

覆膜联合叶面肥对镉污染土壤修复效果研究

杨鑫¹, 陶慧玲¹, 刘春香², 许燮³, 胡鹏², 李剑灵², 张晨光⁴, 廖继华⁵

¹安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

²新余市渝水区农业科学研究中心, 江西 新余

³淮南市生态环境局, 安徽 淮南

⁴武汉奥恒胜科技有限公司, 湖北 武汉

⁵江西省新余市仙女湖风景名胜区农村工作局, 江西 新余

收稿日期: 2026年7月15日; 录用日期: 2026年8月10日; 发布日期: 2026年8月18日

摘要

农田原位农艺调控措施具有操作简便、成本低廉、适合大面积推广等优势, 是实现中轻度镉(Cd)污染农田安全利用的重要途径。为探明覆膜(FM)、叶面肥(YMF)及其组合措施对酸性Cd污染农田土壤pH、土壤有效态Cd、作物产量及籽粒Cd积累的调控效应, 本试验设置对照(CK)、覆膜(FM)、叶面肥(YMF)、覆膜配施叶面肥(FM + YMF) 4个处理开展田间试验。结果表明: FM处理可显著提升土壤pH, 其他措施对土壤理化性质影响较小; 与CK相比, 所有农艺调控处理均能够显著降低土壤有效态Cd含量, 其中YMF处理土壤有效态Cd降幅最大; 各处理作物产量无显著差异, 农艺措施没有作物减产的风险; 单一覆膜、单施叶面肥均可显著降低籽粒Cd富集, 联合处理下对籽粒Cd累积阻控效果最优。覆膜可改善土壤酸化状况、降低土壤Cd有效性; 叶面肥对植物的调控作用可以抑制Cd向籽粒转运; 覆膜与叶面肥联合处理能够协同阻控作物Cd积累, 是Cd污染农田农产品安全生产较优的农艺管理方案。

关键词

农艺调控, Cd污染, 覆膜, 叶面肥, 水稻

Study on the Remediation Effect of Cadmium-Polluted Soils Using Film Mulching Combined with Foliar Fertilizer

Xin Yang¹, Huiling Tao¹, Chunxiang Liu², Xie Xu³, Peng Hu², Jianling Li², Chenguang Zhang⁴, Jihua Liao⁵

¹School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

²Xinyu Yushui District Agricultural Science Research Center, Xinyu Jiangxi

³Bureau of Ecology and Environment of Huainan City, Huainan Anhui

⁴Wuhan Aohengsheng Technology Co., Ltd., Wuhan Hubei

文章引用: 杨鑫, 陶慧玲, 刘春香, 许燮, 胡鹏, 李剑灵, 张晨光, 廖继华. 覆膜联合叶面肥对镉污染土壤修复效果研究[J]. 世界生态学, 2026, 15(3): 494-501. DOI: 10.12677/ije.2026.153054

⁵Rural Work Bureau, Xiannühu Scenic Area, Xinyu City, Jiangxi Province, Xinyu Jiangxi

Received: July 15, 2026; accepted: August 10, 2026; published: August 18, 2026

Abstract

In-field agronomic regulation measures for farmland are simple to operate, low-cost, and suitable for large-scale promotion, making them an important way to safely use farmland with mild to moderate cadmium (Cd) pollution. To explore the effects of film mulching (FM), foliar fertilizer (YMF), and their combination on soil pH, available Cd in soil, crop yield, and grain Cd accumulation in acidic Cd-contaminated farmland, this experiment set up four treatments: control (CK), film mulching (FM), foliar fertilizer (YMF), and film mulching combined with foliar fertilizer (FM + YMF) in a field trial. The results showed that FM treatment could significantly increase soil pH, while other measures had little effect on soil physicochemical properties. Compared with CK, all agronomic regulation treatments significantly reduced the content of available Cd in soil, with the YMF treatment showing the largest decrease. There is no significant differences in crop yield among treatments, which means that agronomic measures have no risk of reducing crop yield. Single film mulching and foliar fertilizer treatments significantly reduced the accumulation of Cd in grains, while compound treatment was most effective to control the accumulation of Cd in grain. Film Mulching can improve soil acidification and reduce soil Cd availability, foliar fertilizer can inhibit Cd transfer to grains, and the combination of film mulching and foliar fertilizer can synergistically control Cd accumulation in crops, making it a preferred agronomic management approach for safely producing crops on Cd-contaminated farmland.

