

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

区域空气质量模拟中查表法的应用研究	谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮(1409)
长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用	苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健(1418)
北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究	徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋(1425)
上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究	张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红(1431)
青岛市大气 PM _{2.5} 元素组成及来源研究	李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军(1438)
冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究	王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅(1446)
再悬浮装置在大气 PM _{2.5} 源谱分析中的应用	段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲(1452)
黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究	魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵(1457)
三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探	蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静(1463)
香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析	王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰(1471)
臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响	陈书涛,张勇,胡正华,史艳妹,沈小帅(1476)
托木尔峰青冰滩 72 号冰川径流水化学特征初步研究	赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰(1484)
五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究	张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林(1491)
7 条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律	卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷(1497)
巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性	李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠(1503)
北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析	郭婧,荆红卫,李金香,李令军(1511)
东莞运河排涝对东江河网水质影响分析	孙磊,毛献忠,黄旻旻(1519)
北京平原区地下水污染源识别与危害性分级	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(1526)
地下水曝气修复过程的三维数值模拟	李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌(1532)
垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究	邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永(1540)
新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究	高明瑜,谢慧君,王文兴(1550)
营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响	齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋(1556)
水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究	傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成(1564)
酞酸酯在模拟海河苕草微宇宙中的消减和分布特征	迟杰,杨青(1570)
电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究	刘书宇,吴明红,姜钦鹏(1575)
青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析	李强坤,胡亚伟,罗良国(1579)
四溴双酚 A 的辐射降解研究	李杰,徐殿斗,徐刚,马玲玲,吴明红(1587)
污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究	王红娟,齐飞,封莉,张立秋(1591)
高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响	李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰(1597)
城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成 NDMA 的影响因素研究	尚晓玲,李咏梅(1604)
利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究	沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙(1609)
好氧污泥颗粒化过程中 Zeta 电位与 EPS 的变化特性	王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓姣,竺建荣(1614)
活性污泥对病毒的生物吸附特性	周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪(1621)
阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律	邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松(1625)
两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征	李婷,孟昭福,张斌(1632)
表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响	张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州(1639)
南京市 4 个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析	葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军(1646)
焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能	陈春,李文英,吴静文,李静(1652)
Xanthobacter flavus DT8 降解二噁烷的特性研究	金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟(1657)
未开发油气田地地表炔氧化菌空间定量分布	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(1663)
矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究	赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才(1670)
长江中游干流及 22 条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险	李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红(1676)
典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险	吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红(1682)
闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究	陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛(1687)
三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价	王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩(1693)
典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险	邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许政英(1700)
密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价	高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,李宏兵(1707)
湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性	杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰(1718)
基于 GIS 的某训练场土壤重金属污染评价	刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军(1725)
土壤质地和湿度对 SVE 技术修复苯污染土壤的影响	刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野(1731)
蒙脱土、高岭土和针铁矿对 DNA 吸附与解吸特征	王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰(1736)
LNAPL 在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究	潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙(1744)
亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征	董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷(1753)
蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究	任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥(1760)
固定化微生物技术修复 PAHs 污染土壤的研究进展	钱林波,元妙新,陈宝梁(1767)
《环境科学》征订启事(1483)	《环境科学》征稿简则(1620)
信息	(1490,1496,1586,1743)

基于 GIS 的某训练场土壤重金属污染评价

刘玉通, 方振东, 杨琴, 谢朝新, 王大勇, 毛华军

(后勤工程学院营房管理和环境工程系, 重庆 401311)

摘要: 以中国西南地区某训练场的坦克射击区为研究对象, 监测并分析了土壤中 Pb、Cu、Zn、Co 和 Ni 的含量; 采用单因子指数法和内梅罗综合污染指数法评价了采样区的重金属污染状况, 同时运用 Arcgis 软件分析制定出了采样区的污染指数分布图。评价结果表明, 坦克射击区 Pb、Cu、Zn、Co 和 Ni 分别存在不同程度的污染, 重金属内梅罗综合污染指数平均为 1.64; Co 的单因子指数最高达到了 3.84, 是未来土壤重金属污染控制中优先关注的元素; 污染指数分布图显示, 落弹区土壤的重金属污染尤为严重。Cu 和 Pb 污染分布特征较相似, Zn、Co、Ni 特征较相似。分析认为, 在射击场各种条件综合作用下, Ni 和 Pb 扩散性较强, Cu 扩散性较弱; 重金属污染源来自于炮弹残片、子弹弹头、火炸药等; 残留在土壤中的炮弹残片和子弹弹头会给土壤带来持久性的重金属污染。

