

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.23.016

景观水体附植藻类群落变化及与环境因子的关系

李 轩¹, 蒋涛阳¹, 王测文¹, 付国楷^{1,2}

(1. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘 要: 为了解秋冬季节景观水体附植藻类与环境因子的关系,以重庆市典型人工景观水体为研究对象,对秋冬季(2019年9月—2020年1月)该景观水体沉水植物上附植藻类生物量、物种组成及其环境因子进行分析。结果表明,10月中旬为景观水体附植藻类秋季暴发高峰,1月为冬季暴发高峰且生物量为秋季峰值的1.9倍。景观水体4个采样点在采样期间共鉴定出附植藻类4门21属,其中硅藻门9属、绿藻门7属、蓝藻门4属、裸藻门1属。秋季采集到附植藻类3门14属,冬季采集到附植藻类4门16属。秋季常见的附植藻类有4属,分别为颤藻(*Oscillatoria* sp.)、针杆藻(*Synedra* sp.)、曲壳藻(*Achnanthes* sp.)、异极藻(*Gomphonema* sp.);冬季常见的附植藻类有2属,为颤藻(*Oscillatoria* sp.)、曲壳藻(*Achnanthes* sp.)。多元回归分析结果表明,对于重庆典型景观水体,影响秋冬两季附植藻类生物量的主要环境因子为pH和总氮。秋季影响附植藻类生物量的主要环境因子为水温和氨氮,冬季为照度、总氮和水温。秋冬季节影响附植藻类的环境因子具有差异。上述结果表明,秋冬季节景观水体水环境变化对附植藻类的生物量和群落组成具有重要影响。

关键词: 景观水体; 附植藻类; 生物量; 群落组成; 环境因子; 秋冬季

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)23-0111-07

Change of Epiphytic Algal Community and Its Relationship with Environmental Factors in Landscape Water

LI Xuan¹, JIANG Tao-yang¹, WANG Ce-wen¹, FU Guo-kai^{1,2}

(1. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environments <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: This paper analyzed the biomass, algal community composition and related environmental factors of epiphytic algae on submerged plants in a typical artificial landscape water body in Chongqing from autumn (September 2019) to winter (January 2020), so as to explore the relationship between the epiphytic algae and environmental factors in landscape water during autumn and winter. The peak of the autumn epiphytic algae bloom in the landscape water was in mid-October. In contrast, the peak of the winter algae bloom was in January, and the biomass in winter was 1.9 times that in autumn. A total of 4 phyla and 21 genera were identified from 4 sampling sites during the sampling period, including 9 genera belonging to *Bacillariophyta*, 7 genera belonging to *Chlorophyta*, 4 genera belonging to

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目(cstc2019jcyj-msxmX0573)

通信作者: 付国楷 E-mail: fuguokai@163.com

Cyanobacteria and 1 genus belonging to *Euglenophyta*. In autumn, 14 genera belonging to 3 phyla were identified, and 16 genera belonging to 4 phyla were identified in winter. Four common genera were identified in autumn, namely *Oscillatoria* sp., *Synedra* sp., *Achnanthes* sp. and *Gomphonema* sp., and two common genera (*Oscillatoria* sp. and *Achnanthes* sp.) were identified in winter. The multiple regression analysis revealed that pH and total nitrogen were the main environmental factors affecting the biomass of epiphytic algae in the typical landscape water in Chongqing in autumn and winter. The main environmental factors affecting the biomass of the epiphytic algae were water temperature and ammonia nitrogen in autumn, while those were illuminance, total nitrogen and water temperature in winter, indicating that the environmental factors affecting the biomass of epiphytic algae were different in autumn and winter. These results indicated that the changes of landscape water environment in autumn and winter had an important impact on the biomass and community composition of epiphytic algae.

