

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

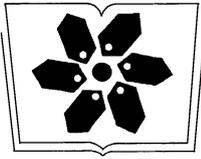
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 23 期 Vol.32 No.23 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 23 期 2012 年 12 月 (半月刊)

目 次

中国石龙子母体孕期调温诱导幼体表型:母体操纵假说的实验检测	李 宏,周宗师,吴延庆,等	(7255)
同种或异种干扰对花鼠分散贮藏点选择的影响	申 圳,董 钟,曹令立,等	(7264)
曝气充氧条件下污染河道氨挥发特性模拟	刘 波,王文林,凌 芬,等	(7270)
贵州草海越冬斑头雁日间行为模式及环境因素对行为的影响	杨延峰,张国钢,陆 军,等	(7280)
青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响	常 娟,王根绪,高永恒,等	(7289)
长沙城市斑块湿地资源的时空演变	恭映璧,靖 磊,彭 磊,等	(7302)
基于模型数据融合的千烟洲亚热带人工林碳水通量模拟	任小丽,何洪林,刘 敏,等	(7313)
农田氮素非点源污染控制的生态补偿标准——以江苏省宜兴市为例	张 印,周羽辰,孙 华	(7327)
用 PFU 微型生物群落监测技术评价化工废水的静态毒性	李朝霞,张玉国,梁慧星	(7336)
京郊农业生物循环系统生态经济能值评估——以密云尖岩村为例	周连第,胡艳霞,王亚芝,等	(7346)
基于遥感的夏季西安城市公园“冷效应”研究	冯晓刚,石 辉	(7355)
海南岛主要森林类型时空动态及关键驱动因子	王树东,欧阳志云,张翠萍,等	(7364)
不同播种时间对吉林省西部玉米绿水足迹的影响	秦丽杰,靳英华,段佩利	(7375)
黄土塬区不同品种玉米间作群体生长特征的动态变化	王小林,张岁岐,王淑庆,等	(7383)
密植条件下种植方式对夏玉米群体根冠特性及产量的影响	李宗新,陈源泉,王庆成,等	(7391)
沙地不同发育阶段的人工生物结皮对重金属的富集作用	徐 杰,敖艳青,张璟霞,等	(7402)
增强 UV-B 辐射和氮对谷子叶光合色素及非酶促保护物质的影响	方 兴,钟章成	(7411)
不同产地披针叶茴香光合特性对水分胁迫和复水的响应	曹永慧,周本智,陈双林,等	(7421)
芦芽山林线华北落叶松径向变化季节特征	董满宇,江 源,王明昌,等	(7430)
地形对植被生物量遥感反演的影响——以广州市为例	宋巍巍,管东生,王 刚	(7440)
指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响	王力朋,晏紫伊,李吉跃,等	(7452)
火烧伤害对兴安落叶松树干径向生长的影响	王晓春,鲁永现	(7463)
山地梨枣树耗水特征及模型	辛小桂,吴普特,汪有科,等	(7473)
两种常绿阔叶植物越冬光系统功能转变的特异性	钟传飞,张运涛,武晓颖,等	(7483)
干旱胁迫对银杏叶片光合系统 II 荧光特性的影响	魏晓东,陈国祥,施大伟,等	(7492)
神农架川金丝猴栖息地森林群落的数量分类与排序	李广良,丛 静,卢 慧,等	(7501)
碱性土壤盐化过程中阴离子对土壤中镉有效态和植物吸收镉的影响	王祖伟,弋良朋,高文燕,等	(7512)
两种绣线菊耐弱光能力的光合适应性	刘慧民,马艳丽,王柏臣,等	(7519)
闽楠人工林细根寿命及其影响因素	郑金兴,黄锦学,王珍珍,等	(7532)
旅游交通碳排放的空间结构与情景分析	肖 潇,张 捷,卢俊宇,等	(7540)
北京市妫水河流域人类活动的水文响应	刘玉明,张 静,武鹏飞,等	(7549)
膜下滴灌技术生态-经济与可持续性分析——以新疆玛纳斯河流域棉花为例	范文波,吴普特,马枫梅	(7559)
高温胁迫及其持续时间对棉蚜死亡和繁殖的影响	高桂珍,吕昭智,夏德萍,等	(7568)
桉树枝瘿姬小蜂虫瘿解剖特征与寄主叶片生理指标的变化	吴耀军,常明山,盛 双,等	(7576)
西南桦纯林与西南桦×红椎混交林碳贮量比较	何友均,覃 林,李智勇,等	(7586)
长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征及其潜在生态风险	方 晰,唐志娟,田大伦,等	(7595)
专论与综述		
城乡结合部人-环境系统关系研究综述	黄宝荣,张慧智	(7607)
陆地生态系统碳水通量贡献区评价综述	张 慧,申双和,温学发,等	(7622)



封面图说: 麋鹿群在过河——麋鹿属于鹿科,是中国的特有动物。历史上麋鹿曾经广布于东亚地区,到 19 世纪时,只剩下在北京南海子皇家猎苑内一群。1900 年,八国联军攻陷北京,麋鹿被抢劫一空。1901 年,英国的贝福特公爵用重金从法、德、荷、比四国收买了世界上仅有的 18 头麋鹿,以半野生的方式集中放养在乌邦寺庄园内,麋鹿这才免于绝灭。在世界动物保护组织的协调下,1985 年起麋鹿从英国分批回归家乡,放养到北京大兴南海子、江苏省大丰等地。这是在江苏省大丰麋鹿国家级自然保护区放养的麋鹿群正在过河。

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

DOI: 10.5846/stxb201201130073

方晰,唐志娟,田大伦,项文化,孙伟军.长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征及其潜在生态风险.生态学报,2012,32(23):7595-7606.

Fang X, Tang Z J, Tian D L, Xiang W H, Sun W J. Distribution and ecological risk assessment of 7 heavy metals in urban forest soils in Changsha City. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7595-7606.

长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征 及其潜在生态风险

方 晰^{1,2,*}, 唐志娟¹, 田大伦^{1,2}, 项文化^{1,2}, 孙伟军¹

(1. 中南林业科技大学, 长沙 410004; 2. 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004)

摘要:采用调查分析方法,研究长沙城市森林土壤 Zn、Cu、Ni、Pb、As、Cd、Hg 7 种重金属含量,并以长沙市土壤背景值和湖南省土壤背景值为参比值,采用 Hakanson 潜在生态危害指数法评价不同城市化梯度森林土壤重金属潜在生态风险。结果表明:7 种重金属的平均含量均随着城市化程度提高而增加,Pb 增幅最大,As 增幅最小。同一城市化梯度森林土壤均以 Zn 平均含量最高,Cd 最低,但均未超过土壤环境质量标准(GB15618—1995) II 级标准值。在城市中心区,桂花树林、樟树+桂花树混交林土壤 Zn、Cu、Pb、As、Hg 平均含量普遍较高,而樟树+马尾松混交林、桂花树+杜英混交林土壤 Cu、Ni、As、Cd、Hg 平均含量普遍较低,Pb、Zn 空间分布差异明显,Cd、Ni、As 空间分布比较均匀,Cu、Ni、Pb、As、Cd、Hg 之间(除 Cd 与 As、Ni 之间外)均存在显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)的相关性,与土壤有机质之间也呈显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)的相关性,Zn、Cu、Ni、Pb、As、Cd、Hg 主要是人为输入;中心区森林土壤重金属的潜在生态危害已达到中等生态危害程度,边缘区接近中等生态危害程度,郊区为轻微生态危害程度,Zn、Cu、Ni、Pb、As 均为轻微生态危害程度,Cd、Hg 已达到中等生态危害程度以上。

关键词:长沙市;城市森林土壤;重金属;潜在生态风险

Distribution and ecological risk assessment of 7 heavy metals in urban forest soils in Changsha City

FANG Xi^{1,2,*}, TANG Zhijuan¹, TIAN Dalun^{1,2}, XIANG Wenhua^{1,2}, SUN Weijun¹

1 Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 State Key Laboratory of Ecological Applied Technology in Forest Area of South China, Changsha 410004, China

Abstract: In order to understand the influence of urbanization on distribution of heavy metals in soils, concentrations characteristics of 7 heavy metals (Zn, Cu, Ni, Pb, As, Cd, and Hg) in various forest types were investigated along an urban gradient in Changsha, a capital city of Hunan Province, China. The concentrations and potential ecological risk of heavy metals in the urban soils was assessed when compared to the background values of heavy metals in soils in both Changsha city and Hunan Province. A total nineteen major forest types were selected at three locations (namely urban district location, urban fringe location, and suburban location) along the urban gradient degree in urban forests soil in the Changsha city. Two forest plots (each with the size of 20m × 20m) were built in each forest types. Three subplots were (each with an area of 1 m²) were set up in each of the plots. Five soil samples (from 0—20 cm depth) were randomly taken within each subplot and pooled to a soil sample for heavy metals chemical analysis, 0—20cm soil samples were collected from different urban gradient (urban district, urban fringe, suburban) forest to analyze the concentrations of Zn, Cu, Ni, Pb, As, Cd, and Hg, and the potential ecological hazard assessment indices by Hakanson was used to assess the

基金项目:国家野外科学观测研究站项目(20080615);湖南省科技厅资助项目(2011SK3120)

