

## 人参属来源中药材重金属污染的研究进展

王成霖<sup>1,2,3</sup>, 张战领<sup>2</sup>, 华欣<sup>3</sup>, 张勇洪<sup>1</sup>, 郑兰兰<sup>1</sup>, 薛哲勇<sup>3</sup>, 刘娟<sup>2\*</sup>, 李琛<sup>1\*</sup>

1. 湖北医药学院基础医学院, 药用植物及进化遗传学十堰市重点实验室, 胚胎干细胞研究湖北省重点实验室, 湖北 十堰 442000
2. 中国中医科学院中药资源中心, 道地药材品质保障与资源持续利用全国重点实验室, 北京 100700
3. 东北林业大学生命科学学院, 黑龙江 哈尔滨 150006

**摘要:** 人参属植物是中药重要来源种属之一, 包含人参 *Ginseng Radix et Rhizoma*、三七 *Notoginseng Radix et Rhizoma*、西洋参 *Panaxis Quinquefolii Radix*、珠子参 *Panaxis Majoris Rhizoma*、竹节参 *Panaxis Japonici Rhizoma* 等名贵中药, 但其重金属污染问题严重影响了药材质量与进出口贸易。通过对近 30 年本领域相关文献与数据进行系统整理, 以《中国药典》2020 年版为标准, 对不同地区的人参、三七、西洋参、珠子参、竹节参中铜、铅、砷、镉、汞 5 种重金属污染现状进行总结。结果表明, 目前人参属来源中药材的重金属检测方法多为电感耦合等离子体-质谱法等传统仪器检测方法, 未来可以进一步开发更快速、更便捷、更灵敏的新型重金属检测方法。同时, 针对重金属污染的消减措施方面, 应从种植源头、运输及加工等减少重金属污染, 提高人参属来源中药材的质量与用药安全。

**关键词:** 人参属; 人参; 三七; 西洋参; 重金属污染; 检测技术; 重金属修复; 安全评估

中图分类号: R282 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2025)02-0696-13

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.02.030

## Research progress on heavy metal contamination from Chinese herbal medicines originated from *Panax* genus

WANG Chenglin<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Zhanling<sup>2</sup>, HUA Xin<sup>3</sup>, ZHANG Yonghong<sup>1</sup>, ZHENG Lanlan<sup>1</sup>, XUE Zheyong<sup>3</sup>, LIU Juan<sup>2</sup>, LI Chen<sup>1</sup>

1. Shiyan Key Laboratory of Medicinal Plants and Evolutionary Genetics, Hubei Key Laboratory of Embryonic Stem Cell Research, School of Basic Medicine, Hubei University of Medicine, Shiyan 442000, China
2. State Key Laboratory for Quality Assurance and Sustainable Use of Dao-di Herbs, National Resource Center for Chinese Materia Medica, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100700, China
3. College of Life Sciences, Northeast Forestry University, Harbin 150006, China

**Abstract:** The *Panax* genus is a crucial source of Chinese herbal medicines, including valuable species like Renshen (*Ginseng Radix et Rhizoma*), Sanqi (*Notoginseng Radix et Rhizoma*), Xiyangshen (*Panaxis Quinquefolii Radix*), Zhuzhishen (*Panaxis Majoris Rhizoma*), Zhujieshen (*Panaxis Japonici Rhizoma*) and other valuable Chinese herbs. However, heavy metal contamination poses a significant challenge, severely impacting the quality of these medicinal materials and their domestic and international trades. This paper systematically reviews the relevant literature and data from the past 30 years, summarizing the current status of contamination by five heavy metals — copper, lead, arsenic, cadmium, and mercury — in *Ginseng Radix et Rhizoma*, *Notoginseng Radix et Rhizoma*, *Panaxis Quinquefolii Radix*, *Panaxis Majoris Rhizoma* and *Panaxis Japonici Rhizoma* from different regions, using the 2020 edition of the *Pharmacopoeia of the People's Republic of China* as the standard. The results show most methods for detecting heavy metals in *Panax* genus and related Chinese herbal medicines rely on traditional instrumental techniques like ICP-MS at present. In the future, faster, more convenient, and more sensitive detection methods should be developed. Additionally, to mitigate heavy metal contamination,

收稿日期: 2024-08-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (82373987); 中国中医科学院科技创新工程项目 (CI2023E002, CI2024C007YN)

作者简介: 王成霖, 硕士研究生, 研究方向为药用植物学。E-mail: wangcl0210@126.com

\*通信作者: 刘娟, 副研究员, 从事药用植物与分子生物学研究。E-mail: juanliu126@126.com

李琛, 教授, 从事药用植物学研究。E-mail: lee.childe@qq.com

efforts should focus on reducing heavy metal content at the source — during cultivation, transportation, and processing — to enhance the quality and safety of *Panax*-based Chinese herbal medicines.

**Key words:** *Panax* L.; *Ginseng Radix et Rhizoma*; *Notoginseng Radix et Rhizoma*; *Panacis Quinquefolii Radix*; heavy metal contamination; detection techniques; heavy metal repair; safety assessment

人参属药用植物隶属于五加科，是我国传统名贵中药材的重要来源，在我国境内分布有 10 个种，均可入药，在中医药体系中占据核心地位，如人参、三七、西洋参、珠子参、竹节参等<sup>[1]</sup>。人参属来源中药材在中医临床中应用广泛，具有滋补强身、抗疲劳、提升免疫力等药用功效<sup>[2]</sup>。然而，由于人参属植物生长缓慢且自然繁殖周期长，加之过度采摘和环境破坏的威胁，导致其自然种群数量逐年减少，因此国家对该属植物实施了严格的保护措施。根据 2021 年新颁布的《国家重点保护野生植物名录》，除西洋参外的所有人参属植物均被列为国家二级重点保护野生植物<sup>[3-4]</sup>。

随着现代农业、工业及城市化的快速发展，人参属等药用植物的生长环境面临严重的重金属污染问题，铜 (Cu)、铅 (Pb)、砷 (As)、镉 (Cd)、汞 (Hg) 等重金属污染是导致人参属来源中药材质量降低的主要原因之一，严重影响其相关制品的安全性及有效性<sup>[5]</sup>。近年来，我国因重金属含量超标导致出口的人参等中药材被退回或销毁的事件时有发生，对我国中医药行业造成了严重的经济损失，也影响了我国中药材出口的国际声誉<sup>[6]</sup>。因此，研究者对中药材重金属问题开展研究并寻找解决方案，尤其在人参属来源的中药材人参、三七、西洋参的重金属检测、寻找超标原因和解决方案上进行了大量工作。本文对不同产地人参属来源中药材的重金属污染现状、种植土壤污染状况、检测技术、重金属超标原因及解决策略进行全面总结，为人参属来源中药材重金属的标准制定、快速检测及重金属的消减方法等提供基础信息，为提高人参属来源中药材的用药安全奠定基础。

## 1 限量标准

不同国家、地区和组织对中药材重金属含量制定了具体的限制，以确保这些药材在使用过程中的安全性。国家中医药管理局于 2001 年颁布实施《药用植物及制剂进出口绿色行业标准》<sup>[7]</sup>，该标准明确了中药材中重金属的限量指标，如重金属总量 $\leq 20.0$  mg/kg、Pb $\leq 5.0$  mg/kg、Cd $\leq 0.3$  mg/kg、Hg $\leq 0.2$  mg/kg 等。这一标准的出台，为中药材的重金属限量

提供了明确的依据。中国医药保健品进出口商会、中国医学科学院等对上述标准进行修订，并于 2005 年颁布《药用植物及制剂外经贸绿色行业标准》<sup>[8]</sup>，主要更新中药材重金属限量的指标检验方法，而中药材重金属限量标准并无差异。2008、2009 年国家质量监督检验检疫总局分别颁布国家标准《地理标志产品 文山三七》与《地理标志产品 吉林长白山人参》<sup>[9]</sup>，分别限定对长白山野山参及文山三七的重金属限量，其中野山参 Pb $\leq 0.5$  mg/kg、Cu $\leq 20$  mg/kg，而文山三七 Pb $\leq 5$  mg/kg，Cu 未作限量要求。这 2 个国家标准的颁布有助于保护和提升具有地域特色的中药材的质量，并支持地方经济的发展。2020 年，由吉林省卫生健康委员会颁布的地方标准《食品安全地方标准 食品原料用人参》对 Hg 标准限量较严格为 $\leq 0.06$  mg/kg，但对 As 及 Cu 未作出限量。此外，我国香港、澳门和台湾地区也制定了相应的中药材重金属限量标准，其中澳门对人参属等中成药的重金属限量标准为 Pb $\leq 20$  mg/kg、As $\leq 5$  mg/kg、Hg $\leq 0.5$  mg/kg、Cu $\leq 150$  mg/kg，均高于内地标准<sup>[1,10]</sup>。具体重金属限量标准见表 1。

