

淹水灌溉联合叶面阻控剂对水稻镉吸收转运的影响

徐军辉¹, 陈丽妮¹, 孟繁波², 莫博程³, 黄芳⁴

¹益阳市赫山区农业技术推广中心, 湖南 益阳

²邵阳市城步苗族自治县农业农村局, 湖南 邵阳

³湖南大学生物学院, 湖南 长沙

⁴中南林业科技大学环境科学与工程学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2025年6月27日; 录用日期: 2025年7月24日; 发布日期: 2025年7月31日

摘要

在益阳市赫山区某镉(Cd)污染稻田进行田间试验, 探讨淹水灌溉联合叶面阻控剂的组合措施对土壤Cd有效态含量、pH值以及水稻植株各器官(根、茎、叶、谷壳和糙米) Cd吸收转运的影响。结果表明: 淹水灌溉联合叶面阻控剂的组合措施可以有效降低土壤中Cd的有效性, 减少水稻对Cd的吸收。在淹水灌溉和叶面阻控剂的联合处理下, 土壤中的pH值与对照相比显著($P < 0.05$)提高0.5个单位, 土壤有效态Cd含量(DTPA-Cd)显著降低了26.2%; 水稻植株的根、茎、叶、谷壳和糙米中Cd含量均显著($P < 0.05$)降低, 降幅分别为14.7%、37.0%、45.4%、54.5%和47.8%; 而水稻产量与对照相比无明显变化。淹水灌溉联合叶面阻控剂措施还抑制了Cd向水稻各部位的转运, 根-茎、茎-叶和叶-谷壳的转运系数显著($P < 0.05$)降低了25.7%、39.5%和58.4%。因此, 淹水灌溉联合叶面阻控剂技术措施可在不影响水稻产量的情况下, 有效阻控Cd在水稻体内的迁移转运, 显著降低水稻糙米对Cd的吸收。

关键词

土壤Cd污染, 水稻, 淹水灌溉, 叶面阻控剂, 转运系数

Effects of Flooding Irrigation Combined with Foliar Inhibitors on the Absorption and Accumulation of Cadmium in Rice

Junhui Xu¹, Lini Chen¹, Fanbo Meng², Bocheng Mo³, Fang Huang⁴

¹Agricultural Technology Extension Center, Heshan District, Yiyang Hunan

²Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Chengbu Miao Autonomous County, Shaoyang Hunan

³College of Biology, Hunan University, Changsha Hunan

文章引用: 徐军辉, 陈丽妮, 孟繁波, 莫博程, 黄芳. 淹水灌溉联合叶面阻控剂对水稻镉吸收转运的影响[J]. 农业科学, 2025, 15(8): 973-981. DOI: 10.12677/hjas.2025.158120

⁴College of Environment Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha Hunan

Received: Jun. 27th, 2025; accepted: Jul. 24th, 2025; published: Jul. 31st, 2025

Abstract

A field experiment was conducted in a cadmium (Cd)-contaminated paddy field in Heshan District, Yiyang City, to investigate the effects of flooding irrigation combined with foliar inhibitors on the availability of Cd in soil, soil pH and Cd uptake and translocation in various rice plant organs (roots, stems, leaves, husks and brown rice). The results indicated that: the remediation technology integrating flooding irrigation combined with foliar inhibitors effectively reduce the bioavailability of Cd in soil and decrease Cd uptake by rice plants. Under this combined treatment, soil pH increased significantly ($P < 0.05$) by 0.5 units compared with the control, and the soil available Cd content decreased significantly ($P < 0.05$) by 26.2%. The Cd contents in roots, stems, leaves, husks and brown rice were all significantly decreased ($P < 0.05$) by 14.7%, 37.0%, 45.4%, 54.5% and 47.8%, respectively; while no significant changes were observed in rice yield compared with the control. Furthermore, the combined treatment significantly inhibited Cd translocation to different parts of rice. The translocation factors of root-stem, stem-leaf and leaf-husk decreased significantly ($P < 0.05$) by 25.7%, 39.5% and 58.4%, respectively. Therefore, the technical measures of flooding irrigation combined with foliar inhibitors can effectively reduce the absorption and translocation of Cd by rice without affecting rice yield, and significantly reduce the absorption of Cd by brown rice.

