

## 洱海湖滨带水生植物多样性及分布现状\*

田玉清<sup>1,2</sup>, 陈欣<sup>3</sup>, 吕超超<sup>1,2</sup>, 单航<sup>1,2</sup>, 丑庆川<sup>1\*\*</sup>, 吕兴菊<sup>4\*\*</sup>, 张霄林<sup>1</sup>, 倪乐意<sup>1</sup>, 曹特<sup>1</sup>

(1: 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

(3: 云南省水利水电勘测设计研究院, 昆明 650021)

(4: 大理州洱海湖泊研究院, 大理 671000)

**摘要:** 湖滨带水生植物对湖泊生态系统健康的维持具有重要作用。为了解当前洱海湖滨带水生植物现状, 本研究于2020—2021年间每季度对洱海湖滨带水生植物进行调查。调查结果表明: ①洱海湖滨带现有水生植物206种, 属56科156属, 其中湿生植物149种, 挺水植物24种, 沉水植物21种, 漂浮植物7种, 浮叶植物5种; 常见种有狗牙根(*Cynodon dactylon*)、菹(*Zizania latifolia*)、苦草(*Vallisneria natans*)、菱(*Trapa bispinosa*)等, 偶见种为忍冬(*Lonicera japonica*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)等。②从区系分布来看, 洱海湖滨带物种主要为世界分布(83种)和热带分布(55种)两种类型, 分别占总物种数比例的40.28%和26.71%。③在植物群落方面, 洱海湖滨带共有18个主要植物群落类型, 其中湿生植物群落4种, 挺水植物群落3种, 沉水植物群落9种, 浮叶植物群落2种; 以狗牙根群落、菹群落、苦草群落、菱群落为主。通过与历史文献结果的对比分析得出, 近年来洱海湖滨带水生植物多样性有了显著提高, 但目前存在挺水植物群落类型单一等问题, 后续应继续加强湖滨带建设, 以改善生境, 增加物种多样性。

**关键词:** 洱海; 水生植物; 物种多样性; 区系组成; 植物群落

## Diversity and distribution status of aquatic plants in the lakeshore zone of Lake Erhai\*

Tian Yuqing<sup>1,2</sup>, Chen Xin<sup>3</sup>, Lv Chaochao<sup>1,2</sup>, Shan Hang<sup>1,2</sup>, Chou Qingchuan<sup>1\*\*</sup>, Lv Xingju<sup>4\*\*</sup>, Zhang Xiaolin<sup>1</sup>, Ni Leyi<sup>1</sup> & Cao Te<sup>1</sup>

(1: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P.R.China)

(2: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

(3: Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming 650021, P.R.China)

(4: Erhai Research Institute, Dali 671000, P.R.China)

**Abstract:** Aquatic plants in lakeshore zone play an important role in maintaining the health of lake ecosystem. In order to understand the current status of aquatic plants in the lakeshore zone of Lake Erhai, this study investigated the aquatic plants quarterly in the lakeshore zone from 2020 to 2021. The results showed that there were 206 species of aquatic plants belonging to 56 families and 156 genera in the lakeshore zone of Lake Erhai, including 149 species of hygrophytes, 24 species of emergent plants, 21 species of submerged plants, 7 species of floating plants and 5 species of floating leaf plants. Among all these species, *Cynodon dactylon*, *Zizania latifolia*, *Vallisneria natans* and *Trapa bispinosa*, etc. were common species, *Lonicera japonica*, *Elymus dahuricus*, etc. were occasional species. From the distribution of floristic regions, the species in the lakeshore zone of Lake Erhai were mainly world distribution (83 species) and tropical distribution (55 species), accounting for 40.28% and 26.71% of the total species, respectively. In terms of plant communities, there were 18 main plant community types in the lakeshore zone of Lake Erhai, including 4 types of hygrophytes communities, 3 types of emergent plant communities, 9 types of submerged plant communities and 2 types of floating leaf plant communities. Among all the communities, the main dominant communities were *Cynodon dactylon* communities, *Zizania latifolia* communities, *Vallisneria natans* communities and *Trapa bispinosa* communities. Compared with previous investigations, it

\* 2022-07-14 收稿; 2022-10-13 收修改稿。

国家自然科学基金项目(32101319, 32071574)和中国博士后科学基金项目(236070)联合资助。

\*\* 通信作者; E-mail: chouqc@ihb.ac.cn, 337491472@qq.com。

was concluded that the diversity of aquatic plants in the lakeshore zone of Lake Erhai had been significantly improved in recent years. However, there are some problems such as the small area of lakeshore zone and the single type of emergent plant community. Therefore, the construction of lakeshore zone should be further strengthened to improve the habitats and increase species diversity.

**Keywords:** Lake Erhai; aquatic plant; diversity of species; floral composition; plant community

湖滨带是湖泊和陆地生态系统之间的生态过渡与缓冲区域,亦是水陆生态系统重要的生态交错带<sup>[1-2]</sup>。湖滨带作为湖泊的一道天然屏障,可分为水向带、岸线带和陆向带。湖滨带主要具有生态功能、环境功能、人文景观功能,其承担了保持生物多样性、提供动物繁殖场所、截污、改善水质、调蓄洪水、提高观赏性等作用<sup>[3-4]</sup>。水生植物是湿地生态系统的重要组成成分,其存在可以维持生物多样性和各项生态功能<sup>[5-6]</sup>。湖滨带作为水生植物生存的重要区域,对湖泊的生态系统健康具有重要意义。在社会经济高速发展的今天,人类活动给湖滨带生态系统带来了越来越大的压力,如何能更好地发挥湖滨带的生态功能已成为人们日益关注的焦点<sup>[7]</sup>。

