

水生植物配植对景观水体藻类水华的抑制*

王占琛^{1,2} 赵伊茜¹ 黎超¹ 尹航¹ 耿勇波² 梁文艳^{1#}

(1.北京林业大学环境科学与工程学院,北京 100083;2.北京市玉渊潭公园管理处,北京 100142)

摘要 针对湖岸和湖底进行了硬化处理的景观水,采用盆栽的方法进行沉水植物种植,并与种植池内的挺水植物配植来抑制藻类水华的暴发。野外实验选择在玉渊潭公园的北门和新建小湖进行,种植的沉水植物有穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)、大茨藻(*Najas marina*)和小茨藻(*Najas minor*),挺水植物有菖蒲(*Acorus calamus*)、水葱(*Scirpus validus*)、千屈菜(*Lythrum salicaria*)、再力花(*Thalia dealbata*)和荷花(*Lotus*)。结果表明,在2016年采取水生植物生态修复后,北门、新建小湖的叶绿素a浓度总体低于未进行水生植物修复的东西湖,尤其是在8月,东西湖叶绿素a高达131.8 $\mu\text{g/L}$ 时,北门和新建小湖的叶绿素a分别为45.4、28.6 $\mu\text{g/L}$ 。与东西湖相比,只种植挺水植物的引水湖的叶绿素a有时会低于东西湖,但抑藻效果不稳定。4个湖水的COD、TN和TP处于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ至Ⅴ类,修复后改善不明显,但水体透明度显著提高。湖水的三维荧光测定结果显示,只有种植沉水植物的湖水在激发波长(E_x)/发射波长(E_m)=255 nm/410 nm附近出现荧光峰,显示沉水植物在藻华抑制中发挥了主要作用。

关键词 景观水体 藻类 水华 水生植物 沉水植物 生态修复

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2018.06.002

The inhibition of microalgae bloom in landscape water via hydrophilic plant arrangement WANG Zhaoshen^{1,2}, ZHAO Yixi¹, LI Chao¹, YIN Hang¹, GENG Yongbo², LIANG Wenyan¹. (1. College of Environmental Science & Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2. Beijing Yuyuantan Park Administrative Office, Beijing 100142)

Abstract: In order to prevent the microalgae blooms in the landscape water with the shore and bottom cemented, the submerged hydrophyte was planted in the pots and arranged together with the emerged hydrophyte in the planting tank. The field study was conducted in Beimen and Xinjian Lake in Yuyuantan Park. The submerged hydrophyte included *Myriophyllum spicatum*, *Najas marina* and *Najas minor* and emerged hydrophyte included *Acorus calamus*, *Scirpus validus*, *Lythrum salicaria*, *Thalia dealbata* and *Lotus*. The results showed that the Chla concentrations of Beimen and Xinjian Lake after hydrophyte remediation in 2016 were generally much lower than those of Dongxi Lake without the hydrophyte remediation. Especially in August, when the Chla concentrations of Dongxi Lake reached 131.8 $\mu\text{g/L}$, the Chla concentrations of the two lakes were only 45.4 and 28.6 $\mu\text{g/L}$, respectively. The Chla concentration of Yingshui Lake with only emerged hydrophyte was sometimes lower than that of Dongxi Lake, but the inhibition effects was unstable. The concentrations of COD, TN and TP in the four lakes were between the level Ⅳ and Ⅴ of "Surface water environmental quality standards" (GB 3838-2002). The hydrophyte remediation didn't improve the water quality, but increased the water transparency obviously. The three dimensional fluorescence spectra of waters from the lakes with submerged hydrophyte showed that there appeared peaks around excitation wavelength (E_x)/emission wavelength (E_m)=255 nm/410 nm, indicating that the submerged hydrophyte played an important role in bloom controls.

