生态与农村环境学报 2023，39（6）：734-740
Journal of Ecology and Rural Environment

DOI：10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0052

华跃洲，杜成栋，何尚卫，等.太湖西山岛河流秋季沉积物氮、磷特征及其对水质的响应[J].生态与农村环境学报，2023，39(6)：734-740.

HUA Yue-zhou，DU Cheng-dong，HE Shang-wei，*et al*.Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Their Responding to the Overlying Water in Xishan Island in Autumn[J].Journal of Ecology and Rural Environment，2023，39(6)：734-740.

太湖西山岛河流秋季沉积物氮、磷特征及其对水质的响应

华跃洲[1,2]，杜成栋[1,2]，何尚卫[3,4]，李清濯[3,4]，李 勇[1,2,5]，潘继征[3①]（1. 苏州科技大学环境科学与工程学院，江苏 苏州 215011；2. 江苏省环境科学与工程重点实验室，江苏 苏州 215011；3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所/湖泊与环境国家重点实验室，江苏 南京 210008；4. 中国科学院大学，北京 100049；5. 佛山市南海区苏州科技大学环境研究院，广东 佛山 528200）

摘要：入湖河流沉积物营养盐的释放制约了河流与太湖水环境的改善。因目前对太湖岛上入湖河流沉积物氮、磷特征及其对水质的响应研究较少，笔者于2020年10月采集西山岛15个代表点位的沉积物样品并测定了其氮、磷含量，进行沉积物对不同初始浓度氨氮（NH_4^+-N）、磷酸盐（PO_4^{3-}-P）的吸附-解吸模拟实验；研究各点位沉积物对水质的响应，确定了需水质管控与沉积物疏浚的点位。结果表明，西山岛河流沉积物总氮、总磷平均含量分别为8.97和2.90 g·kg^{-1}；沉积物活性氮、磷平均含量分别为3.77和1.29 g·kg^{-1}，存在较高的氮、磷释放风险。根据模拟实验结果，7个点位的沉积物NH_4^+-N和9个点位的沉积物PO_4^{3-}-P处于解吸状态，磷的解吸现象更为严重。通过研究入湖河流沉积物对太湖水环境的影响发现，为维持太湖水环境的稳定，点位CZ1、CZ5在原位水质下仅需进行外源管控，点位CZ4的沉积物需进行疏浚或原位覆盖，其他点位需进行水质改善与沉积物疏浚的综合整治。

关键词：西山岛；入湖河流；沉积物；活性氮磷

中图分类号：X524 **文献标志码**：A **文章编号**：1673-4831(2023)06-0734-07

Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Their Responding to the Overlying Water in Xishan Island in Autumn.

HUA Yue-zhou[1,2], *DU Cheng-dong*[1,2], *HE Shang-wei*[3,4], *LI Qing-zhuo*[3,4], *LI Yong*[1,2,5], *PAN Ji-zheng*[3①] (1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China; 2. Key Laboratory of Environmental Science and Engineering of Jiangsu Province, Suzhou 215011, China; 3. Nanjing Institute of Geography and Limnology/ State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. Foshan Nanhai Environmental Research Institute, Suzhou University of Science and Technology, Foshan 528200, China)

Abstract: The nutrient release in the sediments of Xishan Island became the restriction on water quality improvement in Taihu Lake. Little efforts has been made to study the pollution characteristics of nitrogen and phosphorus in sediments and their responding to the overlying waters in Xishan Island. Fifteen representative sections were chosen and sampled in the autumn of 2020 (CZ1-CZ6, CX1-CX3, CX1-CX6), and the concentrations of nitrogen and phosphorus in sediments were determined. The adsorption-desorption experiments were developed under different initial ammonia nitrogen (NH_4^+-N) and phosphate (PO_4^{3-}-P) concentrations. The responses to the overlying water were studied to determine the dredged points. The results indicat that the average concentrations of total nitrogen and total phosphorus were 8.97 and 2.90 g·kg^{-1}, respectively. The average concentrations of reactive nitrogen and phosphorus were 3.77 and 1.29 g·kg^{-1}, respectively, which showed that the sediments in Xishan Island got higher risk of potential nitrogen and phosphorus releases. According to the results of simulation experiments, the sediments in seven points were dominated by NH_4^+-N desorption, and

收稿日期：2022-01-07

基金项目：国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07204)；江苏高校水处理技术与材料协同创新中心项目；江苏省碳达峰碳中和科技创新专项(BK20220014)

① 通信作者 E-mail：jzhpan@ niglas.ac.cn

the sediments in nine points were dominated by PO_4^{3-}-P desorption. In order to maintain the stability of the water environment of Taihu Lake, the exterior pollution should be merely controlled for CZ1 and CZ2. The sediment in CZ4 needs to be dredged and measures should be taken to improve the conditions of waters and sediments in other points.

