



# Vai trò tiềm năng của Bèo hoa dâu trong canh tác nông nghiệp bền vững và giảm phát thải khí nhà kính

NGUYỄN VIỆT HIỆP

Viện Thổ nhưỡng Nông hóa

**T**rong lĩnh vực phát triển nông nghiệp và BVMT, việc theo đuổi tính bền vững đã trở nên thiết yếu. Tích hợp được các phương pháp canh tác nông nghiệp bền vững sẽ góp phần giải quyết những thách thức lớn về môi trường và nâng cao phúc lợi kinh tế - xã hội [1].

Ngày nay, sự nóng lên của khí quyển Trái đất cùng quá trình phát triển công nghiệp được xem là nguyên nhân chính gây mất cân bằng môi trường, tuy nhiên, nông nghiệp lại là ngành phát thải khí nhà kính (KNK) lớn nhất và đóng vai trò quan trọng trong việc làm suy giảm các chương trình phát triển thân thiện với môi trường. Trước bối cảnh đó, hướng tới sản xuất giảm phát thải KNK và thích ứng với tác động tiêu cực của biến đổi khí hậu (BĐKH) là một thách thức lớn, đòi hỏi phải có chiến lược thay thế thân thiện với môi trường. Ứng dụng bèo hoa dâu (*Azolla*) được xem là một phương pháp quan trọng để đạt được tính bền vững về môi trường nông nghiệp [2].

## 1. NGUỒN GỐC VÀ ĐẶC TÍNH CỦA BÈO HOA DÂU

Là một nhóm các loài dương xỉ sống nổi trên mặt nước, thuộc họ Bèo hoa dâu (*Azollaceae*), phân bố trên toàn cầu, Bèo hoa dâu có vi khuẩn lam sống cộng sinh, nhờ khả năng cố định đạm của vi khuẩn lam cư trú trong các hốc lá của cây, nên chúng có tiềm năng để làm phân bón sinh học cho lúa. Tên gọi *Azolla* bắt nguồn từ các từ trong tiếng Hy Lạp *azo* (khô) và *alloy* (giết), ám chỉ sự bất lực của loài thực vật này trong điều kiện khô hạn. Có 21 loài *Azolla* trên thế giới, trong đó có 7 - 9 loài là khá phổ biến (tìm thấy trên toàn thế giới). Tất cả những loài phổ biến đều thuộc hai phân chi: (i) Phân chi *Euazolla*, bao gồm các loài phổ biến là *Azolla filiculoides*, *Azolla mexicana*, *Azolla caroliniana*, *Azolla microphylla*, *Azolla rubra*; (ii) Phân chi *Rhizosperma*, bao gồm các loài phổ biến là *Azolla pinnata*, *A. nilotica* và *A. imbricate*.

*Azolla* được phát hiện lần đầu tiên ở châu Âu, Bắc và cận Sahara châu Phi, Trung Quốc, Nhật Bản, New Zealand, Ôxtrâyliya, Caribe, Hawaii, sau đó dần lan rộng một cách tình cờ hoặc như một loại cây cảnh đến hầu hết mọi nơi trên thế giới, bao gồm châu Phi, châu Á, châu Âu, Bắc Mỹ, châu Đại Dương, Nam Mỹ. Tiềm năng nông học của nhóm này liên quan trực tiếp đến khả năng sinh trưởng thành công của chúng trong môi trường sống thiếu hoặc có hàm lượng nitơ thấp và trong điều kiện ngập úng. Tuy nhiên, đặc điểm nổi

bật nhất khiến chúng trở thành loại phân bón sinh học tiềm năng là tốc độ sinh sôi cao, với khả năng tăng gấp đôi sinh khối trong 1,9 ngày, tùy thuộc vào điều kiện canh tác và môi trường [3, 4]. Bèo hoa dâu trong hệ thống canh tác kép với lúa có thể nở hoa hoàn toàn trong vòng 15 - 20 ngày và ước tính giải phóng khoảng 30 kg N/ha mỗi mùa [5]. Hai hoặc ba loài Bèo hoa dâu trong một mùa trồng lúa sẽ bổ sung khoảng 60 - 80 kg N mỗi ha [6]. Bèo hoa dâu cũng được ứng dụng để cải thiện các điều kiện bất lợi phi sinh học đa dạng về độ mặn, độ pH và nhiệt độ [7].

