây họ đậu, sự phát triển của nốt sần là một quá trình quan trọng giúp cố định nitơ trong khí quyển. Tuy nhiên, quá trình cố định nitơ trong các nốt sần bị hạn chế bởi nhiều yếu tố môi trường kiểm soát dòng cacbon vào chúng [24]. Thực vật tiếp xúc với $[CO_2]$ cao cho thấy số lượng nốt sần rễ tăng đáng kể là 114% ở đậu tương [62], 22% ở đậu răng ngựa [16] và 38% ở đậu bò câu [1]. Đồng thời, các nốt sần của đậu Hà Lan trong điều kiện $[CO_2]$ cao có hàm lượng leghemoglobin cao hơn 38% [24]. Tác động có lợi tiềm tàng của việc bón phân $[CO_2]$ cao đối với năng suất cây họ đậu có hạt có thể là do các chỉ số sức khỏe đất được cải thiện với chu trình dinh dưỡng tốt hơn, như đã thảo luận trong Phần 3.6. Tuy nhiên, ảnh hưởng của việc tăng ($[CO_2]$ đến năng suất của cây họ đậu có hạt, bao gồm cả những tác động đồng thời của hạn hán và chất lượng đất, vẫn chưa rõ ràng. Căng thẳng nhiệt có thể có tác động bất lợi đến thực vật ở mọi giai đoạn sinh trưởng và phát triển. Trong giai đoạn sinh dưỡng, nó có thể cản trở sự phát triển của chồi và rễ. Trong giai đoạn sinh sản, nó có thể dẫn đến vô sinh phấn hoa và rụng hoa [103]. Căng thẳng nhiệt ở đậu xanh, đậu Hà Lan và đậu tương đã được nghiên cứu và những cây này ở giai đoạn cây con tiếp xúc với nhiệt độ cao $28^\circ C$ trong tám ngày dẫn đến tỷ lệ nảy mầm/hạt chết giảm lần lượt là 50 – 88% và 36 – 38% ở đậu tương và đậu xanh [104]. Tương tự như vậy, hạt đậu xanh được xử lý trong 10, 20 và 30 phút ở $50^\circ C$ làm giảm đáng kể tỷ lệ nảy mầm của hạt [105]. Theo Chakraborty và Pradhan [106], hạt đậu lăng tiếp xúc với nhiệt độ $35 - 40^\circ C$ trong bốn giờ cho thấy ít nảy mầm hơn và cây con phát triển chậm hơn. Căng thẳng nhiệt làm giảm số lượng cành ra hoa và hoa ở đậu phộng [107]. Do đó, do sự giảm mạnh về khả năng nảy mầm, sự tăng trưởng và phát triển giảm ở nhiệt độ cao $2 - 3^\circ C$ ảnh hưởng đáng kể đến năng suất hạt ở đậu phộng [107], đậu xanh [108], đậu lăng [109,110] và đậu gà [111].

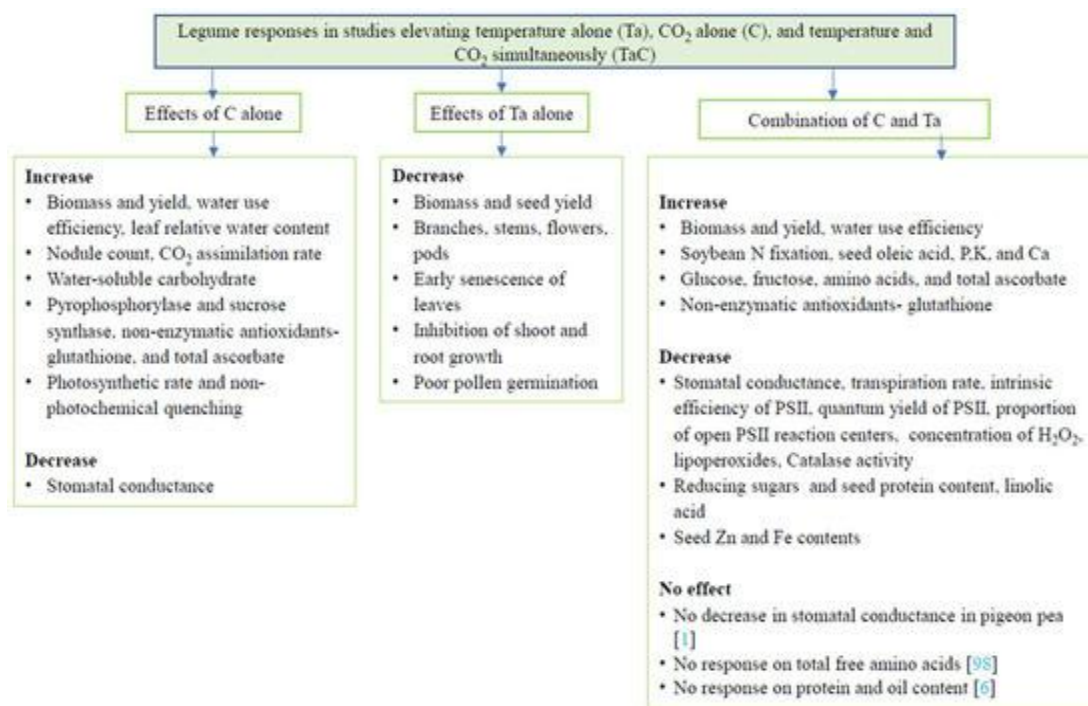
Năng suất hạt đậu tương phản ứng đáng kể với $[CO_2]$ và nhiệt độ tăng cao, dao động từ 10 – 95% [112,113] đến 101% [79]. Laza và cs [14] đã báo cáo sản lượng vỏ đậu phộng tăng 39% và sinh khối trên mặt đất tăng 58% khi được trồng trong điều kiện $[CO_2]$ làm giàu trong buồng thoát hơi nước và đồng hóa tán cây trên đồng ruộng (CETA) (Bảng 1). Tuy nhiên, Bagudam và cs [72] đã báo cáo năng suất hạt đậu phộng giảm 32% và 28% khi phản ứng với 550 và 700 ppm $[CO_2]$ tương ứng trong buồng hở (Bảng 1). Họ cũng báo cáo lượng dầu hạt giảm 6,54% và 2,98%; hàm lượng protein giảm 7,07% và 4,56%. Ji và cs [71] đã chứng minh rằng $[CO_2]$ tăng có tác động có lợi đến năng suất đậu xanh; tuy nhiên, khả năng quang hợp của cây bị ức chế đáng kể. Các giống đậu bò câu thể hiện hiệu quả sử dụng bức xạ (RUE) cao hơn 52,3% ở mức $[CO_2]$ tăng [70]. Ở giai đoạn phát triển quả, mức $[CO_2]$ tăng dẫn đến nồng độ nitơ (N) trong lá giảm 4,4 – 13,9%, lượng photpho (P) và kali (K) hấp thụ tăng lần lượt là 13,2% và 22,4% [99]. Các enzym như sucrose synthase, pyrophosphorylase và phosphoenolpyruvate carboxylase tăng đáng kể, dao động từ 33 – 50% [24]. Tuy nhiên, không có sự chênh lệch đáng kể nào được quan sát thấy trong hoạt động của các enzym như invertase kiềm và malate dehydrogenase. Phản ứng chung đối với $[CO_2]$ và nhiệt độ tăng cao ở cây họ đậu và tác động liên quan của nó đến các thuộc tính sinh trưởng và phát triển của cây được mô tả trong Hình 2.

Bảng 1. Ảnh hưởng của [CO₂] và nhiệt độ cao trong khí quyển đến năng suất và đặc tính quang hợp ở các loại cây trồng khác nhau.

