

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.05.018

黄玉峰, 史自军, 周嘉文, 等. 伴矿景天重金属吸收与土壤阳离子养分供应的关系——基于中国南方地区土壤大样本的盆栽试验. 土壤, 2024, 56(5): 1067–1076.

伴矿景天重金属吸收与土壤阳离子养分供应的关系 ——基于中国南方地区土壤大样本的盆栽试验^①

黄玉峰^{1,2,3}, 史自军⁴, 周嘉文², 黄永杰^{1,3,5*}

(1 安徽师范大学生态与环境学院, 安徽芜湖 241000; 2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 211135; 3 皖江流域退化生态系统的恢复与重建省部共建协同创新中心, 安徽芜湖 241000; 4 江西省余干县现代农业示范区管理办公室, 江西上饶 335199; 5 生物环境与生态安全安徽省高校省级重点实验室, 安徽芜湖 241000)

摘要: 探究伴矿景天(*Sedum plumbizincicola*)镉(Cd)、锌(Zn)吸收与土壤阳离子养分元素供应的关系, 以期从养分调控角度指导提高超积累植物的修复效率。采用盆栽试验比较了中国南方地区不同类型、不同耕作方式和不同污染程度的 49 个土壤上伴矿景天生长及重金属吸收情况, 利用相关分析、广义梯度增强模型等手段挖掘限制植物重金属吸收的关键阳离子养分因子。结果表明: ①土壤全量锰(Mn)和铁(Fe)是影响伴矿景天生长的主要养分因子, 贡献率分别为 34.61% 和 16.31%; ②有效态钙(Ca)、全量镁(Mg)与地上部 Cd 含量及吸收量显著正相关, 其对地上部 Cd 含量的贡献率为 16.90% 和 10.39%, 而有效 Mg 对地上部 Cd 含量的贡献率为 14.21%; 有效 Mn 对伴矿景天 Zn 吸收影响最大, 其对地上部 Zn 含量和吸收量的贡献率分别为 17.76% 和 20.86%。土壤不同阳离子养分元素的供应对伴矿景天生长和重金属吸收能力有一定的影响, 其中土壤 Mg 和 Mn 是影响伴矿景天 Cd 和 Zn 吸收的重要养分元素, 今后可通过调控养分供应促进伴矿景天 Cd 和 Zn 的吸收, 提高修复效率。

关键词: 养分元素; 伴矿景天; 土壤污染; 吸取修复

中图分类号: X53 **文献标志码:** A

Relationship Between Heavy Metal Uptake and Soil Cationic Nutrient Supply in *Sedum plumbizincicola*: Pot Experiment Based on Large Number of Soil Samples in Southern China

HUANG Yufeng^{1,2,3}, SHI Zijun⁴, ZHOU Jiawen², HUANG Yongjie^{1,3,5*}

(1 School of Ecology and Environment, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000, China; 2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 3 Center of Cooperative Innovation for Recovery and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Wanjiang City Belt, Wuhu, Anhui 241000, China; 4 Yugan County Management Office of Modern Agriculture Model District, Shangrao, Jiangxi 335199, China; 5 Provincial Key Laboratory of Biotic Environment and Ecological Safety in Anhui, Wuhu, Anhui 241000, China)

Abstract: To explore the relationship between cadmium (Cd) and zinc (Zn) uptake in *Sedum plumbizincicola* and the supply of soil cationic nutrient elements, and guide the enhancement of phytoextraction performance of hyperaccumulators from the perspective of nutrient regulation, a pot experiment was conducted in 49 soils with different types, cultivation methods, and pollution levels collected from the southern China. Plant growth and metal uptake of *Sedum plumbizincicola* were studied, and correlation analysis and Generalized Boosted Models were used to find the key cationic nutrient factors controlling metal uptake in plants. The results showed that: 1) Soil total manganese (Mn) and iron (Fe) were the main nutrient factors affecting shoot biomass of *Sedum plumbizincicola*, with contribution rates of 34.61% and 16.31%, respectively. 2) The available calcium (Ca) and total magnesium (Mg) were significantly positively correlated with shoot Cd concentration and uptake. Their contribution rates to shoot Cd concentration were 16.90% and 10.39%, respectively. The contribution rate of available Mg to shoot Cd concentration

① 基金项目: 安徽省高等学校自然科学基金项目(KJ2019A0507)、芜湖市科技局项目(2023JC18)和国家重点研发计划项目(2019YFC1804703)资助。

* 通讯作者(yongjiehuang0108@163.com)

作者简介: 黄玉峰(1998—), 女, 安徽滁州人, 硕士研究生, 主要从事土壤重金属污染与修复研究。E-mail: hyufeng1998@163.com

was 14.21%. Available Mn showed the greatest impact on Zn accumulation in *Sedum plumbizincicola*, with its contribution rates to shoot Zn concentration and uptake of 17.76% and 20.86%, respectively. In summary, the supplies of soil cation nutrients affect the growth and metal uptake of *Sedum plumbizincicola* to a certain extent, among which soil Mg and Mn supplies are two major important factors. Via regulating nutrient supply, it can enhance Cd and Zn uptake by *Sedum plumbizincicola*, thereby improving metal removal efficiency in the contaminated soils.

Key words: Nutrient elements; *Sedum plumbizincicola*; Soil pollution; Phytoextraction

随着工业化和城市化的快速发展,人类活动对区域环境造成巨大威胁,采矿冶炼、电镀化工等工业生产活动导致农田土壤重金属含量增加,其中镉(Cd)为首要的重金属污染物,锌(Zn)在矿区附近也显著富集^[1-2]。总体上,我国农田土壤重金属污染状况不容乐观,特别是在南方部分地区有色金属矿长期不合理的开采和冶炼导致了土壤重金属的过量富集,严重威胁人体健康。因此,重金属污染农田土壤的修复迫在眉睫,其对于土壤环境质量保护和农业安全生产具有重要意义。超积累植物伴矿景天(*Sedum plumbizincicola*)对 Cd 和 Zn 具有超强的吸收、积累和耐受能力,且生长速度快,枝条可扦插繁殖。研究发现矿区生长的伴矿景天地上部 Cd 和 Zn 含量可高达 1 470 和 14 600 mg/kg^[3]。超积累植物吸取修复技术因其绿色、低成本等优点而逐渐被应用于大面积中低污染农田土壤的重金属去除并且具有良好的推广前景^[4]。如何提高超积累植物的修复效率,缩短修复期限,是降低修复成本和推动吸取修复技术广泛应用的前提。

