

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

梁尧¹, 姜晓莉¹, 李刚^{1,①}, 任红菲², 杨粉团¹, 曹庆军¹

(1. 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 吉林 长春 130033; 2. 吉林农业大学中药材学院, 吉林 长春 130118)

摘要: 为了全面了解吉林省非林地栽参基地土壤和人参(*Panax ginseng* C. A. Mey.)根部重金属元素的含量及潜在风险,对抚松县(24个样点)和集安市(21个样点)非林地栽参基地的土壤和人参根部Pb、As、Cd、Cu和Zn含量进行测定,并采用单因子污染指数、综合污染指数和潜在生态风险指数对土壤重金属污染状况及潜在生态风险进行评价,同时对人参根部的重金属安全性进行评价。结果表明:Pb、As、Cd、Cu和Zn平均含量在抚松县基地土壤中分别为23.89、7.08、0.19、19.08和81.00 mg·kg⁻¹,而在集安市基地土壤中分别为28.65、7.81、0.20、20.72和81.32 mg·kg⁻¹。2个基地土壤中Cd含量的变异系数均最高,说明2个基地土壤中的Cd含量受人为因素影响较大。单因子污染指数评价结果表明2个基地土壤重金属元素的单因子污染指数平均值均低于0.7,并且均以Cd为最高,其次是Zn和Cu,As和Pb较低;各样点5种重金属元素的单因子污染指数基本上均低于1。抚松县和集安市土壤的重金属综合污染指数平均值分别为0.51和0.55,其中,抚松县3号样点和集安市21号土壤的重金属综合污染指数高于1,其余各样点土壤的重金属综合污染指数均低于1,说明2个基地土壤重金属污染总体处于清洁水平。2个基地土壤Cd单因子潜在生态风险指数均最高(均明显高于40),其余重金属元素单因子潜在生态风险指数均低于40,说明Cd是最主要的潜在生态风险贡献因子。从土壤重金属的综合污染潜在生态风险指数来看,抚松县3号样点和集安市21号样点土壤重金属的综合污染潜在生态风险均处于中等水平,其他样点土壤则处于轻微水平。Pb、As、Cd、Cu和Zn平均含量在抚松县产人参根部分别为0.11、0.07、0.12、8.76和19.67 mg·kg⁻¹,在集安市产人参根部分别为0.13、0.06、0.29、7.46和23.60 mg·kg⁻¹。其中,抚松县产人参根部的Pb、As、Cd和Cu平均含量均低于重金属污染物的限量值,集安市产人参根部的Pb、As和Cu平均含量也低于限量值。总体来看,目前吉林省抚松县和集安市非林地栽参基地的土壤环境质量良好,所产人参质量基本符合国家标准,但个别样点土壤的Cd污染潜在生态风险较高,应及时采取防御措施。

关键词: 非林地栽参基地; 土壤; 人参; 重金属元素含量; 污染指数; 潜在生态风险指数

中图分类号: Q948.113; S567.5⁺1; X826 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2015)03-0068-09
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2015.03.09

Content analysis and risk evaluation of heavy metal elements in soil and ginseng root from non-forestedland base with cultivated ginseng in Jilin Province LIANG Yao¹, JIANG Xiaoli¹, LI Gang^{1,①}, REN Hongfei², YANG Fentuan¹, CAO Qingjun¹ (1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China; 2. College of Chinese Medicinal Materials, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2015, 24(3): 68-76

Abstract: In order to comprehensively understand contents of heavy metal elements and potential risk in soil and ginseng (*Panax ginseng* C. A. Mey.) root from non-forestedland base with cultivated ginseng in Jilin Province, contents of Pb, As, Cd, Cu and Zn in soil and ginseng root from non-forestedland base with cultivated ginseng in Fusong County (including 24 sampling points) and Ji'an City (including 21

收稿日期: 2015-01-30

基金项目: 吉林省博士后科研项目(RB201321); 吉林省科技发展计划重大项目(20126046)

