

长江经济带土壤重金属污染分布特征及影响因素¹

梁宗正¹ 胡碧峰^{2,3,4} 谢模典² 倪晗杰² 李洪义^{2,3}

1. 北京外国语大学区域与全球治理高等研究院 2. 江西财经大学财税与公共管理学院 3. 江西财经大学财经数据科学重点实验室 4. 浙江大学污染环境修复与生态健康教育部重点实验室

摘要: 随着经济的快速发展和城镇化的持续推进,长江经济带面临严峻的生态环境污染和退化问题,尤其是土壤重金属点源污染问题日益突出。文章通过文献搜集整合了2008—2018年期间覆盖长江经济带11省市100个城市土壤重金属含量数据,借助地质累积指数、健康风险评估、空间统计分析等模型对该区域内土壤重金属累积及污染特征进行分析。研究发现:(1)长江经济带不同地区土壤重金属含量富集存在较大空间异质性。(2)Cd和Hg元素为长江经济带主要土壤重金属污染物。(3)儿童群体面临的重金属暴露带来的健康风险最高,重金属暴露带来的潜在致癌风险明显高于非致癌风险,且高风险城市主要集中于湖南、江西、云南和贵州等地。(4)工业生产活动、经济发展水平以及人口密度等因素与土壤中重金属的累积密切相关。

关键词: 长江经济带;土壤重金属;污染;背景值;地质累积指数;健康风险;生态环境;

土壤是人类赖以生存的自然环境的重要资源和农业生产的物质基础^[1]。然而近几十年来,快速的工业化、城镇化和农业集约化发展,工业三废排放量不断增加和农业生产中化肥的盲目施用,导致我国表层土壤重金属污染问题日益严重[2,3]。2014年原环保部和国土资源部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国土壤重金属含量点位超标率高达16.1%。土壤重金属具有难降解、隐蔽性强、毒性大、化学形态和生态环境效应复杂多变等特点^[4],不仅会对农作物产生胁迫作用从而影响农产品的产量和品质,而且还会通过食物链在人体内积累^[5]。当人体内重金属含量超过一定剂量或者是长期暴露于重金属环境会对人体造成不可逆的损害,如长期暴露于Cd可能会导致肺癌、骨质疏松、肾功能受损以及高血压等^[6],长期暴露于As可能会导致膀胱癌、肾癌、肺癌和肝癌^[7],长期接触Pb可能会导致贫血、肾病,同时也可能会损伤中枢神经系统^[8]。积极探索土壤重金属积累的主要影响因素,明确土壤重金属污染空间的分布特征,准确识别土壤重金属污染的热点区域,对于提高土壤重金属污染防控和治理的工作效率,保障人民身体健康具有重要意义。

长江经济带总面积约205.23万km²,占全国的21.4%,人口和GDP均超过全国的40.0%,其社会经济发展以及生态环境保护关系国家发展全局。2016年中共中央政治局审议通过了《长江经济带发展规划纲要》,将推进新型城镇化、创新驱动产业转型升级等明确为该地区发展的重要任务,同时要求坚持生态优先、绿色发展,把生态环境保护摆在优先地位。长江经济带具有丰富的

¹ **作者简介:** 梁宗正(1992—),男,博士,讲师,研究方向为区域空间分析、全球治理。E-mail:zongzh1@bfsu.edu.cn;*胡碧峰(1992—),男,博士,副教授,研究方向为土地生态与环境、时空统计分析与建模、计量土壤学。E-mail:hubifeng@zju.edu.cn;
收稿日期: 2023-03-01

基金: 中央高校基本科研业务费专项资金(2022QD010);浙江大学环境修复与生态健康教育部重点实验室开放基金资助项目(EREH202206);浙江省公益技术应用研究项目(LGN22D010003);江西省引进培养创新创业高层次人才“千人计划”创新领军人才长期项目(jxsq202301091);

农业资源,是我国粮食生产的重要地区和经济最发达地区之一,其土壤质量状况对区域农产品安全和生态环境有重要影响。然而随着经济的快速发展,长江经济带城市化水平不断提升,生态环境也受到巨大破坏,存在一定程度的水土流失、土壤污染等问题。该地区作为我国粮食重要产区,面临着环境保护和食品安全保障的巨大压力。为保护和改善长江经济带土壤环境质量,国家出台了大量政策和措施,如科技部每年专列重大科技专项下拨大量资金用于该地区的土壤和水体重金属污染治理和修复。目前已有较多学者对长江经济带不同地区土壤重金属含量空间分布特征、重金属污染严重区域与行业(矿区以及相关行业)以及重金属健康风险开展了诸多调查和研究,且取得了一些积极进展和重要成果^[9]。但是目前针对长江经济带土壤重金属污染,绝大部分研究采样或聚焦于特定土地利用类型如农用地、矿山、电子垃圾场等污染场地、城市土壤、绿地,或聚焦于工矿企业污染场地或者县域以及地级市尺度^[10, 11, 12, 13]。对于覆盖长江经济带整个区域范围内土壤重金属污染特征和影响因素的系统性研究未见报道,相关的健康风险评估及污染的主要潜在来源等信息也十分匮乏。

鉴于此,本研究整合 2008—2018 年期间覆盖长江经济带 11 省市 100 个城市土壤重金属含量的大量文献数据,致力于明确整个长江经济带土壤重金属污染状况和空间特征,评估长江经济带土壤重金属污染带来的健康风险,探索土壤重金属污染的主要影响因素,以为长江经济带土壤重金属污染防控和生态环境质量管理和改善提供理论支撑和科学依据,促进长江经济带地区社会经济高质量、可持续发展和生态文明建设。

1 方法与材料

1.1 研究区介绍

长江经济带是中央重点实施的“三大战略”之一,是具有全球影响力的内河经济带、沿海沿江沿边全面推进的对内对外开放带,也是生态文明建设的先行示范带。主要包括上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南、贵州等 9 个省和 2 个直辖市,总面积约为 205 万 km²。

长江经济带地区西高东低,横跨我国东中西三大区域,雨热同期的气候特点使得大部分区域适合农业产业的发展,因此该地区也是我国重要的粮食主产区。《2019 年全国耕地质量等级情况公报》显示,长江上游和长江中下游平均耕地质量等级分别为 4.98 等和 4.72 等,仅次于东北区(3.59 等)和黄淮海区(4.2 等)。2019 年长江经济带地区农业总产值占全国农业总产值的 41.9%,粮食产量占全国粮食总产量的 35.9%^[14]。但是长江上游和中游地区处于有色金属矿带分布密集区域,上游地区土壤重金属的土壤环境背景值较高,云贵川等地区土壤重金属超标率在全国范围内属于较高水平^[15]。中下游地区由于工业化、城镇化进程迅速,工矿开采活动和农业生产活动强度较大,重金属污染问题也较为突出^[16]。因此,厘清该地区土壤重金属含量及污染状况的空间特征,探究其影响因素具有重要的理论和实践意义。