Keywords

Soil Cd Contamination, Rice, Flooding Irrigation, Foliar Inhibitors, Translocation Factor

Copyright © 2025 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

Cd 作为我国农田土壤中主要的重金属污染物之一[1], 具有高水溶性、可移动性、生物富集性和不可降解性等特点[2]。Cd 在土壤环境中的累积不仅会破坏土壤生态功能, 还会影响作物的生长发育[3]。水稻作为我国居民的第一主粮, 相比其他作物更容易吸收和积累土壤中的 Cd, 并能通过膳食摄入途径在人体蓄积, 对肾脏、骨骼和心脑血管等造成伤害[4]。基于我国的国情, 不允许大部分 Cd 污染农田用于长时间修复而不进行任何农业生产, 因此修复 Cd 污染土壤、开发 Cd 污染农田安全利用的方法至关重要。

土壤钝化措施是轻中度 Cd 污染农田安全利用的重要措施。常用的钝化材料如石灰[5]、钙镁磷肥[6]、海泡石[7]和生物炭[8]等主要是通过调节土壤 pH 以及 Cd 发生拮抗、吸附、络合、共沉淀等作用降低重金属 Cd 的生物活性, 从而减少水稻对 Cd 的吸收。但在实践中发现, 钝化材料长期使用效果不稳定, 还会破坏土壤结构, 实际使用成本偏高, 甚至还会造成二次污染[9]。水分管理作为农业生产中的重要管理措施, 能够影响土壤中 Cd 的生物有效性[10]。研究表明, 相比其他水分管理模式, 淹水灌溉处理对降低稻米中 Cd 含量有着更显著的效果[11]。水分管理操作方便、经济高效、无二次污染, 但是也有研究表明长期持续淹水会导致水稻产量降低[12]。

叶面阻控技术因具有易操作、成本低、不会对土壤产生二次污染等特点,广泛应用于 Cd 污染稻田的安全利用。目前,我国常见且广泛应用的叶面阻控剂为含硅(Si)叶面阻控剂。硅是水稻生长的必需元素,喷施含硅叶面阻控剂不仅可以促进水稻光合作用[13],提高水稻产量和品质,还能调控相关离子的吸收和转运基因,控制 Cd 在水稻体内的迁移,使 Cd 滞留在水稻的根、茎[14] [15],阻止其向稻米转运。魏宾纭等[16]通过大田试验发现,叶面喷硅对水稻有增产效果,但其对糙米 Cd 含量的降低率仅有 19%,明显低于水分管理及其组合技术措施。因此,含硅叶面阻控剂虽能在不影响水稻产量的情况下降低糙米中 Cd 含量,但其对 Cd 的阻控效果不稳定,受叶面阻控剂施用时期和土壤污染程度影响大[17],并且降 Cd 效果不如淹水处理显著。

基于上述分析,水分管理和叶面阻控剂技术措施均能在一定程度上降低稻米中的 Cd 含量,减少水稻 Cd 超标风险,但单一的农艺措施无法同时兼顾降 Cd 和水稻产量的影响,因此有必要研究水分管理和叶面阻控剂的组合技术措施对大田种植水稻 Cd 吸收与转运的影响。本试验通过在轻中度 Cd 污染农田耕作区域采用淹水灌溉与喷施市售含硅叶面阻控剂的组合技术措施,分析其对土壤 Cd 生物有效性、水稻产量和水稻植株各器官(根、茎、叶、谷壳和糙米) Cd 吸收及转运的影响,以期以轻中度 Cd 污染稻田的安全生产提供科学依据与技术支持。

2. 材料与方法

2.1. 试验地点和材料

大田试验地点位于湖南省益阳市赫山区笔架山乡(N28.557618, E112.513135)的某 Cd 污染稻田,供试稻田土壤 pH 值为 5.47,有机质含量为 $31.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量为 $239 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷含量为 $15.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量为 $152 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤总 Cd 含量为 $0.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。试验地区 2024 年日平均气温 16.9°C ,年降水量 1432.8 mm 。水稻品种为湘早籼 45 号,为当地农户自留种,也是益阳市赫山地区常见的双季稻品种。

叶面阻控剂由贝尔壳生物工程(湖北)有限公司提供,已获得农业农村部肥料登记证,登记证号为农肥(2018)准字 10584 号;产品通用名称:含硅水溶肥料;产品形态:水剂;登记技术指标: $\text{Si} \geq 150 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{K}_2\text{O} \geq 200 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{Na} \leq 10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$;适宜范围:水稻。叶面阻控剂中 Cd 含量低于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.2. 试验设计

试验共设置 4 个处理组,即 T1、T2、T3 和对照组 CK,其中 T1 的技术措施为喷施叶面阻控剂,T2 的技术措施为淹水灌溉,T3 的技术措施为淹水灌溉与喷施叶面阻控剂的组合技术措施,CK 为对照组即不采用任何技术措施。T1 和 T3 处理中叶面阻控剂的喷施量依照前期试验结果设置,喷施量为 $6 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别在水稻的分蘖盛期后段和灌浆期前段各喷施一次,每次喷施量为 $3 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$,喷施方法为叶面阻控剂原液经清水稀释 500 倍后采用植保无人机雾化喷施;T2 和 T3 处理中的淹水灌溉方式及操作按照湖南省农业农村厅发布的《镉污染稻田安全利用田间水分管理技术规程》执行;T1 和 CK 的田间水分管理方式与当地农户常规田间管理一致。试验区每个处理田块面积为 300 m^2 ,每个处理设置 3 个平行,各处理除上述技术措施不同外,其他田间管理方式如追肥、除草、除虫等均相同。水稻于 2024 年 6 月中下旬进行插秧,各试验小区中间以田埂间隔,并在试验区四侧均设置 3 行水稻作为保护行;2024 年 10 月水稻成熟,进行样品采集与收获。

