

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估 ..... 罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)

南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析 ..... 秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)

南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征 ..... 师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)

苏州市 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子的季节变化及来源分析 ..... 王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沫,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)

成都西南郊区春季 PM<sub>2.5</sub> 中元素特征及重金属潜在生态风险评价 ..... 杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)

泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析 ..... 张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)

青奥会期间基于 $\delta^{13}\text{C}$ 观测的大气 CO<sub>2</sub> 来源解析 ..... 徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)

民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析 ..... 韩博,黄佳敏,魏志强(4524)

畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究 ..... 张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)

有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物 ..... 邢奕,王骢,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)

基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性 ..... 楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)

亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征 ..... 龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎春,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)

浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析 ..... 马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)

太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应 ..... 高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)

利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性 ..... 黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)

三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估 ..... 杨兵,何丙辉,王德宝(4586)

太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价 ..... 武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)

滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义 ..... 余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)

洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性 ..... 王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)

蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化 ..... 赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)

三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究 ..... 卓海华,孙志伟,谭凌智,吴云丽,兰静(4633)

模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险 ..... 刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)

有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验 ..... 张思,何江涛,朱晓婧(4651)

无机型城市景观水体表观污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例 ..... 李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)

清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应 ..... 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)

南方典型农田区浅层地下水污染特征 ..... 郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)

水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用 ..... 马燕华,苏春利,刘伟江,朱亚鹏,李俊霞(4690)

粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果 ..... 沈庆然,侯娟,李田(4700)

超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝 ..... 赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4706)

QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO<sub>2</sub> 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制 ..... 姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)

群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能 ..... 赵畅,王文昭,徐期勇(4720)

水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性 ..... 王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)

外加微量 N<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 下 SBR 中硝化微生物特性 ..... 肖芄颖,张代钧,卢培利(4734)

部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析 ..... 鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)

典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响 ..... 姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)

生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析 ..... 张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)

开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析 ..... 吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)

全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性 ..... 李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)

水肥用量对玉米季土壤 CO<sub>2</sub> 排放的综合影响 ..... 杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)

福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性 ..... 姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)

基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估 ..... 杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)

北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系 ..... 柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)

准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征 ..... 刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)

河北平原潮土中微生物对氮降解特征 ..... 张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)

砷-非对蜈蚣草根不同碳基团的影响 ..... 廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)

碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力 ..... 蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净, Mukesh Kumar Awasthi(4848)

不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响 ..... 孙航,蒋煜峰,石磊平,慕仲锋,展惠英(4857)

南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征 ..... 田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李黎,宋波(4867)

Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能 ..... 汪爱河,周康根,刘行,陈泉州,刘芳(4874)

铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂 ..... 付军,范芳,李海宁,张高生(4882)

不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性 ..... 王春峰,陈冠飞,朱艳臣,姚丹,皇晓晨,王连军(4891)

《环境科学》第37卷(2016年)总目录 ..... (4899)

《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)

# 基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估

杨阳<sup>1,2</sup>, 陈卫平<sup>1\*</sup>, 李艳玲<sup>1,2</sup>, 王美娥<sup>1</sup>, 彭驰<sup>1</sup>

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

**摘要:** 从不确定性角度评估土壤-水稻系统镉(Cd)累积风险有助于风险决策的科学性和合理性. 本研究应用物种敏感性分布模型(SSD)、健康风险评估模型及 Monte Carlo 模拟方法分析湖南省攸县土壤-水稻系统 Cd 富集特征, 土壤 Cd 累积风险和稻米 Cd 健康风险. 结果表明攸县稻米 Cd 富集因子(PUF)平均水平为 1.86, 多数 Cd 超标稻米样品来自土壤酸化严重的区域; 土壤 Cd 污染负荷系数为 2.4, 隶属于强污染水平; 在当前土壤 Cd 累积条件下, 10 年后研究区土壤 Cd 含量处于中度污染水平的概率达到 90.4%; 健康风险评估显示研究区成人经食用大米 Cd 平均摄入量(以 BW 计)为  $2.9 \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ , 有 93.9% 的概率高于 WHO 推荐标准. 稻米 Cd 健康风险指数(HRI)主要集中在 2.1~4.7 之间, 健康风险水平较高. 当土壤 pH < 5.5 时, HRI > 1 的概率为 95.3%, 土壤 pH > 6 时, HRI > 1 的概率降为 68.1%.

**关键词:** 累积风险; 健康风险; Monte Carlo 模拟; 稻米 Cd 富集因子; 物种敏感性分布

中图分类号: X286 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4800-06 DOI: 10.13227/j.hjcx.201606073

## Comprehensive Risk Evaluation of Cadmium in Soil-rice System Based on Uncertainty Analysis

YANG Yang<sup>1,2</sup>, CHEN Wei-ping<sup>1\*</sup>, LI Yan-ling<sup>1,2</sup>, WANG Mei-e<sup>1</sup>, PENG Chi<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Cadmium (Cd) can cause adverse health effects and is a subject of concern in rice consumption. The uncertainty analysis helps improve the accuracy in the risk assessment for Cd in soil-rice system. A regional investigation on Youxian prefecture, southern China, was conducted to analyze the Cd concentration in rice. Based on the species sensitivity distribution model (SSD), health risk assessment model, and Monte Carlo simulation, the accumulation characteristic of Cd in soil-rice system, accumulation risk of Cd in soil, and health risk of Cd concentration in rice were determined. The results showed that the plant uptake factor (PUF) of Cd of rice was well fitted by the SSD model. The mean level of PUF was 1.86, with a significant spatial heterogeneity. The rice produced in WL county tended to accumulate a high level of Cd. There was no significant relationship between concentrations of Cd in soil and rice, suggesting that of rice renders the Cd risk management very difficult. The pollution load index of Cd in soil was 2.4, which belonged to a moderate contamination level. Under current accumulation condition of Cd in soil, there would be a 90.4% probability for soil Cd concentration to be higher than the national soil quality standard after 10 years. Health risk assessment showed that the average daily dose (ADD) was  $2.9 \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ , 3.5 fold higher than the WHO limit. About 93.9% of the adult populations consuming rice cropping in affected areas had the risk that the daily Cd intake was above the WHO limit. The health risk index (HRI) was around 2.1 to 4.7. The probability for health risk index (HRI) higher than 5 was 21.5%, suggesting a high health risk. When the soil pH was lower than 5.5, the probability for HRI higher than 1 was 95.3%, and when the soil pH was higher than 6, the probability for HRI higher than 1 reduced to 68.1%. An improved management of soil pH values would be needed for a better and safer rice production. The combination of uncertainty analysis, species sensitivity model and health risk assessment model was validated to be feasible and reliable in the risk analysis.