关键词: 重金属; 射击场; 单因子指数; 内梅罗综合污染指数; Arcgis

中图分类号: X820.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1725-06

Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS

LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, XIE Chao-xin, WANG Da-yong, MAO Hua-jun

(Department of Barracks Management & Environmental Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China)

Abstract: In this paper, a tank shooting range in a training ground in the southwest of China was investigated, and the content of Cu, Pb, Zn, Co and Ni in the soil was monitored and analyzed. Evaluation of pollution in the sampling area was applied through the single factor index method and the composite pollution index Nemrow method, and the pollution index distribution map was worked out by Arcgis software. The evaluation result shows that: Cu, Pb, Zn, Co and Ni in the tank shooting range have different degrees of pollution respectively, the average composite pollution index Nemrow reaches 1.64. The highest single-factor pollution index of Co reaches 3.84, so Co is the priority element to be monitored in the heavy metal pollution control of soil in future. The pollution index distribution map shows that: the heavy metal pollution is particularly serious in the area of dropping bombs. The pollution distributing characters of Cu and Pb are similar, Zn, Co and Ni have similar characters. The author considers that, the migration of Ni and Pb is strong under the combined effect of various conditions in the shooting range, and the migration of Cu is weak. The sources of heavy metal pollution comprise residual cannonballs, bullets, and explosives. The residual shells and bullets in the soil could lead to a permanent soil contamination of heavy metals.

Key words: heavy metal; shooting range; single-factor index; composite pollution index Nemrow; Arcgis

土壤是在岩石风化产物基础上发育形成的自然体, 岩石中含有各种重金属, 重金属也就自然存在于土壤之中^[1,2]。随着人类对重金属的开采、冶炼、加工及商业制造活动日益增多, 造成原本固定在矿石中的重金属进入大气、水和土壤, 成为了重金属污染的重要来源, 最终影响到生态环境和人体健康^[3~6]。

关于射击训练所带来的土壤重金属污染, 丹麦在 20 世纪 80 年代就发现了这个问题^[7], 加拿大安大略省训练场的铅污染普受关注, 现已规定所有公共训练场必须明确对人体安全的影响^[8], 美国曾经应用香根草修复射击场土壤的重金属污染^[9], 而我国在这方面的研究起步较晚。本研究于 2010 年 3 月针对典型坦克射击区的土壤重金属污染状况进行了调查和分析评价, 以期后续训练场土壤重金属污

染控制策略研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 地质条件与土壤类型

本次调查对象为西南地区某训练场的坦克射击区, 调查前使用强度较高, 已连续使用逾 20 a。采样区属于低山丘陵地带, 土壤基础类型为红壤。土壤表层生态环境破坏严重: 非落弹区坦克长期碾压地段土壤表层板结硬化, 几乎寸草不生; 落弹区翻动频繁, 土壤疏松, 主要原因为坦克炮弹残片的经济价值较高, 附近村民在训练结束后常到落弹区挖掘残留

收稿日期: 2011-07-30; 修订日期: 2011-10-24

基金项目: 训练场环境修复技术与决策研究项目

作者简介: 刘玉通(1983~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为军事环境管理与安全, E-mail: lyt_688@163.com

弹片.

1.2 土壤 pH

实验中称取过 20 目尼龙筛的 15 个土壤样品各 10 g, 加入 25 mL 去除 CO₂ 的蒸馏水, 搅拌 2 min, 静置 30 min 后采用玻璃电极测量土壤 pH 值^[10]. 经测定, 采样区土壤的 pH 值平均为 5.96.

1.3 样品采集及处理

如图 1 所示, 整个区域可划分为落弹区和非落弹区, 训练中的坦克于非落弹区内由北向南行进, 逐渐接近落弹区的目标, 并在行进中进行射击. 采样区域总体呈梯形, 采样面积约 $0.25 \times 10^5 \text{ m}^2$, 共采取表层土样 63 个, 网格法取样, 非落弹区的样品按 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的正方形采样, 落弹区的样品按 $20 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的长方形采样, 按照多点混合采样法, 每个区域取样尽量不少于 5 点^[11], 采集深度 0 ~ 15 cm, 将土样混合均匀, 四分法取 1 kg 混合土样^[12]; 另在采样区域附近采取背景样 3 个, 并且每个采样点均采用 GPS 进行定位.

