

引文格式: 宋昕儒, 耿继成, 徐杰, 等. 三七中 5 种重金属的风险评价及累积特征[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2024, 39(1): 153–158. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202212042](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202212042)

三七中 5 种重金属的风险评价及累积特征*

宋昕儒¹, 耿继成¹, 徐杰², 陈建军¹, 陈军³, 邓维萍^{4**}, 梅馨月^{2**}

(1. 云南农业大学 资源与环境学院, 云南 昆明 650201; 2. 云南农业大学 植物保护学院, 云南 昆明 650201;
3. 中国冶金地质总局 昆明地质勘查院测试中心, 云南 昆明 650201; 4. 云南农业大学 理学院, 云南 昆明 650201)

摘要:【目的】评价三七种植农田土壤中 5 种重金属 (Cd、As、Pb、Cr、Hg) 的污染风险及植株对 5 种重金属的累积差异。【方法】采集来自 10 个三七种植地的 250 株三七植株及其根际土壤样品, 通过电感耦合等方法检测土壤和植株中的 5 种重金属含量, 进一步分析三七根际土壤及植株地上部、地下部 5 种重金属的超标率、富集系数和转移系数。【结果】10 个采样地三七根际土壤重金属超标率为 Cd (75.56%)>As (40.23%)>Cr (8.89%)>Hg (0.00%)=Pb (0.00%), 超标重金属未超过管控值, 4 个采样地属于轻度污染。三七植株地上部及地下部均超标的重金属为 Cd、Cr 和 Pb, 地上部重金属超标率为 Cd (67.90%)>Cr (22.22%)>Pb (10.84%), 地下部重金属超标率为 Cr (49.43%)>Cd (32.05%)>Pb (3.70%)。除了 Hg, 三七植株地下部对 Cd、Pb、As 和 Cr 的富集能力均强于地上部, 且地上部和地下部对 Cd 的富集系数均大于 1。【结论】大部分采样地属于轻污染等级, 但三七植株地下部及根际土壤 Cd、As 和 Cr 有潜在的超标风险, 三七对其累积情况均表现为地下部强于地上部, 其中对 Cd 的富集能力最强。在选择三七种植地前应加强土壤重金属的监测并阻控主要药用部位对 Cd、As 和 Cr 的累积。

关键词: 三七; 重金属; 富集系数; 转运系数

中图分类号: S567.236.01 文献标志码: A 文章编号: 1004-390X (2024) 01-0153-06

Risk Assessment and Accumulation Characteristics of Five Heavy Metals in *Panax notoginseng*

SONG Xinru¹, GENG Jicheng¹, XU Jie², CHEN Jianjun¹, CHEN Jun³,
DENG Weiping⁴, MEI Xinyue²

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. College of Plant Protection, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 3. Kunming Institute Testing Center of Geological Exploration of China Metallurgical Geology Bureau, Kunming 650201, China;
4. College of Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: [Purpose] To evaluate the pollution risks of five heavy metals (Cd, As, Pb, Cr, Hg) in *Panax notoginseng* cultivated farmland soil and the accumulation differences of these five heavy metals in plants. [Methods] A total of 250 *P. notoginseng* plants and corresponding rhizosphere soil samples were collected from 10 different planting sites. The contents of five heavy metals in soil

收稿日期: 2022-12-28 修回日期: 2023-11-29 网络首发日期: 2024-03-04

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1000200); 云南省重大科技专项 (202102AE090042); 国家自然科学基金项目 (32260317)。

作者简介: 宋昕儒 (1997—), 女, 辽宁丹东人, 在读硕士研究生, 主要从事中药材生态种植研究。

E-mail: 1009110063@qq.com

**通信作者 Corresponding authors: 邓维萍 (1979—), 女, 云南昭通人, 博士, 副教授, 主要从事中药材生态种植研究。E-mail: 1045940606@qq.com; 梅馨月 (1989—), 女, 云南文山, 博士, 副教授, 主要从事中药材生态种植研究。E-mail: meixinyuemm123@126.com