我国南方地区土壤类型众多,不同区域农田土壤性质存在明显的差异,而土壤 pH、有机质以及养分元素供应状况等诸多因素都会影响超积累植物的吸取修复效率^[5-7]。其中,养分元素钙(Ca)、镁(Mg)、铁(Fe)和锰(Mn)等大多为二价金属阳离子,具有与 Cd、Zn 相似的电荷分布和水合离子半径,从而表现出相似的生化特性,它们很有可能在植物吸收和转运阳离子的过程中发生明显的竞争和协同作用。例如 Cd 和 Mn 都可能通过 Nramp5(天然抗性相关巨噬细胞蛋白)转运蛋白跨膜运输进入水稻根细胞内^[8]。另一方面,这些阳离子元素可以通过影响植物生理代谢、生长发育以及重金属吸收过程从而直接或间接影响超积累植物对重金属的吸收和积累。Liu 等^[9]发现低 Ca 供应可以显著延缓东南景天(*Sedum alfredii*)根部凯氏带和木栓质层的发育,促进东南景天根系 Cd 的吸收,并调节 Cd 向木质部的运输;而在赵涛等^[10]的研究中,增加 Mg 或 Ca 的供应都能提高东南景天根部 Cd 含量,其中 Cd/Mg 为 2 时收获的东南景天生物量、地上部 Zn 和 Cd 含量最大。Lombi 等^[11]指出

Fe 的缺乏诱导了超积累植物天蓝遏蓝菜(*Nocca caerulea*)编码 Fe 吸收相关蛋白基因的高度表达,促进了其对 Cd 的吸收。此外,土壤中养分元素还会影响重金属在土壤固相的分布,从而改变重金属的有效性。当养分元素含量增加时,自由态养分离子的含量也会增加,与土壤固相吸附的重金属离子发生交换,释放更多的重金属离子,进而影响植物根系对重金属的获取和吸收^[12]。因此,合理调控阳离子养分元素也是提高植物修复效率的科学手段之一。

许多研究表明改变土壤阳离子养分供应可以调控植物对重金属的吸收^[13-16]。本课题组前期已系统研究了土壤性质如 pH、有机质含量等对伴矿景天重金属吸收的影响^[6, 17],但关于阳离子养分元素对伴矿景天重金属修复效率的影响效应及相对贡献尚未明确,而基于大样本的统计分析手段为探寻限制植物重金属吸收的主控养分因子提供了新思路。因此本研究采集我国南方地区不同类型及污染程度土壤,设置盆栽试验,比较不同土壤上伴矿景天植物生长和重金属吸收的差异,通过相关分析、广义梯度增强模型等手段探究阳离子养分元素供应与伴矿景天 Cd、Zn 吸收的关系,明确影响伴矿景天 Cd 和 Zn 吸收的主要养分因素,以期从养分调控角度指导超积累植物修复效率的提高,促进植物修复技术的推广。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

从我国南方地区 5 个省份采集共计 49 个不同类型(包括水稻土、红壤、黄棕壤、紫色土、石灰土等)和不同污染程度的农田表层(0~15 cm)土壤样品,其中湖南省(郴州、衡阳和岳阳)10 个、江西省(鹰潭和上饶)6 个、浙江省(杭州、温州和台州)13 个、广西省(河池和桂林)9 个和广东省(韶关、清远和湛江)11 个。采样点土地利用类型包括水田和旱地,其中水稻土有 27 个,旱地土壤有 22 个;从土壤质地分类来看,供试土壤样本包括壤土(砂壤土和粉壤土)35 个以及黏土(砂黏土和壤黏土)14 个。根据中国土壤系统分类原则,供试土壤可分为 4 种,包括筒育水耕人为土 27

个、常湿润铁硅铝土 3 个、湿润铁铝土 14 个和土质初育土 5 个。

供试土壤主要性质如表 1 所示。土壤 pH、阳离子交换量(CEC)和有机碳含量(SOC)的范围分别为 4.28~8.42、7.20~25.4 cmol/kg 和 8.58~56.5 g/kg; 土壤全量 Cd(Cd_全)的含量范围为 0.06~33.2 mg/kg (平均值为 5.72 mg/kg), 其中共有 41 个土样的 Cd_全 超过 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》^[18]的污染风险筛选值(表 2); 土壤全量 Zn(Zn_全)的含量范围为 46~5 403 mg/kg (平均值为 700 mg/kg), 其中有 20 个土样的 Zn_全 超过污染风险筛选值(表 2)。由此可以看出, 供试土壤间性质差异显著, 能够很好地反映不同类型耕地土壤

的性质变异范围。

表 1 供试土壤基本性质
Table 1 Basic chemical properties of tested soils

参数	pH	CEC (cmol/kg)	SOC (g/kg)	Cd _全 (mg/kg)	Zn _全 (mg/kg)
最小值	4.28	7.20	8.58	0.06	46
最大值	8.42	25.4	56.5	33.2	5 403
中位数	5.48	17.9	28.1	11.5	926
平均值	5.73	12.5	22.5	5.72	700
标准差	1.11	4.26	8.62	8.59	1 077
变异系数(%)	19.3	34.1	38.4	150	154

注: CEC 表示土壤阳离子交换量; SOC 表示土壤有机碳; Cd_全表示土壤全量 Cd 含量; Zn_全表示土壤全量 Zn 含量; n=49。

表 2 供试土壤重金属全量超标情况
Table 2 Exceeding rates of Cd and Zn concentrations in tested soils referring to GB 15618—2018

项目	参数	pH≤5.5	5.5<pH≤6.5	6.5<pH≤7.5	pH>7.5
Cd 污染风险筛选值(mg/kg)	水田	0.3	0.4	0.6	0.8
	其他	0.3	0.3	0.3	0.6
	超标土样个数	18	13	5	5
Cd 污染风险管制值	管制值(mg/kg)	1.5	2	3	4
	超标土样个数	7	8	5	3
Zn 污染风险筛选值	筛选值(mg/kg)	200	200	250	300
	超标土样个数	8	5	5	2

1.2 盆栽试验

将供试土壤自然风干后混匀过筛(<4 mm), 分别取 1.5 kg 土样(烘干基)装入底部带有托盘的塑料盆中(直径 15 cm, 高 20 cm), 每盆扦插 4 株长势基本一致的伴矿景天枝条, 每个土壤设置 4 个重复。伴矿景天生长期间保持自然光照, 昼夜平均气温分别为 25 °C 和 15 °C, 土壤含水量维持约 70% 田间持水量。种植后 1 个月和 4 个月左右追肥两次, 每盆各施用尿素(CO(NH₂)₂)0.5 g 和磷酸二氢钾(KH₂PO₄)0.5 g。培养约 150 d 后, 收获植株地上部, 烘干称取地上部生物量, 分析重金属及养分元素含量。

1.3 土壤和植物样品分析

1.3.1 土壤样品重金属与养分元素含量测定

全量: 称取过 100 目筛土壤样品约 0.1 g 于 7 mL 的聚四氟乙烯(PFA)材质溶样杯中, 加入 2 mL 浓 HNO₃ 和 1 mL HClO₄ 120 °C 消解 2 h, 后温度升至 200 °C 消解 4 h, 开盖蒸发掉 HNO₃ 后加入 1 mL HF 继续消解 1 h, 待溶液清亮时 200 °C 蒸干, 最后用 1%(m/V) 稀 HNO₃ 溶液定容至 10 mL, 过滤后利用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Avio™ 200, Perkin