Key words: landscape water; epiphytic algae; biomass; community composition; environmental factors; autumn and winter

附植藻类以水生植物作为附着介质,常与周丛动物、细菌及有机碎屑一同组成水草表面的覆盖物^[1],对湖泊初级生产力、营养循环、食物网和水质监测有着不容忽视的重要作用^[2];而当附植藻类大量繁殖、暴发水华时,其不仅影响水体景观,而且可以通过营养竞争、遮光作用、物理破坏和化感作用等降低沉水植物的恢复率^[2],影响湖泊生态修复。附植藻类是浅水湖泊的重要组成部分,然而目前国内针对附植藻类生长规律的研究主要集中在自然湖泊水体,如张蔚珍等^[2]调查了杭州西湖湖西沿岸带着生藻类的季节变化,杨凯等^[3]调查了滇池沿岸带刚毛藻的季节性种群结构及分布特征。而关于城市景观水体中附植藻类季节性变化的研究鲜见报道。

与自然水体相比,城市景观水体存在流动性低、水域面积小、生态系统简单、外源污染较少等特点。此外,不同地区具有不同的环境特点,导致了同一种藻在不同环境条件下的响应机制存在差异^[4]。由文辉^[1]发现淀山湖沉水植物上着生藻类密度和生物量均是冬季最高、夏季最低;而袁信芳等^[5]发现太湖的着生藻类则是春季种类和数量最多而冬季最少。重庆地区属于亚热带季风性湿润气候,加之地形因素,全年的温度、光照等自然条件与国内其他地区存在显著不同。因此,重庆地区附植藻类的季节性变化和生长影响因素可能与国内其他地区存在不同。

为了解秋冬季景观水体附植藻类与环境因

子的关系,笔者以重庆典型景观水体为研究区域,调查2019年9月(秋季)—2020年1月(冬季)该景观水体附植藻类的生物量、群落结构和环境因子,并综合运用Pearson相关分析和多元回归分析等方法来探究重庆典型景观水体附植藻类生物量与环境因子的相关性,旨在为控制附植藻类异常增殖提供理论参考,并可为景观水体水质检测和保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 采样点设置

研究区域位于重庆市典型景观湖,其是始建于1957年的城市人工湖泊,水面面积为6.242 7 hm²,库容为312 m³,水深为0.9~4 m,为城市公园重要的景观。该景观湖所在地区属于亚热带季风性湿润气候,年平均气温为18.3~18.6℃,年平均降雨量为1 434.8 mm,年平均日照时间为1 233.7 h。湖中沉水植物种类主要有穗花狐尾藻、黑藻、苦草等。2019年9月—2020年1月,设置4个采样点(A、B、C、D),每两周采一次样,采样点设置于沉水植物长势良好、水面开阔区域。

1.2 样品采集与测定

水样采集与水体理化监测:使用2.5 L柱状有机玻璃采水器采集湖泊水样。采水器配有温度计,现场测定水温。照度采用JD-3型数字式照度计现场测定。水样密封,30 min内运回实验室测定水体理化指标,使用pH计和台式溶解氧测试仪分别测定pH和溶解氧。NH₄⁺-N、TN、TP等指标的测定参

照《水和废水监测分析方法》(第4版)。

附植藻类采集与生物量测定:根据《湖泊富营养化调查规范》(第2版)中的天然基质法进行附植藻类样品的采集与处理。根据文献[2],选取干质量作为藻类生物量的表征指标。在各采样点采集2~3株大小、长势相近的附着有藻类的完整沉水植物。从每根沉水植物的根部起,每隔15cm取一段5cm的植物茎段,直至顶端;对所取实验茎端上的叶片进行记数,采用图形法求得该采样点处样品的叶片总面积;将实验茎端上的藻类刮下,用蒸馏水稀释后,取50mL制作好的藻液进行抽滤、烘干、冷却、称重,根据滤膜过滤前后的质量差与叶片面积求得单位叶片面积的干质量,用以表征附植藻类生物量。

藻种鉴定:将采集的附植藻类活体样品邮寄至中国科学院典型培养物保藏委员会淡水藻种库进行基于形态特征的经典分类学方法的藻类鉴定。取少量样品,在Olympus BX53显微镜下观察,并用Olympus DP80相机采集图像。

