

潘声旺, 杨湘豫, 沈加伟, 等. 蔬菜对土壤五氯硝基苯-镉复合污染富集效应的种间差异研究 [J]. 福建农业学报, 2024, 39 (12): 1374–1384.

PAN S W, YANG X Y, SHEN J W, et al. PCNB and Cd Accumulations in Vegetables Grown on Contaminated Soil [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 39 (12): 1374–1384.

蔬菜对土壤五氯硝基苯-镉复合污染富集效应的种间差异研究

潘声旺^{1,2}, 杨湘豫¹, 沈加伟^{1,2}, 杨程鹏^{1,2}, 陈春坛^{2*}, 高 杨^{1,2*}

(1. 成都大学, 四川 成都 610106; 2. 乡村低成本环境治理技术四川省高校重点实验室, 四川 达州 635000)

摘要:【目的】分析常见蔬菜品种在五氯硝基苯(PCNB)和镉(Cd)复合污染环境中的生长反应及污染物富集能力差异, 为探讨其富集机理及受污染农田的合理利用提供依据。【方法】配置不同浓度的污染土壤(PCNB: 0.44~9.88 mg·kg⁻¹; Cd: 0.35~1.96 mg·kg⁻¹), 通过盆栽试验, 测定蔬菜的干重, 并分析蔬菜体内 PCNB 和 Cd 的含量, 考察生菜(*Lactuca sativa*)、油麦菜(*Lactuca sativa* var. *longifolia*)、小白菜(*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis*)、萝卜(*Raphanus sativus*)和莴笋(*Lactuca sativa* var. *angustata*)在 PCNB 和 Cd 复合污染条件下的生长状态, 比较不同蔬菜对污染物的吸收及富集表现。【结果】中、低浓度五氯硝基苯污染土壤(0.44~6.74 mg·kg⁻¹)对叶菜类蔬菜生长有促进作用, 高浓度(9.88~9.96 mg·kg⁻¹)则表现出抑制作用; 而 PCNB 对根茎类蔬菜均为抑制作用; 土壤镉污染(0.35~1.96 mg·kg⁻¹)对 5 种蔬菜的生长也表现为抑制作用。PCNB-Cd 复合污染土壤(PCNB: 0.47~9.88 mg·kg⁻¹; Cd: 0.46~1.63 mg·kg⁻¹)抑制了 PCNB 和 Cd 对蔬菜生长的影响。在高 PCNB 污染水平土壤中, 生菜、油麦菜、小白菜、莴笋的叶组织对 PCNB 的富集量均超过国家食品安全限量标准, 而萝卜的块茎、莴笋的茎组织中 PCNB 的富集量均未超标。5 种蔬菜都受到了 Cd 污染, 莴笋叶片中的 Cd 含量超标最为严重, 超过安全标准 60 倍, 其次是莴笋茎部和萝卜。不同蔬菜对 PCNB 的富集能力从高到低依次为莴笋叶、小白菜、莴笋茎、油麦菜、叶用莴苣和萝卜; 对 Cd 的富集表现为莴笋叶片最高, 而油麦菜最低, 差异显著($P<0.05$, $n=5$)。【结论】PCNB-Cd 复合污染对蔬菜吸收 PCNB、Cd 无促进作用。综上, 生菜、油麦菜 PCNB、Cd 的富集能力较低, 适宜在轻度污染的 PCNB-Cd 复合污染土壤中种植。本研究的结果为成都平原地区蔬菜种植结构的优化调整提供了理论支持。

关键词: 五氯硝基苯; 镉; 复合污染; 富集效应; 蔬菜

中图分类号: S181

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2024) 12-1374-11

PCNB and Cd Accumulations in Vegetables Grown on Contaminated Soil

PAN Shengwang^{1,2}, YANG Xiangyu¹, SHEN Jiawei^{1,2}, YANG Chengpeng^{1,2}, CHEN Chuntan^{2*}, GAO Yang^{1,2*}

(1. Chengdu University, Chengdu, Sichuan 610106, China; 2. Key Laboratory of Low-cost Rural Environmental Treatment Technology in Education Department of Sichuan Province, Dazhou, Sichuan 635000, China)

Abstract: 【Objective】Variations in accumulating PCNB and Cd of different species of vegetables grown on a contaminated soil were studied. 【Method】Different concentrations of contaminated soil were prepared (PCNB: 0.44–9.88 mg·kg⁻¹; Cd: 0.35–1.96 mg·kg⁻¹), and a pot experiment was conducted to determine the dry weight of vegetables and analyze the concentrations of PCNB and Cd within the vegetables, monitoring the growth and pollutant absorption/accumulation of *Lactuca sativa* (CL), *L. sativa* var. *longifolia* (RL), *Brassica rapa* subsp. *chinensis* (PC), *Raphanus sativus* (RR), and *L. sativa* var. *angustata* (AL) in PCNB-Cd contaminated soil. 【Result】Light and medium levels (i.e., 0.44–6.74 mg·kg⁻¹) of PCNB pollution on the soil stimulated growth of the leafy vegetables tested. However, when the contamination reached the severe level at 9.88–9.96 mg·kg⁻¹, the growth was significantly inhibited. And all levels of the contamination were detrimental to

收稿日期: 2024-05-16 修回日期: 2024-09-28

作者简介: 潘声旺(1973—), 男, 博士, 教授, 主要从事生态农业和食品安全研究, E-mail: panwang@swu.edu.cn

* 通信作者: 陈春坛(1986—), 男, 博士研究生, 副教授, 主要从事土壤污染与修复研究, E-mail: 421400935@qq.com; 高杨(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态农业和食品安全研究, E-mail: gaoyang-y@stu.cdu.edu.cn

基金项目: 四川省农村发展研究中心项目(CR2001); 乡村低成本环境治理技术四川省高校重点实验室开放基金项目(XCH 2023ZA-01); 成都大学 2022 年校级实验教学研究项目(cdsyjg2022004)

growth of the root vegetables. Cd pollution at between $0.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $1.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ cut the biomass production on all 5 vegetables. In combination, PCNB at $0.47\text{--}9.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and Cd at $0.46\text{--}1.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ resulted in varied effects on the vegetable growth. The PCNB contents in the leaves of CL, RL, PC, and AL grown on the severely contaminated soil exceeded the food safety threshold, but the roots of RR and stems of AL did not. Meanwhile, Cd in AL leaves significantly rose to a level surpassing the standard by 60 times, which was followed by the level in the stems of AL and that in the roots of RR. Overall, PCNB absorbed by the vegetables or part of the plants ranked as AL leaves > PC > AL stems > RL > CL > RR, and Cd in the order of AL leaves > AL stems > RR > PC > CL > RL ($P < 0.05$, $n=5$). 【Conclusion】 The soil contaminated with PCNB-Cd did not significantly affect the absorption of the pollutants individually by the vegetables. In general, *L. sativa* and *L. sativa* var. *longifolia* accumulated PCNB and Cd less than the other tested vegetables making them more suitable for farming on lands moderately polluted with PCNB-Cd.

