

## 西洞庭湖沉水植物分布格局对环境因子及水文情势差异的响应\*

郭凯迪<sup>1,2</sup>, 张晓波<sup>1,2</sup>, 刘培中<sup>1,2</sup>, 雷光春<sup>1,2\*\*</sup>, 吕 颀<sup>1,2\*\*</sup>, 曾喜凡<sup>3</sup>, 曾伟坤<sup>3</sup>

(1: 北京林业大学东亚-澳大利西亚候鸟迁徙研究中心, 北京 100083)

(2: 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083)

(3: 西洞庭湖国家级自然保护区管理局, 汉寿 415900)

**摘 要:** 沉水植物是湖泊生态系统的重要组成部分, 其生产力和分布格局受环境因子特别是水文情势决定。洞庭湖是长江流域重要的大型通江湖泊, 近年来受人为干扰和气候变化影响, 水文节律与水质等环境因子发生改变, 导致沉水植物出现衰退现象, 急需开展科学恢复, 因此有必要对洞庭湖沉水植物深入研究。本研究选取西洞庭湖为研究区域, 于2018年和2019年夏季调查了12处典型生境, 98个样点的沉水植物与水深、透明度等11个环境因子, 采用独立样本 $T$ 检验和冗余分析方法对沉水植物与环境因子的关系进行分析, 对比年际水文情势变化的影响。结果表明: 1) 西洞庭湖沉水植物主要在水深较浅、水质更优、水体更为稳定的半阻隔子湖和自由连通的湖湾区分布, 在河道及水位波动较大的区域分布较少; 有、无沉水植物分布样点间存在显著差异的环境因子为水深、透明度、底泥总磷和pH; 2) 在有沉水植物分布的样点, 沉水植物生物量与pH、水深和水体总磷呈显著相关关系; 3) 自然连通的季节性淹没湖泊沉水植物生物量在2018年高于2019年, 可能与2019年5—8月沉水植物关键生长期出现的涨水过程有关, 持续的高水位对沉水植物的生长产生了不利影响。维持自然水文节律、湖泊生境异质性与自由连通性、健康的水质等是恢复西洞庭湖沉水植物的关键, 建议在水深低于3 m、营养盐浓度适中、流速及风浪较小的湖湾区或半阻隔湖泊开展沉水植物恢复。

**关键词:** 西洞庭湖; 沉水植物; 分布格局; 环境因子; 水文情势

## The response of submerged plants to different environmental factors and hydrologic regime in West Lake Dongting\*

GUO Kaidi<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaobo<sup>1,2</sup>, LIU Peizhong<sup>1,2</sup>, LEI Guangchun<sup>1,2\*\*</sup>, LV Cai<sup>1,2\*\*</sup>, ZENG Xifan<sup>3</sup> & ZENG Weikun<sup>3</sup>

(1: Center for East Asia-Australasian Flyway Studies, Beijing Forestry University, Beijing 100083, P.R.China)

(2: School of Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, P.R.China)

(3: National Nature Reserve of West Dongting Lake, Hanshou 415900, P.R.China)

**Abstract:** Submerged plants are important components in lake ecosystems, their production and distribution pattern are affected by environmental factors, especially the hydrologic regime. Lake Dongting is an important large lake in the Yangtze River Basin with free hydrologic connection to the main stream. In recent years, due to influences of human disturbances and climate change, environmental factors such as hydrologic regime and water quality of Lake Dongting have been changed dramatically, resulting in the decline of submerged plants, which calls urgent science-based rehabilitation. Thus, there is a need to have further study on submerged plants at Lake Dongting. In this study, West Lake Dongting was selected as the research area. Submerged plant communities and 12 environmental indicators were investigated in 98 sampling plots at 11 sites in West Lake Dongting during summer in 2018 and 2019. Independent  $t$ -test and redundancy analysis were used to evaluate the relationship between the submerged plants and environmental factors, and to explore the effects of hydrologic regime change on submerged plants between years. Results showed that: 1) Submerged plants in West Lake Dongting were mainly distributed at semi-isolated sub-lakes or free flooding lake

\* 2020-02-07 收稿; 2020-03-12 收修稿。

国家重点研发计划项目(2017YFC0405303)资助。

\*\* 通信作者; E-mail: guangchun.lei@foxmail.com; E-mail: lucai.wetland@foxmail.com.

bays where with shallower water depth, better water quality and more stable water body, whilst there is less distribution at sites in major flowing channels and with high water fluctuation. Water depth, transparency, total phosphorus in bottom sediment and water pH showed significant differences between sites with and without appearance of submerged plants in West Lake Dongting; 2) Biomass of submerged plants was significantly correlated with pH, water depth and total phosphorus in water; 3) At free flooding lake bay, biomass of submerged plants was higher in 2018 than it in 2019. It is supposed to be the result of water level raising processes during May to August 2019 when was key growing stage of submerged plants. A continuously high-water level adversely impacted plant growth. Maintaining natural hydrologic regime, habitat heterogeneity with free flow in the lake, and healthy water quality were proposed to be the key factors to rehabilitate submerged plants in the West Lake Dongting. Sites at free flooding lake bay or semi-isolated sub-lakes those with water depth less than 3 meters, appropriate water nutrients, low water flow rate and less waves were recommended to be rehabilitated in priority.

**Keywords:** West Lake Dongting; submerged plants; distribution pattern; environmental factors; hydrologic regime

沉水植物对维持湖泊生态系统结构和功能具有至关重要的作用。沉水植物作为重要的初级生产者,是水生动物和水鸟的食物资源,为鱼类、底栖动物、浮游动物、迁徙候鸟等提供栖息地、避难所和繁殖地<sup>[1-2]</sup>,维持湿地生物多样性。沉水植物能够吸收水体和底质中的营养盐、重金属,有效净化水质,增加水体透明度,抑制藻类暴发<sup>[3-5]</sup>。除此之外还能有效加固底泥,保护湖底,加快湖水中悬浮物的沉降,抑制风浪和湖流。因此,保护和恢复沉水植物群落是维持湿地生态系统健康的重要基础。

受人为干扰与气候变化等因素影响,长江流域的生态系统格局正在发生剧烈改变,三峡水库及上游规模巨大的梯级水库群改变了中下游水沙特征,水文情势与水文节律发生了变化<sup>[6-7]</sup>,中下游湖泊湿地植物也随之发生改变<sup>[8-9]</sup>,水生生物多样性持续下降<sup>[10-11]</sup>。湖泊湿地沉水植物呈现衰退趋势,成为“长江大保护”要面临的首要问题之一。洞庭湖是长江中游的大型通江湖泊,具有丰富的生物多样性与重要的生态系统服务,是“长江经济带”所依托的重要生态安全屏障,但其面临着众多威胁。长江中下游水文节律的改变,对洞庭湖的水资源、水环境和湿地生态系统产生许多不利影响<sup>[12-15]</sup>。主要表现为湿地面积萎缩、植被格局改变、极端事件频发等,其中由于枯水期提前导致湖区低水位洲滩提前出露,苔草、芦苇群落向湖心倾移,挤占沉水植物的生存空间,导致沉水植物衰减严重,打破了现有植被格局的正向演替<sup>[16]</sup>。李娜等<sup>[17]</sup>研究表明,长江中下游一些湖泊的水生植物多样性总体呈现下降趋势,沉水植物、漂浮植物多样性下降明显,而挺水植物呈现增长态势。洞庭湖沉水植物的衰减对其他生物也产生了影响,例如以苦草属(*Vallisneria*)冬芽为食的白鹤种群数量在洞庭湖显著下降<sup>[18]</sup>。

