

VAI TRÒ CỦA DINH DƯỠNG CÂY TRỒNG ĐỐI VỚI SÂU, BỆNH HẠI VÀ SỨC ĐỀ KHÁNG

Trần Minh Tiến¹, Nguyễn Đức Dũng²

1. GIỚI THIỆU

Sâu bệnh hại là một trong những nguyên nhân chính gây thiệt hại năng suất và chất lượng cây trồng trên toàn thế giới. Trong bối cảnh nông nghiệp bền vững, việc giảm thiểu sử dụng thuốc bảo vệ thực vật hóa học đang trở thành ưu tiên hàng đầu. Dinh dưỡng cây trồng không chỉ đóng vai trò quan trọng trong sinh trưởng và phát triển mà còn là yếu tố then chốt trong việc tăng cường sức đề kháng tự nhiên của cây trồng đối với sâu bệnh hại [20].

Các yếu tố dinh dưỡng được phân loại thành ba nhóm chính: đa lượng (macronutrients) bao gồm nitơ (N), photpho (P) và kali (K); trung lượng (secondary nutrients) bao gồm canxi (Ca), magiê (Mg) và lưu huỳnh (S); và vi lượng (micronutrients) bao gồm silic (Si), kẽm (Zn), bo (B), sắt (Fe), mangan (Mn) và đồng (Cu). Mỗi yếu tố dinh dưỡng có vai trò riêng biệt trong việc điều hòa cơ chế phòng vệ của cây trồng [1], [20], [28].

Nghiên cứu về mối quan hệ giữa dinh dưỡng cây trồng và sức đề kháng đã phát triển mạnh mẽ trong những thập kỷ gần đây. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc quản lý dinh dưỡng hợp lý không chỉ cải thiện năng suất mà còn có thể giảm đáng kể tỷ lệ nhiễm bệnh và thiệt hại do sâu hại [16], [20], [27]. Tuy nhiên, tác động của các yếu tố dinh dưỡng lên sức đề kháng của cây trồng rất phức tạp và phụ thuộc vào nhiều yếu tố như loại cây trồng, loại sâu bệnh, điều kiện môi trường và mức độ dinh dưỡng [18], [23].

Báo cáo này tổng hợp các nghiên cứu khoa học gần đây về vai trò của dinh dưỡng cây trồng trong việc tăng cường sức đề kháng đối với sâu bệnh hại, phân tích các cơ chế tác động ở cấp độ phân tử và sinh lý và đưa ra các khuyến nghị thực tiễn cho việc ứng dụng trong canh tác.

2. TỔNG QUAN VỀ VAI TRÒ CỦA CÁC NHÓM YẾU TỐ DINH DƯỠNG

2.1. Yếu tố dinh dưỡng đa lượng

2.1.1. Nitơ (N)

Nitơ là yếu tố dinh dưỡng đa lượng quan trọng nhất, đóng vai trò thiết yếu trong tổng hợp protein, axit nucleic và nhiều hợp chất hữu cơ khác. Tuy nhiên, tác động của nitơ đối với sức đề kháng của cây trồng rất phức tạp và phụ thuộc vào loại bệnh hại. Nghiên cứu cho thấy hàm lượng nitơ cao có xu hướng làm tăng mức độ nghiêm trọng của bệnh do ký sinh bắt buộc (obligate parasites) nhưng lại giảm mức độ nghiêm trọng của bệnh do ký sinh tùy nghi (facultative parasites) [20].

Cơ chế tác động của nitơ liên quan đến việc thay đổi thành phần sinh hóa của mô cây, đặc biệt là hàm lượng amino axit tự do và protein hòa tan. Hàm lượng nitơ cao làm

¹ Viện Khoa học Nông nghiệp Việt Nam

² Viện Thổ nhưỡng Nông hoá

tăng hàm lượng các hợp chất chứa nitơ trong tế bào, tạo môi trường thuận lợi cho sự phát triển của một số loại nấm bệnh và côn trùng ăn mô mềm [30]. Ngược lại, thiếu hụt nitơ có thể làm giảm khả năng tổng hợp các hợp chất phòng vệ như alkaloid và protein liên quan đến bệnh (pathogenesis-related proteins) [20], [30].

Một nghiên cứu trên cây họ Brassicaceae không tìm thấy mối liên hệ đáng kể giữa hàm lượng nitơ và khả năng kháng rệp *Brevicoryne brassicae* hoặc ruồi *Delia radicum* [1]. Điều này cho thấy vai trò của nitơ trong sức đề kháng có thể khác nhau tùy theo loại cây trồng và loại sâu bệnh cụ thể.

2.1.2. Phốt pho (P)

Phốt pho đóng vai trò quan trọng trong chuyển hóa năng lượng, tổng hợp axit nucleic và cấu trúc màng tế bào. Vai trò của phốt pho đối với sức đề kháng của cây trồng còn nhiều tranh cãi và kết quả nghiên cứu không nhất quán [20]. Một số nghiên cứu cho thấy bón phốt pho có thể làm giảm mức độ nhiễm bệnh, trong khi các nghiên cứu khác lại không tìm thấy tác động rõ rệt hoặc thậm chí có tác động tiêu cực [20].

Phốt pho có thể ảnh hưởng đến sức đề kháng thông qua việc điều hòa quá trình trao đổi chất và tăng cường sức sống chung của cây. Cây có đủ phốt pho thường có hệ rễ phát triển tốt hơn, giúp cây hấp thu dinh dưỡng hiệu quả hơn và có khả năng chống chịu stress tốt hơn [20].

2.1.3. Kali (K)

Kali là yếu tố dinh dưỡng đa lượng có vai trò quan trọng trong điều hòa áp suất thẩm thấu, hoạt hóa enzym và vận chuyển chất dinh dưỡng. Nghiên cứu cho thấy kali có tác động tích cực đến sức đề kháng của cây trồng đối với nhiều loại bệnh hại. Bón kali đầy đủ có thể làm giảm mức độ nhiễm bệnh cho đến khi đạt mức tối ưu cho sinh trưởng [20].

Cơ chế tác động của kali bao gồm: tăng cường độ dày và cứng của thành tế bào, điều hòa quá trình mở khí khổng (giảm độ ẩm trên bề mặt lá), và tăng cường tổng hợp các hợp chất phenolic có tác dụng kháng khuẩn [20]. Kali cũng đóng vai trò trong việc duy trì cân bằng ion và pH nội bào, yếu tố quan trọng cho hoạt động của các enzym phòng vệ [2].

2.2. Yếu tố dinh dưỡng trung lượng

2.2.1. Canxi (Ca)

Canxi là yếu tố dinh dưỡng có vai trò đặc biệt quan trọng trong hệ thống phòng vệ của cây trồng. Ion canxi (Ca^{2+}) hoạt động như một phân tử tín hiệu thứ cấp (second messenger) trong nhiều con đường tín hiệu miễn dịch của cây [2], [13], [14]. Khi cây bị tấn công bởi sâu bệnh, nồng độ Ca^{2+} trong tế bào chất tăng lên nhanh chóng, tạo ra các "chữ ký canxi" (calcium signatures) đặc trưng cho từng loại stress [2], [14].

Các protein cảm biến canxi như calmodulin (CaM), calmodulin-like proteins (CMLs) và calcium-dependent protein kinases (CDPKs) nhận biết các tín hiệu canxi này và kích hoạt các phản ứng phòng vệ downstream [2], [13], [14]. Hệ thống tín hiệu canxi điều hòa nhiều quá trình phòng vệ bao gồm: sản xuất các loài oxy phản ứng (reactive oxygen species - ROS), tổng hợp các hợp chất kháng khuẩn, và biểu hiện các gen liên quan đến bệnh [2], [13].

Tuy nhiên, vai trò của canxi trong sức đề kháng có thể phức tạp và phụ thuộc vào loại sâu bệnh. Một nghiên cứu trên cải dầu cho thấy có mối tương quan nghịch đáng kể giữa hàm lượng canxi ở giai đoạn sinh trưởng sinh dưỡng và khả năng kháng rệp *Brevicoryne brassicae* (giải thích 31,8% biến thiên) cũng như ruồi *Delia radicum* (giải thích 41,5% biến thiên) [1]. Điều này cho thấy trong một số trường hợp, hàm lượng canxi cao có thể không có lợi cho sức đề kháng.

2.2.2. Magiê (Mg)

Magiê là thành phần trung tâm của phân tử diệp lục và là chất hoạt hóa cho nhiều enzym quan trọng trong quá trình quang hợp và chuyển hóa. Magiê cũng đóng vai trò trong việc duy trì cấu trúc ribosome và ổn định màng tế bào. Mặc dù vai trò trực tiếp của magiê trong sức đề kháng chưa được nghiên cứu nhiều như các yếu tố khác, nhưng magiê có thể ảnh hưởng gián tiếp thông qua việc duy trì sức khỏe chung của cây và hỗ trợ các quá trình chuyển hóa liên quan đến phòng vệ [1].

