

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2023072806

CSTR:32061.14.hjhx.2023072806

王兴明, 胡雨琴, 范廷玉, 等. 淮南光伏沉陷塘微量元素变化特征及健康风险评价[J]. 环境化学, 2025, 44(1): 273-287.

WANG Xingming, HU Yuqin, FAN Tingyu, et al. Study on the variation characteristics and health risk assessment of trace elements in photovoltaic subsidence ponds in Huainan[J]. Environmental Chemistry, 2025, 44 (1): 273-287.

淮南光伏沉陷塘微量元素变化特征及健康风险评价*

王兴明^{1,2,3,4} ** 胡雨琴¹ 范廷玉^{1,2} 董众兵¹ 梁淑英⁴
董 鹏⁶ 储昭霞⁵ 邓瑞来⁷

(1. 安徽理工大学 地球与环境学院 安徽省高潜水位矿区水土资源综合利用与生态保护工程实验室, 淮南, 232001; 2. 皖江流域退化生态系统的恢复与重建省部共建协同创新中心, 安徽师范大学, 芜湖, 241000; 3. 安徽省高潜水位矿区水土资源综合利用与生态保护工程实验室, 安徽理工大学, 淮南, 232001; 4. 滁州市环保局, 滁州, 239004; 5. 资源与环境生物技术安徽普通高等院校重点实验室, 淮南师范学院 生物工程学院, 淮南, 232038; 6. 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 昆明, 650031; 7. 安徽开源园林绿化工程有限公司, 合肥, 230031)

摘 要 为探究沉陷塘与非沉陷塘、光伏沉陷塘与无光伏沉陷塘、漂浮型光伏沉陷塘与立柱型光伏沉陷塘微量元素污染特征和健康风险的差异, 本研究选取对光伏沉陷塘中 Cr、Ni、Cd、Pb、Cu、Mn、Zn 等 7 种微量元素进行测试分析, 利用相关性和聚类分析, 并采用单因子污染指数法、内梅罗指数法和 USEPA 模型对微量元素进行风险评价. 结果表明, 沉陷塘中 Cd 大于《中国地表水环境质量标准》(GB3838-2002) 中Ⅲ类水环境质量标准, 最高达 $11.78 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, Cu、Zn 浓度最小值分别为 $13.75 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $34.85 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 均大于长江河源区背景值 $3.01 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $6.46 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 呈现一定富集现象, 其中, Zn 富集程度较高; 与无光伏沉陷塘相比, 沉陷塘微量元素浓度较低, 没有受到光伏面板材料的影响或光伏面板影响较小, 整体表现为漂浮型光伏电站>立柱型光伏电站>无光伏沉陷塘; 单因子指数法和内梅罗指数法发现沉陷塘污染水平整体表现为立柱光伏沉陷塘>漂浮光伏沉陷塘, 光伏沉陷塘>无光伏沉陷塘, 沉陷塘>非沉陷塘; 相关性和聚类分析显示, 漂浮光伏沉陷塘的污染源为冶金化工、汽车排放, 立柱光伏沉陷塘的污染源为矿业开采、道路交通、燃煤和农业肥料, 无光伏沉陷塘的污染源为工业生产、交通运输和内源污染, 非沉陷塘的污染源为工业生产、农业肥料和道路交通; 健康风险评价发现沉陷塘中非致癌物质通过饮水摄入途径和皮肤接触途径对成人和儿童造成的非致癌总风险 HI 均小于 1, 最大为 0.133, 处于人体可接受水平, 致癌物质 Cr、Cd 对儿童和成人的致癌风险 CR 小于 1×10^{-6} , 认为无致癌风险或致癌风险较低.

关键词 沉陷塘, 微量元素, 污染评价, 相关性和聚类分析, 健康风险评价.

中图分类号 X-1; O6 **文献标识码** A

2023 年 7 月 28 日收稿(Received: July 28, 2023).

* 国家自然科学基金(51878004), 国家重点研发计划“固废资源化”重点专项(2020YFC1908601), 安徽高校协同创新项目(GXXT-2020-075), 安徽省重点研究与开发计划项目(202104a06020027), 安徽省高校优秀人才重点支持计划项目(gxyqZD2021129)和安徽省高潜水位矿区水土资源综合利用与生态保护工程实验室开放课题(2022-WSREPMA-04)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (51878004), National Key R & D Program "Solid Waste Recycling" Key Project (2020YFC1908601), Anhui University Collaborative Innovation Project (GXXT-2020-075), Anhui Provincial Key Research and Development Program (202104a06020027), Key Support Program for Excellent Talents in Colleges and Universities in Anhui Province (gxyqZD2021129) and the Open Project of Comprehensive Utilization of Water and Soil Resources and Ecological Protection Engineering Laboratory in High Groundwater Level Mining Area of Anhui Province (2022-WSREPMA-04).

** 通信联系人 Corresponding author, E-mail: xmwang-2004@126.com

Study on the variation characteristics and health risk assessment of trace elements in photovoltaic subsidence ponds in Huainan

WANG Xingming^{1,2,3,4 **} HU Yuqin¹ FAN Tingyu^{1,2} DONG Zhongbing¹
LIANG Shuying⁴ DONG Peng⁶ CHU Zhaoxia⁵ DENG Ruilai⁷

(1. Anhui University of Science and Technology, College of Earth and Environment, Laboratory of Comprehensive Utilization of Water and Soil Resources and Ecological Protection Engineering in Mining Area with High Groundwater Level in Anhui Province, Huainan, 232001, China; 2. Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Wanjiang River Basin and Reconstruction of Provincial and Ministerial Co-Construction of Collaborative Innovation Center, Anhui Normal University, Wuhu, 241000, China; 3. Anhui Provincial Laboratory of Comprehensive Utilization of Water and Soil Resources and Ecological Protection Engineering in High Groundwater Level Mining Area, Anhui University of Science and Technology, Huainan, 232001, China; 4. Chuzhou Environmental Protection Bureau, Chuzhou, 239004, China; 5. Resources and Environment Biotechnology Key Laboratory of Anhui Colleges and Universities, School of Bioengineering, Huainan Normal University, Huainan, 232038, China; 6. Kunming University of Science and Technology, School of Metallurgy and Energy Engineering, Kunming, 650031, China; 7. Anhui Kaiyuan Landscaping Engineering Co., Ltd., Hefei, 230031, China)

Abstract In order to explore the characteristics and health risks of trace elements in subsidence pond, non-subsidence pond, photovoltaic subsidence pond and non-photovoltaic subsidence pond, floating photovoltaic subsidence ponds and pillaring photovoltaic subsidence pond, seven trace elements (Cr, Ni, Cd, Pb, Cu, Mn and Zn) were selected and tested in different subsidence ponds. Correlation and cluster analysis were used to find the sources for the elements. The single factor pollution index, Nemero index and USEPA model were adopted to evaluate the risks of trace elements. Results indicated that Cd concentration in the subsidence pond was higher than level III of China Surface Water Environmental Quality Standard (GB3838—2002), with the highest value of $11.78 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. The minimum concentrations of Cu and Zn were $13.75 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $34.85 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, which were higher than $3.01 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $6.46 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ registered in the background values in the source area of the Yangtze River, showing a certain enrichment trend and Zn was highly enriched. Compared with the non-photovoltaic subsidence pond, the trace elements concentrations in the subsidence pond were lower, reflecting non-affection by the photovoltaic panel material or the photovoltaic panel. The overall descending order of the trace elements in subsidence pond is: floating photovoltaic subsidence pond > pillaring photovoltaic subsidence pond > non-photovoltaic subsidence pond. The single factor index and the Nemero index revealed that the overall pollution level followed the order: pillaring photovoltaic subsidence pond > floating photovoltaic subsidence pond, photovoltaic subsidence pond > non-photovoltaic subsidence pond, subsidence pond > non-subsidence pond. Correlation and cluster analysis demonstrated that the pollution sources of floating photovoltaic subsidence ponds were from metallurgical chemical industry and automobile emission, pillaring photovoltaic subsidence ponds from mining, road traffic, coal burning and agricultural fertilizer, non-photovoltaic subsidence ponds from industrial production, transportation and endogenous pollution, non-subsidence ponds from industrial production, agricultural fertilizer and road traffic. The health risk assessment discovered that the total non-carcinogenic risk (HI) of non-carcinogenic substances in the subsidence pond to adults and children via water intake and skin contact was less than 1, with the maximum value was 0.133, which was at acceptable level. The carcinogenic risk (CR) from carcinogens Cr and Cd to children and adults was less than 1×10^{-6} , suggested that there was no carcinogenic risk or low carcinogenic risk.

Keywords subsidence pond, trace elements, pollution assessment, correlation and cluster analysis, health risk assessment.