恢复湖泊沉水植物需要充分掌握环境因子的影响。沉水植物生长和分布因环境因子不同而存在很大差异,大量研究表明水深<sup>[19-21]</sup>、流速<sup>[22-23]</sup>、光照强度<sup>[24-25]</sup>、底质<sup>[26-27]</sup>、水体营养盐<sup>[28]</sup>等多种环境因子都在不同程度上影响沉水植物的物种组成、生物量和分布。植物生长需要充足的光照,水深、透明度都会影响沉水植物可接收的光照强度,进而影响光合作用。通常情况下,水体越深透明度越低,光照强度越弱,当光照强度低于植物所需的光补偿点时会抑制其生长<sup>[29]</sup>。此外,营养盐浓度也会影响植物生长和生存,研究表明,水体营养盐浓度对植物生物量有显著影响,在一定营养盐浓度范围内,营养盐升高有助于沉水植物生长,当水体营养盐浓度过高时,会造成水藻暴发从而降低水体透明度,抑制沉水植物生长<sup>[30]</sup>。另外,底泥营养含量也对植物分布影响显著,尤其是植物体内的磷元素主要依靠根从底泥中吸收,其生长与底泥有极大关系,当底泥过于肥沃时会对沉水植物造成胁迫,影响其生长和分布<sup>[31-32]</sup>。水文节律的变化会直接影响湖泊的水深、光照强度等环境因子,进而影响沉水植物的生长。水位波动会改变湿地生境间的水文连通性,形成不同的生境梯度<sup>[33-34]</sup>,并对透明度、营养盐等环境因子产生季节性影响<sup>[35]</sup>。

当前长江中游沉水植物相关研究多见于阻隔湖泊<sup>[36-39]</sup>,而鄱阳湖与洞庭湖两大通江湖泊较阻隔湖泊具有更大的水文波动,因此需要加强沉水植物对水体环境因子与水文情势响应的研究。鄱阳湖相关研究表明,水文情势对湿地植物的物种组成及沉水植物生长具有明显影响<sup>[39-40]</sup>。受江湖关系改变、水文情势变化、洲滩杨树种植等因素影响,近年来洞庭湖水生生态系统也发生了变化,沉水植物的分布格局及其对环境因子与水文情势的响应尚待进一步掌握,成为湖泊湿地恢复与保护的阻碍,因此需要开展相关研究。考虑到西洞庭湖位于沅澧二水交汇处,具有河、滩、湾、自由连通及退渔还湿后半阻隔的不同子湖等,生境异质性高,

且此前该区域沉水植物分布调查资料较少,故本研究选取西洞庭为研究区域,分别在 2018 年和 2019 年夏季丰水期开展了野外调查,拟探明该区域沉水植物分布格局,并分析沉水植物对环境因子及年际不同水文情势的响应,研究影响沉水植物分布与生长的关键因子,为洞庭湖地区沉水植物的恢复和保护提供科学依据.

1 研究方法

1.1 研究区概况

西洞庭湖(28°47'~29°07'N,111°57'~112°17'E)位于湖南省常德市汉寿县境内,位于洞庭湖西部,是洞庭湖地势最高的区域. 根据西洞庭湖不同典型水文连通特征以及湿地恢复工程所在位置,本研究选取了 12 处生境在 2018 年和 2019 年丰水期(8 月 6—15 日)开展调查,并依据水文连通状况进行了分类,具体信息见表 1 及图 1(部分区域仅调查一年是由于调查时遇到当地渔民布设的渔网阻拦,导致无法乘船进入样点).

表 1 采样地分类  
Tab.1 Classification of sampling sites

样地	调查年份	生境类型	水文管控	连通时间	淹没时间	备注
小淤洲	2018	湖泊	自然	常年	常年	西洞庭湖沅澧交汇洪道
巴浪湖	2018	河道	自然	常年	常年	西洞庭湖沅澧交汇洪道
太阳汉	2018	河道	自然	常年	常年	西洞庭湖沅澧交汇洪道
坡头	2018、2019	湖泊	自然	季节	季节	沅水入西洞庭湖口
半边湖	2018、2019	湖泊	自然	常年	常年	西洞庭湖沅水洪道
北洼	2018、2019	湖泊	自然	季节	季节	鸟类栖息地
青山垸	2018、2019	子湖	阻隔	人工管控	常年	调查时为人工管控鱼塘
天鹅湖	2018、2019	子湖	半阻隔	季节	常年	退渔还湿工程
大连障	2018、2019	子湖	半阻隔	季节	季节	鸟类栖息地
东洼	2019	湖泊	半阻隔	季节	季节	鸟类栖息地
夹田夹	2019	湖泊	自然	常年	常年	西洞庭湖沅水洪道
龙王湖	2019	子湖	半阻隔	季节	常年	调查时养殖螃蟹

在上述调查样地,遵循区域覆盖和随机取样兼顾的原则,调查了 98 个采样点,各采样点位置如图 1 所示.

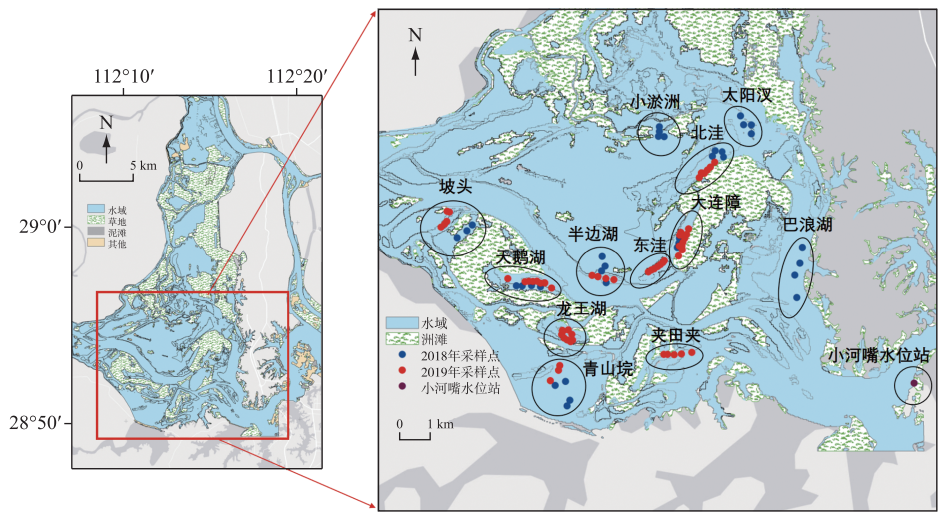


图 1 研究区调查样点示意  
Fig.1 Location of sampling sites in study area

## 1.2 样品采集及数据获取

沉水植物的采集采用多次重复小样方的取样方法,每个点位用自制铁耙式采草器(长 30 cm、宽 10 cm)在约 100 m<sup>2</sup> 的范围内随机采集沉水植物 10 次,每次采集面积为 0.3 m<sup>2</sup>,采样水深范围为 0~4 m,手持式 GPS (Garmin GPSMAP 63csx) 记录样点的经纬度. 采样后将采集到的植物冲洗干净,确定物种类别并记录,将植物带回实验室在烘箱内 80℃ 烘 72 小时后测量干重.

现场使用美国 speedtech SM-5A 手持式声呐测深仪测定水深(WD)、赛氏盘测定水体透明度(SD)、FP311 直读式流速仪测定流速(V),并使用采水器采集水样 500 mL,彼得森采泥器采集底泥约 200 g,每个样点 3 次重复. 水样带回实验室进行 pH、总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素 *a* (Chl.*a*) 浓度测定,其中 TP 浓度采用钼酸铵分光光度法测定,TN 浓度采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,Chl.*a* 浓度采用乙醇分光光度法测定. 底泥风干后分别采用重铬酸钾容量法、凯氏定氮法、氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定土壤有机质(S-OM)、总氮(S-TN)、总磷(S-TP) 含量.

因西洞庭湖为通江湖泊,沉水植物的生长与分布现状是调查时间之前水文情势与环境因子影响的结果,调查区域距离小河嘴国家水位站(图 1) 较近,故本研究使用小河嘴水位站的水位数据来指示西洞庭湖水位变化情况,水位数据来自全国水雨情信息网(<http://xxfb.mwr.cn/ssIndex.html?type=2>). 每年 3 月洞庭湖进入涨水期,4 月沉水植物进入生长期,本研究调查时间为 2018 年和 2019 年丰水期(8 月 6—15 日),沉水植物的分布与生物量现状受 8 月之前的水位波动影响. 因此选取 4 月 1 日至 8 月 5 日的水位数据进行比较分析. 调查样点的海拔高程(Alt) 根据采样点的经纬度坐标利用数字高程模型(DEM) 提取,淹没频率(Ff) 根据小河嘴水位站的水位监测数据结合西洞庭湖遥感影像图提取<sup>[41-42]</sup>,均在 ArcGIS 10.2 软件中完成.

