

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第 45 卷 第 3 期 2024 年 3 月 15 日

目 次

中国省域差异化碳达峰评价方法与应用	(1233) (1243) (1254) (1255) (1274) (1285) (1293) (1293) (1304) (1315) (1328) (1337)
·····································	(1349) (1361) (1371) (1382) (1382) (1392) (1402)
崔志谋,史小红,赵胜男,卢俊平,张吴,刘莹慧,郭鑫,王彦隽(重庆市长寿湖水库表层水体重金属时空分布及风险评价 张瑞溪,刘娅君,罗泳楠,李杰芹,李彩霞,李佳佳,张成(长江流域微塑料污染特征及生态风险评价 好。 宜昌市东山运河微塑料污染评估及年排放量估算 了爽,李卫明,张续同,刘子健,高雅坤,李映成,王芳炜(汜水河(荥阳段)入河排污口水体微塑料赋存特征及风险评估 赵长民,和兵,李和通,张瑞琪,李银月,张发文,桂新,马丽(宁夏入黄排水沟中药物和个人护理品的污染特征与生态风险评价 。 高礼,李凌云,郑兰香,吴海娟,陶红,刘邓超(浙南瓯江流域水体抗生素污染特征及风险评价 好变昕,李立湘,吴鑫,周施阳,姚飞延,董好刚(鄱阳湖沉积物中多环芳烃的时空分布及源解析 好。 马妍,孙晨,毕笳乐,张波涛,刘艳,邵鹏,刘统,王圣瑞,钟文军((1415) (1428) (1439) (1448) (1457) (1468) (1468) (1480) (1492)
杭州湾南岸20a水质净化功能变化及预测	(1502) (1512) (1525) (1539) (1553) (1553) (1561) (1577) (1586)
基于AWRSEI的岱海流域生态环境质量时空演变及驱动因子分析	(1530) (1598) (1615) (1629) (1644) (1655) (1665) (1665) (1674)
 一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、	(1684) (1692) (1702) (1713)
黄河流域农田土壤重金属污染特征及其优先控制源分析	1724) 1739) 1749) 1760) 1769) 1781) (1793) (1803) (1812) (1821)
宏基因组揭示紫色土中邻苯二甲酸酯去除的微生物学机制李雨桐,余海,刘坤,柏宏成,汪军,朱正杰 (养鸡场空气微生物污染及工人呼吸暴露风险	(1830) (1840) (1849) (1859)

黄河流域农田土壤重金属污染特征及其优先控制源 分析

李军^{1,2},李旭¹,李开明^{1*},焦亮²,台喜生¹,臧飞³,曹素珍¹

(1. 兰州城市学院城市环境学院,兰州 730070; 2. 西北师范大学甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室,兰州 730070; 3. 兰州大学草地农业科技学院,兰州 730020)

摘要:农田土壤环境质量评价与污染溯源解析是保障国家粮食安全和农业可持续发展的基础,也是扎实推进国家净土保卫战的 重要前提.基于2000~2023年黄河流域农田土壤重金属(As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb和Zn)含量数据,采用地累积指数法对重金 属污染特征进行评价,利用正定矩阵因子分解(PMF)模型定量解析重金属的来源贡献,并通过运用蒙特卡洛(Monte Carlo)模拟 和人体健康风险评价模型相耦合的方法评价重金属污染的潜在健康风险,实现优先污染源和污染元素的确定.结果表明:①研 究区农田土壤所有重金属的含量均值均低于《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)(pH>7.5)的筛选 值,但分别有 21.69%、5.56% 和 1.23% 的样点 Cd、As 和 Zn 含量超出其筛选值,Cd 超标率最高.②Hg 和 Cd 为偏中度污染,Cu 和 Pb 为轻度污染,其余元素均为无污染.③农田土壤重金属主要来源为交通-工业源、自然-农业源、工业-自然源和农业-工业源, 贡献率分别为 37.04%、26.69%、21.72% 和 14.55%.④农田土壤重金属对成人与儿童存在致癌健康风险,但不具有非致癌风险; As 和 Cd 为人体健康风险优先控制元素,工业-自然源和农业-工业源为研究区优先控制源.

关键词:黄河流域; Monte Carlo模拟; 正定矩阵因子分解(PMF)模型; 源解析; 健康风险评价 中图分类号: X53;X825 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)03-1724-15 DOI: 10.13227/j. hjkx. 202305211

Characteristics and Identification Priority Source of Heavy Metals Pollution in Farmland Soils in the Yellow River Basin

LI Jun^{1,2}, LI Xu¹, LI Kai-ming^{1*}, JIAO Liang², TAI Xi-sheng¹, ZANG Fei³, CAO Su-zhen^{1/2}

(1. College of Urban Environment, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Resource Environment and Sustainable Development of Oasis, Gansu Province, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 3. College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China) **Abstract:** Assessments of the soil environmental quality of farmland and pollution source apportionment are the foundation for ensuring national food security and agricultural sustainable development, as well as an important prerequisite for the pursuit to keep our lands clean. This study evaluated the characteristics of heavy metal pollution in farmland soils in the Yellow River Basin from 2000 to 2023, based on the data of heavy metal contents including As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn, using the geo-accumulation index method. Source apportionment was conducted by employing a positive matrix factorization (PMF) model. The probabilistic health risks were evaluated by coupling Monte Carlo simulation with a human health risk assessment model, and priority pollution sources and elements were identified. The results showed that: ① the average content of all heavy metals in farmland soils within the study area was lower than the screening values specified in the soil environment quality risk control standard for soil contamination of agriculture land (GB 15618-2018) (pH>7.5). However, the contents of Cd, As, and Zn in the samples exceeded their screening values, with percentages of 21. 69%, 5. 56%, and 1. 23%, respectively, with Cd having the highest rate of exceedance. ② Hg and Cd were moderately polluted, Cu and Pb were slightly polluted, and the other elements were not polluted. ③ The main sources of heavy metals in farmland soil were traffic-industrial sources, natural-agricultural sources, industrial-natural sources, and agricultural-industrial sources, with contribution rates of 37. 04%, 26. 69%, 21. 72%, and 14. 55%, respectively. ④ Heavy metals in farmland soil posed carcinogen

Key words: Yellow River Basin; Monte Carlo simulation; positive matrix factorization (PMF) model; source apportionment; health risk assessment

土壤是人类赖以生存的最基本和最重要的自然 资源,土壤环境质量是保障农产品安全、人居环境安 全和生态系统安全的重要基础.近年来,随着中国城 市化及城镇化进程的高速推进,矿产资源开发、金属 加工冶炼、交通运输、污水灌溉以及化肥农药和地 膜长期不合理使用等活动导致以重金属为主的污染 物在农田土壤中不断富集,造成农田土壤质量退化, 引发的农田土壤重金属污染问题日益凸显^[1,2].由于 重金属污染的隐蔽性、累积性、难降解性和显著的 生物毒性等复杂特征使得农田土壤重金属污染不仅 制约着农业的高质量可持续发展,也严重威胁着食 品安全、生态安全和人类健康^[3,4].为此,深入开展农 田土壤重金属污染过程、溯源解析及其风险评估研 究,对于进一步落实国家"科学治污"和"精准治污" 的政策要求和确保国家"净土、洁食、居安、健康"的

基金项目: 甘肃省科技计划项目(21JR1RA319和21JR7RA539);甘 肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室开放课题项 目(GORS202102)

收稿日期: 2023-05-23;修订日期: 2023-06-14

作者简介: 李军(1984~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为土壤污 染过程与环境质量演变, E-mail: lijunrock@163. com

^{*} 通信作者, E-mail: lkm_wd@126.com

战略目标具有重要的战略意义和现实意义.

黄河流域是中国重要的生态走廊、能源富集区 和粮食生产核心区,也是化工、原材料和基础工业基 地[5,6],在保障国家能源和粮食安全及维护生态安全 格局方面具有全局性和战略性地位[7]. 虽然自黄河流 域生态保护和高质量发展上升为国家战略以来,黄 河流域的生态环境保护和治理等方面取得了显著的 成效,但过去粗放式的发展和当前经济社会与城市 化的快速发展所带来的环境污染问题[7],特别是部分 地区农田土壤环境重金属污染问题,依然威胁着农 产品的质量安全和农业绿色发展[8].近年来,黄河流 域农田土壤重金属污染特征、空间分布及其健康风 险引起了学者们的广泛关注,前期已针对黄河流域 宁夏引黄灌区^[9]、银川市兴庆区^[10]、甘肃白银四龙 镇-北湾镇耕地区^[11]和河南开封黑岗口引黄灌区^[12]等 地的农田土壤重金属污染特征与健康风险评价开展 了相关研究,深化了学术界对于黄河流域特定地域 农田土壤重金属污染状况及其健康风险的认识.然 而,已有研究主要侧重于某个镇域、县域、市域或省 域等中小尺度范围,对于整个流域大尺度范围的农 田土壤重金属分布特征及人体健康风险评估仍缺乏 全面系统的认识.

此外,当前针对农田土壤重金属污染暴露引发 的人体健康风险评价主要是利用基于固定暴露参数 和重金属含量的人体健康风险评估模型,这一定程 度上会高估或低估健康风险的评价结果[13]. 而蒙特 卡洛模拟(Monte Carlo simulation)可在综合考虑健康 风险评价模型暴露参数概率分布的基础上,计算健 康风险的概率,从而提高健康风险评价的准确性[14]. 同时,传统的土壤重金属暴露下的人体健康风险评 价是以含量为基础,并不能确定土壤污染的优先控 制重金属,亦无法识别并量化优先控制污染源[15].近 期,研究人员通过将定量污染源解析和 Monte Carlo 模 型相耦合来获取优先控制金属和优先控制污染源等 关键信息,并实现优先控制污染源的识别和人体健 康风险的量化[15],为土壤重金属污染优先污染源控 制的确定和土壤重金属污染的精准防治提供了科学 依据.

