

doi: 10.7541/2019.164

## 长江流域水生植物多样性格局与保护

吴志刚<sup>1</sup> 熊文<sup>2</sup> 侯宏伟<sup>1</sup>

(1. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072; 2. 广东海洋大学水产学院, 湛江 524088)

**摘要:** 为对长江流域尺度的多样性进行分析, 研究以不同时期发表的长江流域水生植物相关文献、专著等为基础资料, 选取了22种环境因子, 分析了长江流域水生植物多样性时空格局, 并应用MaxEnt软件建立物种分布模型预测流域水生植物适生区及主要影响变量。结果表明长江流域已报道分布的水生维管植物共有298种, 隶属于52科、121属, 占我国水生维管植物物种数的57.6%, 是我国水生植物多样性重要区域, 其中长江中游流域的物种多样性最高。海拔和土地利用类型是影响长江流域水生植物空间分布格局的主要因素。水系对于水生植物的隔离效应较小, 而河湖一体的特征使得中下游各流域物种组成较为相近。MaxEnt模型结果表明洞庭湖、鄱阳湖和太湖以及连接三湖的中游干流、下游干流流域是水生植物的适生区域。过去的半个多世纪, 长江流域水生植被出现了明显的退化, 建议建立以“两湖”为核心的长江中下游整体保护体系, 设立或更新现有保护区和管理区时应兼顾水生植被的保护。

**关键词:** 长江流域; 水生植物; 多样性格局; MaxEnt模型; 生态保护

**中图分类号:** S937      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-3207(2019)增-0027-15

水生植物是水生生态系统的重要组成部分<sup>[1,2]</sup>, 是水中氧气和能量的主要生产者, 是水生生态系统中食物链的基础和能量流动的重要环节<sup>[2,3]</sup>, 其构成的复杂空间生境, 为生活在水体及其周围的生物提供栖息地或掩体<sup>[4-6]</sup>, 同时参与湿地水文情势调节、稳定沉积物的形成和物质循环<sup>[1,2,7,8]</sup>, 是湖泊稳态维持和健康生态服务功能的保障<sup>[9-12]</sup>。

Cook<sup>[13]</sup>在其专著《世界水生植物》中认为“水生维管束植物是指所有蕨类和种子植物亚门中光合作用器官永久或季节性沉没于水中或浮于水面的植物”。该定义囊括了能够偶然生长在水中或者只有某个阶段依赖于水生生境(如幼年生长期)的植物(如: 沼生植物), 而将水生植物与光合作用部分可耐受长期淹没的陆生植物区分开来, 这也是目前最为广泛接受的关于水生植物的定义。根据Cook<sup>[13]</sup>的描述, 世界上共有87科、407属可被认为是水生植物, 其中蕨类植物亚门中有水生植物9科、11属, 其余均为被子植物。而中国植物志及

其英文修订版(Flora of China)的记录中可归入水生维管植物共517种, 隶属于67科、169属。我国幅员辽阔, 无数河流、湖泊、沼泽等湿地星罗棋布, 为各异的水生植物提供了理想栖息场所。长江是世界第三长河, 也是我国最大河流, 发源于青藏高原的格拉丹东山, 自西向东流经我国11个省、自治区和直辖市, 最后从上海汇入东海, 全长6300 km, 流域面积近200万km<sup>2</sup>, 占我国国土面积的约20%。长江拥有大小支流3000多条, 湖泊4000余个, 构成完整而庞大的水系网络<sup>[14]</sup>。由于其独特的水文和水资源特征、生态功能、历史变迁、人类活动等因素, 长江及其湖泊被世界自然基金会(the World Wildlife Fund, WWF)列为优先保护生态区。

我国学者对长江流域水生植物的关注始于20世纪50年代起对武汉东湖、梁子湖、洪湖等江汉平原湖泊的水生植被研究<sup>[15-18]</sup>。此后的半个世纪, 包括鄱阳湖<sup>[19-21]</sup>、洞庭湖<sup>[22,23]</sup>、太湖<sup>[24-26]</sup>、巢湖<sup>[27,28]</sup>等在内的长江流域代表性湖泊很多都进

收稿日期: 2018-04-27; 修订日期: 2018-06-18

基金项目: 中国科学院特色研究所项目(支撑长江经济带可持续发展的生态环境保护战略对策研究)资助 [Supported by the Programme for Feature Institutes of Chinese Academy of Sciences (the Strategic Countermeasures of Ecological and Environmental Protection in Supporting Sustainable Development of the Yangtze Economic Belt)]

作者简介: 吴志刚(1987—), 男, 湖北武汉人; 博士研究生; 主要从事植物生态学研究。E-mail: wuzg@ihb.ac.cn

通信作者: 侯宏伟(1968—), 男, 河南南阳人; 博士研究生; 主要从事植物生理学研究。E-mail: houhw@ihb.ac.cn

行过植被调查或是长期监测。然而,至今尚缺少整个流域尺度上的多样性相关综述以及格局分析。了解植物多样性格局有助于人们理解植物群落动态并制定有针对性的保护策略<sup>[29]</sup>,尤其是在现时将长江及其流域生态环境保护作为长江经济带建设的基础和重要的支撑保障的时代背景下。目前只有Li等<sup>[30]</sup>(中国西北干旱区)和Viana等<sup>[31]</sup>(欧洲)少数研究开展过大尺度的水生植物多样性格局及成因分析,水环境、全球变化和人类活动等元素都被认为可能影响水生植物的多样性水平及分布。本文旨在通过收集长江流域水生植物多样性历史文献资料,分析长江流域水生植物多样性格局、潜在分布区和影响水生植物多样性的环境因素,以此为基础对长江流域水生植物多样性保护提出建议。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

本文综述了不同时期以长江流域湖泊、河流、自然保护区和行政区等为研究对象开展的水生植物多样性调查和分析工作,涵盖了包括鄱阳湖、洞庭湖、太湖、巢湖等大型湖泊以及云南高原、江汉平原湖群在内的长江流域湖泊47个,主要支流7条,自然保护区9个以及行政县市54个(图1),数据类型主要包括研究性论文、学位论文、综述、(地方)植物志、专著和在线数据(如:国家地球系统科学数据共享服务平台,湖泊——流域科学数据库, <http://lake.geodata.cn/>; 中国数字植物标本馆, <http://www.cvh.ac.cn/>)等。

为理解影响长江流域水生植物分布的环境因素,分析水生植物的适生分布区,本研究使用气候数据(BIO1-BIO19, <http://www.worldclim.org>)、地形数据(海拔、坡度、坡向等, <http://www.diva-gis.org>)、土地利用类型和土壤数据(Harmonized world

soil database version 1.1)作为环境变量。利用PASW Statistics 18软件对各类环境变量进行Spearman相关分析,对相关性较高(Correlation coefficient >0.75)的变量进行筛选,保留主成分分析中载荷值较高的变量,最终共有22个环境变量用于后续分析,分别是年平均气温(BIO1 - Annual Mean Temperature)、月均日温差(BIO2 - Mean diurnal range)、月均日温差和年均极温差比值(BIO3 - Isothermality)、温度季度变化(BIO4 - Temperature seasonality)、最暖季度均温(BIO10 - Mean Temperature of Warmest Quarter)、最冷季度均温(BIO11 - Mean temperature of coldest quarter)、年降水(BIO12 - Annual precipitation)、降水量季度变化(BIO15 - Precipitation seasonality)、土壤分类(soil\_1)、表层土壤砾石含量(soil\_2)、表层土壤砂石含量(soil\_3)、表层土壤淤泥含量(soil\_4)、表层土壤黏粒含量(soil\_5)、表层土壤容重(soil\_8)、表层土壤有机碳含量(soil\_9)、表层土壤酸碱度(soil\_10)、表层土壤碱度(soil\_17)、表层土壤盐度海拔(soil\_18)、海拔(elevation)、坡度( $0\% \leq \text{slope} \leq 0.5\%$ 、 $0.5\% < \text{slope} \leq 2\%$ 、 $2\% < \text{slope} \leq 5\%$ 、 $5\% < \text{slope} \leq 10\%$ 、 $10\% < \text{slope} \leq 15\%$ 、 $15\% < \text{slope} \leq 30\%$ 、 $30\% < \text{slope} \leq 45\%$ 、 $\text{Slope} > 45\%$ )、坡向(North:  $0^\circ < \text{aspect} \leq 45^\circ$  or  $315^\circ < \text{aspect} \leq 360^\circ$ 、East:  $45^\circ < \text{aspect} \leq 135^\circ$ 、South:  $135^\circ < \text{aspect} \leq 225^\circ$ 、West:  $225^\circ < \text{aspect} \leq 315^\circ$ 、Undefined)和土地利用类型(Landuse, 共分为森林、灌木、草地、湿地、水体、苔原、耕地、人造地表、裸地、冰川、永久积雪和海域共11个类型)。

### 1.2 地理分区

目前长江流域地理分区方式以水利部长江水利委员会<sup>[32]</sup>所划定的上中下游三部分共12个子流域最为常用,分区以水系为原则,多用于鱼类研



图1 长江流域水生维管植物样点分布图

Fig. 1 Sample sites of aquatic vascular plant in the Yangtze River Basin

究。由于水生植物一般分布于湖沼湿地而少见于大江大河,气候、地形地貌对于水生植物空间格局同样具有显著的影响,因此我们对自然地理因素相对复杂的长江上游分区进行了调整,结合气候类型将金沙江流域细分为以高原气候为主的金沙江上游流域、雅砻江流域以及以温带气候为主的金沙江下游流域,由于研究数据较少,河源区与金沙江上游合并进行分析讨论,即长江流域分为13个亚区,分别是河源区及金沙江上游流域亚区(HW&UJS)、雅砻江流域亚区(YLS)、金沙江下游流域亚区(LJS)、岷沱江流域亚区(MTS)、嘉陵江流域亚区(JLS)、乌江流域亚区(WS)、上游干流流域亚区(UMS)、中游干流流域亚区(MMS)、汉江流域(HS)、洞庭湖流域亚区(DTS)、鄱阳湖流域亚区(PYS)、下游干流流域(LMS)和太湖流域亚区(图1)。