样品带回实验室, 经风干后拣去植物残体与石头颗粒, 磨细过 20 目尼龙筛, 再用玛瑙球磨机研磨过 100 目尼龙筛. 取过 100 目筛土样, 采用美国国家环境保护署推荐的 USEPA3050B 方法^[13,14], 采用浓硝酸和双氧水对土样进行消煮, 待测.

1.4 样品分析

土壤重金属含量的测定采用等离子体发射光谱仪 (ICP-OES) Optima 5300 DV, 在分析过程中设置空白、平行样, 同时采用国家标准土壤样品 GSS-2 和 GSS-4 进行分析质量的控制.

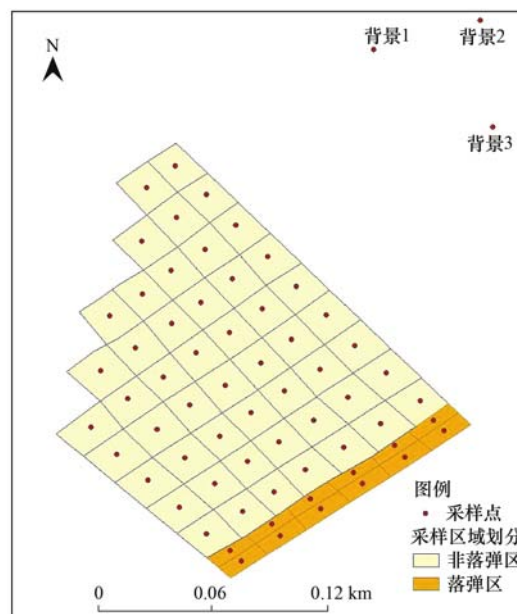


图 1 坦克射击区采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling points in a tank shooting range

2 结果与分析

2.1 测定结果

在坦克射击区, 共监测了 63 个采样点的重金属含量. 实验中监测的重金属元素包括 Pb、Cu、Zn、Co、Ni、As、Cr 等 7 种, 其中 Cu、Pb、Zn、Co、Ni 含量 (表 1) 超出背景值 (表 2) 较高, 坦克射击区表层土样中 Cu 的含量范围为 $27.25 \sim 101.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Pb 的含量范围为 $20.52 \sim 52.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Zn 的含量范围为 $32.17 \sim 91.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Co 的含量范围为 $5.03 \sim 19.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Ni 的含量范围为 $19.05 \sim 56.50$

表 1 坦克射击区超标重金属含量

Table 1 Content of heavy metals excess the standard in a tank shooting range

元素	采样个数	最小值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	最大值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	平均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	标准差	变异系数
Cu	63	27.25	101.90	46.29	16.49	0.356
Pb	63	20.52	52.49	30.33	6.23	0.205
Zn	63	32.17	91.27	56.71	13.17	0.232
Co	63	5.03	19.77	9.82	3.53	0.359
Ni	63	19.05	56.50	32.73	10.42	0.319

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 就平均含量而言, Co 的含量较低. 变异系数较大, 说明坦克射击区落弹区和非落弹区重金属含量存在一定差异.

2.2 土壤重金属污染评价

2.2.1 评价方法

对坦克射击区表层土壤的环境质量评价, 采取单因子指数法对某一种重金属污染进行评价, 采取内梅罗污染指数法对土壤重金属综合污染状况进行

评价, 并运用 Kriging 插值法对整个污染区域进行插值分析, 分别得到各个重金属元素的单因子指数分布图和重金属综合污染指数分布图.

单因子指数法的计算公式: $P_i = c_i / S_i$. 式中, P_i 为污染物单因子指数; c_i 为实测浓度, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; S_i 为土壤环境评价标准, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $P_i \leq 1.0$ 表示未受污染物 i 的污染; $1.0 < P_i \leq 2.0$ 表示轻度污染; $2.0 < P_i \leq 3.0$ 表示中度污染; $P_i > 3.0$ 表示重度污染.

P_i 值越大,污染越严重^[12,15]。

内梅罗指数形式简单,适用性较好,是目前比较常用的重金属综合污染评价方法.其计算公式为:

$$P_N = \sqrt{\frac{P_{\text{平均值}}^2 + P_{\text{最大值}}^2}{2}}$$

式中, P_N 为内梅罗综合污染指数; $P_{\text{平均值}}$ 为各元素单因子指数的算术平均值; $P_{\text{最大值}}$ 为各元素单因子指数中的最大值^[16]。根据内梅罗污染指数,本实验将土壤环境质量分为 4 级: $P_N \leq 1.0$ 表示未污染; $1.0 < P_N \leq 2.5$ 表示轻度污染; $2.5 < P_N \leq 7$ 表示中度污染; $P_N > 7$ 表示重度污染^[17]。

