

DOI: 10.11766/trxb202503020097

CSTR: 32215.14.trxb202503020097

巨晓棠, 张翀, 张丽梅, 宋晓桐, 李婷玉, 刘烁然, 刘四义. 海南热带农田土壤氮素循环研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2026, 63 (4): 1007–1017.

JU Xiaotang, ZHANG Chong, ZHANG Limei, SONG Xiaotong, LI Tingyu, LIU Shuoran, LIU Siyi. Research Progress and Future Perspectives on Soil Nitrogen Cycling in Tropical Croplands of Hainan[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026, 63 (4): 1007–1017.

海南热带农田土壤氮素循环研究进展与展望*

巨晓棠^{1†}, 张 翀¹, 张丽梅², 宋晓桐², 李婷玉¹, 刘烁然¹, 刘四义²

(1. 海南大学热带农林学院, 海口 570228; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘 要: 海南是我国唯一全省处于热带地区的省份, 光热水资源丰富, 是我国最典型的热带农业生产基地。然而, 土壤“瘦、酸、漏”等障碍性因素及高氮肥投入导致了农田氮损失风险大、环境污染严重等问题。海南农业面源污染形势严峻, 农业排放的氮和磷通过较短的迁移路径进入近海水体, 导致珊瑚礁和海草床严重退化。然而, 海南热带农田土壤氮素循环研究基础薄弱, 阻碍了制定科学和有针对性的氮素调控措施。针对热带农业资源特点, 本文提出未来需要从海南热带土壤氮素转化特征、氮去向和损失途径、作物氮高效利用机制、氮肥减施增效原理与调控措施四个方面重点研究。尤其是需要关注有机物介导的土壤地力提升和酸化治理对砖红壤氮素转化特征的影响、酸性土壤高氨排放和深层剖面高硝态氮累积机制、有机物料投入对氧化亚氮排放的影响等方面。进而明确农田土壤氮素转化迁移特征与作物氮素利用的关系, 阐明土壤碳库扩容对氮素转化迁移、保氮与阻损的影响机制。进而提出以“增碳保氮、碳氮耦合、损失阻控、协调供氮”为核心的氮肥减施增效原理, 形成创新的理论和解决方案。以期热带高效绿色农业发展提供科技支撑, 并为理解全球不同气候-土壤带氮素生物地球化学循环区域差异提供科学基础。

关键词: 土壤氮素转化; 氮素去向; 氮素损失途径; 氮素利用率; 碳氮耦合

中图分类号: S153 文献标志码: A

Research Progress and Future Perspectives on Soil Nitrogen Cycling in Tropical Croplands of Hainan

JU Xiaotang^{1†}, ZHANG Chong¹, ZHANG Limei², SONG Xiaotong², LI Tingyu¹, LIU Shuoran¹, LIU Siyi²

(1. School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou 570228, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Hainan is the only province in China entirely situated within the tropical region, characterized by abundant light, heat, and water resources, making it the most typical tropical agricultural production base in China. However, restrictive factors such as “poor, acidic, and leaky” soils, coupled with high nitrogen (N) fertilizer inputs in crop cultivation, led to significant risks for N loss in farmlands and severe environmental pollution. The agricultural non-point source pollution situation in Hainan is severe, N

* 国家自然科学基金项目(U24A20625, 42207348)、海南大学启动经费(KYQD(ZR)-20098)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. U24A20625, 42207348), Hainan University Startup Fund (No. KYQD (ZR) -20098)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: juxt@cau.edu.cn

作者简介: 巨晓棠(1965—), 男, 陕西白水人, 博士, 教授, 主要从事碳氮循环与温室气体减排研究。E-mail: juxt@cau.edu.cn

收稿日期: 2025-03-02; 收到修改稿日期: 2025-06-10; 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-10-13

and phosphorus discharged from agriculture enter nearshore waters via short transport pathways, leading to serious degradation of coral reefs and seagrass beds. However, the generally weak foundation of research on N cycling in Hainan's tropical farmland soils hindered the development of scientific and targeted N regulation measures. In response to the characteristics of tropical agricultural resources, we propose that future research should focus on four key areas: the characteristics of N transformation, the fate and loss pathways of N, the mechanisms of efficient N utilization in crops, and the principles and regulation measures for reducing N fertilizer application while enhancing efficiency. More attention should be paid to the effects of organic matter-mediated soil fertility and acidity improvement on soil N transformation in Latosols, the mechanisms underlying high ammonia emissions in acidic soils and nitrate accumulation in deep soil profiles, as well as the impact of organic material inputs on nitrous oxide emissions. We emphasize the need to clarify the relationship between the transformation and migration characteristics of N in farmland soils and crop N use efficiency, and to elucidate the mechanisms by which soil carbon (C) pool expansion affects N transformation, migration, retention, and loss prevention. Thus, to propose a principle for reducing N fertilizer application while enhancing efficiency, centered on "increasing C to retain N, coupling C and N, controlling losses, and coordinating N supply". This approach will form an innovative theory and solution. The finding would provide scientific and technological support for the development of efficient and green tropical agriculture and offer a scientific basis for understanding regional differences in N cycling across global climate-soil zones.

Key words: Soil nitrogen transformation; Nitrogen fate; Nitrogen loss pathway; Nitrogen use efficiency; Coupling carbon and nitrogen cycle

氮素是作物需求量大且对产量和品质形成起重要作用的关键元素。提高氮肥增产效果、降低其对环境负面影响是全球、尤其是我国集约化农业发展面临的重大社会需求。由于氮元素价态及构成的化合物种类多、移动性强且滞留效应长,其在土-水-气-生介质的转化和迁移过程复杂^[1]。除氮气外,活性氮(Reactive nitrogen)会对环境造成不同程度的影响,引起水体富营养化、土壤酸化、大气污染、温室气体排放和生物多样性减少等问题^[2]。理解不同气候带土壤-作物体系氮素循环过程并采取优化调控措施,是国内外科学界关注的重大科学问题,是农业提质增效和绿色发展的基础。过去四十年来,我国在主要集约化农作区,如华北平原、长江中下游平原、黄土高原等温带或亚热带地区开展了大量农田氮素循环与调控措施的研究,取得了系列进展^[3-5],而对热带地区的相关研究还较薄弱,特别是对热带蔬菜和果树等经济作物的研究较少^[6]。开展我国热带地区氮素循环研究能够对理解全球不同气候-土壤带氮素生物地球化学循环差异机制和氮素优化管理提供科学基础和技术支撑。

海南是我国唯一全省处于热带地区的省份,是我国最典型的热带农业生产基地^[7],也是全国人民的冬季“菜篮子”和热带“果盘子”,全国城镇居民人均年消费海南瓜果蔬菜 10 千克左右^[8]。2018 年国

