

干旱地区农业研究

Agricultural Research in the Arid Areas

ISSN 1000-7601, CN 61-1088/S

《干旱地区农业研究》网络首发论文

题目：不同农艺阻控措施对猕猴桃镉吸收富集的影响及品种差异研究
作者：高亦琛，朱宸颢，黄梓璇，布凤，任沛东，代允超
收稿日期：2026-06-01
网络首发日期：2026-09-08
引用格式：高亦琛，朱宸颢，黄梓璇，布凤，任沛东，代允超. 不同农艺阻控措施对猕猴桃镉吸收富集的影响及品种差异研究[J/OL]. 干旱地区农业研究.
<https://link.cnki.net/urlid/61.1088.s.20260907.1703.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

不同农艺阻控措施对猕猴桃镉吸收富集的影响及品种差异研究

高亦琛¹, 朱宸颀¹, 黄梓璇¹, 布凤², 任沛东², 代允超^{1*}

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2.周至县土壤肥料工作站, 西安 710400)

摘要: 为研究农艺阻控措施及品种对土壤及猕猴桃 Cd 含量的影响, 以‘徐香’猕猴桃品种为试验材料, 开展不同农艺措施对猕猴桃 Cd 富集的影响研究, 采用田间完全随机区组设计, 探究施加有机肥 (11.25 t·hm⁻²)、过磷酸钙 (3.75 t·hm⁻²)、钙镁磷肥 (5.625 t·hm⁻²) 及配施叶面肥等措施对土壤理化性质和猕猴桃各部位 Cd 含量的影响, 并对比 6 个不同猕猴桃品种的 Cd 吸收差异性。结果表明: 相比对照 (CK), 施加钙镁磷肥使土壤 pH 提高 0.40~0.64, 各措施使阳离子交换量增加幅度为 0.84%~19.33%, 施入有机肥使土壤有机质增加 48.97%~53.45%。在土壤 Cd 含量方面, 不同农艺措施对土壤总 Cd 和土壤有效态镉 (DTPA-Cd) 均有一定的降低作用, 降幅最高分别可达 40.82%和 53.28%。施加阻控剂显著降低了猕猴桃果实、根系、茎和叶中的 Cd 含量, 叶面肥+钙镁磷肥处理效果最佳, 果实、根系、茎部和叶片 Cd 含量较 CK 分别降低 55.17%、72.49%、83.04%和 45.45%。相较于 CK, 各阻控处理总体降低了猕猴桃 Cd 富集与转运风险, 其中叶面肥+钙镁磷肥处理对降低根系富集及根至茎转运的效果最为明显。在猕猴桃品种方面, 供试的 6 个品种中, 不同品种各部位对 Cd 的吸收富集能力存在极显著差异, 均表现为“根>叶≈茎>果实”的分配特征; 品种间比较表明, ‘徐香’猕猴桃中各部位的镉富集量处于较低水平且与其他品种差异显著, 是适合陕南地区镉风险土壤的优质品种。‘秦美’品种表现出较强的 Cd 富集能力, 而‘徐香’和‘哑特’品种果实对 Cd 的积累量最低; ‘徐香’品种具有天然的低转运特质, 配合农艺阻控措施后, 其安全生产保障能力最高。综上, 施用农艺阻控措施对土壤有效态镉 (DTPA-Cd) 含量、猕猴桃 Cd 含量、富集和转运都有明显的降低作用, 叶面肥配施钙镁磷肥处理效果最佳; ‘徐香’果实表现出优异的低吸收、低富集特质。

关键词: 农艺阻控; 猕猴桃; 镉; 土壤有效态镉; 安全生产; 品种差异

中图分类号: S663.4; S19 文献标志码: A

Study on the effects of different agricultural control measures and cultivars on cadmium uptake and accumulation in kiwifruit

收稿日期: 2026-06-01 修回日期: 2026-09-04

基金项目: 陕西省重点研发计划 (2024NC-ZDCYL-02-14); 2025 年陕西省农业关键核心技术攻关项目 (2025NYGG011); 西安嘉农实业集团有限公司 2025 年周至县猕猴桃老果园土壤保育修复与提质增效项目

作者简介: 高亦琛 (2005—), 男, 陕西西安人, 本科在读, 研究方向为土壤健康与受污染耕地安全利用。E-mail: yichengao@nwfau.edu.cn
通信作者: 代允超 (1988—), 男, 副教授, 博士, 博士生导师, 主要从事受污染耕地安全利用与治理修复研究。E-mail: daiye2018@163.com

Gao Yichen¹, Zhu Chenjie¹, Huang Zixuan¹, Bu Feng², Ren Peidong², Dai
Yunchao^{1*}

(1.College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.Zhouzhi Soil and Fertilizer

Workstation, Xi'an 710400, China)

Abstract: To investigate the effects of agricultural control measures and cultivars on soil and kiwifruit cadmium (Cd) content, a study was conducted using the 'Xuxiang' kiwifruit variety as the experimental material. A field completely randomized block design was employed to examine how different agricultural practices—such as application of organic fertilizer (11.25 t·hm⁻²), superphosphate (3.75 t·hm⁻²), calcium-magnesium phosphate fertilizer (5.625 t·hm⁻²), and foliar fertilizer—affected soil physicochemical properties and Cd concentrations in various parts of kiwifruit plants. Additionally, differences in Cd uptake among six kiwifruit cultivars were compared. Results showed that compared with the control (CK), application of calcium-magnesium phosphate fertilizer increased soil pH by 0.40–0.64, while all treatments increased cation exchange capacity by 0.84%–19.33%. Organic fertilizer application raised soil organic matter by 48.97%–53.45%. Regarding soil Cd content, all agricultural measures reduced total soil Cd and available Cd (DTPA-Cd), with reductions reaching up to 40.82% and 53.28%, respectively. The use of mitigants significantly decreased Cd levels in kiwifruit fruits, roots, stems, and leaves, with the combination of foliar fertilizer and calcium-magnesium phosphate fertilizer showing the best effect, reducing Cd content in fruits, roots, stems, and leaves by 55.17%, 72.49%, 83.04%, and 45.45% compared to CK, respectively. Overall, all mitigation treatments reduced the risk of Cd accumulation and translocation in kiwifruit, with the foliar fertilizer plus calcium-magnesium phosphate treatment being most effective in suppressing root accumulation and root-to-stem translocation. Among the six tested cultivars, significant differences were observed in Cd uptake and distribution across plant parts, consistently following the pattern "roots >> leaves ≈ stems > fruits." Compared among cultivars, 'Xuxiang' exhibited relatively low Cd accumulation in all parts and showed significant differences from other cultivars, making it a high-quality choice for Cd-contaminated soils in southern Shaanxi. In contrast, 'Qinmei' demonstrated strong Cd accumulation ability, whereas 'Xuxiang' and 'Yate' had the lowest Cd accumulation in fruits. 'Xuxiang' also possesses natural low translocation characteristics; when combined with agricultural control measures, it offers the highest level of safety assurance for production. In summary, agricultural control practices effectively reduce soil available Cd (DTPA-Cd), kiwifruit Cd content, and its accumulation and translocation, with the combination of foliar fertilizer and calcium-magnesium phosphate fertilizer being the most effective. 'Xuxiang' fruit exhibits outstanding traits of low Cd uptake and low accumulation.