2.2.2 评价标准

土壤的环境质量评价,可以参照土壤环境质量标准(GB 15618-1995)^[18],也可以采用背景值及标准偏差评价^[12,19]。经过诸多差别的岩石风化和成土过程的影响,各类土壤中某一元素背景值的大小,可能差异很大,污染土壤最好与一个地区同一类型或相近类型土壤中元素平均含量进行对比,方能确切地说明问题^[20]。为了突出部队射击训练给落弹区土壤环境带来的影响,本次评价标准采用土壤监测背景值的平均值加上 2 倍标准差,作为土壤环境评价标准.3 个背景采样点的监测结果见表 2。

表 2 坦克射击区背景值监测结果分析

Table 2 Analysis of monitoring results of background in a tank shooting range							
元素名称	背景样 1 /mg·kg ⁻¹	背景样 2 /mg·kg ⁻¹	背景样 3 /mg·kg ⁻¹	平均值 /mg·kg ⁻¹	标准差	变异系数	土壤评价标准(S_i) /mg·kg ⁻¹
Cu	39.78	36.00	32.58	36.12	3.60	0.100	43.32
Pb	25.42	24.82	27.35	25.86	1.32	0.051	28.51
Zn	36.94	39.82	37.37	38.04	1.55	0.041	41.15
Co	4.03	4.79	4.14	4.32	0.41	0.095	5.14
Ni	26.08	26.38	22.69	25.05	2.05	0.082	29.15

2.2.3 评价结果

土壤中 Cu、Pb、Zn、Co、Ni 的单因子指数评价结果及污染程度见表 3。根据表 3 可知:Cu 的 P_i 指数为 0.63 ~ 2.35,其中清洁样品 41 个,轻度污染样品 20 个,中度污染样品 2 个,不存在重度污染样品;Pb 的 P_i 指数为 0.72 ~ 1.84,其中清洁样品 27 个,轻度污染样品 36 个,不存在中度污染和重度污染样品;

Zn 的 P_i 指数为 0.78 ~ 2.22,其中清洁样品 4 个,轻度污染样品 56 个,中度污染样品 3 个,不存在重度污染样品;Co 的 P_i 指数为 0.98 ~ 3.84,其中清洁样品 1 个,轻度污染样品 39 个,中度污染样品 17 个,重度污染样品 6 个;Ni 的 P_i 指数为 0.65 ~ 1.94,其中清洁样品 32 个,轻度污染样品 31 个,不存在中度和重度污染样品。

表 3 坦克射击区表层土样污染指数评价结果

Table 3 Pollution index evaluation results of surface soil samples in a tank shooting range								
参数	元素	最大值	最小值	平均值	清洁样品	轻度污染样品	中度污染样品	重度污染样品
P_i	Cu	2.35	0.63	1.07	41	20	2	0
	Pb	1.84	0.72	1.06	27	36	0	0
	Zn	2.22	0.78	1.38	4	56	3	0
	Co	3.84	0.98	1.91	1	39	17	6
	Ni	1.94	0.65	1.12	32	31	0	0
P_N	—	3.04	0.88	1.64	1	55	7	0

从单因子污染指数的平均值来看, $Co > Zn > Ni > Cu > Pb$, 因此 Co 对炮弹落弹区土壤重金属污染的贡献程度大于其它几种元素,是重金属污染控制中优先关注的重金属元素。

从综合污染指数分析结果来看,坦克射击区的内梅罗综合污染指数范围为 0.88 ~ 3.04,平均内梅罗综合污染指数为 1.64,根据内梅罗指数评价分级标准,坦克射击区 55 个样品受到了重金属的轻度污染,此外还包括 7 个中度污染样品和 1 个清洁样品,

没有重度污染样品。

2.3 Arcgis 插值分析

在单因子指数和内梅罗综合污染指数评价结果的基础上,采用 Arcgis(9.2) 软件 Spatial Analyst 模块中无偏最佳估值的普通 Kriging 插值法(Ordinary Kriging)对采样区进行污染状况空间插值分析,分析未测区域的重金属污染状况,从而得到重金属污染指数的空间分布图. Cu、Pb、Zn、Co、Ni 的单因子指数插值分析结果见图 2 ~ 6,内梅罗综合污染指数插值

