

引文格式: 罗平, 杨伊洁, 张新帅, 等. 不同品种荷包豆在云南高寒山地的镉铅累积差异[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2024, 39(5): 141–150. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202308042](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202308042)

不同品种荷包豆在云南高寒山地的镉铅累积差异*

罗平, 杨伊洁, 张新帅, 李博, 湛方栋, 祖艳群, 何永美**
(云南农业大学 资源与环境学院, 云南 昆明 650201)

摘要: 【目的】为降低高寒矿区荷包豆 (*Phaseolus coccineus* L.) 的镉 (Cd) 和铅 (Pb) 含量, 筛选适合该区域农田种植的低累积、高品质荷包豆品种。【方法】采用云南主栽的 10 个荷包豆品种, 在兰坪矿区周边选取具有代表性的农田进行大田试验, 通过测定氮 (N)、磷 (P)、钾 (K)、维生素 C、蛋白质、总淀粉及 Cd、Pb 的含量等指标, 分析不同品种间荷包豆的矿质养分、籽粒品质及 Cd、Pb 累积量差异。【结果】不同品种荷包豆的生物量、矿质养分含量、籽粒品质及 Cd、Pb 累积特征均存在显著差异。生物量和产量的最大差异分别为 3.88 倍和 1.42 倍, 籽粒 N、P、K 含量的最大差异分别为 1.42 倍、1.48 倍和 1.40 倍, 籽粒 Cd、Pb 含量和累积量的最大差异分别为 1.93 倍、5.71 倍和 3.76 倍、4.29 倍, 还原糖、维生素 C、蛋白质、可溶性糖、总淀粉含量的最大差异分别为 1.98 倍、2.09 倍、1.43 倍、1.31 倍、1.42 倍。YN10 表现出高产 (2050 kg/hm²)、低 Pb (0.17 mg/kg) 性状, YN03 表现出高产 (2048 kg/hm²)、低 Cd (0.23 mg/kg) 性状。相关性分析表明: 籽粒 Cd 含量与叶片 N 含量以及根、茎、叶 K 含量呈显著或极显著负相关, 与籽粒总淀粉、维生素 C 含量呈显著或极显著正相关; 籽粒 Pb 含量与蛋白质含量呈极显著正相关。【结论】荷包豆 Cd、Pb 吸收与矿质养分、籽粒品质密切相关。兼顾籽粒产量、重金属累积量、品质等因素, 荷包豆品种 YN10 和 YN03 更适宜在兰坪 Cd、Pb 轻度污染区推广种植。

关键词: 荷包豆; 镉铅含量; 矿质养分; 品质; 品种差异

中图分类号: S643.101 文献标志码: A 文章编号: 1004-390X (2024) 05-0141-10

Differences of Cd and Pb Accumulation in Different Cultivars of *Phaseolus coccineus* L. in Yunnan Alpine Mountain Area

LUO Ping, YANG Yijie, ZHANG Xinshuai, LI Bo,
ZHAN Fangdong, ZU Yanqun, HE Yongmei

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: [Purpose] To reduce the accumulation of cadmium (Cd) and lead (Pb) in *Phaseolus coccineus* L. in alpine mining area, screening for low accumulation and high-quality *P. coccineus* cultivars suitable for farmland planting in this areas. [Methods] A field experiment was conducted with 10 main cultivars of *P. coccineus* in Yunnan Province, and representative farmlands were selected around Lanping mining area. The contents of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K), vitamin C, protein, total starch, Cd and Pb were measured to explore the differences in mineral nutrients, grain quality, and Cd and Pb accumulation in different cultivars of *P. coccineus*. [Results] There

收稿日期: 2023-08-31 修回日期: 2024-09-25 网络首发日期: 2024-10-30
*基金项目: 云南省重点研发课题 (2019BC001-04); 云南省吴龙华专家工作站 (202305AF150042); 云南省中青年学术和技术带头人后备人才培养项目 (202005AC160038)。
作者简介: 罗平 (1999—), 男, 云南大理人, 在读硕士研究生, 主要从事土壤污染修复研究。
E-mail: 2504242590@qq.com
**通信作者 Corresponding author: 何永美 (1980—), 女, 云南楚雄人, 博士, 教授, 主要从事农业环境与生态修复研究。E-mail: heyongmei06@126.com
网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/53.1044.S.20241030.1151.003>



were significant differences in biomass, mineral nutrient content, grain quality and accumulation characteristics of Cd and Pb among different cultivars of *P. coccineus*. The maximum differences in biomass and yield were 3.88 times and 1.42 times, respectively; the maximum differences of N, P, K content in the grains were 1.42 times, 1.48 times and 1.40 times, respectively; the maximum differences of Cd, Pb content in grain were 1.93 times and 5.71 times, respectively; the maximum differences of Cd, Pb accumulation in grain were 3.76 times and 4.29 times, respectively; the maximum differences in the contents of reducing sugar, vitamin C, protein, soluble sugar and total starch were 1.98 times, 2.09 times, 1.43 times, 1.31 times and 1.42 times, respectively. Cultivar of YN10 showed high yield (2050 kg/hm²) and low Pb (0.17 mg/kg), cultivar of YN03 showed high yield (2048 kg/hm²) and low Cd (0.23 mg/kg). Correlation analysis showed that grain Cd content was significantly or extremely significantly negatively correlated with leaf N content, and root, stem and leaf K content; and it was significantly or extremely significantly positively correlated with total starch and vitamin C content. Grain Pb content was extremely significantly positively correlated with protein content.

[**Conclusion**] The absorption of Cd and Pb in *P. coccineus* is closely related to mineral nutrients and grain quality. Considering the grain yield, heavy metal accumulation, quality, and other factors, cultivars of YN10 and YN03 are more suitable for planting in Lanping Cd and Pb mildly polluted areas.

