

TÁC ĐỘNG CỦA NGẬP ÚNG Ở GIAI ĐOẠN SINH TRƯỞNG SỚM ĐẾN NĂNG SUẤT VÀ THÀNH PHẦN HẠT ĐẬU NÀNH

Chengjun Wu¹, Liliana Florez-Palacios¹, Andrea Acuna¹, Derrick Harrison¹, Daniel Rogers¹, John Carlin², Leandro Mozzoni¹, Henry T. Nguyen³, Grover Shannon³, Caio Canella Vieira³

¹ Bộ môn Nông nghiệp, Khoa Khoa học Cây trồng, Đất và Môi trường, Đại học Arkansas, Fayetteville, Arkansas, Hoa Kỳ

² Bộ môn Nông nghiệp, Chương trình Cải tiến Cây trồng Arkansas, Đại học Arkansas, Fayetteville, Arkansas, Hoa Kỳ

³ Khoa học & Công nghệ Cây trồng, Đại học Missouri, Columbia, Missouri, Hoa Kỳ

TÓM TẮT

Căng thẳng do ngập úng đang là mối đe dọa ngày càng tăng đối với sản lượng đậu nành toàn cầu [*Glycine max* (L.) Merr.] vì tần suất và cường độ của lượng mưa cực đoan đang gia tăng do biến đổi khí hậu. Đậu nành rất nhạy cảm với ngập úng và đã quan sát thấy tình trạng mất năng suất đáng kể do một loạt các phản ứng sinh lý tiêu cực do tình trạng thiếu oxy gây ra. Do đó, nhu cầu cấp thiết phải phát triển các kiểu gen chịu ngập úng. Nghiên cứu này đã đánh giá năng suất hạt và hàm lượng protein và dầu trong hạt của 31 kiểu gen đậu nành trong hơn 2 năm trong cả điều kiện ngập và không ngập, trong đó ngập lụt kéo theo tình trạng ngập nước một phần trong 4 ngày trong giai đoạn sinh trưởng sinh trưởng sớm R1/R2. Các mô hình tuyến tính hiệu ứng hỗn hợp đã được sử dụng để đánh giá tác động của điểm số thiệt hại do ngập (FDS, thang điểm 1 – 4) đối với các kiểu hình quan sát được, cũng như sự khác biệt trong các kiểu hình quan sát được giữa các kiểu gen chống chịu, trung bình và mẫn cảm trong các phương pháp xử lý ngập và không ngập. Không có tác động đáng kể nào của FDS đối với hàm lượng protein và dầu trong hạt. Ngoài ra, không có sự khác biệt đáng kể nào về các kiểu hình này được quan sát thấy giữa các phương pháp xử lý ngập và không ngập trên các kiểu gen khác nhau. Trung bình, đối với mỗi đơn vị tăng trong FDS, năng suất hạt giảm 432,7 kg/ha (17,4%). Các kiểu gen chống chịu bị mất năng suất khoảng 33% giữa các phương pháp xử lý ngập và không ngập, trong khi các kiểu gen vừa phải và mẫn cảm bị mất năng suất lần lượt là 44% và 51%. Những tiến bộ trong lĩnh vực hệ gen đang hứa hẹn cho việc xác định và kết hợp các alen chịu ngập mới thông qua lai tạo thực vật, có khả năng giảm thiểu tổn thất năng suất do ngập úng gây ra trong các điều kiện môi trường khác nhau. Tóm tắt bằng ngôn ngữ thông thường ngập úng là một vấn đề đáng kể trong sản xuất đậu nành vì nó ảnh hưởng tiêu cực đến sự phát triển và năng suất của cây trồng. Nghiên cứu này đã điều tra 31 kiểu gen đậu nành trong hơn 2 năm trong điều kiện ngập và không ngập. Kết quả cho thấy ngập lụt làm giảm đáng kể năng suất đậu nành, với cây chống chịu mất khoảng 33% và cây mẫn cảm mất tới 51%. Điều thú vị là ngập úng không ảnh hưởng đến thành phần hạt bao gồm hàm lượng protein và dầu của hạt đậu nành. Các phát hiện cho thấy rằng việc lai tạo đậu nành chịu được ngập úng là rất quan trọng để đảm bảo tính bền vững của sản xuất đậu nành, đặc biệt là khi rủi ro lũ lụt ngày càng tăng liên quan đến biến đổi khí hậu.

1. GIỚI THIỆU

Ngập úng là một căng thẳng phi sinh học đáng kể gây ra những tác động bất lợi đến sự phát triển của cây trồng và tổng sản lượng cây trồng, ảnh hưởng đến khoảng 10% diện tích đất canh tác toàn cầu (Kauret và cs, 2020; Shabala, 2011; Voesenek & Sasidharan,

2013). Do biến đổi khí hậu và tác động trực tiếp của nó đến động lực thủy văn-khí hậu, các mô hình mô phỏng dự đoán rằng cường độ và tần suất của các sự kiện lũ lụt đang gia tăng khi nhiệt độ toàn cầu tăng lên (Rodell & Li, 2023), làm trầm trọng thêm thiệt hại về sản lượng cây trồng trên toàn thế giới (Mustroph, 2018; Pathak và cs, 2017; Zhou và cs, 2021). Trong 15 năm qua, lũ lụt đã trở thành thảm họa nông nghiệp lớn thứ hai ở Hoa Kỳ, gây ra thiệt hại hơn 400 tỷ đô la trên tất cả các lĩnh vực của nền kinh tế (CRED, 2020; Kim và cs, 2023; Teh & Khan, 2021). Ví dụ, riêng các trận lũ năm 2019 dọc theo các con sông Mississippi, Missouri và Arkansas đã gây ra hơn 24 tỷ đô la thiệt hại về nông nghiệp cũng như thiệt hại về cơ sở hạ tầng (lần lượt là 7,5, 13,2 và 3,7 tỷ đô la) (Trung tâm thông tin môi trường quốc gia của NOAA, 2024). Đậu nành [*Glycine max* (L.) Merr.] rất nhạy cảm với tình trạng ngập lụt trong quá trình nảy mầm của hạt (Wu, Chen và cs, 2017) và các giai đoạn tăng trưởng sinh dưỡng và sinh trưởng sớm (Fehr & Caviness, 1977; Ploschuk cs, 2022; Rhine cs, 2010). Việc cung cấp oxy không đủ cho quá trình hô hấp của rễ trong đất bão hòa dẫn đến tình trạng thiếu oxy (Grable, 1966; Russell cs, 1990). Do đó, có thể quan sát thấy nhiều triệu chứng do ngập úng ở cây đậu nành bao gồm giảm nảy mầm hạt và đứng cây, lá vàng và hoại tử, giảm sinh trưởng rễ và nốt sần, thân phì đại, còi cọc, rụng lá, mất năng suất đáng kể và cuối cùng là cây chết (Bacanamwo & Purcell, 1999; Oosterhuis và cs, 1990; Wu, Chen và cs, 2017). Nền tảng của các triệu chứng do ngập úng bao gồm giảm toàn diện nhiều quá trình sinh lý và sinh hóa, bao gồm quang hợp, đồng hóa cacbon, cố định đạm, hoạt động của các enzym chống oxy hóa, biểu hiện các gen liên quan đến quang hợp và tổng hợp diệp lục, đóng khí khổng, thoát hơi nước, tích tụ các nguyên tố khoáng và nồng độ nitơ và photpho trong chồi (Bacanamwo & Purcell, 1999; Jackson & Colmer, 2005; Oosterhuis và cs, 1990; Wu, Chen và cs, 2017). Mức độ nghiêm trọng của các triệu chứng bị ảnh hưởng bởi giai đoạn tăng trưởng của tần suất căng thẳng (Oosterhuis và cs, 1990), thời gian căng thẳng (Scott và cs, 1989), điều kiện môi trường trong và sau căng thẳng (Wu, Zeng và cs, 2017), cũng như nền tảng di truyền đậu nành (Fletcher và cs, 2023; Rhine và cs, 2010; Shannon và cs, 2005). Do đó, mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá tác động của căng thẳng ngập nước 4 ngày ở giai đoạn sinh trưởng sớm R1/R2 (Fehr & Caviness, 1977) đối với năng suất và hàm lượng protein và dầu hạt của một nhóm gồm 31 kiểu gen đậu nành có phản ứng khác nhau đối với căng thẳng ngập úng, bao gồm cả những phản ứng có nguồn gốc từ các chu kỳ nhân giống tiên tiến để chịu ngập. Cho đến nay, tình trạng mất năng suất hạt do hậu quả của căng thẳng ngập nước đã được ghi nhận đầy đủ; tuy nhiên, có một khoảng trống trong tài liệu liên quan đến tác động của ngập úng đối với thành phần hạt đậu nành. Do đó, nghiên cứu này đã cố gắng giải quyết khoảng trống này bằng cách đánh giá những thay đổi về cả năng suất hạt và thành phần hạt trong điều kiện ngập lụt.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

