

## 蓝藻水华衰亡对沉积物碳库有机碳组分的影响\*

汪旋<sup>1,2</sup>, 李致春<sup>1,2,3</sup>, 李翔<sup>1,2</sup>, 许晓光<sup>1,2</sup>, 张思远<sup>1,2</sup>, 王慧敏<sup>1</sup>, 厉荣强<sup>1</sup>, 王国祥<sup>1,2\*\*</sup>

(1: 南京师范大学环境学院, 南京 210023)

(2: 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏省环境演变与生态建设重点实验室, 江苏省水土环境生态修复工程实验室, 南京 210023)

(3: 宿州学院环境与测绘工程学院, 宿州 234000)

**摘要:** 湖泊沉积物碳库作为湖泊生态系统的重要组成部分, 对湖泊碳循环起重要作用, 而蓝藻水华衰亡过程对湖泊碳库稳定性影响研究较少. 本研究采集太湖蓝藻、湖水、沉积物样品, 建立蓝藻-水-沉积物室内模拟实验系统, 分析蓝藻水华衰亡过程中沉积物碳库易氧化有机碳(EOC)、惰性有机碳(ROC)、微生物量碳(MBC)、轻组有机碳(LFOC)和重组有机碳(HFOC)的变化规律, 探究蓝藻水华衰亡过程对湖泊碳库稳定性的影响. 结果表明, 蓝藻水华衰亡前期(1~9天), ROC缓慢下降, EOC和LFOC快速下降, MBC有所增加; 衰亡中期(10~45天), 沉积物TOC和ROC含量升高; 衰亡末期(46~63天), HFOC和ROC等稳定有机碳进入一个从缓慢分解逐渐趋于稳定的阶段. 周期性的蓝藻水华暴发、衰亡和湖泊稳定性有机碳的日渐累积, 最终会对沉积物碳库有机碳组分及其稳定造成显著影响.

**关键词:** 沉积物碳库; 有机碳; 蓝藻; 碳循环

## Effect of the decline of cyanobacterial bloom on the organic carbon composition of lake sediment carbon pool\*

WANG Xuan<sup>1,2</sup>, LI Zhichun<sup>1,2,3</sup>, LI Xiang<sup>1,2</sup>, XU Xiaoguang<sup>1,2</sup>, ZHANG Siyuan<sup>1,2</sup>, WANG Huimin<sup>1</sup>, LI Rongqiang<sup>1</sup> & WANG Guoxiang<sup>1,2\*\*</sup>

(1: School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, P.R.China)

(2: Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource development and application, Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Jiangsu Engineering Lab of Water and Soil Eco-re-mediation, Nanjing 210023, P.R.China)

(3: School of Environment and Surveying Engineering, Suzhou University, Anhui 234000, P.R.China)

**Abstract:** Sedimentary carbon pool, as an important part of lake ecosystems, plays an important role in carbon cycle. However, there is little information on the impact of the cyanobacteria decomposition on the stability of sedimentary carbon pool. In this study, a simulated water-cyanobacteria-sediment system was established to investigate the effects of algal-derived organic carbon during the decline of cyanobacteria on easily oxidized organic carbon (EOC), recalcitrant organic carbon (ROC), microbial biomass carbon (MBC), light fraction organic carbon (LFOC) and heavy fraction organic carbon (HFOC) of sedimentary carbon pool. The results showed that, in the early stage of incubation (1-9 Days), ROC declined slowly, EOC and LFOC declined rapidly, in contrast, MBC increased. After incubation of 10-45 Days, the sediment TOC and ROC content increased. At the end of experiment (46-63 Days), organic carbon contents such as HFOC and ROC only slightly changed. With the outbreak of periodic cyanobacterial blooms, decomposition and accumulation of organic carbon in lake sediments will have a significant impact on the organic carbon composition and stability of the sediment carbon pool.

\* 2019-07-16 收稿; 2019-10-10 收修改稿.

国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07203-003)、国家自然科学基金项目(41573061)和安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2019A0667)联合资助.

\*\* 通信作者; E-mail: wangguoxiang@njnu.edu.cn.

**Keywords:** Sediment carbon pool; organic carbon; cyanobacteria; carbon cycle

湖泊沉积物碳库是湖泊生态系统碳循环的核心环节,既扮演生态系统碳平衡过程中的源/汇角色,又为湖泊生命活动中碳的生产、消费和转换者提供场所<sup>[1]</sup>。湖泊沉积物碳库有机碳组分对于湖泊碳循环环境条件的改变具有高度敏感性,与有机碳的固持和释放密切相关<sup>[2-3]</sup>。同时,沉积物碳库有机碳组分的化学组成和存在状态也是影响有机碳矿化的关键因素<sup>[4]</sup>,而有机碳矿化作为碳循环的关键过程,其动态变化直接影响沉积物碳元素的释放与温室气体的形成<sup>[5]</sup>。因此,碳库中有机碳的固定和循环机制的研究是湖泊碳循环研究的重要内容<sup>[6]</sup>,加强湖泊沉积物碳库及其组分的研究是精确评估沉积物碳储量及其对不同来源有机碳迁移转化响应的关键。

沉积物有机碳库包含了从简单糖类到复杂腐殖质的不同组分<sup>[7]</sup>,按照不同的划分标准,根据稳定性和密度,有机碳可分为轻组有机碳(light fraction organic carbon, LFOC)和重组有机碳(heavy fraction organic carbon, HFOC);按组分可分为易氧化有机碳(easily oxidized organic carbon, EOC)和惰性有机碳(recalcitrant organic carbon, ROC);有机碳库中,易被微生物利用的有机碳组分又被称为微生物量碳(microbial biomass carbon, MBC),这些碳组分被视为表征湖泊沉积物碳库动态的重要指标,能够反映湖泊沉积物碳库的稳定性和碳源/汇的潜在功能,对湖泊碳循环的研究具有现实意义<sup>[8]</sup>。LFOC 对水环境变化敏感,是微生物的重要碳源,易受微生物和酶活性的影响,具有较高的周转率,具有更高的生物可利用性<sup>[9-10]</sup>。HFOC 则较为稳定,密度高,主要为芳香族物质,碳氮比较低,其结构稳定复杂,周转较慢,难被微生物利用,成为土壤和沉积物中碳储存的主要汇库<sup>[11-13]</sup>。EOC 是沉积物有机碳中较活跃的部分,常作为有机碳动态变化的敏感性指标<sup>[14]</sup>;EOC 越大,说明湖泊有机碳越不稳定<sup>[15]</sup>,湖泊沉积物环境发生变化时,沉积物有机碳更易于发生变化。ROC 有效性较高,很难被微生物分解利用,为稳定碳库重要组分之一<sup>[16]</sup>,对沉积物的固碳作用和维持湖泊生态平衡有重要意义。MBC 反映沉积物微生物活性,与有机碳的转化密切相关,能够作为湖泊生态系统的功能变化、沉积物碳库稳定性及有机质变化的早期预测指标<sup>[17-18]</sup>。

