

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.

RAN W Q, PENG Y J, WANG Q, et al. Migration of Heavy Metals in Rhizosphere Soil to Ginseng Roots, Stems, and Leaves [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 38 (11): 1358-1366.

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

冉文倩, 彭韵洁, 王奇, 赵博雅, 张平平, 时东方, 陈丽娜*, 刘春明*

(长春师范大学中心实验室, 吉林 长春 130032)

摘要:【目的】探究人参根、茎叶及其根际土壤中重金属污染程度及迁移能力。【方法】对来自吉林省3个产区的15份人参样本中元素Al、V、Cr、Cd、Pb、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Ba等进行分析测定, 采用单因子污染指数法、内梅罗综合指数法对根际土壤元素Cd、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn等进行污染评价, 分析人参不同部位对其根际土壤中重金属的富集特性及各元素间的相关性。【结果】人参根、茎叶及根际土壤中Al元素含量最高, 根、茎叶变异系数范围分别为: 12.07%~58.43%, 10.02%~87.96%。根际土壤中有13份样品属于安全、清洁水平, 2份属于警戒级、尚清洁水平, 其中Cd元素是主要污染物。茎叶和根对各元素的富集趋势相似, BCF平均值相差较大, 但均表现为对Cu、Zn、Ba、Cd的富集能力较强。【结论】人参种植要采取手段监测与管控单因子污染指数值最大的Cd元素含量, 避免土壤镉污染。人参根、茎叶与土壤元素含量的相关性比较复杂, 土壤中部分元素在植物吸收、转运过程中存在协同或拮抗作用。

关键词: 人参; 土壤; 重金属; 污染; 富集

中图分类号: S646.9

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2023) 11-1358-09

Migration of Heavy Metals in Rhizosphere Soil to Ginseng Roots, Stems, and Leaves

RAN Wenqian, PENG Yunjie, WANG Qi, ZHAO Boya, ZHANG Pingping, SHI Dongfang, CHEN Lina*, LIU Chunming*

(The Central Laboratory, Changchun Normal University, Changchun, Jilin 130032, China)

Abstract: 【Objective】 Heavy metal pollution in rhizosphere soil and its migration to the roots, stems, and leaves of ginseng plants grown on the land were studied. 【Methods】 Contents of Al, V, Cr, Cd, Pb, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, and Ba in randomly collected 15 batches of ginseng specimens from three producing areas in Jilin Province were analyzed. Pollution of rhizosphere soil by Cd, Pb, Cr, Cu, Ni, and Zn was evaluated using the single factor pollution index and Nemerow composite index methods. Accumulation of heavy metals in different parts of a ginseng plant was correlated with the pollution on the corresponding soil. 【Results】 Of all the tested heavy metals, Al in the roots and stems/leaves of the ginseng plants was the highest pollutant in content. The variation coefficient on the roots ranged 12.07-58.43% and that on the stems and leaves 10.02-87.96%. Out of 15 rhizosphere soil samples, 13 were considered safe and clean, and two moderately clean with due warning, which contained a high level of Cd. The ginseng roots and stems/leaves were similar in accumulating the pollutants but significantly different on mean BCFs and all high on Cu, Zn, Ba, and Cd. 【Conclusion】 It is crucial that ginseng be cultivated on land with stringent control on heavy metal pollution for safe consumption. Constant monitoring the soil conditions to avoid a high single factor pollution index on Cd was particularly important. The relationship between the heavy metals in ginseng plants and rhizosphere soil was complex, as certain synergistic and/or antagonistic effects might interfere with the absorption and transport of the harmful elements.

Key words: Ginseng; soil; heavy metals; pollution; accumulation

收稿日期: 2023-06-13 修回日期: 2023-07-13

作者简介: 冉文倩 (2002-), 女, 主要从事天然药物分析研究, E-mail: 3161818400@qq.com

* 通信作者: 陈丽娜 (1984-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事天然药物分析研究, E-mail: chenlina4321@163.com; 刘春明 (1964-), 女, 博士, 教授, 主要从事天然药物分析研究, E-mail: ccsf777@163.com

基金项目: 吉林省教育厅科学研究项目 (JKH20230924KJ)

0 引言

【研究意义】人参为五加科植物人参 (*Panax ginseng* C. A. Mey.) 的干燥根和根茎, 是传统中药材。人参味甘, 性温, 喜阴凉, 具有大补元气、补脾益肺等功效^[1-2], 其功能化学成分如多糖、皂苷等, 具有抗衰老、抗老年痴呆等多种药理学作用^[3-5]。我国人参资源丰富, 人参产量约占世界的 70%^[6], 主产于吉林、黑龙江、辽宁等省, 被誉为“东北三宝”之一^[7]。随着工业和农业生产的迅速繁荣, 重金属污染成为主要环境问题之一。土壤中铅 (Pb)、锌 (Zn) 和镉 (Cd) 等重金属会导致植物中毒^[8], 重金属镉 (Cd) 还会危害人体免疫系统, 诱发各类癌症^[9]; 铜 (Cu) 作为植物生长所必需的元素之一, 过量会严重影响植物生长^[10]; 微量元素镍 (Ni) 有益于人体新陈代谢, 过多摄入则会对人体造成不同程度的危害^[11]。研究人参的重金属污染特征及迁移规律有助于从根源上解决人参重金属污染问题, 对规范人参种植技术, 提高人参品质, 增强市场竞争力具有重要意义。【前人研究进展】迟鸿悦等^[12]分析了吉林省人参中重金属 Cr、Cu、As、Cd、Pd 含量得出结论: 人参中重金属含量合格。而韩小丽等^[13]研究多个产地的多种药材发现 Cd 超标最为严重, 说明重金属含量不同可能与药材本身及生长环境有关。人参生长期较长, 对土壤中的污染物具有一定的富集作用^[14]。张亚玉等^[15]研究发现吉林省人参对土壤中铜富集系数最高, 其次为锌、铅和镉, 这可能与土壤中铜含量高有关。【本研究切入点】人参生长与土壤密切相关, 但目前鲜有对人参根、茎叶与土壤中重金属迁移能力的研究。【拟解决的关键问题】基于人参根、茎叶及根际土壤中 11 种重金属及有害元素 (Al、V、Cr、Cd、Pb、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Ba) 含量状况, 对根际土壤中 6 种重金属元素 (Cd、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn) 进行污染评价, 并通过计算富集系数, 分析重金属从土壤到人参的迁移能力, 以期规范人参种植技术, 合理改善人参种植土壤条件, 提高人参品质提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 仪器与试剂

