J. Lake Sci.(湖泊科学),2022,**34**(5):1493-1504
DOI 10.18307/2022.0507
© 2022 by *Journal of Lake Sciences*

太湖入、出湖湖区磷的特征及其影响因素分析*

蔡　梅[1**],钱　旭[1],王元元[1],陆志华[1],张　玮[2]
(1:太湖流域管理局水利发展研究中心,上海 200434)
(2:上海海洋大学农业部鱼类营养与环境生态研究中心,上海 201306)

摘　要:为进一步了解人类活动及环境因子对太湖磷污染的贡献,揭示磷在太湖不同介质中的迁移转化规律,本文以太湖主要入湖湖区竺山湖、西部沿岸区、南部沿岸区和主要出湖湖区东太湖为对象,调查了表层水、上覆水、间隙水和沉积物中总磷(TP)分布的概况,分析了不同介质中磷的交换特征及其影响因素. 结果表明,表层水和上覆水 TP 浓度基本相当,平均值均为 0.10 mg/L,上覆水和间隙水 TP 差异较大,间隙水平均浓度约为上覆水的 7 倍,表层沉积物 TP 含量为 474~2160 mg/kg. 在本研究水域中,TP 具有较强的沉积物吸附特性,沉积物作为"汇"的特征明显强于其"源"的特征,且磷的留存能力高度依赖于铁浓度. 空间分布上,入湖湖区磷污染程度明显高于出湖湖区,竺山湖和西部沿岸区存在较大的底泥污染释放风险,但竺山湖外源污染影响较内源污染更加突出,应列为当前太湖磷治理重点关注的区域,建议以控源截污作为竺山湖周边区域的治理重点. 西部沿岸区需注重外源和内源污染同步控制. 南部沿岸区周边区域需妥善处理好未来经济发展与废水排放负荷的关系.
关键词:太湖;磷;不同湖区;表层水;上覆水;间隙水;沉积物

Phosphorus cycle and its influencing factors in different areas of Lake Taihu*

Cai Mei[1**], Qian Xu[1], Wang Yuanyuan[1], Lu Zhihua[1] & Zhang Wei[2]
(1: *Water Conservancy Development Research Center of Taihu Basin Authority of Ministry of Water Resources*, *Shanghai* 200434, *P.R.China*)
(2: *Research Center for Fish Nutrition and Environmental Ecology*, *Ministry of Agriculture*, *Shanghai Ocean University*, *Shanghai* 201306, *P.R.China*)

Abstract: This paper explores the influences of human activities and environmental factors to phosphorus (P) loadings in Lake Taihu, and further reveals the migration and transformation patterns of P across different mediums. To this end, the total phosphorus (TP) distribution characteristics were firstly investigated in surface water, overlying water, pore water and sediments, and further, the TP exchange characteristics and its influencing factors were analyzed, taking the main inlet-lake-areas such as the Zhushan Bay, the western coastal area, the southern coastal area, and the main outlet-lake-area of East Lake Taihu as study objects. The TP concentrations in surface water and overlying water was basically equivalent in those study areas, with an average concentration of 0.10 mg/L. Whereas, TP concentrations between the overlying water and the pore water showed large differences: the average TP concentration in pore water reached seven times of that in the overlying water. The TP content of surface sediment was about 474-2160 mg/kg. In those study areas, TP tended to be adsorbed into sediments rather than to be released from sediments, and the characteristics of sediments as "sink" were obviously stronger than those as "source". Also, the P retention capacity was found highly dependent on iron concentrations. Spatially, the degree of P pollution in the inlet-lake-areas was significantly higher than that in the outlet-lake-areas. Main inlet-lake-areas, e.g., Lake Zhushan and the western coastal area showed greater potential risks of TP release from the sediments. However, external P input was still more prominent than that of internal P loading for Lake Zhushan; thus, measures such as source control and pollution interception should be highlighted for those areas. Whilst, for the western coastal area, apart from the external P loading reduction, the potential risks of internal P loadings should also be concentrated. Additionally, for the surrounding region of the southern area, the relationship between future economic development and wastewater

* 2021-11-12 收稿;2022-02-05 收修改稿.
** 通信作者;E-mail:caimei@tba.gov.cn.

discharge loading should be comprehensively considered and properly handled.

Keywords: Lake Taihu; phosphorus; different areas of Lake Taihu; surface water; overlying water; pore water; sediments

磷是生命体物质合成的必需元素[1],其环境浓度的变化会影响生物个体的生长和种群的演替,是影响湖泊富营养化进程的主要限制因子[2-3]. 湖泊中磷浓度的变化,既受集水区(湖泊流域)内人为活动的影响,也与湖泊流域自然地球化学过程及湖体生态系统结构的变化密切相关[4]. 目前,大型浅水湖泊磷污染是我国磷浓度控制、达标管理的难点[5-7];由于风浪对沉积物与水界面的干扰大,沉积物频繁再悬浮,导致颗粒磷沉降较难[8],浅水湖泊对外源磷削减的响应较为迟钝[9]. 因此,研究磷在浅水湖泊中的分布特征及影响因素,对于浅水湖泊水环境治理具有十分重要的科学价值和现实意义.

太湖是我国第三大浅水湖泊,是江浙沪地区的重要水源地,也是整个流域的水资源调配中心和水生态系统核心,对长江下游地区的经济发展有举足轻重的影响. 因此,太湖的富营养化问题一直受到社会各界的广泛关注. 近年来,太湖水体中氮浓度显著下降,但磷浓度仍然处于高位波动[10],因此,探究湖体中磷浓度变化特征及其来源成为当前国内外学者关注的重点. 长序列监测资料表明,太湖水体磷浓度一直存在较大时空差异性[10],究其原因,与太湖流域经济高速发展密切相关;流域上游污染负荷的增加是制约太湖水质的重要因素,入湖水体中的磷是湖体中磷的主要来源[11-13],研究太湖中磷污染特征需重点关注入湖湖区. 除外源输入外,太湖沉积物的内源释放也是导致水体磷浓度居高不下的原因之一,其中,0~30 cm 的表层沉积物释放风险最大[14],水土界面磷交换通量与湖区水生动植物、微生物等密切相关[15-16]. 已有的研究在一定程度上揭示了太湖中磷的污染特征,但受不同因素制约,此类研究主要集中在单一介质中磷的变化,缺乏对不同类型湖区、不同介质中磷元素的分布特征及其相互间关系的系统性研究.

本文聚焦太湖重点湖区,通过对主要入湖湖区竺山湖、西部沿岸区、南部沿岸区以及主要出湖湖区东太湖不同介质中(表层水、上覆水、间隙水和沉积物)总磷(TP)污染及交换特征进行分析,研究了影响湖区 TP 的主要环境因子,探讨了人类活动与不同湖区 TP 浓度的关系,以期为新时期太湖磷治理提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

太湖与流域河网水量交换总体呈“西北进、东南出”的格局. 本文选择太湖主要入湖湖区竺山湖、西部沿岸区、南部沿岸区以及主要出湖湖区东太湖作为研究对象,共布设 10 个采样点(图 1). 其中,竺山湖的入湖河流承纳的水体及污染物主要来源于常州市武进区及无锡市宜兴北部区域,随着太湖水环境综合治理的实施,常州武进区的武进港、雅浦港已基本无入流[17]. 西部沿岸区入湖河流承纳的水体及污染物主要来源于无锡市宜兴城区及其上游常州市溧阳县及金坛区等区域,南部沿岸区入湖河流承纳的水体及污染物主要来源于湖州市,东太湖出湖河流主要流向苏州市吴江区、嘉兴市嘉善县和上海市.