越来越多的学者关注湖泊沉积物碳库有机碳组分变化对碳循环涉及的生物地球化学循环过程的指示意义。在对湖泊有机碳组分的研究中,往往将其与富营养化联系起来<sup>[19]</sup>,湖泊沉积物各形态特征的有机碳中,重组碳的积累对总有机碳的贡献,揭示了湖泊富营养化程度对沉积物碳库动态变化和腐殖化程度的影响<sup>[20]</sup>。太湖沉积物 LFOC 的去除伴随着沉积物有机氮、磷的矿化,而沉积物氮、磷矿化,进一步对上覆水体氮、磷的释放具有较大的影响<sup>[21]</sup>。王亚蕊等探究堆积藻屑和沉积物交互作用发现,藻屑或沉积物有机质短期内不会完全矿化,从而增强了沉积物需氧量,对沉积物中污染物的地球化学循环过程造成进一步的影响<sup>[22]</sup>。Ye 等对蓝藻水华爆发对高分子溶解有机物(DOM)的研究发现,太湖蓝藻水华对 DOM 的定性和定量均有影响,同时溶解性有机碳既受外源输入也受藻源性输入影响<sup>[23]</sup>。然而,学者对蓝藻水华衰亡过程中沉积物碳库不同有机碳组分的动态变化以及活性/惰性碳库状态变化的研究相对较少,沉积物碳库的动态变化,最终影响湖泊富营养化程度,对太湖良性生态系统的构建产生深远影响。

本研究拟通过室内模拟实验,探究蓝藻水华衰亡过程中沉积物碳库 EOC、LFOC、HFOC 和 MBC 动态变化特征,揭示蓝藻水华衰亡过程,沉积物活性/惰性碳库对蓝藻水华衰亡的影响,进而深入认识湖泊富营养化过程对湖泊碳循环的影响机制。

## 1 材料与方法

### 1.1 太湖湖水及沉积物样品采集

2018 年 7 月 15 日,现场使用彼得森采泥器采集太湖竺山湾符读港附近开阔水域(31°24′38.40″N, 120°02′12.45″E)表层 0~20 cm 沉积物,并将符读港原位湖水样品装入采样塑料桶中,同时原位采集新鲜蓝藻装入另一采样塑料桶中,立即运回实验室以建立实验系统。

### 1.2 实验设计

1.2.1 水—沉积物系统的建立 在实验室中,将采集的沉积物样品过 100 目筛,去除杂质,充分混匀,将湖水通过 300 目尼龙网布过滤。向每根直径 6.5 cm、高 30 cm 的有机玻璃管中添加 300 g 混匀的沉积物样品,并加

入 560 mL 的湖水, 不加盖. 将装好水样+沉积物的有机玻璃管垂直放入装有加热棒的水箱中进行水浴, 温度始终控制在  $28 \pm 0.5^\circ\text{C}$ , 系统稳定 1 周.

**1.2.2 蓝藻添加阶段** 实验有机玻璃管稳定半个月, 测定各项理化指标 (pH、溶解氧等) 基本稳定后, 自沉积物上部分层采集深度 0~1、1~2、2~3 cm 样品, 将所采沉积物样品冷冻干燥, 用来测定沉积物总有机碳 (TOC)、EOC、LFOC、HFOC 和 MBC 含量, 作为未加藻之前水-沉积物的初始指标.

本研究实验组分为加藻组 (M) 和对照组 (KB) (图 1), 加藻组通过加入新鲜蓝藻 150 g 模拟野外条件蓝藻水华衰亡分解, 而对照组不加蓝藻作为空白对照. 在蓝藻添加阶段, 用磁力搅拌器将藻浆均匀混合至所有加藻组有机玻璃管蓝藻添加结束.

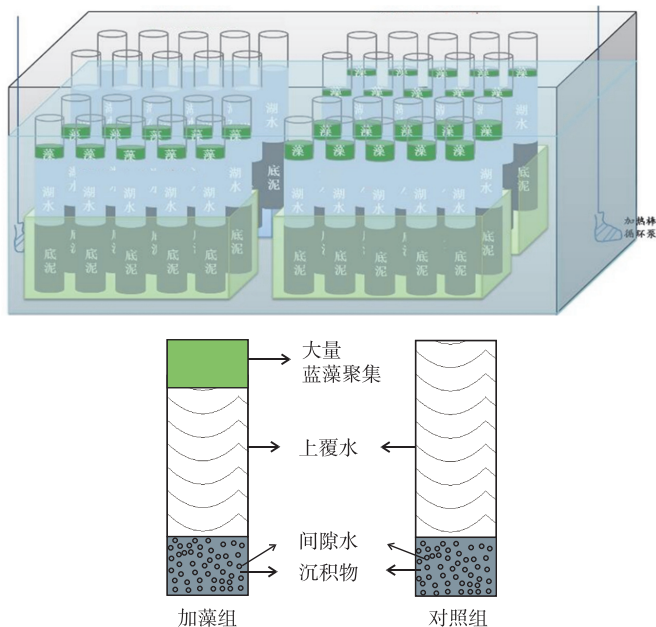


图 1 蓝藻水华衰亡过程室内模拟实验系统设计

Fig.1 Design of indoor simulation experiment system for decaying process of algae blooms

**1.2.3 蓝藻水华衰亡分解阶段** 蓝藻分解阶段过程中每天根据实际情况用 5~10 mL 高纯水补充上覆水水量以保证实验正常进行. 加入蓝藻后第 2、4、7、10、13、18、22、32、46、60 天各采集 1 次样品, 实验期间共采样 10 次. 实验进行破坏性采样, 采用平匙分层采集深度 0~1、1~2、2~3 cm 沉积物样品, 将所采沉积物样品冷冻干燥. 每次采样, 分别同时采集加藻组 3 根有机玻璃管和对照组 3 根有机玻璃管中的上述样品, 保证样品测定指标平行性质量控制. 实验过程中, 添加蓝藻前采样 1 次, 观察上覆水表层蓝藻从投加开始直至腐解为无明显团状蓝藻漂浮时实验结束.