## 2. VAI TRÒ CỦA BÈO HOA DÂU TRONG CANH TÁC BỀN VỮNG

Nông nghiệp là ngành tiêu thụ tới 70% tài nguyên nước của thế giới, tuy nhiên, BĐKH diễn biến ngày càng phức tạp, khó lường, gây ra tác động tiêu cực trực tiếp đến tài nguyên nước và hoạt động sản xuất nông nghiệp. Tình trạng thiếu nước được coi là rào cản môi trường lớn nhất đối với sự tăng trưởng và năng suất cây trồng trên toàn cầu, với nhiều thay đổi sinh lý và sinh hóa, chẳng hạn như điều chỉnh thẩm thấu, gen phản ứng với stress, tối ưu hóa sự mất nước và kích hoạt hệ thống chống oxy hóa [14].

Hiệu suất sử dụng nitơ (NUE) thấp trong lĩnh vực nông nghiệp được cho là nguyên nhân chính gây ra ½ tổng lượng N phản ứng bị thất thoát, từ đó ảnh hưởng tiêu cực đến sức khỏe con người cũng như môi trường sống. Lượng nitơ phản ứng phát thải vào sinh quyển đã vượt quá giới hạn hành tinh được đề xuất [11]. NUE trên ruộng lúa vào khoảng 20 - 30% và hiếm khi vượt quá 50%. Việc sử dụng đạm không hiệu quả của lúa nước là vấn đề đáng lo ngại đối với các nhà nghiên cứu và nông dân vì khả năng phục hồi kém, dẫn đến thiệt hại kinh tế, tác động tiêu cực lên môi trường. Các nhà nghiên cứu ước tính, khoảng 40% tổng lượng đạm bón bị thất thoát do quá trình bay hơi amoniac và NUE thấp cũng xuất phát từ nguyên nhân này, dẫn đến lãng phí tài nguyên, đồng thời gây ra hiện tượng đất bị axit hóa và phú dưỡng [12]. Do đó, việc tìm hiểu các biện pháp công nghệ đơn giản, vừa tiết kiệm chi phí, thân thiện với môi trường, vừa khả thi về mặt kinh tế, bền vững để giảm thiểu bay hơi, đạt được sản xuất lúa gạo sạch hơn là yêu cầu cần thiết.

Thực tế đã có nhiều công nghệ được phát minh trong quá khứ và được sử dụng để kiểm soát sự thất thoát nitơ, góp phần cải thiện NEU, bao gồm việc sử dụng thuốc diệt tảo, màng bề mặt đơn phân tử, chất



ức chế urease... Trong đó, Bèo hoa dâu cũng được biết đến là một giải pháp thay thế tiềm năng giúp tăng cường nitơ cho cây trồng, tạo ra amoniac liên tục với số lượng lớn, chi phí thực tế đáng kể. Sự bay hơi của amoniac có thể được giảm bớt nếu có lớp chắn trên bề mặt nước, trong khi Bèo hoa dâu phát triển lại đáp ứng được điều kiện này, hoạt động như một lớp chắn vật lý để giữ lại  $NH_3$  được giải phóng và hấp thụ bức xạ mặt trời chiếu vào. Bằng cách này, Bèo hoa dâu giúp bảo tồn nitơ, ức chế sự gia tăng pH của nước ngập do tảo gây ra [13]. Do đó, Azolla có thể được khuyến nghị tích cực cho nông dân trồng lúa.

