

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第1期

Vol.34 No.1

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角背景地区秋冬季节大气气态总汞含量特征研究	窦红颖,王书肖,王龙,张磊,郝吉明 (1)
厦门城区大气颗粒物 PM ₁₀ 中有机酸源谱特征分析	杨冰玉,黄星星,郑桢,刘碧莲,吴水平 (8)
兴隆大气气溶胶中水溶性无机离子分析	李杏茹,宋爱利,王英锋,孙颖,刘子锐,王跃思 (15)
气相组分对氨吸收同步脱除模拟烟气 SO ₂ 和 NO _x 的影响	王鸿,朱天乐,王美艳 (21)
麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氨挥发特性比较	汪军,王德建,张刚,王远 (27)
单光子/光电子在线质谱实时分析聚氯乙烯热分解/燃烧产物	陈文东,侯可勇,陈平,李芳龙,赵无垠,崔华鹏,花磊,谢园园,李海洋 (34)
碱性活性炭表面特征及其吸附甲烷的研究	张梦竹,李琳,刘俊新,孙永军,李国滨 (39)
夏季黄渤海表层海水中二甲亚砜 (DMSO) 的浓度分布	王敏,张洪海,杨桂朋 (45)
2010年秋季长江口口外海域 CDOM 的三维荧光光谱-平行因子分析	闫丽红,陈学君,苏荣国,韩秀荣,张传松,石晓勇 (51)
基于集合均方根滤波的太湖叶绿素 a 浓度估算与预测	李渊,李云梅,王桥,张卓,郭飞,吕恒,毕坤,黄昌春,郭宇龙 (61)
基于 HJ1A-CCD 数据的高光谱影像重构研究	郭宇龙,李云梅,朱利,徐德强,李渊,檀静,周莉,刘阁 (69)
重庆雪玉洞岩溶地下河地球化学敏感性研究	徐尚全,杨平恒,殷建军,毛海红,王鹏,周小萍 (77)
区域点源和非点源磷入河量计算的二元统计模型	陈丁江,孙嗣畅,贾颖娜,陈佳勃,吕军 (84)
秦淮河典型河段总氮总磷时空变异特征	李跃飞,夏永秋,李晓波,熊正琴,颜晓元 (91)
湘江沉积物铜和汞质量基准的建立及其应用	蒋博峰,桑磊鑫,孙卫玲,郝伟,李丽,邓宝山 (98)
丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价	张雷,秦延文,郑丙辉,时瑶,韩超男 (108)
汾河水库周边土壤重金属含量与空间分布	李晋昌,张红,石伟 (116)
黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估	张妍,李发东,欧阳竹,赵广帅,李静,柳强 (121)
胶州湾、套子湾及四十里湾表层沉积物中有机氯农药的含量和分布特征	刘艺凯,钟广财,唐建辉,潘晓辉,田崇国,陈颖军 (129)
基于干扰梯度的钦江流域底栖动物完整性指数候选参数筛选	卢东琪,张勇,蔡德所,刘朔孺,陈燕海,王备新 (137)
海洋细菌 <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 分离鉴定及对中肋骨条藻的化感作用	王洪斌,陈文慧,李信书,李士虎,阎斌伦 (145)
水稻秸秆浸泡液对铜绿微囊藻生理特性的影响	苏文,孔繁翔,于洋,贾育红,张民 (150)
化感物质肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻生长及生理特性的影响	高李李,郭沛涌,苏光明,魏燕芳 (156)
无负压供水模式下管网水力模拟与安全评价分析	王欢欢,刘书明,姜帅,孟凡琳,白璐 (163)
天然有机物的相对分子质量分布及亲疏水性对微滤膜组合工艺中膜污染的影响	胡孟柳,林洁,许光红,董秉直 (169)
不同基质条件下透性处理对脱硫弧菌硫酸盐还原活性的影响	徐慧伟,张旭,李立明,郑光洁,李广贺 (177)
基于零价铁的双金属体系对六氯苯还原脱氯研究	曾宪委,刘建国,聂小琴 (182)
负载型 TiO ₂ 光电催化降解孔雀石绿的动力学研究	张小娜,周少奇,周晓 (188)
污水厂微曝气系统工况下充氧性能测试与分析	吴媛媛,周小红,施汉昌,邱勇 (194)
微气泡及其产生方式对活性污泥混合液性质的影响	刘春,马锦,张磊,张静,张明,吴根 (198)
不同氮浓度冲击对颗粒污泥脱氮过程中 N ₂ O 产生量的影响	韩雪,高大文 (204)
模拟电镀污泥重金属浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	谢鑫源,孙培德,楼菊青,郭茂新,马王钢 (209)
嗜麦芽窄食单胞菌对铜的吸附特性与离子交换	白洁琼,尹华,叶锦韶,彭辉,唐立楠,何宝燕,李跃鹏 (217)
阴离子表面活性剂改性水滑石吸附硝基苯的特性研究	夏燕,朱润良,陶奇,刘汉阳 (226)
活性氧化铝对水中磷的去除与回收研究	孟文娜,谢杰,吴德意,张振家,孔海南 (231)
北京城区可吸入颗粒物分布与呼吸系统疾病相关分析	杨维,赵文吉,官兆宁,赵文慧,唐涛 (237)
北京市市售鸡蛋和鸭蛋中全氟化合物的污染水平研究	齐彦杰,周珍,史亚利,孟昭福 (244)
北京市场常见淡水食用鱼体内农药残留水平调查及健康风险评估	于志勇,金芬,孙景芳,原盛广,郑蓓,张文婧,安伟,杨敏 (251)
多效应残差法 (MERA) 表征二甲亚砜-农药二元混合物毒性相互作用	霍向晨,刘树深,张晶,张瑾 (257)
利用 DGGE-菌落原位杂交法分离土壤中精喹禾灵降解菌	吕欣,彭霞薇,呼庆,马安周,江泽平,魏远 (263)
不同白腐真菌复配方式对产酶的影响	孟瑶,梁红,高大文 (271)
不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响	张瑞,张贵龙,姬艳艳,李刚,常泓,杨殿林 (277)
垦殖对湿地土壤有机碳垂直分布及可溶性有机碳截留的影响	霍莉莉,邹元春,郭佳伟,吕宪国 (283)
黄河三角洲碱蓬湿地土壤有机碳及其组分分布特征	董洪芳,于君宝,管博 (288)
丘陵林地土壤酸化改良剂的集中施用-自然扩散修复技术研究	方熊,刘菊秀,尹光彩,赵亮,刘世忠,褚国伟,李义勇 (293)
重度滴滴涕污染土壤低温等离子体修复条件优化研究	陈海红,骆永明,滕应,刘五星,潘澄,李振高,贾玉娟 (302)
无定形 Fe(OH) ₃ 和 Fe ₃ O ₄ 共沉淀态 As 的化学提取	陈义萍,王少峰,黄永峰 (308)
铝和锰对外生菌根真菌生长、养分吸收及分泌作用的影响	李华,黄建国,袁玲 (315)
污泥和餐厨垃圾联合干法中温厌氧消化性能研究	段妮娜,董滨,李江华,戴翎翎,戴晓虎 (321)
高比表面生物质炭的制备、表征及吸附性能	李坤权,李焯,郑正,桑大志 (328)
基于情景分析的浙江沿海地区环境污染防治战略研究	田金平,陈吕军,杜鹏飞,钱易 (336)
微生物全细胞传感器在重金属生物可利用度监测中的研究进展	侯启会,马安周,庄绪亮,庄国强 (347)
2012 城市生态学术研讨会会议论文	
北京市城乡环境梯度下街尘中重金属污染特征	何小艳,顾培,李叙勇,赵洪涛 (357)
北京市道路灰尘中污染物含量沿城乡梯度、道路密度梯度的变化特征	唐荣莉,马克明,张育新,毛齐正 (364)
北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析	任玉芬,王效科,欧阳志云,侯培强 (373)
洋河流域张家口段河流水质演化及驱动因子分析	虎博,王铁宇,吕永龙,吕立云,罗维 (379)
低碳交通电动汽车减排潜力及其影响因素分析	施晓清,李笑诺,杨建新 (385)
北京市社区生活垃圾分类收集实效调查及其长效管理机制研究	邓俊,徐琬莹,周传斌 (395)
人工湿地在应用中存在的问题及解决措施	黄锦楼,陈琴,许连煌 (401)
《环境科学》征订启事 (26)	《环境科学》征稿简则 (68)
信息 (76,144,301,400)	专辑征稿通知 (394)

