

# 盐龙湖沉水植物群落变化规律及其驱动因子研究

郭超<sup>1,2</sup>, 李为<sup>1</sup>, 李诗琦<sup>1,2</sup>, 买占<sup>1,2</sup>, 张堂林<sup>1</sup>, 李林<sup>1</sup>,  
宋立荣<sup>1</sup>, 杜观超<sup>3</sup>, 丁伟<sup>3</sup>, 高旭<sup>3</sup>, 刘家寿<sup>1</sup>

(1. 中国科学院水生生物研究所, 湖北 武汉 430072;

2. 中国科学院大学, 北京 100039;

3. 盐城市盐龙湖饮用水源管理处, 江苏 盐城 224005)

**摘要:**为探究沉水植物群落现状及其变化规律,2015年10月至2019年10月对江苏省盐龙湖沉水植物进行连续跟踪调查,并分析沉水植物生长和分布的主要驱动因子。结果表明,调查期间共记录沉水植物15种,隶属于1门、6科;其中2015–2019年沉水植物出现种类数分别为13、12、9、11、12种。从优势种变化来看,沉水植物优势种整体经过穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)→金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)→马来眼子菜(*Potamogeton malaianus*)→穗状狐尾藻的变化过程。从覆盖度和生物量变化看,盐龙湖沉水植物的覆盖度和生物量均呈现先下降、后上升的变化趋势,其中2016–2017年沉水植物退化显著,但随着生态修复措施的进行,2018–2019年沉水植物群落逐渐恢复。相关分析表明,沉水植物生物量与透明度显著正相关( $P<0.05$ ),与浊度、草食性鱼类生物量和水深呈显著负相关( $P<0.05$ );限制沉水植物生长的生态因子依次为透明度、浊度、草食性鱼类生物量和水深。水体透明度和浊度的改善、草食性鱼类的控制和水位调节是实现盐龙湖沉水植物恢复的主要方向及对策。

**关键词:**盐龙湖;沉水植物;透明度;草食性鱼类;生态修复

**中图分类号:**Q145 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2021)06-0034-07

随着社会经济的快速发展,工农业废水和生活污水排放量显著增加以及大量营养物质的汇入,使湖泊富营养化状态日趋严重(朱颖等,2018;汤显强,2020;Guo et al,2020)。沉水植物作为水域生态系统中的重要组成部分,不仅能通过光合作用提供生态系统所需的初级生产力,还能显著降低水体及沉积物中的营养物质含量,抑制沉积物的再悬浮和藻类的生长,对生态系统的能量流动和物质循环起到重要调控作用(Scheffer et al,1993;Jones et al,1994);另一方面,富营养化湖泊中浮游植物的大量繁殖对沉水植物生长形成明显的遏制作用,造成沉水植物的大量消亡,使得湖泊从清水态的草型湖泊向浊水态的藻型湖泊转变(Bachmann et al,2000)。沉水植物大面积消亡已成为长江中下游浅水湖泊中普遍存在的生态问题(陶花等,2010;刘红艳等,2017;田翠翠等,2019;李伟,2020)。在浅水湖泊生态修复过程

中,以恢复或重建沉水植物为主的生物调控技术因具备独特的经济效益、良好的净化效果、能耗低和简单易行等特点,日益受到广泛关注(Bal et al,2011;张晓姣等,2018;黎铭轩等,2019)。

限制沉水植物生长及分布的生态因子主要包括光照、温度、营养盐及水生动物牧食等方面(胡莲等,2006;Song et al,2006;金相灿等,2007);其中,光照受水体悬浮物质、浮游植物和有色可溶有机物质的传输影响,成为限制沉水植物光合作用的最主要因素(吴振斌等,2011);温度也是限制沉水植物生长的主要因素,高于或者低于其适宜温度,沉水植物都会生长不良或死亡(陈书琴等,2008);营养盐浓度对沉水植物叶片的光合作用、呼吸作用及光呼吸速率也能造成一定影响,一般情况下,净光合速率和呼吸速率随磷浓度的变化呈现先升高、后降低的趋势(吴振斌等,2011)。水生动物牧食主要包括鱼类牧食和螺类牧食,其中以草食性鱼类为主的牧食是长江中下游众多浅水湖泊沉水植物大面积衰亡的直接原因(陈洪达,1989;马凯等,2003;陶花等,2010;刘红艳等,2017)。