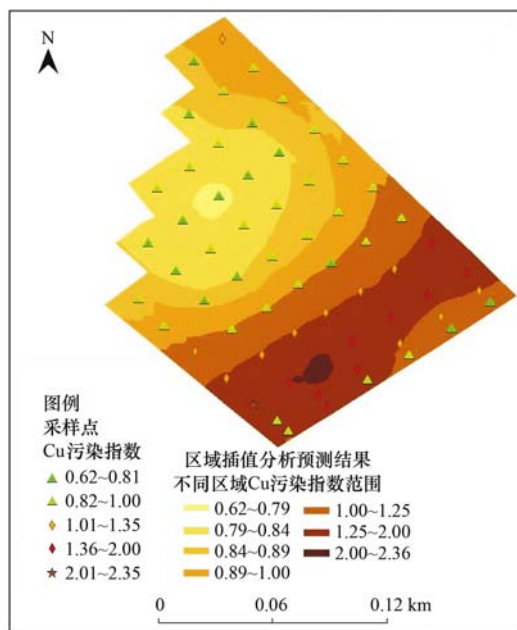


图2 坦克射击区 Cu 污染插值分析结果

Fig. 2 Interpolated results of Cu pollution index in a tank shooting range

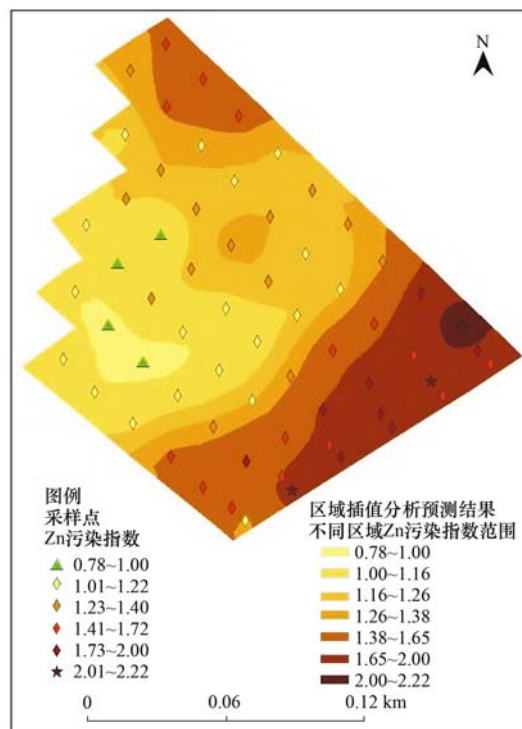


图4 坦克射击区 Zn 污染插值分析结果

Fig. 4 Interpolated results of Zn pollution index in a tank shooting range

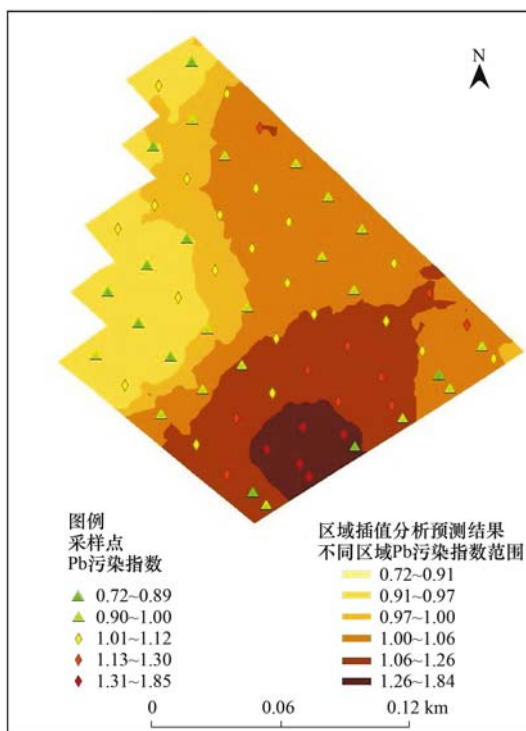


图3 坦克射击区 Pb 污染插值分析结果

Fig. 3 Interpolated results of Pb pollution index in a tank shooting range

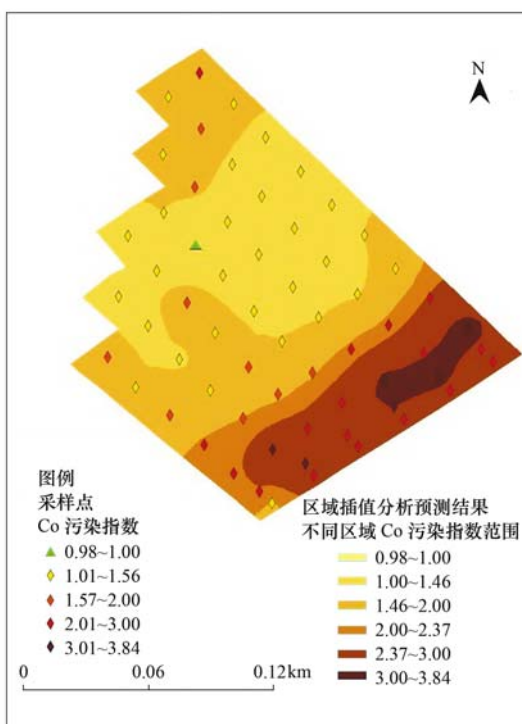


图5 坦克射击区 Co 污染插值分析结果

Fig. 5 Interpolated results of Co pollution index in a tank shooting range