Loài cây trồng	Phương pháp	[CO ₂]	Mức nhiệt độ và phản ứng	Phản ứng CO ₂ tăng lên năng suất	Phản ứng CO ₂ tăng lên quang hợp	Tham khảo
Đậu phộng (<i>Arachis hypogaea</i> L.)	Buồng thoát hơi nước và đồng hóa của tán cây	AC: 400 ppm, EC: 650 ppm	Không	Tăng năng suất quả lên 39% trong điều kiện thiếu nước.	Tăng hiệu quả Rubisco 41%, giảm 16% N trong lá.	[14]
Đậu phộng (<i>Arachis hypogaea</i> L.)	Phòng hờ trên (OTC)	AC: 380 ppm, EC: 550 ppm, EC: 700 ppm	Không	Giảm năng suất hạt 32% ở 550 ppm và 28% ở 700 ppm. Năng suất quả không bị ảnh hưởng.	-	[72]
Đậu phộng (<i>Arachis hypogaea</i> L.)	OTC	AC: 375 ppm, EC: 548 ppm, EC: 730 ppm	Không	Tăng số quả lên 16%.	Tăng quang hợp ròng lên 23%. Giảm độ dẫn khí khổng xuống 42%.	[68]
Đậu xanh (<i>Vigna radiata</i> L.)	Làm giàu CO ₂ trong không khí tự do (FACE)	AC: 400 ppm, EC: 550 ppm	Không	Tăng BM lên 34%, năng suất hạt lên 34-50%.	-	[28]
Đậu xanh (<i>Vigna radiata</i> L.)	FACE: điều kiện không khí mở	AC: 400 ppm EC: 550 ± 17 ppm	Không	Tăng BM lên 12%, năng suất hạt lên 14%.	Tăng quang hợp ròng 7-19%, hàm lượng Chl và tổng Chl tăng 11-12%	[71]
Đậu xanh (<i>Vigna radiata</i> L.)	Buồng tăng trưởng (Model ATC26, Winnipeg, MB).	AC: 400 ppm, EC: 700 ppm	Ngày/đêm: 6/22°C, 32/28°C,	Sinh khối thân và lá cao hơn, thoát hơi nước cao hơn.	-	[31]
Đậu xanh (<i>Vigna radiata</i> L.)	OTC	EC: 600 ± 50 ppm	Không	Phơi nhiễm [CO ₂] trong 0-20 ngày làm tăng trưởng chồi cao hơn 28-35%.	Giảm Chla 10% và 18% vào ngày thứ 15 và ngày thứ 35 sau khi nảy mầm.	[56]
Đậu xanh (<i>Vigna radiata</i> L.)	OTC	AC: Field experiment EC: 700 ppm	Không	Tăng số lượng và khối lượng hạt lên 34,6% và 25%.	Quá trình quang hợp tăng 25-29%, clorua tăng 30-39% và sản xuất carotenoid tăng 8-15%.	[98]
Đậu xanh (<i>Vigna radiata</i> L.)	FACE	AC: 411 ± 15 ppm EC: 550 ± 19 ppm	Không	Tăng BM quả lên 26%, năng suất hạt lên 26%, BM cây lên 17%.	-	[99]
Đậu Hà Lan (<i>Pisum sativum</i>)	FACE ngũ cốc Úc (AGFACE)	AC: 400 ppm, EC: 550 ppm	Không	Tăng 33% số nốt sần	Giảm độ dẫn khí khổng xuống 44% với hàm lượng axit amin thấp hơn.	[19]
Đậu Hà Lan (<i>Pisum sativum</i>)	OTC	AC: 360 ppm, EC: 700 ppm, EC: 1000 ppm	Không	Ở 1000 ppm sinh khối tăng 40% và leghemoglobin 38%.	Không phản ứng.	[24]

Loài cây trồng	Phương pháp	[CO ₂]	Mức nhiệt độ và phản ứng	Phản ứng CO ₂ tăng lên năng suất	Phản ứng CO ₂ tăng lên quang hợp	Tham khảo
Đậu răng ngựa (<i>Vicia faba</i> L.)	AGFACE	AC: 400 ppm, EC: 550 ppm	Không	Năng suất hạt tăng 58% đối với có tưới và 23% đối với hạn.	-	[16]
Đậu bò câu (<i>Cajanus cajan</i> L.)	OTC	AC: 380 ppm, EC: 580 ppm	Không	Tăng năng suất và quả lên 12% và 76% (kiểu gen Pusa-992). Giảm năng suất hạt xuống 33% (kiểu gen PS-2009).	-	[70]
Đậu dãi (<i>Vigna Unguiculata</i>)	Buồng tăng trưởng	AC: 370 ppm, EC: 550 ppm	ngày/đêm: 26/20°C, 29/23°C, 32/29°C	Tăng số lượng và khối lượng hạt 21% and 23%.	Giảm số lượng và trọng lượng quả xuống 23% và 24% ở nhiệt độ 32/29°C và 29/23°C.	[20]
Đậu tương (<i>Glycine max</i> (L.) Merr.)	Buồng Rhizotron	AC: 380 ppm, EC: 800 ppm	Không	Giảm số lá 14-23%, diện tích lá 10-12%. Tăng số quả 55%.	-	[62]
Đậu tương (<i>Glycine max</i> (L.) Merr.)	OTC	AC: 390 ± 30 ppm EC: 550 ± 30 ppm	Không	Giảm protein hạt 2-6% ở các kiểu gen khác nhau.	-	[6]
Đậu tương (<i>Glycine max</i> (L.) Merr.)	OTC	AC: 410 ppm, EC: 610 ppm	Không	Năng suất hạt tăng 101% ở giống có WUE cao và 65% ở giống có WUE thấp.	Tăng quang hợp tán cây lên 37% (kiểu gen WUE cao) và 76,3% (kiểu gen WUE thấp).	[79]
Đậu gà (<i>Cicer arietinum</i> L.)	Buồng làm giàu [CO ₂] trong Ozone không khí tự do (FAOCE)	AC: ambient. EC: 550 ± 25 ppm	Không	Tăng năng suất hạt lên 26-31%	Tăng tốc độ quang hợp rỗng lên 11-17%.	[57]
Đậu đen (<i>Vigna mungo</i>)	OTC	AC: 365 ppm, EC: 550 ppm and 700 ppm	Không	BM tăng 65% ở 700 ppm và 39% ở 550 ppm. HI tăng 39% ở 550 ppm và 40% ở 700 ppm.	-	[100]

Lưu ý: OTC: buồng mở; FACE: làm giàu không khí tự do [CO₂]; AC: môi trường xung quanh [CO₂]; EC: [CO₂] cao; HI: chỉ số thu hoạch; BM: sinh khối; Chl: diệp lục; WUE: hiệu quả sử dụng nước.



Hình 2. Phản ứng của [CO₂] và nhiệt độ cao trong cây họ đậu. [1,6,98].

3.4. Hàm lượng dinh dưỡng của hạt

Tác động của [CO₂] và nhiệt độ cao đối với hàm lượng dinh dưỡng của hạt trong cây họ đậu chưa được nghiên cứu sâu. Nhìn chung, các nghiên cứu được báo cáo cho thấy hàm lượng protein trong hạt giảm trong điều kiện [CO₂] cao, không giống như ngũ cốc, do mất cân bằng trong quá trình cố định N, dẫn đến nồng độ N thấp hơn [10,114]. Các nghiên cứu chỉ tiến hành trong điều kiện [CO₂] cao cũng cho thấy nồng độ N trong hạt giảm [6,19,71,115,116]. Sự giảm nồng độ N trong các cơ quan thực vật có thể là do sự tích tụ carbohydrate tăng lên không tương xứng với mức cố định N trong điều kiện [CO₂] cao [115,117]. Weigel và Manderscheid [118] phát hiện ra rằng sự suy giảm hàm lượng protein trong điều kiện [CO₂] cao không thể được giảm bớt bằng cách cung cấp thêm phân bón N.

Burkey và cs [68], Li và cs [6] báo cáo rằng [CO₂] tăng cao làm tăng đáng kể chất lượng dầu đậu tương bằng cách tăng axit oleic và giảm hàm lượng axit linoleic. Soba và cs [79] phát hiện thấy nồng độ canxi (Ca) và bo (B) giảm ở kiểu gen đậu tương sử dụng nhiều nước hiệu quả và nồng độ phot pho (P) và kẽm (Zn) giảm ở kiểu gen sử dụng ít nước hiệu quả. Kennedy [119] ghi nhận nồng độ sắt và kẽm giảm ở đậu tương và đậu Hà Lan, dẫn đến nồng độ axit amin tự do nói chung giảm đáng kể [6]. Hàm lượng sắt và mangan trong hạt đậu phộng không bị ảnh hưởng. Ngược lại, hàm lượng đồng giảm 13,93% và 26,19%, hàm lượng canxi giảm 24,33% và 8,20% ở mức [CO₂] tăng cao lần lượt là 550 và 700 ppm [72]. Mishra và Agrawal [98] đã báo cáo rằng hàm lượng protein hòa tan giảm 9,9% và hàm lượng đường giảm 8,9 – 9,4%. Người ta cũng quan sát thấy tăng hàm lượng đường hòa tan tổng số (9,3 – 15,1%) và hàm lượng tinh bột (15,5%). Do đó, tình trạng thiếu hụt chất dinh dưỡng trong chế độ ăn uống có thể trở nên rõ ràng hơn khi [CO₂] tăng cao trong tương lai. Nghiên cứu do Martel và Qaderi [120] thực hiện đã chứng minh rằng nhiệt độ tăng cao có tác động bất lợi đến chỉ số cân bằng nitơ (NBI) ở cây đậu Hà Lan (*Pisum sativum*).

3.5. Độ ẩm đất hoặc căng thẳng do hạn hán

[CO₂] tăng khi độ ẩm đất không bị giới hạn dẫn đến sự gia tăng đáng kể về số lượng quả (54,8 – 122,4%) và trọng lượng quả khô (29,8 – 56,6%) ở đậu tương [62]. Độ ẩm đất sẵn

có và sự thiếu hụt áp suất hơi thường ảnh hưởng đáng kể đến quá trình quang hợp và độ dẫn khí khổng ở thực vật được trồng trong điều kiện $[CO_2]$ tăng cao [14,73,121,122,123]. Sự gia tăng $[CO_2]$ làm tăng cường tình trạng nước của cây họ đậu bằng cách làm giảm độ dẫn khí khổng, giúp tăng WUE. Điều này giúp giảm thiểu tác động tiêu cực của căng thẳng hạn hán đối với sự phát triển của thực vật và các quá trình sinh lý khác [73,77,79,124,125,126]. Tuy nhiên, Saha và cs [70] đã báo cáo rằng độ ẩm đất tích lũy giảm 10,7% ở thực vật được trồng trong điều kiện $[CO_2]$ tăng. Điều này cho thấy rằng thực vật trong điều kiện $[CO_2]$ tăng tiêu thụ nhiều nước trong đất hơn để tăng tốc độ quang hợp. Nghiên cứu sâu hơn có thể làm sáng tỏ thêm mối quan hệ giữa diện tích lá, độ dẫn khí khổng và hiệu quả sử dụng cây trồng [73].

