

引用格式:刘春香,黄紫乐,谭博文,李有志. 湖南东江湖水库消落带地形因子与水文要素时空格局变化[J]. 山地学报, 2023, 41(5): 676-688.

LIU Chunxiang, HUANG Ziyue, TAN Bowen, LI Youzhi. Spatiotemporal changes in topographic and hydrological factors in hydro-fluctuation belt in the Dongjiang Lake of Hunan province, China [J]. Mountain Research, 2023, 41(5): 676-688.

湖南东江湖水库消落带地形因子与 水文要素时空格局变化

刘春香,黄紫乐,谭博文,李有志*

(湖南农业大学 环境与生态学院,长沙 410128)

摘 要: 东江湖消落带岸坡侵蚀、水土流失严重,生态风险堪忧,生态修复刻不容缓。地形因子和水文要素作为湖库消落带修复最为关键的约束性条件,反映了库岸生态系统的基本状态。本研究基于东江湖流域 DEM (Digital Elevation Model) 数据和水文站 2017—2021 年的日水位数据,利用 ArcGIS 提取消落带范围,分析地形因子和水文要素时空格局变化。结果表明:(1)东江湖消落带位于 263~278 m 高程区间,垂直落差 15 m,总面积 25.16 km²。消落带高程和坡度均呈现南北高、中间低的特点,即高高程和陡坡区段主要位于淤口镇和黄草镇等地区,而低高程和缓坡主要位于白廊镇和小东江等地区;消落带无坡向分布广泛,呈现出阴坡面积多于阳坡的特点,而长坡主要位于北部,短坡主要位于南部;消落带剖面曲率和平面曲率在空间上呈现相同的变化趋势,即在南北两端较低,在中部较高。(2)东江湖消落带地形因子和水文要素呈现出明显的空间异质性。东江湖消落带全年淹水天数、最低持续淹水天数、平均持续淹水天数、最大淹水深度、平均淹水深度等水文要素均随高程的增加而下降,呈现出显著负相关关系。(3)白廊镇、坪石乡、兴宁镇和小东江应为消落带综合治理的重点区域,淤口镇和黄草镇等为综合治理的难点区域。消落带 263~266 m 高程段属于常年淹水区域,不适宜植被存活;266~278 m 高程段属于偶然淹水区,适宜开展一定植被修复。研究结果可为东江湖消落带的植物群落构建、生态修复与综合治理供科学依据。

关键词: DEM; 坡度; 淹水深度; 淹水天数; 植被修复

中图分类号: Q149

文献标志码: A1

消落带,又称为水位涨落带、消涨带、消落区^[1-3],是水陆之间的过渡区域,即最低水位至最高水位之间的范围,具有水土保持、污染物拦截和生物多样性保育等众多生态功能,对湖库生态安全具有重要意义^[4-5]。湖库消落带是典型的生态脆弱带^[6-7],具有岩质疏松、土层浅薄和水位消涨等自然特征,高强度、高频度人为干扰(如开荒)会导致其

植被盖度低,且易发生泥石流和山体滑坡等地质灾害。围绕湖库消落带生态综合治理,国内外学者开展了大量的基础性工作^[8-9],主要集中在耐淹植物物种筛选、污染阻控、植物恢复和生态系统重建等方面^[10-11]。研究证实,采用挂袋、植生袋等工程措施^[12],可提升三峡库区夷陵段的植被覆盖度,有效降低消落带水土侵蚀。然而,由于湖库消落带立地

收稿日期 (Received date): 2023-04-11; **改回日期** (Accepted date): 2023-10-14

基金项目 (Foundation item): 湖南重点研发项目(2019SK2336); 湖南省水利科技项目(XSKJ2022068-31); 郴州国家可持续发展议程创新示范区建设专项(2019sfq21)。[Key Program of Research and Development of Hunan Province (2019SK2336); Water Resources Science and Technology Program of Hunan Province (XSKJ2022068-31); Chenzhou National Sustainable Development Agenda Innovation Demonstration Zone Construction Project (2019sfq21)]

作者简介 (Biography): 刘春香(2000-),女,湖南邵阳人,硕士研究生,主要研究方向:湿地生态。[LIU Chunxiang (2000-), female, born in Shaoyang, Hunan province, M.Sc. candidate, research on wetland ecology] E-mail: 2228036598@qq.com

* **通讯作者** (Corresponding author): 李有志(1981-),男,博士,教授,主要研究方向:湿地生态与环境。[LI Youzhi (1981-), male, Ph.D., professor, research on wetland ecology and environment] E-mail: liyouzhi2004@163.com