Keywords

Agronomic Regulation, Cadmium Pollution, Film Mulching, Foliar Fertilizer, Rice

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤是生态系统的重要组成部分, Cd 迁移活性强、生物毒性持久, 极易经由土壤 - 农作物系统沿食物链逐级富集, 长期低剂量摄入可造成人体肾脏损伤、骨骼病变等慢性健康损害, 是我国农田重金属污染管控的重点元素[1][2]。我国南方耕地以红壤、水稻土为主, 土壤酸度偏高、阳离子交换量较低, 土壤中 Cd 多以活性较高的可交换态存在, Cd 超标耕地分布范围广, 中轻度污染地块占比极高, 稻米等主粮 Cd 超标风险突出, 直接制约区域粮食质量安全与农产品产地可持续利用[3]。对于大面积连片轻度 Cd 污染农田, 采用客土、淋洗等工程修复技术存在工程量大、治理周期漫长、经济投入高昂、易扰动土层结构等短板, 难以大面积推广应用; 原位钝化、农艺调控等农田安全利用措施无需大规模改造土地, 契合当前农业生产实际需求, 成为污染耕地治理领域的研究热点。农艺调控依托田间栽培管理措施优化根际环境、阻断重金属吸收转运通路, 在维持原有耕作制度、不改变种植结构前提下削减农产品 Cd 累积, 具备操作简便、成本低廉、易于农户接受等优势, 拥有广阔田间应用前景[4][5]。

地膜覆盖是南方旱作与水田广泛采用的栽培管理手段。覆膜能够阻隔雨水冲刷淋溶, 调控土壤水分状况与地表温度, 改变土壤通气条件、氧化还原电位以及有机质分解矿化速率[6], 进而驱动土壤 Cd 不同赋存形态之间相互转化, 调控 Cd 生物有效性。但目前关于覆膜调控 Cd 迁移的驱动条件、适用土壤环境边界尚未厘清, 单独依靠覆膜难以稳定实现农产品 Cd 达标。叶面调控区别于土壤改良类措施, 在作物

关键生育期叶面喷施硅、硒、锌功能性叶面肥，能够提高作物抗逆性，调控靶点集中于作物地上部转运过程，影响作物体内重金属转运蛋白表达水平，增强细胞壁对 Cd 的固定滞留能力，抑制作物根系向可食部位转运重金属，直接降低可食部位 Cd 富集水平。

多数相关研究聚焦地膜覆盖或者叶面阻控单一措施的降 Cd 效果，围绕两类措施联合施用的研究仍较为薄弱。地膜覆盖可以改变土壤理化性质和优化作物生长环境，喷施叶面肥对作物体内重金属转运具有调控作用，两者作用机制相互独立，理论上存在协同增效潜力。然而，覆膜配施叶面肥的组合措施能否发挥出 $1 + 1 > 2$ 的效果，不同措施之间是否存在拮抗作用尚不明确。基于此，本研究设置覆膜、喷施叶面肥、覆膜配施叶面肥处理，系统对比不同农艺措施对土壤理化性质和水稻生长的影响，考察地膜覆盖、叶面阻控单一措施与联合措施对 Cd 污染农田修复的效果，筛选经济高效的农艺组合方案，为我国南方酸性中轻度 Cd 污染耕地安全生产提供理论依据和技术参考。

2. 材料与方法

2.1. 试验概况及供试材料

本研究在江西省新余市珠珊镇丁家村开展大田试验，该地区位于赣江流域中游，属于亚热带季风气候，土壤为第四纪红壤。受上游工矿企业历史废水排放以及大气沉降等因素影响，本次试验区域土壤存在 Cd 污染问题。试验区土壤 pH 为 4.99，总 Cd 含量 0.71 mg/kg，有效态 Cd 含量 0.12 mg/kg，Cd 含量超出《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)¹中的风险筛选值，属于典型的南方中轻度 Cd 污染农田。

本研究选取水稻品种为“皖两优华占”，购自湖北惠民农业科技有限公司，为试验区所在地可以大规模使用的水稻品种。叶面肥“喷喷富”，主要成分为腐殖酸、黄腐酸及微量元素。农艺调控措施包括覆膜、喷施叶面肥和覆膜联合叶面肥三种处理。