收稿日期:2012-01-13; **修订日期:**2012-09-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fangxizhang@sina.com

soil heavy metals potential ecological risk degree in urban forest, based on the background values of soil in Changsha City and in Hunan Province. Results showed that the average concentration of the same heavy metal elements in urban forest soils tended to increase with degree of urbanization. Pb had the maximum increasing value and As the minimum. In the same urbanization location degree, Zn had the highest average concentration and Cd had the lowest one among the studied of all test heavy metals. , On average, while the average the concentrations of all examined heavy metals them in study sites were lower than those in the Environmental Quality Standard for Soil (II grade) in China. ,. The heavy metals whose concentrations were higher than the background values in Changsha cite and the accumulation tendency of test heavy metals in urban forest were as in the order as of Cd>Hg>As>Pb>Cu (Ni)>Zn in the study sites. The concentration of re existed some differences in the same heavy metal element varied concentration with among different types forest types in the city, The average concentrations of Zn, Cu, Pb, As, and Hg were as higher in *Osmanthus fragrans* forests and, *Cinnamomum camphora Presl.* and *Osmanthus fragrans* mixed forests, but that of Cu, Ni, As, Cd, and Hg were found to be was low concentrations in *Cinnamomum camphora Presl.* + *Pinus massoniana* mixed forests and, *Osmanthus fragrans* + *Elaeocarpus sylvestris Poir* mixed forests, the spatial distribution patterns of Pb and Zn was significant different in the study area, while Cd, Ni and As were more evenly distributed. Significant correlations were found among Zn, Cu, Ni, Pb, As, Cd, and Hg concentrations in soils ($P < 0.05$), except the relationships between Cd and As, and Ni. The 7 heavy metals had positively significant correlations with soil organ matter. It was found that Zn, Cu, Ni, Pb, As, Cd and Hg mainly came form the anthropogenic inputs in the urban district forests. Based on potential ecological risk assessment, the situation of heavy metals was in the medium ecological risk level in urban district locations, was in closing to the medium level in urban fringe locations, and was in a slight level in suburban locations in Changsha cite. Among the studied heavy metals, Zn, Cu, Ni, Pb, and As were in a slight risk level, while Cd and Hg were in medium or strong ecological risk level. Our study provided scientific reference to estimate and evaluate the impact of urbanization on heavy metals in Southern China.

Key Words: Changsha city; urban forest soils; heavy metals; potential ecological risk

长沙市为湖南省省会城市,是湖南省政治、经济、文化、交通、科技、金融、信息中心,是华中地区主要的中心城市及经济中心之一,也是中南地区重要工商业城市。近 10a 来,长沙市大力推进新型工业化,积极实施一化三基和四化两型战略,一大批高新技术产业、汽车产业、装备制造、生物医药以及机械重工业产业迅速发展,2010 年机动车保有量突破 100 万辆,2011 年长沙实现地区生产总值 5619.33 亿元,全国 26 个省会城市中排第 7 位^[1],然而随着长沙市经济迅猛发展和城市化进程的加快,城市规模不断扩大,10a 人口数量增加了 90 万人^[2],城市中众多的污染源如交通运输、工业排放、市政建设和大气沉降等造成城市环境问题日益突出。2007 年 12 月,长株潭城市群被国家批准为全国“两型(资源节约型和环境友好型)”社会建设综合配套改革试验区,全面推进各个领域的改革,切实走出一条有别于传统模式的工业化、城市化发展新路^[3]。在长株潭产业快速聚集、经济快速发展的同时,区域生态环境尤其是长沙市面临的形势越来越严峻,环境承载压力与任务也越来越大,为此,湖南省委常委、长沙市委书记陈润儿同志提出了“创建生态文明示范城市”的总体思路,成立了长沙市创建生态文明示范城市课题组,开展长沙创建生态文明城市研究(市委办公厅长办通知(2010)9 号文件)。城市森林是构成城市生态系统中唯一执行自然“纳污吐新”负反馈机制的子系统,被称为“城市之肺”,承载着改善城市生态环境,为城市居民提供良好工作、生活和居住条件的重任^[4]。研究表明,乔灌木和城市森林对重金属具有明显的消减作用^[5-8],而目前国内有关城市森林土壤重金属含量特征及其污染评价方面的研究报道仍很少^[5,9-10],也由于 Zn、Cu、Ni、Pb、As、Cd、Hg 等重金属在城市土壤中污染程度普遍较高,是城市土壤重金属污染研究的主要考虑对象^[8,11-13]。为此为了给长沙市“两型社会”实验区的规划、建设,特别是环境污染预警提供依据,本研究以长沙城市森林土壤为对象,研究不同城市化梯度森林土壤以及城市中心区不同森林类型土壤重金属含量特征,探讨长沙城市森林土壤重金属污染来源,利用 Hakanson 潜在生态危害指

数法评价长沙城市森林土壤重金属潜在生态风险。

1 研究地概况

长沙市位于湖南省东部偏北,地处 27°51'—28°40'N, 111°53'—114°5'E,南接株洲、湘潭,西抵娄底,北达岳阳、益阳,东挨江西省宜春、萍乡。土地总面积 1.18 万 km²,建成区为 256 km²(2009 年)^[2],东西长约 230km,南北宽约 88km,呈东西向长条形状^[14]。海拔 200m 以下,地势东西两端高耸,中部低平,形似马鞍,山地、丘陵、岗地、平原各约占四分之一。母质为花岗岩、第三纪红色砂页岩、第四纪红色土、千枚岩等,地带性土壤以红壤为主,呈弱酸性。属亚热带大陆性季风湿润气候,年平均气温 16.8—17.2℃,年降水量为 1412—1559 mm,夏初多雨,秋季多旱,暑热期长,严冬期短,全年无霜期约 275d。地带性植被为常绿阔叶林,2006 年被评为“国家森林城市”^[15],市区主要绿化树种有樟树(*Cinnamomum camphora*)、广玉兰(*magnolia grandiflora* inn)、山矾(*Symplocos caudata*)、枫香(*Liquidambar formosana* Hance)、复羽叶栎树(*Koelreuteria bipinnata*)、杜鹃花(*Rhododendron simsii* Planch)、桂花树(*Osmanthus fragrans* Lour)等。

2 研究方法

2.1 采样地点的确定

为了比较不同城市化梯度城市森林土壤重金属含量的空间分异特征。首先,根据人口密度、建筑用地、车流量、人流量,将长沙市城市森林划分为城市中心区(简称:中心区,下同)、城市与郊区交错区(简称:边缘区,下同)、郊区 3 个梯度进行设置采样地点,共布置采样地点 11 处。中心区设置在:桂花公园,晓园公园,烈士公园,南郊公园,中南林业科技大学校园,特点是:居民居住集中,人口密度大,人均绿化率低,车流量和人流量大,商业活动繁华,人为干扰明显且干扰因素复杂。边缘区设置在:湖南省植物园,岳麓公园,王陵公园,特点是:居民居住较集中,人口较多,人均绿化率较高,商业活动较繁华,人为干扰也较大。郊区设置在:黑麋峰森林公园,石燕湖公园,大山冲湖南省森林公园,特点是:附近居民居住分散,人口少,人均绿化率高,森林面积大,人为干扰少。在 11 处采样地点选取分布面积较大,树木正常生长,林分年龄比较相近的林分 19 种,每种林分均分别设 2 块面积均为 20 m×20 m 采样样地,采用随机布点方法在每个样地布置 1 m² 采样样方 3 个,共设置 114 个采样样方,每个采集样方以双对角线法采集 5 个点 0—20 cm 的土壤,均匀混合后取约 1kg 土壤样品。每个采样地点的位置、面积、主要树种、采样林分及采集样品数如表 1 所示。

表 1 采样地点的基本概况

Table 1 Fundamentals of each sampling location

梯度 Gradient	采样地点 Sampling location	面积 Area /hm ²	林分类型 Forest type	林龄 Age / a	密度 Density (株/hm ²)	样品数 Sample number
中心区 Urban district	桂花公园	1.64	桂花树 + 杜英混交林 <i>Osmanthus fragrans</i> + <i>Elaeocarpus sylvestris</i> Poir mixed forest	26	276	6
	晓园公园	3.77	樟树 + 桂花树混交林 <i>Cinnamomum camphora</i> Presl. + <i>Osmanthus fragrans</i> mixed forest	28	298	6
	烈士公园	118.0	樟树林 <i>Cinnamomum camphora</i> Presl. forest	34	293	18
			马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> forest	33	696	
	南郊公园	35.92	樟树林 <i>Cinnamomum camphora</i> Presl. forest	28	285	6
边缘区 Urban fringe	湖南省植物园	180.38	樟树林 <i>Cinnamomum camphora</i> Presl. forest	30	750	12
			樟树 + 马尾松混交林 <i>Cinnamomum camphora</i> Presl. + <i>Pinus massoniana</i> mixed forest	35	364	
			樟树 + 马尾松混交林 <i>Cinnamomum camphora</i> Presl. + <i>Pinus massoniana</i> mixed forest	28	210	
			樟树 + 马尾松混交林 <i>Cinnamomum camphora</i> Presl. + <i>Pinus massoniana</i> mixed forest	33	670	
			木莲林 <i>Manglietia fordiana</i> . forest	26	431	18
			枫香林 <i>Liquidambar formosana</i> Hance. forest	35	540	

