

太湖颗粒物/颗粒态磷的空间输移特征及其对底泥淤积/磷蓄积的贡献

梁敏捷¹, 朱伟^{1,2**}, 程林¹, 王意超¹, 薛宗璞³, 梁涛¹, 徐金媛⁴

(1. 河海大学环境学院, 南京 210098)

(2. 河海大学水利科学研究所, 南京 210098)

(3. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

(4. 河海大学土木与交通学院, 南京 210098)

摘要: 浅水湖泊中泥沙颗粒物及颗粒态磷 (PP) 的输移过程对底泥淤积和水质演化至关重要。针对太湖颗粒物与颗粒态磷的输移机制及其对底泥淤积的贡献尚不明确的问题, 本研究通过一年的入出湖河道监测, 结合一个月的全湖采样及粒径分级分析, 使用通量平衡法, 研究了太湖入出湖悬浮颗粒物 (SS) 与颗粒态磷的总体平衡、迁移特征和淤积规律。结果表明: 太湖颗粒物湖内淤积量显著, 磷随颗粒物滞留特征突出。2021年, 太湖净入湖 SS 约 40 万 t, 对应淤泥体积约为 55 万 m³, 淤积速率为 0.35 mm/a, 同期 PP 净滞留量为 989 t, 约 73% 的入湖 PP 或随颗粒物进入太湖, 颗粒物沉降是磷蓄积的主要途径。太湖入、出湖颗粒物粒径及磷的赋存形态差异明显。入湖颗粒物以 20-50 μm 为主, 出湖以 0.45-10 μm 为主, 而 10-20 μm 颗粒物携带了 80% 以上的 PP。湖体水动力过程对颗粒物和 PP 的空间分布产生明显影响。太湖湖内颗粒物呈“西部高, 东部低”的分布格局, 而颗粒态磷呈“西北高, 东南低”的特征。

关键词: 太湖; 底泥; 淤积; 淤积通量; 淤积速率

Transport Characteristics of Particulates/Particulate Phosphorus in Lake Taihu and Their Contribution to Sediment Deposition/Phosphorus Accumulation

Liang Minjie¹, Zhu Wei^{1,2}, Cheng Lin¹, Wang Yichao¹, Xue Zongpu³, Liang Tao¹, Xu Jinyuan⁴

(1: College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

(2: Institute of Water Science and Technology, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

(3: College of Hydrology and Water, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

(4: College of Civil and Transportation, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

Abstract: The transport of sediment particulates and particulate phosphorus (PP) in shallow lakes is critical for sediment accumulation and water quality evolution. To address the unclear mechanisms governing particulate and PP transport in Lake Taihu and their contribution to sediment deposition, this study examined the overall mass balance, transport characteristics, and deposition patterns of suspended solids (SS) and particulate phosphorus entering and leaving the lake. The investigation combined one-year monitoring of inflow and outflow rivers with a one-month whole-lake sampling campaign that included particle size fractionation, supported by flux balance analysis. Results show that sediment accumulation and associated phosphorus retention in Lake Taihu were pronounced. In 2021, the net SS inflow into the lake was approximately 400,000 tons, equivalent to a sediment volume of about 550,000 m³ and an annual deposition rate of 0.35 millimeters. During the same period, net PP retention reached 989 tons, with around 73% of the incoming PP entering the lake adsorbed to particulates, indicating that particulate sedimentation serves as the dominant pathway for phosphorus accumulation. Marked differences were observed in particle size distribution and phosphorus speciation between inflow and outflow. Inflowing particulates were dominated by the 20-50 μm fraction, whereas outflowing

*2025-06-11 收稿, 2025-11-17 收修改稿。
国家重点研发计划项目 (2022YFC3202700) 资助。
**通讯作者, E-mail: zhuweitteam.hhu@gmail.com.

particulates were primarily in the 0.45–10 μm range. Moreover, the 10–20 μm fraction carried over 80% of the PP. Hydrodynamic processes significantly influenced the spatial distribution of particulates and PP, resulting in a “high in the west and low in the east” pattern for particulates and a “high in the northwest and low in the southeast” distribution for particulate phosphorus.

Keywords: Lake Taihu; Sediment; Deposition; Sediment Flux; Sediment deposition rate

自 2020 年以来, 太湖蓝藻水华面积减小, 水质呈现明显的改善趋势。一系列的研究表明磷通量对于太湖微囊藻生物量、水华面积及发生频率都具有显著的相关关系^[1, 2]。在太湖浮游植物多样性增加的同时, 一些水源地出现了由假鱼腥藻、浮丝藻产生的二甲基异菸醇^[3], 而东太湖的总磷 (TP) 出现一些上升的迹象^[4, 5], 一些湖区的沉水植物发生生消变化。种种迹象表明: 经过十几年的治理后太湖已经进入水质、生态动态变动期, 然而在水华暴发灾害渐趋缓解的同时一些新的问题又在酝酿发生。因此, 需要进一步研究新形势下的太湖治理方法和重点。

在持续加大太湖流域污染控制的要求下, “引江济太”、“底泥清淤”等湖内行动仍然是现阶段正在实施的重要治理措施。《新一轮太湖生态清淤工程实施方案》中指出计划到 2030 年实施太湖清淤 4000 万 m^3 , 近两年东部太湖的清淤工程也开始积极推进。太湖底泥清淤的目的一方面是防止湖泛的发生^[6, 7], 即底泥中有机物大量聚集而出现厌氧、黑臭的现象, 另一方面是减少底泥向上覆水释放磷的数量, 从而缓解湖泊内源磷释放的问题。从底泥清淤及减少底泥磷释放的角度, 掌握整个湖泊悬浮颗粒物 (以下简称“颗粒物”)、总磷、颗粒态磷及其通量和存量对于理解太湖颗粒物淤积、磷的平衡具有重要意义。

关于太湖磷平衡的研究多聚焦于入湖磷通量, 现有研究已明确 2007-2019 年间太湖年均净入湖 TP 通量约 2000-2200 t, 2020 年后随蓝藻水华情势好转降至 2022 年的 1880 t^[8-11]。在湖内 P 存量的构成方面, 2005-2018 年, 太湖水体 TP 的赋存量介于 410-1098 t 之间, 颗粒态磷 (PP) 赋存量多年季度平均值为 487 t^[12]。同时, 湖内水体和河道的 PP 占比存在差异, 湖内水体 PP 浓度占 TP 浓度的 68.5%, 河道水体 TP 中约有近 2/3 是以 PP 的形式存在的^[12-14]。从这些研究可知, 进入太湖的颗粒物不但是一个淤积源, 颗粒态磷的高占比对磷平衡起着重要的作用。但现有研究对颗粒态磷的具体构成、迁移路径等关键过程的认知仍显不足, 难以直接服务于清淤工程的精准实施。

在颗粒物通量研究方面, 现有研究主要分为两类: 一类是针对河流或海湾的颗粒物/泥沙输出通量计算^[15-20], 通常基于监测得到的水量、浊度或者悬浮颗粒物 (SS) 浓度数据计算输出通量; 另一类是湖泊沉积学研究中通过沉积物捕获器测定局部湖区的沉积速率, 如五里湖、青海湖、千岛湖等^[21-24]。但前者聚焦跨流域输移, 后者局限于湖泊局部垂向沉积, 均难以适配太湖这样面积广阔、湖区动力学差异显著的水体, 迄今尚未有针对太湖全湖颗粒物输入数量及特征的系统性研究。因此本文尝试借鉴基于物质质量平衡原理的河流通量计算法, 从宏观角度获得太湖的颗粒物沉积通量, 帮助对湖体磷循环及沉积过程的深入理解。

本研究采用质量平衡的方法, 根据 2020 年 10 月份的全太湖采样研究了湖内水体中颗粒物及颗粒态磷的存量及其特征, 并通过 2021 年环湖主要河道采样, 结合水文水质数据, 研究 2021 年入太湖颗粒物及颗粒态磷的通量及颗粒物的构成特征, 分析了主要入出湖河道城东港和太浦河的颗粒物和颗粒态磷的变化规律。从粒径分级的角度研究了太湖不同颗粒物在湖泊内的输移-沉降过程并探究了颗粒物及颗粒态磷对太湖磷平衡的影响。

