

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



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, 龙森, 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 N₂O 间接排放特征 田琳琳, 王正, 朱波 (5391)
不同氮污染特征河流 NO₃⁻ 浓度、释放通量与排放系数 王森, 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 δ¹⁸O 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)
大兴安岭南麓河湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响 周心功, 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类水释放特征 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素分析 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, 曹家玮, 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, 付冀, 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, 方文辉, 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)
某大型神渣场地土壤 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从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)
CO₂ 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)

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*

(山东师范大学地理与环境学院, 济南 250358)

摘要: 采集龙口市北部平原区 5 种土地利用类型表层土壤, 检测 5 种重金属 (Cu、Pb、Zn、Cd 和 As) 的含量. 在初步了解土壤重金属污染状况的基础上, 利用调整评估阈值以后的 Hakanson 潜在生态风险评价模型和修正参数后的健康评估模型, 评价该区由土壤重金属引起的潜在生态风险和对人体健康带来的风险. 结果表明, 本研究中的 5 种重金属含量均超过背景值; Cd 元素的潜在生态风险高而复杂, 在水浇地、果园和裸地中主要为二级风险, 城市工业用地和采矿用地以重度风险为主, As 元素在每种地类中一级和二级风险基本相当, 其余 3 种重金属各地类的轻微风险面积占比都在 70% 以上; 5 种元素的综合生态风险在除裸地外的地类中多为三级风险, 城市工业用地及采矿用地四级风险的面积占比相对较大; 该区 5 种土壤重金属对人体健康存在非致癌和致癌风险, 成人和儿童由 Pb 元素引起的非致癌风险以经口摄入为主要途径, 且致癌重金属 As 对这两类人群的致癌风险的暴露途径亦是经口摄入.

关键词: 土地利用类型; 重金属; 生态风险; 健康风险

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)12-5628-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.201804228

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, YAO Lei, WU Quan-yuan*

(College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Ji'nan 250358, China)

Abstract: Surface soils were collected from five types of land use in the northern plain of Longkou City and the contents of five heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cd, and As) were determined. Based on results from preliminary studies on heavy metal pollution of soil, the potential ecological risks caused by heavy metals in the soil and risks to human health were evaluated using the Hakanson potential ecological risk assessment model after adjusting the evaluation threshold and the health assessment model after modifying parameters. The results show that the contents of five heavy metals in the study area exceed the background value, the potential ecological risk of Cd is high and complex, in irrigated land, orchard land, and bare land it is mostly the second-class risk, and urban industrial land and mining land are dominated by severe risk. The element As is equivalent to the first two levels of each land class; the minor risk areas of the other three types of heavy metals are larger than 70%. The comprehensive ecological risk of the five elements is higher than the three-level risk in the field, except for the bare ground. The area of four-level risk of urban industrial land and mining land is relatively large. The five types of soil heavy metals in this area present noncarcinogenic and carcinogenic risks to human health. The element Pb and heavy metal As, both entering the body by oral intake, pose a noncarcinogenic and carcinogenic risk to adults and children, respectively.

Key words: land use type; heavy metal; ecological risk; health risk

土壤是所有陆地生态系统的基底或基础, 土壤环境受到污染, 其正常功能必然受到影响, 这不但会引起生态系统结构和功能变化, 而且能通过“土壤→植物→人体”或“土壤→水→人体”间接被人体吸收, 威胁人类健康. 重视土壤环境质量, 生态环境安全, 保证人体健康不受威胁是响应国家生态文明建设, 坚持以人为本的重要方面, 土壤重金属污染是土壤环境污染的一种.

不同土地利用类型下同种类土壤的物理性质^[1] (质地、孔隙性、结构性、热性质、耕性) 和化学性质 (吸收性、酸碱性、缓冲性、养分) 有所差异, 土壤水分也会发生变化^[2], 且不同土地利用类型土壤重金属分布^[3] 和积累^[4] 也不相同,

而不同土地利用类型土壤重金属含量存在显著差异^[5]. 土壤重金属含量特征既与土壤物理性质相关又与土壤化学性质相联, 不同土地利用类型造成的土壤性质的差异也可能影响土壤重金属含量特征, 重金属含量超标是引起土壤生态及人体健康风险重要因素. 前人针对农田^[6]、城区^[7]、矿区^[8,9]、工业园区^[10] 周边以及垃圾^[11]

收稿日期: 2018-04-27; 修订日期: 2018-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41371395, 41601549); 山东省煤田地质局委托项目 (鲁勘字[2012]110 号); 黄河三角洲高效生态经济区 (潍坊) 海咸水入侵调查与监控预警系统建设项目 (鲁勘字[2011]14 号)

作者简介: 李春芳 (1989~), 女, 博士研究生, 主要方向为环境遥感与土地信息系统, E-mail: chunfang890720@163.com

* 通信作者, E-mail: wqy6420582@163.com

和污水处理厂周边^[12]等多个地区单一土地利用类型的土壤重金属生态风险与人体健康做了大量研究,近几年有学者对同一地区多种土地利用类型土壤重金属产生的生态与人体健康风险进行探索^[13, 14],但土地类型的多样性和评价方法的普适性均有待进一步改进。

Hakanson 潜在生态风险指数法不仅能够评价水体沉积物的潜在生态风险^[15],很多学者通过改进将其用于土壤重金属潜在生态风险评价^[16],在引入的过程中,并未根据参评重金属的种类和毒性对评价标准进行调整. 重金属健康风险评价方法通常借用美国 EPA 提出的人体健康暴露风险模型^[17],但由于地区差异性,在应用过程中仍需要根据实际人体暴露特征调整模型参数. 基于这两种评价模型的不足,本文根据重金属种类调整潜在生态风险的分级标准完善评价方法,评价重金属潜在生态风险;结合我国环境与居民生活习惯,取环境保护部 2014 年颁布的《污染场地风险评估技术导则》^[18]中人体健康暴露参数,评价研究区由土壤重金属引起的人体健康风险。

近年来,龙口市北部平原区土地利用类型多样,工农业发展迅速,土壤重金属不断积累. 据李春芳等对龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价的研究,该区农田土壤受到一定程度的重金属污染,其中 Cu、Cd 和 Pb 受人为因素影响属重度污染^[19]. 为进一步探索该区土壤重金属污染状况,本研究结合 GIS 技术对龙口市水浇地、果园、城市工业用地、采矿用地和裸地的土壤中

Cu、Pb、Zn、Cd 和 As 这 5 种重金属的生态风险和人体健康风险进行评价,帮助了解该区土壤重金属的污染风险大小,旨在为当地工农业绿色生产和生态文明建设提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区设在山东省龙口市西北部滨海平原区,总面积 409 km²,属于温带季风气候,年平均气温 12℃左右,年平均降雨量 600 mm 左右,土壤 pH 在 6.5~7.5 之间,成土条件基本相同,土壤类型以棕壤为主,其表层有机质及氮、磷、钾含量较高. 矿产资源丰富,2013 年建成了全国唯一的低海拔大型海滨煤炭基地,褐煤总储量 26 亿 t. 龙口市工农业稳定健康发展,农业主要以苹果、葡萄、小麦和玉米为主,区内多采矿、铸造和电镀等工业企业,高新技术产业比重逐年增加。

