

丹江口水库消落区植物群落结构特征*

程清华¹, 张志永^{2*}, 史方², 邹曦², 彭晓然¹, 朱稳², 袁玉洁², 张道熙²

(1. 南水北调中线水源有限责任公司, 丹江口 442700)

(2. 水利部中国科学院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 长江水利委员会流域河湖生态系统修复关键技术创新团队, 武汉 430079)

摘要: 为探明丹江口水库消落区不同高程、不同土地利用类型之间植被特征是否存在显著差异, 于 2024 年 7-8 月, 设置了 45 个监测站点, 根据高程将消落区分为 155~160、160~165 和 165~170 m 等 3 个区域。结果显示: 消落区大型维管束植物有 55 科、140 属、170 种, 菊科最多, 禾本科、豆科、大戟科次之。植物群落以草本植物为主, 一年生草本植物种类数最多 (占 46.47%), 其次为多年生草本植物 (占 32.35%) 和木本植物 (灌木、藤本和乔木) (21.18%)。不同高程区域消落区植物优势种差异显著, 155~160、160~165、165~170 m 区域优势度最大的植物分别为狗牙根、马唐和黄花蒿。消落区植物生物量均值为 $(822.4 \pm 709.4) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, Shannon-Wiener 多样性指数均值为 1.67 ± 0.45 。不同高程区域植被盖度、高度、生物量、多样性差异不显著。随着高程的增加植被高度呈增加趋势。不同土地利用类型区域植被盖度、生物量、多样性差异显著, 草地盖度显著大于林地 (林下草本植物) 和水利设施用地, 草地和耕地植物生物量显著高于林下草本植物和水利设施用地植物。草地、林下草本植物和水利设施用地植物多样性指数显著大于耕地。消落区植物的繁殖方式和种源扩散能力是影响植被分布格局的内因, 而水库调度运行和土地利用类型等人类活动是主要驱动因子。

关键词: 丹江口水库; 消落区; 土地利用类型; 植物群落; 优势种

Plant community structure characteristics in the water level fluctuation zone of Danjiangkou Reservoir

Cheng Jinghua¹, Zhang Zhiyong^{2*}, Shi Fang², Zou Xi², Peng Xiaoran¹, Zhu Wen², Yuan Yujie², Zhang Daoxi²

(1: North Water Diversion Project Limited Liability Company, Danjiangkou 442700, China)

(2: Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Innovation Team of the Changjiang Water Resources Commission for River and Lake Ecosystem Restoration Key Technology, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, P.R.China)

Abstract: The aim of this study was to determine whether significant differences in vegetation characteristics exist across different elevations and land use types in the water-level fluctuation zone (WLFZ) of Danjiangkou Reservoir. From July to August 2024, samples were collected from 45 sites along three WLFZ elevation gradients: 155–160 m, 160–165 m, and 165–170 m. Results showed that a total of 170 species of large vascular plants, belonging to 140 genera and 55 families, were recorded in the WLFZ. The Asteraceae family had the highest species richness, followed by Poaceae, Fabaceae, and Euphorbiaceae. The plant community was dominated by herbaceous plants, with annual herbs accounting for 46.47%, perennial herbs for 32.35%, and woody plants (including shrubs, lianas, and trees) for 21.18%. Dominant species varied significantly among elevation zones: *Cynodon dactylon* was dominant at 155–160 m, *Digitaria*

* 2025-06-09收稿; 2025-08-22收修改稿。

南水北调中线水源公司项目 (ZSY/YG-ZX (2023) 022)、湖北省重点研发项目 (2024BCB064) 和丹江口库区及其上游流域水质安全保障专项资金联合资助。

**通信作者; E-mail: zhangzy@mail.ihe.ac.cn.

sanguinalis at 160–165 m, and *Artemisia annua* at 165–170 m. Average plant biomass was $822.4 \pm 709.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, and the mean Shannon–Wiener diversity index was 1.67 ± 0.45 . No significant differences were observed in vegetation cover, height, biomass, or diversity across elevation zones, although plant height tended to increase with elevation. In contrast, vegetation cover, biomass, and diversity differed significantly among land use types. Cover in grassland was significantly higher than in forestland (understory herb layer) and water conservancy facility land, while biomass in grassland and cropland was significantly higher than in forestland and water conservancy land. The plant diversity index was significantly higher in grassland, forestland, and water conservancy land than in cropland. Plant reproductive strategies and seed dispersal ability were identified as intrinsic factors influencing vegetation distribution patterns, while human activities such as reservoir operation and land use were key external drivers.

Key words: Danjiangkou Reservoir; water level fluctuation zone; land use types; plant community; dominant species

南水北调中线工程是国家重大战略性基础设施工程，是构建国家“四横三纵”骨干水网的重要组成部分，事关国家战略全局、长远发展、人民福祉。丹江口水库作为南水北调中线工程水源地，承担着向京津及华北地区城市供水、同时兼顾农业和生态用水的任务。2014年12月中线工程通水以来，调水量逐年增加。近十年监测结果显示，丹江口水库水质总体良好，常年保持在II类及以上，大部分入库河流水质能够达到管理目标。但水库总氮持续偏高，接近国内外湖泊营养盐基准阈值范围的上限；总磷是当前水库水质超标的主要因子，并且在个别年份汛期浓度大幅升高，导致劣于II类的频次明显增加，引起了我国政府和国内外学术界的高度关注。汛期地表径流携带入库的面源污染是水质超标的主要原因，水淹期间消落区的内源污染物释放（尤其植物因腐烂分解释放）也是重要原因之一。而消落区植物具体释放多少氮磷量与植物群落特（种类、生物量等）密切相关^[1]。