1 样品与方法

1.1 研究区域及样品采集

本研究进行了三次采样调查。2020 年 10 月进行了全湖采样调查, 采样点如图 1 所示。2021 年 9 月进行了最大入湖河道城东港和最大出湖河道太浦河采样调查。2024 年 4 月 (春季)、7 月 (夏季)、11 月 (秋季) 和 2025 年 1 月 (冬季) 进行了主要入出湖河道采样调查, 选取了 4 条入湖河道 (殷村港、城东港、合溪新港和长兜港) 及 5 条出湖河道 (幻淞、太浦河、大浦口、瓜泾口和望虞河) (如图 1 所示), 所选取的入 (出) 湖河道所在的水文巡测段 (站) 的水量占总入 (出) 湖水量的 80% 以上, 且各河道均为所在水文巡测段 (站) 的主要河道。采集各点位的水样, 利用采水器分三层采水。

1.2 水文数据来源

本文所收集到的 2021 年太湖 23 个水文巡测段 (站) 逐月入出湖水量和 TP 浓度、湖内 31 个点位逐月水位、TP 浓度和 DTP 浓度、9 条河道 (城东港、大港河、合溪新港、杨家浦、长兜港、苕溪、汤淞、望虞河和大溪港) 逐月

浊度数据均来自于江苏省水文水资源勘测局（以下简称“省水文局”），湖内 31 个点位高程和分区面积来自于原太湖流域水资源保护局（现为太湖流域东海海域生态环境监督管理局）。

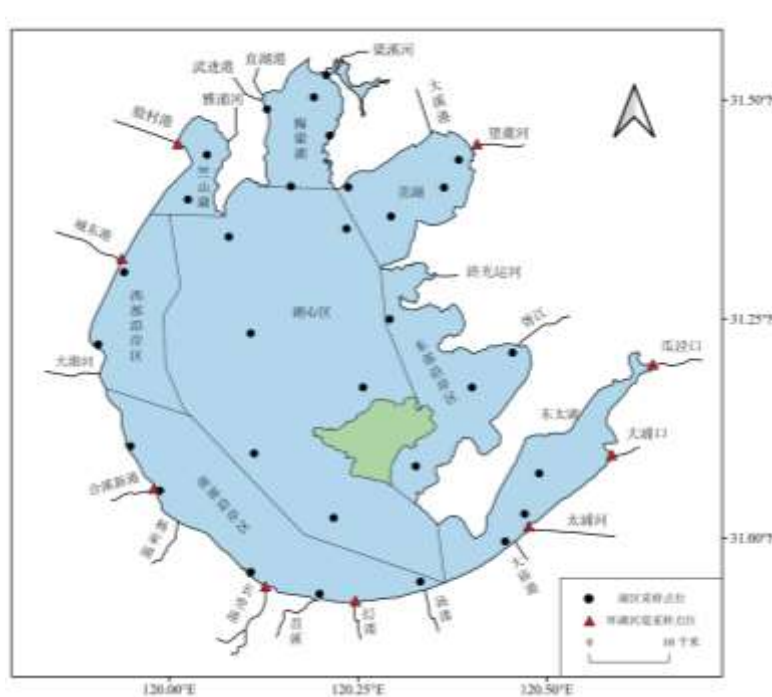


图1 湖区划分及环湖河道采样点设置

Fig.1 The division of the lake area and location of sampling sites settings in the surrounding rivers

1.3 分析方法

全湖采样的水样测定其浊度、总磷（TP）浓度、溶解态磷（DTP）浓度和颗粒态磷（PP）浓度，前处理采用全部混合立即测定的方法^[25]。城东港和太浦河采样的水样测定了水样中不同粒径区间颗粒物中的磷浓度以及颗粒物中磷的形态。为了弥补历史水文数据中缺失的悬浮颗粒物（SS）浓度和 PP 浓度，通过水样中浊度与 SS 浓度、TP 浓度与 PP 浓度的关系，以此来推算出环湖河道 SS 通量和 PP 通量，对主要进出湖河道采样水样的浊度、SS 浓度、TP 浓度和 DTP 浓度进行测定。

浊度使用上海悦丰 SGZ-200A 型浊度仪进行测定，水样 TP 浓度和 DTP 浓度分别通过原水和预先使用 0.45 μm 水相过滤膜过滤后得到的水样采用过硫酸钾消解分光光度法进行测定，PP 浓度为 TP 浓度与 DTP 浓度之差。

对于水样中 SS 浓度的测定采用称重法，采用烘干后 0.45 μm 的玻璃纤维膜（质量为 m_1 ）对原混合水样进行过滤，记录过滤水样的体积（V），再将过滤后得到的含有颗粒物的滤膜放置在 105 °C 烘箱中烘干至恒重（质量为 m_2 ）。SS 浓度的计算公式如下：

$$SS = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (1)$$

本研究中河道水样中各粒径区间的颗粒物和颗粒磷占比、水体颗粒物磷形态的测定为两个独立的实验，分别使用约 50 kg 和 10 kg 的原水水样。

对于水样中不同粒径颗粒物所含磷的测定，本研究借鉴了土工试验标准（GB/T 50123-2019）中的筛析方法对水体颗粒物进行粒径分级。选用了直径 10 cm 标准分样筛，筛孔规格包括 800 μm、500 μm、200 μm、100 μm、50 μm、20 μm 六种级别，筛具由金源筛网（安平赫鼎丝网制品有限公司）生产，执行标准：GB/T6003.1-2012。将各个点位水样分别在混合均匀定量后依次按孔径从大到小过六种标准分样筛，过筛后的颗粒物自然阴干后用蒸馏水稀释至一定体积。再将过 20 μm 孔径标准分样筛后的水样分别通过 10 μm 和 0.45 μm 玻璃纤维滤膜过滤。分别测定不同标准分样筛过筛后颗粒物稀释水样和滤膜过滤后水样的 TP 浓度（方法同原混合水样 TP 浓度测定方法），经处理换算即可分别

得到 0.45-10 μm 、10-20 μm 、20-50 μm 、50-100 μm 、100-200 μm 、200-500 μm 、500-800 μm 粒径区间颗粒物所含 PP 含量。

对于颗粒物中磷形态的测定，首先将水样静置静置一定时间后（约 12-24 h），轻轻倾倒并收集上层清液，底部浑浊水样则自然阴干。随后对收集的上层清液重复此过程，直至获得颗粒物质量超过 0.5 g。颗粒物的磷形态测定参考李悦等^[26]和朱广伟等^[27]提出的改进方法，采用磷元素分级连续提取法对磷形态进行分析。磷形态分为可交换态磷(Ex-P)、铝结合态磷(Al-P)、铁结合态磷(Fe-P)、闭蓄态磷(Oc-P)、自身钙磷(ACa-P)、碎屑磷(De-P)和有机磷(Org-P)共 7 种形态。

1.4 计算方法

1.4.1 入出湖 SS、TP 及 PP 通量计算方法 由于 2021 年环湖河道的水文数据较为齐全，故以 2021 年的太湖为参考来计算环湖河道输入输出 SS 通量和 PP 通量。对四季 9 条环湖河道的采样测定得到的 SS 浓度和浊度、PP 浓度和 TP 浓度进行曲线拟合，将省水文局提供的 2021 年 23 个水文巡测段（站）的浊度和 TP 浓度通过得到的浓度转换关系转换为对应水文巡测段（站）的 SS 浓度和 PP 浓度（水体颗粒物与磷收支计算未包含城市取水对颗粒物与颗粒态磷输出的影响）。

①河道 SS 通量计算方法：

由于省水文局提供的水文数据中只有 9 条河道 2021 年的浊度数据，本文通过类比的方法，以这 9 条河道的浊度数据为基础，以四季 9 条主要入出湖河道采样的 SS 浓度数据为参考。

入（出）湖 SS 通量计算公式如下：

$$M_{SS \text{ 入(出)湖}} = \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^n C_{SSij} \times Q_{ij} \quad (2)$$

式中， $M_{SS \text{ 入(出)湖}}$ 为太湖输入（出）SS 通量； C_{SSij} 为 i 月净入（出）湖河段 j 通过转换得到的月均 SS 浓度； Q_{ij} 为 i 月净入（出）河段 j 的流量（下同）； n 为净入（出）湖河段段数（下同）。

②河道 TP 和 PP 通量计算方法：

采用省水文局提供的 2021 年太湖逐月水量和每月一次的水质监测结果作为月均 TP 浓度数据进行 TP 通量计算，并转换成对应月份的月均 PP 浓度进行 PP 通量计算。

入（出）湖 TP 和 PP 通量计算公式如下：

$$M_{TP/PP \text{ 入(出)湖}} = \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^n C_{TP/PPij} \times Q_{ij} \quad (3)$$

式中， $M_{TP/PP \text{ 入(出)湖}}$ 为太湖输入（出）TP/PP 通量； $C_{TP/PPij}$ 为 i 月净入（出）湖河段 j 的月均 TP/PP 浓度。