## 1.3 数据分析

本研究共 98 个采样点,其中有沉水植物分布的样点 60 个,无沉水植物分布的样点 38 个. 群落优势种依据各采样点每种沉水植物的生物量干重确定. 为获取沉水植物出现与否(有或者无)的环境因子差异,本研究用 IBM SPSS statistics 22 软件进行独立样本 *T* 检验,分别比较了有植物分布和无植物分布样点各环境因子的差异.

为分析不同沉水植物的物种与具体环境因子之间的关系,本研究运用 R 3.6.1 软件进行除趋势对应分析(DCA),第一轴的长度为 3.5301,介于 3~4 之间,之后采用 RDA 线性模型排序(冗余分析) 分析不同沉水植物物种生物量与环境因子的相关性,无沉水植物分布样点在本分析中去除. 随后用蒙特卡罗置换测试(Monte Carlo permutation test) 来检验影响沉水植物分布的主要环境因子<sup>[43]</sup>.

# 2 结果

## 2.1 西洞庭湖沉水植物分布

本研究调查共记录到沉水植物 5 种,分别是刺苦草(*Vallisneria spirulosa*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、马来眼子菜(*Potamogeton malaianus*)、穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*) 和轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*).

2018 年共调查 8 个样地,其中 6 个样地发现有沉水植物分布,小淤洲、巴浪湖、青山垸的所有采样点均未调查到沉水植物分布. 36 个采样点中有 17 个采样点发现沉水植物,刺苦草出现的总频数最高(13)(表 2),并且 5 个区域都有分布,属于优势种. 马来眼子菜总频数最低(4). 在全部有沉水植物的样点中,刺苦草和轮叶黑藻的平均生物量最高,均为 2.98 g/m<sup>2</sup>,其次是金鱼藻、穗状狐尾藻,马来眼子菜的平均生物量最低,为 0.99 g/m<sup>2</sup>(表 2).

2019 年共调查 9 个样地,其中 7 个样地发现有沉水植物分布,龙王湖和青山垸未调查到沉水植物分布. 62 个采样点中有 43 个采样点有沉水植物分布. 刺苦草出现频数为 26,并且在 7 个样地都有分布,分布较为广泛、均匀,是西洞庭湖沉水植物的优势物种. 金鱼藻总频数为 19,马来眼子菜总频数为 9,轮叶黑藻的总频数为 7,穗状狐尾藻出现频数最低(6). 穗状狐尾藻的平均生物量最高,为 2.66 g/m<sup>2</sup>,其次是马来眼子菜、金鱼藻和刺苦草,轮叶黑藻的平均生物量最少,为 0.26 g/m<sup>2</sup>(表 3).

## 2.2 沉水植物物种与生物量年际变化

在 11 个样地中,天鹅湖、半边湖、坡头、大连障、北洼 5 个样地在 2018 年和 2019 年均调查到有沉水植物

表 2 2018 年西洞庭湖各地区沉水植物生物量 ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) \*

Tab.2 The biomass of submerged plants in the sampling area of West Lake Dongting in 2018

地区	刺苦草			金鱼藻			马来眼子菜			穗状狐尾藻			轮叶黑藻		
	生物量	N	F	生物量	N	F	生物量	N	F	生物量	N	F	生物量	N	F
天鹅湖	4.66±4.95	4	4	0	4	0	0	4	0	0	4	0	0	4	0
半边湖	2.28±4.56	4	1	0	4	0	0	4	0	0	4	0	0	4	0
坡头	1.86±2.17	4	2	0	4	0	3.76±7.52	4	2	4.87±8.47	4	2	2.93±5.67	4	2
太阳叉	0	4	0	0.36±0.72	4	1	0	4	0	0.11±0.21	4	1	0.34±0.68	4	1
北洼	4.30±3.12	4	4	8.43±16.44	4	2	3.14±5.90	4	2	6.97±8.23	4	3	13.19±23.03	4	3
大连障	5.36±6.24	4	2	2.51±3.06	4	2	0	4	0	0	4	0	4.39±7.94	4	3
总计	3.07±2.04	28	13	2.14±6.62	28	5	0.99±3.56	28	4	1.71±4.82	28	6	2.98±9.50	28	9

\* N 代表采样点的数量, F 代表发现沉水植物的样点数量.

表 3 2019 年西洞庭湖各地区沉水植物生物量 ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) \*

Tab.3 The biomass of submerged plants in the sampling area of West Lake Dongting in 2019

地区	刺苦草			金鱼藻			马来眼子菜			穗状狐尾藻			轮叶黑藻		
	生物量	N	F	生物量	N	F	生物量	N	F	生物量	N	F	生物量	N	F
天鹅湖	3.82±5.39	10	8	1.07±1.81	10	6	0.09±0.02	10	1	13.12±38.22	10	3	0	10	0
半边湖	0.03±0.08	4	1	0	4	0	13.82±17.89	4	3	0	4	0	0	4	0
坡头	0	6	1	0.04±0.09	6	0	5.45±8.85	6	3	0.03±0.04	6	0	0	6	0
大连障	0.80±2.04	11	4	3.83±12.11	11	5	0	11	0	0	11	0	1.19±2.68	11	5
东洼	0.22±0.28	7	3	0.59±1.15	7	2	0.29±0.77	7	1	0.10±0.27	7	1	0.04±0.01	7	1
北洼	0.60±0.62	7	6	0.56±1.18	7	6	0.01±0.03	7	1	0.10±0.23	7	2	0.08±0.02	7	1
夹田夹	0.12±0.15	5	3	0	5	0	0	5	0	0	5	0	0	5	0
总计	1.07±2.87	50	26	1.22±5.74	50	19	1.83±6.62	50	9	2.66±17.22	50	6	0.26±1.31	50	7

\* N 代表采样点的数量, F 代表发现沉水植物的样点数量.

分布. 对比 2 年沉水植物的生物量, 结果表明坡头、大连障、北洼 2018 年生物量显著高于 2019 年(图 2). 坡头 2018 年调查到的 5 种沉水植物均有分布, 2019 年仅有马来眼子菜、极少量的金鱼藻和穗状狐尾藻, 且生物量明显低于 2018 年; 大连障两年调查结果中沉水植物的物种分布较为稳定, 为刺苦草、金鱼藻和轮叶黑藻, 2019 年的生物量略低于 2018 年; 北洼连续 2 年的调查中, 沉水植物的种类组成较为稳定, 刺苦草、金鱼藻、马来眼子菜、穗状狐尾藻和轮叶黑藻均有分布, 但是 2 年的生物量差距较大, 2018 年总生物量为  $54.31 \text{ g}/\text{m}^2$ , 2019 年总生物量仅为  $1.87 \text{ g}/\text{m}^2$ . 天鹅湖 2018 年只有刺苦草分布, 2019 年沉水植物还发现穗状狐尾藻、金鱼藻和马来眼子菜; 半边湖物种单一, 2018 年仅调查到刺苦草, 2019 年仅有马来眼子菜和极少量刺苦草.

### 2.3 沉水植物分布样点环境因子差异

对 60 个有沉水植物分布样点和 38 个无沉水植物分布样点的 11 个环境因子进行对比(表 4), 结果发现 WD、SD、pH、Chl.a、S-TP 存在显著差异, 水体 TN 和 TP、S-OM 和 TN 以及 Ff 和 Alt 在有、无沉水植物分布的样点中均无显著性差异. 流速在有沉水植物分布的样点中其值均为  $0 \text{ m}/\text{s}$ .

相比无沉水植物分布样点的 WD(范围  $1.5 \sim 5.2 \text{ m}$ ), 有沉水植物分布样点的 WD(范围  $0.15 \sim 2.8 \text{ m}$ ) 显著较浅 ( $P < 0.01$ ); 有沉水植物分布样点的 SD ( $0.68 \text{ m}$ ) 显著高于无沉水植物分布样点 ( $0.45 \text{ m}$ ) ( $P < 0.01$ ); 有沉水植物分布样点的水体 pH、Chl.a 浓度较无沉水植物分布的样点显著较低 ( $P < 0.01$ ); 有沉水植物分布样点的 S-TP 含量 ( $P < 0.01$ ) 显著低于无沉水植物分布样点, 而均无显著性差异.