盐龙湖是国内首个平原开挖的水源地湖泊,于2012年6月建成启用,担任着保证江苏省盐城市饮用水安全的重要责任(左倬等,2013)。沉水植物区是盐龙湖生态净化工程核心单元,水面面积40 hm<sup>2</sup>,其目标是建立以沉水植物为主的生态屏障,为改善

收稿日期:2020-01-11 修回日期:2021-05-21

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2019YFD0900601);国家大宗淡水鱼产业技术体系项目(CARS-45);中国科学院青年创新促进会人才项目(2019331);盐城市项目(YCCG1610-121)。

**作者简介:**郭超,1993年生,男,博士研究生,研究方向为鱼类群落多样性和湖泊生态修复。E-mail: guochao@ihb.ac.cn

**通信作者:**刘家寿,1963年生,男,研究员,主要从事渔业生态与水产养殖研究。E-mail: jslu@ihb.ac.cn

盐龙湖水质起到积极作用。自2012年建湖开始, 沉水植物一直维持着较高的生物量, 但2016年却出现较为明显的退化迹象。为保障盐龙湖沉水植物区生态净化功能, 探明影响沉水植物的关键驱动因子, 本研究于2015–2019年连续定期调查了沉水植物群落以及水环境因子, 并通过搭建围栏降低目标鱼类等技术措施, 减少鱼类对沉水植物的影响, 分析沉水植物与主要生态因子之间的关系, 以期为水源地湖泊沉水植物恢复与重建及水质改善技术提供有效对策。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

盐龙湖位于江苏省盐城市盐都区境内, 水面面积 202.7 hm<sup>2</sup>, 由预处理区(I)、挺水植物区(II)、沉水植物区(III)和深度净化区(IV)共4个净化单元组成(图1)。为降低鱼类对沉水植物恢复的影响, 自2018年3月起, 盐龙湖管理处对沉水植物修复方案进行了调整, 包括在沉水植物补种的基础上搭建总面积约5 hm<sup>2</sup>的透水围栏(网目20 mm)进行保护, 同时在全湖区进行草食性鱼类和底层扰动性鱼类的定向捕捞。截至2019年底, 共计捕捞草食性鱼类草鱼和团头鲂等1.8 t, 捕捞底层杂食性鱼类鲤和鲫等3.5 t。

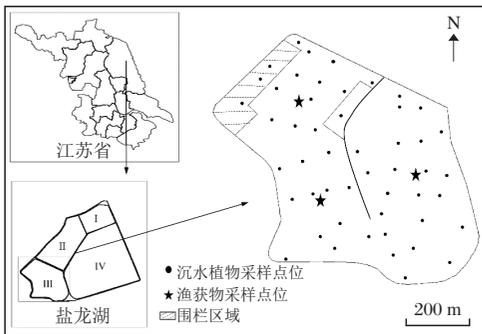


图1 盐龙湖沉水植物分区及渔获物采样点

Fig.1 Location of the sampling sites for submerged macrophyte and fish surveys in the submerged macrophyte area of Yanlong Lake

### 1.2 采样方法

2015年10月至2019年10月, 对盐龙湖沉水植物进行季度调查(1、4、7、10月)。以沉水植物区中间的土埂为界限, 遵循随机和均匀布点的原则, 在整个沉水植物区共设置50个采样点(图1)。每个样点均用GPS定位并记录经纬度, 同时以萨氏盘测量样点的透明度(SD)和水深(D), 用浊度仪(HACH 2100Q)检测水体浊度(Tur), 用多参数水质检测仪 YSI 6600 测

量采样点的水温(WT)、溶氧(DO)、pH、电导率(Cond)。沉水植物用1/6 m<sup>2</sup>的带网采草器采样, 每个点采集2~3次, 除去枯死枝叶和附着生物, 按种分类并称取湿重, 精确至1 g。采用目测法估算各点位沉水植物覆盖度(任艳芹等, 2011); 沉水植物种类的定义以Cook(1996)的概念为准, 依据优势度大小确定优势种(陈洪达, 1980), 优势度计算公式: 优势度=(相对频度+相对生物量)/2×100%。

在季度调查沉水植物的同时, 选取3个点位进行多网目复合刺网渔获物调查, 采样点如图1所示。多网目复合刺网设计主要参考Appelberg(2000)的标准改进而来, 每条网的总长度为30 m, 共12种网目(规格依次为8.5、4.0、12.5、2.0、11.0、1.6、2.5、4.8、3.1、1.0、7.5、6.0 cm), 每种网目的长度为2.5 m, 网高1.5 m。季度采样时, 每个采样点均串联放置2条沉性和1条浮性多网目复合刺网。刺网布置于水中12 h, 即18:00至次日6:00, 重复3 d。采集的所有鱼类标本参考文献进行种类鉴定和生态类型划分(陈宜瑜, 1998; 倪勇和伍汉霖, 2006), 并测量其全长(精确至1 mm)和体重(精确至0.01 g)等生物学指标。

