

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20210831003

罗增明, 马晟, 李林, 等. 土壤污染对中药材三七中重金属含量的影响[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(5): 292-306

Luo Z M, Ma S, Li L, et al. Effects of soil pollution on heavy metals concentrations in Chinese medicinal plant *Panax notoginseng* [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2022, 17(5): 292-306 (in Chinese)

土壤污染对中药材三七中重金属含量的影响

罗增明^{1,2}, 马晟^{1,2}, 李林^{1,2}, 赵宇^{1,2}, 徐其静^{1,2}, 刘雪^{1,2,*}

1. 西南林业大学环境修复与健康研究院, 昆明 650224

2. 西南林业大学生态与环境学院, 昆明 650224

收稿日期: 2021-08-31 录用日期: 2021-11-08

摘要: 三七是我国传统珍贵药用植物, 药用价值极高, 其市场需求量和种植面积不断增长。三七种植区多位于西南土壤重金属高背景区, 叠加频繁的矿业活动及农药化肥的不合理使用, 使土壤重金属含量较高, 导致三七吸收富集重金属, 具有潜在食品安全风险。此外, 三七中重金属通过食物链积累、传递进入人体, 亦具有潜在人体健康风险。前期研究主要集中于种植连作障碍和药用活性方面, 关于其对环境污染吸收分配特征及影响因素的综述性报道较少。因此, 本文基于三七种植区土壤重金属(Cd、As、Pb、Hg 和 Cu)污染现状, 概述三七重金属吸收、分配及富集特征, 重点分析土壤重金属总量与生物有效性、土壤理化性质和环境因素对三七重金属含量与分布的影响, 为阻控吸收、降低三七重金属含量, 保障三七食品安全提供理论依据和技术参考。

关键词: 重金属; 三七; 吸收分配; 生物有效性; 影响因素

文章编号: 1673-5897(2022)5-292-15 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Effects of Soil Pollution on Heavy Metals Concentrations in Chinese Medicinal Plant *Panax notoginseng*

Luo Zengming^{1,2}, Ma Sheng^{1,2}, Li Lin^{1,2}, Zhao Yu^{1,2}, Xu Qijing^{1,2}, Liu Xue^{1,2,*}

1. Institute of Environment Remediation and Health, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

2. Institute of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

Received 31 August 2021 accepted 8 November 2021

Abstract: *Panax notoginseng* is a traditional medicinal plant in China with extremely high medicinal values, leading to the constant increase in market demand and expansion in planting area. The planting areas of *P. notoginseng* are mostly located in regions with high soil background values of heavy metals in southwest China. In addition, the frequent mining activities and unreasonable use of pesticides and fertilizers, lead to high heavy metals concentrations in soils, which induces their uptake and accumulation by *P. notoginseng* resulting in potential food safety risks in *P. notoginseng*. Heavy metals accumulated in *P. notoginseng* can be transferred into human bodies through the food chain, arising potential human health risks. Previous studies on *P. notoginseng* mainly focus on its continuous

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1800504); 国家自然科学基金资助项目(41867066, 41907129); 云南省自然科学基金资助项目(2019FB032); 云南省教育厅科学研究基金项目(2020Y0391, 2021Y234)

第一作者: 罗增明(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为生态毒理学, E-mail: lzm527ycjx@163.com

* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: liuxue20088002@126.com

cropping obstacle and medicinal activity, limited information is available on its pollutant absorption and enrichment characteristics and the associated influencing factors. Therefore, this review summarizes heavy metals (Cd, As, Pb, Hg, Cu) pollution status in *P. notoginseng* growing soils and its absorption, distribution and accumulation characteristics, with more focus on illustrating the associated influencing factors including soil heavy metals total content and bioavailability, soil physical and chemical properties and environmental factors. The information in the review helps to develop strategies to reduce heavy metals uptake and accumulation in *P. notoginseng* and provides theoretical and technical supports to ensure its food safety.

Keywords: heavy metals; *Panax notoginseng*; uptake and distribution; bioavailability; influencing factor

土壤是人类赖以生存的基础,其影响作物生长、食品安全及人体健康。工业和城市的快速发展和化肥、农药的长期过量施用使土壤重金属污染面积不断扩大,土壤作物重金属超标现象日益严重^[1-2]。土壤重金属污染是我国环境污染中面积最广、危害最大的环境问题之一^[3]。原环境保护部对 3.6 万 hm² 基本农田保护区土壤重金属含量进行调查,发现超标率达 12.1%^[4]。研究表明,云南省三七主产区土壤重金属镉(Cd)、砷(As)和铜(Cu)超标率分别约为 62.7%、35.3% 和 64.7%^[5-6]。重金属具有易积累和潜伏、难降解、迁移速率慢和生态环境效应复杂等特点,能够通过作物富集进入食物链并传递至人体,具有潜在人体健康风险。

中药材是我国的民族瑰宝,已成为我国具有自主知识产权优势的现代经济产业之一。中药材作为天然药物,因其特有的医药理论和现实疗效受到关注。随着国内外关注度的不断提升,中药材质量和食用安全已引起重视。在中药材现代化进程中,由于受到水、空气和土壤污染等因素的影响,重金属超标事件屡有发生,成为制约其走向世界的重要因素之一^[7-10]。三七(*P. notoginseng* (Burk.) F. H. Chen), 又名田七、人參三七、田三七、山漆和血參等,为五加科(Araliaceae)人參属,是我国特有的古老物种,喜冬暖夏凉气候、半阴和半潮湿环境,生长期 3 年以上才具有较好的药用价值。因其对气候、土壤和植被等生长环境的特殊要求,分布范围限于西南、华南、华中地区,以云南和广西为主要产地,其中云南省文山州种植三七已有 400 多年历史,市场占有率 > 90%,是著名的“三七之乡”。三七因其在血液、心血管、神经及免疫等系统的生理活性,尤其对心脑血管疾病的显著疗效^[11],已成为我国出口的大宗中药材品种^[12]。

三七作为中成药制剂的重要原料,重金属含量超标对其质量安全造成威胁。近年来,随着采矿活

动的无序扩张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,对三七的种植安全及国际贸易产生严重威胁^[13]。目前,三七研究主要集中于种植连作障碍、药用活性成分、药理作用和临床应用方面,对三七中重金属污染的综述性研究报道较少^[14-16]。然而,三七种植期较长(3 年)且根部为主要药用部位,土壤重金属可能通过根系吸收并积累,故三七重金属的含量与分配值得关注。例如,江滨等^[17]采集云南省三七主产地不同生长年限、不同规格的三七及其种植土壤,对比直接粉碎和清洗后粉碎 2 种处理的三七须根和剪口样品的 Cd、As、铅(Pb)、汞(Hg)和 Cu 含量,发现后者较前者显著降低,认为三七中重金属主要来自其表面所附浮土。郝南明等^[18]和冯光泉等^[14]通过野外调查发现,三七中 Cd、As 等主要源于其特殊的吸收、累积机制。目前对三七重金属吸收、分配特征及其影响因素尚无统一结论。三七主产地云南和广西广泛分布 Pb、锌(Zn)和 Cu 等金属矿,且土壤重金属背景值较其他省份偏高^[19-20],其土壤重金属污染问题较为突出。此外,重金属通过食物链富集进入人体,损害神经系统且致癌,对人体健康具有极大威胁^[21]。中药材的土壤种植安全和食品安全已引起广泛关注^[22],重金属含量已成为中药材质量控制的重要指标之一^[23]。由此,本文重点关注三七种植区土壤和三七植株重金属(Cd、As、Pb、Hg 和 Cu)污染,分析重金属在“土壤-三七”系统的富集转运机理,阐述土壤污染对三七重金属吸收和分配的影响,为降低三七重金属含量、保障其食品安全提供基础信息和技术参考。

1 三七重金属含量与富集分配特征(Content, accumulation and distribution characteristics of heavy metals in *P. notoginseng*)

1.1 三七重金属含量

三七植株形态如图 1 所示,包括主根、侧根、须

根、剪口、茎、叶和籽 7 部分,其主根是主要的药用及食用部位,是中成药制剂的主要原料,其重金属含量超标已有报道^[24]。三七通过叶片气孔和根系吸收重金属,并受大气重金属沉降和人类活动等影响。三

七重金属污染评估主要参照《药用植物及制剂外经贸绿色行业标准》(WM/T2—2004)^[25]和《中国药典》(2015)^[26],其中 Cd、As、Pb、Hg 和 Cu 标准限值分别为 0.3、2、5、0.2 和 20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