Key words: pentachloronitrobenzene; cadmium; combined contamination; bioconcentration effect; vegetables

0 引言

【研究意义】在经济社会的长期发展、工矿业和农业生产多重因素下，土壤受农药和重金属复合污染的程度日益加重，蔬菜生长发育和质量安全也受到严重威胁^[1]。【前人研究进展】Cd 是毒性最强、污染范围最广的重金属，部分地区农业土壤和谷物、蔬菜等农产品中 Cd 含量严重超标^[2-4]；其中，茎叶类蔬菜对 Cd 有极强的富集能力，比其他蔬菜品种容易受到污染^[5-6]。五氯硝基苯（pentachlorobenzene, PCNB）是取代苯类杀菌剂，属有机氯农药（Organochlorine pesticides, OCPs），曾是土壤和种子的高效、广谱的强力杀菌剂。五氯硝基苯具有高残留、难降解等特性，半衰期可达 5~10 个月^[7-10]。目前，包括中国在内的许多国家仍在 PCNB，土壤中依然可检测到残留^[8-11]，并能通过食物链富集。然而，关于 PCNB 污染对蔬菜的影响研究较少，多数集中在 PCNB 毒性或中药材的研究。因此，探究 PCNB 污染土壤上不同蔬菜品种吸收累积 PCNB 特性对发展生态农业、构建农产品质量安全体系具有重要意义。【本研究的切入点】成都作为“天府之国”，土地肥沃、物产丰富，是全国重要的蔬菜生产基地。随着城市化进程的快速推进，工业“三废”排放和农药大量使用，土壤环境中的污染物正趋于多元化和复杂化，复合污染已成为普遍的污染形式^[12-13]，其中有机氯农药和重金属复合污染是较为普遍的土壤污染类型。成都市区蔬菜地中，检测出了双对氯苯基三氯乙烷（dichlorodiphenyltrichloroethane, DDT）、六氯环己烷（hexachlorocyclohexane, HCH）、六氯苯（hexachlorobenzene, HCB）、PCNB 在内的 18 种 OCPs，部分检出率高达 100%^[14]。14 个区县内 OCPs 虽低于国家土壤质量标准（GB15618—1995）的阈值，但部分 OCPs 残留水平已高于基于人体健康风险和生态风险评估基础上得到的荷兰标准^[14]；农田土

壤中，Cd 较为严重，其含量范围为 $0.04\text{--}0.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，有 8.63% 的农田土壤超过了 GB 15618—1995 II 类土壤所规定的限制值 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，主要污染来源是农业生产中农药大量使用、工业生产和交通排放^[15]。农药和重金属复合污染土壤修复的难度大、费用高，种植低富集的农作物是抑制污染物在食物链中传递和保障人体健康的一种有效措施，亦成为农业安全生产和农田安全利用领域关注的重点^[5,16-18]。【拟解决的关键问题】本研究通过盆栽试验，探究成都平原普遍种植的 5 种蔬菜在 PCNB-Cd 复合污染下的吸收累积特征，探讨蔬菜对 PCNB、Cd 的富集能力，为成都平原种植结构调整以及污染农田的合理安全利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

背景土壤：采自成都大学实验基地表层土壤（5~20 cm），土壤类型为紫色土，基本理化性质：pH 值 7.06，有机质 $15.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，碱解氮 $109.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，速效磷 $17.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，速效钾 $98.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ；PCNB 和 Cd 含量分别为 $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.012 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，其 Cd 含量值低于《食用农产品产地环境质量评价标准》（HJ/T 332—2006）中 Cd 含量 $\leq 0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的限量值^[19-20]，满足种植业环境要求。土壤阴干备用。

5 种供试蔬菜分别为意大利耐抽苔生菜（*Lactuca sativa*）、云南四季无斑油麦菜（*Lactuca sativa* var. *longifolia*）、良明四季奶油小白菜（*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis*）、正发满身红樱桃萝卜（*Red Raphanus sativus*）、四季大尖叶莴笋（*Lactuca sativa* var. *angustata*），其种子均购于四川省良明农业有限公司。

1.2 仪器和试剂

仪器：气相色谱仪-电子捕获检测器 GC-ECD（7890B, Agilent），配双塔自动进样器；电子天平

(BSA-2202S-CW, Sartorius); 冷冻高速离心机(X3R, Thermo); 振荡混匀器(Multi Reax, heidolph); 电感耦合等离子体质谱仪 ICP-MS (NexION1000, PE)。

试剂: 五氯硝基苯标准液, 购自 Supelco 公司; 乙腈、甲醇、甲酸和乙酸铵均为色谱级, 提取盐包(4 g MgSO₄、1 g NaCl、0.5 g Na₂H₂C₆H₆O₇ 和 1 g C₆H₅Na₃O₇); 净化管(2 mL 离心管, 内含 20 mg PSA、7.5 mg GCB、142.5 mg 无水 MgSO₄); 以上试剂均购自安捷伦科技(中国)有限公司。

1.3 试验方法

PCNB-Cd 污染土壤: 参照成都平原土壤 PCNB、Cd 污染水平, 模拟配制污染土样^[13-15,21-24]。精确称取 9 组不同量的 PCNB 溶于甲醇、9 组不同量 CdCl₂(CdCl₂·2.5H₂O) 溶于水后, 均匀喷洒混入土样中, 搅拌均匀后, 再将其中 4 组 PCNB 土壤和 4 组 Cd 土壤多次搅拌、混合制得复合土壤; 待甲醇和水挥发后, 黑色塑料袋封口、加盖, 室温下平衡 30 d 后, 得 1 个对照组和 14 个污染处理组, 用 GC-ECD^[25]、ICP-MS^[26] 分别检测配制土壤中 PCNB 和 Cd 的浓度, 并按照单因子污染指数法和内梅罗污染指数法对污染程度进行划分^[27], 具体见表 1。

表 1 各处理组污染水平
Table 1 Soil contamination at test lot

序号 No.	处理 Treatment	土壤PCNB Soil total PCNB/ (mg·kg ⁻¹)	土壤Cd Soil total Cd/ (mg·kg ⁻¹)	污染程度 Pollution degree
1	CK	0.00	0.012	安全
2	PCNB-1	0.44	0.012	轻污染
3	PCNB-2	0.94	0.012	轻污染
4	PCNB-3	2.54	0.012	中污染
5	PCNB-4	6.25	0.012	中污染
6	PCNB-5	9.96	0.012	重污染
7	Cd-1	0.00	0.35	轻污染
8	Cd-2	0.00	0.54	轻污染
9	Cd-3	0.00	0.78	中污染
10	Cd-4	0.00	1.25	重污染
11	Cd-5	0.00	1.96	重污染
12	PCNB-Cd-1	0.47	0.46	轻污染
13	PCNB-Cd-2	1.01	1.07	中污染
14	PCNB-Cd-3	6.74	1.63	中污染
15	PCNB-Cd-4	9.88	0.77	重污染

盆栽试验: 试验于 2023 年 2~6 月在成都大学大
棚实验基地进行。将吸附平衡 30 d 后的土壤装入黑
色塑料盆(25 cm×20 cm×17 cm), 每盆土重 4 kg;

塑料盆底配有垫纱网和托盘, 以防止渗透液溢出。
种植前每盆施加 1.5 g 复合肥, 浇水平衡 1 周后播
种, 5 种蔬菜在 1 个对照组和 14 个不同污染处理组
中均做 5 次重复, 共计 375 盆。

蔬菜培育和试验管理: 根据蔬菜生长习性, 生
菜、油麦菜、小白菜和萝卜采用直播方式种植, 每
个盆均匀播种 10~15 颗, 待幼苗长出四片真叶后间
苗, 每盆留 4 株, 于 3 月中旬播种, 60 d 后收获; 莴
笋采用移栽方式, 从种子市场选择 4 片真叶、长势
一致的幼苗进行移栽、每盆 2 株, 保持均等生长距
离, 在 4 月初移栽, 50 d 后收获。种植期间, 试验
盆每周轮换 1 次, 以保证相同的气候条件, 并根据
天气温度适宜进行浇灌、施肥, 土壤保湿保持田间
持水量(65±2)%。蔬菜以商品成熟为采集标准。
由于莴笋从种子市场购买幼苗移栽非直接播种, 与
其他 4 种蔬菜不同, 因此对莴笋的评估具有一定局
限性。

1.4 测定方法

1.4.1 样品采集

参考《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—
2004) 采集土壤样品。收集 5 种蔬菜的可食部分, 用
去离子水冲洗干净, 将莴笋分为茎和叶两种器官,
称取鲜重后, 部分在 105 ℃ 杀青 30 min 后, 经 70 ℃
恒温条件下烘干至恒重, 称取干重; 部分用食品加
工粉碎机匀浆, 置于塑料自封袋中, 在-18 ℃ 下保
存、待测。土壤和蔬菜均为单盆取样。

1.4.2 PCNB 含量测定

蔬菜样品: 蔬菜中 PCNB 含量测定参照《蔬菜
和水果中有机磷、有机氯、拟除虫菊酯和氨基酸酯
类农药多残留的测定》(NT/Y 761—2008) 气相色谱
检测法^[28]。样品用食品加工粉碎机匀浆保存, 取
25 g 试样于 100 mL 具塞锥形瓶中, 加 50 mL 乙腈和
提取盐包, 涡旋震荡 10 min, 离心 5 min, 取上层清
液全部于 10 mL 聚四氟乙烯净化管中, 震荡 1 min,
离心 5 min, 使有机相和水相分层。取分层后的乙腈
溶液 5 mL 于玻璃管中, 在 60 ℃ 下, 氮吹干, 用正
己烷定容至 5 mL, 涡旋 1 min, 过 0.22 μm 有机滤膜
至 1 mL 进样瓶中, 待上机检测。

