

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.6
第41卷 第6期

目次

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

中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价

陈文轩¹, 李茜², 王珍^{2*}, 孙兆军^{1,2}

(1. 宁夏大学资源环境学院, 银川 750021; 2. 宁夏大学环境工程研究院, 银川 750021)

摘要: 土壤是农业生产过程中不可或缺的自然资源, 掌握农田土壤重金属的空间分布特征及污染水平, 对于农田生态系统安全及人类健康具有重要意义. 基于 2002 年来中国各行政区农田土壤重金属实测数据, 探讨了农田土壤 Cr、Cd、Pb、Zn、Cu、As 和 Hg 等 7 种重金属的空间分布特征, 并采用地累积指数法对污染状况展开评价. 结果表明中国农田土壤重金属的空间分布特征差异较为明显, 南方农田土壤重金属含量明显高于北方; 平均值统计结果表明, 湖南、云南、贵州、四川、福建、广西以及上海的农田土壤重金属含量较高; 污染评价结果显示 7 种重金属的污染程度大小依次为 Cd > Hg > Pb > Cu > Zn > As > Cr, 其中福建、广东、海南、浙江、湖南、陕西、甘肃、河南、重庆、山西、天津、内蒙古和安徽的富集程度较高.

关键词: 农田土壤; 重金属; 分布特征; 污染评价; 地累积指数

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)06-2822-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201910075

Spatial Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Arable Land Soil of China

CHEN Wen-xuan¹, LI Qian², WANG Zhen^{2*}, SUN Zhao-jun^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Institute of Environmental Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Soil is an important component of the terrestrial ecosystem and an indispensable natural resource in agricultural production. Understanding the spatial distribution characteristics and pollution levels of heavy metals in arable land soil is important to safeguard the agriculture ecosystem and human health. Based on the collected data of heavy metal concentrations in arable land soil in various administrative regions of China since 2002, first, we selected and removed the abnormal values, then obtained the spatial distribution of the provinces by the Kriging method, and discussed the spatial distribution characteristics of seven heavy metals (Cr, Cd, Pb, Zn, Cu, As, and Hg) in arable land soil. Finally, we adopted the geo-accumulation index to evaluate the pollution status of arable land soil. The results showed that the spatial distribution of heavy metals Cr, Pb, Cu, Zn, and As in arable land soil of China was obvious, while the spatial distribution of soil Cd and Hg was very similar. Furthermore, the concentration of arable land soil in south China was obviously higher than that in the north. The mean value of the results showed that heavy metals are enriched to different degrees in arable land soil of China, and the average soil heavy metal concentrations of arable land are higher in Hunan, Yunnan, Guizhou, Sichuan, Fujian, Guangxi, and Shanghai. The results of geo-accumulation index pollution evaluations showed that the pollution degree of the seven heavy metals was in the order Cd > Hg > Pb > Cu > Zn > As > Cr, among which the soil heavy metals in arable land soil had a higher enrichment degree in Fujian, Guangdong, Hainan, Zhejiang, Hunan, Shaanxi, Gansu, Henan, Chongqing, Shanxi, Tianjin, Inner Mongolia, and Anhui. In general, the geo-accumulation indexes of Cd and Hg in each administrative region are higher, whereas the average land accumulation indexes also indicate that Cd and Hg in arable land shows greater pollution specially. Results from this study provide valuable scientific basis for formulating effective arable land pollution control strategies in the future.

Key words: arable land soil; heavy metals; distribution characteristics; pollution evaluation; geo-accumulation index

土壤是人类赖以生存和发展的重要资源之一, 也是陆地生态系统重要的组成部分. 近年来, 随着我国城市化进程加快, 矿产资源开发、金属加工冶炼、化工生产、污水灌溉以及不合理的化肥农药施用等因素导致重金属在农田土壤中不断富集^[1-4]. 重金属作为土壤环境中一种具有潜在危害的污染物, 通常不随水淋滤, 也不能被微生物所降解, 具有易积累、难挥发、毒性大和隐蔽性强等特点^[5-7]. 当土壤遭受重金属污染时, 不仅会影响土壤生物的生长发育, 更重要的是重金属元素还会通过食物链以及皮肤接触等方式在人体中积累, 严重威胁人体健康^[8-10]. 文献^[11]显示, 全国土壤污染物总超标率为 16.1%, 其中耕地土壤点位超标率为 19.4%, 其主

要污染物包括镉、铬、铅、铜、汞、砷以及部分有机污染物, 由此可见我国农田土壤污染形势较为严峻.

鉴于目前农田土壤环境质量堪忧以及重金属污染的长期危害性, 近年来农田土壤重金属污染成为国内外学者研究的热点. 当前国内研究多集中在典型耕地^[12-14]、蔬菜地^[15,16]、果园^[17]和工矿区^[18,19]等小尺度区域土壤重金属的富集特征及空间分布, 而对中国农田土壤重金属的污染现状进行系统地评

收稿日期: 2019-10-14; 修订日期: 2020-01-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(31660133); 宁夏重点研发项目(引才专项)(2018BEB04010); 宁夏重点研发计划重点项目(2018BFG02016, 2019BEF02002)

作者简介: 陈文轩(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为自然资源开发与可持续利用, E-mail: 729203295@qq.com

* 通信作者, E-mail: wangzhen001.cool@163.com

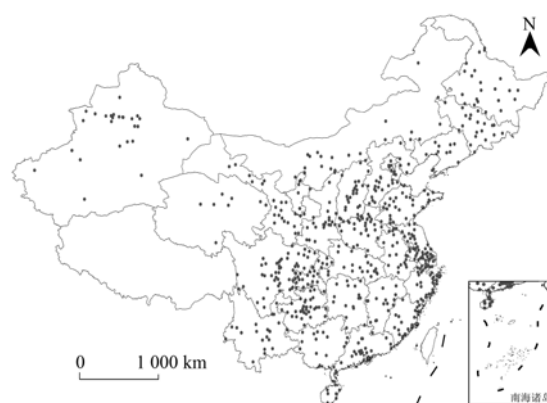
价分析相对较少,如 Wei 等^[20] 汇总了我国部分城市及农田土壤重金属数据,并对这些数据展开分析评价;宋伟等^[21] 根据 138 个典型耕地土壤重金属数据库计算了我国耕地土壤重金属的污染概况,结果显示全国耕地土壤重金属的污染率为 16.67%;张小敏等^[22] 采用平均值法对我国农田土壤铅、镉、铜、锌和铬这 5 种重金属的富集情况及空间分布开展研究,发现我国土壤重金属的空间分布具有明显区域特征;陈奕云等^[23] 基于文献计量法对全国 34 个省级行政区农田土壤重金属的污染状况进行分析评价,结果显示全国 Pb 和 Cd 的污染较为严重. 总体上全国农田土壤重金属的空间分布研究存在以个别样点值代替区域平均值、样点偏少或未展开有效评价等问题,难以全面反映中国农田土壤重金属的实际分布特征水平. 因此,本文基于 2002 年以来可收集到的中国各行政区农田土壤重金属实测含量数据,采用地理信息系统(GIS)及地统计法探讨我国各行政区农田土壤不同重金属:Cr(铬)、Cd(镉)、Pb(铅)、Cu(铜)、Zn(锌)、As(砷)和 Hg(汞)的污染情况及空间分布特征,同时采用地累积指数法对其污染状况展开评价. 通过准确掌握中国各行政区农田土壤重金属的实际污染状况,以期建立农田土壤空间数据库、全面了解中国农田土壤重金属污染现状、分布特征以及对未来农田污染制定有效的防治策略提供科学的依据.