Keywords: agricultural control; kiwifruit; cadmium; available cadmium in soil; safe production; cultivar differences

土壤重金属污染具有不均衡性、积累性及长期潜伏性等特点^[1]。2014 年发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国耕地土壤点位超标率为 19.4%,其中,镉(Cd)污染物点位超标率达到 7.0%,是主要的重金属污染物之一。其生产活动中易被作物吸收富集,不仅影响作物产量和品质,还可通过食物链在人体中积累,危害人体健康^[2]。目前我国防控农产品重金属污染的方法主要有低累积植物筛选^[3]、原位钝化、降低土壤重金属活性(农艺阻控)和作物叶面阻控技术等^[4]。农艺阻控因其降 Cd 高效、实施过程简便且对土壤友好等优势被广泛推广^[5]。目前农艺阻控的方法较多,其中施加有机肥、钙镁磷肥等土壤改良剂因既能钝化土壤中的重金属,又能改善土壤肥力状况^[6],是农户接受度较高的阻控方法。在多种类型农用地开展的试验表明,土壤改良剂单施或与叶面阻控技术联合施用,对减轻水稻、小麦、蔬菜等大田作物中 Cd 的积累均具有明显效果^[7-8]。

我国猕猴桃(*Actinidia deliciosa*)产业起步于 20 世纪 70 年代^[9],在大部分省区都有分布。近年来,随着国内猕猴桃种植规模、面积和产量持续增长,我国已成为猕猴桃栽培大国^[9]。然而,根据栗婷等^[10]的研究,周至猕猴桃产区 3.65%的地区可能存在 Cd 污染风险。猕猴桃作为多年生藤本果树,其食用部位(果实)分布在树体上部,Cd 在“根-茎-叶-果”长距离转运过程中的吸收、分配特征与常规一年生作物存在显著差异,产区土壤 Cd 累积可能通过这一特殊转运路径影响果实安全。

现有对重金属的农艺阻控研究多聚焦于水稻、小麦等一年生草本粮食作物,针对猕猴桃等大型多年生藤本果树的阻控技术体系尚不完善,其 Cd 吸收、转运及阻控机制尚不清楚,不同品种间的吸收富集差异亦不明确。因此,本研究以陕西周至猕猴桃安全利用类耕地为依托,系统开展了施加有机肥、过磷酸钙、钙镁磷肥及配套施用叶面肥的田间阻控试验,并对比‘徐香’、‘秦美’、‘哑特’等 6 个主栽品种的遗传吸收特质,旨在通过“农艺阻控+低累积品种筛选”的协同模式,探明不同处理对土壤理化性质、土壤有效态镉(DTPA-Cd)含量及猕猴桃各部位(根、茎、叶、果实)Cd 含量、转运系数和富集系数的影响,研究结果将为降低重金属污染风险及保障猕猴桃的安全生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与供试材料

试验于 2024 年在陕西省西安市周至县猕猴桃主产区进行,该地区地处秦岭北麓冲积扇平原(108° 12' ~108° 22' E, 34° 03' ~34° 10' N),属暖温带大陆性季风气候,年均气温 13.2℃,年均降水量 674.3 mm,年均日照时数 1993.7 h,无霜期 225 d,昼夜温差

13~17℃，涉及九峰镇南千户村、集贤镇赵代村以及终南镇豆二村，均为 2024 年安全利用类耕地猕猴桃监测点位，各监测点基本情况见表 1。3 个监测点同属秦岭北麓冲积扇平原褐土区，土壤质地均为砂质壤土，栽培模式均为“T”型架，株行距约 2.5 m×3.0 m，灌溉方式均为滴灌。试验果园均为成龄猕猴桃园，树龄 8~12 年，主栽品种为‘徐香’，种植密度约 1320 株·hm⁻²，同时选取同一主产区的‘哑特’、‘秦美’、‘瑞玉’、‘翠香’和‘海沃德’5 个代表性品种作为品种差异对比试验材料。其中，翠香树势最强，属 9 月中旬成熟的中早熟品种；徐香和瑞玉树势较强，属 9 月下旬成熟的中熟品种；秦美树势较强，以高产、高维生素 C 含量著称，属 10 月下旬成熟的晚熟品种；海沃德树势中等，以极耐贮藏见长，属 10 月下旬成熟的晚熟品种；哑特树势中等，抗逆性极强，属 10 月下旬至 11 月上旬成熟的极晚熟品种。

对照（CK）田块土壤初始理化性质为：pH 值为 7.62，有机质含量为 29.00 g·kg⁻¹，全氮含量为 1.72 g·kg⁻¹，有效磷含量为 90.60 mg·kg⁻¹，速效钾含量为 117.00 mg·kg⁻¹，阳离子交换量（CEC，Cation Exchange Capacity）为 11.90 cmol·kg⁻¹。在土壤重金属方面，土壤总 Cd 含量为 0.49 mg·kg⁻¹，土壤有效态镉（DTPA-Cd）含量为 0.137 mg·kg⁻¹。根据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 15618—2018）判定，当 pH>7.5 时，农田 Cd 污染风险筛选值为 0.6 mg·kg⁻¹，试验土壤总 Cd 含量虽略低于风险筛选值，但由于该区域处于安全利用类耕地范围，猕猴桃植株仍存在一定的 Cd 累积风险。

表 1 供试监测点基本情况

Table 1 Basic information of the test monitoring sites

监测点 Monitoring site	地理位置 Geographical location	海拔/m Elevation/m	主栽品种 Main cultivar	备注 Note
九峰镇南千户村 Nanqianhu Village, Jiufeng Town	山前平原区 The plain area in front of the mountains	450~500	海沃德、徐香、翠香 Hayward, Xuxiang, Cuixiang	——
集贤镇赵代村 Zhao Dai Village, Jixian Town	山前平原区 The plain area in front of the mountains	550~600	海沃德为主 Hayward as the main	成熟期较其他两点偏晚 7~10 d The maturity period is 7 to 10 days later than the other two points.
终南镇豆二村 Dou Er Village, Zhongnan Town	中海拔区 Mid-elevation area	480~550	翠香、徐香为主 Cuixiang and Xuxiang are the main ones.	——

供试农艺阻控材料分为土壤改良剂和叶面肥两类。其中，不同施肥措施包括有机肥、过磷酸钙和钙镁磷肥，同时搭配常规叶面肥进行综合阻控。有机肥购买于陕西睿浩生物有限公司，有机质≥45%，总养分（N+P₂O₅+K₂O）≥5%。钙镁磷肥购买于湖北五禾昱丰化工有限公司，有效磷（P₂O₅）≥12.0%。过磷酸钙购买于美乐肥料有限公司，有效磷≥12%，水溶性磷≥7%，硫含量≥8%。叶面肥由实验室自配，主要成分为：亚硒酸钠（Na₂SeO₃，以 Se 计 50~100 mg·L⁻¹）、硅酸钾（K₂SiO₃，以 Si 计 100~200 mg·L⁻¹）和黄腐酸（1~3 g·L⁻¹），另添

加 0.1% (v/v) 有机硅表面活性剂作为展着剂，以去离子水配制。

1.2 试验设计

1.2.1 农艺阻控措施试验 农艺阻控措施试验以‘徐香’猕猴桃为试验对象，采用完全随机区组设计，每处理 3 次重复，每个处理小区选取 5 株长势一致、无病虫害的成龄果树，小区面积约 37.5 m²，共计 120 株。试验果园的基础施肥（本年度施肥情况）为：施用鸡粪 1.5 t·hm⁻²、高氮肥（含氮 28%）0.75 t·hm⁻²以及复合肥（15-5-25）0.75 t·hm⁻²，鸡粪总 Cd 含量经检测为 0.18 mg·kg⁻¹（干重计），低于我国有机肥料 Cd 限量标准（NY/T 525-2021，Cd≤3.0 mg·kg⁻¹），高氮肥和复合肥中的 Cd 含量对土壤 Cd 输入的贡献可忽略^[11]。在此常规施肥管理的基础上，为有效阻断和控制猕猴桃植株对土壤 Cd 的吸收与积累，试验共设置 7 个阻控处理和对照（CK），试验方案详见表 2。土壤改良剂（有机肥、过磷酸钙、钙镁磷肥）结合果园 2024 年 3 月的春季耕作施入土壤，叶面肥于猕猴桃花后（2024 年 5 月）进行叶面喷施，每次喷施量约 600 L·hm⁻²，每 7 d 喷施一次，共喷施 3 次。喷施时间为晴天上午 10 时前或下午 4 时后，喷施后 4 h 内遇雨则补喷。试验期间的其他园艺管理均根据试验区农户日常标准进行。