续表

梯度 Gradient	采样地点 Sampling location	面积 Area /hm ²	林分类型 Forest type	林龄 Age / a	密度 Density (株/hm ²)	样品数 Sample number
	岳麓公园	514.14	枫香林 <i>Liquidambar formosana</i> Hance. forest	35	638	6
	王陵公园	14.94	樟树林 <i>Cinnamomum camphora</i> Presl. forest	45	785	6
郊区 Suburban	黑麋峰森林 公园	4079	毛竹林 <i>Phyllostachys heterocycla</i> Mitf. forest	24	1167	12
			杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	30	1003	
	石燕湖公园	500	樟树+油茶混交林 <i>Cinnamomum camphora</i> Presl. + <i>Keteleeria fortunei</i> Carr. Mixed forest	26	1275	6
			杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	51	625	
大山冲湖南省 森林公园	525.3	马尾松+石栎混交林 <i>Pinus massoniana</i> + <i>Lithocarpus glaber</i> mixed forest	47	1975	18	
		青冈+石栎混交林 <i>Cyclobalanopsis glauca</i> + <i>Lithocarpus glaber</i> mixed forest	58	1474		

2.2 化学分析方法

土壤样品经风干后,过 100 目筛备用。本研究主要对森林土壤中 Zn、Cu、Ni、Pb、As、Cd、Hg 进行分析,Zn、Cu、Ni、Pb、As、Cd、Hg 经碳酸钠碱熔-盐酸提取后,Cu、Zn、Cd、Pb、Ni 采用 Hp3510 原子吸收分光光度计测定,As、Hg 采用 AFS-930 型双道原子荧光光谱仪测定。土壤有机质含量采用重铬酸钾-水合加热法测定,全 N 含量采用半微量凯氏定氮法测定,全 P 含量采用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法测定。

2.3 土壤重金属元素潜在的生态风险评价模型

为了确定长沙城市森林土壤重金属潜在生态危害效应和反映特定区域的特殊性,本研究选用 Hakanson 提出的潜在生态危害指数法^[16],以长沙市土壤背景值^[12]和湖南省土壤背景值^[17]作为参比值(表 2),评价长沙城市森林土壤重金属潜在的生态风险。

表 2 土壤重金属的环境背景值和环境质量标准值

Table 2 Environmental background and Environmental quality standard values of soil heavy metals

指标 Indicators	Zn	Cu	Ni	Pb	As	Cd	Hg
长沙市土壤背景值 ^[12] The background values of soils in Changsha (mg/kg)	93.33	25.67	28.50	30.17	14.43	0.070	0.10
湖南省土壤背景值 ^[17] The background values of soils in Hunan (mg/kg)	90.0	25.0	31.9	26.0	18.6	0.081	0.11
土壤环境质量标准(II 级) Environmental quality standard for soil (II grade) (mg/kg)	200	150	40	250	40	0.30	0.30

单种重金属潜在生态危害系数(E_i)的计算公式为:

$$E_i = T_r^i \times (C_i/C_{0i})$$

式中, C_i 、 C_{0i} 、 T_r^i 分别为第 i 种重金属的实测含量(mg/kg)、参比值(mg/kg)和毒性系数。毒性系数根据徐争启等^[16]计算的重金属毒性系数(T_r^i):Zn=1、Cu=Ni=Pb=5、As=10、Cd=30、Hg=40。

多种重金属潜在生态危害指数(RI)的计算公式为:

$$RI = \sum E_i$$

根据 E_i 和 RI 值,参照沉积物(土壤)中重金属潜在生态危害系数、生态危害指数和污染程度的关系^[16],采用丁振华等^[18]给出 7 种重金属的潜在生态危害指数 RI 划分的潜在生态危害分级标准(表 3)。

2.4 数据处理

采用 EXCEL、SPSS17.0 统计软件进行数据处理、相关性及显著性分析。

表 3 Hakanson 潜在生态危害评价指标

Table 3 The potential ecological hazard assessment indices by Hakanson

生态危害 Ecological risk	轻微 Slight	中等 Medium	强 Strong	很强 Very strong	极强 Greatly strong
E_i	<40	40—80	80—160	160—320	>320
RI	<150	150—300	300—600	>600	

3 结果与分析

3.1 不同城市化梯度森林土壤重金属的含量

从表 4 可以看出,不同城市化梯度林地之间同种重金属的平均含量均呈现出明显的城市化梯度性,即随着城市化程度提高而增大,Pb 增幅最大,As 增幅最小。Zn、Cu、Ni、As、Hg 表现为中心区(分别为 56.8、24.91、28.24、23.93、0.23 mg/kg)与边缘区、郊区的差异显著($P < 0.05$),边缘区与郊区的差异不显著($P > 0.05$),Pb 却表现为中心区(36.55 mg/kg)与边缘区、郊区之间,边缘区与郊区之间的差异均显著($P < 0.05$),Cd 为中心区(0.18 mg/kg)与郊区之间的差异显著($P < 0.05$),但与边缘区之间,边缘区与郊区之间的差异不显著($P > 0.05$)。

如表 4 所示,同一城市化梯度森林土壤均以 Zn 的平均含量最高,Cd 最低,但均未超过土壤环境质量标准(GB15618—1995) II 级标准值。不同梯度森林土壤中 Zn、Cu、Ni 的平均含量均低于长沙市、湖南省土壤背景值^[12,17],但中心区 Cu、Ni 平均含量已接近背景值;Pb 除中心区高于土壤背景值^[12,17]外,边缘区、郊区仍低于土壤背景值^[12,17],As、Cd、Hg 均超过土壤背景值^[12,17],且以 Cd 的标倍数最高,在 1.48—2.57 之间,其次是 Hg,在 1.36—2.30 之间。Zn 的变异系数最大,在 28.37%—48.82%,Pb 为其次,在 27.05%—44.38%,As 最小,为 8.22%—12.22%。在 114 个样方中,Zn、Ni、Cu、Pb、As、Hg、Cd 超过长沙市土壤背景值^[12]的样方分别为 5.38%、18.28%、19.35%、30.18%、92.63%、93.55%、100%,中心区 Zn、Cu、Ni、Pb、As、Hg、Cd 分别为 11.63%、30.23%、37.21%、51.16%、100%、100%、100%,Ni、Hg 超过土壤环境质量标准(GB15618—1995) II 级标准值的样方分别为 2.33% 和 16.28%,表明长沙城市森林表土层(0—20cm)已不同程度受到重金属污染,且已有较大面积受到了 As、Cd、Hg 的污染,尤其是中心区。总体上看,7 种重金属超过长沙市和湖南省土壤背景值^[12,17]倍数排序为: Cd>Hg>As>Pb>Cu(Ni)>Zn。

表 4 长沙市城市中心区-边缘区-郊区梯度森林土壤重金属的含量

Table 4 Heavy metal concentration in urban- fringe- suburban gradient forest soil in Changsha

梯度 Gradient	项目 Item	Zn	Cu	Ni	Pb	As	Cd	Hg
中心区 Urban district	最大值/(mg/kg)	124.35	55.14	45.67	84.00	27.88	0.28	0.56
	最小值/(mg/kg)	30.10	15.69	18.71	20.73	20.94	0.14	0.14
	平均值/(mg/kg)	56.80a	24.91a	28.24a	36.55a	23.98a	0.18a	0.23a
	变异系数/%	48.82	33.52	19.00	44.38	8.22	23.53	37.38
边缘区 Urban fringe	最大值/(mg/kg)	96.98	28.77	30.35	46.73	24.26	0.17	0.28
	最小值/(mg/kg)	28.08	11.10	13.28	16.17	15.46	0.12	0.09
	平均值/(mg/kg)	39.69b	16.12b	21.56b	24.55b	19.52b	0.15ab	0.17b
	变异系数/%	42.08	29.65	19.79	27.05	10.09	6.67	21.76
郊区 Suburban	最大值/(mg/kg)	71.77	32.21	33.21	39.59	22.38	0.14	0.28
	最小值/(mg/kg)	18.30	9.67	13.27	13.77	14.65	0.10	0.08
	平均值/(mg/kg)	43.07b	18.82b	20.17b	20.82c	18.92b	0.12b	0.15b
	变异系数/%	28.37	32.41	25.59	32.66	12.22	8.33	32.13

同列不同字母表示差异显著($P \leq 0.05$),相同字母表示差异不显著($P \geq 0.05$)

