

# 三峡水库干支流浮游植物群落演替规律及驱动机制研究进展

沈旭舟, 张佳磊\*, 曾一恒, 翁传松, 陈佳俊

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 河湖生态修复与藻类利用湖北省重点实验室, 湖北武汉 430068)

**摘要** 从三峡水库干支流浮游植物群落演替机制角度开展水华形成机制研究具有重要的科学意义, 系统凝练了国内外三峡水库干支流浮游植物群落演替规律及其驱动机制, 总结了以下几点研究进展: 干流浮游植物细胞密度显著低于支流浮游植物, 受到干支流水力特性影响, 干流以“激流型”的硅藻门藻类为优势种, 支流以“静水型”蓝藻和绿藻为优势种; 干支流浮游植物细胞密度和群落结构主要受到生境扰动强度的影响, 生境的扰动强度通过影响干支流水温、水体层化结构、光照强度、时间和频率, 营养盐脉冲浓度和频率来驱动浮游植物群落结构的演替; 浮游植物的演替过程更多的是“微生物”和浮游植物“细胞扩散”双重叠加的结果, “微生物”驱动强度强于“细胞扩散”过程。

**关键词** 浮游植物; 群落演替规律; 驱动机制; 三峡水库干支流

中图分类号 Q 948.8 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)20-0018-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.20.005



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Research Progress of Phytoplankton Community Succession and Driving Mechanism in the Main and Tributary Streams of the Three Gorges Reservoir

SHEN Xu-zhou, ZHANG Jia-lei, ZENG Yi-heng et al (School of Civil Engineering, Architecture and Environment of Hubei University of Technology, Key Laboratory of Hubei Province for Lake Restoration and Algae, Wuhan, Hubei 430068)

**Abstract** It is of great scientific significance to study blooms from the mechanism of phytoplankton succession in the main and tributary streams of the Three Gorges Reservoir. This paper systematically condensed the succession rules and driving mechanisms of phytoplankton communities in the main and tributary streams of the Three Gorges Reservoir at home and abroad, and summarized the following research progress: Phytoplankton density of the main streams were significantly lower than that of tributaries, which were affected by the hydrodynamic characteristic parameters. Bacillariophyta dominated in the main streams, while Cyanophyta and Chlorophyta and the tributaries were in dominated in the tributaries. The disturbance intensity of the habitat conditions (including water temperature, under solar-thermal structure and nutrient pulse concentration) were the key regulatory factor for phytoplankton density and community structure in the main streams and tributaries of the Three Gorges Reservoir. The progress of phytoplankton succession were affected by the “aquatic-habits” and the mechanism of “frustule diffusion”, the “aquatic-habits” were more important than the “frustule diffusion”.

**Key words** Phytoplankton; Community succession law; Driving mechanism; Main and tributary streams of the Three Gorges Reservoir

自 2003 年三峡蓄水成库后, 香溪河、大宁河、朱衣河、澎溪河等 17 条一级支流先后暴发了“水华”现象。水华暴发方式呈现以下 2 种形式: 一种呈现单点暴发, 随后水华优势种随着水流方向扩散; 另一种形式为河流中的多个位点同时出现浮游植物生物量的高峰值, 随后水华优势种随着水流逐步扩散, 上下勾连, 导致大面积水华的暴发<sup>[1-4]</sup>。鉴于其水华暴发形成的多样性和偶然性, 目前三峡水库支流的水华机制尚不明晰。从生态学角度来看, 水华是浮游植物群落演替的一个阶段<sup>[5-6]</sup>。因此从三峡水库干支流浮游植物演替角度开展三峡水库水华形成机制研究具有重要的科学意义。

国内外相关研究表明, 目前浮游植物演替机制主要有以下 3 种: ①依据生境选择学说、C-R-S、藻类生态功能分组、中度扰动、时间相干性等理论, 浮游植物的演替是机械能(水文水力学过程和风生流)<sup>[7-8]</sup>、物质场(营养盐和微量元素)和能量场(温度、水体层化结构和光场)叠加作用下浮游植物的响应过程<sup>[9-13]</sup>; ②“生物操纵”和“非经典生物操纵”认为浮游动物和鱼类等通过食物链的摄食作用来影响浮游植