3.6. Sức khỏe đất

Hoạt động của vi sinh vật, tính đa dạng, sự phát triển, chu trình dinh dưỡng và các đặc tính vật lý của đất chịu tác động trực tiếp và gián tiếp bởi nhiệt độ và $[CO_2]$ tăng [126,127]. Nhiệt độ đất tăng kích thích hoạt động của vi sinh vật, làm tăng tốc độ phân hủy chất hữu cơ và giải phóng chất dinh dưỡng vào hệ thống đất và khí quyển. Ví dụ, tốc độ nitrat hóa đất tăng [36] và mất cacbon hữu cơ đất (SOC) cao hơn [37] ảnh hưởng tiêu cực đến các đặc tính sinh học, hóa học và vật lý của đất [38]. Sự tích tụ rỗng của chất hữu cơ trong đất ảnh hưởng tích cực đến các đặc tính vật lý của đất thông qua quá trình kết tụ các hạt đất, quá trình mà cấu trúc đất phát triển [128,129]. Khi tàn suất các kịch bản hạn hán và lũ lụt cực đoan tăng lên do biến đổi khí hậu, các quá trình nitrat hóa và khử nitrat sẽ trở nên quan trọng, vì lũ lụt tạo ra các điều kiện kỵ khí có lợi cho quá trình khử nitrat, mất N vào khí quyển [36,130,131]. Nhìn chung, sự phát triển của cây trồng tăng cường và sự tiết dịch của rễ thường dẫn đến lượng cacbon hữu cơ trong đất lớn hơn khi mức $[CO_2]$ trong khí quyển cao hơn [132]. Lượng cacbon bổ sung này có thể kích thích hoạt động của vi sinh vật bằng cách mở rộng chất nền có sẵn để phân hủy. Tương tự như vậy, nhiệt độ tăng ảnh hưởng trực tiếp đến hoạt động của vi sinh vật trong đất, thường làm tăng tốc độ phân hủy và chu trình dinh dưỡng. Những cải thiện do nhiệt độ gây ra trong quá trình trao đổi chất của vi sinh vật dẫn đến quá trình phân hủy chất hữu cơ nhanh hơn và khoáng hóa chất dinh dưỡng tốt hơn [133]. Ngoài việc tăng cường hô hấp đất và tăng cường khả năng cung cấp chất dinh dưỡng cho cây trồng, điều này có thể khiến đất giải phóng nhiều CO_2 hơn vào khí quyển. Ví dụ, sự phân hủy tăng lên có thể dẫn đến sự gia tăng khả năng cung cấp chất dinh dưỡng; nhưng nếu độ ẩm đất không đủ hoặc nếu nhiệt độ khắc nghiệt ảnh hưởng tiêu cực đến quần thể vi sinh vật, thì sự hấp thụ chất dinh dưỡng có thể bị hạn chế [134]. Các nghiên cứu về việc hiểu tác động trực tiếp của $[CO_2]$ và nhiệt độ cao lên tương tác đất-thực vật-hệ vi sinh vật và các quá trình vật lý, hóa học và sinh học khác của đất ở cây họ đậu vẫn còn thiếu trong tài liệu.

3.7. Côn trùng gây hại cây họ đậu

Tương tác giữa côn trùng ăn cỏ với cây chủ của chúng có thể bị ảnh hưởng bởi mức $[CO_2]$ cao [135,136]. Loài côn trùng *Spodoptera litura* biểu hiện tốc độ ăn tăng lên trên lá đậu xanh do hàm lượng dinh dưỡng thấp trong điều kiện $[CO_2]$ cao [137]. Tương tự như vậy, nhiệt độ và $[CO_2]$ tăng ảnh hưởng đáng kể đến hành vi gây hại của loài cánh vảy [138,139]. Tuy nhiên, những tác động như vậy đối với sự phát triển của côn trùng là đặc trưng cho từng loài. Với $[CO_2]$ tăng cao, các axit amin hòa tan và protein trong cây họ đậu *Phaseolus vulgaris* và cây họ đậu khác tăng lên, điều này cũng cải thiện sinh lý của bọ trĩ và rệp trong giai đoạn ấu trùng của chúng [140,141]. Kích thước quần thể rệp trên cây đậu tương tăng đáng kể ở mức 550 ppm $[CO_2]$, dẫn đến mất năng suất đáng kể [142]. Tỷ lệ ký sinh của *Aphidius avenae* giảm trong điều kiện $[CO_2]$ tăng cao, làm suy

yếu khả năng sản xuất ký sinh trùng của chúng [143]. Vì côn trùng là sinh vật máu lạnh, nhiệt độ cao ảnh hưởng sâu sắc đến hành vi, tuổi thọ và khả năng sinh sản của côn trùng. Tỷ lệ mắc bệnh *Helicoverpa armigera* và *Maruca vitrata* ở đậu bồ câu tăng theo nhiệt độ tăng [144]. Tỷ lệ ăn lá đậu phộng của *Spodoptera litura* tăng theo nhiệt độ và $[CO_2]$ tăng [145]. Ở nhiệt độ cao hơn, *Popillia japonica* (bọ cánh cứng Nhật Bản) gây ra thiệt hại nghiêm trọng cho lá đậu tương [146]. Tóm lại, nguy cơ sâu bệnh xâm lấn tấn công cây họ đậu tăng cao được dự đoán ở nhiệt độ và $[CO_2]$ cao.

Để thụ phấn hiệu quả, các cây họ đậu như đậu xanh, đậu Hà Lan và đậu lăng thường phụ thuộc vào các loài thụ phấn. Các loài thụ phấn giúp thụ tinh và hình thành hạt bằng cách di chuyển phấn hoa từ hoa này sang hoa khác. Hiệu quả thụ phấn giảm có thể là do sự sụt giảm quần thể thụ phấn. Ở các loại cây trồng như đậu tương và đậu gà, sự sụt giảm quần thể thụ phấn có thể dẫn đến giảm tổng năng suất và ít hạt hơn trên mỗi quả [147]. Đảm bảo sản phẩm nông nghiệp cao và tối ưu hóa hạt giống phụ thuộc rất nhiều vào hiệu quả thụ phấn. Bằng cách khuyến khích lai tạo, giúp mở rộng nguồn gen của cây họ đậu, các loài thụ phấn hỗ trợ sự đa dạng di truyền. Các loài thực vật có sự đa dạng di truyền lớn hơn có nhiều khả năng chịu được các thách thức về môi trường, bệnh tật và sâu bệnh [148]. Tương tự như vậy, nhiệt độ và $[CO_2]$ cao có khả năng ảnh hưởng đến hành vi của các loài thụ phấn ở cây họ đậu. Các chuyến thăm của ong mật đến hoa tăng lên ở nhiệt độ và $[CO_2]$ cao, dẫn đến thụ phấn đồng ruộng cao hơn [149]. Căng thẳng nhiệt từ nhiệt độ không khí tăng cao cũng có thể ảnh hưởng đáng kể đến sự tương tác giữa các loài thụ phấn và cây họ đậu. Otieno và cs [149] quan sát thấy sự gia tăng đáng kể về tỷ lệ thụ phấn ở *Vicia faba* trong điều kiện nhiệt độ và $[CO_2]$ cao. Cần nghiên cứu thêm để hiểu cách $[CO_2]$ và nhiệt độ cao ảnh hưởng đến mối quan hệ cộng sinh của côn trùng gây hại ở cây họ đậu.

4. Khoảng cách trong nghiên cứu hiện tại

Sự không nhất quán trong phản ứng vật lý đã được quan sát thấy ở cây họ đậu C3. Ví dụ, một số nghiên cứu báo cáo rằng quá trình ra hoa và phát triển quả được đẩy nhanh ở cây họ đậu trong điều kiện CO_2 tăng cao (ví dụ: đậu gà), trong khi những nghiên cứu khác lại thấy tác động không đáng kể hoặc thậm chí là chậm trễ (ví dụ: đậu răng ngựa, đậu đen). Có một khoảng cách đáng kể trong quá trình quang hợp giữa các nghiên cứu về môi trường được kiểm soát và điều kiện thực tế ngoài đồng ruộng. Tương tự như vậy, nghiên cứu cho thấy tác động khác nhau của $[CO_2]$ tăng cao đối với sức sống của hạt, quá trình nảy mầm, năng suất và chất lượng cây trồng. Kết quả không nhất quán cho thấy thiếu hiểu biết về phản ứng của các kiểu gen và loài cây họ đậu khác nhau đối với $[CO_2]$ tăng ở các giai đoạn sinh trưởng khác nhau. Tuy nhiên, phản ứng của cây họ đậu đối với $[CO_2]$ tăng trong môi trường được kiểm soát có thể không hoàn toàn chuyển thành các điều kiện đồng ruộng có liên quan đến các yếu tố bổ sung (như loại đất, áp lực côn trùng và sâu bệnh). Đồng thời, người ta biết ít hơn về tác động kết hợp của $[CO_2]$ và nhiệt độ tăng lên đối với cộng đồng vi sinh vật đất và chức năng của chúng trong chu trình dinh dưỡng, năng suất và chất lượng cây họ đậu. Cần nghiên cứu dài hạn để đánh giá tác động của $[CO_2]$ và nhiệt độ cao liên tục đối với độ phì nhiêu và sức khỏe của đất theo thời gian.

