

夏季温度升高对浅水湖泊底泥-水界面处沉积物性质的影响*

刘新¹, 周鑫玥¹, 金伟², 吴向阳³, 江和龙⁴, 王春柳^{3*}

(1: 南京林业大学生态与环境学院, 江苏南京 210037)

(2: 南京高科建设发展有限公司, 江苏南京 210038)

(3: 江苏大学环境与安全工程学院, 江苏镇江 212013)

(4: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏南京 210008)

摘要: 近年来, 夏季高温气候频繁出现, 改变了浅水湖泊沉积物性质。由于界面处沉积物具有独特的结构特性, 可直接影响湖泊生态健康。结合高温前、后滆湖原位采样和室内模拟实验, 旨在探明温度对界面处沉积物结构性质的影响。首先采样结果发现高温导致湖泊沉积物密度、屈服应力降低, 促使浮泥(密度<1.25 g/cm³)的形成。其次, 模拟实验也呈现相同趋势。随着温度从25°C升高至35°C, 界面处沉积物密度($R^2=0.99$)呈指数型下降趋势, 由1.244 g/cm³降低至1.229 g/cm³。同时, 粒径分布结果表明, 温度升高导致沉积物的中值粒径从最初的17.22 μm增加至21.16 μm, 可促使沉积物颗粒物絮凝和团聚。并且, 胞外聚合物中多糖/蛋白比值升高, 也表明温度升高会导致沉积物稳定性下降。此外, 沉积物屈服应力($R^2=0.99$)与临界剪切应力($R^2=0.94$)随温度升高呈指数衰减趋势, 且温度阈值为29°C。综上, 研究表明高温会导致沉积物结构的疏松多孔性增加, 且当温度高于29°C时, 沉积物更容易发生起动、悬浮。因此, 本研究加深了温度升高对沉积物性质影响的认识, 为沉积物的修复治理提供数据支持。另外, 对浮泥的特征和再悬浮潜力有了更深入的了解。

关键词: 浅水湖泊; 温度; 沉积物; 密度; 流变特性

The Effect of Temperature Rise in Summer on Sediment Properties at the Sediment-Water Interface of Shallow Lakes

Liu Xin¹, Zhou Xinyue¹, Jin Wei², Wu Xiangyang³, Jiang Helong⁴, Wang Chunliu^{3*}

(1: College of Ecology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

(2: Nanjing Gaoke Construction Development Co. Ltd, Nanjing 210038, China)

(3: School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

(4: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: In recent years, high temperature continued to occur in summer, influencing sediment properties in shallow lakes. The sediments located at the sediment-water interface (SWI) directly impact the lakes ecological health, due to its unique structural characteristics. In order to investigate the effect of temperature on sediment structural properties, this study conducted sampling in Lake Gehu before and after high temperature, complemented by indoor simulation experiments. Firstly, sampling results

* 2024-09-24 收稿; 2024-12-16shou3 修改稿。

国家自然科学基金(52209102, U2240208)、江苏省双创博士(JSSCBS20211393)、江苏省科技创新项目(BK20220043)和江苏省“碳达峰碳中和”科技创新专项资金项目(BE2022805)联合资助。

** 通信作者: E-mail: clwang@ujs.edu.cn.

indicated that elevated temperatures induce a decline in the density and yield stress of lake sediments, promoting the formation of fluid sediments (density < 1.25 g/cm³). Secondly, the simulation experiment also showed the same trend. As the temperature rose from 25°C to 35°C, the density of sediments at the SWI displayed an exponentially decreasing trend ($R^2=0.99$) from 1.244 g/cm³ to 1.229 g/cm³. Meanwhile, the increase in temperature led an increase of the sediment median size from the initial 17.22 μm to 21.16 μm, resulting in the flocculation and aggregation of sediment particles. Additionally, increasing temperatures resulted in a higher polysaccharide/protein ratio in extracellular polymeric substances (EPSs), which decreased the stability of sediments. Rheological tests and calculation of critical shear stress showed that the yield stress ($R^2=0.99$) and critical shear stress ($R^2=0.97$) of sediments exponentially decreased with increasing temperature. Overall, this study demonstrated that high temperatures can lead a loose and porous sediment structures with a threshold at 29°C, which can cause sediment particle resuspension and suspension. Overall, this study has deepened the understanding of the impact of temperature rise on sediment properties and provided data supports for the restoration and management of sediments. And it has provided an in-depth understanding of the characteristics of fluid sediments and its potential for resuspension.

Key words: Shallow lakes; Temperature; Sediment; Density; Rheological properties

近年来，我国浅水湖泊不断面临富营养化问题，且在外部因素影响下，对经济、生态的健康发展造成了持续挑战。而在湖泊中，界面处的沉积物具有上覆水体比表面积大的特点，是有机质矿化的主要场所，也是外源物质的储存场所^[1]。因此界面处沉积物对湖泊生态系统健康起到重要作用。在水动力、微生物共同作用下，界面处的沉积物逐渐会转变为浮泥的状态^[2, 3]。浮泥的密度一般处于 1010~1250 kg/m³之间，由于其密度低，易发生再悬浮现象，引起大量沉积物颗粒进入上覆水体，致使水体浑浊、光线的穿透能力减弱，抑制植物生长^[4]；同时，沉积物颗粒会裹挟大量的氮、磷等营养物质向上层水体释放^[5, 6]，导致水体富营养化程度加剧^[7]。

在对沉积物再悬浮研究的工作中，已形成了一系列的模型公式^[8-10]，其中根据沉积物的密度、粒径分布以及水深等参数模拟的临界剪切应力值是判断沉积物再悬浮能力的重要指标。在沉积物-水界面处，施加在界面处的应力超过临界剪切应力后，沉积物颗粒开始出现再悬浮现象。同时，沉积物在被施加剪切应力下，会展现出流变特性^[11]，表现为粘弹性、剪切变稀、触变性和屈服应力^[12, 13]。而沉积物的屈服应力，普遍被认为是沉积物原有的结构被破坏的临界应力值。在沉积物流变测试中，其流变特性一般表现出“宾汉姆”模型，即施加在沉积物上的剪切速率与沉积物的剪切应力成正比，直到拐点的出现^[11]。当剪切应力超过沉积物的临界屈服应力时，会发生沉积物结构破坏、颗粒再悬浮现象^[14]。研究发现沉积物屈服应力与沉积物临界剪切应力密切相关，因此可以根据沉积物屈服应力快速、有效地反应沉积物再悬浮特征。

近年来随着气候变迁和生态环境恶化，极端气候事件的发生的频率、强度和持续时间都呈上升趋势^[15]。其中，高温现象逐渐受到重视，表现为持续的异常高温天气现象^[16, 17]。温度作为重要的环境因子，在湖泊生态研究中一直受到广泛关注。温度影响着沉积物中微生物的活性，与甲烷等温室气体的形成密切相关^[7, 18]。并且研究发现，沉积物中气体的生成会重塑沉积物结构特性^[19]。同时，沉积物中微生物代谢形成的生物膜主要以胞外聚合物（extracellular polymeric substances, EPSs）的形式存在，它们可以粘附在沉积物颗粒上，影响沉积物颗粒的絮凝和团聚。蛋白质和多糖是 EPSs 的主要成分，高多糖/蛋白质比率会延迟沉积物固结，影响沉积物稳定性^[20]。随着沉积物的结构性质的改变，湖泊沉积物颗粒再悬浮能力也会受到影响。因此，温度的变化会影响湖泊沉积物的结构性质，结合野外采样及室内模拟开展温度变化对沉积物理化性质及再悬浮能力影响的研究十分必要。

