

目次

2013~2020年天津市PM _{2.5} -O ₃ 污染变化趋势和影响因素分析	肖致美, 李亚菲, 高璟赞, 李鹏, 蔡子颖, 郑乃源, 张裕芬, 戴运峰 (4211)
2015~2020年济南市O ₃ 污染趋势及敏感性变化分析	孙晓艳, 孙军, 郭萌萌, 刘杨, 王宝琳, 范国兰, 许宏宇, 姜腾龙 (4220)
南京市南部地区O ₃ 污染特征、生成敏感性及传输影响分析	郑新梅, 胡崑, 王鸣, 谢放尖, 王艳 (4231)
天津市“十三五”期间O ₃ 污染特征和驱动因子	李源, 肖致美, 毕晓辉, 蔡子颖, 徐虹, 高璟赞, 郑乃源, 杨宁 (4241)
基于随机森林的南京市PM _{2.5} 和O ₃ 对减排的响应	尚永杰, 茅宇豪, 廖宏, 胡建林, 邹泽庸 (4250)
基于四维通量法的佛山臭氧污染输送量化	吴莉萍, 莫海华, 杨丽婷, 蔡梓炯, 吴国彤, 白玉洁, 邓思欣, 司徒淑婷, 常鸣, 王雪梅 (4262)
污染地块VOCs源衰减对室内蒸气入侵风险的影响	钟茂生, 汪洋, 姜林, 张丽娜, 马琳, 张瑞环, 赵莹, 李吉鸿 (4271)
2017~2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析	郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 周波, 吕旭波 (4279)
滹沱河流域山区地表水-地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源	孔晓乐, 常玉儒, 刘夏, 赵小宁, 沈彦军 (4292)
重庆东南部岩溶水金属元素空间分布、源解析及健康风险评价	谢浩, 邹胜章, 李军, 申豪勇, 林永生, 周长松, 王丹尼, 王志恒 (4304)
衡水市桃城区浅层地下水咸化成因	何锦, 张怀胜, 蔡五田, 王雨山 (4314)
吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价	白凡, 周金龙, 周殷竹, 韩双宝, 孙英 (4325)
金属硫化物矿山水系统中微生物群落组成及多样性	丁聪聪, 朱旭炎, 赵兴青, 陆金, 周宇诚, 张欣怡, 王霄鹏 (4334)
白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征	程昕煜, 杨丽虎, 宋献方 (4344)
基于溶解性有机物分子指纹特征解析城市河道污染来源与机制	朱奔, 叶建峰, 孙晓楠, 胡曙煜, 陈勋, 唐建飞, 陈浩 (4353)
甾体激素在污水处理厂的赋存特征和行为归趋	刘媛媛, 冯慧, 张云, 叶亮, 钟琴, 邹华 (4364)
博鳌近岸海域表层沉积物中持久性有机污染物的分布、来源与生态风险评价	郝润波, 符国伟, 宋艳伟, 傅开哲, 袁坤 (4374)
太原市耕地土壤PAHs的含量、分布、源解析与风险评价	吴张伟, 段永红, 刘立文, 徐立帅, 陈香玲, 姚旭红 (4387)
雄安新区土壤氟地球化学特征及健康风险评价	郭志娟, 刘飞, 周亚龙, 王乔林, 王成文 (4397)
基于APCS-MLR和PMF模型解析黄河下游文化公园土壤重金属污染特征及来源分析	段海静, 马嘉玉, 彭超月, 刘德新, 王玉龙, 李旭辉, 马建华 (4406)
锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价	余高, 陈芬, 张晓东, 孙约兵 (4416)
老工业城市土壤-作物系统重金属的迁移累积及风险协同评价	王莹, 董爱俊, 杨建峰, 马彦斌, 王泽晶, 杨凡燕 (4429)
畜禽粪肥还田四环素类抗生素(TCs)在土壤-蔬菜系统的分布特征及风险评估	丁丹, 黄晓依, 顾静仪, 陈澄宇, 龙新亮, 曾巧云 (4440)
地质高背景区外源污染叠加条件下大白菜对Cd、Pb、Zn累积途径探究	简槐良, 刘鸿雁, 梅雪, 毛诗佳, 刘芳, 张秋野, 敬鹏 (4448)
微塑料与铅复合污染对玉米种子萌发与生长的影响	马贵, 廖彩云, 周悦, 丁家富, 周炎炎, 王展, 马燕 (4458)
施加Fe ₃ O ₄ /桑树杆生物炭对土壤团形态和水稻砷含量的影响	阮麟乔, 梁美娜, 丁艳梅, 曹海燕, 刘崇敏, 成官文, 朱义年, 王敦球 (4468)
生物炭与氮肥配施对镉污染水稻土修复效应及机制	张丽, 李如霞, 何玉奎, 姚彦坡, 林大松 (4479)
不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响	李平, 聂浩, 郎漫, 朱燕菊, 姜海波, 李楠 (4489)
椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中Pb钝化的影响	侯正伟, 李建宏, 李财生, 张婧旻, 林清火, 赵庆杰, 吴治澎, 王禹 (4497)
生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响	冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 李娟, 杨国梅, 赵雨鑫 (4507)
改性生物炭负载零价铁对土壤中三氯乙烯的去除及微生物响应	陆海楠, 理鹏, 郭琳, 徐佳成, 杨洁, 黄沈发, 柯天英 (4519)
改性酒糟生物炭对紫色土养分及酶活性的影响	由乐林, 谢永红, 王子芳, 杨文娜, 高明 (4530)
化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地土壤中流磷流失风险	赖佳鑫, 邓华, 朱浩宇, 黄容, 龙翼, 王子芳, 高明 (4541)
污泥和鸡粪生物炭制备及其老化过程中的碳损失	张滢, 张长浩, 张秀芳, 段文焱, 陈芳媛 (4554)
化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响	谢军, 王子芳, 王莹, 熊子怡, 高明 (4565)
黄河下游谷子花生间作农田土壤细菌群落结构与功能预测	刘柱, 南镇武, 林松明, 孟维伟, 于海秋, 谢立勇, 张正, 万书波 (4575)
微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土壤理化性质和细菌群落的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (4585)
高效石油降解菌修复石油污染土壤与强化机制分析	姚贞先, 王丽萍, 李丹, 李亚平, 何士龙, 赵雅琴 (4599)
土地集约利用程度对华北潮土农田土壤微生物群落丰度和死生物物质积累的影响	李胜君, 盛美君, 李刚, 王蕊, 李洁, 张贵龙, 修伟明 (4611)
中国省域碳达峰路径与政策	苗安康, 袁越, 吴涵, 马欣, 邵辰宇 (4623)
基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制	钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 邹娜, 封强, 傅泽强 (4637)
不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析	刘欣宇, 卢江, 孟璇, 刘锦, 宋鹏, 李季, 田光明 (4647)
中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估	陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰 (4655)
陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟	古圳威, 刘京, 陈怡, 卢新冉, 王思轶 (4666)
气候变暖对四川盆地水稻土有机碳含量变化的影响	李艾雯, 宋靛颖, 冉敏, 李文丹, 张元媛, 李呈吉, 史文娇, 李启权 (4679)
降水变化下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸	王佳懿, 王兴, 王源苗, 房景博, 夏开拉·阿克拜, 祖丽皮耶·居热艾提, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (4689)
水盐环境对黄河口淡水湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响	秦纪法, 张佳彭, 桑变, 杨云斐, 杨继松, 王志康, 栗云召, 周迪, 于君宝 (4698)
中国省域土壤重金属空间分布特征及分区分区管控对策	石航源, 王鹏, 郑家桐, 肖荣波, 邓一荣, 庄长伟 (4706)
壬基酚的环境生物地球化学研究进展及对新污染物管理的建议	洪亚军, 冯承莲, 徐大勇, 吴丰昌 (4717)
微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展	张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 赵蓝天, 王允圆, 张琦, 曹雷鹏, 崔宪, 巫小丹, 郑洪立 (4728)
生物炭添加对土壤温室气体排放影响的长短期效应研究进展	周咏春, 吴柳林, 李丹阳, 郭思伯, 陈志敏, 李正龙, 赵研 (4742)
铁基双金属催化剂活化过硫酸盐去除水中抗生素研究进展	魏健, 张新怡, 郭壮, 宋永会 (4751)
畜禽粪便污染的环境风险与资源化治理技术进展	安婧, 丁子明, 高程程, 胡芳雨, 魏树和 (4764)
《环境科学》征订启事(4230)	《环境科学》征稿简则(4303)
信息(4506, 4678, 4741)	

中国省域土壤重金属空间分布特征及分区管控对策

石航源¹, 王鹏^{1*}, 郑家桐¹, 肖荣波¹, 邓一荣², 庄长伟²

(1. 广东工业大学环境科学与工程学院, 广州 510006; 2. 广东省环境科学研究院, 广州 510006)

摘要: 掌握土壤重金属空间分布特征及健康风险, 对于落实分级分区的土壤污染管控措施具有重要意义. 通过整理最近 20 年发表的 706 篇核心文献数据, 从省域尺度上分析了我国土壤重金属空间分布特征、累积程度及其健康风险. 结果表明, 在省域尺度上土壤重金属具有明显的空间差异, 整体呈现“南高北低, 东高西低”的特征. 耕地和建设用地上重金属含量较高, 且超标率高于草地和林地. 中国大部分地区土壤重金属含量高于区域背景值, 地累积指数为: $Cd(1.80) > Pb(0.23) > Cu(0.17) > Zn(-0.05) > As(-0.56) > Cr(-0.69)$, 超过 85% 省域土壤 Cd 达到中度污染水平. 云南、贵州、广西、湖南和江西等有色金属资源型省份土壤重金属普遍高于其他省份, 当地儿童面临较高的致癌风险. 福建、浙江、江苏和天津等沿海地区土壤污染主要来源于工业生产和城市化建设. 高强度农业利用是河南、山东和安徽等地区土壤重金属积累的重要原因.