2.2.3. Lưu huỳnh (S)

Lưu huỳnh đóng vai trò quan trọng trong hệ thống phòng vệ của cây trồng, đặc biệt thông qua việc tổng hợp các hợp chất chứa lưu huỳnh có hoạt tính phòng vệ. Lưu huỳnh là thành phần thiết yếu của các amino axit cystein và methionin và là tiền chất cho nhiều hợp chất phòng vệ thứ cấp [25], [26].

Trong họ Brassicaceae, lưu huỳnh đặc biệt quan trọng cho việc tổng hợp glucosinolat, một hệ thống phòng vệ hai thành phần (two-component defense system) hiệu quả chống lại sâu bệnh [1], [25]. Khi mô cây bị tổn thương, glucosinolat được thủy phân bởi enzym myrosinaza, tạo ra các sản phẩm độc hại như isothiocyanat có tác dụng kháng khuẩn và kháng côn trùng mạnh [1], [25].

Lưu huỳnh cũng tham gia vào việc tổng hợp glutathion, một chất chống oxy hóa quan trọng trong việc bảo vệ tế bào khỏi stress oxy hóa do nhiễm bệnh gây ra [25], [26]. Nghiên cứu cho thấy việc cung cấp lưu huỳnh đầy đủ có thể tăng cường khả năng phòng vệ của cây, đặc biệt đối với các bệnh do nấm và vi khuẩn [25], [26].

Tuy nhiên, tác động của lưu huỳnh có thể phụ thuộc vào mức độ cung cấp nitơ và loại bệnh hại. Một nghiên cứu cho thấy lưu huỳnh tăng cường khả năng phòng vệ hiệu quả hơn đối với các bệnh do ký sinh bắt buộc so với ký sinh tùy nghi, và hiệu quả này có thể bị ảnh hưởng bởi mức độ cung cấp nitơ [26].

2.3. Yếu tố dinh dưỡng vi lượng

2.3.1. Silic (Si)

Silic, mặc dù không được coi là yếu tố dinh dưỡng thiết yếu cho hầu hết các loài cây, nhưng đã được chứng minh có vai trò quan trọng trong việc tăng cường sức đề kháng của cây trồng đối với cả sâu hại và bệnh hại [3], [4], [5], [6], [10], [11], [15], [24], [29]. Silic được hấp thu dưới dạng axit monosilicic (H_4SiO_4) và lắng đọng trong các mô cây, đặc biệt là ở lớp biểu bì và thành tế bào [3], [4], [5].

Cơ chế phòng vệ của silic bao gồm cả cơ chế vật lý và sinh hóa. Về mặt vật lý, silic tạo thành một lớp rào cản cơ học bằng cách lắng đọng dưới dạng silica (SiO_2) trong thành tế bào và lớp biểu bì, làm tăng độ cứng và khả năng chống xuyên thủng của mô

cây [3], [4], [6], [10], [15], [29]. Lớp silica này có thể ngăn cản sự xâm nhập của sợi nấm (fungal hyphae) và làm mòn bộ máy nhai của côn trùng [3], [4], [6], [29].

Về mặt sinh hóa, silic có thể kích hoạt các cơ chế phòng vệ cảm ứng (induced defense) trong cây [3], [4], [5], [11], [24]. Nghiên cứu cho thấy silic có thể tăng cường hoạt động của các enzym phòng vệ như peroxidaza, polyphenol oxidaza và phenylalanin amôn-lyasa (PAL), đồng thời kích thích sản xuất các hợp chất phenolic và phytoalexin có tác dụng kháng khuẩn [3], [4], [5], [24].

Silic cũng có thể tương tác với các hormon thực vật như jasmonic axit (JA) và salicylic axit (SA) để điều hòa các con đường tín hiệu phòng vệ [4], [5], [11]. Ngoài ra, silic có thể tăng cường khả năng chống chịu stress của cây thông qua việc giảm stress oxi hóa và cải thiện cân bằng nước trong cây [5], [11].

Một số nghiên cứu còn cho thấy silic có thể có tác động gián tiếp lên sâu hại thông qua việc thu hút thiên địch tự nhiên. Cây được bón silic có thể phát ra các chất bay hơi (volatiles) thu hút ong ký sinh và động vật ăn thịt, tạo thành một cơ chế phòng vệ gián tiếp [4], [19].

2.3.2. Kẽm (Zn)

Kẽm là vi lượng thiết yếu cho nhiều quá trình sinh lý của cây, bao gồm tổng hợp protein, điều hòa hormon và hoạt động của nhiều enzym. Vai trò của kẽm đối với sức đề kháng của cây trồng đã được ghi nhận trong nhiều nghiên cứu, mặc dù kết quả có thể khác nhau tùy theo loại cây và loại bệnh [1], [20], [28].

Kẽm tham gia vào việc duy trì tính toàn vẹn của màng tế bào và điều hòa quá trình tổng hợp auxin, một hormon quan trọng cho sự phát triển của cây. Thiếu kẽm có thể làm suy yếu cấu trúc tế bào và giảm khả năng tổng hợp các hợp chất phòng vệ [20], [28]. Ngược lại, cung cấp kẽm đầy đủ có thể tăng cường hoạt động của các enzym chống oxi hóa như superoxit dismutaza (SOD), giúp cây chống lại stress oxi hóa do nhiễm bệnh [28].

2.3.3. Bo (B)

Bo đóng vai trò quan trọng trong cấu trúc thành tế bào, màng tế bào, và nhiều quá trình chuyên hóa của cây. Bo tham gia vào việc hình thành liên kết chéo giữa các phân tử pectin trong thành tế bào, góp phần tăng cường độ bền cơ học của thành tế bào [20].

Nghiên cứu cho thấy bo có thể làm giảm mức độ nghiêm trọng của bệnh thông qua vai trò của nó trong cấu trúc thành tế bào, chức năng màng tế bào và chuyển hóa thực vật [20]. Cây có đủ bo thường có thành tế bào chắc khỏe hơn, khó bị xâm nhập bởi nấm bệnh và vi khuẩn [20].

2.3.4. Sắt (Fe)

Sắt là thành phần của nhiều enzyme quan trọng trong quá trình quang hợp, hô hấp và tổng hợp ADN. Sắt cũng tham gia vào việc tổng hợp chlorophyll (diệp lục tố) và là chất hoạt hóa cho nhiều enzym liên quan đến phòng vệ [8], [20].

Một nghiên cứu trên cây đậu tương cho thấy sắt có thể ảnh hưởng đến mức độ nhiễm bệnh đốm lá *Cercospora* [8]. Tuy nhiên, vai trò cụ thể của sắt trong sức đề kháng

còn cần được nghiên cứu thêm, vì sắt cũng là yếu tố dinh dưỡng quan trọng cho sự phát triển của nhiều loại vi sinh vật gây bệnh [20].

2.3.5. Mangan (Mn)

Mangan đóng vai trò quan trọng trong quá trình quang hợp, đặc biệt trong phản ứng phân giải nước ở photosystem II. Mangan cũng là chất hoạt hóa cho nhiều enzym liên quan đến chuyển hóa nitơ và tổng hợp các hợp chất phòng vệ [1], [20].

Vai trò của mangan trong sức đề kháng chủ yếu liên quan đến việc tổng hợp licnin và các hợp chất phenolic. Mangan là chất hoạt hóa cho enzym phenylalanin amôn-lyaza (PAL), enzym then chốt trong con đường tổng hợp phenylpropanoit, dẫn đến sản xuất licnin và các hợp chất phenolic có tác dụng kháng khuẩn [20]. Licnin hóa thành tế bào là một cơ chế phòng vệ quan trọng giúp tăng cường độ bền cơ học và khả năng chống xâm nhập của mô cây [20].

2.3.6. Đồng (Cu)

Đồng là thành phần của nhiều enzym quan trọng bao gồm cytochrom oxidaza, superoxit dismutaza và polyphenol oxidaza. Đồng có hoạt tính diệt nấm và diệt khuẩn trực tiếp, và đã được sử dụng lâu đời trong các chế phẩm bảo vệ thực vật như Bordeaux mixture [1].

Nghiên cứu trên cây họ Brassicaceae cho thấy có mối tương quan thuận đáng kể giữa hàm lượng đồng ở giai đoạn sinh trưởng sinh dưỡng và khả năng kháng rệp *Brevicoryne brassicae* (giải thích 30,6% biến thiên) [1]. Điều này cho thấy đồng có thể đóng vai trò tích cực trong việc tăng cường sức đề kháng của cây trồng đối với một số loại sâu hại.

3. CƠ CHẾ VÀ BẢN CHẤT TÁC ĐỘNG CỦA TỪNG YẾU TỐ DINH DƯỠNG

3.1. Tăng cường thành tế bào và hàng rào vật lý

Thành tế bào là hàng rào vật lý đầu tiên ngăn chặn sự xâm nhập của sâu bệnh hại vào mô cây. Nhiều yếu tố dinh dưỡng đóng vai trò quan trọng trong việc tăng cường cấu trúc và độ bền của thành tế bào, từ đó nâng cao khả năng phòng vệ của cây trồng.