丹江口水库正常蓄水位 170 m，死水位 150 m，具多年调节性能。高程 150 m 至 170 m 之间消落区面积 378.8 km²。库区部分地区（尤其是淅川县）人地矛盾十分突出，库周居民对消落区土地的依赖程度高，仍有 122 km² 的消落区被季节性耕作，大量施用农药、化肥，影响库区水质安全。由于水库水位的周期性涨落，消落区植被覆盖度低，群落结构简单，难以发挥固土护岸、环境净化功能。与三峡水库相比，针对丹江口水库消落区的研究偏少，主要涉及消落区土壤生境养分和重金属含量^[2-3]，污染物释放特征^[4]，以及适生植物筛选^[5-6]，以及政府正在推进的库周生态隔离带建设等。

虽然也有少量的消落区植物资源调查，但多为 2011 年以前^[7-8]，缺乏大范围的且覆盖消落区高程 150-170m 区域的系统调查。近 10 余年来，随着周期性蓄水淹没-出露次数的增加，消落区植物种类和分布也有可能发生了较大变化，不同土地利用类型之间植被是否存在显著差异尚不清楚。本文于 2024 年 7-8 月开展了 45 个站点的消落区植被特征监测，揭示了不同高程、土地利用类型之间植被组成及多样性差异，为丹江口水库消落区生态保护与修复，以及科学管理提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析

丹江口水库消落区的形成及出露特点受丹江口水库的人工调度方式、来水量、供水量等综合因素的影响。每年的 3~5 月水位较低，消落区出露。6 月夏汛至 9 月秋汛期，水位逐步上升，消落区淹没。至 11 月初水位最高，然后水位逐渐消落，至次年 3~5 月水位最低。根据长江水文网丹江口水库水位数据统计，近 5 年（2019~2023 年），消落区高程 155~160、160~165、165~170m 三个高程梯度持续水淹时长平均值依次为 299d、118d、23d。

2024 年 7-9 月，开展消落区植物群落特征调查，设置 45 个监测站点，其中汉库 25 个，丹库 20 个（图 1）。覆盖全库区的 6 个市/县/区，覆盖不同高程和不同土地利用类型，草地、耕地、林地和水利设施用地（码头生态护坡）等。草本、耕地和水利设施用地的植物生活型均为草本植物，因此采用林下草本植物与之相比。每个站点设 3 个监测样带，分别位于 155~160、160~165、165~170m 区域，共 135 个样带，样带平行于水流方向。林下草本植物监测样带设在相邻两行植株中间。每个监测样带设置 4 个 1m×1m 调查样方，样方间距 10 m。现场测量样方内每种植物的高度和盖度，然后收割地上部分，测定生物量。野外调查时不能直接识别的，制作标本，编号保存，待野外工作结束后室内鉴定。依据《中国植物志》，统计调查到的植物生活型。

1.2 数据处理

(1) 重要值 (Importance value, IV) 由 Crutis 和 McIntosh 研究森林群落时首先提出^[9]，研究草本植物重要值时多采用公式^[10-11]：

$$\text{重要值} = (\text{相对盖度} + \text{相对高度}) / 2$$

其中，相对盖度 = (某一植物种的盖度/样方内所有植物种的盖度之和) × 100%，相对高度 = (某一植物种的高度/样方内

所有植物种的高度之和) × 100%。

(2) 优势度 (Y_i) 和 Shannon-Wiener 多样性指数: 前者用于表征一个物种在群落中的地位与作用。后者假设在无限大的群落中对个体随机取样, 而且样本包含了群落中所有的物种/个体出现的机会, 公式为:

$$Y_i = P_i \times f_i$$
$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

式中, $P_i = N_i/N$; N_i 为物种 i 的重要值; N 为样方内所有物种重要值之和, f_i 为物种 i 在各个采样点出现的频度, S 为样方内的物种数。

利用 SPSS 18.0 的非参数检验中的 Kruskal-Wallis H 方法检验高程之间和土地利用类型之间植物鲜重、高度、盖度、多样性指数的差异显著性; 若差异显著, 选用 Dunnett's C 法进行多重比较, 显著水平取 0.05^[12] 选用 OriginPro 9.0 软件制图。

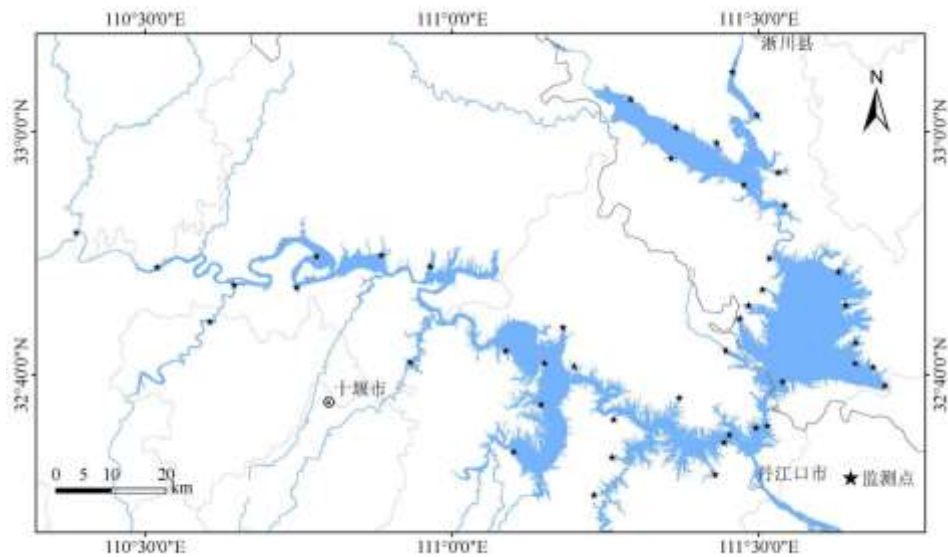


图 1 消落区植物群落监测站点示意图

Fig.1 Schematic diagram of monitoring sites of plant community in the water level fluctuation zone