《中国药典》作为中药材质量控制的权威规范，历版中都涉及重金属限量的要求，尤其是从 2015 年版开始，对中药材的重金属限量进行了更为系统和全面的规定。《中国药典》2020 年版<sup>[11]</sup>进一步对一些药材的重金属进行了限定，如对人参属的三七、人参、西洋参及竹节参，提出了明确的检测要求和限量标准，具体限量标准为 Pb $\leq 5$  mg/kg、Cd $\leq 1$  mg/kg、As $\leq 2$  mg/kg、Hg $\leq 0.2$  mg/kg、Cu $\leq 20$  mg/kg。与《中国药典》2015 年版相比，其中 Cd 的限制由 0.3 mg/kg 提高至 1.0 mg/kg，其余人参属重金属限量无差异。

除中国外，其他国家或国际组织也对人参属中药材或其制品中的重金属进行限量。如 2015 年国际标准化组织 (International Organization for Standardization, ISO) 公布的国际标准<sup>[12]</sup>，规定人参属中药材的重金属限量标准为 Pb $\leq 10$  mg/kg、Cd $\leq 2$  mg/kg、As $\leq 4$  mg/kg、Hg $\leq 3$  mg/kg，均高于国内外大多数重金属限量标准。《日本药典》规定人参重

表 1 国内重金属限量标准

Table 1 Domestic heavy metal limit standards

标准	适用对象	重金属限量/(mg·kg <sup>-1</sup> )				
		Pb	Cd	As	Hg	Cu
《中国药典》2020 年版	人参-西洋参-三七-竹节参	5.0	1.0	2.0	0.2	20
国家标准 GB/T 19506-2009 《地理标志产品 吉林长白山人参》	野山参	0.5	0.5	2.0	0.1	20
国家标准 GB/T 19086-2008 《地理标志产品 文山三七》	文山三七	5.0	0.5	2.0	0.1	—
DBS22/024-2020 《食品安全地方标准 食品原料用人参》	人参	0.5	0.5	—	0.06	—
团体标准 T/CATCM 001-2018 《无公害人参药材及饮片农药与重金属及有害元素的最大残留限量》	人参药材及饮片	0.5	0.5	1.0	0.1	20
WM2—2001 《药用植物及制剂进出口绿色行业标准》	人参属药用植物及制剂	5.0	0.3	2.0	0.2	20
《香港中药材标准》	人参	5.0	1.0	2.0	0.2	—
第 23/ISAF/2022 号批示 中成药重金属及有毒元素含量、微生物限度和农药残留限量标准规范	人参属外用中成药	20	—	5.0	0.5	150
卫部中字第 1051861110 号令 中药材含重金属限量基准	人参属等中药材	5.0	1.0	3.0	0.2	—

“—” -未作限量，下同。

“—” - not limited, same as below.

金属总量不得超过 15 mg/kg，As 含量不高于 2 mg/kg，其余重金属未作出限定。美国、欧洲等药典对 Pb 的规定与《中国药典》2020 年版一致，均不高于 5 mg/kg，而马来西亚国家卫生部标准与 ISO 国际标准一致，为不高于 10 mg/kg。美国、韩国、德国、马来西亚对 Cd 的限量规定均低于《中国药

典》2020 年版，最大限量分别为 0.5、0.3、0.2、0.3 mg/kg；而欧洲药典与《中国药典》2020 年版一致。马来西亚对 As 与 Hg 的限量规定均为《中国药典》2020 年版的 2.5 倍。然而美国、韩国等大多数国家，及 ISO 等组织未对 Cu 作出限量<sup>[10,13-14]</sup>。具体重金属限量标准见表 2。

表 2 国外重金属限量标准

Table 2 Foreign heavy metal limit standards

标准	适用对象	重金属限量/(mg·kg <sup>-1</sup> )				
		Pb	Cd	As	Hg	Cu
ISO 国际标准	人参属等中药材	10.0	2.0	4.0	3.0	—
美国药典	人参属植物药	5.0	0.5	2.0	1.0	—
欧洲药典	人参属草药	5.0	1.0	—	0.1	—
韩国药典	人参属植物药	5.0	0.3	3.0	0.2	—
德国药典	人参属草药	5.0	0.2	5.0	0.1	—
日本药典	人参	—	—	2.0	—	—
马来西亚国家卫生部	人参属中药产品	10.0	0.3	5.0	0.5	—

## 2 不同地区污染现状

本文以“人参属中药名+重金属中文名称”和“人参属中药名+元素符号”作为关键词，通过中国知网 (CNKI)、PubMed、美国国立生物技术信息中心 (NCBI) 等数据库进行检索，对人参属道地产区重金属污染相关的文献进行筛选和统计，排除重金属胁迫类文章，及只进行方法学研究而没有重金属含量数据的文章，共筛选得到 116 篇相关文献，其中三七与人参相关文献报道相对较多，分别为 53、39 篇，西洋参、竹节参、珠子参相关文献报道相对

较少，分别为 22、4、5 篇 (图 1)。根据人参属不同产区进行分类统计，明确来自人参道地产区吉林的相关文献有 22 篇，明确来自三七道地产区云南的相关文献有 37 篇，明确来自西洋参主要产区我国吉林和山东及加拿大的相关文献分别有 7、6、6 篇，竹节参、珠子参相关文献分别有 4、5 篇。从检索数据可见，对于人参及三七重金属残留问题的研究自 20 世纪 90 年代以来便已引起关注，而对于西洋参重金属残留问题的关注较晚。自 1994 年首篇中文人参属重金属含量研究论文发布至今，相关文

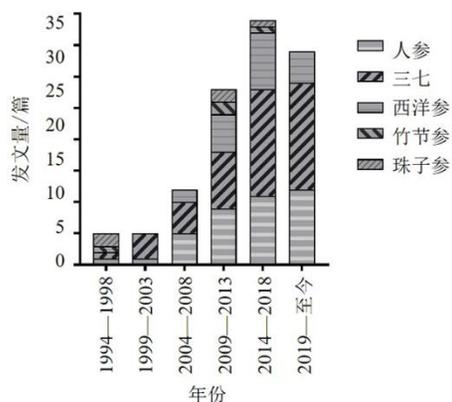


图1 近年有关人参重金属残留研究文献统计

Fig. 1 Literature statistics of heavy metal residues in *Panax* genus in recent years

章发布数量逐年增加，特别是近 10 年的发文总量为 67 篇，占全部文献的 64%，反映了对该领域的关注度持续增高。此外，鉴于不同道地产区的人参属中药材在药用价值和市场认可度上所具有的显著优势，本文以《中国药典》2020 年版中的规定为依据，对不同产地的人参、三七及西洋参中的重金属污染情况进行统计评估。

### 2.1 人参不同地区重金属含量分析

吉林、辽宁省作为人参道地产区的代表，凭借

优越的自然条件和成熟的种植技术，持续生产出高质量的人参。通过对 1994—2024 年吉林省人参样本数据的统计，明确记载 Cu 样本数 639 份，均未超标；Pb 样本数 656 份，超标率为 1.98%；As 样本数 411 份，超标率为 0.24%；Cd 样本数 643 份，超标率为 1.56%；Hg 样本数 301 份，超标率最高，达到 7.64%。相比之下，辽宁地区人参样本数相对较少，明确记载 Cu、Pb、As、Cd、Hg 含量样本数分别为 68、71、71、66、71，其中 As、Hg 存在超标情况，超标率分别为 1.41%、9.86%。此外，对于其他未明确产地或产地数量过少的人参样本，统一归为其他地区，记载 Cu、Pb、As、Cd 含量样本数分别为 208、223、140、211，均未超标情况，但 Hg 样本数为 124 份，超标率为 0.806%。根据检索数据可知，人参样本中 Cu 未出现超标情况，而吉林和辽宁地区所产人参中药材的 Hg 超标较为严重，Hg 质量分数在 0~0.243 mg/kg。此外，吉林地区人参 Pb、Cd 含量及辽宁地区人参 As 含量超标也相对较高，最高分别为 5.78、0.32、2.87 mg/kg。因此，在种植过程中要着重加强对 Hg 的检测及控制，同时对于 Pb、Cd、As 的检测也不可忽视。见表 3<sup>[15-53]</sup>。

表3 不同地区人参属药材重金属超标情况

Table 3 Exceedances of heavy metals in *Panax* genus herbs in different regions

药材	产地	Cu		Pb		As		Cd		Hg	
		样本数	超标率/%								
人参	吉林	639	0	656	1.98	411	0.24	643	1.56	301	7.64
	辽宁	68	0	71	0	71	1.41	66	0	71	9.86
	其他	208	0	223	0	140	0	211	0	124	0.806
三七	云南	847	6.85	975	4.21	933	9.86	906	8.06	384	2.34
	其他	134	1.49	161	9.94	148	3.38	130	1.54	74	0
西洋参	国内	422	0	414	0	398	0	456	0	420	1.67
	国外	64	0	58	0	58	0	58	0	58	0
竹节参	/	26	0	15	0	15	0	18	0	15	0
珠子参	陕西	41	63.41	41	12.20	16	0	19	0	26	19.23
	其他	28	39.29	25	13.04	12	0	16	0	12	8.33

“/” 未记载产地。

“/” no origin recorded.