1 材料与方法

1.1 数据来源与预处理

中国农田土壤重金属含量统计数据均通过“某市(县)重金属”关键词搜索,同一地区以最新年份文献为准. 排除城镇工业用地、大气降尘以及海洋沉积物等非农田土壤重金属研究,共选出 2002 年以来公开发表的文献 603 篇,包括 614 个典型农田样点重金属实测数据(由于文献资料有限,统计地区不包含西藏自治区、中国香港、澳门特别行政区、中国台湾以及南海诸岛),具体的样本点分布见图 1. 其中样本点坐标为文献中直接标注的采样点或通过反转研究区地理坐标位置获取,重金属数据通过提取文献中对应的农田土壤重金属含量或根据污染指数反推得到. 总体上各文献多采用随机采样法,选择在土壤表层(0~10 cm 或 0~20 cm)的深度范围内取样,所有样品经室内风干、压碎、过筛和消解后,用电感耦合等离子质谱法以及原子荧光分光光度法等方法测定各样本重金属含量,并且保证样品分析测试的平均偏差小于 10%.

由于部分研究中采样点受矿区和工业区等因素



西藏自治区、中国香港及澳门特别行政区、中国台湾和南海诸岛的数据暂缺,下同

图 1 农田土壤重金属样本分布示意

Fig. 1 Spatial distribution of arable land soil heavy metals

影响较重,可能导致区域某种重金属含量值存在异常,而异常值对变异函数的模型拟合具有一定的影响. 因此为保证分析结果的可靠性,在展开各项分析前需对重金属样本数据进行检验处理以剔除异常样本. 本文采用 3 倍标准差法处理各文献数据,以 $X \pm 3S$ 为标准, X 表示某重金属所有样点的平均值, S 为标准差,超出该范围的数据则需剔除^[24]. 结果显示,土壤 Cr、Cd、Pb、Zn、Cu、As 和 Hg 的异常值数分别为 10、14、7、7、9、5 和 9 个.

1.2 研究方法

1.2.1 普通克里金插值

由于土壤重金属的富集程度在区域内存在空间分异,且部分地区无统计资料,简单利用样本数据展开分析评价难以准确反映土壤实际状况. 克里金法(Kriging)实质上是利用区域化变量的原始数据以及变差函数的结构特点去估计无数据区域的变量值,该方法能最大限度地利用样点信息来确定未知样点的估计值,这不仅考虑到无数据点与已知样点的空间位置,而且还能利用各邻近样点间的位置关系做出线性无偏的最小方差估计,使评价结果更精确和更符合实际^[25, 26]. 结合前人在土壤重金属空间分布特征方面的研究^[27~29],本文选取克里金算法中的普通克里金法(Ordinary Kriging)确定中国农田土壤重金属的空间分布特征.

1.2.2 土壤污染评价

土壤污染评价方法采用国内外普遍使用地累积指数法(I_{geo}),该法是由 Muller 在 20 世纪 60 年代提出的一种能够定量评价土壤重金属污染水平的方法,地累积指数不仅能充分反映土壤各元素的自然分布特征和累积程度,而且还能判断土壤环境受自然背景和人类活动的影响^[30~32],其计算公式为:

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

式中, I_{geo} 指土壤重金属 i 的地累积指数; C_i 指土壤重金属 i 的实际含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); S_i 指土壤重金属 i 的评价标准值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 评价标准采用各省、直辖市和自治区的土壤背景值; 1.5 是考虑各行政区土壤

岩石差异引起背景值变动的修正系数. 地累积指数分级标准见表 1, 土壤重金属 i 的 I_{geo} 值越大, 污染越严重; 当 I_{geo} 值大于 0 时, 表明土壤重金属主要来源于人类活动而非成土母质等自然因素.

表 1 土壤地累积指数分级标准

Table 1 Classification standard of soil geo-accumulation index

污染等级	无污染	轻度污染	中度污染	重度污染	严重污染
I_{geo}	≤ 0	0 ~ 1	1 ~ 2	2 ~ 3	≥ 3

1.3 数据分析

利用 SPSS 19.0 软件对土壤重金属样本数据进行描述性分析和正态分布检验, 地统计分析在 GS + 9.0 软件中完成, 克里金插值及空间分布图的制作在 ArcGIS 10.2 软件中完成.

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量的描述性统计

剔除异常值后的中国农田土壤重金属描述性统计结果见表 2, 其中土壤环境质量标准采用《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)中农用地土壤污染风险筛选值的较严格项. 结果显示, 农田土壤 Cr、Cd、Pb、Cu、Zn、As 和 Hg 的样本平均值分别为 59.97、0.240、32.73、

28.91、86.52、10.40 和 0.118 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中全国土壤 Cr 和 As 的平均含量均未超出中国土壤背景值, 而 Cd、Pb、Cu、Zn 以及 Hg 的平均含量分别超出中国土壤背景值 2.47、1.26、1.11、1.17 和 1.82 倍, 此外各元素的平均含量均未超过土壤环境质量标准. 变异系数可以反映区域重金属元素的分布差异, 农田土壤 7 种重金属元素的变异系数大小顺序为: $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cr}$, 均属中等程度变异 ($0.10 < \text{CV} < 1.00$)^[33], 其中 Cd 和 Hg 的变异系数均超过 0.75, 表明 Cd 和 Hg 受外界干扰比较大, 含量分布不均匀, 变异性较强; 其余 5 种重金属元素的变异系数较低, 说明它们受外源影响相对较小. 从偏度和峰度值来看, 土壤 Cd 和 Hg 的偏度和峰度值较高, 表明土壤 Cd 和 Hg 呈现高累积状态.

表 2 农田土壤重金属描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of arable land soil heavy metals

元素	样本数	平均值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	标准差	变异系数	偏度	峰度	中国土壤背景值 ^[34] / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	土壤环境质量标准 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
Cr	532	59.97	21.86	0.36	0.21	0.01	61.00	150.0
Cd	535	0.240	0.19	0.78	1.76	3.36	0.097	0.3
Pb	593	32.73	18.57	0.57	1.38	2.05	26.00	70.0
Cu	493	28.91	11.77	0.41	1.01	0.90	22.60	50.0
Zn	389	86.52	32.21	0.37	1.08	1.34	74.20	200.0
As	481	10.40	5.77	0.56	0.42	0.26	11.20	25.0
Hg	449	0.118	0.10	0.83	1.87	5.02	0.065	0.5

2.2 正态分布检验及半方差函数模型

普通克里金插值是区域化变量的线性估计, 它假设数据呈正态分布, 认为区域化的变量是未知的, 因此在插值前需对样本数据进行正态分布检验, 而对于非正态分布序列则需通过转换才能得到相应序列. 正态分布检验的结果表明(表 3), 除 Cr 元素外, 其余 6 种重金属含量均偏离正态分布, 因此需采用对数方法进行标准化处理. 经检验, 转换后的数据均符合正态分布, 在此基础上采用半方差函数模型计算中国农田土壤 7 种重金属元素的半方差函数值, 在各向同性的情况下根据残差平方和(RRS)最小以及决定系数(R^2)最大的原则获取最佳空间变异函数理论模型^[34, 35]. 结果显示, 只有 Cd 元素符合球形模型(Spherical), 其余 6 种重金属元素均为指数模

型(Exponential). 从块基比看, 7 种重金属元素的 $C/(C + C_0)$ 值均大于 0.5, 较好反映了各自空间变异的结构特征, 为空间拟合的最佳模型.