Trong số các loài Bèo hoa dâu phổ biến đã biết, *Anabaena azollae* có thể cải thiện khả năng giữ nước và đất; *Azolla pinnata* có tác dụng đối với hiệu suất tăng trưởng của cây trồng; *Azolla pinnata* lại được sử dụng cho sự phát triển và trao đổi chất của thực vật. Razavipour et al., đã nghiên cứu tác dụng của phân hữu cơ *Azolla filiculoides* trong việc giảm thiểu căng thẳng do thiếu nước đối với sự sinh trưởng của lúa trong hai vụ và nhận thấy năng suất hạt, trọng lượng bông, số nhánh cao hơn [15]. Nhiều thí nghiệm đồng ruộng cũng đã được Maswada et al., thực hiện để tìm hiểu vai trò sinh lý của chiết xuất *Azolla filiculoides* lam như một loại phân bón sinh học đầy hứa hẹn trong việc cải thiện các thông số khác nhau trên cây ngô thiếu đạm ở điều kiện tưới tiêu đầy đủ và thiếu hụt [16]. Việc sử dụng chiết xuất *Azolla* đã góp phần cải thiện các thông số sinh trưởng và sinh lý thông qua nghiên cứu của cây trồng theo nhiều cơ chế khác nhau. Rõ ràng *Azolla* được sử dụng ở nhiều dạng khác nhau (toàn bộ cây, chiết xuất, phân trộn) có lợi trong việc kiểm soát tác động của tình trạng thiếu nước.

Trên thế giới, Bèo hoa dâu đã được sử dụng trong sản xuất nông nghiệp tại một số quốc gia, tiêu biểu như làm phân bón sinh học cho sản xuất lúa ở Ethiopia vì tạo ra sinh khối cao; dễ quản lý, thiết lập; tăng khả năng hấp thụ các chất dinh dưỡng đa lượng và vi lượng (hấp thụ K, tái chế P và S); cải thiện các đặc tính lý - hóa học của đất cũng như hiệu quả sử dụng phân bón; tăng năng suất cây trồng lên 15 - 19% (chỉ bằng một lần bón); giải phóng hormone tăng trưởng và vitamin; không thu hút sâu bệnh hại lúa [8]. Kết quả, trong vụ đầu tiên và vụ thứ hai, việc phun chiết xuất *Azolla* lên lá đã làm tăng năng suất hạt lần lượt là 57,37% và 51,71%; năng suất sinh học lần lượt là 37,66% và 21,57% so với đối chứng. Lượng phân bón NPK tăng từ 60 - 80% lên 100%.

Tương tự, tại Ai Cập, bên cạnh bón phân khoáng, việc phun chiết xuất *Azolla* lên lúa mì đã được ghi nhận là góp phần duy trì năng suất cao, đồng thời giảm thiểu chi phí sản xuất [9]. Sự phân hủy sinh khối Bèo hoa dâu giúp giải phóng một lượng lớn nitơ vào đất lúa để cây hấp thụ (75 - 80% tổng lượng thu được). Bèo hoa dâu xanh đã được trồng hai vụ trên lúa với diện tích 500 kg/ha, làm giàu nitơ



Người dân sử dụng bèo hoa dâu để tăng gia sản xuất  
Ảnh: Dương Đình Tường

trong đất thêm 50 kg/ha và giảm nhu cầu nitơ xuống 20 - 30 kg/ha; sản lượng lúa tăng lên 20 - 30% [10].

### 3. VAI TRÒ CỦA BÈO HOA DÂU TRONG GIÁM PHÁT THẢI KHÍ NHÀ KÍNH

Hiện tượng Trái đất nóng lên đã trở thành một trong những vấn đề môi trường lớn, cấp bách của toàn nhân loại, dẫn đến những thay đổi ở cấp độ khu vực và toàn cầu về các thông số liên quan đến khí hậu, bao gồm mực nước biển dâng, độ ẩm đất, lượng mưa. Các KNK chính bao gồm  $CO_2$ , nitơ oxit, mêtan cũng được đóng góp bởi quá trình phát triển của ngành nông nghiệp [17].