1.2 样品采集

本文在文献^[19]的基础上进一步深化研究,以龙口市土地利用现状图为基础,根据研究区各土地利用类型所占比例及主要污染源选取采样点,采集 0~20 cm 的表层土壤,共 74 个采样点,其中裸地 1 个,城镇工业用地 11 个,采矿用地 12 个,果园 24 个,水浇地 26 个. 实际采样过程中,以 30 m×30 m 为一个样方,清理土壤表面,用木铲采集对角线上 5 个点的土壤,将土壤中砾石等杂物检出,充分混合这些土壤,用四分法取 500 g 装入干净布袋中,记录采样点位置信息(如图 1)。

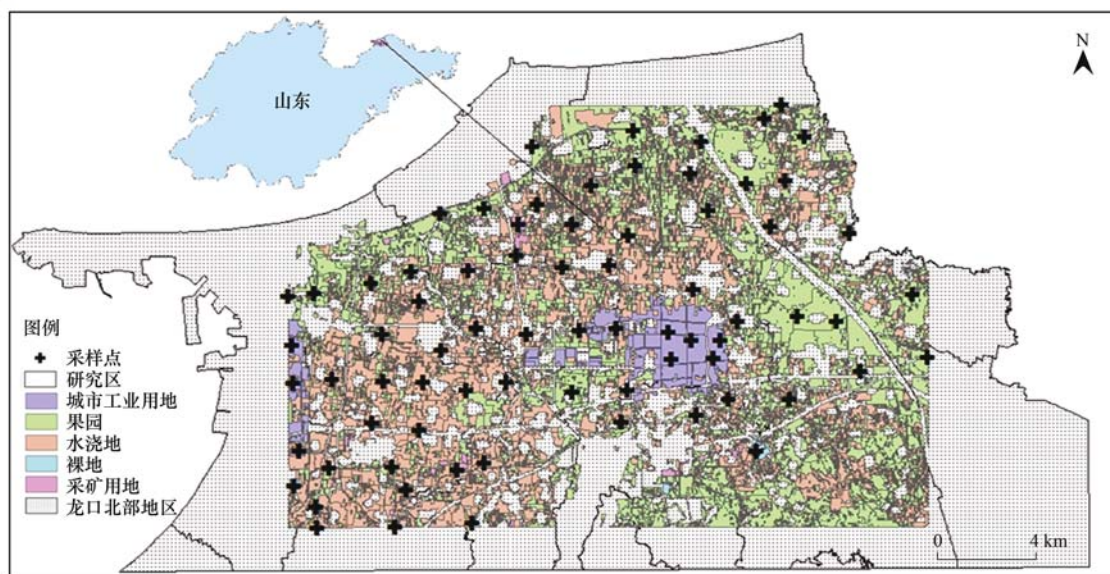


图 1 采样点位置示意

Fig. 1 Sampling point locations

采集的土壤样本在山东省物化探勘察院岩矿测试中心,参照文献[20, 21]方法测试. 首先将土壤过 2 mm 孔径筛,然后继续用玛瑙研钵磨细,使之全部通过 0.074 mm 孔径筛,供元素全量等项目测定. 用石墨炉原子吸收光谱法(GF-AAS)测定 Cd 含量,用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-OES)测定 Cu、Pb、Zn 的含量,氢化物发生-原子荧光光谱法(HG-AFS)测得 As 元素的含量. 最后,根据国家土壤样品标准(GBW7401)检验分析方法的准确度和精密性,结果均符合要求.

1.3 潜在生态评价方法

本研究利用 Hakanson 潜在生态风险评价法,计算每种重金属的单因子潜在生态危害指数 E 和综合潜在生态危害指数 RI,计算公式如下:

$$E_i^j = T_i \times P_i^j = T_i \times \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

$$RI_j = \sum_{i=1}^n E_i^j \quad (2)$$

式中, E_i^j 为 j 采样点 i 污染因子潜在生态风险指数, T_i 为 i 重金属的毒性响应系数,是反映重金属毒性水平和生物对其污染的敏感程度,此处选用陆泗进等^[22]研究所取的值(表 1); 本研究中 P_i^j 为 j 采样点处 i 污染因子污染指数, C_i 为该污染因子的实测含量, S_i 为该污染因子的背景标准值,本研究中继

续使用代杰瑞等^[23]调查研究的土壤环境背景值(表 1). RI_j 为采样点 j 处的综合生态风险指数.

表 1 重金属毒性响应系数及土壤环境背景值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

重金属元素	Cu	Pb	Zn	Cd	As
背景值	24.5	27.2	60.4	0.12	6.3
毒性响应系数	5	5	1	30	10

考虑到 Hakanson 潜在生态风险评价结果的精度和普适性,本研究中根据重金属的毒性和种类调整土壤重金属生态风险分级标准. 具体方法如下.

(1) 计算单位毒性系数分级值

$$RI = \frac{l_1}{TC} \quad (3)$$

(2) 计算第一级界限值

$$L_1 = \sum_{i=1}^5 TC \times RI \quad (4)$$

式中, RI 为单位毒性系数分级值, l_1 为 Hakanson 第一级分级界限值, TC 为 Hakanson 模型中 8 种污染物的毒性系数总值, L_1 为调整后的第一级界限值. 然后根据第一级界限值计算剩下的每一级界限值^[24,25],重新划分土壤重金属潜在生态风险的分级标准(表 2).

表 2 改进后的土壤重金属生态风险评价分级标准

Table 2 Improved classification standard for ecological risk assessment of heavy metals in soil

生态风险级别	1 级(轻微)	2 级(中等)	3 级(重度)	4 级(强烈)	5 级(极强)
E_i	< 30	30 ~ 60	60 ~ 120	120 ~ 240	≥ 240
RI_j	< 60	60 ~ 120	120 ~ 240	240 ~ 480	≥ 480

1.4 人体健康风险评价方法

本研究根据 USEPA 提出的健康风险评价模型结合我国人体健康的实际情况,参照文献[26, 27],对研究区土壤重金属进行人体健康致癌风险与非致癌风险进行评价. 选取经口摄入、口鼻吸入和皮肤接触这 3 种土壤重金属暴露途径,分别对成人和儿童做出评价.

首先,致癌和非致癌健康风险模型分别为:

$$TCR = \sum_{i=1}^3 CR_i = \sum_{i,j=1}^3 EDI_{ij} \times SF_{ij} \quad (5)$$

$$HI = \sum_{i=1}^3 HQ_i = \sum_{i,j=1}^3 \frac{EDI_{ij}}{RfD_{ij}} \quad (6)$$

式中, TCR 表示 3 种暴露途径下土壤重金属的总致癌风险指数; CR_i 为重金属 i 的单因子致癌健康风

险指数; EDI_{ij} 表示 j 暴露途径下重金属 i 的日均暴露量; SF_{ij} 暴露途径下重金属 i 的致癌风险斜率系数(表 3); HI 为 5 种重金属的总非致癌风险指数; HQ_i 表示重金属 i 的单项非致癌健康风险指数; RfD_{ij} 表示暴露途径为 j 时重金属 i 的参考剂量(表 3).