Keywords: landscape water; microalgae; bloom; hydrophyte; submerged hydrophyte; ecological remediation

藻类水华暴发是在一定的营养、气候、水文条件和生态环境下形成的藻类过度繁殖和聚集的现象,是水体环境和气象因子综合作用的结果^[1]。而景观性水体由于水深较浅、水中光照充足、水体流动性较差等原因,更易发生藻类水华。

藻类水华治理方法主要有以机械打捞、底泥疏浚为主的物理方法,以投加化学杀藻剂等为主的化学方法,以及以投加微生物溶藻剂、食藻虫和种植水生植物为主的生物方法。研究显示,很多水生植物具有抑藻效果,如粉绿狐尾藻(*Myriophyllum*

第一作者:王占琛,男,1973年生,硕士研究生,高级工程师,主要从事园林景观设计与管理工作。* 通讯作者。

* 国家自然科学基金资助项目(No.51672028),中央高校基本科研业务费专项(No.2015ZCQ-HJ-02)

http://www.cjpe.com

aquaticum)、凤尾莲(*Eichhornia crassipes*)、穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)、苦草(*Vallisneria spiralis*)等,它们通过分泌化感类物质,诱导藻细胞内活性氧的积累,损伤藻细胞酶活性,从而抑制藻细胞生长与繁殖^[2-4]。与天然水体不同,城市公园景观水体的岸线通常作了硬化处理以节省游览空间,底部通常也作了硬化和防渗处理以节约生态用水量。这些硬化处理对水生植物的种植带来了影响。

玉渊潭位于海淀区,东西长约 1.7 km,占地面积约 $1.37 \times 10^6 \text{ m}^2$,湖区面积约 $1 \times 10^5 \text{ m}^2$,如葫芦状,又名东西湖。湖水引自密云水库,由昆明湖到玉渊潭的引水渠,在罗道庄与永定河水渠相会,再经玉渊潭流入护城河^[5]。湖区夏季受上游水位的影响,湖面上升,但由于湖水流动性差,在夏季极易发生水华。除了东西湖外,园内还有几个小型湖体,均为人工挖掘而成,岸边和湖底多采用硬化处理。

本研究选择玉渊潭的两个小型人工湖体(北门和新建小湖),采用盆栽的方法进行沉水植物种植,并与挺水植物配植来控制藻类的过度生长。在水体水生植物生态修复前后,对各湖的 COD、TN、TP、叶绿素 a、透明度、pH 和水温等进行了逐月监测,评价了对藻类生长抑制效果,同时通过湖水三维荧光有机物质的测定,分析了水生植物控藻的机制。

1 材料与方法

1.1 实验湖体

如图 1 所示,当引水渠的水进入东西湖后,再由东西湖向其他小湖调用。东西湖没有种植水生植物,湖岸为垂直硬化立岸,底部为自然湖底,湖心水深 1.8~2.0 m。新建小湖于 2015 年 5 月建成,面积为 2 300 m^2 ,北门小湖面积为 720 m^2 ,两湖湖岸均为垂直硬化立岸,湖底作了硬化和防渗处理。引水湖面积为 7 100 m^2 ,湖岸为硬化立岸,底部为自然湖底。



图 1 园内各湖体之间的调水示意图
Fig.1 The schematic diagram of water transfer between the lakes

1.2 水生植物的种植

2016 年 5 月,将种植穗花狐尾藻、大茨藻(*Najas marina*)和小茨藻(*Najas minor*)的花盆沉入水底,种植盆随机摆放,北门和新建小湖沉水植物种植面积分别约占水面面积的 1/2、1/3。在种植池内种植挺水植物主要有菖蒲(*Acorus calamus*)、水葱(*Scirpus validus*)、千屈菜(*Lythrum salicaria*)、再力花(*Thalia dealbata*)和荷花(*Lotus*),种植面积分别占北门、新建小湖面积的 40%、35%。

1.3 采样点布设与样品采集

如图 1 所示,设置 4 个监测采样点,2015、2016 年 3—11 月每月下旬采集表层水样 1 次,在采样点测定水体透明度和水温,水样用于测定 COD、TN、TP、叶绿素 a 浓度及 pH,水样不过滤直接测定荧光类有机物质。其中,2015 年 9 月和 2016 年 4、6 月由于样品出现损坏而未获得有效结果。

1.4 分析测试方法

采用 COD 快速消解仪(CTL-12)测定 COD;分别采用《水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》(HJ 636—2012)、《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB 11893—89)、《水质 叶绿素 a 的测定 分光光度法》(HJ 89—2017)测定 TN、TP 和叶绿素 a;采用 pH 电极(PB-10,赛多利斯)测定 pH;采样塞氏盘测定水体透明度;采用普通温度计测定水温。

