

李飞鹏, 陆泓颖, 盛根明, 等. 引江济太沿程湖泊沉积物的粒度特征及其对污染物分布的影响[J]. 净水技术, 2026, 45(8): 54-67, 78.

Li F P, Lu H Y, Sheng G M, et al. Influence of particle size characteristics of lake sediments on pollutants distribution along the channel of water diversion from the Yangtze River to Taihu Lake[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(8): 54-67, 78.

引江济太沿程湖泊沉积物的粒度特征及其对污染物分布的影响

李飞鹏^{1,*}, 陆泓颖¹, 盛根明², 冯君逸¹, 陶红¹

(1. 上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200439)

摘要 【目的】 引江济太工程影响下, 河-湖系统沉积物的粒度参数计算和解释对沉积环境污染物来源分析尤为必要, 可为沿程小型湖泊的环境治理和生态风险管控提供重要科学依据。【方法】 通过对望虞河及沿程湖泊漕湖表层沉积物的粒径分析, 研究了粒度参数特征及空间分布, 分析了其对沉积物有机质(OM)、总氮(TN)、总磷(TP)、9种典型重金属(Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Sb、Pb和Hg)分布的影响。【结果】 望虞河-漕湖系统沉积物来源复杂, 受引水作用影响显著, 湖泊表层沉积物各粒度参数表现出不同的空间分布特征。河-湖沉积物中OM、TN和TP的平均质量分数分别为78.50、0.997 g/kg和0.593 g/kg, 重金属Ni、Cu、Zn、Cd、Sb、Pb和Hg平均质量分数均高于太湖流域区域背景值, 其中Zn、Cd和Hg超过背景值的2倍。漕湖沉积物TN与重金属含量普遍高于望虞河, TP、Ni和Cd含量空间差异显著。引水导致河湖相通区域沉积环境受高能水动力影响较大, 进而显著影响沉积物中砂、粉砂、TP、Ni和Cd的含量与分布。相关性分析表明, 沉积物<63 μm粒级组分与OM、TN、Ni和Sb含量显著正相关, <2 μm粒级组分与OM、TN、Ni和Hg显著正相关, 说明OM、TN、Ni、Sb和Hg易于被细颗粒沉积物吸附。【结论】 本文揭示了引江济太沿程河湖系统中沉积物的粒度特征及其对污染物特征、来源的影响, 对具有相同形态特征的湖泊的生态环境保护具有重要借鉴意义。

关键词 引江济太工程; 沉积物; 粒度; 重金属; 空间分布

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)08-0054-15

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.08.006

Influence of Particle Size Characteristics of Lake Sediments on Pollutants Distribution along the Channel of Water Diversion from the Yangtze River to Taihu Lake

Li Feipeng^{1,*}, Lu Hongying¹, Sheng Genming², Feng Junyi¹, Tao Hong¹

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200439, China)

Abstract [Objective] Under the influence of water diversion project from the Yangtze River to Taihu Lake, the calculation and interpretation of grain size parameters of sediment in river-lake systems are particularly necessary for analyzing the sources of pollutants in sedimentary environments, which can provide important scientific basis for environmental governance and ecological risk control of small lakes along the river. [Methods] By analyzing the particle size of surface sediments along the Wangyu River and Caohu Lake, the characteristics and spatial distribution of particle size parameters were studied, and their effects on the distribution of organic matter (OM), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and nine typical heavy metals (Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Sb, Pb and Hg) in sediments were analyzed. [Results] The sediment sources of the Wangyu River-Caohu Lake system were complex and significantly affected by water diversion. The various grain size parameters of the lake surface sediment exhibited different spatial distribution characteristics. The average mass fractions of OM, TN and TP in river and lake sediments were 78.50, 0.997 g/kg and 0.593 g/kg, respectively. The average mass fractions of heavy metals Ni, Cu, Zn, Cd, Sb, Pb and Hg were higher than the background values in the Taihu Basin, and Zn, Cd and Hg were more than twice the background values. The contents of TN and heavy metals in Caohu Lake

[收稿日期] 2024-12-16

[通信作者] 李飞鹏(1983—), 男, 副教授, 研究方向为环境质量管理与评价, E-mail: lifeipeng@usst.edu.cn。

sediments were generally higher than those in Wangyu River, and the mass fraction of TP, Ni and Cd were significantly different in space. As a result of water diversion, the sedimentary environment in the river-lake interconnecting area was greatly affected by high-energy hydrodynamics, which significantly affected the content and distribution of sand, silt, TP, Ni and Cd in the sediments. Correlation analysis showed that the contents of OM, TN, Ni and Sb were significantly positively correlated with those of $<63\ \mu\text{m}$, and OM, TN, Ni and Hg were significantly positively correlated with those of $<2\ \mu\text{m}$, indicating that OM, TN, Ni, Sb and Hg were easily adsorbed by fine sediment. [Conclusion] This paper reveals the grain size characteristics of sediments in the river-lake system along the Yangtze River Diversion Project and their impact on pollutant characteristics and sources, which can provide reference for ecological environment protection of lakes with similar morphological characteristics.

Keywords projects water diversion from the Yangtze River to Taihu Lake; sediment; granularity; heavy metal; spatial distribution

太湖流域为平原水网地区,地势平坦、水动力弱、受人类活动影响剧烈,自 21 世纪以来,水体富营养化和重金属污染问题日渐凸显^[1-3]。湖泊的富营养化防治和重金属风险防控也一直是水生态环境研究和流域水环境治理的重点内容。为保护太湖水环境,2002 年开始的“引江济太”工程,逐渐形成了望虞河引水、太浦河排水为主的引排水工程体系,不仅改善了太湖及周边河网的水质,保障了区域水源地的供水安全,而且有效地应对了诸多突发性水污染事件,取得了显著的环境和生态效益^[4]。然而,望虞河引水入湖的水源中,氮、磷营养盐含量仍然较高,多数情况下,其值高于太湖水体的相应的水质指标^[5-6],引水在加速湖泊水体交换的同时会产生明显的水生态环境效应。当前,已有研究^[7]对其进行了较为系统的梳理,但“引江济太”的相关研究多着重于分析引水对太湖水质的影响,对沿线过水型湖泊生态环境的研究鲜见报道。过水型湖泊的水环境和水生态状况往往受引水水源、水体换水周期、区域环境条件、社会经济发展水平与流域污染状况等因素的综合影响^[8-9]。由于过水型湖泊水力停留时间的不同,在开展湖泊水环境改善的过程中表现出不同的治理效果。例如,鄱阳湖是我国最大的天然通江过水型淡水湖泊,流域汇入的污染物在湖泊内的停留时间较短,当流域面上的污染得到控制后,短时间内对湖泊的水环境改善即有相对明显的效果^[10-11];而滇池,由于换水周期较长,湖泊内的污染物累积相对较多,即使流域内的外来污染得到了控制,湖泊水环境的改善和生态系统的恢复往往还需要较长的时间^[12]。国际上,一些温带深水型湖泊环境治理和生态恢复的案例^[13]表明,因为具有较长的停留时间,这些湖泊的污染控制和生态恢复往往需要约 20 a 的时间才能恢复到较好的状态。我国长

江中下游的多数湖泊均为过水型浅水湖泊,由于湖泊与河流的水文交换频繁,加之水浅,湖面开阔,湖泊的水动力扰动剧烈且频繁,因此,河-湖关系中的出入流、水动力作用等湖泊物理过程变化特征及其环境和生态效应仍是备受关注的热点问题之一^[14-15]。

位于引江济太沿程的小型过水湖泊(如漕湖、鹅真荡和嘉菱荡)关系到长三角地区的供水质量,兼具生态调节功能,具有重要的生态环境意义。从生态环境研究的角度考虑,河-湖既是污染物迁移的“运输带”,也是污染物富集的“储藏库”,过水型湖泊作为污染物迁移和转化的节点,其在引调水过程中河与湖及其关系对污染物分布所起的作用及其生态影响更值得探索。本文以望虞河及小型湖泊漕湖为例,通过对沉积物粒度特征、营养盐和重金属分布的研究,分析引江济太工程对过水型湖泊的水环境影响,以期对引水线路过水型湖泊的生态环境保护与生态风险管控提供科学依据。

1 研究区域概况

研究区域为长江下游太湖流域望虞河及其过流湖泊嘉菱荡、鹅真荡和漕湖,覆盖面积约为 $270\ \text{km}^2$ 。望虞河全长约为 60 km,河宽为 80~84 m,河底平均高程为 -3 m,最北端与长江相通,最南端通过贡湖湾汇入太湖。望虞河由南至北依次穿过江南运河、漕湖、鹅真荡和嘉菱荡等主要湖泊和河道。3 个湖泊的面积分别为 1.16 、 $5.19\ \text{km}^2$ 和 $9.07\ \text{km}^2$,湖泊水体容量分别 4.2×10^6 、 $1.5\times 10^7\ \text{m}^3$ 和 $2\times 10^7\ \text{m}^3$ 。望虞河调水的具体路线和引江济太工程主要受常熟和望亭 2 座水利枢纽控制,两岸支流河口大部分建有闸站或泵站进行控制。高程分区表明望虞河西岸位于澄锡虞高片区,东岸属于阳澄淀泖区,其中西岸地区属于典型的平原河网区。由于无锡市部分街镇