电感耦合等离子体质谱仪 (ICAP TQ, Thermo, USA); 微波消解仪 (Multiwave PRO, Anton, GER); 实验室纯水制备系统 (Milli-Q Integral 3, Millipor, USA)。

24 种元素混合标准储备溶液 (BWB 2393-2016,

100 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$, 北京北方伟业计量技术研究院); In、Sc、Rh、Cs 内标溶液 (GSB 04-2827-2011, 10.0 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$, 国家有色金属及电子材料分析测试中心); 硝酸、盐酸 (优级纯, 上海安谱实验科技股份有限公司)。

1.2 样品采集与制备

人参生长周期一般为 6 年, 本研究于 2019 年 9~10 月从吉林省白山市抚松县万良镇人参种植基地、吉林省白山市抚松县东岗镇人参种植基地、吉林省白山市抚松县松江河镇人参种植基地采集 15 份六年生人参样品及对应根际土壤样品 (距离作物主根 0~15 cm, 表层 0~20 cm 处; 总采集量为 2.0~2.5 kg), 采集方式采用五点取样法。人参根与茎叶部分先用自来水清洗干净, 再用超纯水冲洗 3 次, 晾干水分后用陶瓷刀切片, 置于 60 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱烘至恒重, 之后研磨, 过 0.4 mm 尼龙网筛保存备用^[16]。土壤样品自然风干, 除去石块、植物残体等异物, 用胶质锤子捶碎, 过 2 mm 尼龙网筛, 再四分法取出四分之一, 采用玛瑙研钵研磨成粉末, 过 0.15 mm 目筛, 备用^[17]。采样点示意图见图 1。

1.3 标准溶液的配制

吸取适量的混合标准储备溶液 (Al、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Ba、Pb 元素含量均为 100 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$), 用 2% HNO_3 溶液逐级稀释成各元素质量浓度分别为 20.0、10.0、5.0、2.0、0.1 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的系列标准工作溶液。吸取适量 In、Sc、Rh、Cs 内标溶液 (10.0 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$), 用纯水稀释成 2.0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的内标工作溶液。

1.4 样品预处理

对于根、茎叶样品, 各准确称取 0.10 g 于消解罐中, 加入硝酸 2 mL, 混匀; 对于土壤样品准确称取 0.05 g 于消解罐中, 加入 2 mL 王水 [V (浓盐酸): V (浓硝酸) 为 3:1], 混匀, 置于微波消解仪内。按照实验室前期建立的消解方法进行消解^[18]。待消解结束, 取出消解罐于通风橱中, 放出气体。将消解罐置于加热器上, 120 $^{\circ}\text{C}$ 赶酸至 1 mL 左右, 冷却至室温, 将液体转移至 50 mL 容量瓶中, 用超纯水冲洗内壁, 合并冲洗液, 定容。同时设置空白对照。将所得溶液通过 0.45 μm 微孔滤膜进行过滤, 待测。

1.5 元素测定方法

样品各元素含量采用 ICP-MS 方法进行测定, 在检测前需采用 1.0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ Li、Co、In、U 调谐液对仪器进行自动调谐, 通过调整矩管位置、雾化器流量等, 使仪器的灵敏度、分辨率、氧化物离子产率及

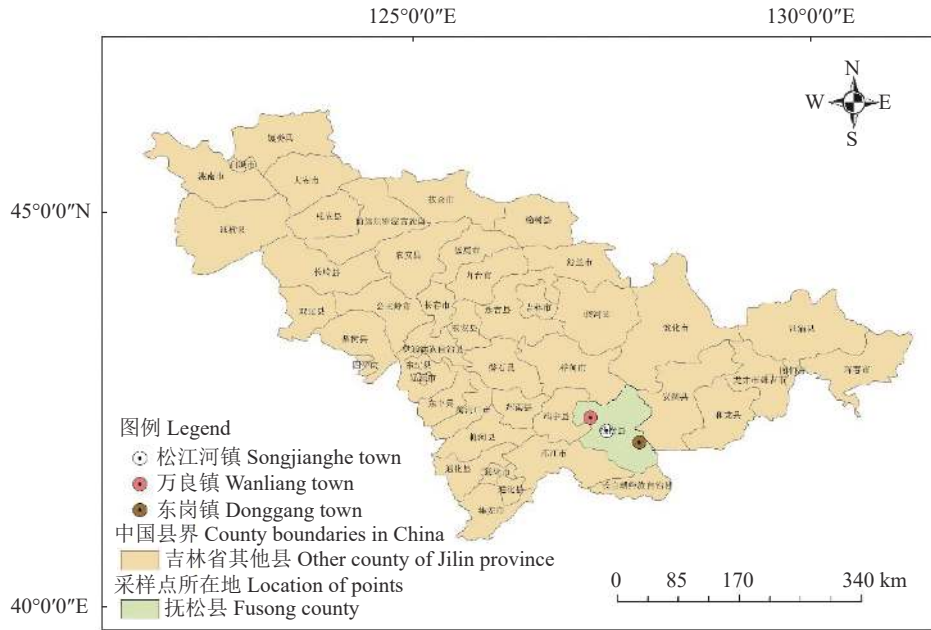


图 1 人参采样点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ginseng sampling sites