其次,成人和儿童由经口摄入、口鼻吸入和皮肤接触这 3 种暴露途径的暴露量计算公式分别如下.

(1) 经口摄入暴露量

$$\text{成人: } EDI = \frac{C \times CF \times EF \times IR_g \times ED}{AT \times BW} \quad (7)$$

$$\text{儿童: } EDI = \frac{C \times CF \times EF}{AT} \times$$

$$\frac{IR_{gA} \times ED_A}{BW_A} + \frac{IR_{gC} \times ED_C}{BW_C} \cdot \frac{\ddot{O}}{\ddot{O}} \quad (8)$$

表3 不同暴露途径土壤重金属健康风险评价 RfD 和 SF

Table 3 Health risk assessment of heavy metals with different exposures (RfD and SF)

暴露途径	重金属	Cu	Pb	Zn	Cd	As
经口摄入	RfD	0.038	3.5×10^{-3}	0.3	0.001	0.3×10^{-3}
	SF	—	—	—	0.38	1.5
口鼻吸入	RfD	0.038	0.525×10^{-3}	0.3	0.001	0.3×10^{-3}
	SF	—	—	—	0.38	3.66
皮肤接触	RfD	0.012	0.352×10^{-3}	0.3	0.001	0.3×10^{-3}
	SF	—	—	—	6.1	1.5

(2) 口鼻吸入

$$\text{成人:EDI} = \frac{C \times CF \times EF \times FSPO \times PLAF \times PM_{10} \times IRh \times ED}{AT \times BW} \quad (9)$$

$$\text{儿童:EDI} = \frac{C \times CF \times EF \times FSPO \times PIAF \times PM_{10}}{AT} \times \left(\frac{IRh_A \times ED_A}{BW_C} + \frac{IRh_C \times ED_C}{BW_C} \right) \quad (10)$$

(3) 皮肤接触

$$\text{成人:EDI} = \frac{C \times CF \times EF \times AF \times ABS \times SA \times ED}{AT \times BW} \quad (11)$$

$$\text{儿童:EDI} = \frac{C \times CF \times EF \times AF \times ABS}{AT} \times \left(\frac{SA_A \times ED_A}{BW_A} + \frac{SA_C \times ED_C}{BW_C} \right) \quad (12)$$

式中, C 为表层土壤重金属含量, $mg \cdot kg^{-1}$; IRg 为摄取土壤速率, $mg \cdot d^{-1}$; IRh 为呼吸摄入量, $m^3 \cdot d^{-1}$; CF 为转换系数; EF 为暴露频率, $d \cdot a^{-1}$; ED 为暴露年限, a ; BW 为成年人体重, kg ; AT 为平均作用时间, d ; PM_{10} 为空气中可吸入颗粒物含量, $mg \cdot m^{-3}$; $FSPO$ 为空气中来自土壤颗粒物的比例; $PIAF$ 为吸入土壤颗粒物在体内滞留的比例; SA 为暴露皮肤表面积, cm^2 ; AF 为土壤对皮肤的吸附系数, $mg \cdot (cm^2 \cdot d)^{-1}$; ABS 为皮肤吸收因子; 下标 A 表示成人的限度值, 下标 C 表示儿童的^[28,29]. 土壤重金属健康风险计算过程中取值如表 4.

表4 土壤重金属健康风险参数

Table 4 Health risk parameters for heavy metals in soil

暴露途径	参数	EF	ED	BW	AT 致癌	AT 非致癌	IRg	FSPO	PIAF	PM ₁₀	IRh	SA	AF	ABS
经口摄入	成人	365	30	70	365 × 70	365 × 30	100							
	儿童	365	10	16	365 × 70	365 × 10	200							
口鼻吸入	成人	365	30	70	365 × 70	365 × 30		0.5	0.75	0.3	15			
	儿童	365	10	16	365 × 70	365 × 10		0.5	0.75	0.3	7.5			
皮肤接触	成人	365	30	70	365 × 70	365 × 30						4 350	0.2	0.001
	儿童	365	10	16	365 × 70	365 × 10						1 600	0.2	0.001

1.5 风险可视化与统计方法

本研究将计算得到的土壤重金属潜在生态风险通过普通克里金插值方法进行空间插值, 借助 ArcGIS 10.2 实现风险的可视化表达, 结合研究区土地利用现状图, 统计并计算每种土地利用类型中土壤重金属潜在生态风险所占比例.

2 结果与分析

2.1 重金属含量统计分析与空间变异拟合

对研究区 74 个采样点 5 种重金属进行描述性统计(表 5), 可以看出每一种重金属元素含量的均

值都大于其背景值, 说明这些元素在此处富集比较严重, 该区生态系统和人体健康可能存风险. 5 种重金属的超标率均在 90% 以上, 按超标率由大到小依次为 $Cu > Zn > Cd = As > Pb$, Cu 的超标率达到了 100%, 超标情况最为明显, 这与文献[19]相同. Cu 和 Zn 在农田中受人类活动影响明显, 而此次研究在水浇地和果园的采样点占 68.91%, 进一步验证了前人的研究.

根据地统计理论, 变异系数的无量纲化能更好地反映重金属含量的波动情况, 变异系数越大, 重金属元素变异程度越高, 重金属含量空间分布越不

表 5 壤重金属描述性统计

Table 5 Statistics of heavy metals in soil

重金属	最小值 /mg·kg ⁻¹	最大值 /mg·kg ⁻¹	中值 /mg·kg ⁻¹	均值 /mg·kg ⁻¹	背景值 /mg·kg ⁻¹	超标率 /%	变异系数 /%	P 值 (K-S 检验)
Cu	24.79	68.64	30.10	35.30	24.5	100	72.31	0.01
Pb	24.96	63.92	32.29	35.08	27.2	93.20	55.42	0.00
Zn	47.66	151.27	70.23	77.89	60.4	95.90	38.50	0.01
Cd	0.049	1.07	0.16	0.20	0.12	94.70	32.82	0.72
As	3.635	13.96	7.46	7.96	6.30	94.70	26.73	0.32

均匀. 表 5 中, Cu 的变异系数最大, 其含量的空间分布最离散, As 的变异系数最小, 空间分布就比较均匀. 经 SPSS 20.0 软件对 5 种重金属元素做正态分布检验, 结果显示 Cu、Pb、Zn 这 3 种重金属含量符合正态分布, Cd 和 As 元素含量经对数变换后符合正态分布, 符合变异拟合以及空间差值要求.