2.3. 样品采集和分析

在水稻成熟时,同时采集水稻样品和土壤样品。在每个水稻试验区中,按照棋盘式布点法采集 9 株水稻植株,同时采集相应的水稻根系土壤。水稻产量的测定方法为采集 1 个平方米面积的成熟期水稻,

进行脱粒,晒干称重,然后计算产量。水稻植株采集带回后,首先用超纯水洗净、晾干,再放在烘箱里进行杀青,杀青温度为 105℃,杀青后将温度调至 70℃,继续烘干至恒重。水稻植株烘干后,将样品分为根、茎、叶、谷壳和糙米 5 个部位,分别进行粉碎,粉碎后的样品用塑封袋保存备用。经风干后的土壤,剔除里面的碎石、植物根系等杂质后进行研磨,分别过 10 目和 100 目尼龙筛,过筛后的样品用塑封袋保存备用。

土壤 pH 的测定采用酸度计(PHS-3C, 雷磁),土水比例为 1:2.5;土壤总 Cd 含量采用 HCl-HNO₃-HF-HClO₄ 消解(GB/T 17141-1997),消解液中的 Cd 含量采用石墨炉原子吸收分光光度法(原子吸收分光光度计 PE900T)测定;土壤 Cd 的生物有效态含量采用 0.01 mol·L⁻¹ 的 DTPA 溶液(GB/T 23739-2009)提取,浸提液中的 Cd 含量采用 ICP(PE Optima8300)测定;水稻植株中 Cd 含量测定采用微波消解法消解(GB 5009.268-2016),消解液中的 Cd 含量采用电感耦合离子体质谱法(ICP-MS)测定。所有处理和分析测定过程均用国家标准物质(土壤[GBW07979(GSS-37)]和大米粉无机成分标准物质[GBW(E) 100915])全程进行质量控制,同时全程做空白试验,Cd 的回收率分别为 94%~109%和 85%~97%。

2.4. 数据分析

采用转运系数(Translocation Factor, TF)来研究 Cd 在水稻各部位中的转运能力[18],计算公式如下:

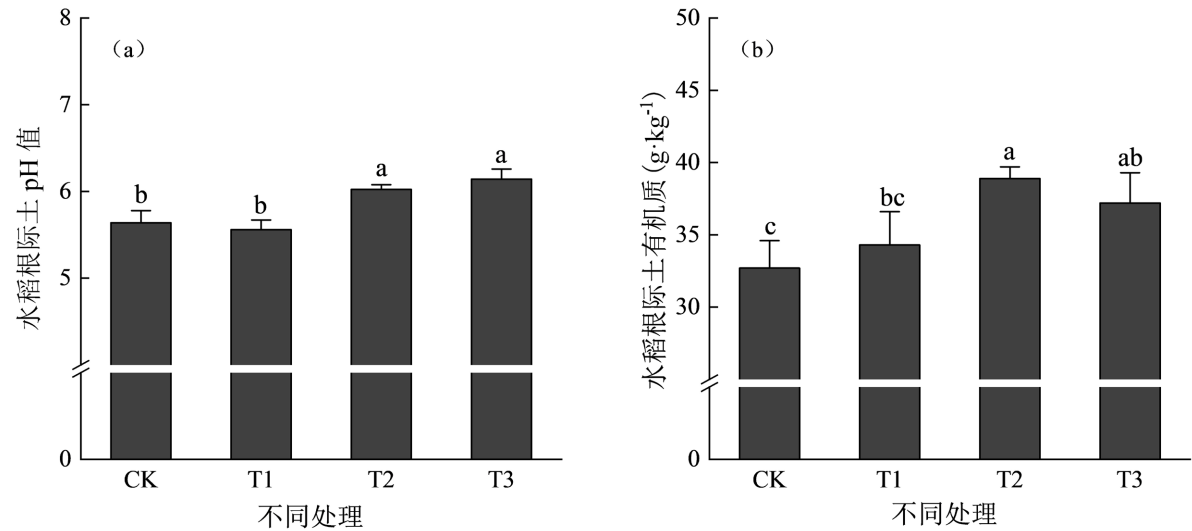
$$TF = \frac{C_{\text{latter}}}{C_{\text{former}}}$$

