

热带水库消落区植物群落物种组成与结构特征——以海南松涛水库为例*

丁扬¹, 姜百惠¹, 丁鑫², 杨帆^{1**}, 孙涛¹

(1: 海南大学热带农林学院, 海口 570228)

(2: 中国科学院西双版纳热带植物园综合保护中心系统发育与保护生物学实验室, 昆明 650223)

摘要: 消落区是河流、湖泊和水库因阶段性或长期性的水位涨落而反复淹没或出露而形成的一种特殊的季节性湿地。消落区植被在维持水陆生态系统的动态平衡、生物多样性、生态安全及生态服务功能等方面发挥着重要作用。通过样方法调查分析了海南松涛水库消落区植物组成、区系特点以及群落分布特征。结果显示: 松涛水库消落区共有维管植物 40 科 101 属 115 种, 其中被子植物 36 科 97 属 111 种, 蕨类植物 4 科 4 属 4 种。植物区系以热带性为主, 外来入侵种较多, 且既耐水淹又耐旱植物众多; 群落以草本、灌木植物为主, 乔木较少且大多以幼苗形式存在。主要群落类型为以铺地黍 (*Panicum repens*) 为优势种的复合群落, 个别区域零散分布有美洲蟛蜞菊 (*Wedelia trilobata*)、光荚含羞草 (*Mimosa sepiaria*)、猪屎豆 (*Crotalaria pallida*)、马松子 (*Melochia corchorifolia*)、假臭草 (*Praxelis clematidea*) 和铺地黍等单优群落。消落区不同海拔区间群落分布存在明显差异, 物种多样性从高到低呈显著递减趋势。研究结果可为松涛水库消落区植被恢复工作提供科学指导。

关键词: 生物多样性; 物种组成; 消落区; 植物群落; 植物区系; 松涛水库

Species composition, structure characteristics of plant communities in the water-level-fluctuation zone of tropical reservoirs: A case study on the Songtao Reservoir, Hainan

DING Yang¹, JIANG Baihui¹, DING Xin², YANG Fan^{1**} & SUN Tao¹

(1: Tropical Agriculture and Forestry Department Hainan University, Haikou 570228, P.R.China)

(2: Laboratory of Plant Phylogenetics and Conservation, Center for Integrative Conservation, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, P.R.China)

Abstract: Water-level-fluctuating Zone (WLFZ), is formed due to periodical or long-term water level fluctuation of rivers, lakes and reservoir, belonging to a seasonal wetland. The vegetation in the WLFZ plays a crucial role in keeping dynamic balances of terrestrial-aquatic ecosystems, biodiversity, ecological security as well as ecological services. The investigation of plant compositions, flora characteristics and community distribution characteristics resulted from vegetation were performed in present research. Results showed that a total of 115 vascular plant species belonging to 40 families and 101 genera were found in the WLFZ of the Songtao Reservoir, Hainan. In addition, 4 fern species belonging to 4 families and 4 genera were found among them. The typical tropical characters of these plant species were found via flora analyses. A large percentage of the exotic invasive species and amphibious plants with flooding tolerances and drought tolerances were found. There were many herbs and shrubs in plant communities, whereas a few arbor species with annual seedlings existed. Many *Panicum repens* dominant compound communities were distributed in the WLFZ. In addition, a few dominant communities, such as *Wedelia trilobata*, *Mimosa sepiaria*, *Crotalaria pallida*, *Melochia corchorifolia*, *Praxelis clematidea*, and *Panicum repens*, were found in some plots. Significant differences in community distributions among altitudes occurred. Along with elevation reduction, the species diversity decreased significantly. The results of this study may

* 国家自然科学基金项目 (31660165)、海南大学科研启动项目 (kyqd1573) 和海南省自然科学基金项目 (317052, 120164161) 联合资助。2017-12-31 收稿; 2018-03-18 收修改稿。丁扬 (1987 ~), 男, 博士研究生; E-mail: 530919583@qq.com。姜百惠 (1991 ~) (并列第一作者), 女, 硕士研究生; E-mail: 1320031847@qq.com。

** 通信作者; E-mail: yangfan@hainu.edu.cn。

provide scientific guidance for the revegetation activities in the WLFZ of the Songtao Reservoir.

Keywords: Biodiversity; species composition; water-level-fluctuating zone; plant community; flora; Songtao Reservoir

湿地是自然界中最富生物多样性的生态景观和重要的生物生存环境,也是人类社会赖以生存和发展的重要基础. 消落区(带)是河流、湖泊和水库因阶段性或长期性的水位涨落而反复淹没或出露而形成的一种特殊的季节性湿地^[1]. 消落区生态系统兼具水、陆生态系统特点,在维持水陆生态系统的动态平衡、生物多样性、生态安全及生态服务功能等方面发挥着重要作用. 然而,由于水位阶段性涨落,特别是受到人为调控的影响,消落区生态系统相对脆弱,也极易发生污染物积累、水土流失、生物多样性减少等特殊水文条件下的生态环境问题. 作为生态系统功能的主体^[2],消落区植被具有调节水质、截留污染物和营养物质、保持水土等生态功能^[3-8],此外还是重要的生态廊道,亦发挥着重要的生态美学功能. 因此,针对消落区内植物退化、生态系统结构和功能干扰严重区域,开展植被恢复和重建工作,显得尤为迫切.

目前,我国关于消落区植被的研究主要集中在三峡水库^[1,9-12],针对热带地区的研究较少,而处于不同气候带的消落区在植物种类、种群结构、土壤特征、水热条件等方面均存在差异. 松涛水库是典型的热带水库,本研究以之为对象,研究热带地区水库消落区的植被状况,弄清其植物种类组成、群落特征,为开展植物分布与环境梯度关系、不同植被型土壤物质能量循环、生态重建适宜植物筛选、不同区域植被重建模式等后续研究提供基础.