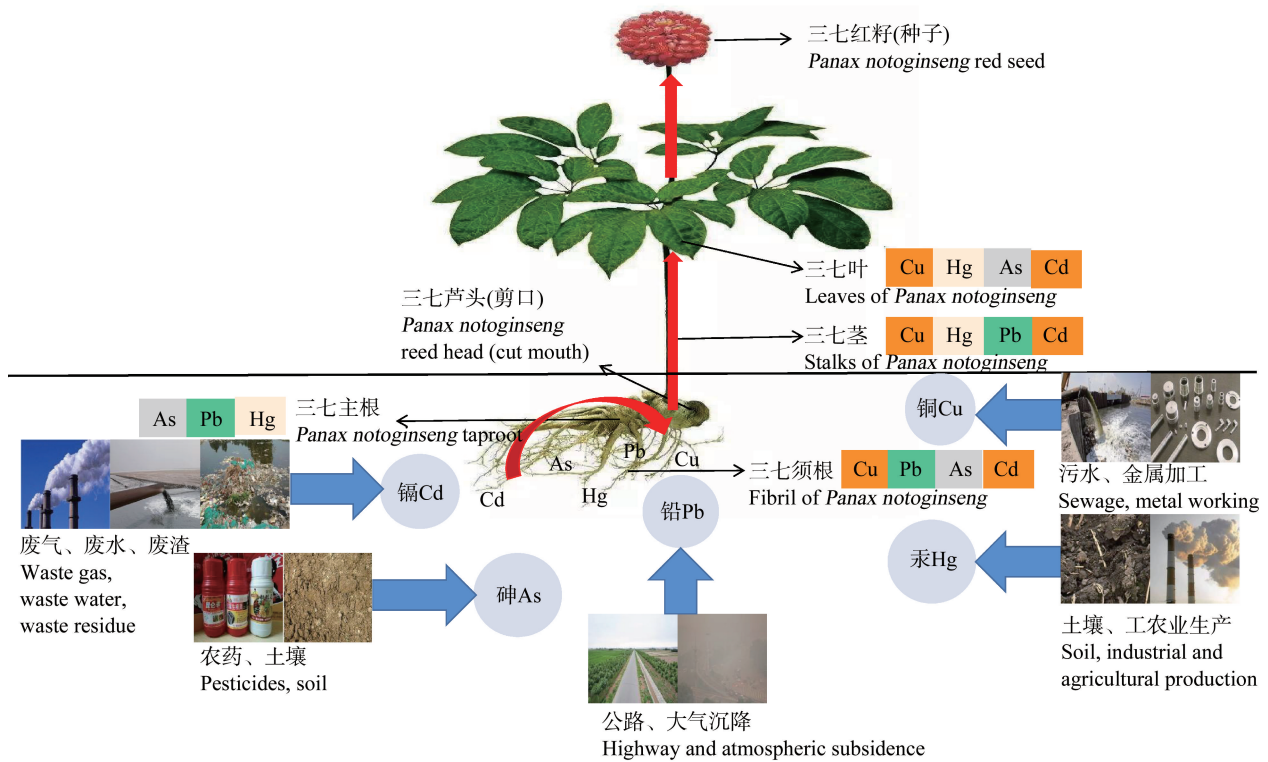


图 1 三七植株形态及其重金属来源与分布

Fig. 1 Plant diagram of *P. notoginseng* and sources and distribution of heavy metals

三七各部位(主根、须根、剪口、茎和叶)重金属(Cd、As、Pb、Hg 和 Cu)含量总结于表 1,超标率总结于表 2。由表 1 可知,三七 Cd 含量总体表现为:须根($0.36 \sim 5.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>茎($0.23 \sim 2.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>叶($0.29 \sim 2.25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>主根($0.21 \sim 1.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[27];茎($0.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>叶($0.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[28];须根($0.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>茎($0.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>主根($0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>剪口和叶($0.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[29];主根和剪口($0.1 \sim 0.22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>茎和叶($0.1 \sim 1.18 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[30-34]。As 含量表现为:须根($4.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>剪口($2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>主根($1.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>叶($1.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>茎($0.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[29];须根($5.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>叶($4.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>主根($1.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>茎($0.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[20]。Pb 含量为:须根($12.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>茎和叶($4.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>主根($1.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>剪口($0.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[14];须根($5.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>茎和叶($1.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>剪口($0.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>主根($0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[35]。Hg 含量为:主根和茎($0.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>叶

($0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[18];主根和茎($0.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>叶($0.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[29]。Cu 含量为:剪口($6.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>主根($5.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>茎和叶($3.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[34]。数据表明,三七各部位重金属含量存在差异,但分布特征较一致,表现为地下部含量高于地上部。由于地下部主根为主要用药部位,其重金属含量及吸收阻控需引起重视。

基于三七各重金属标准限值,其超标率整体表现为 As 12.7% ~ 58.5%^[36]、Cd 16.7% ~ 50%^[36-37]、Cu 25%^[36]、Pb 5.7%^[36] 和 Hg 0%^[36],表明三七 As、Cd 超标问题较为突出^[33,36,38]。如表 2 所示,三七各部位均存在不同程度的重金属超标现象,其中 Cd 超标率表现为:须根(40%)>茎(20%)>主根(13.3%)>叶和剪口(6.6%)^[29]。As 超标率为:须根(66.6%)>剪口(33.3%)>叶(26.6%)>主根(20%)>茎(6.6%)^[29]。Pb 超标率为:须根(63%)>主根(50%)>叶(38%)>茎(25%)^[27];Hg、Cu 无显著超标现象。

表 1 三七植株不同部位重金属 (Cd、As、Pb、Hg 和 Cu) 含量
Table 1 Heavy metals (Cd, As, Pb, Hg, Cu) concentrations in different tissues of *P. notoginseng*

重金属元素 Heavy metals	重金属含量(以干质量计)/(mg·kg ⁻¹) Heavy metals concentration (Based on dry mass)/(mg·kg ⁻¹)					参考文献 References
	主根 Main root	须根 Fibrous root	剪口 Snip	茎 Stem	叶 Leaf	
Cd	0.21 ~ 1.3	0.36 ~ 5.5	—	0.23 ~ 2.07	0.29 ~ 2.25	[27]
	—	—	—	0.4	0.1	[28]
	0.2	0.5	0.1	0.3	0.1	[29]
	0.11 ~ 1.22	—	—	—	0.21 ~ 1.18	[30]
	0.41 ±0.24	—	—	—	0.36 ±0.25	[31]
	0.10 ~ 1.22	—	—	—	0.11 ~ 1.18	[32]
	0.4	—	0.4	0.1	0.1	[34]
As	—	—	—	0.9	1.9	[28]
	2.7	—	—	0.56	0.37	[18]
	1.4	4.4	2	0.5	1.3	[29]
	0.69 ~ 9.28	—	—	—	1.37 ~ 14	[30]
	1.6	5.8	—	0.9	4.6	[20]
	2.09 ±1.57	—	—	—	4.08 ±4.22	[31]
	0.05 ~ 9.28	—	—	—	0.07 ~ 21.8	[32]
Pb	0.9	—	—	0.6	0.6	[14]
	25.3	30.6	—	17.1	9.6	[27]
	—	—	—	2.5	2.2	[28]
	—	—	—	0.2	0.1	[18]
	0.98	3.24	1.34	0.47	2.04	[29]
	0.33 ~ 3.06	—	—	—	3.07 ~ 10.4	[30]
	1.36±0.65	—	—	—	4.68±2.54	[31]
	0.1 ~ 3.06	—	—	—	1.03 ~ 12.9	[32]
	2.9	—	3.1	1.3	1.3	[34]
Hg	0.2	5.2	0.8	1.4	1.4	[35]
	1.3	12.8	0.8	4.6	4.6	[14]
	—	—	0.04	—	—	[28]
Cu	0.4	—	—	0.4	0.2	[18]
	—	0.1	—	0.1	0.06	[29]
	2.62 ~ 7.01	2.17 ~ 14.29	—	1.82 ~ 14.56	3.54 ~ 86.17	[27]
Cu	0.7	—	—	0.1	0.2	[29]
	3.06 ~ 8.12	—	—	—	2.04 ~ 16.9	[29]
	5.44±1.74	—	—	—	8.24±6.47	[31]
	1.58 ~ 12	—	—	—	2.04 ~ 60.3	[32]
	5.2	—	6.1	3.1	3.1	[34]

注:— 未检出;粗体表示超标。
Notes:— means not detected; bold letters indicate exceeding the standard values.