湖滨带水生植物是洱海湖泊生态系统的重要组成部分,但近几十年来洱海水体不断富营养化,导致水生植被分布及组成也随之发生变化。当前洱海湖滨带已严重退化,生物多样性下降,湖岸遭受侵蚀,水质恶化,这些都直接威胁周边民众的生活环境。自 1960s 以来,黎尚豪等<sup>[8-13]</sup>陆续对洱海水生植物的多样性分布做了调查记录;21 世纪初的 10 年间,也有学者<sup>[7,14-18]</sup>陆续进行了洱海流域水生植物的系统研究,发现洱海湖滨带水生植物分布面积及多样性均有所下降。“十一五”以来,在国家“水体污染控制与治理”重大专项及地方政府的治理保护项目支持下,洱海全域生态环境有了较大改变,湖滨带退化情况得到明显遏制并向好发展。为了探明目前洱海湖滨带的水生植物现状,本研究于 2020—2021 年每季度对洱海湖滨带进行了较为全面的调查,并结合历史文献分析,得出洱海水生植物多样性及分布现状,以期为洱海湖滨带生态系统的恢复及其稳定性维持提供理论支撑。

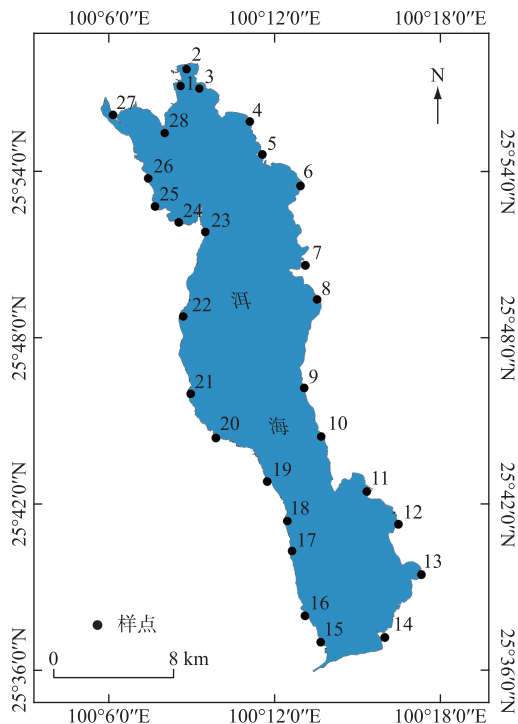


图 1 洱海湖滨带采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Lake Erhai lakeshore zone

## 1 研究区域与方法

### 1.1 研究区域概况

洱海 (25°36'~25°58'N, 100°06'~100°18'E) 位于云南省大理白族自治州境内,是云南省仅次于滇池的第二大湖泊,湖面面积 252 km<sup>2</sup>,最高水位 1966 m (85 高程),总容量为 25.3×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,最大水深 22 m,平均水深 10.2 m。洱海属典型的中亚热带高原季风气候,气候温和,分为干湿两季,11 月至次年 5 月为旱季,6—10 月为雨季,多年平均降雨量 1048 mm,光照充足,年均温 15.1℃。洱海属澜沧江水系,北有弥苴河、罗时江、永安江;西有苍山十八溪;南有波罗江、金星河;东有海潮河、凤尾箐、玉龙河等汇入;西洱河为洱海唯一出湖河流<sup>[19]</sup>。

调查期间,洱海最低水位为 1964.43 m,最高水位为 1965.95 m。其中 2020 年 6 月平均水位 1964.47 m,9 月平均水位为 1965.69 m,12 月平均水位为 1965.76 m,2021 年 3 月平均水位为 1965.32 m。

### 1.2 研究方法

本研究于 2020—2021 年间每季度(共 4 次)对洱海湖滨带进行水生植物调查。在洱海环湖一周共选择 28 个具有代表性的固定样点(图 1),分别为:1.永安江、2.马厂、3.下村、4.红山湾、5.双廊、6.长育、7.康

廊、8.挖色、9.鸡崖寺、10.文笔村、11.向阳村、12.南村、13.下河湾、14.石屏村、15.团山、16.洱滨村、17.大庄村、18.丰城抽水站、19.小邑庄、20.马久邑、21.磻溪、22.古生、23.金龟寺、24.沙村、25.新生邑、26.仁里邑、27.西沙坪、28.弥苴河。每个样点大小为 50 m×50 m,根据洱海水位变动,在每个样点内划分 3 条确定水位线(最高水位线:1966 m;中水位线:1965 m;最低水位线:1964.4 m),在每条水位线处分别设置 3 个固定样方,每个样点共计设置 9 个样方,样方大小为 1 m×1 m,每次采样均保持样方位置一致。作为样方调查的补充,还以样点中心为起点设置巢式样方,每个样点设置 1 个。

水生植物群落调查参考方精云等<sup>[20]</sup>提出的植物群落清查方法和技术规范,调查内容包括水生植物种类、群落类型划分、生物量。定量采集样方范围内所有水生植物,其中使用镰刀沿地面割取湿生植物和挺水植物植株地上部分,使用采草器将浮叶植物和沉水植物植株整株采集,现场区分种类,然后称量植物鲜重并记录;巢式样方多样性调查以起点开始,向水陆两侧扩大样方面积,以 0.5 m×0.5 m 为起始样方,设置 0.5 m×0.5 m、1 m×1 m、2 m×2 m、4 m×4 m、8 m×8 m、16 m×16 m 和 32 m×32 m,至样方内不再出现新物种为止,分别记录每个样方中出现的新物种数及总物种数。

