

CÁC CHẤT ĐIỀU HÒA SINH TRƯỞNG THỰC VẬT CẢI THIỆN NĂNG SUẤT ĐẬU TƯƠNG Ở TÂY BẮC TRUNG QUỐC THÔNG QUA ĐIỀU HÒA DINH DƯỠNG VÀ HORMONE.

Hao Cheng, Yucheng Gan, Xinna Zheng, Ziyi Meng, Feifei Zhao, Wenyue Feng,
Renhui Guo, Xinghu Song and Qiang Zhao*

Khoa Nông học, Đại học Nông nghiệp Tân Cương, Urumqi 830052, Trung Quốc

TÓM TẮT

Tại Tân Cương, tiềm năng năng suất đậu tương bị hạn chế bởi các yếu tố giống và stress phi sinh học. Mặc dù các chất điều hòa sinh trưởng thực vật (plant growth regulator – PGR) có thể nâng cao năng suất cây trồng, nhưng tác động cụ thể của chúng đối với sản xuất đậu tương, điều hòa hormone nội sinh và động lực dinh dưỡng trong khu vực này vẫn chưa được nghiên cứu kỹ lưỡng. Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của các phương pháp xử lý PGR khác nhau đến sự hình thành năng suất, nồng độ hormone và hàm lượng dinh dưỡng thông qua một thí nghiệm thực địa được tiến hành tại Ili, Tân Cương, từ năm 2023 đến năm 2025. Các chất phun lá axit naphthaleneacetic (NAA, 300 g/ha), prohexadione-canxi (Pro-Ca, 450 g/ha) và sắt clo e6 (ICE6, 45 g/ha) được phun hai lần – ở giai đoạn lá chết thứ tư và giai đoạn quả chín – với đối chứng không xử lý (CK) để so sánh. So với đối chứng (CK), các nghiệm thức PGR làm tăng phân bổ sinh khối cho các cơ quan sinh sản lên 6,2%, tích lũy chất dinh dưỡng N, P và K lần lượt là 12,3%, 25,5% và 6,5%, số quả tăng 6,92 quả/cây, số hạt tăng 4,86 hạt/cây và khối lượng 100 hạt tăng 0,47 g, dẫn đến năng suất hạt cao hơn 6,6–12,0%. Dư lượng PGR trong hạt là 0,009 mg/kg. Ứng dụng PGR tăng cường khả năng chuyển đổi của cơ quan sinh sản, hiệu quả hấp thụ chất dinh dưỡng và điều chỉnh mức độ hormone nội sinh, làm rõ cơ chế hình thành năng suất bên trong và cung cấp tài liệu tham khảo có giá trị cho nghiên cứu đậu tương, đặc biệt là ở các vĩ độ tương tự.

Từ khóa: phun qua lá; axit naphthaleneacetic; tích lũy chất dinh dưỡng; hormone nội sinh; phân tích tương quan

1. GIỚI THIỆU

Đậu tương (*Glycine max* (L.) Merr.) giữ vị trí chiến lược trong bối cảnh nông nghiệp Trung Quốc, đóng vai trò là nguồn cung cấp chính ngũ cốc, dầu thực vật và thức ăn giàu protein. Nhờ những đặc tính dinh dưỡng nổi bật, nó vẫn là yếu tố thiết yếu đối với cả hệ thống nông nghiệp sơ cấp và nền kinh tế nông công nghiệp rộng lớn hơn [1]. Tân Cương, được công nhận là một trong những vùng trồng đậu tương năng suất cao ở Trung Quốc, đã ghi nhận năng suất trung bình năm 2022 vượt mức trung bình quốc gia là 1.980,08 kg/ha tới 52,6% [2]. Việc trồng đậu tương bị ảnh hưởng bởi cả đặc điểm giống vốn có và các yếu tố gây căng thẳng phi sinh học khác nhau, có thể dẫn đến các kết quả bất lợi như rụng quả, hạt không phát triển đầy đủ và vận chuyển chất dinh dưỡng không hiệu quả [3]. Ở Tân Cương, những hạn chế này cùng nhau ngăn cản cây trồng đạt được tiềm năng năng suất tối ưu, ngay cả trong điều kiện nông học thuận lợi ở một số khu vực. Các biện pháp canh tác thông thường, chẳng hạn như điều chỉnh mật độ trồng và lượng nước tưới, thường không hiệu quả trong việc nhanh chóng giảm thiểu các tác động bất lợi từ môi trường, bao gồm cả các đợt nắng nóng ngắn hạn và hiện tượng đất bị nén chặt [4,5,6]. Những hạn chế này nhấn mạnh nhu cầu cấp thiết phải xác định và phát triển các chiến lược hiệu quả và dễ triển khai nhằm bảo vệ năng suất cây trồng trong điều kiện môi trường thay đổi nhanh chóng.

Việc sử dụng hợp lý các chất điều hòa sinh trưởng thực vật (plant growth regulator – PGR) đã được công nhận rộng rãi là một phương pháp nông học thuận tiện và hiệu quả để tăng năng suất cây trồng và cải thiện chất lượng sản phẩm bằng cách điều chỉnh các quá trình sinh lý và sinh hóa, chẳng hạn như phân chia tế bào, kéo dài và vận chuyển chất dinh dưỡng [7]. Hơn nữa, PGR có thể góp phần tăng khả năng chống chịu stress, cho phép cây trồng duy trì năng suất trong điều kiện môi trường không tối ưu [8]. Ví dụ, phun sắt clo e6 (ICE-6) và prohexadione-canxi (Pro-Ca) đã được chứng minh là làm tăng số bông lúa hiệu quả và năng suất lúa [9,10]. Pro-Ca làm tăng khối lượng hạt ở cây đậu lăng [11] và thúc đẩy ra hoa ở cây táo, mặc dù nó có thể làm giảm tỷ lệ đậu quả [12]. Axit naphthaleneacetic (NAA) thể hiện tác dụng đáng kể trong việc cải thiện khả năng đậu quả, số lượng và chất lượng quả ở ớt [13], trong khi việc ứng dụng trước khi ra hoa cho dưa chuột có thể thúc đẩy sự phát triển của quả và tăng cường khả năng đậu quả [14]. Ở đậu tương, NAA, Pro-Ca và ICE6 làm giảm đáng kể hiện tượng rụng hoa và quả [8], tuy nhiên hiệu quả so sánh và chiến lược ứng dụng tối ưu của chúng vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ. Một nghiên cứu trước đây đã kiểm tra tác dụng của NAA, Pro-Ca và ICE-6 trên đậu tương; tuy nhiên, nghiên cứu chỉ tập trung vào sự phát triển của hoa và quả [8], mà không mở rộng đến hiệu suất năng suất, phân bố sinh khối, động lực dinh dưỡng (N, P, K) hoặc đánh giá chất lượng hạt giống. Nghiên cứu hiện tại mở rộng phạm vi đánh giá để bao gồm một bộ thông số nông học và sinh lý toàn diện, do đó cung cấp sự hiểu biết đầy đủ hơn về tác dụng của các chất điều hòa sinh trưởng thực vật này. Tuy nhiên, mặc dù các nghiên cứu trước đây đã báo cáo rằng việc sử dụng NAA, Pro-Ca và ICE-6 có thể làm tăng năng suất cây trồng một cách hiệu quả, nhưng ảnh hưởng cụ thể của chúng đến các cơ chế điều hòa sinh lý làm nền tảng cho việc cải thiện năng suất đậu tương được trồng trong điều kiện khí hậu nông nghiệp của Tân Cương vẫn chưa được hiểu rõ. Hơn nữa, vẫn chưa rõ liệu việc sử dụng các chất này có dẫn đến dư lượng các hợp chất trong hạt đậu tương hay không. Việc giải quyết những khoảng trống kiến thức này là rất cần thiết để phát triển các chiến lược đặc thù theo từng vùng nhằm tối ưu hóa năng suất đậu tương đồng thời đảm bảo chất lượng và an toàn hạt giống.

Để giải quyết các vấn đề chưa được giải quyết nêu trên, nghiên cứu này điều tra xem việc phun các chất điều hòa sinh trưởng thực vật NAA, Pro-Ca và ICE-6 lên lá có thể làm tăng sự phân bổ sinh khối sinh sản, thúc đẩy tích lũy chất dinh dưỡng và điều chỉnh hồ sơ hormone nội sinh để cải thiện năng suất và chất lượng hạt đậu tương ở Tây Bắc Trung Quốc hay không. Chúng tôi giả thuyết rằng các chất điều hòa sinh trưởng thực vật này sẽ đạt được những cải thiện như vậy trong khi vẫn giữ mức dư lượng trong hạt ở mức an toàn. Các phát hiện cung cấp những hiểu biết mới về cách thức ứng dụng chất điều hòa sinh trưởng thực vật điều chỉnh hàm lượng hormone nội sinh và mức độ dinh dưỡng trong đậu tương, có khả năng thúc đẩy cải thiện năng suất đậu tương.

