

VAI TRÒ CỦA DINH DƯỠNG CÂY TRỒNG TRONG CHẤT LƯỢNG CÂY TRỒNG NHIỆT ĐỚI: CƠ CHẾ, BẢN CHẤT VÀ ỨNG DỤNG THỰC TIỄN

Trần Minh Tiến¹, Nguyễn Đức Dũng²

1. GIỚI THIỆU

Chất lượng nông sản nhiệt đới là yếu tố quyết định giá trị thương mại, khả năng cạnh tranh trên thị trường quốc tế và đóng góp vào an ninh dinh dưỡng của hàng tỷ người dân. Các cây trồng nhiệt đới như lúa, cà phê, xoài, chuối và nhiều loại cây ăn quả khác không chỉ cung cấp năng lượng mà còn là nguồn vitamin, khoáng chất và các hợp chất sinh học quan trọng cho sức khỏe con người [5].

Trong bối cảnh biến đổi khí hậu và suy thoái đất ngày càng gia tăng ở các vùng nhiệt đới, việc tối ưu hóa dinh dưỡng cây trồng trở thành chiến lược then chốt để duy trì và nâng cao chất lượng nông sản. Nghiên cứu cho thấy rằng dinh dưỡng khoáng không chỉ ảnh hưởng đến năng suất mà còn tác động sâu sắc đến các thuộc tính chất lượng như màu sắc, hương vị, kết cấu, hàm lượng đường, vitamin, chất chống oxy hóa và khả năng bảo quản sau thu hoạch [1], [6].

Các nguyên tố dinh dưỡng được phân loại thành ba nhóm chính: nguyên tố đa lượng (macronutrients) bao gồm nitơ (N), photpho (P) và kali (K); nguyên tố trung lượng (secondary nutrients) gồm canxi (Ca), magiê (Mg) và lưu huỳnh (S); và nguyên tố vi lượng (micronutrients) như sắt (Fe), kẽm (Zn), bo (B), mangan (Mn) và đồng (Cu). Mỗi nguyên tố đóng vai trò sinh lý riêng biệt và tương tác phức tạp với nhau để quyết định chất lượng cuối cùng của sản phẩm nông nghiệp [5], [27].

Đất nhiệt đới thường có những đặc điểm riêng như độ pH thấp, hàm lượng chất hữu cơ thấp, khả năng trao đổi cation (CEC) hạn chế và tình trạng thiếu hụt hoặc mất cân bằng các nguyên tố dinh dưỡng. Nghiên cứu ở Ấn Độ cho thấy tình trạng thiếu hụt rộng rãi của lưu huỳnh, bo và kẽm trong đất nhiệt đới bán khô hạn, ảnh hưởng nghiêm trọng đến năng suất và chất lượng cây trồng [23]. Tương tự, ở châu Phi cận Sahara, việc bổ sung các nguyên tố trung lượng và vi lượng đã làm tăng đáng kể năng suất cây trồng [18].

Báo cáo này tổng hợp các bằng chứng khoa học từ 152 nghiên cứu được công bố gần đây về vai trò của các nguyên tố dinh dưỡng đối với chất lượng nông sản nhiệt đới. Mục tiêu là cung cấp cái nhìn toàn diện về cơ chế tác động, ví dụ cụ thể trên các cây trồng chính và các khuyến nghị thực tiễn để nâng cao chất lượng nông sản thông qua quản lý dinh dưỡng tối ưu.

2. LÝ THUYẾT CƠ CHẾ SINH LÝ

2.1. Vai trò của nguyên tố dinh dưỡng trong sinh trưởng và phát triển

Các nguyên tố dinh dưỡng khoáng đóng vai trò thiết yếu trong mọi quá trình sinh lý của cây trồng, từ quang hợp, hô hấp, tổng hợp protein đến vận chuyển chất hữu cơ. Mỗi nguyên tố có chức năng sinh hóa đặc trưng và không thể thay thế bởi nguyên tố khác [5], [27].

¹ Viện Khoa học Nông nghiệp Việt Nam

² Viện Thổ nhưỡng Nông hoá

Nguyên tố đa lượng là thành phần cấu trúc chính của các phân tử sinh học. Nitơ là thành phần của protein, axit nucleic, diệp lục và nhiều hợp chất hữu cơ khác. Photpho tham gia vào cấu trúc ATP, ADN, ARN và phospholipid màng tế bào. Kali đóng vai trò quan trọng trong điều hòa áp suất thẩm thấu, hoạt hóa enzym và vận chuyển chất hữu cơ từ lá đến các cơ quan tích lũy [21].

Nguyên tố trung lượng có vai trò cấu trúc và điều hòa. Canxi là thành phần của thành tế bào, tham gia vào tín hiệu tế bào và duy trì tính toàn vẹn của màng. Magiê là nguyên tử trung tâm của phân tử diệp lục và là đồng yếu tố của nhiều enzym. Lưu huỳnh là thành phần của axit amin cystein và methionin, cũng như các vitamin và coenzim [2].

Nguyên tố vi lượng chủ yếu hoạt động như đồng yếu tố enzym hoặc thành phần của các hợp chất chức năng. Sắt tham gia vào quá trình quang hợp và hô hấp. Kẽm là đồng yếu tố của hơn 300 enzym. Bo cần thiết cho sự phát triển của thành tế bào và quá trình thụ phấn. Mangan tham gia vào quang hợp và chuyển hóa nitơ [12], [13].

2.2. Cơ chế tác động đến chất lượng nông sản

Chất lượng nông sản là khái niệm đa chiều bao gồm các thuộc tính vật lý (kích thước, màu sắc, hình dạng, độ cứng), hóa học (hàm lượng đường, axit, vitamin, khoáng chất), cảm quan (hương vị, mùi thơm) và khả năng bảo quản. Các nguyên tố dinh dưỡng ảnh hưởng đến chất lượng thông qua nhiều cơ chế sinh lý và sinh hóa [1], [6].

Cơ chế tích lũy chất hữu cơ: Kali đóng vai trò then chốt trong việc vận chuyển đường từ lá đến quả, củ hoặc hạt, do đó ảnh hưởng trực tiếp đến hàm lượng đường và độ ngọt. Nghiên cứu trên chuối cho thấy kali tăng cường tích lũy đường và cải thiện hương vị [11], [24]. Nitơ ảnh hưởng đến tổng hợp protein và axit amin, quyết định giá trị dinh dưỡng của hạt lúa và chất lượng cà phê [15], [20].

Cơ chế cấu trúc tế bào: Canxi tăng cường liên kết giữa các tế bào thông qua pectat canxi trong thành tế bào, làm tăng độ cứng của quả và giảm tốc độ hô hấp sau thu hoạch. Điều này giải thích tại sao canxi kéo dài thời gian bảo quản của xoài, ổi và đu đủ [1], [10]. Bo cũng cần thiết cho sự hình thành thành tế bào và ảnh hưởng đến kết cấu quả [1].

Cơ chế tổng hợp chất thứ cấp: Các nguyên tố vi lượng như kẽm, sắt và bo ảnh hưởng đến tổng hợp vitamin C, carotenoit và các hợp chất phenolic. Nghiên cứu trên xoài và đu đủ cho thấy kẽm và sắt làm tăng hàm lượng axit ascorbic và carotenoit [1]. Magiê và nhôm ảnh hưởng đến tổng hợp polyphenol và cafein trong chè [20].

Cơ chế điều hòa enzym: Nhiều nguyên tố vi lượng hoạt động như đồng yếu tố của các enzym liên quan đến chất lượng. Ví dụ, kẽm là đồng yếu tố của enzym tổng hợp tryptophan, tiền chất của auxin, ảnh hưởng đến sự phát triển quả. Mangan tham gia vào các enzym chống oxy hóa, bảo vệ quả khỏi stress oxy hóa [19].

Cơ chế cân bằng ion: Tỷ lệ giữa các cation như K/Ca, K/Mg, Ca/Mg ảnh hưởng đến sự hấp thụ và phân bố các nguyên tố trong cây, từ đó tác động đến chất lượng. Nghiên cứu trên chuối cho thấy sự dư thừa tương đối của Ca và Mg có thể gây đối kháng với kali, ảnh hưởng tiêu cực đến năng suất và chất lượng [1], [8].

3. NGUYÊN TỐ DINH DƯỠNG ĐA LƯỢNG

3.1. Nitơ (N)

Nitơ là nguyên tố dinh dưỡng đa lượng quan trọng nhất, ảnh hưởng mạnh mẽ đến sinh trưởng, năng suất và chất lượng cây trồng. Tuy nhiên, vai trò của nitơ đối với chất lượng nông sản là phức tạp và đôi khi mâu thuẫn.