1.3 数据分析

原始的水生植物多样性数据均是以湖泊湿地或行政区域为研究单位,置于不同的流域分区或时间序列中来进行比较分析。不同分区物种组成的差异应用PASW Statistics 18软件计算Jaccard相似性指数<sup>[33]</sup>来反应,基于相似性矩阵的聚类分析通过

ntsys软件进行计算。

通过MaxEnt 3.3软件,根据长江流域水生植物分布点和所筛选的环境变量进行分布区模型建立。随机选取25%数据用于模型验证,环境变量评价通过Jackknife检验进行,利用ROC(The receiver operating characteristic curve)和AUC(Area under the curve)值来评价模型精度,AUC值小于0.6则建模失败,越接近1表明模型精度越高。

2 结果

2.1 长江流域水生植物多样性

长江流域共分布有52科、121属、298种水生植物(表1),分别占我国水生植物科、属和种数量的77.6%、71.6%和57.6%,是我国水生植物多样性的中心区域。按生活型,挺水植物共有201种,占总数的67.4%,其中39种挺水植物均可以以沉水或浮叶形态完成生活史,沉水、浮叶和自由漂浮植物各有64种、23种和11种。长江流域分布中国特有种共18种,但并无流域特有种。在科内组成上,禾本科(Poaceae)和莎草科(Cyperaceae)所包含的属和种数量最多,2科植物总和占流域水生植物总属和种数的28.1%和24.2%,其中绝大部分植物为挺水植

表1 长江流域水生植物各科属的种类数及分布  
Tab. 1 List and distribution of aquatic vascular plants in the Yangtze River Basin

| 科<br>Family          | 属<br>Genus        | 物种数<br>Number of species | HW&UJS | YLS | MTS | JLS | WS | LJS | HS | DTS | PYS | MMS | LMS | TS |
|----------------------|-------------------|--------------------------|--------|-----|-----|-----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|----|
| 满江红科Azollaceae       | 满江红属Azolla        | 2                        | 1      | 1   | 0   | 0   | 1  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
| 木贼科Equisetaceae      | 木贼Equisetum       | 1                        | 0      | 0   | 1   | 0   | 0  | 1   | 1  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0  |
| 水韭科Isoetaceae        | 水韭属Isoetes        | 5                        | 1      | 0   | 0   | 0   | 0  | 1   | 0  | 1   | 1   | 0   | 0   | 0  |
| 苹科Marsileaceae       | 苹属Marsilea        | 2                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 1  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
| 水蕨科Parkeriaceae      | 水蕨属Ceratopteris   | 2                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
| 水龙骨科Polypodiaceae    | 星蕨属Microsorium    | 1                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 0   | 0  | 1   | 1   | 0   | 0   | 0  |
| 槐叶苹科Salvinaceae      | 槐叶苹属Salvinia      | 1                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
| 爵床科Acanthaceae       | 水蓼属Hygrophila     | 1                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 1   | 0  | 1   | 1   | 0   | 0   | 1  |
| 泽泻科Alismataceae      | 泽泻属Alisma         | 4                        | 1      | 1   | 1   | 0   | 1  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
|                      | 泽苔草属Caldesia      | 2                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 0   | 0  | 1   | 1   | 0   | 0   | 0  |
|                      | 毛茛泽泻属Ranalisma    | 1                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 0   | 0  | 1   | 1   | 0   | 0   | 0  |
|                      | 慈姑属Sagittaria     | 5                        | 1      | 1   | 0   | 1   | 1  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
| 苋科Amaranthaceae      | 莲子草属Alternanthera | 2                        | 0      | 1   | 0   | 1   | 0  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
| 水蕹科Aponogetonaceae   | 水蕹属Aponogeton     | 1                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 0   | 0  | 1   | 1   | 0   | 0   | 0  |
| 天南星科Araceae          | 菖蒲属Acorus         | 2                        | 1      | 1   | 0   | 0   | 1  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
|                      | 水芋属Calla          | 1                        | 0      | 1   | 0   | 0   | 0  | 1   | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0  |
|                      | 大藻属Pistia         | 1                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 1   | 0  | 1   | 1   | 0   | 1   | 1  |
| 花蔺科Butomaceae        | 花蔺属Butomus        | 1                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 1   | 0  | 0   | 0   | 0   | 1   | 1  |
| 莼菜科Cabombaceae       | 莼属Brasenia        | 1                        | 0      | 0   | 0   | 1   | 0  | 1   | 0  | 1   | 1   | 0   | 1   | 1  |
|                      | 水盾草属Cabomba       | 1                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 1   | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 1  |
| 水马齿科Callitricheaceae | 水马齿属Callitriche   | 3                        | 1      | 1   | 1   | 0   | 0  | 1   | 0  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |



续表 1

| 科<br>Family              | 属<br>Genus               | 物种数<br>Number of species | HW&UJS | YLS | MTS | JLS | WS | LJS | HS | DTS | PYS | MMS | LMS | TS |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------|-----|-----|-----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|----|
| 灯心草科Juncaceae            | 水鳖属 <i>Hydrocharis</i>   | 1                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 1  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
|                          | 水车前属 <i>Ottelia</i>      | 4                        | 0      | 1   | 0   | 0   | 1  | 1   | 0  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
|                          | 苦草属 <i>Vallisneria</i>   | 3                        | 1      | 1   | 0   | 1   | 0  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
|                          | 灯心草属 <i>Juncus</i>       | 2                        | 1      | 1   | 1   | 0   | 1  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
| 水麦冬科Juncaginaceae        | 水麦冬属 <i>Triglochin</i>   | 1                        | 1      | 1   | 1   | 0   | 0  | 1   | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0  |
| 唇形科Labiatae              | 水蜡烛属 <i>Dysophylla</i>   | 3                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 0   | 0  | 1   | 1   | 1   | 0   | 0  |
|                          | 地笋属 <i>Lycopus</i>       | 2                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 0   | 0  | 1   | 1   | 0   | 0   | 0  |
|                          | 薄荷属 <i>Mentha</i>        | 1                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 1   | 0  | 1   | 1   | 0   | 0   | 1  |
| 浮萍科Lemnaceae             | 浮萍属 <i>Lemna</i>         | 3                        | 1      | 1   | 0   | 1   | 0  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
|                          | 紫萍属 <i>Spirodela</i>     | 2                        | 1      | 1   | 0   | 1   | 1  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
|                          | 无根萍属 <i>Wolffia</i>      | 1                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 0   | 0  | 0   | 1   | 1   | 1   | 1  |
| 狸藻科Lentibulariaceae      | 狸藻属 <i>Utricularia</i>   | 6                        | 1      | 1   | 1   | 0   | 0  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
| 千屈菜科Lythraceae           | 千屈菜属 <i>Lythrum</i>      | 1                        | 0      | 0   | 0   | 1   | 0  | 1   | 0  | 1   | 1   | 0   | 0   | 1  |
|                          | 节节菜属 <i>Rotala</i>       | 2                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 1   | 0  | 1   | 1   | 0   | 0   | 0  |
| 睡菜科Menyanthaceae         | 睡菜属 <i>Menyanthes</i>    | 1                        | 1      | 1   | 0   | 0   | 0  | 1   | 1  | 0   | 1   | 0   | 0   | 0  |
|                          | 苈菜属 <i>Nymphoides</i>    | 5                        | 1      | 1   | 0   | 0   | 1  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
| 茨藻科Najadaceae            | 茨藻属 <i>Najas</i>         | 8                        | 1      | 1   | 0   | 0   | 1  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
| 莲科Nelumbonaceae          | 莲属 <i>Nelumbo</i>        | 1                        | 0      | 1   | 0   | 1   | 0  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
| 睡莲科Nymphaeaceae          | 芡属 <i>Euryale</i>        | 1                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 1   | 0  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
|                          | 萍蓬草属 <i>Nuphar</i>       | 1                        | 0      | 1   | 0   | 0   | 1  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
|                          | 睡莲属 <i>Nymphaea</i>      | 3                        | 0      | 1   | 0   | 1   | 0  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
| 柳叶菜科Onagraceae           | 丁香蓼属 <i>Ludwigia</i>     | 7                        | 0      | 1   | 0   | 1   | 0  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
| 胡麻科Pedaliaceae           | 茶菱属 <i>Trapella</i>      | 1                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 1   | 0  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
| 蓼科Polygonaceae           | 蓼属 <i>Polygonum</i>      | 3                        | 1      | 1   | 1   | 1   | 1  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
|                          | 酸模属 <i>Rumex</i>         | 3                        | 0      | 1   | 0   | 0   | 0  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
| 雨久花科Pontederiaceae       | 凤眼莲属 <i>Eichhornia</i>   | 1                        | 0      | 1   | 0   | 1   | 0  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
|                          | 雨久花属 <i>Monochoria</i>   | 3                        | 1      | 0   | 0   | 0   | 1  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
| 眼子菜科<br>Potamogetonaceae | 眼子菜属 <i>Potamogeton</i>  | 17                       | 1      | 1   | 1   | 1   | 1  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
| 毛茛科Ranunculaceae         | 莨菪眼子菜属 <i>Stuckenia</i>  | 4                        | 1      | 1   | 1   | 1   | 0  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 0   | 1  |
|                          | 水毛茛属 <i>Batrachium</i>   | 3                        | 1      | 1   | 1   | 0   | 0  | 1   | 0  | 1   | 1   | 0   | 0   | 0  |
|                          | 驴蹄草属 <i>Caltha</i>       | 2                        | 1      | 1   | 1   | 0   | 0  | 1   | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0  |
|                          | 碱毛茛属 <i>Halerpestes</i>  | 2                        | 1      | 1   | 1   | 0   | 0  | 1   | 1  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0  |
|                          | 毛茛属 <i>Ranunculus</i>    | 4                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 1  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
| 川蔓藻科Ruppiaceae           | 川蔓藻属 <i>Ruppia</i>       | 1                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0  |
| 三白草科Saururaceae          | 蕺菜属 <i>Houttuynia</i>    | 1                        | 1      | 0   | 1   | 0   | 0  | 1   | 0  | 1   | 1   | 0   | 0   | 1  |
|                          | 三白草属 <i>Saururus</i>     | 1                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 1   | 0  | 1   | 1   | 0   | 0   | 1  |
| 玄参科Scrophulariaceae      | 蛇眼属 <i>Dopatrium</i>     | 1                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 0   | 0  | 0   | 1   | 0   | 0   | 0  |
|                          | 水八角属 <i>Gratiola</i>     | 1                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 0   | 0  | 0   | 1   | 0   | 1   | 0  |
|                          | 石龙尾属 <i>Limnophila</i>   | 5                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
|                          | 水茫草属 <i>Limosella</i>    | 1                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 0   | 0  | 0   | 1   | 0   | 0   | 0  |
|                          | 母草属 <i>Lindernia</i>     | 1                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 1   | 1  | 1   | 1   | 0   | 0   | 1  |
| 菱科Trapaceae              | 婆婆纳属 <i>Veronica</i>     | 4                        | 1      | 1   | 1   | 0   | 1  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
|                          | 菱属 <i>Trapa</i>          | 2                        | 0      | 1   | 0   | 0   | 0  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
| 香蒲科Typhaceae             | 黑三棱属 <i>Sparganium</i>   | 6                        | 1      | 1   | 1   | 0   | 0  | 1   | 1  | 1   | 1   | 0   | 1   | 0  |
|                          | 香蒲属 <i>Typha</i>         | 6                        | 1      | 1   | 0   | 1   | 1  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
| 伞形科Umbelliferae          | 积雪草属 <i>Centella</i>     | 1                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 1   | 1  | 0   | 1   | 1   | 0   | 1  |
|                          | 毒芹属 <i>Cicuta</i>        | 1                        | 1      | 0   | 0   | 0   | 0  | 0   | 0  | 1   | 0   | 0   | 0   | 0  |
|                          | 水芹属 <i>Oenanthe</i>      | 5                        | 0      | 1   | 1   | 1   | 1  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
|                          | 泽芹属 <i>Sium</i>          | 1                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0  |
| 黄眼草科Xyridaceae           | 黄眼草属 <i>Xyris</i>        | 1                        | 0      | 0   | 0   | 0   | 0  | 0   | 0  | 0   | 1   | 0   | 0   | 0  |
| 角果藻科Zannichelliaceae     | 角果藻属 <i>Zannichellia</i> | 1                        | 1      | 1   | 1   | 0   | 1  | 1   | 0  | 0   | 1   | 1   | 0   | 1  |