作者简介: 梁尧(1984—),女,满族,吉林辽源人,博士,助理研究员,主要从事农产品质量安全风险评估研究。

①通信作者 E-mail: ligang6@yeah.net

sampling points) were detected, and soil heavy metal pollution status and potential ecological risk were evaluated by single factor pollution index, comprehensive pollution index and potential ecological risk index, meanwhile, heavy metal safety of ginseng root was evaluated. The results show that average contents of Pb, As, Cd, Cu and Zn in base soil of Fusong County are 23.89, 7.08, 0.19, 19.08 and 81.00 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, while those in base soil of Ji'an City are 28.65, 7.81, 0.20, 20.72 and 81.32 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. Coefficient of variation of Cd content in soil of two bases is the highest, indicating that Cd content in soil of two bases is greatly influenced by human factors. The result of single factor pollution index evaluation shows that average of single factor pollution index of each heavy metal element in soil of two bases is lower than 0.7, and that of Cd is the highest, followed by Zn and Cu, that of As and Pb is lower. Single factor pollution indexes of five heavy metal elements of each sampling point are basically lower than 1. Averages of soil heavy metal comprehensive pollution index of Fusong County and Ji'an City are 0.51 and 0.55, respectively, in which, soil heavy metal comprehensive pollution indexes of No. 3 sampling point of Fusong County and No. 21 sampling point of Ji'an City are higher than 1, those of other sampling points all are lower than 1, meaning that soil heavy metal pollutions of two bases are generally at clean level. Single factor potential ecological risk indexes of Cd in soil of two bases both are the highest (obviously higher than 40), those of other heavy metal elements all are lower than 40, indicating that Cd is the most important potential ecological risk contribution factor. From comprehensive potential ecological risk index of heavy metal in soil, comprehensive pollution ecological risk of heavy metals in soil of No. 3 sampling point of Fusong County and No. 21 sampling point of Ji'an City all are at moderate level, that of other sampling points are at mild level. Average contents of Pb, As, Cd, Cu and Zn in ginseng root from Fusong County are 0.11, 0.07, 0.12, 8.76 and 19.67 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, while those in ginseng root from Ji'an City are 0.13, 0.06, 0.29, 7.46 and 23.60 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. In which, Pb, As, Cd and Cu average contents in ginseng root from Fusong County all are lower than limited value of heavy metal pollutants, and Pb, As and Cu contents in ginseng root from Ji'an City are also lower than the limited value. Overall, soil environment quality of non-forestedland base with cultivated ginseng in Fusong County and Ji'an City of Jilin Province are fine at present, quality of ginseng produced by them is accord with national standard, but potential ecological risk of Cd pollution in soil of a few sampling points is higher, so protective measures should be taken in time.

Key words: non-forestedland base with cultivated ginseng; soil; *Panax ginseng* C. A. Mey.; content of heavy metal elements; pollution index; potential ecological risk index

随着现代工农业的迅速发展,公路面积不断扩大,工业“三废”和生活废弃物大量增加,农用物资使用不合理,导致土壤环境质量下降、土壤环境污染风险加大。重金属污染是导致土壤环境质量下降的重要因素之一。近年来,由土壤重金属污染引起的农产品质量安全问题及相关的土壤环境质量评价日益成为研究热点^[1-2]。目前,适于土壤重金属污染评价的方法主要有单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、地积累指数法、潜在生态风险指数法、模糊数学法、灰色聚类法、沉积物富集系数法、风险评价编码法和健康风险评价法等^[3-5],虽然这些方法具有不同的评价目的和适用范围,但它们均能够直观、定量反映污染物在空间上的变化趋势和污染程度。因此,在实际应用过程中,需根据研究区域的实际情况和评价侧重点选择适宜的评价方法,并可将多种方法结合起来进行综合评价^[6]。

人参 (*Panax ginseng* C. A. Mey.) 为五加科 (Araliaceae) 多年生宿根草本植物,被誉为“百药之王”,属于主要大宗道地中药材。中国是世界人参的主产国,全国人参的栽培面积和产量均居世界首位,吉林省为中国人参的主产区,其人参产量占全国总产量的 85%。人参产业不仅是吉林省的特色优势产业,同时也是吉林省长白山区各市县的经济支柱^[7]。人参的栽培模式主要有伐林栽参、林下栽参和非林地栽参(农田栽参)3种。与传统的伐林栽参相比,非林地栽参既能够保护生态环境,又能够缓解栽参和养林之间的矛盾,是实现人参产业可持续发展的必由之路。随着非林地栽参技术的大面积推广,人们对人参生产的安全性更加关注,特别是人参的重金属安全是决定其能否进入市场的关键^[8]。

为了明确非林地栽参基地人参和土壤中的重金属污染状况,作者对吉林省长白山区抚松县和集安市

非林地栽参基地中人参的根围土壤及其根部 Pb、As、Cd、Cu 和 Zn 5 种重金属元素的含量进行了检测和比较,并对 2 个非林地栽参基地的人参根围土壤进行了重金属污染评价和潜在生态风险评价,同时,对人参根部的重金属安全性进行了评价,以期为非林地栽参基地土壤重金属污染防治和人参品质管理提供参考。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

实验选择的吉林省抚松县和集安市的非林地栽参基地均位于长白山区人参主产区的中心,为非林地栽参技术实施及推广较早的地区。抚松县属温带大陆性季风气候,年均温 4.0 ℃,年均降水量 800 mm,无霜期为 79~150 d,平均海拔 520 m;集安市属于北温带大陆性气候,年均温 6.5 ℃,年均降水量 800~1 000 mm,无霜期 150 d 左右,平均海拔约 600 m。

1.2 研究方法

1.2.1 样品的采集及处理 于 2013 年 8 月,根据抚松县和集安市非林地栽参基地的分布情况兼顾采样点的代表性和均匀性,在抚松县和集安市的栽参基地内分别设置 24 和 21 个采样点,每个采样点随机选取 5 株人参(其中,抚松县非林地栽参基地人参的参龄为 3~5 a,集安市非林地栽参基地人参的参龄为 2~6 a),剥除芦头以上的土壤,边挖参边取土,采集人参根部周边 5~10 cm 土层的土壤,将每个样点的 5 株人参根周围土壤充分混匀后,采用四分法留取 1 kg 土壤作为该样点的土样。