1.2 数据统计分析

针对本文的研究内容及研究区,我们筛选了 2008—2018 年期间公开发表在 Web of Science 以及中国知网、万方、维普数据库中 400 余篇关于我国土壤表层(0~20 cm)重金属污染的中英文学术论文。所筛选保留的研究成果需要遵循以下原则:①采样点远离矿山地区、电子废物处理厂和垃圾填埋点等特殊场地。②采样流程以及所采用的化学测试分析方法过程符合国家标准。③文献中提供了化学测试分析结果的质量控制信息,以确保测试结果可靠。经过筛选保留的 400 余篇相关研究中,针对长江经济带地区共整合了 100 个城市的 104476 个土壤样点数据,包含 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Ni 和 Zn 等 8 种土壤重金属含量的均值及对应的采样点数目等信息。在同一城市进行的不同案例研究中,根据样本量计算潜在污染物含量的平均值,以代表该城市某类污染物含量。使用公式(1)获得特定城市中潜在污染物的总含量。

$$C_{ij} = \sum_1^n (C_i \cdot S_l) / \sum_1^n S_l \quad (1)$$

式中： C_i 表示案例 1 中潜在污染物的平均含量 i ； S_l 指城市 j 在案例 1 中的样本量。

另外，本研究选择了 11 个变量数据，包括第二产业比重（%）、工业废水排放量（t）、固体废物排放量（t）、污染企业数量（个）、城镇化率（%）、人均 GDP（元）、化肥施用量（t）、农药施用量（t）、机动车数量（辆）、矿山数量（个）、土壤背景值（mg • kg⁻¹）以及市级的潜在污染物控制措施。

1.3 地质累积指数

地质累积指数被广泛用来计算土壤中潜在污染物的累积情况，它不仅考虑自然地质过程造成的背景值的影响，还能兼顾人为活动对重金属污染的影响^[3]。其计算公式如下：

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5\beta_n} \right) \quad (2)$$

式中： C_n 为实测样本中重金属元素 n 的浓度； β_n 为重金属的背景值。

1.4 生态风险指数

生态风险指数（Ecological Risk Index）由瑞典科学家 Hakanson 于 1980 年建立，是为了评估土壤中潜在污染物造成污染从而可能产生的生态风险^[17]。该指数综合考虑了潜在污染物的含量、背景值、潜在生态风险因素和毒性效率。其具体公式为：

$$C_f^i = \frac{C_{0-20}^i}{C_n^i}; \quad Er^i = Tr^i \cdot C_f^i \quad (3)$$

式中： C_f^i 表示污染物 i 的污染系数； C_{0-20}^i 表示表层（0~20 cm）污染物 i 的平均含量； C_n^i 表示污染物 i 的背景值含量； Er^i 表示污染物 i 的潜在生态风险系数； Tr^i 表示污染物 i 的毒性响应系数。

1.5 健康风险评估

本文采用美国环保局发布的人体健康风险模型来评估土壤潜在污染物对人类的健康风险，主要包括致癌和非致癌影响^[18]。在模型评估中，分别计算三类人群即儿童、成人和老年人的健康风险，同时会考虑 3 种接触途径，包括吸入、皮肤接触和摄入。风险指数（HI）用于评估污染物引起的风险系数，当 HI>1 时，意味着具有较高风险，当 HI<1 时，则不存在健康风险。该方法的详细介绍和模型参数见 Hu 等研究^[19]。

1.6 空间自相关分析

1.6.1 全局空间自相关

全局自相关是对特征值在区域内的空间特征的描述，其描述某现象的整体分布情况，从而判断是否在空间上存在聚集特征，但并不能识别聚集区域所在位置^[20]。表示全局自相关的指标和方法很多，常用的是莫兰指数。

1.6.2 局部空间自相关

空间数据随着数据量的增加，其空间异质性也会增强，进而存在区域内空间正相关性与部分负相关共存的情况，因此采用局部空间自相关统计来揭示空间变异性，实现局部区域自相关评估^[21]。本研究采用局部莫兰指数来衡量局部空间自相关。

2 长江经济带土壤重金属含量统计与相关性分析

2.1 土壤重金属含量描述性统计分析

研究区内土壤重金属的平均含量均明显高于国家土壤环境背景值（图略）。Cr 含量均值为 98.45mg·kg⁻¹，最低值和最高值分别为 0.14 mg·kg⁻¹ 和 2107.12 mg·kg⁻¹，分别出现在安徽省蚌埠市和湖北省襄阳市；Pb 含量均值为 136.72 mg·kg⁻¹，最低值位于四川省泸州市，为 1.33 mg·kg⁻¹，最高值位于贵州省六盘水市，为 1487.21 mg·kg⁻¹；Cd 含量均值为 2.63 mg·kg⁻¹，最低值在安徽省阜阳市，为 0.06 mg·kg⁻¹，最高值为 86.52 mg·kg⁻¹，位于云南省怒江傈僳族自治州；Hg 含量均值为 1.02 mg·kg⁻¹，最低值为 0.03 mg·kg⁻¹，最高值为 41.10 mg·kg⁻¹，分别位于安徽省宿迁市和湖南省湘西土家族苗族自治州；As 含量均值为 1.02 mg·kg⁻¹，最低值为 2.18 mg·kg⁻¹，最高值为 229.39 mg·kg⁻¹，分别位于江苏省镇江市和湖南省郴州市；Cu 含量均值为 70.11 mg·kg⁻¹，最低值为 2.18 mg·kg⁻¹，最高值为 229.39 mg·kg⁻¹，分别位于江苏省镇江市和湖南省郴州市；Zn 含量均值为 306.35 mg·kg⁻¹，最低值为 20.93 mg·kg⁻¹，最高值为 8428.98 mg·kg⁻¹，分别位于湖南省益阳市和云南省怒江傈僳族自治州；Ni 含量均值为 56.32 mg·kg⁻¹，最低值为 2.37 mg·kg⁻¹，最高值为 992.84 mg·kg⁻¹，分别位于江苏省镇江市和安徽省马鞍山市。

2.2 研究区不同省份土壤重金属含量及富集情况

长江经济带不同省份表层土壤重金属含量差异较大（图 1），其中云南省的 Pb、Cd、As、Cu、Zn 等多种重金属含量平均值较高。Cr 含量平均值最高的是湖北省，平均值高达 305.31 mg·kg⁻¹，其次是贵州省和重庆市，分别为 113.85 和 109.2 mg·kg⁻¹，其他省份平均值均低于 100 mg·kg⁻¹；Pb 含量平均值最高的省份是云南省（404.45 mg·kg⁻¹），贵州省（359.17 mg·kg⁻¹）和湖南省（194.91 mg·kg⁻¹）次之；Cd 平均含量最高的省份是云南省，平均含量高达 15.44 mg·kg⁻¹，江苏省（0.40 mg·kg⁻¹）含量最低；湖南省和贵州省的 Hg 含量最高，分别为 5.27 和 1.98mg·kg⁻¹，远高于其他省份；As 平均含量最高的 3 个省份分别是云南省、江西省和湖南省，分别为 50.11、41.24、33.29 mg·kg⁻¹；Cu 平均含量最高的省份为江西省、湖南省和云南省，分别为 116.87、99.36、84.36 mg·kg⁻¹；Zn 平均含量最高的省份为云南省、湖南省和贵州省，平均含量分别为 1436.59、450.367、387.29 mg·kg⁻¹；Ni 平均含量最高的分别是上海市、安徽省和湖南省，分别为 111.07、103.15 和 78.45 mg·kg⁻¹。

