

典型矿冶城市湖泊重金属污染研究 — 以黄石市青山湖为例¹

熊润光^{1,2}, 张文^{1,2}, 陈虎阳^{1,2}, 桂智凡^{1,2*}

(1. 湖北师范大学城市与环境学院, 湖北 黄石 435002; 2. 湖北师范大学资源枯竭城市转型发展研究中心, 湖北 黄石 435002)

【摘要】: 随着社会经济的发展, 城市湖泊重金属越来越受到广泛关注。选择典型的矿冶城市黄石市的湖泊—青山湖为研究对象, 2020年12月采集表层沉积物和湖心柱状样, 测定其部分理化性质以及铬(Cr)、铅(Pb)、镍(Ni)、铜(Cu)、锌(Zn)的含量, 利用多元统计方法、空间插值法、地累积指数法、潜在生态危害指数法探讨其空间分布特征、污染状况, 并对其污染源进行解析; 并利用碳球粒(Spheroidal Carbonaceous Particles, SCP)定年, 结合相关历史资料, 剖析青山湖重金属元素演化特征及污染历史。结果表明: (1)青山湖表层沉积物重金属元素Cr、Pb、Ni、Cu和Zn的含量分别为34.88~69.88(均值: 59.17)、68.41~102.29(均值: 82.48)、38.76~51.10(均值: 46.26)、99.91~479.43(均值: 201.16)和217.83~384.98(均值: 300.18)mg/kg, 分别超出背景值0.69、3.09、1.24、86.55和3.59倍。(2)Cu、Pb和Zn达到了中度及以上污染水平, 各重金属元素的污染程度依次为Cu>Zn>Pb>Ni>Cr。湖区所有样点综合潜在生态危害程度均处于中等以上, 单个重金属元素的潜在生态风险为Cu>Pb>Ni>Zn>Cr。(3)RDA(Redundancy analysis)分析二维排序结果表明Ni为自然源, 来源于岩石的风化和土壤母质等; Cr、Pb、Cu和Zn为人为源, 受交通以及该区污染企业带来的大气沉降影响。(4)球形碳定年显示青山湖1995年之后的平均沉积速率为1.25 cm/a, 1950s~1995年的平均沉积速率为0.5 cm/a, 1950s之前的沉积速率为0.3 cm/a。青山湖重金属含量演变可以分为4个阶段: 1950s前, 这段时间内黄石地区处于工农业产值低, 工业水平较为落后, 重金属含量低; 1950s~1980s, 建国后工业得到了一定的发展, 但发展速度较为缓慢, 重金属开始富集; 1980s~2000s, 黄石地区采掘、冶金等重工业不断发展, 大量重金属污染物被排放进入环境中, 重金属含量和污染水平快速上升; 2000s后矿产资源逐渐枯竭, 伴随着产业技术的升级和环境保护条例的出台, 重金属污染得到了一定的控制。

【关键词】: 城市湖泊; 重金属; 污染评价; 碳球粒定年; 污染历史

【中图分类号】: X524 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2023)08-1698-12

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202308013

湖泊作为淡水资源的重要来源之一, 具有包括防洪抗旱、供给水源、景观生态、调节局部气候在内的诸多重要功能[1]。并

¹ 收稿日期: 2022-11-29; 修回日期: 2023-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41402152); 湖北省自然科学基金项目(2013CFB062); 湖泊与环境国家重点实验室开放基金项目(2014SKL003); 湖北省教育厅科学技术研究计划青年人才项目(Q20142503); 资源枯竭城市转型与发展研究中心开放基金(KF2022Z02)

作者简介: 熊润光(1998~), 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊沉积与环境地球化学. E-mail: 2201136614@qq.com

* **通讯作者** E-mail: gzf249@hbnu.edu.cn

且随着城市化进程加快,越来越多的湖泊成为城市湖泊,且普遍受到人类活动的影响[2]。重金属污染物通过直接的排放、大气沉降或地表径流的冲刷进入湖泊,并产生富集[3]。重金属具有毒性强、易富集、难降解等特点[4],进入湖泊后通过絮凝或沉淀作用,多数将富集在沉积物中,当环境变化时,可能会再次释放,危害区域内的生态安全[5],影响湖泊正常的功能运转[6]。有研究表明大多数城市湖泊重金属含量已经超过背景值,如武汉市中心湖泊[7]、广州市流花湖[8]、济南市大明湖[9]等,存在不同程度的生态风险。

近年来,国内学者对各地典型地区城市水体重金属污染问题进行了研究,但大多集中在知名湖泊如巢湖[10]、异龙湖[11]、草海[12]、鄱阳湖[13]等,或是对现状的污染评价。但对典型矿冶型城市浅水湖泊沉积物中重金属污染历史的研究较少,该类湖泊沉积物的重金属污染历史与城市发展息息相关,因此开展相关研究具有重要现实意义。

为此,对典型矿冶城市黄石市的青山湖表层沉积物中 Pb、Zn、Cr、Ni、Cu 等多种金属含量进行测定,研究其分布特点,利用多种方法对重金属污染水平和潜在生态风险进行全面评价,解析重金属污染物的来源。同时利用碳球粒(Spheroidal Carbonaceous Particles, SCP)建立沉积年代序列,对沉积岩芯重金属含量的历史变化及其它沉积物理化性质的相关性进行研究,明确青山湖沉积物重金属的污染历史,为类似青山湖的城市湖泊综合治理和生态修复提供思路与依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青山湖(115° 20' 41" E~115° 04' 06" E,30° 13' 46" N~30° 14' 29" N)地处湖北省黄石市黄石港区,属于磁湖水系,为黄石市第二大城市湖,对黄石市防洪抗旱、小区域生态调节有着不可替代的作用。青山湖由4个子湖构成,自西向东编号为1#、2#、3#、4#湖,汇水面积6.2 km²。本文所研究的青山湖1#湖区位于青山湖的上游,湖区面积约为0.15 km²,平均水深1 m左右。湖区西面为湖滨大道,东面为居民区,北面为湖滨公园,南面为校园林业用地,由于长期接纳各类污染物的排放,污染较为严重,2020年12月采样测得湖区总氮(TN)浓度均值为3.04 mg/L,总磷(TP)浓度均值为0.11 mg/L,高锰酸盐指数(CODMn)在9.64~12.65 mg/L之间,叶绿素a浓度范围为34.14 ~ 60.06 mg/L。其中TN和氨氮(NH₃-N)属于劣V类水标准,TP和CODMn属于IV类水标准,水质条件和水生态整体属于劣V类水,综合营养指数为67,达到了中度富营养状态。由于1#湖区的水环境状况会直接影响到其它湖区的水质及水环境健康。因此,青山湖的污染治理及生态修复,应优先考虑1#湖区的修复,以保证上游清水对下游其它湖区的持续补给。

1.2 样品采集

2020年12月,根据青山湖湖区的面积大小、流向特征、湖泊形状及污染分布情况,利用GPS定位系统在青山湖湖区布设10个表层沉积物采样点和1个沉积岩芯(Q10)采样点,利用彼得逊采泥器和重力采泥器分别采集表层沉积物样品(0~10 cm)及柱状岩芯样品(岩芯长78 cm),采样点坐标及位置见图1。