本研究为了探究夏季温度变化对浅水湖泊沉积物性质尤其是其再悬浮能力的影响，在高温前、后对滆湖沉积物进行柱状样采集、分析。同时结合室内模拟，进行温度为单一变量的梯度模拟实验。根据以上实验来探究（1）温度变化对界面处沉积物理化性质的影响；（2）明确温度与沉积物再悬浮能力的关系。本研究结果可加深温度对浅水湖泊沉积物影响的认识，并为沉积物治理提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 涠湖原位采样实验

滆湖 ($31^{\circ}29' \sim 31^{\circ}42'N$, $119^{\circ}44' \sim 119^{\circ}53'E$)，位于太湖流域西部，横跨江苏省常州市武进区和无锡宜兴市，湖泊总面积为 $166.7 km^2$ ，平均水深 $1.2 m$ ，为典型的浅水湖泊，是长江三角洲太湖流域湖泊群的重要组成部分^[21]。根据中国气象局的数据发现，2022 年 6 到 8 月期间，常州滆湖经历了一段持续的高温天气。在 6 月前，滆湖平均气温维持在 $17 \sim 26^{\circ}C$ ，在 6~8 月，滆湖平均气温维持在 $24 \sim 35^{\circ}C$ ，其中 $30^{\circ}C$ 以上的天气达 62 天。本实验在滆湖共布设 13 个采样点（图 1 所示），根据地理位置分别为北部湖区（N1、N2、N3、N4），中部湖区（M1、M2、M3、M4、M5）以及南部湖区（S1、S2、S3、S4）。

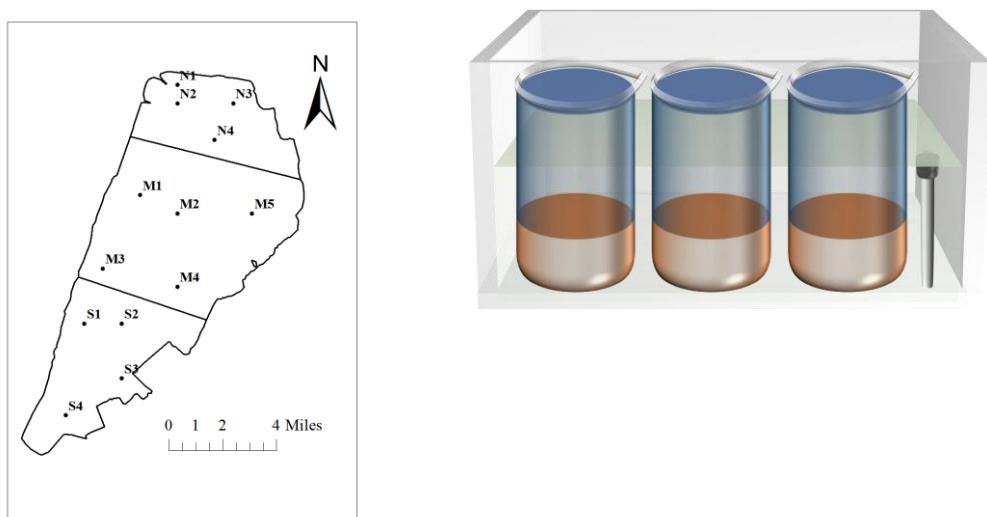


图 1 涠湖采样点分布图及模拟实验装置图

Fig. 1 Sampling point distribution of Lake Gehu and the device diagram of the simulation experiment

高温前 6 月 12 日和高温后 8 月 20 日，分别在滆湖采样点利用直径为 $8.5 cm \times 60 cm$ 柱状有机玻璃采集沉积物样，沉积物高度约为 $40 cm$ ，同时采集湖水。沉积物样上部保持原位水样覆盖，两端用橡皮塞塞紧，垂直放置。采集后的样品在数小时内运送到实验室进行处理。水样放入 $-20^{\circ}C$ 冷冻，贮存备用。利用上顶法^[22]取柱状沉积物界面处 $0 \sim 2 cm$ 湿样测定其密度，采集后的沉积物样品需在冷藏环境下保存并尽快分析以避免理化性质发生改变。鲜泥留样后，剩下样品经冷冻干燥机进行冷冻干燥处理，干燥过的沉积物样品经玛瑙研钵研磨处理，过 200 目筛，贮存备用。

1.2 室内模拟实验设计

为了模拟温度变化对沉积物结构性质的影响，结合原位实际情况，在室内进行了不同温度下沉积物培养的模拟实验。在滆湖采集相对未受干扰的沉积物样品 ($0 \sim 10 cm$)，在几个小时内运回实验室。混匀后沉积物样品通过标准 $2 mm$ 筛网筛分，去除沉积物中较大的动植物、贝壳碎片、石粒等。在此之后，沉积物样品在使用前至少静置一天，并在去除上覆水后进一步混匀，保证样品的均质性。

为了更好模拟富营养化浅水湖泊沉积物，沉积物样品与湿蓝藻以 0.15% 的重量百分比进行充分混合。蓝藻使用前 $4000 rpm$ 离心 $15 min$ ，含水率为 96.0% 。然后将混匀后的沉积物加入 $250 mL$ 烧杯中，沉积物高度为 $4 cm$ ，烧杯底部沉积物采用锡箔纸避光处理，上部用 $200 mL$ 超纯水填充，每组设置 3 个重复样品。每组装置分别加入加热棒，首先于 $25^{\circ}C$ 下培养 $15d$ ，在第 16 天改变装置温度，设置 5 个温度梯度，分别为 $25^{\circ}C$ 、 $27^{\circ}C$ 、 $29^{\circ}C$ 、 $32^{\circ}C$ 和 $35^{\circ}C$ ，继续培养 $15d$ 。实验期间，考虑到上覆水的持续蒸发，每天添加以保持水位。试验结束后，获取界面处 $0 \sim 2 cm$ 沉积物样品，进行物理指标测定，剩余样品经冷冻干燥处理后，研磨过 200 筛，贮存备用。

1.3 理化指标的测定

1.3.1 物理指标 沉积物的密度，将沉积物放入坩埚中，称取其质量，计算沉积物质量与坩埚体积的百分比；含水率，在105℃下干燥直到恒定重量，沉积物的失重与初始沉积物重量的百分比；堆积密度，是给定体积沉积物中干固体的质量。

1.3.2 有机碳 总有机碳（total organic carbon, TOC）的测定采用重铬酸钾—油浴法^[13]；易降解有机碳（labile pool carbon, LP-C）的测定，（1）易降解有机碳 I（LPI-C）：称取0.5 g冻干过筛的沉积物样品于50 mL离心管中，加入20mL的2.5 mol/L H₂SO₄，在105℃下静置30 min，以4000 rpm离心15 min，保存上清液，残留物用20 mL蒸馏水清洗，离心。合并两次离心得到的上清液，采用元素分析仪（岛津TOC-Vcph）测定有机碳含量；（2）易降解有机碳 II（LPII-C，主要为纤维素类物质）：在（1）中的残留物中加入2 mL 13 mol/L H₂SO₄室温过夜，持续振荡水解，用蒸馏水稀释酸度至1 mol/L，105℃水解3 h，每隔0.5 h摇晃一次，以4000 rpm离心15 min，保存上清液，残留物用20 mL蒸馏水清洗，离心。合并两次离心得到的上清液，采用元素分析仪测定有机碳含量；难降解有机碳（recalcitrant pool carbon, RP-C）：将（2）中的残留物用蒸馏水清洗两次，105℃烘干，采用元素分析仪测定有机碳含量。本试验将LPI-C和LPII-C含量统称为易降解有机碳（LP-C）。