家确立海南省建设“国家农业绿色发展先行区”和“国家生态文明试验区”的战略定位,然而,种植系统氮素的高投入和高盈余已成为区域生态环境保护的障碍^[9-10]。提高氮素的增产效果,并降低其负面环境效应是海南发展热带特色高效农业和旅游产业需要解决的关键问题。在海南热带高温高湿、土壤障碍因素、氮素严重过量施用并存的现状下,典型土壤-作物体系氮素去向和损失途径并不明确,也缺乏对微生物驱动的土壤氮素转化过程如何影响热带土壤氮转化过程的系统认知,阻碍了制定科学的氮素调控措施。因此,本文将系统梳理海南农田氮素循环研究进展,并结合热带农业资源特点(土壤、气候和作物体系等),提出热带地区氮素循环拟解决的关键科学问题,为热带农田氮素优化管理和固碳减排提供科学基础,并为热带农业的可持续发展、生态环境保护、面源污染控制、区域经济发展提供科技支撑。

1 海南热带农业资源特点及生态环境问题

1.1 海南热带农业资源的优势和劣势

海南占我国热带土地面积的 43%,长夏无冬,

具有独特的热带气候特征。光、热、水资源丰富，年光照为 1 750~2 650 h，光照率为 50%~60%；年均气温 23~25 °C， $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温为 8 200 °C；降雨充沛，年均降水量为 1 700 mm。海南被誉为“天然温室”，是中国南繁育种的理想基地，稻可三熟，

菜满四季^[11]。近三十年来蔬菜和水果种植面积增长了 3.6 倍，对保障我国冬季蔬菜和热带水果供应具有重要作用^[9]（图 1）。海南得天独厚的气候资源为发展热带农业奠定了坚实的基础，农业产值占海南省 GDP 的三分之一左右^[12]。

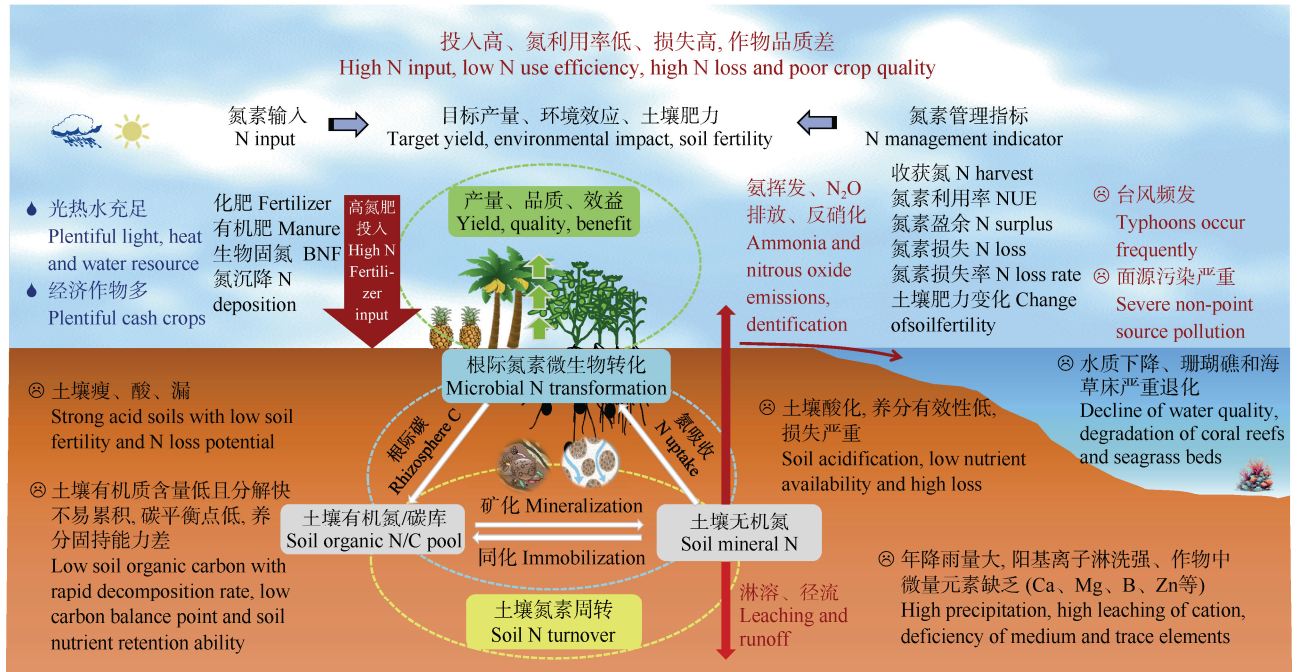


图 1 海南农业资源的优劣势及氮素循环与调控途径

Fig. 1 The advantage and disadvantage of agricultural resources, nitrogen cycling in Hainan Island

海南热带玄武岩（或花岗岩）发育的砖红壤高度风化、阳离子交换量低、盐基饱和度低、酸性强（一般 $\text{pH} < 5.6$ ），农田土壤普遍存在“瘦、酸、漏”的特点（土壤有机碳 $\text{SOC } 9 \text{ g kg}^{-1}$ 左右^[13]），存在径流和淋溶作用强、养分损失风险大等问题。近三十年来，海南因种植结构变化和大量施氮导致土壤有机质下降了 25%^[13]， pH 整体下降约 0.5 个单位^[9]。水稻连作改为稻菜轮作（水田连作改为水旱轮作）、林地开垦为园地、土地利用强度加大是造成有机质含量下降的主要原因。土壤有机质下降和酸化不利于土壤氮素的保持，进一步增加了氮素流失的风险。

1.2 过量施肥导致的生态环境问题

农户为了获得较高的产量和产值，一直依赖于大量的氮肥投入。根据我们调查研究，海南蔬菜和水果种植普遍存在严重过量施用氮肥现象，典型种植区周年每公顷氮肥投入量高达上千千克纯氮，如水稻-蔬菜轮作化肥和有机肥用量分别为 $\text{N } 975$ 和 333 kg hm^{-2} ，香蕉化肥和有机肥用量分别为 $\text{N } 1293$

和 47 kg hm^{-2} 。导致典型种植体系（稻菜轮作、香蕉、菠萝等）氮素盈余高达 $\text{N } 1196 \sim 1271 \text{ kg hm}^{-2[9-10]}$ 。土壤氮素盈余和污染已经超过了全国平均水平，其环境问题日渐凸显^[9]。

