

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第10期

Vol.39 No.10

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国典型城市环境大气挥发性有机物特征比值	王鸣, 陈文泰, 陆思华, 邵敏 (4393)
2015年北京大气 VOCs 时空分布及反应活性特征	张博韬, 安欣欣, 王琴, 闫贺, 刘保献, 张大伟 (4400)
北京市建筑类涂料 VOCs 排放清单编制技术方法及应用	邓子钰, 高美平, 王庆玮, 聂磊 (4408)
基于实测的建筑类涂料挥发性有机物 (VOCs) 含量水平及组分特征	高美平, 邓子钰, 聂磊, 邵霞, 安小栓 (4414)
2014~2016年京津冀沿山城市空气质量首要污染物特征分析	王晓彦, 王帅, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (4422)
北京市大气环境 PM _{2.5} 和 PM ₁ 及其碳质组分季节变化特征及来源分析	樊啸辰, 郎建奎, 程水源, 王晓琦, 吕喆 (4430)
南京春季北郊地区大气 PM _{2.5} 中主要化学组分及碳同位素特征	周一鸣, 韩珣, 王瑾瑾, 陈善莉, 沈潇雨, 章炎麟, 朱彬, 郭照冰 (4439)
热脱附法快速分析大气细颗粒物中非极性有机物	马英歌, 吴霞, 彭梦梦, 冯加良, 郁建珍, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 李莉 (4446)
杭州市空气细颗粒物浓度与哮喘就诊人次的关系	王安旭, 陈曦, 宋从波, 应颂敏, 李倩, 吴琳, 毛洪钧 (4457)
基于远程通讯技术的混动公交车 SCR 系统运行及 NO _x 排放特征	杨强, 胡馨遥, 黄成, 陈昀, 刘佳栋, 李莉, 熊忠亮, 唐伟 (4463)
基于环境风险排序的流域优先污染物筛选	李奇锋, 吕永龙, 王佩, 张悦清 (4472)
重庆远郊丰都雪玉洞流域大气无机氮湿沉降变化特征与来源分析	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 胡刘婵, 曾泽, 吕现福 (4479)
黑龙江凉水国家级自然保护区大气氮沉降特征	宋蕾, 田鹏, 张金波, 金光泽 (4490)
脱甲河水系 N ₂ O 关键产生过程及氮素来源探讨	赵强, 吕成文, 秦晓波, 吴红宝, 万运帆, 廖育林, 鲁艳红, 李健陵 (4497)
生物炭添加对曝气人工湿地脱氮及氧化亚氮释放的影响	王宁, 黄磊, 罗星, 梁岩, 王燕, 陈玉成 (4505)
黑麦草对水体中镉-壬基酚复合污染的生理响应及修复	史广宇, 李中义, 张路, 程媛媛, 陈宏伟, 施维林 (4512)
城市黑臭水体的吸收特性分析	丁潇蕾, 李云梅, 吕恒, 朱利, 温爽, 雷少华 (4519)
岷江上游水体中 DOM 光谱特征的季节变化	范诗雨, 秦纪洪, 刘堰杨, 孙辉 (4530)
防渗型生物滞留中试系统降雨径流水质与三维荧光特征	林修咏, 王书敏, 李强, 谢云成 (4539)
基于δ ¹⁵ N和δ ¹⁸ O的农业区地下河硝酸盐污染来源	盛婷, 杨平恒, 谢国文, 洪爱花, 曹聪, 谢世友, 时伟宇 (4547)
垃圾填埋场地下水溶解性有机物光谱特征	彭莉, 虞敏达, 何小松, 刘思佳, 张鹏 (4556)
铅负载颗粒沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附行为	梁舒静, 林建伟, 詹艳慧, 汪振华, 李雅灵, 何思琪, 陈海洋, 唐凤霞, 李志强 (4565)
基于紫外光谱分析的腐殖质混凝控制	张北辰, 张晓蕾, 秦兰兰, 黄海鸥 (4576)
AAO 工艺联合臭氧削减污水中微量有机污染物及遗传毒性	李默, 汪震哲, 陈志强, 温沁雪 (4584)
抗生素抗性基因在两级废水处理系统中的分布和去除	李奥林, 陈吕军, 张衍, 代天娇, 田金平, 刘锐, 温东辉 (4593)
磁性壳聚糖凝胶球固定厌氧铁氨氧化菌对废水氨氮去除的影响	刘志文, 陈琛, 彭晓春, 谢武明, 黄镇扬, 韩庆吉 (4601)
海藻糖强化厌氧氨氧化耦合反硝化工艺处理高盐废水的脱氮除碳效能	杨振琳, 于德爽, 李津, 王晓霞, 冯莉 (4612)
低温下 A ² /O-BAF 反硝化除磷脱氮特性	黄剑明, 赵智超, 郑隆举, 邵兆伟, 安芳娇, 陈永志 (4621)
O ₃ -BAC 深度处理石化废水厂尾水的特性及菌群结构分析	张超, 单明皓, 许丹宁, 古明哲, 代蓓蓓, 纪轩, 孙井梅 (4628)
基于 MBR 不同种泥短程硝化启动的微生物群落结构分析	吴鹏, 陈亚, 张婷, 沈耀良, 徐乐中 (4636)
3 种不同工艺切换下活性污泥菌群结构及代谢产物对污泥沉降性能的影响	温丹丹, 袁林江, 陈希, 王洋, 申童童, 刘小博 (4644)
硫酸盐还原菌活性污泥胞外聚合物对环丙沙星的吸附机制	张会群, 贾妍艳, 方荷婷, 阴琳婉, 吕慧 (4653)
包埋活性污泥反硝化性能的快速提高及群落分析	杨宏, 徐富, 孟琛, 苏姗, 袁星 (4661)
中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析	尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 黄彩红 (4670)
典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价	马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 侯青叶, 曾庆良, 王锐 (4684)
秸秆与化肥减量配施对菜地土壤温室气体排放的影响	黄容, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 吕盛, 罗梅 (4694)
不同肥料施用对设施蔬菜地 NH ₃ 挥发和 N ₂ O 排放的影响	山楠, 韩圣慧, 刘继培, 陈清, 袁玉玲, 王立刚, 李虎 (4705)
施肥类型和水热变化对农田土壤氮素矿化及可溶性有机氮动态变化的影响	田飞飞, 纪鸿飞, 王乐云, 郑西来, 辛佳, 能惠 (4717)
长期不同施肥量对全程氨氧化细菌丰度的影响	王梅, 王智慧, 石孝均, 蒋先军 (4727)
典型绿洲不同土壤类型有机碳含量及其稳定碳同位素分布特征	陈新, 贡璐, 李杨梅, 安申群, 赵晶晶 (4735)
凹凸棒石及其改性材料对土壤镉生物有效性的影响与机制	陈展祥, 陈传胜, 陈卫平, 焦文涛 (4744)
天然有机物活化过硫酸盐降解土壤有机污染物效果	刘琼枝, 廖晓勇, 李尤, 龚雪刚, 曹红英, 罗俊鹏 (4752)
水分管理和外源硒对水稻吸收累积铅的影响	万亚男, 刘哲, Aboubacar Younoussa Camara, 余垚, 王琪, 李花粉 (4759)
窖水中微生物降解污染物的关键细菌	杨浩, 杨晓妮, 张国珍, 王宝山, 张翔, 李健 (4766)
砷氧化菌对胡敏酸络合 As(Ⅲ) 的氧化作用	李泽姣, 崔岩山, 尹乃毅, 蔡晓琳, 都慧丽, 王鹏飞 (4778)
海域高温油田 1 株耐高温耐盐硫酸盐还原菌的筛选与生理特性及活性抑制	杨春璐, 苑美玉, 史荣久, 闫鹏举, 赵峰, 韩斯琴, 张颖 (4783)
1 株耐盐异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Zobellella</i> sp. B307 的分离及脱氮特性	白洁, 陈琳, 黄潇, 胡春辉, 赵阳国, 李岍然 (4793)
1 株镰刀菌属 KY123915 的分离及其对 17β-雌二醇的降解特性	吴蔓莉, 祝长成, 祁燕云, 时艺馨, 徐会宁, 杨瑾如 (4802)
氟喹诺酮对垂直流人工湿地性能及微生物群落的影响	李新慧, 郑权, 李静, 王晓慧, 海热提 (4809)
林可霉素菌渣堆肥微生物群落多样性分析	任省涛, 郭夏丽, 芦阿度, 张倩倩, 郭笑盈, 王岩, 王连忠, 张宝宝 (4817)
DEP 对蚯蚓抗氧化酶系的影响及 DNA 损伤	平令文, 李现旭, 张翠, 宋佩佩, 王金花, 朱鲁生, 王军 (4825)
生活垃圾焚烧灰灰矿物学特性及重金属分布	李建陶, 曾鸣 (4834)
《环境科学》征订启事 (4429) 《环境科学》征稿简则 (4471) 信息 (4529, 4777, 4816)	

中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析

尚二萍^{1,2}, 许尔琪¹, 张红旗^{1*}, 黄彩红³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 土壤重金属污染威胁着农田生态系统安全和人类健康。基于 2000 年以来中国五大粮食主产区 3 006 个耕地样点的土壤重金属实测数据和 20 世纪 80 年代的土壤重金属历史数据, 采用单因子指数法评估了粮食主产区耕地土壤重金属的污染现状和变化趋势, 并基于地累积指数, 结合区位环境污染探讨了其污染源。结果表明, 中国粮食主产区耕地土壤重金属点位超标率为 21.49%, 整体以轻度污染为主, 其中轻度、中度和重度污染比重分别 13.97%、2.50% 和 5.02%。四川盆地、长江中游及江淮地区、黄淮海平原、松嫩平原和三江平原的耕地点位超标率分别为 43.55%、30.64%、12.22%、9.35% 和 1.67%, 南方耕地污染重于北方。主要污染物为 Cd、Ni、Cu、Zn、Hg, 超标率分别为 17.39%、8.41%、4.04%、2.84%、2.56%。自 20 世纪 80 年代以来, 耕地土壤重金属含量呈增加趋势, 整体上点位超标率增加了 14.91%, 其中 Cd、Ni、Cu、Zn 和 Hg 的污染比重分别增加了 16.07%、4.56%、3.68%、2.24% 和 1.96%。除三江平原外, 其他 4 个粮食主产区耕地土壤重金属点位超标比重增加趋势显著, 且南方地区的 Cd、Ni 和 Cu 重金属超标比重变化量高于北方, 而 Hg 和 Cr 增速低于北方。Cd、Hg 以人为污染源为主, 其他 6 种重金属以自然污染源为主, 但 Pb、Zn 和 Cu 约有 20.00% 的点位受人为活动的影响, 矿业、工业、污灌水是主要的污染源, 除污灌水来源北方重于南方外, 其余污染源均是南方污染重于北方, 污染物种类也多于北方。

关键词: 重金属; 时空变化; 耕地土壤; 区位环境; 污染源

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)10-4670-14 DOI: 10.13227/j.hjxx.201802139

Spatial-Temporal Trends and Pollution Source Analysis for Heavy Metal Contamination of Cultivated Soils in Five Major Grain Producing Regions of China

SHANG Er-ping^{1,2}, XU Er-qi¹, ZHANG Hong-qi^{1*}, HUANG Cai-hong³

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China)