**Key words:** accumulation risk; health risk; Monte Carlo simulation; rice Cd uptake factor; species sensitivity distribution

水稻 (*Oryza sativa*. L) 是我国最主要的粮食作物, 有超过 65% 的人口以稻米为主食<sup>[1,2]</sup>. 近年来, 随着我国农田重金属污染的加重, 出现了广泛的大米富镉(Cd)现象<sup>[3,4]</sup>. 在湖南、广东和浙江, 均出现大米 Cd 含量超过粮食安全标准 10 倍以上的严重大米镉超标事件<sup>[5-7]</sup>, 给我国农业生产造成了严重的

经济损失, 更为当地民众带来了严重的健康风

收稿日期: 2016-06-13; 修订日期: 2016-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41173123); 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室项目(SKLURE2013-1-04)

作者简介: 杨阳(1990~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为生态风险评估, E-mail: yangyang\_st@cees.ac.cn

\* 通讯联系人 Email: wpchen@cees.ac.cn

险<sup>[8]</sup>. 在稻米 Cd 污染防治研究中, 土壤-水稻系统 Cd 累积风险和健康风险评估可为污染控制策略制定和民众健康提供重要参考<sup>[5]</sup>. 近年来国内外学者对于稻米 Cd 污染风险评估进行了大量研究, 主要集中在应用不同评价指数对 Cd 污染土壤和水稻进行质量评估及等级划分<sup>[1,5,9]</sup> 和应用美国环保署 (USEPA) 提供的暴露参数和暴露方程进行健康风险评估<sup>[3,10]</sup> 两方面.

考虑到土壤-水稻重金属污染风险评估系统的随机性和不确定性, 单一的指数评价难以充分反映区域土壤-水稻系统 Cd 污染风险水平<sup>[1,11,12]</sup>. 另一方面, 我国人群在生活习惯、社会经济水平等方面与国外人群差异较大<sup>[10,13]</sup>, 暴露参数的直接应用使评价结果存在较大的偏差<sup>[3]</sup>. 因此, 从系统不确定性角度评估重金属在土壤-水稻系统累积风险有助于风险决策的科学性和合理性<sup>[14,15]</sup>. 本研究以湖南攸县为例, 开展不确定性风险评估, 分析 Cd 在研究区土壤-水稻系统富集特征, 累积风险和健康风险, 以期对稻米 Cd 污染风险管理提供技术支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

攸县位于湖南省东南部, 为湖南省株洲市辖县, 总面积为 2 648 km<sup>2</sup>, 总人口 80.4 万, 介于东经 113°09'09"~113°51'30", 北纬 26°46'34"~27°26'30" 之间, 为中亚热带季风湿润气候 (图 1). 攸县为湖南省主要稻米产区, 近年来的“镉米”事件对该地农业生产造成了严重的经济损失<sup>[3]</sup>. 目前该地土壤-水稻系统 Cd 富集特征仍不明确, 其潜在生态风险受到当地政府部门和民众的广泛关注.

### 1.2 采样与分析

根据攸县水稻分布格局进行野外实地考察, 在各乡镇随机布点并使用 GPS 定位, 在全县共采集 124 组土壤-稻米样品, 其中在 WL 和 DTQ 两个主要乡镇采集样品数分别为 23 和 20 组. 每个样点随机布设 2~3 个 2 m×2 m 的样方, 采集 5~10 穴完整水稻, 密封低温保存于样品袋中. 在每个水稻采样点按照 5 点混合采样法采集土壤样品 (采样深度 0~10 cm), 所有样品密封后带回实验室于阴凉处室温风干.

土壤样品经研磨后过 100 目尼龙筛, 密封保存. 参照文献<sup>[16]</sup> 方法测定土壤 pH 和土壤有机质含量. 土壤样品应用 HCl-HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub><sup>[17]</sup> 消煮. 水稻样品经自来水冲洗后将稻穗剪下, 再用去离子水

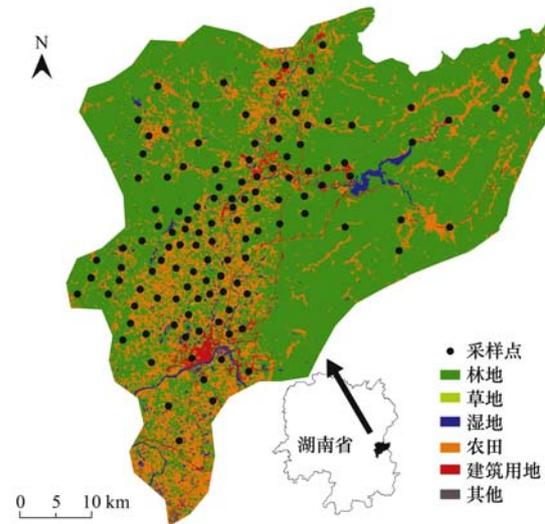


图 1 研究区概况及采样点分布

Fig. 1 Research area and distribution of sampling stations

清洗后于 105℃ 下杀青 30 min, 60℃ 烘至恒重, 经脱壳后粉碎, 应用 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub><sup>[3]</sup> 法消解稻米样品.

应用 ICP-MS 测定样品 Cd 含量. 测定过程中应用 GSS-5 和 GSB-23 对土壤和稻米进行质量控制, 回收率在 85.7%~108.2% 之间.

