

三七-土壤系统重金属分布特征及健康风险评价

吴涵, 何忠俊, 孟溪, 陆春围, 梁社往

引用本文:

吴涵, 何忠俊, 孟溪, 陆春围, 梁社往. 三七-土壤系统重金属分布特征及健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(7): 1477-1486.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1047>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

EDTA强化盐生植物修复Pb、Cd和盐渍化复合污染土壤

王雨涵, 陈冬月, 江志勇, 聂文翰, 张进忠

农业环境科学学报. 2018, 37(9): 1866-1874 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0206>

广西某采选废矿区重金属生态风险与源汇关系

毛志强, 田康, 刘本乐, 张晓辉, 卞子金, 黄标, 袁旭音, 吴龙华, 罗栋源

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 987-998 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1338>

辽宁某冶炼厂周边农田土壤与农产品重金属污染特征及风险评价

都雪利, 李波, 崔杰华, 李国琛, 王颜红

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2249-2258 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0434>

大宝山污灌区土壤-蔬菜系统重金属污染现状及其风险评价

曹春, 张松, 张鹏, 刘雨晨, 陈勋文, 王俊坚

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1521-1531 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0001>

规模化猪场灌区土壤重金属污染特征及风险评价——以重庆市某种猪场为例

杨璐, 张玉, 张智, 李余杰, 翁张帆, 孙磊, 孔媛

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2166-2174 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1775>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

吴涵, 何忠俊, 孟溪, 等. 三七-土壤系统重金属分布特征及健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(7): 1477–1486.

WU H, HE Z J, MENG X, et al. Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in a *Panax notoginseng*-soil system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(7): 1477–1486.

三七-土壤系统重金属分布特征及健康风险评价

吴涵¹, 何忠俊^{1*}, 孟溪¹, 陆春围¹, 梁社往²

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 云南农业大学农学与生物技术学院, 昆明 650201)

摘要: 为了探索云南三七 [*Panax notoginseng* (Bruk) F. H. Chen] 种植地土壤及植株中的重金属分布特征及其对人体造成的健康风险, 本研究通过对三七产区随机采样和室内测定, 采用单项污染指数法、内梅罗指数法计算三七种植地土壤的污染情况, 并对三七中重金属对人体造成的健康风险进行了评估。结果表明: 三七种植区土壤 Cu、Zn、Cd、Pb、As 的超标率分别为 51.7%、10.0%、80.0%、8.33%、65.0%, 4 个片区污染水平依次为红河玉溪市>昆明曲靖片区>文山片区>大理保山片区。三七块根 Cd、As 的超标率分别为 1.67%、5.00%, Cu、Pb 没有超标。芦头 Cu、Cd、Pb、As 的超标率分别为 1.67%、5.00%、3.33%、1.67%。块根和芦头的综合非致癌指数 (HI) 均大于限量标准, 均值分别为 1.20 和 2.33, 贡献率最大的因子均为 Cu。两部位的综合致癌指数 (TCR) 也均高于限量标准, 均值分别为 2.21×10^{-4} 和 2.39×10^{-4} , 贡献率最大的因子均为 Cd。HI 和 TCR 均为芦头高于块根。研究表明, 三七种植区已经出现了一定程度的重金属污染问题, 且服用三七存在潜在的健康风险。建议控制三七的摄入量和服用期限或以提取药效成分服用。

关键词: 三七; 土壤; 重金属; 风险评估

中图分类号: X53; X820.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2023)07-1477-10 **doi:** 10.11654/jaes.2022-1047

Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in a *Panax notoginseng*-soil system

WU Han¹, HE Zhongjun^{1*}, MENG Xi¹, LU Chunwei¹, LIANG Shewang²

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: To explore the distribution characteristics of heavy metals in soil and plants of *Panax notoginseng* (Bruk) F. H. Chen in the planting area of Yunnan, and their impact on human health, this study performed random sampling and laboratory measurements in the *Panax notoginseng* production area. To assess soil pollution, the single pollution index and Nemero index methods were used, and the presence of heavy metals was evaluated for human health risks. We found that the rates of Cu, Zn, Cd, Pb, and As were excessive in the soil samples of *Panax notoginseng* planting area, where levels were 51.7%, 10.0%, 80.0%, 8.33%, and 65.0% above the standard limits, respectively. The pollution levels of the four areas were in the following order: Honghe Yuxi > Kunming Qujing > Wenshan > Dali Baoshan. The rates of Cd and As in the *Panax notoginseng* root tuber were 1.67% and 5.00% above the standard limits, respectively; however, Cu and Pb did not exceed standard limits. The rates of Cu, Cd, Pb, and As in the *Panax notoginseng* rhizome were 1.67%, 5.00%, 3.33%, and 1.67% above the standard limits, respectively. Noticeably, the health risk index (HI) of the *Panax notoginseng* root tuber and rhizome were

收稿日期: 2022-10-19 录用日期: 2022-12-07

作者简介: 吴涵(1996—), 男, 云南昭通人, 硕士研究生, 研究方向为药用植物栽培。E-mail: 626671052@qq.com

*通信作者: 何忠俊 E-mail: hezhongjun@hotmail.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(81860679); 云南省社会发展科技计划项目(2010CA027)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(81860679); Yunnan Province Social Development Science and Technology Project(2010CA027)

greater than the standard limit, with averages of 1.20 and 2.33, respectively. Cu had the largest contribution to the *HI* out of all the metals. The comprehensive carcinogenic index (*TCR*) of the two parts was also higher than the standard limit, with averages of 2.21×10^{-4} and 2.39×10^{-4} , respectively, and Cd had the maximum contribution. The *HI* and *TCR* of the rhizome were higher than that of the root tuber. These data indicate that the *Panax notoginseng* planting area suffers from a heavy metal pollution problem.

Keywords: *Panax notoginseng*; soil; heavy metal; risk assessment

三七 [*Panax notoginseng* (Bruk) F. H. Chen] 为五加科人参属多年生草本植物, 始载于《本草纲目》, 是我国享誉中外的传统名贵中药材, 素有“金不换”、“南国神草”之美誉, 三七具有止血、活血化瘀、抗疲劳、抗衰老、耐缺氧、降血糖和提高机体免疫力等功效, 人们对三七功用的认识也从活血化瘀、消肿定痛延伸到整个心脑血管系统、中枢神经系统、代谢系统等领域^[1]。云南文山州是公认的三七道地产区, 由于三七严重的连作障碍, 文山州适合种植三七的地块越来越少, 三七种植区开始向周边其他州市转移^[2]。目前, 在云南除怒江、迪庆州和昭通外, 其余13个州市均有三七种植。