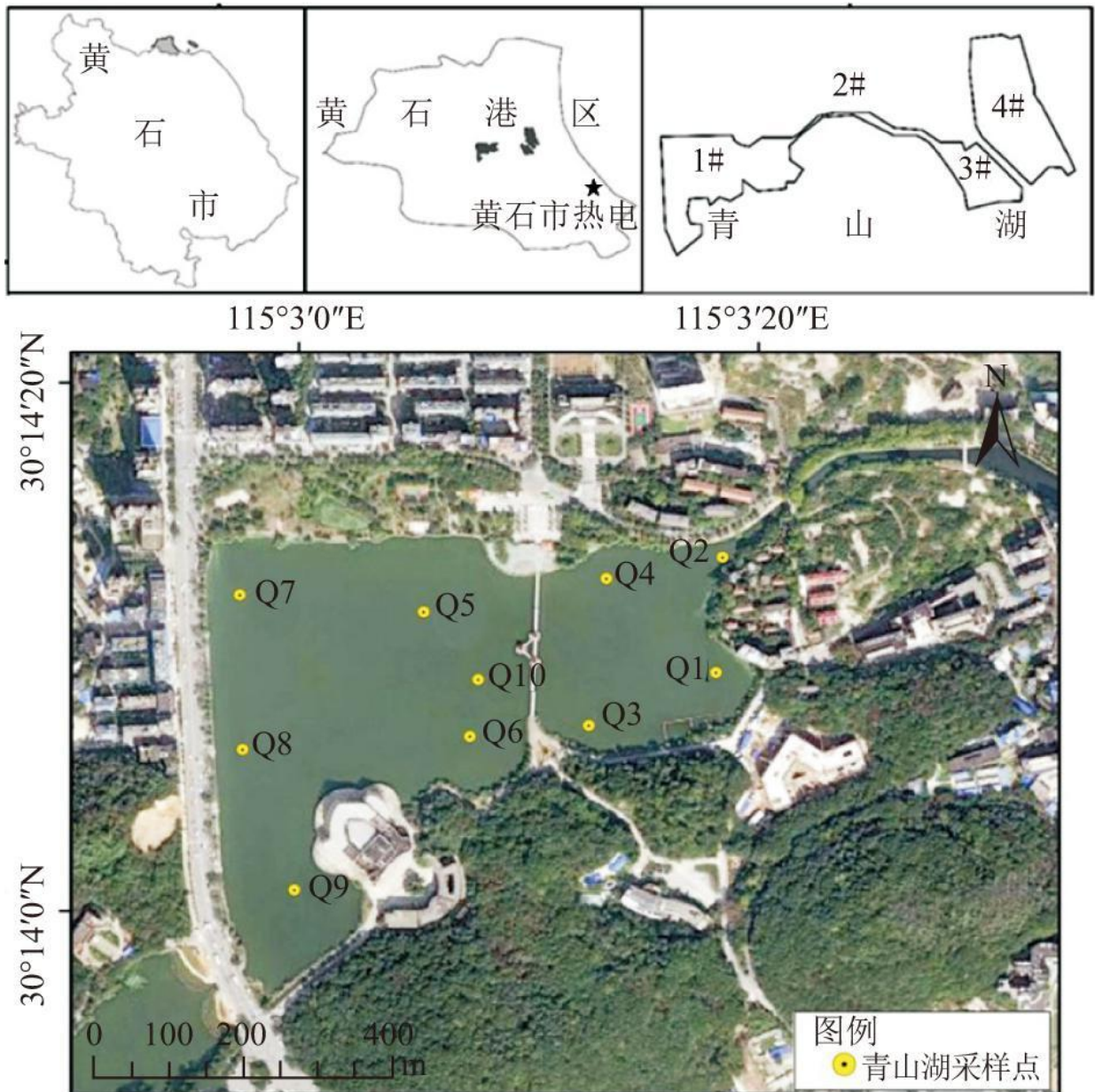


图1 青山湖沉积物采样点位图

1.3 样品分析测定

1.3.1 相关理化性质的测定

沉积物烧失量(LOI)的测定采用马弗炉煅烧法, 样品先于烘箱中 105℃烘干至恒重后记录质量, 再于马弗炉中 550℃煅烧 4 h 后记录质量, 最后计算两次质量差; 总磷(TP)测定, 称取沉积物样品于马弗炉中 450℃煅烧 3 h, 加入 20 mL 的 3.5 mol/L 盐酸震荡 16 h 取清液, 后续测定使用钼酸铵分光光度法; 沉积物磁化率的测定, 称取适量去除杂质后自然风干后的沉积样品装入磁学专用样品塑料盒, 之后采用英国 Bartington-MS2 型双频磁化率仪, 分别对每个样品进行高频(4.7 kHz)和低频(0.47 kHz)磁化率测定; 沉积物粒度的测定, 样品先用过 10%氧化氢和 10%盐酸去除有机质和碳酸盐, 后用超纯水将样品洗至中性, 加入 10%六偏

磷酸钠后超声波清洗仪震荡 30 min, 最后使用 Masterizer 3000 激光粒度仪对其进行测量。

1.3.2 沉积物重金属的测定

沉积物样品于室内风干, 除去植物叶片、根系、石块等杂质, 经粗磨过 2 mm 尼龙筛保存备用。重金属测定采用 HCl- HNO₃-HF 消解(EPA 3052),原子吸收光谱仪(赛默飞 ICE3500)上进行测定。Cr、Cu、Ni 和 Pb 由 0.00、0.10、0.20、0.50、1.00、2.00、5.00 和 10.00 mg/L 混合标准溶液构建标准曲线, r=0.995。Zn 由 0.00 mg/L、0.05、0.10、0.20、0.50 和 1.00 mg/L 混合标准溶液构建标准曲线, r=0.995。以上不同浓度混合标准溶液均由 GNM-M06099-2013 多元素标准溶液配置, 分析过程中采用标准物质 GBW-07423、空白样和平行样进行精度控制。平行分析的相对误差控制在 2%范围内, 标准物质回收率变化范围均在 95%~105% 之间。

1.3.3 球形碳(SCP)的测定

取 0.1 g 左右干样, 置于聚丙烯管中, 先后加入硝酸、氢氟酸, 水浴 80℃各 2 h 分别去除有机质、硅酸盐和碳酸盐物质, 后用蒸馏水洗至中性, 剩余物制成薄片在显微镜下观察鉴定。

1.3.4 数据分析

沉积物采样点位置分布图和采样点土壤重金属含量分布图以及其他图采用 ArcGIS 10.2 软件和 Grapher 软件绘制, 数据分析采用 Excel 2003 软件和 SPSS 23 软件完成。

1.4 重金属污染评价方法

1.4.1 地累积指数法

采用德国科学家 Muller[14]提出的地质累积指数法——公式(1),评重金属的污染水平。

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_i}{K * B_i} \right) \quad (1)$$

式中: I_{geo} 为重金属 i 的地质累积指数; C_i 重金属 i 的实测值; B_i 为背景浓度, 采用湖北省背景值[15];k 为修正系数, 一般为 1.5(本研究亦取此值)。根据 Forstner 等[16]提出的划分标准对地质累积指数 I_{geo} 进行重金属污染评价等级划分: $I_{geo} < 0$ 为无污染, $0 \leq I_{geo} < 1$ 为轻污染, $1 \leq I_{geo} < 2$ 为中污染, $2 \leq I_{geo} < 3$ 为中-重污染, $3 \leq I_{geo} < 4$ 为重污染, $4 \leq I_{geo} < 5$ 为重-极重污染, $5 \leq I_{geo}$ 为极重污染。

1.4.2 潜在生态危害指数法

采用 Hakanson 潜在生态危害指数法[17]——公式(2),评价研究区沉积物重金属生态风险。

$$\begin{aligned}
 RI &= \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \times P_i) \\
 &= \sum_{i=1}^n \left(T_r^i \times \frac{C_s^i}{C_n^i} \right) \quad (2)
 \end{aligned}$$

式中：RI 为综合生态风险指数；Eri 为 i 污染物的潜在生态风险系数；Tri 为 i 污染物的毒性响应系数，重金属的毒性响应系数分别为(Zn = 1) < (Cr = 2) < (Cu = 5) = (Pb = 5) = (Ni = 5)[18];Pi 为 i 重金属的污染指数；Csi 为 i 金属的实测值；Cni 为 i 金属的背景值(采用湖北省背景值)。由于本研究中仅 5 种重金属元素，相对于 Hakanson 研究中的 8 种，需要对 Eri 和 RI 的风险分级标准进行调整[19],调整后的沉积物中重金属潜在生态风险分级如表 1 所示。

表 1 潜在生态危害指数等级划分

潜在生态危害指(Eri)	污染潜在危害程度	综合潜在生态危害指数(RI)	综合污染潜在危害程度
Eri < 5	轻微生态危害	RI < 20	轻微生态危害
5 ≤ Eri < 10	中等生态危害	20 ≤ RI < 40	中等生态危害
10 ≤ Eri < 20	强生态危害	40 ≤ RI < 80	强生态危害
20 ≤ Eri < 40	很强生态危害	80 ≤ RI < 160	很强生态危害
Eri ≥ 40	极强生态危害	RI ≥ 160	极强生态危害

2 结果与讨论

2.1 理化性质

沉积物粒度组成中各粒级组成差异较大，黏土级(<4 μm)含量最高，组分占比为 17.68%~48.23%,均值为 41.46%;细粉砂级

(4~16 μm)含量占第二位,组分占比为32.61%~61.70%,均值为38.90%;中粗粉砂级(16~64 μm)含量居第三位,组分占比为12.65%~25.89%,均值为16.86%;砂粒级(>64 μm)含量最低,组分占比为0%~9.84%,均值为2.75%。整体而言,青山湖表层沉积物粒度组成以细粉砂和黏土为主,砂粒的含量低,这表明该沉积区水动力条件较弱,沉积环境较为稳定。烧失量是在一定的高温条件下样品损失的部分占总质量的百分比。青山湖表层沉积物中烧失量的变化范围为:8.88%~13.82%(均值为11.10%)。

2.2 表层沉积物重金属含量特征及空间分布

青山湖表层沉积物重金属含量范围、数据分析及背景值见表2。Cr、Pb、Ni、Cu和Zn的含量分别为34.88~69.88(均值:59.17)、68.41~102.29(均值:82.48)、38.76~51.10(均值:46.26)、99.91~479.43(均值:201.16)和217.83~384.98(均值:300.18)mg/kg。对照各重金属元素含量均值和对应的背景值,得出青山湖表层沉积物中Cr、Pb、Ni、Cu和Zn依次是背景值的0.69、3.09、1.24、86.55和3.59倍,Pb、Ni、Cu、Zn超出背景值的样点占比为100%,所有样点的Cr含量均未超过背景值。