式中, C_{latter} 为水稻植株后一部位中的 Cd 含量(mg·kg⁻¹), C_{former} 为水稻植株前一部位中的 Cd 含量(mg·kg⁻¹)。

采用 Microsoft Office 2016、IBM SPSS Statistics 22.0 进行数据分析和统计,采用 Origin 2021 Pro 软件进行绘图,文中结果均为 3 个重复样本的平均值 ± 标准偏差(n = 3)。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和 Duncan 多重比较进行处理间的差异分析, P < 0.05 表示不同处理之间存在显著差异。

3. 结果与分析

3.1. 不同处理对土壤 pH、有机质的影响



不同小写字母表示不同处理间具有显著差异, P < 0.05。下同。

Figure 1. Effects of different treatments on the pH and contents in soil
图 1. 不同处理对水稻根际土壤 pH 值和有机质含量的影响

不同处理对水稻根际土壤 pH 值和有机质含量的影响见图 1。由图 1(a)可知, 与 CK 处理相比, T2 和 T3 处理下土壤 pH 值呈显著提升($P < 0.05$), 分别提升了 0.38 和 0.50 个单位, 而 T1 处理下土壤的 pH 值没有明显变化。由图 1(b)可看出, 与 CK 处理相比, T1~T3 处理下土壤有机质均有不同程度的提升, 其中 T2 处理使有机质显著($P < 0.05$)提高了 19.0%, T3 处理使土壤有机质显著($P < 0.05$)提高了 13.8%, 但 T1 处理下有机质的有机质含量与对照相比无显著增加。

3.2. 不同处理对土壤 Cd 生物有效性的影响

不同处理对土壤有效态 Cd 含量的影响见图 2。由图可知, T2、T3 处理与对照处理 CK 相比, 土壤中 Cd 的生物有效态含量显著($P < 0.05$)降低, 降幅分别为 16.7%、26.2%, 而 T1 处理水稻根际土壤 Cd 的生物有效态含量没有明显变化, 这说明淹水灌溉技术措施可以降低土壤中 Cd 的生物有效性。

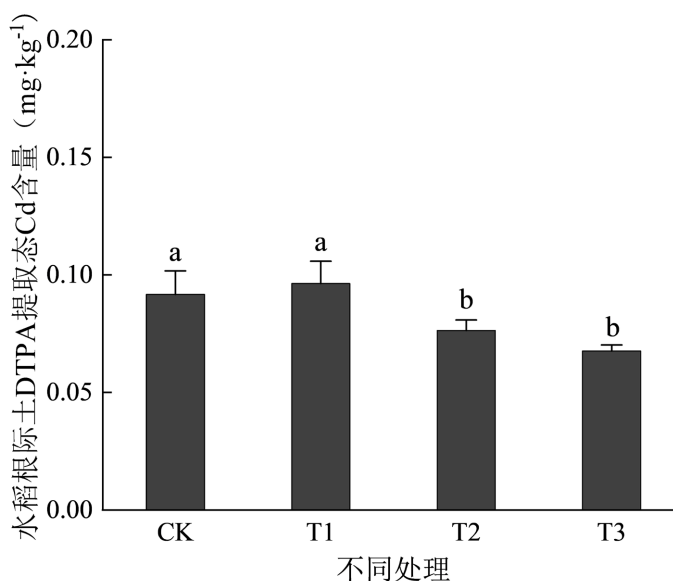


Figure 2. Effects of different treatments on the exchangeable Cd contents in soil
图 2. 不同处理对土壤 DTPA-Cd 含量的影响

3.3. 不同处理对水稻各部位 Cd 含量的影响

不同处理对水稻各部位 Cd 含量的影响见图 3。和对照处理 CK 相比, T1 处理下只有水稻谷壳中 Cd 含量显著($P < 0.05$)降低, 降幅为 20.5%; 水稻叶部和糙米中 Cd 含量有一定程度降低, 但没有达到显著水平; 而根部和茎部 Cd 含量则无明显变化。在 T2 处理下, 除水稻茎部中 Cd 含量无显著降低外, 根部、叶、谷壳和糙米中的 Cd 含量均显著($P < 0.05$)下降, 降幅分别为 16.1%、38.9%、31.8%和 28.3%。T3 处理下, 水稻各部位 Cd 含量均显著($P < 0.05$)下降, 水稻的根部、茎部、叶、谷壳和糙米中的 Cd 含量下降幅度分别为 14.7%、37.0%、45.4%、54.5%和 47.8%。

