

# 目次

|                                                        |                                                           |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 基于时间序列分解的京津冀区域PM <sub>2.5</sub> 和O <sub>3</sub> 空间分布特征 | 姚青, 丁净, 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹 (2487)                               |
| 基于随机森林的北京城区臭氧敏感性分析                                     | 周红, 王鸣, 柴文轩, 赵昕 (2497)                                    |
| 基于随机森林模型的四川盆地臭氧污染预测                                    | 杨晓彤, 康平, 王安怡, 臧增亮, 刘浪 (2507)                              |
| 海口市臭氧浓度统计预报模型的构建与效果评估                                  | 符传博, 林建兴, 唐家翔, 丹利 (2516)                                  |
| 京津冀地区2015~2020年臭氧浓度时空分布特征及其健康效益评估                      | 高冉, 李琴, 车飞, 张艳平, 祖永刚, 刘芬 (2525)                           |
| 2022年北京市城区PM <sub>2.5</sub> 水溶性离子含量及其变化特征              | 陈圆圆, 崔迪, 赵泽熙, 常森, 景宽, 沈秀娥, 刘保献 (2537)                     |
| 郑州市冬春季PM <sub>2.5</sub> 中金属元素污染特征、来源及健康风险评估            | 陶杰, 闫慧姣, 徐艺斐, 荆海涛 (2548)                                  |
| 淄博市供暖前后PM <sub>2.5</sub> 中多环芳烃及其衍生物污染特征、来源及健康风险        | 孙港立, 吴丽萍, 徐勃, 高玉宗, 赵雪艳, 姬亚芹, 杨文 (2558)                    |
| 西安市采暖季过渡期高时间分辨率细颗粒物组分特征及来源解析                           | 李萌津, 张勇, 张倩, 田杰, 李丽, 刘卉昆, 冉伟康, 王启元 (2571)                 |
| 天津冬季两个典型污染过程高浓度无机气溶胶成因及来源分析                            | 卢苗苗, 韩素芹, 刘可欣, 唐晓, 孔磊, 丁净, 樊文雁, 王自发 (2581)                |
| 基于空间尺度效应的山东省PM <sub>2.5</sub> 浓度时空变化及空间分异地理探测          | 徐勇, 韦梦新, 邹滨, 郭振东, 李沈鑫 (2596)                              |
| 我国典型化工行业VOCs排放特征及其对臭氧生成潜势                              | 武婷, 崔焱文, 肖威德, 翟增秀, 韩萌 (2613)                              |
| 廊坊秋季大气污染过程中VOCs二次气溶胶生成潜势及来源分析                          | 张敬巧, 刘铮, 丁文文, 朱瑶, 曹婷, 凌德印, 王淑兰, 王宏亮 (2622)                |
| 景观格局对河流水质影响的尺度效应Meta分析                                 | 王玉仓, 杜晶晶, 张禹, 吴昊, 胡敏韵, 陈丁江 (2631)                         |
| 白洋淀夏季汛期入淀河流水体溶解性有机物的光谱特征及来源                            | 孟佳靖, 宴红, 陈哲, 周石磊, 底怡玲, 武辰彬, 王晨光, 张家丰, 崔建升 (2640)          |
| 北京市丰台区永定河以东浅层地下水水化学演变规律及成因分析                           | 胡昱欣, 周瑞静, 宋炜, 杨全合, 王鑫茹 (2651)                             |
| 庐庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价                         | 刘海, 魏伟, 宋阳, 徐洁, 管政亭, 黄健敏, 赵国红 (2665)                      |
| 农药施用对兴凯湖水中农药残留的影响及其风险评价                                | 王蔚青, 徐雄, 刘权震, 林利华, 吕婧, 王东红 (2678)                         |
| 黄河兰州段河岸带土壤中微生物与耐药基因的赋存特征                               | 韦程宸, 魏枫沂, 夏慧, 黄魁 (2686)                                   |
| 基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析                               | 金晓龙, 邓学良, 戴睿, 徐倩倩, 吴月, 范裕祥 (2694)                         |
| 再生水构建水环境中沉水植物附着细菌群落特征                                  | 贺赞, 李雪梅, 李宏权, 魏琳琳, 姜春晖, 姜大伟, 李魁晚 (2707)                   |
| 水位波动和植被恢复对三峡水库消落带土壤原核微生物群落结构的交互影响                      | 梅渝, 黄平, 王鹏, 朱凯 (2715)                                     |
| 银川市典型湖泊沉积物细菌群落结构及其对重金属的响应关系                            | 蒙俊杰, 刘双羽, 邱小琼, 周娟娟 (2727)                                 |
| 热水解时间对污泥厌氧消化系统微生物群落结构影响分析                              | 张含, 张涵, 王佳伟, 高金华, 文洋, 李相昆, 任征然 (2741)                     |
| 市政污水中吗啡来源辨析                                            | 邵雪婷, 赵悦彤, 蒋冰, 裴伟, 李彦莹, 谭冬芹, 王德高 (2748)                    |
| 滦河流域生态环境动态遥感评价                                         | 李艳翠, 袁金国, 刘博涵, 郭豪 (2757)                                  |
| 黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素                                  | 王奕洪, 孙学堂 (2767)                                           |
| 基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化:以汾河流域为例                 | 蔡进, 危小建, 江平, 梁玉琦 (2780)                                   |
| 贵州高原典型喀斯特县域生境质量时空演变及定量归因                               | 李月, 冯霞, 吴路华, 罗光杰, 罗红芬 (2793)                              |
| 2000~2021年黄土高原生态分区NEP时空变化及其驱动因子                        | 周怡婷, 严俊霞, 刘菊, 王瑛 (2806)                                   |
| 基于SSP-RCP情景的黄土高原土地变化模拟及草原碳储量                           | 崔伟, 董燕, 张露尹, 王荣臻 (2817)                                   |
| 京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响                         | 武爱彬, 陈辅国, 赵艳霞, 秦彦杰, 刘欣, 郭小平 (2828)                        |
| 西南岩溶区土地利用变化对团聚体稳定性及其有机碳的影响                             | 江可, 贾亚男, 杨琰, 陈坚淇, 禹朴家 (2840)                              |
| 不同土地利用方式下土壤有机质分子组成变化的整合分析                              | 黄世威, 赵一锴, 朱馨雨, 刘贺雷, 刘姣姣, 陈稍, 陈佳永, 张阿凤 (2848)              |
| 基于改进麻雀搜索算法优化BP神经网络的土壤有机质空间分布预测                         | 胡志瑞, 赵万伏, 宋根先, 王芳, 林妍敏 (2859)                             |
| 不同有机物料施用对菜地磷累积和转化的影响                                   | 孙凯, 崔玉涛, 李顺晋, 魏冰丽, 王媛, 杨宏博, 王孝忠, 张伟 (2871)                |
| 集约化柑橘种植抑制土壤磷循环微生物活性                                    | 周连吴, 曾全超, 梅唐英泽, 汪明霞, 谭文峰 (2881)                           |
| 控释掺混肥对麦玉米轮作体系作物产量和温室气体排放的影响                            | 高玮, 王学霞, 谢建治, 陈延华, 倪小会, 王甲辰, 董艳芳, 李子双, 曹兵 (2891)          |
| 生物炭对黄绵土中NO <sub>3</sub> -N运移过程影响及模拟                    | 白一茹, 刘旭, 张钰涵, 张睿媛, 马艳, 王幼奇 (2905)                         |
| 中国农田土壤重金属污染分析与评价                                       | 杨雳, 白宗旭, 薄文浩, 林静, 杨俱佳, 陈涛 (2913)                          |
| 城市土壤和地表灰尘重金属污染研究进展与展望                                  | 王晓雨, 刘恩峰, 杨祥梦, 王碧莲, 林锦阔, 颜梦霞, 毕世杰 (2926)                  |
| 场地重金属污染土壤固化及MICP技术研究进展                                 | 陈玥如, 高文艳, 陈虹任, 薛生国, 吴川 (2939)                             |
| 黄河流域山东段近河道煤矿区土壤重金属污染特征及源解析                             | 戴文婷, 张晖, 吴霞, 钟鸣, 段桂兰, 董霁红, 张培培, 樊洪明 (2952)                |
| 拒马河流域河流沉积物与土壤重金属含量及风险评价                                | 韩双宝, 袁磊, 张秋霞, 郑焰, 李甫成 (2962)                              |
| 银川市黄河滩区土壤重金属污染特征、生态风险评估及来源解析                           | 于路加, 马海军, 王翠平 (2971)                                      |
| 基于源导向和蒙特卡罗模型的广东省某城市土壤重金属健康风险评估                         | 陈莲, 邹子航, 张培珍, 王雨菡, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 (2983) |
| 西南典型碳酸盐岩高地背景区农田重金属化学形态、影响因素及回归模型                       | 唐瑞玲, 徐进力, 刘彬, 杜雪苗, 顾雪, 于林松, 毕婧 (2995)                     |
| 贵州省水田土壤-水稻Hg含量特征与安全种植区划                                | 韦美溜, 周浪, 黄燕玲, 庞瑞, 王佛鹏, 宋波 (3005)                          |
| 柠檬酸辅助甜高粱对南方典型母质土壤的镉修复效应                                | 刘梦宇, 罗绪锋, 辜娇峰, 易轩韬, 周航, 曾鹏, 廖柏寒 (3016)                    |
| 改性酒糟生物炭对紫色土壤镉形态及水稻吸收镉的影响                               | 肖乃川, 王子芳, 杨文娜, 谢永红, 代文才, 高明 (3027)                        |
| 生物炭对四环素和铜复合污染土壤生菜生长及污染物累积的影响                           | 郑晨格, 裴欢欢, 张亚珊, 李嘉欣, 刘奋武, 乔星星, 秦俊梅 (3037)                  |
| 基于Meta分析的蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属的影响效应                            | 姜继韶, 侯睿, 崔慧林, 闫广轩, 刘栋 (3047)                              |
| 微塑料对土壤N <sub>2</sub> O排放及氮素转化的影响研究进展                   | 刘一戈, 杨安琪, 陈舒欣, 牛英奕, 卢瑛, 李博 (3059)                         |
| 土地利用对洱海罗时江小流域土壤微塑料污染的影响                                | 戴柳云, 侯磊, 王化, 符立松, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3069)               |
| 养殖海湾淤泥质海岸沉积物微塑料污染特征                                    | 宋可心, 贺金成, 李昌文, 解思琦, 刘宝堃, 黄伟, 冯志华 (3078)                   |
| 聚乙烷微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响                                   | 李志超, 李哲, 李嘉晨, 屈忠义, 杨文煊, 李卫平 (3088)                        |
| 鄱阳湖候鸟栖息地微塑料表面细菌群落结构特征与生态风险预测                           | 俞锦丽, 赵俊凯, 罗思琦, 朱颖婷, 张文慧, 胡启武, 刘淑丽 (3098)                  |
| 粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径                                    | 徐艺诺, 翁大维, 王硕, 胡喜生, 王占永, 张园园, 张兰怡 (3107)                   |
| 电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益分析                                | 徐圆圆, 龚德鸿, 黄正光, 杨浪 (3119)                                  |

# 中国农田土壤重金属污染分析与评价

杨雳<sup>1</sup>, 白宗旭<sup>1</sup>, 薄文浩<sup>1</sup>, 林静<sup>1</sup>, 杨俱佳<sup>1</sup>, 陈涛<sup>1,2\*</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 农业农村部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100)

**摘要:** 为掌握中国农田土壤八大重金属元素(As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb和Zn)的污染现状, 探究其时空变化和在不同耕地类型之间的差异, 通过中国知网和Web of Science收集并整理了2005~2021年449篇相关文献数据, 采用基于“样点数”、“研究区面积”和“标准差”的加权方式进行Meta分析. 结果显示, 中国农田土壤八大重金属的含量平均值为:  $\omega(\text{As}) 11.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\omega(\text{Cd}) 0.350 2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\omega(\text{Cr}) 62.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\omega(\text{Cu}) 28.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\omega(\text{Hg}) 0.135 1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\omega(\text{Ni}) 28.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\omega(\text{Pb}) 34.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $\omega(\text{Zn}) 90.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 与土壤背景值相比, 中国农田土壤中各重金属元素(除As外)均存在一定累积, 其中Cd和Hg的累积量最大, 分别超过对应土壤背景值177.9%和340.3%. 污染评价结果表明, 我国农田土壤重金属污染以Cd和Hg为主, 人类活动是造成其在土壤中累积的主要影响因子; 从时空变化上看, 云贵高原和东部沿海是污染案例最集中的区域, 污染重心随时间变化由长江中游向西南地区偏移; 不同耕地类型之间土壤重金属含量存在差异, 蔬菜地和水田中重金属的累积量明显大于其他耕地类型.

