ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

第 34 卷 第 11 期 Vol.34 No.11 2014

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版

中国科学院科学出版基金资助出版

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 11 期　　2014 年 6 月　(半月刊)

目　　次

前沿理论与学科综述

土壤大孔隙流研究现状与发展趋势…… 高朝侠,徐学选,赵娇娜,等 (2801)

能源基地生态修复

我国大型煤炭基地建设的生态恢复技术研究综述…… 吴　钢,魏　东,周政达,等 (2812)

国家大型煤电基地生态环境监测技术体系研究——以内蒙古锡林郭勒盟煤电基地为例……
…… 魏　东,全　元,王辰星,等 (2821)

基于 DPSIR 模型的国家大型煤电基地生态效应评估指标体系 …… 周政达,王辰星,付　晓,等 (2830)

西部干旱区煤炭开采环境影响研究…… 雷少刚,卞正富 (2837)

露天煤矿区生态风险受体分析——以内蒙古平庄西露天煤矿为例…… 高　雅,陆兆华,魏振宽,等 (2844)

草原区矿产开发对景观格局和初级生产力的影响——以黑岱沟露天煤矿为例……
…… 康萨如拉,牛建明,张　庆,等 (2855)

三七对土壤中镉、铬、铜、铅的累积特征及健康风险评价 …… 林龙勇,阎秀兰,廖晓勇,等 (2868)

某焦化场地土壤中多环芳烃分布的三维空间插值研究…… 刘　庚,毕如田,权　腾,等 (2876)

个体与基础生态

杉木人工混交林对土壤铝毒害的缓解作用 …… 雷　波,刘　彬,罗承德,等 (2884)

基于 $\delta^{15}N$ 稳定同位素分析的人工防护林大型土壤动物营养级研究 …… 张淑花,张雪萍 (2892)

铅镉抗性菌株 JB11 强化植物对污染土壤中铅镉的吸收 …… 金忠民,沙　伟,刘丽杰,等 (2900)

陕北地区石油污染土壤中不动杆菌属的筛选、鉴定及降解性能 …… 王　虎,吴玲玲,周立辉,等 (2907)

祁连山高山植物根际土放线菌生物多样性…… 马爱爱,徐世健,敏玉霞,等 (2916)

新疆沙冬青 AM 和 DSE 真菌的空间分布 …… 姜　桥,贺学礼,陈伟燕,等 (2929)

聚糠萘水剂对不同积温带玉米花后叶片氮同化的影响…… 高　娇,董志强,徐田军,等 (2938)

内蒙古河套灌区玉米与向日葵霜冻的关键温度…… 王海梅,侯　琼,云文丽,等 (2948)

四种类型栓皮栎栲胶含量…… 尹艺凝,张文辉,何景峰,等 (2954)

食物胁迫对翅二型丽斗蟋飞行肌和繁殖发育的影响…… 吴红军,赵吕权,曾　杨,等 (2963)

颜色对梨小食心虫产卵选择性的影响…… 杨小凡,马春森,范　凡,等 (2971)

缓释单萜类挥发物对落叶松毛虫行为及落叶松主要防御蛋白的影响…… 林　健,刘文波,孟昭军,等 (2978)

种群、群落和生态系统

黄土丘陵沟壑区不同植被恢复格局下土壤微生物群落结构 …… 胡婵娟 ,郭　雷 ,刘国华 (2986)

刺参池塘底质微生物群落功能多样性的季节变化…… 闫法军,田相利,董双林,等 (2996)
基于 DGGE 技术的茯砖茶发花过程细菌群变化分析 …… 刘石泉,胡治远,赵运林 (3007)

景观、区域和全球生态

中国区域间隐含碳排放转移…… 刘红光,范晓梅 (3016)
西南地区退耕还林工程主要林分 50 年碳汇潜力 …… 姚 平, 陈先刚,周永锋,等 (3025)
青海湖流域草地植被动态变化趋势下的物候时空特征…… 李广泳,李小雁,赵国琴,等 (3038)
黑龙江省温带森林火灾碳排放的计量估算…… 魏书精,罗碧珍,孙 龙,等 (3048)
三峡库区森林植被气候生产力模拟…… 潘 磊,肖文发,唐万鹏,等 (3064)
三峡水库支流拟多甲藻水华的形成机制…… 朱爱民,李嗣新,胡 俊,等 (3071)
流域库坝工程开发的生物多样性敏感度分区…… 李亦秋,鲁春霞,邓 欧,等 (3081)

城乡与社会生态

基于集对分析的京津冀区域可持续发展协调能力评价…… 檀菲菲,张 萌,李浩然,等 (3090)
江西省自然保护区发展布局空缺分析 …… 黄志强,陆 林, 戴年华,等 (3099)
鄱阳湖生态经济区生态经济指数评价 …… 黄和平,彭小琳 ,孔凡斌,等 (3107)
基于有害干扰的中国省域森林生态安全评价…… 刘心竹,米 锋,张 爽,等 (3115)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 328 * zh * P * ￥90.00 * 1510 * 35 * 2014-06

封面图说: 三峡库区森林植被——三峡地区属亚热带区域,山高坡陡、地形复杂、物种丰富,森林是其最重要的自然资源之一,其面积占到库区总面积的 37%左右,库区内现有森林可初步分为 2 个植被型组,8 个植被型,18 个群系组,44 个群系,102 个群丛,主要树种有马尾松、杉树、柏树等,低海拔处多为落叶阔叶林、常绿阔叶林,较高海拔分布有针阔混交林、针叶混交林、灌木林等,人工林主要有经济林、竹林等。对三峡库区森林气候生产力进行模拟,分析库区森林植被的生产力并进行预测,可以为三峡库区的生态建设决策提供科学依据。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201307261958
林龙勇,阎秀兰,廖晓勇,张玉秀.三七对土壤中镉、铬、铜、铅的累积特征及健康风险评价.生态学报,2014,34(11):2868-2875.
Lin L Y, Yan X L, Liao X Y, Zhang Y X.Accumulation of soil Cd, Cr, Cu, Pb by *Panax notoginseng* and its associated health risk.Acta Ecologica Sinica, 2014,34(11):2868-2875.