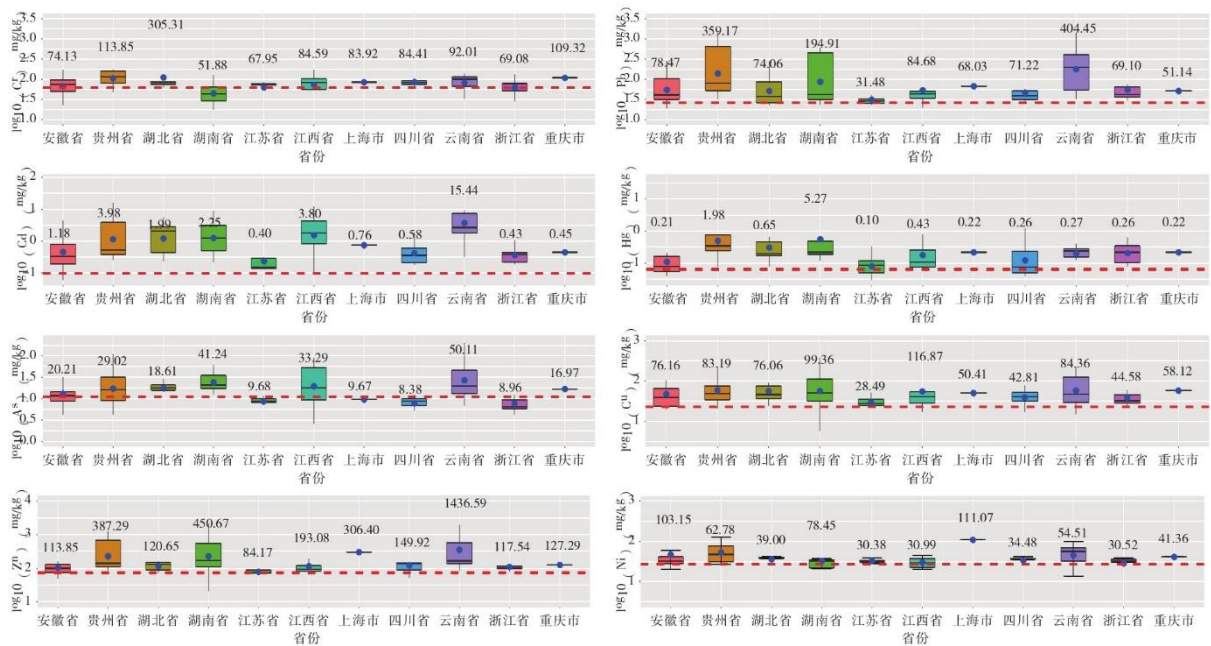


图1 长江经济带不同省份土壤重金属含量箱图(红色虚线表示土壤环境背景值)

Fig.1 Box diagram of soil heavy metal content in different provincial-level regions of the Yangtze River Economic Belt(red dashed line indicates soil environmental background value)

2.3 土壤重金属含量相关性分析

长江经济带地区土壤重金属含量之间相关性系数情况如图2。本研究中,Cd 与 Zn 两种重金属之间正相关性最高,达到 0.96;其次是 Pb 与 Zn 之间的相关性达到 0.64;此外, Pb 与 Cd 两者相关性达到 0.54。诸多研究结果表明,相关系数高的重金属往往可能具有相似来源[22,23]。土壤重金属含量的负相关性相对较低,负相关性程度最高的分别是 Hg 与 Cr、Hg 与 Ni 以及 Zn 与 Cr 两种重金属之间,其相关系数为-0.03。

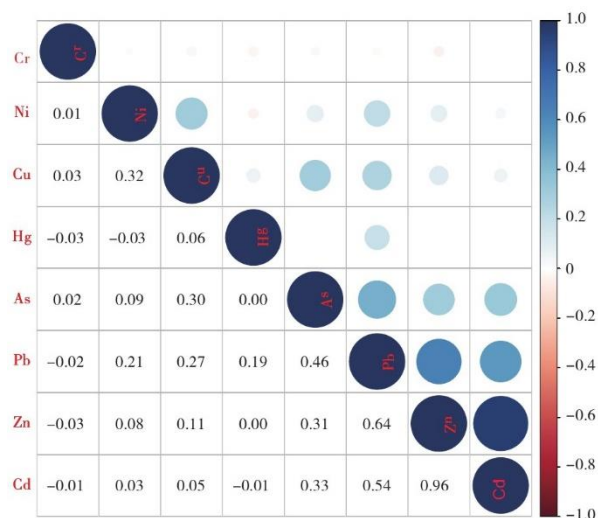


图2 土壤重金属含量相关性矩阵图

Fig.2 Correlation matrix of soil heavy metal content

2.4 土壤重金属含量与主要环境社会影响因素的相关性分析

本研究通过计算土壤重金属含量与工业、交通、农业、居民生活（人口密度、城镇化率、人均 GDP、第二产业比重、工业废水排放量、工业废气排放量、固体废弃物排放总量、化肥施用量、农药施用量、机动车保有量）等多种因素的相关性，进一步判断长江经济带土壤重金属污染的主要影响因素与潜在来源。不同土壤重金属与具有显著相关性的因子的相关系数如图 3 所示，工业生产、经济发展水平以及人口密度等因素是影响研究区土壤重金属累积的主要因素。

其中 Cr 含量与人口密度及人均 GDP 呈显著负相关（图 3a）；Cd、As 含量与人均 GDP 呈显著负相关（图 3c、3e），Zn 含量与城镇化率呈显著负相关（图 3g）。人口密度与人均 GDP 呈显著正相关，二者与城镇化率均能反映经济发展水平与发达程度。一般而言，人均 GDP 高的地区，经济更加发达，城镇化率更高，人口密度更大。同时在经济发达地区，经济产业结构由“二三一”转变为“三二一”，科技含量更高、低污染、低能耗、低污染的高科技产业等第三产业成为主导产业，因此经济更发达、人均 GDP 高的地方土壤环境质量相对更好。这解释了土壤重金属含量与人口密度、人均 GDP 以及城镇化率的显著负相关关系，也表明了人为活动尤其是工业活动对土壤重金属累积的重要影响。

此外 Cu 含量与工业粉尘排放量等呈显著正相关（图 3f），而 Pb 含量不仅与工业粉尘排放量呈显著正相关，还与城镇化率以及人均 GDP 呈显著负相关（图 3b）。说明研究区 Pb 和 Cu 的富集与工业生产活动密切相关。已有许多研究[23, 24]的结果也表明工业企业排放是 Pb 和 Cu 污染主要来源之一，Cu 和 Pb 可以通过工业企业排放的固体废弃物、工业废水或者粉尘沉降等方式累积到土壤中。Hg 含量与城镇化率呈显著负相关，与农药施用量呈显著正相关。如上所述，城镇化率一定程度上可以表征经济发达程度，而农药施用量一定程度上反映了农业生产活动的强度。这表明长江经济带土壤 Hg 的富集除了受到工业活动的影响外，很大程度上也受到农业生产活动的影响，这一结果与前人研究^[25]结果一致。长江经济带表层土壤 Ni 含量与能源消耗量和工业废水排放量成显著正相关（图 3）。能源消耗量可以反映工业生产活动强度，工业废水排放量反映工业废弃物排放量。这说明长江经济带表层土壤 Ni 累积主要受到工业生产活动的影响。已有如 Hu 等的研究结果^[26]均表明表层土壤 Ni 含量与工业活动密切相关。