1.2.2 品种差异对比试验 品种差异对比试验为多点调查试验，依托周至县安全利用类耕地猕猴桃监测点的 3 个采样区域（九峰镇南千户村、集贤镇赵代村、终南镇豆二村），根据各区域实际种植情况选取代表性品种进行对比研究。其中，九峰镇南千户村采集海沃德、徐香、翠香 3 个品种；集贤镇赵代村采集‘海沃德’、‘秦美’、‘瑞玉’ 3 个品种；终南镇豆二村采集‘翠香’、‘徐香’、‘哑特’ 3 个品种。三地共覆盖‘徐香’、‘哑特’、‘秦美’、‘瑞玉’、‘翠香’和‘海沃德’ 6 个代表性品种，每个品种选取 3 株长势一致的果树进行采样，各品种的重复来源于其种植区域。

表 2 不同农艺阻控处理试验方案

Table 2 Experimental design of different agricultural control treatments

处理 Treatment	试验设计 Experimental design
CK	不进行阻控处理 No passivator
TC1	有机肥 Organic fertilizer 11.25 t·hm ⁻²
TC2	过磷酸钙 Superphosphate 3.75 t·hm ⁻²
TC3	钙镁磷肥 Calcium-magnesium phosphate fertilizer 5.625 t·hm ⁻²
TC4	叶面肥+有机肥 11.25 t·hm ⁻² Foliar fertilizer + Organic fertilizer 11.25 t·hm ⁻²
TC5	叶面肥+过磷酸钙 3.75 t·hm ⁻² Foliar fertilizer + Superphosphate 3.75 t·hm ⁻²
TC6	叶面肥+钙镁磷肥 5.625 t·hm ⁻² Foliar fertilizer + Calcium-magnesium phosphate fertilizer 5.625 t·hm ⁻²
TC7	叶面肥单施 Foliar fertilizer

1.3 样品采集与处理

在各供试果园中，于猕猴桃果实成熟期随机选取长势一致的果树作为试验对象进行取样

分析, 其中, 农艺阻控措施试验 (供试品种为'徐香') 的植物与土壤样品统一于 2024 年 9 月 25 日~26 日采集。品种差异对比试验考虑到各供试品种的成熟期跨度较大, 分别在各品种的商品成熟期进行采样: 翠香于 9 月 12 日、徐香和瑞玉于 9 月 25 日~26 日、秦美和海沃德于 10 月 22 日~23 日、哑特于 10 月 28 日采集, 均以果实可溶性固形物含量 $\geq 6.5\%$ 作为成熟度判断标准, 以保证各品种样品处于可比的生理成熟阶段。同时保持各监测点的底肥和土壤基本理化性质一致, 采用随机混合采样法同步采集猕猴桃植物样品与对应的土壤样品。土壤取样位置为施加农艺阻控材料及对应根系分布区: 树冠滴水线以内、距树干约 50~80 cm 处, 使用不锈钢土钻按 0~30 cm 耕层采集, 每小区按 "S" 形 5 点取样混合为一个土样, 每个土壤样品采集量约 500 g; 采集的土壤样品经过自然风干、挑去杂物、研磨并分别过 10 目 (2 mm) 和 100 目 (0.149 mm) 尼龙筛后装袋备用。

对采集了土壤样品的猕猴桃树同步采收植株各部位样品。使用不锈钢剪刀分别采集对应植株的根、茎、叶和果实, 由同一试验小区的多株果树采摘混合而成。各部位采样标准为: 根系 200~300 g、茎 200~300 g、叶片 200~300 g、果实 500 g。采集的植物样品用去离子水彻底洗涤后分类处理: 测试前将果实样品去皮并打浆, 用于测定果肉浆液的 Cd 含量; 根、茎、叶等其余植物样品先在 105℃ 下杀青 30 min, 随后在 65℃ 烘干至恒重, 最后研磨粉碎并过 100 目筛保存待测。

1.4 测定项目与方法

土壤基本理化性质测定: 土壤 pH 使用超纯水浸提, 水土比为 2.5:1, pH 计测定; 土壤有机质采用重铬酸钾 (外加热法) 容量法测定; 土壤阳离子交换量 (CEC) 采用 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{NH}_4\text{OAc}$ (pH=7.0) 交换-滴定法测定。此外, 根据本试验测定需求, 土壤全氮采用凯氏定氮法, 经消解后使用凯氏定氮仪进行测定; 土壤有效磷采用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{NaHCO}_3$ 浸提-钼锑抗比色法测定, 使用可见分光光度计测定; 土壤速效钾采用 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{NH}_4\text{OAc}$ 浸提-火焰光度法, 利用火焰光度计进行测定。

Cd 的浸提与测定: 土壤有效态镉 (DTPA-Cd) 采用二乙三胺五乙酸 (DTPA) 提取^[12]; 土壤总 Cd 的测定采用 $\text{HCl}-\text{HNO}_3-\text{HF}-\text{HClO}_4$ 消解法, 猕猴桃植物样品 (根、茎、叶、果实) 中 Cd 采用 $\text{HNO}_3-\text{HClO}_4$ 消化法进行消解^[13]。上述所有提取液和消解液均使用原子吸收光谱仪 (PE 900T) 测定其中的 Cd 含量。以上所有指标测定均平行测定 3 次。

1.5 数据处理与统计分析

试验数据采用 Excel 2024 软件进行整理和处理, 采用 SPSS 25 软件进行统计分析, 试验结果均以平均值 $\pm$ 标准偏差 (Mean $\pm$ SD) 表示。采用 Duncan 新复极差法进行多重比较 ($P<0.05$), 采用 Origin 2024 软件进行图形绘制。猕猴桃植株各部位 Cd 富集系数 (BCF)、不同部位转运系数 (TF) 计算公式如下^[14]:

$$\text{BCF} = \text{猕猴桃植株各部位 Cd 含量 (mg}\cdot\text{kg}^{-1}) / \text{土壤中总 Cd 含量 (mg}\cdot\text{kg}^{-1})$$

TF_{1-2} =猕猴桃植株部位 1 的 Cd 含量 (mg·kg⁻¹) /部位 2 的 Cd 含量 (mg·kg⁻¹)

2 结果与分析

2.1 不同阻控措施对土壤理化性质的影响

不同农艺阻控措施处理对猕猴桃果园土壤理化性质的影响如表 3 所示。与 CK 相比，呈碱性的钙镁磷肥是提升土壤 pH 的主要因素，有机肥对土壤肥力指标的改善最为全面，过磷酸钙则主要提升了土壤有效磷含量。其中，TC6（叶面肥+钙镁磷肥）对土壤 pH 较 CK 提高了 8.40%，提升幅度最高并达显著差异；相反，施加过磷酸钙的处理（TC2、TC5）使土壤 pH 分别降至 7.32 和 7.11，较 CK 降低 3.94%和 6.69%。在土壤有机质方面，TC1（单施有机肥）和 TC4（叶面肥+有机肥）处理分别提升至 44.50 g·kg⁻¹ 和 43.20 g·kg⁻¹，增幅达 53.45% 和 48.97%；其余处理的有机质含量较 CK 变幅为 0%~14.14%。在土壤全氮方面，与 CK 相比，所有阻控处理均提高了土壤全氮含量，增幅范围为 7.56%~50.00%，其中施加有机肥的 TC1 和 TC4 处理增幅最大，分别达 34.88%和 50.00%。在土壤有效磷方面，各处理有效磷含量较 CK 增幅达 24.17%~93.38%，其中施加过磷酸钙和钙镁磷肥的处理（TC2、TC3、TC5、TC6）增幅最高，TC5 和 TC6 分别达 88.19%和 93.38%。在土壤速效钾方面，各处理速效钾含量较 CK 增幅为 19.66%~150.43%，其中施加有机肥的 TC1 和 TC4 处理增幅最大，分别达 139.32%和 150.43%。各阻控措施对土壤阳离子交换量均有显著提升作用（ $P<0.05$ ），增幅介于 0.84%~19.33%，其中施加有机肥的 TC1 和 TC4 处理增幅最大，均提升至 14.20 cmol·kg⁻¹。综合来看，TC1 和 TC4 在提升土壤有机质、速效钾、阳离子交换量和全氮含量方面效果最优，TC3 和 TC6 在提升土壤 pH 方面表现最为显著，TC2、TC3、TC5 和 TC6 在提升土壤有效磷方面效果最显著。