Abstract: Heavy metal pollution of farmland soils in China has been identified as a threat to ecosystem safety and human health. A total of 3 006 soil samples were analyzed from arable lands in five grain producing regions of China, which included data from published studies from 2000 up to now. An additional 656 historical samples were derived from the 1980s by a digitizing grained point sites map (Cd, Pb, As, Ni, Cu, Zn, Cr, and Hg) from the PRC Atlas of Soil Environmental Background Values. A GIS-based approach and single factor index method were employed to identify the current status and spatial distribution of heavy metal (Cd, Pb, As, Ni, Cu, Zn, Cr, and Hg) contamination in agricultural soils, and these were then compared with historical data to explore contamination trends over time. Then, based on the I_{geo} method and the effects of the surrounding environment on contamination rates, pollution sources were analyzed. Results showed that 21.49% of the agricultural soil samples exceeded the environmental quality standard set by the Ministry of Environmental Protection. The proportions of slight, moderate, and severe pollution were 13.97%, 2.50%, and 5.02%, respectively. Pollution is more extensive in the south compared with the north. Exceedance percentages in the Sichuan Basin (SC), Yangtze River Middle Plain and Jianghuai Plain (CJ), Huang-Huai-Hai Plain (HHH), Songnen Plain (SN), and Sanjiang Plain (SJ), were 43.55%, 30.64%, 12.22%, 9.35%, and 1.67%, respectively. The main pollutants were Cd, Ni, Cu, Zn, and Hg, with exceedance percentages of 17.39%, 8.41%, 4.04%, 2.84%, and 2.56%, respectively. Since the 1980s, heavy metal pollution has increased by 14.91%. The proportion of Cd, Ni, Cu, Zn, and Hg increased by 16.07%, 4.56%, 3.68%, 2.24%, and 1.96%, respectively. Except for SJ, exceedance percentages in cultivated land increased significantly, while the exceedance percentages of Cd, Ni, and Cu in the southern areas were higher than for the northern areas-although the growth rate of Hg and Cr in the south was lower than that in the north. The main sources of Cd and Hg were anthropogenic pollution, while the other six heavy

收稿日期: 2018-02-26; 修订日期: 2018-03-29

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA19040305); 中国工程院咨询研究项目(2016-zd-10-2)

作者简介: 尚二萍(1987~), 女, 博士, 主要研究方向为土地利用与环境科学, E-mail: shangep.15b@igsnrr.ac.cn

* 通信作者, E-mail: zhanghq@igsnrr.ac.cn

metals were from predominantly natural sources. However, about 20.00% of Pb, Zn, and Cu were affected by anthropogenic activities. Mining, industry, and sewage water were the main sources of pollution. In addition to the larger impact of sewage irrigation in the north, other sources of pollution showed greater influence in the south. Mining mainly caused pollution by Cd, Hg, Ni, Cr, and Cu, while excessive levels of Cd, Ni, Cu, Zn, and Hg was the signature of industrial pollution. Irrigation with sewage effluent causes excessive Cd, Ni, and Zn. Results from this study provide valuable information for agricultural soil management and food safety in China.

Key words: heavy metals; spatial-temporal trends; cultivated soils; location environments; pollution source

土壤重金属因其不可降解、移动且具毒性的特性^[1, 2], 直接或间接通过食物链威胁着粮食安全、生态系统和人类健康^[3~6]. 随着城市化和工业化的快速发展, 中国土壤重金属污染事故频发^[7, 8], 尤其是耕地土壤重金属污染已经引起国内外的广泛关注^[9~11].

当前对中国土壤重金属污染研究多集中在小尺度^[12~14]或单个区域的现状分析^[15~17], 且多集中在工业区^[18]、矿区^[19]周边、城郊耕地^[20, 21]等, 易造成部分地区土壤重金属污染程度评估过高或过低, 偏离实际情况; 同时也不利于全面摸清具有显著空间异质性的土壤污染“家底”, 不如大尺度土壤性质空间分析对土壤空间数据库建立、实现数字化管理更有意义. 但当前全国范围多区域的比较研究相对较少, 对粮食主产区耕地土壤重金属研究更少, 已有研究采用样点数量偏少且多集中在静态分布与评估上, 如 Niu 等^[8]仅基于 131 个包含 Pb、Cd、Cr、Zn、Cu 和 Ni 这 6 种重金属的耕地点位, 反映中国 Cd 污染的现状; 张小敏等^[22]则以每个研究中重金属的平均值作为该点位的值统计中国耕地土壤重金属污染状况. 总体上关于耕地土壤重金属污染的动态变化趋势研究, 国内仅少数学者在小尺度范围内, 通过获取不同时间段样点的土壤重金属实测数据, 分析重金属含量的变化^[5, 23~26], 而缺乏大尺度、全国范围内多个区域耕地土壤重金属的时空变化及其对比分析研究, 不能全面了解区域耕地土壤重金属差异及动态变化特征.

三江平原、松嫩平原、长江中游及江淮地区、黄淮海平原和四川盆地是中国农业资源条件极为优越的五大粮食主产区(图 1), 耕地面积约占全国耕地总面积的 40.64% 以上, 粮食产量占全国总产量的 58.49%, 其中小麦、玉米、稻谷产量分别占全国总产量的 70.45%、61.37% 和 43.61%, 在中国粮食生产中拥有重要的战略地位^[27], 其耕地的土壤重金属污染情况则直接威胁着中国的粮食安全和国民健康. 为此, 本文拟以上述五大粮食主产区为研究区, 基于 2000 年以来 3 006 个耕地样点土壤重金属实测数据和 20 世纪 80 年代的土壤重金属历史数

据, 采用单因子指数法, 评估耕地土壤重金属(Cd、Pb、As、Ni、Cu、Zn、Cr、Hg)的污染现状和空间分布, 探讨其时空变化趋势; 同时, 基于样点的区位环境, 结合地累积指数法分析土壤重金属的污染源, 以期为建立土壤空间数据库, 全面了解中国粮食主产区耕地土壤重金属污染状况与动态, 查清污染来源, 以及制定有效的防治策略提供支撑.

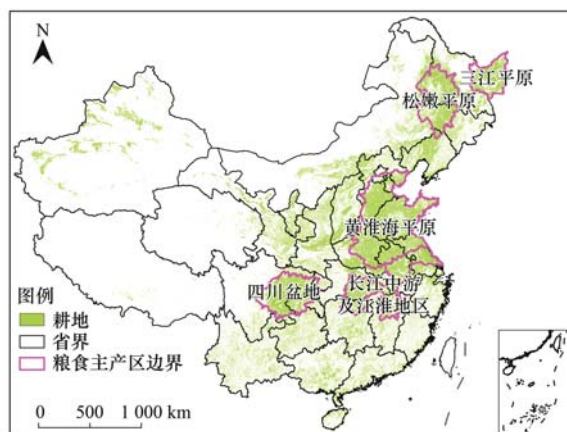


图 1 中国五大粮食主产区空间分布示意

Fig. 1 Distribution of China's five major grain producing regions

1 材料与方法

1.1 土壤重金属数据来源与处理

2000 年以来的 3 006 个采样点数据(图 2), 其中 1 613 个样点数据来自于“中国学术期刊全文数据库”(http://www.cnki.net/)和“Web of Science”(http://www.web of science knowledge.com); 其余的 1 393 个样点数据为野外调查采样数据.

1.1.1 2000 年以来已发表文献采样点数据

已发表文献采样点土壤重金属含量数据, 主要通过“土壤重金属”关键词搜索的 4 000 个文献中, 排除人文社科类期刊, 排除工业用地、城市用地、建设用地、公园绿地、水、底泥沉积物等非耕地的重金属的研究, 同时文献中土壤样品的分解方法、土壤元素理化性质测试方法基本与 20 世纪 80 年代全国土壤环境背景值调查或 GB 15618-1995 标准中推荐的方法吻合, 样品分析测试的质量控制也均小于 10% 的研究, 以及能够直接或通过计算获取点位坐标与相应重金属含量的研究, 共筛选出 2000 年

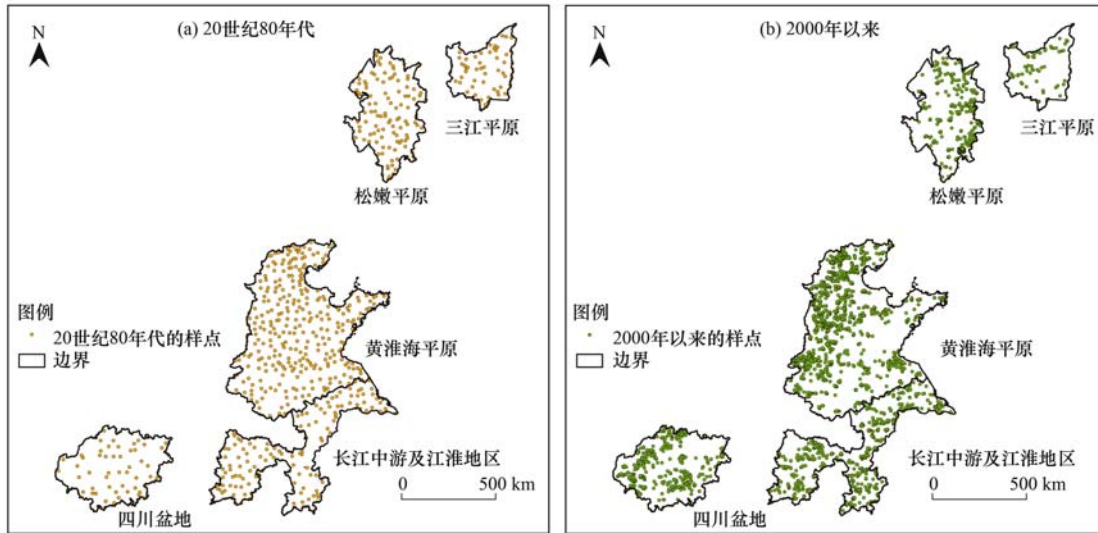


图2 20世纪80年代和2000年以来两个时期五大粮食主产区样点分布示意

Fig. 2 Sampling sites in five major grain producing regions in the 1980s and 2000s

以来发表的满足标准的关于耕地土壤重金属含量数据的380篇文献。

文献数据提取主要通过以下4种方式：一是直接获取。部分文献中直接标注采样点地理坐标与相应土壤重金属含量。二是地名反转坐标。查找文中地点，利用天地图和Google Earth获取详细地理坐标。三是公式反推。通过采样点污染指数及公式反推重金属含量。四是数字化。利用Getdata和ArcGIS等软件提取文献中具有污染物分布数据的柱状图、散点图或空间分布数据。

1.1.2 2000年以来野外调查采样点数据

为了与文献数据相融合，实测采样点重点是针对五大粮食主产区耕地分布范围内没有或少量文献采样点的县级行政单元内，应用随机采样方法，进行补充采样，尽量保证点位在五大粮食主产区大面积耕地区县全覆盖。每个采样单元进行多点采样，取其中心点和4个顶点的0~20 cm表层土壤，从现场等量均匀混合的样品中选择1.0 kg为该采样点的样品。共计1393个采样点，均采用GPS定位，同时记录采样点周边区位环境（工矿区、污灌区、城郊区、农区）。

所有样品均在室温下风干，压碎，然后筛过100目尼龙筛。按照GB 15618-1995标准中推荐的方法测量土壤重金属含量，如Cd、Cr、Pb、As、Cu、Zn、Ni经HNO₃、HClO₄、HF消解，Hg以H₂SO₄和HNO₃消解，用原子荧光光谱法（atomic fluorescence spectrometry, AFS）分析Hg和As含量，以及利用电感耦合等离子质谱（inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS）测定Cu、Pb、