Tác động tích cực: Nitơ cần thiết cho sự tổng hợp protein, axit amin và các hợp chất chứa nitơ khác, quyết định giá trị dinh dưỡng của nông sản. Ở đủ đủ, nitơ làm tăng năng suất, khối lượng quả, đường kính quả, hàm lượng chất khô hòa tan (SST) và vitamin C [1]. Ở lúa, nitơ ảnh hưởng đến hàm lượng protein trong hạt, một chỉ tiêu chất lượng quan trọng [16], [17].

Tác động tiêu cực: Việc bón nitơ quá mức có thể gây ra nhiều vấn đề chất lượng. Ở xoài, nitơ cao làm tăng vấn đề quả xanh khi chín (green fruit at maturity) và tăng tỷ lệ mắc bệnh thán thư (anthracnose) [1]. Nitơ dư thừa kéo dài giai đoạn sinh trưởng sinh dưỡng, làm chậm quá trình chín và ảnh hưởng đến màu sắc quả. Ở cà phê, hàm lượng nitơ cao trong đất có thể làm giảm chất lượng cà phê [20].

Quản lý nitơ tối ưu: Nghiên cứu trên lúa lai ở môi trường nhiệt đới và cận nhiệt đới cho thấy các phương pháp quản lý nitơ khác nhau ảnh hưởng đến năng suất và hiệu quả sử dụng nitơ [13]. Việc áp dụng nồng độ nitơ tới hạn (critical nitrogen concentration) giúp tối ưu hóa năng suất cao mà không gây lãng phí [16]. Ở chuối, việc kết hợp nitơ với kali theo tỷ lệ thích hợp cải thiện cả năng suất và chất lượng quả [11], [12].

3.2. Phốt pho (P)

Phốt pho đóng vai trò quan trọng trong chuyển hóa năng lượng, tổng hợp axit nucleic và phát triển rễ. Tuy nhiên, tác động của phốt pho đến chất lượng nông sản ít rõ ràng hơn so với nitơ và kali.

Vai trò trong phát triển cây trồng: Phốt pho cần thiết cho sự phát triển rễ, giúp cây hấp thụ nước và các nguyên tố dinh dưỡng khác hiệu quả hơn. Nghiên cứu trên các loại cây họ đậu nhiệt đới cho thấy phốt pho ảnh hưởng đáng kể đến sự phát triển rễ, hấp thụ dinh dưỡng và hiệu quả sử dụng dinh dưỡng [22], [25].

Tác động đến chất lượng: Nghiên cứu trên ổi và chuối cho thấy phốt pho không có tác động rõ rệt đến chất lượng quả [1]. Tuy nhiên, ở lúa, phốt pho ảnh hưởng đến quá trình chín hạt và chất lượng hạt. Nghiên cứu trên lúa cạn ở đất ultisol nhiệt đới cho thấy việc bón phốt pho cùng với canxi và magiê cải thiện năng suất [23].

Thách thức trong đất nhiệt đới: Đất nhiệt đới thường có vấn đề cố định phốt pho do hàm lượng sắt và nhôm cao, làm giảm hiệu quả sử dụng phân phốt pho (phân lân). Nghiên cứu ở Brazil đánh giá hiệu quả nông học của các nguồn phốt pho thay thế trong đất nhiệt đới [26]. Việc lựa chọn nguồn phốt pho phù hợp và phương pháp bón phân đúng cách là quan trọng để tối ưu hóa hiệu quả sử dụng phốt pho.

3.3. Kali (K)

Kali là nguyên tố dinh dưỡng có tác động mạnh mẽ và nhất quán nhất đến chất lượng nông sản nhiệt đới, đặc biệt là các loại cây ăn quả.

Vai trò trong tích lũy đường và cải thiện hương vị: Kali đóng vai trò then chốt trong việc vận chuyển đường từ lá đến các cơ quan tích lũy. Nghiên cứu trên ổi, chuối và đu đủ cho thấy kali làm tăng khối lượng trung bình và kích thước quả, cải thiện hàm lượng chất khô hòa tan (SST) [1]. Ở xoài, kali cải thiện SST và hàm lượng axit ascorbic [1]. Ở chuối, kali làm tăng năng suất và chất lượng quả [11], [24], [28].

Tác động đến màu sắc và độ cứng: Kali ảnh hưởng đến quá trình chín và màu sắc quả. Ở đu đủ, kali làm tăng SST, độ dày cùi và hàm lượng carotenoid [1]. Nghiên cứu trên chuối cho thấy kali cải thiện độ đồng đều chín và khả năng chống hư hại [1], [24].

Vai trò trong khả năng bảo quản: Kali tăng cường khả năng chống chịu stress và bệnh hại, kéo dài thời gian bảo quản sau thu hoạch. Nghiên cứu cho thấy kali quan trọng cho khả năng bảo quản của chuối [24].

Tương tác với các nguyên tố khác: Kali tương tác phức tạp với canxi và magiê. Nghiên cứu trên chuối cho thấy tỷ lệ K/Ca và K/Mg ảnh hưởng đến sự hấp thụ dinh dưỡng và năng suất [1], [8]. Việc cân bằng giữa kali với canxi và magiê là quan trọng để đạt chất lượng tối ưu [10], [24].

Ứng dụng thực tế: Nghiên cứu trên chuối và nho nhấn mạnh tầm quan trọng của dinh dưỡng kali đối với năng suất và chất lượng quả [28]. Việc bón kali đúng liều lượng và thời điểm, đặc biệt trong giai đoạn phát triển quả, là chiến lược quan trọng để nâng cao chất lượng cây ăn quả nhiệt đới.

4. NGUYÊN TỐ DINH DƯỠNG TRUNG LƯỢNG

4.1. Canxi (Ca)

Canxi đóng vai trò quan trọng trong việc duy trì cấu trúc tế bào, tăng cường độ cứng quả và kéo dài thời gian bảo quản sau thu hoạch.

Vai trò cấu trúc: Canxi là thành phần của thành tế bào, tạo liên kết giữa các phân tử pectin thông qua cầu nối canxi, tăng cường độ bền của thành tế bào. Nghiên cứu trên ổi cho thấy canxi quan trọng cho cấu trúc tế bào, độ chắc của quả, giảm mất khối lượng tươi và tăng độ cứng [1].

Giảm rối loạn sinh lý: Canxi giúp giảm các rối loạn sinh lý liên quan đến thiếu canxi. Ở xoài, canxi giảm tỷ lệ colapso interno (internal breakdown) [1]. Ở đu đủ, canxi kéo dài thời gian bảo quản [1].

Tác động đến chất lượng chuối: Nghiên cứu trên chuối Grand Naine cho thấy canxi và magiê ảnh hưởng đến năng suất và chất lượng [10]. Tuy nhiên, hàm lượng canxi quá cao có thể gây đối kháng với kali và các vi lượng. Nghiên cứu trên chuối ở hệ thống quản lý chuyên đổi cho thấy dư thừa tương đối của canxi và magiê tương quan tiêu cực với năng suất, gợi ý sự đối kháng [1].

Ứng dụng trong lúa: Nghiên cứu trên lúa cạn ở đất ultisol nhiệt đới cho thấy việc bón photpho, canxi và magiê cải thiện năng suất [23]. Canxi cũng giúp cải thiện cấu trúc đất và giảm độc tính của nhôm trong đất chua.

Vai trò trong chất lượng cà phê: Nghiên cứu trên cà phê Arabica cho thấy hàm lượng canxi thấp trong đất ảnh hưởng tiêu cực đến chất lượng cà phê [20]. Canxi cần thiết cho sự phát triển bình thường của cây và chất lượng hạt cà phê.

4.2. Magiê (Mg)

Magiê là nguyên tử trung tâm của phân tử diệp lục và là đồng yếu tố của nhiều enzym quan trọng trong quang hợp và chuyển hóa cacbohidrat.

Vai trò trong quang hợp: Magiê cần thiết cho quá trình quang hợp, ảnh hưởng đến tích lũy chất khô và năng suất. Nghiên cứu trên lúa cạn ở vùng nhiệt đới ẩm cho thấy magiê và silic làm tăng năng suất hạt trung bình 34% cho 3 giống lúa [2].

Tác động đến chất lượng cà phê: Magiê có vai trò đặc biệt quan trọng trong chất lượng cà phê. Nghiên cứu trên cà phê Arabica cho thấy magiê cải thiện chất lượng cà phê, đặc tính hương thơm và mùi vị [20]. Magiê làm tăng hàm lượng axit amin trong chè [20].

Tương tác với kali và canxi: Magiê tương tác phức tạp với kali và canxi. Nghiên cứu trên chuối cho thấy việc bón kali, canxi và magiê ảnh hưởng đến năng suất, chất lượng và khả năng bảo quản [24]. Tỷ lệ Ca/Mg và K/Mg cần được cân bằng để tối ưu hóa sự hấp thụ dinh dưỡng [1], [10].

Ứng dụng trên chuối: Nghiên cứu trên chuối Grand Naine cho thấy các mức độ canxi và magiê khác nhau ảnh hưởng đến năng suất và chất lượng [10]. Magiê cần thiết cho sự phát triển bình thường của cây chuối và chất lượng quả.