近年来, 随着采矿区域的无序扩张以及含重金属农药的大量使用, 三七种植区土壤重金属污染问题日益严重, 已对三七药材安全及国际贸易产生了严重影响^[2]。林龙勇等^[3]研究发现云南文山三七种植区的土壤重金属污染问题较为严重, 其中Cd、Cr、Cu的超标率高达75.0%、38.0%、50.0%。闫秀兰等^[4]发现文山三七种植区土壤中As含量的超标率占样品总数的48.0%。韩小丽等^[5]对多种中药材的污染现状进行了统计分析, 发现三七中Cd的超标率为50.0%、Cu为25.0%、Pb为5.70%、As为12.7%, 并且结果表明在其所研究的多产地多种药材中Cd超标最为严重。然而目前关于三七中重金属的研究仅限于土壤和三七药材或“土壤-三七”系统, 而缺乏对“土壤-三七-人体”进行系统性的研究。本文对云南三七种植区土壤的重金属污染状况, 三七中的重金属特征及其对人体造成的健康风险进行系统性研究, 以期对三七种植地的选择和安全性评价提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

云南省地势为西北高、东南低, 自北向南呈阶梯状逐级下降。气候基本属于亚热带高原季风型, 立体气候显著, 干湿分明, 每年5—10月为雨季, 雨季集中了85.0%的降雨量, 旱季则为11月至次年4月, 降雨较少, 仅占全年降雨量的15%。云南中药材种植面积和产量连年保持全国第一位, 其中以三七面积和产量

最高。云南地质现象种类繁多, 成矿条件优越, 矿产资源极其丰富, 被誉为“有色金属王国”, 因此云南省的重金属地质背景较高。

1.2 样品的采集与制备

根据云南三七种植面积布置样点, 最少布置4个样点, 采集3年生三七样品及对应的土壤样品共60个 (图1), 其中文山州18个样点、红河州10个样点、大理市4个样点、保山市4个样点、玉溪市7个样点、昆明市6个样点、曲靖市11个样点。土壤、植物样品采用随机多点采样法, 土壤采样深度为0~20 cm。将土壤自然风干后, 挑出植物残体, 过0.149 mm筛, 装入自封袋备用。三七植株带回实验室, 先用自来水冲洗、其次用滴加洗洁精的自来水清洗、再用含1%柠檬酸的蒸馏水漂洗, 以去除表面的泥土和附着的重金属, 最后用蒸馏水反复冲洗干净。将三七摊开晾干附着的水分后分为茎叶、芦头、块根、筋条、须根5个部位, 60℃烘干, 粉碎过100目筛, 装入自封袋备用。

现场测定经度、纬度、海拔, 气象资料来自中国医学科学院药用植物研究所TCM-GIS系统。

1.3 样品测定方法

土壤Cd、Pb总含量根据《土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法》(GB/T 17141—1997)测定, 土壤Cu、Zn总量根据《土壤和沉积物 铜、锌、铅、镍、铬的测定 火焰原子吸收分光光度法》(HJ 491—2019)测定, 土壤As含量采用《土壤和沉积物 汞、砷、硒、铋、锑的测定 微波消解/原子荧光法》(HJ 680—2013)测定。三七中Cu、Zn、Cd、Pb、As含量采用《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》(GB 5009.268—2016)的第一法——电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定。在分析过程中, 采用空白样、平行样和国家标准土壤样品(GSS-2)进行过程质量控制, 测定平行样品误差控制在5%以内, 标准样品中重金属的加标回收率在93.4%~104.5%之间, 满足质量控制要求。

1.4 土壤重金属污染评价方法

(1) 单项污染指数法

单项污染指数是一种评价土壤污染程度的无量

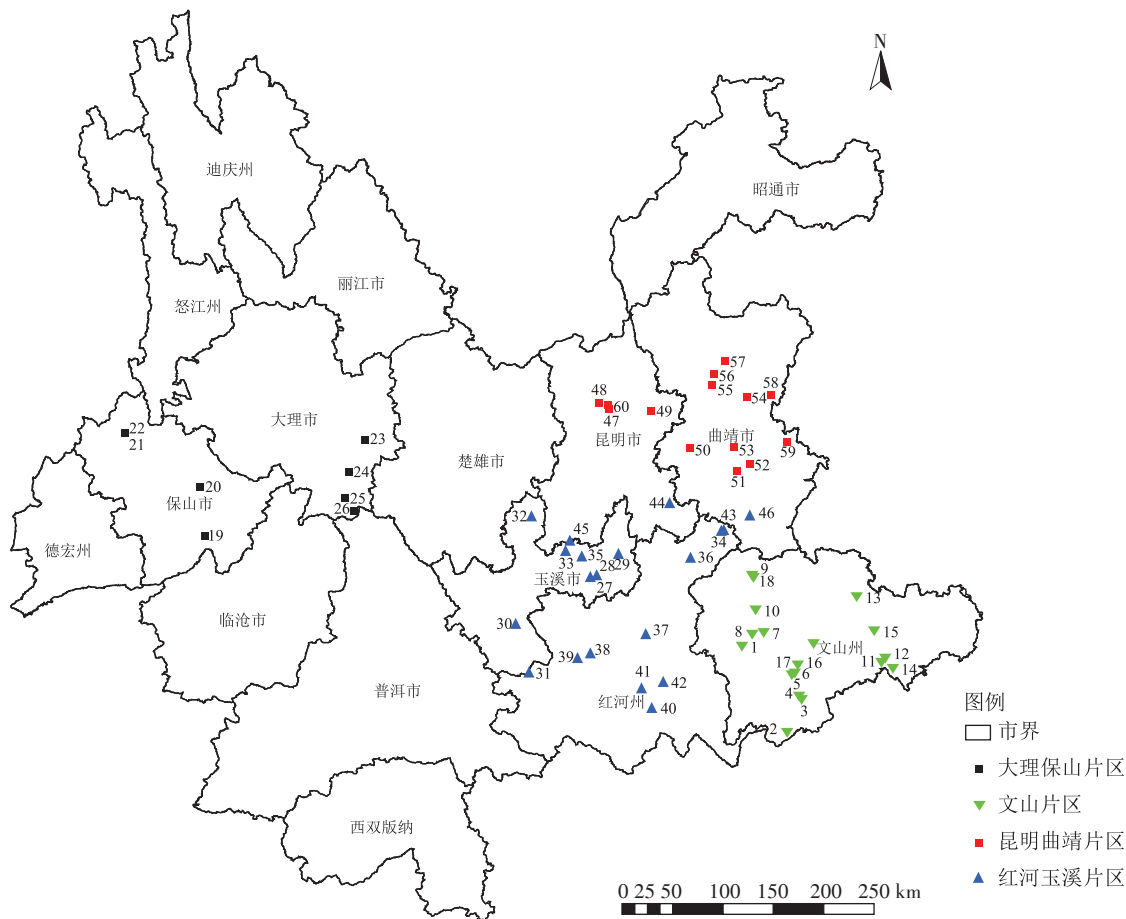


图1 采样点示意图

Figure 1 Distribution of sampling points

纲指数,可反映超标倍数和污染程度,计算公式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

式中: P_i 为土壤中重金属的单项污染指数; C_i 为土壤中重金属 i 的实测值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; S_i 为《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中农用地土壤污染管控中的土壤重金属风险筛选值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。 $P_i \leq 0.7$ 表示土壤清洁; $0.7 < P_i \leq 1$ 表示土壤尚且清洁,此时处于警戒限水平; $1 < P_i \leq 2$ 表示土壤有轻度污染; $2 < P_i \leq 3$ 表示土壤有中度污染; $P_i > 3$ 表示土壤有重度污染。而且当 P_i 的数值越大,土壤的污染程度越严重。