### 2.2 三七不同地区重金属含量分析

本文检索得到三七道地产区为云南省的相关文献有 37 篇，占相关文献总数 71%，明确记载 Cu 样本数 847 份，超标率为 6.85%，质量分数最高为 32.3 mg/kg；Pb 样本数 975 份，超标率为 4.21%，

质量分数最高为 42.93 mg/kg，超出《中国药典》2020 年版规定值的 8 倍多；As 样本数 933 份，超标率为 9.86%，质量分数最高为 25.28 mg/kg，超出规定值 10 倍多；Cd 样本数 906 份，超标率为 8.06%，质量分数最高为 5.50 mg/kg，超出规定值 5 倍多；Hg 样

本数 384 份, 超标率为 2.34%, 质量分数最高为 1.07 mg/kg, 为规定值的 5 倍。其余三七样本产自广西、贵州等地, 明确记载 Cu、Pb、As、Cd、Hg 含量的样本数分别为 134、161、148、130、74, 除 Hg 外, 其余均存在不同程度的超标现象, 其中 Pb 超标率最高, 为 9.94%, 其次 As 超标率为 3.38%, Cd、Cu 超标率相对较低, 分别为 1.54%、1.49%。见表 3<sup>[54-106]</sup>。

### 2.3 西洋参不同地区重金属含量分析

西洋参原产于加拿大及美国, 在我国主要产地有吉林、北京、山东等, 由于产地分布广泛且各地样本数相对较少, 因此本文将样本分成国内及国外 2 部分进行探讨。国内明确记载 Cu、Pb、As、Cd、Hg 含量的样本数分别为 422、414、398、456、420, 除 Hg 外, 其余重金属含量均未超标。相比之下, 国外明确记载样本数较少, Cu 含量的样本数为 64 份, Pb、As、Cd、Hg 含量的样本数为 58 份, 且均未超标情况。整体来看, 无论国内还是国外样本, 西洋参重金属含量超标情况尚好, 但仍然需要加强对 Hg 的监管。见表 3<sup>[17,22,33,46,51,105-121]</sup>。

### 2.4 竹节参及珠子参不同地区重金属含量分析

竹节参主要分布于湖北、江西、陕西等地, 珠子参属其变种之一。《中国药典》2020 年版中并未对竹节参及珠子参重金属进行限量标准, 因此以人参重金属限量标准对其进行分析。经检索得到明确记载竹节参 Cu、Pb、As、Cd、Hg 含量的样本数分别为 26、15、15、18、15, 均为超标。产自陕西珠子参的相关文献有 4 篇, 明确记载 Cu 含量的样本数 41, 超标率 63.41%, 质量分数为 1~72 mg/kg; Pb 样本数 41, 超标率 12.20%, 质量分数为 0.10~12.31 mg/kg; Hg 样本数 26, 超标率 19.23%, 质量分数为 0.01~9.32 mg/kg; As、Cd 样本数分别为 16、19, 均未超标。其余珠子参样本产自云南、四川等地, 明确记载 Cu、Pb、Hg 样本数分别为 28、25、12, 超标率分别为 39.29%、13.04%、8.33%,

As、Cd 样本数分别为 12、16, 均未超标。整体来看, 竹节参相关研究较少, 目前暂无重金属超标情况, 但仍需对其进行监管。此外, 珠子参在不同地区的 Cu、Pb、Hg 含量超标率较高, 特别是 Cu, 建议加强对这些中药材产地的环境监管和土壤重金属含量监测。见表 3<sup>[122-130]</sup>。

## 3 人参属来源中药材种植土壤重金属现状

由于长期过量使用农药、化肥, 并伴随工业废弃物的大量排放, 导致重金属在土壤中不断积聚, 进而引发土壤污染, 这种污染最终可能通过富集作用使人参属的药用植物重金属超标。因此, 本文以“人参属中药名+土壤+重金属中文名称”和“人参属中药名+土壤+元素符号”作为关键词, 对有关人参属植物的土壤重金属污染进行文献统计, 共统计得到 43 篇相关文献。绝大多数为人参及三七根际土壤的相关报道, 分别有 11、28 篇, 西洋参 2 篇, 竹节参及珠子参均为 1 篇。本文以《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(以下简称《土壤环境质量标准》)<sup>[13]</sup>作为标准, 对人参属中的土壤重金属污染情况进行统计评估。

### 3.1 人参种植土壤重金属含量分析

经查询统计得到的人参种植土壤 pH 值为 5.67~6.37, 根据《土壤环境质量标准》中筛选值 Cd≤0.3 mg/kg、As≤40 mg/kg、Pb≤90 mg/kg、Hg≤1.8 mg/kg、Cu≤50 mg/kg, 上述重金属含量按超标率排序为 Cd>Hg>Cu>As>Pb, 其中 Cd 的超标率最高, 为 10.54%, 质量分数为 0~3 mg/kg; Hg 的超标率为 3.94%, 质量分数为 0.003~2.18 mg/kg; Cu 超标率为 1.64%, 质量分数为 0.008 8~205 mg/kg; As、Pb 均未超标。见表 4<sup>[26-29,32-34,132-134]</sup>。

### 3.2 三七种植土壤重金属含量分析

经查询统计得到的三七种植土壤 pH 值为 5.5~6.4, 根据《土壤环境质量标准》中筛选值, 上述重金属超标情况严重, Cd 的超标率高达 65.06%, 最高质

表 4 人参属药材种植土壤重金属超标情况

Table 4 Exceedances of heavy metals in soil for *Panax* genus herbs

土壤来源	pH	Cu		Pb		As		Cd		Hg	
		样本数	超标率/%								
人参种植区	5.67~6.37	305	1.64	698	0	547	0	588	10.54	508	3.94
三七种植区	5.5~6.4	525	40.19	747	12.31	826	31.72	664	65.06	397	15.87
西洋参种植区	5.5~7.0	25	0	5	0	25	0	25	0	5	0
珠子参种植区	5.87~6.92	10	0	10	0	10	0	10	20	10	10
竹节参种植区	5.98	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0

量分数为 7.47 mg/kg; Cu 的超标率高达 40.19%, 最高质量分数为 356 mg/kg; As 的超标率高达 31.72%, 最高质量分数为 310.4 mg/kg; Hg 的超标率高达 15.87%, 最高质量分数为 3.5mg/kg; Pb 的超标率高达 12.31%, 最高质量分数为 330 mg/kg。与全国平均土壤背景值相比, Cd、Cu、As、Hg、Pb 分别为全国背景值的 101、17.8、33.74、87.5、13.98 倍, 表明三七种植土壤均受到严重污染且存在不断累积的现象。这一结果与 Huang 等<sup>[135]</sup> 对全国范围内土地重金属污染现状的研究相近, 进一步证实了三七种植区土壤污染的严重性。见表 4<sup>[72,74,78,81,83-84,88-89,91-92,94,97,100,135-144]</sup>。

### 3.3 西洋参种植土壤重金属含量分析

关于西洋参土壤重金属含量的研究相关文献相对较少, 样本数量也较为有限。Cd、Hg、Cu、As、Pb 的样本数分别为 25、5、25、25、5, 经查询统计得到的西洋参种植土壤 pH 值为 5.5~6.2, 参考《土壤环境标准》中的筛选值, 这些土壤样本中的重金属含量均未超标。值得注意的是, Cd、Hg 的含量均超过全国平均土壤背景值, 且 84% 的西洋参样本 Cd 含量接近土壤筛选值, 因此, 需加强对土壤 Cd 污染监测和管理, 确保土壤安全。见表 4<sup>[33,145]</sup>。

### 3.4 竹节参及珠子参种植土壤重金属含量分析

关于竹节参及珠子参种植土壤重金属的相关文献均为 1 篇, 分别为 2010、2014 年发表。竹节参种植土壤 pH 为 5.98, 所测土壤样本数均为 15 份且均未超标。与全国平均土壤背景值相比, 仅竹节参样本 Hg 质量分数 (0.07 mg/kg) 高出全国 Hg 背景值 (0.04 mg/kg) 的 1.75 倍, 种植土壤安全。珠子参种植土壤 pH 为 5.87~6.92, 所测土壤样本数均为 10 份, Cd 质量分数为 0~1.98 mg/kg, 超标率为 20%; Hg 质量分数为 0.107~0.365 mg/kg, 超标率为 10%; 其余均未超标。建议对珠子参的种植土壤进行进一步的改良和监测, 以确保其生长环境和最终产品的安全。见表 4<sup>[130,146]</sup>。