### 1.3 数据分析

用软件R 3.2.4(R Core Development Team, 2016)对沉水植物区水体环境、各食性鱼类生物量及沉水植物生物量数据进行相关性分析。所有数据处理和绘图均在Excel 2016和R 3.2.4软件中完成。平均数均采用(均值±标准误)表示。显著性标准为 $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 种类组成变化

调查期间共记录盐龙湖沉水植物6科、15种, 均隶属于被子植物门Angiospermae(表1)。其中, 2015–2019年沉水植物分别为13、12、9、11、12种, 2015年沉水植物种类最多, 2017年最少。金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)、菹草(*Potamogeton crispus*)、伊乐藻(*Elodea canadensis*)、苦草(*Vallisneria spiralis*)、大茨藻(*Najas marina*)和穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)出现频率最高, 在近5年均出现; 马来眼子菜(*Potamogeton malaianus*)、眼子菜(*P. distinctus*)和狐尾藻(*M. verticillatum*)出现频率次之; 水盾草(*Cabomba caroliniana*)仅在2017年进行沉水植物恢复实验时引进过, 其他年份均未出现; 篦齿眼子菜(*P. pectinatus*)和小茨藻(*N. minor*)在2015年和2016年生长良好, 2017年后消失; 刺苦草(*V. spinulosa*)仅在2018年和2019年出现。

表 1 盐龙湖沉水植物区沉水植物名录

Tab.1 Species list of submerged macrophytes in Yanlong Lake

沉水植物	年份				
	2015	2016	2017	2018	2019
<b>金鱼藻科 Ceratophyllaceae</b>					
金鱼藻 <i>Ceratophyllum demersum</i>	+	+	+	+	+
<b>水鳖科 Hydrocharitaceae</b>					
轮叶黑藻 <i>Hydrilla verticillata</i>	+	+	+	+	+
伊乐藻 <i>Elodea canadensis</i>	+	+	+	+	+
苦草 <i>Vallisneria natans</i>	+	+	+	+	+
刺苦草 <i>Vallisneria spinulosa</i>				+	+
<b>眼子菜科 Potamogetonaceae</b>					
马来眼子菜 <i>Potamogeton malaianus</i>	+	+		+	+
篦齿眼子菜 <i>Potamogeton pectinatus</i>	+	+			
眼子菜 <i>Potamogeton distinctus</i>	+		+	+	+
菹草 <i>Potamogeton crispus</i>	+	+	+	+	+
微齿眼子菜 <i>Potamogeton maackianus</i>	+	+			+
<b>茨藻科 Najadaceae</b>					
大茨藻 <i>Najas marina</i>	+	+	+	+	+
小茨藻 <i>Najas minor</i>	+	+			
<b>小二仙草科 Haloragidaceae</b>					
穗状狐尾藻 <i>Myriophyllum spicatum</i>	+	+	+	+	+
狐尾藻 <i>Myriophyllum verticillatum</i>	+	+		+	+
<b>睡莲科 Nymphaeaceae</b>					
水盾草 <i>Cabomba caroliniana</i>			+		

注: + 表示该物种出现。

Note: + means the species is present.

## 2.2 种类数与覆盖度变化

对比 2015–2019 年盐龙湖沉水植物的年际变化特征,因 2015 年仅在 10 月进行调查,为保证年际间比较的时间一致性,仅对每年 10 月的沉水植物生长状况进行对比分析。从种类数及覆盖度变化来看,近 5 年盐龙湖沉水植物区沉水植物的种类和覆盖度均呈现先下降、后上升的趋势;其中,2015 年 10 月至 2017 年 10 月,沉水植物种类数由 13 种下降为 3 种,之后逐步上升到 2019 年 10 月的 7 种;2015 年 10 月至 2017 年 10 月,沉水植物覆盖度由 18.1% 下降至 1.7%,之后逐步上升至 2019 年 10 月的 8.3% (图 2)。