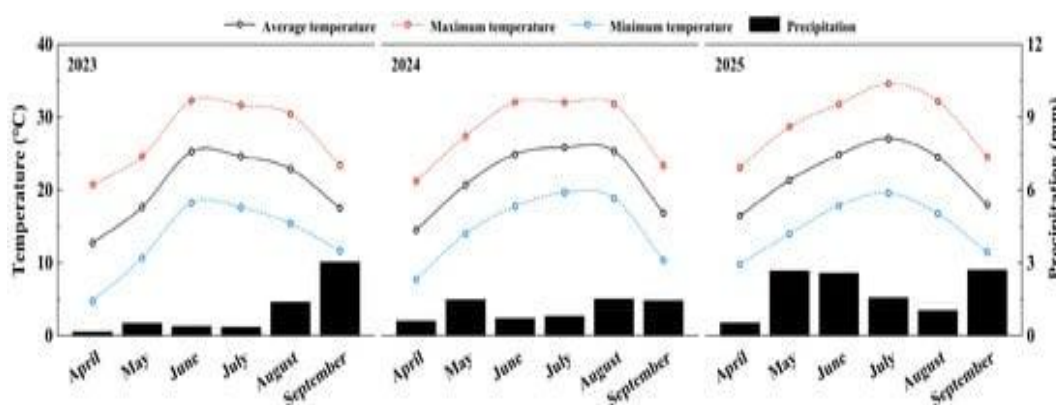
2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

2.1. Địa điểm thí nghiệm

Nghiên cứu thực địa này được tiến hành từ năm 2023 đến năm 2025 tại huyện Qapqal (43°83' N, 81°20' E), tỉnh Ili, Khu tự trị Tân Cương Duy Ngô Nhĩ, Trung Quốc. Đất thí nghiệm được phân loại là đất thịt pha cát. Trong độ sâu 0–30cm, đất thể hiện các đặc tính sau trong ba mùa vụ liên tiếp: giá trị pH là 7,9; 8,1 và 8,2; hàm lượng photpho dễ hấp thụ (dưới dạng P_2O_5) là 17,4, 17,7 và 16,9 mg/kg; và hàm lượng kali dễ hấp thụ (dưới dạng K_2O) là 131,4, 134,1 và 137,6 mg/kg; Tổng hàm lượng nitơ lần lượt là 0,069%, 0,073% và 0,074% cho các năm 2023, 2024 và 2025. Các đặc tính hóa học nông nghiệp của đất được xác định trước khi trồng. Độ pH của đất được xác định bằng phương pháp đo điện

thể trong hỗn hợp đất-nước tỷ lệ 1:2,5, theo phương pháp pH đất trong nước (ISO 10390:2005) [15]. Phốt pho dễ hấp thụ được đo bằng phương pháp Olsen P (chiết xuất natri bicacbonat 0,5 mol/L, pH 8,5; Công ty TNHH Hóa chất Sinopharm, Bắc Kinh, Trung Quốc) [16]. Kali dễ hấp thụ được chiết xuất bằng amoni axetat 1 mol/L (pH 7,0; Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, Hoa Kỳ) và được xác định bằng phương pháp quang phổ ngọn lửa theo quy trình chiết xuất kali dễ hấp thụ bằng amoni axetat [17]. Tổng nitơ được xác định bằng phương pháp Kjeldahl [18]. Tất cả các phân tích đều được thực hiện ba lần để đảm bảo độ chính xác và khả năng tái lập.

Dữ liệu khí tượng cho nghiên cứu này được lấy từ cục khí tượng nông nghiệp huyện phục vụ khu vực thí nghiệm. Bố cục địa điểm và các yếu tố quan sát được thiết kế theo tiêu chuẩn của các tổ chức quốc tế, chẳng hạn như Tổ chức Khí tượng Thế giới. Trong khu vực nghiên cứu, nhiệt độ không khí trung bình trong tháng 4 – 9 các năm 2015 – 2022 dao động từ 13,2 – 25,3°C, và tổng lượng mưa từ 0,38 – 5,53 mm. Số liệu ghi nhận trong giai đoạn 2023 – 2025 nằm trong các phạm vi này, cho thấy các năm thí nghiệm đại diện cho điều kiện khí hậu dài hạn. Điều kiện khí tượng trong mùa vụ trồng đậu tương ở vùng Ili (tháng 4 – tháng 9) được trình bày trong Hình 1.



Hình 1. Nhiệt độ không khí và lượng mưa hàng tháng trong các mùa vụ trồng đậu tương (tháng 4 – tháng 9) từ năm 2023 đến năm 2025 tại Ili, Trung Quốc.

2.2. Thiết kế và quản lý thí nghiệm

Nghiên cứu kéo dài ba mùa vụ độc lập (2023 – 2025). Để đảm bảo tính chính xác về mặt thống kê, dữ liệu từ mỗi mùa vụ được phân tích riêng biệt trước khi kết hợp lại khi thích hợp. Thiết kế khối ngẫu nhiên hoàn chỉnh được sử dụng, với mỗi nghiệm thức được lặp lại trên ba ô thí nghiệm. Bốn lần phun thuốc qua lá được thực hiện, và các nghiệm thức được phân bổ ngẫu nhiên cho các đơn vị thí nghiệm trong mỗi khối. Thuốc phun qua lá được phun hai lần trong mùa vụ: một lần ở giai đoạn lá chết ba lá (31 tháng 5) và một lần ở giai đoạn quả chín (12 tháng 7). Các giai đoạn sinh trưởng của đậu tương được phân loại theo hệ thống của Fehr và Caviness (1971) [19], phân biệt các giai đoạn sinh dưỡng (V1 – Vn) dựa trên số lượng lá thật phát triển đầy đủ và các giai đoạn sinh sản (R1 – R8) lần lượt biểu thị bắt đầu ra hoa, ra hoa hoàn toàn, bắt đầu hình thành quả, quả chín, bắt đầu hình thành hạt, hạt chín, bắt đầu chín và chín hoàn toàn. Tại mỗi thời điểm bón, các nghiệm thức bao gồm axit naphthaleneacetic (NAA) ở liều lượng 300 g/ha, prohexadione-canxi (Pro-Ca) ở liều lượng 450 g/ha, sắt clo e6 (ICE-6) ở liều lượng 45 g/ha và một lượng nước tương đương làm đối chứng (CK). NAA 5% được lấy từ Công ty TNHH Hóa chất Trịnh Thạch Trịnh Châu (Trịnh Châu, Trung Quốc); Pro-Ca 8% từ Công ty TNHH Công nghệ Nông nghiệp Quan Trị Thành Đô (Thành Đô, Trung Quốc); và ICE-6 0,01% từ Công ty TNHH Kỹ thuật Sinh học Biotek Nam Kinh (Nam Kinh, Trung Quốc).

Giống đậu tương XND-3 (Đại học Nông nghiệp Tân Cương, Urumqi, Trung Quốc), đặc trưng bởi thời gian sinh trưởng trung bình và khả năng hình thành quả hạn chế, được sử dụng trong nghiên cứu này. Gieo trồng được thực hiện vào ngày 22 tháng 4. Mỗi ô thí nghiệm có chiều rộng 2,1m và chiều dài 10m, với khoảng cách cây trồng là 5cm và khoảng cách hàng là 45cm. Sử dụng hệ thống tưới nhỏ giọt.

Việc quản lý đồng ruộng tuân theo các phương pháp canh tác nông nghiệp truyền thống của địa phương. Trong suốt chu kỳ sinh trưởng của cây đậu tương, năm lần tưới nước đã được thực hiện, với tổng lượng nước là 3.750m³. Trước khi gieo trồng, phân bón nitơ (70 kg/ha), phân bón photpho (150 kg/ha) và phân bón kali (30 kg/ha) được trộn vào đất bằng máy cày quay. Ngoài ra, urê được bón với liều lượng 150 kg/ha thông qua hệ thống tưới nhỏ giọt.

2.3. Thu thập dữ liệu

2.3.1. Xác định năng suất

Ở giai đoạn chín hoàn toàn, năng suất hạt được xác định bằng cách thu hoạch cây từ năm ô vuông 1 m² được đặt ngẫu nhiên trong mỗi ô thí nghiệm. Hạt thu hoạch từ tất cả các ô vuông được gộp lại, và năng suất trung bình trên mỗi ô thí nghiệm được tính toán để đưa ra ước tính đại diện. Tất cả cây đậu tương trong mỗi khu vực được chọn đều được thu hoạch. Sau khi đập, số lượng quả, số hạt hữu hiệu và trọng lượng hạt được xác định. Độ ẩm được điều chỉnh về giá trị tiêu chuẩn là 13,5% bằng máy đo độ ẩm hạt. Năng suất được tính toán ở độ ẩm 13,5%, biểu thị bằng kg/ha, bằng cách chuyển đổi trọng lượng hạt tươi thu hoạch trên 1m² sang cơ sở trên mỗi hecta. Trọng lượng 100 hạt cũng được xác định. Các phép đo cho mỗi khu vực 1m² được lặp lại năm lần, và giá trị trung bình được sử dụng cho các phân tích tiếp theo.

2.3.2. Lấy mẫu thực vật và phân tích dinh dưỡng

Việc lấy mẫu thực vật được thực hiện ở bốn giai đoạn sinh trưởng chính của cây đậu tương: bắt đầu ra hoa (R1), bắt đầu hình thành quả (R3), bắt đầu hình thành hạt (R5) và bắt đầu chín (R7). Ở mỗi giai đoạn, ba cây trên mỗi ô thí nghiệm được thu hoạch và tách thành các bộ phận sinh dưỡng (thân, lá và cuống lá) và các bộ phận sinh sản (hoa, quả và hạt). Tất cả các mẫu đều được sấy khô trong lò ở 120°C trong 30 phút để vô hiệu hóa hoạt động của enzyme, sau đó được sấy khô ở 80°C cho đến khi đạt được trọng lượng không đổi.

Sự tích lũy nitơ (N), photpho pentoxit (P₂O₅) và kali oxit (K₂O) được xác định riêng cho từng loại bộ phận. Các mẫu khô được nghiền thành bột mịn bằng máy nghiền mẫu (Retsch ZM 200, Retsch GmbH, Haan, Đức) và được phân hủy bằng dung dịch H₂SO₄–H₂O₂ đậm đặc (Sinopharm Chemical Reagent Co., Ltd., Thượng Hải, Trung Quốc). Hàm lượng nitơ được định lượng bằng phương pháp Kjeldahl [18], hàm lượng photpho được xác định bằng phương pháp đo quang phổ thông qua phương pháp đo màu vàng vanadat–molybdat, và hàm lượng kali được đo bằng phương pháp đo quang phổ hấp thụ nguyên tử (AAAnalyst™ 400, PerkinElmer Inc., Waltham, MA, Hoa Kỳ) [20]. Sự tích lũy chất dinh dưỡng (g/m²) được tính bằng cách nhân nồng độ chất dinh dưỡng của mỗi cơ quan với trọng lượng khô của nó trên mỗi đơn vị diện tích nghiên cứu.

2.3.3. Chiết xuất và định lượng hormone thực vật

Vào các thời điểm 6, 12, 18 và 24 giờ sau khi phun qua lá ở giai đoạn quả chín hoàn toàn (R4), các lá đã phát triển đầy đủ và khỏe mạnh từ giữa vị trí đốt thứ ba đảo ngược được

thu thập từ cây đậu tương trong mỗi ô thí nghiệm. Các mẫu được bọc ngay lập tức bằng giấy bạc, đông lạnh nhanh trong nitơ lỏng và bảo quản ở -80°C cho đến khi phân tích.