前期研究认为,Cd 高超标率可能与三七植株较强的 Cd 吸收和富集能力有关^[17,28]。随着工农业发展,Cd 通过废气、废水、废渣进入三七种植环境造成土壤 Cd 污染。Cd 超标主要发生于主根、须根(表 1

~ 表 2),污染源包括工业废气、粉尘、污染水及土壤等。此外,三七 As 超标率亦较高^[39]。例如,云南和广西 12 个产地三七 As 超标率为 32.4%^[40];云南省文山州三七 As 含量为 0.08 ~ 0.46 mg·kg⁻¹,均值为

表 2 三七不同部位重金属(Cd、As、Pb、Hg 和 Cu)超标率
Table 2 Standard exceeding ratios of heavy metals (Cd, As, Pb, Hg, Cu) in *P. notoginseng* different tissues

重金属元素 Heavy metals	超标率/% Standard exceeding ratios/%					参考文献 References
	主根 Main root	须根 Fibrous root	剪口 Snip	茎 Stem	叶 Leaf	
Cd	13.3	40	6.6	20	6.6	[29]
	82.4	—	—	—	64.7	[30]
	62.9	—	—	—	33.3	[31]
As	58.5	76.5	—	—	—	[34]
	31.4	—	—	—	—	[18]
	20	66.6	33.3	6.6	26.6	[29]
	58.8	—	—	—	94.1	[30]
	37	—	—	—	48.2	[31]
	68.3	—	—	—	—	[32]
Pb	50	63	—	25	38	[27]
	—	—	—	—	58.8	[30]
	—	—	—	—	37	[31]
	—	—	—	—	36.6	[35]
Hg	—					
Cu	—				3.7	[31]
	—				4.9	[34]

注：—,无重金属超标率。
Notes:—, no heavy metal standard exceeding ratios available.

0.2 mg·kg⁻¹^[41],超标 2.3 倍;云南省红河州 4 个县市三七主根 As 超标率高达 58.5%^[30],可能源于土壤 As 污染^[42-43]。亦有研究发现,三七地上部(茎、叶)As 含量显著低于地下部(主根、须根)(0.35 ~ 0.4 mg·kg⁻¹ vs. 0.06 ~ 0.39 mg·kg⁻¹,0.1 ~ 0.53 mg·kg⁻¹),认为三七 As 污染源之一为含 As 化学农药(例如退菌特)的使用^[44],且种植区土壤中 As 含量过高是引起三七主根富集 As 的主要原因。茎、叶中 Pb 含量较高(0.2 ~ 17.1 mg·kg⁻¹,0.1 ~ 12.9 mg·kg⁻¹),超标率为 25%^[27]和 58.8%^[30]。研究表明,相较于远公路种植区,近公路种植区三七(3.27 mg·kg⁻¹ vs. 3.35 mg·kg⁻¹)及其种植土壤(15.4 mg·kg⁻¹ vs. 33.7 mg·kg⁻¹)Pb 含量升高^[41],表明三七 Pb 污染可能源于汽车尾气及大气沉降,故三七种植地可选择远离公路区域。此外,种植土壤及三七中 Cu 主要来源于铜矿石采冶、化工和农药等^[28]。

1.2 三七重金属富集分配及转运特征

1.2.1 三七重金属富集分配特征

生物富集系数(bioconcentration factor, BCF)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,BCF 值越大,表明其重金属吸收和富集能力越强,重金属抗性越强^[45-46],反之越弱^[47-52],BCF>1 认为具有富集特性^[53]。三七不同部位对不同重金属(Cd、As、Pb、Hg 和 Cu)的富集能力和分配规律均不同(表 3),其中 BCF_{Cd} 表现为:须根(4.01)>叶(2.64)>茎(2.49)>主根(1.51)^[27];主根(1.34)>叶(1.18)^[31]。BCF_{As} 表现为:须根(0.16)>叶(0.13)>主根(0.05)>茎(0.03)^[33];叶(0.15)>主根(0.08)^[31]。BCF_{Pb} 表现为:须根(0.37)>主根(0.23)>叶(0.13)>茎(0.11)^[27]。BCF_{Hg} 表现为:须根(0.1)>叶(0.05)>主根(0.04)>茎(0.01)^[27]。BCF_{Cu} 表现为:叶(0.37)>须根(0.26)>茎(0.15)>主根(0.13)^[27];叶(0.12)>主根(0.08)^[31]。三七重金属富集系数如表 3 所示。

由上可见,重金属 Cd、As、Pb 和 Hg 在三七不同部位的累积规律总体一致,均为地下部(主根、须根)高于地上部(茎、叶);Cu 的富集规律是地上部(茎、叶)高于地下部(主根、须根)。5 种重金属中,三七对 Cd 的富集能力最强,各部位 BCF_{Cd} 均>1,而 BCF_{Pb、As、Hg、Cu} 则均<1,表明三七极易吸收富集

Cd^[30],与前文三七 Cd 超标率高相对应。另有研究发现,三七 BCF_{Cd,As,Pb} 表现为叶片>须根^[30],可能与三七种植区环境及栽培技术差异等有关。三七对重金属的富集、分配具有部位选择性和生长期特异性,这与不同功能部位不同时期的调控机制有关^[14]。目前三七富集重金属的机理已有报道^[14,20,27],但调控方式仍未知,因此,可开展不同部位、不同生长期重金属富集的分子机制研究,以期通过分子技术手段进行调控,降低三七对重金属的吸收富集。

1.2.2 三七重金属转运特征

转运系数(translocation factor, TF)为植物地上部重金属浓度与根系重金属浓度之比,用于评估化学物质在植物体内的迁移转运能力^[54-55]。自然环境下,植物通过根系从土壤中吸收重金属,并在体内累积和转运,重金属在植物体内迁移、转运受植物转运能力和土壤理化性质的影响^[56]。由于重金属具有毒性,植物可抑制重金属吸收或降低其向地上部转运^[57]。三七重金属转运系数如表 4 所示。

表 3 三七不同部位重金属 (Cd、As、Pb、Hg 和 Cu) 富集系数 (BCF)
Table 3 Heavy metals (Cd, As, Pb, Hg, Cu) bioconcentration factor (BCF) in different tissues of *P. notoginseng*

重金属元素 Heavy metals	富集系数 Bioconcentration factor				参考文献 References
	主根	须根	茎	叶	
	Main root	Fibrous root	Stem	Leaf	
Cd	1.51±1.49	4.01±3.69	2.49±3.24	2.64±3.89	[27]
	1.34	—	—	1.18	[31]
As	0.08	—	—	0.15	[31]
	0.05	0.16	0.03	0.13	[33]
Pb	0.23±0.25	0.37±0.33	0.11±0.23	0.13±0.17	[27]
	0.03	—	—	0.13	[31]
Hg	0.04	0.1	0.01	0.05	[27]
Cu	0.13±0.11	0.26±0.21	0.15±0.12	0.37±0.48	[27]
	0.08	—	—	0.12	[31]

表 4 三七不同部位重金属 (Cd、As、Pb、Hg 和 Cu) 转运系数 (TF)
Table 4 Heavy metals (Cd, As, Pb, Hg, Cu) translocation factor (TF) in different tissues of *P. notoginseng*

重金属元素 Heavy metals	茎 Stem	叶 Leaf	参考文献 References
Cd	—	—	[27]
	4.21	1.14	[29]
As	0.37	4.91	[29]
	0.03	0.13	[20]
Pb	—	—	[27]
	0.61	4.7	[29]
Hg	1.92	1.6	[29]
Cu	—	—	—

三七不同部位重金属转运系数差异较大,TF_{Cd} 表现为:茎(4.21)>叶(1.14)^[29]。TF_{As} 表现为:叶(0.130)>茎(0.03)^[20];叶(4.91)>茎(0.37)^[29]。TF_{Pb} 表现

为:叶(4.7)>茎(0.61)^[29]。TF_{Hg} 表现为:茎(1.92)>叶(1.6)^[29]。由此可见,三七茎对 Cd、Hg,叶对 As、Pb 的转运能力较强(均>1),但茎在重金属富集过程中主要起转运作用,而非富集或储藏功能。研究亦表明,三七具有较强的地下-地上 As 转运能力^[20]。三七茎、叶对 5 种重金属的转运能力表现为: Cd>Hg>Pb>As>Cu, As>Pb>Hg>Cd>Cu。茎(TF_{Cd}=4.21)^[29]、叶(TF_{As}=4.91)^[29] 较高可能与喷洒含 Cd、As 农药和叶面施肥有关^[31],故可通过控制叶面施肥,降低三七地上部对重金属的吸收。