5. KẾT LUẬN

Các tài liệu được xem xét nhìn chung cho thấy tác động tiêu cực của nhiệt độ tăng do khí nhà kính trong khí quyển tăng cao đối với năng suất nông nghiệp trên toàn thế giới. Tuy nhiên, trong khi tác động của việc bón phân do $[CO_2]$ tăng lên đối với sự phát triển của cây trồng là rõ ràng, thì tác động kết hợp của nhiệt độ và $[CO_2]$ tăng lên đối với cây họ

đậu lại ít được nghiên cứu hơn. Chỉ riêng trong điều kiện [CO₂] cao, hai cơ chế bị ảnh hưởng là tốc độ quang hợp (tăng) và độ dẫn khí khổng (giảm), giúp tăng năng suất cây họ đậu và hiệu quả sử dụng nước. Chỉ có một số ít nghiên cứu tập trung vào việc điều tra tình trạng dinh dưỡng của cây họ đậu trong điều kiện [CO₂] và nhiệt độ cao. Các đặc tính dinh dưỡng của hạt như protein, Zn và Ca giảm đáng kể trong điều kiện [CO₂] cao. Nhiệt độ đất tăng làm tăng hoạt động của vi sinh vật, dẫn đến quá trình phân hủy chất hữu cơ và giải phóng chất dinh dưỡng vào hệ thống đất nhanh hơn trong khi làm thay đổi tiêu cực các đặc tính sinh học, hóa học và vật lý của đất. Tuy nhiên, có ít bằng chứng hơn về các chỉ số sức khỏe đất trong điều kiện [CO₂] cao. [CO₂] và nhiệt độ tăng ảnh hưởng đáng kể đến sự sống còn của động vật ăn cỏ và quần thể thiên địch ở cây họ đậu. Việc hiểu được sinh học gây hại và tương tác ở cấp dinh dưỡng trong điều kiện khí hậu thay đổi là điều cần thiết để phát triển các chiến lược quản lý dịch hại tổng hợp chống lại các loài gây hại chính ở cây họ đậu. Cần có kiểu gen lai tạo phù hợp với [CO₂] và nhiệt độ cao để thích nghi. Cần có thêm các nghiên cứu về sự sinh trưởng và phát triển của các loại cây họ đậu chịu tác động kết hợp của [CO₂] và nhiệt độ tăng cao trong các kịch bản cung cấp nước và chất dinh dưỡng khác nhau để thích ứng với sự thay đổi của khí hậu và giảm thiểu tác động đến sản xuất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Sreeharsha, R.V.; Mudalkar, S.; Sengupta, D.; Unnikrishnan, D.K.; Reddy, A.R. Mitigation of drought-induced oxidative damage by enhanced carbon assimilation and an efficient antioxidative metabolism under high [CO₂] environment in pigeon pea (*Cajanus cajan* L.). *Photosynth. Res.* **2019**, *139*, 425–439. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
2. IPCC 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Lee, H., Romero, J., Eds.; IPCC: Geneva, Switzerland, 2023; p. 184. [[Google Scholar](#)]
3. NOAA 2024. National Oceanic and Atmospheric Administration. Carbon Dioxide Now More Than 50% Higher Than Pre-Industrial Levels 2024. Available online: www.noaa.gov (accessed on 15 March 2024).
4. Iizumi, T.; Shiogama, H.; Imada, Y.; Hanasaki, N.; Takikawa, H.; Nishimori, M. Crop production losses associated with anthropogenic climate change for 1981–2010 compared with preindustrial levels. *Int. J. Climatol.* **2018**, *38*, 5405–5417. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
5. Karavolias, N.G.; Horner, W.; Abugu, M.N.; Evanega, S.N. Application of gene editing for climate change in agriculture. *Front. Sust. Food Syst.* **2021**, *5*, 685801. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
6. Li, Y.; Yu, Z.; Jin, J.; Zhang, Q.; Wang, G.; Liu, C.; Wu, J.; Wang, C.; Liu, X. Impact of elevated [CO₂] on seed quality of soybean at the fresh edible and mature stages. *Front. Plant Sci.* **2018**, *9*, 1413. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
7. Wang, D.; Heckathorn, S.A.; Wang, X.; Philpott, S.M. A meta-analysis of plant physiological and growth responses to temperature and elevated [CO₂]. *Oecologia* **2012**, *169*, 1–3. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

8. Vaidya, S.; Vanaja, M.; Sathish, P.; Anitha, Y.; Jyothi, L.N. Impact of elevated [CO₂] on growth and physiological parameters of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) genotypes. *J. Plant Physiol. Pathol.* **2014**, *3*, 1. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
9. van der Kooi, C.J.; Reich, M.; Löw, M.; De Kok, L.J.; Tausz, M. Growth and yield stimulation under elevated [CO₂] and drought: A meta-analysis on crops. *Environ. Exp. Bot.* **2016**, *122*, 150–157. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
10. Myers, S.S.; Zanobetti, A.; Kloog, I.; Huybers, P.; Leakey, A.D.B.; Bloom, A.J.; Carlisle, E.; Dietterich, L.H.; Fitzgerald, G.; Hasegawa, T.; et al. Increasing CO₂ threatens human nutrition. *Nature* **2014**, *510*, 139–142. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
11. Ainsworth, E.A.; Davey, P.A.; Bernacchi, C.J.; Dermody, O.C.; Heaton, E.A.; Moore, D.J.; Morgan, P.B.; Naidu, S.L.; Yoora, H.S.; Zhu, X.G.; et al. A meta-analysis of elevated [CO₂] effects on soybean (*Glycine max*) physiology, growth and yield. *Glob. Chang. Biol.* **2002**, *8*, 695–709. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
12. FAO 1990. *Food & Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Global Map of Aridity. Spatial Resolution of 10 Arc Minutes and Temporal Resolution of 1961–1990*; Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): Rome, Italy, 2009. Available online: <https://data.apps.fao.org/map/catalog/static/api/records/221072ae-2090-48a1-be6f-5a88f061431a> (accessed on 28 February 2024).
13. Qader, S.H.; Dash, J.; Alegana, V.A.; Khwarahm, N.R.; Tatem, A.J.; Atkinson, P.M. The role of earth observation in achieving sustainable agricultural production in arid and semi-arid regions of the world. *Remote Sens.* **2021**, *13*, 3382. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
14. Laza, H.E.; Baker, J.T.; Yates, C.; Mahan, J.R.; Burow, M.D.; Puppala, N.; Gitz, D.C.; Emendack, Y.Y.; Layland, N.; Ritchie, G.L.; et al. Effect of elevated CO₂ on peanut performance in a semi-arid production region. *Agric. For. Meteorol.* **2021**, *308–309*, 108599. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
15. Pang, J.; Turner, N.C.; Du, Y.L.; Colmer, T.D.; Siddique, K.H.M. Pattern of water use and seed yield under terminal drought in chickpea genotypes. *Front. Plant Sci.* **2017**, *8*, 1375. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
16. Parvin, S.; Uddin, S.; Tausz-Posch, S.; Fitzgerald, G.J.; Armstrong, R.; Tausz, M. Elevated [CO₂] improves yield and N₂ fixation but not grain N concentration of faba bean (*Vicia faba* L.) subjected to terminal drought. *Environ. Exp. Bot.* **2019**, *165*, 161–173. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
17. Ainsworth, E.A.; Leakey, A.D.B.; Ort, D.R.; Long, S.P. FACE-ing the facts: Inconsistencies and interdependence among field, chamber and modeling studies of elevated [CO₂] impacts on crop yield and food supply. *New Phytol.* **2008**, *179*, 5–9. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
18. Ratnakumar, P.; Vadez, V. Groundnut (*Arachis hypogaea*) genotypes tolerant to intermittent drought maintain a high harvest index and have small leaf canopy under stress. *Funct. Plant Biol.* **2011**, *38*, 1016–1023. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
19. Parvin, S.; Uddin, S.; Fitzgerald, G.J.; Tausz-Posch, S.; Armstrong, R.; Tausz, M. Free air [CO₂] enrichment (FACE) improves water use efficiency and moderates