### 1.3 数据处理

稻米 Cd 富集系数 (PUF) 常被用来分析土壤-水稻系统 Cd 富集特征<sup>[12]</sup>, 并可在一定程度上消除区域环境因子影响差异<sup>[18]</sup>. 其计算公式为:

$$PUF = R_{Cd}/S_{Cd} \quad (1)$$

式中, PUF 表示稻米 Cd 富集因子,  $R_{Cd}$  和  $S_{Cd}$  分别表示稻米和土壤 Cd 含量.

物种敏感性分布模型 (SSD) 是国际上生态风险评估研究热点之一, 能清楚地表征危害元素在生物体内毒性阈值分布情况<sup>[4]</sup>. Xu 等<sup>[18]</sup> 指出当样本量较大时 ( $n > 30$ ), SSD 对于重金属元素分布的拟合优于其他拟合模型. Ding 等<sup>[19]</sup> 应用 SSD 模型对根菜 Pb 分布进行拟合, 指出 Burr-III 型方程较其他拟合方程效果较好. 本研究应用 Burr-III 型方程对研究区稻米 Cd 富集因子 (PUF) 的物种敏感性分布曲线进行拟合, 其参数方程为:

$$F(x) = 1/[1 + (b/x)^c]^k \quad (2)$$

式中  $b$ 、 $c$ 、 $k$  为 3 个变化参数.

稻米 Cd 污染健康风险指数 (HRI)<sup>[3,5]</sup> 应用 USEPA 提出的暴露方程<sup>[10]</sup> 计算:

$$HRI = \tilde{ADD}/Rfd \quad (3)$$

式中, Rfd 为人均 Cd 摄入参考剂量, 本研究中采用联合国粮农组织 (FAO) 推荐值 0.8  $\mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$  (以 BW 计)<sup>[20]</sup>. 上标“~”表示随机模拟, ADD 为

日均暴露剂量,计算公式如下:

$$ADD = \frac{(\bar{R}_{Cd} \times \bar{IR} \times f)}{\bar{BW}} \quad (4)$$

式中, $f$ 为民众食用自产食物比例, $IR$ 为成人人均摄入大剂量( $g \cdot d^{-1}$ ), $BW$ 为成人平均体重( $kg$ ).

Monte Carlo 模拟常用在风险评价中来处理评估系统的随机性<sup>[13]</sup>. 相关研究指出对样本的 Bootstrap 抽样可进一步提高风险评估的准确性<sup>[14,21]</sup>. 基于此在研究区健康风险评价中稻米 Cd 含量( $R_{Cd}$ )由 Bootstrap 对观测值进行抽样产生. 在健康风险评价中, $IR$ 多服从对数正态分布变量, $BW$ 多服从正态分布变量<sup>[21,22]</sup>. 在本研究模拟中, $IR$ 为( $370.82 \pm 31.0$ ) $g \cdot d^{-1}$ 的对数正态分布变量, $BW$ 为( $58.6 \pm 5.6$ ) $kg$ 的正态分布变量, $f$ 为 89.69%, $IR$ 、 $BW$ 和 $f$ 数值均来自中国人群暴露手册(湖南部分)<sup>[23]</sup>. Monte Carlo 计算显示 10 000 次模拟时结果趋于稳定.

#### 1.4 数据分析

数据统计和多元分析应用 SPSS 17.0. Bootstrap 抽样和 Monte Carlo 模拟应用 Matlab 7.14. “Burr-III”

型方程对物种敏感性曲线(SSD)的拟合通过 BurrIzO 2.0 软件实现. 重金属含量测定结果经对数转换后进行正态分布检验(Shapiro-Wilk 检验, $P < 0.05$ ).

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤-水稻系统 Cd 富集特征

研究区土壤以黏粒(66.9%)为主(表 1),有机质平均含量为  $41.4 g \cdot kg^{-1}$ ,符合当地土壤基本性质<sup>[3]</sup>. 土壤 pH 平均值为 5.42,主要集中在 5.04 ~ 5.64 之间(25% ~ 75% 分布),与湖南省第二次土壤普查值相比<sup>[24]</sup>(pH = 5.9),酸化较为严重. 土壤 Cd 含量范围为  $0.1 \sim 2.44 mg \cdot kg^{-1}$ ,变异系数高达 82.4%,变化幅度较大. 土壤 Cd 平均含量为  $0.33 mg \cdot kg^{-1}$ (表 1),略高于国家土壤环境质量标准值<sup>[25]</sup>( $0.3 mg \cdot kg^{-1}$ ,GB 15618-1995,Grade I). 稻米 Cd 变化幅度较大( $0.01 \sim 1.12 mg \cdot kg^{-1}$ ),变异系数为 65.2%,平均含量为  $0.47 mg \cdot kg^{-1}$ ,约为国家粮食安全标准<sup>[26]</sup>(GB 2762-2005, $0.2 mg \cdot kg^{-1}$ )的 2.4 倍,超标率高达 72.6% (90/124). 其中 WL 镇稻米 Cd 超标率均在 90% 以上,而稻米 Cd 含量较低的 DTQ 镇稻米 Cd 超标率也有 45%.