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/53.1044.S.20240301.1734.006>



and plants were detected by inductively coupled plasma mass spectrometry, then, the exceeding rate, enrichment coefficient, and transport coefficient of five heavy metals in the rhizosphere soil of *P. notoginseng* and the aboveground and underground parts of plants were analyzed. [**Results**] The heavy metal exceeding rate of *P. notoginseng* rhizosphere soil in the 10 sampling sites was Cd (75.56%)>As (40.23%)>Cr (8.89%)>Hg (0.00%)=Pb (0.00%), the exceeding heavy metals did not exceed control value, and four sampling sites belonged to slight pollution. The heavy metals that exceeded the standard in both the aboveground and underground parts of *P. notoginseng* plants were Cd, Cr and Pb, with Cd (67.90%)>Cr (22.22%)>Pb (10.84%) in the aboveground part and Cr (49.43%)>Cd (32.05%)>Pb (3.70%) in the underground part. Except for Hg, the underground parts of *P. notoginseng* showed a stronger enrichment ability for Cd, Pb, As and Cr than the aboveground parts. The enrichment coefficient for Cd in both aboveground and underground parts were greater than one.

[**Conclusion**] Most of the sampling sites are classified as slight pollution level, however, there is a potential risk of exceeding Cd, As and Cr in the underground part and the rhizosphere soil of the *P. notoginseng*, *P. notoginseng* plants accumulate these metals more in the underground part than that in the aboveground part, with the strongest ability for Cd. It is necessary to strengthen the monitoring of soil heavy metals and control the accumulation of Cd, As and Cr in the main medicinal parts before selecting *P. notoginseng* cultivation sites.

Keywords: *Panax notoginseng*; heavy metal; enrichment coefficient; transport coefficient

三七 [*Panax notoginseng* (Burk.) F.H. Chen] 为五加科 (Araliaceae) 人参属 (*Panax*) 多年生草本植物, 是中国珍贵的中药材, 有悠久的栽培和药用历史, 具有散瘀止血、消肿定痛的功效^[1]。云南独特的自然环境造就了生物医药产业发展的资源优势, 三七种植、加工及相关配套产业已成为云南省富民强省的重要支柱产业之一。据统计, 云南省三七种植面积占中国种植面积的 90% 以上, 在文山、昆明、曲靖、红河、临沧等地有广泛的人工种植区, 是中国主要的三七产区之一^[2]。但由于三七部分种植区与锡、锌、镉、铝等金属矿区高度重叠, 再加上密集型农业化肥农药投入量大等问题导致三七种植土壤存在不同程度的重金属污染风险^[3]。

云南地区地质多样, 土壤条件和重金属污染风险也存在差异。黄珍华等^[4]对云南省砚山、丘北、蒙自、石屏和石林不同土层和三七植株中的 8 种重金属污染特征及风险进行评价发现: 三七种植土壤污染程度较高的重金属为 Cd、Cu 和 Cr, 但均对人体健康无风险。刘源等^[5]研究发现: 曲靖、文山、昆明和河红的三七种植土壤中 Cu、Cd 和 As 超标率依次为 64.7%、62.7% 和 35.3%, 且三七块根中重金属累积量与土壤重金属浓度呈线性正相关。许多药用植物在生长过程中可能会

积累重金属 Cd、Pb、As 等, 这些有毒元素的过量累积会对人体健康造成威胁^[6]。因此, 如何在保证三七生长品质的同时降低植株对重金属的吸收累积、免受重金属毒害、提升药效和降低相关风险, 已成为三七种植乃至医药行业亟待解决的问题。本研究采集种植于云南省 10 个三七种植地的三七植株, 测定植株及其根际土壤中 Hg、As、Cd、Pb 和 Cr 的重金属含量, 参照《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[7]评价三七根际土壤以及三七植株地上部和地下部 5 种重金属元素的污染风险, 进一步比较 5 种重金属的超标率, 评价三七对 5 种重金属的累积特征差异, 筛选三七种植地及植株中有潜在污染风险的重金属元素, 以期为田间合理阻控三七对重金属的吸收提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 采样地概况