Key words: Xishan Island; inflow rivers; sediment; reactive nitrogen and phosphorus

湖泊是我国重要的水资源之一,是沿湖工农业稳定发展的基础,是人类活动与发展的热点区域[1]。由于近年来对湖泊流域的过度开发,湖泊水质已受到严重影响,并且外源污染物大量输入湖体,沉降积累于沉积物中,诱导湖泊富营养化、蓝藻暴发等现象发生[2]。

入湖河流是影响湖泊水质并引发蓝藻水华暴发的主要因子[3]。入湖河流中的沉积物会释放营养盐至上覆水中,造成入湖河流的二次污染[4],并诱发湖泊水体的富营养化。太湖湖心区岛上存在大量与太湖直接相连的河流,与环太湖河流相比,这些河流长度较短,河流中的污染物极易输入到太湖水体中。当入湖河流的上游水质显著提升后,河流中的沉积物仍会释放营养盐至上覆水体,进而影响太湖水环境。目前针对太湖流域河流沉积物氮、磷含量特征已开展了诸多研究[5-6],但对太湖岛上入湖河流沉积物氮、磷的含量特征及其水质的影响却关注较少。

选取秋季太湖湖心区西山岛上的入湖河流为研究对象,此时沉积物受水文条件影响较小,能够准确反映出该区域沉积物的污染状况。该研究分析了西山岛入湖河流沉积物总氮、总磷及活性氮、磷含量特征,模拟了沉积物对不同初始浓度氨氮(NH_4^+-N)与磷酸盐(PO_4^{3-}-P)的吸附-解吸情况;从工程管理的角度出发,研究了入湖河流沉积物对太湖水环境的影响,确定了需水质管控与沉积物疏浚的点位,可为进一步提升太湖水质管理提供参考。

1　研究区与研究方法

1.1　研究区概况

西山岛位于太湖湖心区,总面积为 79.80 km^2,东西长 15 km,南北宽 11 km,系太湖第一大岛,也是我国淡水湖泊中最大的岛屿[7]。西山岛四季分明,属亚热带湿润性季风气候区,年均温度约 16 ℃,降水量为 1 000~1 500 mm。西山岛整体属于中间高、周边低的丘陵型地区,岛心为西山岛最高缥缈峰。西山岛经济以农业为主,农用面积约为 36.58 km^2[8]。

各点位河流水资源主要通过泵站从太湖进行调度,由于入河污染物主要来源不同,各点位河流污染程度存在差异。西山岛各入湖河流区域可根据主要污染源的不同分为城镇区、乡村区以及城乡结合区(图 1)。城镇区(点位 CZ1~CZ6)位于金庭镇镇区,有统一的生活污水处理设施,但由于人口密度大,污水产生量较大,存在生活污水偷排漏排的现象,该区域河流的主要污染源为居民生活污水;乡村区(点位 XC1~XC6)人口密度小,周边无生活污水处理设施,河流周边有农田且无污染防护,主要污染源为农业面源污染;城乡结合区(点位 CX1~CX3)位于城镇与农村的交界处,该区域的河流同时受生活污水与农业面源污染的影响(表 1)。

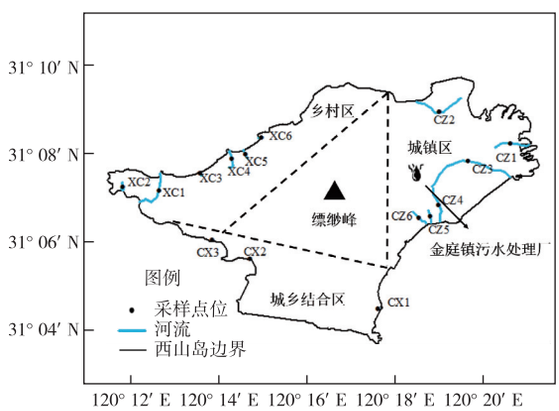


图 1　西山岛入湖河流采样点位

Fig. 1　Sampling points of the inflow rivers in Xishan Island

表 1　各分区 2020 年秋季原位水质情况

Table 1　Water qualities in different zones in autumn of 2020

区域	水温/℃	ρ(DO)/(mg·L^{-1})	ρ(NH_4^+-N)/(mg·L^{-1})	ρ(PO_4^{3-}-P)/(mg·L^{-1})
城镇区	26.02±0.69	5.00±3.37	0.38±0.26	0.08±0.06
城乡结合区	25.07±1.08	5.05±1.18	0.69±0.43	0.06±0.03
乡村区	22.53±1.10	5.16±2.29	0.67±0.39	0.18±0.11
均值	24.43±1.86	5.07±2.48	0.56±0.36	0.11±0.09