为此,本文以黄河流域农田土壤为研究对象,针 对大尺度研究区域土壤采样困难、采样成本高和重 金属含量数据获取难等难题,通过调研2000~2023年 公开发表的黄河流域农田土壤重金属元素(As、Cd、 Cr、Cu、Hg、Ni、Pb和Zn)的含量数据,分析重金属含 量的空间分布和污染特征,利用正定矩阵因子分解 (positive matrix factorization, PMF)模型定量解析土壤 重金属的来源及其贡献率,并将 Monte Carlo模拟引入 健康风险评估模型,实现人体潜在健康风险定量评估的同时,明晰农田土壤重金属污染优先管控金属和来源,以期为黄河流域农田土壤的"科学治污"和 "精准治污"提供科学依据和数据支撑,以及助力黄 河流域农田生态保护和高质量发展.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河流域(95°53′45″~119°12′48″E,32°09′33″ ~41°50′20″N)东西长约1900 km,南北宽约1100 km,流域总面积为79.5万km^{2[16]}.流域地势西高东 低,自西向东分别流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙 古、陕西、山西、河南和山东等9个省区的68个地级 行政单元(图1),呈"几"字形,最终注入渤海^[16].流域 内各地区气候差异明显,总体上呈现出降水量分布 不均、季节温差显著、太阳辐射强和蒸发量大等特 点^[17].流域生态环境脆弱,存在土地荒漠化、湿地功 能退化、生物多样性和土壤质量功能面临威胁等问 题^[18],脆弱的生态环境给农业生产和经济发展造成 很大限制.此外,流域内矿产、能源资源丰富,形成 了一批以石油、天然气和煤炭等能源资源开发为主 的能源化工生产基地,还拥有一批具备制造业高质 量发展的老工业基地^[8].

1.2 数据收集与处理

本研究收集和整理了2000年1月1日至2023年 1月1日期间公开发表的有关黄河流域农田土壤重金 属的研究论文.以"农田或耕地土壤/agricultural or farmland soil" "重金属或潜在有毒元素/heavy metals or potentially toxic elements or potentially toxic metals or trace metals""黄河流域或各省市名称/Yellow River Basin or provinces or cities"为主题在中国知网、维普、 万方和Web of Science数据库中进行文献检索,并利 用 Python 和人工筛选方法对同行公开发表的关于黄 河流域农田土壤重金属的126篇中英文文献中As、 Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb和Zn等8项重金属含量进行 提取.其中数据筛选标准包括:①目标文献的研究对 象为黄河流域内区域农田表层土壤(0~20 cm);②目 标文献中需有明确的研究区域或可直接提取研究区 地理坐标位置;③目标文献明确消解前处理为HNO₃-HClO₄-HF、HCl-HNO₃-HClO₄-HF等方法,测试方法为 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)、火焰原子吸收 法(FAAS)、石墨炉原子吸收法(GAAS)、原子荧光法 (AFS)和电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)中 的一种;④检索结果采用目标文献中土壤重金属含 量平均值.考虑到部分采样点受采矿尾矿区、废物 处置场和燃煤发电厂等工矿业污染因素影响严重,



基于自然资源部地图技术审查中心标准地图[审图号:GS(2020)4619号]绘制,底图无修改 图1 黄河流域农田土壤样本点分布示意

Fig. 1 Distribution of farmland soil sampling sites in the Yellow River Basin

可能导致区域某种重金属含量值出现异常,为了进 一步消除异常值影响,在展开各项分析前需对重金 属样本数据进行检验处理以剔除异常样本.最终获 得15272个采样点,通过将同一县域或镇域样点数 据平均处理之后,共得到样点122个,其中青海4个、 甘肃32个、陕西9个、山西26个、山东13个、河南 16个、内蒙古12个和宁夏10个,样点坐标为地理坐 标器拾取获取,具体样点分布见图1. 1.3 重金属污染评价方法

地累积指数法(geo-accumulation index, Igeo)是由 德国学者 Müller于 1979年提出的一种定量研究河流 沉积物重金属累积程度的方法^[19].该方法综合考虑 了人为干扰、环境地球化学背景值和自然成岩作用 的影响,现被广泛用于土壤重金属污染评价^[13].其计 算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left[C_i / \left(K \times B_i \right) \right]$$
(1)

式中, C_i 为重金属i的实测值(mg·kg⁻¹);K为修正系数,用于消除成岩作用可能引起的背景值变化,一般取1.5; B_i 为重金属i的评价标准值(mg·kg⁻¹),本研究采用各省土壤重金属含量背景值^[20](表1).基于 I_{geo} 的计算结果,污染等级可划分为:无污染($I_{geo}<0$)、轻度污染($0 \le I_{geo} < 1$)、偏中度污染($1 \le I_{geo} < 2$)、中度污染($2 \le I_{geo} < 3$)、偏重度污染($3 \le I_{geo} < 4$)、重度污染($4 \le I_{geo} < 5$)和严重污染($I_{geo} \ge 5$).

表1 中国各省土壤元素含量背景值/mg·kg	-1
------------------------	----

Table 1 Background values of soil elements in different provinces in Unina /mg·kg								
项目	$\omega(As)$	ω (Cd)	$\omega(Cr)$	$\omega(Cu)$	$\omega(Hg)$	$\omega(Ni)$	$\omega(Pb)$	$\omega(Zn)$
青海	14.00	0.14	70.10	22.20	0.02	29.60	25.80	80.30
甘肃	12.60	0.12	70.20	24.10	0.02	35.20	18.80	68.50
陕西	11.10	0.09	62.50	21.40	0.03	28.80	30.90	69.40
山西	9.80	0.13	61.80	26.90	0.03	32.00	21.40	75.50
山东	9.30	0.08	66.00	24.00	0.02	25.80	15.80	63.50
河南	11.40	0.07	63.80	19.70	0.03	26.70	19.60	60.10
内蒙古	7.50	0.05	41.40	14.10	0.04	19.50	17.20	59.10
宁夏	11.90	0.11	60.00	22.10	0.02	36.50	20.90	58.80

1.4 正定矩阵因子分解(PMF)模型

PMF模型是一种基于污染源多元因子分析方法的源解析受体模型^[21].该模型将目标样品含量矩阵 (*X*)通过因子化分解为源贡献矩阵(*G*)、源成分谱矩 阵(*F*)和残差矩阵(*E*)^[21],具体计算公式为:

$$\boldsymbol{X}_{ij} = \sum_{k=1}^{p} \left(\boldsymbol{G}_{ik} \times \boldsymbol{F}_{kj} \right) + \boldsymbol{E}_{ij}$$
(2)

式中, X_{ij} 为第j个样品中i元素的含量; G_{ik} 为i元素在 源因子k中的贡献; F_{jk} 为源因子k中i元素的含量; E_{ij} 为第j个样品中i元素的残差;p为污染因子数目. 通过 Multilinear Engine 模型迭代运算,对矩阵进行优化求解,当目标函数Q最小化时,即为最优解,具体如下式:

$$Q = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \left(\frac{E_{ij}}{U_{ij}} \right)$$
(3)

式中,n和m分别为样品数和元素种类数.U_{ij}为第j个测定样品中i元素的不确定度,当重金属含量(c)小于等于相应的方法检出限(method detection limit, MDL)时,其不确定性可由下式计算得出:

$$\boldsymbol{U}_{ij} = (5/6) \times \text{MDL}^2 \tag{4}$$

当重金属含量超过相应的 MDL 时,则由以下公式计算得出:

$$U_{ij} = \sqrt{(\delta \times c)^2 + \text{MDL}^2}$$
(5)

式中, 8为相对标准偏差.

1.5 基于 Monte Carlo 模拟的人体健康风险评价

采用美国国家环境保护署推荐的环境健康风险 评估"四步法"来量化成人和儿童经口摄入、皮肤接 触和呼吸吸入这3种方式暴露于研究区土壤重金属 而引发的非致癌和致癌健康风险^[22].由于本研究有 限的数据背景信息、采样时间、样点分布和样本测 定分析方法的不统一会引起评价结果的不确定性. 为了提高健康风险评价的科学性和确定性,引入 Monte Carlo的概率风险评价方法来计算健康风险的 概率.设置迭代次数为10000,置信水平为95%,对 风险评估过程中的不确定性进行概率分析.

1.5.1 暴露量评估

农田土壤重金属在不同暴露途径下引起的非致 癌和致癌效应的日均摄入量计算公式分别为:

$$ADD_{ing} = \frac{c_i \times IngR \times ED \times EF}{BW \times AT} \times 10^{-6}$$
 (6)

$$ADD_{inh} = \frac{c_i \times InhR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT}$$
(7)

$$ADD_{dermal} = \frac{c_i \times SA \times AF \times ABS \times ED \times EF}{BW \times AT} \times 10^{-6}$$

(8)

式中,ADD_{ing}、ADD_{inh}和ADD_{demal}分别为重金属元素在 手口摄入、呼吸吸入和皮肤接触途径下的日均摄入 量[mg•(kg•d)⁻¹];IngR和InhR分别表示摄入频率 (mg•d⁻¹)和呼吸频率(m³•d⁻¹);ED和EF分别为暴露年 限(a)和暴露频率(d•a⁻¹);BW和AT分别为平均体重 (kg)和平均暴露时间(d);PEF和SA分别为灰尘排放 因子(m³•kg⁻¹)和暴露皮肤表面积(cm²);AF和ABS分 别为皮肤黏着度[mg•(cm²•d)⁻¹]和皮肤呼吸因子(无 量纲).其它参数取值见表 2^[23].