海南省农业农村面源污染依然形势严峻，种植业是农业面源污染的重要排放源。根据海南省第二次全国污染源普查公报，2017 年海南农业源水污染物排放量总氮 24 114 t（其中种植业占 68%），总磷 3 447 t（其中种植业占 46%），分别占全省总氮、总磷排放量的 58% 和 73%。此外，海南作物生产主要分布在周边沿海地区，大量氮素盈余导致的流失，会通过较短的迁移路径或水系进入近海水体，引起水质降低和水体富营养化，严重影响海南的生态环境和旅游产业。据报道，多个人海口水体受到不同程度的氮素污染，总氮浓度超过海水水质 III 或 IV 类标准^[14]，也是海南省近海珊瑚礁和海草床严重退化的重要原因之一^[15]。因此，迫切需要开展农田土壤氮素转化、去向、损失途径和调控措施的系统深入

研究, 为氮素优化管理提供科学依据 (图 1)。

2 海南热带农田土壤氮素循环特征及研究进展

不同形态氮素通过多途径输入农田生态系统, 包括化肥、有机肥、氮沉降、生物固氮和作物残茬等。其中肥料氮投入 (包括化肥和有机肥) 分别占全球和中国农田氮素投入的 71% 和 83%, 是农田氮素的主要输入源^[16-17]。这些氮素在土壤-作物体系中不断转化和迁移, 除了被作物吸收外, 还会残留于土壤或损失到环境。残留于土壤的氮素滞留时间可达几十年, 既是补充土壤氮库消耗的基础, 也是后茬作物的重要氮素来源^[18], 然而, 过量氮输入超过作物需求和土壤保氮能力, 土壤残留氮极易损失到环境中^[19-21], 特别是在热带高温高湿气候和低碳土壤条件下。利用 ¹⁵N 示踪等技术系统研究氮素在土壤-作物体系中的转化和去向, 是理解土壤转化过程、去向和损失途径的重要方法, 也是制定有针对性的氮素调控措施的前提。

2.1 热带土壤氮素转化过程

利用微宇宙培养试验, 杨钰等^[22]对有机肥改良 4 年的酸性砖红壤 (耕层土壤 pH 由 4.5 提升至 7.0) 进行研究, 发现有机肥改良显著提高了耕层土壤的硝化潜势。随 pH 提高, 氨氧化古菌 (AOA) 和全程氨氧化微生物 (Comammox) 贡献的显著增加是土壤硝化潜势增加的最主要贡献者, 氨氧化细菌 (AOB) 的贡献也有显著提升。这表明, 酸性砖红壤 pH 的提高对土壤氨氧化速率及氨氧化微生物活动均有显著影响, 且这一现象随种植年限增加而加强。尽管砖红壤的 pH 一般低于 5.6, 但经过土壤改良或连续多年投入有机物料 (或有机肥) 后, 有些土壤的 pH 会上升至 6.5 以上, 从而增强了硝化速率, 可能将进一步增加硝化、反硝化损失和 N₂O 的排放; 导致大量施用的尿素态氮转化成了硝态氮, 使硝态氮在土壤剖面不同层次累积、通过径流与淋洗途径损失^[10], 这些机制完全不同于华北强碱性、低有机碳的潮土和少雨的气候特点^[23]。一般认为, 低有机碳土壤 (“瘦”) 的氮滞留能力低, 不利于土壤无机氮的保持, 通过施用有机肥等改良措施可以提高土壤氮固持能力并减少氮损失^[24]。但我们对砖红壤有

机物介导的土壤 pH 和地力提升对氮素转化和损失途径的认识还不深入, 特别是导致的氨氧化微生物、反硝化微生物丰度和群落组成的变化还缺乏深入研究。

早期对土壤氮素转化的研究多采用净转化速率方法, 反映某一形态氮含量的净变化量, 但并不能定量引起该种形态氮含量变化的实际速率。随着 ¹⁵N 示踪技术与数值分析方法的发展, 实现了对多个氮素初级转化速率的同步定量, 被广泛应用的是 FLUAZ 和 MCMC 数值分析模型^[25-26]。近年研究表明, 由于作物根系吸收和改变土壤通气状况、释放分泌物和招募有益微生物, 均会对土壤氮素转化过程产生影响; 土壤-作物体系的氮矿化、自养和异养硝化、硝态氮同化速率显著高于纯土壤培养, 而铵态氮固持受到了作物的抑制^[27]。考虑作物生长的氮素初级转化速率更能解析土壤各氮库周转与作物氮素利用率的直接关系。因此, 研究种植作物下的土壤氮素初级转化速率, 能更好地阐明农田氮素去向及调控措施的效果。利用玉米盆栽试验结合 *Ntracplant* 优化数值模型, 我们初步发现作物和土壤类型能够显著影响土壤氮素初级转化速率 (未发表数据), 未来需要对不同种植年限和管理措施下热带土壤的氮素初级转化速率进行系统研究。

2.2 热带土壤-作物体系氮素损失途径

农田氮素损失包括气态损失和水文损失 (淋溶和径流), 气态损失主要包括氨 (NH₃)、氧化亚氮 (N₂O) 和氮气 (N₂) 的排放等。明确不同气候-土壤带氮素损失过程及强度是实现气态氮减排的关键。一般认为在高温和碱性土壤 NH₃ 损失严重, 如华北平原潮土和四川碱性紫色土夏玉米季氨挥发损失系数高达 30% 左右^[23, 28]; 低土壤 pH 阻碍了 NH₄⁺ → NH₃ + H⁺ 的化学反应, 通常认为在酸性土壤上氨挥发损失较低^[29]。然而, 在海南旱地酸性砖红壤的研究表明, 尿素施用后氨挥发损失率可高达 28%^[30], 我们推测是长期施用有机肥提高酸性土壤的本底 pH, 因为大部分粪肥呈碱性^[31], 或尿素水解消耗土壤氢离子引起短期土壤 pH 升高耦合较高的气温和土壤湿度所致。但目前对热带高温高湿条件下有机肥投入协同 pH 提升促进酸性土壤氨挥发的机制还不清楚。N₂O 是全球三大温室气体之一, 也是平流层臭氧的主要破坏者^[32]。近三十年来, 对我国典型农田

土壤 N_2O 排放通量和产生过程相关的研究取得了较多进展^[33-34]。然而,对我国热带地区土壤 N_2O 、 NO 排放强度及其过程的研究还较薄弱^[35]。Tian 等^[36]发现海南蔬菜田 N_2O 和 NO 排放因子分别为 4.6% 和 0.3%,以上 N_2O 排放因子是政府间气候变化专门委员会 (IPCC) N_2O 排放影子的 4.6 倍。在海南高温高湿条件下,经济作物高氮肥投入,可能会导致 N_2O 和 NO 排放因子增高,其产生过程和作用机制也应有别于其他气候-土壤带,需要进一步对 N_2O 和 NO 排放特征以及高 N_2O 排放的机制进行深入研究。