Silic là yếu tố dinh dưỡng có tác động mạnh nhất đến hàng rào vật lý. Silic được lắng đọng dưới dạng silica (SiO_2) trong thành tế bào và lớp biểu bì, tạo thành một lớp rào cản cơ học chống lại sự xâm nhập của sợi nấm và bộ máy nhai của côn trùng [3], [4], [6], [10], [15], [29]. Nghiên cứu trên lúa cho thấy silic được lắng đọng chủ yếu ở lớp biểu bì của lá và thân, tạo thành các tế bào silica (silica cells) và lông silica (silica hairs) có độ cứng cao [3]. Lớp silica này không chỉ làm tăng độ cứng cơ học mà còn có thể làm mòn bộ máy nhai của côn trùng, giảm khả năng ăn và sinh sản của chúng [4], [6], [29].

Bo tham gia vào việc hình thành cấu trúc thành tế bào thông qua việc tạo liên kết chéo giữa các phân tử pectin. Bo liên kết với các nhóm hydroxyl của rhamnogalacturonan II (RG-II), một thành phần quan trọng của pectin, tạo thành các dimer RG-II-borate ổn định [20]. Các liên kết này góp phần tăng cường độ bền cơ học của thành tế bào và giảm khả năng thủy phân của các enzyme phân giải thành tế bào do nấm bệnh tiết ra [20].

Canxi cũng đóng vai trò trong việc duy trì cấu trúc thành tế bào thông qua việc liên kết với các nhóm carboxyl của pectin, tạo thành canxi pectat. Các liên kết canxi này giúp ổn định cấu trúc lamên (lá mỏng) giữa và thành tế bào sơ cấp, tăng cường độ bền cơ học của mô cây [1], [2].

Mangan góp phần tăng cường thành tế bào thông qua việc kích thích quá trình licnin hóa. Mangan là chất hoạt hóa cho enzym phenylalanin amôn-lyaza (PAL), enzym then chốt trong con đường tổng hợp phenylpropanoít dẫn đến sản xuất licnin [20]. Licnin là một polyme phức tạp được lắng đọng trong thành tế bào thứ cấp, làm tăng độ cứng và khả năng chống thủy phân của thành tế bào, từ đó hạn chế sự xâm nhập của nấm bệnh [20].

Kali có thể ảnh hưởng gián tiếp đến độ bền của thành tế bào thông qua việc điều hòa áp suất thẩm thấu và duy trì độ cứng của tế bào (turgor pressure). Cây có đủ kali thường có thành tế bào dày hơn và độ cứng tế bào cao hơn, khó bị xuyên thủng bởi sợi nấm và bộ máy đâm hút của côn trùng [20].

3.2. Kích hoạt hệ thống phòng vệ sinh hóa

Bên cạnh hàng rào vật lý, cây trồng còn có hệ thống phòng vệ sinh hóa phức tạp bao gồm việc tổng hợp các hợp chất kháng khuẩn, enzym phòng vệ và các loài oxy phản ứng (ROS). Nhiều yếu tố dinh dưỡng đóng vai trò quan trọng trong việc kích hoạt và điều hòa các cơ chế phòng vệ sinh hóa này.

Lưu huỳnh là yếu tố dinh dưỡng then chốt cho việc tổng hợp nhiều hợp chất phòng vệ chứa lưu huỳnh. Trong họ Brassicaceae, lưu huỳnh là tiền chất cho việc tổng hợp glucosinolat, một nhóm hợp chất phòng vệ thứ cấp hiệu quả [1], [25]. Khi mô cây bị tổn thương, glucosinolat được thủy phân bởi enzym myrosinaza (được lưu trữ riêng biệt trong các tế bào myrosin), tạo ra các sản phẩm độc hại như isothiocyanat, thiocyanat và nitril có tác dụng kháng khuẩn và kháng côn trùng mạnh [1], [25].

Lưu huỳnh cũng là thành phần của glutathion, một tripeptit (γ -glutamyl-cysteinyglycine) đóng vai trò quan trọng trong hệ thống chống oxy hóa của cây [25], [26]. Glutathion tham gia vào việc khử độc các loài oxy phản ứng (ROS) và các hợp chất xenobiotic, đồng thời là chất nền cho enzym glutathion S-transferaza (GST), một enzym phòng vệ quan trọng [25], [26].

Ngoài ra, lưu huỳnh còn tham gia vào việc tổng hợp phytoalexin, một nhóm hợp chất kháng khuẩn được tổng hợp de novo khi cây bị nhiễm bệnh. Ví dụ, camalexin, một phytoalexin quan trọng trong Arabidopsis, có chứa lưu huỳnh trong cấu trúc của nó [25].

Silic, mặc dù chủ yếu được biết đến với vai trò tạo hàng rào vật lý, cũng có thể kích hoạt các cơ chế phòng vệ sinh hóa. Nghiên cứu cho thấy silic có thể tăng cường hoạt động của các enzym phòng vệ như peroxidaza (POX), polyphenol oxidaza (PPO), phenylalanin amôn-lyaza (PAL) và chitinaza [3], [4], [5], [24]. Các enzym này tham gia vào việc tổng hợp licnin, hợp chất phenolic và phân giải thành tế bào của nấm bệnh [3], [4], [24].

Silic cũng có thể kích thích sản xuất các hợp chất phenolic và phytoalexin. Nghiên cứu trên lúa cho thấy cây được bón silic có hàm lượng các hợp chất phenolic như axit ferulic và axit p-coumaric cao hơn, đồng thời tăng cường tổng hợp momilacton và phytocassin, hai nhóm phytoalexin quan trọng trong lúa [3], [24].

Mangan đóng vai trò quan trọng trong việc tổng hợp lignin và các hợp chất phenolic thông qua việc hoạt hóa enzym PAL [20]. Mangan cũng là thành phần của enzym mangan superoxit dismutaza (Mn-SOD), một enzym chống oxi hóa quan trọng trong ty thể, giúp khử độc superoxit radical (O_2^-) được tạo ra trong quá trình hô hấp và khi cây bị stress [20].

Đồng là thành phần của nhiều enzym phòng vệ quan trọng. Đồng/kẽm superoxit dismutaza (Cu/Zn-SOD) là một enzym chống oxi hóa chính trong tế bào chất và lục lạp, tham gia vào việc khử độc superoxit radical [1]. Polyphenol oxidaza (PPO), một enzym chứa đồng, xúc tác quá trình oxi hóa các hợp chất phenolic thành quinon, có tác dụng kháng khuẩn và làm nâu mô cây bị tổn thương, ngăn chặn sự lây lan của bệnh [1].

Kẽm là thành phần của Cu/Zn-SOD và nhiều enzym khác liên quan đến chuyển hóa và phòng vệ. Kẽm cũng đóng vai trò trong việc duy trì tính toàn vẹn của màng tế bào và điều hòa quá trình tổng hợp auxin, gián tiếp ảnh hưởng đến khả năng phòng vệ của cây [20], [28].

3.3. Điều hòa con đường tín hiệu và chuyển hóa

Cơ chế phòng vệ của cây trồng được điều hòa bởi các con đường tín hiệu phức tạp liên quan đến nhiều hormon thực vật và phân tử tín hiệu. Một số yếu tố dinh dưỡng đóng vai trò quan trọng trong việc điều hòa các con đường tín hiệu này.

Canxi là phân tử tín hiệu thứ cấp quan trọng nhất trong hệ thống miễn dịch của cây. Khi cây nhận biết được sự hiện diện của sâu bệnh thông qua các hình mẫu sự nhận biết cơ quan nhạy cảm - pattern recognition receptors (PRRs), nồng độ Ca^{2+} trong tế bào chất tăng lên nhanh chóng từ mức nền khoảng 100 nM lên đến vài micromolar [2], [13], [14]. Sự gia tăng Ca^{2+} này tạo ra các "chữ ký canxi" (calcium signatures) đặc trưng về biên độ, tần số và thời gian, mã hóa thông tin về loại stress và mức độ nghiêm trọng [2], [14]. Các protein cảm biến canxi như calmodulin (CaM), calmodulin-like proteins (CMLs), calcium-dependent protein kinases (CDPKs) và calcineurin B-like proteins (CBLs) nhận biết các tín hiệu canxi này và truyền tín hiệu xuống downstream [2], [13], [14]. CDPKs, ví dụ, có cả domain (lĩnh vực) kinaza và domain liên kết canxi, cho phép chúng trực tiếp cảm nhận Ca^{2+} và phosphoryl hóa các protein đích mà không cần trung gian [2], [13], [14].

Hệ thống tín hiệu canxi điều hòa nhiều quá trình phòng vệ bao gồm:

- Sản xuất các loài oxy phản ứng (ROS) thông qua việc kích hoạt NADPH oxidaza (RBOH) [2], [13], [14].
- Đóng khí khổng để ngăn chặn sự xâm nhập của vi khuẩn [2], [14].
- Kích hoạt các MAPK cascades (mitogen-activated protein kinase cascades) [2], [13].
- Biểu hiện các gen phòng vệ thông qua việc kích hoạt các yếu tố phiên mã [2], [13], [14].
- Tổng hợp các hormon phòng vệ như salicylic axit (SA), jasmonic axit (JA) và etylen (ET) [2], [13].