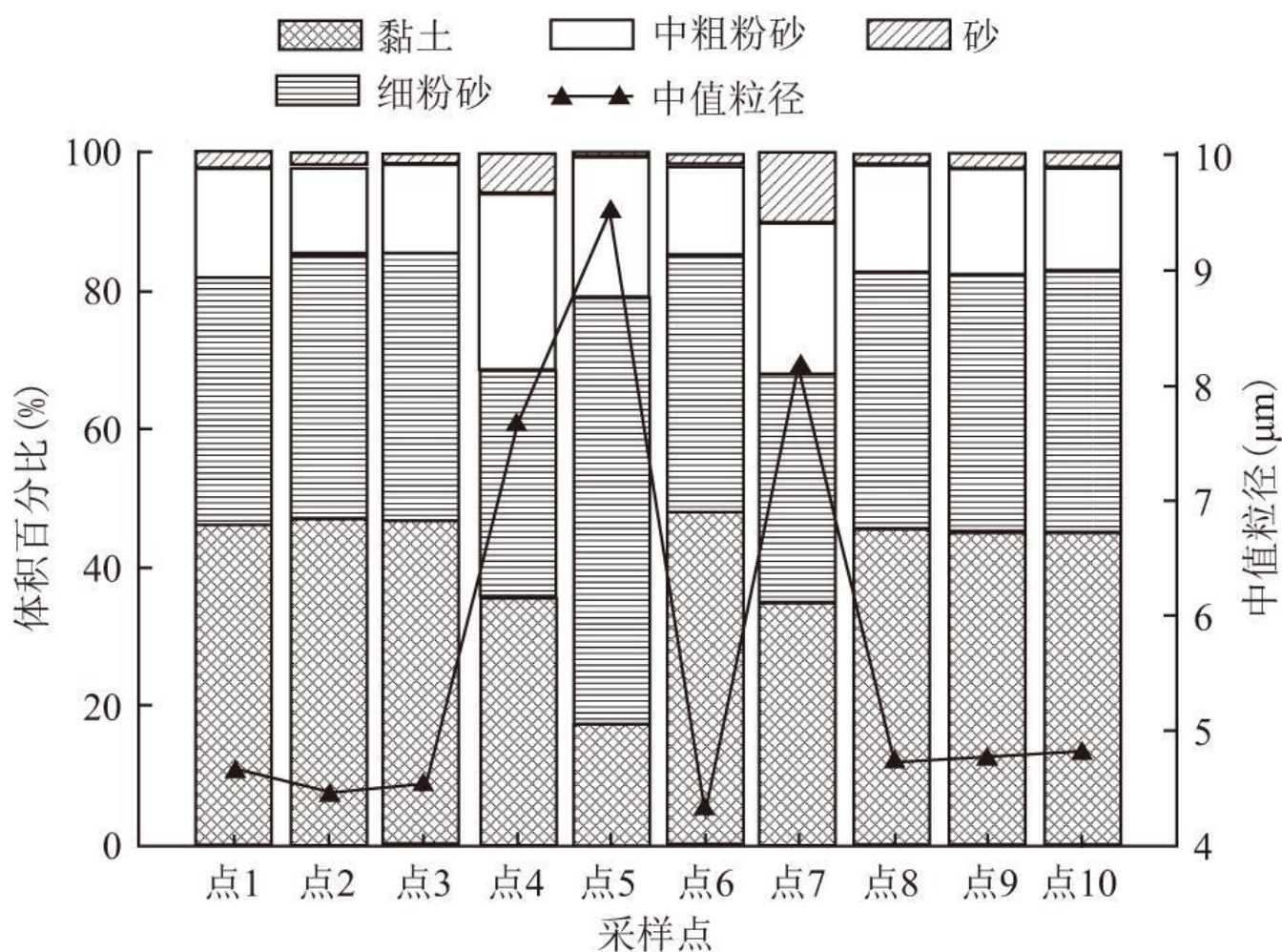


图2 青山湖表层沉积物粒度(左)与烧失量(右)

表 2 青山湖表层沉积物重金属含量

	重金属含量(mg/kg)				
	Cr	Pb	Ni	Cu	Zn
最大值	69.88	102.29	51.10	479.43	384.98
最小值	34.88	68.41	38.76	99.91	217.83
均值	59.17	82.48	46.26	201.16	300.18
变异系数	0.15	0.13	0.08	0.50	0.14
湖北省背景值[15]	86.00	26.70	37.30	30.70	83.60
4#湖区[20]	93.17	120.56	24.33	176.08	367.84
磁湖[21]	75.89	77.10	33.16	57.12	199.44
鄱阳湖[22]	70.20	43.00	-	39.80	119.40
洞庭湖[23]	93.47	36.05	34.47	37.98	147.19
	66.78	27.28	33.89	25.35	74.77

洪泽湖[24]					
---------	--	--	--	--	--

由图 3 可知, Cu、Pb、Zn 和 Cr 空间分布特征较为相似, 表现为湖区四周较高, 靠近湖心区域含量较低, 这可能与湖区水动力条件较差有关。7 号样点和 1 号样点附近普遍为高值, 9 号样点处污染物浓度同样较高, 5 号样点为最低值区。Ni 的空间分布规律与另外 4 种重金属不同, 表现为分布均匀, 但东部较高, 西部较低。相较于青山湖 4#湖区, 除 Ni 和 Cu 外, 1#湖区的其余 3 种重金属含量均低于 4#湖区, 这可能是由于 4#湖区处于下游, 同时离污染源更近所致。而在与临近的磁湖以及其它国内知名湖泊的比较中, 可以看出除 Cr 外, 其余重金属元素的含量均为青山湖 1#湖区更高, 这表明青山湖的沉积物重金属可能存在一定污染。

2.3 污染评价

2.3.1 地累积指数法

青山湖表层沉积物 Ni、Cr、Pb、Cu 和 Zn 5 种重金属地累积指数数值见表 3。根据评价结果, 重金属的地累积污染指数大小依次为: Cu > Zn > Pb > Ni > Cr。Cr 和 Ni 所在的所有样点都显示为无污染(Igeo<0)。Pb 和 Zn 的地累积指数均值分别为 1.03 和 1.25,二者整体处于中度污染状况, Pb 有 40%的采样点处于无-中程度污染, 60%的采样点处于中度污染; Zn 有 10%的采样点处于无-中程度污染, 90%的采样点处于中度污染状况。Cu 的地累积指数均值为 2.00,整体达到了中-强程度污染, 其中有 60%的样点处于中度污染, 30%的样点处于中-强程度污染, 10%的样点处于强污染程度, 污染最强的样点为 7 号样点, 最弱的样点为 5 号样点。

2.3.2 潜在生态危害指数法

根据单项生态危害指数和综合潜在生态危害指数的计算公式, 得到了研究区土壤重金属潜在生态风险评价结果(表 4)。研究区内综合潜在生态危害指数范围为 32.03~98.01(均值: 52.17),依据评价标准得出区域内综合生态风险处于较高水平。其中风险最高为 7 号样点属很强生态危害, 最低为 5 号样点属中等生态危害, 整体上来看西部湖区风险最高, 中部最低。在此基础上分析单个污染物的潜在生态危害指数, Cu、Ni 和 Pb 所有的样点潜在生态危害指数都大于 5,具有不同程度生态危害。其中 Cu 潜在生态危害指数除了 5 号样点为轻生态危害, 其它都属于很强生态危害或以上, Pb 和 Ni 所有的样点都属于中等生态危害。由此可以得出 Cu 是导致研究区处于高生态风险的主要元素, 5 种重金属元素的潜在生态风险由强至若依次为: Cu>Ni>Pb>Zn>Cr。

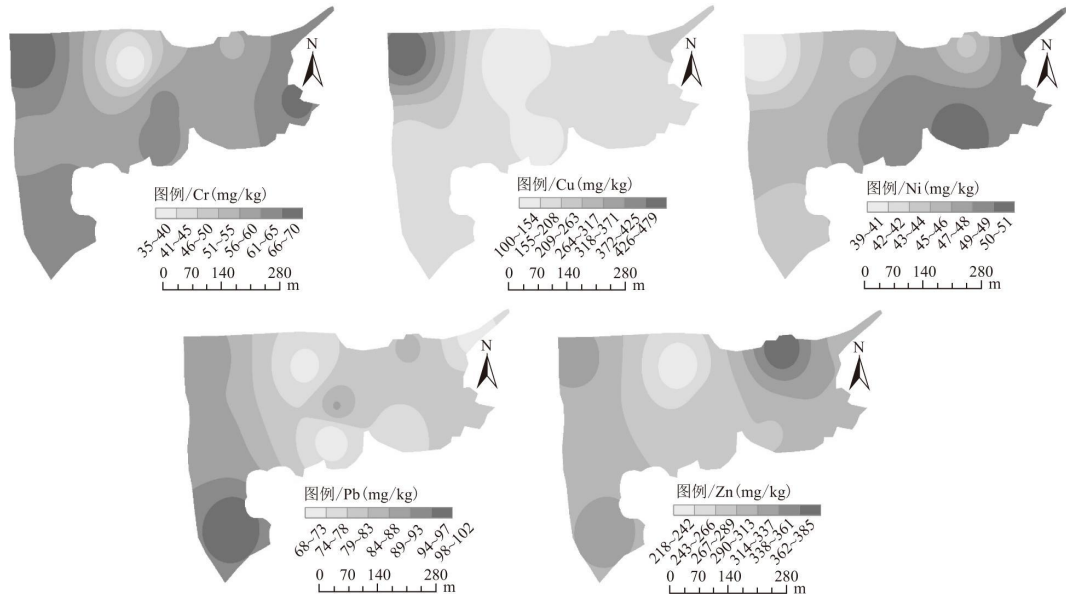


图3 青山湖表层沉积物重金属分布

表3 各重金属的地累积指数

	均值	最小值	最大值	污染分级百分比(%)						
				无	无-中	中	中-强	强	强-极强	极强
Cr	-1.15	-1.89	-0.88	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Pb	1.03	0.77	1.35	0%	40%	60%	0%	0%	0%	0%
Ni	-0.28	-0.53	-0.13	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Cu	2.00	1.12	3.38	0%	0%	60%	30%	10%	0%	0%
	1.25	0.80	1.62	0%	10%	90%	0%	0%	0%	0%