1.5.2 风险表征

本研究中农田土壤As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb

表 2 不同暴露途径下 Monte Carlo 模拟的土壤 重金属健康风险模型参数值¹⁾

Table 2 Parameter values of health risk assessment model under the different exposure pathways via Monte Carlo simulation

暴露参数	概率分布	成人	儿童
IngR	三角分布1)	4、30和52	66、103 和 161
InhR	点分布	19	8.6
ED	点分布	24	6
EF	三角分布1)	180, 34	45和365
BW	对数分布2)	57.03 和 1.18	16.68和1.48
SA	点分布	0.54	0.23
AF	对数正态2)	0.49和0.54	0.65 和 1.2
AT	点分布	365×ED 365×70	(非致癌))(致癌)
PEF	点分布	1.36	5×10 ⁹
ABS	点分布	0.001(非致癌) 致癌)

1) 三角分布:最可能的值(最小值,最大值);2) 对数分布:平均值±标 准差

和Zn等8种元素对人体均具有非致癌风险,其中As、Cd、Cr、Ni和Pb元素亦具有致癌风险,重金属元素可能引起的非致癌和致癌风险可由下列计算公式得出:

$$HI = \sum HQ_i = \sum \frac{ADD_i}{RfD_i}$$
(9)
$$FCR = \sum CR_i = \sum ADD_i \times SF_i$$
(10)

式中,HI和TCR分别为总非致癌和总致癌健康风险, HQ_i和CR_i分别表示重金属*i*不同暴露途径下非致癌 和致癌健康风险(无量纲);RfD_i和SF_i分别表示重金 属*i*在不同暴露途径下的参考剂量[mg·(kg·d)⁻¹]和 斜率因子[mg·(kg·d)⁻¹],具体取值见表 $3^{[23]}$.

重金属元素非致癌风险的阈值为1,如果HQ或 HI<1时,预期不会产生显著非致癌风险;如果HQ或 HI>1时,表示可能产生非致癌风险^[22].对于致癌风险 而言,当重金属的CR或TCR<10⁻⁶时,认为致癌风险 可忽略;当10⁻⁶<CR或TCR<10⁻⁴时,认为可能引起致 癌风险;当CR或TCR>10⁻⁴时,认为引起的致癌风险 较高^[22].

1.6 数据分析方法

采用 Microsoft Excel 2019 进行重金属的描述性统计和数据处理,利用 Oracle Crystal Ball 11.1.2.4软件进行 Monte Carlo模拟,运用 ArcGIS 10.7软件进行克里金(Kriging)空间插值分析和研究区地理位置图的绘制,其他图件均由 Origin 2021完成绘制与编辑.

2 结果与讨论

2.1 黄河流域农田土壤重金属含量描述性统计

黄河流域农田土壤重金属描述性统计结果如表 4所示,从中可知,土壤重金属含量平均值由高到低

45 卷

Zn

105.60

	Table 3	Slope factor and reference do	se of soil heavy metals fro	om different exposur	e pathways	
项目	RfD _{手口摄人}	RfD _{呼吸吸人}	RfD _{皮肤接触}	$\mathrm{SF}_{\mathrm{Fut}}$	SF _{呼吸吸入}	SF 皮肤接触
As	3×10 ⁻⁴	1.23×10 ⁻⁴	1.23×10 ⁻⁴	1.5	15.1	3.66
Cd	1×10 ⁻³	1×10^{-5}	1×10 ⁻⁵	6.1	6.30	_
Cr	3×10 ⁻³	2.86×10 ⁻⁵	6×10 ⁻⁵	8.5×10^{-3}	42	_
Cu	4×10^{-2}	4.02×10^{-2}	1×10^{-2}			
Hg	3×10 ⁻⁴	8.57×10^{-5}	2.1×10 ⁻⁵			
Ni	2×10^{-2}	2.06×10 ⁻²	5.4×10 ⁻³	—	8.4×10^{-1}	_
Pb	3.5×10 ⁻³	3.52×10^{-3}	5.25×10^{-4}	8.5×10^{-3}		
Zn	3×10 ⁻¹	3×10 ⁻¹	6×10 ⁻²		_	_

表3 不同暴露途径下土壤重金属的斜率因子和参考剂量¹⁾

1)"一"表示无相关数据,下同

依次为:Zn>Cr>Ni>Cu>Pb>As>Cd>Hg. 黄河流域耕地 土壤 pH 较高(8.03~8.61)^[24],与我国《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)^[25] (pH>7.5)相比,所有重金属元素含量均值均低于农 用地土壤污染风险筛选值,表明黄河流域农田土壤 质量较为安全,暂不存在重金属污染生态风险.然 而,分别有21.69%、5.56%和1.23%土壤样品的 Cd、As 和 Zn 的含量高于农用地土壤污染风险筛选 值,但低于管控值,说明黄河流域部分地域农田土壤 存在点源污染.

变异系数(coefficient of variance, CV)是一种反映

重金属元素含量空间分布离散程度的指标,根据CV 值的大小,可分为低度变异(CV<20%)、中度变异 (20% ≤ CV < 50%) 和高度变异(50% ≤ CV < 100%)^[26]. 一 般而言,CV值越大,数据离散程度越高,重金属含量 空间分布差异越大,相应地受人类活动影响程度越 大^[26]. 由表4可知,黄河流域农田土壤重金属的CV值 由大到小依次为:Hg>Cd>Zn>Pb>Cu>As>Cr>Ni. 其中 Cu、As、Cr和Ni为低度变异,Cd、Zn和Pb属于中度变 异,Hg表现为高度变异特征(表4). 这说明黄河流域 农田土壤Cd、Zn、Pb和Hg的含量具有一定的空间分 布差异性,受地域背景和人类活动影响的程度较大

黄河流域农田土壤重金属描述性统计和其他区域农田土壤重金属的对比 表 4 Table 4 Descriptive statistics of heavy metal contents in farmland soils around Yellow River Basin and comparison of other regions in China 项目 Cu 举刑 As Cd Cr Hg Ni $\mathbf{P}\mathbf{h}$ 0.02 10.30 最小值/mg·kg⁻¹ 0.08 0.05 16.23 0.01 0.32 5.54 2.15 最大值/mg·kg⁻¹ 33.00 97.51 77.50 农田 73.90 1.70 97.10 330.71 土壤 平均值/mg·kg 11.81 0.43 60.08 29.76 0.25 33.04 27.46 96.83 变异系数/% 10.92 47.18 9.65 17.21 98.09 9.42 25.86 31.87 土壤重金属风险筛选值^[25]/mg·kg⁻¹ 100 190 170 25 0.6 250 3.4 300 长江经济带农田土壤重金属^[27]/mg·kg⁻¹ 13.48 73.58 37.09 0.17 31.71 40.90 99.12 0.45 参考值 雄安新区农田土壤重金属^[28]/mg·kg⁻¹ 11.27 0.29 72.21 35.32 0.04 30.74 31.00 88.72

0.14

39.90

27.60

11.70

此外,与长江经济带农田土壤重金属含量[27]均 值相比,除Hg和Ni的含量均值较高之外,黄河流域 农田土壤其余重金属含量均值均表现为较低的特 征.这可能与黄河流域内兰州、包头和西安等大型 工业城市的布局有关,电镀和冶金等工业生产活动 产生的"三废"会引起土壤中Hg和Ni的累积[2],宁夏 引黄灌区农田土壤 Hg和Ni的源解析研究证实了这 一论断^[9]. 然而,长江经济带农田土壤中其他重金属 含量均值偏高的特征或与该区域工业产生的大气沉 降、污水灌溉、生活污水排放和长期大量农业化肥 的施用有关^[30,31].相较于雄安新区^[28]和珠江三角洲地 区^[29]农田土壤重金属含量均值,研究区农田土壤不 同重金属含量均值表现为有高有低的特征,这与不

珠江三角洲农田土壤重金属^[29]/mg·kg⁻¹

同地域产业结构差异、人类活动影响强弱和土壤背 景值的地域性差别有关系.

21.90

43.80

0.42

2.2 黄河流域农田土壤重金属含量的空间分布 特征

黄河流域农田土壤重金属含量的空间分布特征 如图2所示,不同地域农田土壤重金属含量差异显 著.As的高值区和次高值区主要分布在宁夏中卫和 银川、山西运城和临汾、甘肃白银及河南济源等地. 土壤 Cd高值区主要分布在甘肃白银、宁夏中卫、山 西太原和晋中市、陕西西安及河南济源、洛阳、郑州 等地(图 2). Cr在甘肃庆阳、陕西宝鸡和河南濮阳等 地存在零星状的高值分布,但整体上分布较为均匀, 无明显高值区. 土壤Cu、Ni和Zn的空间分布具有一

定的相似性,在青海果洛、甘肃白银、宁夏中卫和陕西西安等地出现高值区.土壤Hg和Pb的空间分布均存在大面积高值区,两者的高值区和次高值区既有

相似之处也有差异(图2).例如,两者均在河南、陕西 和甘肃白银等地含量相对较高,而Pb在青海果洛含 量较高,但Hg却较低.



