

近两百年长江中下游典型城郊湖泊沉积物重金属污染历史和来源研究——以安庆石塘湖为例*

张晨雪^{1,2,3}, 羊向东^{1,3}, 赵雁捷^{1**}

(1:中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与流域水安全全国重点实验室, 南京 211135)

(2:中国科学院大学, 北京 100049)

(3:中国科学院大学南京学院, 南京 211135)

摘要: 城郊型湖泊受农业扩展和城市化加速的双重影响, 面临日益加剧的重金属污染问题, 威胁水生态系统及周边人类健康。本研究以长江中下游典型城郊湖泊石塘湖为研究对象, 通过沉积岩芯采集和年代序列建立, 结合粒度组分和元素浓度分析, 采用富集系数法和潜在生态风险指数法, 评估并重建了近两百年来 Cd、As、Pb、Co、Cu、Ni、Cr 和 Zn 的污染历史。此外, 利用相关性分析、聚类分析和正定矩阵因子分析法解析了重金属的来源及其相对贡献率。研究表明, 大部分重金属 (如 As、Pb、Co、Cu、Ni、Cr 和 Zn) 的污染等级较低, 潜在生态风险轻微; 然而, Cd 的污染等级和潜在生态风险较高, 自 1981 年起由无污染至较轻污染上升至中等污染, 2004 年达到强生态风险等级。此外, 自 20 世纪 70 年代中期以来, 沉积物综合潜在生态风险指数显著上升, 但总体风险仍处于轻微水平。污染源分析显示, 1930 年之前, 石塘湖沉积物中的重金属主要来源于自然风化 (平均贡献率为 63.63%), 工业源和农业源的贡献率分别为 25.22% 和 11.15%; 1930 年至 1974 年, 农业源上升至 23.44%, 而自然源和工业源的平均贡献率分别为 51.72% 和 24.84%; 1975 年以后, 农业源和工业源贡献率分别上升至 46.74% 和 41.19%, 成为主要污染来源。本研究为石塘湖流域的重金属污染防治提供了科学依据, 为长江中下游湖泊生态环境保护提供了长期变化视角, 同时也为其他发展中国家和地区在快速城镇化背景下的城郊型湖泊污染防治提供了理论参考和技术支持。

关键词: 石塘湖; 沉积物; 重金属污染; 环境演变; 污染历史; 城市化

Study on the history and sources of heavy metal pollution in sediments of a typical suburban lake in the middle and lower Yangtze River over the past two centuries: A case study of Lake Shitang, Anqing*

Chenxue Zhang^{1,2,3}, Xiangdong Yang^{1,3} & Yanjie Zhao^{1**}

(1: State Key Laboratory of Lake Science and Watershen Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R.China)

(2: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

(3: College of Nanjing, University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R.China)

Abstract: Suburban lakes, under the dual influence of agricultural expansion and accelerated urbanization, are facing increasingly severe heavy metal pollution, posing threats to aquatic ecosystems and surrounding human health. This study focuses on

* 2024-11-12 收稿; 2025-01-24 收修改稿。

国家自然科学基金项目 (42171161) 资助。

** 通信作者: Email: yjzhao@niglas.ac.cn。

Lake Shitang, a typical suburban lake in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Through sediment core sampling and chronological reconstruction, combined with grain size and elemental concentration analysis, the enrichment factor method and potential ecological risk index were employed to assess and reconstruct the pollution history of Cd, As, Pb, Co, Cu, Ni, Cr, and Zn over the past two centuries. Additionally, correlation analysis, cluster analysis, and positive matrix factorization were used to determine the sources of heavy metals and their relative contributions. The results show that most heavy metals (e.g., As, Pb, Co, Cu, Ni, Cr, and Zn) exhibited low pollution levels and slight ecological risks. However, Cd had significantly higher pollution levels and potential ecological risks, increasing from no pollution to moderate pollution starting in 1981, with strong ecological risk levels reached in 2004. Furthermore, since the mid-1970s, the comprehensive potential ecological risk index of the sediment has risen significantly, although the overall risk remains at a slight level. Source analysis revealed that before 1930, heavy metals in Lake Shitang sediments primarily originated from natural weathering (average contribution rate of 63.63%), while industrial and agricultural sources contributed 25.22% and 11.15%, respectively. From 1930 to 1974, the contribution of agricultural sources increased to 23.44%, while natural and industrial sources accounted for 51.72% and 24.84%, respectively. After 1975, the contributions of agricultural and industrial sources rose to 46.74% and 41.19%, becoming the main sources of pollution. This study provides a scientific basis for the prevention and control of heavy metal pollution in the Lake Shitang basin, offers a long-term perspective for the ecological protection of lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River, and serves as a theoretical reference and technical support for managing suburban lake pollution in other developing countries and regions under rapid urbanization.

Key words: Lake Shitang; heavy metal pollution; source analysis; pollution history; urbanization; sediment

全球范围内，城市化的迅速推进引发了地球景观和社会结构的深刻变革^[1-2]。这一过程不仅重塑了地表形态，还对自然生态系统产生了重大影响，造成生物栖息地的丧失和水资源的污染，导致原有生态平衡受到严重挑战，水体富营养化、土壤重金属污染以及生物多样性下降等生态环境问题日益凸显^[3-4]。作为城市扩展与农业活动交汇的区域，城郊型湖泊受到来自城市和农村的双重人类活动影响，使其面临更加复杂和严峻的生态环境问题^[5-6]。近年来，国内外学者围绕城郊型湖泊开展了广泛的研究，重点关注快速城市化对湖泊水质的影响^[7-8]，多种污染物分布现状及其环境威胁^[6, 9-11]，以及生态系统对人类活动干扰的响应机制^[12]等方面。这些研究为揭示城郊型湖泊在多重压力下的污染特征、生态风险以及生态系统响应提供了重要基础，但针对污染物的累积模式、来源及其潜在生态风险的长期演变趋势的系统性分析仍需进一步深化。

在城郊型湖泊面临的多种污染问题中，重金属污染物的持续积累及其引发的生态风险已成为亟待解决的关键问题^[6, 13]。重金属通过自然途径（如岩石和土壤风化后，通过地表径流迁移）或人类活动（如采矿、冶炼排放、农业施肥、城市污水排放及交通排放等）进入湖泊，并最终在沉积物中汇聚^[14]。这些污染物因其毒性、持久性和不可降解性，对湖泊生态系统构成长期威胁，例如抑制底栖生物的生长与发育、恶化水质并加剧污染问题^[15-17]。此外，重金属通过食物链逐级放大，形成显著的生物富集效应，最终威胁人类健康，可能引发神经系统损伤、肾功能衰竭以及癌症等健康问题^[18-20]。因此，识别与评估湖泊沉积物重金属污染及生态风险的现状和历史趋势，并分析自然因素与人为活动对湖泊重金属污染贡献的动态过程，对于维护湖泊流域的生态安全和保障人类健康具有重要意义。

近年来，国内外学者在湖泊重金属污染领域取得了诸多进展，研究内容涵盖了污染特征与生态风险评估、污染源解析以及治理技术与管理策略等多个方面^[14, 21-23]。然而这些研究多集中于短时间尺度的环境监测，对长期重金属污染历史和环境变化机制的深入探讨仍显不足。湖泊沉积物因其能够长期、连续地保存流域物质循环的多种成分和历史信息，尤其是重金属的沉积、迁移和累积过程，因此成为重建重金属污染历史的重要载体^[24-25]。通过结合成熟的定年技术，分析沉积物记录中的重金属浓度和累积速率的时序变化特征，不仅能够有效重建流域重金属污染的历史，还能深入揭示流域环境的演变过程^[26-28]。此外，沉积物的物理特征（如沉积通量和粒度）能够有效反映流域的侵蚀状况，将其与重金属浓度变化以及流域社会历史数据相结合，有助于推断并解读自然因素和人类活动对流域环境的影响过程及机制，从而为理解污染源变化提供全面且科学的依据^[29-31]。

长江中下游地区拥有数量众多、分布集中的浅水湖泊，是中国经济发展核心区域之一，具备高度工业化和城市化程度的城市群，经济活动密集且产业结构复杂^[32-34]。石塘湖是该地区典型的城郊型湖泊，地理位置毗邻快速发展的工业区和居民区，长期承受农业、工业和城市排放的多重污染压力。已有研究主要关注石塘湖水质污染和沉积物中重金属浓度的现状调查^[35-36]，但对其重金属污染历史的动态演变、自然因素与人为活动的相对贡献以及不同阶段污染特征仍缺乏系统性解析。在此背景下，本研究以石塘湖作为研究对象，通过采集沉积岩芯，采用 $^{210}\text{Pb}/^{137}\text{Cs}$ 定年方法建立年代序列，并对沉积物的粒度组分及镉（Cd）、砷（As）、铅（Pb）、钴（Co）、铜（Cu）、镍（Ni）、铬（Cr）和锌（Zn）等多种重金属元素（砷为类金属，与重金属元素物化性质相似，故归为一类，下同）浓度进行测定。本研究结合富集系数法和潜在生态风险指数法，重建了近 200 年来石塘湖沉积物重金属污染历史。此外，通过多种重金属来源分析方法（如 Pearson 相关性分析、聚类分析和正定矩阵因子分析法（Positive Definite Matrix Factor Analysis, PMF）），结合社会经济数据，综合分析了石塘湖流域自然因素和人为活动对湖泊沉积物重金属污染的影响，并探究了不同阶段自然源与人为源贡献率的变化过程及其原因。这些研究结果不仅有助于深入理解长江中下游地区湖泊沉积物的污染特征，还为湖泊环境治理和污染修复提供了重要的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

石塘湖位于中国安徽省安庆市宜秀区，属于破罡湖流域。湖泊南部紧邻宜秀区主城区，西北部为大龙山国家森林公园，东北侧与破罡湖相连（图 1）。湖泊水流自西南流向东北，并经破罡湖闸站进入长江。湖泊面积达 14.47 km²，年均蓄水量约 1600 万 m³，平均水深为 1.52 m，最大水深可达 2.5 m。湖泊流域位于亚热带季风气候区，平均气温为 16.5 °C，降雨量为 1375 mm，风速为 3.2 m·s⁻¹，气候温和，雨量适中，光照充足，无霜期较长^[37]。流域母岩基质主要由早白垩纪石英正长岩、晚侏罗纪二长花岗岩、钟山组-罗岭组石英砂岩、粉砂岩等组成^[38]。