使用 Hitachi F-7000 荧光光谱仪测定溶解性荧光有机质的三维荧光光谱(3DEEMs)。激发光源:150 W 氙弧灯;单色器为衍射光栅;分辨率 1 nm;信噪比 > 800;带通激发波长(E_x) 5 nm,发射波长(E_m) 1 nm;波长范围在 E_x 为 200~700 nm、 E_m 为 200~700 nm。

2 结果与讨论

2.1 湖体水温和 pH

如图 2 所示,各湖体之间的水温相差不大,但随季节变化明显。进入 3 月后,水温很快上升至 10 $^{\circ}\text{C}$ 以上;进入 4 月后,水温上升至 20 $^{\circ}\text{C}$ 以上;10—11 月,水温下降明显,11 月下旬水温降至 5 $^{\circ}\text{C}$ 以下,水面开始结冰。在水体环境和气象因子中,水温是影响藻类生长的重要因子,20 $^{\circ}\text{C}$ 以下时,水温与蓝藻生长暴发或沉寂消亡具有明显的相关性;20~30 $^{\circ}\text{C}$ 时,水华的面积受到湖体水温和其他因素的共同影响,容易发生大规模蓝藻暴发;30 $^{\circ}\text{C}$ 以上时,过高的水温会对蓝藻的上浮聚集产生抑制作用^[6]。从所监

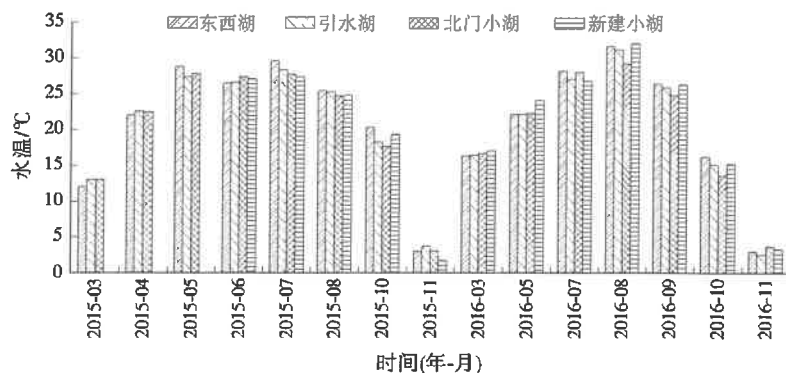


图2 各湖体水温的变化

Fig.2 The variation of temperature of the lakes

测的4个湖体水温看,除2016年8月水温有高于30℃外,4—9月的水温都在20~30℃,非常适宜蓝藻生长。

水体的酸碱度是表征水体状况的重要指标之一,水体pH变化和藻生物量变化是交互作用并互为因果关系的,水体pH会影响藻类生长,而藻类生长又会反过来影响水体pH^[7]。大多数蓝藻偏好弱碱性环境,在弱碱性条件下生长较快,反过来由于藻细胞生长消耗水中的二氧化碳和碳酸盐,又会导致水体的pH出现上升。从图3可看出,4个湖体全

年pH在6.3~9.7波动,大多数时间处于7.0~8.5。大多数时间,东西湖的pH略高于其他3个湖体,而另外3个湖体之间的pH相差不大。

2.2 湖体水质

从图4可看出,4个湖体的COD总体水平处于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ至Ⅴ类,但8月东西湖的COD浓度明显高于其他3个湖体。从图5可看出,4个湖体的TN总体水平也处于GB 3838—2002的Ⅳ至Ⅴ类,但2016年的TN浓度明显比2015年高,有部分处于GB 3838—2002