1.3.3 沉积物中EPSs测定 沉积物中的EPSs组分由两部分组成：胶体态EPSs（colloid-EPSs, C-EPSs）和结合态EPSs（bound-EPSs, B-EPSs）。取2 g新鲜的沉积物中加入5 mL去离子水，混匀震荡30 min，在16000 r·min⁻¹下高速离心20 min，上层清液为C-EPSs。在离心得到的沉积物中继续加入5 mL的10 mmol/L乙二胺四乙酸（ethylene diamine tetraacetic acid, EDTA）溶液，混匀后在室温下培养5 h，同样在16000 r·min⁻¹下离心30 min，取上清液得到B-EPSs。分别采用考马斯亮蓝法和硫酸-苯酚法对EPSs中的蛋白质和多糖进行分析^[13]。

1.3.4 沉积物粒径 取界面处沉积物后，使用粒度分析仪（英国马尔文MastSizer 2000）分析表面沉积物粒度分布，这是一种自动沉积平衡仪，用于确定沉积物的粒度分布和中值粒径（D₅₀）。滆湖高温前后、第15d和第30d的沉积物在进行粒度分布分析前均未进行冻干或分解。将样品与蒸馏水混合在样品浴中，进行粒度测量，平行样品为3个。

1.3.5 沉积物流变特性 实验使用流变仪（Anton Paar, MCR 302）在25℃下测量沉积物样品的屈服应力（τ_y）。沉积物流变试验分为旋转模式下的黏度流动曲线试验和振荡模式下的扫幅试验。实验结束后，立即采集沉积物样品，并将其放入流变仪的量杯中，平衡60 s后进行测试。在测试程序中，首先，剪切速率设置为0.01 s⁻¹~100 s⁻¹，以对数模式变化，上限时间为1 min，其次静息1 min，然后在额外1 min内减速至0。数据点采集设置为稳态采集模式，每个样本采集31个数据点。输出结果为剪切过程中沉积物的剪应力和粘度变化。

1.4 沉积物组成计算

沉积物基质由沙石和有机质（organic matter, OM）、水和空气组成，沉积物组分计算模型是将单位体积中固、液、气的体积百分比占比设定为ε₁、ε₂和ε₃。结合方程（1）~（3）计算出每种组分的体积占比^[23]。

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 1 \quad (1)$$

$$\frac{\varepsilon_2 \times \rho}{\varepsilon_2 \times \rho + \varepsilon_1 \times \rho_s} = \omega \quad (2)$$

$$\varepsilon_1 \times \rho_s = \gamma_0 \quad (3)$$

式中：ρ为水的密度，为1000 kg/m³；ρ_s是沉积物的密度，为2650 kg/m³；ω为含水量；γ₀为沉积物的干体积密度。

1.5 沉积物临界剪应力的计算

本实验根据Shields方法计算了沉积物的临界剪切应力，即沉积物在遇到外界切应力后开始运动的临界大小^[9]。

$$\tau_{cr} = \theta(\rho_s - \rho)gD_{50} \quad (4)$$

$$\log \theta = 0.041(\log Y)^2 - 0.356 \log Y - 0.977 \quad Y < 100 \quad (5)$$

$$\log \theta = 0.132 \log Y - 1.804 \quad 100 \leq Y \leq 3000 \quad (6)$$

$$\theta = 0.045 \quad Y < 3000 \quad (7)$$

$$Y = \left[\frac{(\rho_s - \rho) g D_{50}^2}{\rho v^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中, ρ_s 和 ρ 为沉积物和水密度; g 为重力加速度; θ 是常数, 没有单位; D_{50} 为泥沙中值粒径; V 是粘性力的综合参数 ($=1.05 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)。

1.6 数据分析与处理

利用 Excel 软件进行平均值和标准差的计算; 数据图的绘制使用 Origin 2022 64Bit 软件; 采样点分布及分布面积使用 ArcGIS Map10.7 软件绘制。

2 结果

2.1 涠湖高温前后界面处沉积物性质变化

2.1.1 沉积物的密度、流变变化 高温前后湏湖界面处沉积物密度的空间变化均为北高南低, 东高西低, 湖心和南部湖区的密度整体较低 (图 2a)。高温前湏湖 13 个采样点的平均密度为 1.252 g/cm^3 , 高温后基本所有采样点的密度均呈降低趋势, 平均密度为 1.211 g/cm^3 (图 2a)。经计算, 全湖浮泥的占比由高温前的 48.12% 增加到 90.60%, 即浮泥面积从 80.22 km^2 增加至 151.03 km^2 。其中, 高温前后受外部干扰较小的 M2 湖心区域的密度都是全湖最低值, 分别为 1.151 g/cm^3 和 1.120 g/cm^3 , N4 的密度为高, 分别为 1.330 g/cm^3 和 1.282 g/cm^3 。

沉积物的流变试验反映了沉积物结构状态。湏湖高温前后界面处沉积物的流变特性的结果如图 2 (b) 所示。高温前湏湖 13 个点位界面处沉积物的屈服应力处于 $46.30\text{--}118.20 \text{ Pa}$ 之间, 平均屈服应力为 81.13 Pa , 空间分布特征为北高南低, 东高西低。受外部干扰较小的 M2 湖心点的屈服应力值最小, 为 46.30 Pa , 中西部 M5 点位的屈服应力值最大, 为 118.20 Pa 。经过持续高温后, 全湖界面处沉积物的屈服应力显著降低, 降低幅度为 2.18%~41.84%。界面处沉积物的屈服应力最高点是 N4, 为 99.82 Pa , 最低点是 S3, 为 39.35 Pa 。

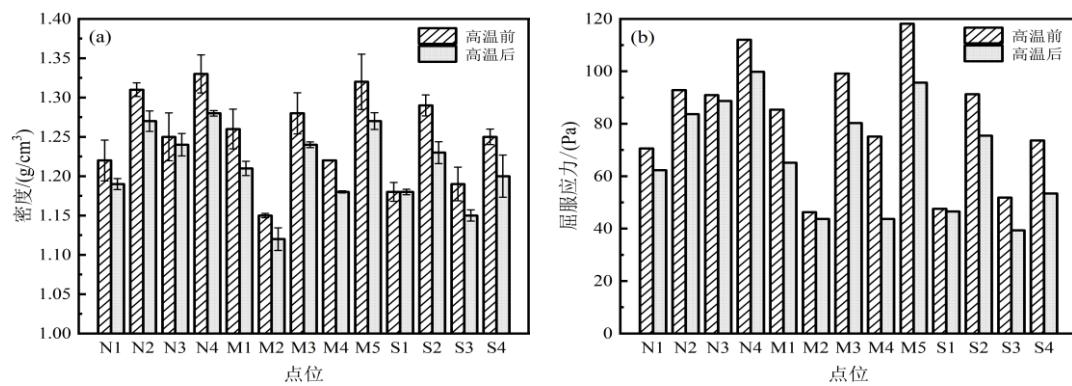


图 2 涠湖界面处沉积物高温前与后密度 (a)、流变变化(b)

Fig. 2 The density(a) and rheological changes(b) of sediments at the SWI of Lake Gehu before and after high temperature

2.1.2 沉积物的粒径分布 通过絮凝作用, 沉积物中的初级颗粒发育成分级结构, 即黏土 ($0\text{--}4 \mu\text{m}$)、粉砂 ($4\text{--}64 \mu\text{m}$)、砂粒 ($64\text{--}2000 \mu\text{m}$)^[24]。由图 3 (a) 可以看出, 涠湖中部沉积物的中值粒径 (D_{50}) 偏大,

而滆湖南、北湖区的 D_{50} 偏小。高温后，全湖 13 个点位的 D_{50} 由 18.65~29.61 μm 增加至 22.69~35.7 μm ，粉砂和砂粒百分比增加，黏土百分比降低。