2.3 中国农田土壤重金属空间分布特征

利用 ArcGIS 10.2 软件分别对经过预处理的全国各省、直辖市和自治区的土壤重金属含量数据进行普通克里金插值, 得到中国农田土壤重金属含量的空间插值图(图 2). 结果显示, 云南、四川、上海以及福建和江西交界有大范围的 Cr 高值区, 甘肃、陕西、山西和湖北等地出现次高值区, 而青海和海南两省土壤 Cr 含量较低; Cd 在甘肃中部、新疆和江苏北部、云南、广西与贵州三省交界、河南与湖北交界、安徽与江西交界以及湖南出现高值, 表明这些区域可能存在明显的 Cd 污染源, 全国其他地区土壤 Cd 含

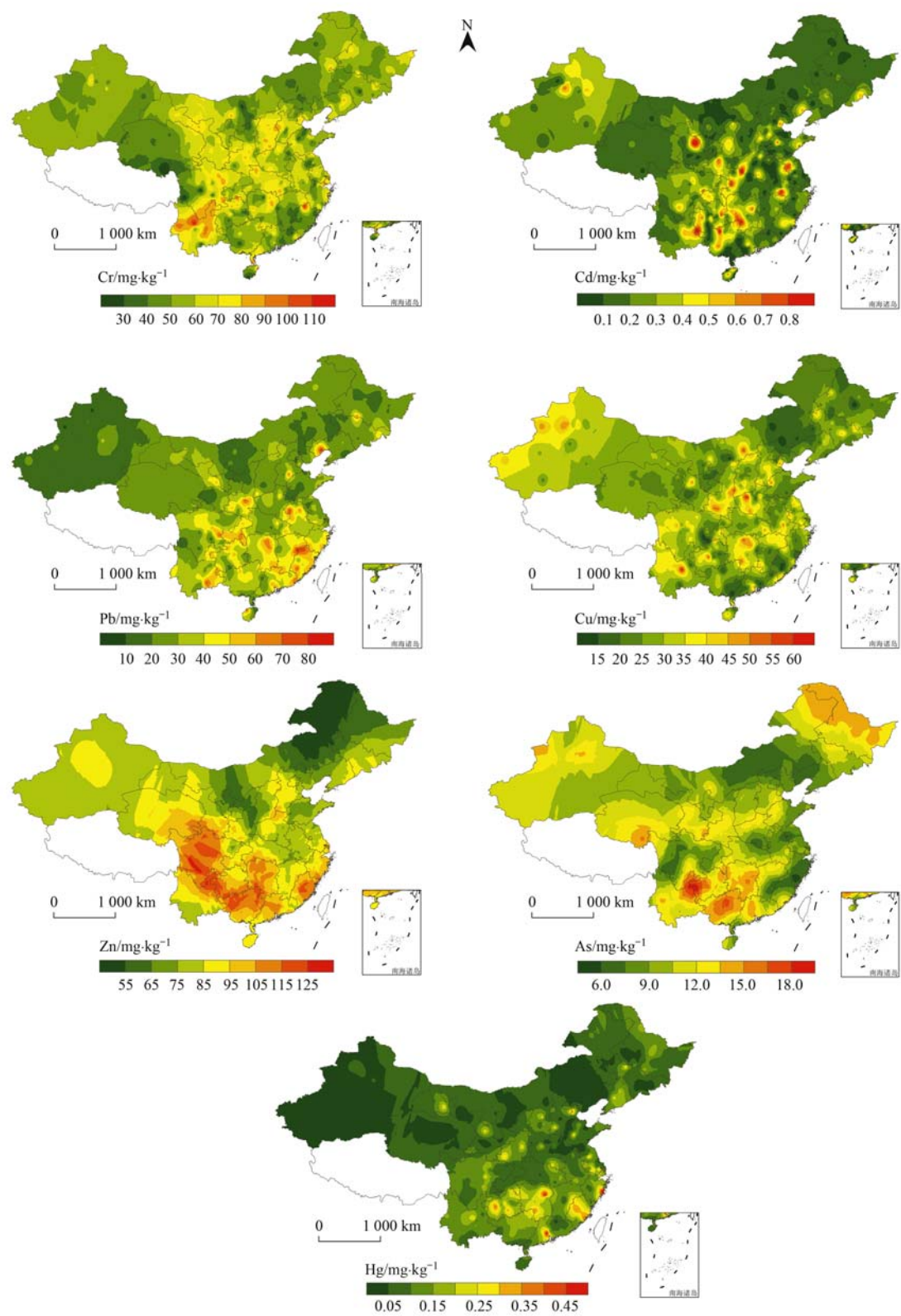


图2 中国农田土壤重金属含量插值

Fig. 2 Spatial distribution of arable land soil heavy metal concentrations in China

量较低且分布较为平均;总体上南方土壤 Pb 含量明显高于北方,其中以新疆农田土壤的 Pb 含量最低,而辽宁西部、陕西中部、重庆、云南、湖南、安徽以及福建等地则有较大范围的高值区;土壤 Cu 含量在空间上分布较为均匀,仅在新疆、内蒙古中部、陕西、

河南、天津、云南以及湖南等地含量较高;土壤 Zn 在全国多地出现连片高值区,包括四川、广西、贵州、湖南、福建、广东、浙江以及云南北部,东北三省、内蒙古、宁夏和陕西北部地区土壤 Zn 含量较低;As 的空间分布较为复杂,云南、四川和贵州三省交界土壤

表 3 最优半方差函数理论模型及相关参数

Table 3 Optimum theoretical semivariogram model and corresponding parameters

元素	分布 ¹⁾	块金值 (C_0)	偏基台值 (C)	块基比 [$C/(C+C_0)$]	决定系数 (R^2)	残差 (RSS)	有效变程 (A)	模型 ²⁾
Cr	N	71.000	418.200	0.855	0.215	1.893×10^4	2.34	E
Cd	LN	0.001	0.033	0.956	0.239	1.114×10^{-4}	2.02	S
Pb	LN	74.600	274.300	0.786	0.734	2.142×10^3	3.39	E
Cu	LN	14.000	123.200	0.898	0.517	3.730×10^2	2.13	E
Zn	LN	764.000	765.000	0.500	0.938	2.176×10^4	72.06	E
As	LN	12.500	25.000	0.500	0.852	0.230×10^2	22.02	E
Hg	LN	0.001	0.009	0.897	0.370	7.996×10^{-6}	3.06	E

1) N:正态分布, LN:对数正态分布; 2) E:指数模型, S:球形模型

As 含量最高,湖南、广西、广东中部、青海南部、新疆和黑龙江北部以及内蒙古东部存在次高值区,四川中部以及华北和华东地区的土壤 As 含量较低;Hg 的高值区主要分布在浙江东部、广东中部以及福建、湖南和贵州,其他省份土壤 Hg 含量相对较低.从空间分布特征情况来看,土壤 Cr、Pb、Cu、Zn 和 As 的空间分布特征明显,而土壤 Cd 和 Hg 在空间分布上

十分相似.