2.2 潜在生态风险评价

2.2.1 单因子潜在生态风险评价

本研究根据前文改进的 Hakanson 潜在生态风险评价分级标准, 评价 5 种重金属单因子潜在生态风险, 对每个采样点的生态风险等级进行对数变换, 使得 74 个采样点的生态风险等级符合正态分布, 利用普通克里金插值方法实现评价结果的分级展现, 如图 2. 从生态风险等级上, 研究区内除 Cd

有 4 级生态风险外, 其余 4 种重金属的生态风险均在中等风险和轻微风险这 2 种水平下. 从空间分布上, 4 种重金属中, Zn 的生态风险除研究区北部小片区域是中等风险之外其余全部为轻微风险, 重金属 Cu 的中等风险水平也是在该区北部地区, 其余地区也是轻微风险; 而 Pb 的中等风险分布比较分散, 主要分布在研究区周边的东部和西部, 轻微风险分布在中部和北部地区; 相对来说, As 元素中等风险的分布比较广, 整个东部和西北部地区几乎都是中等风险, 只有北部和西南小片区域是轻微风险. 对于潜在生态风险等级最多的 Cd 元素, 中部偏东的地区和西北地区污染等级都在重度风险和强烈风险水平, 形成片状高风险区, 其余地区为中等生态风险, 基本没有轻微风险地区.

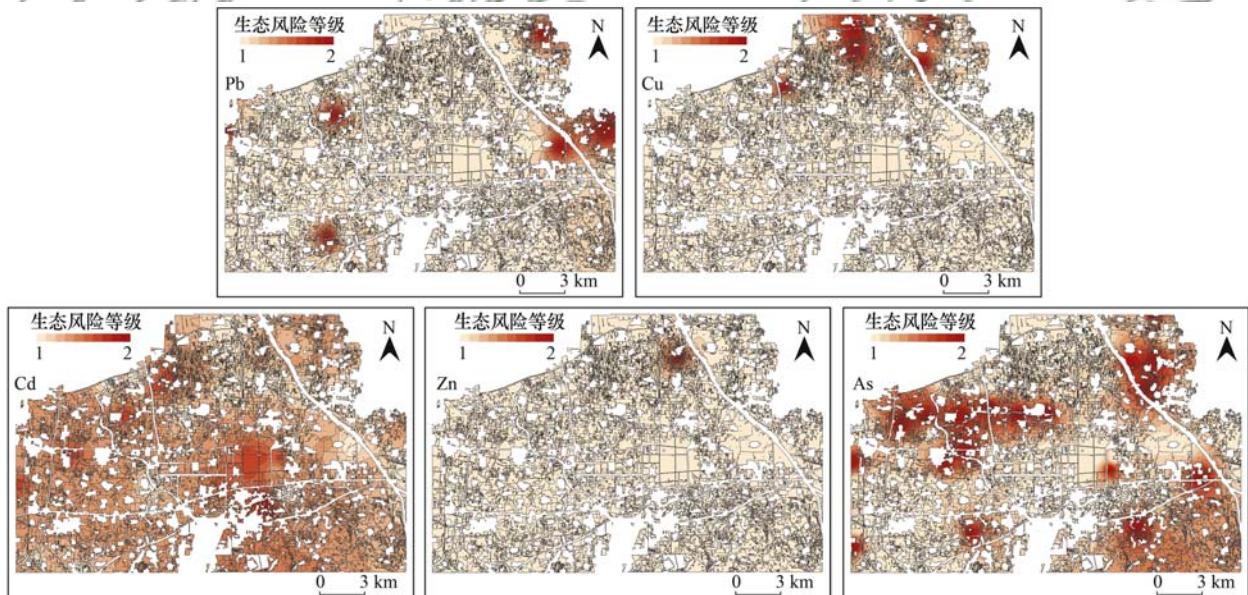


图 2 5 种重金属潜在生态风险评价

Fig. 2 Evaluation of the potential ecological risk of five types of heavy metals

为研究不同土地利用类型土壤重金属生态风险, 本研究借助 ArcGIS 10.2 按土地利用类型对每种重金属元素的风险插值图进行提取分析, 图 3 为潜在生态风险等级最多的 Cd 元素的提取结果, 并统计各土地利用类型各风险等级的面积, 计算不同

风险等级每种土地利用类型面积的百分比, 如表 6, 进一步量化潜在生态风险.

由表 6 可以看出, 5 种重金属除 Cd 外其余 4 种元素潜在生态风险等级大部分都是一级, 地类面积占比按从大到小的顺序依次如下. 水浇地: Cu

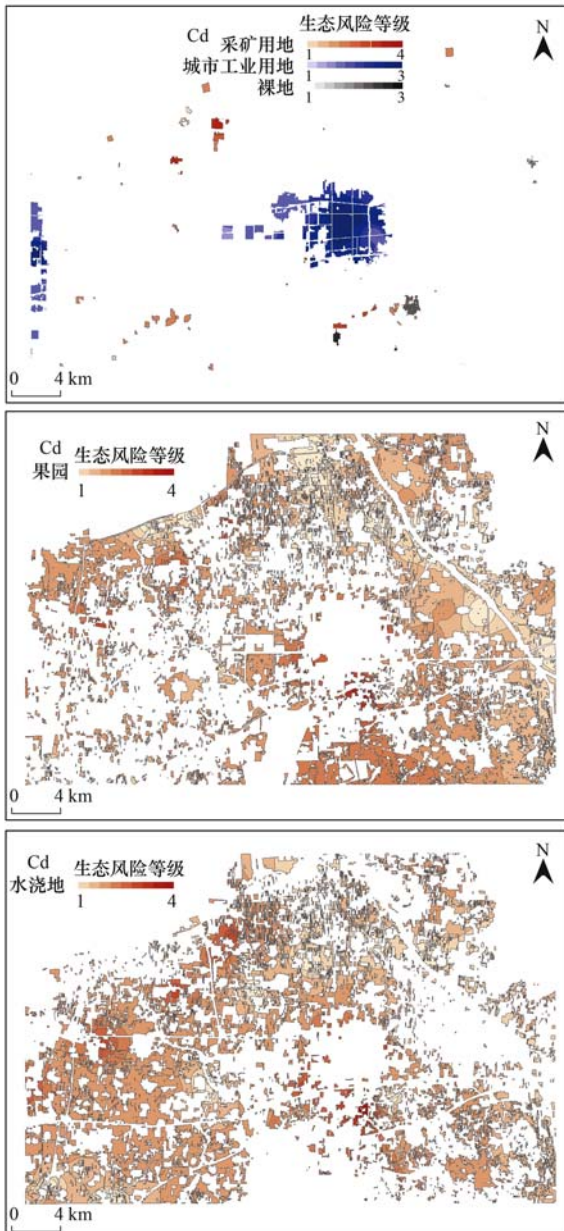


图3 各土地利用类型 Cd 元素潜在生态风险等级

Fig. 3 Potential ecological risk levels of Cd in various land use types

(98.62%) > Zn (97.55%) > Pb (96.45%) > As (34.62%), 果园: Zn (95.73%) > Cu (95.68%) > Pb (92.48%) > As (49.84%), 城市工业用地: Cu (100%) = Zn (100%) > Pb (98.53%) > As (60.35%), 采矿用地: Zn (100%) > Cu (84.09%) > Pb (72.44%) > As (59.19%), 裸地: Cu (99.79%) > Zn (98.07%) > Pb (89.89%) > As (34.88%). 由于这 4 种重金属只有一级和二级两个潜在生态风险等级, 二级风险中 5 种地类的面积占比顺序与一级风险的恰好相反. 而对于污染程度较严重的 Cd 元素来说, 水浇地、果园和裸地多数

为二级中等风险, 城市工业用地和采矿用地多数处于三级重度风险等级, 且采矿用地在四级强烈风险等级中面积占比为 30.52%, 潜在生态风险水平较高, 裸地主要在三级风险以下, 生态风险程度相对较低.