Các kênh canxi khác nhau tham gia vào việc điều hòa dòng Ca^{2+} vào tế bào chất, bao gồm glutamat receptor-like channels (GLRs), cyclic nucleotide-gated channels

(CNGCs) và annexins [2], [13], [14]. Việc điều khiển các kênh này có thể là một chiến lược để tăng cường sức đề kháng của cây trồng [2].

Silic có thể tương tác với các con đường tín hiệu hormon thực vật. Nghiên cứu cho thấy silic có thể điều hòa các con đường tín hiệu salicylic axit (SA) và jasmonic axit (JA), hai hormon quan trọng trong phòng vệ của cây [4], [5], [11], [24]. SA chủ yếu liên quan đến phòng vệ chống lại vi khuẩn và nấm bệnh sinh dưỡng (biotrophic pathogens), trong khi JA liên quan đến phòng vệ chống lại côn trùng ăn lá và nấm bệnh hoại sinh (necrotrophic pathogens) [4], [24].

Silic có thể kích hoạt sự đề kháng đạt được khi ngấm vào qua mầm (Systemic acquired resistance - SAR), một dạng miễn dịch hệ thống lâu dài được kích hoạt sau khi cây bị nhiễm bệnh cục bộ [24]. SAR liên quan đến việc tích lũy SA và biểu hiện các gen pathogenesis-related (PR) trong toàn bộ cây, tạo ra khả năng kháng bệnh tăng cường và lâu dài [24].

Lưu huỳnh cũng có thể tương tác với các con đường tín hiệu hormon. Nghiên cứu cho thấy có sự tương tác phức tạp giữa chuyển hóa lưu huỳnh và các con đường tín hiệu SA và JA [26]. Việc cung cấp lưu huỳnh có thể ảnh hưởng đến sự cân bằng giữa các con đường phòng vệ này, từ đó ảnh hưởng đến khả năng kháng các loại bệnh hại khác nhau [26].

Nitơ có thể ảnh hưởng đến cân bằng giữa sinh trưởng và phòng vệ. Nghiên cứu gần đây cho thấy có sự đánh đổi (trade-off) giữa việc phân bổ nguồn lực cho sinh trưởng và phòng vệ [23]. Khi nitơ dồi dào, cây có xu hướng ưu tiên sinh trưởng hơn là phòng vệ, dẫn đến giảm biểu hiện các gen phòng vệ và giảm tổng hợp các hợp chất phòng vệ thứ cấp [23], [30]. Ngược lại, khi nitơ hạn chế, cây có thể tăng cường đầu tư vào phòng vệ [23].

4. MỘT SỐ TRƯỜNG HỢP CỤ THỂ TRÊN CÁC CÂY TRỒNG

4.1. Cây lúa

Lúa (*Oryza sativa*) là cây lương thực quan trọng nhất thế giới và cũng là đối tượng nghiên cứu điển hình về vai trò của dinh dưỡng trong sức đề kháng. Lúa đặc biệt nhạy cảm với nhiều loại sâu bệnh hại, trong đó bệnh đạo ôn (rice blast) do nấm *Magnaporthe oryzae* gây ra là một trong những bệnh nghiêm trọng nhất.

*** Vai trò của silic trong lúa**

Lúa là cây tích lũy silic cao, với hàm lượng silic trong mô khô có thể đạt 10-15% [3]. Nghiên cứu của Sun et al. (2010) cho thấy silic tăng cường khả năng kháng bệnh đạo ôn của lúa thông qua cả cơ chế vật lý và sinh hóa [3]. Về mặt vật lý, silic được lắng đọng trong lớp biểu bì của lá, tạo thành một lớp rào cản cơ học ngăn chặn sự xâm nhập của sợi nấm [3]. Nghiên cứu sử dụng kính hiển vi điện tử quét (SEM) cho thấy lớp silica trên bề mặt lá của cây lúa được bón silic dày hơn và đồng đều hơn so với cây đối chứng [3].

Về mặt sinh hóa, silic kích hoạt các cơ chế phòng vệ cảm ứng trong lúa. Cây lúa được bón silic có hoạt động enzym peroxidaza (POX) và polyphenol oxidaza (PPO) cao hơn, đồng thời tăng cường tổng hợp các hợp chất phenolic và phytoalexin như

momilacton và phytoalexin [3]. Các hợp chất này có tác dụng kháng nấm mạnh, ức chế sự nảy mầm của bào tử và sự phát triển của sợi nấm [3].

Nghiên cứu cũng cho thấy silic có thể điều hòa biểu hiện các gen phòng vệ trong lúa. Cây lúa được bón silic có biểu hiện cao hơn các gen mã hóa cho các protein liên quan đến bệnh (PR proteins) như PR-1, PR-5 và chitinase [3], [24]. Điều này cho thấy silic không chỉ tạo hàng rào vật lý mà còn kích hoạt hệ thống miễn dịch của cây [3], [24].

*** Vai trò của các yếu tố dinh dưỡng khác trong lúa**

Nghiên cứu về vai trò của nitơ, photpho và kali trong sức đề kháng của lúa cho thấy kết quả phức tạp. Bón nitơ quá mức có thể làm tăng mức độ nhiễm bệnh đạo ôn và bệnh khô vằn do làm tăng hàm lượng amino axit tự do trong mô lá, tạo môi trường thuận lợi cho sự phát triển của nấm bệnh [20], [30]. Tuy nhiên, thiếu nitơ cũng làm giảm khả năng tổng hợp các protein phòng vệ và giảm sức sống chung của cây [20], [30].

Kali đóng vai trò tích cực trong việc tăng cường sức đề kháng của lúa. Bón kali đầy đủ có thể làm giảm mức độ nhiễm bệnh đạo ôn và bệnh khô vằn thông qua việc tăng cường độ dày thành tế bào, điều hòa quá trình mở khí khổng và tăng cường tổng hợp các hợp chất phenolic [20].

Các vi lượng như kẽm và mangan cũng quan trọng cho sức đề kháng của lúa. Thiếu kẽm có thể làm giảm khả năng kháng bệnh do ảnh hưởng đến tổng hợp auxin và hoạt động của các enzym chống oxy hóa [20], [28]. Mangan tham gia vào việc tổng hợp lignin và các hợp chất phenolic, góp phần tăng cường hàng rào vật lý và sinh hóa chống lại sâu bệnh [20].

4.2. Cây ăn quả

Cây ăn quả bao gồm nhiều loài khác nhau như cây có múi (citrus), cây táo, cây lê và các loại cây nhiệt đới. Mỗi loại cây có những đặc điểm riêng về nhu cầu dinh dưỡng và các vấn đề sâu bệnh đặc trưng.

Cà chua (*Solanum lycopersicum*)

Mặc dù cà chua thường được phân loại là cây rau, nhưng về mặt thực vật học, cà chua là cây ăn quả. Cà chua là đối tượng nghiên cứu quan trọng về vai trò của dinh dưỡng trong sức đề kháng.

Nghiên cứu của Shoaib et al. (2021) trên cà chua cho thấy phân bón khoáng có thể cải thiện các phản ứng phòng vệ và giảm bệnh đốm lá sớm (early blight) do nấm *Alternaria solani* gây ra [16]. Nghiên cứu này so sánh hiệu quả của các loại phân bón khoáng khác nhau và cho thấy việc bón phân cân đối có thể làm giảm đáng kể mức độ nhiễm bệnh [16].

Cơ chế tác động bao gồm việc tăng cường hoạt động của các enzym phòng vệ như peroxidaza (POX), polyphenol oxidaza (PPO) và phenylalanin amôn-lyaza (PAL). Cây cà chua được bón phân khoáng đầy đủ có hoạt động enzym cao hơn và hàm lượng các hợp chất phenolic tổng số cao hơn so với cây đối chứng [16].

Một nghiên cứu khác cho thấy các yếu tố dinh dưỡng có thể kích hoạt các con đường miễn dịch khác nhau trong cà chua [22]. Các yếu tố dinh dưỡng khác nhau có thể kích hoạt các con đường tín hiệu salicylic axit (SA) hoặc jasmonic axit (JA) một cách

khác biệt, dẫn đến các phản ứng phòng vệ khác nhau [22]. Điều này cho thấy việc quản lý dinh dưỡng có thể được tối ưu hóa để tăng cường khả năng kháng các loại bệnh hại cụ thể [22].

Cây có múi (*Citrus spp.*)

Cây có múi nhạy cảm với nhiều loại bệnh hại, trong đó bệnh huanglongbing (HLB hoặc citrus greening) là một trong những bệnh nghiêm trọng nhất. Nghiên cứu cho thấy dinh dưỡng đóng vai trò quan trọng trong việc quản lý sức khỏe của cây có múi [27].

Việc cung cấp đầy đủ các vi lượng như kẽm, mangan và bo có thể giúp cây có múi chống chịu tốt hơn với stress và giảm mức độ nhiễm bệnh [27]. Đặc biệt, kẽm và mangan đóng vai trò quan trọng trong việc duy trì sức khỏe của hệ rễ và tăng cường khả năng hấp thu dinh dưỡng, yếu tố quan trọng cho cây bị ảnh hưởng bởi HLB [27].