- drought effect on N₂ fixation of *Pisum sativum* L. *Plant Soil* **2019**, *436*, 587–606. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
20. Angelotti, F.; Barbosa, L.G.; Barros, J.R.A.; dos Santos, C.A.F. Cowpea development under different temperatures and carbon dioxide concentrations. *Pesqui. Agropecu. Trop.* **2020**, *50*, e59377. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 21. Rana, D.S.; Dass, A.; Rajanna, G.A.; Kaur, R. Biotic and abiotic stress management in pulses. *Indian J. Agron.* **2016**, *61*, 238–248. [[Google Scholar](#)]
 22. Meena, H.N.; Ajay, B.C.; Rajanna, G.A.; Yadav, R.S.; Jain, N.K.; Meena, M.S. Polythene mulch and potassium application enhances peanut productivity and biochemical traits under sustained salinity stress condition. *Agric. Water Manag.* **2022**, *273*, 107903. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 23. Rajanna, G.A.; Dhindwal, A.S.; Sriharsha, V.P. Performance of clusterbean (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) under variable irrigation schedules and crop-establishment techniques. *Indian J. Agron.* **2016**, *61*, 223–230. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 24. Cabrerizo, P.M.; González, E.M.; Aparicio-Tejo, P.M.; Arrese-Igor, C. Continuous CO₂ enrichment leads to increased nodule biomass, carbon availability to nodules and activity of carbon-metabolizing enzymes but does not enhance specific nitrogen fixation in pea. *Physiol. Plant.* **2001**, *113*, 33–40. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 25. Ross, D.J.; Newton, P.C.D.; Tate, K.R. Elevated [CO₂] effects on herbage production and soil carbon and nitrogen pools and mineralization in a species-rich, grazed pasture on a seasonally dry sand. *Plant Soil* **2004**, *260*, 183–196. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 26. Gamper, H.; Hartwig, U.A.; Leuchtmann, A. Mycorrhizas improve nitrogen nutrition of *Trifolium repens* after 8 yr of selection under elevated atmospheric [CO₂] partial pressure. *New Phytol.* **2005**, *167*, 531–554. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 27. Rogers, A.; Ainsworth, E.A.; Leakey, A.D.B. Will elevated carbon dioxide concentration amplify the benefits of nitrogen fixation in legumes? *Plant Physiol.* **2009**, *151*, 1009–1016. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 28. Dey, S.K.; Chakrabarti, B.; Prasanna, R.; Mittal, R.; Singh, S.D.; Pathak, H. Growth and biomass partitioning in mungbean with elevated carbon dioxide, phosphorus levels and cyanobacteria inoculation. *J. Agrometeorol.* **2016**, *18*, 7–12. [[Google Scholar](#)]
 29. Hao, X.Y.; Han, X.; Lam, S.K.; Wheeler, T.; Ju, H.; Wang, H.R.; Li, Y.C.; Lin, E.D. Effects of fully open-air [CO₂] elevation on leaf ultrastructure, photosynthesis, and yield of two soybean cultivars. *Photosynthetica* **2012**, *50*, 362–370. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 30. Thompson, M.; Gamage, D.; Hirotsu, N.; Martin, A.; Seneweera, S. Effects of elevated carbon dioxide on photosynthesis and carbon partitioning: A perspective on root sugar sensing and hormonal crosstalk. *Front. Phys.* **2017**, *8*, 578. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

31. Reardon, M.E.; Qaderi, M.M. Individual and interactive effects of temperature, carbon dioxide and abscisic acid on mung bean (*Vigna radiata*) plants. *J. Plant Interact.* **2017**, *12*, 295–303. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
32. Singh, R.N.; Mukherjee, J.; Sehgal, V.K.; Bhatia, A. Effect of elevated ozone, carbon dioxide and their interaction on growth, biomass and water use efficiency of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *J. Agrometeorol.* **2017**, *19*, 301–305. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
33. Needelman, B.A. What are soils. *Natl. Educ. Knowl.* **2013**, *4*, 2. [[Google Scholar](#)]
34. Gopinath, K.A.; Rajanna, G.A.; Venkatesh, G.; Jayalakshmi, M.; Kumari, V.V.; Prabhakar, M.; Rajkumar, B.; Chary, G.R.; Singh, V.K. Influence of crops and different production systems on soil carbon fractions and carbon sequestration in rainfed areas of Semiarid Tropics in India. *Sustainability* **2022**, *14*, 4207. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
35. Rajanna, G.A.; Suman, A.; Venkatesh, P. Mitigating Drought Stress Effects in Arid and Semi-Arid Agro-Ecosystems through Bioirrigation Strategies—A Review. *Sustainability* **2023**, *15*, 3542. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
36. Dai, Z.; Yu, M.; Chen, H.; Zhao, H.; Huang, Y.; Su, W.; Xia, F.; Chang, S.X.; Brookes, P.C.; Dahlgren, R.A.; et al. Elevated temperature shifts soil N cycling from microbial immobilization to enhanced mineralization, nitrification and denitrification across global terrestrial ecosystems. *Glob. Chang. Biol.* **2020**, *26*, 5267–5276. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
37. García-Palacios, P.; Crowther, T.W.; Dacal, M.; Hartley, I.P.; Reinsch, S.; Rinnan, R.; Rousk, J.; van den Hoogen, J.; Ye, J.S.; Bradford, M.A. Evidence for large microbial-mediated losses of soil carbon under anthropogenic warming. *Nat. Rev. Earth Environ.* **2021**, *2*, 507–517. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
38. Page, K.L.; Dang, Y.P.; Dalal, R.C. The ability of conservation agriculture to conserve soil organic carbon and the subsequent impact on soil physical, chemical, and biological properties and yield. *Front. Sustain. Food Syst.* **2020**, *4*, 31. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
39. Ayyogari, K.; Sidhya, P.; Pandit, M.K. Impact of climate change on vegetable cultivation-a review. *Int. J. Agric. Environ. Biotechnol.* **2014**, *7*, 145–155. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
40. Lawrence, D.M.; Oleson, K.W.; Flanner, M.G.; Thornton, P.E.; Swenson, S.C.; Lawrence, P.J.; Zeng, X.; Yang, Z.L.; Levis, S.; Sakaguchi, K.; et al. Parameterization improvements and functional and structural advances in version 4 of the Community Land Model. *J. Adv. Model. Earth Syst.* **2011**, *3*, 27. [[Google Scholar](#)]
41. Purcell, C.; Batke, S.P.; Yiotis, C.; Caballero, R.; Soh, W.K.; Murray, M.; McElwain, J.C. Increasing stomatal conductance in response to rising atmospheric [CO₂]. *Ann. Bot.* **2018**, *121*, 1137–1149. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
42. Thomas, J.M.G.; Prasad, P.V.V.; Boote, K.J.; Allen, L.H. Seed composition, seedling emergence and early seedling vigour of red kidney bean seed produced at elevated temperature and carbon dioxide. *J. Agron. Crop Sci.* **2009**, *195*, 148–156. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

43. Marty, C.; Bassirirad, H. Seed germination and rising atmospheric [CO₂] concentration: A meta-analysis of parental and direct effects. *New Phytol.* **2014**, *202*, 401–414. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
44. Sewelam, N.; Kazan, K.; Schenk, P.M. Global Plant Stress Signaling: Reactive Oxygen Species at the Cross-Road. *Front. Plant Sci.* **2016**, *7*, 187. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
45. Murata, N.; Takahashi, S.; Nishiyama, Y.; Allakhverdiev, S.I. Photoinhibition of photosystem II under environmental stress. *Biochim. Biophys. Acta* **2007**, *1767*, 414–421. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
46. Dannehl, H.; Wietoska, H.; Heckmann, H.; Godde, D. Changes in D1-protein turnover and recovery of photosystem II activity precede accumulation of chlorophyll in plants after release from mineral stress. *Planta* **1996**, *199*, 34–42. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
47. Al-Wahaibi, M.H. Plant heat-shock proteins: A mini review. *J. King Saud Uni. Sci.* **2011**, *23*, 139–150. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
48. Jomova, K.; Alomar, S.Y.; Alwasel, S.H.; Nepovimova, E.; Kuca, K.; Valko, M. Several lines of antioxidant defense against oxidative stress: Antioxidant enzymes, nanomaterials with multiple enzyme-mimicking activities, and low-molecular-weight antioxidants. *Arch. Toxicol.* **2024**, *8*, 1323–1367. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
49. Dumanovic, J.; Nepovimova, E.; Natic, M.; Kuča, K.; Jačević, V. The Significance of Reactive Oxygen Species and Antioxidant Defense System in Plants: A Concise Overview. *Front. Plant Sci.* **2021**, *11*, 552969. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
50. Ul-Haq, S.; Khan, A.; Ali, M.; Khattak, A.M.; Gai, W.X.; Zhang, H.X.; Wei, A.M.; Gong, Z.H. Heat Shock Proteins: Dynamic Biomolecules to Counter Plant Biotic and Abiotic Stresses. *Int. J. Mol. Sci.* **2019**, *20*, 5321. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
51. Mondal, S.; Karmakar, S.; Panda, D.; Pramanik, K.; Bose, B.; Singhal, R.K. Crucial plant processes under heat stress and tolerance through heat shock proteins. *Plant Stress* **2023**, *10*, 100227. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
52. Trovato, M.; Mattioli, R.; Costantino, P. Multiple roles of proline in plant stress tolerance and development. *Rend. Lincei* **2008**, *19*, 325–346. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
53. Hayat, S.; Hayat, Q.; Alyemeni, M.N.; Wani, A.S.; Pichtel, J.; Ahmad, A. Role of proline under changing environments: A review. *Plant Signal. Behav.* **2012**, *7*, 1456–1466. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
54. Ghosh, U.K.; Islam, M.N.; Siddiqui, M.N.; Khan, M.A.R. Understanding the roles of osmolytes for acclimatizing plants to changing environment: A review of potential mechanism. *Plant Signal. Behav.* **2021**, *16*, 1913306. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
55. Srivastava, A.C.; Pal, M.; Das, M.; Sengupta, U.K. Growth, [CO₂] exchange rate and dry matter partitioning in mungbean (*Vigna radiata* L.) grown under elevated [CO₂]. *Indian J. Exp. Biol.* **2001**, *39*, 572–577. [[Google Scholar](#)] [[PubMed](#)]