汾河水库周边土壤重金属含量与空间分布

李晋昌^{1,2,3}, 张红⁴, 石伟³

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学防沙治沙教育部工程研究中心, 北京 100875; 3. 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; 4. 山西大学环境与资源学院, 太原 030006)

摘要: 基于95个表层土壤样品重金属实测含量, 运用多元统计和地统计相结合的方法, 对汾河水库周边土壤重金属含量的分布特征和来源进行分析。结果表明, 研究区土壤重金属Cr、Cu、Ni、Pb、Zn的平均含量分别为38.45、19.09、24.02、11.98、55.01 mg·kg⁻¹, 均没有超过国家土壤环境质量一级标准和山西省土壤背景值, 但各元素均有部分样品含量超过山西省土壤背景值, 其中Pb、Cr和Cu的超标率较为显著, 分别为28%、14%和13%。相关分析和因子分析结果显示, 各元素超标部分的来源可分为三类, Cu、Ni和Zn为一类, Cr和Pb分别单独为一类。分析各重金属空间分布图发现, 第一类元素的超标部分主要来源于城镇区域内的日常生活和生产活动, Cr和Pb的超标部分则分别主要来源于农业生产活动和交通运输等。Cr和Pb元素的高值区分别位于汾河水库的上游和下游区域。

关键词: 土壤; 重金属; 空间分布; 地统计分析; 汾河水库

中图分类号: X131.3; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)01-0116-05

Concentrations of Soil Heavy Metals and Their Spatial Distribution in the Surrounding Area of Fenhe Reservoir

LI Jin-chang^{1,2,3}, ZHANG Hong⁴, SHI Wei³

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. MOE Engineering Center of Desertification and Blown-sand Control, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 4. School of Environmental Science and Resources, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Based on the concentrations of heavy metals from 95 topsoil samples, the spatial distribution characteristics and sources of the heavy metals in soil of the surrounding area of Fenhe Reservoir were analyzed with a method combining multivariate statistics and geo-statistics. The results showed that the average concentrations of the Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn in soil of study area were 38.45, 19.09, 24.02, 11.98 and 55.01 mg·kg⁻¹, respectively, and all were lower than the first class standard of the national soil environment and the background values of soil in Shanxi Province. For all heavy metals, there were some samples with concentrations higher than the background values of soil in Shanxi Province, especially for Pb, Cr, and Cu, exceeding by 28%, 14%, and 13%, respectively. The results of correlation analysis and factor analysis showed that the sources of the excess of these heavy metals could be divided into three categories, Cu, Ni and Zn as one class, Cr and Pb as the other two classes. Spatial structure analysis showed the excess of Cu, Ni, and Zn came mainly from daily life and production activities, and the excess of Cr and Pb came mainly from agricultural activities and transportation.