(2)内梅罗指数法

内梅罗指数法(Nemerowindex)是常用的综合污染评价方法之一,该方法能够较全面地评价整个区域土壤重金属的污染程度^[6],计算公式为:

$$P_c = \sqrt{\frac{P_{i\max}^2 + P_{i\text{ave}}^2}{2}}$$

式中: P_c 是采样区域内梅罗综合污染指数; $P_{i\max}$ 是所有重金属单项污染指数最大值; $P_{i\text{ave}}$ 是所有重金属单项污染指数的平均值。 $P_c \leq 0.7$ 表示土壤清洁; $0.7 < P_c \leq 1$ 表示土壤处于警戒限水平; $1 < P_c \leq 2$ 表示土壤受到轻度污染; $2 < P_c \leq 3$ 表示土壤受到中度污染; $P_c > 3$ 表示土壤受到重度污染。

1.5 人体健康风险评估

本文主要采用美国环保署(USEPA)提出的健康风险评价模型^[7-9],结合我国人体健康的实际情况,对研究区三七药材重金属引起的人体健康非致癌风险与致癌风险进行评价。其评价模型为:

$$EDI = \frac{EF \times Ed \times FIR \times C}{AT \times W} \times 10^{-3}$$

$$HQ = \frac{EDI}{RFD}$$

$$HI = \sum_{i=1}^n HQ$$

$$CR = EDI \times SF$$

$$TCR = \sum_{i=1}^n CR$$

式中: EDI 表示三七重金属每日摄入量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$;

EF 为暴露频率, $365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$; Ed 为暴露持续时间, 为 40 a ; FIR 为三七摄入量, 2020版《中国药典》^[10]规定三七每日最大摄入剂量为 $3 \sim 9 \text{ g} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 本研究取最大数据 $9 \text{ g} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; C 为三七重金属含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; AT 为平均寿命, $365 \times 70 = 25\,550 \text{ d}$; W 为人体质量, 一般按 63 kg 计算^[11]; 10^{-3} 为将 g 换算为 kg 的数量级比例。 HQ 是非致癌风险指数; HI 为综合非致癌风险指数; RFD 为每日摄入参考计量, USEPA 的技术报告显示, Cu 、 Zn 、 Cd 、 Pb 、 As 的 RFD 分别为 3×10^{-4} 、 4×10^{-2} 、 1×10^{-3} 、 3.5×10^{-3} 、 $3 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; n 为重金属种类数。 HQ 或 $HI < 1$ 表明摄入某种或某几种重金属无非致癌风险; HQ 或 $HI \geq 1$ 表明摄入某种或某几种重金属存在非致癌风险。 CR 代表致癌风险指数; TCR 为综合致癌风险指数; SF 为致癌物斜率因子, 指致癌物对人群终生暴露带来的致癌风险, 根据 USEPA 的技术报告, Cd 、 Pb 、 As 的 SF 分别为 6.1 、 8.5×10^{-3} 、 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。在 USEPA 的技术报告中有 Cd 、 Pb 、 As 的摄入参考计量和致癌斜率因子, 但没有 Cu 、 Zn 的致癌斜率因子, 说明这两种元素不是致癌物。当 $CR(TCR) \leq 10^{-6}$ 时, 致癌风险可以忽略; 当 $10^{-6} < CR(TCR) \leq 10^{-4}$ 时, 致癌风险在可接受范围内; 当 $CR(TCR) > 10^{-4}$ 时, 致癌风险较大^[9]。

1.6 聚类分析

本研究采样点分布相对密集, 且人为按照行政区域进行划分, 因此有可能忽略各采样点之间的关系, 影响分析结果。故本研究将已测得的数据, 即经度、纬度、湿度、日照(湿度和日照是三七生长周期的平均值)等作为变量, 进行聚类分析, 将其分成4个片区。聚类分析的方法为组间聚类法, 距离为欧式平方距离。片区聚类图见图2, 图中纵向的缩写为三七采样点的年份、地点, 如19ws-qb1代表2019年文山丘北的采样点, 20ws-qb1代表2020年文山丘北的采样点。

由聚类图可以看出, 从谱系图横向数字10处的虚线进行分区, 聚类分析与行政区的划分基本相同, 第一片区为文山片区, 第二片区为大理-保山片区, 第三片区为红河-玉溪片区, 第四片区为昆明-曲靖片区。第一片区中包括了文山州的所有采样点; 第二片区中包括了大理市和保山市的所有采样点; 第三片区中包括了红河州和玉溪市的所有采样点, 还包括了昆明市石林县的采样点(19km-sl1)、昆明市晋宁区的采样点(19km-jn1)和曲靖市师宗县的采样点(19qj-sz1); 第四片区中包括了昆明市和曲靖市的所有采样点。按生态气候划分更符合实际。