将每个样点的土样分别置于阴凉通风处,经自然风干,剔除土壤中的有机残渣、植物根系及其他杂质,磨碎后过 100 目尼龙筛,备用。直接将人参根部带回实验室,用自来水冲洗至无土壤颗粒附着后,再用去离子水冲洗 3 遍,用吸水纸吸干表面水分,置于 80 ℃ 条件下烘干至恒质量,称量后磨碎并过 100 目筛,装入塑料自封袋中,待测。

1.2.2 各重金属元素含量的测定 采用电热消解法分别对土壤和人参根部样品进行处理,并使用 7500cx 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,美国 Agilent 公司)测定土壤和人参样品中 Pb、As、Cd、Cu 和 Zn 5 种重金属元素的含量^[9]。测定时,采用 20% 样品进行平行样检测,并加入国家标准土壤样品(GSS-2)和植物样品(GBW10010)作为质量控制样品,质量控制样品

的重金属元素含量的相对误差均小于 5%。

1.2.3 评价方法

1.2.3.1 土壤环境质量评价 采用单因子污染指数和综合污染指数^[10]进行土壤环境质量评价,以《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)作为评价标准(所有土样的 pH 值均小于 6.5)。其中,单因子污染指数(P_i)计算公式为: $P_i = C_i/S_i$;综合污染指数(P_n)计算

公式为: $P_n = \sqrt{\frac{\left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{\text{mean}}^2 + \left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{\text{max}}^2}{2}}$ 。式中, C_i 为第 i 种

重金属元素含量的测定值; S_i 为第 i 种重金属元素含量的评价标准值。其中, $P_i < 1$,表示土壤未受到污染; $P_i > 1$,表示土壤受到污染,并且 P_i 值越大,说明土壤受污染程度越重。基于 P_n 的土壤环境质量评价分级标准如下:Ⅰ级(安全), $P_n \leq 0.7$,表示土壤清洁;Ⅱ级(警戒), $0.7 < P_n \leq 1.0$,表示土壤尚清洁;Ⅲ级(轻度污染), $1.0 < P_n \leq 2.0$,表示土壤受到轻度污染,作物也受到污染;Ⅳ级(中等污染), $2.0 < P_n \leq 3.0$,表示土壤和作物均受到中度污染;Ⅴ级(严重污染), $P_n > 3.0$,表示土壤和作物均受到重度污染。

1.2.3.2 土壤重金属污染潜在生态风险评价 采用 Hakanson 潜在生态风险指数^[11]进行土壤重金属污染潜在生态风险评价。单因子潜在生态风险指数(E_r^i)计算公式为: $E_r^i = T_r^i \times C_f^i$;综合潜在生态风险指数(RI)

计算公式为: $RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_f^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C_i}{C_n^i}$ 。式中, T_r^i

为第 i 种重金属元素的毒性响应系数; C_f^i 为第 i 种重金属元素相对参比值的污染系数,计算公式为 $C_f^i = C_i/C_n^i$; C_i 为第 i 种重金属元素的实测浓度; C_n^i 为第 i 种重金属元素的评价参比值。本研究中的评价参比值采用吉林省的土壤元素背景值^[12],而土壤 Pb、Cu、As、Cd 和 Zn 的毒性响应系数分别为 5、5、10、30 和 1^[13]。基于 E_r^i 的生态风险程度评价标准如下: $E_r^i < 40$,轻微风险; $40 \leq E_r^i < 80$,中等风险; $80 \leq E_r^i < 160$,较强风险; $160 \leq E_r^i < 320$,强风险; $E_r^i \geq 320$,极强风险。基于 RI 的生态风险程度评价标准如下: $RI < 150$,轻微风险; $150 \leq RI < 300$,中等风险; $300 \leq RI < 600$,强风险; $RI \geq 600$,极强风险。

1.3 数据统计和分析

采用 EXCEL 2003 和 SPSS 17.0 统计分析软件对数据进行统计和分析;采用 Origin 8.0 软件制图。

2 结果和分析

2.1 非林地栽参基地土壤中重金属元素含量的比较分析

吉林省抚松县和集安市非林地栽参基地土壤中各重金属元素含量见表1。由表1可见:抚松县非林地栽参基地土壤中的Pb、As、Cd、Cu和Zn平均含量分别为23.89、7.08、0.19、19.08和81.00 mg·kg⁻¹,

集安市非林地栽参基地土壤中的Pb、As、Cd、Cu和Zn平均含量分别为28.65、7.81、0.20、20.72和81.32 mg·kg⁻¹,并且集安市非林地栽参基地土壤中的各重金属元素平均含量均高于抚松县。从各重金属元素含量变异系数来看,2个基地土壤中Cd含量的变异系数均最大,其次为As含量变异系数。

2.2 非林地栽参基地土壤重金属污染评价分析

吉林省抚松县和集安市非林地栽参基地土壤重金属污染评价结果见表2。由表2可以看出:抚松县

表1 吉林省抚松县和集安市的非林地栽参基地土壤中不同重金属元素含量的比较($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 1 Comparison on content of heavy metal elements in soil of non-forestedland base with cultivated ginseng in Fusong County and Ji'an City of Jilin Province ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

样地 Sampling plot	各重金属元素含量/mg·kg ⁻¹ Content of different heavy metal elements				
	Pb	As	Cd	Cu	Zn
抚松 Fusong	23.89±3.97(16.6%)	7.08±1.95(27.6%)	0.19±0.08(42.2%)	19.08±3.67(19.2%)	81.00±13.09(16.2%)
集安 Ji'an	28.65±3.75(13.1%)	7.81±1.65(21.2%)	0.20±0.10(50.2%)	20.72±3.82(18.5%)	81.32±13.45(16.5%)

¹⁾ 括号中的百分数为变异系数 Percentages in the brackets are coefficient of variation.