2 结果与分析

2.1 植物种类组成

按植物亲缘关系分类, 在丹江口水库消落区共调查到大型维管束植物 55 科、140 属、170 种, 其中菊科种类数最多 (22 种), 其次为禾本科 (21 种)、豆科 (13 种)、大戟科 (9 种)、苋科 (8 种), 这 5 科植物占总种类数的 42.94%。此外, 单属单种的植物占 67.64%, 共 115 种。

按生活型分类, 消落区植物群落以草本植物为主, 其中一年生草本植物最多, 共 79 种, 占 46.47%; 其次为多年生草本植物, 55 种, 占 32.35%; 灌木 17 种, 乔木 14 种, 藤本植物种类数最少, 仅 5 种。乔木和灌木多呈零星分布。消落区高程 167~170m 区域还分布有成片的人工林, 树种为杨树、美国竹柳和落羽杉, 多分布在淅川县香花镇、九重镇、上集镇、马蹬镇、盛湾镇、大石桥乡和郟阳区杨溪铺镇等, 但美国竹柳病虫害严重, 长势相对较差。

按对水分的依赖程度分类, 消落区植物群落中旱生植物占绝对优势, 共有 146 种 (占 85.88%)。水生植物仅有 24 种 (占 14.12%), 为水蓼 (*Polygonum hydropiper*)、藨草 (*Phalaris arundinacea*)、芦苇 (*Phragmites communis*)、水苦苣 (*Veronica undulata*)、石龙芮 (*Ranunculus sceleratus*)、水花生 (*Alternanthera philoxeroides*)、水芹 (*Oenanthe javanica*)、茵草 (*Beckmannia syzigachne*)、问荆 (*Equisetum arvense*)、扁秆荆三棱 (*Bolboschoenus planiculmis*)、水芹 (*Oenanthe javanica*)、菹草 (*Potamogeton crispus*)、无芒稗 (*Echinochloa crusgali var. Mitis*)、双穗雀稗 (*Paspalum*

paspaloides)、鳢肠(*Eclipta prostrata*)、皱叶酸模(*Rumex crispus*)、酸模(*Rumex acetosa*)、习见蓼(*Polygonum plebeium*)、香附(*Cyperus rotundus*)、异果薹草(*Carex neurocarpa*)、莲(*Nelumbo nucifera*)、香蒲(*Typha orientalis*)、欧菱(*Trapa natans*)和水鳖(*Hydrocharis dubia*)。

2.2 优势种

消落区不同高程区域,优势植物差异明显。高程 155~160m 区域,优势植物主要有狗牙根、苘麻、长芒稗等,160~165m 区域,优势植物主要有马唐、狗牙根、狗尾草等,165~170m 区域,优势植物主要有黄花蒿、马唐、狗尾草等(表 1)。随着高程的增加,狗牙根、苘麻的优势呈降低趋势,而黄花蒿优势度增加。与高程 155~160m 区域相比,高程 165~170m 区域狗牙根和苘麻的优势度分别下降了 80.82%和 96.23%。而黄花蒿的优势度增加了 20.61%。马唐和狗尾草的优势度在高程 160~165m 区域最高,其次为 165~170m 区域,高程 155~160m 区域最低。

表 1 不同高程区域优势种(优势度 ≥ 0.02)

植物	学名	高程范围/m		
		155~160	160~165	165~170
苘麻	<i>Abutilon theophrasti</i>	0.17	0.04	-
鳢肠	<i>Eclipta prostrata</i>	0.03	-	-
狗牙根	<i>Cynodon dactylon</i>	0.23	0.13	0.05
马唐	<i>Digitaria sanguinalis</i>	0.04	0.15	0.08
长芒稗	<i>Echinochloa caudata</i>	0.08	-	-
狗尾草	<i>Setaria viridis</i>	0.04	0.08	0.07
苍耳	<i>Xanthium sibiricum</i>	-	0.04	-
黄花蒿	<i>Artemisia annua</i>	-	0.05	0.09
水蓼	<i>Polygonum hydropiper</i>	-	0.02	0.03
小飞蓬	<i>Erigeron annuus</i>	-	0.06	0.06
艾蒿	<i>Artemisia argyi</i>	-	-	0.02

注: -不为优势种

2.3 植物盖度

丹江口水库消落区植物样方内所有物种盖度之和的均值 $90.5\% \pm 36.1\%$, 其中汉库消落区 ($92.6\% \pm 37.5\%$) 大于丹库 ($87.4\% \pm 33.6\%$) (图 2a)。高程 160~165m 区域植物盖度最高,均值为 $94.7\% \pm 34.9\%$,其次为高程 155~160m 区域,165~170m 区域最低,高程之间植物盖度差异不显著(图 2b)。不同消落区不同地物类型植物盖度差异显著,草地植物盖度显著高于林地(林下草本植物)和水利设施用地(图 2c) ($F=5.088, P=0.002$)。