## 2.3 生物量与优势种变化

盐龙湖沉水植物平均生物量变化呈先下降、后上升的趋势。其中,2015 年 10 月的沉水植物平均生物量最高,为  $(335.6 \pm 73.5) \text{g/m}^2$ ,2016 年 10 月平均生物量急剧下降,于 2017 年 10 月降到最低,为  $(65.6 \pm 40.5) \text{g/m}^2$ ,之后在 2018 年和 2019 年逐渐上升 (图 3)。从沉水植物优势种变化来看,整体经过穗状狐尾藻→金鱼藻→马来眼子菜→穗状狐尾藻的变化过程。在沉水植物生长最好的年份 (2015 年和 2019 年),穗状狐尾藻均为绝

对优势种,其生物量占比分别达到 69.4% 和 54.2%。在沉水植物退化最为显著的 2017 年,优势种为金鱼藻 (60.4%),轮叶黑藻和伊乐藻也占据一定比例 (27.3% 和 12.3%),穗状狐尾藻未出现。

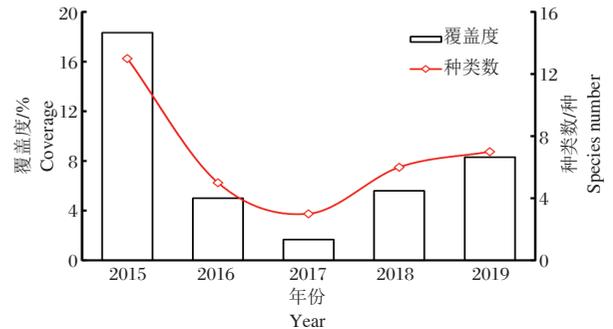


图 2 盐龙湖沉水植物年际覆盖度及种类数变化

Fig.2 Annual variation in coverage area and species number of submerged macrophytes in Yanlong Lake

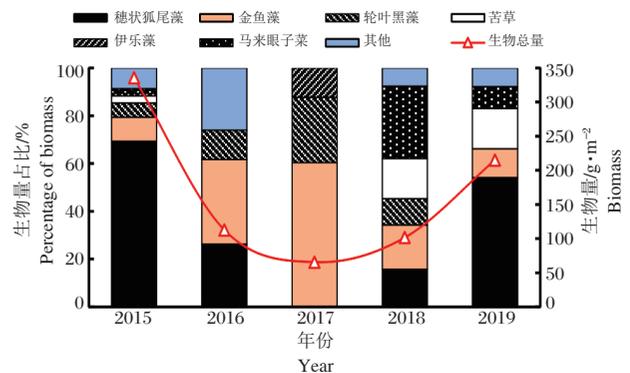


图 3 盐龙湖沉水植物生物量及生物量占比

Fig.3 Annual variation in biomass and biomass percentages of submerged macrophytes in Yanlong Lake

## 2.4 沉水植物与主要生态因子的关系

多网目复合刺网渔获物调查结果显示,沉水植物区草食性鱼类以似鳊 (*Pseudobrama simony*)、团头鲂 (*Megalobrama amblycephala*) 和草鱼 (*Ctenopharyngodon idellus*) 为主,杂食性鱼类以鲫 (*Carassius auratus*)、鲮 (*Hemiculter leucisculus*) 和似鲮 (*Toxabramis swinhonis*) 为主,食鱼性鱼类主要以翘嘴鲌 (*Culter alburnus*)、鳊 (*Siniperca chuatsi*) 和乌鳢 (*Channa argus*) 为主。将每个季节沉水植物区多网目复合刺网调查中的草食性鱼类生物量 (Herbivorous fish)、杂食性鱼类生物量 (Omnivorous fish)、食鱼性鱼类生物量 (Piscivorous fish) 和沉水植物生物量 (Macrophyte) 作为生物因子,与其他 5 个环境因子水深 (Depth)、溶氧 (DO)、透明度 (SD) 和浊度 (Tur) 进行相关性分析。结果表明,沉水植物生物量与透明度显著正相关 ( $P < 0.05$ ),与浊度、草食性鱼类生物量和水深显著负相关

( $P < 0.05$ ), 与食鱼性鱼类生物量和溶氧呈正相关, 但并未达到显著性水平( $P > 0.05$ ), 与杂食性鱼类生物量无明显相关性(图 4)。根据皮尔森相关系数值大小可以看