3 长江经济带土壤重金属污染及健康风险空间格局分析

3.1 土壤重金属累积情况空间分布特征

土壤环境背景值作为土壤污染识别的依据，在环境管理上具有重要作用，对土壤重金属含量有重要影响^[27]。本研究通过计算不同地区表层土壤重金属含量与其土壤环境背景值的比值来反映土壤重金属污染累积情况，消除部分地区如云贵高原土壤重金属含量高背景值的干扰。图 4 显示，通常情况下比值较高的地区土壤重金属累积主要由工业生产、矿山开采、交通运输、农业生产等不同人为活动外源因素引起。其中土壤 Cr 含量背景值倍数最高的地区是湖北省襄阳市；土壤 Pb 含量与背景值的比值最高的地区是贵州省六盘水市、毕节市、黔西南州，云南省曲靖市、怒江州和湖南省郴州市等；土壤 Cd 含量与背景值的比值最高的地区主要在云贵川三省交界区域，湖南省南部，江西省南部等地区以及湖北省黄石市、恩施州、襄阳市，安徽省马鞍山市等地；土壤 Hg 含量与背景值的比值最高的地区主要位于湖南省湘西州、长沙市，贵州省铜仁市、黔西南州、安顺市，湖北省孝感市、黄冈市等地；土壤 As 含量与背景值的比值最高的地区位于湖南省郴州市，其他地区土壤 As 含量背景值倍数均低于 20；土壤 Cu 含量与背景值的比值最高的地区位于江西省景德镇市和安徽省铜陵市，其他地区均低于 20；土壤 Zn 含量与背景值的比值最高的地区位于云南省怒江州、曲靖市，湖南省怀化市和贵州省黔西南州，其他地区均低于 20；土壤 Ni 含量与背景值的比值最高的地区位于安徽省马鞍山市，其他地区均低于 20。

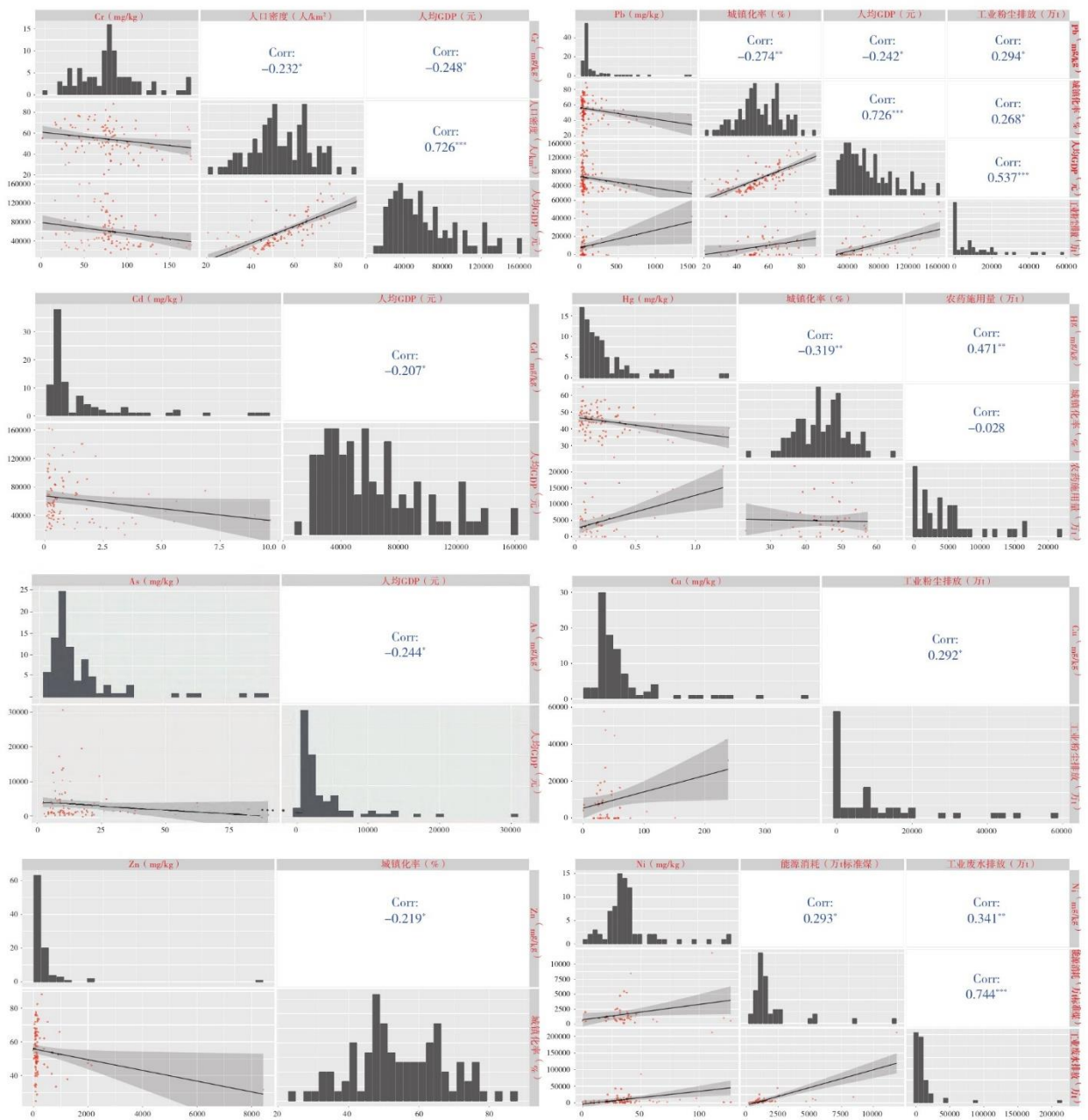


图3 长江经济带不同城市土壤重金属含量与其他因素相关性

Fig.3 Correlation between soil heavy metal content in the Yangtze River Economic Belt and other factors

图4中存在重金属污染的城市大部分与矿业、工业发展关系密切。我国云贵川地区地质构造复杂,岩浆活动频繁,金属、非金属矿产种类较多,储量丰富^[28],如贵州省六盘水市煤矿资源丰富,煤田可靠储量711亿t;云南省曲靖市也以丰富的煤炭资源著称,其煤炭储量270亿t,占云南省全省煤炭储量的56%;安徽省铜陵市更是因铜得名、以铜而兴,素有“中国古铜都,当代铜基地”之称;安徽省马鞍山因钢设市、因钢兴市,是我国七大铁矿区之一;江西省景德镇市则以瓷石、高岭土、煤矿、钨矿、砂金、铜矿等蕴藏丰富而著称;湖南省衡阳市是湖南省的工业重镇,郴州市和怀化市则分布着数量众多的中小规模的矿山企业。因此,长期高强度的工业生产和矿山开采活动等可能是引起这些地方重金属高度富集的主要因素。

3.2 土壤重金属污染潜在生态危害风险空间评估

土壤重金属潜在生态危害指数通常用来衡量土壤重金属累积带来的潜在生态危害。本文通过计算 8 种主要土壤重金属的潜在生态危害指数并采用可视化方式评估研究区的重金属潜在生态危害(图 5),从图 5 中发现研究区内较多城市土壤重金属 Cd 和 Hg 的潜在生态危害等级较高。长江经济带地区绝大部分地区由土壤重金属 Cr、Pb、As、Cu、Zn 和 Ni 累积带来的潜在生态危害处于低风险等级,少数城市处于中等及以上的风险等级。大部分城市由重金属 Cd 累积带来的潜在生态危害属于中等风险及以上,云南省南部、湖南省中部和南部,江西省东部和南部,贵州省西部以及四川省、湖北省、安徽省、浙江省等部分城市处于极强风险等级。由重金属 Hg 累积带来的潜在生态危害总体也较为严重,大部分城市处于中等风险及以上,处于极强风险等级的城市主要位于云南省、四川省、贵州省、湖南省、湖北省、江西省、安徽省和浙江省。