### 2.4 沉水植物分布与环境因子的关系

西洞庭湖沉水植物分布与环境因子之间的 RDA 分析统计见表 5. 结果显示, 所有环境因子对样本变化

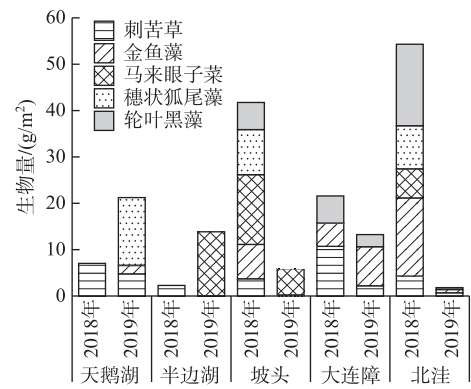


图 2 2018 和 2019 年沉水植物生物量对比

Fig.2 Comparison of biomass of submerged plants in 2018 and 2019

的解释量为 0.3469,第 1、2 轴的特征值分别是 0.1247 和 0.0466,前 2 轴物种与环境因子累积解释量达到 76.16%,说明前两轴能够较好地反映沉水植物分布与环境因子之间的关系.

表 4 有、无沉水植物分布地区环境状况

Tab.4 Environmental conditions of lakes with and without submerged plants

环境指标	有沉水植物分布样点 (n=60)		无沉水植物分布样点 (n=38)	
	平均值	范围	平均值	范围
WD/m *	1.83±0.57	0.15~2.80	2.39±1.17	1.5~5.2
SD/m *	0.68±0.19	0.37~1.17	0.45±0.21	0.19~1.17
TN/(mg/L)	0.11±0.17	0.02~0.99	0.13±0.20	0.02~0.88
TP/(mg/L)	0.25±0.39	0.004~1.043	0.27±0.35	0.003~0.974
pH *	8.08±0.43	7.14~8.76	8.48±0.80	7.32~10.28
Chl.a/(μg/L) *	5.04±3.04	0.34~16.84	9.39±10.37	0.35~31.478
S-OM/(g/kg)	12.04±3.08	5.00~25.42	12.70±3.23	6.49~22.53
S-TN/(g/kg)	1.49±0.46	0.49~3.31	1.57±0.43	1.03~2.56
S-TP/(g/kg) **	0.70±0.14	0.43~0.93	0.77±0.14	0.58~0.98
FE/%	0.76±0.19	0.24~1.00	0.70±0.26	0.13~0.97
Alt/m	27.97±1.09	26.00~30.00	28.18±1.16	26.00~30.00

\* 表示存在显著差异,P<0.05.

图 3 显示,第一排序轴与 pH、S-TN、WD 的相关性较高,第二排序轴与水体 TP、TN、SD 的相关性较高. 刺苦草的生物量与水体 TP、pH 呈正相关趋势,但与水体 TN 呈负相关趋势;穗状狐尾藻的生物量与水体 TP 呈正相关趋势,与 WD、SD 呈负相关趋势;金鱼藻生物量与 WD、S-OM、水体 SD、水体 TN 呈正相关趋势;马来眼子菜的生物量与 WD、S-TN 和 S-TP 呈负相关趋势;轮叶黑藻的生物量与水体 TP 和 pH 呈正相关,与水体 TN 呈负相关趋势.

在 RDA 分析中,环境因子被限定为轴的线性组合,在某个轴上的重要性需要由环境因子与轴的相关系数

表 5 RDA 分析统计信息

Tab.5 Analyzes statistics of redundancy analysis

轴	特征根	物种变量累积 百分数/%	物种与环境变量 累积百分数/%
1	0.1247	19.33	55.44
2	0.0466	26.56	76.16
3	0.0404	32.82	94.10
4	0.0121	34.69	99.46

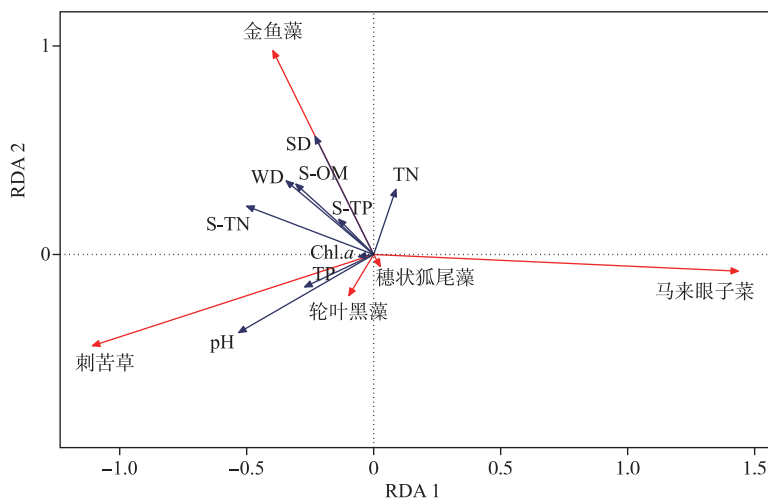


图3 RDA 分析结果(红色箭头指示沉水植物的状况,蓝色箭头指示各环境因子的状况)

Fig.3 Results of redundancy analysis( Red arrows show the submerged plants, blue arrows show the environmental factors)

( $F$ )来衡量, Monte Carlo 检验测得的显著值表明, 在西洞庭湖的各采样点中, 与沉水植物生物量相关的主要环境因子依次是 pH、水体 TP 和 WD ( $F=3.9401, 3.1429$  和  $2.5187$ , 均  $P<0.05$ ). 其他环境因子与沉水植物生物量的关系并不显著, 说明其他环境变量不能独立解释西洞庭湖沉水植物生物量的差异.

### 3 讨论

#### 3.1 西洞庭湖沉水植物分布与样地水文特征关系

本研究结果显示, 沉水植物的分布与生境的水文特征存在相关关系, 包括水深、透明度以及地形与水文连通性影响的流速等. 水深是影响湿地植物群落组成的重要环境因子, 反映湿地植物的空间分布<sup>[44]</sup>, 本研究调查到沉水植物主要分布在水深较浅、透明度较高的地区, 与前人研究结果一致<sup>[45-46]</sup>. 综合两次调查发现, 天鹅湖、大连障、东洼、北洼的沉水植物多样性高于半边湖、太阳汉、夹田夹地区, 前者都是湖湾或是半阻隅子湖、湖泊, 生长环境较为稳定, 水体流速缓慢, 更加适合沉水植物生长<sup>[47]</sup>, 后者更靠近河道及敞水区, 水体及环境扰动影响较大. 此次调查中有沉水植物分布样点的流速均为  $0 \text{ m/s}$ , 有沉水植物分布的区域流速较低. 自然连通的流水区域水位波动较大, 在水位波动时期流速变化较大, 不利于沉水植物生长; 半阻隅子湖因在水位高于圩堤及洲滩后才与大湖连通, 涨水前为静水期, 连通期流速低于自然连通区域, 故适宜沉水植物生长. 已有研究表明, 长江中下游湖泊湖湾区的水生植物多样性和物种数明显高于敞水区<sup>[48]</sup>, 主要是由于湖湾风浪小, 水面较稳定, 光的散射和散射辐射损失率低, 光照充足, 湖泊的生境类型显著影响水生植物的多样性<sup>[17]</sup>.

此外, 本研究发现不同沉水植物的分布对水深具有不同的响应, 验证了不同物种对相同环境因子具有不同的生长响应和代谢策略<sup>[49]</sup>. 本研究冗余分析结果中金鱼藻的分布与水深、透明度呈正相关, 说明其主要分布在水深较深、水体透明度较高的地区. 有研究表明<sup>[50]</sup> 金鱼藻的生长速率会随着光照的增强而减弱, 而穗状狐尾藻和马来眼子菜与水深呈负相关, 主要是这 2 种沉水植物在低光照或低透明度下能够伸长茎或叶来适应胁迫环境, 当水深小于株高时, 植物漂浮在水面同时影响其他植物的光照, 此时水深和透明度不再是限制其生长的因素, 能适应浊度较高的浅水湖泊<sup>[36]</sup>. 刺苦草和轮叶黑藻与水深无显著相关性, 可能原因是调查中有这 2 个物种分布的样点水深数据均小于  $3 \text{ m}$ , 水深尚未达到其分布抑制条件, 以及刺苦草和轮叶黑藻具有冬芽和芽孢可以进行无性繁殖, 故此次调查的水深对这 2 个物种的生物量影响较小<sup>[51]</sup>.