3.2 城市中心区不同森林类型土壤重金属的含量

如表 5 所示,中心区不同森林类型土壤 7 种重金属含量的变异系数差异较大,其中 Pb 最大,为

28.74%—61.02%,其次是 Zn,为 7.34%—59.17%,Cd、Ni 较小,分别为 5.88%—35.22%和 14.20%—29.04%,As 最小,为 3.63%—12.90%。表明 Pb、Zn 空间分布差异明显,Cd、Ni、As 空间分布比较均匀,存在相似性。不同森林类型土壤同种重金属的平均含量存在一定的差异,但各森林类型土壤重金属含量的最大值(除 Ni、Hg 外)、平均值均未超过土壤环境质量标准(GB15618—1995) II 级标准值。整体上,桂花树林、樟树+桂花树混交林土壤 Zn、Cu、Pb、As、Hg 含量较高,樟树+桂花树混交林、马尾松林土壤 Ni、Cd 含量较高,而樟树林、桂花+杜英混交林土壤 Zn、Pb 含量较低,樟树+马尾松混交林、桂花+杜英混交林土壤 Cu、Ni、As、Cd、Hg 含量较低。Zn、Cu(除桂花树林、樟树+桂花树混交林外)平均含量均低于土壤背景值^[12,17],Ni 除桂花树林、马尾松林、樟树+桂花树混交林略超过长沙市土壤背景值^[12]外,均低于土壤背景值^[12,17],Pb、As、Cd、Hg 均超过土壤背景值^[12,17]。方差分析结果表明,除桂花树林土壤 Hg 含量与其它 5 种森林类型之间,桂花树林、马尾松林、樟树+桂花树混交林土壤 Pb 含量与樟树林、桂花+杜英混交林之间,桂花树林、樟树+桂花树混交林土壤 Cu 含量与其它 4 种森林类型之间,桂花树林、樟树+桂花树混交林、樟树+马尾松混交林土壤 Zn 含量与其它 3 种森林类型之间存在显著的差异($P < 0.05$)外,其它不同森林类型之间同种重金属含量无显著差异($P > 0.05$)。

表 5 长沙市中心区森林类型土壤重金属的含量

Table 5 Heavy metal concentrations in different forest types soils in the urban district in Changsha

样地 Sites	项目 Item	Zn	Cu	Ni	Pb	As	Cd	Hg
桂花树林 <i>Osmanthus fragrans</i> forest	最大值/(mg/kg)	112.46	55.14	33.68	70.07	27.88	0.20	0.56
	最小值/(mg/kg)	42.91	23.75	25.46	25.48	21.52	0.16	0.21
	平均值/(mg/kg)	66.82a	34.79a	29.23a	41.91a	25.02a	0.17a	0.34a
	变异系数/%	59.17	50.70	14.20	58.46	12.90	13.32	56.34
樟树林 <i>Cinnamomum camphora</i> Presl. forest	最大值/(mg/kg)	124.35	32.98	39.34	58.43	27.44	0.27	0.36
	最小值/(mg/kg)	30.10	16.38	19.46	20.81	21.86	0.14	0.15
	平均值/(mg/kg)	48.97b	23.65b	27.75a	31.77b	24.15a	0.17a	0.23b
	变异系数/%	51.28	22.32	19.23	28.74	7.15	19.99	28.38
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> Forest	最大值/(mg/kg)	87.33	29.42	37.81	84.00	26.56	0.21	0.26
	最小值/(mg/kg)	31.46	18.13	25.78	25.52	22.49	0.15	0.16
	平均值/(mg/kg)	51.34b	23.27b	29.91a	40.98a	24.69a	0.18a	0.20b
	变异系数/%	41.32	19.14	16.34	61.02	7.06	12.45	19.04
桂花树+杜英混交林 <i>Osmanthus fragrans</i> + <i>Elaeocarpus</i> <i>sylyestris</i> Poir mixed forest	最大值/(mg/kg)	53.13	20.99	35.68	46.73	22.87	0.18	0.19
	最小值/(mg/kg)	44.85	16.04	23.45	20.87	21.06	0.16	0.16
	平均值/(mg/kg)	48.32b	18.94b	27.45a	28.86b	21.98a	0.17a	0.17b
	变异系数/%	7.43	9.46	17.57	35.79	3.63	5.88	6.55
樟树+桂花树混交林 <i>Cinnamomum camphora</i> Presl. + <i>Osmanthus fragrans</i> mixed forest	最大值/(mg/kg)	122.24	51.74	45.67	65.54	26.78	0.26	0.43
	最小值/(mg/kg)	43.03	15.69	23.65	25.57	21.75	0.22	0.14
	平均值/(mg/kg)	89.95a	28.20a	31.16a	42.50a	24.74a	0.23a	0.23b
	变异系数/%	41.42	50.27	29.04	40.16	8.66	6.48	49.89
樟树+马尾松混交林 <i>Cinnamomum camphora</i> Presl. + <i>Pinus Massoniana</i> mixed forest	最大值/(mg/kg)	122.53	27.25	29.06	72.53	25.81	0.28	0.23
	最小值/(mg/kg)	36.23	20.21	18.71	20.73	20.94	0.14	0.18
	平均值/(mg/kg)	61.31a	22.68b	25.43a	38.15ab	23.17a	0.17a	0.20b
	变异系数/%	56.79	13.03	15.67	52.65	8.54	35.22	10.00

同列不同字母表示差异显著($P \leq 0.05$),相同字母表示差异不显著($P \geq 0.05$)

3.3 不同城市化梯度森林土壤重金属之间及其与土壤化学性质指标的相关性

为探讨城市森林土壤中各种重金属的来源和迁移,对不同城市化梯度森林土壤重金属元素之间及其与土壤化学性质指标的相关性进行分析。结果如表 6 所示,中心区除 Cd 与 As、Ni 不相关($P > 0.05$)外,其它重金属之间均存在显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)的相关性,相关系数在 0.445—0.949 之间,表明中心区除 Cd 与 As、Ni 的来源可能不同外,Zn、Cu、Ni、Pb、Cd、As、Hg 可能分别有相同的来源。在边缘区除 Cu 与 As、

Cd、Hg 之间呈显著的相关性($P < 0.05$)外,其它重金属之间均无显著相关性($P > 0.05$),表明边缘区 Cu 与 As、Cd、Hg 的来源可能相同。在郊区仅 Zn 与 Pb 之间呈显著的相关性,表明郊区 Zn 与 Pb 的来源可能相同。中心区 7 种重金属与土壤有机质之间,Zn、Pb、Cd 与全 N 之间,Zn、Cu、Ni、Pb、As、Hg 与全 P 之间呈显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)的相关性,在边缘区仅 Cd 与全 N、全 P 之间,Pb 与有机质之间存在显著相关性($P < 0.05$),在郊区,重金属与土壤有机质、全 N、全 P 之间无显著相关性($P > 0.05$)。

表 6 长沙市不同城市化梯度森林土壤重金属之间及其与土壤化学指标的相关系数

Table 6 Correlation coefficients between heavy metals concentrations and chemical properties in different urbanization gradient forest soils in Changsha

梯度 Gradie		As	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Hg	OM	TN	TP
中心区 Urban district	As	1	0.752 **	0.445 *	0.339	0.515 *	0.765 **	0.729 **	0.515 *	0.336	0.498 *
	Cu		1	0.529 *	0.523 *	0.642 **	0.697 **	0.949 **	0.543 *	0.312	0.622 **
	Zn			1	0.840 **	0.705 **	0.411 *	0.472 *	0.776 **	0.665 **	0.556 *
	Cd				1	0.576 **	0.288	0.526 *	0.560 *	0.546 *	0.393
	Pb					1	0.428 *	0.581 *	0.664 **	0.535 *	0.569 **
	Ni						1	0.693 **	0.457 *	0.215	0.499 *
	Hg							1	0.469 *	0.253	0.575 *
边缘区 Urban fringe	As	1	0.525 *	-0.215	0.431	0.126	0.056	0.369	0.125	0.296	0.325
	Cu		1	-0.224	0.575 *	-0.010	-0.035	0.568 *	-0.021	0.365	0.231
	Zn			1	0.005	-0.001	0.234	-0.274	0.047	-0.012	0.063
	Cd				1	0.001	-0.073	0.344	0.327	0.564 *	0.534 *
	Pb					1	0.133	0.041	0.580 *	0.424	0.155
	Ni						1	-0.013	0.046	0.084	-0.104
	Hg							1	0.040	0.165	0.285
郊区 Suburban	As	1	0.321	0.097	0.055	0.167	0.420	0.435	0.330	0.203	-0.379
	Cu		1	0.089	-0.069	0.034	0.378	0.391	0.182	0.113	-0.426
	Zn			1	0.079	0.548 *	-0.018	0.025	0.113	-0.128	0.208
	Cd				1	0.364	0.020	0.004	0.069	-0.033	-0.039
	Pb					1	-0.050	-0.058	0.344	0.009	0.358
	Ni						1	0.816	0.193	0.121	-0.375
	Hg							1	0.042	0.091	-0.434

* 表示 0.05 水平上差异显著;** 表示 0.01 水平上差异显著

3.4 中心区不同森林类型土壤重金属之间及其与土壤化学性质指标的相关性

由表 7 可知,中心区不同森林类型土壤各种重金属之间普遍存在相关性,但有一定的差异。桂花树林、樟树林、樟树+桂花树混交林、樟树+马尾松混交林土壤重金属之间的相关性比桂花树+杜英混交林、马尾松林较为明显,尤其是桂花树林土壤 7 种重金属两两之间均呈显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)的相关性,在马尾松林土壤仅 Cu 与 As,Zn 与 Cd,Pb 与 Cu、Zn、Cd,Ni 与 As、Cu、Cd,Hg 与 As、Cu、Ni 之间呈显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)的相关性。表明由不同树种组成的城市森林对重金属吸附、累积产生较为明显的影响,林地土壤重金属来源多样复杂。