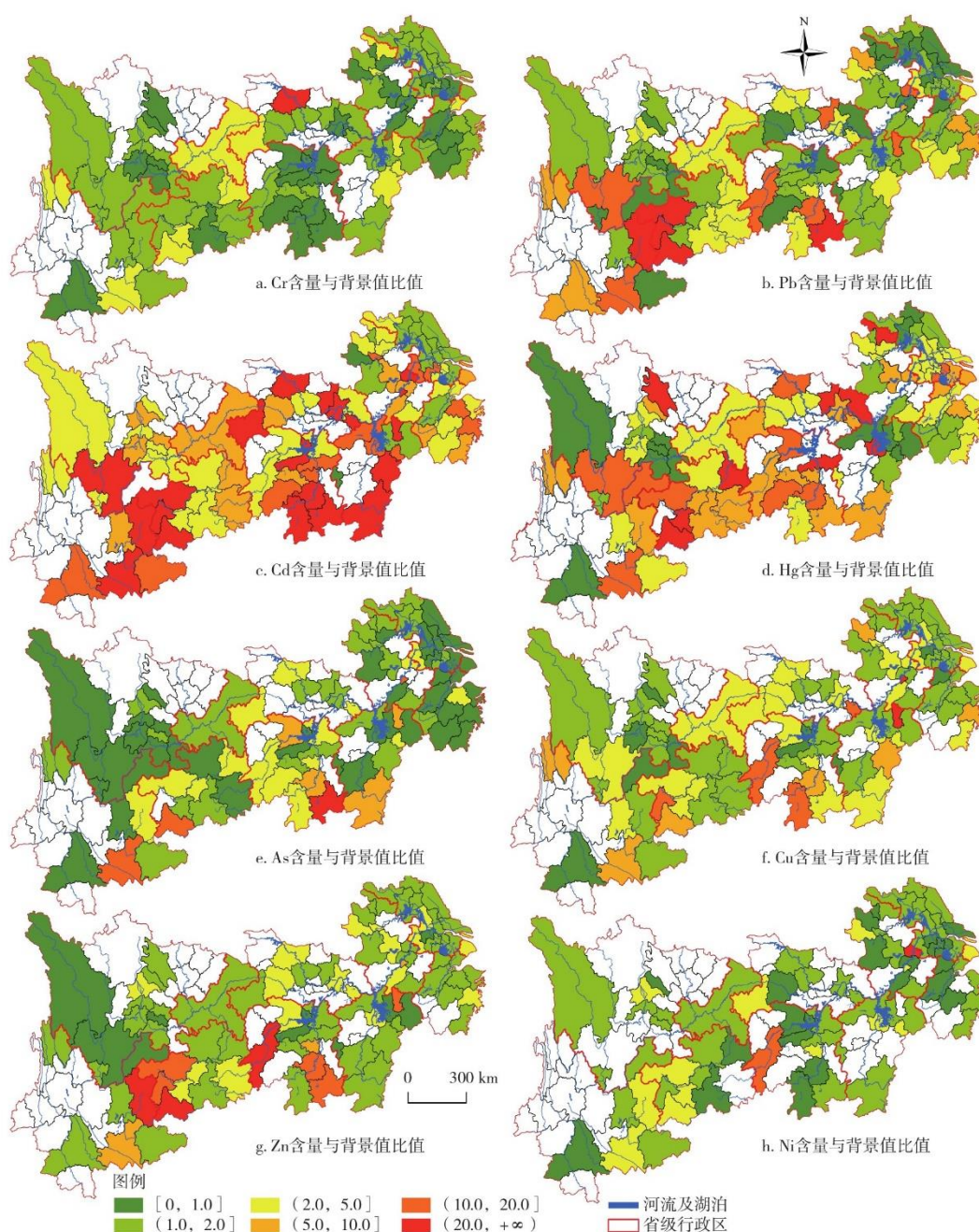


图 4 长江经济带土壤重金属与土壤环境背景值比值空间分布

Fig.4 Spatial distribution of the ratio of soil heavy metal to soil environmental background value in the Yangtze River Economic Belt

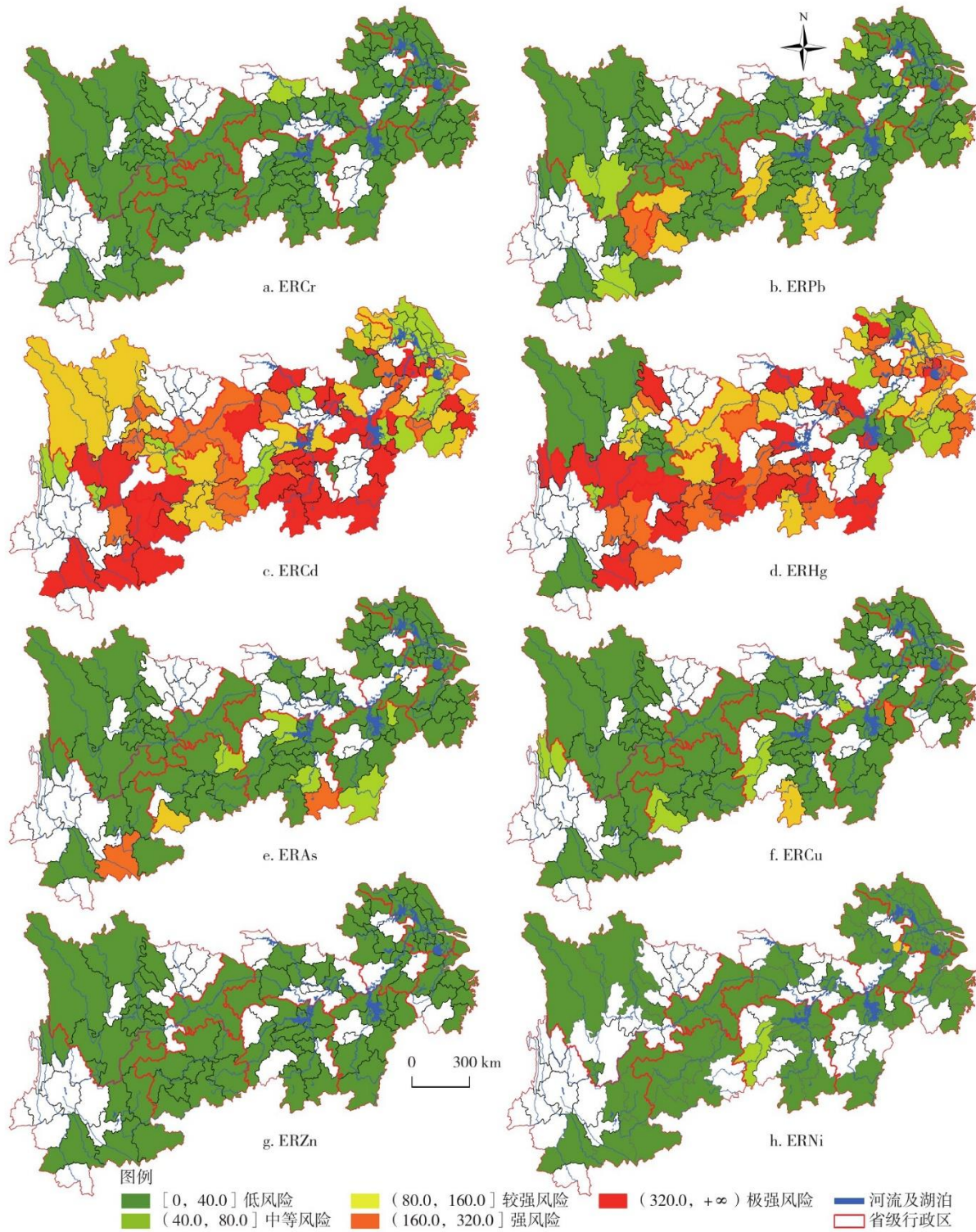


图 5 长江经济带不同地区土壤重金属污染潜在生态危害指数空间分布

Fig.5 Spatial distribution of potential ecological risk index of soil heavy metal pollution in the Yangtze River Economic Belt