Zn										
----	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

表 4 青山湖表层沉积物潜在生态风险指数

采样区	单个元素潜在生态危害指数					综合潜在生态危害指数 RI
	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	
点 1	3.84	27.17	6.54	6.15	3.73	47.42
点 2	3.63	41.46	6.78	5.31	3.65	60.84
点 3	3.38	25.12	6.85	5.69	3.44	44.48
点 4	3.15	29.73	5.84	6.27	4.60	49.61
点 5	2.03	16.27	5.82	5.30	2.61	32.03
点 6	3.57	22.74	6.59	5.12	3.23	41.25
点 7	4.06	78.08	5.20	6.80	3.87	98.01
点 8	3.41	30.19	6.10	6.87	3.60	50.17

点 9	3.73	30.75	5.69	7.66	3.85	51.68
点 10	3.58	26.11	6.61	6.61	3.33	46.24

2.4 来源解析

对研究区沉积物理化性质进行 RDA 约束排序, 得出其对重金属含量特征的解释量。图中重金属用实线表示, 理化性质用虚线表示, 线越长解释量越大, 两线夹角(A)越小, 相关性越大, A 在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 时, 二者呈现正相关, $A=90^{\circ}$ 时, 二者无相关关系, $90^{\circ} < A < 180^{\circ}$ 时, 二者呈现负相关关系。由图可知, 湖区沉积物金属含量特征在第 1 轴、第 2 轴解释量分别为 80.42 和 10.93。Zn、Pb、Cr 和 Cu 主要与烧矢量、中粗粉砂、砂呈较强正相关关系, Ni 与沉积物粒度、烧矢量以及其他重金属相关性不大。

对此可将各重金属分为两类, 第一类包括 Ni, 第二类包括 Cr、Pb、Cu、Zn。第一类中 Ni 变异系数为 0.09 属于较低程度变异, 说明分布较为均匀受人类活动影响较小, 推定为自然源; 第二类中 Cr、Pb、Cu 和 Zn 变异系数分别为 0.16、0.13、0.52 和 0.14, Cu 为高度变异受人类活动影响较大, Cr、Pb 和 Zn 为中等变异一定程度上受人类活动影响。Pb 和 Zn 与机动车尾气排放、轮胎磨损和汽油添加剂的使用等密切相关, 其在靠近滨湖大道的湖区西部较高, 推测湖区西部的 Pb 和 Zn 为交通源。同时湖区重金属整体上还受到大气沉降的影响, 湖区正好位于多个污染企业所在盛行风下方向。杨文聪等[25]研究显示大冶有色金属冶炼厂的废气使得下风向西北地区的土壤富集了大量的 Cd、Pb、As 和 Hg, 刘玮玲等[26]研究表明黄石市大气降尘中重金属存在较严重的环境风险, 姚瑞珍等[27]研究表明黄石市大气降尘中的 Pb、Cu、Cr 含量在黄石港区内含量最高。

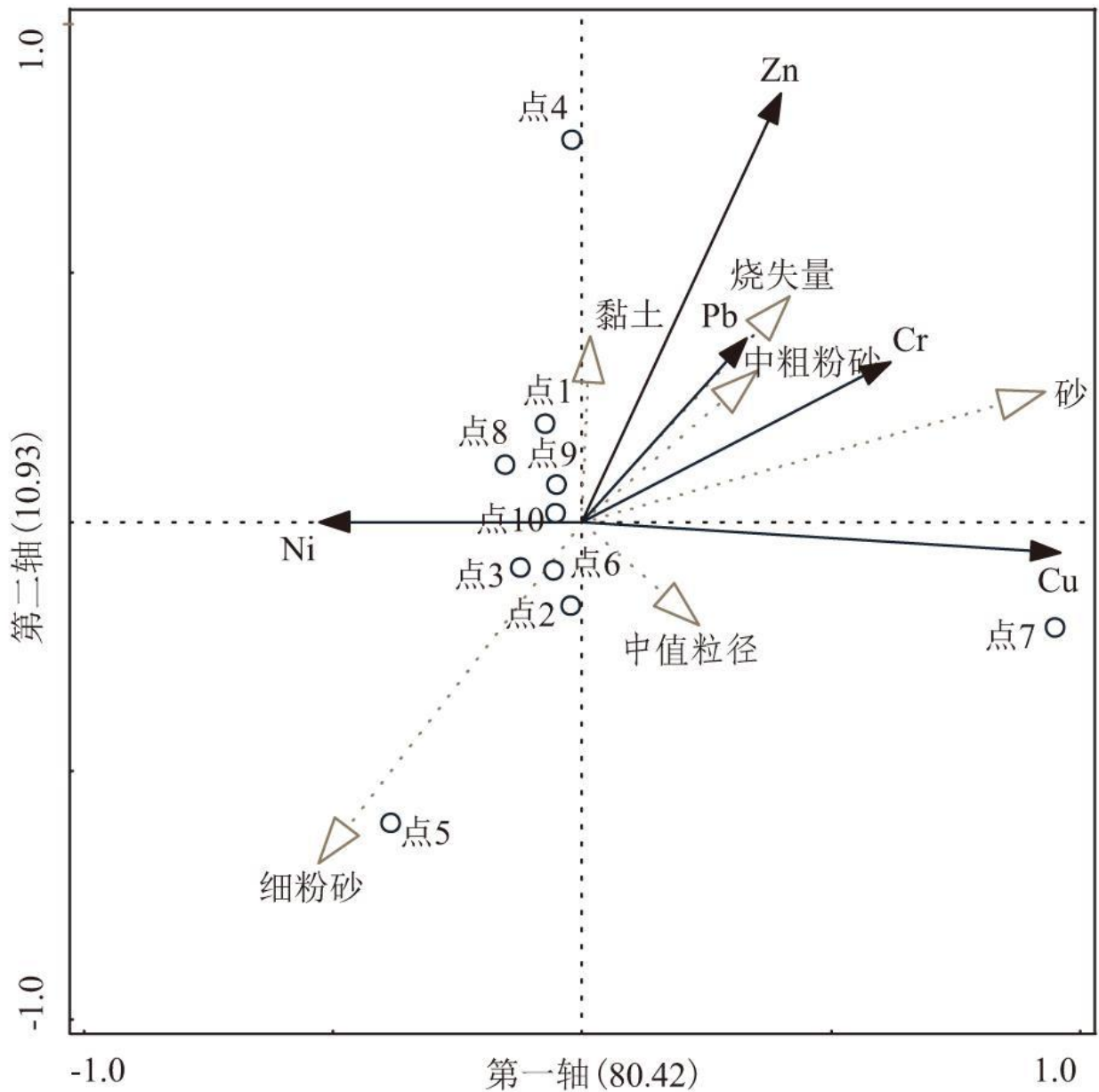


图4 青山湖表层沉积物重金属及理化性质相关性二维排序

2.5 沉积年代测定

根据湖泊沉积物中球状碳颗粒(SCP)的分布, 确定近代湖泊沉积物年代序列是事件性沉积定年的方法之一[28]。SCP 是高温燃烧化石燃料的产物, 能扩散数百公里, 并随降水或干沉降被保存于沉积物中。尽管中国随化石燃料利用较早, 但真正的高温燃烧是伴随着发电工业的出现而开始的。目前中国主要的煤炭消耗是用于发电, SCP 产量与发电量成正比, 反映到湖泊沉积物中为 SCP 的浓度变化随该地区发电量的增长而增长, 因此湖泊沉积物中的 SCP 浓度变化具有时标意义。同时, 吴艳宏等[28]在龙感湖、Chen 等[29]长江中游湖泊、曾令晗等[30]大冶市三里七湖研究表明 SCP 是一个可靠的时标, 其含量变化与区域火发电量有较好对应关系。本研究也借鉴相关研究通过 SCP 与区域火发电量、燃煤消费量之间关系建立沉积年代序列。

如图 5 所示，球形碳从 66 cm 处开始被检出，在 66~50 cm 之间有略微升高随后下降的趋势。在 50 cm 后不断升高，32 cm 处达到第一个峰值。此后逐渐下降，在 26 cm 处达到低值，此后再次上升，在 18 cm 处达到一个高值，在略微平缓后再次快速上升，在 12 cm 处达到另一个峰值，随后在 10 和 8 cm 处先下降再上升，最后开始下降。本研究中 SCP 浓度最大值与三里七湖(9 000 粒/g)[30]、太湖(600~9 000 粒/g)[31]以及部分长江中下游地区湖泊(3 000~8 000 粒/g)[32]较为一致，同时，SCP 的变化趋势与区域内三里七湖[30]的结果一致。