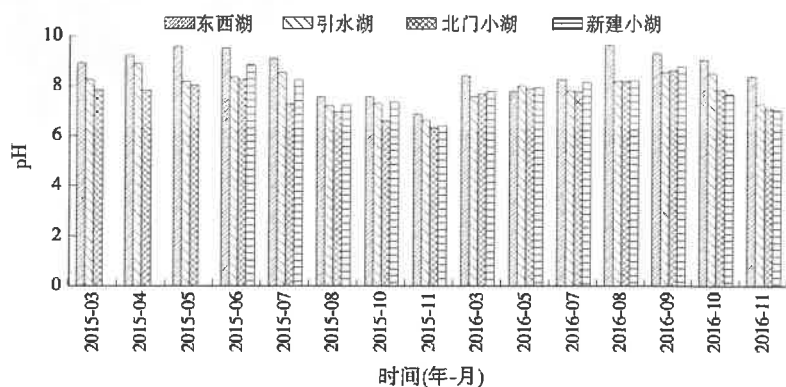


图3 各湖体pH的变化

Fig.3 The variation of pH of the lakes

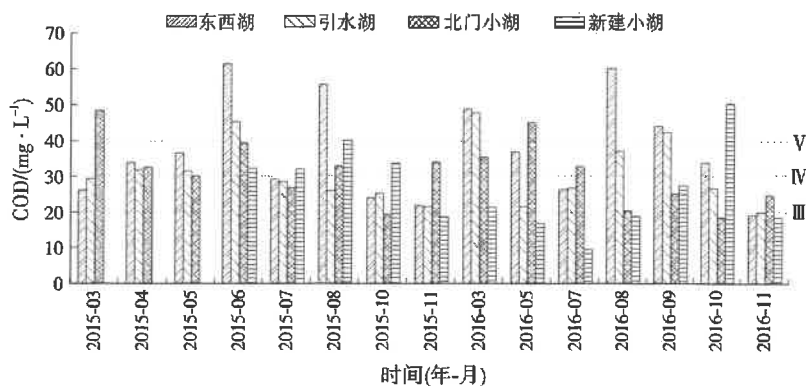


图4 各湖体COD的变化

Fig.4 The variation of COD of the lakes

的劣V类状况,这跟引水渠的来水水质有关。从图6可看出,与COD和TN不同,4个湖体的TP相对较低,但总体水平仍处于GB 3838—2002的Ⅳ至Ⅴ类。可以看出,4个湖体之间的水质差异并不明显,只是在夏季,水质状况会略有变差,东西湖的水质略比其他3个湖体差,但有时候北门和新建小湖的COD、TN和TP浓度也会高于东西湖。

一般认为,TN和TP质量浓度分别超过0.5、

0.02 mg/L,就可能暴发水华,即使无机磷低至0.014 mg/L,蓝藻仍能正常生长;除TN和TP浓度外,氮磷质量比(N/P)也影响蓝藻的生长,N/P为16对蓝藻的生长最适宜,发生蓝藻水华时N/P通常不超过29^[8]。从图5至图7可看出,TN和TP质量浓度基本都超过了0.5、0.02 mg/L的阈值,水体的N/P总体在16~29的适宜范围,所以4个湖体都面临蓝藻暴发的风险。