3.3 不同群体土壤重金属污染健康风险空间分布特征

本研究计算了由重金属暴露给三类群体（儿童、成人和老年）带来的非致癌和致癌健康风险。从非致癌风险来看，长江经济带大部分地区因重金属暴露给儿童群体带来的非致癌健康风险值小于 1.0 的阈值（图 6），少部分地区如湖南省株洲市、郴州市、湘西州、衡阳市、怀化市、常德市，云南省怒江州、红河州、曲靖市，贵州省黔西南州、六盘水市、毕节市、铜仁市，江西省赣州市、景德镇市，安徽省铜陵市、马鞍山市以及江苏省镇江市，重金属暴露给儿童带来的非致癌健康风险值超过了 1.0 的阈值。而对成人来说，长江经济带绝大部分城市重金属暴露给成人带来的非致癌健康风险值小于 1.0 的阈值，但是在湖南省株洲市、郴州市、湘西州、衡阳市，云南省怒江州、红河州、曲靖市，贵州省黔西南州、六盘水市和江苏省镇江市及安徽省铜陵市重金属暴露给成人带来的非致癌健康风险值超过了 1.0 的阈值。对老年群体来说，绝大部分城市重金属暴露给老年人带来的非致癌健康风险值小于 1.0 的阈值，只有湖南省株洲市、郴州市、湘西州，云南省怒江州、红河州、曲靖市以及江苏省镇江市的非致癌健康风险值大于 1.0。

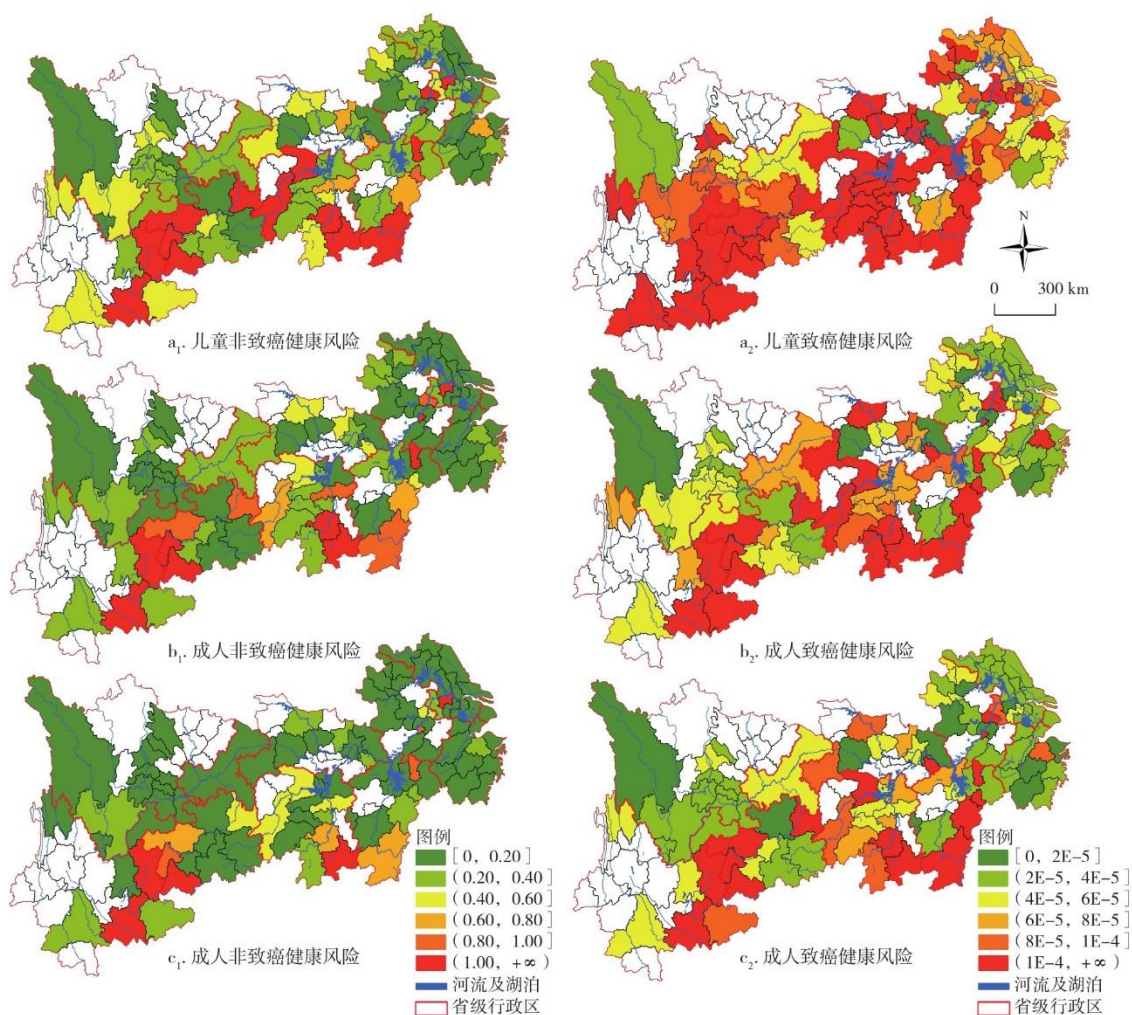


图6 长江经济带不同人群土壤重金属污染健康风险空间分布

Fig.6 Spatial distribution of health risk of soil heavy metal pollution in different groups of people in the Yangtze River Economic Belt

致癌健康风险值达到10-4时表示重金属暴露会给人群带来实质性的致癌健康风险。从致癌风险来看，长江经济带所涉及的100个地级市中，有将近一半（49个）的城市重金属暴露给儿童带来的致癌健康风险值超过安全阈值（图6），主要集中分布于云南省、贵州省、湖南省、江西省、安徽省等地；此外，有26个地级市重金属暴露给成人带来的致癌健康风险值超过安全阈值，主要集中分布于湖南省、云南省、江西省、贵州省和湖北省等；有17个地级市重金属暴露给老年人群带来的致癌健康风险值超过安全阈值，主要集中分布于贵州省、湖南省和江西省。其中湖南省株洲市、郴州市、湘西州，云南省怒江州、红河州、曲靖市以及江苏省镇江市这些地区重金属暴露给三类人群带来的健康风险均超过安全阈值。