土壤样品: 取 10 g 土壤样品于 50 mL 离心管
中, 加 10 mL 乙腈, 振荡提取 30 min, 加 5 g 氯化
钠, 涡旋 1 min, 离心 5 min, 取上清液 2 mL 于玻璃
管中, 氮吹干, 用乙腈定容 2 mL, 涡旋 1 min, 过
0.22 μm 有机滤膜至 1 mL 进样瓶中, 待上机检测。

GC-ECD 分析: DB-1707 毛细管柱(30 m×0.32
mm, 0.25 μm), Ni-ECD 电子捕获检测器; 进样口

温度 230 ℃; 检测器温度 300 ℃; 进样量 1 μL , 分流进样, 分流比 10:1; 色谱柱升温程序为初始 85 ℃, 10 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 170 ℃, 5 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 220 ℃, 20 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 300 ℃, 3 min。此方法中, PCNB 的回收率为 85%~110%, 检出限为 0.0002 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。测定时每批上机样品用标准液进行蔬菜和土壤样品质量控制。

1.4.3 Cd 含量测定

蔬菜样品: 蔬菜中 Cd 含量测定采用《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》(GB 5009.268—2016) 电感耦合等离子体质谱法^[29]。取 1 g 前处理蔬菜样品于硝化管中, 加入 5 mL HNO_3 , 1 mL 氢氟酸, 静置过夜, 采用微波消解仪 (CEM-MARS) 硝解, 去离子水定容至 25 mL 后, 过水系, 25 mm $\times$ 0.45 μm 过滤针头滤器转移至 50 mL 离心管。硝化后样品置于冰箱保存, 待上机检测。

土壤样品: 称取 0.2 g 前处理土壤样品粉末置于硝化管, 加入 5 mL HNO_3 , 1 mL HF, 静置过夜, 采用微波消解仪 (CEM-MARS) 硝解, 去离子水定容至 25 mL 后, 过水系, 25 mm $\times$ 0.45 μm 过滤针头滤器转移至 50 mL 离心管。硝化后样品置于冰箱保存, 待上机检测。

ICP-MS 分析: 采用氦气碰撞模式分析; 等离子体功率 1200 W, 采样深度 8 mm, 雾化室温度 2 ℃, 雾化气流速 0.66 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, 等离子体气流量 17 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, 辅助气流速 1.20 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, 蠕动泵转速 60 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。此方法, Cd 的回收率为 90%~97%, 检出限为 0.002 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。分析过程以“GBW10048 (GSB-26) 生物成分分析标准物质芹菜”和“GBW07409 土壤成分分析标准物质”分别进行蔬菜和土壤样品质量控制。

1.5 数据处理

通过《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》(GB 2763—2021) 查询叶菜类蔬菜和根茎类蔬菜中五氯硝基苯的最大残留限量值; 通过《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022) 判定 5 种蔬菜中镉含量是否超标。

富集系数 (bioconcentration factors, BCF): 蔬菜体内某种污染物含量与土壤中该污染物含量的比值^[30], 反映了蔬菜对土壤中污染物的积累能力。富集系数=蔬菜体内目标污染物含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) / 土壤中目标污染物的含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

耐性指数: 通常采用胁迫响应生物量 (biomass response to stress, BRS) 作为评价指标, 评估蔬菜对污染物的耐受性^[5,19]。生物量对胁迫的响应/%=[(不同处理下可食用部分生物量-CK 处理下蔬菜可食用

部分生物量) / CK 处理下蔬菜可食用部分生物量] $\times$ 100。

采用 SPSS 27.01 对数据进行统计分析; 用 Origin 8.0 作相关的统计图表。

2 结果与分析

2.1 土壤 PCNB 和 Cd 污染对蔬菜生长的影响

2.1.1 PCNB 污染土壤

PCNB 对蔬菜生物量的影响见图 1。在 CK 处理组的土壤上, 生菜、油麦菜、小白菜、萝卜、莴笋茎叶的干重分别为 1.24、2.15、0.52、5.63、8.62、4.55 $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ 。与对照组 CK 相比, 随着 PCNB 处理浓度的升高, 生菜、油麦菜和小白菜的干重呈现先升高后降低的趋势, 而根茎类蔬菜的干重则呈现下降趋势。在污染浓度为 PCNB-5 时, 蔬菜可食用部分的干重都显著低于对照组 CK。

中低浓度 PCNB 污染土壤中 (PCNB-1~PCNB-4), 生菜、油麦菜、小白菜的生物量分别增加了 8.21%~54.52%、11.35%~53.71%、0.85%~24.92%; 较高 PCNB 污染土壤上 (PCNB-5), 生菜、油麦菜、小白菜的 BRS 为负值, 说明中低浓度 PCNB 土壤对叶类蔬菜生长有促进作用, 高浓度下会抑制蔬菜生长。在 PCNB 处理的土壤上, 萝卜、莴笋茎叶 BRS 均为负值, 范围在 -22.55%~-8.26%、-26.71%~-10.91%、-19.56%~-6.92%, 表明 PCNB 对根茎类蔬菜的生长有抑制作用, 其中对莴笋茎的影响高于叶片。

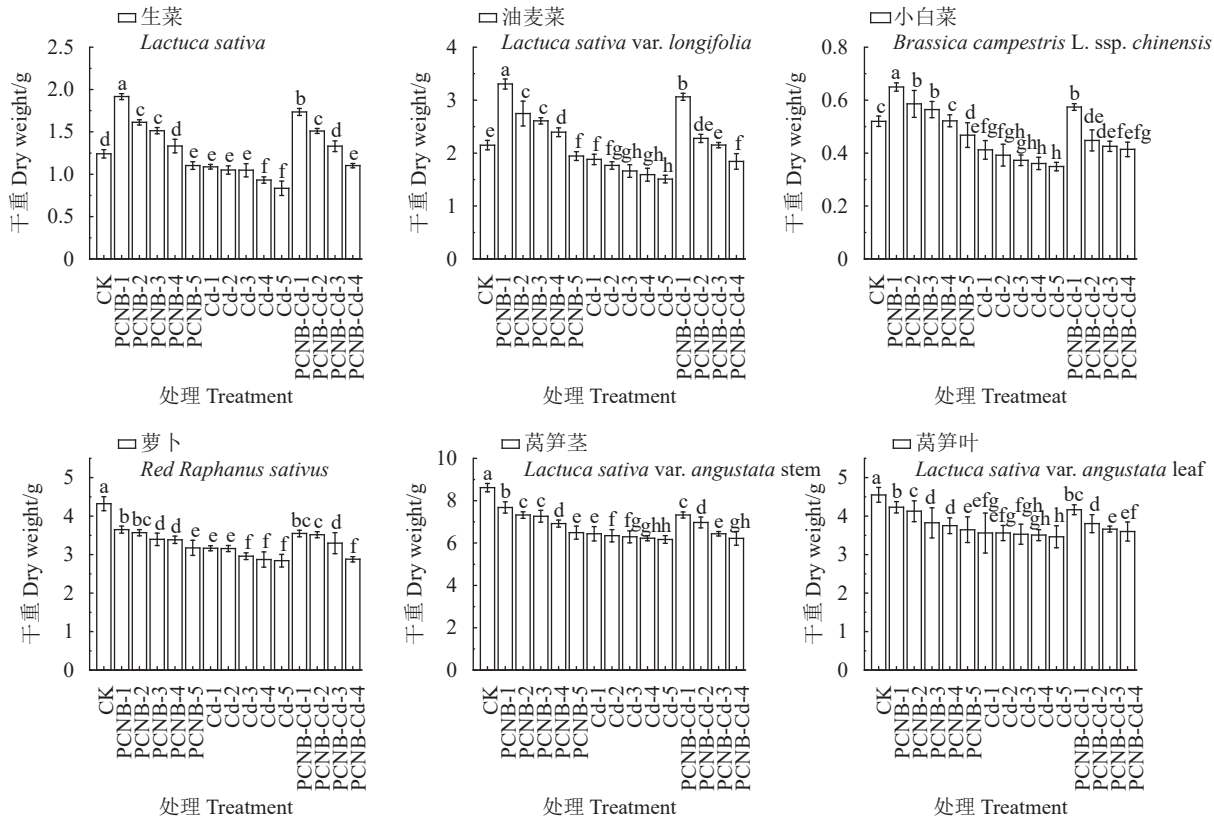
2.1.2 Cd 污染土壤

在 Cd 污染土壤上, 5 种蔬菜的生长均受到影响 (图 1)。在 Cd-1~Cd-5 的污染水平上, 5 种蔬菜可食部分的干重随 Cd 处理浓度升高而减小, 且都显著低于 CK 处理。土壤 Cd 污染对 5 种蔬菜的生长均为抑制作用, 但对根茎类蔬菜的抑制作用更为明显。

