

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第8期

Vol.39 No.8

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

我国城市 PM _{2.5} 污染的健康风险及经济损失评价	李惠娟, 周德群, 魏永杰 (3467)
冬季电力行业对长江中游城市群空气质量影响	孙晓伟, 郭秀锐, 程水源 (3476)
基于区域传输矩阵和 PM _{2.5} 达标约束的大气容量计算方法	李敏辉, 廖程浩, 杨柳林, 曾武涛, 唐喜斌 (3485)
利用 SPAMS 研究天津市夏季环境空气中细颗粒物化学组成特征	温杰, 史旭荣, 田瑛泽, 徐娇, 史国良, 冯银厂 (3492)
重庆市北碚城区气溶胶中有机碳和元素碳的污染特征	彭小乐, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 陈建博, 江长胜 (3502)
杭甬地区大气中含碳气溶胶特征及来源分析	徐宏辉, 徐婧莎, 何俊, 浦静姣, 齐冰, 杜荣光 (3511)
城市生活垃圾露天焚烧 PM _{2.5} 及其组分排放特征	王艳, 郝伟伟, 程珂, 支国瑞, 易鹏, 樊静, 张洋 (3518)
民用燃煤排放分级颗粒物中碳组分排放因子	杨国威, 孔少飞, 郑淑睿, 吴剑, 郑明明, 郑煌, 严沁, 刘海彪, 王伟, 吴方琪, 程溢 (3524)
大连地区夏季非甲烷烃 (NMHC) 特征及其来源解析	纪德钰 (3535)
“十三五”挥发性有机物总量控制情景分析	张嘉妮, 陈小方, 梁小明, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (3544)
浙江省包装印刷行业挥发性有机物排放特征及排放系数	王家德, 吕建璋, 李文娟, 顾震宇, 缪孝平 (3552)
有机溶剂使用企业挥发性恶臭有机物排放特征及特征物质识别	翟增秀, 孟洁, 王巨, 翟友存, 曹阳, 邹克华 (3557)
基于 MODIS_C006 的乌鲁木齐 10 年气溶胶光学厚度变化特征	胡俊, 亢燕铭, 陈勇航, 刘鑫, 李霞, 刘琼 (3563)
基于路网车流量的北京城市副中心机动车污染控制情景	樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (3571)
北京典型跑步区域空气污染特征及跑步者呼吸暴露	陶双成, 高硕吟, 熊新竹, 姚嘉林, 邓顺熙 (3580)
丹江口水库调水前后表层沉积物营养盐和重金属时空变化	李冰, 王亚, 郑钊, 许信, 辛英督, 黄进, 郭诗君, 毕升阁, 胡兰群, 陈兆进, 李玉英 (3591)
太湖北部湖区春、冬季节天然有机质的荧光特征及环境意义	吕伟伟, 姚昕, 张保华 (3601)
太湖重点水域水环境中邻苯二甲酸酯的污染水平及生态风险评价	朱冰清, 高占啟, 胡冠九, 王骏飞, 于南洋, 韦斯 (3614)
台风强降雨输入水源水库悬浮泥沙的氮磷吸附特性	姚玲爱, 赵学敏, 马千里, 梁荣昌, 夏北成, 卓琼芳 (3622)
珠江三角洲高碑地下水赋存环境特征及成因分析	张昌延, 何江涛, 张小文, 倪泽华 (3631)
有机污染物对杭州湾海域浮游细菌群落的影响	宣丽霞, 戴文芳, 郁维娜, 周素明, 欧昌荣, 熊金波 (3640)
澜沧江流域浮游细菌群落结构特征及驱动因子分析	程豹, 望雪, 徐雅倩, 杨正健, 刘德富, 马骏 (3649)
碧流河水库细菌群落结构特征及其关键驱动因子	王欢, 赵文, 谢在刚, 魏杰, 姜洋 (3660)
浑河底泥反硝化厌氧甲烷氧化菌群落多样性的时空分布特征及其与环境因子关系分析	张亚迪, 宋永会, 彭剑桥, 张剑桥, 张盼月, 刘瑞霞, 石国强 (3670)
人类活动对河流沉积物中反硝化厌氧甲烷氧化菌群落特征的影响	刘洋, 陈永娟, 王晓燕, 许康利 (3677)
外源氮输入对不同土地利用排水沟底泥反硝化和 N ₂ O 排放影响	余冬立, 陈心逸, 高雪梅, 张文娟, 夏永秋 (3689)
雨水管道沉积物沉淀特性及主要污染物含量分布	尚宇, 周毅, 廖安意, 方正 (3696)
水体中 Cr(VI) 对不同混凝剂混凝过程的影响	高倩, 张大为, 徐慧, 徐建坤, 张崇森, 王东升 (3704)
Co ₃ O ₄ /BiVO ₄ 复合阳极活化过一硫酸盐强化光电催化降解双酚 A	李蒋, 王雁, 张秀芳, 赵旭 (3713)
海藻酸钙/生物炭复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能和机制	于长江, 董心雨, 王苗, 林强 (3719)
磁性生物炭对水中 CIP 和 OFL 的吸附行为和机制	赵华轩, 郎印海 (3729)
污水中新精神活性物质的分析方法优化及验证	陈培培, 杜鹏, 周子雷, 徐泽琼, 高婷婷, 李喜青 (3736)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺对 PVDF 中空纤维膜污染进程的缓解	关羽琪, 王凯伦, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马艳林, 栾桂荣, 郭瑾 (3744)
阴离子交换树脂生物再生去除硝酸盐氮	叶婷, 张光, 王珂, 双陈冬, 李爱民 (3753)
普鲁士蓝@酵母菌催化剂的合成及其 Fenton 性能	陈思, 白波, 王洪化, 索有瑞 (3759)
PN/A 双菌层系统的构建及其脱氮性能	许静怡, 杜俊, 杨一峰, 吕峰, 夏四清 (3767)
苯酚对 EBPR 系统除磷性能的抑制作用	马娟, 王瑾, 俞小军, 周猛, 李光银, 孙洪伟 (3775)
反硝化-短程硝化-厌氧氨氧化工艺处理晚期垃圾渗滤液的脱氮除碳性能	王凡, 陆明羽, 殷记强, 李祥, 黄勇 (3782)
好/厌氧条件下反硝化细菌脱氮特性与功能基因	康鹏亮, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 商潘路, 刘珍芳, 王跃, 谭欣林 (3789)
苯并[a]芘厌氧降解的苯酚共基质协同作用与污泥微生物特性	吴海珍, 胡肖怡, 王鸣, 韦景悦, 范一文, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (3797)
污泥超高温堆肥过程中 DOM 结构的光谱分析	刘晓明, 余震, 周普雄, 罗海林, 王跃强, 廖汉鹏, 周顺桂 (3807)
生物炭对华北农田土壤 N ₂ O 通量及相关功能基因丰度的影响	刘杏认, 赵光昕, 张晴雯, 田秀平 (3816)
设施菜田土壤 N ₂ O 产生对 O ₂ 的响应	陈吉吉, 宋贺, 曹文超, 王乙然, 王敬国 (3826)
利用 μ -XRF 和 XANES 研究铅锌矿区土壤铅形态及其生物有效性	孙晓艳, 柳检, 罗立强 (3835)
南京市铅锌矿采矿场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征	李俊凯, 张丹, 周培, 刘群录 (3845)
Fe-Al 改性硅藻土的制备及其对土壤 Cd 污染固定化效果	杨雨中, 朱健, 肖媛媛, 谭蓉, 王平, 陈润华, 徐海音, 杨雄 (3854)
基于稳定碳同位素技术的干旱区绿洲土壤有机碳向无机碳的转移	李杨梅, 贡璐, 安申群, 孙力, 陈新 (3867)
生境过滤驱动庞泉沟华北落叶松林土壤真菌群落的构建过程	赵鹏宇, 李鑫, 柴宝峰 (3876)
转 cry1Ab 和 epsps 基因玉米 C0030.3.5 对土壤固氮细菌丰度和群落结构的影响	王蕊, 朱珂, 李刚, 刘惠芬, 王晶, 修伟明, 赵建宁, 杨殿林 (3885)
脱硫石膏对稻田 CH ₄ 释放及其功能微生物种群的影响	胡翔宇, 向秋洁, 木志坚 (3894)
长期施肥对不同深度稻田土壤碳氮水解酶活性的影响特征	杜林森, 唐美铃, 祝贞科, 魏亮, 魏晓梦, 周萍, 葛体达, 王久荣, 邹冬生, 吴金水 (3901)
黄河口滨岸潮滩湿地泥沙沉积及外源 Cd 输入对碱蓬物质量分配及抗氧化酶活性的影响	宋红丽, 王立志, 郁万妮, 吴希媛 (3910)
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	康国华, 张鹏岩, 李颜颜, 杨丹, 庞博, 何坚坚, 闫宇航 (3917)
氧化石墨烯对邻苯二甲酸二丁酯藻毒性的影响	涂海峰, 刘成, 王宇擎, 储祺, 侯晓冬, 李锋民 (3927)
有机物对厌氧氨氧化微生物燃料电池脱氮产电性能的影响	祖波, 马兰, 刘波, 卢培利, 许君 (3937)
中国氢燃料电池车燃料生命周期的化石能源消耗和 CO ₂ 排放	林婷, 吴焯, 何晓婧, 张少君, 郝吉明 (3946)
气溶胶水相反应生成二次有机气溶胶研究进展	叶招莲, 瞿珍秀, 马帅帅, 盖鑫磊 (3954)
《环境科学》征订启事 (3543)	
《环境科学》征稿简则 (3570)	
信息 (3600, 3728, 3844)	