1.2　研究方法

1.2.1　沉积物样品采集

2020 年 10 月使用彼得逊采泥器采集 15 条河流 0~10 cm 的表层沉积物,放入聚乙烯密封袋中并现场混匀,样品冷藏运输至实验室待测。

1.2.2　沉积物总氮和总磷含量及活性组分的测定

沉积物样品经风干磨碎后测定其总氮(TN)和

总磷(TP)含量[9]。采用分级浸取的方法测定沉积物中的活性氮,即可转化态氮(TTN)含量[10]。沉积物 TTN 分为离子交换态氮(IEF-N)、弱酸可浸取态氮(WAEF-N)、强碱可浸取态氮(SAEF-N)与强氧化剂可浸取态氮(SOEF-N)。TTN 含量为硝酸盐氮(NO_3^--N)、亚硝酸盐氮(NO_2^--N)与 NH_4^+-N 的含量之和。

采用经 Huper 改进的 Psenner 连续提取法测定沉积物中的磷形态的含量[11]。沉积物总磷(TP)分为弱吸附态磷(NH_4Cl-P)、金属氧化物结合态磷(Fe/Al-P)、钙结合态磷(Ca-P)、残渣态磷(Res-P)与有机磷(OP)。其中活性磷,即生物可利用磷(BAP)含量由 w(Fe/Al-P)+ w(NH_4Cl-P)+ 0.6× w(OP)计算得出[12]。

1.2.3 沉积物对 NH_4^+-N 与 PO_4^{3-}-P 的吸附热力学实验

称取过 0.15 mm 孔径筛的 0.50 g 沉积物于 100 mL 离心管中,分别加入 50 mL 不同浓度的 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 溶液,NH_4^+-N 初始质量浓度(C_{N0})为 0~25.00 mg·L^{-1},PO_4^{3-}-P 初始质量浓度(C_{P0})为 0~10.00 mg·L^{-1},其中 0~5.00 和 0~0.40 mg·L^{-1}分别为低 C_{N0}和 C_{P0}浓度,加盖混匀后在 25 ℃黑暗环境下振荡 24 h 至吸附平衡。取出离心管,在 4 000 r·min^{-1}下离心 10 min(离心半径为 11 cm),取上清液经 0.45 μm 孔径醋酸纤维滤膜过滤后测定 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 浓度[10, 13]。

1.3 数据分析方法

为计算各点位沉积物 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 的吸附-解吸平衡浓度,需进行沉积物吸附量的计算,并结合 Henry 方程进行线性拟合。

沉积物的吸附量可通过下式计算得到:

$$Q=V(C_0-C_e)/m。 \quad (1)$$

式(1)中,Q 为平衡吸附量,mg·kg^{-1};V 为溶液体积,L;C_0为初始质量浓度,mg·L^{-1};C_e为平衡质量浓度,mg·L^{-1};m 为沉积物的投加量,kg[10]。

Henry 方程的数学表达式[14]为

$$Q_N=k\ C_e-A_N, \quad (2)$$

$$Q_P=k\ C_e-A_P。 \quad (3)$$

式(2)~(3)中,Q_N和 Q_p分别为沉积物 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 的平衡吸附量,mg·kg^{-1};k 为斜率,L·kg^{-1};A_N和 A_P分别为本底吸附态 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 含量,mg·kg^{-1}。当 Q_N和 Q_p为 0 mg·kg^{-1}时,水体 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 浓度为沉积物吸附-解吸平衡浓度,分别记为 C_{N0}和 C_{P0}[15]。

利用 Excel 2019 统计西山岛入湖河流数据,采用 Origin 2021 进行图表绘制,IBM SPSS 26.0 进行方差分析,使用 ArcGIS 10.2 进行区域图的绘制。

2 结果与讨论

2.1 各点位沉积物总氮和总磷含量

沉积物是水体污染物的重要来源与汇,对于水生生态系统中营养物质的迁移和转化起着至关重要的作用[16]。如图 2 所示,15 个采样点位沉积物 w(TN)平均值为 8.97 g·kg^{-1},其中点位 CZ1 最低(4.68 g·kg^{-1}),点位 XC1 最高(15.00 g·kg^{-1});沉积物 w(TP)平均值为 2.90 g·kg^{-1},其中点位 CZ1 最低(1.32 g·kg^{-1}),点位 XC4 最高(5.81 g·kg^{-1})。

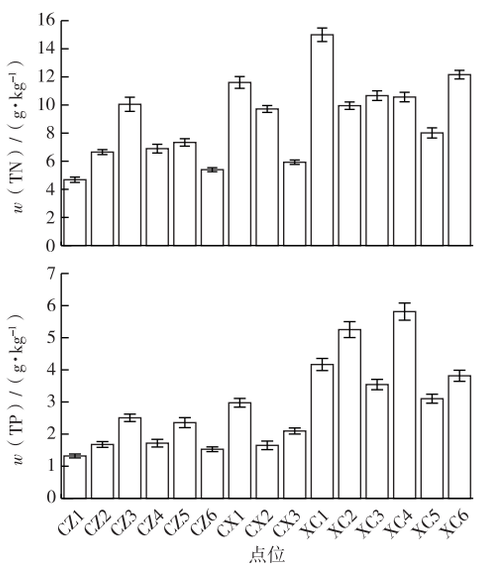


图 2 沉积物各点位总氮与总磷含量

Fig. 2 Variations of total nitrogen and total phosphorus concentrations in sediments