水体中的微量元素具有难降解性和较强的生物毒性^[1], 对人体健康造成不可估量的损伤^[2]. 随着采煤活动的不断进行, 我国采煤沉陷区域面积逐年递增^[3], 开采所产生的副产物释放微量元素进入沉陷水体中, 对采煤沉陷区的水体及土壤造成严重的生态威胁^[4]. 近年来, 不少研究发现, 采煤沉陷塘出现了微量元素富集现象, 如刘旭^[5]发现淮南沉陷水体的重金属受煤矸石堆积、公路干道等人为因素影响, 导致沉陷塘水体部分点位出现重金属富集现象. 此外, 任永乐等^[6]发现淮南沉陷塘水体微量元素 Cd、Pb、Cu、Ni 富集, 陈同等^[7]对研究发现, 淮南潘集采煤沉陷水体底泥中微量元素 Cu、Zn、Cd 富集, 其中 Cd 富集程度最高. 以上研究表明, 采煤沉陷塘出现了 Cd、Pb、Cu、Ni、Zn 元素富集, 同时, Cd 元素在稳沉、非稳沉沉陷塘富集, 且富集程度较高.

然而, 近年来, 不少沉陷塘上铺设了太阳能光伏面板, 包括漂浮型和立柱型两大类, 如 2017 年淮南市潘集 6000 亩采煤沉陷水域上建设的漂浮型光伏电站和李郢孜采煤沉陷水域的立柱型光伏电站. 国际上少数研究表明, 光伏电站的建设对水生态环境的影响并不大^[8-9], 甚至从长远看可以实现良性向好发展, 但也有研究表明光伏电站的建设降低了沉水植物对浮游植物的竞争力, 导致浮游植物生物量的增加和沉水植物量的减少, 进而使整个水生态环境恶化^[10]. 因此, 探究不同类型光伏面板是否对采煤沉陷水域微量元存在不利影响势在必行.

对采煤沉陷塘微量元素的含量特征、形态分布和风险评估等方面进行研究的主要方法包括单因子污染指数法^[11]、综合污染指数法^[12]、内梅罗指数法^[13]、相关性分析^[14]、主成分分析^[15-16]和健康风险评估法^[17], 这些方法对水体微量元素的研究发展具有重要意义. 目前学界对采煤沉陷塘的研究主要集中在微量元素时空变化特征及健康风险评价、来源分析以及水体理化性质和微量元素的相关性分析^[15, 17-18], 对采煤沉陷塘和非沉陷塘微量元素分布特征的研究很少. 因此本研究选取淮南矿区光伏沉陷塘、和无光伏沉陷塘作为研究对象, 以淮南市中央公园湖泊(非沉陷塘)作为对照区, 分析沉陷塘水体中 Cr、Ni、Cd、Pb、Cu、Mn、Zn 的浓度分布特征, 并运用内梅罗指数法、健康风险评估模型、相关性和聚类分析对水体微量元素进行评价, 以期对沉陷塘光伏项目的发展、采煤沉陷塘的综合治理和居民饮水和用水安全提供科学依据.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 研究区概况

淮南矿区位于安徽省北部的淮河两岸, 位置属华北板块南缘, 东起郟庐断裂带, 西至阜阳断层, 北接蚌埠隆起, 南以老人仓-寿县断层与合肥拗陷相邻, 由老矿区(谢家集区)和新矿区(潘谢矿区)组成, 面积约 3200 km²^[19], 是我国 14 个大型煤炭基地和 6 大煤电基地之一, 不但煤种丰富, 且资源保有量为 324 亿吨, 是国家煤炭资源开采与利用的重大工程建设区^[20]. 随着煤炭资源的不断开采, 矿区沉陷区域面积逐年递增, 目前已超 300 km².

研究区域年均气温为 15.5 ℃, 年均降水量为 900.1 mm, 年均蒸发量为 747.0 mm. 区域内四季分明, 全年主导风向为东南风和东北风, 降雨主要集中在夏季, 秋冬季节干燥寒冷, 降雨量少^[21].

1.2 样品采集与测试

选取顾桥矿区的漂浮光伏沉陷塘和无光伏沉陷塘、李郢孜矿区的立柱光伏沉陷塘作为研究水域, 淮南矿区光伏电站于 2017 年至 2018 年期间建设完成, 淮南中央公园位于淮南市高新区, 北邻政务中心, 南邻奥林匹克公园, 总面积约 900000 m², 中心湖面面积达 420000 m², 周边建设尚未完成, 仍然保持苗圃林地原生状态, 受污染程度小, 因此, 为排除部分外部因素影响, 选取淮南市中央公园非沉陷塘水样作为对照, 于 2021 年 6 月进行船只采样.

依照《水和废水监测分析方法(第 4 版)》, 在沉陷塘和中央公园非沉陷塘上分别设置 6 个采样点(漂浮光伏沉陷塘采样点编号为 P1—P6, 立柱光伏沉陷塘采样点编号为 L1—L6, 无光伏沉陷塘采样点编号为 W1—W6, 中央公园非沉陷塘采样点编号为 F1—F6), 采样点尽可能均匀分布在整个采样空间内, 在采样点水面下 0.5 m 处采集多点混合瞬时水样 500 mL, 现场加入硝酸酸化, 4 ℃ 保存, 带回实验室持续低温保存, 采样点具体位置分布如图 1 所示.

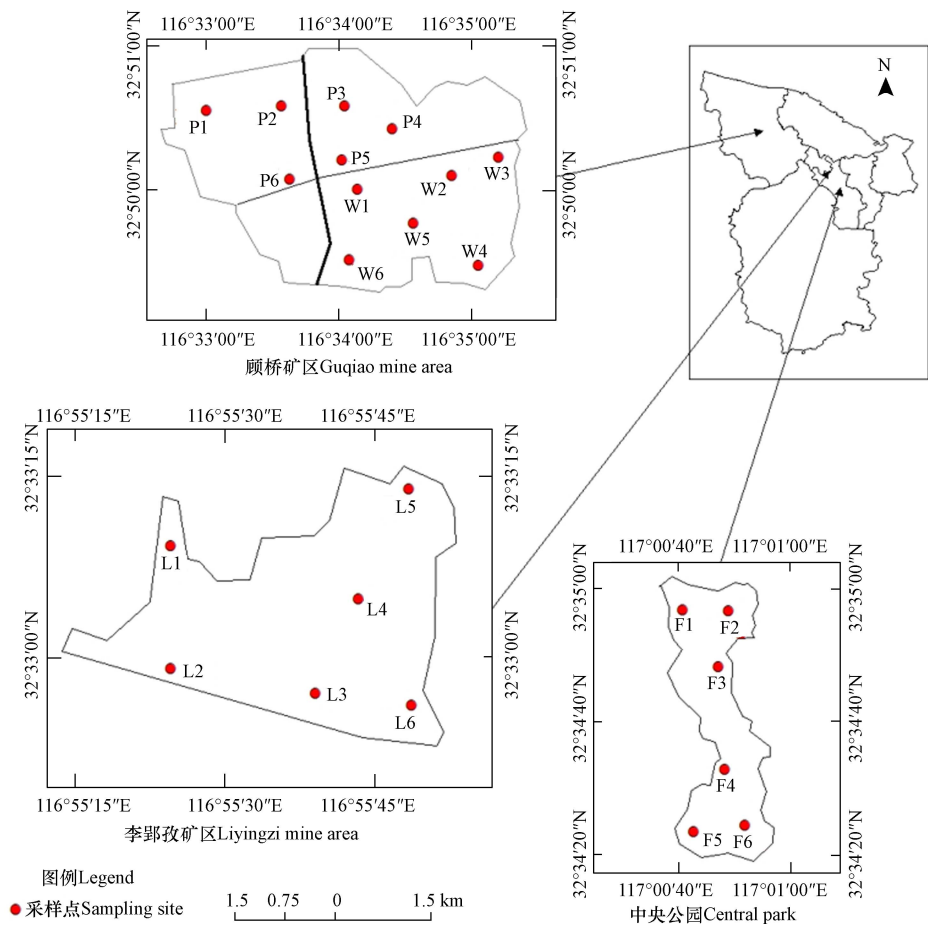


图 1 采样图

Fig.1 Sample graph

水样用 0.45 μm 醋酸纤维素滤膜过滤,采用《水质重金属总量消解硝酸法(HJ677—2013)》进行消解,利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, NexION300X)测定 Cr、Ni、Cd、Pb、Cu、Mn、Zn 含量,并实行质控控制,试验设置 1 个空白样和 3 个平行样.

1.3 污染评价

采用单因子污染指数(P_i)和内梅罗指数(N_i)综合评价地下水中重金属污染水平,公式如(1—2).

$$P_i = \frac{c_i}{s_i} \tag{1}$$

$$N_i = \sqrt{\frac{(c_i/s_i)_{\text{mean}}^2 + (c_i/s_i)_{\text{max}}^2}{2}} \tag{2}$$

式中, i 为不同重金属, c_i 为水中重金属实测浓度, s_i 为地表水质量标准(GB3838—2002)的Ⅲ类浓度阈值, c_i 、 s_i 单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,其划分标准如表 1.