2 结果与讨论

2.1 景观水体环境因子的变化

4个采样点的水温在秋季和冬季的波动范围分别为15.0~23.3、9.0~12.8℃,最高值出现在秋季,最低值出现在冬季,周平均最大温升为0.5℃,周平均最大温降为3.7℃。不同采样点的照度均在秋季最高、冬季最低,秋季和冬季的波动范围分别为290~36000、250~1590lx。pH均在11月最低、1月最高,秋季和冬季的波动范围分别为6.70~8.39、6.61~8.62。溶解氧在秋季最低、冬季最高,秋季和冬季的波动范围分别为3.95~6.02、4.21~9.10mg/L。NH₄⁺-N的最高值出现在9月,并于12月中旬出现峰值,NH₄⁺-N在秋季和冬季的波动范围分别为0.02~0.36、0.03~0.16mg/L。TN于11月上旬和12月中旬出现峰值,在秋季和冬季的波动范围分别为0.16~0.80、0.05~0.92mg/L。TP在秋季和冬季的波动范围分别为0~0.26、0~0.11mg/L。

2.2 景观水体附植藻类群落结构的变化

附植藻类群落结构的变化见表1。

表1 附植藻类群落结构的变化

Tab.1 Change of community composition of epiphytic algae

门类	物种名称	秋季			冬季			
		A	B	C	A	B	C	D
蓝藻门	颤藻(<i>Oscillatoria</i> sp.)	+++	+++	+++	+++	+++	++	
	鱼腥藻(<i>Anabeana</i> sp.)	+	+	+				
	色球藻(<i>Chroococcus</i> sp.)	+	+		+			
	眉藻(<i>Calothrix</i> sp.)							++
硅藻门	针杆藻(<i>Synedra</i> sp.)	+++	+++	+++	++	+	++	
	曲壳藻(<i>Achnanthes</i> sp.)	+++	+++	+++	+++	+++	++	+
	异极藻(<i>Gomphonema</i> sp.)	+++	+++	+	++	++	++	++
	桥弯藻(<i>Cymbella</i> sp.)	++	++	++	++	++	++	++
	窗纹藻(<i>Epithemia</i> sp.)		+					
	脆杆藻(<i>Fragilaria</i> sp.)				++	++		
	等片藻(<i>Diatoma</i> sp.)				+	+		+
	卵形藻(<i>Cocconeis</i> sp.)					+	+	+
	菱形藻(<i>Nitzschia</i> sp.)							+
绿藻门	水绵(<i>Spirogyra</i> sp.)	++	++				+	
	鞘藻(<i>Oedogonium</i> sp.)		++	++	++	++		++
	衣藻(<i>Chlamydomonas</i> sp.)	+						
	鼓藻(<i>Cosmarium</i> sp.)	+		+	+		+	
	新月藻(<i>Closterium</i> sp.)		+					
	角星鼓藻(<i>Staurostrum</i> sp.)			+				
	四尾栅藻(<i>Scenedesmus quadricauda</i>)					+		
裸藻门	囊裸藻(<i>Trachelomonas</i> sp.)							+

注: +表示偶见; ++表示常见; +++表示非常常见。

D点位于小塘,A、B、C点位于大塘。秋季由于游客行船较多,大、小塘水体流动情况区别不大;冬季,D点水体相较于大塘更为静滞缓慢,所以11月上旬和冬季采样时补加了D点。从表1可知,秋冬两季共鉴定出附植藻类4门21属,包括硅藻门9属、绿藻门7属、蓝藻门4属、裸藻门1属。其中,秋季鉴定出附植藻类3门14属,包括绿藻门6属,占总属数的42.9%;硅藻门5属,占35.7%;蓝藻门3属,占21.4%。冬季鉴定出附植藻类4门16属,包括硅藻门8属,占总属数的50.0%;绿藻门4属,占25.0%;蓝藻门3属,占18.75%;裸藻门1属,占6.25%。秋季附植藻类在种类组成上以绿藻门为主,冬季则以硅藻门为主,冬季新出现了脆杆藻(*Fragilaria* sp.)、等片藻(*Diatoma* sp.)、卵形藻(*Cocconeis* sp.)、菱形藻(*Nitzschia* sp.)等4属硅藻。