松涛水库周边以农业经济为主,水库集水区现有农业生产用地主要包括水田、旱地、橡胶林、果园等. 随着松涛水库流域的经济快速发展,库区内的畜禽养殖废水以及工业和生活污水的排放,造成水体中有机物污染加重,而农业种植过程中施用的农药及化肥,随降雨形成的径流和渗流进入水体,导致水质恶化,并存在水体富营养化的潜在危害. 此外,大片单一模式橡胶林种植,也加重了库岸区域水土流失^[13]的风险. 因此,松涛水库消落区植被的维持及其生态功能的发挥,对水库水体健康的保障作用至关重要. 通过对松涛水库消落区植被调查,可以了解消落区的植被生长状况和变化规律,进而初步了解其在特殊水文条件下的维持机制,并在此基础上为热带、亚热带河流、湖泊等消落区植被恢复工作提供基础数据和科学指导.

1 研究地概况

松涛水库(19°10'~19°25'N, 109°28'~109°41'E)流域位于海南省儋州市、白沙县境内,流域面积1503.27 km²(图1). 松涛水库,又名松涛湖,是海南省最大的淡水湖泊,具有农业灌溉、防洪、供水、发电、通航和养殖等功能. 流域大部分位于海南中部山区国家级生态功能保护区,是海南岛的生态核心区域,库盘大致呈一由

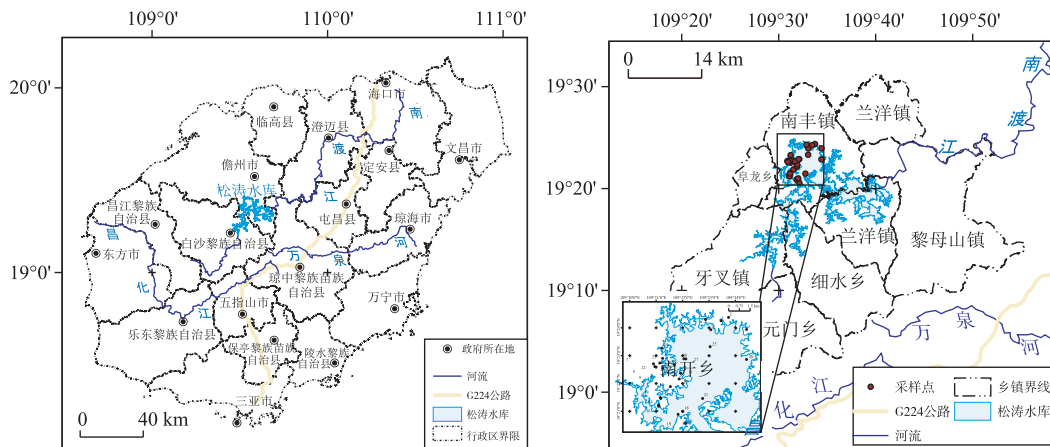


图1 松涛水库地理位置及植被调查采样点分布

Fig.1 Geographical location of Songtao Reservoir and the space distribution of vegetation investigation sampling sites

南至北转向东北的狭长盆地地形,地势西南高东北低. 水库总库容 33.45 亿 m^3 , 正常库容 25.95 亿 m^3 , 死库容 5.12 亿 m^3 . 多年平均入库流量为 52.83 m^3/s , 多年平均入库总水量为 16.66 亿 m^3 . 松涛水库最高洪水水位 195.3 m, 设计洪水水位线为国家 85 高程 193.031 m, 正常水位 190 m, 死水位 165 m. 2012—2016 年松涛水库的水位波动情况如图 2 所示, 水位大致呈现秋冬较高、春季开始下降、夏季水位最低这一趋势, 与三峡水库水文变动趋势大致吻合, 只是最高、最低水位间高差显著小于三峡水库. 处于 187 m 以上水位的时间大致 2 个月左右, 处于 184 m 以上水位的时间大致在 6 个月左右. 松涛水库是海南省最大的饮用水源保护区, 也是海南省最重要的灌溉水源, 同时担负着周边多个县市生产和生活用水的重要供水作用.

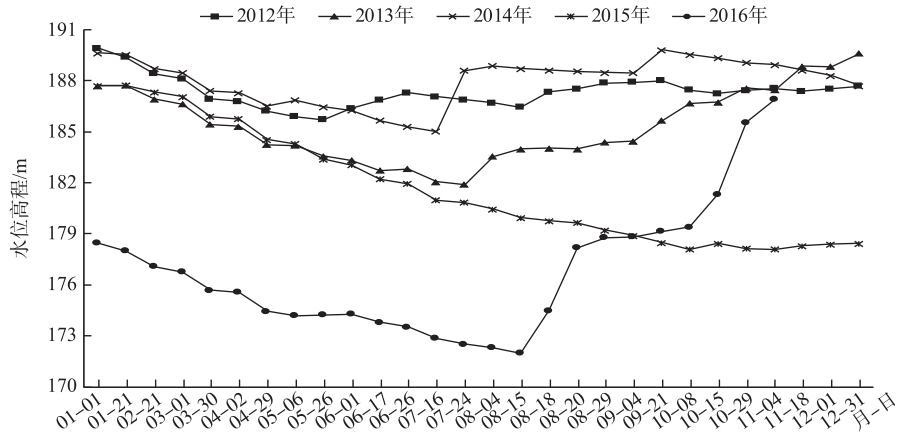


图 2 松涛水库 2012—2016 年水位变化

Fig.2 The water level of Songtao Reservoir during 2012—2016

2 研究方法

2.1 调查方法

于 2017 年 7 月, 乘渔船环松涛水库消落区先对消落区植被进行总体考察, 根据消落区类型、消落区内植被状况、植被特点等综合因素最终确定调查样带. 选定调查样带后, 于 2017 年 7—8 月在海拔 182~190 m 区间调查该样带内的所有植物, 每条样带大约 20~40 m. 调查结束后, 整理所有样带植物图片和标本, 植物鉴定参照文献[14-15], 最终确定植物及种数.

2.2 数据分析

2.2.1 植物区系分布类型统计 植物区系成分分布类型参照世界种子植物科的分布区类型系统^[16]以及中国种子植物属的分布区类型^[17].