表2 吉林省抚松县和集安市非林地栽参基地土壤重金属污染评价分析

Table 2 Evaluation and analysis on soil heavy metal pollution of non-forestedland base with cultivated ginseng in Fusong County and Ji'an City of Jilin Province

样点编号 ¹⁾ No. of sampling point ¹⁾	各重金属元素的单因子污染指数 Single factor pollution index of different heavy metal elements					综合污染指数 Comprehensive pollution index
	Pb	As	Cd	Cu	Zn	
F1	0.10	0.25	0.56	0.38	0.37	0.46
F2	0.11	0.19	0.83	0.42	0.51	0.66
F3	0.10	0.28	1.71	0.41	0.39	1.28
F4	0.09	0.19	0.58	0.32	0.37	0.46
F5	0.11	0.22	0.67	0.41	0.39	0.54
F6	0.10	0.27	0.75	0.40	0.51	0.60
F7	0.09	0.18	0.64	0.41	0.42	0.52
F8	0.10	0.24	0.48	0.58	0.34	0.48
F9	0.08	0.19	0.41	0.32	0.34	0.35
F10	0.11	0.39	0.71	0.57	0.46	0.59
F11	0.11	0.27	0.55	0.36	0.48	0.46
F12	0.10	0.23	0.65	0.32	0.39	0.52
F13	0.09	0.22	0.42	0.33	0.36	0.36
F14	0.11	0.27	0.66	0.34	0.33	0.53
F15	0.11	0.31	0.43	0.48	0.43	0.42
F16	0.10	0.29	0.43	0.30	0.35	0.37
F17	0.10	0.28	0.75	0.37	0.58	0.61
F18	0.10	0.20	0.46	0.35	0.36	0.39
F19	0.09	0.20	0.43	0.35	0.37	0.36
F20	0.10	0.23	0.60	0.38	0.38	0.49
F21	0.11	0.24	0.69	0.34	0.45	0.55
F22	0.09	0.19	0.51	0.38	0.42	0.42
F23	0.03	0.03	0.66	0.32	0.41	0.51
F24	0.09	0.27	0.41	0.31	0.31	0.35
平均值 Average	0.10	0.24	0.62	0.38	0.41	0.51

续表2 Table 2 (Continued)

样点编号 ¹⁾ No. of sampling point ¹⁾	各重金属元素的单因子污染指数 Single factor pollution index of different heavy metal elements					综合污染指数 Comprehensive pollution index
	Pb	As	Cd	Cu	Zn	
J1	0.12	0.25	0.52	0.34	0.36	0.43
J2	0.12	0.29	0.79	0.40	0.40	0.63
J3	0.12	0.21	0.55	0.35	0.46	0.46
J4	0.10	0.25	0.44	0.32	0.36	0.38
J5	0.11	0.38	0.51	0.42	0.42	0.45
J6	0.13	0.22	0.73	0.47	0.49	0.59
J7	0.12	0.26	0.58	0.50	0.41	0.49
J8	0.15	0.23	0.78	0.50	0.50	0.63
J9	0.12	0.23	0.58	0.47	0.40	0.48
J10	0.10	0.26	0.48	0.34	0.36	0.40
J11	0.13	0.28	0.56	0.52	0.39	0.48
J12	0.10	0.41	0.60	0.51	0.41	0.51
J13	0.10	0.20	0.51	0.38	0.37	0.42
J14	0.09	0.31	0.44	0.35	0.30	0.37
J15	0.09	0.27	0.46	0.41	0.31	0.39
J16	0.13	0.24	0.84	0.39	0.38	0.66
J17	0.13	0.30	1.09	0.53	0.46	0.84
J18	0.12	0.24	0.64	0.32	0.35	0.51
J19	0.12	0.17	0.59	0.37	0.59	0.49
J20	0.09	0.26	0.35	0.51	0.42	0.43
J21	0.10	0.22	1.93	0.31	0.40	1.43
平均值 Average	0.11	0.26	0.67	0.41	0.41	0.55

¹⁾ F1-F24: 抚松县样点 Sampling points in Fusong County; J1-J21: 集安市样点 Sampling points in Ji'an City.

