

# 杭州西湖浮游植物群落对沉水植物恢复的响应

代志刚<sup>1</sup>, 蔺庆伟<sup>1,2</sup>, 易科浪<sup>1,2</sup>, 曾 磊<sup>1,2</sup>, 胡胜华<sup>1</sup>, 刘碧云<sup>1</sup>, 贺 锋<sup>1</sup>, 吴振斌<sup>1</sup>

(1. 中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**为评价杭州西湖沉水植物恢复对浮游植物群落的影响,以西湖湖西水域(茅家埠、乌龟潭、浴鹄湾)为代表,通过5年连续采样监测数据,研究了该区域沉水植物恢复前后浮游植物物种组成、生物量、多样性指数及其与水质理化参数的动态变化关系。结果表明,2009–2013年共检出浮游植物156种,隶属8门/78属,其群落结构在3个湖区间不存在显著差异( $P>0.05$ ),藻类优势种的年际变化呈现由绿藻门(Chlorophyta)的球衣藻(*Chlamydomonas globosa*)、小球藻(*Chlamydomonas microspheara*)和蓝藻门(Cyanophyta)的铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)、不定微囊藻(*Microcystis incerta*)逐渐向绿藻门的蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)、细丝藻(*Ulothrix teneri-ima*)、多形丝藻(*Ulothrix variabilis*)和硅藻门(Bacillariophyta)的颗粒直链藻(*Melosira granulata*)、具星小环藻(*Cyclotella stelligera*)转变。浮游植物群落的 Margalef 和 Shannon-Weiner 多样性指数分别在0.632~3.396和0.581~4.438之间变化,指示水体处于中度富营养状态且有转好趋势。调查期间水体总氮和总磷浓度分别在0.92~5.26 mg/L和0.005~0.108 mg/L。水质理化参数分析表明,茅家埠和乌龟潭浮游植物生物量与水体总氮的变化呈显著正相关( $P<0.05$ )。研究表明,相比工程实施前,西湖湖西水质有明显好转,沉水植被恢复是富营养化水体治理的有效措施之一。

**关键词:**杭州西湖;浮游植物;群落演替;多样性指数

**中图分类号:**Q145 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2017)05-0035-11

杭州西湖是世界著名的观光性湖泊,属半封闭城中浅水湖泊,环境容量有限,自净能力较差(刘经雨等,1981);同时,因流域面源污染和旅游业发展,导致西湖水体营养盐含量超标、水生态系统出现退化、沉水植物消失(吴洁等,2001)。为解决西湖富营养化问题,杭州市政府自1987年开展了环湖截污、底泥疏浚、钱塘江引水等工程措施。2002年,在茅家埠、乌龟潭、浴鹄湾实施了西湖湖西综合保护工程(西湖西进工程),扩展了湖西水域0.86 km<sup>2</sup>(杨俊等,2014)。这些工程的实施,在一定程度上促进了西湖流域生态环境的改善(吴芝瑛等,2005;林丰妹等,2007;邓开宇等,2009)。为进一步恢复退化的生态系统,构建西湖健康稳定的水体环境,依托国家“十一五”水专项,在西湖西进水域实施了水生植物群落优化示范工程。

浮游植物作为水生态系统的初级生产者,在淡水生态系统的物质循环、能量流动和信息传递中起

着至关重要的作用(孙军等,2004;张婷等,2009);其生长和分布受到温度、pH、营养盐、浮游动物及鱼类摄食和水生植物等多种因素的影响(Mohan et al, 2007;王丽卿,2008);同时,由于浮游植物能快速反映水环境的变化,常作为水环境的指示生物(唐雅萍等,2008)。浮游植物群落结构和生物量呈季节性变化,可用来指示和评价水体富营养化程度(Zhao et al,2005;Xu et al,2007)。

以往的研究表明,杭州西湖浮游植物种类十分丰富,生物量大,且以蓝藻和绿藻为主,具有典型的富营养化水体特征(He et al,1980;项斯端等,2000;吴洁等,2001;张志兵等,2009)。2011年5月,在西湖西进水域开展了以沉水植物恢复为主的示范工程。工程实施后,茅家埠、浴鹄湾和乌龟潭3个湖区形成了以穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)、苦草(*Vallisneria natans*)和金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)为主的沉水植物群落,3个湖区平均盖度分别达到了14.3%、16.6%和10.2%,形成了比较稳定的沉水植物群落;大面积的沉水植物恢复也势必影响西湖西进水域浮游植物的群落分布和变化。本文通过调查杭州西湖西进水域2009~2013年浮游植物物种组成和生物量,探究其变化规律;并结合水体

收稿日期:2016-08-01

基金项目:国家“十二五”水专项(2012ZX07101007-005)。

作者简介:代志刚,1988年生,男,工程师,主要从事水体生态修复方面的研究。E-mail:daizg0601@163.com

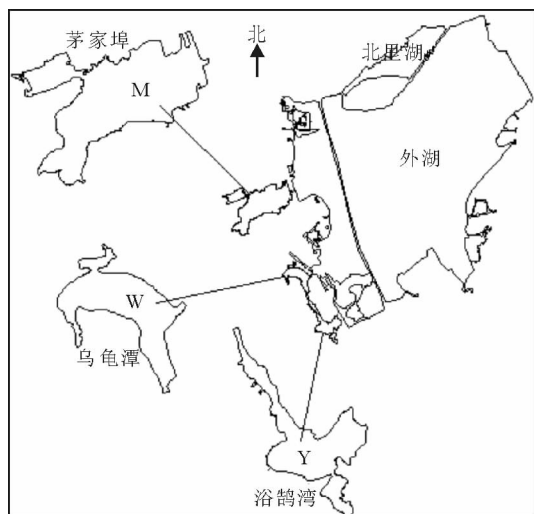
通信作者:刘碧云。E-mail:liuby@ihb.ac.cn

理化参数,探究浮游植物与水环境因子的关系;同时对示范工程施工前后浮游植物多样性的变化,评价了工程实施的效用,为西湖水体维护、管理及其他类似湖泊综合治理提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 监测位点的设置

根据西湖西进水域各湖区的地形特征,本次调查在茅家埠(30°14'31.62"N;120°7'26.33"E)、乌龟潭(30°14'3.98"N;120°7'42.19"E)和浴鹄湾(30°13'41.98"N;120°7'54.50"E)各设置1个监测位点,分别标注为M、W和Y。点位示意图1。



(M:茅家埠,W:乌龟潭,Y:浴鹄湾)

图1 西湖西进水域采样位点示意

(M: Maojiabu Lake, W: Wuguitan Lake, Y: Yuhewan Lake)

Fig. 1 Location of the sampling sites in the three experimental sub lakes in the western district of West Lake

### 1.2 样品采集与处理

于2009年9月、2010年9月、2011年6月、2011年9月、2012年6月、2012年9月、2013年6月、2013年9月对各监测位点进行8次的浮游植物调查,采集浮游植物定性样品和定量样品。参照《湖泊富营养化调查规范》(金相灿和屠清瑛,1990),定性样品采集后现场加入10 mL 4%的甲醛固定以待镜检;定量样品采集完后加入15 mL 鲁哥氏液固定,带回实验室进行沉降、浓缩、镜检。

