

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化	薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐珺,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)
北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源	周雪明,仝雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)
利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布	刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)
兰州城区大气 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)
成都市西南郊区春季大气 PM _{2.5} 的污染水平及来源解析	林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晓芬(1629)
中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征	刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)
固定源排放污染物健康风险评价方法的建立	陈强,吴焕波(1646)
北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试	胡月琪,郭晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)
南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价	王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金花(1662)
CoCuMnO ₂ 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学	孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)
大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化	张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)
典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征	史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)
利用δ ¹⁵ N-NO ₃ ⁻ 和 δ ¹⁸ O-NO ₃ ⁻ 示踪北京城区河流硝酸盐来源	赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)
柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析	王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)
三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响	陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)
亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究	王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)
平原河网典型污染物生物降解系数的研究	冯帅,李叙勇,邓建才(1724)
沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例	张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)
苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素	任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)
河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价	王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)
顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价	蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)
台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险	陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)
乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芙宁,张连凯,苏春田(1779)
岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例	王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)
广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素	黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)
基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(<i>Bacteroides</i>) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例	张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)
典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征	梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)
钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成	刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)
天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究	丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)
臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素	董秉直,张佳丽,何畅(1837)
污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析	程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)
HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学	郭俊元,王彬(1852)
放射性废水处理中吸附铀的优势藻种筛选	李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)
微米 Fe ₃ O ₄ 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究	钱旭,王毅力,赵丽(1864)
间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能	宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)
不同灌溉方式对华北平原冬小麦田土壤 CO ₂ 和 N ₂ O 排放通量的影响	郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)
卫河新乡市区段春季溶解 CH ₄ 与 N ₂ O 浓度特征	侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)
模拟氮沉降对内蒙古克什克腾草原 N ₂ O 排放的影响	杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)
土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制	曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)
黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局	高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)
耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响	史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)
北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险	赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)
准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析	刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)
纳米 TiO ₂ 对土壤重金属释放及形态变化的影响	张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)
纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学	马少云,祝方,商执峰(1953)
低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响	宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)
粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响	黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)
萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析	王亚男,程立娟,周启星(1978)
高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响	郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旻,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)
磺胺抗性消长与堆肥进程交互特征	林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)
《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)	

北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险

赵倩¹, 马琳², 刘翼飞², 何江涛¹, 李广贺^{2*}

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 水资源与环境工程北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

摘要: 选择北京东南郊地区典型污染场地, 基于不同地质剖面重金属(Cu、Pb、Cr、As)的分布特征分析, 运用多元统计分析和潜在风险指数方法, 研究土层中重金属的分布特征与潜在生态风险评价。结果表明, 研究区土层剖面重金属含量大小顺序均为: Cr > Cu > As > Pb, 3~6 m 地层重金属的变异系数介于 59.60%~159.33%, 均属于高度变异。重金属 Cu、Pb 含量与有机质(SOM)、阳离子交换量(CEC)等具有显著正相关性, 在第 1 和第 2 因子上具有较高载荷系数, 表现出土层有机胶体类组分对于重金属赋存的影响。典型地层重金属的潜在风险程度: As > Cu > Pb > Cr, 其中 As 含量已达到中等潜在生态风险。

关键词: 地质剖面; 重金属; 多元统计; 潜在风险评价

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1931-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2016.05.042

Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing

ZHAO Qian¹, MA Lin², LIU Yi-fei², HE Jiang-tao¹, LI Guang-he^{2*}

(1. Key Laboratory of Water Resources and Environment Engineering, School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. State Key Joint Laboratory for Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To investigate the distribution characteristics and the potential ecology risk of different types of heavy metals, soil samples were collected from various stratigraphic sections in the southeastern suburb of Beijing, where soil heavy metal (Cu, Pb, Cr, As) contents were measured and analyzed using multivariate statistical analysis and the potential ecological risk index method. The results showed that the concentrations of the four heavy metals followed the order of Cr > Cu > As > Pb with variable coefficients ranging from 59.60% to 159.33% at 3 - 6 m stratum, which all displayed a high degree of variability. The concentrations of Cu and Pb were positively correlated with soil organic matter (SOM), cation exchange capacity (CEC), etc, with higher eigenvalues in Factor 1 and 2, demonstrating the impact of organic colloid on the occurrence of heavy metals. The risk level of the specific heavy metal followed the order of As > Cu > Pb > Cr, where As already showed a medium potential ecological risk in the studied area.