西山岛入湖河流沉积物 TN 和 TP 含量分别超出 2020 年苏州古城区河流 4.33 和 1.64 倍[17],污染更严重。这与西山岛入湖河流周边多为耕地[8],沉积物受沿岸农业面源污染影响较大,沉积物营养物质累积较多有关。

从各分区来看,位于东部城镇区河流沉积物的氮、磷含量普遍低于南部的城乡结合区及西北部的乡村区河流,不同分区的异质性导致了沉积物氮、磷含量的差异。乡村区与城乡结合区受农村面源污染的影响,农药及肥料的低效喷洒导致部分氮、磷通过地表径流汇入河流中,农业面源污染通过沉降、吸附等形式汇入沉积物中,导致内源污染的积累。相较于乡村区与城乡结合区的河流,城镇区河

流已经过部分改造，河流岸线以人工硬质岸线为主，因此沉积物污染程度较轻。

依据加拿大安大略省环境与能源部颁布的沉积物能引起底栖动物严重生态毒性的标准值（以下简称为“生态毒性严重级标准值”）[18]，14 个点位的沉积物 TN 含量超出生态毒性严重级标准值（4.80 g·kg^{-1}），10 个点位的沉积物 TP 含量超出生态毒性严重级标准值（2.00 g·kg^{-1}）。可见，西山岛入湖河流沉积物氮、磷含量偏高，严重威胁底栖动物的生存。对比太湖沉积物环保疏浚范围的控制标准（高氮污染为≥1.63 g·kg^{-1}，高磷污染为≥0.63 g·kg^{-1}）[19]，各点位沉积物 TN 和 TP 含量均超出相应的沉积物环保疏浚控制标准值，表明各点位需要进行环保疏浚。

2.2　各点位沉积物中活性氮、磷含量

2.2.1　各点位沉积物中活性氮含量

TTN 属于沉积物中活跃的氮形态，能够在外界条件发生改变时扩散到上层水体，加重水体的污染程度[20]。秋季西山岛河流沉积物 w（TTN）平均值为 3.77 g·kg^{-1}，约占沉积物 TN 含量的 45.02%。其中点位 CZ2 最低（3.14 g·kg^{-1}），点位 XC4 最高（4.56 g·kg^{-1}）（图 3）。

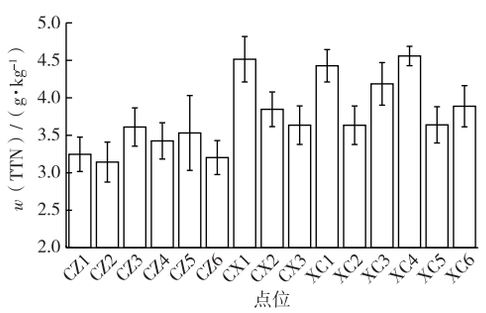


图 3　表层沉积物中 TTN 含量

Fig. 3　Variations of extractable nitrogen concentrations in surface sediments

西山岛各点位沉积物 TTN 平均含量约为宜兴三沙的 10.20 倍[6]。西山岛河流沉积物氮释放风险较高，这与西山岛河流沿岸仍存在农田种植且无污染防护的现象有关[6]。各分区间 TTN 平均含量存在显著差异（P<0.05），且含量从大到小依次为乡村区>城乡结合区>城镇区。这与农田耕作加速土壤的非可转化态氮向 TTN 转化[21]，在地表径流作用下 TTN 向水体中输移沉降有关。

2.2.2　各点位沉积物中活性磷含量

BAP 为沉积物潜在的活性磷组分，它反映了沉积物内部的磷释放能力，能够通过生物、化学作用转变为活性磷而影响上覆水体，导致水体的富营养化[22]。西山岛入湖河流 w（BAP）平均值为 1.29 g·kg^{-1}，约占 TP 含量的 44.52%（图 4）。其中点位 CZ1 最低（0.23 g·kg^{-1}），点位 XC4 最高（3.52 g·kg^{-1}）。

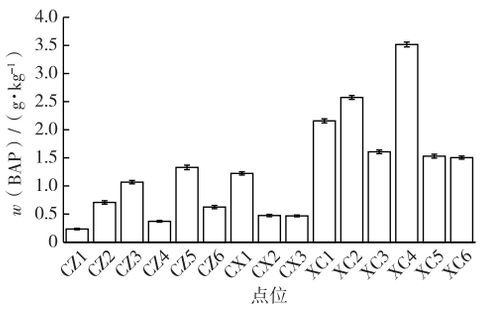


图 4　表层沉积物中 BAP 含量

Fig. 4　Variations of Bio-available phosphorus concentrations in surface sediments