物演替<sup>[14-16]</sup>; ③“Moran 效应”“数量效应”和“复合群落概念”认为, 浮游植物的演替除了受到机械能、物质场、能量场等生境要素的叠加影响和水生态系统食物链中“摄食效应”影响外, 还受到水体滞留时间主导下的细胞扩散效应的影响<sup>[17-18]</sup>。三峡蓄水成库后, 相关科研单位和学者围绕着三峡水库的生境特征、浮游植物演替机制方面开展了大量研究<sup>[19-23]</sup>。但是目前三峡水库的固有植物演替机制是属于以上 3 种的哪一种或者是多种机制叠加的结果尚未得到很好的回答。归根究底是以下 3 个科学问题尚不明晰: ①三峡水库干支流浮游植物的群落特征有何区别; ②三峡水库干支流浮游植物群落演替的关键影响因素尚未明确; ③三峡水库干支流浮游植物演替机制还未得到科学的解释。笔者围绕着上述 3 个关键科学问题, 系统凝练国内外三峡水库干支流浮游植物演替机制研究进展, 以期三峡水库浮游植物演替机制理论体系的构建提供理论基础, 同时为三峡水库水华的防控提供理论依据。

### 1 三峡水库干支流浮游植物群落结构研究进展

如图 1 所示, 三峡蓄水后, 干流水体浮游植物细胞密度为  $2.0 \times 10^4 \sim 3.4 \times 10^5$  个/L, 一级支流水体浮游植物细胞密度为  $6.1 \times 10^6 \sim 2.0 \times 10^7$  个/L<sup>[1, 24-25]</sup>, 干流浮游植物细胞密度显著低于支流浮游植物细胞密度<sup>[24, 26-27]</sup>。

蓄水后干支流浮游植物群落由硅藻、蓝藻、绿藻、甲藻、隐藻和裸藻组成, 但区别于支流“静水型”蓝藻和绿藻为优势

**基金项目** 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07101003-008); 三峡后续工作项目(2017HXXY-05); 国家科技合作项目与交流专项(2014DFE70070)。

**作者简介** 沈旭舟(1994—), 男, 浙江宁波人, 硕士研究生, 研究方向: 生态水工学。\* 通信作者, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事生态水工学研究。

**收稿日期** 2021-01-14

种,干流以“激流型”的硅藻门藻类为优势种<sup>[23,28-31]</sup>。受到干流水体滞留时间的影响,水体滞留时间短的干流内部断面间浮游植物群落相似度较高,水体滞留时间短的干流和相邻水体滞留时间略长的河口段浮游植物群落结构达到中等相似水平,水体滞留时间较长的支流内部断面浮游植物群落相似度较低<sup>[32]</sup>。

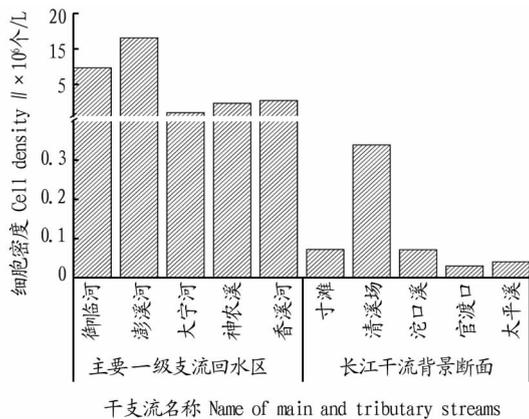


图1 三峡干支流浮游植物细胞密度对比<sup>[1,25]</sup>

Fig.1 Comparison of cell density of phytoplankton in the main and tributary streams of the Three Gorges Reservoir

## 2 三峡水库干支流浮游植物生境特征研究进展

### 2.1 三峡水库干流水文水力特征及其环境效应研究进展

按照水库生态学理论,三峡水库建成运行后对水库影响最直接和显著的影响是水库水文水力条件的改变,导致干支流藻类生境机械势能(水体流速、水体滞留时间和流场等)、物质场(主要是营养盐)、能量场(水下光场和水体层化结构等)的变化,从而以浮游植物群落结构变化表现出来<sup>[6,33-35]</sup>。因此,准确认知三峡水库干流水文水力学特性是开展三峡水库干支流浮游植物演替机制研究的前提条件。

如图2所示,野外监测数据和数值模拟结果表明蓄水后长江干流基本维持一维流态,水体流速从2 m/s下降至0.2~0.8 m/s<sup>[28,36]</sup>。蓄水后支流平均水体流速显著减小,不同支流流速在0.01~0.20 m/s,平均流速普遍小于0.05 m/s<sup>[28,37-41]</sup>。总体上,三峡干流水体流速显著高于一级支流。

