环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第44卷 第6期
2023年6月15日

目 次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析 …… 张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)
我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价 …… 杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)
基于MSPA和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络 …… 乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺曈, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)
城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市区为例 …… 陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)
天津市"十三五"期间$PM_{2.5}$减排效果评估 …… 肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戢运峰 (3054)
清洁取暖对保定市采暖期$PM_{2.5}$中碳质气溶胶的影响 …… 罗宇骞, 张凯, 赵妤希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关健, 郭志强, 李博文 (3063)
南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区 …… 谢放尖, 郑新梅, 窦焘焘, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)
大气环流型对珠三角2015~2020年臭氧变化的影响 …… 汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)
热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析 …… 符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (3089)
基于CMAQ和HYSPLIT模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析 …… 林鑫, 仝纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)
2016~2020年成都市控制$PM_{2.5}$和$O_{3\text{-}8h}$污染的健康效益评价 …… 张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)
深圳市2022年春季新冠疫情管控期间空气质量分析 …… 刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗玫 (3117)
贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单 …… 王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)
西安市大气降水的主要化学组分及其来源 …… 周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)
宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源 …… 刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)
雅鲁藏布江水化学演变规律 …… 江平, 张全发, 李思悦 (3165)
无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析 …… 徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)
太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价 … 罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)
北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估 …… 蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)
氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程 …… 郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)
淮河下游湖泊表层水和沉积物中PPCPs分布特征及风险评估 …… 武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)
西宁市浅层地下水化学特征及形成机制 …… 刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)
叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价 …… 闫志雲, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)
密云水库细菌群落组成结构及影响因素 …… 陈颖, 王佳文, 梁恩航, 陈倩 (3247)
可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径 …… 许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)
纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制 …… 陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)
高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中Cd(Ⅱ)和Ni(Ⅱ)的去除性能及机制 …… 张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)
镧改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定 …… 何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)
城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素 …… 张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)
基于Meta分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响 …… 符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)
我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估 …… 黄静文, 刘磊, 颜晓元, 逯超普 (3321)
气候变化和人类活动对东部沿海地区NDVI变化的影响分析 …… 金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩茹, 陈明利 (3329)
基于InVEST模型和PLUS模型的环杭州湾生态系统碳储量 …… 丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晟, 朱望远 (3343)
河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征 …… 孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)
乌梁素海东部流域非生长季草地土壤细菌群落结构的垂向差异 …… 李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)
芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局 …… 毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)
植被类型对黄土高原露采矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响 …… 赵姣, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)
施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响 …… 姚丽茹, 李伟, 朱员正, 普布仓决, 韩娟 (3396)
甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响 …… 朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)
生物炭对热带地区辣椒种植土壤N_2O排放及其功能基因的影响 …… 陈绮琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)
覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响 …… 蒋洪丽, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)
不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响 …… 穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)
基于PMF模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析 …… 陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闵, 申哲民 (3450)
云南5城市道路扬尘$PM_{2.5}$中重金属含量表征及健康风险 …… 韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)
兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价 …… 李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)
PMF和RF模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例 …… 高越, 吕童, 张蕴凯, 张博晗, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)
基于APCS-MLR受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析 …… 张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)
PCA-APCS-MLR和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析 …… 王美华 (3509)
三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价 …… 刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)
皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准 …… 刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨, 黄健敏 (3531)
张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析 …… 安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)
滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价 …… 汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)
矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析 …… 魏洪斌, 罗明, 向垒, 查理思, 杨慧丽 (3573)
基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析 …… 卫晓锋, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)
不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险 …… 祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)
山东省典型污灌区土壤-小麦重金属健康风险评估 …… 王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)
基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测 …… 牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)
《环境科学》征订启事(3062) 《环境科学》征稿简则(3116) 信息(3164, 3259, 3572)

山东省典型污灌区土壤-小麦重金属健康风险评估

王菲[1], 费敏[2], 韩冬锐[1], 李春芳[3], 曹文涛[4], 姚磊[5], 曹见飞[5], 吴泉源[5]*
(1. 山东省农业科学院农业信息与经济研究所, 济南 250010; 2. 山东省公共资源交易中心, 济南 250014; 3. 山东交通学院交通土建工程学院, 济南 250357; 4. 滁州学院数学与金融学院, 滁州 239000; 5. 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250358)

摘要: 为探讨污灌区农田土壤-小麦体系中重金属的富集特征和潜在健康风险,选取山东省龙口市北部平原为典型区,系统采集了小麦籽粒和对应点表层土壤样品各 63 个,测定 Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、As、Cd 和 Hg 的含量,对土壤和小麦籽粒的重金属含量水平、富集能力和健康风险进行研究. 结果表明,土壤中 8 种重金属的含量均值超出山东省东部元素背景值,由 Cd 元素造成的土壤污染比较明显. 小麦籽粒中 Ni 和 Pb 元素的样品超标率偏高,分别为 100% 和 96.8%. 小麦籽粒与土壤重金属含量间的相关性并不显著,总体上小麦籽粒对 Zn、Hg、Cd 和 Cu 的富集能力较强. 以本地小麦面粉为食源时,健康风险评价结果显示,在当前食用量下,成人和儿童摄入的 Ni 元素分别占日允许摄入量的 28.278% 和 131.980%,潜在威胁性较大. As 和 Pb 的风险指数(HQ)超过 1,是威胁研究区成人和儿童健康的主要物质,约占总风险的 80%. 8 种重金属的 HQ 总和虽低于安全值,但儿童的总风险值为成人的 1.245 倍,儿童的食品安全问题应引起足够重视. 从空间分布来看,研究区南部的健康风险高于北部,今后应加强对南部地区的重金属污染防治工作力度.

关键词:污灌区; 重金属; 土壤; 小麦籽粒; 健康风险
中图分类号: X171.5; X820.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2023)06-3609-10 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202207010

Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province

WANG Fei[1], FEI Min[2], HAN Dong-rui[1], LI Chun-fang[3], CAO Wen-tao[4], YAO Lei[5], CAO Jian-fei[5], WU Quan-yuan[5]*
(1. Institute of Agricultural Information and Economics, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250010, China; 2. Shandong Provincial Public Resources Trading Center, Jinan 250014, China; 3. School of Transportation and Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China; 4. School of Mathematics and Finance, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China; 5. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China)

Abstract: Sewage irrigation is a common alternative to make up for the shortage of agricultural irrigation in intensive agricultural areas. Abundant organic matter and nutrients in sewage can improve soil fertility and crop yield, but hazardous materials, such as heavy metals, will damage the soil environmental quality and threaten human health. To better understand the characteristics of heavy metal enrichment and potential health risk in a sewage irrigated soil-wheat system, a total of sixty-three pairs of topsoil and wheat grain samples were collected from the sewage irrigated area of Longkou City in Shandong Province. The contents of Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, As, Cd, and Hg were determined to analyze heavy metal contamination and calculate bio-accumulation factor (BAF), estimated daily absorption (EDA), as well as hazard quotient (HQ). The results showed that the average contents of the eight heavy metals were 61.647, 30.439, 29.769, 36.538, 63.716, 8.058, 0.328, and 0.028 mg·kg^{-1}, respectively, which all exceeded the background values of corresponding heavy metals in the eastern Shandong Province. Especially, the average content of Cd was higher than the current standard value of soil environmental quality of agricultural land soil pollution risk control, indicating the apparent soil contamination. However, the correlations between the heavy metal contents in soil and wheat grains were not significant, suggesting that it is difficult to conclude the enrichment degree of heavy metals in wheat grains merely by the heavy metal contents in soil. The results of BAF showed that the high enrichment capacity of wheat grain was primarily obtained with Zn, Hg, Cd, and Cu. According to the national food safety limit standard, the over-limit ratios of Ni (100%) and Pb (96.8%) in wheat grains were the most serious. As a result, under the current consumption of local wheat flour, the EDAs of Ni and Pb were high, accounting for 28.278% and 1.955% of the acceptable daily intakes (ADI) for adults and 131.980% and 9.124% of the ADIs for children. The results of the health risk assessment exhibited that As and Pb were the main sources causing health risks, accounting for approximately 80% of the total risk. Although the sums of the HQ of the eight heavy metals for adults and children were below 10, the total HQ of children was 1.245 times higher than that of adults. The food safety of children should receive more attention. When considering spatial characteristics, the health risk in the southern study area was higher than that in the northern part of the study area. The prevention and control of heavy metal contamination in the southern area should be strengthened in the future.