## 4 检测技术现状

重金属难降解的特性使其在环境中持续存在, 且容易通过食物链逐级富集, 最终进入人体。这一过程对食品安全尤其是中药安全构成了严峻挑战。中药作为传统医学的重要组成部分, 在治疗疾病和保健方面发挥了重要作用, 一旦受到重金属污染, 将严重影响其疗效和安全性, 对人类健康构成威胁。因此, 及时、准确分析和检测中药中的重金属

含量, 不仅是保护消费者健康的必要措施, 也是维护中药安全的基本要求。本研究还对人参属植物的重金属分析检测方法进行文献统计, 主要集中于传统的重金属分析检测方法, 以“人参属中药名+检测方法全称”和“人参属中药名+检测方法缩写”作为关键词, 在排除与重金属检测无关文章后, 共统计 97 篇相关文献, 其中涉及人参、三七、西洋参的文献为 30、49、19 篇。

### 4.1 紫外-可见分光光度法 (ultraviolet-visible spectroscopy, UV-Vis)

UV-Vis 的原理为大多数重金属在紫外-可见光区域内不直接吸收光, 但其可通过与特定显色试剂反应生成有色化合物, 在紫外-可见光范围内会有特定的吸光度, 最终通过测量这些有色化合物在特定波长下的吸光度, 可以确定样品中重金属的浓度<sup>[147]</sup>。该方法操作简便、灵敏性高, 但该方法选择性较低, 难以区分不同的化合物且抗干扰能力差。该方法在人参和西洋参重金属的相关文章中仅有 4 篇报道<sup>[22-23,48,51]</sup>, 主要用于 2008—2013 年, 且均集中于对重金属总含量的测定, 并未对特定重金属进行单独分析。目前该方法已不是主流检测方法。

### 4.2 原子吸收光谱法 (atomic absorption spectroscopy, AAS)

AAS 是先将待测样品溶液原子化, 生成基态原子, 当光源发出的光通过原子蒸气时, 基态原子会吸收特定波长的光, 通过检测光强度的减弱程度, 最终定量分析样品中待测重金属元素的含量, 此外, 该方法因其高灵敏度、高选择性和相对较低的干扰而广泛用于环境分析、食品检测等领域<sup>[147]</sup>。适用于测定可形成气态氢化物或易于原子化的金属元素, 如 As、Hg、Pb 等, 但与其他技术相比, 该方法的样品准备及分析过程相对较长且不能对多元素同时分析。从 2004 年发表的对三七中 Cu 含量测定的第 1 篇报道至今<sup>[54]</sup>, 共有 24 篇人参属相关文章应用该方法。该方法在近 3 年来的应用频率有所下降, 但由于其操作简便、成本相对较低, 仍然是一个十分重要的检测技术。

### 4.3 原子荧光光谱法 (atomic fluorescence spectrometry, AFS)

将待测样品溶液进行原子化处理, 使其转化为气态基态原子并暴露在特定波长的激发光下, 使这些基态原子吸收光源发出的激发光, 从而跃迁到激发态, 激发态原子在返回基态的过程中, 释放出特

定波长的荧光；最终通过荧光检测器测量荧光强度进而求得重金属含量<sup>[148]</sup>，称为 AFS。该方法具有极高的灵敏度，能够检测到极低浓度的元素，且与 AAS 相比，AFS 具有较低的背景干扰，也适用于多种元素的分析，但该法应用范围有限，多用于测量 Hg、As、Zn、Cd 等元素<sup>[149]</sup>，在人参属中应用较少，仅有 6 篇报道<sup>[15,24,81,93,97,121]</sup>。

#### 4.4 电感耦合等离子体原子发射光谱法 (inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy, ICP-AES)

ICP-AES 核心在于利用高温等离子体激发样品中的原子，进而通过光谱分析测量元素发射的特征光谱线<sup>[150]</sup>。该方法能够同时分析多种元素、且具有高灵敏度和低背景干扰的特点，在痕量元素分析中表现出色，是目前多元素同时分析的有效方法之一<sup>[149]</sup>。但该设备昂贵且对样品制备要求高，对于一些高挥发性的元素（如 Hg）可能会在雾化过程中损失，导致测量不准确。尽管 ICP-AES 技术已被广泛用于植物样品的重金属分析，但在人参属重金属含量测量方面相关文献相对较少。

#### 4.5 电感耦合等离子体质谱法 (inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)

ICP-MS 是一种高灵敏度的分析痕量元素分析工具；利用 ICP 将样品离子化，并通过质谱对这些离子进行高精度分析<sup>[151]</sup>。该方法具有极高的灵敏度和多元素检测能力，并且可以分辨并分析元素的不同同位素。但对于 Hg 的分析，需要使用专门的技术或配置，如冷蒸气化学或结合冷蒸气的 ICP-MS，以避免汞的挥发性导致的测量损失。该方法目前是人参属重金属含量测定最常用的方法。

#### 4.6 其他检测方法

由于高效液相色谱法 (high performance liquid chromatography, HPLC) 分离机制的限制及络合剂的选择不多等原因，HPLC 通常不直接用于检测重金属而是与 AAS、ICP-MS 等技术进行联用，因此在人参属植物的研究中应用极少，仅有 1 篇相关文献报道<sup>[152]</sup>。此外激光诱导击穿光谱法在人参属植物研究中的应用也较少，仅有 2 篇相关文献报道<sup>[25,153]</sup>。除传统检测方法外，目前一些新兴的快速检测法，如生物传感器<sup>[154]</sup>、纳米材料<sup>[155]</sup>、免疫分析法<sup>[156]</sup>等，这些方法具有检测速度快、灵敏度高、便于携带的优点，但由于缺乏明确的生物标志物或根据所选用生物活性物质的不同，导致开发困难且稳定性不

高，限制了此类方法在重金属检测中的实用性，目前在人参属中药材中应用较少。

### 5 超标原因

在人参属中药材生长过程中，重金属的来源可从自然因素、人为因素和植物自身特性 3 方面考察。自然因素中，地质条件是决定土壤中重金属含量的关键因素之一，由于地质条件、矿产资源等原因，种植人参属等药用植物的土壤本身存在较高的重金属含量<sup>[94]</sup>。如三七道地产区云南省存在丰富的矿产资源，土壤中自然存在的重金属浓度往往较高，可能会导致三七根系吸收较多的重金属<sup>[81,97]</sup>。此外，研究发现人参中 As 超标可能是由于该地土壤含 As 量较高所造成的<sup>[15,28]</sup>。

其次，人为因素是造成人参属等中药材重金属污染的重要因素之一。工业污染、不当使用农药和化肥及加工储存等人为因素均可能导致药用植物的重金属含量增加<sup>[157]</sup>。工业污染可能通过大气沉降使药用植物表面及其组织中累积重金属，黄珍华等<sup>[74]</sup>推测 Hg 可能通过污染大气沉降在三七叶表面积累，并迁移至茎，从而富集更多的 Hg。此外，不当使用含重金属的农药和化肥，如硫酸铜和波尔多液，可能导致药用植物中重金属的残留，冯光泉等<sup>[91]</sup>研究表明三七中 As 污染主要来自含砷农药的使用。人参属中药材在加工储存过程中也可能受到重金属污染，曾宪彩等<sup>[95]</sup>发现三七在清洗不彻底的情况下可能会有重金属超标，提出流水冲洗可以有效减少这种污染。左甜甜等<sup>[111]</sup>指出西洋参中 Hg 超标可能是由于炮制过程不规范所致，但目前缺乏不同炮制方法对人参属药材重金属残留影响的相关研究。

最后，植物自身的特性也在一定程度上决定了其对重金属的吸收和富集能力，不同的植物品种或不同部位对重金属的富集程度各异，这影响了药材的安全性<sup>[157]</sup>。研究表明三七中 Cd 的含量与土壤中 Cd 的含量呈显著正相关，且三七地下部分对 Cd 的富集能力较强，富集系数大于 1，而对 Cu、Pb、As 及 Hg 的富集能力较弱<sup>[81,83,139]</sup>。此外，重金属 Cu、Pb、As、Cd、Hg 在三七中不同器官的累计也存在一定差异，总体表现为地下部分的含量大于地上部分，杨牧青等<sup>[81]</sup>发现三七块茎对 Cd 的富集能力强于叶片部分，冯光泉等<sup>[91]</sup>研究表明 As、Hg、Pb 主要表现为吸附在根表皮。目前，虽然已有一些研究探讨了人参属中药材中重金属的富集情况，但关于其具体机制、不同生长时期及株龄的迁移规律仍需