在采集浮游植物的同时,现场测定水温、pH、溶解氧(DO)等(HQ-30D, HACH),并采集5 L水样带回实验室进行总氮(TN)、总磷(TP)等指标分析,测定方法参照国标(GB11894-89; GB11893-89)进行。

### 1.3 浮游植物鉴定与计数

对野外采样获得的定性和定量样品进行镜检,

定性样品鉴定到属或种,并在10×40倍的显微镜(OLYMPUS BH-2)下对定量样品进行细胞计数(章宗涉和黄祥飞,1991)。每个样品计数3片,取其平均值并按公式换算成单位体积中的个体数量。计算公式如下:

$$N = (A/A_c) \times (V_w/V) \times n$$

式中: $N$ 为1 L水样中浮游藻类个体数(个/L); $A$ 为计数框面积( $\text{mm}^2$ ); $A_c$ 为计数面积( $\text{mm}^2$ ),计数面积为视野面积×视野数; $V_w$ 为浓缩体积; $V$ 为计数体积(mL); $n$ 为计数所得的细胞数。

### 1.4 计算公式

1.4.1 Margalef多样性指数( $D$ ):  $D = (S - 1)/\ln N$ ; 式中: $S$ 为种类数; $N$ 为总个体数。 $D$ 值0~1为重度污染,1~2为严重污染,2~4为中度污染,4~6为轻度污染,大于6为清洁水体。

1.4.2 Shannon-Weiner多样性指数( $H'$ ):  $H' = -\sum (n_i/N) \times \ln(n_i/N)$ ; 式中: $n_i$ 为第*i*种的个体数; $N$ 为总个体数。 $H'$ 值0~1为重度污染,1~2为严重污染,2~3为中污染,3~4.5为轻污染,>4.5为清洁。

1.4.3 均匀度指数( $J$ ):  $J = H'/\lg S$ ; 式中: $H'$ 为Shannon-Weiner多样性指数; $S$ 为种类数。均匀度指数反映的是物种个体分布的均匀程度, $J$ 值越大,物种分布越均匀。

### 1.5 数据分析

通过SPSS19.0统计软件,对浮游植物细胞密度与水体理化参数进行相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 西湖西进水域浮游植物群落结构

2.1.1 浮游植物组成与变化 本次调查结果表明,茅家埠共检出浮游植物131种(含变种),隶属7门、67属;其中绿藻门47种,占总种类数的35.9%;硅藻门45种,占34.3%;其余共39种,占29.8%。乌龟潭共检出浮游植物133种(含变种),隶属8门、61属;其中绿藻门49种,占总种类数的36.9%;硅藻门45种,占33.8%;其余共39种,占29.3%。浴鹄湾共检出浮游植物134种(含变种),隶属8门、62属;其中绿藻门52种,占总种类数的38.8%;硅藻门50种,占37.3%;其余共32种,占23.9%。详见表1。

调查期间,2012年9月乌龟潭浮游植物种类数达到最大47种,浮游植物种类数最少(10种)出现在2011年9月浴鹄湾(图2)。

表 1 2009 – 2013 年茅家埠、乌龟潭、浴鹄湾的浮游植物种类

Tab.1 Species composition of phytoplankton in the three experimental sub lakes, 2009 – 2013

| 浮游植物                                                   | 茅家埠 | 乌龟潭 | 浴鹄湾 |
|--------------------------------------------------------|-----|-----|-----|
| 硅藻门 (Bacillariophyta)                                  |     |     |     |
| 颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>                        | +   | +   | +   |
| 小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.                              | +   | +   | +   |
| 冠盘藻 <i>Stephanodiscus</i> sp.                          | +   |     | +   |
| 窗格平板藻 <i>Tabellaria fenestrata</i>                     | +   | +   | +   |
| 克洛脆杆藻 <i>Fragilaria crotomensis</i>                    | +   | +   | +   |
| 短线脆杆藻 <i>F. brevistriata</i>                           |     | +   | +   |
| 变异脆杆藻 <i>F. virescens</i>                              |     |     | +   |
| 近缘针杆藻 <i>Synedra affinis</i>                           | +   | +   | +   |
| 双头针杆藻 <i>S. amphicephala</i>                           | +   | +   | +   |
| 肘状针杆藻 <i>S. ulna</i>                                   | +   | +   | +   |
| 尖针杆藻 <i>S. acus</i>                                    | +   | +   | +   |
| 偏凸针杆藻 <i>S. vaucheriae</i>                             | +   |     |     |
| 偏凸针杆藻小头变种 <i>S. vaucheriae</i> var. <i>capitellaia</i> | +   |     |     |
| 双球针杆藻 <i>S. amphicephala</i>                           |     |     | +   |
| 美丽星杆藻 <i>Asterionella formosa</i>                      | +   |     | +   |
| 尖布纹藻 <i>Gyrosigma acuminatum</i>                       | +   | +   | +   |
| 细布纹藻 <i>Cymbella lunata</i>                            |     |     | +   |
| 尖辐节藻 <i>Stauroneis acuta</i>                           | +   | +   | +   |
| 双头辐节藻 <i>S. anceps</i>                                 | +   |     |     |
| 紫心辐节藻 <i>S. phoeicenteroa</i>                          | +   |     |     |
| 铜绿羽纹藻 <i>Pinnularia aeruginosa</i>                     | +   | +   | +   |
| 短肋羽纹藻 <i>P. brevicostata</i>                           |     | +   | +   |
| 著名羽纹藻 <i>P. nobilis</i>                                |     |     | +   |
| 间断羽纹藻 <i>P. interrupta</i>                             | +   | +   |     |
| 弯羽纹藻 <i>P. gibba</i>                                   | +   |     |     |
| 同族羽纹藻 <i>P. gentilis</i>                               |     |     | +   |
| 短小舟形藻 <i>Navicula exigua</i>                           | +   | +   | +   |
| 杆状舟形藻 <i>N. bacillum</i>                               | +   | +   | +   |
| 双球舟形藻 <i>N. amphibola</i>                              |     | +   | +   |
| 椭圆舟形藻 <i>N. sclonfelli</i>                             | +   | +   | +   |
| 瞳孔舟形藻 <i>N. pupula</i>                                 |     |     | +   |
| 狭轴舟形藻 <i>N. verecunda</i>                              | +   | +   | +   |
| 微绿舟形藻 <i>N. viridula</i>                               | +   | +   | +   |
| 卡里舟形藻 <i>N. cari</i>                                   | +   |     |     |
| 尖头舟形藻 <i>N. cuspidate</i>                              |     | +   | +   |
| 尖头舟形藻凸顶变种 <i>N. cuspidata cotbiggt</i>                 |     | +   |     |
| 罗泰舟形藻 <i>N. rotaeana</i>                               |     |     | +   |
| 放射舟形藻 <i>N. radiosa</i>                                |     | +   |     |
| 系带舟形藻 <i>N. cincta</i>                                 |     | +   |     |
| 英吉利舟形藻 <i>N. anglica</i>                               |     | +   |     |
| 卵圆双眉藻 <i>Amphora ovalis</i>                            |     | +   | +   |
| 极小桥弯藻 <i>Cymbella perpusilla</i>                       | +   | +   |     |
| 细小桥弯藻 <i>C. gracilis</i>                               | +   |     | +   |
| 披针桥弯藻 <i>C. delicatula</i>                             |     | +   |     |
| 箱型桥弯藻 <i>C. cistula</i>                                | +   | +   | +   |
| 膨胀桥弯藻 <i>C. tumida</i>                                 | +   | +   | +   |
| 小头桥弯藻 <i>C. cuspidate</i>                              |     | +   |     |
| 新月桥弯藻 <i>Cymbella cymbiformis</i>                      | +   |     | +   |
| 胡斯特桥弯藻 <i>C. hustedtii</i>                             | +   |     |     |
| 粗糙桥弯藻 <i>C. aspera</i>                                 |     |     | +   |
| 偏肿桥弯藻 <i>C. naviculiformis</i>                         | +   |     | +   |
| 微细桥弯藻 <i>C. parva</i>                                  | +   |     | +   |
| 近缘桥弯藻 <i>C. cymbiformis</i>                            |     | +   |     |
| 尖头桥弯藻 <i>C. cuspidate</i>                              |     |     | +   |
| 中间异极藻 <i>Gomphonema intricalum</i>                     | +   | +   | +   |

