*J. Lake Sci.*(湖泊科学),2025,**37**(6):1948-1961
DOI 10.18307/2025.0616
© 2025 by *Journal of Lake Sciences*

# 沉积记录揭示的三峡库区一级支流水华对内源营养积累的影响*

宋增辉[1,2],姚学杏[1,2],Muhammad Waqas Yonas[1,2],杨光琅[1,2],孔烨梅[1,2],白果鑫[1,2],张晓楠[3],张 磊[1,2**]

(1:西南大学资源环境学院,重庆 400715)
(2:国家级"三峡库区水环境监测与模拟"国际科技合作基地,重庆 400715)
(3:云南大学,高原湖泊生态与治理研究院,昆明 650091)

**摘 要:** 三峡大坝已经蓄水20余年,库区超过50%的一级支流持续暴发水华,其中主要以蓝藻、绿藻和甲藻为优势藻类。研究水华与内源营养积累的相互关系,将有助于预警预测库区水华的发生和生态环境变化。河流泥芯无疑是研究河流内源生态和水华影响的适宜对象。为此选择同位于三峡库区云阳县的两条一级支流——水华频发的澎溪河和水华偶发的磨刀溪,采集中游泥芯,对比分析在相似的气候和地理条件下水华对底泥沉积的影响。通过$^{210}$Pb定年法测定,澎溪河蓄水后的泥芯沉积深度为45 cm,沉积速率为2.25 cm/a,而磨刀溪的沉积深度约为30 cm,沉积速率为1.50 cm/a,仅为澎溪河同期沉积速率的65%。泥芯数据显示,蓄水前澎溪河底泥中有机质(OM)、总氮(TN)、总磷(TP)、有效磷(AP)和有效氮(AN)的沉积通量分别为13.35、0.81、0.61、0.01和0.02 g/($m^2$·a);磨刀溪分别为12.90、0.79、0.54、0.01和0.01 g/($m^2$·a)。截至2023年采样时,澎溪河和磨刀溪蓄水后OM沉积通量分别为25.95和14.32 g/($m^2$·a),后者仅为前者的55.18%。澎溪河底泥中OM、TN、TP、AP和AN较蓄水前分别增加了94.38%、53.09%、31.15%、77.78%和55.56%,而磨刀溪的增幅仅分别为11.01%、13.92%、16.67%、7.19%和-2.17%。对澎溪河和磨刀溪泥芯上部20 cm段按5 cm间隔分样的样品进行16S和18S DNA高通量测序,结果显示两河泥芯中的原核生物群落组成无显著差异,而真核生物群落方面,澎溪河泥芯表现出更高的生物多样性和物种丰富度。将泥芯定年、营养盐和测序数据结合分析,结果显示2010—2023年期间,澎溪河泥芯0~5 cm处的甲藻和绿藻相对丰度较15~20 cm处分别增加了208%和9%;而同期磨刀溪泥芯的甲藻和绿藻相对丰度分别减少了50%和70%。相关分析显示,泥芯中甲藻相对丰度与OM呈显著正相关,绿藻相对丰度与TP和AP均呈显著正相关,表明甲藻水华是蓄水后两河内源有机质沉积差异的主要原因,而绿藻水华则与内源磷的累积有关。结合已有沉积物与水华关系研究表明,库区蓄水为澎溪河提供了丰富的营养盐,显著促进其水华的发生频率和规模,进而显著影响内源营养的积累。内源有机质的持续累积也预示着三峡库区一级支流水华风险将增加,尤其是甲藻水华的暴发。沉积物中有机质和内源磷可作为预测库区支流水华规模的关键指标。

**关键词:** 三峡库区;澎溪河;磨刀溪;泥芯;水华;甲藻;有机质

# Using the sedimentary records to reveal the influence of algal blooms on internal nutrient accumulation in the first-order tributaries of the Three Gorges Reservoir*

Song Zenghui[1,2], Yao Xuexing[1,2], Muhammad Waqas Yonas[1,2], Yang Guanglang[1,2], Kong Yemei[1,2], Bai Guoxin[1,2], Zhang Xiaonan[3] & Zhang Lei[1,2**]

(1: *College of Resources and Environment*, *Southwest University*, *Chongqing* 400715, *P. R. China*)
(2: *National Base of Water Environmental Monitoring and Simulation in Three Gorges Reservoir Region*, *Chongqing* 400715, *P. R. China*)
(3: *Institute for Ecological Research and Pollution Control of Plateau Lakes*, *Yunnan University*, *Kunming* 650091, *P. R. China*)

* 2024-10-11收稿;2025-02-11收修改稿。
科技部国际科技合作基地项目(2016D01027)和国家国际科技合作专项(2013DFG92520)联合资助。
** 通信作者;E-mail: echozhanglei@swu.edu.cn。

**Abstract**: After the impoundment of the Three Gorges Reservoir for more than 20 years, over 50% of first-order tributaries have experienced harmful algal blooms (HABs), primarily dominated by cyanobacteria, green algae and dinoflagellates. Investigating the relationship between HABs and endogenous nutrient accumulation can help in early HAB warning and ecological predictions in the Three Gorges Reservoir. Sediment cores are invaluable for studying internal nutrient accumulation and its impact on HABs. This study focused on two first-order tributaries in Yunyang County of the Three Gorges Reservoir—the Pengxi River, frequently impacted by HABs, and the Modao River, with rare occurrences of HABs. Sediment cores were collected from the mid-reaches of both rivers to investigate the effects of HABs on sediment deposition under similar climatic and geographic conditions. Using $^{210}$Pb dating, sediment deposition depth after Three Gorges Reservoir impoundment was 45 cm for Pengxi River, with a sedimentation rate of 2.25 cm/a. In contrast, sediment deposition depth in Modao River was 30 cm, with a sedimentation rate of 1.50 cm/a—only 65% of the sedimentation rate in the Pengxi River during the same period. The sediment core data showed that before the impoundment, the sedimentation fluxes of organic matter(OM), total nitrogen(TN), total phosphorus(TP), available phosphorus(AP), available nitrogen(AN) in the sediment of Pengxi River were 13.35, 0.81, 0.61, 0.01 and 0.02 g/($m^2$·a), respectively, while in Modao River, they were 12.90, 0.79, 0.54, 0.01 and 0.01 g/($m^2$·a), respectively. As of 2023, after the impoundment, the sedimentation flux of OM in Pengxi River and Modao River were 25.95 and 14.32 g/($m^2$·a), respectively, with the latter being only 55.18% of the former. In Pengxi River, the sedimentation fluxes of OM, TN, TP, AP, and AN increased by 94.38%, 53.09%, 31.15%, 77.78%, and 55.56%, respectively, compared to pre-impoundment levels, while in Modao River, the increases were only 11.01%, 13.92%, 16.67%, 7.19%, and −2.17%, respectively. The 16S and 18S DNA high-throughput sequencing was performed on samples collected at 5 cm intervals from the top 20 cm of sediment cores from Pengxi River and Modao River. The results showed no significant difference in the prokaryotic community composition. However, in terms of eukaryotic communities, the sediment core from Pengxi River exhibited higher biodiversity and species richness compared to the sediment core from Modao River. Combining sediment core dating, nutrients, and sequencing data, the analysis revealed that from 2010 to 2023, the relative abundance of dinoflagellates and green algae in the 0−5 cm section of the Pengxi River sediment core increased by 208% and 9%, respectively, compared to the 15−20 cm section. In contrast, their relative abundances decreased respectively by 50% and 70% in Modao River. Correlation analysis showed that the relative abundance of dinoflagellate in the sediment core was significantly positively correlated with OM, while the relative abundance of green algae was significantly positively correlated with TP and AP. It suggests that dinoflagellate blooms are the primary cause of the differences in endogenous OM deposition between the two rivers after impoundment, while green algae blooms are related to the accumulation of endogenous phosphorus. Studies on sediments and HABs have demonstrated that Three Gorges Reservoir impoundment has enriched Pengxi River with nutrients, intensifying HABs frequency and scale while significantly influencing internal nutrient accumulation. Endogenous OM accumulation indicates an increasing risk of HABs, particularly dinoflagellate blooms, in primary tributaries of the Three Gorges Reservoir. OM and endogenous phosphorus in sediments can serve as key indicators for predicting HAB scales in Three Gorges Reservoir tributaries.