表 1 污染水平平均标准

Table 1 Average pollution level standards

单因子评价标准 Single factor evaluation criteria		内梅罗评价标准 Nemerow evaluation criteria	
P_i	污染水平 Level of pollutant	N_i	污染水平 Level of pollutant
$P_i \leq 1$	清洁	$N_i < 1$	清洁
$1 < P_i \leq 2$	轻度污染	$1 \leq N_i < 2.5$	轻度污染
$2 < P_i \leq 3$	中度污染	$2.5 \leq N_i < 7$	中度污染
$P_i > 3$	重度污染	$N_i \geq 7$	重度污染

1.4 人体健康风险评价方法

微量致癌物可能对人体健康产生危害,非致癌物(又称为躯体毒物质)对人体健康产生的危害也不容忽视,其危害主要表现在对人体器官或系统的危害.因此对采煤沉陷塘水体致癌物质和非致癌物质都应该进行健康风险评价.

人体健康风险模型(HHR)以风险度为评价指标,将环境污染与人体健康结合,定量描述环境污染对人体健康的危害.根据 EPA 标准,环境介质中的有毒金属可通过饮水摄入、皮肤接触和口鼻吸入三种暴露途径危害人体健康,并成人和儿童两种暴露人群分开考虑.根据沉陷塘水体特点,仅考虑饮水摄入和皮肤接触暴露途径造成的健康风险^[22].

非致癌物质的暴露量通常用日均暴露剂量表征,致癌物质的暴露量通常用终生日均暴露剂量表征.饮水摄入途径暴露的健康风险计算公式如(3—5):

$$ADD_{oral} = \frac{CW \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \tag{3}$$

$$HQ_{oral} = \frac{ADD_{oral}}{RfD} \tag{4}$$

$$CR_{oral} = ADD_{oral} \times SF \tag{5}$$

皮肤接触途径暴露的健康风险计算公式如(6—8):

$$ADD_{dermal} = \frac{CW \times CF \times SA \times PC \times EF \times ED \times ET}{BW \times AT} \tag{6}$$

$$HQ_{dermal} = \frac{ADD_{dermal}}{RfD} \tag{7}$$

$$CR_{dermal} = ADD_{dermal} \times SF \tag{8}$$

非致癌物风险值公式如(9):

$$HI = HQ_{oral} + HQ_{dermal} \tag{9}$$

健康风险评价模型参数如表 2 所示.

表 2 健康风险评价模型参数^[23-24]
Table 2 Health risk evaluation model parameters

参数 Parameter	含义 Implication	值 Value	单位 Unit
CW	微量元素浓度	—	mg·L ⁻¹
IR	日均饮水摄入量	儿童1.14、成人1.70	L·d ⁻¹
EF	暴露频率	350	d·a ⁻¹
ED	暴露持续时间	儿童9、成人30	a
BW	人群体重	儿童24、成人57	kg
AT	平均接触时间	非致癌物30×365、致癌物70×365	d
CF	体积转换因子	0.001	L·cm ⁻³
SA	皮肤接触面积	儿童9300、成人16000	cm ²
PC	皮肤渗透系数	0.002(Cr)、0.0001(Mn)、0.0006(Zn)、0.0005(Cu)、0.001(Cd)、0.000004(Pb)	cm·h ⁻¹
ET	暴露时间	0.12	h·d ⁻¹

RfD 为微量元素直接摄入的参考剂量 [mg·(kg·d)⁻¹]; SF 为直接摄入暴露的致癌系数 [mg·(kg·d)⁻¹],具体参数详见表 3.

1.5 数据分析与处理

运用 SPSS27 对数据进行平均值、标准差、Pearson 相关性分析和聚类分析,采用 Origin2021 进行图形绘制.

表 3 微量元素 RfD 和 SF 参考剂量和致癌系数^[6, 14, 24]

Table 3 2 Reference doses and carcinogenic factors of trace elements RfD and SF

微量元素 Microelement	途径 Pathway	Cr	Cd	Pb	Cu	Mn	Zn
RfD	饮水摄入途径	0.003	0.005	0.0014	0.04	0.046	0.3
	皮肤接触途径	0.003	0.005	0.0014	0.012	0.0018	0.01
SF	饮水摄入途径	0.5	6.1	—	—	—	—
	皮肤接触途径	0.5	0.38	—	—	—	—

“—”表示无参照标准. “—” indicates no reference standard.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 微量元素浓度特征

由图 2、表 4 可知, 漂浮光伏沉陷塘中微量元素浓度从大到小排序为: Zn>Mn>Ni>Cu>Cr>Cd>Pb, 其中 Cd 浓度为 19.35 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 是《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) III 类水环境质量标准 1.97 倍, 其他微量元素浓度均小于 III 类水环境质量标准, 立柱光伏沉陷塘中微量元素浓度从大到小排序为: Zn>Mn>Ni>Cr>Cu> Cd>Pb, 其中 Cd 浓度为 13.94 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 是 III 类水环境质量标准 2.36 倍, 其他微量元素浓度均小于 III 类水环境质量标准, 无光伏沉陷塘中微量元素浓度从大到小排序为: Mn>Zn>Ni>Cu>Cd>Cr>Pb, 其中 Cd 浓度为 6.42 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 是 III 类水环境质量标准 1.95 倍, 其他微量元素浓度均小于 III 类水环境质量标准, 非沉陷塘中微量元素浓度从大到小排序为: Mn>Zn>Cu>Ni> Cd>Cr>Pb, 其中 Cd 浓度为 6.71 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 是 III 类水环境质量标准 1.87 倍, 其他微量元素浓度均小于 III 类水环境质量标准, 淮南矿区沉陷塘 Cd 浓度是皖北某矿区沉陷水体的 4.44—5.60 倍. 整体上看, Cd 富集程度从大到小排序为: 立柱光伏沉陷塘>漂浮光伏沉陷塘>无光伏沉陷塘>非沉陷塘.

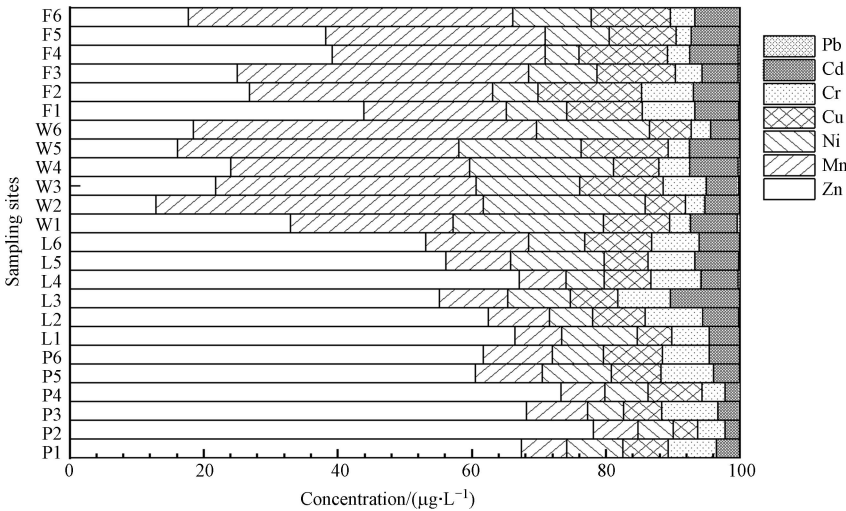


图 2 淮南矿区沉陷塘和中央公园非沉陷塘微量元素浓度占比

Fig.2 Proportion of trace element concentration in submerged pond and non-submerged pond in Central Park in Huainan mining area

与长江河源区作为未受人类活动影响的背景区水丰度^[25]相比, 淮南矿区沉陷塘和中央公园非沉陷塘微量元素 Cd、Cu、Zn 呈现富集现象, 其中漂浮光伏沉陷塘、立柱光伏沉陷塘、无光伏沉陷塘和中央公园非沉陷塘 Zn 浓度分别为 222.62 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、116.87 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、34.85 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、45.23 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 是长江河源区背景值的 5—37 倍, 是皖北某矿区沉陷水体的 0.69—4.40 倍, Zn 的浓度从大到小的排序为: 漂浮光伏沉陷塘>立柱光伏沉陷塘>非沉陷塘>无光伏沉陷塘.

前人研究可知, Cu、Zn 可能与地区地质条件、矿产资源开采等人为因素有关^[26], Cu、Zn 浓度较高并不能说明微量元素 Cu、Zn 对水体造成了污染, 因为 Cu、Zn 是正常生理代谢所必须的微量元素, 只有当微量元素超过生物所必须的量时, 才能对生物体产生毒性效应^[27], 所以 Cu、Zn 浓度是否对生态环

境造成损害, 还需进一步分析. 此外, 经实地调查发现, 淮南矿区沉陷塘出现 Cd 富集现象是由于多年煤炭开采、煤矸石经雨水淋溶进入沉陷水体导致的.