Key words: soil; heavy metal; spatial distribution; geo-statistical analysis; Fenhe Reservoir

土壤作为自然圈层之一, 是大气、水体与生物中物质迁移、滞留和沉积的重要场所^[1]。土壤重金属污染可影响土壤微生物区系、生态物种和微生物过程, 进而影响生态系统的结构和功能^[2], 并且可能经作物吸收后进入食物链^[3], 通过某些迁移方式进入水体和大气^[4], 威胁人类的健康与其它动物的繁衍生息^[5], 从而备受关注。目前, 相关研究主要集中在对城市和农用土壤重金属累积特征、空间分异、污染评价和来源解析等方面^[6~13], 为采取有效措施保护水源, 对水源地土壤重金属污染的研究也正逐渐引起重视^[14~16]。

汾河水库位于山西省太原市西北娄烦县境内,

南北长15 km, 东西宽5 km, 总面积32 km², 上距汾河发源地122 km, 下距省会太原市83 km, 系拦截汾河上游的干流而成, 是山西省最大的水库和最大的饮用水源地。本研究拟通过对汾河水库周边土壤采样监测, 利用RS、GIS技术和地统计分析方法, 探讨重金属元素的含量、空间分布特征及可能来源, 以期对水库周边土壤质量评价及水库综合治

收稿日期: 2012-03-29; 修订日期: 2012-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101558, 41271513, 41101013); 山西省自然科学基金项目(2011021027-1, 2010011044-2)

作者简介: 李晋昌(1980~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为区域生态学, E-mail: lijch@lzb.ac.cn

理提供基础性指导.

1 材料与方法

1.1 样品的采集和分析

2010 年 4 月, 在汾河水库周边 10 km 范围内 ($38^{\circ}00' \sim 38^{\circ}14'N$, $111^{\circ}80' \sim 111^{\circ}93'E$) 采用蛇形采样法和 GPS 定位, 采集地表 0 ~ 20 cm 的土壤样品 95 个(图 1), 每个样品约重 1 kg, 均由 25 m² 范围内的 8 个点的土壤样品均匀混合而成. 土壤经登记编号后, 用聚乙烯塑料袋封装, 于实验室内自然风干, 剔除植物残体和石块, 磨碎、过 100 目筛,

混匀后保存备用. 样品采用 HNO_3 -HF- $HClO_4$ 法消解后采用火焰原子吸收分光光度法 (GB/T 17138-1997) 测定样品中的 Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 等 5 种重金属元素, 这 5 种元素被认为在太原盆地及太原市土壤中污染较为严重^[17]. 分析仪器为 Perkin Elmer 公司生产的 AANAL YST 800 型原子吸收光谱仪. 测定重金属含量时每个样品均采用 3 组平行试验同时进行, 取均值作为样品测定浓度, 并在分析过程中加入国家土壤标准样品 (GSS-1) 进行分析质量控制. 另外从 95 个样品中随机抽取 10 个, 再次测定土壤重金属含量, 以保证测定结果的准确性.

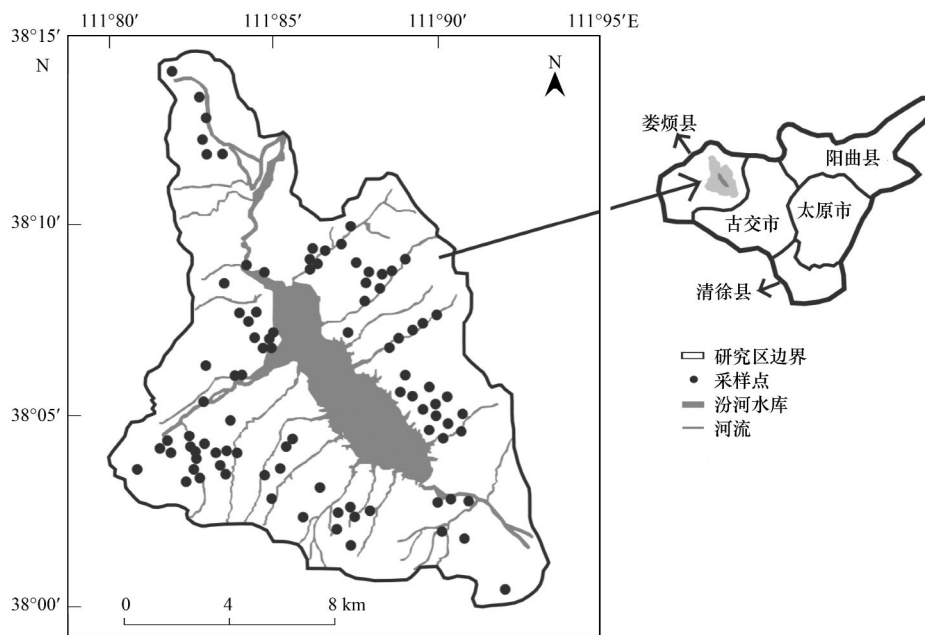


图 1 汾河水库周边土壤重金属污染调查采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites for investigation of soil heavy metal contamination in the surrounding of Fenhe Reservoir

1.2 数据处理

数据统计分析采用 SPSS 13.0 和 Excel 2003 完成, 半变异函数拟合和重金属含量插值图采用 ArcGIS 10.0 完成. 相关系数计算采用的是 Spearman 相关分析. 数理统计分析中, 应用因子分析的前提条件是数据呈正态分布. 数据正态检验方法为单样本 K-S 检验, 若 $PK-S > 0.05$, 表示样本呈正态分布. 对不服从正态分布的数据进行对数转换, 使其服从正态分布.