三七对土壤中镉、铬、铜、铅的累积特征及健康风险评价

林龙勇[1,2],阎秀兰[2,*],廖晓勇[2],张玉秀[1]
(1. 中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院, 北京 100083;
2. 中国科学院地理科学与资源研究所 场地污染评估与修复中关村开放实验室, 北京 100101)

摘要:我国传统珍贵草本药用植物三七 *Panax notoginseng* (Burk.) F. H. Chen 重金属污染问题已引起广泛关注,但相关研究却非常有限。调查了三七种植区土壤重金属污染状况,揭示了三七对土壤中重金属的吸收转运规律及其健康风险。结果表明,三七种植区土壤镉(Cd)、铬(Cr)、铜(Cu)的超标率分别为 75%、38%、50%,污染程度分布表现为丘北县>文山县>砚山县>马关县;种植区三七存在较为严重的 Cd、Cr、铅(Pb)污染,其不同部位的超标率范围分别为 81%—100%、75%—100%、25%—63%;三七具有较强的 Cd 富集能力及 Cd、Cu 转运能力;三七不同部位 Pb、Cd、Cr、Cu 对人体的摄入风险贡献依次为 13.46%—46.40%、8.67%—24.67%、1.90%—14.40%、0.38%—0.79%,其中主根中 Cd、Cr、Cu 对人体的健康风险与土壤中相应的重金属浓度呈线性正相关。研究可为解决三七种植区,乃至其他中草药种植区的重金属污染问题提供重要的科学依据。

关键词:三七;重金属;土壤;富集;转运;健康风险

Accumulation of soil Cd, Cr, Cu, Pb by *Panax notoginseng* and its associated health risk

LIN Longyong[1,2], YAN Xiulan[2,*], LIAO Xiaoyong[2], ZHANG Yuxiu[1]
1 *School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing* 100083, *China*
2 *Zhongguancun Science Park Open Lab of Land Contamination Assessment and Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Science, Beijing* 100101, *China*

Abstract: *Panax notoginseng* is a traditional valuable Chinese medicine plant that can be used for the treatment of cardiovascular diseases, inflammation, trauma, and hemorrhage. In recent years, the heavy metal pollution problem of *P. notoginseng* has attracted widely attention, however studies on this regard are limited. In this study, the heavy metal pollution of *P. notoginseng* and soil in Wenshan (Yunnan, China) was investigated; the bioaccumulation and transfer of heavy metal in *P. notoginseng* was revealed; and the associated health risk was evaluated. Concentrations of Cd, Cr and Cu in soil samples fell in the ranges of 0.13—1.87 mg/kg, 71.35—273.73 mg/kg and 13.96—86.16 mg/kg, respectively. Cd concentrations in 75%, Cr concentrations in 38%, and Cu concentrations in 50% of the soil samples exceeded the Environmental Quality Standard (GB15618—1995), indicating that serious pollution existed in *P. notoginseng* planting area. Shapiro-Wilk test revealed that concentrations of soil Cd, Cr and Cr were not normally distributed (The *P* values of Cd, Cr and Cu were 0.004, 0.02 and 0.03, respectively, which were lower than 1), indicating that human activities had caused skewed probability distribution. Nemerow index analysis indicated that the magnitude of pollution followed the order of, from high to low, Qiubei, Wenshan, Yanshan and Maguan county. The concentrations of Cd, Cr and Pb in *P.notoginseng* were 0.23—5.50 mg/kg, 0—30.57 mg/kg and 0.12—27.45 mg/kg, respectively. and approximately 81%—

基金项目:国家自然科学基金(40801205);中国科学院地理科学与资源研究所优秀青年人才基金项目(2012RC203)
收稿日期:2013-07-26; **网络出版日期**:2014-03-07
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yanxl@igsnrr.ac.cn

100%, 75%—100%, and 25%—63% of the herb samples exceeded the Green Standards of Medicinal Plants and Preparations for Foreign Trade and Economy (WM/T2—2004) or NSF International Draft Standard (173—2001). Bioaccumulation factors (*BCF*) of Cd, Cr, Cu and Pb were 1.51—4.01, 0.01—0.11, 0.13—0.37 and 0.11—0.37, respectively in different part of *P. notoginseng*. Transfer factors (*TF*) of Cd, Cr, Cu and Pb were 1.23, 0.41, 1.14 and 3.61, respectively in *P. notoginseng*. Different parts of *P. notoginseng* accounted for 13.46%—46.40%, 8.67%—24.67% and 1.90%—14.40%, respectively, of the ingestion rates with ADI (Allowable Daily Intake). The correlation coefficient between heavy metal concentration in soil and the percent of main root ingestion rates with ADI were 0.841** (Cd), 0.789** (Cr) and 0.753** (Cu) (The double-asterisk is used to represent $P < 0.01$), respectively. This means that the health risk of Cd, Cr and Cu in the main root of the herb increased with the increasing metal concentrations. In conclusion, heavy metal pollution of soil and *P. notoginseng* in the planting area of Wenshan should not be neglected, and effective measures should be adopted to reduce heavy metal accumulation in the herb and human health risks.