Keywords: *Phaseolus coccineus* L.; cadmium and lead concentrations; mineral nutrients; quality; cultivar variations

重金属对生态系统的污染是备受关注的环境问题之一^[1]。云南省有色金属矿产资源丰富,是中国重要的矿产资源基地。由于长期开采,云南省的土壤重金属污染情况较为严重,尤其是土壤中的镉(Cd)、铅(Pb)含量严重超标,导致周边农田的农作物也出现Cd、Pb超标的现象,危害食品安全^[2-3]。高寒山区植物生长缓慢,植物生长期短,植被生态脆弱,加上重金属污染,植物极难生长。因此,修复农田土壤重金属污染以保障高寒山区农作物的生产安全,是当前土壤和环境领域研究的重点和难点^[4]。

已有研究表明:植物对重金属的吸收和累积不仅存在显著的植物种间差异,同时存在种内差异,如不同品种的大白菜^[5]、玉米^[6]、大豆^[7]等作物对重金属的吸收存在显著差异^[8],由于植物存在遗传特异性,故不同种类作物及其不同品种对Cd、Pb的吸收和累积表现出较大的差异^[9-10]。利用作物对重金属吸收和累积的品种差异,筛选、种植重金属累积量低的农作物品种,已成为应对土壤重金属污染、保障食品安全的有效策略之一^[11-14]。不同的农作物品种具有不同的生态适栽区域,使得许多作物筛选结果具有很强的区域性^[15-16]。由于环境与品种存在相互作用,土壤的理化性质会严重影响植物对重金属的吸收,导致不同土壤环

境下作物重金属的含量存在显著差异^[17-18]。

荷包豆(*Phaseolus coccineus* L.)隶属于豆科(Fabaceae)菜豆属(*Phaseolus*),是中国西南地区重要的1年生粮食作物,在高寒矿山污染地区广泛种植^[19]。由于生长环境复杂、重金属污染、肥力下降等因素,严重威胁高寒山区荷包豆的可持续生产,但目前鲜有针对高寒山区荷包豆重金属吸收和累积的品种差异研究。本研究以10个适宜在云南省怒江傈僳族自治州兰坪白族普米族自治县来龙村种植的荷包豆品种为材料进行大田试验,测定不同品种荷包豆根、茎、叶、籽粒的矿质养分、营养品质及Cd、Pb含量等指标,分析不同品种荷包豆的矿质养分、营养品质及重金属累积的差异,筛选在高寒气候叠加土壤重金属污染背景下,更适合当地种植的荷包豆品种,为其在西南高寒地区的安全种植提供实践参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于云南省怒江傈僳族自治州兰坪白族普米族自治县来龙村(26°27'23.91"N, 99°28'33.47"E),海拔2480 m,年平均气温10℃,年降水量1002 mm,属季风山地气候。试验地周围有1个大型铅锌矿,矿区周边农田均已受到不同

程度的Cd、Pb污染。土壤基本理化性质为:pH 8.09,有机质含量32.30 g/kg,全氮(N)、全磷(P)和全钾(K)含量分别为3.96、0.57和9.36 g/kg,碱解氮、速效磷和速效钾含量分别为140.42、39.81和165.36 mg/kg,全量Cd为25.96 mg/kg,全量Pb为246.39 mg/kg。试验区Cd含量超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[20]中规定的农用地土壤污染风险管制值(pH>7.5, Cd≤4 mg/kg, Pb≤1000 mg/kg) 6.49倍,属于重度Cd超标农田土壤。

1.2 试验材料

供试作物荷包豆属长日照作物,生长期约60~90 d,喜温暖湿润气候,适温能力强,在15~30℃下均能良好生长;具有耐寒、耐旱、耐贫瘠、耐热等特性,环境适应力较强。本研究选取YN01、YN02、YN03、YN04、YN05、YN06、YN07、YN08、YN09和YN10共10个荷包豆品种,由云南省农业科学院粮食作物研究所提供,均为云南高寒山区主栽品种。

1.3 试验设计

于2020年5月3日开展大田试验。在种植荷包豆前,测定土壤背景值。每个荷包豆品种设置3个重复,共30个小区。每个小区面积为20 m²,小区之间间隔35 cm,设置覆膜隔离板,防止小区之间串水串肥,小区随机区组排列。幼苗出土(40 d)后,搭设攀缘支架,以利于采光;开花结荚后,结合天气状况和植株长势进行灌溉,一般每周灌1次透水。于2020年10月15日(荷包豆完熟期)采样,装袋保存,并保留根际土。

1.4 测定指标及其方法

1.4.1 荷包豆的生物量与产量

(1) 生物量。采用五点取样法采集植物样品,每个小区采集5株荷包豆。将采集的植物样品分为根、茎、叶、籽粒4个部分,各部位用清水洗净后再用去离子水冲洗;在105℃烘箱中杀青30 min,再调至75℃至样品完全烘干,称量干质量。用不锈钢粉碎机粉碎,过100目筛备用。

(2) 籽粒产量。采摘每个小区所有荷包豆的籽粒,自然晾干后称量,记为小区产量,并折算为公顷产量。

1.4.2 荷包豆的重金属含量

称取荷包豆根、茎、叶和籽粒干样各0.10 g,用HNO₃—H₂O₂消煮,将滤液定容至50 mL容量

瓶中。采用火焰原子吸收分光光度计测定荷包豆植株各部位的Cd、Pb含量^[21],并按照公式计算各部位的Cd、Pb累积量:重金属累积量=重金属含量×生物量。

1.4.3 荷包豆植株的矿质养分与籽粒品质

称取荷包豆根、茎、叶和籽粒干样各0.10 g,用H₂SO₄—H₂O₂消煮,分别用凯氏定氮法、钼钒黄比色法和火焰光度法测定荷包豆植株的N、P、K含量^[21],并按照公式计算各部位的N、P、K吸收量:矿质养分吸收量=矿质养分含量×生物量。采用还原糖、可溶性糖、蛋白质、淀粉和维生素C试剂盒(苏州格锐思生物科技有限公司)分别测定对应指标的含量,操作步骤按说明书进行。

1.5 数据处理与统计分析

各指标测定重复3次,使用Excel 2007进行试验数据的处理,并以“平均值±标准差”表示;使用SPSS 22.0进行相关性和显著性分析,并采用LSD法检验在0.05和0.01水平上的显著性;使用Origin 9.1制图。

2 结果与分析

2.1 不同品种荷包豆的单株生物量和籽粒产量

由表1可知:不同品种荷包豆的根、茎、叶生物量存在差异,分别为8.12~31.53、38.19~67.30、13.55~23.01 g。YN10的根系生物量最高,YN02的根系生物量最低,两者差异显著;YN06的茎秆生物量最高,YN08的茎秆生物量最低,两者差异显著;YN07的叶片生物量显著高于其他品种,YN01的叶片生物量最低。总体来看,不同品种荷包豆的生物量表现为茎>叶>根,10个品种根、茎、叶的生物量最大差异分别为3.88倍、1.76倍和1.70倍。