### 1.3 数据处理

$\alpha$ -多样性指数是用于度量群落内生物种类数量以及生物种类间相对多度的指标,本文选取 4 种测度指标<sup>[21]</sup>分析样点物种多样性特征,分别是:Margalef 物种丰富度指数( $d$ )、Shannon-Wiener 指数( $H'$ )、Simpson 指数( $D$ )、Pielou 均匀度指数( $J$ )。计算方法分别为:

$$d = (S-1) / \ln N \quad (1)$$

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$D = 1 / \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (3)$$

$$J = H' / \ln S \quad (4)$$

式中, $S$  为样方内的物种数量, $P_i$  为第  $i$  个种的个体数占样地中所有种的总个体数的比例, $N$  为样点生物量。

数据处理及作图均采用 Excel 2016 和 Origin 8.5 软件完成。

## 2 结果

### 2.1 物种组成与分布

2.1.1 物种组成 本研究表明,洱海湖滨带共有水生植物 206 种,属 56 科 156 属;按生活型统计,洱海湖滨带共有湿生植物 149 种,属 38 科 119 属;挺水植物 24 种,属 13 科 18 属;沉水植物 21 种,属 6 科 11 属;漂浮植物 7 种,属 4 科 6 属;浮叶植物 5 种,属 5 科 5 属。在科内属的组成中,禾本科(Poaceae)最多,有 25 属;其次是菊科(Asteraceae),24 属;豆科(Fabaceae)(7 属)、水鳖科(Hydrocharitaceae)(6 属)、伞形科(Apiaceae)(6 属)、莎草科(Cyperaceae)(5 属)、十字花科(Brassicaceae)(5 属),这 5 科占总科数的 12.5%;含 2~4 属的科有锦葵科(Malvaceae)、苋科(Amaranthaceae)、眼子菜科(Potamogetonaceae)等 20 科,占总科数的 35.7%;此外还有 29 科只有 1 属,占总科数的 51.8%。

在科内种的组成中,含 6 种以上的科有菊科(32 种)、禾本科(28 种)、蓼科(Polygonaceae)(11 种)、莎草科(10 种)、眼子菜科(10 种)、豆科(7 种)、水鳖科(7 种)、茄科(Solanaceae)(7 种)、伞形科(6 种)、苋科(6 种),共计 10 科,占总科数的 17.9%;含 3~5 种的科共有 7 科,分别是十字花科(5 种)、锦葵科(5 种)、紫草科(Boraginaceae)(5 种)、唇形科(Lamiaceae)(4 种)、天南星科(Araceae)(4 种)、蔷薇科(Rosaceae)(4 种)、车前科(Plantaginaceae)(3 种),占总科数的 12.5%;含 2 种的科有 13 科,占总科数的 23.2%;仅含 1 种的科有 26 科,占总科数的 46.4%。

在属内种的组成中,有 132 个属只含有 1 种,占总属数的 84.6%;含 2~4 种的属有 20 个,占总属数的 12.8%;含种较多的属有 4 个,分别为眼子菜属(*Potamogeton*)(9 种)、蒿蓐属(*Polygonum*)(7 种)、蒿属(*Artemisia*)(6 种)、莎草属(*Cyperus*)(5 种),仅占总属数的 2.6%。

2.1.2 分布情况 在湖滨带的所有调查中出现频数不低于 15 次的物种共有 28 种,其中湿生植物 13 种,有狗牙根、喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)、紫茎泽兰(*Ageratina adenophora*)、飞蓬

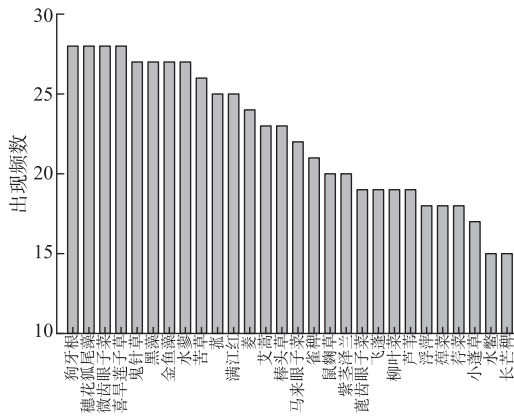


图2 各水生植物物种在所有采样点的出现频数  
Fig.2 Occurrence frequency of each aquatic plants species at all sampling sites

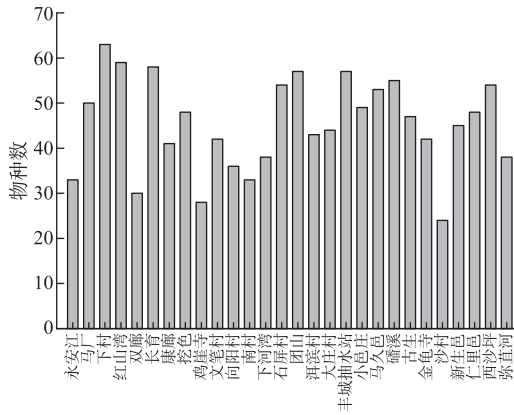


图3 各采样点出现的水生植物物种数  
Fig.3 The number of aquatic plants species present at each sampling site

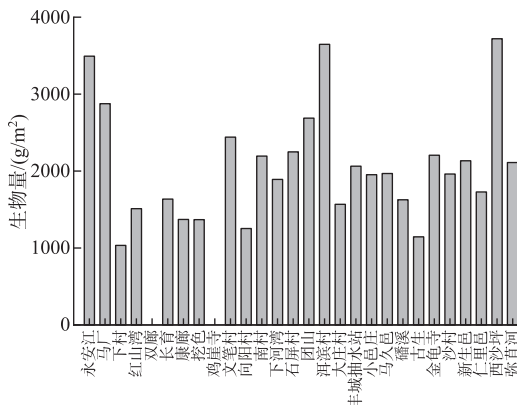


图4 各样点的水生植物生物量  
Fig.4 The biomass of aquatic plants at each sampling site

(*Erigeron acris*)、柳叶菜(*Epilobium hirsutum*)等;挺水植物3种,为水蓼(*Polygonum hydropiper*)、菰、芦苇(*Phragmites australis*);沉水植物7种,为穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)、微齿眼子菜(*Potamogeton maackianus*)、黑藻(*Hydrilla verticillata*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、苦草、马来眼子菜(*Potamogeton wrightii*)、菹齿眼子菜(*Stuckenia pectinata*);漂浮植物2种,为满江红(*Azolla pinnata*)、浮萍(*Lemna minor*);浮叶植物3种,为菱、荇菜(*Nymphaoides peltata*)、水鳖(*Hydrocharis dubia*)(图2)。