### 1.3 沉积物样品指标测定方法及数据处理

用碳氮元素分析仪 (Multi N/C 3100; AnalytikJena, 德国) 测定 TOC、LFOC、HFOC 含量<sup>[24]</sup>. 准确称取 0.05 g 沉积物干样于燃烧舟中, 加入 0.1 mol/L 的 HCl 溶液完全浸润沉积物干样进行酸化, 随后放入烘箱烘干后进行测定. 称取 5 g 冷冻干燥过 60 目筛的沉积物样品于 100 mL 离心管中, 然后加入比重为  $1.7 \text{ g/cm}^3$  的 NaI 溶液 20 mL, 超声分离 1 min, 离心 10 min 后进行抽滤, 并按同样步骤分离、离心和收集轻组有机质. 将 3 次取得的轻质有机质合并后  $60^\circ\text{C}$  下烘干、称重. 烘干的轻组有机质用碳氮元素分析仪测定 TOC 含量, 所得结果为 LFOC 含量. 分离后的离心管沉积物, 加入 0.01 mol/L  $\text{CaCl}_2$  溶液和蒸馏水反复洗去 NaI 和  $\text{Cl}^-$ , 烘干后研磨, 过 100 目筛, 酸化后用碳氮元素分析仪测定 TOC 含量, 所得结果为 HFOC 含量<sup>[25]</sup>. 沉积物 EOC 使用高锰酸钾进行氧化提取, 紫外分光光度法测定<sup>[26]</sup>. 将沉积物样品经冷冻干燥、研磨处理、过筛, 根据沉积物测定的有机碳含量, 计算含有约 15 mg 有机碳的沉积物样品量作为待测样品的称样重, 然后将样品转移至 50 mL

离心管中,以不加土样作为空白<sup>[27]</sup>.向离心管中加入 25 mL 浓度为 333 mmol/L 的高锰酸钾 ( $\text{KMnO}_4$ ) 溶液, 200 r/min 离心振荡 1 h, 转速 4000 r/min 下离心 5 min, 将上清液用去离子水稀释, 分光光度计 565 nm 处测定吸光值. 由不加沉积物的空白与加沉积物样品的吸光度之差, 计算出  $\text{KMnO}_4$  浓度的变化, 进而计算出氧化的碳量<sup>[28]</sup>.

沉积物易氧化有机碳 (EOC) 含量计算公式如下:

$$\text{EOC} = (\Delta C \times 25 \times 250 \times 9) / (M \times 1000) \quad (1)$$

式中,  $\Delta C$  为  $\text{KMnO}_4$  浓度变化值, 25 和 250 分别为  $\text{KMnO}_4$  用量 (mL) 和稀释倍数, 9 为 1 mmol  $\text{KMnO}_4$  所消耗的碳量 (mg/mmol),  $M$  为沉积物干重 (g). ROC 含量为沉积物 TOC 含量减去 EOC 含量.

微生物量碳用改进后的氯仿熏蒸法<sup>[29]</sup>进行测定. 取 15 g 新鲜沉积物湿样置于约 100 mL 烧杯中, 将装有沉积物样品的烧杯放入真空干燥器中, 抽真空使氯仿沸腾至少 2 min, 将干燥器的活塞关闭, 将干燥器放入恒温培养箱中, 在 25℃ 下暗室培养 24 h. 在熏蒸的同时, 另取 15 g 新鲜沉积物样品放入烧杯中, 作为对照. 在沉积物熏蒸同时, 称取沉积物样品 2.00 g, 在 105℃ 下烘 5~6 h 后称重计算水分重量. 24 h 后将烧杯中的沉积物样品, 加入 0.5 mol/L  $\text{K}_2\text{SO}_4$  溶液 50 mL, 充分搅拌, 密封后置于往复振荡机上振荡 30 min 后静置过滤, 将滤液置于锥形瓶中, 稀释后用碳氮元素分析仪测定 TOC 含量.

微生物量碳的计算:

$$\text{MBC} = (E_c^{\text{CHCl}_3} - E_c^{\text{CK}}) \times 1000 \times 2.64 \quad (2)$$

式中, MBC 为沉积物微生物量碳的含量 (mg/kg),  $E_c^{\text{CHCl}_3}$  为熏蒸沉积物样品折合干重 TOC 含量 (mg/kg),  $E_c^{\text{CK}}$  为对照非熏蒸沉积物样品折合干重 TOC 含量 (mg/kg), 2.64 为校正系数.

沉积物不同类型碳库指标的时间变化和统计箱图由软件 Origin 9.0 和 SPSS 19.0 分析和绘制. 碳库间的相关性分析由 SPSS 19.0 执行, 本研究以  $P < 0.05$  为显著性水平.

## 2 结果与讨论

### 2.1 沉积物不同深度 TOC 含量变化特征

实验过程中, 不同沉积物深度 0~1、1~2 和 2~3 cm TOC 含量变化特征如图 2 所示. 实验前 9 天, 对照组和加藻组沉积物表层深度 0~1 cm TOC 含量同时轻微下降, 差异不太明显, 表明微生物对 TOC 有降解作用<sup>[20]</sup>, 此时对照组和加藻组有机碳动态变化都以微生物降解为主; 从实验第 9~18 天, 加藻组沉积物 TOC 含量逐渐上升, 达到实验期间最大值  $22.79 \pm 0.62$  mg/g, 且整体超过对照组含量, 表明蓝藻水华衰亡过程中藻源性碳的沉降会导致沉积物中 TOC 的累积, 且累积作用高于对照组; 18 天以后, 加藻组沉积物 TOC 含量会逐渐下降, 对照组沉积物 TOC 变化较小, 且加藻组沉积物 TOC 含量整体高于对照组, 表明蓝藻沉降分解过程中, 一部分有机碳在微生物作用下降解, 一部分有机碳不易降解并保留在沉积物中, 这与 Xu 等的研究结果较为一致<sup>[30]</sup>. 与表层 0~1 cm 沉积物相比, 对照组和加藻组在沉积物深度 1~2 cm 和 2~3 cm TOC 含量随时间变化差异较小, 表明蓝藻水华衰亡过程中藻源性有机碳的迁移转化对沉积物表层有机碳的累积贡献较大; 在实验 18 天以后, 沉积物深度 1~2 cm 加藻组 TOC 含量略高于对照组, 揭示了表层沉积物累积的有机碳会有一部分向下迁移.