**Keywords**: Three Gorges Reservoir; Pengxi River; Modao River; sediment core; HABs; dinoflagellate; organic matter

目前,全球约70%的河流被大坝阻断,大坝建设在带来经济效益的同时,也会对水环境产生负面影响。自三峡大坝开始蓄水以来,库区水位上升,水体流速降低,滞留时间变长,支流逐渐“湖泊化”[1-2];干流倒灌、水温分层、营养盐累积,导致库区支流水质不断下降[3-4],水华频发。水华的暴发不仅破坏水生态系统平衡,影响水生生物的生存,还对人类健康构成潜在威胁。这一系列问题引起了广泛关注,相关研究主要集中在水文气候、水动力、营养盐变化等方面[2,5-6]。已有研究表明,支流藻类水华的发生是内外源营养积累、水文条件改变和气候变化多重驱动的结果[7];水库调控显著改变了上游支流的水动力条件和营养盐累积动态[8],而支流沉积物在水体氮、磷负荷的时空变化中兼具营养盐“汇”和“源”的角色,其内源营养释放是导致外源输入减少后湖泊富营养化恢复延迟的主要因素[9]。然而,现有研究对库区支流长期沉积记录中内源营养积累的解析及藻类群落演替机制的探讨仍有待拓展。

支流流域生态系统在区域水资源调控、生物多样性保护及生态平衡维持中具有重要意义[10]。系统研究库区支流在蓄水前后的生态环境演变,既可为探明支流生态退化成因和重建流域历史环境演变过程提供科学依据,又能为生态修复和可持续管理提供理论支持。泥芯(沉积物柱)作为湖沼环境变化研究的重要信息载体,能够记录不同时间尺度($10^1$~$10^6$ 年)的环境信息,其中近百年环境变化主要受气候与人类活动的协

同影响[11]。有研究表明,过去 50 年间长江中下游湖泊的持续富营养化现象与人为建设闸坝并阻断江湖联系密切关联[12]。分析支流泥芯各环境指标(粒度、有机质和营养盐等)的垂向分布特征,可重建流域环境的沉积记录,并反映沉积环境对自然因素和人类活动的响应[13]。

澎溪河是三峡库区北岸流域面积最大的支流,其中游的过水型湖泊——高阳平湖常年暴发严重水华[14-15],且澎溪河不同河段水华暴发的规模还存在显著差异[16],而相距仅 50 km,有着相同气候、地理、人文环境的支流磨刀溪却鲜有水华发生[17]。水华的发生对底泥表层和垂向演替的微生物群落多样性产生深远影响[18]。本文通过对澎溪河与磨刀溪泥芯进行沉积物定年、粒度营养盐测定和 DNA 高通量测序,并结合对水体环境因子和藻类群落的分析,旨在揭示三峡库区蓄水前及至今两条一级支流的沉积物内源营养积累动态、蓄水 20 余年后底泥微生物群落多样性组成及其与环境因子的相关性,进而探究水华与沉积过程的响应关系,以期为预测三峡库区水生态环境提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样区域概况

澎溪河(30°49′~31°42′N, 107°56′~108°54′E)地处四川盆地东部边缘,流域面积为 5173 $km^2$,河道全长为 182 km[19](图 1a)。澎溪河发源于大巴山南麓,是三峡库区长江北岸流域面积最大的一级支流,流域气候类型属于亚热带湿润季风气候,河道呈宽窄相间变化,其中高阳平湖河段河面宽阔,呈现湖泊型环境特征。磨刀溪(30°11′~30°56′N, 108°14′~109°1′E)与澎溪河同处于云阳县境内,是三峡库区长江南岸的一级支流,流域面积为 3170 $km^2$,河道全长为 183 km(图 1a),气候类型与澎溪河相同。澎溪河流域的农业土地覆盖率高达 50%,森林覆盖率为 44%;相比之下,磨刀溪流域的农业土地和森林覆盖率分别为 36% 和 54%,澎溪河单位面积的面源污染负荷量为磨刀溪的 1.40 倍[20]。澎溪河富营养化严重,常年暴发水华,而磨刀溪则鲜有水华发生[20]。依据本研究团队于 2022 年水华期间对澎溪河和磨刀溪水质、表层沉积物样本的监测分析,两河水体中叶绿素 *a*(Chl. *a*)与表层沉积物中 OM 含量存在显著差异[21]。澎溪河水体 Chl. *a* 浓度是磨刀溪的 4.50 倍,表层沉积物 OM 含量为磨刀溪的 1.71 倍(表 1)。

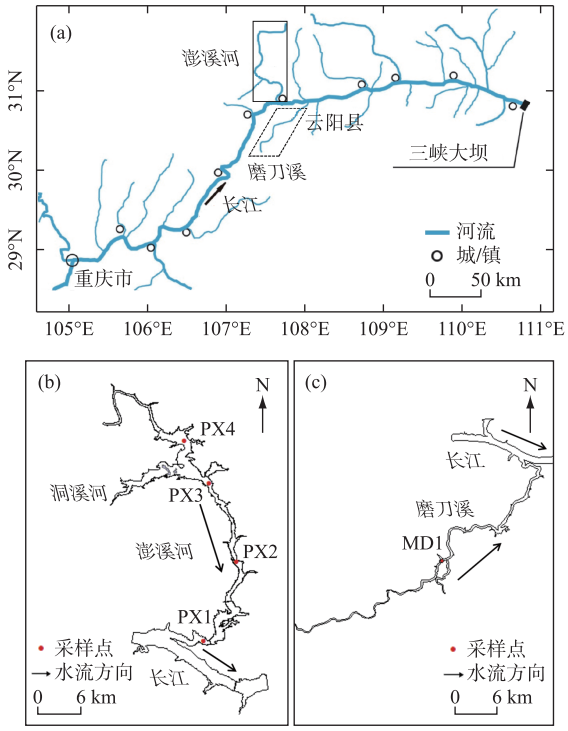


图 1 采样位点分布示意:(a)三峡库区支流,(b)澎溪河采样点,(c)磨刀溪采样点

Fig. 1 Sampling sites distribution: (a) Tributaries of the Three Gorges Reservoir area, (b) Sampling sites in the Pengxi River, (c) Sampling sites in the Modao River

### 1.2 采样点设置

根据澎溪河流域的地理环境和水动力特征,沿澎溪河流域从中游到长江口沿河道中泓线设置 4 个采样点(图 1b),在磨刀溪流域设置 1 个采样点(图 1c)。于 2023 年 6 月 22－23 日(夏季放水期)进行采样监测。其中 PX4(高阳平湖)位于过水性湖泊,与下游 PX3 样点沿河道相距约 4 km,PX2 和 PX1 分别位于澎溪河中下游和下游河口处,MD1 位于磨刀溪中游。经无人船(华微 3 号,上海华测导航技术股份有限公司,上海)在库区夏季的放水期测定,PX1、PX2、PX3、PX4 和 MD1 河道宽度分别为 330、360、390、840 和 180 m。

### 1.3 样品采集与处理

1.3.1 泥芯的采集与处理　使用型号为 Vi-

表 1 澎溪河、磨刀溪水体和沉积物参数比较*

Tab. 1 Distribution of water and sediment factors in Pengxi River and Modao River

| 参数 | 澎溪河 | | 磨刀溪 | |
|---|---|---|---|---|
| | 水体 | 沉积物 | 水体 | 沉积物 |
| 总氮(TN) | 2.66 | 0.90 | 2.62 | 0.83 |
| 溶解性总氮(DTN)/有效氮(AN) | 2.12 | 0.08 | 2.13 | 0.06 |
| 总磷(TP) | 0.13 | 0.59 | 0.14 | 0.60 |
| 溶解性总磷(DTP)/有效磷(AP) | 0.07 | 0.03 | 0.08 | 0.02 |
| 有机质(OM) | — | 20.89 | — | 12.23 |
| 叶绿素(Chl. *a*) | 0.18 | — | 0.04 | — |

* 水体理化指标(TN、DTN、TP、DTP 和 Chl. *a*)单位为 mg/L,沉积物理化指标(TN、AN、TP、AP 和 OM)单位为 g/kg。

beCore-MiniC(美国 Deyan Technology 公司)的 SDI 高频振动泥芯取样钻机对目标点进行沉积物钻探,钻探深度设定为从钻头穿透泥状沉积物直至到达石质河床并无法进一步钻探为止。现场将每根沉积物柱沿横截面平直剖开,将一半沉积物柱用聚乙烯膜包好,在云南大学高原湖泊生态与治理研究院使用型号为 MSCL-XRF(荷兰 Avaatech 公司)的高分辨率 XRF 岩芯扫描仪对沉积物柱进行扫描,获取表面高清光学成像;另一半沉积物柱,每 5 cm 为一段,每段样品沿竖直方向平分为 4 份。其中一份样品干冰低温冷冻保存用以 DNA 高通量测序,其余 3 份样品常温保存,分别用以泥芯定年、粒度和营养盐的测定。

泥芯定年使用 PX4 泥芯(高阳平湖)在中国科学院南京地理与湖泊研究所进行,采用$^{210}$Pb 同位素定年法,即将样品冻干后研磨,装入测试样品盒密封 10 d 后放入高纯锗伽玛能谱仪(Ortec HP Ge GWL)进行定年[22]。粒度和营养盐指标在陕西禾土环检生态科技有限公司测定,取 PX4 和 MD1 泥芯样品进行风干,使用 Mastersizer 3000 激光粒度分析仪(英国 Malvern 公司)测定粒度。分别用重铬酸钾氧化外加热法测定总有机碳(TOC)和 OM(OM=TOC×1.72)、浓硫酸硝化—凯氏定氮法测定 TN、钼锑抗比色法测定 TP 和 AP(主要包括底泥中交换态磷、部分可矿化有机磷及松散结合的无机磷)、碱解扩散法测定 AN[23]。