三七植株及根际土壤的采集地主要信息见表 1, 各采样地的土壤类型均为红壤。

1.2 供试材料

1.2.1 供试三七

采用五点采样法随机采集种植于云南砚山、维摩、师宗、石林、曲靖、临沧、丘北、羊街种

表 1 供试三七采样地信息
Tab. 1 Information of *Panax notoginseng* sample fields for testing

采样地 sample fields	经纬度 longitude and latitude	海拔/m altitude	土壤 pH 值 soil pH value	土壤有机质含 量/(g·kg ⁻¹) soil organic matter content	采样地 sample field	经纬度 longitude and latitude	海拔/m altitude	土壤 pH 值 soil pH value	土壤有机质含 量/(g·kg ⁻¹) soil organic matter content
砚山 Yanshan	23°33'N, 104°20'E	1438	6.75	34.03	曲靖 Qujing	24°43'N, 103°54'E	1803	6.54	27.32
维摩 Weimo	23°46'N, 104°26'E	1499	6.70	31.59	丘北 1 Qiubei 1	23°53'N, 104°02'E	1819	6.83	23.41
师宗 Shizong	24°39'N, 104°06'E	2186	6.54	31.07	丘北 2 Qiubei 2	23°53'N, 104°02'E	1819	6.79	42.81
临沧 Lincang	23°43'N, 100°07'E	2263	6.86	74.21	羊街 1 Yangjie 1	25°27'N, 103°11'E	2215	5.38	63.41
石林 Shilin	24°48'N, 103°26'E	1884	6.43	23.39	羊街 2 Yangjie 2	25°27'N, 103°11'E	2215	6.26	108.22

植地的三七植株, 每个采样点采集 25 株, 共 250 株。新鲜三七采集后用自来水冲洗干净, 洗去根部土壤, 并用细毛刷清洗, 再用去离子水冲洗; 将三七植株分成地上部和地下部, 于 105 ℃ 杀青处理 30 min, 然后于 60 ℃ 下烘干至恒质量, 磨碎后过 60 目筛, 置于封口袋中保存备用^[8]。

1.1.2 供试土壤

采集三七植株根系周围 0~2 cm 的土壤, 每个采样点采集 5 个土壤样品, 混合并自然风干, 共 50 个土壤样品。剔除样品中的植物根系和有机残渣, 碾碎并研磨过筛, 装入自封袋中密封保存, 待测。其中, 过 60 目筛的样品用于测定土壤 pH 值及有机质含量, 过 100 目筛的样品用于测定土壤重金属含量。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤 pH 值及有机质含量的测定

参照中华人民共和国农业行业标准 NY-T 1377—2007 和 NY-T 1121.6—2006^[9-10]测定。

1.3.2 土壤和植株重金属含量的测定

土壤 Hg 和 As 含量的测定采用原子荧光法^[11]; 土壤 Cd、Pb 和 Cr 含量的测定采用《区域地球化学样品分析方法》中的电感耦合等离子质谱法^[12]。三

七植株 Hg 含量的测定参照 GB 5009.17—2014^[13]; 植株 As、Cd、Pb 和 Cr 含量的测定参照 GB 5009.268—2016^[14]。

1.4 评价方法

1.4.1 土壤重金属污染评价

农用地土壤重金属限量评价标准参照《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[7]。采样区域的重金属污染评价采用单因子指数法和内梅罗综合污染指数法^[15-16]。单因子指数评价法的计算公式为 $P_i=C_i/S_i$ 。式中: P_i 为 i 污染物的污染指数; C_i 为 i 污染物的实际测量值; S_i 为 i 污染物的评价标准。内梅罗综合污染指数法的计算公式为 $P_{\text{综合}}=\sqrt{(P_{\text{max}}^2+P_i^2)}/2$ 。式中: $P_{\text{综合}}$ 为内梅罗综合污染指数; P_{max} 为单项污染指数最大值。根据单因子污染指数和内梅罗综合污染指数可将土壤重金属污染分别划分为 4 个和 5 个等级(表 2)。

1.4.2 植株重金属污染评价

三七植株地上部重金属限量标准参考 DBS 53/024—2017^[17]; 三七植株地下部重金属限量标准参考《中国药典》(2020 年版); Cr 元素限量标准参考 GB 2762—2017^[18]。