续表1Continued

| 浮游植物                                   | 茅家埠 | 乌龟潭 | 浴鹄湾 |
|----------------------------------------|-----|-----|-----|
| 窄异极藻 <i>G. angustatum</i>              | +   | +   | +   |
| 缢缩异极藻 <i>G. constrictum</i>            | +   | +   |     |
| 缢缩异极藻头状变种 <i>G. constrictum</i> var.   | +   | +   | +   |
| 短缝异极藻 <i>G. abbreviatum</i>            |     |     | +   |
| 纤细异极藻 <i>G. gracile</i>                |     |     | +   |
| 扁圆卵形藻 <i>Cocconeis placentula</i>      | +   | +   | +   |
| 弯形弯楔藻 <i>Rhoicosphenia curvata</i>     | +   | +   | +   |
| 波缘曲壳藻 <i>Achnanthes orenulata</i>      |     | +   |     |
| 钝端窗纹藻 <i>Epithemia zebra</i>           | +   |     |     |
| 线形菱形藻 <i>Nitzschiaceae sublinearis</i> |     | +   |     |
| 细齿菱形藻 <i>Nitzschia denticula</i>       | +   |     |     |
| 草鞋形波缘藻 <i>Cymatopleura solea</i>       | +   |     | +   |
| 椭圆波缘藻 <i>C. elliptica</i>              | +   |     |     |
| 椭圆波缘藻缢缩变种 <i>C. elliptica</i> var.     | +   |     |     |
| 粗壮双菱藻 <i>Surirella robusta</i>         | +   | +   | +   |
| 线形双菱藻 <i>S. linenris</i>               |     | +   | +   |
| 卵形双菱藻 <i>S. ovata</i>                  |     | +   |     |
| 卵形双菱藻羽纹变种 <i>S. ovata</i> var.         |     | +   | +   |
| 窄异极藻 <i>Gomphonema angustatum</i>      |     | +   | +   |
| 绿藻门(Chlorophyta)                       |     |     |     |
| 衣藻 <i>Chlamydomonas</i> sp.            | +   | +   | +   |
| 盘藻 <i>Gonium</i> sp.                   | +   | +   |     |
| 实球藻 <i>Pandorina morum</i>             | +   | +   | +   |
| 空球藻 <i>Eudorina elegans</i>            | +   | +   | +   |
| 美丽团藻 <i>Volvox aurens</i>              | +   |     |     |
| 疏刺多芒藻 <i>Golenkinia paucispina</i>     | +   |     | +   |
| 多芒藻 <i>G. radiata</i>                  |     | +   |     |
| 近直小桩藻 <i>Charaeium substrietum</i>     | +   |     | +   |
| 硬弓形藻 <i>Schroederia robusta</i>        | +   |     |     |
| 螺旋弓形藻 <i>S. spiralis</i>               | +   | +   |     |
| 拟菱形弓形藻 <i>S. nitzschioides</i>         | +   |     |     |
| 蛋白核小球藻 <i>Chlorella pyrenoidsa</i>     | +   | +   | +   |
| 椭圆小球藻 <i>Ch. ellipsoidea</i>           | +   | +   | +   |
| 长刺顶棘藻 <i>Chodatell alongiseta</i>      |     |     | +   |
| 三角四角藻 <i>Tetraedron trigonum</i>       |     | +   | +   |
| 微小四角藻 <i>T. minimum</i>                | +   |     | +   |
| 月牙藻 <i>Selenastrum bibraianum</i>      | +   | +   | +   |
| 针形纤维藻 <i>Ankistrodesmus acicularis</i> | +   | +   | +   |
| 镰形纤维藻 <i>A. falcatus</i>               | +   |     |     |
| 粗刺四刺藻 <i>Trenbaria triappendicula</i>  |     | +   | +   |
| 浮球藻 <i>Planktosphaeria gelatinosa</i>  | +   |     | +   |
| 椭圆卵囊藻 <i>Oocystis elliptica</i>        |     |     | +   |
| 集星藻 <i>Actinastrum hantzschii</i>      | +   | +   | +   |
| 二角盘星藻 <i>Pediastrum duplex</i>         | +   | +   | +   |
| 二角盘星藻纤细变种 <i>P. duplex</i> var.        | +   | +   | +   |
| 短棘盘星藻 <i>P. boryanum</i>               | +   | +   | +   |
| 短棘盘星藻长角变种 <i>P. boryanum</i> var.      |     | +   | +   |
| 单角盘星藻 <i>P. simplex</i>                | +   | +   | +   |
| 单角盘星藻具孔变种 <i>P. simplex</i> var.       | +   | +   | +   |
| 双射盘星藻 <i>P. biradiatum</i>             | +   | +   | +   |
| 四角盘星藻 <i>P. clathratum</i>             |     | +   | +   |
| 整齐盘星藻 <i>P. integrum</i>               |     | +   |     |
| 弯曲栅藻 <i>Scenedesmus arcuatus</i>       | +   |     |     |
| 四尾栅藻 <i>S. quadricauda</i>             | +   | +   | +   |
| 二形栅藻 <i>S. dimorphus</i>               | +   | +   | +   |
| 龙骨栅藻 <i>S. cavinatus</i>               |     |     | +   |
| 双对栅藻 <i>S. bijuga</i>                  | +   | +   | +   |
| 齿牙栅藻 <i>S. denticulatus</i>            | +   | +   |     |