关键词: 土壤重金属; 分布特征; 污染评价; 人体健康; 风险管控

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)08-4706-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202208160

Spatial Distribution of Soil Heavy Metals and Regional Control Strategies in China at Province Level

SHI Hang-yuan¹, WANG Peng^{1*}, ZHENG Jia-tong¹, XIAO Rong-bo¹, DENG Yi-rong², ZHUANG Chang-wei²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510006, China)

Abstract: It is important to understand the spatial distribution characteristics and health risks of soil heavy metals for the implementation of soil pollution control measures in different levels and regions. Based on the data of 706 core studies in the last 20 years, the spatial distribution characteristics, accumulation degree, and health risks of soil heavy metals in China were analyzed at the provincial level. The results showed that the soil heavy metals had obvious spatial differences on the provincial scale, with an overall trend of “high in the south and low in the north and high in the east and low in the west.” The content of heavy metals in the soil of agricultural land and construction land was high, and the rate of exceeding the standard was higher than that of other land types. Soil heavy metal concentrations in most areas of China were higher than the regional background values and were highly cumulative. The accumulation indices were: $Cd(1.80) > Pb(0.23) > Cu(0.17) > Zn(-0.05) > As(-0.56) > Cr(-0.69)$, with more than 85% of the provincial soils reaching moderate levels of Cd pollution. Non-ferrous metal resource-based provinces such as Yunnan, Guizhou, Guangxi, Hunan, and Jiangxi generally had higher soil heavy metal levels than those in other provinces, and local children faced higher cancer risks. Soil pollution in coastal areas such as Fujian, Zhejiang, Jiangsu, and Tianjin mainly originated from industrial production and urbanization construction. High intensity agricultural utilization was an important cause of soil heavy metal accumulation in Henan, Shandong, and Anhui.

Key words: soil heavy metals; distribution characteristic; pollution assessment; human health; risk control

当前, 土壤重金属污染成为全球突出的环境问题^[1,2]. 重金属具有很强的稳定性和毒性, 可以通过自然过程或人为输入在环境介质中积累和转移, 威胁农产品质量、生态安全和人类健康^[3]. 作为全球经济发展最快且人口分布最密集的国家之一, 我国土壤污染面积已达 100 万 km², 其中 70% 是重金属污染^[4]. 中国政府高度重视土壤重金属污染防治, 已将其列为优先控制污染物, 并提出“管理分类、区域分区、污染分级”的风险管控思路^[5]. 提高对土壤重金属空间分布及其健康风险的认识成为落实分级分区土壤污染治理的重要基础与关键点.

土壤重金属空间分布特征具有突出的空间异质性. 中国土壤类型丰富, 不同成土母岩形成的土壤, 其重金属背景值存在一定的差异^[6]. 同时, 人为活动输入土壤的重金属具有多源、跨介质和复合途径特征, 工业污染排放、污水灌溉和农业污染成为土

壤重金属主要的输入途径^[3,7]. 此外, 重金属在土壤中的累积、迁移受到地形地貌、土壤性质和植被状况等因素影响, 土壤系统中的物理-化学-生物复杂过程也影响重金属的分布与累积. 近几十年来, 中国土壤重金属的富集特征及空间分布受到学界广泛关注. 前期研究多集中于重金属污染突出区域, 如京津冀地区、长江三角洲和珠江三角洲等主要城市群, 以及湖南、安徽、贵州、广西和江西等矿产资源大省^[2,8,9]. 总体来看, 对于大尺度的土壤重金属空间分布特征仍缺少全面认识, 难以支撑土壤污染分级分区治理实际需求^[10,11]. 事实上, 从宏观尺度掌握土壤重金属的空间分异特征十分必要, 但是开展大

收稿日期: 2022-08-17; 修订日期: 2022-11-02

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2020B1111370001); 广州市科技项目(202103000018)

作者简介: 石航源(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染源解析, E-mail: shihangyuan@163.com

* 通信作者, E-mail: wangpengdli@163.com

规模的土壤重金属调查受物力和财力的限制^[12]. 近年来, 基于文献的荟萃分析被认为是从微观尺度拓展到宏观尺度空间特征分析的有效手段^[13]. 李括等^[14]通过文献搜集评价了中国 193 个城市土壤重金属污染程度; 陈世宝等^[15]发现我国农田土壤重金属污染点位超标率相对较高; Li 等^[16]分析了中国矿山周边土壤重金属的生态风险. 以上研究极大深化了对特定区域重金属污染状况认识, 但是对于省域尺度的土壤重金属污染特征及其影响因素的认识仍显不足. 省域尺度是中国开展土壤污染治理的基本单元, 国家专项资金分配和地方技术规范制定均需要从省域尺度认知土壤重金属分布状况.

鉴于此, 本文全面收集了近 20 年来中国土壤重金属研究的文献资料. 基于原位解译数据, 本研究从省域尺度评价土壤重金属污染状况及其健康风险, 分析各省域土壤重金属积累的主要影响因素, 并提出土壤污染分级分区治理对策, 以期科学治污和精准治污提供决策依据.

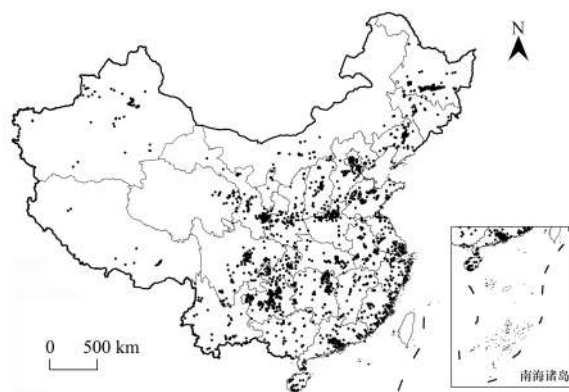
1 材料与方法

1.1 数据来源与预处理

通过中国知网 (CNKI) 和 Web of Science 数据库, 以“土壤重金属”为关键词, 全面搜集了 2000 ~ 2020 年发表的 706 篇核心文献. 受限于数据, 香港、澳门、中国台湾和南海诸岛地区的资料暂缺. 前人研究多采用区域统计均值开展分析, 本研究采样点坐标则是通过直接标注或提取研究区地理坐标位置获取, 以便更真实地反映土壤重金属的空间分布特征. 为提升数据质量与代表性, 本研究基于 3 条原则核检数据质量: ①土壤重金属采样多采用随机布点方法, 为土壤 0 ~ 20 cm 的表层样品; ②土壤重金属元素测试分析参照国家相关标准, 具有明确的质量控制; ③为避免异常值对统计数据整体分布的影响, 本文采用 3 倍标准差法确定异常值 ($X \pm 3S$, X 是样本均值, S 是样本标准差)^[17], 对异常数据进行了剔除. 此外, 为分析土壤重金属污染来源, 通过中国统计年鉴 (<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>) 获取了省级行政区的人口数量、GDP、规模以上工业企业和汽车保有量等数据资料. 基于已有研究的中国土壤重金属样点分布见图 1.

1.2 地累积指数

土壤重金属污染评价采用德国科学家 Müller 提出的地累积指数, 其能够反映土壤中重金属的累积程度, 而且还能一定程度上量化人类活动对土壤环境的影响, 已被广泛应用于河湖沉积物和土壤重金属污染程度评价, 计算公式为^[18]:



基于自然资源部标准地图服务网站
GS(2020)4632 号标准地图制作, 底图无修改

图 1 中国土壤重金属统计样本分布示意

Fig. 1 Spatial distribution of soil heavy metals in China

$$I_{geo} = \log_2 (C_i / 1.5 B_i) \quad (1)$$

式中, I_{geo} 为地累积指数; C_i 为样品中元素 i 的含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); B_i 为元素 i 的背景值^[18]. 根据 I_{geo} 值的不同分为各种等级^[19], 其中 $I_{geo} < 0$, 表示无污染; $0 \leq I_{geo} < 1$, 表示轻度污染; $1 \leq I_{geo} < 2$, 表示轻中度污染; $2 \leq I_{geo} < 3$, 表示中度污染; $3 \leq I_{geo} < 4$, 表示中强度污染; $4 \leq I_{geo} < 5$, 表示强度污染; $5 \leq I_{geo}$, 表示超强度污染.

1.3 健康风险评估

采用美国环境保护署 (USEPA) 推荐的健康风险评估模型量化土壤重金属的长期暴露风险^[20]. 该模型中土壤重金属进入人体主要考虑了摄入、呼吸和直接皮肤接触这 3 种途径^[21]. 不同年龄结构的受体遭受土壤重金属暴露风险存在较大差异, 为更精细地量化健康风险, 将受体人群分为儿童 (< 15 岁) 和成年人两组, 考虑其生理差异分别进行风险评估. 根据暴露度和毒性阈值评估土壤重金属对两类人群的非致癌和致癌风险. 非致癌风险指数 (HI) 的计算公式如下:

$$HI = \sum HQ_i = \sum ADI_i / RfD_i \quad (2)$$

$$ADI_{\text{经口摄入}} = \frac{C \times R_{\text{ing}} \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} \quad (3)$$

$$ADI_{\text{经皮肤}} = \frac{C \times SA \times SL \times ABF \times EF \times ED \times AF}{BW \times AT} \quad (4)$$

$$ADI_{\text{经呼吸}} = \frac{C \times R_{\text{inh}} \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (5)$$

式中, HQ_i 为经口摄入、皮肤接触和呼吸摄入 3 种暴露途径下重金属 i 产生的非致癌风险, 定义为平均每日摄入量 (ADI_i) 和参考剂量 (RfD_i) 之间的比率^[22]. HI 表示土壤各重金属元素和暴露途径的健康风险总和, 其中 HI 值小于 1 表示非致癌健康风险

处于安全等级,而 HI 值大于 1 表示存在显著的非致癌风险.

