



Views & Comments

碳中和愿景下中国可持续农田土壤修复路径

李芳柏^a, 方利平^a, 吴丰昌^b^a National-Regional Joint Engineering Research Center for Soil Pollution Control and Remediation in South China, Guangdong Key Laboratory of Integrated Agro-Environmental Pollution Control and Management, Institute of Eco-Environmental and Soil Sciences, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China^b State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

1. 引言

农田土壤污染威胁土壤健康、粮食生产安全及其粮食供给能力, 已经成为实现全球零饥饿目标的主要障碍[1]。尤其在当前全球紧张局势下, 粮食短缺问题持续加剧。包括联合国环境规划署 (UNEP) 和联合国粮食及农业组织 (FAO) 在内的国际组织就“解决土壤污染问题”达成共识, 提高了全球对土壤污染威胁的认识。前期土壤普查显示, 我国数百万公顷农田土壤存在镉、砷、汞、铬、铅等重 (类) 金属污染问题, 导致年均水稻产量损失超过 1000 万吨[2]。在过去几十年里, 我国用仅占世界 9% 的土地保障了世界四分之一人口的粮食需求, 创造了史无前例的奇迹。然而, 土壤污染正成为 21 世纪面对日益增长的粮食需求的新挑战。2016 年, 我国发布了土壤污染防治行动计划, 旨在扭转土壤污染加剧的局面。与起步较早的建设用地修复技术相比, 农田土壤修复技术面临的挑战是空前的。“十三五”期间, 以全国土壤普查为基础, 在全国尤其是南方地区广泛开展了大规模的示范应用, 投入大量资金, 积累了一定实践经验, 但仍然面临诸多技术难题。此外, 我国为应对气候变化, 提出“双碳”目标, 即碳达峰、碳中和, 并力求实现与国家多个战略目标的协同[3]。但大面积农田土壤修复过程中产生大量能源和资源消耗, 加剧碳排放, 难以匹配“双碳”战略, 可持续性不

足。而从另一方面来说, 农用地土壤是陆地生态系统碳库的重要组成部分, 若能充分挖掘其碳汇潜能, 实现碳封存和固定, 则有望推动土壤污染治理与“双碳战略”的协同。

本文从土壤-作物系统中关键元素的生物地球化学循环出发, 介绍了农田土壤修复中重 (类) 金属调控的基本原理 (图 1), 进一步分析了潜在土壤污染修复技术, 促进了粮食生产安全、土壤质量改善和碳减排/碳封存等多目标协同 (图 1)。基于全生命周期理论, 引入可持续性评估和碳足迹分析框架, 为相关土壤污染修复的政策决策者以及实践者提供理论依据 (图 2)。

2. 探索土壤-作物系统污染物迁移转化的生物地球化学驱动力

我们对土壤中重金属环境行为的认识, 主要停留在矿物吸附固定的物理化学机制层面, 直接采用基于棕地土壤修复的化学稳定、酸碱中和等方法。例如, 石灰、硅钙材料作为一类低成本的土壤调理剂, 被广泛应用于我国农田土壤镉污染修复示范实践中, 有效缓解了我国酸性土壤区的农产品镉超标问题。然而, 尽管这种“末端消除”的技术可快速、有效地降低土壤镉的有效性, 但往往面临着酸度反弹、土壤质量退化、次生环境风险 (如活化砷) 等问

题。其原因主要源于我们对农田土壤重金属的生物地球化学行为的认知不足，从过程解析到修复技术构建的系统性认识也不够（图1），忽略了影响土壤重（类）金属迁移转化的核心驱动力。