表 1 攸县土壤-稻米 Cd 含量及土壤基本性质

Table 1 Descriptive statistics of Cd concentration in soil-rice system and major soil properties in Youxian prefecture

变量	最小值	最大值	平均值	中值	标准差	变异系数/%
土壤 pH	4.71	7.08	5.42	5.26	0.54	9.9
土壤有机质/ $g \cdot kg^{-1}$	13.5	65.2	41.4	42.0	11.2	27.1
黏粒/%	51.4	73.1	66.9	70.0	7.8	11.6
土壤 Cd/ $g \cdot kg^{-1}$	0.10	2.44	0.33	0.27	0.25	77.4
稻米 Cd/ $mg \cdot kg^{-1}$	0.01	1.12	0.47	0.44	0.30	65.2

研究区稻米 Cd 富集因子(PUF)平均值为 1.86,大于 1 和 2 的比率分别为 62.9% (78/124) 和 41.9% (52/124),可见攸县土壤-水稻系统 Cd 富集显著现象广泛存在且较为严重. 应用物种敏感性分布模型(SSD)对 PUF 分布进行拟合,观测值均在 95% 区间以内(图 2),可见 Burr-III 型方程拟合结果较好. 由图 2 可知研究区 PUF 变化幅度较大,主要集中在  $0.5 \sim 2.83$  之间(25% ~ 75% 分布). 对 Cd 积累最为敏感的样品(<25% 分布)在各个乡镇均有出现,主要集中在 DTQ 区域,在这个区间内土壤 Cd 平均含量为  $0.45 mg \cdot kg^{-1}$ ;而耐 Cd 性强的样品(>75% 分布)主要出现在 WL 镇,这个区间内土壤 Cd 平均含量为  $0.21 mg \cdot kg^{-1}$ ,可见攸县稻米 Cd 含量空间差异明显,Cd 不超标或超标不严重土壤生产 Cd 超标大米现象广泛存在. 土壤 Cd 与稻米 Cd

之间线性关系的缺失( $R^2 = 0.05$ )给稻米 Cd 污染风险管理带来了一定的挑战.

### 2.2 土壤 Cd 累积风险评估

分别应用单因子指数( $P_i$ )<sup>[12]</sup>和污染负荷指数(PLI)<sup>[9]</sup>对研究区土壤 Cd 污染进行生态风险评价,结果表明攸县土壤 Cd 单因子指数主要集中在 1.6 ~ 3.0 之间(25% ~ 75% 分布),平均值为 2.2,污染程度较高<sup>[12]</sup>;攸县土壤 PLI<sub>Cd</sub>综合指数为 2.4,属强污染水平<sup>[9]</sup>,可见研究区土壤 Cd 污染较为严重. Wang 等<sup>[3]</sup>对攸县各乡镇土壤剖面 Cd 含量进行调查,指出土壤 Cd 累积率在  $0.029 \sim 1.16 kg \cdot hm^{-2}$  之间,水稻对土壤 Cd 的吸收率在  $0.57 \sim 21.9 g \cdot hm^{-2}$  之间,张敏等<sup>[17]</sup>对攸县背景土、灌溉水、常用肥料和大气沉降等环境介质 Cd 含量进行调查,结果显示攸县土壤 Cd 输入主要来自大气沉降、灌溉水及

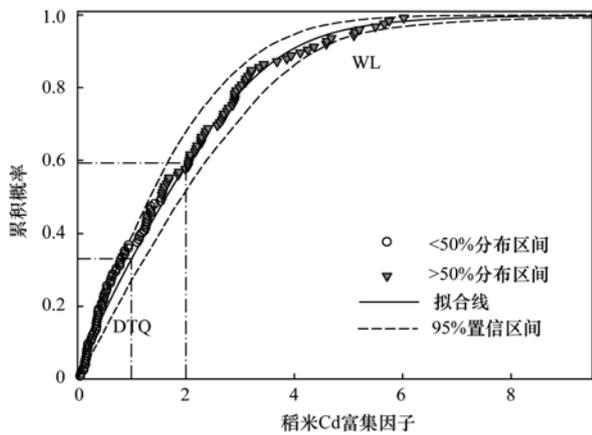


图2 攸县稻米 Cd 富集因子物种敏感性分布曲线

Fig. 2 Species sensitivity distributions of rice Cd uptake factor in Youxian prefecture

水渠底泥,且与工矿企业排污联系较为密切. 根据本文调查结果和以上报道数据,结合章明奎等<sup>[27]</sup>提出的元素平衡分析方法可对攸县土壤 Cd 累积风险进行估算.

结果表明(图3)在当前环境条件下攸县土壤 Cd 有 52.1% 的概率大于国家土壤环境质量标准<sup>[25]</sup> ( $0.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , GB 15618-1995, Grade I), 1 年后该概率增长为 56.0%, 10 年后该概率达到 90.4%, 即 10 年后全县土壤 Cd 含量几乎都高于  $0.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 另一方面, 当前土壤 Cd  $> 0.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  的概率为 15.1%, 而 10 年后土壤 Cd 轻污染概率为 59.7%, 20 年后土壤 Cd 重污染 ( $> 1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 概率达到 48.2%. 可见攸县土壤 Cd 污染形势较为严峻, 需对耕地上风向和河流上游的企业排污进行治理, 同时在工矿区污染排放得到有效控制的情况下, 对研究区灌溉水系及水渠底泥进行 Cd 含量调查, 针对高污染区域底泥进行固定处理, 避免二次污染进入环境.

### 2.3 水稻 Cd 健康风险评价

健康风险评价结果(图4)显示研究区成人经食

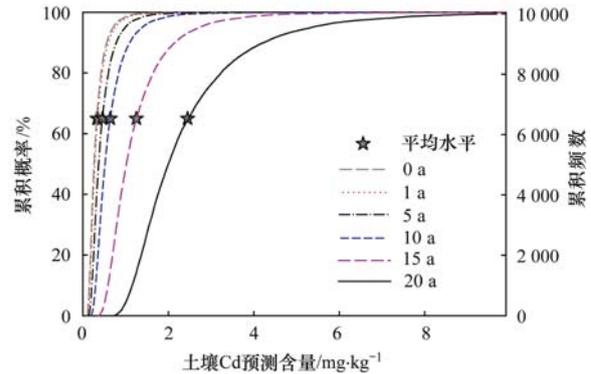


图3 攸县土壤 Cd 累积风险

Fig. 3 Accumulation risk of Cd in soil in Youxian prefecture

用大米 Cd 平均摄入量 (ADD, 以 BW 计, 下同) 为  $2.9 \mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ , 主要集中在  $1.61 \sim 3.76$  之间 (20% ~ 75% 分布), 显著高于 WHO 推荐值 [ $0.8 \mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$  (以 BW 计)]<sup>[20]</sup>. 各乡镇健康风险差异较大, 在稻米 Cd 含量最高的 WL 镇, ADD 均值高达  $4.12 \mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ , 为研究区成人经食用大米 Cd 平均摄入量的 1.4 倍. 在稻米 Cd 含量较小的 DTQ 乡镇, ADD 平均含量为  $1.86 \mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ , 为研究区成人经食用大米 Cd 平均摄入量 Cd 量的 64.1%.