2.2. 试验设计

2.2.1. 试验小区处理

本试验采用随机区组的试验设计，共设置 4 组处理，每种处理对应 3 个试验小区。单个小区面积为 25 m² (5 m × 5 m)，小区之间修筑高度田垄，一垄种 24 行水稻，一行种 3 株水稻，行/株间距 0.2 m，距垄边 0.1 m。铺设隔水薄膜对小区进行阻隔，避免水分和养分发生侧向渗漏。试验区域修建统一的进水渠与排水沟，确保各小区水分管理条件保持一致。各试验组的具体处理方式详见表 1。

Table 1. Experimental treatment design
表 1. 试验处理设计

处理组	采取措施	处理时期	规格
CK	-	-	-
FM	覆膜栽培	移栽前	1 m 宽地膜，垄宽 0.6 m
YMF	喷施叶面肥	灌浆期	500 mL/亩
FM + YMF	覆膜配施叶面肥	覆膜：移栽前 叶面肥：灌浆期	覆膜：1 m 宽地膜 叶面肥：500 mL/亩

2.2.2. 田间管理

(1) 相关处理方式：覆膜栽培小区及时向田垄盖上塑料薄膜；叶面肥在灌浆期采用喷雾器进行叶面喷施。

¹https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bzwb/trhj/201807/t20180703_446029.shtml

(2) 水分管理：各小区田间水分管控保持统一。插秧阶段维持浅水层；分蘖期持续浅水灌溉；停止分蘖生长后，进行短期晒田处理；灌浆阶段则采用干湿交替的灌溉方式。

2.2.3. 样品采集

(1) 土壤样品采集：分别于水稻移栽前和水稻成熟期采集土壤样本。试验采用 S 形五点取样法，采样深度控制在 0~20 cm，将五个采样点的土壤均匀混合为一份样品。土壤样品采集后置于通风处自然风干，剔除石块和植物残体等杂质后进行过筛处理。将处理好的土壤样品通过四分法进行留样，用于后续土壤指标测定(土壤 pH、全量 Cd 和有效态 Cd 含量)。

(2) 植物样品采集：水稻成熟后，在各个试验小区利用五点取样法选取具有代表性的水稻植株。将植株根系表面泥土清洗干净，再按照根、茎、叶和籽粒进行器官划分。稻谷经过脱壳处理，得到籽粒样品，用于后续 Cd 含量检测。

2.3. 测定方法

土壤 pH 值：采用《土壤 pH 值的测定 电位法》(HJ 962-2018)²中规定方法进行测定(土水比为 1:2.5)；土壤 Cd 含量：通过三酸消解法(浓硝酸、高氯酸和氢氟酸)进行消解处理，再利用原子吸收分光光度计(AAS)完成测定；土壤有效态 Cd 选用氯化钙溶液浸提，再使用 AAS 进行检测；水稻籽粒 Cd 含量检测严格参考食品安全国家标准方法进行检测；水稻亩产量经过对每个小区的水稻籽粒收获后称重所得。

2.4. 数据处理

使用 Excel 2019 进行数据整理计算，使用 Origin 2024 软件绘图，使用 IBM SPSS Statistics 27 对数据进行单因素方差分析($p < 0.05$)。

3. 结果与讨论

3.1. 不同农艺调控措施对土壤理化性质的影响

3.1.1. 土壤 pH

不同处理土壤 pH 如图 1 所示，覆膜处理使土壤 pH 显著提升了 0.35 个单位，单施叶面肥和覆膜配施叶面肥对土壤 pH 无明显影响。土壤 pH 是影响土壤中 Cd 形态的重要因素，土壤 pH 的升高有利于促进 Cd 离子向稳定形态转化，降低有效态 Cd 含量[7]。

覆膜条件改变了农田土壤温度和湿度环境状况，能够影响土壤有机质矿化进程和植物根系呼吸[8][9]，进而引起土壤酸碱环境改变。叶面肥更多作用于植物地上部分，不直接干预土壤酸碱平衡，这与人研究一致[10]。同时，FM + YMF 土壤 pH 并未显著升高，这可能是叶面肥喷施带来的少量外源物质或作物旺盛生长分泌有机酸等物质抵消了覆膜对土壤 pH 的提升效应。

3.1.2. 土壤有效态 Cd 含量

由图 2 可知，覆膜、喷施叶面肥和两者的联合处理均有利于降低土壤有效态 Cd 含量。与 CK 相比，FM 处理使土壤有效态 Cd 含量显著降低了 27.57%，YMF 处理使土壤有效态 Cd 含量显著降低了 71.42%，FM + YMF 处理使土壤有效态 Cd 含量显著降低了 29.64%。