致癌风险指数 (TCR) 其计算公式如下:

$$TCR = \sum CR_i = \sum ADI_i \times SF_i \quad (6)$$

式中, CR_i 为经口摄入、皮肤接触和呼吸摄入这 3

种暴露途径下重金属 i 产生的致癌风险. TCR 为土壤各重金属元素和暴露途径的健康风险总和,致癌风险大于 1×10^{-4} 被认为是高概率发生癌症,而风险小于 1×10^{-6} 被认为是可接受的安全水平^[14]. 考虑评估参数的本土化,参照国内研究成果,不同暴露途径摄入土壤重金属的参数见表 1 和表 2^[23].

表 1 土壤重金属健康风险评估参数¹⁾

Table 1 Definition and reference values of health risk assessment parameters of heavy metals in soil

参数	定义	单位	儿童	成人
C	土壤中重金属含量	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	—	—
R_{ing}	口腔摄入率	$\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$	50	20
EF	暴露频率	$\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$	350	350
ED	暴露频率	a	6	24
BW	体重	kg	32	80
AT	平均暴露时间	d	365×6	365×24
R_{inh}	呼吸摄入率	$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	11. 6	15. 2
PEF	粒子排放因子	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	$1. 36\text{E} + 09$	$1. 36\text{E} + 09$
SA	暴露皮肤表面积	cm^2	1 600	4 350
AF	皮肤黏附因子	$\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$	0. 04	0. 07
ABF	皮肤吸收因子	—	0. 001	0. 001

1) “—”表示无数据

表 2 不同暴露途径摄入土壤重金属的参考剂量 (RfD) 和斜率因子 (SF)¹⁾

Table 2 Values of RfD and SF of different metals from different pathways

项目	途径	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb
RfD	经口腔	0. 003	0. 04	0. 3	0. 000 3	0. 001	0. 003 5
	经皮肤	0. 000 06	0. 012	0. 06	0. 000 123	0. 000 01	0. 000 525
	经呼吸	$2. 86\text{E} - 05$	0. 040 2	0. 3	0. 003	0. 001	0. 003 52
SF	经口腔	0. 501	—	—	1. 5	6. 1	—
	经皮肤	20	—	—	3. 66	0. 38	—
	经呼吸	42	—	—	15. 1	6. 3	—

1) “—”表示无数据

2 结果与分析

2.1 土壤重金属的描述性统计

中国土壤重金属的描述性统计结果如表 3 所示,包括样本数量 (N)、分位数 ($P5$ 、 $P25$ 、 $P50$ 、 $P75$ 和 $P95$)、平均值 (Mean)、变异系数 (CV) 和中国土壤背景值 (Cb)^[24]. 土壤重金属 $\omega(\text{Cd})$ 、

$\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{As})$ 和 $\omega(\text{Cr})$ 的样本中位数 ($P50$) 分别为 0. 28、33. 89、89. 95、30. 27、9. 41 和 59. 72 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中 As 和 Cr 的中位数小于中国土壤平均背景值,而 Cd、Pb、Zn 和 Cu 分别超出中国土壤背景值 2. 88、1. 30、1. 21 和 1. 34 倍. 6 种土壤重金属平均值均大于中位数,表明含量较高的样本显著增加了区域含量平均值.

表 3 土壤中重金属含量的描述性统计

Table 3 Descriptive statistics of heavy metal concentrations in soil

元素	N	$\omega/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$						CV/%
		P5	P25	P50	P75	P95	Mean	
Cd	2 157	0. 05	0. 14	0. 28	0. 68	3. 15	0. 72	175
Pb	2 388	8. 12	22. 9	33. 89	57. 04	142. 68	51. 04	117
Zn	1 650	22. 55	60. 07	89. 95	141. 07	305. 49	119. 39	89
Cu	1 899	5. 87	20. 97	30. 27	48. 1	125. 41	44. 79	117
As	1 309	1. 9	6. 36	9. 41	15. 45	29. 82	12. 03	77
Cr	1 667	12. 92	38	59. 72	79. 7	122. 47	61. 29	54

在省域尺度上,土壤重金属具有明显的空间差异特征 (图 2). 中国 31 个行政区的土壤重金属

$\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{As})$ 和 $\omega(\text{Cr})$ 最高省份分别为: 湖南 ($1. 70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、广西

(108.30 mg·kg⁻¹)、上海 (219.56 mg·kg⁻¹)、江西 (110.91 mg·kg⁻¹)、云南 (21.63 mg·kg⁻¹) 和广西 (75.92 mg·kg⁻¹)。所有行政区土壤 Cd 含量平均值均超出当地土壤重金属背景值；土壤 Pb、Zn、Cu、As 和 Cr 含量超出土壤重金属背景值的省份的占比

分别为 94%、90%、90%、71% 和 52%。土壤重金属元素的 CV 大小分别为：Cd > Pb = Cu > Zn > As > Cr，其中 Cd、Pb 和 Cu 的 CV 均超过了 100%，表明具有较大的空间分异；而 Zn、As、Cr 的 CV 小于 100%，说明它们在空间分布上相对均匀。

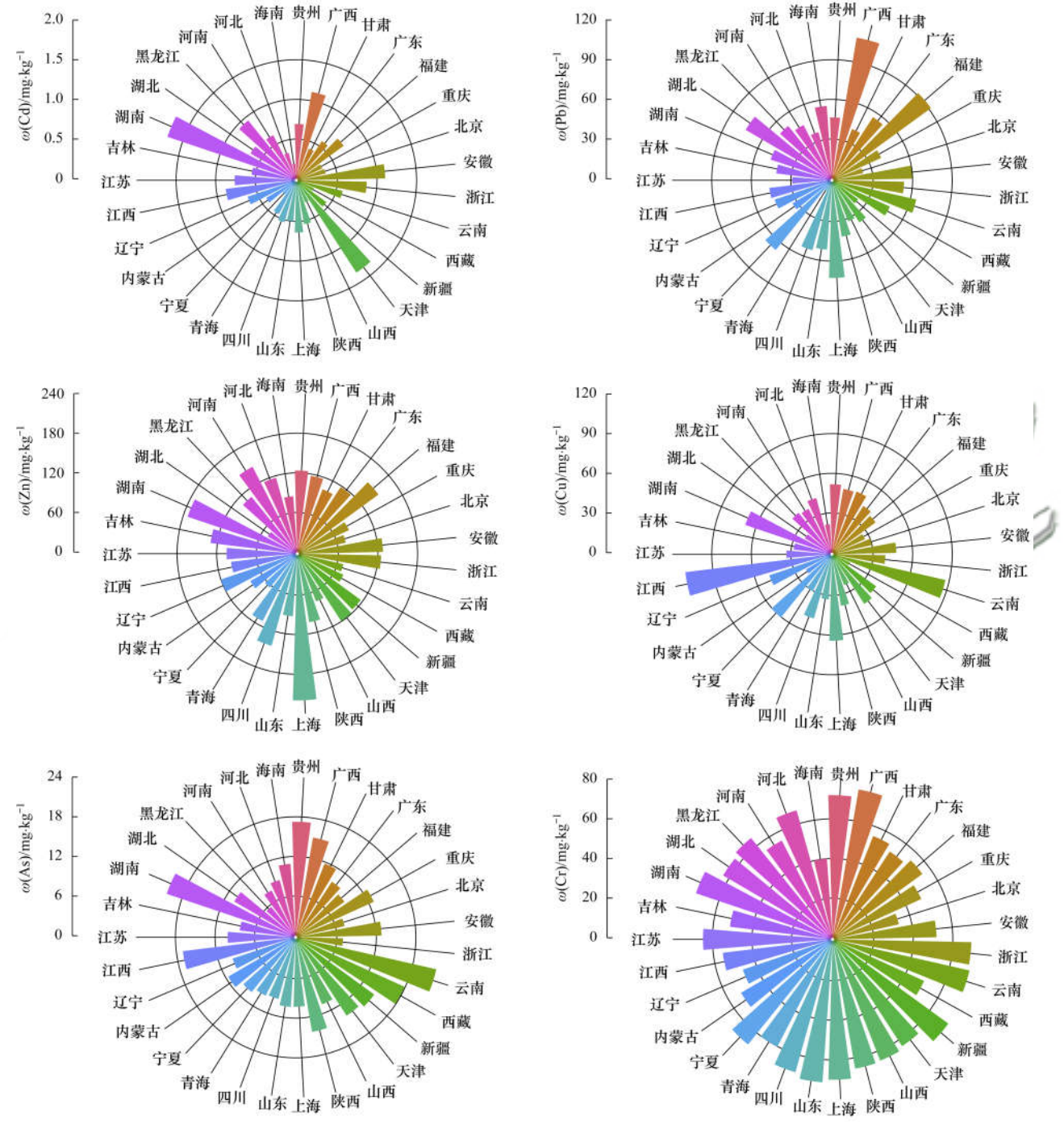


图 2 中国省域土壤重金属的含量平均值
Fig. 2 Average arable land soil heavy metal concentrations in China

中国不同土地利用类型土壤重金属含量统计特征如表 4 所示。土壤重金属 Cd、Zn、As 和 Cr 含量平均值排序为：耕地 > 建设用地 > 林地 ≈ 草地；Pb 和 Cu 含量平均值排序为：建设用地 > 耕地 > 林地 ≈ 草地。4 种土地利用类型土壤中 Zn 含量