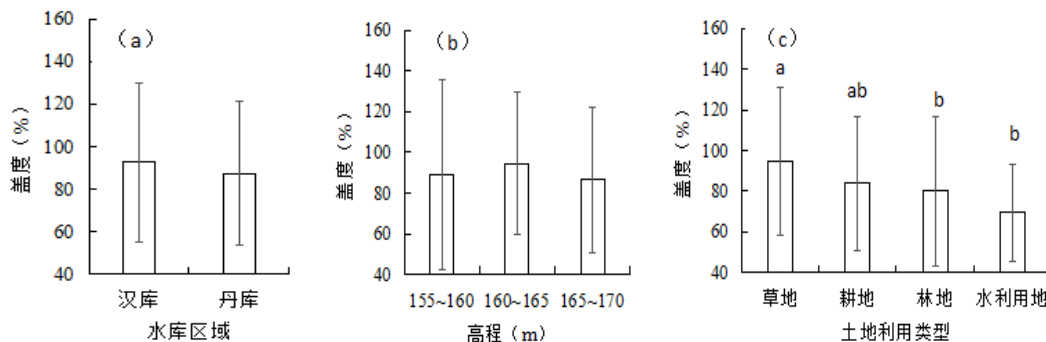


图 2 消落区植物盖度及其空间分布

Fig.2 Vegetation coverage and its spatial distribution in the WLFZ

2.4 植物高度

丹江口水库消落区植物样方内所有物种高度均值 $54.0 \pm 33.4 \text{cm}$ ，其中汉库消落区 ($49.9 \pm 30.0 \text{cm}$) 小于丹库 ($60.0 \pm 37.1 \text{cm}$) (图 3a)。高程 165~170m 区域植物盖度最高，均值为 $56.5 \pm 34.1 \text{cm}$ ，其次为高程 160~165m 区域，156~160m 区域最低 (图 3b)。不同消落区不同地物类型植物高度差异显著，耕地显著高于草地和水利设施用地，草地显著高于水利设施用地 (图 3c) ($F=8.618, P=0.000$)。

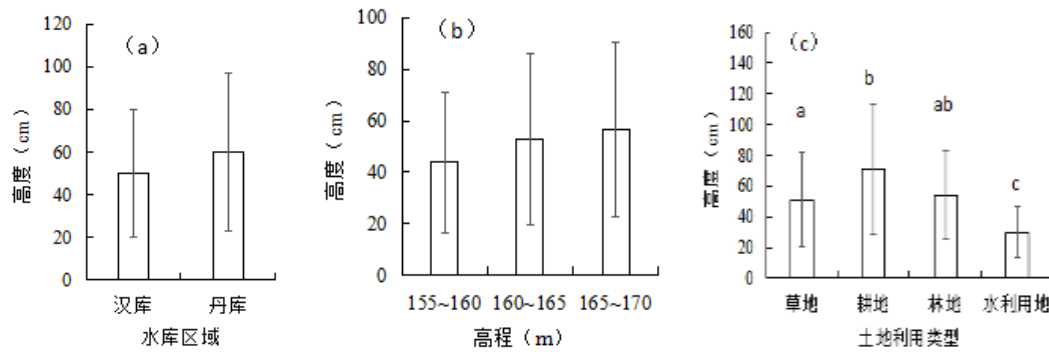


图 3 消落区植物高度及其空间分布

Fig.3 Vegetation height and its spatial distribution in the WLFZ

2.5 植物生物量

丹江口水库消落区植物生物量均值为 $822.4 \pm 709.4 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ，其中汉库消落区 ($802.0 \pm 707.0 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) 小于丹库 ($851.6 \pm 713.9 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) (图 4a)。高程 160~165m 区域植物生物量最高，均值为 $872.3 \pm 777.1 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ，其次为高程 156~160m 区域，165~170m 区域最低。高程之间植物生物量差异不显著 (图 4b)。不同消落区不同地物类型植物生物量差异显著，其中草地和耕地植物生物量显著高于林地 (林下草本植物) 和水利设施用地 (图 4c, $F=7.15, P=0.000$)。丹江口消落区植物生物量与样方内所有植物盖度之和、平均高度显著正相关，与地形坡度负相关 (图 5)。

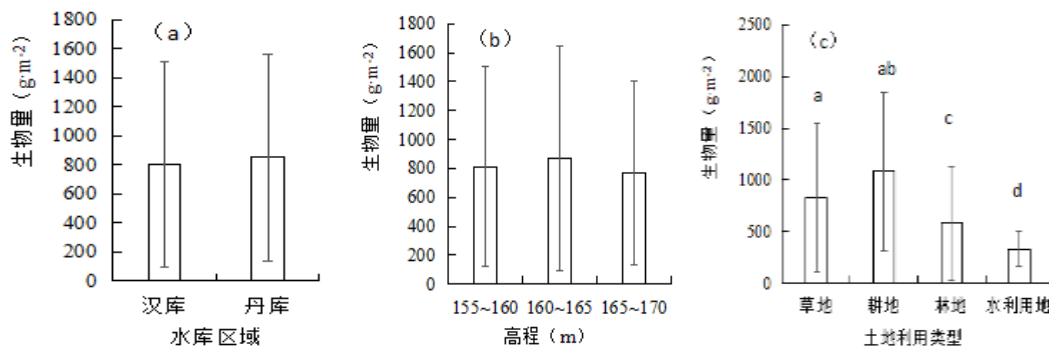


图 4 消落区植物生物量空间分布特征

Fig.4 Vegetation biomass and its spatial distribution in the WLFZ

2.6 植物多样性

丹江口水库消落区植物群落 Shannon-Wiener 多样性指数均值为 1.67 ± 0.45 ，汉库消落区植物多样性指数均值大于丹库 (图 6a)。消落区不同高程区域差异不显著，156~160m 区域多样性指数最大，165~170m 区域最低 (图 5b)。不同地物类型消落区多样性指数差异显著，草地、林地 (林下草本植物)、水利设施用地显著大于耕地 ($F=11.433, P=0.000$) (图 6c)。