28个样点调查到的物种数从24到63种不等,平均物种数为45种(图3);各样点生物量也有较大差异,最小生物量为1034.03 g/m<sup>2</sup>,而最大生物量达到3719.86 g/m<sup>2</sup>,平均生物量为1922.69 g/m<sup>2</sup>(图4)。物种数和生物量较大的区域为海西沿岸,平均物种数为47种,平均生物量为2184.41 g/m<sup>2</sup>,海东沿岸平均物种数为43种,平均生物量为1620.71 g/m<sup>2</sup>。

2.1.3 多样性现状 多样性指数分析结果显示各样点水生植物群落间α-多样性指数变化较小。其中, Margalef物种丰富度指数在洱海最北点位最高(1.69),小邑庄最低(0.92);Simpson多样性指数在红山湾和马久邑最大(0.84),下河湾最小(0.56);Shannon-Wiener指数在红山湾最大(2.08),弥直河最小(1.35);Pielou均匀度指数在马久邑最高(0.84),下河湾最小(0.56)(表1)。

2.2 区系成分分析

2.2.1 科的分布区类型 据李锡文<sup>[22]</sup>提出的中国种子植物科的分布区类型划分规则,洱海湖滨带水生植物可以划分为6个地理分布区类型(表2);其中世界分布29科,占总科数的51.78%;泛热带分布16科,占总科数的28.57%;北温带分布8科,占总科数的14.28%;热带亚洲和热带美洲间断分布、东亚和北美洲间断分布、东亚分布各1科,合计占总科数的5.37%。世界分布的有金鱼藻科(*Ceratophyllaceae*)、眼子菜科、泽泻科(*Alismataceae*)等;泛热带分布的有水鳖科、雨久花科(*Pontederiaceae*)、鸢尾科(*Iridaceae*)等;北温带分布的有毛茛科(*Ranunculaceae*)、蓼科、忍冬科(*Caprifoliaceae*)等;热带亚洲和热带美洲间断分布的为美人蕉科(*Cannaceae*);东亚和北美洲间断分布的为莲科(*Nelumbonaceae*);东亚分布的为菊科。

2.2.2 属的分布区类型 据吴征镒提出的<sup>[23]</sup>中国种子植物属的分布区类型划分规则,洱海湖滨带水生植物可以划分为14个地理分布区类型(表2);其中世

表 1 洱海湖滨带各样点水生植物的  $\alpha$ -多样性指数Tab.1  $\alpha$ -diversity index of aquatic plants at each sampling site in Lake Erhai lakeshore zone

样点	Margalef 指数	Simpson 指数	Shannon-Wiener 指数	Pielou 均匀度 指数	样点	Margalef 指数	Simpson 指数	Shannon-Wiener 指数	Pielou 均匀度 指数
永安江	1.16	0.80	1.83	0.76	团山	1.29	0.72	1.70	0.69
洱海最北	1.69	0.77	1.91	0.71	洱滨村	1.08	0.60	1.39	0.60
下村	1.50	0.80	1.93	0.77	大庄村	0.94	0.68	1.53	0.73
红山湾	1.40	0.84	2.08	0.83	丰城抽水站	1.34	0.76	1.73	0.73
双廊	—	—	—	—	小邑庄	0.92	0.69	1.51	0.73
长育	1.57	0.81	2.00	0.78	马久邑	1.35	0.84	2.01	0.84
康廊	1.43	0.79	1.92	0.78	礐溪	1.24	0.73	1.63	0.71
挖色	1.28	0.83	2.01	0.85	古生	1.14	0.69	1.49	0.78
鸡崖寺	—	—	—	—	金龟寺	1.38	0.71	1.59	0.65
文笔村	1.22	0.76	1.82	0.76	沙村	1.31	0.65	1.54	0.62
向阳村	1.09	0.76	1.68	0.76	新生邑	1.00	0.71	1.53	0.72
南村	1.08	0.72	1.59	0.71	仁里邑	1.54	0.79	1.94	0.76
下河湾	1.20	0.56	1.29	0.56	西沙坪	1.06	0.69	1.52	0.65
石屏村	1.29	0.71	1.61	0.67	弥直河	1.06	0.64	1.35	0.59

—:未获得生物量数据。

界分布的属 48 属, 占总属数的 30.77%; 热带分布 53 属, 占总属数的 33.98%, 其中以泛亚热带属最多, 为 31 属, 占总属数的 19.88%; 温带分布的属共有 55 属, 占总属数的 35.25%, 其中以北温带分布较多, 共 32 属, 占总属数的 20.51%, 其次是旧世界温带分布, 有 10 属, 占总属数的 6.41%。世界分布属有轮藻属 (*Chara*)、茨藻属 (*Najas*)、眼子菜属等 48 属; 泛热带分布有水车前属 (*Ottelia*)、苦草属 (*Vallisneria*)、鸭跖草属 (*Commelina*) 等 31 属; 热带亚洲和热带美洲间断分布有凤眼莲属 (*Eichhornia*)、赛葵属 (*Malvastrum*)、紫茎泽兰属 (*Ageratina*) 等 7 属; 旧世界热带分布有水鳖属 (*Hydrocharis*)、香茶菜属 (*Isodon*)、艾纳香属 (*Blumea*); 热带亚洲及热带大洋洲分布有黑藻属 (*Hydrilla*) 和通泉草属 (*Mazus*); 热带亚洲及热带非洲分布有芒属 (*Miscanthus*)、紫雀花属 (*Parochetus*)、野茼蒿属 (*Crassocephalum*) 等 7 属; 热带亚洲 (印度—马来西亚) 分布有芋属 (*Colocasia*)、薏苡属 (*Coix*)、细圆藤属 (*Pericampylus*); 北温带分布有慈姑属 (*Sagittaria*)、锦葵属 (*Malva*)、忍冬属 (*Lonicera*) 等 32 属; 东亚和北美洲间断分布有菰属 (*Zizania*)、莲属 (*Nelumbo*)、菖蒲属 (*Acorus*) 等 6 属; 旧世界温带分布有水鳖属、菱属 (*Trapa*)、水芹属 (*Oenanthe*) 等 10 属; 温带亚洲分布有防风属 (*Saposhnikovia*)、附地菜属 (*Trigonotis*)、黏冠草属 (*Myriactis*); 地中海区、西亚至中亚分布及其变形有茴香属 (*Foeniculum*); 东亚分布有拟鼠麴草属 (*Pseudognaphalium*); 而中国特有种有盒子草属 (*Actinostemma*) 和假还阳参属 (*Crepidiastrum*)。