续表 1Continued

| 浮游植物                                                | 茅家埠 | 乌龟潭 | 浴鹄湾 |
|-----------------------------------------------------|-----|-----|-----|
| 爪哇栅藻 <i>S. javanicum</i>                            |     |     | +   |
| 韦斯藻 <i>Westella botryoides</i>                      | +   | +   | +   |
| 优美四星藻 <i>Tetrastrum elegans</i>                     | +   | +   |     |
| 四角十字藻 <i>Crucigenia quadrata</i>                    | +   | +   |     |
| 十字藻 <i>Crucigenia</i> sp.                           | +   | +   | +   |
| 四足十字藻 <i>C. tetrapedia</i>                          |     | +   | +   |
| 小空星藻 <i>Coelastrum microporum</i>                   | +   | +   | +   |
| 空星藻 <i>C. sphaericum</i>                            |     | +   | +   |
| 骈胞藻 <i>Binuclearia tectorum</i>                     | +   | +   |     |
| 细丝藻 <i>Ulothrix tenerrina</i>                       | +   | +   | +   |
| 多形丝藻 <i>U. variabilis</i>                           | +   | +   | +   |
| 交错丝藻 <i>U. implexa</i>                              | +   | +   | +   |
| 单型丝藻 <i>U. acqualis</i>                             | +   | +   | +   |
| 丛毛微胞藻 <i>Microspora floccose</i>                    |     |     | +   |
| 夏毛枝藻 <i>Stigeoclonium aestivale</i>                 | +   |     | +   |
| 韦氏水绵 <i>Spirogyra nords</i>                         |     | +   | +   |
| 长绿梭藻 <i>Chlorogonium elongatum</i>                  | +   |     |     |
| 尖角翼膜藻 <i>Pteromonas aculeata</i>                    |     | +   |     |
| 棒形鼓藻 <i>Gonatozygon monotaenium</i>                 | +   | +   | +   |
| 纤细新月藻 <i>Closterium gracile</i>                     |     | +   | +   |
| 膨胀新月藻 <i>C. tumidum</i>                             |     | +   | +   |
| 项圈新月藻 <i>C. moniliferum</i>                         |     |     | +   |
| 裂顶鼓藻 <i>Tetmemcrus brebissonii</i>                  | +   | +   | +   |
| 珍珠角星鼓藻 <i>Staurastrum margaritaceum</i>             |     | +   |     |
| 纤细角星鼓藻 <i>S. gracile</i>                            |     | +   | +   |
| 圆鼓藻 <i>Cosmarium circulare</i>                      |     | +   | +   |
| 双瘤鼓藻 <i>C. geminatum</i>                            |     |     | +   |
| 厚皮鼓藻 <i>C. pachydermum</i>                          | +   |     | +   |
| 英克斯四棘鼓藻 <i>Arthrodemus incus</i>                    | +   |     |     |
| 矮形顶接鼓藻 <i>Spondylosium pygmaeum</i>                 | +   | +   | +   |
| 裸藻门 (Euglenophyta)                                  |     |     |     |
| 长尾扁裸藻 <i>Phacus longicauda</i>                      |     | +   |     |
| 长尾扁裸藻虫形变种 <i>Ph. longicauda</i> var. <i>insecta</i> | +   |     | +   |
| 扭曲扁裸藻 <i>Ph. tortus</i>                             | +   |     |     |
| 梨形扁裸藻 <i>Ph. pyrum</i>                              |     | +   |     |
| 哑铃扁裸藻 <i>Ph. peteloti</i>                           |     | +   |     |
| 曲尾扁裸藻 <i>Ph. lismorensis</i>                        |     |     | +   |
| 尖尾扁裸藻 <i>Ph. acuminatus</i>                         |     | +   |     |
| 具刺扁裸藻 <i>Ph. hystrix</i>                            | +   |     |     |
| 具瘤扁裸藻 <i>Ph. suecicus</i>                           |     |     | +   |
| 尾裸藻 <i>Euglena caudata</i>                          | +   | +   |     |
| 近轴裸藻 <i>E. proxima</i>                              | +   | +   | +   |
| 尖尾裸藻 <i>E. oxyuris</i>                              | +   | +   |     |
| 易变裸藻 <i>E. mutabilis</i>                            | +   | +   | +   |
| 中型裸藻 <i>E. intermedia</i>                           | +   | +   |     |
| 静裸藻 <i>E. deses</i>                                 | +   | +   |     |
| 多形裸藻 <i>E. polymorpha</i>                           | +   |     | +   |
| 血红裸藻 <i>E. sanguinea</i>                            | +   |     |     |
| 珍珠囊裸藻 <i>Tracgelomonas margaritifera</i>            |     | +   |     |
| 截头囊裸藻 <i>Tr. abrupta</i>                            |     |     | +   |
| 不定囊裸藻 <i>Tr. incerta</i>                            | +   |     |     |
| 剑尾陀螺藻 <i>Strombomonas ensifera</i>                  |     | +   |     |
| 盘形异丝藻 <i>Heteronema discomorphum</i>                | +   |     |     |
| 广卵异鞭藻 <i>Anisonema prosgeobium</i>                  | +   |     |     |
| 蓝藻门 (Cyanophyta)                                    |     |     |     |
| 水华微囊藻 <i>Microcystis flos-aquae</i>                 | +   | +   | +   |
| 铜绿微囊藻 <i>M. aeruginosa</i>                          | +   | +   | +   |
| 不定微囊藻 <i>M. incerta</i>                             | +   | +   | +   |

续表1Continued

| 浮游植物                                 | 茅家埠 | 乌龟潭 | 浴鹄湾 |
|--------------------------------------|-----|-----|-----|
| 色球藻 <i>Chroococcus</i> sp.           | +   | +   | +   |
| 粘球藻 <i>Gloeocapsa</i> sp.            | +   | +   | +   |
| 粘杆藻 <i>Gloeotheca</i> sp.            | +   | +   | +   |
| 不定腔球藻 <i>Coelosphaerium dubium</i>   | +   | +   | +   |
| 微小平裂藻 <i>Merismopedia tenuissima</i> | +   | +   | +   |
| 银灰平裂藻 <i>M. glauca</i>               | +   | +   | +   |
| 中华尖头藻 <i>Raphidiopsis sinensia</i>   | +   | +   | +   |
| 固氮鱼腥藻 <i>Anabaena azotica</i>        | +   | +   | +   |
| 螺旋鱼腥藻 <i>A. spiroides</i>            |     | +   | +   |
| 卷曲鱼腥藻 <i>A. circinalis</i>           |     | +   | +   |
| 大螺旋藻 <i>Spirulina maxima</i>         | +   | +   | +   |
| 巨颤藻 <i>Oscillatoria princeps</i>     | +   | +   | +   |
| 小颤藻 <i>O. tenuis</i>                 | +   | +   | +   |
| 美丽颤藻 <i>O. formosa</i>               | +   |     |     |
| 小席藻 <i>Ph. tenue</i>                 |     |     | +   |
| 隐藻门 (Cryptophyta)                    |     |     |     |
| 尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>        | +   | +   | +   |
| 嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i>        | +   | +   | +   |
| 甲藻门 (Pyrrophyta)                     |     |     |     |
| 裸甲藻 <i>Gymnodinium aerucinosum</i>   | +   | +   | +   |
| 光薄甲藻 <i>Glenodinium gymnodinium</i>  | +   | +   | +   |
| 多甲藻 <i>Peridinium</i> sp.            | +   | +   |     |
| 角甲藻 <i>Ceratium hirundinella</i>     | +   | +   | +   |
| 圆后沟藻 <i>Massartia campylops</i>      |     |     | +   |
| 金藻门 (Chrysophyta)                    |     |     |     |
| 鱼鳞藻 <i>Mallomonas</i> sp.            | +   | +   | +   |
| 圆筒锥囊藻 <i>Dinobryon cylindricum</i>   | +   | +   |     |
| 分歧锥囊藻 <i>D. divergens</i>            | +   |     |     |
| 黄藻门 (Xanthophyta)                    |     |     |     |
| 头状黄管藻 <i>Ophiocytium capitatum</i>   |     | +   | +   |