平均值差异明显，耕地土壤 Zn 分别是林地和草地的 1.4 倍和 1.3 倍。而 As 在 4 种土地利用类型土壤中的含量分布较均匀。以土壤环境质量标准作为参考，土壤中 Cd、Cu、Pb、As、Cr 和 Zn 超标率分别是 45.85%、16.83%、2.48%、23.49%、

4.35%和2.04%。其中,建设用地和耕地土壤中Cd的超标率分别达到了48.27%和46.68%,Cu的超标率分别为25.39%和22.95%,高于林地和草地土壤重金属的超标率。总体上,建设用地和耕地中土壤重金属含量和污染超标率明显高于林地和草地,这与前人对龙口、广州和保定等

区域研究的结论一致^[21,25,26]。与2014年全国土壤污染状况调查公报结果相比^[4],本研究中调查的土壤重金属污染更加严重,尤其是耕地土壤中Cd、Cu和Pb污染超标率较高,这主要是因为文献中的土壤样本总量相对较少,且学者们重点关注的是受污染区域。

表 4 中国不同土地类型土壤重金属含量和超标率

Table 4 Heavy metal content and exceeding standard rate in soils of different land types in China

土地利用	含量平均值/mg·kg ⁻¹				超标率/%			
	草地	林地	耕地	建设	草地	林地	耕地	建设
Cd	0.58	0.62	0.73	0.72	37.84	40.27	46.68	48.27
Pb	42.04	47.78	48.26	50.32	15.13	14.65	15.51	18.91
Zn	82.21	78.62	109.87	98.78	1.15	0.54	1.75	3.61
Cu	37.57	32.99	41.61	44.95	18.35	20.88	22.95	25.39
As	10.81	11.31	11.81	11.21	2.35	2.72	5.08	4.55
Cr	56.87	53.00	63.78	59.24	1.72	1.72	2.04	2.20

2.2 中国土壤重金属空间分布特征

中国土壤重金属空间分布具有明显的分级分区特征。图3所示,Cd高值区主要分布在湖南南部 $[\omega(\text{Cd}) > 3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$,广西、云南、贵州、甘肃和吉林有点状零星分布。土壤Pb的空间分布与Cd具有一定的相似性,在云南和四川的西北部均出现高值区,但是广西的Pb含量平均值明显高于其他省份。Zn的高值区分布在贵州和湖南交界处、粤北地区和四川西部地区,新疆、黑龙江、吉林亦有高值区零星分布。Cu较高的地区主要分布在江西、云南、湖南、内蒙古西部、甘肃北部和黑龙江北部等地区,其中湖南南部和甘肃北部等地区与Cd具有相似性。As在新疆西部以及广西、湖南和广东三省交界处有高值区分布,其他省份As相对较低。土壤Cr在省域尺度上分布差异性较小,相对高值区主要分布在云南东部、广西以及四川北部与重庆南部的交界地区。总体来看,湖南、江西、云南、广西和内蒙古等有色金属资源丰富的省份,其土壤重金属含量相对较高;Cd、Pb和Cu的空间分布特征具有一定的相似性,珠江三角洲、京津冀和长江三角洲等城市群地区亦有高值区呈现点状分布。

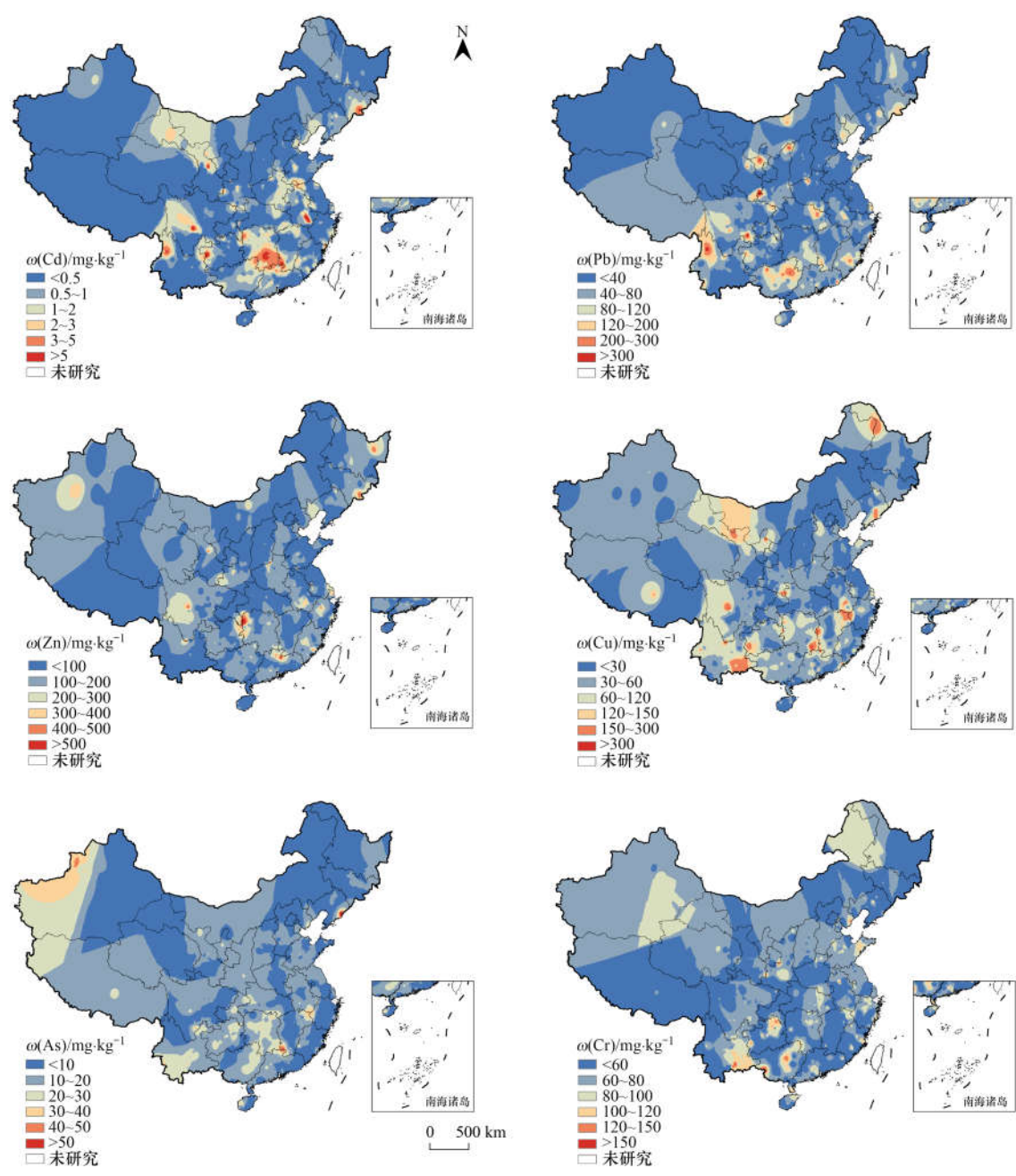
2.3 地累积指数评价

以各省的土壤重金属背景值为参照^[24],计算重金属的地累积指数(表5)。土壤重金属 I_{geo} 均值大小为: Cd (1.80) > Pb (0.23) > Cu (0.17) > Zn (-0.05) > As (-0.56) > Cr (-0.69), Cd、Pb和Cu的 I_{geo} 均值大于0,而As和Cr的 I_{geo} 均值远小于0。在省域尺度上,土壤Cd的地累积指数评价污染等级普遍较高,41.94%的行政区达到中度以上污染等级,其中湖南、天津和浙江Cd污染等级属于严重污染,且重金属累积程度极高;大部分行政区土

表 5 中国省域尺度土壤重金属污染等级(I_{geo})

Table 5 Levels of soil heavy metal concentrations in China (I_{geo})

项目	Cd	Pb	Zn	Cu	As	Cr
安徽	2.88	0.58	0.46	0.64	-0.08	-0.95
北京	1.78	-0.73	-1.07	-0.24	-0.98	-1.61
重庆	1.50	-0.22	-0.63	-0.83	-0.29	-1.29
福建	2.78	0.57	0.21	0.22	-0.09	-0.16
广东	1.66	0.98	0.20	0.23	-0.95	-1.02
甘肃	2.19	-0.42	0.53	0.96	-0.18	-0.46
广西	1.45	1.59	0.05	0.23	-1.03	-0.70
贵州	-0.52	-0.19	-0.27	0.11	-0.80	-1.00
海南	1.08	0.03	0.26	-0.24	-0.29	-0.92
河北	1.33	0.18	-0.01	0.40	-1.22	-0.62
河南	2.56	0.64	0.69	0.34	-1.14	-0.79
黑龙江	2.81	0.51	0.03	0.38	-0.95	-0.44
湖北	1.35	0.90	-1.35	-1.03	-0.81	-1.03
湖南	3.12	0.10	0.29	0.74	-0.21	-0.57
吉林	1.87	-0.06	0.11	0.13	-0.53	-0.44
江苏	1.96	-0.44	0.16	0.00	-0.57	-0.85
江西	2.42	-0.05	-0.07	1.86	-0.39	-0.32
辽宁	1.93	0.48	0.33	0.72	-0.42	-0.88
内蒙古	2.49	0.37	-0.15	0.04	0.04	-0.23
宁夏	0.35	1.11	-0.47	0.87	-0.78	-0.42
青海	1.13	-2.03	-0.10	-0.13	-1.11	-0.81
四川	2.14	0.22	0.13	0.08	-0.72	-0.78
山东	2.06	0.41	-0.04	-0.12	-0.43	-0.47
上海	1.61	0.96	0.85	0.66	-0.41	-0.59
陕西	2.00	0.39	-0.02	0.26	-0.22	-0.52
山西	0.52	0.44	-0.59	-0.75	-0.46	-0.51
天津	3.34	0.23	0.01	0.02	-0.05	-0.99
新疆	1.32	-0.32	0.17	0.01	-0.21	-0.05
西藏	0.87	0.11	-0.58	-1.26	-0.72	-1.20
云南	0.81	0.08	-0.96	0.33	-0.35	-0.48
浙江	3.05	0.59	0.24	0.58	-0.99	-0.19
平均值	1.8	0.23	-0.05	0.17	-0.56	-0.69
草地	2.00	0.11	-0.44	0.15	-0.64	-0.69
林地	2.09	0.29	-0.50	-0.04	-0.57	-0.79
耕地	2.33	0.31	-0.02	0.30	-0.51	-0.52
建设用地	2.31	0.37	-0.17	0.41	-0.58	-0.63



基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2020)4632 号标准地图制作,底图无修改

图3 中国土壤重金属含量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil heavy metal concentrations in China

壤 Cu、Pb 和 Zn 的地累积指数小于 1,属于无污染到轻度污染等级,仅广西和宁夏部分地区的 Pb、江西的 Cu 有中度污染^[27,28]. 内蒙古土壤 As 有轻微富集,其他地区土壤 As 的地累积指数均小于 0;土壤 Cr 地累积指数均小于 0,显示累积程度较低.