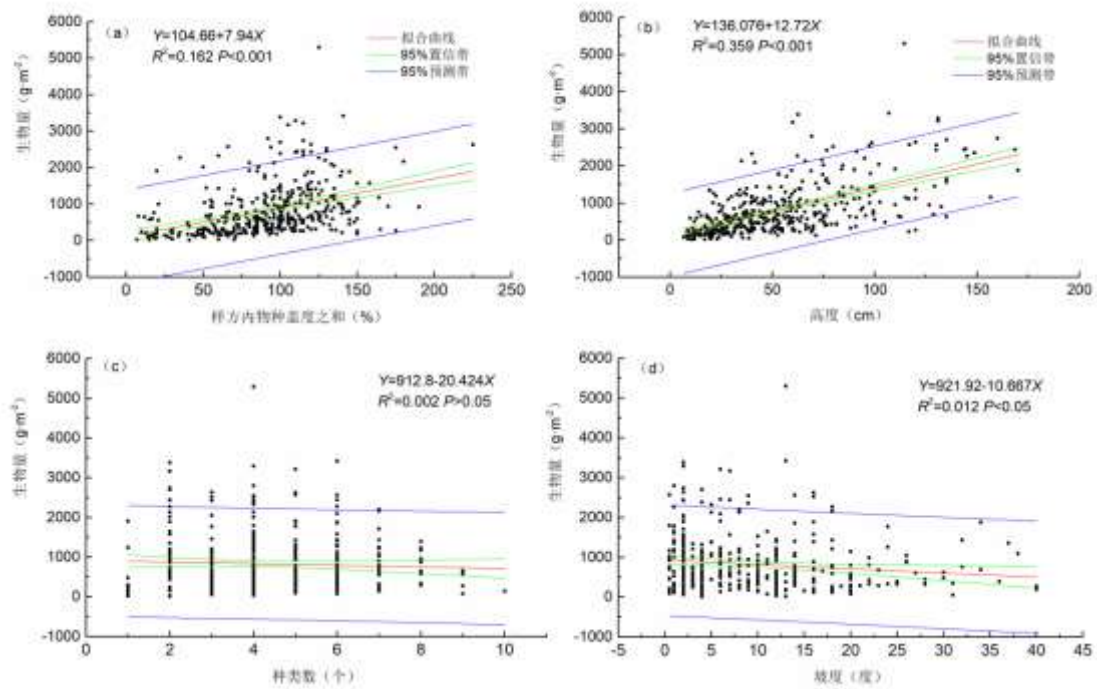


图5 消落区植物生物量与物种盖度、高度、种类数、坡度的关系
Fig.5 Relationship between vegetation biomass and cover, height in the WLFZ

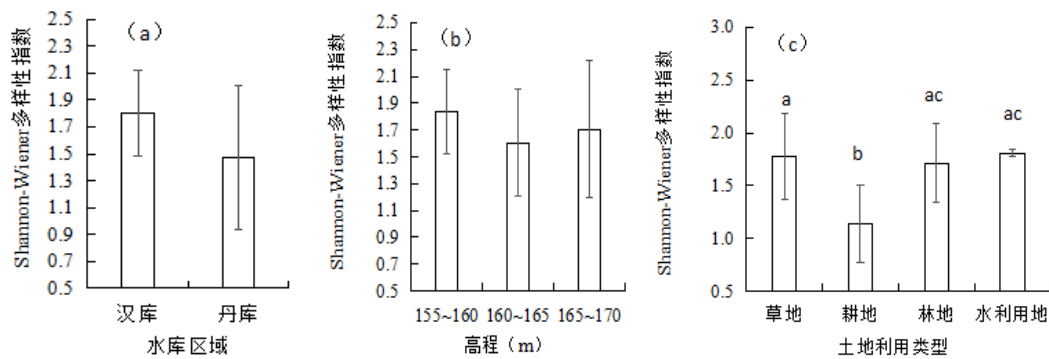


图6 消落区植物多样性指数空间分布特征
Fig.6 Plant diversity index and its spatial distribution in the WLFZ

3 讨论

3.1 消落区植物繁殖方式和种源扩散

丹江口水库消落区植物种类分布、频度大小与繁殖方式和扩散能力紧密相关。高程 155~160m 区域，频度大于 10% 的植物有 12 种，无性繁殖植物仅有狗牙根，其他的均为种子繁殖。高程 155~160m 区域，频度大于 10% 的植物有 10 种，无性繁殖植物为狗牙根和香附，其他 8 种为种子繁殖。虽然狗牙根也能种子繁殖，但在消落区淹没前，狗牙根尚未抽穗，因此消落区范围内狗牙根分布范围的扩张主要依靠无性繁殖。高程 155~160m 区域，频度排名前 5 的植物均为种子繁殖（图 7），这些植物的种子小，数量多，在蓄水前能完成生活史，经过长期的水淹仍然保持较高的种子活力。大多数多年生植物生长空间相对固定，但狗牙根之所以具有较高的频度，这是因为它既具有较强的耐水淹能

力，而且它的茎细而坚韧，下部匍匐地面蔓延甚长，节上常生不定根，根茎蔓延力强。这与其他研究结果相近，狗牙根的生态位宽度大，在三峡水库和溪洛渡水库消落区低高程区域占绝对优势^[13-15]。无性繁殖植物香附的地下部分由根状茎连接着大量的椭圆形块茎组成，繁殖力强，块茎又具有休眠性，能在土壤种存活数年甚至更久，一旦条件适宜就能萌发^[16-17]。

一年生草本植物占有的空间比较随机，出现频率与种子大小、数量和种源扩散途径紧密相关。消落区裸露期间，种子扩散以风力传播为主。有效的长距离传播依赖于种子的形态学特征辅助飞行。不少菊科植物种子常附有冠毛，辅助其较长距离的传播，利于后代对生存空间的开拓^[18]。如鬼针草瘦果上部具稀疏瘤状突起及刚毛，顶端芒刺3-4枚，具倒刺毛。苍耳的总苞具钩状的硬刺，常贴附于家畜和人体上，故易于散布。小飞蓬瘦果线状披针形，被贴微毛，冠毛糙毛状。强风速条件下，种子能有效地脱离植株，并被风传播得更远，这种同步性促使种子能向更远距离传播和扩散^[19-20]。为了与多年生草本植物竞争生存空间和阳光，种子一旦萌发，高度和生物量快速增长，优势度增加明显^[12]。