**关键词:** 中国农田; 土壤重金属; 空间分布; 污染评价; Meta分析

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)05-2913-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202305253

## Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China: A Meta-analysis

YANG Li<sup>1</sup>, BAI Zong-xu<sup>1</sup>, BO Wen-hao<sup>1</sup>, LIN Jing<sup>1</sup>, YANG Ju-jia<sup>1</sup>, CHEN Tao<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling 712100, China)

**Abstract:** In this study, a Meta-analysis was used to investigate the pollution status of eight farmland soil heavy metal elements (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn) in China. Meanwhile, their spatiotemporal changes and differences between different types of cultivated land were explored. The research data were chosen from 449 relevant literature data collected by CNKI and Web of Science from 2005 to 2021, and the Meta-analysis used a weighted method based on “sampling numbers”, “study area”, and “standard deviation”. The results showed that the national average values of the eight heavy metal elements in Chinese farmland soil were  $\omega(\text{As}) 11.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\omega(\text{Cd}) 0.350 2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\omega(\text{Cr}) 62.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\omega(\text{Cu}) 28.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\omega(\text{Hg}) 0.135 1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\omega(\text{Ni}) 28.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\omega(\text{Pb}) 34.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , and  $\omega(\text{Zn}) 90.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Compared with their background values, all elements except As accumulated to some extent, and Cd and Hg accumulated the most, exceeding their background values by 177.9% and 340.3%, respectively. The research results indicated that Cd and Hg were the main pollution elements in farmland soil in China, and their accumulation was mainly influenced by human activities. In terms of their temporal and spatial changes, the Yunnan-Guizhou Plateau and the eastern coast were the most concentrated areas of pollution cases, and the pollution center shifted from the middle reaches of the Yangtze River to the southwest over time. The accumulation of heavy metals in farmland soil was affected by crop planting types, and the accumulation of heavy metals in vegetable and paddy soil was significantly greater than that in other cultivated land types.

**Key words:** Chinese arable land; heavy metal; spatial distribution; pollution evaluation; Meta-analysis

土壤是作物生长的关键基础, 也是农业生产的重要资源, 在生态系统中占据重要地位. 农田土壤中各化学物质含量直接影响着作物的生长, 并通过食物链影响着人类和其他动物的健康<sup>[1]</sup>. 根据2014年《全国土壤污染状况调查公报》披露的数据显示, 我国土壤点位污染物超标率为16.1%, 在各种土地利用类型中, 耕地超标率最高, 达到了19.4%; 其中: 镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)和镍(Ni)这八大重金属元素是主要的无机污染物. 耕地土壤重金属污染已给社会带来经济和健康的双重巨大危害. 据估计, 我国每年因重金属污染导致的粮食减产超过1 000万t, 受重金属污染的粮食数量也高达1 200万t, 合计造成约200亿元人民币的经济损失<sup>[2]</sup>. 此外, 重金属还与心血管疾病、

肾损伤、糖尿病、不孕症和癌症等重大疾病密切相关, 对人体健康构成巨大威胁<sup>[3]</sup>. 因此, 农田土壤重金属污染防治迫在眉睫.

然而, 制定国家土壤重金属污染防治政策需要充分了解全国土壤重金属污染的现状并考虑其未来发展趋势. 尽管在我国已有许多研究者对小尺度农田进行了采样监测, 但受制于人力和物力限制, 很少有关于全国尺度农田土壤重金属的监测与评价报道. 虽然近年来, 一些研究者开始关注并尝试从全国尺度来评价我国农田土壤重金属的污染状况, 主

收稿日期: 2023-05-29; 修订日期: 2023-07-29

基金项目: 中央高校基本业务费专项(2452018143)

作者简介: 杨雳(1999~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤环境风险评估, E-mail: younglee\_12138@163.com

\* 通信作者, E-mail: tchen@nwsuaf.edu.cn

要方法包括空间插值、平均数计算和荟萃分析(Meta-analysis)等<sup>[4~9]</sup>,但由于样点数量和发表偏倚等因素影响,空间插值和平均数计算法得到的结果存在极大的不稳定性.例如,张小敏等<sup>[4]</sup>通过克里金插值法得到云南省农田土壤 $\omega(\text{Pb})$ 的平均值为 $118.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而陈文轩等<sup>[5]</sup>通过相同方法得到的结果却是 $35.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Meta分析最初是在医学领域提出的,直到1998年,Gurevitch等<sup>[10]</sup>出版了第一本生态学领域的Meta分析专著,通过实例阐述了Meta分析在生态学领域中应用的可能性,自此Meta分析在环境科学研究中开始使用.

在土壤重金属研究领域,已有研究者通过Meta分析对中国土壤重金属污染状况进行了描述.然而,部分研究中文献的纳入标准并不严谨,部分研究有着相同的研究对象,文献纳入却有较大差异<sup>[6, 7, 9]</sup>,而文献纳入对于Meta分析结果有着决定性的影响.近年来,还有许多与土壤重金属相关的新研究发表,纳入以上新文献也可能改变Meta分析的结果.除此之外,已有研究往往以省份为研究单位,或者仅通过经济条件来划分研究区域,并未充分考虑到不同农业活动的影响.

因此,本研究尝试以2005~2021年相关文献为数据来源,通过引入权重、减少极值和发表偏倚影响,利用Meta分析对中国农田土壤重金属现状进行分析和评价,在此基础上揭示其时空变化规律以及不同耕地类型间土壤重金属的累积差异,旨在为我国农田土壤重金属污染防治提供决策依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 Meta分析

#### 1.1.1 数据来源

本研究数据主要源于中国知网(<http://www.cnki.net>)和Web of Science(<https://www.webofknowledge.com/>)两个数据库,在专业模式下检索搜集2000~2021年所有实地研究我国农田土壤重金属元素[镉(Cd)、铬(Cr)、汞(Hg)、铅(Pb)、砷(As)、铜(Cu)、锌(Zn)和镍(Ni)]的相关论文(中文和英文).关键词选择有:“重金属”或“单个元素”“农田土壤”“耕地”“农业土壤”“中国”.在后续文献筛选中,由于文献质量控制去除了2005年以前的数据,因此实际研究时段为2005~2021年.

Web of Science检索式:

TS = (lead OR chromium OR arsenic OR cadmium OR mercury OR zinc OR copper OR nickel OR Pb OR Cr OR As OR Cd OR Hg OR Zn OR Cu OR Ni) AND

(agriculture soil OR farmland) AND (China)

中国知网检索式:

KY=(“Pb”+“Cr”+“As”+“Cd”+“Hg”+“Zn”+“Cu”+“Ni”+“铅”+“铬”+“砷”+“镉”+“汞”+“锌”+“铜”+“镍”+“重金属”)AND AB=(“农业土壤”+“农田”+“耕地”)

为确保研究准确性,制定了如下文献筛选标准:①必须是我国境内实地研究,且监测对象为农田表层土壤(0~15 cm或0~20 cm);②明确描述研究区域位置,研究区域面积和采样点位置;③单个研究案例中采集的土壤样本数量 $\geq 50$ 个;④研究中样点的布设、土壤样品的采集、土壤重金属含量的分析测定方法均使用行业认证方法,例如:《农田土壤环境质量监测技术规范》(NY/T 395-2012)、《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166-2004)等;⑤研究中明确描述了研究区重金属含量的平均值和标准偏差(或范围、变异系数)等指标(文字、表格和图像).图1给出了文献搜集与筛选的详细过程.

#### 1.1.2 数据提取

根据研究内容和预期结果,从最终符合标准的文献中提取以下信息作为Meta分析的基本数据:①文献基本信息,包括文献题目、作者、发表时间及发表期刊;②研究区域信息,包括研究区域位置(经纬度信息),所属行政区划和研究区域面积(若文章没有明确研究区域面积,可以根据所属行政区划和样点密度估算);③采样点信息,包括采样点数量和采样时间;④农田基础信息,包括样点作物种类和土壤pH值,本研究中将耕地类型分为水田(水稻)、旱地(小麦、玉米、烟草等)、蔬菜地(大田蔬菜、大棚蔬菜)和其他(果园、茶园等);⑤土壤污染物信息,包括8种重金属的全量统计量(包括均值、最大值、最小值、变异系数或方差或标准差).对于部分没有明确指出标准差的文献,可以通过范围值和采样点数量进行估算<sup>[11]</sup>.

#### 1.1.3 数据计算

##### 1.1.3.1 权重的确定与计算

在Meta分析中,计算研究变量平均值的过程被称为合并效应量.计算过程中模型的选择取决于纳入文献的差异性.通常情况下,如果所有研究都估计了一个共同的效应量参数,那么固定效应模型可以提供较为精确的结论,而随机效应模型将导致显著性检验效果较差,且置信区间过宽.存在多个效应量的情况下,随机效应模型通过引入“异质性”参数,可以更好地平衡不同效应量之间的差异<sup>[12,13]</sup>.

在大田监测试验中,研究结果的准确性和代表

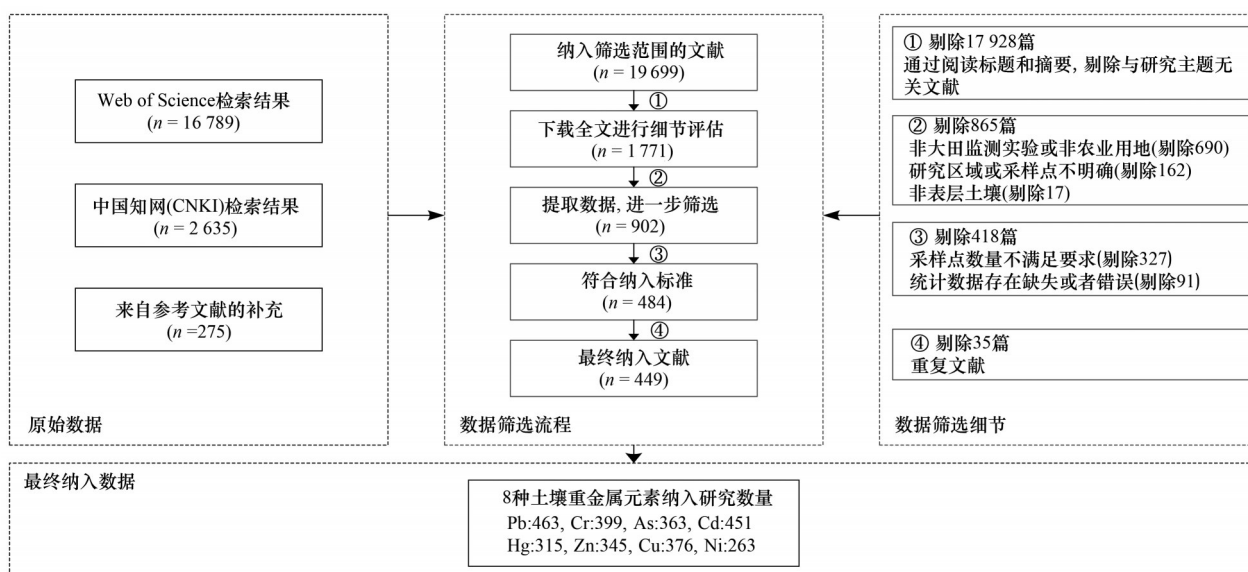


图1 文献筛选流程

Fig. 1 Literature screening flow

性取决于研究区域面积, 样点数量和数据标准差。因此, 在本研究中, 不同案例权重取决于研究区域大小, 采样点数量和数据标准差, 权重( $W_i$ )的具体算法如下:

$$W_i = A_i \times N_i / Sd_i \quad (1)$$

式中,  $A_i$ 为研究区域面积( $\text{km}^2$ ),  $N_i$ 为采样点数量,  $Sd_i$ 为各个研究报告中的标准差。

加权平均含量( $C$ )可表示为:

$$C = C_i \times W_i / \sum_{i=0}^n W_i \quad (2)$$

式中,  $C_i$ 为每项研究中给出的重金属含量平均值。考虑到不同研究间的差异主要体现在标准差, 样点数量和研究区域面积, 这种差异已通过权重体现。因此, 为避免计算重复, 研究中效应值的合并采用了固定效应模型。

#### 1.1.3.2 数据分布检验

为确保研究的准确性, 在进行合并计算前需要对数据分布进行检验。从各个案例中不同元素的概率分布直方图来看(图2), 8种重金属元素呈现出明显的偏态分布; 并且根据公式(1)对不同案例权重进行统计时, 得到的不同元素权重概率分布直方图(图3)表明各元素的权重也呈现明显的偏态分布。

重金属含量和重金属权重的偏态分布说明在这两个数据集中存在极值, 其中重金属含量的差异取决于实地污染情况, 而重金属权重差异则与不同文献采样点数量、研究区域面积以及数据标准差相关<sup>[14]</sup>。极值的出现会使得合并效应值出现偏差, 从而使最终结果由极少数占较大权重的数据所决定, 这种加权结果并不能代表整体水平。因此, 本研究