氮淋溶和径流是氮素随农田水迁移的过程,铵态氮和可溶性有机氮通常被土壤颗粒所吸附,而负电荷的硝态氮极易随水迁移,农田生态系统的氮淋溶和径流多以硝态氮为主^[23]。一般认为南方酸性土壤硝化能力弱^[37],土壤不易生成和积累硝态氮。然而,我们利用深层取样技术,发现海南热带酸性砖红壤土壤剖面高硝态氮累积的现象,例如海南香蕉园 0~4 m 砖红壤硝态氮累积量高达 $\text{N } 1\ 131\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ ^[10],类似结果在红壤关键带也有报道^[38]。这可能与海南砖红壤地区使用石灰、生物炭、有机肥改良酸性土壤和提升肥力,导致土壤微域 pH 增加及其对硝化过程的增强有关。利用径流收集装置,李鹏^[39]发现优化施氮、优化施氮配施生物炭(或硝化抑制剂、脲酶抑制剂、控释尿素)能够显著降低海南典型稻菜轮作体系氮径流,且稻菜轮作体系氮径流中主要成分是氨氮(占比 50%左右),硝态氮占比 11%~22%。尽管优化施氮、优化施氮+生物炭可以同时降低氮径流损失,且效果无显著差异,但优化施氮+生物炭的 N_2O 排放显著低于优化施氮、且生物量显著提高^[39-40]。

2.3 热带土壤氮素调控现状

海南粮食作物、蔬菜和果树化肥氮平均施用量分别为 $\text{N } 226$ 、 470 和 $473\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$,分别高于全国的 $\text{N } 186$ 、 318 、 $393\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$,高氮肥投入导致低氮素利用率和氮素盈余。海南不同种植体系的有机肥氮均低于全国平均水平,肥料氮(有机氮和无机氮肥)投入中,有机肥仅占上述三种作物体系的 4%、20%和 12%^[41]。我们前期在海南土壤-作物体系的研究发现,为了克服砖红壤“瘦、酸、漏”的缺点,农户在种植热带蔬菜和水果前,一般要进行一定程度的土壤改良,施有机肥或用石灰等材料矫正土壤酸化。例如,在火龙果种植前,用桉树皮、羊粪和

生物菌肥混合发酵物,与土壤混合后起宽垄种植。此外,生物炭作为惰性碳土壤改良剂,其施用能提高热带土壤肥力、作物产量和养分累计吸收量,且水稻壳生物炭要优于花生壳生物炭^[42]。尽管土壤增碳有利于氮素固持和持续供应,但在海南高热高湿的气候条件下,有机物料投入是否可能增加反硝化作用导致更高的氮损失和 N_2O 的排放?什么调控措施更适合热带地区高温、高湿的气候及土壤条件,能实现增碳固氮、损失阻控、协调供氮?这些均是亟待研究的重要科学问题。

3 海南热带农田土壤增碳保氮和作物氮素高效利用的调控

3.1 “4R”养分管理策略

氮素调控是为了达到目标产量,提高农产品品质 and 经济效益,并将氮素损失降到最低,同时维持或提高土壤肥力^[43]。氮素调控的首要原则是“4R”养分管理策略^[44-45],即在正确的时间,将正确用量和品种的肥料施在正确的位置上。其中,正确的用量是“4R”养分管理的核心,因为氮素损失随着施氮量增加而呈指数增长^[46]。我国已经在不同气候-土壤带开展了较多的相关研究,得到了不同作物的推荐氮肥用量,如区域平均适宜施氮量^[47]、理论施氮量^[48-49]、养分专家系统^[50]和氮素动态平衡优化管理法^[51]等。

控释氮肥、添加硝化或脲酶抑制剂等缓释氮肥可以提高氮肥利用率,然而,这些增效氮肥的作用效果因气候-土壤而异^[52],如在土壤有机碳和粘粒含量高的土壤,硝化抑制剂会被吸附而削弱其 N_2O 减排效果^[53],脲酶抑制剂在干旱半干旱地区的 NH_3 减排效果优于年降雨量高的地区^[52]。尽管硝化抑制剂在碱性土壤上,能够显著降低硝化速率和减少 N_2O 排放^[54],但也会增加 30%左右的氨挥发损失^[55]。我们在华北潮土的研究结果表明,深施添加硝化抑制剂 DMPP 的尿素,可实现 NH_3 和 N_2O 的协同减排,消除不同措施的“此消彼长”(trade-off)效应^[56]。尽管酸性土壤的硝化速率较低,但在这些土壤上使用硝化抑制剂,也许会产生更好的效果;因为更多氮会以铵 (NH_4^+) 的形态存在,而且酸性条件不会发生强烈的氨挥发、也会降低强降雨下的硝态氮淋

洗与径流。深入研究增效肥料在热带高温高湿条件下不同土壤-作物体系土壤氮素转化迁移过程及作用机制,能够为氮素综合调控措施提供科学依据。

3.2 内稳性地力与土壤增碳保氮

近年研究表明,内稳性地力反映了土壤有机质、养分、团聚结构以及微生物的协同效应,进而决定了作物生长环境的缓冲能力与稳定性。内稳性地力越高,土壤的缓冲性和稳定性越强,对氮素的固持和供应最协调,可持续生产能力越高^[57]。有机碳是组成土壤内稳性地力的核心要素,提高有机碳累积速率最有效的方式是施用外源有机物料,且以能提高土壤有机碳平衡点的物料最佳^[58]。外源有机物输入提高了土壤活性有机碳的积累,并促进了大团聚体的形成,提高团聚体的稳定性指数,从而提升了土壤内稳性地力^[59-60]。长期施用有机物料可以维持分解微生物的高活性,有助于有机碳积累和土壤内稳性地力的提高^[61]。土壤中的微生物从产生到死亡转变成微生物残体整个生命过程中,对土壤有机碳的形成以及周转过程起到关键的作用。微生物通过分解有机残体、合成和分泌有机物,使土壤有机碳形成顺利进行。有研究表明,至少有 50% 的土壤有机碳来源于微生物死亡细胞,即通过微生物作为碳泵而发挥其续埋作用(Entombing effect),从而促进土壤固碳过程^[62]。微生物死亡后产生的有机残体逐渐分解后的中间产物则可以作为胶结物质,参与土壤团聚体的形成过程。施用富含小分子有机碳氮营养的生物激发剂如腐熟有机肥、氨基酸粉和豆科绿肥等,可以通过激发微生物代谢活性并驯化土壤微生物进一步加速土壤有机碳的形成^[57]。同时,生物激发剂中的小分子有机碳(≤ 1 kDa)可有效增强土壤微生物活性,微生物通过菌根网络缠绕作用促进水稳性大团聚体形成,进而增加较大粒径团聚体质量分数,增强土壤团聚体稳定性^[63]。近年研究表明,周转速率较低的稳定土壤有机质(SOM)通常由相对较低分子量的有机碳底物组成,这些底物以溶解有机物的形式进入矿质土壤,并与矿物表面结合称为“矿物结合有机质”(MAOM)^[64],增加了土壤有机碳的稳定性。

