

钱江源国家公园水田土壤重金属污染特征、来源分析及健康风险评估

武昊天^{1,2}, 蓝文超³, 徐浙³, 吴明², 邵学新²

(1.浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 杭州 311300; 2.中国林业科学研究院 亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400; 3.钱江源国家公园管理局, 浙江 衢州 324307)

摘要: [目的] 探究钱江源国家公园水田土壤重金属含量特征并评价其污染程度, 分析重金属来源及人体的健康风险评估, 为研究区域内土壤重金属污染防控和土壤保护提供科学依据。[方法] 采集并测定研究区 61 个土壤样品中 pH 值以及重金属镉(Cd)、铅(Pb)、汞(Hg)、铬(Cr)、砷(As)、镍(Ni)、铜(Cu)和锌(Zn)的含量, 运用一系列指数法、因子分析和聚类分析等方法进行了重金属元素污染特征与生态风险评估和来源解析, 同时对研究区内人体健康风险进行评估。[结果] ①研究区内水田表层土壤呈酸性, 土壤中 Cd, Pb, Hg, Cr, As, Ni, Cu 和 Zn 这 8 种重金属平均含量分别为 0.19, 32.74, 0.13, 67.06, 4.43, 24.90, 21.51, 94.60 mg/kg。与浙江省土壤背景值对比发现, 重金属 Hg, Cr, Ni, Cu, Zn 平均含量均超过了浙江省土壤环境背景值, 分别是背景值的 1.32, 1.71, 2.0, 1.19, 1.13 倍。②对于风险筛选值来说, 虽然 Cd 的点位超标率达到了 6.56%, Ni 和 Cr 的点位超标率分别为 3.28% 和 1.64%, 但是以调查的水田重金属含量均值为代表, 研究区域中 8 种重金属含量平均值均小于对应的农用地土壤风险筛选值。③通过因子分析等方法发现, 土壤重金属的来源以人为因素为主导, 人为与自然两者综合作用; 儿童的综合致癌健康风险处于可耐受风险。[结论] 钱江源国家公园水田土壤重金属污染程度较低, 整体呈轻度生态风险, 但存在 Cr 和 Ni 元素的污染风险; 重金属元素 As 是影响人体健康的主要致癌因素。

关键词: 钱江源国家公园; 土壤重金属; 污染防控; 因子分析; 健康风险评估

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0001-11

中图分类号: X53

文献参数: 武昊天, 蓝文超, 徐浙, 等. 钱江源国家公园水田土壤重金属污染特征、来源分析及健康风险评估[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 1-11. Wu Haotian, Lan Wenchao, Xu Zhe, et al. Characteristics, source analysis, and health risk assessment of heavy metal pollution in paddy soil at Qianjiangyuan National Park [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 1-11. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.001; CSTR:32312.14.stbctb.2025.02.001.

Characteristics, source analysis, and health risk assessment of heavy metal pollution in paddy soil at Qianjiangyuan National Park

Wu Haotian^{1,2}, Lan Wenchao³, Xu Zhe³, Wu Ming², Shao Xuexin²

(1. College of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Hangzhou, Zhejiang

311300, China; 2. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou,

Zhejiang 311400, China; 3. Qianjiangyuan National Park Administration Bureau, Quzhou, Zhejiang 324307, China)

Abstract: [Objective] The characteristics of heavy metal content in paddy soil at Qianjiangyuan National Park were explored, and its pollution level was assessed. The sources of heavy metals were analyzed, and the associated human health risks were evaluated, in order to provide a reference basis for the prevention and control of soil heavy metal pollution and soil protection. [Methods] The pH value and contents of heavy metals, including Cd, Pb, Hg, Cr, As, Ni, Cu, and Zn, of 61 soil samples were determined. Index, factor and cluster analyses were employed to assess the characteristics of and ecological risks posed by the heavy

收稿日期: 2024-09-24

修回日期: 2024-12-12

采用日期: 2024-12-13

资助项目: 钱江源国家公园科技项目“钱江源地役权改革后农田土壤环境监测分析研究”(QZLHKH2023-2, QZLHKH2024-1); 中国林业科学研究院亚热带林业研究所创新研究项目(RISFZ-2023-01)

第一作者: 武昊天(1997—), 男(汉族), 辽宁省阜新市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤质量监测评估。Email: wht082929@163.com。

通信作者: 邵学新(1980—), 男(汉族), 浙江省杭州市人, 博士, 研究员, 主要从事湿地碳氮磷生物地球化学等方面的研究。Email: shaouxuexin@126.com。

metal pollution, analyze their sources, and evaluate human health risks. [Results] ① The surface soil of the paddy fields was acidic. The average Cd, Pb, Hg, Cr, As, Ni, Cu, and Zn contents were 0.19, 32.74, 0.13, 67.06, 4.43, 24.90, 21.51, and 94.60 mg/kg, respectively. The average contents of Hg, Cr, Ni, Cu, and Zn exceeded the Zhejiang provincial soil background values by 1.32, 1.71, 2, 1.19, and 1.13 times, respectively. ② The average contents of the eight heavy metals were lower than the corresponding risk screening values for agricultural land soil, as represented by the average heavy metal content in the paddy fields. The exceedance rates of sampling points for Cd, Ni, and Cr were 6.56%, 3.28%, and 1.64%, respectively. ③ The results of factor analysis and the other methods showed that the soil heavy metal sources were predominantly anthropogenic and were the result of a combination of human and natural influences. The overall carcinogenic health risk for children was deemed tolerable. [Conclusion] The level of heavy metal pollution in the paddy soil at Qianjiangyuan National Park was low, as was the overall ecological risk. However, pollution risks were associated with Cr and Ni. The heavy metal As is the primary carcinogenic factor affecting human health.

Keywords: Qianjiangyuan National Park; soil heavy metals; pollution prevention and control; factor analysis; health risk assessment

重金属具有不易降解的生化毒性、累积性、持久性和迁徙性^[1]。近年来,随着工业化及城市化进程加快,人民的物质生活日益丰富的同时,也带来了一系列环境问题,其中农田土壤环境质量逐渐下降,农田土壤重金属污染问题越来越突出^[2-3]。土壤重金属污染不仅会影响农作物的生长,也会给农产品质量安全及人体健康带来潜在的风险^[4]。国家公园是指以保护具有国家代表性的自然生态系统为主要目的,实现自然资源科学保护和合理利用的特定区域,是我国自然生态系统中最重要的一部分。钱江源国家公园作为我国 10 个国家公园体制试点区之一,是长三角经济发达地区唯一的试点区^[5]。目前,对于国家公园内土壤重金属污染等方面的研究报道相对较少。因此,对钱江源国家公园土壤重金属污染特征、来源分析及健康风险评价显得尤为重要。

综上所述,本文选取钱江源国家公园内具有代表性、广泛性和普适性点位的水田土壤,对水田表层土壤的 pH 值, Cd, Hg, As, Cu, Pb, Cr, Zn, Ni 进行分析研究,通过单因子污染指数和地累积指数对研究区土壤重金属污染水平进行评价,结合生态环境部发布的《土壤环境质量:农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)对水田土壤污染状况进行评价。并对土壤重金属来源进行解析,最后分析重金属对人体健康造成的影响。以期为钱江源国家公园土壤重金属污染防治和保障人体健康提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