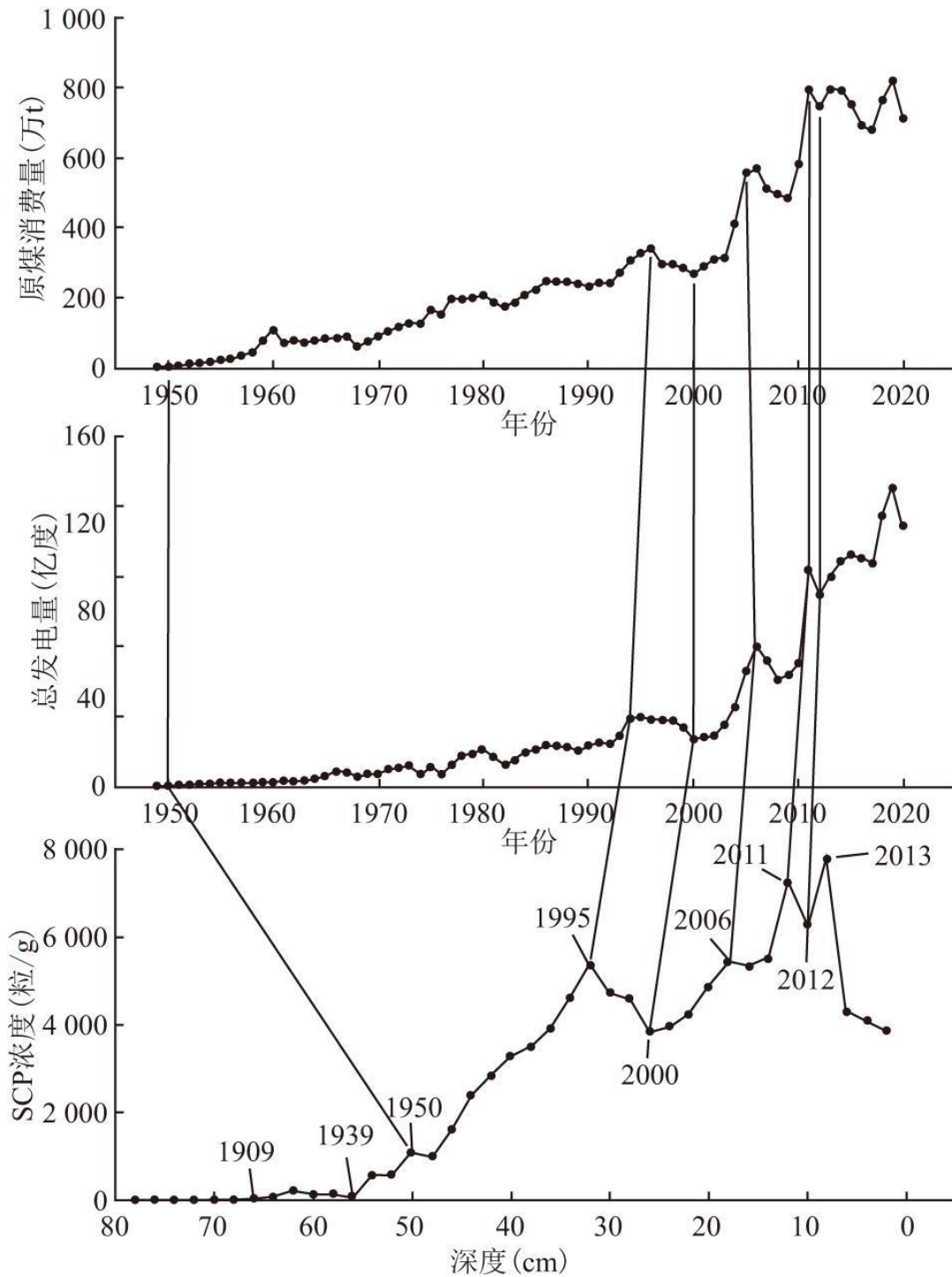


图 5 青山湖柱状沉积物碳球粒浓度及黄石市发电量、工业企业煤消耗量

本研究将青山湖沉积物 SCP 浓度与黄石市发电量(黄石市火电发电量占总发电量 95%以上)[33]及黄石市工业企业燃煤量进行对比,发现三者之间有很好的对应关系。在 1950 年之前,通过黄石市县志[34]中记载可知,黄石市最早于 1909 年湖北水泥厂设电气部,开始有发电设施,对应 66 cm 处 SCP 的出现。1909~1938 年期间黄石地区的发电量虽小但有一些民营电灯公司,所以仍有略微上升。1938 年黄石被日军占领,大多数发电设备毁于战火或迁移至后方,完全沦陷后,日军修复了得道湾发电所、新厂发电所,装机总容量恢复至战前水平。以上对应 66~50 cm 处先上升后下降再略微上升的趋势。在抗战胜利后,国民政府接管发电设施,成立大冶电厂,并统一管理发供电业务,初步形成黄石电力工业体系,1950 年 12 月大冶电厂一期工程建设完成,对应了 50 cm 后 SCP 一路上升的趋势。黄石市发电量自 1949 年后才有具体数据记载[33],自 1949 年以来发电量逐渐增加,于 1995 年达到高值,而后开始下降,在 2000 年达到低值后重新开始上升,于 2006 年达到一个峰值,在略微下降后快速上升于 2011 年达到另一个峰值,于 2012 年下降后又继续上升。可以看出,在 1950 年后的发电量与 50 cm 后的 SCP 浓度有很好的对应关系。而近年来发电量呈现波动上升状态,无法完全对应相应时期 SCP 浓度的快速下降,这是由于在近年来燃煤技术的提升所致。根据图 5 可以看出 2010 年后在燃煤量未有较大提升情况下发电量仍有所升高,同样根据图 6 可以发现 2010 年以来,工业烟(尘)排放量在迅速下降,这就导致了 SCP 浓度的下降。

综合上述分析,可以推测岩芯 66 cm 处对应 1909 年电气部的设立,54 cm 处球形碳数量开始上升对应 1950 年左右大冶电厂建设完成后发电量不断上升,32 cm 处碳球粒数量高值大致对应 1995 年黄石市发电量高。根据这些时标,计算得出 1990s 至今平均沉积速率为 1.25 cm/a,1950s~1990s 的平均沉积速率为 0.5 cm/a,1900s~1950s 的平均沉积速率为 0.3 cm/a,将 66 cm 以下的沉积岩芯的沉积速率按照 1900s~1950s 的平均沉积速率计算,岩芯底部对应的年代大致为 1860s。曾令晗等[30]在利用 SCP 对三里七湖进行定年后发现,三里七湖 1996 年至今的沉积速率为 1.13 cm/a。结合长江中游其它湖泊沉积物球形碳数量的对比及青山湖沉积物球形碳数量与发电量、燃煤量的对比,本文的球形碳定年具有一定的可信度。