通过对数转换, 促使偏态数据向正态分布转化, 使最终加权结果更有代表性<sup>[15]</sup>。对数变换权重( $W_i^*$ )可由式(3)得到, 加权平均含量( $C$ )按式(4)用 $W_i^*$ 重新计算。

$$W_i^* = \lg(A_i \times N_i / Sd_i) \quad (3)$$

$$C = C_i \times W_i^* / \sum_{i=0}^n W_i^* \quad (4)$$

式中,  $A_i$ 、 $N_i$ 和 $Sd_i$ 与式(1)和式(2)中的意义相同。

图4为经过对数变换后的权重系数, 与变换前相比, 变换后的权重系数明显趋于正态分布, 其计算结果更具有代表性。

#### 1.1.3.3 异常值处理与敏感性分析

由于在环境污染的研究领域中, 无论作者还是读者都更加关心污染案例, 这导致研究人员偏爱选择污染严重的特殊地区作为研究对象, 这种行为通常被称为发表偏倚。例如, 靠近矿山或者工业区的有关土壤重金属超标研究更易于发表, 土壤重金属含量正常的地区则往往容易被忽视。发表偏倚在数据库中常以极值形式来体现, 但并不是所有极值都是发表偏倚。因此, 如何识别和剔除异常值对确保研究结果的准确性至关重要。异常值的识别和剔除也被称为敏感性分析。Viechtbauer等<sup>[16]</sup>建立了多个针对Meta分析异常值的诊断方法, 本文主要通过DFITs, Cook's Distance和COVRATIO进行诊断。

在本研究中, 数据预处理和统计分析使用Microsoft Excel 2003, 相关图表使用Origin 2022以及RStudio绘制, 利用ArcGIS Pro 3.0进行土壤重金属含量的空间分布分析。另外, 所有Meta分析均在RStudio中通过metafor软件包完成。

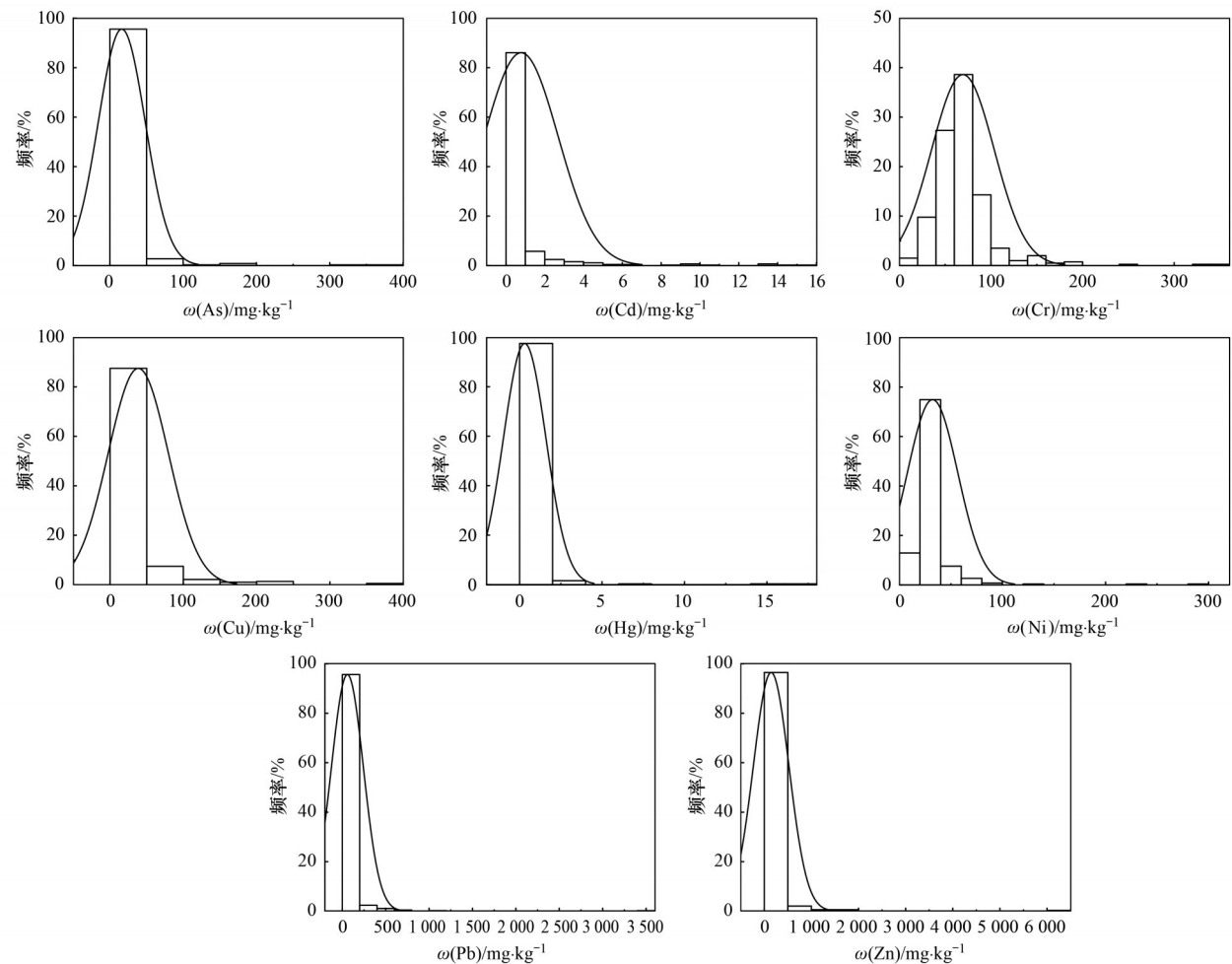


图2 8种重金属元素含量概率分布直方图  
Fig. 2 Histogram of probability distribution of eight element concentrations

1.2 地累积指数

地累积指数(geoaccumulation index,  $I_{geo}$ ), 常被作为研究沉积物和其他材料中重金属污染程度的定量指标<sup>[17]</sup>, 其分类等级如表1所示. 计算过程如式(5)所示:

$$I_{geo} = \log_2(C_i/kS_i) \tag{5}$$

式中,  $C_i$ 为沉积物中元素*i*的含量;  $S_i$ 为沉积物中元素的地球化学背景值;  $k$ 用于表征沉积特征、岩石地质和其他相关影响(一般取1.5). 由式(5)可知, 地累积指数法的实质是将当前金属含量除以相应的背景含量, 得到人为活动所致的重金属富集量. 因此, 该方法可以纠正不同地球化学背景所造成的区域污染评价偏差<sup>[18]</sup>. 如表2所示, 本研究中尽可能检索并使用研究案例当地土壤背景值, 对于缺少当地土壤背景值的研究区域则使用《中国土壤元素背景值》中各省均值代替.

表1 地累积指数分类

Table 1 Classification criteria of the  $I_{geo}$

| 分类        | 清洁  | 轻度污染 | 中度污染 | 强污染 | 极强污染 |
|-----------|-----|------|------|-----|------|
| $I_{geo}$ | < 0 | 0~1  | 1~2  | 2~3 | >3   |

2 结果与讨论

2.1 我国农田土壤重金属污染概况

Meta分析结果如表3所示. 与全国土壤背景值相比, 除As外各元素在土壤中均存在累积, 其中Cd和Hg的累积量较大, 分别超过土壤背景值177.9%和340.3%, Cd元素甚至超过了参考标准值的16.73%, 这意味着对农田土壤Cd污染的防治已经到了刻不容缓的地步. 虽然Hg含量远超土壤背景值, 但与参考标准值相比仍处于安全范围, 需要注意的是已有的研究表明Hg的积累与工业活动息息相关<sup>[30]</sup>, 这意味着随着中国工业化进一步发展, 土壤Hg的累积可能加剧, 因此也需密切关注土壤Hg的污染. 其余6种元素与土壤背景值相比略微超标, 但仍远低于参考标准值, 由此可见, 我国农田土壤重金属污染主要以Cd和Hg为主, 其他元素的污染并不突出. 在超标研究占比中, Hg超标研究占比仅为3.93%, Cd超标研究占比高达34.81%, 这意味着Cd污染更具有普遍性, Hg污染主要集中在少量超标案例中.

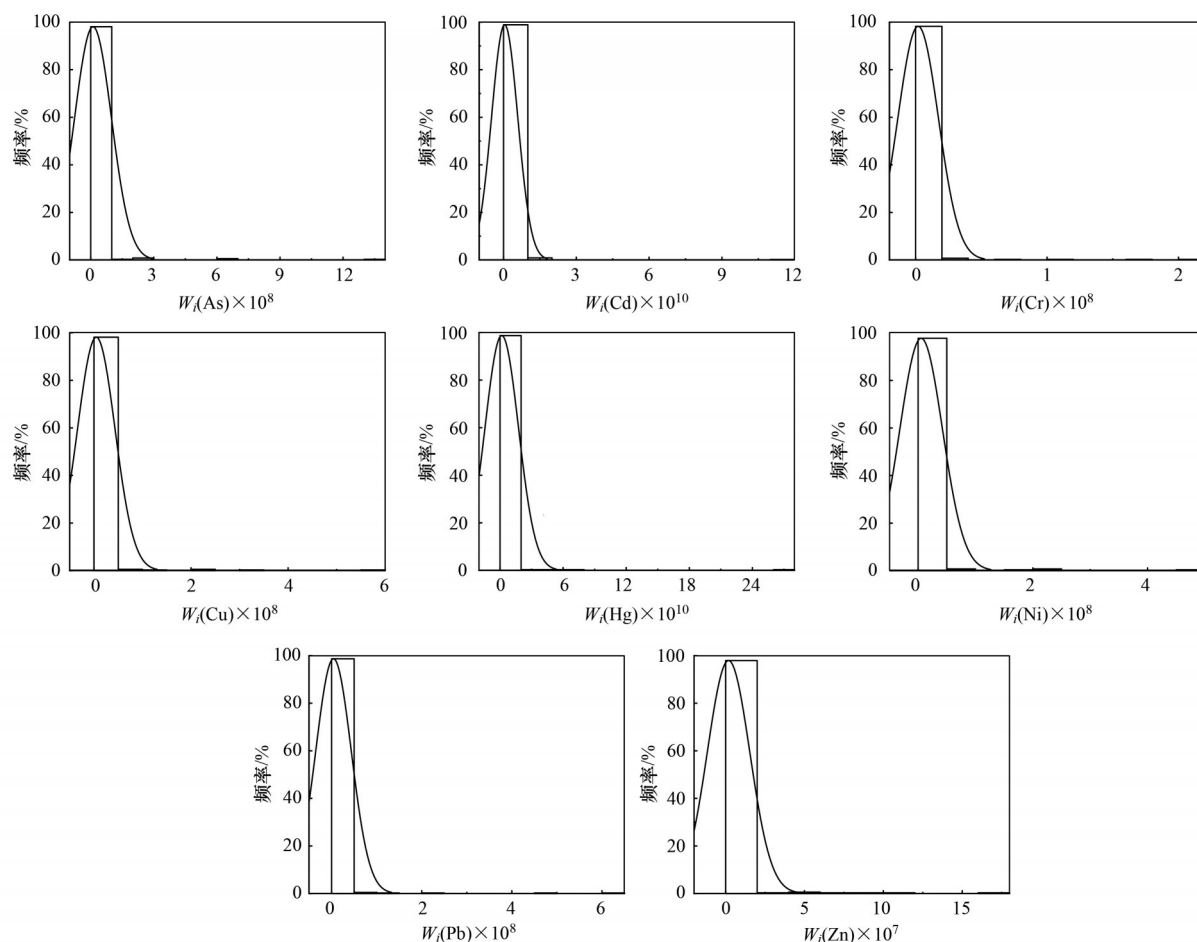


图3 8种重金属元素权重系数概率分布直方图

Fig. 3 Probability distribution histogram of weight coefficients of eight elements

表4为本研究与其他国内外同类研究的比较结果. 从中可知, 与其他研究报告相比, 本研究计算得到的土壤重金属含量与其他研究较为一致, 在一定程度上反映了研究结果的有效性. 但同时也发现, 本研究计算得到的Cd含量有明显上升, 这主要是由于近年来研究人员发表了大量有关Cd污染的研究报告, 据本研究统计2018~2021年的案例占总案例的38.4%, 这也说明纳入不同期的研究案例对Meta分析的最终结果有较大影响. 同城市土壤相比, 除Ni外各元素含量均低于城市土壤, 说明工业化和城市化对土壤的负面影响要远大于农业活动. 与矿山土壤相比, 农田土壤中Cd、Pb和Zn远低于矿山土壤, 分别是矿山土壤的9.31%和17.65%和37.30%, 表明矿山活动主要影响到土壤Cd、Pb和Zn的累积, 这与我国有色金属矿山以铅锌矿为主有密切关联, 矿渣、粉尘和废水中存在大量Pb和Zn元素, 而Cd元素是铅锌矿开采的主要伴生产物<sup>[32]</sup>. 与欧美国家相比, 我国土壤中各项重金属元素均较高, 但这主要源于我国较高的土壤背景值. 与以泰国为代表的亚洲国家相比, 我国农田土壤中Cd和Hg含量较高, 除受土壤背景值影响外, 这与我国较强的工业活动

有关, 通常认为工矿企业生产活动是其主要人为排放源<sup>[33]</sup>. 与世界土壤均值相比, 除Hg明显高出1倍外, 其余元素均较为接近. 总体来看, 我国农田土壤中各项重金属均存在一定累积, 污染程度较轻, 仍在世界土壤均值的可控范围内, Hg和Cd的累积最为明显, 需要额外关注. 而我国对于农田重金属的过度恐慌可能来自于较为严苛的土壤环境标准, 以目前污染较为严重的Cd和Hg为例, 我国的标准值(GB 15618-2018, 水稻土, pH ≤ 5.5)仅为丹麦的55%和28.6%, 为韩国的2.3%和1.2%<sup>[34]</sup>, 这也是导致我国有关土壤重金属含量超标的报道多于其他国家和地区的主要原因.

