

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心  
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.6  
第41卷 第6期

# 目次

|                                                            |                                                                |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 基于SPAMS的天津市夏季环境受体中颗粒物的混合状态及来源 .....                        | 林秋菊, 徐娇, 李梅, 王伟, 史国良, 冯银厂 (2505)                               |
| 南京北郊降水无机离子和有机酸的化学特征及来源分析 .....                             | 杨笑影, 曹芳, 林煜棋, 章炎麟 (2519)                                       |
| 西安市PM <sub>2.5</sub> 中水溶性离子的季节变化特征 .....                   | 黄含含, 王羽琴, 李升苹, 陈庆彩 (2528)                                      |
| 新疆石化工业区颗粒物含水量和酸度对二次无机组分形成的影响 .....                         | 刘会斌, 迪丽努尔·塔力甫, 王新明, 张潇潇, 王威, 阿布力克木·阿不力孜, 买里克扎提·买合木提, 刘伟 (2536) |
| 长秋季生物物质燃烧对PM <sub>2.5</sub> 中WSOC吸光性的影响 .....              | 孟德友, 曹芳, 翟晓瑶, 张世春, 章炎麟 (2547)                                  |
| 2019年5月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源 .....                       | 王倩 (2555)                                                      |
| 南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 .....                             | 曹梦瑶, 林煜棋, 章炎麟 (2565)                                           |
| 郑州市春季大气污染过程VOCs特征、臭氧生成潜势及源解析 .....                         | 任义君, 马双良, 王思维, 于世杰, 李一丹, 张瑞芹, 尹沙沙 (2577)                       |
| 上甸子区域背景站VOCs污染特征及其对臭氧生成贡献 .....                            | 韩婷婷, 李颖若, 邱雨露, 何迪, 王焱, 马志强 (2586)                              |
| 北京市餐饮业大气污染物排放特征 .....                                      | 孙成一, 白画画, 陈雪, 翟翼飞, 高启天, 何万清, 聂磊, 石爱军, 李国傲 (2596)               |
| 北京市农业机械排放因子与排放清单 .....                                     | 王凯, 樊守彬, 亓浩云 (2602)                                            |
| 北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化 .....                                     | 李贝贝, 黄玉虎, 毕晓辉, 刘李阳, 秦建平 (2609)                                 |
| 基于MODIS_C061的长三角地区AOD与Angström指数时空变化分析 .....               | 张颖蕾, 崔希民 (2617)                                                |
| 环渤海地区2,4,4'-三氯联苯的多介质归趋模拟 .....                             | 张毅, 马艳飞, 宋帅, 吕永龙, 张盛, 吴强 (2625)                                |
| 岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析 .....                        | 周石磊, 孙悦, 苑世超, 彭瑞哲, 刘世崇, 岳奇丞, 张航, 王周强, 李再兴, 罗晓 (2635)           |
| “河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析 .....                                 | 李悦昭, 陈海洋, 孙文超 (2646)                                           |
| 伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价 .....                            | 姜时欣, 翟付杰, 张超, 王蒙蒙, 单保庆 (2653)                                  |
| 典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析 .....                                   | 赵然, 韩志伟, 申春华, 张水, 涂汉, 郭永丽 (2664)                               |
| 沉积物参与氮磷脉冲式输入对太湖水体营养盐浓度和藻类生长的影响 .....                       | 陈洁, 许海, 詹旭, 许笛, 朱广伟, 朱梦圆, 李鹏飞, 康丽娟 (2671)                      |
| 丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因素 .....                           | 李胜男, 陈豪宇, 彭华, 李芸君, 朱坚, 简燕, 纪雄辉 (2679)                          |
| 胶网藻对水体中恩诺沙星的毒性响应及去除作用 .....                                | 王振方, 韩子玉, 王梦雪, 马逸驰, 王婷, 王丽卿, 张玮 (2688)                         |
| 不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较 .....                           | 桑雨璇, 杨珈乐, 熊怡, 尹文博, 汪华, 王和云 (2698)                              |
| 过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用 .....                               | 张帅, 李大鹏, 丁玉琴, 徐楚天, 许鑫澎, 孙培荣, 赵哲豪, 黄勇 (2706)                    |
| 基于区域DNDC的稻田轮作氮素空间分异与驱动分析:以晋江流域为例 .....                     | 王亚楠, 祝伟, 祁新华, 范水生 (2714)                                       |
| 不同铁锰浓度的低温铁锰氨地下水净化中氨氮去除途径 .....                             | 张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (2727)                                    |
| 高晶度Mn-Fe LDH催化剂活化过一硫酸盐降解偶氮染料RBK5 .....                     | 李立, 吴丽颖, 董正玉, 王霖, 张倩, 洪俊明 (2736)                               |
| Fe-cyclam/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 体系催化降解罗丹明B机制 ..... | 余雨清, 陈翔宇, 蔡荣华, 黄歆珏, 陈曼 (2746)                                  |
| 微生物光电化学池去除硝酸盐氮:以PANl/TiO <sub>2</sub> -NTs为光阳极 .....       | 卢忆, 周海珊, 彭瑞建, 叶杰旭, 陈建孟, 宋爽, 张士汉 (2754)                         |
| 缺氧MBR-MMR处理海水养殖废水性能及膜污染特性 .....                            | 陈凡雨, 徐仲, 尤宏, 柳锋, 李之鹏, 陈其伟, 韩红卫 (2762)                          |
| HRT对改良式A <sup>2</sup> /O-BAF反硝化除磷脱氮的影响 .....               | 赵凯亮, 刘安迪, 南彦斌, 梁利民, 王云霞, 陈永志 (2771)                            |
| 重金属Ni(II)对厌氧氨氧化脱氮性能的影响及其动力学特征变化 .....                      | 孙琪, 赵白航, 范飒, 周邦磊, 李玉璋 (2779)                                   |
| 异养硝化-好氧反硝化混合菌对尿素的去除及重金属和盐度的影响 .....                        | 王萌萌, 曹刚, 张迪, 冯乃亮, 潘涌璋 (2787)                                   |
| 火山岩填料曝气生物滤池的SNAD工艺启动特性及功能菌丰度演替 .....                       | 薛嘉俊, 张绍青, 张立秋, 李淑更, 姚海楠, 耿忠轩, 李鸿, 刘晓玲 (2796)                   |
| 游离羟胺对两种典型亚硝态氮氧化菌活性的影响 .....                                | 沈琛, 张树军, 彭永臻 (2805)                                            |
| 死菌DNA对厌氧消化污泥中抗生素抗性基因及微生物群落分析的干扰 .....                      | 苏宇傲, 刘宏波, 毛秋燕, 张慧旻, 张衍, 刘和 (2812)                              |
| 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价 .....                                 | 陈文轩, 李茜, 王珍, 孙兆军 (2822)                                        |
| 土壤环境质量预警体系构建与应用 .....                                      | 李笑诺, 丁寿康, 陈卫平, 王夏晖, 吕斯丹, 刘睿 (2834)                             |
| 不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系 .....                   | 毛霞丽, 邱志腾, 张爽, 沈倩, 章明奎 (2842)                                   |
| 长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征 .....                            | 宁玉菲, 魏亮, 魏晓梦, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 吴金水 (2852)                        |
| 生物质炭对磷富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响 .....                        | 黄洋, 郭晓, 胡学玉 (2861)                                             |
| 基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价 .....                        | 肖冰, 薛培英, 韦亮, 刘成程, 高培培, 樊利敏, 杜佳燕, 刘文菊 (2869)                    |
| 重构土壤垂直剖面重金属Cd赋存形态及影响因素 .....                               | 胡青青, 沈强, 陈飞, 尹炳, 邹宏光, 庄红娟, 张世文 (2878)                          |
| 新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果 .....                               | 陈兆进, 李英军, 邵洋, 林立安, 徐鸽, 陈彦, 田伟, 姚伦广, 韩辉 (2889)                  |
| 三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征 .....                        | 李丽娟, 李昌晓, 陈春桦, 杨治华, 陈雪梅 (2898)                                 |
| 滇池水中细菌和古菌氮代谢功能基因的空间分布 .....                                | 张宇, 左剑恶, 王丝可, Alisa Salimova, 李爱军, 李玲玲 (2908)                  |
| 模拟升温对冰川前缘地微生物种群的影响 .....                                   | 王愉琬, 马安周, 种国双, 谢飞, 周汉昌, 刘国华, 庄国强 (2918)                        |
| 水肥气耦合对温室番茄地土壤N <sub>2</sub> O排放及番茄产量的影响 .....              | 商子惠, 蔡焕杰, 陈慧, 孙亚楠, 李亮, 朱艳, 王晓云 (2924)                          |
| 矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用 .....                               | 尚誉, 杨丰隆, 宁夏, 董铁茹, 桑楠 (2936)                                    |
| 海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价 .....                   | 汪慧娟, 旷泽行, 周贤, 覃晓青, 黄洪辉 (2942)                                  |
| 春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因素分析 .....                           | 贺玉晓, 李珂, 任玉芬, 王思琪, 方文颖 (2951)                                  |
| 热解温度和时间对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估 .....                            | 蔡朝卉, 楚沉静, 郑浩, 罗先香, 李锋民 (2963)                                  |
| 长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年) .....                       | 蒋自然, 金环环, 王成金, 叶士琳, 黄艳豪 (2972)                                 |
| 《环境科学》征订启事(2595) 《环境科学》征稿简则(2687) 信息(2697, 2713, 2811)     |                                                                |