太湖表层水体、环湖河道水质数据源自太湖流域管理局水文水资源监测中心以及《2018 年太湖健康状况报告》[18],数据采样频率为每月 1 次,采集湖面下 50 cm 处水样. 上覆水、间隙水及沉积物数据来自太湖流域管理局在 2018 年 10－11 月组织开展的太湖底泥情况勘测工作. 研究采集表层沉积物(0~30 cm)、间隙水、上覆水样品测试相关参数. 沉积物采用箱式采样器和柱状采样器结合的方式分 3 层采集,一部分装入密实聚乙烯塑料袋中,另一部分装入聚乙烯塑料瓶中,加入少量 10% 乙酸锌固定. 上覆水使用便携式蠕动泵采集湖底以上 50 cm 水样,间隙水从沉积物 0~10 cm 样品中离心采集.

1.2 样品处理与分析

表层水、上覆水、间隙水的 TP 测定依据 GB 11893－1989,采用钼酸铵分光光度法(上海棱光 S22PC 可见分光光度计)进行测定. 沉积物中 TP 的测定依据 LY/T 1232－2015,采用 ICP 法(美国珀金埃尔默 PE Optima8000)测定. 水体透明度(SD)依据 SL87－1994 的塞氏盘法现场测定,pH 采用玻璃电极法(上海雷磁 PHBJ-260 型便携式 pH 计)现场测定,溶解氧(DO)、氧化还原电位(ORP)采用上海雷磁多参数分析仪 DZB-718B 现场测定,高锰酸盐指数(COD_{Mn})、化学需氧量(COD)、有机质(OM)分别采用高锰酸盐氧化法、重铬酸盐氧化法、重铬酸钾氧化—还原容量法测定,总有机碳(TOC)采用燃烧氧化—非分散红外吸收法(德国 ele-

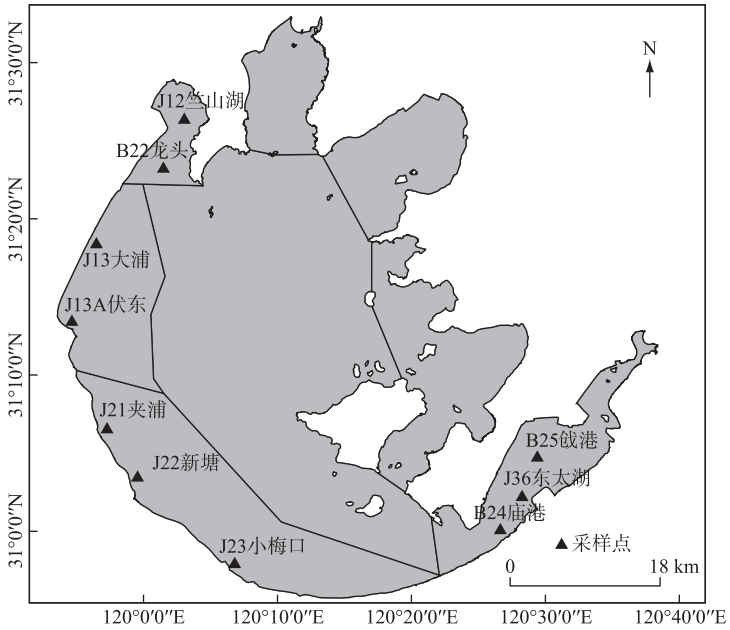

图 1 太湖研究区域采样点位置

Fig.1 Location of sampling sites in the study area of Lake Taihu

mentar vario TOC cube 总有机碳分析仪)测定,亚铁离子(Fe^{2+})采用邻菲啰啉分光光度法测定,酸可挥发性硫化物(AVS)采用碘量法测定.

1.3 数据处理与分析

污染物在动态的"水—沉积物"系统中较难达到平衡状态. 为判断研究区域沉积物对磷的吸附或释放特征,依据相平衡分配法,引入分配系数 K_d 值(污染物在沉积物和上覆水中含量比值)来表征污染物在水和沉积物环境之间达到热力学平衡状态时,其在沉积相、水相两者之间的分布情况. K_d 为正,其值越高,则沉积物的吸附性越强,K_d 为负则是释放的表现[19]. 同时,引进 K_{OM} 值(将 K_d 值除以 OM 值)来代表沉积物中有机质归一化分配系数. 为便于制图,本研究对 K_d 值取对数进行绘图.

本研究采用 WPS Office 中 WPS 表格和 SPSS 13.0 软件进行数据的处理和统计分析;采用 Origin 2021 软件进行 Pearson 相关性分析和制图.

2 结果与讨论

2.1 不同湖区中磷的分布特征

研究区域表层水和上覆水 TP 浓度差异较小(图 2),平均值均为 0.10 mg/L,略高于《2018 年太湖健康报告》中的均值(0.079 mg/L),这与本研究中未包含水质较好的湖心区、贡湖区以及东部胥湖区有关,同时也反映出浅水湖泊易受风力扰动、理化指标垂直分层不明显的特点. 从上覆水和间隙水 TP 浓度差异而言,沉积物—水界面浓度梯度较大,后者均值约为前者的 7 倍,表明沉积物具有较强的释放风险. 张润宇等[20]对太湖春季沉积物间隙水中磷的界面释放研究也表明,间隙水中各形态的磷均具有向上覆水释放的趋势. 表层水 TP 浓度变异系数均高于底层,一方面是由于表层水更易受风力扰动的影响,另一方面,与表层水光照强烈、溶解氧高、磷的迁移转化比底层快也有关[21]. 本研究中表层沉积物 TP 含量为 474~2160 mg/kg,入湖湖区中,竺山湖、西部沿岸区和南部沿岸区部分点位 TP 含量超出全湖均值 665 mg/kg,出湖湖区所有点位 TP 含量均低于平均值,可见,外源输入的大部分磷滞留在太湖中.

与国内其他大型浅水湖泊 TP 特征对比(表 1),除呼伦湖、滇池外,国内主要大型浅水湖泊表层水 TP 浓

度基本相当,但本研究中表层沉积物 TP 污染程度偏重,仅次于洪湖、滇池,超出洞庭湖、鄱阳湖,洪泽湖、巢湖等多个同类湖泊 TP 平均含量(832 mg/kg),超出美国环境保护署(USEPA)规定的重度污染区标准(650 mg/kg).