钱江源国家公园地处浙、皖、赣三省交界地带(118°32'47"—118°34'20"E, 28°11'20"—28°32'32"N),西接江西婺源县森林鸟类自然保护区,北接安徽省休

宁县的岭南自然保护区,共有两个国家自然保护地,分别是古田山自然保护区和钱江源国家公园^[6]。钱江源国家公园也是中国特有的世界珍稀濒危物种、国家一级重点保护野生动物白颈长尾雉、黑麂的主要栖息地。规划面积为 252.95 km²,涉及开化县苏庄、长虹、何田、齐溪 4 个片区,包括 21 个行政村、72 个自然村,总人口约为 9 744 人。该区域母岩以花岗岩为主,区内分布有红壤、黄壤、水稻土、沼泽土 4 个土类:红壤主要分布于 500 m 以下的区域,成土时间较短,肥力较好,适宜水稻生长;黄壤主要分布于 600 m 以上的区域,以山地黄泥砂土种分布最广。水稻土分布于附近的农田中,为长期耕作形成;沼泽土分布在海拔 850 m 左右的古田庙一带局部低洼处,土壤呈酸性,多样的土壤类型塑造了不同的植被景观和生物多样性^[7]。

1.2 土壤样品采集与处理

土壤样品共分两次进行采集,第一次采样时间为 2020 年(36 个点位),第二次采样时间为 2022 年(25 个点位),两年共采集 61 个点位,且各个点位与点位之间均不重复。本研究将 2020 年采集的 36 个点位和 2022 年采集的 25 个点位放在一起(图 1),对研究区域的重金属污染动态进行综合评估。采集样地点位于钱江源国家公园内,以直接耕种的自然田块为取样单元。本研究所选取的所有样地类型均为水稻田,样地选取位于钱江源国家公园中主要的 4 个片区:苏庄、何田、长虹和齐溪片区,每个片区均对应具有代表性样地的采样,并选取在水稻收割后的农田进行。研究区域内水田主要分布在地势较为平坦、排水条件良好的低洼地区,而山区由于地形崎岖,不利于水田的开垦和耕作,一般不分布有水田,因此,采样主要集中在地形低洼地区。为便于田间示范追踪和捕获最具代表性的样本数据,在每个采样单元中,采样点主要

集中在这些单元内的相对中心位置,并选择该位置的典型地块作为具体的采样对象,采样地块面积为 666.67 m²。在作物收获后进行采集,每个样点的取土深度及采样量应均匀一致。取样器需垂直于地面入土,深度相同。

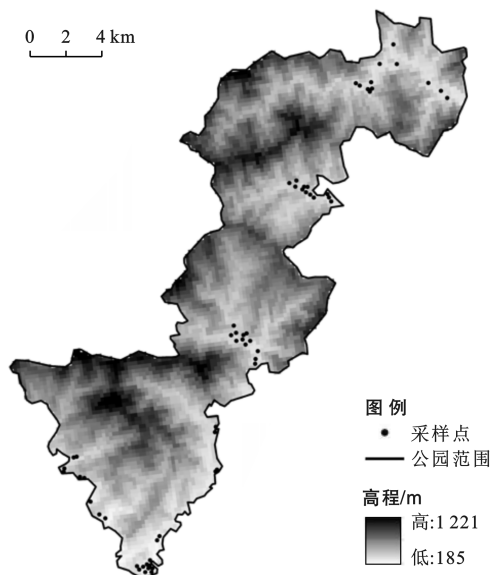


图 1 钱江源国家公园地形及采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites and topography in Qianjiangyuan National Park

采样深度为 0—20 cm。每个样品采用 S 形,取 5—10 个样点,并采用四分法混合后带回实验室。土壤样品在室内进行自然风干、研磨后,将待测土样分别筛后,混合均匀装入样品瓶中,放置于阴凉干燥处,待检。

1.3 测定指标及方法

根据已有研究,对土壤样品中 pH 值,以及砷(As)、镉(Cd)、锌(Zn)、铅(Pb)、铬(Cr)、铜(Cu)、镍(Ni)和汞(Hg)这 8 种重金属含量进行检测分析。

样品经自然风干后,土壤 pH 值按电位法 HJ 962—2018 要求,用酸度计(MP521,上海三信,中国)进行测定;Cd 按照 GB/T 17141—1997 要求,经盐酸—硝酸—氢氟酸—高氯酸全消解后,用石墨炉火焰原子吸收分光光度计(ZEEnit 700, Panalytik Jena,

德国)测定;Hg 和 As 按照 GB/T 22105.1—2008 要求,用原子荧光光度计(AFS-933,北京吉天,中国)测定,测定前取 0.25 g 土样放入 25 ml 比色管,加水润湿后加入 10 ml 混酸(HNO₃: HCl=3:1)进行冷消化,次日沸水浴 2 h,经过定容、摇匀、静置,待溶液澄清后上机测定。土壤中 Pb,Cu,Zn,Cr 和 Ni 用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS 7900,安捷伦,美国)测定,称取 0.20 g 样品于聚四氟乙烯烧杯中,用少量去离子水润湿,加入 HNO₃,HCl,HClO₄ 和 HF 后加盖,于消解炉中 150 °C 加热消解 3 h,消解完毕后进行赶酸(加热至白烟冒尽),定容、摇匀、静置后上机测定。

土壤样品按 10% 的比例进行平行测定,每个样品测试 3 个重复,测试过程中使用国家标准物质 GBW 07405(GSS-5)进行质量控制和分析,各重金属元素的回收率均在合格范围内,土壤样品分析测试条件均满足标准分析方法质控要求。

1.4 污染评价方法

1.4.1 单因子污染指数评价法 采用单因子污染指数(P_i)法评价单个重金属污染因子的污染程度,本研究参照浙江省主要重金属元素的土壤环境背景值(0—20 cm)^[8],当 $P_i \leq 1.0$ 时,无污染; $1.0 < P_i \leq 2.0$ 时,轻度污染; $2.0 < P_i \leq 3.0$ 时,中度污染; $P_i > 3.0$ 时,重度污染。单因子污染指数(P_i)的计算公式为^[9]:

$$P_i = \frac{C_i}{C_i^*} \quad (1)$$

式中: P_i 为土壤重金属 i 的单因子污染指数; C_i 为土壤重金属 i 的实测数据; C_i^* 为重金属 i 的背景值。

1.4.2 地累积指数评价法 地累积指数(I_{geo})是目前国内外普遍使用的土壤污染评价方法之一,其计算公式为^[10]:

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

式中: I_{geo} 表示地累积指数; C_n 表示土壤中元素的实测值; B_n 表示土壤中元素的背景值,该处按浙江省土壤背景值进行计算,常数 1.5 为成岩过程中重金属含量自然波动的校正系数。地累积指数的分级标准见表 1^[11]。