# 基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉砷铅污染特征及健康风险评价

肖冰<sup>1</sup>, 薛培英<sup>1</sup>, 韦亮<sup>1</sup>, 刘成程<sup>2</sup>, 高培培<sup>1</sup>, 樊利敏<sup>1</sup>, 杜佳燕<sup>1</sup>, 刘文菊<sup>1\*</sup>

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院, 省部共建华北作物改良与调控国家重点实验室, 河北省农田生态环境重点实验室, 保定 071000; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

**摘要:**以典型镉(Cd)、砷(As)和铅(Pb)复合污染农田为主要研究对象,在田块尺度上(纵向上受周边冶炼厂和污灌河流影响,横向上受道路交通影响)重点调查分析了农田土壤和小麦籽粒中Cd、As和Pb污染特征,并采用化学致癌物和化学非致癌物模型对小麦籽粒Cd、As和Pb含量进行了人体健康风险评价。结果表明,该农田土壤为中度污染水平,土壤Cd、As和Pb含量均有不同程度超标(GB 15618-2018),点位超标率分别为100%、100%和36.7%;小麦籽粒中Cd和Pb含量超标率分别为76.7%和13.3%,As含量未超过食品安全国家标准(GB 2762-2017)。在纵向上距冶炼厂和污灌河流不同距离土壤Cd、As和Pb含量无显著差异,但小麦籽粒中Cd和As含量差异显著,近组Cd和As含量比远组分别高14.9%和41.8% ( $P < 0.05$ )。在横向上土壤和小麦籽粒Pb含量主要受道路交通影响,最近组土壤和籽粒Pb含量分别比最远组高78.9%和471% ( $P < 0.05$ )。该典型污染农田中小麦籽粒Cd和As对成人和儿童均存在致癌风险(致癌风险值 $R_i > 1 \times 10^{-4}$ ),风险值Cd > As,儿童 > 成人,小麦籽粒Pb尚未产生健康风险。

**关键词:**田块尺度;复合污染农田;小麦;重金属;污染特征;健康风险

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)06-2869-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201911130

## Characteristics of Cd, As, and Pb in Soil and Wheat Grains and Health Risk Assessment of Grain-Cd/As/Pb on the Field Scale

XIAO Bing<sup>1</sup>, XUE Pei-ying<sup>1</sup>, WEI Liang<sup>1</sup>, LIU Cheng-cheng<sup>2</sup>, GAO Pei-pei<sup>1</sup>, FAN Li-min<sup>1</sup>, DU Jia-yan<sup>1</sup>, LIU Wen-ju<sup>1\*</sup>

(1. State Key Laboratory of North China Crop Improvement and Regulation, Key Laboratory of Ecological Environment of Farmland in Hebei, College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** In recent years, heavy metal pollution in farmlands has become increasingly serious because of human activities such as metal smelting, sewage irrigation, and road traffic in China. A field survey was conducted to investigate characteristics of Cd, As, and Pb in soil and wheat grains and assess the health risk of grain-Cd/As/Pb to humans on the fields scale. The farmland was influenced by smelter and sewage irrigation in the attitude and by road traffic in the horizon. The results showed that in farmland soil with moderate pollution levels, Cd, As, and Pb concentrations in soil samples all exceeded the risk screening values of farmland soil (GB 15618-2018), and the exceeding rates were 100%, 100%, and 36.7% respectively; the exceeding rates of Cd and Pb concentrations in wheat grains were 76.7% and 13.3%, respectively (GB 2762-2017). Distance from smelter, river of sewage irrigation, and road had no significant effect on Cd, As, and Pb concentrations in soil but had a significant effect on Cd and As concentrations in wheat grains, with the median Cd and As concentrations of the closest group being 14.9% and 41.8%, respectively, higher than the highest group ( $P < 0.05$ ). The Pb concentrations in soil and wheat grains were influenced by road traffic; the median Pb concentrations of the closest group were 78.9% and 471%, respectively, higher than the highest group ( $P < 0.05$ ). Cd and As in wheat grains have carcinogenic risks ( $R_i > 1 \times 10^{-4}$ ),  $R_{Cd} > R_{As}$ ,  $R_{children} > R_{adult}$ , while Pb poses no health risks in this farmland.

**Key words:** field-scale; compound pollution farmland; wheat; heavy metals; pollution characteristics; health risk

近年来,随着我国经济的发展,工业“三废”的排放、污灌和道路交通等人为活动造成重金属污染物向农田排放增加,从而使我国农田土壤重金属污染日趋严重。2014年全国土壤污染状况调查公报显示,我国耕地土壤点位超标率达19.4%,主要污染物镉(Cd)、砷(As)和铅(Pb)的点位超标率分别达到了7.0%、2.7%和1.5%<sup>[1]</sup>。Cd、As和Pb被美国环保署(USEPA)列为优先控制污染物,会通过食物链威胁人体和生态健康。

华北地区水资源短缺,自1972年以来,污水灌溉作为一种重要的替代性水资源广泛地应用于农业灌溉中,但是长期污灌已导致一半以上污灌区土壤被污染,其中主要为重金属污染<sup>[2,3]</sup>。河北省保定、

收稿日期: 2019-11-14; 修订日期: 2019-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(31870490); 国家重点研发计划项目(2018YFC1800806); 河北省高等学校创新团队领军人才培育计划项目(LJRC016)

作者简介: 肖冰(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为环境化学污染与控制, E-mail: 262099945@qq.com

\* 通信作者, E-mail: liuwj@hebau.edu.cn

石家庄和天津市是华北地区的主要污灌区,研究表明长期污灌导致污灌区土壤重金属累积,石家庄污灌区有 23.1% 的小麦籽粒 Pb 超标,重金属的健康风险指数大于 1<sup>[4]</sup>;天津污灌区小麦和水稻中 Pb 含量高于国家食品安全限值,并且小麦和水稻中 As THQ 值的和超过 1<sup>[5]</sup>;保定污灌区距今已有 60 多年污灌历史<sup>[6]</sup>,长期污灌导致土壤中 Cd、As 和 Pb 明显累积,周边农田表层土壤 Cd、As 和 Pb 含量点位超标率分别为 65.0%、20.0% 和 37.0%<sup>[7]</sup>,小麦籽粒中 Cd 和 Pb 均存在超标现象,并且长期污灌区(>60 a)以及污灌和冶炼混合区小麦籽粒总目标风险指数(TTHQ)大于 1<sup>[8]</sup>,以上均说明食用该地区小麦会对当地居民产生健康风险.因此,污灌区农田土壤和粮食重金属污染问题需要引起足够的重视.

金属冶炼过程产生的废渣、废水和烟气中含有大量重金属,不合理排放同样易造成冶炼厂周边土壤的重金属污染.贵州毕节铅锌冶炼区耕地土壤受到重金属不同程度污染,稻米、玉米和小麦均存在重金属超标现象,且重金属污染程度以小麦最重,Cd 和 Pb 超标率分别为 33.3% 和 6.67%<sup>[9]</sup>.此外,广西矿区和冶炼区周围水田 Pb 污染调查结果显示农田土壤和水稻籽粒中 Pb 均主要来源于大气沉降,其贡献率分别为 42% 和 98%<sup>[10]</sup>.

道路交通作为周边农田土壤的污染源之一,也是导致路侧土壤和植物重金属污染的重要来源<sup>[11,12]</sup>.机动车尾气的排放,轮胎与路面间磨损、刹车等车辆零部件磨损后产生的重金属粉尘以及道路扬尘会经自然沉降进入土壤或直接被植物吸收,使得路侧土壤及植物中重金属含量高于远离道路的区域,其中道路扬尘贡献较大<sup>[13~15]</sup>.有研究表明,距离道路 0~30 m 内土壤 Cd 和 Pb 含量随距离路侧距离增加呈指数下降趋势,30 m 后趋于平稳<sup>[16]</sup>;此外,路侧植物叶片的 Pb 含量受距离道路远近及车流量影响<sup>[17]</sup>.

目前有关农田土壤和作物重金属污染特征的研究多集中于大尺度单一重金属来源或单一影响因素等方面,对田块尺度多种污染源综合影响下土壤和主粮作物籽粒中重金属 Cd、As 和 Pb 污染特征和健康风险评价方面的系统研究较少.因此,本研究围绕保定市具有 40 a 污灌历史的小麦种植区,选择受污灌、冶炼厂和道路交通综合影响下的典型农田为主要研究对象,调查并分析了距冶炼厂、污灌河流、道路这 3 个污染源不同距离情况下土壤及小麦籽粒中 Cd、As 和 Pb 的污染特征,同时,对小麦籽粒中 Cd、As 和 Pb 分别进行致癌和非致癌健康风险评价,以期科学评估污灌、冶炼和道路交通复合污染

区农田重金属污染风险和小麦安全生产提供依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本次调查区域为华北某污灌区,其主要种植方式为冬小麦-夏玉米,一年两熟.在该区域选择受冶炼厂、污灌、道路交通共同影响的典型农田(图 1),该农田东侧紧邻道路,北侧与污灌河流和冶炼厂相距 500 m.该区域农田污水灌溉始于 1958 年,1998 年改为地下水喷灌,历时 40 a.冶炼厂为炼铜厂,于 2005 年建厂,2016 年停产,历时 11 a.