3.4. 不同处理对水稻 Cd 转运系数的影响

水稻根、茎、叶、谷壳和糙米对 Cd 的转运能力可以用转运系数表示, 不同处理对水稻各部位 Cd 转运系数的影响见图 4。与 CK 相比, T1 处理下, $TF_{茎-叶}$ 和 $TF_{叶-谷壳}$ 分别显著($P < 0.05$)降低了 36.8%和 38.9%; T2 处理的 $TF_{茎-叶}$ 和 $TF_{叶-谷壳}$ 有一定程度降低, 但降低效果没有显著; T3 处理的 $TF_{根-茎}$ 、 $TF_{茎-叶}$ 和 $TF_{叶-谷壳}$ 均显著下降($P < 0.05$), 降幅分别为 25.7%、39.5%和 58.4%; 各处理的 $TF_{谷壳-糙米}$ 则均无明显变化。

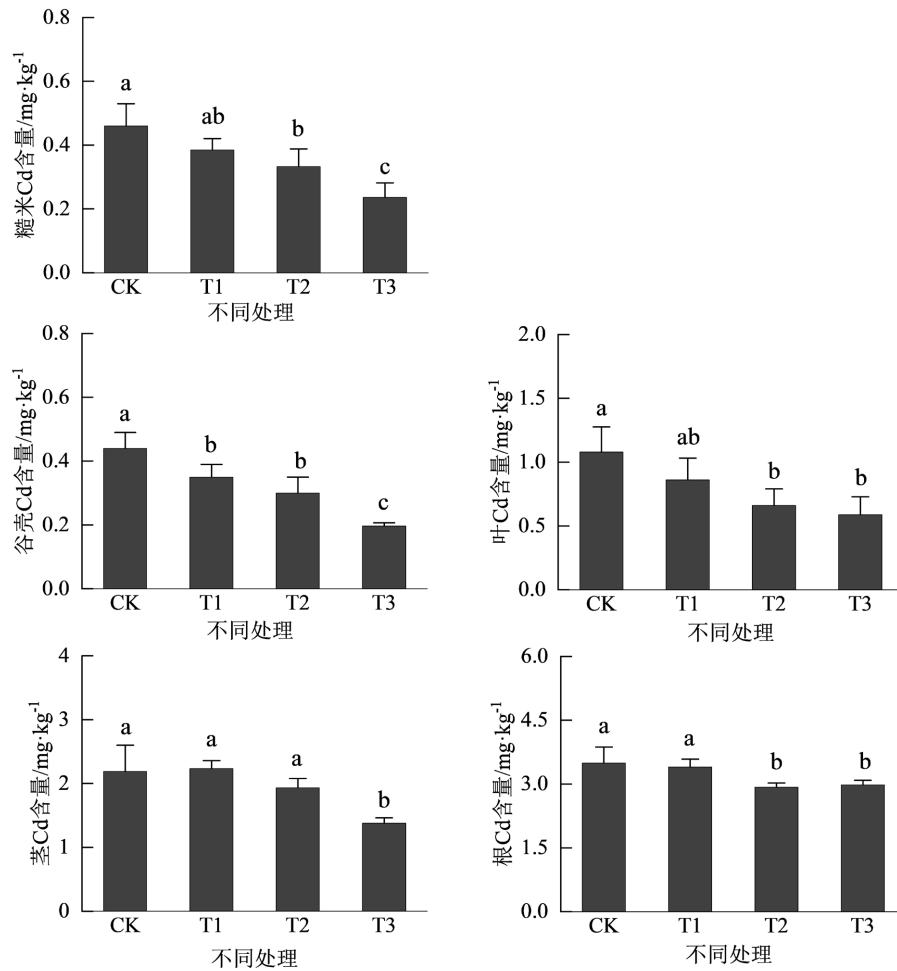


Figure 3. Effects of different treatments on the Cd content in different rice tissues
图 3. 不同处理对水稻各部位 Cd 含量的影响

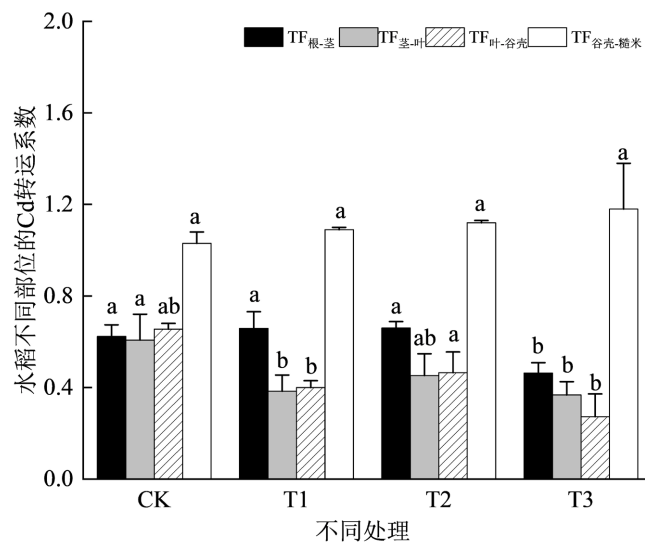


Figure 4. Effects of different treatments on the translocation factor of Cd in different rice tissues
图 4. 不同处理对水稻各部位 Cd 转运系数的影响