2.2.3 种的分布区类型 据吴征镒等<sup>[24]</sup>对中国种子植物种的分布区类型划分系统, 洱海湖滨带水生植物可划分为 14 个地理分布区类型 (表 2); 其中世界分布种有 83 种, 占总种数的 40.28%; 热带分布有 55 种, 占总种数的 26.71%, 以泛热带分布为最多, 共 33 种, 占总种数的 16.02%, 热带亚洲和热带美洲间断分布、热带亚洲及热带非洲分布各 7 种, 分别占总种数的 3.40%; 温带成分有 65 种, 占总种数的 31.55%, 其中北温带分布有 44 种, 占总种数的 21.35%, 其次是旧世界温带分布, 共 11 种, 占总种数的 5.34%; 东亚分布仅 1 种, 即鼠麴草 (*Pseudognaphalium affine*); 中国特有种有 2 种, 为盒子草 (*Actinostemma tenerum*) 和假还阳参 (*Crepidiastrum lanceolatum*)。世界分布种有菹草 (*Potamogeton crispus*)、微齿眼子菜、大茨藻 (*Najas marina*) 等 83 种; 泛热带分布种有海菜花、水蕴草 (*Egeria densa*)、刺苦草 (*Vallisneria spinulosa*) 等 33 种; 热带亚洲和热带美洲间断分布种有凤眼莲 (*Eichhornia crassipes*)、美人蕉 (*Canna indica*)、紫茎泽兰等 7 种; 旧世界热带分布种有水鳖、扫帚草 (*Isodon ternifolius*)、六耳铃 (*Blumea sinuata*); 热带亚洲及热带大洋洲分布种有黑藻、通泉草 (*Mazus pumilus*); 热带亚洲及热带非洲分布种有五节芒 (*Miscanthus floridulus*)、菴草 (*Arthraxon*)

表2 洱海湖滨带水生植物分布区类型

Tab.2 Distribution types of aquatic plants in Lake Erhai lakeshore zone

分布区类型	科	占比/%	属	占比/%	种	占比/%
1.世界分布	29	51.78	48	30.77	83	40.28
2.泛热带分布	16	28.57	31	19.88	33	16.02
3.热带亚洲和热带美洲间断分布	1	1.79	7	4.49	7	3.40
4.旧世界热带分布	—	—	3	1.92	3	1.46
5.热带亚洲及热带大洋洲分布	—	—	2	1.28	2	0.97
6.热带亚洲及热带非洲分布	—	—	7	4.49	7	3.40
7.热带亚洲(印度-马来西亚)分布	—	—	3	1.92	3	1.46
8.北温带分布	8	14.28	32	20.51	44	21.35
9.东亚和北美洲间断分布	1	1.79	6	3.85	6	2.91
10.旧世界温带分布	—	—	10	6.41	11	5.34
11.温带亚洲分布	—	—	3	1.92	3	1.46
12.地中海区、西亚至中亚分布及其变形	—	—	1	0.64	1	0.49
13.东亚分布	1	1.79	1	0.64	1	0.49
14.中国特有种	—	—	2	1.28	2	0.97
合计	56	100	156	100	206	100

hispidus)、野苘蒿(*Crassocephalum crepidioides*)等7种;热带亚洲(印度-马来西亚)分布种有野芋(*Colocasia antiquorum*)、薏苡(*Coix lacryma-jobi*)、细圆藤(*Pericampylus glaucus*);北温带分布种有慈姑(*Sagittaria trifolia*)、鸢尾(*Iris tectorum*)、黑三棱(*Sparganium stoloniferum*)等44种;东亚和北美洲间断分布种有菖蒲(*Acorus calamus*)、菰、莲(*Nelumbo nucifera*)等6种;旧世界温带分布种有菱、窃衣(*Torilis scabra*)、苜蓿(*Medicago sativa*)等11种;温带亚洲分布种有附地菜(*Trigonotis peduncularis*)、圆舌粘冠草(*Myriactis nepalensis*)、防风(*Saposhnikovia divaricata*);地中海区、西亚至中亚分布及其变形有茴香(*Foeniculum vulgare*)1种。

### 2.3 主要植物群落

2.3.1 湿生植物群落 洱海湖滨带湿生植物群落主要有狗牙根群落、喜旱莲子草群落、紫茎泽兰群落和长芒稗(*Echinochloa caudata*)群落。其中,狗牙根群落是洱海湖滨带的优势群落,在各样点均有分布,生物量为80~1200 g/m<sup>2</sup>,在优势群落中占比常达到50%~60%,常见伴生种为紫茎泽兰、喜旱莲子草等;喜旱莲子草群落环洱海均有分布,生物量通常在50~2000 g/m<sup>2</sup>之间,在优势群落中占比常达到70%~100%,群落中常伴生狗牙根、双穗雀稗(*Paspalum distichum*)、鬼针草等;紫茎泽兰群落环洱海均有分布,生物量通常在200~4780 g/m<sup>2</sup>之间,在优势群落中占比常达到90%,主要伴生种为飞蓬、鬼针草、棒头草(*Polypogon fugax*)等;长芒稗群落主要分布在弥苴河和沙村,长芒稗在群落中是绝对优势种,生物量通常在250~1800 g/m<sup>2</sup>之间,在优势群落中占比常达到50%,常见伴生种有喜旱莲子草、水蓼、芦苇等。