Key words: stratigraphic section; heavy metals; multivariate analysis; potential ecological risk

由于重金属化学性质和生态效应的复杂性, 土壤重金属污染成为环境领域关注的重点问题之一^[1]。重金属可通过多种暴露途径危害人体健康^[2]。随着社会的快速发展, 重金属污染的多样化, 使得地层剖面重金属分布和迁移十分复杂。因此, 如何评价地层重金属的赋存与风险成为关注焦点。

潜在生态风险指数法^[3]是国际上众多专家从沉积学角度提出的, 开始大多用于沉积物中重金属的污染评价^[4,5]。近年来被国内外学者广泛应用于土壤重金属评价。Islam 等^[6]利用该方法对孟加拉国城市土壤有害元素进行生态风险评价。Ali 等^[7]应用于制革工业污染区的重金属风险分析。张倩等^[8]分析了天津工业区表层土壤重金属的污染污染程度及潜在生态风险; 郭伟等^[9]分析不同功能区 0~5 cm 地层重金属污染, 对土壤环境质量进行综合评价。但这些研究局限于大城市或污染较重的城

区浅层土壤重金属^[10,11], 仅凭浅层的土壤风险指数或污染指数判定一个剖面的污染及存在的风险。然而随着深度的增加, 由于地层原位层的氧化还原环境演变, 影响着重金属的水溶性、迁移性和生物有效性, 随着时间的推移, 在包气带易造成重金属累积, 因此有必要对不同地层的风险指数进行潜在风险评价, 结合重金属重点污染地层, 综合反映包气带存在的污染特征及潜在生态风险。

目前关于北京地区的研究注重于重金属的空间分布特征及污染等级^[12~14], 对地层剖面中重金属的污染特性及潜在生态风险研究较少。本研究通过对

收稿日期: 2015-10-19; 修订日期: 2015-12-17

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201309001); 国土调查课题项目(1212011220986)

作者简介: 赵倩(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为地下水环境, E-mail: qian242914@163.com

* 通讯联系人, E-mail: ligh@tsinghua.edu.cn

Fig. 1 Distribution of stratum lithology and sampling sites in the research area

较大；工业区污染地段剖面在 20 m 以上全为黏土，20 m 左右为细砂层；集约化农业区地层在 0 ~ 15 m 左右大多为颗粒较细的黏土，中间穿插有 1 ~ 2 m 不等的粉砂和细砂；再生水灌溉区地层主要为黏土、粉土、砂，15 m 左右存在一层杂色卵石；对照区包气带岩性主要为粉土、粉砂。

1.2 分析方法

1.2.1 基本理化指标分析方法

有机质 (SOM)、总磷 (TP)、阳离子交换量 (CEC) 按照《农业行业标准》测定。总氮 (TN) 按照《林业行业标准》测定。pH 值用酸度计测量^[15]。利用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 测定重金属 Cu、Pb、Cr 的含量，原子荧光光谱法 (AFS) 测 As 的含量，测试仪器的检出限均低于 0.01 mg·kg⁻¹，测试的准确度和精密度采用国家土壤标准物质 (GBW 系列) 进行控制，各重金属的加标回收率均在 90% 以上，同时进行空白试验，测试结果符合质量控制要求。

1.2.2 数据处理

本研究采用 Origin 8.0 软件作图，统计学软件

SPSS 19.0 对土层中重金属含量与土壤理化性质进行相关性和因子分析。

1.2.3 重金属潜在生态风险评价

采用潜在生态风险指数法对研究区土层重金属进行潜在生态风险评价。该方法在土壤重金属污染研究中已被广泛采用^[16,17]。潜在生态风险指数 (RI) 体现了生物有效性和相对贡献比例及地理空间差异等特点，能综合反映沉积物中重金属的影响潜力^[18]。根据该方法，单一金属潜在生态风险因子 E_r^i 、多金属综合潜在生态风险指数 RI，其关系如下：

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \tag{2}$$

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i = \sum_{i=1}^m T_r^i \times C_f^i = \sum_{i=1}^m T_r^i \times C_s^i / C_n^i \tag{3}$$

式中， C_f^i 为单一金属 i 的污染系数 ($C_f^i = C_s^i / C_n^i$)， C_s^i 为样品实测浓度， C_n^i 为土壤重金属背景参考值， T_r^i 为重金属 i 的毒性系数，反映了金属在水相、固相和生物相之间的响应关系。Cu、Pb、Cr、As 的毒性系数为 5、5、2、10，潜在生态风险分级^[19]见表 1。