2 三七吸收富集重金属的影响因素 (Factors affecting uptake and accumulation of heavy metals in *P. notoginseng*)

2.1 土壤重金属含量、赋存形态和生物有效性

2.1.1 土壤重金属含量

种植土壤重金属种类和含量直接影响三七重金属含量与富集^[58]。三七种植区土壤重金属含量如表 5 所示。三七种植区土壤 Cd、As、Pb、Hg 和 Cu 含量

范围分别为 0.38 ~ 1.2^[29,32]、4.68 ~ 70.7^[30,32]、4.22 ~ 53.4^[29-30]、0.56^[29] 和 0.74 ~ 72.6^[29-30] mg·kg⁻¹。参照《土壤环境质量标准》(GB 15618—2018)^[59-61]土壤重金属二级标准(Cd 0.3 mg·kg⁻¹、As 40 mg·kg⁻¹、Pb 250 mg·kg⁻¹、Hg 0.3 mg·kg⁻¹、Cu 50 mg·kg⁻¹)，现有

研究数据表明三七土壤超标率范围分别为 53.3% ~ 75%^[27,35]、35.3% ~ 66.7%^[29,32]、6.67%^[35]、73.3%^[29]和 50% ~ 71%^[27,30]，表明三七种植土壤重金属污染较严重，对三七重金属含量及其质量安全具有潜在影响。

表 5 三七种植地土壤重金属(Cd、As、Pb、Hg 和 Cu)含量

Table 5 Heavy metals (Cd, As, Pb, Hg, Cu) content in *P. notoginseng* planting soils

重金属元素 Heavy metals	重金属含量 (mg·kg ⁻¹) Heavy metal content (mg·kg ⁻¹)	超标率/% Standard exceeding ratios/%	参考文献 References	重金属元素 Heavy metals	重金属含量 (mg·kg ⁻¹) Heavy metal content (mg·kg ⁻¹)	超标率/% Standard exceeding ratios/%	参考文献 References
Pb	29.9	—	[25]	As	57.95	66.7	[29]
	53.4	—	[27]		65.59	—	[28]
	42.9	—	[26]		4.68	53	[30]
	4.22	—	[28]		6.9 ~ 242	—	[31]
	22.0	—	[30]		70.7	35.3	[32]
	49.3	6.67	[33]		51.96	—	[35]
Cd	0.74	75	[25]	Hg	18.93	—	[14]
	1.2	60	[27]		0.56	73.3	[29]
	0.49	71	[28]	Cu	47.77	50	[27]
	0.38	62.7	[30]		72.61	—	[29]
	0.92	53.3	[33]		0.74	71	[30]

研究表明，当土壤 As 由 40.7 mg·kg⁻¹ 升至 46.8 mg·kg⁻¹、Cd 由 0.46 mg·kg⁻¹ 升至 0.92 mg·kg⁻¹，三七主根、叶片中 As (0.051 mg·kg⁻¹ vs. 9.28 mg·kg⁻¹，0.07 mg·kg⁻¹ vs. 21.8 mg·kg⁻¹)、Cd (0.1 mg·kg⁻¹ vs. 1.22 mg·kg⁻¹，0.12 mg·kg⁻¹ vs. 1.18 mg·kg⁻¹) 含量增加，超标率分别达 31.4% 和 68.3%、76.5% 和 58.5%^[32]。此外，三七主根、叶片 Pb 含量与土壤 Pb 含量呈正相关($r^2=0.237$ 、 0.226)^[32]。土培实验中，三七各部位 Cd 含量随土壤 Cd 含量升高而升高，例如，土壤 Cd 浓度由 10 mg·kg⁻¹ 升至 30 mg·kg⁻¹ 时，三七各部位(叶、茎、剪口、主根、须根)Cd 含量均升高(1.86 mg·kg⁻¹ vs. 2.81 mg·kg⁻¹、1.75 mg·kg⁻¹ vs. 2.81 mg·kg⁻¹、2.25 mg·kg⁻¹ vs. 4.35 mg·kg⁻¹、1.91 mg·kg⁻¹ vs. 3.01 mg·kg⁻¹、20.0 mg·kg⁻¹ vs. 52.2 mg·kg⁻¹)^[62]。研究亦表明，随土壤 Cd 浓度增加，三七主根的食品安全风险亦增加^[27]。三七不同部位 As 含量因土壤 As 含量呈现差异^[63]。例如，当土壤 As ≤ 100 mg·kg⁻¹，主根 As 含量随土壤 As 含量增加 80%，须根 As 含量则降低 5%，茎 As 含量降低 5%；当土壤 As > 100 mg·kg⁻¹，主根 As 含量降低 5%，而须根 As 含量升高 34%，茎 As 含量升高

28%，叶 As 含量降低 5%^[20]。研究亦发现，当土壤 As 含量为 14 ~ 25 mg·kg⁻¹ 时，主根 As 含量高于茎叶(0.85 mg·kg⁻¹ vs. 0.6 mg·kg⁻¹)；而当土壤 As 含量为 64 ~ 124 mg·kg⁻¹ 时，主根 As 含量显著低于茎叶(4.04 mg·kg⁻¹ vs. 76.6 mg·kg⁻¹)^[64]，表明土壤高 As 促进 As 由根向地上部转运。综合来看，三七体内的重金属主要来源仍然是土壤，因此，控制种植区域的土壤环境质量、减少栽培过程中外源重金属对土壤的二次污染是解决三七重金属污染问题的关键。

2.1.2 土壤重金属赋存形态及生物有效性

研究表明，相较于重金属总量，重金属赋存形态及生物有效性更大程度上决定着土壤重金属的活动性、环境行为、环境效应及生物毒性^[65]。重金属的不同形态具有不同的生物毒性和环境行为，影响其在“土壤—三七”系统中的迁移转化。生物有效态重金属是指能够被生物吸收利用或可产生毒害效应的形态^[66]。重金属在土壤中的形态含量直接影响其迁移、转化及生物毒性^[67-68]。水溶态、离子交换态和碳酸盐结合态为生物有效态，可迁移性最强，易被植物吸收；腐殖酸结合态、铁锰氧化物结合态和强有机结合态为潜在生物有效态，受介质酸碱度影响较大，在

强酸性环境下易被植物吸收^[69-70]。

土壤重金属赋存形态影响其生物有效性,进而影响三七重金属吸收与含量^[71]。研究发现,三七种植土壤中,能被三七充分吸收利用的Cd主要为可交换态与碳酸盐结合态^[62]。云南省文山市三七种植土壤中Cd形态含量为:铁锰氧化物结合态($0.125 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)>残渣态($0.078 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)>碳酸盐结合态($0.062 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)>有机物结合态($0.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)>可交换态($0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[35],表明文山市三七种植地区土壤Cd全量虽有超标现象,但其生物有效态含量较低,然而,研究表明,在三七种植土壤中施加磷肥可使Cd由不溶态转变成水溶交换态^[72],提高其生物有效性,导致三七Cd含量升高。此外,云南省文山市三七种植区土壤Pb形态表现为:残渣态($21.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)>有机物结合态($13.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)>铁锰氧化物结合态($9.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)>碳酸盐结合态($6.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)>可交换态($4.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[35]。云南省文山市三七土壤Cu形态为:残渣态($15.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)>有机物结合态($9.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)>铁锰氧化物结合态($7.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)>碳酸盐结合态($6.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)>可交换态($4.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[35]。Pb、Cu均是残渣态含量最高,其次为有机结合态和铁锰氧化物结合态,可交换态含量最低。不同重金属的赋存形态差异受多种因素影响。其中,土壤Cd、Pb的生物有效性主要受重金属全量、土壤pH、有机质、氧化还原电位、人为干预等因素影响^[73-74]。

2.2 土壤理化性质

2.2.1 土壤pH

酸碱性影响土壤理化性质、微生物活性、重金属赋存形态和生物有效性。低pH可促进重金属溶解,提高其生物有效性,pH<6.5重金属有效性较高^[75]。研究表明,三七种植区土壤pH为5.0~8.0,中性偏酸性(pH 6.5~7.0)适宜生长^[76]。pH降低使腐殖酸结合态、铁锰氧化物结合态重金属活动性增强,故土壤酸化可导致三七重金属污染率升高^[77-78]。盆栽试验研究不同pH值(4.0、5.5、7.0、8.5)对重金属植物吸收的影响,发现酸性(pH 5.5)促进植物Cd吸收(由23.2%提高至46%)^[79]。碱性时,土壤中黏粒矿物和有机质表面负电荷减少,降低 H^+ 与重金属竞争吸附位点,从而降低重金属的生物有效性^[38]。红壤、潮土、黄褐土和水稻土pH值与Cd、Pb有效态含量的关系研究表明,pH值由4.34~8.30升高至5.05~8.62,有效态Cd、Pb含量由 $0.01 \sim 7.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.55 \sim 256 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降至 $0.05 \sim 0.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 0.28