### 2.2 沉积物轻重组有机碳变化特征

实验第 1 天, 未加蓝藻时 0~1 cm 表层沉积物 LFOC 和 HFOC 的含量分别为  $547.7 \pm 49.9$  和  $17.43 \pm 0.22$  mg/g, LFOC 和 HFOC 占沉积物 TOC 的比例 (LFOC/TOC 和 HFOC/TOC) 分别为  $21.38\% \pm 1.16\%$  和  $78.62\% \pm 1.16\%$  (图 3). 在实验前 5 天, 对照组 LFOC 含量快速下降, 而加藻组 LFOC 含量出现轻微的上升, 上升到  $564.8 \pm 55.6$  mg/g (图 3a); 在 5 天之后, 对照组沉积物 LFOC 含量没有明显的上升和下降, 呈现波动状态, 而加藻组沉积物 LFOC 含量从第 5~13 天, 呈现快速下降, 而后出现波动状态至实验结束, 且其含量远低于对照组 (图 3a). 实验前期, 由于蓝藻的加入, 部分沉降至沉积物表面, 导致加藻组 LFOC 的含量轻微上升, 随后受 LFOC 易降解的特点, 微生物作用下促使其快速降解从而 5 天后呈现快速下降的现象. 在实验前 18 天, 加藻组 HFOC 含量快速上升, 达到最大值  $22.1 \pm 0.01$  mg/g, 后期呈现缓慢下降的趋势 (图 3b); 与加藻组相比, 对照组 HFOC 含量变化趋势不太明显, 实验前 13 天呈现先缓慢下降, 实验第 13~31 天缓慢上升, 最后呈现

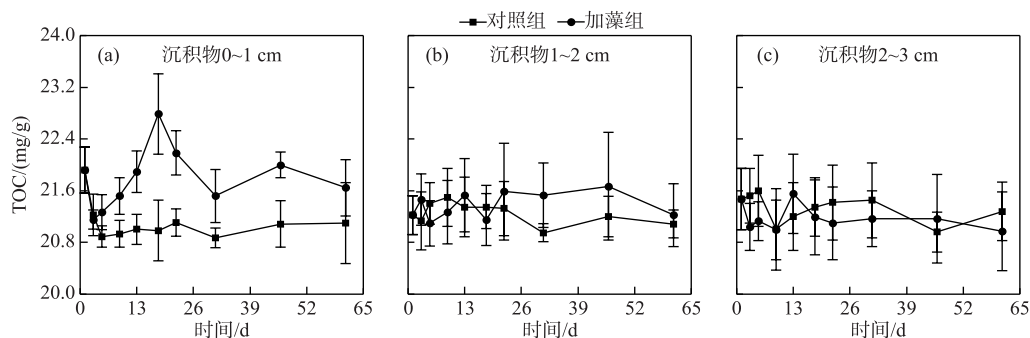


图2 沉积物不同深度(0~1、1~2和2~3 cm)TOC 含量变化特征

Fig.2 Change characteristic of TOC contents at different depths (0~1 cm, 1~2 cm and 2~3 cm) of sediments

缓慢下降,在实验第5天后,其含量明显低于加藻组(图3b).从实验第1~13天,加藻组 LFOC/TOC 呈现快速下降的趋势,LFOC/TOC 降到  $2.86\% \pm 0.59\%$  后又呈现轻微波动上升的变化趋势(图3c);与加藻组相比,对照组 LFOC/TOC 整体下降或上升趋势不太明显,在实验前31天,呈现轻微的波动下降趋势,降到  $13.74\% \pm 1.16\%$ ,而后出现轻微上升,在实验第9天之后,加藻组 LFOC/TOC 明显低于对照组(图3c).在实验前31天,对照组 HFOC/TOC 呈现缓慢上升趋势,而后逐渐下降(图3d);与对照组相比,在实验前31天,HFOC/TOC 快速上升,达到  $97.53\% \pm 0.21\%$ ,后期基本处于缓慢下降趋势(图3d).这些结果表明蓝藻的添加会对沉积物轻、重组有机碳含量及比例产生明显影响,在实验初期,部分蓝藻沉降到沉积物,提升了 LFOC 含量,对 LFOC 影响较为明显,这部分 LFOC 属于易降解有机碳,会被微生物快速降解,使 LFOC 明显下降,沉降于沉积物表面的蓝藻碎屑真正保存的是 HFOC,是不易降解有机碳,因此 HFOC 呈现整体上升的趋势,HFOC 后期轻微下降表明其较为稳定、降解缓慢.

### 2.3 沉积物易氧化有机碳和惰性有机碳变化特征

沉积物不同深度 0~1、1~2 和 2~3 cm 易氧化有机碳含量变化特征如图4所示.实验前9天,加藻组与对照组相比,沉积物深度 0~1 cm EOC 含量快速上升,达到  $12.52 \pm 1.26$  mg/g,且明显大于对照组 EOC 含量,表明蓝藻分解沉降于沉积物表面增加了沉积物 EOC 含量(图4a),同时也可能因为蓝藻分解过程在上覆水中的释放 DOC 会迁移至沉积物间隙水中,提升了间隙水 DOC 含量,而 DOC 中会存在一定比例的 EOC;由于 EOC 含量属于易降解有机碳,能够被微生物快速降解,因此9天后快速下降,达到  $5.36 \pm 0.38$  mg/g,实验13天后基本与对照组 EOC 含量变化趋势保持一致,且在同一时间段其值比较接近(图4a).沉积物深度 1~2 cm,加藻组 EOC 含量在前5天略高于对照组,说明该深度沉积物 EOC 含量轻微受到蓝藻分解和沉降的影响,主要是因为沉积物 0~1 cm 中高含量的 EOC 会由于浓度梯度向下迁移,第13天后,加藻组和对照组 EOC 含量变化趋势基本一致,与 0~1 cm 相似,表明蓝藻沉降分解过程对其沉积物 EOC 含量影响减弱(图4b).在沉积物深度 2~3 cm,加藻组和对照组 EOC 含量变化基本一致,说明蓝藻沉降分解过程对该深度沉积物影响较小(图4c).整体来看,加藻组和对照组沉积物 EOC 含量变化趋势差异性随着深度增加而减弱,揭示了蓝藻分解过程藻源性有机碳的迁移转化对沉积物碳库中表层沉积物 EOC 含量动态变化影响较大,随着深度增加,有机碳能力迁移逐渐减弱,影响相对减小.