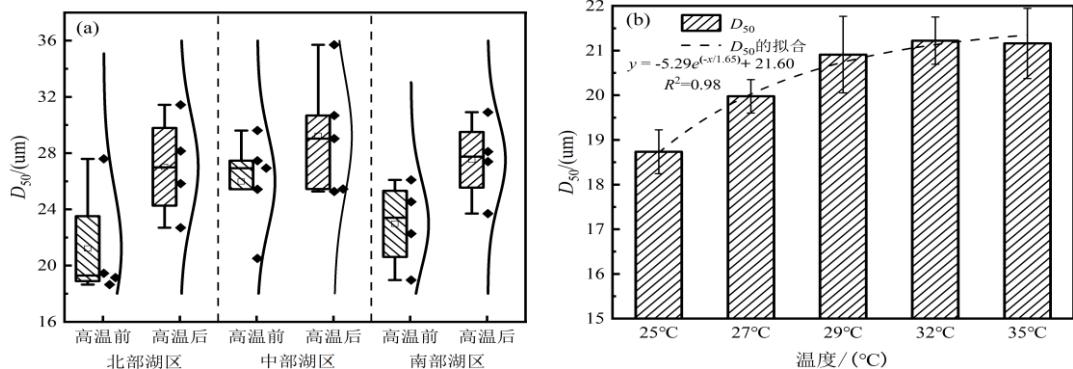


图 3 滆湖原位沉积物中值粒径 (a) 和室内模拟实验沉积物中值粒径 (b) 变化趋势图

Fig. 3 Trends of the median grain size in the in situ sediments of Gehu Lake (a) and the median grain size in the sediments from laboratory simulation experiments (b)

2.2 温度梯度模拟实验

2.2.1 界面处沉积物密度及结构组分变化 30d 后，不同温度下的沉积物密度均较第 15d 沉积物密度 1.271 g/cm^3 有明显下降。如图 4 所示，界面处沉积物的密度随着温度的升高呈指数型下降趋势 ($R^2=0.99$)，从 1.244 g/cm^3 降低至 1.229 g/cm^3 ，且 29°C 后趋于稳定。具体来说，第 15d 界面处沉积物密度为 1.271 g/cm^3 ，第 30d 25、27、29、32、35°C 下界面处沉积物的密度分别为 1.244、1.236、1.232、1.230、1.229 g/cm^3 。

根据沉积物的堆积密度、含水率计算沉积物中固体、液体、气体组分的体积占比。结果发现，30d 室内模拟实验后，沉积物中固体、液体和气体的体积占比表现出差异性。随着温度的升高，沉积物中液体体积从 74.85% 升至 78.7%，固体体积从 18.76% 降至 16.71%，气体体积从 6.38% 降至 4.59%（图 5）。

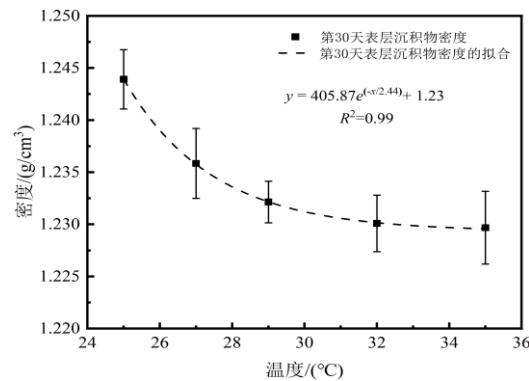


图 4 不同温度条件下，30d 后界面处沉积物密度变化趋势

Fig. 4 Variation trend of sediment density at the interface after 30 days under different temperature conditions

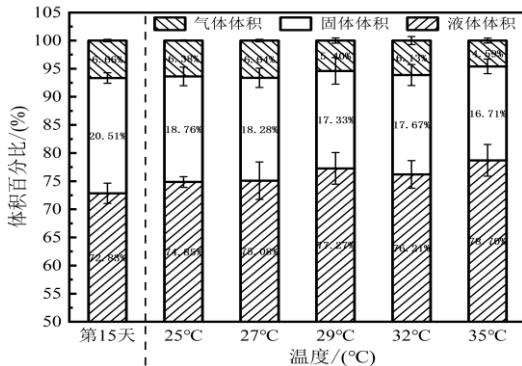


图 5 不同温度情况下，界面处沉积物固、液、气体积百分比变化

Fig. 5 The variation in the percentage of solid, liquid, and gas volumes in sediments at the SWI under different temperature conditions

2.2.2 界面处沉积物有机质及粒径分布 30d 后，测定了界面处沉积物中有机质组分的变化，主要分为易降解有机质 (LPI-C) 和难降解有机质 (RP-C)。如表 1 所示，25°C 下培养 15d 后的沉积物中 LPI-C、LPII-C 和 RP-C 的质量分数分别为 1.70、4.03 和 14.55 mg/g，RP 的质量分数约为 LP 的 2.5 倍，说明沉积物中多糖和纤维素类物质较少，主要为难降解有机质。30d 后，随温度的升高，总有机质从 19.81 mg/g 降至 18.85 mg/g，LPI-C、LPII-C、RP-C 的质量分数均有所降低，其中 RP-C 的含量降低了 4.82%。

在不同温度作用下，由于沉积物中微生物降解有机质，沉积物的粒径分布会发生变化。如图 3 (b) 所示，30d 后，界面处沉积物的 D_{50} 随着温度呈增大趋势，从最初的的 17.22 μm 增加至 21.16 μm ，且 29°C 后趋于稳定。同时，随着温度的升高，30d 后絮状物的百分比降低，大絮凝体的百分比增加。第 30d，粒径处于 0~4 μm 颗粒的占比随温度的升高从 7.48% 降低到 6.09%，粉砂和砂粒的占比升高 (表 2)。

表 1 不同温度情况下，30d 后界面处沉积物的基本理化性质

Tab.1 Basic physicochemical properties of sediments at the interface after 30 days at different temperatures

温度	含水率 / (%)	堆积密度 / (g/cm^3)	LPI-C / (mg/g)	LPII-C / (mg/g)	RP-C / (mg/g)	TOC / (mg/g)
25°C	60.09% \pm 0.024	0.50 \pm 0.049	1.68 \pm 0.17	4.01 \pm 0.36	14.12 \pm 0.19	19.81 \pm 0.00
27°C	60.78% \pm 0.015	0.48 \pm 0.014	1.46 \pm 0.10	4.02 \pm 0.07	14.33 \pm 0.03	19.81 \pm 0.45
29°C	62.72% \pm 0.004	0.46 \pm 0.002	1.44 \pm 0.04	4.07 \pm 0.39	13.66 \pm 0.35	19.17 \pm 0.45
32°C	61.94% \pm 0.012	0.47 \pm 0.018	1.39 \pm 0.03	3.59 \pm 0.34	13.06 \pm 0.37	18.04 \pm 0.68
35°C	63.99% \pm 0.013	0.44 \pm 0.021	1.42 \pm 0.03	3.99 \pm 0.05	13.44 \pm 0.07	18.85 \pm 0.91

表 2 不同温度情况下，30d 后界面处沉积物的粒径分布

Tab.2 Particle size distribution of sediment at the SWI after 30 days under different temperature conditions

温度	0~4 μm / (%)	4~64 μm / (%)	> 64 μm / (%)
25°C	7.48 \pm 0.17	79.38 \pm 1.45	13.14 \pm 0.78
27°C	6.43 \pm 0.22	76.56 \pm 1.38	17.01 \pm 0.80
29°C	6.13 \pm 0.11	77.93 \pm 0.67	15.93 \pm 0.12
32°C	6.66 \pm 0.64	76.75 \pm 0.58	16.59 \pm 0.87
35°C	6.09 \pm 0.08	76.39 \pm 0.71	17.11 \pm 0.25