三峡水库蓄水后水体滞留时间显著延长,干流平均水体滞留时间为5~77 d,一级支流平均滞留时间为26~538 d,按照Straskraba和Tundisi的水库分级标准<sup>[42]</sup>,干流水体基本上趋向于河流型水体,部分时段为过渡型水体<sup>[6,32]</sup>,支流为过渡型水体和湖泊型水体<sup>[28,43-45]</sup>。库区一级支流流场复杂,难以用一维流态简单概化,干流侵入水体与支流上游来水在密度差的作用下在库湾内形成分层异重流,广泛存在库区一级支流<sup>[6,46-47]</sup>。分层异重流的存在,导致干流水体在不同水文期以不同形式的异重流倒灌进入支流,从而对库湾的营养盐的迁移转化过程、水体层化结构和水下光场产生显著影响<sup>[34]</sup>。

### 2.2 三峡水库干流水质特征研究进展

三峡蓄水后,干流水体总氮和总磷浓度分别为1.5~2.0和0.14~0.17 mg/L,支流水体总氮和总磷浓度分别为1.1~1.7和0.05~0.30 mg/L<sup>[25]</sup>,干

流水体中总氮和总磷浓度显著高于相邻支流水体(图3)<sup>[31-32,48]</sup>。相关研究表明支流水体浮游植物细胞密度大于干流水体中浮游植物细胞密度,区别于浅水湖泊水体中氮、磷浓度和浮游植物细胞密度的线性关系,三峡水库浮游植物演替机制不能单纯地从氮、磷浓度与浮游植物相关关系这一研究角度切入<sup>[25]</sup>。

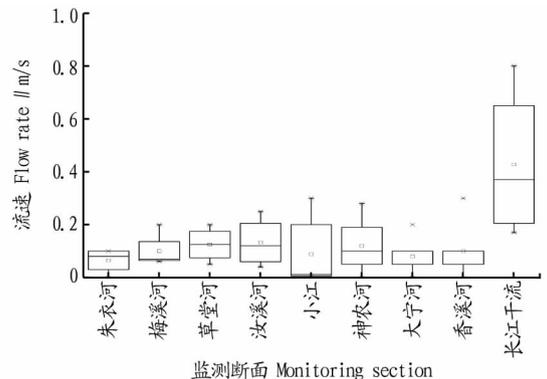


图2 三峡水库干支流水体流速特征<sup>[28,37-41]</sup>

Fig.2 Characteristics of water velocity in the main and tributary streams of the Three Gorges Reservoir

早期研究认为三峡水库支流营养盐主要来源于支流流域内污染源,但罗专溪等<sup>[49-50]</sup>在大宁河调查发现长江干流倒灌水体对大宁河库湾水体的氮、磷贡献量是上游来水的数倍,后期研究进一步表明干流倒灌是影响三峡库区支流水体中的氮、磷来源、数量和时空分布的重要因素<sup>[51-53]</sup>。支流营养盐浓度受到干流水体补给影响而升高,同时在干流顶托和分层异重流双重作用下,污染物在库湾内不易消散,为浮游植物的生长提供了充足的物质基础,同时也影响了浮游植物群落演替规律。

## 3 三峡水库干支流生物因素对浮游植物影响研究进展

三峡蓄水后,干流浮游动物丰度为800~1 600个/L,支流为8 000~12 000个/L,干流浮游动物密度显著高于支流浮游动物密度<sup>[54]</sup>。蓄水后干流原生动物、枝角和桡足等大型浮游动物种类显著增加,轮虫类群种数显著降低<sup>[54-56]</sup>,但支流浮游动物群落结构并未发生显著变化,主要由轮虫等小型浮游动物组成,大型浮游动物较少<sup>[57-58]</sup>。

三峡蓄水后,在水温、流速、水深、过水面积等因素影响下干流、支流鱼类密度均有所增加,变化范围分别为0.015 5~0.092 1和0.033 6~0.363 8尾/m<sup>3</sup>,支流鱼类密度显著高于干流<sup>[59]</sup>。蓄水后干流、支流鱼类群落结构均发生显著变化,激流性鱼类减少且多集中在干流上游,缓流性(或静水性)鱼类种类增加,主要集中在坝前和支流回水区<sup>[60]</sup>。

虽然蓄水后干流、支流浮游动物和鱼类密度均有所增加,与浮游植物时空变化趋势一致,但摄食浮游植物的浮游动物(枝角、桡足)和鱼类(鲢、鳙)密度较低,无法通过食物网的下行生物摄食效应来影响浮游植物的演替过程。

## 4 三峡水库干支流浮游植物演替驱动因素研究进展

### 4.1 生境扰动驱动

相关科研单位和学者综合利用现场监测、室内外控制试验和数值模拟技术开展了三峡水库支流浮

游植物驱动因素研究。彭成荣等<sup>[61]</sup>基于香溪河干支流野外监测结果指出洪水通过改变支流的水动力条件和水质状况,从而对浮游植物群落结构产生影响。崔玉洁<sup>[62]</sup>基于香溪河野外监测数据认为表层水温是驱动香溪河浮游植物群落演替的主要因素。香溪河、大宁河和彭溪河支流的监测数据表明,水动力参数(水体滞留时间和水体稳定参数)<sup>[29-30]</sup>、光热参数(非藻类浊度、藻类可利用的能量指数)<sup>[23]</sup>和营养盐参