2 结果与讨论

2.1 云南三七种植地土壤重金属污染评价

2.1.1 土壤重金属含量

因为采样区土壤的 pH 范围在 $4.17 \sim 7.23$ 之间, 所

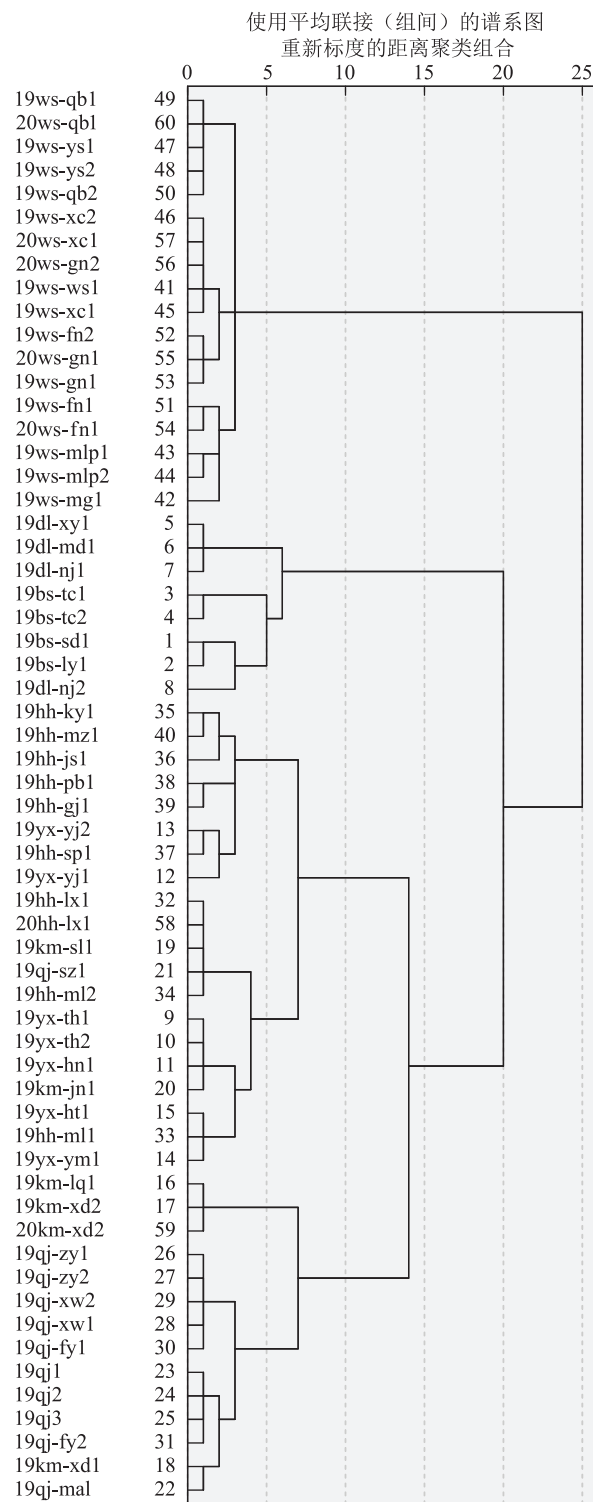


图2 三七种植地聚类分析图

Figure 2 Cluster analysis of *Panax notoginseng* plantation

以选取《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中 $\text{pH}<7.5$ 的标准。

三七种植地重金属分布情况详见表1,可见60个土壤样品的重金属平均含量为 $\text{Zn}>\text{As}>\text{Cu}>\text{Pb}>\text{Cd}$,其值分别为116、76.5、70.9、49.3、0.87 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,样品超标率最高的是Cd元素,超标率为80.0%,其次是As、Cu、Zn和Pb,超标率分别为65.0%、51.7%、10.0%、8.33%,说明云南三七种植区存在较为严重的Cu、Cd、As污染问题。变异系数可以反映区域重金属元素的分布差异,种植区5种重金属的变异系数大小为 $\text{Pb}>\text{Cd}>\text{As}>\text{Cu}>\text{Zn}$,均属于中等程度变异($0.10<\text{CV}<1.00$)。Cd、Pb、Zn的偏度和峰度较高,表明这3种元素处于一个高累积的状态。T-S test检验发现:采样区土壤Cd含量的数据接近正态分布,说明Cd主要来源于成土母质,受人为活动的影响较小;Cu、Zn、Pb、As的数据不符合正态分布,说明这4种重金属受外源影响相对较大^[12]。云南省有色金属丰富,土壤重金属背景值高,频繁的矿业活动及农药的不合理施用导致种植区重金属污染越来越严重。

2.1.2 土壤重金属污染评价

以《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的筛选值作为评价标准,云南三七种植区土壤重金属单项污染指数和内梅罗指数结果见表2。Cu单项污染中清洁占26.7%、警戒限占21.7%、轻度污染占33.3%、中度污染占11.7%、重度污染占6.6%;Zn单项污染中清洁占76.7%、警戒限占13.3%、轻度污染占10.0%,没有中度污染和重度污染;Cd单项污染中清洁占11.7%、警戒限占8.3%、轻度污染占18.3%、中度污染占21.7%、重度污染占40.0%;Pb单项污染中清洁占71.7%、警戒限占20.0%、轻度污染占5.0%、中度污染占1.7%、重度污染占1.6%;As单项污染中清洁占25.0%、警戒限占10.0%、轻度污染占23.3%、中度污

染占20.0%、重度污染占21.7%;在Cu、Zn、Cd、Pb、As 5种重金属元素中,其污染水平在轻度及其以上的占比分别约为52%、10%、76%、9%、65%。内梅罗指数的平均值为2.70,说明云南三七种植区土壤整体处于中度污染的水平。有研究表明,传统产区文山州及红河州三七种植区土壤存在较为严重的Cd、Cu、As的污染^[3-4,13],孙兆帅等^[14]研究发现三七种植土壤Cd、Cu、As的平均值为0.52、49.44、84.27 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均高于GB 15618—2018中的标准值。一般而言,土壤中的Cd来源于成土母质及锌铅矿的历史污染^[15-16],使用含有Cu、As元素的杀菌剂和杀虫剂会造成土壤中Cu、As含量的增加^[17]。在对云南三七种植区土壤重金属污染程度的调查中,单项污染指数最大的为Cd,其次是 $\text{As}>\text{Cu}>\text{Pb}>\text{Zn}$ 。GB 15618—2018中的土壤筛选值使用方法表明,土壤中的重金属含量超过该值时,农产品的质量安全、农作物的生长或生态环境可能存在风险。本研究发现采样点Cu、Cd、As 3种元素的超标率较高,建议采取改善农艺措施、替代种植、种植点远离矿山及冶炼厂等安全措施降低Cu、As的含量^[18]。Cd因为主要来源于成土母质,建议施用钝化剂等方式降低其累积^[19]。

分析内梅罗指数可以看出在文山片区18个采样点中属于清洁水平的样点有1个,2个处于警戒限水平、3个处于轻度污染水平、5个处于中度污染水平、7个处于重度污染水平,轻度污染及其以上水平的占比为83%;大理保山片区8个采样点中2个处于清洁水平、1个轻度污染、5个中度污染,没有警戒限水平和重度污染水平,但是轻度污染及其以上水平的占比也达到75%,处于一个较高的水平;红河玉溪片区20个采样点中处于警戒限水平的样点有1个、9个处于轻度污染水平、10个处于重度污染水平,没有中度污染水平的样点,轻度污染及其以上水平的占比为95%;昆明曲靖片区14个采样点中处于清洁水平的有1个、

表1 土壤中重金属含量($n=60$)

Table 1 Concentration of heavy metals in soil($n=60$)

重金属 Heavy metal	最小值 Minimum value/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	最大值 Maximum value/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	均值 Average value/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	标准偏差 Standard deviation/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数 CV	超标率 Over-standard rate/%
Cu	12.9	186	70.9	44.4	1.13	0.51	0.63	51.7
Zn	23.9	375	116	65.6	1.47	3.17	0.57	10.0
Cd	0.09	2.68	0.87	0.64	1.09	0.75	0.74	80.0
Pb	4.14	253	49.3	38.5	2.92	13.1	0.78	8.33
As	10.2	223	76.5	55.4	0.90	-0.07	0.72	65.0