2.1. Vật liệu thực vật và thí nghiệm thực địa

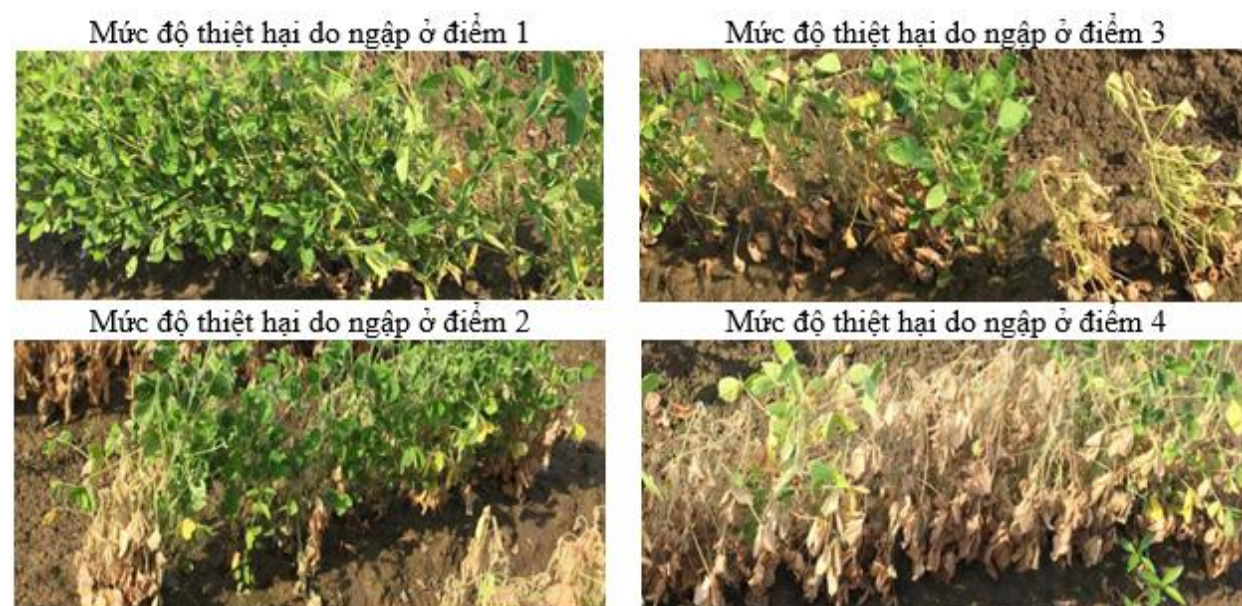
Tổng cộng có 31 kiểu gen đậu nành được đưa vào thí nghiệm này, trong đó có năm giống thương mại biến đổi gen có khả năng kháng thuốc diệt cỏ dicamba (axit 3,6-dichloro-2-methoxybenzoic, Công ty Monsanto) và 26 là dòng lai do Khoa Nông nghiệp của Đại học Arkansas và Đại học Missouri phát triển (lần lượt là 10 và 16) (Bảng S1). 26 dòng lai này có nguồn gốc từ 25 quần thể lưỡng tính độc đáo. Các kiểu gen có phản ứng tương phản với điều kiện ngập úng; chín kiểu gen được phân loại là miễn cảm do ngập úng, 13 là trung bình và chín là chống chịu. Các thử nghiệm thực địa đã được tiến hành trên đất thịt pha bùn DeWitt tại Trung tâm nghiên cứu và mở rộng lúa gạo ở Stuttgart, AR

(34°27'56.1" Bắc, 91°25'20.4" Tây) vào các năm 2019 và 2020. Các thí nghiệm được sắp xếp theo thiết kế khối đầy đủ ngẫu nhiên, ba lần lặp lại. Mỗi ô bao gồm hai hàng dài 4,6 m cách nhau 0,76 m. Các ô được thu hoạch bằng máy gặt đập liên hợp để xác định năng suất hạt được điều chỉnh theo độ ẩm hạt 13%, cũng như để đánh giá hàm lượng protein và dầu trong hạt. Hàng năm, các kiểu gen được thử nghiệm trong điều kiện ngập và không ngập được đặt cạnh nhau trong một cánh đồng bằng phẳng. Xử lý ngập bao gồm việc ngập nước một phần trong 4 ngày (cách bề mặt đất 10–16 cm) ở giai đoạn sinh trưởng sớm R1/R2 (Fehr & Caviness, 1977). Xử lý không ngập bao gồm tưới rãnh theo các thông lệ tiêu chuẩn.

2.2. Thu thập và phân tích dữ liệu

2.2.1. Điểm thiệt hại do ngập úng, năng suất hạt và thành phần hạt

Trong quá trình xử lý ngập, các kiểu gen được đánh giá về điểm thiệt hại do lũ (FDS) theo thang điểm 1–4 sau 7 ngày loại bỏ nước. Điểm 1 biểu thị $\leq 10\%$ số cây biểu hiện triệu chứng thiệt hại do ngập úng; điểm 2 biểu thị $>10\%$ và $\leq 30\%$ số cây bị thiệt hại; điểm 3 biểu thị $>30\%$ và $\leq 50\%$; và điểm 4 biểu thị $>50\%$ số cây thiệt hại do ngập úng (Hình 1). Trong các quá trình xử lý, tất cả các kiểu gen và sự lặp lại trong mỗi năm thử nghiệm đều được đánh giá về năng suất hạt và thành phần hạt. Năng suất hạt (kg/ha) được thu được bằng máy gặt đập liên hợp khi lúa chín hoàn toàn R8 (Fehr & Caviness, 1977) và điều chỉnh theo độ ẩm 13%. Mẫu 20 g hạt nguyên vẹn được phân tích bằng phương pháp quang phổ phản xạ hồng ngoại gần (NIR) sử dụng Thiết bị NIR At-line DA 7250 (Pertten Instruments AB) để xác định hàm lượng protein và dầu trong hạt (g/kg) được điều chỉnh theo trọng lượng khô.



Hình 1. Biểu diễn trực quan về mức độ nghiêm trọng của điểm số thiệt hại do ngập theo thang điểm từ 1 đến 4. Điểm 1 biểu thị $\leq 10\%$ cây biểu hiện triệu chứng thiệt hại liên quan đến ngập và điểm 4 biểu thị $>50\%$ cây biểu hiện thiệt hại liên quan đến ngập.