石塘湖形成于第三纪末至第四纪初期的构造活动，受到区域性断陷作用和长江泥沙淤积的共同影响。在头陀断层和南天盘断层的作用下，湖泊最初为构造湖，后经历泥沙淤积与岸线扩展逐渐演变为现今的平原湖泊形态；进入近现代，由于人类聚居与开发，沿湖湿地逐步演变为农田，湖泊功能和生态环境发生显著变化^[39]。目前，地表径流和降雨是石塘湖的主要补给来源。然而，近年来随着流域内城镇建设的快速发展和工厂的密集分布（图 1），石塘湖长期承受生活污水和工业废水的排放压力，湖泊水质持续恶化，生态环境问题日益突出^[35]。

1.2 流域历史记录

社会经济指标为理解流域人类活动对石塘湖沉积物重金属污染影响过程提供了重要背景。本研究收集了 1949 年至 2021 年期间安庆市的社会经济数据，包括总人口、非农业人口、国内生产总值、化肥使用量、粮食产量、肉类产量和水产品产量，这些数据来自地方志和年鉴，包括《安庆地区志》、《安庆市国民经济和社会发展统计公报》、《安徽统计年鉴》和《安庆经济统计年鉴》等。对于缺失的时间序列数据，使用 R 语言中的 imputeTS 包^[40]进行了插值。此外，1900 年至 2016 年宜秀区、大观区和迎江区耕地面积变化数据来源于地球系统科学数据（Earth System Science Data）^[41]，1980 年至 2020 年石塘湖流域土地利用数据来源于中国科学院资源环境与数据平台^[42]。

安庆作为长江沿线的重要工业城市，工业活动起步较早，工业发展历史悠久，1860 年设立的安庆兵械所更标志着中国近代工业的开端^[43]。进入 20 世纪以来，伴随着工农业活动的发展，石塘湖流域及其周边区域的土地利用方式发生了显著变化。自 20 世纪 30 年代起，耕地面积开始扩张，1978 年后迅速增长，并在 1983 年达到 151.91 km² 的峰值，随后逐渐减少（图 2a）。同时，自 20 世纪 90 年代以来，湖泊流域的建设用地面积不断扩展（图 2b）。在 20 世纪 70 年代至 80 年代，安庆市总人口快速增长，伴随非农业人口的显著增加（图 2c），显示出城市化进程的加速。此外，自 20 世纪 80 年代以来，安庆市的国内生产总值（GDP）呈现指数增长趋势（图 2d）。与此同时，自 20 世纪 50 年代起，安庆市的粮食产量显著增加，化肥使用量自 20 世纪 70 年代起持续上升（图 2e, f）。在 20 世纪 90 年代，水产养殖强度的增加也导致

了水产品产量的显著提升（图 2e）。这些变化充分反映了区域经济的快速发展及土地利用方式的转变。

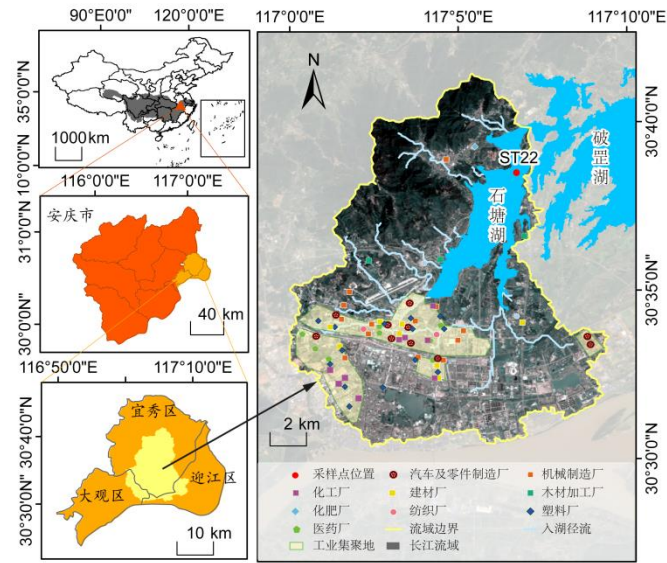


图 1 石塘湖流域工厂分布及湖泊沉积岩芯采样点位置

Fig.1 Distribution of factories in catchment and sampling site of sediment core in Lake

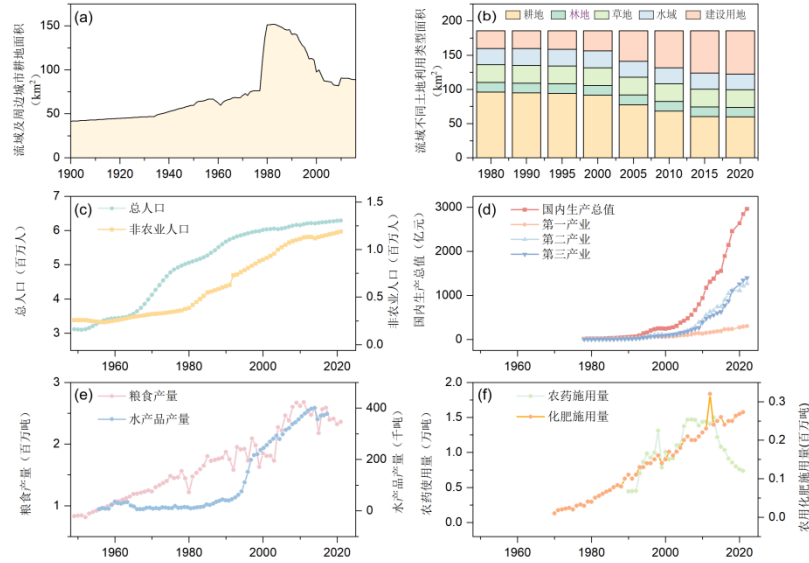


图 2 石塘湖流域社会经济发展状况：（a）1900-2016 年宜秀区、大观区和迎江区耕地面积（ km^2 ）；（b）1980-2020 年石塘湖湖泊流域土地利用类型变化情况；（c）安庆市 1949-2021 年总人口、非农业人口变化状况（百万人）；（d）1978-2022 年安庆市国内生产总值变化状况（亿元）；（e）1949-2021 年安庆市粮食产量（百万吨）和水产品产量（千吨）；（f）1949-2021 年安庆市农药施用量（万吨）和化肥施用量（百万吨）

Fig. 2 Socio-economic development status of Shitanghu Basin: (a) Cultivated land area (km^2) in Yixiu District, Daguan District and Yingjiang District during 1900-2016; (b) Changes of land use types in Shitanghu Lake basin from 1980 to 2020; (c) Changes of total population and non-agricultural population in Anqing City from 1949 to 2021 (million people); (d) Changes in gross domestic product of Anqing City from 1978 to 2022 (million); (e) The grain production (million tons) and aquatic product output (thousand tons) in Anqing City from 1949 to 2021; (f) The usage of pesticides (ten thousand tons) and fertilizers (million tons) in Anqing City from 1949 to 2021

1.3 样品采集与实验室分析

2022年2月,在石塘湖北部(30°38'24.54"N, 117°7'9.01"E)(图1)水深1.9 m处,利用重力采样器获取沉积岩芯ST22-1,芯长71 cm。采样点湖水透明度为0.55 m,总磷、总氮和叶绿素-a的浓度分别为0.1 mg·L⁻¹、2.59 mg·L⁻¹和14.35 μg·L⁻¹。现场将沉积岩芯以1 cm的间隔进行分样,所有子样品密封在聚乙烯袋中,带回实验室进行-4℃冷冻保存直到处理。本研究的实验室分析项目包括²¹⁰Pb、¹³⁷Cs放射性测定,粒度组分分析和元素浓度测定,所有测试均在湖泊与环境国家重点实验室完成。

沉积岩芯²¹⁰Pb、¹³⁷Cs的比活度采用高纯锗井型探测器(HPGe GWL-120-15)测定。取0.5 g冷冻干燥后的样品,采用30% H₂O₂去除有机质,利用10% HCl去除碳酸盐,在样品洗至中性后加入10 ml浓度为10%的六偏磷酸钠溶液,超声波仪中振荡15 min后,用Mastersizer 2000型激光粒度仪测量并分析粒度组成^[44]。沉积物元素的测量方法为:将冷冻干燥沉积物样品,混合、研磨、过筛(100目)后,称取约0.1 g置于利用四氟乙烯消解罐中,经HCl-HNO₃-HF-HClO₄四酸消解法处理后^[45],铝(Al)、钛(Ti)和铁(Fe)和Zn的浓度通过电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES, Leeman Labs, Profile DV)测定,而Cr、Co、Cu、As、Cd和Pb的浓度则通过电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS, Agilent 7700×)测定,仪器测量误差在±5%之间。

1.4 沉积物干沉积通量和重金属累积速率计算方法

沉积物干沉积通量(Dry Mass Accumulation Rate, DMAR)和重金属累积速率(Heavy Metal Accumulation Rate, HMAR)是分析沉积物中物质输入强度及其重金属累积历史的重要参数。其中沉积物干沉积通量用于表征单位时间内沉积物的堆积强度,其计算公式为:

$$DMAR = \rho \times SAR \quad (1)$$

式中,DMAR为沉积物干沉积通量(g·cm⁻²·a⁻¹);ρ为沉积物干密度(g·cm⁻³);SAR为沉积速率(Sediment Accumulation Rate)(cm·a⁻¹),基于放射性同位素²¹⁰Pb、¹³⁷Cs测年结果计算^[46]。