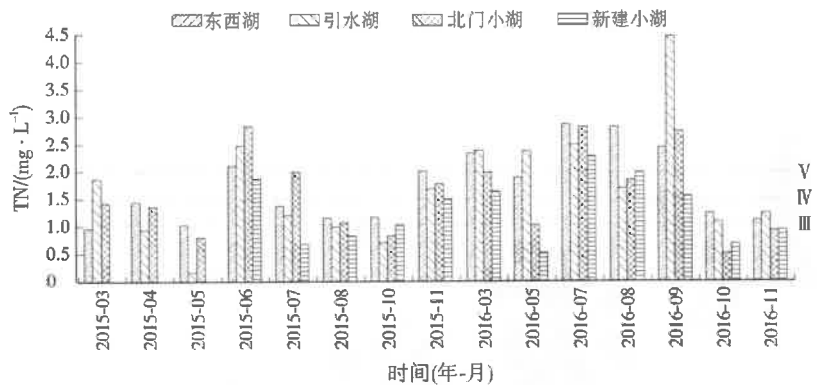


图5 各湖体TN的变化
Fig.5 The variation of TN of the lakes

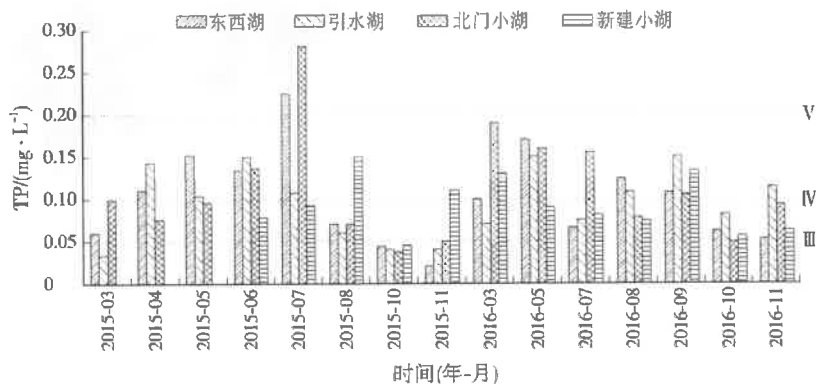


图6 各湖体TP的变化
Fig.6 The variation of TP of the lakes

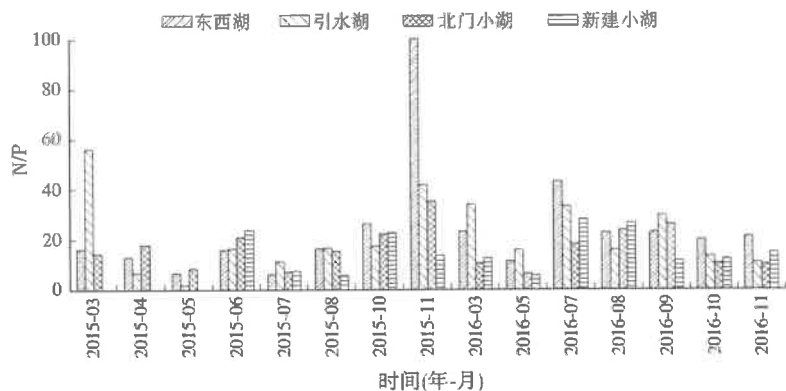


图7 各湖体N/P的变化
Fig.7 The variation of N/P of the lakes

2.3 湖水叶绿素 a

如图 8 所示,在 2015 年采取水生植物生态修复前,北门小湖的叶绿素 a 浓度总体高于东西湖,作为一个小型的静置浅水池,藻类生长非常旺盛;新建小湖在 2015 年 6 月通水后,7 月的叶绿素 a 质量浓度较高,达到了 $61.5 \mu\text{g/L}$,也明显高于东西湖。在 2016 年采取水生植物生态修复后,北门、新建小湖的叶绿素 a 浓度总体低于未进行水生植物修复的东西湖,尤其是在 8 月,东西湖出现较严重水华现象,叶绿素 a 质量浓度高达 $131.8 \mu\text{g/L}$,北门、新建小湖的叶绿素 a 质量浓度只有 45.4 、 $28.6 \mu\text{g/L}$,藻类过度生长受到明显抑制。

引水湖作为东西湖调水给新建小湖的中间连接湖,其水生植物种植与其他湖体不同,采用 5 个种植池,只种植了挺水植物,包括有荷花、菖蒲、芦苇(*Phragmites communis*)、香蒲(*Typha L.*)、千屈菜、再力花,种植池的面积约占水面面积的 10%,没有种植沉水植物。因此,4 个湖体在水生植物配植方面具有明显差异性和代表性,即东西湖没有种植任何水生植物,引水湖只种植挺水植物,而北门、新建小湖种植挺水和沉水植物。由图 8 可见,2016 年除 5、7、9 月外,引水湖的叶绿素 a 浓度低于东西湖,尤其在 8 月出现水华时,引水湖的叶绿素 a 浓度明

显低于东西湖。但在 7—10 月,引水湖的叶绿素 a 浓度还是明显高于北门和新建小湖。由此可见,种植挺水植物能抑制藻类过度繁殖,但并不稳定,只采用挺水植物抑制藻类生长,没有挺水植物与沉水植物共同配植的抑藻效果明显。根据图 4 至图 6 和图 8,各湖体之间的水质差异不大,但叶绿素 a 浓度差异显著,可见各湖体之间的藻类生长差异性与湖水水质相关性不大,即当湖泊整体处于 GB 3838—2002 的 IV 至 V 类时,水质对藻类生长和水华暴发已不是关键的制约因素,而水生植物的种植以及配植方式显著影响湖泊中的藻类生长与繁殖。

通过 4 个湖体水中浮游藻类的观察,玉渊潭水体的藻类种类主要有:蓝藻门的微囊藻(*Microcystis*)、伪鱼腥藻(*Anabaena*)、平裂藻(*Merismopedia*);绿藻门的小球藻(*Chlorella*)、栅藻(*Scenedesmus*)、鼓藻(*Cosmarium*)、盘星藻(*Pediastrum*);硅藻门的直链藻(*Melosira*)、小环藻(*Cyclotella*)、针杆藻(*Synedra*)。但优势藻种以微囊藻为主,夏季藻华严重时,东西湖的部分湖面形成明显的微囊藻聚集层。各湖体平均藻细胞密度见表 1。