表2 各采样点污染指数

Table 2 Pollution index of each sampling point

片区Area	样点位置Sample position	P_{Cu}	P_{Zn}	P_{Cd}	P_{Pb}	P_{As}	P_c	污染程度Pollution level
文山片区($n=18$)	文山州秉烈乡小平坝村	0.43	0.15	1.17	0.28	0.40	0.90	警戒值
	马关县都龙镇茅坪村	1.56	0.13	1.56	0.48	1.37	1.32	轻度污染
	麻栗坡县大坪镇小石洞村	0.45	0.55	3.68	1.06	3.35	2.90	中度污染
	麻栗坡县大坪镇白铜厂	0.89	0.21	0.87	3.62	2.75	2.82	中度污染
	西畴县蚌谷乡木者村	0.80	1.11	8.16	0.97	2.43	6.07	重度污染
	西畴县蚌谷乡蚌谷村	0.35	0.81	8.94	0.62	2.60	6.60	重度污染
	砚山县维摩乡长岭街	0.76	0.39	2.15	0.77	1.44	1.71	轻度污染
	砚山县维摩乡幕菲勒	0.44	0.38	2.34	0.46	2.96	2.29	中度污染
	丘北县双龙营镇大井村	0.53	0.45	3.48	0.51	4.38	3.37	重度污染
	丘北县树皮乡新街村	1.52	0.72	3.83	0.91	4.36	3.47	重度污染
	富宁县木央镇木思村	0.54	1.03	7.79	0.59	2.62	5.79	重度污染
	富宁县木央镇木杠村	1.17	0.85	2.29	0.60	3.33	2.63	中度污染
	广南县莲城镇董拉孟村	0.24	0.24	2.94	0.45	2.40	2.26	中度污染
	富宁县田蓬镇木卓村	0.61	0.29	0.80	0.32	0.94	0.78	警戒值
	广南县屏镇林家坝	0.59	0.29	2.04	0.18	0.55	1.53	轻度污染
	广南县那洒镇罗卜冲	0.33	0.12	0.84	0.31	0.50	0.67	清洁
	西畴县蚌谷乡对门寨	0.85	1.03	8.10	0.71	1.86	6.00	重度污染
	丘北县双龙营镇大井村	1.76	0.60	4.02	0.50	4.35	3.46	重度污染
大理保山片区($n=8$)	施甸县姚关镇摆马村	0.83	0.48	3.80	0.51	0.93	2.84	中度污染
	保山市隆阳区下庄村	0.45	0.34	3.14	0.50	0.60	2.33	中度污染
	腾冲市明光镇顺农村	0.76	0.45	2.65	1.38	1.45	2.10	中度污染
	腾冲市明光镇顺农村	0.98	0.61	1.87	2.26	2.40	2.05	中度污染
	祥云县云南驿北湖村	1.20	0.34	1.12	0.41	2.59	2.00	轻度污染
	弥渡县密祉镇永和村	0.26	0.25	0.44	0.19	0.26	0.37	清洁
	南涧县宝华镇大村	2.95	0.19	1.18	0.30	0.53	2.21	中度污染
	南涧县无量山镇浪泥箐村	0.51	0.29	0.37	0.25	0.53	0.47	清洁
红河玉溪片区($n=20$)	通海县纳古镇五组	1.24	0.70	4.65	0.90	1.71	3.54	重度污染
	通海县四街镇大狮山村	0.68	0.31	2.08	0.55	0.97	1.61	轻度污染
	华宁县青龙镇塘子村	3.72	0.57	3.94	0.46	0.35	3.06	重度污染
	元江县甘庄镇一碗水村	1.06	0.70	1.25	0.70	1.32	1.17	轻度污染
	元江县那诺乡哈施村	1.17	0.44	0.51	0.80	1.83	1.46	轻度污染
	易门县六街镇毛毛凹村	0.96	0.32	0.91	0.38	0.68	0.82	警戒值
	红塔区春和镇黄草坝村	1.55	0.96	2.34	0.99	1.11	1.92	轻度污染
	泸西县白水镇既蔗村	1.45	0.51	4.76	0.06	2.57	3.62	重度污染
	弥勒县弥勒镇小当甸村	0.72	0.45	3.54	0.24	6.94	5.19	重度污染
	弥勒县弥勒镇卫泸普村	1.55	0.58	4.56	0.23	4.50	3.61	重度污染
	开远市灵泉街道三台铺村	2.83	0.55	5.41	0.19	1.38	4.09	重度污染
	建水县青龙镇业租村	1.49	1.18	5.06	1.18	2.31	3.91	重度污染
	石屏县牛街镇扯直村	1.41	1.25	6.66	0.52	3.88	5.09	重度污染
	屏边县新现乡水塘村	0.97	0.41	2.62	0.06	0.91	1.98	轻度污染
	个旧市卡房镇苗寨村	1.97	1.87	6.16	0.87	3.37	4.80	重度污染
	蒙自市冷泉镇泥都底	0.89	0.60	2.01	0.62	1.68	1.64	轻度污染
	泸西县白水镇既蔗村	1.10	0.54	1.97	0.76	0.52	1.55	轻度污染
	石林县石林镇北大村	1.30	0.77	0.60	0.68	1.91	1.54	轻度污染
	晋宁区双河彝族乡田坝村	1.30	0.62	1.22	0.88	1.51	1.33	轻度污染
	师宗县大同镇山外村	0.91	0.89	0.29	0.48	7.43	5.44	重度污染

续表2 各采样点污染指数
Continued table 2 Pollution index of each sampling point

片区 Area	样点位置 Sample position	P_{Cu}	P_{Zn}	P_{Cd}	P_{Pb}	P_{As}	P_c	污染程度 Pollution level
昆明曲靖片区 ($n=14$)	禄劝县九龙镇教务营村	1.21	0.38	2.70	0.75	1.18	2.10	中度污染
	寻甸县倘甸镇打马岭1	2.03	0.36	3.33	0.53	0.69	2.55	中度污染
	寻甸县功山镇三保村	3.64	0.63	3.94	0.62	0.48	3.08	重度污染
	寻甸县倘甸镇打马岭2	3.00	0.39	5.84	0.54	0.41	4.37	重度污染
	马龙区月望乡三间屋村	0.51	0.20	0.75	0.09	0.41	0.59	清洁
	麒麟区东山镇转长河村	1.98	0.45	0.49	0.52	4.50	3.37	重度污染
	麒麟区东山镇法色村	2.53	0.57	2.16	0.42	4.03	3.16	重度污染
	麒麟区次营镇大麦塘村	3.31	0.76	2.55	0.60	2.05	2.68	中度污染
	沾益区播乐乡大海村	0.83	0.37	1.04	0.25	4.17	3.09	重度污染
	沾益区菱角乡卡郎村	1.35	0.56	1.22	0.53	2.66	2.08	中度污染
	宣威市热水镇黎山村	2.19	0.51	1.90	0.16	0.86	1.74	轻度污染
	宣威市热水镇述迤村	3.62	0.63	3.31	0.26	0.82	2.83	中度污染
	富源县后所镇老牛场村	2.65	0.68	3.44	0.43	0.37	2.66	中度污染
	富源县富村镇德胜村	0.58	0.39	0.65	0.20	1.94	1.47	轻度污染