出, 限制盐龙湖沉水植物生长的生态因子依次为透明度(0.57)、浊度(-0.49)、草食性鱼类生物量(-0.43)和水深(-0.40)。

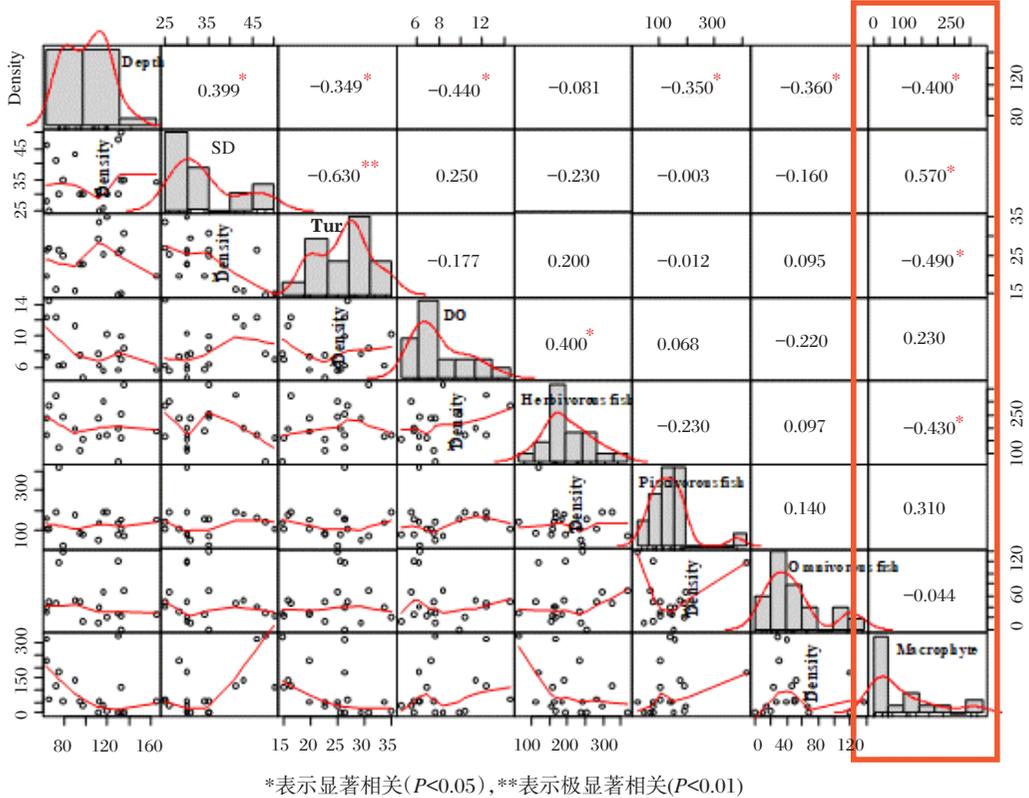


图 4 盐龙湖沉水植物生物量与环境因子相关性分析

\*means significant difference ( $P < 0.05$ ), and \*\* means extremely significant difference ( $P < 0.05$ )

Fig.4 Correlation of submerged macrophyte biomass with environmental factors in Yanlong Lake

### 3 讨论

#### 3.1 盐龙湖沉水植物现状及变化规律

盐龙湖属新建水源地湖泊, 这类湖泊往往会由于形成时间较短、生态系统结构不够成熟而受外界环境影响较大(成必新等, 2013; 蔡杏伟等, 2019)。从本研究结果来看, 近 5 年盐龙湖沉水植物的波动较大, 其变化过程大致可分为退化阶段(2015–2017 年)和恢复阶段(2018–2019 年)。2015–2017 年沉水植物退化严重, 其主要表现在以下方面:

(1) 沉水植物种类由 2015 年的 13 种降为 2017 年的 9 种, 其中小茨藻、微齿眼子菜和篦齿眼子菜等土著种消失, 水盾草等外来种人工引入;

(2) 沉水植物覆盖度和生物量下降明显, 沉水植物在 2017 年年底基本消失;

(3) 沉水植物优势种从较高株的穗状狐尾藻变为较矮小且易折断死亡的金鱼藻和轮叶黑藻。

2018–2019 年沉水植物进入恢复阶段, 沉水植物

种类丰度不断上升, 达到 12 种, 覆盖度和生物量也逐步回升, 优势种历经金鱼藻和马来眼子菜, 最终演变回穗状狐尾藻。盐龙湖沉水植物的逐步恢复主要与相关措施调整有关。自搭建透水围栏与定向捕捞鱼类以来, 沉水植物区鱼类群落平均生物量下降明显, 其中 12 h 的草食性鱼类生物量由 6.1 g/m<sup>2</sup> 降低为 4.2 g/m<sup>2</sup>, 杂食性鱼类由 10.3 g/m<sup>2</sup> 降低为 5.5 g/m<sup>2</sup>(数据未发表)。由此可见, 围栏的阻隔和鱼类的定向捕捞能有效控制沉水植物区的鱼类生物量, 通过减少草食性鱼类对沉水植物的摄食及底层杂食性鱼类对底泥的扰动, 促进了沉水植物的逐步恢复。