2.4 中国农田土壤重金属平均含量分布

在克里金插值基础上利用 ArcGIS 软件的区域分析工具对中国农田土壤重金属含量的插值结果进行分省统计,得到各省、直辖市和自治区的农田土壤重金属含量平均值(表 4 和图 3).其中土壤环境质量标准采用《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管

表 4 中国各行政区农田土壤重金属含量平均值¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 4 Average arable land soil heavy metal concentrations in China/mg·kg⁻¹

行政区	Cr	Cd	Pb	Cu	Zn	As	Hg
浙江省	58.78	0.204	40.84	26.90	95.08	7.27	0.166
云南省	74.43	0.249	35.74	32.56	93.49	12.35	0.124
新疆维吾尔自治区	51.26	0.274	18.02	32.79	81.55	11.03	0.039
四川省	60.87	0.268	32.28	30.89	107.58	9.65	0.108
陕西省	61.16	0.314	32.63	34.31	75.99	11.26	0.118
山西省	69.98	0.180	27.22	31.38	80.15	10.08	0.101
山东省	55.29	0.198	24.13	25.60	75.51	9.95	0.076
青海省	46.63	0.171	24.64	26.16	89.62	11.53	0.055
宁夏回族自治区	56.98	0.211	23.26	22.70	66.95	9.80	0.067
内蒙古自治区	51.85	0.142	23.24	23.87	63.03	9.24	0.061
辽宁省	56.32	0.218	29.27	24.35	76.86	7.81	0.102
江西省	50.40	0.220	44.32	29.50	87.90	10.36	0.140
吉林省	52.47	0.189	25.91	27.33	77.49	10.47	0.074
湖南省	59.97	0.381	42.78	35.50	104.25	13.39	0.201
湖北省	67.11	0.259	31.75	29.35	86.46	10.33	0.097
黑龙江省	54.95	0.138	23.71	22.94	64.66	13.19	0.095
河南省	60.57	0.252	30.03	32.90	84.72	10.10	0.081
北京市	50.59	0.153	23.57	23.90	83.77	8.60	0.073
天津市	69.52	0.351	25.99	32.86	82.03	9.79	0.159
海南省	46.44	0.288	33.62	29.64	89.34	9.87	0.080
贵州省	60.17	0.365	38.49	29.35	103.86	13.88	0.190
广西壮族自治区	54.50	0.317	34.92	25.22	107.98	14.17	0.144
甘肃省	63.01	0.213	27.52	26.83	86.43	10.46	0.084
福建省	50.00	0.240	52.48	24.18	105.45	8.68	0.225
安徽省	59.04	0.241	39.57	28.75	80.15	9.17	0.100
上海市	74.90	0.138	26.18	29.58	95.35	8.87	0.145
重庆市	58.57	0.400	50.46	26.34	93.72	10.22	0.099
江苏省	57.88	0.244	28.73	30.55	83.90	8.37	0.120
广东省	53.67	0.195	39.47	25.15	97.43	11.74	0.144
河北省	56.72	0.181	26.42	26.39	81.30	9.00	0.068
全国平均值	58.13	0.240	31.91	28.26	86.73	10.35	0.111
土壤环境质量标准	150	0.3	70	50	200	25	0.5

1) 西藏自治区、中国香港及澳门特别行政区、中国台湾和南海诸岛的数据暂缺,下同

控标准(试行)》(GB 15618-2018)中农用地土壤污染风险筛选值的较严格项。

根据中国农田土壤重金属平均含量统计,7种重金属含量最高的行政区分别为:Cr 74.90 mg·kg⁻¹(上海市)、Cd 0.400 mg·kg⁻¹(重庆市)、Pb 52.48 mg·kg⁻¹(福建省)、Cu 35.50 mg·kg⁻¹(湖南省)、Zn 107.98 mg·kg⁻¹(广西壮族自治区)、As 14.17 mg·kg⁻¹(广西壮族自治区)以及 Hg 0.225 mg·kg⁻¹(福建省)。其中湖南、云南、贵州、四川、福建、广西以及上海市农田土壤重金属平均含量总体较高,而内蒙古、黑龙江、青海、新疆、辽宁、吉林以及宁夏回族自治区的平均含量较低。

以各省、直辖市和自治区的土壤背景值为标准(表5),计算各行政区农田土壤重金属含量超出当地背景值的倍率(图3)。结果显示,各行政区农田土壤Cr、Cd、Pb、Cu、Zn、As和Hg的平均含量超出当地土壤背景值的比例(平均倍数)分别为36.67%(0.93倍)、96.67%(2.33倍)、80.00%(1.28倍)、83.33%(1.23倍)、90.00%(1.20倍)、

40.00%(1.03倍)以及93.33%(2.24倍);农田土壤平均含量超出背景值最多的行政区分别为:Cr 1.25倍(内蒙古自治区)、Cd 4.44倍(福建省)、Pb 2.15倍(重庆市)、Cu 1.69倍(内蒙古自治区)、Zn 2.06倍(广东省)、As 2.29倍(海南省)以及Hg 4.19倍(甘肃省)。其中土壤Cr和As在全国各行政区的超标率仅为36.67%和40.00%,平均超标倍数也均低于其他几种重金属;各行政区Cd和Hg远远高于当地农田土壤背景值,如福建和海南省的土壤Cd以及甘肃和山东省的土壤Hg均超出当地土壤背景值的4倍以上,仅贵州(0.55倍)的Cd以及广西(0.95倍)和江苏(0.42倍)的Hg元素未超出背景值,表明全国范围内农田土壤Cd和Hg存在明显富集;土壤Pb除云南、新疆、山东、吉林、黑龙江和北京,Cu除云南、四川、湖北、贵州和广西,Zn除吉林、黑龙江和北京外,全国其他行政区的农田土壤重金属含量也均高于背景值,但相对于Cd和Hg,各行政区超出背景值的倍数相对较低。

表5 中国各行政区农田土壤重金属含量背景值/mg·kg⁻¹
Table 5 Background values of arable land soil heavy metal concentrations in China/mg·kg⁻¹

行政区	Cr	Cd	Pb	Cu	Zn	As	Hg	文献
浙江省	52.90	0.070	23.70	17.60	70.60	9.20	0.086	[36]
云南省	65.20	0.218	40.60	46.30	89.70	18.40	0.058	[36]
新疆维吾尔自治区	49.30	0.120	19.40	26.70	68.80	11.20	0.017	[36]
四川省	79.00	0.079	30.90	31.10	86.50	10.40	0.061	[36]
陕西省	62.50	0.094	21.40	21.40	69.40	11.10	0.030	[36]
山西省	61.80	0.128	15.80	26.90	75.50	9.80	0.027	[36]
山东省	66.00	0.084	25.80	24.00	63.50	9.30	0.019	[36]
青海省	70.10	0.137	20.90	22.20	80.30	14.00	0.020	[36]
宁夏回族自治区	60.00	0.112	20.90	22.10	58.80	11.90	0.021	[36]
内蒙古自治区	41.40	0.053	17.20	14.10	59.10	7.50	0.040	[36]
辽宁省	57.90	0.108	21.40	19.80	63.50	8.80	0.037	[36]
江西省	45.90	0.108	32.30	20.30	69.40	14.90	0.084	[36]
吉林省	46.70	0.099	28.80	17.10	80.40	8.00	0.037	[36]
湖南省	71.40	0.126	29.70	27.30	94.40	15.70	0.116	[36]
湖北省	86.00	0.172	26.70	30.70	83.60	12.30	0.080	[36]
黑龙江省	58.60	0.086	24.20	20.00	70.70	7.30	0.037	[36]
河南省	63.80	0.074	19.60	19.70	60.10	11.40	0.034	[36]
北京市	68.10	0.074	25.40	23.60	102.60	9.70	0.069	[36]
天津市	84.20	0.090	21.00	28.80	79.30	9.60	0.084	[36]
海南省	105.74	0.069	26.07	20.97	56.52	4.31	0.049	[37]
贵州省	95.90	0.659	35.20	32.00	99.50	20.00	0.110	[36]
广西壮族自治区	82.10	0.267	24.00	27.80	75.60	20.50	0.152	[36]
甘肃省	70.20	0.116	18.80	24.10	68.50	12.60	0.020	[36]
福建省	41.30	0.054	34.90	21.60	82.70	5.78	0.081	[38]
安徽省	66.50	0.097	26.60	20.40	62.00	9.99	0.033	[36]
上海市	70.20	0.138	25.00	27.20	81.30	9.19	0.095	[36]
重庆市	49.08	0.140	23.52	22.87	78.22	6.99	0.040	[39]
江苏省	77.80	0.126	26.20	22.30	62.60	10.99	0.289	[36]
广东省	50.50	0.056	36.00	17.00	47.30	8.99	0.078	[36]
河北省	68.30	0.094	21.50	21.80	78.40	13.60	0.036	[36]