从土壤生物地球化学的角度来看，铁作为红壤中的特征元素，以铁矿物的形态存在，是土壤污染物的主要载体，并在微生物作用下（即铁循环），在驱动土壤中生命元素和重金属迁移转化等过程中发挥着关键作用[4-5]。前期研究表明，在排水阶段稻田土壤中微生物胞外呼吸生成的亚铁的氧化、水解过程是质子产生的主要贡献者，从而导致土壤产酸，这也是难以通过硅钙质材料的“末端消除”策略彻底解决的主因[6]。当前，一种潜在的替代策略是通过微生物厌氧亚铁氧化和硝酸盐还原过程耦合，即通过硝酸盐还原有效清除亚铁氧化产生的过量质子[4,7]。更为重要的是，微生物硝酸盐还原可以激活砷氧化微生物（如 *Pseudogulbenkiania*），促进亚砷酸氧化，从而降低其在厌氧环境下的移动性[8]。腐殖质也能通过加速电子转移参与到这些生物地球化学过程中，是决定上述生物地球化学过程耦合的热力学和动力学的重要因子。事实上，研究发现微生物驱动的铁循环还决定着土壤中的碳固定或矿化，如异化铁还原与有机碳矿化及甲烷减排[9]、Fe(II)氧化与碳同化（即二氧化碳固定）[10]。在未来的工程实践中，上述耦合过程在同步实现碳封存和重金属污染治理方面可挥发较大潜力。

此外，我们当前仍然缺乏对重金属从根际吸收到作物可食用部位积累（如大米）过程的充分认识。土壤-作物系统中重（类）金属的迁移转化涉及微生物、化学和生理等多个过程，这种多介质、多界面、多过程的迁移转化特

征显然与棕地土壤有着本质上的差异。需要明确的是，农田土壤修复的最终目标是实现粮食安全生产，因此必须有效阻控污染物从根部吸收、运输到作物可食部位。其中，在污染物从土壤进入水稻根部的过程中，我们发现根表铁膜是阻控重金属进入根细胞的关键。因此，了解铁膜的形成及其对重金属的阻控作用，例如，通过硝酸盐促进亚铁氧化诱导铁膜形成，是阻控根际吸收重（类）金属的关键机制，已经引起学术界广泛关注[11]。

重金属从根部向作物可食用部位积累的吸收、转运涉及多个复杂的生理过程，而元素拮抗机制则发挥着关键作用。研究表明，硅和硒可有效下调镉转运基因 *OsLCT1* 的表达，并显著上调镉在根液泡中积累基因 *OsHMA3* 的表达[12]。近年来，研究人员提出了铁与有机碳配合物可以靶向调控水稻组织中的基因表达，从而实现镉优先积累到叶片，进一步推动了作物重金属生理阻隔新策略的研究[13]。前期的大量研究为农田土壤修复打下了良好的基础，但基于多学科交叉破解农田土壤修复的技术瓶颈仍有极大的研究空间。

3. 展望多目标协同绿色修复技术

如上所述，未来农田土壤修复以多目标协同为核心，因此避免土壤修复过程中产生环境风险是关键。多个研究证实，炭技术在提高土壤质量和固定土壤中的重金属方面具有巨大潜力。事实上，依据《农用地土壤环境质量国家标准》（GB15618—2018），我国红壤地区土壤有机碳严重不足，是当前农田土壤退化的主因，加剧了土壤重金属污染风险[14]。生物质炭逐渐成为农田土壤修复的热门材