## 2.2 我国农田土壤重金属含量空间分布

图5为基于Meta分析原始数据, 绘制的我国农田土壤重金属含量空间分布.

从研究案例的数量分布来看, 案例主要聚集在云贵高原、黄淮海平原和东南沿海, 以青海、西藏和内蒙古为代表的西北地区研究案例较少. 在西北地区, 由于经济发展相对较弱、工业活动和人口较少, 因此人类活动对土壤重金属的累积影响较弱, 研究人员对该地区关注也较少. 相反,

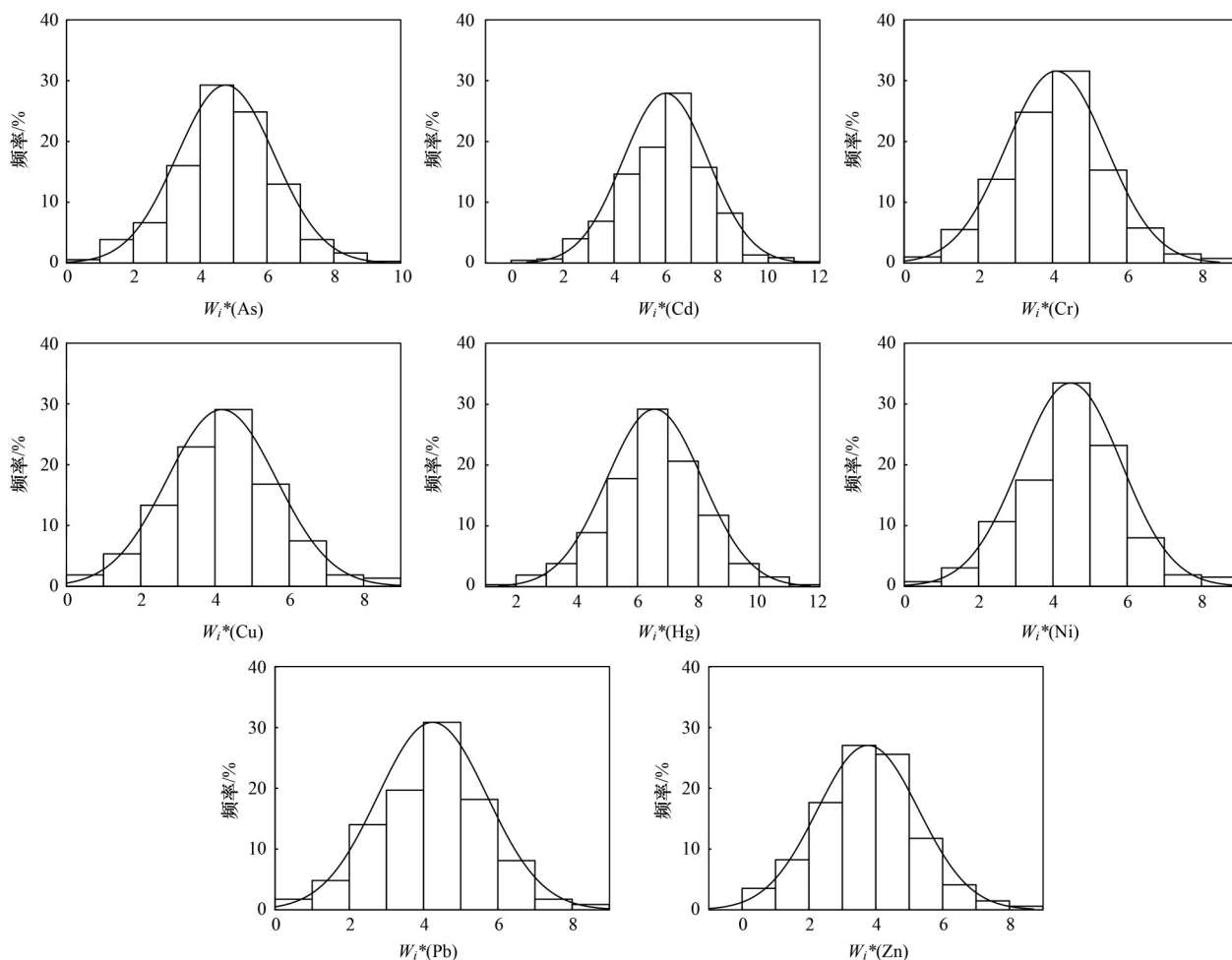


图 4 8 种重金属元素经对数转换后权重系数的概率分布直方图

Fig. 4 Probability distribution histogram of weight coefficients of eight elements after Log transformation

东南沿海和京津冀地区是我国经济发展最快的地区之一,大量人口聚集伴随高强度的农业和工业活动,因此研究人员常把该区域作为研究人类活动对土壤环境与物质循环影响的理想区域.相比之下,云贵高原土壤背景值普遍偏高,导致土壤重金属元素含量更易超标,该区域也是科研人员较为关注的区域之一.

从研究区域的大小来看,As、Hg、Ni、Pb和Zn的高值案例研究区域面积普遍较小;而相比较而言,Cd、Cr和Cu则存在于多个面积较大且累积明显的地区,这反映了农田土壤As、Hg、Ni、Pb和Zn的累积主要以小范围为主,而Cd、Cr和Cu则表现出大面积区域的累积效应,十分值得后续关注.

为进一步探究不同区域土壤重金属累积的差异性,本研究根据划分不同研究子区将案例进行亚组分析.在所有人类活动中,工业活动和农业活动是影响农田土壤重金属累积的主要因素<sup>[41]</sup>.因此,本研究根据中国八大经济区和中国九大农业区将全国细化为10个亚组区域,采用与全国均值计算相同的方法,得到各子区域的土壤重金属含量(见表5).此

外,为明确人类活动对土壤重金属累积的影响大小,本研究引入了地累积指数( $I_{geo}$ ),其结果见表6.

从表5和表6可知,虽然土壤As和Cr含量在部分区域存在高值,但人类活动对其累积并未有明显影响,其高值出现主要是当地土壤背景水平较高所致.Cd含量在全国各地土壤中均较高,其中以云贵高原为最高,其地累积指数也表明在全国各地存在较明显累积.在华南地区、黄土高原、四川盆地、云贵高原和长江中游地区Cd含量及其地累积指数均出现高值,这意味着由于人类活动可能加剧未来土壤Cd的进一步迅速累积.所有区域的土壤Cu含量均在参考标准值以下,在北方半干旱区域和黄土高原区域存在少量人类活动所致的累积.青藏地区和黄土高原地区土壤Hg的地累积指数均较大,但二者却存在巨大不同.在黄土高原区,Hg含量出现了不合理的极大值,主要是由于该地区纳入文献大多是受工矿污染的土壤研究.在青藏地区,土壤Hg含量较低,但地累积指数却较大,这意味着该地区原始背景值较低,因受人类活动影响,导致累积较为明显.通常认为Hg的人为来源主要是化石燃料燃烧、

表 2 不同地区土壤背景值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$   
Table 2 Soil background values in different regions/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

| 地区    | As    | Cd    | Cr   | Cu   | Hg    | Ni   | Pb   | Zn    | 文献   |
|-------|-------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|
| 北京    | 9.70  | 0.074 | 68.1 | 25.4 | 0.069 | 29.0 | 25.4 | 102.6 | [19] |
| 天津    | 9.60  | 0.090 | 84.2 | 21.0 | 0.084 | 33.3 | 21.0 | 79.3  | [19] |
| 河北    | 13.60 | 0.094 | 68.3 | 21.5 | 0.036 | 30.8 | 21.5 | 78.4  | [19] |
| 山西    | 9.80  | 0.128 | 61.8 | 15.8 | 0.027 | 32.0 | 15.8 | 75.5  | [19] |
| 辽宁    | 8.80  | 0.108 | 57.9 | 21.4 | 0.037 | 25.6 | 21.4 | 63.5  | [19] |
| 吉林    | 8.00  | 0.099 | 46.7 | 28.8 | 0.037 | 21.4 | 28.8 | 80.4  | [19] |
| 黑龙江   | 7.30  | 0.086 | 58.6 | 24.2 | 0.037 | 22.8 | 24.2 | 70.7  | [19] |
| 上海    | 9.19  | 0.138 | 70.2 | 25.0 | 0.095 | 29.9 | 25.0 | 81.3  | [19] |
| 江苏    | 10.99 | 0.126 | 77.8 | 26.2 | 0.289 | 26.7 | 26.2 | 62.6  | [19] |
| 浙江    | 9.20  | 0.070 | 52.9 | 23.7 | 0.086 | 24.6 | 23.7 | 70.6  | [19] |
| 安徽    | 9.99  | 0.097 | 66.5 | 26.6 | 0.033 | 29.8 | 26.6 | 62.0  | [19] |
| 福建    | 5.78  | 0.054 | 41.3 | 34.9 | 0.081 | 18.2 | 34.9 | 82.7  | [19] |
| 江西    | 14.90 | 0.108 | 45.9 | 32.3 | 0.084 | 18.9 | 32.3 | 69.4  | [19] |
| 山东    | 9.30  | 0.084 | 66.0 | 25.8 | 0.019 | 25.8 | 25.8 | 63.5  | [19] |
| 河南    | 11.40 | 0.074 | 63.8 | 19.6 | 0.034 | 26.7 | 19.6 | 60.1  | [19] |
| 湖北    | 12.30 | 0.172 | 86.0 | 26.7 | 0.080 | 37.3 | 26.7 | 83.6  | [19] |
| 湖南    | 15.70 | 0.126 | 71.4 | 29.7 | 0.116 | 31.9 | 29.7 | 94.4  | [19] |
| 广东    | 8.99  | 0.056 | 50.5 | 36.0 | 0.078 | 14.4 | 36.0 | 47.3  | [19] |
| 广西    | 20.50 | 0.267 | 82.1 | 24.0 | 0.152 | 26.6 | 24.0 | 75.6  | [19] |
| 四川    | 10.40 | 0.079 | 79.0 | 30.9 | 0.061 | 32.6 | 30.9 | 86.5  | [19] |
| 贵州    | 20.00 | 0.659 | 95.9 | 35.2 | 0.110 | 39.1 | 35.2 | 99.5  | [19] |
| 云南    | 18.40 | 0.218 | 65.2 | 40.6 | 0.058 | 42.5 | 40.6 | 89.7  | [19] |
| 西藏    | 16.20 | 0.074 | 68.0 | 19.4 | 0.021 | 32.1 | 27.6 | 70.7  | [19] |
| 陕西    | 11.10 | 0.094 | 62.5 | 21.4 | 0.030 | 28.8 | 21.4 | 69.4  | [19] |
| 甘肃    | 12.60 | 0.116 | 70.2 | 18.8 | 0.020 | 35.2 | 18.8 | 68.5  | [19] |
| 青海    | 14.00 | 0.137 | 70.1 | 20.9 | 0.020 | 29.6 | 20.9 | 80.3  | [19] |
| 宁夏    | 11.90 | 0.112 | 60.0 | 20.9 | 0.021 | 36.5 | 20.9 | 58.8  | [19] |
| 新疆    | 11.20 | 0.120 | 49.3 | 19.4 | 0.017 | 26.6 | 19.4 | 68.8  | [19] |
| 重庆    | 5.82  | 0.133 | 76.1 | 23.8 | 0.053 | 30.6 | 25.5 | 75.8  | [20] |
| 内蒙古   | 6.12  | 0.050 | 39.8 | 13.9 | 0.030 | 18.6 | 16.8 | 56.6  | [21] |
| 河套平原  | 9.68  | 0.116 | 56.4 | 19.2 | 0.025 | 24.5 | 18.7 | 55.7  | [21] |
| 海南    | 2.92  | 0.060 | 52.8 | 15.4 | 0.040 | 22.1 | 24.6 | 48.3  | [22] |
| 西江流域  | 17.04 | 0.560 | 82.7 | 20.8 | 0.040 | 26.5 | 50.7 | 67.3  | [23] |
| 松嫩平原  | 9.33  | 0.079 | 50.8 | 18.7 | 0.016 | 24.2 | 22.7 | 57.3  | [24] |
| 韶关市   | 9.60  | 0.170 | 45.5 | 17.3 | 0.110 | 15.3 | 51.9 | 67.0  | [25] |
| 杭嘉湖平原 | 7.59  | 0.152 | 77.6 | 30.8 | 0.160 | 32.4 | 30.4 | 92.7  | [26] |
| 宁绍平原  | 6.23  | 0.157 | 68.7 | 29.2 | 0.110 | 26.3 | 32.5 | 89.9  | [26] |
| 温黄平原  | 7.98  | 0.159 | 89.1 | 33.8 | 0.107 | 38.3 | 34.2 | 106.0 | [26] |
| 温瑞平原  | 6.27  | 0.180 | 85.8 | 29.9 | 0.144 | 35.7 | 41.1 | 116.0 | [26] |
| 金衢盆地  | 6.49  | 0.194 | 39.1 | 18.1 | 0.098 | 12.4 | 35.1 | 72.1  | [26] |
| 商丘市   | 10.50 | 0.163 | 59.6 | 22.7 | 0.034 | 28.9 | 22.3 | 67.2  | [27] |
| 喀什地区  | 16.89 | 0.140 | 46.7 | 26.5 | 0.024 | 25.4 | 22.4 | 70.6  | [28] |
| 太原市   | 6.27  | 0.138 | 57.3 | 23.6 | 0.210 | 22.1 | 27.0 | 74.5  | [29] |