Key Words: *Panax notoginseng*; heavy metal; soil; bioaccumulation; transfer; health risk

三七 *Panax notoginseng* (Burk.) F. H. Chen 是我国传统珍贵药用植物,对心血管系统、血液系统、免疫系统、中枢神经系统等均具有重要疗效[1]。三七起源于2500万年前第三纪古热带残遗植物,生理生态上对环境适应能力很低,仅局限于北纬23.5°附近的中高海拔地区,主要分布于我国云南文山州境内[2]。云南文山州种植三七历史迄今已有400余年,年产量达900万kg,约占全世界三七市场的90%以上,是中国乃至世界著名的"三七之乡"。

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]。环境保护部曾对3.6万 hm^2的基本农田保护区进行土壤重金属调查,发现超标率达12.1%[4]。目前,珠江三角洲约有40%的农田菜地土壤存在重金属污染,西江流域的土壤重金属污染甚至已达60%—70%,农田重金属污染问题已引起人们的广泛关注[5]。云南文山州作为我国重要的矿区,富含锌、铜、锡、砷等(非)金属矿,土壤重金属背景值相对较高[6-7]。近年来,随着采矿区域的无序扩张以及含重金属农药的大量使用,三七种植区土壤重金属污染问题日益严重,已对三七药品安全及国际贸易产生了严重威胁[8]。

目前,三七研究主要集中于药用活性领域,其重金属污染研究仍处于起步阶段[2,9]。江滨等首次提出三七中的重金属主要来源于附着在表面的浮土[10]。郝南明等和冯光泉等通过野外调查发现,三七中砷、镉等污染可能主要来源于其特殊的重金属吸收、累积机制[8,11]。Yan 等通过多年长期定位实验,揭示了砷在土壤-三七系统内的迁移和转化规律,并评估了三七砷污染对人体的健康风险[12]。然而目前对于三七中其他重金属的吸收、累积规律及其对人体的健康风险仍然缺乏有效研究,三七重金属污染研究滞后将阻碍相关控制技术的发展。

本研究通过调查云南文山三七种植区土壤及三七中的重金属污染现状,揭示三七中 Cd、Cr、Cu、Pb 等重金属的的吸收和累积规律,并评估其对人体的健康风险,以期为有效解决三七重金属污染问题、保障三七药物安全提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　样品采集和前处理

云南文山州三七种植区海拔约为1000—1800 m,土壤为疏松红壤或棕红壤,环境温暖而阴湿,年平均气温12.8—18.1 ℃。随机选取16个典型三七种植地块,在每个地块随机采集三七样品10—15株,同时采集相对应的表层土壤(0—20 cm)。取样点以GPS精确定位,具体采样点分布见图1。新鲜三七采集后用自来水冲洗干净,洗去根部泥土,并用细毛刷清洗,再用去离子水冲洗。将三七植株分成主根、须根、茎、叶等不同部位,105 ℃下杀青处理30 min,然后于60 ℃条件下烘干24 h至恒重,烘干后的三七样品经玛瑙研钵磨碎后置于封口袋中保存。将土壤样品自然风干后,剔除样品中植物根系、有机残渣以及可见侵入体,用木质工具碾碎并用玛瑙研钵研磨,分别过20目和100目尼龙筛,待测。

1.2　分析方法

土壤样品采用美国国家环保局推荐的

图 1 云南文山三七种植区调查点分布示意图

Fig. 1 Sampling sites in *P. notoginseng* planting area in Wenshan county, Yunnan Province

USEPA3050B 方法消煮待测[13],植物样品采用 HNO_3-$HClO_4$法消煮[14]。用电感耦合等离子发射光谱法(ICP-OES)测定待测液中的 Cd、Cr、Cu、Pb 4 种重金属含量。分析过程所用试剂均为优级纯,土壤样品和植物样品的分析过程中分别采用国家标准参比物质(土壤:GBW07404;植物:GBW07603)进行分析质量控制,标样测定结果均在参比物质允许误差范围内。

1.3 数据处理

数据采用 Microsoft Excel 2003 及 SPSS 12.0 for Windows 软件进行统计分析。

(1)土壤重金属污染评估

本研究以综合污染指数法为评价模式[15],用《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)的土壤重金属二级标准对文山州三七种植区土壤 Cd、Cr、Cu、Pb 环境质量进行评价。

综合污染指数法

$$P_{综合} = \sqrt{[P_{max}^2 + P_{ave}^2]/2}$$

式中,$P_{综合}$为 Nemerow 综合污染指数,P_{max}为单项污染指数最高值,P_{ave}为各单项污染指数的算术平均值。$P_{综合}$<0.7 表示清洁,在 0.7—1 之间为警戒限,在 1—2 间属轻度污染,在 2—3 范围属中度污染,$P_{综合}$>3 为重度污染。

(2)人体健康风险评估:根据样品中 Cd、Cr、Cu、Pb 含量的测定结果,参照 1993 年 FAO/WHO 规定的 Cd、Cu、Pb 每日允许摄入量(allowable daily intake, ADI)60、12000、214 μg/d 以及中国营养学会 Cr 安全摄入量最大值 200 μg/d(以体重 60 kg 计),并考虑医学上推荐的三七每日的最大摄入剂量 10 g,评估人体对三七的摄入量的风险。

日摄入量(μg/d)= 三七中重金属浓度(μg/g)×三七摄入量(g/d)

日摄入量占 ADI 百分比(%)= 每日摄入量(μg/d)/ADI 值(μg/d)

2 结果与讨论

2.1 三七种植区土壤存在较为严重的重金属污染问题

三七种植区土壤重金属含量及分布见表 1。由《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)的土壤重金属二级标准可知,三七种植区存在较为严重的土

表 1 土壤中重金属 Cd、Cr、Cu、Pb 浓度(n=16)/(mg/kg)

Table 1 Concentrations of Cd, Cr, Cu, and Pb in soil samples

	Cd	Cr	Cu	Pb
范围 Range	0.13—1.87	71.35—273.73	13.96—86.16	14.25—60.01
平均值 Average	0.74	151.21	47.77	29.86
标准差 Standard deviation	0.60	67.98	25.74	13.54
变异系数 Coefficient of variation	81.96	44.96	53.89	45.34
偏度系数 Coefficient of kewness	1.06	0.77	0.44	1.09
峰度系数 Coefficient of kurtosis	−0.70	−1.13	−1.59	0.45
标准* Standard	0.3	150	50	250
超标率 Over standard rate	75%	38%	50%	0