取 PX1~PX4 和 MD1 泥芯的表层 20 cm 样品(每 5 cm 分层),在上海美吉生物医药科技有限公司(http://www.majorbio.com)使用 Illumina Nextseq2000 平台进行 DNA 高通量测序。用 Soil DNA Extraction Kit 试剂盒抽提样品微生物 DNA,进行 PCR 扩增和测序文库构建。为全面解析沉积物记录,避免偏向单一类群,选择原核和真核微生物的通用引物,扩增区间为 16S rRNA 和 18S rRNA 基因的 V4~V5 可变区。16S rRNA 扩增引物为 314F(5′-CCTACGGGNGGCWGCAG-3′)、805R(5′-GACTACHVGGGTATCTAA TCC-3′),18S rRNA 的扩增引物为 3NDF(5′-GGCAAGTCTGGTGCCAG-3′)、V4-euk-R2R(5′-ACGGTATCTRATCR TCTTCG-3′)[24]。将所有样本序列数抽平至 23143,抽平后每个样本的平均序列覆盖度仍可达 99.58%。基于 Sliva 138/16S rRNA 细菌和 Sliva 138/18S rRNA 真核生物基因数据库,使用 Qiime2 中的 Naive bayes 分类器对 ASVs 进行物种分类学分析。

1.3.2 水体藻类群落及底泥样品的采集与处理 水体镜下形态学鉴定浮游植物相较于沉积物 DNA 分析在识别当前优势藻类方面具备更为直观的优势,便于计算优势藻类的丰度和生物量,为分析泥芯藻类群落结构的演替提供补充和佐证。为此,本研究于 2022 年 5 月 8、9、15 和 16 日水华暴发期间,用有机玻璃采水器(格雷斯普科技开发公司,北京市)分别采集 PX1~PX4 和 MD1 采样点表层(0.5 m 深度处)水样,每个采样点水样收集于 2 个 500 mL 聚乙烯瓶中,一瓶于 4 ℃下冷藏,另一瓶立即加入 7.5 mL 鲁哥试剂摇匀,常温保存,在采样后 48 h 带回实验室分析[21]。

上述每 500 mL 水样中,100 mL 水样直接用于 TN、TP 浓度的测定;剩余 400 mL 水样经 0.45 μm 混合膜过滤后,滤膜用于测定 Chl. *a* 浓度;滤液用于测定 DTP、DTN 浓度;底泥用国产的 ETC-200 污泥采集器(金坛区白塔新宝仪器厂,江苏)采集,取底泥表面 0~2 cm 样品,测定 OM、TN、TP、AP 和 AN 含量。将 500 mL 水样浓缩至 50 mL,静置 24 h,再次浓缩至 5 mL,将样品充分摇匀,吸取 0.1 mL 到计数框中,计数框横、竖各划分 10 行格,共 100 个小方格,使用 BX53F2 显微镜(奥林巴斯公司,日本)并通过迅数 F310 浮游生物鉴定计

数软件(杭州迅数科技有限公司,浙江)对计数框中的浮游植物进行拍照计数[25]。计算公式如下:

$$浮游植物密度=\frac{总数}{行数}\times\frac{1}{目镜直径}\times物镜倍数\times浮游计数框宽度\times\frac{浓缩后体积}{采样水量} \quad (1)$$

$$浮游植物生物量=\frac{总数}{行数}\times\frac{1}{目镜直径}\times物镜倍数\times浮游计数框宽度\times\frac{浓缩后体积}{采样水量}\times\frac{1}{10000} \quad (2)$$

### 1.4 数据分析与处理

1.4.1 沉积物年代　由于样品中$^{137}Cs$比活度未显示明显峰值,所以选择$^{210}Pb$测年方法进行沉积物年代测定。鉴于三峡工程蓄水前后澎溪河流域环境、气候和流域源区的改变,沉积速率可能发生明显变化,所测年代的时段内沉积速率为非恒定,选用恒定放射性通量模式计算泥芯的沉积年龄[26],其表达式为:

$$T=-\lambda^{-1}\ln(1-\zeta) \quad (3)$$

$$^{210}Pb_{ex}=^{210}Pb-^{210}Pb_{eq} \quad (4)$$

式中,$T$为泥芯当前深度的年龄,$\lambda$为$^{210}Pb$半衰期常数,$\zeta$为当前深度以上$^{210}Pb_{ex}$累计值与整个样柱$^{210}Pb_{ex}$累计值的比值,$^{210}Pb_{eq}$为与样品中$^{226}Ra$呈放射性长期平衡的$^{210}Pb$放射性强度。由此计算澎溪河沉积物的沉积速率和堆积年龄[27]。磨刀溪泥芯则基于粒度变化和事件定年(三峡蓄水事件)[28],确定其蓄水后的沉积物累积深度。

1.4.2 粒度分级和营养盐沉积通量　粒度分级根据 Krumbein $\Phi$ 值公式:

$$\Phi=-\log_2(d/d_0) \quad (5)$$

式中,$\Phi$为粒度指数,用于表示颗粒的粒径等级;$d$为颗粒直径(mm);$d_0$为标准颗粒直径(1 mm)[28]。粒度分级为:中细砂($1<\Phi\leqslant2$)、细砂($2<\Phi\leqslant3$)、极细砂($3<\Phi\leqslant4$)、粗粉砂($4<\Phi\leqslant5$)、中粉砂($5<\Phi\leqslant6$),其中$\Phi$值越小,粒径越粗,$\Phi$值越大,粒径越细。

沉积物营养盐沉积通量[29-30]计算公式为:

$$F=C\times R\times\rho_{dry} \quad (6)$$

式中,$F$为营养盐沉积通量($g/(m^2\cdot a)$),$C$为沉积物中营养盐含量(g/kg),$R$为沉积速率(cm/a),$\rho_{dry}$为沉积物的干密度($g/cm^3$)。

1.4.3 数值分析方法　本研究采用非度量多维尺度分析(NMDS)优化高通量测序样本间的相对距离关系,将高维数据映射到低维空间,以揭示样本间的群体差异。使用 NMDS 模型,旨在分析不同采样点、深度及沉积物中微生物群落结构的差异,为深入探讨环境因素对微生物群落分布的影响提供依据。此外,通过 Wilcoxon 秩和检验对 alpha 多样性进行组间差异分析,以明确泥芯中微生物群落的分布差异。

1.4.4 统计和作图　使用 Excel 2019 软件进行数据统计;使用 Mothur 软件计算 Alpha 多样性指数;通过 SPSS 16.0 对藻类基因表达和环境因子指标之间的相关性进行统计分析;使用 Origin 2021 软件进行相关图形的绘制。

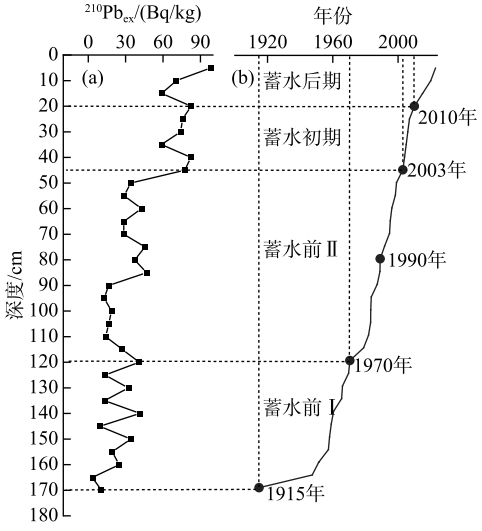


图 2 澎溪河 PX4 泥芯沉积物年代变化

Fig. 2 Chronological changes in sediment core of the PX4 in Pengxi River

## 2 结果与分析

### 2.1 沉积物年代变化与粒度组成

通过整合$^{210}Pb$和$^{226}Ra$的比活度得到采自澎溪河高阳平湖 PX4 的柱状沉积物$^{210}Pb_{ex}$比活度垂直分布特征(图 2a)。定年结果显示,PX4 泥芯底部沉积年代为 1915 年,记录了澎溪河距今约 108 年泥沙连续沉积的历史(图 2b)。澎溪河泥芯总长 170 cm,其中蓄水后的泥芯沉积深度为 0~45 cm。结合三峡库区成库蓄水并依据定年结

果和沉积速率变化,将泥芯分为蓄水前Ⅰ、Ⅱ和蓄水初期、后期4个阶段,即蓄水前Ⅰ阶段,120~170 cm(1915—1970年),平均沉积速率较低,为0.91 cm/a;蓄水前Ⅱ阶段,45~120 cm(1970—2003年),平均沉积速率较高,为2.27 cm/a;蓄水初期阶段,20~45 cm(2003—2010年),由于蓄水导致消落带淹没和水位波动,泥沙颗粒沉积速率较快,平均为3.57 cm/a,是蓄水前(2003年以前)的1.57倍;蓄水后期阶段,0~20 cm(2010—2023年),随着水体环境的逐渐稳定,沉积速率逐渐降低,平均沉积速率为1.50 cm/a,低于蓄水前Ⅱ和蓄水初期阶段(1970—2010年)。