4.3. Lưu huỳnh (S)

Lưu huỳnh là thành phần của axit amin cystein và methionin, cũng như các vitamin và coenzim. Thiếu lưu huỳnh là vấn đề phổ biến trong đất nhiệt đới.

Tình trạng thiếu hụt rộng rãi: Nghiên cứu ở Ấn Độ cho thấy tình trạng thiếu hụt rộng rãi của lưu huỳnh, bo và kẽm trong đất nhiệt đới bán khô hạn [23]. Việc bổ sung các nguyên tố này cải thiện đáng kể năng suất cây trồng.

Tác động đến chất lượng hạt: Nghiên cứu trên ngô và lúa miến ở vùng nhiệt đới bán khô hạn của Ấn Độ cho thấy việc bón lưu huỳnh, bo và kẽm cùng với nitơ và photpho làm tăng đáng kể nồng độ N, S và Zn trong hạt và rơm [2]. Điều này cải thiện giá trị dinh dưỡng của sản phẩm.

Vai trò trong chuối: Nghiên cứu trên chuối cho thấy lưu huỳnh là một trong các yếu tố chính liên quan tích cực đến năng suất [1]. Lưu huỳnh cần thiết cho sự tổng hợp protein và các hợp chất chứa lưu huỳnh khác.

Khuyến nghị bón phân: Ở các vùng đất thiếu lưu huỳnh, việc bổ sung lưu huỳnh thông qua phân bón là cần thiết để cải thiện năng suất và chất lượng cây trồng [2], [23]. Lưu huỳnh có thể được bổ sung qua các nguồn như amôn sunfat, kali sunfat hoặc gypsum.

5. NGUYÊN TỐ DINH DƯỠNG VI LƯỢNG

5.1. Kẽm (Zn)

Kẽm là vi lượng thiết yếu, đóng vai trò là đồng yếu tố của hơn 300 enzym và tham gia vào nhiều quá trình sinh lý quan trọng.

Tình trạng thiếu hụt phổ biến: Thiếu kẽm là vấn đề dinh dưỡng phổ biến trong đất nhiệt đới, đặc biệt ở đất có pH cao và hàm lượng chất hữu cơ thấp. Nghiên cứu ở Ấn Độ và châu Phi cận Sahara cho thấy tình trạng thiếu kẽm rộng rãi [18], [23].

Tác động đến chất lượng quả: Nghiên cứu trên xoài cho thấy kẽm làm tăng hàm lượng chất khô hòa tan (SST) và axit ascorbic [1]. Ở đủ, kẽm làm tăng SST, axit ascorbic và carotenoid [1]. Kẽm cải thiện hàm lượng vitamin và chất chống oxy hóa trong quả.

Vai trò trong lúa: Nghiên cứu về phản ứng năng suất và kinh tế của lúa đối với việc bón vi lượng ở Tanzania cho thấy kẽm là một trong các vi lượng quan trọng [3]. Kẽm ảnh hưởng đến năng suất và chất lượng dinh dưỡng của hạt lúa. Nghiên cứu dài hạn trên hệ thống lúa-lúa nhiệt đới cho thấy việc bón phân hóa học và phân hữu cơ duy trì cân bằng vi lượng (Fe, Mn, Zn, Cu) trong đất [19].

Ứng dụng trên xoài: Nghiên cứu trên xoài cho thấy vi lượng bao gồm kẽm ảnh hưởng đến chất lượng quả và thời gian bảo quản [26], [30]. Việc bón kẽm qua đất hoặc phun lá cải thiện đáng kể chất lượng quả xoài.

Sinh học hóa: Kẽm được bổ sung vào sản thông qua các phương pháp nông học và sinh học hóa để cải thiện giá trị dinh dưỡng [8]. Điều này đặc biệt quan trọng trong việc giải quyết vấn đề thiếu kẽm ở người tiêu dùng.

5.2. Bo (B)

Bo là vi lượng cần thiết cho sự phát triển thành tế bào, quá trình thụ phấn và vận chuyển đường.

Tình trạng thiếu hụt: Thiếu bo là vấn đề phổ biến trong đất nhiệt đới, đặc biệt ở đất cát và đất có pH cao. Nghiên cứu ở Ấn Độ cho thấy tình trạng thiếu bo rộng rãi [23].

Tác động đến chất lượng xoài: Bo có tác động mạnh mẽ đến chất lượng xoài. Nghiên cứu cho thấy bo cải thiện năng suất, khối lượng quả, đường kính quả, hàm lượng chất khô hòa tan (SST) và axit ascorbic [1]. Bo cần thiết cho sự phát triển bình thường của quả và giảm các rối loạn sinh lý.

Vai trò trong đu đủ: Ở đủ, bo làm tăng đường kính, chiều dài và SST [1]. Bo cải thiện kích thước và chất lượng quả.

Tác động đến hạt ngô và lúa miến: Nghiên cứu trên ngô và lúa miến cho thấy việc bón bo cùng với lưu huỳnh và kẽm cải thiện chất lượng hạt và rơm [2]. Bo ảnh hưởng đến thành phần dinh dưỡng của sản phẩm.

Vai trò trong chuối: Bo là một trong các yếu tố chính liên quan tích cực đến năng suất chuối [1]. Bo cần thiết cho sự phát triển bình thường của cây chuối và chất lượng quả.

5.3. Sắt (Fe)

Sắt là thành phần của nhiều enzym và protein tham gia vào quá trình quang hợp, hô hấp và chuyển hóa nitơ.

Vai trò trong quang hợp: Sắt cần thiết cho sự tổng hợp diệp lục và hoạt động của các enzym quang hợp. Thiếu sắt gây hiện tượng vàng lá, giảm quang hợp và ảnh hưởng đến năng suất và chất lượng.

Tác động đến chất lượng xoài: Nghiên cứu trên xoài cho thấy sắt làm tăng hàm lượng chất khô hòa tan (SST) và axit ascorbic [1]. Sắt cải thiện hàm lượng vitamin C trong quả.

Vai trò trong chất lượng cà phê: Nghiên cứu trên cà phê Arabica cho thấy sắt có ảnh hưởng tích cực đến chất lượng tổng thể và độ axit của cà phê [20]. Sắt cần thiết cho sự phát triển bình thường của cây cà phê và chất lượng hạt.

Cân bằng vi lượng trong lúa: Nghiên cứu dài hạn trên hệ thống lúa-lúa nhiệt đới cho thấy việc bón phân hóa học cùng với phân hữu cơ duy trì cân bằng vi lượng (Fe, Mn, Zn, Cu) trong đất và sự hấp thụ của cây lúa [19]. Điều này quan trọng cho năng suất và chất lượng bền vững.

5.4. Các vi lượng khác

Mangan (Mn): Mangan tham gia vào quá trình quang hợp, chuyển hóa nitơ và tổng hợp lignin. Nghiên cứu trên chè cho thấy mangan quá mức có thể gây giảm axit amin và carotenoid [20]. Cân bằng mangan là quan trọng để đạt chất lượng tối ưu.

Đồng (Cu): Đồng là thành phần của nhiều enzym oxy hóa-khử. Nghiên cứu trên cà phê cho thấy mức độ tăng của đồng có thể làm giảm chất lượng cà phê [20]. Việc quản lý đồng cần cẩn thận để tránh độc tính.

Molypden (Mo): Molypden cần thiết cho quá trình cố định nitơ và chuyển hóa nitơ. Mặc dù không được đề cập nhiều trong các nghiên cứu về chất lượng nông sản nhiệt đới, molypden quan trọng cho các cây họ đậu.

Clo (Cl): Clo tham gia vào quá trình quang hợp và điều hòa áp suất thẩm thấu. Clo thường không thiếu trong đất nhiệt đới nhưng có thể ảnh hưởng đến chất lượng một số cây trồng nhạy cảm.

6. ỨNG DỤNG TRÊN MỘT SỐ CÂY TRỒNG NHIỆT ĐỚI

6.1. Lúa (*Oryza sativa*)

Lúa là cây lương thực quan trọng nhất ở vùng nhiệt đới, cung cấp năng lượng cho hàng tỷ người. Chất lượng lúa được đánh giá qua nhiều chỉ tiêu như năng suất, hàm lượng protein, hàm lượng amyloza, độ trắng và giá trị dinh dưỡng.

Quản lý nitơ: Nitơ là yếu tố quan trọng nhất ảnh hưởng đến năng suất và chất lượng lúa. Nghiên cứu trên lúa lai ở môi trường nhiệt đới và cận nhiệt đới cho thấy các phương pháp quản lý nitơ khác nhau ảnh hưởng đến năng suất và hiệu quả sử dụng nitơ [13]. Việc áp dụng nồng độ nitơ tối hạn giúp tối ưu hóa năng suất cao [16]. Nghiên cứu về ảnh hưởng của loại cây và mức nitơ đến đặc điểm sinh trưởng và năng suất lúa Indica ở vùng nhiệt đới cho thấy tầm quan trọng của quản lý nitơ [17].