有色金属冶炼、汞冶炼、水泥生产和涉汞相关企业的生产(荧光灯管生产、电石法 PVC 生产和氯碱工业)等<sup>[42]</sup>，这也解释了为何在东北平原、东部沿海和华南地区这类新老工业区的农田土壤 Hg 含量出现高值的原因。Ni 元素在全国各区域土壤中均低于参

考标准值，且受人类活动影响较小。Pb 和 Zn 则表现出相似规律，在云贵高原，这两种元素在土壤中均略微超标，这主要与云贵高原较高的土壤背景值和频繁的采矿活动相关<sup>[32,43]</sup>，其他区域均处于参考标准值以下。

表 3 我国农田土壤重金属含量<sup>1)</sup>/mg·kg<sup>-1</sup>

Table 3 Mean values of heavy metal contents in farmland in China/mg·kg<sup>-1</sup>

| 元素                   | As    | Cd      | Cr     | Cu     | Hg      | Ni    | Pb    | Zn    |
|----------------------|-------|---------|--------|--------|---------|-------|-------|-------|
| 研究数量                 | 363   | 451     | 399    | 376    | 315     | 263   | 463   | 345   |
| 平均值 <sup>2)</sup>    | 11.00 | 0.350 2 | 62.91  | 28.87  | 0.135 1 | 28.91 | 34.67 | 90.24 |
| 标准误(SE)              | 0.47  | 0.03    | 1.23   | 1.01   | 0.01    | 0.83  | 1.61  | 4.20  |
| 剔除异常值数量              | 15    | 23      | 20     | 21     | 10      | 6     | 21    | 24    |
| 全国背景值 <sup>3)</sup>  | 10.3  | 0.126   | 53     | 21     | 0.03    | 22.9  | 23.1  | 67    |
| 参考标准值 <sup>3)</sup>  | 20    | 0.30    | 250.00 | 150.00 | 0.50    | 60.00 | 80.00 | 200.0 |
| 超标研究数量               | 46    | 149     | 0      | 0      | 12      | 7     | 24    | 20    |
| 超标研究占比 <sup>4)</sup> | 13.22 | 34.81   | 0      | 0      | 3.93    | 2.72  | 5.43  | 6.04  |

1)平均值、标准误、背景值和参考标准值的单位为mg·kg<sup>-1</sup>,超标研究占比单位为%;2)平均值的计算过程中已经剔除了异常值;3)源于《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)中各元素最小的筛选值;4)超标研究占比即单个研究重金属含量超过参考标准值的数量占比

表 4 国内外相关研究的元素含量/mg·kg<sup>-1</sup>

Table 4 Domestic and international research on soil heavy metal content/mg·kg<sup>-1</sup>

| 项目     | As    | Cd   | Cr    | Cu    | Hg    | Ni              | Pb    | Zn    | 研究方式          | 文献   |
|--------|-------|------|-------|-------|-------|-----------------|-------|-------|---------------|------|
| 中国农田土壤 | 11.00 | 0.35 | 62.91 | 28.87 | 0.14  | 28.91           | 34.67 | 90.24 | Meta分析(449文献) | 本研究  |
| 中国农田土壤 | 10.4  | 0.23 | 59.97 | 28.91 | 0.118 | — <sup>1)</sup> | 32.73 | 86.52 | 综述(603文献)     | [5]  |
| 中国农田土壤 | 10.7  | 0.24 | 62.2  | 28.3  | 0.13  | 28.2            | 32.1  | 83.3  | Meta分析(336文献) | [6]  |
| 中国农田土壤 | 8.45  | 0.18 | 66.81 | 25.73 | 0.07  | 27.67           | 30.25 | 83.87 | Meta分析(410文献) | [7]  |
| 中国农田土壤 | 13.3  | 0.55 | 68.45 | 33.77 | 0.21  | 34.63           | 39.27 | 91.01 | 综述(568文献)     | [35] |
| 中国城市土壤 | 12.2  | 0.39 | 68.5  | 40.4  | 0.31  | 24.9            | 55.2  | 109   | 综述(21城市)      | [36] |
| 中国矿区土壤 | 20.6  | 3.76 | 67.3  | 88.8  | 0.18  | 45.4            | 196.4 | 241.9 | 综述(72矿区)      | [37] |
| 世界土壤   | 7.2   | 0.35 | 40    | 30    | 0.07  | 20              | 2~300 | 90    | 综述            | [38] |
| 欧洲土壤   | 5.5   | 0.18 | 20    | 15    | 0.03  | 15              | 16    | 45    | 实地监测(2 108样点) | [38] |
| 美国土壤   | 5.2   | 0.34 | 37    | 17    | 0.06  | 19              | 16    | 48    | 实地监测(355样点)   | [39] |
| 泰国土壤   | 7.5   | 0.03 | 25.2  | 14.1  | 0.04  | 13.5            | 17.5  | 23.9  | 实地监测(318样点)   | [40] |

1)“—”表示文献没有给出相应数据

表 5 不同地区土壤重金属含量/mg·kg<sup>-1</sup>

Table 5 Soil heavy metal concentration in different regions/mg·kg<sup>-1</sup>

| 地区 <sup>1)</sup>    | As       | Cd         | Cr       | Cu       | Hg         | Ni       | Pb       | Zn        |
|---------------------|----------|------------|----------|----------|------------|----------|----------|-----------|
| 北方半干旱区              | 11.03*** | 0.545 9*   | 58.59*** | 31.40*** | 0.038 2*** | 31.12*** | 23.09*** | 80.94***  |
| 东北平原区               | 8.50***  | 0.358 7*   | 54.68*** | 26.11*** | 0.403 6*** | 26.28*** | 25.34*** | 64.96***  |
| 东部沿海区               | 9.35***  | 0.238 1*** | 65.73*** | 30.83*** | 0.190 1*** | 27.03*** | 32.92*** | 100.05*** |
| 华南地区                | 12.26*** | 0.412 1*** | 57.50*** | 32.41**  | 0.192 4*** | 30.01*** | 60.43*** | 121.38*** |
| 黄淮平原区               | 9.47***  | 0.292 2*** | 62.72*** | 25.51*** | 0.109 4    | 27.26*** | 29.39*** | 70.26***  |
| 黄土高原区               | 11.24*** | 0.524 1**  | 68.66*** | 36.04*** | 1.002 3*   | 31.82*** | 56.82**  | 100.15*** |
| 青藏高原区               | 15.91*** | 0.267 5    | 76.98    | 22.96*** | 0.092      | 34.79    | 27.36*** | 74.46***  |
| 四川盆地                | 8.55***  | 0.532 8*   | 88.35*** | 32.40*** | 0.152 6    | 36.54*** | 34.43*** | 95.69***  |
| 云贵高原区               | 38.23*** | 1.472 0*   | 94.25*** | 53.81*** | 0.198 6*** | 42.17*** | 88.96*   | 238.68    |
| 长江中游区               | 17.44*** | 0.872 8*** | 63.76*** | 35.64*** | 0.131 2*** | 30.54*** | 45.43*** | 105.26*** |
| 全国均值                | 11.00*** | 0.350 2*** | 62.91*** | 28.87*** | 0.135 1*** | 28.91*** | 34.67*** | 90.24***  |
| 参考标准值 <sup>2)</sup> | 20       | 0.3        | 250      | 150      | 0.5        | 60       | 80       | 200       |

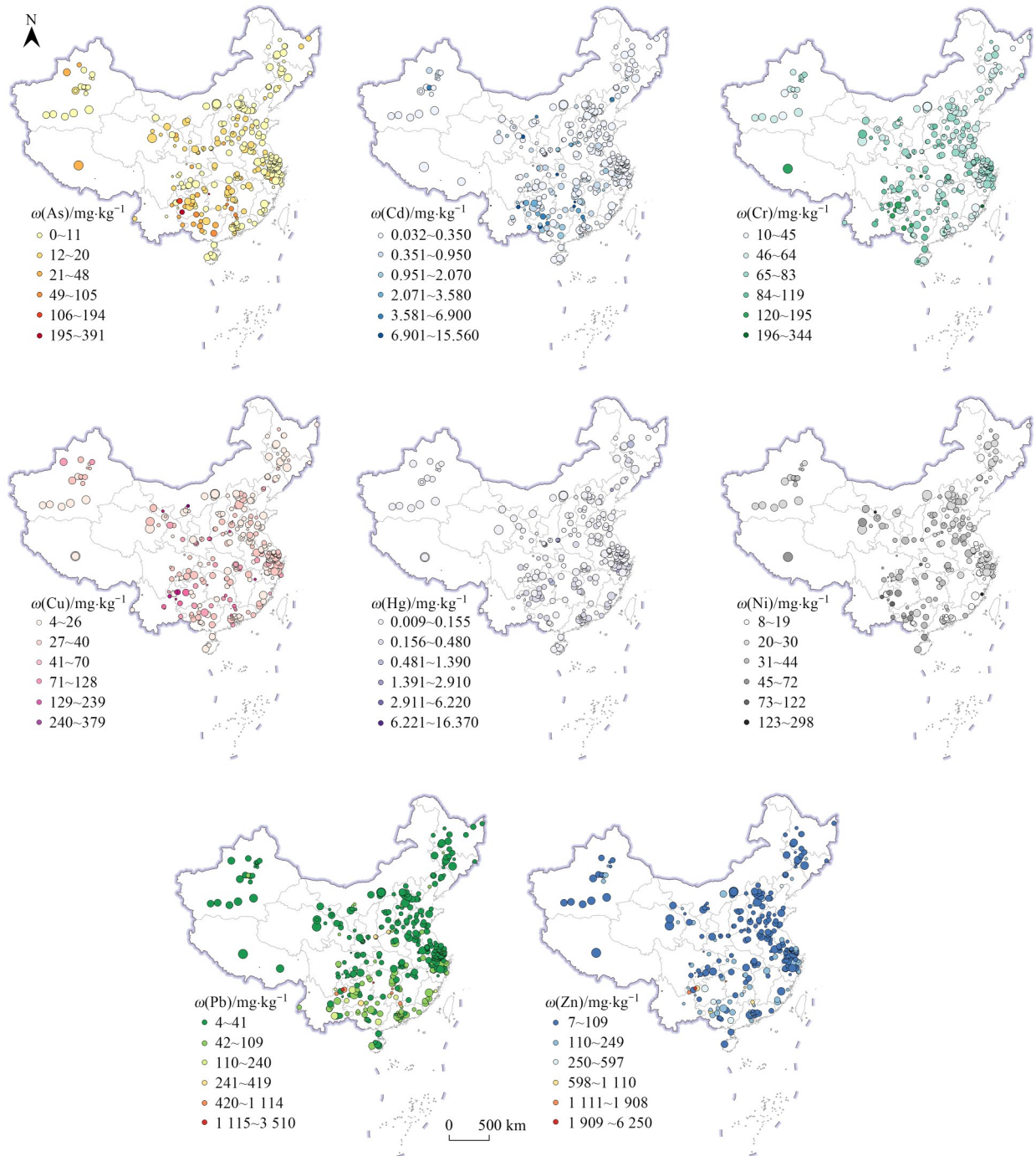
1)北方半干旱区:甘肃、新疆、内蒙古和宁夏;东北平原:黑龙江、吉林和辽宁;东部沿海:上海、江苏和浙江;华南农业区:广东、福建和海南;黄淮平原:河北、河南、山东、北京和天津;黄土高原:陕西和山西;青藏高原:青海和西藏;四川盆地:四川和重庆;云贵高原:云南、贵州和广西;长江中游:湖南、湖北、安徽和江西;2)源于《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)中各元素最小筛选值;3)\*\*\*表示效应值合并模型极其显著, $P < 0.001$ ;\*\*表示效应值合并模型极显著, $P < 0.01$ ;\*表示效应值合并模型显著, $P < 0.05$ ;未做说明表示效应值合并模型不显著, $P > 0.05$ .