健康风险评价指数 (HRI) 评价结果 (图4) 显示攸县稻米 Cd 健康风险指数 (HRI) 主要集中在  $2.1 \sim 4.7$  (25% ~ 75% 分布), 风险水平较高<sup>[10]</sup>. 在 WL 镇 HRI  $> 5$  的概率高达 51.33%, 有 8.5% 和 1.5% 的概率出现 HRI  $> 8$  和 HRI  $> 10$  的高风险区域. 在 DTQ 镇, HRI 均值为 2.3, HRI  $> 5$  的概率只有 10.81%, 明显低于全县和 WL 镇健康风险水平, 但仍需对此区域保持关注.

攸县成人经食用大米 Cd 摄入风险较高, 各乡镇差异较大. 考虑到湖南省人群大米摄入量高达  $390 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ , 在我国各省份中仅次于安徽省和江西

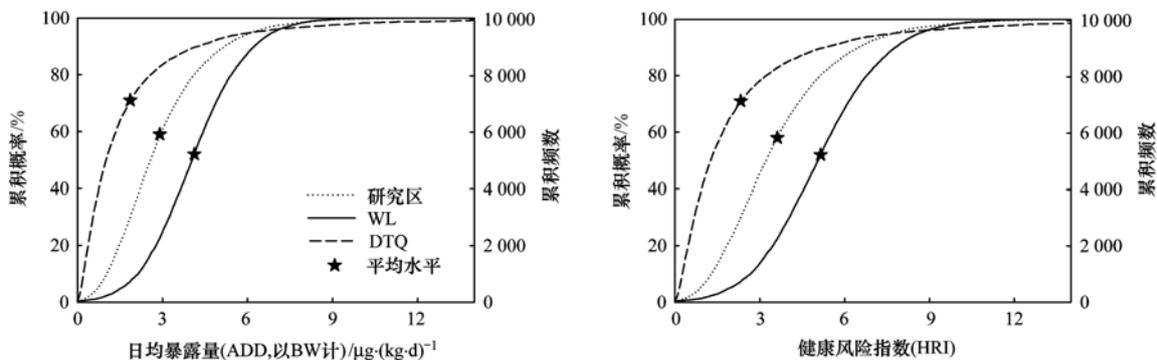


图4 攸县稻米 Cd 日均暴露量及健康风险指数

Fig. 4 Average daily dose and health risk index of Cd in rice in Youxian prefecture

省<sup>[23]</sup>,且湖南省食用自产食物比例高达 90%<sup>[23]</sup>,因此造成的危害也较大,在风险管理时应给予足够重视.

#### 2.4 稻米 Cd 健康风险与土壤 pH 关系

众多研究指出土壤 pH 是影响 Cd 在土壤-水稻系统中富集的主要因子<sup>[6,8]</sup>. 通过对 PUF 的物种敏感性分布模型(SSD)的进一步分析(图 2)可知,对 Cd 积累较为敏感的样品(<50%分布)的土壤 pH 平均水平为 5.53,变异系数为 66.7%,而耐 Cd 性较好的样品(>50%分布)的土壤 pH 平均水平为 5.3,变异系数仅为 6.2%,可见大多数 Cd 超标稻米样品均来自土壤酸化严重的区域.

以土壤 pH = 5.5 和 6.0 为界限对研究区稻米样品进行分类和健康风险评价. 结果显示(图 5)当土壤 pH < 5.5 时,研究区人群经食用大米 Cd 平均

摄入量(以 BW 计)为  $3.06 \mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ,有 95.3% 的概率高于 WHO 推荐标准; HRI 均值为 3.8, HRI > 3 和 HRI > 5 的概率分别为 61.6% 和 23.8%,健康风险较高. 当土壤 pH 在 5.5 和 6.0 之间时,ADD 平均值为  $2.5 \mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ,高于 WHO 标准的概率降为 77.2%,HRI 均值为 3.1,HRI > 3 的概率降为 33.7%;当土壤 pH > 6 时,ADD 平均值为  $2.0 \mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ,有 68.1% 的概率高于 WHO 推荐标准,HRI 均值为 2.4,HRI > 3 的概率降到 25% 以下. 可见土壤酸化较轻或非酸化区域稻米 Cd 健康风险,显著低于土壤严重酸化区. 在最近的报道中,有学者指出土壤酸化也可导致水稻减产 7% ~ 8%<sup>[28]</sup>. 因此控制土壤酸化,增施石灰、生物炭等土壤调理剂改善土壤酸化情况是控制稻米 Cd 富集,提升稻米质量水平的关键途径.