总的来说,黄河流域甘肃、宁夏、山西和河南等 地土壤重金属含量相对较高,青海次之,其他地区零 星存在重金属含量高值区.除了样品数量和区域背 景值差异影响之外,各地产业结构差异、工矿业发展 模式和经济区域发展类型是造成其差异性较大的主 要原因.特别是As、Cd、Hg和Pb的含量空间分布与 "上游落后、中游崛起、下游发达"的黄河流域高质量 发展水平空间分布特征具有相似性^[32],即具有"上游 较低、中游一般、下游较高"的特征.

2.3 黄河流域农田土壤重金属污染评价

黄河流域各省农田土壤重金属的地累积指数评价(I_{geo})均值结果显示,黄河流域各省农田土壤 I_{geo} 均值由高到低依次为:Hg(1.65)>Cd(1.12)>Cu(0.09)>Pb(0.05)>Zn(-0.09)>Ni(-0.65)>Cr(-0.69)>As(-0.92),见表 5.其中Zn、Ni、Cr和As为无污染(I_{geo} <0),Zn、Cu和Pb为轻度污染($0 \le I_{geo}$ <1),Hg和Cd属于

偏中度污染(1 < I_{geo} < 2). 具体而言,各省 Hg的 I_{geo}均值 均大于 0,说明 Hg 在各省均出现了污染,其中内蒙 古、陕西和甘肃等地污染较重,宁夏地区污染较轻 (表 5). 对于 Cd 而言,除了在青海为清洁无污染之 外,其余各省均存在不同程度的污染,甘肃、河南和 内蒙古等地污染程度最高;Cu 和 Pb 除了在内蒙古为 偏中度污染之外,其余各省均为无-轻度污染;Zn 在 甘肃、河南、内蒙古和宁夏等地存在轻度污染,其余 各省为无污染;Ni、Cr 和 As 在整个黄河流域几乎无 污染(表 5).

此外,黄河流域农田土壤重金属 Igeo评价结果空间分布图显示,不同区域农田土壤各元素的污染程度差异明显(图3). Hg的 Igeo值介于-2.68~6.62(图3),超过89%的地域处于不同程度的污染状态,其中陕西渭南、甘肃白银和山西运城等地的农田土壤存在严重的 Hg污染.Cd的 Igeo值为-3.03~7.02,绝大部

Tab	le 5 Geo-accum	ulation index of	soil heavy metals	in farmland soils	s of different pro	vinces in the Yell	ow River Basin	
项目	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
青海	-4.92	-0.51	-1.23	-0.18	0.77	-0.96	-0.39	-1.00
甘肃	-0.06	2.67	-1.49	0.61	2.60	-0.48	0.61	0.92
陕西	-0.74	1.41	-0.40	0.13	2.67	-0.27	-0.25	-0.17
山西	-0.79	0.32	-0.75	-0.67	1.58	-1.53	-0.27	-0.49
山东	-0.71	0.61	-0.52	-0.43	1.64	-0.07	-0.19	-0.33
河南	-0.01	2.42	-0.38	0.12	1.04	-0.31	0.27	0.15
内蒙古	-0.13	2.1	-0.19	1.67	2.86	-0.10	1.00	0.16
宁夏	0	0.72	-0.58	-0.53	0.05	-1.44	-0.38	0.06
平均值	-0.92	1.22	-0.69	0.09	1.65	0.65	0.05	-0.09

表5 黄河流域各省农田土壤地累积指数评价结果

分(66.67%)地域受到了不同程度的重金属污染,其 中甘肃白银和河南济源两地污染最为严重,为中度-严重污染水平.对于Zn和Pb而言,超过30%的地域 农田土壤存在轻度及以上污染(图3),其中甘肃白银 和河南洛阳地区农田土壤存在中度-偏重度的Zn污 染水平,而陕西渭南、甘肃白银和兰州以及山东济南 等地的农田土壤处于中度-重度的 Pb 污染,特别需 要引起注意的是河南洛阳地区的农田土壤存在严重 的 Pb 污染. Cu 的污染分布较广, 但污染水平相对较 轻(图3),有30.11%的地域处于轻度及以上污染,其 中甘肃白银和河南洛阳两地的污染最为严重,达到 了中度-重度污染水平.As、Ni和Cr污染相对较轻, 分别有 81.82%、85.51% 和 95.05% 的地域未受污 染,为清洁无污染状态(图3).但在甘肃白银和河南 洛阳两地的农田土壤As达到了偏中度-中度污染,Cr 和Ni同样在河南洛阳地区出现了偏中度污染.

由上分析可知,Hg和Cd是黄河流域农田土壤污染的首要污染元素,其次为Zn和Pb元素,其余Cu、Cr、Ni和As污染相对较小.这与已有的黄河下游灌溉区农田土壤^[12]和中国农田土壤重金属^[4]污染评价研究结果相一致.具体到地域而言,Hg、Cd、Zn、Pb和Cu等元素在甘肃白银地区污染较为严重,陕西渭南地区的农田土壤存在较为严重的Hg和Pb污染,山东济南地区Cd和Pb的污染也较为严重,Pb和Cu元

素在河南洛阳地区的污染也较为严重.而这些地区 均是中国著名的装备制造、有色金属冶炼加工和能 源化工基地^[11,33,34],化工、采矿、选矿和金属冶炼加工 等工业活动是引起以上地区农田土壤Cu、Cd、Zn、 Pb和Hg重金属污染的主要因素^[1,35].

2.4 黄河流域农田土壤重金属污染来源解析

土壤重金属元素之间的相关性分析可为判别不同重金属元素是否具有同源性提供参考.若两种重金属之间存在正相关关系且相关系数(r)越大,说明这两种元素具有相同污染来源的可能性就越高.由表6可知,研究区农田土壤重金属As-Cd、As-Cu、As-Ni、As-Pb、Cd-Cu、Cd-Ni、Cd-Pb、Cd-Zn、Cr-Cu、Cu-Ni、Cu-Pb、Cu-Zn、Ni-Pb和Pb-Zn在P<0.01水平上存在显著正相关关系(r>0.5),说明这些元素之间可能具有同源性.此外,As-Hg、As-Zn和Ni-Zn在P<0.05水平上有正相关关系(r≥0.4),表明它们两者之间可能有相同的污染源.

为明晰研究区农田土壤重金属的污染来源及其 贡献率,采用PMF模型进行定量源解析.将原始数据 导入PMF 5.0软件进行各重金属元素的不确定度计 算,结果显示所有重金属均被归为"strong"(S/N>1). 设定因子数为 3~7,并对模型参数进行多次调试与优 化,以实现Q值的最小化.当因子数为4时,得到较低 的Q值.所有元素的残差值均在-3~3之间,拟合结果

表6 黄河流域农田土壤重金属相关性分析¹⁾

	Table 0 Correlation analysis of nearly metal in farmland solis in the Tenlow River basin									
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn		
As	1									
Cd	0.609^{**}	1								
Cr	0.312	0.23	1							
Cu	0.786^{**}	0.841**	0.499^{**}	1						
Hg	0.433*	0.226	0.285	0.356	1					
Ni	0.849^{**}	0.535**	0.251	0.733**	0.405^{*}	1				
Pb	0.751**	0.924**	0.334	0.937**	0.387	0.687^{**}	1			
Zn	0.391*	0.552**	0.126	0.623**	0.102	0.478^{*}	0.586^{**}	1		

1)*表示 P<0.05,**表示 P<0.01



Fig. 3 Geo-accumulation index (I_{reo}) of heavy metal in farmland soils in the Yellow River Basin

显示,所有元素的拟合系数 R²均大于 0.60,说明 PMF 模型源解析效果整体良好,所选定的因子数可以较 好地解释原始数据所蕴含的信息.PMF 解析的黄河 流域农田土壤各污染源贡献率成分谱如图 4 所示.

因子1由Cr(76.54%)大量加权,Zn(58.69%)和Cu(51.77%)略微加权[图4(a)].由前述可知,Cr和Cu为低度变异,且Cr含量的平均值低于流域内各省背景值,而Cu含量的平均值仅略高于各省背景值;Zn为中度变异,且部分区域农田土壤存在Cr和Cu污染,这说明研究区农田土壤中Cr、Zn和Cu的含量受

一定程度的人类活动输入影响.从含量空间分布上 来看,Zn的高值区和次高值区分布于黄河上游甘肃 白银、宁夏中卫和陕西西安等地(图2).已有研究表 明,农田土壤Cr、Cu和Zn主要来源于成土母质的风 化、农业活动中畜禽粪便和磷肥的长期施用、农药 和杀虫剂及地膜的使用^[36,37].此外,长期的农田耕作 活动也会将土壤母质中的Cr元素释放,从而引起农 田土壤Cr的富集^[37].黄河上游甘肃、陕西地区的农 业生产过程中都会大量施用复合肥和农药,而宁夏 中卫的农业以枸杞种植为主,其枸杞种植基地主要



(a)源解析;(b)因子贡献率

基于PMF模型的黄河流域农田土壤重金属溯源解析



施用鸡粪、羊板粪和有机肥^[38],表明Cr、Zn和Cu来 源于土壤母质风化和农业活动.相关性分析也显示 Cr-Cu和Cu-Zn具有同源性(表6).因此,因子1代表 自然源和农业源的混合源.