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

康国华, 张鹏岩*, 李颜颜, 杨丹, 庞博, 何坚坚, 闫宇航

(河南大学环境与规划学院, 开封 475004)

摘要: 为探究引黄灌区小麦对人体健康的影响, 以黄河下游引黄灌区开封段为研究区, 对其中水稻乡、柳园口乡、西郊乡和北郊乡的小麦进行采样调查, 采用内梅罗综合指数法、健康风险评价模型对研究区小麦重金属污染状况及其对成人和儿童的健康风险进行评价. 结果表明, 研究区小麦籽粒中 Cd、Cr、Pb、Cu、Zn、Ni、Hg 平均含量分别为 0.034、0.428、0.279、5.363、29.605、0.305 和 0.003 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 除 Pb 和 Zn 外, 其他重金属均未超出国家食品卫生标准限值. 研究区小麦籽粒中 Pb 和 Zn 的污染指数大于 1, Cd、Cr、Cu、Ni 和 Hg 的污染指数均小于 1, 小麦综合污染指数为 1.985 > 1, 各乡区小麦的综合污染指数介于 1.116 ~ 1.847 之间. 非致癌重金属 (Pb、Cu、Zn、Hg) 对成人和儿童的健康风险指数分别为 1.055 8 和 0.545 0; 致癌重金属 (Cd、Cr、Ni) 对成人和儿童的健康风险指数均值均高于 USEPA 推荐的最大可接受风险水平 1×10^{-4} , 可能存在引发癌症的风险.

关键词: 小麦; 重金属; 污染特征; 健康风险; 引黄灌区

中图分类号: X171.5; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)08-3917-10 DOI: 10.43227/j.hjxx.201709198

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wheat Grains Cultivated in Kaifeng Irrigation Area of the Yellow River

KANG Guo-hua, ZHANG Peng-yan*, LI Yan-yan, YANG Dan, PANG Bo, HE Jian-jian, YAN Yu-hang

(College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: In order to monitor heavy metal pollution in agricultural soils and assess the corresponding health risk in the Yellow River irrigation area, this study applied the Nemero index and the health risk index to evaluate heavy metal pollution in wheat grains and the health risks for residents in the lower reaches of the Yellow River. Four towns in Kaifeng, which are within the lower reaches of the Yellow River, were selected as the study area. The examination of wheat samples revealed that the average contents of Cd, Cr, Pb, Cu, Zn, Ni, and Hg in the wheat grains were 0.034, 0.428, 0.279, 5.363, 29.605, 0.305, and 0.003 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. Among the heavy metals, Pb and Zn exceeded the national food hygiene standards. The pollution indices of Pb and Zn in the wheat grains contributed significantly to the comprehensive pollution index, as each was greater than 1 (1.985), although the pollution indices of the other heavy metals were less than 1. The comprehensive pollution index of wheat in each town ranged from 1.116 to 1.847. The health risk indices of non-carcinogenic heavy metals (Pb, Cu, Zn, and Hg) for adults and children were 1.055 8 and 0.545 0, respectively. The health risk indices of carcinogenic heavy metals (Cd, Cr, and Ni) for adults and children were higher than the maximum acceptable risk level (1×10^{-4}) recommended by the USEPA, which suggests that residents of the study area have a high risk of developing various forms of cancer.

Key words: wheat; heavy metal; pollution characteristics; health risk; Yellow River irrigation area

重金属是指原子密度超过 $5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的金属元素, 是一类对环境对人类极易造成危害的污染物^[1]. 作为具有持久性潜在毒性的污染物, 重金属一旦进入土壤, 将长期存在于土壤且无法被降解, 通过生物系统间的物质转换和能量循环, 间接转移至农作物中, 从而抑制作物的光合作用和生长, 甚至通过食物链进入人体, 进入人体的重金属元素一旦超过一定浓度, 会造成人体机能的功能性障碍和不可逆性损伤, 甚至引发癌症^[2,3]. 重金属进入人体中的途径主要有 3 种: 呼吸、皮肤接触和饮食摄入. 相对于呼吸和皮肤接触途径, 饮食摄入由于其

摄入量、饮食种类复杂、饮食中重金属含量差异明显等因素, 成为重金属摄入的主要途径^[4~6]. 有研究表明, 食用重金属污染的粮食所产生的危害高于饮用重金属污染的水体, 长期食用受污染的谷物, 会引发重金属慢性中毒^[7,8]. 随着公众健康风险意识的增强, 关于农作物重金属污染特性及其健

收稿日期: 2017-09-21; 修订日期: 2018-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601175); 河南省基础与前沿技术项目(152300410067); 河南省高校科技创新团队支持计划项目(16IRTSTHN012)

作者简介: 康国华(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为资源利用与环境保护, E-mail: GuangliGH@163.com

* 通信作者, E-mail: pengyanzh@henu.edu.cn

康风险的研究受到广大学者的关注。

关于重金属对人体健康潜在风险的研究,前人做了大量的积累. 研究领域多集中于矿区^[9,10]、污灌区^[11,12]和垃圾处理厂^[13,14]等地方,研究对象专注于降尘^[15,16]、水稻^[17,18]、玉米^[19,20]、蔬菜^[21,22]、饮用水^[23,24]等. 这些研究对重金属的积累特征、理化性质、赋存形态以及污染后被污染体的生理生化效应等做了较为深入地研究,为进一步深入展开作物中重金属积累及对人体健康影响的研究奠定了基础.

灌区一般是指有可靠水源和引、输、配水渠道系统以及相应排水沟道的灌溉面积,是一个具有很强的社会性质的半人工的开放式生态系统. 我国是世界农业大国,灌区作为我国特有的农业灌溉方式,其一直是农业研究的重要区域,国内学者对甘肃沿黄灌区^[25]、宁夏引黄灌区^[26]、内蒙古河套灌区^[27]、陕西关中灌区^[28]、天津污灌区^[29]、沈抚灌区^[30]等地的土地利用、土壤质量和粮食生产进行了深入研究.

黄河下游引黄灌区是我国最大的连片自流灌区,是我国农业规模化生产和重要的粮食生产基地,关于灌区土壤质量和粮食安全的问题受到学者们的关注^[31,32]. 以往关于作物重金属的相关研究主要以水稻、玉米为研究对象,而小麦作为三大谷物之一,在北方居民的饮食结构中占据着不可替代的位置. 本文以黄河下游引黄灌区开封段为研究区域,对研究区内小麦籽粒中重金属元素进行理化分析,并针对成人和儿童对摄食区域小麦导致的健康风险进行评估,旨在为引黄灌区的粮食安全和环境保护提供理论指导和决策依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处河南省开封市北侧,黄河下游冲积扇南翼,包括水稻乡、柳园口乡、北郊乡和西郊乡. 境内地势平坦,无山峰、丘陵. 该地属半干旱半湿润温带大陆性季风气候,冬季雨雪稀少,夏季降水集中. 区内年平均气温 14℃,年平均降水量 634 mm,全年无霜期 213 d,年平均日照时数 2 268 h.

开封市位于黄河下游南岸,具有得天独厚的引黄优势. 全市引黄灌区设计总引水能力 270 m³·s⁻¹,有效灌溉面积 18.88 万 hm²,占全市耕地面积的 47.6%. 灌区作为一个综合性水利工程,不仅承担着开封市农业灌溉用水,还担负着开封市工业生产、日常生活、水产养殖以及城市洗污用水等,对开封市工农业生产及社会经济发展具有重要的作用.