在土地利用类型上,Cd 的 I_{geo} 值均大于 2,处于轻度到中度污染等级,表明 Cd 污染范围较大,4 种类型的土壤中积累量明显. Pb 和 Cu 的 I_{geo} 均值小于 1,处于轻度污染水平;相比之下,Zn 和 Cr 的 I_{geo} 均值小于 0,累积程度较低,属于无污染等级. 其中,耕地土壤中 Cd 的积累程度远高于其他土壤,而建设

用地土壤中 Pb 和 Cu 较其他土壤富集明显. 总体上,4 种土地类型中土壤重金属的积累程度和风险等级依次排序为:耕地~建设用地>林地>草地.

2.4 土壤重金属健康风险评价

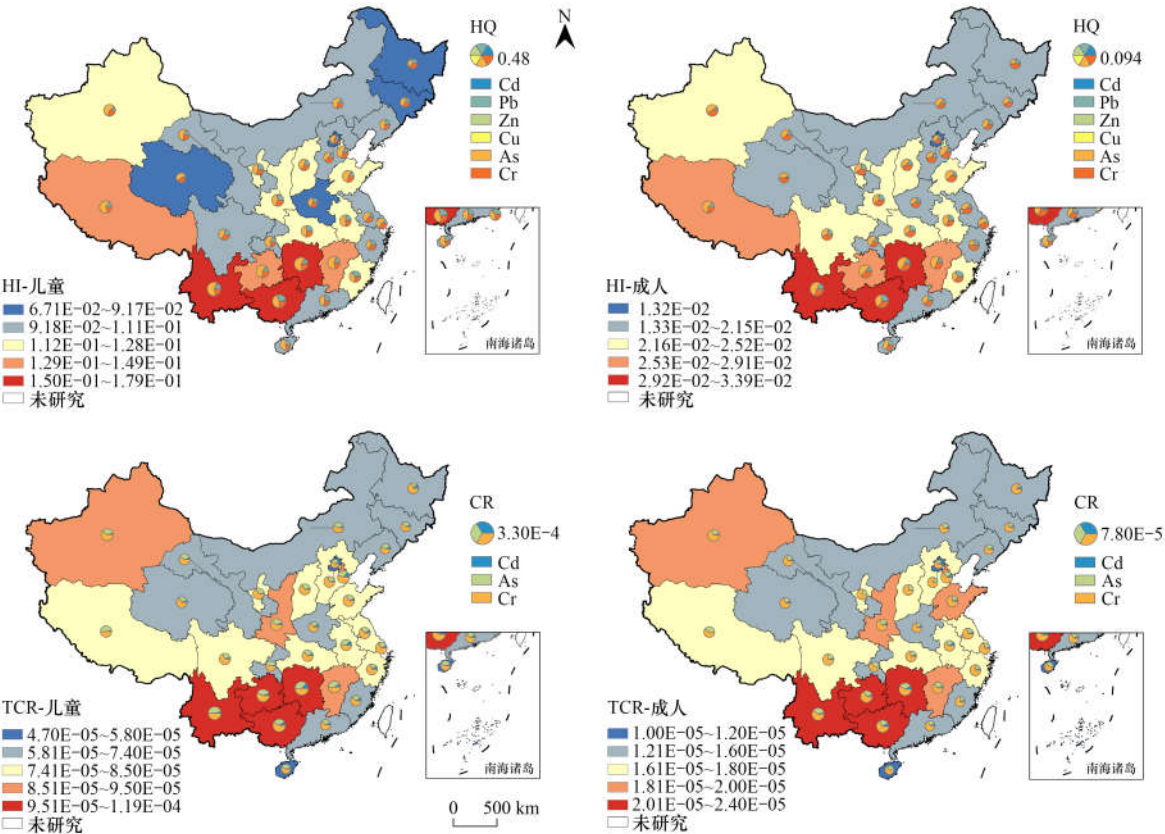
土壤重金属的健康风险评价结果见表 6. 从发生途径来看,3 种暴露途径的非癌风险(HI)和致癌风险(TCR)的大小顺序均为:口腔摄入>皮肤接触>呼吸摄入^[29]. 儿童和成人的 HI 均值($1.16\text{E}-01$ 和 $2.30\text{E}-02$)低于阈值 1,表明非致癌健康风险处于安全等级. 儿童和成人 TCR 均值($8.08\text{E}-05$ 和 $1.73\text{E}-05$)低于阈值 $10\text{E}-4$,这表明土壤重金属

对人体的致癌暴露风险较低. 由于儿童的行为和生理特征, 如在地上玩耍、吃手指和高频率呼吸^[30], 土壤重金属对儿童的健康风险(HI 和 TCR)是成人的 5 倍左右. 广西、贵州、湖南和云南的儿童 TCR 值大于阈值, 存在较高概率的致癌风险(图 4). 土壤重金属各元素的 HQ 平均值依次为: As >

Cr > Pb > Cu > Cd > Zn, 显示 As 对人体非致癌风险更大; 而 CR 平均值依次为: Cr > As > Cd, 表明 Cr 是致癌风险的主要元素. 与已有研究方法相同^[14,22,31], 本文采用 Cr 和 As 总含量数据计算健康风险, 能够反映整体的变化趋势, 但是也可能会高估健康风险.

表 6 中国土壤重金属不同暴露途径健康风险评价

项目	经口腔		经呼吸		经皮肤		总风险	
	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人
Cd	9.49E-04	1.52E-04	1.62E-07	8.49E-08	1.22E-04	2.31E-04	1.07E-03	3.83E-04
Pb	2.10E-02	3.36E-03	3.57E-06	1.87E-06	1.80E-04	3.42E-04	2.12E-02	3.71E-03
Zn	5.51E-04	8.81E-05	9.40E-08	4.93E-08	3.53E-06	6.71E-06	5.55E-04	9.49E-05
Cu	1.61E-03	2.58E-04	2.74E-07	1.44E-07	6.88E-06	1.31E-05	1.62E-03	2.71E-04
As	5.91E-02	9.45E-03	1.01E-05	5.28E-06	1.84E-04	3.51E-04	5.93E-02	9.80E-03
Cr	3.01E-02	4.82E-03	5.39E-04	2.83E-04	1.93E-03	3.67E-03	3.26E-02	8.77E-03
HI	1.13E-01	1.81E-02	5.53E-04	2.90E-04	2.42E-03	4.61E-03	1.16E-01	2.30E-02
Cd	5.79E-06	9.26E-07	1.02E-09	5.35E-10	4.62E-10	8.79E-10	5.79E-06	9.28E-07
As	2.66E-05	4.25E-06	4.56E-08	2.39E-08	8.30E-08	1.58E-07	2.67E-05	4.43E-06
Cr	4.53E-05	7.24E-06	6.48E-07	3.40E-07	2.31E-06	4.40E-06	4.83E-05	1.20E-05
TCR	7.77E-05	1.24E-05	6.94E-07	3.64E-07	2.40E-06	4.56E-06	8.08E-05	1.73E-05



基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2020)4632 号标准地图制作, 底图无修改

图 4 中国土壤重金属健康风险评价

Fig. 4 Health risk assessment of soil heavy metals in China

3 讨论

3.1 中国省域土壤重金属的关注元素与关键区

我国重金属污染具有明显的类别差异, 识别关注元素与关键区是高效治理的重要抓手. 从平均值

分布来看, 除 As 和 Cr 外的 4 种重金属均存在超过中国土壤背景值, 以 Cd 最为严重, 其次为 Zn、Pb 和 Cu. 因此, 中国省域尺度土壤应优先控制重金属 Cd, 尤其是广西、湖南和天津这 3 个省市. 四川、云南、贵州、江西、福建和江苏应重点关注土壤 Pb、Cu 和

Zn 污染.

土壤重金属具有明显的时空分异性,且具有较强的累积性.中国土壤重金属含量呈现出南方高于北方,东部高于西部的分布趋势,在有色金属资源型省份云南、贵州、广西、湖南和江西污染较突出.这些省区土壤 Cd 和 Cr 的含量和潜在致癌风险相对较高,可划分为我国土壤重金属污染防治的重点区;其次,广东、四川、重庆、湖北、安徽、福建、浙江、江苏、河北、天津、山西、山东、宁夏和陕西土壤重金属呈中度积累,当地居民健康风险在可以接受范围内,可划分为第二梯度的健康风险管控区;最后,其他省区土壤重金属污染程度低,当地居民健康风险在安全等级,可划分为我国土壤重金属污染的防范区.