西山岛 BAP 平均含量为纽约布朗斯克河的 5.00 倍[23]。西山岛入湖河流磷释放风险较高，这与西山岛高 BAP 含量的点位主要分布于乡村区，沿岸存在大面积的农用耕地，土壤中的 BAP 经地表径流作用输送沉降至河流中有关。

2.3　入湖河流沉积物对水质的响应

2.3.1　NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 的吸附-解吸平衡点

不同初始浓度各点位沉积物对水体 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 的吸附量见图 5。吸附量曲线随初始浓度的增加而逐渐趋于平缓。在低 C_{N0} 和 C_{P0} 条件下沉积物出现了解吸现象；而当 C_{N0} 和 C_{P0} 分别为 20 和 5 mg·L^{-1} 时，沉积物吸附-解吸逐渐平衡，这与沉积物的吸附点位已逐步被 NH_4^+ 与 PO_4^{3-} 占据，导致吸附位点减少有关[24]。

在低浓度范围内，初始浓度与吸附量呈良好的线性关系（R^2 为 0.88～0.99），而高初始浓度下，沉积物对水体 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 的吸附曲线表现为非线性。在低浓度范围内计算 NH_4^+-N 及 PO_4^{3-}-P 在水-沉积物系统中的吸附-解吸平衡点（图 6）。各点位沉积物 C_{N0} 为 0.12～1.28 mg·L^{-1}，C_{P0} 为 0.04～0.49 mg·L^{-1}。当平衡吸附量为 0 g·kg^{-1} 时，水体平衡浓度高于原位水体浓度，沉积物 NH_4^+-N 与 PO_4^{3-}-P 处于解吸状态；反之，则处于吸附状态[25]。由图 6 可见，7 个点位的沉积物 NH_4^+-N 处于解吸状态，9 个点位的沉积物 PO_4^{3-}-P 处于解吸状态，磷的解吸现象更为严重。

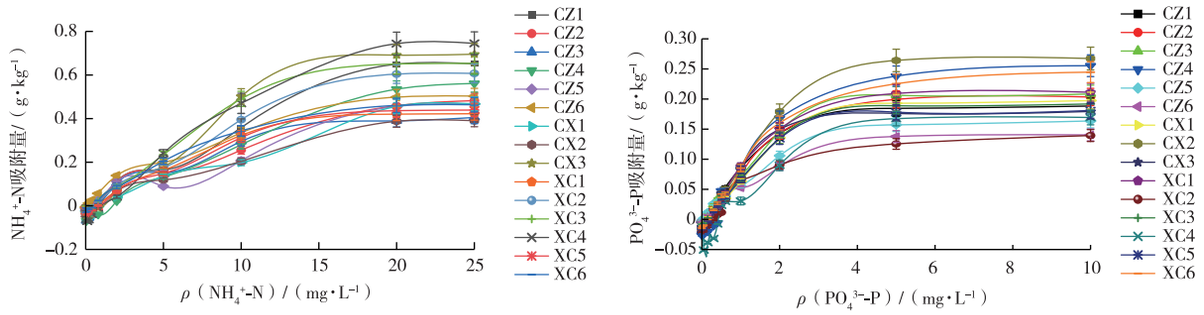


图 5 不同初始浓度下各点位沉积物对 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 的吸附–解吸曲线

Fig. 5 Adsorption-desorption thermo-dynamic curves of ammonia nitrogen and phosphate under various initial concentrations

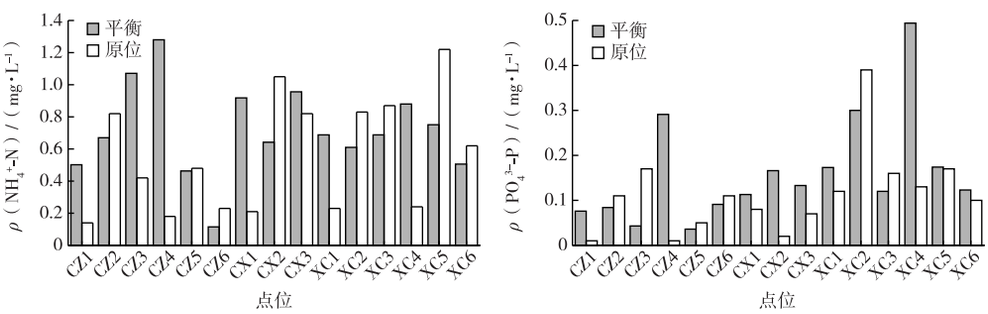


图 6 各点位沉积物的吸附–解吸平衡浓度

Fig. 6 Variations of equilibrium concentrations in different sediments

2.3.2 入湖河流沉积物对太湖水环境的影响

各点位沉积物 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 整体处于释放状态，存在导致太湖水环境恶化的风险。为确定需水质管控与沉积物疏浚的点位，通过模拟实验结果，估算原位水质与水质改善后水体 NH_4^+-N 及 PO_4^{3-}-P 的平衡浓度，并与太湖 2020 年湖体水质目标值进行对比〔ρ（NH_4^+-N）为 0.50 mg·L^{-1}，ρ（PO_4^{3-}-P）为 0.05 mg·L^{-1}〕[26]。图 7 为初始浓度与平衡浓度的变化曲线。随着初始浓度的增加，沉积物吸附逐渐趋于饱和，曲线斜率逐渐增大。