双电荷离子产率等指标达到测定要求，仪器工作参数：等离子体 RF 功率 1550 W，载气流速 0.8 L·min⁻¹，雾化器流速 1.5 L·min⁻¹，辅助气流 1.5 L·min⁻¹，冷却气流 20 L·min⁻¹，分析时间为 0.6 s，测量 3 次。

1.6 重金属污染评价依据及方法

对人参种植区土壤进行重金属污染评价，能准确地反映土壤环境质量的真实情况，本试验依据《土壤环境质量标准》(GB 15618—2018)中规定的农用地土壤污染风险筛选值 (6.5 < pH ≤ 7.5)，评价人参根际土壤重金属污染状况，详见表 1^[19]。

表 1 农用地土壤污染风险筛选值

Table 1 Values for screening pollution risk on agricultural land (单位: mg·kg⁻¹)

元素 Element	农用地土壤污染风险筛选值 Risk screening value of soil pollution in agricultural land			
	pH ≤ 5.5	5.5 < pH ≤ 6.5	6.5 < pH ≤ 7.5	pH > 7.5
Cd	0.3	0.3	0.3	0.6
Hg	1.3	1.8	2.4	3.4
As	40	40	30	25
Pb	70	90	120	170
Cr	150	150	200	250
Cu	50	50	100	100
Ni	60	70	100	190
Zn	200	200	250	300

单因子指数法只能评价某种重金属元素的污染程度，无法综合反映人参受重金属污染程度，因此

还要利用内梅罗综合污染指数法，兼顾极值，反映重金属元素含量对人参的综合影响。

单因子污染指数计算方法为^[20]:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \tag{1}$$

其中 P_i : 土壤中重金属第 i 个单项的污染指数; C_i : 土壤中重金属第 i 个的实测值, mg·kg⁻¹; S_i : 土壤中重金属第 i 个的限量值, mg·kg⁻¹。吉林省农用地土壤 pH 在 6.5~7.5, 各元素标准限值: Cd: 0.3 mg·kg⁻¹, Pb: 120 mg·kg⁻¹, Cr: 200 mg·kg⁻¹, Cu: 100 mg·kg⁻¹, Ni: 100 mg·kg⁻¹, Zn: 250 mg·kg⁻¹。

单因子污染指数分级标准^[21]: $P_i \leq 1$, 非污染; $1 < P_i \leq 2$, 轻污染; $2 < P_i \leq 3$, 中污染; $P_i > 3$, 重污染。

内梅罗综合污染指数法计算方法为^[22]:

$$P_{综合} = \frac{\sqrt{P_{max}^2 + P_{ave}^2}}{2} \tag{2}$$

其中, $P_{综合}$: 内梅罗综合污染指数; P_{max} : 各单因子指数中的最大值; P_{ave} : 所有单因子指数的平均值。内梅罗综合污染指数法对土壤环境质量评价分级见表 2。

1.7 富集能力的表征

用生物富集系数 BCF^[23-24] 表征人参不同部位对其根际土壤某种重金属的富集能力，即人参某一部位中重金属元素含量与其根际土壤中重金属含量的比值越大，表明其对重金属富集能力越强。相应计算公式为:

表 2 内梅罗综合污染指数法对土壤环境质量评价分级标准
Table 2 Standards for classifying soil quality by Nemerow comprehensive pollution index method

综合污染指数 ($P_{综合}$) Composite pollution index	污染等级 Pollution level	污染评价 Pollution assessment
$P_{综合} \leq 0.7$	安全 Safe	清洁 Clean
$0.7 < P_{综合} \leq 1.0$	警戒级 Alert level	尚清洁 Relatively clean
$1.0 < P_{综合} \leq 2.0$	轻度污染 Slight pollution	开始受污染 Start to be polluted
$2.0 < P_{综合} \leq 3.0$	中度污染 Moderate pollution	受中度污染 Moderately polluted
$P_{综合} > 3.0$	重度污染 Heavy pollution	受污染已相当严重 Heavy polluted

$$BCF = \frac{\text{人参某一部位重金属元素含量}}{\text{根际土壤中重金属元素含量}} \quad (3)$$

1.8 数据分析

采用 SPSS 19.0、Excel 2016 及 Origin 对人参根、茎叶及其根际土壤重金属元素进行斯皮尔曼相关性数据统计和其他数据处理分析。

2 结果与分析

2.1 人参各部位及其根际土壤重金属元素含量的测定

从表 3、4 中可以看出，人参根、茎叶部位测定结果存在明显差异，变化范围分别为 $0 \sim 2002 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ， $0.04 \sim 4014.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在根部位重金属元素及有害元素平均含量依次为 $\text{Al} > \text{Mn} > \text{Ba} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{V} > \text{Co} > \text{Cd} > \text{Pb}$ ，在茎叶部位中元素平均含量为 $\text{Al} > \text{Mn} > \text{Ba} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{V} > \text{Pb} > \text{Co} > \text{Cd}$ ，元素含量均按照根 $>$ 茎叶的规律。依据中华药典一部^[25]中对人参所含重金属元素及有害元素的限量标准， $w(\text{Pb}) \leq 5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ； $w(\text{Cd}) \leq 1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ； $w(\text{As}) \leq$