Elmer, 美国)和电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Nexion 2000, Perkin Elmer, 美国)测定消解液中的各元素(Cd、Zn、Ca、Mg、Fe、Mn、Ni、Cu、K)含量。

土壤有效态 Cd、Zn、Mn、Ca、Mg、K 含量测定^[19]: 称取过 10 目筛土壤 2.00 g, 加入 20 mL NH₄OAc 溶液(1 mol/L, pH=7), 在往复振荡机上振荡 0.5 h, 放置 6 h, 并时加摇动, 过滤, 采用 ICP-OES 和 ICP-MS 测定浸出液中的元素含量。

1.3.2 植物样品重金属与养分元素含量测定

称取植物样品约 0.2 g 于聚四氟乙烯密闭消解罐, 加入 6 mL 浓 HNO₃ 和 2 mL H₂O₂ 于 105 °C 烘箱消解 7 h, 电热板上赶酸后定容, 过滤, 采用 ICP-OES 测定消解液中的各元素(同上)含量。

1.4 数据处理与统计分析

所有土壤及植物样品测定数据均经过对数转换, 以实现数据的正态分布和线性回归模型残差的方差齐性, 采用 Pearson 相关(双侧检验)对不同变量进行相关性分析, 预测地上部重金属含量的方程通过 SPSS 进行多元逐步回归获得。通过广义梯度增强模型(Generalized boosted models, GBM)分析自变量与

因变量间的非线性关系,进一步探究影响伴矿景天重金属吸收的主控养分因子。GBM 是一种基于集成学习和强化计算的算法模型,它扩展了 Freund 和 Schapire 的 Adaboost 算法和 Friedman 的梯度提升机,将一系列弱学习器组合成强学习器,从而提升总体模型的预测准确度^[20]。使用该模型能够定量描述自变量对因变量方差的相对影响,而且通过偏相关图可以直观看到因变量随自变量的变化趋势。模型分析通过 R 语言中的 GBM 包实现。

所有数据表示为平均值±标准差,采用 Excel 2016 和 SPSS 19.0 进行统计分析,Origin 2023b 进行绘图分析,统计显著性水平为 $P<0.05$ 或 $P<0.01$ 。

2 结果与分析

2.1 伴矿景天地上部生物量与重金属吸收量

盆栽试验中生长在不同土壤上的伴矿景天均未出现明显的重金属毒害症状,其地上部平均生物量为 9.33 g/pot(表 3)。供试土壤理化性质的不同对伴矿景天的生长有一定影响,其中在供试土壤 Cd 含量最大时(33.2 mg/kg),对植物造成了毒害作用,导致该土壤上伴矿景天长势最弱,生物量最小。然而由于供

试土壤全量重金属的变异范围很大,地上部重金属吸收量的变异范围较大,地上部 Cd 和 Zn 平均含量分别为 174 和 3 536 mg/kg,最大值分别为 1 141 和 14 779 mg/kg,接近于矿区环境报道的伴矿景天的地上部重金属含量^[3]。地上部重金属吸收量随着生物量的增加而呈上升趋势,Cd 和 Zn 平均吸收量分别为 1.68 和 37.9 mg/pot,其中在紫砂岩发育的 Ca 和 Mg 含量较为丰富的矿区污染土壤上,伴矿景天长势良好,地上部 Cd 吸收量最大,为 14.1 mg/pot。

2.2 供试土壤养分元素全量及其有效态含量

供试土壤的养分元素供应状况如图 1 和图 2 所示。土壤全量 Ca、Mg、Fe 和 Mn 含量的平均值分别为 8.25、6.23、42.8 g/kg 和 615 mg/kg,同时土壤 NH₄OAc 提取的 Cd、Zn、Ca、Mg、Mn 和 K 有效态含量分别为 2.02、22.5、2 380、148、61.4 和 90.1 mg/kg。根据第二次土壤普查土壤养分分级标准^[21],供试土壤有效态 Ca 和 Mn 供应充足(第一等级:Ca>1 000 mg/kg, Mn>30 mg/kg),有效态 Mg 含量处于第三等级(100~200 mg/kg),速效 K 含量水平位于第四等级(50~100 mg/kg),在相当一部分土壤上修复植物可能出现 Mg、K 养分供应限制问题。

表 3 伴矿景天地上部生物量、重金属含量和吸收量
Table 3 Shoot biomass, metal concentration and uptake of *Sedum plumbizincicola* grown in tested soils

参数	生物量 (g/pot, DW)	重金属含量(mg/kg)		重金属吸收量(mg/pot)	
		Cd	Zn	Cd	Zn
最小值	1.84	3.87	303	0.02	1.96
最大值	16.6	1 141	14 779	14.1	198
中位数	9.89	67.0	1 946	0.56	13.9
平均值 ± 标准差	9.33 ± 3.59	174 ± 237	3 536 ± 3 624	1.68 ± 2.58	37.9 ± 49.3
变异系数 (%)	38.5	155	102	154	130