表 3 不同阻控措施对土壤理化性质的影响

Table 3 Effects of different control treatments on soil physicochemical properties

处理 Treatment	pH	有机质 OM/(g·kg ⁻¹)	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	有效磷 AP/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK/(mg·kg ⁻¹)	阳离子交换量 CEC/(cmol·kg ⁻¹)
CK	7.62 ± 0.13 bc	29.00 ± 0.42 d	1.72 ± 0.02 f	90.60 ± 0.88 e	117.00 ± 1.55 f	11.90 ± 0.08 d
TC1	7.64 ± 0.20 bc	44.50 ± 1.16 a	2.32 ± 0.07 b	112.50 ± 1.90 d	280.00 ± 2.12 b	14.20 ± 0.26 a
TC2	7.32 ± 0.19 cd	30.10 ± 0.89 cd	1.97 ± 0.04 d	155.20 ± 2.87 b	140.00 ± 4.29 e	12.20 ± 0.22 d
TC3	8.02 ± 0.22 ab	31.10 ± 0.81 c	1.96 ± 0.05 d	153.00 ± 3.73 b	146.00 ± 3.64 e	12.50 ± 0.33 cd
TC4	7.70 ± 0.22 c	43.20 ± 0.73 a	2.58 ± 0.06 a	118.50 ± 2.14 cd	293.00 ± 6.47 a	14.20 ± 0.19 a
TC5	7.11 ± 0.13 d	33.10 ± 0.80 b	2.02 ± 0.03 cd	170.50 ± 2.96 a	201.00 ± 1.92 c	12.90 ± 0.27 c
TC6	8.26 ± 0.19 a	33.00 ± 0.79 b	2.09 ± 0.07 c	175.20 ± 4.05 a	194.00 ± 4.13 d	13.50 ± 0.30 b
TC7	7.44 ± 0.15 cd	29.00 ± 0.77 d	1.85 ± 0.04 e	118.00 ± 3.33 c	144.00 ± 2.69 e	12.00 ± 0.33 d

注：同列不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at $P<0.05$. The same below.

2.2 不同阻控措施对土壤总镉和有效态镉含量的影响

不同农艺阻控措施对土壤总 Cd 和土壤有效态镉 (DTPA-Cd) 的影响如图 1 所示。与 CK 相比, 各阻控处理土壤总 Cd 含量均显著降低 ($P<0.05$)。其中, CK 处理的土壤总 Cd 含量为 $0.49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 施加阻控措施后, TC3 (钙镁磷肥)、TC4 (叶面肥+有机肥) 和 TC6 (叶面肥+钙镁磷肥) 处理降幅最大, 总 Cd 均降至 $0.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 较对照减少了 40.82%。其余 TC5、TC1、TC2、TC7 处理的土壤总 Cd 也分别降至 $0.32 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.35 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。对于土壤有效态镉 (DTPA-Cd), 各阻控剂均能显著降低其含量。相较于 CK 处理的 $0.137 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 各处理的土壤有效态镉 (DTPA-Cd) 分别降至 $0.064 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (TC6)、 $0.076 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (TC4)、 $0.077 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (TC3)、 $0.078 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (TC5)、 $0.084 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (TC1、TC2)、 $0.089 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (TC7), 减幅范围为 35.04%~53.28%。由此可见, TC6 (叶面肥+钙镁磷肥) 处理效果最优, 其土壤有效态镉 (DTPA-Cd) 降至 $0.064 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (降幅达 53.28%); 总 Cd 降至 $0.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (降幅达 40.82%), 显著高于其他处理, 对降低土壤有效态镉 (DTPA-Cd) 活性效果最好。

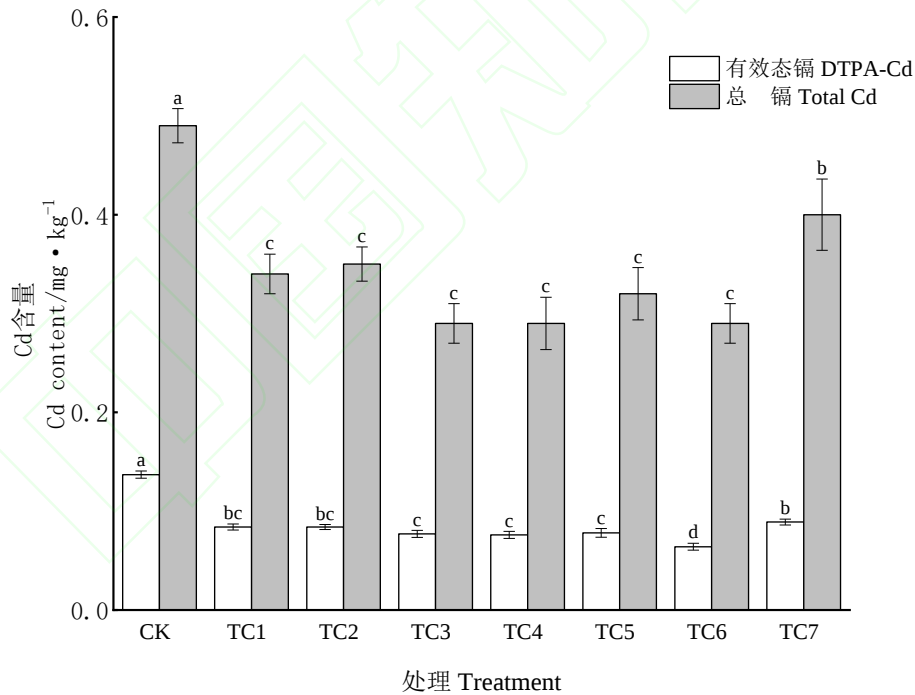


图 1 不同阻控处理对土壤总镉和有效态镉 (DTPA-Cd) 含量的影响

Fig.1 Effects of different treatments on soil total Cd and available Cd (DTPA-Cd) contents

注: 不同小写字母表示同一指标不同处理间差异显著 ($P<0.05$); 误差线代表标准偏差 (SD)。下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at $P<0.05$. Error bars represent the standard deviation (SD). The same below.

2.3 不同阻控措施对猕猴桃各部位镉含量的影响

不同阻控措施对猕猴桃各部位 Cd 含量的影响如表 4 所示。无论是对照还是施加阻控剂，猕猴桃植株各部位 Cd 含量分布趋势一致，均表现为：根>>叶≈茎>果实。CK 处理的猕猴桃果实 Cd 含量最高，为 0.0029 mg·kg⁻¹，仍远低于国家标准规定的新鲜水果 Cd 限量值（0.05 mg·kg⁻¹）。与 CK 相比，各项农艺阻控措施均降低了猕猴桃各部位 Cd 含量，果实、根、茎和叶的降幅范围分别为 3.45%~55.17%、0.87%~72.49%、52.17%~83.04%和 9.09%~45.45%。配施叶面肥的处理（TC4、TC5、TC6）果实 Cd 降幅为 48.28%~55.17%，整体高于对应单施肥料处理（TC1、TC2、TC3）的 37.93%~51.72%。其中，TC6（叶面肥+钙镁磷肥）降 Cd 效果最优，果实、根、茎和叶 Cd 含量较 CK 分别降低 55.17%、72.49%、83.04%和 45.45%；TC4（叶面肥+有机肥）次之，各部位降幅分别为 51.72%、67.25%、80.87%和 36.36%。单施叶面肥的 TC7 处理降幅最小，果实 Cd 仅降低 3.45%，根和叶降幅均不足 10%。综上，土壤改良剂配施叶面肥的双重阻控模式较单一措施降 Cd 效果更优，其中 TC6（叶面肥+钙镁磷肥）是实现根际钝化与植株阻控协同效应的最有效手段。

表 4 不同阻控措施对猕猴桃各部位镉含量的影响/（mg·kg⁻¹）

Table 4 Effects of different control measures on Cd content in different tissues of kiwifruit