2.3.2 挺水植物群落 挺水植物群落主要有菖群落、芦苇群落和香蒲(*Typha orientalis*)群落。菖群落作为洱海湖滨带的绝对优势群落,环洱海一周均有分布,且在群落中为绝对优势种,生物量在800~9200 g/m<sup>2</sup>之间,在优势群落中占比常达到85%~95%,伴生种主要有芦苇、狗牙根、水蓼等;芦苇群落分布面积较小,且分布主要集中在洱海西岸,现存群落多为人工恢复而来,其生物量较高,在800~13800 g/m<sup>2</sup>之间,在优势群落中占比常达到60%~95%,常见伴生种为风眼莲、满江红、狗牙根等;香蒲群落在洱海分布较少见,主要集中在洱海北部,且常与菖群落交错,生物量通常在600~14100 g/m<sup>2</sup>之间,在优势群落中占比常达到70%~100%,常见伴生种为菖、喜旱莲子草、柳叶菜等。

2.3.3 沉水植物群落 洱海湖滨带主要沉水植物群落有9种,其中苦草群落环洱海一周均有分布,东部沿线分布相对较多,分布水深范围涵盖1.0~5.5 m,最适分布水深在3.5~5.0 m之间,主要分布在坡度较大的深水区域,伴生有微齿眼子菜、金鱼藻、黑藻等物种,群落覆盖度较低,一般生物量较大,通常为400~3200 g/m<sup>2</sup>;金鱼藻群落一般为单优势种或主要优势种的群落结构,环湖一周均有分布,生物量常在200~5600 g/m<sup>2</sup>之间,在优势群落中占比最高达到90%以上,北部湖湾中金鱼藻生物量较大,尤其在沙坪湾及周边区域、东岸

局部区域(挖色、鸡崖寺、康廊、长育一带)的水生植物群落中金鱼藻的优势度极高,尤其是在深水区域,常伴生有微齿眼子菜、穗花狐尾藻、光叶眼子菜(*Potamogeton lucens*)、苦草等物种;微齿眼子菜群落沿全湖一周均有分布,主要分布在洱海北部、西部沿线,以及东部的挖色、长育附近,南部分布相对较少,分布的水深范围涵盖 0.5~5.0 m 的大部分区域,最适分布水深 2.5~3.0 m,作为优势种的微齿眼子菜一般占据中等水深的大面积区域,其附近的浅水区中物种多样性较高,伴生有金鱼藻、穗花狐尾藻、苦草、黑藻、光叶眼子菜等物种,群落覆盖度一般达到 75% 以上;马来眼子菜群落主要分布在海西沿岸,海东沿岸零星可见,生物量通常在 200~3200 g/m<sup>2</sup>,常见伴生种为菹齿眼子菜、苦草、穗花狐尾藻等;较少的区域形成以黑藻为优势种的群落结构,其主要分布在洱海西岸,仁里邑、西沙坪和东沙坪是黑藻分布相对集中的区域,东南侧湖湾中也有分布,大多群落中黑藻都是作为主要伴生种组成水生植物群落,尤其在苦草群落中常见,常见伴生种为苦草、金鱼藻、微齿眼子菜等;金鱼藻-微齿眼子菜群落主要分布在大营、东沙坪、西沙坪、石屏村、康郎等地,其他点零星可见,通常共同占比达到 80% 以上,主要伴生种为黑藻、马来眼子菜、穗花狐尾藻等;微齿眼子菜-苦草群落在弥苴河口、向阳湾、文笔村、双廊湾的分布较为典型,群落生物量较大,伴生种有穗花狐尾藻、菹齿眼子菜、黑藻等;微齿眼子菜-马来眼子菜群落以马久邑处较为典型,群落生物量适中,常见伴生种有菹齿眼子菜、穗花狐尾藻、金鱼藻、黑藻等;苦草-金鱼藻群落全湖均有分布,植物群落内部占比能达到 100%,主要在海西沿岸,群落生物量较高,常见伴生种为黑藻、马来眼子菜、微齿眼子菜等。

2.3.4 浮叶植物群落 浮叶植物群落主要为菱群落和荇菜群落。菱群落在洱海湖滨带近岸处几乎都有分布,生物量通常为 40~400 g/m<sup>2</sup>,在水面常形成 100% 单优种群落,但水下常伴有其他沉水植物,常见伴生种有马来眼子菜、光叶眼子菜、黑藻、苦草等;荇菜群落在洱海东西两岸均有分布,分布面积相对较少,主要集中在挖色、长育、南村、石屏村等地,生物量通常为 50~1400 g/m<sup>2</sup>,在水面形成优势种群落中占比常达到 90%~100%,伴生种为海菜花、黑藻、苦草、马来眼子菜等。

### 3 讨论

洱海水生植物资源的调查自 1960s 开始已有,调查的方式以及侧重点各有不同,因此获得的水生植物种数也多有变化,总体变化是由少到多(表 3)。本次调查共发现洱海湖滨带水生植物 56 科、156 属、206 种;按照生活型划分为湿生植物 149 种,属 38 科 119 属;挺水植物 24 种,属 13 科 18 属;沉水植物 21 种,属 6 科 11 属;漂浮植物 7 种,属 4 科 6 属;浮叶植物 5 种,属 5 科 5 属。相比前人的研究,本研究中发现的物种数最多(149 种),对湿生植物的调查也更为详尽;挺水植物由最初调查的 4 种增加到了本次的 24 种。这可能是由调查范围及调查深度的不同导致的,本次调查针对洱海湖滨带季节性淹水区域进行了不同季节的调查,相较前人的单次调查会采集到更多不同季节出现的物种。水生植物的生长繁殖依赖于水环境,近 10 年,由于国家“水体污染控制与治理”重大专项、“三退三还”以及 2017 年以来的洱海修复工程等影响,水体以及湖滨