56. Das, M.; Zaidi, P.H.; Pal, M.; Sengupta, U.K. Stage sensitivity of mungbean (*Vigna radiata* L. Wilczek) to an elevated level of carbon dioxide. *J. Agron. Crop Sci.* **2002**, *188*, 219–224. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
57. Bhatia, A.; Mina, U.; Kumar, V.; Tomer, R.; Kumar, A.; Chakrabarti, B.; Singh, R.N.; Singh, B. Effect of elevated ozone and carbon dioxide interaction on growth, yield, nutrient content and wilt disease severity in chickpea grown in Northern India. *Heliyon* **2021**, *7*, e06049. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
58. Prasad, P.V.V.; Boote, K.J.; Allen, L.H.; Thomas, J.M.G. Effects of elevated temperature and carbon dioxide on seed-set and yield of kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Glob. Chang. Biol.* **2002**, *8*, 710–721. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
59. Ahmed, F.E.; Hall, A.E.; Madore, M.A. Interactive effects of high-temperature and elevated carbon dioxide concentration on cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp]. *Plant Cell Environ.* **1993**, *16*, 835–842. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
60. Ellis, R.H.; Craufurd, P.Q.; Summerfield, R.J.; Roberts, E.H. Linear relations between carbon dioxide concentration and rate of development towards flowering in sorghum, cowpea and soybean. *Ann. Bot.* **1995**, *75*, 193–198. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
61. Earl, H.J. Stomatal and non-stomatal restrictions to carbon assimilation in soybean (*Glycine max*) lines differing in water use efficiency. *Environ. Exp. Bot.* **2002**, *48*, 237–246. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
62. Madhu, M.; Hatfield, J. Elevated carbon dioxide and soil moisture on early growth response of soybean. *Agric. Sci.* **2015**, *6*, 263–278. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
63. Junior, C.E.G.; Medeiros, J.F.; Sobrinho, E.J.; Figueiredo, V.B.; Costa, J.P.N.; Santos, W.O. Development and water requirements of cowpea under climate change conditions in the Brazilian semi-arid region. *Rev. Bras. Deengenharia Agríc. E Ambient.* **2016**, *20*, 783–788. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
64. Booker, F.L.; Burkey, K.O.; Pursley, W.A.; Heagle, A.S. Elevated carbon dioxide and ozone effects on peanut: I. gas-exchange, biomass, and leaf chemistry. *Crop Sci.* **2007**, *47*, 1475–1487. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
65. Leakey, A.D.; Ainsworth, E.A.; Bernacchi, C.J.; Rogers, A.; Long, S.P.; Ort, D.R. Elevated [CO₂] effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: Six important lessons from FACE. *J. Exp. Bot.* **2009**, *60*, 2859–2876. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
66. Erb, T.J.; Zarzycki, J. A short history of RubisCO: The rise and fall (?) of Nature's predominant CO₂ fixing enzyme. *Curr. Opin. Biotechnol.* **2018**, *49*, 100–107. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
67. Percy, R.W.; Bjorkman, O. Physiological effects. In *Carbon Dioxide and Plants: The Response of Plants to Rising Levels of Atmospheric Carbon Dioxide*; Lemon, E.R., Ed.; Westview Press: Boulder, CO, USA, 1983; pp. 65–105. [[Google Scholar](#)]
68. Burkey, K.O.; Booker, F.L.; Pursley, W.A.; Heagle, A.S. Elevated carbon dioxide and ozone effects on peanut: II. seed yield and quality. *Crop Sci.* **2007**, *47*, 1488–1497. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

69. Singh, S.K.; Kakani, V.G.; Surabhi, G.K.; Reddy, K.R. Cowpea (*Vigna unguiculata* [L.] Walp.) genotypes response to multiple abiotic stresses. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* **2010**, *100*, 135–146. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
70. Saha, S.; Sehgal, V.K.; Nagarajana, S.; Pal, M. Impact of elevated atmospheric CO₂ on radiation utilization and related plant biophysical properties in pigeon pea (*Cajanus cajan* L.). *Agric. For. Meteorol.* **2012**, *158–159*, 63–70. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
71. Cao, J.; Han, X.; Seneweera, S.; Li, P.; Zong, Y.-Z.; Dong, Q.; Lin, E.D.; Hao, X.-Y. Leaf photosynthesis and yield components of mung bean under fully open-air elevated [CO₂]. *J. Integr. Agric.* **2015**, *14*, 977–983. [[Google Scholar](#)]
72. Bagudam, R.; Kancherla, E.; Abady, S.; Wankhade, A.P.; Deshmukh, D.B.; Vemula, A.; Kadirimangalam, S.R.; Kumar, S.S.; Reddy, S.N.; Pasupuleti, J. Influence of elevated [CO₂] on growth, yield, haulm, and kernel quality of groundnut (*Arachis hypogaea* L.). *Acta Physiol. Plant.* **2023**, *45*, 67. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
73. Xu, Z.; Jiang, Y.; Jia, B.; Zhou, G. Elevated-CO₂ response of stomata and its dependence on environmental factors. *Front. Plant Sci.* **2016**, *7*, 657. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
74. Blaceburn, G.A. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: A test using senescent tree leaves. *Remote Sens. Environ.* **1998**, *19*, 657–675. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
75. McLeod, A.R.; Long, S.P. Free-air carbon dioxide enrichment (FACE) in global change research: A review. *Adv. Ecol. Res.* **1999**, *28*, 1–56. [[Google Scholar](#)]
76. Long, S.P.; Ainsworth, E.A.; Rogers, A.; Ort, D.R. Rising atmospheric carbon dioxide: Plants FACE the future. *Ann. Rev. Plant Biol.* **2004**, *55*, 591–628. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
77. Ainsworth, E.A.; Rogers, A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: Mechanisms and environmental interactions. *Plant Cell Environ.* **2007**, *30*, 258–270. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
78. Bernacchi, C.; Kimball, B.; Quarles, D.; Long, S.; Ort, D. Decreases in stomatal conductance of soybean under open-air elevation of [CO₂] are closely coupled with decreases in ecosystem evapotranspiration. *Plant Physiol.* **2007**, *143*, 134–144. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
79. Soba, D.; Shub, T.; Runionc, G.B.; Priorc, S.A.; Fritschid, F.B.; Aranjueloa, I.; Sanz-Saezb, A. Effects of elevated [CO₂] on photosynthesis and seed yield parameters in two soybean genotypes with contrasting water use efficiency. *Environ. Exp. Bot.* **2020**, *178*, 104154. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
80. Li, Q.M.; Liu, B.B.; Wu, Y.; Zou, Z.R. Interactive effects of drought stresses and elevated [CO₂] concentration on photochemistry efficiency of cucumber seedlings. *J. Integr. Plant Biol.* **2008**, *50*, 1307–1317. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
81. Qaderi, M.M.; Reid, D.M. Crop responses to elevated carbon dioxide and temperature. In *Climate Change and Crops*; Singh, S.N., Ed.; Springer: Berlin, Germany, 2009; pp. 1–18. [[Google Scholar](#)]