1.2 样品采集与处理

1.2.1 样点的布设与采集

样点的布设按照均匀布点、污染处加密(水稻乡的北部偏西地区、东部及东南部地区,柳园口乡的南部地区)、避开污染源(西郊乡的东部和北郊乡的南部地区)的原则. 样点采集范围覆盖开封市引黄灌区内的 4 个乡区,共采集样品 122 个(图 1). 小麦样品的采集采用随机采样的方法,在每个采样单元随机抽取 6 棵小麦植株,采集麦穗,重量约 150 g,将采集的样品放入样品袋中,做好标记.

1.2.2 样品的处理及测定

小麦样品在室内风干脱皮,麦粒经超声波清洗后,用去离子水冲洗 3 次,在 65℃ 烘箱中烘干,粉

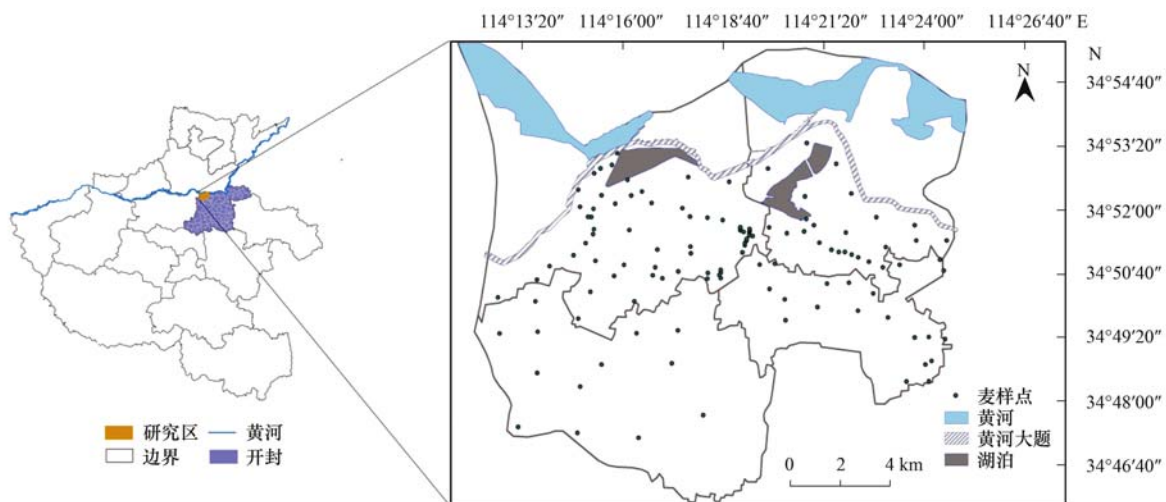


图 1 研究区位置及样点分布示意

Fig. 1 Location of the study area and sampling sites

碎后存储在牛皮纸袋中备用。采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 法 (体积比 4:1) 消煮, 石墨炉-原子吸收光谱法测定 Cd、Cr、Ni、Pb 含量; 火焰-原子吸收光谱法测定 Cu、Zn 含量; 氢化物发生-原子荧光光谱法测定 Hg 含量。

消煮及实验过程所使用试剂均为优级纯, 所用的水均为超纯水。分析过程中加入国家标准植物样品 (GSV-3) 进行质量控制, 测定均重复 3 次, 确保回收率均在国家标准参比物质的允许范围内, 符合分析质量控制要求。

1.3 研究方法

1.3.1 小麦籽粒重金属污染质量评价

小麦籽粒中 Cd、Cr、Pb、Cu、Zn、Hg 的限量标准参照《粮食 (含谷物、豆类、薯类) 及制品中铅、铬、镉、汞、硒、砷、铜、锌等 8 种元素限量》(NY 861-2004); Ni 的限量标准参照《食品安全国家标准-食品中污染物限量》(GB 2762-2012)。采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对作物中重金属含量进行评价^[33]。

单因子污染指数:

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

式中, P_i 为单项重金属 i 的污染指数, C_i 为作物中重金属 i 的实测浓度 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); S_i 为重金属 i 的

评价标准临界值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

内梅罗综合污染指数:

$$P = \sqrt{\frac{\bar{P}_i^2 + P_{imax}^2}{2}} \tag{2}$$

式中, P 为农作物籽粒中重金属的综合污染指数; $\bar{P}_i$ 为重金属单项污染指数平均值, P_{imax} 为重金属单项污染指数最大值。

1.3.2 农作物摄入的健康风险评价

为评估研究区居民 (成人、儿童) 摄食区域小麦的健康风险, 采用美国环境保护署 (USEPA) 推荐的健康风险评价模型, 针对饮食摄入途径下小麦籽粒重金属对人体产生的健康风险进行评价^[34], 评价模型包括非致癌风险模型和致癌风险模型。非致癌重金属包括 Pb、Cu、Zn、Hg; 致癌重金属包括 Cd、Cr、Ni。

污染物经农作物摄入的平均日摄取量 (ADD):

$$\text{ADD} = \frac{C_i \times I \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \tag{3}$$

式中, ADD 为污染物经农作物摄入的平均日摄取量 [$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$]; C_i 为农作物中重金属 i 的含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); I 为人体每日对农作物的摄入量 ($\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$); EF 为暴露频率 ($\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$); ED 为暴露时间 (a); BW 为受体体重 (kg); AT 为生命期望值 (d)。各参数名称及取值见表 1。

表 1 谷类农作物健康风险评价模型参数

Table 1 Model parameters for the health risk assessment of cereal crops				
模型参数	参数名称	参考值		文献
		成人	儿童	
$I/\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$	摄入量	0.5	0.177	[35]
$\text{EF}/\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$	暴露频率	365	365	[36]
ED/a	暴露时间	30	10	[34]
BW/kg	受体体重	70	16	[36]
AT/d	生命期望值	10 950	3 650	[36]
$\text{RfD}/\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$	暴露参考剂量	$\text{RfD}(\text{Cd}) = 0.001$		[37]
		$\text{RfD}(\text{Cr}) = 0.003$		[36]
		$\text{RfD}(\text{Pb}) = 0.0035$		[38]
		$\text{RfD}(\text{Cu}) = 0.04$		[39]
		$\text{RfD}(\text{Zn}) = 0.3$		[40]
		$\text{RfD}(\text{Ni}) = 0.02$		[36]
		$\text{RfD}(\text{Hg}) = 0.001$		[36]
$\text{SF}/(\text{kg}\cdot\text{d})\cdot\text{mg}^{-1}$	致癌强度系数	$\text{SF}(\text{Cd}) = 6.1$		[41]
		$\text{SF}(\text{Cr}) = 14$		[41]
		$\text{SF}(\text{Ni}) = 0.84$		[41]

(1) 非致癌风险评价

单一重金属的健康风险指数 (HQ):

$$\text{HQ} = \frac{\text{ADD}}{\text{RfD}} \tag{4}$$

式中, HQ 为健康风险指数; RfD 为重金属暴露参考剂量 [$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$]. 若 $\text{HQ} \leq 1$, 表明重金属污染物不会对人体造成健康风险; $\text{HQ} > 1$, 表明重金属污染物可对人体健康产生影响, 指数值越大代表

存在的健康风险越高.

多种重金属复合污染的健康风险指数(HI):

$$HI = \sum HQ \tag{5}$$

若 $HI \leq 1$, 表明重金属尚未对人体造成健康风险; $HI > 1$, 表明重金属有很大可能性对人体健康产生影响; $HI > 10$, 表明重金属已经对人体健康造成威胁, 存在慢性毒性.

(2)致癌风险评价

$$RI = ADD \times SF \tag{6}$$

$$R = \sum RI \tag{7}$$

式中, RI 为人体暴露重金属 i 的致癌风险; SF 为致癌强度系数[$(\text{kg} \cdot \text{d}) \cdot \text{mg}^{-1}$]. 当 $RI < 1 \times 10^{-6}$, 表示风险不明显; 当 $1 \times 10^{-6} < RI < 1 \times 10^{-4}$, 表示风险在可接受范围内; 当 $RI > 1 \times 10^{-4}$, 表示风险显著. R 为致癌总风险, 当 $R < 1 \times 10^{-6}$, 表明小麦籽粒中重金属不会对人体健康造成致癌性风险; 当 $1 \times 10^{-6} < R < 1 \times 10^{-4}$, 表明风险程度处于人体可接受的范围内; 当 $R > 1 \times 10^{-4}$, 表明可能存在引发癌症的风险.

1.3.3 主成分分析

主成分分析法是一种通过降维将多个变量转化为少数几个主成分的多元统计分析方法, 不仅可以最大限度地保留原始数据的信息, 对高维变量进行

综合和简化, 而且能够客观地确定各指标的权重. 具体步骤: ①对原始数据进行标准化处理; ②计算标准化数据的相关系数、相关系数矩阵、特征向量和贡献率; ③根据特征值和贡献率确定主成分数量; ④计算主成分综合得分及排序.