表 3 人参根样本中重金属和有害元素检测结果

Table 3 Heavy metals and harmful elements detected in ginseng roots

(单位: $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

编号 Number	Al	V	Cr	Cd	Pb	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ba
1-1	1475	0.65	1.20	0.11	0.04	44.06	0.19	2.74	9.85	23.12	27.00
1-2	1421	1.52	2.46	0.21	0.24	72.45	0.26	3.48	8.79	23.95	29.18
1-3	1192	0.52	1.55	0.12	0.10	100.11	0.20	2.75	10.32	21.33	17.96
1-4	1390	0.56	1.28	0.11	0	42.80	0.17	2.77	10.11	21.65	26.40
1-5	1366	1.51	1.52	0.20	0.20	70.79	0.25	3.13	8.23	22.04	26.40
2-1	904	0.26	0.17	0.14	0	77.25	0.11	2.13	7.29	14.03	14.80
2-2	1182	0.40	1.54	0.16	0.07	98.50	0.16	2.97	9.91	19.13	22.60
2-3	1252	0.54	1.41	0.19	0.15	103.32	0.20	2.54	12.15	23.97	32.26
2-4	1425	0.61	1.61	0.13	0	116.74	0.22	3.40	10.81	28.18	24.67
2-5	1197	0.40	1.39	0.18	0.08	100.83	0.16	2.97	10.02	23.57	22.40
3-1	1550	0.54	1.39	0.09	0	39.56	0.21	2.97	11.97	23.87	29.19
3-2	2002	0.78	2.32	0.13	0	92.96	0.30	3.35	9.96	23.96	35.54
3-3	1302	0.55	1.08	0.14	0	46.83	0.17	3.27	12.06	23.90	52.15
3-4	1431	0.50	1.40	0.15	0	36.39	0.16	3.19	11.52	21.91	28.32
3-5	1991	0.77	2.18	0.10	0	91.43	0.31	3.18	9.07	25.63	33.23
平均值 Average value	1405.33	0.67	1.50	0.14	0.13	75.60	0.20	2.99	10.14	22.68	28.14
标准差 Standard deviation	286.88	0.37	0.55	0.04	0.07	27.44	0.06	0.36	1.42	3.15	8.62
CV/%	20.41	54.36	36.51	25.83	58.43	36.30	27.13	12.07	14.05	13.89	30.64

表 4 人参茎叶样本中重金属和有害元素检测结果

Table 4 Heavy metals and harmful elements detected in ginseng stems/leaves

(单位: $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

编号 Number	Al	V	Cr	Cd	Pb	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ba
1-1	2984.80	2.14	2.58	0.09	0.71	287.16	0.42	3.02	9.90	35.66	59.44
1-2	2099.19	1.58	1.90	0.18	0.67	417.75	0.42	3.38	11.57	32.98	64.70
1-3	3396.54	3.34	3.12	0.14	0.92	512.10	0.68	4.32	14.28	32.28	68.65
1-4	2989.24	2.08	2.34	0.09	0.67	298.07	0.41	2.91	9.69	33.45	60.72
1-5	2050.26	1.93	2.18	0.22	0.89	412.35	0.50	4.09	14.14	29.68	64.07
2-1	1384.90	1.02	2.16	0.41	0.59	249.32	0.23	2.62	6.85	29.08	60.60
2-2	3790.23	3.46	3.17	0.18	1.11	455.84	0.59	3.84	11.24	30.56	65.08
2-3	1457.44	0.92	2.80	0.37	1.61	188.56	0.23	2.02	7.75	30.83	66.61
2-4	1421.41	0.55	1.02	0.24	0.04	264.36	0.13	1.42	3.83	26.61	63.77
2-5	4014.67	3.02	2.51	0.12	0.87	469.18	0.51	3.20	9.14	26.19	64.62
3-1	1607.11	1.37	1.59	0.17	0.57	212.98	0.30	2.82	13.63	27.52	76.80
3-2	1663.52	1.27	1.30	0.07	0.48	354.39	0.32	3.41	11.31	28.42	60.58
3-3	2033.26	1.55	1.61	0.07	0.66	360.10	0.34	2.53	12.81	25.20	69.63
3-4	1611.22	1.17	1.28	0.13	0.41	209.90	0.25	2.25	11.57	28.62	77.60
3-5	1461.31	1.32	1.36	0.07	0.48	339.09	0.33	3.65	11.18	20.79	52.07
平均值 Average value	2264.34	1.78	2.06	0.17	0.71	335.41	0.38	3.03	10.59	29.19	65.00
标准差 Standard deviation	919.79	0.89	0.69	0.10	0.35	102.05	0.15	0.79	2.86	3.73	6.51
CV%	10.02	61.49	36.34	61.49	49.75	87.96	49.75	17.98	10.02	29.35	10.02

$2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; $w(\text{Hg}) \leq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; $w(\text{Cu}) \leq 20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。本试验研究的人参各部位中元素 Pb、Cd、Cu 含量均未超过限量。根、茎叶部位变异系数的变化范围分别为: 12.07%~58.43%, 10.02%~87.96%, 可知人参不同部位元素含量相差较大。

人参根际土壤中重金属元素及有害元素平均含量依次 $\text{Al} > \text{Mn} > \text{Ba} > \text{Zn} > \text{V} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Co} > \text{Cd}$, 根据《土壤环境质量标准》(GB 15618—2018) 中规定, 人参根际土壤中元素 Cd、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn 的平均含量均未超过最大值, 但人参样品 1-1、1-2、1-4 中 Cd 元素含量超过最大值, 分别为 $0.56 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0.35 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0.51 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 5)。

2.2 人参根际土壤重金属及有害元素污染评价

根据单因子污染指数、内梅罗综合污染指数计算方法, 结果如表 6 所示。从表中可以看出, 15 份根际土壤样品中除样品 1-1 和 1-4 外, 其余样品内梅罗综合污染指数均小于 0.7, 污染等级为安全级, 属于清洁水平; 样品 1-1 和 1-4 内梅罗综合污染指数分别为 0.97, 0.90, 污染等级均为警戒级, 属于尚清洁