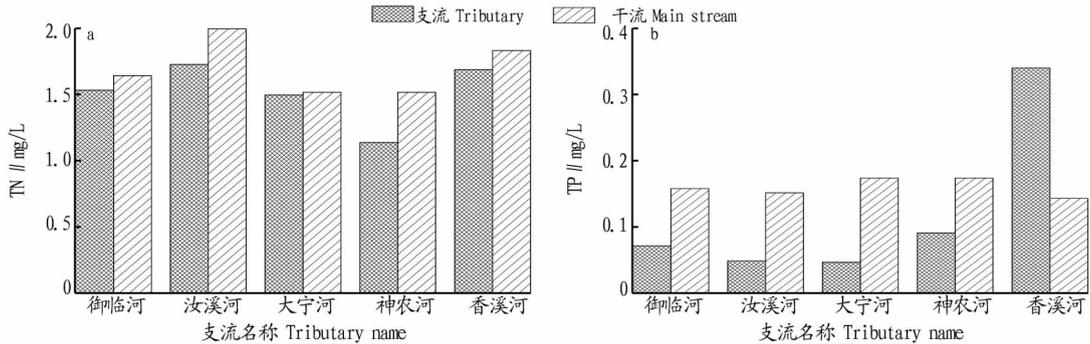


图3 蓄水后三峡水库干支流氮(a)和磷(b)浓度对比<sup>[25]</sup>

Fig.3 Comparison of nitrogen (a) and phosphorus (b) concentrations in the main and tributary streams of the Three Gorges Reservoir

**4.2 生物驱动** 按照“生物操纵”“非经典生物操纵”和“体积-效率假说”,大型浮游动物枝角类和桡足类主要摄食粒径小于 $40\ \mu\text{m}$ 的浮游植物,当浮游动物满足一定密度时,通过摄食效应,抑制粒径小于 $40\ \mu\text{m}$ 浮游植物生长,促使浮游植物向丝状藻或者易形成群体的方向演替;当水体中鲢鱼和鳙鱼密度达到 $50\ \text{g}/\text{m}^3$ ,通过摄食超微浮游植物或易形成群体的浮游植物影响浮游植物演替过程<sup>[67-68]</sup>。干支流浮游动物和鱼类调查结果表明,摄食浮游植物的枝角类、桡足类浮游动物和鲢鱼、鳙鱼并未占优,同时浮游动物生物量和鱼类的密度均较低<sup>[69]</sup>,无法通过食物网的摄食作用来影响浮游植物的演替过程。

**4.3 “微生境”和“细胞扩散”驱动** 香溪河、大宁河和小江流域均观测到干流内部断面间浮游植物群落相似度较高,水体滞留时间短的干流和相邻水体滞留时间略长的河口段浮游植物群落结构达到中等相似水平,水体滞留时间较长的支流内部断面浮游植物群落相似度较低的现象,认为浮游植物群落结构的演替可能是该断面的“微生境”驱动下浮游植物向适宜优势种演替的结果,也可能是水流中浮游植物细胞向相邻断面通过“细胞扩散机制”扩散的结果,也可能是2种机制叠加的结果<sup>[6,31,70]</sup>。李哲<sup>[37]</sup>通过化学计量学方法指出干支流间存在较强的流动性,使得彼此之间的浮游植物细胞存在一定的交换过程,澎溪河回水区浮游植物的演替过程更多的是“微生境”和浮游植物“细胞扩散”双重叠加的结果。徐耀阳<sup>[70]</sup>通过时间相干性理论和生态同步性理论发现,干流内部断面浮游植物群落同步性程度较高,表明干流内断面间有明显的浮游植物扩散过程;干支流间浮游植物群落同步性程度较低,表明干支流间浮游植物扩散能力较弱;支流库湾浮游植物群落同步性程度也较低,表明支流间浮游植物扩散能力也较弱,浮游植物的演替过程更多地取决于库湾支流“微生境”特征。

数(TP、溶解性硅酸盐浓度、硝酸盐浓度)<sup>[63-64]</sup>是影响浮游植物群落结构的关键要素。湖北工业大学生态水利学课题组通过系统梳理野外观测数据,针对性开展室内外控制试验,提出浮游植物群落结构主要决定于生境的扰动强度,生境的扰动强度通过影响水温、水体层化结构<sup>[28]</sup>,光照强度、时间和频率<sup>[65]</sup>,营养盐脉冲浓度和频率<sup>[66]</sup>来驱动浮游植物群落结构的演替。