$\sim 106 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[80-81]。与重金属阳离子相反,类金属As阴离子有效态含量随pH升高而增加,导致植物As吸收增加,例如,土壤pH值由5.87升至6.33时,三七As含量由 $0.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增至 $0.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[62]。土壤pH通过影响土壤Hg的存在形态影响其生物有效性,进而影响Hg在土壤中的迁移转化能力。酸性条件可能会使土壤Hg有效态含量增加,生物有效性提高,迁移能力增强;碱性条件则相反^[82]。

2.2.2 土壤有机质

土壤有机质是土壤中含碳有机物的总称,是土壤固相的重要组分,直接影响和改变土壤物理、化学和生物学性质,对土壤质量保持与养分控制具有重要作用^[83]。土壤有机质亦可促进土壤结构的形成,减少水分蒸发和改善土壤渗透性,是土壤养分的重要来源,是三七生长不可或缺的要素^[84]。土壤有机质在微生物作用下,形成土壤腐殖质,腐殖质含有多种含氧功能团,易与重金属发生络合或螯合反应,形成“重金属-有机质”有机结合态复合物,改变重金属在土壤中的赋存形态^[85],从而降低植物对重金属的吸收^[86]。土壤有机质对重金属形态具有多方面影响,可溶性有机质可与重金属形成络合物提高生物有效性、促进迁移转化^[87]。

2.2.3 土壤质地、类型及种植环境

土壤质地对重金属形态分布影响作用复杂,不同质地结构土壤颗粒的比表面积影响重金属离子吸附,影响其活动性及迁移转化^[88]。研究表明,采集的土壤样品中黏土占比40%,其中壤质黏土占比43.3%,较高的黏粒含量使须根As吸附量增加^[89-90]。因此,对于三七种植区,需关注土壤质地的选择。黏重土壤可进行改良,增加砂粒比重,减少三七须根对土壤As的吸附和吸收。土壤类型亦影响植物重金属含量,同一土壤各重金属含量差异亦较大。研究表明,同一品种三七的微量元素组成相似,但由于生长产地的不同,其重金属含量存在差异,例如,云南铤卡和广西靖西同品种三七的对比发现,云南三七Cu、As含量高于广西($111、28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ vs $79、18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[91],源于不同产地因气候、工业排放、烟尘沉降和灌溉水污染等差异而产生的土壤重金属含量形态及理化性质差异。

2.3 降低三七重金属吸收的途径

2.3.1 种植基地选择

在保证药材生产道地性的基础上,三七种植可选择环境质量较好、无重金属污染、偏远郊区或远离

公路的区域进行栽培,从控制污染源有效降低三七重金属含量。三七栽培可采用生产质量管理规范(good agricultural practice, GAP)基地,研究无公害化和有机栽培技术是控制三七重金属污染的有效途径之一。GAP基地是标准化、系统性强、结构严谨、可操作性强而效益显著、主要以预防为主、农产品质量安全保证体系。作为生产初级农产品良好农业规范标准,应用到实际农业生产中,提高可靠性和安全性,可有效减少因大量抽样检查增加的运行管理成本。

2.3.2 种植地执行重金属监测及评价

三七生产基地进行定期且全面的环境监测及评价,建立绿色三七基地环境质量监测及其评价方法、评价标准和绿色三七的质量标准。三七种植基地的环境质量监测和评价可包括水质监测与评价标准,参照《绿色食品产地环境质量现状评价纲要》^[92]和《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)^[93]二级和三级标准;大气质量监测与评价标准,参照《绿色食品产地环境质量现状评价纲要》^[92];土壤环境质量监测与评价标准,参照《绿色食品产地环境质量现状评价纲要》^[92]。

2.3.3 运用土壤修复技术降低三七重金属含量

三七产量、质量及其产业发展受种植土壤质量的严重影响,可通过植物修复、施加土壤钝化剂等技术降低种植土壤重金属的含量或生物有效性,进而降低三七对重金属的吸收。例如,基于超富集植物对特定重金属的超吸收和富集能力及其较大的生物量,形成蜈蚣草/杨树-三七间作模式,通过植物修复技术降低土壤As、Cd、Pb和Cu含量,从而降低三七对As、Cd、Pb和Cu的吸收^[94-95]。此外,土壤钝化剂(粉煤灰、石灰、石膏和秸秆生物炭等)、改良剂(泥炭、沸石、树脂、动物粪便和微生物制剂等)联合间套种植技术修复三七种植土壤重金属污染亦已引起关注^[96]。目前对三七种植土壤重金属污染治理多采用农艺措施,如减少含As、Cu等农药的使用、规范化种植、使用土壤改良剂和合理施肥等,然而,利用绿色、高效的生物技术治理或缓解三七种植土壤重金属污染还需进一步研究。

2.3.4 改进清洗、加工和炮制工艺

科学清洗三七对其重金属超标现象有明显改善。研究表明,三七样品经过清洗后,Pb、Cd、As和Cu含量均有不同程度的降低^[97],且流水冲洗较清水浸泡可有效去除三七切口As、Cd、Pb和Hg^[98]。因此,改进清洗方式对降低三七重金属含量具有一定

作用。三七加工炮制过程中,使用含重金属的炮制用水或容器,均会引入三七重金属污染。对粉碎前后的中药材、中药饮片、中成药及药用辅料中进行Cd含量检测发现,加工和处理过程中使用不锈钢材质的机器导致Cd污染,影响中药质量^[99]。故可改进三七炮制技术,选择符合三七药用标准的炮制辅料及炮制工具,改进传统包装,在精加工基础上采用新型包装方法和技术,最大限度阻控重金属污染。

3 结论与展望(Conclusions and prospects)

本文基于前期研究成果,分析了土壤污染对三七植株吸收、富集和转运重金属的影响。然而,目前关于三七重金属污染的研究主要关于农艺性状、生理生化、药用价值及连作障碍,而在其重金属含量分配特征、影响因素、吸收阻控措施及遗传学和分子生物学调控机制等方面的系统性研究较少,以下几方面可进一步研究。

(1)筛选重金属低累积三七品种,研究三七对不同重金属吸收分配的基因型差异及其不同时期、不同部位的分配规律,通过品种和生长过程调控,降低三七对重金属的吸收和含量。

(2)交叉学科研究,在阐明影响因素和调控机制基础上,研究与集成推广三七重金属综合防控措施,促进三七规范化种植。

(3)土壤中重金属能否被三七吸收取决于其生物有效性,重金属生物有效性是一个动态平衡过程,受土壤pH值、有机质含量、微生物、土壤机械组成和重金属总量等多种因素影响。生物有效性直接反映土壤重金属的污染程度,是三七吸收分配重金属的重要影响因素。因此,在研究土壤重金属全量基础上,可研究土壤重金属形态与生物有效性及其影响因素,通过重金属生物有效性初步判断其对三七重金属含量和品质的影响,通过调控重金属生物有效性的关键影响因素实现降低三七对重金属的吸收和富集。

通讯作者简介:刘雪(1987—),女,博士,副研究员,主要研究方向为土壤污染修复与食品安全。

参考文献(References):

- [1] 淡俊豪,齐绍武,朱益,等.有机改良剂修复重金属污染土壤研究的自然辩证法评述[J].天津农业科学,2017,23(4):26-29
- Dan J H, Qi S W, Zhu Y, et al. Review on organic agents