由表1还可知:不同品种荷包豆的籽粒产量为1537~2178 kg/hm²,平均值为1945.77 kg/hm²,品种间差异较小,最大差异为1.42倍。YN01的产量最高,其次为YN10、YN03和YN06,这些品种的产量均显著高于YN09,YN09的产量最低。

2.2 不同品种荷包豆的矿质养分

由表2可知:不同品种荷包豆根、茎、叶和籽粒的N含量存在差异,分别为1.02~1.89、0.49~0.88、2.28~3.47和2.70~3.83 g/kg,平均值分别为1.40、0.68、2.74和3.21 g/kg。YN09的根系N含量

表 1 不同品种荷包豆的单株生物量和籽粒产量
Tab. 1 Biomass per plant and grain yield of different cultivars of *Phaseolus coccineus*

品种 cultivars	生物量/g biomass			籽粒产量/(kg·hm ⁻²) yield
	根 root	茎 stem	叶 leaf	
YN01	9.58±0.19 d	64.69±0.59 ab	13.55±0.58 e	2 178±117 a
YN02	8.12±0.49 d	49.38±0.92 f	20.62±0.90 b	1 955±62 b
YN03	10.80±0.42 d	61.12±0.49 cd	13.59±0.59 e	2 048±118 ab
YN04	10.95±0.31 d	61.65±1.62 bc	20.42±0.90 b	1 932±72 b
YN05	11.54±1.03 d	51.87±1.55 ef	16.31±1.14 d	1 854±94 b
YN06	16.72±2.59 c	67.30±3.03 a	18.84±1.54 bc	2 011±136 ab
YN07	15.44±0.97 c	52.47±2.63 ef	23.01±2.43 a	1 933±116 b
YN08	15.50±2.50 c	38.19±1.93 g	19.92±1.42 bc	1 959±93 b
YN09	26.43±4.65 b	54.52±2.52 e	20.37±1.12 b	1 537±103 c
YN10	31.53±0.94 a	58.17±2.31 d	17.78±1.47 cd	2 050±81 ab

注：同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)；下同。
Note: In the same column, different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$); the same as below.

表 2 不同品种荷包豆的氮含量
Tab. 2 Nitrogen content of different cultivars of *P. coccineus* g/kg

品种 cultivars	根 root	茎 stem	叶 leaf	籽粒 grain
YN01	1.02±0.12 c	0.71±0.15 abcde	2.52±0.04 bcd	2.70±0.22 d
YN02	1.13±0.08 c	0.60±0.12 cdef	2.81±0.11 bc	2.79±0.39 cd
YN03	1.09±0.19 c	0.83±0.18 ab	2.77±0.25 bc	3.27±0.74 abcd
YN04	1.12±0.06 c	0.56±0.04 def	2.70±0.21 bc	3.57±0.17 ab
YN05	1.12±0.04 c	0.67±0.07 bcdef	2.84±0.14 b	2.86±0.61 bcd
YN06	1.86±0.07 a	0.88±0.14 a	3.47±0.14 a	3.41±0.18 abcd
YN07	1.54±0.04 b	0.49±0.04 f	2.67±0.23 bc	3.83±0.17 a
YN08	1.41±0.08 b	0.53±0.07 ef	2.46±0.18 cd	3.46±0.23 abc
YN09	1.89±0.11 a	0.77±0.11 abc	2.86±0.21 b	3.01±0.32 bcd
YN10	1.86±0.35 a	0.76±0.04 abcd	2.28±0.28 d	3.18±0.19 abcd

最高，YN01 的根系 N 含量最低，两者差异为 1.85 倍；YN06 的茎秆 N 含量最高，YN07 的茎秆 N 含量最低，两者差异为 1.80 倍；YN06 的叶片 N 含量最高，YN10 的叶片 N 含量最低，两者差异为 1.52 倍；YN07 的籽粒 N 含量最高，YN01 的籽粒 N 含量最低，两者差异为 1.42 倍。不同品种荷包豆各部位的 N 含量总体表现为籽粒>叶>根>茎。

由表 3 可知：不同品种荷包豆根、茎、叶和籽粒的 P 含量存在差异，分别为 0.82~2.15、0.09~0.81、0.29~2.29 和 1.42~2.10 g/kg，平均值分别为 1.61、0.35、1.27 和 1.81 g/kg。YN05 的根系 P 含量最高，与 YN10、YN08、YN06 无显著差异，但显著高于其他品种，YN01 的根系 P 含量最低，品种间的根系 P 含量最大差异达 7.68 倍。YN08

的茎秆 P 含量最高，与 YN02 无显著差异，但显著高于其他品种，YN04 的茎秆 P 含量最低，品种间的茎秆 P 含量最大差异达 9.00 倍。YN05 的叶片 P 含量最高，YN01 的叶片 P 含量最低，两者差异达 7.90 倍。YN07 的籽粒 P 含量最高，YN02 的籽粒 P 含量最低，两者差异达 1.48 倍。总体来看，荷包豆的 P 主要集中在籽粒部分。

由表 4 可知：不同品种荷包豆根、茎、叶和籽粒的 K 含量存在差异，分别为 5.65~22.67、7.15~28.36、5.93~26.55 和 35.96~50.28 g/kg，平均值分别为 16.71、20.31、17.11 和 42.35 g/kg。YN05 的根系 K 含量最高，YN10 的根系 K 含量最低，两者差异达 4.01 倍；YN03 的茎秆 K 含量最高，YN10 的茎秆 K 含量最低，两者差异达 3.97 倍；YN07 的叶片 K 含量最高，YN10 的叶

片 K 含量最低, 两者差异达 4.48 倍; YN07 的籽粒 K 含量最高, YN06 的籽粒 K 含量最低, 两者差异达 1.40 倍。总体来看, 荷包豆的 K 主要集中在籽粒部分。

表 3 不同品种荷包豆的磷含量
Tab. 3 Phosphorus content of different cultivars of *P. coccineus* g/kg