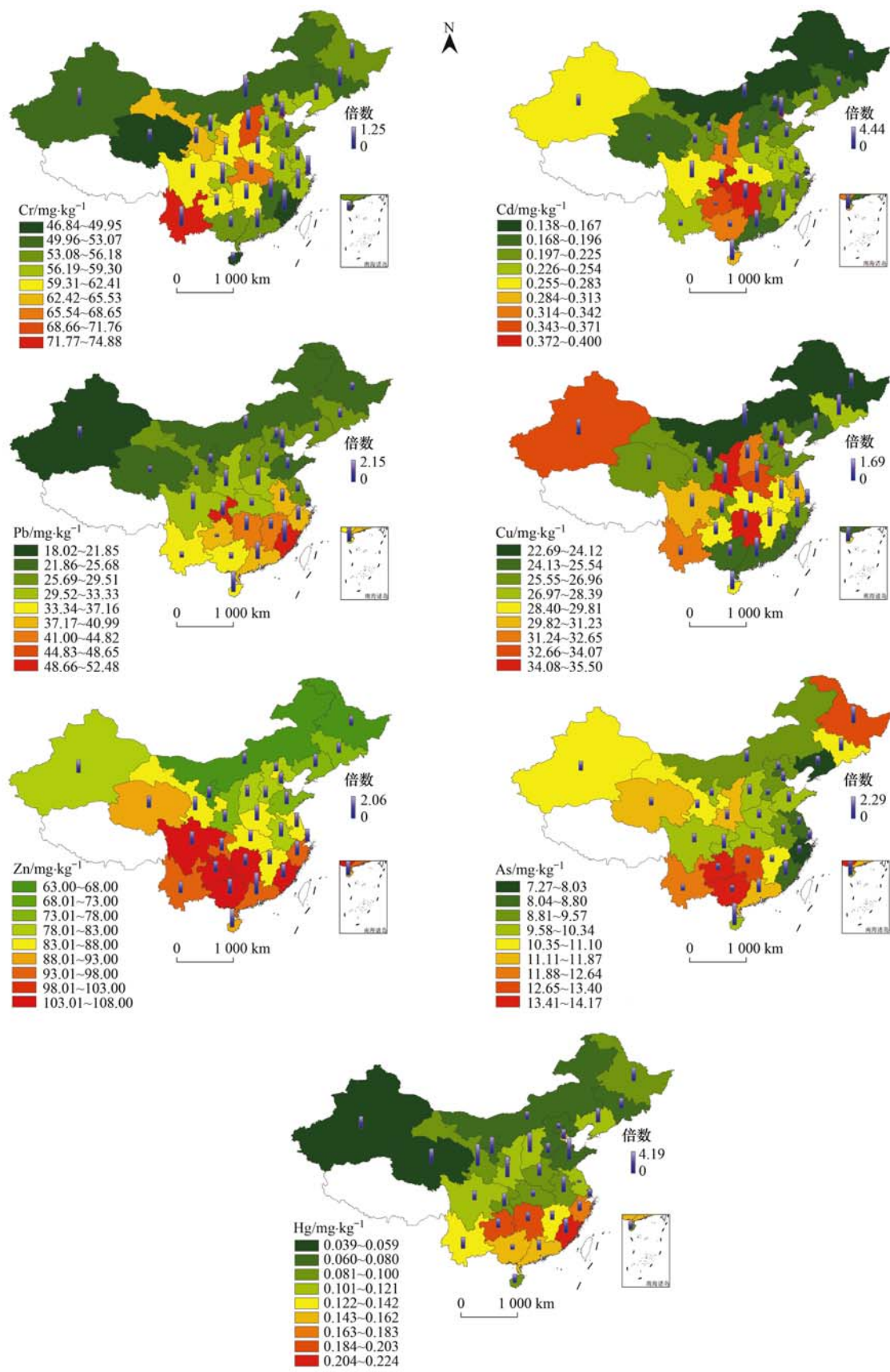


图3 中国农田土壤重金属平均含量及超出背景值的倍率

Fig. 3 Average arable land soil heavy metal concentrations and the multiplier of the value beyond the background in China

然而,由于图3是在图2的基础上计算出的区域平均值,因此某个行政区可能会出现局部具有

全国最高(最低)值,但该地区整体平均值并非为全国最高(最低)值.此外,各行政区农田土壤重金属

的平均含量与土壤环境质量标准相比,除 Cd 外其余 6 种重金属的平均含量均在标准限定范围内,表明当前中国农田土壤重金属的含量基本处于安全范围,各大种植区均可放心种植农作物,但仍需注意土壤 Cd 的潜在风险.

2.5 农田土壤重金属污染评价

以各省、直辖市和自治区的土壤背景值为标准,计算各行政区农田土壤 7 种重金属的地质累积指数(表 6).从平均地质累积指数来看(表 7),全国农田土壤地累积指数大小依次为: Cd > Hg > Pb > Cu > Zn > As > Cr. 其中各省、直辖市和自治区农田土壤 Cr 的 I_{geo} 值均小于 0,并且各行政区土壤 Pb、Cu、Zn 和 As 的 I_{geo} 值也多数小于 0,表明这 5 种重金属主要来源于地质因素;而全国农田土壤 Cd 和 Hg 的平均 I_{geo} 值分别为 0.50 和 0.44,表明这 2 种元素主要来源于人类活动.

地累积指数还考虑到各种重金属的累积程度^[40],综合分析表 6 和表 7 可知,中国农田土壤重金属的污染比重为 30.00%,以福建、广东、海南、

浙江、陕西、河南、湖南省和重庆市最为严重.其中,各行政区土壤 Cr 的污染等级均属无污染;除部分行政区土壤 Pb(浙江、陕西、山西、河南省和重庆市)、Cu(浙江、陕西、河南、吉林省和内蒙古自治区)、Zn(海南和广东省)以及 As(黑龙江和海南省)的地累积指数分布在 0 ~ 1 之间外,其他行政区的 I_{geo} 值均小于 0,属无污染;各省、直辖市和自治区的土壤 Cd 和 Hg 的地累积污染等级较高,分别有 80.00% 和 86.67% 的区域属轻度污染及以上,仅云南、山西、青海、贵州、广西和上海的土壤 Cd 以及湖北、北京、广西和江苏的土壤 Hg 污染等级属无污染,而四川、陕西、湖南、河南、天津、海南和福建 Cd 以及陕西、山西、宁夏、甘肃 Hg 属中度污染,表明这些区域农田土壤 Cd 或 Hg 污染较重.总体来看,各省、直辖市和自治区农田土壤 Cd 与 Hg 的 I_{geo} 值较高,而平均地累积指数也表明农田土壤 Cd 和 Hg 的污染较重,这与 2.4 节中各行政区农田土壤重金属的平均含量分布以及 Wei 等^[20]的研究结果一致.