Zn、Cr、Cd、Ni的含量。所有的重金属含量均采用地球化学参考资料（GSS系列）进行质量控制，平均偏差小于10%。

1.1.3 20世纪80年代的历史数据

本研究所用的20世纪80年代土壤样点数据来源于《中华人民共和国土壤环境背景值图集》中的8幅1:1200万的20世纪80年代中国土壤重金属单元素（Cd、Pb、As、Ni、Cu、Zn、Cr、Hg）分级点位图，样点主要采用网格法，并依据顺序统计量（5%、10%、25%、50%、75%、90%、95%、100%），将每种重金属含量划分为8~9个区间（表1）。本研究利用ArcGIS 10.1软件的数字化功能获取其空间分布矢量数据，共提取656个采样点数据（图2），为后续的土壤重金属含量的时空变化研究做支撑。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤重金属污染评价方法

$$P_i = C_i/S_i$$

式中， P_i 为土壤中单项重金属*i*的污染指数； C_i 为重金属*i*的实测值（mg·kg⁻¹）； S_i 为根据需要选取的重金属*i*评价标准（mg·kg⁻¹），本文采用中国广泛使用的（GB 15618-1995）二级标准作为评价标准：清洁（0 < P_i ≤ 0.7）、尚清洁（0.7 < P_i ≤ 1）、轻度污染（1 < P_i ≤ 2）、中度污染（2 < P_i ≤ 3）、重度污染（ P_i > 3）。

1.2.2 土壤重金属污染源识别方法

地质累积指数（ I_{geo} ）自20世纪60年代末起就开始使用^[28]，重点考虑了环境地球化学背景值，以

表 1 土壤重金属含量分级标准/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 1 Grading standards of heavy metal contents in soils/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

区间	Cd	Pb	As	Ni	Cu	Zn	Cr	Hg
1	0~0.016	0~10.0	0~2.4	0~5.6	0~6.0	0~25.0	0~17.2	0~0.009
2	0.016~0.024	10.0~13.5	2.4~3.5	5.6~9.0	6.0~8.8	25.0~34.7	17.2~23.8	0.009~0.012
3	0.024~0.046	13.5~18.5	3.5~6.2	9.0~17.0	8.8~14.9	34.7~50.9	23.8~40.2	0.012~0.020
4	0.046~0.080	18.5~23.9	6.2~9.6	17.0~24.9	14.9~20.7	50.9~67.3	40.2~57.3	0.020~0.040
5	0.080~0.120	23.9~31.1	9.6~13.7	24.9~33.0	20.7~27.3	67.3~88.5	57.3~73.9	0.040~0.080
6	0.120~0.190	31.1~43.8	13.7~20.2	33.0~42.4	27.3~36.7	88.5~116.9	73.9~94.6	0.080~0.150
7	0.190~0.270	43.8~56.0	20.2~27.0	42.4~51.0	36.7~44.8	116.9~142.2	94.6~118.5	0.150~0.220
8	0.270~2.000	56.0~300.0	27.0~50.0	>51.0	44.8~250.0	>142.2	>118.5	0.220~0.500
9	>2.000	>300.0	>50.0		>250.0			>0.500

及自然活动对背景值的影响。利用地累积指数法判别土壤重金属受自然背景和人为污染的影响程度，为后续的污染源识别研究做基础。计算公式如下：

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{C_i}{1.5B_i}$$

式中， C_i 是土壤样品的重金属的含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)， B_i 是重金属的自然背景值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)，1.5 是考虑各地岩石差异可能会引起背景值的变动而取的系数。 I_{geo} 值越大，污染越严重，当 I_{geo} 值 >0 表示土壤中的金属来自人为活动而不是来源于自然地壳的贡献。

1.2.3 格网分析法

为保证进行空间统计分析或表达时不会遗漏任何一个点位重金属超标信息，同时降低空间插值对空间分布的不确定性，并减小因两期点位基数及分布不对称造成的误差，采用格网分析法分析土壤重金属的时空分布变化格局。在保证足够精度下，创建与研究区范围相同且与 20 世纪 80 年代采样相似的 $50\text{ km}\times 50\text{ km}$ 格网；识别 (Identity) 每个点位所归属的公里格网，统计每个公里格网的点位超标率，形成 20 世纪 80 年代和 2000 年以来两个时期

的土壤重金属点位超标格网空间分布图。

1.3 数据分析

利用 Origin 2017 软件进行重金属含量箱式图的绘制；SPSS 18.0 软件进行描述性统计分析；ArcGIS 10.1 制作空间分布图及公里格网分布图。

2 结果与分析

2.1 粮食主产区土壤重金属污染现状

五大粮食主产区耕地土壤污染点位超标率平均为 21.49%，高于全国耕地 19.40%^[29] 的平均水平。土壤重金属污染程度总体上以轻度为主，其中轻度、中度、重度污染点位比例分别为 13.97%、2.50% 和 5.02%。污染物以 Cd、Ni、Cu、Zn 和 Hg 为主，污染比重分别为 17.39%、8.41%、4.04%、2.84% 和 2.56%，其他污染物比重仅在 0.14%~0.89% 之间 (图 3)。

南方粮食主产区土壤重金属污染重于北方。从点位超标率看 (图 4 和图 5)，四川盆地和长江中游及江淮地区的耕地点位超标率分别为 43.55% 和 30.64%，高于黄淮海平原、松嫩平原和三江平原的 12.22%、9.35% 和 1.67%。从污染等级看，四

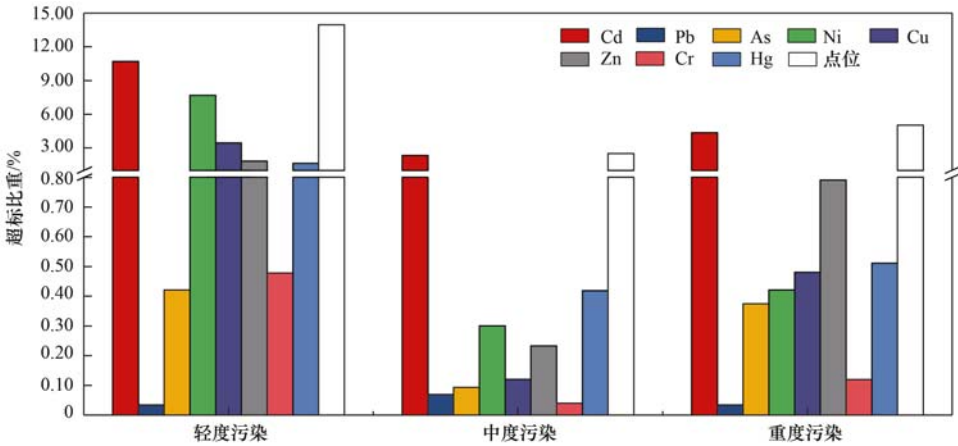


图 3 粮食主产区污染物污染等级统计

Fig. 3 Heavy metal pollution levels in soil samples from the main grain producing regions

川盆地、长江中游及江淮地区、黄淮海平原轻度污染比重较高,分别为 34.57%、21.61% 和 5.78%,约占其总超标比重的 79.37%、70.54% 和 47.27%;松嫩平原以中、重度污染为主,污染比重分别为 3.97% 和 3.40%,占其总超标比重的 42.42% 和 36.36%;三江平原仅存在中度污染,超标比重为 1.67% (图 5). 此外,分析各粮食主产区的重度污染点位发现,长江中游及江淮地区重度污染点位比重最大,为 7.11%,主要分布在该区的西北、南端和北部,如江汉平原东北部、鄱阳湖平原南部、巢湖西部平原和淮河中游;黄淮海平原重度污染次之,比重为 5.11%,主要分布在中部、北部和东南部的部分地区,如山东丘陵区、豫北平原、京津唐地区、黄泛平原等;四川盆地重度污染点位仅为 3.52%,主要分布在成都平原中部;松嫩平原重污染点位比重为 3.40%,主要集中在哈尔滨、长春等地区;三江平原尚无重度污染。

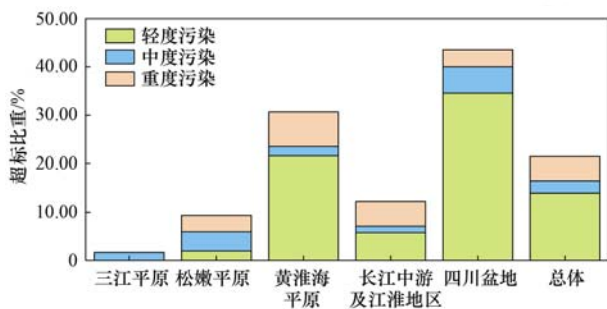


图4 五大粮食主产区不同污染等级样点数占总点数的比重

Fig. 4 Percentages of sites at different pollution levels in five major grain producing regions

在 8 种重金属中, Cd 是五大粮食主产区最主要的污染物, 超标比重在 1.72% ~ 34.90% 之间 (图 6). 其中四川盆地 Cd 污染超标最为严重, 达 34.90%, 主要分布在重庆东部地区; 长江中游及江淮地区 Cd 点位超标比重为 21.88%, 重度污染点位超标为 5.21%, 主要分布在北部的淮河下游地区和西部的江汉平原; 黄淮海平原 Cd 的点位超标率为 10.75%, 鲁北平原南部、黄泛平原、京津唐地区、豫北平原西部等地区污染较重. 其次, Ni 和 Cu 主要分布于南方粮食主产区. 其中, 四川盆地 Ni 和 Cu 超标分别为 30.32% 和 9.34%, 以轻度污染为主, 仅中部鄂州, 及西南-东北沿线存在少量的中、重度污染点位; 长江中游及江淮地区的超标比重分别为 16.46% 和 8.28%, 也是以轻度污染为主, 空间分布与四川盆地相似, 比重较低的中、重度污染分布在西南-东北沿线一带的地区. Zn 和 Hg 在黄

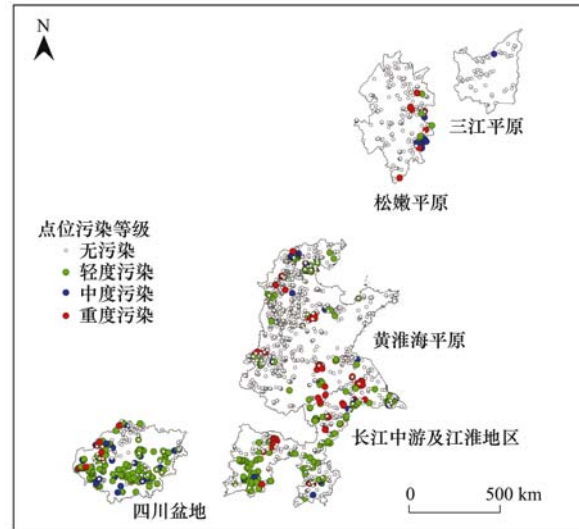


图5 五大粮食主产区耕地土壤重金属污染等级空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of pollution levels of heavy metal in farmland soils in five major grain producing regions

淮海平原、长江中游及江淮地区存在一定程度污染, 污染比重分别在 2.86% ~ 4.62% 和 0.71% ~ 1.00% 之间, 但均以轻度污染为主, 少量的重度污染分布在洞庭湖平原、淮河下游平原、京津冀地区、黄泛平原和济焦新山前平原等地区.

2.2 土壤重金属污染的时空变化趋势

20 世纪 80 年代 ~ 2000 年以来, 五大粮食主产区耕地土壤重金属点位超标率从 7.16% 增至 21.49%, 20 多年间快速增长了 14 个百分点. 除三江平原外, 耕地土壤重金属点位超标率增加趋势显著 (图 7). 四川盆地从 17.68% 增至 43.55%, 增长了近 25 个百分点, 变化量最大; 其他 3 个主产区点位超标率约增长了 9 ~ 11 个百分点, 其中松嫩平原从 0.52% 增至 9.35%, 约增长了 9 个百分点; 黄淮海平原从 3.06% 增至 12.22%, 增长了近 9 个百分点; 长江中游及江淮地区从 19.38% 增至 30.64%, 增长了约 11 个百分点.