- in remediation of heavy metals-contaminated soil from scope of natural dialectics [J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2017, 23(4): 26-29 (in Chinese)
- [2] 王丹丹, 李卫华, 郭海平, 等. 重金属汞在玉米不同组织内积累差异性分析[J]. 山西农业科学, 2017, 45(6): 912-917
- Wang D D, Li W H, Guo H P, et al. Analysis of mercury accumulation in different tissues of maize [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2017, 45(6): 912-917 (in Chinese)
- [3] 茹淑华, 张国印, 孙世友, 等. 重金属 Cu、Zn、Pb 和 Cd 在土壤-萝卜系统中的迁移累积规律[J]. 华北农学报, 2013, 28(S1): 361-365
- Ru S H, Zhang G Y, Sun S Y, et al. Accumulation and mobility of heavy metals Cu, Zn, Pb and Cd in soil-radish system [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2013, 28(S1): 361-365 (in Chinese)
- [4] 杨红飞, 王友保, 李建龙. 铜、锌污染对水稻土中油菜 (*Brassica chinensis* L.) 生长的影响及累积效应研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(10): 1470-1477
- Yang H F, Wang Y B, Li J L. Impacts of Cu and Zn pollution on rape (*Brassica chinensis* L.) growth and its accumulation effect of heavy metals in paddy soil [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(10): 1470-1477 (in Chinese)
- [5] 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
- Yang Y, Chen Y J, Zhang A C, et al. Relationship between inorganic elements in soil and herbal quality of *Panax notoginseng* [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2018, 24(13): 47-53 (in Chinese)
- [6] 朱烨, 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
- Zhu Y, Teng Y, Zhang M Y, et al. Pollutant accumulation and microbiological characteristics change in notoginseng-planting soils [J]. Soils, 2015, 47(1): 121-127 (in Chinese)
- [7] 傅国伟. 中国水土重金属污染的防治对策[J]. 中国环境科学, 2012, 32(2): 373-376
- Fu G W. Countermeasures for water and soil heavy metal pollution in China [J]. China Environmental Science, 2012, 32(2): 373-376 (in Chinese)
- [8] 罗小莉, 杨金蓉, 李汝佳, 等. 中药中重金属元素测定的研究进展[J]. 实用医药杂志, 2009, 26(5): 61-63
- Luo X L, Yang J R, Li R J, et al. Research progress on determination of heavy metal elements in traditional Chinese medicine [J]. Practical Journal of Medicine & Pharmacy, 2009, 26(5): 61-63 (in Chinese)
- [9] 李艳丽, 王庚, 沈秀静. 微波消解-ICP-MS 测定中药材中 5 种有害元素的研究[J]. 分析试验室, 2008, 27(S1): 10-14
- Li Y L, Wang G, Shen X J. Determination of five harmful elements in traditional Chinese medicine by microwave digestion-ICP-MS [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2008, 27(S1): 10-14 (in Chinese)
- [10] 陆龙根. 植物类中药材中砷、镉和铅的含量及安全性评价[J]. 微量元素与健康研究, 2003, 20(1): 51-52
- Lu L G. Content and safety evaluation of arsenic, cadmium and lead in plant-like traditional Chinese medicine [J]. Studies of Trace Elements and Health, 2003, 20(1): 51-52 (in Chinese)
- [11] 张晖芬, 赵春杰. 中药材中重金属的控制及其分析方法[J]. 中药研究与信息, 2004, 6(5): 10-12, 35
- Zhang H F, Zhao C J. Control and analysis methods of heavy metals in traditional Chinese medicine [J]. Research & Information of Traditional Chinese Medicine, 2004, 6(5): 10-12, 35 (in Chinese)
- [12] 刘刚, 刘育辰, 鲍建才, 等. 三七药理作用的研究进展[J]. 人参研究, 2005, 17(3): 12-17
- Liu G, Liu Y C, Bao J C, et al. The advancement in pharmacological actions study of *Panax notoginseng* [J]. Ginseng Research, 2005, 17(3): 12-17 (in Chinese)
- [13] 李冠烈. 三七的现代研究与进展(二)[J]. 世界中西医结合杂志, 2008, 3(11): 687-691
- [14] 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
- 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): 1051-1054 (in Chinese)
- [15] 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): 511-514
- Wang C L, Chen Z J, Cui X M, et al. Characteristics of *Panax notoginseng* products in Wenshan's native areas [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2004, 29(6): 511-514 (in Chinese)
- [16] Ng T B. Pharmacological activity of *Panax notoginseng* [J]. Journal of Pharmacy and Pharmacology, 2010, 58(8): 1007-1019
- [17] 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(6): 33-37
- Jiang B, Wen X, Zhao Q. Preliminary study on content control of heavy metals in *Panax notoginseng* [J]. Chinese Journal of Ethnomedicine and Ethnopharmacy, 1997, 6(6): 33-37 (in Chinese)

- 33-37 (in Chinese)
- [18] 郝南明, 田洪, 苟丽. 三七生长初期不同部位微量元素的含量测定[J]. 广东微量元素科学, 2004, 11(6): 31-34
- [19] 何剑. 文山都龙含铜超高铁闪锌矿的活化试验与理论研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2006: 56-57
- He J. Activation experiment and theoretical study of Dulong indium-bearing ultra-high iron zinc blende in Wenshan [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2006: 56-57 (in Chinese)
- [20] 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 (in Chinese)
- [21] 张俊清, 刘明生, 符乃光, 等. 中药材微量元素及重金属研究的意义与方法[J]. 中国野生植物资源, 2002, 21(3): 48-49
- Zhang J Q, Liu M S, Fu N G, et al. Significance and methods of research on trace elements and heavy metals in Chinese herbal medicines [J]. Chinese Wild Plant Resources, 2002, 21(3): 48-49 (in Chinese)
- [22] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部[S]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 214
- [23] 高秀蓉, 许小红, 廖昌军. 中药重金属质量控制研究进展[J]. 医药导报, 2008, 27(4): 431-433
- [24] 朱美霖, 姜阳, 崔斌, 等. 云南道地产区中药三七中镉的健康风险评价[C]/风险分析和危机反应的创新理论和方法——中国灾害防御协会风险分析专业委员会第五届年会论文集. 南京: 中国灾害防御协会风险分析专业委员会, 2012: 572-576
- [25] 中华人民共和国对外贸易经济合作部. 药用植物及制剂进出口绿色行业标准: WM/T2—2004 [S]. 北京: 中华人民共和国对外贸易经济合作部, 2004
- [26] 李璇. 重金属对《中国药典》收载6种中药材品质的影响及其限量标准的制定[D]. 成都: 西南交通大学, 2012: 4-5
- Li X. Effect and limited standards of heavy metals on the 6 medicinal materials in pharmacopoeia of People's Republic of China [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012: 4-5 (in Chinese)
- [27] 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 (in Chinese)
- [28] 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
- [29] 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
- Chen L, Mi Y H, Lin X, et al. Investigation and analysis of heavy metal pollution related to soil-*Panax notoginseng* system [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2014, 39(14): 2608-2613 (in Chinese)
- [30] 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 (in Chinese)
- [31] 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
- Tao L, Bao L, Liu Y, et al. Absorption and accumulation characteristics of heavy metals in *Panax notoginseng* from different regions of Yunnan [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(34): 74-81 (in Chinese)
- [32] 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): 298-302
- Liu Y, Yang M Q, Wang T, et al. Distribution of soil heavy metals in *Panax notoginseng* plantation of Yunnan Province and its relationship with heavy metal contents in roots and leaves of *Panax notoginseng* [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(18): 298-302 (in Chinese)
- [33] 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: 18-19
- 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: 18-19 (in Chinese)
- [34] 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
- Xie X W, Niu R X. Determination and analysis of contents of metal elements in pseudo-ginseng and soil in a region of Wenshan [J]. Journal of Dali University, 2017, 2(10): 87-89 (in Chinese)
- [35] 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
Zu Y Q, Cheng S C, Ke H L, et al. Distribution of Pb, Cd, Cu and Zn in plant of *Panax notoginseng* and soil in Wenshan prefecture, a *Panax notoginseng*-growing region [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, 33 (4): 317-323 (in Chinese)
- [36] 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 (in Chinese)
- [37] 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, 26 (27): 3847-3849
Gao Z J, Gao H X, Liu Y L, et al. Contents determination of 5 heavy metals in 5 TCM powders by ICP-MS [J]. China Pharmacy, 2015, 26(27): 3847-3849 (in Chinese)
- [38] 金航, 崔秀明, 徐珞珊, 等. 三七道地与非道地产区药材及土壤微量元素分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2006, 28(2): 144-149
Jin H, Cui X M, Xu L S, et al. The analysis of roots of *Panax notoginseng* from famous and infamous regions [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2006, 28(2): 144-149 (in Chinese)
- [39] 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, 23(S2): 168-170
Li W D. Investigation on environmental quality of pseudo-ginseng GAP planting areas in Wenshan District [J]. Yunnan Environmental Science, 2004, 23 (S2): 168-170 (in Chinese)
- [40] 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 (in Chinese)
- [41] 祖艳群, 孙晶晶, 郭先华, 等. 文山三七(*Panax notoginseng*)种植区土壤 As 空间分布特征及理化性质对三七 As 含量的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(6): 1034-1041
Zu Y Q, Sun J J, Guo X H, et al. Effects of As spatial distribution and physical and chemical characteristics of soil on As contents in *Panax notoginseng* in Wenshan plantation area [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(6): 1034-1041 (in Chinese)
- [42] 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
Zhu L, Zhou J M, Zeng H C, et al. Analysis of heavy metal content in stem, leaf and flower of *Panax notoginseng* [J]. Research and Practice on Chinese Medicines, 2010, 24(2): 70-71 (in Chinese)
- [43] 林龙勇, 于冰冰, 廖晓勇, 等. 三七及其中药制剂中神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
Lin L Y, Yu B B, Liao X Y, et al. Contents and health risk of As and heavy metals in *Panax notoginseng* and their pharmaceutical preparations [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2013, 8(2): 244-249 (in Chinese)
- [44] 冯光泉, 张文斌, 刘云芝. 公路铅污染对三七药材中铅残留量的影响研究[J]. 现代中药研究与实践, 2003, 17 (S1): 34-36
Feng G Q, Zhang W B, Liu Y Z. Study on the influence of highway pollution on lead residues in *Panax notoginseng* [J]. Research and Practice of Chinese Medicines, 2003, 17(S1): 34-36 (in Chinese)
- [45] Liu X J, Zhao Q L, Sun G X, et al. Arsenic speciation in Chinese herbal medicines and human health implication for inorganic arsenic [J]. Environmental Pollution, 2013, 172: 149-154
- [46] Connell D W. Bioaccumulation behavior of persistent organic chemicals with aquatic organisms [J]. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 1988, 102: 117-154
- [47] 王玉宏, 李保同, 汤丽梅. 3 种作物对添加外源性 Cu、Zn 的土壤中 Cu、Zn 的富集与转运[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(2): 250-256
Wang Y H, Li B T, Tang L M. Bioconcentration and translocation of Cu and Zn by three crops grown in exogenous Cu and Zn added soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(2): 250-256 (in Chinese)
- [48] 戴泽龙, 凌海波, 李晓玲, 等. 湿生植物酸模对重金属富集作用研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(11): 58-62
Dai Z L, Ling H B, Li X L, et al. Study of heavy metals bioconcentration in the wetland plant *Rumex acetosa* [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(11): 58-62 (in Chinese)
- [49] 李庚飞. 某矿区附近不同作物对 3 种重金属富集能力的研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(26): 257-261
Li G F. Study on the concentration capacity to three kinds of heavy metals for different crops around the gold area [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(26): 257-261 (in Chinese)
- [50] 卢德亮, 乔璐, 陈立新, 等. 哈尔滨市市区绿地土壤重金属污染特征及植物富集[J]. 林业科学, 2012, 48(8): 16-