1.4.2 湖内 SS 及 PP 存量计算方法 由于 2020 年 10 月太湖湖内水文数据较为全面，故以 2020 年 10 月的太湖为参考来计算太湖湖内 SS 存量和 PP 存量。将 2020 年 10 月实测得到的全湖 31 个点位的浊度通过拟合得到的 SS 浓度和浊度的转换关系转换成各点位 SS 浓度。各点位的 PP 浓度由实测得到。

湖内 SS 和 PP 存量计算公式如下：

$$M_{SS/PP \text{ 湖内}} = \sum_{i=1}^{31} C_{SS/PPi} \times S_i \times h_i \quad (4)$$

式中， $M_{SS/PP \text{ 湖内}}$ 为太湖湖内 PP 存量； $C_{SS/PPi}$ 为湖内监测点位 i 的 PP 浓度； S_i 为湖内监测点位 i 的对应分区的面积；

h_i 为湖内监测点位 i 的水深，由当月太湖月均水位减去监测点位高程得到。

2 结果

2.1 入出湖河道水体中的的颗粒物与磷浓度

根据环湖入出湖河道调查的数据得到浊度、SS 浓度、TP 浓度和 PP 浓度的结果（图 2）。从结果可以看出入湖河道的浊度、SS 浓度、TP 浓度及 PP 浓度普遍高于出湖河道。入湖河道浊度四季平均值为 51.72 NTU，而出湖河道浊度四季平均值为 24.35 NTU、约为入湖河道的 50%。入湖河道 SS 平均浓度的季节变化范围为 60.72-69.71 mg/L，而出湖河道每个季节的 SS 平均浓度的季节变化范围为 31.97-38.28 mg/L，是入湖河道的 53%-55%。在入湖河道中长兜港的 SS 浓度（96.39 mg/L）和浊度（73.31 NTU）显著高于其他入湖河道；而出湖河道中的幻淩的 SS 浓度（64.58 mg/L）和浊度（60.34 NTU）都比较高。入湖河道 TP 浓度普遍较高（0.13-0.17 mg/L），尤其是合溪新港秋季为 0.20 mg/L，而出湖河道 TP 浓度较低且季节波动较小（0.05-0.09 mg/L）、是入湖河道的 38%-53%。

从季节变化来看，浊度和 SS 浓度呈现明显的季节差异。入湖河道浊度在秋季达到峰值（64.05 NTU），SS 浓度同样在秋季最高（69.71 mg/L）；而出湖河道浊度和 SS 浓度的季节性波动较小，仅秋季略高（41.61 NTU 和 38.28 mg/L）。实测的入湖 TP 浓度在 0.15 mg/L 左右，出湖浓度在 0.06 mg/L 上下波动。入湖河道的 PP 浓度在季节性变化比较大，在浓度 0.05-0.10 mg/L 的范围内波动，但入湖 DTP 的四季差异不明显基本在均值 0.05 mg/L 左右。相对于入湖河道，出湖河道 TP 的变化幅度较小，介于 0.06-0.12 mg/L 之间，而出湖河道的 DTP 全年稳定维持在 0.02 mg/L 附近，PP 则在 0.02-0.08 mg/L 范围内小幅度变化。

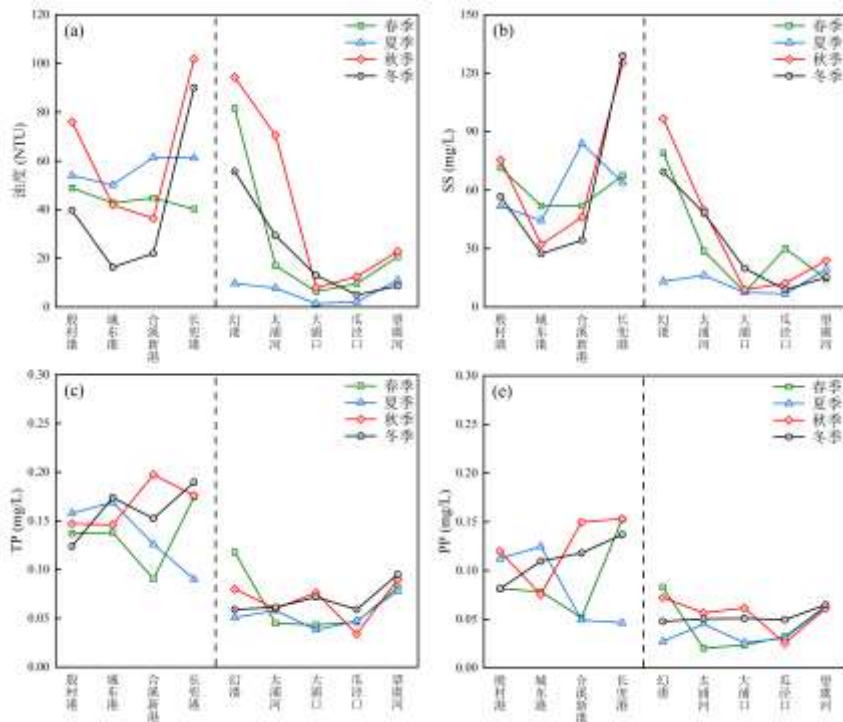


图 2 2024 年四季太湖主要入出湖颗粒物与颗粒态磷 (a) 浊度、(b) SS、(c) TP、(d) PP

Fig.2 Particulates and particulate phosphorus in the main inflows and outflows of Lake Taihu

in four seasons of 2024 (a) Turbidity, (b) SS, (c) TP, (d) PP

2.2 河道水体悬浮颗粒物浓度与浊度、TP 和 PP 浓度的关系

为得到入出湖河道水体的浊度与 SS 浓度、TP 与 PP 浓度的转换关系，以弥补水文数据中缺失的河道 SS 浓度和 PP 浓度的数据，将 2024 年四次环湖河道采样的浊度与 SS 浓度、TP 浓度与 PP 浓度进行分析，得到图 3。

浊度和 SS 浓度曲线拟合结果：

$$C_{SS} = 0.26 + 1.26t \quad (R^2=0.838) \quad (5)$$

由于湖内存在磷吸附-解析附的过程，且入出湖河道水体 PP 占比的差异，本文分别对入出湖河道水体的 TP 浓度与 PP 浓度分别进行曲线拟合。

入湖水体 PP 和 TP 浓度曲线拟合结果：

$$C_{入湖PP} = -0.03 + 0.82C_{入湖TP} \quad (R^2=0.923) \quad (6)$$

出湖水体 PP 和 TP 浓度曲线拟合结果：

$$C_{出湖PP} = -0.02 + 0.95C_{出湖TP} \quad (R^2=0.967) \quad (7)$$

拟合结果表明，SS 浓度和浊度为线性关系，PP 浓度和 TP 浓度为线性关系，且由斜率($k_{入湖} = 0.82, k_{出湖} = 0.95$)

可知出湖河道 PP 占比高于出湖河道。

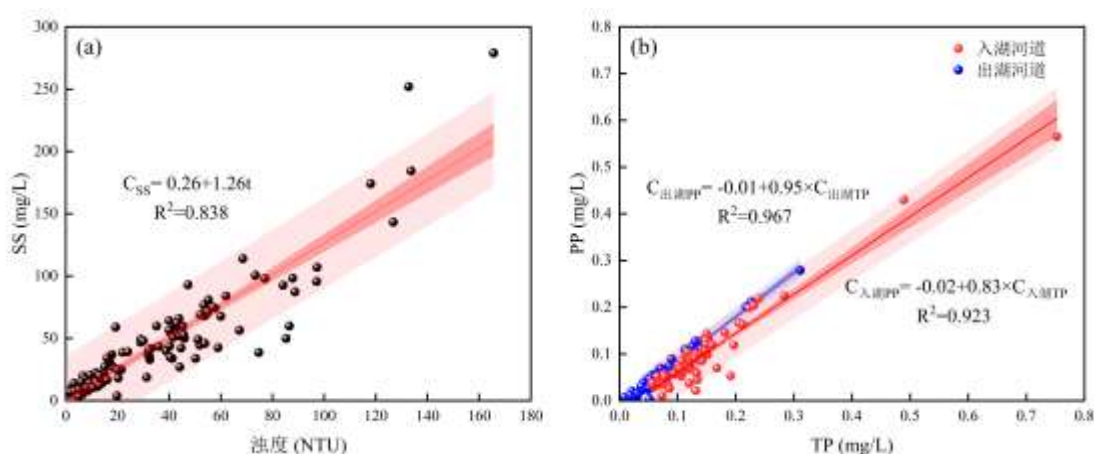


图3 河道 SS 浓度与浊度拟合关系图 (a) 和 PP 浓度与 TP 浓度拟合关系图 (b)