Key words: sewage irrigation area; heavy metals; soil; wheat grain; health risk

中国是全球 13 个贫水国之一,水资源短缺严重制约着我国农业发展[1,2]. 为弥补农业灌溉用水不足,污水灌溉现象在我国北方缺水地区较为普遍[3~6]. 污水中丰富的有机质和营养元素可以提高土壤肥力和作物产量,但其中的有害物质也会给农田生态安全造成一定威胁[2,7]. 近年来,由污水灌溉引起的农田重金属污染成为国内外关注的热点问题[8~11]. 有研究表明,污灌会导致土壤和作物中重金属含量持续积累,并通过食物链危害人类健康[10~12]. 我国针对污灌区土壤和作物重金属进行过相关调查研究,如在北京市[13~15]、天津市[15,16]和辽

收稿日期: 2022-07-01; **修订日期**: 2022-08-22
基金项目: 国家自然科学基金项目(41371395,41601549); 山东省重点研发计划项目(2019GSF109034); 山东省农业科学院科技创新工程项目(CXGC2022E07)
作者简介: 王菲(1991~),女,博士,主要研究方向为农田生态安全评价,E-mail:fei1226h@126.com
* 通信作者,E-mail:wqy6420582@163.com

宁省沈、抚等多个地区[17,18]发现灌区土壤均存在不同程度的重金属富集现象,部分作物籽粒样本重金属超标而不宜食用.

小麦是我国重要的粮食作物,在我国北方地区广泛种植[19]并大量消费[13,20].重金属可通过饮食摄入途径在人体内富集,直接危害人类健康[10,12,13,21,22],评估食用小麦类食品所导致的重金属健康风险具有重要的现实意义.龙口市工农业发达、水资源短缺,其北部平原是山东省典型污灌区域,已显现出一定的农田重金属富集现象[23~27].多位学者曾对龙口市污灌区土壤重金属进行过污染评价并提出相应的对策建议[24,25,28,29],但尚未系统评估过当地居民膳食中由小麦类食品摄入重金属所引发的健康风险.因此,本文以山东省东部土壤元素背景值、土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准和国家食品安全限量为标准,分析了龙口市污灌区内土壤与小麦籽粒中 Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、As、Cd 和 Hg 这 8 种重金属的富集程度;探究了土壤-小麦籽粒重金属的富集和迁移规律;采用美国环保署推荐的评价模型,对成人和儿童食用本地小麦面粉时摄入重金属的健康风险进行了评估,旨在为当地农田生态系统的重金属防治与居民健康水平防护提供一定科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山东省龙口市北部平原,地理坐标 37°34′35″~37°44′49″N,120°13′04″~120°40′47″E,属温带季风性气候,年降水量约 600~700 mm.该地区成土条件基本相同,主要为棕壤、褐土、潮土和砂姜黑土,pH 介于 6.5~7.5 之间[24].

研究区存在 30 a 以上的污水灌溉历史,污灌面积约4 500 hm^2,主要污灌水源为龙口市内污水处理厂排放的工业废水和生活污水,以及周边工厂和采矿区排入黄水河和泳汶河等河流内的废水[27].

1.2 样品采集与测试分析

根据研究区农田分布情况和道路通达性,本次共采集小麦籽粒及其对应点土壤样品各 63 个,具体分布见图 1.土壤样品取自 30 m×30 m 样方,样方内采用梅花形 5 点采样法,在对角线 4 等分点和对角线交接点处各选一个采样点,每点用木铲取 0~20 cm 表层土,剔除杂物,均匀混合后装入聚乙烯塑料袋中,同时记录采样点坐标.小麦为对应样方内 5 点麦穗混合而成,重约 150 g.

采集的土样带回实验室后通风阴干,用玛瑙研钵压碎并过 100 目尼龙筛后备用.小麦自然风干,手工搓掉外皮后得到籽粒部分,粉碎机粉碎后称取样品 15 g 用于重金属含量测定.前期处理后,样品依托山东省物化探勘察院岩矿测试中心检测.

土壤样品经 HNO_3-HCl-HF-$HClO_4$ 消解,小麦样品则用 HNO_3-$HClO_4$(4∶1)法消煮,采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)测定 Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 和 Cd 含量,电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定 As 含量,冷原子吸收分光光度法(ASS)测定

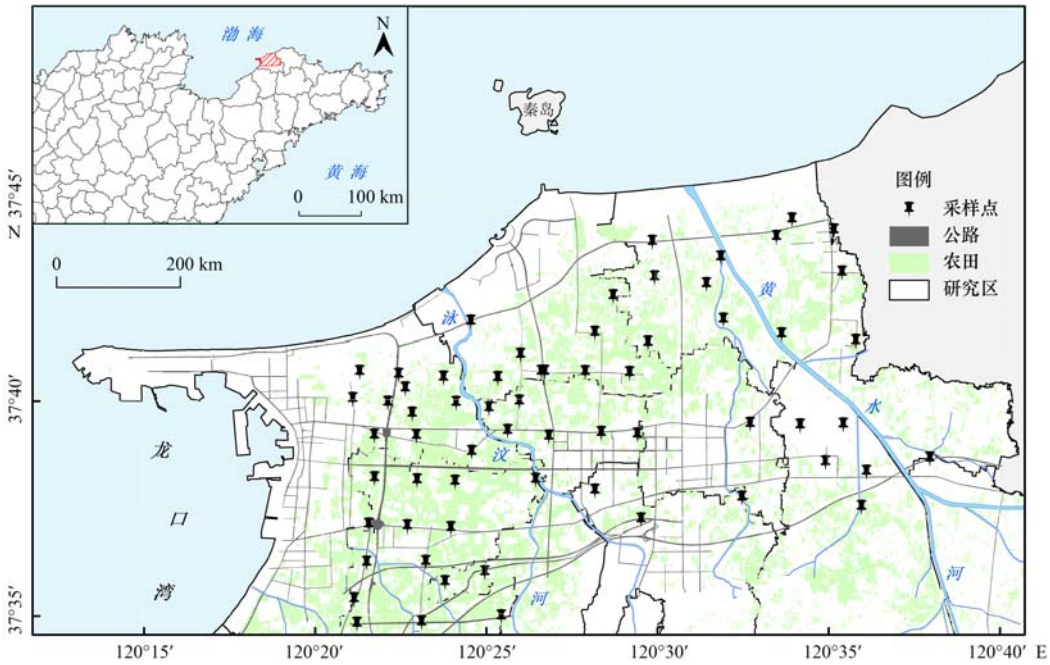

图 1 研究区及采样点分布示意

Fig. 1 Study area and sampling sites

Hg 的含量. 分析所用试剂均为优级纯,采用国家土样标准(GBW 07401)和植物标样(GBW 07604)进行质量控制[30],回收率介于 97.1%~108.2%之间,测试结果符合精度要求[31].