中心临近望虞河,人口密度较高且西岸地势比东岸高,因此排放至西岸支流的未达标生活污水和工业废水中污染物容易进入望虞河并引起水体污染。由于鹅真荡和嘉菱荡基本与望虞河贯通,因此本文选择漕湖为研究对象。漕湖为东西向狭长形湖泊,整体湖形近似椭圆形,望虞河在其西侧约 1/5 处穿过,湖心处有 3 个人工构筑的小岛,最东岸则有 1 个月牙形人工岛。

望虞河通常于汛后期(一般为 10 月—12 月)引水频率较高。因此,本文 2 次采样时间均为汛后期,于 2019 年—2020 年的 10 月下旬,自望虞河引水起约 1 周后,在漕湖、望虞河及其相通水域附近采集沉积物样品。2 a 的水情年报表明汛后期分别调水 1 次和 4 次,引长江水量分别为 13.66 亿 m^3 和 6.60 亿 m^3 ,其中入太湖水量分别为 5.62 亿 m^3 和 2.36 亿 m^3 。

2 材料与方法

2.1 沉积物样品采集

按照确定性布点方法^[16],在河湖出入口、漕湖—望虞河连通段、圩区排口以及漕湖支流河口附近增设采样点位,共布设 22 个采样点,采样点位和点位编号如图 1 所示,采用抓斗式彼得森采泥器(25 cm×25 cm)进行沉积物样品采集。经分样处理后,装入采样袋密封,编号后置于温度为 0~4 ℃ 的保温箱保存。采样完成后立即运回实验室,进行冷冻干燥备用。

2.2 水动力模拟及特征区域划分

为表征望虞河进出漕湖的吞吐流和风场对漕湖水力条件、湖流的影响,采用丹麦水力研究所(DHI)开发的 MIKE 21 建立的区域二维水动力模型来反映入湖河流和湖区的水利交换,从而进行不同水利分区,以探究不同区域间的粒度特征和沉积理化性质。环漕湖硬质湖岸被设为闭合边界,望虞河至鹅真荡湖口被设为开边界。根据 2020 年太湖水情月报和年报,初始流速设置为 0.8 m/s,风向取 2020 年望虞河行洪期间盛行的东南方向,风速取太湖地区平均风速为 5 m/s。

根据模型计算(图 2),在望虞河行洪期间,望虞河穿漕湖段西侧区域和东侧小部分地区与望虞河水体交换速度较快,是漕湖调蓄、望虞河行洪的主要区域,约占整个湖区面积的 31%,其中西侧沿漕湖湖岸形成了小范围的逆时针环流,东侧主要受河湖水

体交换影响在东西横向出现了一定程度的水力梯度扩散和冲击。此外,望虞河从入湖口进入漕湖的开阔湖区,加之湖盆淤泥堆积导致湖底高程升高,水体进入漕湖后因流向的改变而损失了部分动能,流速随之减缓。而望虞河河道东侧漕湖大部分受风场影响形成内部风生环流,与望虞河水体几乎无交换,流速比望虞河及其贯穿漕湖段流速低得多,甚至部分区域成为静水区。

基于水力模型分析结果,将漕湖—望虞河研究区域划分成 5 个特征区域,分别为望虞河入湖区(A: WY1~WY6)、出湖区(B: WY8~WY11)、漕湖东西向中线(C: WY7, CH2, CH5, CH7)、圩区口(D: CH1, CH3, CH4 和 CH6)和支流口(E: CH8~CH11),以探究不同区域间的粒度特征和沉积理化性质。

2.3 表层沉积物粒度和污染指标分析方法

采用激光粒度仪(BT9300Z, 丹东百特仪器有限公司)对沉积物样品进行粒度分析。仪器测量值为 0.02~1 250 μm 。本文仅分析了表层沉积物的粒径分布,由于表层沉积物受成岩作用影响较小,通过物理研磨可分离大部分细颗粒聚集体,因此不对沉积物颗粒进行化学预处理。经软件分析可得 0.02~1 250 μm 内各粒级组的百分比频率及频率分布曲线,用对数转化公式和矩值法^[17]计算各点位的粒度参数(平均粒度 M_z 、分选系数 S_g 、偏度 S_k 和峰度 K)。

取足量的沉积物样品进行研磨预处理,过 60 目尼龙筛后,参照《土壤有机质测定法》(NY/T 85—1988)、《土壤 第 24 部分:土壤全氮的测定自动定氮仪法》(NY/T 1121.24—2012)、《土壤 总磷的测定碱熔—钼锑抗分光光度法》(HJ 632—2011),对有机质(OM)、总氮(TN)和总磷(TP)的含量进行分析^[18]。

将研磨后的沉积物样品过 200 目尼龙筛后,采用由盐酸、硝酸、氢氟酸、高氯酸组成的四酸消解法对样品进行预处理^[19],使用电感耦合等离子质谱仪(NexION 300X, Perkin-Elmer 公司)测定 Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Sb 和 Pb 等 8 种重金属的总量。Hg 采用单独的方法进行测定,参照《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第 1 部分:土壤中总汞的测定》(GB/T 22105.1—2008),使用原子荧光光度计(Kylin S12, 北京吉天仪器有限公司)测定沉积物总



图 1 研究区域采样点位分布示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of the Distribution of Sampling Points in the Study Area

Hg 含量^[20]。

测定沉积物 Hg 含量时,每批次试验设置 1 个空白样,每隔 9 个样品设置平行样(共 7 个),质控样品选择 GBW07385,并设置 2 个标准样品,结果表

明 Hg 含量的相对偏差为 0.61%~3.54%,回收率为 113%~118%。测定其余 8 种重金属含量时,每批次试验设置 2 个空白样,每隔 3 个样品设置平行样(共 21 个),质控样品同样为 GBW07455 并设置 3 个标

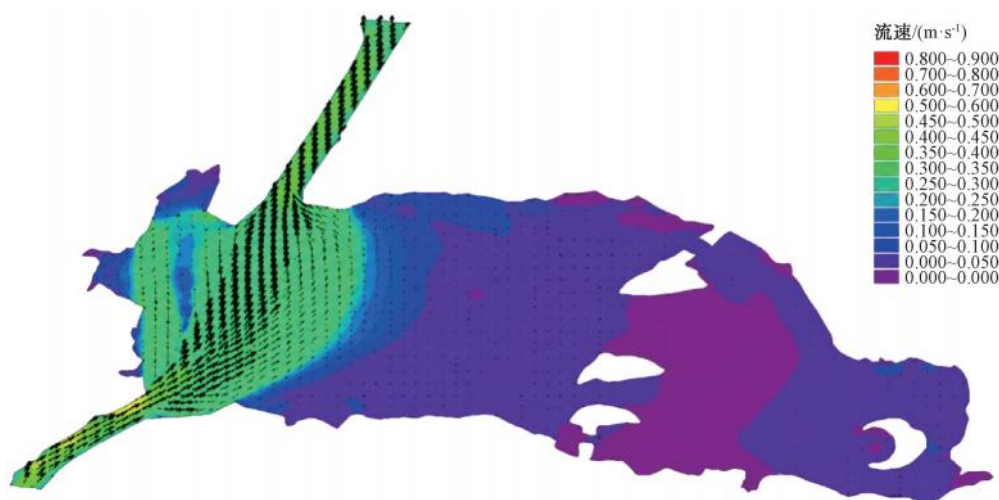


图2 望虞河行洪期漕湖-望虞河 2D 水动力模型

Fig. 2 2D Hydrodynamic Model of Caohu Lake-Wangyu River during the Flood Period of Wangyu River

准样品,结果表明 8 种重金属含量的相对偏差为 7.28%~9.35%,回收率为 81%~90%。在重金属测定过程中,每个样品均重复测试 3 次,结果显示相对标准偏差 (RSD) $\leq 9.76\%$ 。测定时选用 Ge ($10 \mu\text{g/L}$)、In ($5 \mu\text{g/L}$) 和 Bi ($5 \mu\text{g/L}$) 作为内标法的参考元素来校正仪器的响应信号,以消除基线漂移及基体效应。

3 结果与讨论

3.1 沉积物粒度各组分空间分布特征

按 Friedman-Sanders 的分级标准^[21],将沉积物的颗粒粒径划分为砂 ($64 \sim 2 \text{ mm}$)、粉砂 ($2 \sim 64 \mu\text{m}$) 和黏土 ($< 2 \mu\text{m}$) 3 类。研究区域沉积物的粒度组分以砂和粉砂为主,黏土组分的含量较低,3 者的平均值分别为 41.60%、51.04% 和 7.37%,变化值分别为 1.11%~65.86%、30.10%~84.63% 和 3.95%~14.34%。根据各组分变异系数,3 种组分含量的离散程度排序为:砂>黏土>粉砂,总体上优势粒级为粉砂。按谢帕德图解法(图 3)描述,沉积物粒度类型主要为砂质粉砂、粉砂质砂和粉砂,整体上偏细。