Fig.3 Fitting relationship between suspended solids concentration and turbidity (a) of river and fitting relationship between particulate phosphorus concentration and total phosphorus concentration (b) of rivers

2.3 太湖颗粒物通量

2021 年各出入湖河道输入/输出的水量和 SS 量计算结果见图 4a。从中可以看出环太湖总入湖水量 130.2 亿 m^3 ，主要来自湖西区 and 浙西区，分别占总入湖水量的 67% 和 23%，合计比例达到 90%；总出湖水量 115.7 亿 m^3 ，主要为太浦闸和阳澄淀泖区，分别占总出湖水量的 28% 和 24%，合计比例达 52%。

2021 年太湖入湖 SS 通量为 92 万 t，出湖 SS 通量为 52 万 t，净入湖 SS 通量为 40 万 t，滞留率为 44%。湖西区为悬浮颗粒物的主要输入区，在输入总量 92 万 t 中，城东港桥段为 48.29 万 t，占 52%；浞溪桥段为 16.84 万 t，占 17%；占到输入量的近 70%。而浙西区杨家埠站为 20.31 万 t，占输入总量的 20%，这几条河占总输入量的 90% 左右。太浦河、杭嘉湖区、阳澄淀泖区和望虞河为悬浮颗粒物主要输出区，其中太浦闸为 15.29 万 t、占 29.29%，幻溇段为 7.26 万 t、占 13.92%，杭长桥段为 6.24 万 t、占 11.96%，这 3 条河占到总数输出量的 55% 左右。

2021 年逐月入出湖 SS 通量计算结果见图 4b。从季节上来看春夏季 (3-8 月份) 是悬浮颗粒物的主要输入季节，累计输入 67 万 t 的悬浮颗粒物，达到输入总量的 72%，其中 7 月份达到最大值 (17.5 万 t)。而悬浮颗粒物的输出主要集中在秋冬季 (8-12 及 1 月份)，累计输出 38 万 t，达到总输出量的 74%，其中 8 月份达到最大值 (8.7 万 t)。从中看出太湖颗粒物的输入和输出时间之间存在一定的滞后性。

2.4 总磷和颗粒态磷通量

计算入出湖 TP 的通量，结果见图 5a。2021 年太湖入湖 TP 通量为 2054 t，出湖 TP 通量为 591 t，净入湖 TP 通量为 1463 t，TP 滞留率为 71%。计算入出湖 PP 的通量，见图 5b。2021 年太湖入湖 PP 通量为 1353 t，出湖 PP 通量为 364 t，净滞留 PP 通量为 989 t，PP 滞留率为 73%。

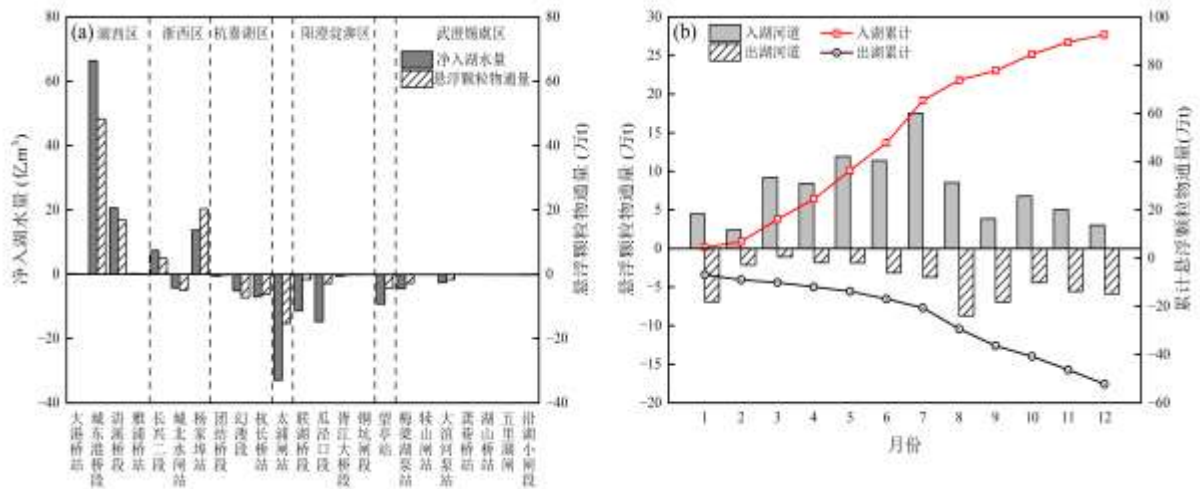


图4 2021年各水文巡测段入出湖水量和悬浮颗粒物通量 (a)、逐月悬浮颗粒物通量 (b)

Fig.4 inflow/outflow and suspended solids flux in each hydrological survey section (a) and monthly suspended solids flux (b) in 2021

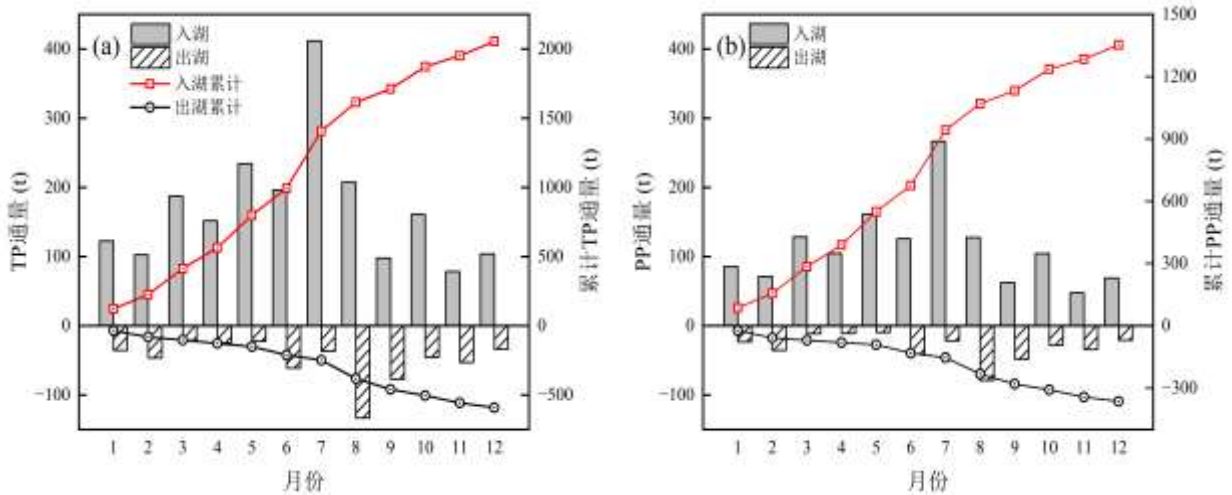


图5 2021年入出湖总磷通量 (a) 与颗粒态磷通量 (b)

Fig.5 Total phosphorus flux (a) and particulate phosphorus flux (b) in 2021

太湖河道 TP 和 PP 的输入主要集中在春夏季, 输出主要集中在秋冬季。其中, 7 月份有 TP 和 PP 的最大输入量, 分别达到 411 t 和 267 t; 8 月份有 TP 和 PP 的最大输出量, 分别达到 133 t 和 79 t, 与悬浮颗粒物的输入输出趋势接近。

2.5 湖内颗粒物和颗粒态磷的存量

图 6a 显示了 2020 年 10 月份太湖湖内 SS 浓度的分布情况。此时太湖内部水量为 56.9 亿 m^3 , SS 的存量为 45.3 万 t。太湖总体 SS 的浓度出现西北高、东南低的趋势, 在大港河、城东港出现颗粒物含量最高的区域, 存量可达 300 t/km^2 以上。而全湖平均存量大约为 169 t/km^2 。东部太湖 (东太湖和胥湖) 的存量在 50 t/km^2 左右, 与西北部出现 3 倍左右的差异。为了表达太湖湖区之间颗粒物出现的巨大差异, 以北部湖湾区(梅梁湖西边界)与湖心区的交界点 (31.40°N, 120.13°E) 为起点、以幻溇和汤溪入湖口之间的太湖岸线上的一点 (30.93°N, 120.28°E) 为终点画出一条中心分界线 (以下称为泥沙中心分界线) 大致可以将太湖水域面积划分成面积相等的西部湖区和东部湖区两个部分。计算西部湖区和东部湖区中 SS 存量, 西部湖区为 30.8 万 t, 东部湖区为 14.6 万 t, 可以看出西部湖区 SS 的存量约为东部湖区的 2 倍, 明显看出水体在由西向东循环的过程中 SS 出现减少的趋势。