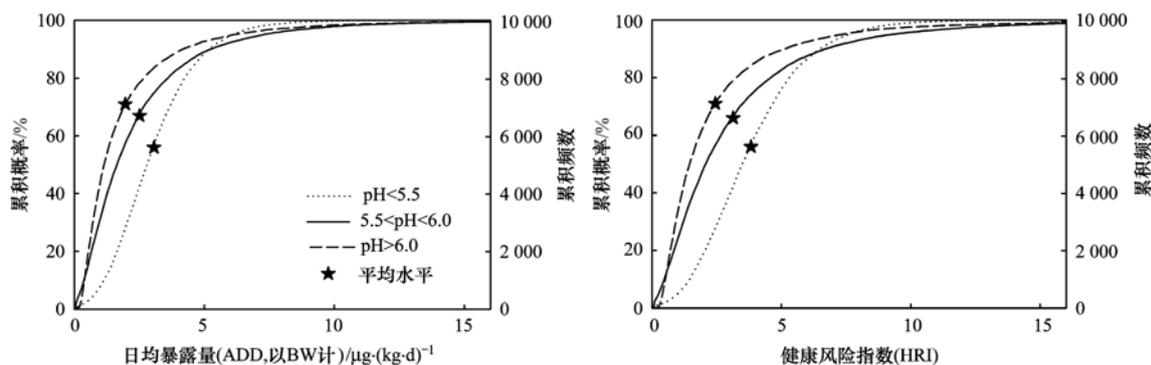


图 5 攸县不同土壤 pH 条件下稻米 Cd 日均暴露量与健康风险指数

Fig. 5 Average daily dose and health risk index of Cd in rice practiced in different soil pH conditions in Youxian prefecture

### 3 结论

攸县土壤-水稻系统 Cd 污染风险水平较高,各乡镇差异显著. Cd 不超标或超标不严重土壤生产 Cd 超标大米现象广泛存在. 研究区土壤 Cd 累积风险较高,需采取一定措施进行土壤修复. 研究区成人经食用大米 Cd 摄入风险较高,以严重酸化区稻米最为显著. 改善土壤酸化现状是控制稻米 Cd 污染的有效途径. 基于不确定性分析原理的风险评价可以同时提供风险水平及不同风险等级的相应概率. 不确定性分析、物种敏感性分布模型和健康风险评价模型的综合应用有助于风险决策的合理性和科学性.

#### 参考文献:

[1] Li W, Xu B, Song Q, *et al.* The identification of 'hotspots' of heavy metal pollution in soil-rice systems at a regional scale in eastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **472**: 407-420.

[2] 林鸾芳,王昌全,李冰,等. 秸秆还田下改良剂对水稻生长和 Cd 吸收积累的影响 [J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(9): 1492-1497.  
Lin L F, Wang C Q, Li B, *et al.* Effect of amendments on rice growth and cd uptake based on straw returning [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(9): 1492-1497.

[3] Wang M E, Chen W P, Peng C. Risk assessment of Cd polluted paddy soils in the industrial and township areas in Hunan, Southern China [J]. *Chemosphere*, 2016, **144**: 346-351;

[4] 孙聪,陈世宝,宋文恩,等. 不同品种水稻对土壤中镉的富集特征及敏感性分布(SSD) [J]. *中国农业科学*, 2016, **47**(12): 2384-2394.  
Sun C, Chen S B, Song W E, *et al.* Accumulation characteristics of cadmium by rice cultivars in soils and its species sensitivity distribution [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, **47**(12): 2384-2394.

[5] Lu Y L, Song S, Wang R S, *et al.* Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China [J]. *Environment International*, 2015, **77**: 5-15.

[6] Yu H Y, Liu C P, Zhu J S, *et al.* Cadmium availability in rice paddy fields from a mining area: The effects of soil properties highlighting iron fractions and pH value [J]. *Environmental*

- Pollution, 2015, **209**: 38-45.
- [ 7 ] 程旺大, 姚海根, 张国平, 等. 镉胁迫对水稻生长和营养代谢的影响[J]. 中国农业科学, 2005, **38**(3): 528-537.  
Cheng W D, Yao H G, Zhang G P, *et al.* Effect of cadmium on growth and nutrition metabolism in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, **38**(3): 528-537.
- [ 8 ] Du Y, Hu X F, Wu X H, *et al.* Affects of mining activities on Cd pollution to the paddy soils and rice grain in Hunan province, Central South China [ J ]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(12): 9843-9856.
- [ 9 ] 许端平, 李晓波, 苗丹, 等. 不同粒级土壤磁化率与重金属污染特征的相关关系[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(12): 6121-6127.  
Xu D P, Li X B, Miao D, *et al.* Correlation between magnetic susceptibility and contents of heavy metals in contaminated-soil of different particle-size fractions [ J ]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(12): 6121-6127.
- [ 10 ] Zheng N, Wang Q, Zhang X, *et al.* Population health risk due to dietary intake of heavy metals in the industrial area of Huludao city, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **387**(1-3): 96-104.
- [ 11 ] Römken P F A M, Gou H Y, Chu C L, *et al.* Prediction of cadmium uptake by brown rice and derivation of soil-plant transfer models to improve soil protection guidelines [ J ]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(8-9): 2435-2444.
- [ 12 ] Liu W T, Zhou Q X, An J, *et al.* Variations in cadmium accumulation among Chinese cabbage cultivars and screening for Cd-safe cultivars[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **173**(1-3): 737-743.
- [ 13 ] Koupaie E H, Eskicioglu C. Health risk assessment of heavy metals through the consumption of food crops fertilized by biosolids; A probabilistic-based analysis [ J ]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **300**: 855-865.
- [ 14 ] Qian Y Z, Chen C, Zhang Q, *et al.* Concentrations of cadmium, lead, mercury and arsenic in Chinese market milled rice and associated population health risk[J]. *Food Control*, 2010, **21**(12): 1757-1763.
- [ 15 ] 刘潇威, 何英, 赵玉杰, 等. 农产品中重金属风险评估的研究与进展[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(1): 15-18.  
Liu X W, He Y, Zhao Y J, *et al.* Risk assessments for heavy metals in agri-foods[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, **26**(1): 15-18.
- [ 16 ] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [ 17 ] 张敏, 王美娥, 陈卫平, 等. 湖南攸县典型煤矿和工厂区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1425-1430.  
Zhang M, Wang M E, Chen W P, *et al.* Characteristics and inputs of cd contamination in paddy soils in typical mining and industrial areas in youxian county, Hunan province [ J ]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1425-1430.
- [ 18 ] Xu F L, Li Y L, Wang Y, *et al.* Key issues for the development and application of the species sensitivity distribution (SSD) model for ecological risk assessment[J]. *Ecological Indicators*, 2015, **54**: 227-237.
- [ 19 ] Ding C F, Ma Y B, Li X G, *et al.* Derivation of soil thresholds for lead applying species sensitivity distribution: A case study for root vegetables[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, **303**: 21-27.
- [ 20 ] Codex Standard 193- 1995, Codex General Standard for Contaminants and Toxins in Food and Feed[S].
- [ 21 ] Augustsson A L M, Uddh-Söderberg T E, Hogmalm K J, *et al.* Metal uptake by homegrown vegetables - the relative importance in human health risk assessments at contaminated sites [ J ]. *Environmental Research*, 2015, **138**: 181-190.
- [ 22 ] Filipsson M, Öberg T, Bergbäck B. Variability and uncertainty in Swedish exposure factors for use in quantitative exposure assessments[J]. *Risk Analysis*, 2011, **31**(1): 108-119.
- [ 23 ] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013. 262-263, 765.
- [ 24 ] 文星, 李明德, 涂先德, 等. 湖南省耕地土壤的酸化问题及其改良对策[J]. 湖南农业科学, 2013, (1): 56-60.  
Wen X, Li M D, Tu X D, *et al.* Acidification problems of arable land in hunan province and its improvement countermeasures [ J ]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2013, (1): 56-60.
- [ 25 ] GB 15618-1995, 土壤环境质量标准[S].  
GB 15618-1995, *Environmental Quality Standard for Soils*[S].
- [ 26 ] GB 2762-2005, 食品中污染物限量[S].  
GB 2762-2005, *Maximum Levels of Contaminants in Foods*[S].
- [ 27 ] 章明奎, 杨东伟. 绍兴平原二种典型农田系统中重金属流及其平衡分析[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(2): 320-324.  
Zhang M K, Yang D W. Flows and mass balance of heavy metals in two typical farming systems in Shaoxing plain, Zhejiang province, China [ J ]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, **19**(2): 320-324.
- [ 28 ] 曾勇军, 周庆红, 吕伟生, 等. 土壤酸化对双季早、晚稻产量的影响[J]. 作物学报, 2014, **40**(5): 899-907.  
Zeng Y J, Zhou Q H, Lv W S, *et al.* Effects of soil acidification on the yield of double season rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, **40**(5): 899-907.