表 1 地累积指数法污染分级标准

Table 1 Pollution classification criteria of geoaccumulation index method

污染程度	无污染	轻污染	中污染	中—强污染	强污染	强—极强污染	极强污染
I_{geo}	≤ 0	(0,1]	(1,2]	(2,3]	(3,4]	(4,5]	> 5

1.4.3 健康风险评价 分 3 种暴露途径对矿区周边成人和儿童进行非致癌风险(HQ)和致癌风险(CR)的健康评价。由于重金属 As 被认为是毒性最大的重

金属之一,且从致癌敏感性分析来看,重金属中 As 的致癌敏感性较高,因此致癌风险主要针对 As,Cr,Pb,Cd 4 种元素进行^[12]。3 种途径重金属元素每日摄入

量;手口(ADI_{ing})、呼吸(ADI_{inh})和皮肤接触(ADI_{der})计算方法如下,各暴露评估参数取值如表 2^[13]所示。其计算公式为:

$$ADI_{ing} = \frac{C \times R_{ingest} \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} \quad (3)$$

$$ADI_{inh} = \frac{C \times R_{inhal} \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (4)$$

$$ADI_{der} = \frac{C \times CF \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (5)$$

人体非致癌风险指数的计算公式为:

$$THI = \sum HI = \sum_{i=1}^n HQ_i = \sum_{i=1}^n \frac{ADI}{RFD_i} \quad (6)$$

人体致癌风险指数的计算公式为:

$$TCRI = \sum_{i=1}^n CR_i = \sum_{i=1}^n ADI_i \times SF_i \quad (7)$$

式中:ADI 为重金属日均摄入量[mg/(kg·d)]; HI 和 HQ 分别代表综合和单项元素非致癌健康风险指数; TCR 和 CR 分别代表综合和单项致癌健康风险指数; RFD 为非致癌风险参考剂量; SF 为致癌斜率因子。其他参数参考表 3^[14]。

重金属的非致癌风险可分为无风险($HQ < 1/HI < 1$)和有风险($HQ > 1/HI > 1$); 致癌风险可分为无风险($CR < 10^{-6}$ / $TCR < 10^{-6}$)、有人体可耐受的风险($10^{-6} < CR < 10^{-4}$ / $10^{-6} < TCR < 10^{-4}$)和有人体不可耐受的风险($CR \geq 10^{-4}$ / $TCR \geq 10^{-4}$)。

表 2 土壤重金属暴露量参数及取值

Table 2 Parameters and values of heavy metal exposure in soil

参数	含义	单位	取值	
			儿童	成人
C	土壤中重金属含量	mg/kg	本研究	本研究
R_{ingest}	土壤颗粒摄取速率	mg/d	200	100
R_{inhal}	土壤颗粒吸入速率	m^3/d	7.65	20
EF	暴露频率	d/a	350	350
ED	暴露时间	a	6	24
BW	体重	kg	16	60
CF	转换因子	kg/mg	10^{-6}	10^{-6}
PEF	土壤粉尘扩散因子	m^3/kg	15.92	15.92
AF	土壤对皮肤的黏附系数	$mg/(cm^2 \cdot d)$	0.2	0.07
ABS	皮肤吸收系数	无量纲	0.001	0.001
SA	可能接触土壤的皮肤面积	cm^2/d	800	5 700
AT(非致癌)	平均暴露时间	d	6×365 (非致癌)	24×365 (非致癌)
AT(致癌)			70×365 (致癌)	70×365 (致癌)

表 3 重金属致癌风险评价参考剂量

Table 3 Referent dose of heavy metals in carcinogenic risk assessment

元素	非致癌风险参考剂量 RFD/($mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$)			致癌斜率因子 SF/($kg \cdot d \cdot mg^{-1}$)		
	经口摄入	呼吸吸入	皮肤接触	经口摄入	呼吸吸入	皮肤接触
Cd	0.001	1.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}	6.10	6.30	—
Pb	3.50×10^{-3}	3.52×10^{-3}	5.25×10^{-4}	8.50×10^{-3}	—	—
Hg	3.00×10^{-4}	8.57×10^{-5}	2.10×10^{-5}	—	—	—
Cr	0.003	2.86×10^{-5}	6.00×10^{-5}	8.50×10^{-3}	42	—
As	3.00×10^{-4}	1.23×10^{-4}	1.23×10^{-4}	1.50	15.1	3.66
Ni	0.02	2.06×10^{-2}	5.40×10^{-3}	—	0.84	—
Cu	0.04	4.02×10^{-2}	0.012	—	—	—
Zn	0.30	0.30	0.06	—	—	—

注:“—”表示无该数值。下同。

1.5 数据统计与分析

采用 Excel 2016 处理试验数据,采用 SPSS Statistics 25.0 进行数据显著性统计分析和 Pearson 相关性分析,采用 Origin 2023 制图。

单因素方差分析图中不同片区之间差异显著

($p < 0.05$),由标注的不同小写字母表示。在相关性分析中的“*”表示在 0.05 水平(双侧)上具有显著的相关性,“**”表示在 0.01 水平(双侧)上具有显著的相关性。“***”表示在 0.001 水平(双侧)上具有显著的相关性。

2 结果与分析

2.1 水田重金属含量分析

根据所测得的样点土壤 pH 值,对该稻田土壤重金属污染状况进行评价。发现钱江源国家公园水田土壤总体呈酸性,土壤 pH 值范围在 4.69~5.93,pH 值均值为 5.13。因此,根据《土壤环境质量:农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),本研究选择水田土壤 pH 值 ≤ 5.5 时的相应农用地土壤污染风险筛选值。

土壤中的重金属含量可用作判断土壤污染等级的一个重要标志。由表 4 可见,钱江源国家公园水田土壤中重金属含量平均值(mg/kg)为 Zn=94.60,Cr=67.06,Pb=32.74,Ni=24.90,Cu=21.51,As=4.43,Cd=0.19,Hg=0.13,重金属 Hg,Cr,Ni,Cu,Zn 含量的平均值超过了浙江省土壤环境背景值,分别是背景值的 1.32,1.71,2.00,1.19,1.13 倍。为了更为直观表达钱江源国家公园水田土壤重金属富集情况,本研究采用 Origin 2023 绘制了箱线图(图 2),并与浙江省土壤环境背景值、《土壤环境质量:农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中农用地土壤污染风险筛选值及管控值进行比较。由图 2 可知,虽然 Cd,Pb,As 重金属的平均含量低于浙江省背景值,

但仍有个别点位中的测定数值高于浙江省背景值。

Cai Limei 等^[15]指出,变异系数(C_V)可以体现出元素含量的变化幅度, C_V 值越高,变异程度越高($C_V \leq 20\%$ 为弱变异型, $20\% < C_V \leq 50\%$ 为中等变异型, $C_V > 50\%$ 为强变异型)。研究区域内农田土壤重金属含量的变异系数依次为 Ni(62.86%)>Cr(59.74%)>Hg(55.10%)>Cd(50.94%)>As(43.72%)>Cu(23.93%)>Pb(22.78%)>Zn(18.43%)。其中,Cd,Hg,Cr,Ni 为强变异型,空间变异相对显著。As,Pb 和 Cu 为中等变异型,表明其空间分布差异明显,而 Zn 的空间异质性较弱,受工业生产和人为活动的影响较小。