重金属累积速率用于量化目标重金属在沉积物中的堆积强度,其计算公式为:

$$HMAR = H_x \times DMAR \quad (2)$$

式中,HMAR为重金属累积速率(mg·cm⁻²·a⁻¹);H_x为目标重金属元素的浓度(mg·kg⁻¹),DMAR为沉积物干沉积通量(g·cm⁻²·a⁻¹)。

1.5 重金属污染评价方法

1.5.1 富集系数 富集系数法是一种广泛用于沉积物重金属等污染程度评估的地球化学方法^[47-49]。该方法通过选取适宜的参比元素作为参考标准,对目标元素浓度进行归一化和标准化处理,以平衡矿物自然风化、粒度变化以及采样和制样过程中可能引入的干扰,从而提高结果的准确性和各指标之间的可比性^[50-51]。常用参比元素包括Al、Ti和铁Fe等,因其化学性质稳定、丰度较高且分布均匀,被广泛应用于湖泊沉积物重金属研究^[51-53]。石塘湖流域的母岩基质主要由早白垩纪石英正长岩、晚侏罗纪二长花岗岩、钟山组-罗岭组石英砂岩、粉砂岩等组成^[38],而Al广泛存在于这些地质背景中,与正长石、铝硅酸盐和其他土壤矿物(如铝土矿)有较强相关性,因此适合作为富集系数计算的背景元素。在长江中下游湖泊重金属污染研究中Al元素也被广泛应用为参比元素^[53-55]。此外,本研究中沉积记录显示Al元素浓度与黏土(<2 μm)组分呈显著正相关(R²=0.89, p-value=0.98),指示其自然来源特征。因此本研究选用Al作为参比元素计算富集系数。在本研究中,重金属的富集系数(Enrichment factor, EF)按以下公式计算:

$$EF = (M/Al)_S / (M/Al)_B \quad (3)$$

式中(M/Al)_S为样品中重金属与Al元素的浓度比,(M/Al)_B为背景样品中重金属与Al元素浓度比。本研究采用岩芯ST22-1中1860年之前(63-71 cm)的元素平均浓度作为背景参考值。富集因子评价的沉积物污染等级划分见表1。

1.5.2 潜在生态风险评价 潜在生态风险指数法是一种评估沉积物重金属污染及其生态危害的常用方法,该方法在分析过程中同时考虑了重金属的浓度和毒性两方面的因素^[56-57]。单个重金属潜在生态风险指数(Single factor ecological risk index, E_rⁱ)和综合潜在生态风险指数(Comprehensive potential ecological risk

index, RI) 的计算方法如下:

$$E_r^i = T_r^i(C_s^i/C_b^i) \tag{4}$$

$$RI = \sum E_r^i \tag{5}$$

式(4)中 T_r^i 为重金属*i*的毒性响应系数值^[59], C_s^i 和 C_b^i 分别为重金属*i*的实测浓度和背景值。式(5)中, RI 为沉积物中所有重金属潜在风险因子 E_r^i 的总和。 E_r^i 和 RI 的等级划分见表1。

表1 富集因子(EF), 单因子潜在生态风险指数(E_r^i)和综合潜在生态风险指数(RI)及其对应的污染等级和生态风险等级划分标准^[58-59]

Tab. 1 Classification standards for enrichment gactor (EF), single factor ecological risk index (E_r^i), and comprehensive potential ecological risk index (RI) along with their corresponding pollution and ecological risk levels ^[58-59]

EF	污染等级	E_r^i	RI	潜在生态风险等级
EF<2	无污染至较轻污染	$E_r^i<40$	RI<150	轻微
2≤EF<5	中等污染	40≤ E_r^i <80	150≤RI<300	中等
5≤EF<20	重度污染	80≤ E_r^i <160	300≤RI<600	强
20≤EF	极重污染	160≤ E_r^i <320	RI≥600	很强
		$E_r^i\geq320$		极强

1.6 重金属来源分析

分析沉积物中重金属元素与粒度指标之间的相关性, 为深入理解重金属污染源提供了重要线索^[29-30, 60]。已有研究表明, 在自然状态下, 沉积物中的重金属含量通常与黏土组分呈正相关关系。然而, 人为活动可能会改变这种相关性^[61-63]。本研究采用 Pearson 相关性分析法, 探讨沉积岩芯中 8 种重金属元素 (Cd、As、Pb、Co、Cu、Ni、Cr 和 Zn) 与 4 个粒度指标 (中值粒径、黏土组分、粉砂组分和砂组分) 之间的相关关系。分析过程基于 R 4.3.1 软件, 借助 corplot 包进行数据处理与结果可视化^[64]。此外, 本研究采用层次聚类分析法, 对沉积物中的 8 种重金属元素组合特征进行了分析, 为识别重金属来源提供有效信息^[31]。该分析同样使用 R 4.3.1 软件, 并结合 cluster 包和 dendextend 包进行数据分析和图形绘制^[65-66]。

正定矩阵因子分析法是一种应用广泛的污染源解析方法, 适用于识别和量化土壤、沉积物及大气颗粒物中重金属的来源和非负源贡献率^[57, 67-68]。该模型基于迭代最小二乘算法, 该算法将原始受体数据矩阵(E)分解为因子评分矩阵(X), 因子加载矩阵(Y)和残差矩阵(Z), 并根据对重金属来源的先验知识确定不同因子的贡献率^[67]。PMF 模型的基本方程如下:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik}f_{ik} + e_{ij} \tag{6}$$

式中, X_{ij} 表示样本*i*种第*j*个元素的浓度; g_{ij} 是样本*i*种第*k*个元素的贡献率; f_{ij} 是污染源*k*为第*j*个元素的特征值。残差矩阵 e_{ij} 有目标函数*Q*的最小值计算。

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{e_{ij}}{u_{ij}} \right)^2 \tag{7}$$

式中, u_{ij} 指的是*i*样本中第*j*个元素的不确定度。

在本研究中, 所有样品的每种元素的浓度都超过了仪器检测限, 因此不确定度采用以下公式进行计算:

$$Unc = \sqrt{(EC \times C)^2 + (0.5 \times MDL)^2} \tag{8}$$

式中, Unc 为元素的不确定度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), EC 为误差系数 (本研究采用经验值 10%), C 为元素浓度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), MDL 为元素仪器检出限 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。模型输入的元素包括 8 种重金属元素 (Cd、As、Pb、

Co、Cu、Ni、Cr 和 Zn），相关操作在 EPA PMF 5.0 软件中进行。在运行过程中，我们选择了 3~6 个因子进行 20 次迭代计算。通过多次重复计算物种比例残差、信噪比 (S/N)、观测值与预测值之间的相关性 (r^2) 和 Q 值，最终确定了能够合理解释污染源类别的 3 个因子。

2 结果与讨论

2.1 沉积岩心年代

石塘湖 ST22-1 钻孔 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度随深度的增加呈指数下降趋势 (图 3a)。由于钻孔 64cm 以下的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度较低，因此在年代计算中不予考虑。 ^{137}Cs 活度在 36 cm 处达到峰值，对应于 1963 年全球核试验 (图 3b)。鉴于长江中下游地区强烈人类活动对沉积速率的影响，本研究采用 ^{210}Pb 恒定放射性通量模式 (Constant rate of supply, CRS) 来计算钻孔沉积物的年代，但结果与通过 ^{137}Cs 活度获得的 1963 年时间标记有所偏差。为了解决这一问题，本研究采用复合模式方法计算钻孔沉积年代，即使用 ^{137}Cs 时标对 CRS 计算结果进行校正^[46]。通过该模式得到的沉积钻孔年代和深度之间的关系如图 3c 所示。在 64 cm 处，沉积岩芯的年代约为 1833 年，整个钻孔记录了近 200 年的沉积历史。

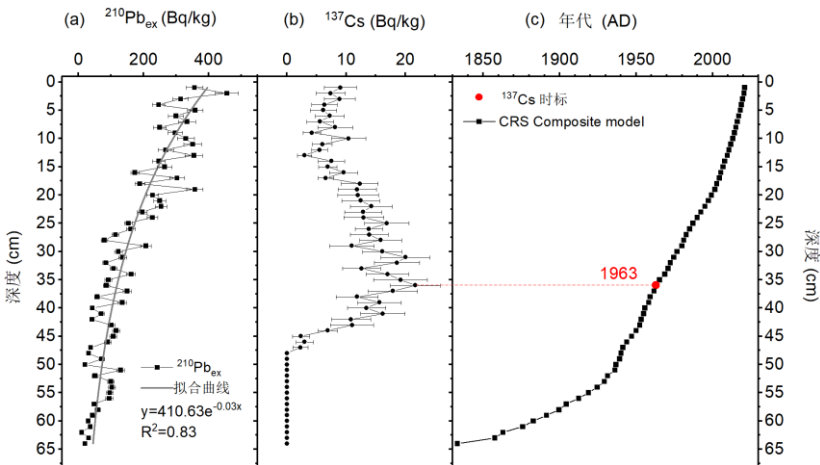


图 3 ST22-1 岩芯沉积物 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度 (a)、 ^{137}Cs 比活度 (b) 及年代-深度对应图 (c)

Fig. 3 The activities of unsupported $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (a), ^{137}Cs (b), the age-depth relationship (c) in sediments of ST22-1 Core

2.2 石塘湖表层沉积物重金属污染状况及潜在生态风险评价

石塘湖沉积钻孔表层 (0-1 cm) 沉积物中 Cd、As、Pb、Co、Cu、Ni、Cr 和 Zn 的浓度分别为 0.71、19.58、50.05、16.43、34.98、40.47、87.89 和 170.97 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 2)。与中国不同地区的城郊型湖泊相比，石塘湖表层沉积物中 Cd、As、Pb、Ni 和 Cr 的浓度普遍高于长江中下游其他城郊湖泊，但部分元素 (如 Zn 和 Cu) 的浓度低于龙阳湖和墨水湖；总体上，石塘湖的重金属浓度水平高于淮河流域的骆马湖。在与西南地区的滇池对比中，石塘湖在 Ni 和 Cr 等重金属的浓度上表现出更高水平；此外，与邛海相比，石塘湖在 As、Pb 和 Zn 的浓度上明显较高。

石塘湖表层沉积物中 As、Pb、Co、Cu、Ni、Cr 和 Zn 的污染等级和潜在生态风险被评估为无污染至轻微污染等级和轻微生态风险，而 Cd 的污染程度和潜在生态风险最为突出，达到了中度污染和强生态风险等级。这一结果与安庆市湿地湖滨带土壤及河湖沉积物的重金属污染状况的研究结果一致，均表明 Cd 的污染水平和生态风险系数显著高于其他元素^[69-70]。综合已有研究，中国城郊型湖泊沉积物中，Cd 相较于其他重金属元素展现出更高的潜在生态风险等级 (表 2)。