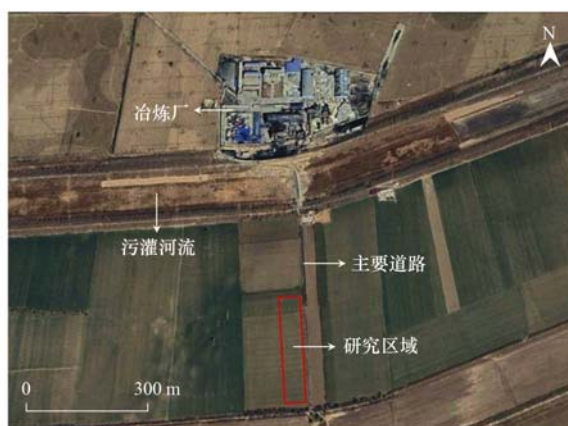


图 1 研究区域概况

Fig. 1 Location of the study area

### 1.2 样品采集及分析方法

2017 年初步调查显示 0~20 cm 耕层土壤 8 种重金属中只有 Cd、As 和 Pb 存在超标现象,且农作物玉米籽粒重金属没有出现超标现象,因此,在 2018~2019 年详细调查时将研究的主要对象定为 0~20 cm 耕层土壤和小麦籽粒中 Cd、As 和 Pb 含量.

#### 1.2.1 土壤样品采集及分析方法

由于污灌、冶炼厂和道路交通对土壤及小麦籽粒重金属累积的影响范围不同,将该农田均匀划分为 30 个采样单元(150 个采样点),每个采样单元 500 m<sup>2</sup>(南北纵向 100 m,东西横向 5 m),采样单元布置见图 2.

于 2018 年 6 月采集土壤样品,每个采样单元按照 S 型取样法采集 0~20 cm 耕层土壤 5 个样点(30 个采样单元,共 150 个采样点).土壤样品风干后去除沙砾及植物残体,粉碎后过 0.15 mm 尼龙筛待测.土壤中 Cd、As 和 Pb 全量采用硝酸+氢氟酸+高氯酸(DZ/T0279-2016)消解,消解液中 Cd 和 Pb 含量采用 ICP-MS(Agilent 7500X),而 As 采用原子荧光(AFS-3000)进行测定,以国家一级标准物质(GBW07451、GBW07452 和 GBW0745)进行准确度



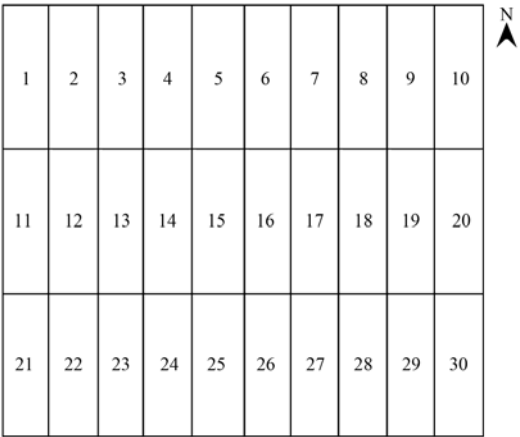


图2 采样单元布置示意  
Fig. 2 Schematic diagram of sampling unit layout

和精密度控制,回收率为80%~90%。

1.2.2 植物样品采集及分析方法

采集土壤样品的同时按照1:1取样法采集与土壤对应的小麦样品,风干后脱粒将小麦籽粒洗净65℃烘干至恒重,不锈钢微型粉样机粉碎后保存备用。小麦籽粒中Cd、As和Pb全量采用HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>(4:1,体积比)消解<sup>[18]</sup>,消解液中Cd、As和Pb含量采用ICP-MS(PE NexION 350X)和原子荧光(AFS-9600)进行测定,以国家一级标准(GBW10046和GBW07603)进行准确度和精密度控制,回收率为80%~110%。

1.3 农田土壤Cd、As和Pb污染评价方法

1.3.1 单因子污染指数法

其表达式为:

$$P_i = C_i/S_i \tag{1}$$

式中, $P_i$ 为重金属*i*单项污染指数; $C_i$ 为重金属*i*实测含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); $S_i$ 为重金属*i*评价标准值( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。分级标准: $P_i\leq 1$ 时表示无污染; $1 < P_i\leq 2$ 时表示轻度污染; $2 < P_i\leq 3$ 时表示中度污染; $P_i > 3$ 时表示重度污染。

1.3.2 综合污染指数法

其表达式为:

$$P = \sqrt{\frac{P_i^2 + P_{\max}^2}{2}} \tag{2}$$

式中, $P$ 为重金属综合污染指数; $\overline{P_i}$ 为各单项污染指数平均值; $P_{\max}$ 为各单项污染指数最大值,分级标准见表1。

1.4 小麦籽粒重金属健康风险评价模型

针对重金属污染,目前国际健康风险评价模型主要分:化学致癌物风险评价模型和化学非致癌物风险评价模型。Cd和As具有致癌风险,选择化学致癌物风险评价模型,其表达式为:

$$R_i = \text{ADD}_i \times \text{SF}_i \tag{3}$$

$$R = \sum R_i \tag{4}$$

式中, $R_i$ 为化学致癌物质*i*所致个人致癌风险; $R$ 为总致癌物所致个人致癌风险; $\text{ADD}_i$ 为化学致癌物质*i*的日均暴露剂量, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ;  $\text{SF}_i$ 为化学致癌物质*i*的致癌强度系数, $\text{kg}\cdot\text{d}\cdot\text{mg}^{-1}$ ,Cd为6.1,As为1.5<sup>[19]</sup>。

分级标准: $R_i < 1 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ 表示化学致癌物质*i*对人体健康产生的风险不明显; $1 \times 10^{-6} < R_i < 1 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ 表示有风险且人体可接受的风险水平; $R_i > 1 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ 表示有较显著风险。 $R < 1 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ 表示致癌重金属对人体健康产生的风险不明显; $1 \times 10^{-6} < R < 1 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ 表示有风险且人体可接受的风险水平; $R > 1 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ 表示有较显著风险。

Pb不具有致癌风险,选择化学非致癌物风险评价模型,其表达式为:

$$H = \text{ADD}_i/\text{RfD} \tag{5}$$

式中, $H$ 为化学非致癌物质所致个人非致癌风险; $\text{ADD}_i$ 为化学非致癌物质*i*的日均暴露剂量, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ;  $\text{RfD}$ 为化学非致癌物质暴露的参考剂量, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ,Pb为 $3.5 \times 10^{-3}$ <sup>[20]</sup>。

分级标准: $H\leq 1$ ,表明化学非致癌物尚未对人体造成健康风险; $H > 1$ ,有很大可能性对人体健康产生影响; $H > 10$ ,已经对人体健康造成威胁,存在慢性毒性。

农作物摄入途径下日均暴露量 $\text{ADD}_i$ 计算公式为:

$$\text{ADD}_i = (C_i \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED})/(\text{BW} \times \text{AT}) \tag{6}$$

式中各人体健康风险评价模型参数见表2<sup>[21]</sup>。

| 表1 土壤环境质量分级标准                                      |                 |      |      |
|----------------------------------------------------|-----------------|------|------|
| Table 1 Soil contamination level grading standards |                 |      |      |
| 等级                                                 | 综合污染指数          | 污染等级 | 污染水平 |
| I                                                  | $P\leq 0.7$     | 安全   | 清洁   |
| II                                                 | $0.7 < P\leq 1$ | 警戒线  | 尚清洁  |
| III                                                | $1 < P\leq 2$   | 轻污染  | 轻度污染 |
| IV                                                 | $2 < P\leq 3$   | 中污染  | 中度污染 |
| V                                                  | $P > 3$         | 重污染  | 重度污染 |

1.5 数据分析

卫星图源自Google Earth,采用Microsoft Excel 2010进行数据分析,Origin 2017进行图形处理,SPSS 21.0统计软件进行统计学分析,采用单因素方差分析法(One-way ANOVA)进行显著性检验,采用最小显著差异法(LSD)进行不同处理均值的差异显著性比较。

表 2 人体健康风险评价模型参数

Table 2 Parameters of human health risk assessment model

| 评价参数  | 含义       | 单位                             | 参考值                                                |       |
|-------|----------|--------------------------------|----------------------------------------------------|-------|
|       |          |                                | 成人                                                 | 儿童    |
| $C_i$ | 作物中重金属含量 | $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ |                                                    |       |
| IR    | 日均食物摄入量  | $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$  | 0.5                                                | 0.177 |
| EF    | 作物暴露频率   | $\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$   | 365                                                | 365   |
| ED    | 作物暴露年限   | a                              | 30                                                 | 10    |
| BW    | 体重       | kg                             | 70                                                 | 16    |
| AT    | 作物平均作用时间 | d                              | $30\times 365$ (致癌物); $\text{ED}\times 365$ (非致癌物) |       |

冶炼厂毗邻污灌河流,其对农田影响方向为纵向,按照距污灌河流和冶炼厂远近将采样单元划分为3个区组:近组(1~10号采样单元)、中组(11~20号采样单元)和远组(21~30号采样单元).采样单元横向间隔5 m 旨在探索距道路在横向不同距离上土壤和小麦籽粒 Cd、As 和 Pb 的累积情况,因此,在横向上按照距离道路远近将采样单元又划分为5个区组:最远组(1~2、11~12、21~22号采样单元)、远组(3~4、13~14、23~34号采样单元)、中组(5~6、15~16、25~26号采样单元)、近组(7~8、17~18、27~28号采样单元)和最近组(9~10、19~20、29~30号采样单元).