从表1还可以发现,附植藻类优势种在硅藻门以针杆藻(*Synedra* sp.)、曲壳藻(*Achnanthes* sp.)、异极藻(*Gomphonema* sp.)、桥弯藻(*Cymbella* sp.)等属为主;绿藻门以鞘藻(*Oedogonium* sp.)和水绵(*Spirogyra* sp.)等属为主;在蓝藻门以颤藻(*Oscillatoria* sp.)等属为主。秋季,非常常见的附植藻类有4属,分别为颤藻(*Oscillatoria* sp.)、针杆藻(*Synedra* sp.)、曲壳藻(*Achnanthes* sp.)、异极藻(*Gomphonema* sp.);冬季非常常见的附植藻类有2属,分别为颤藻(*Oscillatoria* sp.)和曲壳藻(*Achnanthes* sp.)。

2.3 景观水体附植藻类生物量的变化

秋季和冬季附植藻类生物量的变化见图1。

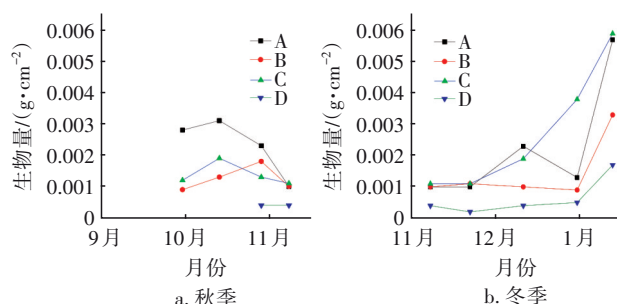


图1 秋季和冬季附植藻类生物量的变化

Fig.1 Change of biomass of epiphytic algae in autumn and winter

从图1可知,附植藻类生物量(干质量)秋季和冬季的变化显著。秋季生物量变化范围为0.000 4~0.003 1 g/cm²,冬季为0.000 1~0.005 9 g/cm²。其中,10月中旬观测到秋季的峰值为0.003 1 g/cm²,11月下旬出现监测期的最低值0.153 mg/cm²,最高值

出现在1月中旬采样点C,达到0.005 9 g/cm²,为秋季峰值的1.9倍,出现附植藻类冬季暴发现象。

2.4 附植藻类生物量与环境因子的相关关系

将附植藻类生物量与水温、照度、溶解氧、pH、氨氮、总氮、总磷等环境因子进行Pearson相关性分析(个案数为30)。结果表明,附植藻类生物量与溶解氧($R = 0.467, P < 0.01$)、pH($R = 0.502, P < 0.01$)呈显著正相关;与总氮($R = -0.401, P < 0.05$)呈显著负相关。秋季(9月下旬至11月上旬)附植藻类生物量与环境因子没有显著相关性。冬季(11月中旬至1月中旬)附植藻类生物量与环境因子Pearson相关性分析(个案数均为16)结果表明,附植藻类生物量与照度($R = 0.658, P < 0.01$)、溶解氧($R = 0.500, P < 0.05$)、pH($R = 0.571, P < 0.05$)呈显著正相关,而与水温($R = -0.501, P < 0.05$)呈显著负相关。

对附植藻类生物量与水温、照度、溶解氧、pH、氨氮、总氮、总磷等环境因子进行多元回归分析。秋季环境因子与附植藻类生物量的多元回归统计结果见表2。可知,水温、氨氮为影响秋季附植藻类生物量的主要环境因子,两个环境因子的变化解释了附植藻类生物量变化的70.3%。在所有环境因子中,水温的变化解释了附植藻类生物量变化的46.8%,所以水温是最重要的影响因素。

表2 秋季环境因子与附植藻类生物量的多元回归统计结果

Tab.2 Multiple regression analysis of environmental factors and biomass of epiphytic algae in autumn