应用格网法分析各区土壤重金属污染超标变化趋势的结果表明 (图 8), 四川盆地在西部的成都平原绵阳、雅安、眉山、乐山等地区, 以及中部盆地中丘陵南部地区重金属点位超标率增加了 50.00% 以上, 而在东南部盆地东低山丘陵增加了 30.00% ~ 50.00% 之间. 其次是松嫩平原, 增加的超标点位主要分布在东部和南部边界, 增加比重分别在 5.00% ~ 30.00%. 黄淮海平原东南的徐淮低平原、皖北平原和中部的黄海平原超标点位增加显著, 增加比重 30.00% 以上, 部分地区增加比重在 50.00% 以上; 而在西南的豫东平原和北部的京津

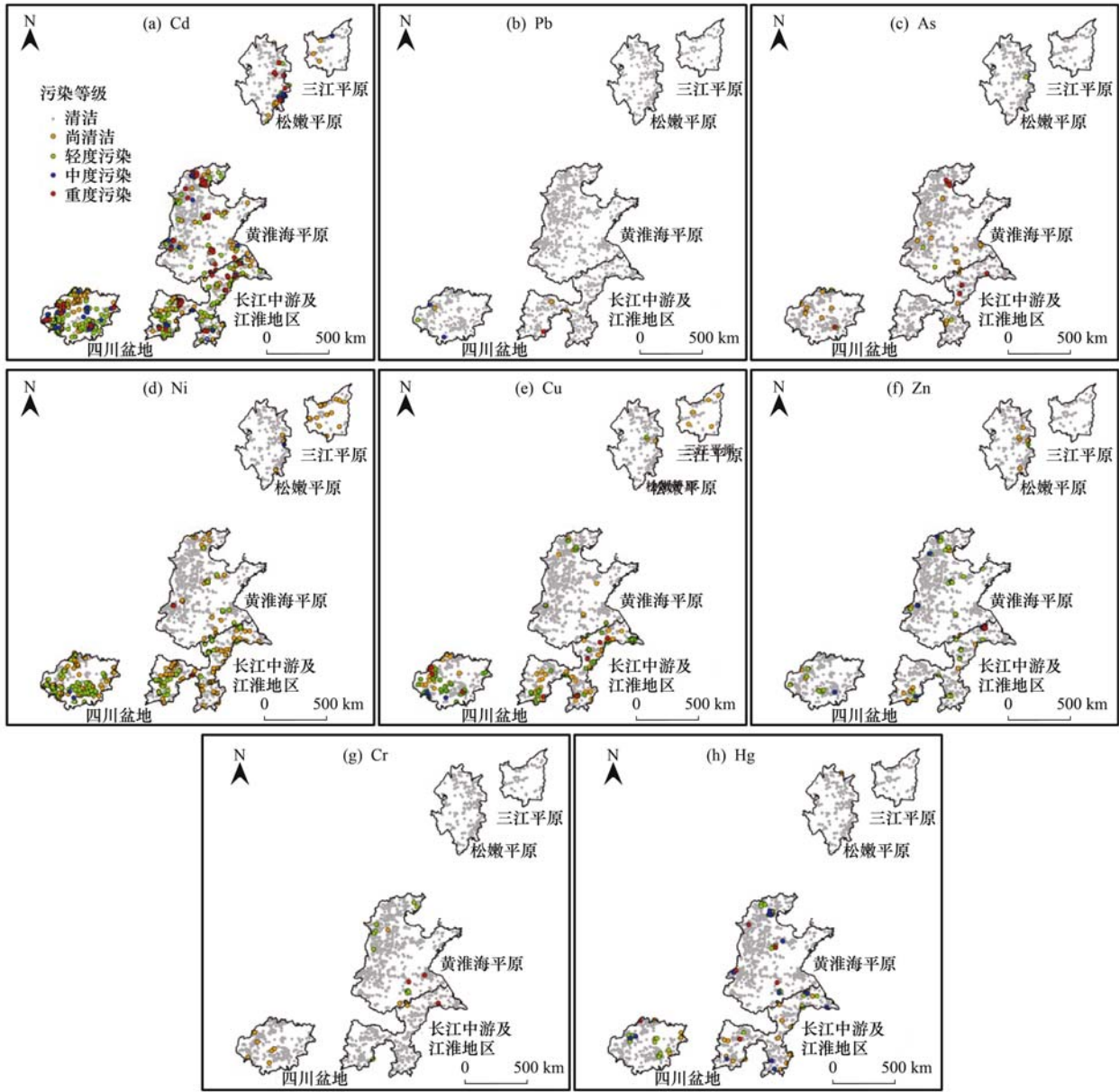


图 6 2000 年以来的 8 种重金属污染等级空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of pollution levels of eight heavy metals in five major grain producing regions in the 2000s

唐平原，超标比重增加量低于 20.00%。长江中游及江淮地区在北部沿线的淮南沿海平原、江淮丘陵，以及西部的洞庭湖平原重金属污染增加趋势最为显著，变化量在 50.00% 以上，其次是洞庭湖平原的岳阳、江汉平原的孝感、江淮丘陵的巢湖、淮南沿海平原的盐城、太湖杭嘉湖平原南通和镇江超标比重增加了 30.00% ~ 50.00% 之间。

绝大多数重金属元素污染比重呈上升趋势。其中，Cd 的污染比重增加趋势最为显著，从 1.32% 增至 17.39%，20 多年间增加了 16.07%，Ni、Cu、Zn 和 Hg 分别增加了 4.56%、3.68%、2.24% 和 1.96%；而 Pb 和 Cr 的污染比例稍有降低，分别降

低了 0.01% 和 0.03% (表 2)。

从区域层面上看(图 9)，除三江平原变化趋势不明显外，南方地区的 Cd、Ni 和 Cu 重金属超标比重变化量重于北方，而 Hg 和 Cr 增速北方重于南方。20 多年间，四川盆地，长江中游及江淮地区的 Cd 污染比重增加了 16 ~ 35 个百分点，其中，四川盆地从 0 增加至 34.90%，长江中游及江淮地区从 5.41% 到 21.88%；高于松嫩平原和黄淮海平原的变化量，其中松嫩平原从 0 增至 9.75%，黄淮海平原从 0.40% 增至 10.75%，两地区均增长了 10 个百分点。Ni 变化量四川盆地、长江中游及江淮地区较大，分别增加了 4 和 19 个百分点，高于松嫩平

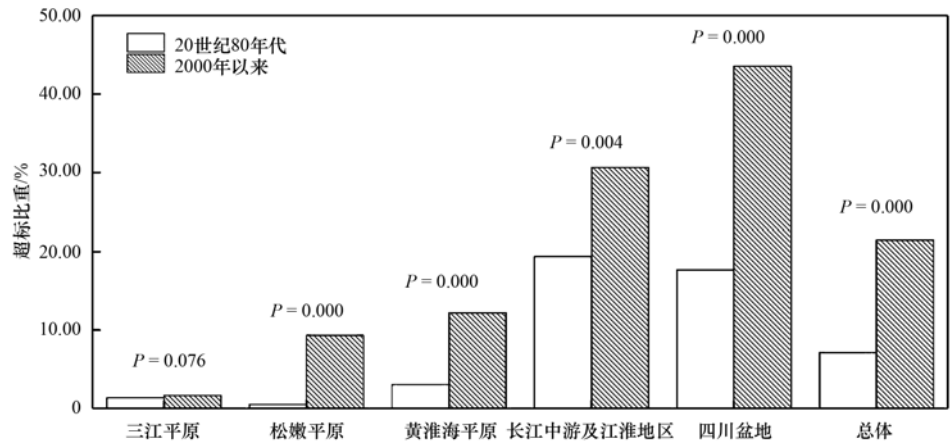


图 7 20 世纪 80 年代 ~2000 年以来五大粮食主产区耕地土壤重金属点位超标比重

Fig. 7 Percentages of sites with heavy metals exceeding the standard in farmland soils from the 1980s to the 2000s

表 2 研究区土壤重金属描述性统计

Table 2 Descriptive statistics for heavy metals in soils of the study area

项目	Cd	Pb	As	Ni	Cu	Zn	Cr	Hg
样本量	2 784	2 889	2 137	1 664	2 498	2 150	2 510	2 152
均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.537	30.69	11.62	32.56	28.07	104.92	65.40	0.207
标准差	3.20	29.23	91.94	43.20	35.26	386.37	45.55	1.94
变异系数	5.97	0.95	7.91	1.33	1.26	3.68	0.70	9.38
中国背景值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.097	26.00	11.20	26.90	22.60	74.20	61.00	0.065
超出背景值数量	2 460	1 684	842	1 176	1 695	1 252	1 602	1 488

原和黄淮海平原的 1 个百分点. Cu 在南方粮食主产区超标比重增加近 9 个百分点,而在北方增加不足 1 个百分点. 北方粮食主产区 Hg 和 Cr 的超标比重趋势重于南方. Hg 在黄淮海平原的超标比重从 0 增至 2.81%,增加了近 3 个百分点,而在长江中游及江淮地区和四川盆地仅增加了 1.6 个百分点. Cr 的变化趋势较小,但其在北方的黄淮海平原污染比重小幅度增加了 0.24%,而在长江中游及江淮地区还小幅度降低了 0.81%.

2.3 污染源分析

2.3.1 描述性统计分析

五大粮食主产区土壤 Cd、Pb、As、Ni、Cu、Zn、Cr、Hg 的平均值分别为 0.537、30.69、11.62、32.56、28.07、104.92、65.40 和 0.207 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均超过中国土壤重金属背景值(表 2). 超出背景值比重从大到小依次为: Cd (88.36%)、Ni (70.67%)、Hg (69.14%)、Cu (67.85%)、Cr (63.82%)、Pb (58.29%)、Zn (58.23%) 和 As (39.40%),这表明五大粮食主产区的土壤重金属污染种类较多.

变异系数(CV)能更好地反映重金属含量的波动情况,当 $\text{CV} \leq 10\%$ 为弱变异, $10\% < \text{CV} \leq 100\%$ 为中等变异, $\text{CV} > 100\%$ 为强变异^[30],变异系数越

大表明重金属含量受外界因素影响越大^[31]. 由表 2 可知,耕地土壤 8 种重金属的变异系数由大到小为: $\text{Hg} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cr}$. 除 Pb 和 Cr 属于中等变异外,其余 6 种重金属均属于强变异,其含量数据空间分布离散性受外界人类活动的影响较大.

2.3.2 自然与人为污染源判定

当地累积指数 I_{geo} 值 > 0 ,表示土壤中的重金属主要来自人为活动而不是自然地壳的贡献. 五大粮食主产区土壤重金属的 I_{geo} 均值从大到小依次为: $\text{Cd} > \text{Hg} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{As}$ [图 10(a)],且 Cd 大于 0, Hg 接近于 0. 可初步判定五大粮食主产区耕地土壤中 Cd、Hg 以人为污染源为主,所占比重分别为 66.13% 和 56.41%;其他 6 种重金属以自然污染源为主,尤其是 90% 以上的 As、Ni 和 Cr 的地累积指数 I_{geo} 点位小于 0,即主要受自然地壳因素的影响;但 Pb、Zn 和 Cu 分别有 21.88%、20.33% 和 17.85% 的点位受人为活动的影响.