覆膜提升土壤 pH，能够促进土壤胶体对 Cd^{2+} 的吸附，有利于 Cd 沉淀物的形成，从而降低土壤有效态 Cd 含量[11]。一方面，叶面肥淋洗沉降进入土壤可能会直接产生钝化作用；另一方面，叶面肥能够通过地上 - 地下长距离作用路径影响作物根系分泌物组分和泌氧能力，从而改变根际微环境，调控 Cd 有效性

²https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/jcffbz/201808/t20180815_451430.shtml

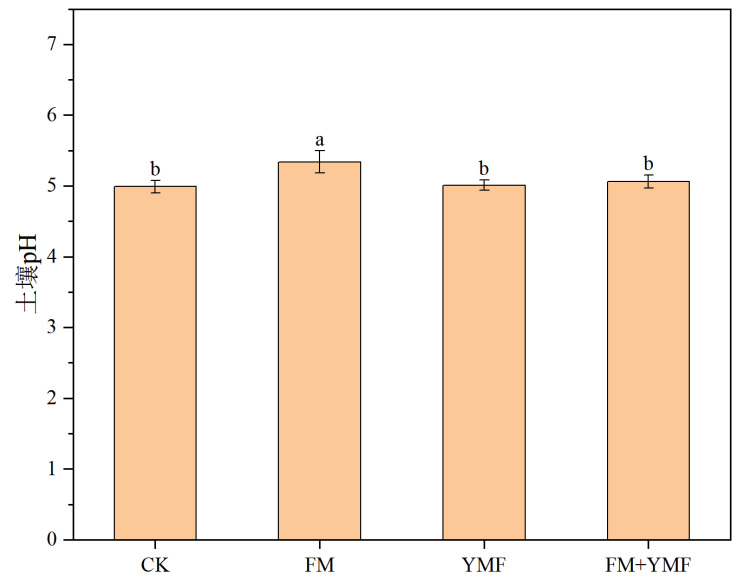


Figure 1. Soil pH at maturity

图 1. 成熟期土壤 pH

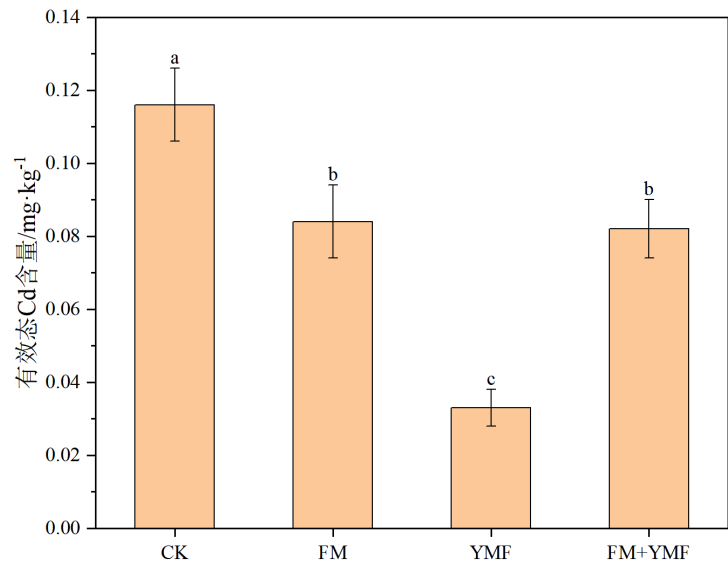


Figure 2. Content of available Cd in soil

图 2. 土壤有效态 Cd 含量

[12] [13]。值得关注的是，FM + YMF 土壤有效态 Cd 含量并未低于 YMF，两种措施在降低土壤有效态 Cd 层面未表现出协同增效作用。究其原因，这可能源于两项措施作用空间与机制存在一定的制衡。覆膜的钝化效应体现在整体土体，而叶面肥主要影响根际区域，叶面肥调控下根系有机酸分泌变化可在根区活化 Cd，部分抵消土体 pH 升高带来的 Cd 固定效果。

3.2. 不同农艺调控措施对水稻生长的影响

3.2.1. 水稻产量

不少研究表明，地膜覆盖通过增温保墒、改善土壤理化性状、提升养分有效性，促进水稻根系发育

与分蘖发生[14][15]；同时抑制杂草、减轻病虫害[6]，优化光合产物积累与转运，最终实现水稻增产。功能性叶面肥可补充微量元素、缓解重金属胁迫，也有助于农作物的增产[16]。图3展示了各处理组水稻产量情况，本研究中农艺调控措施有利于水稻的生长，但没有发挥出显著的增产效果，这可能与当地自然条件、水稻品种以及田间管理措施等有关[17][18]。