表 3 不同时期洱海水生植被统计  
Tab.3 Aquatic plants statistics in Lake Erhai in different periods

时间	科数	属数	种数	湿生植物	挺水植物	沉水植物	浮叶植物	漂浮植物	参考文献
1977 年	19	30	40	13	4	15	3	5	[19]
1983 年	17	24	32	8	4	13	3	4	[9]
1986 年	26	44	61	18	11	19	7	6	[25]
1989 年	—	—	40	8	6	18	4	4	[13]
1996 年	19	26	35	8	6	12	4	5	[26]
1997 年	—	—	45	11	9	13	7	5	[14]
2005 年	26	44	61	29	—	19	7	6	[16]
2009 年	38	76	100	—	—	—	—	—	[17]
2009 年	47	108	145	75	15	26	7	7	[7]
2014 年	17	—	32	—	8	15	4	5	[18]
2016 年	56	144	199	—	—	—	—	—	[27]

带生境都有较大改善,水生植物获得了良好的生存环境,相比生态修复工程前,修复后的物种多样性有了明显提升,其中沉水植物重新达到 20 种以上,挺水植物更是达到了 24 种,湿生植物也达到了 149 种,因此洱海植物种类的多样性有了明显提高。

调查中发现,洱海湖滨带水生植物分布情况呈现明显的在洱海西岸大于东岸的情况。从物种数以及生物量来看,海西明显多于海东;从多样性来看,较高的多样性也同样存在于海西沿岸。这可能是由于洱海本身地理条件所决定,海西沿岸坡度较小,湖滨带面积较大,且底质多为泥沙质,因此水生植物具有良好的生存条件;海东沿岸坡度较大,且沿岸多为大块砾石,不适宜水生植物生长,并且海东沿岸受风向影响,有较大风浪冲击岸坡,也不适宜植物生长。因此相比较来看,海西适宜植物生长,对维持洱海湖滨带水生植物多样性来说,首先应重点关注海西沿岸,同时应着力改善海东岸带生存环境,促进海东物种多样性的增加。

本次调查到的洱海湖滨带水生植物区系分布仍以世界分布和热带分布为主,特有种分布较少,这与前人的研究结果相似<sup>[13,17]</sup>。洱海处于低纬度的云贵高原上,年均温度变化较小,且水体温度变化也不明显。因此使得广布种、热带亚热带分布种出现较多。相比陆生生境而言,水生生境具有更高稳定性,可以缓冲环境变化带来的影响,因此水生植物具有更广的分布范围<sup>[28]</sup>。

洱海湖滨带共有 18 个主要植物群落类型,当前菰群落仍为洱海湖滨带主要植物群落中的绝对优势群落<sup>[7]</sup>,芦苇群落得到进一步恢复;微齿眼子菜群落和金鱼藻群落成为沉水植物群落中的绝对优势群落,苦草群落也占有一定生态位,而一些共优群落如金鱼藻-微齿眼子菜群落、苦草-金鱼藻群落也很常见。特别是生态修复工程实施以来,洱海湖滨带主要植物群落结构组成有了改善,共优群落类型有所增加,群落整体以及群落物种多样性均有所恢复。

综上,洱海水环境及湖滨带在经过 10 余年的恢复和治理以后,整体生境有了较大改善,水生植物多样性有了较大提高,后续应继续加强对洱海水生植物变化的监测,加强特有种及濒危植物的恢复和重建,同时应着重关注外来入侵种的变化,为生态系统健康发展提供保障。

#### 4 参考文献

- [ 1 ] Ostendorp W, Schmieder K, Jöhnk K. Assessment of human pressures and their hydromorphological impacts on lakeshores in Europe. *Ecology and Hydrobiology*, 2004, **4**(4): 379-395.
- [ 2 ] 叶春. 退化湖滨带水生植物恢复技术及工程示范研究[学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [ 3 ] Yan CZ, Jin XC, Zhao JZ *et al.* The functions of lakeside zone and its management. *Ecology and Environmental Sciences*, 2005, **14**(2): 294-298. [ 颜昌宙, 金相旭, 赵景柱等. 湖滨带的功能及其管理. *生态环境*, 2005, **14**(2): 294-298. ]
- [ 4 ] Schmieder K. European lake shores in danger—Concepts for a sustainable development. *Limnologia*, 2004, **34**(1/2): 3-14. DOI: 10.1016/s0075-9511(04)80016-1.
- [ 5 ] Tian YQ, Shi DL, Zhang SQ *et al.* Biogeographic pattern, main community types, and the influencing factors of aquatic macrophytes in the Hexi Corridor of Northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(1): 202-212. [ 田玉清, 石道良, 张淑倩等. 河西走廊水生植物多样性格局、群落特征及影响因素. *生态学报*, 2020, **40**(1): 202-212. ]
- [ 6 ] Jeppesen E, Søndergaard M, Mortensen E *et al.* Fish manipulation as a lake restoration tool in shallow, eutrophic temperate lakes 1: Cross-analysis of three Danish case-studies. *Hydrobiologia*, 1990, **200**(1): 205-218. DOI: 10.1007/BF02530340.
- [ 7 ] Li EH, Wang XL, Cai XB *et al.* Features of aquatic vegetation and the influence factors in Erhai lakeshore wetland. *J Lake Sci*, 2011, **23**(5): 738-746. DOI: 10.18307/2011.0511. [ 厉恩华, 王学雷, 蔡晓斌等. 洱海湖滨带植被特征及其影响因素分析. *湖泊科学*, 2011, **23**(5): 738-746. ]
- [ 8 ] Li SH, Yu MJ, Li GZ *et al.* Limnological survey of the lakes of Yunnan Plateau. *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. ]
- [ 9 ] Dai QY. A preliminary study of the aquatic vegetation in Erhaihu Lake. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1984, (4): 31-41. [ 戴全裕. 洱海水生植被的初步研究. *海洋湖沼通报*, 1984, (4): 31-41. ]
- [ 10 ] Dai QY. The ecological characteristics of the aquatic vegetation in the lakes of Fuxianhu, Erhai and Dianchi in Yunnan planteau. *Acta Ecologica Sinica*, 1985, **5**(4): 324-335. [ 戴全裕. 云南抚仙湖、洱海、滇池水生植被的生态特征. *生态学报*, 1985, **5**(4): 324-335. ]
- [ 11 ] Li H. A study on the lake vegetation of Yunnan Plateau. *Acta Botanica Yunnanica*, 1980, **2**(2): 113-139, 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): 113-139, 141. ]
- [ 12 ] Li H. The lake vegetation of Hengduan Mountains. *Acta Botanica Yunnanica*, 1987, **9**(3): 257-270. [ 李恒. 横断山区的湖泊植被. *云南植物研究*, 1987, **9**(3): 257-270. ]