表 4 淮南矿区沉陷塘和中央公园非沉陷塘微量元素浓度统计(μg·L⁻¹)

Table 4 Statistics of trace element concentrations in submerged ponds and non-submerged ponds in Central Park in Huainan mining area

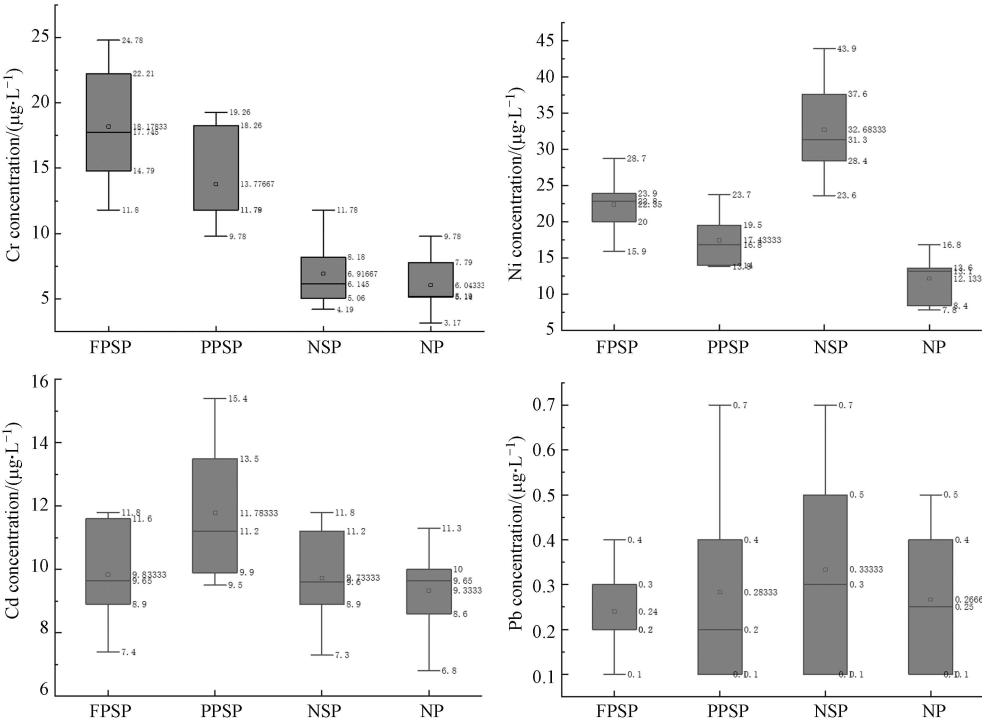
	Cr	Ni	Cd	Pb	Cu	Mn	Zn
淮南漂浮光伏沉陷塘	19.35	22.35	9.83	0.24	20.63	25.42	222.62
淮南立柱光伏沉陷塘	13.94	17.10	11.78	0.28	13.75	17.93	116.87
淮南无光伏沉陷塘	6.42	32.68	9.73	0.33	14.82	66.65	34.85
淮南中央公园非沉陷塘	6.71	12.13	9.33	0.27	17.12	49.62	45.23
长江河源背景值	12.60	/	0.046	3.18	3.01	50.19	6.46
地表水环境质量标准 GB3838-2002	≤50.00	/	≤5.00	≤10.00	≤1000.00	≤100.00	≤1000.00
USEPA(2009)标准	—	≤70.00	—	—	—	—	—
皖北某矿沉陷区地表水 ^[28]	72.80	60.80	2.10	/	8.60	/	50.60
蒙陕某矿沉陷区地表水 ^[29]	1.11	7.40	/	/	/	/	/
山东某矿沉陷区地表水 ^[30]	4.90	/	/	129.00	190.00	/	/
Nowa Ruda沉陷区地表水 ^[31]	15.00	56.00	/	/	/	87.00	/

“—”表示未取参照标准; “/”表示无对应标准. “—”indicates that no reference standard has been taken; “/” indicates that there is no corresponding standard.

2.2 微量元素浓度分布特征

由图 3 可知, 淮南矿区不同沉陷塘 Cr、Ni、Mn、Zn 等 4 种微量元素分布特征较明显, 其中 Cr、Zn 的浓度分布特征表现为: 漂浮光伏沉陷塘>立柱光伏沉陷塘>非沉陷塘、无光伏沉陷塘, Ni、Mn 浓度分布存在差异, Ni 表现为: 无光伏沉陷塘>漂浮光伏沉陷塘、立柱光伏沉陷塘>非沉陷塘, Mn 表现为: 无光伏沉陷塘、非沉陷塘>漂浮沉陷塘沉陷塘>立柱光伏沉陷塘.

整体上看, 沉陷塘 Ni 浓度高于非沉陷塘, 其他元素无明显差别; 光伏沉陷塘 Cr、Zn 浓度高于无光伏沉陷塘, 但 Mn 浓度却低于无光伏沉陷塘, 其他元素无明显差别; 漂浮型光伏沉陷塘 Cr、Mn、Zn 浓度明显高于立柱型光伏沉陷塘, 但 Cd 浓度却低于立柱型光伏沉陷塘, 其他元素无明显差别.



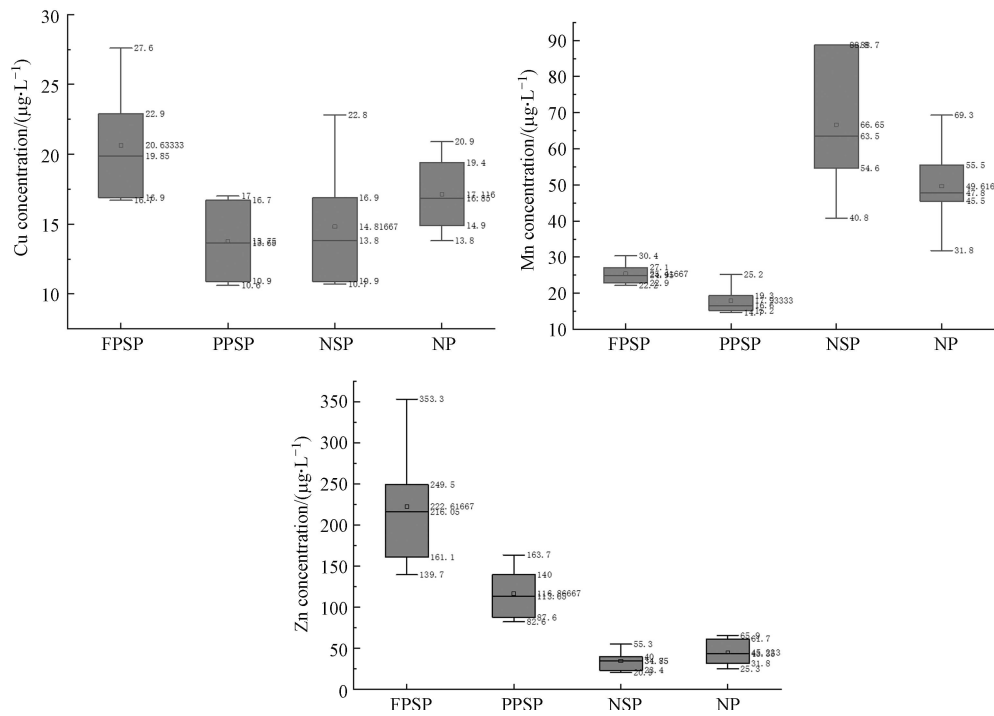


图 3 研究区不同水体微量元素浓度分布

注: FPSP 为漂浮光伏沉陷塘(Floating photovoltaic subsidence pond), PPSP 为立柱光伏沉陷塘(Pillaring photovoltaic subsidence pond), NSP 为无光伏沉陷塘(Non-photovoltaic subsidence pond), NP 为非沉陷塘(Non- subsidence pond)。

Fig.3 Box diagram of trace element concentration in different water bodies in the study area

综上,有、无光伏面板覆盖水域的微量元素浓度没有明显差别,表明淮南矿区沉陷塘水体本身微量元素浓度很低,且没有受到光伏面板 FPV 材料的污染,这与宋鑫^[9]等的研究结果一致,宋鑫等通过监测沉陷塘高光伏覆盖率、低光伏覆盖率和无光伏覆盖率的沉陷塘重金属浓度,没有发现高覆盖率的光伏板浸泡导致水域重金属浓度升高的迹象.此外,不同类型光伏电站的建设可能会导致沉陷塘中微量元素 Cr、Mn、Zn 呈现明显浓度差异,其大小顺序为:漂浮型光伏电站>立柱型光伏电站设置立柱光伏电站的沉陷塘水深较浅,适合最高洪水位时应小于 5 m 的水域,漂浮型光伏电站适合最高洪水位大于 5 m 且最低枯水位大于 1 m 的水域,因此,立柱型光伏沉陷塘 Cr、Mn、Zn 浓度较低可能是由于立柱型光伏面板一般用于水深较浅的水体中,较浅水体悬浮物沉降速率较高,内源性污染较低^[16].