### 3.2 沉水植物与水质的关系

本研究发现,沉水植物对水体 pH、Chl. *a* 和营养盐浓度等环境因子具有不同的响应. pH 是植物生长发育中重要的环境因子,在合适 pH 范围内植物能够吸收足够养分并快速生长,同时 pH 能影响水体中营养物质的存在方式,如水中磷的形态转化<sup>[52]</sup>. 本研究有沉水植物分布地区 pH 范围是 7.14~8.76,明显低于无沉水植物分布地区定的 pH 范围 7.32~10.28,研究表明 pH 在 7~9 时对沉水植物的生长最为有利,pH 过高或过低会导致植物光合速率下降,沉水植物在弱碱性水环境中状态最佳<sup>[53-54]</sup>. 水体 Chl. *a* 浓度反映水体浮游藻类的数量,是表征湖泊富营养化状态的核心指标<sup>[55]</sup>,此次调查结果中有沉水植物分布区域的 Chl. *a* 浓度显著低于无沉水植物分布区域,说明有沉水植物分布的区域水质条件更好. 营养盐也是影响沉水植物生长分布的关键环境因子之一,本次调查中有沉水植物分布样点的底泥与水体总氮、总磷浓度均低于无沉水植物分布样点,说明沉水植物更适宜营养浓度较低的生境. 在营养盐中,沉水植物分布与水体和底泥总磷关系显著,与总氮不显著. 本研究 Monte Carlo 检验结果表明水体与底质总磷是影响沉水植物生物量的显著环境因子,与袁龙义<sup>[32]</sup>、苏豪杰等<sup>[56]</sup>的研究结果一致. 本研究在西洞庭湖青山垠未调查到沉水植物分布,原因可能是青山垠长期人工水产养殖导致水体营养浓度过高,沉水植物无法生长<sup>[57]</sup>. 近年来长江中下游地区湖泊水质富营养化污染较为严重,前人对长江中下游 27 个湖泊研究调查发现大多数湖泊都处于富营养化水平<sup>[58]</sup>,洞庭湖水质与历史数据相比还是存在较大水质污染问题<sup>[59-60]</sup>,因此水质是沉水植物恢复应关注的重要因素.

与生境水文特征相似,不同种类的沉水植物对营养盐浓度具有不同的响应. 本研究冗余分析结果中金鱼藻、轮叶黑藻和刺苦草对水体和底质营养物质具有较高的耐受性,表明其耐污方面比其他沉水植物更强<sup>[61]</sup>. 而马来眼子菜生长在营养水平较低的水质中,与前人结果一致<sup>[62]</sup>. 轮叶黑藻的生物量与底质总氮、总磷均无显著相关性,李垒等的研究<sup>[63]</sup>也表明不同营养的底质对黑藻的生长无显著影响.

### 3.3 沉水植物年际变化与水文情势的关系

年际水文情势变化是西洞庭湖沉水植物分布和生长年间差异形成的关键原因. 相比 1980—2002 年(三峡大坝建设前)和 2003—2017 年逐日平均水位(图 4),2019 年 5—8 月的水位明显高于历史多年平均水位与 2018 年同期,是水位相对较高的一年. 据实地调查观测,5 月后是洞庭湖沉水植物生长的关键时期,2018 年该时期出现 1 次低水位波动过程,2019 年出现 3 次高水位波动过程. 5—8 月 2018 年平均水位 30.3 m,2019 年平均水位 31.8 m,6 月 17 日—7 月 1 日由水位波动造成的年际水位差最高达 3.4 m,处于植物生长关键时期的这一高水位会对沉水植物生长形成抑制,从而造成两年沉水植物种类与分布的差异. 表现为 2 个季节性淹没自然连通湖泊样地坡头和北洼的物种数与生物量在 2019 年低于 2018 年(图 2),半阻隔子湖大连障的物种无变化但生物量

同样减少. 位于沉水洪道的半边湖 2 年均少量刺苦草分布,但在 2019 年新调查到马来眼子菜分布,半阻隔子湖天鹅湖的刺苦草生物量在 2019 年减少但新调查到穗状狐尾藻与金鱼藻,其中 2018 年天鹅湖水体 TP 浓度为 0.8 mg/L,在所有样点中最高,不确定其影响,因此这 2 处样地的变化原因有待继续调查研究.

### 3.4 沉水植物的恢复与保护

对比前人在 2010 年的调查,本研究调查到的沉水植物种类有所减少. 王朝晖等<sup>[64]</sup>在 2008—2010 年对西洞庭湖植物多样性调查共发现了 10 种沉水植物,而在本次调查中仅发现 5 种沉水植物,眼子菜(*Potamogeton distinctus*)、大茨藻(*Najas marina*)、小茨藻(*Najas minor*)、狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*)等长江流域夏季常见沉水植物在本研究中并未调查到<sup>[65-66]</sup>. 并据西洞庭湖自然保护区反馈,近十年来以沉水植物为食的水鸟数量减少. 因此应采取保护措施对洞庭湖沉水植物进行恢复.

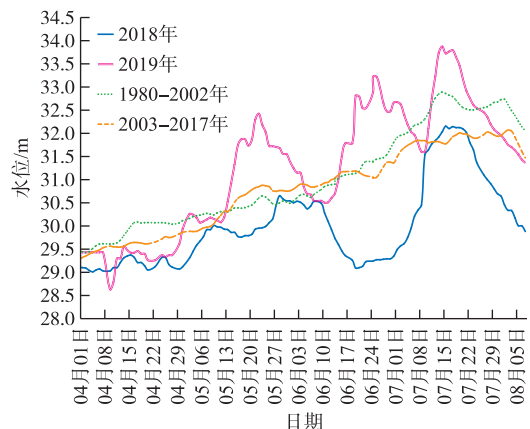


图 4 2018 年和 2019 年小河嘴水位站水位变化

Fig.4 Change of water level in Xiaohesui Station in 2018 and 2019



本研究表明,自然的水文节律、高湖泊生境异质性和水文连通性是恢复西洞庭沉水植物的重要因素. 2019年西洞庭湖水位整体高于2018年,2018年水位较低且波动较少,更加适合沉水植物的生长,而2019年水位波动大. 极端高水位抑制沉水植物生长,长时间高水位更会导致沉水植物死亡<sup>[67]</sup>. 本研究也发现,当水文节律与多年平均波动幅度接近时,季节性淹没的自然连通湖区的物种数与生物量均高于半阻隔或管控子湖,而在水文节律波动异常时,2种不同生境在不同水文情势下对维持沉水植物生物量具有不同的作用. 如高水位波动时自然连通湖区沉水植物生物量减少,而半阻隔子湖沉水植物的生物量可能会高于前者,半阻隔子湖在剧烈水位波动时可形成沉水植物的“避难所”. 因此,同时保持自然连通湖区、半阻隔子湖等不同生境并使其可以随水位波动而被季节性淹没,也即维持更高的生境异质性与水文连通性,避免单一生境与单一水文管理模式,对恢复并维持通江湖泊的沉水植物具有重要作用. 这与通江湖泊洲滩植物生长的研究一致,在水文情势变化时,东洞庭湖秋季洲滩植物在自然连通与人工管控生境对生长具有不同的生长过程,从而为越冬雁类提供了避难所<sup>[68]</sup>,而鄱阳湖半阻隔碟形子湖的洲滩植物较自然连通湖区有更高的刚性(稳定性)<sup>[9,69]</sup>. 在2018年环保督察后,洞庭湖拆除了湖内大量历史遗留的子湖矮圩,导致湖内生境多样性与异质性的降低,本研究建议应对这一措施的影响进行深入研究 with 客观评估.