图 6b 显示了 2020 年 10 月份太湖湖内 PP 浓度的分布情况。PP 的分布出现显著的西北高东南低的特征。西北湖区 PP 存量可以达到 0.2-0.3 t/km² 左右，而东南湖区基本上在 0.1 t/km² 左右，两者也出现 3 倍左右的差异。同样为了表达太湖湖区之间颗粒态磷出现的差异，以北部湖区（梅梁湖西边界）与湖心区的交界点（31.40°N,120.13°E）为起点、以幻溇和汤溇入湖口之间的太湖岸线上的一点（30.93°N,120.28°E）为终点画出一条中心分界线，也将太湖水域面积划分成西北部湖区和东南部湖区两个相等面积的部分（以下称为颗粒态磷中心分界线）。西北湖区 PP 存量为 297.04 t，而东南湖区为 79.09 t，西北湖区 PP 存量约为东南湖区的 3.75 倍，从西北向东南 PP 的减少，比由西向东 SS 的减少更加显著。

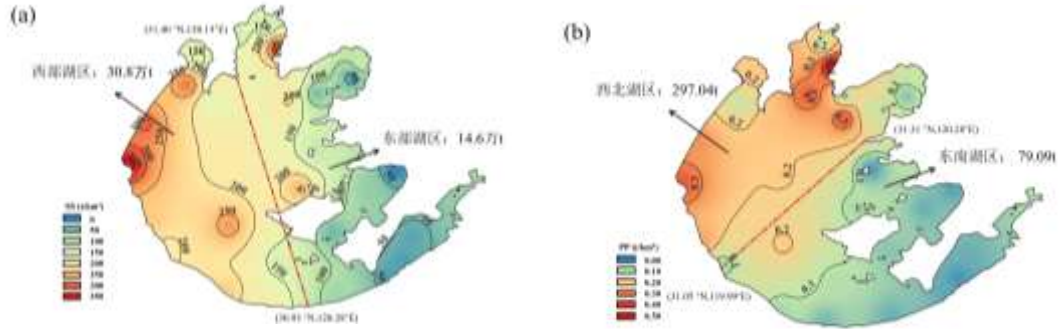


图 6 2020 年 10 月湖内悬浮颗粒物存量 (a) 和颗粒态磷存量 (b)

Fig.6 Storage of suspended particulate matter (a) and particulate phosphorus (b) in the lake in October 2020

2.6 入出湖河道水体颗粒物与颗粒态磷的特征

以城东港为入湖河道代表、太浦河为出湖河道代表对两者的颗粒物粒径和 PP 的构成占比进行分析，得到图 7a。城东港入湖颗粒物的粒径主要分布在 20-50 μm、10-20 μm、0.45-10 μm 之间，各占 1/3 左右。而太浦河 50% 左右的粒径都在 0.45-10 μm 之间，20-50 μm 的颗粒只占到 18% 左右。从这个结果明显看出在入出湖之间大颗粒（20-50 μm）比例明显减少，而小颗粒（0.45-10 μm）的比例明显增加。从携带 PP 的颗粒物来看，无论是城东港还是太浦河，颗粒态磷的主要携带者集中在 10-20 μm 的颗粒物，占比均可达到 80% 以上，太浦河的比例要更高一些，而这一颗粒粒径入湖占比在 30% 左右，出湖占比 25%，在太湖内部的比例减少自由 5% 左右。

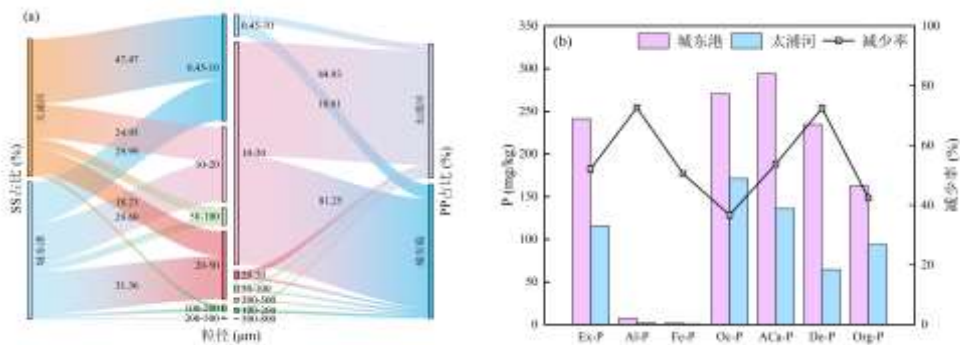


图 7 入出湖河道在各粒径上颗粒物与颗粒态磷占比 (a) 和各形态磷含量及变化 (b)

Fig.7 Proportion of particulate matter and particulate phosphorus in each particle size (a) and phosphorus content and changes in each form (b) of the inflow/outflow rivers

假设以城东港的 10-20 μm 颗粒物的占比 (29.60%) 作为入湖河道该粒径区间的颗粒物的占比，以太浦河的 10-20 μm 颗粒物的占比 (24.95%) 作为出湖河道该粒径区间的颗粒物的占比，结合前面的入出湖颗粒物通量的计算，得到 10-20 μm 颗粒物的输入量为 27 万 t，输出量为 13 万 t，净滞留量为 14 万 t。

图 7b 是主要入湖河道城东港和出湖河道太浦河颗粒态磷形态比较的结果。入湖颗粒态磷中, A Ca-P、Oc-P、Ex-P、De-P 的含量较高, 均在 250 mg/kg 上下, 而 Al-P 和 Fe-P 的含量很低, 仅在 2-7 mg/kg 左右。各种形态的颗粒态磷减少率在 40-70% 之间, 其中 Al-P 和 De-P 的减少最为突出, 而 Oc-P 和 Org-P 减少相对较少。

3 讨论

3.1 太湖颗粒物淤积量及淤积速率

由悬浮颗粒物通量和颗粒态磷通量计算结果可知, 基于物质质量平衡原理的理论进行估算得到: 2021 年太湖净入湖颗粒物约为 40 万 t, 按照太湖水面面积 2338 km², 其底泥表层的淤泥质粉土的平均密度 (1.46 g/cm³) [28] 计算, 可得到太湖 2021 年沉积的淤泥体积约为 55 万 m³。假设颗粒物在全湖全面积平均沉积则淤积速率约为 0.23 mm/a。根据调查, 太湖内有 750 km², 大约 1/3 的面积没有湖相沉积物^[29,30]。去除 1/3 侵蚀区域的面积进行计算, 淤积速率约为 0.35 mm/a, 该淤积速率不同于湖泊沉积学中通过 ¹³⁷Cs 年代法等方法获得的局部实测沉积速率, 主要反映太湖整体范围内颗粒物沉积的宏观趋势, 侧重描述细颗粒泥沙在水体底部的理论堆积速率。根据前人的研究, 东五里湖^[31]的沉积速率约为 3.2 mm/a, 西太湖和东太湖的沉积速率分别约为 0.35-0.42 mm/a 和 1.54 mm/a^[32], 梅梁湖和贡湖的沉积速率分别约为 1.9 mm/a 和 0.76 mm/a^[33], 与以往研究相比本研究基于颗粒物总体平衡估算得到的全湖平均淤积速率为 0.35 mm/a, 远低于局部湖区的调查数据。这种差异可能源于两方面原因: 一是沉积物捕获器通常布设在近岸或河口区, 这些区域因水流减缓更易发生颗粒物沉降, 导致局部淤积速率偏高; 二是本研究基于全湖通量平衡计算, 反映了整体平均状况, 而太湖西北部 (如城东港入湖口) 因颗粒物输入集中, 实际淤积速率可能接近历史实测值。此外, 风力驱动的底泥再悬浮^[34]和植被覆盖的差异^[35]进一步加剧了淤积速率的空间异质性。因此, 本研究结果与历史数据并不矛盾, 反而揭示了太湖淤积的“局部高、整体低”特征。

与国内其他湖泊的沉积速率进行比较: 青海湖^[36]为 0.2 mm/a, 巢湖^[37]为 0.5-2.0 mm/a, 鄱阳湖^[38]为 1.6 mm/a, 青海湖淤积水平与太湖相近, 其余均高于太湖。洞庭湖^[39]由于其入湖河水携带大量泥沙, 沉积速率高达 5-25 mm/a。与国外其他湖泊对比: 以色列基尼烈湖^[40]为 3-5 mm/a, 罗马尼亚圣安娜湖^[41]为 1.1 mm/a, 美国伊利湖^[42]为 0.5-1.0 mm/a, 日本霞浦湖^[43]为 1.0-1.5 mm/a, 皆高于太湖; 贝加尔湖^[44] (0.136 mm/a) 则低于太湖, 而瑞士日内瓦湖为 0.1-0.3 mm/a^[45], 日本琵琶湖^[46]为 0.2-0.5 mm/a, 二者较为接近太湖。太湖的较低淤积速率可能与其流域处于平原河网区域, 本身携沙量较小, 以及其浅水特性和风浪的强扰动导致的底泥再悬浮^[34]有关。