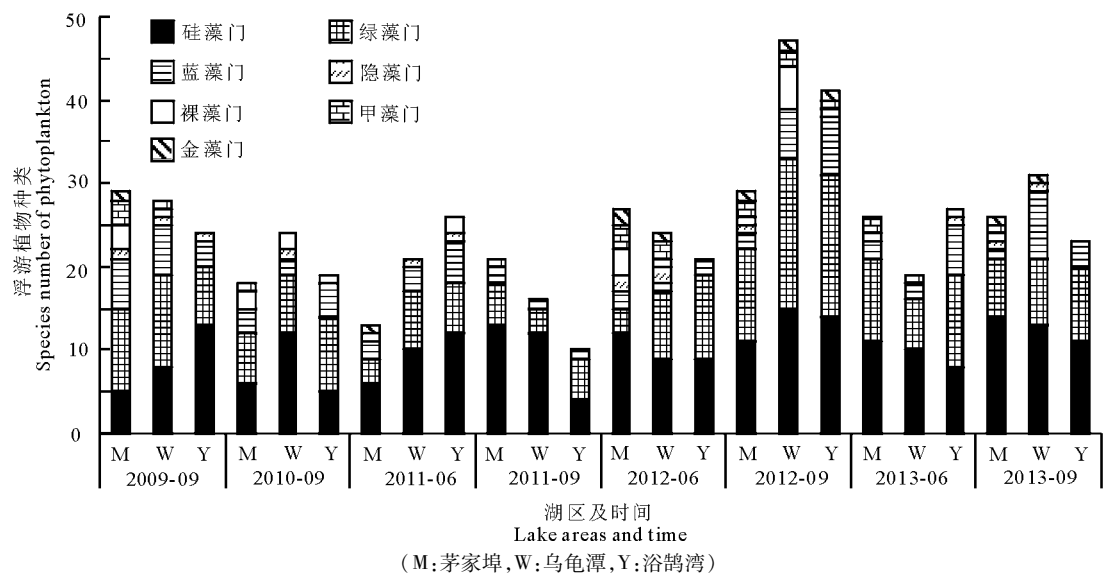


图2 2009 – 2013 年西湖西进水域 3 个调查区域的浮游植物种类组成  
(M: Maojiabu Lake, W: Wuguitan Lake, Y: Yuhuwan Lake)

Fig. 2 Percentage composition of the phytoplankton community in the three experimental sub lakes, 2009 – 2013

2009 年 9 月茅家埠浮游植物以绿藻门为主 (34.48%), 2011 – 2013 年以硅藻门为主 (37.93% ~ 61.90%)。茅家埠浮游植物总种类数 2009 年 9 月至 2011 年 6 月逐渐减少, 之后逐年增加, 至 2012 年 9 月达最高 47 种, 之后又降低。

2009 年 9 月和 2012 年 9 月乌龟潭浮游植物以

绿藻门(分别为 39.29% 和 38.30%)为主,2010 年 9 月至 2012 年 6 月、2013 年 6 月和 9 月以硅藻门为主。乌龟潭浮游植物总种类数 2009 年 9 月(28 种)至 2011 年 9 月(16 种)逐渐减少,之后逐年增加至 2012 年 9 月达最高(47 种),2013 年又降低。

2009 年 9 月和 2011 年 6 月浴鹄湾浮游植物以硅藻门(分别为 54.17% 和 46.16%)为主,其他年际月份均以绿藻门为主。浴鹄湾浮游植物总种类数变化波动不规律,年际间先降低后升高,于 2012 年 9 月达最高(41 种)。

2.1.2 浮游植物细胞密度的变化 通过定量样品分析,茅家埠浮游植物平均细胞密度为  $4.02 \times 10^6$  个/L;其中绿藻门占 60.85%,蓝藻门占 22.66%,隐藻门和硅藻门分别占 5.78% 和 5.72%,其余共占 4.99%。优势种为衣藻(*Chlamydomonas* sp.)、铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)、小环藻(*Cyclotella* sp.)和直链藻(*Melosira* sp.)。

乌龟潭浮游植物平均细胞密度为  $3.56 \times 10^6$  个/L;其中绿藻门占 69.82%,蓝藻门占 20.4%,硅藻门占 5.15%,其余共占 4.63%。优势种为衣藻(*Chlamydomonas* sp.)、蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)、丝藻(*Ulothrix* sp.)、铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)和颗粒直链藻(*Melosira granulata*)。

浴鹄湾浮游植物平均数量为  $4.85 \times 10^6$  个/L;其中绿藻门占 77.47%,蓝藻门占 17.18%,硅藻门占 4.34%,其余共占 1.01%。优势种为衣藻、丝藻和平裂藻(*Merismopedia* sp.)。

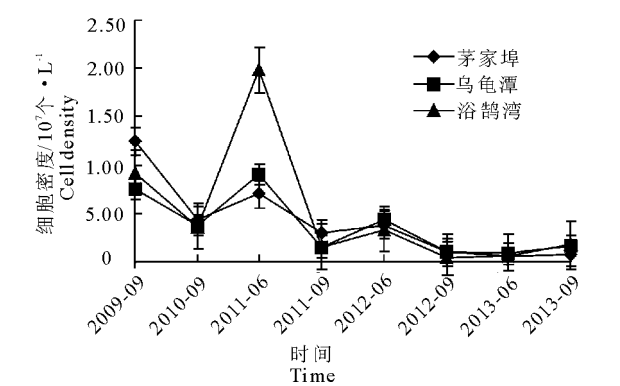


图 3 2009 – 2013 年西湖西进水域 3 个调查区域浮游植物细胞密度时空动态变化

Fig.3 Spatial and temporal changes in phytoplankton cell density in the three experimental sub lakes in the western district of West Lake, 2009 – 2013

由图 3 可知,浮游植物细胞密度在  $1.21 \times 10^5 \sim 1.99 \times 10^7$  个/L,各湖区浮游植物细胞密度值从

2009 年 9 月至 2012 年 9 月呈波动性下降,2012 年 9 月至 2013 年 9 月趋于稳定。与 2009 年 9 月相比,2013 年 9 月的浮游植物细胞密度下降了 2 个数量级。整体而言,每年 6 月浮游植物的细胞密度都大于 9 月的细胞密度。