沉积物不同深度 0~1、1~2 和 2~3 cm 惰性有机碳含量变化特征如图5所示.在实验前9天,表层 0~1 cm 沉积物 ROC 含量变化与 EOC 含量相反,呈逐渐下降的趋势,达到表明实验初期沉积物有机碳活性较高,沉积物碳库处于不稳定状态(图3a和图4a);实验9天后,ROC 含量逐渐上升趋于稳定,且整体含量略高于对照组,表明当 EOC 在微生物作用下分解后,藻源性碳的沉降分解过程会导致沉积物 ROC 含量相对增加,最终 ROC 会保存在表层沉积物中,这与博斯腾湖、长寿湖和鄱阳湖等的研究结果基本一致<sup>[31-33]</sup>.与表层沉积物 0~1 cm 相比,沉积物深度 1~2 和 2~3 cm 随时间变化趋势基本一致,表明藻源性碳的沉降分解过程对表层 ROC 含量影响较大,随着深度增加,影响在减弱(图4b和图4c);同时迁移至沉积物深度 1~2 cm 的

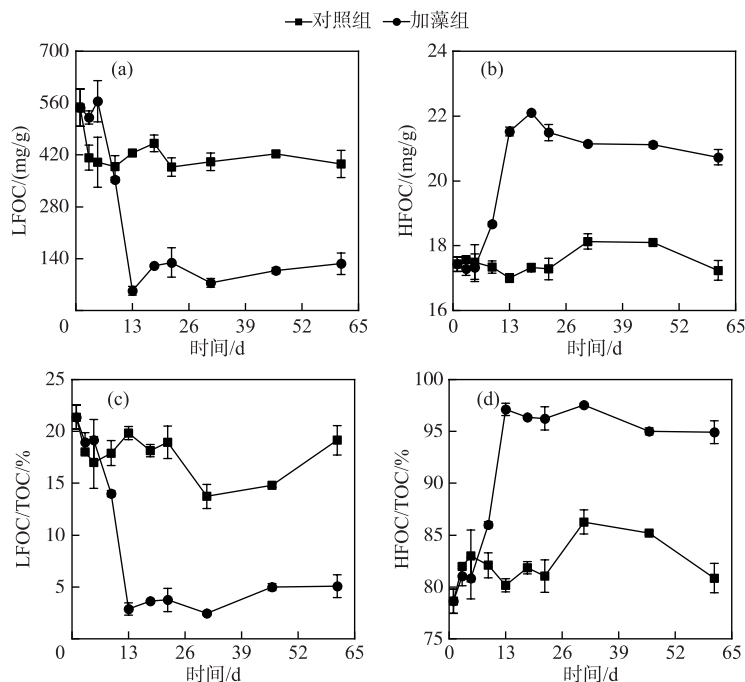


图3 沉积物表层 0~1 cm 轻重组有机碳含量(a,b)及轻重组有机碳占沉积物 TOC 比例变化特征(c,d)

Fig.3 Variations of LFOC and HFOC contents (a, b) and their relative proportions accounted for TOC in the surface sediments (0-1 cm) (c, d)

DOC 易被微生物利用,该层的 ROC 被最大程度地保留在沉积物中,导致实验部分时间段(13~31 天)加藻组 ROC 含量大于对照组,这一结果与沉积物深度 1~2 cm TOC 含量特征相对应。

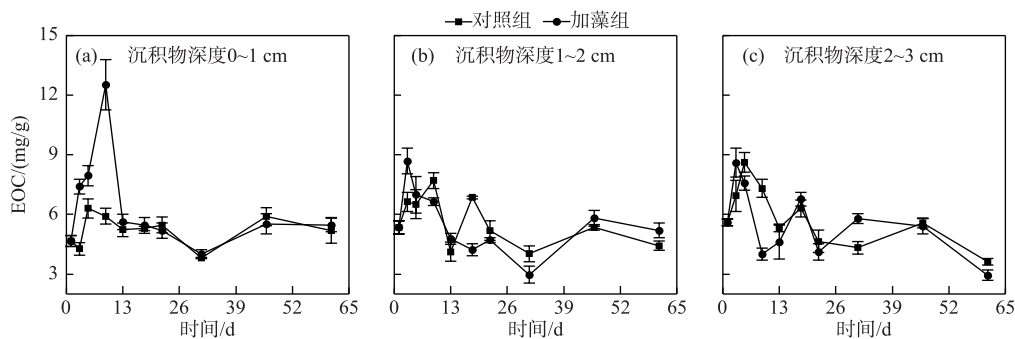


图4 沉积物不同深度(0~1、1~2 和 2~3 cm)易氧化有机碳含量变化特征

Fig.4 Change characteristic of EOC contents at different depths (0-1 cm, 1-2 cm and 2-3 cm) of sediments

#### 2.4 沉积物微生物量碳变化特征

微生物量碳是微生物生长的重要供给来源<sup>[34]</sup>。实验过程中不同深度(0~1、1~2 和 2~3 cm)沉积物微生物量碳随时间变化特征如图 6 所示。在沉积物表层 0~1 cm,尽管加藻组和对照组微生物量碳随时间变化趋势较为一致,但从实验第 9 天开始至实验结束,加藻组微生物量碳含量明显高于对照组(图 5a),表明加藻组蓝藻水华衰亡过程中,蓝藻腐烂降至沉积物表面,使沉积物有机质增加,为微生物活动提供了充足的碳源,微生物活动增强,致使微生物量碳含量增加<sup>[35]</sup>;实验 18 天后,对照组和加藻组微生物量碳含量逐渐下降,表



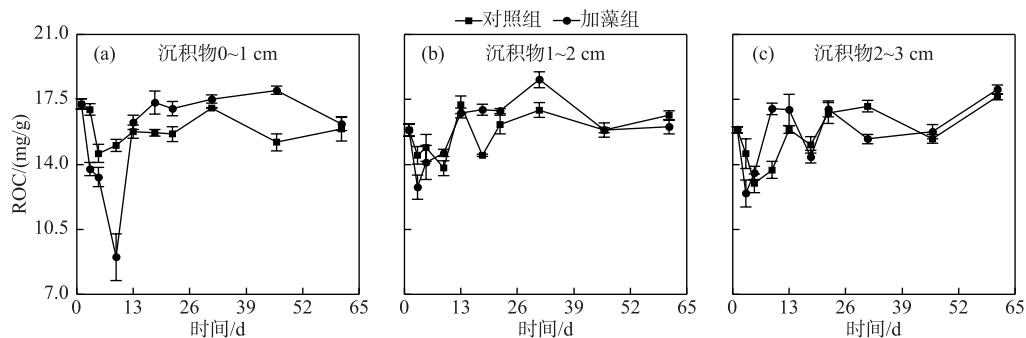


图 5 沉积物不同深度(0~1、1~2 和 2~3 cm)惰性有机碳含量变化特征

Fig.5 Change characteristic of ROC contents at different depths (0~1 cm, 1~2 cm and 2~3 cm) of sediments

明微生物活动逐渐减弱,其变化趋势基本与 TOC、LFOC、EOC 含量变化较为一致,揭示了微生物利用的有机碳含量逐渐减小导致了这一结果. 沉积物深度 1~2 和 2~3 cm 微生物量碳随时间变化特征与沉积物深度 0~1 cm 相比存在一定差异,呈现先下降后上升再下降的趋势(图 5b 和图 5c),表明蓝藻沉降分解过程藻源性有机碳的迁移转化随着深度增加而减弱;加藻组沉积物深度 1~2 和 2~3 cm 微生物量碳部分值高于相同实验时间对照组,可能是由于加藻组表层 0~1 cm 较高含量的 TOC 逐渐向下迁移导致 1~2 和 2~3 cm 深度其含量可供微生物提供能量有机碳的含量增加,导致微生物量碳含量偏高;微生物量碳后期基本呈现下降,可能是因为容易被微生物降解的有机碳整体含量逐渐减少,当满足不了微生物活动需求时,导致微生物活动减弱,从而造成微生物量碳的下降. 沉积物有机质不仅来源于蓝藻腐烂分解向底泥中进行梯级扩散,还包括植物腐烂带来的有机质输入,但微生物对植物降解产生的有机质利用程度相对较低<sup>[36]</sup>,故综上所述,蓝藻水华衰亡过程中藻源性碳的迁移转化能够通过沉积物有机碳的累积影响可供微生物活动使用的碳源,从而改变沉积物微生物活性,最终影响沉积物碳库稳定性.

