

酸性和碱性土壤中绣球花对镉的耐性响应及积累转运特征

陆清¹, 王朝宇¹, 罗菊丽¹, 周瑞伍^{1*}, 陈莉莉^{2*}

¹玉溪师范学院地理与国土工程学院, 云南 玉溪

²云南特色生物资源高值化利用教育部工程研究中心, 云南 昆明

收稿日期: 2026年7月13日; 录用日期: 2026年8月14日; 发布日期: 2026年8月25日

摘要

为探讨绣球花(*Hydrangea macrophylla*)在镉(Cd)污染土壤生态绿化与根部滞留型稳定化修复中的应用潜力, 本研究通过盆栽试验, 比较了其在酸性和碱性土壤条件下的Cd耐性响应及积累转运特征。结果表明, 绣球花在这两类土壤中均具有一定Cd耐受能力; 在相同Cd处理下, 碱性土壤Cd有效性低于酸性土壤, 植株生长和生物量积累整体较好。Cd主要富集于根部, 转移系数为0.03~0.05, 表现出明显的根部滞留特征。本研究结果反映了酸性和碱性土壤条件及其伴随养分背景下绣球花对Cd胁迫的综合响应。综上, 绣球花具有作为Cd污染土壤生态绿化和根部滞留型稳定化修复候选植物的潜力。

关键词

绣球花, 镉, 土壤pH, 耐性响应, 积累转运

Tolerance Response, Cadmium Accumulation and Translocation Characteristics of *Hydrangea macrophylla* in Acidic and Alkaline Soils

Qing Lu¹, Chaoyu Wang¹, Juli Luo¹, Ruiwu Zhou^{1*}, Lili Chen^{2*}

¹College of Geography and Land Engineering, Yuxi Normal University, Yuxi Yunnan

²Engineering Research Center for Valorization of Unique Bio-Resources in Yunnan, Ministry of Education, Kunming Yunnan

Received: July 13, 2026; accepted: August 14, 2026; published: August 25, 2026

*通讯作者。

文章引用: 陆清, 王朝宇, 罗菊丽, 周瑞伍, 陈莉莉. 酸性和碱性土壤中绣球花对镉的耐性响应及积累转运特征[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(8): 1394-1401. DOI: 10.12677/aep.2026.168140

Abstract

To investigate the application potential of *Hydrangea macrophylla* in ecological greening and root-retention-based stabilization remediation of cadmium (Cd)-contaminated soils, a pot experiment was conducted to compare its Cd tolerance responses and accumulation-translocation characteristics under acidic and alkaline soil conditions. The results showed that *H. macrophylla* exhibited a certain degree of Cd tolerance in both soil types. Under the same Cd treatments, Cd availability in alkaline soil was lower than that in acidic soil, and plant growth and biomass accumulation were generally better in alkaline soil. Cd was mainly accumulated in the roots, with translocation factors ranging from 0.03 to 0.05, indicating a pronounced root-retention characteristic. These results reflect the integrated responses of *H. macrophylla* to Cd stress under acidic and alkaline soil conditions, together with their associated nutrient backgrounds. Overall, *H. macrophylla* has potential as a candidate plant for ecological greening and root-retention-based stabilization remediation of Cd-contaminated soils.

Keywords

Hydrangea macrophylla, Cadmium, Soil pH, Tolerance Response, Accumulation and Translocation

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

镉(Cd)是典型的高毒性重金属污染物, 具有较强迁移性和生物毒性, 易被植物吸收并通过食物链传递, 对生态环境和人体健康造成潜在威胁[1][2]。随着工业活动、污水灌溉及农业投入品使用等因素的影响, Cd 污染土壤的修复需求日益迫切[3]。植物修复因成本较低、环境扰动小和生态友好等优点受到广泛关注, 其中观赏植物兼具污染修复与景观美化功能, 在污染土壤生态绿化与修复利用中具有潜在应用价值[4][5]。