物,而眼子菜科(Potamogetonaceae)和水鳖科(Hydrocharitaceae)中沉水、浮叶或自由漂浮等水生植物种类最多,分别为21种和15种(表1)。

长江流域分布有19科25属的珍稀濒危水生植物47种(见附录1),占长江流域水生植物总数的16.1%,全国珍稀濒危水生植物总数的46.1%。其中国家Ⅰ级保护植物5种,Ⅱ级保护植物12种;列入IUCN濒危物种红色名录中濒危(EN)以上级别植物15种。这些植物多在长江中游流域分布,仅鄱阳湖流域亚区就记录有珍稀濒危水生植物分布33种,而如莼菜(*Brasenia schreberi* J. F. Gmel.)、莲(*Nelumbo nucifera* Gaertn.)、萍蓬草(*Nuphar pumila* (Timm.) Dc.)、细果野菱(*Trapa incisa* Sieb. & Zucc.)等植物受人工栽培的影响分布区相对广布。

整体来看,长江中游的物种丰富度最高,达248种,占全流域物种数的72.5%,其中仅鄱阳湖流域就有195种水生植物分布,是全流域水生植物物种数量最多的亚区(图2)。流域面积较大的长江上游物种丰富度仅次于长江中游,共有210种,其中亚热带气候为主的金沙江下游流域记录有147种水生植物分布,而上游其他水系的水生植物种类相对较少(图2)。在长江上、中、下游段均有分布的水生植物共133种,占总物种数的44.6%,其中67种为沉水、浮叶或自由漂浮植物,表明真性水生植物中广布物种占比更高。

Jaccard物种相似性系数对长江流域各亚区进行聚类分析,结果表明整个流域可划分为两部分,其中河源区及金沙江上游流域、雅砻江流域和岷沱江流域等高寒地区物种组成相似度更高,而金沙江下游流域与长江中下游各水系聚为一类(图3)。

由于乌江流域、嘉陵江流域和长江上游干流流域的水生植物多样性研究较为匮乏,未纳入聚类分析。Maxent模型中Jackknife检验结果也同样表明海拔是影响长江流域水生植物分布的最重要因素(表2)。

## 2.2 长江流域水生植物适生区域

长江流域的水生植物在整个区域有广泛的适生分布区,Maxent分析中ROC评价结果表明分布模型预测效果较为理想,长江流域水生植物/珍稀濒危水生植物的训练数据和验证数据的AUC值分别是0.956和0.859、0.964和0.899(图4)。

潜在分布概率结果同样表明水生植物在长江流域有较为广泛的适生区( $P>0.5$ ),其中洞庭湖流域、鄱阳湖流域和太湖流域的湖区以及连接三湖的中游干流、下游干流流域是水生植物的较适生区域( $P>0.7$ ),此外金沙江下游和汉江流域的部分区域也同样较为适于水生植物的分布(图5)。这些区域同样是全流域水生植物的多样性热点区域,而水生植物在高海拔地区的适生度较低。

## 2.3 长江流域的水生植物多样性变化

自20世纪50年代起至今,长江流域不同湖泊水生植物多样性呈现出不同的趋势,但整体上物种丰富度均呈下降趋势,尤其是受人为干扰较大的湖泊,如滇池、洪湖、东湖、洞庭湖等,而开发较小、位于经济欠发达地区或较早开展保护工作的湖泊如泸沽湖、邛海、梁子湖等物种丰富度较为稳定。水生植物群落结构也有较为明显的变化,有些湖泊受到了湖泊水质、水文情势和开发利用强度变化的影响,经历了较为复杂而剧烈的变化。而更多湖泊经历了水生植被的极度萎缩,例如长江中游湖泊

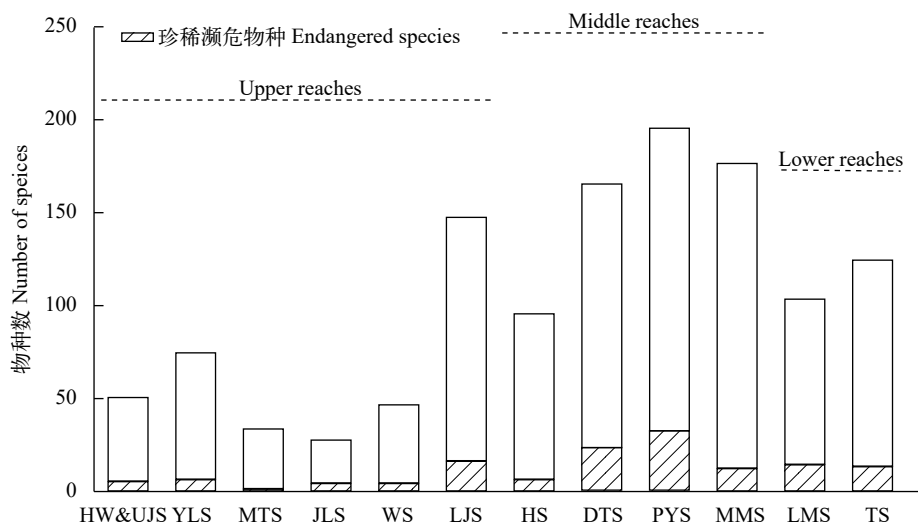


图2 长江流域各亚区水生植物的物种数

Fig. 2 Species number of aquatic vascular plants in the subregions of the Yangtze River Basin

洪湖、长湖、斧头湖、大通湖等植被覆盖率从20世纪50年代接近100%到近年来不足10%(图 6), 单位面积生物量下降也十分明显, 洪湖、梁子湖、斧头湖、西凉湖等都从20世纪90年代以前的峰值每平方米平均鲜重4—6.39 kg, 下降至2000年以后每平方米0.406—1.47 kg。水生植被萎缩首当其冲的是沉水植被的退化(图 7), 自20世纪90年代起, 长

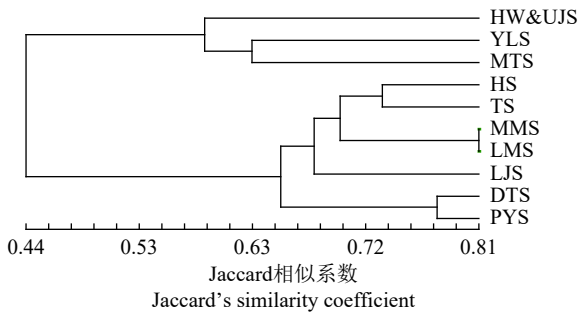


图3 长江流域各亚区水生植物物种相似性

Fig. 3 Similarity of aquatic flora among the subregions in the Yangtze River Basin

表2 影响长江流域水生植物分布格局的环境变量及其贡献度  
Tab. 2 Contributions of environmental variables to spatial pattern of aquatic vascular plants in the Yangtze River Basin

| 环境变量<br>Environmental variable | 缩写<br>Code | 贡献率Percent contribution |                              |
|--------------------------------|------------|-------------------------|------------------------------|
|                                |            | 所有物种<br>All species     | 珍稀濒危物种<br>Endangered species |
| 年平均气温                          | BIO1       | 0                       | 0                            |
| 月均日温差                          | BIO2       | 0.7                     | 1.1                          |
| 月均日温差和年均极温差比值                  | BIO3       | 4.6                     | 4.1                          |
| 温度季度变化                         | BIO4       | 2.2                     | 3.4                          |
| 最暖季度均温                         | BIO10      | 1                       | 6.6                          |
| 最冷季度均温                         | BIO11      | 1.2                     | 2                            |
| 年降水                            | BIO12      | 0.3                     | 0                            |
| 降水量季度变化                        | BIO15      | 1.4                     | 0.1                          |
| 土壤分类                           | Soil_1     | 0                       | 0                            |
| 表层土壤砾石含量                       | Soil_2     | 0.3                     | 1.7                          |
| 表层土壤砂石含量                       | Soil_3     | 0                       | 0                            |
| 表层土壤淤泥含量                       | Soil_4     | 0                       | 0.1                          |
| 表层土壤黏粒含量                       | Soil_5     | 0                       | 0                            |
| 表层土壤容重                         | Soil_8     | 0.5                     | 0.8                          |
| 表层土壤有机碳含量                      | Soil_9     | 0.8                     | 0.9                          |
| 表层土壤酸碱度                        | Soil_10    | 1.7                     | 2.8                          |
| 表层土壤碱度                         | Soil_17    | 0.3                     | 0.2                          |
| 表层土壤盐度海拔                       | Soil_18    | 1.7                     | 1.7                          |
| 海拔                             | Elevation  | 61.8                    | 60.5                         |
| 坡度                             | Slope      | 4.6                     | 3.8                          |
| 坡向                             | Aspect     | 5.9                     | 2.2                          |
| 土地利用类型                         | Landuse    | 11                      | 8                            |