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属 Cd、As 和 Pb 含量及分布特征

本研究的农田土壤 pH 值为 7.90~8.30,土壤 Cd 和 As 含量范围分别为  $1.23\sim 1.97\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $66.3\sim 89.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (表 3),全部超过我国土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618-

2018)的筛选值( $\text{pH}>7.5$ ),分别为标准的 2.05~3.28 倍和 2.65~3.56 倍;土壤 Pb 含量范围为  $79.1\sim 450\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,超标率为 36.7%,为标准的 0.470~2.65 倍.土壤 Cd、As 和 Pb 单项污染指数分别为 2.60、3.16 和 1.06(表 4),分别为中度污染、重度污染和轻度污染,污染严重程度表现为  $\text{As}>\text{Cd}>\text{Pb}$ .对比土壤环境质量分级标准(表 1),总体来看该典型农田土壤的综合污染指数高达 2.75,为中度污染水平(表 4).由变异系数(CV)可知,Cd 和 As 变异系数分别为 12.4%和 7.06%,均为低等变异( $\text{CV}\leq 15\%$ ),而 Pb 的变异系数较大为 51.7%,为高等变异( $\text{CV}>35\%$ ).调查显示,沈抚污灌区和陕西铅锌冶炼区周边土壤 Cd 和 Pb 分布均随距离污染源远近存在较大差异<sup>[22,23]</sup>,同样日本越后铁路沿线土壤 Pb 的变异系数分别是 Cd 和 As 的 3.60 倍和 6.60 倍<sup>[24]</sup>,变异系数表现为  $\text{Pb}>\text{Cd}>\text{As}$ ,这说明土壤中 Pb 含量更易受道路交通、污灌和冶炼等人为因素的影响,这与本研究结果一致.

表 3 壤 Cd、As 和 Pb 含量统计

Table 3 Cd, As, and Pb concentrations in soil

| 重金属 | 范围/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 标准差   | 变异系数/% | 超标率/% | 土壤环境质量标准<br>(GB 15618-2018, $\text{pH}>7.5$ )/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ |       |
|-----|------------------------------------|------------------------------------|-------|--------|-------|-------------------------------------------------------------------------------|-------|
|     |                                    |                                    |       |        |       | 筛选值                                                                           | 管制值   |
| Cd  | 1.23~1.97                          | 1.56                               | 0.190 | 12.4   | 100   | 0.6                                                                           | 4     |
| As  | 66.3~89.0                          | 78.9                               | 5.57  | 7.06   | 100   | 25                                                                            | 100   |
| Pb  | 79.1~450                           | 181                                | 93.5  | 51.7   | 36.7  | 170                                                                           | 1 000 |

表 4 土壤 Cd、As 和 Pb 污染状况评价

Table 4 Pollution index evaluation of Cd, As, and Pb in soil

| 单项污染指数 |      |      | 综合污染指数 |
|--------|------|------|--------|
| Cd     | As   | Pb   |        |
| 2.60   | 3.16 | 1.06 | 2.75   |

2.1.1 距冶炼厂和污灌河流不同距离土壤中 Cd、As 和 Pb 分布特征

为了研究冶炼厂和污灌对农田土壤 Cd、As 和 Pb 累积的影响,将采样单元分为近、中和远这 3 组进行数据分析,结果显示 3 组采样单元之间土壤 Cd 和 As 含量中位值均在  $1.55\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $79.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  左

右,而 Pb 含量中位值由远及近分别为 136、145 和  $157\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (图 3),虽有增加趋势,但 3 组之间土壤中 Cd、As 和 Pb 均无显著差异( $P>0.05$ ).河北石家庄典型污灌区土壤 Cd 分布大致呈现出距离污灌河流越近污染浓度越大的趋势<sup>[25]</sup>;河南焦作铅锌冶炼厂(停产 14 a) 3 km 范围内距离冶炼厂越近 Cd 和 Pb 污染越严重<sup>[26]</sup>.该典型农田土壤 Cd、As 和 Pb 纵向分布差异不显著,可能是由于田块尺度的调查范围较小造成污染特征不明显,并且该地区近几年未受污灌和冶炼厂影响,长期农业活动使其未表现出随着距离污染源远近呈现出显著的差异.



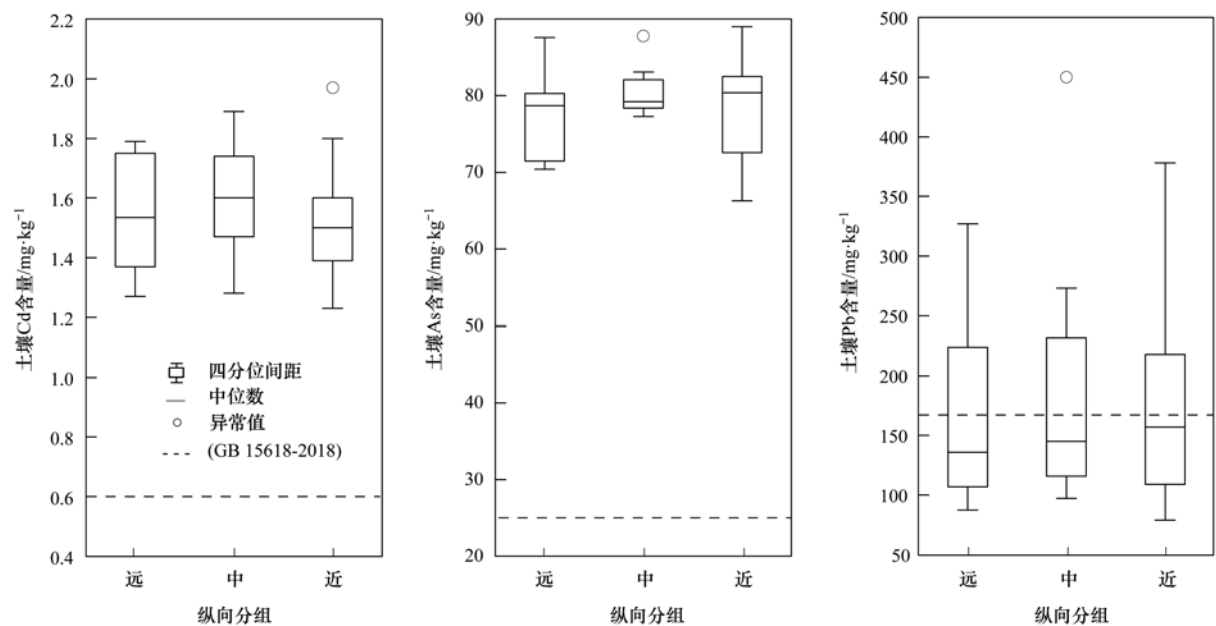


图3 距冶炼厂和污灌河流不同距离土壤中 Cd、As 和 Pb 含量

Fig. 3 Cd, As, and Pb concentrations in soil at different distances from smelter and river of sewage irrigation

2.1.2 距道路不同距离土壤中 Cd、As 和 Pb 分布特征

为了研究道路交通对农田土壤 Cd、As 和 Pb 累积的影响,将采样单元按照距离道路远近分为最远、远、中、近和最近 5 组进行比较(图 4)。结果显示 5 组采样单元之间土壤 As 含量中位值在 80.0  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  左右,由远及近 5 组土壤中 Cd 含量中位值分别为 1.53、1.69、1.59、1.34 和 1.55  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , Pb 含量中位值分别为 119、195、172、108 和 212  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。5 组采样单元土壤 Cd(远与近两组除外)、As 和 Pb(最远与远两组除外)含量差异均不显著( $P>0.05$ ),但土壤 Pb 含量中位值最高和最低分

别在最近组和最远组,最近组比最远组高 78.9%,且最近组土壤 Pb 含量超标率为 66.7%,而最远组土壤 Pb 含量均未超过土壤环境质量标准筛选值(GB 15618-2018)。土壤 Cd 和 Pb 含量均表现出先降低再升高后降低的趋势,并且峰值均出现在距道路 30~40 m 的远组。有研究表明国道 310 杏花营断面土壤 Cd 和 Pb 均为偏态分布,含量峰值位置同样出现在距离路基 30~50 m 之间<sup>[27]</sup>,与本研究结果一致。Pb 同位素和主成分分析结果也表明,九龙江中下游沿岸与天津近郊农田土壤中 57.0% 和 24.1% 的 Pb 来源于道路交通<sup>[28, 29]</sup>。可见道路交通