一般情况下,湖泊沉积物粒度由于受风力、水动力搬运及物质来源的影响,往往表现为多种组分^[22]。本文沉积物粒度各组分含量的空间分布如图 4 所示。A、B、E 区域的砂含量相对较高,而 C、D 区域粉砂和黏土的比重较大。砂的高值区域主要分布于望虞河沿线、鹅真荡、漕湖北岸以及湖心 3 岛东侧支流口(E)附近;粉砂组分高值区域位于望虞河过流漕湖河道的东侧以及漕湖东西向中线的 CH7

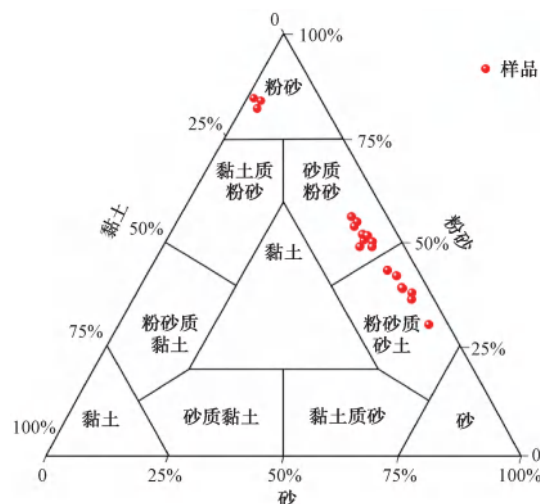


图3 漕湖-望虞河沉积物粒度组成类型分布
(谢帕德图解法)

Fig. 3 Distribution of Grain Size Composition Types of Sediments in the Caohu Lake-Wangyu River
(Shepard Diagram)

点位;而黏土组分含量普遍较低,其相对高值区域的分布情况与粉砂组分含量类似。

单因素方差分析 (ANOVA) 检验结果表明,不同区域间砂和粉砂含量的差异显著, P 值分别为 0.030 和 0.028,说明各区域水力条件差异对砂和粉砂含量的分布情况有显著的影响。粒度组分含量变异系数排序结果表明,A、C、D 区域各组分含量离散程度较高,而 B、E 区域各组分含量相对集中,说明 A、C、D 区域各点位组分含量的差异比 B、E 大。

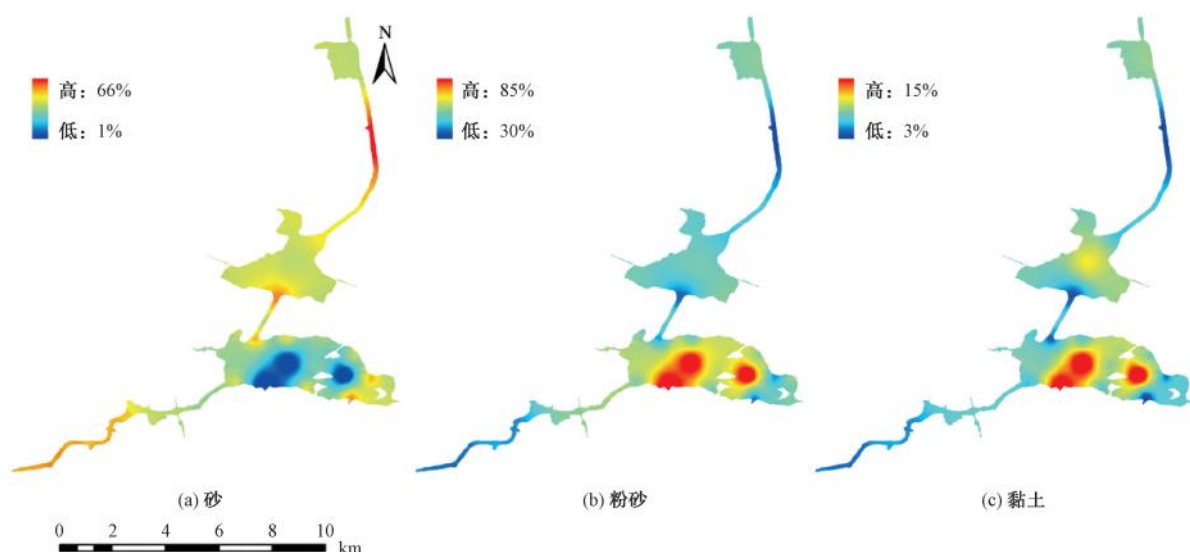


图4 沉积物粒度组分的空间分布

Fig. 4 Spatial Distribution of Sediments Particle Size Components

研究^[23-25]表明,沿水流方向沉积物粒度一般逐渐变小,即颗粒的粗细可以反映沉积区域水流的方向。由图4可知,漕湖沉积物的粒度自望虞河起呈现出从西向东快速变细,从CH7点位至支流口附近逐渐变粗的趋势,而其他区域包括望虞河沿线、鹅真荡的沉积物粒度偏粗。砂组分含量的高、低值区域与粉砂和黏土的分布情况相反。漕湖支流口附近可能是因为受到闸站泵水的影响,水动力条件变化剧烈,易使细颗粒组分悬浮迁移,而靠近湖岸河口区域形成了较粗颗粒的沉积物,且从湖岸至湖心,颗粒粒径变细,与范成新等^[26]研究结果相同。

粒度组分含量排序表明,A、B、E区域的水体交换频率较高,存在由望虞河上游流向下流的水流,说明望虞河受引水影响,而C、D区域的水体流量相对较低,因此细颗粒组分占比较高。结合2.2小节的水动力模型可知,A、B、C、D区域的粒度组分分布情况符合模拟结果,原因为A、B区域处在望虞河行洪和引水通道上且经过多个河湖出入口、水动力条件复杂、水体流速较高,粗颗粒在沉积界面上沿水流方向进行短距离滑动,从而使细颗粒始终处在悬浮状态,并随水流方向迁移至漕湖或研究区域外,因此望虞河河道沉积物含有较多的砂组分;C、D区域则位于漕湖湖区,受望虞河输水通道影响较小,圩区口(D)附近没有闸站,水动力弱,基本上只受风生流的影响,因此细颗粒组分(包括粉砂和砂)占整体的比重较大。章婷曦等^[27]对太湖西北部湖湾沉积物粒

度特征的研究表明,受入湖河流影响的太湖近岸区易于堆积粗颗粒,且沿近岸向湖心方向沉积物粒径缓慢减小,说明水动力较弱的区域沉积颗粒会相应变细,与本文中粒度组分分布情况基本一致。本文河湖系统沉积物粒度组分的空间分布能在一定程度上反映较长时间跨度下上覆水或表层水体的水力情况,可以作为判断水力条件、沉积环境和沉积物物质来源的依据和分析指标,与已有的沉积学研究^[28-29]结论一致。

3.2 沉积物粒度特征与空间分布

沉积物粒度的测定和相关参数的计算及解释对湖泊水体动力、沉积环境、周边地貌成因和演变的研究具有十分重要的意义。将沉积物粒径转换为粒度 Φ 值(粒径的对数转换值),用矩值法来计算各区域沉积物粒度参数^[30]。本文沉积物的 M_z 为 $2.93\Phi \sim 6.93\Phi$,平均值为 4.31Φ ,属粉砂的范畴,各区域 M_z 平均值排序为 $C > D > E > B > A$,变异系数排序为 $D > C > A > E > B$,细粒级颗粒主要集中在漕湖,反映了从望虞河至漕湖沿程,水体平均动能和沉积环境由高能到低能的转变^[31]。沉积物的 S_o 为 $1.76 \sim 3.31$,各区域 S_o 平均值排序为 $A > B > E > D > C$,变异系数排序为 $C > D > A > E > B$ 。一般来说, S_o 越大,其分选程度越差,颗粒粒度分布得越不均匀,表现为水动力变化比较剧烈的沉积环境^[32-33],而湖区分选系数有较高的变异系数,充分湖区受到多来源的水力扰动。出现该现象的原因可能是湖区受到多来源的水力扰动,虽

然湖区水动力较弱,但是其水体不仅受到望虞河影响,还受到漕湖支流和附近圩区水渠水体流入或流出的影响,湖流变化相对复杂,从而降低了湖区沉积物粒度的均一性。沉积物的偏度 S_k 为 0.05~1.00,平均值为 0.42,粒度接近对称,但平均粒度偏细粒,与沉积物粉砂和黏土比重大的特点吻合。

各粒度参数的空间分布图如图 5 所示。平均粒度 M_z 的空间分布表明细粒级颗粒主要分布于漕湖湖心岛东侧和西侧的中线及南岸附近,而粗颗粒多

分布在望虞河沿线,说明沉积物颗粒分布特征明显受到水动力条件影响。分选系数 S_o 高值和低值的空间分布特征与 M_z 大致呈相反的趋势,这是因为细颗粒聚集处水动力条件较弱,水力情况稳定,使分选系数相对较小^[34-35]。望虞河沿线以及北岸和南岸的圩区口和支流口分选系数也相对较大,说明漕湖湖区沉积物的物质来源不仅受望虞河调水以及支流输入的影响,还受圩区排水影响,导致附近区域分选性差。