表 1 潜在生态风险评价指标的分级

Table 1 Classification criteria of the potential ecological risk index

生态风险系数	生态风险程度				
	轻微	中等	强	很强	极强
E_r^i	<40	40 ~ 80	80 ~ 160	160 ~ 320	>320
RI	<150	150 ~ 300	300 ~ 600	600 ~ 1 200	>1 200

2 结果与分析

2.1 地层剖面重金属含量的空间分布特征

重金属含量在不同地质剖面中的分布能在一定程度上反映人为污染的影响^[20]。本研究采用土壤环境质量标准 (GB 15618-1995)^[21]和北京市土壤背景值^[22]评价区域的污染状况，地层土壤主要理化性质及重金属含量剖面分布特征见表 2。

由表 2 可知，地层土壤 pH 均值在 8.3 左右，变异系数均小于 3%，在地层中较稳定，属于碱性土；根据均值分析，SOM、TN、TP 整体随地层深度的增加逐渐降低，在 0 ~ 3m 均值最高，分别为 2.05%、0.63 g·kg⁻¹、0.65 g·kg⁻¹，CEC 值表现为在 0 ~ 6m 逐渐降低，6 ~ 12m 段出现小幅度回升现象；SOM、CEC、TN 变异系数随着深度的增加逐渐升高，最高值分别达到了 167.54%、90.35%、176.9%，表明地层中有机物和营养元素的来源已明显受到外界干扰，离散型相对较大，在地层中的变化规律较复杂，根据取样场地的周围环境可知，这些变异很大程度

上可归结为农业化肥的过量使用、工业污废水排放、再生水回灌、垃圾填埋堆积等人类活动强度不一的影响。

由分层均值可知，除 Pb 外，重金属含量在 0 ~ 3 m、3 ~ 6 m 及 6 ~ 12 m 整体表现为逐渐降低的趋势，且含量均高于背景值，其中 Cu、Cr、As 在 0 ~ 3 m 段的最高均值分别达到各自背景值的 1.18、2.11、2.71 倍，但未超过土壤环境质量二级标准 (pH > 7.5)；根据变异程度的分层分析，除 Cr 外，3 ~ 6 m 段重金属变异程度最高，其次为 6 ~ 12 m，0 ~ 3 m。由 Wilding^[23]对变异系数的划分，3 ~ 6 m 段 Cu、Pb、Cr、As 变异系数分别为 68.93%、159.33%、59.60%、92.04%，均属于高度变异 (CV > 36%)。表明在区域农业生产及人类活动干扰下，该地区土壤中重金属的聚集趋势较为明显，地层显著受到外界干扰。

2.2 地层剖面重金属的分布规律

重金属含量的剖面分布如图 2 所示，不同场地地层重金属分布表现出差异性，同一地段不同重金

属含量垂直分布规律非常相似,含量顺序均表现为: Cr > Cu > As > Pb. 研究区对照组 (CK) 重金属围绕背景值上下浮动,受人类活动干扰较小. 重金属 Pb

在地质剖面中的含量整体表现为随地层深度增加而降低,变幅为 3 ~ 27.7 mg·kg⁻¹,含量明显低于北京市背景值,仅在 0 ~ 3 m 表现出了一定的累积现象.

表 2 土壤主要理化性质及重金属含量剖面分布特征¹⁾

Table 2 Physical-chemical properties and heavy metal contents in studied soil profiles										
项目	深度/m	pH	SOM/%	CEC /meq·g ⁻¹	TN /g·kg ⁻¹	TP /g·kg ⁻¹	Cu /mg·kg ⁻¹	Pb /mg·kg ⁻¹	Cr /mg·kg ⁻¹	As /mg·kg ⁻¹
M ± SD	0 ~ 3	8.23 ± 0.20	2.05 ± 1.52	15.84 ± 7.08	0.63 ± 0.49	0.65 ± 0.31	22.11 ± 7.73	14.32 ± 4.28	62.76 ± 64.90	19.23 ± 13.83
	3 ~ 6	8.35 ± 0.13	0.85 ± 0.81	6.8 ± 5.23	0.40 ± 0.31	0.51 ± 0.14	17.81 ± 12.28	15.43 ± 24.58	43.97 ± 26.21	18.32 ± 16.86
	6 ~ 12	8.5 ± 0.22	0.78 ± 1.31	9.23 ± 8.34	0.19 ± 0.34	0.40 ± 0.12	16.74 ± 9.84	10.66 ± 4.95	36.93 ± 17.27	12.91 ± 11.45
CV/%	0 ~ 3	2.42	73.97	44.7	77.43	48.68	34.94	29.87	103.40	71.94
	3 ~ 6	1.51	95.12	76.96	75.78	26.98	68.93	159.33	59.60	92.04
	6 ~ 12	2.56	167.54	90.35	176.9	29.88	58.80	46.41	46.76	88.65
土壤质量标准	—	—	—	—	—	—	100	350	250	25
背景值(BL)	—	—	—	—	—	—	18.7	24.6	29.8	7.09