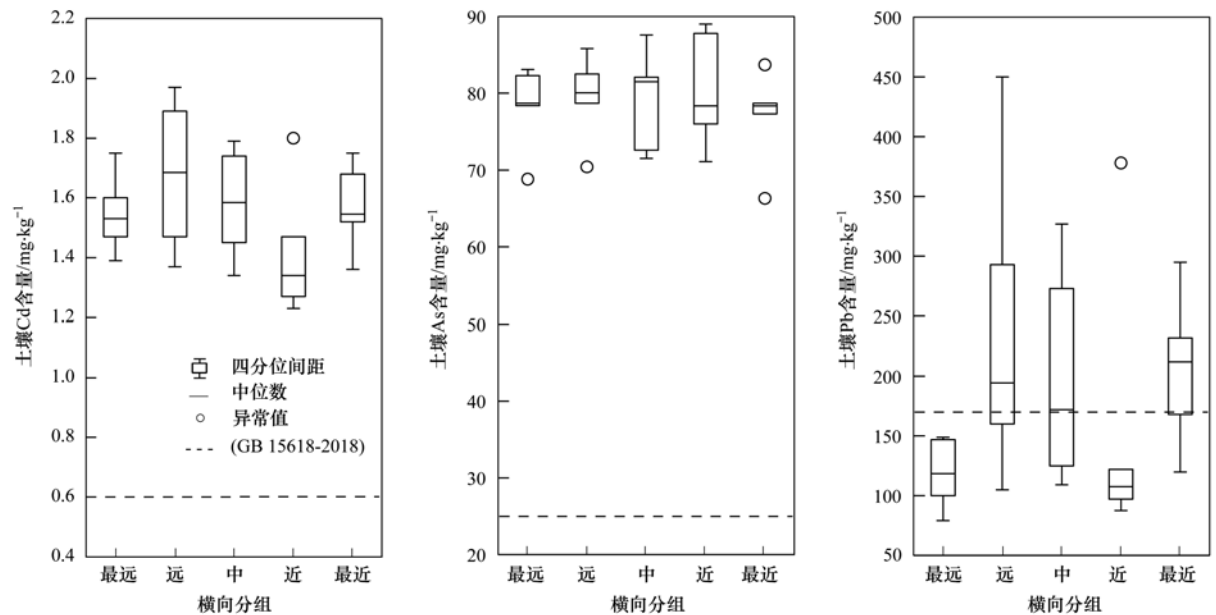


图4 距道路不同距离土壤中 Cd、As 和 Pb 含量

Fig. 4 Cd, As, and Pb concentrations in soil at different distances from road

是该典型农田土壤 Pb 含量的重要来源,机动车产生的粉尘及道路扬尘中负载的 Pb 会进入土壤,造成近路土壤中 Pb 含量升高,这也是土壤 Pb 含量的变异系数远高于 Cd 和 As 的原因.

2.2 小麦籽粒 Cd、As 和 Pb 含量及分布特征

该农田小麦籽粒中 Cd、As 和 Pb 含量见表 5. 小麦籽粒 Cd 和 Pb 含量范围分别为 0.070 ~ 0.140  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.030 ~ 0.430  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 部分采样单元 Cd 和 Pb 含量超过了食品安全国家标准(GB 2762-2017)安全限值,超标率分别为 76.7% 和 13.3%, 分别为标准的 0.700 ~ 1.40 倍、0.150 ~ 2.15 倍;小麦

籽粒 As 含量范围 0.110 ~ 0.300  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 均未超过食品安全国家标准安全限值,为标准的 0.220 ~ 0.600 倍. 小麦籽粒 Cd 和 As 变异系数分别为 16.0% 和 26.9%, 均为中等变异 ( $15\% < \text{CV} \leq 35\%$ ), Pb 变异系数 80.6%, 为高等变异 ( $\text{CV} > 35\%$ ), 变异系数表现为  $\text{Pb} > \text{As} > \text{Cd}$ . 调查表明,开封段引黄灌区受到人为活动影响,小麦籽粒重金属含量空间分布差异显著, Cd、Pb 均为高等变异 ( $\text{CV} > 35\%$ )<sup>[30]</sup>. 该典型农田小麦籽粒中 Cd、As 和 Pb 变异系数较大,说明在很大程度上受到冶炼厂、污灌和道路交通的影响.

表 5 小麦籽粒 Cd、As 和 Pb 含量

Table 5 Cd, As, and Pb concentrations in wheat grains

| 重金属 | 范围<br>/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 均值<br>/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 标准差<br>/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 变异系数<br>/% | 超标率/% | 食品安全国家标准<br>(GB 2762-2017)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ |
|-----|----------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|------------|-------|------------------------------------------------------------|
| Cd  | 0.070 ~ 0.140                          | 0.110                                  | 0.020                                   | 16.0       | 76.7  | 0.1                                                        |
| As  | 0.110 ~ 0.300                          | 0.190                                  | 0.050                                   | 26.9       | 0     | 0.5                                                        |
| Pb  | 0.030 ~ 0.430                          | 0.100                                  | 0.080                                   | 80.6       | 13.3  | 0.2                                                        |

2.2.1 距冶炼厂和污灌口不同距离小麦籽粒中 Cd、As 和 Pb 分布特征

为了研究冶炼厂和污灌对小麦籽粒 Cd、As 和 Pb 累积的影响,采样单元分组同 2.1.1 节,结果显示 3 组采样单元之间由远及近小麦籽粒 Cd 含量中位值分别为 0.100、0.106 和 0.119  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , As 含量中位值分别为 0.165、0.176 和 0.234  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , Pb 含量中位值在 0.080 0  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  左右(图 5). 近组小麦籽粒 Cd 和 As 含量显著高于中和远 2 组 ( $P < 0.05$ ), 分别比远组高 20.0% 和 41.0%, 且近组的小麦籽粒 As 含量均未超过食品安全国家标准限值(GB 2762-2017), 但 Cd 含量全部超标(超标率达

100%), 中和远 2 组超标率分别为 80.0% 和 50.0%, 但中和远这 2 组之间 Cd 和 As 含量显著差异不显著 ( $P > 0.05$ ); 3 组之间小麦籽粒 Pb 含量无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 但在近组的调查中发现小麦籽粒 Pb 含量存在异常值, 且含量很高. 总之, 该典型农田小麦籽粒 Cd 和 As 含量特征为距离冶炼厂和污灌河流越近含量越高. 冶炼厂和污灌对小麦籽粒 Cd 和 As 含量影响较大, 对 Pb 含量影响较小.

2.2.2 距道路不同距离小麦籽粒中 Cd、As 和 Pb 分布特征

为了研究道路交通对小麦籽粒重金属累积的影响,采样点分组同 2.1.2 节,结果显示 5 组采样单元

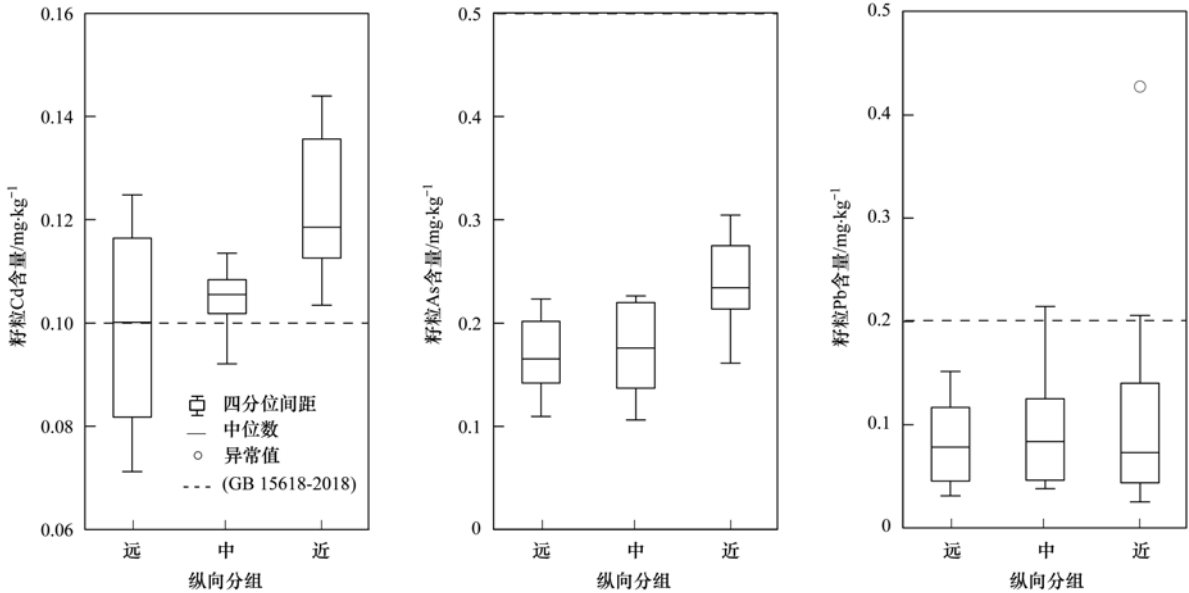


图 5 距冶炼厂和污灌河流不同距离小麦籽粒中 Cd、As 和 Pb 含量

Fig. 5 Cd, As, and Pb concentrations in wheat grains at different distances from smelter and river of sewage irrigation