图 4

因子2主要载荷元素是 As (74.64%) 和 Ni (51.51%) [图4(a)]. 研究区农田土壤 As 和 Ni 为低度 变异,说明二者受人类活动影响较小,污染评价结果 也显示仅在甘肃白银和河南洛阳两地出现了 度的污染(图3). 相关研究表明,煤炭燃烧、工业活动 和成土母质的风化是土壤 Ni 的主要来源^[39,40], 而 As 则主要来源于化石燃料的燃烧、燃煤电厂和冶炼厂 及化学工业等排放的废水[41]. 甘肃白银和河南洛阳 是中国重要的老工业基地,而甘肃白银还分布有大 唐景泰发电厂、靖远第二发电有限公司发电厂和靖 煤集团白银热电有限公司及多座有色金属冶炼厂, 冶炼厂排放的废水和燃煤电厂常年洗煤和燃煤等过 程中排放的废水与废气势必会导致周边农田土壤As 和Ni含量的增加^[42].相关性分析也表明As-Ni存在相 同的污染源(表6).为此,因子2可视为工业源和自 然源的混合源.

因子3的主要载荷元素为Cd(54.23%)[图4 (a)].已有研究认为,工业大气沉降、有机肥、化肥 和农药及污水灌溉是导致中国农田土壤Cd污染的主 要原因^[4,30].研究区Cd高值区和次高值区位于甘肃 白银、宁夏中卫、陕西西安、山西太原和河南洛阳等 地(图2),黄河流域下游的河南和山东既是中国的重 要农业基地和主要粮食产区,也是主要的装备制造 业和能源基地.而中上游的甘肃白银、宁夏中卫、山西太原和陕西西安等地能源煤炭矿产资源丰富,是中国能源、冶金、化工和机械制造基地⁽³⁾.除了长期农业活动中农药化肥和杀虫剂的施用导致农田土壤Cd含量增加之外,金属冶炼、矿产资源开采、燃煤发电等工业活动也是导致农田土壤Cd富集的重要因素.为此,因子3代表了农业-工业源.

因子4具有高负荷的Hg(82.89%)、Pb (63.39%)、Ni (48.49%)、Cu (41.42%)和 Zn (41.31%)[图4(a)]. 由前述可知, Hg为高度变异, Pb、Cu和Zn属于中度变异,说明这些元素的含量受 人类活动干扰显著.其中Hg、Cu、Zn和Pb作为典型 的亲硫元素,具有相近的构型、性质和沉积同源 性[43,44]. 研究区重金属含量空间分布特征显示, Hg和 Ni元素在甘肃、陕西和河南等地的农田土壤中含量 较高,以上地区的燃煤发电、金属冶炼和机械制造等 工业排放通过大气干湿沉降引起农田土壤中Hg的累 积^[45,46]. 土壤中Zn的富集与冶炼加工和机械制造等 工业活动排放密接相关^[4],而车辆轮胎磨损、镀锌部 件腐蚀、汽车尾气排放和润滑油耗损等交通源是土 壤 Pb、Zn、Cu 和 Ni 等重金属的重要来源^[41]. 相关性 分析证实 Pb、Zn、Cu 和 Ni 具有同源性(表 6),研究区 Pb、Zn和Cu的高含量区主要分布于甘肃白银、青 海、陕西和河南等地,以上地区既分布有国家能源化 工基地,也是中国的粮食主产区.长期工业活动排放 的废气伴随着农业机械化程度的提高,交通污染和 工业废气经大气扩散和干湿沉降最终蓄积于周边农

田土壤.为此,因子4受到了交通污染和工业活动的 影响.

综上所述,交通-工业源对研究区周边农田土壤 重金属累积的贡献率最高,为37.04%;其次为自然-农业源和工业-自然源,贡献率分别为26.69%和 21.72%;农业-工业源的贡献率最小,仅为14.55% [图4(b)].

2.5 基于 Monte Carlo 与健康风险评价模型耦合的 人体健康风险评价

基于 Monte Carlo 模拟的不同人群的非致癌和 致癌健康风险评估结果和概率分布如表 7 和图 5 所 示.从中可知,8 种重金属非致癌健康风险(HQ)值 均小于1,且其均值由大到小依次为: As>Cr>Pb>Ni> Hg>Cu>Cd>Zn,表明As是引起农田土壤非致癌风险 暴露的首要元素.黄河流域农田土壤8种重金属对 成人和儿童的HI平均值分别为2.88×10⁻²和9.48× 10⁻²,且两者的95%分数位分别为5.42×10⁻²和1.61× 10⁻¹,均未超出引起非致癌健康的阈值1,说明黄河 流域农田土壤重金属对成人和儿童的非致癌健康 风险暴露可以忽略.对于致癌健康风险而言,不同 重金属产生的CR值由高到低为:As>Cd>Cr>Pb>Ni (表7).成人和儿童的TCR均值分别为8.66×10⁻⁶和 2.79×10⁻⁵,且两者的95%分数位分别为1.83×10⁻⁵和 5.41×10⁻⁵,均高于1×10⁻⁶,说明总体上黄河流域农田 土壤重金属对成人和儿童均存在一定程度的致癌 健康风险.

	表 7	基于 Monte Carlo 模拟的黄河流域农田土壤重金属致癌健康风险评价 $^{1)}$
Table 7	Carcinogenic health	risk assessment of heavy metals in farmland soils in the Yellow River Basin via Monte Carlo simulation

西口	非致癌风险	金指数平均值	致癌风险指数平	立均值
坝日 -	成人	儿童	成人	儿童
As	1.54×10 ⁻²	5.14×10 ⁻²	7.09×10^{-6}	2.29×10 ⁻⁵
Cd	1.84×10^{-4}	5.91×10^{-4}	1.11×10^{-6}	3.76×10 ⁻⁶
Cr	8.65×10 ⁻³	2.75×10^{-2}	3.46×10 ⁻⁷	8.56×10 ⁻⁷
Cu	3.01×10 ⁻⁴	1.01×10^{-3}	<i>+ g</i>) (()	(//))
Hg	3.19×10 ⁻⁴	1.10×10 ⁻³	ANCIN	-3/1
Ni	6.58×10 ⁻⁴	2.18×10=3	5.41×10 ⁻⁹	2.11×10 ⁻⁹
Pb /	3.16×10 ⁻³	1.06×10 ⁻²	1.12×10 ⁻⁷	3.68×10 ⁻⁷
Zn (1.30×10 ⁻⁴	4.35×10 ⁻⁴	F () "]	F- 0

此外,不论是非致癌健康风险还是致癌健康风险,儿童的暴露风险均高于成人,这与已有的众多相似研究的结果相一致^[15,47],主要是因为儿童频繁的手口

行为和较高呼吸速率等特有行为习惯及体重小且发育

不完全等生理特征对污染物的敏感度更高^[48].此外, 单个元素 As和 Cd的 TCR 值均高于可接受致癌风险阈 值 1×10⁻⁶.为此,黄河流域各地方政府需加强对 As和 Cd的风险管控力度,也要加强儿童日常健康防范.



因5 英内加以上极重亚高陡冰八位计由城平力中

Fig. 5 Probability distribution for health risk assessment of soil heavy metals in farmland in the Yellow River Basin

为了精准控制土壤重金属暴露下的健康风险, 需要识别农田土壤重金属污染风险管控中的优先控 制金属,识别并量化关键污染源和健康风险^[15].基于 不同污染源对成人和儿童的非致癌健康风险的贡献 率显示,4种污染源对成人和儿童的非致癌风险贡献 率均表现为:工业-自然源>自然-农业源>农业-工业 源>交通-工业源(图6).各污染源对成人和儿童的总 HI值分别为2.88×10⁻²和9.48×10⁻²,均小于非致癌风 险阈值1.同时,8种元素在各污染源下诱发的非致癌 风险也均低于阈值1.这说明在不同污染源下不论是 重金属的复合影响还是单一元素作用均对人体健康 不构成非致癌健康风险.



(a)成人非致癌健康风险,(b)儿童非致癌健康风险,(c)成人致癌健康风险,(d)儿童致癌健康风险;内圆表示不同污染源对人体健康风险的贡献率,外圆表示不同重金属元素在特定污染源中对人体健康风险的贡献率;外圆中相同颜色表示相同重金属元素

图6 黄河流域农田土壤重金属不同来源的人体健康风险评价

Fig. 6 Health risk assessment from different sources of heavy metals in farmland soils in the Yellow River Basin

此外,4种污染源对成人和儿童的致癌风险贡献 率表现为:工业-自然源>农业-工业源>自然-农业源> 交通-工业源(图6).而不同污染源对成人和儿童的 致癌健康风险的贡献率结果显示,工业-自然源和农 业-工业源中As对成人引发的CR值分别为5.29×10⁻⁶ 和1.22×10⁻⁶,高于人体致癌健康风险的可接受阈值 1×10⁻⁶,表明单一重金属As在这两种污染源下已对成 人存在致癌健康风险,也说明As是诱发成人致癌风 险的主要贡献元素.从污染源贡献率来看,As主要来 自于工业-自然源(98.79%)和农业-工业源 (56.57%),可知工业-自然源为As的优先控制源.对 于儿童而言,自然-农业源、工业-自然源和农业-工 业源中As引发的CR值分别为1.87×10⁻⁶、1.71×10⁻⁶ 和3.94×10⁻⁶,农业-工业源中Cd对儿童诱发的CR值 为3.05×10⁻⁶,也均高于人体致癌健康风险的可接受 阈值1×10⁻⁶.表明单一重金属As在自然-农业源、工 业-自然源和农业-工业源,Cd在农业-工业源存在的 情景下已对儿童形成了致癌健康风险.从贡献率来 看,As的主要源为工业-自然源(98.94%)、自然-农 业源(72.13%)和农业-工业源(55.68%),Cd的污染 源为农业-工业源(43.14%).为此,工业-自然源和农 业-工业源可分别视为As和Cd的优先控制源,As和 Cd为研究区优先控制污染元素,这与中国农田重金 属污染的主要风险元素调查结果相一致,As和Cd为 对人体健康造成风险的主要元素[30].