1.3　研究方法

1.3.1　小麦籽粒重金属富集系数

小麦籽粒富集系数(bio-accumulation factor, BAF)为小麦籽粒重金属含量与土壤重金属含量之比,可以大致反映土壤-小麦籽粒系统中元素迁移的难易程度[32]. BAF 值越大,小麦籽粒的重金属富集能力越强; BAF 越小表示小麦对重金属的富集能力越差,抗污染能力越强[33].

1.3.2　健康风险评估方法

(1) 日均摄入量　研究区居民经小麦面粉摄入的重金属含量采用估算的日摄入量(estimated daily absorption, EDA)衡量,具体计算公式如下:

$$EDA_i = Q \times C_i \quad (1)$$

式中,EDA_i 为第 i 种重金属的日均摄入量,$kg \cdot d^{-1}$; Q 为小麦面粉的日均消费量,$kg \cdot d^{-1}$; C_i 为第 i 种重金属的在小麦籽粒中的含量,$mg \cdot kg^{-1}$.

由于样品采集时间为 2017 年,因此本文采用 2016~2018 年 3 a 的烟台市居民面粉消费量[34~36]均值,即 0.232 $kg \cdot d^{-1}$,为输入值. 调查对象涉及各个年龄段(0~6、7~17、18~44、45~59 和 60 周岁以上). 其中,儿童(0~6 岁)的小麦日均摄食量假定为成人的 1/3[13],即为 0.077 $kg \cdot d^{-1}$.

(2) 健康风险模型　本研究采用美国环保署(U.S. Environmental Protection Agency, US EPA)推荐的健康风险指数(hazard quotient, HQ)评价模型对食用小麦面粉所产生的重金属健康风险进行定量评估,计算公式为[12]:

$$HQ = \frac{C \times FIR \times EF \times ED}{BW \times AT \times RfD} \quad (2)$$

式中, C 为小麦籽粒中重金属含量,$mg \cdot kg^{-1}$; FIR 为小麦面粉的日均摄入量,$kg \cdot d^{-1}$,本文成人取值 0.232 $kg \cdot d^{-1}$,儿童取值 0.077 $kg \cdot d^{-1}$; EF 为暴露频率,$d \cdot a^{-1}$,取值 365 $d \cdot a^{-1}$; ED 为暴露年限,a,成年人取值 70 a,儿童取值 10 a[25,35]; BW 为受体体重,kg,成年人取值为 60 kg[10,32],儿童为 16 kg[37]; AT 为平均暴露时间,a,通常取值为 ED×365; RfD 为重金属经食入途径的暴露参考剂量,$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$,Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、As、Cd 和 Hg 的 RfD 分别为: 1.5、0.04、0.2、3.5×10^{-3}、0.3、3.0×10^{-4}、0.001 和 3.0×10^{-4} $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$[38].

一般,当 HQ≥1 时,认为该污染物会引起人的健康风险,且 HQ 越大风险越大; HQ 小于 1 表明不会造成人体健康威胁. 多种重金属元素共同作用时, HQ 值总和超过 10,认为存在慢性毒性效应[12,32,39]. 健康风险计算完成后,利用 ArcGIS 10.6(Esri Inc.)中的地统计模块对 8 种重金属的 HQ 值总和进行空间插值,分析健康风险的空间特征.

2　结果与讨论

2.1　土壤重金属含量与对比分析

土壤重金属描述性统计结果显示(表 1), ω(Cr)、ω(Cu)、ω(Ni)、ω(Pb)、ω(Zn)、ω(As)、ω(Cd)和 ω(Hg)的均值分别为 61.647、30.439、29.769、36.538、63.716、8.058、0.328 和 0.028 $mg \cdot kg^{-1}$,均超过山东省东部土壤元素背景值[40]; 含量最大值分别为背景值的 1.923、9.867、3.175、7.705、3.346、3.251、8.056 和 2.897 倍,表明某些样点处的土壤重金属含量受到比较强烈的人为影响,存在一定的点源污染[41]. Cu、Pb 和 Zn 含量的数值波动范围较大,变异系数分别为 84.068%、66.807%和 38.656%, Cr 元素含量波动最小,变异系数为 23.440%. 以土壤元素背景值为标准时, Cd 元素含量的超标率为 100%,其余元素的含量超标率均在 60%以上,依次为: Pb(95.238%) > As

表 1　土壤重金属描述性统计分析结果1)

Table 1　Descriptive statistical analysis of heavy metal contents in soils

重金属	含量范围 /mg·kg⁻¹	均值 /mg·kg⁻¹	背景值 /mg·kg⁻¹	风险筛选值 /mg·kg⁻¹	变异系数 /%	超标率 1 /%	超标率 2 /%
Cr	34.600~108.100	61.647	56.200	200.0	23.440	63.492	0.000
Cu	14.590~193.400	30.439	19.600	100.0	84.068	65.079	1.563
Ni	16.170~74.610	29.769	23.500	100.0	29.796	84.127	0.000
Pb	11.390~195.700	36.538	25.400	120.0	66.807	95.238	3.125
Zn	36.950~187.700	63.716	56.100	250.0	38.656	61.905	0.000
As	4.551~20.482	8.058	6.300	30.0	28.914	85.714	0.000
Cd	0.136~0.870	0.328	0.108	0.3	36.559	100.000	57.813
Hg	0.010~0.084	0.028	0.029	2.4	35.412	68.254	0.000

1)风险筛选值为《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)中各元素在非水田、土壤 pH 值介于 6.5~7.5 时的取值; 超标率 1 以山东省东部土壤背景值为参比标准; 超标率 2 以风险筛选值为参比标准

(85.714%) > Ni(84.127%) > Hg(68.254%) > Cu(65.079%) > Cr(63.492%) > Zn(61.905%). 以风险筛选值为标准时,样本中 Cr、Ni、Zn、As 和 Hg 元素的含量不存在超标情况; Cu 和 Pb 元素的超标率较低,分别为 1.563% 和 3.125%; Cd 元素含量的超标率最高(57.813%),表明存在土壤重金属污染情况.

表 2 中的污灌区均存在至少 20 a 以上的污水灌溉历史. 对比后发现,研究区土壤中 Cu、Pb 和 Cd 元素的含量与北京凉凤灌区对应元素的含量接近; Cr 含量的范围和均值与天津市污灌区 Cr 含量数值基本相同; Ni 元素含量最大值明显高于太原市结果(46.700 mg·kg^{-1}),但含量均值低,说明研究区 Ni 元素含量总体不高,仅个别样点处的土壤 Ni 含量表现异常. 在所列的典型污灌区中,研究区 Zn、As 和 Hg 含量均值最低,污染情况并不严重. Cd 元素含量均值高于北京市与太原市 Cd 含量均值,但显著低于河南污灌区 Cd 含量. 5 个污灌区中,河南某地土壤重金属污染程度最高,特别是 Cu、Zn、As 和 Cd,均值分别为本研究区对应元素含量均值的 1.335、3.193、3.335 和 5.610 倍,其次为天津市污灌区. 龙口污灌区虽个别重金属存在异常高值,但总体上的重金属富集情况与北京凉凤灌区最接近. 有研究表明,北京市污灌区土壤重金属积累状况明显,已经在一定程度上了影响了当地农产品的质量[7,13,15,30],因此研究区的土壤环境和农作物污染状况同样应引起警惕.