模型	R	R^2	调整后 R^2	标准估算的误差	F	P
水温	0.468	0.219	0.154	0.000 753 7	3.370	0.091
水温+氨氮	0.703	0.494	0.402	0.000 633 5	5.378	0.023

冬季环境因子与附植藻类生物量的多元回归统计结果见表3。可知,照度、总氮、水温为影响冬季附植藻类生物量的主要环境因子,3个环境因子解释了附植藻类生物量变化的87.5%,其中照度是最重要的环境因子,单独解释了附植藻类生物量变化的65.8%。结合Pearson相关性分析结果可得,冬季重庆景观水体沉水植物上附植藻类生物量与照度呈显著正相关,与总氮、水温呈显著负相关。

秋冬两季环境因子与附植藻类生物量的多元回归统计结果见表4。可知,pH、总氮为主要环境因子,两个环境因子解释了附植藻类生物量变化的

74.6%,其中pH是最重要的环境因子,解释了附植藻类生物量变化的50.2%。结合Pearson相关性分析结果可得,秋冬两季重庆景观水体沉水植物上附植藻类生物量与pH呈显著正相关,与总氮呈显著负相关。

表3 冬季环境因子与附植藻类生物量的多元回归统计结果

Tab.3 Multiple regression analysis of environmental factors and biomass of epiphytic algae in winter

模型	<i>R</i>	<i>R</i> ²	调整后 <i>R</i> ²	标准估算的 误差	<i>F</i>	<i>P</i>
照度	0.658	0.433	0.393	0.001 384 8	10.711	0.006
照度+总氮	0.724	0.524	0.451	0.001 317 2	7.157	0.008
照度+总氮+ 水温	0.875	0.766	0.707	0.000 961 7	13.081	<0.001

表4 秋冬两季环境因子与附植藻类生物量的多元回归统计结果

Tab.4 Multiple regression analysis of environmental factors and biomass of epiphytic algae in autumn and winter

模型	<i>R</i>	<i>R</i> ²	调整后 <i>R</i> ²	标准估算的 误差	<i>F</i>	<i>P</i>
pH	0.502	0.252	0.225	0.001 248 0	9.438	0.005
pH+总氮	0.746	0.556	0.523	0.000 978 9	16.926	<0.001

2.5 讨论

2.5.1 附植藻类群落结构在秋冬季的变化

秋冬季,重庆景观水体的附植藻类主要属于硅藻门和绿藻门,兼有少量属于蓝藻门。由文辉^[1]发现,淀山湖沉水植物上着生的藻类以硅藻门和绿藻门为主,其次为蓝藻门。张蔚珍等^[2]发现,西湖湖西着生藻类在各类生境中均以硅藻门的属数最多,蓝藻门和绿藻门次之。本研究支持了前人获得的结论,表明不同地区浅水湖泊沉水植物着生藻类的种类组成大体相似,这可能与藻类的生长特性有关^[5]。

秋季绿藻门属数占比大于硅藻门,冬季硅藻门属数占比大于绿藻门。冬季较秋季新增了4属硅藻门的藻类:菱形藻、卵形藻、等片藻、脆杆藻;而冬季减少了2属绿藻门藻类:新月藻、角星鼓藻。绿藻适合在高温、高营养盐环境下生长,大部分绿藻在春夏之交和秋季生长最旺盛;而硅藻适合在低温、高营养盐的情况下生长^[6],在春秋两季和初冬生长最好。Yang等^[7]发现,硅藻的适宜生长温度在10℃左右。该景观水体冬季均温为10.4℃,有利于硅藻繁

殖。张蔚珍等^[2]发现,西湖湖西附植藻类在不同季节的优势种存在差异。本研究支持了前人获得的结论,表明秋冬季节的变化对重庆景观水体附植藻类群落物种组成具有显著影响,呈现对不同季节的不同指示特征^[6]。