3.2.2. 水稻籽粒 Cd 含量

由图4可知，各处理组籽粒 Cd 含量由高到低为 CK > FM > YMF > FM + YMF。与 CK 相比，FM 和

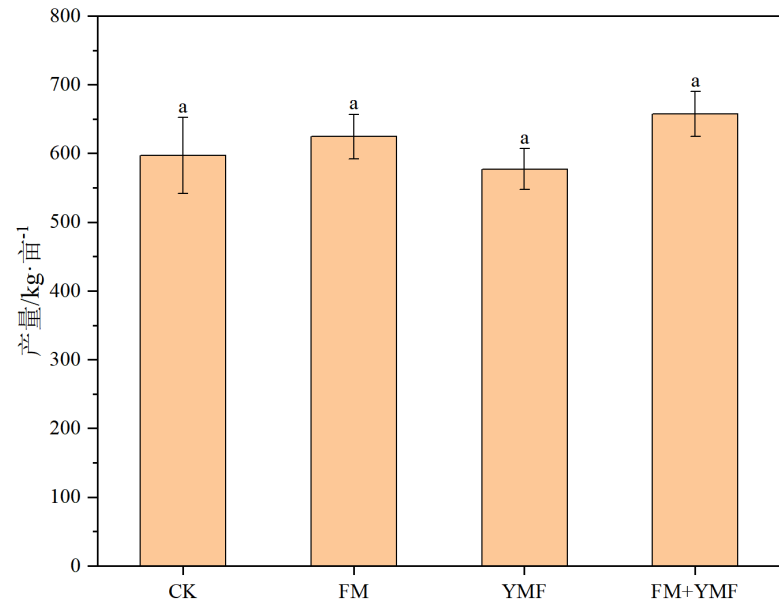


Figure 3. Rice yields in different treatment groups
图 3. 不同处理组水稻产量

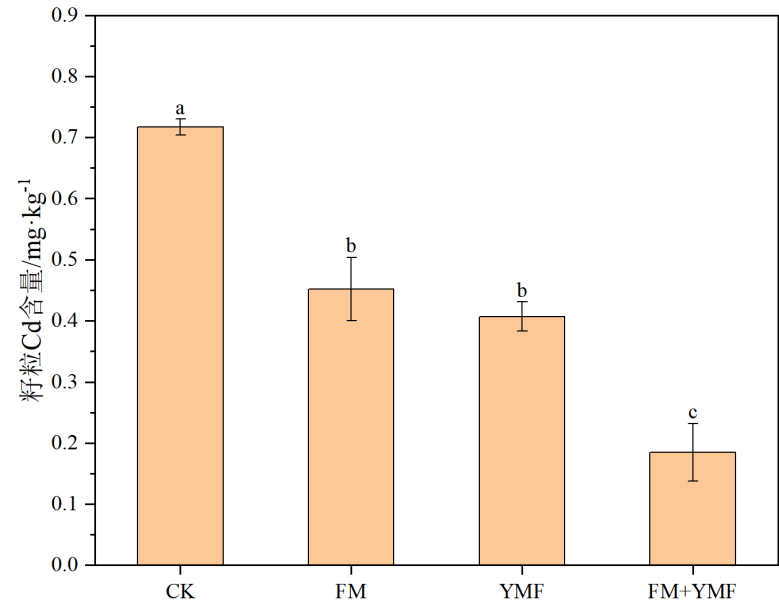


Figure 4. Cd content in rice grains
图 4. 水稻籽粒 Cd 含量

YMF 处理组水稻籽粒 Cd 含量显著降低了 36.94%和 43.18%; FM + YMF 处理组水稻籽粒 Cd 含量显著降低了 74.15%, 对水稻 Cd 吸收的抑制效果最好。

覆膜通过改善土壤环境、降低土壤有效态 Cd, 有助于从源头减少根系 Cd 吸收, 进而降低水稻籽粒 Cd 含量; 叶面肥主要在作物体内发挥调控作用, 抑制 Cd 向水稻籽粒的转运。两类措施调控路径存在互补性, 当采取覆膜配施叶面肥处理时, 可以同时实现“土壤减少吸收 + 植株阻断转运”的双重调控, 最大限度降低籽粒 Cd 累积。本研究结果表明, 单一的农艺措施难以实现最优农产品安全管控, 组合方案的优势更为突出。