表 1 研究区 TP 特征与其他湖泊对比

Tab.1 Comparison of TP characteristics in the study area with other lakes

湖区	表层水 TP 浓度/(mg/L)	表层沉积物 TP 含量/(mg/kg)
太湖(本研究水域)	0.03~0.20	474~2160
洞庭湖[22-23]	0.03~0.18	482~982
鄱阳湖[24-25]	0.05~0.10	578~814
洪泽湖[26-27]	0.08~0.17	631~1403
巢湖[28-29]	0.09~0.19	263~1194
洪湖[30-31]	0.03~0.10	897~2951
白洋淀[32-33]	0.10~0.23	344~915
呼伦湖[34-35]	0.05~0.43	438~695
滇池[36-37]	0.02~0.72	1625~1765

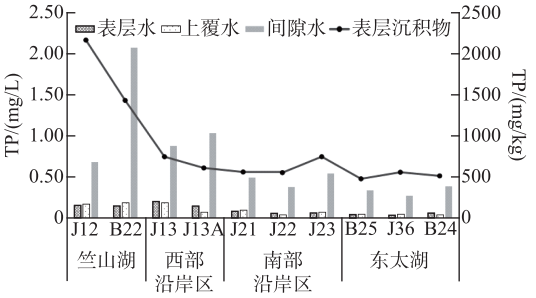

图 2 不同点位各介质中 TP 浓度特征

Fig.2 Characteristics of TP concentration in different media at differentsites

从空间分布而言,本研究中 TP 浓度总体呈西部高于东部、北部高于南部的特征(竺山湖>西部沿岸区>南部沿岸区>东太湖)(图 2),这可能与外源影响输入以及磷元素易于被吸附沉降紧密相关[38]. 竺山湖各介质中 TP 浓度均明显高于其它湖区,一方面,竺山湖是入湖污染负荷的主要承纳区,大量生活污水、工农业废水汇入湖区,入湖水量和污染物通量均较高[39];另一方面,竺山湖为湖湾,相对闭塞,具有水流不畅和污染物易积聚的特点,且其位于盛行风东南风的下风向[40],在外源输入和内源释放的共同作用下,营养负荷高,容易出现水华、"湖泛"等现象[41]. 相较于竺山湖,西部沿岸区和南部沿岸区同是入湖污染负荷主要承纳区,但由于这两个区域均为开敞湖区,污染程度略轻于竺山湖,西部湖区入湖负荷量高于南部湖区. 东太湖是主要出水湖区,也是典型的草型湖区,自然水体中 TP 浓度低于 0.05 mg/L,未达到吴雅丽等[42]研究认为春季藻类生长的 TP 阈值 0.059 mg/L. 太湖换水周期超过 150 天[43],磷元素通过西部入湖河道进入太湖后,经吸附、沉降,到达东太湖时其浓度大幅降低. 此外,东太湖沉积物中 TP 含量略高于 1980s 太湖沉积物中 TP 含量(440 mg/kg),这可能与 1980s 后期快速发展的围网养殖有关[44],但由于湖区沉水植物生长繁茂,通过根系直接吸收底泥中的氮磷营养盐[45],促使表层沉积物中 TP 含量处于相对较低的水平.

2.2 不同介质中磷的交换特征分析

TP 的 lg K_d 值介于 3.59~4.14 L/kg 之间(图 3). 侯俊等[46]认为太湖沉积物中 Pb、Cu、Zn、Cr 的分配系数分别在 449.47~7927.64 L/kg 之间,对其取对数则为 2.6~3.9 L/kg. 与其相比,本研究水域中 TP 具有较强的沉积物吸附特性,沉积物作为"汇"的特征明显强于其"源"的特征.

lg K_{OM} 值与 lg K_d 值存在一定的正相关,但并不显著($P<0.05$),推测沉积物磷可能并非有机磷,而是活性较强的无机磷,如以金属结合态磷、矿物表面吸附的可交换态磷和间隙水中以溶解态磷等形式存在的磷. 刘雪芳[47]通过对太湖全湖 21 个监测点位的分析发现,太湖沉积物中无机磷含量占 TP 含量的比例为 58%~76%. 相较于有机磷,无机磷更容易受风浪扰动而参与湖体磷循环,进而对湖区内水生生物造成较大的影响[48-49]. 汪明等[50]发现,太湖藻类生长与 TP、溶解性磷酸盐(DIP)、颗粒态磷(PP)含量的相关性明显高于

溶解性有机磷(DOP). 这些研究均与本研究结果基本一致.

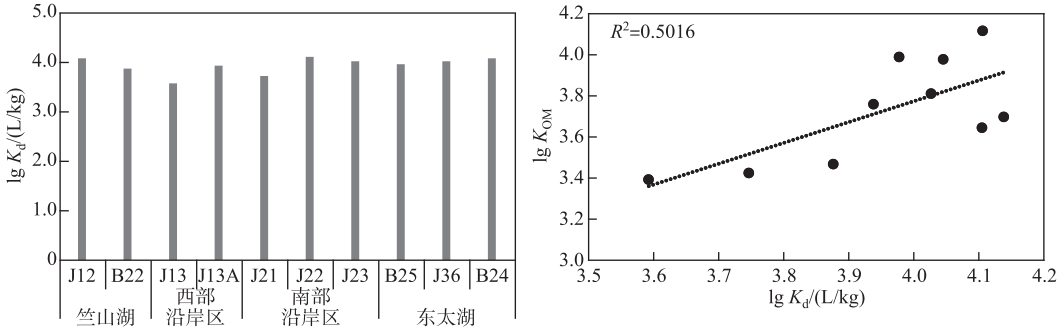

图 3 研究区域 TP 在沉积物—水界面的分配特征

Fig.3 Distribution characteristics of TP at the sediment-water interface in the study area

太湖内源释放更多来源于间隙水,其扩散符合 Fick 第一定律,即沉积物—水界面营养盐的扩散转移通量主要取决于水土界面处间隙水和上覆水中营养盐的浓度梯度[2,20,51-52]. 本研究水域沉积物—水界面 TP 浓度梯度值平均约为 0.61 mg/L,间隙水存在向上覆水释放磷的风险. 竺山湖和西部沿岸区沉积物—水界面 TP 浓度梯度值超过平均水平,分别为 1.20 和 0.83 mg/L,表明竺山湖和西部沿岸区内源释放磷的潜在风险相对更高,这与陆源输入对湖区生态系统的强烈影响有关. 南部湖区和东太湖沉积物—水界面 TP 浓度梯度值相对较小,主要是因为南部沿岸区外源输入相对较少,东太湖是非陆源污染的受水区,且沿岸区域水生植物长势较好,沉水植物群落结构及其抵抗力稳定性和恢复力稳定性均较强[53],既有较强的磷吸收能力,又可固磷减少沉积物—水界面的迁移通量,从而降低这两个湖区 TP 污染程度.

2.3 磷与其他指标的相关性分析

本研究中,表层水体 pH 总体为中性略偏碱性,透明度偏低(<0.5 m);DO 浓度较高,达到地表 Ⅰ 类,但上覆水部分区域 DO 浓度偏低(<5 mg/L)(表 2). 表层水有机物污染较小,上覆水、间隙水 COD 浓度变幅则较大,间隙水 COD 浓度最高达 51.00 mg/L,属于地表劣 Ⅴ 类. 本研究的调查时间处于秋冬季节(10—11 月),但表层水 ρ(Chl.a)总体偏高且变幅较大,最高值出现在竺山湖 B22 龙头站点位,达 169.40 μg/L,J12 竺山湖和 J13 大浦点位分别为 112.85 和 110.30 μg/L,其余点位 Chl.a 浓度在 10~35 μg/L 之间. 从 ORP 和 Fe^{2+} 来看,沉积物总体呈现还原环境.