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属元素含量

由表 1 可知, 重金属元素 Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的平均值均未超过国家土壤环境质量一级标准^[18], 且仅 Cr 和 Ni 有个别样点超过该标准, 其中以 Cr 含

量较为突出, 最高值达到 $176.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 明显高于国家土壤环境质量标准的一级标准值 $90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

5 种重金属元素平均值均未超过山西省土壤背景值^[19], 但均有部分样点超过背景值, 以 Pb、Cr 和 Cu 相对较为显著, 超标率分别为 28%、14% 和 13%. 研究区除 Cr 和 Pb 的变异系数相对较大外, 其它元素的变异系数介于 0.17 ~ 0.21 之间, 属中等变异强度, 表明 Cr 和 Pb 的空间差异相对较大. 从偏态和峰度来看, Cr 和 Ni 服从对数正态分布, Cu、Pb 和 Zn 服从正态分布. 以上分析表明, 研究区人类活动对土壤重金属累积影响较小, 其中 Cr 和 Pb 累积相对较为明显.

2.2 土壤重金属元素间的相关性

相关性分析 (Spearman 相关) 表明(表 2), 研究

表 1 研究区土壤重金属统计分析($n=95$)

Table 1 Statistical analysis of heavy metals in the soils of study area

重金属元素	平均值 /mg·kg ⁻¹	标准差	变异系数	最小值 /mg·kg ⁻¹	最大值 /mg·kg ⁻¹	峰度
Cr	38.45	29.52	0.77	4.60	176.82	7.31
Cu	19.09	3.92	0.21	12.14	31.44	0.31
Ni	24.02	4.02	0.17	16.89	40.57	4.63
Pb	11.98	4.77	0.40	1.70	23.72	-0.44
Zn	55.01	10.11	0.18	15.26	89.40	4.09

重金属元素	偏度	分布类型	山西省土壤背景值 /mg·kg ⁻¹	超标率/%	国家土壤环境质量 一级标准/mg·kg ⁻¹
Cr	2.34	对数正态	55.3	14	90
Cu	0.64	正态	22.9	13	35
Ni	1.49	对数正态	29.9	4	40
Pb	0.34	正态	14.7	28	35
Zn	-0.06	正态	63.5	8	100

表 2 研究区土壤重金属含量的相关系数¹⁾

Table 2 Correlation coefficients among heavy metal contents
in soils of study area

	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Cr	1				
Cu	0.10	1			
Ni	-0.10	0.62**	1		
Pb	0.06	0.25*	0.18	1	
Zn	-0.22*	0.35**	0.45**	0.32**	1

1) **表示 $P<0.01$; *表示 $P<0.05$ ($n=95$)

区土壤中 Cr 与 Zn 呈显著负相关,此外,除 Cr 与 Cu、Ni、Pb 及 Ni 与 Pb 相关性不明显外,其它元素之间均呈显著正相关,其中 Ni 与 Cu、Zn 之间的相关系数较高,Pb 与其它元素之间的相关系数相对较小.该结果进一步表明,研究区土壤中 Cr 与 Pb 的累积具有与其它元素不同的影响因素,尤其是 Cr.

2.3 土壤重金属元素的因子分析

因子分析是将多个实测变量简化为较少变量的

方法,可用来判别土壤中元素的来源^[20,21].由于研究区土壤中 5 种重金属污染并不严重,因此,因子分析中不同因子主要反映了各重金属元素超标部分的人为源差异^[2].通过主成分分析计算(表 3),研究区土壤中 5 种重金属元素(5 个变量)可由前 3 个因子(特征值: $2.137+1.079+0.888=4.104$ 个变量)反映 82% 的信息,即对前 3 个因子进行分析已基本能够反映 5 种重金属含量数据的大部分信息.在因子的初始矩阵中,Pb 在 3 个因子中的载荷差别较小,经过矩阵变化后,差别明显增大(表 4).第一主成分的贡献率为 42.736%,特点表现为因子变量在元素 Cu、Ni 和 Zn 的含量上有较高的正载荷(表 4).由于 Cu 和 Zn 主要来源于汽车轮胎磨损和油的泄露,因此第一主成分可能反映了道路交叉口区域高负荷的汽车排放对环境的污染^[20].第二主成分的贡献率是 21.571%,在 Pb 的含量上有较高的载荷,为 0.949,而 Pb 的来源常与工业和交通有

表 3 研究区土壤重金属元素含量的因子分析

Table 3 Factor analysis of heavy metal concentrations in the soil of study area

主成分	初始特征值			提取特征值		
	特征根	贡献率/%	累积贡献率/%	特征根	贡献率/%	累积贡献率/%
1	2.137	42.736	42.736	2.137	42.736	42.736
2	1.079	21.571	64.307	1.079	21.571	64.307
3	0.888	17.766	82.073	0.888	17.766	82.073
4	0.542	10.847	92.919			
5	0.354	7.081	100.000			

表 4 研究区土壤重金属含量因子分析成分矩阵

Table 4 Component matrix for factor analysis of heavy metal concentrations in the soils of study area

元素	初始因子载荷			旋转后因子载荷		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3
Cr	-0.189	0.922	-0.148	0.009	0.056	0.951
Cu	0.784	0.209	-0.363	0.874	0.134	0.087
Ni	0.821	-0.010	-0.373	0.889	0.079	-0.128
Pb	0.504	0.367	0.726	0.085	0.949	0.086
Zn	0.747	-0.223	0.263	0.509	0.474	-0.439

关^[22]。第二主成分也支配部分 Zn 的来源。第三主成分的主要特征在 Cr 的含量上有较高的载荷,为 0.951,可能来源于农业施肥^[23]。因子分析进一步验证了相关分析的结果。