## 5 结论与展望

三峡水库调度过程下的干支流间顶托倒灌、层化滞留、支流汇入等主要水文过程交互,显著影响营养盐迁移转化过程和水下光热结构,从而影响浮游植物群落结构演替过程<sup>[34]</sup>。该研究以“干支流相互作用”为切入点,系统凝练了国内外三峡水库干支流浮游植物群落演替规律及其驱动机制,总结了以下几点研究进展:①三峡蓄水后,干流浮游植物细胞密度显著低于支流浮游植物细胞密度,受到干流水动力特性的影响,干流以“激流型”的硅藻门藻类为优势种,支流以“静水型”蓝藻和绿藻为优势种。②干支流生境扰动强度的差异通过影响干流水温、水体层化结构,光照强度、时间和频率,营养盐脉冲浓度和频率来影响浮游植物群落结构的演替;浮游植物群落结构还受到浮游动物和鱼类摄食作用影响。③浮游植物的演替过程更多的是“微生境”和浮游植物“细胞扩散”双重叠加的结果,“微生境”驱动强度强于“细胞扩散”过程。

总体上,目前国内外相关单位从“干支流交互作用”开展浮游植物演替机制取得了阶段性成果,但是仍然存在一些问题。首先是由于时空限制所导致的现阶段的研究结果普适性有待进一步的验证,“时间限制”与三峡水库阶段蓄水方式有关,三峡水库2010年10月28日完成3期试验性蓄水,标志三峡水库进入正常运行阶段,在三峡水库3期试验性蓄水阶段和正常运行阶段水文情势频繁变动,水库生态过程尚不稳定,因此该阶段的研究结果能否适用于三峡水库正常运行阶段依赖于长期持续的监测和研究工作来验证;其次,三峡水库作为一个开放复杂巨大的水库系统,如果要将典型干支流的研究结果外推适用于整个三峡水库生态系统,需要在空间尺度上设置更多的监测断面;再次,从“干支流交互作用”开展浮游植物演替机制的研究偏重于宏观定性描述,缺乏对动态细节和关键过程的定量辨识,从物理学角度来看,水华

的形成、维持和消散过程是水体中总能量和物质与浮游植物生物体内能量和物质的动态平衡过程,因此可以引入水流势能、化学势能和热能势能等相关参数量化干支流间宏观的水文水力过程、生源要素迁移转化过程和热力学过程,构建干支流水文物理过程-化学过程-生物过程耦合定量关系,为正在大规模开展的三峡水库生态系统演变过程理论研究提供定量数据和理论支撑。