表 2 不同介质理化特征指标范围

Tab.2 The range of physical and chemical characteristics of different media in the study area

介质	指标	范围	介质	指标	范围
表层水	SD/m	0.23~0.45	上覆水	ORP/mV	−43.00~444.00
	DO/(mg/L)	8.07~9.24		DO/(mg/L)	4.86~7.50
	pH	8.04~8.47		pH	7.46~8.86
	COD_{Mn}/(mg/L)	3.37~6.67		COD/(mg/L)	7.00~33.00
	Chl.a/(μg/L)	13.55~169.40		TOC/‰	$(0.80\sim2.30)\times10^{-3}$
间隙水	pH	7.10~8.40	表层沉积物	pH	7.13~8.56
	ORP/mV	63.00~269.00		ORP/mV	−146.50~−2.00
	Fe^{2+}/(mg/L)	1.79~9.36		Fe^{2+}/(mg/kg)	3249~10394
	TOC/‰	$(0.80\sim4.80)\times10^{-3}$		OM/%	0.96~2.85
	COD/(mg/L)	17.00~51.00		AVS/(mg/kg)	49.30~232.00

相关性分析表明,水体中影响 TP 浓度的因子数目多于沉积物(表层水>上覆水>间隙水>沉积物)(图 4),说明影响自然水体中 TP 浓度的因素较多且十分复杂. 具体而言,表层水中 TP 浓度不仅与同环境中的

pH、COD_{Mn}、Chl.*a* 密切相关,且同时会受上覆水的 TP、pH、COD,间隙水的 TP、pH、COD、Fe^{2+},以及表层沉积物的 TP、Fe^{2+}等多诸多因素的影响. 影响上覆水中 TP 浓度的环境因子和表层水基本相当,更加证实浅水湖泊理化指标无明显垂直分层差异性. 水柱中的 TP 浓度和相关环境因子会影响间隙水和表层沉积物中 TP 浓度[54],从相关强度而言,间隙水比表层沉积物更易受到影响.

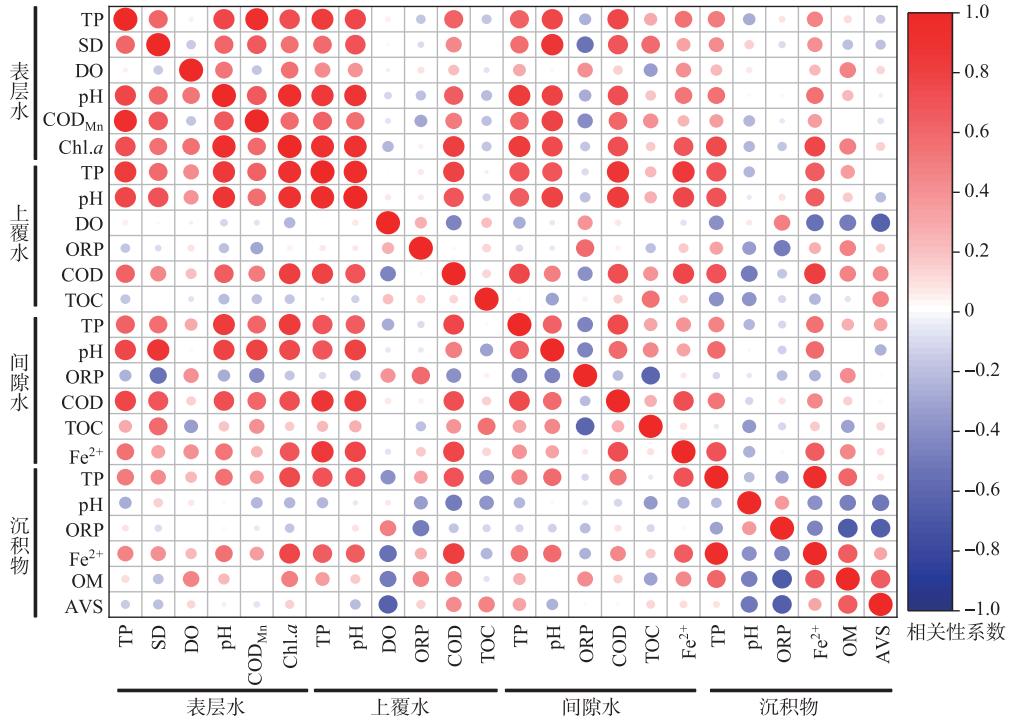

图 4 TP 与其他指标的相关性分析
(红色圆圈表示正相关,蓝色圆圈表示负相关,圆圈大小表示相关系数大小)
Fig.4 Correlation results of TP and other parameters

表层水中的 Chl.*a* 浓度与上覆水和间隙水中的 TP 浓度均呈极显著相关($P<0.01$),R^2分别为 0.916 和 0.832,与表层水和表层沉积物中的 TP 浓度呈显著相关($P<0.05$),R^2 分别 0.740 和 0.750(表 3). Chl.*a* 可表征水体浮游植物的生物量,不同介质中磷浓度与 Chl.*a* 浓度均呈显著或极显著相关,可能说明磷和蓝藻水华暴发紧密相关. 一方面,TP 浓度极大地影响了藻类的生长,水体中的磷对藻类生长有更强的缓冲力[21]. 另一方面,水体藻类的分布格局对不同区域不同介质的 TP 浓度也有影响,高密度藻类(水华)在湖泊随风浪迁移,是磷元素迁移转化途径之一[55].

湖区中表征碳源的指标浓度和 TP 浓度也有较强的相关性(表 3),表层水中 COD_{Mn}与 TP 浓度呈极显著相关,R^2达 0.926;上覆水 COD 和上覆水 TP 以及间隙水 TP 均呈极显著相关($P<0.01$);间隙水 COD 则和表层水 TP、上覆水 TP 以及间隙水 TP 均呈极显著相关($P<0.01$). 碳源作为水生植物生长的重要营养元素之一,其与湖体中藻类、沉水植物生长都紧密相关,是湖体磷循环的影响因子之一. 胡颖等[56]研究表明太湖沉积物中存在聚磷菌,这种微生物在沉积物磷循环中起着重要的作用,其生长受碳源限制,这会直接导致碳源和磷源呈现显著的正相关关系.

从间隙水和沉积物中 Fe^{2+}浓度影响上覆水和沉积物中 TP 浓度的现象来看,本研究水域属磷留存能力依赖于铁的水体;因为羟基离子与磷竞争吸附,氧化沉积层的磷结合能力会随着 pH 的增加而降低[16],故而 pH 对于此类水体沉积物内部磷释放至关重要. 这与表 3 中呈现的 pH 与 TP 显著相关的特征一致. 已有研究对 pH 与磷释放的关系做了总结,即:当水环境越偏酸或越偏碱时,沉积物中磷素释放量越高[56-57];而当 pH

越接近中性时,磷素释放作用越不明显. 因此,在夏季,太湖受藻类大量生长影响,pH 一般在 9~11 之间,碱性条件下,体系中 OH^- 会和 PO_4^{3-} 竞争与铁、锰等金属氧化物或氢氧化物结合,从而促进磷的释放,由温度驱动的微生物代谢也会将有机磷矿化为溶解磷,如果再耦合水体扰动,溶解磷解除吸附,直接从细菌细胞中释放,或者通过沉积物中死亡藻细胞(其他生物体)分泌的溶解态有机磷的代谢释放,则会显著增加内部磷污染风险[2].