2 结果与分析

2.1 小麦籽粒中重金属的含量水平

根据研究区小麦籽粒重金属含量统计结果可见(表2), 小麦籽粒中 Cd、Cr、Pb、Cu、Zn、Ni、Hg 平均含量分别为 0.034、0.428、0.279、5.363、29.605、0.305 和 0.003 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 除 Pb 和 Zn 外, 其他重金属均未超出国家食品卫生标准限制值. 以国家食品卫生标准限制值为参照标准, 研究区小麦籽粒中 Cd、Cr、Pb、Cu、Zn、Ni、Hg 的超标率分别为 8.20%、0.82%、37.71%、0%、94.26%、10.66% 和 0%, 各重金属的超标水平差异性明显, 其中, Zn 的超标率高达 94.26%, 表明绝大多数小麦样品中的 Zn 含量超过国家标准. 就变异系数而言, Ni、Pb、Hg、Cd 和 Cr 为高等变异($CV > 35\%$), Zn 和 Cu 为中等变异($15\% < CV \leq 35\%$), 无低等变异. 这表明研究区小麦中重金属含量的空间分布差异显著, 重金属来源受到外界干扰明显, 很大程度上受交通、工业生产及农业活动的影响.

表2 研究区小麦籽粒重金属含量水平

Table 2 Heavy metal contents of the wheat grains in the study area

元素	最大值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	平均值 $\pm$ 标准差 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	最小值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	CV/%	超标率/%
Cd	0.099	0.034 $\pm$ 0.014	0.009	43.11	8.20
Cr	1.640	0.428 $\pm$ 0.150	0.262	35.08	0.82
Pb	1.435	0.279 $\pm$ 0.216	0.108	77.33	37.71
Cu	9.093	5.363 $\pm$ 0.969	3.275	18.07	0
Zn	43.549	29.605 $\pm$ 5.899	18.504	19.93	94.26
Ni	2.542	0.305 $\pm$ 0.341	0.055	111.76	10.66
Hg	0.012	0.003 $\pm$ 0.002	0.000	51.96	0

2.2 小麦籽粒中重金属的主成分分析

为进一步准确地解析小麦籽粒中重金属来源, 对研究区小麦籽粒中重金属含量进行主成分分析. 根据分析结果(表3)显示, 提取的成分1、2和3, 特征值均大于1, 解释了总方差的63.203%, 前3个成分反映了重金属含量数据的大部分信息. 由旋转后的成分矩阵(表4)可知, 第1主成分中具有较高载荷的重金属元素为 Zn、Cu、Pb, 解释了总方差的25.558%, 相比旋转前有所下降; 第2主成分中具有较高载荷的重金属元素为 Cd、Hg, 解释了总方差的18.92%; 第3主成分中具有较高载荷的重

金属元素为 Cr、Ni, 解释了总方差的18.725%, 第2、第3主成分的贡献率较旋转之前均有不同程度的提升.

运用 SPSS 20.0 生成研究区小麦重金属因子载荷(图2), 由图2得知, 主成分1主要支配小麦籽粒中 Zn、Cu 和 Pb 的来源, 三者之间的相关性最强, 具有一定的同源特征, 主要受电镀工业废水的影响, 主成分2主要贡献元素为 Cd 和 Hg, 存在不同程度的复合污染, Cd 是农业活动(喷洒农药、施用化肥等)的标识性元素^[42], 其在我国的利用率比较低, 约70%流失于土壤、水体和空气中; Hg 主要

来源于工业废水、废气和废渣，深受区域工业活动的影响；成分 3 的高载荷元素为 Cr 和 Ni，两者来源相似，主要受开采、冶炼、加工、电镀工业排放物的影响。

表 3 小麦籽粒重金属含量主成分分析解释方差

Table 3 Variance analysis of the principal component analysis of heavy metals in wheat grains									
成分	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%
1	2.054	29.339	29.339	2.054	29.339	29.339	1.789	25.558	25.558
2	1.283	18.327	47.666	1.283	18.327	47.666	1.324	18.920	44.478
3	1.088	15.537	63.203	1.088	15.537	63.203	1.311	18.725	63.203
4	0.875	12.507	75.710						
5	0.673	9.614	85.324						
6	0.660	9.422	94.746						
7	0.368	5.254	100.000						

表 4 小麦籽粒重金属旋转成分矩阵

Table 4 Rotated component matrix for heavy metal contents in wheat grains			
重金属	成分		
	1	2	3
Cd	0.089	0.735	0.073
Cr	0.272	-0.004	0.750
Zn	0.716	0.462	0.040
Ni	-0.137	-0.028	0.833
Hg	0.016	0.671	-0.100
Cu	0.769	0.221	0.183
Pb	0.765	-0.264	-0.073

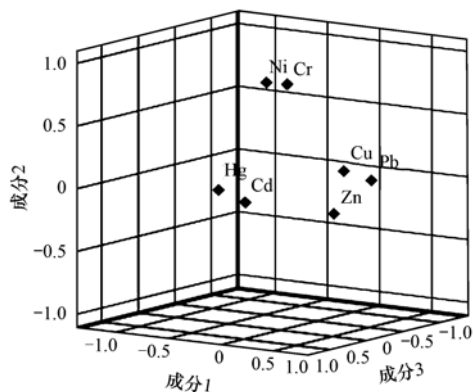


图 2 研究区小麦籽粒重金属因子负载
Fig. 2 Factor loading of heavy metals in wheat grains in the study area

2.3 小麦籽粒中重金属污染特征评价

根据公式(1)、(2)得出研究区分区重金属污染评价结果(表 5、6)，从单因子污染指数评价结果来看(表 5)，研究区小麦籽粒中主要重金属污染物为 Pb 和 Zn，污染指数均大于 1，各个乡区 Pb 和 Zn 的污染等级占比均较高，说明研究区已经受到了 Pb 和 Zn 的污染；Cd、Cr、Cu、Ni 和 Hg 的污染指数均小于 1，表明研究区尚未受到这些重金属元素的污染。其中，Hg 的值最小，为 0.162，在各乡区的

无污染比重均为 100%，是研究区影响力度最小的重金属元素。综观水稻乡、柳园口乡、北郊乡和西郊乡小麦中各重金属的污染指数，主要的污染元素均为 Pb 和 Zn。相比较 Ni、Cr 和 Hg，Cd 和 Cu 的污染指数较大，是继 Pb 和 Zn 之后，可能会造成潜在污染的重金属元素。从综合污染指数评价结果可知(表 6)，研究区小麦综合污染指数为 1.985 > 1，属于轻度污染程度；将各乡区小麦的综合污染指数依次排序为水稻乡 > 北郊乡 > 柳园口乡 > 西郊乡，污染指数介于 1.116 至 1.847 之间，属轻度污染范畴。由于不同乡区所处的地理位置不同，且经济发展水平和产业结构布局存在差异，各乡区小麦的具体污染状况存在差异。水稻乡是豫东最大的水产品养殖基地，且农业资源丰富，该乡处于开封悬河生态旅游区的中心地带，交通流量大，经济快速发展，工业废水、水产养殖、农药化肥、农业灌溉、汽车尾气等是重金属主要来源；西郊乡地处开封市旧城区与新城区的结合部，境内道路网络系统发达，是开封市高校的聚集地，工业废水和农业活动对农田土壤的影响相对缓和，是研究区内小麦综合污染指数最小的区域；柳园口乡和北郊乡位于黄河滩区开封段的中部和下部，属于新滩和老滩，常年土壤淤积，土质较黏，较易吸附重金属在该区富集，加之北郊乡是开封市人文景观的主要聚集地，东部为化肥河污灌区，污水灌溉、交通运输和工业生产等成为影响当地重金属富集的主要因素。

2.4 农作物摄入的健康风险评估

根据公式(3)~(7)计算得到研究区小麦籽粒中重金属(致癌和非致癌)对成人和儿童的健康风险(表 7、8)。

2.4.1 非致癌风险评价

根据表 7 可知，成人和儿童对 Pb、Cu、Zn、Hg

表 5 研究区各乡区单因子污染指数及污染等级占比

Table 5 Single factor pollution index and the proportion of the pollution grade for each heavy metal, in each district of the study area