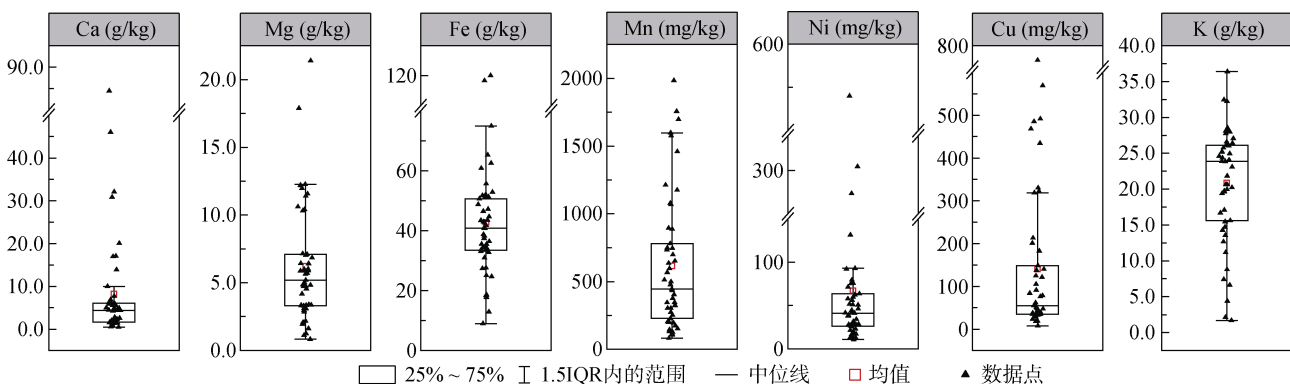


图 1 供试土壤全量 Ca、Mg、Fe、Mn、Ni、Cu 和 K 含量

Fig. 1 Concentrations of total Ca, Mg, Fe, Mn, Ni, Cu and K in the tested soils

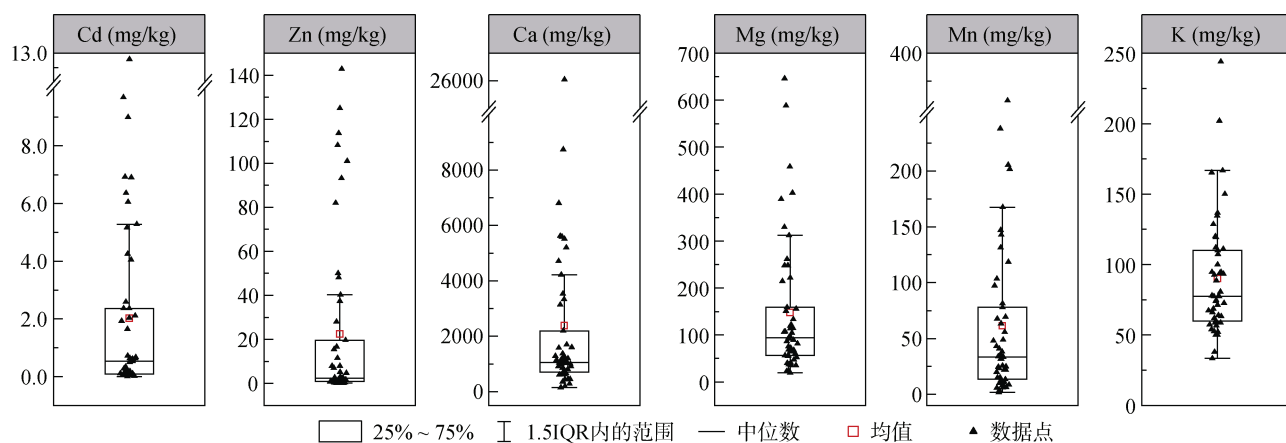


图 2 供试土壤有效态 Cd、Zn、Ca、Mg、Mn 和 K 含量
Fig. 2 Concentrations of available Cd, Zn, Ca, Mg, Mn, and K in tested soils

2.3 伴矿景天生长、重金属吸收与土壤养分元素供应的关系

相关分析(表 4)的结果表明：伴矿景天地上部生物量与供试土壤养分元素全量及有效态含量相关性均不显著。通过进一步的 GBM 分析，可以获得各养分因子对伴矿景天生长的相对贡献(表 5)和地上部生物量随养分元素含量变化的偏相关图(图 3)。可以看出，在所有研究的阳离子养分因素中，全量 Mn 对伴矿景天生物量的相对影响最大，贡献率为 34.61%；其次为全量 Fe 和 Cu、有效态 Ca，贡献率分别为 16.31%、

13.60% 和 12.27%。其中，当全量 Mn>1 300 mg/kg 或有效态 Ca 范围为 3 500~4 000 mg/kg 时，地上部生物量随着全量 Mn 或有效态 Ca 含量的增加而逐渐降低(图 3A、3C)；相反地，地上部生物量与全 Fe 含量 17.8~28.2 g/kg 范围内呈正相关关系(图 3B)。全量 Mg 和有效 Mg 对地上部生物量也有一定影响，两者贡献率合计为 12.25%(表 5)；其中在有效 Mg 含量为 55~75 mg/kg 的范围内，地上部生物量与有效 Mg 具有正相关关系，而当其含量较高或较低时，地上部生物量无明显变化(图 3D)。

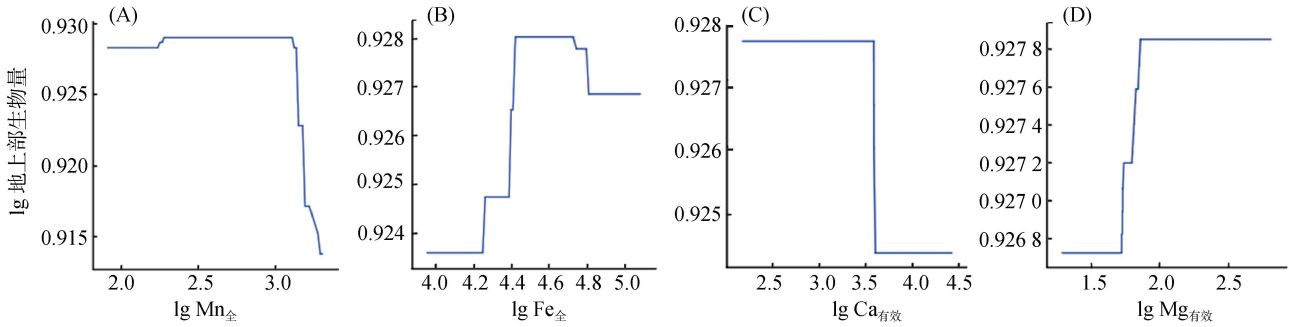
表 4 地上部生物量、重金属含量和吸收量与供试土壤养分元素供应的相关性
Table 4 Correlation of shoot biomass, metal concentration and uptake with nutrient concentrations in tested soil

	Ca _全	Mg _全	Fe _全	Mn _全	Ni _全	Cu _全	K _全	Ca _{有效}	Mg _{有效}	Mn _{有效}	K _{有效}
生物量	-0.07	0.26	0.06	-0.07	-0.04	0.11	0.23	-0.16	0.20	0.08	-0.09
Cd 含量	0.22	0.34*	-0.10	-0.09	0.26	0.00	0.26	0.43**	0.07	0.06	0.03
Zn 含量	0.04	0.24	-0.09	0.02	0.17	0.02	0.36*	0.10	-0.08	0.25	-0.14
Cd 吸收量	0.19	0.41**	-0.13	-0.12	0.23	0.04	0.32*	0.35*	0.13	0.08	-0.01
Zn 吸收量	-0.01	0.30*	-0.10	-0.03	0.12	0.06	0.40*	0.003	0.01	0.23	-0.15

注：X_全：土壤各金属及养分元素全量含量；X_{有效}：土壤各金属及养分元素有效态含量，下同。*、** 分别表示相关性达 P<0.05、P<0.01 显著水平。

表 5 各土壤养分元素对伴矿景天地上部生物量、重金属含量和吸收量相对贡献率(%)
Table 5 Contribution rates of soil nutrient factors to shoot biomass, metal concentration and uptake of *Sedum plumbizincicola*

土壤养分元素	地上部生物量	地上部 Cd 含量	地上部 Cd 吸收量	地上部 Zn 含量	地上部 Zn 吸收量
Ca _全	2.33	5.03	6.17	2.49	4.18
Mg _全	6.70	10.39	20.20	11.28	11.46
Fe _全	16.31	9.12	7.90	3.67	9.92
Mn _全	34.61	8.33	9.78	0.43	4.08
Ni _全	0.88	14.61	12.44	13.18	6.60
Cu _全	13.60	6.79	9.17	14.96	17.55
K _全	1.65	1.59	4.13	17.63	11.51
Ca _{有效}	12.27	16.90	8.88	3.00	5.36
Mg _{有效}	5.55	14.21	7.74	9.39	2.21
Mn _{有效}	4.90	7.94	11.55	17.76	20.86
K _{有效}	1.29	5.08	2.13	6.21	6.27