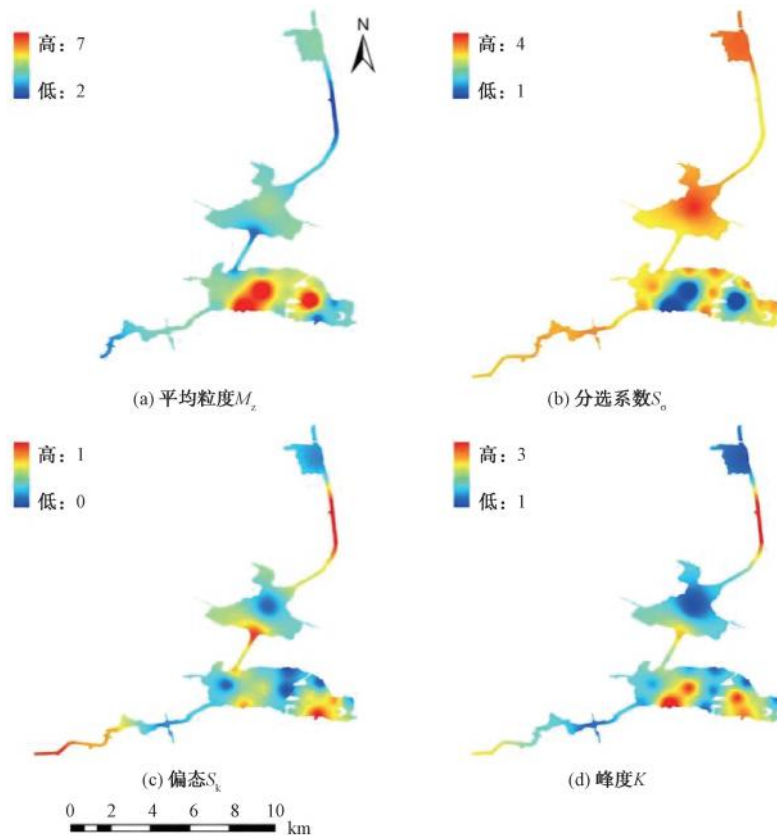


图 5 沉积物粒度参数的空间分布

Fig. 5 Spatial Distribution of Sediments Particle Size Parameters

沉积物粒度频率分布曲线的 K 值为 1.71~2.85,平均值为 2.12,大部分点位沉积物粒度的分布范围较宽,表现为分散的趋势。样品的粒径频率分布曲线显示了沉积物粒度的粒径、粒度组分特征和沉积环境特点。由图 6 可知,只有 CH2、CH3 和 CH7 3 个点位的沉积物粒度分布呈单峰特征,而根据粒度统计分析软件 (GRADISTAT) 分析结果,其余曲线呈现双峰和三峰的特征,表明大部分点位沉积物颗粒具有多种碎屑物质来源^[36-38]。从整体的分布情况看,望虞河河道及过流漕湖段的点位 (WY1~

WY11) 砂含量较粗颗粒段累积频率百分比与漕湖湖区点位 (CH1~CH11) 相比较,说明了望虞河较强的水动力情况;漕湖湖区各点位中 CH9 和 CH10 的粗颗粒段累积频率和峰值频率十分突出,原因可能是这 2 个点位处于漕湖支流口附近,且 2 个支流口的水流量都受闸站控制,存在强度较高的水体交换情况,使得 CH9 和 CH10 处沉积物的粗颗粒占比较大;粒度频率曲线呈单峰特征的点位中 CH2、CH7 位于漕湖东西向中线,CH3 位于漕湖南岸靠近望虞河过流段的圩区口,表明这 3 处水力作用最弱,是细

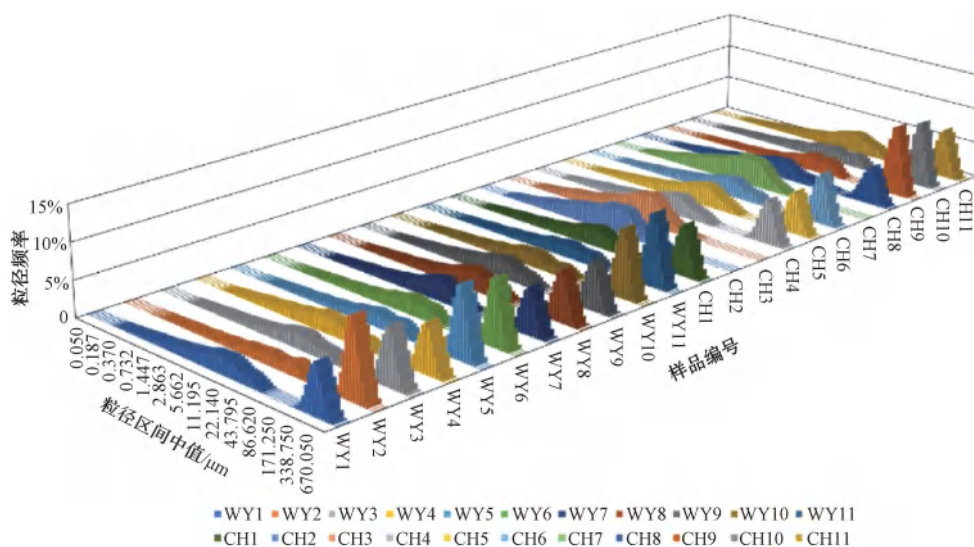


图 6 研究区域各点位沉积物粒度频率分布曲线

Fig. 6 Grain Size Frequency Distribution Curves of Sediments at Each Point in the Study Area

颗粒的连续堆积场所,与平均粒径空间分布中高值的分布情况一致。

3.3 沉积物 OM、营养盐和重金属的空间分布

沉积物 OM、TN 和 TP 的空间分布如图 7 所示。沉积物 OM 的质量分数为 56.90~105.90 g/kg,平均值为 78.50 g/kg,最大值位于漕湖东西向中线(C)。沉积物 TN 质量分数为 0.514~1.625 g/kg,平均值为 0.997 g/kg,OM 和 TN 的最大值均位于漕湖东西向中线(C)。沉积物 TP 质量分数为 0.204~0.830 g/kg,平均值为 0.593 g/kg,最大值出现在漕湖圩区口(D)。总体上,望虞河沉积物的 OM 和营养盐含

量普遍较低,而望虞河东侧漕湖西部区域和东西向中线沉积物的富营养程度相对较高。任凌霄等^[39]2011 年对望虞河表层沉积物总氮的研究表明,调水期间望虞河沉积物 TN 沿程呈现出先增大后减小再增大的趋势,望虞河进出漕湖段的 TN 含量处于减小段,说明望虞河水体中悬浮颗粒物携带的 TN 可能累积于漕湖等过水湖泊,导致 TN 含量下降。秦延文等^[40]研究表明,长江水体进入望虞河后,随输水距离增加悬浮颗粒物因沉降减少,而水体中的磷主要以颗粒态磷存在,望虞河悬浮颗粒的 TP 质量分数为 284.85~1 814.12 mg/kg,平均值为 793.73 mg/kg,

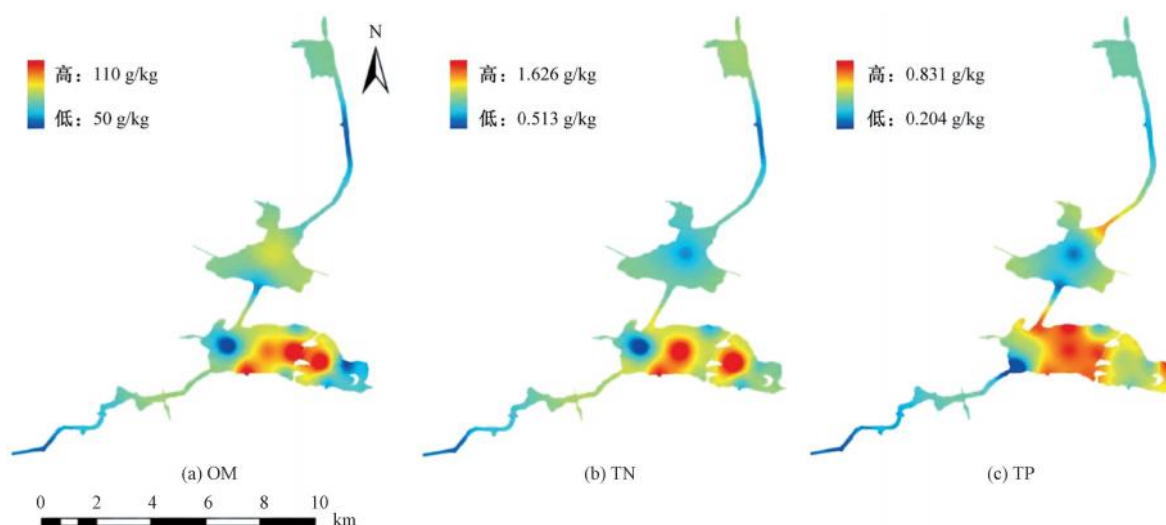


图 7 沉积物营养物质的空间分布

Fig. 7 Spatial Distribution of Sediments Nutrients

比本文中沉积物 TP 的波动范围更广,平均含量明显偏高。说明进入望虞河的多数悬浮颗粒可能于引水方向的上游沉降,使调水对漕湖沉积物 TP 含量的影响降低。因此,从整体上看,望虞河调水对漕湖沉积物中营养物质的积累存在一定影响。