与对照组 CK 相比, 5 种蔬菜在镉污染土壤上的生物量均有所下降, 且 BRS 均为负值。叶类蔬菜 BRS 范围为 -32.89%~-12.27%, 其中小白菜受 Cd 影响最为显著。根茎类蔬菜 BRS 为 -34.26%~-19.56%, 受影响程度大于叶类蔬菜。在 Cd 污染土壤环境下, Cd 对莴笋的茎的影响高于对莴笋叶片的影响。

2.1.3 PCNB-Cd 复合污染

5 种蔬菜在复合污染土壤生长过程中均未出现农药药害、重金属毒害等现象。蔬菜可食部分干重如图 1 所示。随着复合污染程度的加剧, 蔬菜干重的变化与单 PCNB 污染相似。生菜、油麦菜和小白菜的干重为 1.12~1.74 $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ 、1.84~3.06 $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$, 0.41~



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$.

图 1 不同 PCNB、Cd 含量土壤上 5 种蔬菜可食部分的干重

Fig. 1 Dry weight edible part of vegetables grown on PCNB-Cd contaminated soil

0.58 g·株⁻¹，随复合污染程度升高呈现先上升后下降的趋势；而萝卜和莴笋茎叶的干重随复合污染程度升高呈现出下降趋势，其干重分别为 3.75~4.62 g·株⁻¹、6.22~7.33 g·株⁻¹、3.59~3.67 g·株⁻¹。但相对单独 PCNB 污染土壤，复合污染下的 5 种蔬菜干重均有所下降，可能是土壤 Cd 污染减弱了 PCNB 对叶类蔬菜的促进作用和根茎的抑制作用。而与单独 Cd 污染土壤比较，5 种蔬菜的干重有所增加，可能是土壤中 PCNB 缓解了 Cd 对蔬菜生长的抑制作用。

除小白菜外，其余 4 种蔬菜的 BRS 与单 PCNB 污染相似。复合污染 PCNB-Cd-1~PCNB-Cd-3 对生菜、复合污染 PCNB-Cd-1~PCNB-Cd-2 对油麦菜均有促进作用，但小于单 PCNB 污染对蔬菜的促进作用；PCNB-Cd 复合污染土壤均对萝卜、莴笋茎叶的生物量也为抑制作用。小白菜的 BRS 为 -20.42%~10.34%，仅在低复合污染 (PCNB-Cd-1) 时为正值，起促进作用；在其他污染水平下均为负值，为抑制作用，原因可能为小白菜更易受土壤 Cd 的影响。

2.2 不同处理组下蔬菜 PCNB 和 Cd 的吸收富集差异

2.2.1 PCNB 污染土壤

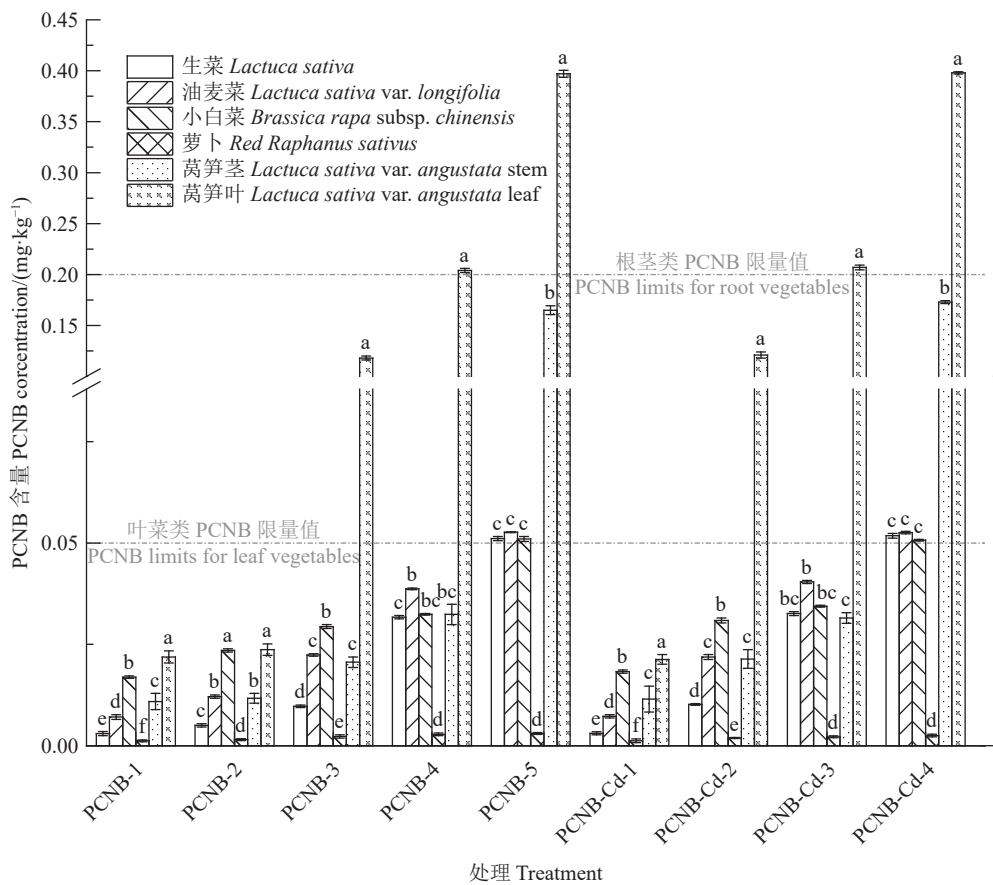
在无污染土壤 CK 和镉污染土壤上，蔬菜均未检

测出 PCNB。蔬菜可食部分 PCNB 含量见图 2，生菜、油麦菜、小白菜在 PCNB 污染土壤 (PCNB-1~PCNB-4) 上 PCNB 的含量为 $2.98 \times 10^{-3} \sim 3.87 \times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，均未超过食品安全标准叶类蔬菜最大残留量 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，但在 PCNB 质量浓度为 $9.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤上，3 种叶类蔬菜超过限量值的 2%~6%。PCNB 在萝卜茎块中检出率较低，含量为 $1.20 \times 10^{-3} \sim 3.00 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，可能与萝卜对 PCNB 富集能力有关。莴笋茎的含量为 $1.09 \times 10^{-2} \sim 1.65 \times 10^{-1} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，未超过食品安全根茎类蔬菜可食部分限量值标准 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，而莴笋叶在 PCNB-4~PCNB-5 污染土壤上，超过限量值 1~2 倍。

PCNB 平均富集系数为 $1.0 \times 10^{-4} \sim 3.92 \times 10^{-2}$ (图 3)，其中莴笋叶最大，萝卜最小，莴笋茎、小白菜、油麦菜和生菜的富集系数介于二者之间。

2.2.2 Cd 污染土壤

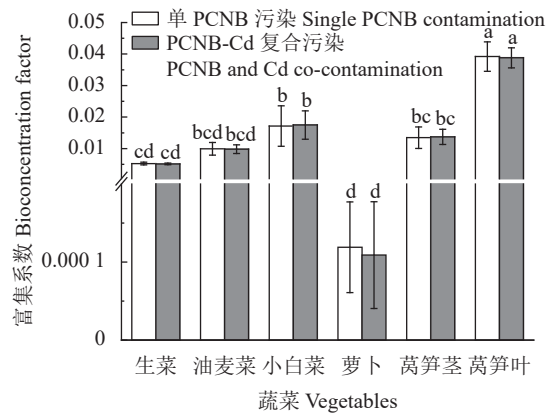
图 4 所示，在 CK 组和单独 PCNB 污染处理 (PCNB-1~PCNB-5) 上，蔬菜 Cd 含量在 $4.0 \times 10^{-3} \sim 8.0 \times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，均未超标食品安全叶类蔬菜限量值 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 或根茎类限量值 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在 Cd 污染土壤上 (Cd-1)，生菜、油麦菜、小白菜 Cd 含量分别是



不同的小写字母表示在相同处理条件下，不同蔬菜之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。同图 4。

Different lowercase letters indicate significant differences between different vegetables under the same treatment ($P < 0.05$). Same for Fig. 4.