将研究区域水田土壤重金属含量的均值分别与浙江省背景值和《土壤环境质量:农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)进行比较,相对于风险筛选值,重金属 Cd 的点位超标率达到了 6.56%,Ni 和 Cr 的点位超标率分别为 3.28% 和 1.64%,其余重金属的风险筛选值的点位超标率均为 0%,但是研究区域中有 8 种重金属含量的平均值均小于其对应的农用地的土壤风险筛选值。对于浙江省土壤环境背景值来说,Cr,Ni,Zn,Hg,Cu 这 5 种重金属元素的土壤背景值的点位超标率均大于 50.00%,尤其值得注意的是 Zn 和 Ni 的土壤背景值的点位超标率超过 90.00%。

表 4 钱江源国家公园水田土壤重金属质量分数描述性统计

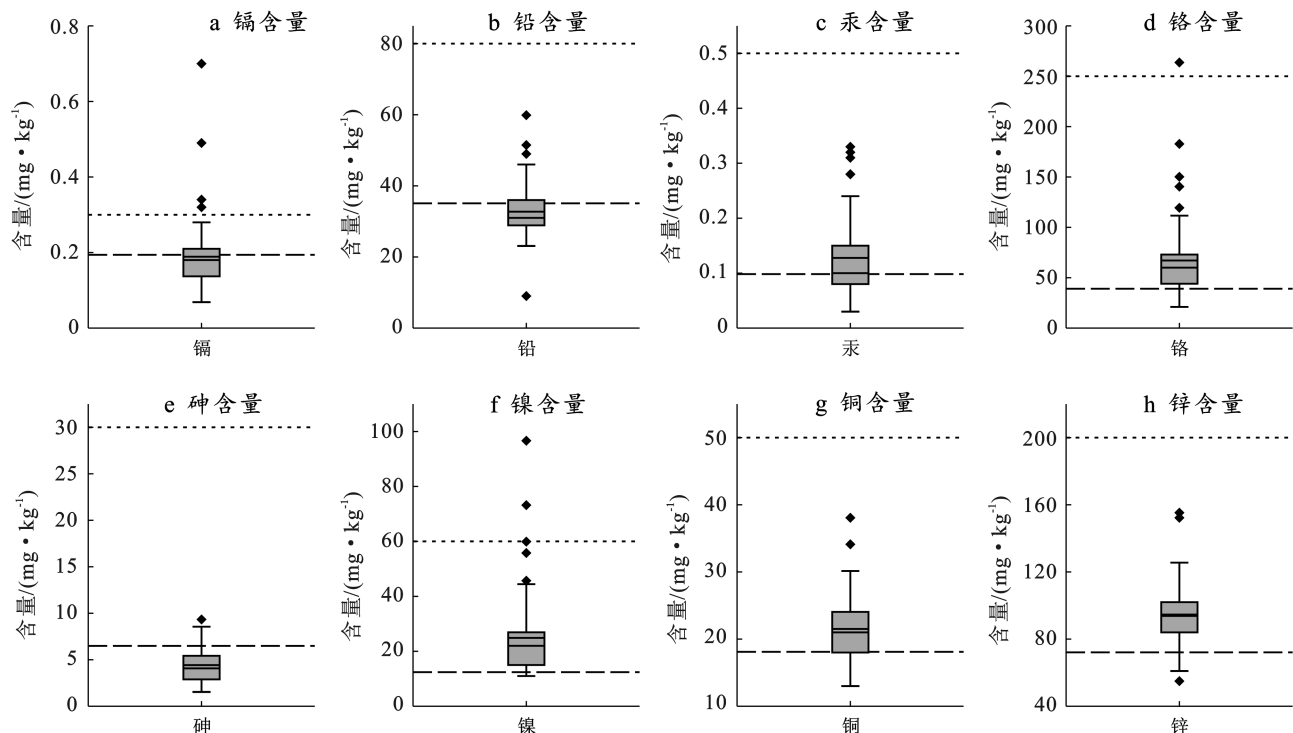
Table 4 Descriptive statistics of heavy metal mass fraction of paddy soil in Qianjiangyuan National Park

指标	最小值/ (mg·kg ⁻¹)	最大值/ (mg·kg ⁻¹)	平均值/ (mg·kg ⁻¹)	标准差/ (mg·kg ⁻¹)	变异系数/ %	浙江省土壤		农用地土壤	
						背景值/ (mg·kg ⁻¹)	超标率/ %	污染风险筛选值/ (mg·kg ⁻¹)	超标率/ %
Cd	0.07	0.70	0.19	0.10	50.94	0.19	31.15	0.30	6.56
Pb	9.00	59.89	32.74	7.46	22.78	35.10	27.87	80.00	0.00
Hg	0.03	0.33	0.13	0.07	55.10	0.10	55.74	0.50	0.00
Cr	21.00	263.65	67.06	40.06	59.74	39.10	81.97	250.00	1.64
As	1.54	9.33	4.43	1.94	43.72	6.49	18.03	30.00	0.00
Ni	11.00	96.66	24.90	15.65	62.86	12.40	90.16	60.00	3.28
Cu	13.00	38.06	21.51	5.15	23.93	18.10	73.77	50.00	0.00
Zn	55.00	155.28	94.60	17.43	18.43	72.10	93.44	200.00	0.00

2.2 水田重金属污染评价结果

2.2.1 单因子污染指数评价法 以浙江省土壤环境背景值作为评价标准进行单因子污染指数评价。结合单因子污染指数和各污染等级所占比例(图 3a, 3b)。分析发现,在研究区水田土壤的 8 种重金属中,仅有 Cd,Pb 和 As 这 3 种重金属平均单因子污染指数处于轻度污染级别,其余 5 种重金属中,虽有个别点位达到重度污染级别,但总体上它们的平均单因子污染指数均处于中度污染级别。

在研究区域的水田土壤中,重金属 As 的污染程度最轻,其轻度污染的点位相对较多。Cd,Hg,Cr 和 Ni 的污染状态从清洁到重度污染均有分布,其中 Ni 的重度污染点位最多;紧随其后的是 Cr,Hg 和 Cd,但 Cd 的点位主要集中在轻度污染水平。Zn 和 Cu 的单因子污染指数分布情况相似,主要集中在中度污染区间。同时,As 和 Pb 的点位基本处于轻度污染状态。总体来看,Ni 的污染程度最为严重,其次是 Cr,Hg,Zn,Cu 和 Cd,而 Pb 和 As 的污染程度相对较轻。



注:箱体实线表示所测重金属含量平均值;长虚线表示浙江省土壤环境背景值;短虚线表示《土壤环境质量:农用地土壤风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)筛选值。