土壤 pH 是影响 Cd 有效性、迁移性及植物吸收的重要因素[6]。一般而言, 酸性条件下 Cd 有效性通常较高, 更易被植物吸收; 而碱性条件下 Cd 有效性通常降低, 植物对 Cd 的吸收和转运可能受到影响[7]。但植物对 Cd 胁迫的响应不仅受土壤 pH 影响, 还与土壤养分背景、Cd 形态及植物自身耐性等因素有关。不同植物在酸性和碱性土壤中的 Cd 耐性、富集能力及转运特征存在明显差异[7]。目前, 相关研究多集中于典型修复植物[1][8], 而对观赏植物, 尤其是绣球花在不同 pH 条件下 Cd 污染土壤中对 Cd 胁迫响应的研究仍相对较少[4]。

绣球花(*Hydrangea macrophylla*)具有较强的环境适应能力和较高的观赏价值, 适用于园林绿化及生态景观建设, 具备应用于 Cd 污染土壤生态绿化与稳定化修复的潜在优势[4]。然而, 绣球花在酸性和碱性 Cd 污染土壤中的 Cd 耐性响应差异及 Cd 积累转运规律尚不明确, 其在生态绿化与 Cd 污染土壤稳定化修复中的应用潜力仍有待进一步评价。因此, 本研究通过盆栽试验, 比较酸性和碱性 Cd 污染土壤中绣球花对 Cd 胁迫的耐性响应差异, 分析其 Cd 积累与转运特征, 并初步评价其作为 Cd 污染土壤生态绿化及稳定化修复候选植物的应用潜力, 以期观赏植物在 Cd 污染土壤生态修复中的应用提供科学参考。

2. 材料与方法

2.1. 试验材料

试验所用绣球花幼苗和土壤由云南思创格科技有限责任公司提供。供试植物为大叶绣球园艺品种“海

蓝”，由扦插繁殖获得，选择生长健壮、长势基本一致的扦插苗作为试验材料。供试土壤为酸性和碱性有机质营养土，其基本理化性质见表 1。

Table 1. Basic physicochemical properties of the tested soil
表 1. 供试土壤基本理化性质

土壤类型	土壤性质					
	pH 值	有机质(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	总 Cd (mg/kg)	有效 Cd (mg/kg)
酸性土壤	5.32	390.54	795.20	629.85	0.23	0.06
碱性土壤	7.31	361.87	636.11	259.54	0.22	0.05

2.2. 试验设计

盆栽试验于云南思创格科技有限责任公司温室大棚内进行(24°21'00" N, 102°35'24" E)。试验采用双因素设计，以不同 pH 有机质营养土条件和 Cd 处理液浓度为因素，在酸性和碱性有机质营养土中分别设置 Cd 处理。供试土壤装入黑色塑料试验桶(上口直径 36 cm、底径 30 cm、高 32 cm)中，每桶装土 20 L。移栽前轻轻去除供试扦插苗根系附着基质，随后移栽至试验桶中，每桶 1 株。移栽后培养 10 个月，使植株适应盆栽条件并形成稳定根系，随后进行 Cd 处理。

鉴于绣球花主要用于园林绿化和非食用观赏植物配置，结合《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB36600—2018)¹、前期预试验结果及相关文献，设置 Cd 处理液浓度为 0、40 和 160 mg/L，以 Cd²⁺计，每桶加入处理液 2.5 L，分别对应 Cd 添加量为 0、100 和 400 mg/桶，按每桶土壤干重约 7 kg 折算，外源 Cd 添加量约为 0、14.29 和 57.14 mg/kg 干土。每种土壤条件下各设置 3 个 Cd 处理，每个处理 3 次重复，每桶 1 株并作为 1 个独立生物学重复。

