ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第12期

Vol.39 No.12

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 39 卷 第 12 期
2018 年 12 月 15 日

目 次(卷终)

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征…… 秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 耿冠楠, 贺克斌 (5289)
基于 LUR 模型的中国 $PM_{2.5}$ 时空变化分析 …… 刘炳杰, 彭晓敏, 李继红 (5296)
长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制 …… 黄丹丹, 周敏, 余传冠, 朱书慧, 王裕成, 乔利平, 楼晟荣, 陶士康, 杨强, 李莉 (5308)
春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析 …… 杨阳, 李杏茹, 陈曦, 刘水桥, 刘雨思, 徐静, 王莉莉, 陶明辉, 王格慧 (5315)
成都双流夏秋季环境空气中 VOCs 污染特征 …… 邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东 (5323)
佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成 …… 李霞, 苏伟健, 黎碧霞,龙淼, 黎丽莉, 张洲, 于跃刚, 王云鹏, 王新明 (5334)
四川省人为源大气污染物排放清单及特征 …… 周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 杨欣悦, 周小玲 (5344)
炼焦工序颗粒物排放特征 …… 王彦辉, 赵亮, 孙文强, 叶竹, 蔡九菊 (5359)
小流域大气氮干湿沉降特征 …… 王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 樊彦波 (5365)
流域氮素主要输出途径及变化特征 …… 李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志 (5375)
生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响 …… 斯林林, 周静杰, 吴良欢, 胡兆平 (5383)
长江上游农业源溪流雨季中 N_2O 间接排放特征 …… 田琳琳, 王正, 朱波 (5391)
不同氮污染特征河流 N_2O 浓度、释放通量与排放系数 …… 王淼, 李亚峰, 雷坤, 杨丽标 (5400)
多种同位素手段的硝酸盐污染源解析:以会仙湿地为例 …… 彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁 (5410)
典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 时空分布特征:以重庆市中梁山岩溶槽谷为例 …… 吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄 (5418)
沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析 …… 刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭 (5428)
2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响 …… 廖安然, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 卜红梅, 马英, 韩冬梅, 秦文婧, 杨胜天 (5440)
周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征 …… 周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 李再兴, 罗晓 (5451)
三峡库区沉积物中镍污染特征评价 …… 张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 高丽, 高博 (5464)
四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律 …… 郭攀, 孙涛, 杨光, 马明 (5473)
大兴安岭南瓮河湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响 …… 周心劝, 刘玉荣, 李晶, 周志峰 (5480)
模拟三峡库区消落带土壤有机磷酸酯淹水释放特征 …… 杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (5487)
典型旅游城市河流水体及污水厂出水中全氟烷基酸类化合物的空间分布及其前体物的转化 …… 王世亮, 孙建树, 杨月伟, 张敏 (5494)
4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析 …… 江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊 (5503)
微量元素锰对威氏海链藻生长及叶绿素荧光的影响 …… 王木兰, 姜玥璐 (5514)
广东省水库拟柱孢藻(*Cylindrospermopsis raciborskii*)的分布特征及影响因子分析 …… 雷敏婷, 彭亮, 韩博平, 雷腊梅 (5523)
磁性壳聚糖接枝聚丙烯酰胺去除水体中腐殖酸 …… 尤雯, 刘海成, 曹家炜, 沈耀良, 陈卫 (5532)
臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果 …… 兰亚琼, 刘锐, 马正杰, 陈吕军 (5541)
水解酸化/AO 组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能 …… 顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 吴光学 (5550)
“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性 …… 刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博 (5558)
静压快速启动亚硝酸盐依赖型甲烷厌氧氧化反应 …… 王一因, 胡振, 茹东云, 姜丽萍, 刘华清 (5565)
多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制 …… 王帆, 李军, 边德军, 聂泽兵, 张莉, 孙艺齐 (5572)
主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效能脱氮过程 …… 刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 王建芳, 吴鹏, 钱飞跃, 陈重军 (5580)
不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响 …… 高雪健, 张杰, 李冬, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (5587)
主流厌氧氨氧化工艺的运行优化及其微生物的群落变迁 …… 付昆明, 付巢, 李慧, 姜姗, 仇付国, 曹秀芹 (5596)
厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性 …… 陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 黄勇, 李祥, 陆明羽, 方文烨, 金润 (5605)
低温反硝化菌——施氏假单胞菌 N3 的筛选及脱氮性能 …… 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (5612)
复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险 …… 吴健, 王敏, 张辉鹏, 黄宇驰, 徐志豪, 李青青, 陈昊, 黄沈发 (5620)
不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险 …… 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 姚磊, 吴泉源 (5628)
某大型砷渣场地土壤 As 污染特征及生态风险评价 …… 刘庚, 石瑛, 田海金, 李豪, 张蕾, 牛俊杰, 郭观林, 张朝 (5639)
亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系 …… 辛胜林,梁月明, 彭文杰, 宋昂, 靳振江, 朱美娜, 李强 (5647)
岩溶区典型灌丛植物根系丛枝菌根真菌群落结构解析 …… 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (5657)
模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响 … 李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 刘国平, 白文明, 贺纪正 (5665)
添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响 …… 柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 祝贞科, 李科林, 彭佩钦, 吴小红, 葛体达, 吴金水 (5672)
长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响 … 马欣, 魏亮, 唐美玲, 徐福利, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5680)
黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系 …… 乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠 (5687)
生活垃圾不同填埋阶段的富里酸对五氯苯酚的降解 …… 刘思佳, 何小松, 张慧, 祖国峰, 席北斗, 李丹, 党秋玲 (5699)
CO_2 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征 …… 唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5708)
基于层次分析法的医疗废物处置技术评价 …… 许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 李金惠 (5717)
中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力 …… 刘晓永, 王秀斌, 李书田 (5723)
《环境科学》第 39 卷(2018 年)总目录 …… (5740)
《环境科学》征订启事(5343) 《环境科学》征稿简则(5439) 信息(5595, 5619, 5638)

复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险

吴健[1], 王敏[1], 张辉鹏[2], 黄宇驰[1], 徐志豪[3], 李青青[1], 陈昊[1], 黄沈发[1,3]*
(1. 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 2. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200433; 3. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620)