表 2 土壤重金属污染评价分级标准
Tab. 2 Evaluation classification standard of soil heavy metal pollution

等级 grade	单因子污染指数法 single factor pollution index method		综合污染指数法 comprehensive pollution index method	
	污染指数 pollution index	污染等级 pollution level	污染指数 pollution index	污染等级 pollution level
1	$P_i<1$	清洁 clean	$P\leq 0.7$	安全 safety
2	$1\leq P_i<2$	轻污染 slight pollution	$0.7<P\leq 1$	警戒级 alert level
3	$2\leq P_i<3$	中污染 moderate pollution	$1<P\leq 2$	轻污染 slight pollution
4	$P_i\geq 3$	重污染 heavy pollution	$2<P\leq 3$	中污染 moderate pollution
5			$P>3$	重污染 heavy pollution

1.4.3 植株重金属吸收转运能力评价

采用生物富集系数 (bio-enrichment coefficient, BEC) 和转运系数 (transport coefficient, TC) 进行评价。BEC 为植物中不同部位重金属浓度与土壤重金属浓度之比, 用于评价植物吸收和富集某种重金属的能力, BEC>1 表明具有富集能力, BEC 值越大, 表明其重金属富集能力越强^[19]。TC 为植物地上部重金属含量与地下部重金属含量之比, 用于评估化学物质在植物体内的迁移转运能力。

1.5 数据处理与统计分析

采用 Excel 和 SPSS 26 分析和处理数据。

2 结果与分析

2.1 三七根际土壤的重金属含量

由表 3 可知: 三七根际土壤中 Hg、As、Cd、

Pb 和 Cr 的平均含量分别为 0.15、31.73、0.51、31.80 和 122.05 mg/kg。其中 As、Cd 和 Cr 含量均超过筛选值, 但并未超过管控值, 超标率依次为 Cd>As>Cr。Cd 平均含量为 0.10~1.35 mg/kg, 超标率为 75.56%, 超出限量标准 101.02%; As 平均含量为 4.87~87.67 mg/kg, 超标率为 40.23%, 超出限量标准 107.88%; Cr 平均含量为 63.91~280.00 mg/kg, 超标率为 8.89%, 超出限量标准 65.06%。可见, 本研究中三七采样地土壤 Cd 污染最严重。

2.2 三七根际土壤的重金属污染指数

由表 4 可知: 10 个采样地的根际土壤重金属污染指数依次为 Cd>As>Cr>Pb>Hg; 10 个采样地中, 1 个采样地处于重度污染, 1 个采样地处于中度污染, 4 个采样地处于轻度污染, 2 个采样地处于警戒级, 2 个采样地处于安全。

表 3 三七根际土壤中 5 种重金属的含量
Tab. 3 Contents of five heavy metals in *P. notoginseng* rhizosphere soil

重金属 heavy metal	范围/ (mg·kg ⁻¹) range	均值/ (mg·kg ⁻¹) average	最大值/ (mg·kg ⁻¹) maximum	标准差 standard deviation	变异系数/% coefficient of variation	超标率/% exceeded rate	超出限制标准的 百分比/% percentage of exceeding of limit standard
汞 Hg	0.05~0.52	0.15	0.81	0.17	113.89	0.00	0.00
砷 As	4.87~87.67	31.73	90.20	28.09	88.54	40.23	107.88
镉 Cd	0.10~1.35	0.51	1.43	0.33	65.97	75.56	101.02
铅 Pb	16.13~61.97	31.80	65.90	12.74	40.06	0.00	0.00
铬 Cr	63.91~280.00	122.05	297.00	55.68	45.63	8.89	65.06

表 4 三七根际土壤中 5 种重金属的污染指数
Tab. 4 Pollution index of five heavy metals in *P. notoginseng* rhizosphere soil