表 3 研究区不同介质中 TP 浓度与其他指标的相关关系

Tab.3 Correlation between TP and other indicators in different media in the study area

	表层水					上覆水			间隙水				沉积物	
	TP	SD	pH	COD_{Mn}	Chl.*a*	TP	pH	COD	TP	pH	COD	Fe^{2+}	TP	Fe^{2+}
TP(表层水)	1.000	0.620	0.771 **	0.926 **	0.740 *	0.838 **	0.771 **	0.630	0.629	0.774 **	0.774 **	0.545	0.510	0.462
TP(上覆水)	0.838 **	0.600	0.859 **	0.624	0.916 **	1.000	0.952 **	0.794 **	0.698 *	0.696 *	0.875 **	0.855 **	0.709 *	0.659 *
TP(间隙水)	0.629	0.571	0.835 **	0.603	0.832 **	0.698 *	0.658 *	0.765 **	1	0.631	0.744 **	0.393	0.460	0.543
TP(沉积物)	0.510	0.422	0.544	0.347	0.750 *	0.709 *	0.707 *	0.710 *	0.460	0.589	0.525	0.705 *	1	0.940 **

** 表示极显著相关,$P<0.01$; * 表示显著相关,$P<0.05$.

2.4 人类活动对湖区磷的影响

太湖现已全面取缔入湖排污口. 2018 年,入湖河道 TP 浓度与入湖湖区不同介质中 TP 浓度表现出较强的空间一致性. 竺山湖入湖河道 ρ(TP)在 0.21~0.25 mg/L 之间,劣于河道地表水Ⅲ类标准,显著高于其它湖区(表 4). 西部沿岸区入湖河道 ρ(TP)在 0.04~0.20 mg/L 之间,均值虽已达到河道地表水Ⅲ类标准,但仍远远超过生态环境部 2020 年发布的《湖泊营养盐基准-中东部湖区(总磷、总氮、叶绿素 *a*)(2020 年版)》中的基准值(0.029 mg/L). 南部湖区入湖河道 ρ(TP)在 0.06~0.15 mg/L 之间,均值接近河道地表水Ⅱ类标准,是太湖入湖河道中水质最好的区域(表 4).

表 4 入湖河道和入湖湖区 ρ(TP)的对比

Tab.4 Comparison of ρ(TP) between the river into the lake and the lake area into the lake

分类		竺山湖		西部沿岸区		南部沿岸区	
		范围	均值	范围	均值	范围	均值
入湖河道/(mg/L)		0.21~0.25	0.23	0.04~0.20	0.15	0.06~0.15	0.10
湖区	表层水/(mg/L)	0.14~0.15	0.15	0.15~0.20	0.17	0.05~0.08	0.06
	上覆水/(mg/L)	0.17~0.19	0.18	0.07~0.19	0.13	0.04~0.10	0.07
	间隙水/(mg/L)	0.68~2.07	1.38	0.88~1.03	0.95	0.38~0.54	0.47
	沉积物/(mg/kg)	1426.67~2160.00	1793.33	606.00~742.50	674.25	549.00~743.00	616.33

人类活动强度可直接影响湖区磷污染程度. 聚类分析表明,太湖湖体营养盐浓度存在显著空间异质性,位于竺山湖和西部沿岸区的 J12 竺山湖、B22 龙头、J13 大浦可聚为一类,南部湖区和东太湖可聚为一类,西部沿岸区和南部沿岸区交界 J13A 洑东单独聚为一类,但其与南部湖区、东太湖更接近(图 5). 究其原因,竺山湖、西部湖区和南部湖区是太湖的主要入湖湖区,受人为活动影响较大,环湖河道是磷元素入湖最主要途径,入太湖 80% 以上的磷负荷来自周边河道[58],其中,80% 来自竺山湖和西部沿岸区入湖河道,仅 16% 来自南部沿岸区入湖河道. 东太湖是太湖主要出水区,虽有四十余年水面围网养殖历史,但无外源直接输入,且该水域挺水植物(芦苇、菰等)的生物量较高,可阻挡陆源径流输入;另外,苦草、金鱼藻、菹草等沉水植物覆盖度较高,水体自净能力较强[20]. 南部沿岸区与东太湖 TP 浓度特征相似,反映出南部沿岸区外源输入较少,沉积物对磷较强的吸附作用,该湖区对磷的自净能力总体也较强.

生活污水、工业废水和农业面源污水等是太湖水体磷的主要来源[11]. 2018 年,入太湖 TP 负荷约 1900 t,远远超出程声通等[59]估算的太湖宏观水环境容量 873 t. 因此,现阶段流域经济社会发展是入湖 TP 负荷增加,影响受纳水体水质的重要因素[11]. 太湖西北是大规模的工业生产区,2018 年,位于太湖西北部的无锡市、常

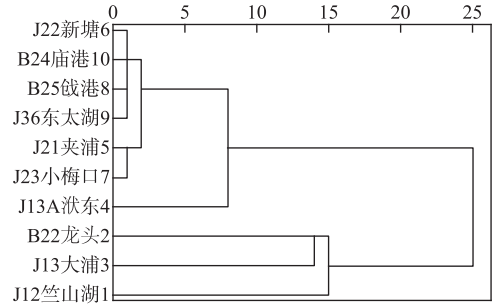

图 5 不同采样点位 TP 浓度特征 Bray-Curtis 聚类

Fig.5 Bray-Curtis clustering of TP concentration characteristics at different sampling sites

州市人均 GDP 分别为 17.43 万和 14.93 万元,分别是当年全国人均 GDP 的 2.7 和 2.3 倍,大量的含磷工农业污水和城市污水通过地表或地下径流汇入太湖,导致太湖北部湖区 TP 浓度普遍高于其它湖区. 农业面源污染也是太湖上游磷污染的主要来源. 李恒鹏等[60]发现,太湖上游面源污染中农业面源占 56.20%;陈丽娜等[61]对武宜运河磷污染来源进行了解析,认为农业面源(包括种植业、畜禽养殖业和水产养殖业)的入河通量占入河总污染物量的 85.9%.

综上分析,竺山湖应是当前太湖磷治理需要重点关注的水域,其外源污染影响较内源更加突出,控源截污是竺山湖及上游区域治理重点,特别是要全面排查涉磷企业,探索实施 TP 排放浓度和排放总量的“双控”制度,加快城中村、老旧城区、新建小区、城乡结合部污水收集管网建设,加强各类行业污水收集,加快补齐城镇污水收集管网短板,加强雨水管控,大力推进农业绿色发展,加快农村人居环境整治. 西部沿岸区在注重外源污染控制的同时,需同步关注内源潜在风险. 南部沿岸区周边区域需妥善处理好未来经济发展与废水排放负荷的关系,进一步提升现有入湖河道水质.

3 结论

1)本研究中表层水和底层上覆水的 TP 浓度平均值为 0.10 mg/L,间隙水平均浓度约为上覆水的 7 倍;表层沉积物 TP 含量在 474~2160 mg/kg,污染程度偏重. 磷污染总体呈现西部高于东部、北部高于南部的特征,入湖湖区污染程度明显高于出湖湖区.

2)太湖水体 TP 具有较强的沉积物吸附特性,属于磷留存能力依赖于铁的湖泊,沉积物磷的形态主要为活性较强的无机磷. pH 对于内部磷释放特别重要,Chl.*a*、碳源、pH 是和太湖磷浓度特征相关性最强的指标.

3)竺山湖外源污染影响较内源污染更加突出,是当前太湖 TP 治理需重点关注的区域. 西部沿岸区在注重外源污染控制的同时,需同步关注内源释放的潜在风险. 南部沿岸区周边区域需妥善处理好未来经济发展与废水排放负荷的关系.

4 参考文献

[1] Zhang L, Fan CX, Zhu GW *et al*. Distribution of bioavailable phosphorus (BAP) in lake sediments of the middle and lower reaches of the Yangtze River. *J Lake Sci*, 2006, **18**(1): 36-42. DOI: 10.18307/2006.0105.[张路, 范成新, 朱广伟等. 长江中下游湖泊沉积物生物可利用磷分布特征. 湖泊科学, 2006, **18**(1): 36-42.]