## 参考文献

- [1] 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[J].水生生物学报,2005,29(4):353-358.
- [2] 胡征宇,蔡庆华.三峡水库蓄水前后水生态系统动态的初步研究[J].水生生物学报,2006,30(1):1-6.
- [3] 曹承进,郑丙辉,张佳磊,等.三峡水库支流大宁河冬、春季水华调查研究[J].环境科学,2009,30(12):3471-3480.
- [4] 张敏,蔡庆华,王岚,等.三峡水库香溪河库湾蓝藻水华生消过程初步研究[J].湿地科学,2009,7(3):230-236.
- [5] REYNOLDS C S. The ecology of phytoplankton[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006: 1-36.
- [6] 郭劲松,李哲,方芳.三峡水库运行对其生态环境的影响与机制——典型支流澎溪河水环境变化研究[M].北京:科学出版社,2017:89-147.
- [7] 陈伟民,陈宇炜,秦伯强,等.模拟水力对湖泊生物群落演替的实验[J].湖泊科学,2000,12(4):343-352.
- [8] 潘雯雯,杨桂军,芮政,等.野外模拟扰动方式对太湖浮游植物群落结构的影响[J].环境科学研究,2020,33(6):1421-1430.
- [9] LITCHMAN E, KLAUSMEIER C A, BOSSARD P. Phytoplankton nutrient competition under dynamic light regimes[J]. Limnology and oceanography, 2004, 49: 1457-1462.
- [10] ROBERTS R D, ZOHARY T. Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria[J]. New Zealand journal of marine and freshwater research, 1987, 21(3): 391-399.
- [11] DENMAN K L, GARRETT A E. Time and space scales of vertical mixing and advection of phytoplankton in the upper ocean[J]. Limnology and oceanography, 1983, 28(5): 801-815.
- [12] HARDER W. Reactions of plankton organisms to water stratification[J]. Limnology and oceanography, 1968, 13(1): 156-168.
- [13] HUISMAN J, JONKER R R, ZONNEVELD C, et al. Competition for light between phytoplankton species: Experimental tests of mechanistic theory[J]. Ecology, 1999, 80(1): 211-222.
- [14] SHAPIRO J. Biomaniipulation: The next phase-making it stable[J]. Hydrobiologia, 1990, 200(1): 13-27.
- [15] 刘建康,谢平.用鲢鱼直接控制微囊藻水华的围隔试验和湖泊实践[J].生态科学,2003,22(3):193-198.
- [16] 刘恩生.生物操纵与非经典生物操纵的应用分析及对策探讨[J].湖泊科学,2010,22(3):307-314.
- [17] HOLYOAK M, LAWLER S P. The contribution of laboratory experiments on protists to understanding population and metapopulation dynamics[J]. Advances in ecological research, 2005, 37: 245-271.
- [18] MORAN P A P. The statistical analysis of the Canadian Lynx cycle[J]. Australian journal of zoology, 1953, 1(3): 291-298.
- [19] 郭劲松,张超,方芳,等.三峡水库小江回水区水华高发期浮游植物群落结构特征研究[J].科技导报,2008,26(17):70-75.
- [20] 杨浩,曾波,孙晓燕,等.蓄水对三峡库区重庆段长江干流浮游植物群落结构的影响[J].水生生物学报,2012,36(4):715-723.
- [21] 姚绪蛟.三峡水库香溪河库湾浮游植物群落结构演替规律研究[D].宜昌:三峡大学,2013.
- [22] 潘晓洁,刘诚,朱梦灵,等.三峡水库泄、蓄水过程对小江浮游植物群落结构的影响[J].水生态学杂志,2016,37(3):42-48.
- [23] 张佳磊,郑丙辉,刘德富,等.三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素[J].环境科学,2017,38(2):535-546.
- [24] 张远,郑丙辉,刘鸿亮.三峡水库蓄水后的浮游植物特征变化及影响因素[J].长江流域资源与环境,2006,15(2):254-258.
- [25] 夏志强.三峡库区水华敏感期水质和浮游植物时空分布研究[D].重庆:西南大学,2014.
- [26] 邱光胜,胡圣,叶丹,等.三峡库区支流富营养化及水华现状研究[J].长江流域资源与环境,2011,20(3):311-316.
- [27] ZENG H, SONG L R, YU Z G, et al. Distribution of phytoplankton in the Three-Gorge Reservoir during rainy and dry seasons[J]. Science of the total environment, 2006, 367(2/3): 999-1009.
- [28] 杨正健.分层异重流背景下三峡水库典型支流水华生消机理及其调控[D].武汉:武汉大学,2014.