区域	元素	单因子污染指数			不同污染等级占比/%			
		最大值	平均值	最小值	无污染	轻度污染	中度污染	重度污染
水稻乡	Cd	1.433	0.625	0.189	96.83	3.17		
	Cr	0.775	0.394	0.262	100			
	Pb	7.176	1.428	0.541	63.49	12.70	11.11	12.70
	Cu	0.909	0.534	0.360	100			
	Zn	2.142	1.485	0.928	6.35	92.06	1.59	
	Ni	4.237	0.501	0.126	88.89	7.94	1.59	1.59
	Hg	0.584	0.181	0.015	100			
柳园口乡	Cd	1.507	0.744	0.290	88	12		
	Cr	0.725	0.429	0.267	100			
	Pb	4.014	1.553	0.558	56	16	12	16
	Cu	0.667	0.507	0.327	100			
	Zn	2.121	1.529	0.981	4	92	4	
	Ni	2.830	0.547	0.168	92	4	4	
	Hg	0.289	0.113	0.172	100			
北郊乡	Cd	1.975	0.798	0.263	78.95	21.05		
	Cr	1.640	0.542	0.278	94.74	5.26		
	Pb	4.468	1.276	0.699	52.63	36.84	5.26	5.26
	Cu	0.735	0.560	0.396	100			
	Zn	2.177	1.522	0.936	5.26	84.21	10.53	
	Ni	1.248	0.428	0.204	89.47	10.53		
	Hg	0.267	0.128	0.050	100			
西郊乡	Cd	1.107	0.594	0.331	90	10		
	Cr	0.540	0.422	0.334	100			
	Pb	2.933	1.171	0.655	80		20	
	Cu	0.708	0.544	0.392	100			
	Zn	1.595	1.331	1.071		100		
	Ni	2.617	0.696	0.091	80	10	10	
	Hg	0.239	0.133	0.050	100			

表 6 研究区分区单因子与综合污染指数及综合污染等级

Table 6 Single factor and comprehensive pollution indices, and the comprehensive pollution grade in the study area

区域	单因子污染指数							综合污染指数	污染等级
	Cd	Cr	Pb	Cu	Zn	Ni	Hg		
水稻乡	0.625	0.394	1.428	0.534	1.485	0.501	0.181	1.847	轻度污染
柳园口乡	0.744	0.429	1.553	0.507	1.529	0.547	0.113	1.361	轻度污染
北郊乡	0.798	0.542	1.276	0.560	1.522	0.428	0.128	1.384	轻度污染
西郊乡	0.594	0.422	1.171	0.544	1.331	0.696	0.133	1.116	轻度污染
全区	0.671	0.428	1.394	0.536	1.480	0.508	0.162	1.985	轻度污染

的平均日摄入量 (ADD) 均低于参考暴露剂量 (RfD), 单项健康风险指数均小于 1, 说明 Pb、Cu、Zn、Hg 尚未对人体造成健康风险. 针对各单项重金属, 小麦摄入对成人和儿童身体造成健康风险的排序均为 Cu > Zn > Pb > Hg, 相对于其它重金属, Cu 对不同人群的健康风险均为最高. Cu 作为人体必需的微量元素, 对造血细胞生长、神经系统及内分泌等功能具有重要的作用, 但长期过量摄入 Cu, 会导致元素在体内积累并危及人体健康, 相关研究表明, 人体血清中 Cu 含量与癌症病发率之间存在

密切的联系^[43]. 对比研究区小麦单项重金属污染评价结果, 关于 Hg 的评价结果完全一致, 研究区各区小麦中的 Hg 污染指数均为最小, 未受到 Hg 的污染; 而研究区成人和儿童关于 Hg 的健康风险指数均小于 0.1, 即研究区的 Hg 没有对区内居民的健康造成任何影响. 就复合重金属健康风险指数评价结果而言, 成人的健康风险值 (HI) 为 1.055 8 > 1, 说明食用研究区小麦所摄入的重金属很大可能已经对成人造成健康风险; 儿童的健康风险值 (HI) 为 0.545 0 < 1, 且明显低于成人的风险值, 说

明摄食当地小麦尚未对儿童产生健康风险。

表 7 小麦摄取途径的重金属摄入量及非致癌风险

Table 7 Intake and non-carcinogenic risk of heavy metals calculated by the amount of wheat consumed in the study area

重金属	ADD		HQ	
	成人	儿童	成人	儿童
Pb	8.54×10^{-4}	4.41×10^{-4}	2.44×10^{-1}	1.26×10^{-1}
Cu	1.64×10^{-2}	8.48×10^{-3}	4.10×10^{-1}	2.12×10^{-1}
Zn	9.06×10^{-2}	4.68×10^{-2}	3.02×10^{-1}	1.56×10^{-1}
Hg	9.92×10^{-6}	5.13×10^{-6}	9.93×10^{-2}	5.13×10^{-2}
HI			1.055 8	5.45×10^{-1}

2.4.2 致癌风险评价

根据重金属健康风险评价结果可知(表 8),成人和儿童对 Cd、Cr、Ni 的平均日摄入量(ADD)均低于参考暴露剂量(RfD),说明就重金属的日均摄入量而言,Cd、Cr、Ni 尚未对人体造成健康风险。Cd、Cr、Ni 对成人的健康风险指数均值分别为 6.26

$\times 10^{-4}$ 、 1.83×10^{-2} 、 7.85×10^{-4} ; 儿童的健康风险指数均值为 3.23×10^{-4} 、 9.46×10^{-3} 、 4.05×10^{-4} ,均高于 USEPA 推荐的最大可接受风险水平 1×10^{-4} ,可能存在引发癌症的高风险。其中,Ni、Cd 的健康风险值处在人体可接受的风险范围的边缘,相对于 Cr 来说,致癌风险程度较低;Cr 的健康风险指数大于 USEPA 推荐的最大可接受风险水平,是研究区 3 种致癌重金属中健康风险程度最高的重金属元素。这与研究区小麦单项重金属污染评价结果存在一定程度的偏差。在单因子污染评价中,Cr 均显示无污染,而在健康风险计算结果中风险指数是最高的,这主要与重金属的原始含量水平和致癌系数等指标参数有关。Cr 是人体必需的微量元素,对人体健康起着关键作用,但过量 Cr 元素进入人体,会导致呼吸道、胃肠道疾病、皮肤损伤等,甚至引发癌症,是致癌风险较高的重金属元素。

表 8 小麦摄取途径的重金属摄入量及致癌风险

Table 8 Intake and carcinogenic risk of heavy metals calculated by the amount of wheat consumed in the study area

人群	ADD			RI			R
	Cd	Cr	Ni	Cd	Cr	Ni	
成人	1.03×10^{-4}	1.31×10^{-3}	9.34×10^{-4}	6.26×10^{-4}	1.83×10^{-2}	7.85×10^{-4}	1.97×10^{-2}
儿童	5.30×10^{-5}	6.76×10^{-4}	4.82×10^{-4}	3.23×10^{-4}	9.46×10^{-3}	4.05×10^{-4}	1.02×10^{-2}

3 讨论

由环境保护部和国土资源部主导的《全国土壤污染状况调查公报》显示,在对全国 630 万 km^2 的土地进行调查中,土壤总的点位超标率为 16.1%,约 100.8 万 km^2 ,其中,轻微、轻度、中度和重度污染点位比例分别为 11.2%、2.3%、1.5% 和 1.1%^[44]。2016 年 5 月 28 日,国务院印发《土壤污染防治行动计划》,明确要求发布《农用地土壤环境管理办法》,从土壤污染预防、调查与监测、分类管理、监督管理等方面为农用地土壤环境管理工作提供依据,以防控农用地土壤污染风险,保障农产品质量安全^[45]。

本文从理论角度客观地评判了小麦籽粒中重金属的超标情况,而且对摄食当地小麦所给人体带来的健康风险进行了分析,具有一定的参考价值和实践意义。根据研究结果显示(表 2),研究区小麦籽粒中各重金属的平均含量依次排列为 $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cd} > \text{Hg}$,这与天津某污灌区^[46]和江苏省典型地震带^[47]小麦籽粒中重金属含量的排序一致。Pb 和 Zn 作为研究区小麦籽粒中主要污染元素,平均含量均超出国家食品卫生标准限制值,超