### 2.3 我国农田土壤重金属含量时空变化

为表征重金属污染空间格局随时间的变化情况,本研究通过划分不同时间段(2005~2009年、2010~2013年、2014~2017年和2018~2021年)来计算

各时期轻度污染及以上污染案例的 $I_{\text{geo}}$ 平均值,以每个案例 $I_{\text{geo}}$ 平均值为权重,绘制了每个时间段的标准差椭圆(SDE).

从空间上来看(图6),2005~2009年共有23个



基于自然资源部标准地图网站下载的底图制作,底图边界无修改,审图号:GS(2020)4619号;图中颜色深浅表示土壤重金属含量高低,点的大小与案例的研究面积有关(为防止点堆叠和遮盖,并未直接选择研究区面积作为点大小参数,而是选择面积自然对数作为点大小参数)

图5 土壤重金属元素含量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of heavy metal element content in soil

研究案例,主要分布在东部沿海和黄淮平原,SDE呈“南(偏东)-北(偏西)”分布格局.2010~2013年共有24个案例,主要集中在北方半干旱地区(内蒙古)、华南地区(广东、福建)和东部沿海(江苏、浙江).与前一时段相比,由于西北地区出现了更多高权重的案例,椭圆长短轴差异变大,SDE模型表现出明显“西北-东南”分布格局,椭圆重心也略向西南方向偏移.在2014~2017年期间,案例数量迅速增加至44

个,云贵高原、四川盆地和黄土高原的案例数量增加明显,这使得SDE模型迅速转变为“南(偏西)-北(偏东)”分布格局,同时椭圆重心进一步向西南方向偏移.在2018~2021年,研究案例进一步增加到了69个,增加的案例仍然以云贵高原、四川盆地和黄土高原为主,使得模型“南(偏西)-北(偏东)”分布趋势更加明显,椭圆重心继续向西南方向偏移,椭圆的长短轴均更加变短,表明椭圆内案例的空间密

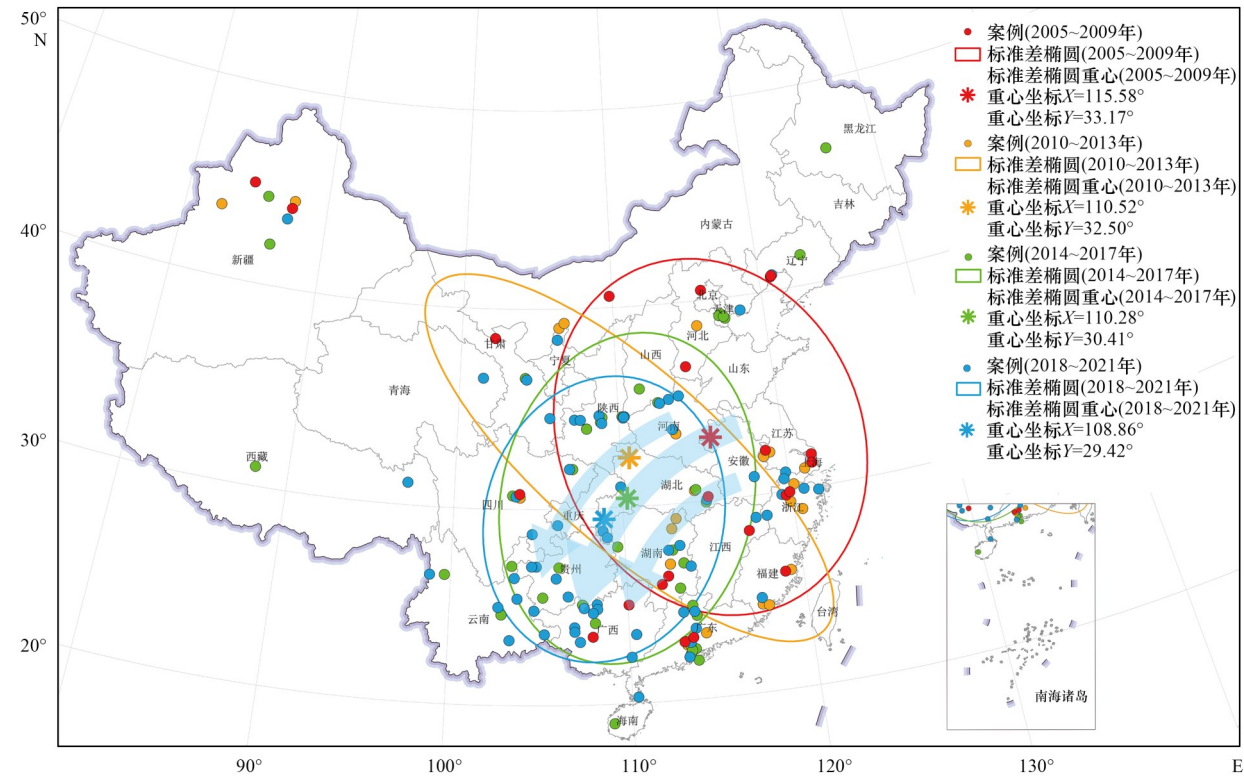
表 6 各研究区域地累积指数( $I_{geo}$ )<sup>1)</sup>  
Table 6 Geoaccumulation index ( $I_{geo}$ ) for different regions

| 地区     | As    | Cd   | Cr    | Cu    | Hg    | Ni    | Pb    | Zn    |
|--------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 北方半干旱区 | -0.70 | 0.62 | -0.52 | 0.07  | 0.21  | 0.45  | -0.38 | -0.27 |
| 东北平原区  | -0.55 | 0.46 | -0.57 | -0.60 | 0.81  | -0.39 | -0.61 | -0.76 |
| 东部沿海区  | -0.67 | 0.16 | -0.75 | -0.37 | -0.80 | -0.68 | -0.34 | -0.18 |
| 华南地区   | -0.09 | 1.37 | -0.47 | -0.61 | 0.59  | 0.02  | 0.04  | 0.42  |
| 黄淮平原区  | -0.80 | 0.79 | -0.71 | -0.49 | 0.51  | -0.68 | -0.37 | -0.68 |
| 黄土高原区  | -0.49 | 1.22 | -0.48 | 0.12  | 1.96  | -0.35 | 0.30  | -2.88 |
| 青藏高原区  | -0.84 | 0.86 | -0.72 | -0.40 | 1.56  | -0.53 | -0.39 | -0.54 |
| 四川盆地   | -0.59 | 1.41 | -0.36 | -0.34 | 0.22  | -0.35 | -0.35 | -0.32 |
| 云贵高原区  | -0.16 | 0.56 | -0.54 | 0.00  | 0.13  | -0.32 | 0.58  | 0.92  |
| 长江中游区  | -0.41 | 1.40 | -0.90 | -0.34 | -0.01 | -0.74 | 0.04  | -0.08 |

1)计算结果表示区域内所有单个案例地累积指数算数平均值

度增加.在4个时间段内,标准差椭圆中心均呈现出向西南地区迁移的趋势,这与中国经济发展轨迹密切相关.我国中部和西南部经济增长迅速,在过去十几年间,中部和西南地区取代了东北地区 and 沿海地

区逐渐成为我国经济增速最快的区域;此外,长久以来中部地区的第二产业占比就较高,西南地区近年来也恰逢经历了第二产业的高速发展,这应是加重该区域农田土壤重金属累积的主要原因<sup>[44]</sup>.



基于自然资源部标准地图网站下载的底图制作,底图边界无修改,审图号:GS(2020)4630号

图 6 中国农田土壤重金属污染时空格局

Fig. 6 Spatial and temporal changes in heavy metal pollution in farmland soil of China

2.4 不同耕地类型土壤重金属含量差异

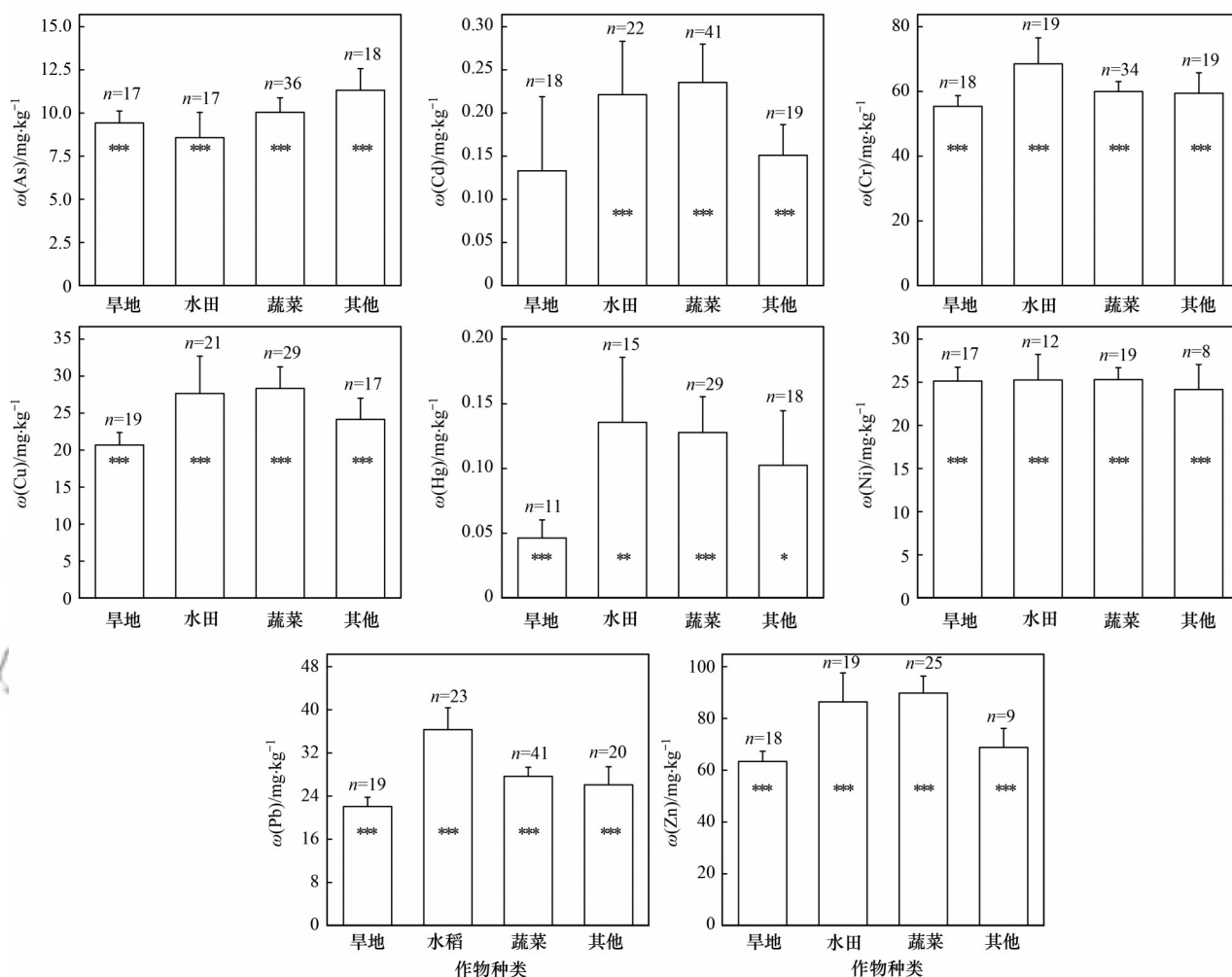
已有研究表明土壤重金属分布与多种因素相关,主要包括:土壤类型、土壤pH、土壤有机质和土地利用类型等<sup>[45]</sup>.在土地利用类型与土壤重金属的相关研究中,大多停留在一级地类间的对比(例如耕地与林地)<sup>[46]</sup>,很少关注到一级地类的进一步细化.本研究通过对耕地进一步细分为旱地、水田、

蔬菜地以及其他类耕地(果园、茶园),进行了亚组分析,探究不同耕地类型下土壤重金属含量的差异性.