处理 Treatment	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root	果实 Fruit
CK	0.022 ± 0.002 a	0.0230 ± 0.002 a	0.229 ± 0.004 a	0.0029 ± 0.0002 a
TC1	0.018 ± 0.003 abc	0.0053 ± 0.0004 c	0.119 ± 0.004 c	0.0015 ± 0.0004 b
TC2	0.019 ± 0.003 ab	0.0110 ± 0.001 b	0.225 ± 0.003 a	0.0018 ± 0.0002 b
TC3	0.017 ± 0.002 abc	0.0061 ± 0.0004 c	0.078 ± 0.003 d	0.0014 ± 0.0002 b
TC4	0.014 ± 0.001 bc	0.0044 ± 0.0002 c	0.075 ± 0.003 d	0.0014 ± 0.0003 b
TC5	0.019 ± 0.003 ab	0.0055 ± 0.0003 c	0.162 ± 0.003 b	0.0015 ± 0.0003 b
TC6	0.012 ± 0.001 c	0.0039 ± 0.0003 c	0.063 ± 0.006 e	0.0013 ± 0.0004 b
TC7	0.020 ± 0.004 ab	0.0110 ± 0.003 b	0.227 ± 0.003 a	0.0028 ± 0.0002 a

2.4 不同阻控措施对‘徐香’猕猴桃镉富集与转运的影响

不同农艺阻控措施下，‘徐香’猕猴桃各部位对 Cd 的富集系数均表现为“根系 > 叶 > 茎 > 果实”，转运系数整体呈现“茎至叶最高，茎至果实次之，根系至茎最低”的分配规律，表明猕猴桃自身存在明显的根部阻截效应。在 Cd 富集方面，根系是主要的富集器官，相比于 CK 的根系富集系数，施加过磷酸钙或单施叶面肥（TC2、TC7）使其升高 21.43%~37.55%，而施加偏碱性缓释肥及复合处理（TC1、TC3、TC4、TC6）则大幅降低了根系富集作用。其中，复合阻控模式表现最优，TC6（叶面肥+钙镁磷肥）处理将根系富集系数降至最低，较 CK 降低 53.52%，TC4（叶面肥+有机肥）降至 0.259，较 CK 降低 44.66%，其拦截效果均明显优于对应的单施处理。在体内转运方面，各阻控处理均有效抑制了 Cd 向地上部

的迁移，“根系至茎”转运系数较 CK 下降 22.10%~66.20%。对比配施与单施处理，配施叶面肥增强了土壤改良剂的降 Cd 效果。根系富集系数方面，TC4 较 TC1 降低 26.11%，TC5 较 TC2 降低 21.25%，TC6 较 TC3 降低 19.23%，表明叶面肥与土壤改良剂具有协同增效作用。根至茎转运系数方面，TC5 较 TC2 降低 30.56%，TC6 较 TC3 降低 20.84%；TC4 的根至茎转运系数虽略高于 TC1，但其根系 Cd 绝对含量较 TC1 降低 36.97%，向地上部转运总量仍显著减少。综合来看，TC6 在降低根系富集与抑制 Cd 转运方面均表现最优。

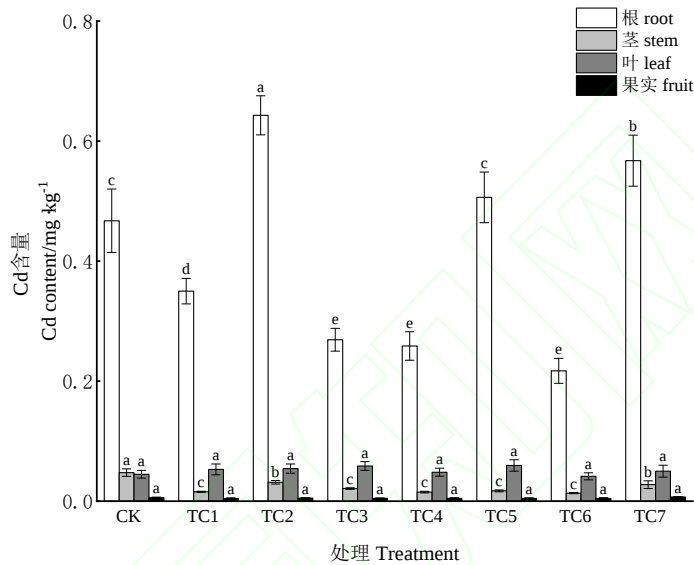


图 2 不同阻控处理对猕猴桃各部位镉富集系数的影响

Fig.2 Effects of different control treatments on Cd bioconcentration factor in different parts of kiwifruit

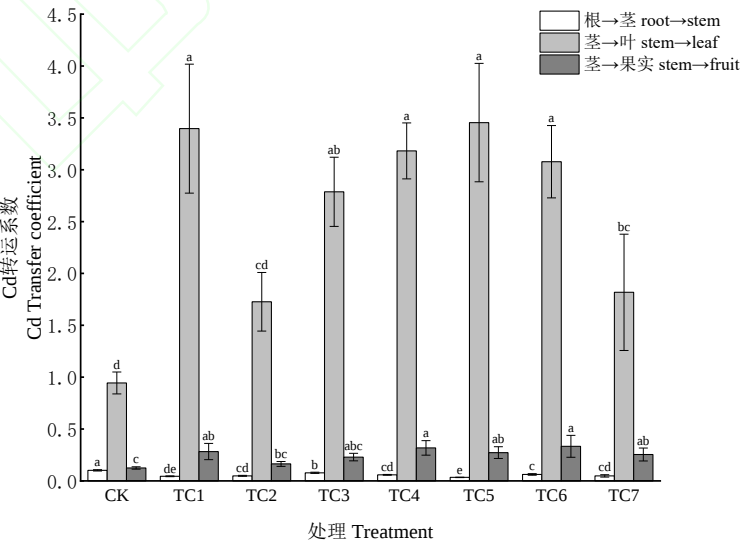


图 3 不同阻控处理对猕猴桃各部位镉转运系数的影响

Fig.3 Effects of different control treatments on Cd transfer coefficient in different tissues of kiwifruit

2.5 不同猕猴桃品种镉吸收与积累的差异分析

由图 4 可知, 6 个供试猕猴桃品种对土壤中重金属 Cd 的吸收及在不同组织器官中的分配表现出一致的规律, 即 Cd 含量均呈现“根>叶≈茎>果实”的分布特征。绝大部分被吸收的 Cd 离子被截留在根部, 向地上部果实的转运量极低, 表明猕猴桃植株自身存在明显的根系阻截效应。在基因型差异方面, 不同品种根系对 Cd 的吸收富集能力存在极显著差异。其中, 本试验主推的品种‘徐香’(0.229 mg·kg⁻¹)与‘哑特’(0.310 mg·kg⁻¹)根系 Cd 含量处于极低水平; 而‘秦美’根系的 Cd 积累量最高(1.490 mg·kg⁻¹), ‘海沃德’与‘瑞玉’次之。从可食部位来看, ‘哑特’(0.0020 mg·kg⁻¹)和‘徐香’(0.0029 mg·kg⁻¹)果实的 Cd 富集风险最低, 而‘秦美’果实的 Cd 含量(0.0237 mg·kg⁻¹)远高于其他品种。综合以上特征, 不同猕猴桃品种根系对 Cd 的吸收以及镉向果实的转运能力具有显著的遗传特异性。其中, ‘徐香’与‘哑特’不仅根部吸收量少, 且向果实转运的比例极低, 展现出优异的“低吸收、低富集”特质。