2个处于轻度污染水平、6个处于中度污染水平、5个处于重度污染水平,没有处于警戒值的样点,处于轻度污染及其以上水平的占比为92%。本次调查云南三七种植区4个片区的污染水平依次为红河玉溪片区>昆明曲靖片区>文山片区>大理保山片区。云南省的地理环境复杂,各个地方的成土母质、质地、水质、环境和海拔等地区的差异^[20-22],导致每个地区的重金属污染程度存在一定的差异。

2.2 三七重金属污染评价

2.2.1 三七块根和芦头中重金属含量特征

三七以块根和芦头入药^[1],本研究三七块根和芦头中重金属的含量见表3。60个三七样品块根中重金属的平均含量大小为 $Zn>Cu>As>Pb>Cd$,分别为12.5、3.41、0.77、0.49、0.25 $mg\cdot kg^{-1}$,芦头中重金属的平均含量大小为 $Zn>Cu>Pb>As>Cd$,分别为20.6、

7.59、1.50、0.64、0.36 $mg\cdot kg^{-1}$,总体上芦头的重金属含量高于块根。本研究对三七重金属污染的研究主要参照2020版《中国药典》,其Cu、Cd、Pb、As的标准分别为20、1、5、2 $mg\cdot kg^{-1}$ 。本研究发现三七块根中Cu、Pb含量均低于标准,Cd、As的超标率分别为1.67%、5.00%。芦头中Cu、Cd、Pb、As的超标率分别为1.67%、5.00%、3.33%、1.67%。黄珍华等^[23]调查研究发现三七各部位均存在不同程度的重金属超标现象,块根中Cd的超标率为4.00%,芦头中Cd、As、Pb和Cu的超标率分别为24.0%、4.00%、20.0%和40.0%。赵静等^[24]研究发现三七块根中存在Cd、As超标,超标率分别为29.7%、32.4%。郭婷等^[25]通过调查研究发现三七根系部位的重金属含量存在超标现象且芦头部位高于块根部位。于冰冰^[26]研究发现,不同的植物对重金属元素具有不同的吸收和累积特性,植株不同的

表3 三七各部位重金属含量和超标率

Table 3 Heavy metal concentration and exceeding standard rate of various parts of *Panax notoginseng*

重金属 Heavy metal	块根 Root tuber		芦头 Rhizoma		标准 Standard/ $(mg\cdot kg^{-1})$	超标率 Over-standard rate/%	
	范围 Range/ $(mg\cdot kg^{-1})$	平均值 Average value/ $(mg\cdot kg^{-1})$	范围 Range/ $(mg\cdot kg^{-1})$	平均值 Average value/ $(mg\cdot kg^{-1})$		块根 Root tuber	芦头 Rhizoma
Cu	1.02~7.98	3.41±1.23	1.81~93.8	7.59±10.9	20	0	1.67
Zn	5.85~45.6	12.5±7.02	9.13~80.4	20.6±11.5	20	11.7	33.3
Cd	0.03~1.07	0.25±0.19	0.05~1.29	0.36±0.26	1	1.67	5.00
Pb	0.05~4.25	0.49±0.73	0.10~39.4	1.50±6.33	5	0	3.33
As	0.23~5.50	0.77±0.73	0.18~2.25	0.64±0.43	2	5.00	1.67

器官对不同重金属也有不同的吸收特征,这可能是造成三七块根、芦头中重金属元素含量差异的原因。王朝梁等^[27]调查发现三七中的Cu、Zn含量偏高,其余指标处于正常范围。冯光泉等^[2]通过对三七和栽培土壤中重金属元素的调查发现As的超标率为14.5%,认为杀菌剂和退菌特等农药的施用造成了As元素的超标。本研究的结果与前人一致,芦头中的超标率高于块根部位,各重金属元素有不同的超标现象。

2.2.2 三七重金属风险评价

如表4所示,从单一元素来看,块根和芦头中的Zn、Cd、Pb、As的非致癌风险指数均小于1,但是Cu在芦头中的非致癌风险指数高达2.07,在块根中也达0.93,趋近于1。从单元素来看,块根和芦头中的综合非致癌风险指数分别为1.20和2.33,说明可能存在由重金属引起的综合非致癌风险。块根和芦头中Cd的致癌风险指数均大于 1×10^{-4} ,存在致癌风险,Pb、As的致癌风险指数均小于 1×10^{-4} ,不存在致癌风险。从多元素来看块根和芦头的综合致癌指数为 2.21×10^{-4} 、 2.39×10^{-4} ,均大于限量标准,说明食用块根和芦头存在致癌风险。对于块根和芦头,不同重金属元素对人体健康风险的贡献相似。非致癌风险指数的主要贡献因子为Cu和As,块根中的贡献率分别为77.5%、17.5%,芦头中的贡献率分别为88.8%、6.88%。芦头和块根中重金属元素致癌风险指数的贡献率大小均为Cd>As>Pb,其中最大为芦头中的Cd,贡献率为69.4%。Huang等^[28]研究发现消费者食用三七存在潜在的健康风险。林龙勇等^[3]的研究结果也表明,种植区三七也存在较高的Pb、Cd摄入风

险。综合本研究结果,提示食用三七存在潜在的重金属摄入风险,长期摄入会引发一系列急慢性中毒反应,应当控制三七的摄入量或以提取药效成分服用。但由于三七是保健用品非主要膳食,因此按《中国药典》规定食用即可。

通过图3可以看出,在大理保山片区和文山片区,块根部位中的Cu的非致癌风险指数均大于1,且大理保山片区>文山片区。Cd元素的致癌风险指数为昆明曲靖片区最高,As元素仅在昆明曲靖片区存在致癌风险。由图4可以看出,在4个片区中,芦头部位的Cu元素的非致癌风险指数均大于1,且文山片区>大理保山片区>红河玉溪片区>昆明曲靖片区。4个片区中Cd元素的致癌风险指数大于 1×10^{-4} ,表现为昆明曲靖片区>红河玉溪片区>文山片区>大理保山片区。

3 结论

(1)云南三七种植区土壤处于中度污染的水平,并且已经出现了较为严重的Cu、Cd、As污染问题,4个种植片区的污染水平依次为红河玉溪片区>昆明曲靖片区>文山片区>大理保山片区。