品种 cultivars	根 root	茎 stem	叶 leaf	籽粒 grain
YN01	0.82±0.06 d	0.49±0.13 b	0.29±0.10 f	1.73±0.07 abc
YN02	1.55±0.35 bc	0.73±0.20 a	1.29±0.16 c	1.42±0.17 c
YN03	1.26±0.20 cd	0.29±0.09 c	0.73±0.10 e	1.68±0.14 bc
YN04	1.51±0.21 bc	0.09±0.01 d	0.92±0.02 de	2.07±0.20 a
YN05	2.15±0.39 a	0.13±0.01 d	2.29±0.03 a	1.60±0.16 bc
YN06	1.68±0.01 abc	0.51±0.07 b	2.11±0.29 ab	1.82±0.12 ab
YN07	1.61±0.38 bc	0.14±0.03 d	0.81±0.01 e	2.10±0.34 a
YN08	1.96±0.22 ab	0.81±0.02 a	1.15±0.05 cd	1.96±0.06 ab
YN09	1.54±0.37 bc	0.22±0.01 cd	2.05±0.01 b	1.83±0.33 ab
YN10	2.00±0.11 ab	0.12±0.02 d	1.09±0.16 cd	1.88±0.21 ab

表 4 不同品种荷包豆的钾含量
Tab. 4 Potassium content of different cultivars of *P. coccineus* g/kg

品种 cultivars	根 root	茎 stem	叶 leaf	籽粒 grain
YN01	19.63±0.84 ab	18.85±1.64 c	12.34±2.91 d	44.09±3.23 ab
YN02	13.34±1.50 c	17.03±2.53 cd	17.29±2.45 bc	39.24±1.36 ab
YN03	13.41±1.74 c	28.36±4.83 a	15.16±2.18 cd	42.07±2.46 ab
YN04	19.35±2.82 ab	11.78±1.43 de	12.87±1.22 d	50.06±3.98 a
YN05	22.67±4.82 a	27.23±5.71 ab	15.03±2.77 cd	39.22±2.86 ab
YN06	18.47±1.84 ab	21.23±3.00 bc	20.66±1.31 b	35.96±2.66 b
YN07	20.91±2.44 ab	22.92±2.82 abc	26.55±2.41 a	50.28±14.85 a
YN08	16.97±2.07 bc	26.55±2.53 ab	24.73±1.21 a	44.32±1.90 ab
YN09	16.72±0.19 bc	22.04±3.66 bc	20.54±1.88 b	39.91±8.70 ab
YN10	5.65±0.75 d	7.15±0.38 e	5.93±0.94 e	38.32±3.44 b

2.3 不同品种荷包豆的 Cd、Pb 含量及累积特征

由表 5 可知: 不同品种荷包豆的根、茎、叶、籽粒 Cd、Pb 含量均存在差异。参试荷包豆根系 Cd 含量为 1.10~3.98 mg/kg, 平均值为 2.86 mg/kg, 最大差异为 3.62 倍; 茎秆 Cd 含量为 0.46~2.47 mg/kg, 平均值为 1.34 mg/kg, 最大差异为 5.36 倍; 叶片 Cd 含量为 0.74~2.63 mg/kg, 平均值为 1.53 mg/kg, 最大差异为 3.55 倍; 籽粒 Cd 含量为 0.23~0.45 mg/kg, 平均含量为 0.32 mg/kg, 最大差异为 1.93 倍。参试荷包豆根系 Pb 含量为 42.53~189.45 mg/kg, 平均值为 105.27 mg/kg, 最大差异为 4.45 倍; 茎秆 Pb 含量为 0.32~10.04 mg/kg, 平均值为 1.77 mg/kg, 最大差异为 31.38 倍; 叶片 Pb 含量为 0.83~24.01 mg/kg, 平均值为 7.87 mg/kg, 最大差异为 28.93 倍; 籽粒 Pb 含量为 0.17~0.97 mg/kg, 平均

含量为 0.34 mg/kg, 最大差异为 5.71 倍。

单株荷包豆的平均根系 Cd 累积量为 0.040 mg, 最高的是 YN06 和 YN10 (0.066 mg), 最低的是 YN03 (0.024 mg), 最大差异为 2.75 倍; 平均茎秆 Cd 累积量为 0.073 mg, 最高的是 YN02 (0.122 mg), 最低的是 YN10 (0.027 mg), 最大差异为 4.52 倍; 平均叶片 Cd 累积量为 0.028 mg, 最高的是 YN02 (0.050 mg), 最低的是 YN05 和 YN07 (0.017 mg), 最大差异为 2.94 倍; 平均籽粒 Cd 累积量为 0.120 mg, 最高的是 YN10 (为 0.271 mg), 最低的是 YN09 (0.072 mg), 最大差异为 3.76 倍。综合而言, 茎秆和籽粒的 Cd 累积量占比最高(图 1)。

单株荷包豆的平均根系 Pb 累积量为 1.505 mg, 最高的是 YN06 (3.187 mg), 最低的是 YN02 (0.482 mg), 最大差异为 6.61 倍; 平均茎秆 Pb 累

表 5 不同品种荷包豆的 Cd、Pb 含量

Tab. 5 Cd and Pb contents of different cultivars of *P. coccineus*

mg/kg

品种 cultivars	Cd 含量 content of Cd				Pb 含量 content of Pb			
	根 root	茎 stem	叶 leaf	籽粒 grain	根 root	茎 stem	叶 leaf	籽粒 grain
YN01	3.17±0.16 c	1.73±0.10 b	2.04±0.41 b	0.36±0.01 b	71.22±5.10 f	0.82±0.52 bc	6.73±0.45 cd	0.36±0.04 bc
YN02	3.78±0.01 ab	2.47±0.61 a	2.41±0.34 ab	0.31±0.01 cd	59.33±5.44 f	0.43±0.01 c	9.45±2.00 c	0.21±0.01 ef
YN03	2.21±0.14 d	1.16±0.21 c	1.37±0.19 c	0.23±0.01 g	119.52±13.53 d	1.18±0.28 bc	4.74±1.52 d	0.31±0.03 bcd
YN04	3.39±0.32 d	0.58±0.13 d	1.43±0.24 c	0.28±0.01 f	165.55±7.85 b	1.02±0.04 bc	5.47±0.63 d	0.24±0.01 def
YN05	3.37±0.13 bc	1.37±0.09 bc	1.05±0.17 cd	0.29±0.01 ef	128.57±2.95 cd	1.17±0.12 bc	15.38±2.55 b	0.28±0.02 cde
YN06	3.98±0.14 a	1.51±0.10 bc	0.92±0.03 cd	0.33±0.02 c	189.45±11.17 a	10.04±1.30 a	24.01±3.33 a	0.20±0.02 ef
YN07	3.11±0.56 c	1.06±0.023 c	0.74±0.03 d	0.32±0.01 cd	136.67±6.78 c	1.53±0.49 b	5.83±1.22 d	0.39±0.06 b
YN08	3.36±0.27 bc	1.74±0.31 b	1.36±0.44 c	0.31±0.01 de	94.01±2.76 e	0.62±0.01 bc	4.75±1.35 d	0.23±0.03 def
YN09	1.10±0.03 e	1.34±0.06 bc	1.37±0.17 c	0.28±0.01 f	45.83±3.54 g	0.61±0.02 bc	0.83±0.23 e	0.97±0.14 a
YN10	2.09±0.19 d	0.46±0.03 d	2.63±0.40 a	0.45±0.01 a	42.53±2.60 g	0.32±0.18 c	1.49±0.19 e	0.17±0.01 f