由表 5、表 7 可知,重金属含量较高的林分如桂花树林、樟树+桂花树混交林、马尾松林、樟树+马尾松混交林(Cu、Hg 除外)、樟树林(As、Ni 除外)土壤重金属含量与土壤有机质、全 N(除樟树林 As、Cu、Ni、Hg 外)含量均呈显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)的正相关性,此外桂花树林、樟树+桂花树混交林、樟树林(As、Ni 除外)土壤重金属含量还与全 P 含量呈显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)的正相关性;而重金属含量较低的桂花树+杜英混交林土壤中,除少数重金属与有机质、全 N、全 P 之间呈显著($P < 0.05$)的相关性外,多数重金属与有机质、全 N、全 P 之间不存在显著的相关性($P > 0.05$)。表明有机质对重金属具有很强的吸附性,是城市

森林土壤中重金属的重要载体。

表7 长沙市城市中心区森林土壤重金属之间及其与化学性质指标的相关系数

Table 7 Correlation coefficients between heavy metals concentrations and chemical properties of urban district different forests soils in Changsha

森林类型 Forest type		As	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Hg	OM	TN	TP
桂花树林 <i>Osmanthus fragrans</i> forest	As	1	0.797 *	0.784 *	0.808 **	0.701 *	0.951 **	0.829 **	0.567 *	0.633 *	0.810 **
	Cu		1	0.883 **	0.999 **	0.959 **	0.945 **	0.998 **	0.849 **	0.853 **	0.876 **
	Zn			1	0.999 **	0.892 **	0.938 **	0.997 **	0.875 **	0.854 **	0.891 **
	Cd				1	0.987 **	0.951 **	0.999 **	0.842 **	0.882 **	0.898 **
	Pb					1	0.887 **	0.980 **	0.895 **	0.882 **	0.843 **
	Ni						1	0.962 **	0.794 *	0.842 **	0.952 **
	Hg							1	0.930 **	0.957 **	0.999 **
樟树林 <i>Cinnamomum camphora</i> Presl. forest	As	1	0.856 **	0.137	0.272	0.345	0.875 **	0.816 **	0.192	-0.074	0.231
	Cu		1	0.386 *	0.585 *	0.689 **	0.777 *	0.857 **	0.486 *	0.257	0.450 *
	Zn			1	0.908 **	0.752 *	0.300	0.472 *	0.746 *	0.782 *	0.719 *
	Cd				1	0.887 **	0.394 *	0.527 *	0.737 *	0.724 *	0.787 *
	Pb					1	0.442 *	0.612 *	0.857 **	0.695 *	0.579 *
	Ni						1	0.921 **	0.217	-0.009	0.361
	Hg							1	0.435 *	0.193	0.436 *
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> forest	As	1	0.805 **	-0.261	-0.251	0.055	0.813 **	0.694 *	0.463 *	0.601 *	0.200
	Cu		1	0.200	-0.136	0.473 *	0.908 **	0.966 **	0.889 **	0.956 **	0.094
	Zn			1	0.724 *	0.928 **	-0.181	0.194	0.589 *	0.426 *	-0.312
	Cd				1	0.795 *	-0.469 *	-0.291	0.534 *	0.415 *	0.219
	Pb					1	0.109	0.406	0.771 *	0.630 *	-0.054
	Ni						1	0.906 **	0.688 *	0.807 **	0.274
	Hg							1	0.887 **	0.965 **	-0.046
桂花树+杜英混交林 <i>Osmanthus fragrans</i> + <i>Elaeocarpus sylestris</i> Poir mixed forest	As	1	0.787 *	-0.283	-0.380	0.609 *	0.725 *	0.937 **	-0.109	0.106	0.655 *
	Cu		1	0.813 *	-0.690 *	0.587 *	0.789 *	0.891 **	0.027	0.317	0.218
	Zn			1	-0.253	-0.549 *	-0.167	-0.154	0.351	0.571 *	-0.370
	Cd				1	0.000	-0.746 *	-0.658 *	0.561 *	0.252	0.112
	Pb					1	0.082	0.409	-0.492 *	-0.430 *	0.949 **
	Ni						1	0.902 **	-0.246	-0.041	0.008
	Hg							1	-0.229	0.038	0.406
樟树+桂花树混交林 <i>Cinnamomum camphora</i> Presl. + <i>Osmanthus fragrans</i> mixed forest	As	1	0.806 **	0.968 **	0.297	0.903 **	0.805 **	0.768 *	0.976 **	0.965 **	0.971 **
	Cu		1	0.743 *	0.008	0.930 **	0.986 **	0.995 **	0.760 *	0.842 **	0.869 **
	Zn			1	0.941 **	0.859 **	0.689 *	0.648 *	0.979 **	0.965 **	0.937 **
	Cd				1	0.747 *	-0.114	-0.094	0.841 *	0.872 *	0.674 *
	Pb					1	0.944 **	0.916 **	0.921 **	0.963 **	0.899 **
	Ni						1	0.993 **	0.775 *	0.840 **	0.834 **
	Hg							1	0.724 *	0.805 **	0.824 **
樟树+马尾松混交林 <i>Cinnamomum camphora</i> Presl. + <i>Pinus massoniana</i> mixed forest	As	1	0.669 *	0.805 **	0.777 *	0.899 **	0.744 *	0.740 *	0.768 *	0.628 *	0.408
	Cu		1	0.631 *	0.240	0.673 *	0.161	0.973 **	0.257	0.092	0.049
	Zn			1	0.988 **	0.958 **	0.465 *	0.393 *	0.985 **	0.938 **	0.164
	Cd				1	0.968 **	0.533 *	0.302	0.996 **	0.968 **	0.163
	Pb					1	0.697 *	0.453 *	0.963 **	0.898 **	0.270
	Ni						1	0.330	0.518 *	0.438 *	0.503 *
	Hg							1	0.328	0.172	0.014

* 表示 0.05 水平上差异显著; ** 表示 0.01 水平上差异显著

3.5 森林土壤重金属的潜在生态风险评价

3.5.1 不同城市化梯度森林土壤重金属的潜在生态风险

如表 8 所示,以长沙市、湖南省土壤背景值^[12,17]作为参比值时,长沙城市森林土壤重金属潜在生态危害指数呈现出明显的城市化梯度性,中心区最高(分别为 202.23 和 180.26),均已达到中等生态危害程度,边缘区为其次(分别为 157.23 和 139.63),分别为中等生态危害程度和轻微生态危害程度,郊区最低(135.66 以下)均为轻微生态危害程度。从潜在生态危害系数(E_i)来看,无论是以长沙市土壤背景值^[12]还是以湖南省土壤背景值^[17]作为参比值,不同城市化梯度森林土壤中,Zn、Cu、Ni、Pb、As 均为轻微生态危害程度,其中 Zn 潜在生态危害系数均小于 1,危害程度最小,Cd 均为中等生态危害程度,为 44.44 以上,Hg 在中心区均超过 80,均已达到强生态危害程度,边缘区和郊区分别为 61.82 和 54.55 以上,均为中等生态危害程度。表明长沙市中心区森林土壤重金属潜在生态危害程度最高,以 Hg 的潜在生态危害程度最高,Cd 为其次,Zn 为最小。

表 8 长沙市林地土壤重金属的潜在生态危害系数和潜在生态危害指数

Table 8 Potential ecological hazard coefficient and potential ecological risk index of heavy metals in forest-lands soil

梯度 Gradient	参比值 Consult value	潜在生态危害系数 Potential ecological hazard coefficient (E_i)							潜在生态危害指数 Potential ecological risk index (RI)
		Zn	Cu	Ni	Pb	As	Cd	Hg	
中心区	长沙市土壤背景值 ^[12]	0.61	4.85	4.95	6.06	16.62	77.14	92.00	202.23
Urban district	湖南省土壤背景值 ^[17]	0.63	4.98	4.43	7.03	12.89	66.67	83.64	180.26
边缘区	长沙市土壤背景值 ^[12]	0.43	3.14	3.78	4.07	13.53	64.29	68.00	157.23
Urban district	湖南省土壤背景值 ^[17]	0.44	3.22	3.38	4.72	10.49	55.56	61.82	139.63
郊区	长沙市土壤背景值 ^[12]	0.46	3.67	3.54	3.45	13.11	51.43	60.00	135.66
Suburban	湖南省土壤背景值 ^[17]	0.48	3.76	3.16	4.00	10.17	44.44	54.55	120.57

3.5.2 中心区不同森林类型土壤重金属的潜在生态风险

从表 9 可以看出,以长沙市土壤背景值^[12]和湖南省土壤背景值^[17]作为参比值时,中心区不同森林类型土壤重金属的潜在生态危害指数均已超过 150,大小排序为:桂花树林(220.39 以上)>樟树+桂花树混交林(201.82 以上)>樟树林(175.32 以上)>马尾松林(170.46 以上)>樟树+马尾松混交林(164.69 以上)>桂花树+杜英混交林(150.78 以上),均已达到中等生态危害程度。从潜在生态危害系数(E_i)来看,无论是以长沙市土壤背景值^[12]还是以湖南省土壤背景值^[17]作为参比值,Zn、Cu、Ni、Pb、As 在各森林类型土壤均为轻微生态危害程度,Cd 在樟树+桂花树混交林土壤已达到强生态危害程度,其它 5 种森林类型土壤均为中等生态危害程度,Hg 在桂花树林、樟树林、樟树+桂花树混交林土壤潜在生态危害系数均已超过 80,达到了强生态危害程度,在马尾松林、樟树+马尾松混交林、桂花树+杜英混交林均处于中等生态危害程度,但均已接近 80。