分析结果见图7。

2.3.1 污染指数空间分布特征分析

总体观察6幅插值分析图,①从5种重金属各自的单因子污染指数空间分布特征来看,均表现为落弹区污染较重,非落弹区较轻。其中Co污染在落

弹区存在重度污染,Zn、Cu在落弹区存在中度污染、Ni、Pb均属于轻度污染。②Cu和Pb污染分布特征较相似,污染较重区域集中于落弹区左下方,而Zn、

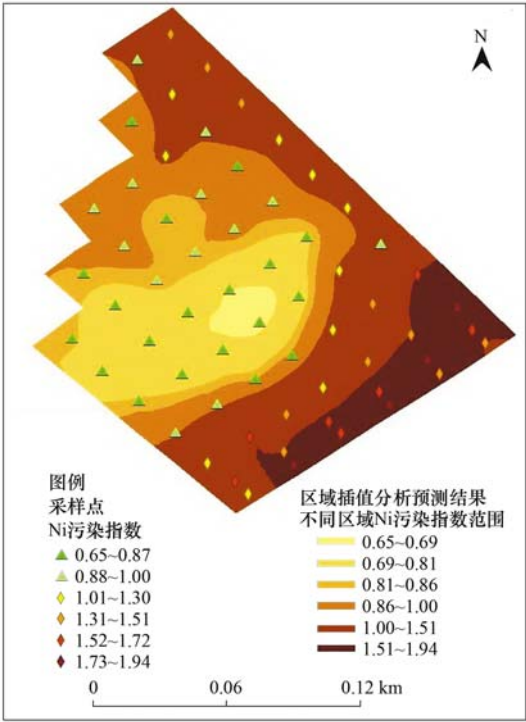


图 6 坦克射击区 Ni 污染插值分析结果
Fig. 6 Interpolated results of Ni pollution index
in a tank shooting range

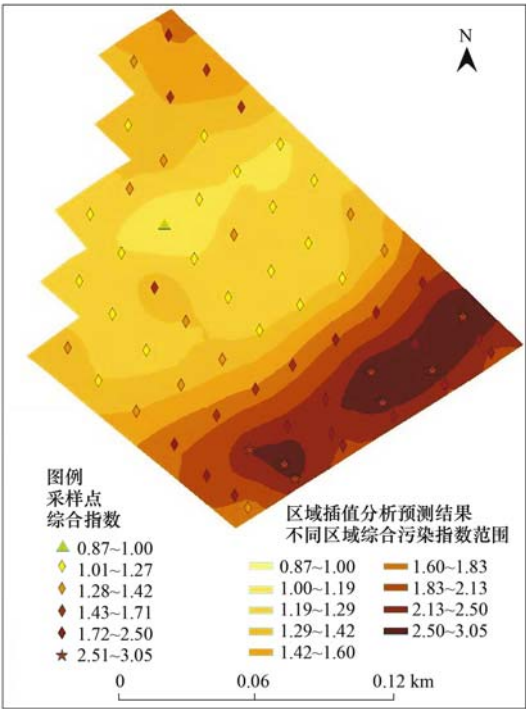


图 7 坦克射击区综合污染指数插值分析结果
Fig. 7 Interpolated results of composite pollution
index in a tank shooting range

Co 和 Ni 的分布特征较相似,污染较重区域集中于落弹区右上方.同时从单因子指数平均值来看(表 2),Co、Zn、Ni 大于 Cu、Pb,说明 Cu 和 Pb 污染具有