2.3 微量元素污染评价

由图 4 可知,漂浮光伏沉陷塘微量元素单因子污染指数 P_i 在 0.01—2.36 之间,平均值约为 0.48,立柱光伏沉陷塘微量元素 P_i 在 0.01—3.08 之间,平均值约为 0.50,无光伏沉陷塘微量元素 P_i 在 0.01—2.36 之间,平均值约为 0.47,非沉陷塘 P_i 在 0.01—2.00 之间,平均值约为 0.43,根据单因子污染指数分类标准,沉陷塘与非沉陷塘的污染因子均为 Cd,漂浮光伏沉陷塘和立柱光伏沉陷塘无明显差别,整体上看,光伏沉陷塘 P_{Cr} 、 P_{Zn} >非光伏沉陷塘 P_{Cr} 、 P_{Zn} ,光伏沉陷塘 P_{Mn} <非光伏沉陷塘 P_{Mn} .

由表 5 可知,各微量元素内梅罗污染指数大小排序为 Cd>Cr>Zn>Mn>Pb>Cu,根据内梅罗污染水平分类标准,立柱光伏沉陷塘的重金属 Cd 的污染水平处于中度污染,漂浮光伏沉陷塘、无光伏沉陷塘和非沉陷塘的 Cd 处于轻度污染水平,其他元素均处于清洁水平.整体上看,光伏沉陷塘 N_{Cr} 、 N_{Zn} >非光伏沉陷塘 N_{Cr} 、 N_{Zn} ,光伏沉陷塘 N_{Mn} <非光伏沉陷塘 N_{Mn} ,与单因子污染指数发评价结果一致,从污染程度上看,本研究中的无光伏沉陷经过多年综合治理,污染程度与淮南中央公园非沉陷塘相差无几.

综上,淮南矿区沉陷塘的污染因子为 Cd,微量元素污染指数平均值从大到小的顺序为:立柱型光伏沉陷塘>无光伏沉陷塘>漂浮型光伏沉陷塘>非沉陷塘.

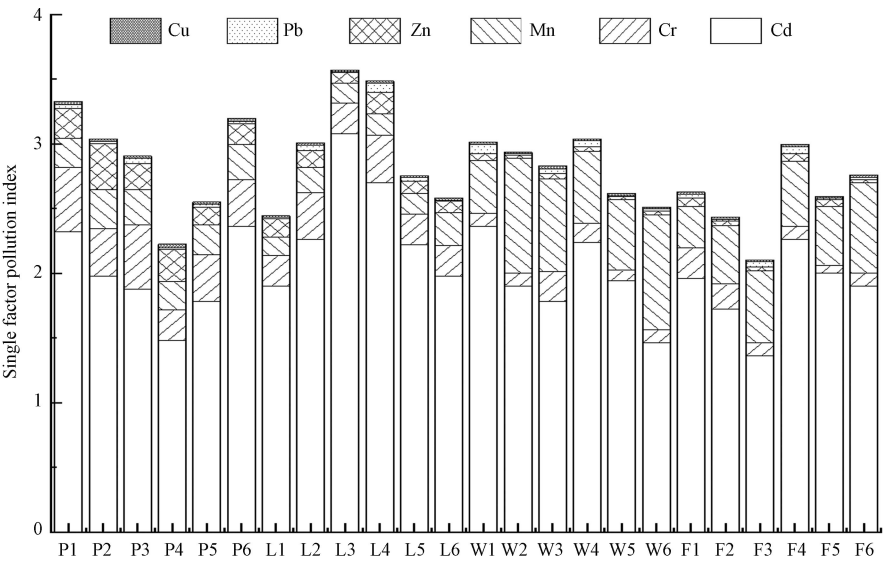


图 4 沉陷塘与非沉陷塘微量元素单因子污染指数(P_i)堆积图

Fig.4 Accumulation of microelement single-factor pollution index in subsidence pond

表 5 沉陷塘与非沉陷塘微量元素内梅罗指数(N_i)

Table 5 Mero index of trace elements in subsidence ponds

	Cr	Cd	Pb	Cu	Mn	Zn
漂浮光伏	0.44	2.17	0.03	0.02	0.28	0.30
立柱光伏	0.32	2.74	0.05	0.02	0.22	0.14
无光伏	0.19	2.16	0.05	0.02	0.79	0.05
非沉陷塘	0.19	2.07	0.04	0.02	0.60	0.06

2.4 微量元素相关性分析和聚类分析

为分析淮南矿区沉陷塘和中央公园非沉陷塘中的 7 种微量元素的相关关系, 计算了 pearson 相关系数, 结果如表 6 所示, 漂浮光伏沉陷塘和立柱光伏沉陷塘水体微量元素 Cr-Pb 呈显著正相关, 相关系数分别为 0.944、0.860, 表明随着 Cr 和 Pb 的污染来源相同^[32]. 无光伏沉陷塘中 Mn-Cd 显著负相关, 相关系数为-0.829, Zn-Pb 极显著正相关, 相关系数为 0.961. 淮南矿区沉陷塘微量元素之间存在显著或极显著的相关性, 表明这些元素之间可能存在复合污染或者同源关系^[33].

表 6 不同类型水体中微量元素的相关性分析

Table 6 Correlation analysis of trace elements in different types of water

区域	元素	Cr	Ni	Cd	Pb	Cu	Mn	Zn
漂浮光伏沉陷塘	Cr	1						
	Ni	0.019	1					
	Cd	0.599	0.255	1				
	Pb	0.944*	-0.257	0.394	1			
	Cu	-0.497	0.189	-0.102	-0.666	1		
	Mn	0.201	-0.366	0.311	0.568	-0.559	1	
	Zn	-0.141	0.221	-0.123	-0.04	-0.037	0.511	1
立柱光伏沉陷塘	Cr	1						
	Ni	-0.506	1					
	Cd	0.211	-0.498	1				
	Pb	0.860*	-0.275	0.276	1			
	Cu	0.741	-0.692	-0.103	0.582	1		

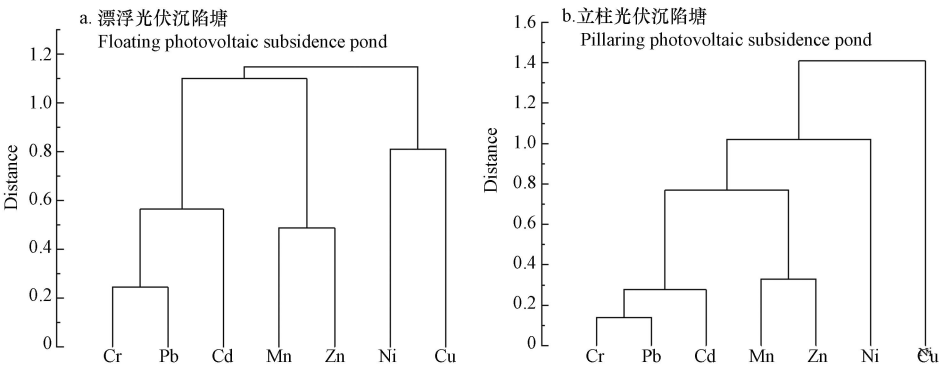
续表 6

区域	元素	Cr	Ni	Cd	Pb	Cu	Mn	Zn
立柱光伏沉陷塘	Mn	0.032	-0.494	-0.397	-0.114	0.67	1	
	Zn	0.733	0.011	-0.09	0.713	0.422	-0.284	1
无光伏沉陷塘	Cr	1						
	Ni	-0.174	1					
	Cd	-0.1	0.363	1				
	Pb	0.302	0.185	0.68	1			
	Cu	0.634	-0.433	0.034	0.242	1		
	Mn	0.062	0.171	-0.829*	-0.684	-0.338	1	
	Zn	0.306	0.196	0.512	0.961**	0.304	-0.554	1
非沉陷塘	Cr	1						
	Ni	-0.174	1					
	Cd	-0.06	-0.211	1				
	Pb	-0.08	-0.266	0.11	1			
	Cu	0.359	-0.707	0.445	0.355	1		
	Mn	-0.622	0.37	-0.201	0.032	-0.057	1	
	Zn	0.241	-0.314	0.664	0.336	0.183	-0.769	1

* 在 0.05 级别(双尾), 相关性显著. ** 在 0.01 级别(双尾), 相关性显著.

为进一步探求淮南矿区沉陷塘中 Cr、Ni、Cd、Pb、Cu、Mn、Zn 的来源, 分别对每个沉陷塘的微量元素进行聚类分析. 由图 5 可以看出, 可将漂浮光伏沉陷中的 Cr、Ni、Cd、Pb、Cu、Mn、Zn 归为 3 类, 第一类元素为 Cr、Cd、Pb, 第二类元素为 Mn、Zn, 第三类元素为 Ni、Cu, 有研究表明, Pb、Cd 可能来源于冶炼化工行业(如铅蓄电池)生产过程中产生废水和固体废物^[34], 也可能是燃煤产生的, Cr 主要源于冶炼化工、矿业开采等人为活动^[35], Cu、Zn 来源于农药、有机肥、化肥、畜禽粪便, Ni、Cu、Zn 可能来源于工业源和交通源^[36], Mn 来源于道路降尘、采矿扬尘和建筑扬尘, 此外, 地表水中 Mn 不易被氧化, 因此可能来源于内源性污染^[37], Zn 来源于汽车排放, Pb 也可能来自交通和工业垃圾堆肥等^[38], Cd 可能来自燃煤、施肥过程. 综上, 漂浮光伏沉陷塘的污染源为冶金化工、汽车排放.