- [29] 方丽娟,刘德富,杨正健,等.三峡水库香溪河库湾夏季浮游植物演替规律及其原因[J].生态与农村环境学报,2013,29(2):234-240.
- [30] 田泽斌,刘德富,姚绪蛟,等.水温分层对香溪河库湾浮游植物功能群季节演替的影响[J].长江流域资源与环境,2014,23(5):700-707.
- [31] 张佳磊.三峡库区大宁河富营养化和水华研究[D].上海:华东师范大学,2011.
- [32] XU Y Y, ZHANG M, WANG L, et al. Changes in water types under the regulated mode of water level in Three Gorges Reservoir, China[J]. Quaternary international, 2011, 244(2): 272-279.
- [33] 蔡庆华,孙志禹.三峡水库水环境与水生态研究的进展与展望[J].湖泊科学,2012,24(2):169-177.
- [34] 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[J].水利学报,2016,47(3):443-454.
- [35] 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[J].武汉大学学报(工学版),2017,50(4):507-516.
- [36] 李锦秀,廖文根,黄真理.三峡工程对库区水流水质影响预测[J].水利水电技术,2002,33(10):22-25,80.
- [37] 李哲.三峡水库运行初期小江回水区藻类生境变化与群落演替特征研究[D].重庆:重庆大学,2009.
- [38] 王晓青.三峡库区澎溪河(小江)富营养化及水动力水质耦合模型研究[D].重庆:重庆大学,2012.
- [39] 龙良红,纪道斌,刘德富,等.基于CE-QUAL-W2模型的三峡水库神农溪库湾水流水温特性分析[J].长江科学院院报,2016,33(5):28-35.
- [40] 赵云云.三峡水库主库区干流对大宁河回水区水质影响研究[D].北京:清华大学,2017.
- [41] 康元昊,施军琼,杨燕君,等.三峡库区汝溪河浮游植物动态及其与水质的关系[J].水生态学杂志,2018,39(6):23-29.
- [42] STRASKRABA M, TUNDISI J G. Guidelines of lake management (volume 9): Reservoir water quality management[M]. Shiga, Japan: International lake Environment Committee, 1999: 37-66.
- [43] 张远,郑丙辉,刘鸿亮,等.三峡水库蓄水后氮、磷营养盐的特征分析[J].水资源保护,2005,21(6):23-26.
- [44] 黄程.三峡水库重庆段一维水体富营养化计算机模拟:以小江、梅溪河、大宁河为例[D].重庆:西南大学,2006.
- [45] 李哲,郭劲松,方芳,等.三峡水库澎溪河(小江)回水区一维水力特性分析[J].重庆大学学报,2012,35(5):143-150.
- [46] 纪道斌,刘德富,杨正健,等.三峡水库香溪河库湾水动力特性分析[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2010,40(1):101-112.
- [47] 刘德富,黄钰铃,纪道斌.三峡水库支流水华与生态调度[M].北京:中国水利水电出版社,2013:90-158.
- [48] XU Y Y, WANG L, CAI Q H, et al. Temporal coherence of chlorophyll a during a spring phytoplankton bloom in Xiangxi Bay of Three-Gorges Reservoir, China[J]. International review of hydrobiology, 2009, 94(6): 656-672.
- [49] 罗专溪,朱波,郑丙辉,等.三峡水库支流回水河段氮磷负荷与干流的逆向影响[J].中国环境科学,2007,27(2):208-212.
- [50] HOLBACH A, WANG L J, CHEN H, et al. Water mass interaction in the confluence zone of the Daning River and the Yangtze River-A driving force for algal growth in the three gorges reservoir[J]. Environmental science pollution research international, 2013, 20(10): 7027-7037.
- [51] 杨正健,刘德富,纪道斌,等.三峡水库 172.5m 蓄水过程对香溪河库湾水体富营养化的影响[J].中国科学:技术科学,2010,40(4):358-369.
- [52] 吉小盼,刘德富,黄钰铃,等.三峡水库泄水期香溪河库湾营养盐动态及干流逆向影响[J].环境工程学报,2010,4(12):2687-2693.
- [53] YANG L, LIU D F, HUANG Y L, et al. Isotope analysis of the nutrient supply in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir[J]. Ecological engineering, 2015, 77: 65-73.
- [54] 王英才,邱光胜,陈水松,等.三峡库区试验性蓄水期间浮游生物群落特点研究[J].人民长江,2012,43(12):4-9.
- [55] 韩德举,胡菊香,高少波,等.三峡水库 135m 蓄水过程坝前水域浮游生物变化的研究[J].水利渔业,2005,26(5):55-58,112.
- [56] 吴利,唐会元,龚云,等.三峡水库正常运行下库区干流浮游动物群落特征研究[J].水生态学杂志,2021,42(1):58-65.
- [57] 薛俊增,叶麟,蔡庆华.三峡水库坝前段蓄水前后桡足类种类组成的变化[J].水生生物学报,2006,30(1):113-115.