(图中土壤元素含量单位均采用 mg/kg, 下图同)

图 3 地上部生物量随土壤全 Mn、全 Fe、有效态 Ca 和有效态 Mg 含量变化的偏相关图

Fig. 3 Partial correlation diagram of shoot biomass with soil total Mn, total Fe, available Ca and available Mg concentrations

地上部 Cd 和 Zn 含量均与对应土壤全量和有效态含量存在显著的正相关线性关系(图 4); 此外, 地上部 Cd 含量和 Cd 吸收量与土壤有效态 Ca 和全量 Mg 含量显著正相关(表 4)。与相关分析结果吻合的是, GBM 分析发现地上部 Cd 含量最大的养分影响因子为有效态 Ca, 贡献率达 16.90%(表 5), 且地上部 Cd 含量随着有效 Ca 含量的增加而增加(图 5A); 其次, 有效 Mg 对地上部 Cd 含量的贡献率为 14.21%(表 5), 且随着有效 Mg 的增加, 地上部 Cd 含量表现为逐渐降低的趋势(图 5B)。而地上部 Zn 含量和吸收量与土壤全量 K 显著正相关, 同时地上部 Zn 吸收量

还与土壤全量 Mg 显著正相关(表 4)。从相对贡献率看, 地上部 Zn 含量的所有养分影响因子中, 有效 Mn 和全量 K 的贡献率最大, 分别贡献了 17.76% 和 17.63%(表 5); 且两者对地上部 Zn 含量的影响趋势大致相同, 当其含量增加到一定程度后对地上部 Zn 含量无明显影响(图 6A、6B)。

对土壤重金属及养分元素含量进行多元逐步线性回归分析, 获得预测地上部 Cd 和 Zn 含量的回归方程(表 6)。结果表明, 在土壤全量 Zn 基础上引入全量 Ca、Fe 和 K 也能显著提高地上部 Zn 含量的预测效果。

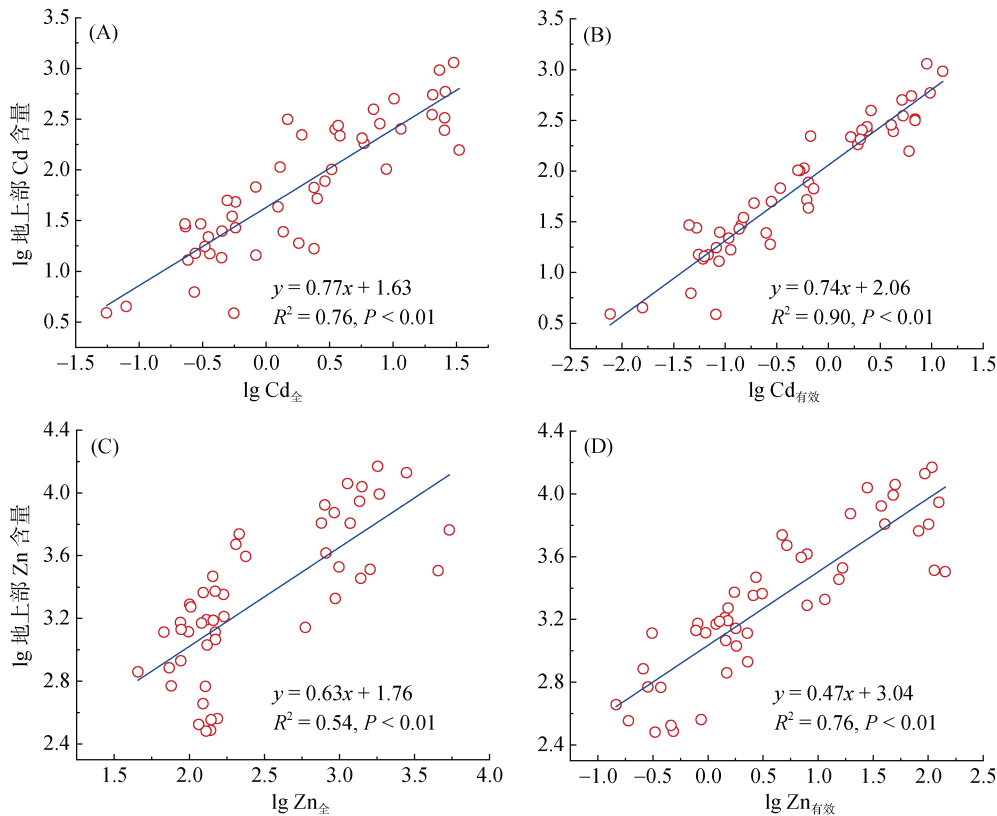


图 4 地上部 Cd 含量与土壤全 Cd、有效态 Cd 及地上部 Zn 含量与土壤全 Zn、有效态 Zn 的相关性

Fig. 4 Correlations between shoot Cd concentration with total Cd, available Cd and shoot Zn concentration with total Zn, available Zn

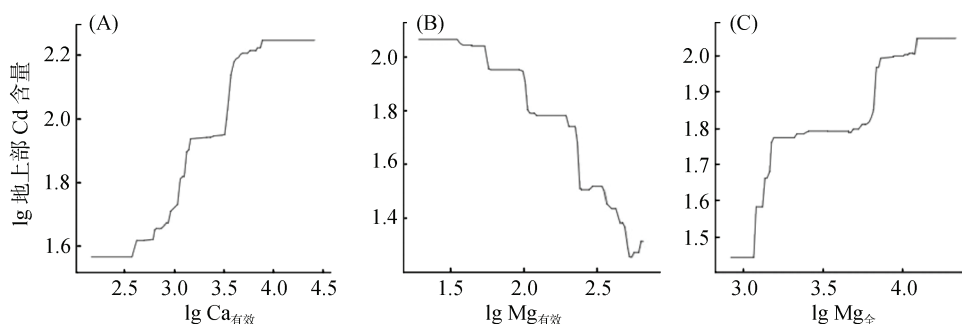


图 5 地上部 Cd 含量随土壤有效态 Ca、有效态 Mg 和全量 Mg 含量变化的偏相关图

Fig. 5 Partial correlation diagram of shoot Cd concentration with soil available Ca, available Mg and total Mg concentrations