从管理角度看, 太湖的年淤积量 (55 万 m³) 仅占《新一轮太湖生态清淤工程实施方案》中 2030 年目标清淤量 (4000 万 m³) 的 1.37%, 表明当前淤积速率对湖容的直接影响较小。然而, 淤积的空间分异性 (西部湖区显著高于东部湖区) 意味着清淤工程应优先针对颗粒物输入集中的河口区 (如城东港附近) 和底泥再悬浮频繁的湖心北区^[47,48]。此外, 尽管淤积总量不高, 但颗粒态磷的滞留率 (73%) 显著高于颗粒物整体滞留率 (44%), 说明淤积底泥可能成为磷的“汇”, 在外源控制后的长时期内存在内源释放风险^[49]。因此, 清淤工程需结合磷释放评估、磷形态分析, 聚焦有机质含量高且界面出现厌氧状态的底泥, 重点关注生物可利用磷的释放, 以抑制藻类对水体中磷的利用^[50-52]。

3.2 入湖过程中的粒径分级及颗粒态磷输移机制

从本研究结果来看, 2021 年太湖净入湖悬浮颗粒物通量约为 40 万 t, 其中颗粒态磷净输入量为 989 t。结合湖内 SS 和 PP 存量分布 (西北湖区显著高于东南湖区) 及滞留率, 可测算出 44% 的颗粒物携带 73% 的 PP 进入太湖, 并大部分沉积于底泥表面, 少部分留存于湖水中或被水生生物利用^[53]。滞留的 PP 占全年净入湖 TP 的 68%, 表明颗粒物沉降是太湖磷迁移转化的主要途径之一。

粒径分析表明, 太湖入湖颗粒物以 20-50 μm 为主 (占比约 33%), 而出湖颗粒物则以 0.45-10 μm 为主 (占比 50%), 说明粗颗粒 (>20 μm) 更易在湖内沉降。然而, PP 的富集特征显示, 10-20 μm 颗粒携带了 80% 以上的 PP (图 7a), 其出湖占比 (25%) 显著低于入湖占比 (30%), 表明该粒径段颗粒是磷向底泥迁移的主要载体。这一现象与 Yi 等^[54]的研究一致: 细颗粒 (10-20 μm) 因比表面积大、吸附能力强, 更易结合溶解态磷 (DTP) 并随沉降进入底泥。此外, 入湖颗粒物中闭蓄态磷 (Oc-P) 和碎屑磷 (De-P) 的减少率最高 (53% 和 72%), 二者迁移主要依赖载体颗粒的物理运动, 表明颗粒物的物理沉降现象显著, 而携带弱吸附态磷 (如吸附态 Ex-P、Fe-P) 的颗粒物可能来自入湖颗粒物的迁移, 也可能是湖泊自生、底泥再悬浮以及颗粒物吸附。

从湖区差异来看,太湖颗粒物显著地表现出“西部高东部低”的趋势,而PP的沉降呈现明显的“西北高、东南低”格局(图6)。西北湖区(如城东港入湖口附近)SS存量达300 t/km²,PP存量达0.3 t/km²,分别为东南湖区的3倍和6倍。西北湖区是主要入湖河道(城东港、长兜港)的汇流区,水流减缓导致粗颗粒快速沉降;而东南湖区受湖河道(如太浦河)的携带细颗粒更易输出。东部湖区沉水植被茂密^[35],具有一定抑制底泥再悬浮的能力,而为藻型湖区的西北湖区受风影响显著^[34,55],导致沉积-再悬浮动态平衡,可使PP在局部反复积累。

3.3 太湖内部磷的转化机制

太湖的颗粒物输移与磷循环呈现出动态的“输入-沉降-再生”过程。从空间分布和泥沙中心分界线来看,悬浮颗粒物(SS)的存量呈现“西部高、东部低”的格局(图6a),与入湖河道(如城东港)的泥沙输入路径一致,表明水动力驱动的物理沉降是颗粒物分布的主控因素。然而从颗粒态磷中心分界线来看,PP的分布却是“西北高、东南低”的格局(图6b),这与微囊藻受风场驱动的迁移聚集过程相关。太湖夏季盛行的东南风使得水体表层微囊藻向西部沿岸区及北部湖湾区迁移,其聚集带动PP在西北湖区同步累积,表明微囊藻上浮聚集对PP分布的调控作用。蓝藻(微囊藻)的繁殖会大量吸收溶解态磷(DTP),形成生物源性颗粒态磷(Org-P)。这些藻类在表层水体聚集后,受风浪作用向西北湖区漂移并最终沉降,导致PP在西北湖区的富集。这一现象与Shi等^[57]的遥感研究一致,即太湖PP的长期变化与藻华分布高度相关。因此,太湖的PP存量不仅受外源颗粒物输入影响,还受内源藻类生长-沉降循环的调控,形成“物理沉降主导西北、生物过程影响全域”的磷分布模式。

太湖颗粒态磷的形态分析表明,入湖颗粒物以碎屑磷(De-P)和自身钙磷(ACa-P)为主(图7b),而出湖颗粒物中这些形态的磷显著减少(减少率40-70%),说明沉积过程以物理截留为主。然而,可交换态磷(Ex-P)和有机磷(Org-P)的减少率较低(<50%),表明其可能通过解吸或降解重新进入水体,被藻类再利用。内部的磷转化存在以下三种情况:(1)吸附-解吸附:细颗粒(10-20 μm)因比表面积大,优先吸附DTP形成Ex-P和Fe/Al-P,但在厌氧条件下(如西北湖区底泥),这些结合态磷易释放回水体^[58-60],促进藻类增殖。(2)生物利用与再生:藻类增殖将DTP转化为Org-P,而藻类衰亡后,Org-P通过微生物降解部分矿化为DTP,形成“藻-磷”循环。这一过程在夏季藻华期尤为显著,导致出湖PP占比升高(表1)。(3)沉降与再悬浮的调控:风力扰动导致西北湖区底泥再悬浮^[61],使吸附态磷(如Fe-P)重新进入水体,而东南湖区因沉水植被抑制再悬浮^[62],更多促使磷的长期埋藏。

4 结论

(1)太湖颗粒物湖内淤积量显著,磷随颗粒物滞留特征突出。2021年太湖净入湖悬浮颗粒物约40万t,对应淤泥体积约为55万m³(按照表层底泥平均密度1.46 g/cm³计算),淤积速率为0.35 mm/a;同期PP净滞留量为989 t,占全年净入湖总磷的49%。73%的入湖颗粒态磷或随颗粒物进入太湖,颗粒物沉降是太湖磷迁移的主要途径之一。

(2)太湖入、出湖颗粒物粒径及磷的赋存形态差异明显。入湖颗粒物以20-50 μm为主(约31%),而出湖颗粒物则以0.45-10 μm为主(约47%)。10-20 μm颗粒物携带了80%以上的PP,是磷向底泥迁移的主要载体。入湖PP以碎屑磷(De-P)和自身钙磷(ACa-P)为主,而出湖颗粒物中上述形态的磷显著减少(减少率分别为53%和72%);可交换态磷(Ex-P)的减少率比有机磷(Org-P)的减少率低约10%。

(3)湖体水动力过程对颗粒物和颗粒态磷的空间分布产生明显影响。太湖湖内颗粒物呈“西部高,东部低”的空间分布格局,而颗粒态磷却呈“西北高,东南低”的特征。这种差异表明泥沙的迁移与湖体的吞吐流关联性强,而颗粒态磷的迁移受到风生流的影响。

5 参考文献

- [1] Zhu W, Chen HM, Wang RC, et al. Causes of the larger algal bloom area in Lake Taihu in 2017. *J Lake Sci*, 2019, **31**(3): 621-632. [朱伟, 陈怀民, 王若辰等. 2017年太湖水华面积偏大的原因分析. *湖泊科学*, 2019, **31**(3): 621-32.]
- [2] Zhu GW, Guo CX, Kang LJ, et al. Characteristics of algal dynamics and water quality changes under the background of Lake Taihu reaching Class III water quality. *J Lake Sci*, 2025, **37**(03):705-715. [朱广伟, 国超旋, 康丽娟等. 太湖水质达III类背景下藻情与水质变化特征. *湖泊科学*, 2025, **37**(3):705-715.]