和集安市非林地栽参基地的土壤重金属单因子污染指数从高到低均依次为 Cd、Zn、Cu、As、Pb。其中,抚松县非林地栽参基地 24 个样点土壤的 Pb、As、Cd、Cu 和 Zn 单因子污染指数基本上均低于 1.0,仅 3 号样点土壤的 Cd 单因子污染指数(1.71)高于 1.0,平均值分别为 0.10、0.24、0.62、0.38 和 0.41;集安市非林地栽参基地 21 个样点土壤的 Pb、As、Cd、Cu 和 Zn 单因子污染指数基本上也低于 1.0,仅 17 号和 21 号样点土壤的 Cd 单因子污染指数(分别为 1.09 和 1.93)高于 1.0,平均值分别为 0.11、0.26、0.67、0.41 和 0.41。并且,集安市非林地栽参基地土壤的重金属单因子污染指数和综合污染指数均高于抚松县。根据单因子污染指数评价标准,抚松县 3 号样点以及集安市 17 号和 21 号样点土壤均已经受到 Cd 污染,其余样点土壤均未受到明显的重金属污染。

由表 2 还可以看出:抚松县非林地栽参基地土壤的重金属综合污染指数为 0.35~1.28,仅 3 号样点土壤的重金属综合污染指数高于 1.0,其他样点土壤的重金属综合污染指数均低于 0.7,根据综合污染指数

评价标准,3 号样点土壤处于轻度污染水平,其他样点的土壤则处于清洁水平。集安市非林地栽参基地土壤的重金属综合污染指数为 0.37~1.43,其中,17 号样点土壤的重金属综合污染指数为 0.84,21 号样点土壤的重金属综合污染指数为 1.43,其他样点土壤的重金属综合污染指数均低于 0.7,根据综合污染指数评价标准,17 号样点土壤处于尚清洁水平,但已介于警戒线,21 号样点土壤处于轻度污染水平,而其他样点土壤均处于清洁水平。总体来看,抚松县和集安市非林地栽参基地土壤的重金属综合污染指数分别为 0.51 和 0.55,2 个基地的土壤均处于清洁水平。

2.3 非林地栽参基地土壤重金属污染潜在生态风险评价

吉林省抚松县和集安市非林地栽参基地土壤重金属污染潜在生态风险评价结果见表 3。从各金属元素的单因子潜在生态风险指数(E_i^p)平均值来看,抚松县和集安市非林地栽参基地土壤中 5 种重金属元素的污染风险由高到低依次为 Cd、As、Cu、Pb、Zn。其中,Cd 是最主要的生态风险因子,抚松县非林地栽参

基地土壤 Cd 的 E_r^i 值为 33.71 ~ 141.08, 集安市非林地栽参基地土壤 Cd 的 E_r^i 值为 28.86 ~ 158.72; 2 个非林地栽参基地土壤中 Pb、As、Cu 和 Zn 的 E_r^i 值均低于 40。根据 E_r^i 值评价标准, 2 个非林地栽参基地土壤的 Pb、As、Cu 和 Zn 污染的潜在生态风险均处于轻微水平。就 Cd 元素而言, 抚松县非林地栽参基地 33.3% 样点(8 个样点)土壤 Cd 污染的潜在生态风险处于轻微水平($E_r^i < 40$), 62.5% 样点(15 个样点)土壤 Cd 污染的潜在生态风险处于中等水平($40 \leq E_r^i < 80$), 4.2% 样点(仅 3 号样点)土壤具有较强的 Cd 污染潜在生态风险($80 \leq E_r^i < 160$); 集安市非林地栽参基地 23.8% 样点(5 个样点)土壤的 Cd 污染潜在生态风险轻微, 66.7% 样点(14 个样点)土壤的 Cd 污染潜在生态风险中等, 9.5% 样点(17 号和 21 号样点)土壤的 Cd 污染潜在生态风险较强。

由表 3 还可以看出: 吉林省抚松县非林地栽参基地土壤重金属污染的综合潜在生态风险指数(RI)为

51.03 ~ 164.30, 仅 3 号样点土壤重金属污染的 RI 值高于 150, 其他样点土壤重金属污染的 RI 值均低于 150, 根据 RI 值评价标准, 3 号样点土壤重金属污染综合潜在生态风险处于中等水平, 其他样点土壤重金属污染综合潜在生态风险则处于轻微水平。集安市非林地栽参基地土壤重金属污染的 RI 值为 51.91 ~ 177.86, 根据 RI 值评价标准, 21 号样点土壤重金属污染综合潜在生态风险处于中等水平, 其他样点土壤重金属污染综合潜在生态风险则处于轻微水平。总体来看, 抚松县和集安市非林地栽参基地土壤重金属污染 RI 值的平均值分别为 72.03 和 77.81, 2 个基地土壤重金属污染综合潜在生态风险均处于轻微生态风险等级。

2.4 非林地栽参基地人参根部重金属含量分析及安全性评价

吉林省抚松县和集安市非林地栽参基地人参根部的重金属含量检测结果见表 4。由表 4 可以看

表 3 吉林省抚松县和集安市非林地栽参基地土壤重金属污染潜在生态风险评价分析

Table 3 Evaluation and analysis on potential ecological risk of soil heavy metal of non-forestedland base with cultivated ginseng in Fusong County and Ji'an City of Jilin Province