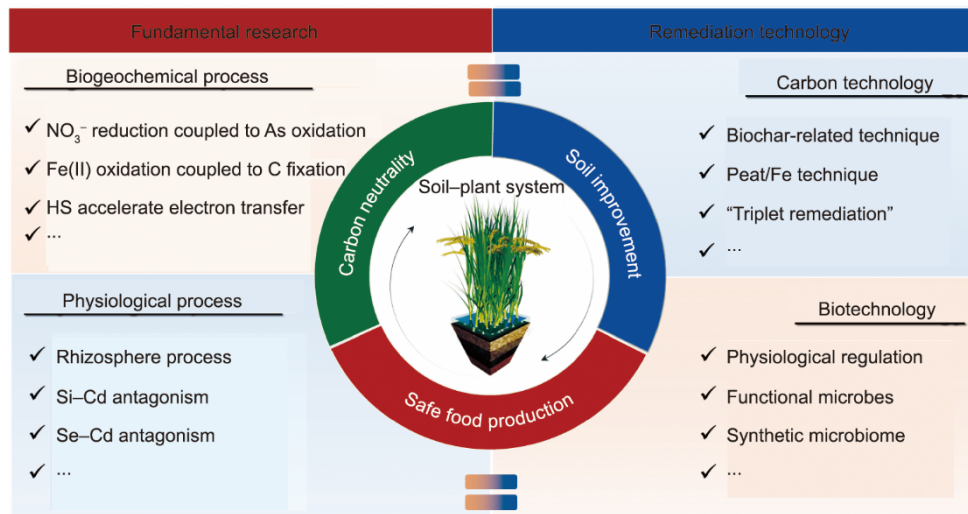


图1. 代表性农田土壤重金属原理与技术。NO₃⁻: 硝酸根; Hs: 腐殖质; C: 碳; Si: 硅; Se: 硒; Fe: 铁; Fe(II): 亚铁。

料，尽管关于其成本与效率的争论仍然存在，但以铁-碳耦合为原理开发的铁改性生物质炭等技术已在我国南方多个土壤示范工程中展示了其潜能[15]。基于硝酸盐还原耦合亚铁氧化的技术原理，铁改性木本泥炭技术已经实现了商业化，并成功应用于田间砷镉同步钝化的试验。以广东省为例，我们测算农业源生物质炭化，并返回农田土壤，每年大约可以封存约900万吨碳，有效减少碳排放。这些持久性有机碳在农田土壤中可同时有效提高碳固定和缓解温室气体（如甲烷）排放。

此外，农作物重金属生理阻隔的纳米技术开始蓬勃发展。研究发现，硅纳米颗粒或量子点可调控水稻对镉的吸收，尤其可降低轻度镉污染农田粮食生产的风险[16]。鉴于硅是重要的生命元素，二氧化硅生理阻隔剂对环境友好，因而得到了广泛应用。然而，这些生理阻隔技术存在效率较低等缺点，往往需要与土壤钝化剂（如生物质炭）结合。因此，我们提出了“三重阻控”的新修复策略，为土壤-作物系统中重金属污染治理提供系统性解决方案，并在稻田重金属污染修复实践中取得了显著成效。但要完全破解我国农田土壤重金（类）属污染的国家需求，仍然面临诸多的挑战。尤其是关于这些技术的可持续性、稳定性等问题，还没有彻底解决。更重要的是，在“双碳”目标愿景下，发展绿色修复技术已经成为一个新命题。例如，研发移动式生物炭生产装备实现生物质田间炭化，从而最大限度地降低运输的能源消耗，是一个重要方向。农业生产附加值往往远低于工业等领域，未来技术研发层面还需要付出更大努力，从而有效降低技术的成效比。

微生物技术作为战略性新兴产业，也吸引了包括土壤修复等多个领域的关注[17]。事实上，基于 Calvin-Benson-Bassham 循环固定二氧化碳的蓝藻和光合自养细菌等自养型微生物在土壤碳平衡中发挥着重要作用[18]，而根瘤菌和地杆菌的土壤固氮在改善土壤质量方面也引起了关注。这些功能微生物还具有与铬和镉等重金属还原固定建立电子传递网络的潜力，如部分脱硫弧菌可以介导硫氧化耦合镉还原。此外，功能微生物对重金属的直接固定或解毒是另一种土壤微生物的修复机制，如亚硝酸盐呼吸型微生物。然而，使用这些单一菌株进行土壤修复时，面临着其余本地物种生态位竞争的问题，导致长效性不佳等问题。针对这一问题，合成生物技术可能是一种潜在的解决工具。此外，稻田周丛生物调控、旱地丛枝菌根共生、植物修复等其他潜在生物技术也为实现土壤碳封存和重金属阻控的协同提供了技术策略选择。

4. 可持续性评估和碳足迹分析辅助的修复技术决策

联合国 17 项可持续发展目标（SDG）中，多个目标相互联系，尤其是 SDG 2：“消除饥饿、实现粮食安全和改善营养、促进可持续农业”和 SDG 11：“应对气候变化”，充分考虑了农业、能源与气候变化之间的协同和平衡。因此，FAO 为了给各国政府官员和其他利益相关者提供一套框架指引，于 2020 年制定了可持续土壤管理（SSM）评估协议，提供了评估土壤功能关键指标的多个实用条款[19]。该协议代表了一种新的转变，即在整个修复过程中使环境、社会、农业和经济效益最大化。基于这一准则，我们前期研究证实了生物质炭对稻田土壤修复的可持续性明显优于石灰质，可实现土壤质量改善和水稻安全生产双重目标的协同[15]。但仅依据成本或效率的单一评估体系往往得到相反的结论，这是忽略了生产/开发和运输过程的负面环境等影响所导致的。此外，土壤修复过程的碳足迹分析是可持续性评估的重要补充，必须与其相结合应用（图 2），从而实现碳减排（SDG 11）与粮食生产（SDG 2）的可持续目标的协同。因此，建立全生命周期农田土壤修复可持续性评估框架是至关重要的，可为政府监管、市场管理、技术选择决策提供重要参考。