Hàm lượng cytokinin (CTK), axit indole-3-acetic (IAA), axit abscisic (ABA) và axit gibberellic (GA3) được xác định bằng HPLC–MS/MS (Agilent 1290 – 6460). Tóm lại, 0,5g mô lá được nghiền trong cối đã được làm lạnh trước bằng nitơ lỏng và chiết xuất với 5mL n-propanol/nước/HCl (2:1:0,002, v/v) ở 100 vòng/phút trong 30 phút ở 4°C , sau đó thêm 2mL dichloromethane và tiếp tục lắc trong 30 phút. Sau khi ly tâm (13.000 vòng/phút, 5 phút, 4°C), 2mL pha hữu cơ được đông lạnh (-80°C , 14 giờ), sấy thăng hoa (24 giờ), hòa tan lại trong 200 μL methanol 50%, trộn đều bằng máy khuấy vortex và lọc (0,22 μm) để phân tích [21].

Quá trình tách sắc ký được thực hiện trên cột Eclipse Plus C18 (2,1mm $\times$ 50mm, 1,8 μm , 35°C ; Agilent Technologies, Santa Clara, CA, Hoa Kỳ) sử dụng pha động gồm (A) 0,1% axit formic trong nước và (B) 0,1% axit formic trong acetonitrile ở tốc độ 0,3 mL/phút, với thể tích tiêm 2 μL . Các hợp chất được xác định và định lượng bằng thời gian lưu và đường cong hiệu chuẩn từ các tiêu chuẩn bên ngoài [22].

2.3.4. Đánh giá chất lượng hạt giống và xác định giới hạn dư lượng tối đa

Hàm lượng protein và dầu được xác định theo các giao thức chính thức của Hiệp hội Hóa học Dầu mỡ Hoa Kỳ (AOCS, 2009) [23]. Hạt từ các cây riêng lẻ được gộp lại và nghiền bằng máy nghiền đa năng (Tecno Dalvo, Santa Fe, Argentina). Hàm lượng nitơ được đo bằng phương pháp Kjeldahl và chuyển đổi thành protein bằng hệ số 6,25. Dầu được chiết xuất bằng n-hexane trong thiết bị Soxhlet, dung môi được loại bỏ bằng phương pháp bay hơi chân không quay ở 40°C , và hàm lượng dầu được xác định bằng phương pháp trọng lượng.

Giới hạn dư lượng tối đa (MRL) của NAA, Pro-Ca và ICE-6 trong hạt đậu tương được xác định theo tiêu chuẩn địa phương Trung Quốc DB 37/T 3760-2019 [24]. Các mẫu hạt đã được đồng nhất hóa (5,0 g) được chiết xuất bằng methanol (25mL) bằng cách lắc trong 30 phút, ly tâm ở 4.000 vòng/phút trong 10 phút và lọc qua màng 0,45 μm . NAA được định lượng bằng HPLC trên cột pha đảo C18 sử dụng methanol–nước (70:30, v/v) ở tốc độ 1,0 mL/phút, phát hiện ở 280 nm và hiệu chuẩn tiêu chuẩn ngoại. Pro-Ca được phân tích bằng HPLC với methanol–nước (60:40, v/v) ở tốc độ 1,0 mL/phút, phát hiện ở 230 nm và thể tích tiêm 20 μL . Fe-dihydro-porphyrin được định lượng bằng quang phổ UV–Vis ở 410nm (dải Soret), sử dụng các tiêu chuẩn ngoại. Kết quả được biểu thị bằng mg/kg và so sánh với MRL được quy định trong GB 2763-2021 [25].

2.4. Phân tích thống kê

Tất cả dữ liệu được tổng hợp và sắp xếp bằng Excel 2021 (Microsoft Corp., Redmond, WA, USA). Dữ liệu được phân tích phương sai (ANOVA) bằng phần mềm SPSS (phiên bản 26.0; SPSS Inc., Chicago, IL, USA), và giá trị trung bình của các nghiệm thức được so sánh bằng phép thử LSD (Least Significant Difference) ở mức xác suất 0,05. Các hình ảnh được tạo bằng Origin 2025 (OriginLab Corp., Northampton, MA, USA) và PowerPoint 2021 (Microsoft Corp., Redmond, WA, USA).

3. KẾT QUẢ

3.1. Các thành phần năng suất

Trong ba năm thí nghiệm, mật độ cây trồng (104 cây/ha) nhìn chung không thay đổi giữa các nghiệm thức, với sự khác biệt trong cùng một năm $<7\%$ và không có ý nghĩa thống

kê (Bảng 1), cho thấy việc sử dụng PGR không ảnh hưởng đến mật độ cây trồng cuối cùng. Ngược lại, các đặc điểm sinh sản cho thấy sự cải thiện rõ rệt và có thể định lượng được. Số lượng quả trên mỗi cây luôn cao hơn khi sử dụng NAA so với đối chứng (CK), với mức tăng từ 12,1–32,8%, trong khi Pro-Ca và ICE-6 cho thấy mức tăng vừa phải từ 8,3–19,9% tùy thuộc vào từng năm. Số lượng hạt trên mỗi cây cũng có xu hướng tương tự, với NAA làm tăng số lượng hạt lên 9,3–13,1% so với đối chứng; ICE-6 làm tăng số lượng hạt lên đến 12,9%, và Pro-Ca làm tăng từ 5,8–7,9%.

Bảng 1. Ảnh hưởng của các nghiệm thức PGR đến năng suất và các thành phần năng suất đậu tương trong ba mùa vụ (2023 – 2025).

Năm	Nghiệm thức	Mật độ (104 cây/ha)	Số quả /cây	Số hạt/cây (hạt)	P 100 hạt (g)	Năng suất (kg/ha)	Vượt đối chứng (%)
2023	CK	40,11 a	41,76 c	64,82 c	18,67 b	4849,78 c	-
	NAA	39,67 a	55,47 a	73,31 a	18,70 b	5433,80 a	12,0
	Pro-Ca	40,34 a	50,07 b	69,93 b	18,91 b	5330,72 ab	9,9
	ICE-6	40,33 a	47,49 b	65,21 c	19,87 a	5220,95 b	7,7
2024	CK	43,67 a	42,38 b	60,45 b	18,25 c	4802,14 b	-
	NAA	43,11 a	50,42 a	66,08 a	18,40 c	5230,19 a	8,9
	Pro-Ca	42,00 a	50,60 a	65,22 a	18,76 b	5123,64 a	6,7
	ICE-6	42,89 a	48,00 a	62,16 b	19,58 a	5209,61 a	8,5
2025	CK	43,00 a	43,87 c	57,03 b	18,36 b	4489,31 c	-
	NAA	42,11 a	49,18 a	64,05 a	18,41 b	4952,61 a	10,3
	Pro-Ca	43,22 a	47,51 b	60,33 ab	18,43 b	4783,48 b	6,6
	ICE-6	40,33 a	47,56 b	64,37 a	19,05 a	4935,82 a	9,9
Nguồn biến thiên							
Y		**	ns	**	**	**	
T		ns	**	**	**	**	
Y × T		ns	**	ns	ns	ns	

*Lưu ý: Đối với một đặc điểm nhất định, các nghiệm thức có cùng chữ cái trong cùng một năm không có sự khác biệt đáng kể, dựa trên phép thử khoảng đa bội Duncan ở mức $p < 0,05$, sử dụng mô hình tuyến tính tổng quát. ** biểu thị sự khác biệt đáng kể ở mức 1%; ns biểu thị không có sự khác biệt đáng kể ở mức 5%.*

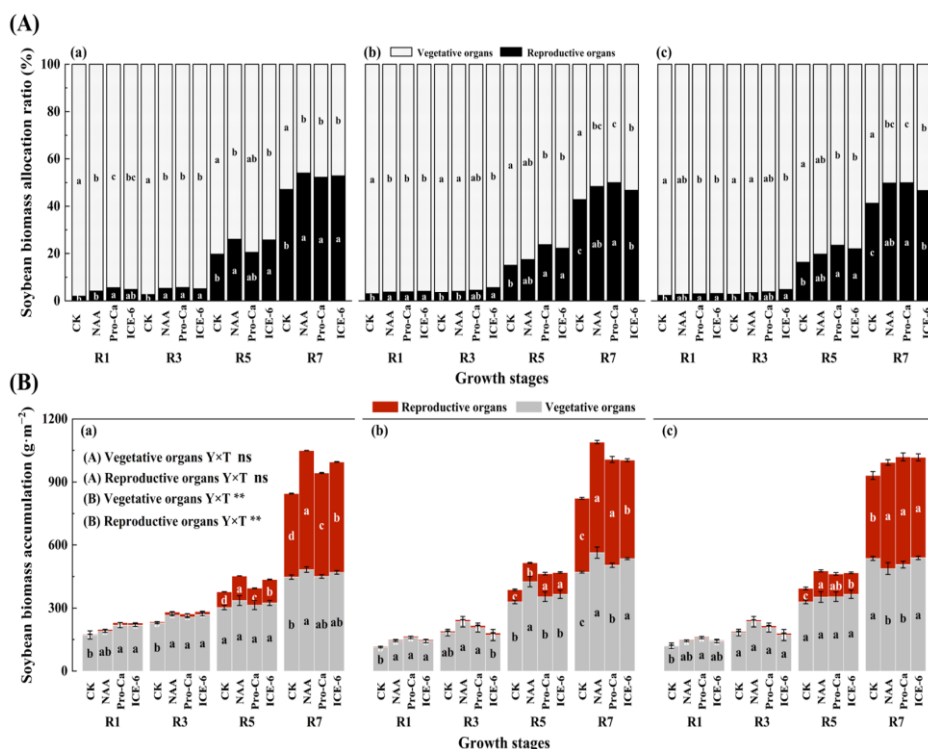
Về kích thước hạt, được biểu thị bằng trọng lượng 100 hạt, giống ICE-6 thường cho ra hạt lớn nhất, vượt trội hơn giống đối chứng (CK) từ 3,8–7,3%. NAA và Pro-Ca đạt được những thay đổi nhỏ hơn nhưng vẫn tích cực (0,2–2,8%), trong khi giống đối chứng luôn ghi nhận giá trị nhỏ nhất. Năng suất hạt (kg/ha) tăng đáng kể nhờ ứng dụng PGR, với NAA mang lại sự cải thiện lớn nhất (8,9–12,0% so với giống đối chứng), Pro-Ca mang lại mức tăng trung bình 7,7%, và ICE-6 đạt mức tăng trung bình 8,7%.