4 结论与讨论

4.1 长沙城市森林土壤重金属含量特征

城市土壤重金属含量与人类活动密切相关,但不同重金属含量不同^[19]。长沙城市森林土壤中以 Zn 平均含量最高,Cd 最低。同区域内,由于城市化程度不同,人类活动影响强度不同,土壤重金属含量不同;建城历史越悠久,含量越高;城市化、工业化水平越高,含量越高^[20]。因此与市中心的距离远近是影响土壤重金属含量的重要因素之一,城市中心区土壤重金属含量明显高于城市外围^[21],在城市绿地土壤中分布为城区含量高于郊区,人类活动密集区和交通拥挤区含量较高,市区边缘地带含量较低^[22-23]。长沙城市森林土壤重金属含量也呈现出相似的规律性,但不同重金属含量变化幅度不同,中心区的平均含量是郊区的 1.27—1.76 倍,边缘区 Ni、Pb、As、Cd、Hg 平均含量也高于郊区。

生长在同一环境条件由不同树种组成的不同森林类型,由于其生物学特性显著改变了土壤化学性质如 pH 值、有机质和 N、P、K 含量,对不同重金属的吸附和累积有较为明显的影响^[9,24],从而引起不同类型的城市

森林同一土层同种重金属含量差异显著^[10,25],如有机质对重金属具有较强的络合能力,土壤重金属含量随着有机质含量增加而增高^[26]。与此相一致,长沙市城市中心区桂花树林、樟树+桂花树混交林土壤 Zn、Cu、Pb、As、Hg 平均含量普遍较高,而樟树+马尾松混交林、桂花树+杜英混交林土壤 Cu、Ni、As、Cd、Hg 平均含量普遍较低。

表 9 长沙市城市中心区不同森林类型土壤重金属的潜在生态危害系数和潜在生态危害指数

Table 9 Potential ecological hazard coefficient and potential ecological risk index of heavy metals in different types soil in the urban district in Changsha City

森林类型 Forest type	参比值 Consult value	潜在生态危害系数 Potential ecological hazard coefficient (E_i)							潜在生态危害指数 Potential ecological risk index (RI)
		Zn	Cu	Ni	Pb	As	Cd	Hg	
桂花树林 <i>Osmanthus fragrans</i> forest	长沙市土壤背景值 ^[12]	0.72	6.78	5.13	6.95	17.34	72.86	136.00	245.76
樟树林 <i>Cinnamomum camphora</i> Presl. forest	湖南省土壤背景值 ^[17]	0.74	6.96	4.58	8.06	13.45	62.96	123.64	220.39
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> Fores	长沙市土壤背景值 ^[12]	0.52	4.61	4.87	5.27	16.74	72.86	92.00	196.86
桂花树+杜英混交林 <i>Osmanthus fragrans</i> + <i>Elaeocarpus sylvestris</i> Poir mixed forest	湖南省土壤背景值 ^[17]	0.54	4.73	4.35	6.11	12.98	62.96	83.64	175.32
樟树+桂花树混交林 <i>Cinnamomum camphora</i> Presl. + <i>Osmanthus fragrans</i> mixed forest	长沙市土壤背景值 ^[12]	0.55	4.53	5.25	6.79	17.11	77.14	80.00	191.37
樟树+马尾松混交林 <i>Cinnamomum camphora</i> Presl. + <i>Pinus massoniana</i> mixed forest	湖南省土壤背景值 ^[17]	0.57	4.65	4.69	7.88	13.27	66.67	72.73	170.46
	长沙市土壤背景值 ^[12]	0.52	3.69	4.82	4.78	15.23	72.86	68.00	169.89
	湖南省土壤背景值 ^[17]	0.54	3.79	4.30	5.55	11.82	62.96	61.82	150.78
	长沙市土壤背景值 ^[12]	0.96	5.49	5.47	7.04	17.14	98.57	92.00	226.68
	湖南省土壤背景值 ^[17]	1.00	5.64	4.88	8.17	13.30	85.19	83.64	201.82
	长沙市土壤背景值 ^[12]	0.66	4.42	4.46	6.32	16.06	72.86	80.00	184.77
	湖南省土壤背景值 ^[17]	0.68	4.54	3.99	7.34	12.46	62.96	72.73	164.69

4.2 长沙市城市森林土壤重金属的来源及空间分异性

处于同一环境不同森林类型土壤重金属如 Zn、Cu、Ni、Pb、As、Cd、Hg 主要来自于成土母质和人类活动。通过分析土壤重金属间的相关性,可以推测它们来源是否相同,若重金属之间存在相关性,说明它们来源可能是相同的,否则来源是不同的^[27]。长沙市中心区,无论是从整体的森林土壤还是从不同森林类型(除桂花+杜英混交外)土壤看来,Zn、Cu、Ni、Pb、As、Cd、Hg 两两之间呈显著或极显著的正相关性,且 Pb、As、Cd、Hg 平均含量和 As、Cd、Hg 最小含量均高于长沙市土壤背景值^[12],尽管 Cu、Ni 平均含量与背景值^[12]相当,Zn 平均含量低于背景值^[12],但 48 个采样样方中均已有部分超过背景值^[12]的,而且它们又均为人类活动引起污染的重金属指示元素^[28],表明处于中心区森林土壤 Zn、Cu、Ni、Pb、As、Cd、Hg 主要是外界污染源人为输入的。

重金属以不同形式吸附在有机颗粒上,与有机质络合成复杂的络合态金属而被固定在土壤中,不易释放^[29],且络合作用随有机质含量增加而增强,因此有机质是城市土壤重金属的重要载体^[25]。长沙市中心区重金属含量较高的森林土壤中,重金属与有机质之间呈显著或极显著正相关性,而 6 种森林类型均为老城区,林分年龄在 26 年以上,均被繁忙交通要道所包围,机动车和人流量大,交通拥堵严重,住宅区密集,人口密度高,商业繁华。本研究中,长沙市中心区森林表土层(0—20cm)有机质含量平均为 10.470%,高于边缘区(9.094%)和郊区(8.905%)。城市土壤有机质主要来源于交通释放的有机污染物如碳氢化合物、轮胎的磨损、土壤颗粒、风化的建筑材料、植物的残体以及城市生活、工业垃圾^[30]。据报道,各种汽油含 Pb 量在 0.4—1.0 g/kg 之间,汽车排气中 Pb 的多达 20—50 $\mu\text{g}/\text{L}$ ^[31]。汽车尾气颗粒物中 Pb、Ni 含量分别占 37% 和 34.5%,在怠速状态下向大气分别排放 0.571 mg/min 和 0.533 mg/min^[32],汽车尾气排放的汞主要是 Hg^{2+} ,易于与颗

颗粒物结合,造成地表累积物中高汞含量^[33]。汽车金属部件和引擎的磨损可导致大量含 Cu、Cd 粉尘产生,汽车轮胎磨损及润滑油燃烧是土壤 Cu、Zn 的重要来源^[34-35]。玻璃、建材、制革、油漆、颜料、药物、木材防腐剂等产品在使用过程中产生含砷很高的生活垃圾,同时居民生活、工业生产、交通运输过程中化石燃料燃烧也是砷的另一个重要来源。表明长沙市中心区森林土壤 Zn、Cu、Ni、Pb、As、Cd、Hg 主要来源于交通运输污染源、居民生活污染源和工业污染源,其中交通运输活动对城市土壤重金属含量的贡献是一个主要影响因素。

边缘区森林土壤中除 Cu 与 As、Cd、Hg 外,郊区除 Zn 与 Pb 外,其它重金属之间均不存在显著相关,表明边缘区和郊区森林土壤重金属来源不止一个。As、Cd、Hg 平均含量和最小值均高于或接近土壤背景值^[12,17],尽管 Zn、Cu、Ni、Pb 平均含量仍低于土壤背景值^[12,17],但其最大值(除郊区 Zn 外)均超过了土壤背景值^[12,17],表明边缘区和郊区,大部分森林土壤受到了 As、Cd、Hg 污染,也有部分受到了 Zn、Cu、Ni、Pb 污染。干湿沉降是长沙市土壤重金属的主要携带介质^[12]。长期使用磷肥、除草剂、杀虫剂等会使砷在土壤中不断积累^[36]。由于饲料中添加了含 Cu、Fe、Zn、Mn、As、钴、硒、碘的添加剂而导致养殖场废弃物中 Cu、Zn、Mn、As 等含量比饲料高出 3 倍之多,对环境产生潜在的污染^[37]。表明边缘区和郊区森林土壤重金属可能主要来源于汽车尾气和城市周边工业区采矿、冶炼、化工生产的大气飘尘,农业生产活动。