之间由远及近小麦籽粒 Cd 含量中位值分别为 0.105、0.106、0.112、0.105 和 0.113  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , As 含量中位值分别为 0.173、0.190、0.150、0.212 和 0.222  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , Pb 含量中位值分别为 0.036 8、0.058 9、0.069 2、0.116 和 0.210  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (图 6). 由此可见,距道路越近,小麦籽粒中 Cd 含量有增加趋势,距离道路由远及近的 5 组小麦籽粒 Cd 含量点位超标率分别为 66.7%、66.7%、83.3%、66.7% 和 100%,其中最近组 Cd 含量中位值最高为 0.113  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,超标率也最高为 100%,并且最近组 Cd 含量中位值比最远组高 14.6%;距道路越近,小麦籽粒中 As 含量同样有增加趋势,最近组小麦籽粒 As 含量中位值比最远组高 41.8%,但 5 组之间小麦 Cd 和 As 含量差异均不显著 ( $P > 0.05$ );距道路越近,小麦籽粒中 Pb 含量则呈现出明显的逐渐增高趋势,最近组小麦籽粒 Pb 含量显著高于其他组 ( $P < 0.05$ ),Pb 含量中位值比最远

组高 471%. 已有的研究表明道路交通可显著影响禾本科作物籽粒中 Pb 含量,距离道路 15 m 水稻籽粒 Pb 含量比距离道路 50 m 水稻籽粒 Pb 含量高 56.6%<sup>[31]</sup>. Pb 稳定同位素分析结果表明,暴露在大气沉降中的小麦籽粒 Pb 含量均显著高于未暴露处理,土壤和大气沉降是小麦籽粒 Pb 的主要来源<sup>[32]</sup>. 对叶面积较大的叶菜类蔬菜研究同样表明,大气沉降和土壤扬尘对蔬菜中 Cd、As 和 Pb 的贡献率不容忽视,分别达到 33.7%、83.7% 和 72.8%<sup>[33]</sup>. 综上所述,道路交通是路侧农田小麦籽粒 Cd、As 和 Pb 的重要来源,并且对小麦籽粒 Pb 含量影响最为显著,这是由于除机动车等带来的 Pb 污染之外,道路交通造成的土壤二次扬尘,也可以通过附着到植物叶片被植物吸收或沉降到土壤中被根系吸收进而转运到可食部位<sup>[34]</sup>,土壤污染和道路交通造成的土壤二次扬尘是近路侧小麦籽粒 Pb 含量超标的主要原因.

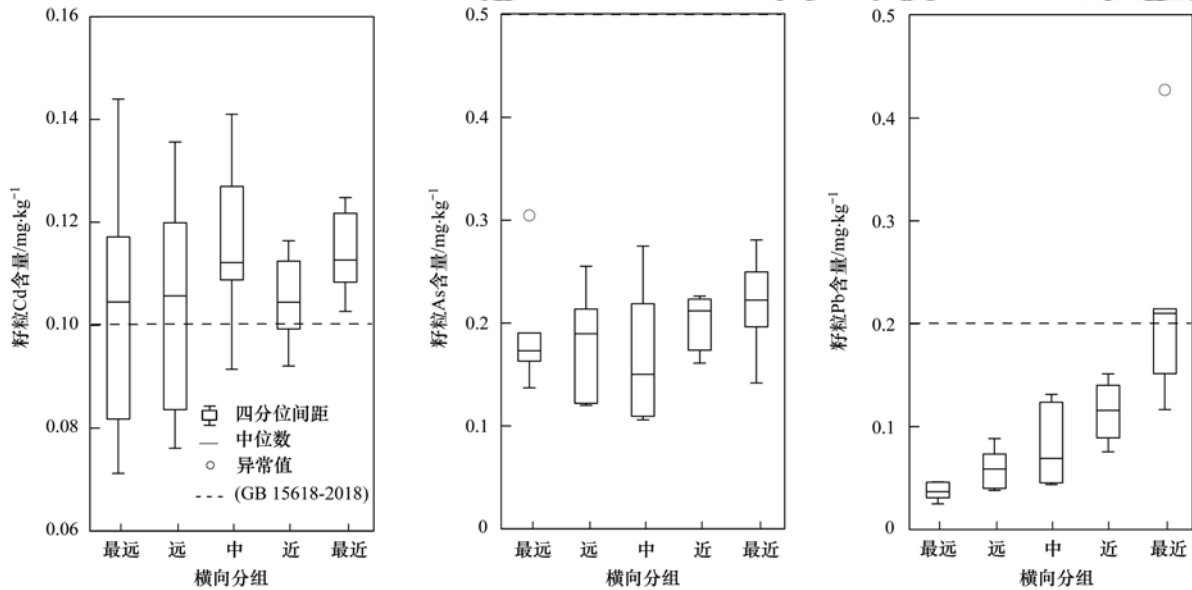


图 6 距道路不同距离小麦籽粒 Cd、As 和 Pb 含量

Fig. 6 Cd, As, and Pb concentrations in wheat grains at different distances from road

2.3 小麦籽粒 Cd、As 和 Pb 人体健康风险评价

该典型农田小麦籽粒 Cd、As 和 Pb 对成人、儿童人体健康风险值见表 6. 成人和儿童的致癌总风险分别为  $6.83 \times 10^{-3}$  和  $10.6 \times 10^{-3}$ , 均高于最大可接受风险水平  $1 \times 10^{-4}$ , 存在引发癌症的风险. 致癌重金属 Cd 和 As 对成人的健康风险值分别为  $4.79 \times 10^{-3}$  和  $2.04 \times 10^{-3}$ , 对儿童的健康风险值分别为  $7.42 \times 10^{-3}$  和  $3.15 \times 10^{-3}$ , 均高于最大可接受风险水平  $1 \times 10^{-4}$ , 存在引发癌症的风险. 非致癌重金属 Pb 对成人和儿童的健康风险值分别为 0.200 和 0.320, 均低于 1, 表示小麦籽粒 Pb 不会对人体健康造成非致癌风险. 小麦籽粒 As 含量均未超过食品安

国家标准 (GB 2762-2017) 限值, 但仍会对人体造成较大的致癌风险, 而部分小麦籽粒 Pb 含量超标, 健康风险评价结果显示其并未对人体造成健康风险. 致癌重金属对人体健康造成的风险高于非致癌重金属, 并且表现为  $\text{Cd} > \text{As} > \text{Pb}$ . 小麦籽粒中 Cd 和 As 对儿童造成的健康风险高于成人, 儿童会受到更

表 6 小麦籽粒中 Cd、As 和 Pb 成人及儿童人体健康风险值

Table 6 Human health risk values of Cd, As, and Pb in wheat grains for adults and children

| 重金属 | 成人                    | 儿童                    |
|-----|-----------------------|-----------------------|
| Cd  | $4.79 \times 10^{-3}$ | $7.42 \times 10^{-3}$ |
| As  | $2.04 \times 10^{-3}$ | $3.15 \times 10^{-3}$ |
| Pb  | 0.200                 | 0.320                 |

高的致癌风险。

### 3 结论

(1)该典型农田土壤 Cd、As 和 Pb 均超过土壤环境质量标准筛选值(GB 15618-2018),超标率分别为 100%、100% 和 36.7%,为中度污染水平,土壤中 Cd 和 As 空间分布无显著差异,Pb 含量主要受道路交通影响。

(2)小麦籽粒 Cd 和 Pb 超标率分别为 76.7% 和 13.3%,As 含量未超过食品安全国家标准(GB 2762-2017)。小麦籽粒中 Cd、As 和 Pb 空间分布差异显著,其中 Cd 和 As 含量主要受冶炼厂和污灌河流影响,Pb 含量主要受道路交通影响。