Phân tích thống kê cho thấy ảnh hưởng của năm (Y) rất có ý nghĩa ($p < 0,01$) đối với hầu hết các đặc điểm, ngoại trừ số quả. Ảnh hưởng của nghiệm thức (T) có ý nghĩa ($p < 0,01$) đối với số quả, số hạt, trọng lượng 100 hạt và năng suất hạt. Tương tác giữa năm và nghiệm thức (Y × T) chỉ có ý nghĩa thống kê đối với số lượng quả ($p = 0,006$), cho thấy tác động của PGR lên sự hình thành quả có sự khác biệt nhỏ giữa các năm. Nhìn chung, việc sử dụng PGR đã tăng cường các thành phần năng suất chính – đặc biệt là số lượng quả, số lượng hạt và trọng lượng hạt – với biên độ có thể đo lường được, dẫn đến sự gia

tăng năng suất toàn cây ổn định, trong đó NAA thường ưu tiên khả năng sinh sản, ICE-6 cải thiện kích thước hạt và Pro-Ca mang lại sự cải thiện cân bằng.

3.2. Phân bổ và tích lũy sinh khối

Trong ba năm liên tiếp, việc sử dụng PGR đã liên tục làm thay đổi sự phân bổ sinh khối hướng tới các cơ quan sinh sản trong giai đoạn sinh sản muộn, với sự khác biệt rõ ràng giữa các nghiệm thức. Sự phân bổ sinh sản vẫn ở dưới 5,0% ở giai đoạn R1 – R3 đối với tất cả các nghiệm thức, sau đó tăng mạnh lên 15,0–26,2% ở giai đoạn R5 và 42,3–54,0% ở giai đoạn R7 (Hình 2A). NAA đạt mức cao nhất (lên đến 54,0%) vào năm 2023 và 2025, trong khi Pro-Ca đạt mức tối đa tương tự vào năm 2024, vượt trội đáng kể so với CK (mức ổn định ở mức 50,0–52,2%). ICE-6 duy trì tỷ lệ trung bình (48,6%), nhưng vẫn vượt trội hơn CK trong hầu hết các năm ($p < 0,05$). Tương ứng, tỷ lệ phân bổ cho tế bào thực vật giảm từ 96,1% ở giai đoạn R1 – R3 xuống còn 46,0–57,7% ở giai đoạn R7.



Hình 2. Phân bổ sinh khối (A) và tích lũy (B) trong các cơ quan sinh dưỡng và sinh sản của cây đậu tương ở các giai đoạn sinh trưởng R1, R3, R5 và R7 từ 2023 – 2025. Các bảng (a, b, c) trong mỗi bộ biểu thị dữ liệu tương ứng năm 2023, 2024 và 2025. Các chữ cái viết thường khác nhau phía trên các cột biểu thị sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các nghiệm thức trong cùng một giai đoạn sinh trưởng trong cùng một năm ($p < 0,05$). Thanh lỗi biểu thị sai số chuẩn của giá trị trung bình ($n = 3$). ** biểu thị sự khác biệt có ý nghĩa ở mức 1%; ns biểu thị không có sự khác biệt có ý nghĩa ở mức 5%.

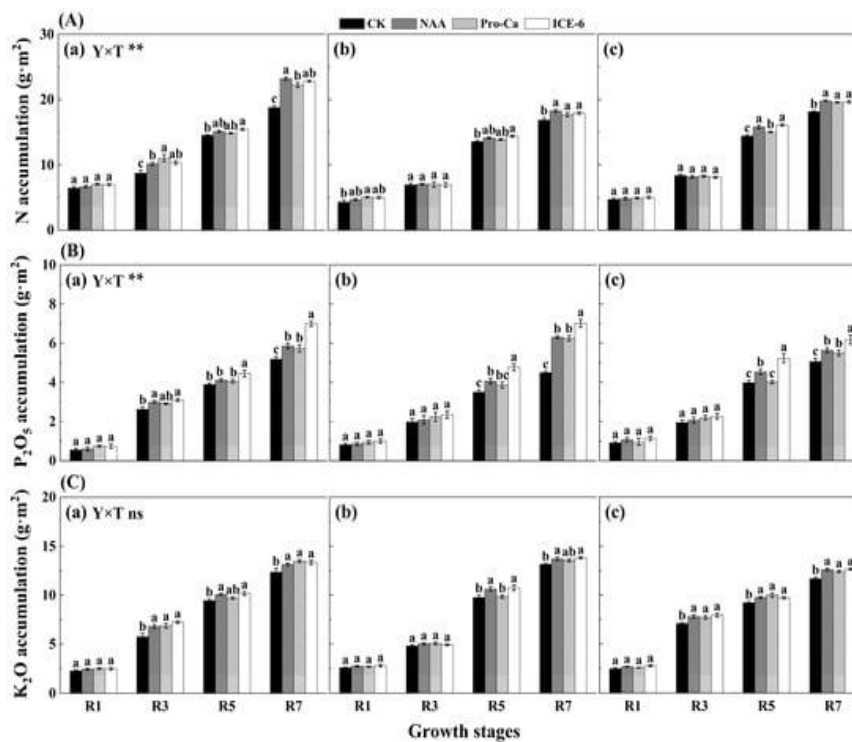
Sự tích lũy sinh khối diễn ra đều đặn từ giai đoạn đầu đến giai đoạn cuối (Hình 2B). Tại R5, sinh khối đạt 377,5–515,4 g/m², với NAA và ICE-6 vượt trội hơn CK từ 15,6–33,0% (chủ yếu do sự gia tăng sinh khối sinh sản từ 31,3–60,6 g/m²). Tại R7, tổng sinh khối đạt đỉnh điểm ở mức 822,4–1.090,1 g/m²; NAA ghi nhận mức cao nhất vào năm 2023 (1.049,8 g/m², 54,0% sinh sản) và năm 2024 (1.090,1 g/m², 48,3% sinh sản), trong khi Pro-Ca vượt trội hơn kết quả năm 2025 (1.019,8 g/m², 50,3% sinh sản). ICE-6 đạt được sinh khối 995,5–1.017,5 g/m² với tỷ lệ sinh sản từ 46,7–52,8%, luôn vượt trội hơn so với CK (822,4–931,0 g/m², 42,4–47,1% sinh sản) về tổng sinh khối và sinh khối sinh sản.

Phân tích thống kê cho thấy tương tác $Y \times T$ không có ý nghĩa thống kê ($p = 0,133$) đối với tỷ lệ phân bổ sinh khối của cả cơ quan sinh dưỡng và sinh sản. Điều này cho thấy sự phân chia sinh khối tương đối giữa các cơ quan đáp ứng với các nghiệm thức là nhất quán qua các năm. Sự tích lũy sinh khối ở cả cơ quan sinh dưỡng ($p = 0,04$) và cơ quan sinh sản ($p = 0,07$) bị ảnh hưởng rất đáng kể bởi tương tác $Y \times T$ ($p < 0,01$). Điều này cho thấy tác động của các nghiệm thức lên sự phân bổ sinh khối khác nhau đáng kể giữa các năm. Nhìn chung, NAA ưu tiên tăng cường khả năng hấp thụ sinh sản và tích lũy ở giai

đoạn cuối, Pro-Ca mang lại sinh khối sinh sản cân bằng nhưng đôi khi vượt trội, trong khi ICE-6 mang lại lợi ích vừa phải nhưng ổn định cả về phân bố và tổng sinh khối. CK luôn thể hiện tỷ lệ sinh sản và tích lũy thấp nhất, nhấn mạnh tác động tích cực của việc ứng dụng PGR có mục tiêu lên các đặc điểm sinh khối liên quan đến năng suất trong nhiều mùa vụ (Hình 2).

3.3. Tích lũy chất dinh dưỡng trong đậu tương

Trong cả ba mùa vụ, sự tích lũy N, P_2O_5 và K_2O trong toàn bộ cây đậu tương cho thấy phản ứng nhất quán với các nghiệm thức PGR (NAA, Pro-Ca và ICE-6) so với đối chứng (CK) ở các giai đoạn sinh trưởng R1, R3, R5 và R7 (Hình 3). Đối với N, tất cả các PGR đều làm tăng sự tích lũy từ 6,3–23,7% so với CK ở các giai đoạn sinh trưởng, với NAA và ICE-6 tạo ra lợi ích lớn hơn ở giai đoạn R7 (Hình 3A). Sự tích lũy P_2O_5 tăng từ 3,6–56,4%, với mức tăng cao nhất ở giai đoạn R7 dưới tác động của ICE-6 (Hình 3B). Sự tích lũy K_2O toàn cây cũng luôn cao hơn dưới các nghiệm thức PGR so với đối chứng (CK), với khoảng cách ngày càng rộng sau giai đoạn R3; đến giai đoạn R7, NAA, Pro-Ca và ICE-6 duy trì mức cao nhất (Hình 3C).