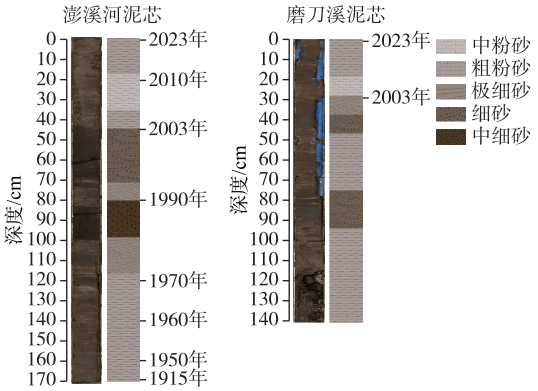


图3 澎溪河和磨刀溪泥芯粒度分布

Fig. 3 Grain size distribution of sediment cores in Pengxi River and Modao River

澎溪河和磨刀溪的泥芯岩性变化趋势整体相近,上部泥芯呈灰棕色,颗粒较细;中部泥芯颜色逐渐加深至黑棕色,颗粒明显变粗;下部泥芯颜色转为深棕色,颗粒细化(图3)。澎溪河泥芯在45 cm深度处出现明显的分层界线,表现为由细砂向粉砂和黏土过渡,颗粒显著细化,表明这是三峡成库后澎溪河沉积物的厚度。同样,在磨刀溪泥芯的30 cm深度处也观察到类似的分层界线,两处泥芯粒度变化与观察结果高度一致。根据澎溪河与磨刀溪地理位置相邻且同时经历了蓄水事件的特点,结合泥芯粒度变化的相似性,可以推测三峡成库后磨刀溪的沉积深度约为30 cm,平均沉积速率为1.50 cm/a。

### 2.2 泥芯营养盐累积动态

澎溪河PX4泥芯的TOC和TN含量随时间变化整体呈增加的趋势(图4a),TOC含量在0.18%~1.26%之间变化,平均为0.83%;TN含量在0.02%~0.11%之间变化,平均为0.07%。TOC和TN含量在沉积物上部0~70 cm处明显高于下部,增幅始于80 cm(1990 A. D.)处。TOC/TN比值在120 cm处(1970 A. D.)出现了19.13的异常高值,标志着有机质的来源组成发生了显著改变。

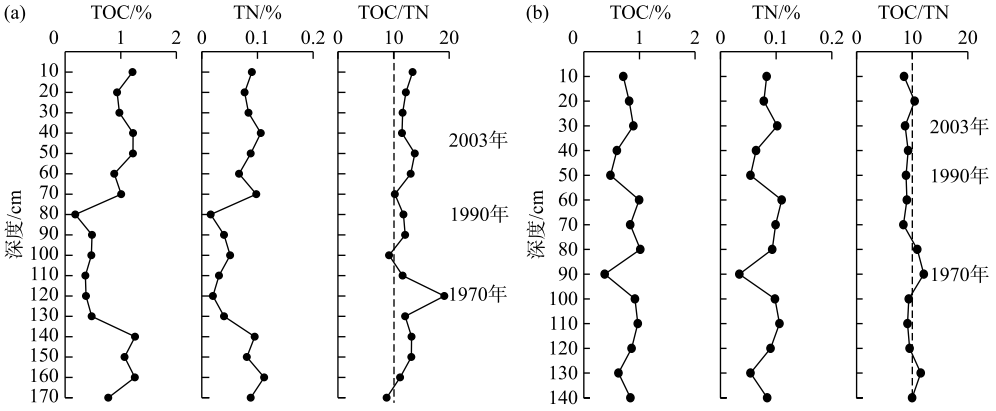


图4 澎溪河(a)和磨刀溪(b)泥芯TOC、TN含量和TOC/TN

Fig. 4 TOC, TN content and TOC/TN of sediment cores in Pengxi River (a) and Modao River (b)

磨刀溪MD1泥芯的TOC和TN含量随时间变化呈波动变化趋势(图4b),TOC含量在0.38%~1.02%之间变化,平均为0.78%;TN含量变化范围为0.03%~0.11%,平均为0.08%。TOC和TN含量增幅始于50 cm处,且TOC/TN比值在90 cm处达到最高值,为12.08。由于两河位于同一县境,具有相同的气候条件,沉积物变化受相似的环境因素影响,澎溪河和磨刀溪应在相同的时间节点经历了相似的环境变化,因此推测

磨刀溪泥芯 50 cm 处为 1990 年,90 cm 处为 1970 年。

泥芯营养盐累积值是底泥中营养盐长期富集的沉积通量,其动态反映该通量的时序变化。澎溪河泥芯的 OM 和营养盐波动变化较为明显(图 5a、b)。结合 TOC/TN 异常高值(1970 年)及泥芯粒度分界线(蓄水事件),将澎溪河泥芯蓄水前后分为 3 个阶段:120~170 cm,即蓄水前Ⅰ阶段(1915—1970 年),OM 和营养盐沉积通量由下往上呈下降趋势,OM、TN、TP、AP 和 AN 平均沉积通量分别为 20.17、1.05、0.69、0.01 和 0.03 g/($m^2$·a);45~120 cm,即蓄水前Ⅱ阶段(1970—2003 年),各指标达到整个泥芯的谷值后,于 80 cm(1990 年)处显著上升,平均沉积通量分别为 13.35、0.81、0.61、0.01 和 0.02 g/($m^2$·a);0~45 cm 即蓄水期阶段(2003—2023 年),澎溪河泥芯中的 OM 和营养盐沉积通量再次呈现上升趋势,平均分别为 25.95、1.24、0.80、0.02 和 0.03 g/($m^2$·a),较蓄水前Ⅱ阶段(1970—2003 年)分别增加了 94.38%、53.09%、31.15%、77.78% 和 55.56%。

磨刀溪泥芯各指标波动变化较小,但同样可分为 3 个阶段:90~140 cm,即蓄水前Ⅰ阶段(1970 年之前),与澎溪河此阶段相似,OM 和营养盐沉积通量整体随时间变化呈下降趋势,OM、TN、TP、AP 和 AN 平均沉积通量分别为 15.26、0.91、0.57、0.01 和 0.02 g/($m^2$·a);30~90 cm,即蓄水前Ⅱ阶段(1970—2003 年),也与澎溪河相似,各指标呈波动变化,于 50 cm 处(1990 年)显著上升,平均沉积通量分别为 12.90、0.79、0.54、0.01 和 0.01 g/($m^2$·a);0~30 cm,即蓄水期阶段(2003—2023 年),与澎溪河不同,磨刀溪泥芯中的 OM、TN、TP、AP 和 AN 沉积通量变化不大,平均分别为 14.32、0.90、0.63、0.01 和 0.01 g/($m^2$·a),较蓄水前Ⅱ阶段(1970—2003 年)仅分别增加了 11.01%、13.92%、16.67%、7.19% 和-2.17%。

在三峡库区蓄水前,澎溪河和磨刀溪泥芯的 OM 和营养盐沉积通量几乎相同,而蓄水后,澎溪河泥芯各指标沉积通量显著上升且增幅远超磨刀溪。这表明蓄水前两河受外源输入条件影响相近,蓄水后则因富营养化程度差异导致其沉积物累积速率不同。

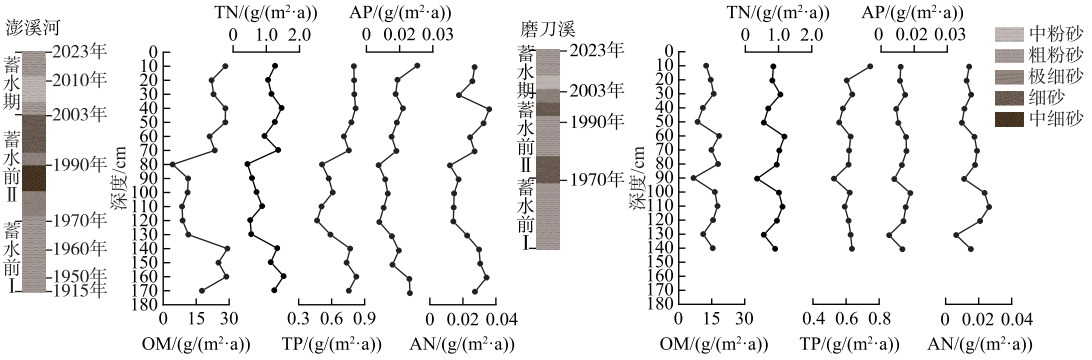


图 5 澎溪河和磨刀溪泥芯营养盐分布

Fig. 5 Nutrient distribution of sediment cores in Pengxi River and Modao River

表 2 不同生境微生物 Alpha 多样性的表层分布

Tab. 2 Surface distribution of microbial Alpha diversity in different habitats

| 样品 | 16S rRNA | | 18S rRNA | |
|---|---|---|---|---|
| | Shannon | Chao | Shannon | Chao |
| PX4 | 7.63 | 3458.90 | 6.15 | 1499.23 |
| PX3 | 7.55 | 3509.91 | 5.88 | 1261.96 |
| PX2 | 7.48 | 3695.59 | 5.24 | 927.29 |
| PX1 | 7.62 | 3983.43 | 4.41 | 846.75 |
| MD1 | 7.44 | 3622.40 | 5.38 | 1140.38 |