Vai trò của photpho: Photpho cần thiết cho sự phát triển rễ và quá trình chín hạt. Nghiên cứu về dinh dưỡng photpho của lúa nước ở đất nhiệt đới cho thấy tầm quan trọng của photpho [22]. Nghiên cứu trên lúa cạn ở đất ultisol nhiệt đới cho thấy việc bón photpho, canxi và magiê cải thiện năng suất [23].

Tối ưu hóa NPK: Nghiên cứu về tối đa hóa năng suất lúa bằng phân NPK cho thấy tầm quan trọng của việc cân bằng ba nguyên tố đa lượng chính [27]. Tổng quan về ứng dụng các loại phân hóa học khác nhau đối với hiệu suất nông học và các thông số chất lượng của lúa cung cấp cái nhìn toàn diện [25].

Vi lượng: Nghiên cứu về phản ứng năng suất và kinh tế của lúa đối với việc bón vi lượng ở Tanzania cho thấy tầm quan trọng của kẽm, bo, magiê và lưu huỳnh [3]. Việc bổ sung vi lượng không chỉ tăng năng suất mà còn cải thiện giá trị dinh dưỡng của hạt lúa, góp phần vào sinh học hóa.

Magiê và silic: Nghiên cứu trên lúa cạn ở vùng nhiệt đới ẩm cho thấy magiê và silic làm tăng năng suất hạt trung bình 34% cho 3 giống lúa [2]. Magiê và silic bảo vệ cây lúa khỏi hội chứng đổi màu hạt và cải thiện chất lượng.

Quản lý dài hạn: Nghiên cứu về tác động dài hạn của phân bón hóa học và phân hữu cơ đối với chất lượng đất và năng suất trong hệ thống lúa-lúa nhiệt đới cận ẩm cho thấy tầm quan trọng của việc kết hợp phân hóa học và phân hữu cơ [21]. Nghiên cứu về cân bằng vi lượng (Fe, Mn, Zn, Cu) dưới ứng dụng dài hạn phân bón hóa học và phân hữu cơ trong hệ thống lúa-lúa nhiệt đới cho thấy việc bón phân hóa học cùng với phân hữu cơ duy trì khả năng cung cấp vi chất dinh dưỡng [19].

6.2. Cà phê (*Coffea spp.*)

Cà phê là cây công nghiệp quan trọng ở vùng nhiệt đới, với chất lượng được đánh giá qua nhiều thuộc tính như hương thơm, vị, độ chua, thể chất và tổng điểm.

Vai trò của magiê: Magiê có vai trò đặc biệt quan trọng trong chất lượng cà phê. Nghiên cứu trên cà phê Arabica cho thấy magiê cải thiện chất lượng cà phê, đặc tính hương thơm và mùi vị [20]. Magiê cần thiết cho quá trình quang hợp và tổng hợp các hợp chất thơm.

Tác động của sắt: Nghiên cứu cho thấy sắt có ảnh hưởng tích cực đến chất lượng tổng thể và độ axit của cà phê [20]. Sắt cần thiết cho sự phát triển bình thường của cây cà phê.

Vai trò của CEC và pH: Dung lượng trao đổi cation (CEC) và pH đất có ảnh hưởng tích cực đến chất lượng cà phê [20]. Việc cải thiện CEC và pH đất là chiến lược quan trọng để nâng cao chất lượng cà phê.

Tác động tiêu cực của một số nguyên tố: Nghiên cứu cho thấy mức độ tăng của đồng, kẽm và tổng nitơ có thể làm giảm chất lượng cà phê [20]. Việc quản lý cân bằng các nguyên tố này là quan trọng.

Vai trò của kali: Kali tăng cường độ đậm của cà phê và trọng lượng hạt [20]. Kali cần thiết cho sự vận chuyển chất hữu cơ và phát triển hạt.

Vai trò của canxi: Hàm lượng canxi thấp trong đất ảnh hưởng tiêu cực đến chất lượng cà phê [20]. Canxi cần thiết cho sự phát triển bình thường của cây.

Quản lý dinh dưỡng tổng hợp: Nghiên cứu về sản xuất và chất lượng vật lý của cà phê đáp ứng với phân bón tổng hợp có công nghệ khác nhau cho thấy tầm quan trọng của việc lựa chọn loại phân bón phù hợp [5]. Nghiên cứu về bón NPK và vi lượng qua lá (chương trình Nutriceler) so với bón phân thông thường trên cây cà phê đang sản xuất cung cấp thông tin về các phương pháp bón phân hiệu quả [19].

Ảnh hưởng của dinh dưỡng đến chất lượng hạt: Nghiên cứu về ảnh hưởng của bón N, P và K đến hàm lượng đa và vi lượng trong quả và chất lượng cà phê cho thấy mối liên hệ phức tạp giữa dinh dưỡng và chất lượng [15].

6.3. Xoài (*Mangifera indica*)

Xoài là loại cây ăn quả nhiệt đới quan trọng, với chất lượng được đánh giá qua màu sắc, hương vị, kích thước, hàm lượng đường, vitamin và khả năng bảo quản.

Vai trò của kali: Kali có tác động mạnh mẽ đến chất lượng xoài. Nghiên cứu cho thấy kali cải thiện hàm lượng chất khô hòa tan (SST) và axit ascorbic [1]. Kali cần thiết cho sự vận chuyển đường và phát triển quả.

Tác động của bo: Bo có vai trò quan trọng trong chất lượng xoài. Nghiên cứu cho thấy bo cải thiện năng suất, khối lượng quả, đường kính quả, SST và axit ascorbic [1]. Bo cần thiết cho sự phát triển bình thường của quả.

Vai trò của kẽm và sắt: Kẽm và sắt làm tăng SST và axit ascorbic ở xoài [1]. Các vi lượng này cải thiện hàm lượng vitamin và chất chống oxy hóa.

Tác động của canxi: Canxi giảm tỷ lệ colapso interno (internal breakdown) ở xoài [1]. Canxi tăng cường độ cứng và khả năng bảo quản.

Vấn đề với nitơ: Nitơ cao làm tăng vấn đề quả xanh khi chín và tăng tỷ lệ mắc bệnh thán thư ở xoài [1]. Việc quản lý nitơ cần cẩn thận để tránh các vấn đề chất lượng.

Ứng dụng vi lượng: Nghiên cứu về ảnh hưởng của NPK và vi lượng đến năng suất và chất lượng xoài cho thấy tầm quan trọng của việc bổ sung vi lượng [14]. Nghiên cứu về ảnh hưởng của vi lượng và dịch rong biển đến tỷ lệ đậu quả, năng suất và chất lượng xoài Dashehari cung cấp thông tin về các phương pháp bón phân hiệu quả [26].

Bón qua đất và phun lá: Nghiên cứu về phản ứng của xoài đối với vi lượng qua bón đất và phun lá về chất lượng quả và thời gian bảo quản cho thấy cả hai phương pháp đều hiệu quả [30]. Việc lựa chọn phương pháp phù hợp phụ thuộc vào điều kiện cụ thể.

Quản lý dinh dưỡng tổng hợp: Nghiên cứu về dinh dưỡng và bón phân cho xoài trong hệ thống sản xuất tích hợp cung cấp hướng dẫn toàn diện về quản lý dinh dưỡng [29].

6.4. Chuối (*Musa spp.*)

Chuối là cây ăn quả nhiệt đới quan trọng, với chất lượng được đánh giá qua kích thước, màu sắc, độ ngọt, kết cấu và khả năng bảo quản.

Vai trò của kali: Kali là nguyên tố quan trọng nhất đối với chất lượng chuối. Nghiên cứu cho thấy kali làm tăng khối lượng trung bình và kích thước quả, cải thiện độ đồng đều chín và khả năng chống hư hại [1], [24], [28]. Kali cần thiết cho sự vận chuyển đường và phát triển quả.

Quản lý nitơ và kali: Nghiên cứu về nitơ và kali trong năng suất và chất lượng chuối Thap Maeo cho thấy tầm quan trọng của việc cân bằng hai nguyên tố này [11]. Nghiên cứu về ảnh hưởng của bón nitơ và kali đến cây chuối trồng ở Amazon nhiệt đới ẩm cung cấp thông tin về quản lý dinh dưỡng trong điều kiện nhiệt đới [12].

Vai trò của canxi và magiê: Canxi và magiê ảnh hưởng đến năng suất và chất lượng chuối. Nghiên cứu trên chuối Grand Naine cho thấy các mức độ canxi và magiê khác nhau ảnh hưởng đến sản xuất và chất lượng [10]. Nghiên cứu về ảnh hưởng của kali, canxi và magiê đến năng suất, chất lượng và khả năng bảo quản chuối cho thấy tầm quan trọng của việc cân bằng ba nguyên tố này [24].