Bèo hoa dâu được biết đến với vai trò quan trọng trong việc cô lập  $CO_2$  trong khí quyển, thông qua sử dụng  $CO_2$  kết hợp với nước để sản xuất ôxy và monosaccharide trong lục lạp, hoạt động giống các loài thực vật khác, như một hệ thống tái chế tự nhiên, làm giảm lượng khí thải  $CO_2$  [18]. Tiềm năng của Bèo hoa dâu trong việc cô lập  $CO_2$  lớn nằm ở tốc độ sinh trưởng nhanh hơn của chúng do mối quan hệ cộng sinh với vi khuẩn lam cố định đạm, sinh sản sinh dưỡng, bản chất trương nở và thường không có sâu bệnh. Một nghiên cứu từ Anh cho thấy, Bèo hoa dâu (*Azolla filiculoides*) cô lập được 32,54 tấn  $CO_2$ /ha/năm [19]. Việc tăng cường canh tác Bèo hoa dâu (*Azolla*) ở Sri Lanka, đặc biệt là trên các cánh đồng lúa nước, có thể giảm khoảng 509.422 tấn  $CO_2$  từ khí quyển mỗi năm [20]. Như vậy, vai trò hiệu quả của loài cây này sẽ được nhấn mạnh như một nguồn cô lập các-bon và đóng vai trò tích cực trong việc duy trì khí hậu cũng như tính bền vững của môi trường.

Bên cạnh đó, khí dinitơ monoxit ( $N_2O$ ) được tạo ra ở điều kiện môi trường yếm khí trong đất thông qua quá trình khử nitơ nhờ vi khuẩn [21]. Tại châu Á, Bèo hoa dâu đã được sử dụng làm phân xanh trên các cánh đồng lúa nhờ khả năng cố định ni tơ ( $N_2$ ). Việc sử dụng Bèo hoa dâu kết hợp với phân đạm vô



cơ có thể làm giảm lượng phân đạm bón, ảnh hưởng đến lượng khí thải  $N_2O$  từ lúa, dẫn đến giảm cường độ KNK do tiềm năng làm nóng toàn cầu thấp hơn trên mỗi tấn lúa.

Khí mêtan ( $CH_4$ ) được ước tính có tiềm năng làm nóng toàn cầu theo quy mô 100 năm, gấp 28 lần cường độ bức xạ cưỡng bức của  $CO_2$  trên mỗi khối lượng. Nồng độ  $CH_4$  trong khí quyển ước tăng từ 722 ppb (năm 1750) lên 1803 ppb (năm 2010) [22].  $CH_4$  được tạo ra từ quá trình phân hủy chất hữu cơ do vi sinh vật trong đất diễn ra ở điều kiện yếm khí. Ruộng lúa là nguồn phát thải  $CH_4$  tiềm năng, tương đương khoảng 10 - 12% lượng  $CH_4$  do con người tạo ra trên toàn cầu [23]. Những quốc gia sản xuất lúa gạo chính như Trung Quốc, Ấn Độ, Indônêxia, Myanmar, Thái Lan, Việt Nam thải ra 78% tổng lượng khí thải từ việc trồng lúa. Khi sản lượng lúa tăng lên, khí  $CH_4$  từ các cánh đồng lúa cũng sẽ tiếp tục tăng [24].

Việc giảm thiểu phát thải  $CH_4$  khi có sự hiện diện của Azolla có liên quan đến việc tăng hàm lượng ôxy hòa tan trong nước đọng. Tác động của các loại phân hữu cơ khác nhau lên sự phát thải  $CH_4$  trong đất ruộng lúa đã được nghiên cứu, kết quả cho thấy, việc bổ sung Azolla có thể làm giảm đáng kể lượng  $CH_4$  thoát ra từ ruộng lúa khi so sánh với các loại phân hữu cơ khác [25].