2.2.2 植物群落的数量特征分析 根据松涛水库消落区植被分布特征(多为草本植物, 乔木分布较少, 且无高大灌木), 选取相对频度、相对高度和相对盖度作为计算群落内灌木和草本各物种重要值的依据^[12,18-19], 同时计算植物的相应指标.

$$\text{重要值}(IV) = (\text{相对频度} + \text{相对盖度} + \text{相对高度}) / 3 \quad (1)$$

$$\text{相对频度} = \text{某种的频度} / \text{所有种频度和} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{相对盖度} = \text{某种的盖度} / \text{所有种盖度和} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{相对高度} = \text{某种总高度} / \text{所有种高度和} \times 100\% \quad (4)$$

2.2.3 植物群落的物种多样性统计 综合考虑地质背景、土壤条件、坡度坡向、海拔、人为干扰因素, 在南丰镇主库区选择 28 个样点(图 1), 每个样点长 20~40 m, 并划分 182~184、185~187 和 188~190 m 三个高程区间, 分别在三个区间内观察其植被状况. 为了更好地描述消落区内植物群落特征, 在重要值基础上, 根据主观经验对植物群落类型进行简单划分. 在群落分析时, 选 28 个样点中的 7 个样点(以铺地黍为主要优势种分布较普遍的群落), 在各海拔区间随机选择 1~3 个 2 m×2 m 样方, 在重要值统计基础上, 应用目前最广泛

采用的物种丰富度指数(Gleason 指数, dt)、Simpson 指数(D)、Shannon-Wiener 指数(H')、Pielou 均匀度指数(Jh)来综合分析群落的物种多样性^[20-21].

$$dt = (S-1) / \ln A \quad (5)$$

$$H' = -\sum (P_i \ln P_i) \quad (6)$$

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (7)$$

$$Jh = H / \ln S \quad (8)$$

式中, S 为物种数, A 为样方面积, $P_i = n_i / N$ 代表第 i 个物种的相对多度, N 为所有个体数之和, n_i 为第 i 个物种的个体数.

2.2.4 统计分析 使用 SPSS 20.0 软件, 通过方差分析功能下的 Duncan 法, 计算不同海拔区间群落多样性指数. $P < 0.05$ 表示具有统计学意义.

3 结果

3.1 植物区系基本特征

3.1.1 植物区系的基本构成 根据调查结果统计, 松涛水库消落区内共有维管植物 40 科 101 属 115 种(图 3), 其中被子植物 36 科 97 属 111 种, 蕨类植物 4 科 4 属 4 种. 在 40 个科中, 含有 10 种以上的科为禾本科(Gramineae) 18 种、蝶形花科(Papilionaceae) 17 种、菊科(Compositae) 15 种、大戟科(Euphorbiaceae) 11 种, 5 种以上的科为含羞草科(Mimosaceae) 6 种, 再次为苋科(Amaranthaceae) 4 种, 茜草科(Rubiaceae) 和旋花科(Convolvulaceae) 各 3 种, 紫草科(Boraginaceae)、莎草科(Cyperaceae)、锦葵科(Malvaceae)、桃金娘科(Myrtaceae)、茄科(Solanaceae) 和梧桐科(Sterculiaceae) 各 2 种, 只有 1 种的科有 26 科, 占总科数的 65%. 在 101 属中, 含物种数最多的属是含羞草属(4 种), 含 2 种的属有 11 属, 含 1 种的属有 89 属, 占总属数的 88.12%. 在 115 种中, 草本植物 72 种, 占 62.61%; 灌木植物 23 种, 占 20.00%; 乔木植物 11 种, 占 9.57%; 藤本植物 9 种, 占 7.83%(表 1).

表 1 松涛水库消落区植物物种组成及生活型

Tab.1 Species compositions and life-form of plants in the WLFZ of Songtao Reservoir

类群	物种组成			生活型(比例/%)			
	科	属	种	乔木	灌木	草本	藤本
蕨类植物	4	4	4	—	—	4(3.45)	—
被子植物	36	97	111	11(9.57)	23(20.00)	68(59.13)	9(7.83)
合计	40	101	115	11(9.57)	23(20.00)	72(62.61)	9(7.83)

3.1.2 外来入侵植物统计 在松涛水库 115 种植物中, 外来入侵植物 43 种, 占 37.39%, 隶属于 16 科 38 属. 其中菊科有 12 种, 占总种数的 27.91%, 其次为禾本科、蝶形花科和含羞草科各 5 种, 再次为苋科(4 种), 大戟科 2 种, 其余 10 个种分属于 10 个科. 外来入侵植物来源最多的属是含羞草属(4 种), 其次为苋属(*Amaranthus*) 和藜香蓟属(*Ageratum*) 各 2 种, 余下 35 个种分属于 35 个不同的属. 在所有的外来入侵植物中, 草本植物 27 种, 占 62.79%; 灌木植物 13 种, 占 30.23%; 乔木植物 2 种, 占 4.65%, 藤本植物 1 种, 占 2.33%.

3.2 植物区系地理成分分析

3.2.1 基本区系地理科与属成分分析 根据吴征镒等^[16]对世界植物科的分布类型划分, 对消落区内的被子植物 36 科进行统计, 仅可划分为三个分布型: 世界广布 18 科, 占总科数的 50%, 如禾本科、菊科、蝶形花科、苋科、茜草科和藜科(*Chenopodiaceae*) 等; 泛热带分布 17 科, 占 47.22%, 如大戟科、含羞草科、梧桐科、桃金娘科和楝科(*Meliaceae*) 等; 以及热带亚洲和热带美洲间断分布 1 科, 占 2.78%, 为马鞭草科(*Verbenaceae*) (表 2).