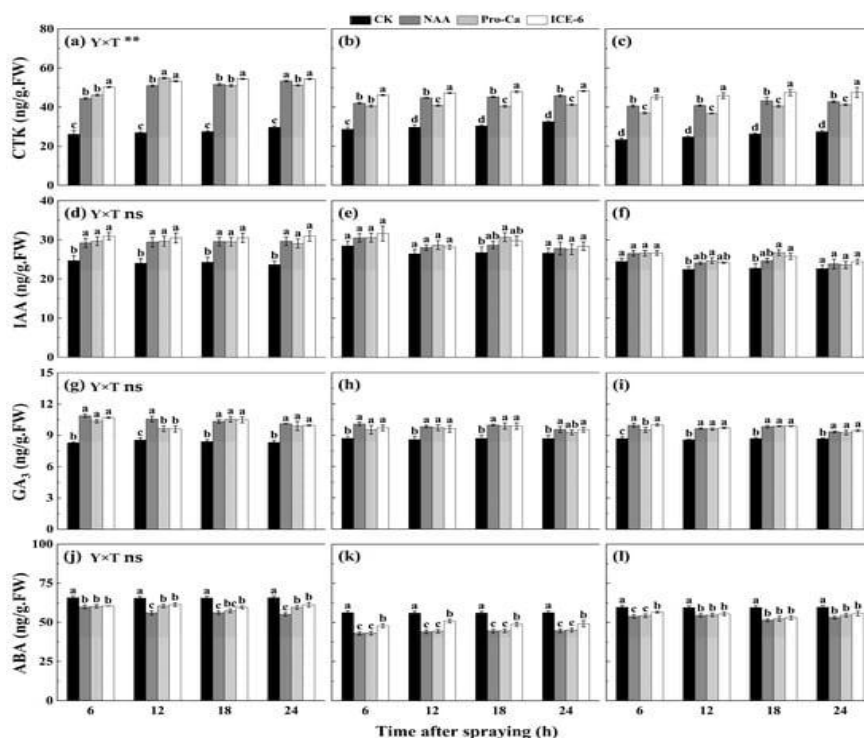
Hình 3. Sự tích lũy N, P_2O_5 và K_2O toàn cây đậu tương ở các giai đoạn sinh trưởng R1, R3, R5 và R7 dưới các nghiệm thức PGR khác nhau từ 2023 – 2025. Các bảng (a, b, c) trong mỗi bộ biểu thị dữ liệu từ năm 2023, 2024 và 2025 tương ứng; (A) Sự tích lũy N, (B) Sự tích lũy P_2O_5 , (C) Sự tích lũy K_2O . Các chữ cái viết thường khác nhau phía trên các cột biểu thị sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các nghiệm thức trong cùng một giai đoạn sinh trưởng trong cùng một năm ($p < 0,05$). Thanh lỗi biểu thị sai số chuẩn của giá trị trung bình ($n = 3$). ** biểu thị sự khác biệt có ý nghĩa ở mức 1%; ns biểu thị không có sự khác biệt có ý nghĩa ở mức 5%.

Xét về ý nghĩa thống kê, sự tích lũy N toàn cây khác biệt chủ yếu ở giai đoạn R5 và R7 (Hình 3A), với NAA luôn cao hơn CK, và ICE-6 và Pro-Ca cũng cho thấy sự gia tăng ở một số giai đoạn. Đối với P_2O_5 , sự khác biệt thường xuyên nhất ở giai đoạn R7 (Hình 3B), khi tất cả các nghiệm thức PGR đều vượt quá CK, đặc biệt là ICE-6. Sự khác biệt về K_2O chủ yếu xảy ra từ R3 đến R7, với các nghiệm thức PGR nhìn chung cao hơn các phương pháp khác, mặc dù mức độ khác biệt không lớn.

Phân tích thống kê cho thấy tương tác $Y \times T$ có ý nghĩa thống kê cao ($p < 0,001$) đối với hàm lượng N và P, nhưng không có ý nghĩa thống kê ($p = 0,508$) đối với hàm lượng K. Điều này cho thấy tác động của các nghiệm thức lên N và P thay đổi đáng kể giữa các năm, trong khi phản ứng về hàm lượng K tương đối ổn định qua các năm.

3.4. Hàm lượng Phytohormone

Trong cả ba năm, xu hướng tổng thể đều nhất quán. Đáp ứng với các nghiệm thức PGR, nồng độ CTK, IAA và GA3 trong lá đậu tương nhìn chung tăng lên so với CK, trong khi nồng độ ABA có xu hướng giảm (Hình 4). Sự gia tăng rõ rệt nhất xảy ra ở CTK dưới tác động của NAA và ICE-6, đặc biệt là ở thời điểm 24 giờ (Hình 4a–c), trong đó Pro-Ca cũng thúc đẩy sự gia tăng nhẹ (khoảng 27,0–83,2%). IAA cho thấy sự dịch chuyển tăng nhẹ (3,5–31,0%) trên tất cả các nghiệm thức (Hình 4d–f), và GA3 tăng đáng kể dưới tác động của NAA và ICE-6 ở thời điểm 6 giờ (tăng 10,0–31,2% so với nhóm đối chứng), với mức tăng nhỏ hơn dưới tác động của Pro-Ca (Hình 4g–i). ABA cho thấy xu hướng giảm so với nhóm đối chứng trong tất cả các nghiệm thức PGR (Hình 4j–l), với mức giảm đạt 6,8–20,5% ở các thời điểm sau đó (18–24 giờ).



Hình 4. Ảnh hưởng của việc phun PGR lên nồng độ phytohormone trong lá đậu tương ở giai đoạn chín quả (R4), được đo trong vòng 24 giờ sau khi xử lý, trong ba mùa vụ liên tiếp (2023, 2024 và 2025; dữ liệu trong mỗi bảng được trình bày từ trái sang phải theo thứ tự thời gian). Các hormone được đo bao gồm CTK (a–c), IAA (d–f), GA3 (g–i) và ABA (j–l). Vạch lỗi biểu thị sai số chuẩn của giá trị trung bình ($n = 3$). Các chữ cái viết thường khác nhau theo chiều dọc cho thấy sự khác biệt đáng kể giữa các nghiệm thức trong cùng một năm ($p < 0,05$). ** biểu thị sự khác biệt đáng kể ở mức 1%; ns biểu thị không có sự khác biệt đáng kể ở mức 5%.

Trong khoảng thời gian từ 6 – 12 giờ sau khi phun (HAS), nồng độ CTK trong các nhóm PGR cao hơn đáng kể so với nhóm đối chứng (CK) ($p < 0,05$). Trong tất cả các năm được khảo sát, GA3 trong nhóm PGR tăng đáng kể ở 6 HAS, mặc dù sự khác biệt giữa các nghiệm thức giảm dần sau đó. Sự giảm ABA trong nhóm PGR chủ yếu được quan sát thấy ở 18–24 HAS, trong khi IAA cho thấy xu hướng tăng nhưng hiếm khi đạt được ý nghĩa thống kê.

Phân tích thống kê cho thấy tương tác $Y \times T$ có ý nghĩa thống kê cao ($p < 0,001$) đối với hàm lượng CTK, trong khi tương tác đối với IAA ($p = 0,202$), GA3 ($p = 0,222$) và ABA ($p = 0,235$) không có ý nghĩa thống kê. Điều này cho thấy tác động của nghiệm thức lên CTK thay đổi đáng kể giữa các năm, trong khi phản ứng của IAA, GA3 và ABA đối với các nghiệm thức tương đối nhất quán qua các năm.

3.5. Giới hạn dư lượng tối đa (MRL) trong hạt và hàm lượng protein, dầu

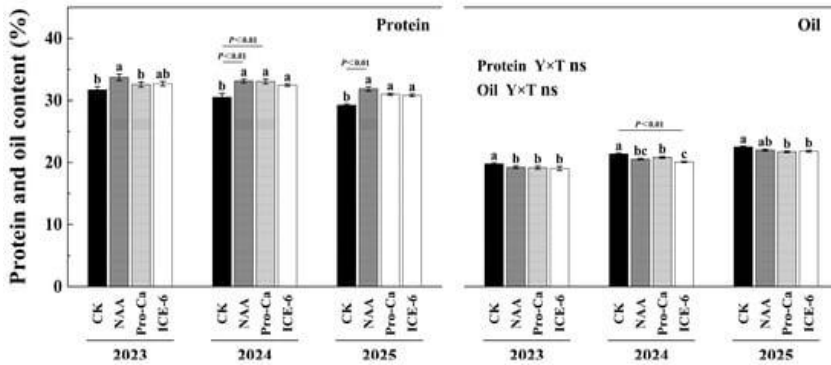
Như thể hiện trong Bảng 2, mức dư lượng của NAA, Pro-Ca và ICE-6 trong hạt đậu tương vẫn ở mức thấp hơn nhiều so với giới hạn dư lượng tối đa (0,05 mg/kg), với giá trị trung bình lần lượt là 0,009, 0,013 và 0,006 mg/kg.

Bảng 2. Nồng độ dư lượng PGR trong hạt đậu tương (2023 – 2025).

Năm	Nghiệm thức	Nồng độ (mg/kg)
2023	CK	0.000 c
	NAA	0.009 ab
	Pro-Ca	0.012 a
	ICE-6	0.006 b
2024	CK	0.000 c
	NAA	0.004 b
	Pro-Ca	0.008 a
	ICE-6	0.002 bc
2025	CK	0.000 c
	NAA	0.013 b
	Pro-Ca	0.020 a
	ICE-6	0.009 b
Nguồn biến thiên		
Y		**
T		**
Y × T		*

Lưu ý: Theo tiêu chuẩn an toàn thực phẩm quốc gia Trung Quốc GB 2763-2021, giới hạn dư lượng tối đa (MRL) đối với hạt đậu tương là 0,05 mg/kg. Đối với cùng một đặc tính, các nghiệm thức có cùng chữ cái trong cùng một năm không có sự khác biệt đáng kể, dựa trên phép thử đa khoảng Duncan ở mức $p < 0,05$, sử dụng mô hình tuyến tính tổng quát. * và ** lần lượt biểu thị sự khác biệt đáng kể ở mức 5% và 1%; ns biểu thị không có sự khác biệt đáng kể ở mức 5%.

Trong suốt ba năm thí nghiệm, hiệu quả của các nghiệm thức vẫn tương đối ổn định, với việc sử dụng PGR làm tăng đáng kể hàm lượng protein trong hạt đậu tương đồng thời làm giảm nhẹ hàm lượng dầu (Hình 5). Tất cả các nghiệm thức bằng PGR đều tạo ra mức protein cao hơn đáng kể so với đối chứng (CK) ($p < 0,05$), với sự gia tăng lớn nhất được quan sát thấy ở NAA ($p < 0,01$, vào năm 2024 và 2025), vượt CK từ 6,4–9,0%. Pro-Ca và ICE-6 cũng cho thấy tác dụng tích cực, làm tăng hàm lượng protein từ 2,7–8,3% so với CK. Ngược lại, việc sử dụng PGR làm giảm hàm lượng dầu trong hạt từ 2,2–6,1% so với CK, cho thấy sự đánh đổi nhất quán giữa lượng protein thu được và năng suất dầu trong các mùa vụ.