南方人口相对密集,粮食主产区较北方受人为活动影响大. 四川盆地除 As 约 90% 的点位受自然因素影响外,其他 7 种重金属含量尤其是 Cd、Zn 和 Hg 分别有 84.90%、61.33% 和 60.70% 的点位主要受到人为活动影响[图 10(f)]. 黄淮海平原

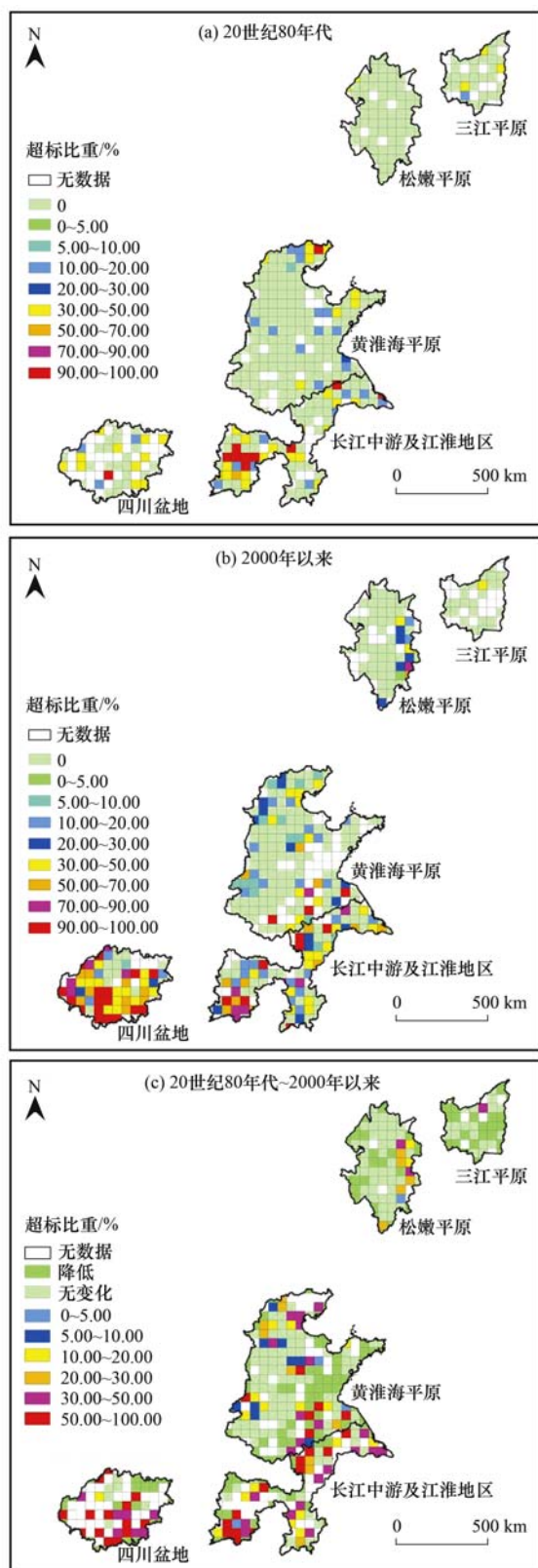


图 8 20 世纪 80 年代 ~ 2000 年以来五大粮食主产区
50 km 格网耕地土壤点位超标空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of percentages of sites with heavy metals exceeding the standard at 50 km grid from the 1980s to the 2000s

[图 10(d)] 和长江中游及江淮地区[图 10(e)]的

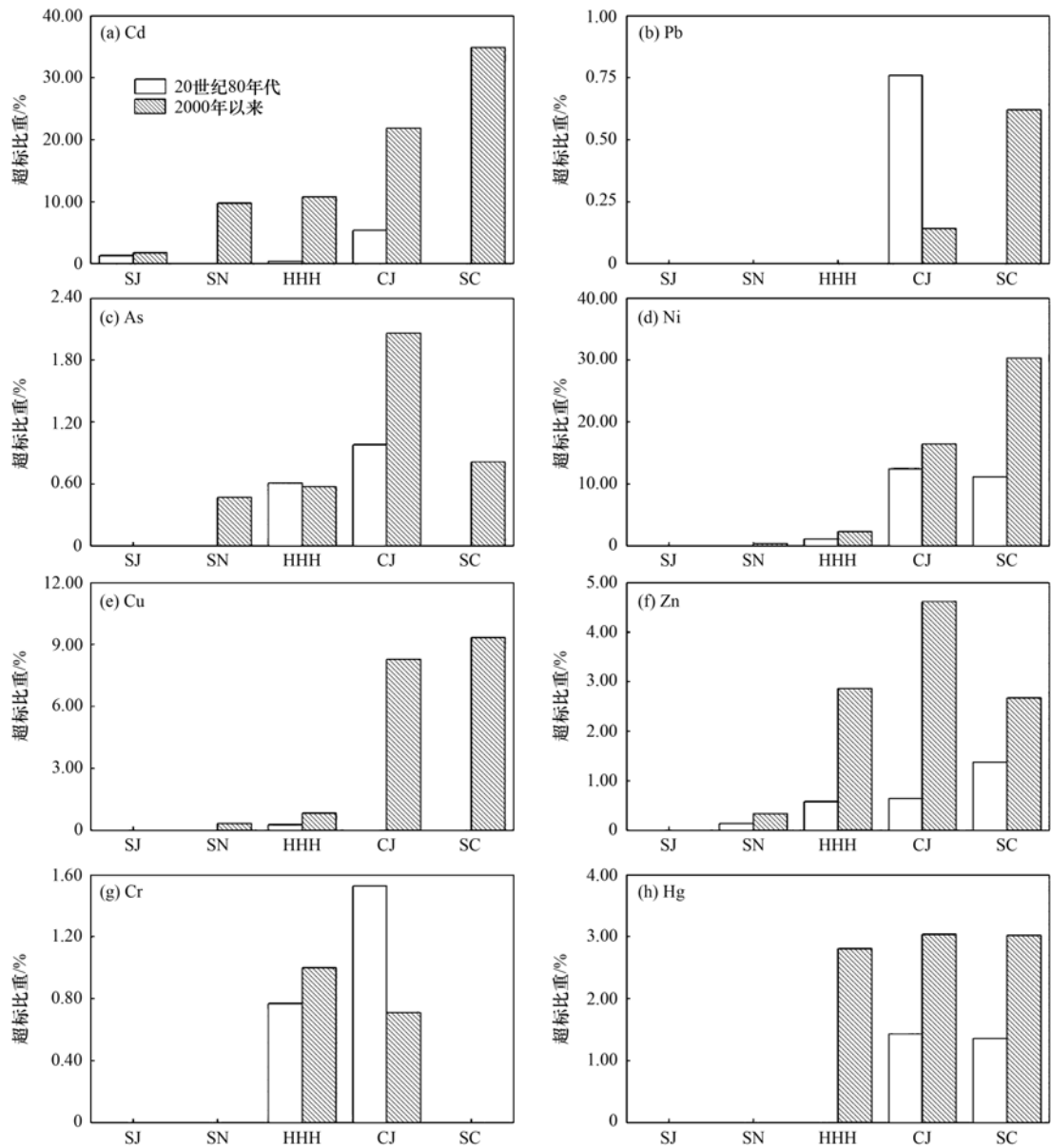
Cd 和 Hg 的积累以人为污染为主, 其中黄淮海平原分别有 66.93% 和 65.89% 的点位污染受到人类活动影响, 略高于长江中游及江淮地区的 59.08% 和 46.73%; 两个地区的 Pb、Cu 和 Zn 受到人为活动影响的比重不高, 大致在 11.00% ~ 24.00% 区间. 东北地区三江平原[图 10(b)]和松嫩平原[图 10(c)]耕地土壤点位超标主要以自然因素影响为主, 尤其是三江平原 98.00% 以上的 Pb、As、Zn、Ni 和 Cr 含量均来自于自然地壳, 松嫩平原除 Cd 以外的 7 种重金属也有 70.00% ~ 99.00% 的比重以自然活动为主. 与其他地区一样, Cd 污染是松嫩平原和三江平原受人为活动影响最多的元素, 人为贡献分别达 54.40% 和 36.21%.

3 讨论

3.1 中国粮食主产区耕地土壤重金属污染程度的探讨

本文根据五大粮食主产区的 3006 个样点实测数据, 得到耕地土壤重金属点位超标率为 21.49%, 较之 2014 年我国发布的《全国土壤污染状况调查公报》(《公报》)[²⁹] 中耕地土壤平均点位超标率 19.40% 高了两个百分点. 从污染程度上看, 本研究轻度、中度和重度污染等级的比重分别为 13.97%、2.50% 和 5.02%, 而《公报》中耕地污染等级比重分别为 13.70%、2.80% 和 2.90%. 从中可明显看出, 本研究的轻度、中度污染等级比重与《公报》中的轻、中度污染比例非常接近, 但重度污染比重高出《公报》的两个百分点以上. 两者结果尤其是重度污染比重存在差异的原因主要是采样方法不同, 《公报》中的数据来源于均匀采样, 而本研究中的数据大部分来自各种文献, 部分采样点数据存在一定的发表偏倚, 如部分文献重点关注了工矿业区附近、污水灌溉区、大城市周边等已被和易被污染的耕地, 这种偏好已被污染尤其是重度污染地区的采样方式, 是导致本研究重度污染比重相对较高的原因, 并从整体上提高粮食主产区土壤重金属点位超标率的主要原因.

前已叙述, 中国粮食主产区耕地土壤重金属污染超标比重为 21.49%, 南方的四川盆地和长江中游及江淮地区的污染超标比重更是分别达到 43.55% 和 30.64%, 从超标数值上看已经达到较严重的状态, 但是通过对比不同国家或地区耕地的重金属含量中位值可以发现(图 11), 我国粮食主产区耕地土壤重金属含量在国际上仅处于中等水平,



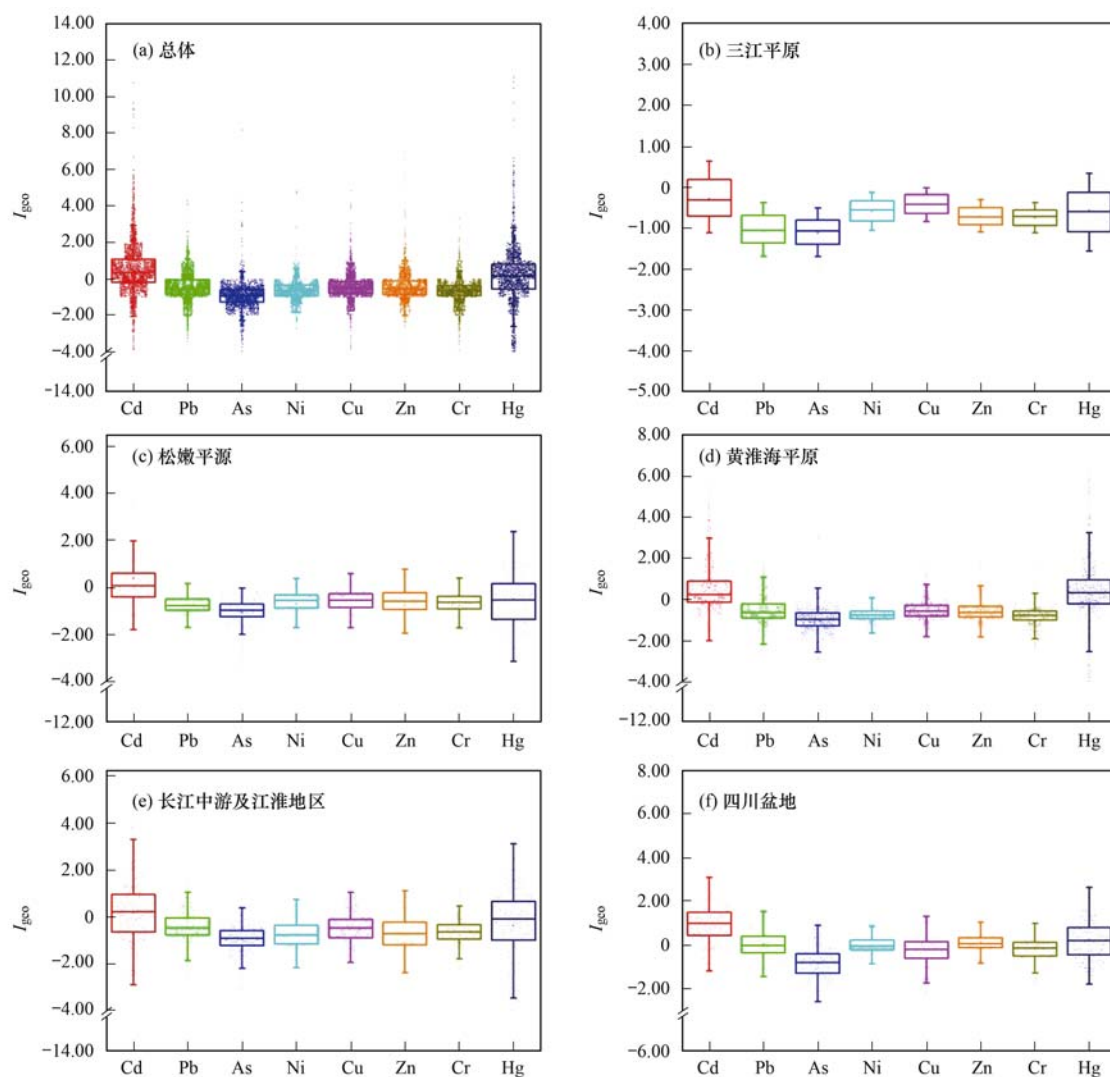
SJ: 三江平原, SN: 松嫩平原, HHH: 黄淮海平原, CJ: 长江中游及江淮地区, SC: 四川盆地