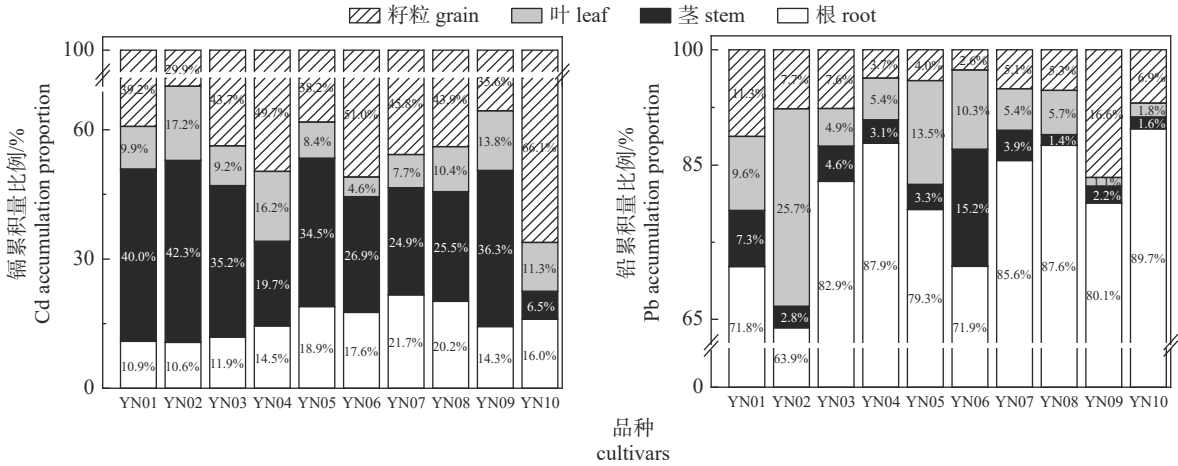


图 1 不同品种荷包豆的单株镉、铅累积量

Fig. 1 Cd and Pb accumulation per plant of different cultivars of *Phaseolus coccineus*

积量为 0.114 mg，最高的是 YN06 (0.676 mg)，最低的是 YN02 (0.021 mg)，最大差异为 32.19 倍；平均叶片 Pb 累积量为 0.145 mg，最高的是 YN06 (0.455 mg)，最低的是 YN09 (0.017 mg)，最大差异为 26.76 倍；平均籽粒 Pb 累积量为 0.112 mg，最高的是 YN09 (0.249 mg)，最低的是 YN02 (0.058 mg)，最大差异为 4.29 倍。综合而言，根系的 Pb 累积量占比最高 (图 1)。

2.4 不同品种荷包豆的籽粒品质

由表 6 可知：不同荷包豆的籽粒品质存在差异。籽粒总淀粉的平均含量为 51.32 mg/g，YN10 的最高，YN08 的最低，最大差异为 1.42 倍；可溶性糖的平均含量为 27.75 mg/g，YN08 的最高，YN03 的最低，最大差异为 1.31 倍；蛋白质含量的平均值为 0.93 mg/g，YN09 的最高，YN02

的最低，最大差异为 1.43 倍；维生素 C 含量的平均值为 0.06 mg/g，YN01、YN10 和 YN05 的最高，YN07 的最低，最大差异为 2.09 倍。还原糖含量的平均值为 1.49 mg/g，YN01 的最高，YN02 的最低，最大差异为 1.98 倍。综合来看，不同品种籽粒中总淀粉和可溶性糖的含量最高，其次为蛋白质和还原糖的含量，维生素 C 含量最低。

2.5 相关性分析

由表 7 可知：根系生物量与根系 Cd 含量、茎秆 Cd 含量、籽粒 Cd 含量呈极显著正相关，与根系 Pb 含量呈显著负相关；茎秆生物量与茎秆 Pb 含量呈极显著正相关；籽粒产量与根系 Cd 含量呈显著正相关，与籽粒 Pb 含量则呈极显著负相关。

由表 8 可知：在重金属含量与矿质养分方面，

表 6 不同品种荷包豆的籽粒品质
Tab. 6 Grain quality of different cultivars of *P. coccineus*

品种 cultivars	总淀粉 total starch	可溶性糖 soluble sugar	蛋白质 protein	维生素C vitamin C	还原糖 reducing sugar
YN01	46.36±3.32 de	25.57±3.33 bcde	0.79±0.01 c	0.07±0.01 ab	1.82±0.20 a
YN02	52.21±2.32 c	30.08±0.94 abc	0.77±0.11 c	0.04±0.00 c	0.92±0.28 d
YN03	51.19±3.35 cd	23.54±2.52 e	0.89±0.15 bc	0.05±0.01 c	1.54±0.20 abc
YN04	45.92±5.14 e	25.33±2.34 cde	0.89±0.06 bc	0.06±0.01 ab	1.61±0.09 ab
YN05	44.90±2.68 e	29.25±2.53 abc	1.09±0.01 a	0.07±0.01 ab	1.74±0.28 a
YN06	54.70±1.41 bc	30.37±2.09 ab	0.87±0.04 bc	0.06±0.00 ab	1.58±0.09 ab
YN07	57.77±1.66 b	29.07±3.47 abc	1.05±0.05 a	0.03±0.00 c	1.25±0.02 c
YN08	44.09±3.29 e	31.50±3.10 a	0.99±0.08 ab	0.06±0.01 ab	1.54±0.04 abc
YN09	53.31±1.10 bc	28.73±1.80 abcd	1.10±0.01 a	0.06±0.00 b	1.31±0.20 bc
YN10	62.74±2.63 a	24.10±2.27 de	0.90±0.03 bc	0.07±0.01 ab	1.60±0.04 ab

表 7 荷包豆重金属含量与生物量、籽粒产量的相关性
Tab. 7 Correlations between heavy metals and biomass, grain yield of *P. coccineus*

指标 index		生物量 biomass			籽粒产量 yield
		根 root	茎 stem	叶 leaf	
Cd 含量 content of Cd	根 root	0.556**	-0.100	0.030	0.438*
	茎 stem	0.478**	-0.315	0.016	0.003
	叶 leaf	0.187	0.031	-0.211	0.248
	籽粒 grain	0.498**	0.130	-0.018	0.349
Pb 含量 content of Pb	根 root	-0.398*	0.326	0.102	0.135
	茎 stem	0.000	0.474**	0.043	0.108
	叶 leaf	-0.321	0.298	-0.053	0.142
	籽粒 grain	0.333	-0.036	0.153	-0.679**

注: “*”表示显著相关 ($P<0.05$), “**”表示极显著相关 ($P<0.01$); 下同。
Note: “*” indicates significant correlation ($P<0.05$), “**” indicates extremely significant correlation ($P<0.01$); the same as below.