2.2.2 综合潜在生态风险评价

5 种重金属协同作用下产生的污染风险用综合潜在生态风险指数表达, 反映研究区总体生态风险等级. 如图 4 所示, 研究区总体生态风险水平基本都在二级中等风险等级以上, 三级重度风险等级主要分布在中部以及东南部和西北部成对角线带状分布, 低风险区零星分布在研究区北部、东北和西南等地区.

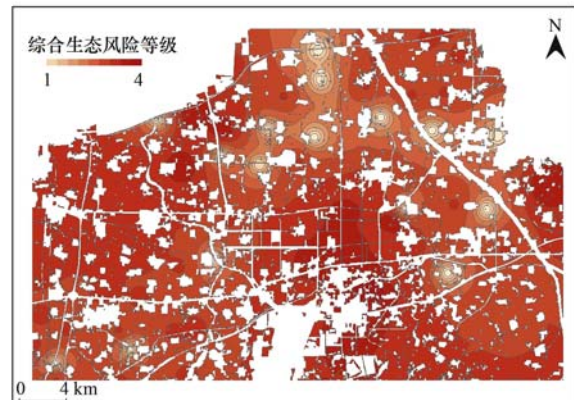


图4 综合潜在生态风险评价

Fig. 4 Comprehensive potential ecological risk assessment

从土地利用类型来看, 每种地类一级轻微风险的面积百分比都在 10% 以下(表 7), 尤其是城市工业用地轻微风险等级的面积占比只有 0.01%, 水浇地和裸地的风险程度并未达到四级强烈水平. 除裸地外, 其他 4 种地类土壤重金属潜在综合生态风险大部分都在三级重度水平上(图 5), 按面积占比大小排列: 水浇地 (80.53%) > 果园 (70.89%) > 采矿用地 (61.34%) > 城市工业用地 (54.17%). 而裸地土壤重金属的综合生态风险大多处于二级中等水平, 果园虽然存在强烈风险等级, 但面积占比很少, 只有 6.97%. 城市工业用地和采矿用地的土壤重金属综合潜在生态四级强烈风险的面积占比分别为 38.85% 和 34.52%, 说明这两种土地利用类型的污染状况相对比较严重.

2.3 人体健康风险评价

重金属非致癌健康风险在 3 种暴露途径下的单项风险指数 HQ 和非致癌综合健康风险指数的阈值均为 1; 若 $HQ < 1$, 则说明该重金属在此暴露途径下对人体健康的影响不显著, 反之则对人体健康存

表 6 5 种土地利用类型土壤重金属单因子潜在生态风险等级面积及占比

Table 6 Single-factor potential ecological risk grade area and ratio for soil heavy metals of five land use types

重金属	地类	一级		二级		三级		四级	
		面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%
Cu	水浇地	113.75	98.62	1.59	1.38	—	—	—	—
	果园	117.60	95.68	5.30	4.32	—	—	—	—
	城市工业用地	14.77	100.00	—	—	—	—	—	—
	采矿用地	1.94	84.09	0.37	15.91	—	—	—	—
	裸地	0.92	99.79	0.002	0.21	—	—	—	—
Pb	水浇地	111.27	96.45	4.08	3.55	—	—	—	—
	果园	113.66	92.48	9.24	7.52	—	—	—	—
	城市工业用地	14.55	98.53	0.22	1.47	—	—	—	—
	采矿用地	1.67	72.44	0.63	27.56	—	—	—	—
	裸地	0.83	89.89	0.09	10.10	—	—	—	—
Zn	水浇地	112.53	97.55	2.82	2.45	—	—	—	—
	果园	117.66	95.73	5.24	4.27	—	—	—	—
	城市工业用地	14.77	100.00	—	—	—	—	—	—
	采矿用地	2.31	100.00	—	—	—	—	—	—
	裸地	0.91	98.07	0.02	1.93	—	—	—	—
Cd	水浇地	16.56	14.35	84.81	84.81	13.72	11.89	0.26	0.23
	果园	25.49	20.72	81.62	66.35	15.36	12.49	0.53	0.43
	城市工业用地	0.37	37.15	4.09	27.25	7.31	49.51	2.98	20.20
	采矿用地	0.06	2.49	0.15	6.42	1.40	60.56	0.70	30.52
	裸地	0.14	14.67	0.78	85.32	4.72E-05	0.51	—	—
As	水浇地	39.94	34.62	75.41	65.38	—	—	—	—
	果园	61.26	49.84	61.64	50.16	—	—	—	—
	城市工业用地	8.91	60.35	5.85	39.65	—	—	—	—
	采矿用地	1.36	59.19	0.94	40.81	—	—	—	—
	裸地	0.32	34.88	0.60	65.11	—	—	—	—

表 7 5 种土地利用类型土壤重金属综合潜在生态风险等级面积及占比

Table 7 Comprehensive potential ecological risk level area and ratio for soil heavy metals for five types of land use

地类	一级		二级		三级		四级	
	面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%
水浇地	1.16	1.00	21.30	18.47	92.89	80.53	—	—
果园	1.94	1.57	25.27	20.56	87.13	70.89	8.57	6.97
城市工业用地	0.0028	0.01	1.03	6.95	8.00	54.17	5.74	38.85
采矿用地	0.056	2.41	0.040	1.72	1.42	61.34	0.80	34.52
裸地	0.05	5.53	0.59	64.61	0.28	29.85	—	—

在显著影响;若 $HI < 1$, 重金属在该区对人体非致癌健康没有影响或者影响不显著;但若 $HQ < 1$ 而 $HI > 1$, 尽管重金属单一非致癌风险不显著, 但综合非致癌风险对人体健康具有一定的影响. 因此, 根据前文健康风险评价模型和参数计算研究区不同暴露途径下成人和儿童的人体健康风险, 结果如表 8 所示.