Giá trị trung bình đã điều chỉnh của FDS cho mỗi kiểu gen trong sáu lần quan sát (kết hợp 2 năm \times ba lần lặp lại) được tính toán dựa trên mô hình tuyến tính hiệu ứng hỗn hợp được thực hiện trong R (Nhóm cốt lõi R, 2024) với gói “lmerTest” (Kuznetsova và cs, 2017). Mô hình bao gồm FDS_{nitjcr} làm biến phản ứng và các biến phụ thuộc bao gồm hiệu ứng cố định của “kiểu gen” Gen_i , hiệu ứng ngẫu nhiên “môi trường” (Kết hợp năm và địa điểm) Env_t , tương tác giữa “kiểu gen” và “môi trường” $(Gen \times Env)_{it}$, hiệu ứng

lồng nhau của “lần lặp lại” trong “môi trường” (Rep|Env)_{jt}, hiệu ứng thử nghiệm của “phạm vi” (biến thể không gian trên trục Y) trong “môi trường” (Rng|Env)_{rt}, cũng như hiệu ứng lồng nhau của “cột” (biến thể không gian trên trục X) trong “môi trường” (Col|Env)_{ct} (Phương trình 1). Các giá trị trung bình đã điều chỉnh thu được bằng cách sử dụng hàm “Is_means” của “lmerTest”. Sau đó, kiểu gen được phân loại thành chống chịu, trung bình và mẫn cảm bằng cách sử dụng phương pháp phân cụm K-means (Mac-Queen và cs, 1967). Hàm “kmeans” của gói “cluster” (Maechler và cs, 2023) được gọi với “trung tâm” bằng ba, cũng như số lượng các tập hợp ngẫu nhiên “nstart” bằng 100 để giảm thiểu sự thay đổi trong cụm.

$$FDS_{itjrc} = \mu + Gen_i + Env_t + (Gen \times Env)_{it} + (Rep|Env)_{jt} + (Rng|Env)_{rt} + (Col|Env)_{ct} + \varepsilon_{itjrc} \quad (1)$$

trong đó FDS_{itjrc} là FDS quan sát được trên thang điểm 1–4, μ là giá trị trung bình tổng thể cho FDS; Gen_i là hiệu ứng kiểu gen cố định với $i = 1, 2, \dots, 31$; Env_t là hiệu ứng môi trường ngẫu nhiên với $Env_t \sim N(0, \sigma^2_{Env})$, $t = 1, 2$; Rep_j là hiệu ứng lặp lại ngẫu nhiên với $Rep_j \sim N(0, \sigma^2_{Rep})$, $j = 1, 2, 3$; Rng_r là hiệu ứng khoảng ngẫu nhiên với $Rng_r \sim N(0, \sigma^2_{Rng})$, $r = 1, 2, \dots, 9$; Col_c là hiệu ứng cột ngẫu nhiên với $Col_c \sim N(0, \sigma^2_{Col})$, $c = 1, 2, \dots, 10$; và ε_{itjrc} là phần dư với $\varepsilon_{itjrc} \sim N(0, \sigma^2_{\varepsilon})$.

2.2.2. Tác động của FDS đến các đặc điểm quan sát được

Để nghiên cứu các tác động của FDS đến năng suất hạt và hàm lượng protein và dầu hạt trong điều kiện ngập úng, các mô hình tuyến tính hiệu ứng hỗn hợp đã được tiến hành cho từng kiểu hình quan sát được với gói R “lmerTest”, cung cấp các giá trị p cho các hiệu ứng cố định bằng cách sử dụng phép tính xấp xỉ Satterthwaite. Tóm lại, các mô hình bao gồm các kiểu hình quan sát được như các phản ứng biến đổi (năng suất hạt, hàm lượng protein hạt và hàm lượng dầu hạt) và biến phụ thuộc FDS_n như một hiệu ứng cố định. Các biến phụ trợ “kiểu gen” Gen_i, “môi trường” (kết hợp giữa năm và địa điểm) Env_t và tương tác “kiểu gen” \times “môi trường” (Gen \times Env)_{it} được đưa vào như các hiệu ứng ngẫu nhiên. Để tính đến sự thay đổi về mặt không gian, các hiệu ứng lồng nhau của “lần lặp lại” trong “môi trường” (Rep|Env)_{jt}, “khoảng” trong “môi trường” (Rng|Env)_{rt} và “cột” trong “môi trường” (Col|Env)_{ct} được đưa vào dưới dạng các hiệu ứng ngẫu nhiên (Phương trình 2).

$$Y_{nitjrc} = \mu + FDS_n + Gen_i + Env_t + (Gen \times Env)_{it} + (Rep|Env)_{jt} + (Rng|Env)_{rt} + (Col|Env)_{ct} + \varepsilon_{nitjrc} \quad (2)$$

trong đó Y_{nitjrc} là kiểu hình quan sát được (năng suất hạt, hàm lượng protein hạt và hàm lượng dầu hạt); μ là giá trị trung bình chung cho mỗi kiểu hình quan sát được; FDS_n là các FDS cố định với $n = 1, 2, 3, 4$; Gen_i là hiệu ứng kiểu gen ngẫu nhiên với $Gen_i \sim N(0, \sigma^2_{Gen})$, $i = 1, 2, \dots, 31$; Env_t là hiệu ứng môi trường ngẫu nhiên với $Env_t \sim N(0, \sigma^2_{Env})$, $t = 1, 2$; Rep_j là hiệu ứng lặp lại ngẫu nhiên với $Rep_j \sim N(0, \sigma^2_{Rep})$, $j = 1, 2, 3$; Rng_r là hiệu ứng khoảng ngẫu nhiên với $Rng_r \sim N(0, \sigma^2_{Rng})$, $r = 1, 2, \dots, 9$; Col_c là hiệu ứng cột ngẫu nhiên với $Col_c \sim N(0, \sigma^2_{Col})$, $c = 1, 2, \dots, 10$; và ε_{nitjrc} là phần dư với $\varepsilon_{nitjrc} \sim N(0, \sigma^2_{\varepsilon})$.

2.2.3. Các đặc điểm quan sát được trong các nhóm tương phản giữa các phương pháp xử lý

Mục tiêu chung của phân tích này là xác định ý nghĩa của các phương pháp xử lý (ngập và không ngập) đối với các kiểu hình quan sát được giữa các nhóm kiểu gen được phân loại là chống chịu ngập, trung bình và mẫn cảm với ngập. Các mô hình tuyến tính hiệu ứng hỗn hợp được thực hiện riêng cho từng kiểu hình (năng suất hạt, hàm lượng protein

hạt và hàm lượng dầu hạt) bằng cách sử dụng gói R “lmerTest”. Mỗi mô hình bao gồm kiểu hình quan sát được như một hàm của sự tương tác giữa “đặc tính” (được biểu thị là phản ứng với ngập lụt; chống chịu, trung bình và miễn cảm) và “phương pháp xử lý” (ngập và không ngập) như một biến phụ thuộc hiệu ứng cố định (Đặc tính × Nghiệm thức)_{nw}. Các biến ngẫu nhiên bao gồm sự tương tác giữa “năm” và “Nghiệm thức” (Năm × Nghiệm thức)_{yw}, “kiểu gen” Gen_i và sự tương tác giữa “kiểu gen” và “môi trường” (sự kết hợp của “năm” và “Nghiệm thức”) (Gen × Môi trường)_{it}. Để tính đến sự thay đổi về không gian, các hiệu ứng lồng nhau của “lần lặp lại” trong “môi trường” (Rep|Env)_{jt}, “khoảng” trong “môi trường” (Rng|Env)_{rt} và “cột” trong “môi trường” (Col|Env)_{ct} được đưa vào như các biến phụ thuộc ngẫu nhiên (Phương trình 3).