## CONTENTS

Transport Loss Estimation of Fine Particulate Matter in Sampling Tube Based on Numerical Computation .....	LUO Li-na, CHENG Zhen, ZHU Wen-fei, <i>et al.</i> (4457)
Sources Analysis of Heavy Metal Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing .....	QIN Xin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (4467)
Distribution Characteristics of Water Soluble Ions Under Different Weather Conditions During the Youth Olympic Games in Nanjing .....	SHI Yuan-zhe, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4475)
Seasonal Variation and Source Analysis of the Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Suzhou .....	WANG Nian-fei, CHEN Yang, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4482)
Characteristics of Elements and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> at the Southwest Suburb of Chengdu in Spring .....	..... YANG Huai-jin, YANG De-rong, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (4490)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Rare Earth Elements in the Dustfall of Quanzhou City .....	ZHANG Zong-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4504)
<sup>13</sup> C-based Sources Partitioning of Atmospheric CO <sub>2</sub> During Youth Olympic Games, Nanjing .....	XU Jia-ping, LI Xu-hui, XIAO Wei, <i>et al.</i> (4514)
Gaseous Emission Characterization of Civil Aviation Aircraft During Takeoff .....	HAN Bo, HUANG Jia-min, WEI Zhi-qiang (4524)
Pollution Characteristics of Antibiotic Resistant Bacteria from Atmospheric Environment of Animal Feeding Operations .....	ZHANG Lan-he, HE Yu-wei, CHEN Mo, <i>et al.</i> (4531)
Removing Nano Particles by Filtration Using Materials with Ordered Mesoporous Structure .....	XING Yi, WANG Cong, LU Pei, <i>et al.</i> (4538)
Emission Characteristics of Gaseous Pollutants from City Bus Fueled with Biodiesel Based on DOC + CDPF Technology in Real Road Conditions .....	..... LOU Di-ming, ZHANG Yun-hua, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4545)
Characteristics of Methane Flux Across the Water-air Interface in Subtropical Shallow Ponds .....	LONG Li, XIAO Shang-bin, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4552)
Succession of Phytoplankton Assemblages and Its Influencing Factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province .....	MA Pei-ming, SHI Lian-dong, ZHANG Jun-fang, <i>et al.</i> (4560)
Responses of Physiological Indices of Typical Submerged Macrophytes to Water Quality in Taihu Lake .....	GAO Min, HU Wei-ping, DENG Jian-cai, <i>et al.</i> (4570)
Optical Characteristics of Dissolved Organic Matter from Two Different Full Mixed Reservoirs in Winter Based on UV-vis and EEMs .....	..... HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (4577)
Hanfeng Pre-dam Commissioning Eutrophication Status and Control Evaluation in Three Gorges Reservoir .....	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (4586)
Occurrence, Distribution and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water of the Gonghu Bay, Taihu Lake .....	WU Xu-yue, ZOU Hua, ZHU Rong, <i>et al.</i> (4596)
Distribution Characteristics of <i>n</i> -alkanes in Sediment Core and Implication of Environment in Different Lakes of Dianchi .....	YU Li-yan, HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, <i>et al.</i> (4605)
Vertical Distribution and Pollution Risk Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Sediment of Inflowing Rivers of Erhai Lake Estuarine Wetland in Wet and Dry Seasons .....	..... WANG Shu-jin, LIU Yun-gen, WANG Yan, <i>et al.</i> (4615)
Variation of Nitrogen Forms in Sediments of Lihu Lake During Mineralization .....	ZHAO Li, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (4626)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of the Heavy Metals Content in the Surface Sediment and the Potential Ecological Risk Trends in the Three Gorges Reservoir Area .....	..... ZHUO Hai-hua, SUN Zhi-wei, TAN Ling-zhi, <i>et al.</i> (4633)
Modeling the Environmental Behaviors and Ecological Risks of Permethrin in Chaohu Lake .....	LIU Ya-li, WANG Ji-zhong, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (4644)
Simulation Experiment; Effect of Organic Colloid on Carbamazepine Transport in Porous Media .....	ZHANG Si, HE Jiang-tao, ZHU Xiao-jing (4651)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Inorganic Type Urban Landscape Water: Taking the Canal of Suzhou Section as Example .....	..... LI Qian-qian, PAN Yang, GONG Dan-yan, <i>et al.</i> (4662)
Rock Weathering Characteristics and the Atmospheric Carbon Sink in the Chemical Weathering Processes of Qingshuijiang River Basin .....	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (4671)