### 2.3 泥芯中微生物分布的差异分析

Alpha 多样性分析显示,原核生物群落(16S rRNA)在两河底泥中均表现出较高的生物多样性(Shannon 指数为 7.44~7.63)和物种丰富度(Chao 指数为 3458~3983),但不同样本间的原核生物群落种类和组成并未表现出显著差异(表 2)。真核生物群落(18S rRNA)方面,从澎溪河中游到下游各采样点的生物多样性和物种丰富度沿水流方向依次降低。此外,澎溪河中游 PX4 采样点真核生物群落的 Shannon 指数(6.15)与 Chao 指数(1499)显著高于磨刀溪中游 MD1 采样点,进一步表明

澎溪河较磨刀溪具有更高的真核生物群落多样性和物种丰富度。

泥芯表层 20 cm 的测序结果显示(图 6),在澎溪河和磨刀溪泥芯中的原核藻类(平均为 0.67% ~ 1.31%)以蓝藻为主。蓝藻在各采样点泥芯表层 0~5 cm 相对丰度最高。垂向分布上,在澎溪河下游的 PX1 和 PX2 以及磨刀溪中游 MD1 采样点,蓝藻相对丰度呈现随深度增加逐渐降低的趋势。而在澎溪河中游的 PX3 和 PX4 采样点,蓝藻相对丰度随深度变化表现出波动性。15 ~ 20 cm 深度处蓝藻相对丰度 PX3(1.67%)>PX4(0.62%)>PX2(0.56%)>MD1(0.45%)>PX1(0.29%)。

两河泥芯中的真核藻类(平均为 4.87% ~8.77%)以绿藻和甲藻为主。在澎溪河下游的 PX1 和 PX2 采样点,泥芯中真核藻类的相对丰度随深度增加逐渐降低。在澎溪河中游的 PX3 和 PX4(10~15 cm 深度处未检测到真核藻类)采样点,其相对丰度在垂向分布中较高且较为稳定(7.22% ~9.42%),这与蓄水后澎溪河水华现象集中发生在中游的 PX3 和 PX4 样点相符。而在磨刀溪,真核藻类的相对丰度在表层 0~5 cm 深度(1.71%)显著低于该断面其他深度。因此,基于两河泥芯的 DNA 高通量数据分析得出,在蓄水后期(2010—2023 年),澎溪河的藻类群落结构主要以蓝藻、绿藻和甲藻为优势类群;磨刀溪的藻类群落则以蓝藻和绿藻占主导地位。

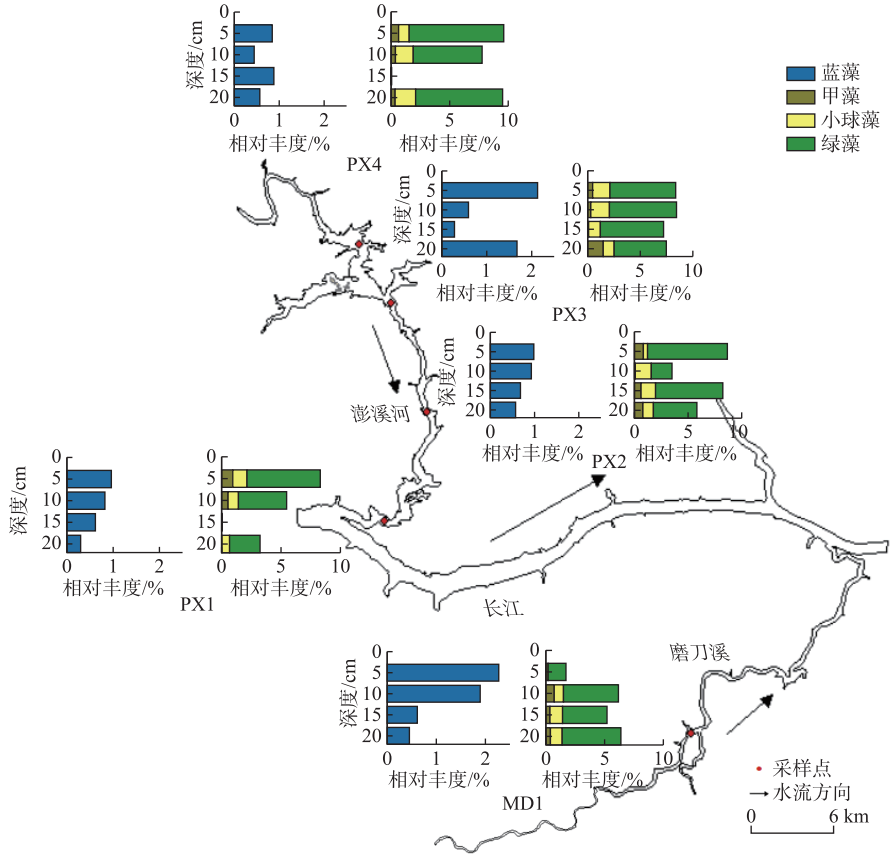


图 6 澎溪河、磨刀溪泥芯中不同深度水华藻类类群的相对丰度动态变化

Fig. 6 Dynamics of relative abundance of bloom-forming algae taxa at different depths in the sediment of Pengxi River and Modao River

图 7a 为基于 DNA 高通量数据对澎溪河和磨刀溪泥芯进行的属水平微生物群落相似性分析。样品检验的 NMDS 模型对原始数据的拟合度较好(stress=0.086)。分析结果表明,不同采样点间的微生物群落组成具有一定差异,其中 PX4、PX3 和 PX2 采样点的微生物群落组成较相似($R$=0.02,$P$=0.38),而与 PX1 及

MD1 采样点的微生物群落组成差异显著($R=0.41$,$P=0.05$)。图 7b 为两河泥芯优势藻类和环境因子间的相关性分析,表明在沉积物中甲藻与 OM 含量呈现显著正相关($R^2=0.83$,$P<0.05$),绿藻与 TP($R^2=0.73$,$P<0.05$)和 AP($R^2=0.89$,$P<0.01$)呈现显著正相关。

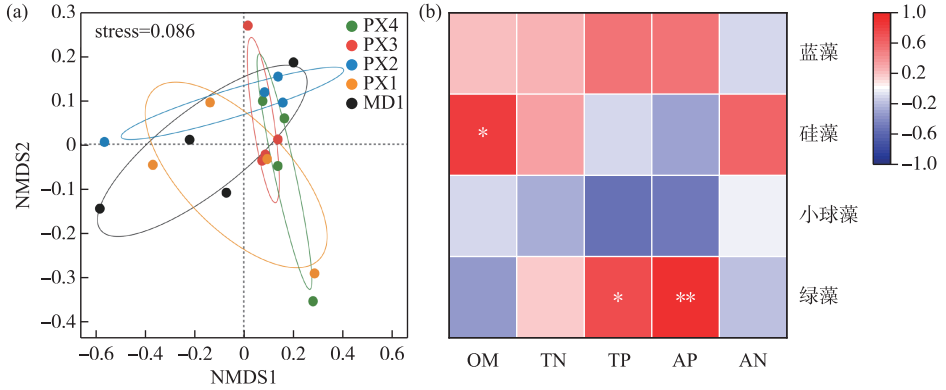


图 7 基于属水平的非度量多维尺度分析(a),沉积物中水华优势藻类热图(b)
( * $P\leqslant0.05$; ** $P\leqslant0.01$)

Fig. 7 Non-metric multidimensional scaling (NMDS) at genus level (a), Heatmap of dominant bloom-forming algal genera in sediments(b)( * $P\leqslant0.05$; ** $P\leqslant0.01$)

### 2.4 澎溪河和磨刀溪水华季水体藻类组成

作为验证,2022 年春季水华季对表层水体浮游藻类的分析结果也表明,澎溪河和磨刀溪不同采样点水体中浮游植物生物量和群落结构均存在显著的空间差异(图 8)。澎溪河水体浮游植物丰度范围为 $0.44\times10^6$(PX1)~$5.71\times10^6$(PX2)cells/L,而磨刀溪水体浮游植物丰度为 $1.52\times10^6$ cells/L。澎溪河 PX1、PX2 和 PX3 样点浮游植物群落丰度以蓝藻门和绿藻门为主,PX4 群落丰度则以甲藻门为主,其中飞燕角甲藻(*Ceratium hirundinella*)占水体藻类总生物量的 98%。磨刀溪水体的浮游植物群落丰度以绿藻门为主。飞燕角甲藻的平均个体体积为蓝藻门中占绝对优势的卷曲鱼腥藻(*Anabaena circinalis*)的 333 倍,是绿藻门中占绝对优势的小球藻(*Chlorella vulgaris*)的 215 倍。尽管磨刀溪 MD1 样点的浮游植物丰度高于澎溪河 PX4 样点,但 PX4 样点的浮游植物生物量是 MD1 样点的 6.67 倍。