$$Y_{nwwzjtcr} = \mu + (\text{Trait} \times \text{Treat})_{nw} + (\text{Year} \times \text{Treat})_{zw} + (\text{Gen} \times \text{Env})_{it} + \text{Gen}_i + (\text{Rep|Env})_{jt} + (\text{Rng|Env})_{rt} + (\text{Col|Env})_{ct} + \varepsilon_{nwwzjtcr} \quad (3)$$

trong đó $Y_{nwwzjtcr}$ là kiểu hình quan sát được (năng suất hạt, hàm lượng protein hạt và hàm lượng dầu hạt); μ là giá trị trung bình chung cho mỗi kiểu hình quan sát được; Trait_n là nhóm phản ứng với ngập cố định với $n = 1, 2, 3$; Treat_w là Nghiệm thức cố định với $w = 1, 2$; Year_t là hiệu ứng năm ngẫu nhiên với $\text{Year}_z \sim N(0, \sigma^2_{\text{Year}})$, $z = 1, 2$; Gen_i là hiệu ứng kiểu gen ngẫu nhiên với $\text{Gen}_i \sim N(0, \sigma^2_{\text{Gen}})$, $i = 1, 2, \dots, 31$; Env_t là hiệu ứng môi trường ngẫu nhiên với $\text{Env}_t \sim N(0, \sigma^2_{\text{Env}})$, $t = 1, 2, 3, 4$; Rep_j là hiệu ứng lần lặp lại ngẫu nhiên với $\text{Rep}_j \sim N(0, \sigma^2_{\text{Rep}})$, $j = 1, 2, 3$; Rng_r là hiệu ứng khoảng ngẫu nhiên với $\text{Rng}_r \sim N(0, \sigma^2_{\text{Rng}})$, $r = 1, 2, \dots, 9$; Col_c là hiệu ứng cột ngẫu nhiên với $\text{Col}_c \sim N(0, \sigma^2_{\text{Col}})$, $c = 1, 2, \dots, 10$; và $\varepsilon_{nwwzjtcr}$ là phần dư với $\varepsilon_{nwwzjtcr} \sim N(0, \sigma^2_{\varepsilon})$.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Giá trị trung bình đã điều chỉnh cho FDS trên các quan sát dao động từ 1,0 (R07-6669) đến 3,1 (S14-9051), với giá trị trung bình là 2,0 (Bảng S1). Tổng cộng có chín kiểu gen được phân loại là chống chịu (trọng tâm bằng 1,2), 13 là trung bình (trọng tâm bằng 1,8) và chín là miễn cảm (trọng tâm bằng 2,6). Khoảng 30,7% thành phần phương sai được giải thích bởi sự tương tác giữa “năm” và “kiểu gen” (T_{00} Kiểu gen × Năm), 32% được giải thích bởi các điều chỉnh phương sai không gian trên trục X (T_{00} Cột|Năm) và trục Y (T_{00} Range|Year) (lần lượt là 20,8% và 11,2%), trong khi phần còn lại được tính đến bởi phương sai dư σ^2 (37,3%). Mặc dù các phương pháp thiết kế thử nghiệm tốt nhất đã được triển khai trong nghiên cứu để đạt được các thiết lập đồng nhất trên cánh đồng, nhưng một tỷ lệ lớn các thành phần phương sai đã được quy cho sự thay đổi không gian. Điều này làm nổi bật tầm quan trọng của việc điều chỉnh đúng các giá trị trung bình thông qua các mô hình tuyến tính hiệu ứng hỗn hợp để có được các ước tính không thiên vị và chính xác hơn (Henderson, 1975).

Trong điều kiện ngập, năng suất bị ảnh hưởng đáng kể (giá trị $p < 0,001$) bởi FDS quan sát được trên thang điểm từ 1 đến 4 (Bảng 1). Trung bình, năng suất giảm 432,7 kg/ha (khoảng tin cậy ở $\alpha = 0,05$; 318,1–547,4 kg/ha) cho mỗi đơn vị tăng trong FDS (Bảng 1). Do đó, năng suất giảm từ 12,8 – 22,1% khi tăng một đơn vị FDS, đạt tới 88% khi bị thiệt hại nghiêm trọng (FDS = 4). Trong các nhóm chống chịu, trung bình và miễn cảm, sự khác biệt về năng suất không đáng kể về mặt số học đã được quan sát thấy trong điều kiện không ngập (lần lượt là 2997,9; 3028,5 và 2601,3 kg/ha), mặc dù các kiểu gen được phân loại là miễn cảm có năng suất thấp hơn về mặt số học so với kiểu gen chống chịu và trung bình có thể do tiềm năng năng suất tổng thể thấp hơn (Hình 2). Trong điều kiện ngập, sự khác biệt đáng kể về năng suất đã được quan sát thấy giữa các nhóm chống chịu

và mẫn cảm (lần lượt là 2.006,2 và 1.267,9 kg/ha) và các nhóm trung bình và mẫn cảm (lần lượt là 1.682,1 và 1.267,9 kg/ha) (Hình 2).

Nhìn chung, các kiểu gen chống chịu bị tổn thất khoảng 33% giữa các lần xử lý ngập và không ngập, trong khi các kiểu gen trung bình và mẫn cảm chịu lần lượt 44% và 51% tổn thất năng suất (Hình 2). Tương tác giữa các nhóm trung bình và mẫn cảm với nghiệm thức ngập là đáng kể (giá trị p lần lượt là 0,021 và 0,012) theo hướng tiêu cực (ước tính lần lượt là -388,6 và -394,5 kg/ha), cho thấy xử lý ngập có tác động tiêu cực lớn hơn đến các nhóm này so với kiểu gen chống chịu (Bảng 2).

Bảng 1. Ảnh hưởng của mức độ thiệt hại do ngập đến năng suất hạt và hàm lượng protein và dầu trong hạt.

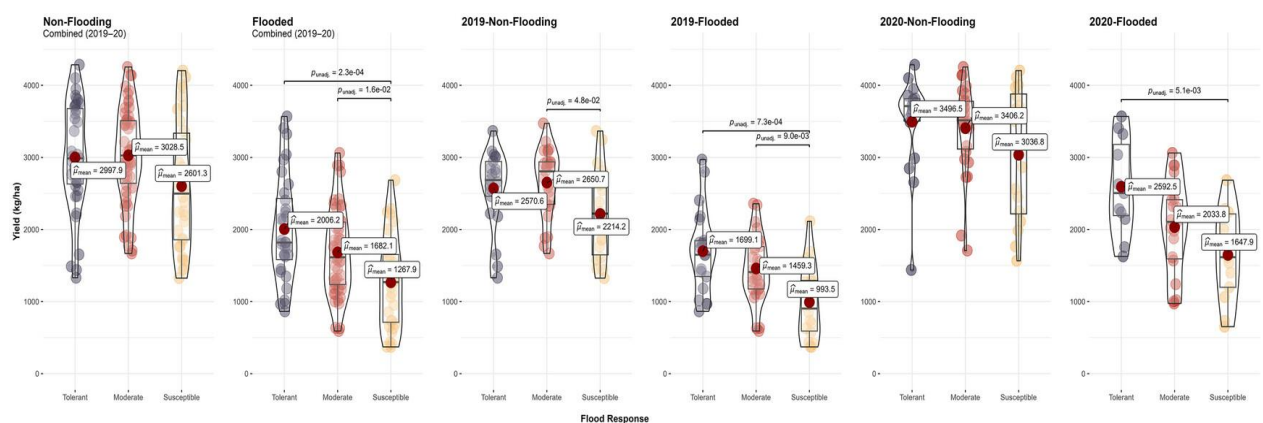
	Năng suất hạt (kg/ha)	p	Protein hạt (kg/ha)	p	Dầu hạt (kg/ha)	p
Intercept ^a	2481,9 (1768,7 – 3195,1)	-	405,4 (372,9 – 437,9)	-	218,7 (202,9 – 234,5)	-
FDS ^b	-432,7 (-547,4 đến -318,1)	<0,001**	-0,5 (-3,5 đến 2,5)	0,742	1,0 (-0,8 đến 2,8)	0,287
Hiệu ứng ngẫu nhiên^c						
σ^2	117.405,5		87,4		38,8	
T_{00}	37.511,6 _{Genotype x Environment}		38,7 _{Genotype x Environment}		1,7 _{Genotype x Environment}	
	38.019,0 _{Genotype}		50,0 _{Genotype}		21,9 _{Genotype}	
	87.394,3 _{Column Environment}		23,3 _{Column Environment}		6,0 _{Column Environment}	
	8.319,0 _{Range Environment}		0,0 _{Range Environment}		3,3 _{Range Environment}	
	8.922,3 _{Replication Environment}		5,9 _{Replication Environment}		0,0 _{Replication Environment}	
	215.341,6 _{Environment}		510,4 _{Environment}		118,0 _{Environment}	