*标准参照《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)二级标准 pH<6.5

壤 Cd、Cr、Cu 污染,样品超标率分别为 75%、38%、50%,土壤 Pb 浓度均远低于限量标准(250 mg/kg)。褚卓栋等认为,土壤重金属浓度概率分布若符合正态分布,则表明该元素来源于成土母质,不符合则可能来源于人类活动[15]。本研究通过 Shapiro-Wilk test 分析发现,土壤中 Pb 的 P 值为 0.085(大于 0.05),其含量符合正态分布,表明种植区土壤 Pb 主要来源于成土母质;而 Cd、Cr、Cu 的 P 值分别为 0.004、0.02、0.03(均小于 0.05),这 3 种金属含量不符合正态分布,原因可能是人类活动导致元素富集,使概率分布偏移。

2.2　三七种植区土壤重金属污染评价

以《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)二级标准作为评价标准,土壤重金属单项污染指数法和综合污染指数法评价,结果如表 2 所示。所有采样点中,Cd 单项污染,重度污染级占 31%、轻度污染占 44%、13%处于警戒限、12%为清洁级;Cr 单项污染,轻度污染占 38%、43%处于警戒限、19%为清洁级;Cu 单项污染,轻度污染占 50%、50%为清洁级;而 Pb 则均处于清洁级。一般而言,土壤中 Cd 主要来源于锌、铅矿的采冶、精炼等,而 Cu、Cr 则主要来源于铜、铬矿石采冶、化工、农药等[16-17]。冯光泉等调查发现,三七种植区土壤重金属含量符合 GAP(Good Agricultural Practices)对栽培土壤的要求[8]。曾鸿超等通过对 3 年生三七种植区调查发现,土壤主要存在 Cu(超标率达 50%),而 Cd 含量则均低于限量标准[18]。本研究结果发现,三七种植区已出现比较严重的 Cd、Cr、Cu 等多种重金属污染。表明,近年来云南文山州矿产资源的不合理开发、矿业活动的无序扩张以及含重金属农药的大规模使用[8],已导致三七种植区土壤重金属污染范围不断扩大、污染程度不断加剧。

通过分析综合污染指数发现,丘北县 5 个采样点中,4 个采样点出现重度污染,1 个出现轻度污染;文山县 6 个采样点中,1 个采样点出现中度污染、3 个出现轻度污染、1 个处于警戒限、1 个为清洁;砚山县 2 个采样点中,1 个采样点出现轻度污染、一个为清洁;马关县 3 个采样点中,2 个采样点处于警戒限、1 个为清洁。本次调查的文山州 4 县重金属污染程度依次表现为丘北县>文山县>砚山县>马关县。

表 2　各采样点土壤污染指数(参考《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)二级标准)

Table 2　Contamination indexes of soils in sampling regions (Use the second level criterion of Standard of Soil Environment (GB15618—1995))

区县 Counties	采样点 Sampling site	P_{Cd}	P_{Cr}	P_{Cu}	P_{Pb}	$P_{综合}$	污染程度 Pollution level
马关县	夹寒箐	0.42	0.75	0.53	0.13	0.62	清洁
	马白镇达号村	1.19	0.48	0.38	0.13	0.92	警戒限
	马白镇马鞍山	1.24	0.59	0.28	0.11	0.96	警戒限
砚山县	盘龙乡白石岩	0.81	0.75	0.57	0.07	0.69	清洁
	盘龙乡白石岩	1.36	0.72	0.55	0.07	1.07	轻度污染
文山县	马塘镇农人河	0.44	0.77	0.54	0.06	0.63	清洁
	古木莲花塘	1.00	0.50	1.09	0.08	0.90	警戒限
	薄竹镇新村	1.64	0.80	1.48	0.09	1.36	轻度污染
	追栗街金洞村	1.87	1.13	0.62	0.13	1.48	轻度污染
	马塘镇农人河	1.83	1.40	1.13	0.09	1.51	轻度污染
	薄竹大麻栗树	3.28	0.84	1.03	0.11	2.50	中度污染
丘北县	树皮姑珠长冲	1.68	0.73	0.53	0.06	1.30	轻度污染
	树皮白色姑	5.57	1.64	1.62	0.16	4.25	重度污染
	八道哨乡鱼塘	5.29	1.65	1.68	0.22	4.05	重度污染
	树皮麦色白租	5.35	1.55	1.54	0.16	4.08	重度污染
	八道哨乡鱼塘	6.25	1.82	1.72	0.24	4.76	重度污染

2.3　三七植株重金属累积状况分析

本文对三七重金属污染评估主要参照了《药用植物及制剂外经贸绿色行业标准》(WM/T2—2004),其 Cd、Cu、Pb 的限量标准分别为 0.3、20、5 mg/kg。然而上述标准并未对 Cr 浓度提出限量要求,因此本文同时参照了《NSF International Draft

Standard》(173—2001),其 Cr 限量标准为 0.2 mg/kg。本研究发现,三七种植区植株各部位均存在较为严重的 Cd、Cr、Pb 污染(表 3)。其中须根、主根、茎、叶 Cd 超标率分别为 100%、81%、94%、94%,Cr 超标率分别为 100%、100%、75%、100%,Pb 超标率分别为 63%、50%、25%、38%,而 Cu 则均达标。王朝梁和崔秀明等调查发现,种植区三七除 Cu、Zn 含量偏高外,其余指标均属正常范围,已达绿色药材标准[2]。冯光泉等调查发现,种植区部分三七样品出现 Cd、Pb 等重金属超标的现象[19]。近年来,由于国内外需求量剧增、文山耕地有限、三七连作障碍等原因,使得部分重金属含量超标区域也被应用于三七种植,从而导致三七重金属污染问题凸显[20-21]。本研究结果表明,三七种植区植株已存在较为严重的 Cd、Cr、Pb 等重金属污染,对人体健康及国际贸易造成威胁。

表 3 三七各部位的重金属浓度和超标率

Table 3 Concentrations and exceed ratios of heavy metal in different part of *P. notoginseng*