图 2 土壤重金属质量分数分布箱线图

Fig. 2 Box diagram of distribution of heavy metal mass fraction in soil

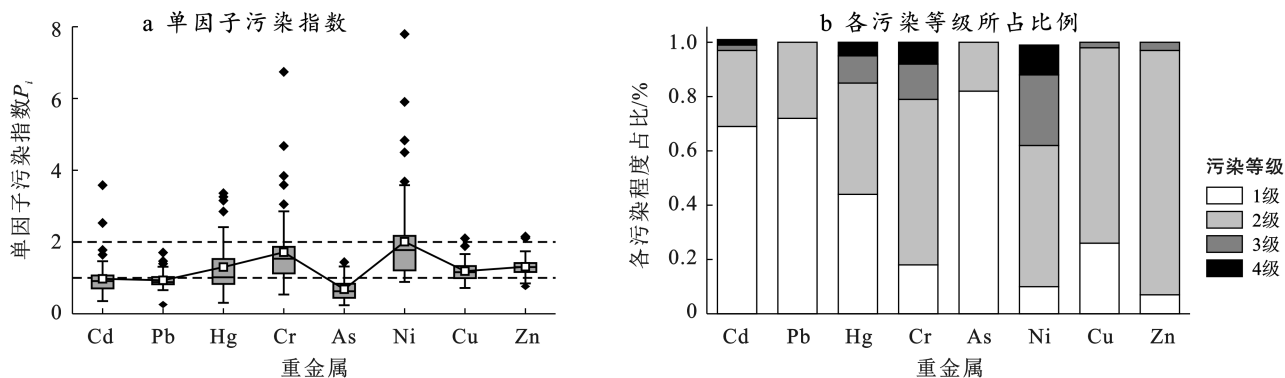


图 3 水田土壤重金属单因子污染指数(a)和各污染等级所占比例(b)

Fig. 3 Single factor pollution index (a) of heavy metals in paddy soil and proportion of each pollution grade (b)

2.2.2 地累积指数评价法 采用地累积指数法对研究区域内水田土壤重金属积累程度进行评价,以浙江省表层土壤(0—20 cm)元素背景值作为评价标准值,利用公式(2)计算该区域水田土壤中8种重金属地累积指数值。地累积指数(I_{geo})评价和分级结果见图4, Ni和Cr平均地累积指数处于轻污染级别,剩余6种重金属虽有个别点位的地累积指数处于轻度或中度污染,但总体上看,其重金属平均地累积指数均小于0,均处于无污染等级。

根据图4b显示,所有点位的As均未受到污染,而Pb和Cd则主要呈现无污染状态。Ni和Cr的地

累积指数分布范围较广,涵盖了无污染、轻污染、中污染及中—强污染4个等级,其中无污染和中—强污染相近。在研究区域的水田土壤中,重金属Cu以无污染和轻污染为主;Zn的情况与Cu类似,也主要集中在无污染和轻污染状态。相比之下,Hg的无污染区域较少,同时存在一定范围的轻污染和中污染区域。整体来看,所有采样点中重金属Ni在土壤环境中的富集最为严重,其次是Cr和Hg;Zn,Cu和Cd次之;Pb和As在土壤中的富集程度较低。这一结果与单因子污染指数的结果一致。由此可见,研究区域农田土壤重金属的污染程度与累积效应密切相关。

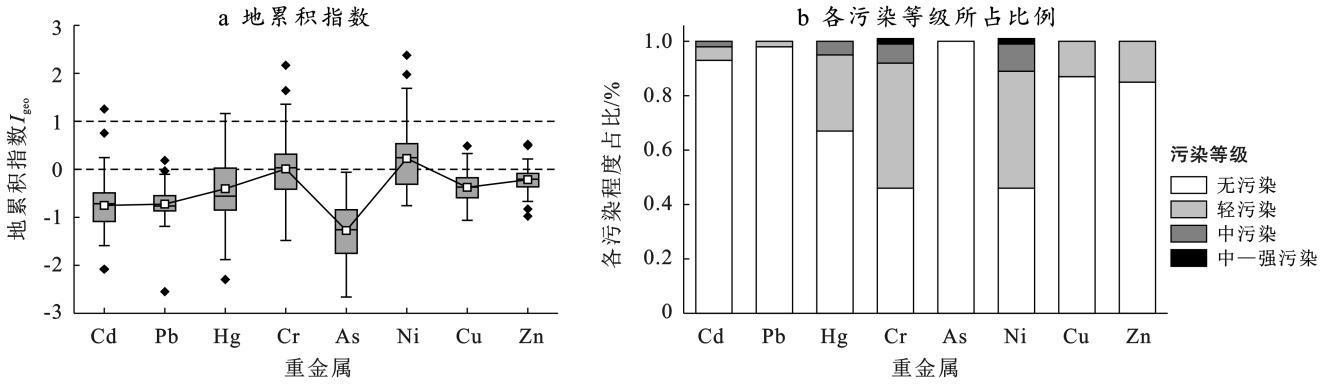


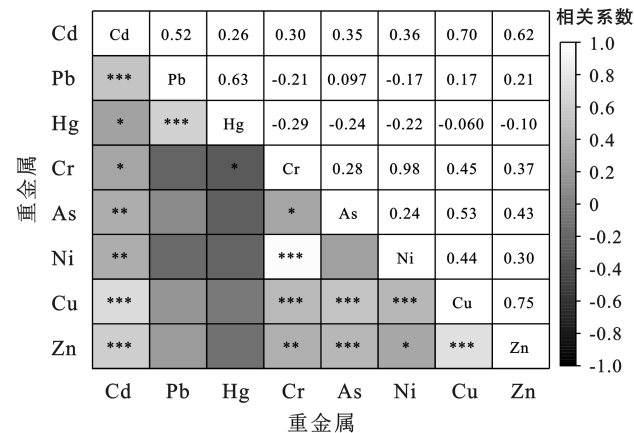
图 4 农田土壤重金属地累积指数(a)和各污染等级所占比例(b)

Fig.4 Heavy metal geoaccumulation index (a) and proportion of different pollution level (b) in paddy soil

2.3 水田重金属来源特征分析

2.3.1 重金属元素相关性分析 各元素之间的相关性分析结果能够反映出它们之间的相似性^[16]。利用 Pearson 相关性分析辨识不同重金属之间是否具有同源性,对研究区内 8 种水田土壤重金属的含量进行 Pearson 相关性分析(如图 5 所示)。

Cr 和 Ni 之间,Pb 和 Hg 之间以及 Cu 和 Zn 之间均在 0.001 水平上相关,相关系数分别为 0.98, 0.75,0.63,此外,Cd 与 Zn,Cd 与 Cu 之间也同时在 0.001 水平上相关,相关系数分别为 0.62,0.70,初步判断它们之间具有相同的来源。As 与 Zn,Cu 之间均存在 0.001 水平上显著相关,与 Cd 在 0.01 水平上显著相关,可能存在相似的污染源或混合污染源。Pb 和 Hg 与 Zn,Cu,Ni,As,Cr 之间相关性均不显著,其来源可能相对独立。



注: * 为 $p \leq 0.05$ 水平上显著; ** 为 $p < 0.01$ 水平上显著; *** 为 $p < 0.001$ 水平上显著。

图 5 土壤重金属含量相关性分析结果

Fig.5 Correlation analysis results of heavy metal content in soil

2.3.2 重金属元素因子分析 为进一步明确土壤重金属污染来源类别,采用因子分析法对相关分析结

果进行进一步验证。首先判定数据是否适合进行因子分析。经计算得出 KMO 值 $0.574 > 0.5$, Bartlett 球形检验显著值为 0.00,表明可以采用因子分析法分析土壤重金属含量。采用方差最大旋转因子法,可以抽取出 3 个特征值大于 0.8 的主因子,3 个主因子累积方差的贡献率为 83.161%(表 5),表明通过方差最大旋转因子法所提取出来的前 3 个主因子可以将这 8 种重金属相关数据的大部分信息反映出来。