82. Ralston, L.; Subramanian, S.; Matsuno, M.; Yu, O. Partial reconstruction of flavonoid and isoflavonoid biosynthesis in yeast using soybean type I and type II chalcone isomerases. *Plant Physiol.* **2005**, *137*, 1375–1388. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
83. Kretzschmar, F.D.S.; MarinhoAidar, M.P.; Salgado, I.; Braga, M.R. Elevated [CO₂] atmosphere enhances production of defense-related flavonoids in soybean elicited by NO and a fungal elicitor. *Environ. Exp. Bot.* **2009**, *65*, 319–329. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
84. O'Neill, B.F.; Zangerl, A.R.; Dermody, O.; Bilgin, D.D.; Casteel, C.L.; Zavala, J.A.; Berenbaum, M.R. Impact of elevated levels of atmospheric [CO₂] and herbivory on flavonoids of soybean (*Glycine max* L.). *J. Chem. Ecol.* **2010**, *36*, 35–45. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
85. Warren, J.M.; Norby, R.J.; Wullschleger, S.D. Elevated CO₂ enhances leaf senescence during extreme drought in a temperate forest. *Tree Physiol.* **2011**, *31*, 117–130. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
86. Bukhov, N.G.; Mohanty, P. Elevated temperature stress effects on photosystems: Characterization and evaluation of the nature of heat induced impairments. In *Concepts in Photobiology: Photosynthesis and Photomorphogenesis*; Singal, G.S., Renger, G., Sopory, S.K., Irrgang, K.D., Govindjee, Eds.; Narosa Publishing House: New Delhi, India, 1999; pp. 617–648. [[Google Scholar](#)]
87. Mohanty, P.; Kreslavski, V.D.; Klimov, V.V.; Los, D.A.; Mimuro, M.; Carpentier, R.; Allakhverdiev, S.I. Heat stress: Susceptibility, recovery and regulation. In *Photosynthesis: Plastid Biology, Energy Conversion and Carbon Assimilation, Advances in Photosynthesis and Respiration 34*; Eaton-Rye, J.J., Tripathy, B.C., Sharkey, T.D., Eds.; Springer Science+Business Media B.V.: Berlin/Heidelberg, Germany, 2012; pp. 251–274. [[Google Scholar](#)]
88. Morales, F.; Ancín, M.; Fakhret, D.; González-Torralba, J.; Gámez, A.L.; Seminario, A.; Soba, D.; Mariem, B.S.; Garriga, M.; Aranjuelo, I. Photosynthetic metabolism under stressful growth conditions as a bases for crop breeding and yield improvement. *Plants* **2020**, *9*, 88. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
89. Repková, J.; Brestič, M.; Olšovská, K. Leaf growth under temperature and light control. *Plant Soil Environ.* **2009**, *55*, 551–557. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
90. Qaderi, M.M.; Basraon, N.K.; Chinnappa, C.C.; Reid, D.M. Combined effects of temperature, ultraviolet-B radiation, and watering regime on growth and physiological processes in canola (*Brassica napus*) seedlings. *Int. J. Plant Sci.* **2010**, *171*, 466–481. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
91. Gliessman, S.R. *Agroecology: The Ecology of Sustainable Food Systems*, 3rd ed.; CRC Press/Taylor & Francis: Boca Raton, FL, USA, 2015; p. 371. [[Google Scholar](#)]
92. Inagaki, N. Processing of D1 Protein: A Mysterious Process Carried Out in Thylakoid Lumen. *Int. J. Mol. Sci.* **2022**, *23*, 2520. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
93. Chovancek, E.; Zivcak, M.; Botyanszka, L.; Hauptvogel, P.; Yang, X.; Misheva, S.; Hussain, S.; Brestic, M. Transient heat waves may affect the photosynthetic capacity

- of susceptible wheat genotypes due to insufficient photosystem I photoprotection. *Plants* **2019**, *8*, 282. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
94. McClain, A.M.; Sharkey, T.D. Rapid CO₂ changes cause oscillations in photosynthesis that implicate PSI acceptor-side limitations. *J. Exp. Bot.* **2023**, *74*, 3163–3173. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
95. Shanker, A.K.; Gunnapaneni, D.; Bhanu, D.; Vanaja, M.; Lakshmi, N.J.; Yadav, S.K.; Prabhakar, M.; Singh, V.K. Elevated CO₂ and water stress in combination in plants: Brothers in arms or partners in crime? *Biology* **2022**, *11*, 1330. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
96. Moore, C.E.; Meacham-Hensold, K.; Lemonnier, P.; Slattery, R.A.; Benjamin, C.; Bernacchi, C.J.; Lawson, T.; Cavanagh, A.P. The effect of increasing temperature on crop photosynthesis: From enzymes to ecosystems. *J. Exp. Bot.* **2021**, *72*, 2822–2844. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
97. Lamichaney, A.; Parihar, A.K.; Hazra, K.K.; Dixit, G.P.; Katiyar, P.K.; Singh, D.; Singh, A.K.; Kumar, N.; Singh, N.P. Untangling the influence of heat stress on crop phenology, seed set, seed weight, and germination in field pea (*Pisum sativum* L.). *Front. Plant Sci.* **2021**, *2*, 437. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
98. Mishra, A.K.; Agrawal, S.B. Cultivar specific response of [CO₂] fertilization on two tropical mung bean (*Vigna radiata* L.) cultivars: ROS generation, antioxidant status, physiology, growth, yield and seed quality. *J. Agron. Crop Sci.* **2014**, *200*, 273–289. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
99. Li, P.; Han, X.; Zong, Y.; Li, H.; Lin, E.; Han, Y.; Hao, X. Effects of free-air [CO₂] enrichment (FACE) on the uptake and utilization of N, P and K in *Vigna radiata*. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2015**, *202*, 120–125. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
100. Vanaja, M.; Reddy, P.R.; Lakshmi, N.J.; Maheswari, M.; Vagheera, P.; Ratnakumar, P.; Jyothi, M.; Yadav, S.K.; Venkateswarlu, B. Effect of elevated atmospheric [CO₂] concentrations on growth and yield of black gram (*Vigna mungo* L. Hepper) – A rainfed pulse crop. *Plant Soil Environ.* **2007**, *53*, 81–88. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
101. Martel, A.B.; Qaderi, M.M. Light quality and quantity regulate aerobic methane emissions from plants. *Physiol. Plant.* **2017**, *159*, 313–328. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
102. Sannagoudar, M.S.; Patil, R.H.; Rajanna, G.A.; Ghosh, A.; Singh, A.K.; Halli, H.M.; Khandibagur, V.; Kumar, S.; Kumar, R.V. Rising temperature coupled with reduced rainfall will adversely affect yield of kharif sorghum genotypes. *Curr. Sci.* **2023**, *124*, 921. [[Google Scholar](#)]
103. Bitá, C.E.; Gerats, T. Plant tolerance to high temperature in a changing environment: Scientific fundamentals and production of heat stress-tolerant crops. *Front. Plant Sci.* **2013**, *4*, 273. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
104. Nemeskeri, E. Heat tolerance in grain legumes. *Bodenkultur* **2004**, *55*, 3–11. [[Google Scholar](#)]
105. Piramila, B.H.M.; Prabha, A.L.; Nandagopalan, V.; Stanley, A.L. Effect of heat treatment on germination, seedling growth and some biochemical parameters of dry

- seeds of black gram. *Int. J. Pharm. Phytopharm. Res.* **2012**, *1*, 194–202. [[Google Scholar](#)]
106. Chakraborty, U.; Pradhan, D. High temperature-induced oxidative stress in *Lens culinaris*, role of antioxidants and amelioration of stress by chemical pre-treatments. *J. Plant Inter.* **2011**, *6*, 43–52. [[Google Scholar](#)]
107. Prasad, P.V.V.; Craufurd, P.Q.; Kakani, V.G.; Wheeler, T.R.; Boote, K.J. Influence of temperature during pre and post anthesis stages of floral development on fruit set and pollen germination in groundnut (*Arachis hypogaea* L.). *Aust. J. Plant Physiol.* **2001**, *28*, 233–240. [[Google Scholar](#)]
108. Kaur, R.; Bains, T.S.; Bindumadhava, H.; Nayyar, H. Responses of mungbean (*Vigna radiata* L.) genotypes to heat stress: Effects on reproductive biology, leaf function and yield traits. *Sci. Hortic.* **2015**, *197*, 527–541. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
109. Barghi, S.S.; Mostafaii, H.; Peighami, F.; Zakaria, R.A. Path analysis of yield and its components in lentil under end season heat condition. *Int. J. Agric. Res. Rev.* **2012**, *2*, 969–974. [[Google Scholar](#)]
110. Sita, K.; Sehgal, A.; HanumanthaRao, B.; Nair, R.M.; Prasad, P.V.V.; Kumar, S.; Gaur, P.M.; Farooq, M.; Siddique, K.H.M.; Varshney, R.K.; et al. Food legumes and rising temperatures: Effects, adaptive functional mechanisms specific to reproductive growth stage and strategies to improve heat tolerance. *Front. Plant Sci.* **2017**, *8*, 1658. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
111. Kumar, S.; Thakur, P.; Kaushal, N.; Malik, J.A.; Gaur, P.; Nayyar, H. Effect of varying high temperatures during reproductive growth on reproductive function, oxidative stress and seed yield in chickpea genotypes differing in heat sensitivity. *Arch. Agron. Soil Sci.* **2013**, *59*, 823–843. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
112. Bunce, J.A. Elevated carbon dioxide effects on reproductive phenology and seed yield among soybean cultivars. *Crop Sci.* **2015**, *55*, 339–343. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
113. Li, Y.; Yu, Z.; Yang, S.; Jin, J.; Wang, G.; Liu, C.; Herbert, S.J.; Liu, X. Soybean intraspecific genetic variation in response to elevated [CO₂]. *Arc. Agron. Soil Sci.* **2019**, *65*, 1733–1744. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
114. Bellaloui, N.; Bruns, H.A.; Abbas, H.K.; Mengistu, A.; Fisher, D.K.; Reddy, K.N. Agricultural practices altered soybean seed protein, oil, fatty acids, sugars, and minerals in the Midsouth USA. *Front. Plant Sci.* **2015**, *6*, 31. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
115. Rogers, G.S.; Milham, P.J.; Thibaud, M.C.; Conroy, J.P. Interactions between rising [CO₂] concentration and nitrogen supply in cotton. I. Growth and leaf nitrogen concentration. *Funct. Plant Biol.* **1996**, *23*, 119–125. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
116. Köhler, I.H.; Huber, S.C.; Bernacchi, C.J.; Baxter, I.R. Increased temperatures may safeguard the nutritional quality of crops under future elevated CO₂ concentrations. *Plant J.* **2019**, *97*, 872–886. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
117. Pérez-López, U.; Miranda-Apodaca, J.; Mena-Petite, A.; Muñoz-Rueda, A. Responses of nutrient dynamics in barley seedlings to the interaction of salinity and