摘要: 测定了上海郊区 53 个复垦工业场地土壤点位和 23 个周边河道沉积物点位中 8 项重金属(As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 和 Hg)含量, 通过内梅罗指数法和潜在生态风险指数法评价了复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险. 结果表明, 复垦工业场地土壤中 8 项重金属均不同程度超过二级标准, 其中 Zn、Cu 的点位超标率最为突出, 分别达到了 47.17% 和 43.40%; 周边河道沉积物中重金属含量显著低于复垦工业场地土壤. 复垦工业场地土壤重金属内梅罗综合污染指数为 11.41, 处于重度污染水平, 其中 Cu、Zn 最为突出; 周边河道沉积物重金属内梅罗综合污染指数为 1.26, 处于轻度污染水平. 从单项潜在生态风险来看, 复垦工业场地土壤重金属除 Cd(较强)、Hg(较强)、Cu(中度)外, 均处于轻度潜在生态风险水平, 潜在生态风险指数(RI)为 385.79, 总体处于较强潜在生态风险水平; 周边河道沉积物重金属除 Hg 略高于轻度外, 均处于轻度潜在生态风险水平, 潜在生态风险指数(RI)为 83.91, 总体处于轻度潜在生态风险水平. 总之, 复垦工业场地土壤重金属 Cu、Zn 污染较为突出, 考虑到毒性响应因素则 Cd、Hg 更应引起关注; 周边河道沉积物重金属污染较轻, 处于轻度潜在生态风险水平.

关键词: 复垦工业场地; 土壤; 沉积物; 重金属; 内梅罗指数; 潜在生态风险指数
中图分类号: X53 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2018)12-5620-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201803116

Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk of Soil from Reclaimed Industrial Sites and Surrounding River Sediments

WU Jian[1], WANG Min[1], ZHANG Hui-peng[2], HUANG Yu-chi[1], XU Zhi-hao[3], LI Qing-qing[1], CHEN Hao[1], HUANG Shen-fa[1,3]*
(1. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Eight heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, and Hg) in the soils from 53 reclaimed industrial sites and 23 river sediments in the Shanghai suburbs were determined using the Nemero pollution index and Hakanson potential ecological risk index (RI). The results show that the eight heavy metals exceed the secondary standard limits to different extents. The rate of standard excess is the most prominent for Cu and Zn; it accounts for 47.17% and 43.40%, respectively. The contents of heavy metals in the sediments from surrounding rivers are significantly lower than those in soil from reclaimed industrial sites. The comprehensive Nemero pollution index of heavy metals in reclaimed soil is 11.41, which represents a serious pollution level; Cu and Zn are the most prominent heavy metals. The Nemero pollution index of heavy metals in surrounding river sediments is 1.26, indicating slight pollution. Based on the single-potential ecological risk, the heavy metals at the reclaimed industrial sites all have a slightly latent ecological risk level, except for Cd (strong), Hg (strong), and Cu (moderate). The potential ecological RI is high (385.79). Heavy metals from the surrounding river sediments have a mild potential ecological risk level, except for Hg. Overall, the potential ecological level is mild (RI = 83.91). In short, Cu and Zn are more prominent in reclaimed industrial soil. With respect to the toxic response factor, Cd and Hg should be focused on. The heavy metal pollution of surrounding river sediments is light, leading to a mild potential ecological risk level.

Key words: reclaimed industrial sites; soil; sediments; heavy metals; Nemero index; potential ecological risk index

重金属具有不能被生物降解, 易富集的特性[1]. 而土壤作为工业废弃物的"汇", 各种污染物尤其是重金属, 会在土壤中不断累积, 对人类的生存和健康构成巨大威胁[2,3]. 随着工业化进程的加快, 工业"三废"对土壤环境质量的影响日益严重,

收稿日期: 2018-03-18; **修订日期**: 2018-06-08
基金项目: 上海市环境保护局重大科研项目(沪环科[2016]第 7 号); 上海市科学技术委员会重大项目(17DZ1202003, 17DZ1202200)
作者简介: 吴健(1977~), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为城市土壤环境管理, E-mail: wuj@saes.sh.cn
* 通信作者, E-mail: huangsf@saes.sh.cn

土壤重金属污染已经成为了世界性的问题，引起了全社会的巨大关注[2~4]. 与此同时，随着城市化进程的加快和产业结构调整政策的实施，我国由工业企业搬迁而废弃遗留下来的“棕地”超过 50 多万块，由于长期以来粗放的环境安全管理模式、无序的工业废水排放以及废渣的堆放导致了大量的重金属污染场地内及周边土壤与水体[5]，严重影响土地后续使用的安全性，尤其是近年来低效工业用地复垦还耕力度加大，复垦工业场地土壤重金属污染状况关乎农产品安全和人体健康. 因此，探讨复垦工业场地重金属污染特征具有十分重要的意义. 然而，由于对大量工业场地进行采样调查难度较大，此前关于重金属污染及潜在生态风险评价的研究大多针对个别特定场地[6~9]，缺乏覆盖多行业、大尺度的总体分析和判断. 本研究利用上海近年来推进低效工业场地复垦还耕的契机，选择了 53 个复垦工业场地和 23 个周边河道进行土壤和沉积物采样检测，分析其重金属污染特征及潜在生态风险，以期为此类工业复垦场地管理和治理提供科学依据.

1　材料与方法

1.1　样品采集、处理与测定

考虑到上海复垦工业用地的主要行业类型，在上海郊区选择 53 块典型复垦工业场地，行业类型主要涉及机械加工、金属制品、染料涂料、橡胶塑料、化工医药等，这些研究区域同时兼顾到空间上的代表性. 在每个工业场地上根据行业污染特征，识别选取其生产、存储、废物处置等潜在污染区域，通过梅花布点采取各区域表层土壤(0 ~ 20 cm)混合样，最终再混合形成 500 g 左右代表该场地的土壤样品. 另选取 23 条与这些场地相邻的周边河道，利用彼得逊采泥器采集沉积物样品进行检测分析，以进一步分析工业场地对周边河道沉积物的影响. 在实验室风干样品，拣出枯枝落叶、砖瓦块和垃圾等侵入体，然后将样品碾碎，全部通过 2 mm 尼龙筛并充分混合，再从中多点取样约 5 g，用玛瑙研钵进一步研磨，使之全部通过 0.149 mm 尼龙筛备用. 其中，As、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 含量利用 2100DV 等离子发射光谱仪进行检测，方法为 USEPA6010D-2014；Cd 含量利用电感耦合等离子体质谱仪进行检测，方法为 USEPA 200.8-1994；Hg 含量利用 NIC MA-3000 测汞仪进行检测，方法为 GB/T 17136-1997. 各重金属加标回收率在 84.7% ~ 118.6% 之间，平行样品间的 RSD 均小于 20%.