[2] Chen J, Xu H, Zhan X *et al*. Mechanisms and research methods of phosphorus migration and transformation across sediment-water interface. *J Lake Sci*, 2019, **31**(4): 907-918. DOI: 10.18307/2019.0416.[陈洁, 许海, 詹旭等. 湖泊沉积物—水界面磷的迁移转化机制与定量研究方法. 湖泊科学, 2019, **31**(4): 907-918.]

[3] Chen MS, Ding SM, Chen X *et al*. Mechanisms driving phosphorus release during algal blooms based on hourly changes in iron and phosphorus concentrations in sediments. *Water Research*, 2018, **133**: 153-164. DOI: 10.1016/j.watres.2018.01.040.

[4] Nixon SW ed. Remineralization and nutrient cycling in coastal marine and nutrients. New Jersey: Humana Press, 1981:

111-138.

[5] Dai XL, Qian PQ, Ye L *et al*. Changes in nitrogen and phosphorus concentrations in Lake Taihu, 1985-2015. *J Lake Sci*, 2016, **28**(5): 935-943. DOI: 10.18307/2016.0502.[戴秀丽, 钱佩琪, 叶凉等. 太湖水体氮、磷浓度演变趋势(1985—2015 年). 湖泊科学, 2016, **28**(5): 935-943.]

[6] Zhu GW, Zou W, Guo CX *et al*. Long-term variations of phosphorus concentration and capacity in Lake Taihu, 2005-2018: Implications for future phosphorus reduction target management. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1): 21-35. DOI: 10.18307/2020.0103.[朱广伟, 邹伟, 国超旋等. 太湖水体磷浓度与赋存量长期变化(2005—2018 年)及其对未来磷控制目标管理的启示. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 21-35.]

[7] Qin BQ, Paerl HW, Brookes JD *et al*. Why Lake Taihu continues to be plagued with cyanobacterial blooms through 10 years (2007-2017) efforts. *Science Bulletin*, 2019, **64**(6): 354-356. DOI: 10.1016/j.scib.2019.02.008.

[8] Qin BQ, Zhou J, Elser JJ *et al*. Water depth underpins the relative roles and fates of nitrogen and phosphorus in lakes. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(6): 3191-3198. DOI: 10.1021/acs.est.9b05858.

[9] Zhu GW, Qin BQ, Zhang YL *et al*. Fluctuation of phosphorus concentration in Lake Taihu in the past 70 years and future control strategy. *J Lake Sci*, 2021, **33**(4): 957-973. DOI: 10.18307/2021.0401.[朱广伟, 秦伯强, 张运林等. 近 70 年来太湖水体磷浓度变化特征及未来控制策略. 湖泊科学, 2021, **33**(4): 957-973.]

[10] Sondergaard M, Jensen PJ, Jeppesen E. Retention and internal loading of phosphorus in shallow, eutrophic lakes. *The Scientific World Journal*, 2001, (1): 427-442. DOI: 10.1100/tsw.2001.72.

[11] Wu P, Qin BQ, Yu G *et al*. Effects of economic development on wastewater discharge and influent total phosphorus load in the upstream of Lake Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2015, **27**(6): 1107-1114. DOI: 10.18307/2015.0616.[吴攀, 秦伯强, 于革等. 太湖上游流域经济发展对废水排放及入湖总磷的影响. 环境科学, 2015, **27**(6): 1107-1114.]

[12] Wu HY, Jia GH, Xu B *et al*. Analysis of variation and driving factors of total phosphorus in Lake Taihu, 1980-2020. *J Lake Sci*, 2021, **33**(4): 974-991. DOI: 10.18307/2021.0402.[吴浩云, 贾更华, 徐彬等. 1980 年以来太湖总磷变化特征及其驱动因子分析. 湖泊科学, 2021, **33**(4): 974-991.]

[13] Wang H, Chen HX, Xu ZA *et al*. Variation trend of total phosphorus and its controlling factors in Lake Taihu, 2010-2017. *J Lake Sci*, 2019, **31**(4): 919-929. DOI: 10.18307/2019.0421.[王华, 陈华鑫, 徐兆安等. 2010—2017 年太湖总磷浓度变化趋势分析及成因探讨. 湖泊科学, 2019, **31**(4): 919-929.]

[14] Mao XW, Wu HY, Xu F. Analysis of pollution characteristics of main nutrients inTaihu Lake sediment. *Water Resources Protection*, 2020, **36**(4): 100-104.[毛新伟, 仵荟颖, 徐枫. 太湖底泥主要营养物质污染特征分析. 水资源保护, 2020, **36**(4): 100-104.]

[15] Zhang L, Fan CX, Wang JJ *et al*. Space-time dependent variances of ammonia and phosphorus flux on sediment-water interface in Lake Taihu. *Environmental Science*, 2006, **27**(8): 1537-1543. DOI: 10.13227/j.hjkx.2006.08.011.[张路, 范成新, 王建军等. 太湖水土界面氮磷交换通量的时空差异. 环境科学, 2006, **27**(8): 1537-1543.]

[16] Long HY. Distribution characteristics of phosphorus in the sediments of Lake Taihu and the influence mechanism of phosphate solubilizing bacteria[Dissertation]. Nanjing: Nanjing University, 2020.[龙宏燕. 太湖沉积物中磷素分布特征与解磷菌影响机制[学位论文]. 南京: 南京大学, 2020.]

[17] China International Engineering Consulting Corporation ed. Consultation and evaluation report on the implementation of the overall plan for comprehensive treatment of the water environment in the Taihu Basin (revised in 2013). Beijing: China International Engineering Consulting Corporation, 2018.[中国国际工程咨询有限责任公司. 太湖流域水环境综合治理总体方案(2013 年修编)实施情况咨询评估报告. 北京: 中国国际工程咨询有限责任公司, 2018.]

[18] Taihu Basin Authority of Ministry of Water Resource ed. The health status report of Taihu Lake in 2018. Shanghai: Taihu Basin Authority, MWR, 2019.[水利部太湖流域管理局. 2018 年太湖健康状况报告. 上海: 水利部太湖流域管理局, 2019.]

[19] Zhang ZB, Duan YP, Shen JH *et al*. Multimedia distribution characteristics and risk assessment of 22 PPCPs in the water environment of Qinpu District, Yangtze River delta. *Environmental Science*, 2022, (1): 349-362. DOI: 10.13227/j.hjkx.202105121.[张智博, 段艳平, 沈嘉豪等. 长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 中 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估. 环境科学, 2022, (1): 349-362.]

[20] Zhang RY, Wang LY, Wu FC *et al*. Distribution patterns of phosphorus forms in sediments interstitial water of Lake Taihu and the effects of sediment-water phosphorus release in spring. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(4): 902-907. DOI:

10.13292/j.1000-4890.2012.0105.[张润宇, 王立英, 吴丰昌等. 太湖春季沉积物间隙水中磷的分布特征及界面释放的影响. 生态学杂志, 2012, **31**(4): 902-907.]

[21] Tao YY, Geng JJ, Wang HJ *et al*. Spatio-tempo variations of dissolved phosphorus concentrations in Lake Taihu. *Environmental Monitoring in China*, 2013, **29**(5): 84-90.[陶玉炎, 耿金菊, 王红军等. 太湖水体溶解态磷的时空变化特征. 中国环境监测, 2013, **29**(5): 84-90.]