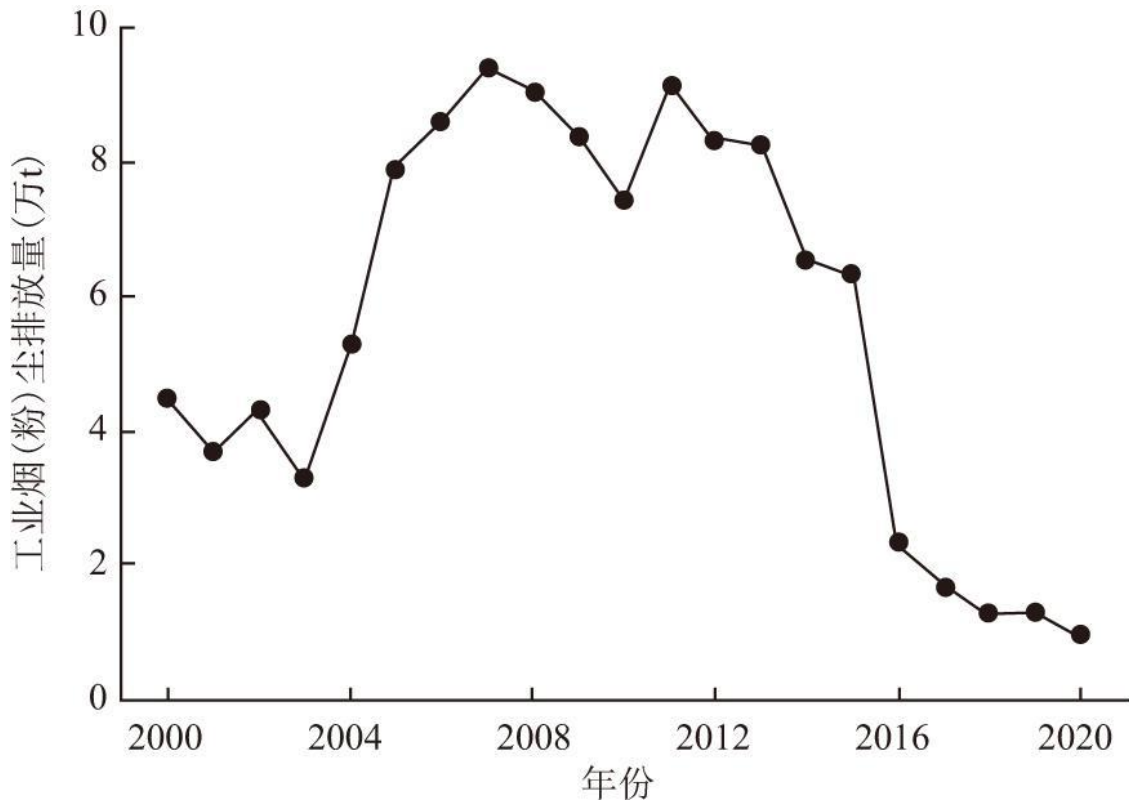


图 6 黄石市工业烟(粉)尘排放历史情况

根据沉积年代的判定，可以对湖区污染历史进一步讨论，青山湖柱状沉积物重金属元素的变化如图 7 所示。根据重金属含量在岩芯的变化趋势，重金属元素大致可以分为两组，同一组元素呈现出相似的垂向变化趋势，第一组元素为 Cr、Pb、Cu 和 Zn，由岩芯底部至 32 cm 处，重金属含量处于低值且保持着较为稳定的状态，在 32~24 cm 的范围内，重金属含量呈现快速上升的趋势并达到含量峰值，24 cm 后下降，最终在表层附近保持着较为稳定的状态。第二组元素为 Ni，Ni 的含量自岩芯底部至顶部一直保持着较为稳定的状态，没有明显的变化趋势。磁化率自沉积岩芯底部至 34 cm 的范围内始终保持着较低的含量，并有着下降的趋势，在 34~24 cm 处快速上升并达到峰值，在 24~18 cm 处呈现下降趋势，并于 18 cm 以上的范围内保持稳定。烧失量和 TP 变化趋势相似，分别在 48 和 42 cm 以下保持较低含量，随后快速上升，又分别在 40 和 34 cm 到达峰值，随后开始波动式缓慢上升。

根据图 6 的工业烟(粉)尘排放量和图 8 黄石市工业废水排放量、污水处理率以及图 9 黄石市工农业产值分布可知黄石市大致在 2008 年开始转型，在此前污染物排放量随着工农业发展一路走高，在 2008 年后由于发展观念的转变、生产技术的革新，在工业产值保持增加基础上，工业烟(粉)尘、废水排放迅速下降，污水处理率快速上升。2009 年黄石市被列入第二批资源枯竭城市，同年湖北省统计局发布《黄石市加快推进资源型城市转型问题研究》[35]一文分析黄石市转型发展的思路。2013 年 9 月，黄石确立了“生态立市、产业强市”战略[36],打破“资源诅咒”,换绿色发展之道。