4.3 长沙市城市森林土壤重金属潜在的生态风险

长沙市中心区森林土壤及其 6 种森林类型土壤重金属 RI 均已超过 150,均达到了中等生态危害程度,但因不同森林类型而异。边缘区 RI 在 139.63—157.23 之间,接近中等危害程度,郊区均低于 150,为轻微危害程度。无论是不同城市化梯度森林土壤还是中心区不同森林类型土壤,Zn、Cu、Ni、Pb、As 均为轻微危害程度,Cd、Hg 达到了中等危害程度以上。Zn 含量较高,但毒性系数较小,潜在生态风险较低,而 Cd、Hg 含量低,但毒性系数大,潜在生态风险高。也由于 Cd、Hg 的 E_i 高,使中心区森林土壤重金属潜在生态危害达到了中等程度以上,所以要注意 Cd、Hg 的污染状况。Cd、Hg 是严重污染性重金属,是生物非必要元素,但在生物圈中普遍存在。火山喷发、岩溶和 Cd、Hg 自然浓集作用,常常导致土壤 Cd、Hg 高背景。此外人为地球化学的作用,包括交通运输、制造电池、生产颜料和荧光粉、采矿、冶炼、污灌和磷肥施用等活动,也会导致土壤中 Cd、Hg 含量很高。

References:

- [1] http://www.hunan.gov.cn/xxgk/szfzcbm_8834/tjbm_6941/tjsj/tjgzbz/201203/t20120323_461299.html.
- [2] <http://bbs.rednet.cn/forum.php?mod=viewthread&tid=25222106>
- [3] Gu C L, Ma T, Yuan X H, Zhang X M, Wang X. Ecological protection and development of green land in the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(10): 1124-1131.
- [4] Zhu W Q, He X Y, Chen W. Advances in urban forest. Chinese Journal of Ecology, 2001, 20(5): 55-59.
- [5] Peng Z H. China Urban Forest. Beijing: China Forestry Press, 2003.
- [6] Liu X H, Lü X G, Liu H Q. Longitudinal variation of heavy metals contents in topsoil covered with different vegetation in gully area. Environmental Science, 2007, 28(12): 2766-2770.
- [7] Chen T B, Wong M H, Wong J W C, Zhou H Y. A study on heavy metal pollution in soils in Hong Kong. Acta Geographica Sinica, 1997, 52(3): 228-236.
- [8] Wu X M, Li L Q, Pan G X, Ju Y F, Jiang H Y. Soil pollution of Cu, Zn, Pb and Cd in different city zones of Nanjing. Environmental Science, 2003, 24(3): 105-111.
- [9] Ning X B, Xiang W H, Fang X, Yan W D, Deng X W. Heavy metal concentrations and pollution assessment of limestone forests in Huaxi district, Guiyang. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 2169-2177.
- [10] Sun H Z, Lu X J, Chen M Y, Cai C J, Zhu N. Soil heavy metals concentration in different type plantation in Harbin City. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(3): 614-620.
- [11] Wu X M, Pan G X. The correlation analysis between the content of heavy metals and the factors influencing the pollution of heavy metals in urban soils in Nanjing city. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(6): 921-928.
- [12] Wu Q H, Dai T G, Fang J W, Zhang J X, Xing X D, Guo D L. Sources of heavy metals in soils of Changsha, Zhuzhou and Xiangtan, Hunan, China. Geological Bulletin of China, 2007, 26(11): 1453-1458.
- [13] Liu H Y, Xie Z R, Chen D Y, Zhou X M, Feng X M, Guo K Y. Primary assessment of environmental quality of soils in Chengdou Area. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004, 24(2): 297-303.
- [14] Almanac editorial department of Chorography office in Changsha. An almanac of Changsha City (Volume 2007). Beijing: Fangzhi Press, 2007.
- [15] <http://news.sina.com.cn/o/2006-10-23/043810299335s.shtml>.
- [16] Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, Zhang C J. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index. Environmental Science and Technology, 2008, 31(2): 112-115.
- [17] Wang Y, Wei F S. Chemistry of Soil Environmental Elements. Beijing: Environmental Science Press of China, 1995.

- [18] Ding Z H, Jia H W, Liu C E, Tang Q H, Wang W H, Zhuang M, Xu S. Pollution and assessment of heavy metals in Huangpu River sediments. *Environmental Science and Technology*, 2006, 29(2): 64-66.
- [19] Bilos C, Colombo J C, Skorupka C N, Rodriguez P M J. Source, distribution and variability of airborne trace metals in La Plata City area, Argentina. *Environmental Pollution*, 2001, 111(1): 149-158.
- [20] Chu C J, Zhu Y D. The research situation and problem of heavy metals contamination in city soil. *Environmental Study and Monitoring*, 2008, 21(3): 7-11.
- [21] Higgs F J, Mielke H W, Brisco M. Soils lead at Elementary public schools; comparison between school properties and residential neighborhoods of New Orleans. *Environmental Geochemistry and Health*, 1999, 21(1): 27-36.
- [22] Chen L X, Zhao S P, Duan W B. Heavy metal contamination of soil and its evaluation in different greenbelt region of Harbin. *Scientia Silvae Sinica*, 2007, 43(S1): 65-71.
- [23] Fang X, Jin W F, Li K Z, Wu Q, Zhang X Y, Qin L H, Wu Z C. Concentration and potential ecological risk of heavy metals in soils from different urban greenlands along the Shaoshan Road side, Changsha. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(3): 64-70.
- [24] Vandecasteele B, Quataert P, Tack M G F. Uptake of Cd, Zn and Mn by willow increases during terrestrialisation of initially ponded polluted sediments. *Science of the Total Environment*, 2007, 380(1/3): 133-143.
- [25] Lu Y, Gong Z T, Zhang G L, Zhang B. Heavy metal concentration in Nanjing urban soils and their affecting factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1): 123-126.
- [26] Cao H C, Wang J D, Zhang X L. Study on the association between heavy metals and organic matter in polluted black soil in Northeast China. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(1): 36-41.
- [27] Robertson D J, Taylor K G, Hoon S R. Geochemical and mineral magnetic characterization of urban sediment particulates, Manchester, U K. *Applied Geochemistry*, 2003, 18(2): 269-282.
- [28] Liu N W. *Physical Geography*. Beijing: Science Press, 2001.
- [29] Zhu W, Bian B, Ruan A D. Analysis of sources of heavy metal contamination in road-deposited sediment from Zhenjiang. *Environmental Science*, 2007, 28(7): 1584-1589.
- [30] Al-Chalabi A S, Hawker D. Retention and exchange behavior of vehicular lead in street dusts from major roads. *Science of the Total Environment*, 1996, 87(2): 105-119.
- [31] Meng K, Zhang X L, Qin J Y, Wang D X. Analysis of factors effecting lead pollution in urban environment of China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1995, 15(2): 135-140.
- [32] Zhang Z H, Yang W M. Analysis on chemical components in particulates of gasoline -fueled engine exhaust. *Chinese Journal of Public Health*, 2001, 17(7): 623-624.
- [33] Hall B, Schager P, Lindqvist O. Chemical reaction of mercury in combustion flue gases. *Water, Air and Soil Pollution*, 1991, 56(1): 3-23.
- [34] Chen J H, Lu X W, Zhai M. Sources and potential risk of heavy metals in roadside soils of Xi'an City. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(7): 1810-1816.
- [35] Alloway B J, Jackson A P, Morgan H. The accumulation of cadmium by vegetables grown on soils contaminated from a variety of sources. *Science of the Total Environment*, 1990, 91: 223-236.
- [36] Folkes D J, Kuehster T E. Contributions of pesticide use to urban background concentration of Arsenic in Denver, Colorado. *U. S. A. Environmental Forensics*, 2001, 2(2): 127-139.
- [37] Poulsen H D. Phosphorus utilization and excretion in pig production. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1): 24-27.

参考文献:

- [3] 顾朝林, 马婷, 袁晓辉, 张晓明, 王旭. 长株潭城市绿心生态保护与发展探讨. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(10): 1124-1131.
- [4] 朱文泉, 何兴元, 陈玮. 城市森林研究进展. *生态学报*, 2001, 20(5): 55-59.
- [5] 彭镇华. *中国城市森林*. 北京: 中国林业出版社, 2003.
- [6] 刘晓辉, 吕宪国, 刘惠清. 沟谷地不同植被下土壤重金属纵向分异研究. *环境科学*, 2007, 28(12): 2766-2770.
- [7] 陈同斌, 黄铭洪, 黄焕忠, 周海云. 香港土壤中的重金属含量及其污染现状. *地理学报*, 1997, 52(3): 228-236.
- [8] 吴新民, 李恋卿, 潘根兴, 居玉芬, 姜海洋. 南京市不同功能城区土壤中重金属 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的污染特征. *环境科学*, 2003, 24(3): 105-110.
- [9] 宁晓波, 项文化, 方晰, 闫文德, 邓湘雯. 贵阳花溪区石灰质土壤重金属含量特征及其污染评价. *生态学报*, 2009, 29(4): 2169-2177.
- [10] 孙慧珍, 陆小静, 陈明月, 蔡春菊, 祝宁. 哈尔滨市不同类型人工林土壤重金属含量. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 614-624.
- [11] 吴新民, 潘根兴. 影响城市土壤重金属污染因子的关联度分析. *土壤学报*, 2003, 40(6): 921-928.
- [12] 吴玺虹, 戴塔根, 方建武, 张建新, 邢旭东, 郭定良. 长沙、株洲、湘潭三市土壤中重金属元素的来源. *地质通报*, 2007, 26(11): 1453-1458.
- [13] 刘红樱, 谢志红, 陈德友, 周小梅, 冯小铭, 郭坤一. 成都地区土壤环境质量初步评价. *环境科学学报*, 2004, 24(2): 297-303.
- [14] 长沙市地方志办公室年鉴编辑部. *长沙年鉴(2007卷)*. 北京: 方志出版社, 2007.
- [16] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 张成江. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算. *环境科学与技术*, 2008, 31(2): 112-115.
- [17] 王云, 魏复盛. *土壤环境元素化学*. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.
- [18] 丁振华, 贾洪武, 刘彩娥, 汤庆合, 王文华, 庄敏, 许实. 黄浦江沉积物重金属的污染及评价. *环境科学与技术*, 2006, 29(2): 64-66.
- [20] 楚纯洁, 朱玉涛. 城市土壤重金属污染研究现状及问题. *环境研究与监测*, 2008, 21(3): 7-11.
- [22] 陈立新, 赵淑苹, 段文标. 哈尔滨市不同绿地功能区土壤重金属污染及评价. *林业科学*, 2007, 43(增刊1): 65-71.
- [23] 方晰, 金文芬, 李开志, 吴茜, 张兴钰, 覃立厚, 武志超. 长沙市韶山路沿线不同绿地土壤重金属含量及其潜在生态风险. *水土保持学报*, 2010, 24(3): 64-70.
- [25] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖, 张波. 南京城市土壤重金属含量及其影响因素. *应用生态学报*, 2004, 15(1): 123-126.
- [26] 曹会聪, 王金达, 张学林. 东北地区污染黑土中重金属与有机质的关联作用. *环境科学研究*, 2007, 20(1): 36-41.
- [28] 刘南威. *自然地理学*. 北京: 科学出版社, 2001.
- [29] 朱伟, 边博, 阮爱东. 镇江城市道路沉积物中重金属污染的来源分析. *环境科学*, 2007, 28(7): 1584-1589.
- [31] 孟可, 张学林, 秦建业, 王德宣. 我国大城市环境铅污染影响因素分析. *环境科学学报*, 1995, 15(2): 135-140.
- [32] 张志红, 杨文敏. 汽油车排出颗粒物的化学组分分析. *中国公共卫生*, 2001, 17(7): 623-624.
- [34] 陈景辉, 卢新卫, 翟萌. 西安城市路边土壤重金属来源与潜在风险. *应用生态学报*, 2011, 22(7): 1810-1816.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 23 December, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Maternal thermoregulation during gestation affects the phenotype of hatchling Chinese skinks (*Eumeces chinensis*): testing the maternal manipulation hypothesis LI Hong, ZHOU Zongshi, WU Yanqing, et al (7255)

Effects of conspecific and interspecific interference competitions on cache site selection of Siberian chipmunks (*Tamias sibiricus*) SHEN Zhen, DONG Zhong, CAO Lingli, et al (7264)

Characterization of ammonia volatilization from polluted river under aeration conditions: a simulation study LIU Bo, WANG Wenlin, LING Fen, et al (7270)

Diurnal activity patterns and environmental factors on behaviors of Bar-headed Geese *Anser indicus* wintering at Caohai Lake of Guizhou, China YANG Yanfeng, ZHANG Guogang, LU Jun, et al (7280)

Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permafrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau CHANG Juan, WANG Gengxu, GAO Yongheng, et al (7289)

Spatial-temporal changes of urban patch wetlands in Changsha, China GONG Yingbi, JING Lei, PENG Lei, et al (7302)

Modeling of carbon and water fluxes of Qianyanzhou subtropical coniferous plantation using model-data fusion approach REN Xiaoli, HE Honglin, LIU Min, et al (7313)

Ecological compensation standard for controlling nitrogen non-point pollution from farmland: a case study of Yixing City in Jiang Su Province ZHANG Yin, ZHOU Yuchen, SUN Hua (7327)

Static toxicity evaluation of chemical wastewater by PFU microbial communities method LI Zhaoxia, ZHANG Yuguo, LIANG Huixing (7336)

Emergy evaluation of an agro-circulation system in Beijing suburb: take Jianyan village as a case study ZHOU Liandi, HU Yanxia, WANG Yazhi, et al (7346)

Research on the cooling effect of Xi'an parks in summer based on remote sensing FENG Xiaogang, SHI Hui (7355)

The dynamics of spatial and temporal changes to forested land and key factors driving change on Hainan Island WANG Shudong, OUYANG Zhiyun, ZHANG Cuiping, et al (7364)

Impact of different sowing dates on green water footprint of maize in western Jilin Province QIN Lijie, JIN Yinghua, DUAN Peili (7375)

The dynamic variation of maize (*Setaria mays* L.) population growth characteristics under cultivars-intercropped on the Loess Plateau WANG Xiaolin, ZHANG Suiqi, WANG Shuqing, et al (7383)

Effect of different planting methods on root-shoot characteristics and grain yield of summer maize under high densities LI Zongxin, CHEN Yuanquan, WANG Qingcheng, et al (7391)

Heavy metal contaminant in development process of artificial biological Soil Crusts in sand-land XU Jie, AO Yanqing, ZHANG Jingxia, et al (7402)

Effects of enhanced UV-B radiation and nitrogen on photosynthetic pigments and non-enzymatic protection system in leaves of foxtail millet (*Setaria italica* (L.) Beauv.) FANG Xing, ZHONG Zhangcheng (7411)

Photosynthetic response of different ecotype of *Illicium lanceolatum* seedlings to drought stress and rewatering CAO Yonghui, ZHOU Benzhi, CHEN Shuanglin, et al (7421)

Seasonal variations in the stems of *Larix principis-rupprechtii* at the treeline of the Luya Mountains DONG Manyu, JIANG Yuan, WANG Mingchang, et al (7430)

Influence of terrain on plant biomass estimates by remote sensing: a case study of Guangzhou City, China SONG Weiwei, GUAN Dongsheng, WANG Gang (7440)

Effects of exponential fertilization on biomass allocation and root morphology of *Catalpa bungei* clones WANG Lipeng, YAN Ziyi, LI Jiyue, et al (7452)

Effects of fire damages on *Larix gmelinii* radial growth at Tahe in Daxing'an Mountains, China WANG Xiaochun, LU Yongxian (7463)

A model for water consumption by mountain jujube pear-like XIN Xiaogui, WU Pute, WANG Youke, et al (7473)

Specificity of photosystems function change of two kinds of overwintering broadleaf evergreen plants ZHONG Chuanfei, ZHANG Yuntao, WU Xiaoying, et al (7483)

- Effects of drought on fluorescence characteristics of photosystem II in leaves of *Ginkgo biloba* WEI Xiaodong, CHEN Guoxiang, SHI Dawei, et al (7492)
- Numerical classification and ordination of forest communities in habitat of Sichuan Snub-nosed Monkey in Hubei Shennongjia National Nature Reserve LI Guangliang, CONG Jing, LU Hui, et al (7501)
- Impact of inorganic anions on the cadmium effective fraction in soil and its phytoavailability during salinization in alkaline soils WANG Zuwei, YI Liangpeng, GAO Wenyan, et al (7512)
- Photosynthetic adaptability of the resistance ability to weak light of 2 species *Spiraea* L. LIU Huimin, MA Yanli, WANG Baichen, et al (7519)
- Fine root longevity and controlling factors in a *Phoebe Bournei* plantation ZHENG Jinxing, HUANG Jinxue, WANG Zhenzhen, et al (7532)
- Analysis on spatial structure and scenarios of carbon dioxide emissions from tourism transportation XIAO Xiao, ZHANG Jie, LU Junyu, et al (7540)
- The hydrological response to human activities in Guishui River Basin, Beijing LIU Yuming, ZHANG Jing, WU Pengfei, et al (7549)
- Socio-economic impacts of under-film drip irrigation technology and sustainable assessment: a case in the Manas River Basin, Xinjiang, China FAN Wenbo, WU Pute, MA Fengmei (7559)
- Effects of pattern and timing of high temperature exposure on the mortality and fecundity of *Aphis gossypii* Glover on cotton GAO Guizhen, LÜ Zhaozhi, XIA Deping, et al (7568)
- Physiological responses of *Eucalyptus* trees to infestation of *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle WU Yaojun, CHANG Mingshan, SHENG Shuang, et al (7576)
- Carbon storage capacity of a *Betula alnoides* stand and a mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand in Southern Subtropical China: a comparison study HE Youjun, QIN Lin, LI Zhiyong, et al (7586)
- Distribution and ecological risk assessment of 7 heavy metals in urban forest soils in Changsha City FANG Xi, TANG Zhijuan, TIAN Dalun, et al (7595)
- Review and Monograph**
- The relationship between humans and the environment at the urban-rural interface: research progress and prospects HUANG Baorong, ZHANG Huizhi (7607)
- Flux footprint of carbon dioxide and vapor exchange over the terrestrial ecosystem: a review ZHANG Hui, SHEN Shuanghe, WEN Xuefa, et al (7622)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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,300 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 32 卷 第 23 期 (2012 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 23 (December, 2012)

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	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
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
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	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100071, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@esp.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100071, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@esp.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
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	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



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 70.00 元