^a Intercept: Kiểu hình ước tính (năng suất hạt, hàm lượng protein hạt và hàm lượng dầu hạt) khi điểm thiệt hại do ngập (FDS) bằng 0. Trong trường hợp này, nó sẽ đề cập đến kiểu hình trung bình của các kiểu gen đậu nành không bị thiệt hại do ngập.

^b FDS: Tác động của một đơn vị tăng điểm thiệt hại do ngập lên kiểu hình quan sát được. Trong ngoặc đơn là khoảng tin cậy ở xác suất 95%. FDS được biểu diễn trên thang điểm từ 1 – 4 trong đó điểm 1 biểu thị $\leq 10\%$ số cây biểu hiện các triệu chứng thiệt hại liên quan đến ngập và điểm 4 biểu thị $>50\%$ số cây biểu hiện thiệt hại liên quan đến ngập.

^c Hiệu ứng ngẫu nhiên: Tóm tắt các thành phần phương sai của hiệu ứng ngẫu nhiên T_{00} cũng như phương sai dư σ^2 .

** biểu thị ý nghĩa của FDS ở mức xác suất 0,01.



Hình 2. Biến động năng suất (kg/ha) giữa các kiểu gen chống chịu, trung bình và mẫn cảm trong các nghiệm thức ngập và không ngập.

Bảng 2. Sự khác biệt về năng suất hạt và hàm lượng protein và dầu trong hạt giữa các kiểu gen chống chịu, trung bình và mẫn cảm trong các nghiệm thức ngập và không ngập

	Năng suất hạt (kg/ha)	<i>p</i>	Protein hạt (kg/ha)	<i>p</i>	Dầu hạt (kg/ha)	<i>p</i>
Intercept ^a	3.022,6	-	394,4	-	224	-
Trait (moderate) ^b	-66,0	0,693	3,1	0,469	-3,9	0,162
Trait (susceptible) ^b	-394,2	0,059	-3,8	0,426	1,5	0,635
Trait (flooding) ^c	-856,9	0,069	8,9	0,622	-4,8	0,709
Trait x treatment (moderate x flooding) ^d	-388,6	0,021*	1,6	0,664	3,8	0,087
Trait x treatment (susceptible x flooding) ^d	-394,5	0,012*	0,6	0,893	2,5	0,300
Hiệu ứng ngẫu nhiên^c						
σ^2	123.507,5		83,6		35,2	
T_{00}	31.274,7 _{Genotype x Environment}		18,9 _{Genotype x Environment}		4,3 _{Genotype x Environment}	
	168.708,90 _{Column Environment}		31,60 _{Column Environment}		5,90 _{Column Environment}	
	0,0 _{Range Environment}		0,0 _{Range Environment}		3,7 _{Range Environment}	
	89.590,87 _{Genotype}		63,67 _{Genotype}		28,67 _{Genotype}	
	41.391,4 _{Replication Environment}		4,8 _{Replication Environment}		0,0 _{Replication Environment}	
	174.855,3 _{Year x Treatment}		314,1 _{Year x Treatment}		158,2 _{Year x Treatment}	

^a Intercept: Kiểu hình ước tính (năng suất hạt, hàm lượng protein hạt và hàm lượng dầu hạt) khi tất cả các biến phụ trợ khác đều bằng 0. Trong trường hợp này, nó sẽ đề cập đến kiểu hình trung bình của các kiểu gen chống chịu trong điều kiện không ngập.

^b Tính trạng: Tác động của các kiểu gen trung bình và mẫn cảm so với các kiểu gen chống chịu. Đối với năng suất hạt trong phương pháp xử lý không ngập, các kiểu gen trung bình và mẫn cảm thấp hơn về mặt số học nhưng tương tự về mặt thống kê so với các kiểu gen chống chịu.

^c Xử lý: Tác động của phương pháp xử lý ngập khi không xem xét tương tác Tính trạng \times Nghiệm thức. Đối với năng suất hạt của các kiểu gen chống chịu, xử lý ngập làm giảm năng suất 856,9 kg/ha.

^d Tính trạng \times Nghiệm thức: Tác động của tương tác giữa tính trạng (trung bình và mẫn cảm) và Nghiệm thức xử lý (ngập).

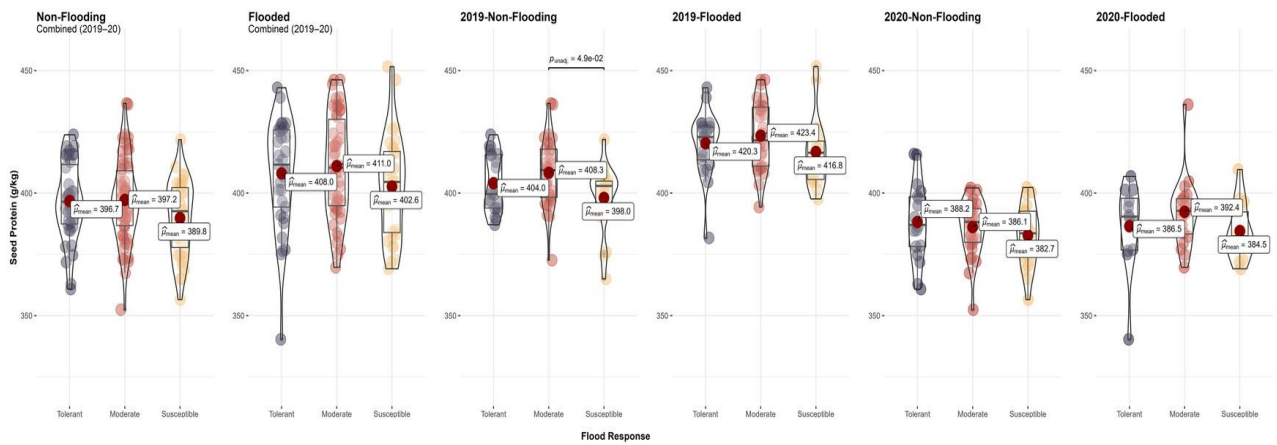
^e Hiệu ứng ngẫu nhiên: Tóm tắt các thành phần phương sai của hiệu ứng ngẫu nhiên T_{00} cũng như phương sai dư σ^2 .