1) M 为平均值; SD 为标准差; CV 为变异系数

Cu、Cr 和 As 变化趋势表现出一致性,在农业地段 (NY1)、垃圾场 (LJ)、污灌 (WG1)、工业 (GY1) 的采样点的整体含量明显高于背景值及对照组,在地层中分布规律复杂,0 ~ 3 m 起伏波动较密集,变幅分别在 12.7 ~ 39.3、48.2 ~ 115、21 ~ 53.6 mg·kg⁻¹之间; 3 ~ 6 m 波动幅度较大,Cu、Cr、As 最高含量分别达到了 46、115、53.6 mg·kg⁻¹,达到

各自对照点的 2.46、3.2、5.36 倍; 6 m 以下整体表现为下降趋势. 由于不同污染来源,造成了不同地段的地层剖面重金属分布规律具有显著的差异.

农业区(NY2、NY3)、污灌区 (WG2)、工业区 (GY2) 重金属围绕背景值上下浮动,整体呈现先降低后升高,之后降低的趋势. 表现为在 0 ~ 6 m 含量逐渐下降,土层 Cu、Pb、Cr 和 As 最低平均含量为

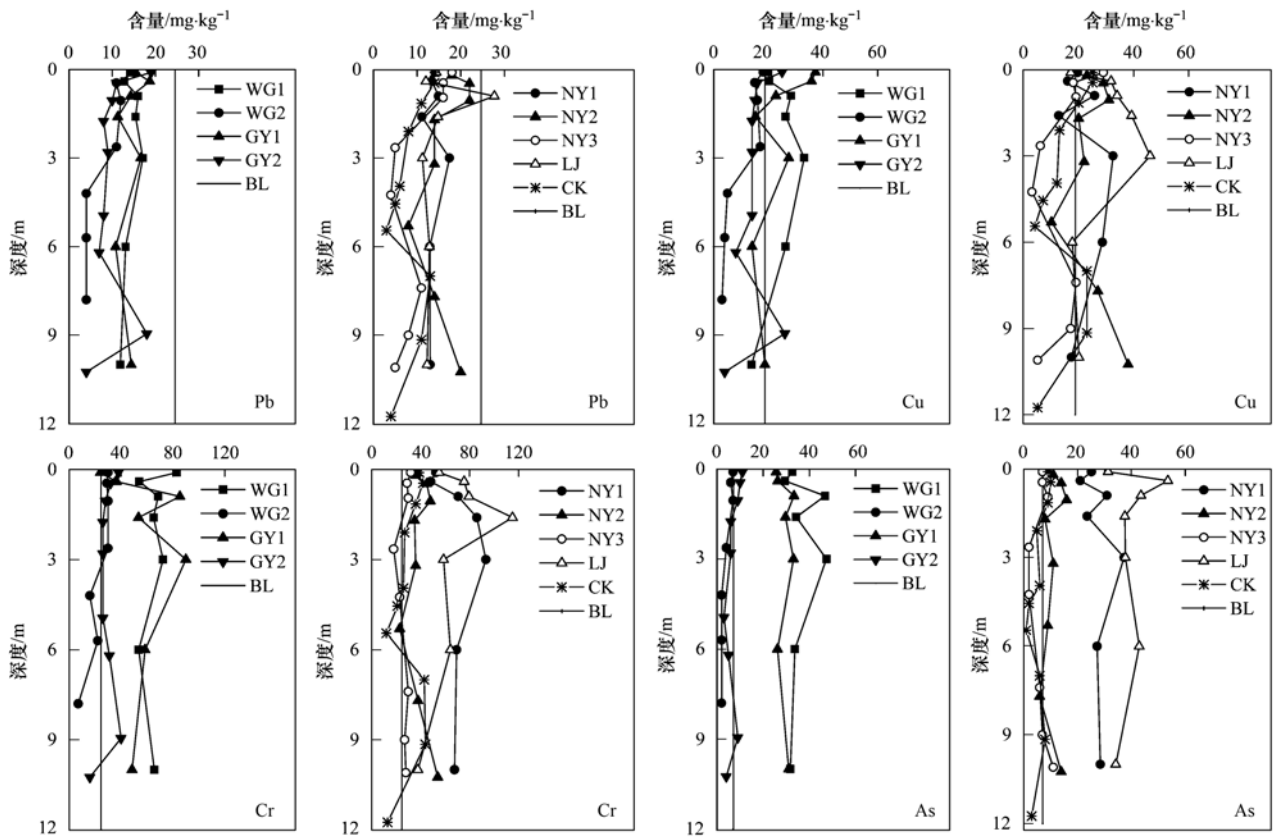


图 2 地层中重金属的剖面分布
Fig. 2 Distribution of heavy metal contents in studied soil profiles

3、4、7、2 mg·kg⁻¹,在 6~9 m 土层 4 种元素含量逐渐升高,分别达到 18.5、11.25、28.25、6 mg·kg⁻¹,9 m 以下则恢复下降趋势。

地层重金属的垂向分布不同于以往随深度增加而降低的规律^[24~26],在地层中含量变化波动范围较大,且表层聚集表现不明显,表现出人为和自然地质双重叠加影响。由岩性分布可知,0~3 m 岩性复杂,黏土层掺杂着粉砂层、杂填土、粉土、细砂等,可能是造成该地段重金属分布不均的原因;3~6 m 段岩性单一,均属于黏土层,粒径较小,孔隙结构密实,连通性变差,土壤具有良好的持水性能,造成重金属在该地段发生累积。此外,SOM、CEC、TN、TP 在地层分布的变异程度较强,也是造成重金属分布差异性显著的重要原因。