有机无机肥料配合施用可显著提高土壤生物活性及微生物介导的生态系统功能,进而促进作物生长和提高农田生产力。如在长期有机无机配施下,土壤养分资源水平较高,显著增加了潜在的跨营养

级生物间互作(增幅超 316%),进而促进农田土壤生物所驱动的碳氮循环、促进作物生长等功能的稳定性^[65]。长期有机肥施用还能改善土壤固氮微生物群落结构及其活性,提高固氮微生物群落稳定性和生物固氮速率^[66];增加香蕉园土壤捕食性原生生物的数量,进而刺激根际土壤中具有抑菌性功能的芽孢杆菌的繁殖和活性,从而促进作物健康^[67]。其他有机碳源投入,如绿肥还田除了提高土壤肥力外,还可以通过重塑微生物群落结构和调节微生物群落网络互作关系等促进农田生态系统多重功能性^[68]。这些研究均表明,有机物料投入可通过调节整体微生物组的组成和跨营养级生物网络的互作,提高农田生态系统功能的稳定性。我们在华北潮土上的定位试验研究表明,长期有机无机氮肥配施的高肥力土壤比单施化学氮肥土壤能够抵御不利生长条件,如干旱和极端降雨等,并具有较高的作物生产力稳定性等^[69],这些均可能与有机肥施用调控了土壤微生物组成和及其功能稳定性密切相关。在微观层面上,根际微生物也可通过分泌植物生长素、脂壳聚糖、酰基高丝氨酸内酯(AHLs)、铁载体等小分子物质直接或间接地影响植物生长和对氮素的吸收^[70]。

通过施用有机物料(如秸秆、有机肥、生物炭等)、激发剂结合“4R”氮肥管理技术的碳氮耦合措施可以提高土壤内稳性地力,达到“增碳保氮”的目的(可称之为“4R Plus”)。土壤氮素固持-矿化是其氮素保持-供应的重要机制,长期施用有机物料,不仅提高了土壤有机碳和全氮含量,还能提高土壤固持-矿化周转速率,为作物生长提供足够的无机态氮,也能将无机态氮固持到有机氮库中,避免其损失^[44, 71-72]。利用¹⁵N示踪表明,长期有机无机配施的高肥力土壤,在作物生长前期可通过强烈同化作用减少施入的化肥氮损失,在作物生长后期氮素需求旺盛时能够释放同化的肥料氮,使土壤供氮和作物需氮在时空上更匹配,提高了作物从肥料和土壤中吸收氮素的协调能力^[73-75]。

3.3 增碳保氮、碳氮耦合、损失阻控与协调供氮的技术途径

我国在不同气候-土壤带开展了大量的土壤有机碳提升定位试验,结果表明,在高温高湿的热带气候条件下,土壤有机质周转较快、损失高,土壤固碳效率低于温带和亚热带地区^[76]。热带酸性砖红

壤和水稻土较低的土壤有机碳累积速率严重限制了土壤保氮和协调供氮的性能。据此，我们提出了热带土壤增碳保氮和协调作物氮素高效利用的解决方案（图2）。采用惰性有机物料如高 C/N 比秸秆、生物炭等，富含小分子有机碳氮的生物激发剂如生物有机肥、氨基酸粉、绿肥等相结合的有机碳氮组合措施，增强土壤微生物生物量碳氮、代谢活性，提高土壤碳平衡点，促进大团聚体碳氮稳定性，实现

“增碳保氮、碳氮耦合、损失阻控、协调供氮”，并通过调节土壤生物跨营养级网络互作关系及与作物的相互作用，协调作物氮素高效利用、减少损失。也应聚焦不同功能有机物料对土壤氮素转化和去向的调控作用”。因此，亟需对热带高温高湿土壤有机碳积累提升内稳性地力，从而增强氮素持留能力、协调作物氮素高效利用的过程及机制进行深入系统研究。

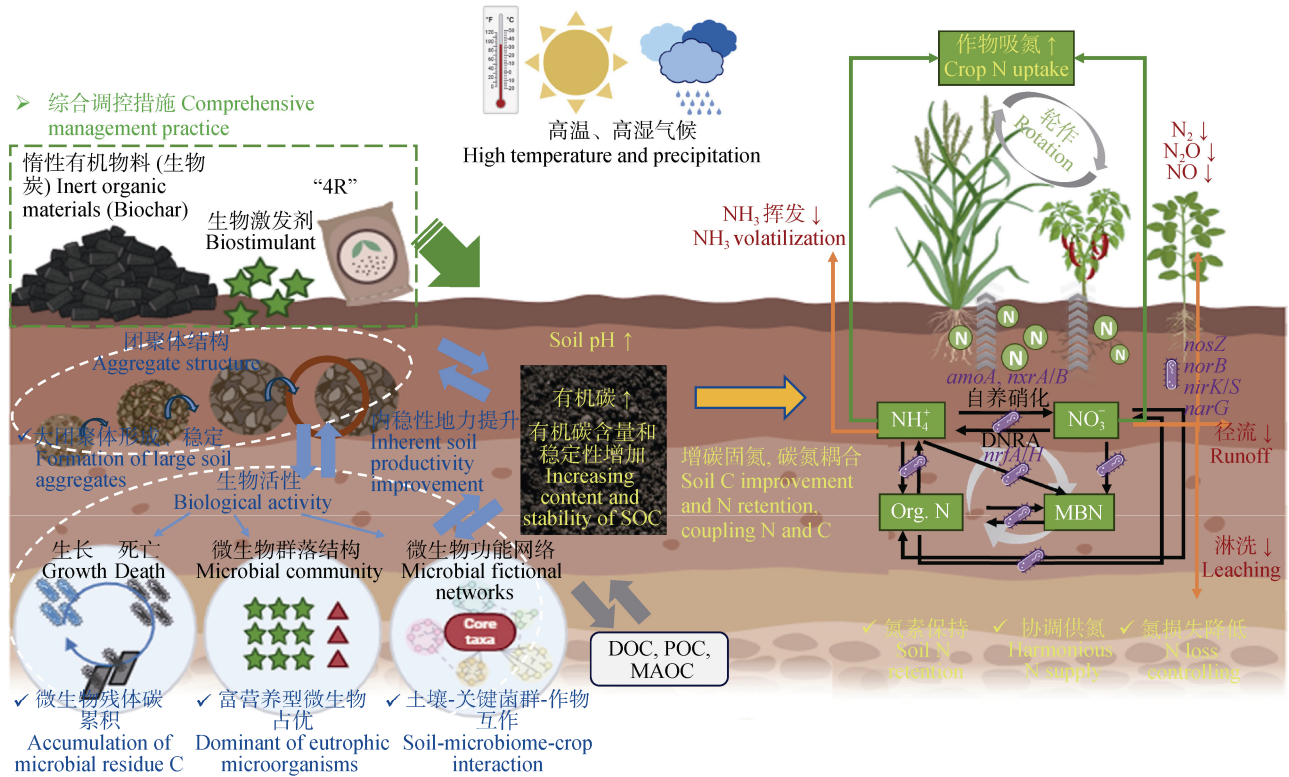


图2 热带土壤“增碳保氮、碳氮耦合、损失阻控、协调供氮”的作物氮素高效利用概念图

Fig. 2 The concept of “increasing C to retain N, coupling C and N, controlling losses, and coordinating N supply” for increasing N use efficiency in tropical soils