表 8 中, 成人只有 Pb 元素的非致癌健康风险指数 $HI > 1$, 其中经口摄入的单项非致癌风险指数 HQ 为 1.07 也大于 1, 因此经口摄入是 Pb 主要成人非致癌风险暴露途径. 而 3 种非致癌暴露途径下成

人其余 4 种重金属的单项健康风险指数 HQ 均小于 1, 说明非致癌重金属 Cu、Zn、Cd 和 As 对成人健康的影响并不显著. 非致癌重金属对儿童的综合健康风险指数为 3.95, 其中 Cu 和 Pb 的单项非致癌风险指数分别为 1.19 和 1.48, 说明非致癌重金属对儿童的暴露风险主要是由这两种重金属造成的. 重金属 Zn、Cd 和 As 对儿童的非致癌健康暴露风险指数都小于 1, 对儿童的健康影响较小. 儿童在经口摄入途径下重金属 Cu 的单项风险指数达到了 1.16 贡献率为 97.5%, 重金属 Pb 的单项风险指数为 1.25 贡献率 84.46%, 可以看出经口摄入不仅是成

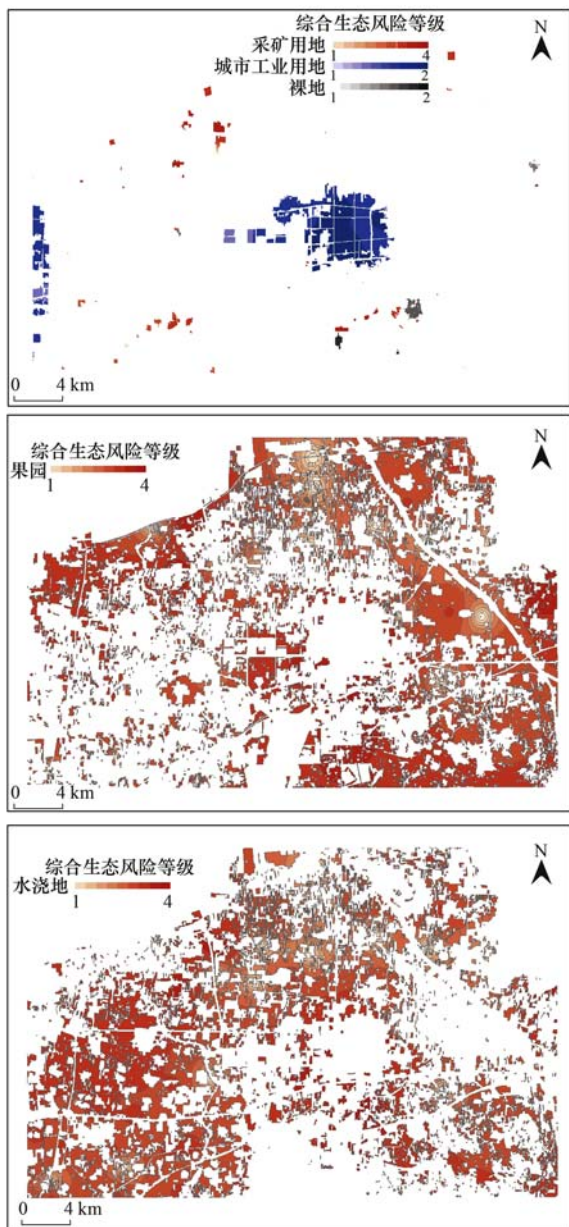


图 5 各土地利用类型综合潜在生态风险等级

Fig. 5 Comprehensive potential ecological risk grade for each land use type

人非致癌风险的暴露途径更是儿童非致癌健康风险的暴露途径. 比较成人和儿童的非致癌综合健康风险指数, 后者是前者的两倍, 根据前人的研究结果^[30], 一方面是由于儿童体重比成年人轻, 另一方面是因为儿童经口摄入重金属的频率高于成人, 说明在同一生活环境中, 儿童受重金属非致癌健康风险的影响较大.

根据美国 EPA 提出的土壤治理基准 1×10^{-6} , 即每百万人中有一个癌症患者是由重金属污染导致, 若风险值小于该基准, 则重金属污染可以接受; 另外, 有关专家的研究发现^[31], 致癌风险大于 1×10^{-4} 的上限, 则认为该区致癌重金属对人体健康的影响较大. 成人和儿童的两种重金属总致癌健康风险分别为 $1.34E-03$ 和 $2.84E-03$, 大于风险上限, 且重金属 As 的贡献率都在 99% 以上, Cd 的致癌风险低于上限, 总风险的贡献率小于 1%. 成人不同致癌风险暴露途径按暴露量的大小排序为: 经口摄入 > 皮肤接触 > 口鼻吸入, 而儿童为: 经口摄入 > 口鼻吸入 > 皮肤接触. 因此, 致癌重金属 As 对人体健康的影响应引起重视.

3 讨论

经评价结果与分析可知, 不同土地利用类型土壤重金属引发的环境潜在生态风险不同. 单因子生态风险中 Cd 与其它 4 种重金属的风险等级数数目不同, 且这 4 种重金属各自产生的生态风险空间分布也不相同. 同一种重金属的同一生态风险等级在不同土地利用类型下的面积占比也存在差异. 因此, 本文针对不同土地利用类型土壤重金属所做的生态风险评价对土壤环境保护和土壤生态修复具有一定的指导意义.

生态与人体健康风险是评价由土壤重金属引起

表 8 不同暴露条件下成人和儿童健康风险评价

Table 8 Assessment of the health risks for adults and children under different exposure conditions

项目	经口摄入		口鼻吸入		皮肤接触		总风险		
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	
非致癌	Cu	$9.89E-02$	1.16	$5.31E-03$	$2.76E-02$	$8.64E-02$	$3.98E-03$	$1.91E-01$	1.19
	Pb	1.07	1.25	$1.21E-01$	$9.34E-01$	$9.26E-03$	$4.27E-02$	1.19	1.48
	Zn	$2.76E-02$	$3.25E-01$	$4.69E-04$	$2.43E-03$	$2.42E-02$	$1.11E-03$	$5.22E-02$	$3.29E-01$
	Cd	$2.08E-02$	$2.45E-01$	$3.54E-04$	$1.84E-03$	$1.82E-02$	$8.4E-04$	$3.94E-02$	$2.48E-01$
	As	$2.82E-01$	$3.32E-01$	$4.79E-02$	$2.49E-01$	$2.47E-01$	$1.14E-02$	$5.75E-01$	$6.95E-01$
	5 种重金属总非致癌健康风险 HI							2.04	3.95
致癌	As	$1.27E-03$	$1.49E-03$	$5.26E-05$	$2.73E-04$	$1.11E-05$	$5.12E-05$	$1.34E-03$	$2.83E-03$
	Cd	$7.92E-06$	$9.32E-05$	$1.34E-07$	$6.97E-07$	$1.12E-06$	$5.38E-06$	$9.17E-06$	$9.90E-05$
	3 种重金属总致癌健康风险 TCR							$1.34E-03$	$2.84E-03$

的环境污染的两种有效方法. 本研究分别针对不同土地利用类型评价土壤重金属生态风险, 针对不同暴露条件评价人体健康风险, 评价结果存在差别.

首先, 高生态风险的重金属对人体健康并无影响, 以 Cd 最具代表性. 单因子潜在生态风险评价显示, 5 种重金属中只有 Cd 生态风险达到了四级水平, 且高风险在全区均有分布, 其 $HI < 1$, 未导致非致癌暴露风险, 且致癌风险也低于上限, 所以 Cd 不存在人体健康风险.

其次, 潜在生态风险较高且分布集中的重金属仅对儿童存在非致癌健康风险, 重金属 Cu 最为典型. Cu 在研究区北部的高生态风险等级较集中, 但在进行人体健康风险评价时, 成人的非致癌健康暴露风险不显著, 且儿童在经口摄入途径下的暴露风险远高于成人.