	标准 Standard/(mg/kg)	重金属浓度/(mg/kg) Heavy metal concentration				超标率/% Over standard rate			
		须根 Fibrous root	主根 Main root	茎 Stem	叶 Leaf	须根 Fibrous root	主根 Main root	茎 Stem	叶 Leaf
镉 Cd	0.3	0.36—5.50	0.21—1.30	0.23—2.07	0.29—2.25	100	81	94	94
铬 Cr	0.2	0.26—5.97	0.29—27.45	0.12—1.00	0.28—1.39	100	100	75	100
铜 Cu	50	2.17—14.29	2.62—7.01	1.82—14.56	3.54—86.17	0	0	0	0
铅 Pb	5	0.00—30.57	0.00—25.34	0.00—17.06	0.00—9.62	63	50	25	38

重金属从土壤进入植物体的过程与植物本身的遗传特性、主动吸收功能和对元素的富集能力有关[6]。生物富集系数(BCF)常被用来评价有机体吸收和富集化学物质的能力[22]。冯光泉等研究发现,三七对土壤 Cd 有一定的吸收和富集能力,而对 Pb 则主要表现为根表皮的吸附[19]。本研究中,三七各部位 Cd 的 *BCF* 均大于 1,而 Cr、Cu、Pb 则均远小于 1(表 4),表现出了三七较强的 Cd 富集特征。转运系数(TF)常被用来评估化学物质的在植物体内的迁移能力[23]。由于重金属的危害性,普通植物一般尽量抑制其吸收或避免其向地上部转运[24]。阎秀兰等和 Yan 等研究均发现,三七具有较强的向叶部转运砷的能力[6,12]。本研究中,Cd、Cu、Pb 平均转运系数均大于 1,而 Cr 则远小于 1,表明三七体内可能存在着较强的 Cd、Cu、Pb 向地上部转运能力。

表 4 三七各部位重金属的平均富集系数和转运系数

Table 4 The average *BCF* and *TF* of heavy metal in *P. notoginseng*

重金属 Heavy metals	Cd	Cr	Cu	Pb
富集系数 *BCF*				
须根 Fibrous root	4.01±3.69	0.05±0.05	0.26±0.21	0.37±0.33
主根 Main root	1.51±1.49	0.11±0.16	0.13±0.11	0.23±0.25
茎 Stem	2.49±3.24	0.01±0.01	0.15±0.12	0.11±0.23
叶 Leaf	2.64±3.89	0.02±0.01	0.37±0.48	0.13±0.17
转运系数 *TF*				
地上部浓度/地下部浓度 Aboveground concentration/Underground concentration	1.23±1.28	0.41±0.56	1.14±0.59	3.61±3.11

三七中 Cd、Cr、Cu、Pb 4 种重金属的 *BCF* 和 *TF* 计算方法分别为 $BCF=C_p/C_s$ 和 $TF=C_a/C_u$,其中 C_p、C_s、C_a、C_u 分别表示植物、土壤、植物地上部、植物地下部重金属浓度

2.4 三七中重金属的健康风险初步评价

本研究拟分别参照 1993 年 FAO/WHO 规定的 Cd、Cu、Pb 每日允许摄入量、中国营养学会规定的 Cr 安全摄入量及人体对重金属的每日摄入量估算值,综合评价三七各部位对人体重金属暴露的健康风险。图 2 表示三七不同部位重金属每日摄入量占

ADI 的比值。结果发现,三七不同部位 Cd、Cr、Cu、Pb 对人体的摄入风险贡献依次为 8.67%—24.67%、1.90%—14.40%、0.38%—0.79%、13.46%—46.40%,主要表现为 Pb>Cd>Cr>Cu。阎秀兰等研究发现,文

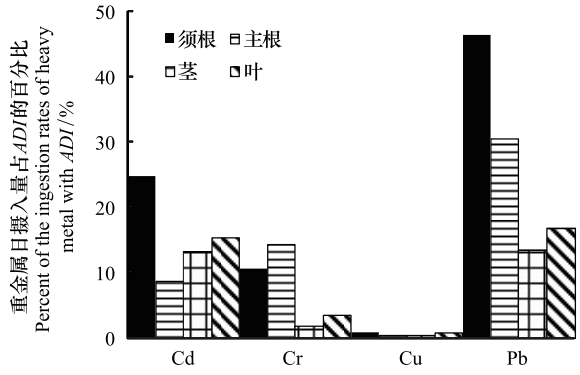

图 2　三七不同部位重金属日摄入量占 ADI 的百分比

Fig.2　Percent of the average ingestion rates of heavy metal from different part of *P. notoginseng* with ADI

山州种植区三七的砷日摄入量占 ADI 比值平均为 12.83%,最高可达 45.87%[6]。本研究结果表明,种植区三七也存在较高的 Pb、Cd、Cr 摄入风险,而 Cu 目前还未发现明显的健康风险。

主根是三七主要药用部位,因此本研究将三七主根各重金属日摄入量占 ADI 比值与土壤重金属浓度进行拟合(图 3)。研究发现,Cd、Cr、Cu 3 种重金属具有较好的拟合性(拟合系数分别为 0.7067、0.6222、0.5682),相关性极显著(P 值分别为 0.841^{**}、0.789^{**}、0.753^{**},**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关)。说明随着土壤 Cd、Cr、Cu 浓度的增加,三七主根对人体的摄入风险也随之增加,且当土壤浓度分别达到 0.3、150、50 mg/kg 以上时,每日摄入量占 ADI 的比值分别达到 4.77%、10.89%、0.42%。此外,本研究中,Pb 的拟合性较差,拟合系数仅为 0.0218,表明三七中 Pb 可能不仅仅来源于土壤,还可能来源于交通污染、含 Pb 农药的喷施等[25]。