3.2 土地类型对土壤重金属含量影响

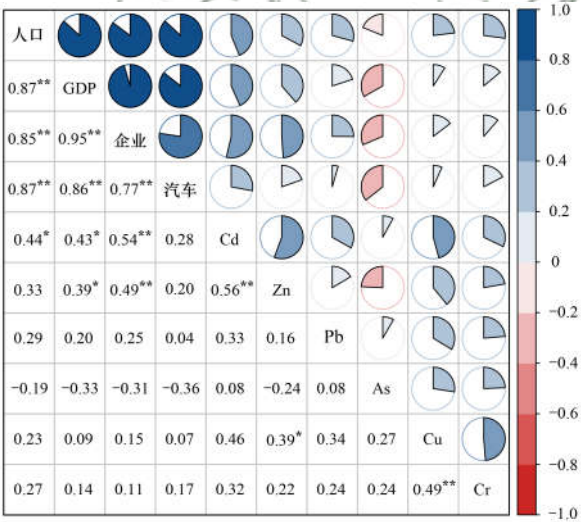
据前文分析,不同土地类型土壤重金属含量存在明显差异,人类活动引起的土地利用方式影响了土壤重金属分布状况.与草地和林地相比较,随着人类活动强度逐渐增大,耕地和建设用地土壤重金属含量相应提高.由于土壤肥力、pH 值、微生物连通性和含水量的差异,各种土地利用类型对土壤吸收重金属的能力有不同的影响,导致土壤中重金属积累的变化^[32].此外,不同重金属具有不同的径流迁移能力,甚至相同的重金属在不同的土地利用类型中表现出不同的迁移能力.土地利用对土壤中重金属的再分布具有重要影响,这可以反映在元素的直接输入和间接迁移过程.建设用地是为人类生产和生活提供操作场地的主要土地类型,人类生活中常使用的 Cu、Zn 和 Pb 等重金属长期蓄积;耕地中污水农灌和化肥等农用物质的不合理施用等带来 As、Cu 和 Zn 等重金属的长期累积;草地和林地的开发利用效率较低,重金属外源输入受到限制,土壤重金属的积累量相对较低.

3.3 中国省域尺度土壤重金属来源及其影响因素

成土母质是土壤重金属的原始来源^[33]. 各行政区的土壤重金属背景值差异导致其含量平均值及空间分布存在一定差异,例如云南、贵州以及广西土壤重金属 Cd、Cu 和 Cr 含量总体偏高,而这些区域土壤背景值也明显高于其他地区.有研究表明^[34],中国西南(广西、贵州和云南)主要以喀斯特地貌为主,石灰岩母质在自然风化和土壤形成过程中重金属会凝结,因此 Cd 和 Cr 等土壤重金属的含量平均值要显著高于其他类型的土壤.

采矿、冶炼、化工、电镀、机械制造和火力发电等人为活动通常是土壤重金属积累的重要输入源.从污染源的角度看,社会经济指标可以在一定程

度上反映出当地重金属排放量,各省重金属的含量平均值一定程度上能够反映其污染程度.图 5 显示了各省土壤重金属的含量平均值与社会经济指标的相关性.土壤 Zn 与 Pb、Cd 与 Cu 存在显著的相关性($P<0.01$),同时 Cu 与 Pb 也存在着较强的相关性,说明这些重金属可能存在相同的来源,如交通尾气、轮胎和刹车片磨损会导致 Cd、Zn 和 Cu 在道路周边土壤中累积^[35].而 As 与其他重金属的相关系数较低且不显著,其输入源可能不同于其他重金属.人口、GDP 与土壤 Zn、Pb 和 Cu 含量平均值有较强的相关性.这表明人类活动对土壤重金属含量影响干扰,人口的增长加剧了资源消耗和环境污染.大量人口涌入经济发达地区,城市垃圾、交通排放和资源消耗等问题进一步加剧土壤重金属污染^[36],威胁城市生态环境和居民健康.企业数量和汽车拥有量与重金属的相关性并不显著,这是因为土壤重金属含量往往呈现很强的空间异质性,单一的平均值难以反映出区域土壤重金属的累积水平^[31].



* 表示 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$

图5 中国行政区土壤重金属含量与经济指标相关性分析结果

Fig. 5 Correlations of heavy metal concentrations in urban soils of administrative region in China with economic indicators

在省域尺度上,湖南、浙江、江苏、福建、安徽和天津等地土壤重金属含量明显高于当地背景值,而这些地区多以第二产业为主导经济,频繁的工业活动很可能是造成这些区域土壤重金属污染的因素之一^[37].广西、湖南、安徽、甘肃和云南以丰富的有色金属矿产资源和发达的有色金属开采和加工产业著称^[38~40].含有重金属的固体废物、废水和废气从矿山开采、有色金属冶炼和加工等相关活动中排出,通过大气沉降和地表径流积累在土壤环境.

农业生产亦是造成土壤重金属污染的途径之一.河南、山东和安徽是中国重要的农业和粮食生

产基地,其化肥施用量占 2020 中国总量的 1/4. 化肥农药中通常含有微量 Cd、Pb、Zn、Cu、As、Cu 和 Cr 等重金属元素,在长期施用过程中土壤会不断积累重金属. 2008 ~ 2018 年之间,中国农业生产过程中土壤中 As、Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 的年投入分别为 7 974、1 298、36 838、84 068、176.6 和 21 820 t^[41]. 饲料中也添加微量元素,造成畜禽粪便中重金属元素的环境污染风险增高,尤其是猪粪中 As、Zn、Cu 和 Cd 的含量及超标率远高于其他重金属^[42].

3.4 中国土壤重金属分区、分级和分类治理对策

构建精细化的土壤环境质量管理体系是我国土壤环境科学治理的重要支撑. 按照“分区、分级、分类”的原则,推进建立土壤环境质量管理标准体系^[43,44],应重点根据各地区土壤重金属污染程度、地质背景、土地利用类型、农作物种类和区域产业结构布局细化研究. 广西、湖南和天津这 3 个省市应关注土壤 Cd 污染物,四川、云南、贵州、江西、福建和江苏应重点关注土壤 Pb、Cu 和 Zn 污染. 高强度人类活动是土壤重金属污染的主要原因,特别是有色金属矿产资源开采. 冶炼大省的土壤重金属污染突出,因此应加强对矿产资源的规范管理,持续提升绿色采矿、冶炼水平,严格控制工业生产过程“三废”的排放,督促国家标准落实落细. 农业生产过程中应加强环境监管力度,科学施肥、合理用药,并提高农用薄膜的回收率,严格控制污水灌溉、污泥和固体废弃物用于农业生产. 此外,倡导居民发展更环保和低消费的生活方式,开发新动力能源,能够减少交通活动和垃圾焚烧产生的大量粉尘进入土壤系统^[45].

4 结论

(1) 中国土壤重金属在省域尺度上具有明显的空间差异. 中国大部分地区土壤重金属含量高于区域背景值,具有较强的累积性. 甘肃、安徽、福建和江西等有色金属丰富的资源型省份土壤重金属普遍高于其他省份. 不同土地类型下土壤中 Cd、Cu 的含量平均值超过了相应的质量标准,特别是耕地和建设用地. Cd 是土壤中污染最严重的重金属,所有行政区的土壤 Cd 含量均超过背景值. 土壤重金属污染对云南、广西、贵州和湖南的居民,特别是儿童可能因土壤重金属暴露而经历相对较高的致癌风险.

(2) 云南、广西、贵州、湖南、江西、安徽和甘肃等省份的 Cd、Pb、Cu 和 Zn 污染较突出,在实施污染控制措施时应重点关注. 工业、采矿和农业生

产活动是土壤重金属积累的主要原因,特别是有色金属丰富的资源型省份应优化产业结构,提升采矿、冶炼绿色水平,严格控制工业生产过程“三废”的排放. 福建、浙江、江苏和天津等沿海地区土壤污染主要来源于工业生产和城市化建设,其应重点强化清洁生产,推进无废城市化建设. 高强度农业利用是河南、山东和安徽等地区土壤重金属积累的重要原因,其应科学施肥,持续推动绿色农业发展.