进一步深入研究。

## 6 解决策略

### 6.1 土壤修复及农艺改进

人参属等药材在生长过程中对土壤环境有着较高的依赖性，因此通过有效的土壤改良措施及农艺改进可以减少重金属的污染，并显著提高药材的品质。使用改良剂改变土壤的理化性质，从而有效地降低土壤中重金属的生物有效性，最终减少植物对这些重金属的吸收。李瑞月等<sup>[158]</sup>研究表明生物质炭（麦秸炭）和钙镁磷肥能降低三七种植土壤中有有效 Cd 的含量，降低三七对 Cd 的吸收，并且还能够促进三七的生长；但有机肥（禽类粪便）对三七中 Cd 的生物量无影响。刘云芝等<sup>[159]</sup>提出使用生石灰、粉煤灰等 3 种改良剂处理三七种植土壤，能降低三七块根中 Pb、As、Hg 的残留量。利用改良剂等化学修复方法操作简便且成本较低，可以用于大面积的土壤修复，但植物在生长过程中，根系的活动及分泌的有机酸或其他物质可能会改变土壤的理化性质，导致土壤中重金属的再次活化或增加其生物可用性，从而影响其修复性。此外，轮作种植可以降低土壤中的重金属积累，并改善土壤质量。吴启廷等<sup>[142]</sup>研究发现三七轮作 3 年后的土壤 Cu 质量分数由 32.15 mg/kg 降至 19.68 mg/kg；杨建忠等<sup>[160]</sup>使用轮作 5 年以上的土壤种植的三七，其质量和产量都高于轮作年限较短的土壤。

### 6.2 植物修复

植物修复主要是一种利用植物来降低土壤中重金属含量的方法<sup>[157]</sup>。通过种植能够富集、去除或稳定土壤中重金属的植物，以降低土壤中重金属的含量，进而减少药用植物对重金属的富集。Zhang 等<sup>[161]</sup>研究发现在土壤 Cd、Zn 浓度分别为 8、200 mg/kg 下，杂交狼尾草对 Cd、Zn 的提取量可达 624 和 9039 μg/株，虽其不能作为超富集植物，但由于其高产的特性，仍可作为重金属生物修复的优质牧草。陈同斌等<sup>[162]</sup>表明蜈蚣草为 As 超富集植物，其不仅对 As 具有极强的耐受性及富集能力，且生长快、植株高、分布广，可作为一种优秀的 As 修复植物。此外，海州香薷、鸭跖草、印度芥菜等可对 Cu 超富集；圆锥南芥、小鳞苔草等对 Pb 超富集<sup>[157,163-164]</sup>。目前有关种植富集植物之后的土壤再种植人参或与人参间作的案例相对较少。

### 6.3 微生物修复

土壤微生物和根际微生物可通过多种机制降

低重金属的生物有效性，包括吸附、转化和改变根际环境等。研究表明从三七根部分离得到的深色有隔内生真菌对 As、Pb 具有较高的耐性<sup>[165]</sup>；月桂假单胞菌可通过络合反应将 As、Pb 及 Cr 吸附至细胞壁上<sup>[166]</sup>；地衣芽孢杆菌死菌体对 Cd<sup>6+</sup>、Pb<sup>2+</sup>具有良好的吸附效果<sup>[157,167]</sup>；假单胞菌体内存在的汞还原酶及裂解酶，可将土壤中不同形态的 Hg 还原成易挥发的元素 Hg<sup>[168]</sup>。此外，根际微生物在植物应对环境中重金属胁迫中发挥重要作用。从人参根际土壤中分离得到的绿脓杆菌与哈茨木霉菌，可通过增加铁载体的分泌，帮助植物调节环境中的重金属含量，提高植物的耐受性和修复能力<sup>[169-170]</sup>。

## 7 结语与展望

本文以《中国药典》2020 年版为依据，对不同产地的人参属药用植物中 5 种主要重金属污染状况进行分析评估。通过对比不同产地药材及种植土壤的数据，吉林省作为人参的主要产区，其土壤和药材中重金属 Hg 和 Cd 的超标情况引起了广泛关注。人参中 Hg 超标率最高，而土壤中 Hg 的超标率较低，且人参对 Hg 的富集能力相对较弱，这可能是由于大气沉降和工业污染造成的<sup>[29]</sup>。另一方面，土壤中 Cd 的超标情况最为严重且人参对 Cd 的富集能力最强，且研究表明国内外的磷肥中含有较高的 Cd，主要来源可能与农药化肥的不当使用及土壤污染有关。此外，研究表明随着人参种植年限的增加，重金属的积累量也随之增加，在人参的生长周期中，第 3~5 年是其生长最快的阶段，此时重金属的吸收速度也较快，从而进一步加剧了人参重金属超标问题<sup>[27]</sup>。三七中重金属含量普遍较高，且三七种植土壤的超标情况也较为严重。目前研究表明三七对 Cd 富集较强，因此，为了减少重金属污染对药用植物的影响，推进林下种植、良好农业规范种植等无公害种植基地的建设显得尤为重要。相比之下，西洋参重金属超标情况较好，但由于西洋参使用广泛，对进出口的西洋参及其产品进行严格的重金属检测仍然是必要的。特别是对 Hg 的监管检测需要加强，以确保西洋参产品的安全性和质量。以人参重金属指标为标准分析珠子参重金属超标情况，发现珠子参的重金属 Cu 的超标问题较为显著，但目前针对珠子参与竹节参的重金属研究仍显不足，需要进一步制定二者的重金属标准，为进一步落实珠子参与竹节参安全用药的监管政策奠定基础。

目前,传统重金属检测技术虽然在精确度和灵敏度上有很大优势,但其通常需要较长时间来完成检测,且成本较高。值得注意的是,这些检测通常需要在实验室或检测中心进行,这限制了其在药用植物种植基地的实时应用。随着快速检测技术的不断发展,已经有很多新兴的方法可以用于重金属检测,但在人参属上的应用还相对较少。因此,开发和应用新兴的快速检测技术在药用植物种植基地具有重要意义,不仅能提高检测的效率,还能实时监测土壤和植物中的重金属含量,保障药用植物的安全性。

本文对人参属药用植物的重金属污染现状、检测技术及其相关问题进行系统总结,初步展望了该属植物在重金属方面未来重点研究方向,在种植方面,应选择土壤背景值低的区域,科学使用农药化肥;在检测技术方面,应开发快速便捷的检测方法,以便实时检测种植土壤及药材;在生产加工方面,应采取有效的去除或减少重金属的技术措施,降低成品中的重金属含量。本文为促进人参属药用植物在经济、医药及保健等领域的发展和应,同时为其他药用植物重金属控制等方面提供数据参考。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

#### 参考文献

- [1] 舒盼盼,朱鹏飞,杨鑫龙,等. 6种人参属药材体外抗凝血活性与皂苷含量的相关性研究 [J]. 中草药, 2019, 50(4): 918-924.
- [2] 徐蓓,王洪达,洪莉丽,等. 聚乙炔类成分纯化技术及其在人参属中的研究进展 [J]. 中草药, 2024, 55(14): 4962-4977.
- [3] 国家林业和草原局,农业农村部. 国家重点保护野生植物名录 [EB/OL]. (2021-09-08) [2024-12-30]. <https://www.forestry.gov.cn/c/www/gkml/11057.jhtml>.
- [4] 陈锋,熊驰. 重庆五加科植物新记录变种: 珠子参 [J]. 福建林业科技, 2023, 50(2): 97-99.
- [5] 王影,查琳,杨怀雷,等. 人参及制品中重金属研究概述 [J]. 人参研究, 2019, 31(6): 47-52.
- [6] 曾海清. 绿色贸易壁垒对吉林省农产品出口的影响及对策研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [7] 中华人民共和国外贸行业绿色标准——药用植物及制剂进出口绿色行业标准 [J]. 中药研究与信息, 2001(8): 9-10.
- [8] 药用植物及制剂外贸绿色行业标准 [S]. WM/T 2-2004. 2005: 1.
- [9] 董林林,张照宇,刘丛盛,等. 以人参和三七为例浅析品质中药材质量标准现状 [J]. 环球中医药, 2022, 15(12): 2289-2296.
- [10] 左甜甜,申明睿,张磊,等. 中药中重金属及有害元素限量标准的制定及有关问题的思考 [J]. 药物分析杂志, 2023, 43(4): 701-711.
- [11] 中国药典 [S]. 一部. 2020.
- [12] 郭兰萍,周利,王升,等. 《中医药-中药材重金属限量》ISO 国际标准下中药材重金属污染现状与分析 [J]. 科技导报, 2017, 35(11): 91-98.
- [13] 楚楚,李璟,颜继忠. 中药重金属限量标准现状及分析方法研究进展 [J]. 浙江工业大学学报, 2021, 49(4): 435-441.
- [14] 徐美玲,孙婉萍,曲扬,等. 植物药材重金属残留药典标准的研究 [J/OL]. 中华中医药学刊, [2024-05-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1546.R.20240517.1718.030.html>.
- [15] 朱颖虹,向飞军,张毅宁. 原子荧光法测定人参中重金属的含量 [J]. 广东微量元素科学, 2005, 12(6): 35-39.
- [16] 杜雪,郭美玲,刘洋等. 人参等 10 种中药材及饮片中重金属及有害元素测定 [J]. 中国药事, 2018, 32(10): 1354-1361.
- [17] 冯克然,张玉婷,王钢力,等. 应用 ICP-MS 同时测定人参和西洋参提取物中 47 种元素 [J]. 分析仪器, 2018(4): 26-33.
- [18] 孙文凯,李曼曼,徐振秋等. ICP-MS 法测定人参药材中 3 种重金属溶出特性的研究 [J]. 轻工科技, 2015, 31(10): 38-40.
- [19] Yang S H, Lee T W, Lee J I, et al. Distribution characteristics of hazardous heavy metals in ginseng and wood-cultivated ginseng [J]. *J Fd Hyg Safety*, 2019, 34(4): 325-333.
- [20] Kim J Y, Kim B W, Kwon K R. A study on heavy metal contents in cultivated wild ginseng from Korea and China [J]. *J Pharmacopunct*, 2007, 10: 67-77.
- [21] Park S W, Kim J H. Residues of heavy metals and organochlorine pesticides in ginseng at environment of north gyeongbuk [J]. *J Environ Sci*, 2010, 19(10): 1203-1210.
- [22] 张春盛,吴舜芳,林炳国,等. 西洋参等 8 种中药的重金属检测 [J]. 中国药业, 2009, 18(17): 20-21.
- [23] 沈晓君,蔡广知,齐晋楠,等. 人参等 7 种吉林省道地药材中重金属检测方法研究 [J]. 长春中医药大学学报, 2010, 26(4): 585-586.
- [24] 陈绍瑜,边疆,张博,等. 氢化物发生-原子荧光法同时测定人参中铋汞 [J]. 中国实用医药, 2012, 7(27): 249-250.
- [25] 赵上勇,周志明,宋超,等. 基于 LIBS 技术人参样品聚类分析及重金属检测研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(8): 2629-2633.