因低、高浓度下曲线斜率存在差别，而原位 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 浓度及太湖水质目标值均处于低浓度范围。为准确估算达到平衡后水体营养盐的浓度，对低浓度范围内初始浓度与平衡浓度的曲线进行拟合。经计算，初始浓度与平衡浓度线性拟合的整体情况较好（R^2 为 0.74～0.99），因此可根据该线性方程估算经沉积物吸附–解吸后各点位的平衡浓度。

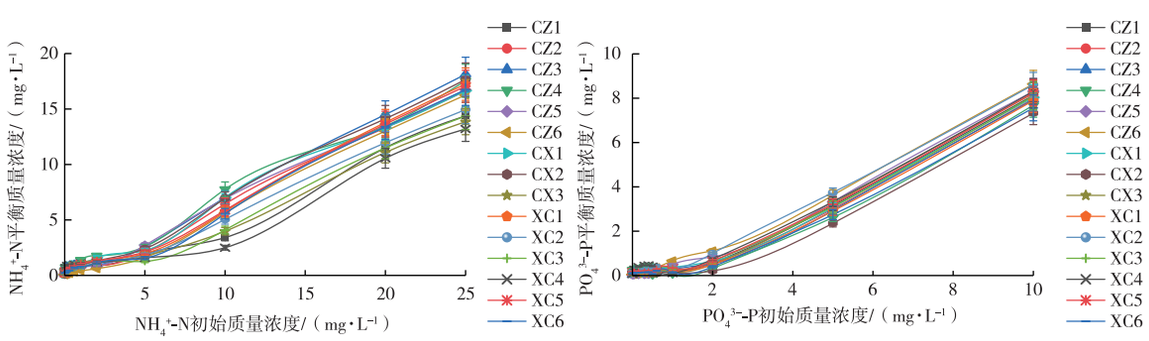


图 7 沉积物初始浓度与平衡浓度的关系

Fig. 7 Relationships between initial and equilibrium concentrations in the sediments

表 2 为经沉积物吸附-解吸平衡后原位 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 的平衡浓度。点位 CZ1 和 CZ5 的平衡浓度能够达到太湖水质目标值；点位 CZ4 的原位水质虽能够稳定太湖水环境，但受沉积物解吸的影响，平衡后水体营养盐浓度反而超出太湖水质目标值。因此，为维持太湖水环境的稳定，点位 CZ1 和 CZ5 仅需在原位水质下进行外源管控；而点位 CZ4 需进行沉积物疏浚或原位覆盖；因吸附-解吸平衡前点位 CZ1、CZ4 和 CZ5 的原位 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 浓度已达到太湖水质目标值，这些点位的水质无需进行治理。

表 2　原位 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 的平衡浓度

Table 2　Equilibrium concentrations of ammonia nitrogen and phosphate *in situ* waters　　mg · L^{-1}

点位	原位浓度		平衡浓度	
	$\rho(NH_4^+\text{-N})$	$\rho(PO_4^{3-}\text{-P})$	$\rho(NH_4^+\text{-N})$	$\rho(PO_4^{3-}\text{-P})$
CZ1	0.14	0.01	0.39	0.05
CZ2	0.82	0.11	0.72	0.08
CZ3	0.42	0.17	0.71	0.05
CZ4	0.18	0.01	0.79	0.27
CZ5	0.48	0.05	0.48	0.03
CZ6	0.23	0.11	0.17	0.06
CX1	0.21	0.08	0.67	0.10
CX2	1.05	0.02	0.82	0.16
CX3	0.82	0.07	0.90	0.13
XC1	0.23	0.12	0.54	0.16
XC2	0.83	0.39	0.66	0.32
XC3	0.87	0.16	0.58	0.12
XC4	0.24	0.13	0.79	0.28
XC5	1.22	0.17	0.91	0.18
XC6	0.62	0.10	0.53	0.12

除点位 CZ1、CZ4 和 CZ5 外，其他点位的原位水质超出太湖水质目标值且沉积物吸附-解吸平衡后水体 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 浓度仍对太湖水环境存在威胁。为确定水质改善后这些点位沉积物对太湖水环境的影响，将太湖水质目标值作为初始浓度代入拟合方程，以水体 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 的平衡浓度表征沉积物对太湖水环境的影响。根据表 3，水质改善后各点位沉积物对上覆水均表现出解吸作用，水体 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 的平衡浓度均超出太湖水质目标值，对太湖水环境存在威胁，因此这些点位需进行水质改善与沉积物疏浚的综合整治。