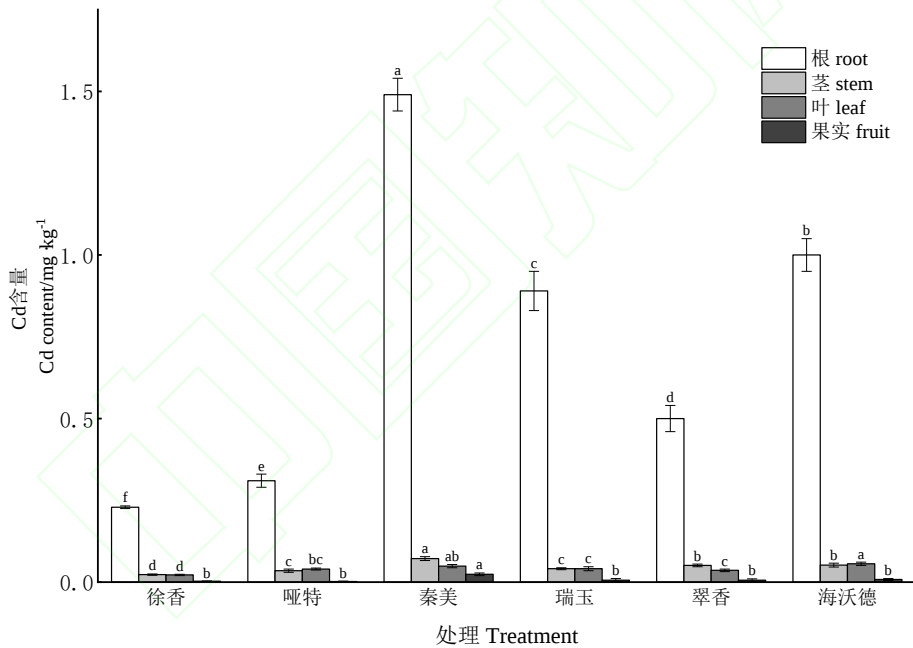


图 4 不同猕猴桃品种各部位镉吸收与积累差异

Fig.4 Differences in Cd uptake and accumulation in different tissues of various kiwifruit cultivars

2.6 土壤理化性质与镉含量的相关性及其主成分分析

对土壤 pH、有机质、全氮、有效磷、速效钾、CEC 与土壤有效态镉 (DTPA-Cd)、植株各部位 Cd 含量及富集转运系数进行 Pearson 相关性分析, 并选取 pH、有机质、全氮、有效磷、速效钾、CEC、土壤有效态镉 (DTPA-Cd)、根系 Cd 和果实 Cd 共 9 个关键指标进行主成分分析 (PCA), 结果如图 5 所示。相关性方面, 土壤 pH 和 CEC 是影响 Cd 活性的两个核心土壤因子, 与土壤有效态镉 (DTPA-Cd) 及各部位 Cd 含量总体呈负相关, 其中 pH

与根系富集系数的负相关性最强 ($r=-0.832$, $P=0.011$), CEC 与根系 Cd 和果实 Cd 亦均达显著负相关 ($r=-0.753$, $P=0.031$; $r=-0.714$, $P=0.047$), 表明提升土壤 pH 和阳离子交换能力是降低植株 Cd 积累的关键途径; 土壤有效态镉 (DTPA-Cd) 与各部位 Cd 含量均呈正相关, 与茎部 Cd 的相关系数最高 ($r=0.960$, $P<0.001$), 与果实 Cd 次之 ($r=0.811$, $P=0.015$), 与叶片 Cd 也达到了显著水平 ($r=0.756$, $P=0.030$), 揭示了土壤 Cd 有效性对植株各部位 Cd 积累的逐级驱动效应。土壤肥力指标之间, 有机质与速效钾、CEC、全氮均呈极显著正相关 (r 分别为 0.971、0.938 和 0.922, P 值均小于 0.01), 印证了有机肥的施入可提升多项土壤肥力。植株各部位 Cd 含量之间, 根系 Cd 与叶片 Cd 的相关系数最高 ($r=0.867$, $P=0.005$), 根系 Cd 与果实 Cd ($r=0.822$, $P=0.012$)、茎部 Cd 与果实 Cd ($r=0.865$, $P=0.006$) 亦均达显著或极显著正相关水平, 进一步证实根部 Cd 吸收量是决定地上部及果实 Cd 积累水平的基础。PCA 结果表明, 前两个主成分累计贡献率为 81.5%, 其中 PC1 贡献率 59.2%, PC2 贡献率 22.3%, 可有效概括 9 个指标的大部分变异信息。PC1 正载荷最高的指标依次为 CEC、全氮、速效钾和有机质, 负载荷绝对值最高的指标为根系 Cd、果实 Cd 和土壤有效态镉 (DTPA-Cd), PC1 正方向表征了“高土壤肥力—低 Cd 含量”的递变趋势, 负方向则对应“低土壤肥力—高 Cd 含量”。各处理 PC1 得分排序为 TC4>TC1>TC6>TC3>TC5>TC2>TC7>CK, 其中 TC4 (叶面肥+有机肥)、TC1 (有机肥) 和 TC6 (叶面肥+钙镁磷肥) 得分最高 (3.12~1.71), 位于 PC1 正方向端 (高肥力—低 Cd), 与前述各节中三者降 Cd 效果最优的结论一致; CK 和 TC7 (单施叶面肥) 得分最低, 位于 PC1 负方向端 (低肥力—高 Cd), 降 Cd 效果最差; TC2 得分亦为负值, 其降 Cd 效果居中偏弱。PC2 主要受有效磷 (载荷 0.88) 和 pH (载荷 0.34) 驱动, 施加钙镁磷肥的 TC6 和 TC3 在 PC2 上得分最高 (2.05 和 1.75), 与其 pH 提升幅度最大相对应, 体现了钙镁磷肥降低 Cd 活性的作用路径。综上说明, “提升土壤 CEC 和 pH→降低土壤有效态镉 (DTPA-Cd)→减少根系 Cd 吸收→抑制果实 Cd 积累”的级联调控路径在统计学层面得到了完整验证, TC6 (叶面肥+钙镁磷肥) 在该路径各环节均表现最优。

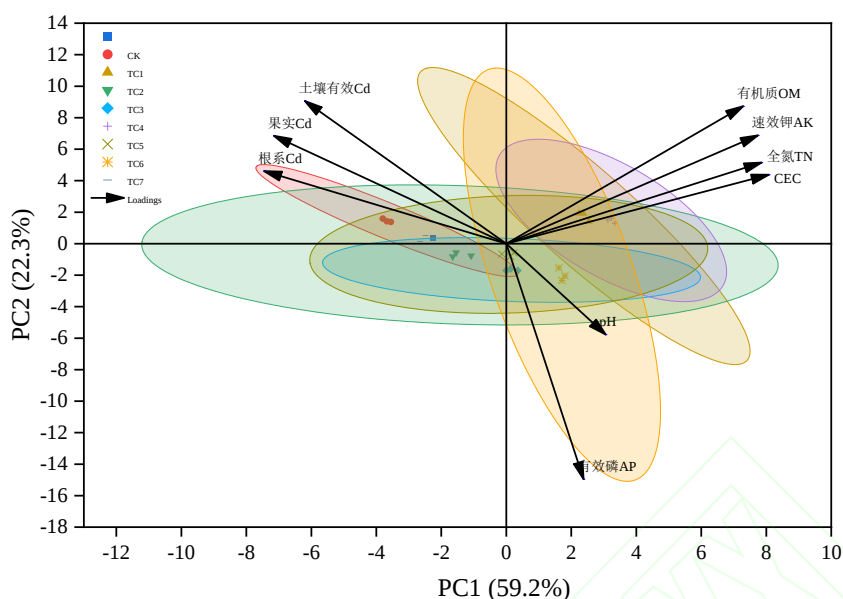


图5 土壤理化性质与镉相关指标的 Pearson 相关性热图及主成分分析双标图

Fig.5 Pearson correlation heatmap and PCA biplot of soil physicochemical properties and Cd-related indicators