图9 20世纪80年代~2000年以来五大粮食主产区耕地土壤重金属超标比重

Fig. 9 Percentages of eight heavy metals exceeding the standard in five major grain producing regions from the 1980s to the 2000s

8种重金属含量均显著低于欧洲的英格兰^[32]和荷兰^[33]。从粮食主产区污染最重的Cd含量来看,本文中耕地土壤Cd含量的中位数是 $0.159\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著低于世界平均水平,也明显低于图11中英格兰、荷兰和爱尔兰^[34]的Cd含量,而与欧美^[35, 36]、丹麦^[37]等国平均含量相似;本研究中的Pb含量与世界平均值和爱尔兰的^[34]基本持平,均在 $24.97\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右,但显著低于英格兰^[32]和荷兰^[33]等国,高于欧美^[35, 36]、波罗的海^[38]、丹麦^[37]等国家和地区;Hg含量也显著低于爱尔兰^[34]、美国^[35]和世界的均值,Ni、Cu、Zn和Cr含量则显著低于美

国^[39],但略高于波罗的海^[38]、丹麦^[37]等国家与地区。另一方面,中国土壤重金属超标率较高的原因是判别土壤污染标准的阈值较低,以污染最重的Cd为例,我国与丹麦、芬兰的土壤Cd标准最严格,均为 $0.30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著低于其他国家的 $0.40\sim 5.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[40],尤其是英国、东欧,其Cd标准分别是我国的6.70和15.70倍;德国和爱尔兰的Cd标准也是我国的5.00倍和3.30倍。假设欧美采用和我国相同的Cd污染标准($0.30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),对比标准值的置信区间可以发现,欧美和本研究的结果相似,Cd含量75.00%和90.00%的置信区间分

图 10 五大粮食主产区重金属 I_{geo} 结果Fig. 10 Results of the I_{geo} for selected heavy metals in five major grain producing regions

别在 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右^[41], 其重金属超标率将与本研究相似, 而英格兰和威尔士^[42]则在 40.00% 和 80.00% 的置信区间 Cd 含量就高达 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其超标率将远远高于 20.00%, 污染重于我国。

3.2 不同粮食主产区的人为污染源分析

对比分析五大粮食主产区不同区位环境重金属污染超标比重 (图 12), 发现矿区附近污染耕地重金属超标比重达到 93.75%, 其中重度污染比重高达 87.50%。由此可见矿区排污是研究区耕地土壤重金属最大的污染源。矿山的开采、冶炼、重金属尾矿、冶炼废渣和矿渣堆放等, 间接或直接造成矿区周边耕地土壤重金属污染^[43~45]。南方矿区污染耕地重于北方, 除三江平原和松嫩平原无矿区附近点位外, 长江中游及江淮地区、四川盆地的矿区附近的点位重金属超标均为 100%, Cd 和 Zn 超标率

均为 100% 和 25.00%, 且前者 Ni 和 Cu 超标比重为 100% 和 75.00%, 高于后者的 33.33% 和 25.00%; 而黄淮海平原矿区附近耕地点位超标率仅为 60.00%, 污染物以 Hg、Cr 和 Cd 为主, 超标比重分别为 100%、40.00% 和 28.57%。这主要是因为矿山多分布于江西德兴、湖南湘西、湖北大冶、四川攀枝花等南方地区。总体上, 南方矿业开采污染重于北方, 主要造成了 Cd、Hg、Ni、Cr 和 Cu 污染, 超标比重分别为 66.67%、50.00%、50.00%、28.57% 和 23.53%。

工业城市、城市工业区或城郊结合部的“涉重”工业生产排放的“三废”是工业区附近和城郊耕地土壤重金属污染较重的主要原因之一, 尤其易造成 Cd、Ni、Cu、Zn 和 Hg 污染。四川盆地和黄淮海平原工业区附近耕地样点 Cd 均 100% 超标, 长江中游及江淮地区和黄淮海平原工业区附近样点 Hg 皆

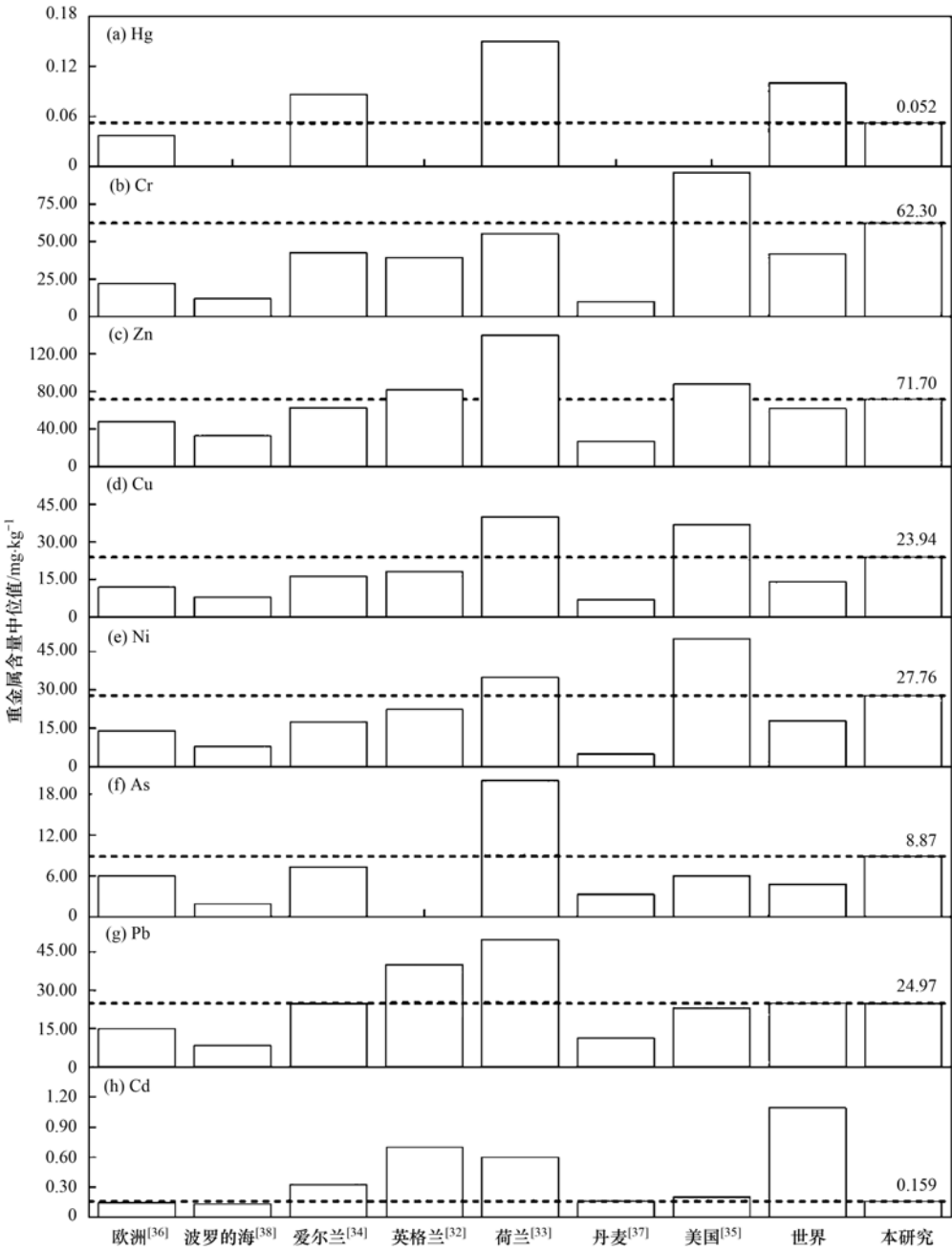


图 11 中国粮食主产区与世界部分国家或地区耕地土壤重金属中值对比

Fig. 11 Comparison of the median heavy metal content in farmland soils around the world

100% 污染; Cu 在四川盆地的超标比重为 75.00%, 长江中游及江淮地区其超标相对较低, 但也达到 27.27%; 黄淮海平原和长江中游及江淮地区工业区附近耕地 Ni 超标也较严重, 分别为 66.66% 和 50.00%.

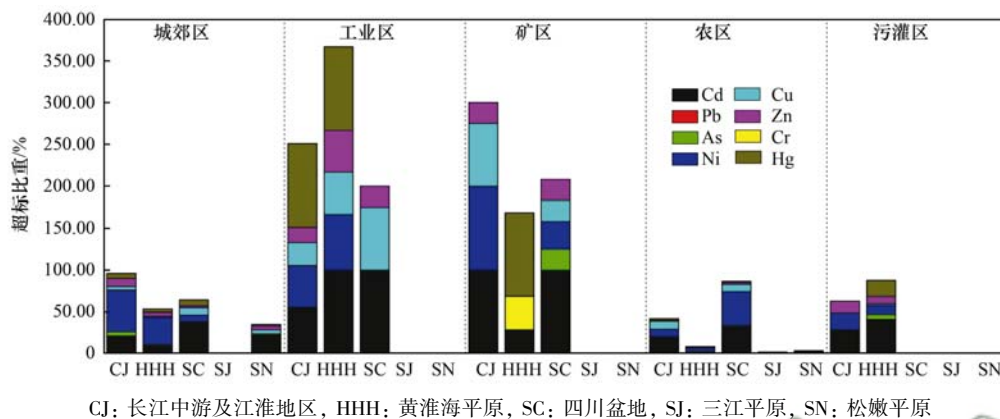
污灌区耕地点位超标比重为 47.62%, 且北方重于南方, 黄淮海平原污水灌溉除了导致 Cd 超标率比长江中游及江淮地区高了 12.34%, 且除了主要污染物 Ni 和 Cu 外, 同时还比南方主产区多了 As、Cu、Hg 污染. 据调查, 约有 1/4 的污灌污水中

Hg、Pb、Cr、Zn、Cu 不符合耕地灌溉水质标准^[46], 尤其是北方为缓解农业水资源短缺, 长期过量利用污水灌溉导致土壤中 Zn、Pb、Cu、Cr 等重金属的累积^[47], 这与廖林仙^[48]和辛术贞^[46]等得出的中国污灌耕地主要集中在北方水资源严重短缺的辽、黄、淮 4 大流域结果相吻合. 总之, 因北方主产区污灌耕地污染重于南方, 污染物以 Cd、Ni 和 Zn 为主.