重庆景观水体附植藻类生物量在冬季较高,其中10月中旬为景观水体附植藻类秋季暴发高峰,1月为冬季暴发高峰且生物量为秋季峰值的1.9倍。秋冬季水温的变化可能导致了不同附植藻类光合作用和生长出现差异,使得附植藻类群落组成和优势属发生变化,属数较多的藻类由绿藻门转变为硅藻门。硅藻门对冷暖季的变化较为敏感,在环境条件适宜的情况下体积激增,3大着生藻类中,平均体积最大的为硅藻,绿藻次之,蓝藻最小,体积比为32:8:1^[8]。因此,冬季新出现的硅藻藻种以及硅藻在适宜环境条件下体积的激增可能是导致1月附植藻类生物量远高于10月的原因之一。此外,冬季为沉水植物群落生物量一年中的最低期^[1],由于沉水植物与附植藻类相互抑制^[9],冬季水草生长减缓或衰亡,有利于附植藻类增长。同时,裴国凤等^[10]指出,湖泊底栖藻类和浮游藻类之间存在光照和营养竞争,高密度浮游藻类的遮荫会抑制底栖藻类的生长。一般情况下,9月中旬以后浮游藻类密度大幅下降^[11],有利于底栖藻类生物量积累。

2.5.2 附植藻类群落特征与环境因子的关系

着生藻类的生长速率和光合作用效率受到营养物质、光照和摄食等各因子及其之间互相作用的影响,决定了着生藻类的生长状态、群落结构及其空间分布的变化。一般认为,水体温度、氮磷营养盐等环境因子可以直接影响藻类的群落组成、细胞密度、生命周期及分布等^[12]。已有研究表明,藻类大量繁殖与持续的时段与水温变化密切相关^[11]。Engle等^[13]认为温度变化通过控制底栖藻类光合作用或呼吸作用的酶促反应,直接影响藻类生长,并可通过控制水体中各类物质的解离、溶解和分解等间接影响藻类生长,从而使得附植藻类群落组成和优势种发生变化。本研究发现,秋季水温与生物量呈显著正相关,冬季呈显著负相关,而秋冬两季生物量与水温之间无显著相关性,说明水温始终对附植藻类生物量有影响,而秋冬季优势藻种的改变使得相关性发生变化,因此秋冬两季整体分析时无法体现显著相关性。可见衡量附植藻类对环境因子

响应时,应考虑藻类生物量与群落组成的变化。而不同季节水体中藻类的群落组成变化较大,后续进行藻类生物量与环境因子关系研究时应考虑季节划分。本研究还发现,影响冬季附植藻类生物量的最主要环境因子为照度,且冬季生物量与照度呈显著正相关,归因于冬季较低的照度限制藻类生长,使得照度成为影响藻类生物量积累的主要因素。

营养盐浓度被认为是显著影响藻类生长与组成的关键因子。秋冬两季附植藻类的生物量与总氮呈显著负相关,秋季生物量与氨氮呈显著负相关。刘奕伶等^[8]认为,藻类体积与氨氮、硝态氮之间呈一定的负相关关系,解释了藻类消耗景观水体中的氮源时,生物量增长。此外,氨氮还可以通过食物链传递作用决定以藻类为食的寡食者和沉积物收集者的密度,从而反作用于底栖藻类,导致底栖藻类的分布和数量发生明显变化。磷常被认为是藻类生物量积累的重要因素。本研究发现,总磷对秋冬两季景观水体附植藻类生物量的影响均不显著,这归因于景观水体中总磷含量较低,限制了着生藻类的生长繁殖。刘奕伶等^[8]的研究也表明,水体中较低的总磷浓度对着生藻类体积的影响不显著。