采样地 sample fields	单因素污染指数 single factor pollution index					综合污染指数 comprehensive pollution index	污染程度 degree of contamination
	Hg	As	Cd	Pb	Cr		
砚山 Yanshan	0.05	1.99	1.21	0.37	0.45	1.52	轻度污染 slight pollution
维摩 Weimo	0.15	2.92	1.07	0.36	0.83	2.20	中度污染 moderate pollution
师宗 Shizong	0.02	0.30	1.22	0.19	0.80	0.94	警戒级 alert level
临沧 Lincang	0.08	0.27	0.28	0.32	0.44	0.37	安全 safety
石林 Shilin	0.03	1.27	4.43	0.69	1.87	3.35	重度污染 heavy pollution
曲靖 Qujing	0.04	0.72	1.10	0.23	0.57	0.86	警戒级 alert level
丘北 1 Qiubei 1	0.02	0.54	0.87	0.13	0.32	0.67	安全 safety
丘北 2 Qiubei 2	0.21	2.36	1.02	0.17	0.91	1.80	轻度污染 slight pollution
羊街 1 Yangjie 1	0.07	0.14	2.57	0.47	0.70	1.90	轻度污染 slight pollution
羊街 2 Yangjie 2	0.03	0.11	2.11	0.33	0.71	1.56	轻度污染 slight pollution
均值 average	0.07	1.06	1.59	0.33	0.76	1.52	轻度污染 slight pollution

2.3 三七植株中的重金属含量

由表 5 可知: 三七地上部 5 种重金属的超标率由高到低依次为 Cd (67.90%)>Cr (22.22%)>Pb (10.84%), 3 种元素的平均含量分别为 0.72、1.41 和 0.95 mg/kg, 分别超出限量标准筛选值 85.10%、62.69% 和 16.35%; Hg 和 As 含量未超标。地下部重金属超标率依次为 Cr (49.43%)>Cd (32.05%)>

As (23.46%)>Pb (3.70%), 4 种元素的平均含量分别为 3.42、1.15、1.19 和 1.50 mg/kg, 分别超出限量标准筛选值 97.92%、125.53%、30.33% 和 74.22%; Hg 未超标。除了 Hg, 三七植株中其他 4 种重金属超出限量标准的百分比均表现为地下部>地上部, 且地下部和地上部均超标的重金属为 Cd、Cr 和 Pb。

表 5 三七植株中 5 种重金属的含量及超标率
Tab. 5 Contents and exceeded rate of five heavy metals in *P. notoginseng* plants

重金属 heavy metal	限量标准/(mg·kg ⁻¹) limit standard		重金属含量均值/(mg·kg ⁻¹) average content of heavy metal		超标率/% exceeded rate		超出限制标准的百分比/% percentage of exceeding of limit standard	
	地上 aboveground	地下 underground	地上 aboveground	地下 underground	地上 aboveground	地下 underground	地上 aboveground	地下 underground
汞 Hg	0.10	0.20	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
砷 As	1.50	2.00	0.33	1.19	0.00	23.46	0.00	30.33
镉 Cd	0.50	1.00	0.72	1.15	67.90	32.05	85.10	125.53
铅 Pb	2.00	5.00	0.95	1.50	10.84	3.70	16.35	74.22
铬 Cr	2.00	2.00	1.41	3.43	22.22	49.43	62.96	97.92

2.4 三七植株的重金属累积特征

三七植株中 5 种重金属的转运系数由大到小依次为 Hg (1.89)>Pb (0.96)>Cd (0.71)>Cr (0.63)>As (0.41)。除 Hg 以外, 其他 4 种重金属的转运系数均小于 1, 说明三七易将 Hg 转移至地上部, 而 Cd、Pb、As 和 Cr 主要累积在三七植株的地下部。

三七植株地上部对 5 种重金属的富集系数排序为 Cd (1.70)>Hg (0.36)>Pb (0.03)>As (0.02)>Cr (0.01), 地下部对 5 种重金属的富集系数排序为 Cd (2.55)>Hg (0.18)>As (0.06)>Pb (0.05)>Cr (0.03)。地上部和地下部的富集系数均为 Cd 最大、Cr 最小, 且对 Cd 的富集系数均大于 1, 对 Hg、Pb、As 和 Cr 的富集系数均小于 1, 说明三七植株的地上部和地下部对 Cd 均有较强的富集能力。除了 Hg, 三七地下部对 Cd、Pb、As 和 Cr 的富集能力均强于地上部。