3 讨论

3.1 土壤改良剂对镉的钝化机理

土壤 pH 和阳离子交换量直接决定 Cd 的存在形态与有效性。钙镁磷肥施入土壤后释放 OH^- ，提高 pH 和磷酸根浓度，促使 Cd^{2+} 与 OH^- 、 PO_4^{3-} 反应生成 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 或 $\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$ 沉淀^[15]，经 TC3 和 TC6 处理后 pH 较 CK 提高 5.25%~8.40%，其中经 TC6 处理后土壤有效态镉（DTPA-Cd）降幅达 53.28%，与该钝化路径一致。有机肥通过另一路径发挥作用：TC1 和 TC4 处理阳离子交换量较 CK 提高 19.33%，有机质提高 48.97%~53.45%，前者增加土壤胶体负电荷位点，增强了 Cd^{2+} 的静电吸附；后者降解产生的羧基和酚羟基进一步络合固定 Cd^{2+} 。Liu 等^[16]在碱性土壤中同样证实有机肥可以通过提升阳离子交换量降低小麦对 Cd 的吸收。钟林炳等^[17]在猕猴桃和葡萄园中施用钙镁磷肥后降 Cd 幅度低于本试验，赵少婷等^[18]在同一产区的结果亦不及本研究。差异可能源于两点：本试验钙镁磷肥施用量为 $5.625 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，高于常规用量；同时配施了含硒、硅的叶面肥，强化了整体阻控效果。此外，TC1 和 TC4 速效钾含量较 CK 增幅达 139.32%~150.43%，说明有机肥在钝化 Cd 的同时兼具培肥功能。相关性分析进一步证实，CEC 与根系 Cd、果实 Cd 均呈显著负相关，土壤有效态镉（DTPA-Cd）与果实 Cd 呈极显著正相关，从统计学角度验证了‘提升土壤阳离子交换能力→降低 Cd 有效性→减少果实 Cd 积累’的因果链。

3.2 土壤改良剂与叶面肥协同阻控猕猴桃镉积累的机制

土壤改良剂与叶面肥配合施用存在协同效应，可从根际竞争和植株阻控两方面加以解释。

根际层面,钙镁磷肥和有机肥释放的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与 Cd^{2+} 竞争根系细胞膜转运蛋白结合位点,减少 Cd 的跨膜吸收,马桥等^[19]在水稻中证实了 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 对 Cd^{2+} 的竞争抑制作用,有机肥活性官能团对 Cd^{2+} 的络合进一步降低了根际土壤有效态镉(DTPA-Cd)浓度。植株层面,叶片喷施的硒、硅经吸收后进入木质部,与 Cd 竞争装载位点和长距离转运通道。石楷岐^[20]在小麦中报道叶面硅肥使籽粒 Cd 降低 27.70%~40.60%,Zheng 等^[21]证实锌通过抑制 Cd 在木质部的移动性减少籽粒积累。配施叶面肥后,根系富集系数 TC4 较 TC1 降低 26.11%,TC5 较 TC2 降低 21.25%,TC6 较 TC3 降低 19.23%,TC6 果实 Cd 降幅达 55.17%,均优于对应的单施处理。上述“土壤钝化—根际竞争—植株阻控”三者的协同机制在水稻、小麦等一年生作物中已被验证,本试验将其整合应用于猕猴桃这一多年生果树,为该机制在多年生果树中的应用提供了田间证据。

3.3 猕猴桃植株镉分配特征与根部阻截机制

各处理猕猴桃 Cd 含量和富集系数均呈根>叶≈茎>果实的分布特征,根至茎转运系数在各转运路径中最低,说明根部阻截是限制 Cd 向地上部迁移的关键。该阻截效率取决于两条途径:根系细胞壁中果胶和纤维素的羧基、羟基与 Cd^{2+} 结合,将其固定在胞外基质中^[22];穿越细胞膜进入胞质的 Cd^{2+} 被谷胱甘肽和植物络合素螯合后,经液泡膜 ABC 转运蛋白和 HMA3 转运至液泡中区隔储存^[23]。王思元等^[24]在猕猴桃盆栽试验中测得根系 Cd 分配系数(根系 Cd 占全株 Cd 总量的比例)超过 0.90、果实分配系数低于 0.01,即绝大部分 Cd 被截留在根系,与本研究田间结果中根系富集系数远高于地上部的规律一致。TC4 的根至茎转运系数虽略高于 TC1,但其根系 Cd 绝对含量较 TC1 降低 36.97%,向茎部转运的总量仍大幅减少,由此判断根部阻截效果兼顾了转运系数与 Cd 的绝对含量变化。

3.4 猕猴桃品种间 Cd 积累差异的生理基础

品种间 Cd 积累差异的生理基础与根系分泌物、细胞壁固定和液泡区隔化三个方面有关。秦美根系 Cd 含量为 $1.490 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,约为徐香的 6.5 倍。吴香等^[25]指出 Cd 胁迫下根系分泌的低分子量有机酸可酸化根际微域并活化土壤中难溶态 Cd。秦美根系分泌的草酸、柠檬酸等可能促进了根际 Cd 活化,是其高吸收的重要原因。在体内阻控方面,杨釜等^[26]在 Cd 安全水稻材料中发现根系细胞壁果胶含量和甲酯化程度显著高于普通品种,增强了 Cd 的吸附固定能力。徐香和哑特果实 Cd 含量仅为 0.0029 和 $0.0020 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,推测其根系细胞壁 Cd 固定能力和液泡区隔化效率均优于秦美。王仁才等^[27]对湖南猕猴桃产区的调查表明品种间 Cd 积累差异显著,筛选低累积品种是降低果实 Cd 风险的有效策略,本试验进一步从富集系数和转运系数角度为徐香和哑特的低累积特性提供了数据支撑。

然而,本研究仍存在一定局限性。首先,试验仅在一个生长季(2024 年)开展,猕猴桃作为多年生果树,阻控措施的长期持续效果有待多年定位试验验证。其次,本研究仅聚焦于 Cd 含量的变化,未同步监测叶片丙二醛(MDA)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)

等抗氧化系统指标及果实品质与产量指标,无法评估农艺阻控措施对猕猴桃植株生理健康与果实商品性的潜在影响,后续研究应结合生理生化指标进行综合效应评价。同时,钙镁磷肥和有机肥的高施用量可能带来磷素淋溶和面源污染的环境风险,未来需在保证降 Cd 效果的前提下继续探索经济-环境效益最优的减量施用方案。建议后续研究可结合代谢组学和转录组学技术,阐明不同猕猴桃品种 Cd 耐性与转运差异的分子调控网络,为猕猴桃 Cd 低累积品种的分子标记辅助育种提供依据。

4 结论

(1) 施加有机肥和钙镁磷肥均可降低土壤有效态镉(DTPA-Cd)含量,以叶面肥配施钙镁磷肥效果最佳,其次为叶面肥配施有机肥。两种复合处理均能有效抑制 Cd 由根系向地上部的转运,降低果实 Cd 积累。

(2) 6 个供试品种中,徐香和啞特果实 Cd 含量低、Cd 富集和转运能力弱,属低积累品种;秦美根系 Cd 积累量最高,在 Cd 污染风险区种植时需关注其果实安全性。选用徐香等低积累品种,配套钙镁磷肥与叶面肥的复合阻控措施,可有效降低猕猴桃果实 Cd 超标风险。

参考文献

- [1] 何富豪,田超,户少武,等.土壤镉污染和叶面施锌对小麦不同部位镉锌含量的影响[J].农业环境科学学报,2024,43(04):741-751.
- HE H F, TIAN C, HU S W, et al. Effects of soil Cd pollution and foliar zinc application on Cd and Zn contents in different parts of wheat[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(04): 741-751.
- [2] 杨宇,郭婷婷,刘孝利,等.南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价[J].环境科学,2023,44(03):1602-1610.
- YANG Y, GUO T T, LIU X L, et al. Spatial distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in cultivated soils of agricultural small watersheds in typical mining areas of southern China[J]. Environmental Science, 2023, 44(03): 1602-1610.
- [3] 井永苹,聂岩,李彦,等.山东偏酸性棕壤区小麦镉低累积品种筛选[J].农业环境科学学报,2023,42(06):1238-1246.
- JING Y P, NIE Y, LI Y, et al. Screening of wheat cultivars with low Cd accumulation in slightly acidic brown soil area of Shandong Province[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(06): 1238-1246.
- [4] 曹阳,李撑娟,王辉,等.施加钝化剂及叶面肥对大田小麦-玉米轮作 Cd 吸收转运的影响[J].农业环境科学学报,2023,42(02):319-326.
- CAO Y, LI C J, WANG H, et al. Effects of passivator and foliar fertilizer application on Cd uptake and transport in a wheat-maize rotation system[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(02): 319-326.
- [5] 王晓晶,张东明,曹阳,等.钝化剂对轻中度镉污染农田的安全利用效果[J].环境科学,2024,45(02):1098-1106.
- WANG X J, ZHANG D M, CAO Y, et al. Safe utilization effects of passivators on lightly to moderately Cd-contaminated farmland[J]. Environmental Science, 2024, 45(02): 1098-1106.
- [6] JIA M K, WU C R, LI Y H, et al. Effect of Organic and Inorganic Soil Amendments on Cadmium Immobilization and Bioaccumulation in Chinese Cabbage[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2024, 29(6): 600-610.
- [7] 上官宇先,尹宏亮,徐懿,等.不同钝化剂对水稻小麦籽粒镉吸收的影响[J].生态环境学报,2022,31(02):370-