总之，农田土壤修复作为我国生态领域的第三大行动计划，即《土壤污染防治行动计划》的重要内容，是人类历史上史无前例的民生工程，还面临着诸多挑战。“十三五”期间取得的成功经验为有效遏制农田土壤污染持续恶化打下了良好的基础，我们还需进一步总结经验。土壤修复技术的创新应考虑到农田的基本特征，故需根据土壤-作物系统重金属多种介质、多界面、多过程的基本原理，以粮食安全生产、土壤质量提升、碳中和多目标协同为根本原则，并有必要在规模化应用之前，对潜在技术进行系统评估与筛选。此外，农田土壤修复还面临着许多其他问题，例如，区域农田土壤存在异质性，需要针对不同类型污染土壤制定针对性策略。

另外，我们还需要构建完善的治理技术标准体系，推动技术的大规模化应用。农田土壤污染修复的基础理论已初具雏形，未来需要来自环境化学、生物学和地球化学等多个学科的科学家长期持续合作。本文旨在为重金属污染农田土壤绿色、可持续修复的实现提供一定的参考，从而支撑国家土壤污染行动计划的有效实施。

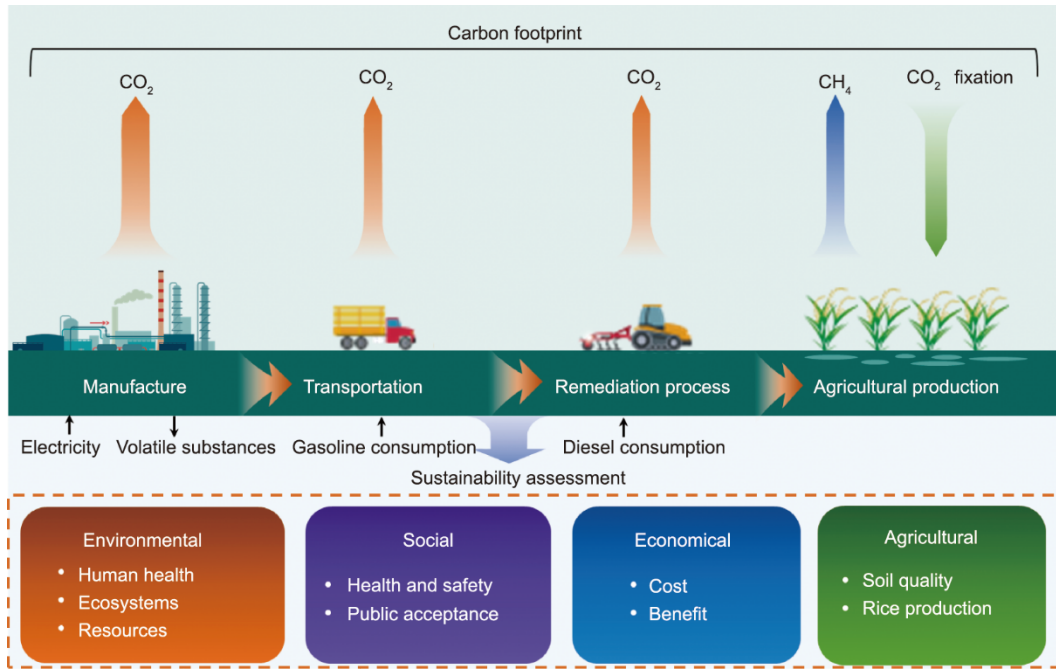


图2. 可持续性评估和碳足迹分析的概念框架。

致谢

本研究得到国家自然科学基金项目(42030702)和广东省科学院项目(2019GDASYL-0102006, 2019GDASYL-0301002)的资助。

References

- [1] FAO. Global assessment of soil pollution—summary for policy makers. Report. Rome: FAO; 2020.
- [2] Xu J, Meng J, Liu X, Shi J, Tang X. Control of heavy metal pollution in farmland of China in terms of food security. *Bull Chin Acad Sci* 2018;33:153–9. Chinese.
- [3] Wei Y, Chen K, Kang J, Chen W, Wang X, Zhang X. Policy and management of carbon peaking and carbon neutrality: a literature review. *Engineering* 2022;14:52–63.
- [4] Kappler A, Bryce C, Mansor M, Lueder U, Byrne JM, Swanner ED. An evolving view on biogeochemical cycling of iron. *Nat Rev Microbiol* 2021; 19(6): 360–74.
- [5] Feng Y, Delgado-Baquerizo M, Zhu Y, Han X, Han X, Xin X, et al. Responses of soil bacterial diversity to fertilization are driven by local environmental context across China. *Engineering* 2022;12:164–70.
- [6] Gao B, Chen Q, Liu K, Li F, Fang L, Zhu Z, et al. Biogeochemical Fe(II) generators as a new strategy for limiting Cd uptake by rice and its implication for agricultural sustainability. *Sci Total Environ* 2022;820:153306.
- [7] Li X, Zhang W, Liu T, Chen L, Chen P, Li F. Changes in the composition and diversity of microbial communities during anaerobic nitrate reduction and Fe(II) oxidation at circumneutral pH in paddy soil. *Soil Biol Biochem* 2016;94:70–9.
- [8] Li X, Qiao J, Li S, Häggblom MM, Li F, Hu M. Bacterial communities and functional genes stimulated during anaerobic arsenite oxidation and nitrate reduction in a paddy soil. *Environ Sci Technol* 2020;54(4):2172–81.