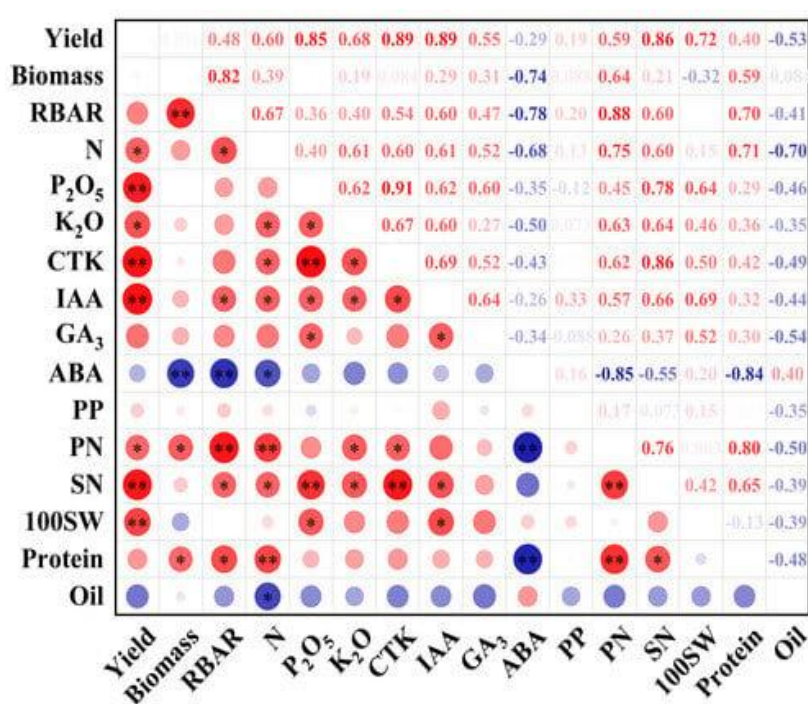
Hình 5. Hàm lượng protein và dầu trong hạt đậu tương được xử lý bằng PGR từ năm 2023 – 2025. Vạch lỗi biểu thị sai số chuẩn của giá trị trung bình ($n = 3$). Các chữ cái viết thường khác nhau theo chiều dọc cho thấy sự khác biệt đáng kể giữa các nghiệm thức trong cùng một năm ($p < 0,05$). ns biểu thị không có sự khác biệt đáng kể ở mức 5%.

Phân tích thống kê cho thấy nồng độ dư lượng bị ảnh hưởng đáng kể bởi tương tác $Y \times T$ ($p = 0,015$), trong khi tác động chính của Y và T đều có ý nghĩa thống kê cao ($p < 0,001$) (Bảng 2). Tương tác cho thấy tác động của nghiệm thức khác nhau giữa các năm, với một

số nghiệm thức cho thấy sự giảm nồng độ dư lượng lớn hơn vào năm 2024 so với năm 2023 và 2025. Tương tác $Y \times T$ không có ý nghĩa thống kê đối với cả hàm lượng protein ($p = 0,544$) và dầu ($p = 0,350$) trong hạt đậu tương. Điều này cho thấy tác động của nghiệm thức lên hàm lượng protein và dầu trong hạt vẫn tương đối nhất quán qua các năm khác nhau.

3.6. Phân tích tương quan

Phân tích tương quan cho thấy năng suất đậu tương có mối liên hệ tích cực mạnh nhất với hàm lượng cytokinin (CTK; $r = 0,89$), axit indole-3-acetic (IAA; $r = 0,89$), hàm lượng photpho (P_2O_5 ; $r = 0,85$), số hạt (SN; $r = 0,86$) và trọng lượng 100 hạt (100SW; $r = 0,72$). Các mối tương quan tích cực vừa phải cũng được quan sát thấy với hàm lượng kali (K_2O ; $r = 0,68$), hàm lượng nitơ (N; $r = 0,60$), số lượng quả (PN; $r = 0,59$), axit gibberellic (GA3; $r = 0,55$) và tỷ lệ phân bố sinh khối sinh sản (RBAR; $r = 0,48$). Ngược lại, axit abscisic (ABA) cho thấy mối tương quan tiêu cực với năng suất ($r = -0,29$), và hàm lượng dầu có mối liên hệ tiêu cực với năng suất ($r = -0,53$). Tổng sinh khối không có mối tương quan đáng kể với năng suất ($r = 0,056$, $p > 0,05$). Hàm lượng protein cho thấy mối tương quan dương thấp ($r = 0,40$). Những kết quả này cho thấy việc cải thiện năng suất có liên quan chặt chẽ đến sự phân bố sinh sản cao hơn, các phytohormone quan trọng (CTK và IAA), đặc điểm hạt giống (SN, 100SW), và dinh dưỡng photpho và kali (Hình 6).



Hình 6. Ma trận tương quan Pearson giữa năng suất đậu tương, sinh khối, tỷ lệ phân bố sinh khối sinh sản (RBAR), hàm lượng dinh dưỡng (N, P_2O_5 , K_2O), phytohormone (CTK, IAA, GA₃, ABA), mật độ cây trồng (PP), các thành phần năng suất (PN biểu thị số quả; SN biểu thị số hạt; 100SW là trọng lượng 100 hạt.) và các đặc điểm chất lượng hạt (hàm lượng protein và dầu). Các tương quan dương được thể hiện bằng màu đỏ và các tương quan âm bằng màu xanh lam, với kích thước vòng tròn tỷ lệ thuận với giá trị tuyệt đối của r. Dấu * biểu thị ý nghĩa thống kê (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$).

4. THẢO LUẬN

Kết quả nghiên cứu này cho thấy PGR khác nhau đã tăng cường năng suất đậu tương thông qua các con đường sinh lý khác nhau, với xu hướng tổng thể vẫn nhất quán qua các năm mặc dù có một số điểm không nhất quán giữa các nghiệm thức.

Sự cải thiện năng suất tổng thể từ việc sử dụng PGR là đáng kể (Bảng 1). Cách giải thích này được củng cố bởi các nghiên cứu trước đây chứng minh sự giảm năng suất tương tự dưới tác động của stress nhiệt theo từng đợt [26,27,28,29]. Tuy nhiên, năng suất năm 2025 thấp hơn so với năm 2023 và 2024, có thể là do tỷ lệ hạt không phát triển cao hơn

do các đợt nhiệt độ cao ngắn hạn, với nhiệt độ tối đa trung bình trong tháng 7 đạt 34,6°C so với 31,9°C trong hai năm còn lại (Hình 1). Ngược lại, tỷ lệ tăng năng suất dưới tác động của PGR năm 2025 vượt trội hơn so với năm 2024, có thể là do hàm lượng nitơ cao hơn trong giai đoạn R5 [30] (Hình 3A) và nồng độ ABA tăng cao trong giai đoạn R4 (Hình 4j-l), cùng nhau có thể đã tăng cường khả năng chịu đựng của cây đối với stress phi sinh học [31] và thúc đẩy quá trình hình thành hạt.

Như thể hiện trong Hình 2, NAA đã gây ra sự gia tăng rõ rệt nhất về tỷ lệ sinh khối được phân bổ cho các cơ quan sinh sản vào năm 2023; Tuy nhiên, hiệu ứng này kém ổn định hơn qua các năm so với Pro-Ca và ICE-6. Hiện tượng quan sát được có thể là do mức ABA giảm (Hình 4j-l) trong các nghiệm thức PGR, có khả năng làm giảm khả năng chịu nhiệt do ABA điều hòa [32]. Vào năm 2025, người ta quan sát thấy sự giảm tích lũy sinh khối thực vật sau khi bón NAA, có thể là do rụng lá do căng thẳng nhiệt [33]. Một lời giải thích hợp lý khác là khả năng của NAA trong việc giảm thiểu căng thẳng phi sinh học vốn dĩ kém nhất quán hơn, một giả thuyết được hỗ trợ bởi các báo cáo trước đó [34, 35, 36].

Các mô hình biến đổi động học hàng năm về hàm lượng nitơ (N), photpho (P) và kali (K) trong toàn bộ cây nhìn chung là nhất quán; tuy nhiên, tổng mức tăng hàm lượng N vào năm 2023 lớn hơn so với mức quan sát được vào năm 2024 và 2025 (Hình 3A). Sự khác biệt này có thể phản ánh sự điều hòa tăng cường của các gen liên quan đến quá trình cố định nitơ và tổng hợp axit amin [37], hoặc, dưới sự điều hòa của tín hiệu hormone nội sinh [38], nhiệt độ trong giai đoạn sinh trưởng R5 – R7 trở nên thuận lợi hơn cho sự phát triển của cây, do đó tăng cường sự sinh sôi và hoạt động của vi khuẩn *Rhizobium*, từ đó kích hoạt sự gia tăng ngắn hạn trong quá trình tích lũy nitơ [39]. Mặc dù cơ chế chính xác vẫn chưa rõ ràng, các nghiên cứu trong tương lai sẽ nhằm mục đích làm sáng tỏ các quá trình này.

Mức độ hormone nội sinh vào năm 2023 cũng cao hơn so với hai năm còn lại (Hình 4), với các cây được xử lý bằng PGR cho thấy sự khác biệt rõ rệt hơn so với CK. Mô hình này có thể liên quan đến nhiệt độ trung bình tương đối thấp hơn trong năm đó, theo đó việc ứng dụng PGR có thể đã tăng cường khả năng tổng hợp hormone của lá - một hiện tượng phù hợp với các phát hiện từ các nghiên cứu khác [40]. Mặt khác, hiện tượng này có thể là do sự tương tác mạnh mẽ hơn giữa CTK, IAA, GA3 và ABA sau khi xử lý bằng PGR, từ đó tăng cường khả năng chịu đựng của cây đậu tương đối với stress phi sinh học [41].

Nhìn chung, sự tương tác giữa Năm và Nghiệm thức ($Y \times T$) thể hiện các mô hình đặc trưng theo từng đặc điểm. Nồng độ dư lượng, hàm lượng CTK, hàm lượng N và P, sự tích lũy sinh khối trong các cơ quan sinh dưỡng và sinh sản, và số quả cho thấy tác động $Y \times T$ đáng kể hoặc rất đáng kể, cho thấy phản ứng của các thông số này đối với các nghiệm thức thay đổi đáng kể qua các năm. Sự biến đổi này có thể liên quan đến sự khác biệt về mức độ phối hợp giữa hormone và chất dinh dưỡng trong các điều kiện môi trường khác nhau, như được hỗ trợ bởi các nghiên cứu trước đây [42, 43].