* biểu thị ý nghĩa của FDS ở mức xác suất 0,05.

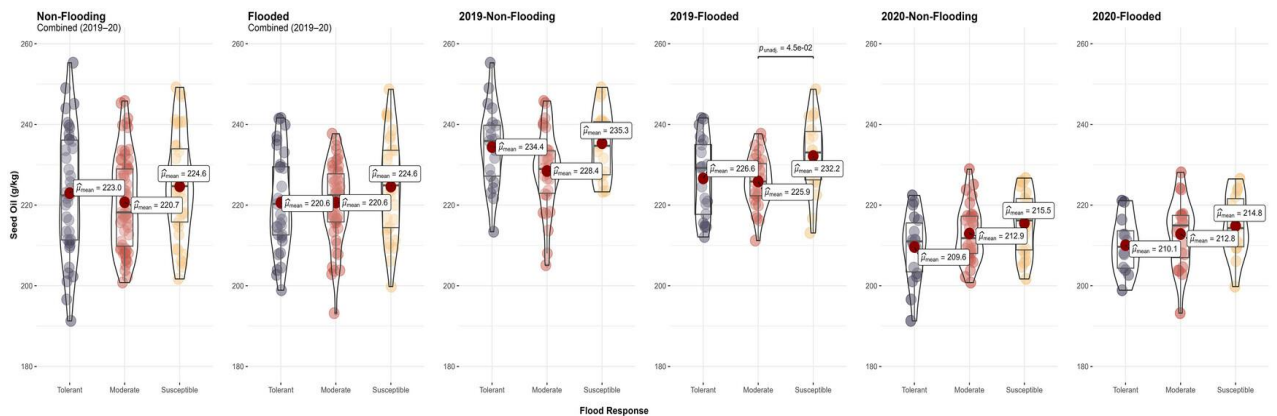
Mặc dù chưa có nghiên cứu nào trước đây báo cáo về tác động của một loạt mức độ nghiêm trọng của thiệt hại đối với tổn thất năng suất ở giai đoạn sinh trưởng sớm trên một nhóm các kiểu gen đậu nành đa dạng về mặt di truyền, nhưng tổn thất năng suất do tiếp xúc với ngập úng đã được ghi chép đầy đủ trong tài liệu. Yếu tố sinh lý chính gây ra mất năng suất có liên quan đến việc cung cấp oxy không đủ cho quá trình hô hấp của rễ dẫn đến tình trạng thiếu oxy (Grable, 1966; Russell và cs, 1990). Do đó, một loạt tác động tiêu cực đến sự phát triển và chức năng của rễ, sự hình thành nốt sần và cố định đạm, quá trình quang hợp và tốc độ sinh trưởng của cây trồng dẫn đến mất năng suất nghiêm trọng, thường dẫn đến chết cây (Bacanamwo & Purcell, 1999; Oosterhuis và cs, 1990). Nhìn chung, mức độ nghiêm trọng của mất năng suất được báo cáo trong nghiên cứu này phù hợp với các tài liệu trước đây khi xem xét đến tình trạng sinh trưởng sớm, tiếp xúc với ngập úng ngắn hạn (Ploschuk và cs, 2022). Mặc dù các kiểu gen thể hiện khả năng chống chịu ngập bằng thị giác cho thấy năng suất hạt cao hơn so với các kiểu gen mẫn cảm trong điều kiện ngập, nhưng vẫn xảy ra tình trạng mất năng suất đáng kể, cho

thấy việc xác định và kết hợp các alen chịu ngập mới thông qua quá trình lai tạo thực vật có khả năng làm giảm tổn thất do thiệt hại do ngập úng gây ra. Các alen chịu ngập đã được xác định trên các nhiễm sắc thể 3 (nhóm liên kết [LG] N, bố mẹ cho PI 561271) (Ye và cs, 2018), 5 (nhóm liên kết A1, giống bố mẹ cho PI 546487) (Cornelious và cs, 2005), 11 (nhóm liên kết B1, bố mẹ cho PI 654356) (Nguyen và cs, 2012), 13 (nhóm liên kết F, bố mẹ cho PI 408105A và PI 546487) (Cornelious và cs, 2005; Nguyen và cs, 2012) và 18 (nhóm liên kết G, bố mẹ cho PI 546487) (Cornelious và cs, 2005; VanToai và cs, 2001). Ngoài ra, đậu nành dại (*Glycine soja*) đại diện cho nguồn gen chưa được khai thác về khả năng chịu ngập, với sự hỗ trợ của các công cụ giải trình tự gen hiện đại, có thể nhanh chóng được đưa vào các dòng chọn tạo ưu tú để sản xuất bền vững trong các kịch bản biến đổi khí hậu khắc nghiệt (Valliyodan và cs, 2016).

Scott và cs (1989) đã báo cáo rằng năng suất giảm ở giai đoạn sinh trưởng R2 tăng khi số ngày bị ngập tăng lên. Trung bình, năng suất giảm 7,7% (157 kg/ha) được quan sát thấy cho mỗi ngày bị ngập (Scott và cs, 1989). Ngoài ra, những khác biệt đáng kể về năng suất giảm giữa các kiểu gen được thử nghiệm đã được đề cập, trong đó DPL 105 (PI 556635) cho thấy năng suất cao nhất trong nghiệm thức ngập và Essex (PI 548667) cho năng suất thấp nhất. Oosterhuis và cs (1990) đã quan sát thấy năng suất giảm từ 40 – 52% đối với Forrest (PI 548655) và Essex khi bị ngập lụt trong 7 ngày ở giai đoạn tăng trưởng R2. Nghiên cứu cũng báo cáo tỷ lệ quang hợp ròng giảm đối với Forrest và Essex trong cùng một nghiệm thức ngập (lần lượt là 22% và 32%) (Oosterhuis và cs, 1990). VanToai và cs (1994) đã báo cáo rằng năng suất biến thiên lên tới 65% (3700–1270 kg/ha) trên 84 kiểu gen được trồng trong điều kiện ngập, mặc dù nghiên cứu không phân biệt kiểu gen dựa trên mức độ thiệt hại. Ngoài ra, không có sự kéo giảm năng suất nào được báo cáo liên quan đến khả năng chịu đựng về mặt di truyền đối với căng thẳng do ngập úng, điều này xác nhận các kết quả được báo cáo ở đây (VanToai và cs, 1994). Sử dụng phương pháp phân loại tương tự (hệ thống ba lớp), năng suất bị mất giữa các nghiệm thức ngập và không ngập trên các kiểu gen chống chịu dao động từ 20 – 39%, trong khi các kiểu gen mẫn cảm bị mất năng suất tới 77% (Rhine và cs, 2010). Fletcher và cs (2023), Shannon và cs (2005) đã nghiên cứu phản ứng năng suất của 15 kiểu gen đối với tình trạng ngập 7 ngày ở giai đoạn R1 và xác định mối tương quan âm mạnh ($-0,51$) giữa thiệt hại do ngập (điểm thị giác trên thang điểm 0–9) và năng suất hạt (Fletcher và cs, 2023). Về thành phần hạt đậu nành, FDS không ảnh hưởng đáng kể đến hàm lượng protein và dầu trong hạt (giá trị p lần lượt là 0,742 và 0,287). Hàm lượng protein trong hạt giảm về mặt số học 0,5 g/kg cho mỗi đơn vị gia tăng của FDS, trong khi hàm lượng dầu trong hạt tăng về mặt số học 1,0 g/kg cho mỗi đơn vị gia tăng của FDS (Bảng 1). Giữa các nghiệm thức ngập và không ngập, hàm lượng protein hạt không cho thấy thay đổi đáng kể nào ở kiểu gen chống chịu, trung bình và mẫn cảm (lần lượt là 2,77%, 3,36% và 3,2%) (Hình 3). Tương tự như vậy, không có thay đổi đáng kể nào ở kiểu gen chống chịu, trung bình và mẫn cảm đã được quan sát thấy đối với hàm lượng dầu hạt giữa các nghiệm thức ngập và không ngập (lần lượt là 1,1%, 0,04% và 0,00%) (Hình 4). Không giống như năng suất hạt, không có tương tác đáng kể nào giữa các nhóm trung bình và mẫn cảm với nghiệm thức ngập đối với hàm lượng protein và dầu hạt trong điều kiện ngập nước một phần trong 4 ngày ở giai đoạn sinh trưởng sớm R1/R2 (Bảng 2). Điều thú vị là, sự thay đổi nồng độ mô của các chất dinh dưỡng đa lượng và vi lượng trong điều kiện ngập nước đã được báo cáo trước đây, đặc biệt là tổng lượng nitơ của rễ và thân thấp hơn do thiếu oxy (Bacanawo & Purcell, 1999; Board, 2008). Tuy nhiên, những biến thể như vậy dường như không ảnh hưởng trực tiếp đến hàm lượng protein và dầu trong hạt (Gupta, 1970; Sullivan và cs, 2001; VanToai và cs, 2012).