3　结论

（1）西山岛各点位 TN 和 TP 平均含量较高，已超出生态毒性严重级标准值与环保疏浚的控制标准值，沉积物污染严重。

表 3　经沉积物吸附-解吸后的平衡浓度

Table 3　Equilibrium concentrations of ammonia nitrogen and phosphate in ameliorated waters　　mg · L^{-1}

点位	$\rho(NH_4^+\text{-N})$	$\rho(PO_4^{3-}\text{-P})$
CZ2	0.63	0.07
CZ3	0.71*	0.03
CZ6	0.17*	0.06
CX1	0.67*	0.10
CX2	0.59	0.16*
CX3	0.74	0.12
XC1	0.54*	0.16
XC2	0.56	0.22
XC3	0.51	0.11
XC4	0.79*	0.21
XC5	0.66	0.17
XC6	0.50	0.12

* 表示在原位水质下经沉积物作用后的平衡浓度。

（2）相对于太湖流域而言，西山岛各点位沉积物 TTN 与 BAP 存在高释放风险，各分区中乡村区 TTN 和 BAP 释放风险较高。

（3）与原位水质相比，7 个点位的沉积物 NH_4^+-N 处于解吸状态，9 个点位的沉积物 PO_4^{3-}-P 处于解吸状态，磷的解吸现象更为严重。

（4）根据入湖河流沉积物对太湖水环境的影响发现，为维持太湖水环境的稳定，点位 CZ1 和 CZ5 在原位水质下仅需进行外源管控，点位 CZ4 需进行沉积物疏浚或原位覆盖，其他点位需进行水质改善与沉积物疏浚的综合整治。

参考文献：

[1] 朱广伟，许海，朱梦圆，等.三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素[J].湖泊科学，2019，31(6)：1510-1524.[ZHU Guang-wei，XU Hai，ZHU Meng-yuan，*et al*.Changing Characteristics and Driving Factors of Trophic State of Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River in the Past 30 Years[J].Journal of Lake Sciences，2019，31(6)：1510-1524.]

[2] WANG S S，GAO Y N，LI Q，*et al*.Long-term and Inter-monthly Dynamics of Aquatic Vegetation and Its Relation with Environmental Factors in Taihu Lake，China[J].The Science of the Total Environment，2019，651(1)：367-380.

[3] 李丛杨，史宸菲，方家琪，等.太湖入湖河流氮磷时空分布特征[J].生态与农村环境学报，2021，37(2)：182-187.[LI Cong-yang，SHI Chen-fei，FANG Jia-qi，*et al*. Spatio-temporal Distribution Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in the Typical Inflow River of Taihu Lake[J].Journal of Ecology and Rural Environment，2021，37(2)：182-187.]

[4] 冀峰，王国祥，韩睿明，等.无锡市农村黑臭河流沉积物营养盐垂向分布与污染特征分析[J].环境工程学报，2016，10(7)：3462-3470.[JI Feng，WANG Guo-xiang，HAN Rui-ming，*et al*. Vertical Distribution and Pollution Characteristics of Nutrient in

Sediment of Rural Malodorous Black River in Wuxi City, China [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(7): 3462-3470.]

[5] 于佳佳,尹洪斌,高永年,等.太湖流域沉积物营养盐和重金属污染特征研究[J].中国环境科学,2017,37(6):2287-2294.[YU Jia-jia, YIN Hong-bin, GAO Yong-nian, *et al*. Characteristics of Nutrient and Heavy Metals Pollution in Sediments of Taihu Watershed [J]. China Environmental Science, 2017, 37(6): 2287-2294.]

[6] 邹民虎,连斌,王晓昌,等.宜兴三沟沉积物氮形态分布及其影响因素[J].水资源保护,2019,35(2):54-59.[ZOU Min-hu, LIAN Bin, WANG Xiao-chang, *et al*. Nitrogen Forms in Sediments and Their Influence Factors of Sanjiu Lakes in Yixing City[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 54-59.]

[7] 杨阳,唐晓岚.太湖西山岛山坞村落空间特征分析[J].中国园林,2021,37(6):66-70.[YANG Yang, TANG Xiao-lan. An Analysis of the Spatial Characteristics of Col Villages in Xishan Island of Taihu Lake[J]. Chinese Landscape Architecture, 2021, 37(6): 66-70.]

[8] 潘峰,唐晓岚,黄滢,等.太湖西山岛景观格局演变及风景开发趋向研究[J].西北林学院学报,2017,32(5):276-281.[PAN Feng, TANG Xiao-lan, HUANG Ying, *et al*. Landscape Pattern Evolution and Developmental Trend of Xishan Island in Taihu Lake [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(5): 276-281.]

[9] 钱君龙,张连弟,乐美麟.过硫酸盐消化法测定土壤全氮全磷[J].土壤,1990,22(5):258-262.[QIAN Jun-long, ZHANG Lian-di, LE Mei-lin. Determination of Soil Total Nitrogen and Total Phosphorus by Persulfate Digestion Method [J]. Soils, 1990, 22(5): 258-262.]