第一主成分(F_1)为 32.718%,主要包括 Cd,As,Cu 和 Zn,其中 Cu 和 Zn 载荷最高,分别为 0.833, 0.824。相关性分析结果表明 Cu,Zn,Cd 和 As 这 4 种重金属元素间存在强相关性,且它们在空间上分布较均匀,表明这 4 种重金属元素具有相同或相似的来源。同时,重金属元素 Cu 和 Zn 分别是浙江省背景值的 1.19 和 1.31 倍,说明这两种重金属元素可能受到较大程度的人为影响,究其原因,有研究表明 Zn 和 Cu 元素可提高水稻产量的增收,并减轻亚铁毒害^[17]。

可能是研究区内的水稻主产区长期用大量含有 Zn 和 Cu 的化肥,并且用来灌溉水田的水中也可能含有 Zn 和 Cu;化肥和农药的过度使用是土壤中 Cd 和 Zn 元素的重要来源之一,农用化学品使用强度增加可能是土壤 Cd 和 Zn 相对富集的主要因素^[18];Cd 被认为是农业活动的标志元素^[19]。因此,研究区内 Cd,As,Cu 和 Zn 主要被认定为农业源。

第二主成分(F_2)的方差贡献率为 26.423。主要包括 Cr 和 Ni,旋转后的载荷分别为 0.943,0.969。本研究结果表明,Cr,Ni 主要来源为自然来源(成土母质)。有研究表明,土壤中的 Cr,Ni 主要来源于自然界,主要受成土母质的影响;Cr 和 Ni 的含量变化与成土母质、成土过程和地质活动显著相关^[20],这些研究结果与本研究结果均一致。因此,Cr 和 Ni 主要来源为土壤母质即自然源。

第三主成分(F_3)的方差贡献率为 24.02,主要包

括 Pb 和 Hg, 旋转后的载荷分别为 0.848, 0.889, 其中重金属元素 Hg 的平均含量是浙江省背景值的 1.3 倍, 并且 Hg 的变异系数为 55.10, 表明该元素可能受到一定程度的人为影响。已有研究发现, 化石燃料燃烧、矿物冶炼等过程排放了大量汞, 并通过大气干湿沉降及地表径流等方式进入土壤, 造成汞的持续累积^[21]。同时也有研究表明, 汽车汽油中含有 Pb 和 Hg, 可能导致土壤中的 Pb 和 Hg 升高^[22]。经调查发现, 研究区周边也有一些矿区和工业工厂, 其工业生产过程也会增加研究区土壤重金属 Pb 和 Hg 的含量。综上, 研究区内 Pb 和 Hg 主要来源为工业源。

表 5 土壤重金属含量因子分析

Table 5 Analysis of heavy metal content factors in soil

重金属元素	旋转前因子			旋转后因子		
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₁	F ₂	F ₃
Cd	0.753	0.507	0.088	0.657	0.297	0.558
Pb	0.161	0.876	0.131	0.241	-0.184	0.848
Hg	-0.147	0.786	0.453	-0.206	-0.111	0.889
Cr	0.736	-0.491	0.433	0.234	0.943	-0.163
As	0.616	-0.009	-0.531	0.789	0.012	-0.196
Ni	0.722	-0.443	0.513	0.187	0.969	-0.085
Cu	0.873	0.152	-0.188	0.833	0.332	0.129
Zn	0.788	0.186	-0.279	0.824	0.204	0.109
方差贡献	3.439	2.138	1.076	2.617	2.114	1.922
贡献率	42.990	26.724	13.447	32.718	26.423	24.020
累积贡献率	42.990	69.714	83.161	32.718	59.141	83.161

2.3.3 重金属元素聚类分析 可采用聚类分析验证主成分分析结果的准确性^[23]。本研究采用聚类分析进一步分析研究区域内水田 8 种土壤重金属之间的关系(如图 6 所示)。当欧氏距离为 1.0 时, 可将重金属分为 2 类。第 I 类包括 Cd, Cu, Zn, As, Cr 和 Ni, 第 II 类包括 Pb 和 Hg。当欧氏距离为 0.65 时, 又可

将第 I 类分为两簇, 其中一簇为 Cr 和 Ni, 另外一簇为 Cd, Cu, Zn 和 As。Cd 和 As 相互关联密切, 并与 Cu, Zn 相连在一个分支上, 这与 Pearson 相关分析以及因子分析的结果相一致。Cu 与 Zn 在 0.001 水平上相关, 为第 I 类中的其中一簇, 这为判定 Cd 和 Zn 来源于农业源提供了依据。

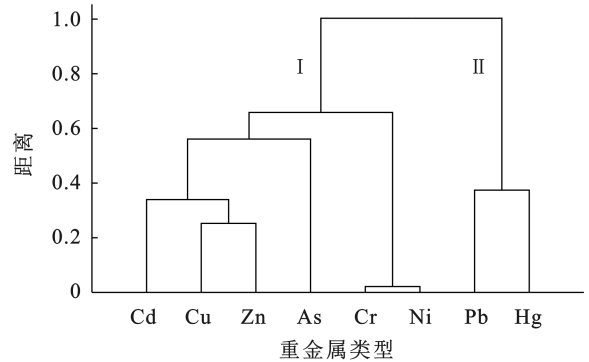


图 6 水田土壤重金属元素聚类分析

Fig. 6 Cluster analysis of heavy metal elements in paddy soil

2.4 重金属环境健康风险评估

2.4.1 土壤重金属非致癌健康风险评估 根据表 6 可以看出, 研究区内 8 种重金属的非致癌健康风险指数(HQ)的平均值均小于 1。在 3 种暴露途径下, 单一重金属元素对成人及儿童的非致癌风险由高到低排序是: Cr>As>Pb>Ni>Cu>Hg>Zn>Cd, 表明重金属元素 Cr, As 和 Pb 是引发研究区不同人群非致癌风险的主要重金属危害元素, 这一研究结果与刘力等^[24]的研究相一致。此外, 成人和儿童的综合非致癌风险指数(HI)均小于 1, 未超出引发非致癌健康阈值 1, 所以研究区内水田土壤重金属对成人和儿童的非致癌健康风险可以忽略, 但儿童的非致癌健康健康风险指数高于成人的非致癌健康风险指数。

表 6 土壤重金属非致癌暴露风险指数值

Table 6 Non-carcinogenic exposure risk indices of heavy metals in soil

人群	单项风险指数(HQ)								综合风险指数(HI)
	Cd	Pb	Hg	Cr	As	Ni	Cu	Zn	
成人	1.42×10^{-4}	5.12×10^{-3}	2.40×10^{-4}	1.45×10^{-2}	7.94×10^{-3}	6.73×10^{-4}	2.90×10^{-4}	1.71×10^{-4}	2.90×10^{-2}
儿童	9.68×10^{-4}	3.81×10^{-2}	1.77×10^{-3}	1.02×10^{-1}	5.94×10^{-2}	5.03×10^{-3}	2.17×10^{-3}	1.28×10^{-3}	2.11×10^{-1}