表 2 典型污水灌溉区土壤重金属含量统计结果1)/mg·kg^{-1}

Table 2 Descriptive statistical analysis of heavy metal contents in soils from typical sewage irrigation areas/mg·kg^{-1}

重金属	北京凉凤灌区[13]		天津市污灌区[42]		太原市污灌区[43]		河南某污灌区[44]	
	含量范围	均值	含量范围	均值	含量范围	均值	含量范围	均值
Cr	—	—	40.160 ~ 108.000	64.190	48.000 ~ 99.700	79.817	—	—
Cu	13.310 ~ 60.040	26.510	10.900 ~ 61.300	28.150	14.900 ~ 48.900	28.523	30.160 ~ 56.80	40.630
Ni	—	—	—	—	17.800 ~ 46.700	33.427	—	—
Pb	19.900 ~ 42.830	28.040	5.800 ~ 69.770	15.620	16.800 ~ 52.500	25.230	15.300 ~ 39.350	22.100
Zn	61.590 ~ 142.520	85.590	62.200 ~ 333.000	129.050	52.400 ~ 259.000	83.703	196.530 ~ 209.330	203.470
As	—	—	5.140 ~ 17.700	11.230	5.300 ~ 21.300	12.267	17.360 ~ 38.560	26.870
Cd	0.010 ~ 0.420	0.240	0.050 ~ 1.170	0.460	0.110 ~ 0.450	0.190	1.120 ~ 2.590	1.840
Hg	—	—	0.035 ~ 1.720	0.410	0.020 ~ 1.300	0.097	—	—

1)"—"表示无数据

2.2 小麦籽粒重金属含量统计分析

小麦籽粒重金属含量描述性统计分析结果显示(表 3), ω(Pb)和 ω(As)波动范围较大,分别为 0.125 ~ 9.221 mg·kg^{-1}和 0.041 ~ 1.142 mg·kg^{-1},对应变异系数达 103.608% 和 71.704%(表 3),空间变异性明显. ω(Cr)、ω(Cu)、ω(Ni)、ω(Pb)、ω(Zn)、ω(As)、ω(Cd)和 ω(Hg)的均值分别为 0.782、4.622、1.463、1.081、30.945、0.311、0.051 和 0.010 mg·kg^{-1}. 其中,Ni 和 Pb 明显超出国家食品安全限量标准(GB 2762-2022),含量均值分别为安全标准的 3.658 和 5.405 倍,其余元素的含量均值在限量值以下. 小麦籽粒样品中 Ni 元素含量全部超标,Pb 超标样品 61 件,超标率为 96.800%; As 的超标率为 20.600%,其次为 Cd(6.300%) = Cr(6.300%) > Zn(4.800%),Cu 和 Hg 元素无超标样品. 由此推断,Ni 和 Pb 元素在研究区小麦籽粒中富集比较严重. 有研究表明,长期食用 Ni 超标食物会损害人的肝脏和心肺功能,过量摄入 Pb 元素会导致神经系统受损,影响儿童生长和智力发育[44,45],直接威胁人类健康.

表 3 小麦籽粒重金属描述性统计分析结果

Table 3 Descriptive statistical analysis of heavy metal contents in wheat grains

重金属	含量范围/mg·kg^{-1}	均值/mg·kg^{-1}	变异系数/%	安全限量标准/mg·kg^{-1}	超标率/%
Cr	0.532 ~ 1.434	0.782	18.031	1.00[1)]	6.300
Cu	2.536 ~ 6.891	4.622	21.722	10.00[2)]	0.000
Ni	0.518 ~ 4.545	1.463	42.037	0.40[46]	100.000
Pb	0.125 ~ 9.221	1.081	103.608	0.20[1)]	96.800
Zn	19.360 ~ 57.320	30.945	28.893	50.00[2)]	4.800
As	0.041 ~ 1.142	0.311	71.704	0.50[1)]	20.600
Cd	0.018 ~ 0.180	0.051	56.863	0.10[1)]	6.300
Hg	0.005 ~ 0.017	0.010	40.000	0.02[1)]	0.000

1)源自《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2022); 2)源自《粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中铅、镉、铬、汞、硒、砷、铜、锌等 8 种元素限量》(NY 861-2004)

2.3 土壤-小麦籽粒重金属相关性分析

由 2.1 节和 2.2 节中的分析结果可知，研究区 Cd、As、Ni 和 Pb 元素在土壤中的富集现象较明显，但小麦籽粒中 Cd 和 As 元素的含量并不高. Pearson 相关性分析结果显示(表 4)，小麦籽粒中的 Cu 和 Ni 元素含量与土壤中对应元素含量显著相关，相关系数(r)分别为 0.258 ($P < 0.05$) 和 0.373 ($P < 0.01$). 其余元素的含量在小麦籽粒-土壤间的相关程度一般，其中 Pb 元素 r 值为 0.001，Cr、As 和 Cd 的相关系数为负值. 有研究表明低浓度的重金属胁迫对根系活力有一定促进作用，随着重金属浓度的持续升高，小麦植株对重金属吸收和转运能力将逐渐下降[47,48]，使重金属无法在植物体内进一步富集. 小麦籽粒对重金属的摄取受多种因素影响[49]，因此无法单纯利用土壤中重金属的含量水平来推测对应小麦籽粒中重金属的富集程度.

表 4　土壤-小麦籽粒重金属 Pearson 相关性分析结果[1)]

Table 4　Correlation analysis between heavy metals in soil and wheat grains

	Cr-v	Cu-v	Ni-v	Pb-v	Zn-v	As-v	Cd-v	Hg-v
Cr-s	−0.135	−0.148	0.034	0.016	−0.142	−0.003	−0.154	−0.181
Cu-s	0.128	0.258 *	0.145	−0.035	0.203	−0.112	0.154	−0.269 *
Ni-s	−0.229	−0.157	0.373 **	−0.042	−0.032	−0.137	−0.004	0.045
Pb-s	−0.111	−0.037	−0.047	0.001	−0.024	−0.052	−0.085	0.021
Zn-s	−0.112	0.049	0.477 **	−0.100	0.128	−0.091	0.075	−0.069
As-s	0.040	−0.086	0.041	0.124	−0.171	−0.234	−0.085	−0.116
Cd-s	−0.024	−0.094	−0.016	0.114	0.075	−0.040	−0.147	−0.074
Hg-s	−0.002	−0.019	0.127	0.246	−0.122	0.006	0.109	0.105

1) * 表示 $P < 0.05$，** 表示 $P < 0.01$；s 表示土壤样品，v 表示小麦籽粒样品

2.4 土壤-小麦籽粒重金属富集分析

土壤-小麦籽粒富集系数计算结果显示(表 5)，Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、As、Cd 和 Hg 富集系数值的范围分别为 0.594% ~ 2.901%、3.062% ~ 40.726%、1.555% ~ 12.827%、0.280% ~ 26.558%、19.262% ~ 115.691%、0.443% ~ 18.759%、5.285% ~ 60.00% 和 12.005% ~ 98.853%，其中以 Zn、Hg、Cd 和 Cu 这 4 种元素的富集系数波动范围较大. 由箱式图可知(图 2)，相对于最高值，8 种元素的富集系数均值与最小值更接近，由此推断，富集系数最高值可能无法真实描绘小麦籽粒的重金属吸收能力，相比之下，最小值更能反映吸收能力的强弱. 经计算，Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、As、Cd 和 Hg 的富集系数均值分别为 1.345%、19.300%、5.154%、3.349%、53.969%、4.233%、17.841% 和 38.767%(表 5)，富集能力由大到小依次为：Zn > Hg > Cu > Cd > Ni > As > Pb > Cr，这与最小值反映的次序一致. 在本研究中，小麦籽粒对 Zn、Hg、Cd 和 Cu 的富集作用最明显，杨刚等的研究同样发现小麦籽粒富集能力遵循 Zn > Cu > Cd > Cr 的规律，但对 Hg 的富集能力一般[37]. 王晓瑞等[50]则发现小麦籽粒对土壤中 Cd 的富集作用最明显，其次为 Zn、Cu、Hg、Pb、Ni 和 As，Cr 最弱.