2.3 沉积岩芯中重金属浓度、干沉积通量、重金属累积速率及粒度分布的变化趋势

根据表 3 中石塘湖沉积岩芯的重金属浓度和累积速率统计结果，8 种重金属元素 (Cd、As、Pb、Co、

Cu、Ni、Cr、Zn)的平均浓度分别为0.45、17.2、46.69、17.5、35.06、43.07、91.42和152.93 mg·kg⁻¹。按重金属的平均浓度从大到小排序依次为 Zn>Cr>Pb>Ni>Cu>Co>As>Cd。按变异系数大小排序为 Cd>Pb>Ni>As>Co>Zn>Cr>Cu, 其中 Cd 的变异系数达到 37.22%, 远高于其他元素。在 8 种重金属元素中, Cd、As、Pb 和 Zn 的平均浓度高于石塘湖沉积物重金属浓度的背景值, 特别是 Cd 的浓度达到背景值的 1.74 倍, 表明其受人为影响较为显著。

表 2 中国不同地区城郊型湖泊表层沉积物中重金属浓度及不同重金属元素的最高生态风险等级 (mg/kg)¹⁾
Tab.2 Heavy metal concentrations in surface sediments and maximum ecological risks level of different heavy metals
in suburban lakes across various regions of China (mg/kg)¹⁾

地区	湖泊	行政区划	Cd	As	Pb	Co	Cu	Ni	Cr	Zn
长江中下游地区	石塘湖	安徽	0.71 ^c	19.58 ^a	50.05 ^a	16.43 ^a	34.98 ^a	40.47 ^a	87.89 ^a	170.97 ^a
	巢湖 ^[10]	安徽	0.12 ^c	4.46 ^a	21.93 ^a	/	19.07 ^a	22.04 ^a	57.33 ^a	54.82 ^a
	太湖 ^[10]	江苏	0.09 ^c	10.55 ^b	25.72 ^a	/	19.07 ^a	38.85 ^a	85.74 ^a	71.33 ^a
	北麻漾 ^[6]	江苏	0.25 ^c	/	26.4 ^a	33.2 ^a	60.55 ^a	39.26 ^a	80.56 ^a	131.62 ^a
	龙阳湖 ^[9]	湖北	0.58 ^d	14.27 ^a	33.2 ^a	/	55.61 ^a	/	59.2 ^a	176.94 ^a
	墨水湖 ^[9]	湖北	0.62 ^d	19.26 ^a	41.69 ^a	/	53.67 ^a	/	85.53 ^a	266.64 ^a
淮河流域	骆马湖 ^[71]	江苏	0.19 ^b	11.24 ^a	21.42 ^a	/	27.12 ^a	34.02 ^a	72.18 ^a	69.82 ^a
西南地区	滇池 ^[72]	云南	1.3 ^c	27.9 ^a	64.2 ^a	/	71.6 ^a	36.9 ^a	65.1 ^a	186 ^a
	邛海 ^[72]	云南	0.74 ^c	15.1 ^a	31.4 ^a	/	28.3 ^a	42.4 ^a	90.4 ^a	124 ^a

1) a, b, c, d, 分别表示单因子潜在生态风险等级为轻微, 中等, 强, 很强。

石塘湖沉积岩芯中沉积物干沉积通量介于 0.01~0.69 g·cm⁻²·a⁻¹ 之间, 平均值为 0.24±0.14 g·cm⁻²·a⁻¹ (图 4)。8 种重金属元素 (Cd、As、Pb、Co、Cu、Ni、Cr、Zn) 的平均累积速率分别为 1.13、41.61、112.60、41.53、83.29、101.61、216.52 和 367.61 mg·m⁻²·a⁻¹。整个沉积岩芯中值粒径介于 3.46~6.54 μm, 平均值为 4.96±0.97 μm。粒度组成以粉砂为主, 组分占 66.66~80.14%; 黏土组分在 19.74~33.12%之间; 砂的组分在 0~2.16%之间。

根据石塘湖近 200 年来沉积物重金属浓度、干沉积通量、重金属累积速率及粒度分布的变化趋势 (图 4), 可以将沉积物重金属元素的输入和累积过程划分为三个阶段:

阶段 I (1833-1929 年): 在这一时期, Cd、As、Pb 和 Zn 等四个元素的浓度较低且相对稳定, 而 Co、Cu、Ni 和 Cr 的浓度则呈下降趋势。沉积物干沉积通量及 8 种重金属元素的累积速率均较低并保持稳定, 干沉积通量介于 0.01-0.22 g·cm⁻²·a⁻¹ 之间, 均值为 0.07±0.05 g·cm⁻²·a⁻¹。中值粒径和粒度组分变化较为平稳, 中值粒径在 3.46 至 3.8 μm 之间, 平均值为 3.61±0.1 μm; 黏土和粉砂的变化范围分别为 30.5%至 33.12%和 66.66%至 69.41%。

阶段 II (1930-1974 年): Cd、Pb 和 Zn 的浓度总体稳定, Co、Cu、Ni 和 Cr 的浓度继续下降, 而 As 则波动上升。沉积物干沉积通量及 8 种重金属元素的累积速率表现出强烈的上升和波动, 在 1937 年达到峰值。同时, 中值粒径和粉砂组分均显示出线性上升的趋势。

阶段 III (1975-2022 年): Cd、Pb 和 Zn 的浓度显著增长, As 在 1975 至 2000 年呈现下降趋势, 但自 2000 年以来持续上升, 而 Co、Cu、Ni 和 Cr 的浓度明显下降。沉积物干沉积通量及 8 种重金属元素的累积速率则呈现出明显的上升趋势。1975 年至 21 世纪初, 中值粒径和粉砂组分持续上升, 黏土组分不断下降。进入 21 世纪以来, 石塘湖沉积物的中值粒径和粉砂组分维持在较高水平, 中值粒径均值为 5.81±0.49 μm, 粉砂组分在 74.74%至 80.14%之间, 黏土组分则保持在 19.74%至 25.08%之间。

表 3 石塘湖沉积岩芯元素浓度及累积速率描述性统计结果

Tab.3 Descriptive statistics of element concentrations and accumulation rates in Lake Shitang

		Cd	As	Pb	Co	Cu	Ni	Cr	Zn	Al	Ti	Fe
浓度	背景值	0.2	15.8	44.3	19.3	37.4	48.3	100.	143.	10335	5712	5336
	(mg·kg ⁻¹)	6	4	3	6	7	2	06	90	5.75	.95	3.63
	最小值	0.2	15.0	41.1	15.8	33.0	38.2	83.6	139.	85371.	5247	4462
	(mg·kg ⁻¹)	5	9	2	8	9	2	9	37	18	.79	5.63
	最大值	0.7	19.9	52.2	20.1	39.8	49.4	102.	170.	10353	5951	5470
	(mg·kg ⁻¹)	2	5	7	3	3	2	73	97	6.40	.26	5.86
	平均值	0.4	17.2	46.6	17.5	35.0	43.0	91.4	152.	93467.	5630	4932
	(mg·kg ⁻¹)	5	0	9	0	6	7	2	93	70	.90	6.25
	标准差	0.1								5757.5	207.	3261.
	(mg·kg ⁻¹)	7	1.28	3.77	1.14	1.52	3.28	5.15	9.65	6	57	50
累积速率	变异系数 (%)	37.22	7.45	8.08	6.53	4.34	7.61	5.64	6.31	6.16	3.69	6.61
	平均值与背景值之比	1.74	1.09	1.05	0.90	0.94	0.89	0.91	1.06	0.90	1.01	0.92
	最小值	0.0										
	(g·cm ⁻² ·a ⁻¹)	4	2.26	5.65	2.59	5.34	6.59	13.7	19.2			
	最大值	2.7	119.	302.	124.	237.	314.	657.	998.			
	(g·cm ⁻² ·a ⁻¹)	1	34	74	94	82	09	55	06			
	平均值	1.1	41.6	112.	41.5	83.2	101.	216.	367.			
	(g·cm ⁻² ·a ⁻¹)	3	1	60	3	9	61	52	61			
	标准差	0.7	24.2	62.4	24.3	47.7	59.4	125.	204.			
	(g·cm ⁻² ·a ⁻¹)	2	5	2	1	3	9	96	78			
	变异系数 (%)	64.00	58.2	55.4	58.5	57.3	58.5	58.1	55.7			
			6	3	4	1	5	8	1			

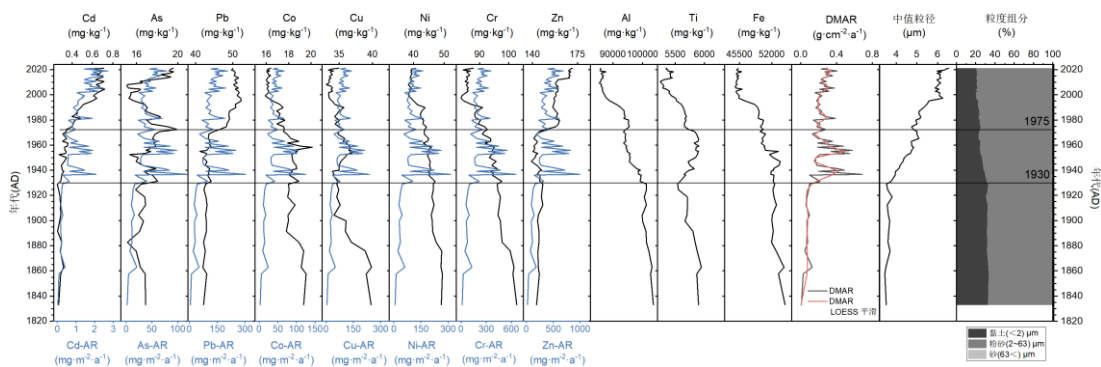


图 4 石塘湖岩芯元素浓度、累积速率、沉积物干沉积通量及粒度组分历史变化特征

Fig.4 Historical variation characteristics of element concentrations and accumulated rates (AR), Dry mass accumulated rate (DMAR), and grain size index in Lake Shitang