以 CdCl₂·2.5H₂O 为 Cd 源，根据各处理液目标浓度称取相应质量，溶于去离子水后采用多点、缓慢浇施方式沿盆土表面均匀加入，浇施过程中避免桶底渗漏，以降低局部 Cd 浓度过高及 Cd 损失的影响；对照处理加入等量去离子水。Cd 处理后，植株在温室内继续培养 84 d，条件为自然光照，昼/夜温度为 25℃/20℃，相对湿度为 40%~60%。该培养过程为外源 Cd 在盆土中的扩散、吸附和转化提供了时间。各处理盆栽采用完全随机排列，并在培养期间定期调整盆位，以降低温室内空间异质性对试验结果的影响。采用称重法维持土壤含水量为田间持水量的 60%~70%，根据土壤水分损失补充等量自来水，以保证不同处理间水分条件一致，并避免灌溉水外渗，所用水中未检出 Cd。试验期间各处理采用一致的管理措施，及时防治病虫害并清除杂草。培养结束后收获植株，并同步采集土壤样品，测定土壤总 Cd 和有效 Cd 含量，相关结果见表 2。

2.3. 指标测定

2.3.1. 生长生理指标的测定

将植株保持完整取出后分为地上部和根部两部分，用蒸馏水洗净并吸干表面水分后，测量记录株高和根长。叶绿素含量采用紫外分光光度法进行测定[9]；根系活力采用氯化三苯基四氮唑(TTC)还原法进行测定[10]。将绣球花植物样品放入烘箱中，在 105℃杀青 15 min，再在 65℃烘干至恒重，用万分之一电子天平称重，计算地上部生物量和地下部生物量。根冠比通过地下部生物量与地上部生物量的比值计算。以 Cd 处理下植株整株平均质量与对照处理下植株整株平均质量的比值表示耐性指数。

2.3.2. Cd 积累指标的测定

将烘干的绣球花植物样品磨碎过 0.25 mm 尼龙筛，采用 HNO₃-HClO₄法消解；将风干土壤样品磨碎

¹https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/trhj/201807/t20180703_446027.shtml

过 0.15 mm 筛, 采用 $\text{HNO}_3\text{-HCl-H}_2\text{O}_2$ 消解。消解液中的 Cd 浓度采用原子吸收分光光度法进行测定。Cd 富集系数、转移系数、Cd 积累量和地上部 Cd 分配比例根据如下公式计算:

$$\begin{aligned}\text{富集系数(BCF)} &= \text{植物各部位 Cd 浓度} / \text{土壤中总 Cd 浓度} \\ \text{转移系数(TF)} &= \text{植物地上部 Cd 浓度} / \text{根部 Cd 浓度} \\ \text{Cd 积累量} &= \text{植物各部位 Cd 浓度} \times \text{植物各部位生物量} \\ \text{地上部 Cd 分配比例} &= \text{植物地上部 Cd 积累量} / \text{植物整株 Cd 积累量} \times 100\%\end{aligned}$$

2.4. 数据分析

采用 R4.2.2 对数据进行统计分析。采用单因素方差分析(ANOVA)检验不同处理间的差异显著性, 显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$; 组间多重比较采用 Tukey HSD 检验。

3. 结果与分析

3.1. 不同 Cd 处理下酸性和碱性土壤 pH 及有效 Cd 含量变化

由表 2 可知, Cd 处理 84 d 后, 酸性和碱性土壤的 pH 在不同 Cd 处理间均无显著差异。酸性和碱性土壤总 Cd 及有效 Cd 含量均随 Cd 处理浓度升高而显著增加($P < 0.05$)。在 40 和 160 mg/L Cd 处理下, 酸性土壤与碱性土壤的总 Cd 含量差异均不显著; 但酸性土壤有效 Cd 含量分别较碱性土壤显著提高 68.35% 和 56.16% ($P < 0.05$), 表明相同 Cd 处理水平下酸性土壤有效 Cd 含量较高。

Table 2. pH, total Cd and available Cd contents in acidic and alkaline soils under different Cd treatments
表 2. 酸性和碱性土壤在不同 Cd 处理下的 pH 值、总 Cd 及有效 Cd 含量