结合水动力模型和粒度组分的空间分布,望虞河输水通道的沉积物受调水影响多为砂态粗颗粒,营养物质含量较低;来自上游或沉积物再悬浮的粉砂态和黏土态细颗粒在调水过程中更容易随悬浮颗粒迁移至漕湖湖区水动力偏弱的区域,并沉降于湖底,导致其吸附的溶解态营养物质在沉积内累积。圩区口营养物质含量的分布情况表明,圩区排水可能也是导致这种分布特征的原因。空间分布进一步表明,漕湖-望虞河系统沉积物中营养物质的来源

可能是望虞河调水过程的引入和漕湖附近圩区面源污染的输入两者之间的协同作用。

沉积物中重金属的空间分布如图 8 所示。研究区沉积物中重金属质量分数相差较大,Hg 质量分数最低,平均质量分数为 0.25 mg/kg,Zn 含量最高,平均质量分数为 143.56 mg/kg。对比采用的太湖流域重金属地球化学背景值^[41-42],仅有 Cr 和 Co 元素质量分数低于背景值,而 Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 和 Hg 元素质量分数分别是背景值的 1.72、1.51、2.43、6.93、1.09 倍和 2.27 倍,表明重金属普遍呈富集状态,其中 Cd 的富集程度最高。平均质量分数达到背景值的 7 倍。此外,Cd 的变异系数在所有重金属中最大,较高的不均匀程度说明 Cd 可能在部分区域形成了“汇”。

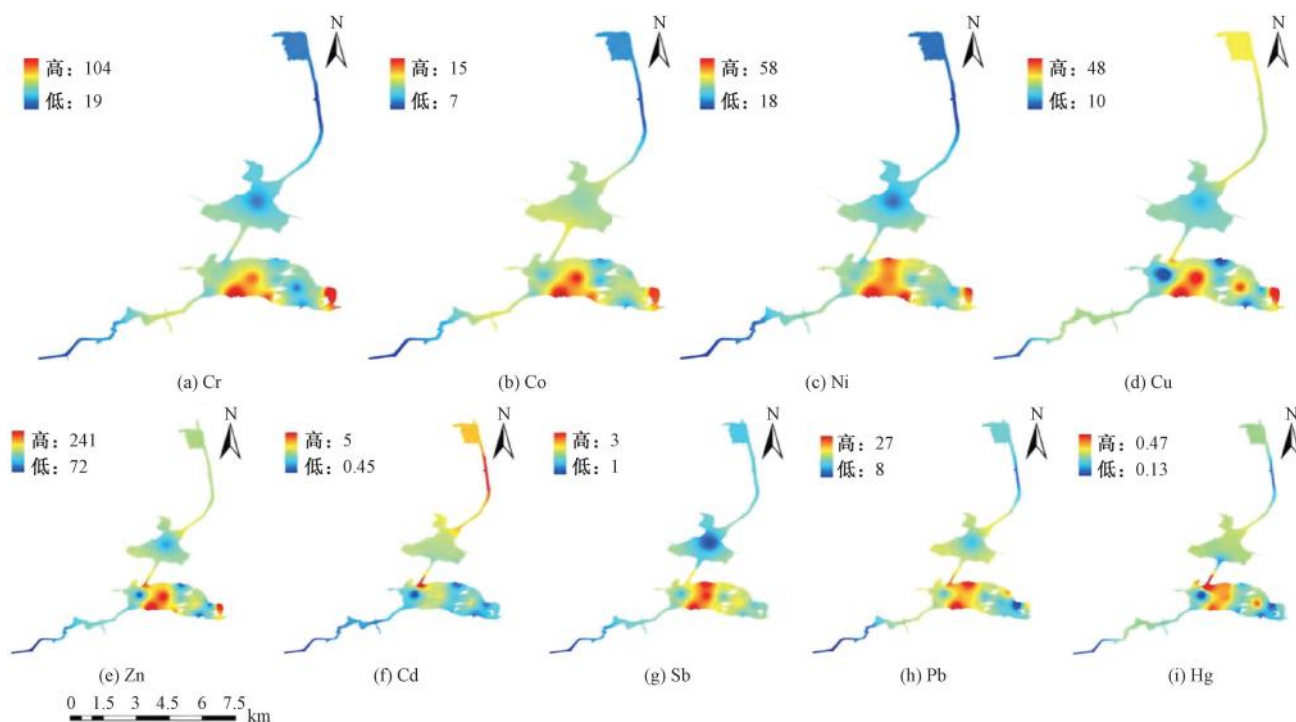


图 8 沉积物重金属质量分数的空间分布(单位:mg/kg)

Fig. 8 Spatial Distribution of Heavy Metal Mass Fraction in Sediments (Unit: mg/kg)

大部分重金属的高值分布于包含 C、D、E 区域的漕湖湖区,仅有 Cd 和 Hg 含量的高值出现于望虞河入湖区(A)。结合沉积物中营养物质含量的空间分布情况,可以看出 C、D、E 区域是营养物质与目标重金属富集的区域,说明漕湖部分区域为污染物累积区。Li 等^[43]对非汛期长江中下游水体、沉积物和底栖动物中重金属质量分数的时空分布情况进行了研究,发现长江中下游沉积物中 Cu、Zn、Cd、Pb 和 Hg

的平均质量分数分别为 27.68、97.69、0.63、27.00、0.027 mg/kg。Fu 等^[44]对夏季长江下游南京段、常熟段和太湖沉积物重金属的污染风险进行了研究,结果表明,长江沉积物中的重金属污染程度明显高于太湖,其中,常熟段近望虞河河口沉积物中 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 和 Hg 的平均质量分数分别为 85.78、46.90、56.94、131.80、2.28、371.17 mg/kg 和 0.23 mg/kg,而太湖北部的重金属平均质量分数为

68.09、36.23、34.14、105.55、0.14、33.55 mg/kg 和 0.11 mg/kg。通过与长江中下游沉积物中重金属质量分数的对比,可以发现长江下游沉积物的金属富集程度最为严重,其次为太湖沉积物,然后为漕湖-望虞河系统沉积物,且太湖和漕湖-望虞河沉积物金属含量间差异较小,表明引长江水入望虞河可能会加重漕湖金属富集程度和污染风险。由于本文中 Cd 污染风险最高,因此进一步比较沉积物 Cd 平均质量分数可知,长江下游(2.28 mg/kg) > 望虞河(1.87 mg/kg) > 太湖(0.11 mg/kg);而徐晨等^[45]对望虞河西岸支流沉积物的研究表明,大部分西岸河网沉积物 Cd 质量分数为 0.15~0.75 mg/kg,说明研究区域沉积物 Cd 受引入的长江水体影响的可能性更大。

3.4 沉积物的粒度与污染指标的相关性分析

研究^[46]表明,水体悬浮颗粒中<63 μm 的粒级部分与重金属总量和地球化学含量的相关性好,具有显著的物理意义,且<63 μm 的悬浮颗粒因具有足够大的比表面积,易于对缓流水体中的营养盐和金属离子进行物理吸附^[47]。而沉积物中的黏土(<2 μm)组分由于含有层状且表面通常带负电荷

的黏土矿物,可通过物理化学方式吸附水体中溶解性有机物和金属阳离子^[48-49]。因此本文引入沉积物颗粒中<63、<2 μm 的粒级组分作为影响因素一同进行相关性分析。

沉积物中营养物质含量、粒级组分间的相关性如表 1 所示,3 类营养物质间 TP 和 TN 在 $P<0.05$ 水平上呈显著正相关,而 OM 和 TN 在 $P<0.01$ 水平上呈显著正相关,OM 和 TN 有较高的相关系数($R^2=0.797$)说明 OM 和 TN 的来源具有较强的同质性,亦有可能是 TN 中有机氮的成分占比偏高所致,而 TP 和 TN 较低的相关系数($R^2=0.465$)表明两者来源的同质性不如 OM 和 TN,可能存在差异^[50-52]。沉积物<63 μm 粒级组分与 TN 在 $P<0.05$ 水平上呈显著正相关,与 OM 在 $P<0.01$ 水平上呈显著正相关,而与 TP 则无明显相关性,说明当沉积物颗粒粒径<63 μm 时,对有机物的吸附能力较强。<2 μm 粒级组分与营养物质含量间的相关性和<63 μm 粒级组分基本一致,说明在<63 μm 粒级范围内,沉积物粒径大小与吸附能力无关,即达到最大吸附能力,不再随着粒径减小而增大。

表 1 沉积物中营养物质含量、粒级组分间的 Spearman 相关性
Tab. 1 Spearman Correlation between Nutrient Contents and Particle Size Components in Sediments

指标	OM	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)	<64 μm	<2 μm
OM	1.000				
TN/(mg·L ⁻¹)	0.797 **	1.000			
TP/(mg·L ⁻¹)	0.415	0.465 *	1.000		
<64 μm	0.682 **	0.493 *	0.394	1.000	
<2 μm	0.694 **	0.439 *	0.323	0.933 **	1.000

注:“*”表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关;“**”表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关。