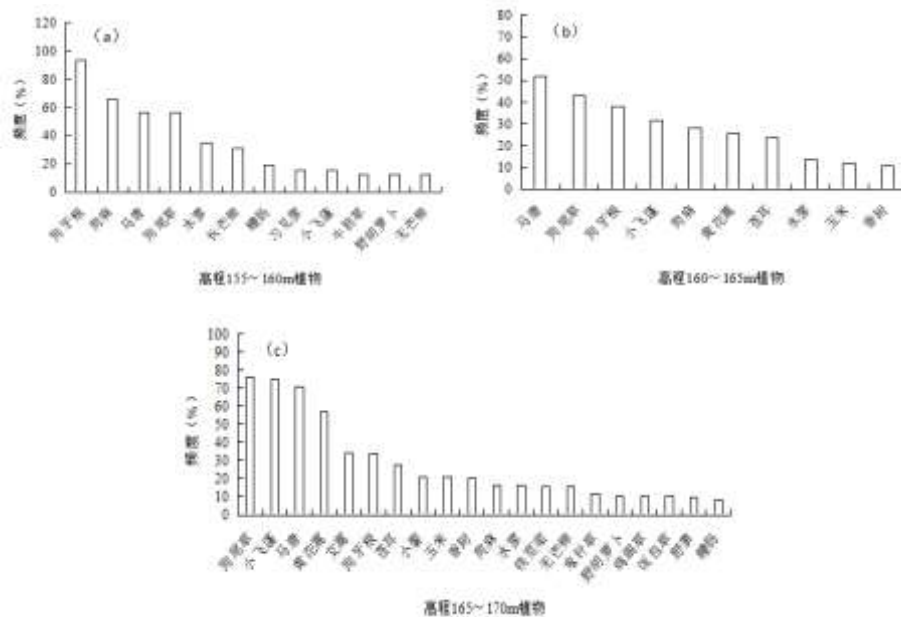


图7 不同高程区域频度10%以上的植物

Fig.7 Plant species with a frequency of more than 10% in different elevation zones

消落区淹没期间，种子扩散以水媒传播为主。大多数一年生植物，如苘麻、马唐、水蓼、狗尾草、小飞蓬、黄花蒿、鬼针草等，在7-9月种子已完全成熟。且7-9月是我国大部分地区的汛期，由于季风活动的影响，降水较为集中，降雨强度大，降雨量大。种子成熟掉落的峰值时期与降雨时期、径流时期高度同步。雨滴的击打利于成熟的种子从母体脱落，然后随地表径流运动，有的滞留获搁浅于土壤缝隙，有的漂浮于水体随沿河道长距离传播^[21-22]。水库蓄水抬升期间，波浪反复冲刷利于消落区植物种子脱离，漂浮于水中，随机无定向传播。水位下降，种子搁浅消落区土壤表面，一旦温度合适，种子萌发定植。因此，消落区一年生植物生存空间相对随机，往往是消落区裸露初期的先锋植物。由于水媒传播的距离更远，范围更广，消落区生态修复时，可以改变种子的扩散路径，滞留较多种子，进而提高消落区植被的覆盖度和生物多样性，降低水土流失风险。

3.2 人类活动对消落区植被的影响

水库调度运行直接影响着水库水位的消涨幅度和波动节律，决定着消落区高程范围、持续水淹时间和出露时间长短。而长时间持续水淹严重制约着消落区植物群落组成、高度和多样性。研究表明3个高程区域优势植物差异明显，随着高程的增加，植物高度呈增加趋势，这说明长时间的持续水淹，会过滤掉不耐水淹的中高草本植物，只有低矮的草本植物能够适应新的生长环境。有研究认为水淹时长是影响消落区植物群落组成和多样性的主要因子^[23-24]，不同高

程区域优势种的差异是植物对水库水位调节模式适应性策略的体现^[25]。丹江口水库大坝加高工程向北方受水区正式通水(2014年)前,消落区低高程区域优势植物主要有鳢蓂和苘麻,中高程区域为细叶水芹、狗牙根等,水淹影响较小的区域为响叶杨、狗牙根、杜梨、白刺花^[8]。经历近10余年的周期性水淹,苘麻、狗牙根和长芒稗已成为低高程区域优势植物,而鳢蓂和细叶水芹成为伴生种。

长时间的深水淹没,导致丹江口水库消落区水生植物种类数显著性减少,蓄水前水生植物种类数为90种^[7],本研究仅调查到25种,仅有少量的沉水植物分布在高程165~170m区域废弃的坑塘中。这可能是因为丹江口水库大坝加高工程运行后,原来分布在河漫滩湿地的一些沉水植物和挺水植物不能适应长时间的深水淹没环境死亡所致。本研究还发现丹江口水库消落区一年生草本植物占物种总数的比例(46.47%)三峡水库相近(45.46%),但木本植物(灌木、藤本和乔木)(21.18%)比例高于三峡水库(15.15%^[26]和16.88%^[27]),这可能与丹江口水库满蓄率(仅有1年蓄水至正常蓄水位170m)较低,水淹胁迫强度相对较低有关。

土地利用类型显著影响着消落区植被的盖度、高度、生物量和多样性。本研究表明耕地植物的高度和生物量最大,但多样性指数最低,虽然水利设施用地植被的盖度、高度和生物量最低,但多样性指数仅次于草地。这就说明相同水淹胁迫下,人为干扰强度不同是导致消落区不同地带植物多样性差异的主要原因^[28]。由于丹江口库区人地矛盾突出,目前,消落区范围内仍然有122.22km²(占32.26%)的土地用于种植农作物,尤其是丹库淅川县香花镇、九重镇和大石桥乡等地较为常见,主要为玉米、芝麻和小麦等。为了提高产量,不可避免的施用化肥,导致丹库消落区植被高度和生物量大于汉库。淹没期,耕地中残留的化和杀虫剂、农作物残体等污染物逐渐释放,影响水库水质安全^[29-31]。消落区水利设施用地,如人工护坡植被经过多次水淹后,从完工时播种的较为单一的植被演替为以草本植物为主的多物种群落,护坡类型、建成时间、基质颗粒级配和淹没历时是群落演替的主要影响因素^[32-33]。