参考文献:

- [1] 李斌,段亚军,张娜,等. 典型农业区土壤 6 种重金属的人为污染情况及健康风险评价[J]. 环境与健康杂志, 2020, 37(3): 246-248.
Li B, Duan Y J, Zhang N, et al. Anthropogenic pollution and health risk assessment of six heavy metals in soil of a typical agricultural area[J]. Journal of Environment and Health, 2020, 37(3): 246-248.
- [2] 张义,周心劝,曾晓敏,等. 长江经济带工业土壤重金属污染特征与评价[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 2062-2070.
Zhang Y, Zhou X Q, Zeng X M, et al. Characteristics and assessment of heavy metal contamination in soils of industrial regions in the Yangtze River Economic Belt[J]. Environmental Science, 2022, 43(4): 2062-2070.
- [3] 陈雅丽,翁莉萍,马杰,等. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(10): 2219-2238.
Chen Y L, Weng L P, Ma J, et al. Review on the last ten years of research on source identification of heavy metal pollution in soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(10): 2219-2238.
- [4] 陈能场,郑煜基,何晓峰,等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1689-1692.
Chen N C, Zheng Y J, He X F, et al. Analysis of the Report on the national general survey of soil contamination[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(9): 1689-1692.
- [5] 胡文友,陶婷婷,田康,等. 中国农田土壤环境质量管理现状与展望[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1094-1109.
Hu W Y, Tao T T, Tian K, et al. Status and prospect of farmland soil environmental quality management in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(5): 1094-1109.
- [6] Jia X L, Fu T T, Hu B F, et al. Identification of the potential risk areas for soil heavy metal pollution based on the source-sink theory[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 393, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122424.
- [7] Hu Y A, Cheng H F. A method for apportionment of natural and anthropogenic contributions to heavy metal loadings in the surface soils across large-scale regions[J]. Environmental Pollution, 2016, 214: 400-409.
- [8] Zhou X Y, Wang X R. Impact of industrial activities on heavy metal contamination in soils in three major urban agglomerations of China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 230: 1-10.
- [9] 王信凯,张艳霞,黄标,等. 长江三角洲典型城市农田土壤重金属累积特征与来源[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 82-91.
Wang X K, Zhang Y X, Huang B, et al. Accumulation and sources of heavy metals in agricultural soil in a city typical of the Yangtze River Delta, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(1): 82-91.
- [10] 余淑凤. 基于文献分析的长三角农田土壤重金属时空分布及

- 数据库系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [11] Zhang X X, Zha T G, Guo X P, *et al.* Spatial distribution of metal pollution of soils of Chinese provincial capital cities[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **643**: 1502-1513.
- [12] Ren S Y, Song C Q, Ye S J, *et al.* The spatiotemporal variation in heavy metals in China's farmland soil over the past 20 years: a meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **806**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150322.
- [13] Hu B F, Shao S, Ni H, *et al.* Current status, spatial features, health risks, and potential driving factors of soil heavy metal pollution in China at province level[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **266**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114961.
- [14] 李括, 彭敏, 杨峥, 等. 中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1825-1837.
- Li K, Peng M, Yang Z, *et al.* Trace metals pollution and health risks for planning area soils of 193 Chinese cities[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1825-1837.
- [15] 陈世宝, 王萌, 李杉杉, 等. 中国农田土壤重金属污染防治现状与问题思考[J]. *地学前缘*, 2019, **26**(6): 35-41.
- Chen S B, Wang M, Li S S, *et al.* Current status of and discussion on farmland heavy metal pollution prevention in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, **26**(6): 35-41.
- [16] Li Z Y, Ma Z W, Van Der Kuijp T J, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **468-469**: 843-853.
- [17] 陈文轩, 李茜, 王珍, 等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2822-2833.
- Chen W X, Li Q, Wang Z, *et al.* Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2822-2833.
- [18] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine river[J]. *Geojournal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [19] 陈航, 王颖, 王澍. 铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2719-2731.
- Chen H, Wang Y, Wang S. Source analysis and pollution assessment of heavy metals in farmland soil around Tongshan mining area[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2719-2731.
- [20] 徐梦琪, 杨文弢, 杨利玉, 等. 黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准[J]. *环境科学*, 2022, **43**(7): 3799-3810.
- Xu M Q, Yang W T, Yang L Y, *et al.* Health risk assessment and environmental benchmark of heavy metals in cultivated land in mountainous area of Northwest Guizhou Province[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3799-3810.
- [21] 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.
- [22] Lin Y, Ma J, Zhang Z D, *et al.* Linkage between human population and trace elements in soils of the Pearl River Delta: Implications for source identification and risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **610-611**: 944-950.
- [23] Kong F J, Chen Y C, Huang L, *et al.* Human health risk visualization of potentially toxic elements in farmland soil: a combined method of source and probability[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **211**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.111922.
- [24] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [25] 宗庆霞, 窦磊, 侯青叶, 等. 基于土地利用类型的土壤重金属区域生态风险评价: 以珠江三角洲经济区为例[J]. *地球科学进展*, 2017, **32**(8): 875-884.
- Zong Q X, Dou L, Hou Y Q, *et al.* Regional ecological risk assessment of soil heavy metals in Pearl River Delta economic zone based on different land uses[J]. *Advances in Earth Science*, 2017, **32**(8): 875-884.
- [26] 刘雪松, 王雨山, 尹德超, 等. 白洋淀内不同土地利用类型土壤重金属分布特征与污染评价[J]. *土壤通报*, 2011, **53**(3): 710-717.
- Liu X S, Wang X S, Yin D C, *et al.* Characteristics and assessment of soil heavy metal pollution under different land-use types in the Baiyangdian wetland[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, **53**(3): 710-717.
- [27] 张大超, 张菊花, 刘晓来, 等. 赣南稀土矿区农田土壤环境有效态稀土的分布[J]. *有色金属科学与工程*, 2013, **4**(3): 87-90.
- Zhang D C, Zhang J H, Liu X L, *et al.* The effective REES distribution in the farmland soil environment of rare earth mining region in southern Jiangxi[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2013, **4**(3): 87-90.
- [28] 徐启胜, 李雨晴, 陈燕, 等. 我国中南地区土壤重金属污染状况及其空间分布研究[J]. *北方农业学报*, 2018, **46**(3): 93-100.
- Xu Q S, Li Y Q, Chen Y, *et al.* Study on heavy metal pollution and its spatial distribution in soil in central South China[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2018, **46**(3): 93-100.
- [29] 成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 等. 浙中典型硫铁矿农区农田土壤重金属含量特征及健康风险[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 442-453.
- Cheng X M, Sun B B, Wu C, *et al.* Heavy metal concentration characteristics and health risks of farmland soils in typical pyrite mining area of the central Zhejiang Province, China[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 442-453.
- [30] Cai L M, Wang Q S, Wen H H, *et al.* Heavy metals in agricultural soils from a typical township in Guangdong Province, China: occurrences and spatial distribution[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **168**: 184-191.
- [31] 彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 等. 中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 1-10.
- Peng C, He Y L, Guo C H, *et al.* Characteristics and risk assessment of heavy metals in urban soils of major cities in China[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 1-10.
- [32] Zhang Y, Zhang X, Bi Z L, *et al.* The impact of land use changes and erosion process on heavy metal distribution in the hilly area of the Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **718**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137305.
- [33] 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 等. 西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2877-2884.
- Liu Y Z, Xiao T F, Xiong Y, *et al.* Accumulation of heavy metals in agricultural soils and crops from an area with a high geochemical background of cadmium, Southwestern China[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2877-2884.
- [34] Xia X Q, Ji J F, Zhang C S, *et al.* Carbonate bedrock control of

- soil Cd background in Southwestern China: its extent and influencing factors based on spatial analysis[J]. *Chemosphere*, 2022, **290**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.133390.
- [35] Liu Z Y, Fei Y, Shi H D, *et al.* Prediction of high-risk areas of soil heavy metal pollution with multiple factors on a large scale in industrial agglomeration areas [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **808**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151874.
- [36] Wang S, Cai L M, Wen H H, *et al.* Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in soil from a typical county-level city of Guangdong Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **655**: 92-101.
- [37] 刘孝严, 樊亚男, 刘鹏, 等. 基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征[J]. *环境科学*, 2022, **43**(11): 5169-5179.
- Liu X Y, Fan Y N, Liu P, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution in farmland soil of the Yangtze River Economic Belt based on bibliometric analysis [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(11): 5169-5179.
- [38] 李静, 俞天明, 周洁, 等. 铅锌矿区及周边土壤铅、锌、镉、铜的污染健康风险评价[J]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2327-2330.
- Li J, Yu T M, Zhou J, *et al.* Assessment of health risk for mined soils based on critical thresholds for lead, zinc, cadmium and copper[J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(8): 2327-2330.
- [39] 刘兰英, 涂杰峰, 黄薇, 等. 福建闽西矿区周边土壤Cd、Pb、Cr含量及风险评价[J]. *福建农业学报*, 2017, **32**(1): 68-74.
- Liu L Y, Tu J F, Huang W, *et al.* Monitoring and risk assessment on heavy metals in soil at a mining area in Fujian[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2017, **32**(1): 68-74.
- [40] 陶美霞, 胡虎, 胡兰文, 等. 上饶市某铜矿废弃地土壤重金属污染特征及健康风险评价[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(6): 1153-1159.
- Tao M X, Hu H, Hu L W, *et al.* Characteristics and health risk assessment of heavy metals in polluted abandon soil of Shangrao, Jiangxi[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(6): 1153-1159.
- [41] Peng H, Chen Y L, Weng L P, *et al.* Comparisons of heavy metal input inventory in agricultural soils in North and South China: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 776-786.
- [42] 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 等. 我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 986-996.
- Mu H Y, Zhuang Z, Li Y M, *et al.* Heavy metal contents in animal manure in China and the related soil accumulation risks [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 986-996.
- [43] 骆永明, 滕应. 我国土壤污染的区域差异与分区治理修复策略[J]. *中国科学院院刊*, 2018, **33**(2): 145-152.
- Luo Y M, Teng Y. Regional difference in soil pollution and strategy of soil zonal governance and remediation in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, **33**(2): 145-152.
- [44] 徐建明, 孟俊, 刘杏梅, 等. 我国农田土壤重金属污染防治与粮食安全保障[J]. *中国科学院院刊*, 2018, **33**(2): 153-159.
- Xu J M, Meng J, Liu X M, *et al.* Control of heavy metal pollution in farmland of China in terms of food security [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, **33**(2): 153-159.
- [45] Pan Y J, Ding L, Xie S Y, *et al.* Spatiotemporal simulation, early warning, and policy recommendations of the soil heavy metal environmental capacity of the agricultural land in a typical industrial city in China: case of Zhongshan City[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **285**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124849.