2.4 沉积岩芯重金属污染历史和潜在生态风险变化趋势

通过分析沉积岩芯中 8 种重金属元素 (Cd、As、Pb、Co、Cu、Ni、Cr 和 Zn) 的富集因子、单因子潜在生态风险指数以及综合潜在生态风险指数的变化趋势, 本研究评估了石塘湖近 200 年来沉积物污染等级和生态风险的变化趋势。近 200 年来, 这 8 种重金属元素的 EF 均值分别为 1.97、1.21、1.17、1.00、1.04、0.98、1.01 和 1.18。按照 EF 均值的大小排序为 $Cd > As > Zn > Pb > Cu > Cr > Co > Ni$ 。如 (图 5a) 所示, 在这 8 种重金属中, Cd 的 EF 值呈现出明显增长趋势, 其污染等级自 1981 年起由无至较轻污染升至中等污染。As、Pb、Co、Cu、Ni、Cr 和 Zn 均处于无至较轻污染等级, 其中 As、Zn 和 Pb 的 EF 值上升明显。

在石塘湖沉积岩芯中, 8 种重金属元素 E_r^I 均值大小依次为: Cd (52.15)、As (10.86)、Pb (5.27)、Cu (4.68)、Co (4.52)、Ni (4.46)、Cr (1.83) 和 Zn (1.06)。如图 5b 所示, As、Pb、Co、Cu、Ni、Cr 和 Zn 等 7 种重金属的 E_r^I 值均小于 40, 整体上处于轻微生态风险等级。相对而言, Cd 的潜在生态风险等级较高。在 1950 年之前, E_r^{Cd} 值低于 40, 处于轻微生态风险等级; 然而, 自 1950 年起, 该值超过 40, 并呈持续上升趋势, 逐步达到中等生态风险等级, 并在 2004 年后达到了强生态风险等级。石塘湖沉积岩芯中重金属元素 RI 值范围为 61.09 ~ 116.78 (图 5c), 总体而言综合潜在生态风险总体上处于轻微等级, 但自 20 世纪 70 年代中期以来, 综合潜在生态风险指数显著上升。

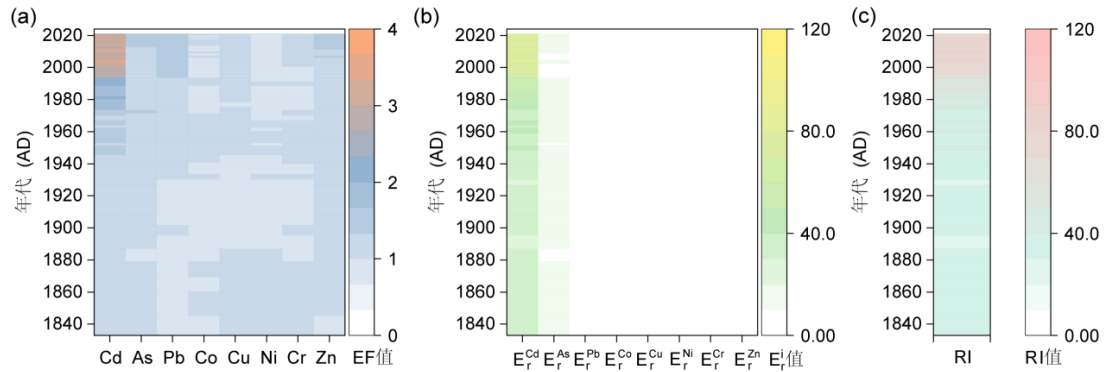


图 5 石塘湖岩芯重金属 (a) 富集因子 (EF)、(b) 单因子潜在生态风险指数 (E_r^I) 和 (c) 综合潜在生态风险指数 (RI) 变化趋势

Fig.5 Variation trend of heavy metal (a) enrichment factor (EF), (b) single factor potential ecological risk index (E_r^I) and (c) comprehensive potential ecological risk index (RI) in sediment core of Lake Shitang

2.5 沉积岩芯重金属来源分析

湖泊沉积物中的重金属元素受到母岩、气候和沉积环境等多种因素的综合影响, 随着人类活动范围和强度不断增加, 沉积物中重金属元素特征逐渐转变为自然过程与人类活动相互作用的结果^[73-75]。本研究利用多种分析手段 (包括 Pearson 相关性分析、聚类分析和正定矩阵因子分析法) 进行重金属来源分析。

在本研究中, 石塘湖沉积岩芯中 Cu、Cr、Ni 和 Co 等四种重金属元素之间呈现显著的正相关关系 ($P < 0.001$) (图 6a)。此外, 这四种重金属元素与黏土组分也显示出显著的正相关 ($P < 0.001$) 聚类分析的结果将这四种重金属元素归为同一组 (图 6b), 表明它们可能具有共同的起源或相似的迁移路径。沉积物岩芯中 Cu、Cr、Ni 和 Co 的平均浓度分别为背景值的 0.94 倍、0.91 倍、0.89 倍和 0.91 倍, 且变异系数较低, 这表明这些元素的浓度相对稳定, 且其污染水平和潜在生态风险均处于较低等级。这四种重金属元素主要受到自然背景因素的控制, 其人为活动的影响较小。这一发现与长江中游典型湖泊 (如东洞庭湖、洪湖和赤湖) 对沉积物重金属来源的研究结果一致, 这些研究也表明, Cr、Co 和 Ni 主要来源于母质背景^[76]。安庆位于长江中下游铜铁矿成矿带, 铜矿资源丰富, 储量达 60 万吨^[43], 因此 Cu 元素可能通过岩石自然

风化过程汇入湖泊沉积物中。PMF 源解析结果显示，在因子 1 中，Ni、Co、Cr 和 Cu 等四种元素的载荷较高，因此推测因子 1 代表了自然源（图 7a）。这些自然来源元素的浓度呈下降趋势（图 4），可能受到人为活动对沉积物结构的显著影响，一方面沉积物中人为来源重金属的比例逐渐增加，稀释了自然来源元素的浓度，另一方面沉积速率的增加可能掺入更多人为来源颗粒物，使自然来源元素的浓度表现出下降趋势。

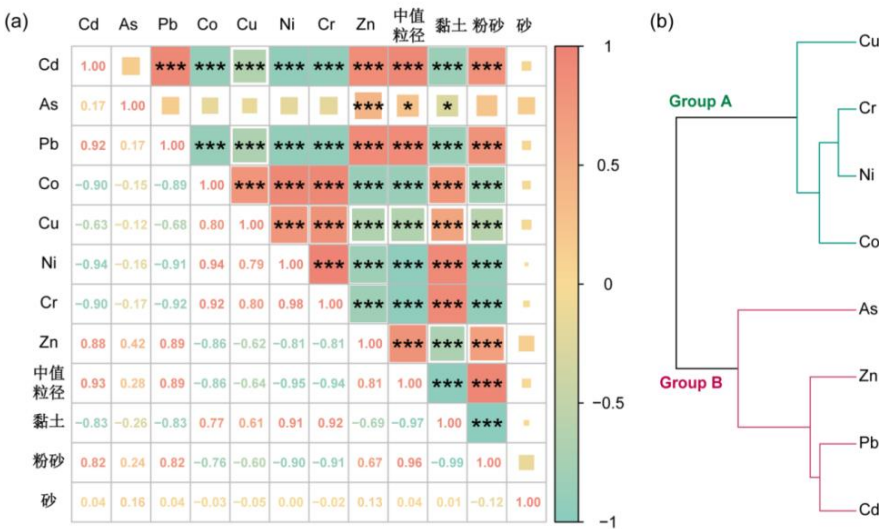


图 6 石塘湖 ST22-1 沉积岩心 (a) 粒度与各重金属元素之间的相关性 (n=64)；(b) 重金属元素聚类分析¹⁾

1) * 表示在 0.05 水平上显著相关，** 表示在 0.01 水平上显著相关，*** 表示在 0.001 水平上显著相关

Fig.6 (a) Correlation between grain size and heavy metal elements (n=64); (b) Cluster analysis of heavy metal elements of ST22-1 sedimentary core in Lake Shitang

聚类分析将 Cd、Pb、Zn 和 As 等四种重金属元素归为一组（图 7b）。其中，Cd、Pb 和 Zn 三种元素之间存在显著的正相关关系（ $P < 0.001$ ），同时它们与粉砂和中值粒径也表现出显著的相关性（ $P < 0.001$ ）。此外，As 与 Zn 之间以及 As 与中值粒径之间均呈现明显的正相关关系（ $P < 0.001$ 和 $P < 0.05$ ）[图 7(a)]。四种重金属元素平均浓度均高于石塘湖沉积物重金属浓度的背景值。这些结果表明，这四种元素受到人为因素的影响，可能具有相似的污染来源或复合污染特征。

PMF 源解析结果显示（图 7a），在因子 2 中，As 的载荷达到 51.15%，成为该因子的主要贡献元素。同时，其他载荷较高的重金属包括 Zn 和 Pb，载荷分别为 36.05% 和 32.66%。As 的主要来源于人为活动，尤其是在农业中广泛使用的化学品，如杀虫剂、除草剂和化肥等^[77]。Zn 和 Pb 在农家肥和商品有机肥料中普遍含量较高^[78]，因此可以推测因子 2 主要代表农业源。然而，需要注意的是，现代化农业投入品（如化肥和农药）在 20 世纪 50 年代之前的普及程度较低，因此 20 世纪 50 年代以前农业污染可能更多来自传统农家肥的施用。

在因子 3 中，Cd 具有最高的载荷值，此外，Pb、Zn 和 Cu 的载荷也相对较高。安庆地区的铜矿冶炼和采矿活动可能导致 Cd、Zn、Pb 和 Cu 等重要污染物的释放^[79]。同时，石塘湖集水区内的工业生产活动（如汽车零部件制造、机械制造和化工生产）也对环境产生了显著影响。金属加工、机械制造和化学生产等行业的排放是环境中 Cd、Zn 和 Cu 的重要来源^[80]；此外，汽车轮胎、润滑剂和刹车片中也含有 Cd、Zn 和 Cu 成分^[81]。因此，因子 3 可被认为代表工业源。自 19 世纪中叶安庆军械所设立以来^[43]，安庆工业逐步发展，铜矿冶炼和机械制造等工业活动对区域环境造成了一定影响。至 20