农业生产投入活动、大气沉降等也会造成一定的重金属累积. 本研究中纯农区的土壤样点污染超标比重最低, 仅为 11.44%, 且南方污染重于北方.

四川盆地, 长江中游及江淮地区的农区耕地点位超标比重约 30%, 显著高于北方粮食主产区 2.00% 的超标率。一方面是因为南方大气降尘中 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、Ni 和 Hg 的平均含量高于北方^[49]; 另一方面是化肥农药的过量施用、农用塑料薄膜的使用也给耕地带来不同程度的重金属污染^[31]。

总之, 矿业、工业、污灌水是五大粮食主产区耕地土壤重金属主要的污染来源, 且其影响远大于农业生产活动投入。其中, 矿业开采主要造成了 Cd、Hg、Ni、Cr、Cu 污染, 工业污染三废导致 Cd、Ni、Cu、Zn 和 Hg 超标, 污灌水灌溉易使 Cd、Ni 和 Zn 超标。



CJ: 长江中游及江淮地区, HHH: 黄淮海平原, SC: 四川盆地, SJ: 三江平原, SN: 松嫩平原

图 12 五大粮食主产区不同区位环境重金属污染超标比重

Fig. 12 Percentages of eight heavy metals exceeding the standard in different locations in five major grain producing regions

4 结论

(1) 我国耕地土壤污染点位超标率平均为 21.49%，其中轻度、中度、重度污染点位比例分别为 13.97%、2.50% 和 5.02%。污染物以 Cd、Ni、Cu、Zn 和 Hg 为主，污染比重分别为 17.39%、8.41%、4.04%、2.84% 和 2.56%。南方粮食主产区的土壤重金属污染重于北方。四川盆地、长江中游及江淮地区、黄淮海平原、松嫩平原和三江平原的点位超标率分别为 43.55%、30.64%、12.22%、9.35%、1.67%。

(2) 自 20 世纪 80 年代以来，粮食主产区耕地土壤重金属点位超标率从 7.16% 增至 21.49%，20 多年间快速增长了 14 个百分点。其中 Cd、Ni、Cu、Zn 和 Hg 的污染比重分别增加了 16.07%、4.56%、3.68%、2.24% 和 1.96%。除三江平原外，其他 4 个粮食主产区耕地土壤重金属点位超标比重增加趋势显著，且南方地区的 Cd、Ni 和 Cu 超标比重变化量高于北方，而 Hg 和 Cr 增速低于北方。

(3) 南方较北方主产区受人为活动影响大。四川盆地受人为活动影响最为严重，长江中游及江淮地区和黄淮海平原次之，东北地区的三江平原和松嫩平原则以自然因素为主。采矿业、工业、污灌水是五大粮食主产区耕地土壤重金属的最主要的污染来源，除北方粮食主产区污灌污染重于南方外，其余污染源中，南方粮食主产区污染超标率及污染物

种类均重于北方。

参考文献:

- [1] He B, Yun Z J, Shi J B, *et al.* Research progress of heavy metal pollution in China: sources, analytical methods, status, and toxicity[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(2): 134-140.
- [2] Wang C, Yang Z F, Zhong G, *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.
- [3] Rahman M A, Rahman M M, Reichman S M, *et al.* Heavy metals in Australian grown and imported rice and vegetables on sale in Australia: health hazard [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, **100**: 53-60.
- [4] Klaassen C D, Liu J, Diwan B A. Metallothionein protection of cadmium toxicity [J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2009, **238**(3): 215-220.
- [5] 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.
- [6] Ji X H, Liu S H, Juan H, *et al.* Effect of silicon fertilizers on cadmium in rice (*Oryza sativa*) tissue at tillering stage [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(11): 10740-10748.
- [7] Zhou C C, Liu G J, Fang T, *et al.* Partitioning and transformation behavior of toxic elements during circulated fluidized bed combustion of coal gangue [J]. Fuel, 2014, **135**: 1-8.
- [8] Niu L L, Yang F X, Xu C, *et al.* Status of metal accumulation in farmland soils across China: from distribution to risk assessment [J]. Environmental Pollution, 2013, **176**: 55-62.
- [9] Liu X M, Song Q J, Tang Y, *et al.* Human health risk assessment of heavy metals in soil-vegetable system: a multi-

- medium analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **463-464**: 530-540.
- [10] Ma L, Wang L, Tang J, *et al.* Arsenic speciation and heavy metal distribution in polished rice grown in Guangdong Province, Southern China[J]. *Food Chemistry*, 2017, **233**: 110-116.
- [11] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils[J]. *Environmental Pollution*, 2001, **114**(3): 313-324.
- [12] Yu L, Cheng J M, Zhan J C, *et al.* Environmental quality and sources of heavy metals in the topsoil based on multivariate statistical analyses: a case study in Laiwu City, Shandong Province, China[J]. *Natural Hazards*, 2016, **81**(3): 1435-1445.
- [13] Sun C Y, Liu J S, Wang Y, *et al.* Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in Dehui, Northeast China[J]. *Chemosphere*, 2013, **92**(5): 517-523.
- [14] 许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 等. 天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1095-1101.
- Xu M M, Liu A F, Shi R G, *et al.* Characteristics of heavy metals pollution of farmland and the leaching effect of rainfall in Tianjin[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1095-1101.
- [15] Abdelhafez A A, Li J H. Environmental monitoring of heavy metal status and human health risk assessment in the agricultural soils of the Jinxi River Area, China[J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2015, **21**(4): 952-971.
- [16] Liu G N, Tao L, Liu X H, *et al.* Heavy metal speciation and pollution of agricultural soils along Jishui River in non-ferrous metal mine area in Jiangxi Province, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, **132**: 156-163.
- [17] Zhi Y Y, Li P, Shi J C, *et al.* Source identification and apportionment of soil cadmium in cropland of Eastern China: a combined approach of models and geographic information system[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, **16**(2): 467-475.
- [18] 张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 等. 大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4232-4240.
- Zhang Q, Chen Z J, Peng C S, *et al.* Heavy metals pollution in topsoil from Dagang industry area and its ecological risk assessment[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11): 4232-4240.
- [19] 尹国庆, 江宏, 王强, 等. 安徽省典型区农用地土壤重金属污染成因及特征分析[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(1): 96-104.
- Yin G Q, Jiang H, Wang Q, *et al.* Analysis of the sources and characteristics of heavy metals in farmland soil from a typical district in Anhui Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(1): 96-104.
- [20] 董騷睿, 胡文友, 黄标, 等. 基于正定矩阵因子分析模型的城郊农田土壤重金属源解析[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(7): 2103-2111.
- Dong L R, Hu W Y, Huang B, *et al.* Source appointment of heavy metals in suburban farmland soils based on positive matrix factorization[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(7): 2103-2111.
- [21] 胡孙, 袁旭音, 陈红燕, 等. 城郊农业土壤重金属不同尺度空间分布及源分析——以宁镇交界带为例[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(12): 2295-2303.
- Hu S, Yuan X Y, Chen H Y, *et al.* Multi-scale spatial distribution and source discrimination of heavy metals in suburb soils: a case study of junctional zone between Nanjing City and Zhenjiang City[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(12): 2295-2303.
- [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] Zhou J, Feng K, Pei Z P, *et al.* Pollution assessment and spatial variation of soil heavy metals in Lixia River Region of Eastern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, **16**(3): 748-755.
- [24] Liang J, Feng C T, Zeng G M, *et al.* Spatial distribution and source identification of heavy metals in surface soils in a typical coal mine city, Lianyuan, China[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **225**: 681-690.
- [25] Yang Y, Christakos G, Guo M W, *et al.* Space-time quantitative source apportionment of soil heavy metal concentration increments[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 560-566.
- [26] Zhang J J, Wang Y, Liu J S, *et al.* Multivariate and geostatistical analyses of the sources and spatial distribution of heavy metals in agricultural soil in Gongzhuling, Northeast China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, **16**(2): 634-644.
- [27] 康蕾, 张红旗. 我国五大粮食主产区农业干旱态势综合研究[J]. *中国生态农业学报*, 2014, **22**(8): 928-937.
- Kang L, Zhang H Q. Comprehensive research on the state of agricultural drought in five main grain producing areas in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, **22**(8): 928-937.
- [28] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geology Journal*, 1969, **2**: 108-118.
- [29] 环境保护部和国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm, 2014-04-17.
- [30] 杨艳丽, 史学正, 于东升, 等. 区域尺度土壤养分空间变异及其影响因素研究[J]. *地理科学*, 2008, **28**(6): 788-792.
- Yang Y L, Shi X Z, Yu D S, *et al.* Spatial heterogeneity of soil nutrients and their affecting factors at regional scale[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, **28**(6): 788-792.
- [31] 李春芳, 王菲, 曹文涛, 等. 龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 1018-1027.
- Li C F, Wang F, Cao W T, *et al.* Source analysis, spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in sewage irrigation area farmland soils of Longkou City[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 1018-1027.
- [32] McGrath S P, Loveland P J. The soil geochemical atlas of England and Wales[M]. London: Blackie Academic & Professional, 1992.
- [33] Breward N. Arsenic and presumed resistate trace element geochemistry of the Lincolnshire (UK) sedimentary ironstones, as revealed by a regional geochemical survey using soil, water and stream sediment sampling[J]. *Applied Geochemistry*,

- 2007, **22**(9): 1970-1993.
- [34] Zhang C S, Fay D, McGrath D, *et al.* Statistical analyses of geochemical variables in soils of Ireland[J]. *Geoderma*, 2008, **146**(1-2): 378-390.
- [35] Burt R, Wilson M A, Mays M D, *et al.* Major and trace elements of selected pedons in the USA [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, **32**(6): 2109-2121.
- [36] Salminen R. Foregs geochemical atlas of Europe, EuroGeoSurveys [EB/OL]. <http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/index.php>.
- [37] Bak J, Jensen J, Larsen M M, *et al.* A heavy metal monitoring-programme in Denmark[J]. *Science of the Total Environment*, 1997, **207**(2-3): 179-186.
- [38] Reimann C, Siewers U, Tarvainen T, *et al.* Agricultural soils in Northern Europe [M]. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 2003.
- [39] Goldhaber M B, Morrison J M, Holloway J M, *et al.* A regional soil and sediment geochemical study in Northern California[J]. *Applied Geochemistry*, 2009, **24**(8): 1482-1499.
- [40] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(9): 1689-1692.
- Chen N C, Zheng Y J, He X F, *et al.* Analysis of the report on the national general survey of soil contamination[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(9): 1689-1692.
- [41] Reimann C, de Caritat P, Team G P, *et al.* New soil composition data for Europe and Australia: demonstrating comparability, identifying continental-scale processes and learning lessons for global geochemical mapping [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **416**: 239-252.
- [42] Rawlins B G, McGrath S P, Scheib A J, *et al.* The advanced soil geochemical atlas of England and Wales[M]. Keyworth: British Geological Survey, 2012.
- [43] 刘胜洪, 张雅君, 杨妙贤, 等. 稀土尾矿区土壤重金属污染与优势植物累积特征[J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(6): 1042-1045.
- Liu S H, Zhang Y J, Yang M X, *et al.* Heavy metal contamination of soil and concentration of dominant plants in rare earth mine tailing area[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2014, **23**(6): 1042-1045.
- [44] 李江遐, 张军, 黄伏森, 等. 铜矿区土壤重金属污染与耐性植物累积特征[J]. *土壤通报*, 2016, **47**(3): 719-724.
- Li J X, Zhang J, Huang F S, *et al.* Heavy metal contamination of soil and its accumulation in tolerant plants in copper mine tongling area[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, **47**(3): 719-724.
- [45] 王璇, 于宏旭, 熊惠磊, 等. 南方某典型矿冶污染场地健康风险评估及修复建议[J]. *环境工程学报*, 2017, **11**(6): 3823-3831.
- Wang X, Yu H X, Xiong H L, *et al.* Health risk assessment and remediation suggestion of a typical smelter contaminated site in Southern China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, **11**(6): 3823-3831.
- [46] 辛术贞, 李花粉, 苏德纯. 我国污灌污水中重金属含量特征及年代变化规律[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(11): 2271-2278.
- Xin S Z, Li H F, Su D C. Concentration characteristics and historical changes of heavy metals in irrigation sewage in China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(11): 2271-2278.
- [47] Dère C, Lamy I, Jaulin A, *et al.* Long-term fate of exogenous metals in a sandy Luvisol subjected to intensive irrigation with raw wastewater[J]. *Environmental Pollution*, 2007, **145**(1): 31-40.
- [48] 廖林仙, 邵孝侯, 钟华. 污水灌溉对土壤环境的影响及其防治对策[J]. *江苏农业科学*, 2006, (3): 188-190.
- Liao L X, Shao X H, Zhong H. Influences of sewage irrigation on soil and its preventing countermeasures [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2006, (3): 188-190.
- [49] 王梦梦, 原梦云, 苏德纯. 我国大气重金属干湿沉降特征及时空变化规律[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(11): 4085-4096.
- Wang M M, Yuan M Y, Su D C. Characteristics and spatial-temporal variation of heavy metals in atmospheric dry and wet deposition of China[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(11): 4085-4096.