根系 Cd 含量与茎秆 P 含量呈极显著正相关; 茎秆 Cd 含量与茎秆 P 含量呈极显著正相关, 与籽粒 P 含量呈极显著负相关; 叶片 Cd 含量与叶片、籽粒 N 含量呈显著负相关, 与根、茎、叶 K 含量呈极显著负相关; 籽粒 Cd 含量与根系 N 含量呈显著正相关, 与叶片 N 含量以及根、茎、叶 K 含量呈显著或极显著负相关; 根系 Pb 含量与叶片、籽粒 N 含量以及根系 K 含量呈显著或极显著正相关; 茎秆 Pb 含量与根、茎、叶 N 含量以及叶片 P 含量呈显著或极显著正相关; 叶片 Pb 含量与叶片 N、P 含量呈极显著正相关。在重金属含量与籽粒品质方面, 蛋白质含量与叶片 Cd 含量呈极显著负相关, 与籽粒 Pb 含量呈极显著正相关; 总淀粉含量与籽粒 Cd 含量呈极显著正相关; 维生素 C 含量与茎秆 Cd 含量呈显著负相关, 与籽粒 Cd 含量呈显著正相关; 还原糖含量与茎秆 Cd 含量呈显著负相关; 可溶性糖含量

与根、茎 Cd 含量以及叶片 Pb 含量呈显著正相关, 与叶片 Cd 含量呈显著负相关。

3 讨论

3.1 不同品种荷包豆的重金属含量对生物量、籽粒产量的影响

已有研究证实: 不同浓度重金属胁迫对不同作物的生长影响具有品种差异, 但低浓度下促进、高浓度下抑制生长的效应普遍存在^[22-23]。重金属胁迫会导致作物生理代谢过程的紊乱, 使其正常生长受到干扰, 以致作物的生物量及产量受到影响^[24]。根系是植物从土壤中吸收水分和无机养分的重要营养器官, 也是最先感知到土壤环境中非生物逆境胁迫的器官, 因此, 根系生物量可以直观地反映植物在胁迫环境中的适应能力^[25]。本研究发现: 根系生物量与根系、籽粒的 Cd 含量呈极显著正相关, 与根系 Pb 含量呈显著负相

关；籽粒产量与籽粒 Pb 含量呈极显著负相关。根系富集了大量重金属，但很少将重金属转移到果实中，究其原因可能是根、茎、叶主要由植物纤维组成，而果实的主要成分是淀粉，Cd、Pb 主要残留在纤维中，而淀粉对 Cd、Pb 的蓄积作

用较弱，因此，作物的根和茎可作为阻止 Cd、Pb 向籽粒中迁移的屏障^[26]，从而减少重金属 Cd、Pb 对籽粒的危害，但荷包豆的根系生长受到抑制，导致根系生物量降低。

表 8 荷包豆重金属与矿质养分、籽粒品质的相关性
Tab. 8 Correlation between heavy metals and mineral nutrients, grain quality of *P. coccineus*

指标 index		氮 N				磷 P				钾 K			
		根 root	茎 stem	叶 leaf	籽粒 grain	根 root	茎 stem	叶 leaf	籽粒 grain	根 root	茎 stem	叶 leaf	籽粒 grain
Cd含量 content of Cd	根 root	-0.27	-0.196	0.297	0.035	0.098	0.535**	0.045	-0.163	0.285	0.177	0.254	-0.097
	茎 stem	-0.275	-0.126	0.260	-0.322	-0.167	0.717**	0.114	-0.491**	0.130	0.342	0.352	-0.211
	叶 leaf	-0.085	0.024	-0.403*	-0.364*	-0.097	0.163	-0.313	-0.265	-0.639**	-0.598**	-0.638**	-0.167
	籽粒 grain	0.379*	0.064	-0.369*	-0.103	0.130	0.013	-0.168	0.099	-0.456*	-0.627**	-0.436*	-0.170
Pb含量 content of Pb	根 root	-0.098	0.017	0.525**	0.427*	0.057	-0.165	0.161	0.266	0.527**	0.214	0.272	0.144
	茎 stem	0.370*	0.415*	0.734**	0.169	0.051	0.148	0.423*	0.049	0.198	0.101	0.246	-0.265
	叶 leaf	0.025	0.207	0.672**	-0.026	0.156	0.186	0.500**	-0.186	0.355	0.178	0.147	-0.253
	籽粒 grain	0.318	0.133	0.060	-0.080	-0.198	-0.224	0.253	0.086	0.165	0.181	0.247	0.013
指标 index		蛋白质 protein			总淀粉 total starch		维生素C vitamin C		还原糖 reducing sugar		可溶性糖 soluble sugar		
Cd含量 content of Cd	根 root	-0.304			-0.228		-0.135		-0.021		0.458*		
	茎 stem	-0.201			-0.280		-0.370*		-0.381*		0.411*		
	叶 leaf	-0.516**			0.219		0.200		-0.099		-0.364*		
	籽粒 grain	-0.253			0.491**		0.397*		0.157		-0.100		
Pb含量 content of Pb	根 root	0.011			-0.188		-0.051		0.251		0.133		
	茎 stem	-0.145			0.136		0.103		0.136		0.269		
	叶 leaf	-0.168			-0.114		0.066		0.156		0.377*		
	籽粒 grain	0.472**			0.060		-0.050		-0.131		0.062		

3.2 不同品种荷包豆的重金属含量对籽粒矿质养分的影响

N、P、K 是作物生长发育所必需的 3 种大量营养元素。N 是蛋白质、叶绿素、核酸、酶等重要生命物质的组成部分，是植物结构组分元素；P 在 ATP 反应、糖类代谢、蛋白质代谢以及脂类代谢中起重要作用；K 作为重要的抗逆元素，对植物细胞渗透压和膨压的调节具有重要作用^[27]。本研究表明：根系 Cd 含量与茎秆 P 含量呈极显