3.5. 不同处理对水稻产量的影响

不同处理对水稻产量的影响见图 5。与 CK 处理相比, T1 和 T3 处理下水稻产量显著增加了 5.9% 和 2.7%, 这说明叶面喷施硅对水稻有一定的增产效果; T2 处理下水稻产量显著降低了 2.7%, 说明单一的淹水灌溉措施会使得水稻有一定程度的减产。

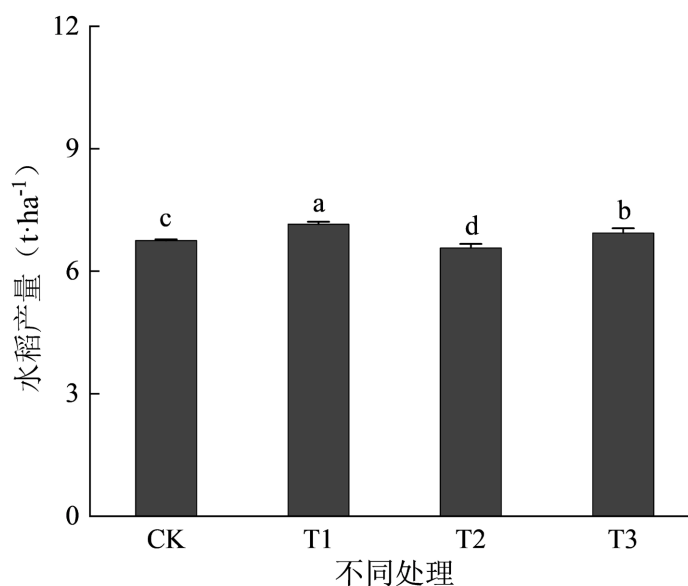


Figure 5. Effects of different treatments on the rice yields
图 5. 不同处理对水稻产量的影响

4. 讨论

有研究表明, 淹水灌溉主要通过影响土壤中 Cd 的生物利用度、pH 值和氧化还原电位(Eh)来调节水稻中的 Cd 积累[19]。本试验发现, T2 和 T3 处理下水稻根际土壤 pH 值和有机质含量高于 CK 处理(图 1), DTPA 提取态 Cd 含量低于 CK 处理(图 2); 而 T1 处理下土壤 pH、有机质和 DTPA 提取态 Cd 含量无明显变化。这说明淹水灌溉能够影响土壤中 pH、有机质和有效态 Cd 含量。淹水土壤氧化还原状态的改变会引起土壤 pH 的变化, 会使微酸性土壤 pH 提升至中性, 而 pH 值与土壤 Cd 的有效性呈负相关关系[20] [21]。本试验中, T2 和 T3 处理下土壤中有有效态 Cd 含量与 CK 相比显著降低(图 1)。这是因为土壤 pH 值的增大促进了土壤胶体对 Cd²⁺的吸附作用, 增强土壤中 OH⁻、PO₄³⁻、CO₃²⁻ 等对 Cd²⁺的沉淀作用, 从而降低 Cd 的有效性[22]。同时, 淹水条件下土壤有机质也有一定的增加, 主要是淹水后土壤中的 O₂⁻减少, 降低了有机质的分解速率, 从而致使有机质累积[23]。所以, T2 和 T3 处理下土壤有机质含量显著高于对照 CK 处理和单施叶面阻控剂处理。土壤有机质的提升也在一定程度上降低了土壤 Cd 的生物有效性。有机质富含各类含氧官能团, 能为土壤中 Cd²⁺提供吸附位点并与之发生物理化学作用, 通过螯合、络合等反应促使土壤中活性态 Cd 向有机结合态转化[24], 进而使土壤中 Cd 的有效性降低。因此, 在淹水灌溉联合叶面阻控剂的共同应用中, 淹水灌溉在降低土壤中 Cd 的有效性方面发挥了关键作用。

淹水灌溉联合叶面阻控剂技术措施下, 水稻体内的 Cd 含量、各部位的 Cd 转运能力(除谷壳外)均显著降低(图 3 和图 4)。相比其他处理, 淹水处理显著降低了水稻根部的 Cd 含量, 主要是因为淹水处理下土壤 pH 和有机质的提升, 使 Cd 的生物有效性显著降低, 进而减少了水稻根部对 Cd 的吸收, 这与吴家梅[25]、Wan [26]等的研究结果一致。单施叶面阻控剂和淹水灌溉联合叶面阻控剂处理下, 水稻的 TF_{茎-叶}