计算结果如图7所示,As在不同耕地土壤的含量表现为:其他>蔬菜>旱地>水田,水田和旱地之间差异较小,这可能是因为As被广泛用于杀虫剂、除草剂和化肥等农业化学用品中,而果园、茶园和

蔬菜地对此类农业用品依赖更强所致<sup>[47]</sup>;此外,成土母质也被认为是影响土壤 As 含量的重要因素<sup>[48]</sup>.在不同耕作土壤中,Cr、Hg、Pb 和 Zn 则表现出相似的排序变化,依次为:水田>蔬菜>其他>旱地.对于 Cu 元素,在蔬菜地和水田土壤中的累积量较高,与前人的研究结果一致<sup>[49,50]</sup>,这可能是由于含铜杀虫剂和杀菌剂在蔬菜地和稻田中被普遍使用所致<sup>[51]</sup>.Ni 在不同耕作土壤之间并没表现出明显差异.由此可见,蔬菜地和水田总体上对促进土壤重

金属的累积更为明显.然而需要注意的是,在 2000~2016 年期间,我国蔬菜种植面积增长了 28.3%,且在西部地区增速较快,这意味着西部地区需要更加关注因蔬菜种植所带来的土壤重金属的污染问题<sup>[52]</sup>.而水稻是我国居民特别是南方地区重要的主食,在淹水环境下,重金属的有效性提高,更易从土壤中转移富集到籽粒中<sup>[53]</sup>,因此南方地区也需关注在水稻种植过程中重金属在土壤和籽粒中的累积问题.



\*\*\*表示效应值合并模型极其显著,  $P < 0.001$ ; \*\*表示效应值合并模型极显著,  $P < 0.01$ ; \*表示效应值合并模型显著,  $P < 0.05$ ; 未做说明表示效应值合并模型不显著,  $P > 0.05$

图 7 不同作物种类土壤重金属含量

Fig. 7 Heavy metal content in soil of different crop types

### 3 结论

(1)与土壤背景值相比,除 As 外各元素在农田土壤中均存在累积,其中 Cd 和 Hg 的累积量较大,分别超过土壤背景值 177.9% 和 340.3%.

(2)在空间分布上,研究案例主要集中在东部沿海、黄淮平原和云贵高原地区,云贵高原是高值案例最为集中的区域,我国农田土壤重金属污染的

重心正逐渐从中东部向西南地区迁移.

(3)人类活动主要影响到 Cd 和 Hg 在农田土壤中的累积,尤其在黄土高原、青藏地区、四川盆地和华南地区,这种影响更加明显.

(4)不同耕地类型的土壤重金属累积存在差异,总体而言,As 元素在果园、茶园和蔬菜地的含量相对较高,而其他元素则在蔬菜地和水田中含量较高.

### 参考文献:

[1] Liu B L, Ai S W, Zhang W Y, et al. Assessment of the

- bioavailability, bioaccessibility and transfer of heavy metals in the soil-grain-human systems near a mining and smelting area in NW China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **609**: 822-829.
- [2] 蔡美芳, 李开明, 谢丹平, 等. 我国耕地土壤重金属污染现状与防治对策研究[J]. *环境科学与技术*, 2014, **37**(S2): 223-230.
- Cai M F, Li K M, Xie D P, *et al.* The status and protection strategy of farmland soils polluted by heavy metals [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **37**(S2): 223-230.
- [3] Rehman K, Fatima F, Waheed I, *et al.* Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences [J]. *Journal of Cellular Biochemistry*, 2018, **119**(1): 157-184.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Huang Y, Wang L Y, Wang W J, *et al.* Current status of agricultural soil pollution by heavy metals in China: a meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **651**: 3034-3042.
- [7] Yuan X H, Xue N D, Han Z G. A meta-analysis of heavy metals pollution in farmland and urban soils in China over the past 20 years [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **101**: 217-226.
- [8] Shao D W, Zhan Y, Zhou W J, *et al.* Current status and temporal trend of heavy metals in farmland soil of the Yangtze River delta region: field survey and meta-analysis [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 329-336.
- [9] 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.
- [10] Gurevitch J, Hedges L V. Meta-analysis: combining the results of independent experiments [A]. In: Scheiner S (Ed.). *Design and Analysis of Ecological Experiments* [M]. New York: Chapman and Hall, 1998. 378-398.
- [11] Hozo S P, Djulbegovic B, Hozo I. Estimating the mean and variance from the median, range, and the size of a sample [J]. *BMC Medical Research Methodology*, 2005, **5**(1), doi: 10.1186/1471-2288-5-13.
- [12] Hedges L V, Vevea J L. Fixed- and random-effects models in meta-analysis [J]. *Psychological Methods*, 3(4): 486-504.
- [13] Laird N M, Mosteller F. Some statistical methods for combining experimental results [J]. *International Journal of Technology Assessment in Health Care*, 1990, **6**(1): 5-30.
- [14] Baker R, Jackson D. A new approach to outliers in meta-analysis [J]. *Health Care Management Science*, 2008, **11**(2): 121-131.
- [15] Liang H J, Li J L, Di Y L, *et al.* Logarithmic transformation is essential for statistical analysis of fungicide EC50 Values [J]. *Journal of Phytopathology*, 2015, **163**(6): 456-464.
- [16] Viechtbauer W, Cheung M W L. Outlier and influence diagnostics for meta-analysis [J]. *Research Synthesis Methods*, 2010, **1**(2): 112-125.
- [17] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *GeoJournal*, 1969, **2**: 108-118.
- [18] Xia P H, Ma L, Sun R G, *et al.* Evaluation of potential ecological risk, possible sources and controlling factors of heavy metals in surface sediment of Caohai Wetland, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **740**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140231.
- [19] 国家环境保护局, 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.
- [20] 赵丽娟. 重庆都市经济圈土壤八种重金属元素的背景值特征和分布规律[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
- Zhao L J. Background value and enrichment of eight heavy metals in soil of Chongqing metropolitan area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008.
- [21] 高红霞, 王喜宽, 张青, 等. 内蒙古河套地区土壤背景值特征 [J]. *地质与资源*, 2007, **16**(3): 209-212.
- Gao H X, Wang X K, Zhang Q, *et al.* Characteristics of soil background value in Hetao area, Inner Mongolia [J]. *Geology and Resources*, 2007, **16**(3): 209-212.
- [22] 吴含志. 海南省土壤重金属元素分布特征及成土母质的影响 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- Wu H Z. The distribution characteristics of heavy metal elements in soil and the influence of soil parent material in Hainan province [D]. Beijing: China University of Geosciences Beijing, 2008.
- [23] 王佛鹏, 宋波, 周浪, 等. 广西西江流域土壤重金属背景值再研究 [J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(9): 3695-3702.
- Wang F P, Song B, Zhou L, *et al.* Redistribution of heavy metal background in soil of Xijiang River Basin in Guangxi [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(9): 3695-3702.
- [24] 张慧, 马鑫鹏, 苏航, 等. 松嫩平原黑龙江省南部土壤重金属背景值及污染程度分析 [J]. *干旱地区农业研究*, 2018, **36**(6): 230-236.
- Zhang H, Ma X P, Su H, *et al.* Soil heavy metal background values and pollution degree in southern Songnen Plain of Heilongjiang Province [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, **36**(6): 230-236.
- [25] 李婷婷, 刘子宁, 贾磊, 等. 广东韶关地区土壤环境背景值及其影响因素 [J]. *地质学刊*, 2021, **45**(3): 254-261.
- Li T T, Liu Z N, Jia L, *et al.* Analysis on background value of soil elements and influencing factors in Shaoguan, Guangdong Province [J]. *Journal of Geology*, 2021, **45**(3): 254-261.
- [26] 汪庆华, 董岩翔, 周国华, 等. 浙江省土壤地球化学基准值与环境背景值 [J]. *生态与农村环境学报*, 2007, **23**(2): 81-88.
- Wang Q H, Dong Y X, Zhou G H, *et al.* Soil geochemical baseline and environmental background values of agricultural regions in Zhejiang Province [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, **23**(2): 81-88.
- [27] 王春松, 盛奇, 裴瑞亮. 河南商丘地区土壤元素基准值与背景值研究 [J]. *安徽农业科学*, 2019, **47**(12): 1-5.
- Wang C S, Sheng Q, Pei R L. Study on soil element reference value and background value in Shangqiu region of Henan Province [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, **47**(12): 1-5.
- [28] 王琳. 喀什地区土壤元素背景值研究 [J]. *新疆环境保护*, 1992, **14**(4): 20-27.
- [29] 陈慧选, 吴家华, 白增森, 等. 太原市南郊区土壤8种重金属元素背景值的研究 [J]. *山西农业科学*, 1994, **22**(2): 32-35.
- Chen H X, Wu J H, Bai Z S, *et al.* Environmental background data for agricultural soil in Taiyuan South-suburban [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 1994, **22**(2): 32-35.
- [30] Qiu G L, Feng X B, Wang S F, *et al.* Environmental contamination of mercury from Hg-mining areas in Wuchuan, northeastern Guizhou, China [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **142**(3):