图 2 5 种蔬菜可食部分 PCNB 含量
Fig. 2 PCNB contents in edible part of vegetables



同小写字母表示不同蔬菜处理间差异显著 ($P < 0.05$)，同图 5。

Different lowercase letters represent significant differences between vegetables at $P < 0.05$, same for Fig. 5.

图 3 5 种蔬菜可食部分 Cd 含量
Fig. 3 Cd contents in edible part of vegetables

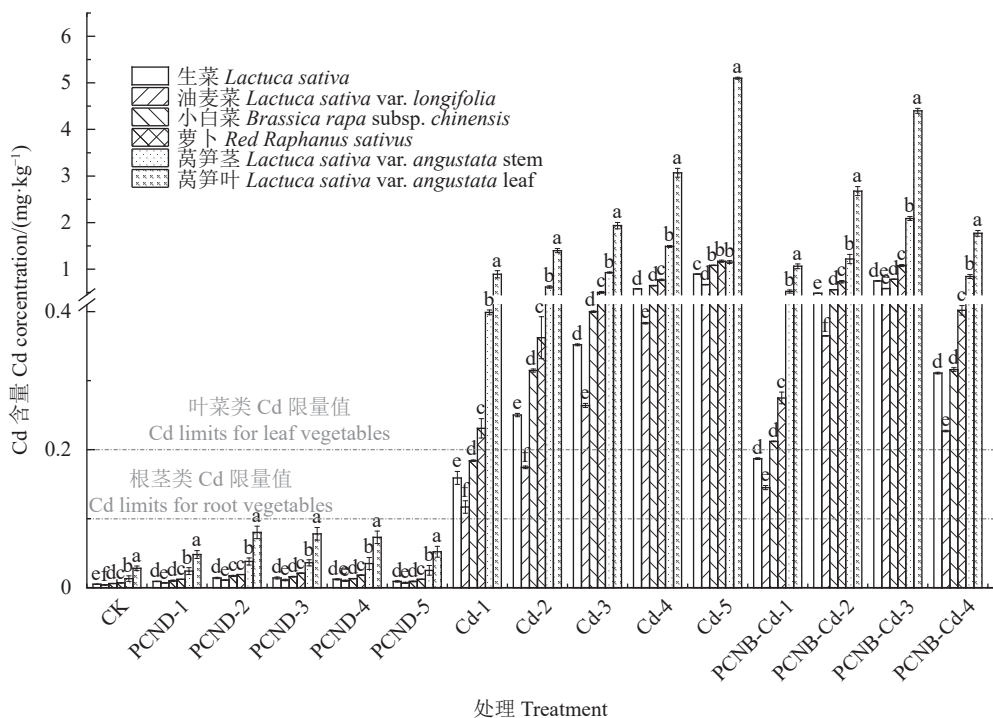
0.159、0.117、0.184 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，但萝卜、莴笋茎叶均超标；在 Cd 含量为 0.54 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土壤上生长的蔬菜，仅有油麦菜未超标，其蔬菜中 Cd 含量为 0.174 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ；在 Cd-3~Cd-5 污染土壤上，5 种蔬菜中

Cd 含量均超标，其中莴笋叶含量是标准限量值的 60 倍。

Cd 平均富集系数为 0.338~2.52 (图 5)，种间差异显著 ($P < 0.05$, $n=5$)。莴笋叶最大，莴笋茎次之，且富集系数大于 1；油麦菜 Cd 富集系数最小为 0.338，莴笋茎叶 Cd 富集系数差异可能与 Cd 在蔬菜的体内的转运有关。

2.2.3 PCNB-Cd 复合污染土壤

复合污染下，5 种蔬菜吸收富集 PCNB、Cd 情况见图 2、图 4。3 种叶类蔬菜在复合污染土壤 (PCNB-Cd-1~PCNB-Cd-4) 上的 PCNB 含量是 $2.98 \times 10^{-3} \sim 3.87 \times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，也未超过最大残留限量 0.05 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ；在 PCNB-Cd 复合污染土壤上，生菜、油麦菜和小白菜吸收富集 PCNB 情况和单独 PCNB 污染一致。萝卜在复合污染下，吸收积累 PCNB 能力并未受 Cd 影响，其可食部分 PCNB 含量范围在 $1.2 \times 10^{-3} \sim 2.5 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。莴笋茎和叶在复合污染下，PCNB 含量也具有明显差异，莴笋叶组织中 PCNB 含量高于茎组织含量。PCNB-Cd 复合污染土壤环境下，萝卜受污染程度最小、莴笋叶最高，与单



CL-生菜; RL-油麦菜; PC-小白菜; RR-萝卜; ALS-莴笋茎; ALL-莴笋叶。

CL: *Lactuca sativa*; RL: *Lactuca sativa* var. *longifolia*; PC: *Brassica rapa* subsp. *chinensis*; RR: *Red Raphanus sativus*; ALS: *Lactuca sativa* var. *angustata* stem; ALL- *Lactuca sativa* var. *angustata* leaf

图 4 5 种蔬菜可食部分 PCNB、Cd 富集系数 ($n=5$)

Fig. 4 Bioconcentration coefficients of PCNB and Cd in edible part of vegetables ($n=5$)

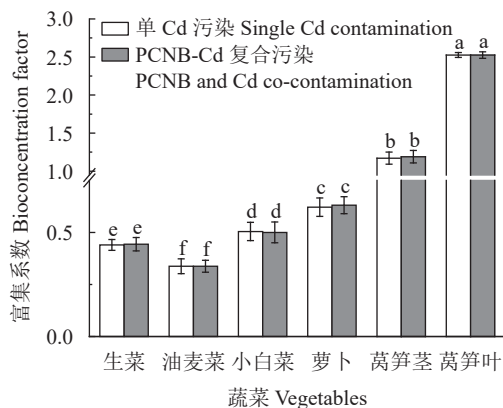


图 5 5 种蔬菜可食部分 Cd 富集系数 ($n=5$)

Fig. 5 Bioconcentration coefficients of Cd in edible part of vegetables ($n=5$)

PCNB 污染土壤结果一致。

5 种蔬菜在复合污染土壤上均受到 Cd 不同程度的污染。仅在 PCNB-Cd-1 土壤上 (PCNB: $0.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd: $0.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 部分蔬菜未超过限量值 (生菜为 $0.187 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、油麦菜为 $0.145 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 而在其余污染水平下, 5 种蔬菜均超标, 其中莴笋叶超标最严重。

随着土壤中 PCNB 和 Cd 处理浓度的升高, 蔬菜吸收的 PCNB 和 Cd 的浓度呈现出上升的趋势。蔬菜在复合污染上吸收 PCNB 与在单独 PCNB 污染上吸

收 PCNB 含量没有显著差异; PCNB 对蔬菜 Cd 含量影响也不显著 (t 验证), 表明 PCNB-Cd 复合污染对蔬菜吸收 PCNB、Cd 的无促进作用。

复合污染土壤下, 5 种蔬菜 PCNB 和 Cd 的平均富集系数分别 $1.0 \times 10^{-4} \sim 3.92 \times 10^{-2}$ 和 $0.337 \sim 2.52$, 与单污染土壤环境下的富集系数无明显差异, 说明 PCNB-Cd 复合污染不影响蔬菜对 PCNB 和 Cd 的富集效应。