- [3] Wu D, Chen M, Shen A, et al. Spatiotemporal dynamics of 2-methylisoborneol produced by filamentous cyanobacteria and associated driving factors in Lake Taihu, China. *Harmful Algae*, 2024, **138**.
- [4] Dai QZ, Zhang K, Xu B. Analysis of water quality variation characteristics in Meiliang Bay and East Taihu Lake during 2014-2018. *China Rural Water Hydropower*, 2020, (7): 82-84. [代倩子, 张坤, 徐彬. 2014-2018年太湖梅梁湖和东太湖水质变化特征分析. *中国农村水利水电*, 2020, (07): 82-4.]
- [5] Zhu W, Cheng L, Xue ZP, et al. Variation of water exchange cycle in Lake Taihu (1986-2018) and its impact on spatial pattern of water quality. *J Lake Sci*, 2021, **33**(4): 1087-1099. [朱伟, 程林, 薛宗璞等. 太湖水体交换周期变化(1986-2018年)及对水质空间格局的影响. *湖泊科学*, 2021, **33**(4): 1087-99.]
- [6] Fan CX, Zhong JC, Zhang L, et al. Progress and prospect of environmental dredging decision-making for lake sediments. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1254-1277. [范成新, 钟继承, 张路等. 湖泊底泥环保疏浚决策研究进展与展望. *湖泊科学*, 2020, **32**(5): 1254-77.]
- [7] Liu JJ, Lu J, Zhu GW, et al. Characteristics and influencing factors of lake blackening events in Lake Taihu during 2009-2017. *J Lake Sci*, 2018, **30**(5): 1196-1205. [刘俊杰, 陆隽, 朱广伟等. 2009-2017年太湖湖泛发生特征及其影响因素. *湖泊科学*, 2018, **30**(5): 1196-205.]
- [8] Wang H, Chen HX, Xu ZA, et al. Trend analysis and causes of total phosphorus concentration changes in Lake Taihu during 2010-2017. *J Lake Sci*, 2019, **31**(4): 919-929. [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): 919-29.]
- [9] Wu HY, Jia GH, Xu B, et al. Characteristics of total phosphorus variation and driving factors in Lake Taihu since 1980. *J Lake Sci*, 2021, **33**(4): 974-991. [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): 974-91.]
- [10] Mao XW, Dai QZ, Wu HY, et al. Mass balance calculation and analysis of total phosphorus pollution load in Lake Taihu since 2007. *J Lake Sci*, 2023, **35**(5): 1594-1605. [毛新伟, 代倩子, 吴浩云等. 2007年以来太湖总磷污染负荷质量平衡计算与分析. *湖泊科学*, 2023, **35**(5): 1594-605.]
- [11] 2024 Lake Taihu Blackening Patrol and Water Quantity-Quality Analysis Report. Wuxi: Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, 2025. [2024年太湖湖泛巡查及水量水质分析报告. 无锡: 江苏省水文水资源勘测局, 2025.]
- [12] Zhu GW, Zou W, Guo CX, et al. Long-term variations of phosphorus concentration and storage in Lake Taihu (2005-2018) and implications for future phosphorus control target management. *J Lake Sci*, 2020, **32**(01): 21-35. [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**(01): 21-35.]
- [13] Zha HM, Zhu MY, Zhu GW, et al. Seasonal differences in water quality between inflow/outflow rivers and lake body of Lake Taihu. *Environ Sci*, 2018, **39**(3): 1102-1112. [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**(03): 1102-12.]
- [14] Zhu W, Hu SY, Feng GY, et al. Effects of great floods on phosphorus in shallow lakes: A case study of Lake Taihu in 2016. *J Lake Sci*, 2020, **32**(2): 325-336. [朱伟, 胡思远, 冯甘雨等. 特大洪水对浅水湖泊磷的影响: 以2016年太湖为例. *湖泊科学*, 2020, **32**(02): 325-36.]
- [15] Liu S, Wang D, Miao W, et al. Characteristics of runoff and sediment load during flood events in the Upper Yangtze River, China. *Journal of Hydrology*, 2023, **620**.
- [16] Wang H, Sun F. Variability of annual sediment load and runoff in the Yellow River for the last 100 years (1919-2018). *Science of the Total Environment*, 2021, **758**.
- [17] Puls W, Heinrich H, Mayer B. Suspended particulate matter budget for the German Bight. *Marine Pollution Bulletin*, 1997, **34**(6): 398-409.
- [18] Coynel A, Schäfer J, Hürtz J E, et al. Sampling frequency and accuracy of SPM flux estimates in two contrasted drainage basins. *Science of the Total Environment*, 2004, **330**(1-3): 233-47.
- [19] Poulter G, Launay M, Le Bescond C, et al. Combining flux monitoring and data reconstruction to establish annual budgets of suspended particulate matter, mercury and PCB in the Rhone River from Lake Geneva to the Mediterranean Sea. *Science of the Total Environment*, 2019, **658**: 457-73.
- [20] Launay M, Le Coz J, Diouf S, et al. Re-estimation of mean suspended solid delivery of the Arve River to the Rhone River. *Houille Blanche-Revue Internationale De L'Eau*, 2019, **2**(2): 89-100.
- [21] Hu CH, Pu PM. Study on sedimentation flux and organic matter decomposition rate in Wuli Bay of Lake Taihu. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, **31**(3): 327-333. [胡春华, 濮培民. 太湖五里湖沉降通量及其有机质分解率研究. *海洋与湖沼*, 2000, **31**(03): 327-33.]
- [22] Jin ZD, Zhang F, Li FC, et al. Seasonal and interannual variations of lake water properties and particulate sedimentation flux in Qinghai Lake: Insights from sediment traps. *J Earth Environ*, 2013, **4**(3): 1306-1313. [金章东, 张飞, 李福春等. 青海湖湖水性质、颗粒物沉积通量季节和年际变化——来自沉积物捕获器的研究. *地球环境学报*, 2013, **4**(3): 1306-13.]