2.3 土壤理化性质与重金属元素的相关性分析

土壤重金属的空间分布主要是由母质、土壤成因、土壤性质和人类活动等共同作用的结果^[27]。已有研究表明,土壤 SOM、pH 等是影响重金属分布的关键因素^[28,29]。重金属含量与土壤理化指标的相关关系如表 3 所示,pH 值仅与 Cu 含量之间呈极显著负相关($P<0.01$),而与其他金属均不存在显著相关性。大量研究表明,pH 升高会提高重金属的吸附量,反之则下降,而在不同的土壤矿物、土壤胶体、

金属的种类及本身特性情况下,pH 的影响程度不同^[30,31]。该研究中地层 pH 偏碱性而与 Pb、Cr、As 不显著可能与研究区土壤矿物及土壤胶体在地层中分布不均有关。SOM 对土壤理化性质影响较大,对土壤中的重金属行为影响较复杂,SOM 中的腐殖质可与重金属形成络合物来影响土壤中重金属的流动性及其生物有效性^[32],地层中 SOM、CEC 与 Cu、Pb 呈极显著或显著正相关($P<0.05$ 或 $P<0.01$),与 Cr、As 相关性均不显著,可能是由于采样区地层受人为影响造成有机质的变异程度较大所致。

由于人类活动的影响,营养元素 N、P 不断向下淋溶,造成地层剖面 N、P 的积累。该研究中地层剖面营养元素 TN 与 Cu 呈极显著正相关($P<0.01$),与 Pb、As 呈显著正相关($P<0.05$);TP 与 Cu、Pb、As 呈极显著正相关($P<0.01$)。表明 Cu、Pb、As 在地层中的分布均受到了 TN、TP 的影响。通过几项理化指标的相关分析可知,TN、TP、CEC 与 SOM 之间存在极显著正相关($P<0.01$),证实地层中 TN、TP、CEC 的累积伴随 SOM 的累积,环境行为近似,由此造成 TN、TP、CEC 影响地层重金属的分布。重金属 Cu 与 Pb、As,Cr 与 Cu、As 之间呈现呈极显著或显著正相关($P<0.05$ 或 $P<0.01$),反映出以上土壤重金属具有一定同源关系。