Ngược lại, hàm lượng protein và dầu trong hạt, hàm lượng K, tỷ lệ phân bổ sinh khối và hầu hết các đặc điểm liên quan đến năng suất (ngoại trừ số quả) không thể hiện tương tác $Y \times T$ đáng kể, cho thấy tác động của nghiệm thức lên các đặc điểm này tương đối ổn định qua các năm. Sự ổn định này có thể là do sự kiểm soát di truyền mạnh mẽ của thành phần hạt [44], sự sẵn có tương đối dồi dào và ổn định của K trong đất thí nghiệm [45], và

sự cân bằng sinh lý vốn có của việc phân bố sinh khối và hình thành các thành phần năng suất theo các biện pháp quản lý nhất định [46].

Ngược lại, các đặc điểm thể hiện tương tác $Y \times T$ đáng kể có xu hướng dễ bị biến đổi giữa các năm hơn, chủ yếu do các sự kiện căng thẳng nhiệt ngắn hạn (Hình 1, với nhiệt độ tối đa trung bình trong tháng 7 đạt $34,6^{\circ}\text{C}$). Căng thẳng nhiệt tạm thời như vậy có thể ức chế quá trình quang hợp, đẩy nhanh quá trình lão hóa lá và làm thay đổi sự phân bố chất dinh dưỡng. Bón phân N, P và K đầy đủ và cân bằng đóng vai trò quan trọng trong việc giảm thiểu những tác động bất lợi này (Hình 3, trong đó các nghiệm thức PGR làm tăng đáng kể sự tích lũy chất dinh dưỡng trong cây): nitơ hỗ trợ khả năng quang hợp và phòng vệ chống oxy hóa [47]; photpho tăng cường quá trình trao đổi chất năng lượng, phát triển rễ và ổn định màng [48]; và kali điều chỉnh cân bằng thẩm thấu, độ dẫn khí khổng và hoạt động của enzyme [49]. Tác dụng hiệp đồng của N, P và K giúp duy trì cân bằng sinh lý và giảm tổn thất năng suất dưới điều kiện căng thẳng nhiệt tạm thời [47,48,49], nhấn mạnh tầm quan trọng của việc tích hợp các đánh giá khí hậu cụ thể theo từng năm – đặc biệt là sự xuất hiện và cường độ của căng thẳng nhiệt ngắn hạn – vào việc đánh giá hiệu quả xử lý.

Phân tích tương quan (Hình 6) cho thấy các tác động quan sát được của hàm lượng protein và dầu lên năng suất có thể không mang tính đại diện, vì không có mối quan hệ nhân quả vốn có giữa các đặc điểm chất lượng này và năng suất [50]. Mối tương quan giữa mức NPK và hàm lượng hormone rất mạnh, phù hợp với các phát hiện trước đây [51, 52]. Trong số đó, mối tương quan giữa photpho (P) và cytokinin (CTK) là rõ rệt nhất. Phù hợp với quan sát này, các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng P có thể điều chỉnh các gen quan trọng liên quan đến truyền tín hiệu CTK [53]. Tuy nhiên, bản chất tương tác của chúng sau khi ứng dụng PGR trong đậu tương vẫn chưa được hiểu rõ, và phạm vi khu vực canh tác rộng lớn khiến việc xác định liệu các mô hình như vậy có nhất quán trên các vùng trồng khác nhau hay không trở nên khó khăn. Việc giải quyết khoảng trống kiến thức này sẽ là trọng tâm của các nghiên cứu trong tương lai, với mục đích làm sáng tỏ các cơ chế sinh lý và phân tử tiềm ẩn.

5. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu này cho thấy việc sử dụng các chất điều hòa sinh trưởng thực vật (NAA, Pro-Ca và ICE-6) đã điều chỉnh các yếu tố nội tại quan trọng trong đậu tương, bao gồm nồng độ hormone nội sinh và nồng độ nitơ, photpho và kali. Sự điều chỉnh này đã tăng cường phân bố sinh khối cho các cơ quan sinh sản, tăng tiềm năng năng suất và cải thiện hàm lượng protein trong hạt, trong khi dư lượng vẫn ở mức thấp hơn nhiều so với ngưỡng an toàn ($0,05 \text{ mg/kg}$), cho thấy không có nguy cơ đối với sức khỏe con người.

NAA có tác dụng rõ rệt nhất, làm tăng đáng kể sự phân bố sinh khối sinh sản và tích lũy nitơ, dẫn đến năng suất cao nhất. Trong điều kiện khí hậu nông nghiệp đặc thù của Tân Cương, việc sử dụng NAA ở liều lượng 300 g/ha đã cải thiện đáng kể năng suất; tuy nhiên, cần thận trọng khi khái quát hóa các kết quả này từ thử nghiệm quy mô nhỏ duy nhất này.

Những phát hiện này làm rõ các cơ chế sinh lý mà qua đó các chất điều hòa sinh trưởng thực vật tăng cường năng suất đậu tương và cung cấp cơ sở để tối ưu hóa năng suất thông qua việc điều chỉnh hormone và chất dinh dưỡng một cách có mục tiêu. Cần tiến hành các thử nghiệm đa địa điểm, đa năm để xác nhận tính vững chắc và khả năng áp dụng rộng rãi hơn của các kết quả này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Waqar, A.; Li, S.; Liu, Y.; Jiang, K.; Wang, S.; Yang, M.; Yuan, S.; Chen, Q.; Hu, L.; Xu, L. Genetic yield improvements and associated physiological and agronomic traits in soybean cultivars released from 1940 to 2021 in Northeast China. *Field Crop. Res.* **2025**, *328*, 109956. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
2. WNBS; PRC. Website of National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Available online: <https://data.stats.gov.cn/english/easyquery.htm?cn=E0103> (accessed on 10 September 2025).
3. David, S.; Cesar, A.; Iker, A. Additive effects of heatwave and water stresses on soybean seed yield is caused by impaired carbon assimilation at pod formation but not at flowering. *Plant Sci.* **2022**, *321*, 111320. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
4. Sankarapillai, L.; Adhikari, B.; Bista, M.; Shrestha, A.; Stetina, S.; Reddy, K.; Bheemanahalli, R. High night temperature disrupts the assimilate utilization and yield potential in soybean. *Plant Stress* **2025**, *16*, 100826. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
5. Di Mauro, G.; Rotundo, J. Lodging dynamics and seed yield for two soybean genotypes with contrasting lodging-susceptibility. *Eur. J. Agron.* **2025**, *163*, 127445. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
6. Komaljeet, G.; Pankaj, K.; Shivanti, N.; Rajnish, S.; Ajay, K.; Ivan, I.; Ekaterina, A. Physiological perspective of plant growth regulators in flowering, fruit setting and ripening process in citrus. *Sci. Hortic.* **2023**, *309*, 111628. [[Google Scholar](#)]
7. Cannon, B.; Shear, H.; Johnson, C.; Rice, J.; Lofton, J. Physiological Effects and Economic Impact of Plant Growth Regulator Applications on Soybean. *Agronomy* **2025**, *15*, 965. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
8. Cheng, H.; Xu, Q.; Ding, C.; Meng, Z.; Zhao, F.; Gan, Y.; Song, X.; Zhao, Q. Plant Growth Regulators Reduce Flower and Pod Shedding and Optimize Pod Distribution in Soybean in Northwest China. *Agronomy* **2025**, *15*, 924. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
9. Dubey, A.; Malla, M.; Kumar, A.; Khan, M.; Kumari, S. Seed bio-priming with ACC deaminase-producing bacterial strains alleviates impact of drought stress in Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). *Rhizosphere* **2024**, *30*, 100873. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
10. Huang, X.; Zheng, D.; Feng, N.; Huang, A.; Zhang, R.; Meng, F.; Zhou, H. Effects of prohexadione calcium spraying during the booting stage on panicle traits, yield, and related physiological characteristics of rice under salt stress. *PeerJ* **2023**, *11*, e14673. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
11. Ishfaq, S.; Ding, Y.; Liang, X.; Guo, W. Advancing lodging resistance in maize: Integrating genetic, hormonal, and agronomic insights for sustainable crop productivity. *Plant Stress* **2025**, *15*, 100777. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
12. Musacchi, S.; Sheick, R.; Mia, M.; Serra, S. Studies on physiological and productive effects of multi-leader training systems and Prohexadione-Ca applications on apple cultivar 'WA 38'. *Sci. Hortic.* **2023**, *312*, 111850. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
13. Ahmed, I.; Ali, E.; Gad, A.; Bardisi, A.; El-Tahan, A.; Abd Esadek, O.; Gendy, A. Impact of plant growth regulators spray on fruit quantity and quality of pepper