标率分别为 94.26% 和 37.71%,高于太湖水网地区 18.18% (Zn)和 4.55% (Pb)的超标率^[47]以及贵州某锌冶炼区 0% (Zn)和 6.67% (Pb)的超标率^[48],这可能受城市人类活动的性质、规模和强度的空间差异性影响,而不同小麦品种也会因其不同的吸收和富集能力,导致作物籽粒中重金属含量出现差异。成人和儿童对 Pb、Cu、Zn、Hg、Cd、Cr、Ni 的平均日摄入量(ADD)均低于参考暴露剂量(RfD),单项健康风险指数均小于 1,尚未对人体造成健康风险。成人的非致癌风险总指数(HI) > 儿童,这与贵州某锌冶炼区农作物重金属健康风险评价结果一致^[48],其中 HI(成人)为 1.0558 > 1,表明摄食当地小麦可能已经对成人造成健康风险;Cd、Cr、Ni 对成人和儿童的致癌风险指数均高于 USEPA 推荐的最大可接受风险水平,可能存在引发癌症的高风险,其中,Cr 的健康风险值最高,是研究区 3 种致癌重金属中健康风险程度最高的重金属元素。与徐州地区的致癌风险评价结果相似^[49]。根据研究结果(表 5~8)显示,引黄灌区小麦籽粒重金属污染等级已达到轻度污染水平,Cd、Cr、Ni 对成人和儿童的致癌风险程度超出人体可接受的范围,可能存在引发癌症的高风险,应该得到相关部

门的关注和重视。

由于指标参数的国际性和研究区域的地域性, 以及不同生活环境下人体素质状况的差异性, 评价结果存在一定的局限性和片面性。因此, 后续研究在综合考虑当前各种影响因子的基础上, 注重重金属元素在“水体-土壤-植物-人体”系统中的迁移、转化和生物可给性方面的实证研究, 以期为农田土壤保护和粮食安全管理提供数据参考。

4 结论

(1) 研究区小麦籽粒中 Cd、Cr、Pb、Cu、Zn、Ni、Hg 平均含量分别为 0.034、0.428、0.279、5.363、29.605、0.305 和 0.003 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 除 Pb 和 Zn 外, 其他重金属均未超出国家食品卫生标准限值。小麦籽粒中 Cd、Cr、Pb、Cu、Zn、Ni、Hg 的超标率分别为 8.20%、0.82%、37.71%、0%、94.26%、10.66% 和 0%, 各重金属的超标水平差异性明显。

(2) 整个研究区小麦受污染的主要重金属元素为 Pb 和 Zn, 污染指数均大于 1, Cd、Cr、Cu、Ni 和 Hg 的污染指数均小于 1。研究区小麦综合污染指数为 1.985 > 1, 属于轻度污染程度; 将各乡区小麦的综合污染指数依次排序为水稻乡 > 北郊乡 > 柳园口乡 > 西郊乡, 污染指数介于 1.116 ~ 1.847 之间, 属轻度污染范畴。

(3) 成人和儿童对非致癌重金属 (Pb、Cu、Zn、Hg) 和致癌重金属 (Cd、Cr、Ni) 的平均日摄入量 (ADD) 均低于参考暴露剂量 (RfD)。非致癌重金属 (Pb、Cu、Zn、Hg) 对成人和儿童的健康风险指数分别为 1.055 8 和 0.545 0; 致癌重金属 Cd、Cr、Ni 对成人和儿童的健康风险指数均值均高于 USEPA 推荐的最大可接受风险水平 1×10^{-4} , 可能存在引发癌症的风险。

参考文献:

- [1] 董立宽, 方斌. 茶园土壤重金属乡镇尺度下空间异质性分析——以江浙优质名茶种植园为例[J]. 地理研究, 2017, **36**(2): 391-404.
Dong L K, Fang B. Analysis of spatial heterogeneity of soil heavy metals in tea plantation: case study of high quality tea garden in Jiangsu and Zhejiang[J]. Geographical Research, 2017, **36**(2): 391-404.
- [2] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Multivariate geostatistical analyses of heavy metals in soils: spatial multi-scale variations in Wulian, eastern China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, **107**: 140-147.
- [3] Martín J A R, Ramos-Miras J J, Boluda R, *et al.* Spatial relations of heavy metals in arable and greenhouse soils of a Mediterranean environment region (Spain)[J]. Geoderma, 2013, **200-201**: 180-188.
- [4] Li H H, Chen L J, Yu L, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of human exposure to oral bioaccessibility of heavy metals via urban street dusts from different functional areas in Chengdu, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, **586**: 1076-1084.
- [5] Gu Y G, Gao Y P, Lin Q. Contamination, bioaccessibility and human health risk of heavy metals in exposed-lawn soils from 28 urban parks in southern China's largest city, Guangzhou[J]. Applied Geochemistry, 2016, **67**: 52-58.
- [6] Vannini C, Domingo G, Onelli E, *et al.* Phytotoxic and genotoxic effects of silver nanoparticles exposure on germinating wheat seedlings[J]. Journal of Plant Physiology, 2014, **171**(13): 1142-1148.
- [7] 陈志凡, 赵焱, 谷蕾, 等. 基于农业区位论的北京市土壤-小麦系统中重金属 Pb 积累特征及其健康风险[J]. 地理科学, 2012, **32**(9): 1142-1147.
Chen Z F, Zhao Y, Gu L, *et al.* Pb accumulation and its health risk in soil-wheat system of Beijing city based on agricultural location theory[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, **32**(9): 1142-1147.
- [8] 聂亚平, 王晓维, 万进荣, 等. 几种重金属 (Pb、Zn、Cd、Cu) 的超富集植物种类及增强植物修复措施研究进展[J]. 生态科学, 2016, **35**(2): 174-182.
Nie Y P, Wang X W, Wan J R, *et al.* Research progress on heavy metal (Pb, Zn, Cd, Cu) hyperaccumulating plants and strengthening measures of phytoremediation[J]. Ecological Science, 2016, **35**(2): 174-182.
- [9] 吴燕明, 吕高明, 周航, 等. 湖南某矿区蔬菜中 Pb、Cd 污染状况及健康风险评估[J]. 生态学报, 2014, **34**(8): 2146-2154.
Wu Y M, Lv G M, Zhou H, *et al.* Contamination status of Pb and Cd and health risk assessment on vegetables in a mining area in southern Hunan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(8): 2146-2154.
- [10] Cai L M, Xu Z C, Qi J Y, *et al.* Assessment of exposure to heavy metals and health risks among residents near Tonglushan mine in Hubei, China[J]. Chemosphere, 2015, **127**: 127-135.
- [11] 张妍, 李发东, 欧阳竹, 等. 黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 121-128.
Zhang Y, Li F D, Ouyang Z, *et al.* Distribution and health risk assessment of heavy metals of groundwaters in the irrigation district of the lower reaches of Yellow River[J]. Environmental Science, 2013, **34**(1): 121-128.
- [12] Zeng X F, Wang Z W, Wang J, *et al.* Health risk assessment of heavy metals via dietary intake of wheat grown in Tianjin sewage irrigation area[J]. Ecotoxicology, 2015, **24**(10): 2115-2124.
- [13] 解惠婷, 张承中, 徐峰, 等. 生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1523-1530.
Xie H T, Zhang C Z, Xu F, *et al.* Distribution and assessment of mercury in the ambient soil of a municipal solid waste incinerator[J]. Environmental Science, 2014, **35**(4): 1523-1530.
- [14] Li N, Kang Y, Pan W J, *et al.* Concentration and transportation