2.2 浮游植物多样性指数变化

2.2.1 Margalef 多样性指数 2009 – 2013 年,西湖西进水域浮游植物 Margalef 多样性指数为 0.632 ~ 3.396(图 4-a)。最大值发生在 2012 年 9 月的乌龟潭,最小值在 2011 年 9 月的浴鹄湾,一定程度上说明西湖西进水域水质处于中度 – 重度污染程度之间;其中,茅家埠浮游植物 Margalef 多样性指数在 2011 年 6 月达到最低值,乌龟潭和浴鹄湾 Margalef 多样性指数在 2011 年 9 月达到最低值。3 个湖区的 D 值均在 2012 年 9 月达到峰值,随后下降,但终值始终高于初始值。

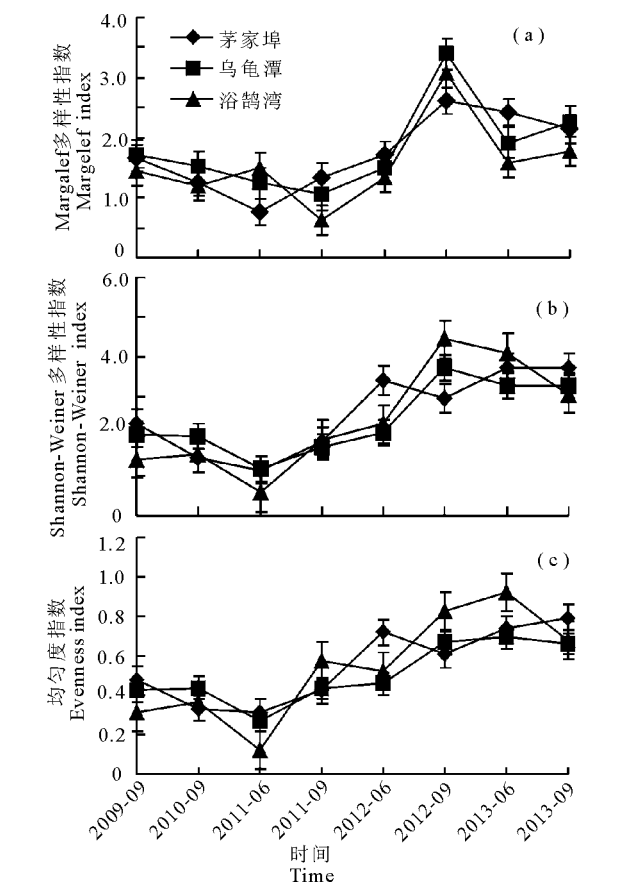
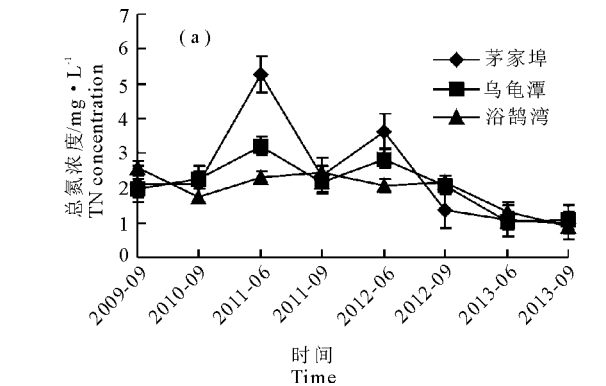


图 4 2009 – 2013 年西湖西进水域 3 个调查区域浮游植物多样性指数变化

Fig.4 Variation of phytoplankton diversity indices in the three experimental sub lakes in the western district of West Lake, 2009 – 2013

2.2.2 Shannon-Weiner 多样性指数 研究期间,浮游植物 Shannon-Weiner 多样性指数在 0.5808 ~

4.4382(图4-b)。表明水质由重度污染程度向中污染程度转变,最终趋向于清洁水体。茅家埠  $H'$  值在 1.4467~3.7263。通过比较不同年度同一月份的多样性指数,发现 3 个湖区 Shannon-Weiner 多样性指数均有上升的趋势,在 2011 年 6 月处于最低值,随后每年 6 月均大于前一年同月值,多样性指数逐年升高。浴鹄湾和乌龟潭  $H'$  值在 2012 年 9 月达到峰值,分别为 4.4382 和 3.7443,随后缓慢降低。自 2011 年 5 月水生植物群落优化示范工程实施后, $H'$  值总体呈上升趋势,最大值和最小值发生在浴鹄湾,且 3 个湖区  $H'$  值均在 2011 年 6 月达到最小值,随时间推进而升高。



2.2.3 均匀度指数 浮游植物均匀度指数在 0.124~0.921(图4-c),其变化趋势与 Shannon-Weiner 多样性指数一致。

2.3 不同区域常规水质参数变化

2009~2013 年,水体 TN 在 0.916~5.260 mg/L,整体呈现下降的趋势(图5-a)。2011 年 6 月茅家埠 TN 呈现最大值,2013 年 9 月浴鹄湾 TN 为最低值,3 个湖区均在 2011 年 6 月和 2012 年 6 月出现峰值,在 2013 年 9 月时达到最低。水体 TP 在 0.005~0.108 mg/L,整体呈缓慢上升的趋势(图5-b);最大值发生在 2012 年 6 月的乌龟潭,最低值发生在 2011 年 9 月的浴鹄湾。

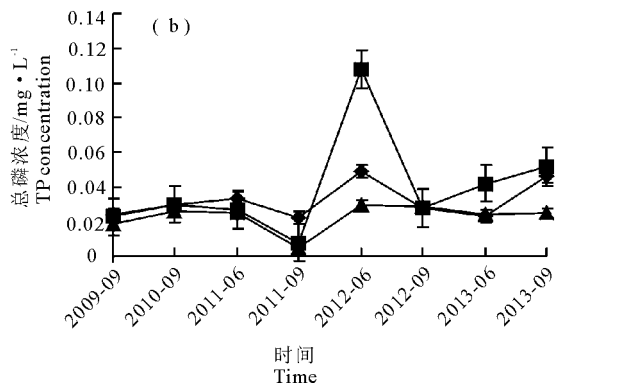


图5 2009-2013年西湖西进水域3个调查区域总氮和总磷浓度变化

Fig.5 Variation of TN and TP in the three experimental sub lakes in the western district of West Lake, 2009-2013

2.4 浮游植物细胞密度与水体理化参数的相关性

通过 SPSS 对各湖区浮游植物细胞密度和水体理化参数总氮(TN)和总磷(TP)进行 Pearson 相关性分析,结果显示:茅家埠和乌龟潭浮游植物细胞密度与水体总氮有显著正相关关系,相关系数分别为 0.929 和 0.800 ( $P<0.05$ );浴鹄湾浮游植物细胞密度与 TN 无相关关系。3 个湖区浮游植物细胞密度与总磷无明显相关关系。

表2 杭州西湖各湖区浮游植物细胞密度与总氮和总磷的相关性分析

| 湖区名 | 总氮(TN)   | 总磷(TP) |
|-----|----------|--------|
| 茅家埠 | 0.929 ** | 0.095  |
| 乌龟潭 | 0.800 *  | 0.092  |
| 浴鹄湾 | 0.367    | 0.116  |

注: \*\* 表示在 0.01 水平上显著相关; \* 表示在 0.05 水平上显著相关。  
Note: \*\* highly significant correlation ( $P<0.01$ , double tail); \* significant correlation ( $P<0.05$ , double tail).