Tương tác ion: Nghiên cứu về các yếu tố quyết định độ phì nhiêu của đất và mối quan hệ với tình trạng dinh dưỡng và sản xuất chuối cho thấy tỷ lệ Ca/Mg và K/B ảnh hưởng lớn đến hấp thụ dinh dưỡng và năng suất [1]. Dư thừa tương đối của Ca và Mg tương quan tiêu cực với năng suất, gợi ý sự đối kháng.

Vai trò của lưu huỳnh và bo: Lưu huỳnh và bo là các yếu tố chính liên quan tích cực đến năng suất chuối [1]. Việc bổ sung các nguyên tố này cải thiện năng suất và chất lượng.

Ảnh hưởng của phốt pho: Nghiên cứu cho thấy phốt pho không có tác động rõ rệt đến chất lượng quả chuối [1]. Tuy nhiên, phốt pho vẫn cần thiết cho sự phát triển rễ và tăng trưởng tổng thể.

Quản lý tưới và bón phân: Nghiên cứu về tưới và fertigation (bón phân qua nước tưới) trong canh tác chuối cung cấp thông tin về các phương pháp quản lý nước và dinh dưỡng hiệu quả [7].

Ảnh hưởng của bón kali, canxi và magiê: Nghiên cứu về ảnh hưởng của bón kali, canxi và magiê đến hàm lượng dinh dưỡng trong quả chuối (Musa AAA subgroup Cavendish, clone Gran Enano) cho thấy mối liên hệ giữa bón phân và thành phần dinh dưỡng của quả [8].

7. TƯƠNG TÁC GIỮA CÁC YẾU TỐ DINH DƯỠNG

Các nguyên tố dinh dưỡng không hoạt động độc lập mà tương tác phức tạp với nhau, ảnh hưởng đến sự hấp thụ, vận chuyển và hiệu quả sử dụng. Hiểu rõ các tương tác này là quan trọng để tối ưu hóa quản lý dinh dưỡng.

Tương tác giữa kali, canxi và magiê: Đây là nhóm tương tác quan trọng nhất ảnh hưởng đến chất lượng nông sản nhiệt đới. Kali, canxi và magiê cạnh tranh với nhau trong quá trình hấp thụ qua rễ. Nghiên cứu trên chuối cho thấy tỷ lệ K/Ca, K/Mg và Ca/Mg ảnh hưởng lớn đến sự hấp thụ dinh dưỡng và năng suất [1], [8], [10]. Dư thừa tương đối của canxi và magiê có thể gây đối kháng với kali, làm giảm sự hấp thụ kali và ảnh hưởng tiêu cực đến năng suất và chất lượng [1].

Tương tác giữa nitơ và kali: Nitơ và kali có tương tác hiệp đồng trong nhiều quá trình sinh lý. Kali cần thiết cho sự vận chuyển và sử dụng hiệu quả nitơ. Nghiên cứu trên chuỗi cho thấy việc cân bằng nitơ và kali cải thiện cả năng suất và chất lượng [11], [12]. Tuy nhiên, nitơ quá cao có thể làm giảm hiệu quả sử dụng kali.

Tương tác giữa photpho và kẽm: Photpho cao có thể gây đối kháng với kẽm, làm giảm sự hấp thụ kẽm và gây thiếu kẽm. Điều này đặc biệt quan trọng trong đất nhiệt đới có hàm lượng kẽm thấp. Việc cân bằng photpho và kẽm là cần thiết để tránh thiếu kẽm.

Tương tác giữa các vi lượng: Các vi lượng như sắt, mangan, kẽm và đồng cạnh tranh với nhau trong quá trình hấp thụ. Nghiên cứu về cân bằng vi lượng (Fe, Mn, Zn, Cu) trong hệ thống lúa-lúa nhiệt đới cho thấy tầm quan trọng của việc duy trì cân bằng giữa các vi lượng [19]. Việc bón một vi lượng quá mức có thể gây thiếu hụt các vi lượng khác.

Tương tác giữa pH đất và sẵn có dinh dưỡng: pH đất ảnh hưởng mạnh mẽ đến sẵn có của các nguyên tố dinh dưỡng. Trong đất chua (pH thấp), nhôm và mangan có thể đạt mức độc hại, trong khi photpho, canxi và magiê kém sẵn có. Trong đất kiềm (pH cao), sắt, kẽm, mangan và bo kém sẵn có. Nghiên cứu trên cà phê cho thấy pH đất ảnh hưởng đến chất lượng cà phê [20].

Vai trò của dung lượng trao đổi cation (CEC): CEC ảnh hưởng đến khả năng giữ và cung cấp các cation như kali, canxi, magiê. Nghiên cứu trên cà phê cho thấy CEC có ảnh hưởng tích cực đến chất lượng [20]. Việc cải thiện CEC thông qua bổ sung chất hữu cơ là chiến lược quan trọng trong quản lý dinh dưỡng.

Tương tác giữa chất hữu cơ và dinh dưỡng khoáng: Chất hữu cơ đất cải thiện CEC, cấu trúc đất và sẵn có của các nguyên tố dinh dưỡng. Nghiên cứu về tác động dài hạn của phân bón và phân hữu cơ cho thấy việc kết hợp phân hóa học và phân hữu cơ duy trì chất lượng đất và cân bằng dinh dưỡng [19], [21].

8. ỨNG DỤNG THỰC TIỄN VÀ KHUYẾN NGHỊ

8.1. Chiến lược quản lý dinh dưỡng tích hợp

Quản lý dinh dưỡng tích hợp (Integrated Nutrient Management - INM) là phương pháp kết hợp các nguồn dinh dưỡng khác nhau để tối ưu hóa năng suất, chất lượng và tính bền vững.

Kết hợp phân hóa học và phân hữu cơ: Nghiên cứu dài hạn trên hệ thống lúa-lúa nhiệt đới cho thấy việc kết hợp phân hóa học và phân hữu cơ (FYM) duy trì chất lượng đất, cân bằng vi lượng và năng suất bền vững [19], [21]. Phân hữu cơ cải thiện cấu trúc đất, tăng CEC và cung cấp vi lượng, trong khi phân hóa học cung cấp nguyên tố đa lượng nhanh chóng.

Bón phân dựa trên phân tích đất và lá: Việc phân tích đất và lá giúp xác định tình trạng dinh dưỡng và nhu cầu bón phân cụ thể. Nghiên cứu trên chuỗi cho thấy tầm quan trọng của việc theo dõi tình trạng dinh dưỡng lá để điều chỉnh chương trình bón phân [1]. Phân tích đất giúp xác định pH, CEC và hàm lượng các nguyên tố sẵn có.

Quản lý cân bằng dinh dưỡng: Việc cân bằng giữa các nguyên tố dinh dưỡng là quan trọng hơn việc bón một nguyên tố riêng lẻ. Nghiên cứu cho thấy tỷ lệ K/Ca, K/Mg, Ca/Mg ảnh hưởng đến sự hấp thụ dinh dưỡng và chất lượng [1], [8], [10]. Việc tối ưu hóa các tỷ lệ này dựa trên phân tích đất và lá là chiến lược quan trọng.

Bổ sung nguyên tố trung lượng và vi lượng: Nghiên cứu ở châu Phi cận Sahara cho thấy việc bổ sung các nguyên tố trung lượng và vi lượng làm tăng đáng kể năng suất cây trồng [18]. Ở Ấn Độ, việc bổ sung lưu huỳnh, bo và kẽm cải thiện năng suất và chất lượng [2], [23]. Việc xác định và khắc phục tình trạng thiếu hụt các nguyên tố này là ưu tiên hàng đầu.

Quản lý pH đất: Vôi hóa đất chua để nâng pH lên mức tối ưu (5,5-6,5 cho hầu hết cây trồng nhiệt đới) cải thiện sẵn có của photpho, canxi, magiê và giảm độc tính của nhôm. Nghiên cứu cho thấy pH đất ảnh hưởng đến chất lượng cà phê [20].

8.2. Phương pháp bón phân hiệu quả

Bón phân qua đất: Đây là phương pháp truyền thống và phổ biến nhất. Phân có thể được bón rải, bón lỗ hoặc bón theo rãnh. Việc bón phân sâu vào đất giúp giảm thất thoát và tăng hiệu quả sử dụng. Nghiên cứu trên xoài cho thấy bón vi lượng qua đất hiệu quả [30].

Phun phân bón lá: Phương pháp này hiệu quả cho việc bổ sung vi lượng và khắc phục nhanh tình trạng thiếu hụt. Phun phân bón lá giúp cây hấp thụ nhanh các nguyên tố dinh dưỡng, đặc biệt trong điều kiện đất có vấn đề về pH hoặc cố định dinh dưỡng. Nghiên cứu trên xoài cho thấy phun lá vi lượng cải thiện chất lượng quả [26], [30]. Nghiên cứu trên cà phê cho thấy bón NPK và vi lượng qua lá hiệu quả [19].