小麦籽粒对土壤重金属的富集程度与植物生长特性和重金属的化学形态等因素相关. Zn 和 Cu 为植物生长所需的微量元素，在植物叶绿素形成、呼吸作用和光合作用等生理活动中发挥着重要作用，因此在植物体内积累较多[51]. Cd 在土壤中主要以离子交换态(活动态)的形式存在，迁移能力较强，由此造成小麦籽粒对 Cd 的富集能力较高[52]. Cr、Ni、As、Hg 和 Pb 多以残渣态(稳定态)赋存于土壤中，特别是 Cr 元素的稳定态比例达 85% 以上，较难被植物吸收[14,51]. 多项研究结果中 Hg 元素的土壤-作物籽粒富集系数并不高[42,53,54]，与本研究结果相差较大，这可能是因为龙口研究区仅部分样点小麦籽粒中 Hg 含量过高，从而提高了整体的富集程度，Hg 富集系数均值与最小值相近而偏离最大值较多(图 2)，因此大部分的小麦籽粒对土壤 Hg 的吸收能力比较有限. 除此之外，土壤 pH 值、有机质含量以及小麦品种等也会在一定程度上影响小麦籽粒对土壤重金属的吸收[10,31,52,54].

表 5　土壤-小麦籽粒富集系数统计结果/%

Table 5　Statistics on the accumulation coefficients of heavy metals in soil and wheat grains/%

项目	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Cd	Hg
最大值	2.901	40.726	12.827	26.558	115.691	18.759	60.000	98.853
最小值	0.594	3.062	1.555	0.280	19.262	0.443	5.285	12.005
均值	1.345	19.300	5.154	3.349	53.969	4.233	17.841	38.767

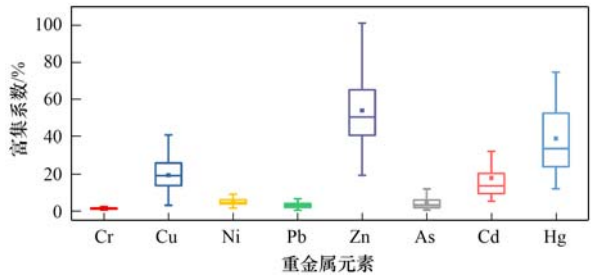

图 2 土壤-小麦籽粒重金属富集系数箱式图

Fig. 2 Boxplot of the accumulation coefficients of heavy metals in soil and wheat grains

2.5 小麦籽粒重金属健康风险评估

重金属日摄入量估算结果表明,与日允许摄入量(acceptable daily intake, ADI)相比,成人和儿童的 Ni 元素摄入量偏高,分别占到日允许摄入量的 28.278% 和 131.980%(表 6),这可能与小麦籽粒中 Ni 的含量水平密切相关. 由小麦籽粒重金属描述性统计结果可知(表 3),Ni 元素的样本超标率为 100%,长期摄入较高 Ni 含量的食物必然会造成 Ni 元素在人体中的积累. 因此,研究区小麦籽粒中 Ni元素的潜在健康风险比较严重,应引起足够重视. 相比之下,其余元素的成人和儿童 EDA/ADI 值分别在 2% 和 10% 以下,由大到小依次为:Pb > Cr > Cd > Zn > Hg > Cu > As.

表 6 研究区居民经小麦面粉摄入的重金属估算量[1)]

Table 6 Estimated intake of heavy metals from wheat flour by residents in the study area

项目	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Cd	Hg
成人 EDA	3.023×10^{-3}	1.787×10^{-2}	5.656×10^{-3}	4.183×10^{-3}	1.235×10^{-1}	1.201×10^{-3}	1.961×10^{-4}	3.791×10^{-5}
儿童 EDA	3.763×10^{-3}	2.224×10^{-2}	7.039×10^{-3}	5.207×10^{-3}	1.537×10^{-1}	1.49510^{-3}	2.441×10^{-4}	4.718×10^{-5}
成人 ADI[30]	0.2 ~ 0.5	30	0.02	0.214	60	3	0.06	0.043
儿童 ADI[30]	0.05 ~ 0.133	8	0.005	0.057	16	0.8	0.016	0.011
成人 EDA/ADI	0.605 ~ 1.512	0.060	28.278	1.955	0.206	0.040	0.327	0.088
儿童 EDA/ADI	2.829 ~ 7.526	0.278	131.980	9.124	0.961	0.187	1.526	0.411

1) EDA 和 ADI 的单位为 $mg\cdot(kg\cdot d)^{-1}$,EDA/ADI 的单位为%

研究区小麦籽粒重金属健康风险的综合评价结果显示(表 7),成年人的 Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、As、Cd 和 Hg 的健康风险指数分别为 0.002、0.447、0.283、1.195、0.412、4.005、0.196 和 0.126,危害性由大到小依次为:As > Pb > Cu > Zn > Ni > Cd > Hg > Cr,其中 Pb 与 As 元素的 HQ 值超过 1,存在明显的健康风险. 8 种重金属的总 HQ 值为 6.666,低于临界值 10,表明在当前小麦面粉食用量下,重金属摄入量不会对研究区的成年人造成慢性毒害. 儿童的 Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、As、Cd 和 Hg 风险指数分别为 0.003、0.556、0.352、1.488、0.512、4.984、0.244 和 0.157,其中 As 和 Pb 超出参考标准,其余元素不存在风险. 儿童的 8 种元素 HQ 值总计 8.296,低于临界值 10,表明由当前小麦面粉食用量摄入的重金属总量不会危害儿童健康. 虽然成人和儿童的 HQ 总值在安全范围内,但对比两者的健康风险可知,儿童 8 种元素的 HQ 值均高于成人对应值,健康风险总值为成年人的 1.245 倍,儿童的食品健康安全应引起更多关注.

所有重金属中,As 的成人与儿童 HQ 指数分别占到对应风险总和的 60% 以上,是造成人体健康风险的主要元素. 有研究表明,长期摄入 As 可导致肝、肾、肺和皮肤癌发病率的增加[55],具有极大威胁性. 研究区土壤中 As 的富集程度一般,且小麦籽粒对土壤 As 的吸收能力并不强,仅有 20.6% 的籽实样品 As 元素超出食用限量. As 通常用于农药生产[56],因此小麦植株上的农药残留可能是造成籽粒中 As 元素积累的主要原因; 且 As 为化学致癌物,毒性较大而参考的暴露剂量小[55],由此造成的健康风险偏高. Pb 元素的 HQ 值分别占成人与儿童总风险的 17.927% 和 17.936%,仅次于 As. 由表 3 可知,小麦籽粒中 Pb 含量较高,存在一定健康风险. 虽然 Ni 元素的小麦籽粒样本超标率较高(表 3),且成人和儿童的 EDA 分别为 ADI 的 28.278% 和 131.980%(表 6),但成人和儿童的 HQ 值均小于 1,潜在风险性表现一般. 这可能是因为 Ni 元素属于非致癌物质,相同浓度下毒性通常低于 As、Cd 和 Cr^{6+} 等致癌物质,以及 Pb 和 Cu 等元素[45,55,57~60]. 虽然金属 Ni 几乎不存在急性毒性,但如果过量积累,仍会损害人体健康. Cu 和 Zn 对儿童造成的健康风险则主要是与小麦籽粒中的含量水平相关.