3 讨论

3.1 浮游植物群落结构对沉水植被恢复的响应

利用水体生物指标(如浮游植物)反映水质变化,在国内外很多湖泊中均有广泛应用,通过监测浮游植物的变化,判断该水环境的富营养化程度(李宝林等,1993;李晓波,2009;郑辉和徐文超,2011;李继影等,2011)。2009 年 9 月的浮游植物相关数据表明,茅家埠、乌龟潭和浴鹄湾 3 个湖区的优势藻类为铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)和衣藻(*Chlamydomonas* sp.),浮游植物平均细胞密度达到  $10^7$  个/L,为典型重度富营养化水体的藻类功能群(Reynolds et al,2002;董静等,2014)。

2011 年 5 月,国家“十一五”水专项西湖水生植物群落优化示范工程在茅家埠、乌龟潭和浴鹄湾实施,通过种植适合湖区水质特征的苦草(*V. natans*)、穗花狐尾藻(*M. spicatum*)等沉水植物,形成了比较稳定的沉水植物复合群落。研究表明,2011 年 6 月 3 个湖区的浮游植物细胞密度均达到最大值;随着示范工程的实施,细胞密度逐渐减少,后期趋于稳定。2013 年 9 月最后一次监测显示,3 个湖

区的优势藻类为颤藻、丝藻和直链藻,浮游植物的平均细胞密度为  $10^6$  个/L,在一定程度上说明沉水植物可以控制浮游植物的生长,主要是由于沉水植物和浮游植物之间存在营养和光的竞争,也可能是沉水植物对浮游植物产生了化感抑制作用(邱东茹,等,1998;肖溪等,2009;边归国等,2012)。

### 3.2 优化示范工程实施后的沉水植物群落变化

浮游植物 Shannon-Weiner 多样性指数和均匀度指数显示,在示范工程实施后,水体中浮游植物的物种多样性和均匀度均有显著提升,并在后期达到稳定。3 个湖区浮游植物物种组成数据表明,浴鹄湾的浮游植物群落结构相对简单,其生物多样性较其他 2 个湖区低;同时, Margalef 多样性指数和 Shannon-Weiner 多样性指数也证实了这一结果。示范工程实施后的沉水植物监测数据显示,茅家埠、乌龟潭、浴鹄湾沉水植物面积分别占总面积的 14.3%、16.6% 和 10.2%,3 个湖区均形成了以苦草和穗花狐尾藻为主的沉水植物复合群落;其中,浴鹄湾的沉水植物种植面积最少(未发表数据),在一定程度上表明沉水植物种类和数量达到一定规模后,可以使整个水体达到一个比较稳定的生态环境。

### 3.3 水质营养变化及其与浮游植物群落的相关性

水体理化参数分析同样是反应水质变化、指示水体富营养化状态的直接方法(许正隆,1999;郭怀成和孙延枫,2002),特别是氮(N)和磷(P)更直观反映水体受污染程度(童昌华,2004)。本次研究表明,3 个湖区 TN 在  $0.916 \sim 5.260$  mg/L,但整体呈下降趋势。2013 年 9 月的最后一次监测表明,3 个湖区总氮值均在 1 mg/L 左右,达到了 IV 类水质标准。在 2011 年 6 月和 2012 年 6 月均出现了较大的波动,达到峰值,这可能主要是由于 6 月梅汛时期大量雨水入湖带进的外源氮污染(张春艳等,2012),导致了水体总氮的升高。随着时间的推移,沉水植物生长稳定后,水体总氮开始下降并趋于稳定;而 2013 年 9 月茅家埠、乌龟潭和浴鹄湾的水体 TP 浓度较 2009 年 9 月分别略高 0.022、0.029 和 0.006 mg/L,其原因主要是由于 2013 年自 6 月底开始,杭州出现了历史罕见的连续高温天气。相关研究表明(吴根福等,1998;姜敬龙和吴云海,2008),一定条件下温度的升高可导致底泥中磷的释放,所以 2013 年 9 月 TP 的数据高于同年 6 月,而 2011 年和 2012 年 9 月 TP 的数据均低于同年 6 月。

研究表明,茅家埠和乌龟潭浮游植物细胞密度与水体总氮有显著正相关关系,相关系数  $r$  分别为

0.929 和 0.800 ( $P < 0.05$ )。工程实施后,茅家埠和乌龟潭总氮整体下降,其湖区中浮游植物的生物量也随之降低,这与 Qiu 等(2012)研究结果一致,说明水体氮的含量对水体浮游植物生物量的增减有显著影响(宋玉芝等,2007);浮游植物细胞密度的监测结果表明,每年 6 月浮游植物的细胞密度都高于同年 9 月,这与各湖区总氮的变化规律一致。可能是由于温度升高,同时水体 TN 升高,有利于浮游植物生长繁殖,但在 2011 年 6 月示范工程实施后,浮游植物生物量明显降低,主要原因可能是由于沉水植物的快速生长扩繁,生物面积和覆盖度显著增加。一方面是由于沉水植物与浮游植物在营养盐、光照、空间生态位等方面产生竞争;另一方面,沉水植物在生长过程中分泌的部分代谢产物也对浮游植物产生了化感抑制作用(肖溪等,2009;边归国等,2012)。通过沉水植物恢复,不仅对浮游植物产生了竞争和抑制作用,同时对水体氮进行了有效的利用和吸收(吴振斌等,2003;姚瑶等,2011),这也进一步说明沉水植物在水环境恢复和净化中起着重要的作用,是进行水体生态修复的有效措施之一。

### 参考文献

- 边归国,赵卫东,达来,2012. 沉水植物化感作用抑制藻类生长的研究[J]. 北方环境, 24(1):59-64.
- 邓开宇,吴芝瑛,张国亮,等,2009. 从叶绿素 a 的变化浅析西湖综合保护工程效益(1998-2007 年)[J]. 湖泊科学, 21(4):518-522.
- 董静,李根保,宋立荣,2014. 抚仙湖、洱海、滇池浮游藻类功能群 1960s 以来演变特征[J]. 湖泊科学, 26(5):735-742.
- 郭怀成,孙延枫,2002. 滇池水体富营养化特征分析及控制对策探讨[J]. 地理科学进展, 21(5):500-506.
- 姜敬龙,吴云海,2008. 底泥磷释放的影响因素[J]. 环境科学与管理, 33(6):43-46.
- 金相灿,屠清瑛,1990. 湖泊富营养化调查规范(第 2 版)[M]. 北京:中国环境科学出版社.
- 李宝林,王玉亭,张路增,1993. 以浮游植物评价达赉湖水质污染及营养水平[J]. 水生生物学报, 17(1):27-34.
- 李继影,徐恒省,翁建中,等,2011. 阳澄湖浮游植物调查与水质评价[J]. 环境监控与预警, 3(2):30-32.
- 李晓波,2009. 滴水湖浮游植物群落结构变化及其水质评价[D]. 上海:上海师范大学.
- 林丰妹,叶旭红,焦荔,等,2007. 综合保护工程对杭州西湖生态环境的影响[J]. 水资源与水工程学报, 18(6):1-4.