#### 4. HIỆN TRẠNG VÀ TRIỂN VỌNG TƯƠNG LAI CỦA SẢN XUẤT BÈO HOA DÂU

Các chủng Bèo hoa dâu từ nhiều vùng sinh thái nông nghiệp khác nhau có khả năng cố định đạm hiệu quả cần được sàng lọc và hiệu suất của chúng trong điều kiện bất lợi phi sinh học khác nhau như độ mặn, kim loại nặng, tiếp xúc với tia UV-B... cũng cần được đánh giá, bằng cách sử dụng tiến bộ của sinh học phân tử. Mọi nỗ lực nghiên cứu có thể tập trung vào việc tạo ra các giống Bèo hoa dâu có khả năng chống chịu tốt hơn với những thay đổi của môi trường, chẳng hạn như sự thay đổi về độ pH đất, nhiệt độ, muối, ô nhiễm kim loại nặng. Để giải quyết khả năng chịu đựng bất lợi phi sinh học của các loài Bèo hoa dâu ở những vùng khí hậu nông nghiệp khác nhau nhằm thu hoạch N trong khí quyển cũng như xử lý sinh học kim loại nặng, các kỹ thuật biến đổi gen có thể là một giải pháp khả thi.

Trong quá khứ, việc sử dụng Bèo hoa dâu (Azolla) đòi hỏi ít công sức và ít rủi ro hơn. Vì nhiệt độ là một trong những yếu tố khí hậu quan trọng trong sự phát triển của thực vật, các loài chịu nhiệt được công nhận là một lĩnh vực nghiên cứu thiết yếu cần được tiến hành trong bối cảnh BĐKH. Cần có thêm nhiều nghiên cứu về đặc tính xử lý thực vật của sinh khối Azolla đã chết và thực tế hơn khi xét đến việc loài dương xỉ nước này dễ trồng vào mùa thích hợp, dễ bảo quản sinh khối khô, dễ vận chuyển sinh khối để sử dụng bền vững và dễ xử lý sinh khối bị ô nhiễm sau khi biến thành tro, chôn sâu dưới đất hoang.

Các phương pháp sử dụng công nghệ sinh học Azolla đang phát triển nhanh chóng và sẽ tiếp tục mở rộng trong tương lai. Việc cải thiện hiệu quả của Azolla là một trong những yếu tố chính được tính đến trong quá trình phát triển di truyền phân tử, kỹ thuật tế bào và di truyền, cũng như chỉnh sửa bộ gen. Ngoài ra, để cải thiện lượng chất chuyển hóa thứ cấp, chất dinh dưỡng trong thực vật thủy sinh, các nghiên cứu về di truyền cơ bản và kỹ thuật di truyền cũng phải được sử dụng.

#### KẾT LUẬN

Nhân loại dễ bị tổn thương trước những thay đổi mạnh mẽ của môi trường và việc nghiên cứu, phát triển các phương pháp thay thế bền vững là yêu cầu cấp thiết. Bèo hoa dâu là một sinh vật đa năng, đóng vai trò to lớn trong việc giải quyết những thách thức lớn đang được toàn cầu quan tâm. Việc sử dụng Bèo hoa dâu (Azolla) mang lại sự gia tăng tích cực trong phát triển kinh tế - xã hội, phục hồi sinh học và kiểm soát BĐKH. Mối quan hệ cộng sinh của nó với vi khuẩn lam cố định đạm *A. azollae* là chìa khóa để cô lập  $CO_2$  trong khí quyển. Trên thực tế, việc phát thải các KNK khác như  $CH_4$ ,  $N_2O$  có thể được kiểm soát thông qua sử dụng Bèo hoa dâu, tuy nhiên, ứng dụng của nó cho mục đích bền vững vẫn cần được khám phá thêm.