CONTENTS

Ratios of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Various Cities of China	WANG Ming, CHEN Wen-tai, LU Si-hua, <i>et al.</i> (4393)
Temporal Variation, Spatial Distribution, and Reactivity Characteristics of Air VOCs in Beijing 2015	ZHANG Bo-tao, AN Xin-xin, WANG Qin, <i>et al.</i> (4400)
Research and Application of the Technical Method for the Compilation of VOCs Emission Inventories from Architectural Coatings in Beijing	DENG Zi-yu, GAO Mei-ping, WANG Qing-wei, <i>et al.</i> (4408)
Content Levels and Compositions Characteristics of Volatile Organic Compounds(VOCs) Emission from Architectural Coatings Based on Actual Measurement	GAO Mei-ping, DENG Zi-yu, NIE Lei, <i>et al.</i> (4414)
Characteristics of Primary Pollutants of Air Quality in Cities Along the Taihang Mountains in Beijing-Tianjin-Hebei Region During 2014-2016	WANG Xiao-yan, WANG Shuai, ZHU Li-li, <i>et al.</i> (4422)
Seasonal Variation and Source Analysis for PM _{2.5} , PM ₁ and Their Carbonaceous Components in Beijing	FAN Xiao-chen, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4430)
Chemical Constitution and Carbon Isotopic Compositions of PM _{2.5} in the Northern Suburb of Nanjing in Spring	ZHOU Yi-ming, HAN Xun, WANG Jin-jin, <i>et al.</i> (4439)
Analysis of Non-polar Organic Compounds in PM _{2.5} by Rapid Thermo-desorption Method Coupled with GC/MS	MA Ying-ge, WU Xia, PENG Meng-meng, <i>et al.</i> (4446)
Association Between Fine Particulate Matter and Asthma Hospital Outpatient Visits in Hangzhou	WANG An-xu, CHEN Xi, SONG Cong-bo, <i>et al.</i> (4457)
Hybrid Electric Bus SCR System Operation and NO _x Emission Characteristics Based on Remote Communication Technology	YANG Qiang, HU Qing-yao, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (4463)
Selection of Priority Contaminants in a Watershed Using Risk Ranking Methodology	LI Qi-feng, LÜ Yong-long, WANG Pei, <i>et al.</i> (4472)
Characteristics and Sources of Atmospheric Inorganic Nitrogen Wet Deposition in Xueyu Cave Watershed, Outer Suburbs of Chongqing City	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (4479)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve	SONG Lei, TIAN Peng, ZHANG Jin-bo, <i>et al.</i> (4490)
Key Production Process of Nitrous Oxide and Nitrogen Sources in Tuojia River	ZHAO Qiang, LÜ Cheng-wen, QIN Xiao-bo, <i>et al.</i> (4497)
Impact of Biochar on Nitrogen Removal and Nitrous Oxide Emission in Aerated Vertical Flow Constructed Wetland	WANG Ning, HUANG Lei, LUO Xing, <i>et al.</i> (4505)
Physiological Responses of Ryegrass in Cadmium-Nonylphenol Co-contaminated Water and the Phytoremediation Effects	SHI Guang-yu, LI Zhong-yi, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (4512)
Analysis of Absorption Characteristics of Urban Black-odor Water	DING Xiao-lei, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (4519)
Seasonal Variations of DOM Spectral Characteristics in the Surface Water of the Upstream Minjiang River	FAN Shi-yu, QIN Ji-hong, LIU Yan-yang, <i>et al.</i> (4530)
Water Quality and Three-Dimensional Fluorescence of Stormwater Runoff from Lined Bioretention Field Cells	LIN Xiu-yong, WANG Shu-min, LI Qiang, <i>et al.</i> (4539)
Nitrate-Nitrogen Pollution Sources of an Underground River in Karst Agricultural Area Using ¹⁵ N and ¹⁸ O Isotope Technique	SHENG Ting, YANG Ping-heng, XIE Guo-wen, <i>et al.</i> (4547)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Landfill Groundwater	PENG Li, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4556)
Adsorption Behavior of Phosphate from Water on Zirconium-loaded Granular Zeolite-amended Sediment	LIANG Shu-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (4565)
Control of Coagulant Dosing for Humic Substances Based on Ultraviolet Spectrum Analysis	ZHANG Bei-chen, ZHANG Xiao-lei, QIN Lan-lan, <i>et al.</i> (4576)
Reduction of Wastewater Organic Micro-pollutants and Genotoxicity in a Hybrid Process Involving Anaerobic-anoxic-oxic and Ozonation Treatments	LI Mo, WANG Zhen-zhe, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4584)
Distribution and Removal of Antibiotic Resistance Genes in Two Sequential Wastewater Treatment Plants	LI Ao-lin, CHEN Li-jun, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (4593)
Effect of Magnetic Chitosan Hydrogel Beads with Immobilized Feamnox Bacteria on the Removal of Ammonium from Wastewater	LIU Zhi-wen, CHEN Chen, PENG Xiao-chun, <i>et al.</i> (4601)
Enhanced Nitrogen and Carbon Removal Performance of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) with Trehalose Addition Treating Saline Wastewater	YANG Zhen-lin, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (4612)
Characteristics of Denitrifying Phosphorus Removal by A ² /O-BAF at Low Temperatures	HUANG Jian-ming, ZHAO Zhi-chao, ZHENG Long-ju, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics of Advanced Treatment of Treated Petrochemical Water by O ₃ -BAC and Analysis of Consortium Structure	ZHANG Chao, SHAN Ming-hao, XU Dan-ning, <i>et al.</i> (4628)
Microbial Community Characteristics of Shortcut Nitrification Start-up in Different MBR-Inoculated Sludges	WU Peng, CHEN Ya, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (4636)
Effect of Microbial Community Structure and Metabolites on Sludge Settling Ability Under Three Different Switching Condition Processes	WEN Dan-dan, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4644)
Adsorption Mechanisms of Ciprofloxacin by Extracellular Polymeric Substances of Sulfate-reducing Bacteria Sludge	ZHANG Hui-qun, JIA Yan-yan, FANG He-ting, <i>et al.</i> (4653)
Rapid Improvement of Denitrification Performance of Embedded Activated Sludge and Community Analysis	YANG Hong, XU Fu, MENG Chen, <i>et al.</i> (4661)
Spatial-Temporal Trends and Pollution Source Analysis for Heavy Metal Contamination of Cultivated Soils in Five Major Grain Producing Regions of China	SHANG Er-ping, XU Er-qi, ZHANG Hong-qi, <i>et al.</i> (4670)
Spatial Interpolation Methods and Pollution Assessment of Heavy Metals of Soil in Typical Areas	MA Hong-hong, YU Tao, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (4684)
Effect of Straw Residues in Combination with Reduced Fertilization Rate on Greenhouse Gas Emissions from a Vegetable Field	HUANG Rong, GAO Ming, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (4694)
Emission of NH ₃ and N ₂ O from Spinach Field Treated with Different Fertilizers	SHAN Nan, HAN Sheng-hui, LIU Ji-pei, <i>et al.</i> (4705)
Effects of Various Combinations of Fertilizer, Soil Moisture, and Temperature on Nitrogen Mineralization and Soluble Organic Nitrogen in Agricultural Soil	TIAN Fei-fei, JI Hong-fei, WANG Le-yun, <i>et al.</i> (4717)
Long-term Fertilization Effects on the Abundance of Complete Ammonia Oxidizing Bacteria(Comammox <i>Nitrospira</i>) in a Neutral Paddy Soil	WANG Mei, WANG Zhi-hui, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4727)
Spatial Variation of Soil Organic Carbon and Stable Isotopes in Different Soil Types of a Typical Oasis	CHEN Xin, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (4735)
Effect and Mechanism of Attapulgite and Its Modified Materials on Bioavailability of Cadmium in Soil	CHEN Zhan-xiang, CHEN Chuan-sheng, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4744)
Persulfate Oxidation Effect of Soil Organic Pollutants by Natural Organic Matters	LIU Qiong-zhi, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4752)
Lead Uptake and Accumulation in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) with Water Management and Selenite Fertilization	WAN Ya-nan, LIU Zhe, Aboubacar Younoussa Camara, <i>et al.</i> (4759)
Key Bacteria for the Microbial Degradation of Pollutants in Cellar Water	YANG Hao, YANG Xiao-ni, ZHANG Guo-zhen, <i>et al.</i> (4766)
Oxidation of Humic Acid Complexing As(III) by As(III)-Oxidizing Bacteria	LI Ze-jiao, CUI Yan-shan, YIN Nai-yi, <i>et al.</i> (4778)
A Thermotolerant and Halotolerant Sulfate-reducing Bacterium in Produced Water from an Offshore High-temperature Oilfield in Bohai Bay, China: Isolation, Phenotypic Characterization, and Inhibition	YANG Chun-lu, YUAN Mei-yu, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (4783)
Isolation and Nitrogen Removal Characteristics of Salt-tolerant Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacteria <i>Zobellella</i> sp. B307	BAI Jie, CHEN Lin, HUANG Xiao, <i>et al.</i> (4793)
Isolation, Identification and Degradation Characteristics of a 17 β -estradiol Degrading Strain <i>Fusarium</i> sp. KY123915	WU Man-li, ZHU Chang-cheng, QI Yan-yun, <i>et al.</i> (4802)
Effect of Fluoroquinolones on Performance and Microbial Community of a Vertical Flow Constructed Wetland	LI Xin-hui, ZHENG Quan, LI Jing, <i>et al.</i> (4809)
Microbial Community Diversity Analysis During Lincomycin Mycelia Dreg with Manure	REN Sheng-tao, GUO Xia-li, LU A-qian, <i>et al.</i> (4817)
Oxidative Stress and DNA Damage Induced by DEP Exposure in Earthworms	PING Ling-wen, LI Xian-xu, ZHANG Cui, <i>et al.</i> (4825)
Mineralogy Characteristics and Heavy Metal Distribution of MSWI Fly Ash	LI Jian-tao, ZENG Ming (4834)