和 $TF_{\text{叶-谷壳}}$ 显著降低, 说明叶面阻控剂主要通过阻控 Cd 从水稻茎部向叶部、叶部向谷壳的转运来降低水稻体内的 Cd 含量。而淹水灌溉处理下, 水稻各部位的转运系数无明显变化。本试验中使用的叶面阻控剂富含硅元素($Si \geq 150 \text{ g/L}$), 叶面喷施含硅叶面阻控剂可将茎部、叶片细胞壁及液泡中的 Cd^{2+} 络合形成沉淀, 从而减轻了 Cd 的向上转运[27][28]。唐乐斌[29]等研究也发现, 在水稻叶面喷施流体硅后增强了 Cd 在茎部的固定和滞留, 抑制其向上迁移, 减少 Cd 从水稻茎部向叶片中的运输和分配。因此, 在淹水灌溉联合叶面阻控剂对水稻中 Cd 的阻控作用中, 淹水灌溉在降低土壤 Cd 生物有效性以及减少水稻根部对 Cd 的吸收上发挥关键作用, 而叶面阻控剂则有效阻控了 Cd 从水稻茎部向叶部、叶部向谷壳的转运。

综上分析, 单独喷施叶面阻控剂或进行淹水灌溉均能在一定范围内降低水稻体内的 Cd 含量, 单施叶面阻控剂措施虽不会影响水稻的产量, 但未能让糙米中的 Cd 含量达到显著降低效果; 单独进行淹水灌溉时, 水稻根部、叶、谷壳和糙米中 Cd 含量均显著降低, 但会导致水稻有一定程度的减产(图 5); 而淹水灌溉联合叶面阻控剂的组合措施显著降低了土壤中 Cd 的生物有效性和水稻 Cd 吸收, 且不会影响水稻的产量。本研究各处理(T1、T2 和 T3)均没有使糙米中的 Cd 含量下降到食品安全标准规定的限制内($\leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 但淹水灌溉联合叶面阻控剂的组合措施使糙米中 Cd 含量从 $0.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低至 $0.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 降幅达到 47.8%, 降低糙米 Cd 含量效果达到极显著水平($P < 0.01$)(图 3)。本试验中使用的叶面阻控剂成本较低, 随着植保无人机的广泛应用, 其操作也更为便利, 淹水灌溉措施经济环保, 农户接受程度高。因此, 在轻中度 Cd 污染稻田中可以尝试采用淹水灌溉联合叶面阻控剂的技术措施进行管理, 有望实现污染稻田安全利用。在后续研究应用中, 一方面可以加大叶面阻控剂的喷施量或喷施次数, 另一方面对于水资源较紧张的地区也可考虑在齐穗至灌浆中期采取间歇灌溉方式。

5. 结论

(1) 淹水灌溉联合叶面阻控措施可降低土壤中 Cd 的生物有效性。在淹水灌溉联合叶面阻控剂处理下, 土壤 pH 提升了 0.5 个单位, 有机质提高了 13.8%, 有效态 Cd 含量降低了 26.2%。

(2) 淹水灌溉联合叶面阻控剂技术措施可降低水稻对 Cd 的吸收与转运。在淹水灌溉联合叶面阻控剂处理下, 水稻各部位 Cd 含量均显著($P < 0.05$)下降, 糙米中的 Cd 含量较对照降低了 47.8%; 根-茎、茎-叶和叶-谷壳的转运系数均显著下降了 25.7%、39.5%和 58.4%。

(3) 淹水灌溉联合叶面阻控剂技术措施可在不影响水稻产量的情况下, 有效阻控 Cd 在水稻体内的迁移转运, 显著降低水稻糙米对 Cd 的吸收。

参考文献

- [1] 中国生态环境部. 2023 年中国生态环境状况公报[R]. 北京: 中国生态环境部, 2024.
- [2] Hussain, B., Ashraf, M.N., Shafeeq-ur-Rahman, Abbas, A., Li, J. and Farooq, M. (2021) Cadmium Stress in Paddy Fields: Effects of Soil Conditions and Remediation Strategies. *Science of the Total Environment*, **754**, Article ID: 142188. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142188>
- [3] Aslam, M.M., Okal, E.J. and Waseem, M. (2022) Cadmium Toxicity Impacts Plant Growth and Plant Remediation Strategies. *Plant Growth Regulation*, **99**, 397-412. <https://doi.org/10.1007/s10725-022-00917-7>
- [4] Suhani, I., Sahab, S., Srivastava, V. and Singh, R.P. (2021) Impact of Cadmium Pollution on Food Safety and Human Health. *Current Opinion in Toxicology*, **27**, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2021.04.004>
- [5] 谢可军, 田发祥, 刘昭兵, 等. 不同土壤质地稻田施用石灰的调酸降镉效果[J]. 湖南生态科学学报, 2024, 11(3): 19-25.
- [6] 裴楠, 梁学峰, 秦旭, 等. 海泡石对镉污染稻田钝化修复效果的稳定性[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(2): 277-284.
- [7] 马桥, 陈镔, 赵颖玥, 等. 钙镁磷肥-碳酸钾-石灰配施对稻米镉积累的影响[J]. 土壤通报, 2024, 55(3): 819-829.
- [8] 陈伟, 俞倩, 叶正钱, 等. 共热解生物炭对农田土壤镉污染修复及水稻吸收和积累镉的影响[J]. 农学学报, 2024, 14(9): 17-23.