Các loài Bèo hoa dâu khác nhau có thể được sử dụng để giảm thiểu phân bón hóa học theo cách thân thiện với môi trường, hướng đến tăng năng suất cây trồng và sự bền vững của nông nghiệp. Vì vậy, cần chú trọng đến việc phát hiện ra các loài Bèo hoa dâu mới cũng như các vi sinh vật mới liên quan đến hệ sinh thái Bèo hoa dâu. Về vấn đề này, việc nâng cao nhận thức của nông dân là một bước quan trọng khác. Các chương trình nghiên cứu khoa học và chính sách phát triển giống Bèo hoa dâu hiệu quả sẽ khuyến khích nông dân áp dụng chiến lược tiềm năng này để cải thiện sức khỏe đất và sử dụng nước, năng lượng một cách tiết kiệm hơn, góp phần BVMT.

Có thể nói, việc khám phá tất cả mọi khả năng tiềm ẩn của Bèo hoa dâu chắc chắn sẽ cải thiện tình trạng chung của môi trường toàn cầu. Bằng cách kết hợp các phương pháp tiếp cận đa dạng, bao gồm nghiên cứu ứng dụng và nghiên cứu cơ bản, Azolla có thể có khả năng chống chịu tốt hơn với những biến động của môi trường và được sử dụng hiệu quả hơn trong nỗ lực phát triển bền vững trong tương lai ■

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Rusdiyana E, Sutrisno E, Harsono I (2024) A bibliometric review of sustainable agriculture in rural development. *West Sci Interdiscip Stud* 2:630-637.
2. Kollah B, Patra AK, Mohanty SR (2016) Aquatic microphylla Azolla: a perspective paradigm for sustainable agriculture, environment and global climate