3 讨论

本研究对 10 个三七种植地的土壤污染等级评价表明: 4 个采样地属于轻度污染, 仅有 1 个采样地属于重度污染, 不同采样地不同重金属的污染程度差异较大, 与前人研究结果^[2, 5]一致。对根际土壤中 5 种重金属 (Hg、As、Cd、Pb、Cr) 含量及土壤污染情况进行评价发现: 重金属 Cd、As 和 Cr 含量超标, 但并未超过管控值, 其中 Cd 超标率最高, 与前人报道的云南主要种植区的重金属超标情况^[4]一致。本研究中, 三七植

株中超标的重金属与土壤中超标的重金属基本一致, 超标严重的皆为 Cd 和 Cr 元素, 说明三七植株的重金属主要来源可能仍然是土壤。由于农业活动、工业活动、矿产资源开采、大气沉降等原因可能会导致 Cd 元素进入土壤导致污染, 因此, 在种植三七前需要加强监测与调查, 合理利用农业投入产品, 控制工业废物的排放, 加强环境保护措施, 以降低土壤 Cd 污染的风险。

三七对重金属的吸收会因为不同生长环境、部位以及与污染源的距離而不同, 通常情况下植株重金属含量与土壤重金属含量成正比^[20-21]。本研究中, 三七不同部位的重金属含量有明显差异, 除 Hg 外, 其他 4 种重金属含量均表现为地下部高于地上部, 与陈璐等^[22]和倪中应等^[23]的研究结果基本一致。其中, Cd 和 Cr 的超标率和超出限量标准的占比都很高, 因此, 在三七生长过程中应采取适当的农艺措施阻控植株对 Cd 和 Cr 的吸收, 在后期研究中应加强低累积重金属三七品种的选育。

不同部位、不同生长期植株富集重金属的能力不同^[24-25]。本研究发现: 三七植株对 5 种重金属的富集能力和转运能力有所差异, 其中对 Cd 的富集系数大于 1, 表明三七对 Cd 的富集能力最强。转运系数显示: Cd、As、Pb 和 Cr 主要累积于三七地下部, Hg 主要累积于三七地上部, 而三七的主要药用部位是地下部, 因此, 明确三七对不同重金属的累积特征尤为重要。引起

重金属累积差异的原因除了受采样量、三七植株部位、生长年限等因素的特异选择外,还可能受采样地土壤背景值尤其是理化性质的影响。通常情况下,植株对重金属的吸收取决于土壤中重金属的迁移性和活性,土壤的理化性质如 pH 值、有机质含量、阳离子交换量、氧化还原电位等对重金属形态变化有重要影响^[26-30]。本研究采集的样品为大田实际种植的三七植株及根际土壤,初步探明了三七对重金属的富集特征差异,而引起重金属含量、积累和转运有所差异的原因可能受植株年限和土壤背景值的影响,为得到更准确的数据,将来还需进一步设置盆栽试验选取背景值和生育期一致的三七植株,对不同重金属的累积特征及差异进行评价,采取农艺措施调控土壤理化性质,从而降低三七对重金属的吸收累积。

4 结论

本研究选取的三七采样地多属于轻度污染等级,三七根际土壤及植株地下部 Cd、As、Cr 有潜在污染风险,其中 Cd 风险最为严重。除了 Hg,三七对 Cd、As、Pb 和 Cr 的富集能力均表现为地下部强于地上部,且对 Cd 的富集能力最强。

[参考文献]