- [26] 张淋淋, 孙海, 刘宁, 等. 通化农田栽培人参土壤养分和重金属分布及其生物有效性研究 [J]. 特产研究, 2020, 42(2): 15-19.
- [27] Yin J X, Zhuang J J, Zhang X, *et al.* Ginseng of different ages is affected by the accumulation of heavy metals in ginseng soil [J]. *PLoS One*, 2022, 17(6): e0269238.
- [28] 张亚玉, 孙海, 高明, 等. 吉林省人参土壤中重金属污染水平及生物有效性研究 [J]. 土壤学报, 2011, 48(6): 1306-1313.
- [29] 金书含. 东北人参中重金属迁移规律及膳食风险评估 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2024.
- [30] 刘长姣, 王磊, 刘长龙, 等. ICP-MS 法测定人参中 Pb 含量的不确定度评定 [J]. 中国食品添加剂, 2017(6): 200-203.
- [31] 刘长姣, 王磊, 刘长龙, 等. ICP-MS 法测定人参中 Cd 和 Cu 含量的不确定度评定 [J]. 中国食品添加剂, 2017(2): 179-183.
- [32] 冉文倩, 彭韵洁, 王奇, 等. 人参根、茎叶及其根际土壤中重金属污染评价及迁移能力分析 [J]. 福建农业学报, 2023, 38(11): 1358-1366.
- [33] 魏春雁, 刘笑笑, 宋志峰, 等. 不同产地中药材及其栽培土壤中重金属含量比较研究 [J]. 东北农业科学, 2017, 42(4): 39-43.
- [34] 梁尧, 姜晓莉, 李刚, 等. 吉林省非林地栽参基地土壤和人参根部重金属元素含量分析及风险评价 [J]. 植物资源与环境学报, 2015, 24(3): 68-76.
- [35] 迟鸿悦, 李文影, 李乐乐, 等. ICP-MS 法测定人参中 6 种重金属元素 [J]. 吉林中医药, 2018, 38(8): 954-957.
- [36] 赵立春. 人参化学成分的提取及测试方法的优化研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [37] 王妮. 微波消解-ICP-MS 法测定人参中 5 种重金属 [J]. 食品工业, 2018, 39(6): 280-282.
- [38] 于丽, 顾俊杰, 张宁, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定芦荟、人参、五味子、龙胆草中 5 种重金属含量 [J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(16): 5751-5754.
- [39] 薛晓丽. 三种消解方法对人参中重金属元素含量的影响比较 [J]. 吉林农业科技学院学报, 2014, 23(1): 4-6.
- [40] 崔业波, 马晓静, 高楠楠. 人参须药材中重金属残留量的测定 [J]. 中国药物评价, 2018, 35(3): 212-214.
- [41] 卢恒, 徐宁, 孟繁蕴. 毛细管电泳-激光诱导荧光法测定人参中铜和镉离子含量 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2017, 23(14): 52-56.
- [42] 马双欣, 高宇, 张银玲, 等. 人参中重金属及有害元素的含量测定 [J]. 人参研究, 2020, 32(5): 13-16.
- [43] 孙冰雪, 于萍, 李沅耕, 等. 石墨炉法测定中药黄芪、人参中镉含量方法改进 [J]. 长春中医药大学学报, 2022, 38(3): 292-294.
- [44] 梁淑敏, 张景东, 周浩然. 人参粉中有害重金属含量测定 [J]. 化学与粘合, 2003(4): 205-206.
- [45] 徐晶, 窦德强. 人参的质量标准研究 [J]. 中国现代中药, 2008, 10(3): 21-24.
- [46] 邱连建, 曾斌, 冯四林, 等. 美国等五国西洋参药材中重金属残留量分析 [J]. 中国当代医药, 2012, 19(4): 55-56.
- [47] Asgarpanah J. Comparing heavy metal contents of *Panax ginseng* samples from selected markets in Tehran and Beijing [J]. *J Environ Anal Toxicol*, 2013, 3(5): 183-186.
- [48] 田雅琴, 徐腾, 张国梅. 紫外分光光度法测定 8 种中药材中重金属的含量 [J]. 中国药房, 2008, 19(33): 2609-2610.
- [49] 黄淑萍, 陈亮. ICP-AES 技术测定人参等名贵药材中微量元素初步研究 [J]. 山西大学学报: 自然科学版, 1994(1): 56-59.
- [50] 吕金朋, 张文丽, 张晔, 等. 人参连作障碍土壤改良技术的重金属及农残评价研究 (续) [J]. 吉林中医药, 2020, 40(10): 1357-1359.
- [51] 陈中万, 陈赞光. 中药材重金属及其药效机理的研究 [J]. 中外健康文摘, 2013, 10(30): 417-418.
- [52] 陈静. 人参提取物中残留农药和重金属的测定方法研究 [D]. 沈阳: 沈阳药科大学, 2008.
- [53] 黎剑华, 张春和. 人参中多种微量元素测定 [J]. 微量元素与健康研究, 2016, 33(4): 41-42.
- [54] 李学章, 贺与平, 李维香. 原子吸收法测定三七中的铜、镉和锂 [J]. 光谱实验室, 2004(4): 818-820.
- [55] 何平, 孙巍, 孙玉侠, 等. 微波消解-ICP-MS 法测定丹参和三七药材中 18 种重金属元素 [J]. 中成药, 2011, 33(12): 2110-2113.
- [56] 刘春侠, 王齐, 何素芳, 等. 三七中 Cu、Pb 和 Cd 含量的不确定度评定 [J]. 光谱实验室, 2012, 29(2): 725-729.
- [57] 林龙勇, 于冰冰, 廖晓勇, 等. 三七及其中药制剂中砷和重金属含量及健康风险评估 [J]. 生态毒理学报, 2013, 8(2): 244-249.
- [58] 李伟, 吴英婷, 郝晶晶. 微波消解-电感耦合等离子体质谱仪法测定三七粉中重金属元素 [J]. 分析仪器, 2019(1): 36-39.
- [59] 范菲菲, 龙丽芳. ICP-MS 法测定中药材中重金属元素的含量 [J]. 农技服务, 2020, 37(2): 26-27.
- [60] 张静. ICP-MS 法测定三七中重金属及有害元素的残留量 [J]. 广州化工, 2018, 46(8): 77-79.
- [61] 许嵩飞. 微波消解-电感耦合等离子体质谱同时测定三七中 5 种重金属含量 [J]. 安徽农业科学, 2012(30): 14978-14979.
- [62] Chen X F, Rui Y K, Yu Y. Determining trace elements and heavy metals in Chinese herbal medicine *Panax notoginseng* from Tibet [J]. *Asian J Chem*, 2011, 23 (11): 5167-5168.