立柱光伏沉陷塘中微量元素可分为 4 类, 第一类元素是 Cr、Pb、Zn, 第二类元素是 Cu、Mn, 第三类元素是 Cd, 第四类元素是 Ni, 根据本研究相关性和聚类分析, 可推测立柱光伏沉陷塘的污染源为矿业开采、道路交通、燃煤和农业肥料; 无光伏沉陷塘中微量元素可分为 3 类, 第一类元素是 Cr、Cu, 第二类元素是 Ni、Cd、Pb、Zn, 第三类元素是 Mn, 可推测无光伏沉陷塘的污染源为工业生产、交通运输和内源污染; 非沉陷塘中的微量元素可归为 3 类, 第一类元素为 Cr、Cu, 第二类元素为 Cd、Pb、Zn, 第三类元素为 Ni、Mn, 可推测非沉陷塘的污染源为工业生产、农业肥料和道路交通.



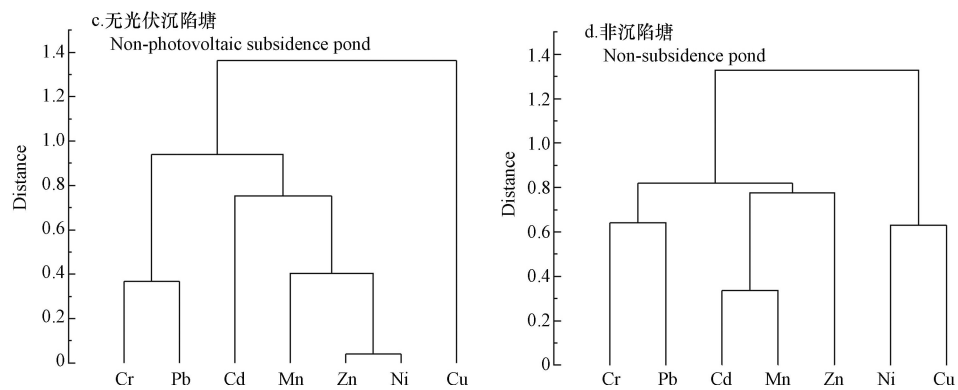


图 5 淮南矿区沉陷塘和中央公园非沉陷塘微量元素聚类分析

Fig.5 Cluster analysis of trace elements in submerged ponds and non-submerged ponds in Central Park in Huainan mining area

2.5 微量元素健康风险评价

由图 6 所示,淮南矿区沉陷塘非致癌物质 Cr、Cd、Mn、Cu、Zn、Pb 对成人和儿童的非致癌风险变化趋势一致,饮水摄入途径下为:Cr>Cd>Mn>Cu>Zn>Pb,对成人的平均风险值在 1.42×10^{-3} — 8.21×10^{-2} 之间,对儿童的平均风险值在 6.80×10^{-4} — 3.92×10^{-2} 之间;皮肤接触途径下,非致癌物质对成人和儿童的平均风险值变化趋势为 Mn>Zn>Cr>Cd>Cu>Pb,对成人的风险值在 4.30×10^{-6} — 1.03×10^{-3} 之间,对儿童的风险值在 1.78×10^{-6} — 4.25×10^{-4} 之间.由此,饮水摄入途径和皮肤接触途径下微量元素对成人和儿童的非致癌风险值均处于可接受水平,整体表现为成人>儿童,且饮水摄入途径>皮肤接触途径.两种途径的非致癌总风险值如表 7 所示,漂浮光伏沉陷塘、立柱光伏沉陷塘、无光伏沉陷塘和非沉陷塘微量元素对成人和儿童的非致癌总风险 HI 小于 1,均处于人体可接受水平.整体上看,微量元素对成人和儿童的非致癌总风险值表现为:漂浮光伏沉陷塘>立柱光伏沉陷塘>无光伏沉陷塘>非沉陷塘.

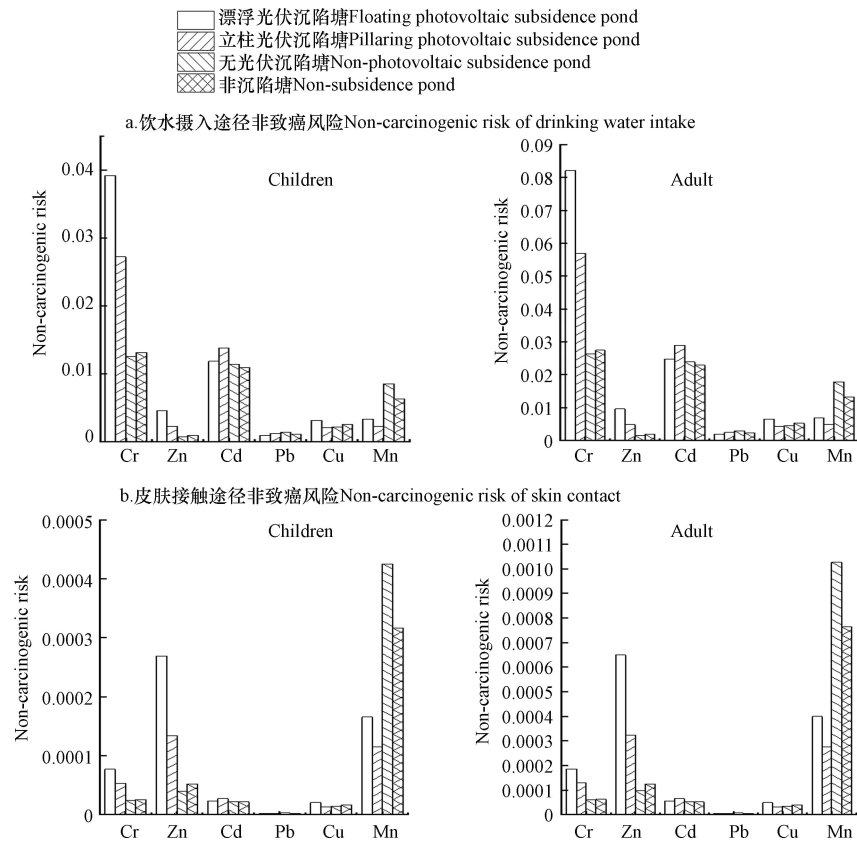


图 6 微量元素经饮水摄入途径和皮肤接触途径对儿童和成人的非致癌风险

Fig.6 Non-carcinogenic risk of trace elements to children and adults through drinking water intake and skin contact

表 7 微量元素饮水摄入途径和皮肤接触途径非致癌总风险值

Table 7 Total non-carcinogenic risk values of trace element drinking water intake route and skin contact route

		HI
儿童	漂浮光伏沉陷塘	6.35×10^{-2}
	立柱光伏沉陷塘	4.91×10^{-2}
	无光伏沉陷塘	3.72×10^{-2}
	非沉陷塘	3.53×10^{-2}
成人	漂浮光伏沉陷塘	1.33×10^{-1}
	立柱光伏沉陷塘	1.03×10^{-1}
	无光伏沉陷塘	7.80×10^{-2}
	非沉陷塘	7.40×10^{-2}

由图 7 可知,致癌物 Cr、Cd 的致癌风险值 CR 通过饮水摄入途径和皮肤接触途径暴露的健康风险变化规律与非致癌健康风险一致,整体表现为:成人>儿童,这与程晓静^[15]、师环环^[24]等的研究结果一致,说明虽然儿童对重金属的敏感性高于成人,但其饮水量、暴露时间和体重相对成人较少,因此非致癌风险值较低^[22,39],此外,致癌风险值均表现为 Cd>Cr。根据 USEPA 公布的分类标准,淮南矿区沉陷塘和对照区非沉陷塘中致癌物质 Cr、Cd 对儿童和成人的致癌风险 CR 低于 1×10^{-6} ,认为无致癌风险或致癌风险较低。