- [9] 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.
- [10] Li, H., Zhang, H., Yang, Y., Fu, G., Tao, L. and Xiong, J. (2022) Effects and Oxygen-Regulated Mechanisms of Water Management on Cadmium (cd) Accumulation in Rice (*Oryza sativa*). *Science of the Total Environment*, **846**, Article ID: 157484. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157484>
- [11] 杨小粉, 伍湘, 汪泽钱, 等. 水分管理对水稻镉吸收积累的影响研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(10): 2091-2101.
- [12] 张燕, 江建锋, 黄奇娜, 等. 水分管理调控水稻镉污染的研究与应用进展[J]. 中国稻米, 2021, 27(3): 10-16.
- [13] Chen, H., Huang, X., Chen, H., Zhang, S., Fan, C., Fu, T., *et al.* (2024) Effect of Silicon Spraying on Rice Photosynthesis and Antioxidant Defense System on Cadmium Accumulation. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 15265. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66204-9>
- [14] 黄奇娜, 徐有祥, 林光号, 等. 硅对镉胁迫下水稻苗期抗氧化酶系统及镉离子吸收和转运相关基因表达水平的影响[J]. 中国水稻科学, 2023, 37(5): 486-496.
- [15] 胡婧怡, 陶荣浩, 周晓天, 等. 硅和硒肥叶面调控对水稻镉铅吸收积累的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(6): 1308-1318.
- [16] 魏宾纭, 周航, 刘佳炜, 等. 不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(8): 3855-3861.
- [17] 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.
- [18] Zeng, P., Wei, B., Zhou, H., Gu, J. and Liao, B. (2022) Co-Application of Water Management and Foliar Spraying Silicon to Reduce Cadmium and Arsenic Uptake in Rice: A Two-Year Field Experiment. *Science of the Total Environment*, **818**, Article ID: 151801. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151801>
- [19] 纪雄辉, 梁永超, 鲁艳红, 等. 污染稻田水分管理对水稻吸收积累镉的影响及其作用机理[J]. 生态学报, 2007(9): 3930-3939.
- [20] 李畅, 曾鹏, 杨文, 等. 淹水灌溉协同钝化剂对水稻 Cd 吸收和积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 535-542.
- [21] 张雨婷, 田应兵, 黄道友, 等. 典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(5): 2512-2521.
- [22] Chen, H., Wang, P., Gu, Y., Kretschmar, R., Kopittke, P.M. and Zhao, F. (2020) The Within-Field Spatial Variation in Rice Grain Cd Concentration Is Determined by Soil Redox Status and pH during Grain Filling. *Environmental Pollution*, **261**, Article ID: 114151. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114151>
- [23] 李义纯, 葛滢. 淹水土壤中镉活性变化及其制约机理[J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 840-846.
- [24] 吴雨含, 何磊, 朱捍华, 等. 水分管理耦合硫素对土壤镉活性降低的影响[J]. 环境科学, 2025, 46(6): 3913-3922.
- [25] 吴家梅, 谢运河, 官迪, 等. 硅肥与水分耦合对土壤镉生物有效性和水稻吸收镉的影响[J]. 农业现代化研究, 2025, 46(3): 1-9.
- [26] Wan, Y., Huang, Q., Camara, A.Y., Wang, Q. and Li, H. (2019) Water Management Impacts on the Solubility of Cd, Pb, As, and Cr and Their Uptake by Rice in Two Contaminated Paddy Soils. *Chemosphere*, **228**, 360-369. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.133>
- [27] 高敏, 周俊, 刘海龙, 等. 叶面喷施硅硒联合水分管理对水稻镉吸收转运特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(2): 215-222.
- [28] Huang, X., Fan, C., Xie, D., Chen, H., Zhang, S., Chen, H., *et al.* (2023) Synergistic Effects of Water Management and Silicon Foliar Spraying on the Uptake and Transport Efficiency of Cadmium in Rice (*Oryza sativa* L.). *Plants*, **12**, Article 1414. <https://doi.org/10.3390/plants12061414>
- [29] 唐乐斌, 黄燕玲, 周子寒, 等. 叶面阻隔对水稻吸收和转运镉的影响[J]. 中国环境科学, 2024, 44(3): 1534-1541.