4 总结与展望

综上所述，热带土壤普遍存在“瘦、酸、漏”的特点，导致农田单位面积化肥施用量大、径流与淋溶作用强、养分损失严重，是热带作物生产面临的重大难题和技术瓶颈。海南热带酸性砖红壤和水稻土有机碳含量低，高温、强降雨的气候条件不利于土壤氮素的保持，以生产高附加值热带水果和冬季蔬菜为主，土壤障碍因素并存，农田氮肥投入量大、氮素利用率低、氮素损失严重、环境影响大。热带高温高湿环境下，有机碳氮的分解和转化速率

加快，土壤有机碳累积速率严重限制了土壤保氮和协调供氮的性能，导致土壤氮素转化驱动的保氮、供氮与氮损失耦合过程与关联机制显著不同于温带和亚热带气候-土壤带。采用基于“4R”的氮素优化管理措施，通过惰性有机物料及富含小分子有机碳氮相结合的有机碳氮组合措施，能够促进大团聚体碳氮稳定性，“增碳固氮”和协调作物氮素高效利用、减少损失。亟待对海南热带农田土壤氮素转化迁移、损失途径、阻控机制及调控措施开展应用基础研究、形成系统的科学认知和调控原理。尤其需要关注有机物介导的土壤地力提升和酸化治理对砖红壤氮素

转化特征的影响、酸性土壤高氨排放和深层剖面高硝态氮累积机制、有机物料投入对氧化亚氮排放的影响等方面。对海南热带农田土壤氮素循环及环境效应的系统研究,能够深入理解全球不同气候-土壤带氮素生物地球化学循环机制,并为全球热带土壤-作物体系的氮素优化管理提供科学基础。

参考文献 (References)

- [1] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions[J]. *Science*, 2008, 320 (5878): 889—892.
- [2] Kanter D R, Bartolini F, Kugelberg S, et al. Nitrogen pollution policy beyond the farm[J]. *Nature Food*, 2020, 1 (1): 27—32.
- [3] Cai S, Zhao X, Pittelkow C M, et al. Optimal nitrogen rate strategy for sustainable rice production in China[J]. *Nature*, 2023, 615 (7950): 73—79.
- [4] Chen X, Cui Z, Fan M, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. *Nature*, 2014, 514 (7523): 486—489.
- [5] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving n management in intensive chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106 (9): 3041—3046.
- [6] Zhu X, Zhou P, Miao P, et al. Nitrogen use and management in orchards and vegetable fields in China: Challenges and solutions[J]. *Frontiers of Agricultural Science & Engineering*, 2022, 9 (3): 386—395.
- [7] Xu Q, Dong Y, Wang Y, et al. Determinants and identification of the northern boundary of China's tropical zone[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28: 31—45.
- [8] The People's Government of Hainan Province. Series of commentaries on heeding the general secretary's guidance: Building a moderately prosperous society hinges on the well-being of rural compatriots[EB/OL]. [2025-03-02] <https://www.hainan.gov.cn/hainan/ljzsjzt/4e014712d0ab4c6aa3463ccd118b44f4.shtml>. [海南省人民政府. 牢记总书记嘱托系列述评: 小康不小康 关键看老乡[EB/OL]. [2025-03-02] <https://www.hainan.gov.cn/hainan/ljzsjzt/4e014712d0ab4c6aa3463ccd118b44f4.shtml>.]
- [9] Li T, Hong X, Liu S, et al. Cropland degradation and nutrient overload on Hainan Island: A review and synthesis[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 313: 120100.
- [10] Zhao Y J, Zhang B F, Zhang C, et al. Nitrogen and phosphorus surplus and soil nitrate nitrogen accumulation in typical rice-vegetable rotation and banana garden in Hainan[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56 (15): 2954—2965. [赵永鉴, 张博飞, 张翀, 等. 海南典型稻菜轮作区和香蕉园氮磷盈余及土壤硝态氮累积[J]. *中国农业科学*, 2023, 56 (15): 2954—2965.]
- [11] Qi Z P, Wang D F, Wei Z Y. Soil Series of China: Hainan[M]. Beijing: Science Press, 2018: 3—5. [智智平, 王登峰, 魏志远. 中国土系志·海南卷[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 3—5.]
- [12] Song C Y, Zhang J J, Liu L, et al. Spatial and temporal characteristics of agricultural green development indicators in Hainan Island[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28 (8): 1156—1167. [宋晨阳, 张建杰, 刘玲, 等. 海南岛农业绿色发展指标时空变化特征[J]. *中国生态农业学报*, 2020, 28 (8): 1156—1167.]
- [13] Jiang S P, Zhang R L, Zhang W L, et al. Spatial and temporal variation of soil organic matter and cause analysis in Hainan Island in recent 30 years[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52 (6): 1032—1044. [姜赛平, 张认连, 张维理, 等. 近 30 年海南岛土壤有机质时空变异特征及成因分析[J]. *中国农业科学*, 2019, 52 (6): 1032—1044.]
- [14] Zhang P, Ruan H, Dai P, et al. Spatiotemporal river flux and composition of nutrients affecting adjacent coastal water quality in Hainan Island, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 591: 125293.
- [15] Huang H, Chen Z, Huang L T. Status of coral reefs in China (2019-2020) [M]. Beijing: Ocean Press, 2021. [黄晖, 陈竹, 黄林韬. 中国珊瑚礁状况报告 (2019-2020) [M]. 北京: 海洋出版社, 2021.]
- [16] Gu B, Ju X, Chang J, et al. Integrated reactive nitrogen budgets and future trends in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112 (28): 8792—8797.
- [17] Zhang X, Zou T, Lassaletta L, et al. Quantification of global and national nitrogen budgets for crop production[J]. *Nature Food*, 2021, 2 (7): 529—540.
- [18] Yan M, Pan G, Lavallee J M, et al. Rethinking sources of nitrogen to cereal crops[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26 (1): 191—199.
- [19] Sebilo M, Mayer B, Nicolardot B, et al. Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110 (45): 18185—18189.
- [20] van Meter K J, van Cappellen P, Basu N B. Legacy nitrogen may prevent achievement of water quality goals in the Gulf of Mexico[J]. *Science*, 2018, 360 (6387): 427—430.
- [21] Wang Y Y, Xia L L, Cai S Y, et al. Long-term fate and availability of residual fertilizer nitrogen in rice-wheat cropping system in Taihu Lake region of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 (6): 1626—1639. [王盈