根据吴征镒对我国被子植物属的分布类型划分^[17], 对消落区内的种子植物 97 属进行统计, 可划分为 10 个分布型: 泛热带分布 50 属, 占 51.55%, 如含羞草属、蟛蜞菊属(*Wedelia*)、泽兰属、叶下珠属(*Phyllanthus*) 和猪屎豆属(*Crotalaria*) 等; 旧世界热带分布有 11 属, 占 11.34%, 如木豆属(*Cajanus*)、艾纳香

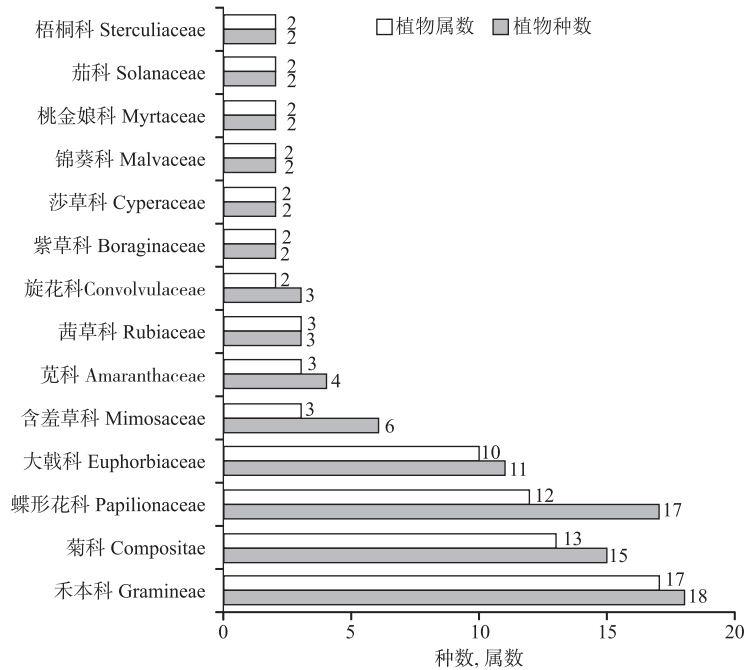


图 3 松涛水库消落区植物种属数排名前 14 的科

Fig.3 Plants ranking in the top 14 at the genera level in the WLFZ of Songtao Reservoir

属 (*Blumea*)、蒲桃属 (*Syzygium*)、野桐属 (*Mallotus*) 和合欢属 (*Albizia*) 等;世界广布及热带亚洲和热带美洲间断分布各 9 属, 均占 9.28%, 世界广布如苋属、刺藜属 (*Dysphania*)、莎草属 (*Cyperus*)、酸浆属 (*Physalis*) 和茄属 (*Solanum*) 等, 热带亚洲和热带美洲间断分布, 如藜香蓟属、银胶菊属 (*Parthenium*)、羽芒菊属 (*Tridax*)、野甘草属 (*Scoparia*) 和木薯属 (*Manihot*) 等; 热带亚洲分布 8 属, 占 8.25%, 如海芋属 (*Alocasia*)、秋枫属 (*Bischofia*)、水柳属 (*Homonoia*) 和木蓝属 (*Indigofera*) 等; 热带亚洲至热带大洋洲分布 4 属, 占 4.12%, 为黑面神属 (*Breynia*)、野牡丹属 (*Melastoma*)、桉属 (*Eucalyptus*) 和野扁豆属 (*Dunbaria*); 其他 4 个分布型均为 1 或 2 属, 占 6.19% (表 2)。

表 2 松涛水库消落区植被科属分布型

Tab.2 Areal-types at family and genus levels of the Angiosperm in the WLFZ of Songtao Reservoir

区系类型	科数	百分比/%	属数	百分比/%
1.世界广布	18	50.00	9	9.28
2.泛热带	17	47.22	50	51.55
3.热带亚洲和热带美洲间断	1	2.78	9	9.28
4.热带亚洲至热带大洋洲	0	0	4	4.12
5.热带亚洲至热带非洲	0	0	2	2.06
6.热带亚洲	0	0	8	8.25
7.北温带	0	0	2	2.06
8.东亚和北美洲间断	0	0	1	1.03
9.旧世界热带	0	0	11	11.34
10.东亚分布	0	0	1	1.03
合计	36	100	97	100

3.2.2 外来入侵植物区系地理科与属成分分析 根据吴征镒等^[16]对世界植物科的分布类型划分,对消落区

内的外来种子植物 16 科进行统计,划分为三个分布型:世界广布 10 科,占 62.50%,如菊科、禾本科、蝶形花科、苋科和藜科等;泛热带分布 5 科,占 31.25%,为含羞草科、大戟科、桃金娘科、商陆科(Phytolaccaceae)和雨久花科(Pontederiaceae);热带亚洲和热带美洲间断分布 1 科,占 6.25%,为马鞭草科。

根据吴征镒^[17]对我国种子植物属的分布类型划分,对消落区内的外来入侵种子植物 38 属进行统计,总共划分为 8 个分布型:泛热带分布 19 属,占 50%,如含羞草属、虻蜚菊属、泽兰属、叶下珠属和猪屎豆属;热带亚洲和热带美洲间断分布 8 属,占 21.05%,如藿香蓟属、银胶菊属、羽芒菊属、野甘草属和木薯属等;世界广布 5 属,占 13.16%,为苋属、刺藜属、黍属(*Panicum*)、商陆属(*Phytolacca*)和酸浆属,其余 5 个分布型均为 1 或 2 属,共占 15.79%(表 3)。

表 3 松涛水库消落区入侵植物科属分布型

Tab.3 Areal-types at family and genus levels of the exotic invasive plants in the WLFZ of Songtao Reservoir

区系类型	科数	百分比/%	属数	百分比/%
1.世界广布	10	62.50	5	13.16
2.泛热带	5	31.25	19	50.00
3.热带亚洲和热带美洲间断	1	6.25	8	21.05
4.热带亚洲至热带大洋洲	0	0	1	2.63
5.热带亚洲至热带非洲	0	0	1	2.63
6.热带亚洲	0	0	2	5.26
7.北温带分布	0	0	1	2.63
8.旧世界热带	0	0	1	2.63
合计	16	100	38	100