- 刘经雨,毛发新,何绍箕,1981. 杭州西湖水质特征及其综合评价[J]. 杭州大学学报(自然科学版),8(3):309-319.
- 邱东茹,吴振斌,况琪军,等,1998. 不同生活型大型植物对浮游植物群落的影响[J]. 生态学杂志,17(6):22-27.
- 宋玉芝,秦伯强,高光,2007. 氮及氮磷比对附着藻类及浮游藻类的影响[J]. 湖泊科学,19(2):125-130.
- 孙军,刘东艳,2004. 多样性指数在海洋浮游植物研究中的应用[J]. 海洋学报,26(1):62-75.
- 唐雅萍,张哲海,梅卓华,2008. 南京市主要湖泊浮游植物群落结构分析[J]. 环境科技,21(5):14-16.
- 童昌华,2004. 水体富营养化发生原因分析及植物修复机理的研究[D]. 杭州:浙江大学.
- 王丽卿,2008. 淀山湖浮游生物群落结构特征及其与环境因子的相关性[D],上海. 上海海洋大学.
- 吴根福,吴雪昌,金承涛,等,1998. 杭州西湖底泥释磷的初步研究[J]. 中国环境科学,18(2):107-110.
- 吴洁,虞左明,2001. 西湖浮游植物的演替及富营养化治理措施的生态效应[J]. 中国环境科学,21(6):540-544.
- 吴振斌,邱东茹,贺峰,等,2003. 沉水植物重建对富营养水体氮磷营养水平的影响[J]. 应用生态学报,14(8):1351-1353.
- 吴芝瑛,吴洁,虞左明,2005. 杭州西湖水生高等植物的恢复与水生生态修复[J]. 环境污染与防治,27(1):36-40.
- 许正隆主编,1999. 中国环境保护年鉴[M]. 北京:中国环境出版社:188-189.
- 项斯端,吴文卫,黄三红,等,2000. 近2000年来杭州西湖藻类种群的演替与富营养化的发展过程[J]. 湖泊科学,12(3):219-225.
- 肖溪,楼莉萍,李华,等,2009. 沉水植物化感作用控藻能力评述[J]. 应用生态学报,20(3):705-712.
- 杨俊,吴芝瑛,徐骏,等,2014. 西湖不同湖区营养盐特征及富营养化现状研究[J]. 环境科学导刊,33(3):8-12.
- 姚瑶,黄立章,陈少毅,等,2011. 不同沉水植物对水体氮磷的净化效果[J]. 浙江农业科学,(4):789-792.
- 张春艳,王力,孙明明,等,2012. 2011年浙江梅汛期暴雨特征及影响天气系统分析[J]. 暴雨灾害,31(2):132-140.
- 张婷,李林,宋立荣,2009. 熊河水库浮游植物群落结构的周年变化[J]. 生态学报,29(6):2972-2979.
- 张志兵,施心路,刘桂杰,等,2009. 杭州西湖浮游藻类变化规律与水质的关系[J]. 生态学报,29(6):2980-2987.
- 章宗涉,黄祥飞,1991. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京:科学出版社.
- 郑辉,徐文超,2011. 陡河水库浮游植物群落特征及水质评价[J]. 水生态学杂志,32(2):47-51.
- He S J, Liu J Y, Mao F X, 1980. A preliminary investigation of the phytoplankton in the West Lake, Hangzhou[J]. Journal of Hangzhou University, (1):104-116.
- Mohan P, Niraula B E, Casareto S, et al, 2007. Examining the effects of nutrients on the composition and size of phytoplankton using unaltered deep-sea waters[J]. Journal of Experimental Marine Biology Ecology, 348:23-32.
- Qiu X C, Zhao H X, Sun X X, 2012. Studies on relationship of phytoplankton and water environmental factors in Shahu Lake[J]. Environmental Science, 33(7):2265-2271.
- Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, et al, 2002. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton[J]. Journal of Plankton Research, 24:417-428.
- Xu J H, Pan W B, Zhang H Y, 2007. Studying on planktonic algae and characteristics of water quality of some small and adlittoral artificial lake in the city zone[J]. Ecologic Science, 26(1):36-40.
- Zhao M X, Lei L M, Han B P, 2005. Seasonal change in phytoplankton communities in Tangxi Reservoir and the affecting factors[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 13(5):386-392.

(责任编辑 万月华)

Response of Phytoplankton Community to Restoration of Submerged  
Macrophytes in West Lake, Hangzhou

DAI Zhi-gang<sup>1</sup>, LIN Qing-wei<sup>1,2</sup>, YI Ke-lang<sup>1,2</sup>, ZENG Lei<sup>1,2</sup>,  
HU Sheng-hua<sup>1</sup>, LIU Bi-yun<sup>1</sup>, HE Feng<sup>1</sup>, WU Zhen-bin<sup>1</sup>

- (1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology,  
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P. R. China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China)

**Abstract:** Eutrophication of water bodies has been attracting attention globally. Phytoplankton is affected by the degree of eutrophication and phytoplankton community structure is affected by submerged macrophytes. This study evaluated the effect of restoring submerged macrophytes on the phytoplankton community in West Lake, Hangzhou. Variations in phytoplankton community species composition, biomass, biodiversity indices, and changes in the physicochemical parameters of the water body were investigated before and after restoration of submerged macrophytes in the western lake district, including Maojiabu Lake, Wuguitan Lake and Yuhewan Lake, during five-years of monitoring from 2009 to 2013. Samples were collected at three sites located near the centers of the three lakes. The Margalef diversity index and Shannon-Weiner diversity index were used to assess the trophic status, and total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) concentrations were measured to indicate the nutrient level. A total of 156 phytoplankton species, belonging to 8 phyla and 78 genera, were recorded during the study and no significant differences in phytoplankton community structure were observed among the three lake districts ( $P > 0.05$ ). The dominant species of phytoplankton gradually shifted from *Chlamydomonas globosa* and *Chlamydomonas microspheara* (Chlorophyta), and *Microcystis aeruginosa* and *Microcystis incerta* (Cyanophyta) to *Chlorella pyrenoidosa*, *Ulothrix teneriima* and *Ulothrix variabilis* (Chlorophyta) and *Melosira granulata* and *Cyclotella stelliger* (Bacillariophyta). The Margalef and Shannon-Weiner diversity indices fluctuated from 0.632 to 3.396 and from 0.581 to 4.438, respectively, indicating that water quality in the western area of West Lake was moderately eutrophic and that it improved significantly ( $P < 0.05$ ) after the demonstration project. TN and TP concentration ranges were, respectively, 0.92 – 5.26 mg/L and 0.005 – 0.108 mg/L. Analysis of water quality parameters indicates that the annual variation of phytoplankton density in Maojiabu Lake and Wuguitan Lake was positively correlated with TN ( $P < 0.05$ ). Our findings prove that water quality in West Lake improved after submerged vegetation was restored and demonstrate that macrophyte restoration is an effective means of managing eutrophication.

**Key words:** West Lake (Hangzhou); phytoplankton; community succession; biodiversity index