1.2　内梅罗综合污染指数

本研究选用国内外土壤重金属污染研究广泛应用的内梅罗综合污染指数法[7, 10~13]对复垦工业场地和周边河道沉积物重金属污染程度进行评价.

计算方法如下：

$$P_i = C_s^i / C_n^i \tag{1}$$

$$P = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{n}\sum P_i\right)^2 + P_{i\max}^2}{2}} \tag{2}$$

式中，P_i 表示土壤中某种重金属的单因子污染指数；C_s^i 表示土壤中重金属含量的实测值，$mg \cdot kg^{-1}$；C_n^i 表示土壤中重金属的评价标准，$mg \cdot kg^{-1}$，本研究采用上海市土壤环境背景值作为评价标准[14]；P 表示内梅罗综合污染指数；$P_{i\max}$ 为土壤中各重金属单因子污染指数中最大值.

内梅罗综合污染指数法(P)评价标准为：$P \leqslant 0.7$，安全；$0.7 < P \leqslant 1.0$，警戒线；$1.0 < P \leqslant 2.0$，轻度污染；$2.0 < P \leqslant 3.0$，中度污染；$P > 3.0$，重度污染.

1.3　潜在生态风险评价

评价土壤重金属污染生态风险评估方法很多，本研究参考 Hakanson 潜在生态风险评价法[4,6~9,15~20]等研究，在不考虑 PCB 影响的前提下，将重金属 Ni 纳入评价体系，形成以 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 和 Hg 为研究对象的潜在生态风险评价体系，并调整潜在风险分级标准如表 1 和 2 所示. 相应公式为：

$$RI = \sum_{i=1}^{n} E_r^i \tag{3}$$

$$E_R^i = T_R^i \times c_f^i \tag{4}$$

$$C_f^i = c_{表层}^i / c_n^i \tag{5}$$

式中，RI 为生态风险指数，E_R^i 为单项潜在生态风险系数，C_f^i 为重金属污染物的污染指数，$c_{表层}^i$ 和 c_n^i 分别为土壤中污染物的实测含量($mg \cdot kg^{-1}$)和上海市土壤环境背景值($mg \cdot kg^{-1}$)，T_R^i 为单个污染物的毒性响应参数，如表 1 所示. Hakanson 将 8 种污染物(PCB、Hg、Cd、As、Pb、Cu、Cr 和 Zn)的毒性系

表 1　重金属污染物毒性系数

Table 1　Toxic response factors of heavy metals

元素	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
毒性系数	10	30	2	5	5	5	1	40

数之和(133)加以放大后确定了 RI 第一级阈值，余下各级阈值逐级扩大 2 倍. 本文研究对象较之有所差异，毒性系数之和为 98，经文献比较[21,22]，本文将 RI 第一级阈值设为 110，如表 2 所示.

表 2 土壤重金属的潜在风险分级标准

Table 2 Potential risk level of heavy metals in soil

潜在生态风险	轻度	中度	较强	很强	极强
E_R^i	<40	40 ~ 80	80 ~ 160	160 ~ 320	≥320
RI	<110	110 ~ 220	220 ~ 440	≥440	

2 结果与讨论

2.1 重金属含量分布

由表 3 可知，53 个复垦工业场地土壤点位中，As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 和 Hg 含量的算术平均值均高于上海市土壤环境背景值，分别是其背景值的 1.2、4.4、1.9、15.2、6.5、2.8、6.7 和 2.3 倍. 相较于几何平均值和中位数，8 项重金属的算数平均值明显偏高，表明重金属含量变异性大. 从 23 个河道沉积物点位重金属含量的统计结果分析，重金属含量普遍处于较低的水平，As、Cd、Cr、Ni、Pb 和 Hg 的平均含量均低于其背景值，分别为其背景值的 0.7、0.6、0.4、0.8、0.9 和 1.0 倍.

复垦工业场地土壤和周边河道沉积物中 8 项重金属的污染情况如图 1 所示. 对照《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)可以明显看出，场地土壤中重金属超二级标准比例远远高于河道沉积物. 其中重金属 Cu 和 Zn 的超标情况最严重，超二级标准比例分别达到了 43.40% 和 47.17%，而沉积物中 Cu、Zn 超标率仅为 4.17%，仅一个点位超二级标准，超标含量与标准十分接近. 这一结果表明，场地土壤中重金属含量与河道沉积物含量存在着显著的差异，表层土壤中重金属的含量远远超过沉积物，说明企业生产过程对场地土壤中重金属影响较大，但对周边相邻河道的影响相对较小. 对场地土壤-河道沉积物重金属含量进行相关性分析，结果表明极显著相关($P<0.01$，$r=0.93$).

2.2 土壤重金属污染评价

依据内梅罗综合污染指数(P)法，对复垦工业场地土壤和周边河道沉积物中重金属的综合污染指数进行计算，结果分别如图 2 和表 4 所示.

表 3 场地土壤和周边河道沉积物重金属含量统计/mg·kg^{-1}

Table 3 Heavy metal concentrations in soils and surrounding river sediments/mg·kg^{-1}

重金属元素	样品类型	最大值	最小值	中位数	算术平均值	几何平均值	标准差	背景值	土壤二级标准	土壤三级标准
砷(As)	土壤	44	3.7	8.6	11.1	9.65	7.68	9.1	25.0	40.0
	沉积物	10.3	3.2	5.7	6.01	5.67	2.10			
镉(Cd)	土壤	10.5	0.015	0.079	0.577	0.096	2.02	0.13	0.6	1.0
	沉积物	0.125	0.045	0.08	0.08	0.077	0.02			
铬(Cr)	土壤	2 470	19.6	64.2	139.4	76.7	342.1	75.0	250.0	300.0
	沉积物	70.4	15.2	26.5	30.66	28.05	14.66			
铜(Cu)	土壤	5 600	12.4	73.3	435.4	108.8	1 055.6	28.6	100.0	400.0
	沉积物	176	13.1	32.4	44.02	35.45	35.81			
镍(Ni)	土壤	5 760	10.3	35.2	206.2	48.7	829.1	31.9	60.0	200.0
	沉积物	53.1	14.9	22	24.40	23.08	9.16			
铅(Pb)	土壤	1 010	11.3	35.5	71.2	40.6	143.0	25.5	350.0	500.0
	沉积物	37.7	10.5	23.4	23.17	21.70	8.33			
锌(Zn)	土壤	5 640	49.6	213	579.3	258.8	1 040.9	86.1	300.0	500.0
	沉积物	379	36.9	88.7	108.85	91.03	77.60			
汞(Hg)	土壤	2.41	0.02	0.12	0.23	0.12	0.41	0.1	1.0	1.5
	沉积物	0.4	0.03	0.09	0.10	0.08	0.08			