著正相关；茎秆 Cd 含量与茎秆 P 含量呈极显著正相关，与籽粒 P 含量呈极显著负相关；叶片 Cd 含量与叶片、籽粒 N 含量呈显著负相关，与根、茎、叶 K 含量呈极显著负相关；籽粒 Cd 含量与根系 N 含量呈显著正相关，与叶片 N 含量以及根、茎、叶 K 含量呈显著或极显著负相关。这表明 Cd 污染与荷包豆对 N、P、K 的吸收既存在协同作用，又存在拮抗作用。Cd²⁺与养分竞争植物根系吸收的部位，高浓度的重金属可能会影

响养分的吸收和运输机制,进而干扰植物的正常代谢^[28]。这一现象是否与荷包豆的品种及耐Cd机制有关,还有待于进一步的研究。本研究还表明:根系Pb含量与叶片、籽粒N含量以及根系K含量呈显著或极显著正相关;茎秆Pb含量与根、茎、叶N含量以及叶片P含量呈显著或极显著正相关;叶片Pb含量与叶片N、P含量呈极显著正相关。这表明Pb与N、P、K的吸收存在协同作用,并且Pb可以促进荷包豆对N、P、K的吸收,从而降低Pb对荷包豆的毒害作用,这与刘小文等^[29]和刘碧英等^[30]的研究结论相同,究其原因可能与荷包豆的耐Pb机制有关,还有待于进一步的研究。

3.3 不同品种荷包豆的重金属含量对籽粒品质的影响

本研究发现:蛋白质含量与叶片Cd含量呈极显著负相关,与籽粒Pb含量呈极显著正相关;总淀粉含量与籽粒Cd含量呈极显著正相关;维生素C含量与茎秆Cd含量呈显著负相关,与籽粒Cd含量呈显著正相关;还原糖含量与茎秆Cd含量呈显著负相关;可溶性糖含量与根、茎Cd含量以及叶片Pb含量呈显著正相关,与叶片Cd含量呈显著负相关。这表明Pb对籽粒产生蛋白质和可溶性糖有协同作用;Cd对籽粒产生蛋白质和还原糖有拮抗作用,但对籽粒产生淀粉有协同作用,对产生维生素C和可溶性糖既有协同也有拮抗作用。蛋白质浓度可间接反映作物进行各种代谢活动的强弱^[31],Cd²⁺浓度过高时,可能与—SH结合导致代谢酶失活,可溶性蛋白合成受到抑制,进而导致蛋白质含量减少;而低浓度Cd²⁺能够迅速刺激蛋白质合成,产生新的蛋白质,从而促进蛋白质总量增加^[32]。Cd促进淀粉的产生可能是由于光合作用的产物在Cd影响下被直接转化为淀粉^[33]。可溶性糖是植物体内碳素营养状况及农产品品质性状的重要指标之一^[34-36]。高浓度的Cd²⁺可能抑制了可溶性糖合成酶的活性,导致植物碳水化合物代谢活动受阻,可溶性糖含量降低;而Cd对产生可溶性糖表现为协同作用,可能是由于大分子多糖在Cd作用下被分解为单糖,也有可能是光合作用的产物直接转化为低分子的蔗糖^[32]。Cd既促进也抑制维生素C的含量,说明Cd²⁺对维生素C的合成有一定的阻碍作用,但尚未达到显著水平^[32]。Pb对籽粒

产生蛋白质和可溶性糖有协同作用,可能是由于Pb²⁺促进了荷包豆中与蛋白质和可溶性糖合成相关基因酶的表达,其具体协同机理有待于进一步深入研究。

4 结论

(1) 供试10个品种荷包豆的生物量、矿质养分、Cd和Pb含量、籽粒产量和品质方面存在明显差异,其中,YN10为具有高产、低Pb潜力性状的品种,YN03为具有高产、低Cd潜力性状的品种,且两者籽粒品质及矿质养分均较好。因此,YN10和YN03品种更适宜在兰坪Cd、Pb轻度污染区推广种植。

(2) 籽粒Cd含量与叶片N含量以及根、茎、叶K含量呈显著或极显著负相关;籽粒Cd含量与总淀粉含量、维生素C含量显著或极显著正相关,籽粒Pb含量与蛋白质含量极显著正相关。表明荷包豆籽粒Cd、Pb吸收与矿质养分、籽粒品质密切相关。

[参考文献]

- [1] 秦榕璘,李元,祖艳群,等.不同基因型玉米品种对Pb的富集特征[J].农业资源与环境学报,2016,33(3): 268. DOI: 10.13254/j.jare.2016.0007.
- [2] 杨姝,贾乐,毕玉芬,等.7种紫花苜蓿对云南某铅锌矿区土壤镉铅的累积特征及品种差异[J].农业资源与环境学报,2018,35(3): 222. DOI: 10.13254/j.jare.2017.0334.
- [3] 程先锋,宋婷婷,陈玉,等.滇西兰坪铅锌矿区土壤重金属含量的高光谱反演分析[J].岩石矿物学杂志,2017,36(1): 60. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6524.2017.01.005.
- [4] 黄芳,辜娇峰,周航,等.不同马铃薯品种对Cd、Pb吸收累积的差异[J].水土保持学报,2019,33(6): 370. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2019.06.052.
- [5] 刘维涛,周启星,孙约兵,等.大白菜对铅积累与转运的品种差异研究[J].中国环境科学,2009,29(1): 63. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6923.2009.01.013.
- [6] 郭晓芳,卫泽斌,丘锦荣,等.玉米对重金属累积与转运的品种间差异[J].生态与农村环境学报,2010,26(4): 367. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4831.2010.04.015.
- [7] 黄益宗,朱永官,胡莹,等.不同品种大豆对As吸收积累和分配的影响[J].农业环境科学学报,2006,25(6): 1397. DOI: 10.3321/j.issn:1672-2043.2006.06.001.
- [8] 陈建军,于蔚,祖艳群,等.玉米(*Zea mays*)对镉积累与转运的品种差异研究[J].生态环境学报,2014,23(10): 1671. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2014.10.012.
- [9] ZHANG G P, FUKAMI M, SEKIMOTO H. Genotypic differences effects of cadmium on growth and nutrient compositions in wheat[J]. Journal of Plant Nutrition, 2000(9):