国内利用围栏或围隔等工程措施修复水生植被, 改善湖泊水体环境, 已有一些成功案例, 如太湖(Gao et al, 2017)、东湖(马剑敏等, 1996)、漏湖(吴晓东等, 2013)和南湖(陈宗永等, 2019)等。因此, 在一些水草资源匮乏且受鱼类影响较大的浅水湖泊, 可选择水位较浅的局部区域进行围栏搭建来恢复沉水植物。

### 3.2 盐龙湖沉水植物变化的驱动因子

皮尔森相关系数值排序限制因子的方法在水体透明度的研究中得到应用(潘继征等,2008;张晓晶等,2009)。本研究发现,限制盐龙湖沉水植物生长的生态因子依次为透明度、浊度、草食性鱼类生物量和水深,说明此 4 项是盐龙湖沉水植物生长与分布的驱动因子。透明度和浊度能直接反应水下光照环境的好坏,是决定沉水植物生长与分布的两个关键因子(徐瑶等,2007;张晓晶等,2009)。一般情况下,水体透明度与浊度呈明显的反比关系,其大小通常与水体理化性质、悬浮物质组成和浮游生物密度等条件密切相关(张晓晶等,2009;秦伯强等,2014)。本次研究期间,沉水植物区水下光照环境整体处于较差状况(透明度均值 30.0 cm,浊度均值 27.5 NTU),这主要与盐龙湖长期施工有关。据盐龙湖管理处提供的数据,湖区各净化单元平均每年进行生态施工的时间长达 120 d,主要包括水生植物收割、清淤、鱼类捕捞及其他生态工程改造等。长期施工会加剧底泥的扰动,造成水体悬浮物质增加,进而降低沉水植物的光合作用能力。因此,降低施工强度并改善水下光照环境是盐龙湖沉水植物恢复的先决条件。

受传统渔业模式的影响,20 世纪 60—80 年代,诸多浅水湖泊通过放养草食性鱼类以利用水生植物来增加渔业产量和产值,长期不合理的放养对水生植物群落造成严重威胁,导致很多湖泊从草型湖泊向藻型湖泊转化,如武汉东湖(陈洪达,1989)、保安湖(马凯等,2003)和漏湖(陶花等,2010)等。蟒蛇河是盐龙湖最主要的补充水源,也是其鱼类资源的主要来源(蔡杏伟等,2019);而蟒蛇河周围水产养殖强度大,人工养殖的草食性鱼类(草鱼和团头鲂等)因人为或自然因素逃逸至蟒蛇河,这可能是盐龙湖草食性鱼类的主要来源。虽然盐龙湖进水泵站设置了约 5 cm 孔径的网片来拦截大型外来生物,但无法阻隔较小规格的草食性鱼类进入。因此,控制盐龙湖全湖区草食性鱼类的密度与生物量,对于沉水植物的生长与定植非常重要。水深是决定沉水植物空间分布及物种结构的主导因素(Wilcox et al,2002)。有研究表明,当水深和透明度比值超过 5.59 时,沉水植物的生长受限严重(梁彦龄和刘伙泉,1995)。盐龙湖沉水植物区田埂东侧的深水区域水深和透明度比值可达 10,极不利于沉水植物生长;而浅水区域水深和透明度比值在 3.0~6.5,适宜沉水植物生长。因此,沉水植物会向着浅水区域逐步迁移。

### 3.3 沉水植物恢复措施与管理建议

沉水植物是水域生态系统的重要组成部分,对维护整个湖泊生态系统的结构、功能及稳定性有决定性的影响(Phillips et al,1978;Jones et al,1994)。结合本文的研究,认为水体环境的改善和鱼类群落的调整是当前盐龙湖沉水植物恢复的主要方向与对策。据此提出以下建议:

(1)降低施工强度,改善水下光照环境;

(2)针对性捕捞草食性鱼类,减少其摄食对沉水植物的直接胁迫;