藻类的光合作用导致水体 pH 和 DO 含量较高^[14]。水体 pH 与藻类数量具有较好的相关性。藻类大量生长会引起水体 pH 的变化:藻类光合作用影响 CO₂ 缓冲体系,藻类大量吸收 CO₂ 引起水体 pH 上升;部分藻类对水体中有机酸的吸收和重碳酸盐的利用也会引起 pH 上升^[15]。本研究发现,秋冬两季附植藻类生物量与 pH 呈显著正相关。刘春光等^[15]认为,藻类种群密度的增大会使 pH 逐渐增加。本研究发现,景观水体附植藻类达到秋季与冬季高峰时,pH 接近 8.5。pH 为 8.5 时水体碳酸系统稳定性较高,此情况下藻类生长状况最好,这可能是由于较高浓度的 OH⁻ 促进水体吸收空气中的 CO₂,加速了藻类光合作用,使附植藻类生物量增加。本研究发现,秋冬两季附植藻类生物量与溶解氧呈显著正相关。郑晓红^[14]的研究也表明,溶解氧与叶绿素 a 之间存在显著正相关性,归因于藻类在光合作用下释放氧分子,从而使水体中溶解氧浓度升高。

景观水体易受到各种环境因子的干扰,同时人为活动的影响尤为突出^[9],这些因素可能对附植藻类生物量和群落组成产生影响。调查发现,该景观

水体主要补水为周围城镇区域雨水,雨水携入的冲击负荷与当地居民活动、天气情况密切相关。无降水时,水体营养盐含量维持在一定水平;降水时,营养盐含量急剧上升。景观水体流速缓慢且环境容量有限,不利于污染物的扩散自净。提高水体流速可以加速底栖硅藻对营养盐的吸收(特别是对磷的吸收)、促进光合作用、提高繁殖率。为了保持重庆典型景观水体生态系统的稳定性,建议加强防御景观水体附近污染、破坏生态环境的人类活动。

3 结论

① 10月中旬为重庆景观水体附植藻类秋季暴发高峰,1月为冬季暴发高峰,且冬季生物量峰值为秋季峰值的1.9倍。

② 重庆景观水体4个采样点共鉴定出附植藻类4门21属,包括硅藻门9属、绿藻门7属、蓝藻门4属、裸藻门1属。秋季,非常常见的附植藻类有4属,分别为颤藻(*Oscillatoria* sp.)、针杆藻(*Synedra* sp.)、曲壳藻(*Achnanthes* sp.)、异极藻(*Gomphonema* sp.)。冬季,非常常见的附植藻类有2属,包括颤藻(*Oscillatoria* sp.)和曲壳藻(*Achnanthes* sp.)。

③ 多元回归分析结果表明,对于重庆典型景观水体,影响秋冬两季附植藻类生物量的主要环境因子为 pH、总氮。秋季,影响生物量的主要环境因子为水温、氨氮,冬季为照度、总氮和水温。

参考文献:

- [1] 由文辉. 淀山湖着生藻类群落结构与数量特征[J]. 环境科学, 1999, 20(5): 59-62.
YOU Wenhui. The species composition and quantitative features of the periphytic algae communities in Dianshan Lake[J]. Environmental Science, 1999, 20(5): 59-62 (in Chinese).
- [2] 张蔚珍, 于佳, 夏午来, 等. 西湖湖西浮游与着生藻类季节变化及相互关系[J]. 水生生物学报, 2017, 41(4): 896-903.
ZHANG Weizhen, YU Jia, XIA Wulai, et al. Seasonal variation of phytoplankton and periphyton and their relationships in the western region of the West Lake[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2017, 41(4): 896-903 (in Chinese).
- [3] 杨凯, 董静, 郭亮亮, 等. 滇池沿岸带刚毛藻种群结构及分布特征[J]. 水生态学杂志, 2013, 34(3): 8-16.
YANG Kai, DONG Jing, GUO Liangliang, et al. The