2.4 土壤重金属元素的空间结构和空间分布

2.4.1 重金属的空间结构

利用 ArcGIS 地统计分析模块对研究区土壤中

各重金属进行最优模型拟合,结果如表 5 所示。元素 Cr、Cu、Ni 和 Zn 块金值与基台值的比值在 25%~75%之间,属于中等空间相关,其中 Cr 的比值为 75%,表明受人类活动等随机因子影响相对较大;元素 Pb 块金值与基台值的比值 >75% (88%),属于空间弱相关,表明 Pb 空间结构受随机因子影响显著,外源污染物对土壤 Pb 含量的贡献较大。

表 5 研究区土壤重金属半变异函数模型¹⁾

Table 5 Semi-variation models for heavy metals in soils of study area						
元素	拟合模型	块金值 C_0	基台值 $C_0 + C_1$	块金值/基台值/% $C_0 / (C_0 + C_1)$	标准平均值	标准均方根预测误差
Cr	高斯模型	0.370 7	0.494 0	75	-0.704 6	1.035
Cu	球状模型	12.275 0	17.626 2	70	0.078 7	1.002
Ni	高斯模型	0.020 0	0.034 0	59	0.014 0	1.039
Pb	指数模型	20.970 0	23.838 3	88	0.044 3	1.045
Zn	指数模型	114.760 0	193.210 0	59	-0.004 4	1.054

1) 最优拟合模型检验标准: 标准平均值接近于 0, 标准均方根预测误差接近于 1

2.4.2 土壤重金属元素的空间分布规律

根据各重金属元素的分布形态,采用 ArcGIS 软件中的地统计模块,对服从正态分布的 Cu、Pb 和 Zn 采用普通克里格插值,Cr 和 Ni 采用析取克里格插值,结果如图 2 所示。从中可知,Cu、Ni、Zn 含量的高值区及 Cr 和 Pb 含量的部分高值区均位于研究区西南部,即娄烦县城所在区域,表明城镇内

的工业生产、交通运输、燃煤释放、生活排污等是研究区土壤中 Cu、Ni、Zn 及部分 Cr 和 Pb 的主要污染源。Cr 含量的其它高值区主要位于汾河水库的上游地区,该区域地势平坦,农业历史悠久,分布有大面积耕地。由于农业施用的磷肥、含磷复合肥及城市垃圾、污泥为原料的肥料中均混杂有 Cr 元素^[23],因此该区域土壤中 Cr 元素的累积可能主要

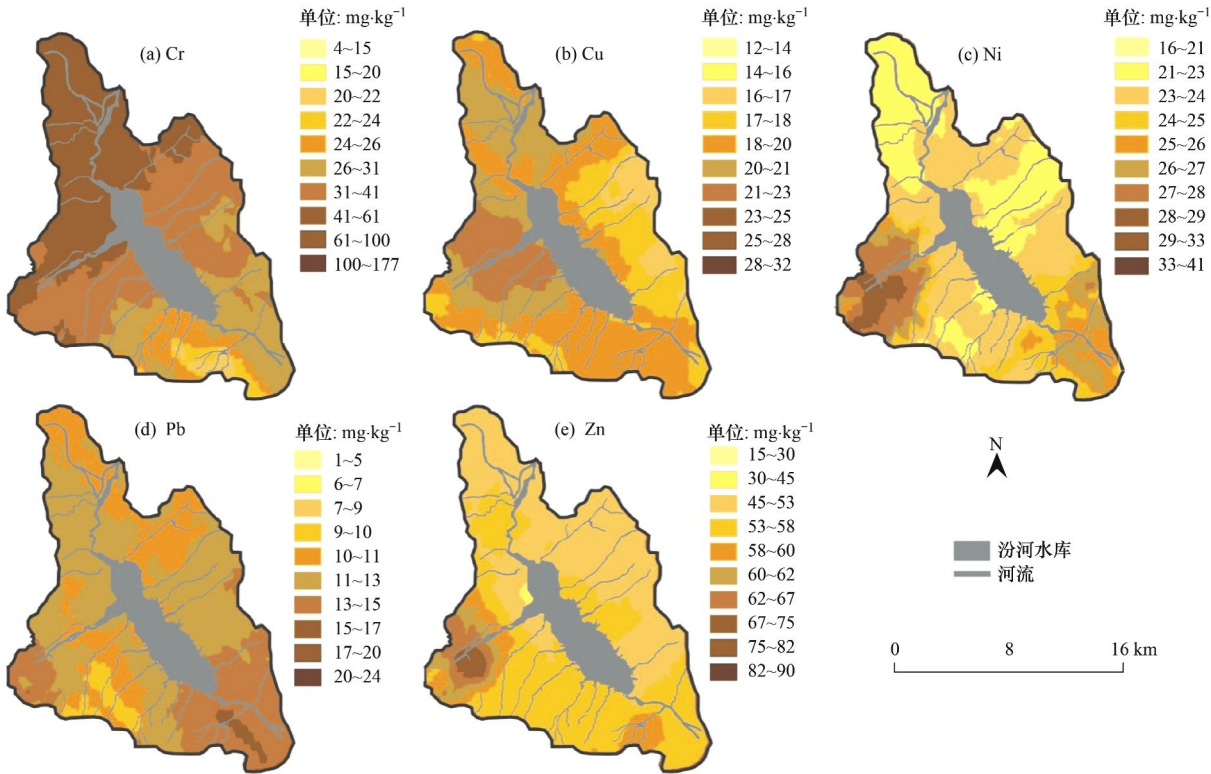


图 2 汾河水库周边土壤重金属含量空间分布

Fig. 2 Distribution of the concentrations of soil heavy metals in the surrounding of Fenhe Reservoir

源于上述农业活动. 由于极其重要的地理位置, 汾河水库上游土壤中 Cr 的累积可能会直接影响汾河水库的水质, 因此该区域土壤中 Cr 元素的累积应引起高度重视. Pb 含量的另一高值区位于汾河水库下游, 该区域是娄烦县及其北部和西北部其它县市通往古交市和太原市的交通要道, 来往车辆较多, 而 Pb 被认为是机动车污染源的标志性元素^[24,25], 因此该区域土壤中 Pb 的累积可能主要源于交通污染. 整体而言, 研究区各样点 5 种重金属含量与山西省背景值较为接近, 应主要由成土母质等自然因素控制.