- 黄云. 云南文山三七的药用价值及其对土壤中微量元素的吸收规律[J]. 中国食品, 2021(14): 136. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1085.2021.14.056.
- 陶亮, 包立, 刘源, 等. 云南不同产地三七的重金属吸收累积特征研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(34): 74.
- 石玥. 钾降低三七镉累积的机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- 黄珍华, 沈智达, 施辉能, 等. 三七中药材种植产地土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(5): 645. DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2021.0487.
- 刘源, 杨牧青, 汪泰, 等. 云南三七种植区土壤重金属分布特征及其与三七块根叶片内含量的关系[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(18): 298. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2018.18.071.
- BELLOEIL C, JOUANNAIS P, MALFAISAN C, et al. The X-ray fluorescence screening of multiple elements in herbarium specimens from the Neotropical region reveals new records of metal accumulation in plants[J]. Metallomics Integrated Biometal Science, 2021, 13(8): mfab045. DOI: 10.1093/mtomcs/mfab045.
- GB15618—2018. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- 林龙勇, 阎秀兰, 廖晓勇, 等. 三七对土壤中镉、铬、铜、铅的累积特征及健康风险评价[J]. 生态学报, 2014, 34(11): 2868. DOI: 10.5846/stxb201307261958.
- NY-T 1377—2007. 中华人民共和国农业行业标准 土壤pH值测定[S].
- NY-T 1121.6—2006. 中华人民共和国农业行业标准 土壤有机质测定[S].
- GB/T 22105—2008. 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法[S].
- DZ/T 0279—2016. 区域地球化学样品分析方法[S].
- GB 5009.17—2014. 食品安全国家标准 食品中总汞及有机汞的测定[S].
- GB 5009.268—2016. 食品安全国家标准 食品中多元素的测定[S].
- 崔瀚文, 杨广斌, 崔文刚. 贵阳市观山湖区喀斯特城乡交错区土壤重金属的分布特征及风险评价[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(2): 351. DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).202104024.
- NEMEROW N L. Scientific stream pollution analysis[M]. Washington: Scripta Book Co., 1974.
- DBS 53/024—2017. 云南省食品安全地方标准[S].
- GB 2762—2017. 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- FALANDYSZ J, DREWNOWSKA M. Macro and trace elements in common chanterelle (*Cantharellus cibarius*) mushroom from the European background areas in Poland: composition, accumulation, dietary exposure and data review for species[J]. Journal of Environment Science & Health (Part B), 2015, 50(5): 374. DOI: 10.1080/03601234.2015.1000190.
- 叶林, 刘作云. 9种河流沿岸植物对砷、汞的累积作用比较[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(4): 1995. DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2010.04.010.
- 周启星, 黄国宏. 环境生物地球化学及全球环境变化[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- 陈璐, 米艳华, 林昕, 等. 土壤—三七系统重金属污染调查及相关分析[J]. 中国中药杂志, 2014, 39(14): 2608. DOI: 10.4268/cjcmm20141404.
- 倪中应, 章明奎, 王京文, 等. 水稻不同生育期镉吸收与积累特征研究[J]. 农学报, 2020, 10(3): 49.
- 王涛, 段积德, 王锦霞, 等. 美人蕉不同生长期生物量分配格局与重金属累积、分配特征[J]. 环境化学, 2020, 39(4): 1031. DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2019070807.
- 陈涵, 庄玉婷, 冯嘉仪, 等. 铅镉复合污染对台湾相思生长和元素吸收的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2022, 42(1): 76. DOI: 10.11929/j.swfu.202006009.
- 邵代兴, 罗元琼, 吴正肖, 等. 有机肥用量对土壤性质及水稻重金属含量的影响试验[J]. 南方农业, 2022, 16(15): 68. DOI: 10.19415/j.cnki.1673-890x.2022.15.014.
- 杨凤, 丁克强, 刘廷凤. 土壤重金属化学形态转化影响因素的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(29): 10083. DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2014.29.015.
- 周晓声, 娄厦, LARISA D R, 等. 植物对土壤重金属富集特性研究进展[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(3): 400. DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20210803001.
- 赵一鸣, 董颖博, 林海, 等. 土壤理化性质对重金属形态的影响[J]. 农业工程, 2018, 8(12): 38. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1795.2018.12.012.
- 高郢, 张铎, 卢杰, 等. 色季拉山高山松林降雨再分配及重金属元素的时空特征研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2022, 42(1): 115. DOI: 10.11929/j.swfu.202008013.

责任编辑: 何承刚