土壤类型	Cd 溶液处理浓度(mg/L)	pH 值	总 Cd 含量(mg/kg)	有效 Cd 含量(mg/kg)
酸性土壤	0	5.32 ± 0.08 b	0.23 ± 0.05 c	0.06 ± 0.02 e
	40	5.25 ± 0.12 b	13.96 ± 1.05 b	6.33 ± 0.28 c
	160	5.23 ± 0.05 b	55.04 ± 2.22 a	25.36 ± 0.78 a
碱性土壤	0	7.31 ± 0.08 a	0.22 ± 0.02 c	0.05 ± 0.01 e
	40	7.29 ± 0.10 a	12.80 ± 0.56 b	3.76 ± 0.20 d
	160	7.26 ± 0.06 a	53.75 ± 4.32 a	16.24 ± 0.53 b

注: 表中数据为平均值 ± 标准误; 同列不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

3.2. 不同 Cd 处理下酸性和碱性土壤中绣球花生长生理及 Cd 耐性响应

随着 Cd 处理浓度升高, 酸性和碱性土壤中绣球花生长均受到不同程度影响。与 0 mg/L Cd 处理相比, 160 mg/L Cd 处理下绣球花株高、地上部生物量、根部生物量及总生物量均显著降低($P < 0.05$, 表 3); 根长及根冠比在不同 Cd 处理间差异不显著; 耐性指数随 Cd 处理浓度升高显著降低($P < 0.05$)。与 0 mg/L Cd 处理相比, 酸性和碱性土壤中绣球花总叶绿素含量在 40 mg/L Cd 处理下无显著变化, 在 160 mg/L Cd 处理下显著降低($P < 0.05$); 根系活力在 40 和 160 mg/L Cd 处理下均显著降低($P < 0.05$, 表 4)。

Table 3. Effects of Cd treatments on growth parameters and tolerance index of *Hydrangea macrophylla* under acidic and alkaline soil conditions

表 3. 酸性和碱性土壤条件下 Cd 处理对绣球花生长指标及耐性指数的影响

土壤类型	Cd 溶液处理浓度(mg/L)	株高(cm)	根长(cm)	地上部生物量(g/株)	根部生物量(g/株)	总生物量(g/株)	根冠比	耐性指数
酸性土壤	0	34.7 ± 2.1 cd	30.2 ± 2.4 bcd	35.90 ± 4.07 cd	28.06 ± 2.07 bc	63.96 ± 5.40 cd	0.78 ± 0.08 a	1.00 ± 0.09 a

续表

酸性土壤	40	29.3 ± 3.8 de	28.5 ± 3.4 cd	27.97 ± 2.13 de	23.06 ± 2.50 c	51.03 ± 1.74 d	0.83 ± 0.13 a	0.80 ± 0.03 b
	160	26.7 ± 0.6 e	24.8 ± 0.7 d	18.94 ± 1.35 e	16.32 ± 1.18 d	35.26 ± 2.06 e	0.86 ± 0.07 a	0.55 ± 0.03 c
碱性土壤	0	51.0 ± 4.0 a	36.5 ± 1.6 a	69.96 ± 6.37 a	49.23 ± 2.63 a	119.19 ± 8.74 a	0.71 ± 0.04 a	1.00 ± 0.08 a
	40	46.7 ± 2.5 ab	34.9 ± 2.0 ab	52.98 ± 3.23 b	44.36 ± 2.48 a	97.34 ± 4.65 b	0.84 ± 0.06 a	0.82 ± 0.04 b
	160	40.3 ± 1.5 bc	33.1 ± 1.5 abc	41.21 ± 1.14 c	33.90 ± 1.63 b	75.11 ± 2.73 c	0.82 ± 0.02 a	0.63 ± 0.02 c

由表 3 和表 4 可知,在相同 Cd 处理下,碱性土壤中绣球花的株高、根长、地上部生物量、根部生物量及总生物量均显著高于酸性土壤($P < 0.05$);而酸性土壤与碱性土壤中绣球花的根冠比、耐性指数、总叶绿素含量及根系活力差异均不显著。

Table 4. Effects of Cd treatments on chlorophyll content and root activity of *H. macrophylla* under acidic and alkaline soil conditions