- [23] Shi PC, Zhu GW, Yang WB, et al. Spatiotemporal distribution and sedimentation flux of suspended particulate matter in Xin'anjiang Reservoir and their nutrient effects. *Environ Sci*, 2020, **41**(5): 2137-2148. [史鹏程, 朱广伟, 杨文斌等. 新安江水库悬浮颗粒物时空分布、沉降通量及其营养盐效应. *环境科学*, 2020, **41**(5): 2137-48.]
- [24] Ji KY, Li Q, Shan BQ, et al. Characteristics of particulate components and sedimentation flux in swamp and open water areas of Baiyangdian Lake. *Acta Sci Circumstantiae*, 2022, **42**(8): 271-281. [季恺悦, 李琦, 单保庆等. 白洋淀沼泽区与开阔水域区颗粒物组分特征与沉降通量研究. *环境科学学报*, 2022, **42**(8): 271-81.]
- [25] Chen MGS, Wang MX, Yang LY. Study on the effect of pretreatment methods on total phosphorus determination in water bodies. *Environ Monit Early Warning*, 2020, **12**(2): 1-5. [陈孟高山, 王鸣轩, 杨柳燕. 前处理方法对水体总磷测定值的影响研究. *环境监控与预警*, 2020, **12**(2): 1-5.]
- [26] Li Y, Wu DN, Xue YX. Improvement of extraction methods for different phosphorus forms in sediments and their environmental geochemical significance. *Mar Environ Sci*, 1998, **17** (1): 16-21. [李悦, 乌大年, 薛永先. 沉积物中不同形态磷提取方法的改进及其环境地球化学意义. *海洋环境科学*, 1998, **17**(01): 16-21.]
- [27] Zhu GW, Qin BQ. Application of sequential chemical extraction method for phosphorus forms in sediments. *J Agro-Environ Sci*, 2003, **22**(3): 349-352. [朱广伟, 秦伯强. 沉积物中磷形态的化学连续提取法应用研究. *农业环境科学学报*, 2003, **22**(03): 349-52.]
- [28] Hou H, Zhu W, Xu XG et al. Vertical composition types of sediments and interface substances between sediment and water in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2022, **34**(3): 804-815. [侯豪, 朱伟, 许小格等. 太湖底泥垂向构成类型及底泥-水界面组成物质. *湖泊科学*, 2022, **34**(3): 804-15.]
- [29] 太湖清淤固淤试点工程实施方案. 上海: 上海市政工程建设研究总院, 2019.
- [30] Luo LC, Qin BQ, Zhu GW. Calculation of sediment accumulation and suspendable amount in Lake Taihu. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2004, **35**(6): 491-496. [罗淑葱, 秦, 朱广伟. 太湖底泥蓄积量和可悬浮量的计算. *海洋与湖沼*, 2004, **35**(6): 491-6.]
- [31] Hua ZZ, Chen Y, Wang XR. Phosphorus content and sedimentation flux in sediments of Wuxi Lake area, Lake Taihu. *J Jiangnan Univ*, 2005, **4**(5): 77-81, 89. [华兆哲, 陈, 王晓蓉. 太湖无锡湖区沉积物磷含量及其沉积通量. *江南大学学报*, 2005, **4**(5): 77-81+9.]
- [32] Wang J, Chen X, Zhu X-H, et al. Taihu Lake, lower Yangtze drainage basin: evolution, sedimentation rate and the sea level. *Geomorphology*, 2001, **41**.
- [33] Zhu JG, Hu WP, Hu CH. Distribution evolution of sedimentation rate and health assessment of siltation degree in Lake Taihu. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2010, **19**(6): 703-706. [朱金格, 胡维平, 胡春华. 太湖沉积速率分布演化及其淤积程度健康评价. *长江流域资源与环境*, 2010, **19**(06): 703-6.]
- [34] Jalil A, Li Y, Zhang K, et al. Wind-induced hydrodynamic changes impact on sediment resuspension for large, shallow Lake Taihu, China. *International Journal of Sediment Research*, 2019, **34**(3): 205-15.
- [35] Zhao K, Zhou YF, Jiang ZL, et al. Evolution of aquatic vegetation in Lake Taihu since 1960. *J Lake Sci*, 2017, **29**(2): 351-362. [赵凯, 周彦锋, 蒋兆林等. 1960年以来太湖水生植被演变. *湖泊科学*, 2017, **29**(02): 351-62.]
- [36] Xu H, Liu X, An Z, et al. Spatial pattern of modern sedimentation rate of Qinghai Lake and a preliminary estimate of the sediment flux. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(7): 621-7.
- [37] Xue B, Yao S. Recent sedimentation rates in lakes in lower Yangtze River basin. *Quaternary International*, 2011, **244**(02).
- [38] Xiong DG. Sediment sources of Poyang Lake and recent sedimentation patterns in the lake basin. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1990, **21**(4): 374-385. [熊道光. 鄱阳湖泥沙来源及湖盆近期沉积规律探讨. *海洋与湖沼*, 1990, **21**(04): 374-85.]
- [39] Ran FW, Nie XD, Wang SL, et al. Sedimentary environmental evolution characteristics indicated by grain size in Dongting Lake over the past century. *J Lake Sci*, 2023, **35**(3): 1111-1125. [冉凤维, 聂小东, 王诗兰等. 近百年来洞庭湖粒度指示的沉积环境演变特征. *湖泊科学*, 2023, **35**(03): 1111-25.]
- [40] Koren N, Klein M. Rate of sedimentation in Lake Kinneret, Israel: spatial and temporal variations. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, **25**(08).
- [41] Simon H, Kelemen S, Begy R-C. Anthropogenic influences on the sedimentation rates of lakes situated in different geographic areas. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, **173**.
- [42] Kemp A L W, Macinnis G A, Harper N S. Sedimentation Rates and a Revised Sediment Budget for Lake Erie. *Journal of Great Lakes Research*, 1977, **3**(3-4):221-233.
- [43] Kamiya K, Fukushima T, Onda Y, et al. Changes in sedimentation rates and phosphorus accumulation in shallow Japanese lakes during 30 years. *Verh. Internat. Verein. Limnol*, 2009, **30**(08):1219-1224.

- [44] Nara F W, Watanabe T, Nakamura T, et al. Radiocarbon and Stable Carbon Isotope Ratio Data from a 4.7-Mlong Sediment Core of Lake Baikal (Southern Siberia, Russia). *Radiocarbon*, 2016, **52**(03).
- [45] Piton V, Lemmin U, Bourrin F, et al. From Particles to Floccs: Revealing Where Flocculation Occurs in the Nearfield of a Negatively-Buoyant River Plume in a Large Lake (Lake Geneva). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2024, **129**(02).
- [46] Goto N, Iwata T, Akatsuka T, et al. Environmental factors which influence the sink of silica in the limnetic system of the large monomictic Lake Biwa and its watershed in Japan. *Biogeochemistry*, 2007, **84**(3): 285-95.
- [47] 邱辉. 不同气象条件下太湖底泥再悬浮和水温的模拟研究[学位论文], 南京: 河海大学, 2012.
- [48] Hu KM, Wang S, Pang Y. Study on sediment suspension-settlement rules and estimation of internal nutrient release in different regions of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2014, **26**(2): 191-199. [胡开明, 王水, 逢勇. 太湖不同湖区底泥悬浮沉降规律研究及内源释放量估算. *湖泊科学*, 2014, **26**(2): 191-9.]
- [49] Sondergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Internal phosphorus loading in shallow Danish lakes. *Hydrobiologia*, 1999, **408**: 145-52.
- [50] Chen C, Zhong JC, Shao SG et al. Comparison of internal nutrient release potential in typical dredged/control areas of northwestern Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2014, **26**(6): 829-836. [陈超, 钟继承, 邵世光等. 太湖西北部典型疏浚/对照湖区内源性营养盐释放潜力对比. *湖泊科学*, 2014, **26**(6): 829-36.]
- [51] Dong DP, Zhang TX, Zhang DY, et al. Distribution characteristics of organic phosphorus forms in sediments of lake blackening-prone areas in Lake Taihu. *Environ Sci*, 2016, **37**(11): 4194-4202. [董丹萍, 章婷曦, 张丁子等. 太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4194-202.]
- [52] Fan CX, Zhang L, Qin BQ, et al. Estimation of dynamic phosphorus release from suspended particles in Lake Taihu under wind-wave action. *Sci China Ser D: Earth Sci*, 2004, **47**:710-719. [范成新, 张路, 秦伯强等. 风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2004, **47**:710-719.]
- [53] Ji N, Liu Y, Wang S, et al. Buffering effect of suspended particulate matter on phosphorus cycling during transport from rivers to lakes. *Water Research*, 2022, **216**.
- [54] Yi Q T, Chen Q W, Shi W Q, et al. Sieved Transport and Redistribution of Bioavailable Phosphorus from Watershed with Complex River Networks to Lake. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(18): 10379-86.
- [55] Wang J, Yuan Y, Yu Z-G et al. Effect of turbulence driven by wind on sediment suspension under different submerged vegetation density in Lake Taihu. *Ecological Indicators*, 2023, **154**.
- [56] Xue ZP, Zhu W, Bai S, et al. Drift-aggregation patterns of Microcystis in Taihu Lake: Simulation based on the combined effects of wind and light. *J Lake Sci*, 2024, **36**(06): 1660-1684. [薛宗璞, 朱伟, 柏松, 等. 太湖微囊藻漂移—聚集规律——基于风与光共同作用的模拟[J]. *湖泊科学*, 2024, **36**(6):1660-1684.]
- [57] Shi K, Zhang Y, Zhang Y, et al. Understanding the long-term trend of particulate phosphorus in a cyanobacteria-dominated lake using MODIS-Aqua observations. *Science of the Total Environment*, 2020, **737**.
- [58] Tang ZA, Yang CL, Liu WQ, et al. Vertical distribution characteristics of nitrogen and phosphorus in sediments of riverine wetland in Qilu Lake. *Environ Chem*, 2025, **44**(2): 522-536. [唐中奥, 杨常亮, 刘雯清等. 杞麓湖入湖河口湿地沉积物氮磷垂向的分布特征. *环境化学*, 2025, **44**(2): 522-36.]
- [59] Zhu W, Hou H, Liu H, et al. Review of phosphorus release amount and rules from sediments in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2025, **37**(1): 14-35. [朱伟, 侯豪, 刘环等. 太湖底泥磷释放量及释放规律的研究综述. *湖泊科学*, 2025, **37**(1): 14-35.]
- [60] Huang Y, Xu C, Yang B, et al. Biogeochemistry of phosphorus species in water and sediments and sedimentary phosphorus release potential from a eutrophic estuary and adjacent bay. *Marine Environmental Research*, 2025, **208**.
- [61] Tang C, Li Y, He C, et al. Dynamic behavior of sediment resuspension and nutrients release in the shallow and wind-exposed Meiliang Bay of Lake Taihu. *Science of the Total Environment*, 2020, **708**.
- [62] Zhu M Y, Zhu G W, Nurminen L, et al. The Influence of Macrophytes on Sediment Resuspension and the Effect of Associated Nutrients in a Shallow and Large Lake (Lake Taihu, China). *Plos One*, 2015, **10**(6).