- 盈, 夏龙龙, 蔡思源, 等. 长期不施氮肥下稻麦轮作农田残留化肥氮的后效及去向[J]. 土壤学报, 2022, 59 (6): 1626—1639.]
- [22] Yang Y, Zhao Y J, Song X T, et al. Relative contribution of ammonia-oxidizing microorganisms to nitrous oxide emissions in upland agricultural soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61 (5): 1398—1409. [杨钰, 赵永鉴, 宋晓桐, 等. 典型旱作农田土壤氧化亚氮排放的氨氧化微生物相对贡献[J]. 土壤学报, 2024, 61 (5): 1398—1409.]
- [23] Ju X T, Zhang C. Nitrogen cycling and environmental impacts in upland agricultural soils in north China: A review[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16 (12): 2848—2862.
- [24] Dai S Y, Wang J, Cheng Y, et al. Effects of long-term fertilization on soil gross N transformation rates and their implications[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16 (12): 2863—2870.
- [25] Mary B, Recous S, Robin D. A model for calculating nitrogen fluxes in soil using N-15 tracing[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1998, 30 (14): 1963—1979.
- [26] Müller C, Rütting T, Kattge J, et al. Estimation of parameters in complex ¹⁵N tracing models by Monte Carlo sampling[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39 (3): 715—726.
- [27] He X, Chi Q, Cai Z, et al. ¹⁵N tracing studies including plant N uptake processes provide new insights on gross N transformations in soil-plant systems[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2020, 141: 107666.
- [28] Zhang C, Han X Y, Li X Q, et al. Ammonia volatilization in winter wheat/summer maize rotation system of purple soil in hilly area of Central Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23 (11): 1359—1366. [张翀, 韩晓阳, 李雪倩, 等. 川中丘陵区紫色土冬小麦/夏玉米轮作氨挥发研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23 (11): 1359—1366.]
- [29] Huang S, Lv W, Bloszies S, et al. Effects of fertilizer management practices on yield-scaled ammonia emissions from croplands in China: A meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2016, 192: 118—125.
- [30] Wang D P, Du Y H, Luo X H, et al. Characteristics of ammonia volatilization under different nitrogen managements in red latosol of rubber plantation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27 (4): 685—691. [王大鹏, 杜玉赫, 罗雪华, 等. 橡胶林下砖红壤不同氮肥处理氨挥发特征[J]. 生态环境学报, 2018, 27 (4): 685—691.]
- [31] Howe J A, Mcdonald M D, Burke J, et al. Influence of fertilizer and manure inputs on soil health: A review [J]. Soil Security, 2024, 16: 100155.
- [32] Ravishankara A R, Daniel J S, Portmann R W. Nitrous oxide (N₂O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century[J]. Science, 2009, 326 (5949): 123—125.
- [33] Lin Y, Ding W, Liu D, et al. Wheat straw-derived biochar amendment stimulated N₂O emissions from rice paddy soils by regulating the amoA genes of ammonia-oxidizing bacteria[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2017, 113: 89—98.
- [34] Wei H, Song X, Liu Y, et al. In situ ¹⁵N-N₂O site preference and O₂ concentration dynamics disclose the complexity of N₂O production processes in agricultural soil[J]. Global Change Biology, 2023, 29 (17): 4910—4923.
- [35] Albanito F, Lebender U, Cornulier T, et al. Direct nitrous oxide emissions from tropical and sub-tropical agricultural systems - A review and modelling of emission factors[J]. Scientific Reports, 2017, 7 (1): 44235.
- [36] Tian W, Liang F, Tu L, et al. Mineral fertilizer substitution and application of *Bacillus velezensis* SQR9 reduced nitrogen-oxide emissions in tropical vegetable fields[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2025, 384: 109554.
- [37] Zhu G, Song X, Ju X, et al. Gross n transformation rates and related N₂O emissions in Chinese and UK agricultural soils[J]. Science of the Total Environment, 2019, 666: 176—186.
- [38] Yang S, Wu H, Dong Y, et al. Deep nitrate accumulation in a highly weathered subtropical critical zone depends on the regolith structure and planting year[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54 (21): 13739—13747.
- [39] Li P. Study on Nitrogen and phosphorus runoff loss processes in agricultural fields of typical crop systems in Hainan[D]. Haikou: Hainan University, 2018. [李鹏. 海南典型作物体系农田氮磷径流流失过程研究[D]. 海口: 海南大学, 2018.]
- [40] Qin Y, Tian X, Du J Y, et al. Effects of different fertilization regimes on nitrous oxide emissions from a tropical pepper cropping system in Hainan[J/OL]. Journal of Agro-Environment Science, 1-22[2025-06-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20250306.1755.002.html>. [秦雨, 田雪, 杜佳瑶, 等. 不同施肥措施对海南热带辣椒体系土壤氧化亚氮排放的影响[J/OL]. 农业环境科学学报, 1-22[2025-06-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20250306.1755.002.html>.]
- [41] Hong X Y, Zhong Y X, Li W F, et al. Nutrient balance in farmlands and the resulting environmental risk in Hainan Province[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28 (11): 2070—2081. [洪秀杨, 钟于秀, 李伟芳, 等. 海南农田养分平衡状况及环境风险评价[J]. 植物营养与肥科学报, 2022, 28 (11): 2070—2081.]