2.4 水体透明度

透明度是水体富营养化的特征指标之一。水体透明度与光照强度、水中悬浮物浓度、水中营养盐含

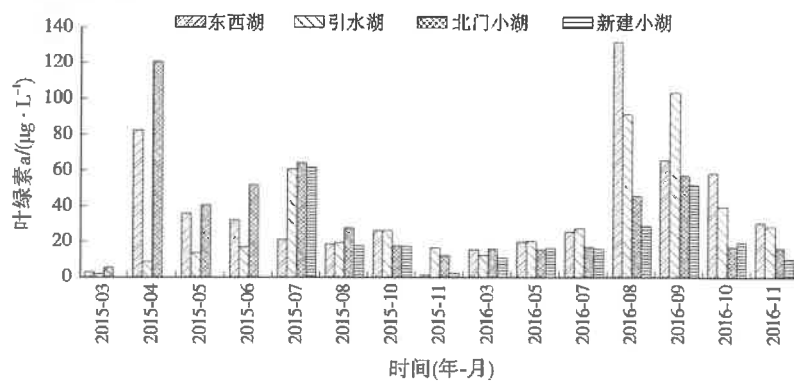


图 8 各湖体叶绿素 a 的变化
Fig.8 The variation of Chl a of the lakes

表 1 各湖体平均藻细胞密度
Table 1 The average algal cell densities of the lakes

时间	地点	微囊藻	伪鱼腥藻	平裂藻	小球藻	栅藻	鼓藻	盘星藻	直链藻	小环藻	针杆藻
2015 年	东西湖	947	11	3	168	3	6	0	0	2	5
	引水湖	1 699	9	140	161	4	9	0	0	0	5
	北门小湖	377	1	42	152	7	6	0	4	4	1
	新建小湖	517	4	7	2	4	5	0	0	0	2
2016 年 7—9 月	东西湖	2 350	38	231	548	28	7	4	7	35	7
	引水湖	2 640	28	133	564	38	7	7	11	25	7
	北门小湖	224	11	56	272	66	7	0	4	7	4
	新建小湖	315	45	13	517	20	4	0	4	4	0