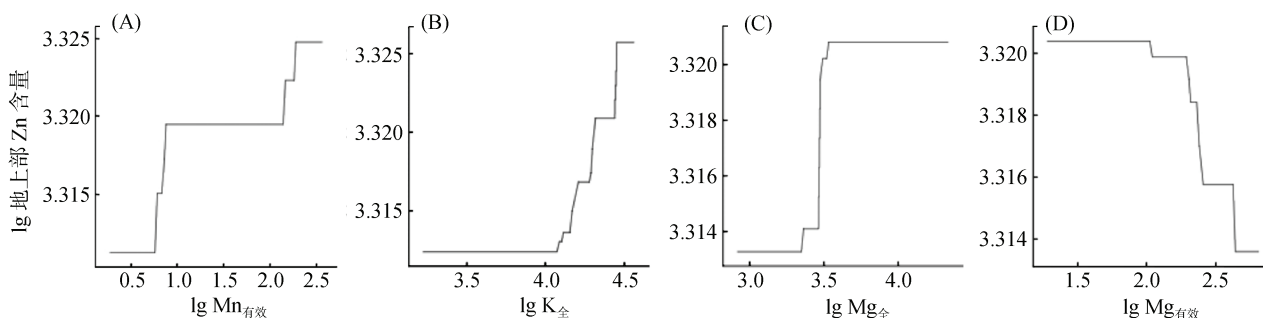


图 6 地上部 Zn 含量随土壤有效态 Mn、全量 K、全量 Mg 和有效态 Mg 含量变化的偏相关图

Fig. 6 Partial correlation diagram of shoot Zn concentration with soil available Mn, total K, total Mg and available Mg concentrations

表 6 地上部 Cd 和 Zn 含量与土壤重金属及养分元素含量多元线性逐步回归分析

Table 6 Multiple linear stepwise regression of shoot Cd and Zn concentrations with concentrations of soil heavy metals and nutrient elements

引入变量	回归方程	调整 R^2	P
Cd	$y=0.77 \lg Cd_{全} + 1.63$	0.76	<0.01
Cd+养分元素	$y=0.77 \lg Cd_{全} - 0.21 \lg Mn_{全} + 2.18$	0.77	<0.01
Zn	$y=0.63 \lg Zn_{全} + 1.76$	0.54	<0.01
Zn+养分元素	$y=0.72 \lg Zn_{全} - 0.29 \lg Ca_{全} - 0.59 \lg Fe_{全} + 0.40 \lg K_{全} + 3.62$	0.71	<0.01

注：y 为对数转换后的伴矿景天地上部 Cd 和 Zn 含量(lg 地上部 Cd 含量、lg 地上部 Zn 含量)，自变量为对数转换后的土壤重金属及养分全量含量。

3 讨论

3.1 土壤养分元素供应对植物生长的影响

除氮(N)、磷(P)养分元素外，部分土壤阳离子养分元素虽然含量较少，但其参与了植物体内关键的生理生化过程，对植物的生长发育和新陈代谢起着重要调控作用。众多研究表明，外源增加阳离子养分元素的供应，会促进植物生长并提高植物的生物量。梁婷等^[22]采用均衡养分元素的施肥方法有效提高了作物养分储存能力和养分利用效率，促进了水稻(*Oryza sativa* L.)和小麦(*Triticum aestivum* L.)的生长和产量；伍龙梅等^[23]发现，施用中微量元素肥料对植物干物质积累具有一定的积极作用，但持续增加中微量元素肥料用量对干物质积累的影响不大，过量还可能对

植物有毒害作用。

本试验中 GBM 分析结果表明土壤全 Mn 对伴矿景天生生物量的相对影响最大。由于供试土壤 Mn 含量丰富，Mn 对伴矿景天生长的效应主要表现为抑制作用。从图 3A 看出，当土壤全量 Mn 含量>1 300 mg/kg 后，植物生物量逐渐降低。有研究表明适量的 Mn(20、200 mg/kg)可以促进玉米(*Zea mays*)根系的生长，提高玉米各部位生物量，但过量的 Mn(2 000 mg/kg)则会对玉米产生一定的毒害作用^[24]。同样地，水培试验中非积累型东南景天在 1 000 $\mu\text{mol/L}$ Mn 处理即出现死亡情况，而对 Mn 有一定耐受能力的超积累型东南景天在 5 000 $\mu\text{mol/L}$ Mn 处理下也出现毒害症状^[15]。一般土壤溶液中 Mn 浓度的范围在 0.1 ~ 800 $\mu\text{mol/L}$ ^[24]，而本研究部分供试土壤采自南方酸性红壤区，Mn 有效

性高,土壤溶液中 Mn 浓度很有可能超过 1 000 $\mu\text{mol/L}$,从而影响修复植物的生长。就常规植物而言,其体内 Mn 含量一般为 10 ~ 150 mg/kg ^[19],而本试验中种植的伴矿景天地上部 Mn 含量为 254 mg/kg ,很可能会对植物的生长产生一定的毒害作用。高含量的 Mn 会破坏细胞的抗氧化防御机制,导致植物激素种类和水平的改变,最终表现为生物量降低、植物发育受阻等多种症状^[25]。

土壤全 Fe 含量是影响伴矿景天地上部生物量的第二大贡献因子,全 Fe 含量的增加导致伴矿景天地上部生物量不断上升并最终基本保持不变(图 3B)。Fe 是植物体内很多酶的重要组分,同时还参与植物叶绿素的合成和电子传递,在植物生长和代谢过程中发挥着重要作用^[26]。植物体内 Fe 的含量一般为 50 ~ 250 mg/kg ^[19],而本研究中伴矿景天地上部 Fe 的含量为 202 mg/kg ,位于该含量范围内,表明供试土壤 Fe 供应状况未引起 Fe 在修复植物体内的过量积累。

此外,土壤有效态 Ca、Mg 含量对伴矿景天的生长也有较大的贡献(表 4、表 5)。相关分析表明有效态 Ca 与生物量呈负相关,同时从偏相关图(图 3C)可以看出在一定范围内,地上部生物量随有效态 Ca 含量的增加而降低。供试土壤有效态 Ca 的平均值为 2 386 mg/kg ,远高于土壤养分分级标准中有效 Ca 的第一等级标准(1 000 mg/kg),处于过量供应状态,这很可能超出了伴矿景天生长所需含量阈值。过量的 Ca 吸收会造成植物叶片气孔关闭,从而抑制植物的生长^[27]。李香君等^[28]研究发现沙地樟子松(*Pinus sylvestris* var. *Mongolica*)幼苗最适土壤 Ca 含量保持在 50 ~ 100 mg/kg ,过高或过低的 Ca 含量都会抑制其生长发育。与 Ca 相反,有效 Mg 的增加促进了伴矿景天地上部生物量的积累(图 3D)。Mg 是叶绿素的组成成分,促进叶绿素的形成,参与光合作用以及各类营养成分的合成,对植物生长发育有促进作用^[29]。一般土壤中有效态 Mg 含量低于 50 mg/kg 作物就会出现缺 Mg 症状^[30]。本研究供试土壤有效 Mg 的平均含量为 148 mg/kg ,属于中等供应水平,也位于伴矿景天对 Mg 需求范围内,因此有效 Mg 对地上部生物量表现出一定的正向促进作用。

3.2 土壤养分元素供应对伴矿景天 Cd、Zn 吸收的影响

土壤阳离子养分元素(如 Ca、Mg、Fe、Mn 等)一方面会通过影响植物生理代谢和生长发育,间接影响植物对重金属的获取和吸收^[31];另一方面这些养分离子与重金属 Cd 和 Zn 可能会直接竞争跨膜运输