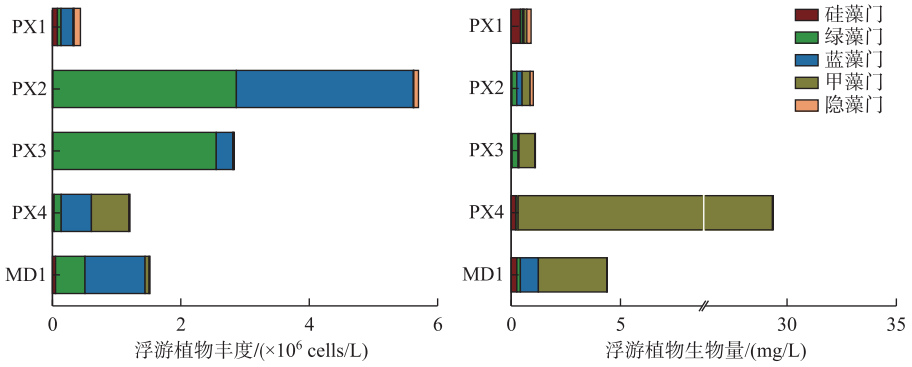


图 8 澎溪河、磨刀溪水体浮游植物群落丰度和生物量分布

Fig. 8 Distribution of phytoplankton community abundance and biomass in Pengxi River and Modao River

## 3 讨论

### 3.1 澎溪河和磨刀溪内源营养积累与水华强度间的响应关系

Allison 等[31]和陈昭明等[32]的研究表明,水体营养盐过剩是库区水华暴发的本质因素,适宜的光照、温度和水动力条件是水华暴发的重要原因。随着三峡库区开始蓄水,超过 50% 的支流出现不同程度的水华现象[16]。在研究区域内,澎溪河和磨刀溪的富营养化差异主要源自流域面积、土地利用方式以及农业活动强度等方面的不同[20]。过量的氮、磷等营养盐供给为澎溪河的水华暴发提供了物质基础[33]。这些营养盐主要来源于流域内农业活动、生活污水和径流等多种非点源污染物的汇入。在水华期间,蓝藻、绿藻和甲藻等浮游藻类大量繁殖不仅增加了水体的耗氧量,抑制了好氧生物的生长繁殖,还通过影响沉积物—水微界面的交互作用[34-35],破坏了水生生态系统的多样性和稳定性。同时,部分藻类在繁殖过程中释放的毒素(如微囊藻毒素、河豚毒素等)对鱼类和其他水生动物具有直接毒性,严重时可导致它们大规模死亡。藻类毒素不仅大幅增加了饮用水处理的难度和成本,还严重威胁公共健康[36]。在水华消退期,大量藻类细胞消亡并随之分解,这一过程释放的氮、磷化合物及有机碳等营养物质短期内无法被完全消耗,从而加剧了水体的内源性营养负荷。蓄水导致的河流湖泊化使残余的藻体逐步原位沉降至水体底部,通过微生物的分解代谢,不断转化为不同形式的有机质和无机磷,进而导致底泥中有机质和内源磷的持续累积;同时,有害藻类在消亡过程中常形成孢囊或休眠细胞,沉积于底泥中,在条件适宜时可重新激活,进一步增加了水华暴发的潜在风险[37]。

而底泥中富集的营养盐为藻类生长持续提供营养,能够维持甚至加剧水华的发生。底泥有机质主要通过细菌和真菌等异养微生物的分解,从高分子有机质降解为低分子有机质,并最终矿化成氮、磷等无机化合物[38]。这些营养元素的释放结合底泥扰动和微生物活动,将惰性有机质转化为水体可用营养。此外,沉积物中内源磷的释放受颗粒再悬浮、pH、溶解氧及磷形态等因素的影响,通过各形态磷之间相互转化迁移,最终以弱结合态磷($NH_4Cl$-P)的形式通过间隙水扩散到上覆水,为藻类的大量繁殖提供有利条件[2,39]。

泥芯数据显示,库区蓄水 20 余年后,澎溪河底泥中的 OM 和 TP 沉积通量显著增加,增幅分别高达 94% 和 31%,远超磨刀溪(图 5)。主要原因一方面是澎溪河流域以农业土地覆盖为主,森林覆盖率较低,外源性沉积物(粉砂颗粒磷)和营养负荷显著高于磨刀溪[20];另一方面,澎溪河频繁暴发大规模水华,藻类及其他浮游生物的沉降进一步促进了营养物质的累积。相关性分析显示,底泥中 OM 含量与甲藻分布($P<0.05$)、TP 和 AP 含量与绿藻分布呈显著正相关($P<0.01$),表明甲藻、绿藻水华对澎溪河底泥内源营养积累具有显著的驱动影响(图 7b)。此外,澎溪河底泥中较高的 OM 含量和 TP 含量,为水华的发生提供了丰富的营养源,进一步加剧了水华的发展。相比之下,磨刀溪的内源营养积累较少,其水华的发生频率和强度也较低。

### 3.2 藻类生物群落与生态环境的关系

三峡水库蓄水前(1970 年以前),由于水流湍急、水体充分混合,蓝藻和绿藻难以形成优势种群,整体生物量较低,三峡库区支流的藻类群落以硅藻为主,主要表现出典型的河流型特征[40]。支流断面的水质较好,富营养化程度较低,藻类群落结构简单,底栖生物数量有限,生态系统处于相对稳定的状态[41]。水体流速较快,沉积物难以积聚导致底泥粒度较粗,有机质和营养盐浓度较低。因此,此时期内支流水体对污染物的稀释能力强,水体的复氧能力基本上可以维持水生态系统物质循环和能量代谢的正常运行,库区支流未观测到水华现象[42]。

随着葛洲坝和三峡大坝等水坝的修建(1970—2003 年),支流水位逐渐升高,流速减缓,支流水体开始由贫—中营养状态逐渐向中—富营养状态转变[43]。藻类群落的结构表现为河流型和湖泊型的双重生态特征,以硅藻和绿藻为主,但未发现极为单一的优势种群[44]。

蓄水初期(2003—2010 年)库区水位上升,支流水体流速减缓,稀释自净能力减弱。澎溪河、大宁河等库区主要支流开始暴发水华,并呈现出逐渐加重的趋势[45],库区水质由蓄水前的Ⅱ类降为Ⅳ类[41]。长期的水质监测显示,这些支流的氮、磷营养盐浓度在蓄水前后变化不大,且均高于水华发生临界浓度,说明在成库前支流就已具备充足的水华发生营养基础[46]。支流呈现湖泊型的水库生态特征,较深水域内部的垂直循环受阻,出现温跃层[47],藻类群落结构以蓝藻和绿藻为主,部分支流出现了以拟多甲藻为优势的单一种群[44]。

蓄水后期(2010－2023 年),澎溪河的藻类群落结构以蓝藻、绿藻和甲藻为主。当甲藻成为主要优势种时,过量繁殖形成的水华使表层水体呈褐黄色并伴有腥臭味。底泥中的有机质和营养盐因水华现象的频繁发生进一步累积。蓄水后,底泥沉积环境较为稳定,粒度呈现较细特征。支流水体因热分层及有机质的耗氧降解,形成广泛的缺氧区[48],导致底泥中的污染物(如铁、锰、硫化物等)和大量氮、磷营养元素的释放[49],不仅直接威胁鱼类和底栖生物的生存和繁殖,还进一步加剧藻类生长暴发。

### 3.3 三峡库区甲藻水华的生态影响

自 2004 年三峡库区首次报道甲藻水华现象以来[50],多个支流回水区(如汝溪河、大宁河、香溪河、澎溪河等)均相继出现甲藻水华。2010－2023 年,澎溪河甲藻水华的发生频率显著增加,并逐步成为最主要的水华类型。目前,甲藻水华已经成为三峡库区支流最广泛且持续时间最长的生态问题之一[24,51-52]。

甲藻是混合营养性藻类,除通过光合作用获取能量外,还可通过摄取水体有机质和蓝藻等生物实现异养,这种特性使其在不同环境中具备更强的竞争优势[37]。甲藻的出现对库区的食物链产生深远影响。首先,甲藻产生的神经毒素能够抑制浮游动物的摄食行为,从而影响初级消费者的数量和种类。这些毒素通过食物链传递将进一步影响更高营养级的生物(包括鱼类、鸟类和哺乳动物),甚至对人类健康构成威胁[53]。另外,甲藻的大量繁殖不仅会抑制其他浮游植物的生长,改变浮游生物群落组成,进而破坏食物网结构和生态平衡[54];还会导致水体溶解氧下降,形成缺氧环境,严重时可能导致鱼类及其他需氧生物的大量死亡,极大威胁水生生态系统的生物多样性[55]。

因此,鉴于甲藻水华问题日益严峻,必须高度警惕其潜在的生态危害,并采取相应的有效措施控制水体富营养化,遏制甲藻水华的进一步发展。研究表明,生态清淤技术能够有效移除底泥有机质和营养盐,包括富含营养的软状沉积物(如淤泥)和半悬浮的絮状物(如藻类残体等)[56]。近年来,滇池、太湖等大型湖泊和水库通过实施生态清淤工程取得了显著的生态改善效果[57]。然而作为应急措施,生态清淤的效果具有短期性和局限性,无法从根本上解决外源性营养物质持续输入的问题。因此,水质的长期改善需将生态清淤与源头控制外源性营养输入相结合。

## 4 结论

1)三峡库区蓄水后,澎溪河和磨刀溪的生态特征由河流型逐渐转变为湖泊型水库。澎溪河由于水华频发,其沉积物和内源营养的累积速率显著高于磨刀溪,表明水体富营养化进程对河流内源物质积累具有显著的促进作用。其中,甲藻水华是蓄水后两河内源有机质沉积差异的主要原因,而绿藻水华则与内源磷的累积有关。此外,沉积物中的内源营养能够为藻类生长提供持续的养分供给,进而维持甚至加剧水体富营养化的发展态势。

2)随着三峡库区富营养化程度的加深,与澎溪河有类似生态特征的其他一级支流暴发水华的风险将持续增加。对水华频发河段实施清淤可在短期内缓解富营养化,而减少面源污染并降低沉积物内源物质积累才是改善库区一级支流水质的长期方针。

## 5 参考文献

[1] Xiang R, Wang LJ, Li H *et al*. Water quality variation in tributaries of the Three Gorges Reservoir from 2000 to 2015. *Water Research*, 2021, **195**: 116993. DOI: 10.1016/j.watres.2021.116993.