表 4 内梅罗综合污染指数评价

Table 4 Nemero pollution index results

项目	单因子污染指数平均值								综合污染指数(P)
	砷(As)	镉(Cd)	铬(Cr)	铜(Cu)	镍(Ni)	铅(Pb)	锌(Zn)	汞(Hg)	
土壤	1.22	4.44	1.86	15.22	6.46	2.79	6.82	2.34	11.41
沉积物	0.66	0.62	0.41	1.54	0.76	0.91	1.28	1.02	1.26

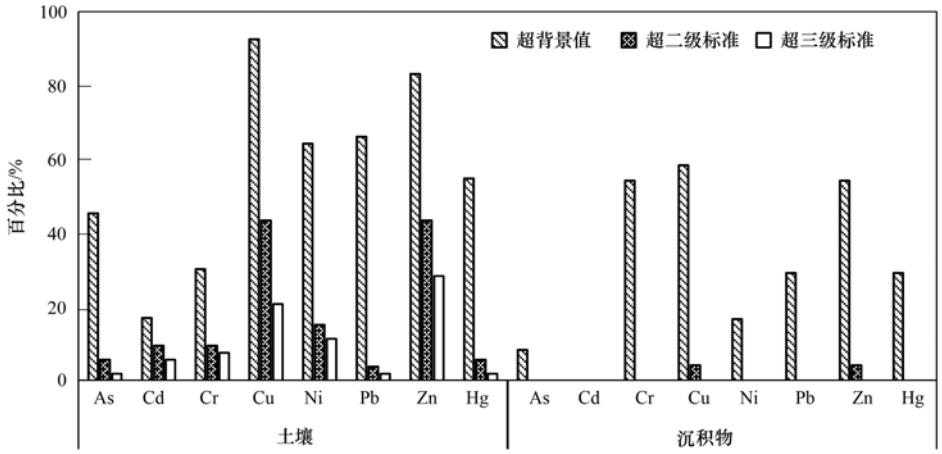

图 1　场地土壤与河道沉积物中重金属点位超标率

Fig. 1　Over-standard rates of heavy metals in soils and surrounding river sediments

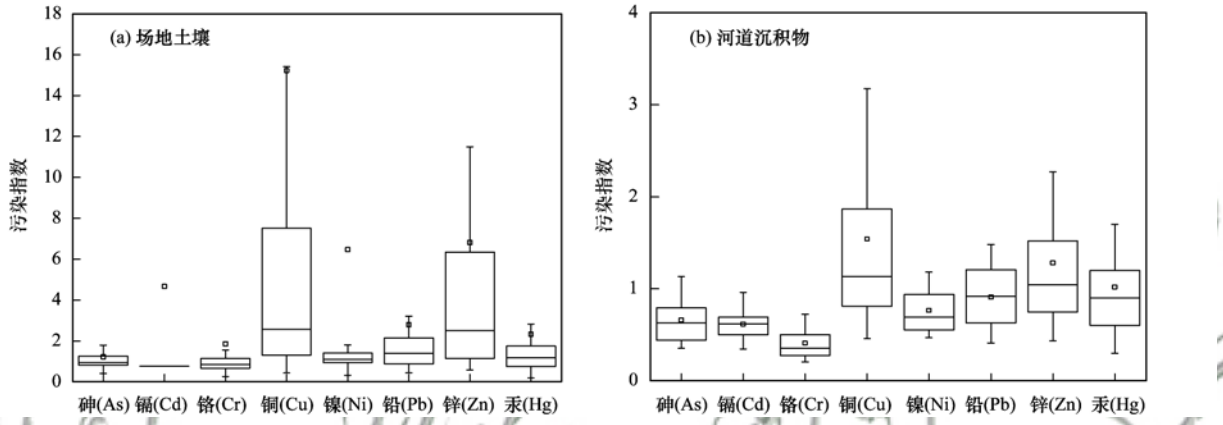

图 2　单因子污染指数分布

Fig. 2　Distribution of the single factor pollution index

从综合污染指数的统计结果来看，场地土壤中金属 Cu 和 Zn 重度污染比重较高，分别达到了 45.28% 和 47.17%，而河道沉积物中大部分点位重金属污染指数保持在警戒线以下，其分布趋势与场地土壤中重金属单因子污染指数情况十分接近. 场地土壤与河道沉积物中，重金属 Cu 的内梅罗指数最高，分别达到了 15.22 与 1.54，其次是金属 Zn，分别为 6.82 和 1.28. 从调查的 8 种重金属分析结果来看，场地土壤和河道底泥中的含量存在着显著的差异，从单因子内梅罗污染指数分析，场地土壤中污染指数达到河道沉积物的 1.9 ~ 46.6 倍.

结合实际调查情况分析，拟复垦地块中分布着大量中小型企业，其中金属制品、机械加工行业占比超过三分之一，而这部分企业由于重金属用量较大、生产环节复杂、管理制度不完善等问题，对周边土壤环境造成了很大的影响，尤其是 Cu、Zn 作为金属加工、机械制造和橡胶等行业的主要原料[23~26]，对场地土壤中重金属含量贡献较大，本研究中 Cu 和 Zn 含量的高值均出现于上述行业企业用地. 土壤和沉积物中重金属含量存在着显著的差异，表明企业生产环节对场地土壤环境影响严重，对周边河道沉积物影响相对较小.

2.3　潜在生态风险评价

根据式(3) ~ (5)，计算出上海场地土壤及河道沉积物中污染分级情况、单项潜在生态风险系数(E_R^i)以及综合潜在生态风险指数(RI)分别如表 5 和 6 所示.