2.2.3 界面处沉积物中胞外聚合物的变化 随着温度的升高，EPSs 中多糖和蛋白含量均呈下降趋势，并在 29°C 后趋于稳定 (图 6)，可能是由于碳源含量的下降所导致的。第 15d 的多糖和蛋白含量分别为 168.45

$\mu\text{g/g}$ 和 $137.35 \mu\text{g/g}$, 经 15d 持续高温后, 在 $25\sim35^\circ\text{C}$ 下, 多糖分别降低 6.46 、 16.65 、 20.34 、 18.92 和 $24.12 \mu\text{g/g}$, 蛋白分别降低 11.53 、 22.88 、 30.72 、 26.94 和 $36.39 \mu\text{g/g}$ 。由此可见, 温度的升高抑制了 EPSs 的产生。此外, 第 30d $25\sim35^\circ\text{C}$ 下沉积物中 EPSs 的多糖/蛋白比值分别为 1.29 、 1.33 、 1.39 、 1.35 和 1.43 , 第 15d 为 1.23 (图 6c), 由此可见多糖与蛋白的比值随温度升高而增加。

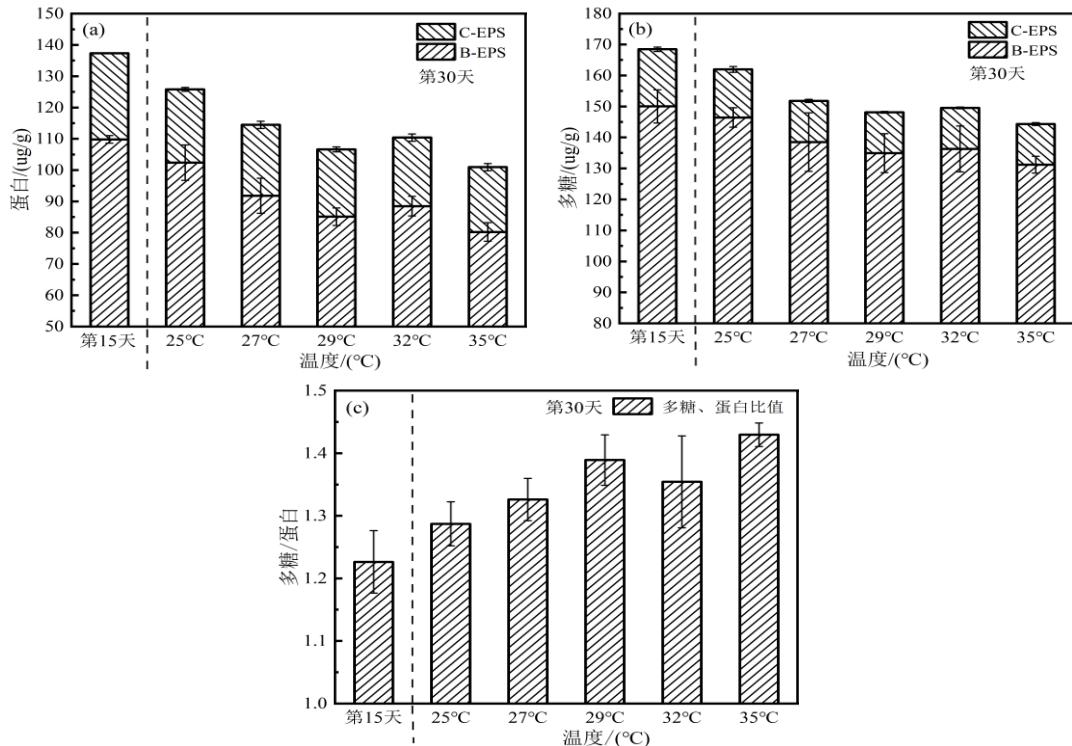


图 6 不同温度情况下, 界面处沉积物中胞外聚合物浓度变化 (a:EPS 中蛋白的变化; b:EPS 中多糖的变化; c:多糖与蛋白的比值)

Fig. 6 Variations in extracellular polymeric substances concentrations in sediments at the SWI under different temperature conditions (a: changes in proteins within the EPSs; b: changes in polysaccharides within the EPSs; c: the ratio of polysaccharides to proteins)

2.2.4 界面处沉积物流变及临界剪切应力变化 进一步的流变实验中 (图 7) 发现, 第 30d 界面处沉积物的屈服应力与温度呈现指数型下降趋势 ($R^2=0.99$)。第 15d 界面处沉积物的屈服应力为 446.04 Pa , 经 15d 持续高温后, 导致界面处沉积物的屈服应力显著降低了 $7.30\% \sim 46.78\%$ 。特别是在 35°C 下, 沉积物的屈服应力明显低于第 15d, 降低至 237.39 Pa 。由实验中屈服应力的变化表明, 持续的高温导致沉积物结构不稳定。而且, 在 25 、 27 、 29°C 下沉积物的屈服应力分别为 413.5 、 303.46 、 250.27 Pa , 在 32 、 35°C 下的屈服应力为 238.78 和 237.39 Pa 。由此可见当温度低于 29°C 时, 沉积物的屈服应力变化迅速, 当温度超过 29°C 后, 沉积物屈服应力的降低减慢并逐渐达到平衡值。

沉积物最初具有塑性流体的流变特性, 剪切速率与剪切应力成正比, 直到出现一个临界剪切应力点, 即破坏其结构的临界剪切应力。根据公式 (4) ~ (8) 计算沉积物的临界剪切应力值 (图 7b)。随着温度的增加, 第 30d 界面处沉积物的临界剪切应力也呈与屈服应力和粘度试验相似的指数型下降趋势 ($R^2=0.98$)。

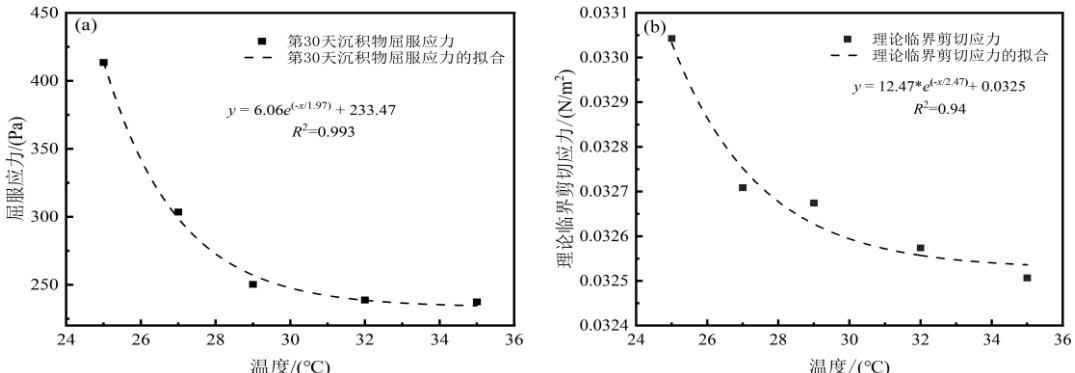


图 7 不同温度情况下, 30d 后界面处沉积物的屈服应力 (a) 及临界剪切应力 (b) 变化趋势

Fig. 7 Trends in the yield stress (a) and critical shear stress (b) of sediments at the SWI after 30 days under different temperature conditions