综上所述，长江经济带儿童群体面临的重金属暴露带来的健康风险明显高于成人组和老年人群体，重金属暴露带来的潜在致癌风险明显高于非致癌风险，且高风险城市主要集中于湖南省、江西省、云南省和贵州省等地。相比成人和老人，儿童的暴露剂量更大，对重金属污染暴露更加敏感，这些因素可能导致了儿童面临着更大的健康风险。周建军等也发文指出我国土壤重金属污染区域相对集中于云南、贵州、广西等西南地区，江西、湖南等华中地区^[29]。我国长江流域矿产种类较齐全，目前已发现矿产地共计15490处，其中超大型159处，大型1108处，中型2333处^[30]。而湖南省、云南省、贵州省和江西省是我国乃至全世界有色金属储量最为丰富的地区，有色重金属开采、选矿、冶炼企业众多。其中，四川省、云南省等省份，铜铅锌矿发育潜力大，铁、锰、铝土矿等储量也都在国内名列前茅；湖南省、江西省的钨矿，湖南省的锑矿均居全国之首；铝土矿、汞矿分布以上游贵州省、重庆市等省份为主；铜矿沿江主要呈带状分布，全国规模最大的德兴铜矿就位于江西省上饶市，也是我国重要的铜生产基地；安徽省铁矿资源十分丰富，冶矿行为导致周边及下游江河沿岸土壤重金属大量积累，由此带来的重金属污染问题也较为突出。这些因素导致湖南省、江西省、云南省和贵州省等地由于土壤重金属污染暴露带来的健康风险尤为突出。

长江经济带下游的江苏省、上海市以及浙江省等地重金属污染程度和由此带来的健康风险等级均相对较低。得益于这些地区产业升级，较早地淘汰了高能耗高污染的传统工业，经济结构以低污染低能耗以及环境友好型的第二产业以及第三产业为主，同时也在大力开展土壤重金属污染的治理工作，因此江浙沪地区近些年来土壤环境质量得到持续改善，居民健康得到较好保障。She等研究发现长江三角洲地区农田土壤重金属Cd、Pb和Zn等含量在1993—2000年期间保持增长趋势，随后开始呈现下降趋势，与此同时Hg、As和Ni含量呈现持续下降趋势^[31]。因此，江浙沪等经济发达地区的社会经济发展给生态环境改善以及当地居民健康带来了显著的正面效应。

3.4 土壤重金属污染健康风险空间热点分析

本研究通过计算局部莫兰指数识别出长江经济带土壤重金属污染健康风险热点和冷点区域。如图7所示，不同群体面临致癌风险较高的热点区域分布较为一致。其中儿童群体由重金属暴露引发的非致癌风险的热点区域主要分布在云南省东部、贵州省西部和湖南省中南部。成人人群由重金属暴露引发的非致癌风险的热点区域主要分布在云南省东南部、贵州省西部和湖南省南部以及江西省景德镇市、江苏省镇江市。老年人群由重金属暴露带来的非致癌风险的热点区域跟成年人群体总体一致。而不同年龄组由重金属暴露带来的致癌风险的热点区域分布较为一致，致癌风险热点区域主要分布在云南省红河州，贵州省黔东南州，湖南省郴州市、衡阳市，江西省景德镇市和安徽省马鞍山市。

4 结论与建议

4.1 主要结论

本文评估了长江经济带土壤重金属污染情况，探索了长江经济带不同地区土壤重金属污染状况及健康风险空间格局特征，分析了长江经济带土壤重金属潜在来源。结果表明：①长江经济带地区土壤重金属的平均含量明显高于相应的国家土壤环境背景值，研究区内多种重金属均存在不同程度的污染等级。长江经济带土壤中主要重金属污染物为 Cd 和 Hg。不同地区的土壤重金属含量存在较大差距，部分省份如云南省、贵州省、江西省和湖南省等土壤重金属污染问题相对突出。②相关性分析结果表明，Cr、Pb 和 Zn 之间相关系数最高。工业生产活动、经济发展水平以及人口密度等因素是影响长江经济带土壤重金属累积的主要因素。③研究区内由土壤中重金属 Cd 和 Hg 累积引起的潜在生态危害等级较高，由土壤重金属 Cr、Pb、As、Cu、Zn 和 Ni 累积带来的潜在生态危害等级较低。④长江经济带儿童群体面临的土壤重金属暴露带来的健康风险明显高于成人和老年人群体。且土壤重金属暴露带来的潜在致癌风险明显高于非致癌风险，高风险城市主要集中于湖南省、江西省和云贵地区。

4.2 相关建议

土壤重金属污染会严重影响农业产品质量以及食品安全，改善长江经济带土壤环境质量对保障我国粮食安全生产、经济社会高质量发展和繁荣稳定至关重要。故提出以下几个方面的建议：①明确污染源，分区治理。本研究揭示，目前长江经济带存在不同重金属污染情况，且土壤重金属污染源各不相同。要针对不同污染源，开展分区分策治理。因此，首先应明确不同区域重金属来源，采取针对性的治理措施。如对云贵川地区、江西省景德镇市、安徽省铜陵市等矿山开采活动较多的地区，应重点从源头控制污染，避免矿山开采废弃物的无序堆放。对存在污染的土壤可根据修复场地实际情况采用物理、化学等多种方法进行修复。各地区可联合高校、企业等成立专业的土壤环境调查组织，对相关重金属数据进行全面分析与科学评估，为区域内的分策治理提供有力依据。

②合理施用化肥，加快绿色农业技术创新。农药和化肥是重要农用物资，对农业生产至关重要，但长期不合理施用农药和化肥会导致土壤重金属集聚。因此，应提倡科学高效的农业管理措施，实现农业生产过程的规范化、科学化，降低农药、化肥的过度使用。可在部分地区考虑改变现有作物种类，如在污染严重地区考虑种植低金属累积的经济作物而不是粮食作物。同时大力发展生物修复、农业生态修复以及联合修复（物化联合、生物联合以及物化—生物联合）等新型土壤修复技术^[32]。

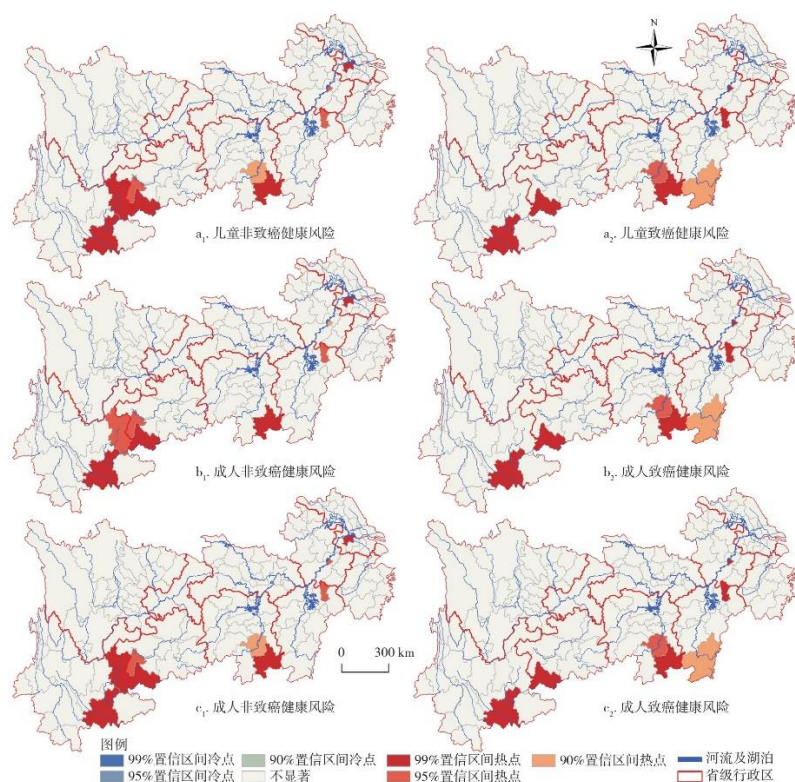


图 7 长江经济带土壤重金属暴露非致癌和致癌风险冷热点分布图

Fig.7 Distribution map of non-carcinogenic risk and carcinogenic risk of soil heavy metal exposure in the Yangtze River Economic Belt