- [9] Weiss JV, Emerson D, Megonigal JP. Rhizosphere Iron(III) deposition and reduction in a *Juncus effusus* L.-dominated wetland. *Soil Sci Soc Am J* 2005; 69(6):1861–70.
- [10] Tong H, Zheng C, Li B, Swanner ED, Liu C, Chen M, et al. Microaerophilic oxidation of Fe(II) coupled with simultaneous carbon fixation and As(III) oxidation and sequestration in karstic paddy Soil. *Environ Sci Technol* 2021; 55(6):3634–44.
- [11] Wang X, Yu HY, Li F, Liu T, Wu W, Liu C, et al. Enhanced immobilization of arsenic and cadmium in a paddy soil by combined applications of woody peat and Fe(NO₃)₃: possible mechanisms and environmental implications. *Sci Total Environ* 2019;649:535–43.
- [12] Cui J, Liu T, Li Y, Li F. Selenium reduces cadmium uptake into rice suspension cells by regulating the expression of lignin synthesis and cadmium-related genes. *Sci Total Environ* 2018;644:602–10.
- [13] Wang X, Du Y, Li F, Fang L, Pang T, Wu W, et al. Unique feature of Fe-OM complexes for limiting Cd accumulation in grains by target-regulating gene expression in rice tissues. *J Hazard Mater* 2022;424:127361.
- [14] Ministry of Ecological Environment of the People's Republic of China. GB 15618—2018: soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land. Chinese standard. Beijing: Standards Press of China; 2018. Chinese.
- [15] Liu K, Fang L, Li F, Hou D, Liu C, Song Y, et al. Sustainability assessment and carbon budget of chemical stabilization based multiobjective remediation of Cd contaminated paddy field. *Sci Total Environ* 2022;819:152022.
- [16] Liu C, Li F, Luo C, Liu X, Wang S, Liu T, et al. Foliar application of two silica sols reduced cadmium accumulation in rice grains. *J Hazard Mater* 2009; 161(2–3): 1466–72.
- [17] Du J, Ma L, Ma A, Liu L, Yu Q, Wu Q. Development strategy of microbial industry in China. *Strateg Study Chin Acad Eng* 2021;23(5):51–8.
- [18] Nanba K, King GM, Dunfield K. Analysis of facultative lithotroph distribution and diversity on volcanic deposits by use of the large subunit of ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase. *Appl Environ Microbiol* 2004; 70(4): 2245–53.
- [19] FAO. Protocol for the assessment of sustainable soil management Report. Rome: FAO; 2020.