表 4. 酸性和碱性土壤条件下 Cd 处理对绣球花叶绿素及根系活力的影响

土壤类型	Cd 溶液处理浓度(mg/L)	总叶绿素含量(mg/g)	根系活力($\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$)
酸性土壤	0	1.62 ± 0.08 a	66.85 ± 2.94 a
	40	1.50 ± 0.05 a	42.86 ± 2.29 bc
	160	1.21 ± 0.08 b	27.15 ± 3.21 d
碱性土壤	0	1.66 ± 0.04 a	69.05 ± 5.39 a
	40	1.55 ± 0.05 a	50.06 ± 3.36 b
	160	1.24 ± 0.08 b	32.41 ± 8.27 cd

3.3. 不同 Cd 处理下酸性和碱性土壤中绣球花 Cd 积累转运及分配特征

由表 5 可知,酸性和碱性土壤中绣球花地上部及根部 Cd 含量均在 160 mg/L Cd 处理下较 40 mg/L Cd 处理显著升高($P < 0.05$);但地上部富集系数、根部富集系数及转移系数均在 160 mg/L Cd 处理下较 40 mg/L Cd 处理显著降低($P < 0.05$)。在不同 Cd 处理下,绣球花 Cd 富集系数均表现为根部富集系数大于 1、地上部富集系数小于 1,转移系数为 0.03~0.05,表明绣球花 Cd 积累以根部富集为主,向地上部转运能力较弱。由表 6 可知,在同一 pH 土壤条件下,绣球花根部及整株 Cd 积累量在 160 mg/L Cd 处理下较 40 mg/L Cd 处理均显著升高($P < 0.05$);地上部 Cd 积累量仅占整株 Cd 积累量的 3.52%~5.90%,表明 Cd 主要分配于根部。

在 40 和 160 mg/L Cd 处理下,酸性土壤中绣球花的地上部 Cd 含量、根部 Cd 含量及根部富集系数均显著高于碱性土壤($P < 0.05$);酸性土壤与碱性土壤中绣球花的转移系数及地上部 Cd 分配比例差异均不显著。从 Cd 积累量看,在 40 mg/L Cd 处理下,酸性和碱性土壤中绣球花地上部、根部及整株 Cd 积累量均无显著差异;而在 160 mg/L Cd 处理下,酸性土壤中绣球花地上部、根部及整株 Cd 积累量均显著低于碱性土壤($P < 0.05$)。

Table 5. Cd contents, bioconcentration factors and translocation factors in shoots and roots of *H. macrophylla* under acidic and alkaline soil conditions**表 5.** 酸性和碱性土壤条件下绣球花地上部和根部 Cd 含量、富集系数及转移系数

土壤类型	Cd 溶液处理浓度(mg/L)	Cd 含量(mg/kg)		富集系数		转移系数
		地上部	根部	地上部	根部	
酸性土壤	40	10.33 ± 0.69 b	229.20 ± 17.33 c	0.75 ± 0.09 a	16.51 ± 2.13 a	0.04 ± 0.01 ab
	160	16.44 ± 0.63 a	525.18 ± 43.85 a	0.30 ± 0.01 c	9.54 ± 0.64 b	0.03 ± 0.00 c
碱性土壤	40	6.34 ± 0.43 c	121.00 ± 8.57 d	0.50 ± 0.03 b	9.45 ± 0.27 b	0.05 ± 0.00 a
	160	10.83 ± 1.43 b	312.81 ± 26.31 b	0.20 ± 0.02 c	5.86 ± 0.86 c	0.03 ± 0.01 bc

Table 6. Cd accumulation in shoots and roots and proportion of Cd allocated to shoots in *H. macrophylla* under acidic and alkaline soil conditions**表 6.** 酸性和碱性土壤条件下绣球花地上部和根部 Cd 积累量及地上部 Cd 分配比例

土壤类型	Cd 溶液处理浓度(mg/L)	Cd 积累量(mg/株)			地上部 Cd 分配比例 (%)
		地上部	根部	整株	
酸性土壤	40	0.29 ± 0.02 b	5.31 ± 0.98 c	5.60 ± 0.98 c	5.25 ± 0.96 ab
	160	0.31 ± 0.03 b	8.55 ± 0.57 b	8.86 ± 0.60 b	3.52 ± 0.13 c
碱性土壤	40	0.33 ± 0.02 b	5.37 ± 0.49 c	5.70 ± 0.50 c	5.90 ± 0.46 a
	160	0.44 ± 0.07 a	10.59 ± 0.61 a	11.03 ± 0.66 a	4.04 ± 0.47 bc