世纪 70-80 年代，随着工业化进程的加速^[43]，工业源对重金属污染的贡献显著增加（图 7b）。

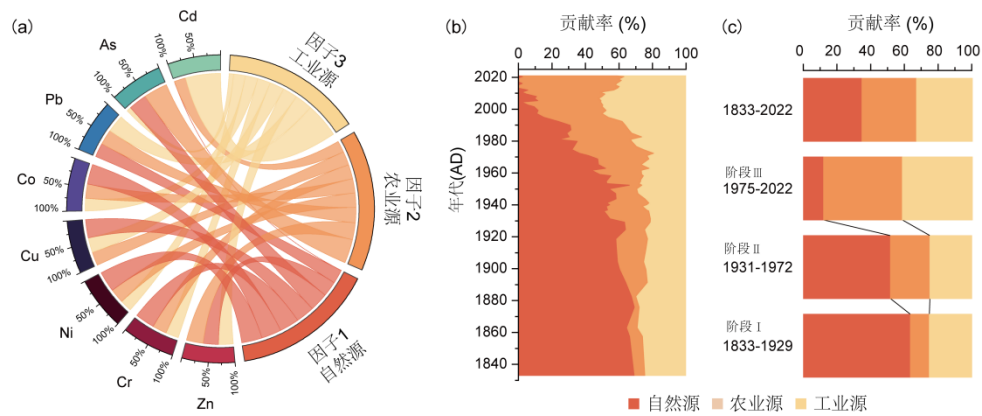


图 7 基于 PMF 模型的石塘湖沉积岩芯重金属源解析：（a）不同污染源对重金属的贡献分配；（b）3 种因子对石塘湖沉积物重金属污染的贡献率（c）不同阶段 3 种因子的贡献均值（因子 1-自然源；因子 2-农业源；因子 3-工业源）

Fig.7 Source analysis of heavy metals in sedimentary core of Lake Shitang based on the PMF model: (a) Contribution distribution of heavy metals from different pollution sources; (b) Contribution rate of three factors from different sources to heavy metal pollution in sediments of Lake Shitang; (c)The average contribution of three factors in different periods (Factor 1 - Natural source; Factor 2 - Agricultural source; Factor 3 - Industrial source)

3 讨论

在本研究中，我们发现近 200 年来，石塘湖沉积物的重金属记录与流域人类活动的发展过程存在对应。沉积记录所指示的湖泊重金属污染史与湖泊周边的社会经济发展史均呈现出明显的阶段性特征。区域人口、工农业发展及土地利用转型的关键节点，都会导致湖泊沉积物的粒度组分、沉积通量、重金属污染源贡献比和污染程度的显著变化。

在 20 世纪 30 年代之前，石塘湖流域的开发程度较低，湖泊受人类活动影响相对较小。1900 年至 1930 年间，湖泊流域及周边地区的耕地总面积仅为 41.48~46.46 km²（图 2a）。沉积记录显示，在这一阶段，沉积物的中值粒径、粒度组分及沉积通量的变化趋势相对稳定，且中值粒径和沉积通量均较小。在这一阶段，石塘湖沉积物的重金属污染主要源于自然因素，其平均贡献率达到 63.63%（图 7c）。安庆市的工业起步较早，19 世纪中叶安庆军械所的设立使其成为中国近现代工业的重要发源地。随后，安庆市逐渐兴起了一系列工厂，包括制造、铸币（如银元和铜币）、煤炭开采、电力生产、食品加工以及纺织等^[43]。受早期工业化的影响，工业源对沉积物重金属污染的平均贡献率相对较高，达 25.22%；而农业源的平均贡献率则较低，仅为 11.15%。总体而言，这一阶段沉积物重金属污染水平和潜在生态风险均处于较低状态。

20 世纪 30 年代至 20 世纪 70 年代中期，湖泊流域人口逐渐增加，工农业活动逐渐增强。这一时期，湖泊流域所在城市的耕地面积也在不断扩大，到 1970 年已超过 70 km²（图 2a）。历史资料显示，1949 至 1979 年间，安庆市的工业经济各部门的现代化程度和生产水平显著提高，初步形成了以石油化工、机械和轻纺为主体的工业部门^[43]。湖泊沉积记录表明，在这一阶段，沉积物干沉积通量呈现明显的上升和波动趋势。这种变化与长江中下游地区夏季降水量的增加以及流域内大规模耕地开垦活动密切相关^[82-83]。然而，由于农业和工业活动的增强，沉积物中输入成分发生了显著变化。耕地侵蚀带来的颗粒物（如有机物和肥料）及工业排放物稀释了自然风化来源重金属的浓度。此外，垦殖活动导致植被覆盖减少，改变了侵蚀路径，更多表层土壤而非岩石风化产物被冲刷进入湖泊，从而进一步降低了自然来源重金属的比例。在此阶段，沉积物重金属的自然源贡献率显著下降，平均为 54.74%（图 7c），农业源贡献比增长至 23.44%；工业源则占比 24.84%。工农业活动的发展使湖泊沉积物中部分重金属的潜在生态风险水平升高，其中 Cd 的

潜在生态风险在 1950 年以后已达到中等等级。

自 20 世纪 70 年代中期以来, 安庆市总人口和非农业人口迅速增长, 城镇化进程明显加快(图 2c)。湖泊流域土地利用变化频繁, 伴随着耕地面积的急剧增减和建设用地的上升。20 世纪 80-90 年代开始, 安庆市粮食产量、水产品产量、农药及化肥施用量不断上升(图 2e, f)。历史资料表明, 从 1980 年代开始, 安庆市工业蓬勃发展, 逐渐形成石油化工、机械制造、汽车零配件制造、纺织工业和建筑建材为支柱的产业结构^[43]。沉积岩芯记录显示, 自 20 世纪 70 年代中期以来, 石塘湖沉积物的干沉积通量、中值粒径和粉砂组分呈现显著上升趋势。城市化过程中建设用地的增加破坏了土壤结构, 加剧了流域侵蚀作用^[84], 导致大量碎屑物质被带入湖泊, 增加了沉积物中值粒径和粉砂组分的比例。此外, 受到人为源影响的 Cd、Pb、Zn 和 As 等重金属元素在此阶段的浓度和累积速率均呈现显著上升趋势。这一时期人类活动强度的增加使得人为源成为主要的重金属污染来源, 其中农业源和工业源的贡献率分别增加到 46.74%和 41.19%, 而自然源显著下降, 仅为 12.07%(图 7c)。随着人类活动加剧, 沉积物中的重金属污染水平和潜在生态风险等级进一步提升。自 1981 年起, Cd 污染等级已达到中等, 潜在生态风险在 2004 年后上升至强风险等级; 重金属综合潜在生态风险指数也在持续增加。

综上所述, 本研究通过重建长江中下游城郊湖泊石塘湖沉积物中主要重金属浓度演变历史, 评估了过去两百年来湖泊重金属潜在生态风险变化, 量化了城市化和工业化前后湖泊污染来源及其转变节点, 揭示了多种人类活动对流域环境变化的驱动过程。研究结果显示, 湖泊流域的社会发展方式对城郊湖泊重金属污染类型和程度影响明显, 因此在未来生态治理和保护中应该注意城市化发展进程中典型人为源重金属元素(Cd、Pb、Zn 和 As 等)的排放和入湖途径, 建立长期监测体系, 动态追踪沉积物中重金属的变化趋势, 并评估其对水生植物和底栖动物等生物群落的潜在影响。在城镇化建设不断推进的过程中, 还需注重水土保持措施, 比如设立植被缓冲带以过滤地表径流中的泥沙和污染物, 降低湖泊生态系统受到的毒性效应, 维护区域发展与生态保护的平衡。

4 结论

(1) 沉积记录表明, 在过去的两个世纪中, 石塘湖沉积物中的 As、Pb、Co、Cu、Ni、Cr 和 Zn 的污染等级大多维持在无污染至较小污染, 潜在生态风险主要为轻微。相比之下, Cd 的污染等级和潜在生态风险较高, 其 EF 和 E_{fCd} 值持续上升, 自 1981 年起, 其污染等级从无污染和较轻污染上升至中等污染, 而潜在生态风险等级在 1950 年和 2004 年分别上升至中等和强风险等级。此外, 自 20 世纪 70 年代中期以来, 沉积物中重金属的综合潜在生态风险指数显著上升。

(2) 相关性分析、聚类分析和 PMF 源解析结果显示, 石塘湖沉积物中的重金属受自然风化与人类活动的双重影响。在 1930 年之前, 石塘湖沉积物中的重金属主要来源于自然风化(平均贡献率为 63.63%), 工业源和农业源的贡献率分别为 25.22%和 11.15%。1930 年至 1974 年, 农业源上升至 23.44%, 自然源和工业源的平均贡献率分别为 51.72%和 24.84%。1975 年以后, 农业源和工业源贡献率分别上升至 46.74%和 41.19%, 成为主要污染来源。

(3) 本研究为石塘湖流域的重金属污染防治提供了科学依据, 为长江中下游地区的湖泊生态环境保护提供了长期变化视角的参考, 同时为其他发展中国家快速城镇化背景下城郊型湖泊重金属污染的历史动态、来源解析及管理对策研究提供了重要参考。

致谢: 感谢课题组成员赵钰及仇恒帅在采样过程中的辛苦付出, 感谢山东大学刘恩峰老师在钻孔年代计算中的帮助, 感谢阜阳师范大学章宏亮老师在写作和修改过程中提供的宝贵建议, 感谢湖泊与环境国家重点实验室工作人员对样品的测试与分析。

5 参考文献

- [1] Sun LQ, Chen J, Li QL *et al.* Dramatic uneven urbanization of large cities throughout the world in recent decades. *Nature Communications*, 2020, 11: 5366. DOI:10.1038/s41467-020-19158-1.
- [2] Tian YY, Tsendbazar NE, van Leeuwen E *et al.* Herold Martin A global analysis of multifaceted urbanization patterns using Earth