3 讨论

3.1 土壤 PCNB 和 Cd 污染对蔬菜生物量的影响

重金属、农药等环境污染物会引起植物生理变化, 最直观的影响是对植物生长的抑制。本研究中, 5 种蔬菜发芽均未受到抑制, 没有发黄病害现象。叶类蔬菜的干重在中轻度 PCNB 污染中有增加的趋势, 但随 PCNB 浓度越高, 干重的增量越小。相关性分析表明污染土壤 PCNB 浓度与根茎类蔬菜的生物量有显著的负相关性 (相关系数 $R^2 = -0.18, n=5$), 可能与土壤中微生物或酶活性有关。PCNB 为高效杀菌剂, 在中低浓度时 PCNB 能提高土壤酶活性, 使土壤中的有害霉菌失活, 促进土壤中有机质趋于平衡利于叶类蔬菜生长, 较高浓度时 PCNB 抑制土壤酶活性使土壤肥力降低进而影响叶类蔬菜生

长^[10]。PCNB 对根茎类蔬菜的生物量均为抑制作用, 且效果显著, 可能是 PCNB 主要积累在蔬菜根下部, 根茎类蔬菜直接接触对其更为敏感, 更易受到影响^[8]。在复合污染土壤中 Cd 的存在可能导致蔬菜生物量显著低于单一 PCNB 污染土壤。这是由于 Cd 作为重金属对植物根系及其生长发育产生直接的毒害作用, 抑制了营养物质的吸收^[12,31-32]。同时, 受 PCNB 的影响, Cd 对蔬菜生长的抑制作用有所减缓。这一现象可能与 PCNB 提高植物抗氧化酶活性的能力有关^[8,10], 从而减轻 Cd 所引发的氧化应激, 降低其对植物的毒性影响^[13]。然而, PCNB 和 Cd 之间没有吸附行为, 一方面原因可能是土壤有机质有螯合和吸附 Cd²⁺的作用, 降低了 Cd 污染的危害^[5,33,34], 另一方面原因可能重金属与以分子形态存在的疏水性有机氯污染物在土壤有机质上的吸附机理不同而不会有影响^[13]。

有机氯农药由植被根吸附, 通过蒸腾流, 由木质部导管向叶片扩散^[35,11]。植被根系吸收有机氯农药的能力、向地上部转运能力与污染物的正辛醇-水分配系数 ($\lg K_{ow}$) 有关^[36]。亲水性物质 ($\lg K_{ow} < 1.8$) 容易从根部转运到木质部, 而疏水性物质 ($\lg K_{ow} > 3$) 易与根中脂质结合, 难以将物质从根部转运到木质部^[35,37-38]。PCNB 疏水性较强 ($\lg K_{ow} = 4.64$), 生菜、油麦菜和小白菜对中轻度 PCNB 污染土壤的高耐受性, 原因可能是 PCNB 与蔬菜根部脂质结合, 蔬菜在土壤中吸收的 PCNB 难以从蔬菜根部转运到地上部。叶类蔬菜在有机氯农药和重金属轻度复合污染土壤上有高耐受性, 一方面是有机氯农药与根部脂质物结合, 难以将有机氯农药通过木质部扩散到叶片, 一方面是蔬菜具有不良环境胁迫的能力, 吸收的重金属只有少部分向地上部转运^[39-40]。

不同蔬菜 BRS 值差异可能与根部富集 PCNB 和 Cd 能力、根向地上部转运污染物比例以及重金属螯合物等特性有关^[8,41]。不同蔬菜品种吸收 OCPs 能力与其根系结构也有关^[37], 较为发达的根系具有的吸附表面积也较大, 因此更易吸收土壤中的有机氯农药。植物通过吸收重金属并将其螯合到根部液泡中来减轻地上部分受到的胁迫, 进而降低地上部分的重金属积累^[42]。不同蔬菜的品种差异^[36,43-44]、螯合物含量差异^[41-42], 与蔬菜对 PCNB、Cd 的 BRS 有显著相关性。在污染土壤上生长的蔬菜虽无明显毒害现象, 但部分蔬菜中 Cd 含量已经超过国标限量标准 (图 4), 因此无法凭借蔬菜生长情况或生物量来判断其是否受到污染^[8,18,45]。相关性分析表明, 不同品

种蔬菜生物量大小或产量高低与 PCNB、Cd 含量积累的高低无关, 而是由不同品种蔬菜的生理遗传属性决定。

3.2 PCNB 和 Cd 低富集蔬菜品种对比

有机氯农药及其衍生物、重金属可通过食物链富集, 蔬菜是其进入生物体的主要途径。因此, 选育低富集蔬菜品种对食品安全有重要意义^[3,18]。蔬菜对有机氯农药、重金属的富集具有品种特异性, 在白菜^[35,46]、番茄^[36,44]、西葫芦^[44]、生菜^[43]以及韭菜^[47]等蔬菜上得到了证实。土壤在单 PCNB 污染浓度 $6.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时、复合污染 PCNB 浓度在 $6.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 莴笋叶组织已超过食品安全标准根茎类 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤在单 PCNB 污染浓度 $9.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时、复合污染 PCNB 浓度在 $9.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 3 种叶类蔬菜可食部分和莴笋叶组织部分已超过食品安全标准叶菜类 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和根茎类 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。说明生菜、油麦菜、小白菜、莴笋是 PCNB 高富集型蔬菜, 对 PCNB 较为敏感。萝卜、莴笋茎组织在土壤 PCNB 的浓度范围内均未受到污染。萝卜虽为根茎类蔬菜, 但其富集 PCNB 的能力较弱, 为低吸收型蔬菜, 可能与萝卜的根系结构有关。生菜、油麦菜、小白菜在 PCNB 中低污染时, 均在食品安全标准范围内, 可与萝卜共同作为在轻度 PCNB 污染土壤上推荐种植蔬菜。本研究中莴笋茎的 PCNB 的含量小于叶的含量, 与其他研究结论茎 > 叶不相符, 可能原因是莴笋生长受 PCNB 抑制使其生物量减少从而促进了 PCNB 向地上部转运^[45]。根据这一结果, 不建议食用在 PCNB 污染土壤或含 PCNB 复合污染上生长的莴笋叶部分。

土壤 Cd 浓度为 $0.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 生菜、油麦菜及小白菜可食部分未超出食品安全限量值标准 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤 Cd 浓度在 $0.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 除生菜、油麦菜外, 其余 3 种蔬菜可食部分均超过 Cd 限量值。土壤 Cd 浓度大于 $0.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 5 种蔬菜可食部分均超过限量值。5 种蔬菜在处理组均受到不同程度的污染, 受污染程度为莴笋 > 萝卜 > 小白菜 > 生菜 > 油麦菜, 这表明 5 种蔬菜都为 Cd 高富集型蔬菜, 对 Cd 均易感。但在低浓度 Cd 污染土壤上, 生菜、油麦菜未受污染, 推荐在轻度 Cd 污染土壤或轻度 PCNB-Cd 复合污染土壤上种植。

本研究中, 小白菜 PCNB 的富集系数与 Li 等^[11]的盆栽试验所得结果一致, 相关研究结论与 Zhang^[36]、Gonzalez^[44]和 Donnarumma^[45]在 OCPs 的田间试验研究结论一致。本试验生菜、油麦菜 Cd 富集系数与孟媛等^[5]以西安为背景值盆栽试验结果一

致。Cd 富集系数生菜>油麦菜,这与珠江三角洲^[48]、南宁市^[49]两个地方 Cd 富集系数一致。Cd 富集系数莴笋>萝卜,莴笋叶>莴笋茎,根茎蔬菜>叶类蔬菜与成都市^[50-53]和山东省^[54]两个地区蔬菜 Cd 富集系数结果一致。研究数据均为田间土壤-蔬菜“一对一”采样,表明盆栽试验结果与田间试验结果吻合、品种差异性与田间试验结果也相似,验证了盆栽试验结果对实际农业生产是具有参考性的,因此用盆栽试验对比不同蔬菜品种对农药-重金属富集能力的方案可行。也有研究表明盆栽试验蔬菜的富集系数、污染物浓度高于田间试验,可能与生长气候和栽培条件有关,因此本研究尽量模拟田间真实情况。