表 3 土壤理化性质与重金属元素的相关分析¹⁾

	Cu	Pb	Cr	As	pH	SOM	CEC	TN	TP
Cu	1								
Pb	0.608 **	1							
Cr	0.278 *	0.077	1						
As	0.423 **	0.291 **	0.463 **	1					
pH	-0.418 **	-0.207	-0.013	-0.104	1				
SOM	0.493 **	0.295 **	-0.155	-0.128	-0.144	1			
CEC	0.692 **	0.288 *	-0.064	0.128	-0.564 **	0.482 **	1		
TN	0.516 **	0.237 *	0.029	0.238 *	-0.213	0.596 **	0.418 **	1	
TP	0.579 **	0.303 **	0.247	0.430 **	-0.011	0.536 **	0.255 **	0.723 **	1

1) ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关,* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

以研究区土壤样品中 4 种重金属元素及 pH、SOM 等为选择变量,进行因子分析(表 4),根据相关性对变量进行分组,同组内的变量之间相关性较高,通过因子分析获取变量间相关关系更可靠的信息^[33,34]。选取最大方差法,根据特征值大于 1 原则抽取的 3 个主因子对重金属的累积解释率达到了 73.60%。第 1 主因子轴中解释了总变异的 29.75%,主要表现为 SOM、TN、TP 具有较高载荷系数,说明 SOM、TN、TP 相关性较大,存在伴生现

象。第 2 主因子轴解释了总变异的 24.42%,其中 CEC、pH、Cu、Pb 载荷系数较高,而 Cu、Pb 在第一主因子轴中的载荷系数也较高,说明 SOM、TN、TP、CEC 对 Cu、Pb 的络合、迁移、沉淀起到主要作用。第 3 因子解释了总变异的 19.43%,其中 Cr、As 的载荷系数较高。因子分析结果进一步证实了相关分析的结论。

2.4 地层重金属潜在生态风险评价

根据潜在生态风险指数法计算各场地不同

地层剖面中重金属的 E_r^i 和 RI 范围见图 3 及 4 所示. 以单个重金属的潜在生态风险系数箱型图分析可知,Cu、Pb、Cr、As 在研究区不同地层中的 E_r^i 均值分别为 5.27、2.47、2.94、24.42,远远低于 40,整体属于较微生态风险;但 As 的 E_r^i 值明显高于 Cu、Pb、Cr,最大值达到 58.6,存在中等潜在生态风险. 以单个潜在生态风险指数均值可知,土壤中 4 种重金属的潜在风险程度为 As >

Cu > Cr > Pb. 从多种重金属的综合潜在生态风险指数来看,0 ~ 3 m 和 3 ~ 6 m 地层指数略高,6 ~ 12 m 指数有所下降,但变化差异不大. 研究区内重金属的 RI 均值为大约为 35.11,各地层段 RI 值范围均在 150 以内,属于轻微污染. 评价结果表明,目前北京东南郊地层重金属存在轻微生态风险,但 As 的含量已达到中等程度生态风险,需加以关注.

表 4 重金属影响因子分析

Table 4 Analysis of influencing factors for heavy metals

指标	初始因子载荷矩阵			旋转后因子载荷矩阵		
	1	2	3	1	2	3
TP	0.75	0.33	0.43	0.88	0.04	0.30
TN	0.79	0.03	0.37	0.85	0.21	0.04
SOM	0.69	-0.29	0.47	0.81	0.18	-0.30
pH	-0.41	0.43	0.65	0.12	-0.85	0.13
CEC	0.71	-0.35	-0.35	0.31	0.80	-0.11
Cu	0.88	0.06	-0.22	0.55	0.67	0.26
Pb	0.57	0.09	-0.23	0.30	0.48	0.25
As	0.37	0.77	-0.31	0.15	0.18	0.88
Cr	-0.04	0.80	-0.18	-0.08	-0.17	0.80
特征值	3.57	1.74	1.31	2.68	2.20	1.75
贡献率%	39.67	19.36	14.57	29.75	24.42	19.43
累积贡献率%	39.67	59.03	73.60	29.75	54.17	73.60