表 6 中国各行政区农田土壤地累积指数
Table 6 Geo-accumulation index for arable land soil in China

行政区	Cr	Cd	Pb	Cu	Zn	As	Hg
浙江省	-0.43	0.96	1.17	0.03	-0.16	-0.93	0.36
云南省	-0.39	-0.39	-0.77	-1.09	-0.53	-1.16	0.51
新疆维吾尔自治区	-0.53	0.61	-0.69	-0.29	-0.34	-0.61	0.60
四川省	-0.96	1.17	-0.52	-0.59	-0.27	-0.69	0.24
陕西省	-0.62	1.15	0.02	0.10	-0.45	-0.56	1.39
山西省	-0.41	-0.10	0.20	-0.36	-0.50	-0.54	1.32
山东省	-0.84	0.65	-0.68	-0.49	-0.34	-0.49	1.42
青海省	-1.17	-0.27	-0.35	-0.35	-0.43	-0.86	0.88
宁夏回族自治区	-0.66	0.33	-0.43	-0.55	-0.40	-0.87	1.10
内蒙古自治区	-0.26	0.83	-0.15	0.17	-0.49	-0.28	0.02
辽宁省	-0.62	0.43	-0.13	-0.29	-0.31	-0.76	0.88
江西省	-0.45	0.44	-0.13	-0.05	-0.24	-1.11	0.15
吉林省	-0.42	0.34	-0.74	0.09	-0.64	-0.20	0.42
湖南省	-0.84	1.01	-0.06	-0.21	-0.44	-0.81	0.21
湖北省	-0.94	0.01	-0.34	-0.65	-0.54	-0.84	-0.30
黑龙江省	-0.68	0.10	-0.61	-0.39	-0.71	0.27	0.78
河南省	-0.66	1.18	0.03	0.15	-0.09	-0.76	0.68
北京市	-1.01	0.46	-0.69	-0.57	-0.88	-0.76	-0.50
天津市	-0.86	1.38	-0.28	-0.39	-0.54	-0.56	0.34
海南省	-1.77	1.47	-0.22	-0.09	0.08	0.61	0.12
贵州省	-1.26	-1.44	-0.46	-0.71	-0.52	-1.11	0.20
广西壮族自治区	-1.18	-0.34	-0.04	-0.73	-0.07	-1.12	-0.67
甘肃省	-0.74	0.29	-0.04	-0.43	-0.25	-0.85	1.48
福建省	-0.31	1.57	0.00	-0.42	-0.23	0.00	0.89
安徽省	-0.76	0.73	-0.01	-0.09	-0.21	-0.56	1.01
上海市	-0.49	-0.58	-0.52	-0.46	-0.35	-0.62	0.02
重庆市	-0.33	0.93	0.52	-0.38	-0.32	-0.04	0.73
江苏省	-1.01	0.37	-0.45	-0.13	-0.16	-0.84	-1.85
广东省	-0.50	1.22	-0.45	-0.02	0.46	-0.18	0.30
河北省	-0.85	0.36	-0.29	-0.31	-0.53	-1.18	0.33
全国平均值	-0.73	0.50	-0.27	-0.32	-0.35	-0.61	0.44

表 7 中国农田土壤重金属污染等级(I_{geo})

Table 7 Levels of arable land soil heavy metal concentrations in China (I_{geo})

项目	Cr	Cd	Pb	Cu	Zn	As	Hg
平均地累积指数	-0.73	0.50	-0.27	-0.32	-0.32	-0.61	0.44
最小值	-1.77	-1.44	-0.77	-1.09	-0.88	-1.18	-1.85
最大值	-0.26	1.57	0.52	0.17	0.46	0.61	1.48
无污染/%	100.00	20.00	86.67	83.33	93.33	93.33	13.33
轻度污染/%	0.00	53.33	13.33	16.67	6.67	6.67	66.67
中度污染/%	0.00	26.67	0.00	0.00	0.00	0.00	20.00
严重污染及以上/%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

3 讨论

通常土壤重金属主要来自成土母岩,自然成土过程中各种微量重金属在次生层中的再分配造成了土壤重金属富集^[41],而各行政区成土母质的差异正是造成中国农田土壤重金属空间分布特征存在差异的部分原因.综合分析表 4、表 5 和图 3 发现,各行政区的背景值差异导致农田土壤重金属平均含量的空间分布特征与实际超出背景值倍数的分布特征存在显著差异,例如云南、贵州以及广西农田土壤重金属含量总体偏高,尤其以 Cr、Cd、Zn 和 As 最为明显,而这些区域土壤背景值也同样较高,因此这三省农田土壤重金属的污染等级并不高.实际上中国西南地区地质构造复杂,火成岩或石灰岩母质中的重金属含量较高,故而在自然风化过程中土壤 Cr、Cd、Zn 和 As 等重金属的平均含量要显著高于风沙母质地区^[42, 43].另外,由于区域经济的发展也存在一定差异,因此土壤重金属在空间上的后期累积程度存在略微差异.

随着城市及农村经济的快速发展,土壤成为承接各种污染物的首要目标,以人为因素为主导的工业活动、污水灌溉以及化肥农药施用等方式产生的重金属直接或间接通过大气沉降、降雨、地表径流以及地下径流等方式进入土壤生态系统,给土壤环境造成了一定的破坏^[44].首先,化工、机械制造、电镀及火力发电等工业活动会释放大量的 Cd、Cu、Zn、As 和 Hg 等重金属元素,同时采矿、金属冶炼加工会引起 Cd、Pb 和 Hg 等重金属污染^[45].前已叙述,如福建、广东、海南、湖南、陕西和甘肃等地农田土壤重金属含量与当地背景值相比差值较高,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.此外另有研究显示中国农田土壤 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的年大气输入量分别为 0.4、10.67、20 和 64.08 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ ^[46],汽车尾气排放、垃圾焚烧以及能源、冶金和建筑材料粉尘等因素产生的重金属微粒通过特定途径沉降到农田土壤,进一步加剧土壤重金属

污染.

其次,我国普遍存在利用工业废水及生活污水灌溉农田,这些污水通常含有微量 Cr、Zn、Cu 和 Cd 等重金属元素,长期灌溉必然会造成土壤重金属富集^[47].相关资料显示^[48],中国污水灌溉面积占全国农田总面积的 7.3%,这些污灌区主要分布于水资源严重短缺的海、辽、黄、淮四大流域,并且面积还在不断增加,如何趋利避害及实现水资源的最大化利用将成为未来防治农田土壤重金属污染的重大课题.

第三,化肥农药的不合理施用也是造成农田土壤污染的途径之一,化肥农药中通常含有微量 Cd、Zn、Cu、As 和 Hg 等重金属元素,即便是符合国家标准化肥农药,在长期施用的过程中农田土壤也会不断富集重金属.例如,作为一个工业欠发达地区,海南省除 Cr 元素外其余重金属都具有较低的土壤背景值,但相比于其他省份海南农田土壤污染指数偏高.据统计^[49],海南岛农用地利用程度较高,化肥农药的施用量远高于全国平均值,而且其利用率极低,约有 70% 的化肥和农药在雨水淋溶作用下随渗滤水向四周土壤迁移,造成土壤 Cd 和 As 大量富集.此外,使用含 Cu、Zn 和 As 的饲料添加剂,含 Cd 和 Pb 的地膜覆盖物等同样会影响土壤环境,直接或间接威胁到土壤生物甚至人类的生命健康安全.

总体来看,当前中国农田土壤重金属空间分布的特征差异十分明显.从平均值分布来看,南方农田土壤重金属含量明显高于北方;而从农田土壤污染等级来看,福建、广东、海南、浙江、湖南、陕西、甘肃、河南、重庆、山西、天津、内蒙古以及安徽等地农田土壤重金属富集程度较高.综合土壤重金属的分布特征及污染评价结果可以确定 Cd 和 Hg 元素为农田土壤优先控制重金属.然而,由于资料限制,本研究采用的样本数据分布并不完全均匀,如中国东部地区样本点较密集,而西部的青海省和内蒙古自治区样本数较少且分散;此外,已发表文献多倾向于在具有一定污染的区域展开研究,或农业与工业园区的界限模糊以及存在土壤性质以及气候差异等因素,因此最终评价结果可能会存在一些偏差.但农田土

壤重金属污染依旧不可忽视,针对当前我国农田土壤重金属的分布特征及污染现状,人们应采取更多切实有效的措施来防治农田土壤污染,如重视工业生产运输过程中重金属的泄漏问题、取缔无法处理重金属污染的工厂、合理采用达到农业回用水质标准的污水灌溉、减少或避免含高重金属化肥的使用以及提高化肥农药的利用率等,从各行业的角度来改变现状,推进农田土壤重金属污染防治工作。