最后, 虽然单一重金属非致癌风险的显著性不高, 但 5 种重金属的综合人体非致癌风险显著. 因此, 重金属种类和数量在环境中对人体健康具有累积影响.

同时, 两种污染评价结果以不同方式呈现. 潜在生态风险借助 GIS 空间统计与分析在反映全区生态风险污染状况的同时, 定量地展示不同种类重金属、不同土地利用类型土壤在不同生态风险的面积和面积占比. 而人体健康风险是非致癌及致癌重金属对人体暴露的风险的定量化表达, 并能进一步反映不同人群不同暴露途径下的人体健康风险, 但不能分地类定量展示风险的面积和面积占比.

4 结论

(1) 研究区 5 种土壤重金属 Cu、Pb、Zn、Cd 和 As 的含量均超过该区背景值, 且超标率都在 90% 以上, 其中 Cu 全部超标.

(2) Cd 元素对土壤生态环境的影响最严重, 城市工业用地和采矿用地的生态风险尤其高, 基本在强烈和重度水平, 其它地类多为二级风险. 而 Pb、Zn、Cd 和 As 这 4 种元素的潜在生态风险都在二级水平以下.

(3) 研究区土壤重金属综合潜在生态风险以三级重度污染为主, 除裸地之外, 其他 4 种地类综合潜在生态风险重度污染的面积占比均在 50% 以上, 城市工业用地和采矿用地具有显著的土壤重金属潜在生态风险, 应引起重视.

(4) 该区综合人体非致癌风险在成人和儿童两个群体中影响都比较显著, 其中 Pb 对成人的非致

癌风险贡献最大, Cu 和 Pb 对儿童非致癌风险影响均较大, 经口摄入是两个群体主要的暴露途径. 致癌重金属 As 对成人和儿童均有一定的致癌风险, 经口摄入仍是最主要的暴露途径.

参考文献:

- [1] 梁博, 聂晓刚, 杨东升, 等. 西藏尼洋河流域下游 5 种典型土地利用方式土壤物理性质差异分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 119-128.
Liang B, Nie X G, Yang D S, et al. Differences in soil physical properties of 5 typical land use types in downstream of the Niyang River in Tibet[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2018, 46(1): 119-128.
- [2] 邵臻, 张富, 陈瑾, 等. 陇中黄土丘陵沟壑区不同土地利用下土壤水分变化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(12): 129-135.
Shao Z, Zhang F, Chen J, et al. Soil moisture changes for different land use types in Loess Plateau gully and hilly region of central Gansu [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(12): 129-135.
- [3] 商靖敏, 罗维, 吴光红, 等. 洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素[J]. 环境科学, 2015, 36(1): 301-308.
Shang J M, Luo W, Wu G H, et al. Spatial distribution of Se in soils from different land use types and its influencing factors within the Yanghe watershed, China [J]. Environmental Science, 2015, 36(1): 301-308.
- [4] 郑袁明, 陈同斌, 陈煌, 等. 北京市不同土地利用方式下土壤铅的积累[J]. 地理学报, 2005, 60(5): 791-797.
Zheng Y M, Chen T B, Chen H, et al. Lead accumulation in soils under different land use types in Beijing City [J]. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(5): 791-797.
- [5] Wang Z X, Guo Q W, Yang Z H, et al. A land use-based spatial analysis method for human health risk assessment of heavy metals in soil and its application in Zhuzhou City, Hunan Province, China [J]. Journal of Central South University, 2016, 23(8): 1915-1923.
- [6] 李明. 上海市崇明县农田生态风险评价[D]. 上海: 华东师范大学, 2006.
Li M. Ecological risk assessment for the farmland of Chongming country, Shanghai [D]. Shanghai: East China Normal University, 2006.
- [7] 梁立成, 余树全, 张超, 等. 浙江省永康市城区土壤重金属空间分布及潜在生态风险评价[J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34(6): 972-982.
Liang L C, Yu S Q, Zhang C, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in Yongkang City [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2017, 34(6): 972-982.
- [8] 陈怡先, 姜小三, 王勇, 等. 基于 GIS 矿区土壤重金属生态环境及人体健康评价[J]. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1642-1652.
Chen Y X, Jiang X S, Wang Y, et al. Assessment of ecological environment and human health of heavy metals in mining area based on GIS [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(4): 1642-1652.