- population structure and the distributing characteristics of *Cladophora* in the littoral zone of Dianchi Lake [J]. Journal of Hydroecology, 2013, 34 (3): 8-16 (in Chinese).
- [4] 项珍龙,杨璐,李晨,等. 浑河流域底质类型对硅藻群落分布特征的影响[J]. 环境科学学报,2018,38(2): 570-578.
XIANG Zhenlong, YANG Lu, LI Chen, *et al.* Effect of sediment type on the distribution of diatom community in Hunhe River basin, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(2): 570-578(in Chinese).
- [5] 袁信芳,施华宏,王晓蓉. 太湖着生藻类的时空分布特征[J]. 农业环境科学学报,2006,25(4):1035-1040.
YUAN Xinfang, SHI Huahong, WANG Xiaorong. Temporal and spatial distributions of periphytic algae in Taihu Lake [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006,25(4): 1035-1040(in Chinese).
- [6] SANTOS A C A D, CALIJURI M C. Survival strategies of some species of the phytoplankton community in the Barra Bonita Reservoir (São Paulo, Brazil) [J]. Hydrobiologia, 1998, 367(1/3): 139-151.
- [7] YANG Q, XIE P, SHEN H, *et al.* A novel flushing strategy for diatom bloom prevention in the lower-middle Hanjiang River [J]. Water Research, 2012, 46 (8): 2525-2534.
- [8] 刘奕伶,葛继稳,李艳元,等. 古夫河着生藻类优势种体积与水质因子的相关性研究[J]. 中国环境科学, 2015,35(7):2182-2191.
LIU Yiling, GE Jiwen, LI Yanyuan, *et al.* Correlations between the volume of dominant periphytic algae species and the water quality parameters in Gufu River [J]. China Environmental Science, 2015, 35 (7): 2182-2191(in Chinese).
- [9] 苏胜齐,沈鑫绿,姚维志. 菹草着生藻类的群落结构与数量特征初步研究[J]. 西南农业大学学报,2002,24 (3):255-258.
SU Shengqi, SHEN Anglü, YAO Weizhi. Species composition and quantitative features of periphytic algae communities on *Potamogeton Crispus* L. [J]. Journal of Southwest Agricultural University, 2002, 24(3): 255-258(in Chinese).
- [10] 裴国风,刘国祥,胡征宇. 东湖沿岸带底栖藻类群落的时空变化[J]. 水生生物学报,2007,31(6):836-842.
PEI Guofeng, LIU Guoxiang, HU Zhengyu. Spatial and temporal variation of benthic algal communities in the littoral zone of Lake Donghu [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2007,31(6): 836-842(in Chinese).
- [11] 江耀慈,丁建清,张虎军. 太湖藻类状况分析[J]. 江苏环境科技,2001,14(1):30-31.
JIANG Yaoci, DING Jianqing, ZHANG Hujun. Analysis of algae condition of Lake Tai [J]. Jiangsu Environmental Science and Technology, 2001, 14 (1): 30-31(in Chinese).
- [12] 杨宋琪,祖廷勋,王怀斌,等. 黑河张掖段浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学,2019, 31(1):159-170.
YANG Songqi, ZU Tingxun, WANG Huaibin, *et al.* Relationship between the structure of phytoplankton community and environmental factors in the Zhangye section of Heihe River [J]. Journal of Lake Sciences, 2019,31(1): 159-170(in Chinese).
- [13] ENGLE V D, SUMMERS J K, MACAULEY J M. Dissolved oxygen conditions in northern gulf of Mexico estuaries [J]. Environmental Monitoring and Assessment,1999,57(1):1-20.
- [14] 郑晓红. 地表水中总磷和总氮对藻类生长的影响以及藻类生长对pH值和溶解氧含量的影响[J]. 仪器仪表与分析监测,2012(3):43-45.
ZHENG Xiaohong. The influence analysis of total phosphorus on algae growing and algae growing on pH and dissolved oxygen in surface water [J]. Instrumentation Analysis Monitoring, 2012(3):43-45(in Chinese).
- [15] 刘春光,金相灿,孙凌,等. pH值对淡水藻类生长和种类变化的影响[J]. 农业环境科学学报,2005,24(2): 294-298.
LIU Chunguang, JIN Xiangcan, SUN Ling, *et al.* Effects of pH on growth and species changes of algae in freshwater [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005,24(2): 294-298(in Chinese).

作者简介:李轩(1999-),女,湖南长沙人,大学本科,
主要研究方向为城市水体污染控制与温室气体排放核算。

E-mail: betterplum@163.com

收稿日期:2020-04-22

修回日期:2020-08-04

(编辑:任莹莹)