3 结论

(1) 研究区土壤重金属元素 Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 的平均含量均低于国家土壤环境一级标准和山西省背景值, 基本处于正常水平. 以山西省土壤背景值为标准, Pb、Cr 和 Cu 超标率相对较高.

(2) 5 种元素超标部分的来源可分为三类, Cu、Ni 和 Zn 为一类, Cr 和 Pb 分别单独为一类. Cu、Ni 和 Zn 的超标部分主要来源于城镇区域内的日常生活和生产活动, Cr 和 Pb 的超标部分分别主要来源于农业生产活动和交通运输等. Cr 和 Pb 的污染区域分别主要位于汾河水库的上游和下游区域.

参考文献:

- [1] 周生路, 廖富强, 吴绍华, 等. 宜兴典型农用地土壤剖面重金属元素含量研究[J]. 科学通报, 2008, **53**(增刊): 153-161.
- [2] 刘勇, 岳玲玲, 李晋昌. 太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(6): 1285-1293.
- [3] Wenzel W W, Jockwer F. Accumulation of heavy metals in plants grown on mineralised soils of the Austrian Alps [J]. Environmental Pollution, 1999, **104**(1): 145-155.
- [4] Nriagu J O, Pzcyna J M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soil by trace metals[J]. Nature, 1988, **333**(6169): 134-139.
- [5] Qian J, Shan X Q, Wang Z, et al. Distribution and plant availability of heavy metals in different particle-size fractions of soil[J]. Science of the Total Environment, 1996, **187**(2): 131-141.
- [6] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils[J]. Environmental Pollution, 2001, **114**(3): 313-324.
- [7] Gil C, Boluda R, Ramos J. Determination and evaluation of cadmium, lead and nickel in greenhouse soils of Almería (Spain)[J]. Chemosphere, 2004, **55**(7): 1027-1034.
- [8] Huang K M, Lin S. Consequences and implication of heavy metal spatial variations in sediments of the Keelung River drainage basin, Taiwan[J]. Chemosphere, 2003, **53**(9): 1113-1121.
- [9] Nicholson F, Smiths R, Alloway B, et al. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales[J]. Science of the Total Environment, 2003, **311**(1-3): 205-219.
- [10] Zhao Y F, Shi X Z, Huang B, et al. Spatial distribution of heavy metals in agricultural soils of an industry-based peri-urban area in Wuxi, China[J]. Pedosphere, 2007, **17**(1): 44-51.
- [11] 郭朝晖, 肖细元, 陈同斌, 等. 湘江中下游农田土壤和蔬菜的重金属污染[J]. 地理学报, 2008, **63**(1): 3-11.
- [12] 吴绍华, 周生路, 杨得志, 等. 宜兴市近郊土壤重金属来源与空间分布研究[J]. 科学通报, 2008, **53**(增刊): 162-170.
- [13] 朱文转, 夏北成, 江学顶. 惠州市土壤重金属污染景观空间格局特征研究[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(8): 885-891.
- [14] 张春燕, 王学锋, 王建玲, 等. 新乡市水源地土壤重金属含量特征及其对地下水的影响[J]. 生态学杂志, 2007, **26**(9): 1355-1358.
- [15] 王铁宇, 罗维, 吕永龙, 等. 官厅水库周边土壤重金属空间变异特征及风险分析[J]. 环境科学, 2007, **28**(2): 225-231.
- [16] 史贵涛, 陈振楼, 张翠, 等. 上海市饮用水源地周边环境中的重金属[J]. 环境科学, 2008, **29**(7): 1797-1805.
- [17] 王雄军, 赖健清, 孔华, 等. 太原盆地及太原市重金属元素地球化学分布特征分析[J]. 地球与环境, 2008, **36**(1): 72-80.
- [18] GB 15618-1995. 土壤环境质量标准[S].
- [19] 史崇文, 赵玲芝, 郭新波, 等. 山西土壤元素背景值及其特征[J]. 华北地质矿产杂志, 1994, **9**(2): 188-196.
- [20] 张一修, 王济, 秦樊鑫, 等. 贵阳市道路灰尘和土壤重金属来源识别比较[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(1): 204-212.
- [21] Martín J A R, Arias M L, Corbí J M G. Heavy metals contents in agricultural topsoils in the Ebro basin (Spain). application of the multivariate geostatistical methods to study spatial variations[J]. Environmental Pollution, 2006, **144**(3): 1001-1012.
- [22] 杨忠平, 卢文喜, 刘新荣, 等. 长春市城区表层土壤重金属污染来源解析[J]. 城市环境与城市生态, 2009, **22**(5): 29-33.
- [23] 王军, 陈振楼, 王初, 等. 上海崇明岛蔬菜地土壤重金属含量与生态风险预警评估[J]. 环境科学, 2007, **28**(3): 647-653.
- [24] 肖鹏飞, 李法云, 付宝荣, 等. 土壤重金属污染及其植物修复研究[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2004, **31**(3): 279-283.
- [25] 朱建军, 崔保山, 杨志峰, 等. 纵向岭谷区公路沿线土壤表层重金属空间分异特征[J]. 生态学报, 2006, **26**(1): 146-153.