2.4.2 土壤重金属致癌健康风险评估 由表 7 可知, 研究区内 5 种单一重金属元素对成人及儿童的致癌健康风险指数(CR)均值由大到小依次是: As>Cd>Cr>Pb>Ni, 儿童的健康风险指数均高于成人健康风险指数。

重金属元素 As 对于儿童和成人而言均存在可耐

受致癌风险。且儿童的可耐受致癌风险大于成人; 重金属元素 Cd, Pb, Cr 的致癌健康风险指数均值结果都显示出儿童处于可耐受的致癌风险, 而成人的致癌风险可以忽略; 重金属 Ni 对于成人和儿童均不造成致癌风险, 但儿童的致癌健康风险指数均值大于成人。值得注意的是, 5 种重金属元素中, As 元素是引

发致癌健康风险最主要的元素,长期低剂量暴露于砷可引起慢性砷中毒,诱发各种皮肤病,导致肝肾功能受损,引发癌症。研究区水田土壤中砷含量相对较少,在日常耕作过程中可以采用深耕翻土等方法来减轻重金属砷对人体的致癌风险。综合致癌健康风险

指数(TCR)表明,成人和儿童的 TCR 平均值分别为 5.74×10^{-6} , 4.09×10^{-5} , 因此,对于成人来说不存在综合致癌健康风险。但儿童的综合致癌健康风险处于可耐受风险,应该引导儿童在日常生活中注意个人习惯,以尽量减少土壤重金属的致癌风险。

表 7 土壤重金属致癌暴露风险指数值

Table 7 Carcinogenic exposure risk indices of heavy metals in soil

人群	致癌暴露风险指数值(CR)								TCR
	Cd	Pb	Hg	Cr	As	Ni	Cu	Zn	
成人	9.21×10^{-7}	4.45×10^{-7}	—	7.86×10^{-7}	3.58×10^{-6}	4.91×10^{-9}	—	—	5.74×10^{-6}
儿童	6.90×10^{-6}	3.39×10^{-6}	—	3.89×10^{-6}	2.67×10^{-5}	7.05×10^{-9}	—	—	4.09×10^{-5}

3 讨论

从研究区内 8 种重金属元素含量的平均值来看,重金属元素 Hg, Cr, Ni, Cu 和 Zn 的含量平均值均高于浙江省土壤环境背景值,但未超过土壤环境《土壤环境质量:农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的风险筛选值。本研究中重金属 Hg 的平均值和最大值均超过了浙江省土壤环境背景值,这也与 S. Amin 等^[25]通过对近年全球土壤污染物调研发现的趋势一致。其余 3 种重金属元素 Pb, Cd, As 含量平均值虽然低于浙江省土壤环境背景值,但存在部分样品中的测定值超出浙江土壤环境背景值。

通过单因子污染指数分析,研究区水田土壤主要处于轻度污染水平,但有部分点位存在一定程度的 Ni 和 Cr 元素污染,这可能与当地土壤母质有关。而地累积指数评价法表明,所有采样点位中,重金属 Ni 在土壤环境污染中的占比最大,且是最主要的环境污染因子,其次是 Cr 和 Hg,这一结果与单因子污染指数的结果相一致。

皮尔逊相关分析结果发现,As 与 Zn, Cu 之间均存在 0.001 水平上显著正相关,与 Cd 在 0.01 水平上显著正相关,说明这 4 种元素间可能有相似的来源途径。Cr 和 Ni 二者之间的相关系数高达 0.98,且在 0.001 水平上显著正相关,而重金属 Pb 和 Hg 之间的相关系数为 0.63,在 0.001 水平上显著正相关。仅用土壤重金属元素的相关性分析还不足以解释其来源,因此使用因子分析法对相关性结果进行进一步验证。因子分析表明,可以抽取出 3 个特征值大于 0.8 的主因子,第一主因子主要包括 Cd, As, Cu, 和 Zn, 且这 4 种重金属元素间相关性较强,结合当地的实地考察发现,在田间地头上有时可以见到一些使用过的化肥包装袋,化肥的不合理施用可能是造成土壤中重金属元素污染的途径之一。此外,灌溉等农业上的不合理

的种植方式也是造成土壤中重金属元素污染的主要原因,因此第一主因子为农业源;第二主因子主要包括 Cr 和 Ni 元素,这两种重金属元素主要受成土母质的影响,且在本研究中, Cr 和 Ni 的相关系数最高,因此第二主因子可归为自然源;第三主因子包括 Pb 和 Hg,结合研究区的实际情况可将它们归纳为工业源。最后,通过聚类分析再一次验证了之前相关性分析和因子分析所得出的结论,说明钱江源国家公园水田土壤重金属来源途径主要可分为农业源、自然源和工业源。

通过重金属环境健康风险评估法,从致癌程度来看,研究区内最主要的致癌重金属元素为 As,这与陈瑜佳等^[26]所研究的成果相一致。As 对人体的危害不容忽视,且 As 是国际上公认的一类致癌物^[27]。本研究结果表明,As 对儿童的致癌风险高于成人,因此应加强对 As 的污染防控。此外,从综合致癌健康风险指数来看,儿童的致癌风险高于成人致癌风险,这与前人研究成果相一致^[28],这可能与儿童在此阶段的生活与行为活动等有关。

4 结论

(1) 调查结果显示研究区内水田土壤呈酸性,重金属 Hg, Cr, Ni, Cu, Zn 含量的平均值超过了浙江省土壤环境背景值,但总体来看,研究区内 8 种重金属含量均低于《土壤环境质量标准》中的风险筛选值。

(2) 重金属元素 Ni 在土壤中富集最为严重,是主要贡献因子,研究区内水田土壤重金属污染程度较低;重金属污染源主要是农业源、自然源和工业源;儿童在非致癌和致癌健康风险方面均高于成人,且儿童存在一定程度的可耐受性致癌健康风险,最主要的致癌重金属为 As。

(3) 目前,钱江源国家公园正处于地役权改革管理阶段,本文对钱江源国家公园水田土壤重金属的污

染状况及生态风险等进行了研究,但对于地役权改革是否以及如何影响水稻田土壤的恢复,今后还需要持续开展监测评估,才能做出更加科学合理的评判。

参考文献 (References)