Hình 3. Sự thay đổi hàm lượng protein hạt (g/kg) giữa các kiểu gen chống chịu, trung bình và miễn cảm trong các nghiệm thức ngập và không ngập.



Hình 4. Sự thay đổi hàm lượng dầu hạt (g/kg) giữa các kiểu gen chống chịu, trung bình và miễn cảm trong các nghiệm thức ngập và không ngập.

4. KẾT LUẬN

Căng thẳng do ngập úng đang là mối quan tâm ngày càng tăng ở các vùng sản xuất đậu nành vì tần suất mưa cực đoan dự kiến sẽ tăng do biến đổi khí hậu. Đậu nành rất nhạy cảm với tình trạng ngập úng và người ta quan sát thấy năng suất bị mất đáng kể do một loạt các phản ứng sinh lý tiêu cực do tình trạng thiếu oxy gây ra. Mặc dù khả năng chịu ngập đã được chứng minh là đảm bảo năng suất khi tiếp xúc với lũ lụt trong thời gian ngắn, nhưng vẫn quan sát thấy tổn thất ở các kiểu gen chịu ngập và người ta biết rất ít về tính ổn định của khả năng chịu ngập và vô số tác động của môi trường lên đặc điểm này. Phân tích kiểu hình trực quan về thiệt hại do ngập úng đã hữu ích để phân biệt đáng kể các nhóm và năng suất trung bình của chúng khi chịu căng thẳng. Tuy nhiên, nó có thể không phản ánh đầy đủ khả năng chống chịu ngập về mặt năng suất hạt. Như đã quan sát thấy trong nghiên cứu này, một số kiểu gen được phân loại trực quan là trung bình cho năng suất cao hơn những kiểu gen được phân loại là chịu ngập kém. Những hạn chế của việc chấm điểm trực quan chủ quan, kết hợp với sự thay đổi không gian, nhấn mạnh nhu cầu về các phương pháp mới và cải tiến để phân loại chính xác các phản ứng kiểu gen. Với những tiến bộ trong lĩnh vực genomics và phenomics, cũng như việc tích hợp các biến môi trường vào các mô hình dự đoán genomics, việc xác định và kết hợp các alen chịu ngập mới thông qua lai tạo thực vật có thể cải thiện hơn nữa khả năng chịu ngập của đậu nành và có khả năng giảm mức độ nghiêm trọng của tình trạng mất năng suất trên nhiều môi trường khác nhau.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Bacanamwo, M., & Purcell, L. C. (1999). Soybean dry matter and N accumulation responses to flooding stress, N sources and hypoxia. *Journal of Experimental Botany*, **50**(334), 689–696. <https://doi.org/10.1093/jxb/50.334.689>

[CASWeb of Science®Google Scholar](#)

Board, J. E. (2008). Waterlogging effects on plant nutrient concentrations in soybean. *Journal of Plant Nutrition*, **31**(5), 828–838. <https://doi.org/10.1080/01904160802043122>

[CASWeb of Science®Google Scholar](#)

Cornelious, B., Chen, P., Chen, Y., de Leon, N., Shannon, J. G., & Wang, D. (2005). Identification of QTLs underlying water-logging tolerance in soybean. *Molecular Breeding*, **16**(2), 103–112. <https://doi.org/10.1007/s11032-005-5911-2>

[Web of Science®Google Scholar](#)

CRED. (2020). *Natural disasters 2019*. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, Institute Health and Society UCLouvain. https://emdat.be/sites/default/files/adsr_2019.pdf

[Google Scholar](#)

Fehr, W. R., & Caviness, C. E. (1977). *Stages of soybean development* (Special Report 80). Iowa State University.

[Google Scholar](#)

Fletcher, E., Patterson, R., Dunne, J., Saski, C., & Fallen, B. (2023). Evaluating the effects of flooding stress during multiple growth stages in soybean. *Agronomy*, **13**(5), 1–11. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051243>

[Google Scholar](#)

Grable, A. R. (1966). Soil aeration and plant growth. In A. G. Norman (Ed.), *Advances in agronomy* (pp. 57–106). Academic Press.

[Google Scholar](#)

Gupta, P. C. (1970). *Influence of variety, environment and threshing methods of seed quality and effects of flooding on growth, yield, and composition of soybeans, Glycine max (L.) Merrill* [Doctoral dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign]. University of Illinois Repository. <https://www.ideals.illinois.edu/items/78234>

[Google Scholar](#)

Henderson, C. R. (1975). Best linear unbiased estimation and prediction under a selection model. *Biometrics*, **31**(2), 423–447. <https://doi.org/10.2307/2529430>

[CASPubMedWeb of Science®Google Scholar](#)

Jackson, M. B., & Colmer, T. D. (2005). Response and adaptation by plants to flooding stress. *Annals of Botany*, **96**(4), 501–505. <https://doi.org/10.1093/aob/mci205>

[CASPubMedWeb of Science®Google Scholar](#)

Kaur, G., Singh, G., Motavalli, P. P., Nelson, K. A., Orlowski, J. M., & Golden, B. R. (2020). Impacts and management strategies for crop production in waterlogged or

flooded soils: A review. *Agronomy Journal*, **112**(3), 1475–1501. <https://doi.org/10.1002/agj2.20093>

[Web of Science®Google Scholar](#)

Kim, W., Iizumi, T., Hosokawa, N., Tanoue, M., & Hirabayashi, Y. (2023). Flood impacts on global crop production: Advances and limitations. *Environmental Research Letters*, **18**(5), 1–9. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/accd85>

[Web of Science®Google Scholar](#)

Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., & Christensen, R. H. B. (2017). lmerTest package: Tests in linear mixed effects models. *Journal of Statistical Software*, **82**(13), 1–26. <https://doi.org/10.18637/jss.v082.i13>

[Web of Science®Google Scholar](#)

MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In L. M. Le Cam & J. Neyman (Eds.), *Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability* (pp. 281–297). University of California Press.