一定相关性,Co、Zn、Ni 污染的相关性较大.③Ni 和 Pb 在落弹区仅为轻度污染,但一半以上区域均处于轻度污染状态,在对该地土壤中重金属含量充分调研基础上,分析认为主要原因有两点,一是炮弹爆破过程中,Ni 和 Pb 宜吸附于颗粒粉尘中,随大气迁移沉降;二是雨水淋溶、地表径流、酸碱腐蚀以及生物迁移等作用^[21~23].以上因素共同造成 Ni 和 Pb 在该地环境中的迁移性较强.④对比之下,Cu 在落弹区存在中度污染,但一半以上区域处于未污染状态,而同样在落弹区达到中度污染以上程度的 Zn 和 Co,几乎整个采样区域均处于轻度以上污染状态.分析认为 Cu 在射击场环境条件中的迁移性较弱.⑤从综合污染指数分析结果可以看出,坦克射击区整个区域的土壤均受到了重金属污染,整体处于轻度污染状态,在落弹区存在一定的中度污染区域,不存在严重污染区域.总体上坦克射击区的重金属污染元素种类较多,污染状况较复杂.

2.3.2 重金属污染成因分析

坦克炮弹种类繁多,包括爆破(榴)弹、穿甲弹、破甲弹、碎甲弹等,成分比较复杂,其中含有合金钢、黄铜、紫铜、钨合金、镍合金、铝合金等^[24~26],个别一些国家还使用贫铀合金^[27,28].可以确定,各类炮弹中均含有重金属.坦克炮弹爆炸时会瞬间产生巨大的冲击力和气流,一些炮弹中的重金属元素会释放到土壤中,或者随烟尘颗粒释放到大气中,随后沉降于落弹区周边区域^[29].同时爆炸后产生的炮弹残片存留于土壤中,会对土壤造成持久性的重金属污染.美国对别克斯岛训练基地的研究表明,炮弹给当地土壤、水以及生长的菠萝带来了 Co、Pb 等重金属污染^[28].调研中发现,坦克射击训练中经常伴随着轻武器射击训练,已有分析表明,残留在土壤中的轻武器子弹会给土壤带来 Pb 和 Cu 的污染^[30],这也一定程度上造成了 Pb 和 Cu 的污染分布特征较为相似.同时还发现,爆破后的炮弹残片具有一定的经济价值,当地村民在每次坦克射击结束后,常到落弹区挖掘炮弹残片,这在一定程度上降低了落弹区土壤的重金属污染,但频繁的土壤翻动也加强了重金属污染的迁移和扩散.此外,很多研究证实,坦克炮弹中的火炸药,同样含有重金属 Pb 的化合物^[29,31].随着火炸药的爆炸,Pb 可以瞬间扩散到大气中,形成颗粒物,漂浮沉降到周边区域,这可能是 Pb 污染迁移性较强的原因之一.

3 结论

(1)在评价中,土壤环境标准采用土壤监测背

景值的平均值加上 2 倍标准差. 将结果与土壤环境标准对比, 采用土壤单因子指数和内梅罗综合污染指数对采样区的重金属含量进行了评价, 结果显示坦克射击区的超标重金属元素包括 Cu、Pb、Zn、Co 和 Ni, 其污染严重程度依次为 $\text{Co} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Pb}$, 优先关注污染元素为 Co, 其单因子指数达到了 3.84, 重金属内梅罗综合污染指数平均为 1.64.

(2) 应用 Arcgis 软件对炮弹落弹区进行插值分析, 结果表明, 坦克射击区整体处于重金属轻度污染状态. 单因子指数插值分析结果显示, Cu 和 Pb 污染分布特征较相似, Zn、Co、Ni 污染分布特征较相似. 在射击场各种条件的综合作用下, 重金属 Ni 和 Pb 迁移性较强, Cu 的迁移性较差. 综合污染指数插值分析结果显示, 重金属污染在落弹区较重.

(3) 分析认为, 坦克射击区土壤的重金属污染主要来源于炮弹残片、子弹弹头和火炸药, 残留于土壤中的炮弹残片和子弹弹头会持续释放重金属, 导致土壤中重金属污染的持续存在. 针对这一特征, 本研究建议首先采用物理方法清除落弹区土壤中的残留弹头弹片, 然后再采取其它相关控制措施, 以避免重金属污染的严重化.