(3)保持适当水位,保证合适的水深透明度比,为沉水植物萌发与生长提供良好环境。

#### 参考文献

- 蔡杏伟,熊鹰,郭超,等,2019. 饮用水水源地盐龙湖鱼类群落结构特征及调控策略研究[J]. 淡水渔业,49(2):44-50.
- 陈洪达,1980. 武汉东湖水生维管束植物群落的结构和动态[J]. 海洋与湖沼,(3):275-284.
- 陈洪达,1989. 放养草鱼对东湖生态系统的影响[J]. 水生生物学报,13(4):359-368.
- 陈书琴,许秋瑾,李法松,等,2008. 环境因素对湖泊高等水生植物生长及分布的影响[J]. 生物学杂志,25(2):11-15.
- 陈宜瑜,1998. 中国动物志[M]. 北京:科学出版社.
- 陈宗永,马海霞,韦兰英,等,2019. 草型生态系统构建技术在南湖富营养化防治中的应用[J]. 水生态学杂志,40(2):35-40.
- 成必新,郭萧,朱雪诞,等,2013. 盐龙湖富营养化防治关键技术探讨[J]. 中国水利,(14):20-22.
- 胡莲,万成炎,沈建忠,等,2006. 沉水植物在富营养化水体生态恢复中的作用及前景[J]. 水利渔业,26(5):69-71.
- 金相灿,楚建周,王圣瑞,2007. 水体氮浓度、形态对黑藻和狐尾藻光合特征的影响[J]. 应用与环境生物学报,13(2):200-204.
- 黎铭轩,张妍,江学顶,等,2019. 水体富营养化的生物修复研究进展[J]. 科技创新导报,16(36):105-107.
- 李伟,2020. 我国水生植物多样性保护的研究与实践[J]. 人民长江,51(1):104-112.
- 梁彦龄,刘伙泉,1995. 草型湖泊资源、环境与渔业生态学管理[M]. 北京:科学出版社.
- 刘红艳,熊飞,宋丽香,等,2017. 汉阳地区五个湖泊沉水植物分布及富营养化现状[J]. 淡水渔业,47(1):107-112.
- 马剑敏,严国安,任南,等,1996. 东湖大型围隔及围栏内植物群落和水质的变化[J]. 植物资源与环境学报,5(3):35-40.
- 马凯,蔡庆华,谢志才,等,2003. 保安湖沉水植物分布的 GIS 模拟[J]. 生态学报,23(11):2271-2277.
- 倪勇,伍汉霖,2006. 江苏鱼类志[M]. 北京:中国农业出版社.
- 潘继征,熊飞,李文朝,等,2008. 云南抚仙湖透明度的时空变