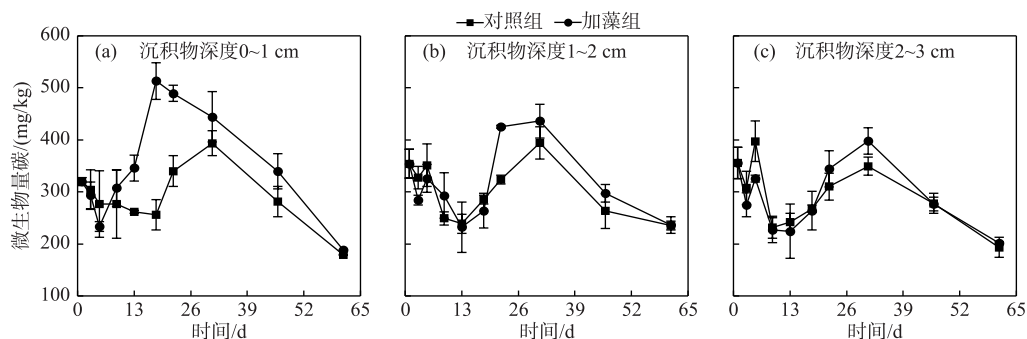


图 6 沉积物不同深度(0~1、1~2 和 2~3 cm)微生物量碳含量变化特征

Fig.6 Change characteristic of MBC contents at different depths (0~1 cm, 1~2 cm and 2~3 cm) of sediments

## 2.5 蓝藻水华衰亡过程中湖泊沉积物碳库动态

实验研究表明,蓝藻聚集层的存在,会促使蓝藻的快速衰亡,这一过程促进了藻源性碳的迁移与转化,并显著影响了沉积物碳库的组成<sup>[37]</sup>. 在蓝藻衰亡过程中,分解和沉降是同时进行的. 一方面,悬浮于上覆水中的蓝藻在分解初期,DOC 迅速释放,并导致 DOC 自沉积物-水界面进入间隙水中;另一方面,尚未完全分解的蓝藻碎屑也沉降于沉积物表面,这两种过程共同引起 EOC 和 LFOC 含量上升(图 2a 和图 3a). 由于沉积物表面的蓝藻具有较高的活性,易被微生物利用并促进其增殖,因此 EOC 和 LFOC 含量快速下降. 一方面, MBC 含量的上升表明 EOC 和 LFOC 有向其转化的趋势(图 5a,表 1),另一方面,蓝藻中的易降解组分也

会被微生物矿化并生成 H<sub>2</sub>S 气态碳(CO<sub>2</sub>和 CH<sub>4</sub>)释放到大气中<sup>[38-39]</sup>.

在蓝藻水华衰亡中期,分解较为彻底的藻残体逐渐沉降至沉积物表面. 由于这部分蓝藻易降解的组分多被分解,仅存难以降解的部分,因此往往会随着沉降过程稳定保存在沉积物中,实验中期沉积物中 HFOC 和 ROC 含量均达到最大值都证实了这一现象(图 2b、图 4a);而 HFOC 与 ROC 之间较强的相关性(表 1),表明这部分有机碳在沉积物中属于较为稳定的有机碳. 沉积物 TOC 与 HFOC、ROC 较强的相关性,揭示了蓝藻中不易降解的组分沉降至沉积物表面,成为沉积物碳库较为稳定的组分,最终增加了湖泊沉积物 TOC 含量.

当湖泊上覆水的蓝藻完全沉降至沉积物底部,沉积物中大部分为较为稳定的有机碳组分. 当沉积物中仅存的少量易降解碳源满足不了过量微生物时,湖泊沉积物中微生物量开始下降,引起 MBC 含量的下降(图 5a),此时微生物作用减弱,沉积物中稳定有机碳进入一个缓慢分解并逐渐趋于稳定的阶段.

蓝藻快速堆积腐解为微生物提供了大量有机碳源和相对有利的厌氧环境<sup>[40]</sup>. 蓝藻衰亡初期,蓝藻中易被降解的组分成为微生物碳源被其充分利用并快速增殖,大量微生物需要寻求更多的碳源以满足自身需求,此时易降解有机碳被部分或全部吸收,蓝藻不断腐解,仅存的稳定有机碳不易或难被微生物利用,受稳定有机碳限制,微生物作用减弱,导致稳定有机碳进入稳定的缓慢分解阶段. 蓝藻在整个碳源-微生物系统起着重要的促进作用. 研究发现,水生植物作为湖泊碳源之一占据一定比例<sup>[41-42]</sup>,但水生植物在短期内腐烂分解程度较低,相较于蓝藻腐烂分解释放的有机碳不多,而夏季太湖蓝藻水华频发,受水文气象因子等的影响<sup>[43]</sup>,北部和西部湖区蓝藻堆积严重,东部湖区蓝藻堆积较少. 蓝藻的腐烂分解过程中带来的碳源输入导致全湖碳库处于一个动态的变化期,而碳库动态和稳定性的空间差异,影响到湖泊碳循环的地球生物化学过程. 蓝藻水华的衰亡过程促进了沉积物中有机质向外界的进一步释放,可能造成湖泊腐殖化程度越来越高及温室气体排放的增加<sup>[44]</sup>. 因此,蓝藻水华衰亡过程对沉积物碳库的影响是湖泊生态环境保护不可忽略的一个生物地球化学过程.

表 1 加藻实验组沉积物碳库有机碳组分间的相关性分析  
Tab.1 Correlation analysis between organic carbon components in sediment carbon pool  
in experimental group added algae biomass

沉积物碳库	TOC	MBC	LFOC	HFOC	EOC	ROC
TOC	1					
MBC	0.696 *	1				
LFOC	-0.531	-0.480	1			
HFOC	0.687 *	0.598	-0.974 **	1		
EOC	-0.400	-0.357	0.417	-0.460	1	
ROC	0.550	0.429	-0.501	0.561	-0.969 **	1

\* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, \*\* 表示在 0.01 平(双侧)上显著相关.