- of heavy metals in vegetables and risk assessment of human exposure to bioaccessible heavy metals in soil near a waste-incinerator site, South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **521-522**: 144-151.
- [15] 陈轶楠, 马建华. 河南省某市驾校地表灰尘重金属污染及健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(8): 3017-3026.
- Chen Y N, Ma J H. Assessment of pollution and health risks of heavy metals in surface dusts from driving schools in a city of Henan, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(8): 3017-3026.
- [16] Mehr M R, Keshavarzi B, Moore F, *et al.* Contamination level and human health hazard assessment of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in street dust deposited in Mahshahr, southwest of Iran[J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2016, **22**(8): 1726-1748.
- [17] 秦鱼生, 喻华, 冯文强, 等. 成都平原北部水稻土重金属含量状况及其潜在生态风险评价[J]. *生态学报*, 2013, **33**(19): 6335-6344.
- Qin Y S, Yu H, Feng W Q, *et al.* Assessment on heavy metal pollution status in paddy soils in the northern Chengdu Plain and their potential ecological risk[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(19): 6335-6344.
- [18] Fu Q L, Li L H, Achal V, *et al.* Concentrations of heavy metals and Arsenic in market rice grain and their potential health risks to the population of Fuzhou, China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2015, **21**(1): 117-128.
- [19] 纪小凤, 郑娜, 王洋, 等. 有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险[J]. *环境科学*, 2015, **36**(10): 3845-3851.
- Ji X F, Zheng N, Wang Y, *et al.* Accumulation of mercury in soil-maize system of non-ferrous metals smelting area and its related risk assessment [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(10): 3845-3851.
- [20] Yu R, Wang Y, Wang C X, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in soils and maize (*Zea mays* L.) from Yushu, Northeast China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2017, **23**(6): 1493-1504.
- [21] 陈志良, 黄玲, 周存宇, 等. 广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 389-398.
- Chen Z L, Huang L, Zhou C Y, *et al.* Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in vegetables in Guangzhou [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 389-398.
- [22] Chang C Y, Yu H Y, Chen J J, *et al.* Accumulation of heavy metals in leaf vegetables from agricultural soils and associated potential health risks in the Pearl River Delta, South China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186**(3): 1547-1560.
- [23] 符刚, 曾强, 赵亮, 等. 基于 GIS 的天津市饮用水水质健康风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4553-4560.
- Fu G, Zeng Q, Zhao L, *et al.* Health risk assessment of drinking water quality in Tianjin based on GIS [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4553-4560.
- [24] Giri S, Singh A K. Human health risk assessment via drinking water pathway due to metal contamination in the groundwater of Subarnarekha River Basin, India [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**(3): 63.
- [25] 刘星, 邱慧珍, 王蒂, 等. 甘肃省中部沿黄灌区轮作和连作马铃薯根际土壤真菌群落的结构性差异评估[J]. *生态学报*, 2015, **35**(12): 3938-3948.
- Liu X, Qiu H Z, Wang D, *et al.* Evaluation on fungal community structure of rhizosphere soils of potato under rotation and continuous cropping systems in Yellow River irrigation areas of Middle Gansu Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(12): 3938-3948.
- [26] 杨世琦, 韩瑞芸, 王永生, 等. 基于秸秆还田条件下的黄灌区稻旱轮作土壤硝态氮淋失特征研究[J]. *生态学报*, 2017, **37**(9): 2926-2934.
- Yang S Q, Han R Y, Wang Y S, *et al.* Effect of straw application to soil nitrate leaching of paddy-upland rotation in the Yellow River irrigation area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(9): 2926-2934.
- [27] 武荣盛, 吴瑞芬, 侯琼, 等. 内蒙古河套灌区春玉米苗期光温指标[J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(1): 241-248.
- Wu R S, Wu R F, Hou Q, *et al.* Light and temperature indices during the seeding stage of spring maize in Hetiao irrigation district, Inner Mongolia, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(1): 241-248.
- [28] 张玉, 韩清芳, 成雪峰, 等. 关中灌区沟垄集雨种植补灌对冬小麦光合特征、产量及水分利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(5): 1382-1390.
- Zhang Y, Han Q F, Cheng X F, *et al.* Effects of ridge and furrow rain harvesting with supplemental irrigation on winter wheat photosynthetic characteristics, yield and water use efficiency in Guanzhong irrigation district [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(5): 1382-1390.
- [29] 郑顺安, 唐杰伟, 郑宏艳, 等. 污灌区稻田汞污染特征及健康风险评价[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(9): 2729-2736.
- Zheng S A, Tang J W, Zheng H Y, *et al.* Pollution characteristics and risk assessments of mercury in wastewater-irrigated paddy fields [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(9): 2729-2736.
- [30] 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.
- [31] 陈志凡, 王岩松, 段海静, 等. 开封黑岗口引黄灌区稻麦轮作下农田土壤剖面重金属分布特征[J]. *中国生态农业学报*, 2012, **20**(4): 480-487.
- Chen Z F, Wang Y S, Duan H J, *et al.* Vertical distribution characteristics of heavy metals in agricultural soil profiles under rice-wheat system in Heigangkou Yellow River irrigation region [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, **20**(4): 480-487.
- [32] 马建华, 马诗院, 陈云增. 河南某污灌区土壤-作物-人发系统重金属迁移与积累[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(6): 1517-1526.
- Ma J H, Ma S Y, Chen Y Z. Migration and accumulation of heavy metals in soil-crop-hair system in a sewage irrigation area, Henan, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(6): 1517-1526.

- [33] Cao C, Chen X P, Ma Z B, *et al.* Greenhouse cultivation mitigates metal-ingestion-associated health risks from vegetables in wastewater-irrigated agroecosystems[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **560-561**: 204-211.
- [34] US EPA. Risk assessment guidance for superfund volume I human health evaluation manual (part A)[R]. EPA/540/1-89/002. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 1989. 256-263.
- [35] 段小丽. 中国人群暴露参数手册概要(儿童卷)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016. 74-75.
- Duan X L. Highlights of the Chinese exposure factors handbook [M]. Beijing: China Environmental Press, 2016. 74-75.
- [36] US EPA. Superfund public health evaluation manual[R]. EPA/540/1-86/060. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 1986. 1-52.
- [37] CASRN 7440-43-9, Cadmium[S].
- [38] CASRN 7439-92-1, Lead and compounds (inorganic)[S].
- [39] CASRN 7440-50-8, Copper[S].
- [40] CASRN 7440-66-6, Zinc and compounds[S].
- [41] US EPA. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites [M]. Washington, DC: Washington Office of Solid Waste and Emergency Response, US Environmental Protection Agency, 2001. 4-24.
- [42] Filzek P D B, Spurgeon D J, Broll G, *et al.* Pedological characterisation of sites along a transect from a primary cadmium/lead/zinc smelting works[J]. *Ecotoxicology*, 2004, **13**(8): 725-737.
- [43] Emwas A H M, Al-Talla Z A, Guo X R, *et al.* Utilizing NMR and EPR spectroscopy to probe the role of copper in prion diseases[J]. *Magnetic Resonance in Chemistry*, 2013, **51**(5): 255-268.
- [44] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm, 2014-04-17.
- [45] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院关于印发土壤污染防治行动计划的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/jzhqce/content/2016-05/31/content_5078377.htm, 2016-05-28.
- [46] 孙亚芳, 王祖伟, 孟伟庆, 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 W Q, *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.
- [47] 陈京都, 戴其根, 许学宏, 等. 江苏省典型区农田土壤及小麦中重金属含量与评价[J]. *生态学报*, 2012, **32**(11): 3487-3496.
- Chen J D, Dai Q G, Xu X H, *et al.* Heavy metal contents and evaluation of farmland soil and wheat in typical area of Jiangsu Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(11): 3487-3496.
- [48] 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.
- [49] 强承魁, 秦越华, 丁永辉, 等. 徐州地区麦田土壤和小麦籽实重金属污染特征分析[J]. *生态环境学报*, 2016, **25**(6): 1032-1038.
- Qiang C K, Qin Y H, Ding Y H, *et al.* Pollution characteristics of heavy metals in soils and wheat grains in Xuzhou area[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(6): 1032-1038.