通常,模型的计算结果与参数值的选取密切相关. 对比龙口市污灌区现有的同类型研究[25]后发现,虽然与本文在成人和儿童的暴露年限和受体体重等模型参数值上有所差异,但采用的重金属经食用途径的暴露参考剂量均为 US EPA 推荐值,得到的健康风险评价结果也基本一致,即重金属 As 和 Pb 是造成研究区居民健康风险的主要物质. 由此可见,暴露年限和受体体重为非敏感参数,健康风险结果更受重金属暴露途径参考剂量的影响. 目前,在 HQ 计算中使用的 RfD 普遍为 US EPA 推荐参考

表 7　食用本地小麦面粉的重金属健康风险综合评价结果

Table 7　Health risk of heavy metals caused by the consumption of local wheat flour

项目	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Cd	Hg	总计
成人	0.002	0.447	0.283	1.195	0.412	4.005	0.196	0.126	6.666
儿童	0.003	0.556	0.352	1.488	0.512	4.984	0.244	0.157	8.296

值[10~13,25,32,37,39]. 总体上,本文采取的评价手段和得到的评价结果较为合理可靠.

8 种重金属的健康风险空间分布结果显示(图 3),龙口市徐福镇、龙岗街道和诸由观镇北部的成年人健康风险较小,HQ 总和小于 6; 其中,徐福镇东南部的成人健康风险为全域最低,HQ 总和介于 4~5 之间. 研究区西南部的成人 HQ 总和大于 7,健康风险略高于徐福镇及其周围片区; 其中,芦头镇、北马镇和新嘉街道交界处的成人健康风险为全域最高,HQ 总和介于 8~9 之间. 其余大部分地区的健康风险 HQ 总和介于 6~7 之间. 对比之下,除徐福镇外,其他区域的儿童健康风险总和均大于 7. 北马镇、芦头镇、东家镇、新嘉街道中部、兰高镇北部和诸由观镇东南部等地的 HQ 总和主要为 8~9. 虽然综合评价结果显示(表 7),儿童的 8 种重金属 HQ 总和小于 10,但空间分布结果显示在芦头镇、北马镇和新嘉街道交界处儿童的 HQ 总和可达 10~11,这可能是因为在该范围内采集的籽粒样品中存在某种重金属的异常高值,若以该范围内小麦籽粒生产的面粉为食源,摄入的重金属总量可能会对儿童健康造成慢性毒害. 总体来看,研究区南部的重金属健康风险高于北部,重金属污染防治工作尤应重视.

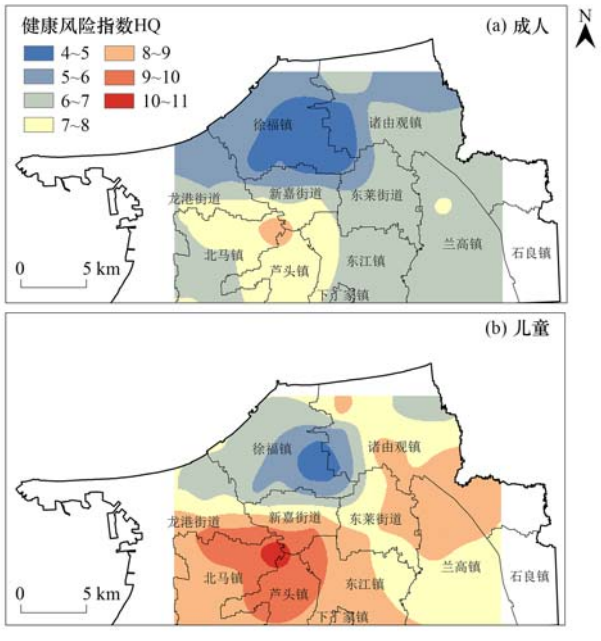

图 3　研究区成人和儿童健康风险空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of health risk in study area for adults and children

3　结论

(1)龙口市污灌区土壤重金属富集明显. 8 种重金属的含量均值普遍高于对应元素土壤背景值,样本超标率在 60% 以上; 其中,Cd 元素的含量均值高于现行土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准值,样本超标率达 57.813%. 与其他典型污灌区相比,研究区土壤重金属污染程度与北京凉凤灌区比较接近,土壤环境质量并不乐观.

(2)除 Cu 和 Ni 元素外,研究区内土壤与小麦籽粒中重金属含量的相关性并不显著,无法仅通过土壤重金属含量水平判断小麦籽粒中重金属的富集程度. 由富集系数计算结果可知,小麦籽粒对 Zn、Hg、Cd 和 Cu 的富集能力更强,对 Cr 的富集能力最弱.

(3)参照国家食品安全限量标准,小麦籽粒中 Ni 和 Pb 元素的超标情况最严重,超标率分别为 100% 和 96.8%. 由此造成的成人和儿童日均 Ni 和 Pb 元素摄入量偏高,分别占成人日允许摄入量的 28.278% 和 1.955%、儿童日允许摄入量的 131.980% 和 9.124%. 健康风险评价结果显示,经小麦面粉摄入的重金属中,As 和 Pb 对成人和儿童造成的潜在健康风险最大,应特别注意控制 As 和 Pb 向小麦植株内的输入,以降低食用本地小麦面粉所引起的健康风险. 此外,儿童的潜在健康风险结果普遍高于成人,儿童食品安全问题应引起更多重视.

(4)从空间分布来看,研究区南部的北马镇、芦头镇和东江镇是成人和儿童的潜在健康风险高发地区,北部的徐福镇健康风险最低. 今后应加强南部地区重金属污染防治工作的力度.

参考文献:

[1] 夏军, 翟金良, 占车生. 我国水资源研究与发展的若干思考[J]. 地球科学进展, 2011, **26**(9): 905-915.
Xia J, Zhai J L, Zhan C S. Some reflections on the research and development of water resources in China[J]. Advances in Earth Science, 2011, **26**(9): 905-915.

[2] 陈涛, 常庆瑞, 刘京, 等. 长期污灌农田土壤重金属污染及潜在环境风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(11): 2152-2159.
Chen T, Chang Q R, Liu J, *et al*. Pollution and potential environment risk assessment of soil heavy metals in sewage irrigation area[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, **31**(11): 2152-2159.

[3] 李晓燕, 郝晋珉, 陈爱琪. 山东省农业水土资源时空匹配格

局及评价研究[J]. 中国农业大学学报, 2020, **25**(11): 1-11.
Li X Y, Hao J M, Chen A Q. Time-space matching pattern and evaluation of agricultural water and soil resources in Shandong Province[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, **25**(11): 1-11.

[4] 王红瑞, 刘昌明, 毛广全, 等. 水资源短缺对北京农业的不利影响分析与对策[J]. 自然资源学报, 2004, **19**(2): 160-169.
Wang H R, Liu C M, Mao G Q, *et al*. Negative effects of water scarcity on agriculture in Beijing and countermeasures [J]. Journal of Natural Resources, 2004, **19**(2): 160-169.

[5] 李明姝, 王瑶瑶, 郝毅, 等. 华北小麦玉米轮作体系下土壤重金属污染研究进展[J]. 山东农业科学, 2018, **50**(12): 144-151.
Li M S, Wang Y Y, Hao Y, *et al*. Research progress of soil heavy metal pollution under wheat-maize rotation system in the North China [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2018, **50**(12): 144-151.

[6] 秦欢欢, 孙占学, 高柏. 农业节水和南水北调对华北平原可持续水管理的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2019, **28**(7): 1716-1724.
Qin H H, Sun Z X, Gao B. Effects of agricultural water conservation and south-to-north water diversion on sustainable water management in North China Plain[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, **28**(7): 1716-1724.

[7] Lyu S D, Wu L S, Wen X F, *et al*. Effects of reclaimed wastewater irrigation on soil-crop systems in China: a review[J]. Science of the Total Environment, 2022, **813**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152531.