- carbon dioxide enrichment. *Environ. Exp. Bot.* **2014**, *99*, 86–99. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
118. Weigel, H.J.; Manderscheid, R. [CO₂] enrichment effects on forage and grain nitrogen content of pasture and cereal plants. *J. Crop Improv.* **2005**, *13*, 73–89. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
119. Kennedy, M. As carbon dioxide levels rise, major crops are losing nutrients. June 19, 2018 story on NPR's *Morning Edition*. Available online: <https://www.npr.org/sections/thesalt/2018/06/19/616098095/as-carbon-dioxide-levels-rise-major-crops-are-losing-nutrients> (accessed on 1 March 2024).
120. Martel, A.B.; Qaderi, M.M. Does salicylic acid mitigate the adverse effects of temperature and ultraviolet-B radiation on pea (*Pisum sativum*) plants? *Environ. Exp. Bot.* **2016**, *122*, 39–48. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
121. Peak, D.; Mott, K.A. A new, vapour-phase mechanism for stomatal responses to humidity and temperature. *Plant Cell Environ.* **2011**, *34*, 162–178. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
122. Chen, Y.; Yu, J.; Huang, B. Effects of elevated [CO₂] concentration on water relations and photosynthetic responses to drought stress and recovery during rewatering in tall fescue. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* **2015**, *140*, 19–26. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
123. Nadeem, M.; Li, J.; Yahya, M.; Sher, A.; Ma, C.; Wang, X.; Qiu, L. Research progress and perspective on drought stress in legumes: A review. *Int. J. Mol. Sci.* **2019**, *20*, 2541. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
124. Manea, A.; Leishman, M.R. Competitive interactions between established grasses and woody plant seedlings under elevated [CO₂] levels are mediated by soil water availability. *Oecologia* **2015**, *177*, 499–506. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
125. Hatfield, J.L.; Dold, C. Water-use efficiency: Advances and challenges in a changing climate. *Front. Plant Sci.* **2019**, *10*, 103. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
126. Tubiello, F.N.; Salvatore, M.; Ferrara, A.F.; House, J.; Federici, S.; Rossi, S.; Biancalani, R.; Condor Golec, R.D.; Jacobs, H.; Flammini, A.; et al. The contribution of agriculture, forestry and other land use activities to global warming, 1990–2012. *Glob. Chang. Biol.* **2015**, *21*, 2655–2660. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
127. Malhi, G.S.; Kaur, M.; Kaushik, P. Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. *Sustainability* **2021**, *13*, 1318. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
128. Witzgall, K.; Vidal, A.; Schubert, D.I.; Höschen, C.; Schweizer, S.A.; Buegger, F.; Pouteau, V.; Chenu, C.; Mueller, C.W. Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon. *Nat. Commun.* **2021**, *12*, 1–10. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
129. Mendoza, O.; De Neve, S.; Deroo, H.; Sleutel, S. Mineralisation of ryegrass and soil organic matter as affected by ryegrass application doses and changes in soil structure. *Biol. Fertil. Soils* **2022**, *58*, 679–691. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
130. Hu, J.; Liao, X.; Vardanyan, L.G.; Huang, Y.; Inglett, K.S.; Wright, A.L.; Reddy, K.R. Duration and frequency of drainage and flooding events interactively affect soil

- biogeochemistry and N flux in subtropical peat soils. *Sci. Total Environ.* **2020**, *727*, 138740. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
131. Yi, L.; Sheng, R.; Wei, W.; Zhu, B.; Zhang, W. Differential contributions of electron donors to denitrification in the flooding-drying process of a paddy soil. *Appl. Soil Ecol.* **2022**, *177*, 104527. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
132. Lipson, D.A.; Wilson, R.F.; Oechel, W.C. Effects of elevated atmospheric CO₂ on soil microbial biomass, activity, and diversity in a chaparral ecosystem. *Appl. Environ. Microbiol.* **2005**, *71*, 8573–8580. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
133. Davidson, E.; Janssens, I. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* **2006**, *440*, 165–173. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
134. Holland, E.A.; Braswell, B.H.; Sulzman, J.; Lamarque, J.F. Nitrogen deposition onto the United States and Western Europe: Synthesis of observations and models. *Ecol. Appl.* **2005**, *15*, 38–57. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
135. Massad, T.J.; Dyer, L.A. A meta-analysis of the effects of global environmental change on plant-herbivore interactions. *Arthropod-Plant Interact.* **2010**, *4*, 181–188. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
136. Zavala, J.A.; Nability, P.D.; DeLucia, E.H. An emerging understanding of mechanisms governing insect herbivory under elevated CO₂. *Annu. Rev. Entomol.* **2013**, *58*, 79–97. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
137. Srivastava, A.C.; Tiwari, L.D.; Pal, M.; Sengupta, U.K. CO₂-mediated changes in mung bean chemistry: Impact on plant-herbivore interactions. *Curr. Sci.* **2002**, *82*, 1148–1151. [[Google Scholar](#)]
138. Akbar, S.M.; Pavani, T.; Nagaraja, T.; Sharma, H.C. Influence of CO₂ and temperature on metabolism and development of *Helicoverpa armigera* (Noctuidae: Lepidoptera). *Environ. Entomol.* **2016**, *45*, 229–236. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
139. Zhang, Y.; Yang, D.; Wan, G.; Liu, B.; Xing, G.; Chen, F. Effects of elevated CO₂ on plant chemistry, growth, yield of resistant soybean, and feeding of a target lepidoptera pest, *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae). *Environ. Ent.* **2018**, *47*, 848–856. [[Google Scholar](#)]
140. Guo, H.; Sun, Y.; Li, Y.; Tong, B.; Harris, M.; Zhu-Salzman, K.; Ge, F. Pea aphid promotes amino acid metabolism both in *Medicago truncatula* and bacteriocytes to favor aphid population growth under elevated CO₂. *Glob. Chang. Biol.* **2013**, *19*, 3210–3223. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
141. Qian, L.; Huang, Z.; Liu, X.; Li, C.; Gao, Y.; Gui, F.; Chang, X.; Chen, F. Effect of elevated CO₂ on interactions between the host plant *Phaseolus vulgaris* and the invasive western flower thrips, *Frankliniella occidentalis*. *J. Pest Sci.* **2021**, *94*, 43–54. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
142. O'Neill, B.F.; Zangerl, A.R.; DeLucia, E.H.; Casteel, C.; Zavala, J.A.; Berenbaum, M.R. Leaf temperature of soybean grown under elevated CO₂ increases *Aphis glycines* (Hemiptera: Aphididae) population growth. *Insect Sci.* **2011**, *18*, 419–425. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

143. Yan, H.Y.; Guo, H.G.; Sun, Y.C.; Ge, F. Plant phenolics mediated bottom-up effects of elevated CO₂ on *Acyrtosiphon pisum* and its parasitoid *Aphidius avenae*. *Insect Sci.* **2020**, *27*, 70–184. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
144. Jat, B.L.; Pagaria, P.; Mali, G.; Khan, T. Impact of major environmental conditions on pest population dynamics and plant resistance mechanisms in legumes. *Indian J. Plant Prot.* **2021**, *49*, 215–226. [[Google Scholar](#)]
145. Sreenivas, A.G.; Ashoka, J.; Nadagoud, S.; Kuchnoor, P.H. Effect of elevated CO₂ and temperature on biochemistry of groundnut and its effect on development of leaf eating caterpillar, *Spodoptera litura* Fabricius. *Legume Res.* **2019**, *42*, 399–404. [[Google Scholar](#)]
146. Niziolek, O.K.; Berenbaum, M.R.; DeLucia, E.H. Impact of elevated CO₂ and increased temperature on Japanese beetle herbivory. *Insect Sci.* **2013**, *20*, 513–523. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
147. Garibaldi, L.A.; Steffan-Dewenter, I.; Winfree, R.; Aizen, M.A.; Bommarco, R. Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honey bee abundance. *Science* **2013**, *339*, 1608–1611. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
148. Ashman, T.L.; Knight, T.M.; Steets, J.A.; Amarasekare, P.; Burd, M.; Campbell, D.R.; Dudash, M.R.; Johnston, M.O.; Mazer, S.J.; Mitchell, R.J.; et al. Pollen limitation of plant reproduction: Ecological and evolutionary causes and consequences. *Ecology* **2004**, *85*, 2408–2421. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
149. Otieno, M.; Peters, M.K.; Duque, L.; Steffan-Dewenter, I. Interactive effects of ozone and carbon dioxide on plant-pollinator interactions and yields in a legume crop. *Environ. Adv.* **2022**, *9*, 100285. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]