4. 讨论

4.1. 酸性和碱性土壤中绣球花 Cd 耐性响应及其影响因素

植物对 Cd 胁迫的耐受能力通常可通过株高、根长等形态生长指标,生物量积累与分配特征,以及叶绿素含量、根系活力和耐性指数等指标进行评价[3][11][12]。本研究表明,绣球花对 Cd 处理的响应具有明显浓度差异。40 mg/L Cd 处理下,株高、根长、生物量和总叶绿素含量均未出现显著下降,说明该浓度 Cd 胁迫对绣球花形态生长和光合色素积累的影响相对有限;但根系活力显著降低,表明根系生理活性可能较形态生长指标对 Cd 胁迫更为敏感。160 mg/L Cd 处理下,绣球花生长、生物量积累、叶绿素含量和耐性指数均受到明显抑制,说明高浓度 Cd 已对其营养生长、干物质积累及生理活性产生不利影响。已有研究表明,低浓度 Cd 对部分植物生长影响相对有限,而高浓度 Cd 通常会抑制植株生长和生物量积累[13][14],这可能与 Cd 干扰细胞分裂、抑制叶绿素合成、降低根系吸收功能并诱导氧化损伤有关[9][11]。此外,绣球花根长和根冠比在不同 Cd 处理间变化不显著,说明 Cd 胁迫未明显改变其根系伸长和地上部/地下部生物量分配格局;但耐性指数下降表明,其耐受能力随 Cd 处理浓度升高而减弱。

土壤 pH 是影响 Cd 生物有效性及植物毒害效应的重要因素[6][7]。本研究,碱性土壤中绣球花株高、根长和生物量整体高于酸性土壤,表明不同 pH 土壤条件下绣球花对 Cd 胁迫的生长响应存在差异。在本试验条件下,较高 pH 可能有利于 Cd 吸附、沉淀或络合固定,从而降低部分 Cd 的生物有效性,并在一定程度上缓解 Cd 对植株生长的抑制。与此同时,酸性和碱性土壤中绣球花根冠比、耐性指数、总叶绿素含量及根系活力差异不显著,表明不同 pH 条件下绣球花对 Cd 的耐性响应并非表现为各项生理指标的同步变化,而主要体现在形态生长和生物量积累的差异上。但需要注意的是,两种供试土壤除 pH 外,有效磷等养分背景也存在差异,可能共同影响 Cd 有效性和植株生长响应。因此,本研究结果更适宜解释为不同 pH 及其伴随养分背景下绣球花对 Cd 胁迫的综合响应,而非 pH 单因素的独立效应。由此可见,

在绣球花用于 Cd 污染土壤生态绿化或稳定化修复时, 适宜的土壤酸碱环境及养分条件可能有助于降低 Cd 活化程度, 减轻 Cd 毒害, 并为其生态绿化和根部滞留型稳定化修复潜力的发挥提供生长基础。