江流域众多湖泊都经历了这一过程, 如程海、滇池、东湖、巢湖、西太湖、武山湖、菜子湖等, 沉水植被几近消失, 呈现出草型向藻型湖泊生态系统演变, 拉市海、洪湖、长湖、斧头湖、龙感湖等则从原来以沉水植物群落的优势类型逐步演替为以挺水植物+漂浮浮叶植物群落占优, 此外群落类型的减少、群落结构的简化(共优群落演替为单优群落、伴生种类减少等)也成为长江中下游湖泊的共性趋势。仅是少有的一些小型浅水湖泊如草海、沉湖、白莲湖、西凉湖、平天湖、升金湖、泊湖等尚还保留着一定面积的沉水植被, 但相比20世纪中期也出现了不同程度的退化<sup>[15—21, 24—26, 34—62]</sup>。

长江流域水生植物多样性的变化还体现在外来水生植物种群的扩张(图 7)。其中空心莲子草

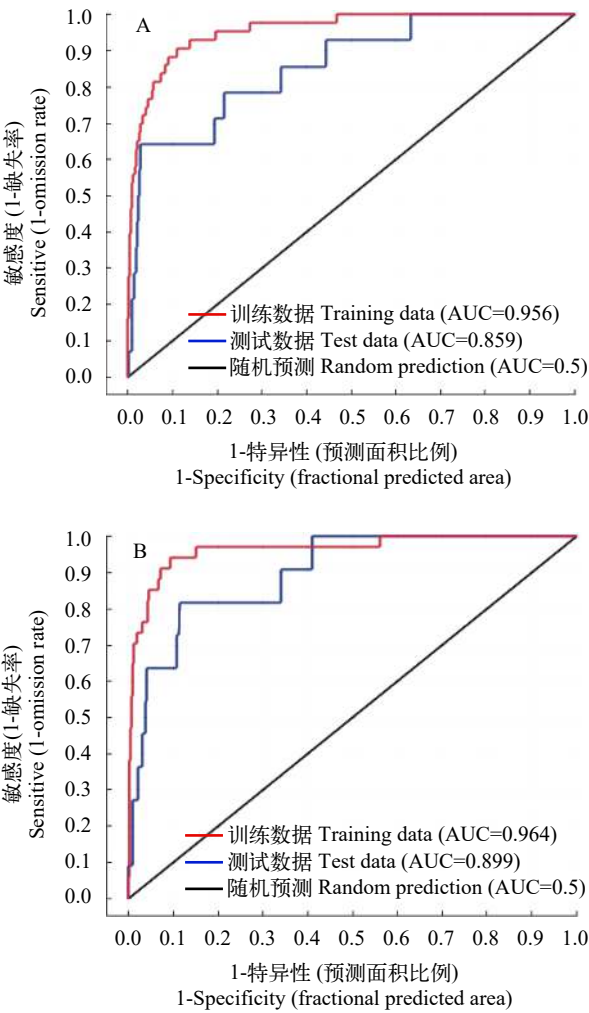


图4 MaxEnt模型受试者工作特征曲线(A. 长江流域所有水生植物; B. 长江流域珍稀濒危水生植物, AUC值为曲线下面积)

Fig. 4 The receiver operating characteristic curve (ROC) of MaxEnt model for the potential distribution of aquatic vascular plants in the Yangtze River Basin (A. all species; B. endangered species. AUC is the area under the curve)

(*Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb.)和凤眼莲(*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms)在青藏高原以外区域十分常见,近20年来种群扩张明显,已成为长江流域很多湖泊中的优势种群(图7)。而其他入侵水生植物,如水盾草(*Cabomba caroliniana* A.

Gray),以景观用途引入后逸生,主要分布在长三角地区,在阳澄湖、东太湖等地已成为优势种;而大藻(*Pistia stratiotes* L.)以长江以南为高威胁区,易在河道缓流区形成单优群落,在太湖、滇池湖滨区已形成优势群落类型,其分布有北移趋势。

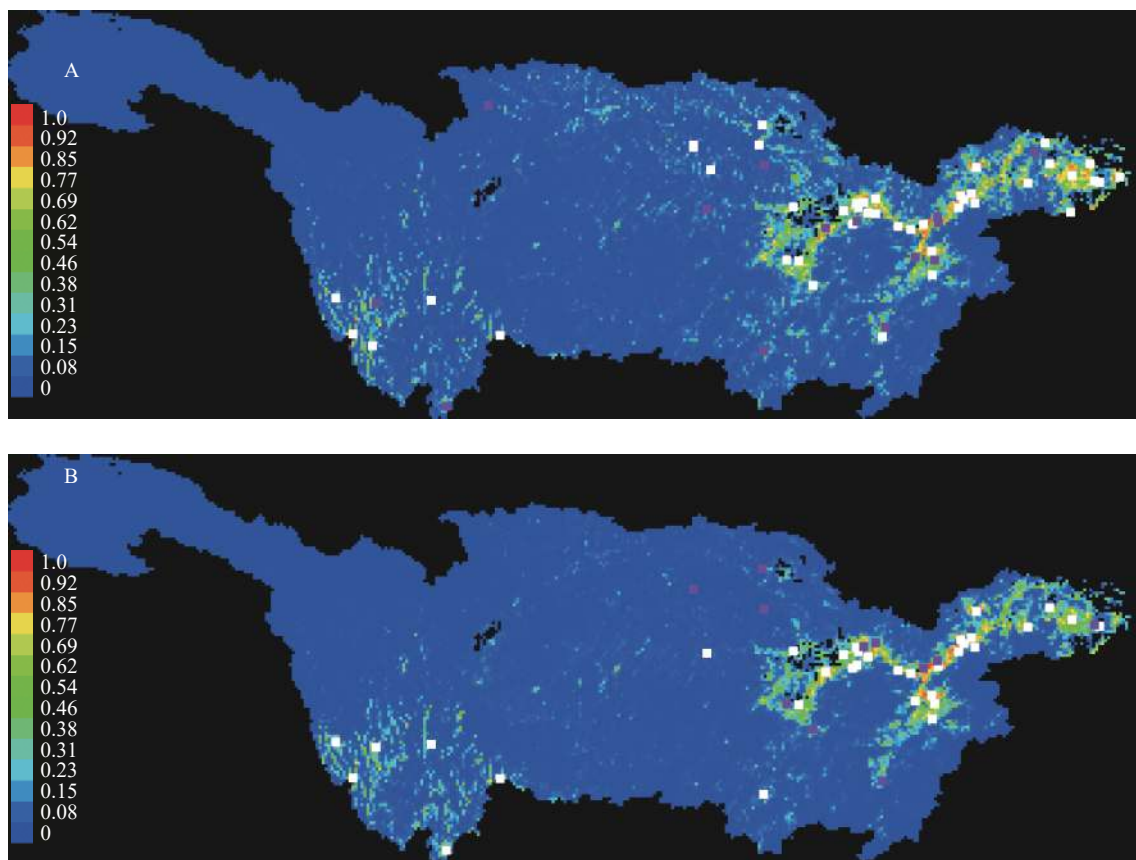


图5 基于MaxEnt模型的长江流域水生植物潜在分布概率图(A. 所有物种; B. 珍稀濒危物种)

Fig. 5 Probability of potential distribution for the aquatic vascular plants in the Yangtze River Basin based on the MaxEnt model (A. All species; B. endangered species)

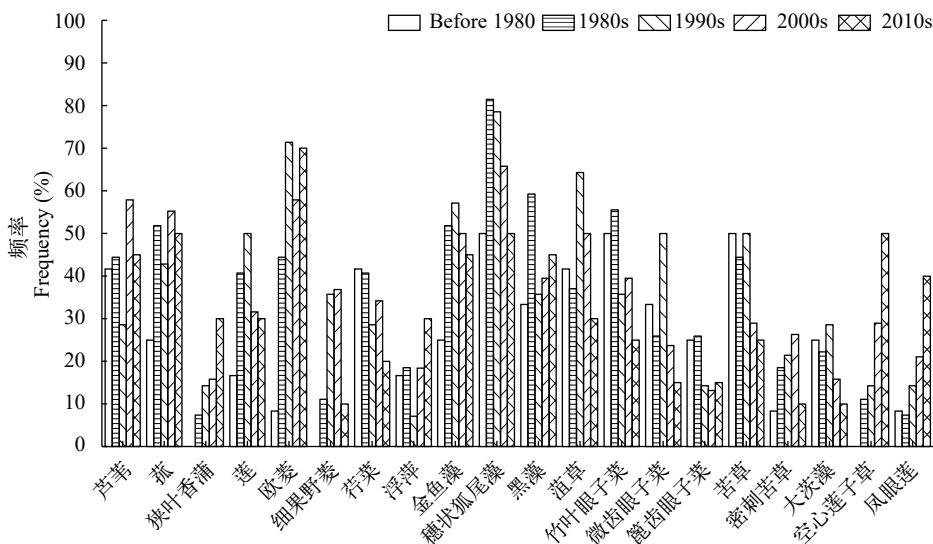


图6 1950年代至今长江流域水生植物优势种频度变化

Fig. 6 Changes of observed frequency of dominant aquatic plants in the Yangtze River Basin since 1950s

### 3 讨论

#### 3.1 长江流域水生植物多样性的空间格局

由于我国水生植物多具有世界分布或隐域性等广布特征, 使得以亚热带和暖温带气候为主且湿地密布的长江流域成为我国水生植物分布的热点区域, 本研究表明我国半数以上的水生植物在长江流域都有分布, 长江中下游尤其洞庭湖、鄱阳湖、太湖及干流原通江湖泊流域是长江流域水生植物多样性中心(图2)。