[Google Scholar](#)

Maechler, M., Rousseeuw, P., Struyf, A., Hubert, M., & Hornik, K. (2023). cluster: Cluster Analysis Basics and Extensions (Version 2.1.6) [Computer software]. CRAN. <https://cran.r-project.org/web/packages/cluster/cluster.pdf>

[Google Scholar](#)

Mustroph, A. (2018). Improving flooding tolerance of crop plants. *Agronomy*, **8**(9), 1–25. <https://doi.org/10.3390/agronomy8090160>

[Google Scholar](#)

Nguyen, V. T., Vuong, T. D., VanToai, T., Lee, J. D., Wu, X., Mian, M. A. R., Dorrance, A. E., Shannon, J. G., & Nguyen, H. T. (2012). Mapping of quantitative trait loci associated with resistance to *Phytophthora sojae* and flooding tolerance in soybean. *Crop Science*, **52**(6), 2481–2493. <https://doi.org/10.2135/cropsci2011.09.0466>

[CASWeb of Science®Google Scholar](#)

NOAA National Centers for Environmental Information (NCEI). (2024). *U.S. billion-dollar weather and climate disasters*. <https://www.ncei.noaa.gov/access/billions/>

[Google Scholar](#)

Oosterhuis, D. M., Scott, H. D., Hampton, R. E., & Wullschleger, S. D. (1990). Physiological responses of two soybean [*Glycine max* (L.) Merr] cultivars to short-term flooding. *Environmental and Experimental Botany*, **30**(1), 85–92. [https://doi.org/10.1016/0098-8472\(90\)90012-S](https://doi.org/10.1016/0098-8472(90)90012-S)

[Web of Science®Google Scholar](#)

Pathak, P., Kalra, A., & Ahmad, S. (2017). Temperature and precipitation changes in the Midwestern United States: Implications for water management. *International Journal of Water Resources Development*, **33**(6), 1003–1019. <https://doi.org/10.1080/07900627.2016.1238343>

[Web of Science®Google Scholar](#)

Ploschuk, R. A., Miralles, D. J., & Striker, G. G. (2022). A quantitative review of soybean responses to waterlogging: Agronomical, morpho-physiological and anatomical

traits of tolerance. *Plant and Soil*, **475**(1–2), 237–252. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05364-x>

[CASWeb of Science®Google Scholar](#)

R Core Team. (2024). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. The R Project for Statistical Computing. <http://www.r-project.org/>

[Google Scholar](#)

Rhine, M. D., Stevens, G., Shannon, G., Wrather, A., & Sleper, D. (2010). Yield and nutritional responses to waterlogging of soybean cultivars. *Irrigation Science*, **28**(2), 135–142. <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0168-x>

[Web of Science®Google Scholar](#)

Rodell, M., & Li, B. (2023). Changing intensity of hydroclimatic extreme events revealed by GRACE and GRACE-FO. *Nature Water*, **1**(3), 241–248. <https://doi.org/10.1038/s44221-023-00040-5>

[Google Scholar](#)

Russell, D. A., Wong, D. M.-L., & Sachs, M. M. (1990). The anaerobic response of soybean. *Plant Physiology*, **92**(2), 401–407. <https://doi.org/10.1104/pp.92.2.401>

[CASPubMedWeb of Science®Google Scholar](#)

Scott, H. D., DeAngulo, J., Daniels, M. B., & Wood, L. S. (1989). Flood duration effects on soybean growth and yield. *Agronomy Journal*, **81**(4), 631–636. <https://doi.org/10.2134/agronj1989.00021962008100040016x>

[Web of Science®Google Scholar](#)

Shabala, S. (2011). Physiological and cellular aspects of phytotoxicity tolerance in plants: The role of membrane transporters and implications for crop breeding for waterlogging tolerance. *New Phytologist*, **190**(2), 289–298. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03575.x>

[CASPubMedWeb of Science®Google Scholar](#)

Shannon, G., Stevens, W. E., Wiebold, W. J., McGraw, R. L., & Sleper, D. A. (2005). *Breeding soybeans for improved tolerance to flooding*. Proceedings of 35th soybean seed research conference American Seed Trade Association. Chicago, IL, United States.

[Google Scholar](#)

Sullivan, M., VanToai, T., Fausey, N., Beuerlein, J., Parkinson, R., & Soboyejo, A. (2001). Evaluating on-farm flooding impacts on soybean. *Crop Science*, **41**(1), 93–100. <https://doi.org/10.2135/cropsci2001.41193x>

[Web of Science®Google Scholar](#)

Teh, D., & Khan, T. (2021). Types, definition and classification of natural disasters and threat level. In S. Eslamian & F. Eslamian (Eds.), *Handbook of disaster risk reduction for resilience* (pp. 27–56). Springer International Publishing.

[Google Scholar](#)

Valliyodan, B., Ye, H., Song, L., Murphy, M., Shannon, J. G., & Nguyen, H. T. (2016). Genetic diversity and genomic strategies for improving drought and waterlogging tolerance in soybeans. *Journal of Experimental Botany*, **68**(8), 1835–1849. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw433>

[Google Scholar](#)

VanToai, T. T., Beuerlein, A. F., Schmitthenner, S. K., & St Martin, S. K. (1994). Genetic variability for flooding tolerance in soybeans. *Crop Science*, **34**(4), 1112–

1115. <https://doi.org/10.2135/cropsci1994.0011183X003400040051x>

[Web of Science®Google Scholar](#)

VanToai, T. T., Lee, J. D., Goulart, P. F., Shannon, G., Alves, J. D., Nguyen, H. T., Yu, O., Rahman, M., & Islam, R. (2012). Soybean (*Glycine max* L. Merr.) seed composition response to soil flooding stress. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, **10**(1), 1–7.

[Google Scholar](#)

VanToai, T. T., St Martin, S. K., Chase, K., Boru, G., Schnipke, V., Schmitthenner, A. F., & Lark, K. G. (2001). Identification of a QTL associated with tolerance of soybean to soil waterlogging. *Crop Science*, **41**(4), 1247–

1252. <https://doi.org/10.2135/cropsci2001.4141247x>

[Web of Science®Google Scholar](#)

Voesenek, L. A. C. J., & Sasidharan, R. (2013). Ethylene–and oxygen signalling–drive plant survival during flooding. *Plant Biology*, **15**(3), 426–

435. <https://doi.org/10.1111/plb.12014>

[CASPubMedWeb of Science®Google Scholar](#)

Wu, C., Chen, P., Hummer, W., Zeng, A., & Klepadlo, M. (2017). Effect of flood stress on soybean seed germination in the field. *American Journal of Plant Sciences*, **8**(1), 53–

68. <https://doi.org/10.4236/ajps.2017.81005>

[CASGoogle Scholar](#)

Wu, C., Zeng, A., Chen, P., Hummer, W., Mokuia, J., Shannon, J. G., & Nguyen, H. T. (2017). Evaluation and development of flood-tolerant soybean cultivars. *Plant Breeding*, **136**(6), 913–923. <https://doi.org/10.1111/pbr.12542>

[CASWeb of Science®Google Scholar](#)

Ye, H., Song, L., Chen, H., Valliyodan, B., Cheng, P., Ali, L., Vuong, T., Wu, C., Orłowski, J., Buckley, B., Chen, P., Shannon, J. G., & Nguyen, H. T. (2018). A major natural genetic variation associated with root system architecture and plasticity improves waterlogging tolerance and yield in soybean. *Plant, Cell and Environment*, **41**(9), 2169–

2182. <https://doi.org/10.1111/pce.13190>

[CASPubMedWeb of Science®Google Scholar](#)

Zhou, W., Yang, Y., Zheng, C., Luo, X., Chandrasekaran, U., Yin, H., Chen, F., Meng, Y., Chen, L., & Shu, K. (2021). Flooding represses soybean seed germination by mediating anaerobic respiration, glycometabolism and phytohormones biosynthesis. *Environmental and Experimental Botany*, **188**, 1–

12. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104491>

[Web of Science®Google Scholar](#)