4 结论

(1) 克里金插值结果表明,湖南、云南、贵州、四川、福建、广西以及上海市农田土壤重金属的平均含量较高,而内蒙古、黑龙江、青海、新疆、辽宁、吉林和宁夏的平均含量较低。其中,上海市 Cr 含量最高,Pb 和 Hg 则在福建省达到最高值,Zn 和 As 在广西壮族自治区含量最高,而 Cd 和 Cu 含量最高的省份分别为重庆市和湖南省。从空间分布特征情况来看,土壤 Cr、Pb、Cu、Zn 和 As 的空间分布特征明显,而土壤 Cd 和 Hg 在空间分布上十分相似。

(2) 以各省、直辖市和自治区的土壤背景值为标准,中国各行政区农田土壤重金属含量超出当地背景值的比例分别为 36.67% (Cr)、96.67% (Cd)、80.00% (Pb)、83.33% (Cu)、90.00% (Zn)、40.00% (As) 以及 93.33% (Hg)。其中全国各行政区土壤 Cd 和 Hg 的平均含量与当地背景值相比差值相对较高,表明全国农田土壤 Cd 和 Hg 存在明显富集,而各行政区土壤 Cr 和 As 含量基本低于或略高于当地背景值。总体而言,除重金属 Cd 外,各行政区农田土壤重金属的平均含量均在中国农业土壤污染物的最高允许浓度标准限定之内。

(3) 土壤污染评价结果表明,中国农田土壤 7 种重金属的污染程度大小依次为: Cd > Hg > Pb > Cu > Zn > As > Cr, 其中福建、广东、海南、浙江、湖南、陕西、甘肃、河南、重庆、山西、天津、内蒙古以及安徽等地农田土壤重金属富集程度较高;各行政区农田土壤 Cd 与 Hg 的地累积指数较高,平均地累积指数也表明农田土壤 Cd 和 Hg 的污染较重。

参考文献:

- [1] 张军,董洁,梁青芳,等. 宝鸡城区土壤重金属空间分布特征及生态风险评价[J]. 干旱区资源与环境, 2018, **32**(10): 100-106.
Zhang J, Dong J, Liang Q F, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in urban soils of Baoji city [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, **32**(10): 100-106.
- [2] 孟敏,杨林生,韦炳干,等. 我国设施农田土壤重金属污染评价与空间分布特征[J]. 生态与农村环境学报, 2018, **34**(11): 1019-1026.
- Meng M, Yang L S, Wei B G, *et al.* Contamination assessment and spatial distribution of heavy metals in greenhouse soils in China [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, **34**(11): 1019-1026.
- [3] 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 the Chinese Academy of Sciences, 2018, **33**(2): 153-159.
- [4] 陈程,陈明. 环境重金属污染的危害与修复[J]. 环境保护, 2010, (3): 55-57.
- [5] Wang C, Yang Z F, Zhong C, *et al.* Temporal-spatial variation and source apportionment of soil heavy metals in the representative river-alluviation depositional system [J]. Environmental Pollution, 2016, **216**: 18-26.
- [6] Jiao W T, Chen W P, Chang A C, *et al.* Environmental risks of trace elements associated with long-term phosphate fertilizers applications: a review [J]. Environmental Pollution, 2012, **168**: 44-53.
- [7] 陈满怀. 土壤环境学[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 216-273.
- [8] 宋波,杨子杰,张云霞,等. 广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1888-1900.
Song B, Yang Z J, Zhang Y X, *et al.* Accumulation of Cd and its risks in the soils of the Xijiang River drainage basin in Guangxi [J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1888-1900.
- [9] 马铁铮,马友华,徐露露,等. 农田土壤重金属污染的农业生态修复技术[J]. 农业资源与环境学报, 2013, **30**(5): 39-43.
Ma T Z, Ma Y H, Xu L L, *et al.* Agro-ecological remediation technologies on heavy metal contamination in cropland soils [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2013, **30**(5): 39-43.
- [10] Shi T R, Ma J, Wu X, *et al.* Inventories of heavy metal inputs and outputs to and from agricultural soils: a review [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **164**: 118-124.
- [11] 环境保护部和国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 [J]. 中国环保产业, 2014, (5): 10-11.
- [12] 李伟迪,崔云霞,曾撑撑,等. 太湖流域农田土壤重金属污染特征与来源解析 [J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 5073-5081.
Li W D, Cui Y X, Zeng C C, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of heavy metals in farmland soils in the Taihe Canal Valley [J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 5073-5081.
- [13] 周艳,陈楷,邓绍坡,等. 西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2884-2892.
Zhou Y, Chen Q, Deng S P, *et al.* Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb-Zn mine in southwestern China [J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2884-2892.
- [14] 麦麦提吐尔逊·艾则孜,阿吉古丽·马木提,艾尼瓦尔·买买提,等. 博斯腾湖流域绿洲农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 地理学报, 2017, **72**(9): 1680-1694.
Eziz M, Mamut A, Mohammad A, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and its potential ecological risks of farmland soils of oasis in Bosten Lake Basin [J]. Acta Geographica Sinica,