3 结论

本研究表明湖泊聚积蓝藻水华衰亡过程会对沉积物碳库有机碳组分和碳库稳定性造成明显影响,主要结论如下:

- 1) 蓝藻水华衰亡前期,刚开始分解的蓝藻碎屑沉降至沉积物表面,引起易氧化有机碳(EOC)和轻组有机碳(LFOC)含量上升,EOC 和 LFOC 活性较高、易降解,会快速在沉积物中被微生物利用,导致 EOC 和 LFOC 快速下降,促进微生物量碳(MBC)的增长.
- 2) 蓝藻水华衰亡中期,上覆水中分解较为彻底的蓝藻残体逐渐沉降至沉积物表面,这部分蓝藻残体中易降解组分已分解,其剩余的大部分有机碳组分较为稳定,不易降解,沉降至沉积物表面,促使沉积物 TOC 含量升高.
- 3) 蓝藻水华衰亡末期,当湖泊上覆水的蓝藻残体完全沉降至沉积物表面,相对稳定的有机碳进入从缓



慢分解逐渐趋于稳定的阶段,最终周期性的蓝藻暴发和湖泊稳定性有机碳的累积造成湖泊腐殖化程度越来越高.

#### 4 参考文献

- [ 1 ] Hu WP, Jorgensen SE, Zhang FB *et al.* A model on the carbon cycling in Lake Taihu, China. *Ecological Modeling*, 2011, **222**(16): 2973-2991.
- [ 2 ] Tranvik LJ, Downing JA, Cotner JB *et al.* Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and Oceanography*, 2009, **54**(6part2): 2298-2314.
- [ 3 ] Xie Z, He J, Lv CW *et al.* Organic carbon fractions and estimation of organic carbon storage in the lake sediments in Inner Mongolia Plateau, China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(5): 2169-2178.
- [ 4 ] Gobas FAPC, Maclean LG. Sediment-water distribution of organic contaminants in aquatic ecosystems: The role of organic carbon mineralization. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(4): 735-741.
- [ 5 ] Pajunen H, Saarnisto M, Rantakari M *et al.* A large carbon pool and small sink in boreal holocene lake sediments. *Global Change Biology*, 2010, **10**(10): 1648-1653.
- [ 6 ] Huguet A, Vacher L, Relexans S *et al.* Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary. *Organic Geochemistry*, 2009, **40**: 706-719.
- [ 7 ] Jin Q, Wu Q, Zhong XZ *et al.* Characteristics of soil organic carbon components of different plant communities under water level gradient in Poyang Lake wetland. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(5): 1180-1187. [金奇, 吴琴, 钟欣孜等. 鄱阳湖湿地水位梯度下不同植物群落类型土壤有机碳组分特征. 生态学杂志, 2017, **36**(5): 1180-1187.]
- [ 8 ] Kumar A, Sharma MP. Review of methodology for estimation of labile organic carbon in reservoirs and lakes for GHG emission. *J Mater Environ Sci*, 2014, **5**(3): 653-660.
- [ 9 ] Cheng QL. Sources and characterization of organic carbon and nitrogen in sediments of plateau lakes [Dissertation]. Shanghai: East China Normal University, 2014. [程庆霖. 高原湖泊沉积物有机碳、氮来源与表征[学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2014.]
- [ 10 ] Andruschkewitsch R, Geisseler D, Koch HJ *et al.* Effects of tillage on contents of organic carbon, nitrogen, water-stable aggregates and light fraction for four different long-term trials. *Geoderma*, 2013, **192**: 368-377.
- [ 11 ] Wang FG, Wang QJ, Wang WY *et al.* Research progress in soil organic carbon. *Grass Science*, 2008, (2): 48-54. [王发刚, 王启基, 王文颖等. 土壤有机碳研究进展. 草业科学, 2008, (2): 48-54.]
- [ 12 ] Christensen BT. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *European Journal of Soil Science*, 2001, **52**(3): 345-353.
- [ 13 ] Wei YM, Hu HQ, Sun JB *et al.* Effects of different intensity fire on light group and recombinant organic carbon. *Anhui Agricultural Sciences*, 2014, **42**(18): 5840-5843. [魏云敏, 胡海清, 孙家宝等. 不同强度火烧对轻组和重组有机碳的影响. 安徽农业科学, 2014, **42**(18): 5840-5843.]
- [ 14 ] Ke YJ, Hu XY, Yi Q *et al.* Effects of rice straw biochar on soil organic carbon and CO<sub>2</sub> release from cultivated land. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 93-99. [柯跃进, 胡学玉, 易卿等. 水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其CO<sub>2</sub>释放的影响. 环境科学, 2014, **35**(1): 93-99.]
- [ 15 ] Chen GX, Gao DZ, Wang ZP *et al.* Effects of reclamation on the organic carbon components and mineralization of sediments in Minjiang Estuary. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2017, **37**(11): 4374-4382. [陈桂香, 高灯州, 王志萍等. 闽江口围垦养殖对沉积物有机碳组分及其矿化的影响. 环境科学学报, 2017, **37**(11): 4374-4382.]
- [ 16 ] Hansell DA. Recalcitrant dissolved organic carbon fractions. *Annual Review of Marine Science*, 2013, **5**(1): 421-445.
- [ 17 ] Peng XZ, Wang W. Spatial distribution and driving factors of soil microbial biomass carbon in temperate steppe of Inner Mongolia. *Bulletin of Microbiology*, 2016, **43**(9): 1918-1930. [彭晓茜, 王妮. 内蒙古温带草原土壤微生物生物量碳的空间分布及驱动因素. 微生物学通报, 2016, **43**(9): 1918-1930.]
- [ 18 ] Lian ZL, Jiang ZJ, Huang XP *et al.* Labile and recalcitrant sediment organic carbon pools in the Pearl River Estuary, southern China. *Science of the Total Environment*, 2018, **640**: 1302-1311.
- [ 19 ] Lv CW. Geochemical characteristics of carbon (nitrogen, phosphorus, silicon) in lakes and lakes in Inner Mongolia [Dissertation]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2008. [吕昌伟. 内蒙古高原湖泊碳(氮、磷、硅)的地球化学特征[学