4 结论

(1) 中低 PCNB 污染土壤对叶类蔬菜生物量有促进作用,但随处理浓度升高促进作用变小,且在高浓度时则呈现出抑制作用;PCNB 污染土壤对根茎类蔬菜生物量均为抑制作用。在 PCNB-Cd 复合污染下蔬菜吸收 PCNB 不受影响。叶用莴苣、油麦菜、小白菜、莴笋叶可食部分 PCNB 含量均有超过食品安全限量标准,而萝卜和莴笋茎可食部分 PCNB 含量未超标。此外,5 种蔬菜体内 PCNB 的含量随土壤 PCNB 浓度升高有所增加的趋势。

(2) Cd 污染土壤上,5 种蔬菜可食部分均受到不同程度的污染,且种间差异显著。其中,萝卜和莴笋可食部分 Cd 含量均超出国家食品安全限量值标准。叶用莴苣、油麦菜和小白菜仅在轻度 Cd 污染浓度上未超标。

(3) 5 种蔬菜 PCNB、Cd 富集系数具有显著差异,PCNB 富集系数为:莴笋叶>小白菜>莴笋茎>油麦菜>叶用莴苣>萝卜;莴笋叶 Cd 富集系数高于莴笋茎 Cd,且都大于 1,油麦菜的 Cd 富集系数最小。莴笋叶 PCNB、Cd 富集系数均大于其他蔬菜品种。

(4) 叶用莴苣、油麦菜对 PCNB 和 Cd 的富集能力均较低,宜作为轻度 PCNB-Cd 复合污染土壤环境条件下低富集蔬菜品种推广种植。萝卜对五氯硝基苯吸收能力低,可在单 PCNB 污染土壤环境条件下推广种植,但其对 Cd 富集能力较大,不宜在含 Cd 土壤上种植。莴笋受生长抑制的影响,PCNB 更易积累在莴笋叶中,因此不建议食用在中高度 PCNB 污染土壤或复合污染土壤下种植的莴笋叶部分。莴笋茎叶组织对 Cd 吸收富集能力均较大,不建议在中高度 Cd 污染土壤环境下种植。

参考文献:

- [1] 何任红, 马爱军, 王良梅. 镉与毒死蜱复合污染对白菜生长及叶绿素、类胡萝卜素含量的影响 [J]. 江苏农业科学, 2013, 41 (8): 330-332.
- [2] HE R H, MA A J, WANG G M. Effects of combined pollution of cadmium and chlorpyrifos on growth, chlorophyll and carotenoid content of Chinese cabbage [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2013, 41(8): 330-332. (in Chinese)
- [3] ZHUANG P, MCBRIDE M B, XIA H P, et al. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(5): 1551-1561.
- [4] XU Z, SHI M Y, YU X M, et al. Heavy metal pollution and health risk assessment of vegetable-soil systems of facilities irrigated with wastewater in Northern China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(16): 9835.
- [5] ZHENG S N, WANG Q, YUAN Y Z, et al. Human health risk assessment of heavy metals in soil and food crops in the Pearl River Delta urban agglomeration of China [J]. *Food Chemistry*, 2020, 316: 126213.
- [6] 孟媛, 张亮, 王林权, 等. 复合污染土壤上几种叶类蔬菜对 Cd 和 As 的富集效应 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (6): 972-981.
- [7] MENG Y, ZHANG L, WANG L Q, et al. Cd and As accumulation of several leafy vegetables in soils contaminated by combined heavy metal [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(6): 972-981. (in Chinese)
- [8] XIONG W M, LI Y J, MO G M, et al. Comparison of heavy metal accumulation in four vegetables grown in the soils contaminated with multiple heavy metals [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2022, 23(4): 25-32.
- [9] LI M, XU G H, YU R, et al. Bioaccumulation and toxicity of pentachloronitrobenzene to earthworm (*Eisenia fetida*) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 174: 429-434.
- [10] LI Y Y, YANG H. Bioaccumulation and degradation of pentachloronitrobenzene in *Medicago sativa* [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 119: 143-150.
- [11] 刘晓漫, 曹勘程, 王秋霞, 等. 建议我国重视五氯硝基苯的应用风险 [J]. 植物保护, 2018, 44 (3): 1-5.
- [12] LIU X M, CAO A C, WANG Q X, et al. China should attach importance to the risk of quinoxaline application [J]. *Plant Protection*, 2018, 44(3): 1-5. (in Chinese)
- [13] 樊宏娜, 袁星, 贾会娟, 等. 五氯硝基苯对蔬菜大棚土壤酶活性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2006, 25 (1): 208-210.
- [14] FAN H N, YUAN X, JIA H J, et al. Influence of PCNB on enzyme activities in vegetable greenhouse soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(1): 208-210. (in Chinese)
- [15] LI M, XU G H, YU R, et al. Uptake and accumulation of pentachloronitrobenzene in pak choi and the human health risk [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, 42(1): 109-120.
- [16] 潘攀, 杨俊诚, 邓仕槐, 等. 重金属与农药复合污染研究现状及展望