③协同治理、鼓励参与。实现多方协同治理需要明确参与主体的责任，政府要主动发挥自身强制力与协调力，通过政策积极引导，鼓励更多主体参与到治理中来。针对土壤重金属污染的上下游协同治理，鼓励、支持相关科研单位联合攻关，协同创新，加强土壤重金属污染治理的基础研究以及应用研究，尤其是重金属治理修复技术的推广与应用，从根本上解决重金属超标问题。同时改变政府财政投入的单一模式，依靠社会力量，鼓励企业参与污染治理，产生社会效益的同时解决污染问题，探索政府主导一企业承包的治理模式。

④构建长江经济带土壤重金属长期定位监测网。土壤重金属污染累积受到一系列人为及社会经济因素的影响，因而具有较强的时空异质性。部分欧美发达国家较早地建立了国家长期定位土壤监测网络，如欧盟的 LANDMARK 计划、法国土壤质量监测系统（RMQS）计划、荷兰土壤质量监测网络^[33]等。因此，从政府层面来讲，可以在长江经济带重金属污染较严重以及人体健康风险较高的地区，如贵州省六盘水市，云南省曲靖市，安徽省铜陵市，湖南省衡阳市、株洲市、郴州市、湘西州，云南省怒江州、红河州、曲靖市以及江苏省镇江市等地，建立土壤重金属及土壤质量的动态监测站点，构成完整的长期定位监测网络，不断提高土壤环境监测的整体水平，制定土壤监测管理体系，加大环境监测数据的共享和信息化管理力度，完善数据监测共享平台，实现土壤监测全过程的信息化管理。

参考文献

- [1] Hu B F, Bourennane H, Arrouays D, et al. Developing pedotransfer functions to harmonize extractable soil phosphorus content measured with different methods: A case study across the mainland of France[J]. *Geoderma*, 2021, 381: 114645.
- [2] Jiang Y F, You Q H, Chen X Y, et al. Preliminary risk assessment of regional industrial enterprise sites based on big data[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 838, 156609.
- [3] 胡碧峰, 王佳昱, 傅婷婷, 等. 空间分析在土壤重金属污染研究中的应用[J]. *土壤通报*, 2017, 48(4): 1014-1024.
- [4] Nriagu J O, Pacyna J M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals[J]. *Nature*, 1988, 333(6169): 134-139.
- [5] 孙养存, 尹紫良, 葛菁萍. 土壤中重金属污染物的来源及治理方式[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(6): 75-79.
- [6] Satarug S, Baker J R, Urbanjapol S, et al. A global perspective on cadmium pollution and toxicity in non-occupationally exposed population[J]. *Toxicology Letters*, 2003, 137(1-2), 65-83.
- [7] Smith A H, Goycolea M, Haque R, et al. Marked increase in bladder and lung cancer mortality in a region of northern Chile due to arsenic in water[J]. *American Journal of Epidemiology*, 1998, 147(7): 660-669.
- [8] Li Z Y, Ma Z W, 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: 843-853.

-
- [9] Wu Z, Chen Y, Yang Z, et al. Spatial distribution of lead concentration in peri-urban soil: Threshold and interaction effects of environmental variables[J]. *Geoderma*, 2023, 429:116193.
- [10] 陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 等. 南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价[J]. *环境科学*, 2021, 42(2):909-916.
- [11] 陈丹丹, 谭璐, 聂紫萌, 等. 湖南典型金属冶炼与采选行业企业周边土壤重金属污染评价及源解析[J]. *环境化学*, 2021, 40(9):2667-2679.
- [12] 陶美霞, 胡虎, 胡兰文, 等. 上饶市某铜矿废弃地土壤重金属污染特征及健康风险评价[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(6):1153-1159.
- [13] Huang J, Wu Y, Sun J, et al. Health risk assessment of heavy metal(loid)s in park soils of the largest megacity in China by using Monte Carlo simulation coupled with Positive matrix factorization model[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 415:125629.
- [14] 吴传清. 长江经济带产业发展报告(2019—2020)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2021.
- [15] Hu B F, Shao S, Ni H, et al. Current Status, Spatial features, health risk and potential driving factors of soil heavy metal pollution in China at province level[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 266:114961.
- [16] 刘孝严, 樊亚男, 刘鹏, 等. 基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征[J]. *环境科学*, 2022, 43(11):5169-5179.
- [17] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [18] Hu B F, Jia X L, Hu J, et al. Assessment of heavy metal pollution and health risks in the soil-plant-human system in the Yangtze River Delta, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14(9):1042.
- [19] Hu B F, Shao S, Ni H, et al. Current Status, Spatial features, health risk and potential driving factors of soil heavy metal pollution in China at province level[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 266:114961.
- [20] 孟斌, 王劲峰, 张文忠, 等. 基于空间分析方法的中国区域差异研究[J]. *地理科学*, 2005, 25(4):393-400.
- [21] 李美芳, 欧金沛, 黎夏. 基于地理信息系统的 2009—2013 年甲型 H1N1 流感的时空分析[J]. *地理研究*, 2016, 35(11):2139-2152.
- [22] Chen H, Wang L, Hu B, et al. Potential driving forces and probabilistic health risks of heavy metal accumulation in the soils from an e-waste area, southeast China[J]. *Chemosphere*, 2022, 289:133182.
- [23] Li Z, Ma Z, van der Kuijp T J, Yuan Z, 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.

-
- [24] 李艳玲, 陈卫平, 杨阳, 等. 济源市平原区农田重金属污染特征及综合风险评估[J]. 环境科学学报, 2020, 40(6):2229-2236.
- [25] Hu B F, Zhou Y, Jiang Y F, et al. Spatio-temporal variation and source changes of potentially toxic elements in soil on a typical plain of the Yangtze River Delta, China(2002-2012)[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 271:110943.
- [26] Hu B F, Shao S, Ni H, et al. Assessment of potentially toxic element pollution in soils and related health risks in 271 cities across China[J]. Environmental Pollution, 2021, 270:116196
- [27] 吴运金, 周艳, 杨敏, 等. 国内外土壤环境背景值应用现状分析及对策建议[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(12):1524-1531.
- [28] 徐磊, 黄加忠, 张亚, 等. 滇中高山丘陵区土壤重金属来源及影响因素——以武定县为例[J]. 中国农学通报, 2022, 38(1):82-92.
- [29] 周建军, 周桔, 冯仁国. 我国土壤重金属污染现状及治理战略[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(3):315-320, 350, 272.
- [30] 王岩, 王登红, 黄凡. 长江流域矿产资源特征及成矿规律[J]. 地质学报, 2022, 96(5):1724-1735.
- [31] She S F, Hu B F, Zhang X L, et al. Current status and temporal trend of potentially toxic elements pollution in agricultural soil in the Yangtze River Delta Region:A meta-analysis[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(3):1033.
- [32] 师艳丽, 陈明, 李凤果, 等. 土壤重金属污染修复技术研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2018, 9(5):66-71.
- [33] Bünemann E K, Bongiorno G, Bai Z, et al. Soil quality - A critical review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 120:105-125.