以上分析可知,As和Cd分别为工业-自然源和农业-工业源的主要载荷元素,研究区农田土壤Cd和As虽然在甘肃、宁夏和河南等地存在一定的富集(图2),但As整体上无污染,而存在偏中度污染.健康风险评价结果显示As却有着较高的致癌健康风险,这与As有着相对较高的斜率因子(SF)有关^[49],也说明污染程度较低的元素不一定就具有较低的健康风险^[15].此外,作为对重金属贡献最高的交通-工业源,却不是研究区健康风险的优先控制源,这也进一步印证了具有高贡献率的污染源并不一定就具有较高的健康风险^[15].综上所述,As和Cd为人体健康风险优先控制元素,工业-自然源和农业-工业源为优先控制源.

2.6 不确定性分析

不确定性评估或敏感性分析是提升人体健康风

险评价科学性的需要,当敏感度为正值时,敏感度值 越大意味着对风险结果的影响越大,反之亦然^[23].黄 河流域农田土壤非致癌和致癌健康风险不确定性评 估结果如图7所示.就非致癌健康风险而言,摄入频 率(IngR)对成人的影响最高,解释了50.05%的非致 癌风险的不确定性.土壤As含量对于成人的影响仅 次于IngR,解释了34.19%的非致癌风险的不确定性 (图7).然而,土壤As含量对于儿童的非致癌风险的 影响却是最高的,解释了53.07%的不确定性.IngR 和暴露频率(EF)对儿童也具有较高的敏感性,分别 解释了19.66%和14.24%的非致癌风险的不确定性 (图7).土壤Cr和Pb含量对于成人和儿童的非致癌 风险也有一定的影响.此外,体重(BW)和Ni含量对 儿童的非致癌风险有一定影响,但对成人的非致癌 风险无影响.



对致癌健康风险而言,成人和儿童中As具有最高的敏感度,分别解释了49.21%和70.12%的致癌风险的不确定性(图7),说明As的含量是影响人体致癌健康风险的主要因素,且对儿童的影响高于成人. 其次是IngR和EF,对成人和儿童分别解释了38.63%和13.34%(IngR)、8.58%和7.98%(EF)的致癌风险的不确定性,且对成人的影响高于儿童.此外,土壤Cd含量对成人和儿童也具有一定的敏感性(图7).然而,与非致癌风险相似的是BW对儿童致癌风险有影响,对成人致癌风险无影响. 由上可知,摄入频率(IngR)、As含量和暴露频率 (EF)对成人和儿童的非致癌和致癌健康风险影响显 著.特别是As对不同人群致癌的敏感性较高,这与 前文健康风险评价结果相一致.

3 结论

(1)Cd、As和Zn的含量均值超出《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018) (pH>7.5)筛选值的比例分别为21.69%、5.56%和 1.23%,其余元素均未超过筛选值.As和Cd含量高值 区出现在甘肃白银、宁夏中卫和河南济源等地区,Cr 高值区主要在甘肃庆阳、陕西宝鸡和河南濮阳,Cu、 Ni和Zn高值区集中在青海果洛、甘肃白银、宁夏中 卫和陕西西安,而Hg和Pb高值区则出现在河南、陕 西和甘肃白银等地区.

(2) *I*geo评价结果显示,研究区农田土壤Cu、Cr、 Ni和As的污染相对较小,Hg、Cd、Zn和Pb存在不同 程度的污染,其中Hg和Cd的污染最为严重.

(3)PMF模型溯源解析结果表明,研究区农田土 壤重金属受到自然-农业源、工业-自然源、农业-工 业源和交通-工业源的综合影响,贡献率分别为 26.69%、21.72%、14.55%和37.04%.其中Cr、Zn和 Cu主要来源于自然-农业源,As和Ni主要为工业-自 然源,Cd主要源自于农业-工业源,Hg、Pb、Ni、Cu和 Zn的主要为交通-工业源.

(4)Monte Carlo与健康风险评价模型耦合的评价 结果显示,农田土壤重金属对成人和儿童虽然不具 有非致癌风险,但却存在一定的致癌风险,且儿童的 致癌风险高于成人.基于不同来源的健康风险评价 结果表明,As和Cd为人体健康风险优先控制元素, 工业-自然源和农业-工业源为优先控制源.

参考文献:

- [1] 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.
- Shi J D, Zhao D, Ren F T, et al. Spatiotemporal variation of soil heavy metals in China: The pollution status and risk assessment
 [J]. Science of the Total Environment, 2023, 871, doi: 10.1016/j. scitotenv. 2023. 161768.
- [3] 金昭, 吕建树. 基于机器学习模型的区域土壤重金属空间预测精度比较研究[J]. 地理研究, 2022, 41(6): 1731-1747.
 Jin Z, Lv J S. Comparison of the accuracy of spatial prediction for heavy metals in regional soils based on machine learning models
 [J]. Geographical Research, 2022, 41(6): 1731-1747.
- [4] 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.
- [5] 巨虹,李同昇, 翟洲燕. 基于 ETFP 的黄河流域工业高质量发展水平时空分异研究[J]. 资源科学, 2020, 42(6): 1099-1109.

Ju H, Li T S, Zhai Z Y. Spatial-temporal differentiation of highquality industrial development level in the Yellow River Basin based on ecological total factor productivity [J]. Resources Science, 2020, **42**(6): 1099-1109.

[6] 李长生,严金明.生态退耕背景下黄河流域耕地变化与农业 生产和生态环境关系研究[J].中国农业资源与区划,2022, 43(10):1-8.

> Li C S, Yan J M. The relationship between cultivated land change and agricultural production, ecological environment in the Yellow

River basin under the background of grain for green program [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, **43**(10): 1-8.

- [7] 陆大道,孙东琪.黄河流域的综合治理与可持续发展[J].地 理学报,2019,74(12):2431-2436.
 Lu D D, Sun D Q. Development and management tasks of the Yellow River Basin: a preliminary understanding and suggestion
 [J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(12):2431-2436.
- [8] 汪芳,安黎哲,党安荣,等.黄河流域人地耦合与可持续人居 环境[J].地理研究,2020,39(8):1707-1724.
 Wang F, An L Z, Dang A R, et al. Human-land coupling and sustainable human settlements in the Yellow River Basin [J]. Geographical Research, 2020, 39(8):1707-1724.
- [9] 陈林,马琨,马建军,等.宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态 风险评价及来源解析[J].环境科学,2023,44(1):356-366. Chen L, Ma K, Ma J J, et al. Risk assessment and sources of heavy metals in farmland soils of Yellow River irrigation area of Ningxia[J]. Environmental Science, 2023,44(1):356-366.
- [10] 王幼奇,白一茹,王建宇.基于GIS的银川市不同功能区土壤 重金属污染评价及分布特征[J].环境科学,2016,37(2): 710-716.
 Wang Y Q, Bai Y R, Wang J Y. Distribution of urban soil heavy metal and pollution evaluation in different functional zones of Yinchuan city [J]. Environmental Science, 2016, 37 (2): 710-716.
- [11] 王磊,段星星,赵禹,等.甘肃省白银市四龙镇-北湾镇耕地区土壤重金属现状及生态风险评价[J].中国地质,2023, doi: 10.12029/gc20220906001.
 Wang L, Duan X X, Zhao Y, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in soil in Silong and Beiwan towns, Gansu Province [J]. Geology in China, 2023, doi: 10.12029/gc20220906001.
- [12] Zhang P Y, Qin C Z, Hong X, et al. Risk assessment and source analysis of soil heavy metal pollution from lower reaches of Yellow River irrigation in China [J]. Science of the Total Environment, 2018, 633: 1136-1147.
- [13] Sun J X, Zhao M L, Huang J L, et al. Determination of priority control factors for the management of soil trace metal(loid)s based on source-oriented health risk assessment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 423, doi: 10.1016/j.jhazmat. 2021. 127116.
- [14] Yang Q C, Zhang L M, Wang H L, et al. Bioavailability and health risk of toxic heavy metals (As, Hg, Pb and Cd) in urban soils: a monte Carlo simulation approach [J]. Environmental Research, 2022, 214, doi: 10.1016/j. envres. 2022. 113772.
- [15] 石文静,周翰鹏,孙涛,等.矿区周边土壤重金属污染优先控制因子及健康风险评价研究[J]. 生态环境学报,2022,31 (8):1616-1628.
 Shi W J, Zhou H P, Sun T, *et al.* Research on priority control factors and health risk assessment of heavy metal pollution in soil

factors and health risk assessment of heavy metal pollution in soil around mining areas [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, **31**(8): 1616-1628.

- [16] 董盼盼,修玉娇,张振明,等.黄河流域湿地保护与高质量发展[J].湿地科学,2020,18(3):350-355.
 Dong P P, Xiu Y J, Zhang Z M, et al. Conservation and high quality development of wetlands in the Yellow River Basin [J]. Wetland Science, 2020, 18(3): 350-355.
- [17] 李静,李帅,张英,等. 2000-2020年黄河流域生物多样性维 护功能时空变化及驱动分析[J].中国环境科学,2023,43 (9):4780-4790.

Li J, Li S, Zhang Y, et al. Spatio-temporal variation of

biodiversity maintenance function and its driving factors in the Yellow River Basin from 2000 to 2020 [J]. China Environmental Science, 2023, 43(9): 4780-4790.