样点编号 ¹⁾ No. of sampling point ¹⁾	各重金属元素的单因子潜在生态风险系数 Single factor potential ecological risk index of different heavy metal elements					综合潜在生态风险指数 Comprehensive potential ecological risk index
	Pb	As	Cd	Cu	Zn	
F1	5.16	9.01	46.36	5.78	1.03	67.33
F2	5.72	6.92	68.37	6.48	1.42	88.90
F3	5.63	10.12	141.08	6.37	1.10	164.30
F4	4.78	6.98	47.35	4.88	1.03	65.02
F5	5.74	8.00	55.26	6.38	1.08	76.47
F6	5.64	9.52	61.60	6.20	1.42	84.39
F7	4.91	6.60	52.79	6.29	1.18	71.76
F8	5.16	8.57	39.70	8.93	0.95	63.31
F9	4.35	6.83	33.92	4.98	0.95	51.03
F10	5.73	14.11	58.05	8.76	1.29	87.94
F11	5.90	9.84	44.91	5.60	1.33	67.58
F12	5.32	8.19	53.42	4.98	1.08	73.00
F13	4.97	7.80	34.53	5.10	1.00	53.39
F14	5.83	9.74	54.47	5.17	0.93	76.14
F15	5.82	11.18	35.61	7.39	1.19	61.19
F16	5.33	10.21	35.58	4.65	0.98	56.76
F17	5.61	10.18	61.69	5.70	1.62	84.80
F18	5.19	7.18	38.17	5.46	1.01	57.01
F19	4.94	7.01	35.19	5.35	1.03	53.52
F20	5.20	8.23	49.46	5.80	1.05	69.74
F21	5.77	8.74	56.46	5.29	1.26	77.51
F22	4.73	6.97	41.78	5.78	1.17	60.43
F23	1.64	1.18	54.28	4.97	1.15	63.22
F24	5.12	9.60	33.71	4.72	0.88	54.02
平均值 Average	5.18	8.45	51.41	5.88	1.13	72.03

续表3 Table 3 (Continued)

样点编号 ¹⁾ No. of sampling point ¹⁾	各重金属元素的单因子潜在生态风险系数 Single factor potential ecological risk index of different heavy metal elements					综合潜在生态风险指数 Comprehensive potential ecological risk index
	Pb	As	Cd	Cu	Zn	
J1	6.72	9.13	42.61	5.25	1.02	64.73
J2	6.74	10.34	65.00	6.12	1.13	89.32
J3	6.44	7.48	45.14	5.34	1.29	65.69
J4	5.58	8.89	36.35	4.92	1.00	56.75
J5	6.19	13.53	42.14	6.49	1.16	69.50
J6	6.84	8.02	60.07	7.23	1.37	83.53
J7	6.60	9.25	47.86	7.70	1.14	72.54
J8	7.99	8.09	63.98	7.63	1.40	89.09
J9	6.29	8.30	47.98	7.30	1.11	70.98
J10	5.62	9.21	39.25	5.17	1.01	60.26
J11	6.83	9.92	46.22	8.05	1.09	72.12
J12	5.45	14.67	49.67	7.85	1.15	78.78
J13	5.44	7.19	41.91	5.83	1.03	61.41
J14	5.13	11.00	36.02	5.43	0.84	58.42
J15	5.14	9.59	38.19	6.34	0.86	60.12
J16	6.89	8.66	69.49	6.02	1.05	92.11
J17	7.13	10.71	89.35	8.15	1.27	116.60
J18	6.76	8.46	52.58	4.98	0.97	73.75
J19	6.36	6.16	48.82	5.63	1.66	68.63
J20	4.81	9.23	28.86	7.84	1.18	51.91
J21	5.39	7.95	158.72	4.70	1.10	177.86
平均值 Average	6.21	9.32	54.77	6.38	1.13	77.81

¹⁾ F1-F24: 抚松县样点 Sampling points in Fusong County; J1-J21: 集安市样点 Sampling points in Ji'an City.

表4 吉林省抚松县和集安市非林地栽参基地人参根部重金属元素含量的比较($\bar{X}\pm SD$)¹⁾Table 4 Comparison on content of heavy metal elements in ginseng root from non-forestedland base with cultivated ginseng in Fusong County and Ji'an City of Jilin Province ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

样地 Sampling plot	各重金属元素含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Content of different heavy metal elements				
	Pb	As	Cd	Cu	Zn
抚松 Fusong	0.11±0.08(72.9%)	0.07±0.04(51.9%)	0.12±0.07(55.2%)	8.76±1.63(18.6%)	19.67±4.09(20.8%)
集安 Ji'an	0.13±0.05(34.4%)	0.06±0.03(44.0%)	0.29±0.16(55.6%)	7.46±1.55(20.7%)	23.60±6.64(28.2%)

¹⁾ 括号中的百分数为变异系数 Percentages in the brackets are coefficient of variation.

出:抚松县非林地栽参基地人参根部的 Pb、As、Cd、Cu 和 Zn 平均含量分别为 0.11、0.07、0.12、8.76 和 19.67 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中 Pb、As、Cd 和 Cu 平均含量均低于《鲜园参分等质量》(GB/T 22533—2008)中关于人参根部重金属污染物含量的限量值(0.5、2.0、0.5 和 20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。集安市非林地栽参基地人参根部的 Pb、As、Cd、Cu 和 Zn 平均含量分别为 0.13、0.06、0.29、7.46 和 23.60 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中 Pb、As、Cd 和 Cu 平均含量均低于前述限量标准,但 2 号和 21 号样点人参根部的 Cd 含量超出前述限量值。由于目前国家对食品和中药材中 Zn 的限量标准并没有明确规定,因此无法对人参根部的 Zn 安全性进行科学评价。从