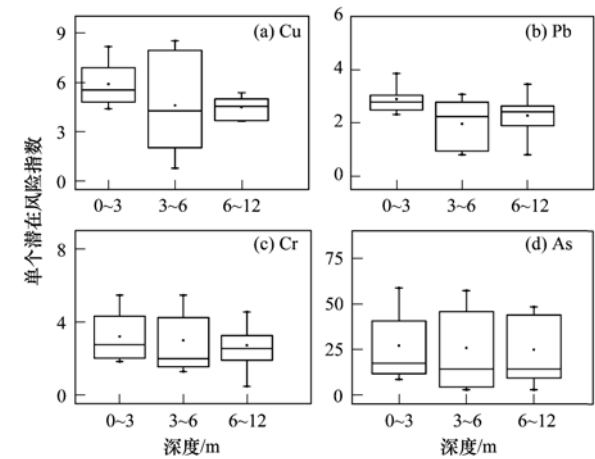


图 3 土壤重金属潜在生态风险系数

Fig. 3 Potential ecological risk coefficients of soil heavy metals

3 结论

(1)北京东南郊地层中重金属含量的高低顺序表现为:Cr > Cu > As > Pb. 其中 Pb 仅在地层 0 ~ 3 m 出现累积现象; Cu、Cr 和 As 在 3 ~ 6 m 富集,最高值分别达到对照点的 2.46、3.2、5.36 倍. 地层中重金属元素在 3 ~ 6 m 段变异系数在 59.60% ~ 159.33% 之间,属于高度变异.

(2)相关性因子分析表明,地层剖面 SOM、

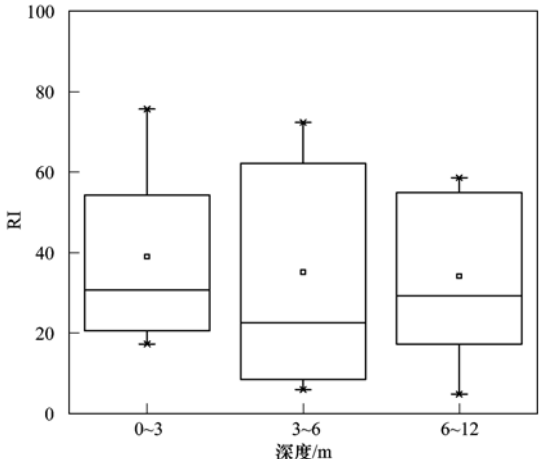


图 4 重金属综合潜在生态风险指数

Fig. 4 Potential ecological risk index of soil heavy metals

CEC、TN、TP 与 Cu、Pb 呈极显著或显著正相关,证实 SOM、TN、TP、CEC 是影响地层中重金属分布的重要因素.

(3)基于潜在生态风险分析可知,单个重金属的潜在风险程度为 As > Cu > Cr > Pb, As 已达到中等潜在生态风险. 重金属综合潜在生态风险指数 RI 在不同地层之间差异较小,均值约为 35.11,表明该区域重金属生态风险属轻微,但 As 污染需加以关注.

参考文献:

- [1] 韩平, 王纪华, 冯晓元, 等. 北京顺义区土壤重金属污染生态风险评估研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(1): 103-109.
- [2] 庞妍, 同延安, 梁连友, 等. 污灌农田土壤-作物体系重金属污染评价[J]. 农业机械学报, 2015, **46**(1): 148-154.
- [3] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [4] Xiao R, Bai J H, Huang L B, *et al.* Distribution and pollution, toxicity and risk assessment of heavy metals in sediments from urban and rural rivers of the Pearl River delta in southern China [J]. Ecotoxicology, 2013, **22**(10): 1564-1575.
- [5] Abuduwaili J, Zhang Z Y, Jiang F Q. Assessment of the distribution, sources and potential ecological risk of heavy metals in the dry surface sediment of Aibi Lake in Northwest China[J]. PLoS One, 2015, **10**(3): e0120001.
- [6] Islam S, Ahmed K, Habibullah-Al-Mamun, *et al.* Potential ecological risk of hazardous elements in different land-use urban soils of Bangladesh [J]. Science of the Total Environment, 2015, **512-513**: 94-102.
- [7] Ali Z, Malik R N, Shinwari Z K, *et al.* Enrichment, risk assessment, and statistical apportionment of heavy metals in tannery-affected areas[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2015, **12**(2): 537-550.
- [8] 张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 等. 大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 4232-4240.
- [9] 郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 等. 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1561-1567.
- [10] 雷国建, 陈志良, 刘千钧, 等. 广州郊区土壤重金属污染程度及潜在生态危害评价[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(S1): 49-53.
- [11] 王爽, 李荣华, 张增强, 等. 陕西潼关农田土壤及农作物重金属污染及潜在风险[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(9): 2313-2320.
- [12] 贾月慧, 郭家选, 刘杰, 等. 北京郊区设施菜地剖面中重金属的分布特征[J]. 农业资源与环境学报, 2015, **32**(3): 282-288.
- [13] 邹建美, 孙江, 戴伟, 等. 北京近郊耕作土壤重金属状况评价分析[J]. 北京林业大学学报, 2013, **35**(1): 132-138.
- [14] 乔敏敏, 季宏兵, 朱先芳, 等. 密云水库入库河流沉积物中重金属形态分析及风险评价[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(12): 3324-3333.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 25-35.
- [16] 方明, 吴友军, 刘红, 等. 长江口沉积物重金属的分布、来源及潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(2): 563-569.
- [17] 厉炯慧, 翁珊, 方婧, 等. 浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1509-1515.
- [18] 刘晶, 滕彦国, 崔艳芳, 等. 土壤重金属污染生态风险评价方法综述[J]. 环境监测管理与技术, 2007, **19**(3): 6-11.
- [19] U.S. EPA. Acceleration simulation mode test procedures, emission standards, quality control requirements, and equipment specification technical guidance (EPA 420-P-00-004) [R]. Washington, DC: U.S. EPA, 2000.
- [20] 乔胜英, 李望成, 何方, 等. 漳州市城市土壤重金属含量特征及控制因素[J]. 地球化学, 2005, **34**(6): 635-642.
- [21] GB 15618-1995, 土壤环境质量标准[S].
- [22] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. 环境科学, 2004, **25**(1): 117-122.
- [23] Wilding L P. Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys[A]. In: Nielsen D R, Bouma J (Eds.). Soil Spatial Variability [M]. Wageningen: Pudoc Publishers, 1985. 166-194.
- [24] 张引娥. 重金属元素在厦门-漳州土壤剖面中的分布特征及其环境意义[J]. 地球与环境, 2013, **41**(1): 13-19.
- [25] 陆安祥, 孙江, 王纪华, 等. 北京农田土壤重金属年际变化及其特征分析[J]. 中国农业科学, 2011, **44**(18): 3778-3789.
- [26] 项广鑫, 张建新, 吕焕哲. 工业污染场地重金属的垂向分布及影响因素——以株洲霞湾港为例[J]. 科学技术与工程, 2015, **15**(10): 21-26, 36.
- [27] 严明书, 李武斌, 杨乐超, 等. 重庆渝北地区土壤重金属形态特征及其有效性评价[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(1): 64-70.
- [28] Akan J C, Audu S I, Audu, *et al.* Assessment of heavy metals, pH, organic matter and organic carbon in roadside soils in Makurdi Metropolis, Benue State, Nigeria [J]. Journal of Environmental Protection, 2013, **4**(6): 618-628.
- [29] Yu T, Zhang Y, Zhang Y. Distribution and bioavailability of heavy metals in different particle-size fractions of sediments in Taihu Lake, China[J]. Chemical Speciation & Bioavailability, 2012, **24**(4): 205-215.
- [30] Ding Y Z, Song Z G, Feng R W, *et al.* Interaction of organic acids and pH on multi-heavy metal extraction from alkaline and acid mine soils [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2014, **11**(1): 33-42.
- [31] Wang S L, Mulligan C N. Effects of three low-molecular-weight organic acids (LMWOAs) and pH on the mobilization of arsenic and heavy metals (Cu, Pb, and Zn) from mine tailings[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2013, **35**(1): 111-118.
- [32] 侯博特, 李婉玲. 重金属离子与腐殖质的相互作用机理研究[J]. 农业与技术, 2014, **34**(6): 5, 48.
- [33] Ghrefat H, Yusuf N. Assessing Mn, Fe, Cu, Zn, and Cd pollution in bottom sediments of Wadi Al-Arab Dam, Jordan[J]. Chemosphere, 2006, **65**(11): 2114-2121.
- [34] De Bartolomeo A, Poletti L, Sanchini G, *et al.* Relationship among parameters of lake polluted sediments evaluated by multivariate statistical analysis [J]. Chemosphere, 2004, **55**(10): 1323-1329.

CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015; Pollution Process and Emissions Variation	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Lanzhou City	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM _{2.5} in Southwest Suburb of Chengdu in Spring	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO ₂ Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojinggong Cave in Guangdong Province	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co ²⁺ Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe ₃ O ₄ Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO ₂ and N ₂ O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH ₄ and N ₂ O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N ₂ O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO ₂ on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i>	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorffii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 15, 2016

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: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行