环境生态与污染 <http://www.zjepc.com>

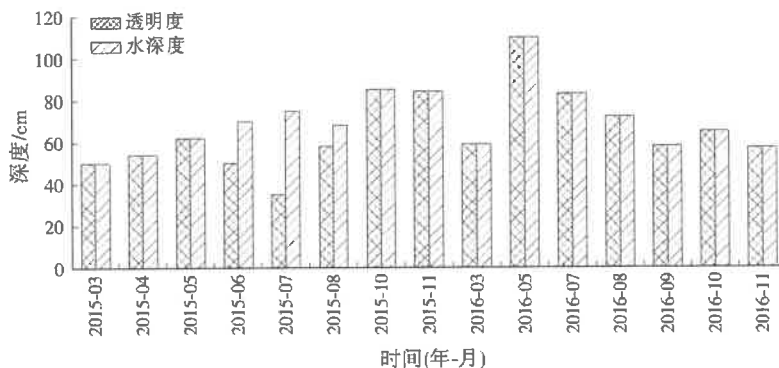


图9 北门小湖水体透明度的变化

Fig.9 The variation of transparency in Beimen Lake

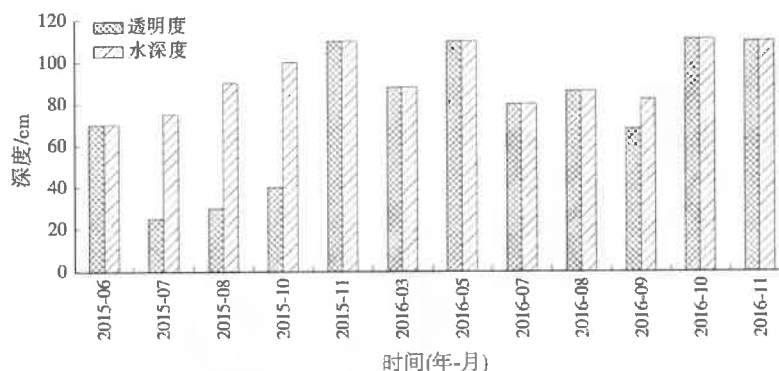


图10 新建小湖水体透明度的变化

Fig.10 The variation of transparency in Xinjian Lake

量及浮游生物含量有很大关系,在富营养化水体中主要受藻类的影响,尤其在夏季由于浮游植物的生长旺盛和大量入流雨水携带的悬浮物,透明度一般较低^[9]。从图9和图10可见,2015年6—10月,北门和新建小湖的水体透明度总体较低,低于监测点位的水深度。在采取水生植物生态修复措施后的2016年,水体透明度明显提高,除新建小湖在9月略低于水深度外,其他时间两湖的水体透明度均与水深度一致。由此可见,水生植物生态修复不仅控制了藻类过度生长繁殖,而且水华的有效控制也明显提高了水体的透明性,水体的景观效应得到有效提升。

2.5 水体中的荧光类有机物

荧光光谱法的原理是有机物分子在一定波长的紫外光或可见光照射下吸收光能,在极短的时间内(约 10^{-8} s)产生波长大于激发波长的荧光(也叫发射光),对于一种有机物,激发光和发射光的波长都是固定的,可通过荧光的波长和强度来判别有机物质的种类和浓度。因此,该方法广泛用于水体中溶解性有机质的研究^{[10]1525}。

图11为4个湖的湖水在2016年9月所测定的3DEEMs。根据荧光峰位置,3DEEMs可划分为3

个荧光区:峰A荧光中心在 $E_x/E_m=280\text{ nm}/340\text{ nm}$ 附近,为芳香族蛋白类,一般指具有芳香性的氨基酸,如酪氨酸、色氨酸等;峰B荧光中心在 $E_x/E_m=230\text{ nm}/340\text{ nm}$ 附近,为类蛋白质物质,通常为微生物代谢产物,如类酪氨酸、类色氨酸及其残基等;峰C荧光中心在 $E_x/E_m=255\text{ nm}/410\text{ nm}$ 附近,为类腐殖酸荧光^{[10]1526}。4个湖的湖水中峰A的荧光强度都最强,峰B的荧光强度相对较弱,而峰C的荧光峰只出现在北门和新建小湖。通常,类腐殖酸来源于底泥和沉积物,但是对于长有较多沉水植物的两个湖体,底泥与沉积物的释放是较少的,而类腐殖酸也会来源于植物残体和植物分泌的化感物质。研究发现,水生植物产生的植物多酚具有强烈的抑藻效果,其中所含有的小分子酚类,就在类腐殖酸区域产生强烈的荧光信号^[11]。另外,从全年监测的3DEEMs结果(受篇幅所限图未给出)看,北门和新建小湖的峰C也只是在6—10月出现,在春季和冬季沉水植物生长不旺盛时,峰C也消失了。因此,可以看出,种植沉水植物的北门和新建小湖,沉水植物分泌的化感物质信号明显强于只有挺水植物的引水湖,更强于没有水生植物的东西湖,这些化感物质是抑制蓝藻细胞过度生长并控制水华