人参根部各重金属元素含量的变异系数来看,Pb、As 和 Cd 含量的变异系数远高于 Cu 和 Zn。

3 讨论和结论

中药材中的重金属元素含量与地质背景存在密切关系,不同母质和成土过程形成的土壤中积累的重金属元素在种类和数量上往往不同^[14]。李莉等^[15]关于吉林省抚松县和集安市林地栽参基地土壤中重金属元素含量的调查结果表明:2 个林地栽参基地土壤中的 Pb 含量分别为 12.13 和 11.20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Cd 含量分别为 0.157 和 0.190 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,As 含量分别为

6.01 和 7.29 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。本研究中,2 个非林地栽参基地土壤中的 Pb 和 As 含量明显高于前述研究结果,并且虽然土壤中的 Cd 含量与前述研究结果接近,但其变化幅度和变异系数均明显偏高。土壤中重金属元素含量的变异系数越大,说明其在土壤中的分布越不均匀,受到的人为干扰越大^[16]。据此推测造成本研究结果与前述研究结果不同的主要原因可能是本研究的采样点位于非林地栽参基地中人为干扰较大的农田中〔前茬作物为玉米(*Zea mays* Linn.)〕,而李莉等^[15]的采样点则主要分布在林地等受人为干扰较小的区域。

一般情况下,可以根据土壤的单因子污染指数和综合污染指数分别从单一因素和整体上评价土壤受污染的程度,而土壤的单因子潜在生态风险指数和综合潜在生态风险指数则能够反映土壤中污染物对作物的毒害程度,只有将这几方法综合运用才能够对土壤的重金属污染状况进行准确评价^[17-18]。研究结果表明,抚松县和集安市非林地栽参基地各样点土壤中的 Pb、As、Cu 和 Zn 的单因子污染指数和单因子潜在生态风险指数均较低,分别低于 1 和 40。但是,Cd 的单因子污染指数和单因子潜在生态风险指数平均值明显高于上述 4 种重金属元素。其中,各样点的单因子污染指数基本上均低于 1(抚松县 3 号样点和集安市 21 号样点除外),但其单因子潜在生态风险指数多高于 40,说明抚松县和集安市非林地栽参基地土壤大多未受到 Cd 污染,但其潜在 Cd 污染风险处于中等水平。这一研究结果与孙海等^[19]的研究结果相似。

本研究土壤的 Cd 来源,一方面与其成土母质和地质构造密切相关,另一方面还与样地由农田土壤改建而成密切相关。李莉等^[15]测得抚松县和集安市土壤中 Cd 含量分别为 0.241 和 0.237 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,明显高于吉林省土壤中的 Cd 含量,这是造成本研究中大部分样点土壤 Cd 污染潜在风险偏高的原因之一。在农田管理过程中,化肥、农药、地膜以及有机肥料等可致使土壤中的 Cd 含量大幅提高^[14];其中,磷肥施用对土壤 Cd 含量增加的贡献率达 54%~58%^[20],而家禽粪肥施用是导致设施蔬菜地和稻田土壤 Cd 累积的最重要因素^[21-22],并且随着有机肥施用量的增加,土壤中的 Cd 含量显著增加^[23]。此外,由于实验选取的非林地栽参基地在整地和栽培管理过程中施用了大量的绿肥和有机肥,同时还铺设了地膜,这些措施无疑将增大土壤 Cd 污染的风险。

在非林地栽参过程中,通常选用 2 年生或 3 年生人参种苗进行移栽,因此,人参根部的重金属元素含量受到前期种苗培育土壤环境和后期栽培土壤环境的双重影响。综合考虑非林地人参栽培在地块选择、种苗移栽以及栽培管理等方面的特殊性,应加强对非林地栽参基地重金属污染的源头控制和栽培过程的规范化管理,从而避免和降低土壤和人参根部的重金属污染对人类造成危害。

中药材的重金属污染不但取决于其自身的遗传特性(即植物对重金属元素的主动吸收和富集),还与其生长环境有关^[24]。人参为多年生草本植物,对重金属元素具有一定的富集能力^[8],并且其安全性与土壤中的重金属元素含量及形态密切相关^[25]。土壤中的 Cd 元素具有较高的生物活性,其有效态含量占总量的 22.1%,明显高于 Zn、As、Cr 和 Cu 等重金属元素,致使其可能更易被人参吸收和富集^[19]。本研究中,抚松县和集安市非林地栽参基地人参根部的 Pb、As 和 Cu 含量均低于限量值,抚松县所有样点和集安市 19 个样点人参根部的 Cd 含量也均低于限量值,但集安市 2 号和 21 号样点人参根部的 Cd 含量却超出限量值,具体原因有待进一步研究。

综上所述,吉林省抚松县和集安市非林地栽参基地的土壤质量总体良好,土壤中的 Pb、As、Cu 和 Zn 含量均处于安全水平,人参根部的上述重金属元素含量基本符合国家标准;但是,个别样点土壤中的 Cd 含量偏高,超出国家标准。2 个基地土壤的 Cd 污染潜在生态风险较高,可能造成对人参质量安全的危害,相关部门应引起重视并实施相应的防御措施。

参考文献:

- [1] WEI B G, YANG L S. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China[J]. *Microchemical Journal*, 2010, 94: 99-107.
- [2] 陈永,黄标,胡文友,等.设施蔬菜生产系统重金属积累特征及生态效应[J]. *土壤学报*, 2013, 50(4): 57-66.
- [3] 易昊旻,周生路,吴绍华,等.基于正态模糊数的区域土壤重金属污染综合评价[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(4): 1127-1134.
- [4] VAROL M, ŞEN B. Assessment of nutrient and heavy metal contamination in surface water and sediments of the Upper Tigris River, Turkey[J]. *Catena*, 2012, 92: 1-10.
- [5] LIU J, ZHANG X H, TRAN H, et al. Heavy metal contamination and risk assessment in water, paddy soil, and rice around an electroplating plant[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2011, 18: 1623-1632.

- [6] 金 艳,何德文,柴立元,等. 重金属污染评价研究进展[J]. 有色金属, 2007, 59(2): 101-104.
- [7] 王秀全,张崇禧,赵 英,等. 振兴吉林人参产业的若干思考[J]. 吉林农业大学学报, 2003, 25(2): 235-238.
- [8] 赵连华,杨银慧,胡一晨,等. 我国中药材中重金属污染现状分析及对策研究[J]. 中草药, 2014, 45(9): 1199-1206.
- [9] 陈 岩,季宏兵,朱先芳,等. 北京市得田沟金矿和崎峰茶金矿周边土壤重金属形态分析和潜在风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2142-2151.
- [10] 陈宇航,郭巧生,张贤秀,等. 夏枯草药材和种植土壤中农药及重金属残留分析[J]. 植物资源与环境学报, 2012, 21(2): 60-63.
- [11] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control; a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14: 975-1001.
- [12] 孟宪玺,李生智. 吉林省土壤元素背景值研究[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [13] 徐争启,倪师军,庾先国,等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 秦鱼生,喻 华,冯文强,等. 成都平原北部水稻土重金属含量状况及其潜在生态风险评价[J]. 生态学报, 2013, 33(19): 6335-6344.
- [17] LIU J L, LI Y L, ZHANG B, et al. Ecological risk of heavy metals in sediments of the Luan River source water[J]. Ecotoxicology, 2009, 18: 748-758.
- [18] LIU J L, WU H, FENG J X, et al. Heavy metal contamination and ecological risk assessments in the sediments and zoobenthos of selected mangrove ecosystems, South China[J]. Catena, 2014, 119: 136-142.
- [19] 孙 海,张亚玉,孙长伟,等. 林下参土壤中重金属形态分布及生态风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 928-934.
- [20] 韩 平,王纪华,陆安祥,等. 北京顺义区土壤重金属分布与环境质量评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(1): 106-112.
- [21] LIU P, ZHAO H J, WANG L L, et al. Analysis of heavy metal sources for vegetable soils from Shandong Province, China[J]. Agricultural Sciences in China, 2011, 10: 109-119.
- [22] SHI J C, YU X L, ZHANG M K, et al. Potential risks of copper, zinc and cadmium pollution due to pig manure application in a soil-rice system under intensive farming: a case study of Nanhu, China[J]. Journal of Environmental Quality, 2011, 40: 1695-1704.
- [23] 孙 海,张亚玉,孙长伟,等. 不同肥料对栽参土壤中 Cr、Cu、Pb 和 Zn 含量及有效态的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2011, 33(4): 411-417.
- [24] LI Q S, CHEN Y, FU H B, et al. Health risk of heavy metals in food crops grown on reclaimed tidal flat soil in the Pearl River Estuary, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 227/228: 148-154.
- [25] ZHANG J H, WIDER B, SHANG H C, et al. Quality of herbal medicines: challenges and solutions[J]. Complementary Therapies in Medicine, 2012, 20: 100-106.

(责任编辑: 佟金凤)

欢迎订阅 2016 年《热带生物学报》

《热带生物学报》是由海南大学主办、海南省教育厅主管的学术性期刊,为中国核心期刊数据库、中国学术期刊(光盘版)、“万方数据——数字化期刊群”和中文科技期刊数据库等收录。本刊原名《华南热带农业大学学报》(1985年创刊),于2009年更名,2010年3月起正式出版发行。该刊登载热带生物领域的学术论文、研究报告、专题评述、学术问题讨论、研究简报(或快报)等稿件,内容包括热带农林科学、热带微生物科学、热带海洋生物科学、热带动物科学、热带医药科学、热带园艺科学、热带生物安全以及生物学实验技术等领域的最新研究进展和成果。读者对象为从事热带农业与生命科学研究的

科技工作者、大专院校师生等。

本刊为季刊,大16开本,每期100页;每期定价15.00元(含邮寄费),全年60.00元。国内统一连续出版物号:CN 46-1078/S,国际标准连续出版物号:ISSN 1674-7054。全国各地邮局发行,邮发代号:84-32。错过订阅的读者可向本刊资料室(或邮局)直接订阅。

编辑部地址:海南省海口市人民大道58号《海南大学学报》编辑部(邮编:570228)。联系电话:0898-66289657,0898-66182769(传真);联系人:林允刚。

欢迎投稿! 欢迎订阅!