- [42] Hou G Q, Cheng W X, Shao X J, et al. Effect of biochar on the growth, nutrient accumulation and yield of maize in the tropics after three years of application[J]. *Journal of Tropical Biology*, 2025, 16(3): 379—388. [侯广庆, 程文肖, 邵徐杰, 等. 生物炭施入三年后对热带地区玉米生长发育和产量的影响[J]. *热带生物学报*, 2025, 16(3): 379—388.]
- [43] Ju X T, Zhang C. The principles and indicators of rational N fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(1): 1—13. [巨晓棠, 张翀. 论合理施氮的原则和指标[J]. *土壤学报*, 2021, 58(1): 1—13.]
- [44] Grandy A S, Daly A B, Bécu T, et al. A microbial framework for nitrogen cycling solutions in agroecosystems[J]. *One Earth*, 2024, 7(12): 2103—2107.
- [45] International Fertilizer Industry Association. The Global 4R Nutrient Stewardship Framework for Developing and Delivering Fertilizer Best Management Practices[EB/OL]. [2025-03-02] <https://www.fertilizer.org/resource/the-global-4r-nutrient-stewardship-framework-for-developing-and-delivering-fertilizer-best-management-practices/>.
- [46] Cui Z, Zhang H, Chen X, et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers[J]. *Nature*, 2018, 555(7696): 363—366.
- [47] Zhu Z L. On the methodology of recommendation for the application rate of chemical fertilizer nitrogen to crops[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(1): 1—4. [朱兆良. 推荐氮肥适宜施用量的方法论争议[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(1): 1—4.]
- [48] Ju X T, Christie P. Calculation of theoretical nitrogen rate for simple nitrogen recommendations in intensive cropping systems: A case study on the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2011, 124(3): 450—458.
- [49] Ju X T. Improvement and validation of theoretical N rate (TNR) —Discussing the methods for N fertilizer recommendation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(2): 249—261. [巨晓棠. 理论施氮量的改进及验证——兼论确定作物氮肥推荐量的方法[J]. *土壤学报*, 2015, 52(2): 249—261.]
- [50] He P, Jin J Y, Mirasol F P, et al. Approach and decision support system based on crop yield response and agronomic efficiency[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(2): 499—505. [何萍, 金继运, Mirasol F Pampolino, 等. 基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 499—505.]
- [51] Yin Y L, Zhao R F, Yang Y, et al. A steady-state N balance approach for sustainable smallholder farming[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(39): e2106576118.
- [52] Li T, Zhang W, Yin J, et al. Enhanced-efficiency fertilizers are not a panacea for resolving the nitrogen problem[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(2): e511—e521.
- [53] Zhu G D, Ju X T, Zhang J B, et al. Effects of the nitrification inhibitor DMPP (3, 4-dimethylpyrazole phosphate) on gross N transformation rates and N₂O emissions[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, 55(6): 603—615.
- [54] Liu S Y, Wu D, Ju X T, et al. Nitrification inhibitor induced microbial NH₄⁺-N immobilization improves maize nitrogen use efficiency in strong ammonia oxidation soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2025, 202: 109687.
- [55] Wu D, Zhang Y, Dong G, et al. The importance of ammonia volatilization in estimating the efficacy of nitrification inhibitors to reduce N₂O emissions: A global meta-analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 271: 116365.
- [56] Zhang C, Song X T, Zhang Y Q, et al. Using nitrification inhibitors and deep placement to tackle the trade-offs between NH₃ and N₂O emissions in global croplands[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(14): 4409—4422.
- [57] Zhang J B. Improving inherent soil productivity underpins agricultural sustainability[J]. *Pedosphere*, 2023, 33(1): 3—5.
- [58] Xin X, Zhang J, Zhu A, et al. Effects of long-term (23 years) mineral fertilizer and compost application on physical properties of fluvo-aquic soil in the North China Plain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 156: 166—172.
- [59] Peng X, Zhu Q, Zhang Z, et al. Combined turnover of carbon and soil aggregates using rare earth oxides and isotopically labelled carbon as tracers[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2017, 109: 81—94.
- [60] Zhang X, Xin X, Zhu A, et al. Effects of tillage and residue managements on organic C accumulation and soil aggregation in a sandy loam soil of the North China Plain[J]. *Catena*, 2017, 156: 176—183.
- [61] Ye Z, Li J, Wang J, et al. Diversity and co-occurrence network modularization of bacterial communities determine soil fertility and crop yields in arid fertigation agroecosystems[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2021, 57(6): 809—824.
- [62] Liang C, Amelung W, Lehmann J, et al. Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(11): 3578—3590.
- [63] Wang Y. Effect of different molecular weights organic carbon on the formation of soil aggregates[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018. [王越. 不同分子量有机碳施加对土壤团聚体形成影响研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.]
- [64] Sokol N W, Sanderman J, Bradford M A. Pathways of mineral-associated soil organic matter formation:

- Integrating the role of plant carbon source, chemistry, and point of entry[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25 (1): 12—24.
- [65] Zhu L Y, Chen Y, Sun R B, et al. Resource-dependent biodiversity and potential multi-trophic interactions determine belowground functional trait stability[J]. *Microbiome*, 2023, 11 (1): 95.
- [66] Shi W, Zhao H Y, Chen Y, et al. Organic manure rather than phosphorus fertilization primarily determined asymbiotic nitrogen fixation rate and the stability of diazotrophic community in an upland red soil[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 319: 107535.
- [67] Guo S, Tao C Y, Jousset A, et al. Trophic interactions between predatory protists and pathogen-suppressive bacteria impact plant health[J]. *ISME Journal*, 2022, 16 (8): 1932—1943.
- [68] Zeng Q, Yin M, Fu L B, et al. Green manure substitution for potassium fertilizer promotes agro-ecosystem multifunctionality via triggering interactions among soil, plant and rhizosphere microbiome[J]. *Plant and Soil*, 2024, 498 (1/2): 431—450.
- [69] Tian X, Zhang C, Ju X T. Crop responses to application of optimum nitrogen fertilizers on soils of various fertilities formed from long-term fertilization regimes[J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 148: 126857.
- [70] Peng J, Oladele O, Song X, et al. Opportunities and approaches for manipulating soil-plant microbiomes for effective crop nitrogen use in agroecosystems[J]. *Frontier of Agricultural Science and Engineering*, 2022, 9: 333—343.
- [71] Wang J, Zhu B, Zhang J, et al. Mechanisms of soil N dynamics following long-term application of organic fertilizers to subtropical rain-fed purple soil in China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 91: 222—231.
- [72] Zhang C, Ju X, Zhang J, et al. Soil pH and long-term fertilization affect gross N transformation and N₂O production pathways in Chinese and UK croplands[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2023, 59 (5): 527—539.
- [73] Liang B, Yang X Y, Murphy D V, et al. Fate of ¹⁵N-labeled fertilizer in soils under dryland agriculture after 19 years of different fertilizations[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49 (8): 977—986.
- [74] Liang B, Zhao W, Yang X Y, et al. Fate of nitrogen-15 as influenced by soil and nutrient management history in a 19-year wheat-maize experiment[J]. *Field Crops Research*, 2013, 144: 126—134.
- [75] Zhang C, Rees R M, Ju X T. Fate of ¹⁵N-labelled urea when applied to long-term fertilized soils of varying fertility[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2021, 121 (2/3): 151—165.
- [76] Xu M G, Zhang W J, Yang X Y, et al. Theory and practice of soil organic matter improvement in cropland[M]. Beijing: Science Press, 2022. [徐明岗, 张文菊, 杨学云, 等. 农田土壤有机质提升理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2022.]

(责任编辑：陈德明)