CONTENTS

Analysis of Change Trend and Influencing Factors of PM _{2.5} -O ₃ Pollution in Tianjin from 2013 to 2020	XIAO Zhi-mei, LI Ya-fei, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (4211)
Changes in Ozone Pollution Trend Characteristics and Sensitivity in Jinan from 2015 to 2020	SUN Xiao-yan, SUN Jun, GUO Meng-meng, <i>et al.</i> (4220)
Analysis of O ₃ Pollution Characteristics, Formation Sensitivity, and Transport Impact in Southern Nanjing	ZHENG Xin-mei, HU Kun, WANG Ming, <i>et al.</i> (4231)
Characteristics and Driving Factors of O ₃ Pollution During 13 th Five-Year Period in Tianjin	LI Yuan, XIAO Zhi-mei, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (4241)
Response of PM _{2.5} and O ₃ to Emission Reductions in Nanjing Based on Random Forest Algorithm	SHANG Yong-jie, MAO Yu-hao, LIAO Hong, <i>et al.</i> (4250)
Quantification of Ozone Pollution Transport Based on Four-dimensional Flux Method in Foshan, China	WU Li-ping, MO Hai-hua, YANG Li-ting, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Source Depletion on Vapor Intrusion Risk Assessment	ZHONG Mao-sheng, WANG Yang, JIANG Lin, <i>et al.</i> (4271)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Main Pollutant Fluxes in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020	GUO Chao-chen, LEI Kun, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (4279)
Spatial Variation Characteristics, Influencing Factors, and Sources of Hydrogeochemical of Surface Water and Groundwater in Mountainous Area of Hutuo River	KONG Xiao-le, CHANG Yu-ru, LIU Xia, <i>et al.</i> (4292)
Spatial Distribution, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Metal Elements in Karst Water in Southeastern Chongqing	XIE Hao, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (4304)
Mechanism of Salinization of Shallow Groundwater in Taocheng District, Hengshui City	HE Jin, ZHANG Huai-sheng, CAI Wu-tian, <i>et al.</i> (4314)
Assessment of Groundwater Contamination Risk in the Plain Area of Southern Turpan Basin	BAI Fan, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (4325)
Microbial Community Composition and Diversity in Metal Sulfide Mine Water Systems	DING Cong-cong, ZHU Xu-yan, ZHAO Xing-qing, <i>et al.</i> (4334)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Baiyangdian Lake Water and Sediments	CHENG Xin-yu, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (4344)
Analyzing the Pollution Sources and Mechanisms of Urban Rivers Based on Identifying the Molecular Signature of Dissolved Organic Matter	ZHU Yi, YE Jian-feng, SUN Xiao-nan, <i>et al.</i> (4353)
Occurrence and Fate of Steroid Hormones in Sewage Treatment Plants	LIU Yuan-yuan, FENG Hui, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4364)
Distribution, Source, and Ecological Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in Surface Sediments of Boao Coastal Waters	HAO Run-bo, FU Guo-wei, SONG Yan-wei, <i>et al.</i> (4374)
Content, Distribution, Source Analysis, and Risk Assessment of PAHs in Arable Soils of Taiyuan	WU Zhang-wei, DUAN Yong-hong, LIU Li-wen, <i>et al.</i> (4387)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	GUO Zhi-juan, LIU Fei, ZHOU Ya-long, <i>et al.</i> (4397)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils in Yellow River Cultural Park Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	DUAN Hai-jing, MA Jia-yu, PENG Chao-yue, <i>et al.</i> (4406)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Surrounding Farmlands of Manganese Mining Area	YU Gao, CHEN Fen, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (4416)
Translocation, Accumulation, and Comprehensive Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop Systems in an Old Industrial City, Shizuishan, Ningxia, Northwest China	WANG Ying, DONG Ai-jun, YANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4429)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics (TCs) in Soil-Vegetable System with Soil Fertilized with Animal Manure	DING Dan, HUANG Xiao-yi, GU Jing-yi, <i>et al.</i> (4440)
Accumulation Pathway of Cd, Pb, and Zn in Chinese Cabbage under the Condition of Exogenous Pollution Superposition in High Geological Background Area	JIAN Huai-liang, LIU Hong-yan, MEI Xue, <i>et al.</i> (4448)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Lead on Maize Seed Germination and Growth	MA Gui, LIAO Cai-yun, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (4458)
Application of Fe ₃ O ₄ /Mulberry Stem Biochar Effects on Soil Arsenic Species and Rice Arsenic Content	RUAN Lin-qiao, LIANG Mei-na, DING Yan-mei, <i>et al.</i> (4468)
Remediation Effect and Mechanism of Biochar in Combination with Nitrogen Fertilizer on Cd-contaminated Paddy Soil	ZHANG Li, LI Ru-xia, HE Yu-lei, <i>et al.</i> (4479)
Effects of Combined Application of Different Nitrogen Fertilizers and Biochar on Cadmium Uptake by Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.) in Cadmium Contaminated Soil	LI Ping, NIE Hao, LANG Man, <i>et al.</i> (4489)
Effect of Coconut Fiber Biochar and Its Nitrate Modification on Pb Passivation in Paddy Soils	HOU Zheng-wei, LI Jian-hong, LI Cai-sheng, <i>et al.</i> (4497)
Effects of Biochar Application on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Microplastic-contaminated Calcareous Soil	RAN Tai-shan, LONG Jian, LIAO Hong-kai, <i>et al.</i> (4507)
Effects of Modified Biochar-Supported Zero-Valent Iron on the Removal of Trichloroethylene and Responses of Microbial Community in Soil	LU Hai-nan, LI Peng, GUO Lin, <i>et al.</i> (4519)
Effects of Modified Distiller's Lees Biochar on Nutrients and Enzyme Activities in Purple Soil	YOU Le-lin, XIE Yong-hong, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (4530)
Biochar or Straw Substituting Chemical Fertilizer Increase the Risk of Phosphorus Loss in Subsurface Runoff in Sloping Farmland	LAI Jia-xin, DENG Hua, ZHU Hao-yu, <i>et al.</i> (4541)
Carbon Loss During Preparation and Aging of Sludge Livestock Manure Biochars	ZHANG Ying, ZHANG Chang-hao, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (4554)
Effect of Chemical Fertilizer and Manure Combined with Biochar on Denitrification Potential and Denitrifying Bacterial Community in Rhizosphere Soil	XIE Jun, WANG Zi-fang, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (4565)
Soil Bacterial Community Structure and Function Prediction of Millet/Peanut Intercropping Farmland in the Lower Yellow River	LIU Zhu, NAN Zhen-wu, LIN Song-ming, <i>et al.</i> (4575)
Effects of Microbial Fertilizer on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Saline Soil Under Brackish Water Irrigation	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (4585)
Remediation of Petroleum-contaminated Soil by Highly Efficient Oil-degrading Bacteria and Analysis of Its Enhancement Mechanism	YAO Zhen-xian, WANG Li-ping, LI Dan, <i>et al.</i> (4599)
Impacts of Land Use Intensification Level on Fluvio-aquic Cropland Soil Microbial Community Abundance and Necromass Accumulation in North China	LI Sheng-jun, SHENG Mei-jun, LI Gang, <i>et al.</i> (4611)
Pathway and Policy for China's Provincial Carbon Emission Peak	MIAO An-kang, YUAN Yue, WU Han, <i>et al.</i> (4623)
Carbon Offsetting Mechanism of China Province Based on Carbon Reduction Cost	ZHONG Shi-yu, ZHANG Xiao-min, WU Jia, <i>et al.</i> (4637)
Analysis on Change in Soil Organic Carbon Content of Farmland in Yangtze River Economic Belt Under Different Fertilizing Measures	LIU Xin-yu, LU Jiang, MENG Xuan, <i>et al.</i> (4647)
Multi-scenario Land Use Optimization and Carbon Storage Assessment in Northwest China	CHEN Ning, XIN Cun-lin, TANG Dao-bin, <i>et al.</i> (4655)
Analysis and Simulation of the Spatiotemporal Evolution of Habitat Quality and Carbon Storage in the Weiwei Dry Plateau Region of Shaanxi	GU Zhen-wei, LIU Jing, CHEN Yi, <i>et al.</i> (4666)
Impact of Climate Warming on Paddy Soil Organic Carbon Change in the Sichuan Basin of China	LI Ai-wen, SONG Liang-ying, RAN Min, <i>et al.</i> (4679)
Stoichiometric Imbalance of Abandoned Grassland Under Precipitation Changes Regulate Soil Respiration	WANG Jia-yi, WANG Xing, WANG Yuan-zhuo, <i>et al.</i> (4689)
Effects of Water-salt Environment on Freshwater Wetland Soil C, N, and P Ecological Stoichiometric Characteristics in the Yellow River Estuary Wetland	QIN Ji-fa, ZHANG Jia-peng, SANG Luan, <i>et al.</i> (4698)
Spatial Distribution of Soil Heavy Metals and Regional Control Strategies in China at Province Level	SHI Hang-yuan, WANG Peng, ZHENG Jia-tong, <i>et al.</i> (4706)
Comprehensive Review on Environmental Biogeochemistry of Nonylphenol and Suggestions for the Management of Emerging Contaminants	HONG Ya-jun, FENG Cheng-lian, XU Da-yong, <i>et al.</i> (4717)
Research Progress on Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Microplastics in the Environment	ZHANG Long-fei, LIU Yu-huan, RUAN Rong-sheng, <i>et al.</i> (4728)
Review on the Long-term and Short-term Effects of Biochar Addition on Soil Greenhouse Gas Emissions	ZHOU Yong-chun, WU Liu-lin, LI Dan-ying, <i>et al.</i> (4742)
Iron-based Bimetallic Catalysts for Persulfate Activation to Remove Antibiotics in Water: A Review	WEI Jian, ZHANG Xin-yi, GUO Zhuang, <i>et al.</i> (4751)
Analysis of the Environmental Risk of Livestock Manure Pollution and Resource Treatment Technology	AN Jing, DING Zi-ming, GAO Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4764)