如表 5 所示，通过潜在生态风险指数(RI)对上海市复垦工业场地土壤进行分析，大部分场地土壤处于轻度和中度风险范围，其比例分别为 39.62% 和 28.30%. 对比不同重金属单项潜在生态风险系数(E_R^i)可以发现，除了 Hg 以外，其他重金属基本处在轻度风险等级，其比例保持在 75% 以上；对于 Hg 而言，样点也主要集中在轻度和中度风险等级，比例分别为 45.28% 和 33.96%. 由此可以说明，所选取的53块场地中，大部分土壤重金属含量处于

表 5 各金属风险分级百分比统计/%

Table 5 Percentage of heavy metal risk levels/%

重金属种类	类型	轻度	中度	较强	很强	极强
砷(As)	土壤	96.23	3.77	0.00	0.00	0.00
	沉积物	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
镉(Cd)	土壤	84.91	3.77	1.89	3.77	5.66
	沉积物	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
铬(Cr)	土壤	98.11	1.89	0.00	0.00	0.00
	沉积物	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
铜(Cu)	土壤	77.36	7.55	5.66	1.89	7.55
	沉积物	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
镍(Ni)	土壤	90.57	5.66	0.00	0.00	3.77
	沉积物	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
铅(Pb)	土壤	84.91	9.43	3.77	0.00	1.89
	沉积物	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
锌(Zn)	土壤	90.57	3.77	3.77	1.89	0.00
	沉积物	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
汞(Hg)	土壤	45.28	33.96	11.32	1.89	7.55
	沉积物	56.52	39.13	4.35	0.00	0.00
潜在生态风险指数(RI)	土壤	39.62	28.30	11.32	20.76	
	沉积物	82.61	13.04	4.17	0.00	

表 6 潜在生态风险指数

Table 6 Potential ecological risk results

项目	单项潜在生态风险系数(E_R^i)平均值								潜在生态风险指数(RI)
	砷(As)	镉(Cd)	铬(Cr)	铜(Cu)	镍(Ni)	铅(Pb)	锌(Zn)	汞(Hg)	
土壤	12.21	133.26	3.72	76.12	32.32	27.93	6.82	93.41	385.79
沉积物	6.61	18.46	0.82	7.70	3.82	4.54	1.26	40.70	83.91

轻度风险等级，个别场地存在着重金属含量超标、生态风险等级高的现象. 各河道沉积物潜在生态风险均处于轻度或中度水平，其中轻度占比超过80%. 对比不同重金属 E_R^i 发现，除 Hg 有 39.13% 中度和 4.35% 较强风险外，其余重金属均处于轻度风险水平.

从图 3(a)、表 6 可知，上海复垦工业场地土壤中 Cd 元素对 RI 值的贡献率最大，其次为 Hg 和 Cu，分别占到 34.54%、24.21% 和 19.73%. 其中 Cd 元素 E_R^i 最高，达到了 133.26，处在较强生态风险水平，这一结论与很多土壤潜在生态风险评价的研究相一致[4,6~8,27~29]；Hg 处在较强的生态风险水平，Cu 为中度风险等级，其他重金属元素的单一潜在生态风险都比较低，属于轻度生态风险. 经过研究，场地土壤的平均潜在风险指数(RI)达到 385.79，存在较强的潜在生态风险. 对比相关研究，

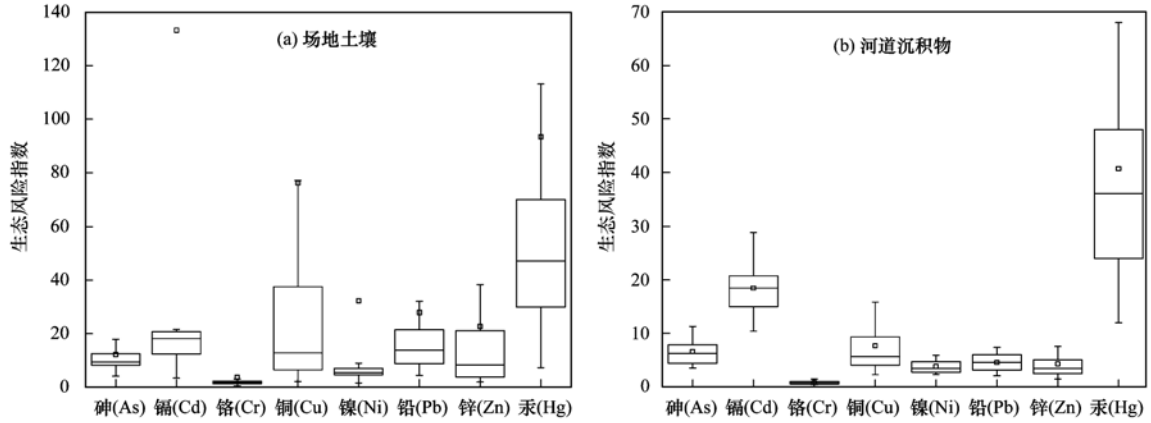

图 3 重金属单项潜在生态风险系数分布

Fig. 3 Distribution of potential ecological risk factors

石家庄-邢台地区汪洋沟沿岸土壤 RI 值在 38.93 ~ 104.43[9]，顺德水道土壤 RI 平均值为 73.20[16]，西安公园土壤中 RI 值在 44.95 ~ 137.84[30]，温州灵昆岛围垦区土壤 RI 值在 347.94 ~ 787.59[31]，河北曹妃甸农田土壤 RI 平均值为 114.49[32]，可以发现上海工业场地土壤潜在风险值处于相对中等的水平，加强相关企业的管控才是有效控制土壤风险的关键. 从图 3(b)、表 6 可知，沉积物单个重金属的 E_R^i 除 Hg 略高于 40 之外，其余均低于 20，属于轻度生态风险. 沉积物的平均潜在风险指数(RI)为 83.91，潜在生态风险低.

本研究表明，各重金属元素的污染程度和生态风险水平不完全一致. 一方面，内梅罗指数主要用于污染评价，是一种兼顾最大值的计权型多因子环境质量指数，更加注重相对背景值含量最高的重金属对土壤环境的影响，而 Hakanson 指数侧重风险评价，引入了反映重金属毒性水平的污染物毒性响应参数. 另一方面，Hakanson 指数中 E_R^i 以最大的重金属毒性系数为一级阈值，又将各重金属毒性系数之和相应扩大后得到 RI 的一级阈值，后逐级扩大得到其分级标准，而内梅罗指数的划分则仅与污染物含量和背景值的比例有关. 因此，在土壤环境的评价中，Hakanson 潜在生态风险指数法与内梅罗综合污染指数评价各具优势，如何将各自的优势结合开展土壤重金属的生态风险评价，值得进一步深入研究.