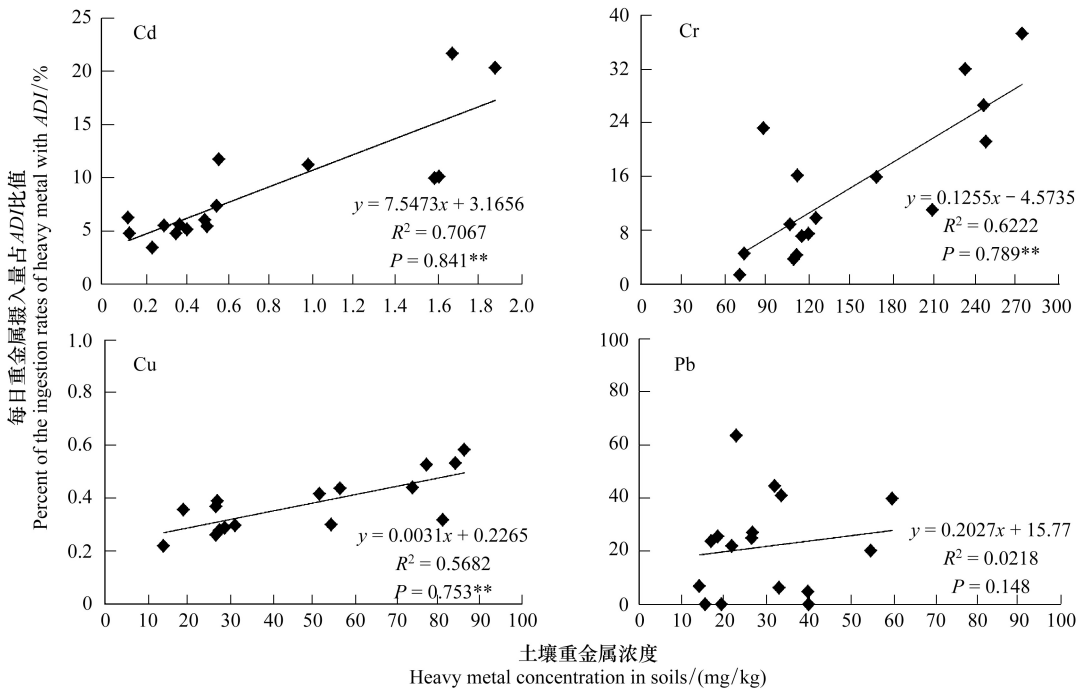

图 3　三七主根中不同重金属每日摄入量占 ADI 的百分比

Fig.3　Percent of the average ingestion rates of heavy metal from *P. notoginseng* with ADI

3　结论

(1)云南文山三七种植区土壤已出现较为严重的 Cd、Cr、Cu 污染问题,其 4 个主产县的污染程度依次表现为丘北县>文山县>砚山县>马关县。

(2)种植区三七存在较为严重的 Cd、Cr、Pb 超标现象,而 Cu 含量则均低于相关标准;三七具有较强的 Cd 富集能力及 Cd、Cu 转运能力。

(3)种植区三七具有较高的 Cd、Cr、Pb 人体摄入风险,Cu 的摄入风险则不明显;随着土壤 Cd、Cr、Cu 浓度的增加,三七主根对人体的摄入风险也随之增加。

References:

[1] Liu C X, Xiao P G. Recent advances on ginseng research in China. Journal of Ethnopharmacology, 1992, 36(1): 27-38.

[2] Wang C L, Chen Z J, Cui X M, Sun Y Q. The characteristic of *Panax notoginseng* product of geographical indication in Wenshan. China Journal of Chinese Materia Medica, 2004, 29(6): 511-514.

[3] Yang H F, Wang Y B, Li J L. Impacts of Cu and Zn pollution on rape (*Brassica chinensis* L.) growth and accumulation effect of heavy metals in paddy soil. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(10): 1470-1477.

[4] Zeng X B, Li L F, Mei X R. Heavy metal content in soils of vegetable-growing lands in China and source analysis. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(11): 2507-2517.

[5] Fu G W. Countermeasures for water and soil heavy metal pollution in China. China Environmental Science, 2012, 32(2): 373-376.

[6] Yan X L, Liao X Y, Yu B B, Zhang W B. Accumulation of soil arsenic by *Panax notoginseng* and its associated health risk. Environmental Science, 2011, 32(3): 880-885.

[7] He J. The Indium Marmatite and Pyrrhotite Flotation Separation Experiment and the Fundamental Research to the Wenshan Dulong Mining Area [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2006.

[8] Feng G Q, Zhang W B, Chen Z J, Wang Y, Cui X M. Determination on residues of several heavy metal elements in *Panax notoginseng* and its cultivating soil. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2003, 34(11): 1051-1054.

[9] Ng T B. Pharmacological activity of sanchi ginseng (*Panax notoginseng*). Journal of Pharmacy and Pharmacology, 2010, 58(8): 1007-1019.

[10] Jiang B, Wen X, Zhao Q. The preliminary research on the heavy metal control of *Panax notoginseng*. Chinese Journal of Ethnomedicine and Ethnopharmacy, 1997, (6): 33-37.

[11] Hao N M, Tian H, Gou L. Determination of trace element's content in different parts of Wenshan Gingseng in initial stage. Guangdong Trace Elements Science, 2004, 11(6): 31-34.

[12] Yan X L, Lin L Y, Liao X Y, Zhang W B. Arsenic accumulation and resistance mechanism in *Panax notoginseng*, a traditional rare medicinal herb. Chemosphere, 2012, 87(1): 31-36.

[13] USEPA. EPA 3050B (revision 2). www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/testmain.htm, 1996, 53.

[14] Lei M, Yue Q L, Chen T B, Huang Z C, Liao X Y, Liu Y R, Zheng G D, Chang Q R. Heavy metal concentrations in soils and plants around Shizhuyuan mining area of Hu'nan province. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(5): 1146-1151.

[15] Chu Z D, Liu W J, Xiao Y B, Zhu Y G, Zheng W J, Duan Y H. Survey and assessment of heavy metals in soils and herbal medicines from Chinese herbal medicine cultivated regions. Environmental Science, 2010, 31(6): 1600-1607.

[16] Ye L, Cook N J, Liu T G, Ciobanu C L, Gao W, Yang Y L. The Niujiaotang Cd-rich zinc deposit, Duyun, Guizhou province, southwest China: ore genesis and mechanisms of cadmium concentration. Mineralium Deposita, 2012, 47(6): 683-700.