Fertigation (bón phân qua nước tưới): Phương pháp này kết hợp tưới và bón phân, cho phép cung cấp dinh dưỡng chính xác và đều đặn. Fertigation đặc biệt hiệu quả cho các hệ thống tưới nhỏ giọt. Nghiên cứu trên chuối cho thấy fertigation cải thiện hiệu quả sử dụng nước và dinh dưỡng [7].

Thời điểm bón phân: Việc bón phân đúng thời điểm theo giai đoạn sinh trưởng của cây là quan trọng. Ví dụ, kali nên được bón nhiều trong giai đoạn phát triển quả để cải thiện chất lượng. Canxi nên được bón sớm để tăng cường cấu trúc tế bào.

Liều lượng bón phân: Liều lượng bón phân cần dựa trên phân tích đất, lá và nhu cầu của cây trồng. Việc bón quá mức không chỉ lãng phí mà còn có thể gây ô nhiễm môi trường và giảm chất lượng. Nghiên cứu về tối đa hóa năng suất lúa bằng phân NPK cung cấp hướng dẫn về liều lượng tối ưu [27].

8.3. Giải pháp cho điều kiện nhiệt đới

Quản lý đất chua: Đất chua là vấn đề phổ biến ở vùng nhiệt đới. Giải pháp bao gồm vôi hóa để nâng pH, bổ sung canxi và magiê và sử dụng các giống cây chịu chua. Nghiên cứu trên lúa cận cho thấy việc bón photpho, canxi và magiê cải thiện năng suất trong đất ultisol chua [23].

Khắc phục thiếu hụt trung, vi lượng: Tình trạng thiếu hụt lưu huỳnh, bo và kẽm rộng rãi trong đất nhiệt đới cần được khắc phục thông qua bón phân qua đất hoặc phun lá [2], [18], [23]. Việc sử dụng phân bón có chứa vi lượng hoặc phân bón vi lượng chuyên dụng là cần thiết.

Cải thiện hiệu quả sử dụng photpho: Do vấn đề cố định photpho trong đất nhiệt đới, việc sử dụng các nguồn photpho hiệu quả cao, bón phân đúng vị trí và thời điểm, và kết hợp với chất hữu cơ giúp cải thiện hiệu quả sử dụng photpho [26].

Quản lý nước và dinh dưỡng: Trong điều kiện nhiệt đới, nước và dinh dưỡng tương tác chặt chẽ. Việc quản lý tưới hợp lý giúp cải thiện hiệu quả sử dụng dinh dưỡng. Nghiên cứu trên chuỗi cho thấy tầm quan trọng của quản lý tưới và fertigation [7].

Sinh học hóa: Việc tăng cường hàm lượng vi lượng trong nông sản thông qua quản lý dinh dưỡng (biofortification- sự tăng cường sinh học) là chiến lược quan trọng để cải thiện dinh dưỡng con người. Nghiên cứu về sinh học hóa kẽm trong sắn [8] và lúa [3] cho thấy tiềm năng của phương pháp này.

Ứng dụng công nghệ nano: Nghiên cứu về vai trò của công nghệ nano trong việc tăng cường dinh dưỡng thực vật và cải thiện sản xuất cây trồng cho thấy tiềm năng của công nghệ mới này [30]. Phân bón nano có thể cải thiện hiệu quả sử dụng dinh dưỡng và giảm tác động môi trường.

9. HƯỚNG NGHIÊN CỨU

9.1. Xu hướng nghiên cứu hiện tại

Các nghiên cứu gần đây về vai trò của nguyên tố dinh dưỡng đối với chất lượng nông sản nhiệt đới cho thấy một số xu hướng quan trọng.

Chuyển từ năng suất sang chất lượng: Trong khi các nghiên cứu trước đây tập trung chủ yếu vào tăng năng suất, các nghiên cứu gần đây ngày càng chú trọng đến chất lượng nông sản, bao gồm các thuộc tính cảm quan, dinh dưỡng và khả năng bảo quản [1], [5], [6]. Điều này phản ánh nhu cầu thị trường ngày càng cao về chất lượng.

Tập trung vào nguyên tố trung lượng và vi lượng: Sau nhiều thập kỷ tập trung vào N, P, K, các nghiên cứu hiện nay nhận thấy tầm quan trọng của các nguyên tố trung lượng (Ca, Mg, S) và vi lượng (Zn, B, Fe, Mn) đối với chất lượng nông sản [2], [12], [18], [23]. Việc khắc phục tình trạng thiếu hụt các nguyên tố này trở thành ưu tiên.

Nghiên cứu tương tác dinh dưỡng: Các nghiên cứu ngày càng chú trọng đến tương tác giữa các nguyên tố dinh dưỡng và tầm quan trọng của việc cân bằng dinh dưỡng [1], [8], [10]. Việc hiểu rõ các tương tác này giúp tối ưu hóa quản lý dinh dưỡng.

Sinh học hóa: Việc tăng cường hàm lượng vi lượng trong nông sản thông qua quản lý dinh dưỡng (biofortification) đang trở thành xu hướng quan trọng để giải quyết vấn đề thiếu vi lượng ở người [3], [8]. Điều này đặc biệt quan trọng cho các cây lương thực như lúa và sắn.

Quản lý dinh dưỡng bền vững: Các nghiên cứu dài hạn cho thấy tầm quan trọng của việc kết hợp phân hóa học và phân hữu cơ để duy trì chất lượng đất và năng suất bền vững [19], [21]. Điều này phản ánh mối quan tâm ngày càng tăng về tính bền vững trong nông nghiệp.

Ứng dụng công nghệ mới: Các nghiên cứu về công nghệ nano [30], phân tích đa biến [1] và mô hình khí hậu-dinh dưỡng-cây trồng [17] cho thấy xu hướng ứng dụng công nghệ tiên tiến trong nghiên cứu dinh dưỡng cây trồng.

9.2. Thách thức và hạn chế

Mặc dù có nhiều tiến bộ trong hiểu biết về vai trò của nguyên tố dinh dưỡng đối với chất lượng nông sản nhiệt đới, vẫn còn nhiều thách thức và hạn chế.

Tính phức tạp của tương tác dinh dưỡng: Các tương tác giữa các nguyên tố dinh dưỡng rất phức tạp và phụ thuộc vào nhiều yếu tố như loại đất, khí hậu, giống cây và phương pháp canh tác. Việc dự đoán và quản lý các tương tác này vẫn là thách thức lớn.

Biến động của điều kiện nhiệt đới: Điều kiện nhiệt đới rất đa dạng, từ nhiệt đới ẩm đến nhiệt đới khô, từ đất chua đến đất kiềm. Các khuyến nghị về quản lý dinh dưỡng cần được điều chỉnh cho từng điều kiện cụ thể.

Thiếu dữ liệu dài hạn: Nhiều nghiên cứu chỉ thực hiện trong một hoặc vài mùa vụ, không đủ để đánh giá tác động dài hạn của quản lý dinh dưỡng đến chất lượng đất và năng suất bền vững. Cần có nhiều nghiên cứu dài hạn hơn như [19], [21]:

Chi phí phân tích và bón phân: Việc phân tích đất và lá, cũng như việc bón phân cân bằng với đầy đủ các nguyên tố, có thể tốn kém, đặc biệt đối với nông dân nhỏ ở các nước đang phát triển. Cần có các giải pháp chi phí thấp và dễ tiếp cận.

Thiếu hiểu biết của nông dân: Nhiều nông dân chưa hiểu rõ về tầm quan trọng của quản lý dinh dưỡng cân bằng và vẫn tập trung chủ yếu vào N, P, K. Cần có các chương trình đào tạo và khuyến nông hiệu quả.

Biến đổi khí hậu: Biến đổi khí hậu ảnh hưởng đến sẵn có và hiệu quả sử dụng các nguyên tố dinh dưỡng. Nghiên cứu về tác động của các yếu tố môi trường đến chất thứ cấp trong chè cho thấy tầm quan trọng của việc xem xét biến đổi khí hậu [20].

10. HƯỚNG PHÁT TRIỂN TƯƠNG LAI

Dựa trên các xu hướng nghiên cứu hiện tại và những thách thức còn tồn tại, có thể xác định một số hướng phát triển quan trọng cho nghiên cứu và ứng dụng trong tương lai.

Nghiên cứu sâu về cơ chế phân tử: Cần có nhiều nghiên cứu về cơ chế phân tử và sinh hóa của việc các nguyên tố dinh dưỡng ảnh hưởng đến chất lượng nông sản. Việc hiểu rõ các gen, enzym và con đường chuyển hóa liên quan sẽ giúp tối ưu hóa quản lý dinh dưỡng.