- [63] 高振杰, 高红霞, 刘英莉, 等. ICP-MS 法测定 5 种中药材粉剂中 5 种重金属的含量 [J]. 中国药房, 2015(27): 3847-3848.
- [64] 刘佳, 王丽, 陆雪萍, 等. 三七药材中农药及重金属残留特征研究 [J]. 中国药房, 2015, 26(21): 2975-2977.
- [65] 李琳, 崔秀明, 王承潇, 等. 活性超微三七粉质量特征研究 [J]. 云南农业大学学报 (自然科学), 2016, 31(2): 232-238.
- [66] 孙玉琴, 高明海, 朱云飞, 等. 烤房快速干燥对三七品质的影响研究 [J]. 现代农业科技, 2016(3): 317-319.
- [67] 杨国宁, 毕天琛, 张裕民, 等. 三七片中重金属元素残留量测定及风险评估 [J]. 食品与药品, 2020, 22(5): 390-394.
- [68] 谭礼浩, 贺丽苹, 曹庸, 等. 络合萃取降低三七中的重金属及其萃取前后形态分析 [J]. 食品与机械, 2014, 30(5): 30-35.
- [69] 杨荣, 杨红, 师姣, 等. 7 种药材中重金属及有害元素的化学形态分析 [J]. 中成药, 2015, 37(2): 350-354.
- [70] Ou X H, Wang L, Guo L P, *et al.* Soil-plant metal relations in *Panax notoginseng*: An ecosystem health risk assessment [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2016, 13(11): 1089.
- [71] 赖茂祥, 刘华钢, 梁秋云. 广西靖西县三七中微量元素及重金属含量分析测定 [J]. 广西科学, 2006, 13(1): 46-47.
- [72] 张文斌, 曾鸿超, 冯光泉, 等. 不同栽培地区的三七总砷及无机砷含量分析 [J]. 中成药, 2011, 33(2): 291-293.
- [73] Geng Y, Jiang L J, Jiang H X, *et al.* Assessment of heavy metals, fungicide quintozene and its hazardous impurity residues in medical *Panax notoginseng* (Burk) F. H. Chen root [J]. *Biomed Chromatogr*, 2019, 33(2): e4378.
- [74] 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估 [J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(5): 645-653.
- [75] Huang Z H, Shen Z D, Liu C L, *et al.* Characteristics of heavy metal accumulation and risk assessment in understory *Panax notoginseng* planting system [J]. *Environ Geochem Health*, 2023, 45(12): 9029-9040.
- [76] 袁宇琳, 张静, 毛腾霄, 等. 成都市售即食中药预包装产品重金属含量分析及健康风险评估 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2018, 24(24): 213-218.
- [77] 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估 [J]. 广东农业科学, 2022, 49(1): 22-29.
- [78] 吴涵. 三七不同产地重金属分布特征及其健康风险评估 [D]. 昆明: 云南农业大学, 2023.
- [79] 赵静. 三七中皂苷类成分的裂解规律探究及其化学特征的道地性研究 [D]. 北京: 北京中医药大学, 2015.
- [80] 刘杨, 苏维, 沈冰冰, 等. 采用 ICP-MS 法评估土家族自治县白三七中重金属污染风险 [J]. 中医药导报, 2021, 27(12): 24-27.
- [81] 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.
- [82] 杨仁贵, 王美玲, 芮蕊, 等. 华山松-三七种植模式下矿质元素分布特征及重金属污染评价 [J]. 山东农业科学, 2023, 55(5): 127-133.
- [83] 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估 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), 2020, 42(4): 750-759.
- [84] 严华, 黄小艳, 于爽, 等. 云南不同颜色三七中重金属及微量元素分析 [J]. 中国现代中药, 2022, 24(1): 86-93.
- [85] 江滨, 文旭, 赵庆. 三七中重金属含量控制的初步研究 [J]. 中国民族民间医药杂志, 1997(6): 33-37.
- [86] 郝南明, 田洪, 苟丽. 三七生长初期不同部位重金属元素含量测定 [J]. 微量元素与健康研究, 2004, 21(5): 27-28.
- [87] 冯光泉, 刘云芝, 张文斌, 等. 三七植物体中重金属残留特征研究 [J]. 中成药, 2006, 28(12): 1796-1798.
- [88] 刘云芝, 张文斌, 冯光泉, 等. 改良剂对降低三七中重金属残留量作用的研究 [J]. 云南农业大学学报, 2008(1): 118-121.
- [89] 柳晓娟, 林爱军, 孙国新, 等. 三七中砷的来源及其健康风险初步评价 [J]. 环境化学, 2009, 28(5): 770-771.
- [90] 王宝森, 刘贵阳, 刘卫, 等. 不同消解方法对原子吸收光谱法测定三七中重金属铜的影响 [J]. 安徽农业科学, 2012, 40(2): 786-787.
- [91] 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): 1051-1054.
- [92] 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估 [J]. 生态学报, 2014, 34(11): 2868-2875.
- [93] 朱琳, 周家明, 曾鸿超, 等. 三七茎叶和花的重金属含量分析 [J]. 现代中药研究与实践, 2010, 24(2): 70-71.
- [94] 祖艳群, 程诗丛, 柯汉玲, 等. 文山三七 (*Panax notoginseng*) 种植区三七与土壤中 Pb、Cd、Cu 和 Zn 的分布特征及评价 [J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(4): 317-323.
- [95] 曾宪彩, 朱美霖, 蒋艳雪, 等. 不同清洗处理方式对三七剪口中重金属及药效成分的影响 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2015, 21(8): 9-12.
- [96] 温慧敏, 尹小娟, 杨沙, 等. 去皮与水洗对三七中重金属与有效成分含量的影响 [J]. 西部中医药, 2019, 32(2): 49-51.

- [97] 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): 74-81.
- [98] 刘格. 不同产地三七药材质量综合评价研究 [J]. 北京: 北京中医药大学, 2020.
- [99] 王丽, 符德欢. 三七重金属含量影响因素的初步研究 [J]. 云南中医学院学报, 2014(5): 13-15.
- [100] 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.
- [101] 孟溪, 梁社往, 吴涵, 等. 基于三七质量安全的土壤 Cd 和 Pb 风险阈值 [J]. 湖北农业科学, 2024, 63(2): 25-30.
- [102] 王朝梁, 崔秀明, 李忠义. 三七农药残留量分析 [J]. 中药材, 1999(4): 167-169.
- [103] 王朝梁, 陈中坚, 崔秀明. 三七综合栽培技术试验示范 [J]. 人参研究, 2003, 15(2): 30-32.
- [104] 曾江, 冯光泉, 张文斌, 等. 三七 GAP 栽培产品质量评价 [J]. 现代中药研究与实践, 2003(S1): 55-56.
- [105] 钟义华, 于伯清, 靳剑. ICP-OES 测定四种中药材重金属含量 [J]. 内蒙古中医药, 2013, 32(26): 32-33.
- [106] 杨继彪, 库德热提·阿吉, 赵媛, 等. ICP-OES 测定中药材中重金属的含量 [J]. 新疆中医药, 2014, 32(5): 63-65.
- [107] 张凌艳. 葛根与 4 种常用中药材中重金属元素含量的比较研究 [J]. 中医药信息, 2011, 28(3): 54-55.
- [108] 刘祖圻, 曹吉越, 崔闻宇等. Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-石墨烯修饰玻碳电极阳极溶出伏安法测定西洋参中的铅和镉 [J]. 化学与黏合, 2018, 40(4): 303-306.
- [109] 钟敏, 于辉. 西洋参中 5 种重金属及有害元素的含量测定研究 [J]. 中国保健营养, 2016, 26(9): 285.
- [110] 毛腾霄, 程龙, 袁涛, 等. 7 种即食中药中 5 种重金属的健康风险评估 [J]. 中成药, 2020, 42(12): 3265-3269.
- [111] 左甜甜, 李耀磊, 陈沛, 等. 西洋参、山楂、枸杞子中重金属及有害元素残留量测定及初步风险评估 [J]. 药物分析杂志, 2016, 36(11): 2016-2021.
- [112] 周海燕, 杨峻山, 周应群, 等. 微波消解/电感耦合等离子体质谱法测定西洋参重金属及有害元素含量 [J]. 中国医院药学杂志, 2011, 31(11): 889-891.
- [113] 李火云, 黄俊忠. 西洋参检验结果分析 [J]. 广东化工, 2020, 47(18): 174-175.
- [114] 陈小荣, 李文贵, 唐立跃. 不同产地西洋参质量研究 [J]. 中国保健营养, 2018, 28(1): 5.
- [115] 陈芳芳, 李志刚, 王晓琳, 等. 西洋参和铁皮石斛中重金属元素的污染情况及健康风险评估 [J]. 预防医学论坛, 2022, 28(10): 730-733.
- [116] 杨修仕. 西洋参品质评价、多糖提取纯化工艺及生物活性研究 [D]. 太原: 山西大学, 2014.
- [117] 刘志婷, 黄盼盼, 黄琼, 等. 广东省灵芝、铁皮石斛、西洋参三种食药物质重金属暴露风险评估 [J]. 中国食品卫生杂志, 2024, 36(4): 414-419.
- [118] 贾婵. 不同产地西洋参的品质评价 [D]. 北京: 北京协和医学院, 2017.
- [119] 张燕停, 陆雨顺, 魏晓明, 等. 山东省威海地区西洋参重金属和有机氯农药残留分析 [J]. 特产研究, 2023, 45(6): 124-131.
- [120] 隋玉兰. 电感耦合等离子体原子发射光谱法测定西洋参药材中无机元素含量 [J]. 济宁医学院学报, 2011, 34(3): 165-166.
- [121] 高宇, 马双欣, 张银玲, 等. 原子荧光光谱法测定西洋参中的砷 [J]. 人参研究, 2021, 33(3): 13-14.
- [122] 池群, 郭建文. 珠子参的微量元素分析比较 [J]. 西北药学杂志, 1993(2): 61-64.
- [123] 杨新杰, 王薇, 刘超, 等. 珠子参药材无机元素特征及与道地性的关系 [J]. 中药材, 2014, 37(11): 1951-1955.
- [124] 崔九成, 张旋, 杨新杰, 等. 不同产地珠子参中微量元素含量分析 [J]. 光谱实验室, 2011, 28(6): 2866-2870.
- [125] 宋小妹, 李渊源, 宋蓓. 珠子参不同药用部位微量元素分析 [J]. 西北药学杂志, 2011, 26(2): 79-80.
- [126] 赵恒, 谢成科, 岳松健. 珠子参及其炮制品中 16 种元素的含量测定 [J]. 中国中药杂志, 1994, 19(7): 411-412.
- [127] 徐凤玲, 马生芹, 夏晓慧, 等. 竹节参中 10 种元素的分析 [J]. 科技资讯, 2016, 14(25): 122-123.
- [128] 许小燕, 程齐来. 赣南竹节参中微量元素含量分析 [J]. 广东微量元素科学, 2011, 18(1): 50-53.
- [129] 吴锦忠, 易骏, 林晓峰, 等. 人参属四种植物中氨基酸和无机元素的比较研究 [J]. 贵阳医学院学报, 1992, 17(3): 230-232.
- [130] 翟琨. 竹节人参 GAP 基地土壤环境质量现状分析 [J]. 湖北农业科学, 2010, 49(10): 2477-2478.
- [131] 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 [S]. GB 15618—2018. 2018.
- [132] 徐万玲, 王钰婷, 李会杰, 等. 长白山地区园参地土壤环境质量及重金属潜在生态风险评价: 以敦化市为例 [J]. 延边大学学报: 自然科学版, 2014(1): 89-94.
- [133] 李莉, 赵晓松. 吉林省东部山区人参栽培基地土壤污染现状与评价 [J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 403-406.
- [134] 何宛晟. 不同年限人参根际土壤理化性质及酶活性研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2014.
- [135] Huang Y, Wang L Y, Wang W J, et al. Current status of agricultural soil pollution by heavy metals in China: A Meta-analysis [J]. *Sci Total Environ*, 2019, 651(2): 3034-3042.
- [136] 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.
- [137] 谢秀文, 钮荣祥. 文山某地三七及其种植土壤中七种