本研究也发现水深、营养盐和pH等环境因子对不同沉水植物的影响存在差异,因此应控制洞庭湖的入湖营养盐输入,并在不同生境选择不同的沉水植物物种进行恢复. 研究表明,选择在水深3 m以内、流速及风浪小的湖湾区或半阻隔湖泊更易开展沉水植物恢复工作. 在水位波动较大、浊度较高的区域可以考虑种植马来眼子菜、穗状狐尾藻等更能适应水位变化且耐污的物种;在中等水深稳定水体的区域则考虑种植刺苦草更适合,水深过浅或过深都会抑制其生长;在营养盐浓度较高的区域建议选择金鱼藻、刺苦草和轮叶黑藻耐营养盐的物种.

#### 4 结论

西洞庭湖沉水植物的分布格局与生物量对水深、透明度、pH、底泥总磷等环境因子变化以及年际水文情势差异具有不同的响应,且不同物种的响应也存在差异. 保持适宜水深、较低水文扰动与适宜的营养盐是维持湖泊沉水植物种类与生物量的重要因素,而在水文情势异常时,维持高生境异质性可减缓异常波动对沉水植物的影响. 在洞庭湖开展沉水植物恢复,可选择水深3 m以内、环境因子较为稳定的湖湾区和半阻隔湖泊,并降低流域与湖区的入湖营养盐. 恢复物种的选择应基于湖区营养盐浓度差异,在高浓度营养盐的区域优先恢复金鱼藻、黑藻与刺苦草等物种,如退渔还湿后的人工养殖子湖,在营养盐浓度较低的区域建议优先恢复马来眼子菜. 在制定恢复沉水植物恢复措施的同时,一方面应针对未来江湖关系改变引起的水文情势新变化对沉水植物的影响开展进一步研究,尤其是营养盐与水文特征对沉水植物生长的综合作用机理与量化研究;另一方面应在洞庭湖拆除矮圩的区域开展对比研究,客观评价生境异质性变化的作用与影响. 此外,本研究尚有不足,如调查时间主要集中在8月,未来可扩大调查时间与空间覆盖,继续研究沉水植物对环境响应的季节性差异和年际差异.

#### 5 参考文献

- [1] Stansfield JH, Perrow MR, Tench LD *et al.* Submerged macrophytes as refuges for grazing Cladocera against fish [-3pt] predation: observations on seasonal changes in relation to macrophyte cover and predation pressure. *Hydrobiologia*, 1997, **342-343**(1): 229-240.
- [2] MacEina MJ, Bettoli PW, Klusmann WG *et al.* Effect of aquatic macrophyte removal on recruitment and growth of black crappies and white crappies in lake Conroe, Texas. *North American Journal of Fisheries Management*, 1991, **11**(4): 556-563.
- [3] Gao HR, Chen XL, Zhao AJ *et al.* Comparison of heavy metal accumulation by five submerged macrophytes. *Environmental Protection Science*, 2016, **42**(4): 101-105. [高海荣, 陈秀丽, 赵爱娟等. 5种沉水植物对重金属富集能力的对比研究. 环境保护科学, 2016, **42**(4): 101-105.]
- [4] Dai LL, Zhang Y, Li SS *et al.* Inhibition of algae growth by submerged macrophyte at different nutrient levels. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(6): 1801-1807. [代亮亮, 张云, 李双双等. 不同营养水平下沉水植物的抑藻效应. 环

- 境科学学报, 2019, **39**(6): 1801-1807.]
- [ 5 ] Li L, Yue CL, Zhang H *et al.* Correlation between water purification capacity and bacterial community composition of different submerged macrophytes. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 4962-4970. [李琳, 岳春雷, 张华等. 不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性. 环境科学, 2019, **40**(11): 4962-4970.]
- [ 6 ] Lu C, Jia YF, Jing L *et al.* Shifts in river-floodplain relationship reveal the impacts of river regulation: A case study of Dongting Lake in China. *Journal of Hydrology*, 2018, **559**: 932-941. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.03.004.
- [ 7 ] Lai XJ, Jiang JH, Huang Q. Effects of the normal operation of the Three Gorges Reservoir on wetland inundation in Dongting Lake, China: A modelling study. *Hydrological Sciences Journal*, 2013, **58**(7): 1467-1477. DOI: 10.1080/02626667.2013.831418.
- [ 8 ] Jing L, Lu C, Xia Y *et al.* Effects of hydrological regime on development of *Carex* wet meadows in East Dongting Lake, a Ramsar Wetland for wintering waterbirds. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 41761. DOI: 10.1038/srep41761.
- [ 9 ] Shi LL, Wang YY, Jia YF *et al.* Vegetation cover dynamics and resilience to climatic and hydrological disturbances in seasonal floodplain: The effects of hydrological connectivity. *Frontiers in Plant Science*, 2017, **8**: 2196. DOI: 10.3389/fpls.2017.02196.
- [ 10 ] Zhu Y, Lv C, Hu HJ *et al.* Changes in fish community structure in West Dongting Lake after the operation of the Three Gorges Dam. *J Lake Sci*, 2014, **26**(6): 844-852. DOI: 10.18307/2014.0605. [朱轶, 吕偲, 胡慧建等. 三峡大坝运行前后西洞庭湖鱼类群落结构特征变化. 湖泊科学, 2014, **26**(6): 844-852.]
- [ 11 ] Wang HZ, Liu XQ, Wang HJ. The Yangtze River floodplain: Threats and rehabilitation. *American Fisheries Society Symposium*, 2016, **84**: 263-291.
- [ 12 ] Hou ZY, Xie YH, Zhao QH *et al.* Status, utilization and conservation of plant resources in Dongting Lake wetlands. *Research of Agricultural Modernization*, 2013, **34**(2): 181-185. [侯志勇, 谢永宏, 赵启鸿等. 洞庭湖湿地植物资源现状及保护与可持续利用对策. 农业现代化研究, 2013, **34**(2): 181-185.]
- [ 13 ] Tang Y, Xie YH, Li F *et al.* Spatial distribution of emergent herbaceous wetlands in the East Dongting Lake during the last twenty years based on Landsat data. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, **22**(11): 1484-1492. [唐玥, 谢永宏, 李峰等. 基于 Landsat 的近 20 余年东洞庭湖湿地草洲变化研究. 长江流域资源与环境, 2013, **22**(11): 1484-1492.]
- [ 14 ] Sun ZD, Huang Q, Jiang JH *et al.* Recent hydrological droughts in Dongting Lake and its association with the operation of Three Gorges reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(2): 251-256. [孙占东, 黄群, 姜加虎等. 洞庭湖近年干旱与三峡蓄水影响分析. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(2): 251-256.]
- [ 15 ] Yuan YJ. Research on the evolution of hydrological regimes and wetlands conservation in Dongting Lake under the changing environment [Dissertation]. Changsha: Hunan University, 2017. [袁玉洁. 变化环境下洞庭湖水文情势的演变及湿地保护研究 [学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2017.]
- [ 16 ] Xie YH, Chen XS. Effects of three-gorge project on succession of wetland vegetation in Dongting Lake. *Research of Agricultural Modernization*, 2008, **29**(6): 684-687. [谢永宏, 陈心胜. 三峡工程对洞庭湖湿地植被演替的影响. 农业现代化研究, 2008, **29**(6): 684-687.]
- [ 17 ] Li N, Yang L, Deng XW *et al.* Aquatic plant diversity in relation to lake morphology in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Plant Science Journal*, 2018, **36**(1): 65-72. [李娜, 杨磊, 邓绪伟等. 湖泊形态与水生植物多样性关系——以长江中下游湖群典型湖泊为例. 植物科学学报, 2018, **36**(1): 65-72.]
- [ 18 ] Zhou Y, Jing L, Jia YF *et al.* Population dynamics of four endangered cranes and landscape patterns of habitats in the East Dongting Lake during recent 30 years. *J Lake Sci*, 2019, **31**(5): 1415-1423. DOI: 10.18307/2019.0515. [周延, 靖磊, 贾亦飞等. 东洞庭湖 4 种濒危鹤类近 30 年种群动态及栖息地景观格局变化. 湖泊科学, 2019, **31**(5): 1415-1423.]
- [ 19 ] Li L, Bonser SP, Lan ZC *et al.* Water depth affects reproductive allocation and reproductive allometry in the submerged macrophyte *Vallisneria spiralis*. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 16842. DOI: 10.1038/s41598-017-16719-1.
- [ 20 ] Chambers PA, Kaiff J. Depth distribution and biomass of submersed aquatic macrophyte communities in relation to secchi depth. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1985, **42**(4): 701-709. DOI: 10.1139/f85-090.
- [ 21 ] Xiao KY, Yu D, Wu ZH. Differential effects of water depth and sediment type on clonal growth of the submersed macrophyte *Vallisneria spiralis*. *Hydrobiologia*, 2007, **589**(1): 265-272. DOI: 10.1007/s10750-007-0740-4.