长江流域水生植物的分布范围往往比较广泛, 很多物种都能在除青藏高原以外的流域大部分地区分布, 这些物种多为世界分布或洲际分布<sup>[63]</sup>, 金鱼藻(*Ceratophyllum demersum* L.)、穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum* L.)、黑藻(*Hydrocharis dubia* (Bl.) Backer)、浮萍(*Lemna minor* L.)、芦苇(*Phragmites australis* (Cavanilles) Trin. ex Steudel)等在除两级外各大洲均有分布。水环境的相对同质性、水生植物的克隆繁殖、多样而高效的传播方式以及强大的表形可塑性都是水生植物可以广泛分布的重要因素<sup>[64]</sup>。气候等生态因素是影响和限制植物分布的关键<sup>[65]</sup>, 水生植物也同样表现出一定的地带性<sup>[66]</sup>, 例如水鳖科和水蕹科具有更明显的热带属性, 在低纬度地区具有更高的物种多样性, 而眼子菜科、黑三棱科、水马齿科等世界广布科则包含了更多温带属性物种。大部分科、属的水生植物不会严格的分布于一个温度带, 但海拔显著影响着水生植物流域空间分布格局(表2), 高原地区特殊的环境(如温度、降水、气压、辐射、贫营养、景观特征等)极大地影响着植物的生存、生长和繁殖, 演化出一些具有特殊形态结构或者生理机

制以适应严酷环境的高寒分布类群<sup>[67, 68]</sup>, 这也使得在长江上游的河源区、金沙江上游流域、雅砻江流域和岷沱江流域等高海拔地区与其他亚区在物种组成的相似度上有较明显的差异, 而同处长江上游但以亚热带气候为主的金沙江下游流域与长江中下游各亚区的水生植物种类更为相近(图3)。

水系隔离对于水生植物传播影响较为有限, 很多研究都表明水生植物跨流域的传播是广泛存在的<sup>[69]</sup>, 这种长距离传播可能是借助水生动物(如水禽等)的携带<sup>[70]</sup>, 在高原地区可能对这种传播方式更为依赖<sup>[71]</sup>。借助水势的局地传播是水生植物扩散的主要方式, 尤其是无性繁殖体, 如断枝、鳞芽等<sup>[72, 73]</sup>, 因此水系的连通会极大地促进水生植物的扩散。长江中下游湿地具有“江湖一体”的特征<sup>[39]</sup>, 例如: 洞庭湖流域河网密布, 各湖泊及主要河流之间都有渠道相接, 而江汉平原作为长江、汉江冲积形成的泛滥平原, 是历史上著名的云梦泽。长江中下游湿地的连通性促进了各亚区内部以及之间的种群交流, 此外在长江中下游很多大型湿地作为水禽等水生动物重要的栖息和越冬地, 其活动可能促进水生植物多向化和长距离的传播<sup>[74]</sup>, 从而影响流域水生植物空间分布格局, 使得除高寒地区之外的长江流域各区域水生植物物种组成趋于同质化(图3)。

#### 3.2 人为因素对长江流域水生植物多样性的影响

自20世纪50年代起至今, 如同长江流域其他水生生物<sup>[75, 76]</sup>, 水生植物的多样性也呈现出明显的下降趋势, 尤其是受人为干扰较大的湖泊。本研究表明确土地利用类型是影响长江流域水生植物分布的另一主要因素(表2)。

土地利用变化主要可能体现在造成生境丧失的围湖造田和生境破碎的过度的围网养殖。在过

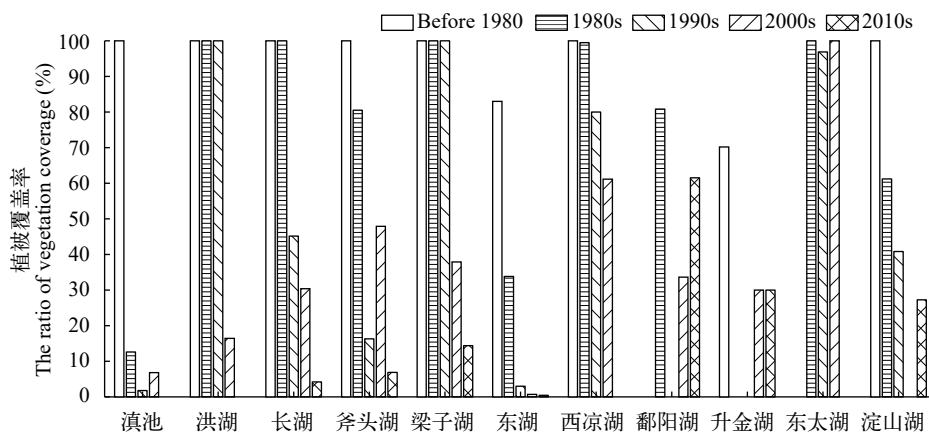


图7 1950年代至今长江流域部分湖泊植被覆盖率变化

Fig. 7 Changes of aquatic vegetation coverage ratio in representative lakes of the Yangtze River basin since 1950s

数据来源于文献[15—21, 24—26, 34—62]

Reference [15—21, 24—26, 34—62]

去的半个多世纪,我国湖泊数量急剧减少,仅面积  $1\text{ km}^2$  以上的湖泊就消失了543个。长江中下游的主要湖泊面积从解放初的  $2.9 \times 10^4\text{ km}^2$  骤降至20世纪80年代的  $1.9 \times 10^4\text{ km}^2$ , 随后的30年又再有  $4000\text{ km}^2$  的水域消亡<sup>[77, 78]</sup>, 其中围湖造田等人类活动是湖泊水域面积减少的主要原因, 很多湖泊, 尤其是长江中下游原通江湖泊, 围垦面积都接近原有面积的一半<sup>[79]</sup>。大规模的围垦使得原有天然湖湾和缓坡消落区消失殆尽, 而在发育良好的天然水体中, 该区域是多种生活型水生植物集中分布区域, 是很多陆生或水生昆虫、两栖类、鱼类以及水鸟等的栖息场所, 也使其成为各生态系统中生产力最高的区域之一<sup>[4, 80]</sup>。此外, 长江中下游很多湖泊养殖区面积都达到水面面积的一半以上<sup>[81]</sup>, 围网使得湖泊生境逐渐变得破碎, 由此造成原生水生生物生存空间压缩、水势和物质交换阻隔、水质快速恶化等一系列环境问题<sup>[82]</sup>, 对沉水植被的破坏尤为明显<sup>[83]</sup>。有研究表明相较20世纪80年代前的围垦阶段, 围网养殖阶段对长江中下游部分湖泊水生植物多样性的破坏可能更严重<sup>[40]</sup>。

湖泊水环境的变化是导致水生植被退化另一个重要原因, 特别是城市生活污水、工业废水以及农村面源污染等引起的湖泊富营养化。在人口稠密、城市化程度高的东部地区尤为严重, 如巢湖、太湖和武汉东湖等城市湖泊则经历了更早、更为严重的富营养化进程<sup>[49, 84]</sup>。湖泊富营养化引起的水质恶化、藻类大量繁殖、有机聚集体增加极大地威胁着水生植物多样性乃至整个湖泊生态系统的健康与稳定<sup>[85]</sup>, 尤其是引起浅水湖泊中沉水植被的消亡<sup>[86]</sup>, 只有少量耐污植物在尚未达到重度富营养化的湖泊湿地中得以幸存。

### 3.3 长江流域水生植物保护

长江流域生物多样性及其保护一直以来是我国学者重点关注的问题, 基于江豚等旗舰水生动物、淡水鱼类和鸟类等的分布格局和受危状况研究, 已设立一批省级以上自然保护区<sup>[87-90]</sup>, 但一直以来对水生植物的关注甚少。作为水生生态系统的重要组成, 近半个世纪以来, 长江流域水生植被, 尤其是沉水植被退化明显(图6、图7)。

由于现有水生植物调查研究主要是区域性工作, 多集中在少数热点地区, 而如长江上游的四川盆地、乌江流域、嘉陵江下游流域等地区湿地水生植物多样性尚缺乏系统研究, 这使得我们很难从完整性的角度来理解全流域的水生植物, 而本底数据的掌握本身也是对现状进行保护和合理开发利用、对已遭受破坏的生态环境进行修复的基

础<sup>[36]</sup>。本研究通过分析流域水生植物的时空格局, 以及环境因子等对流域水生植物的影响, 通过物种分布模型的建立, 探讨物种潜在适生区, 一定程度上弥补了已有工作的不足, 但各区域的基础研究不对称可能会低估非热点地区水生植物的适生程度和保护必要性。本研究揭示了洞庭湖、鄱阳湖、太湖以及中、下游干流流域所构成的生态系统网络是长江流域水生植物的热点区域, 其中洞庭湖和鄱阳湖已是长江仅剩的通江湖泊和阵地。我们建议加强长江流域水生植物多样性研究, 尤其是对于尚缺乏系统研究区域的投入; 建立以“两湖”为核心的长江中下游整体保护体系, 设立或更新现有保护区和管理区时应考虑并兼顾水生植被的保护; 以科学研究为基础, 通过污染和水位控制以及人工辅助等途径加强长江中下游原通江湖泊的水生植被恢复工作。

### 参考文献:

- [1] Carpenter S R, Lodge D M. Effects of submersed macrophytes on ecosystem processes [J]. *Aquatic Botany*, 1986, 26: 341—370
- [2] Engelhardt K A M, Ritchie M E. Effects of macrophyte species richness on wetland ecosystem functioning and services [J]. *Nature*, 2001, 411: 687—689
- [3] van Donk E, Gulati R D, Iedema A, et al. Macrophyte-related shifts in the nitrogen and phosphorus contents of the different trophic levels in a biomanipulated shallow lake [A]. In: Hillbricht-Ilkowska A, Pieczyńska E (Eds.), Nutrient Dynamics and Retention in Land/Water Ecotones of Lowland, Temperate Lakes and Rivers [C]. Dordrecht: Springer Netherlands. 1993, 19—26
- [4] Wetzel R G. Structure and productivity of aquatic ecosystems [A]. In: Wetzel R G (Eds.), Limnology [C]. San Diego: Academic Press. 2001, 129—150
- [5] Heegaard E, Birks H H, Gibson C E, et al. Species-environmental relationships of aquatic macrophytes in Northern Ireland [J]. *Aquatic Botany*, 2001, 70(3): 175—223
- [6] Valley R D, Cross T K, Radomski P. The Role of Submersed Aquatic Vegetation as Habitat for Fish in Minnesota Lakes, Including the Implications of Non-native Plant Invasions and Their Management [M]. Special Publication, Saint Paul: Minnesota Department of Natural Resources. 2004, 160
- [7] Madsen J D, Chambers P A, James W F, et al. The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes [J]. *Hydrobiologia*, 2001, 444(1): 71—84
- [8] Pluntke T, Kozerski H-P. Particle trapping on leaves and on the bottom in simulated submerged plant stands [J]. *Hydrobiologia*, 2003, 506(1): 575—581
- [9] Hosper H, Meijer M L. Biomanipulation, will it work for