- 24
Lu D L, Qiao L, Chen L X, et al. Soil pollution characteristics by heavy metals and the plant enrichment in green space of urban areas of Harbin [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(8): 16-24 (in Chinese)
- [51] 向明文, 王丹, 姚天月, 等. 8种植物对铀和镉的富集特性[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(1): 594-601
Xiang M W, Wang D, Yao T Y, et al. Enrichment characteristics of eight plants to uranium and cadmium [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(1): 594-601 (in Chinese)
- [52] 周启星, 宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 136-139
- [53] Simon L. Cadmium accumulation and distribution in sunflower plant [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1998, 21(2): 341-352
- [54] 郭晓宏, 朱广龙, 魏学智. 5种草本植物对土壤重金属铅的吸收、富集及转运[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(1): 183-186
Guo X H, Zhu G L, Wei X Z. Characteristics of uptake, bioaccumulation and translocation of soil lead (Pb) in five species of herbaceous plants [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(1): 183-186 (in Chinese)
- [55] Berry W L. Plant and factors influencing the use of plant analysis as a tool for biogeochemical prospecting [C]// Carlisle D, Berry W L, Kaplan I R, et al. *Mineral Exploration: Biogeological Systems and Organic matter*. Englewood Cliffs, N J: Prentice-Hall, 1986, 5: 13
- [56] 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, 35(1): 3-4
Wu Q T, Hu M Y, Zhang H J, et al. Study on the content of several kinds of heavy metals in the soil with different crop rotation years of *Panax notoginseng* [J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2014, 35(1): 3-4 (in Chinese)
- [57] Sarma H, Deka S, Deka H M, et al. Accumulation of heavy metals in selected medicinal plants [J]. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2011, 214: 63-86
- [58] 张广庆. 中药材种植环境中重金属形态及其影响因素研究[J]. *北京农业*, 2015(19): 139-140
Zhang G Q. Study on the speciation of heavy metals in Chinese herbal medicine planting environment and its influencing factors [J]. *Beijing Agriculture*, 2015(19): 139-140 (in Chinese)
- [59] 高琳琳, 鲍广灵, 张宁, 等. 土壤重金属有效态纳入农田土壤环境质量标准探讨[J]. *安徽农学通报*, 2021, 27(10): 105-109, 114
Gao L L, Bao G L, Zhang N, et al. Study on the availability of heavy metals in soil as a risk assessment index for heavy metal pollution of soil and agricultural products [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2021, 27(10): 105-109, 114 (in Chinese)
- [60] 李朋飞, 陶春军. 安徽黄泛区农用地土壤重金属含量特征及环境质量评价[J]. *地质学刊*, 2019, 43(2): 301-306
Li P F, Tao C J. Heavy metal content characteristics and environmental quality assessment of agricultural land in the Yellow River flooded area of Anhui Province [J]. *Journal of Geology*, 2019, 43(2): 301-306 (in Chinese)
- [61] 张雯博. 土壤重金属环境质量评价研究进展[J]. *绿色科技*, 2017(18): 156-157
Zhang W B. Research progress on environmental quality evaluation of heavy metals in soil [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2017(18): 156-157 (in Chinese)
- [62] 李子唯. 三七对重金属镉的富集效应及其生理机制研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017: 18-21
Li Z W. Study on accumulation effects and physiological mechanism of *Panax notoginseng* (Burk) F. H. Chen to cadmium [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017: 18-21 (in Chinese)
- [63] 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
Liu X J, Lin A J, Sun G X, et al. Source of arsenic in *Panax notoginseng* and preliminary evaluation of its health risk [J]. *Environmental Chemistry*, 2009, 28(5): 770-771 (in Chinese)
- [64] 张文斌, 刘云芝, 冯光泉. 土壤砷污染对三七药材中砷残留量的影响[J]. *现代中药研究与实践*, 2003, 17(S1): 32-34
Zhang W B, Liu Y Z, Feng G Q. Effect of arsenic pollution in soil on arsenic residue in *Panax notoginseng* [J]. *Research and Practice of Chinese Medicines*, 2003, 17(S1): 32-34 (in Chinese)
- [65] 周卫红, 张静静, 邹萌萌, 等. 土壤重金属有效态含量检测与监测现状、问题及展望[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(4): 605-615
Zhou W H, Zhang J J, Zou M M, et al. The detection and monitoring of available heavy metal content in soil: A review [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(4): 605-615 (in Chinese)
- [66] Ruby M V, Schoof R, Brattin W, et al. Advances in evaluating the oral bioavailability of inorganics in soil for use in human health risk assessment [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, 33(21): 3697-3705