- 549-558.
- [31] 伦知颖, 程志中, 严光生, 等. 中国不同景观区水系沉积物中 39 种元素的背景值[J]. 地学前缘, 2015, **22**(5): 226-230.
- Lun Z Y, Cheng Z Z, Yan G S, *et al.* Concentrations of 39 elements in stream sediment in different landscape zones of China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, **22**(5): 226-230.
- [32] 张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 等. 中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(9): 4414-4421.
- Zhang J L, Qu M K, Chen J, *et al.* Meta-analysis of the effects of metal mining on soil heavy metal concentrations in southwest China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4414-4421.
- [33] 马丽钧, 周浪, 宋波, 等. 贵州省旱地土壤 Hg 污染状况与玉米安全生产评估[J]. 环境科学, 2023, **44**(5): 2868-2878.
- Ma L J, Zhou L, Song B, *et al.* Mercury pollution in dryland soil and evaluation of maize safety production in Guizhou Province [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(5): 2868-2878.
- [34] Chen S B, Wang M, Li S S, *et al.* Overview on current criteria for heavy metals and its hint for the revision of soil environmental quality standards in China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, **17**(4): 765-774.
- [35] 曾思燕, 于昊辰, 马静, 等. 中国耕地表层土壤重金属污染状况评判及休耕空间权衡[J]. 土壤学报, 2022, **59**(4): 1036-1047.
- Zeng S Y, Yu H C, Ma J, *et al.* Identifying the status of heavy metal pollution of cultivated land for tradeoff spatial fallow in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, **59**(4): 1036-1047.
- [36] Luo X S, Yu S, Zhu Y G, *et al.* Trace metal contamination in urban soils of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **421-422**: 17-30.
- [37] 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.
- [38] Reimann C, Fabian K, Birke M, *et al.* GEMAS: Establishing geochemical background and threshold for 53 chemical elements in European agricultural soil [J]. *Applied Geochemistry*, 2018, **88**: 302-318.
- [39] Shacklette H T, Boerngen J G. Element concentrations in soils and other surficial materials of the conterminous United States [M]. Washington: United States Department of the Interior, Geological Survey, 1984.
- [40] Zarcinas B A, Pongsakul P, McLaughlin M J, *et al.* Heavy metals in soils and crops in Southeast Asia 2. Thailand [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, **26**(3): 359-371.
- [41] 蒋玉莲, 余京, 王锐, 等. 渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价[J]. 环境科学, 2023, **44**(7): 4017-4026.
- Jiang Y L, Yu J, Wang R, *et al.* Source analysis and pollution assessment of soil heavy metals in typical geological high background area in southeastern Chongqing [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(7): 4017-4026.
- [42] Song Z C, Li P, Ding L, *et al.* Environmental mercury pollution by an abandoned chlor-alkali plant in southwest China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2018, **194**: 81-87.
- [43] 贺灵, 吴超, 曾道明, 等. 中国西南典型地质背景区土壤重金属分布及生态风险特征[J]. 岩矿测试, 2021, **40**(3): 384-396.
- He L, Wu C, Zeng D M, *et al.* Distribution of heavy metals and ecological risk of soils in the typical geological background region of southwest China [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2021, **40**(3): 384-396.
- [44] 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.
- [45] Hou D Y, O'Connor D, Nathanail P, *et al.* Integrated GIS and multivariate statistical analysis for regional scale assessment of heavy metal soil contamination: a critical review [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **231**: 1188-1200.
- [46] Hu Y N, Liu X P, Bai J M, *et al.* Assessing heavy metal pollution in the surface soils of a region that had undergone three decades of intense industrialization and urbanization [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(9): 6150-6159.
- [47] 黄凤艳, 周浪, 宋波, 等. 贵州省旱地土壤和玉米 As 含量特征及其种植安全性评估[J]. 环境科学, 2023, **44**(1): 415-425.
- Huang F Y, Zhou L, Song B, *et al.* Characteristics and planting safety assessment of As content in dryland soil and maize in Guizhou Province [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(1): 415-425.
- [48] 余雪莲, 李启权, 彭月月, 等. 成都平原核心区土壤砷空间变异特征及影响因素[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(4): 1005-1012.
- Yu X L, Li Q Q, Peng Y Y, *et al.* Spatial variability and influencing factors of soil arsenic in the core area of Chengdu Plain [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(4): 1005-1012.
- [49] 石雨佳, 方林发, 方标, 等. 三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析[J]. 环境科学, 2023, **44**(3): 1611-1619.
- Shi Y J, Fang L F, Fang B, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of heavy metals in vegetable field in the Three Gorges Reservoir area (Chongqing section) [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(3): 1611-1619.
- [50] 李颖, 陈敬龙, 段华泰, 等. 工业和农业污染稻田土壤重金属的赋存形态及水稻吸收运移比较[J]. 土壤通报, 2022, **53**(1): 204-212.
- Li H, Chen J L, Duan H T, *et al.* Comparison of the forms of heavy metals and the absorption and transport by rice between industrial and agricultural contaminated paddy soils [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, **53**(1): 204-212.
- [51] Tegenaw A, Sorial G A, Sahle-Demessie E, *et al.* Influence of water chemistry on colloid-size Cu-based pesticides particles: a case of Cu(OH)<sub>2</sub> commercial fungicide/bactericide [J]. *Chemosphere*, 2020, **239**, doi: 10.1016/j.chemosphere. 2019. 124699.
- [52] 于丽艳, 穆月英. 中国蔬菜生产的时空变迁与比较优势分析[J]. 新疆农业科学, 2019, **56**(10): 1948-1958.
- Yu L Y, Mu Y Y. Analysis of the temporal and spatial changes and comparative advantages of vegetable production in China [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2019, **56**(10): 1948-1958.
- [53] Murakami M, Nakagawa F, Ae N, *et al.* Phytoextraction by rice capable of accumulating Cd at high levels: reduction of Cd content of rice grain [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(15): 5878-5883.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                       |                                                                |        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------|
| Spatial Distribution Characteristics of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Time Series Decomposition                       | YAO Qing, DING Jing, YANG Xu, <i>et al.</i>                    | (2487) |
| Ozone Sensitivity Analysis in Urban Beijing Based on Random Forest                                                                                                    | ZHOU Hong, WANG Ming, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i>             | (2497) |
| Prediction of Ozone Pollution in Sichuan Basin Based on Random Forest Model                                                                                           | YANG Xiao-tong, KANG Ping, WANG An-yi, <i>et al.</i>           | (2507) |
| Establishment and Effective Evaluation of Haikou Ozone Concentration Statistical Prediction Model                                                                     | FU Chuan-bo, LIN Jian-xing, TANG Jia-xiang, <i>et al.</i>      | (2516) |
| Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Health Benefit Assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2015 to 2020          | GAO Ran, LI Qin, CHE Fei, <i>et al.</i>                        | (2525) |
| Water-soluble Inorganic Ion Content of PM <sub>2.5</sub> and Its Change Characteristics in Urban Area of Beijing in 2022                                              | CHEN Yuan-yuan, CUI Di, ZHAO Ze-xi, <i>et al.</i>              | (2537) |
| Pollution Characteristics, Source, and Health Risk Assessment of Metal Elements in PM <sub>2.5</sub> Between Winter and Spring in Zhengzhou                           | TAO Jie, YAN Hui-jiao, XU Yi-fei, <i>et al.</i>                | (2548) |
| Characteristics, Sources Apportionment, and Health Risks of PM <sub>2.5</sub> -bound PAHs and Their Derivatives Before and After Heating in Zibo City                 | SUN Gang-li, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>                  | (2558) |
| Components Characteristic and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Transition Period of Heating Season in Xi'an with High Time Resolution               | LI Meng-jin, ZHANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i>             | (2571) |
| Source and Cause Analysis of High Concentration of Inorganic Aerosol During Two Typical Pollution Processes in Winter over Tianjin                                    | LU Miao-miao, HAN Su-qin, LIU Ke-xin, <i>et al.</i>            | (2581) |
| Spatial-temporal Variation and Spatial Differentiation Geographic Detection of PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Shandong Province Based on Spatial Scale Effect | XU Yong, WEI Meng-xin, ZOU Bin, <i>et al.</i>                  | (2596) |
| Characteristics of VOCs Emissions and Ozone Formation Potential for Typical Chemicals Industry Sources in China                                                       | WU Ting, CUI Huan-wen, XIAO Xian-de, <i>et al.</i>             | (2613) |
| Formation Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources of Volatile Organic Compounds During an Air Pollution Episode in Autumn, Langfang                       | ZHANG Jing-qiao, LIU Zheng, DING Wen-wen, <i>et al.</i>        | (2622) |
| Scale Effects of Landscape Pattern on Impacts of River Water Quality: A Meta-analysis                                                                                 | WANG Yu-cang, DU Jing-jing, ZHANG Yu, <i>et al.</i>            | (2631) |
| Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter in Inflow Rivers of Baiyangdian Lake Water in Summer Flood Season                                    | MENG Jia-jing, DOU Hong, CHEN Zhe, <i>et al.</i>               | (2640) |
| Analysis on Hydrochemical Evolution of Shallow Groundwater East of Yongding River in Fengtai District, Beijing                                                        | HU Yu-xin, ZHOU Rui-jing, SONG Wei, <i>et al.</i>              | (2651) |
| Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Tan-Lu Fault Zone (Anhui Section)                           | LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i>                     | (2665) |
| Effects of Pesticides Use on Pesticides Residues and Its Environmental Risk Assessment in Xingkai Lake (China)                                                        | WANG Wei-qing, XU Xiong, LIU Quan-zhen, <i>et al.</i>          | (2678) |
| Characteristics of Microorganisms and Antibiotic Resistance Genes of the Riparian Soil in the Lanzhou Section of the Yellow River                                     | WEI Cheng-chen, WEI Feng-yi, XIA Hui, <i>et al.</i>            | (2686) |
| Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Algal Blooms and Its Driving Factors in Chaohu Lake Based on Multi-source Datasets                                     | JIN Xiao-long, DENG Xue-liang, DAI Rui, <i>et al.</i>          | (2694) |
| Characteristics of Epiphytic Bacterial Community on Submerged Macrophytes in Water Environment Supplemented with Reclaimed Water                                      | HE Yun, LI Xue-mei, LI Hong-quan, <i>et al.</i>                | (2707) |
| Effects of Water Level Fluctuations and Vegetation Restoration on Soil Prokaryotic Microbial Community Structure in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir   | MEI Yu, HUANG Ping, WANG Peng, <i>et al.</i>                   | (2715) |
| Bacterial Community Structure of Typical Lake Sediments in Yinchuan City and Its Response to Heavy Metals                                                             | MENG Jun-jie, LIU Shuang-yu, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i>      | (2727) |
| Effect of Thermal Hydrolysis Pretreatment Time on Microbial Community Structure in Sludge Anaerobic Digestion System                                                  | ZHANG Han, ZHANG Han, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>              | (2741) |
| Source Apportionment of Morphine in Wastewater                                                                                                                        | SHAO Xue-ting, ZHAO Yue-tong, JIANG Bing, <i>et al.</i>        | (2748) |
| Ecological Environment Dynamical Evaluation of Hutuo River Basin Using Remote Sensing                                                                                 | LI Yan-cui, YUAN Jin-guo, LIU Bo-han, <i>et al.</i>            | (2757) |
| Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin                                                                 | WANG Yi-qi, SUN Xue-ying                                       | (2767) |
| Ecosystem Service Trade-off Synergy Strength and Spatial Pattern Optimization Based on Bayesian Network: A Case Study of the Fenhe River Basin                        | CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, <i>et al.</i>              | (2780) |
| Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau                                               | LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, <i>et al.</i>                     | (2793) |
| Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021                                                  | ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, <i>et al.</i>               | (2806) |
| Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios                                                                   | CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, <i>et al.</i>                 | (2817) |
| Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration                      | WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, <i>et al.</i>            | (2828) |
| Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China                                             | JIANG Ke, JIA Ya-nan, YANG Yan, <i>et al.</i>                  | (2840) |
| Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses                                                                    | HUANG Shi-wei, ZHAO Yi-kai, ZHU Xin-yu, <i>et al.</i>          | (2848) |
| Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm                                    | HU Zhi-rui, ZHAO Wan-fu, SONG Yin-xian, <i>et al.</i>          | (2859) |
| Effects of Application of Different Organic Materials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields                                               | SUN Kai, CUI Yu-tao, LI Shun-jin, <i>et al.</i>                | (2871) |
| Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity                                                                                    | ZHOU Lian-hao, ZENG Quan-chao, MEI Tang-ying-ze, <i>et al.</i> | (2881) |
| Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System                                            | GAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, <i>et al.</i>             | (2891) |
| Effect of Biochar on NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N Transport in Loessial Soil and Its Simulation                                                                    | BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, <i>et al.</i>                 | (2905) |
| Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China: A Meta-analysis                                                                           | YANG Li, BAI Zong-xu, BO Wen-hao, <i>et al.</i>                | (2913) |
| Critical Review on Heavy Metal Contamination in Urban Soil and Surface Dust                                                                                           | WANG Xiao-yu, LIU En-feng, YANG Xiang-meng, <i>et al.</i>      | (2926) |
| Research Progress on Solidification and MICP Remediation of Soils in Heavy Metal Contaminated Site                                                                    | CHEN Yue-ru, GAO Wen-yan, CHEN Hong-ren, <i>et al.</i>         | (2939) |
| Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metal in Coal Mine Area near the Yellow River in Shandong                                                 | DAI Wen-ting, ZHANG Hui, WU Xia, <i>et al.</i>                 | (2952) |
| Heavy Metal Content and Risk Assessment of Sediments and Soils in the Juma River Basin                                                                                | HAN Shuang-bao, YUAN Lei, ZHANG Qiu-xia, <i>et al.</i>         | (2962) |
| Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in the Yellow River Floodplain of Yinchuan City                            | YU Lu-jia, MA Hai-jun, WANG Cui-ping                           | (2971) |
| Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of a City in Guangdong Province Based on Source Oriented and Monte Carlo Models                                       | CHEN Lian, ZOU Zi-hang, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i>          | (2983) |
| Chemical Speciation, Influencing Factors, and Regression Model of Heavy Metals in Farmland of Typical Carbonate Area with High Geological Background, Southwest China | TANG Rui-ling, XU Jin-li, LIU Bin, <i>et al.</i>               | (2995) |
| Hg Content Characteristics and Safe Planting Zoning of Paddy Soil and Rice in Guizhou Province                                                                        | WEI Mei-liu, ZHOU Lang, HUANG Yan-ling, <i>et al.</i>          | (3005) |
| Cadmium Phytoremediation Effect of Sweet Sorghum Assisted with Citric Acid on Typical Parent Soil in Southern China                                                   | LIU Meng-yu, LUO Xu-feng, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>          | (3016) |
| Effects of Modified Distillers' Grains Biochar on Cadmium Forms in Purple Soil and Cadmium Uptake by Rice                                                             | XIAO Nai-chuan, WANG Zi-fang, YANG Wen-na, <i>et al.</i>       | (3027) |
| Effects of Biochar on Growth and Pollutant Accumulation of Lettuce in Soil Co-contaminated with Tetracycline and Copper                                               | ZHENG Chen-ge, PEI Huan-huan, ZHANG Ya-shan, <i>et al.</i>     | (3037) |
| Effects of Vermicomposting on Compost Quality and Heavy Metals: A Meta-analysis                                                                                       | JIANG Ji-shao, HOU Rui, CUI Hui-lin, <i>et al.</i>             | (3047) |
| Advances in the Effects of Microplastics on Soil N <sub>2</sub> O Emissions and Nitrogen Transformation                                                               | LIU Yi-ge, YANG An-qi, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>             | (3059) |
| Effects of Land Use Patterns on Soil Microplastic Pollution in the Luoshijiang Sub-watershed of Erhai Lake Basin                                                      | DAI Liu-yun, HOU Lei, WANG Hua, <i>et al.</i>                  | (3069) |
| Characteristics of Microplastic Pollution in Sediment of Silty Coast in Culture Bay                                                                                   | SONG Ke-xin, HE Jin-cheng, LI Chang-wen, <i>et al.</i>         | (3078) |
| Effect of Polyethylene Microplastics on the Microbial Community of Saline Soils                                                                                       | WANG Zhi-chao, LI Zhe, LI Jia-chen, <i>et al.</i>              | (3088) |
| Characterization of Microplastic Surface Bacterial Community Structure and Prediction of Ecological Risk in Poyang Lake, China                                        | YU Jin-li, ZHAO Jun-kai, LUO Si-qi, <i>et al.</i>              | (3098) |
| Energy-saving and Emission Reduction Path for Road Traffic in Key Coastal Cities of Guangdong, Fujian and Zhejiang                                                    | XU Yi-nuo, WENG Da-wei, WANG Shuo, <i>et al.</i>               | (3107) |
| Life Cycle Carbon Reduction Benefits of Electric Heavy-duty Truck to Replace Diesel Heavy-duty Truck                                                                  | XU Yuan-yuan, GONG De-hong, HUANG Zheng-guang, <i>et al.</i>   | (3119) |