- SHANGGUAN Y X, YIN H L, XU Y, et al. Effects of different passivators on Cd uptake in rice and wheat grains[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(02): 370-379.
- [8] 周洪印,李嘉琦,包立,等.不同阻控措施对生菜中镉铅累积及品质的影响[J].*环境科学*,2023,44(09):5196-5203.
- ZHOU H Y, LI J Q, BAO L, et al. Effects of different control measures on Cd and Pb accumulation and quality of lettuce[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(09): 5196-5203.
- [9] 方金豹,钟彩虹.新中国果树科学研究 70 年——猕猴桃[J].*果树学报*,2019,36(10):1352-1359.
- FANG J B, ZHONG C H. Seventy years of fruit tree scientific research in China: Kiwifruit[J]. *Journal of Fruit Science*, 2019, 36(10): 1352-1359.
- [10] 栗婷,任晓姣,齐高旺,等.猕猴桃产区土壤重金属分布特征及生态环境污染风险评价——以西安市周至县为例[J].*土壤与作物*,2022,11(03):307-319.
- LI T, REN X J, QI G W, et al. Distribution characteristics of soil heavy metals and ecological environmental pollution risk assessment in kiwifruit production areas: A case study of Zhouzhi County, Xi'an[J]. *Soils and Crops*, 2022, 11(03): 307-319.
- [11] 段路路, 杨一, 房朋, 等. 我国不同肥料品种中砷、铬、铅、镉、汞和铊的含量与评价[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(6): 1152-1162.
- DUAN L L, YANG Y, FANG P, et al. The status quo of arsenic, chromium, lead, cadmium, mercury and thallium content in main chemical fertilizer categories in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(6): 1152-1162.
- [12] 苏丹,谭福民,王晟,等.农田土壤有效态镉的分析方法筛选与优化[J].*云南农业大学学报(自然科学版)*,2024,39(04):166-174.
- SU D, TAN F M, WANG S, et al. Screening and optimization of analytical methods for available cadmium in farmland soils[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2024, 39(04): 166-174.
- [13] 于冲冲,高巍,叶优良,等.氮肥形态对小麦镉吸收及转运的影响[J].*西北农业学报*,2022,31(01):15-24.
- YU C C, GAO W, YE Y L, et al. Effects of nitrogen fertilizer forms on cadmium uptake and transport in wheat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2022, 31(01): 15-24.
- [14] 肖蓓,王正海,申晋利,等.内蒙古钱家店铀矿区土壤-植物中重金属元素迁移富集特征[J].*浙江大学学报(农业与生命科学版)*,2022,48(05):625-634.
- XIAO B, WANG Z H, SHEN J L, et al. Migration and enrichment characteristics of heavy metal elements in soil-plant system of Qianjiadian uranium mining area, Inner Mongolia[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences Edition)*, 2022, 48(05): 625-634.
- [15] 巩龙达,陈凯,李丹,等.复合钝化剂施用水平对镉污染农田土壤的修复效果[J].*浙江大学学报(农业与生命科学版)*,2022,48(03):359-368.
- GONG L D, CHEN K, LI D, et al. Remediation effects of composite passivator application rates on Cd-contaminated farmland soils[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2022, 48(03): 359-368.
- [16] LIU J, KONG L X, WAN Y N, et al. Effects of zinc and organic fertilizer amendments, applied individually or in combination, on cadmium uptake by wheat grown in alkaline soil[J]. *Plants*, 2025, 14(16): 2525.
- [17] 钟林炳, 谢伟, 王洁, 等. 改良剂对果园土壤镉有效性及果品中镉积累的影响 [J]. *农业科技通讯*, 2020(12):111-113.
- ZHONG L B, XIE W, WANG J, et al. Effects of soil amendments on cadmium availability in orchard soils and cadmium accumulation in fruits[J]. *Agricultural Science and Technology Newsletter*, 2020(12): 111-113.
- [18] 赵少婷, 曹莹菲, 李森, 等. 不同钝化剂对土壤和猕猴桃的降镉效果研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2026, 44 (2) : 网络首发.

- ZHAO S T, CAO Y F, LI S, et al. Effects of different passivators on reducing cadmium in soil and kiwifruit[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2026, 44(2): online first.
- [19] 马桥,陈斌,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(03):819-829.
- MA Q, CHEN B, ZHAO Y Y, et al. Effects of combined application of calcium-magnesium phosphate fertilizer, potassium carbonate and lime on Cd accumulation in rice[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2024, 55(03): 819-829.
- [20] 石楷岐.叶面硅肥、锌肥对小麦镉积累及品质的影响研究[D].成都:四川农业大学,2022.
- SHI K Q. Effects of foliar silicon and zinc fertilizers on cadmium accumulation and quality of wheat[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2022.
- [21] ZHENG S, XU C, LYU G H, et al. Foliar zinc reduced Cd accumulation in grains by inhibiting Cd mobility in the xylem and increasing Cd retention ability in roots[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 333: 122046.
- [22] 张星雨, 叶志彪, 张余洋. 植物响应镉胁迫的生理与分子机制研究进展[J]. *植物生理学报*, 2021, 57(7): 1437-1450.
- ZHANG X Y, YE Z B, ZHANG Y Y. Advances in physiological and molecular mechanism of plant response to cadmium stress[J]. *Plant Physiology Journal*, 2021, 57(7): 1437-1450.
- [23] VITELLI Valentina, GIAMBORINO Agnese, BERTOLINI Andrea, et al. Cadmium Stress Signaling Pathways in Plants: Molecular Responses and Mechanisms[J]. *Current Issues in Molecular Biology*, 2024, 46(6): 6052-6068.
- [24] 王思元,王仁才,石浩,等.镉胁迫下猕猴桃对镉的吸收及转运[J].*湖南农业大学学报(自然科学版)*,2020,46(06):698-705.
- WANG S Y, WANG R C, SHI H, et al. Cadmium uptake and translocation in kiwifruit under cadmium stress[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2020, 46(06): 698-705.
- [25] 吴香,李娟,曹艳,等.植物根系分泌物响应镉胁迫的研究进展[J].*中国农业科技导报*,2023,25(07):12-20.
- WU X, LI J, CAO Y, et al. Research progress on plant root exudates in response to cadmium stress[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2023, 25(07): 12-20.
- [26] 杨釜,余海英,黄化刚,等.镉安全水稻材料根系细胞壁果胶对镉的响应特征[J].*植物营养与肥料学报*,2023,29(04):704-711.
- YANG F, YU H Y, HUANG H G, et al. Response characteristics of root cell wall pectin to Cd in Cd-safe rice materials[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(04): 704-711.
- [27] 王仁才,石浩,庞立,等.湘西猕猴桃种植基地土壤和猕猴桃中重金属积累状况研究[J].*农业资源与环境学报*,2017,34(3):280-285.
- WANG R C, SHI H, PANG L, et al. Heavy metal accumulation in soils and kiwifruit from kiwifruit planting bases in western Hunan Province[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(3): 280-285.