参考文献:

- [1] 张辉. 土壤环境学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. 8-30.
- [2] 黄镇国, 张伟强, 陈俊鸿, 等. 中国南方红色风化壳[M]. 北京: 海洋出版社, 1996. 38-41.
- [3] 邢宁, 吴平霄, 李媛媛, 等. 大宝山尾矿重金属形态及其潜在迁移能力分析[J]. 环境工程学报, 2011, 5(6): 1370-1374.
- [4] 项萌, 张国平, 李玲, 等. 广西铅锡矿冶炼区表层土壤重金属污染的分布规律[J]. 矿物学报, 2011, 31(2): 250-255.
- [5] Lin Z X, Harsbo K, Ahlgren M, et al. The source and fate of Pb in contaminated soils at the urban area of Falun in central Sweden [J]. Science of the Total Environment, 1998, 209(1): 47-58.
- [6] 龙安华, 刘建军, 倪才英, 等. 贵溪冶炼厂周边农田土壤重金属污染特性及评价[J]. 土壤通报, 2006, 37(6): 1212-1217.
- [7] Jørgensen S S, Willems M. The fate of lead in soils: the transformation of lead pellets in shooting-range soils [J]. A Journal of the Human Environment, 1987, 16(1): 12-14.
- [8] Darling C T R, Thomas V G. The distribution of outdoor shooting ranges in Ontario and the potential for lead pollution of soil and water[J]. Science of the Total Environment, 2003, 313(1-3): 235-243.
- [9] Wilde E W, Brigmon R L, Dunn D L, et al. Phytoextraction of lead from firing range soil by Vetiver grass[J]. Chemosphere, 2005, 61(10): 1451-1457.
- [10] 李强, 文唤成, 胡彩荣. 土壤 pH 值的测定国际国内方法差异研究[J]. 土壤, 2007, 39(3): 488-491.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999. 14-19.
- [12] HJ/T 166-2004, 中华人民共和国环境保护业标准土壤环境监测技术规范[S].
- [13] 杨军, 郑袁明, 陈同斌, 等. 北京市凉水河灌区土壤重金属的积累及其变化趋势[J]. 环境科学学报, 2005, 25(9): 1175-1181.
- [14] EPA. Acid digestion of sediments sludge and soils, EPA 3050B [EB/OL]. <http://www.epa.gov/wastes/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3050b.pdf>, 1996-12
- [15] 徐燕, 李淑芹, 郭书海, 等. 土壤重金属污染评价方法的比较[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(11): 4615-4617.
- [16] 郭笑笑, 刘丛强, 朱兆洲, 等. 土壤重金属污染评价方法[J]. 生态学杂志, 2011, 30(5): 889-896.
- [17] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 522-523.
- [18] GB 15618-1995, 中华人民共和国土壤环境质量标准[S].
- [19] 王登启. 设施菜地土壤重金属的分布特征与生态风险评价研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008.
- [20] 刘琦. 环境化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 164-165.
- [21] 万红友, 周生路, 赵其国. 苏南经济快速发展区土壤有效态铅、镉含量影响因素及分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1566-1573.
- [22] 方晓航, 仇荣亮, 刘雯, 等. 小分子有机酸对蛇纹岩发育土壤 Ni、Co 的活化影响[J]. 中国环境科学, 2005, 25(5): 618-621.
- [23] 万红友, 周生路, 赵其国. 苏南经济快速发展区土壤 Ni 的形态分布影响因素——以昆山市为例[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10): 1953-1959.
- [24] 王凤英, 刘天生, 苟瑞君, 等. 钨铜镍合金药型罩研究[J]. 兵工学报, 2001, 22(1): 112-114.
- [25] 王红军, 张文明, 赵连武. GJB 398A-98 炮弹用碳素钢棒规范编制说明[J]. 冶金标准化与质量, 2001, 39(4): 24-27.
- [26] 迟秀斌, 黄涛, 刘春明. 炮弹系列用钢的转炉工艺研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(4): 4-7.
- [27] 丁志斌, 罗凌江. 贫铀武器对人体健康和环境的影响[J]. 解放军预防医学杂志, 2003, 21(3): 458-462.
- [28] López Morales J L. Determination of Arsenic (As), Cadmium (Cd), Chromium (Cr), Cobalt (Co) and Lead (Pb) in "smooth cayenne" pineapple fruit, leaves tissue and soil using inductively coupled plasma-optical emission spectrometry (ICP-OES) [D]. Puerto Rico: University of Puerto Rico Mayagüez Campus, 2005.
- [29] 曹宏安, 张怀智, 黄鹏波, 等. 报废弹药销毁处理职业危害因素分析与控制[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(3): 4-7.
- [30] 刘玉通, 方振东, 杨琴, 等. 某军事区域土壤重金属污染状况及其评价[J]. 后勤工程学院学报, 2010, 26(5): 62-65.
- [31] 王昕. 绿色火炸药及相关技术的发展与应用[J]. 火炸药学报, 2006, 29(5): 67-71.

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qingbiantan, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorus in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DT8	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《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)

2012年5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人