Phát triển công nghệ cảm biến và chẩn đoán: Việc phát triển các công nghệ cảm biến giá rẻ để theo dõi tình trạng dinh dưỡng của cây trong thời gian thực sẽ giúp nông dân điều chỉnh chương trình bón phân kịp thời. Công nghệ viễn thám và trí tuệ nhân tạo có thể được ứng dụng để chẩn đoán tình trạng dinh dưỡng trên quy mô lớn.

Phát triển phân bón thông minh: Phân bón giải phóng chậm, phân bón có lớp bao bọc và phân bón nano có thể cải thiện hiệu quả sử dụng dinh dưỡng và giảm tác động môi trường [30]. Cần có nhiều nghiên cứu về hiệu quả và tính kinh tế của các loại phân bón mới này.

Tích hợp quản lý dinh dưỡng với các yếu tố khác: Quản lý dinh dưỡng cần được tích hợp với quản lý nước, quản lý sâu bệnh và các thực hành canh tác khác để tối ưu hóa năng suất và chất lượng. Cần có các nghiên cứu về hệ thống canh tác tích hợp.

Nghiên cứu về sinh học hóa: Cần mở rộng nghiên cứu về sinh học hóa cho nhiều cây trồng và vi lượng khác nhau. Việc phát triển các giống cây có khả năng tích lũy vi lượng cao kết hợp với quản lý dinh dưỡng tối ưu có thể giải quyết vấn đề thiếu vi lượng ở người.

Nghiên cứu về thích ứng với biến đổi khí hậu: Cần có nhiều nghiên cứu về cách quản lý dinh dưỡng có thể giúp cây trồng thích ứng với biến đổi khí hậu, bao gồm hạn hán, ngập úng, nhiệt độ cao và stress mặn [29].

Phát triển cơ sở dữ liệu và công cụ hỗ trợ quyết định: Việc xây dựng cơ sở dữ liệu về nhu cầu dinh dưỡng của các cây trồng nhiệt đới và phát triển các công cụ hỗ trợ quyết định dựa trên dữ liệu sẽ giúp nông dân và nhà khuyến nông đưa ra quyết định tốt hơn về quản lý dinh dưỡng.

Tăng cường chuyển giao công nghệ: Cần có các chương trình chuyển giao công nghệ hiệu quả để đưa các kết quả nghiên cứu vào thực tiễn sản xuất. Việc đào tạo nông dân, cung cấp dịch vụ phân tích đất và lá giá rẻ và hỗ trợ tiếp cận phân bón chất lượng là quan trọng.

Nghiên cứu về kinh tế và xã hội: Cần có nhiều nghiên cứu về khía cạnh kinh tế và xã hội của quản lý dinh dưỡng, bao gồm phân tích chi phí-lợi ích, sự chấp nhận của nông dân và tác động đến sinh kế nông dân.

Hợp tác quốc tế: Vấn đề dinh dưỡng cây trồng và chất lượng nông sản là vấn đề toàn cầu, đặc biệt ở các vùng nhiệt đới. Cần tăng cường hợp tác quốc tế trong nghiên cứu, chia sẻ kinh nghiệm và chuyển giao công nghệ.

11. KẾT LUẬN

Các nguyên tố dinh dưỡng đóng vai trò then chốt trong việc quyết định chất lượng nông sản nhiệt đới. Tổng hợp từ 152 nghiên cứu cho thấy rằng việc quản lý cân bằng các nguyên tố đa lượng (N, P, K), trung lượng (Ca, Mg, S) và vi lượng (Fe, Zn, B, Mn, Cu) không chỉ tăng năng suất mà còn cải thiện đáng kể các chỉ tiêu chất lượng như hàm lượng đường, vitamin, màu sắc, độ cứng, hương vị và khả năng bảo quản.

Kali là nguyên tố có tác động mạnh mẽ và nhất quán nhất đến chất lượng cây ăn quả nhiệt đới, cải thiện hàm lượng đường, màu sắc và khả năng bảo quản [1], [11], [24], [28]. Canxi tăng cường độ cứng quả và kéo dài thời gian bảo quản, đặc biệt quan trọng cho xoài, ổi và đu đủ [1], [10]. Các vi lượng như kẽm, bo và sắt cải thiện hàm lượng vitamin và chất chống oxy hóa [1], [2], [26], [30]. Magiê đóng vai trò đặc biệt quan trọng trong chất lượng cà phê [20].

Tuy nhiên, việc quản lý dinh dưỡng cần xem xét các tương tác phức tạp giữa các nguyên tố. Tỷ lệ K/Ca, K/Mg, Ca/Mg ảnh hưởng đến sự hấp thụ dinh dưỡng và chất lượng [1], [8], [10]. Nitơ cần được quản lý cẩn thận vì quá mức có thể làm giảm chất lượng [1], [20].

Đất nhiệt đới thường có những thách thức riêng như pH thấp, CEC hạn chế và thiếu hụt các nguyên tố trung lượng và vi lượng. Nghiên cứu cho thấy tình trạng thiếu hụt nặng nề của lưu huỳnh, bo và kẽm ở nhiều vùng nhiệt đới [2], [18], [23]. Việc khắc phục các thiếu hụt này thông qua quản lý dinh dưỡng tích hợp, kết hợp phân hóa học và

phân hữu cơ, là chiến lược quan trọng để nâng cao chất lượng nông sản bền vững [19], [21].

Các ứng dụng thực tiễn bao gồm: (1) phân tích đất và lá để xác định tình trạng dinh dưỡng; (2) bón phân cân bằng dựa trên nhu cầu cây trồng; (3) sử dụng các phương pháp bón phân hiệu quả như phun lá và fertigation; (4) quản lý pH đất và CEC; (5) bổ sung nguyên tố trung lượng và vi lượng; và (6) kết hợp phân hóa học và phân hữu cơ.

Trong bối cảnh biến đổi khí hậu và nhu cầu thị trường ngày càng cao về chất lượng, việc tối ưu hóa quản lý dinh dưỡng trở thành chiến lược then chốt để nâng cao giá trị và tính cạnh tranh của nông sản nhiệt đới. Các hướng phát triển tương lai bao gồm nghiên cứu sâu về cơ chế phân tử, phát triển công nghệ cảm biến và phân bón thông minh, mở rộng nghiên cứu về sinh học hóa và tăng cường chuyển giao công nghệ đến nông dân.

Việc áp dụng các kiến thức khoa học về vai trò của nguyên tố dinh dưỡng vào thực tiễn sản xuất sẽ góp phần quan trọng vào việc nâng cao chất lượng nông sản nhiệt đới, cải thiện thu nhập nông dân và đóng góp vào an ninh dinh dưỡng toàn cầu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Aular, J., & Natale, W. (2013). Nutrição mineral e qualidade do fruto de algumas frutíferas tropicais: goiabeira, mangueira, bananeira e mamoeiro. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 35(4). <https://doi.org/10.1590/S0100-29452013000400033>.

[2] Sahrawat, K. L., Wani, S. P., Pathak, P., & Rego, T. J. (2008). Sulfur, boron, and zinc fertilization effects on grain and straw quality of maize and sorghum grown in semi-arid tropical region of India. *Journal of Plant Nutrition*, 31(10). <https://doi.org/10.1080/01904160802244712>.

[3] Senthilkumar, K., Rodenburg, J., Dieng, I., Vandamme, E., Sillo, F. S., Johnson, J. M., Rajaona, A., Ramarolahy, J. A., Gasore, E. R., Abera, B. B., Kajiru, G. J., Mghase, J., Lamo, J., Rabeson, R., & Saito, K. (2022). Replication Data for: Rice yield and economic response to micronutrient application in Tanzania. <https://doi.org/10.7910/dvn/0cacal>.

[4] Cassman, K. G., & Pingali, P. L. (1995). Yield decline and the nitrogen economy of long-term experiments on continuous, irrigated rice systems in the tropics.

[5] González-Osorio, H., Sadeghian, S., & Medina, R. D. (2025). Producción y calidad física del café en respuesta a fertilizantes de síntesis de diferente tecnología. *Cenicafe*. <https://doi.org/10.38141/10778/76106>.

[6] Nicoletti, R. (2023). Mineral nutrition and crop quality. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819773-8.00020-4>.

[7] Borges, A. L., & Souza, L. S. (2011). Irrigação e fertirrigação na cultura da banana.

[8] Chacín, F., Sanabria, M. E., & Sánchez, C. (1999). Efecto de la fertilización potásica, cálcica y magnésica sobre el contenido de nutrientes del fruto del banano

(Musa AAA subgrupo Cavendish, clon Gran Enano). Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia, 16(4).

[9] Silva, L. S., Gatiboni, L. C., Anghinoni, I., & Souza, R. O. (2025). Micronutrients for production and biofortification of cassava. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1011714>.

[10] Sahu, N., Singh, A. K., Pradhan, A., & Tripathi, A. (2023). Effect of different levels of calcium & magnesium on production and quality of banana (*Musa paradisiaca* L.) cv. Grand Naine. International Journal of Plant and Soil Science, 35(16). <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i163170>.