- [18] 尹登玉,于吴辰,卢彦琦,等. 2000—2020年黄河流域国土空间格局演变及生态响应[J]. 农业工程学报, 2023, 39(4): 217-228.
 Yin D Y, Yu H C, Lu Y Q, et al. Spatial pattern evolution of
 - territorial space and its effects on ecological response in the Yellow
 River Basin during 2000-2020 [J]. Transactions of the Chinese
 Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(4): 217-228.
- [19] Müeller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins-Veräenderungen seit 1971 [J]. Umschau in Wissenschaft und Technik, 1979, 79(24): 778-783.
- [20] 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.
- [21] Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values
 [J]. Environmetrics, 1994, 5(2): 111-126.
- U. S. EPA. Risk assessment guidance for superfund Volume I: human health evaluation manual supplemental Guidance [R].
 Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1989.
- [23] 马杰,佘泽蕾,王胜蓝,等.基于蒙特卡罗模拟的煤矸山周边农用地土壤重金属健康风险评估[J].环境科学,2023,44 (10):5666-5678.
 Ma J, She Z L, Wang S L, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in agricultural soils around the gangue heap of coal mine based on Monte Carlo simulation [J]. Environmental Science, 2023, 44(10): 5666-5678.
- [24] 曹婧,陈怡平,毋俊华,等.黄河流域五大灌区活河耕地土壤 肥力评价与改良措施[J].地球环境学报,2020,11(2): 204-214.
 - Cao J, Chen Y P, Wu J H, *et al.* Soil fertility evaluation and improvement measures in five irrigated areas along the Yellow River Basin[J], Journal of Earth Environment, 2020, **11**(2); 204-214.
- [25] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标 准(试行)[S].
- [26] Xu L, Dai H P, Skuza L, et al. Integrated survey on the heavy metal distribution, sources and risk assessment of soil in a commonly developed industrial area [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, 236, doi: 10.1016/j.ecoenv. 2022. 113462.
- [27] 刘孝严,樊亚男,刘鹏,等.基于文献计量分析的长江经济带 农田土壤重金属污染特征[J].环境科学,2022,43(11):5169-5179.

Liu X Y, Fan Y A, Liu P, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution in farmland soil of the Yangtze River economic belt based on bibliometric analysis [J]. Environmental Science, 2022, **43** (11): 5169-5179.

[28] 周亚龙,杨志斌,王乔林,等.雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析[J].环境科学,2021,42(4):2003-2015.
Zhou Y L, Yang Z B, Wang Q L, et al. Potential ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in soil-crop system

assessment and source analysis of heavy metals in soil-crop system in Xiong'an New District [J]. Environmental Science, 2021, **42** (4): 2003-2015.

 [29] 韩存亮,罗炳圣,常春英,等.基于多种方法的区域农业土壤 重金属污染成因分析研究[J]. 生态与农村环境学报,2022, 38(2):176-183.

Han C L, Luo B S, Chang C Y, et al. Identifying the source of soil

heavy metal pollution in regional agricultural area based on multiple methods[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, **38** (2): 176-183.

- [30] 陈世宝,王萌,李杉杉,等.中国农田土壤重金属污染防治现状与问题思考[J].地学前缘,2019,26(6):35-41.
 Chen S B, Wang M, Li S S, et al. Current status of and discussion on farmland heavy metal pollution prevention in China[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(6):35-41.
- [31] 赵健,籍瑶,刘玥,等.长江流域农业面源污染现状、问题与 对策[J].环境保护,2022,50(17):30-32.
 Zhao J, Ji Y, Liu Y, et al. Current situation, problems and suggestions on agricultural non-point source pollution in the Yangtze River Basin [J]. Environmental Protection, 2022, 50 (17):30-32.
- [32] 郭付友,高思齐,佟连军,等.黄河流域绿色发展效率的时空 演变特征与影响因素[J].地理研究,2022,41(1):167-180.
 Guo F Y, Gao S Q, Tong L J, et al. Spatio-temporal evolution track and influencing factors of green development efficiency in Yellow River Basin [J]. Geographical Research, 2022, 41(1): 167-180.
- [33] 党民团,刘秉智.渭南市近郊菜地土壤重金属污染分析与评价[J]. 渭南师范学院学报, 2015, 30(18): 34-37.
 Dang M T, Liu B Z. Investigation and assessment of heavy metals' pollution in soil vegetable bases in suburban areas of Weinan city
 [J]. Journal of Weinan Normal University, 2015, 30(18): 34-37.
- [34] 刘亚纳,朱书法,魏学锋,等.河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J].环境科学,2016,37(6):2322-2328.
 Liu Y N, Zhu S F, Wei X F, et al. Assessment and pollution characteristics of heavy metals in soil of different functional areas in Luoyang[J]. Environmental Science, 2016, 37(6): 2322-2328.
- [35] Yuan Y H, Xue N D, Han Z G, et al. 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.
- [36] Liu J W, Kang H, Tao W D, et al. A spatial distribution Principal component analysis (SD-PCA) model to assess pollution of heavy metals in soil [J]. Science of the Total Environment, 2023, 859, doi: 10.1016/j.scitotenv. 2022. 160112.
- [37] Zhou H, Chen Y, Yue X M, et al. Identification and hazard analysis of heavy metal sources in agricultural soils in ancient mining areas: A quantitative method based on the receptor model and risk assessment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 445, doi: 10.1016/j.jhazmat. 2022. 130528.
- [38] 王奂仑, 耿贵工, 韩燕, 等. 青海省枸杞种植土壤重金属富集 现状及潜在风险分析[J]. 青海大学学报, 2018, 36(1): 34-39.

Wang H L, Geng G G, Han Y, et al. Accumulation status and potential risk analysis of heavy metals in soil of Lycium barbarum
L. plantation in Qinghai [J]. Journal of Qinghai University, 2018, 36(1): 34-39.

- [39] Duan X C, Yu H H, Ye T R, et al. Geostatistical mapping and quantitative source apportionment of potentially toxic elements in top- and sub-soils: a case of suburban area in Beijing, China[J]. Ecological Indicators, 2020, 112, doi: 10.1016/j. ecolind. 2020. 106085.
- [40] Zhao H D, Lan X P, Yu F X, et al. Comprehensive assessment of heavy metals in soil-crop system based on PMF and evolutionary game theory [J]. Science of the Total Environment, 2022, 849, doi: 10.1016/j. scitotenv. 2022. 157549.

[41] Fan P, Lu X W, Yu B, et al. Spatial distribution, risk estimation and source apportionment of potentially toxic metal (loid) s in resuspended megacity street dust [J]. Environment International, 2022, 160, doi: 10.1016/j. envint. 2021.107073.

[42] 李军,李旭,高世刚,等.基于APCS-MLR和PMF模型的燃煤 电厂周边土壤潜在有毒元素(PTEs)污染特征与来源解析[J]. 环境科学,2023,44(10):5689-5703.
Li J, Li X, Gao S G, *et al.* Contamination characteristics and source apportionment of potentially toxic elements in soil around the coal-fired power plant based on APCS-MLR and PMF models[J].

Environmental Sciences, 2023, 44(10): 5689-5703.

[43] 贾晗,刘军省,王晓光,等.安徽典型硫铁矿集中开采区土壤
 重金属污染特征及来源解析[J].环境科学,2023,44(9):
 5275-5287.

Jia H, Liu J X, Wang X G, *et al.* Pollution characteristics and sources of heavy metals in soil of a typical pyrite concentrated mining area in Anhui Province [J]. Environmental Sciences, 2023, 44(9): 5275-5287.

[44] 王代懿,王雷,樊传慧,等.贵州某流域城市河段沉积物及悬 浮物重金属污染研究[J].中国环境监测,2023,39(1): 159-169.

Wang D Y, Wang L, Fan C H, et al. Preliminary study on heavy metal pollution in sediments and suspended particulate matter in urban reach of a river basin in Guizhou [J]. Environmental Monitoring in China, 2023, **39**(1): 159-169.





- [45] 周旭,吕建树.山东省广饶县土壤重金属来源、分布及生态风险[J].地理研究,2019,38(2):414-426.
 Zhou X, Lv J S. Sources, distribution and ecological risk of soil heavy metals in Guangrao county, Shandong Province [J]. Geographical Research, 2019, 38(2):414-426.
- [46] Guo Y Q, Chen B, Li Y X, et al. The co-benefits of clean air and low-carbon policies on heavy metal emission reductions from coalfired power plants in China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 181, doi: 10. 1016/j. resconrec. 2022. 106258.
- [47] Zheng F, Guo X, Tang M Y, et al. Variation in pollution status, sources, and risks of soil heavy metals in regions with different levels of urbanization[J]. Science of the Total Environment, 2023, 866, doi: 10.1016/j.scitotenv. 2022. 161355.
- [48] 马杰, 沈智杰, 张萍萍, 等. 基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤 矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析[J].环境科学, 2023, 44(4): 2192-2203.

Ma J, Shen Z J, Zhang P P, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of heavy metals in farmland soils around the gangue heap of coal mine based on APCS-MLR and PMF receptor model[J]. Environmental Science, 2023, **44**(4): 2192-2203.

[49] Lei M, Li K, Guo G H, et al. Source-specific health risks apportionment of soil potential toxicity elements combining multiple receptor models with Monte Carlo simulation [J]. Science of the Total Environment, 2022, 817, doi: 10.1016/j. scitotenv. 2021. 152899.



HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

CONTENTS

Research on the Evaluation Method and Application of Provincial Differentiated Carbon Peaking in China Evolution and Influencing Factors of Spatial Correlation Network of Construction Carbon Emission in China from the Perspective of Whole Efficiency Characteristics and Evolution Patterns of Urban Carbon Metabolism of Production-Living-Ecological Space in Beijing-Tianjin-	LIU Run-pu, PENG Shuan, CHEN Yu-shuo, et al. Life CycleREN Xiao-song, LI Zhao-rui Hebei Region SHAO Ying-chao SHAO Ying-chao	(1233) (1243) (1254)
Assessment of CO ₂ Co-benefits of Air Pollution Control Policies in Taiyuan's 14th Five-Year Plan	XIAO Ting-yu, SHU Yun, LI hui, et al.	(1265) (1274)
Coal Control and Carbon Reduction Path in Henan Province's Power Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target: A Mediu	m- and Long-term Study ZHANG Jing, YANG Meng, ZHANG Wei, <i>et al.</i>	(1285)
Environmental Benefits of Pollution and Carbon Reduction by Bus Fleet Electrification in Zhengzhou	ver	(1293)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomerations on the N	IANG Zheng, ZHOU Img-gang, ZHOU Zhi-heng, <i>et al.</i> Northern Slope of Tianshan Mountains	(1304)
Spatial Variability and Source Apportionment of PM _{2.5} Carbon Components in Tianjin	WU Fu-liang, WU Jian-hui, DAI Qi-li, et al.	(1313)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} in Huaxi District, Guiyang	·····GUI Jia-qun, YANG Yuan, WANG Xian-qin, et al.	(1337)
Fortunion characteristics; source Apportonment, and Meteorological Response of water source routing in $m_{2,5}$ in Annyang Forth China Characterization of Metal Elements in Atmospheric PM, ϵ and Health Risk Assessment in Heze in Winter from 2017 to 2018	U Hong-xuan, REN Li-hong, ZHAO Ming-sheng, et al.	(1361)
Analysis of the Jumping Characteristics and Influencing Factors of Ozone Pollution in Beijing	·······PAN Jin-xiu, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, et al.	(1371)
Analysis of Photochemical Characteristics and Sensitivity of Atmospheric Ozone in Nanjing in Summer	LUO Li-tong, ZHANG Yan-lin, LIN Yu-qi, et al.	(1382)
Ozone Pollution in Suzhou During Early Summertime: Formation Mechanism and Interannual Variation	WU Ye-zheng, ZHANG Xin, GU Jun, et al.	(1392)
Distribution Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Tracing of Heavy Metals in the Sediments of Typical Lakes in the !	Middle Keaches of the Yangtze Kiver	(1402)
Spatiotemporal Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Mo	del	(1402)
	CUI Zhi-mou, SHI Xiao-hong, ZHAO Sheng-nan, et al.	(1415)
Spatial and Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Changshou Lake Reservoir, Chongqing …	·····ZHANG Rui-xi, LIU Ya-jun, LUO Yong-nan, et al.	(1428)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Microplastics in the Yangtze River Basin	LI Si-qiong, WANG Hua, CHU Lin-you, et al.	(1439)
Assessment of Microplastic Pollution and Estimation of Annual Emission Volume in the Dongshan Ganal of Tichang City		(1448) (1457)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Drains Flowing into the	Yellow River of Ningxia	(1457)
	GAO Li, LI Ling-yun, ZHENG Lan-xiang, et al.	(1468)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Oujiang River Basin in Southern Zhejiang Province	······ZHONG Yi-xin, LI Li-xiang, WU Xin, et al.	(1480)
Spatial-temporal Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Poyang Lake	MA Yan, SUN Chen, BI Jia-le, et al.	(1492)
Change and Prediction of Water Purification Function in the South Bank of Hangzhou Bay in the Past 20 Years	ANG Shan-shan, CAO Gong-ping, XU Ming-wei, et al.	(1502)
Effects of Land Use Types on water Quality at Different Burler Scales : Hanjin Section of the Haine River Basin as an Example	DAI meng-jun, ZHANG Bing, DU Qian-qian, et al.	(1512) (1525)
Dynamic Changes of Dissolved Organic Matter Derived from Algal Decomposition and the Environmental Effects in Eutrophic Lakes	····ZHANG Jin, CHEN Ming-ving, HAO Zhi-neng, et al.	(1529)
Degradation of Carbamazepine in Water by UV-activated Sulfite Process	LIN Tao, YUAN Yu-jie	(1553)
Detection, Generation, and Control of Disinfection By-products of Reclaimed Water	LIAO Yu-feng, WANG Zheng, PAN Yang, et al.	(1561)
Absorption of Ammonium by Three Substrates Materials in Constructed Wetland System	·······HE Qiang, CHEN Bo-wen, YANG Yu-jing, et al.	(1577)
Ecological Environment Assessment and Driving Mechanism Analysis of Nagqu and Amdo Sections of Qinghai-Xizang Highway Based on	Improved Remote Sensing Ecological Index	(1586)
Spatial-temporal Evolution and Driving Factors Analysis of Ecological Environment Quality in Daihai Basin based on AWRSEI	······································	(1598)
Quantitative Assessment of the Impact of Climate Change on the Growing Season of Vegetation Gross Primary Productivity in the Middle a	nd Lower Reaches of the Yangtze River	
	XU Yong, PAN Yu-chun, ZOU Bin, et al.	(1615)
Effect of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Storage in Coal Mining Areas Based on Meta-analysis	····LI Jian-ming, KANG Yu-xin, JIANG Fu-zhen, et al.	(1629)
Effects of Continuous Annual Crop Kotation and Fallow on Soil Aggregate Stability and Organic Carbon	LU Ze-rang, LI Yong-mei, YANG Chun-huai, et al.	(1644)
Changes in Soil Nitrogen Components and Their Relationship with Environmental Factors with Different Tea Plantation Ages		(1665)
Nutrients and Ecological Stoichiometry Characteristics of Typical Wetland Soils in the Lower Yellow River	G Chuan-ying, WANG Kai-yue, WANG Hao-ran, et al.	(1674)
Effect of Film Mulching Age and Organic Fertilizer Application on the Distribution Characteristics of Microplastics in the Soil of a Peanut	Field	
דר היי די ד	SONG Ning-ning, LI Meng-jia, WANG Xue-xia, et al.	(1684)
Effects of Straw Keturning and blochar Addition on Greenhouse Gas Emissions from High Mitrate Mitrogen Soli After riooding in Kice-ve	getable Rotation System in Tropical China HII Tian-vi, CHE Iia-vue, HII Yu-iie, et al.	(1692)
Tillage Depth Regulation and the Effect of Straw Return on Soil Respiration in Farmland	······CHEN Xi, ZHANG Yan-jun, ZOU Jun-liang, et al.	(1702)
Distribution Prediction of Soil Heavy Metals Based on Remote Sensing Temporal-Spatial-Spectral Features and Random Forest Model	WANG Ze-qiang, ZHANG Dong-you, XU Xi-bo, et al.	(1713)
Characteristics and Identification Priority Source of Heavy Metals Pollution in Farmland Soils in the Yellow River Basin	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, et al.	(1724)
Characteristics of Cd Fluxe in Topsoil Around Typical Mining Area in Hezhou, Guangxi	······YANG Ye-yu, LI Cheng, YANG Zhong-fang, et al.	(1739)
Forential Ecological Risk Assessment of Son Heavy Metals in Fenguong New District Dased on Information Diritition model Traceability Analysis and Environmental Quality Assessment of Soil Heavy Metal Pollution in West Human Province	XIAO Kai-gi XII Hong-gen GAN lie et al	(1749)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Typical Industry Reclaimed Soil …	SHEN Cheng, WANG Wen-juan, SHA Chen-yan, et al.	(1769)
Provincial-scale Soil As Migration and Transformation and Rice Safe Planting Zoning: A Case Study of Guizhou Province	DONG Xin-yue, WU Yong, ZHOU Zi-han, et al.	(1781)
Effect of Silica Fertilizer(Husk Ash) to Improve Soil Quality and Reduce Cd and As Accumulation in Rice	YI Xuan-tao, OUYANG Kun, GU Jiao-feng, et al.	(1793)
Effect of EDDS Application on Soil Cu/Cd Availability and Uptake/transport by Castor	·····LIU Wen-ying, WU Gang, HU Hong-qing	(1803)
DIOCKING ELIECTS OF FOHAT CONDITIONERS ON CAOMIUM, Arsenic, and Lead Accumulation in Wheat Grain in Compound-confaminated Farm	uanu ·······XIAO Bing, WANG Oiu-shi GAO Pei-nei <i>et al</i>	(1812)
Soil Microbial Community Structure and Functional Diversity Character of Abandoned Farmland in Mingin Oasis	LI Chang-le, ZHANG Fu, WANG Li-de, et al.	(1821)
Microbial Mechanisms of Removal of Phthalic Acid Esters in Purple Soils Revealed Using Metagenomic Analysis	LI Yu-tong, YU Hai, LIU Kun, et al.	(1830)
Air Microbial Contamination and Risk of Respiratory Exposure of Workers in Chicken Farms	BAI Yu-qiao, SUN Xing-bin, QIU Tian-lei, et al.	(1840)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Multi-environmental Media and <i>Bellamya aeruginosa</i> of Manao River	GAO Ya-kun, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, et al.	(1849)
biological Effect of Microplastics with Different Functional Groups on the Bacterial Communities and Metabolic Functions of Zebralish (1	Janio rerio J Embryos	(1850)
	init Luch nua, Linaito I all, DAU Au-flui, el al.	(1037)