[17] Guo C H, Zhu Y G. Contamination and availabile contents of heavy metals in soils in the typical mining smelting circumjacent districts. Ecology and Environment, 2004, 13(4): 553-555.

[18] Zeng H C, Zhang W B, Feng G Q, Liu Y Z, Ma N, Yang J Z. The Cu, Pb, Cd, and Zn Content and pollution evaluation of *Panax notoginseng* cultivated soil in Wenshan. Chinese Traditional Patent Medicine, 2009, 31(2): 317-320.

[19] Feng G Q, Liu Y Z, Zhang W B, Wang Y. Residual characteristics research of heavy metal in *Panax notoginseng* plant. Chinese Traditional Patent Medicine, 2006, 28(12): 1796-1798.

[20] Zhang Z Y, Lin W X. Continuous cropping obstacle and allelopathic autotoxicity of medicinal plant. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(1): 189-196.

[21] Zhang Z L, Wang W Q, Yang J Z, Cui X M. Effects of continuous *Panax notoginseng* cropping soil on *P. notoginseng* seed germination and seedling growth. Soil, 2010, 42(6): 1009-1014.

[22] Connell D W. Bioaccumulation behavior of persistent organic chemicals with aquatic organisms. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 1988, 102: 117-154.

[23] Berry W L. Plant factors influencing the use of plant analysis as a tool for biogeochemical prospecting // Carlisle D, Berry W L, Kaplan I R, Watterson J R, eds. Mineral Exploration: Biological Systems and Organic Matter. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1986: 13.

[24] Sarma H, Deka S, Deka H, Saikia R R. Accumulation of heavy metals in selected medicinal plants. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 2011, 214: 63-86.

[25] Feng G Q, Zhang W B, Liu Y Z. Effect of highway Pb pollution on the Pb residues in *Panax notoginseng* product. Research and Practice of Chinese Medicines, 2003, 17(Z1): 34-36.

参考文献:

[2] 王朝梁, 陈中坚, 崔秀明, 孙玉琴. 文山三七的原产地域产品特征. 中国中药杂志, 2004, 29(6): 511-514.

[3] 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. 生态环境学报, 2011, 20(10): 1470-1477.

[4] 曾希柏, 李莲芳, 梅旭荣. 中国蔬菜土壤重金属含量及来源分析. 中国农业科学, 2007, 40(11): 2507-2517.
[5] 傅国伟. 中国水土重金属污染的防治对策. 中国环境科学, 2012, 32(2): 373-376.
[6] 阎秀兰, 廖晓勇, 于冰冰, 张文斌. 药用植物三七对土壤中砷的累积特征及其健康风险. 环境科学, 2011, 32(3): 880-885.
[7] 何剑. 文山都龙含铟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.
[8] 冯光泉, 张文斌, 陈中坚, 王勇, 崔秀明. 三七及其栽培土壤中几种重金属元素含量的测定. 中草药, 2003, 34(11): 1051-1054.
[10] 江滨, 文旭, 赵庆. 三七中重金属含量控制的初步研究. 中国民族民间医药杂志, 1997, (6): 33-37.
[11] 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. 广东微量元素科学, 2004, 11(6): 31-34.
[14] 雷梅, 岳庆玲, 陈同斌, 黄泽春, 廖晓勇, 刘颖茹, 郑国砥, 常庆瑞. 湖南柿竹园矿区土壤重金属含量及植物吸收特征. 生态学报, 2005, 25(5): 1146-1151.
[15] 褚卓栋, 刘文菊, 肖亚兵, 朱永官, 郑文杰, 段宇航. 中草药种植区土壤及草药中重金属含量状况及评价. 环境科学, 2010, 31(6): 1600-1607.
[17] 郭朝晖, 朱永官. 典型矿冶周边地区土壤重金属污染及有效性含量. 生态环境, 2004, 13(4): 553-555.
[18] 曾鸿超, 张文斌, 冯光泉, 刘云芝, 马妮, 杨建忠. 文山三七栽培土壤铜、铅、镉和锌含量水平及污染评价. 中成药, 2009, 31(2): 317-320.
[19] 冯光泉, 刘云芝, 张文斌, 王勇. 三七植物体中重金属残留特征研究. 中成药, 2006, 28(12): 1796-1798.
[20] 张重义, 林文雄. 药用植物的化感自毒作用与连作障碍. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 189-196.
[21] 张子龙, 王文全, 杨建忠, 崔秀明. 三七连作土壤对其种子萌发及幼苗生长的影响. 土壤, 2010, 42(6): 1009-1014.
[25] 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. 现代中药研究与实践, 2003, 17(Z1): 34-36.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.11 June, 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

Review on macropore flow in soil ..... GAO Zhaoxia, XU Xuexuan, ZHAO Jiaona, et al (2801)

Ecological Restoration

A summary of study on ecological restoration technology of large coal bases construction in China ..... WU Gang, WEI Dong, ZHOU Zhengda, et al (2812)

The ecology and environment monitoring technical systems in national large-scale coal-fired power base: a case study in Xilingol League, Inner Mongolia ..... WEI Dong, QUAN Yuan, WANG Chenxing, et al (2821)

Evaluation index system on ecological effect of national large-scale coal-fired power base based on the dpsir conceptual model ..... ZHOU Zhengda, WANG Chenxing, FU Xiao, et al (2830)

Research progress on the environment impacts from underground coal mining in arid western area of China ..... LEI Shaogang, BIAN Zhengfu (2837)

Ecological risk receptors analysis of pingzhuang western open-cut coal mining area in inner mongolia ..... GAO Ya, LU Zhaohua, WEI Zhenkuan, et al (2844)

Impacts of mining on landscape pattern and primary productivity in the grassland of Inner Mongolia: a case study of Heidaigou open pit coal mining ..... KANG Sarula, NIU Jianming, ZHANG Qing, et al (2855)

Accumulation of soil Cd, Cr, Cu, Pb by *Panax notoginseng* and its associated health risk ..... LIN Longyong, YAN Xiulan, LIAO Xiaoyong, et al (2868)