- your lake? A simple test for the assessment of chances for clear water, following drastic fish-stock reduction in shallow, eutrophic lakes [J]. *Ecological Engineering*, 1993, 2(1): 63—72
- [10] Scheffer M, Hosper S H, Meijer M L, *et al.* Alternative equilibria in shallow lakes [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 1993, 8(8): 275—279
- [11] Scheffer M. Ecology of Shallow Lakes [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 2004
- [12] Jeppesen E, Sondergaard M, Sondergaard M, *et al.* The Structuring Role of Submerged Macrophytes in Lakes [M]. New York: Springer Science and Business Media, 2012
- [13] Cook C D K. Aquatic Plant Book [M]. The Hague: SPB Academic Publishing. 1990
- [14] Zeng X C. Fishery Resources of the Yangtze River Basin [M]. Beijing: Marine Press. 1990 [曾祥琮. 长江水系渔业资源. 北京: 海洋出版社. 1990]
- [15] Chen H D, He C H. Standing crop of the macrophytes of Lake Donghu, Wuchang, with reference to the problem of its rational piscicultural utilization [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1975, 5(3): 410—420 [陈洪达, 何楚华. 武昌东湖水生维管束植物的生物量及其在渔业上的合理利用问题. 水生生物学集刊, 1975, 5(3): 410—420]
- [16] Chen H D. Structure and dynamic of macrophyte communities in Lake Donghu, Wuhan [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1980, 11(3): 275—284 [陈洪达. 武汉东湖水生维管束植物群落的结构和动态. 海洋与湖沼, 1980, 11(3): 275—284]
- [17] Wang Z X. A Limnological survey of lake Liang-tze [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1959, 3: 352—368 [王祖熊. 梁子湖湖沼学资料. 水生生物学集刊, 1959, 3: 352—368]
- [18] Chen H D. Aquatic vegetation in Honghu Lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1963, 16(3): 69—81 [陈洪达. 洪湖水生植被. 水生生物学集刊, 1963, 16(3): 69—81]
- [19] Wu W P. Preliminary investigation on the distribution of vegetation and oncomelania snails in the Poyang Lake [J]. *Journal of Nanchang University (Natural Science)*, 1977, 1: 77—83 [吴文谱. 鄱阳湖草滩植被与钉螺分布的初步调查. 南昌大学学报(理科版), 1977, 1: 77—83]
- [20] Guan S F. Phytogeographic characteristics of aquatic flora in Poyang Lake [J]. *Scientia Limnologica Sinica*, 1990, 2(1): 44—49 [官少飞. 鄱阳湖水生植物区系的植物地理学特征. 湖泊科学, 1990, 2(1): 44—49]
- [21] Ge G, Chen S F. Wetland Plants of Poyang Lake [M]. Beijing: Science Press. 2015 [葛刚, 陈少凤. 鄱阳湖湿地植物. 北京: 科学出版社. 2015]
- [22] Peng D C, Yuan Z K, Liao Q F, *et al.* Vegetations in lakes and bogs of Dongting Lake district [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1986, 5(2): 28—32 [彭德纯, 袁正科, 廖起凤, 等. 洞庭湖区湖沼植被. 生态学杂志, 1986, 5(2): 28—32]
- [23] Jian Y X, Wang J B, He G Q, *et al.* A comparative study on aquatic plant diversity and its long-term changes in the three lakes of Dongtinghu district in China [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2002, 26(2): 160—167 [简永兴, 王建波, 何国庆, 等. 洞庭湖区三个湖泊水生植物多样性的比较研究. 水生生物学报, 2002, 26(2): 160—167]
- [24] Cao C H. Effects of aquatic vascular plants on the Taihu Lake ecosystem [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1987, 6(1): 21—41 [曹萃禾. 水生维管束植物在太湖生态系统中的作用. 生态学杂志, 1987, 6(1): 21—41]
- [25] Zhang S Z, Wang G X, Pu P M, *et al.* Succession of hydrophytic vegetation and swampy tendency in the East Taihu Lake [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 1999, 8(2): 1—6 [张圣照, 王国祥, 濮培民, 等. 东太湖水生植被及其沼泽化趋势. 植物资源与环境学报, 1999, 8(2): 1—6]
- [26] Zhao K, Zhou Y E, Jiang Z L, *et al.* Changes of aquatic vegetation in Lake Taihu since 1960s [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(2): 351—362 [赵凯, 周彦锋, 蒋兆林, 等. 1960年以来太湖水生植被演变. 湖泊科学, 2017, 29(2): 351—362]
- [27] Lu X G. Aquatic vegetation survey in the Chaohu lake [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 1984, (2): 95—102 [卢心固. 巢湖水生植被调查. 安徽农业大学学报, 1984, (2): 95—102]
- [28] Wang J X, Meng W Q, Li G X, *et al.* Diversity of aquatic plants in Chaohu basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(6): 1386—1397 [王金霞, 孟炜淇, 李国祥, 等. 巢湖流域水生植物多样性. 湖泊科学, 2017, 29(6): 1386—1397]
- [29] Lovett J C, Rudd S, Taplin J, *et al.* Patterns of plant diversity in Africa south of the Sahara and their implications for conservation management [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2000, 9(1): 37—46
- [30] Li Z, Yu D, Xiong W, *et al.* Aquatic plants diversity in arid zones of Northwest China: patterns, threats and conservation [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2006, 15(11): 3417—3444
- [31] Viana D S, Santamaría L, Schwenk K, *et al.* Environment and biogeography drive aquatic plant and cladoceran species richness across Europe [J]. *Freshwater Biology*, 2014, 59(10): 2096—2106
- [32] Changjiang Hydrological Committee of Hydrology Ministry. Atlas of the Yangtze River Basin [M]. Beijing: China Map Press. 1999 [水利部长江水利委员会. 长江流域地图集. 北京: 中国地图出版社. 1999]
- [33] Jaccard P. Nouvelles recherches sur la distribution florale [J]. *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles*, 1908, 44: 223—270
- [34] Li H. A study on the lake vegetation of Yunnan Plateau [J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 1980, 2(2): 113—141 [李恒. 云南高原湖泊水生植被的研究. 云南植物研究, 1980, 2(2): 113—141]
- [35] Li S H, Yu M J, Li G Z, *et al.* Limnological survey of the lakes of Yunnan Plateau [J]. *Oceanologia et Limnologia*

- Sinica*, 1963, **5**(2): 87—114 [黎尚豪, 俞敏娟, 李光正, 等. 云南高原湖泊调查. 海洋与湖沼, 1963, **5**(2): 87—114]
- [36] Wang S B, Xu Z R, Zhang J. Dynamic changes of higher submerged macrophytes in Dianchi Lake in recent 50 years and implication for ecological restoration [J]. *Water Resources Protection*, 2016, **32**(6): 1—5 [王寿兵, 徐紫然, 张洁. 滇池高等沉水植物50年变迁状况对生态修复的启示. 水资源保护, 2016, **32**(6): 1—5]
- [37] Jin B X, Deng Z R, Li X M. Comprehensive Study of Jianghan Lakes Area [M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Publishing House. 1992 [金伯欣, 邓兆仁, 李新民. 江汉湖群综合研究. 武汉: 湖北科学技术出版社. 1992]
- [38] Li W. Studies on aquatic vegetation and its succession in Honghu Lake [D]. Thesis for Doctor of Science. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan. 1995 [李伟. 洪湖水生植被及其演替研究. 博士学位论文, 中国科学院水生生物研究所, 武汉. 1995]
- [39] Chen Y Y, Xu W X. Hydrobiology and Resources Exploitation in Honghu Lake [M]. Beijing: Science Press. 1995 [陈宜瑜, 许蕴珩. 洪湖水生生物及其资源开发. 北京: 科学出版社. 1995]
- [40] Peng Y H, Jian Y X, Wang J B, *et al.* A Comparative study on aquatic plant diversity in five largest lakes of Hubei province in China [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2004, **28**(5): 464—470 [彭映辉, 简永兴, 王建波, 等. 湖北省五大湖泊水生植物多样性的比较研究. 水生生物学报, 2004, **28**(5): 464—470]
- [41] Liu Y, Ren W B, Shu T, *et al.* Current status and the long-term change of riparian vegetation in last fifty years of Lake Honghu [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(Z1): 38—45 [刘毅, 任文彬, 舒潼, 等. 洪湖湖滨带植被现状以及近五十年的变化分析. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(Z1): 38—45]
- [42] Feng C, Wang X L, Wang Z X, *et al.* Studies on the communities of aquatic vascular plants in Changhu Lake [J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 1989, **7**(2): 123—130 [冯灿, 王学雷, 王增学, 等. 长湖水生维管束植物群落研究. 武汉植物学研究, 1989, **7**(2): 123—130]
- [43] Peng Y H, Jian Y X, Ni L Y, *et al.* Aquatic plant diversity and its changes in Changhu Lake of Hubei Province in China [J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 2003, **25**(2): 173—180 [彭映辉, 简永兴, 倪乐意, 等. 长湖水生植物多样性及其变化. 云南植物研究, 2003, **25**(2): 173—180]
- [44] Hao M X. Diversity and community succession of macrophytes in Jiangnan Lake Groups—the cases of lake Liangzi, lake Changhu, lake Futou and lake Zhangdu [D]. Thesis for Master of Science. Hubei University, Wuhan. 2014 [郝孟曦. 江汉湖群主要湖泊水生植物多样性及群落演替规律研究. 硕士学位论文, 湖北大学, 武汉. 2014]
- [45] Li W. Floristic analysis on the aquatic vascular plants in Futouhu Lake [J]. *Journal of Shanxi Teacher's University* (Natural Science Edition), 1993, (S2): 1—6 [李伟. 斧头湖水生维管束植物区系分析. 山西师范大学学报(自然科学版), 1993, (S2): 1—6]
- [46] Li Z Q, Ren H, Hao M X, *et al.* Diversity variation and community succession of aquatic macrophytes in Lake Futou [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, **36**(6): 1018—1026 [李中强, 任慧, 郝孟曦, 等. 斧头湖水生植物多样性及群落演替研究. 水生生物学报, 2012, **36**(6): 1018—1026]
- [47] Wang W M, Yang G R, Fan Q X, *et al.* Aquatic vegetation in Liangzi Lake [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 1994, **13**(3): 281—290 [王卫民, 杨干荣, 樊启学, 等. 梁子湖水生植被. 华中农业大学学报, 1994, **13**(3): 281—290]
- [48] Ge J W, Cai Q H, Li J J, *et al.* On aquatic vegetation succession of Lake Liangzihu from 1955 to 2001 [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2004, **26**(1): 14—20 [葛继稳, 蔡庆华, 李建军, 等. 梁子湖水生植被1955—2001年间的演替. 北京林业大学学报, 2004, **26**(1): 14—20]
- [49] Yao Z W, Li Y J, Xia S L. Studies of the aquatic vascular plants and eutrophication in Wuhan East Lake [J]. *Chongqing Environmental Science*, 1990, **12**(4): 26—30 [姚作五, 李益健, 夏盛林. 武汉东湖水维管束植物与富营养化. 重庆环境科学, 1990, **12**(4): 26—30]
- [50] Wu Z B, Chen D Q, Qiu D R. Investigation of the distribution of the aquatic vegetation in Lake Donghu, Wuhan [J]. *Chongqing Environmental Sciences*, 2003, **25**(8): 54—58 [吴振斌, 陈德强, 邱东茹. 武汉东湖水生植被现状调查及群落演替分析. 重庆环境科学, 2003, **25**(8): 54—58]
- [51] Zhong A W, Song X, Zhang J, *et al.* Diversity and distribution of aquatic plants in Lake Donghu in Wuhan in 2014 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, **30**(3): 398—405 [钟爱文, 宋鑫, 张静, 等. 2014年武汉东湖水生植物多样性及其分布特征. 环境科学研究, 2017, **30**(3): 398—405]
- [52] Guan S F, Lang Q, Zhang B. Aquatic vegetation of Poyang Lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1987, **11**(1): 9—21 [官少飞, 郎青, 张本. 鄱阳湖水生植被. 水生生物学报, 1987, **11**(1): 9—21]
- [53] Jian Y X. Inventory and assessment of aquatic plant diversity in the lake wetlands of Lianghu Plain [D]. Thesis for Doctor of Sciences. Wuhan University, Wuhan. 2000 [简永兴. 两湖平原湖泊湿地水生植物多样性编目与评价. 博士学位论文, 武汉大学, 武汉. 2000]
- [54] Peng Y H, Jian Y X, Li R D. Community diversity of aquatic plants in the lakes of Poyang plain district of China [J]. *Journal of Central South Forestry University*, 2003, **23**(4): 22—27 [彭映辉, 简永兴, 李仁东. 鄱阳湖平原湖泊水生植物群落的多样性. 中南林学院学报, 2003, **23**(4): 22—27]
- [55] Meng R X. Aquatic vascular plants of Shengjin Lake [J]. *Journal of Anhui University* (Natural Sciences), 1979, (1): 73—82 [蒙仁宪. 升金湖的水生植物. 安徽大学学报(自然科学版), 1979, (1): 73—82]
- [56] Ma S Y. Study on vegetation community characteristics in wetland of Shengjin Lake in Anhui Province [D]. Thesis for Master of Sciences. Anhui University, Hefei. 2011