[8] Ghosh A K, Bhatt M A, Agrawal H P. Effect of long-term application of treated sewage water on heavy metal accumulation in vegetables grown in Northern India [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, **184**(2): 1025-1036.

[9] Tal A. Rethinking the sustainability of Israel's irrigation practices in the drylands[J]. Water Research, 2016, **90**: 387-394.

[10] 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.

[11] Qin G W, Niu Z D, Yu J D, *et al*. Soil heavy metal pollution and food safety in China: effects, sources and removing technology[J]. Chemosphere, 2021, **267**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129205.

[12] 肖冰, 薛培英, 韦亮, 等. 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[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2869-2877.
Xiao B, Xue P Y, Wei L, *et al*. Characteristics of Cd, As, and Pb in soil and wheat grains and health risk assessment of grain-Cd/As/Pb on the field scale[J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2869-2877.

[13] 朱宇恩, 赵烨, 李强, 等. 北京城郊污灌土壤-小麦(*Triticum aestivum*)体系重金属潜在健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(2): 263-270.
Zhu Y E, Zhao Y, Li Q, *et al*. Potential influences of heavy metal in "soil-wheat (*Triticum aestivum*)" system on human health: a case study of sewage irrigation area in Beijing, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, **30**(2): 263-270.

[14] 陈志凡, 赵烨, 郭廷忠, 等. 污灌条件下重金属在耕作土壤中的积累与形态分布特征——以北京市通州区凤港减河污灌区农用地为例[J]. 地理科学, 2013, **33**(8): 1014-1021.
Chen Z F, Zhao Y, Guo T Z, *et al*. Impacts of sewage irrigation on heavy metal distribution and chemical fractions in arable soils: a case study about sewage-irrigated farmlands of the Fenggangjian river in Tongzhou district of Beijing, China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, **33**(8): 1014-1021.

[15] Wang Z W, Yu X M, Geng M S, *et al*. Accumulation of heavy metal in scalp hair of people exposed in Beijing sewage discharge channel sewage irrigation area in Tianjin, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(15): 13741-13748.

[16] 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.

[17] Lu Y T, Zang X H, Yao H, *et al*. Assessment of trace metal contamination in groundwater in a highly urbanizing area of Shenfu New District, Northeast China[J]. Frontiers of Earth Science, 2018, **12**(3): 569-582.

[18] 徐宁, 魏忠义. 沈抚灌区耕地重金属 Cd、Pb 的变化特征分析[J]. 农业资源与环境学报, 2019, **36**(6): 783-791.
Xu N, Wei Z Y. Analysis on the variation character of heavy metals Cd and Pb in the cultivated land of Shenfu sewage irrigation district [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, **36**(6): 783-791.

[19] 王利民, 刘佳, 季富华, 等. 中国小麦面积种植结构时空动态变化分析[J]. 中国农学通报, 2019, **35**(18): 12-23.
Wang L M, Liu J, Ji F H, *et al*. Analysis of spatial-temporal dynamic change of wheat planting structure of China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, **35**(18): 12-23.

[20] Nadal M, Schuhmacher M, Domingo J L. Metal pollution of soils and vegetation in an area with petrochemical industry [J]. Science of the Total Environment, 2004, **321**(1-3): 59-69.

[21] Adimalla N, Qian H, Wang H K. Assessment of heavy metal (HM) contamination in agricultural soil lands in northern Telangana, India: an approach of spatial distribution and multivariate statistical analysis [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2019, **191**(4), doi: 10.1007/s10661-019-7408-1.

[22] 贾佳瑜, 刘小芳, 赵勇钢, 等. 汾河流域下游农田土壤重金属空间分布特征与污染评价[J]. 干旱区资源与环境, 2021, **35**(8): 132-137.
Jia J Y, Liu X F, Zhao Y G, *et al*. Spatial distribution characteristics and assessment of heavy metal pollution in farmland soils in the lower reaches of Fenhe river basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, **35**(8): 132-137.

[23] 刘硕, 吴泉源, 曹学江, 等. 龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 270-279.
Liu S, Wu Q Y, Cao X J, *et al*. Pollution assessment and spatial distribution characteristics of heavy metals in soils of coal mining area in Longkou city[J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 270-279.

[24] 李春芳, 王菲, 曹文涛, 等. 龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价[J]. 环境科学, 2017, **38**(3): 1018-1027.
Li C F, Wang F, Cao W T, *et al*. Source analysis, spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in sewage irrigation area farmland soils of Longkou city[J]. Environmental

Science, 2017, **38**(3): 1018-1027.

[25] 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, Lü 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.

[26] 李彤, 吴泉源, 姚磊, 等. 龙口市北部平原区不同土地利用类型对土壤重金属污染距离的影响[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(7): 1224-1230.
Li T, Wu Q Y, Yao L, *et al*. Effects of different land use types on pollution distance of heavy metals in north plain of Longkou city[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(7): 1224-1230.

[27] 刘建华, 顾振飞, 曹见飞, 等. 龙口市污灌区重金属污染影响因子分析[J]. 环境污染与防治, 2022, **44**(4): 448-453.
Liu J H, Gu Z F, Cao J F, *et al*. Analysis of the influence factors of heavy metal pollution in sewage irrigation area of Longkou city[J]. Environmental Pollution & Control, 2022, **44**(4): 448-453.

[28] 王菲. 龙口市污灌区农田重金属遥感监测研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2017.
Wang F. Monitoring of heavy metals in the sewage irrigated farmlands in Longkou city using remote sensing technology[D]. Ji'nan: Shandong Normal University, 2017.

[29] 刘玉红. 龙口市北部平原土壤重金属空间分布特征分析[J]. 安徽农学通报, 2020, **26**(1): 98-100.
Liu Y H. Analysis of spatial distribution characteristics of heavy metals in soil of northern plain of Longkou city[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2020, **26**(1): 98-100.

[30] 李晓燕, 陈同斌, 谭勇壁, 等. 北京市小麦籽粒的重金属含量及其健康风险分析[J]. 地理研究, 2008, **27**(6): 1340-1346.
Li X Y, Chen T B, Tan Y B, *et al*. Concentrations and risk of heavy metals in grain of wheat grown in Beijing[J]. Geographical Research, 2008, **27**(6): 1340-1346.

[31] 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. 地理学报, 2012, **67**(7): 971-984.
Lü J S, Zhang Z L, Liu Y, *et al*. Sources identification and hazardous risk delineation of heavy metals contamination in Rizhao city[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, **67**(7): 971-984.

[32] 李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 等. 典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 1076-1085.
Li R Z, Pan C R, Xu J J, *et al*. Contamination and health risk for heavy metals via consumption of vegetables grown in fragmentary vegetable plots from a typical nonferrous metals mine city[J]. Environmental Science, 2013, **34**(3): 1076-1085.

[33] 陈同斌, 宋波, 郑袁明, 等. 北京市蔬菜和菜地土壤砷含量及其健康风险分析[J]. 地理学报, 2006, **61**(3): 297-310.
Chen T B, Song B, Zheng Y M, *et al*. A survey of arsenic concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, **61**(3): 297-310.

[34] 烟台市统计局. 烟台统计年鉴-2017[M]. 烟台: 烟台市统计局, 2017.

[35] 烟台市统计局. 烟台统计年鉴-2018[M]. 烟台: 烟台市统计局, 2018.

[36] 烟台市统计局. 烟台统计年鉴-2019[M]. 烟台: 烟台市统计局, 2019.