沉积物粒度不同对重金属的吸附和迁移能力也不同,导致重金属含量不同,小粒径沉积物富含 OM,重金属与 OM 通过表面吸附、离子交换和螯合反应形成金属有机络合物,进而对重金属迁移和生态毒性造成影响^[53-55],而大粒径沉积物富含二氧化硅,OM 含量较少,对重金属的吸附和富集能力较弱^[56-58]。引入沉积物颗粒中<64、<2 μm 的粒级组分作为影响因素一同进行相关性分析。

在沉积物中,一般认为污染物之间相关性越高,其来源或迁移特征越接近,沉积物营养物质含量、粒级组分与重金属含量的相关性系数如图 9 所示,结果表明,OM 含量和 Ni、Cu、Zn、Pb 在 $P<0.05$ 水平

上呈显著正相关,与 Hg 在 $P<0.01$ 水平上呈显著正相关;TN 含量和 Co、Cd 在 $P<0.05$ 水平上呈显著正相关,与 Ni、Cu、Zn、Pb、Hg 在 $P<0.01$ 水平上呈显著正相关;TP 含量和 Co、Cu、Hg 在 $P<0.05$ 水平上呈显著正相关,与 Cr、Ni、Zn、Pb 在 $P<0.01$ 水平上呈显著正相关。总体上,3 类营养物质含量与所有重金属都呈正相关关系,其中 OM 与 Hg 的相关性显著($R^2=0.777$),而 TN ($R^2=0.715$)、TP ($R^2=0.711$)均与 Sb 呈现显著的相关性,说明营养物质对沉积物中重金属的累积有正向作用,有助于沉积物吸附金属离子,而 Hg 和 Sb 可能与营养物质具有同源性。此外,沉积物<63 μm 粒级组分与 Ni、Sb 在

$P < 0.05$ 水平上呈显著相关, $< 2 \mu\text{m}$ 粒级组分则与 Ni、Hg 在 $P < 0.05$ 水平上呈显著相关, 说明由于 $< 63 \mu\text{m}$ 颗粒具有 Ni、Sb、Hg 更容易被沉积物中的

细颗粒组分(粉砂和黏土物质)吸附累积, 与 Mao 等^[59]对 $< 63 \mu\text{m}$ 粒级组分和沉积物重金属间相关性的分析结果类似。

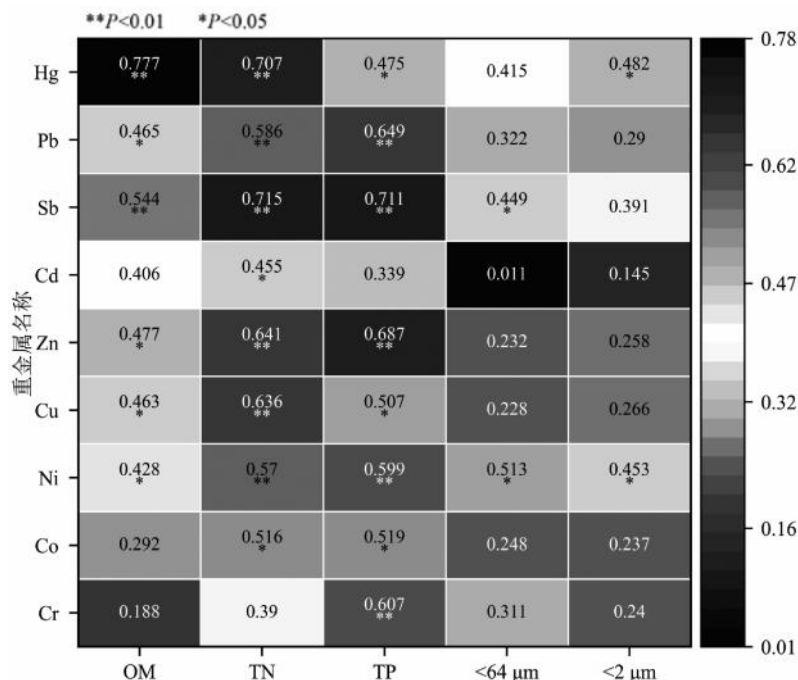


图9 沉积物中营养物质含量和粒级组分与重金属含量的相关性

Fig. 9 Correlation between Nutrient Contents and Particle Size Composition and Heavy Metal Contents in Sediments

通过对沉积物中重金属含量间的相关性分析, 共有 5 对重金属在 $P < 0.05$ 水平上呈显著正相关; 有 21 对重金属在 $P < 0.01$ 水平上呈显著正相关, 其中 Cr、Co、Ni、Pb 和 Cu、Zn、Sb、Hg 两组重金属相互间均呈显著相关, 说明可能存在 2 种不同的来源; Cu 和 Zn 的相关系数在各金属间最大 ($R^2 = 0.897$), 与 Cr 和 Co ($R^2 = 0.842$)、Ni 和 Sb ($R^2 = 0.806$) 间的相关系数皆大于 0.8, 说明这 3 对金属可能存在同一源。根据沉积物各污染因子间的相关性可知, 多数污染因子间呈显著正相关, 因此通过相关性分析可知沉积物粒径对污染物含量的影响程度以及污染因子间的相关程度^[60-62]。

4 结论

(1) 望虞河-漕湖系统沉积物的粒度组分为砂、粉砂和黏土, 平均质量分数为 41.60%、51.04% 和 7.37%, 整体粒度偏细; 粒度类型主要为砂质粉砂、粉砂质砂和粉砂, 其中 50% 点位沉积物为砂质粉砂。引水期间望虞河及其过流路线沉积环境受高能水动力影响较大。沉积物粒度特征分析表明, 河湖系统沉积物来源较为复杂, 受引水水力作用影响

显著。

(2) 河湖系统表层沉积物 OM、TN 和 TP 的含量在漕湖圩区口和支流口较其他区域高。漕湖湖区沉积物中重金属的含量普遍比望虞河输水通道高, Ni 和 Cd 含量空间差异显著。区域之间差异对沉积物 TP 含量有显著影响, 漕湖湖区 TN 含量显著高于出湖区。望虞河输水路线沉积物的营养物质含量普遍较低, 而望虞河东侧的漕湖区域和东西向中线沉积物富含营养物质, 调水和圩区排水可能是营养物质的主要来源。

(3) Spearman 相关性分析表明表层沉积物中营养物质含量普遍与重金属含量呈正相关关系; 沉积物 $< 63 \mu\text{m}$ 粒级组分与 OM、TN、Ni 和 Sb 含量显著正相关, $< 2 \mu\text{m}$ 粒级组分则与 OM、TN、Ni 和 Hg 显著正相关, 说明 OM、TN、Ni、Sb 和 Hg 易于被细颗粒沉积物物理吸附; OM 和 TN、TN 和 TP 之间显著正相关, TN 中有机氮含量可能较高; 各重金属两两间普遍为正相关且多数存在显著关系。