- 金属元素含量测定分析 [J]. 大理大学学报, 2017, 2(10): 87-89.
- [138] 罗增明, 剧永望, 张慧娟, 等. 三七及种植土壤重金属污染特征与风险评价 [J]. 中国环境科学, 2022, 42(12): 5775-5784.
- [139] 朱焯, 滕应, 张满云, 等. 三七种植土壤中主要污染物累积及微生物特性变化 [J]. 土壤, 2015, 47(1): 121-127.
- [140] 吴冠美, 覃雪梅, 刘云霞, 等. 广西靖西县田七种植区土壤重金属的调查与分析 [J]. 环境保护科学, 2017, 43(1): 123-128.
- [141] 杨月, 陈艳姣, 张爱琛, 等. 土壤无机元素含量与三七药材品质的关系 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2018, 24(13): 47-53.
- [142] 吴启廷, 胡明友, 张华敬, 等. 三七不同轮作年限土壤中几种重金属元素含量的探究 [J]. 畜牧与饲料科学, 2014(1): 3-4.
- [143] 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): 2608-2613.
- [144] 李卫东. 文山州三七 GAP 种植区环境质量状况调查 [J]. 云南环境科学, 2004(S2): 168-170.
- [145] 闫雪纯, 王琪, 杨倩, 等. 西洋参种植土壤重金属含量变化 [J]. 现代农业研究, 2019(9): 45-46.
- [146] 杨新杰, 许苗苗, 宋蓓, 等. 土壤因子对珠子参药材质量的影响研究 [J]. 中药材, 2014, 37(9): 1513-1517.
- [147] 冷进松, 高雪梅, 王磊鑫. 食品中重金属污染的危害及其检测技术研究进展 [J]. 农产品加工, 2015(23): 50-53.
- [148] 李刚, 胡斯宪, 陈琳玲. 原子荧光光谱分析技术的创新与发展 [J]. 岩矿测试, 2013, 32(3): 358-376.
- [149] 姚惠文. 中药中重金属检测方法的研究进展 [J]. 沈阳药科大学学报, 2022, 39(11): 1399-1408.
- [150] 阮桂色. 电感耦合等离子体原子发射光谱 (ICP-AES) 技术的应用进展 [J]. 中国无机分析化学, 2011, 1(4): 15-18.
- [151] 冯先进, 屈太原. 电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 最新应用进展 [J]. 中国无机分析化学, 2011, 1(1): 46-52.
- [152] 朱慧贤, 章新, 王林, 等. 用快速分离柱高效液相色谱法测定中草药中的重金属元素 [J]. 信阳师范学院学报 (自然科学版), 2006, 19(4): 467-469.
- [153] Zhao S Y, Zhou Z H, Song C, et al. Classification analysis and heavy metal detection of *Panax ginseng* sample by using LIBS technology [J]. *Spectrosc Spectr Anal*, 2020, 40: 2629.
- [154] 魏静, 朱治, 王亚生, 等. 生物传感技术在食品中重金属检测中的应用进展 [J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(19): 6337-6345.
- [155] 李晓怡, 韩梦璇, 俞果. 纳米材料在重金属污染土壤植物修复中的应用研究进展 [J]. 中国金属通报, 2022(2): 156-158.
- [156] 欧阳辉. 中药中农药残留和重金属的化学发光免疫传感器的构建及性能研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [157] 梁尧, 李刚, 曹庆军, 等. 人参产地土壤重金属污染现状及修复技术的研究进展 [J]. 中药材, 2013, 36(10): 1709-1713.
- [158] 李瑞月, 陈德, 李恋卿, 等. 不同作物秸秆生物炭对溶液中  $Pb^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  的吸附 [J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5): 1001-1008.
- [159] 刘云芝, 王勇, 武忠翠, 等. 不同肥料种类对三七生长及病害发生的影响研究 [J]. 文山学院学报, 2012, 25(6): 22-26.
- [160] 杨建忠, 崔秀明, 陈昱君, 等. 连作地土壤处理对三七根腐病的控制效果 [J]. 特产研究, 2010, 32(2): 37-39.
- [161] Zhang X F, Xia H P, Li Z A, et al. Potential of four forage grasses in remediation of Cd and Zn contaminated soils [J]. *Bioresour Technol*, 2010, 101(6): 2063-2066.
- [162] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征 [J]. 科学通报, 2002, 47(3): 207-210.
- [163] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展 [J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1196-1203.
- [164] 聂亚平, 王晓维, 万进荣, 等. 几种重金属 (Pb、Zn、Cd、Cu) 的超富集植物种类及增强植物修复措施研究进展 [J]. 生态科学, 2016, 35(2): 174-182.
- [165] 毕银丽, 解琳琳. 丛枝菌根真菌与深色有隔内生真菌生态修复功能与作用 [J]. 微生物学报, 2021, 61(1): 58-67.
- [166] Sarkar S, Mukherjee A, Parvin R, et al. Removal of Pb (II), As (III), and Cr (VI) by nitrogen-starved *Papiliotrema laurentii* strain RY1 [J]. *J Basic Microbiol*, 2019, 59(10): 1016-1030.
- [167] 周鸣, 刘云国, 李欣, 等. 地衣芽孢杆菌 (*Bacillus licheniformis*) 对  $Cr^{6+}$  的吸附动力学研究 [J]. 应用与环境生物学报, 2006, 12(1): 84-87.
- [168] 吴建峰, 林先贵. 土壤微生物在促进植物生长方面的作用 [J]. 土壤, 2003, 35(1): 18-21.
- [169] Abdallah Hussein K, Joo J H. Zinc ions affect siderophore production by fungi isolated from the *Panax ginseng* rhizosphere [J]. *J Microbiol Biotechnol*, 2019, 29(1): 105-113.
- [170] 刘树梁. 中药材北沙参不同发育阶段根际微生物群落动态研究 [D]. 烟台: 鲁东大学, 2023.

[责任编辑 赵慧亮]