3 讨论

3.1 漏湖界面处沉积物密度、屈服应力的空间分布特征及性质变化

漏湖沉积物密度从北到南存在空间差异性, 呈现出了不同性质特征。其中北部湖区沉积物密度较高, 可能是由于该区域有频繁的人为活动, 如渔业养殖、建筑围堰等^[25], 且北侧近年来经历了底泥疏浚、开发利用等。北部湖区 N2 临近扁担河和夏溪河入湖口^[25], 中部湖区 M1、M3 点位处于北干河入湖河道两侧, 入湖河道对界面处沉积物冲刷作用强烈, 密度较大。湖心区域 M2 沉积物受人为影响较小, 中部区域 M4 为漕桥河流出湖口^[26], 界面处沉积物存在絮凝沉降的现象, 更疏松、偏软, 因此中部沉积物密度较低。南部湖区由于水生植被覆盖度高, 沉积物中有机质含量高^[21], 且夏季温度高, 微生物活动剧烈, 有利于低密度的浮泥形成。另外漏湖夏季受东南季风的影响^[27], 造成浅水区域底部沉积物扰动, 发生再悬浮并裹挟至湖泊西北岸, 导致漏湖西北区域沉积物密度整体偏高。有研究发现^[21], 从黏土含量的空间分布来看, 北部湖区最高, 中部和南部区别不大。由于黏土 ($0\sim4 \mu\text{m}$) 粒径小, 导致北部湖区的中值粒径低于中部和南部湖区 (图 3a)。此外, 沉积物密度是影响沉积物屈服应力的关键要素^[13], 漏湖表层沉积物屈服应力空间分布特征为北高南低, 与全湖沉积物密度分布规律一致。其中, 南部湖区大量植物残体有机质堆积、降解会导致沉积物密度和屈服降低^[13]。北部湖区沉积物固体组分含量要大于中、南部, 且黏土含量、密度偏大 (图 2), 致使北部湖区沉积物屈服应力偏大。在高温后, 沉积物密度在三个区域均出现了下降的趋势 (图 2), 颗粒物平均中值粒径增大 (图 3a) 的现象。同时, 高温后界面处沉积物的屈服应力与高温前相比均有所下降 (图 2), 说明高温导致沉积物稳定性降低。

3.2 界面处沉积物密度及组分变化

本研究表明, 温度升高会促使浮泥形成, 导致沉积物易发生起动再悬浮现象, 且阈值出现在 29°C 。在富营养化浅水湖泊中, 位于界面处的沉积物是微生物代谢活动频繁且剧烈的场所^[28]。局部湖区蓝藻水华生物质会沉降、堆积在沉积物-水界面处, 影响微生物代谢, 进而改变沉积物结构特征^[29]。已有研究发现, 在界面处微生物的快速消耗有机质会产生大量不易溶于水的甲烷、二氧化碳气体^[30]。开始阶段沉积物会随着气体体积的增加而发生拉伸断裂^[31], 后一旦超过沉积物的自身的约束力后, 气体会通过鼓泡的方式从沉积物中排出^[32], 此过程会重塑沉积物结构。结合图 5 发现, 温度的升高导致沉积物中气体组分

百分比占比下降，且气体的释放加速了孔隙水的交换，使得沉积物含水率升高（表 1），密度也呈指数型趋势下降 ($R^2=0.99$)（图 4），降低了界面处沉积物的稳定性^[33]。进一步分析发现，当温度大于 29°C 后，沉积物密度的变化趋于稳定，这表明温度阈值为 29°C，一旦温度达到或超过 29°C，沉积物密度大大降低，易形成浮泥。

3.3 界面处沉积物 EPSs 组分和粒度变化

在沉积物中，微生物降解淀粉、脂质和蛋白质等有机物质的过程，会产生大量胞外分泌物。它们附着在沉积物颗粒上，形成生物膜。而生物膜主要以 EPSs 的形式存在，它们影响沉积物颗粒的絮凝、团聚^[34, 35]。图 6 结果表明，随着温度升高，EPSs 的产生量减少，导致沉积物结构的稳定性变弱。EPSs 中的蛋白质和多糖是其主要成分^[36]，其中蛋白质主要由促进絮凝的疏水氨基酸组成，而多糖具有促进亲水性的亲水基团。研究发现多糖/蛋白质的比值与泥沙固结速度呈负相关，比值的上升会延迟沉积物的固结^[20]，促进浮泥的形成。实验数据显示，随着温度的升高，多糖/蛋白比值呈升高趋势（图 6c），这表明温度升高促进浮泥的形成，会降低沉积物的稳定性。在 EPSs 的作用下，浮泥中大粒径的沉积物颗粒物主要以絮凝体的复合形式存在^[37]。沉积物中的固体组分主要是以初级和次级矿物颗粒以及有机成分组成的混合物^[38]。有研究表明，0~4 μm 的黏土主要由初级颗粒和有机质构成^[39]。随着温度的升高，不断升高的多糖/蛋白使黏土组分占比降低，团聚体增多，沉积物的 D_{50} 值升高（图 3b）。这种大尺寸的絮凝团聚体疏松多孔，不利于沉积物的稳定。在水动力的作用下，这些松散和脆弱结构的团聚体会分解成更小的初级颗粒，造成沉积物起悬^[40-42]，影响湖泊生态环境健康。

3.4 界面处沉积物流变性质变化

在对沉积物结构稳定性研究中，流变测试的屈服应力是沉积物对流动、变形和结构变化的阻力^[23]，可作为黏性沉积物侵蚀悬浮的指标参数^[43]。高温使沉积物的密度降低、含水率上升，进而屈服应力随温度的升高呈指数型下降（图 7a）^[44]。本实验中，流变实验中的屈服应力大于计算值，这是因为屈服应力是表示沉积物从固态到液态的屈服力^[45]，而临界剪切应力表示沉积物颗粒物在切应力作用下，起动再悬浮的临界值。因此，研究发现温度的升高减小了沉积物的屈服应力，使得沉积物易发生再悬浮。

不同于沉积物屈服应力，沉积物临界剪应力值可以直接指示沉积物颗粒的起悬能力^[46]。一旦河床所受到的剪切应力超过沉积物自身的临界值，沉积物颗粒起动、悬浮现象出现^[44, 47]。因此，在考虑浅湖泥沙再悬浮时，界面处沉积物临界剪应力值是一个重要指标。研究发现造成湖泊沉积物再悬浮的临界剪切应力一般处于 0.01~0.1 N/m² 之间^[48, 49]，例如秦伯强等^[50]通过野外观测与模拟发现位于太湖湖湾区域的沉积物再悬浮所需的临界剪切应力在 0.03~0.04 N/m² 之间。本实验研究计算模拟出的临界剪切应力值处于该范围内，在 0.032~0.034 N/m² 之间，并且发现随着温度的升高，沉积物理论临界剪切应力值呈指数型下降趋势（图 7b）。这是由于温度升高，形成的 EPSs 促使不稳定的絮团状颗粒形成，进而界面处沉积物易被破坏，发生再悬浮。因此，温度的升高会导致沉积物稳定性降低。进一步分析发现，当温度超过 29°C 后，临界剪切应力趋于稳定，表明温度阈值为 29°C。位于太湖流域的浅水湖泊四季的平均气温为 15°C~17°C，极端最高气温为 41.2°C，极端最低气温为 -17.0°C^[51]。且冬季太湖流域沉积物中存在大量越冬蓝藻^[19]，导致沉积物有机质含量提升，接着进入春、夏季节后，温度升高使得易降解有机质分解，沉积物结构松散，沉积物颗粒易发生再悬浮。沉积物再悬浮后，上覆水中悬浮颗粒大量增加，降低水体透明度^[4]。同时再悬浮引起的内源释放是湖泊富营养化的重要原因^[7]。因此，考虑到再悬浮现象对湖泊生态