水平, 其中 1-1 和 1-4 样品中 Cd 元素的单因子污染指数分别为 1.85, 1.72, 其余 6 种元素的单因子污染指数均未超过 1, 表明 Cd 元素是主要污染物。Cd 等重金属会引起身体各部分的病变, 甚至引起肺病的发生^[26], 故人参种植过程中要降低土壤中 Cd 元素含量。

2.3 人参各部位富集重金属元素能力分析

由表 7 可知, 不同产地人参茎叶、根对重金属和有害元素富集能力不同, 3 个产地人参茎叶中各元素平均富集系数趋势为 $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Ba} > \text{Mn} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{V} > \text{Co} > \text{Al}$, 根中各元素平均富集系数大小为 $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Ba} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Mn} > \text{Co} > \text{Al} > \text{V}$, 茎叶和根对各元素的 BCF 平均值相差较大, 但都表现为对 Cu、Zn、Ba、Cd 的富集能力较强, 说明这些元素从土壤到人参各部位的迁移能力较强; 对其他元素的富集能力较弱, 表明其他元素从土壤迁移到茎叶部位难度很大。

2.4 人参各部位重金属与根际土壤各重金属元素的相关性分析

由图 2、3、4 可知, 人参根中 Al、Ni 与茎叶

表 5 人参根际土壤样本中重金属和有害元素检测结果
Table 5 Heavy metals and harmful elements detected in ginseng rhizosphere soil (单位: mg·kg⁻¹)

编号 Number	Al	V	Cr	Cd	Pb	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ba
1-1	73 136.93	54.80	43.90	0.56	24.07	2406.05	18.91	65.77	31.14	88.82	223.50
1-2	86 154.51	44.18	33.69	0.35	16.78	2740.77	10.65	53.58	28.29	73.20	206.61
1-3	64 333.74	50.93	37.37	0.28	16.68	2022.73	16.57	45.35	23.63	81.00	238.75
1-4	79 783.41	52.41	40.72	0.51	35.22	2375.47	17.40	54.90	26.81	80.26	225.23
1-5	81 160.59	45.12	35.58	0.27	14.33	2401.34	10.93	42.86	23.27	78.89	216.75
2-1	84 922.87	40.73	35.74	0.29	13.80	2307.78	8.40	34.81	20.19	67.81	226.59
2-2	83 016.45	36.49	22.66	0.20	11.95	2151.34	8.48	33.74	19.32	63.37	207.71
2-3	85 159.45	43.64	27.92	0.27	13.98	2263.85	9.31	33.33	18.60	69.02	206.82
2-4	90 096.30	39.37	26.04	0.29	14.46	2546.09	8.14	34.58	20.25	91.58	211.79
2-5	94 330.80	44.16	33.45	0.24	14.03	2355.70	10.06	40.12	22.59	103.99	243.51
3-1	87 839.36	42.30	31.29	0.25	16.20	2600.08	9.40	35.96	21.35	81.41	186.96
3-2	87 511.38	37.85	30.37	0.26	16.33	2302.12	8.75	39.59	21.66	67.49	173.98
3-3	85 706.23	39.04	28.46	0.24	16.42	2271.62	8.53	40.12	24.82	91.98	176.27
3-4	84 904.09	41.94	31.35	0.23	15.95	3264.03	9.22	34.83	20.86	77.97	186.68
3-5	86 765.80	37.57	29.33	0.23	13.81	3092.77	8.25	32.82	17.68	65.45	226.58
平均值 Average value	83 654.79	43.37	32.52	0.30	16.93	2473.45	10.87	41.49	22.70	78.82	210.52

表 6 人参根际土壤重金属污染评价
Table 6 Evaluation on heavy metal pollution of ginseng rhizosphere soil

编号 Number	单因子污染指数 Single factor pollution index						内梅罗综合污染指数 Nemerow composite pollution index	污染等级 Pollution level	污染水平 Pollution level
	Cd	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn			
1-1	1.85	0.20	0.22	0.31	0.66	0.36	0.97	警戒级 Alert level	尚清洁 Relatively clean
1-2	1.16	0.14	0.17	0.28	0.54	0.29	0.62	安全 Safe	清洁 Clean
1-3	0.95	0.14	0.19	0.24	0.45	0.32	0.51	安全 Safe	清洁 Clean
1-4	1.72	0.29	0.20	0.27	0.55	0.32	0.90	警戒级 Alert level	尚清洁 Relatively clean
1-5	0.89	0.12	0.18	0.23	0.43	0.32	0.48	安全 Safe	清洁 Clean
2-1	0.95	0.11	0.18	0.20	0.35	0.27	0.51	安全 Safe	清洁 Clean
2-2	0.68	0.10	0.11	0.19	0.34	0.25	0.37	安全 Safe	清洁 Clean
2-3	0.89	0.12	0.14	0.19	0.33	0.28	0.47	安全 Safe	清洁 Clean
2-4	0.98	0.12	0.13	0.20	0.35	0.37	0.52	安全 Safe	清洁 Clean
2-5	0.81	0.12	0.17	0.23	0.40	0.42	0.44	安全 Safe	清洁 Clean
3-1	0.82	0.13	0.16	0.21	0.36	0.33	0.44	安全 Safe	清洁 Clean
3-2	0.88	0.14	0.15	0.22	0.40	0.27	0.47	安全 Safe	清洁 Clean
3-3	0.81	0.14	0.14	0.25	0.40	0.37	0.44	安全 Safe	清洁 Clean
3-4	0.77	0.13	0.16	0.21	0.35	0.31	0.42	安全 Safe	清洁 Clean
3-5	0.78	0.12	0.15	0.18	0.33	0.26	0.42	安全 Safe	清洁 Clean