- [13] Li H, Shang YM. Aquatic vegetation in Lake Erhai, Yunnan. *Journal of Mountain Research*, 1989, **7**(3): 166-174. [李恒, 尚榆民. 云南洱海水生植被. 山地研究, 1989, **7**(3): 166-174.]
- [14] Wu QL, Wang YF. On the succession of aquatic communities in Erhai Lake. *J Lake Sci*, 1999, **11**(3): 267-273. DOI: 10.18307/1999.0312. [吴庆龙, 王云飞. 洱海生物群落的历史演变分析. 湖泊科学, 1999, **11**(3): 267-273.]
- [15] Hu XZ, Jin XC, Du BH *et al.* Submerged macrophyte of Lake Erhai and its dynamic change. *Research of Environmental Sciences*, 2005, **18**(1): 1-4, 84. DOI: 10.13198/j.res.2005.01.2.huxzh.001. [胡小贞, 金相灿, 杜宝汉等. 云南洱海沉水植被现状及动态变化. 环境科学研究, 2005, **18**(1): 1-4, 84.]
- [16] Shi JM. Vegetation of Erhai Lake wetland and its protection. *Forest Inventory and Planning*, 2006, **31**(1): 83-87. [施俊美. 洱海湿地植被及其保护. 林业调查规划, 2006, **31**(1): 83-87.]
- [17] Zhang GB, Yang Q, Yang D *et al.* Flora studies on aquatic angiosperm in wetland of Erhai Lake basin. *Journal of Hydroecology*, 2011, **32**(3): 1-8. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2011.03.001. [张桂彬, 杨青, 杨东等. 洱海流域湿地水生被子植物区系研究. 水生态学杂志, 2011, **32**(3): 1-8.]
- [18] Zhao HG, Kong DP, Fan YN *et al.* Current status of aquatic macrophyte and analysis of its variation in lakeside zone of Erhai Lake. *Environmental Science Survey*, 2020, **39**(2): 20-25. [赵海光, 孔德平, 范亦农等. 洱海湖滨带大型水生植物现状及其变化趋势分析. 环境科学导刊, 2020, **39**(2): 20-25.]
- [19] 李恒. 洱海水生植被回顾. 见: 沈仁湘等编. 云南洱海科学论文集. 昆明: 云南民族出版社, 1989: 31-44.
- [20] Fang JY, Wang XP, Shen ZH *et al.* Methods and protocols for plant community inventory. *Biodiversity Science*, 2009, **17**(6): 533-548. [方精云, 王襄平, 沈泽昊等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范. 生物多样性, 2009, **17**(6): 533-548.]
- [21] Ma KP. Measurement method of biological community diversity I. Measurement method of  $\alpha$  diversity (1). *Chinese Biodiversity*, 1994, **2**(3): 231-239. [马克平. 生物群落多样性的测度方法 I  $\alpha$  多样性的测度方法(上). 生物多样性, 1994, **2**(3): 231-239.]
- [22] Li XW. Floristic statistics and analyses of seed plants from China. *Acta Botanica Yunnanica*, 1996, **18**(4): 363-384. [李锡文. 中国种子植物区系统计分析. 云南植物研究, 1996, **18**(4): 363-384.]
- [23] Wu ZY. The areal-types of Chinese genera of seed plants (supplement IV). *Acta Botanica Yunnanica*, 1991: 1-139. [吴征镒. 中国种子植物属的分布类型(增刊IV). 云南植物研究, 1991: 1-139.]
- [24] 吴征镒, 周浙昆, 孙航等. 种子植物的分布区类型及其起源和分化. 昆明: 云南科技出版社, 2006.
- [25] 钱德仁. 洱海水生植被考察. 见: 沈仁湘等编. 云南洱海科学论文集. 昆明: 云南民族出版社, 1989: 45-67.
- [26] Dong YX, Xie JP, Dong YS *et al.* Water vegetation resources of Erhai Lake and its sustainable utilization ways. *Ecological Economy*, 1996, (5): 15-19. [董云仙, 谢建平, 董云生等. 洱海水生植被资源及其可持续利用途径. 生态经济, 1996, (5): 15-19.]
- [27] Lu SY, Zhang SL, Jin X *et al.* Analysis of main rivers vegetation features in Erhai lakeside and buffer zone. *Science & Technology Review*, 2017, **35**(9): 41-49. [卢少勇, 张森霖, 金鑫等. 洱海湖滨缓冲带主要入湖河流植被特征分析. 科技导报, 2017, **35**(9): 41-49.]
- [28] Philbrick CT, Les DH. Evolution of aquatic angiosperm reproductive systems. *BioScience*, 1996, **46**(11): 813-826. DOI: 10.2307/1312967.