4.3. Rau màu

Rau màu bao gồm nhiều loài thuộc các họ khác nhau, trong đó họ Brassicaceae (cải, cải bắp, cải dầu) và họ Solanaceae (cà chua, ớt, khoai tây) là hai họ quan trọng nhất.

Cây họ Brassicaceae

Cây họ Brassicaceae có hệ thống phòng vệ đặc trưng dựa trên glucosinolat, một nhóm hợp chất chứa lưu huỳnh. Nghiên cứu của Szwarc et al. (2021) trên cải dầu (*Brassica napus*) cho thấy mối quan hệ phức tạp giữa hàm lượng các yếu tố dinh dưỡng và khả năng kháng sâu hại [1].

Nghiên cứu này phân tích hàm lượng của nhiều yếu tố dinh dưỡng (N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Zn, Mn, Fe) và mối liên hệ của chúng với khả năng kháng rệp *Brevicoryne brassicae* và ruồi *Delia radicum* [1]. Kết quả cho thấy:

Có mối tương quan nghịch đáng kể giữa hàm lượng canxi và khả năng kháng cả hai loại sâu hại (giải thích 31,8% biến thiên cho rệp và 41,5% cho ruồi) [1].

Có mối tương quan thuận đáng kể giữa hàm lượng đồng và khả năng kháng rệp (giải thích 30,6% biến thiên) [1].

Không tìm thấy mối liên hệ đáng kể giữa hàm lượng nitơ và khả năng kháng sâu hại [1].

Hàm lượng lưu huỳnh không có mối liên hệ với khả năng kháng ruồi trong nghiên cứu này [1].

Kết quả này cho thấy vai trò của các yếu tố dinh dưỡng trong sức đề kháng có thể phức tạp và không phải lúc nào cũng theo hướng tích cực như dự đoán. Mối tương quan nghịch giữa canxi và khả năng kháng sâu hại có thể liên quan đến việc canxi làm tăng hàm lượng các hợp chất dinh dưỡng trong mô lá, tạo môi trường thuận lợi hơn cho sâu hại [1].

Lưu huỳnh đóng vai trò đặc biệt quan trọng trong họ Brassicaceae thông qua việc tổng hợp glucosinolat [1], [25]. Các nghiên cứu khác cho thấy việc bón lưu huỳnh đầy đủ có thể tăng cường hàm lượng glucosinolat trong mô cây, từ đó tăng cường khả năng phòng vệ chống lại sâu bệnh [25]. Tuy nhiên, hiệu quả này có thể phụ thuộc vào mức độ cung cấp nitơ và loại sâu bệnh cụ thể [26].

Cây họ Solanaceae

Ngoài cà chua đã được đề cập ở trên, các cây khác trong họ Solanaceae như ớt và khoai tây cũng có những đặc điểm riêng về mối quan hệ giữa dinh dưỡng và sức đề kháng.

Nghiên cứu trên khoai tây cho thấy việc bón kali đầy đủ có thể làm giảm mức độ nhiễm bệnh mốc sương (late blight) do *Phytophthora infestans* gây ra [20]. Kali giúp tăng cường độ dày thành tế bào và giảm hàm lượng nước tự do trong mô lá, làm giảm môi trường thuận lợi cho sự phát triển của nấm bệnh [20].

Các vi lượng như bo và kẽm cũng quan trọng cho sức đề kháng của cây họ Solanaceae. Thiếu bo có thể làm tăng mức độ nhiễm bệnh thối đầu quả (blossom end rot) ở cà chua và ớt, mặc dù bệnh này chủ yếu liên quan đến thiếu canxi [20].

Rau lá xanh

Các loại rau lá xanh như rau diếp, rau bina, và cải xanh cũng được hưởng lợi từ việc quản lý dinh dưỡng hợp lý. Silic có thể đóng vai trò quan trọng trong việc tăng cường sức đề kháng của rau lá xanh đối với côn trùng ăn lá [4], [6]. Việc bón silic có thể làm tăng độ cứng của lá, giảm khả năng ăn của côn trùng như sâu xanh, rệp và bọ trĩ [4], [6].

5. ỨNG DỤNG THỰC TẾ TRONG CANH TÁC

5.1. Chiến lược quản lý dinh dưỡng tích hợp

Quản lý dinh dưỡng tích hợp (Integrated Nutrient Management - INM) là một phương pháp tiếp cận toàn diện nhằm tối ưu hóa việc cung cấp dinh dưỡng cho cây trồng, đồng thời tăng cường sức đề kháng tự nhiên và giảm thiểu tác động môi trường. Chiến lược này dựa trên các nguyên tắc sau:

1. Cân bằng dinh dưỡng

Việc cung cấp cân bằng các yếu tố dinh dưỡng đa lượng, trung lượng và vi lượng là yếu tố then chốt cho sức khỏe và sức đề kháng của cây trồng [20], [27]. Bón quá nhiều một yếu tố dinh dưỡng (đặc biệt là nitơ) có thể gây mất cân bằng và làm giảm sức đề kháng [20], [30]. Ngược lại, thiếu hụt bất kỳ yếu tố nào cũng có thể làm suy yếu cây và tăng tính nhạy cảm với sâu bệnh [18], [20].

Phân tích đất và mô cây là công cụ quan trọng để xác định tình trạng dinh dưỡng và điều chỉnh chương trình bón phân phù hợp [27]. Việc bón phân nên dựa trên nhu cầu thực tế của cây trồng và khả năng cung cấp của đất, tránh bón thừa hoặc thiếu [20], [27].

2. Tối ưu hóa thời điểm và phương pháp bón phân

Thời điểm và phương pháp bón phân có thể ảnh hưởng đáng kể đến hiệu quả sử dụng phân bón và sức đề kháng của cây trồng. Bón phân theo giai đoạn sinh trưởng, tập trung vào các giai đoạn quan trọng như giai đoạn sinh trưởng sinh dưỡng mạnh và giai đoạn ra hoa kết quả, có thể giúp cây duy trì sức khỏe tốt và tăng cường khả năng phòng vệ [20], [27].

Phương pháp bón phân cũng quan trọng. Bón phân qua lá (foliar application) có thể là một phương pháp hiệu quả để cung cấp nhanh các vi lượng như kẽm, bo và mangan, đặc biệt khi cây đang bị stress hoặc khi đất có pH không thuận lợi cho việc hấp thu các yếu tố này [27], [28].

3. Kết hợp phân hữu cơ và phân vô cơ

Việc kết hợp phân hữu cơ và phân vô cơ có thể mang lại nhiều lợi ích cho sức đề kháng của cây trồng [20], [27]. Phân hữu cơ không chỉ cung cấp dinh dưỡng mà còn cải thiện cấu trúc đất, tăng cường hoạt động của vi sinh vật có lợi và cung cấp các chất kích thích sinh trưởng tự nhiên [20].

Vi sinh vật có lợi trong đất, được nuôi dưỡng bởi chất hữu cơ, có thể góp phần tăng cường sức đề kháng của cây thông qua nhiều cơ chế như cạnh tranh với vi sinh vật gây bệnh, sản xuất các chất kháng sinh tự nhiên và kích hoạt hệ thống miễn dịch của cây (induced systemic resistance - ISR) [20].

4. Ứng dụng silic trong canh tác

Silic đã được chứng minh có vai trò quan trọng trong việc tăng cường sức đề kháng của nhiều loại cây trồng, đặc biệt là lúa và các loại cỏ khác [3], [4], [5], [6], [24], [29]. Việc bón silic có thể được thực hiện thông qua nhiều phương pháp:

Bón silic vào đất: Sử dụng các nguồn silic như xỉ thép (steel slag), tro trấu (rice husk ash) hoặc các sản phẩm silic thương mại. Liều lượng khuyến nghị cho lúa thường từ 200-400 kg SiO_2 /ha, tùy thuộc vào hàm lượng silic có sẵn trong đất [3], [24].

Bón silic qua lá: Sử dụng các dung dịch silic hòa tan như kali silicat hoặc natri silicat. Phương pháp này có thể cung cấp nhanh silic cho cây và kích hoạt các cơ chế phòng vệ cảm ứng [4], [24].

Ngâm hạt trong dung dịch silic: Phương pháp này có thể tăng cường sức sống của hạt giống và cung cấp silic ngay từ giai đoạn đầu của sự phát triển [24].

Việc ứng dụng silic đặc biệt hiệu quả trong điều kiện cây trồng bị stress do hạn, mặn hoặc nhiễm bệnh nặng [5], [11], [24]. Silic không chỉ tăng cường sức đề kháng mà còn cải thiện khả năng chống chịu stress abiotic, giúp cây duy trì năng suất trong điều kiện bất lợi [5], [11].

5. Quản lý vi lượng

Các vi lượng như kẽm, bo, mangan và đồng đóng vai trò quan trọng trong sức đề kháng của cây trồng mặc dù chỉ cần với lượng nhỏ [1], [20], [28]. Thiếu hụt vi lượng có thể làm giảm đáng kể sức đề kháng và tăng tính nhạy cảm với sâu bệnh [18], [20], [28].