- [马淑勇. 升金湖湿地维管植物群落结构研究. 硕士学位论文, 安徽大学, 合肥. 2011]
- [57] Liu L L. Study on vascular plant in Susong Huayang Lake nature reserves and Shengjin Lake nature reserves, Anhui Province [D]. Thesis for Master of Sciences. Anhui University, Hefei. 2016 [刘靛靛. 安徽宿松华阳河湖群和升金湖自然保护区维管植物研究. 硕士学位论文, 安徽大学, 合肥. 2016]
- [58] Nanjing Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences. Preliminary Reports of Comprehensive Investigation on Lake Taihu [M]. Beijing: Science Press. 1965 [中国科学院南京地理研究所. 太湖综合调查初步报告. 北京: 科学出版社. 1965]
- [59] Lei Z X. Study on aquatic macrophyte vegetations and their environment effects in Taihu Lake [D]. Thesis for Doctor of Sciences. Jinan University, Guangzhou. 2006 [雷泽湘. 太湖大型水生植被及其环境效应研究. 博士学位论文, 暨南大学, 广州. 2006]
- [60] Song Y C, Wang Y, Qi R H. The Research of Eutrophication and Control in Dianshan Lake [M]. Shanghai: East China Normal University Press. 1992 [宋永昌, 王云, 戚仁海. 淀山湖富营养化及其防治研究. 上海: 华东师范大学出版社. 1992]
- [61] You W H. A Study on the communities of aquatic vascular plants in Dianshan Lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1994, **6**(4): 317—324 [由文辉. 淀山湖水生维管束植物群落研究. 湖泊科学, 1994, **6**(4): 317—324]
- [62] Shi W. Study on the temporal and spatial pattern of aquatic vegetation and their influences in Dianshan Lake [D]. Thesis for Master of Sciences. East China Normal University, Shanghai. 2011 [施文. 淀山湖水生植被动态格局及成因分析. 硕士学位论文, 华东师范大学, 上海. 2011]
- [63] Stuckey R L. Phytogeographical outline of aquatic and wetland angiosperms in continental eastern North America [J]. *Aquatic Botany*, 1993, **44**(2-3): 259—301
- [64] Santamaria L. Why are most aquatic plants widely distributed? Dispersal, clonal growth and small-scale heterogeneity in a stressful environment [J]. *Acta Oecologica*, 2002, **23**(3): 137—154
- [65] Walter H. Vegetation of the Earth in Relation to Climate and the Eco-physiological Conditions [M]. New York: Springer-Verlag. 1973
- [66] Crow G E. Species diversity in aquatic angiosperms: latitudinal patterns [J]. *Aquatic Botany*, 1993, **44**(2): 229—258
- [67] Sun H, Niu Y, Chen Y S, *et al.* Survival and reproduction of plant species in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Systematics and Evolution*, 2014, **52**(3): 378—396
- [68] Wang D. The geography of aquatic vascular plants of Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau [D]. Thesis for Doctor of Sciences. Wuhan University, Wuhan. 2003 [王东. 青藏高原水生植物地理研究. 博士学位论文, 武汉大学, 武汉. 2003]
- [69] Fér T, Hroudová Z. Detecting dispersal of *Nuphar lutea* in river corridors using microsatellite markers [J]. *Freshwater Biology*, 2008, **53**(7): 1409—1422
- [70] Reynolds C, Miranda N A F, Cumming G S. The role of waterbirds in the dispersal of aquatic alien and invasive species [J]. *Diversity and Distributions*, 2015, **21**(7): 744—754
- [71] Wu Y, Colwell R K, Han N, *et al.* Understanding historical and current patterns of species richness of babblers along a 5000-m subtropical elevational gradient [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, **23**(11): 1167—1176
- [72] Barrett S C H, Eckert C G, Husband B C. Evolutionary processes in aquatic plant populations [J]. *Aquatic Botany*, 1993, **44**(2-3): 105—145
- [73] Madsen J D, Smith D H. Vegetative spread of Eurasian watermilfoil colonies [J]. *Journal of Aquatic Plant Management*, 1997, **35**: 63—68
- [74] Chen Y, Li X, Yin L, *et al.* Genetic diversity and migration patterns of the aquatic macrophyte *Potamogeton malaianus* in a potamo-lacustrine system [J]. *Freshwater Biology*, 2009, **54**(6): 1178—1188
- [75] Fu C, Wu J, Chen J, *et al.* Freshwater fish biodiversity in the Yangtze River basin of China: patterns, threats and conservation [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2003, **12**(8): 1649—1685
- [76] Fang J Y, Zhao S Q, Tang Z Y, *et al.* Ecological Basis of Regional Biodiversity Conservation of Wetlands in the Central Yangtze [M]. Beijing: Higher Education Press. 2006 [方精云, 赵淑清, 唐志尧, 等. 长江中游湿地生物多样性保护的生态学基础. 北京: 高等教育出版社. 2006]
- [77] Liu X, He L H, Zhou C. Study on lake surface area change in the mid-low reaches of the the Yangtze River based on the remote sensing technique [J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2008, (4): 124—129 [刘新, 何隆华, 周驰. 长江中下游近30年来湖泊的水域面积变化研究. 华东师范大学学报(自然科学版), 2008, (4): 124—129]
- [78] Yang G S, Ma R H, Zhang L, *et al.* Lake status, major problems and protection strategy in China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(6): 799—810 [杨桂山, 马荣华, 张路, 等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 799—810]
- [79] Shi K C. Wetlands in Anhui Province [M]. Hefei: Hefei University of Technology Publishing House. 2003 [施葵初. 安徽湿地. 合肥: 合肥工业大学出版社. 2003]
- [80] Yu D, Kang H, Chen Y Y. Lake bend effect and its influence on the specific diversity of aquatic plants in the lakes of middle basins of Changjiang river [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, **16**(5): 476—483 [于丹, 康辉, 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]
- [81] Li J J, He L H, Dai J F, *et al.* Extract enclosure culture in lakes bases on remote sensing image texture information