3.3 植物群落特征分析

3.3.1 主要群落类型 松涛水库消落区植被分布同时受地质背景、土壤条件、坡度坡向、淹水时间(海拔)、周边居民活动等因素影响。在坡度较大,土壤条件差的地区,植被覆盖较少;在坡度较平缓、土壤条件较好地区,植被覆盖较高。在个别地方,有单优群落出现,但分布较多的还是以铺地黍为优势种的复合群落(表 4)。

表 4 松涛水库消落区主要群落类型及其分布

Tab.4 Main community and their distribution in the WLFZ of Songtao Reservoir

群落类型	主要分布海拔区间/m	重要值	主要生活型
美洲虻蜚菊群落	188~190	0.90	草本
光荚含羞草群落	188~190	0.71	灌木
猪屎豆群落	185~187	0.65	灌木
马松子群落	182~187	0.40	草本
假臭草群落	185~187	0.40	草本
铺地黍群落	182~184	0.38	草本
以铺地黍为优势种的复合群落	182~190	铺地黍(0.43)	多为草本

3.3.2 群落物种多样性 在松涛水库消落区,分布较普遍的群落为以铺地黍为优势种的群落,以此类型群落研究其不同海拔区间的植物物种多样性,更能准确反映该地区的植物群落状况。就 dt 、 H' 、 D 多样性指数而言,高、中和低海拔区间多样性指数差异显著,且呈现从高到低的变化趋势(表 5)。在 Jh 指数上,中海拔区间偏低,高和低海拔区间差异不显著,或低处略高。

4 讨论

4.1 消落区植物区系特点

4.1.1 植物区系以热带性为主 海南省植物区系热带性特别强烈,典型的热带性大科如龙脑香科(Dipterocar-

表 5 松涛水库消落区不同海拔区间群落物种多样性^{*}

Tab.5 Community species diversity at different altitudes in the WLFZ of Songtao Reservoir

多样性指数	高海拔区间	中海拔区间	低海拔区间
<i>dt</i>	21.0635±1.5539 ^a	13.85±0.73563 ^b	5.4822±0.53976 ^c
<i>H'</i>	1.8879±0.4267 ^a	1.5559±0.4267 ^b	1.1737±0.08027 ^c
<i>D</i>	0.8241±0.1104 ^a	0.6589±0.02006 ^b	0.5283±0.01930 ^c
<i>Jh</i>	0.6909±0.01416 ^a	0.7693±0.03318 ^a	0.6588±0.03211 ^b

* 表中数据为均值±标准差,同一行上标不同小写字母表示 $P \leq 0.05$ 水平下显著水平, $n=7$.

paceae)、樟科(Lauraceae)、楝科、棕榈科(Palmae)、梧桐科、桃金娘科、番荔枝科(Annonaceae)、桑科(Moraceae)、无患子科(Sapindaceae)、杜英科(Elaeocarpaceae)、第伦桃科(Dilleniaceae)、山榄科(Sapotaceae)、含羞草科、大戟科和紫金牛科(Myrsinaceae)等成为不同植物群落的建群种、优势种^[22-23]。本研究中,在科的水平上,松涛水库消落区有 18 个热带性分布科,占分布的被子植物总科数的 50%;属的水平上,有 84 个热带性分布的属,占分布的被子植物总属数的 86.60%,体现了海南植物区系强烈的热带性。然而,松涛水库消落区的植物又不足以代表海南植物区系全部特点,龙脑香、樟科、无患子科、杜英科、第伦桃科、山榄科等大型木本类植物的科及一些大型藤本类植物,如密花豆(*Spatholobus suberectus*)、扁担藤(*Tetrastigma planicaule*)、槁藤(*Entada phaseoloides*)等在本研究区域都没有分布。可能是由于消落区阶段性水位波动带来的水淹和干旱胁迫的干扰,只适合生活史较短的草本植物或小灌木生长。从生活型的统计上可以体现,草本植物占 62.61%,乔木只占 9.57%,且大多为落水期间幼苗,藤本植物只有单叶省藤(*Calamus simplicifolius*)和龙珠果(*Passiflora foetida*)等几种草质藤本。

4.1.2 外来入侵植物众多 单家林等^[24]统计表明海南岛的外来植物共有 153 种,彭宗波等^[25]通过调查发现海南共有外来入侵植物 160 种。在本研究中,依据单家林等做的统计,松涛水库就有外来入侵植物 43 种,占整个消落区总物种数的 37.39%,占整个海南岛外来入侵植物的近 1/3。其中不乏已对生态系统造成危害的植物,如飞机草(*Eupatorium odoratum*)、薇甘菊(*Mikania micrantha*)、美洲蜚螞菊、银胶菊(*Parthenium hysterophorus*)、假臭草、假高粱(*Sorghum halepense*)、空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、光荚含羞草和阔叶丰花草(*Borreria latifolia*)等^[24-26]。这些入侵物种经常形成单一的优势群落,通过化感作用或强大的生长能力挤占其他植物生存空间进而影响周围植物和水中生物的生存。在本研究中,研究区阶段性水位波动的干扰造成生态位空缺,美洲蜚螞菊、假臭草、光荚含羞草、阔叶丰花草、含羞草等外来物种趁机入侵,并大量繁殖,多以单优群落或复合群落出现(表 4)。在今后的水库管理中可以人为清除这些入侵植物,并对这些极具危害种进行有效的监控,防止其再次蔓延而造成更大危害。在这些外来入侵种中,草本和灌木植物占 93.02%,主要来自菊科、禾本科和含羞草科等,主要因为这些种类入侵性和对环境的适应性极强,而乔木类较少,仅有窿缘桉(*Eucalyptus exserta*)和马占相思(*Acacia mangium*),往往也不构成危害。在所有的外来入侵种中,有 29 个物种来源于中南美洲,因此有必要在与该地区的人流和物流上,加强检验检疫。