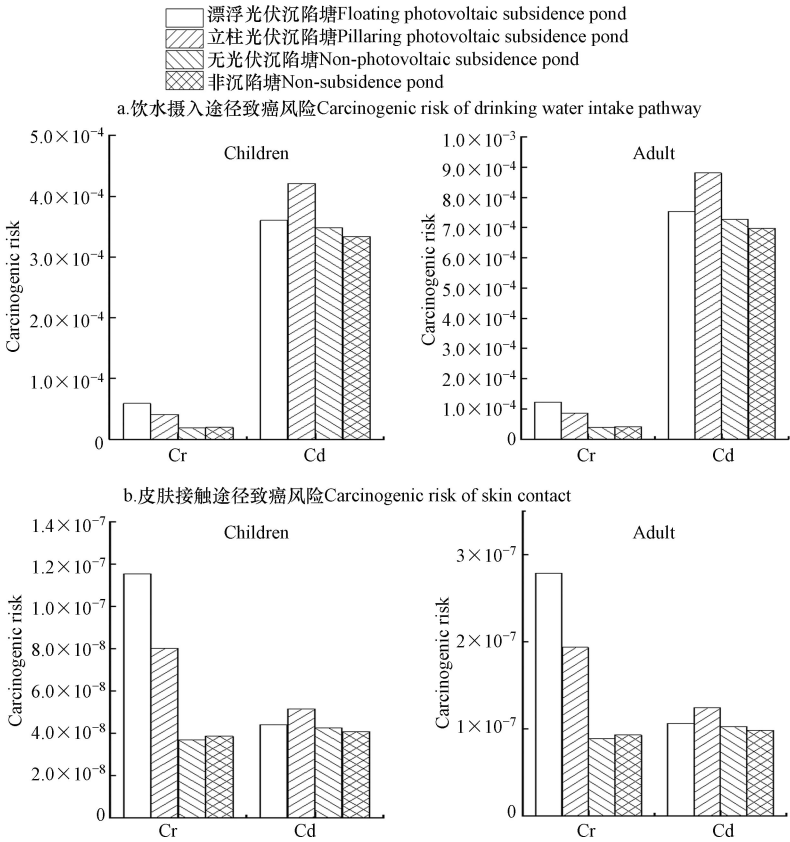


图 7 微量元素经饮水摄入途径和皮肤接触途径对儿童和成人的致癌风险

Fig.7 Carcinogenic risk of trace elements to children and adults through drinking water intake and skin contact

2.6 不确定性分析

完整的健康风险评估应包括饮水摄入、口鼻吸入和皮肤接触的途径吸入空气、土壤和水中的污染物造成的健康风险^[40]。本研究仅通过饮水摄入途径对研究区沉陷塘和非沉陷塘的 Cr、Cd 进行健康风险评价,暴露途径和暴露浓度可能因所处环境的改变随时间发生变化,且采样区域和统计模型本身具有局限性,健康风险模型的参数选择也存在不确定性,并不能准确反映研究区健康风险现状^[41]。此外,

考虑到该矿区居民的流动性, 暴露在沉陷塘中的人群在时间、生活方式、体重、体质等方面存在差异^[13], 并且考虑到本研究采集的样品数较少, 目前的评估结果应被视为初步评估。

3 结论(Conclusion)

- 1) 淮南矿区沉陷塘中 Cd 超出《中国地表水环境质量标准》(GB3838-2002) 中Ⅲ类水环境质量标准, Cd、Cu、Zn 明显大于长江河源区背景值, 呈现一定富集现象, 其中 Zn 富集程度最高。
- 2) 浓度分布特征表明沉陷塘微量元素浓度较低, 没有受到光伏面板材料的影响或光伏面板影响较小, 且不同类型光伏电站的建设可能会导致沉陷塘中微量元素 Cr、Mn、Zn 呈现明显浓度差异, 一般表现为: 漂浮型光伏电站>立柱型光伏电站。
- 3) 立柱光伏沉陷塘污染水平较高, 污染因子为 Cd, 污染水平整体表现为: 立柱光伏沉陷塘>漂浮光伏沉陷塘, 光伏沉陷塘>无光伏沉陷塘, 沉陷塘>非沉陷塘。
- 4) 相关性和聚类分析显示, 漂浮光伏沉陷塘的污染源为冶金化工、汽车排放, 立柱光伏沉陷塘的污染源为矿业开采、道路交通、燃煤和农业肥料, 无光伏沉陷塘的污染源为工业生产、交通运输和污染源污染, 非沉陷塘的污染源为工业生产、农业肥料和道路交通。
- 5) 沉陷塘中非致癌物质通过饮水摄入途径和皮肤接触途径对成人和儿童造成的非致癌总风险 HI 小于 1, 处于人体可接受水平, 致癌物质 Cr、Cd 对儿童和成人的致癌风险 CR 低于 1×10^{-6} , 认为无致癌风险或致癌风险较低。

参考文献 (References)

[1] DAVE D, SARMA S, PARMAR P, et al. Microbes as a boon for the bane of heavy metals[J]. Environmental Sustainability, 2020, 3((3): 233-255.

[2] 曾晨, 郭少娟, 杨立新. 汞、镉、铅、砷单一和混合暴露的毒性效应及机理研究进展 [J]. 环境工程技术学报, 2018, 8(2): 221-230.

ZENG C, GUO S J, YANG L X. Toxic effects and mechanisms of exposure to single and mixture of mercury, cadmium, lead and arsenic[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2018, 8(2): 221-230 (in Chinese).

[3] 陈用泷, 李思阳, 吴泽璇, 等. 湘江源头某河段水体重金属污染特征与健康风险评估 [J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(2): 590-596.

CHEN Y S, LI S Y, WU Z X, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals of a certain river in headwater stream of Xiangjiang River[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(2): 590-596 (in Chinese).

[4] 许可. 临涣采煤沉陷区土壤重金属时空分布及迁移转化特征研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2021.

XU K. Study on the Temporal and Spatial Distribution, Migration and Transformation Characteristics of Soil Heavy Metals in Linhuan Coal Mining Subsidence Area[D]. Hefei: Anhui University, 2021.

[5] 刘旭. 淮南潘集采煤沉陷区重金属分布赋存及生物累积特征研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2019.

LIU X. Chemical forms and bioaccumulation characteristics of heavy metals in subsidence area of Panji coal mining in Huainan, Anhui Province, China[D]. Hefei: Anhui University, 2019 (in Chinese).

[6] 任永乐, 董少春, 姚素平. 淮南塌陷塘重金属空间分布特征研究 [J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(1): 125-134.

REN Y L, DONG S C, YAO S P. Spatial distribution characteristics of heavy metals in Huainan subsidence pond[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(1): 125-134 (in Chinese).

[7] 陈同, 高良敏, 苏桂荣. 淮南潘集矿区底泥中重金属空间分布特征研究 [J]. 绿色科技, 2014(3): 62-63.

CHEN T, GAO L M, SU G R. Study on spatial distribution characteristics of heavy metals in sediment of Panji mining area in Huainan[J]. Journal of Green Science and Technology, 2014(3): 62-63 (in Chinese).

[8] LEE I, JOO J C, LEE C S, et al. Evaluation of the water quality changes in agricultural reservoir covered with floating photovoltaic solar-tracking systems[J]. Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 2017, 39(5): 255-264.

[9] 宋鑫, 贝耀平, 袁丙青, 等. 水上光伏电站对淮南采煤沉陷积水区水生态环境的影响 [J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 204-211.

SONG X, BEI Y P, YUAN B Q, et al. Influence of floating photovoltaic power plants on water ecological environment in coal mining subsidence water area of Huainan City[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 204-211 (in Chinese).

[10] YAMAMICHI M, KAZAMA T, TOKITA K, et al. A shady phytoplankton paradox: When phytoplankton increases under low light[J]. Proceedings. Biological Sciences, 2018, 285(1882): 20181067.