表 7 人参的 BCF 平均值
Table 7 Mean BCF of ginseng

采样地 Sample site	Al		V		Cr		Mn		Co		Ni		Cu		Zn		Ba		Cd	
	茎叶 Stem leaf	根 Root	茎叶 Stem leaf	根 Root	茎叶 Stem leaf	根 Root	茎叶 Stem leaf	根 Root	茎叶 Stem leaf	根 Root	茎叶 Stem leaf	根 Root	茎叶 Stem leaf	根 Root	茎叶 Stem leaf	根 Root	茎叶 Stem leaf	根 Root	茎叶 Stem leaf	根 Root
J1	0.036	0.018	0.045	0.020	0.063	0.043	0.164	0.028	0.034	0.016	0.071	0.058	0.460	0.359	0.409	0.280	0.286	0.115	0.433	0.436
J2	0.027	0.014	0.045	0.011	0.083	0.045	0.141	0.043	0.038	0.019	0.074	0.080	0.386	0.501	0.380	0.278	0.294	0.108	1.002	0.637
J3	0.020	0.018	0.033	0.015	0.048	0.051	0.115	0.022	0.034	0.023	0.073	0.085	0.558	0.515	0.350	0.297	0.392	0.202	0.452	0.524

Cr 呈极显著负相关，根中 Pb 与茎叶 Pb 呈极显著正相关；人参茎叶中 Cr 与土壤中 Mn、茎叶中 Zn 与土壤中 Al 呈极显著负相关，人参茎叶中 Zn 与土壤中 V、Cd、Co 呈极显著正相关；人参根中 Ba 与土壤中的 Ba 呈极显著负相关，人参根中 Zn 与土壤中 Al、人参根中 Al 与土壤中 Mn 呈极显著正相关。结果表明，人参根、茎叶与土壤元素含量的相关性比较复杂，

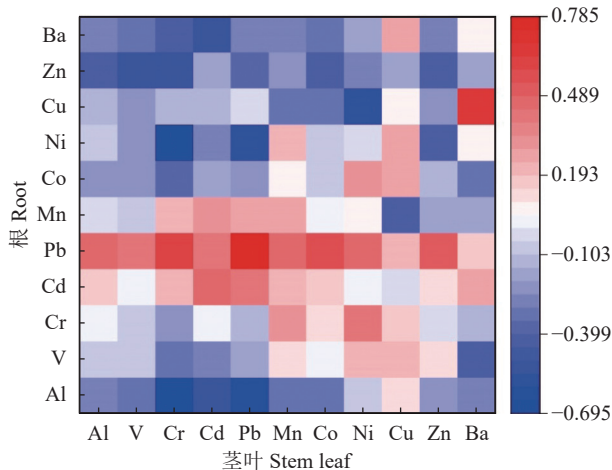


图 2 人参根与茎叶元素间的相关性

Fig. 2 Correlation between elements in roots and stems/leaves of a ginseng plant

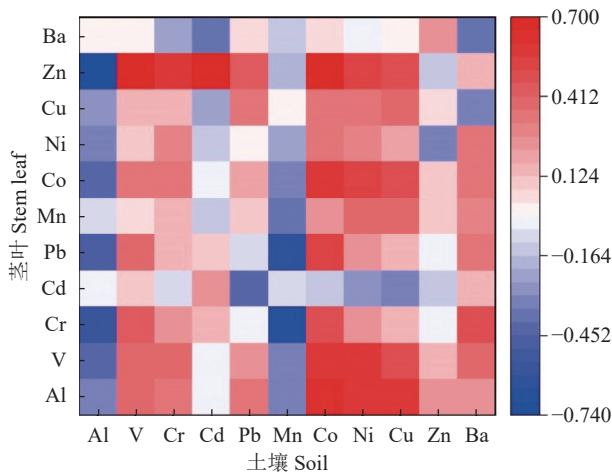


图 3 人参茎叶与根际土壤元素间的相关性

Fig. 3 Correlation between elements in ginseng stems/leaves and rhizosphere soil

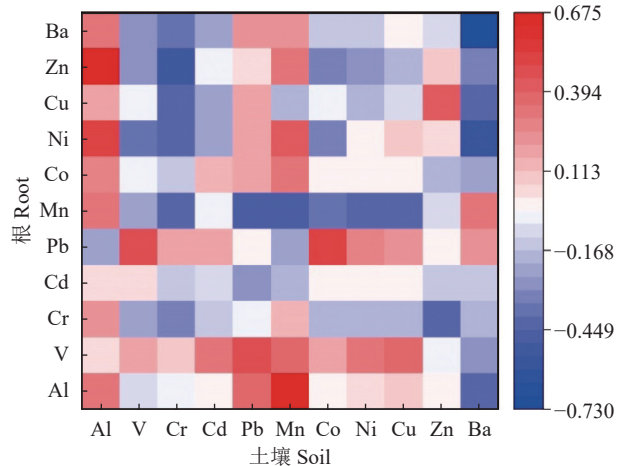


图 4 人参根与根际土壤元素间的相关性

Fig. 4 Correlation between elements in ginseng roots and rhizosphere soil

杂，土壤中部分元素在植物吸收、转运过程中存在协同或拮抗作用。

3 讨论与结论

人参生长离不开土壤，土壤是影响人参生长的主要环境因子之一。本研究通过测定人参根、茎叶及根际土壤重金属和有害元素含量，分析各元素含量之间的关系，对土壤重金属进行污染评价，研究人参根、茎叶对土壤重金属和有害元素的富集能力以及人参根、茎叶与土壤重金属元素之间的相互关系，进而为规范人参种植技术，合理改善人参种植土壤条件，提高人参品质提供科学依据。