3D interpolation of soil PAHs distribution in a coking contaminated site of China ... LIU Geng, BI Rutian, QUAN Teng, et al (2876)

Autecology & Fundamentals

Catabatic effect from artificial mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* on soil aluminum toxicity ..... LEI Bo, LIU Bin, LUO Chengde, et al (2884)

Study on the trophic levels of soil macrofauna in artificial protection forests by means of stable nitrogen isotopes ..... ZHANG Shuhua, ZHANG Xueping (2892)

Lead- and cadmium-resistant bacterial strain JB11 enhances lead and cadmium uptake in the phytoremediation of soils ..... JIN Zhongmin, SHA Wei, LIU Lijie, et al (2900)

Identification and oil-degrading performance of *Acinetobacter* sp. isolated from North Shaanxi oil-contaminated soil ..... WANG Hu, WU Lingling, ZHOU Lihui, et al (2907)

Phylogenetic and physiological diversity of actinomycetes isolated from plant rhizosphere soils in the Qilian Mountains ..... MA Aiai, XU Shijian, MIN Yuxia, et al (2916)

Spatial distribution of AM and DSE fungi in the rhizosphere of *Ammopiptanthus nanus* ..... JIANG Qiao, HE Xueli, CHEN Weiyan, et al (2929)

Effects of PASP-KT-NAA on maize leaf nitrogen assimilation after florescence over different temperature gradients ..... GAO Jiao, DONG Zhiqiang, XU Tianjun, et al (2938)

Key temperatures of corn and sunflower during cooling process in Hetao irrigation district, Inner Mongolia ..... WANG Haimei, HOU Qiong, YUN Wenli, et al (2948)

The content of tannin extract in four types of *Quercus variabilis* ..... YIN Yining, ZHANG Wenhui, HE Jingfeng, et al (2954)

Effect of food stress on flight muscle and reproduction development in a wing dimorphic cricket, *Velarifictorus ornatus* ..... WU Hongjun, ZHAO Lüquan, ZENG Yang, et al (2963)

Effect of colours on oviposition preference of the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* Busck ····· YANG Xiaofan, MA Chunsen, FAN Fan, et al (2971)

Monoterpene volatiles affecting host selection behavior of *Dendrolimus superans* and the activities of defense protein in larch needles ····· LIN Jian, LIU Wenbo, MENG Zhaojun, et al (2978)

Population, Community and Ecosystem

Soil microbial community structure under different vegetation restoration patterns in the loess hilly area ····· HU Chanjuan, GUO Lei, LIU Guohua (2986)

Seasonal variation of functional diversity of microbial communities in sediment and shelter of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) cultural ponds ····· YAN Fajun, TIAN Xiangli, DONG Shuanglin, et al (2996)

Analysis of bacterial flora during the fahua-fermentation process of fuzhuan brick tea production based on DGGE technology ····· LIU Shiquan, HU Zhiyuan, ZHAO Yunlin (3007)

Landscape, Regional and Global Ecology

CO_2 emissions transfer embedded in inter-regional trade in China ····· LIU Hongguang, FAN Xiaomei (3016)

Carbon sequestration potential of the major stands under the Grain for Green Program in Southwest China in the next 50 years ····· YAO Ping, CHEN Xiangang, ZHOU Yongfeng, et al (3025)

Characteristics of spatial and temporal phenology under the dynamic variation of grassland in the Qinghai Lake watershed ····· LI Guangyong, LI Xiaoyan, ZHAO Guoqin, et al (3038)

Estimates of carbon emissions caused by forest fires in the temperate climate of Heilongjiang Province, China, from 1953 to 2012 ····· WEI Shujing, LUO Bizhen, SUN Long, et al (3048)

Simulation of the climatic productivity of forest vegetation in Three Gorges Reservoir area ····· PAN Lei, XIAO Wenfa, TANG Wanpeng, et al (3064)

The mechanism for occurrence of *Peridiniopsis* blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir ····· ZHU Aimin, LI Sixin, HU Jun, et al (3071)

Biodiversity sensitivity zoning of river dam and reservoir engineering development ····· LI Yiqiu, LU Chunxia, DENG Ou, et al (3081)

Urban, Rural and Social Ecology

Assessment on coordinative ability of sustainable development of Beijing-Tianjin-Hebei Region based on set pair analysis ····· TAN Feifei, ZHANG Meng, LI Haoran, et al (3090)

Vacancy analysis on the development of nature reserves in Jiangxi Province ····· HUANG Zhiqiang, LU Lin, DAI Nianhua, et al (3099)

Evaluation of ecological economy index in the poyang lake ecological economic zone ····· HUANG Heping, PENG Xiaolin, KONG Fanbin, et al (3107)

Research on China's provincial forest ecological security appraisal based on the detrimental interferences ····· LIU Xinzhu, MI Feng, ZHANG Shuang, et al (3115)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科研工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科研人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933　　CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址: 100085 北京海淀区双清路 18 号　**电　　话**:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@ rcees.ac.cn　**网　　址**: www.ecologica.cn

编辑部主任　孔红梅　　**执行编辑**　刘天星　段　靖

生　态　学　报
(SHENGTAI　XUEBAO)
(半月刊　1981 年 3 月创刊)
第 34 卷　第 11 期　(2014 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 34　No. 11 (June, 2014)

编　　辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@ rcees.ac.cn
主　　编	王如松
主　　管	中国科学技术协会
主　　办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085
出　　版	科学出版社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717
印　　刷	北京北林印刷厂
发　　行	科学出版社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@ cspg.net
订　　购	全国各地邮局
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044
广告经营许可证	京海工商广字第 8013 号

Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@ rcees.ac.cn
Editor-in-chief	WANG Rusong
Supervised by	China Association for Science and Technology
Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@ cspg.net
Domestic	All Local Post Offices in China
Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P.O.Box 399 Beijing 100044, China

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q　　国内外公开发行　　国内邮发代号 82-7　　国外发行代号 M670　　定价 90.00 元