- 化及影响因子分析[J]. 湖泊科学, 20(5):681-686.
- 秦伯强, 张运林, 高光, 等, 2014. 湖泊生态恢复的关键因子分析[J]. 地理科学进展, 33(7):918-924.
- 汤显强, 2020. 长江流域水体富营养化演化驱动机制及防控对策[J]. 人民长江, 51(1):80-87.
- 陶花, 潘继征, 沈耀良, 等, 2010. 溇湖沉水植物概况及退化原因分析[J]. 环境科技, 23(5):64-68.
- 田翠翠, 郭传波, 吴幸强, 2019. 高邮湖沉水植物分布格局及其与水环境因子的关系[J]. 水生生物学报, 43(2):423-430.
- 吴晓东, 潘继征, 李文朝, 等, 2013. 溇湖东岸生态修复试验区的水质净化效果[J]. 生态与农村环境学报, 29(3):284-289.
- 吴振斌, 马剑敏, 贺峰, 等, 2011. 水生植物和水体生态修复[M]. 北京: 科学出版社.
- 徐瑶, 王国祥, 李强, 2007. 水体浊度对苦草光合荧光特性的影响[J]. 武汉植物学研究, 25(1):70-74.
- 张晓姣, 朱金格, 刘鑫, 2018. 浅水湖泊沉水植物调控技术研究进展[J]. 净水技术, 37(12):46-51.
- 张晓晶, 李畅游, 贾克力, 等, 2009. 乌梁素海水体透明度分布及影响因子相关分析[J]. 湖泊科学, 21(6):879-884.
- 朱颖, 马骏, 陈睿哲, 2018. 富营养化的湖泊[J]. 生态经济, 34(12):8-11.
- 左倬, 胡伟, 朱雪诞, 等, 2013. 不同季节表流湿地对微污染原水的净化效果分析[J]. 人民长江, 44(19):91-95.
- Appelberg M, 2000. Swedish standard methods for sampling freshwater fish with multi-mesh gillnets[J]. International Journal of Oncology, 26(2):441-448.
- Bachmann R W, Hoyer M V, Canfield D E, 2000. Internal heterotrophy following the switch from macrophytes to algae in Lake Apoka, Florida[J]. Hydrobiologia, 418:217-227.
- Bal K, Struyf E, Vereecken H, et al, 2011. How do macrophyte distribution patterns affect hydraulic resistances?[J]. Ecological Engineering, 37(3):529-533.
- Cook C D K, 1996. Aquatic Plant Book[M]. Hague: Quarterly Review of Biology.
- Gao H, Xin Q, Wu H, et al, 2017. Combined effects of submerged macrophytes and aquatic animals on the restoration of a eutrophic water body—a case study of Gonghu Bay, Lake Taihu[J]. Ecological Engineering, 102:15-23.
- Guo C B, Chen Y S, Xia W T, et al, 2020. Eutrophication and heavy metal pollution patterns in the water supplying lakes of China's south-to-north water diversion project[J]. Science of the Total Environment, 711:134543.
- Jones C G, Lalvton J H, Shachak M, 1994. Organisms as ecosystem engineers[J]. Oikos, 69:373-386.
- Phillips G L, Eminson D, Moss B, 1978. A mechanism to account for macrophyte decline in progressively eutrophicated freshwaters[J]. Aquatic Botany, 4(2):103-126.
- Scheffer M, Hosper S H, Meijer M L, et al, 1993. Alternative equilibria in shallow lakes[J]. Trends in Ecology & Evolution, 8(8):275-279.
- Song G, Hou W, Wang Q, et al, 2006. Effect of low temperature on eutrophicated waterbody restoration by *Spirodela polyrhiza*[J]. Bioresource Technology, 97(15):1865-1869.
- Wilcox D A, Meeker J E, Hudson P L, et al, 2002. Hydrologic variability and the application of Index of Biotic Integrity metrics to wetlands: a great lakes evaluation[J]. Wetlands, 22(3):588-615.

(责任编辑 万月华)

## Succession and Driving Factors of Submerged Macrophytes in Yanlong Lake

GUO Chao<sup>1,2</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, LI Shi-qi<sup>1,2</sup>, MAI Zhan<sup>1,2</sup>, ZHANG Tang-lin<sup>1</sup>, LI Lin<sup>1</sup>,  
SONG Li-rong<sup>1</sup>, DU Guan-chao<sup>3</sup>, DING Wei<sup>3</sup>, GAO Xu<sup>3</sup>, LIU Jia-shou<sup>1</sup>

(1. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Science, Wuhan 430072, P.R.China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, P.R.China;

3. Management Office of Yanlong Lake, Yancheng 224005, P.R.China)

**Abstract:** Yanlong Lake is the drinking water source for Yancheng City, Jiangsu Province and plays an important role in ensuring urban drinking water safety. The area of submerged macrophyte (40 hm<sup>2</sup>) is the key component of the ecological purification project in Yanlong Lake, acting as an ecological barrier and improving water quality. In this study, a seasonal survey of submerged macrophyte succession in Yanlong Lake was conducted at 50 sampling sites from October 2015 to October 2019. During the same period, we completed fish surveys at three sites using gill nets of different mesh size. Based on the survey, we analyzed the status and succession rules of the submerged macrophyte community in Yanlong Lake and explored the primary driving factors for the growth and distribution of submerged macrophytes. We aimed to provide a reference for restoring submerged macrophytes and improving water quality in source water lakes. A total of 15 submerged macrophyte species were recorded in Yanlong Lake, belonging to 6 families within a single phylum. The number of submerged macrophyte species by year from 2015 to 2019 was 13, 12, 9, 11 and 12. The succession of dominant submerged macrophyte species followed the order *Myriophyllum spicatum*, *Ceratophyllum demersum*, *Potamogeton malaianus*, *M. spicatum*. Both the coverage and biomass of submerged macrophytes initially decreased and then increased, clearly degrading in 2016 and 2017 but recovering in 2018 and 2019 after ecological restoration. There was a significant positive correlation between submerged macrophyte biomass and transparency and significant negative correlations with turbidity, herbivorous fish biomass and water depth. Therefore, increasing transparency, decreasing turbidity, controlling herbivorous fish and regulating water level are the primary objectives for restoring submerged macrophytes in Yanlong Lake.

**Key words:** Yanlong Lake; submerged macrophyte; transparency; herbivorous fish; ecological restoration