[37] 杨刚, 沈飞, 钟贵江, 等. 西南山地铅锌矿区耕地土壤和谷类产品重金属含量及健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(9): 2014-2021.
Yang G, Shen F, Zhong G J, *et al*. Concentration and health risk of heavy metals in crops and soils in a Zinc-Lead mining area in southwest mountainous regions[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, **31**(9): 2014-2021.

[38] US EPA. Handbook for non-cancer health effects valuation[R]. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, 2000.

[39] Paustenbach D J. Human and ecological risk assessment: theory and practice[M]. New York: John Wiley & Sons, 2002.

[40] 代杰瑞, 庞绪贵, 喻超, 等. 山东省东部地区土壤地球化学特征及污染评价[J]. 中国地质, 2011, **38**(5): 1387-1395.
Dai J R, Pang X G, Yu C, *et al*. Geochemical features and contamination assessment of soil elements in east Shandong Province[J]. Geology in China, 2011, **38**(5): 1387-1395.

[41] Lv J, Liu Y, Zhang Z L, *et al*. Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, **261**: 387-397.

[42] 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.

[43] 解文艳, 樊贵盛, 周怀平, 等. 太原市污灌区土壤重金属污染现状评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(8): 1553-1560.
Xie W Y, Fan G S, Zhou H P, *et al*. Access of heavy metals pollution of the sewage irrigation region in Taiyuan, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, **30**(8): 1553-1560.

[44] 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.

[45] US EPA. CASRN 7439-92-1 Lead and compounds (inorganic)[R]. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 2004.

[46] 杨惠芬, 李明元, 沈文. 食品卫生理化检验标准手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 1998.

[47] 王效瑾, 高巍, 赵鹏, 等. 小麦幼苗根系形态对镉胁迫的响应[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(6): 1218-1225.
Wang X J, Gao W, Zhao P, *et al*. Changes to wheat seedling root morphology in response to cadmium stress[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(6): 1218-1225.

[48] 李堆淑, 魏苗苗, 顷少锟. 重金属胁迫下商麦 5226 的富集特征[J]. 河南科学, 2021, **39**(10): 1603-1607.
Li D S, Wei M M, Qing S K. Enrichment characteristics of Shangmai 5226 under heavy metal stress[J]. Henan Science, 2021, **39**(10): 1603-1607.

[49] 王成尘, 田稳, 向萍, 等. 土壤－水稻/小麦重金属吸收机制与安全调控[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(2): 794-807.
Wang C C, Tian W, Xiang P, *et al*. Mechanism of heavy metal uptake and transport in soil-rice/wheat system and regulation

measures for safe production[J]. China Environmental Science, 2022, **42**(2): 794-807.

[50] 王晓瑞, 周生路, 吴绍华. 长江三角洲地区小麦植株的重金属分布及其相关性——以昆山市为例[J]. 地理科学, 2011, **31**(2): 226-231.
Wang X R, Zhou S L, Wu S H. Distribution and relationship of heavy metals in wheat in the Changjiang River Delta—a case study of Kunshan[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, **31**(2): 226-231.

[51] 苍晶, 李唯. 植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2017.
Cang J, Li W. Plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2017.

[52] 齐菲, 付同刚, 高会, 等. 污水灌溉农田土壤镉污染研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2022, **38**(1): 10-20.
Qi F, Fu T G, Gao H, *et al*. Review on Cadmium pollution from sewage irrigation in farmland soil[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, **38**(1): 10-20.

[53] 王国兰, 王玥, 李旭, 等. 千河下游土壤-小麦系统重金属富集特征及风险评价[J]. 干旱区资源与环境, 2022, **36**(4): 80-86.
Wang G L, Wang Y, Li X, *et al*. Enrichment characteristics and risk assessment of heavy metals in the soil-wheat system in the lower reaches of the Qianhe river[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, **36**(4): 80-86.

[54] 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.

[55] US EPA. CASRN 7440-38-2 Arsenic, inorganic [R]. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 1993.

[56] Lv J, Zhang Z L, Li S, *et al*. Assessing spatial distribution, sources, and potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of the Nansi Lake, Eastern China[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2014, **299**(3): 1671-1681.

[57] US EPA. CASRN 7440-43-9 Cadmium[R]. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 1987.

[58] US EPA. CASRN 7440-50-8 Copper[R]. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 1988.

[59] US EPA. CASRN 18540-29-9 Chromium (Ⅵ)[R]. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 1998.

[60] US EPA. Risk assessment guidance for superfund volume I human health evaluation manual (part A)[R]. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 1989.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 44 No. 6

Jun. 15, 2023

CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals ····· ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, *et al.* (3017)

Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China ····· YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)

Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory ····· QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, *et al.* (3034)

Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City ····· CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, *et al.* (3043)

Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on $PM_{2.5}$ Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin ····· XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, *et al.* (3054)

Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in $PM_{2.5}$ During the Heating Period in Baoding ····· LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, *et al.* (3063)

Transport Influence and Potential Sources of $PM_{2.5}$ Pollution for Nanjing ····· XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, *et al.* (3071)

Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020 ····· WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)

Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island ····· FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, *et al.* (3089)

Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models ····· LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, *et al.* (3098)

Health Benefit Evaluation for $PM_{2.5}$ as Well as $O_{3\text{-}8h}$ Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020 ····· ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, *et al.* (3108)

Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022 ····· LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, *et al.* (3117)

Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province ····· WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, *et al.* (3130)

Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an ····· ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, *et al.* (3142)

Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City ····· LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, *et al.* (3152)

Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin ····· JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)

Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin ····· XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, *et al.* (3174)

Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River ····· LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, *et al.* (3184)

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing ····· JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, *et al.* (3198)

Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes ····· GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, *et al.* (3206)

Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River ····· WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, *et al.* (3217)

Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City ····· LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, *et al.* (3228)

Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin ····· YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, *et al.* (3237)

Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir ····· CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, *et al.* (3247)

Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light ····· XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, *et al.* (3260)

Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar ····· CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, *et al.* (3270)

Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(Ⅱ) and Ni(Ⅱ) in Aquatic Environment ····· ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, *et al.* (3278)

Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar ····· HE Li-wenze, CHEN Yu, SUN Fei, *et al.* (3288)

Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant ····· ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, *et al.* (3301)

Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis ····· FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, *et al.* (3309)

Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China ····· HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, *et al.* (3321)

Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China ····· JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, *et al.* (3329)

Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models ····· DING Yue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, *et al.* (3343)

Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye ····· SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, *et al.* (3353)

Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non- Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin ····· LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, *et al.* (3364)

Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of *Larix principis-rupprechtii* Forest in Luya Mountain ····· MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, *et al.* (3376)

Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau ····· ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, *et al.* (3386)

Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields ····· YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, *et al.* (3396)

Effects of Different Planting Years of *Dendrocalamus brandisii* on Soil Fungal Community ····· ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, *et al.* (3408)

Effects of Biochar Amendment on N_2O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas ····· CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, *et al.* (3418)

Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland ····· JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, *et al.* (3426)

Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield ····· MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, *et al.* (3439)

Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model ····· CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, *et al.* (3450)

Characterization and Health Risk of Heavy Metals in $PM_{2.5}$ from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province ····· HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, *et al.* (3463)

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou ····· LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, *et al.* (3475)

Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China ····· GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, *et al.* (3488)

Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method ····· ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, *et al.* (3500)

Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics ····· WANG Mei-hua (3509)

Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area ····· LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, *et al.* (3520)

Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone ····· LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, *et al.* (3531)

Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City ····· AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, *et al.* (3544)

Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City ····· TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, *et al.* (3562)

Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland ····· WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, *et al.* (3573)

Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials ····· WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, *et al.* (3585)

Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables ····· QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, *et al.* (3600)

Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province ····· WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-rui, *et al.* (3609)

Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning ····· NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, *et al.* (3619)