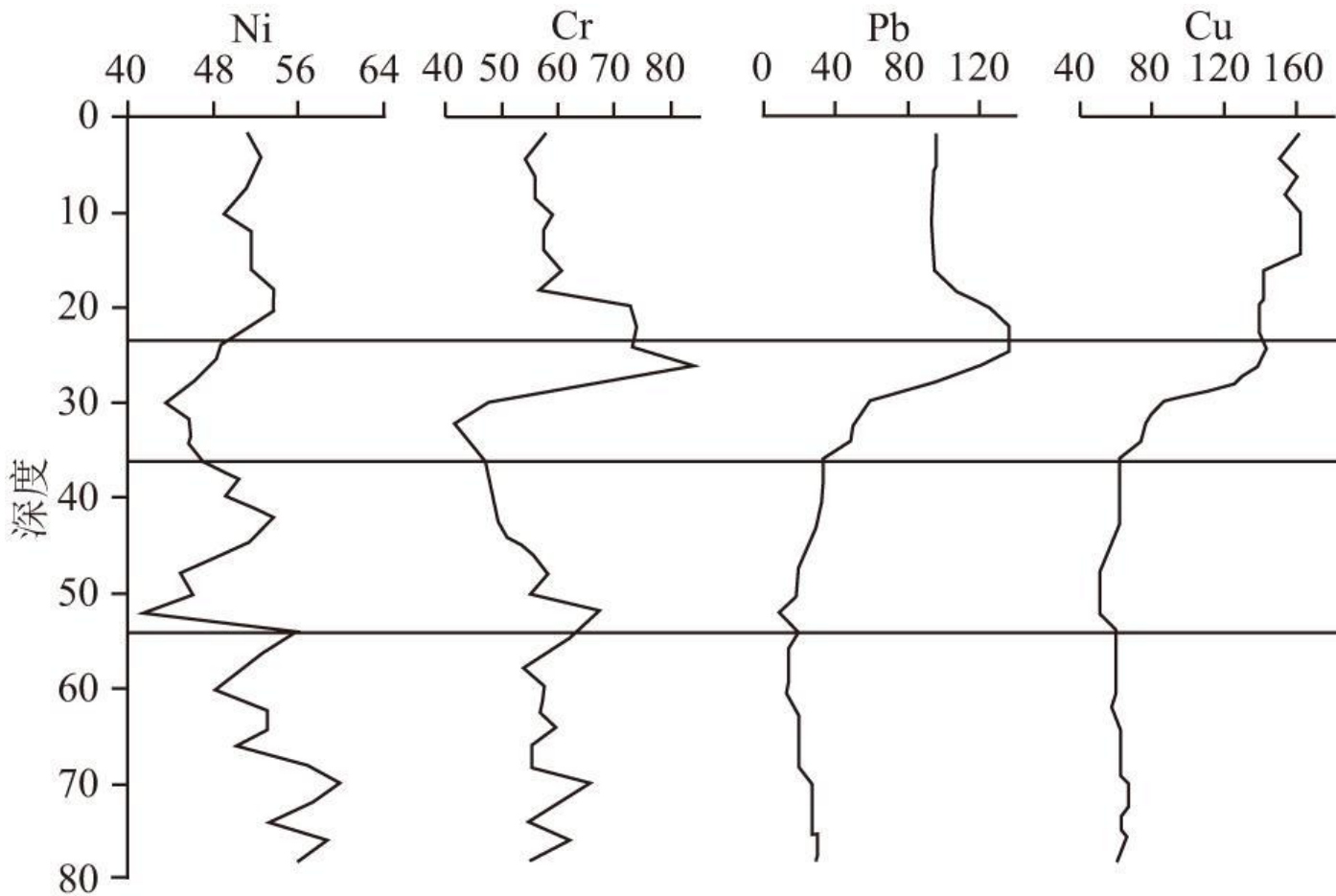


图 7 青山湖柱状沉积物重金属及理化性质垂直分布情况

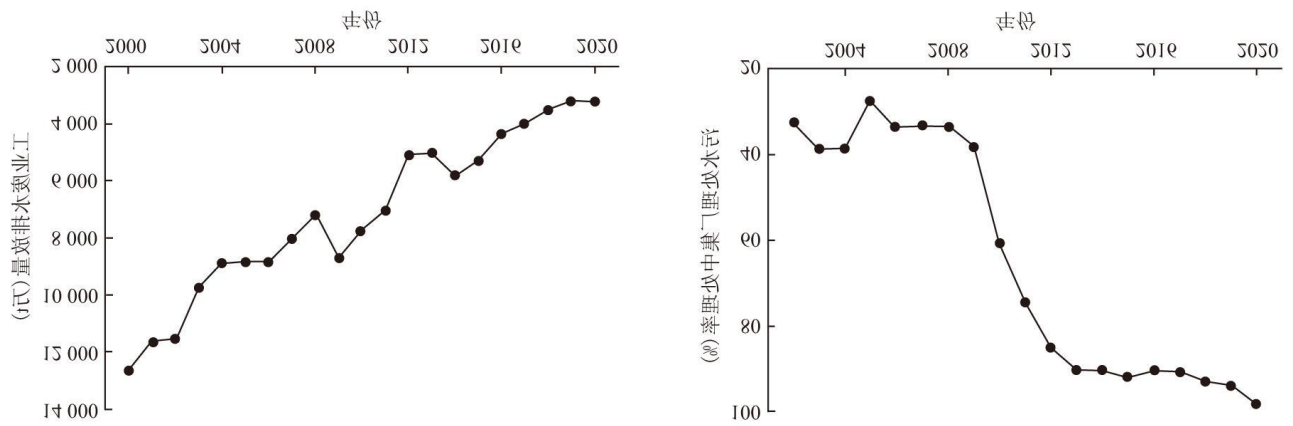


图8 黄石市工业废水排放量及污水处理率

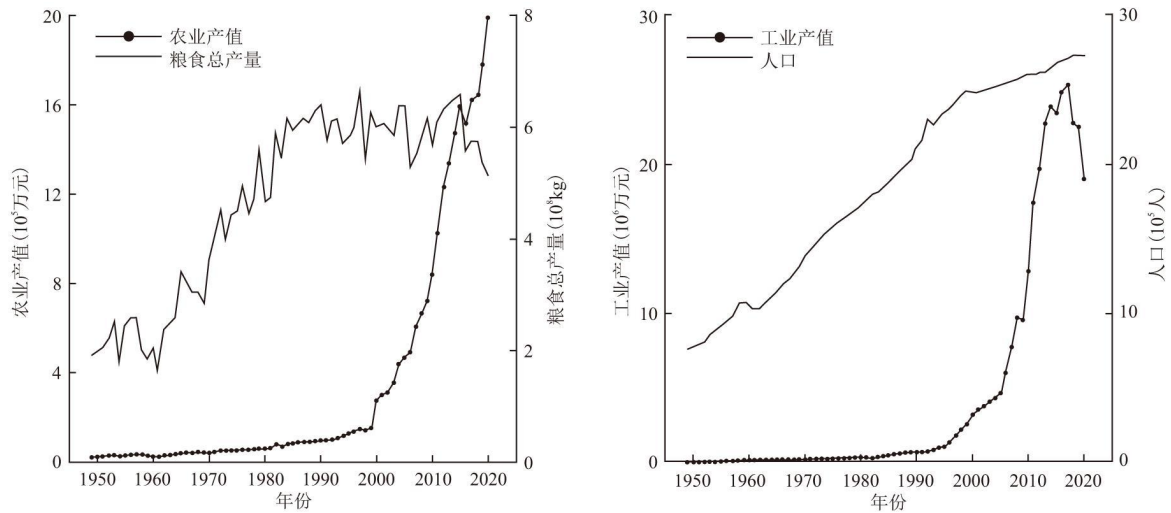


图9 黄石市工业农业产值历史情况

结合沉积岩芯中重金属元素及磁化率、烧失量和 TP 的垂向变化特征以及黄石市工农业产值变化(图 10),可以将青山湖沉积岩芯中重金属的污染历史分为以下 4 个阶段:

1950s 以前(78~54 cm),这个阶段的重金属元素 Pb、Cu、Zn 处于低值且保持平稳;磁化率、Ni 和 Cr 较高,而烧失量和 TP 均较为稳定。这段时间对应建国前,黄石地区工农业产值较低,青山湖流域的人为活动破坏较小,较高的磁化率、Cr 和 Ni 对应本地铁矿含量较高,富含磁铁矿、赤铁矿地质背景。

1950s~1980s (54~36 cm),这个阶段重金属元素含量整体仍然较低,但 Pb、Cu 和 Zn 的含量开始出现上升趋势;磁化率较为稳定,烧失量和 TP 开始快速上升。此时改革开放尚未彻底展开,黄石地区的农业得到了发展,粮食产量快速上升,使得入湖有机质的含量快速上升,工业得到了一定的发展但较为缓慢,人类活动对环境的影响相较于之后的时代而言仍较为轻微。

1980s~2000s (36~24 cm),这个阶段重金属元素的含量处于快速上升的状态,并于 24 cm 处达到峰值;磁化率的变化与重金属元素较为相似,表现出了快速上升的态势;烧失量和 TP 则保持着较高的数值,呈波动上升趋势。随着改革开放的推进,采矿、冶金等重工业开始快速发展,由于早期缺乏环境保护意识,大量废弃物被直接排放进入水体环境中,从而导致重金属含量和磁化率的快速上升。

2000s 以来(24~0 cm),这个阶段重金属含量或保持稳定或下降后保持稳定;磁化率在下降后重新保持稳定;烧失量和 TP 在短暂下降后开始再次上升。随着黄石地区矿产资源的枯竭,大量工矿类活动减弱,向水体环境排放的污染物数量下降,重金属与磁化率含量随之下降,冶炼技术的进步和相关环保政策的出台也促进了这一结果。同时居民生活水平的提升及人口数量的增加,使得大量生活污水进入湖体,从而导致湖体有机质含量在短暂下降后再次上升。

3 结论

本文以青山湖沉积物为研究对象,于青山湖布设 10 个表层采样点和 1 个柱状采样点,探讨青山湖沉积物重金属含量、部分理化性质的特征及空间分布。并运用地累积指数法、潜在生态风险评价法评估沉积物重金属的风险水平。使用 RDA 分析二维排序解析表层重金属的污染来源。最后利用 SCP 进行沉积定年,分析湖区的历史污染情况。本文主要结论如下:

(1)青山湖表层沉积物重金属元素 Cr、Pb、Ni、Cu 和 Zn 的含量分别为 34.88~69.88(均值: 59.17)、68.41~102.29(均值: 82.48)、38.76~51.10(均值: 46.26)、99.91~479.43(均值: 201.16)和 217.83~384.98(均值: 300.18)mg/kg, 分别超出背景值 0.69、3.09、1.24、86.55 和 3.59 倍。从空间来看 Cu、Pb、Zn 和 Cr 空间分布特征较为相似, Ni 的空间分布规律与另外 4 种重金属不同。

(2)地累积指数法结果表明, Cu、Pb 和 Zn 达到了中度及以上污染水平,各重金属元素的污染状况依次为: Cu > Zn > Pb > Ni > Cr。潜在生态风险指数法结果显示,湖区所有样点综合潜在生态危害程度均处于中等以上,单个重金属元素的潜在生态风险为: Cu > Pb > Ni > Zn > Cr。

(3)RDA 分析二维排序结果表明, Cr、Pb、Ni、Cu 和 Zn 可分为两类,第一类为 Ni,分布较为均匀受人类活动影响较小,推定为自然源。第二类为 Cr、Pb、Cu 和 Zn,受周边人类活动影响,主要为交通和污染企业带来的重金属大气沉降。

(4)球形碳定年显示青山湖 1995 年之后的平均沉积速率为 1.25 cm/a, 1950s~1995 年的平均沉积速率为 0.5 cm/a, 1950s 之前的沉积速率为 0.3 cm/a。青山湖重金属含量演变可以分为 4 个阶段: 1950s 前,这段时间内黄石地区处于工农业产值低,工业水平较为落后,重金属含量较低; 1950s~1980s 年,建国后工业得到了一定的发展,但发展速度较为缓慢,重金属开始富集; 1980s~2000s,黄石地区采掘、冶金等重工业不断发展,大量重金属污染物被排放进入环境中,重金属含量快速上升; 2000s 后矿产资源逐渐枯竭,伴随着产业技术的升级和环境保护条例的出台,重金属污染得到了一定的控制。

参考文献:

[1] GUO W, HUO S L, XI B D, et al. Heavy metal contamination in sediments from typical lakes in the five geographic regions of China: Distribution, bioavailability, and risk [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 81: 243-255.

[2] 臧泉, 陈鲁, 杨玉义, 等. 城市化对湖泊表层沉积物重金属污染的影响: 高原湖泊和城市湖泊重金属生态风险比较[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(10): 43-50.

ZANG Q, CHEN L, YANG Y Y, et al. Effects of urbanization on the pollution and ecological risk of heavy metals in surface sediments from lakes: Comparison of the plateau and urban lakes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 43(10): 43-50.

[3]李贺,王书航,车霏霏,等.巢湖、洞庭湖、鄱阳湖沉积物重金属污染及来源的 Meta 分析[J].中国环境科学, 2023, 43(2): 831-842.

LI H, WANG S H, CHE F F, et al. Meta analysis of heavy metal pollution in sediments of Chaohu Lake, Dongting Lake and Poyang Lake [J]. China Environmental Science, 2023, 43 (2): 831-842.

[4]罗正雅,刘畅,黄磊,等.重金属捕集剂在水处理中的 研究与应用进展综述[J].环境污染与防治, 2022, 44 (11): 1519-1525.

LUO Z Y , LIU C, HUANG L, et al. The research and application progress of heavy metal capturing agents in water treatment: A review [J]. Environmental Pollution & Control, 2022, 44 (11): 1519-1525.

[5]周成,杨国录,陆晶,等.河湖底泥污染物释放影响因素及底泥处理的研究进展[J].环境工程, 2016, 34(5): 113-117, 94.

ZHOU C, YANG G L, LU J, et al. Research progress about sediment disposal and factors influencing release of sediment pollutants in rivers and lakes [J] . Environmental Engineering , 2016, 34(5) : 113-117, 94.

[6] YUAN H Z, SHEN J, LIU E F, et al. Assessment of nutrients and heavy metals enrichment in surface sediments from Taihu Lake, a eutrophic shallow lake in China[J] . Environmental Geochemistry and Health, 2011, 33(1) : 67-81.

[7]陈路锋,潘钰,曹梦西,等.武汉城市湖泊表层底泥汞分布、风险评价及影响因素[J].地球与环境, 2022, 50(3): 388-396.

CHEN L F, PAN Y , CAO M X, et al. Distribution, risk assessment and influencing factors of mercury in the surface sediment of urban lakes in Wuhan city[J] . Earth and Environment, 2022, 50(3) : 388-396.

[8]孙康康,董旭辉.广州市流花湖沉积物重金属污染特征及 潜在生态风险评估[J].亚热带水土保持, 2020, 32(1) : 19-26.

SUN K K, DONG X H. Assessment on the characteristics of heavy metal pollution and potential ecological risk in sediments of Liuhua Lake of Guangzhou municipality[J] . Subtropical Soil and Water Conservation, 2020 , 32(1) : 19-26.