- [22] Cui J, Neary VS. LES study of turbulent flows with submerged vegetation. *Journal of Hydraulic Research*, 2008, **46**(3): 307-316.
- [23] Chambers PA, Prepas EE, Hamilton HR *et al.* Current velocity and its effect on aquatic macrophytes in flowing waters. *Ecological Applications*, 1991, **1**(3): 249-257. DOI: 10.2307/1941754.
- [24] Arthaud F, Mousset M, Valloir D *et al.* Effect of light stress from phytoplankton on the relationship between aquatic vegetation and the propagule bank in shallow lakes. *Freshwater Biology*, 2012, **57**(4): 666-675. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2011.02730.x.
- [25] Havens KE. Submerged aquatic vegetation correlations with depth and light attenuating materials in a shallow subtropical lake. *Hydrobiologia*, 2003, **493**(1/2/3): 173-186. DOI: 10.1023/A:1025497621547.
- [26] Wang H, Pang Y, Liu SB *et al.* Research progress on influencing of environmental factors on the growth of submersed macrophytes. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(8): 3958-3968. [王华, 逢勇, 刘申宝等. 沉水植物生长影响因子研究进展. 生态学报, 2008, **28**(8): 3958-3968.]
- [27] Li SP, Zhu ZJ, Yan YE *et al.* Effects of different light intensity and sediment nutrition on three submerged macrophytes. *Ecological Science*, 2018, **37**(1): 101-107. [李鹏善, 朱正杰, 严燕儿等. 不同光照强度和底质营养对三种沉水植物的影响. 生态科学, 2018, **37**(1): 101-107.]
- [28] Zhu B, Chen FX, Chen ZQ. Study progress on purification of eutrophic water by aquatic macrophytes. *Shanghai Environmental Sciences*, 2002, (9): 54-57. [朱斌, 陈飞星, 陈增奇. 利用水生植物净化富营养化水体的研究进展. 上海环境科学, 2002, (9): 54-57.]
- [29] Lu JJ, Zhang M, Quan SQ *et al.* Integrated effects of hypoxia, high ammonia and low light on the growth and physiological C-N metabolism indices of *Vallisneria natans*. *J Lake Sci*, 2018, **30**(4): 1064-1074. DOI: 10.18307/2018.0419. [卢皎皎, 张萌, 全水清等. 低氧、高氨和低光对沉水植物苦草 (*Vallisneria natans*) 生长与 C-N 代谢生理指标的影响特征. 湖泊科学, 2018, **30**(4): 1064-1074.]
- [30] Kang CX, Dai XZ, Liu Y. Physiological responses of *Vallisneria asiaticato* the stress of high concentrations of Ammonia N or P. *Safety and Environmental Engineering*, 2018, **25**(3): 72-77. [康彩霞, 戴星照, 刘艳. 高浓度氨氮或磷胁迫对亚洲苦草生理特性的影响. 安全与环境工程, 2018, **25**(3): 72-77.]
- [31] Ni LY. Stress of fertile sediment on the growth of submersed macrophytes in eutrophic waters. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2001, **25**(4): 399-405. [倪乐意. 富营养水体中肥沃底质对沉水植物生长的胁迫. 水生生物学报, 2001, **25**(4): 399-405.]
- [32] Yuan LY. Study on effects of environmental factors on the life-history strategies of submerged macrophytes [Dissertation]. Wuhan: Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, 2007. [袁龙义. 环境因子对沉水植物生活史对策的影响研究 [学位论文]. 武汉: 中国科学院武汉植物园, 2007.]
- [33] Li B, Tan WZ, Wen L *et al.* Anthropogenic habitat alternation significantly decreases  $\alpha$ - and  $\beta$ -diversity of benthopelagic metacommunity in a large floodplain lake. *Hydrobiologia*, 2020, **847**(1): 293-307. DOI: 10.1007/s10750-019-04091-2.
- [34] Feng DD, Guan L, Shi LL *et al.* Impact of autumn hydrologic regime on plants in beach and distribution of populations of wintering lesser white-fronted goose in east Dongting Lake. *Wetland Science*, 2014, **12**(4): 491-498. [冯多多, 关蕾, 史林鹭等. 东洞庭湖秋季水文情势对洲滩植物及越冬稳定期小白额雁种群分布影响. 湿地科学, 2014, **12**(4): 491-498.]
- [35] Wang YF, Ni ZK, Lin RP *et al.* Evolution characteristics of the Dongting Lake water environment and revealing its key influent factors. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(7): 2554-2559. [王艳分, 倪兆奎, 林日彭等. 洞庭湖水环境演变特征及关键影响因素识别. 环境科学学报, 2018, **38**(7): 2554-2559.]
- [36] Wang Q, Gao XQ, Xiao NW *et al.* Distribution pattern of submerged macrophytes and its influencing factors of water environment in Lake Dianchi. *J Lake Sci*, 2018, **30**(1): 157-170. DOI: 10.18307/2018.0116. [王琦, 高晓奇, 肖能文等. 滇池沉水植物的分布格局及其水环境影响因子识别. 湖泊科学, 2018, **30**(1): 157-170.]
- [37] Xu J, He P, Wang Q *et al.* Relationship between distribution of submerged macrophyte and water environment factors in Baiyangdian lake in summer. *Wetland Science*, 2013, **11**(4): 488-494. [徐杰, 何萍, 王钦等. 夏季白洋淀沉水植物分布与水环境因子的关系. 湿地科学, 2013, **11**(4): 488-494.]
- [38] Tian CC, Guo CB, Wu XQ. Distribution of submerged plants and its relationship with environmental factors in Gaoyou lake. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(2): 423-430. [田翠翠, 郭传波, 吴幸强. 高邮湖沉水植物分布格局及其

与水环境因子的关系. 水生生物学报, 2019, **43**(2): 423-430.]