4. 结论

(1) 覆膜可改变土壤环境状况, 显著提升土壤 pH 值; 不同农艺调控措施均能够有效显著降低土壤有效态 Cd 含量, 喷施叶面肥的效果最为显著。

(2) 本研究中, 各项农艺调控措施均不存在减产风险, 能够维持农田正常生产功能, 具备治理 Cd 污染农田的应用前景。

(3) 单一覆膜、单施叶面肥均可显著降低水稻籽粒 Cd 含量, 二者效果相近; 覆膜配施叶面肥对籽粒 Cd 累积阻控效果最优, 两类措施存在协同降 Cd 效应。

(4) 覆膜侧重于改良土壤环境、削减根系 Cd 吸收。叶面肥侧重调控植株内部 Cd 转运, 两类措施调控路径互补。在 Cd 污染农田实际安全生产中, 采用覆膜联合叶面肥的组合管理模式, 更加有利于保障农产品质量安全。

基金项目

鹰潭市科技计划项目(202412-48928)。

参考文献

- [1] 田燕燕, 李亚娜. 重金属镉污染农田修复技术研究进展[J]. 现代化工, 2024, 44(9): 36-39+45.
- [2] 黄卫, 庄荣浩, 刘辉, 等. 农田土壤镉污染现状与治理方法研究进展[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2022, 45(1): 49-56.
- [3] 赵慧, 何博, 王铁宇, 等. 我国南方典型城市土壤重金属污染特征及源汇关系分析[J]. 环境科学学报, 2019, 39(7): 2231-2239.
- [4] 余琼阳, 李婉怡, 张宁, 等. 农田土壤重金属污染现状与安全利用技术研究进展[J]. 土壤, 2024, 56(2): 229-241.
- [5] 杨树深, 孙衍芹, 郑鑫, 等. 重金属污染农田安全利用: 进展与展望[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1555-1572.
- [6] 胡国辉, 朱德峰, 徐一成, 等. 水稻覆膜栽培研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(6): 163-170.
- [7] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 等. 土壤 pH 对镉形态影响的研究进展[J]. 土壤, 2020, 52(3): 439-444.
- [8] 付第慧, 邢志鹏, 程爽, 等. 水稻覆膜栽培技术应用研究现状与展望[J]. 中国稻米, 2024, 30(6): 1-6.
- [9] 常传义, 吴家安, 高明宇, 等. 有机水稻覆膜栽培技术与机具研究进展[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(22): 46-55.
- [10] 余侃, 刘永贤, 汪盛明, 等. 灌浆期叶面喷施不同硒源对水稻主要性状、硒含量和根际土壤理化性质的影响[J]. 南方农业学报, 2023, 54(4): 1086-1094.
- [11] 陈剑珠, 潘伯桂, 杨丽雯, 等. 水分管理耦合改良剂施用阻控水稻镉累积的机制[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(6): 1147-1158.
- [12] 任利娟, 卢维宏, 李嘉琦, 等. 叶面阻控剂在重金属污染耕地土壤安全利用中的应用[J]. 中国土壤与肥料, 2022(11): 230-236.
- [13] 邱永洪, 唐宇龙, 李择桂, 等. 土壤和叶面施锰联合钝化剂降低稻米镉的综合效应[J]. 环境科学, 2024, 45(12): 7226-7236.

-
- [14] 王玉, 高海河, 马雪, 等. 覆膜栽培对水稻产量和稻田温室气体排放的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(7): 14-23.
- [15] 熊家欢, 张义凯, 向镜, 等. 覆膜稻田施用炭基肥对水稻产量及氮素利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2024, 38(5): 567-576.
- [16] 邬奇峰, 魏倩倩, 徐青山, 等. 叶面肥对水稻养分吸收、产量和二化螟危害的影响[J]. 中国稻米, 2023, 29(3): 84-87.
- [17] 韩小英, 杨三维, 李文婷, 等. 地膜覆盖对谷子产量影响的整合分析[J]. 江西农业学报, 2024, 36(7): 7-12+19.
- [18] 唐乐斌, 黄燕玲, 周子寒, 等. 基于大田试验的叶面阻隔对水稻吸收和转运镉的影响[J]. 中国环境科学: 1-10. <https://www.chndoi.org/Resolution/Handler?doi=10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20231128.013>, 2026-07-14.