4.1.3 湿生植物较多 既耐水淹又耐旱的湿生植物始终是消落区生态系统的重要组成部分^[27],许多拥有发达的匍匐茎和根状茎的多年生草本植物,其具有广泛和强大的适应性,既在丰水期耐水淹,又在枯水期耐旱,可作为消落区植被恢复的先锋物种,如铺地黍^[28]、狗牙根(*Cynodon dactylon*)^[29-30]、芦苇(*Phragmites australis*)^[31-32]、李氏禾(*Leersia hexandra*)^[33-34]、香根草(*Vetiveria zizanioides*)^[35]和芦竹(*Arundo donax*)^[36-38]等。在松涛水库消落带内,这些植物都有分布,即便外来入侵种不作考虑外,还有莎草(*Cyperus* sp.)、畦畔飘拂草(*Fimbristylis squarrosa*)、鸭嘴草(*Paspalum scrobiculatum*)、斑茅(*Saccharum arundinaceum*)、粽叶芦(*Thysanolaena latifolia*)、叶下珠(*Phyllanthus urinaria*)、乌墨(*Syzygium cumini*)等,这些植物可以作为消落区植被恢复的适宜物种。

4.2 消落区植物群落分布特征

松涛水库消落区主要以草本群落为主,多为以铺地黍为优势种的复合群落。在个别地区较高海拔区间偶有猪屎豆、含羞草等单优灌木群落。乔木群落较少且比较单一,主要是人工种植的光荚含羞草群落,极个

别地区有稀疏隆缘桉生长。尽管在消落区中,乔木植物占了植物种数的9.57%(表1),但多为临时植被,不能完成生活史,在海拔较低处,均以幼苗形式存在。而且,其生物量分布较少,重要值几乎为零。此群落组分构成主要是由于水淹时间长短造成的:在低海拔区域,水淹时间较长,两次水淹之间的落干期较短,只适合一些生活史较短、且耐水淹的草本植物生存;在海拔较高区间,落干期较长,适合一些灌木、亚灌木生长并完成其生活史,个别耐短期水淹的乔木(光荚含羞草)则能在消落区生存并完成其生活史。这一结论与刘维璋等^[12]、卢志军等^[39]在三峡大坝消落区研究结论相似。在这些单优群落中,大多为外来入侵种构成的,如含羞草、美洲蟛蜞菊、假臭草等。

在群落物种多样性上,高、中、低区域差异比较明显,与水淹时间梯度呈相反趋势。 dt 指标最直观反映了物种种类多少, Jh 均匀度指数在一定程度上能反映群落演替过程中的稳定性,均匀度较高的群落稳定性相对较差,而均匀度较低的群落稳定性相对较高。丰富度从高到低变化明显,物种呈现减少的趋势,而均匀度下部略低,说明其稳定性较高,这主要是由于水淹时间较长,只适合较耐水淹的草本物种(本研究中为铺地黍)形成单优群落。而中部和高处区别不明显,或中部略高,这一现象的原因也与水淹梯度有关。在较高处,水淹时间短,几乎不受水淹干扰,容易形成优势群落。而中部水淹程度介于高处和地处之间,中度的干扰使群落呈现水淹植物逐渐朝不耐水淹植物过渡的趋势,由于竞争激烈,物种分配较均匀,但处于不稳定的演替状态。

此外,消落区植物群落受人为因素干扰严重。一方面,人为划定保护区对植被维持起到促进作用,如位于观测塔附近的植被,由于不允许工作人员之外的人进入,此处植被状况较好;另一方面,附近居民的放牧活动对群落组成成分、盖度和高度等,都产生了影响,如马岭排附近的消落区植被受到了周边居民成群的牛、羊干扰,群落状况完全不同于其他相似地形条件非人为干扰情况下的群落状况。铺地黍被大量牧食后,改变了原先的通风、光照等条件,原本生长受限制的密子豆(*Pycnospora lutescens*)、链荚豆(*Alysicarpus vaginalis*)等蝶形花科植物得以更充分生长。

总之,松涛水库是典型的热带地区湿地,与其他地区消落区^[9-10]相比,其植被有着明显的区域特征:热带性植物种类多、外来入侵植物比例较大。而植被生活型分布则和其他水库消落区的类似,主要以草本为主,且在群落分布上,海拔梯度效应较明显。在消落区,植物面临的主要环境胁迫因子是水淹及水淹消退后非降雨期间的干旱。既耐水淹又耐干旱的植物如狗牙根、含羞草、铺地黍、牛筋草、飞机草^[40]、叶下珠等能较好地适应消落区这一特殊生境。此外,消落区内分布着不少植物幼苗,如白背叶(*Mallotus apelta*)、山黄麻(*Trematomentosa*)、山桐子(*Idesia polycarpa*)、排钱树(*Phyllodium pulchellum*)、黄豆树(*Albizia procera*)等,而这些植物的成熟个体却未见分布,由此推测岸区植被也为消落区提供了丰富的种子资源。了解消落区的植被状况及其特殊条件下的维持机制,对进一步的植被恢复和重建工作,有着重要指导意义。

致谢:海南省水利灌区管理局松涛灌区管理分局副局长吴仕川在植被调查工作中提供前期帮助;海南省海口市国土资源局琼山分局蒋龙瀛协助植被调查;海南大学杨小波教授在植物鉴定、耐水淹植物筛选等工作中提供帮助;海南省国土资源厅提供松涛水库流域矢量地形数据;云南大学王超在研究区地理位置绘图工作上提供帮助,在此一并表示感谢。

5 参考文献

- [1] Wang Y, Wu JQ, Huang HW *et al.* Quantitative analysis of plant communities in water-level-fluctuation zone within Three Gorges Reservoir area of Changjiang River. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2004, **22**(4): 307-314. [王勇, 吴金清, 黄宏文等. 三峡库区消涨带植物群落的数量分析. 武汉植物学研究, 2004, **22**(4): 307-314.]
- [2] Azza N, Denny P, Koppel JV *et al.* Floating mats: their occurrence and influence on shoreline distribution of emergent vegetation. *Freshwater Biology*, 2006, **51**: 1286-1297.
- [3] Acharya G. Approaches to valuing the hidden hydrological services of wetland ecosystems. *Ecological Economics*, 2000, **35**: 63-74.
- [4] Daily GC, Söderqvist T, Aniyar S *et al.* The value of nature and the nature of value. *Science*, 2000, **289**: 395-396. DOI: 10.1126/science.289.5478.395.
- [5] Guo Z, Xiao X, Li D. An assessment of ecosystem service supplied by a Yangtze River watershed: water flow regulation and hydroelectric power production. *Ecological Applications*, 2000, **10**: 925-936. DOI: 10.1890/1051-0761(2000)010