- [39] Jian MF, Jian MF, Li LY *et al.* Distribution pattern of submerged plants in typical wetlands of Poyang Lake and its influencing factors of water environment. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(5): 765-772. [简敏菲, 简美锋, 李玲玉等. 鄱阳湖典型湿地沉水植物的分布格局及其水环境影响因子. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(5): 765-772.]
- [40] Jian M, Xu P, Yu H *et al.* Distribution of the aquatic plant communities and its environmental impacted factors in the wetland between Le'an River and Poyang Lake. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(3): 408-417.
- [41] Pekel JF, Cottam A, Gorelick N *et al.* High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 2016, **540**(7633): 418-422. DOI: 10.1038/nature20584.
- [42] Lu C, Shi LL, Lei GC *et al.* Potential impacts of proposed Chenglingji hydraulic project on wetlands in Dongting Lake. *Wetland Science*, 2018, (3).
- [43] Zhang JT ed. Quantitative ecology. Beijing: Science Press, 2004. [张金屯. 数量生态学. 北京: 科学出版社, 2004.]
- [44] Chen XS, Li X, Xie YH *et al.* Combined influence of hydrological gradient and edaphic factors on the distribution of macrophyte communities in Dongting Lake wetlands, China. *Wetlands Ecology and Management*, 2015, **23**(3): 481-490.
- [45] Wang SP, Chen JW, Liu YH *et al.* Distribution characteristics of submerged plants in urban Rivers and its influencing factors: A case of Ningbo urban Rivers. *J Lake Sci*, 2019, **31**(4): 1064-1074. DOI: 10.18307/2019.0414. [王苏鹏, 陈吉炜, 刘意恒等. 城区河流中沉水植物分布特征及其影响因素分析——以宁波城区内河为例. 湖泊科学, 2019, **31**(4): 1064-1074.]
- [46] Chen XS, Xie YH, Li F *et al.* Comparison between enclosed estuary and centre of Dongting Lake in basic ecological characteristics—A case study of sampling belt from liumen gate to Xiaoxi lake. *Rural Eco-Environment*, 2010, **26**(5): 502-507. [陈心胜, 谢永宏, 李峰等. 洞庭湖封闭河口区与湖心区的基本生态特征——以六门闸至小西湖样带为例. 生态与农村环境学报, 2010, **26**(5): 502-507.]
- [47] Hu ZP, Ge G, Liu CL *et al.* Structure of Poyang lake wetland plants ecosystem and influence of lake water level for the structure. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, **19**(6): 597-605. [胡振鹏, 葛刚, 刘成林等. 鄱阳湖湿地植物生态系统结构及湖水位对其影响研究. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(6): 597-605.]
- [48] Yu D, Chen YY. Lake bend effect and its influence on the specific diversity of aquaic plants in the lakes of middle basins of Changjiang river. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, **16**(5): 476-483. [于丹, 陈宜瑜. 湖湾效应对长江中游湖泊水生植物多样性的影响. 生态学报, 1996, **16**(5): 476-483.]
- [49] Yuan GX, Fu H, Zhong JY *et al.* Growth and C/N metabolism of three submersed macrophytes in response to water depths. *Environmental and Experimental Botany*, 2016, **122**: 94-99. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2015.09.009.
- [50] Lin C, Han CM, Pan H *et al.* Effects of different light intensity on growth of the eight submerged plants. *Environmental Engineering*, 2016, **34**(7): 16-19. [林超, 韩翠敏, 潘辉等. 不同光照条件对8种沉水植物生长的影响. 环境工程, 2016, **34**(7): 16-19.]
- [51] Jian MF. Research on distribution characteristics of the submerged plants and its environmental impact factors in some wetlands of Poyang Lake [Dissertation]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2015. [简美锋. 鄱阳湖湿地沉水植物的分布特征及其环境影响因子研究[学位论文]. 南昌: 江西师范大学, 2015.]
- [52] Körner S, Das SK, Veenstra S *et al.* The effect of pH variation at the ammonium/Ammonia equilibrium in wastewater and its toxicity to *Lemna gibba*. *Aquatic Botany*, 2001, **71**(1): 71-78. DOI: 10.1016/S0304-3770(01)00158-9.
- [53] Chen G, Long X, Li XY *et al.* Effects of pH on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characters in *Ceratophyllum demersum* L. *Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Science Edition*, 2015, **36**(1): 65-71. [陈刚, 龙茜, 李谢颖等. 不同 pH 值对金鱼藻光合作用及叶绿素荧光特性的影响. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2015, **36**(1): 65-71.]
- [54] Vestergaard O, Sand-Jensen K. Alkalinity and trophic state regulate aquatic plant distribution in Danish lakes. *Aquatic Botany*, 2000, **67**(2): 85-107. DOI: 10.1016/S0304-3770(00)00086-3.
- [55] Jin Y, Tie C, Yin LP *et al.* Comparison between analysis methods of chlorophyll a for eutrophic lakes. *Environmental Science and Technology*, 2013, **36**(10): 137-141. [金玉, 铁程, 殷丽萍等. 富营养化湖泊叶绿素 a 分析方法比较研究. 环境科学与技术, 2013, **36**(10): 137-141.]
- [56] Su HJ, Wu Y, Xia WL *et al.* Community level stoichiometric characteristics of submerged macrophytes and their influ- enc-

- ing factors in the mid-lower Yangtze lakes. *J Lake Sci*, 2017, **29**(2): 430-438. DOI: 10.18307/2017.0219. [苏豪杰, 吴耀, 夏午来等. 长江中下游湖泊群落水平下沉水植物碳、氮、磷化学计量特征及其影响因素. 湖泊科学, 2017, **29**(2): 430-438.]
- [57] Guo CJ, Zhou WB. Eutrophic status in the aquaculture water around Poyang Lake and its effects on the water environment. *Journal of Nanchang University: Natural Science*, 2012, **36**(4): 380-384. [郭春晶, 周文斌. 鄱阳湖周边几种养殖水体的富营养化现状及对水环境影响. 南昌大学学报:理科版, 2012, **36**(4): 380-384.]
- [58] Zhu GW, Xu M, Zhu MY *et al.* Changing characteristics and driving factors of trophic state of lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River in the past 30 years. *J Lake Sci*, 2019, **31**(6): 1510-1524. DOI: 10.18307/2019.0622. [朱广伟, 许海, 朱梦圆等. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1510-1524.]
- [59] Hu GW, Zhang M, Liu Z *et al.* Analysis of water quality change and its formation mechanism of Dongting Lake. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, **30**(3): 39-45. [胡光伟, 张明, 刘珍等. 洞庭湖水质变化及其形成机制分析. 水资源与水工程学报, 2019, **30**(3): 39-45.]
- [60] Guo J, Lian H, Li LQ *et al.* Pollution status and source analysis of the water environment in Dongting Lake. *Journal of Hydroecology*, 2019, **40**(4): 1-7. [郭晶, 莲花, 李利强等. 洞庭湖水质污染状况及主要污染物来源分析. 水生态学杂志, 2019, **40**(4): 1-7.]
- [61] Li W. The research on purification effect of 6 common submerged plants on eutrophic water in Hunan Province [Dissertation]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2018. [李威. 6种湖南常见沉水植物对富营养化废水净化效果研究 [学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018.]
- [62] Wang B, Li W. Physiological reactions of *Potamogeton malaianus* to different N and P concentrations in the growth medium. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(10): 1616-1621. [王斌, 李伟. 不同 N、P 浓度条件下竹叶眼子菜的生理反应. 生态学报, 2002, **22**(10): 1616-1621.]
- [63] Li L, Liao RH, Niu Y *et al.* Effects of sediments with different characteristics on restoration of submerged macrophytes. *Ecology and Environment*, 2010, **19**(11): 2680-2685. [李垒, 廖日红, 牛影等. 不同特性底质对沉水植物恢复生长的影响. 生态环境学报, 2010, **19**(11): 2680-2685.]
- [64] Wang ZH, Peng YL, Xu ZL *et al.* Diversity of wild plants in the wetland of West Dongting Lake. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2012, **40**(3): 6-11. [王朝晖, 彭友林, 徐兆林等. 西洞庭湖湿地野生植物的多样性. 贵州农业科学, 2012, **40**(3): 6-11.]
- [65] Editorial Board of Flora Reipublicae Popularis Sinicae, Chinese Academy of Sciences ed. Flora Reipublicae Popularis Sinicae. Beijing: Science Press, 2004. [中国科学院《中国植物志》编辑委员会. 中国植物志. 北京: 科学出版社, 2004.]
- [66] Hou ZY, Xie YH, Zhao QH *et al.* Status, utilization and conservation of plant resources in Dongting Lake wetlands. *Research of Agricultural Modernization*, 2013, **34**(2): 181-185. [侯志勇, 谢永宏, 赵启鸿等. 洞庭湖湿地植物资源现状及保护与可持续利用对策. 农业现代化研究, 2013, **34**(2): 181-185.]
- [67] Yin J, Yang F, Zhang YM *et al.* Study on adaptability of two submerged macrophytes for wind-induced wave and high water level stress. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(2): 805-813. [尹杰, 杨飞, 张毅敏等. 两种沉水植物对风浪及持续高水位胁迫的适应性研究. 环境科学学报, 2018, **38**(2): 805-813.]
- [68] Feng DD, Guan L, Shi LL *et al.* Impact of autumn hydrologic regime on plants in beach and distribution of populations of wintering lesser white-fronted goose in east Dongting Lake. *Wetland Science*, 2014, **12**(4): 491-498. [冯多多, 关蕾, 史林鹭等. 东洞庭湖秋季水文情势对洲滩植物及越冬稳定期小白额雁种群分布影响. 湿地科学, 2014, **12**(4): 491-498.]
- [69] Shi LL, Jia YF, Zuo AJ *et al.* Dynamic change of vegetation cover and productivity of Poyang Lake wetland based on MODIS EVI time series. *Biodiversity Science*, 2018, **26**(8): 828-837. [史林鹭, 贾亦飞, 左奥杰等. 基于 MODIS EVI 时间序列的鄱阳湖湿地植被覆盖和生产力的动态变化. 生物多样性, 2018, **26**(8): 828-837.]