- 2017, **72**(9): 1680-1694.
- [15] 熊仕娟, 邢丹, 王永平, 等. 辣椒产地土壤重金属潜在生态风险评价——以贵州省百宜镇为例[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, **40**(11): 1-9.
- Xiong S J, Xing D, Wang Y P, *et al.* Distribution and risk assessment of heavy metals in a pepper-growing area—a case study in Baiyi, Guizhou [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2018, **40**(11): 1-9.
- [16] 余志, 陈凤, 张军方, 等. 锌冶炼区菜地土壤和蔬菜重金属污染状况及风险评价[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(5): 2086-2094.
- Yu Z, Chen F, Zhang J F, *et al.* Contamination and risk of heavy metals in soils and vegetables from zinc smelting area[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(5): 2086-2094.
- [17] 黄莹, 景金泉, 毛久庚, 等. 南京市3种果园土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 江西农业学报, 2018, **30**(2): 117-122.
- Huang Y, Jing J Q, Mao J G, *et al.* Distribution characteristics and pollution evaluation of soil heavy metals in three orchards of Nanjing[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2018, **30**(2): 117-122.
- [18] 吴劲楠, 龙健, 刘灵飞, 等. 典型铅锌矿化区不同土地利用类型土壤重金属污染特征与评价[J]. 地球与环境, 2018, **46**(6): 561-570.
- Wu J N, Long J, Liu L F, *et al.* Characterization and assessment of the heavy metal pollution in soils of different land use patterns around a typical lead-zinc mineralization area[J]. Earth and Environment, 2018, **46**(6): 561-570.
- [19] 郑堃, 任宗玲, 覃小泉, 等. 韶关工矿区水稻土和稻米中重金属污染状况及风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(5): 915-925.
- Zheng K, Ren Z L, Qin X Q, *et al.* Status and risk assessment of heavy metal pollution in paddy soil and rice grains from the industrial and mining area of Shaoguan, Guangdong Province [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(5): 915-925.
- [20] Wei B G, Yang L S. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China [J]. Microchemical Journal, 2010, **94**(2): 99-107.
- [21] 宋伟, 陈百明, 刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究, 2013, **20**(2): 293-298.
- Song W, Chen B M, Liu L. Soil heavy metal pollution of cultivated land in China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, **20**(2): 293-298.
- [22] 张小敏, 张秀英, 钟太洋, 等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 692-703.
- Zhang X M, Zhang X Y, Zhong T Y, *et al.* Spatial distribution and accumulation of heavy metal in arable land soil of China[J]. Environmental Science, 2014, **35**(2): 692-703.
- [23] 陈奕云, 唐名阳, 王淑桃, 等. 基于文献计量的中国农田土壤重金属污染评价[J]. 土壤通报, 2016, **47**(1): 219-225.
- Chen Y Y, Tang M Y, Wang S T, *et al.* Evaluation of heavy metal pollution in farmland soil of China based on bibliometrics [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, **47**(1): 219-225.
- [24] Liu X M, Wu J J, Xu J M. Characterizing the risk assessment of heavy metals and sampling uncertainty analysis in paddy field by geostatistics and GIS[J]. Environmental Pollution, 2006, **141**(2): 257-264.
- [25] 王幼奇, 白一茹, 王建宇. 引黄灌区不同尺度农田土壤重金属空间分布及污染评价: 以银川市兴庆区为例[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2714-2720.
- Wang Y Q, Bai Y R, Wang J Y. Distribution of soil heavy metal and pollution evaluation on the different sampling scales in farmland on Yellow River irrigation area of Ningxia: a case study in Xingqing county of Yinchuan city[J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2714-2720.
- [26] 吴子豪, 刘艳芳, 陈奕云, 等. 综合土地利用及空间异质性的土壤有机碳空间插值模型[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(1): 238-246.
- Wu Z H, Liu Y F, Chen Y Y, *et al.* Spatial interpolation model of soil organic carbon density considering land-use and spatial heterogeneity[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, **29**(1): 238-246.
- [27] 王剑凯, 林玉英, 邱荣祖, 等. 基于 Ordinary Kriging 路域土壤重金属含量的空间分布——以国道316线福州至闽清段为例[J]. 安徽农业大学学报, 2018, **45**(3): 506-511.
- Wang J K, Lin Y Y, Qiu R Z, *et al.* Spatial distribution of heavy metals in roadside soils based on ordinary kriging: a case study of No. 316 national road between Fuzhou and Mingqing[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2018, **45**(3): 506-511.
- [28] 高文武, 姜燕, 赵晋陵. 基于协同克里金插值法的土壤锰元素含量预测[J]. 地理与地理信息科学, 2018, **34**(3): 119-124.
- Gao W W, Jiang Y, Zhao J L. Predicting and mapping the Mn content in soil based on cokriging [J]. Geography and Geo-Information Science, 2018, **34**(3): 119-124.
- [29] 王洋洋, 李方方, 王桢阳, 等. 铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 437-444.
- Wang Y Y, Li F F, Wang X Y, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal contamination in surface farmland soil around a lead and zinc smelter[J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 437-444.
- [30] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal, 1969, **2**(3): 108-118.
- [31] Förstner U, Müller G. Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in river sediments: geochemical background, man's influence and environmental impact [J]. GeoJournal, 1981, **5**(5): 417-432.
- [32] Ghrefat H A, Abu-Rukah Y, Rosen M A. Application of geoaccumulation index and enrichment factor for assessing metal contamination in the sediments of Kafra Dam, Jordan [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, **178**(1-4): 95-109.
- [33] 张敬雅, 李湘凌, 章凌曦, 等. 安徽庐江县砖桥潜在富硒土壤重金属元素空间变异与来源[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(9): 1594-1603.
- Zhang J Y, Li X L, Zhang L X, *et al.* Spatial variations and source apportionment of heavy metals in potential selenium-enriched soils in Zhuanqiao Village, Lujiang County, Anhui Province [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(9): 1594-1603.
- [34] Wang Y Q, Shao M G, Gao L. Spatial variability of soil particle size distribution and fractal features in water-wind erosion crisscross region on the loess plateau of China[J]. Soil Science, 2010, **175**(12): 579-585.
- [35] 刘霏珈, 吴克宁, 罗明. 基于数据稳健性的农用地土壤重金属空间分异研究[J]. 中国土地科学, 2019, **33**(5): 86-94.
- Liu P J, Wu K N, Luo M. Research on spatial variation characteristics of agricultural land soil heavy metals based on data

- robustness[J]. *China Land Science*, 2019, **33**(5): 86-94.
- [36] 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. 330-368.
- [37] 王景华. 海南岛土壤和植物中的化学元素[M]. 北京: 科学出版社, 1987. 31-45.
- [38] 陈振金, 陈春秀, 刘用清, 等. 福建省土壤环境背景值研究[J]. *环境科学*, 1992, **13**(4): 70-75.
- [39] 李章平, 陈玉成, 杨学春, 等. 重庆市主城区土壤重金属的潜在生态危害评价[J]. *西南农业大学学报(自然科学版)*, 2006, **28**(2): 227-230, 251.
- Li Z P, Chen Y C, Yang X C, *et al.* Assessment of potential ecological hazard of heavy metals in urban soils in Chongqing city[J]. *Journal of Southwest Agricultural University (Natural Science)*, 2006, **28**(2): 227-230, 251.
- [40] 郭笑笑, 刘丛强, 朱兆洲, 等. 土壤重金属污染评价方法[J]. *生态学杂志*, 2011, **30**(5): 889-896.
- Guo X X, Liu C Q, Zhu Z Z, *et al.* Evaluation methods for soil heavy metals contamination: a review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(5): 889-896.
- [41] 王玉军, 吴同亮, 周东美, 等. 农田土壤重金属污染评价研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(12): 2365-2378.
- Wang Y J, Wu T L, Zhou D M, *et al.* Advances in soil heavy metal pollution evaluation based on bibliometrics analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(12): 2365-2378.
- [42] 李丽辉, 王宝禄. 云南省土壤 As、Cd 元素地球化学特征[J]. *物探与化探*, 2008, **32**(5): 497-501.
- Li L H, Wang B L. Geochemical characteristics of As and Cd in soils of Yunnan Province[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2008, **32**(5): 497-501.
- [43] 罗慧, 刘秀明, 王世杰, 等. 中国南方喀斯特集中分布区土壤 Cd 污染特征及来源[J]. *生态学杂志*, 2018, **37**(5): 1538-1544.
- Luo H, Liu X M, Wang S J, *et al.* Pollution characteristics and sources of cadmium in soils of the karst area in South China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(5): 1538-1544.
- [44] 周建军, 周桔, 冯仁国. 我国土壤重金属污染现状及治理战略[J]. *中国科学院院刊*, 2014, **29**(3): 315-320, 350.
- Zhou J J, Zhou J, Feng R G. Status of China's heavy metal contamination in soil and its remediation strategy[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2014, **29**(3): 315-320, 350.
- [45] Yang Q Q, Li Z Y, Lu X N, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: pollution and risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **642**: 690-700.
- [46] Luo L, Ma Y B, Zhang S Z, *et al.* An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(8): 2524-2530.
- [47] 廖强, 李金鑫, 李明珠, 等. 污灌条件下重金属在土壤中的累积效应及风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(11): 2560-2569.
- Liao Q, Li J X, Li M Z, *et al.* Cumulative distribution and risk assessment of heavy metals during sewage irrigation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(11): 2560-2569.
- [48] 王永强, 李诗殷, 蔡信德. 中国农田污水灌溉研究进展[J]. *天津农业科学*, 2010, **16**(4): 77-80.
- Wang Y Q, Li S Y, Cai X D. Advance of research on sewage irrigation in farmland in China[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2010, **16**(4): 77-80.
- [49] 李福燕, 李许明, 杨帆, 等. 海南岛农田土壤重金属污染的评价及其来源分析[J]. *海南大学学报(自然科学版)*, 2013, **31**(3): 211-217.
- Li F Y, Li X M, Yang F, *et al.* Pollution evaluation and preliminary analysis of pollution sources of heavy Metals in Agricultural Soil of Hainan Island[J]. *Natural Science Journal of Hainan University*, 2013, **31**(3): 211-217.

CONTENTS

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