环境的危害，高温对沉积物结构特征和水生生态系统污染物释放的影响需要综合研究。在对浅水湖泊污染沉积物进行修复治理的时候，需结合温度变化因素对区域沉积物进行修复治理。

4 结论

本文通过原位采样分析和室内温度梯度模拟实验，以滆湖沉积物为研究对象，研究高温前、后温度对界面处沉积物结构性质的影响。研究发现，温度升高后滆湖界面处沉积物的密度发生明显下降，全湖浮泥含量增多，同时沉积物的屈服应力呈现下降趋势。室内模拟实验中，30d后的沉积物密度随着温度的升高呈指数下降趋势 ($R^2=0.99$)，均小于 1.25 g/cm^3 ，且沉积物颗粒形成团聚体，促进浮泥生成，并降低沉积物稳定性。同时，随着温度升高，EPSs 中多糖和蛋白的含量均下降，且多糖/蛋白的比值增加，有利于浮泥的形成。此外，界面处沉积物的屈服应力 ($R^2=0.99$) 和临界剪切应力值 ($R^2=0.94$) 均出现指型下降趋势，且当温度超过 29°C 时，均达到稳定的低值，此时沉积物容易出现再悬浮现象，影响湖泊生态健康。综上，当温度超过 29°C 时，富营养化湖泊界面处沉积物物理结构和性质的变化会导致其临界剪应力大大减弱，从而引发一系列泥沙侵蚀和再悬浮等环境问题。本研究有助于了解浅水湖泊沉积物对夏季温度变化的响应，对浮泥的性质特征和再悬浮潜力有了更深入的了解，并对沉积物治理提供数据支持。

5 参考文献

- [1] Song N, Yan Z, Cai H, et al.. Effect of temperature on submerged macrophyte litter decomposition within sediments from a large shallow and subtropical freshwater lake. *Hydrobiologia*. 2013, **714**(1): 131-144. DOI: 10.1007/s10750-013-1529-2.
- [2] Azhikodan G, Yokoyama K. Erosion and sedimentation pattern of fine sediments and its physical characteristics in a macrotidal estuary. *Science of The Total Environment*. 2021, **753**: 142025. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142025.
- [3] Deng SY. Summary of Study on Fluid Mud Movement. Yellow River, 2005(09): 21-23. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2005.09.00.
[邓绍云. 浮泥运动研究综述. 人民黄河. 2005(09): 21-23.]
- [4] Jin H, van Leeuwen C H A, Van de Waal D B, et al.. Impacts of sediment resuspension on phytoplankton biomass production and trophic transfer: Implications for shallow lake restoration. *Science of The Total Environment*. 2022, **808**: 152156. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152156.
- [5] Shen X, Li W, Fan B, et al.. Sediment resuspension causes horizontal variations in the distributions of phosphorus (P) and P-inactivating materials with differing P immobilization in different sediment planes. *Water Research*. 2023, **243**: 120327. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120327.
- [6] Wang J, Chai J, Xu R, et al.. The effects of wind-wave disturbances on sediment resuspension and phosphate release in Lake Chao. *Science of The Total Environment*. 2024, **912**: 169254. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169254.
- [7] Shinohara R, Tsuchiya K, Kohzu A. Warming of water temperature in spring and nutrient release from sediment in a shallow eutrophic lake. *Journal of Water and Climate Change*. 2021, **12**(7): 3187-3199. DOI: 10.2166/wcc.2021.145.
- [8] Tran D, Strom K. Floc sizes and resuspension rates from fresh deposits: Influences of suspended sediment concentration, turbulence, and deposition time. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2019, **229**: 106397. DOI: 10.1016/j.ecss.2019.106397.
- [9] Li M Z, Amos C L. SEDTRANS96: the upgraded and better calibrated sediment-transport model for continental shelves. *Computers*

-
- & Geosciences. 2001, **27**(6): 619-645. DOI: 10.1016/S0098-3004(00)00120-5.
- [10] Valipour R, Boegman L, Bouffard D, et al.. Sediment resuspension mechanisms and their contributions to high-turbidity events in a large lake. *Limnology and Oceanography*. 2017, **62**(3): 1045-1065. DOI: 10.1002/lno.10485.
- [11] Shakeel A, Kirichek A, Chassagne C. Yield stress measurements of mud sediments using different rheological methods and geometries: An evidence of two-step yielding. *Marine Geology*. 2020, **427**: 106247. DOI: 10.1016/j.margeo.2020.106247.
- [12] Shakeel A, Kirichek A, Chassagne C. Rheological analysis of mud from Port of Hamburg, Germany. *Journal of Soils and Sediments*. 2020, **20**(6): 2553-2562. DOI: 10.1007/s11368-019-02448-7.
- [13] Xu D, Jin W, Wei Y, et al. The influence of the accumulation of submerged plant residues on the physicochemical properties of sediments—a case study of Malayan cabbage. *China Environmental Science*, 2023, 43(3): 1360-1367. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2023.03.037. [徐达, 金伟, 尉艺等. 沉水植物残体堆积量对沉积物理化性质的影响——以马来眼子菜为例. 中国环境科学, 2023, 43(3): 1360-1367.]
- [14] Qin B, Hu W, Gao G, et al.. Dynamics of sediment resuspension and the conceptual schema of nutrient release in the large shallow Lake Taihu, China. *Chinese Science Bulletin*. 2004, **49**(1): 54-64. DOI: 10.1360/03wd0174.
- [15] Chen Y, Moufouma-Okia W, Masson-Delmotte V, et al.. Recent Progress and Emerging Topics on Weather and Climate Extremes Since the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Annual Review of Environment and Resources*. 2018, **43**(1): 35-59. DOI: 10.1146/annurev-environ-102017-030052.
- [16] Wang W, Shi K, Wang X, et al.. The impact of extreme heat on lake warming in China. *Nature Communications*. 2024, **15**(1): 70. DOI: 10.1038/s41467-024-44936-6.
- [17] Calderó-Pascual M, de Etyo E, Jennings E, et al.. Effects of Consecutive Extreme Weather Events on a Temperate Dystrophic Lake: A Detailed Insight into Physical, Chemical and Biological Responses: Water. 2020; 12. DOI: 10.3390/w12051411.
- [18] Jansen J, Woolway R I, Kraemer B M, et al.. Global increase in methane production under future warming of lake bottom waters. *Global Change Biology*. 2022, **28**(18): 5427-5440. DOI: 10.1111/gcb.16298.
- [19] Wang C, Xu D, Bai L, et al.. Effects of accumulated cyanobacterial bloom biomass contents on the characteristics of surface fluid sediments in a eutrophic shallow lake. *Journal of Environmental Management*. 2022, **308**: 114644. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114644.
- [20] Pang Q, Zhang R, Wen C, et al.. Fluid mud consolidation delayed by extracellular polymer substances. *Environmental Technology*. 2018, **39**(19): 2534-2541. DOI: 10.1080/0959330.2017.1360397.
- [21] Bao XM, Chao JY, Yin HB. Occurrence characteristics and bioavailability of heavy metals in surface sediments of Lake Gehu, Taihu Basin. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(05): 1010-1017. DOI: 10.18307/2016.0510. [包先明, 郑建颖, 尹洪斌. 太湖流域滆湖底泥重金属赋存特征及其生物有效性. 湖泊科学. 2016, 28(05): 1010-1017.]
- [22] 范成新. 湖泊沉积物调查规范.北京:科学出版社, 2018.
- [23] Wang C, Yao Z, Huang L, et al.. Reliance and effect of sediment bulking on the physicochemical properties of sediments in aquatic environments. *Science of The Total Environment*. 2020, **723**: 137872. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137872.
- [24] Wentworth C K. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *The Journal of Geology*. 1922, **30**(5): 377-392. DOI: 10.1086/622910.
- [25] Peng ZR, Chen LJ, Jiang M, et al. Water quality investigation and eutrophication status evaluation in Gehu Lake. *Journal of Shanghai*

Ocean University, 2007(3): 252-258. [彭自然, 陈立婧, 江敏等. 漏湖水质调查与富营养状态评价. 上海水产大学学报. 2007(3): 252-258.]