4.2. 酸性和碱性土壤中绣球花 Cd 积累转运特征及应用潜力

植物在 Cd 污染土壤中的应用潜力不仅取决于植株 Cd 含量, 还受生物量、富集系数、转移系数及 Cd 分配格局的共同影响[5] [12] [15]。本研究中, Cd 处理浓度由 40 mg/L 升高至 160 mg/L 后, 绣球花地上部和根部 Cd 含量总体增加, 表明其具有一定 Cd 吸收和积累能力。需要注意的是, 在 160 mg/L Cd 处理下, 尽管酸性土壤中绣球花植株 Cd 含量较高, 但碱性土壤中较高的生物量积累最终使其地上部、根部及整株 Cd 积累量更高, 说明在 Cd 污染土壤植物修复潜力评价中, 生物量是影响 Cd 积累总量的重要因素。然而, 160 mg/L Cd 处理下, 地上部富集系数、根部富集系数和转移系数均低于 40 mg/L Cd 处理, 说明高浓度 Cd 虽提高了植株 Cd 含量, 但降低了其相对富集能力和向地上部转运能力。这可能与高浓度 Cd 抑制生物量积累、降低根系活力、破坏膜系统稳定性并干扰植物代谢过程有关[11]-[14]。从 Cd 积累量看, 40 mg/L Cd 处理下绣球花在积累 Cd 的同时未表现出明显生物量损失; 而 160 mg/L Cd 处理下, 生物量下降成为限制地上部、根部及整株 Cd 积累量进一步提高的重要因素。由此可见, 对于绣球花这类具有根部滞留特征的植物而言, 维持较高生物量可能比单纯提高植株 Cd 含量更有利于增加整株 Cd 积累量。因此, 评价绣球花在 Cd 污染土壤中的应用潜力时, 不能仅依据植株 Cd 含量, 还需结合生物量和 Cd 积累总量进行判断。该结果与植物修复潜力评价中强调植物体内 Cd 浓度和生物量共同决定 Cd 积累总量的观点一致[12] [15]。

不同 pH 土壤条件及其伴随的养分背景差异影响绣球花对 Cd 的吸收积累。本研究中, 酸性土壤有效 Cd 含量在 40 和 160 mg/L Cd 处理下分别较碱性土壤提高 68.35%和 56.16%, 表明在本试验条件下, 较低 pH 可能促进了土壤 Cd 活化和释放。已有研究表明, 土壤酸化可通过增强 H^+ 竞争吸附作用促进 Cd 解吸和释放, 而较高 pH 则有利于 Cd 吸附、沉淀或络合固定, 从而降低其生物有效性[6] [7]。因此, 酸性土壤中绣球花地上部和根部 Cd 含量及根部富集系数较高, 可能与 Cd 生物有效性较高及土壤养分背景差异共同有关。值得注意的是, 酸性土壤中 Cd 有效性较高, 虽然增加了植株 Cd 含量, 但在高 Cd 处理下也可能加重生长抑制, 从而限制 Cd 积累总量; 相反, 碱性土壤中植株 Cd 含量较低, 但生长状况相对较好, 因而使绣球花在 160 mg/L Cd 处理下获得更高的地上部、根部和整株 Cd 积累量。综合来看, 在植物修复应用中, 适宜的土壤 pH 不仅影响 Cd 有效性, 也可能通过影响植株生长状态和生物量积累, 进而影响最终的 Cd 积累效果。因此, 不同 pH 条件下绣球花 Cd 积累差异并非单纯由 Cd 有效性决定, 而是 Cd 有效性、植株耐性、生物量积累以及土壤养分背景综合作用的结果。Cd 分配特征进一步表明, 绣球花根部富集系数大于 1, 地上部富集系数小于 1, 转移系数仅为 0.03~0.05, 且地上部 Cd 积累量仅占整株 Cd 积累量的 3.52%~5.90%, 说明 Cd 主要滞留于根部, 向地上部迁移能力较弱。与典型提取型植物通常要求较高地上部 Cd 积累能力不同[1] [8], 绣球花更接近根部滞留型 Cd 稳定化植物。这种特征可能有助于降低 Cd 向地上部迁移的风险, 并为其作为 Cd 污染土壤生态绿化和根部滞留型稳定化修复候选植物提供依据。

5. 结论

绣球花在酸性和碱性土壤中均具有一定 Cd 耐受能力, 其生长和 Cd 积累转运特征在不同土壤条件下表现出明显差异。在本试验条件下, 偏碱性土壤中 Cd 有效性相对较低, 并有助于缓解 Cd 对植株生长的抑制。Cd 主要富集于根部, 向地上部转运较弱, 表明绣球花具有明显的 Cd 根部滞留特征, 可作为 Cd 污染土壤生态绿化和根部滞留型稳定化修复的候选植物。本研究基于盆栽试验, 所得结果反映了酸性和碱性土壤条件及其伴随养分背景下绣球花对 Cd 胁迫的综合响应; 其根部 Cd 滞留机制、长期稳定化效果及