- [0925;AAOESW]2.0.CO;2.
- [6] Guo Z, Xiao X, Gan Y *et al.* Ecosystem functions and their services—A case study in Xingshan County of China. *Ecological Economics*, 2001, **38**:141-154. DOI: 10.1016/S0921-8009(01)00154-9.
- [7] Guo Z, Li Y, Xiao X *et al.* Hydroelectricity production and forest conservation in watersheds. *Ecological Applications*, 2007, **17**(6): 1557-1562. DOI: 10.1890/06-0840.1.
- [8] van Beukering PJH, Cesara HSJ, Janssen MA. Economic valuation of the Leuser National Park on Sumatra, Indonesia. *Ecological Economics*, 2003, **44**: 43-62. DOI: 10.1016/S0921-8009(02)00224-0.
- [9] Wang Y, Li EH, Wu JQ. A preliminary study on the vascular plant flora of the water-level-fluctuating zone in the Three Gorge Reservoir area. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2002, **20**(4): 265-274. [王勇, 厉恩华, 吴金清. 三峡库区消涨带维管植物区系的初步研究. 武汉植物学研究, 2002, **20**(4): 265-274.]
- [10] Sun R, Yuan XZ, Ding JJ. Plant communities in water-level-fluctuating-zone of Baijia Stream in Three Gorges Reservoir after its initiate impounding to 156 m height. *Wetland Science*, 2010, **8**(1): 1-7. [孙荣, 袁兴中, 丁佳佳等. 三峡水库蓄水至 156 m 水位后白夹溪消涨带植物群落生态学研究. 湿地科学, 2010, **8**(1): 1-7.]
- [11] Liu WW, Yang F, Wang J *et al.* A study on the plant species dynamic distribution in the water-level-fluctuating zone of main stream and bay of the Three Gorges Reservoir. *Plant Science Journal*, 2011, **29**(3): 296-306. DOI: 10.3724/SP.J.1142.2011.30296. [刘维曄, 杨帆, 王杰等. 三峡水库干流和库湾消落区植被物种动态分布研究. 植物科学学报, 2011, **29**(03): 296-306.]
- [12] Liu WW, Wang J, Wang Y *et al.* The differences of plant community diversity among the different altitudes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(17): 5454-5466. DOI: 10.5846/stxb201102240211. [刘维曄, 王杰, 王勇等. 三峡水库消落区不同海拔高度的植物群落多样性差异. 生态学报, 2012, **32**(17): 5454-5466.]
- [13] Luo QP, Liu WJ. Comparison of the effect of different canopy of rubber plantation on soil splash erosion and through fall erosivity. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, **43**(6): 1348-1354. [罗亲普, 刘文杰. 不同橡胶林林冠下的土壤溅蚀率及穿透水侵蚀力比较. 土壤通报, 2012, **43**(6): 1348-1354.]
- [14] The Editoria of Flora of China, Chinese Academy of Sciences. Flora of China. Beijing: Science Press, 1959—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, 1959—2004.]
- [15] Wu ZY, Raven PH, Hong DY eds. Flora of China. Beijing: Science Press, St. Louis: Missouri Botanical Garden Press, 2008.
- [16] Wu ZY, Zhou ZK, Li DZ *et al.* The areal-types of the world families of seed plants. *Acta Botanical Yunnanica*, 2003, (3): 245-257. [吴征镒, 周浙昆, 李德铎等. 世界种子植物科的分布区类型系统. 云南植物研究, 2003, (3): 245-257.]
- [17] Wu ZY. The areal-types of the China genera of seed plants. *Plant Diversity*, 1991, **13**(s4): 1-3. [吴征镒. 中国种子植物属的分布区类型. 植物多样性, 1991, **13**(s4): 1-3.]
- [18] Jiang ZG, Ma KP, Han XG eds. Conservation biology. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 1997. [蒋志刚, 马克平, 韩兴国. 保护生物学. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1997.]
- [19] Zhang JT ed. Quantitative vegetation ecology. Beijing: University of Science and Technology of China Press, 1995. [张金屯. 植被数量生态学方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.]
- [20] Qi K, Zhang CY, Hou JH *et al.* Dynamics of species diversity and interspecific associations of herbaceous plants in a Pinus Tabulaeformis forest on a sandy site in Chifeng, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(18): 5106-5112. [奇凯, 张春雨, 侯继华等. 赤峰市沙地油松林草本植物多样性及种间关联动态. 生态学报, 2010, **30**(18): 5106-5112.]
- [21] Zhang JT ed. Quantitative ecology. Beijing: Science Press, 2004.
- [22] Zhang HD. The diversity of the Hainan Flora. *Ecologic Science*, 2001, (Z1): 1-10. [张宏达. 海南植物区系的多样性. 生态科学, 2001, (Z1): 1-10.]
- [23] Lin ZQ, Yang XB, Chen YK *et al.* Local wild vascular plant flora in Hainan. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2016, **37**(2): 351-358. [林泽钦, 杨小波, 陈玉凯等. 海南本地野生维管植物区系研究. 热带作物学报, 2016, **37**(2): 351-358.]
- [24] Shan JL, Yang FC, Zheng XQ. Exotic plants in Hainan Province. *Subtropical Plant Science*, 2006, (3): 39-44. [单家林, 杨逢春, 郑学勤. 海南岛的外来植物. 亚热带植物科学, 2006, (3): 39-44.]
- [25] Peng ZB, Jiang Y, Jiang JS. Risk evaluation indicator system for exotic plant invasion in Hainan Island, South China. *Chi-*