- [67] 贺建群, 许嘉琳, 杨居荣, 等. 土壤中有有效态 Cd、Cu、Zn、Pb 提取剂的选择[J]. 农业环境保护, 1994, 13(6): 246-251
- He J Q, Xu J L, Yang J R, et al. Study of the extractants for available Cd, Cu, Zn and Pb in soils [J]. Agro-Environmental Protection, 1994, 13(6): 246-251 (in Chinese)
- [68] 朱波, 青长乐, 牟树森. 紫色土外源锌、镉形态的生物有效性[J]. 应用生态学报, 2002, 13(5): 555-558
- Zhu B, Qing C L, Mu S S. Bioavailability of exotic zinc and cadmium in purple soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(5): 555-558 (in Chinese)
- [69] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. Analytical Chemistry, 1979, 51(7): 844-851
- [70] 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 等. 广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 449-459
- Ma H H, Peng M, Liu F, et al. Bioavailability, translocation, and accumulation characteristic of heavy metals in a soil-crop system from a typical carbonate rock area in Guangxi, China [J]. Environmental Science, 2020, 41(1): 449-459 (in Chinese)
- [71] Zhu N, Qiang L, Guo X J, et al. Sequential extraction of anaerobic digestate sludge for the determination of partitioning of heavy metals [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 102(1): 18-24
- [72] Williams C H, David D J. The accumulation in soil of cadmium residues from phosphate fertilizers and their effect on the cadmium content of plants [J]. Soil Science, 1976, 121(2): 86-93
- [73] 郭曙林, 杜葱远. 淹水土壤中砷的形态及有效性研究进展[J]. 闽西职业技术学院学报, 2008, 10(1): 116-119
- Guo S L, Du C Y. Research progress of the forms and effectiveness of As in waterlogged soil [J]. Journal of Minxi Vocational and Technical College, 2008, 10(1): 116-119 (in Chinese)
- [74] 杨洁, 瞿攀, 王金生, 等. 土壤中重金属的生物有效性分析方法及其影响因素综述[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(2): 217-223
- Yang J, Qu P, Wang J S, et al. Review on analysis methods of bioavailability of heavy metals in soil and its influence factors [J]. Environmental Pollution & Control, 2017, 39(2): 217-223 (in Chinese)
- [75] 王炳艳, 韦美丽, 陈中坚, 等. 文山三七产区土壤养分测试与分析[J]. 人参研究, 2006, 18(3): 35-37
- Wang B Y, Wei M L, Chen Z J, et al. Test and analysis of soil nutrients in Wenshan *Panax notoginseng* production area [J]. Ginseng Research, 2006, 18(3): 35-37 (in Chinese)
- [76] 李思民, 王豪吉, 朱曦, 等. 土壤 pH 和有机质含量对重金属可利用性的影响[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2021, 41(1): 49-55
- Li S M, Wang H J, Zhu X, et al. Effects of soil pH and organic matter on the content of bioavailable heavy metals [J]. Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition), 2021, 41(1): 49-55 (in Chinese)
- [77] 费毅琴, 汪波, 朱海兰, 等. 我国部分地区中药材栽培土壤污染情况分析[J]. 中药材, 2020, 43(11): 2639-2643
- [78] Kidd P S, Domínguez-Rodríguez M J, Díez J, et al. Bioavailability and plant accumulation of heavy metals and phosphorus in agricultural soils amended by long-term application of sewage sludge [J]. Chemosphere, 2007, 66(8): 1458-1467
- [79] 廉梅花. 根际土壤中重金属的活化因素及作用机理研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2016: 36-59
- Lian M H. Study on the activating factors and mechanisms of heavy metals in rhizosphere soil [D]. Shenyang: Northeastern University, 2016: 36-59 (in Chinese)
- [80] 杜英秋. 土壤中镉、镍、铅全量和有效态的 ICP-MS 法测定及两者相关性分析[J]. 中国西部科技, 2015, 14(12): 101-104, 84
- Du Y Q. Determination for total content and available state of cadmium, nickel, lead in soil by ICP-MS and correlation analysis between the two [J]. Science and Technology of West China, 2015, 14(12): 101-104, 84 (in Chinese)
- [81] 杨梦丽, 马友华, 黄文星, 等. 土壤 Cd 和 Pb 有效态与全量和 pH 相关性研究[J]. 广东农业科学, 2019, 46(4): 74-80
- Yang M L, Ma Y H, Huang W X, et al. Study on the correlation between available state, total amount and pH of soil Cd and Pb [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2019, 46(4): 74-80 (in Chinese)
- [82] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 等. 土壤 pH 对汞迁移转化的影响研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(1): 1-8
- Dou W Q, An Y, Qin L, et al. Research progress on effects of soil pH on migration and transformation of mercury [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(1): 1-8 (in Chinese)
- [83] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 46-47
- [84] 蒋靖怡, 杨婉珍, 康传志, 等. 中药材栽培地土壤肥力评价[J]. 中国中药杂志, 2018, 43(4): 847-852
- Jiang J Y, Yang W Z, Kang C Z, et al. Assessment of soil fertility for cultivation of Chinese herbal medicines [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2018, 43(4):

- 847-852 (in Chinese)
- [85] 王丹丽, 关子川, 王恩德. 腐殖质对重金属离子的吸附作用[J]. 黄金, 2003, 24(1): 47-49
Wang D L, Guan Z C, Wang E D. Adsorption of heavy metal ions onto humus [J]. Gold, 2003, 24(1): 47-49 (in Chinese)
- [86] 董克虞, 陈家梅. 镉对农作物生长发育的影响与吸收累积的关系[J]. 环境科学, 1982, 3(4): 31-34
Dong K Y, Chen J M. Effect of cadmium on crop growth and development and its relationship with absorption and accumulation [J]. Environmental Science, 1982, 3(4): 31-34 (in Chinese)
- [87] Chomchoei R, Shiowatana J, Pongsakul P. Continuous-flow system for reduction of metal readsorption during sequential extraction of soil [J]. Analytica Chimica Acta, 2002, 472(1-2): 147-159
- [88] 祝惠, 阎百兴, 张丰松, 等. 粒级、pH 和有机质对汞在松花江沉积物表面吸附-解吸的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(10): 2315-2320
Zhu H, Yan B X, Zhang F S, et al. Effects of particle-sizes, pH and organic matter on adsorption and desorption of mercury to sediments in the Songhua River [J]. Environmental Science, 2010, 31(10): 2315-2320 (in Chinese)
- [89] 崔秀明, 徐珞珊, 王强, 等. 云南三七道地产区地质背景及土壤理化状况分析[J]. 中国中药杂志, 2005, 30(5): 332-335
Cui X M, Xu L S, Wang Q, et al. Analysis on the geologic background and physicochemical properties of soil for the cultivation of *Panax notoginseng* in Yunnan Province [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2005, 30(5): 332-335 (in Chinese)
- [90] Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments—A review [J]. Waste Management, 2008, 28(1): 215-225
- [91] 张之申, 朱梅年, 闻家政. 不同产地三七的生态环境观察和微量元素研究[J]. 中国中药杂志, 1991, 16(6): 334-336
Zhang Z S, Zhu M N, Wen J Z. Ecological environment observation and trace elements study of *Panax notoginseng* from different producing areas [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 1991, 16(6): 334-336 (in Chinese)
- [92] 黄国锋, 吴启堂. 绿色食品产地土壤环境质量现状评价标准的修正[J]. 农业环境保护, 2000, 19(2): 123-125
Huang G F, Wu Q T. Recommendation of amendment on standards of soil environmental quality for green-food production area [J]. Agro-Environmental Protection, 2000, 19(2): 123-125 (in Chinese)
- [93] 高波. 绿色食品产地环境质量现状评价综述[J]. 热带农业工程, 2004, 28(1): 41-45
Gao B. Review on the evaluation of environmental quality in green food producing areas [J]. Tropical Agricultural Engineering, 2004, 28(1): 41-45 (in Chinese)
- [94] 董祥伟. 蜈蚣草-作物间作模式修复土壤砷的效果研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020: 32-34
Dong X W. Soil arsenic remediation effect and its mechanisms for intercropping models of *Pteris vittata* L. and crops [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020: 32-34 (in Chinese)
- [95] 李晓宇. 杨树修复土壤重金属污染研究进展[J]. 辽宁林业科技, 2021(4): 59-61
Li X Y. Research progress on remediation of soil heavy metal pollution through poplar plantations [J]. Liaoning Forestry Science and Technology, 2021(4): 59-61 (in Chinese)
- [96] 孙岩, 吴启堂, 许田芬, 等. 土壤改良剂联合间套种技术修复重金属污染土壤: 田间试验[J]. 中国环境科学, 2014, 34(8): 2049-2056
Sun Y, Wu Q T, Xu T F, et al. Applying soil amendments to co-cropping system for remediating heavy metal contaminated soil: Field experiment [J]. China Environmental Science, 2014, 34(8): 2049-2056 (in Chinese)
- [97] 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, 37(5): 13-15
Wang L, Fu D H. A preliminary study of the effects of heavy metals in *Panax notoginseng* [J]. Journal of Yunnan University of Traditional Chinese Medicine, 2014, 37(5): 13-15 (in Chinese)
- [98] 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
Zeng X C, Zhu M L, Jiang Y X, et al. Influence of different processing methods on heavy metals and effective components in *Notoginseng Radix et Rhizoma* [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2015, 21(8): 9-12 (in Chinese)
- [99] 曾秋初, 李衡, 刘建存, 等. 中药粉碎前后重金属铬含量检测分析[J]. 中国药师, 2016, 19(3): 613-615
Zeng Q C, Li H, Liu J C, et al. Evaluation of heavy metal chromium pollution problems and results in the production process of traditional Chinese medicines [J]. China Pharmacist, 2016, 19(3): 613-615 (in Chinese) ◆