(4) 本文未涉及底栖生物、微生物对沉积物各污染物赋存形态的生物可利用度以及相关生物效

应、生态健康风险评价等。在客观条件允许下,可开展上述研究,提升对该区域生态环境现状的认识程度。

参考文献

- [1] Zhao G J, Gao J F, Tian P, et al. Spatial-temporal characteristics of surface water quality in the Taihu Basin, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(3): 809-819.
- [2] 刘丽华. 福建省西南近岸海域表层沉积物重金属污染特征与风险评价[J]. *海洋环境科学*, 2022(2): 200-207.
Liu L H. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in sediments in the coastal areas of southwest Fujian[J]. *Marine Environmental Science*, 2022(2): 200-207.
- [3] 姚春雨, 夏霆, 朱玲, 等. 太湖流域水生态功能分区沉积物污染评估[J]. *南京工业大学学报: 自然科学版*, 2022, 44(1): 57-67.
Yao C Y, Xia T, Zhu L, et al. Assessment of sediment pollution in the aquatic ecological function areas of Taihu Lake Basin[J]. *Journal of Nanjing University of Technology: Natural Science Edition*, 2022, 44(1): 57-67.
- [4] 潘晓雪, 马迎群, 秦延文, 等. “引江济太”过程中长江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究[J]. *环境科学*, 2015, 36(8): 2800-2808.
Pan X X, Ma Y Q, Qin Y W, et al. Nutrients input characteristics of the Yangtze River and Wangyu River during the “water transfers on Lake Taihu from the Yangtze River” [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(8): 2800-2808.
- [5] 张利民, 王水, 韩敏, 等. 太湖流域望虞河西岸地区氮磷污染来源解析及控制对策[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(3): 315-320.
Zhang L M, Wang S, Han M, et al. Nitrogen and phosphorus pollution in the western district of Wangyu River and countermeasures, Taihu Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(3): 315-320.
- [6] 顾振锋, 王沛芳, 陈娟, 等. 望虞河西岸河流氮磷污染状况及其对调水水质的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(11): 1428-1435.
Gu Z F, Wang P F, Chen J, et al. Nitrogen and phosphorus pollution in the west bank of Wangyu River and its impact on water quality of water diversion[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(11): 1428-1435.
- [7] 吕学研, 吴时强, 张咏, 等. 调水引流工程生态与环境效应研究进展[J]. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(4): 38-45.
Lü X Y, Wu S Q, Zhang Y, et al. Progress of ecology and environment effect of water diversion project [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015, 26(4): 38-45.
- [8] Zhang J, Wang K, Yi Q T, et al. Transport and partitioning of metals in river networks of a plain area with sedimentary resuspension and implications for downstream lakes [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 294: 118668. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118668.
- [9] 高可伟, 朱元荣, 孙福红, 等. 我国典型湖泊及其入湖河流氮磷水质协同控制探讨[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(5): 1400-1414.
Gao K W, Zhu Y R, Sun F H, et al. A study on the collaborative control of water quality of nitrogen and phosphorus between typical lakes and their inflow rivers in China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(5): 1400-1414.
- [10] 黄爱平, 刘晓波, 彭文启, 等. 鄱阳湖水龄时空特征和影响因素分析[J]. *水利学报*, 2021, 52(9): 1082-1090.
Huang A P, Liu X B, Peng W Q, et al. Spatial and temporal characteristics and influencing factors of water age in Poyang Lake [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(9): 1082-1090.
- [11] 袁伟皓, 王华, 曾一川, 等. 通江湖泊河湖两相判别机制研究与应用[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(1): 181-189.
Yuan W H, Wang H, Zeng Y C, et al. Research and application of two phases discriminant mechanism of river and lake in river-connected lake [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(1): 181-189.
- [12] 程浩亮. 高原湖泊湿地生态水动力学模拟研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.
Cheng H L. Study on eco-hydrodynamic simulation of plateau lake wetland[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012.
- [13] Chen X C, Chen Y Q, Shimizu T, et al. Water resources management in the urban agglomeration of the Lake Biwa region, Japan: An ecosystem services-based sustainability assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 174-187. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.197.
- [14] Zhang Y L, Qin B Q, Zhu G W, et al. Profound changes in the physical environment of Lake Taihu from 25 years of long-term observations: Implications for algal bloom outbreaks and aquatic macrophyte loss[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(7): 4319-4331.
- [15] 张运林, 秦伯强, 朱广伟. 过去40年太湖剧烈的湖泊物理环境变化及其潜在生态环境意义[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(5): 1348-1359.
Zhang Y L, Qin B Q, Zhu G W. Long-term changes in physical environments and potential implications for the eco-environment of Lake Taihu in the past four decades [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(5): 1348-1359.
- [16] 姜霞, 王书航, 等. 沉积物质量调查评估手册[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
Jiang X, Wang S H. Handbook of sediment quality investigation and evaluation[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [17] 刘志杰, 公衍芬, 周松望, 等. 海洋沉积物粒度参数3种计算方法的对比研究[J]. *海洋学报: 中文版*, 2013, 35(3): 179-188.

- Liu Z J, Gong Y F, Zhou S W, et al. A comparative study on the grain-size parameters of marine sediments derived from three different computing methods [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 35(3): 179–188.
- [18] Wu D H, Yin Y J, Shen A C, et al. Impacts of hydrodynamic disturbance on black blooms: An *in-situ* study in Lake Taihu [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 641: 131794. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131794.
- [19] Álvarez E A, Mochón M C, Sánchez J C J, et al. Heavy metal extractable forms in sludge from wastewater treatment plants [J]. *Chemosphere*, 2002, 47(7): 765–775.
- [20] El-Hak H N G, El-Din M I S, Elrayess R A. Bioaccumulation of heavy metals and their histopathological impact on *Mugil cephalus* from the North Eastern Region of Manzala Lake, Egypt [J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2021, 45: 101841. DOI: 10.1016/j.rsma.2021.101841.
- [21] Friedman G M, Sanders J E. *Principles of sedimentology* [M]. New York: Wiley, 1978.
- [22] 曾维特, 张东强, 刘兵, 等. 海南岛北部海湾表层沉积物粒度特征及输运趋势 [J]. *海洋地质前沿*, 2024, 40(5): 10–18.
- Zeng W T, Zhang D Q, Liu B, et al. Grain size characteristics and transport trends of surface sediment in the bays of northern Hainan Island [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2024, 40(5): 10–18.
- [23] 李原, 李任伟, 尚榆民, 等. 云南洱海的环境沉积学研究——表层沉积物的粒度分布、水流方向和能量 [J]. *沉积学报*, 1999, 17(A12): 769–774.
- Li Y, Li R W, Shang Y M, et al. The Environment Sedimentological Study on Erhai Lake, Yunnan Province—Sediments particle size distribution, flow direction and energy distribution [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(A12): 769–774.
- [24] He D, Shi X M, Wu D Y. Particle-size distribution characteristics and pollution of heavy metals in the surface sediments of Kuitun River in Xinjiang, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(2): 104–104.
- [25] Wang S S, Pan C H, Xie D F, et al. Grain size characteristics of surface sediment and its response to the dynamic sedimentary environment in Qiantang Estuary, China [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2022, 37(4): 457–468.
- [26] 范成新, 张路. 太湖——沉积物污染与修复原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 65–68.
- Fan C X, Zhang L. *Lake Taihu: Principles of sediment pollution and remediation* [M]. Beijing: Science Press, 2009: 65–68.
- [27] 章婷曦, 文莹亭, 董丹萍, 等. 太湖西北部表层沉积物粒度特征与沉积环境 [J]. *湖泊科学*, 2018, 30(3): 836–846.
- Zhang T X, Wen Y T, Dong D P, et al. Grain size features and sedimentary environment of surficial sediments in the northwest Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(3): 836–846.
- [28] 王国庆, 石学法, 刘焱光, 等. 粒径趋势分析对长江南支口外沉积物输运的指示意义 [J]. *海洋学报(中文版)*, 2007, 29(6): 161–166.
- Wang G Q, Shi X F, Liu Y G, et al. Grain-size trend analysis on the south branch of the Changjiang Estuary in China and its implication to sediment transportation [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, 29(6): 161–166.
- [29] Blott S J, Pye K. GRADISTAT: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(11): 1237–1248.
- [30] Tao H, Zhou W X, Li F P, et al. Flow confluence affects the distribution and accumulation of Sb from the effluent of a sewage treatment plant in the plain river network of the Yangtze River estuary [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2025, 25(1): 292–301.
- [31] 卢连战, 史正涛. 沉积物粒度参数内涵及计算方法的解析 [J]. *环境科学与管理*, 2010, 35(6): 54–60.
- Lu L Z, Shi Z T. Analysis for sediment grain size parameters of connotations and calculation method [J]. *Environmental Science and Management*, 2010, 35(6): 54–60.
- [32] 王小雷, 杨浩, 赵其国, 等. 云南抚仙湖近现代环境变化的沉积物粒度记录 [J]. *沉积学报*, 2010, 28(4): 776–782.
- Wang X L, Yang H, Zhao Q G, et al. Recent environmental change inferred from grain-size records in Fuxian Lake, Yunnan Province [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(4): 776–782.
- [33] 汤世凯, 张杰, 于晓静, 等. 山东丁字湾海域沉积物重金属含量、分布及与粒径之间的关系研究 [J]. *现代地质*, 2020, 34(5): 928–935.
- Tang S K, Zhang J, Yu X J, et al. Heavy metal contents, spatial distributions and their relationships with the grain size of surficial sediments in dingziwan, Shandong [J]. *Geoscience*, 2020, 34(5): 928–935.
- [34] 李晓刚, 白巧慧, 庞奖励, 等. 丹江流域河流表层沉积物粒度分析与重金属污染评价 [J]. *江西农业学报*, 2019, 31(4): 93–98.
- Li X G, Bai Q H, Pang J L, et al. Grain size analysis and heavy metal pollution assessment of river surface sediments in Danjiang River Basin [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2019, 31(4): 93–98.
- [35] 冯岚, 孙省利, 张才学, 等. 白茅海潮滩重金属空间分布特征及生态风险评价 [J]. *海洋环境科学*, 2022, 41(3): 356–364.
- Feng L, Sun X L, Zhang C X, et al. Spatial distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the tidal flat at the Baimaohai [J]. *Marine Environmental Science*, 2022, 41(3): 356–364.
- [36] 蒲佳, 马龙, 吉力力·阿不都外力, 等. 新疆博斯腾湖表层沉