4 结论

丹江口水库消落区植物群落中,草本植物占绝对优势,其中一年生和多年生草本植物分别占物种总数的46.47%和32.35%。不同高程区域优势植物差异明显,155~160、160~165和165~170m区域优势度最大的植物分别为狗牙根、马唐和黄花蒿。水库调度和土地利用方式对消落区植被的盖度、高度、生物量和多样性的影响显著。草地盖度显著大于林下草本植物和水利设施用地植物,草地和耕地植物生物量显著高于林下草本植物和水利设施用地植物,草地、林下草本植物和水利设施用地植物多样性指数显著大于耕地。因此,在丹江口水库消落区生态修复和管理中,应坚持保留保护和生态修复为主的策略,重点选育耐水淹能力和种源扩散能力强的植物,以提高生态修复效果的长期性和稳定性。同时,依据水位消涨幅度及水淹时间长短,划分多个高程区域梯度,实施分层治理,同时减少农作物种植和放牧等人类活动,保障消落区良好生态功能。

5 参考文献

- [1] Du LG, Fang F, Guo JS, *et al.* Characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus release from dominant herbaceous plants in water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(9): 1024-1031. [杜立刚, 方芳, 郭劲松等. 三峡库区消落带草本植物碳氮磷释放及影响因素. 环境科学研究, 2014, **27**(9):1024-1031.]
- [2] Yin W, Zhu D, Lei JS, *et al.* Distribution of nitrogen and phosphorus in the soils of different land uses from the representative water-level-fluctuating Zone of Danjiangkou Reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze River Basin*, 2015, **24**(7): 1185-1191. [尹炜, 朱惇, 雷俊山等. 丹江口水库典型消落区不同土地利用类型土壤养分分布. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(7):1185-1191.]
- [3] Jin HY, Wang L, Zhao LY, *et al.* Variation characteristics and flux of TN and TP in water level fluctuation zone of Danjiangkou Reservoir. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2023, **40**(5): 58-62. [金海洋, 王立, 赵良元等. 丹江口水库消落带总氮和总磷变化特征及通量研究. 长江科学院院报, 2023, **40**(5):58-62.]
- [4] Li ZG, Zhang RH, Liu C, *et al.* Phosphorus spatial distribution and pollution risk assessment in agricultural soil around the Danjiangkou reservoir, China. *Science of The Total Environment*, 2020, **699**:134417.
- [5] Ren JW, Ren ZY, Ren H, Selection of plant species for ecological protection in hydro-fluctuation belt of Danjiangkou Reservoir. *Forest Resources Management*, 2015, **1**:88-94. [任建武, 任志远, 任海等. 丹江口水库消落区生态修复植物选择. 林业资源管理, 2015, **1**:88-94.]

- [6] Wang O, Wang C, Study on restoration of vegetation community in water-level-fluctuating zone of Danjiangkou Reservoir. *Yangtze River*, 2018, **49**(2):11-14+73. [王培, 王超. 丹江口水库消落带植被群落恢复模式研究. *人民长江*, 2018, **49**(2):11-14+73.]
- [7] Liu WZ, Zhang QF, Liu GH, *et al.* Flora Studies on Aquatic Vascular Plants in Wetland of Danjiangkou Reservoir Region. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2005, **23**(5):449-454. [刘文治, 张全发, 刘贵华等. 丹江口库区湿地水生维管束植物的区系研究. *武汉植物学研究*, 2005, **23**(5):449-454.]
- [8] Liu RX, Chen LQ, Shi ZH. Spatial distribution of plant communities and environmental interpretation in the riparian zone of Danjiangkou Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(4) : 1208-1216. [刘瑞雪, 陈龙清, 史志华. 丹江口水库水滨带植物群落空间分布及环境解释. *生态学报*, 2015, **35**(4):1208-1216.]
- [9] Curtis JT, McIntosh RP. An upland forest continuum in the Prairie-forest border region of Wisconsin. *Ecology*, 1951, **32**(3):476-496.
- [10] Zhang JT, Xiang CL, Li M, 2012. Effects of Tourism and Topography on Vegetation Diversity in the Subalpine Meadows of the Dongling Mountains of Beijing, China. *Environmental Management*, **49**:403-411.
- [11] Li JP, Dong SK, Yang ZF, *et al.* Effects of cascade hydropower dams on the structure and distribution of riparian and upland vegetation along the middle-lower Lancang-Mekong River. *Forest Ecology and Management*, 2012, **284**:251-259.
- [12] Zhang ZY, Hu XH, Xiang L *et al.* Plant community structure and seasonal variation in the water level fluctuation zone of Three Gorges reservoir. *Journal of Hydroecology*, 2020, **41**(6): 37-45. [张志永, 胡晓红, 向林等. 三峡水库消落区植物群落结构及其季节性变化规律. *水生态学杂志*, 2020, **41**(6): 37-45.]
- [13] Zhang LM, Lan B, Zhang DS, *et al.* Niche and interspecific association of dominant herbaceous plants in the water-level-fluctuating zone of Fuling—Fengjie section of the Three Gorges Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(8): 3228-3240. [张乐满, 兰波, 张东升等. 三峡水库涪陵—奉节段消落带优势草本植物生态位与种间联结性研究. *生态学报*, 2022, **42**(8):3228-3240.]
- [14] Jiang WW, Xiao N, Xiao HL. Niche and interspecific associations of dominant plants in the water-level-fluctuating zones of the reservoirs in the Jinshajiang River watershed. *Journal of Lake Science*, 2023, **35**(1):236-246. [江维薇, 肖宁, 肖衡林. 金沙江流域水库消落带优势植物生态位及种间关系. *湖泊科学*, 2023, **35**(1):236-246.]
- [15] Tan HY, Li SZ, Chen QK, *et al.* Plant Diversity and Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus Distribution in Water Level Fluctuating Zone of Daning River. *Journal of Hydroecology*, 2025, **46**(2):22-32. [谭慧月, 李珊泽, 陈晴空等. 大宁河消落带植物多样性和土壤碳氮磷分布特征. *水生态学杂志*, 2025, **46**(2):22-32.]
- [16] Xu XY, Zhang ZY, Li DM, *et al.* Research Progress on Noxious Weed *Cyperus rotundus* L. in Cotton. *Journal of Weed Science*, 2021, **39**(1) : 1-11. [徐小燕, 张卓亚, 李冬梅等. 棉田恶性杂草香附子的研究概况. *杂草学报*, 2021, **39**(1) : 1-11.]
- [17] Zheng H, Wang Y, Xu J, *et al.* Anatomical and histochemical features of amphibious *Cyperus rotundus*. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, **33**(6):155-164. [郑海, 王莹, 徐娟, 等. 两栖植物香附子的解剖结构和组织化学研究. *草业学报*, 2024, **33**(6):155-164.]
- [18] Zhu GXL, Zhu M, Ji L, *et al.* The influence of plant traits on seed wind dispersal of two invasive weeds, *Coryza canadensis* and *Aster subulatus*. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(10):1978-1984. [诸葛晓龙, 朱敏, 季璐等. 入侵杂草小飞蓬和钻形紫菀种子风传扩散生物学特性研究. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(10):1978-1984.]
- [19] Greene D F. The role of abscission in long-distance seed dispersal by the wind. *Ecology*, 2005, **86**:3105-3110.
- [20] Soons M B, Bullock J M. Non-random seed abscission, long-distance wind dispersal and plant migration rates. *Journal of Ecology*, 2008, **96**:581-590.
- [21] Cain M L, Nathan R, Levin S A. Long-distance dispersal. *Ecology*, 2003, **84**(8): 1943-1944.
- [22] Greet J, Angus Webb J, Cousens R D. The importance of seasonal flow timing for riparian vegetation dynamics: a systematic review using causal criteria analysis. *Freshwater Biology*, 2011, **56**(7): 1231-1247.
- [23] Cheng LD, Deng HP, He S, *et al.* Distribution patterns and diversity of plant communities in fluctuating areas of Chongqing section of Yangtze River. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, **38**(12): 3626-3634. [程莅登, 邓洪平, 何松等. 长江重庆段消落区植物群落分布格局与多样性. *生态学杂志*, 2019, **38**(12): 3626-3634.]
- [24] Chen G, Li XL, Huang J, *et al.* Characteristics of plant communities and their relationships with environmental factors in the water level fluctuation zone of the Zigui region of the Three Gorges Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(2):688-699. [陈功, 李晓玲, 黄杰等. 三峡水库秭归段消落带植物群落特征及其与环境因子的关系. *生态学报*, 2022, **42**(2):688-699.]
- [25] You YF, Yang CH, Lei B, *et al.* Effect of water level regulation on vegetation characteristics in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges

- Reservoir. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2017, **23**(6): 1103-1109. [由永飞, 杨春华, 雷波, 等. 水位调节对三峡水库消落带植被群落特征的影响. *应用与环境生物学报*, 2017, **23**(6):1103-1109.]
- [26] Zhang AY, Xiong GM, Pan DY, *et al.* Effects of damming on plant diversity in the inundated and riparian zones of the Three Gorges Reservoir Area, China. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(9): 2505-2518. [张爱英, 熊高明, 樊大勇, 等. 三峡水库运行对淹没区及消落带植物多样性的影响. *生态学杂志*, 2016, **35**(9):2505-2518.]
- [27] Yang F, Liu W, Wang J, *et al.* Riparian vegetation's responses to the new hydrological regimes from the Three Gorges Project: Clues to revegetation in reservoir water-level-fluctuation zone. *Acta Ecologica Sinica* **32**(2): 89-98.
- [28] Wang Y, Liang W, Zhang T, *et al.* Effects of land-use types on plant species diversity in Jinzhong Basin, Chinese. *Journal of Ecology*, 2015, **34**(11):2995-3001. [王应, 梁炜, 张婷, 等. 晋中盆地不同土地利用类型的植物多样性. *生态学杂志*, 2015, **34**(11):2995-3001.]
- [29] Wang J, Yin W, Zhao XL, *et al.* The potential risk evaluation of farmland soil from new submerged area in Danjiangkou Reservoir. *China Environmental Science*, 2015, **35**(1):157-164. [王剑, 尹炜, 赵晓琳, 等. 丹江口水库新增淹没区农田土壤潜在风险评估. *中国环境科学*, 2015, **35**(1):157-164.]
- [30] Song Z, Shan B, Tang W, *et al.* Phosphorus distribution and sorption-release characteristics of the soil from newly submerged areas in the Danjiangkou reservoir, China. *Ecological Engineering*, 2017, **99**:374-380.
- [31] Chen M, Jin X, Liu Y, *et al.* Human activities induce potential aquatic threats of micropollutants in Danjiangkou Reservoir, the largest artificial freshwater lake in Asia. *Science of The Total Environment*, 2022, **850**:157843.
- [32] Fan YI, Yang ZH, Zou MZ, *et al.* Evaluation of ecological restoration effect of steel wire mesh stone cage revetment in middle and lower reaches of the Yangtze River. *Port and Waterway Engineering*, 2021, **1**:129-135. [范玉洁, 杨中华, 邹明哲, 等. 长江中下游钢丝网石笼护坡生态恢复效果评价. *水运工程*, 2021, **1**:129-135.]
- [33] Zhang ZY, Li M, Yang ZH, *et al.* Vegetation distribution on the ecological protection slopes of the middle and lower Yangtze River. *Journal of Hydroecology*, 2021, **42**(6):7-15. [张志永, 李明, 杨中华, 等. 长江中下游生态护坡坡面植被分布特征. *水生态学杂志*, 2021, **42**(6):7-15.]