- change. *Environ Sci Pollut Res* 23:4358- 4369. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5857-9>.
3. Hasan MR, Rina C (2009) Use of algae and aquatic macrophytes as feed in small-scale aquaculture: A review. vol 531. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
  4. Alfasane MA, Bhuiyan RA, Jolly JA, Islam S (2019) *Azolla microphylla* Kaulf. (Salviniaceae): a new pteridophytic record for Bangladesh. *Bangladesh J Plant Taxon* 26:325-327.
  5. Malyan SK, Bhatia A, Tomer R, Harit RC, Jain N, Bhowmik A, Kaushik R (2021) Mitigation of yield-scaled greenhouse gas emissions from irrigated rice through *Azolla*, Blue-green algae, and plant growth-promoting bacteria. *Environ Sci Pollut Res* 28:51425-51439. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14210-z>.
  6. Gevrek MN, Samanci B, Yagmur B, Arabaci O, Özkaynak E (2004) Studies on the adaptation of *Azolla mexicana* in the aegean and the mediterranean regions. *Plant Prod Sci* 7:50-54.
  7. Taghilou S, Peyda M, Mehrasbi M (2023) A review on the significance of *Azolla* for water and wastewater treatment. *Desalin Water Treat* 293:138-149.
  8. Steffen W, Richardson K, Rockström J, Cornell SE, Fetzer I, Bennett EM, Biggs R, Carpenter SR, De Vries W, De Wit CA (2015) Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science* 347:6223. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>.
  9. Feyisa T, T. Amare, E. A. Adgo, and Y. G. Selassie (2013) Symbiotic blue green algae (*Azolla*): a potential bio fertilizer for paddy rice production in Fogera Plain, northwestern Ethiopia. *Ethiopia, Journal of Science and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 1-11, 2013, <http://creativecommons.org/licenses/CCBY4.0>.
  10. Altai D. S., A. R. Alhasany, A. H. Noaema, W. J. Idan, and I. M. Al-Farhan (2019) Effectiveness of *Azolla* extract in reducing use of mineral fertilizers (NPK) and increasing productivity of wheat under new reclaimed soils. *Journal of Plant Production*, vol. 10, pp. 859-866, 2019.
  11. Verma G., K. A. Prakriti, S. Babu et al. (2022) Implications and future prospects of *Azolla* as a low-cost organic input in agriculture. *Agriculture*, vol. 1, no. 6, pp. 1-7, 2022.
  12. Ti C, Xia L, Chang SX, Yan X (2019) Potential for mitigating global agricultural ammonia emission: a meta-analysis. *Environ Pollut* 245:141-148. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.124>.
  13. de Macale MAR, Vlek PL (2004) The role of *Azolla* cover in improving the nitrogen use efficiency of lowland rice. *Plant Soil* 263:311-321. <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000047742.67467.50>.
  14. Jha Y, Subramanian RB (2018) From interaction to gene induction: An eco-friendly mechanism of pgpr-mediated stress management in the plant. In: Egamberdieva D, Ahmad P (eds) *Plant Microbiome: Stress Response*. Springer Singapore, Singapore, pp 217-232.
  15. Razavipour T, Moghaddam SS, Doaei S, Noorhosseini SA, Damalas CA (2018) *Azolla* (*Azolla filiculoides*) compost improves grain yield of rice (*Oryza sativa* L.) under different irrigation regimes. *Agric Water Manag* 209:1-10. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.05.020>.
  16. Maswada HF, Abd El-Razek UA, El-Sheshtawy A-NA, Mazrou YS (2021) Effect of *Azolla filiculoides* on growth, physiological and yield attributes of maize grown under water and nitrogen deficiencies. *J Plant Growth Regul* 40:558-573. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10120-5>.
  17. Rani M, Jha A (2019) Potential of *Azolla* in Sustainable Agriculture and Climate Change Mitigation. In: Bajpai O and Khan K (ed) *Recent trends in tropical plant research* pp 27-37.
  18. Maham SG, Rahimi A, Subramanian S, Smith DL (2020) The environmental impacts of organic greenhouse tomato production based on the nitrogen-fixing plant (*Azolla*). *J Clean Prod* 245:118679. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118679>.
  19. Dawson JJ, Smith P (2007) Carbon losses from soil and its consequences for land-use management. *Sci Total Environ* 382:165- 190. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.03.023>.
  20. Surenthiran S, Loganathan P (2012) Carbon sequestration of *Azolla* and soil nitrogen mineralization. In: *Proceedings of International Forestry and Environment Symposium*.
  21. Smith P, Martino D, Cai Z, Gwary D, Janzen H, Kumar P, McCarl B, Ogle S, O'Mara F, Rice C (2008) Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transact Royal Soc b: Biol Sci* 363:789-813.
  22. Xu H, Zhu B, Liu J, Li D, Yang Y, Zhang K, Jiang Y, Hu Y, Zeng Z (2017) *Azolla* planting reduces methane emission and nitrogen fertilizer application in double rice cropping system in southern China. *Agron Sustain Develop* 37:29. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0440-z>.
  23. Ciais P, Sabine C, Bala G, Bopp L, Brovkin V, Canadell J, Chhabra A, DeFries R, Galloway J, Heimann M (2014) Carbon and other biogeochemical cycles. In: *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, pp 465-570.
  24. Hussain S, Peng S, Fahad S, Khaliq A, Huang J, Cui K, Nie L (2015) Rice management interventions to mitigate greenhouse gas emissions: a review. *Environ Sci Pollut Res* 22:3342-3360. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3760-4>.
  25. Adhya T, Bharati K, Mohanty SR, Ramakrishnan B, Rao VR, Sethunathan N, Wassmann R (2000) Methane emission from rice fields at Cuttack, India. *Nutr Cycling Agroecosyst* 58:95-105. <https://doi.org/10.1023/A:1009886317629>.
  26. Gamachis Korsa, Digafe Alemu, Abate Ayele (2024). *Azolla* Plant Production and Their Potential Applications. *International Journal of Agronomy* Volume 2024, Article ID 1716440, 12 page. <https://doi.org/10.1155/2024/1716440>.