- [9] 魏勇, 周春财, 王婕, 等. 淮南矿区土壤中 6 种典型微量元素的空间分布特征及其生态风险评价[J]. 中国科学技术大学学报, 2017, **47**(5): 413-420.
Wei Y, Zhou C C, Wang J, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of 6 typical trace elements in mining soils in Huainan coalfield [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2017, **47**(5): 413-420.
- [10] Zhao H R, Xia B C, Fan C, *et al.* Human health risk from soil heavy metal contamination under different land uses near Dabaoshan Mine, Southern China [J]. Science of the Total Environment, 2012, **417-418**: 45-54.
- [11] 罗成科, 毕江涛, 肖国举, 等. 宁东基地不同工业园区周边土壤重金属污染特征及其评价[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(7): 1221-1227.
Luo C K, Bi J T, Xiao G J, *et al.* Pollution characteristics and assessment of heavy metals in soil of different industry zones of Ningdong Base in Ningxia, China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(7): 1221-1227.
- [12] 赵曦, 黄艺, 李娟, 等. 大型垃圾焚烧厂周边土壤重金属含量水平、空间分布、来源及潜在生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(6): 1013-1021.
Zhao X, Huang Y, Li J, *et al.* Environmental Levels, spatial Distribution, sources and potential ecological risk of heavy metals in soils surrounding a large solid waste incinerator [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, **24**(6): 1013-1021.
- [13] Zhang Y B, Wu F Q, Zhang X S, *et al.* Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in three land-use types on the southern Loess Plateau, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, **189**(9): 470.
- [14] Bartkowiak A, Lemanowicz J, Hulisz P. Ecological risk assessment of heavy metals in salt-affected soils in the Natura 2000 area (Ciechocinek, north-central Poland) [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(35): 27175-27187.
- [15] 马婷, 赵大勇, 曾巾, 等. 南京主要湖泊表层沉积物中重金属污染潜在生态风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2011, **27**(6): 37-42.
Ma T, Zhao D Y, Zeng J, *et al.* Potential ecological risk assessment of heavy metal pollutants in surface sediments of the lakes in Nanjing [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2011, **27**(6): 37-42.
- [16] 侯千, 马建华, 王晓云, 等. 开封市幼儿园土壤重金属生物活性及潜在生态风险[J]. 环境科学, 2011, **32**(6): 1764-1771.
Hou Q, Ma J H, Wang X Y, *et al.* Bioavailability and potential ecological risk of soil heavy metals in kindergartens, Kaifeng City [J]. Environmental Science, 2011, **32**(6): 1764-1771.
- [17] 安婧, 宫晓双, 陈宏伟, 等. 沈抚灌区农田土壤重金属污染时空变化特征及生态健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(1): 37-44.
An J, Gong X S, Chen H W, *et al.* Temporal and spatial characteristics and health risk assessments of heavy metal pollution in soils of Shenfu irrigation area [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(1): 37-44.
- [18] 环境保护部. 污染场地风险评估技术导则[EB/OL]. http://kjs.mep.gov.cn/hjbhbz/bzwb/jcffbz/201402/t20140226_268358.shtml, 2014-02-19.
- [19] 李春芳, 王菲, 曹文涛, 等. 龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价[J]. 环境科学, 2017, **38**(3): 1018-1027.
Li C F, Wang F, Cao W T, *et al.* Source Analysis, spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in sewage irrigation area farmland soils of Longkou City [J]. Environmental Science, 2017, **38**(3): 1018-1027.
- [20] DZ/T 0130-2006, 地质矿产实验室测试质量管理规范[S].
DZ/T 0130-2006, The specification of testing quality management for geological laboratories[S].
- [21] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S].
- [22] 陆泗进, 王业耀, 何立环. 会泽某铅锌矿周边农田土壤重金属生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(11): 1832-1838.
Lu S J, Wang Y Y, He L H. Heavy metal pollution and ecological risk assessment of the paddy soils around a Pb-Zn mine in Huize country [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(11): 1832-1838.
- [23] 代杰瑞, 庞绪贵, 喻超, 等. 山东省东部地区土壤地球化学基准值与背景值及元素富集特征研究[J]. 地球化学, 2011, **40**(6): 577-587.
Dai J R, Pang X G, Yu C, *et al.* Geochemical baselines and background values and element enrichment characteristics in soils in eastern Shandong Province [J]. Geochimica, 2011, **40**(6): 577-587.
- [24] Fernández J A, Carballeira A. Evaluation of contamination, by different elements, in terrestrial mosses [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2001, **40**(4): 461-468.
- [25] 马建华, 王晓云, 侯千, 等. 某城市幼儿园地表灰尘重金属污染及潜在生态风险[J]. 地理研究, 2011, **30**(3): 486-495.
Ma J H, Wang X Y, Hou Q, *et al.* Pollution and potential ecological risk of heavy metals in surface dust on urban kindergartens [J]. Geographical Research, 2011, **30**(3): 486-495.
- [26] HJ 25.4-2014, 污染场地土壤修复技术导则[S].
HJ 25.4-2014, Technical guidelines for site soil remediation [S].
- [27] US EPA, Office of Solid Waste Emergency Response. Waste and Cleanup Risk Assessment. Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS), Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment) Interim [R]. 2009.
- [28] 谷蕾, 仝致琦, 宋博, 等. 基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险: 以连霍高速郑州—商丘段为例[J]. 环境科学, 2012, **33**(10): 3577-3584.
Gu L, Tong Z Q, Song B, *et al.* Health Assessment of Heavy metals in roadside soils at different operation time: a case study of Zhengzhou-Shangqiu section along the Lianyungang-Horgas highway [J]. Environmental Science, 2012, **33**(10): 3577-3584.
- [29] Ferreira-Baptista L, De Miguel E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: a tropical urban environment [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(25): 4501-4512.
- [30] 陈星, 马建华, 李新宁, 等. 基于棕地的居民小区土壤重金

属健康风险评估[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 1068-1074.
Chen X, Ma J H, Li X N, *et al.* Health risk assessment of soil heavy metals in residential communities built on Brownfields[J]. Environmental Science, 2014, **35**(3): 1068-1074.

[31] Li L, Cui J J, Liu J H, *et al.* Extensive study of potential harmful elements (Ag, As, Hg, Sb, and Se) in surface sediments of the Bohai Sea, China: Sources and environmental risks[J]. Environmental Pollution, 2016, **219**: 432-439.

《环境科学》连续 6 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2017 年 11 月 22 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2017 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2017 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 6 次获此殊荣. 评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

环 境 科 学

CONTENTS

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants	QIN Yu, ZHANG Qiang, LI Xin, <i>et al.</i> (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)
Physicochemical 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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (5315)
Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn	DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (5334)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (5344)
Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process	WANG Yan-hui, ZHAO Liang, SUN Wen-qiang, <i>et al.</i> (5359)
Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Small Catchments	WANG Huan-xiao, PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (5365)
Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China	LI Wen-chao, LEI Qiu-liang, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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 ₂ O in Rivers with Different Nitrogen Pollution Features	WANG Miao, LI Ya-feng, LEI Kun, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (5410)
Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δ D and δ^{18} O in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountains, Chongqing City .....	..... WU Wei, JIANG Yong-jun, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5418)
Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River	LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (5451)
Pollution Characteristic of Ni in Sediments in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Wei-jie, YIN Shu-hua, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (5487)
Spatial Distribution of Perfluoroalkyl Acids and Transformation of Their Precursors in River Water Samples and Effluents of Wastewater Treatment Plants in a Typical Tourism City .....	..... WANG Shi-liang, SUN Jian-shu, YANG Yue-wei, <i>et al.</i> (5494)
Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions	JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, <i>et al.</i> (5503)
Effects of Manganese on the Growth and Fluorescence Induction Kinetics of <i>Conticribra weisflogii</i>	WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu (5514)
Distribution and Factors Affecting <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> in Guangdong Reservoirs	LEI Min-ting, PENG Liang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (5523)
Removal of Humic Acid from Water by Magnetic Chitosan-Grafted Polyacrylamide	YOU Wen, LIU Hai-cheng, CAO Jia-wei, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (5550)
Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a "Heterotrophic Sulfur Autotrophic" Combination Process	LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5558)
Rapid Start-up of a Nitrite-Dependent Methane Anaerobic Oxidation Reaction Under Static Pressure Conditions	WANG Yi-nan, HU Zhen, RU Dong-yun, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (5572)
High-rate Nitrogen Removal in a Two-stage Partial Nitrification-ANAMMOX Process Under Mainstream Conditions	LIU Wen-ru, YANG Dian-hai, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (5580)
Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria	GAO Xue-jian, ZHANG Jie, LI Dong, <i>et al.</i> (5587)
Optimization of the Mainstream Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Changes of the Microbial Community	FU Kun-ming, FU Chao, LI Hui, <i>et al.</i> (5596)
Granular Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Sludge During the Recovery Process	CHEN Fang-min, GU Cheng-wei, HU Yu-ting, <i>et al.</i> (5605)
Characterization of a Newly Isolated Strain <i>Pseudomonas</i> 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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (5647)
Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (5657)
Effects of Stimulated Nitrogen Deposition on the Bacterial Community Structure of Semiarid Temperate Grassland	LI Zong-ming, SHEN Ju-pei, ZHANG Li-mei, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (5672)
Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil	MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-liang, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (5687)
Degradation of Pentachlorophenol by Fulvic Acid in a Municipal Solid Waste Landfill	LIU Si-jia, HE Xiao-song, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (5708)
Assessment of Medical Waste Disposal Technologies Based on the AHP	XU Xiao-fang, TAN Quan-yin, LIU Li-li, <i>et al.</i> (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)