从根、茎叶及根际土壤测定结果来看，不同部位元素含量相差较大，Pb、Cd、Cu 均未超过中国药典一部所规定的限量标准，Al 含量最高，一方面 Al 在地壳中广泛存在，环境污染造成土壤酸化，促使土壤中自由的 Al³⁺ 溶出，导致人参生长过程中大量吸收 Al^[27]；另一方面可能与铝制品随意丢弃和填埋造成土壤污染有关^[28]，还有待进一步研究。

本试验采集的 15 份根际土壤样品中有 13 份样品的内梅罗综合污染指数均小于 0.7，属于安全，清洁水平，但样品 1-1 和 1-4 属于警戒级，尚清洁水平，

其内梅罗综合污染指数分别为 0.97、0.90，很可能存在污染风险，其中 Cd 元素是主要污染物，单因子污染指数分别为 1.85、1.72，属于轻污染，此外少量根际土壤样品中 Cd 元素含量超过《土壤环境质量标准》(GB 15618—2018)规定的最大值。镉会胁迫植物生长，抑制细胞生长分裂、水分吸收等多种生理机制^[29]。人参生长过程中需要施加一定的肥料以保证有良好的收成，研究表明^[30-31]，长期使用进口的磷矿粉和以进口 P 矿为原料的 P 肥可能会造成土壤 Cd 污染，有机物堆肥的产品中也有出现 Cd 超标的情况，种植中要加强对 Cd 污染的检测与管控，同时注意严格把关施用的磷肥，充分处理有机肥，科学施肥才能使人参优质高产^[32]。

茎叶和根对各元素的富集趋势相似，BCF 平均值相差较大，但都表现为对 Cu、Zn、Ba、Cd 的富集能力较强，说明这些元素从土壤到人参各部位的迁移能力较强，其他元素从土壤迁移到人参各部位的难度较大。从元素间的相关性来看，土壤中部分元素在植物吸收、转运过程中存在协同或拮抗作用。

参考文献：

- [1] 李成华, 薛长松. 从人参药性历史记载的变化看单味药药性成因 [J]. 中国药学杂志, 2022, 57 (19): 1596-1600.
LI C H, XUE C S. Origin study of medicinal properties of single drug from the history of *Panax ginseng* medicinal properties [J]. *Chinese Pharmaceutical Journal*, 2022, 57 (19): 1596-1600. (in Chinese)
- [2] 李倩, 柴艺汇, 高洁, 等. 人参现代药理作用研究进展 [J]. 贵阳中医学院学报, 2019, 41 (5): 89-92.
LI Q, CHAI Y H, GAO J, et al. Research progress on modern pharmacological effects of ginseng [J]. *Journal of Guiyang University of Chinese Medicine*, 2019, 41 (5): 89-92. (in Chinese)
- [3] RATAN Z A, HAIDERE M F, HONG Y H, et al. Pharmacological potential of ginseng and its major component ginsenosides [J]. *Journal of Ginseng Research*, 2021, 45 (2): 199-210.
- [4] 高健, 吕邵娃. 人参化学成分及药理作用研究进展 [J]. 中医药导报, 2021, 27 (1): 127-130,137.
GAO J, LYU S W. Research progress in chemical constituents and pharmacological action of renshen(ginseng) [J]. *Guiding Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy*, 2021, 27 (1): 127-130,137. (in Chinese)
- [5] JIN D, ZHANG Y Q, ZHANG Y H, et al. *Panax ginseng* C. A. Mey. as medicine: The potential use of *Panax ginseng* C. A. Mey. as a remedy for kidney protection from a pharmacological perspective [J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2021, 12: 734151.
- [6] 梁尧, 李刚, 曹庆军, 等. 人参产地土壤重金属污染现状及其修复技术的研究进展 [J]. 中药材, 2013, 36 (10): 1709-1713.
LIANG Y, LI G, CAO Q J, et al. Research progress on heavy metal pollution in soil of ginseng producing area and its remediation technology [J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2013, 36 (10): 1709-1713. (in Chinese)
- [7] 左湘熙, 孙海, 钱佳奇, 等. 东北不同产地农田栽培人参品质与参根矿质元素的相关分析 [J]. 吉林农业大学学报, 2022, 44 (3): 307-312.
ZUO X X, SUN H, QIAN J Q, et al. Correlation analysis of ginseng quality and ginseng root mineral elements cultivated in farmland of different producing areas in northeast China [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2022, 44 (3): 307-312. (in Chinese)
- [8] 邸文瑞, 冯雯. 铅锌污染土壤修复治理应用技术分析 [J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4 (5): 133-135.
DI W R, FENG W. Analysis of application technology of remediation and treatment lead-zinc contaminated soil [J]. *Leather Manufacture and Environmental Technology*, 2023, 4 (5): 133-135. (in Chinese)
- [9] 方明中, 孙海敏, 汪铨程. 镉污染土壤植物提取技术研究进展 [J]. 广东化工, 2023, 50 (5): 143-144,162.
FANG M Z, SUN H M, WANG C C. Review on phytoextraction of cadmium-contaminated soil [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2023, 50 (5): 143-144,162. (in Chinese)
- [10] 杨曼, 赵丽娅, 钟金梅, 等. 铜污染土壤中植物修复技术的应用研究进展 [J]. 现代农业科技, 2023 (3): 159-164,169.
YANG M, ZHAO L Y, ZHONG J M, et al. Research progress on application of phytoremediation technology in copper contaminated soil [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2023 (3): 159-164,169. (in Chinese)
- [11] 陈安娜, 孙敏, 李博. 微波消解-原子吸收光谱法测定竹荪中镍含量 [J]. 浙江农业科学, 2021, 62 (8): 1594-1595,1632.
CHEN A N, SUN M, LI B. Determination of nickel in *Dictyophora indusiata* by microwave digestion-atomic absorption spectrometry [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2021, 62 (8): 1594-1595,1632. (in Chinese)
- [12] 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.
CHI H Y, LI W Y, LI L L, et al. Determination of heavy metal elements in ginseng by ICP-MS [J]. *Jilin Journal of Chinese Medicine*, 2018, 38 (8): 954-957. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 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.
LI L, ZHAO X S. Investigation and assessment on pollution of ginseng cultivation soil in the east mountain areas of Jilin Province [J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2005, 24 (2): 403-406. (in Chinese)
- [15] 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.