(3)该典型污染农田小麦籽粒 Cd 和 As 存在致癌风险。

#### 参考文献:

- [1] 全国土壤污染状况调查公报[J]. 中国环保产业, 2014, (5): 10-11.
- [2] Meng W Q, Wang Z W, Hu B B, *et al.* Heavy metals in soil and plants after long-term sewage irrigation at Tianjin China: a case study assessment[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, **171**: 153-161.
- [3] Teng Y G, Wu J, Lu S J, *et al.* Soil and soil environmental quality monitoring in China: a review [J]. *Environment International*, 2014, **69**: 177-199.
- [4] 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.
- [5] 孙亚芳, 王祖伟, 孟庆伟, 等. 天津污灌区小麦和水稻重金属的含量及健康风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34** (4): 679-685.  
Sun Y F, Wang Z W, Meng Q W, *et al.* Contents and health risk assessment of heavy metals in wheat and rice grown in Tianjin sewage irrigation area, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34** (4): 679-685.
- [6] 孙洪欣, 杨阳, 王倩倩, 等. 府河流域污灌状况及农户对污灌与人体健康关系的认知调查分析[J]. *中国农学通报*, 2015, **31** (2): 197-200.  
Sun H X, Yang Y, Wang Q Q, *et al.* An investigation of the situation of sewage irrigation and local farmers concern the relationship between sewage irrigation and human health along the Fu River[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, **31** (2): 197-200.
- [7] 张丽红, 徐慧珍, 于青春, 等. 河北清苑县及周边农田土壤及农作物中重金属污染状况与分析评价[J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29** (11): 2139-2146.  
Zhang L H, Xu H Z, Yu Q C, *et al.* The investigation and evaluation of the heavy metal pollution in farmland soil and crop in the Qingyuan of Hebei, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, **29** (11): 2139-2146.
- [8] Xue P Y, Zhao Q L, Sun H X, *et al.* Characteristics of heavy metals in soils and grains of wheat and maize from farmland irrigated with sewage[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26** (6): 5554-5563.
- [9] 陈凤, 董泽琴, 王程程, 等. 锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价[J]. *环境科学*, 2017, **38** (10): 4360-4369.  
Chen F, Dong Z Q, Wang C C, *et al.* Heavy metal contamination of soils and crops near a zinc smelter [J]. *Environmental Science*, 2017, **38** (10): 4360-4369.
- [10] Liu J, Wang D Q, Song B, *et al.* Source apportionment of Pb in a rice-soil system using field monitoring and isotope composition analysis[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, **204**: 83-89.
- [11] 阳小成, 赵桂丹, 熊曼君, 等. 川西北高原路侧土壤重金属分布特征及污染评价[J]. *应用与环境生物学报*, 2018, **24** (2): 239-244.  
Yang X C, Zhao G D, Xiong M J, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of soil heavy metal contamination along roadsides of the northwestern Sichuan Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2018, **24** (2): 239-244.
- [12] 吴迪, 程志飞, 邓琴, 等. 山区路侧土壤-油菜系统重金属来源及关联特征[J]. *生态科学*, 2019, **38** (2): 168-175.  
Wu D, Cheng Z F, Deng Q, *et al.* Correlation characteristics and source of heavy metals in roadside rape and soil system in mountainous areas[J]. *Ecological Science*, 2019, **38** (2): 168-175.
- [13] Wiseman C L S, Zereini F, Püttmann W. Traffic-related trace element fate and uptake by plants cultivated in roadside soils in Toronto, Canada[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **442**: 86-95.
- [14] 胡月琪, 郭建辉, 张超, 等. 北京市道路扬尘重金属污染特征及潜在生态风险[J]. *环境科学*, 2019, **40** (9): 3925-3934.  
Hu Y Q, Guo J H, Zhang C, *et al.* Pollution characteristics and potential ecological risks of heavy metals in road dust in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (9): 3925-3934.
- [15] 吴珊珊, 孙慧兰, 周永超, 等. 伊宁市道路土壤重金属污染现状及其环境质量评价[J]. *干旱区研究*, 2019, **36** (3): 752-760.  
Wu S S, Sun H L, Zhou Y C, *et al.* Heavy metal pollution in urban soil and environment quality in Yining [J]. *Arid Zone Research*, 2019, **36** (3): 752-760.
- [16] 王冠星, 闫晓东, 张凡, 等. 青藏高原路侧土壤重金属含量分布规律及影响因素研究[J]. *环境科学学报*, 2014, **34** (2): 431-438.  
Wang G X, Yan X D, Zhang F, *et al.* Influencing factors of heavy metal concentration in roadside-soil of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34** (2): 431-438.
- [17] 李晶, 徐玉玲, 黎桂英, 等. 兰州市交通道路主要乔灌木植物叶片重金属积累及生理特性的分析[J]. *生态环境学报*, 2019, **28** (5): 999-1006.  
Li J, Xu Y L, Li G Y, *et al.* Analyses of heavy metal accumulation and physiological characteristics in leaves of main arbor and shrub plants in traffic roads of Lanzhou City [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28** (5): 999-1006.
- [18] 高敏, 周俊, 刘海龙, 等. 叶面喷施硅硒联合水分管理对水稻镉吸收转运特征的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37** (2): 215-222.  
Gao M, Zhou J, Liu H L, *et al.* Effect of silica and selenite foliar sprays on the uptake and transport of cadmium by rice under water management [J]. *Journal of Agro-Environment Science*,

- 2018, **37**(2): 215-222.
- [19] 王世玉, 吴文勇, 刘菲, 等. 典型污灌区土壤与作物中重金属健康风险评估[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(4): 1550-1560.
- Wang S Y, Wu W Y, Liu F, *et al.* Assessment of human health risks of heavy metals in the typical sewage irrigation areas[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(4): 1550-1560.
- [20] 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 等. 不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5628-5638.
- Li C F, Cao J F, Lv J S, *et al.* Ecological risk assessment of soil heavy metals for different types of land use and evaluation of human health [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5628-5638.
- [21] 杨俊, 吕府红, 宋永伟, 等. 典型重金属污染地区蔬菜中重金属含量及健康风险[J]. 环境污染与防治, 2017, **39**(9): 952-956.
- Yang J, Lv F H, Song Y W, *et al.* Vegetable heavy metal content and health risks in the typical heavy metal contaminated area[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2017, **39**(9): 952-956.
- [22] 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.
- [23] 刘智峰, 呼世斌, 宋凤敏, 等. 陕西某铅锌冶炼区土壤重金属污染特征与形态分析[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(4): 818-826.
- Liu Z F, Hu S B, Song F M, *et al.* Pollution characteristics and speciation analysis of heavy metals in soils around a lead-zinc smelter area in Shaanxi Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(4): 818-826.
- [24] 王桢, 张建强, 渡边泉, 等. 铁路和道路沿线土壤重金属含量及来源解析[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(2): 364-372.
- Wang Z, Zhang J Q, Watanabe I, *et al.* Concentrations and sources of heavy metals in soil near railway and road[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(2): 364-372.
- [25] 邵金秋, 刘楚琛, 阎秀兰, 等. 河北省典型污灌区农田镉污染特征及环境风险评价[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(3): 917-927.
- Shao J Q, Liu C C, Yan X L, *et al.* Cadmium distribution characteristics and environmental risk assessment in typical sewage irrigation area of Hebei Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(3): 917-927.
- [26] 王洋洋, 李方方, 王笑阳, 等. 铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 437-444.
- Wang Y Y, Li F F, Wang X Y, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal contamination in surface farmland soil around a lead and zinc smelter[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 437-444.
- [27] 全致琦, 段海静, 阮心玲, 等. 路旁土壤公路源重金属含量空间分布数值模型的探讨[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(4): 996-1002.
- Tong Z Q, Duan H J, Ruan X L, *et al.* Spatial numerical model of traffic-source heavy metals in roadside soils[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(4): 996-1002.
- [28] 陈锦芳, 方宏达, 巫晶晶, 等. 基于 PMF 和 Pb 同位素的农田土壤中重金属分布及来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(5): 1026-1035.
- Chen J F, Fang H D, Wu J J, *et al.* Distribution and source apportionment of heavy metals in farmland soils using PMF and lead isotopic composition [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(5): 1026-1035.
- [29] 纪冬丽, 曾琬晴, 张新波, 等. 天津近郊农田土壤重金属风险评价及空间主成分分析[J]. 环境化学, 2019, **38**(9): 1955-1965.
- Ji D L, Zeng W Q, Zhang X B, *et al.* Ecological risk assessment and principal component analysis of heavy metals in suburban farmland soils of Tianjin [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(9): 1955-1965.
- [30] 康国华, 张鹏岩, 李颜颜, 等. 黄河下游开封段引黄灌区小麦中重金属污染特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3917-3926.
- Kang G H, Zhang P Y, Li Y Y, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in wheat grains cultivated in Kaifeng irrigation area of the Yellow River [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(8): 3917-3926.
- [31] 丁宁. 公路交通污染对水稻的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2011.
- Ding N. Effect of road traffic pollution on rice [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2011.
- [32] Chuang M, Liu F Y, Hu B, *et al.* Direct evidence of lead contamination in wheat tissues from atmospheric deposition based on atmospheric deposition exposure contrast tests [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **185**: 109688.
- [33] 程珂, 杨新萍, 赵方杰. 大气沉降及土壤扬尘对天津城郊蔬菜重金属含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(10): 1837-1845.
- Cheng K, Yang X P, Zhao F J. Effects of atmospheric and dust deposition on content of heavy metals in vegetables in suburbs of Tianjin [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(10): 1837-1845.
- [34] Luo X S, Bing H J, Luo Z X, *et al.* Impacts of atmospheric particulate matter pollution on environmental biogeochemistry of trace metals in soil-plant system; a review [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **255**: 113138.



## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                 |                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Mixed State and Sources of Fine Particulate Matter in the Summer in Tianjin City Based on Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS) .....                                               | LIN Qiu-ju, XU Jiao, LI Mei, <i>et al.</i> (2505)                 |
| Characteristics and Sources of Inorganic Ions and Organic Acids in Precipitation in the Northern Suburb of Nanjing, China .....                                                                 | YANG Xiao-ying, CAO Fang, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (2519)         |
| Seasonal Variation of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> in Xi'an .....                                                                                                                    | HUANG Han-han, WANG Yu-qin, LI Sheng-ping, <i>et al.</i> (2528)   |
| Effect of Liquid Water Content of Particles and Acidity of Particulate Matter on the Formation of Secondary Inorganic Components in Xinjiang Petrochemical Industrial Area .....                | LIU Hui-bin, Dilinuer-Talifu, WANG Xin-ming, <i>et al.</i> (2536) |
| Effect of Biomass Burning on the Light Absorption Properties of Water Soluble Organic Carbon in Atmospheric Particulate Matter in Changchun .....                                               | MENG De-you, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (2547)        |
| Chemical Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Shanghai During an Ozone and Particulate Pollution Episode in May 2019 .....                                              | WANG Qian (2555)                                                  |
| Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in the Nanjing Industrial Area in Autumn .....                                                                                     | CAO Meng-yao, LIN Yu-chi, ZHANG Yan-lin (2565)                    |
| Ambient VOCs Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of Air Pollution in Spring in Zhengzhou .....                                                                 | REN Yi-jun, MA Shuang-liang, WANG Si-wei, <i>et al.</i> (2577)    |
| Characteristics of VOCs and Their Roles in Ozone Formation at a Regional Background Site in Beijing, China .....                                                                                | HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, QIU Yu-lu, <i>et al.</i> (2586)       |
| Emission Characteristics of the Catering Industry in Beijing .....                                                                                                                              | SUN Cheng-yi, BAI Hua-hua, CHEN Xue, <i>et al.</i> (2596)         |
| Emission Factors and Emission Inventory of Agricultural Machinery in Beijing Under Real-world Operation .....                                                                                   | WANG Kai, FAN Shou-bin, QI Hao-yun (2602)                         |
| Localization of Soil Wind Erosion Dust Emission Factor in Beijing .....                                                                                                                         | LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (2609)        |
| Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Angström Exponent in the Yangtze River Delta Based on MODIS_C061 .....                                                                          | ZHANG Ying-lei, CUI Xi-min (2617)                                 |
| Fate Simulation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl in the Bohai Rim Using the Multimedia Model .....                                                                                                   | ZHANG Yi, MA Yan-fei, SONG Shuai, <i>et al.</i> (2625)            |
| Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Sediment Interstitial Water from Gangnan Reservoir .....                  | ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUAN Shi-chao, <i>et al.</i> (2635)        |
| Environmental Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in the Sediments of a River-Lake System .....                                                                            | LI Yue-zhao, CHEN Hai-yang, SUN Wen-chao (2646)                   |
| Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Yitong River City Area .....                                                                                  | JIANG Shi-xin, ZHAI Fu-jie, ZHANG Chang, <i>et al.</i> (2653)     |
| Identifying Nitrate Sources in a Typical Karst Underground River Basin .....                                                                                                                    | ZHAO Ran, HAN Zhi-wei, SHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2664)        |
| Influence of Nutrient Pulse Input on Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Algal Growth in the Sediment-Water System of Lake Taihu .....                                                   | CHEN Jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2671)                   |
| Temporal and Spatial Variation Patterns of Picophytoplankton and Their Correlations with Environmental Factors During the Wet Season in East Lake Dongting .....                                | LI Sheng-nan, CHEN Hao-yu, PENG Hua, <i>et al.</i> (2679)         |
| Toxicological Effects of Enrofloxacin and Its Removal by Freshwater Micro-Green Algae <i>Dictyosphaerium</i> sp. ....                                                                           | WANG Zhen-fang, HAN Zi-yu, WANG Meng-xue, <i>et al.</i> (2688)    |
| Comparative Phosphorus Accumulation and Ca-P Content of Two Submerged Plants in Response to Light Intensity and Phosphorus Levels .....                                                         | SANG Yu-xuan, YANG Jia-le, XIONG Yi, <i>et al.</i> (2698)         |
| Effect of Calcium Peroxide Composite Tablets on Water Remediation and Phosphorus Control in Sediment .....                                                                                      | ZHANG Shuai, LI Da-peng, DING Yu-qin, <i>et al.</i> (2706)        |
| Spatial Differentiation and Driving Analysis of Nitrogen in Rice Rotation Based on Regional DNDC: Case Study of Jinjiang River Watershed .....                                                  | WANG Ya-nan, SHUI Wei, QI Xin-hua, <i>et al.</i> (2714)           |
| Low Temperature Ammonia Nitrogen Removal from an Iron, Manganese, and Ammonia Groundwater Purification Process with Different Concentrations of Iron and Manganese .....                        | ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i> (2727)           |
| Degradation of RBKS by High Crystallinity Mn-Fe LDH Catalyst Activating Peroxymonosulfate .....                                                                                                 | LI Li, WU Li-ying, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (2736)            |
| Mechanisms of Fe-cyclam/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> System Catalyzing the Degradation of Rhodamine B .....                                                                                    | YU Yu-qing, CHEN Xiang-yu, CAI Quan-hua, <i>et al.</i> (2746)     |
| Removal of Nitrate Nitrogen by Microbial Photoelectrochemical Cell; PANI/TiO <sub>2</sub> -NTs as a Photoanode .....                                                                            | LU Yi, ZHOU Hai-shan, PENG Rui-jian, <i>et al.</i> (2754)         |
| Performance and Membrane Fouling Characteristics of Mariculture Wastewater Treated by Anoxic MBR-MMR .....                                                                                      | CHEN Fan-yu, XU Zhong, YOU Hong, <i>et al.</i> (2762)             |
| Effect of HRT on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Modified A <sup>2</sup> /O-BAF .....                                                                                           | ZHAO Kai-liang, LIU An-di, NAN Yan-bin, <i>et al.</i> (2771)      |
| Effect of Ni(II) on Anaerobic Ammonium Oxidation and Changes in Kinetics .....                                                                                                                  | SUN Qi, ZHAO Bai-hang, FAN Sa, <i>et al.</i> (2779)               |
| Removal of Urea by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Mixed Strains and Effects of Heavy Metals and Salinity .....                                                             | WANG Meng-meng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (2787)          |
| Start-up Characteristics of SNAD Process and Functional Abundance Succession of Volcanic Rock Biological Aerated Filter .....                                                                   | XUE Jia-jun, ZHANG Shao-qing, ZHANG Li-qiu, <i>et al.</i> (2796)  |
| Effect of Free Hydroxylamine on the Activity of Two Typical Nitrite-oxidizing Bacteria .....                                                                                                    | SHEN Chen, ZHANG Shu-jun, PENG Yong-zhen (2805)                   |
| Interference of Dead Cell DNA on the Analysis of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in Anaerobic Digestion Sludge .....                                                        | SU Yu-ao, LIU Hong-bo, MAO Qiu-yan, <i>et al.</i> (2812)          |
| Spatial Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Arable Land Soil of China .....                                                                                | CHEN Wen-xuan, LI Qian, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2822)           |
| Construction and Application of Early Warning System for Soil Environmental Quality .....                                                                                                       | LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2834)  |
| Response of Aggregate Distribution to Input Straw and Their Linkages to Organic Carbon Mineralization in Soils Developed from Five Different Parent Materials .....                             | MAO Xia-li, QIU Zhi-teng, ZHANG Shuang, <i>et al.</i> (2842)      |
| Response of Extracellular Enzyme Activities to Substrate Availability in Paddy Soil with Long-term Fertilizer Management .....                                                                  | NING Yu-fei, WEI Liang, WEI Xiao-meng, <i>et al.</i> (2852)       |
| Effects of Biochar on Bioavailability of Two Elements in Phosphorus and Cadmium-Enriched Soil and Accumulation of Cadmium in Crops .....                                                        | HUANG Yang, GUO Xiao, HU Xue-yu (2861)                            |
| Characteristics of Cd, As, and Pb in Soil and Wheat Grains and Health Risk Assessment of Grain-Cd/As/Pb on the Field Scale .....                                                                | XIAO Bing, XUE Pei-ying, WEI Liang, <i>et al.</i> (2869)          |
| Reconstructed Soil Vertical Profile Heavy Metal Cd Occurrence and Its Influencing Factors .....                                                                                                 | HU Qing-qing, SHEN Qiang, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2878)          |
| Bacterial Community Composition in Cadmium-Contaminated Soils in Xinxiang City and Its Ability to Reduce Cadmium Bioaccumulation in Pak Choi ( <i>Brassica chinensis</i> L.) .....              | CHEN Zhao-jin, LI Ying-jun, SHAO Yang, <i>et al.</i> (2889)       |
| Root Activities of Re-Vegetated Plant Species Regulate Soil Nutrients and Bacterial Diversity in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir .....                                          | LI Li-juan, LI Chang-xiao, CHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2898)    |
| Spatial Distribution of Nitrogen Metabolism Functional Genes of Eubacteria and Archaeobacteria in Dianchi Lake .....                                                                            | ZHANG Yu, ZUO Jian-e, WANG Si-ke, <i>et al.</i> (2908)            |
| Effect of Simulated Warming on Microbial Community in Glacier Forefield .....                                                                                                                   | WANG Yu-wan, MA An-zhou, CHONG Guo-shuang, <i>et al.</i> (2918)   |
| Effect of Water-Fertilizer-Gas Coupling on Soil N <sub>2</sub> O Emission and Yield in Greenhouse Tomato .....                                                                                  | SHANG Zi-hui, CAI Huan-jie, CHEN Hui, <i>et al.</i> (2924)        |
| Toxicity of Soil Leachate from Coal Gangue and Its Surrounding Village of Barley ( <i>Hordeum vulgare</i> ) .....                                                                               | SHANG Yu, YANG Feng-long, NING Xia, <i>et al.</i> (2936)          |
| Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution in Marine Organisms from Estuaries of Changhua River in Hainan Province ..... | WANG Hui-juan, KUANG Ze-xing, ZHOU Xian, <i>et al.</i> (2942)     |
| Characteristics of Macrobenthos Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Rivers of Beijing in Spring .....                                                     | HE Yu-xiao, LI Ke, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2951)               |
| Effect of Pyrolytic Temperature and Time on Characteristics of <i>Typha angustifolia</i> Derived Biochar and Preliminary Assessment of the Ecological Risk .....                                | CAI Zhao-hui, CHU Chen-jing, ZHENG Hao, <i>et al.</i> (2963)      |
| Measurement of Traffic Carbon Emissions and Pattern of Efficiency in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016) .....                                                                          | JIANG Zi-ran, JIN Huan-huan, WANG Cheng-jin, <i>et al.</i> (2972) |