- [26] Chao B, Cai YJ, Xu XG, et al. Traceability of lake pollution based on aqueous fluorescence fingerprint method: A case study of Lake Gehu, Taihu Basin. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(4): 1330-1342. DOI: 10.18307/2023.0425. [巢波, 蔡永久, 徐宪根等. 基于水质荧光指纹法的湖泊污染溯源研究——以太湖流域漏湖为例. 湖泊科学. 2023, 35(4): 1330-1342.]
- [27] Liao RH, Wu XG, Wang ZD et al. Spatial distribution and pollution assessment on the main nutrients and heavy metals in sediments of Lake Gehu, Taihu Basin after removing the aquaculture net. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(5): 1436-1447. DOI: 10.18307/2021.0511. [廖润华, 吴小刚, 王兆德等. 太湖流域漏湖围网拆除后沉积物营养盐和重金属空间分布特征及评价. 湖泊科学. 2021, 33(5): 1436-1447.]
- [28] Pace M L, Prairie Y T. 103Respiration in lakes: Respiration in Aquatic Ecosystems. Del Giorgio P, Williams P. Oxford University Press, 20050. DOI: 10.1111/j.1439-0485.2006.00074.X.
- [29] Song N, Jiang H, Cai H, et al.. Beyond enhancement of macrophyte litter decomposition in sediments from a terrestrialized shallow lake through bioanode employment. *Chemical Engineering Journal*. 2015, 279: 433-441. DOI: 10.1016/j.cej.2015.05.041.
- [30] Wang C, Xu D, Bai L, et al.. Important Role of Biogas and Secretions in the Formation of Biological Fluid Sediment under Cyanobacterial Bloom Biomass Degradation. *ACS ES&T Water*. 2023, 3(3): 773-782. DOI: 10.1021/acsestwater.2c00564.
- [31] Daigle H, Cook A, Fang Y, et al.. Gas-Driven Tensile Fracturing in Shallow Marine Sediments. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2020, 125(12): e2020JB020835. DOI: 10.1029/2020JB020835.
- [32] Liu L, De Kock T, Wilkinson J, et al.. Methane Bubble Growth and Migration in Aquatic Sediments Observed by X-ray μ CT. *Environmental Science & Technology*. 2018, 52(4): 2007-2015. DOI: 10.1021/acs.est.7b06061.
- [33] Liu L, Wilkinson J, Koca K, et al.. The role of sediment structure in gas bubble storage and release. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2016, 121(7): 1992-2005. DOI: 10.1002/2016JG003456.
- [34] Duteil T, Bourillot R, Grégoire B, et al.. Experimental formation of clay-coated sand grains using diatom biofilm exopolymers. *Geology*. 2020, 48(10): 1012-1017. DOI: 10.1130/G47418.1.
- [35] Malarkey J, Baas J H, Hope J A, et al.. The pervasive role of biological cohesion in bedform development. *Nature Communications*. 2015, 6(1): 6257. DOI: 10.1038/ncomms7257.
- [36] Meng D, Jin W, Chen K, et al.. Cohesive strength changes of sewer sediments during and after ultrasonic treatment: The significance of bound extracellular polymeric substance and microbial community. *Science of The Total Environment*. 2020, 723: 138029. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138029.
- [37] Gounder Krishnappan B, Stone M, Granger S J, et al.. Experimental Investigation of Erosion Characteristics of Fine-Grained Cohesive Sediments: Water. 2020: 12. DOI: 10.3390/w12051511.
- [38] Upadhyay H R, Granger S J, Collins A L. Dynamics of fluvial hydro-sedimentological, nutrient, particulate organic matter and effective particle size responses during the U.K. extreme wet winter of 2019 – 2020. *Science of The Total Environment*. 2021, 774: 145722. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145722.
- [39] Wang SR, Zhao HC, Zhou XN et al. Study on the organic matter, total nitrogen and phosphorus form distribution of different particle size fractions in the sediments from Wuli Lake and Gonghu Lake. *Research of Environmental Sciences*, 2004(S1): 11-14. DOI: 10.3321/j.issn:1001-6929.2004.z1.003. [王圣瑞, 赵海超, 周小宁等. 五里湖与贡湖不同粒径沉积物中有机质、总氮和]

-
- 磷形态分布研究. 环境科学研究. 2004(S1): 11-14.]
- [40] Le H, Gratiot N, Santini W, et al.. Sediment properties in the fluvial and estuarine environments of the Mekong River. *E3S Web Conf.* 2018, **40**. DOI: 10.1051/e3sconf/20184005063.
- [41] Jarvis P, Jefferson B, Gregory J, et al.. A review of floc strength and breakage. *Water Research*. 2005, **39**(14): 3121-3137. DOI: 10.1016/j.watres.2005.05.022.
- [42] Byun J, Son M. On the relationship between turbulent motion and bimodal size distribution of suspended flocs. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2020, **245**: 106938. DOI: 10.1016/j.ecss.2020.106938.
- [43] Wu W, Perera C, Smith J, et al.. Critical shear stress for erosion of sand and mud mixtures. *Journal of Hydraulic Research*. 2018, **56**(1): 96-110. DOI: 10.1080/00221686.2017.1300195.
- [44] Yang W, Yu G, Tan S K, et al.. Rheological properties of dense natural cohesive sediments subject to shear loadings. *International Journal of Sediment Research*. 2014, **29**(4): 454-470. DOI: 10.1016/S1001-6279(14)60059-7.
- [45] Wenyu Y, Meixin Y, Guoliang Y. Stratification and Rheological Properties of Near-Bed Cohesive Sediments in West Lake, Hangzhou, China. *Journal of Coastal Research*. 2018, **34**(1): 185-192. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-16-00182.1.
- [46] Kang Y, Song X, Liu Z. Sediment resuspension dampens the effect of nutrient inputs on the phytoplankton community: a mesocosm experiment study. *Hydrobiologia*. 2013, **710**(1): 117-127. DOI: 10.1007/s10750-012-1221-y.
- [47] Berlamont J, Ockenden M, Toorman E, et al.. The characterisation of cohesive sediment properties. *Coastal Engineering*. 1993, **21**(1): 105-128. DOI: 10.1016/0378-3839(93)90047-C.
- [48] Sheng Y P, Lick W. The transport and resuspension of sediments in a shallow lake. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1979, **84**(C4): 1809-1826. DOI: 10.1029/JC084iC04p01809.
- [49] James R T, Martin J, Wool T, et al.. A SEDIMENT RESUSPENSION AND WATER QUALITY MODEL OF LAKE OKEECHOBEE1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 1997, **33**(3): 661-678. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1997.tb03540.x.
- [50] Qin BQ, Hu WG, Gao G et al. Dynamic mechanism of sediment suspension and conceptual model of endogenous release in Taihu Lake. *Chinese Science Bulletin*, 2003(17): 1822-1831. DOI: 10.3321/j.issn:0023-074X.2003.17.002. [秦伯强, 胡维平, 高光等. 太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式. 科学通报. 2003(17): 1822-1831.]
- [51] Liu L, Xu Z, Huang J. Spatio-temporal variation and abrupt changes for major climate variables in the Taihu Basin, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2012, **26**(6): 777-791. DOI: 10.1007/s00477-011-0547-8.