- ZHANG Y Y, SUN H, GAO M, et al. Pollution level and bioavailability of heavy metals in ginseng soil Jilin Province [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (6) : 1306-1313. (in Chinese)
- [16] 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.
YANG R G, WANG M L, RUI R, et al. Distribution characteristics of mineral elements and pollution evaluation of heavy metals in *Pinus armandii*-*Panax notoginseng* planting pattern [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2023, 55 (5) : 127-133. (in Chinese)
- [17] 中国农业部. 中华人民共和国农业行业标准: NY/T 1121.1—2016[S]. 2006-7-10.
- [18] 王奇, 陈丽娜, 彭韵洁, 等. 五味子中金属元素分析及膳食风险评估 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13 (4) : 1310-1317.
WANG Q, CHEN L N, PENG Y J, et al. Analysis of metallic elements in *Schisandra chinensis* and assessment of dietary risk [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13 (4) : 1310-1317. (in Chinese)
- [19] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准: GB 15618—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [20] 李浪, 孙燕, 刘妮, 等. 红托竹荪与覆土土壤重金属污染评价及迁移能力分析 [J]. *福建农业学报*, 2021, 36 (7) : 836-842.
LI L, SUN Y, LIU N, et al. Content and migration of heavy metals in *Dictyophora rubrovalvata* and soil [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 36 (7) : 836-842. (in Chinese)
- [21] 唐功政, 刘国栋, 高润青, 等. 利用单因子污染指数与内梅罗综合指数进行土壤重金属污染程度评级 [J]. *科技风*, 2019 (13) : 125-126.
TANG G Z, LIU G D, GAO R Q, et al. Using single factor pollution index and Nemerow comprehensive index to grade soil heavy metal pollution degree [J]. *Technology Wind*, 2019 (13) : 125-126. (in Chinese)
- [22] 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估 [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. (in Chinese)
- [23] 罗增明, 刷永望, 张慧娟, 等. 三七及种植土壤重金属污染特征与风险评估 [J]. *中国环境科学*, 2022, 42 (12) : 5775-5784.
LUO Z M, JU Y W, ZHANG H J, et al. Heavy metals pollution characteristic in *Panax notoginseng* and planting soil and the associated risk assessment [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42 (12) : 5775-5784. (in Chinese)
- [24] 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.
WEI C Y, LIU X X, SONG Z F, et al. Comparison of heavy metal contents in Chinese herbal medicine and their cultivated soils from different habitats [J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2017, 42 (4) : 39-43. (in Chinese)
- [25] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典. 一部: 2010年版[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2010.
- [26] 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.
SHEN X J, CAI G Z, QI J N, et al. Study on detection methods of heavy metals in seven genuine medicinal materials in Jilin Province, such as ginseng [J]. *Journal of Changchun University of Traditional Chinese Medicine*, 2010, 26 (4) : 585-586. (in Chinese)
- [27] 曾林, 周涛, 代祖洋, 等. ICP-MS测定大曲中23种无机元素 [J]. *现代食品*, 2023, 29 (9) : 148-151.
ZENG L, ZHOU T, DAI Z Y, et al. Determination of 23 inorganic elements in daqu by ICP-MS [J]. *Modern Food*, 2023, 29 (9) : 148-151. (in Chinese)
- [28] 李瑞仙, 刘婧晶, 李玉泽. 铝灰主要污染成分及其对周围土壤环境的影响和治理措施 [J]. *矿产勘查*, 2019, 10 (6) : 1513-1516.
LI R X, LIU J J, LI Y Z. Main pollution components of aluminum ash and their influence on surrounding soil environment and control measures [J]. *Mineral Exploration*, 2019, 10 (6) : 1513-1516. (in Chinese)
- [29] 薛永, 王苑妮, 姚泉洪, 等. 植物对土壤重金属镉抗性的研究进展 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23 (3) : 528-534.
XUE Y, WANG Y Y, YAO Q H, et al. Research progress of plants resistance to heavy metal Cd in soil [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23 (3) : 528-534. (in Chinese)
- [30] 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.
HUANG Z H, SHEN 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. (in Chinese)
- [31] 曹志洪. 施肥与土壤健康质量: 论施肥对环境的影响(3) [J]. *土壤*, 2003, 35 (6) : 450-455.
CAO Z H. Effect of fertilization on soil health quality—Effect of fertilization on environment quality (3) [J]. *Soils*, 2003, 35 (6) : 450-455. (in Chinese)
- [32] 霍跃文, 杨雁, 石亚娜, 等. 化肥减量施用对三七生长及药用成分的影响 [J]. *西南农业学报*, 2020, 33 (11) : 2558-2564.
HUO Y W, YANG Y, SHI Y N, et al. Effect of reducing chemical fertilizer on growth and medicinal compositions of *Panax notoginseng* [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33 (11) : 2558-2564. (in Chinese)

(责任编辑: 林海清)