Pollution Characteristics Analysis in Shallow Groundwater of Typical Farmland Area, Southern China .....	GUO Hui, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4680)
Identification of Sulfate Sources in the Groundwater System of Zaozhuang; Evidences from Isotopic and Hydrochemical Characteristics .....	MA Yan-hua, SU Chun-li, LIU Wei-jiang, <i>et al.</i> (4690)
Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Extensive Green Roofs .....	SHEN Qing-ran, HOU Juan, LI Tian (4700)
Comparative Study on Pretreatment Process of Ultrafiltration; Chemical Coagulation and Electrocoagulation .....	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4706)
Adsorption Mechanisms Analysis of EOM on PVDF Ultrafiltration Membranes Modified by SiO <sub>2</sub> Using QCM-D and AFM .....	JIANG Jia-liang, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (4712)
Isolation of Quorum Quenching Bacteria and Their Function for Controlling Membrane Biofouling .....	ZHAO Chang, WANG Wen-zhao, XU Qi-yong (4720)
Effects of Hydraulic Loading Rate on the Removal of Pollutants from an Integrated Biological Settling Tank .....	WANG Wen-dong, MA Cui, LIU Hui, <i>et al.</i> (4727)
Characteristics of Nitrobacteria in SBR with Trace N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Addition .....	XIAO Peng-ying, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li (4734)
Start-up of Partial Nitrification AGS-SBR and Analysis of Its Microbial Community Composition .....	LU Hang, XIN Xin, GUAN Lei, <i>et al.</i> (4741)
Effects of PAHs Pollution on the Community Structure of Denitrifiers in a Typical Oilfield .....	YAO Yan-hong, WANG Ming-xia, ZUO Xiao-hu, <i>et al.</i> (4750)
Performance and Microbial Community Analysis of Bioaugmented Treatment of Diethyl Phthalate (DEP) in Membrane Bioreactor .....	ZHANG Ke, GUAN Yun, LUO Hong-bing, <i>et al.</i> (4760)
Comparative Analysis of the Bacterial Community on Anodic Biofilms in Sediment Microbial Fuel Cell Under Open and Closed Circuits .....	..... WU Yi-cheng, DENG Quan-xin, WANG Ze-jie, <i>et al.</i> (4768)
Anaerobic Biodegradability of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) .....	LI Fei, CHEN Yi-dan, ZHOU Zhen-ming, <i>et al.</i> (4773)
Comprehensive Effects of the Application of Water and Fertilizer Amount on CO <sub>2</sub> Emission from Soils of Summer-maize Field .....	YANG Shuo-huan, ZHANG Bao-cheng, WANG Li, <i>et al.</i> (4780)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in the Soil Erosion Area of West Mountains in Fujian Province, China .....	YAO Xiong, YU Kun-yong, ZENG Qi, <i>et al.</i> (4789)
Comprehensive Risk Evaluation of Cadmium in Soil-rice System Based on Uncertainty Analysis .....	YANG Yang, CHEN Wei-ping, LI Yan-ling, <i>et al.</i> (4800)
Fluorescence Properties of Glomalin and Its Relationship with Soil Physicochemical Characteristics in Different Regions of Beijing City .....	..... CHAI Li-wei, LIU Meng-jiao, JIANG Da-lin, <i>et al.</i> (4806)
Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metal Pollution and Health Risk in Soil Around the Coal Industrial Area of East Junggar Basin .....	..... LIU Fang, Tashpolat Tiyp, Ilyas Nurmamat, <i>et al.</i> (4815)
Characteristics of Microbial Nitrogen Degradation in Fluvo-aquic Soil of Hebei Plain .....	ZHANG Can-can, PANG Hui-cong, GAO Tai-zhong, <i>et al.</i> (4830)
Influence of Arsenate and Phenanthrene on Carbon-groups of <i>Pteris vittata</i> L. Roots .....	LIAO Xiao-yong, GONG Xue-gang, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4841)
Effect of Alkali Solids Amendment on Sewage Sludge Aerobic Composting and the Potential of Related Products on Infertile Soil Amelioration .....	..... CAI Han-zhen, NING Xi-cui, WANG Quan, <i>et al.</i> (4848)
Adsorption and Influential Factors of Diuron on the Loess Soil by Adding Different Biochar Prepared at Varying Temperatures .....	SUN Hang, JIANG Yu-feng, SHI Lei-ping, <i>et al.</i> (4857)
Characteristics of Heavy Metal Contents in Human Hairs of Mine Contaminated Areas in Nandan County .....	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, XIA De-shang, <i>et al.</i> (4867)
Preparation of Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) Composite Oxides for Efficient Fluoride Uptake .....	WANG Ai-he, ZHOU Kang-gen, LIU Xing, <i>et al.</i> (4874)
Fe-Mn Binary Oxide Impregnated Chitosan Bead (FMCB): An Environmental Friendly Sorbent for Phosphate Removal .....	FU Jun, FAN Fang, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4882)
Leaching Toxicity and Bioaccessibility of Heavy Metals in MSW Fly Ash with Various Particle Sizes .....	WANG Chun-feng, CHEN Guan-fei, ZHU Yan-chen, <i>et al.</i> (4891)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

## 环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年12月15日 第37卷 第12期(卷终)

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行