Việc bón vi lượng cần được thực hiện cẩn thận vì khoảng cách giữa mức thiếu hụt và mức độc hại thường rất hẹp [20], [28]. Phân tích đất và mô cây là cần thiết để xác định nhu cầu vi lượng cụ thể [27], [28].

Bón vi lượng qua lá thường hiệu quả hơn bón vào đất, đặc biệt trong điều kiện đất có pH cao hoặc thấp, khi khả năng hấp thu vi lượng từ đất bị hạn chế [27], [28]. Tuy nhiên, cần chú ý đến nồng độ và tần suất phun để tránh gây phồng lá [27].

5.2. Khuyến nghị thực hành

Dựa trên các bằng chứng khoa học đã được tổng hợp, dưới đây là các khuyến nghị thực hành cụ thể cho việc quản lý dinh dưỡng nhằm tăng cường sức đề kháng của cây trồng:

Đối với cây lúa:

Quản lý nitơ hợp lý: Tránh bón nitơ quá mức, đặc biệt ở giai đoạn đẻ nhánh và trổ bông. Chia nhỏ liều lượng nitơ thành nhiều lần bón để tránh tích lũy amino axit tự do quá mức trong lá, giảm nguy cơ nhiễm bệnh đạo ôn và bệnh khô vằn [20], [30].

Bón silic: Bón 200-400 kg SiO_2 /ha vào đất trước khi cấy hoặc phun dung dịch silic 1-2 g/L lên lá 2-3 lần trong mùa vụ. Silic đặc biệt hiệu quả trong việc giảm bệnh đạo ôn và tăng cường khả năng chống đổ [3], [24].

Cung cấp đầy đủ kali: Bón kali theo khuyến cáo (thường 60-90 kg K_2O /ha) để tăng cường độ cứng thân lá và giảm mức độ nhiễm bệnh [20].

Bón vi lượng: Đảm bảo cung cấp đầy đủ kẽm (5-10 kg ZnSO_4 /ha) và mangan, đặc biệt trên đất có pH cao hoặc đất cát nghèo dinh dưỡng [20], [28].

Đối với cây ăn quả (cà chua, cây có múi):

Bón phân cân đối: Sử dụng phân bón có tỷ lệ N:P:K phù hợp với giai đoạn sinh trưởng. Tránh bón nitơ quá mức ở giai đoạn ra hoa kết quả [16], [22], [27].

Quản lý canxi: Đảm bảo cung cấp đầy đủ canxi, đặc biệt cho cà chua và ổi để tránh bệnh thối đầu quả. Phun canxi qua lá (0,5-1% CaCl_2) có thể hiệu quả trong điều kiện đất thiếu canxi hoặc khi cây bị stress [27].

Bón vi lượng: Chú ý đến việc cung cấp kẽm, bo và mangan. Phun vi lượng qua lá (Zn: 0,3-0,5% ZnSO_4 , B: 0,1-0,2% H_3BO_3) có thể hiệu quả, đặc biệt ở giai đoạn ra hoa [27], [28].

Sử dụng phân hữu cơ: Kết hợp phân hữu cơ để cải thiện cấu trúc đất và tăng cường hoạt động của vi sinh vật có lợi [20], [27].

Đối với rau màu (họ Brassicaceae và các loại rau khác):

Quản lý lưu huỳnh: Đối với cây họ Brassicaceae, đảm bảo cung cấp đầy đủ lưu huỳnh (20-40 kg S/ha) để tăng cường tổng hợp glucosinolat. Có thể sử dụng phân bón chứa lưu huỳnh như amôn sunfat hoặc kali sunfat [25], [26].

Cân bằng canxi và đồng: Dựa trên nghiên cứu, cần cân nhắc việc quản lý canxi và đồng. Mặc dù canxi quan trọng cho cấu trúc tế bào, nhưng hàm lượng quá cao có thể không có lợi cho khả năng kháng một số loại sâu hại. Đồng có thể có tác động tích cực đến khả năng kháng rệp [1].

Bón silic cho rau lá: Bón silic có thể tăng cường độ cứng của lá và giảm thiệt hại do côn trùng ăn lá. Phun dung dịch silic 1-2 g/L lên lá 2-3 lần trong chu kỳ sinh trưởng [4], [6].

Quản lý nitơ: Tránh bón nitơ quá mức để giảm nguy cơ nhiễm bệnh và tăng chất lượng sản phẩm. Bón nitơ theo nhu cầu của cây ở từng giai đoạn sinh trưởng [20], [30].

Nguyên tắc chung:

Phân tích đất và mô cây: Thực hiện phân tích đất định kỳ (ít nhất 1 lần/năm) và phân tích mô cây khi cần thiết để xác định tình trạng dinh dưỡng và điều chỉnh chương trình bón phân [27].

Theo dõi sức khỏe cây trồng: Quan sát thường xuyên để phát hiện sớm các dấu hiệu thiếu hụt dinh dưỡng hoặc nhiễm sâu bệnh. Can thiệp kịp thời bằng các biện pháp dinh dưỡng phù hợp [27].

Kết hợp với các biện pháp quản lý khác: Quản lý dinh dưỡng nên được kết hợp với các biện pháp quản lý tổng hợp sâu bệnh (IPM) khác như sử dụng giống kháng bệnh, luân canh, quản lý nước hợp lý và sử dụng thuốc bảo vệ thực vật sinh học khi cần thiết [20], [27].

Ghi chép và đánh giá: Ghi chép chi tiết về chương trình bón phân, tình hình sâu bệnh và năng suất để đánh giá hiệu quả và điều chỉnh cho các vụ sau [27].

6. ĐỊNH HƯỚNG NGHIÊN CỨU

6.1. Những thách thức trong nghiên cứu và ứng dụng

Mặc dù đã có nhiều bằng chứng khoa học về vai trò của dinh dưỡng cây trồng trong sức đề kháng, vẫn còn nhiều thách thức trong việc hiểu rõ và ứng dụng kiến thức này vào thực tiễn sản xuất.

* Tính phức tạp của tương tác dinh dưỡng-cây trồng-sâu bệnh

Mối quan hệ giữa dinh dưỡng và sức đề kháng rất phức tạp và phụ thuộc vào nhiều yếu tố. Tác động của một yếu tố dinh dưỡng có thể khác nhau tùy theo loại cây trồng, loại sâu bệnh (ký sinh bắt buộc hay tùy nghi, côn trùng ăn lá hay hút mật), giai đoạn sinh trưởng của cây và điều kiện môi trường [18], [20], [23]. Ví dụ, nitơ có thể làm tăng mức độ nhiễm bệnh do ký sinh bắt buộc nhưng lại giảm mức độ nhiễm bệnh do ký sinh tùy nghi [20].

Ngoài ra, còn có sự tương tác phức tạp giữa các yếu tố dinh dưỡng với nhau. Ví dụ, tác động của lưu huỳnh lên sức đề kháng có thể bị ảnh hưởng bởi mức độ cung cấp nitơ [26]. Sự cân bằng giữa các yếu tố dinh dưỡng cũng quan trọng không kém việc cung cấp đầy đủ từng yếu tố riêng lẻ [20], [27].

* Sự đánh đổi giữa sinh trưởng và phòng vệ

Nghiên cứu gần đây cho thấy có sự đánh đổi (trade-off) giữa việc phân bổ nguồn lực cho sinh trưởng và phòng vệ [23]. Khi dinh dưỡng (đặc biệt là nitơ) dồi dào, cây có xu hướng ưu tiên sinh trưởng hơn là phòng vệ, dẫn đến giảm biểu hiện các gen phòng vệ và giảm tổng hợp các hợp chất phòng vệ thứ cấp [23]. Ngược lại, khi dinh dưỡng hạn chế, cây có thể tăng cường đầu tư vào phòng vệ nhưng với cái giá là giảm sinh trưởng và năng suất [23].

Việc tối ưu hóa cân bằng này là một thách thức lớn trong quản lý dinh dưỡng. Mục tiêu không chỉ là tăng cường sức đề kháng mà còn phải duy trì năng suất và chất lượng sản phẩm ở mức cao [23].

* Biến đổi khí hậu và stress phức hợp

Biến đổi khí hậu đang tạo ra những thách thức mới cho sản xuất nông nghiệp. Cây trồng ngày càng phải đối mặt với nhiều loại stress đồng thời (stress phức hợp) như

hạn hán, nhiệt độ cao và sâu bệnh [5], [11]. Vai trò của dinh dưỡng trong việc giúp cây chống chịu stress phức hợp này cần được nghiên cứu thêm [5], [11], [23].

Silic, ví dụ, đã được chứng minh có vai trò trong việc giúp cây chống chịu cả stress sinh học (sâu bệnh) và stress phi sinh học (hạn, mặn, nhiệt độ cao) [5], [11]. Tuy nhiên, cơ chế tương tác giữa các loại stress này và vai trò của dinh dưỡng trong việc điều hòa các phản ứng chống stress vẫn chưa được hiểu rõ [5], [11], [23].