过程中的转运蛋白,从而影响重金属在植物体内的积累^[32]。

本研究结果发现,土壤全量 Fe 和 Mn 均会影响地上部 Cd 和 Zn 的含量和吸收量。GBM 分析结果表明全量 Fe 和 Mn 对地上部 Cd 含量的贡献率分别为 9.12% 和 8.33%;有效 Mn 对地上部 Zn 含量贡献率达 17.76%,对地上部 Cd 和 Zn 吸收量的贡献率分别为 11.55% 和 20.86%(表 5)。相关性分析表明,伴矿景天地上部 Cd 含量和吸收量与土壤全量 Fe 和 Mn 含量呈负相关关系(表 4),这可能是由于 Cd、Zn 和 Fe、Mn 在根系细胞质膜上的转运存在竞争关系,Cd²⁺ 和 Zn²⁺ 可以通过 Fe²⁺ 和 Mn²⁺ 的转运蛋白进入根系细胞^[33-34]。研究发现 Fe 供应充足时,Fe 转运子基因关闭,Fe 吸收增加,Cd 的被动吸收量下降,因此当土壤中 Fe 含量增加时植物对 Cd 的吸收和积累降低^[35-36];而土壤中 Mn 含量增加会促进土壤中有效 Mn 含量增加,促进植物根部对 Mn 的吸收,从而抑制植物根部对 Cd 的吸收,减少根部 Cd 向地上部的转运^[12]。还有研究表明,外源施加 Mn 能增加土壤重金属在铁锰氧化物上的结合比例,增强土壤固相对重金属的固定能力,改变其在土壤中的赋存形态,降低重金属的生物有效性,从而抑制植物对重金属的吸收和积累^[36]。有效 Mn 是地上部 Zn 含量的最大影响因素,但该变量并未出现在预测地上部 Zn 含量的最优多元回归方程中(表 6)。原因是土壤 Fe 和 Mn 高度正相关,共线性问题可能导致土壤 Fe 的变量代替 Mn 进入了回归方程。

土壤有效态 Ca 和 Mg 是影响伴矿景天地上部 Cd 含量的两个主要因子,并且土壤全 Mg 是地上部 Cd 吸收量的最大贡献因子,贡献率达 20.2%(表 5)。Ca、Mg 和 Cd 同是二价离子,且离子半径极度接近,它们能够共享许多转运蛋白、运输通道和结合位点,从而影响 Cd 在植物中的积累和转运^[37]。一般而言,低 Ca 或低 Mg 供应条件下,植物 Ca/Mg 转运蛋白基因表达量显著提高,在吸收 Ca 或 Mg 的同时也能够促进植物对 Cd 的吸收^[30];而在过量供应 Ca 或 Mg 时,植物主要通过离子通道吸收 Ca 或 Mg,因此土壤有效态 Ca 或 Mg 含量的提高会抑制植物对 Cd 的吸收^[38-39]。赵涛等^[10]的研究表明,在水培溶液 Ca 浓度不超过 6 mmol/L ,Mg 浓度不超过 10 mmol/L 时,增加 Ca 或 Mg 的供应都会增加东南景天根部 Cd 的含量。本研究中,地上部 Cd 含量随着土壤有效态 Ca 含量的增加而逐渐增加(图 5A)。本研究供试土壤有效态 Ca 供应过量,正常来说过量 Ca 会降低地上部

Cd 含量,但本研究结果刚好相反。可能原因有:①过量 Ca 会降低伴矿景天的地上部生物量,由于“浓缩效应”,地上部 Cd 含量会有所上升;②伴矿景天是喜 Ca 植物,其根系对 Ca 的大量吸收会释放等量的 H^+ ,导致根系酸化,提高土壤 Cd 的生物有效性,从而提高地上部 Cd 含量^[17]。从地上部 Cd 吸收量来看,其与土壤有效态 Ca 显著正相关(表 4),表明增加土壤 Ca 的供应能一定程度促进修复植物对 Cd 的积累。与 Ca 不同的是,随着土壤有效态 Mg 含量的增加,地上部 Cd 含量逐渐降低(图 5B)。一方面土壤有效 Mg 含量增加促进了地上部生物量的积累,“稀释效应”导致地上部 Cd 含量降低;另一方面 Mg^{2+} 与 Cd^{2+} 竞争共享的转运蛋白或通道,降低了植物 Cd 的积累。例如,硫酸镁处理降低了小麦籽粒和秸秆 Cd 含量,抑制了小麦对 Cd 的吸收,并减少了 Cd 从秸秆向籽粒的转移^[38]。

值得注意的是,土壤 K 在伴矿景天 Zn 吸收中发挥重要作用,伴矿景天地上部 Zn 含量和吸收量与土壤中 K 的含量呈显著正相关关系(表 4),且全量 K 对地上部 Zn 含量贡献率为 17.63%(表 5)。邹嘉成等^[40]的研究表明施用 K 肥后土壤重金属 Cd 和 Zn 的有效态含量呈增加趋势,促进了伴矿景天对 Cd 和 Zn 的吸收和积累;沈丽波等^[41]研究表明增施 K 肥提高了伴矿景天地上部 Zn 和 Cd 的含量,从而增大伴矿景天地上部 Zn 和 Cd 的积累。

综合可知,本试验表明土壤阳离子养分元素的供应状况对伴矿景天 Cd 和 Zn 的吸收能力具有一定的影响,其中土壤 Mg 和 Mn 是影响伴矿景天 Cd 和 Zn 吸收的主要阳离子养分元素。

4 结论

土壤全量 Fe 和 Mn 含量是影响伴矿景天地上部生物量的主要养分因子;土壤中全量 Mg、有效态 Ca 与地上部 Cd 含量以及吸收量有显著正相关关系,其对地上部 Cd 含量的贡献率分别为 10.39% 和 16.90%;有效态 Mn 对地上部 Zn 含量影响较大,贡献率为 17.76%,且地上部 Zn 含量及吸收量与土壤全量 K 显著正相关;从地上部重金属的吸收量看,土壤 Mg 和 Mn 是影响伴矿景天 Cd、Zn 吸收的主要养分因子。因此,可以通过调控污染土壤的阳离子养分元素供应,提高植物修复效率,降低修复成本。但土壤中影响伴矿景天生长的阳离子养分元素的含量阈值以及各养分间配比情况尚不明确,还需要后续试验进一步完善和补充。

参考文献:

- [1] 骆永明,滕应. 中国土壤污染与修复科技研究进展和展望[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1137–1142.
- [2] 生态环境部. 2020 年中国生态环境状况公报(摘录)[J]. 环境保护, 2021, 49(11): 47–68.
- [3] Hu P J, Wang Y D, Przybyłowicz W J, et al. Elemental distribution by cryo-micro-PIXE in the zinc and cadmium hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* grown naturally[J]. Plant and Soil, 2015, 388(1): 267–282.
- [4] 胡鹏杰,李柱,钟道旭,等. 我国土壤重金属污染植物吸取修复研究进展[J]. 植物生理学报, 2014, 50(5): 577–584.
- [5] Wu L H, Zhou J W, Zhou T, et al. Estimating cadmium availability to the hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* in a wide range of soil types using a piecewise function[J]. Science of the Total Environment, 2018, 637: 1342–1350.
- [6] Zhou T, Wu L H, Christie P, et al. The efficiency of Cd phytoextraction by *S. plumbizincicola* increased with the addition of rice straw to polluted soils: The role of particulate organic matter[J]. Plant and Soil, 2018, 429(1): 321–333.
- [7] 李静,林青,徐绍辉. 不同 pH/离子强度时 Cu/Cd 复合污染土壤解吸和迁移特征[J]. 土壤学报, 2023, 60(4): 1026–1034.
- [8] Sasaki A, Yamaji N, Yokosho K, et al. Nramp5 is a major transporter responsible for manganese and cadmium uptake in rice[J]. The Plant Cell, 2012, 24(5): 2155–2167.
- [9] Liu Y K, Tao Q, Guo X Y, et al. Low calcium-induced delay in development of root apoplastic barriers enhances Cd uptake and accumulation in *Sedum alfredii*[J]. Science of the Total Environment, 2020, 723: 137810.
- [10] 赵涛,刘登彪,郑俊宇,等. 不同钙镁比处理对三种超富集植物生长及吸收重金属的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3): 440–448.
- [11] Lombi E, Tearall K L, Howarth J R, et al. Influence of iron status on cadmium and zinc uptake by different ecotypes of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*[J]. Plant Physiology, 2002, 128(4): 1359–1367.
- [12] 姚澄,周天宇,易超,等. 施用锰肥对根际土壤锰有效性及小麦镉吸收转运的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(9): 1955–1965.
- [13] Tian S K, Xie R H, Wang H X, et al. Calcium deficiency triggers phloem remobilization of cadmium in a hyperaccumulating species[J]. Plant Physiology, 2016, 172(4): 2300–2313.
- [14] Huang Y F, Chen J H, Sun Y M, et al. Mechanisms of calcium sulfate in alleviating cadmium toxicity and accumulation in pak choi seedlings[J]. Science of the Total Environment, 2022, 805: 150115.
- [15] Ge J, Tian S K, Yu H Y, et al. Exogenous application of Mn significantly increased Cd accumulation in the Cd/Zn hyperaccumulator *Sedum alfredii*[J]. Environmental Pollution, 2021, 278: 116837.

- [16] 张雨婷, 朱奇宏, 黄道友, 等. 落干过程对土壤-水稻系统镉和砷形态及有效性的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(2): 446-457.
- [17] Sun X, Li Z, Wu L H, et al. Root-induced soil acidification and cadmium mobilization in the rhizosphere of *Sedum plumbizincicola*: Evidence from a high-resolution imaging study[J]. Plant and Soil, 2019, 436(1): 267-282.
- [18] 中华人民共和国国家标准. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)(GB 15618—2018)[S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- [20] Hofner B, Mayr A, Robinzonov N, et al. Model-based boosting in R: A hands-on tutorial using the R package mboost[J]. Computational Statistics, 2014, 29(1): 3-35.
- [21] 孙娟, 李松刚, 魏志远, 等. 海南中西部荔枝园土壤养分分布特征[J]. 广东农业科学, 2013, 40(10): 62-64.
- [22] 梁婷, 刘明, 李帅, 等. 均衡施肥对滩涂盐碱农田稻麦轮作系统土壤养分与作物生长和养分吸收的影响[J]. 土壤, 2021, 53(3): 483-490.
- [23] 伍龙梅, 李惠芬, 张彬, 等. 中微量元素肥料对超级杂交籼稻株型和干物质积累的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(28): 1-6.
- [24] Shao J F, Yamaji N, Shen R F, et al. The key to Mn homeostasis in plants: Regulation of Mn transporters[J]. Trends in Plant Science, 2017, 22(3): 215-224.
- [25] Liu Y, Chen J Y, Li X H, et al. Physiological mechanisms in which manganese toxicity inhibits root growth in soybean[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2023, 23(3): 4141-4156.
- [26] 黄益宗, 朱永官, 黄凤堂, 等. 镉和铁及其交互作用对植物生长的影响[J]. 生态环境, 2004, 13(3): 406-409.
- [27] 肖玉梅, 陈玉玲, 黄荣峰, 等. 拟南芥保卫细胞微丝骨架的解聚可能参与了细胞外钙调素诱导的气孔关闭[J]. 中国科学(C辑: 生命科学), 2004, 34(2): 129-135.
- [28] 李香君, 张广岐, 李慧, 等. 外源钙对沙地樟子松幼苗生长及生理特性的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(5): 1095-1103.
- [29] Dukic E, van Maldegem K A, Shaikh K M, et al. Chloroplast magnesium transporters play essential but differential roles in maintaining magnesium homeostasis[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1221436.
- [30] 杜文琪. 外源镁对镉在稻田系统中生物有效性与转运累积的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018.
- [31] Zhou K N, Zhang Y Y, Wu J S, et al. Integrated fertilization regimes boost heavy metals accumulation and biomass of *Sedum alfredii* hance[J]. Phyton, 2021, 90(4): 1217-1232.
- [32] Tao J Y, Lu L L. Advances in genes-encoding transporters for cadmium uptake, translocation, and accumulation in plants[J]. Toxics, 2022, 10(8): 411.
- [33] 刘俊, 周坤, 徐卫红, 等. 外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(10): 4126-4131.
- [34] Yu E, Wang W G, Yamaji N, et al. Duplication of a manganese/cadmium transporter gene reduces cadmium accumulation in rice grain[J]. Nature Food, 2022, 3(8): 597-607.
- [35] 上官宇先, 陈琨, 喻华, 等. 不同铁肥及其施用方法对水稻籽粒镉吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7): 1440-1449.
- [36] Van Groeningen N, Christl I, Kretzschmar R. The effect of aeration on Mn(II) sorbed to clay minerals and its impact on Cd retention[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55(3): 1650-1658.
- [37] 张亚利, 王继先. 镉对钙代谢的影响及相关机制研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2004, 21(4): 269-271.
- [38] 周相玉, 冯文强, 秦鱼生, 等. 镁、锰、活性炭和石灰及其交互作用对小麦镉吸收的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(14): 4289-4296.
- [39] Wu J W, Li R J, Lu Y, et al. Sustainable management of cadmium-contaminated soils as affected by exogenous application of nutrients: A review[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 295: 113081.
- [40] 邹嘉成, 牛莹新, 宋付朋, 等. 钾肥强化植物间作修复镉锌污染土壤效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(2): 304-312.
- [41] 沈丽波, 吴龙华, 韩晓日, 等. 养分调控对超积累植物伴矿景天生长及镉吸收性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(2): 221-225.