[22] Li YJ, Wang LJ, Li H *et al*. Distribution characteristics and influencing factors of phosphorus in the Dongting Lake at different water periods. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2170-2177. DOI: 10.13227/j.hjkx.201809137.[李莹杰, 王丽婧, 李虹等. 不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素. 环境科学, 2019, **40**(5): 2170-2177.]

[23] Yin YY, Peng GZ, Xie YN *et al*. Characteristics and risk assessment of nutrients and heavy metals pollution in sediments of Dongting Lake. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(8): 2399-2409.[尹宇莹, 彭高卓, 谢意南等. 洞庭湖表层沉积物中营养元素、重金属的污染特征与评价分析. 环境化学, 2021, **40**(8): 2399-2409.]

[24] Huang DL, Ni ZK, Zhao S *et al*. Correlation analysis of water quality between lake inflow and outflow: A case study of Poyang Lake. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4450-4460. DOI: 10.13227/j.hjkx.201902103.[黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽等. 基于湖泊与出入湖水质关联性研究: 以鄱阳湖为例. 环境科学, 2019, **40**(10): 4450-4460.]

[25] Xiang SL, Zhou WB. Phosphorus existing forms and distribution characteristic in Lake Poyang sediments. *J Lake Sci*, 2010, **22**(5):649-654. DOI: 10.18307/2010.0504.[向速林, 周文斌. 鄱阳湖沉积物中磷的赋存形态及分布特征. 湖泊科学, 2010, **22**(5):649-654.]

[26] Cui JY, Guo R, Song XW *et al*. Spatio-temporal variations of total nitrogen and total phosphorus in lake and inflow/outflow rivers of Lake Hongze, 2010-2019. *J Lake Sci*, 2021, **33**(6): 1727-1741. DOI: 10.18307/2021.0610.[崔嘉宇, 郭蓉, 宋兴伟等. 洪泽湖出入河流及湖体氮、磷浓度时空变化(2010—2019 年). 湖泊科学, 2021, **33**(6): 1727-1741.]

[27] Yang WL, Jiang GC, Wang ZQ *et al*. Chemical forms and distribution of phosphorus in surface sediments of Lake Hongze. *Earth and Environment*, 2013, **41**(1): 43-49.[杨文澜, 蒋功成, 王兆群等. 洪泽湖不同湖区表层沉积物中磷的形态和分布特征. 地球与环境, 2013, **41**(1): 43-49.]

[28] Yang BY. Simulation study on eutrophication of Chaohu Lake based on statistical method[Dissertation]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2020.[杨碧莹.基于统计模型的巢湖水体富营养化模拟研究[学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.]

[29] Wang YP, Xu WW, Han C *et al*. Distribution of nitrogen and phosphorus in Lake Chaohu sediments and pollution evaluation. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 699-711. DOI: 10.13227/j.hjkx.202006216.[王艳平, 徐伟伟, 韩超等. 巢湖沉积物氮磷分布及污染评价. 环境科学, 2021, **42**(2): 699-711.]

[30] Zhou HE, Chen XF, He X *et al*. Research on spatio-temporal variation and causes of nutrients in Honghu Lake. *Earth and Environment*, 2021, **49**(1): 9-17.[周汉娥, 陈晓飞, 何鑫等. 洪湖营养盐时空分布特征及成因分析. 地球与环境, 2021, **49**(1): 9-17.]

[31] Liu X, Deng ZL, Zhang L *et al*. Sediment endogenous pollution and release characteristics of Honghu Lake. *Research of Environmental Science*, 2022, **35**(1): 80-88.[刘昔, 邓兆林, 张露等. 洪湖沉积物内源污染及其氮磷营养盐释放特征研究. 环境科学研究, 2022, **35**(1): 80-88.]

[32] Du YH, Liu C, Chen KN *et al*. Occurrence and internal loadings of nitrogen and phosphorus in the sediment of Lake Baiyangdian. *J Lake Sci*, 2018, **30**(6): 1537-1551. DOI: 10.18307/2018.0606.[杜奕衡, 刘成, 陈开宁等. 白洋淀沉积物氮磷赋存特征及其内源负荷. 湖泊科学, 2018, **30**(6): 1537-1551.]

[33] Zhou YT, Chen XH, Li LQ *et al*. Identification of dredging depths based on sediment vertical distribution profiles of total nitrogen and total phosphorus and their adsorption-desorption equilibria. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4781-4788. DOI: 10.13227/j.hjkx.202101188.[周亚婷, 陈兴宏, 李立青等. 基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度. 环境科学, 2021, **42**(10): 4781-4788.]

[34] Zhang B, Guo YY, Wang SH *et al*. Spatial-temporal changes of phosphorus and its influential factors in Lake Hulun. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(4): 824-830. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2021.01.24.[张博, 郭云艳, 王书航等. 呼伦湖水体磷的时空演变及其影响因素. 环境科学研究, 2021, **34**(4): 824-830.]

[35] Guo X. The study on the geochemical characteristics of phosphorus in four typical lakes of Inner Mongolia plateau[Dissertation]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2014.[郭霞. 内蒙古高原典型湖泊磷的地球化学特征[学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2014.]

[36] Huang J, Wang YC, Deng XQ *et al*. Characteristics of water quality and trophic level variation of Dianchi Lake. *Yangtze River*, 2022, (6): 61-67. [黄杰, 王英才, 邓晓庆等.滇池水质及营养状态时空变化特征. 人民长江, 2022, (6): 61-67.]

[37] Cheng WJ, Bao L, Luo XX *et al*. Characteristics of phosphorus in the sediment of Dianchi Lake and its effects on algae. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, **36**(6): 822-828. DOI: 10.13254/j.jare.2018.0310.[程文娟, 包立, 罗雄鑫等. 滇池水体沉积物磷素特征及其对藻类的影响. 农业资源与环境学报, 2019, **36**(6): 822-828.]

[38] Li X, Geng X, Wang HW *et al*. Effects of exogenous inputs on phosphorus recovery and transport in newborn surface layers from sediment dredging. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3539-3549. DOI: 10.13227/j.hjkx.201901222.[李鑫, 耿雪, 王洪伟等. 外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响. 环境科学, 2019, **40**(8): 3539-3549.]

[39] Ling H, Wu D, Tan DX *et al*. Causes and countermeasures of total phosphorus rise in Taihu Lake during recent years. *Environmental Science and Technology*, 2018, **31**(6): 54-59.[凌虹, 巫丹, 谭东烜等. 近年太湖总磷升高成因及对策建议. 环境科技, 2018, **31**(6): 54-59.]

[40] Fang JQ, Qi C, Zhang XH *et al*. Spatial distribution and pollution evaluation of carbon, nitrogen, and phosphorus in sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5367-5374. DOI: 10.13227/j.hjkx.201905127.[方家琪, 祁闯, 张新厚等. 太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价. 环境科学, 2019, **40**(12): 5367-5374.]

[41] Xin HR, Zhu GW, Wang XS *et al*. Variation and driving factors of black water event intensity in Lake Taihu during 2009 to 2018. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4914-4923. DOI: 10.13227/j.hjkx.202004172.[辛华荣, 朱广伟, 王雪松等. 2009－2018 年太湖湖泛强度变化及其影响因素. 环境科学, 2020, **41**(11): 4914-4923.]