CONTENTS

Characteristics of Total Gaseous Mercury Concentrations at a Rural Site of Yangtze Delta, China	DOU Hong-ying, WANG Shu-xiao, WANG Long, <i>et al.</i> (1)
Compositions of Organic Acids in PM ₁₀ Emission Sources in Xiamen Urban Atmosphere	YANG Bing-yu, HUANG Xing-xing, ZHENG An, <i>et al.</i> (8)
Analysis on Water-soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol of Xinglong	LI Xing-ru, SONG Ai-li, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> (15)
Effects of Gaseous Compositions the on Simultaneous Removal of NO _x and SO ₂ from Simulated Flue Gas by Ammonia Absorption	WANG Hong, ZHU Tian-le, WANG Mei-yan (21)
Comparing the Ammonia Volatilization Characteristic of Two Typical Paddy Soil with Total Wheat Straw Returning in Taihu Lake Region	WANG Jun, WANG De-jian, ZHANG Gang, <i>et al.</i> (27)
Real-Time Analysis of Polyvinyl Chloride Thermal Decomposition/Combustion Products with Single Photon Ionization/Photoelectron Ionization Online Mass Spectrometer	CHEN Wen-dong, HOU Ke-yong, CHEN Ping, <i>et al.</i> (34)
Surface Characteristics of Alkali Modified Activated Carbon and the Adsorption Capacity of Methane	ZHANG Meng-zhu, LI Lin, LIU Jun-xin, <i>et al.</i> (39)
Distribution of Dimethylsulfoxide(DMSO) in the Surface Water of the Yellow Sea and the Bohai Sea	WANG Min, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (45)
Resolving Characteristic of CDOM by Excitation-Emission Matrix Spectroscopy Combined with Parallel Factor Analysis in the Seawater of Outer Yangtze Estuary in Autumn in 2010	YAN Li-hong, CHEN Xue-jun, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (51)
Estimation and Forecast of Chlorophyll a Concentration in Taihu Lake Based on Ensemble Square Root Filters	LI Yuan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (61)
Research of Hyperspectral Reconstruction Based on HJ1A-CCD Data	GUO Yu-long, LI Yun-mei, ZHU Li, <i>et al.</i> (69)
Research on the Sensitivity of Geochemical of Underground River in Chongqing Xueyu Cave	XU Shang-quan, YANG Ping-heng, YIN Jian-jun, <i>et al.</i> (77)
Bivariate Statistical Model for Calculating Phosphorus Input Loads to the River from Point and Nonpoint Sources	CHEN Ding-jiang, SUN Si-yang, JIA Ying-na, <i>et al.</i> (84)
Temporal and Spatial Variations of Total Nitrogen and Total Phosphorus in the Typical Reaches of Qinhuai River	LI Yue-fei, XIA Yong-qiu, LI Xiao-bo, <i>et al.</i> (91)
Derivation and Application of Sediment Quality Criteria of Cd and Hg for the Xiangjiang River	JIANG Bo-feng, SANG Lei-xin, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (98)
Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soil of Relocation Areas from the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (108)
Concentrations of Soil Heavy Metals and Their Spatial Distribution in the Surrounding Area of Fenhe Reservoir	LI Jin-chang, ZHANG Hong, SHI Wei (116)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals of Groundwaters in the Irrigation District of the Lower Reaches of Yellow River	ZHANG Yan, LI Fa-dong, OUYANG Zhu, <i>et al.</i> (121)
Concentrations and Distribution of Organochlorine Pesticides in the Surface Sediments of Jiaozhou Bay, Taozi Bay and Sishili Bay	LIU Yi-kai, ZHONG Guang-cai, TANG Jian-hui, <i>et al.</i> (129)
Choice of Macroinvertebrate Metrics for Constructing a Benthic-Index of Biotic Integrity Based on the Disturbance Gradients in the Qinjiang River Basin	LU Dong-qi, ZHANG Yong, CAI De-suo, <i>et al.</i> (137)
Isolation and Identification of <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 and Its Allelopathy on <i>Skeletonema costatum</i>	WANG Hong-bin, CHEN Wen-hui, LI Xin-shu, <i>et al.</i> (145)
Effects of the Rice Straw on <i>Microcystis aeruginosa</i> Analyzed by Different Physiological Parameters	SU Wen, KONG Fan-xiang, YU Yang, <i>et al.</i> (150)
Effects of Allelochemicals Ethyl Cinnamate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	GAO Li-li, GUO Pei-yong, SU Guang-ming, <i>et al.</i> (156)
Hydraulic Simulation and Safety Assessment of Secondary Water Supply System with Anti-Negative Pressure Facility	WANG Huan-huan, LIU Shu-ming, JIANG Shuai, <i>et al.</i> (163)
Effect of Relative Molecular Mass Distribution and Hydrophilicity/Hydrophobicity of NOM on Membrane Fouling in MF-combined Process	HU Meng-liu, LIN Jie, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (169)
Effect of Permeabilization on Sulfate Reduction Activity of <i>Desulfovibrio vulgaris</i> Hildenborough Cells in the Presence of Different Electron Donors	XU Hui-wei, ZHANG Xu, LI Li-ming, <i>et al.</i> (177)
Dechlorination of HCB by Bimetals Based on Zero Valent Iron	ZENG Xian-wei, LIU Jian-guo, NIE Xiao-qin (182)
Study on Kinetics of Photoelectrocatalytic Degradation of Supported TiO ₂ on Malachite Green	ZHANG Xiao-na, ZHOU Shao-qi, ZHOU Xiao (188)
Measurement and Analysis of Micropore Aeration System's Oxygenating Ability Under Operation Condition in Waste Water Treatment Plant	WU Yuan-yuan, ZHOU Xiao-hong, SHI Han-chang, <i>et al.</i> (194)