1337. DOI: [10.1080/01904160009382104](https://doi.org/10.1080/01904160009382104).
- [10] LIU W T, ZHOU Q X, AN J, et al. Variations in cadmium accumulation among Chinese cabbage cultivars and screening for Cd-safe cultivars[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 173(1/2/3): 737. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2009.08.147](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.147).
- [11] YU H, WANG J L, FANG W, et al. Cadmium accumulation different rice cultivars and screening for pollution safe cultivars of rice[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 370(2/3): 302. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2006.06.013](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.06.013).
- [12] GRANT C A, CIARKE J M, DUGUID S, et al. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 390: 301. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2007.10.038](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.10.038).
- [13] 龚玉莲, 杨中艺. 蕹菜不同镉积累品种的根际土壤化学特征[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2377. DOI: [10.13287/j.1001-9332.20140611.015](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.20140611.015).
- [14] XIN J L, HUANG B F, YANG Z Y, et al. Responses of different water spinach cultivars and their hybrid to Cd, Pb and Cd-Pb exposures[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 175(1/2/3): 468. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2009.10.029](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.029).
- [15] DICKINSON N M, BAKER A J M, DORONILA A, et al. Phytoremediation of inorganics: realism and synergies[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2009, 11(2): 97. DOI: [10.1080/15226510802378368](https://doi.org/10.1080/15226510802378368).
- [16] 陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 等. 不同作物对土壤中Cd的富集特征及低累积品种筛选[J]. *环境科学*, 2019, 40(10): 4647. DOI: [10.13227/j.hjxx.201811059](https://doi.org/10.13227/j.hjxx.201811059).
- [17] 伍钧, 吴传星, 孟晓霞, 等. 重金属低积累玉米品种的稳定性及环境适应性分析[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(11): 2160.
- [18] 鄢小龙, 马宏朕, 李元, 等. 铅锌矿区周边农田Cd、Pb低累积玉米品种筛选[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2019, 34(6): 1076. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).201901006](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).201901006).
- [19] 耿智德, 杨雄, 保丽萍, 等. 多花菜豆异交率的测定及育种策略[J]. *江苏农业科学*, 2006(6): 237. DOI: [10.3969/j.issn.1002-1302.2006.06.083](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-1302.2006.06.083).
- [20] GB 15618—2018. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [21] 鲍士旦. 土壤农业化学分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 于子昊, 李胜宝, 赵晓玲, 等. 玉米根系、根鞘性状与镉吸收的品种差异研究[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(4): 747. DOI: [10.11654/jaes.2020-0733](https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0733).
- [23] 冯莲莲, 郭京霞, 黄梓璨, 等. 水稻土中7个水稻品种对土壤Cd、Pb的富集与转运: 田间研究[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(12): 2146. DOI: [10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.12.020](https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.12.020).
- [24] 于蔚, 李元, 陈建军, 等. 铅低累积玉米品种的筛选研究[J]. *环境科学导刊*, 2014, 33(5): 4. DOI: [10.13623/j.cnki.hkdk.2014.05.002](https://doi.org/10.13623/j.cnki.hkdk.2014.05.002).
- [25] 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. DOI: [10.11733/j.issn.1007-0435.2021.06.017](https://doi.org/10.11733/j.issn.1007-0435.2021.06.017).
- [26] 赵本行, 陈康姜, 何楚斌, 等. 大豆作物对污染土壤中重金属镉的富集研究[J]. *天津农业科学*, 2013, 19(11): 15. DOI: [10.3969/j.issn.1006-6500.2013.11.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-6500.2013.11.005).
- [27] 王垚, 李江遇, 王冬良, 等. 基于Cd污染土壤修复的天竺葵品种差异性研究[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(10): 148. DOI: [10.19672/j.cnki.1003-6504.2019.10.023](https://doi.org/10.19672/j.cnki.1003-6504.2019.10.023).
- [28] 孙宁晓, 宋桂龙. 紫花苜蓿对镉胁迫的生理响应及积累特性[J]. *草业科学*, 2015, 32(4): 581. DOI: [10.11829/j.issn.1001-0629.2014-0581](https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2014-0581).
- [29] 刘小文, 齐成媚, 欧阳灿斌, 等. Pb、Cd胁迫对紫茎泽兰N、P、K吸收的影响[J]. *植物保护*, 2015, 41(4): 84. DOI: [10.3969/j.issn.0529-1542.2015.04.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.0529-1542.2015.04.015).
- [30] 刘碧英, 潘远智, 赵杨迪, 等. Pb胁迫对藿香蓿(*Ageratum conyzoides*)营养积累与分配的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(3): 435.
- [31] TIAN D, YAN Z B, NIKLAS K J, et al. Global leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry and their scaling exponent[J]. *National Science Review*, 2018, 5(5): 728. DOI: [10.1093/nsr/nwx142](https://doi.org/10.1093/nsr/nwx142).
- [32] 孟丽, 李德生, 李海茹, 等. 重金属Cd²⁺对日本榉木营养品质和抗氧化酶活性的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2013, 41(11): 94. DOI: [10.13759/j.cnki.dlxb.2013.11.023](https://doi.org/10.13759/j.cnki.dlxb.2013.11.023).
- [33] 施伟, 朱国永, 孙明法, 等. 水稻籽粒灌浆的影响因子及其机制研究进展[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(8): 1. DOI: [10.3969/j.issn.1003-1650.2022.10.046](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-1650.2022.10.046).
- [34] 罗茜, 朱雅静, 贺斌, 等. 紫果西番莲‘满天星’二倍体与三倍体生长生理指标的比较[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2024, 44(3): 27. DOI: [10.11929/j.swfu.202304018](https://doi.org/10.11929/j.swfu.202304018).
- [35] 苏妮妮, 吴浪, 习鹏, 等. ‘砧茄一号’砧木新品种特性及其对嫁接番茄农艺性状的影响[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(6): 97. DOI: [10.13718/j.cnki.xdzk.2023.06.010](https://doi.org/10.13718/j.cnki.xdzk.2023.06.010).
- [36] 黎大顺, 余德会, 吴华丽, 等. 贵州野核桃种仁营养成分测定及分析[J]. *西部林业科学*, 2023, 52(5): 110. DOI: [10.16473/j.cnki.xblykx1972.2023.05.015](https://doi.org/10.16473/j.cnki.xblykx1972.2023.05.015).

责任编辑: 何承刚