[2] Huang W, Zhang X, Luo XJ *et al*. River-lake states in the tributary of the Three Gorges Reservoir area and their effects on the phosphorus content of different forms in the sediment. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1356-1364. DOI: 10.13227/j.hjkx.202106176. [黄伟, 张钘, 罗晓佼等. 三峡库区支流的河-湖两态及其对沉积物不同形态磷含量的影响. 环境科学, 2022, **43**(3): 1356-1364.]

[3] Chen Q, Huang MT, Tang XD. Eutrophication assessment of seasonal urban lakes in China Yangtze River Basin using Landsat 8-derived Forel-Ule index: A six-year (2013-2018) observation. *Science of the Total Environment*, 2020, **745**: 135392. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135392.

[4] Yan MM, Zhang HH, Huang TL *et al*. Mechanism of algal community dynamics driven by the seasonal water bacterial community in a stratified drinking water reservoir. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 221-233. DOI: 10.13227/j.hjkx.202006234. [闫苗苗, 张海涵, 黄廷林等. 分层型水库藻类季相演替的细菌种群驱动机制. 环境科学, 2021, **42**(1): 221-233.]

[5] Fang HT, Song LX, Ji DB *et al*. Regional differences and mechanism analysis of summer blooms in Xiangxihe Reservoir Bay. *Environmen-*

*tal Science & Technology*, 2019, **42**(9): 68-74. [方海涛, 宋林旭, 纪道斌等. 香溪河夏季水华暴发差异性研究及其机制分析. 环境科学与技术, 2019, **42**(9): 68-74.]

[6] Huang JW, Ji DB, Song LX *et al*. Characteristics and effects of different density flows in tributaries of Three Gorges Reservoir in summer. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2019, **38**(4): 63-74. DOI: 10.11660/slfdxb.20190407. [黄佳维, 纪道斌, 宋林旭等. 三峡水库夏季不同支流倒灌特性及其影响分析. 水力发电学报, 2019, **38**(4): 63-74.]

[7] Kong FX, Gao G. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(3): 589-595. [孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考. 生态学报, 2005, **25**(3): 589-595.]

[8] Liu DF, Yang ZJ, Ji DB *et al*. A review on the mechanism and its controlling methods of the algal blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **47**(3): 443-454. [刘德富, 杨正健, 纪道斌等. 三峡水库支流水华机理及其调控技术研究进展. 水利学报, 2016, **47**(3): 443-454.]

[9] Søndergaard M, Jeppesen E, Lauridsen TL *et al*. Lake restoration: Successes, failures and long-term effects. *Journal of Applied Ecology*, 2007, **44**(6): 1095-1105. DOI: 10.1111/j.1365-2664.2007.01363.x.

[10] Yang ZJ, Yu Y, Chen Z *et al*. Mechanism of eutrophication and phytoplankton blooms in Three Gorges Reservoir, China: A research review. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2017, **50**(4): 507-516. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2017-04-005. [杨正健, 俞焰, 陈钊等. 三峡水库支流库湾水体富营养化及水华机理研究进展. 武汉大学学报: 工学版, 2017, **50**(4): 507-516.]

[11] Chen JA, Wan GJ, Zhang F *et al*. Environmental records of lake sediments at different time scales—A case study of sediment grain size. *Science in China: Ser D: Earth Sciences*, 2003, **33**(6): 563-568. [陈敬安, 万国江, 张峰等. 不同时间尺度下的湖泊沉积物环境记录——以沉积物粒度为例. 中国科学: D 辑: 地球科学, 2003, **33**(6): 563-568.]

[12] Dong XH, Yang XD, Liu EF. Diatom records and reconstruction of epilimnetic phosphorus concentration in Lake Taibai (Hubei Province) over the past 400 years. *J Lake Sci*, 2006, **18**(6): 597-604. DOI: 10.18307/2006.0607. [董旭辉, 羊向东, 刘恩峰. 湖北太白湖 400 多年来沉积硅藻记录及湖水总磷的定量重建. 湖泊科学, 2006, **18**(6): 597-604.]

[13] Xue B, Yao SC, Xia WL. Modern environmental changes of typical lakes along the middle and lower reaches of Yangtze River Basin. *Acta Geologica Sinica*, 2008, **82**(8): 1135-1141. [薛滨, 姚书春, 夏威岚. 长江中下游典型湖泊近代环境变化研究. 地质学报, 2008, **82**(8): 1135-1141.]

[14] Qin RC, Xiao Y, Guo JS *et al*. *In situ* research of relationship between cellular N/P of dominate algae species and limitation evaluation in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci*, 2018, **30**(5): 1284-1294. DOI: 10.18307/2018.0511. [秦镕聪, 肖艳, 郭劲松等. 三峡库区澎溪河典型优势藻细胞 N/P 比与限制性评价的原位分析. 湖泊科学, 2018, **30**(5): 1284-1294.]

[15] Zhang L, Wei JJ, Fu L *et al*. Temporal and spatial variation of nutrients and chlorophyll a, and their relationship in Pengxi River backwater area, Three Gorges Reservoir. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 2061-2069. DOI: 10.13227/j.hjkx.2015.06.020. [张磊, 蔚建军, 付莉等. 三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系. 环境科学, 2015, **36**(6): 2061-2069.]

[16] Luo XJ, Zhang X, Huang W *et al*. Severity differences and mechanisms of algal blooms among sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir. *Environmental Science*, 2023, **44**(1): 282-292. DOI: 10.13227/j.hjkx.202204018. [罗晓佼, 张钘, 黄伟等. 三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制. 环境科学, 2023, **44**(1): 282-292.]

[17] 牛晓旭. 基于水华发生程度的三峡库区澎溪河与磨刀溪水环境比较[学位论文]. 重庆: 西南大学, 2019.

[18] Wu HP, Zeng GM, Liang J *et al*. Changes of soil microbial biomass and bacterial community structure in Dongting Lake: Impacts of 50,000 dams of Yangtze River. *Ecological Engineering*, 2013, **57**: 72-78. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.04.038.

[19] Li Z, Bai L, Guo JS *et al*. Comparative study on water-air $CO_2$, $CH_4$ flux in two tributaries in the Three Gorges Reservoir, China. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 1008-1016. DOI: 10.13227/j.hjkx.2013.03.013. [李哲, 白镭, 郭劲松等. 三峡水库两条支流水-气界面 $CO_2$、$CH_4$ 通量比较初探. 环境科学, 2013, **34**(3): 1008-1016.]

[20] 赵晓松. 三峡库区澎溪河/磨刀溪流域土地覆被利用与水质关系探究[学位论文]. 重庆: 西南大学, 2018.

[21] Yao XX, Song ZH, Yang GL *et al*. How water stability relates with timing, size, and community successions of harmful algal blooms: A case study in the Three Gorges Reservoir. *Marine Pollution Bulletin*, 2024, **206**: 116781. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2024.116781.

[22] Zeng L, Wu FC, Wan GJ *et al*. The distribution characteristic and environmental significance of Cesium-137 deposit profile in Chinese lacustrine sediment. *J Lake Sci*, 2009, **21**(1): 1-9. DOI: 10.18307/2009.0101. [曾理, 吴丰昌, 万国江等. 中国地区湖泊沉积物中$^{137}$Cs 分布特征和环境意义. 湖泊科学, 2009, **21**(1): 1-9.]

[23] 鲍士旦. 土壤农化分析(第 3 版). 北京: 中国农业出版社, 2000.

[24] Ohore OE, Wei YJ, Wang YW *et al*. Tracking the influence of antibiotics, antibiotic resistomes, and salinity gradient in modulating microbial community assemblage of surface water and the ecological consequences. *Chemosphere*, 2022, **305**: 135428. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135428.

[25] 胡鸿钧, 李尧英, 魏印心等. 中国淡水藻类. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态. 北京: 科学出版社,2006.

[26] 沈吉. 湖泊沉积与环境演化. 湖泊沉积与环境演化. 北京: 科学出版社, 2010.