- 位论文]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2008.]
- [20] Mao HF, He J, Lu CW *et al.* Morphological characteristics of organic carbon in sediments of Wu Liangsuhai and Bo Hai Sea. *Environmental Science*, 2011, **32**(3): 658-666. [毛海芳, 何江, 吕昌伟等. 乌梁素海和岱海沉积物有机碳的形态特征. 环境科学, 2011, **32**(3): 658-666.]
- [21] Yang CX, Wang SR, Jin XC *et al.* Effects of light organic matter on nitrogen and phosphorus mineralization in sediments of Taihu Lake. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(9): 1001-1007. [杨春霞, 王圣瑞, 金相灿等. 轻组有机质对太湖沉积物氮、磷矿化的影响. 环境科学研究, 2009, **22**(9): 1001-1007.]
- [22] Wang YR, Chen XC, Fu XJ *et al.* The releasing characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus from sediment under the influence of different densities of algal detritus. *J Lake Sci*, 2018, **30**(4): 925-936. DOI: 10.18307/2018.0406. [王亚蕊, 陈向超, 付绪金等. 不同密度藻屑堆积下沉积物碳氮磷释放特征. 湖泊科学, 2018, **30**(4): 925-936.]
- [23] Ye L, Shi X, Wu X *et al.* Dynamics of dissolved organic carbon after a cyanobacterial bloom in hypereutrophic Lake Taihu (China). *Limnologia*, 2011, **41**(4): 382-388.
- [24] Gao SP, Xu BQ, Wang JB *et al.* Accurate determination of TOC in lake sediments by total organic carbon analyzer. *Analytical Laboratory*, 2019, **38**(4): 413-416. [高少鹏, 徐柏青, 王君波等. 总有机碳分析仪准确测定湖泊沉积物中的TOC. 分析实验室, 2019, **38**(4): 413-416.]
- [25] Janzen HH, Campbell CA, Brandt SA *et al.* Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, **56**: 1799-1806.
- [26] Blair G, Lefroy R, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, **46**(7): 1459.
- [27] Logninow W, Wisniewski W, Strony W *et al.* Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation. *Polish Journal of Soil Science*, 1987, **20**(1): 47-52.
- [28] Yu R, Xu MG, Wang BR. Comparison of determination methods of soil active organic matter. *Journal of Soil and Fertilizer*, 2005, (2): 49-52. [于荣, 徐明岗, 王伯仁. 土壤活性有机质测定方法的比较. 土壤肥料, 2005, (2): 49-52.]
- [29] Lin QM, Wu YG, Liu HL. Improvement of soil microbial biomass carbon by fumigation method. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, (2): 64-67. [林启美, 吴玉光, 刘焕龙. 熏蒸法测定土壤微生物量碳的改进. 生态学杂志, 1999, (2): 64-67.]
- [30] Xu X, Li W, Fujibayashi M *et al.* Predominance of terrestrial organic matter in sediments from a cyanobacteria-blooming hypereutrophic lake. *Ecological Indicators*, 2015, **50**: 35-43.
- [31] Yu ZT, Wang XJ, Zhang EL *et al.* Spatial distribution and sources of organic carbon in the surface sediment of Bosten Lake, China. *Biogeosciences*, 2015, **12**(22): 6605-6615.
- [32] Anjum R, Gao J, Tang Q *et al.* Linking sedimentary total organic carbon to  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  chronology from Changshou Lake in the Three Gorges Reservoir Region, China. *Chemosphere*, 2017, **174**: 243-252.
- [33] Maolan W. Stable organic nitrogen isotope in core sediments of the Three Rivers Estuary, Poyang Lake and its environmental implications. *China Environmental Science*, 2015, **35**(2): 558-564.
- [34] Bradley RL, Fyles JW. A kinetic parameter describing soil available carbon and its relationship to rate increase in C mineralization. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, **27**(2): 167-172.
- [35] Wang N, Xu DL, Guo W *et al.* Microbial biomass and its correlation with carbon, nitrogen and phosphorus in sediments of Taihu Lake. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(7): 1921-1926. [王娜, 徐德琳, 郭璇等. 太湖沉积物微生物量及其与碳、氮、磷的相关性. 应用生态学报, 2012, **23**(7): 1921-1926.]
- [36] Mann KH. Production and use of detritus in various freshwater, estuarine, and coastal marine ecosystems. *Limnology & Oceanography*, 1988, **33**(4): 910-930.
- [37] Zhang FJ, Xue B, Yao SC. Organic carbon burial and its driving mechanism in the sediment of Lake Hulun, northeastern Inner Mongolia, since the mid-Holocene. *J Lake Sci*, 2018, **30**(1): 234-244. DOI: 10.18307/2018.0123. [张凤菊, 薛滨, 姚书春. 中全新世以来呼伦湖沉积物碳埋藏及其影响因素分析. 湖泊科学, 2018, **30**(1): 234-244.]
- [38] Qi C, Fang JQ, Zhang LM *et al.* Composition and distribution of biodegradable compounds in phytoplankton-dominated zone of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2019, **31**(4): 941-949. DOI: 10.18307/2019.0423. [祁闯, 方家琪, 张利民等. 太湖藻型湖区沉积物中生物易降解物质组成及分布规律. 湖泊科学, 2019, **31**(4): 941-949.]
- [39] Yan XC, Zhang ZQ, Ji M *et al.* Concentration of dissolved greenhouse gas and its influence factors in the summer surface

- water of eutrophic lake. *J Lake Sci*, 2018, **30**(5): 1420-1428. DOI: 10.18307/2018.0523. [闫兴成, 张重乾, 季铭等. 富营养化湖泊夏季表层水体温室气体浓度及其影响因素. 湖泊科学, 2018, **30**(5): 1420-1428.]
- [40] Yan X, Xu X, Wang M *et al.* Climate warming and cyanobacteria blooms: Looks at their relationships from a new perspective. *Water Research*, 2017; S0043135417307418.
- [41] Li ZC, Zhao YP, Xu XG *et al.* Migration and transformation of dissolved carbon during accumulated cyanobacteria decomposition in shallow eutrophic lakes: a simulated microcosm study. *PeerJ*, 2018.
- [42] Jie X, Heng L, Xiao GX, Yun ML *et al.* Dual stable isotope tracing the source and composition of POM during algae blooms in a large and shallow eutrophic lake: All contributions from algae? *Ecological Indicators*, 2019, **102**: 599-607.
- [43] Zhu GW, Qin BQ, Zhang YL *et al.* Variation and driving factors of nutrients and chlorophyll-a concentrations in northern region of Lake Taihu, China, 2005–2017. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 279-295. DOI: 10.18307/2018.0201. [朱广伟, 秦伯强, 张运林等. 2005—2017 年北部太湖水体叶绿素 a 和营养盐变化及影响因素. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 279-295.]
- [44] Mao HF, He J, Lv CW *et al.* Characteristics of organic carbon forms in the sediment of Wuliangsuai and Daihai Lakes. *Environmental Science*, 2011, **32**(3): 658.