- 积物粒度空间分布特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 477-485.
- Pu J, Ma L, Jilili A, et al. Spatial distribution of grain size composition of surface sediment in the Bosten Lake Region, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 477-485.
- [37] 胡京九, 张虎才, 常凤琴, 等. 程海表层沉积物粒度空间分布特征及其影响因素[J]. 沉积学报, 2020, 38(2): 340-348.
- Hu J J, Zhang H C, Chang F Q, et al. Spatial distribution of grain size composition of surface sediments in Lake Cheng (Chenghai) and their influential factors [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(2): 340-348.
- [38] 刘宪斌, 李孟沙, 梁梦宇, 等. 曹妃甸近岸海域表层沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(3): 507-514.
- Liu X B, Li M S, Liang M Y, et al. Grain size features and sedimentary environment of surficial sediments in the Caofeidian offshore area [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35(3): 507-514.
- [39] 任凌霄, 王沛芳, 王超, 等. 望虞河表层沉积物中氮的分布与形态变化特征[J]. 环境工程学报, 2015, 9(3): 1201-1208.
- Ren L X, Wang P F, Wang C, et al. Characteristics of distribution and variation of nitrogen species in surface sediments of Wangyu River [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(3): 1201-1208.
- [40] 秦延文, 郑丙辉, 韩超南, 等. 引江济太调水河段悬浮颗粒物中磷的形态与分布研究[C]// 中国环境科学学会. 2013年水资源生态保护与水污染控制研讨会论文集. 2013: 681-688.
- Qin Y W, Zheng B H, Han C N, et al. Study of forms and distributions of particulate phosphorus in the river reach; Diversion from the Yangtze River to the Tai Lake[C]// Chinese Society for Environmental Sciences. Proceedings of the 2013 Symposium on Water Resources Ecological Protection and Water Pollution Control. 2013: 681-688.
- [41] Qu W C, Dickman M, Wang S M. Multivariate analysis of heavy metal and nutrient concentrations in sediments of Taihu Lake, China[J]. Hydrobiologia, 2001, 450(1/2/3): 83-89. DOI: 10.1023/A:1017551701587.
- [42] 过子怡, 盛根明, 冯君逸, 等. 引江济太沿程小型过水湖泊典型重金属富集特征及潜在生态风险[J]. 净水技术, 2023, 42(4): 52-61.
- Guo Z Y, Sheng G M, Feng J Y, et al. Enrichment characteristics and potential ecological risks of typical heavy metals in small river-passing lakes along the water diversion project of Yangtze River to Taihu Lake[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(4): 52-61.
- [43] Li R, Tang X Q, Guo W J, et al. Spatiotemporal distribution dynamics of heavy metals in water, sediment, and Zoobenthos in mainstream sections of the middle and lower Changjiang River [J]. Science of the Total Environment, 2020, 714: 136779. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136779.
- [44] Fu J, Hu X, Tao X C, et al. Risk and toxicity assessments of heavy metals in sediments and fishes from the Yangtze River and Taihu Lake, China[J]. Chemosphere, 2013, 93(9): 1887-1895.
- [45] 徐晨, 王沛芳, 陈娟, 等. 望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2019, 40(11): 4914-4923.
- Xu C, Wang P F, Chen J, et al. Contaminant characteristics and ecological risk assessments of heavy metals from river networks in the western area of the Wangyu River [J]. Environmental Science, 2019, 40(11): 4914-4923.
- [46] 陈静生, 王飞越, 陈江麟. 论小于 63 μm 粒级作为水体颗粒物重金属研究介质的合理性及有关粒级转换模型研究[J]. 环境科学学报, 1994, 14(4): 419-425.
- Chen J S, Wang F Y, Chen J L. Relation of aquatic particulate grain size to heavy metals concentrations in eastern Chinese rivers [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1994, 14(4): 419-425.
- [47] Zhang Q, Jin X, Li S M. Heavy metal pollution in slow-moving river; Highlight the high risks posed by suspended particulate matter[J]. Soil and Sediment Contamination, 2020, 29(8): 914-928.
- [48] Duong C N, Schlenk D, Chang N I, et al. The effect of particle size on the bioavailability of estrogenic chemicals from sediments [J]. Chemosphere, 2009, 76(3): 395-401.
- [49] Liu X D, Tournassat C, Grangeon S, et al. Molecular-level understanding of metal ion retention in clay-rich materials[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2022, 3(7): 461-476.
- [50] 张家根, 黄天寅, 陈书琴, 等. 南水北调东线工程沿线湖泊表层沉积物重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(4): 1354-1363.
- Zhang J G, Huang T Y, Chen S Q, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of lakes along the east route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(4): 1354-1363.
- [51] 杨俊, 卢明明, 程婉芸, 等. 武汉市渣子湖沉积物中重金属、氮、磷和有机质的分布特征及污染评价[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(3): 199-207.
- Yang J, Lu M M, Cheng W Y, et al. Distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals, nitrogen, phosphorus and organic matter in sediment of Zhazi Lake, Wuhan[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(3): 199-207.
- [52] Zhang X J, Zhang Y T. Distribution and ecological risk of sediment heavy metals in the water-level-fluctuation zone of the Shawan River section of Yelang Lake[J]. Journal of Chemistry, 2021, 2021: 5495915. DOI: 10.1155/2021/5495915.

(下转第 78 页)

- by the combined injection of acetate and nano zero-valent iron [J]. *Science of the Total Environment*, 2026, 1012: 181218. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.181218.
- [12] 晁琛, 张家铭, 马新民, 等. ZVI-AC 复合材料对硝酸盐污染修复效果的激发极化法监测实验[J]. *地球与行星物理评论 (中英文)*, 2026, 57(2): 164–176.
- Chao C, Zhang J M, Ma X M, et al. The monitoring experiment of ZVI-AC material on nitrate pollution remediation effect by induced polarization method [J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2026, 57(2): 164–176.
- [13] Wei S Y, Jia L X, Tan J C, et al. Iron-carbon micro-electrolysis simultaneously enhanced nutrient and heavy metal removal in constructed wetlands for purifying polluted groundwater with variable hydraulic loadings [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 470: 144367. DOI: 10.1016/j.cej.2023.144367.
- [14] Wu R F, Jeyakumar P, Bolan N, et al. Enhanced denitrification driven by a novel iron-carbon coupled primary cell: Chemical and mixotrophic denitrification [J]. *Biochar*, 2024, 6: 5. DOI: 10.1007/s42773-023-00274-2.
- [15] Duan W J, Li G, Lei Z C, et al. Highly active and durable carbon electrocatalyst for nitrate reduction reaction [J]. *Water Research*, 2019, 161: 126–135. DOI: 10.1016/j.watres.2019.05.104.
- [16] 房新昌, 马良, 田彬彬, 等. 厌氧-好氧-缺氧 SBBR 工艺对垃圾渗滤液深度脱氮处理的试验[J]. *净水技术*, 2024, 43(4): 121–127.
- Fang X C, Ma L, Tian B B, et al. Experiment of advanced treatment with anaerobic-aerobic-anoxic SBBR processes for landfill leachate denitrification [J]. *Water Purification Technology*, 2024, 43(4): 121–127.
- [17] Elmidaoui A, Elhannouni F, Menkouchi Sahli M A, et al. Pollution of nitrate in Moroccan ground water: Removal by electrodialysis [J]. *Desalination*, 2001, 136(1-3): 325–332. DOI: 10.1016/S0011-9164(01)00195-3.

(上接第 67 页)

- [53] Liu J J, Wang P F, Wang C, et al. Heavy metal pollution status and ecological risks of sediments under the influence of water transfers in Taihu Lake, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(3): 2653–2666.
- [54] 赵玉庭, 孙珊, 由丽萍, 等. 莱州湾沉积物粒度与重金属分布特征[J]. *海洋科学*, 2021, 45(3): 43–50.
- Zhao Y T, Sun S, You L P, et al. Distribution characteristics of grain size and heavy metals of sediments in Laizhou Bay [J]. *Marine Sciences*, 2021, 45(3): 43–50.
- [55] 雷雁翔, 张斌, 吴治国, 等. 长岛北部海域表层沉积物重金属分布特征与风险评价及来源分析[J]. *海洋地质前沿*, 2023, 39(3): 40–50.
- Lei Y X, Zhang B, Wu Z G, et al. Spatial distribution of heavy metals in the surface sediments of Changdao Island and their sources and pollution assessment [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2023, 39(3): 40–50.
- [56] Liu X B, Li D L, Song G S. Assessment of heavy metal levels in surface sediments of estuaries and adjacent coastal areas in China [J]. *Frontiers of Earth Science*, 2017, 11(1): 85–94.
- [57] Feng H, Jiang H Y, Gao W S, et al. Metal contamination in sediments of the western Bohai Bay and adjacent estuaries, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(4): 1185–1197.
- [58] Chen W B, Wang Y, Wang L G, et al. Emerging investigator series: Effects of sediment particle size on the spatial distributions of contaminants and bacterial communities in the reservoir sediments [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2022, 8(5): 957–967.
- [59] Mao L C, Ye H, Li F P, et al. Source-oriented variation in trace metal distribution and fractionation in sediments from developing aquaculture area—A case study in south Hangzhou bay, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 125(1/2): 389–398. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2017.09.046.
- [60] 许欣, 蔡钰灿, 史华明, 等. 海口湾海域表层沉积物重金属空间分布特征及其生态风险评价[J]. *海洋环境科学*, 2023, 42(4): 493–501.
- Xu X, Cai Y C, Shi H M, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment on heavy metals in surface sediments in Haikou Bay [J]. *Marine Environmental Science*, 2023, 42(4): 493–501.
- [61] 陈斌, 吕向立, 王中媛, 等. 珠江口表层沉积物重金属潜在生态风险及生物富集评价[J]. *中国海洋大学学报*, 2021, 51(7): 73–82.
- Chen B, Lv X L, Wang Z Y, et al. Assessment of the potential ecological risk of heavy metals in the surface sediments and biological accumulation in Pearl River Estuary [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2021, 51(7): 73–82.
- [62] 闫兴国, 袁庆政, 赵明杰, 等. 广东吴川市近岸海域表层沉积物重金属分布特征与污染评价[J]. *海洋地质前沿*, 2022, 38(11): 82–90.
- Yan X G, Yuan Q Z, Zhao M J, et al. Assessment on heavy metal pollution in surface sediments off Wuchuan, Guangdong Province [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(11): 82–90.