- nese Journal of Ecology, 2013, **32**(8): 2029-2034. DOI:10.13292/j.1000-4890.2013.0430. [彭宗波, 蒋英, 蒋菊生. 海南岛外来植物入侵风险评价指标体系. 生态学杂志, 2013, **32**(8): 2029-2034.]
- [26] Wang W, Zhang XM, Sha LH *et al.* Roster of alien invasive perilous species of animals and plants in Hainan Island(I). *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2007, (4): 58-64. [王伟, 张先敏, 沙林华等. 海南岛外来入侵危险性动植物名录(一). 热带农业科学, 2007, (4): 58-64.]
- [27] Guo QS, Hong M, Kang Y *et al.* Research development on hydro-fluctuation belt plants. *World Forestry Research*, 2010, **23**(4): 14-20. [郭泉水, 洪明, 康义等. 消落带适生植物研究进展. 世界林业研究, 2010, **23**(4): 14-20.]
- [28] Fu QF, Fang H, Lin JP. Selection of suitable plants for the ecological reconstruction of water-level-fluctuation zone of reservoirs in south China. *Ecology and Environment*, 2008, **17**(6): 2325-2329. [付奇峰, 方华, 林建平. 华南地区水库消涨带生态重建的植物筛选. 生态环境, 2008, **17**(6): 2325-2329.]
- [29] Tan SD, Zhu MY, Dang HS *et al.* Physiological responses of Bermudagrass (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.) to deep submergence stress in the Three Gorges Reservoir area. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(7): 3685-3691. [谭淑端, 朱明勇, 党海山等. 三峡库区狗牙根对深淹胁迫的生理响应. 生态学报, 2009, **29**(7): 3685-3691.]
- [30] Yang F, Wang Y, Chan Z. Review of environmental conditions in the water level fluctuation zone: Perspectives on riparian vegetation engineering in the Three Gorges Reservoir. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 2015, **18**(2): 240-249. DOI: 10.1080/14634988.2015.1040332.
- [31] Feng DL, Liu Y, Zhong ZC *et al.* Photosynthesis and chlorophyll II fluorescence parameters of the reed (*Phragmites communis*) grown in the hydro-fluctuation belt of Three Gorges Reservoir Area. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, (5): 2013-2021. [冯大兰, 刘芸, 钟章成等. 三峡库区消落带芦苇 (*Phragmites communis* (reed)) 的光合生理响应和叶绿素荧光特性. 生态学报, 2008, (5): 2013-2021.]
- [32] Wang JX, Meng WQ, Li GX *et al.* Diversity of aquatic plants in Chaohu Basin. *J Lake Sci* 2017, **29**(6): 1386-1397. DOI:10.18307/2017.0611. [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.]
- [33] Fang H, Chen TF, Lin JP *et al.* Common cutgrass: its characteristics of soil conservation and application on water-fluctuation belt at Xinfengjiang Reservoir. *Tropical Geography*, 2003, (3): 214-217. [方华, 陈天富, 林建平等. 李氏禾的水土保持特性及其在新丰江水库的应用. 热带地理, 2003, (3): 214-217.]
- [34] Yao C, Hu XZ, Geng RM *et al.* Effects of five littoral-zone plants on lakeshore sediment stabilization. *J Lake Sci*, 2017, **29**(1): 105-115. DOI: 10.18307/2017.0112. [姚程, 胡小贞, 耿荣妹等. 几种水陆交错带植物对湖滨带底质的稳固作用. 湖泊科学, 2017, **29**(1): 105-115.]
- [35] Ma LM, Tang YP, Zhang M *et al.* Evaluation of adaptability of plants in Water-Fluctuation-Zone of the Three Gorges Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(4): 1885-1892. [马利民, 唐燕萍, 张明等. 三峡库区消落区几种两栖植物的适生性评价. 生态学报, 2009, **29**(4): 1885-1892.]
- [36] Bai X, Wen Y, Wei GY *et al.* Effects of water depth gradient on growth and chlorophyll II fluorescence characteristics of *Arundo donax*. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2015, **21**(6): 1157-1161. DOI: 10.3724/SP.J.1145.2015.04041. [柏祥, 温瑀, 魏国印等. 湿地水深梯度对芦竹 (*Arundo donax*) 生长及叶绿素荧光特性的影响. 应用与环境生物学报, 2015, **21**(6): 1157-1161.]
- [37] Zhao JS, Bai M, Cheng FM *et al.* Physio-ecological characteristics of *Phragmites australis* and *Arundo donax* under two types of constructed wetlands. *Wetland Science*, 2008, **6**(3): 398-404. [赵建松, 白梅, 程凤鸣等. 两种人工湿地条件下芦苇和芦竹生理生态特性研究. 湿地科学, 2008, **6**(3): 398-404.]
- [38] Lin JH, Yang Y, Li L *et al.* Characteristics of growth and radial oxygen loss of eight wetland plants. *J Lake Sci*, 2015, **27**(6): 1042-1048. DOI: 10.18307/2015.0608. [林剑华, 杨扬, 李丽等. 8种湿地植物的生长状况及泌氧能力. 湖泊科学, 2015, **27**(6): 1042-1048.]
- [39] Lu ZJ, Li LF, Huang HD *et al.* Preliminary effects of impounding on vegetation in drawdown zone of the Three Gorges Reservoir Region. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2010, **28**(3): 303-314. DOI: 10.3724/SP.J.1142.2010.30303. [卢志军, 李连发, 黄汉东等. 三峡水库蓄水对消涨带植被的初步影响. 武汉植物学研究, 2010, **28**(3): 303-314.]
- [40] Lu P. Studies on ecophysiology of an invasive species *Eupatorium adenophorum* [Dissertation]. Beijing: Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, 2006. [鲁萍. 外来入侵种紫茎泽兰生理生态学研究[学位论文]. 北京: 中国科学院植物研究所, 2006.]