田间应用潜力仍有待进一步研究。

基金项目

玉溪师范学院大学生创新创业训练计划项目“基于 pH 调控的绣球花镉污染修复效率优化研究”(202511390014)。

参考文献

- [1] 李熠, 陈熹, 肖丕显, 等. 中国镉超富集植物种类组成及分布特征研究[J]. 中国野生植物资源, 2020, 39(6): 11-16.
- [2] 柯嘉雯, 程张浩, 高雪夷, 等. 镉污染下的植物响应: 从吸收、转运到应答与缓解机制[J]. 植物生态学报, 2026, 50(4): 814-832.
- [3] 陈迪, 李伯群, 杨永平, 等. 4 种草本植物对镉的富集特征[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 960-966.
- [4] Chen, H., Zhao, H.Q. and Zhao, B. (2024) Exploring the Remediation Potential of *Hydrangea macrophylla* (Thunb.) Ser. in Cadmium-Contaminated Soil by Comparing Cultivars and Seedling Age. *Environmental Technology & Innovation*, **33**, Article 103474. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103474>
- [5] 朱丽霞, 韩琰, 陆奎眉, 等. 四种花灌木对镉的耐性和富集特性研究[J]. 闽南师范大学学报: 自然科学版, 2020, 33(1): 74-80.
- [6] Li, Y.Q., Yang, Y.R., Xing, C., Zhan, S., Yu, W., Chen, R., *et al.* (2026) Photosynthetic and Rhizospheric Response Characteristics to Cd Stress in Five (Hyper)Accumulator Species from Two Contrasting Soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **309**, Article 119602. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.119602>
- [7] Huang, R., Dong, M.L., Mao, P., Zhuang, P., Paz-Ferreiro, J., Li, Y., *et al.* (2020) Evaluation of Phytoremediation Potential of Five Cd (Hyper)Accumulators in Two Cd Contaminated Soils. *Science of The Total Environment*, **721**, Article 137581. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137581>
- [8] 赵晓峰, 雷梅, 陈同斌. 中国镉超富集植物的物种、生境特征和筛选建议[J]. 环境科学, 2023, 44(5): 2786-2798.
- [9] Li, Y.P., Sun, M.J., He, W., Wang, H., Pan, H., Yang, Q., *et al.* (2021) Effect of Phosphorus Supplementation on Growth, Nutrient Uptake, Physiological Responses, and Cadmium Absorption by Tall Fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) Exposed to Cadmium. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **213**, Article 112021. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112021>
- [10] Bora, M.S. and Sarma, K.P. (2021) Anatomical and Ultrastructural Alterations in *Ceratopteris pteridoides* under Cadmium Stress: A Mechanism of Cadmium Tolerance. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **218**, Article 112285. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112285>
- [11] 张思宇, 田佳源, 祁小旭, 等. 外来入侵植物黄顶菊生长及生理生态特性对镉胁迫的响应[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(3): 445-452.
- [12] 弋良朋, 王祖伟. 滨海盐渍土壤中不同类型盐生植物富集镉的效应[J]. 生态学报, 2017, 37(14): 4656-4662.
- [13] Li, X., Li, B.Q., Zheng, Y., Luo, L., Qin, X., Yang, Y., *et al.* (2022) Physiological and Rhizospheric Response Characteristics to Cadmium of a Newly Identified Cadmium Accumulator *Coreopsis grandiflora* Hogg. (Asteraceae). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **241**, Article 113739. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113739>
- [14] Ramana, S., Tripathi, A.K., Kumar, A., Dey, P., Saha, J.K. and Patra, A.K. (2021) Phytoremediation of Soils Contaminated with Cadmium by *Agave americana*. *Journal of Natural Fibers*, **19**, 4984-4992. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1870642>
- [15] 张杨杨, 李希铭, 高鹏, 等. 不同浓度镉胁迫下 6 种草本植物的耐性及富集特征的比较[J]. 草地学报, 2021, 29(6): 1265-1276.