[9]代静,李欣,王小燕,等.大明湖表层沉积物重金属污染特征及生态风险评估[J].环境化学, 2020, 39(1) : 249-263.

DAI J, LI X, WANG X Y, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments of Daming Lake[J] . Environmental Chemistry, 2020 , 39 (1) : 249-263.

[10]杜臣昌,刘恩峰,羊向东,等.巢湖沉积物重金属富集特征 与人为污染评价[J].湖泊科学,2012, 24(1): 59-66.

DU C C, LIU E F, YANG X D, et al. Characteristics of enrichment and evaluation of anthropogenic pollution of heavy metals in the sediments of Lake Chaohu[J] . Journal of Lake Sciences, 2012, 24(1) : 59-66.

[11] 李小林,刘恩峰,于真真,等.异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险[J].环境科学, 2019, 40(2): 614-624.

LI X L, LIU E F, YU Z Z , et al. Contamination and potential ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of Yilong Lake, southwest China [J] . Environmental Science, 2019, 40(2) : 614-624.

[12] 钱晓莉,冯新斌,闭向阳,等.贵州草海沉积物汞的含量和分布特征初步研究[J].西南大学学报(自然科学版),2009,31(1):32-36.

QIAN X L, FENG X B, BI X Y, et al. A preliminary study of the contents and distribution of mercury in the sediments of Lake Caohai in Guizhou[J] . Journal of Southwest University (Natural Science Edition) , 2009, 31(1) : 32-36.

[13] 刘佳伟,杨明生.鄱阳湖流域重金属污染评价与分析[J].环境污染与防治,2022,44(1):99-103.

LIU J W, YANG M S. Assessment and analysis of heavy metal pollution in Poyang Lake Basin[J] . Environmental Pollution & Control, 2022, 44(1) : 99-103.

[14] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J] . GeoJournal, 1969 , 2 : 108-118.

[15] 魏复盛,杨国治,蒋德珍,等.中国土壤元素背景值基本统计量及其特征[J].中国环境监测,1991,7(1):1-6.

WEI F S, YANG G Z, JIANG D Z, et al. Basic statistics and characteristics of background values of soil elements in China [J] . Environmental Monitoring in China, 1991, 7(1) : 1 - 6.

[16] FORSTNER U, AHLF W, CALMANO W, et al. Sediment criteria development [M]// Sediments and Environmental Geochemistry. Berlin, Heidelberg: Springer, 1990 : 311 -338.

[17] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J] . Water Research, 1980, 14(8) : 975-1001.

[18] 徐争启,倪师军,虞先国,等.潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J].环境科学与技术,2008,31(2):112-115.

XU Z Q, NI S J, TUO X G, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J] . Environmental Science & Technology, 2008 , 31 (2) : 112-115.

[19] 王小雷,杨浩,顾祝军,等.抚仙湖沉积物重金属垂向分布及潜在生态风险评价[J].地球与环境,2014,42(6):764-772.

WANG X L, YANG H, GU Z J, et al. Vertical distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediment cores of Lake Fuxian[J] . Earth and Environment, 2014, 42 (6) : 764-772.

[20] 吉芬芬,华江环,雷东桥,等.黄石典型城市小型浅水湖泊沉积物重金属污染特征及潜在生态风险评价[J].福建师范大学学报(自然科学版),2021,37(3):36-47.

JI F F, HUA J H, LEI D Q, et al. Pollution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments from a small and shallow urban lake in Huangshi city[J] . Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition) , 2021, 37(3) : 36-47.

[21] 仇梦璇,刘蓬,刘琳,等.磁湖底泥重金属生态风险评价及溯源分析[J].湖北大学学报(自然科学版),2021,43(6):

653-660.

QIU M X, LIU P, LIU L, et al. Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in sediments of Cihu Lake [J]. Journal of Hubei University (Natural Science), 2021, 43(6): 653-660.

[22] 刘佳伟, 杨明生.鄱阳湖流域重金属污染评价与分析[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(1): 99-103.

LIU J W, YANG M S. Assessment and analysis of heavy metal pollution in Poyang Lake Basin[J]. Environmental Pollution & Control, 2022, 44(1) : 99- 103.

[23] 尹宇莹, 彭高卓, 谢意南, 等.洞庭湖表层沉积物中营 养元 素、重金属的污染特征与评价分析[J].环境化学, 2021, 40(8) : 2399-2409.

YIN Y Y , PENG G Z, XIE Y N , et al. Characteristics and risk assessment of nutrients and heavy metals pollution in sediments of Dongting Lake [J] . Environmental Chemistry, 2021 , 40 (8) : 2399-2409.

[24] 瞿鑫源, 张 鸣, 谷孝鸿, 等.洪泽湖围栏养殖对表层沉积 物重金属含量影响与生态风险评价[J].环境科学, 2021, 42(11) : 5355-5363.

ZI X Y, ZHANG M, GU X H, et al. Impact of enclosure culture on heavy metal content in surface sediments of Hongze Lake and ecological risk assessment [J] . Environmental Science , 2021, 42(11) : 5355-5363.

[25] 杨文聪, 祁士华, 邢新丽, 等.大冶冶炼厂对周边土壤重金 属贡献机制研究[J].环境科学与技术, 2020, 43(S1): 110-115.

YANG W C , QI S H, XING X L, et al. Study on the contribution mechanism of Daye smelter to the heavy metals in the surrounding soil[J] . Environmental Science & Technology, 2020 , 43(S1) : 110-115.

[26] 刘玮玲, 肖文胜, 张家泉, 等.黄石市大气降尘中重金属污 染及其化学形态特征研究[J].湖北理工学院学报, 2014, 30(2) : 32-37.

LIU W L, XIAO W S, ZHANG J Q, et al. Research on pollution and speciation characteristics of heavy metals in atmospheric dustfall of Huangshi[J] . Journal of Hubei Polytechnic Universi ty, 2014, 30(2) : 32-37.

[27] 姚瑞珍, 张 勇, 王亚良, 等.黄石市大气降尘中重金属污 染特征与评价[J].地球与环境,2016, 44(2) : 212-218.

YAO R Z, ZHANG Y, WANG Y L, et al. Distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in atmospheric dustfall of Huangshi city, China [J] . Earth and Environment, 2016, 44(2) : 212-218.

[28] 吴艳宏, 王苏民, 夏威夷, 等.近代湖泊沉积物球状碳颗粒 (SCP)定年[J].科学通报, 2005, 50(7) : 703-707.

WU Y H, WANG S M, XIA W L, et al. Dating of spherical carbon particles (SCP) in modern lake sediments[J] . Chinese Science Bulletin, 2005, 50(7) : 703-707.

[29] CHEN X, LI C G, MCGOWAN S, et al. Diatom response to heavy metal pollution and nutrient enrichment in an urban lake: Evidence from paleolimnology[J] . Annales De Limnologie - International Journal of Limnology, 2014, 50 (2) : 121 - 130.

[30]曾令晗, 宁栋梁, 毛欣, 等.近 60 年大冶市三里七湖重 金属污染沉积记录[J].地球环境学报, 2014, 5(4) : 252-260.

ZENG L H, NING D L, MAO X, et al. A 60 - year sedimentary record of heavy metal pollution in Sanliqi Lake in Daye City[J]. Journal of Earth Environment, 2014 , 5 (4) : 252-260.

[31] CAO Y, ZHANG E, LANGDON P , et al. Spatially different nutrient histories recorded by multiple cores and implications for management in Taihu Lake, Eastern China [J] . Chinese Geographical Science, 2013 , 23(5) : 537 - 549.

[32] CHEN X, QIAO Q, MCGOWAN S, et al. Determination of geochronology and sedimentation rates of shallow lakes in the middle Yangtze reaches using 210Pb, 137Cs and spheroidal carbonaceous particles[J] . CATENA, 2019 , 174: 546-556.

[33] 黄石市统计局, 国家统计局黄石调查队.黄石市统计年鉴 (2010-2021 年)[M].黄石: 黄石市统计局.

Huangshi Statistics Bureau, Huangshi Investigation Team of National Statistics Bureau. Huangshi Statistical Yearbook from 2010 to 2021 [M] . Huangshi: Huangshi Statistics Bureau .

[34] 黄石市地方志编纂委员会.黄石市志[M].北京: 中华书 局, 2001: 354-361.

Huangshi Local Records Compilation Committee of Hubei P rov-ince. Huangshi City Annals [M] . Beijing: Zhonghua Book Company, 2001 : 354 - 361.

[35] 徐欢.加快推进黄石市资源型城市转型调研报告[J]. 传承, 2012, 153(14) : 82-83.

XU H. Research report on accelerating the transformation of resource-based cities in Huangshi[J] . Inheritance & Innovation, 2012, 153(14) : 82-83.

[36] 陶忠辉, 王剑.黄石: 从资源枯竭“破茧”转型[N].湖 北日报, 2018-11-21(1).

TAO Z H, WANG J. Huangshi: Transition from “ breaking the cocoon" of resource depletion[N]. Hubei daily, 2018- 11-21 (1).