CONTENTS

An Assessment of PM _{2.5} -Related Health Risks and Associated Economic Losses in Chinese Cities	LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (3467)
Impact of the Electric Power Industry on Air Quality in Winter of Urban Agglomerations Along the Middle Reaches of the Yangtze River	SUN Xiao-wei, GUO Xiu-rui, CHENG Shui-yuan (3476)
Capacity Simulation Method Based on Regional Transfer Matrix and PM _{2.5} Concentration Target Constraint	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, YANG Liu-lin, <i>et al.</i> (3485)
Analysis of Chemical Composition of the Fine Particulate Matter in Summer in Tianjin City via a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	WEN Jie, SHI Xu-rong, TIAN Ying-ze, <i>et al.</i> (3492)
Pollution Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	PENG Xiao-le, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (3502)
Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Carbonaceous Aerosols in the Cities of Hangzhou and Ningbo	XU Hong-hui, XU Jing-sha, HE Jun, <i>et al.</i> (3511)
Emission Characteristics and Chemical Components of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste	WANG Yan, HAO Wei-wei, CHENG Ke, <i>et al.</i> (3518)
Size-resolved Emission Factors of Carbonaceous Particles from Domestic Coal Combustion in China	YANG Guo-wei, KONG Shao-fei, ZHENG Shu-ni, <i>et al.</i> (3524)
Characteristics and Source Analysis of Non-methane Hydrocarbons (NMHC) in Dalian	JI De-yu (3535)
Scenario Analyses of the Volatile Organic Compound Emission Allowance and Allocation in the 13th Five-Year Period	ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, LIANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (3544)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Packaging and Printing Industry in Zhejiang Province	WANG Jia-de, LÜ Jian-zhang, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3552)
Emission Characteristics and Characteristic Substance Identification of Volatile Odorous Organic Compounds in Industries Using Organic Solvents	ZHAI Zeng-xiu, MENG Jie, WANG Gen, <i>et al.</i> (3557)
Analysis of Aerosol Optical Depth Variation Characteristics for 10 years in Urumqi Based on MODIS_C006	HU Jun, KANG Yan-ming, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (3563)
Motor Vehicle Pollution Control Scenarios of Beijing Subsidiary Administrative Center Based on Road Traffic Flow	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (3571)
Air Pollution Characteristics and Jogger Inhalation Exposure in Typical Running Area of Beijing	TAO Shuang-cheng, GAO Shuo-han, XIONG Xin-zhu, <i>et al.</i> (3580)
Temporal and Spatial Changes in Sediment Nutrients and Heavy Metals of the Danjiangkou Reservoir Before and After Water Division of the Mid-route Project	LI Bing, WANG Ya, ZHENG Zhao, <i>et al.</i> (3591)
Fluorescence Characteristics and Environmental Significance of Organic Matter in the Northern Part of Lake Taihu in Spring and Winter	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua (3601)
Contamination Levels and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Aquatic Environment of Key Areas of Taihu Lake	ZHU Bing-qing, GAO Zhan-qi, HU Guan-jiu, <i>et al.</i> (3614)
Nitrogen and Phosphorous Adsorption Characteristics of Suspended Solids Input into a Drinking Water Reservoir via Typhoon Heavy Rainfall	YAO Ling-ai, ZHAO Xue-min, MA Qian-li, <i>et al.</i> (3622)
Geochemical Characteristics and Genesis Analyses of High-arsenic Groundwater in the Pearl River Delta	ZHANG Chang-yan, HE Jiang-tao, ZHANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3631)
Effects of Organic Pollutants on the Bacterioplankton Community in Hangzhou Bay	XUAN Li-xia, DAI Wen-fang, YU Wei-na, <i>et al.</i> (3640)
Bacterioplankton Community Structure in the Lancang River Basin and the Analysis of Its Driving Environmental Factors	CHENG Bao, WANG Xue, XU Ya-qian, <i>et al.</i> (3649)
Bacterial Community Structure Characteristics in the Biliuhe Reservoir and Its Key Driving Factors	WANG Huan, ZHAO Wen, XIE Zai-gang, <i>et al.</i> (3660)
Analysis of the Temporal and Spatial Distribution of the Diversity of the Denitrifying Anaerobic Methane-Oxidizing Bacterial Community in the Sediments of the Hunhe River and Its Relationship with Environmental Factors	ZHANG Ya-di, SONG Yong-hui, PENG Jian-feng, <i>et al.</i> (3670)
Influences of Anthropogenic Activities on the Community Structure of N-DAMO Bacteria in the North Canal	LIU Yang, CHEN Yong-juan, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3677)
Impact of Exogenous Nitrogen Import on Sediment Denitrification and N ₂ O Emissions in Ditches Under Different Land Uses	SHE Dong-li, CHEN Xin-yi, GAO Xue-mei, <i>et al.</i> (3689)
Sedimentation Characteristics and Pollutant Content Distribution of Storm Drainage Sediments	SHANG Yu, ZHOU Yi, LIAO An-yi, <i>et al.</i> (3696)
Effect of Cr(VI) on Coagulation Process of Different Coagulants	GAO Qian, ZHANG Da-wei, XU Hui, <i>et al.</i> (3704)
Enhancement of Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A with Peroxymonosulfate Activated by a Co ₃ O ₄ /BiVO ₄ Composite Photoanode	LI Jiang, WANG Yan, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (3713)
Preparation and Characterization of a Calcium Alginate/Biochar Microsphere and Its Adsorption Characteristics and Mechanisms for Pb(II)	YU Chang-jiang, DONG Xin-yu, WANG Miao, <i>et al.</i> (3719)
Behaviors and Mechanisms of CIP and OFL Adsorption by Magnetic Biochar	ZHAO Hua-xuan, LANG Yin-hai (3729)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect New Psychoactive Substances in Wastewater	CHEN Pei-pei, DU Peng, ZHOU Zi-lei, <i>et al.</i> (3736)
Effect of Hybrid Process of Pre-ozonation and CNT Modification on Hollow Fiber Membrane Fouling Control	GUAN Yu-qi, WANG Kai-lun, ZHU Xue-dong, <i>et al.</i> (3744)
Bioregeneration of Anion Exchange Resin Used in Nitrate Removal	YE Ting, ZHANG Guang, WANG Ke, <i>et al.</i> (3753)
Preparation of Prussian Blue@Yeast Catalyst and Its Heterogeneous Fenton Performance	CHEN Si, BAI Bo, WANG Hong-lun, <i>et al.</i> (3759)
Nitrogen Removal of Double-bacteria-layer System via PN/A Process	XU Jing-yi, DU Jun, YANG Yi-feng, <i>et al.</i> (3767)
Inhibitory Effect of Phenol on Phosphorus Removal Performance of an EBPR System	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3775)
Treatment of Old Landfill Leachate via a Denitrification-Partial Nitritation-ANAMMOX Process	WANG Fan, LU Ming-yu, YIN Ji-qiang, <i>et al.</i> (3782)
Denitrification Characteristics and Functional Genes of Denitrifying Bacteria Under Aerobic or Anaerobic Conditions	KANG Peng-liang, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3789)
Characteristic of Benzo[a]pyrene Anaerobic Degradation by Phenol Co-substrate and Microbial Communities from Two Types of Sludge	WU Hai-zhen, HU Xiao-yi, WANG Ming, <i>et al.</i> (3797)
Spectroscopic Characterization of DOM During Hyperthermophilic Composting of Sewage Sludge	LIU Xiao-ming, YU Zhen, ZHOU Pu-xiong, <i>et al.</i> (3807)
Effects of Biochar on Nitrous Oxide Fluxes and the Abundance of Related Functional Genes from Agriculture Soil in the North China Plain	LIU Xing-ren, ZHAO Guang-xin, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i> (3816)
Nitrous Oxide Production in Response to Oxygen in a Solar Greenhouse Vegetable Soil	CHEN Ji-ji, SONG He, CAO Wen-chao, <i>et al.</i> (3826)
Comprehensive Study of Lead Speciation and Its Bioavailability in Soils From a Lead/Zinc Mining Area by Micro X-Ray Fluorescence and X-Ray Absorption Near-Edge Structure	SUN Xiao-yan, LIU Jian, LUO Li-qiang (3835)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Soil and Its Bioaccumulation by Dominant Plants in a Lead-Zinc Mining Area, Nanjing	LI Jun-kai, ZHANG Dan, ZHOU Pei, <i>et al.</i> (3845)
Preparation of Iron-Aluminum Modified Diatomite and Its Immobilization in Cadmium-Polluted Soil	YANG Yu-zhong, ZHU Jian, XIAO Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3854)
Transfer of Soil Organic Carbon to Inorganic Carbon in Arid Oasis Based on Stable Carbon Isotope Technique	LI Yang-mei, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i> (3867)
Environmental Filters Drive the Assembly of the Soil Fungal Community in the <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forests of the Guandi Mountains	ZHAO Peng-yu, LI Cui, CHAI Bao-feng (3876)
Effects of Transgenic Maize with <i>cry1Ab</i> and <i>Epsps</i> Genes C0030.3.5 on the Abundance and Community Structure of Soil Nitrogen-fixing Bacteria	WANG Rui, ZHU Ke, LI Gang, <i>et al.</i> (3885)
Effects of Gypsum on CH ₄ Emission and Functional Microbial Communities in Paddy Soil	HU Xiang-yu, XIANG Qiu-jie, MU Zhi-jian (3894)
Effects of Long-term Fertilization on Enzyme Activities in Profile of Paddy Soil Profiles	DU Lin-sen, TANG Mei-ling, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3901)
Effects of Sediment Burial and Exogenous Cd Input on Biomass Allocation and Antioxidative Enzyme Activities of <i>Suaeda salsa</i> in the Coastal Wetland of the Yellow River Delta	SONG Hong-li, WANG Li-zhi, YU Wan-ni, <i>et al.</i> (3910)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wheat Grains Cultivated in Kaifeng Irrigation Area of the Yellow River	KANG Guo-hua, ZHANG Peng-yan, LI Yan-yan, <i>et al.</i> (3917)
Effect of Graphene Oxide on Algal Toxicity of Dibutyl Phthalate	TU Hai-feng, LIU Cheng, WANG Yu-qing, <i>et al.</i> (3927)
Effects of Organic Substrates on ANAMMOX-MFC Denitrification Electrogenesis Performance	ZU Bo, MA Lan, LIU Bo, <i>et al.</i> (3937)
Well-to-Wheels Fossil Energy Consumption and CO ₂ Emissions of Hydrogen Fuel Cell Vehicles in China	LIN Ting, WU Ye, HE Xiao-yi, <i>et al.</i> (3946)
Secondary Organic Aerosols from Aqueous Reaction of Aerosol Water	YE Zhao-lian, QU Zhen-xiu, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (3954)