***Khả năng ứng dụng trong thực tiễn**

Mặc dù có nhiều bằng chứng khoa học từ các nghiên cứu trong điều kiện kiểm soát (nhà lưới, phòng thí nghiệm), việc chuyển giao kiến thức này vào thực tiễn sản xuất vẫn gặp nhiều khó khăn. Điều kiện thực tế trong đồng ruộng phức tạp hơn nhiều so với điều kiện thí nghiệm, với nhiều yếu tố không thể kiểm soát [27].

Ngoài ra, việc áp dụng các biện pháp quản lý dinh dưỡng tiên tiến đòi hỏi kiến thức kỹ thuật, thiết bị phân tích và chi phí đầu tư ban đầu, có thể là rào cản đối với nhiều nông dân, đặc biệt là nông dân nhỏ ở các nước đang phát triển [27].

6.2. Định hướng nghiên cứu tương lai

Dựa trên các khoảng trống kiến thức hiện tại và những thách thức đã được xác định, các định hướng nghiên cứu tương lai có thể bao gồm:

1. Nghiên cứu cơ chế phân tử

Cần có thêm nhiều nghiên cứu về cơ chế phân tử chi tiết của việc các yếu tố dinh dưỡng điều hòa hệ thống miễn dịch của cây. Đặc biệt, vai trò của các yếu tố dinh dưỡng trong việc điều hòa biểu hiện gen, sửa đổi epigenetic và tương tác với các con đường tín hiệu hormon cần được làm rõ [2], [12], [13], [14], [23].

Công nghệ omics (genomics, transcriptomics, proteomics, metabolomics) có thể cung cấp cái nhìn toàn diện về các thay đổi phân tử xảy ra khi cây được cung cấp các yếu tố dinh dưỡng khác nhau và khi cây bị tấn công bởi sâu bệnh [12], [23]. Những thông tin này có thể giúp xác định các gen và con đường tín hiệu then chốt, từ đó phát triển các chiến lược quản lý dinh dưỡng chính xác hơn [12].

2. Nghiên cứu tương tác giữa các yếu tố dinh dưỡng

Cần có thêm nghiên cứu về tương tác giữa các yếu tố dinh dưỡng và cách chúng cùng nhau ảnh hưởng đến sức đề kháng. Hầu hết các nghiên cứu hiện tại tập trung vào từng yếu tố riêng lẻ, trong khi trong thực tế, cây trồng nhận được nhiều yếu tố dinh dưỡng cùng lúc và có thể có các tác động hiệp đồng hoặc đối kháng [20], [26].

Ví dụ, tương tác giữa lưu huỳnh và nitơ trong việc điều hòa phòng vệ của cây cần được nghiên cứu sâu hơn [26]. Tương tác giữa silic và các yếu tố dinh dưỡng khác cũng là một hướng nghiên cứu hứa hẹn [5], [11].

3. Nghiên cứu trong điều kiện stress phức hợp

Cần có thêm nghiên cứu về vai trò của dinh dưỡng trong việc giúp cây chống chịu stress phức hợp (kết hợp giữa stress sinh học và phi sinh học). Điều này đặc biệt quan trọng trong bối cảnh biến đổi khí hậu, khi cây trồng ngày càng phải đối mặt với nhiều loại stress đồng thời [5], [11], [23].

Nghiên cứu cần xác định các yếu tố dinh dưỡng và chế độ dinh dưỡng nào có thể giúp cây duy trì cả năng suất và sức đề kháng trong điều kiện stress phức hợp [5], [11], [23].

4. Phát triển công nghệ quản lý dinh dưỡng chính xác

Công nghệ nông nghiệp chính xác (precision agriculture) có thể giúp tối ưu hóa việc quản lý dinh dưỡng để tăng cường sức đề kháng. Việc sử dụng các cảm biến, drone, và hệ thống thông tin địa lý (GIS) có thể giúp theo dõi tình trạng dinh dưỡng và sức khỏe của cây trồng theo thời gian thực, từ đó điều chỉnh chương trình bón phân kịp thời [27].

Trí tuệ nhân tạo (AI) và machine learning có thể được sử dụng để phân tích dữ liệu lớn về dinh dưỡng, sâu bệnh và điều kiện môi trường, từ đó đưa ra các khuyến nghị quản lý dinh dưỡng tối ưu cho từng điều kiện cụ thể [27].

5. Nghiên cứu ứng dụng trong các hệ thống canh tác bền vững

Cần có thêm nghiên cứu về vai trò của dinh dưỡng trong các hệ thống canh tác bền vững như nông nghiệp hữu cơ, nông lâm kết hợp và canh tác bảo tồn. Các hệ thống này thường dựa vào các nguồn dinh dưỡng tự nhiên và tái chế dinh dưỡng và vai trò của dinh dưỡng trong sức đề kháng trong các hệ thống này có thể khác với canh tác thông thường [20].

Nghiên cứu cũng cần tập trung vào việc phát triển các nguồn dinh dưỡng bền vững và thân thiện với môi trường, như các chế phẩm sinh học cung cấp dinh dưỡng, phân bón giải phóng chậm và các công nghệ tái chế dinh dưỡng [20], [27].

6. Nghiên cứu đa ngành và tích hợp

Nghiên cứu về vai trò của dinh dưỡng trong sức đề kháng cần có sự hợp tác đa ngành giữa các nhà dinh dưỡng thực vật, bệnh lý thực vật, côn trùng học, sinh lý thực vật, sinh học phân tử và khoa học đất. Cách tiếp cận tích hợp này có thể giúp hiểu rõ hơn về các tương tác phức tạp giữa dinh dưỡng, cây trồng, sâu bệnh và môi trường [20], [23], [27].

Ngoài ra, cần có sự kết nối chặt chẽ hơn giữa nghiên cứu cơ bản và nghiên cứu ứng dụng, đảm bảo rằng các phát hiện khoa học có thể được chuyển giao hiệu quả vào thực tiễn sản xuất [27].

7. KẾT LUẬN

Dinh dưỡng cây trồng đóng vai trò quan trọng và đa dạng trong việc tăng cường sức đề kháng của cây trồng đối với sâu bệnh hại. Các yếu tố dinh dưỡng đa lượng (N, P, K), trung lượng (Ca, Mg, S) và vi lượng (Si, Zn, B, Fe, Mn, Cu) đều có những đóng góp riêng biệt và quan trọng cho hệ thống phòng vệ của cây trồng.

Các cơ chế tác động của dinh dưỡng lên sức đề kháng rất đa dạng, bao gồm: (1) tăng cường cấu trúc thành tế bào và tạo hàng rào vật lý chống lại sự xâm nhập của sâu bệnh; (2) kích hoạt hệ thống phòng vệ sinh hóa thông qua việc tổng hợp các enzym phòng vệ, hợp chất kháng khuẩn và các loài oxy phản ứng; và (3) điều hòa các con đường tín hiệu nội bào và tương tác với các hormon thực vật để kích hoạt các phản ứng phòng vệ toàn diện.

Silic nổi lên như một yếu tố dinh dưỡng có vai trò đặc biệt quan trọng trong việc tăng cường sức đề kháng, đặc biệt đối với cây lúa và các loại cỏ. Silic không chỉ tạo hàng rào vật lý mà còn kích hoạt các cơ chế phòng vệ cảm ứng, mang lại khả năng kháng bệnh phổ rộng [3], [4], [5], [6], [11], [24], [29].

Canxi đóng vai trò then chốt như một phân tử tín hiệu thứ cấp trong hệ thống miễn dịch của cây, điều hòa nhiều quá trình phòng vệ từ nhận biết sâu bệnh đến kích hoạt các phản ứng phòng vệ downstream [2], [13], [14].

Lưu huỳnh quan trọng cho việc tổng hợp các hợp chất phòng vệ chứa lưu huỳnh như glucosinolat trong họ Brassicaceae và glutathion trong tất cả các loài cây [1], [25], [26].

Các vi lượng như kẽm, bo, mangan và đồng, mặc dù chỉ cần với lượng nhỏ, nhưng đóng vai trò quan trọng trong nhiều enzym và quá trình chuyển hóa liên quan đến phòng vệ [1], [20], [28].

Nghiên cứu trên các nhóm cây trồng chính như lúa, cây ăn quả và rau màu đã cung cấp nhiều bằng chứng cụ thể về vai trò của dinh dưỡng trong sức đề kháng. Tuy nhiên, tác động của các yếu tố dinh dưỡng có thể khác nhau tùy theo loại cây trồng, loại sâu bệnh và điều kiện môi trường, cho thấy sự phức tạp của mối quan hệ này [1], [18], [20], [23].

Ứng dụng thực tế của kiến thức về dinh dưỡng và sức đề kháng đòi hỏi một cách tiếp cận quản lý dinh dưỡng tích hợp, bao gồm: cân bằng dinh dưỡng, tối ưu hóa thời điểm và phương pháp bón phân, kết hợp phân hữu cơ và vô cơ, ứng dụng silic và quản lý vi lượng hợp lý [20], [27]. Việc kết hợp quản lý dinh dưỡng với các biện pháp quản lý tổng hợp sâu bệnh khác có thể mang lại hiệu quả cao trong việc giảm thiểu thiệt hại do sâu bệnh, đồng thời giảm sử dụng thuốc bảo vệ thực vật hóa học [20], [27].