3　结论

通过对复垦工业场地土壤及河道沉积物中重金属的检测发现，土壤中 Cu 和 Zn 的超标最严重，而沉积物中 Cu 和 Zn 略超标. 结合内梅罗指数对场地土壤及河道沉积物中重金属污染情况进行评价发现，土壤中金属 Cu 和 Zn 重度污染比重较高，河道沉积物中大部分点位重金属污染指数保持在警戒线以下. 土壤中重金属镉(Cd)平均潜在生态风险指数最大，达到了 133.26，表明其是决定上海复垦场地潜在生态风险的主要因素. 全市复垦场地土壤重金属平均潜在生态风险指数(RI)为 385.79，处于较强风险等级；沉积物属于轻度风险水平. 总体而言，工业场地土壤的潜在生态风险较强，个别重金属更为突出，在复垦过程中，必须加强场地调查和风险评估，对于污染严重的场地采取必要的处理处置措施，确保后续利用安全性，尤其避免对农产品安全和人体健康构成威胁，可考虑用作生态造林等用途.

参考文献：

[1] 秦普丰，刘丽，侯红，等. 工业城市不同功能区土壤和蔬菜中重金属污染及其健康风险评价[J]. 生态环境学报，2010，**19**(7)：1668-1674.
Qin P F，Liu L，Hou H，*et al*. The pollution and health risk assessment of heavy metals in soils and vegetables from different function areas in industrial city[J]. Ecology and Environmental Science，2010，**19**(7)：1668-1674.

[2] 严连香，黄标，邵学新，等. 不同工业企业周围土壤-作物系统重金属 Pb、Cd 的空间变异及其迁移规律[J]. 土壤学报，2009，**46**(1)：52-62.
Yan L X，Huang B，Shao X X，*et al*. Spatial variability and transfer of Pb and Cd in soil-crop system around different types of factories[J]. Acta Pedologica Sinica，2009，**46**(1)：52-62.

[3] 曹伟，周生路，王国梁，等. 长江三角洲典型区工业发展影响下土壤重金属空间变异特征[J]. 地理科学，2010，**30**(2)：283-289.
Cao W，Zhou S L，Wang G L，*et al*. Spatial variability characteristics of soil heavy metals due to industry development of typical regions in Changjiang River Delta of China[J]. Scientia Geographica Sinica，2010，**30**(2)：283-289.

[4] 戴彬，吕建树，战金成，等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. 环境科学，2015，**36**(2)：507-515.
Dai B，Lü J S，Zhan J C，*et al*. Assessment of sources，spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong Province，Eastern China[J]. Environmental Science，2015，**36**(2)：507-515.

[5] 陈梦舫. 我国工业污染场地土壤与地下水重金属修复技术综述[J]. 中国科学院院刊，2014，**29**(3)：327-335.
Chen M F. Review on heavy metal remediation technology of soil and groundwater at industrially contaminated site in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences，2014，**29**(3)：327-335.

[6] 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.
Zhang Q，Chen Z J，Peng C S，*et al*. Heavy metals pollution in topsoil from Dagang Industry Area and its ecological risk assessment[J]. Environmental Science，2015，**36**(11)：4232-4240.

[7] 陆泗进，王业耀，何立环. 湖南省某冶炼厂周边农田土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 中国环境监测，2015，**31**(3)：77-83.
Lu S J，Wang Y Y，He L H. Heavy metal pollution and ecological risk assessment of the paddy soils near a smelting area in Hunan Province[J]. Environmental Monitoring in China，2015，**31**(3)：77-83.

[8] 李一蒙，马建华，刘德新，等. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境科学，2015，**36**(3)：1037-1044.
Li Y M，Ma J H，Liu D X，*et al*. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng City，China[J]. Environmental Science，2015，**36**(3)：1037-1044.

[9] 刘晓宇，梁琼，高如泰，等. 长期污灌条件下农田土壤重金

属污染环境风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2015, **31**(4): 572-578.
Liu X Y, Liang Q, Gao R T, *et al*. Environmental risk assessment of soil heavy metal pollution of farmlands with long period of sewage irrigation[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, **31**(4): 572-578.

[10] 高军侠, 党宏斌, 郑敏, 等. 郑州市郊农田土壤重金属污染评价[J]. 中国农学通报, 2013, **29**(21): 116-120.
Gao J X, Dang H B, Zheng M, *et al*. Heavy metal pollution assessment of farmland soil in suburb in Zhengzhou City[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, **29**(21): 116-120.

[11] 方晓波, 史坚, 廖欣峰, 等. 临安市雷竹林土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(6): 1883-1891.
Fang X B, Shi J, Liao X F, *et al*. Heavy metal pollution characteristics and ecological risk analysis for soil in *Phyllostachys praecox* stands of Lin'an[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, **26**(6): 1883-1891.

[12] 祝培甜, 赵中秋, 陈勇, 等. 江苏省某镇土壤重金属污染评价[J]. 环境工程学报, 2017, **11**(4): 2535-2541.
Zhu P T, Zhao Z Q, Chen Y, *et al*. Evaluation of soil heavy metals pollution in a town, Jiangsu Province[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, **11**(4): 2535-2541.

[13] 李致春, 桂和荣, 陈松. 宿州市护城河沉积物重金属污染程度及来源分析[J]. 生态与农村环境学报, 2015, **31**(4): 559-565.
Li Z C, Gui H R, Chen S. Source and degree of heavy metal pollution in the sediment of the moat of Suzhou City, Anhui Province[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, **31**(4): 559-565.

[14] 王云, 汪雅谷, 罗海林, 等. 上海市土壤环境背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.

[15] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.

[16] 蔡怡敏, 陈卫平, 彭驰, 等. 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[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1763-1770.
Cai Y M, Chen W P, Peng C, *et al*. Spatial distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in soils and sediments in Shunde Waterway, Southern China[J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1763-1770.

[17] 樊文华, 白中科, 李慧峰, 等. 复垦土壤重金属污染潜在生态风险评价[J]. 农业工程学报, 2011, **27**(1): 348-354.
Fan W H, Bai Z K, Li H F, *et al*. Potential ecological risk assessment of heavy metals in reclaimed soils[J]. Transactions of the CSAE, 2011, **27**(1): 348-354.

[18] 杨净, 王宁. 夹皮沟金矿开采区土壤重金属污染潜在生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(3): 595-600.
Yang J, Wang N. Assessment of potential ecological risk of heavy metals in soils from Jia-Pi-Gou gold mine area, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(3): 595-600.

[19] 张栋, 郑晓玲, 何鹰, 等. 渤海南部表层沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境污染与防治, 2011, **33**(9): 8-10, 24.
Zhang D, Zheng X L, He Y, *et al*. Pollution and risk assessment of heavy metals in surface sediment of South Bohai[J]. Environmental Pollution and Control, 2011, **33**(9): 8-10, 24.