[10] 王圣瑞.湖泊沉积物-水界面过程-基本理论与常用测定方法[M].北京:科学出版社,2014:65-260.[WANG Sheng-rui. Sediment-water Interface Process of Lakes[M]. Beijing: Science Press, 2014: 65-260.]

[11] 陈春瑜,徐晓梅,邓伟明,等.滇池表层沉积物对磷的吸附特征[J].环境科学学报,2014,34(12):3065-3075.[CHEN Chun-yu, XU Xiao-mei, DENG Wei-ming, *et al*. Characteristics of Phosphorus Adsorption on Surface Sediments of Dianchi Lake[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(12): 3065-3075.]

[12] 向速林,李松贵,张旭,等.小型浅水湖泊沉积物磷的赋存形态及其相关性分析[J].生态科学,2019,38(1):33-41.[XIANG Su-lin, LI Song-gui, ZHANG Xu, *et al*. Fractions and Correlation Analysis of Phosphorus in Sediments of a Small Shallow Lake[J]. Ecological Science, 2019, 38(1): 33-41.]

[13] 《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M].4 版.北京:中国环境科学出版社,2002:271-283.

[14] STUMIN W, MORGAN J. Aquatic Chemistry [M]. New York, USA: J Wiley and Sons, 1981: 102-123.

[15] XIE F Z, DAI Z L, ZHU Y R, *et al*. Adsorption of Phosphate by Sediments in a Eutrophic Lake: Isotherms, Kinetics, Thermodynamics and the Influence of Dissolved Organic Matter[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 562: 16-25.

[16] CHEN Q Y, NI Z K, WANG SR, *et al*. Climate Change and Human Activities Reduced the Burial Efficiency of Nitrogen and Phosphorus in Sediment from Dianchi Lake, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 274: 122839.

[17] 白冬锐,张涛,陈坦,等.苏州古城区域河道碳氮磷类污染物的分布特征[J].环境科学,2021,42(3):1403-1415.[BAI Dong-rui, ZHANG Tao, CHEN Tan, *et al*. Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Bearing Pollutants in the Ancient Town Rivers of Suzhou[J]. Environmental Science, 2021, 42(3): 1403-1415.]

[18] PERSAU D, JAAGUMAGI R, HAYTON A. Guidelines for the Protection and Management of Aquatic Sediment Quality in Ontraio [M]. Ottawa, Canada: Ontario Ministry of the Environment and Energy, 1993: 1-3.

[19] 环境保护部.湖泊生态环境保护系列技术指南之三:湖泊河流环保疏浚工程技术指南(试行)[EB/OL].[2014-12-23]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201501/t20150104_293730.htm.

[20] 周睿,袁旭音,BAWK M J,等.不同湖泊入湖河流沉积物可转化态氮的空间分布及其影响因素[J].环境科学,2018,39(3):1122-1128.[ZHOU Rui, YUAN Xu-yin, BAWK M J, *et al*. Spatial Distributions of Transferable Nitrogen Forms and Influencing Factors in Sediments from Inflow Rivers in Different Lake Basins [J]. Environmental Science, 2018, 39(3): 1122-1128.]

[21] 王晓锋,袁兴中,刘红,等.三峡库区消落带 4 种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态[J].环境科学,2015,36(10):3662-3673.[WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, *et al*. Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR[J]. Environmental Science, 2015, 36(10): 3662-3673.]

[22] BOSTRÖM B, PERSSON G, BROBERG B. Bioavailability of Different Phosphorus Forms in Freshwater Systems[J]. Hydrobiologia, 1988, 170(1): 133-155.

[23] WANG J Y, PANT H. Land Use Impact on Bioavailable Phosphorus in the Bronx River, New York[J]. Journal of Environmental Protection, 2011, 2(4): 342-358.

[24] 胡洁蕴,李淑芹,宋歌,等.北京市北运河沉积物对氮、磷的吸附/解吸动力学特征[J].湖泊科学,2018,30(3):650-659.[HU Jie-yun, LI Shu-qin, SONG Ge, *et al*. Adsorption/Desorption Dynamic Characteristic of Sediments on Nitrogen and Phosphorus in the North Grand Canal of Beijing[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(3): 650-659.]

[25] ROBERTS E J, COOPER R J. Riverbed Sediments Buffer Phosphorus Concentrations Downstream of Sewage Treatment Works across the River Wensum Catchment, UK[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18(5): 2107-2116.

[26] 江苏省人民政府.江苏省"十三五"太湖流域水环境综合治理行动方案[EB/OL].[2017-01-18]. http://www.jiangsu.gov.cn/art/2017/1/18/art_65017_3462 54.html.

作者简介:华跃洲(1997—),男,江苏宜兴人,硕士,从事环境污染控制理论与技术研究。E-mail: huayuezhou@foxmail.com

(**责任编辑**:陈 昕)