- (*Capsicum annuum* L.) cultivars grown under plastic tunnels. *Saudi J. Biol. Sci.* **2022**, 29, 2291–2298. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
14. Cokuraj, M.; Manokari, M.; Mohammad, F.; Alatar, A.; Shekhawat, M. Synergistic effects of growth regulators and silicon nanoparticles on enhancing morpho-structural stability in *Vitex agnus-castus* L. plantlets. *S. Afr. J. Bot.* **2025**, 177, 500–509. [[Google Scholar](#)]
 15. ISO 10390:2005; Soil Quality – Determination of pH. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2005.
 16. Olsen, S.; Cole, C.; Watanabe, F. *Estimation of Available Phosphorus in Soils by Extraction with Sodium Bicarbonate*; US Government Printing Office: Washington, DC, USA, 1954; Volume 934. [[Google Scholar](#)]
 17. Pratt, P. Potassium. In *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*; Black, C.A., Ed.; ASA-SSSA: Madison, WI, USA, 1965; pp. 1022–1030. [[Google Scholar](#)]
 18. Shamim, M.; Chilawal, A.; Haramoto, E.; Naeve, S.; Poffenbarger, H.; Purcell, L.; Salmeron, M. Evaluating the impact of cover cropping and late-season N applications on soybean growth and biological N fixation. *Field Crop. Res.* **2025**, 330, 109960. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 19. Fehr, W.; Caviness, C. Stages of Soybean Development. Special Report 80, Iowa Agricultural Experiment Station, Iowa Cooperative External Series, Iowa State University, Ames. 1971. Available online: <https://dr.lib.iastate.edu/handle/20.500.12876/90239> (accessed on 1 March 2023).
 20. Nazir, F.; Khatoon, S.; Mahajan, M.; Kumari, S.; Alajmi, M.; Rehman, M.; Khan, M. Enhanced arsenic stress tolerance in landrace and improved rice cultivars through modulation of gibberellic acid (GA₃) synthesis and antioxidant metabolism via phosphorus and silicon supplementation. *Plant Stress* **2024**, 13, 100511. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 21. Dávila-Lara, A.; Rahman-Soad, A.; Reichelt, M.; Mithöfer, A. Carnivorous *Nepenthes x ventrata* plants use a naphthoquinone as phytoanticipin against herbivory. *PLoS ONE* **2021**, 16, e0258235. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 22. Nidhi; Iqbal, N.; Khan, N. Synergistic effects of phytohormones and membrane transporters in plant salt stress mitigation. *Plant Physiol. Biochem.* **2025**, 221, 109685. [[Google Scholar](#)]
 23. Badia, M.; Costa, J.; Zucchetti, J.; Pavlovic, T.; Calace, P.; Saigo, M.; Wheeler, M. Protein characterization of the soybean malic enzyme family to select metabolic targets for seed oil improvement. *Plant Sci.* **2025**, 360, 112707. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 24. DB37/T 3760-2019; National Public Service Platform for Standards Information. Shandong Provincial Local Standard—Determination of Absciscic Acid, Naphthaleneacetic Acid, Forchlorfenuron and Uniconazole in Fertilizers—High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) Method. ShanDong Administration for Market Regulation: Jinan, China, 2019. Available

online: <https://std.samr.gov.cn/db/search/stdDBDetailed?id=998D3D4C0EE8A099E05397BE0A0AF5E3> (accessed on 10 October 2023).

25. GB 2763-2021; National Food Safety Standard—Maximum Residue Limits for Pesticides in Food. Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China: Beijing, China, 2021. Available online: https://www.moa.gov.cn/ztl/sqxzjcgs/xzjcbz/202506/t20250626_6475099.htm (accessed on 10 July 2025).
26. Xu, G.; Singh, S.; Reddy, V.; Barnaby, J.; Sicher, R.; Li, T. Soybean grown under elevated CO₂ benefits more under low temperature than high temperature stress: Varying response of photosynthetic limitations, leaf metabolites, growth, and seed yield. *J. Plant Physiol.* **2016**, *205*, 20–32. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
27. Hill, C.; Angessa, T.; Westcott, S.; McFawn, L.; Shidelmoghanloo, H.; Han, Y.; Li, C. Evaluation of the impact of heat stress at flowering on spikelet fertility and grain quality in barley. *Agri. Commun.* **2024**, *2*, 100066. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
28. Lu, T.; Li, G.; Ma, J.; Huang, H.; Fu, W.; Chen, T.; Wang, W.; Zeng, Y.; Chen, M.; Fu, G.; et al. ATP utilization efficiency plays a key role in determining rice quality under high-temperature conditions. *Plant Physiol. Biochem.* **2025**, *221*, 109582. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
29. Tidy, A.; Siles, L.; Jacott, C.; Wells, R.; Kurup, S.; Wilson, Z. Large scale phenotyping on the effect of heat and cold stress on Brassica napus during floral development. *Plant Stress* **2025**, *17*, 100957. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
30. Siddique, A.; Shabala, S.; Li, C.; Chen, Z.; Varshney, R.; Zhao, C.; Zhou, M. Reducing heat stress damage in cereal crops through agronomic management and breeding strategies. *Plant Stress* **2025**, *16*, 100888. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
31. Mahajan, M.; Poor, P.; Kaur, H.; Aher, R.; Palakolanu, S.; Khan, M. Salt stress tolerance and abscisic acid in plants: Associating role of plant growth regulators and transcription factors. *Plant Physiol. Biochem.* **2025**, *228*, 110303. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
32. Li, N.; Euring, D.; Cha, J.; Lin, Z.; Lu, M.; Huang, L.; Kim, W. Plant Hormone-Mediated Regulation of Heat Tolerance in Response to Global Climate Change. *Front. Plant Sci.* **2021**, *11*, 627969. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
33. Liu, Y.; Mizuta, K.; Morokuma, M.; Toyota, M. Effects of combined high temperature and water stress on soybean growth and physiological processes in a temperature gradient chamber. *Field Crop. Res.* **2025**, *333*, 110063. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
34. Tang, X.; Wang, Z.; Zong, F.; Xue, X.; Gao, J.; Li, S.; Wang, S.; He, B.; Li, W.; Wu, B.; et al. Impact of naphthalene acetic acid and Piriformospora indica on WOX gene expression and rooting in woody ornamentals. *Sci. Hortic.* **2025**, *350*, 114330. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
35. Butova, V.; Bauer, T.; Polyakov, V.; Minkina, T. Advances in nanoparticle and organic formulations for prolonged controlled release of auxins. *Plant Physiol. Biochem.* **2023**, *201*, 107808. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

36. Mathur, P.; Tripathi, D.; Frantiska, F.; Mukherjee, S. Auxin-mediated molecular mechanisms of heavy metal and metalloid stress regulation in plants. *Environ. Exp. Bot.* **2022**, *196*, 104796. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
37. Zhang, Y.; Fu, Y.; Xian, W.; Li, X.; Feng, Y.; Bu, F.; Shi, Y.; Chen, S.; Velzen, R.; Battenberg, K.; et al. Comparative phylogenomics and phylotranscriptomics provide insights into the genetic complexity of nitrogen-fixing root-nodule symbiosis. *Plant Commun.* **2024**, *5*, 100671. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
38. Castroverde, C.; Dina, D. Temperature regulation of plant hormone signaling during stress and development. *J. Exp. Bot.* **2021**, *72*, 7436–7458. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
39. Fudge, R.; Gardner, P.; Denison, R.; Burghardt, L.; Grossman, J. Temperature and host plant ecotype drive nitrogen fixation, but not nodule rhizobia community composition, in hairy vetch. *Rhizosphere* **2025**, *34*, 101077. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
40. Shehzad, M.; Munir, M.; Nazim, M.; Tahir, M.; Maqbool, M.; Nawaz, M.; Javeed, H.; Ghamdi, A. Evaluating the impact of phyto-hormones on the morpho-biochemical traits of soybean through seed treatment and foliar application. *J. King Saud Univ. Sci.* **2024**, *36*, 103446. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
41. Waadt, R.; Seller, C.; Hsu, P.; Takahashi, Y.; Munemasa, S.; Schroeder, J. Plant hormone regulation of abiotic stress responses. *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.* **2022**, *23*, 680–694. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
42. Vega, A.; Brien, J.; Gutiérrez, R. Nitrate and hormonal signaling crosstalk for plant growth and development. *Curr. Opin. Plant Biol.* **2019**, *52*, 155–163. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
43. Jia, Z.; Giehl, R.; Wirén, N. Nutrient–hormone relations: Driving root plasticity in plants. *Mol. Plant* **2022**, *15*, 86–103. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
44. Duan, Z.; Li, Q.; Wang, H.; He, X.; Zhang, M. Genetic regulatory networks of soybean seed size, oil and protein contents. *Front. Plant Sci.* **2023**, *14*, 1160418. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
45. Han, F.; Huang, J.; Liu, K.; Fan, H.; Shi, X.; Chen, J.; Jiang, X.; Liu, G.; Liu, S.; Zhang, L.; et al. Soil potassium regulation by changes in potassium balance and iron and aluminum oxides in paddy soils subjected to long-term fertilization regimes. *Soil Tillage Res.* **2021**, *214*, 105168. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
46. Zhang, W.; Li, H.; Zhang, J.; Shen, J.; Brown, H.; Wang, E. Contrasting patterns of accumulation, partitioning, and remobilization of biomass and phosphorus in a maize cultivar. *Crop J.* **2022**, *10*, 254–261. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
47. Sikder, R.; Wang, X.; Zhang, H.; Gui, H.; Dong, Q.; Jin, D.; Song, M. Nitrogen Enhances Salt Tolerance by Modulating the Antioxidant Defense System and Osmoregulation Substance Content in *Gossypium hirsutum*. *Plants* **2020**, *9*, 450. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
48. Bucio, J.; González, J.; Bucio, J. Review: Adaptation of plants to phosphorus scarcity: From nutritional crosstalk to organellar function. *Plant Sci.* **2025**, *359*, 112685. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

49. Bhardwaj, S.; Kapoor, B.; Kapoor, D.; Thakur, U.; Dolma, Y.; Raza, A. Manifold roles of potassium in mediating drought tolerance in plants and its underlying mechanisms. *Plant Sci.* **2025**, *351*, 112337. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
50. Kaniz, F.; Mannan, M.; Karim, M.; Akter, M.; Akter, M.; Dola, D.; Jarin, A.; Islam, M. Enhancing soybean growth, yield, and seed protein by TiO₂ nanoparticles and *Brevibacterium sediminis* under drought stress. *Heliyon* **2025**, *11*, e43499. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
51. Martins, J.; Wawrzyniak, M.; López, J.; Mendes, M.; Mokhtari, A.; Chmielarz, P. Regulation of the cytokinin metabolic spectrum and morphogenesis in *Quercus robur* (L.) in vitro by exogenous cytokinins and activated charcoal. *Ind. Crops Prod.* **2025**, *233*, 121362. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
52. Kumari, S.; Nazir, F.; Maheshwari, C.; Kaur, H.; Gupta, R.; Siddique, K.; Khan, M. Plant hormones and secondary metabolites under environmental stresses: Enlightening defense molecules. *Plant Physiol. Biochem.* **2024**, *206*, 108238. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
53. Zheng, Y.; Lou, M.; Jiao, N. Transcriptomic insights into phosphorus-mediated wheat tillering: Auxin-cytokinin crosstalk coordinates phenylpropanoid and glycerophospholipid metabolism. *Environ. Exp. Bot.* **2025**, *237*, 106199. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]