- [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, **18**(4): 337—342 [李俊杰, 何隆华, 戴锦芳, 等. 基于遥感影像纹理信息的湖泊围网养殖区提取. *湖泊科学*, 2006, **18**(4): 337—342]
- [82] Ban X, Yu C, Wei K, *et al.* Analysis of influence of enclosure aquaculture on water quality of Honghu Lake [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, **33**(9): 125—129 [班璇, 余成, 魏珂, 等. 围网养殖对洪湖水质的影响分析. *环境科学与技术*, 2010, **33**(9): 125—129]
- [83] Yan G A, Ma J M, Qiu D R, *et al.* Succession and species replacement of aquatic plant communities in East Lake, Wuhan [J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 1997, **21**(4): 319—327 [严国安, 马剑敏, 邱东茹, 等. 武汉东湖水生植物群落演替的研究. *植物生态学报*, 1997, **21**(4): 319—327]
- [84] Jin X C, Liu H Y, Ju Q T, *et al.* Eutrophication of Chinese Lakes [M]. Beijing: China Environmental Science Press. 1990 [金相灿, 刘鸿夷, 居清谈, 等. 中国湖泊富营养化. 北京: 中国环境科学出版社. 1990]
- [85] Qin B Q. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2002, **14**(3): 193—202 [秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探. *湖泊科学*, 2002, **14**(3): 193—202]
- [86] Qiu D R, Wu Z B. On the decline and restoration of submerged vegetation in eutrophic shallow lakes [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1997, **9**(1): 82—88 [邱东茹, 吴振斌. 富营养化浅水湖泊沉水水生植被的衰退与恢复. *湖泊科学*, 1997, **9**(1): 82—88]
- [87] Ma F J, Lin D Q, Zhang X K, *et al.* Characteristics of riparian plant community in Yangtze finless porpoise ex-situ reserve in Xijiang Oxbow, Anqing City [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(3): 623—633 [马凤娇, 蔺丹清, 张晓可, 等. 安庆西江长江江豚迁地保护基地河岸带植物群落结构特征. *水生生物学报*, 2019, **43**(3): 623—633]
- [88] Zhao X, Wang D, Turvey S T, *et al.* Distribution patterns of Yangtze finless porpoises in the Yangtze River: implications for reserve management [J]. *Animal Conservation*, 2014, **16**(5): 509—518
- [89] Huang X Y, Li F, Chen J K. Reserve network planning for fishes in the middle and lower Yangtze River basin by systematic conservation approaches [J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2015, **45**(12): 1244—1257 [黄心一, 李帆, 陈家宽. 基于系统保护规划法的长江中下游鱼类保护区网络规划. *中国科学: 生命科学*, 2015, **45**(12): 1244—1257]
- [90] Nature Reserves Department, State Environmental Protection Administration of China. Catalog of China Nature Reserves (2014) [M]. Beijing: Chinese Environment Science Press. 2015 [国家环境保护局自然保护司. 全国自然保护区名录(2014). 北京: 中国环境出版社. 2015]

## BIODIVERSITY PATTERN AND CONSERVATION OF AQUATIC VASCULAR PLANTS IN THE YANGTZE RIVER BASIN, CHINA

WU Zhi-Gang<sup>1</sup>, XIONG Wen<sup>2</sup> and HOU Hong-Wei<sup>1</sup>

(1. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. College of Fisheries, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

**Abstract:** The Yangtze River is the largest river in China. It is a priority conservation area for biodiversity of the world, with its main river, branches and wetlands. As an essential part of freshwater ecosystem, aquatic vegetation has been well studied by Chinese researchers since 1950s, but large-scaled analysis on the biodiversity pattern is lacked. Based on published studies, we analyzed spatial and temporal pattern of aquatic plant diversity in the Yangtze River Basin, and calculated the suitable habitat area and underlying influence of environmental factors using MaxEnt software. A total of 298 species are recognized, belonging to 121 genera in 52 families, which is 57.6% of the total aquatic vascular plants in China. The Yangtze River Basin is the key area for aquatic plant diversity of China, especially the subregions of middle reaches. The elevation and land use are the key environmental variables to the spatial pattern of aquatic plants. The separation among water systems have weak influence on the spatial pattern of diversity in aquatic vascular plants, but potamo-lacustrine habitats facilitated the species homogenization of the flora in a sub-basin scale. The network consists of Poyang Lake, Dongting Lake, Tai Lake, and the middle and lower mainstream is the suitable area for the aquatic plants based on the MaxEnt model. In the past half century, the decline or loss of aquatic vegetation occurred in plenty of lakes in the Yangtze River Basin. We suggested that the protection of aquatic vegetation should be incorporated into the integrated conservation of the middle and lower Yangtze River.

**Key words:** The Yangtze River Basin; Aquatic vascular plant; Diversity pattern; MaxEnt model; Conservation

附录 1 长江流域珍稀濒危水生植物名录  
Appendix 1 List of endangered aquatic vascular plants in the Yangtze River Basin

| 科     | Family           | 属     | Genus                 | 种      | Species                            | 保护等级/IUCN |
|-------|------------------|-------|-----------------------|--------|------------------------------------|-----------|
| 水韭科   | Isoetaceae       | 水韭属   | <i>Isoetes</i>        | 高寒水韭   | <i>Isoetes hypsophila</i>          | VU        |
|       |                  |       |                       | 东方水韭   | <i>Isoetes orientalis</i>          | CR        |
|       |                  |       |                       | 中华水韭   | <i>Isoetes sinensis</i>            | I 级, EN   |
| 水蕨科   | Parkeriaceae     | 水蕨属   | <i>Ceratopteris</i>   | 粗梗水蕨   | <i>Ceratopteris pteridoides</i>    | II 级, EN  |
|       |                  |       |                       | 水蕨     | <i>Ceratopteris thalictroides</i>  | II 级, VU  |
| 泽泻科   | Alismataceae     | 泽苔草属  | <i>Caldesia</i>       | 宽叶泽苔草  | <i>Caldesia grandis</i>            | CR        |
|       |                  |       |                       | 泽苔草    | <i>Caldesia parnassifolia</i>      | CR        |
|       |                  | 毛茛泽泻属 | <i>Ranalisma</i>      | 长喙毛茛泽泻 | <i>Ranalisma rostrata</i>          | I 级, CR   |
|       |                  | 慈姑属   | <i>Sagittaria</i>     | 冠果草    | <i>Sagittaria guayanensis</i>      | EN        |
|       |                  |       |                       | 利川慈姑   | <i>Sagittaria lichuanensis</i>     | VU        |
|       |                  |       |                       | 小慈姑    | <i>Sagittaria potamogetifolia</i>  | VU        |
|       |                  |       |                       | 野慈姑    | <i>Sagittaria trifolia</i>         | NT        |
| 水薹科   | Aponogetonaceae  | 水薹属   | <i>Aponogeton</i>     | 水薹     | <i>Aponogeton lakhonensis</i>      | VU        |
| 莼菜科   | Cabombaceae      | 莼属    | <i>Brasenia</i>       | 莼菜     | <i>Brasenia schreberi</i>          | I 级, CR   |
| 莎草科   | Cyperaceae       | 石龙刍属  | <i>Lepironia</i>      | 石龙刍    | <i>Lepironia articulata</i>        | NT        |
|       |                  | 水葱属   | <i>Schoenoplectus</i> | 曲氏水葱   | <i>Schoenoplectus chuanus</i>      | EN        |
|       |                  |       |                       | 荆门水葱   | <i>Schoenoplectus jingmenensis</i> | VU        |
| 谷精草科  | Eriocaulaceae    | 谷精草属  | <i>Eriocaulon</i>     | 谷精草    | <i>Eriocaulon buergerianum</i>     | VU        |
|       |                  |       |                       | 长苞谷精草  | <i>Eriocaulon decemflorum</i>      | VU        |
| 禾本科   | Gramineae        | 莎禾属   | <i>Coleanthus</i>     | 莎禾     | <i>Coleanthus subtilis</i>         | EN        |
|       |                  | 水禾属   | <i>Hygroryza</i>      | 水禾     | <i>Hygroryza aristata</i>          | NT        |
| 小二仙草科 | Haloragaceae     | 狐尾藻属  | <i>Myriophyllum</i>   | 互花狐尾藻  | <i>Myriophyllum alterniflorum</i>  | VU        |
|       |                  |       |                       | 二分果狐尾藻 | <i>Myriophyllum dicocum</i>        | NT        |
|       |                  |       |                       | 东方狐尾藻  | <i>Myriophyllum oguraense</i>      | NT        |
|       |                  |       |                       | 四蕊狐尾藻  | <i>Myriophyllum tetrandrum</i>     | RE        |
|       |                  |       |                       | 乌苏里狐尾藻 | <i>Myriophyllum ussuriense</i>     | II 级, VU  |
| 杉叶藻科  | Hippuridaceae    | 杉叶藻属  | <i>Hippuris</i>       | 四叶杉叶藻  | <i>Hippuris tetraphylla</i>        | NT        |
| 水鳖科   | Hydrocharitaceae | 水筛属   | <i>Blyxa</i>          | 无尾水筛   | <i>Blyxa aubertii</i>              | VU        |
|       |                  |       |                       | 光滑水筛   | <i>Blyxa leiosperma</i>            | VU        |
|       |                  | 水车前属  | <i>Ottelia</i>        | 海菜花    | <i>Ottelia acuminata</i>           | VU        |
|       |                  |       |                       | 龙舌草    | <i>Ottelia alismoides</i>          | VU        |
|       |                  |       |                       | 水菜花    | <i>Ottelia cordata</i>             | II 级, RE  |
|       |                  | 苦草属   | <i>Vallisneria</i>    | 刺苦草    | <i>Vallisneria spinulosa</i>       | NT        |
| 睡菜科   | Menyanthaceae    | 荇菜属   | <i>Nymphoides</i>     | 水金莲花   | <i>Nymphoides aurantiaca</i>       | NT        |
|       |                  |       |                       | 小荇菜    | <i>Nymphoides coreana</i>          | NT        |
| 茨藻科   | Najadaceae       | 茨藻属   | <i>Najas</i>          | 弯果茨藻   | <i>Najas ancistrocarpa</i>         | VU        |
|       |                  |       |                       | 多孔茨藻   | <i>Najas foveolata</i>             | VU        |
|       |                  |       |                       | 纤细茨藻   | <i>Najas gracillima</i>            | II 级, LC  |
|       |                  |       |                       | 澳古茨藻   | <i>Najas oguraensis</i>            | EN        |
| 莲科    | Nelumbonaceae    | 莲属    | <i>Nelumbo</i>        | 莲      | <i>Nelumbo nucifera</i>            | II 级      |
| 睡莲科   | Nymphaeaceae     | 萍蓬草属  | <i>Nuphar</i>         | 萍蓬草    | <i>Nuphar pumila</i>               | II 级, VU  |
| 眼子菜科  | Potamogetonaceae | 眼子菜属  | <i>Potamogeton</i>    | 浮叶眼子菜  | <i>Potamogeton natans</i>          | NT        |
|       |                  |       |                       | 白茎眼子菜  | <i>Potamogeton praelongus</i>      | VU        |
| 菱科    | Trapaceae        | 菱属    | <i>Trapa</i>          | 细果野菱   | <i>Trapa incisa</i>                | II 级, DD  |
| 香蒲科   | Typhaceae        | 黑三棱属  | <i>Sparganium</i>     | 线叶黑三棱  | <i>Sparganium angustifolium</i>    | NT        |
|       |                  |       |                       | 矮黑三棱   | <i>Sparganium natans</i>           | VU        |
| 伞形科   | Umbelliferae     | 水芹属   | <i>Oenanthe</i>       | 短辐水芹   | <i>Oenanthe benghalensis</i>       | VU        |