- Observation data from 1975 to 2015. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 219: 104316. DOI:10.1016/j.landurbplan.2021.104316.
- [3] Dadashpoor H, Azizi P, Moghadasi M. Land use change, urbanization, and change in landscape pattern in a metropolitan area. *Science of the Total Environment*, 2019, 655: 707-719. DOI:10.1016/j.scitotenv.2018.11.267.
- [4] Wei Y, Li YX, Liu Y *et al.* Impacts of rainfall intensity and urbanization on water environment of urban lakes. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2020, 20(4): 513-524. DOI:10.1016/j.ecohyd.2020.06.006.
- [5] Cao YM, Langdon P, Chen X *et al.* Regime shifts in shallow lake ecosystems along an urban-rural gradient in central China. *Science of the Total Environment*, 2020, 733: 139309. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.139309.
- [6] Shen QS, Shao SG, Bao QZ *et al.* Potential environment risk assessment of sediment heavy metals in a typical suburban shallow lake. *Environmental Engineering*, 2014, 32(10): 137-141, 75. [申秋实, 邵世光, 保琦蓓等. 典型城郊湖泊沉积物重金属生态风险评价. 环境工程, 2014, 32(10): 137-141.]
- [7] Raveen R, Chennakrishnan C, Stephen A. Impact of pollution on the quality of water in three freshwater lakes of suburban Chennai. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2008, 7(1), 61-64.
- [8] Jin Y, Qin BL, Wu C *et al.* Trophic Assessment and Water-Quality Spatial Distribution of Luoma Lake During Summertime. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(3): 360-367. [唐金玉, 覃宝利, 吴春等. 骆马湖夏季水质空间分布特征及评价. 生态与农村环境学报, 2019, 35(3): 360-367.]
- [9] Zhou F, Li P, Weng M Z *et al.* Ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Longyang Lake and Moshui Lake in Wuhan. *China Environmental Science*, 2023, 43(10):5433-5443. [周峰, 李朋, 翁茂芝等. 武汉龙阳湖、墨水湖沉积物重金属生态风险评价. 中国环境科学, 2023, 43(10):5433-5443.]
- [10] Yang H, Chen GG, Liu HY *et al.* Pollution of heavy metals in the sediments from the lower reaches of the Yangtze River and its potential ecological risk assessment. *Earth and Environment*. 2013, 41(02): 160-165. [杨辉, 陈国光, 刘红樱等. 长江下游主要湖泊沉积物重金属污染及潜在生态风险评价. 地球与环境, 2013, 41(02): 160-165.]
- [11] Li YF, Zhang CR, Wang XX *et al.* Pollutant impacts on bacteria in surface water and sediment: Conventional versus emerging pollutants in Taihu Lake, China. *Environmental Pollution*, 2023 323, 121334. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121334.
- [12] Mititelu-Ionuș O, Goga CI, Simulescu D. Lakes ecosystem responses to human pressures a case study in Southwestern Romania. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2021, 30(2), 1737-1747. DOI: 10.15244/pjoes/126400.
- [13] Li XL, Liu EF, Zhang EL *et al.* Spatio-temporal variations of sedimentary metals in a large suburban lake in southwest China and the implications for anthropogenic processes. *Science of the Total Environment*, 2020, 707: 135650. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.135650.
- [14] Niu YD, Chen FL, Li YZ *et al.* Trends and sources of heavy metal pollution in global river and lake sediments from 1970 to 2018. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* 2021, 257: 1-35. DOI:10.1007/398_2020_59.
- [15] Bashir I, Lone F A, Bhat R A *et al.* Concerns and threats of contamination on aquatic ecosystems. *Bioremediation and biotechnology: sustainable approaches to pollution degradation*, 2020: 1-26. DOI: 10.1007/978-3-030-35691-0_1.
- [16] Khalef R N, Hassan A I, Saleh H M. Heavy metal's environmental impact. *Environmental Impact and Remediation of Heavy Metals*. IntechOpen, 2022. DOI: 10.5772/intechopen.103907.
- [17] Melake B A, Nkuba B, Groffen T *et al.* Distribution of metals in water, sediment and fish tissue. Consequences for human health risks due to fish consumption in Lake Hawassa, Ethiopia. *Science of the Total Environment*, 2022, 843: 156968. DOI:10.1016/j.scitotenv.2022.156968.
- [18] Castro-González M I, Méndez-Armenta M. Heavy metals: Implications associated to fish consumption. *Environmental toxicology and pharmacology*, 2008, 26(3): 263-271. DOI: 10.1016/j.etap.2008.06.001.
- [19] Qian Y, Cheng C, Feng H *et al.* Assessment of metal mobility in sediment, commercial fish accumulation and impact on human health risk in a large shallow plateau lake in southwest of China. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2020, 194: 110346. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.110346.
- [20] Yi YJ, Yang ZF, Zhang SH. Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy metals in fishes in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin. *Environmental pollution*, 2011, 159(10): 2575-2585. DOI:

10.1016/j.envpol.2011.06.011.

- [21] Qin YH, Tao YQ. Pollution status of heavy metals and metalloids in Chinese lakes: Distribution, bioaccumulation and risk assessment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 248, 114293. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2022.114293.
- [22] Ding ZY, Pu J, Jilili A. Heavy metal contamination characteristics and its assessment in surface sediments of major lakes in China. *Environmental Engineering* 2017, 35(6): 136-141. [丁之勇, 蒲佳, 吉力力·阿不都外力. 中国主要湖泊表层沉积物重金属污染特征与评价分析. 环境工程, 2017, 35(6): 136-141.]
- [23] Sojka M, Jaskula J, Barabach *et al.* Heavy metals in lake surface sediments in protected areas in Poland: concentration, pollution, ecological risk, sources and spatial distribution. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 15006. DOI: 10.1038/s41598-022-19298-y
- [24] Ismukhanova L, Choduraev T, Opp C *et al.* Accumulation of heavy metals in bottom sediment and their migration in the water ecosystem of Kapshagay reservoir in Kazakhstan. *Applied Sciences*, 2022, 12(22): 11474. DOI: 10.3390/app122211474.
- [25] Luo MK, Kang XQ, Liu Q *et al.* Research on the geochemical background values and evolution rules of lake sediments for heavy metals and nutrients in the Eastern China Plain from 1937 to 2017. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 436: 129136. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.129136
- [26] Varol M, Canpolat Ö, Eriş K K *et al.* Trace metals in core sediments from a deep lake in eastern Turkey: Vertical concentration profiles, eco-environmental risks and possible sources. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2020, 189: 110060. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.110060.
- [27] Renberg I. Concentration and annual accumulation values of heavy metals in lake sediments: their significance in studies of the history of heavy metal pollution Paleolimnology IV: Proceedings of the Fourth International Symposium on Paleolimnology, held at Ossiach, Carinthia, Austria. Springer Netherlands, 1987: 379-385. DOI: 10.1007/978-94-009-4047-5_50.
- [28] Zhang H, Shan BQ. Historical records of heavy metal accumulation in sediments and the relationship with agricultural intensification in the Yangtze-Huaihe region, China. *Science of the Total Environment*, 2008, 399(1-3): 113-120. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.03.036.
- [29] Liu EF, Shen J, Liu XQ *et al.* Variation characteristics of heavy metals and nutrients in the core sediments of Taihu Lake and their pollution history. *Science in China Series D*, 2006, 49: 82-91. DOI: 10.1007/s11430-006-8108-6.
- [30] Liu Y, Cheng Y, Li FX *et al.* Pollution evaluation of vertical sediments in the Yalu River Estuary over the past century. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(5):489-494. [刘月, 程岩, 李富祥等. 鸭绿江口近百年来重金属垂向沉积的污染评价. 环境科学研究, 2012, 25(5): 489-494.]
- [31] Zhang Y, Huo S, Zan F *et al.* Historical records of multiple heavy metals from dated sediment cores in Lake Chenghai, China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74: 3897-3906. DOI: 10.1007/s12665-014-3858-5.
- [32] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 中国湖泊调查报告. 北京: 科学出版社. 2019: 46-47.
- [33] Xie HL, Chen QR, Lu FC *et al.* Spatial-temporal disparities, saving potential and influential factors of industrial land use efficiency: A case study in urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River. *Land Use Policy*, 2018, 75: 518-529. DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.04.027.
- [34] Yang B, Zhang Z, Wu H. Detection and attribution of changes in agricultural eco-efficiency within rapid urbanized areas: A case study in the Urban agglomeration in the middle Reaches of Yangtze River, China. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109533. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109533.
- [35] 储安西, 丁爱生. 安庆市石塘湖备用水源地污染源分析与生态修复. 山西建筑, 2018, 44(21): 172-173.
- [36] Fan ZY, Wang WC, Tang CY *et al.* Targeting remediation dredging by ecological risk assessment of heavy metals in lake sediment: A case study of Lake Shitang, China. *Sustainability*, 2019, 11(24): 7251. DOI: 10.3390/su11247251.
- [37] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社. 1998: 251.
- [38] 叶天竺, 黄崇轲, 邓志奇. 1:250 万中华人民共和国数字地质图空间数据库. 地质科学数据 2017. DOI: 10.23650/data.H.2017.NGA121474.K1.1.1.
- [39] 安庆市地方志编纂委员会. 安庆市志. 北京: 方志出版社. 1997: 116-117.