- [11] 季文光,李志伟,许皞.基于时空变化及分布特征的海域重金属污染评价[J].山东农业科学,2022,54(8):104-115.
JI W G, LI Z W, XU H. Pollution assessment of heavy metals in sea area based on temporal and spatial variation and distribution characteristics[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54(8): 104-115 (in Chinese).
- [12] 马迎群,时瑶,秦延文,等.浑河上游(清原段)水环境中重金属时空分布及污染评价[J].环境科学,2014,35(1):108-116.
MA Y Q, SHI Y, QIN Y W, et al. Temporal-spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in the upper reaches of Hunhe River(qingyuan section), northeast China[J]. Environmental Science, 2014, 35(1): 108-116 (in Chinese).
- [13] 余天智,刘运涛,曹地,等.沙颍河流域污染控制因素及水体重金属迁移规律研究[J].环境工程,2023,41(2):30-36,52.
YU T Z, LIU Y T, CAO D, et al. Study on pollution control factors and their influencing laws on heavy metal migration in the shaying river basin[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(2): 30-36,52 (in Chinese).
- [14] WANG X M, ZHAO Y Y, CHU Z X, et al. Influence of solar photovoltaic system on the concentration and environmental risks of heavy metals in subsidence pond water from coal mining area: A case study from Huainan subsidence pond[J]. Water, 2022, 14(14): 2257.
- [15] 程晓静,王兴明,储昭霞,等.淮南典型矿区不同塌陷年龄沉陷塘水中微量元素浓度特征及健康风险[J].水土保持通报,2022,42(2):74-81,88.
CHENG X J, WANG X M, CHU Z X, et al. Characteristics of trace element concentration and health risk in subsidence ponds of different subsidence ages in Huainan mining area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 74-81,88 (in Chinese).
- [16] 程晓静.水面光伏对采煤沉陷塘水环境质量和浮游植物群落结构的影响研究[D].淮南:安徽理工大学,2022.
CHENG X J. Effects of photovoltaic power stations on water environmental quality and phytoplankton community structure in coal mining subsidence ponds[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2022 (in Chinese).
- [17] 安士凯,赵琦,姜春露,等.淮南采煤沉陷区积水重金属健康风险评估[J].中国矿业,2020,29(增刊2):88-93.
AN S K, ZHAO Q, JIANG C L, et al. Health risk assessment of heavy metals in waterlogging areas in Huainan coal mining area[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(Sup 2): 88-93 (in Chinese).
- [18] 刘响响,程桦,郑刘根,等.淮南采煤沉陷水体中氮磷的分布特征及环境意义[J].中国科学技术大学学报,2014,44(11):926-932.
LIU X X, CHENG H, ZHENG L G, et al. Distribution characteristics and environmental significance of nitrogen and phosphorus in the Huainan coal mining subsidence area[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014, 44(11): 926-932 (in Chinese).
- [19] 杨林,李慧,耿艳,等.淮南矿区煤中氟含量分布规律及其赋存形态研究[J].煤质技术,2019,34(2):1-4,15.
YANG L, LI H, GENG Y, et al. Study on distribution rule of fluorine and its mode of occurrence in the coal samples collected from Huainan coal mining area[J]. Coal Quality Technology, 2019, 34(2): 1-4,15 (in Chinese).
- [20] 童格军,庞建勇,姜子亮,等.“两淮”高潜水位采煤沉陷区生态修复治理探究[J].建井技术,2022,43(5):43-48.
TONG G J, PANG J Y, JIANG Z L, et al. Exploration on ecological restoration and control of coal mining subsidence area with high potential water level in “Huainan and Huaibei”[J]. Mine Construction Technology, 2022, 43(5): 43-48 (in Chinese).
- [21] 张维翔,姜春露,郑刘根,等.淮南采煤沉陷区积水中氮、磷分布特征及变化趋势[J].环境工程,2019,37(9):62-67,73.
ZHANG W X, JIANG C L, ZHENG L G, et al. Distribution characteristics and trends of nitrogen and phosphorus in subsidence water of Huainan coal mining area[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(9): 62-67,73 (in Chinese).
- [22] 宁文婧,谢先明,严丽萍.清远市清城区土壤中重金属的空间分布、来源解析和健康评价:基于PCA和PMF模型的对比[J].地学前缘,2023,30(4):470-484.
NING W J, XIE X M, YAN L P. Spatial distribution, sources and health risks of heavy metals in soil in Qingcheng District, Qingyuan City: Comparison of PCA and PMF model results[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(4): 470-484 (in Chinese).
- [23] DUAN X, ZHAO X, WANG B, ET AL. Highlights of the chinese exposure factors handbook[M]. Amsterdam: Elsevier, 2015.
- [24] 师环环,潘羽杰,曾敏,等.雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评估[J].环境科学,2021,42(9):4246-4256.
SHI H H, PAN Y J, ZENG M, et al. Source analysis and health risk assessment of heavy metals in groundwater of Leizhou peninsula[J]. Environmental Science, 2021, 42(9): 4246-4256 (in Chinese).
- [25] 张立成,董文江,王李平.长江水系河水的地球化学特征[J].地理学报,1992,47(3):220-232.
ZHANG L C, DONG W J, WANG L P. The geochemical characteristics of the water in the Changjiang River system[J]. Acta Geographica Sinica, 1992, 47(3): 220-232 (in Chinese).
- [26] 蒋超,燕文明,何翔宇,等.变化水文条件下高原河流微量元素的分布及溯源[J].水电能源科学,2023,41(1):55-58,5.
JIANG C, YAN W M, HE X Y, et al. Distribution characteristics and source analysis of trace elements in plateau rivers under variable hydrological conditions[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(1): 55-58,5 (in Chinese).
- [27] 李玉斌,冯流,刘征涛,等.中国主要淡水湖泊沉积物中重金属生态风险研究[J].环境科学与技术,2012,35(2):200-205.
LI Y B, FENG L, LIU Z T, et al. Ecological risk assessment of sediment heavy metals in main lakes of China[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(2): 200-205 (in Chinese).
- [28] 刘朝发,冯银炉,方刘兵,等.皖北某矿沉陷区地表水与浅层地下水重金属含量特征及影响因素[J].环境科技,2018,31(4):

44-49.

LIU C F, FENG Y L, FANG L B, et al. Heavy metals characteristics and its influencing factors of surface water and shallow groundwater in mining subsidence area in the northern of Anhui Province[J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, 31(4): 44-49 (in Chinese).

- [29] 蔡月, 李小平, 赵亚楠, 等. 蒙陕大型煤矿开采区水质化学特征与健康风险 [J]. *生态学杂志*, 2018, 37(2): 482-491.

CAI Y, LI X P, ZHAO Y N, et al. Chemical characteristics and health risk assessment of groundwater from large coalmining area in Shaanxi and Inner Mongolia of China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(2): 482-491 (in Chinese).

- [30] 王文军, 张璟, 张春芝, 等. 济宁市采煤塌陷区水体重金属含量及煤、煤矸石淋溶试验研究 [J]. *中国卫生检验杂志*, 2013, 23(5): 1142-1144.

WANG W J, ZHANG J, ZHANG C Z, et al. Study on heavy metals content in coal-mining subsided area and leaching experiment of coal, coal gangue in Jining[J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2013, 23(5): 1142-1144 (in Chinese).

- [31] CHUDY K, MARSZALEK H, KIERCZAK J. Impact of hard-coal waste dump on water quality—a case study of Ludwikowice Kłodzkie (Nowa Ruda Coalfield, SW Poland)[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 146: 127-135.

- [32] SANTANA C S, MONTALVÁN OLIVARES D M, SILVA V H C, et al. Assessment of water resources pollution associated with mining activity in a semi-arid region[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 273: 111148.

- [33] 黄冠星, 孙继朝, 张英, 等. 珠江三角洲污灌区地下水重金属含量及其相互关系 [J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 2011, 41(1): 228-234.

HUANG G X, SUN J C, ZHANG Y, et al. Content and relationship of heavy metals in groundwater of sewage irrigation area in Pearl River Delta[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011, 41(1): 228-234 (in Chinese).

- [34] 任静华, 范健, 何培良, 等. 典型工矿企业周边农田土壤重金属污染评价及来源解析 [J]. *环境污染与防治*, 2023, 45(6): 855-861,869.

REN J H, FAN J, HE P L, et al. Pollution characteristics and source apportionment of heavy metals in soils around a typical industrial enterprises[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2023, 45(6): 855-861,869 (in Chinese)

- [35] HAO Y C, GUO Z G, YANG Z S, et al. Seasonal variations and sources of various elements in the atmospheric aerosols in Qingdao, China[J]. *Atmospheric Research*, 2007, 85(1): 27-37.

- [36] 张松, 郑刘根, 陈永春, 等. 淮南矿区道路环境大气颗粒物重金属污染特征及来源解析 [J]. *环境污染与防治*, 2020, 42(7): 912-916,928.

ZHANG S, ZHENG L G, CHEN Y C, et al. Characteristics and source apportionment of heavy metals in atmospheric particles at the roadside of Huainan mining area[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2020, 42(7): 912-916,928 (in Chinese)

- [37] 黄文丹. 我国饮用水水源地锰超标原因及防控对策研究进展 [J]. *能源与环境*, 2018(6): 57-58.

HUANG W D. Research progress on the causes of manganese exceeding the standard in drinking water sources in China and its prevention and control countermeasures[J]. *Energy and Environment*, 2018(6): 57-58 (in Chinese).

- [38] 王丽霞, 杜子文, 封莉, 等. 连续施用城市污泥后林地土壤中重金属的含量变化及生态风险 [J]. *环境工程学报*, 2021, 15(3): 1092-1102.

WANG L X, DU Z W, FENG L, et al. Eco-environmental risk assessment of urban sludge application in forest land[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(3): 1092-1102 (in Chinese).

- [39] JIANG H H, CAI L M, HU G C, et al. An integrated exploration on health risk assessment quantification of potentially hazardous elements in soils from the perspective of sources[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 208: 111489.

- [40] 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价 [J]. *环境科学*, 2021, 42(4): 1714-1723.

HUANG H W, XIAO H, WANG D Q, 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 (in Chinese).

- [41] 郑建成, 王育兵. 我国饮用水健康风险评价的研究进展 [J]. *总装备部医学学报*, 2015, 17(2): 127-130.

ZHENG J C, WANG Y B. Research progress on health risk assessment of drinking water in China[J]. *Medical Journal of General Equipment Headquarters*, 2015, 17(2): 127-130 (in Chinese).