- [1] 郭宜薇,丁文峰,朱秀迪,等.三峡库区重金属含量空间分布及污染状况[J].水土保持通报,2021,41(6):105-112.
Guo Yiwei, Ding Wenfeng, Zhu Xiudi, et al. Spatial distribution and pollution characteristics of heavy metal contents in Three Gorges reservoir area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(6):105-112.
- [2] Song Peipei, Xu Dan, Yue Jingyuan, et al. Recent advances in soil remediation technology for heavy metal contaminated sites: A critical review [J]. Science of the Total Environment, 2022,838:156417.
- [3] Zhao Keli, Zhang Luyao, Dong Jiaqi, et al. Risk assessment, spatial patterns and source apportionment of soil heavy metals in a typical Chinese hickory plantation region of Southeastern China [J]. Geoderma, 2020,360:114011.
- [4] Ayuso-Álvarez A, Simón L, Nuñez O, et al. Association between heavy metals and metalloids in topsoil and mental health in the adult population of Spain [J]. Environmental Research, 2019,179:108784.
- [5] 钱江源国家公园管理局.开化聚力打造钱江源国家公园[J].浙江林业,2019(7):20-21.
Qianjiangyuan National Park Administration. Kaihua to build Qianjiangyuan National Park [J]. Zhejiang Forestry, 2019(7):20-21.
- [6] 肖练练,钟林生,虞虎,等.功能约束条件下的钱江源国家公园体制试点区游憩利用适宜性评价研究[J].生态学报,2019,39(4):1375-1384.
Xiao Lianlian, Zhong Linsheng, Yu Hu, et al. Assessment of recreational use suitability of Qianjiangyuan National Park pilot under the zoning constraints [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(4):1375-1384.
- [7] 何友均,赵晓迪,等.国家公园体制试点区生态补偿与管理体制研究[M].北京:科学出版社,2020.
He Youjun, Zhao Xiaodi, et al. Ecological Compensation and Management System of a National Park System Pilot Area [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd, 2020.
- [8] 汪庆华,董岩翔,周国华,等.浙江省土壤地球化学基准值与环境背景值[J].生态与农村环境学报,2007,23(2):81-88.
Wang Qinghua, Dong Yanxiang, Zhou Guohua, et al. Soil geochemical baseline and environmental background values of agricultural regions in Zhejiang Province [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2007,23(2):81-88.
- [9] Huang Jingling, Wu Yuying, Sun Jiaxun, 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.
- [10] Sun Jiaxun, Zhao Menglu, Huang Jingling, 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, 2022,423:127116.
- [11] 陈展,吴育林,张刚.上海市某大型再开发场地土壤重金属污染特征、评价及来源分析[J].水土保持通报,2021,41(1):227-236.
Chen Zhan, Wu Yulin, Zhang Gang. Pollution characteristics, assessment, and source analysis of soil heavy metals in large-scale redevelopment site in Shanghai City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(1):227-236.
- [12] Wang Qiang, Hong Hualong, Yang Dan, et al. Health risk assessment of heavy metal and its mitigation by glomalin-related soil protein in sediments along the South China coast [J]. Environmental Pollution, 2020,263:114565.
- [13] Chen Ziwan, Xu Jing, Duan Ruichun, et al. Ecological health risk assessment and source identification of heavy metals in surface soil based on a high geochemical background: A case study in Southwest China [J]. Toxics, 2022,10(6):282.
- [14] Abouian Jahromi M, Jamshidi-Zanjani A, Khodadadi Darban A. Heavy metal pollution and human health risk assessment for exposure to surface soil of mining area: A comprehensive study [J]. Environmental Earth Sciences, 2020,79(14):365.
- [15] Cai Limei, Xu Zhencheng, Ren Mingzhong, et al. Source identification of eight hazardous heavy metals in agricultural soils of Huizhou, Guangdong Province, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2012,78:2-8.
- [16] Zhang Zhaocong, Li Juying, Mamat Z, et al. Sources identification and pollution evaluation of heavy metals in the surface sediments of Bortala River, Northwest China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016,126:94-101.
- [17] 于莎莎.锌和铜对镉胁迫下水稻幼苗生长及植物螯合肽合成的影响研究[D].北京:中国农业科学院,2016.
Yu Shasha. Effects of zinc and copper on growth and the synthesis of phytochelatin under cadmium stress in seedlings of rice [D]. Beijing: Chinese Academy of Ag-

- ricultural Sciences Dissertation, 2016.
- [18] 黄宏伟,肖河,王敦球,等.漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评估[J].环境科学,2021,42(4):1714-1723.
Huang Hongwei, Xiao He, Wang Dunqiu, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in the water of Lijiang River basin [J]. Environmental Science, 2021,42(4):1714-1723.
- [19] 杨振宇,廖超林,邹炎,等.湘东北典型河源区土壤重金属分布特征、来源解析及潜在生态风险评估[J].环境科学,2023,44(9):5288-5298.
Yang Zhenyu, Liao Chaolin, Zou Yan, et al. Distribution characteristics, source analysis and potential ecological risk assessment of soil heavy metals in typical river source areas of Northeastern Hunan Province [J]. Environmental Science, 2023,44(9):5288-5298.
- [20] 陈盟,潘泳兴,黄奕翔,等.阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析[J].环境科学,2022,43(10):4545-4555.
Chen Meng, Pan Yongxing, Huang Yixiang, et al. Spatial distribution and sources of heavy metals in soil of a typical lead-zinc mining area, Yangshuo [J]. Environmental Science, 2022,43(10):4545-4555.
- [21] 安永龙,殷秀兰,李文娟,等.张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析[J].环境科学,2023,44(6):3544-3561.
An Yonglong, Yin Xiulan, Li Wenjuan, et al. Evaluation and source analysis of soil heavy metal pollution in a planting area in Wanquan District, Zhangjiakou City [J]. Environmental Science, 2023,44(6):3544-3561.
- [22] 陈丹青,谢志宜,张雅静,等.基于 PCA/APCS 和地统计学的广州市土壤重金属来源解析[J].生态环境学报,2016,25(6):1014-1022.
Chen Danqing, Xie Zhiyi, Zhang Yajing, et al. Source apportionment of soil heavy metals in Guangzhou based on the PCA/APCS model and geostatistics [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016,25(6):1014-1022.
- [23] 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.
- [24] 刘力,张传华,王钟书,等.农用地土壤重金属来源解析与健康风险空间分异特征研究:以重庆市巫山县笃坪乡为例[J].西南农业学报,2024,37(05):1099-1107.
Liu Li, Zhang Chuanhua, Wang Zhongshu, et al. Analysis of heavy metal sources and spatial differentiation of health risks in agricultural soil: A case study of Duping Township, Wushan Country, Chongqing [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2024, 37(5): 1099-1107.
- [25] Amin S, Khan S, Sarwar T, et al. Mercury methylation and its accumulation in rice and paddy soil in degraded lands: A critical review [J]. Environmental Technology & Innovation, 2021,23:101638.
- [26] 陈瑜佳,屈星辰,张斌,等.香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估[J].环境科学,2022,43(12):5728-5741.
Chen Yujia, Qu Xingchen, Zhang Bin, et al. Ecological and health risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil of Xianghe County [J]. Environmental Science, 2022,43(12):5728-5741.
- [27] 吴婧,董欣敏,郑燕芳,等.镉致癌的分子机制研究进展[J].生态毒理学报,2015,10(6):54-61.
Wu Jing, Dong Xinmin, Zheng Yanfang, et al. Recent research progress in molecular mechanisms of cadmium induced carcinogenesis [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2015,10(6):54-61.
- [28] 马杰,余泽蕾,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 Jie, Yu Zelei, Wang Shenglan, 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.