[27] Li WB, Lin JY, Zhou Q *et al*. Determination and environmental implications of $^{137}Cs$ and $^{210}Pb_{ex}$ in modern sediment from Luoma Lake. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2021, **33**(5): 41-45. [李文博, 林建宇, 周强等. 骆马湖现代沉积物$^{137}Cs$和$^{210}Pb_{ex}$的测定分析与环境指示意义. 环境监测管理与技术, 2021, **33**(5): 41-45.]

[28] Friedman GM, Sanders JE. Principles of sedimentology. Berlin: Wiley, 1978.

[29] Wu YH, Wang SM. Estimate of anthropogenic nutrient element fluxes recorded in lacustrine sediments: A case study in Longgan Lake. *Quaternary Sciences*, 2006, **26**(5): 843-848. [吴艳宏, 王苏民. 龙感湖沉积物中人类活动导致的营养盐累积通量估算. 第四纪研究, 2006, **26**(5): 843-848.]

[30] Li FY, Song JM, Li XG *et al*. Modern sedimentation rate and flux in the Jiaozhou bay. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, **23**(4): 29-33. [李凤业, 宋金明, 李学刚等. 胶州湾现代沉积速率和沉积通量研究. 海洋地质与第四纪地质, 2003, **23**(4): 29-33.]

[31] Allison AO, Randy AD, Michael LD. The upside-down river: Reservoirs, algal blooms, and tributaries affect temporal and spatial patterns in nitrogen and phosphorus in the Klamath River, USA. *Journal of Hydrology*, 2014, **519**: 164-176. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.06.025.

[32] Chen ZM, Wang W, Zhao Y *et al*. Water eutrophication status and control strategy of tributaries in the Three Gorges Reservoir region. *Environmental Engineering*, 2019, **37**(4): 32-37. DOI: 10.13205/j.hjgc.201904007. [陈昭明, 王伟, 赵迎等. 三峡水库支流水体富营养化现状及防治策略. 环境工程, 2019, **37**(4): 32-37.]

[33] Wang XQ, Li Z. Swat and mike21 coupled models and their application in the Pengxi watershed. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(3): 426-432. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201503011. [王晓青, 李哲. SWAT与MIKE21耦合模型及其在澎溪河流域的应用. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(3): 426-432.]

[34] Qin BQ, Zhu GW, Gao G *et al*. A drinking water crisis in Lake Taihu, China: Linkage to climatic variability and lake management. *Environmental Management*, 2010, **45**(1): 105-112. DOI: 10.1007/s00267-009-9393-6.

[35] Wang YP, Xie R, Chao JY *et al*. Effects of algal blooms and their degradation on the sediment-water microinterface. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3179-3186. DOI: 10.13227/j.hjkx.201710029. [王永平, 谢瑞, 晁建颖等. 蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响. 环境科学, 2018, **39**(7): 3179-3186.]

[36] Nwankwegu AS, Zhang L, Xie DT *et al*. Metabolites dynamics exacerbated by external nutrients inputs into a *Ceratium hirundinella*-dominated bloom in the Pengxi River, Three Gorges Reservoir, China. *Aquatic Toxicology*, 2023, **258**: 106507. DOI: 10.1016/j.aquatox.2023.106507.

[37] Wen G, Wang R, Wen CC *et al*. A review on the formation mechanism and *in situ* control of freshwater dinoflagellate bloom. *China Environmental Science*, 2023, **43**(5): 2239-2253. [文刚, 王茹, 温成成等. 淡水甲藻水华形成原因及原位控制研究进展. 中国环境科学, 2023, **43**(5): 2239-2253.]

[38] 熊薇. 有机质来源对洱海底泥垂向微生物群落组成的影响[学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2014.

[39] 俞林伟. 广东省城市湖泊底泥磷形态及其与富营养化的关系[学位论文]. 广州: 暨南大学, 2006.

[40] Qin YW, Han CN, Zheng BH *et al*. Analysis of transport and transformation characteristics between dissolved phosphorus and particulate phosphorus in water of the Three Gorges Reservoir. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2152-2159. DOI: 10.13227/j.hjkx.201808146. [秦延文, 韩超南, 郑丙辉等. 三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析. 环境科学, 2019, **40**(5): 2152-2159.]

[41] Kuang QJ, Tan YY, Wan DB *et al*. On the phytoplankton in the middle and lower reaches of the Hanjiang river and the prevention of water blooms. *Resources and Enuironment in the Yangtze Basin*, 2000, **9**(1): 63-70. [况琪军, 谭渝云, 万登榜等. 汉江中下游江段藻类现状调查及"水华"成因分析. 长江流域资源与环境, 2000, **9**(1): 63-70.]

[42] Feng J, He TR, Wei J. Analysis of water quality variation and countermeasures in Three Gorges Project Reservoir area before and after impoundment. *Journal of Chongqing Normal University: Natural Science*, 2011, **28**(2): 23-27. [冯静, 何太蓉, 韦杰. 三峡工程蓄水前后库区水质变化及对策分析. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2011, **28**(2): 23-27.]

[43] Huang XS. Water pollution and counter-measures in the Three Gorges Dam area. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2002, **25**(6): 155-158. [黄秀山. 三峡库区水污染及其治理对策. 重庆大学学报: 自然科学版, 2002, **25**(6): 155-158.]

[44] Liu F, Hua TM. Discussion on water environment problems and countermeasures in Three Gorges Reservoir area. *Design of Hydroelectric Power Station*, 1998, **14**(4): 33-36. [刘凤, 华涂敏. 三峡库区的水环境问题及对策探讨. 水电站设计, 1998, **14**(4): 33-36.]

[45] Kuang QJ, Bi YH, Zhou GJ *et al*. Study on the phytoplankton in the Three Gorges Reservoir before and after sluice and the protection of water quality. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2005, **29**(4): 353-358. [况琪军, 毕永红, 周广杰等. 三峡水库蓄水前后浮游植物调查及水环境初步分析. 水生生物学报, 2005, **29**(4): 353-358.]

[46] Qiu GS, Tu M, Ye D *et al*. General investigation of eutrophication for tributaries in TGP reservoir area. *Yangtze River*, 2008, **39**(13): 1-4, 106. [邱光胜, 涂敏, 叶丹等. 三峡库区支流富营养化状况普查. 人民长江, 2008, **39**(13): 1-4, 106.]

[47] Liu L, He XY, Fu JK *et al*. Benthic diatom communities in the main stream of Three Gorges Reservoir area and its relationship with envi-

ronmental factors. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3577-3587. DOI: 10.13227/j.hjkx.201901017. [刘黎, 贺新宇, 付君珂等. 三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系. 环境科学, 2019, **40**(8): 3577-3587.]

[48] Zhang X, Luo XJ, Huang W *et al*. Unique physical processes of canyon reservoirs regulate the timing and size of algal blooms - based on a study in Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydrology*, 2023, **621**: 129662. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129662.

[49] Diaz RJ, Rosenberg R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 2008, **321**(5891): 926-929. DOI: 10.1126/science.1156401.

[50] Singleton VL, Little JC. Designing hypolimnetic aeration and oxygenation systems—A review. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(24): 7512-7520. DOI: 10.1021/es060069s.

[51] Zhou GJ, Kuang QJ, Liu GX *et al*. Investigation on algal water-blooms in the Three Gorges Reservoir and its toxicological study. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, **30**(1): 37-41. [周广杰, 况琪军, 刘国祥等. 三峡库区藻类水华调查及其毒理学研究. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 37-41.]

[52] Huang YN, Ji DB, Long LH *et al*. The variance analysis of characteristics and blooms of the typical tributaries of the Three Gorges Reservoir in spring. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(3): 461-470. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201703017. [黄亚男, 纪道斌, 龙良红等. 三峡库区典型支流春季特征及其水华优势种差异分析. 长江流域资源与环境, 2017, **26**(3): 461-470.]

[53] Zhu AM, Li SX, Hu J *et al*. The mechanism for occurrence of *Peridiniopsis* blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(11): 3071-3080. DOI: 10.5846/stxb201304090646. [朱爱民, 李嗣新, 胡俊等. 三峡水库支流拟多甲藻水华的形成机制. 生态学报, 2014, **34**(11): 3071-3080.]

[54] Oshima Y, Minami H, Takano Y *et al*. Ichthyotoxins in a freshwater Dinoflagellate *Peridinium polonicum*. *Toxicon*, 1987, **25**(6): 603-610. DOI: 10.1016/0041-0101(87)90103-6.

[55] Rengefors K, Legrand C. Toxicity in *Peridinium aciculiferum*—An adaptive strategy to outcompete other winter phytoplankton. *Limnology and Oceanography*, 2001, **46**(8): 1990-1997. DOI: 10.4319/lo.2001.46.8.1990.

[56] Landsberg JH. The effects of harmful algal blooms on aquatic organisms. *Reviews in Fisheries Science*, 2002, **10**(2): 113-390. DOI: 10.1080/20026491051695.

[57] 倪其军. 富营养化湖泊底泥低扰动射流清淤及其余水人工湿地净化关键技术研究[学位论文]. 无锡: 江南大学, 2020.

[58] 张建华. 太湖生态清淤关键技术及效果研究[学位论文]. 南京: 南京大学, 2011.