[42] Wu YL, Xu H, Yang GJ *et al*. Developing the critical phosphorus threshold for spring algal growth in Lake Taihu, China. *China Environmental Science*, 2013, **33**(9): 1622-1629.[吴雅丽, 许海, 杨桂军等. 太湖春季藻类生长的磷营养盐阈值研究. 中国环境科学, 2013, **33**(9): 1622-1629.]

[43] Taihu Basin Water Resources Protection Bureau. Study on the self-purification ability of pollutants in Taihu Lake and the suitable water exchange period. Shanghai: Taihu Basin Water Resources Protection Bureau, 2012.[太湖流域水资源保护局. 太湖污染物自净能力与适宜换水周期研究. 上海: 太湖流域水资源保护局, 2012.]

[44] Yang JZC, Luo JH, Lu LR *et al*. Changes in aquatic vegetation communities based on satellite images before and after pen aquaculture removal in East Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2021, **33**(2): 507-517. DOI: 10.18307/2021.0228.[杨井志成, 罗菊花, 陆莉蓉等. 东太湖围网拆除前后水生植被群落遥感监测及变化. 湖泊科学, 2021, **33**(2): 507-517.]

[45] Xiang SL, Zhu MY, Zhu GW *et al*. Pollution characteristics of nitrogen and phosphorus in sediment of the eastern bays of Lake Taihu with aquatic macrophytes. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, **32**(6): 1083-1088.[向速林, 朱梦圆, 朱广伟等. 太湖东部湖湾水生植物生长区底泥氮磷污染特征. 沉积学报, 2014, **32**(6): 1083-1088.]

[46] Hou J, Wang C, Wang PF *et al*. Sediment quality guidelines and potential ecological risk assessment for heavy metals based on equilibrium partitioning approach in Taihu Lake. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(12): 2951-2959. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2012.12.013.[侯俊, 王超, 王沛芳等. 基于平衡分配法的太湖沉积物重金属质量基准及其在生态风险评价中的应用研究. 环境科学学报, 2012, **32**(12): 2951-2959.]

[47] Liu XF. Composition characteristics of organic matter in sediments of Taihu Lake and its effect on phosphorus adsorption [Dissertation]. Kaifeng: Henan University, 2017.[刘雪芳. 太湖沉积物有机质组成特征及其对磷吸附的影响[学位论文]. 开封: 河南大学, 2017.]

[48] Tammeorg O, Horppila J, Laugaste R *et al*. Importance of diffusion and resuspension for phosphorus cycling during the growing season in large, shallow Lake Peipsi. *Hydrobiologia*, 2015, **760**(1): 133-144. DOI: 10.1007/s10750-015-2319-9.

[49] Zhu GW, Qin BQ, Gao G. Direct evidence of violent release of endogenous phosphorus from shallow lakes caused bu wind and waves disturbance. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50**(1): 66-71.[朱广伟, 秦伯强, 高光. 风浪扰动引起大型浅水湖泊内源磷暴发性释放的直接证据. 科学通报, 2005, **50**(1): 66-71.]

[50] Wang M, Wu XF, Li DP *et al*. Annual variation of different phosphorus forms and response of algae growth in Meiliang Bay of Taihu Lake. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 80-86. DOI: 10.13227/j.hjkx.2015.01.011.[汪明, 武晓飞, 李大鹏等. 太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究. 环境科学, 2015, **36**(1): 80-86.]

[51] Fan CX, Zhang L, Bao XM *et al*. Migration mechanism of biogenic elements and their quantification on the sediment-water

interface of Lake Taihu: Ⅱ. chemical thermodynamic mechanism of phosphorus release and its source-sink transition. *J Lake Sci*, 2006, **18**(3): 207-217. DOI: 10.18307/2006.0303.[范成新, 张路, 包先明等. 太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及定量化——2.磷释放的热力学机制及源-汇转换. 湖泊科学, 2006, **18**(3): 207-217.]

[52] Zhang L, Fan CX, Wang JJ *et al*. Comparison of physicochemical characters of pore water in grass/algae type zone in Lake Taihu. *China Environmental Science*, 2004, **24**(5): 556-560. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-6923.2004.05.011.[张路, 范成新, 王建军等. 太湖草藻型湖区间隙水理化特性比较. 中国环境科学, 2004, **24**(5): 556-560.]

[53] Zhang L. Characteristics of phosphorus speciation, burial patterns and endogenous load in sediment of phytoplankton and macrophyte dominated zones in Taihu Lake[Dissertation]. Huainan: Anhui Univerity of Science and Technology, 2016.[章磊. 太湖草、藻型湖泊沉积物磷的赋存形态特征、埋藏规律及内源负荷风险比较研究[学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.]

[54] Qin BQ. Shallow lake limnology and control of eutrophication in LakeTaihu. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1229-1243. DOI: 10.18307/2020.0501.[秦伯强. 浅水湖泊湖沼学与太湖富营养化控制研究. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1229-1243.]

[55] Wu XF, Li DP, Wang M *et al*. Migration and transformation of phosphorus forms under effect of sediment resuspension and the addition of algae. *China Environmental Science*, 2015, **35**(4): 1187-1196.[武晓飞, 李大鹏, 汪明等. 反复扰动下加藻对不同形态磷相互转化的影响. 中国环境科学, 2015, **35**(4): 1187-1196.]

[56] Hu Y, Wang SH, Jiang HL *et al*. Effect of different carbon resources on the enrichment of polyphosphate accumulating organisms in sediments from Taihu Lake. *Safety and Environmental Engineering*, 2011, **18**(6): 49-52.[胡颖, 王世和, 江和龙等. 碳源对太湖沉积物中聚磷菌的影响. 安全与环境工程, 2011, **18**(6): 49-52.]

[57] Wang FF, Qu JH, Hu YS. Spatio-temporal characteristics and correlation of phosphate, pH and alkaline phosphatase on water-sediment interface of Lake Taihu. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(5): 907-912.[王福芳, 屈建航, 胡元森. 太湖水-沉积物界面磷、pH 及碱性磷酸酶的时空特征及相关性. 生态环境学报, 2012, **21**(5): 907-912.]

[58] Zha HM, Zhu MY, Zhu GW *et al*. Seasonal difference in water quality between lake and inflow/outflow rivers of Lake Taihu, China. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1102-1112. DOI: 10.13227/j.hjkx.201707184.[查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟等. 太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析. 环境科学, 2018, **39**(3): 1102-1112.]

[59] Cheng ST, Qian YC, Zhang HJ. Estimation and application of macroscopic water environmental capacity of total phosphorus and nitrogen for Taihu Lake. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(10): 2848-2855. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2013.10.032.[程声通, 钱益春, 张红举. 太湖总磷、总氮宏观水环境容量的估算与应用. 环境科学学报, 2013, **33**(10): 2848-2855.]

[60] Li HP, Yang GS, Huang WY *et al*. Simulating fluxes of non-point source nitrogen from upriver region of Taihu Basin. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, **44**(6): 1063-1069. DOI: 10.3321/j.issn: 0564-3929.2007.06.015.[李恒鹏, 杨桂山, 黄文钰等. 太湖上游地区面源污染氮素入湖量模拟研究. 土壤学报, 2007, **44**(6): 1063-1069.]

[61] Chen LN, Wu JF, Ling H *et al*. Source analysis and control measures of nitrogen and phosphorus pollution in Wuyi canal water system. *China Water Transport*, 2015, **15**(12): 152-154.[陈丽娜, 吴俊锋, 凌虹等. 武宜运河水系氮磷污染来源解析及控制对策. 中国水运: 下半月, 2015, **15**(12): 152-154.]