- [40] Moritz S, Bartz-Beielstein T. imputeTS: time series missing value imputation in R. *R Journal*, 2017, 9(1) 207-218.
- [41] Yu Z, Jin XB, Miao LJ *et al.* A historical reconstruction of cropland in China from 1900 to 2016. *Earth System Science Data*, 2021, 13(7): 3203-3218. DOI: 10.5194/essd-13-3203-2021, 2021.
- [42] 徐新良. 中国多时期生态系统类型空间分布数据. 资源环境科学数据注册与出版系统, 2023. DOI:10.12078/2023010301
- [43] 安庆市地方志办公室. 安庆工业发展史, 安徽: 黄山书社. 2011: 50-257.
- [44] Shen J, Yang LY, Yang XD *et al.* Lake sediment records on climate change and human activities since the Holocene in Erhai catchment, Yunnan Province, China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48: 353-363. DOI: 10.1360/03yd0118.
- [45] Lin Q, Liu EF, Zhang EL *et al.* Spatial distribution, contamination and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Erhai Lake, a large eutrophic plateau lake in southwest China. *Catena*, 2016, 145: 193-203. DOI: 10.1016/j.catena.2016.06.003.
- [46] Appleby P G. Chronostratigraphic techniques in recent sediments. Tracking environmental change using lake sediments: basin analysis, coring, and chronological techniques, 2001: 171-203. DOI: 10.1007/0-306-47669-x_9.
- [47] Xia WT, Wang R, Zhu B *et al.* Heavy metal gradients from rural to urban lakes in central China. *Ecological Processes*, 2020, 9: 1-11. DOI: 10.1186/s13717-020-00251-8
- [48] Chabukdara M, Nema A K. Assessment of heavy metal contamination in Hindon River sediments: a chemometric and geochemical approach. *Chemosphere*, 2012, 87(8): 945-953. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2012.01.055.
- [49] Zhang ZF, Yu N, Liu DY, *et al.* Assessment and source analysis of heavy metal contamination in water and surface sediment in Dongping Lake, China. *Chemosphere*, 2022, 307: 136016. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.136016.
- [50] Fan XT, Jiang YX, Cui B *et al.* Selection of reference elements for enrichment factors: A case study on the pollution evaluation of heavy metal in the sediments of Yuan River. *Acta Scientiae Circumstantiae*. 2016, 36(10): 3795-3803. [范晓婷, 蒋艳雪, 崔斌, 等. 富集因子法中参比元素的选取方法——以元江底泥中重金属污染评价为例. 环境科学学报, 2016, 36(10): 3795-3803.]
- [51] Boës X, Rydberg J, Martinez-Cortizas *et al.* Evaluation of conservative lithogenic elements (Ti, Zr, Al, and Rb) to study anthropogenic element enrichments in lake sediments. *Journal of Paleolimnology*, 2011, 46: 75-87. DOI: 10.1007/s10933-011-9515-z.
- [52] Li A, Boardwine AJ, Hoang TC. Metals in sediment of the upper Great Lakes: Spatial distribution, temporal trends, anthropogenic enrichment, and risk assessments. *Science of the Total Environment*, 2024, 951: 175568. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.175568.
- [53] Bing HJ, Wu YH, Liu EF *et al.* Assessment of heavy metal enrichment and its human impact in lacustrine sediments from four lakes in the mid-low reaches of the Yangtze River, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(7): 1300-1309. DOI: 10.1016/S100107421260195-8.
- [54] Yuan HZ, Shen J, Liu EF, *et al.* Assessment of nutrients and heavy metals enrichment in surface sediments from Taihu Lake, a eutrophic shallow lake in China. *Environmental Geochemistry and Health*, 2011, 33: 67-81. DOI: 10.1007/s10653-010-9323-9.
- [55] Li YZ, Chen HY, Teng YG. Source apportionment and source-oriented risk assessment of heavy metals in the sediments of an urban river-lake system. *Science of the Total Environment*, 2020, 737: 140310. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140310.
- [56] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001. DOI: 10.1016/0043-1354(80)90143-8.
- [57] Li DP, Yu RD, Chen J, *et al.* Ecological risk of heavy metals in lake sediments of China: A national-scale integrated analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 334: 130206. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130206
- [58] Sutherland R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*, 2000, 39: 611-627. DOI: 10.1007/s002540050473.
- [59] Xu ZQ, Ni SJ, Tuo XG *et al.* Calculation of heavy metals' toxicity voefficient in the evaluation of potential ecological risk Index. *Environmental Science & Technology*. 2008, 31(2): 112-115. [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. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115.]
- [60] Zhao ZJ, Li SH, Li YL. Controlling factors and sources-specific ecological risks associated with toxic metals in core sediments from cascade reservoirs in Southwest China. *Science of the Total Environment*, 2024, 924: 171570. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171570.
- [61] Howari F M. Assessment of Fe, Zn, Cd, Hg and Pb in the Jordan and Yarmouk River sediment in relation to their physico-chemical proper-ties and sequential extraction characterization. *Water, Air & Soil Pollution*, 2001, 132(1-2): 43-59. DOI:

10.1023/A:1012062814873.

- [62] Brack K, Stevens RL. Historical pollution trends in a disturbed, estuarine sedimentary environment, SW Sweden. *Environmental Geology*, 2001, 40(8): 1017-1029. DOI: 10.1007/s002540100294.
- [63] Liu EF, Shen J, Zhu YX. Geochemical records and comparative study of the sediments in the western Taihu lake. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(1):102-107. [刘恩峰, 沈吉, 朱玉新. 西太湖沉积物污染的地球化学记录及对比研究. 地理科学, 2005, 25(1): 102-107.]
- [64] Wei T, Simko V, Levy M *et al.* Package 'corrplot'. *Statistician*, 2017, 56(316): e24.
- [65] Maechler M, Rousseeuw P, Struyf A *et al.* Package 'cluster'. *Dosegljivo na*, 2013, 980.
- [66] Galili T. dendextend: an R package for visualizing, adjusting and comparing trees of hierarchical clustering. *Bioinformatics*, 2015, 31(22): 3718-3720. DOI: 10.1093/bioinformatics/btv428
- [67] Guan QY, Wang FF, Xu CQ, *et al.* Source apportionment of heavy metals in agricultural soil based on PMF: A case study in Hexi Corridor, northwest China. *Chemosphere*, 2018, 193: 189-197. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.10.151
- [68] Men C, Liu RM, Wang QR *et al.* Uncertainty analysis in source apportionment of heavy metals in road dust based on positive matrix factorization model and geographic information system. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 27-39. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.212
- [69] Li FS, Han C, Lin DS *et al.* Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments from lakes of Anqing City and Anqing section of Yangtze River. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(3): 574-582. [李法松, 韩铖, 林大松等. 安庆沿江湖泊及长江安庆段沉积物重金属污染特征及生态风险评价. 农业环境科学学报, 2017, 36(03): 574-582.]
- [70] Zhao K, Wan X, Guo ZC *et al.* Characterization of heavy metals and assessment of potential ecological risk in shoreline buffer zone soils of Anqing lake wetland. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(04): 67-75. [赵宽, 万昕, 郭展翊等. 安庆湿地湖滨带土壤重金属含量特征及潜在生态风险评价. 水生态学杂志, 2021, 42(04): 67-75.]
- [71] 夏建东. 骆马湖沉积物重金属环境行为及源解析研究[学位论文]. 安庆师范大学, 2020.
- [72] 李小林. 云贵高原典型城郊湖泊沉积物重金属污染研究[学位论文]. 山东师范大学, 2020.
- [73] Wu Q, Qi J, Xia XX. Long-term variations in sediment heavy metals of a reservoir with changing trophic states: Implications for the impact of climate change. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 242-250. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.041.
- [74] Ebrahimpour M, Mushrifah I. Heavy metal concentrations in water and sediments in Tasik Chini, a freshwater lake, Malaysia. *Environmental monitoring and assessment*, 2008, 141: 297-307. DOI: 10.1007/s10661-007-9896-7.
- [75] Liu HJ, Liu EF, Yu ZZ *et al.* Spatio-temporal accumulation patterns of trace metals in sediments of a large plateau lake (Erhai) in Southwest China and their relationship with human activities over the past century. *Journal of Geochemical Exploration*, 2022, 234: 106943. DOI: 10.1016/j.gexplo.2022.106943.
- [76] Lu HB, Lu SY, Li X *et al.* Distribution Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Tracing of Heavy Metals in the Sediments of Typical Lakes in the Middle Reaches of the Yangtze River. *Environmental Science*, 2024, 45(3): 1402-1414. [卢洪斌, 卢少勇, 李响等. 长江中游典型湖泊沉积物重金属分布特征、生态风险评估及溯源. 环境科学, 2024, 45(3): 1402-1414.]
- [77] Huang FY, Zhou L, Song B *et al.* Characteristics and planting safety assessment of As content in dryland soil and maize in Guizhou Province. *Environmental Science*, 2023, 44(1): 415-425 [黄凤艳, 周浪, 宋波等. 贵州省旱地土壤和玉米 As 含量特征及其种植安全性评估. 环境科学, 2023, 44(1): 415-425.]
- [78] Dong YY, Hu WY, Huang B *et al.* Source appointment of heavy metals in suburban farmland soils based on positive matrix factorization. *Chinese Environmental Science*, 2015, 35(7): 2103-2111. [董骞睿, 胡文友, 黄标等. 基于正定矩阵因子分析模型的城郊农田土壤重金属源解析. 中国环境科学, 2015, 35(7): 2103-2111.]
- [79] Li Q, He LS, Wang YF *et al.* The characteristics and distribution of soil pollution in smelting industry sites in China. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(3): 586-595. [李强, 何连生, 王耀锋等. 中国冶炼行业场地土壤污染特征及分布情况. 生态环境学报, 2021, 30(3): 586-595.]
- [80] Chen HY, Teng YG, Lu SJ *et al.* Contamination features and health risk of soil heavy metals in China. *Science of the Total Environment*, 2015, 512: 143-153. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.01.025.

- [81] Liu ZY, Fei Y, Shi HD *et al.* Prediction of high-risk areas of soil heavy metal pollution with multiple factors on a large scale in industrial agglomeration areas. *Science of the Total Environment*, 2022, 808. DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.151874 .
- [82] Liu EF, Yang XD, Shen Ji *et al.* Sedimentary flux of Lake Taibai, Hubei Province and correlations with precipitation and human activities in its catchment during the last century. *Journal of Lake Science*.2007, 19(4):407-412. [刘恩峰, 羊向东, 沈吉等. 近百年来湖北太白山沉积通量变化与流域降水量和人类活动的关系. 湖泊科学, 2007, (04): 407-412.]
- [83] Wu YH, Liu EF, Bing HJ *et al.* Geochronology of recent lake sediments from Longgan Lake, middle reach of the Yangtze River, influenced by disturbance of human activities. *Science China Earth Science*, 2010, 40(06): 751-757. [吴艳宏, 刘恩峰, 郝海健等. 人类活动影响下的长江中游龙感湖近代湖泊沉积年代序列. 中国科学:地球科学, 2010, 40(06): 751-757.]
- [84] Rao EM, Xiao Y, Ouyang ZY *et al.* National assessment of soil erosion and its spatial patterns in China. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2015, 1(4): 1-10. DOI: 10.1890/EHS14-0011.1.