(2)三七块根部位中的Cu、Pb含量低于限量标准,Cd、As含量超标。芦头部位中的Cu、Cd、Pb、As含量均超标,且芦头部位的污染程度高于块根部位。

(3)块根和芦头两个部位的综合非致癌风险指数均大于1,主要的贡献因子为Cu、As两种元素;综合致癌风险指数大于 1×10^{-4} ,主要贡献因子为Cd、As两种元素。食用三七块根和芦头存在潜在的健康风险。

表4 三七中不同重金属的致癌和非致癌风险指数及贡献率

Table 4 Carcinogenic and non-carcinogenic risk indexes and contribution rates of different heavy metals in *Panax notoginseng*

三七器官 Panax notoginseng organ	重金属 Heavy metal	非致癌风险指数 HQ	致癌风险指数 CR	非致癌贡献率 Non-carcinogenic index/%	致癌贡献率 Carcinogenic index/%	综合非致癌 风险指数 HI	综合致癌 风险指数 TCR
块根	Cu	0.93	—	77.5	—	1.20	2.21×10^{-4}
	Zn	0.03	—	2.50	—		
	Cd	0.02	1.26×10^{-4}	1.67	56.9		
	Pb	0.01	3.44×10^{-7}	0.83	0.20		
	As	0.21	9.46×10^{-5}	17.5	42.9		
芦头	Cu	2.07	—	88.8	—	2.33	2.39×10^{-4}
	Zn	0.04	—	1.72	—		
	Cd	0.03	1.66×10^{-4}	1.30	69.4		
	Pb	0.03	9.60×10^{-7}	1.30	0.40		
	As	0.16	7.21×10^{-5}	6.88	30.2		

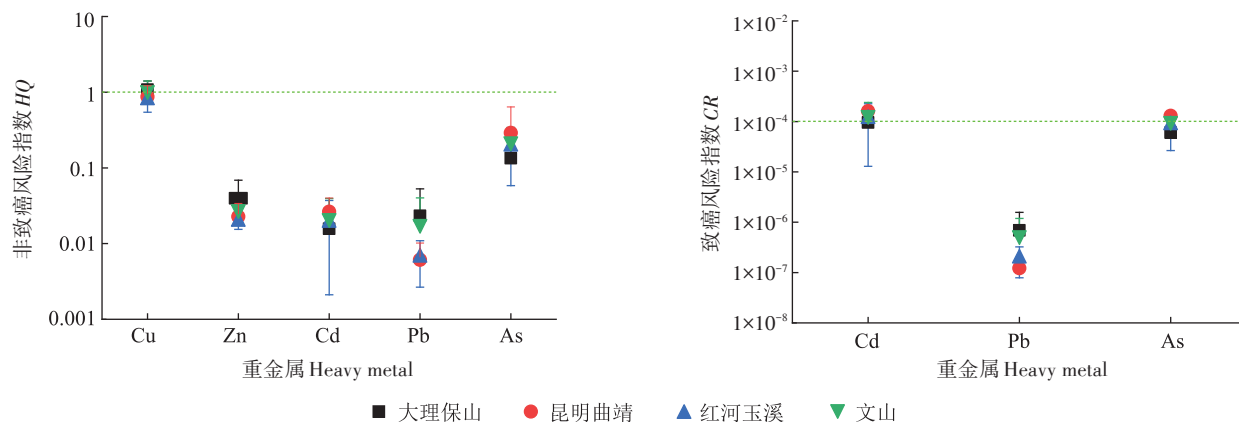


图3 云南4个片区三七块根中非致癌指数和致癌指数

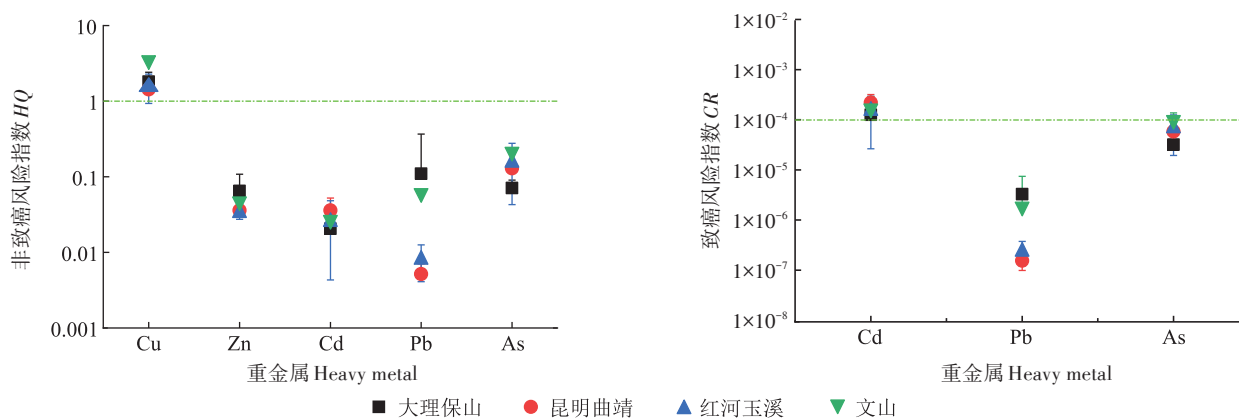
Figure 3 Non-carcinogenic index and carcinogenic index of *Panax notoginseng* root tuber in four area of Yunnan

图4 云南4个片区三七芦头中非致癌指数和致癌指数

Figure 4 Non-carcinogenic index and carcinogenic index of *Panax notoginseng* rhizoma in four area of Yunnan

参考文献:

- [1] 崔秀明, 杨野, 董丽, 等. 三七栽培学[M]. 北京: 科学出版社, 2017. CUI X M, YANG Y, DONG L, et al. *Panax notoginseng* cultivation[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [2] 冯光泉, 张文斌, 陈中坚, 等. 三七及其栽培土壤中几种重金属元素含量的测定[J]. 中草药, 2003, 34(11): 94-97. FENG G Q, ZHANG W B, CHEN Z J, et al. Determination on residues of several heavy metal elements in *Panax notoginseng* and its cultivating soil[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2003, 34(11): 94-97.
- [3] 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): 2868-2875. LIN L Y, YAN X L, LIAO X Y, et al. Accumulation of soil Cd, Cr, Cu, Pb by *Panax notoginseng* and its associated health risk[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(11): 2868-2875.
- [4] 阎秀兰, 廖晓勇, 于冰冰, 等. 药用植物三七对土壤中砷的累积特征及其健康风险[J]. 环境科学, 2011, 32(3): 880-885. YAN X L, LIAO X Y, YU B B, et al. Accumulation of soil arsenic by *Panax notoginseng* and its associated health risk[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(3): 880-885.
- [5] 韩小丽, 张小波, 郭兰萍, 等. 中药材重金属污染现状的统计分析[J]. 中国中药杂志, 2008, 33(18): 2041-2048. HAN X L, ZHANG X B, GUO L P, et al. Statistical analysis of residues of heavy metals in Chinese crude drugs[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2008, 33(18): 2041-2048.
- [6] 高洁, 李淑英, 顾优丽, 等. 杭州市和睦湿地农田蔬菜中Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Ni污染评价及富集特性研究[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2014, 13(4): 386-390. GAO Q, LI S Y, GU Y L, et al. Pollution evaluation and enrichment characteristics of heavy metals in the farmland vegetables in Hemu wetland[J]. *Journal of Hangzhou Normal University(Natural Science Edition)*, 2014, 13(4): 386-390.
- [7] United States Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for superfund, human health evaluation manual (Part A) [R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1989.
- [8] United States Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for superfund volume I : Human health evaluation manual (Part E, supplemental guidance for dermal risk assessment) final[R]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, 2004.
- [9] United States Environmental Protection Agency. Exposure factors handbook chapter 5(Update) : Soil and dust ingestion[R]. Washington DC:

- United States Environmental Protection Agency, 2017.
- [10] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典. 一部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020. Chinese Pharmacopoeia Commission. Chinese pharmacopoeia. 1st volume[M]. Beijing: China Pharmaceutical Science and Technology Press, 2020.
- [11] 左甜甜, 王莹, 张磊, 等. 中药中外源性有害残留物安全风险评估技术指导原则[J]. 药物分析杂志, 2019, 39(10): 1902–1907. ZUO T T, WANG Y, ZHANG L, et al. Guideline of risk assessment of exogenous harmful residues in traditional Chinese medicines[J]. *Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis*, 2019, 39(10): 1902–1907.
- [12] 陈文轩, 李茜, 王珍, 等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2822–2833. CHEN W X, LI Q, WANG Z, et al. Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(6): 2822–2833.
- [13] 杨牧青, 刘源, 黄维恒, 等. 新产区土壤和三七中重金属元素的累积状况[J]. 中国农学通报, 2018, 34(12): 91–97. YANG M Q, LIU Y, HUANG W H, et al. Accumulation of heavy metal elements in soil and *Panax notoginseng* in new producing areas[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(12): 91–97.
- [14] 孙兆帅, 杨野, 崔秀明, 等. 三七及种植土壤重金属含量特征与人体健康风险评价[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2020, 42(4): 750–759. SUN Z S, YANG Y, CUI X M, et al. Characteristics of heavy metal content in *Panax notoginseng* and planting soil and risk assessment of human health[J]. *Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition)*, 2020, 42(4): 750–759.
- [15] 李杰, 战明国, 钟晓宇, 等. 广西典型岩溶地区重金属在土壤-农作物系统中累积特征及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2021, 41(2): 597–606. LI J, ZHAN M G, ZHONG X Y, et al. Distribution and accumulation of heavy metals in soil-crop systems from a typical carbonate rocks area in Guangxi[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(2): 597–606.
- [16] 瞿明凯, 李卫东, 张传荣, 等. 基于受体模型和地统计学相结合的土壤镉污染源解析[J]. 中国环境科学, 2013, 33(5): 854–860. QU M K, LI W D, ZHANG C R, et al. Source apportionment of soil heavy metal Cd based on the combination of receptor model and geostatistics[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(5): 854–860.
- [17] 刘佳, 翟崇治, 许丽萍, 等. 灰霾天气下重庆地区秋冬金属污染特征及来源分析[J]. 生态环境学报, 2015, 24(10): 1689–1694. LIU J, ZHAI C Z, XU L P, et al. Characteristics and sources of metal elements in PM_{2.5} during heavy days in Chongqing during Autumn and Winter[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(10): 1689–1694.
- [18] 史静, 张乃明. 云南设施土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2010, 25(6): 862–867. SHI J, ZHANG N M. The distributing character of heavy metals and its pollution estimate in greenhouse soils of Yunnan Province[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University(Natural Science)*, 2010, 25(6): 862–867.
- [19] 刘娟, 李佳佳, 张乃明, 等. 复合钝化剂对镉污染土壤三七生长及生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2190–2197. LIU J, LI J J, ZHANG N M, et al. Effects of compound passivators on growth and physiological characteristics of *Panax notoginseng* in cadmium-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2190–2197.
- [20] 王玉军, 欧名豪. 徐州农田土壤养分和重金属含量与分布研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1438–1450. WANG Y J, OU M H. Contents and distribution of soil nutrients and heavy metal elements in farmlands of Xuzhou[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(6): 1438–1450.
- [21] 龚仓, 王亮, 王顺祥, 等. 基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2022, 43(10): 4566–4577. GONG C, WANG L, WANG S X, et al. Spatial differentiation and influencing factor analysis of soil heavy metal content at town level based on geographic detector[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(10): 4566–4577.
- [22] 康乐, 彭鑫波, 马延龙, 等. 兰州市耕地表层土壤重金属的积累特征及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2023, 44(3): 1620–1635. KANG L, PENG X B, MA Y L, et al. Accumulation characteristics and influencing factors of heavy metals in cultivated land surface soil in Lanzhou[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(3): 1620–1635.
- [23] 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): 645–653. HUANG Z H, CHEN Z D, SHI H N, et al. Pollution characteristics and risk assessment of soil heavy metals in *Panax notoginseng* planting fields[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(5): 645–653.
- [24] 赵静, 刘勇, 张艾华, 等. 不同产地三七中重金属元素的含量测定及分析[J]. 中国中药杂志, 2014, 39(20): 4001–4006. ZHAO J, LIU Y, ZHANG A H, et al. Determination and analysis of heavy metals content in *Panax notoginseng* of different origination[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2014, 39(20): 4001–4006.
- [25] 郭婷, 何忠俊, 李冬雪, 等. 三七各器官 Cu、Cr、Cd、Pb 含量特征及其健康风险评价[J]. 广东农业科学, 2022, 49(1): 22–29. GUO T, HE Z J, LI D X, et al. Content characteristics and health risk assessment of heavy metals in various organs of *Panax notoginseng*[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2022, 49(1): 22–29.
- [26] 于冰冰. 云南文山三七种植区土壤和三七中砷的分布特征及其健康风险[D]. 南京: 南京农业大学, 2011. YU B B. Arsenic distribution of soil and *Panax notoginseng* in Wenshan County, Yunnan Province and its health risk[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.
- [27] 王朝梁, 陈中坚, 崔秀明, 等. 文山三七的原产地域产品特征[J]. 中国中药杂志, 2004, 29(6): 22–25. WANG C L, CHEN Z J, CUI X M, et al. Characteristics of origin region products of Wenshan *Panax notoginseng*[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2004, 29(6): 22–25.
- [28] HUANG Y, TENG Y, ZHANG N, et al. Human health risk assessment of heavy metals in the soil: *Panax notoginseng* system in Yunnan Province, China[J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2018, 24(5): 1312–1326.

(责任编辑: 李丹)