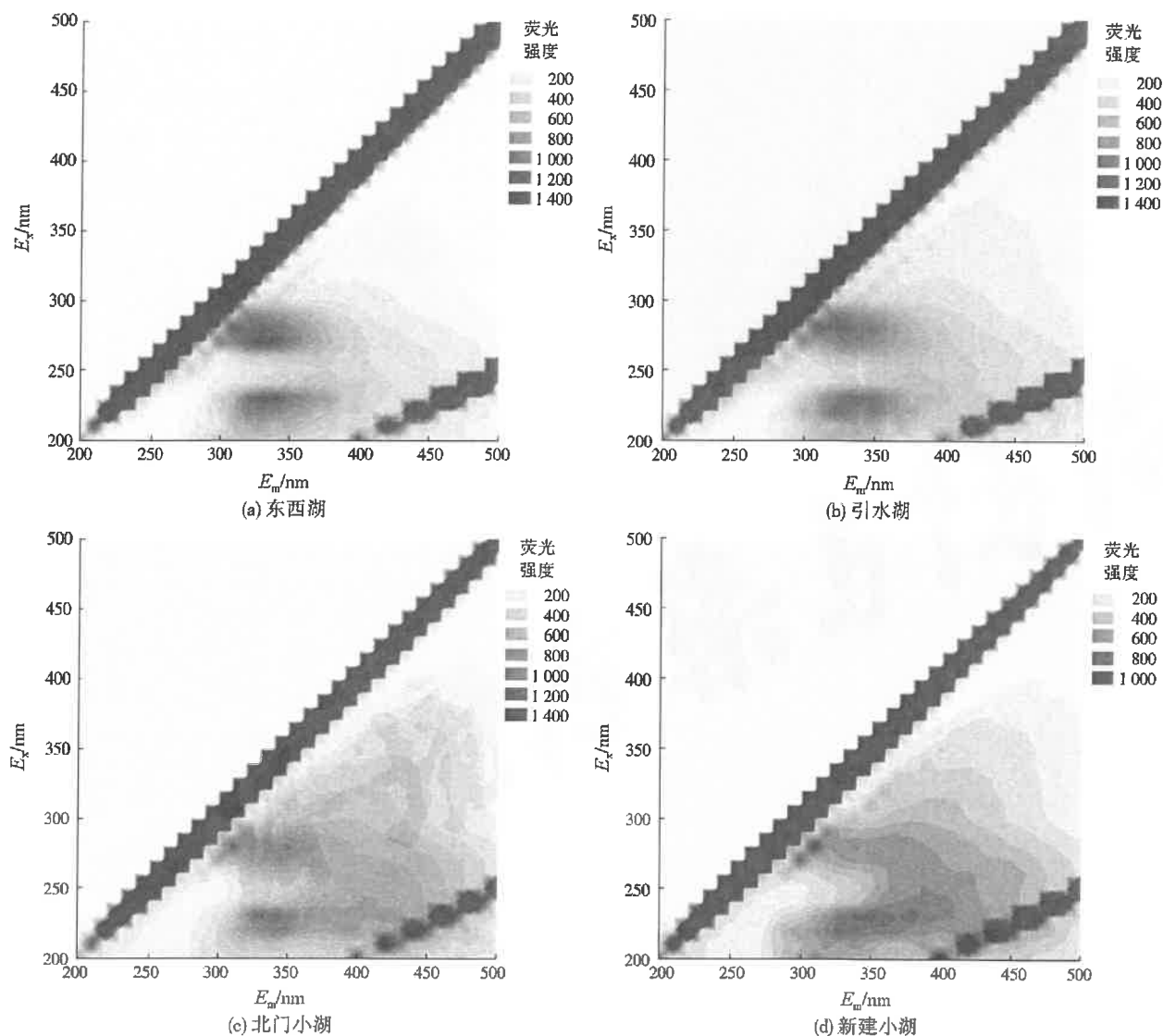


图 11 湖水的 3DEEMs

Fig.11 The three dimensional fluorescence spectra of the lake waters

暴发的根本原因。

3 结 论

(1) 在湖岸和湖底都进行了硬化处理的景观水体中,采用盆栽方式大面积种植沉水植物,并配植挺水植物,可有效抑制水体中蓝藻的生长,进而控制蓝藻水华的暴发,但对水体水质只略有改善。

(2) 只种植挺水植物,也可抑制水体中蓝藻的生长,但是效果并不非常稳定,而沉水植物在蓝藻抑制中发挥了主要作用。

(3) 当湖泊 COD、TN、TP 处于 GB 3838—2002 的 IV 至 V 类时,水质对藻类生长和水华暴发已不是关键的制约因素,而水生植物的种植及配植方式显著影响湖泊中的藻类生长与繁殖。

参考文献:

- [1] 鲁韦坤,余凌翔,欧晓昆,等.滇池蓝藻水华发生频率与气象因子的关系[J].湖泊科学,2017,29(3):534-545.
- [2] WANG H, LIU F L, LUO P, et al. Allelopathic effects of *Myriophyllum aquaticum* on two cyanobacteria of *Anabaena flos-aquae* and *Microcystis aeruginosa*[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2017, 98(4): 556-561.
- [3] ZHOU Q, HAN S, YAN S H, et al. Impacts of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms stress on the physiological characteristics, microcystin production and release of *Microcystis aeruginosa*[J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2014, 55: 148-155.
- [4] HE Y, ZHOU Q H, LIU B Y, et al. Programmed cell death in the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* induced by allelopathic effect of submerged macrophyte *Myriophyllum spicatum* in co-culture system[J]. Journal of Applied Phycology, 2016, 28(5): 2805-2814.

环境污染防治网 <http://www.zjepc.com> (下转第 638 页)