- [J]. 农业环境科学学报, 2011, 30 (10): 1925–1929.
- PAN P, YANG J C, DENG S H, et al. Heavy metals and pesticides co-contamination in environment [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10): 1925–1929. (in Chinese)
- [13] 李婉怡, 於维维, 余琼阳, 等. 土壤重金属-有机物复合污染环境效应与修复技术研究进展 [J]. 土壤, 2023, 55 (3): 453–463.
- LI W Y, YU W W, YU Q Y, et al. Environmental effects and remediation technologies of heavy metal-organic pollutant co-contaminated soil: A review [J]. *Soils*, 2023, 55(3): 453–463. (in Chinese)
- [14] 潘声旺, 吴云霄, 罗竞红, 等. 成都城区蔬菜地土壤中农药残留及其分布特征 [J]. 生态环境学报, 2011, 20 (3): 538–543.
- PAN S W, WU Y X, LUO J H, et al. Residual of organochlorine pesticides and distribution characteristics in the vegetable soils from Chengdu region of Sichuan province, China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(3): 538–543. (in Chinese)
- [15] 李冰, 王昌全, 谭婷, 等. 成都平原土壤重金属区域分布特征及其污染评价 [J]. 核农学报, 2009, 23 (2): 308–315.
- LI B, WANG C Q, TAN T, et al. Regional distribution and pollution evaluation of heavy metal pollution in topsoils of the Chengdu plain [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2009, 23(2): 308–315. (in Chinese)
- [16] YANG Y, ZHANG F S, LI H F, et al. Accumulation of cadmium in the edible parts of six vegetable species grown in Cd-contaminated soils [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(2): 1117–1122.
- [17] XU Z Q, PENG J W, ZHU Z, et al. Screening of leafy vegetable varieties with low lead and cadmium accumulation based on foliar uptake [J]. *Life*, 2022, 12(3): 339.
- [18] LI X H, ZHOU Q X, WEI S H, et al. Identification of cadmium-excluding Welsh onion (*Allium fistulosum* L.) cultivars and their mechanisms of low cadmium accumulation [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2012, 19(5): 1773–1780.
- [19] 任艳军, 任学军, 马建军, 等. Cd/Cr 复合胁迫下不同品种蔬菜对 Cd 和 Cr 积累与转运的差异研究 [J]. 核农学报, 2018, 32 (5): 993–1002.
- REN Y J, REN X J, MA J J, et al. Study on the variety difference of Cd and Cr accumulation and translocation in vegetable under Cd/Cr combination stress [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(5): 993–1002. (in Chinese)
- [20] 国家环境保护总局. 食用农产品产地环境质量评价标准: HJ/T 332—2006[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [21] ZHOU Y X, PAN S W. Assessment of the efficiency of immobilized degrading microorganisms in removing the organochlorine pesticide residues from agricultural soils [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 195(11): 1274.
- [22] LIAO Y L, TANG Q X, YANG J Y. Microplastic characteristics and microplastic-heavy metal synergistic contamination in agricultural soil under different cultivation modes in Chengdu, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 459: 132270.
- [23] DENG S W, YU J, WANG Y T, et al. Distribution, transfer, and time-dependent variation of Cd in soil-rice system: A case study in the Chengdu Plain, Southwest China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 195: 104367.
- [24] 四川省国土资源厅. 四川省土壤污染状况调查公报 [R/OL]. (2014-12-01) [2024-12-02]. <https://www.sc.gov.cn/10462/10464/10727/10866/2014/12/1/10319883.shtml>.
- [25] LI Y, LONG L, YAN H Q, et al. Comparison of uptake, translocation and accumulation of several neonicotinoids in komatsuna (*Brassica rapa* var. *perviridis*) from contaminated soils [J]. *Chemosphere*, 2018, 200: 603–611.
- [26] 宋志敏, 潘万伟, 王小强, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定土壤中 9 种重金属元素 [J]. 化学分析计量, 2023, 32 (12): 43–46.
- SONG Z M, PAN W W, WANG X Q, et al. Determination of 9 heavy metals in soil by ICP-MS with microwave digestion [J]. *Chemical Analysis and Meterage*, 2023, 32(12): 43–46. (in Chinese).
- [27] 龚敏, 李妍昕, 张含, 等. 重庆佛手产地土壤及药材中重金属和农药残留特征及健康风险评价 [J]. 西南农业学报, 2023, 36 (11): 2500–2510.
- GONG M, LI Y X, ZHANG H, et al. Characteristics and health risk assessment of heavy metals and pesticide residues in soil and herbs of *Citrus medica* var. *sarcodactylis* from Chongqing [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 36(11): 2500–2510. (in Chinese)
- [28] 中华人民共和国农业部. 蔬菜和水果中有机磷、有机氯、拟除虫菊酯和氨基甲酸酯类农药多残留的测定: NY/T 761—2008[S]. 北京: 农业出版社, 2008.
- [29] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中多元素的测定: GB 5009.268—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [30] 查燕, 汤婕, 牛天新. 叶菜类蔬菜对重金属富集特征研究 [J]. 江西农业大学学报, 2022, 44 (3): 773–782.
- ZHA Y, TANG J, NIU T X. Study on enrichment characteristics of heavy metals in leafy vegetables [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2022, 44(3): 773–782. (in Chinese)
- [31] 金彩霞, 周启星, 王新. 镉-豆磺隆复合污染对小麦生物学性状与品质的胁迫 [J]. 农业环境科学学报, 2004, 23 (6): 1160–1163.
- JIN C X, ZHOU Q X, WANG X. Stress of combined pollution of cadmium- chlorimuron- ethyl on biological characteristics and quality of wheat *Triticum aestivum* L [J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2004, 23(6): 1160–1163. (in Chinese)
- [32] HUANG H, XIONG Z T. Toxic effects of cadmium, acetochlor and bensulfuron-methyl on nitrogen metabolism and plant growth in rice seedlings [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2009, 94(2/3): 64–67.
- [33] TRA H T L, EGASHIRA K. Status of heavy metals in agricultural soils of Vietnam [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2001, 47(2): 419–422.
- [34] YANG Y, CHEN W P, WANG M E, et al. Regional accumulation characteristics of cadmium in vegetables: Influencing factors, transfer

- model and indication of soil threshold content [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 219: 1036–1043.
- [35] WANG X P, SHAN X Q, ZHANG S Z, et al. A model for evaluation of the phytoavailability of trace elements to vegetables under the field conditions [J]. *Chemosphere*, 2004, 55(6): 811–822.
- [36] LÉTONDOR C, PASCAL-LORBER S, LAURENT F. Uptake and distribution of chlordecone in radish: Different contamination routes in edible roots [J]. *Chemosphere*, 2015, 118: 20–28.
- [37] ZHANG A P, LUO W X, SUN J Q, et al. Distribution and uptake pathways of organochlorine pesticides in greenhouse and conventional vegetables [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 505: 1142–1147.
- [38] SICBALDI F, SACCHI G A, TREVISAN M, et al. Root uptake and xylem translocation of pesticides from different chemical classes [J]. *Pesticide Science*, 1997, 50(2): 111–119.
- [39] JIA Y X, YUE P X, LI K H, et al. Mechanisms of cadmium tolerance and detoxification in two ornamental plants [J]. *Agronomy*, 2023, 13(8): 2039.
- [40] LACALLE R G, APARICIO J D, ARTETXE U, et al. Gentle remediation options for soil with mixed chromium (VI) and lindane pollution: Biostimulation, bioaugmentation, phytoremediation and vermiremediation [J]. *Heliyon*, 2020, 6(8): e04550.
- [41] CHOPPALA G, SAIFULLAH, BOLAN N, et al. Cellular mechanisms in higher plants governing tolerance to cadmium toxicity [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2014, 33(5): 374–391.
- [42] AKHTER M F, MCGARVEY B, MACFIE S M. Reduced translocation of cadmium from roots is associated with increased production of phytochelatins and their precursors [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2012, 169(18): 1821–1829.
- [43] MENG Y, ZHANG L, WANG L Q, et al. Antioxidative enzymes activity and thiol metabolism in three leafy vegetables under Cd stress [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 173: 214–224.
- [44] GONZALEZ M, MIGLIORANZA K S B, AIZPÚN DE MORENO J E, et al. Evaluation of conventionally and organically produced vegetables for high lipophilic organochlorine pesticide (OCP) residues [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2005, 43(2): 261–269.
- [45] DONNARUMMA L, POMPI V, FARACI A, et al. Dieldrin uptake by vegetable crops grown in contaminated soils [J]. *Journal of Environmental Science and Health Part B, Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 2009, 44(5): 449–454.
- [46] MENDOZA-CÓZATL D, LOZA-TAVERA H, HERNÁNDEZ-NAVARRO A, et al. Sulfur assimilation and glutathione metabolism under cadmium stress in yeast, protists and plants [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2005, 29(4): 653–671.
- [47] WANG X, SHI Y, CHEN X, et al. Screening of Cd-safe genotypes of Chinese cabbage in field condition and Cd accumulation in relation to organic acids in two typical genotypes under long-term Cd stress [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, 22(21): 16590–16599.
- [48] GONZALEZ M, MIGLIORANZA K S B, AIZPÚN DE MORENO J E, et al. Organochlorine pesticide residues in leek (*Allium porrum*) crops grown on untreated soils from an agricultural environment [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(17): 5024–5029.
- [49] ZHANG H H, CHEN J J, ZHU L, et al. Transfer of cadmium from soil to vegetable in the Pearl River Delta area, South China [J]. *PLoS One*, 2014, 9(9): e108572.
- [50] CUI Y J, ZHU Y G, ZHAI R H, et al. Transfer of metals from soil to vegetables in an area near a smelter in Nanning, China [J]. *Environment International*, 2004, 30(6): 785–791.
- [51] 赵小蓉, 杨谢, 陈光辉, 等. 成都平原区不同蔬菜品种对重金属富集能力研究 [J]. 西南农业学报, 2010, 23 (4): 1142–1146.
- ZHAO X R, YANG X, CHEN G H, et al. Assessment of heavy metal enrichment in vegetables of Chengdu Plain [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 23(4): 1142–1146. (in Chinese)
- [52] 赖佳, 李浩, 何斌, 等. 不同小春作物种类对重金属吸收差异性的研究 [J]. 四川农业科技, 2016 (10): 28–30.
- LAI J, LI H, HE B, et al. Study on the difference of heavy metal absorption by different spring crops [J]. *Sichuan Agricultural Science and Technology*, 2016(10): 28–30. (in Chinese)
- [53] 崔冬霞, 刘应平, 曾宜君, 等. 蔬菜中 Cd 的积累与土壤环境的相关性分析 [J]. 西南大学学报 (自然科学版), 2012, 34 (6): 133–137.
- CUI D X, LIU Y P, ZENG Y J, et al. Correlation analysis of Cd enrichment by vegetables and the soil environment [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2012, 34(6): 133–137. (in Chinese)
- [54] ZHANG T R, ZHANG Y, LI W, et al. Occurrence and dietary exposure of heavy metals in marketed vegetables and fruits of Shandong Province, China [J]. *Food Science & Nutrition*, 2021, 9(9): 5166–5173.

(责任编辑: 于洪杰)