Mặc dù đã có nhiều tiến bộ trong hiểu biết về vai trò của dinh dưỡng trong sức đề kháng, vẫn còn nhiều thách thức và khoảng trống kiến thức cần được giải quyết. Nghiên cứu tương lai cần tập trung vào việc làm rõ các cơ chế phân tử, nghiên cứu tương tác giữa các yếu tố dinh dưỡng, nghiên cứu trong điều kiện stress phức hợp, phát triển công nghệ quản lý dinh dưỡng chính xác và ứng dụng trong các hệ thống canh tác bền vững [2], [5], [11], [12], [23], [27].

Trong bối cảnh nông nghiệp bền vững và biến đổi khí hậu, việc tối ưu hóa quản lý dinh dưỡng để tăng cường sức đề kháng tự nhiên của cây trồng không chỉ là một chiến lược hiệu quả về mặt kinh tế mà còn là một giải pháp thân thiện với môi trường, góp phần vào an ninh lương thực và phát triển bền vững [20], [27].

8. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Szwarc, J., Bocianowski, J., Cyplik, A., & Szwarc, M. (2021). Connection between Nutrient Content and Resistance to Selected Pests Analyzed in Brassicaceae Hybrids. *Agriculture*, 11(2), 94. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE11020094>.
- [2] Vidhyasekaran, P. (2020). Manipulation of Calcium Ion Influx—Mediated Immune Signaling Systems for Crop Disease Management. https://doi.org/10.1007/978-94-024-1940-5_2.
- [3] Sun, W., Zhang, J., Fan, Q., Xue, G., Li, Z., & Liang, Y. (2010). Silicon-enhanced resistance to rice blast is attributed to silicon-mediated defence resistance and its role as physical barrier. *European Journal of Plant Pathology*, 128, 39-49. <https://doi.org/10.1007/S10658-010-9625-X>.
- [4] Reynolds, O. L., Padula, M. P., Zeng, R., & Gurr, G. M. (2016). Silicon: potential to promote direct and indirect effects on plant defense against arthropod pests in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 7, 744. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2016.00744>.
- [5] Thakur, M., Kumar, S., Kaur, N., Sharma, S., & Kaur, S. (2023). Insights into the molecular mechanisms of uptake, phytohormone interactions and stress alleviation by silicon: a beneficial but non-essential nutrient for plants. *Plant Growth Regulation*, 99, 413-434. <https://doi.org/10.1007/s10725-023-01002-3>.
- [6] Liang, Y., Sun, W., Zhu, Y. G., & Christie, P. (2015). Silicon and insect pest resistance. In *Silicon in Agriculture* (pp. 197-213). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9978-2_10.
- [7] Oyebamiji, N. A., Adejumo, S. A., & Atayese, M. O. (2025). Nutrient Management and Their Role in Plant Defense Against Plant-Parasitic Nematodes. <https://doi.org/10.1201/9781779643285-4>.
- [8] Silva, L. C. (2014). Effects of Iron on Cercospora Leaf Blight of Soybean.
- [9] Gómez-Trejo, O., Ferrera-Cerrato, R., Alarcón, A., & Sangabriel-Conde, W. N, P, K nutrition differentially affects the incidence and severity of the attack of pests and diseases in plants.
- [10] Camargo, M. S., Bezerra, B. K. L., Vitti, A. C., Silva, M. A., & Oliveira, A. L. (2013). Interação silício e insetos-praga: defesa mecânica ou química? *Brazilian Journal of Agriculture*, 86(1), 71-81. <https://doi.org/10.37856/BJA.V86I1.81>.
- [11] Yu, Y., Xu, W., Wang, J., Wang, L., Yao, W., Yang, Y., Xu, Y., & Ma, F. (2022). Silicon mediated plant immunity against nematodes: Summarizing the underline defence mechanisms in plant nematodes interaction. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(22), 14026. <https://doi.org/10.3390/ijms232214026>.
- [12] Hui, S., Zhang, M., Shi, Y., Xu, C., Zhu, J., Zhang, Y., & Wang, W. (2024). Optimizing nutrient transporters to enhance disease resistance in rice: a review. *Journal of Experimental Botany*, 75(12), 3535-3556. <https://doi.org/10.1093/jxb/erae087>.

- [13] Singh, P., Sinha, A. K., & Pandey, G. K. (2024). Editorial: Calcium signaling: an early plant defense response against pests and pathogens. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1400006. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1400006>.
- [14] Kim, Y., Gilroy, S., & Pandey, S. (2022). Con-Ca²⁺-tenating plant immune responses via calcium-permeable cation channels. *New Phytologist*, 234(3), 813-820. <https://doi.org/10.1111/nph.18044>.
- [15] Alhousari, F., & Greger, M. (2018). Silicon and mechanisms of plant resistance to insect pests. *Plants*, 7(2), 33. <https://doi.org/10.3390/PLANTS7020033>.
- [16] Shoaib, M., Banerjee, B. P., Hayden, M., & Kant, S. (2021). Mineral fertilizers improve defense related responses and reduce early blight disease in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal of Plant Pathology*, 103, 403-416. <https://doi.org/10.1007/S42161-020-00713-0>.
- [17] Adejumo, S. A. (2023). Sustainable Crop Nutrition for Ameliorating Biotic Stress in Grain Legumes and Ensuring Food Security. <https://doi.org/10.2174/9789815165319123020012>.
- [18] Graham, R. D. (1983). Effects of Nutrient Stress on Susceptibility of Plants to Disease with Particular Reference to the Trace Elements. *Advances in Botanical Research*, 10, 221-276. [https://doi.org/10.1016/S0065-2296\(08\)60261-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2296(08)60261-X).
- [19] Johnson, R., Moscou, M. J., Aranzana, M. J., Allard, V., Carver, T., & Cooke, D. (2017). Editorial: Crop Traits for Defense against Pests and Disease: Durability, Breakdown and Future Prospects. *Frontiers in Plant Science*, 8, 209. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2017.00209>.
- [20] Dordas, C. (2008). Role of nutrients in controlling plant diseases in sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 28(1), 33-46. <https://doi.org/10.1051/AGRO:2007051>.
- [21] Meena, P. D., Meena, R. L., Chattopadhyay, C., & Kumar, A. (2016). Role of plant nutrients in enhancing productivity and managing diseases of oilseed Brassica. *Journal of Oilseed Brassica*, 7(2), 107-131.
- [22] Nutrient Elements Promote Disease Resistance in Tomato by Differentially Activating Immune Pathways. (2022). *Phytopathology*, 112(10), 2089-2099. <https://doi.org/10.1094/phyto-02-22-0052-r>.
- [23] Dutta, S., Mitra, M., Agarwal, P., Mahapatra, K., De, S., Sett, U., & Roy, S. (2024). Balancing act: The dynamic relationship between nutrient availability and plant defence. *Plant Journal*, 119(6), 2627-2655. <https://doi.org/10.1111/tpj.17098>.
- [24] Van Bockhaven, J., De Vleeschauwer, D., & Höfte, M. (2013). Towards establishing broad-spectrum disease resistance in plants: silicon leads the way. *Journal of Experimental Botany*, 64(5), 1281-1293. <https://doi.org/10.1093/JXB/ERS329>.
- [25] Nwachukwu, I. D., Slusarenko, A. J., & Gruhlke, M. C. H. (2012). Sulfur and sulfur compounds in plant defence. *Natural Product Communications*, 7(3), 395-400. <https://doi.org/10.1177/1934578X1200700323>.

- [26] Kruse, C., Jost, R., Lipschis, M., Kopp, B., Hartmann, M., & Hell, R. (2007). Sulfur-Enhanced Defence: Effects of Sulfur Metabolism, Nitrogen Supply, and Pathogen Lifestyle. *Plant Biology*, 9(5), 608-619. <https://doi.org/10.1055/S-2007-965432>.
- [27] Spann, T. M., & Schumann, A. W. (2010). Mineral Nutrition Contributes to Plant Disease and Pest Resistance. University of Florida IFAS Extension, HS1181.
- [28] Graham, R. D., & Webb, M. J. (2018). Micronutrients and disease resistance and tolerance in plants. In *Micronutrients in Agriculture* (2nd ed., pp. 329-370). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/SSSABOOKSER4.2ED.C10>.
- [29] Reynolds, O. L., Keeping, M. G., & Meyer, J. H. (2009). Silicon-augmented resistance of plants to herbivorous insects: a review. *Annals of Applied Biology*, 155(2), 171-186. <https://doi.org/10.1111/J.1744-7348.2009.00348.X>.
- [30] Sharma, S. (2020). Impacts of nitrogen on plant disease severity and plant defense mechanism. *Fundamental and Applied Agriculture*, 5(1), 8-19. <https://doi.org/10.5455/FAA.103334>.