Influence of Microbubble and Its Generation Process on Mixed Liquor Properties of Activated Sludge	LIU Chun, MA Jin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (198)
Impact of Different Nitrogen Concentrations on the N ₂ O Production in the Denitrification Process of Granular Sludge	HAN Xue, GAO Da-wen (204)
Effect of Simulated Heavy Metal Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	XIE Xin-yuan, SUN Pei-de, LOU Ju-qing, <i>et al.</i> (209)
Characteristic and Ion Exchanges During Cu ²⁺ and Cd ²⁺ Biosorption by <i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	BAI Jie-qiong, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (217)
Sorption of Nitrobenzene to Anionic Surfactant Modified Layered Double Hydroxides	XIA Yan, ZHU Run-liang, TAO Qi, <i>et al.</i> (226)
Study on Phosphate Removal and Recovery by Activated Alumina	MENG Wen-na, XIE Jie, WU De-yi, <i>et al.</i> (231)
Spatial Distribution of Inhalable Particulate and Association with Respiratory Disease in Beijing City	YANG Wei, ZHAO Wen-ji, GONG Zhao-ning, <i>et al.</i> (237)
Pollution Levels of Perfluorochemicals in Chicken Eggs and Duck Eggs from the Markets in Beijing	QI Yan-jie, ZHOU Zhen, SHI Ya-li, <i>et al.</i> (244)
Residual Levels of Pesticides in Freshwater Fish from Beijing Aquatic Product Markets and Health Risk Assessment	YU Zhi-yong, JIN Fen, SUN Jing-fang, <i>et al.</i> (251)
Characterizing the Toxicity Interaction of the Binary Mixture Between DMSO and Pesticide by the Multi-Effect Residual Analysis (MERA)	HUO Xiang-chen, LIU Shu-shen, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (257)
Isolation of Quinoloprop-ethyl-degrading Bacteria from Soil by DGGE-Colony <i>in situ</i> Hybridization	LÜ Xin, PENG Xia-wei, HU Qing, <i>et al.</i> (263)
White-Rot Fungi Combinations Impact on Enzyme Productions	MENG Yao, LIANG Hong, GAO Da-wen (271)
Effects of Different Fertilizer Application on Soil Active Organic Carbon	ZHANG Rui, ZHANG Gui-long, JI Yan-yan, <i>et al.</i> (277)
Effect of Reclamation on the Vertical Distribution of SOC and Retention of DOC	HUO Li-li, ZOU Yuan-chun, GUO Jia-wei, <i>et al.</i> (283)
Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Composition in <i>Suaeda salsa</i> Wetland in the Yellow River Delta	DONG Hong-fang, YU Jun-bao, GUAN Bo (288)
Study the Restoration Technology of Concentrated Application-Natural Diffusion about Amendments of Acidified Soil of Hilly Woodland	FANG Xiong, LIU Ju-xiu, YIN Guang-cai, <i>et al.</i> (293)
Optimizing Remediation Conditions of Non-thermal Plasma for DDTs Heavily Contaminated Soil	CHEN Hai-hong, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (302)
Chemical Extraction of Arsenic Co-precipitated with Amorphous Fe(OH) ₃ and Fe ₃ O ₄	CHEN Yi-ping, WANG Shao-feng, JIA Yong-feng (308)
Influence of Aluminum and Manganese on the Growth, Nutrient Uptake and the Efflux by Ectomycorrhizal Fungi	LI Hua, HUANG Jian-guo, YUAN Ling (315)
High-solids Anaerobic Co-digestion of Sludge and Kitchen Garbage Under Mesophilic Conditions	DUAN Ni-na, DONG Bin, LI Jiang-hua, <i>et al.</i> (321)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of High Surface Area Biomass-based Activated Carbons	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (328)
Study on Strategies of Pollution Prevention in Coastal City of Zhejiang Province Based on Scenario Analysis	TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (336)
Advance in the Bioavailability Monitoring of Heavy Metal Based on Microbial Whole-cell Sensor	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xiu-liang, <i>et al.</i> (347)
Characteristics of Heavy Metal Contamination in Street Dusts Along the Urban-Rural Gradient Around Beijing	HE Xiao-yan, GU Pei, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (357)
Content Trends of Pollutants in Street Dust of Beijing Along the Urban-Rural Gradient and Road Density Gradient	TANG Rong-li, MA Ke-ming, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (364)
Analysis of First Flush Effect of Typical Underlying Surface Runoff in Beijing Urban City	REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (373)
Temporal Variation of Water Quality and Driving Factors in Yanghe Watershed of Zhangjiakou	PANG Bo, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (379)
Research on Carbon Reduction Potential of Electric Vehicles for Low-Carbon Transportation and Its Influencing Factors	SHI Xiao-qing, LI Xiao-nuo, YANG Jian-xin (385)
Investigation of Waste Classification and Collection Actual Effect and the Study of Long Acting Management in the Community of Beijing	DENG Jun, XU Wan-ying, ZHOU Chuan-bin (395)
Problems and Countermeasures in the Application of Constructed Wetlands	HUANG Jin-lou, CHEN Qin, XU Lian-huang (401)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年1月15日 34卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 1 Jan. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 90.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行