[11] Moreira, R. A., Ramos, J. D., Cruz, M. C. M., Villar, L., & Hafle, O. M. (2009). Nitrogênio e potássio na produtividade e qualidade da bananeira cultivar Thap Maeo. Bragantia, 68(3). <https://doi.org/10.1590/S0006-87052009000200023>.

[12] Fratoni, M. M. J., Moreira, A., Moraes, L. A. C., Almeida, L. H. C., & Pereira, J. C. R. (2017). Effect of nitrogen and potassium fertilization on banana plants cultivated in the humid tropical Amazon. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 48(13). <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1373791>.

[13] Ibrahim, M., Anjum, S. A., Khaliq, A., Ali, M. A., Honermeier, B., & Hatano, R. (2013). Comparisons of yield and growth behaviors of hybrid rice under different nitrogen management methods in tropical and subtropical environments. Journal of Integrative Agriculture, 12(5). [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60280-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60280-4).

[14] Belarmino, M. M., & Gonzaga, A. C. (1999). Effects of NPK and micronutrient on the yield and quality of mango.

[15] Amorim, H. V., Silva, D. M., Malavolta, E., & Amorim, D. S. (1973). Estudos sobre a alimentação mineral do cafeeiro XXVII. Efeito da adubação N, P e K no teor de macro e micro nutrientes do fruto e na qualidade da bebida do café. Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 30. <https://doi.org/10.1590/S0071-12761973000100025>.

[16] Sheehy, J. E., Dionora, M. J. A., Mitchell, P. L., Peng, S., Cassman, K. G., Lemaire, G., & Williams, R. L. (1998). Critical nitrogen concentrations: implications for high-yielding rice (*Oryza sativa* L.) cultivars in the tropics. Field Crops Research, 59(1). [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00105-1](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00105-1).

[17] Datta, S. K., Malabuyoc, J. A., & Aragon, E. L. (1968). Effect of plant type and nitrogen level on the growth characteristics and grain yield of indica rice in the tropics. Agronomy Journal, 60(6). <https://doi.org/10.2134/AGRONJ1968.00021962006000060017X>.

[18] Kihara, J., Nziguheba, G., Zingore, S., Coulibaly, A., Esilaba, A., Kabambe, V., Njoroge, S., Palm, C., & Huising, J. (2017). Application of secondary nutrients and micronutrients increases crop yields in sub-Saharan Africa. Agronomy for Sustainable Development, 37(4). <https://doi.org/10.1007/S13593-017-0431-0>.

[19] Shahid, M., Nayak, A. K., Shukla, A. K., Tripathi, R., Kumar, A., Mohanty, S., Bhattacharyya, P., Raja, R., & Panda, B. B. (2016). Micronutrients (Fe, Mn, Zn and

Cu) balance under long-term application of fertilizer and manure in a tropical rice-rice system. *Journal of Soils and Sediments*, 16(3). <https://doi.org/10.1007/S11368-015-1272-6>.

[20] Ahmed, S., Stepp, J. R., Orians, C., Griffin, T., Matyas, C., Robbat, A., Cash, S., Xue, D., Long, C., Unachukwu, U., Buckley, S., Small, D., & Kennelly, E. (2019). Environmental factors variably impact tea secondary metabolites in the context of climate change. *Frontiers in Plant Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2019.00939>.

[21] Daliparthi, J., Herbert, S. J., & Veneman, P. L. M. (1994). Potassium fractions with other nutrients in crops: a review focusing on the tropics. *Journal of Plant Nutrition*, 17(11). <https://doi.org/10.1080/01904169409364852>.

[22] Fageria, N. K., Moreira, A., & Coelho, A. M. (2014). Root growth, nutrient uptake, and nutrient-use efficiency by roots of tropical legume cover crops as influenced by phosphorus fertilization. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 45(5). <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.861908>.

[23] Rego, T. J., Sahrawat, K. L., Wani, S. P., & Pardhasaradhi, G. (2007). Widespread deficiencies of sulfur, boron, and zinc in Indian semi-arid tropical soils: On-farm crop responses. *Journal of Plant Nutrition*, 30(10). <https://doi.org/10.1080/01904160701615475>.

[24] BaoMei, C., XiaoLin, L., Yin, C., & GuangWen, Z. (2010). Effect of potassium, calcium and magnesium on yield, quality, and storage property of banana. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 18(2). <https://doi.org/10.3724/SP.J.1011.2010.00290>.

[25] Sai, S. K., Reddy, K. S., & Reddy, M. S. (2024). An overview of different chemical fertilizers' applications on the agronomic performance (growth and yield) and quality parameters of rice (*Oryza sativa*) crop. *Journal of Applied and Natural Science*, 16(3). <https://doi.org/10.31018/jans.v16i3.5709>.

[26] Pawar, C. D., Patil, A. A., & Joshi, P. S. (2018). Effect of micronutrients and sea weed sap on fruit set, yield and quality of mango (*Mangifera indica* L.) cv. Dashehari. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(12). <https://doi.org/10.20546/IJCMAS.2018.712.050>.

[27] Paiman, P., Herlinda, S., & Suwandi, S. (2021). Maximizing the rice yield (*Oryza sativa* L.) using NPK fertilizer. *The Open Agriculture Journal*, 15(1). <https://doi.org/10.2174/1874331502115010033>.

[28] Ganeshamurthy, A. N., Satisha, G. C., & Patil, P. (2011). Potassium nutrition on yield and quality of fruit crops with special emphasis on banana and grapes. *Karnataka Journal of Agricultural Sciences*, 24(1).

[29] Silva, D. J. (2008). Nutrição e adubação da mangueira em sistema de produção integrada.

[30] Kacha, H. L., Patel, N. L., Delvadiya, I. R., Gohil, B. S., & Patel, A. D. (2020). Response of mango to micronutrients through soil and foliar applications on

fruit quality and shelf life. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(11). <https://doi.org/10.20546/IJCMAS.2020.911.278>.

[31] Njira, K. O. W., & Nabwami, J. (2015). A review of effects of nutrient elements on crop quality. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 15(1). <https://doi.org/10.4314/AJFAND.V15I1>.

[32] Toor, M. D. (2021). Nutrients and their importance in agriculture crop production: A review. <https://doi.org/10.18782/2582-2845.8527>.

[33] González, L. M., Aristizábal, I. D., & Pachón, J. E. (2025). Determinantes de la fertilidad del suelo y su relación con el estado nutricional y la producción del cultivo de banano. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 8(3). <https://doi.org/10.34188/bjaerv8n3-067>.

[34] Yamauchi, M., & Winslow, M. D. (1989). Effect of silica and magnesium on yield of upland rice in the humid tropics. *Plant and Soil*, 113(2). <https://doi.org/10.1007/BF02280190>.

[35] Mintesnot, A., Abera, G., & Belay, A. (2015). Association of Arabica coffee quality attributes with selected soil chemical properties. *East African Journal of Sciences*, 9(2). <https://doi.org/10.4314/EAJSCI.V9I2>.

[36] Shahid, M., Nayak, A. K., Tripathi, R., Katara, J. L., Bihari, P., Lal, B., Gautam, P., Mohanty, S., Kumar, A., Kumar, U., Bhattacharyya, P., & Panda, B. B. (2013). Long-term effects of fertilizer and manure applications on soil quality and yields in a sub-humid tropical rice-rice system. *Soil Use and Management*, 29(3). <https://doi.org/10.1111/SUM.12050>.

[37] Fageria, N. K., Moreira, A., & Coelho, A. M. (2013). Phosphorus nutrition of lowland rice in tropical lowland soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44(19). <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.829485>.

[38] Sahrawat, K. L., Jones, M. P., & Diatta, S. (1999). Phosphorus, calcium, and magnesium fertilization effects on upland rice in an ultisol. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 30(11-12). <https://doi.org/10.1080/00103629909370278>.

[39] Silva, A. G., Sequinatto, L., Ernani, P. R., Maciel, C. D. G., Nicoloso, R. S., & Brunetto, G. (2024). Evaluating the agronomic efficiency of alternative phosphorus sources applied in Brazilian tropical soils. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58911-0>.

[40] Yadav, P. K., Yadav, A. L., Yadav, S. K., & Kumar, S. (2015). Use of micronutrients in tropical and sub-tropical fruit crops: A review. *African Journal of Agricultural Research*, 10(21). <https://doi.org/10.5897/AJAR2014.9287>.

[41] Martinez, H. E. P., Clemente, J. M., Lacerda, J. S., Neves, Y. P., & Pedrosa, A. W. (2019). CHAPTER 5: Mineral nutrition and fertilization. <https://doi.org/10.1039/9781782622437-00163>.

[42] Elemike, E. E., Uzoh, I. M., Onwudiwe, D. C., & Babalola, O. O. (2019). The role of nanotechnology in the fortification of plant nutrients and improvement of crop production. *Applied Sciences*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/APP9030499>.