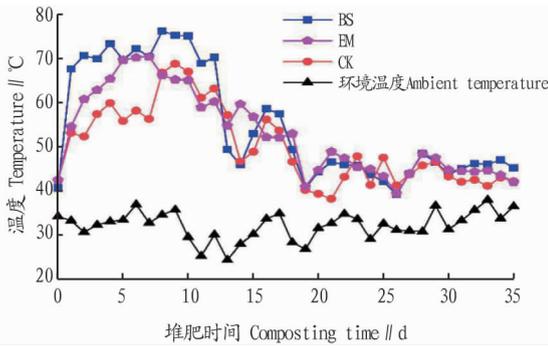


图6 牛粪-秸秆堆肥发酵温度变化

Fig.6 Temperature change of dairy manure-straw composting fermentation

菌株的处理在堆肥中半纤维素、纤维素和木质素的降解更为充分更迅速,堆肥后三者分别下降 13.6%、23.5%和 7.1%。因此,高温降解菌株 BS40-4 可在畜禽粪便堆肥中有效提高木质纤维素的降解效率和能力。

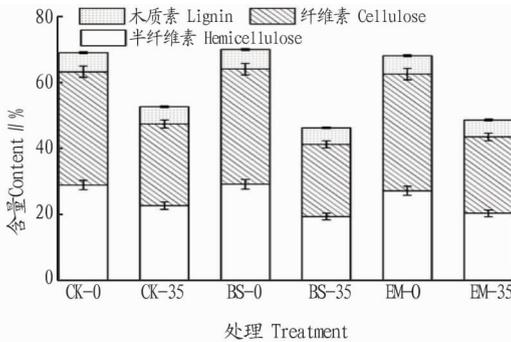


图7 牛粪-秸秆堆肥发酵中木质纤维素变化

Fig.7 Changes of lignocellulose in cow manure-straw composting fermentation

### 3 结论

(1) 该研究从高温时期堆肥样品中筛选能在 50、60 和 70 °C 高温下生长、产酶的高温降解菌株,结合水解圈、秸秆崩解、纤维素酶活测试试验结果,筛选出高温降解菌株 BS40-4,通过形态学观察和 16S rRNA 测序法,确定为枯草芽孢杆菌 *Bacillus subtilis*。

(2) BS40-4 菌株的堆肥应用效果表明,对比未接种或接种 EM 菌剂的处理,接种 BS40-4 菌株的处理具有发酵启动快、升温迅速、高温持续时间长、木质纤维素降解充分等优势,从而提高堆肥发酵效率。

### 参考文献

- [1] AWASTHI M K, SARSAIYA S, WAINAINA S, et al. A critical review of organic manure biorefinery models toward sustainable circular bioeconomy: Technological challenges, advancements, innovations, and future perspectives[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2019, 111: 115-131.
- [2] GAO X T, TAN W B, ZHAO Y, et al. Diversity in the mechanisms of humin formation during composting with different materials [J]. *Environmental science & technology*, 2019, 53(7): 3653-3662.
- [3] 徐杰, 许修宏, 门梦琪, 等. 木质纤维素降解菌剂 DN-1 促进堆肥腐熟度的评估[J]. *中国土壤与肥料*, 2016(6): 146-151.
- [4] 朱晨杰, 张会岩, 肖睿, 等. 木质纤维素高值化利用的研究进展[J]. *中国科学: 化学*, 2015, 45(5): 454-478.
- [5] 李荣华, 涂志能, ALI AMJAD, 等. 生物炭复合菌剂促进堆肥腐熟及氮磷保留[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(8): 3449-3457.
- [6] 罗晓莎, 王明明, 宋颖, 等. 接种嗜热侧孢霉对堆肥木质纤维素降解的影响[J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(2): 63-67, 71.
- [7] 张喜庆, 勾长龙, 娄玉杰, 等. 高效纤维素分解菌的分离鉴定及堆肥效果研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(2): 380-386.
- [8] 王顺利, 刘克锋, 李荣旗, 等. 木质纤维素分解复合菌剂强化牛粪堆肥工艺[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(4): 201-207.
- [9] 余培斌, 杜晶, 陈建新. 高温好氧堆肥过程中芽孢杆菌的筛选、鉴定及应用[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(12): 199-205, 212.
- [10] 金迪, 彭清静, 易浪波, 等. 一株纤维素降解细菌的筛选、鉴定及产酶条件分析[J]. *中国微生物学杂志*, 2010, 22(4): 289-292, 295.

(上接第 21 页)

- [58] 翟世涛, 杨健, 张磊, 等. 三峡库区支流澎溪河浮游动物的季节性变化与水质评价[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(14): 307-312.
- [59] 王珂. 三峡库区鱼类时空分布特征及与相关因子关系分析[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.
- [60] 杨峰. 三峡库区蓄水后大宁河鱼类资源状况及主要经济鱼类摄食生态学的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [61] 彭成荣, 陈磊, 毕永红, 等. 三峡水库洪水调度对香溪河藻类群落结构的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(7): 1863-1871.
- [62] 崔玉洁. 三峡水库香溪河藻类生长敏感生态动力学过程及其模拟[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [63] 郭劲松, 李哲, 张呈, 等. 三峡小江回水区藻类集群与主要环境要素的典范对应分析研究[J]. *长江科学院院报*, 2010, 27(10): 60-64, 87.

- [64] 张磊, 夏志强, 周伟, 等. 三峡水库春季营养盐和浮游植物空间分布及其影响机制[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(7): 1069-1077.
- [65] 贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 等. 周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响[J]. *环境科学*, 2016, 37(6): 2149-2157.
- [66] 严广寒. 脉冲式添加营养盐对藻类群落结构的影响[D]. 宜昌: 三峡大学, 2018.
- [67] 王娣娟. 几种我国常见鱼类对经典生物操纵的影响研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2012.
- [68] 李优迈. 大亚湾中型浮游动物的摄食生态学研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [69] 解崇友, 胡佐灿, 蔡瑞钰, 等. 三峡库区重要支流 8 种优势鱼类生长及其资源开发现状评估[J]. *中国水产科学*, 2019, 26(3): 504-511.
- [70] 徐耀阳. 基于生态同步性概念的大型水库富营养化与春季藻类水华研究: 以三峡水库为例[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.