[20] 张丽旭, 蒋晓山, 赵敏, 等. 长江口海域表层沉积物污染及其潜在生态风险评价[J]. 生态环境, 2007, **16**(2): 389-393.
Zhang L X, Jiang X S, Zhao M, *et al*. Pollution of surface sediments and its assessment of potential ecological risk in the Yangtze Estuary[J]. Ecology and Environment, 2007, **16**(2): 389-393.

[21] 贾英, 方明, 吴友军, 等. 上海河流沉积物重金属的污染特征与潜在生态风险[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(1): 147-153.
Jia Y, Fang M, Wu Y J, *et al*. Pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in river sediments of Shanghai[J]. China Environmental Science, 2013, **33**(1): 147-153.

[22] 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.
Fang M, Wu Y J, Liu H, *et al*. Distribution, sources and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of the Yangtze River Estuary[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(2): 563-569.

[23] 顾睿, 舒艳, 刘一帆, 等. 有色金属冶炼企业建设项目土壤环评分析与展望[J]. 环境影响评价, 2015, **37**(3): 65-69, 76.
Gu R, Shu Y, Liu Y F, *et al*. Problems and prospects of soil environmental impact assessment for nonferrous metal smelting projects[J]. Environmental Impact Assessment, 2015, **37**(3): 65-69, 76.

[24] 曹雪莹, 张莎娜, 谭长银, 等. 中南大型有色金属冶炼厂周边农田土壤重金属污染特征研究[J]. 土壤, 2015, **47**(1): 94-99.
Cao X Y, Zhang S N, Tan C Y, *et al*. Heavy metal contamination characteristics in soils around a nonferrous metal smelter in Central Southern China[J]. Soils, 2015, **47**(1): 94-99.

[25] 陈志宏, 齐琳, 方春平, 等. 有机锌在橡胶中的应用(一)[J]. 橡胶科技市场, 2011, (1): 20-24.
Chen Z H, Qi L, Fang C P, *et al*. Application of organic zinc in rubber compound[J]. China Rubber Science and Technology Market, 2011, (1): 20-24.

[26] 林新花, 陈朝晖, 王迪珍. 三种有机锌盐促进剂对天然橡胶硫化的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2008, **36**(11): 153-156, 161.
Lin X H, Chen Z H, Wang D Z. Effects of three zinc salt accelerators on vulcanization of natural rubber[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2008, **36**(11): 153-156, 161.

[27] 窦智勇, 程建华, 周平, 等. 基于总量及有效态的铜陵矿区农田土壤重金属生态风险评价[J]. 环境污染与防治, 2015, **37**(11): 6-10.
Dou Z Y, Cheng J H, Zhou P, *et al*. Eologocal risk assessment based on total and available content of heavy metals in farmland soil of Tongling Mining Area[J]. Environmental Pollution and Control, 2015, **37**(11): 6-10.

[28] 麻冰涓, 王海邻, 李小超, 等. 河南省武陟县大田土壤重金

属形态分布及潜在生态风险评价[J]. 安全与环境学报, 2015, **15**(4): 363-367.
Ma B J, Wang H L, Li X C, *et al*. Fractional distribution and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soil, Wuzhi, Henan[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, **15**(4): 363-367.

[29] 贾亚琪, 程志飞, 刘品祯, 等. 煤矿区周边农田土壤重金属积累特征及生态风险评价[J]. 土壤通报, 2016, **47**(2): 474-479.
Jia Y Q, Cheng Z F, Liu P Z, *et al*. Accumulation characteristics of heavy metals in agricultural soil around the mining area and ecological risk assessment[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, **47**(2): 474-479.

[30] 贾锐鱼, 朱万勇, 李楠, 等. 西安市公园土壤及灰尘中重金属污染与生态风险评价[J]. 水土保持研究, 2015, **22**(5): 316-320.
Jia R Y, Zhu W Y, Li N, *et al*. Heavy metal contents and ecological risk assessment of soils and dust in urban parks of Xi'an City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, **22**(5): 316-320.

[31] 童敏, 黄民生, 何岩, 等. 温州灵昆岛围垦区土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2015, (2): 75-83.
Tong M, Huang M S, He Y, *et al*. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in reclamation district of Lingkun Island in Wenzhou[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2015, (2): 75-83.

[32] 王岩, 王楠, 王素华, 等. 河北曹妃甸农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 中国环境监测, 2016, **32**(4): 58-62.
Wang Y, Wang N, Wang S H, *et al*. The evaluation of heavy metals pollution and potential ecological risk of farmland in Caofeidian, Hebei[J]. Environmental Monitoring in China, 2016, **32**(4): 58-62.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 39 No. 12

Dec. 15, 2018

CONTENTS

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants ····· QIN Yu, ZHANG Qiang, LI Xin, *et al.* (5289)

Analysis of the Temporal and Spatial Variation of $PM_{2.5}$ in China Based on the LUR Model ····· LIU Bing-jie, PENG Xiao-min, LI Ji-hong (5296)

Physiochemical Properties of the Aerosol Particles and Their Impacts on Secondary Aerosol Formation at the Background Site of the Yangtze River Delta ····· HUANG Dan-dan, ZHOU Min, YU Chuan-guan, *et al.* (5308)

Analysis of Different Particle Sizes, Pollution Characteristics, and Sources of Atmospheric Aerosols During the Spring Dust Period in Beijing ····· YANG Yang, LI Xing-ru, CHEN Xi, *et al.* (5315)

Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn ····· DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, *et al.* (5323)

Source Profiles and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Surface Coating of Aluminum Products in Foshan, China ····· LI Xia, SU Wei-jian, LI Bi-xia, *et al.* (5334)

Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province ····· ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, *et al.* (5344)

Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process ····· WANG Yan-hui, ZHAO Liang, SUN Wen-qiang, *et al.* (5359)

Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Small Catchments ····· WANG Huan-xiao, PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, *et al.* (5365)

Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China ····· LI Wen-chao, LEI Qiu-liang, ZHAI Li-mei, *et al.* (5375)

Dynamics and Runoff Losses of Nitrogen in Paddy Field Surface Water Under Combined Application of Biochar and Slow/Controlled-Release Fertilizer ····· SI Lin-lin, ZHOU Jing-jie, WU Liang-huan, *et al.* (5383)

Indirect Nitrous Oxide Emissions from an Agricultural Headwater Stream During the Rainy Season in the Upper Reach of the Yangtze River ····· TIAN Lin-lin, WANG Zheng, ZHU Bo (5391)

Concentration, Flux, and Emission Factor of N_2O in Rivers with Different Nitrogen Pollution Features ····· WANG Miao, LI Ya-feng, LEI Kun, *et al.* (5400)

Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland ····· PENG Cong, PAN Xiao-dong, JIAO You-jun, *et al.* (5410)

Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and $\delta^{18}O$ in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountains, Chongqing City ····· WU Wei, JIANG Yong-jun, JIA Ya-nan, *et al.* (5418)

Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River ····· LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, *et al.* (5428)

Impact of Maximum Precipitation in 2017 on the Runoff Component of Reclaimed Water-Intaking River ····· LIAO An-ran, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, *et al.* (5440)

Spectral Evolution Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water During the Formation Stage of Thermal Stratification in the Main Reservoir Area of the Zhoucun Reservoir ····· ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, *et al.* (5451)

Pollution Characteristic of Ni in Sediments in the Three Gorges Reservoir ····· ZHANG Wei-jie, YIN Shu-hua, XU Dong-yu, *et al.* (5464)

Migration and Transformation of Mercury at Sediment-Water Interface of the Dahong Lake Reservoir in the Simian Mountains ····· GUO Pan, SUN Tao, YANG Guang, *et al.* (5473)

Effects of Wetland Types on Distribution of Soil Methylmercury Based on the Region of Nanweng River in the Greater Xing'an Mountains ····· ZHOU Xin-quan, LIU Yu-rong, LI Jing, *et al.* (5480)

Simulation of the Migration and Release Characteristics of Organophosphate Esters in Fluctuation Zone Soil of the Three Gorges Reservoir During Flooding ····· YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, *et al.* (5487)

Spatial Distribution of Perfluoroalkyl Acids and Transformation of Their Precursors in River Water Samples and Effluents of Wastewater Treatment Plans in a Typical Tourism City ····· WANG Shi-liang, SUN Jian-shu, YANG Yue-wei, *et al.* (5494)

Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions ····· JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, *et al.* (5503)

Effects of Manganese on the Growth and Fluorescence Induction Kinetics of *Conticribra weissflogii* ····· WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu (5514)

Distribution and Factors Affecting *Cylindrospermopsis raciborskii* in Guangdong Reservoirs ····· LEI Min-ting, PENG Liang, HAN Bo-ping, *et al.* (5523)

Removal of Humic Acid from Water by Magnetic Chitosan-Grafted Polyacrylamide ····· YOU Wen, LIU Hai-cheng, CAO Jia-wei, *et al.* (5532)

Ozone-Biological Activated Carbon for Advanced Removal of Typical Persistent Organic Pollutants from Micro-Polluted Source Water in the Yangtze Delta Region ····· LAN Ya-qiong, LIU Rui, MA Zheng-jie, *et al.* (5541)

Color and Nitrogen Removal from Synthetic Dye Wastewater in an Integrated Hydrolysis/Acidification and Anoxic/Aerobic Process ····· GU Meng-qi, YIN Qi-dong, LIU Ai-ke, *et al.* (5550)

Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a "Heterotrophic Sulfur Autotrophic" Combination Process ··· LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, *et al.* (5558)

Rapid Start-up of a Nitrite-Dependent Methane Anaerobic Oxidation Reaction Under Static Pressure Conditions ····· WANG Yi-nan, HU Zhen, RU Dong-yun, *et al.* (5565)

Optimization of the Flow Distribution Ratio and Mechanism of Nitrogen Removal in a Multi-level AO Coupled Flow Biochemical Process ····· WANG Fan, LI Jun, BIAN De-jun, *et al.* (5572)

High-rate Nitrogen Removal in a Two-stage Partial Nitritation-ANAMMOX Process Under Mainstream Conditions ····· LIU Wen-ru, YANG Dian-hai, SHEN Yao-liang, *et al.* (5580)

Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria ····· GAO Xue-jian, ZHANG Jie, LI Dong, *et al.* (5587)

Optimization of the Mainstream Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Changes of the Microbial Community ····· FU Kun-ming, FU Chao, LI Hui, *et al.* (5596)

Granular Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Sludge During the Recovery Process ····· CHEN Fang-min, GU Cheng-wei, HU Yu-ting, *et al.* (5605)

Characterization of a Newly Isolated Strain *Pseudomonas* sp. N3 for Denitrification at Low Temperature ····· LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, XIAO Lin (5612)

Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk of Soil from Reclaimed Industrial Sites and Surrounding River Sediments ····· WU Jian, WANG Min, ZHANG Hui-peng, *et al.* (5620)

Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals for Different Types of Land Use and Evaluation of Human Health ····· LI Chun-fang, CAO Jian-fei, LÜ Jian-shu, *et al.* (5628)

Soil Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As at a Large-scale Arsenic Slag-contaminated Site ····· LIU Geng, SHI Ying, TIAN Hai-jin, *et al.* (5639)

Relationship Between the Bacterial Abundance and Production with Environmental Factors in a Subtropical Karst Reservoir ····· XIN Sheng-lin, LIANG Yue-ming, PENG Wen-jie, *et al.* (5647)

Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions ····· LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, *et al.* (5657)

Effects of Stimulated Nitrogen Deposition on the Bacterial Community Structure of Semiarid Temperate Grassland ····· LI Zong-ming, SHEN Ju-pei, ZHANG Li-mei, *et al.* (5665)

Effect of Phosphorus Addition on the Abundance of Autotrophic CO_2-Fixation Microorganisms in Rhizospheric Soil from a Phosphorus-Limited Paddy Field ····· BAI Jing, LI Yi-fei, LIU Shou-long, *et al.* (5672)

Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil ····· MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-ling, *et al.* (5680)

Relationship Between the Vegetation Community and Soil Nutrient and Enzyme Activity During the Restoration of Abandoned Land in the Loess Hilly Region ····· QIAO Wen-jing, DAI Yin-yue, ZHANG Wei, *et al.* (5687)

Degradation of Pentachlorophenol by Fulvic Acid in a Municipal Solid Waste Landfill ····· LIU Si-jia, HE Xiao-song, ZHANG Hui, *et al.* (5699)

Effect of CO_2 Doubling and Different Plant Growth Stages on Rice Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Their Stoichiometric Ratios ····· TANG Mei-ling, XIAO Mou-liang, YUAN Hong-zhao, *et al.* (5708)

Assessment of Medical Waste Disposal Technologies Based on the AHP ····· XU Xiao-fang, TAN Quan-yin, LIU Li-li, *et al.* (5717)

Livestock and Poultry Faeces Nitrogen Loading Rate and Its Potential Return to Farmland in China ····· LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian (5723)