条件差,水文要素多变,植被建群难,生态修复效果不尽如人意^[13],究其原因在于对消落带地形和水文条件的认识不清。因此,精准识别湖库消落带的基本要素是开展生态修复的前提和基础,决定着生态治理的成效。

作为消落带生态最为关键的外在约束条件,地形地貌和水文情势反映了生态系统结构和功能的基本状态。在生态系统尺度,地貌(坡度、坡向、坡位、坡长等)营造了生境^[14],而水文情势(淹水深度、淹水时间、淹水频率等)塑造了植被格局^[15]。在洞庭湖消落带,水位呈梯度分布的特点决定了植被在空间上从水域及陆地依次为沉水植物群落—藨草(*Phalaris arundinacea*)群落—苔草(*Carex cinerascens*)群落—芦苇(*Phragmites australis*)群落—旱柳(*Salix matsudana*)群落^[16]。由于湖库消落带地形地貌、水文条件等参数大多在点尺度获取,难以及时、宏观和动态地反映大尺度特征,而遥感影像数据具有周期短和时效性强等特点,在获取生态要素等方面具有独特的优势^[17]。目前,ArcGIS技术已广泛用于地理学、生态学等相关研究中^[18]。在长江三峡水库^[19],利用ArcGIS,以水位高程变化、坡度和小尺度地形地貌为依据,可将消落带划分为经常性水淹型、半淹半露型、经常性出露型、岛屿型、湖盆-河口-库湾-库尾型、峡谷型6大类类型。在澜沧江流域的糯扎渡水库,消落带地形因子对植被构建具有重要影响,其影响大小依次为高程>地表起伏度>距水体距离>坡度>地形湿度指数>坡向^[20]。然而,由于水文学上的高程系统和地理学上的高程系统在高程基准上存在差异^[21],导致以消落带水位高程数据获取的水文特征与实际水文特征存在一定的偏差,不利于后续工作的开展^[22]。因此,科学精准地识别消落带地形和水文要素,方可消落带综合治理提供可靠的理论依据。

东江湖位于湖南省郴州市资兴市境内,水域面积160 km²,蓄水81.2亿m³,是一个集发电、防洪、航运、旅游和供水于一体的国家特大型水库。东江湖水位受人工调控,在非补偿期(4—11月)一般为调峰蓄水,在补偿期(12月—次年3月)为下泄放水。东江湖消落带岸线总长581 km,长期以来受到当地农业生产、旅游发展等人为干扰的影响,泥石流、山体滑坡等地质灾害频发,区域潜在生态风险堪忧。近10年来,地方政府围绕东江湖消落带植被修

复,开展了一些探索性的研究,如在消落带邻近岸线区域种植木芙蓉时发现植物生存状况欠佳,主要原因是对其生境因子的认识不足,因此精准识别消落带基本要素对减缓水土流失和维持当地生物多样性具有重大意义。为此,本研究以东江湖水文站(如东江大坝)多年日水位数据为基准,根据东江湖流域DEM数据,建立消落带水位数据与高程数据的转换关系,以识别消落带的范围,从而提取消落带地形因子和水文要素,分析地形因子空间格局及水文要素时空演变规律,为东江湖乃至其他湖库消落带综合治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 消落带范围提取

根据东江湖水文站(东江大坝)2017—2021年的日水位数据(slt.hunan.gov.cn/hnsw/),确定东江湖消落带位于265.33~280.27 m水位。利用东江湖流域12.5 m分辨率的DEM数据(NASA SRTM)与东江湖2017—2021年的水位数据进行对比,建立水位数据与高程数据的转换关系。由于东江湖水位数据和高程数据分别参考吴淞高程和EGM96,两者之间的换算关系为:高程数据=水位数据-1.953-0.375^[21],确定了东江湖消落带范围位于263~278 m高程区间。将东江湖流域DEM数字高程数据导入ArcGIS10.2中,提取263~278 m高程段范围,与目视解译的实际消落带轮廓进行对比,剔除不属于消落带的区间后获得东江湖消落带范围。

1.2 消落带地形因子分析

将东江湖消落带的DEM图导入ArcGIS,对高程、坡度、坡向、坡长、剖面曲率和平面曲率等地形因子进行重分类提取。将高程划分为5个区间:263~266 m、266~269 m、269~272 m、272~275 m、275~278 m。坡度按照1984年中国农业区划委员会颁发的《土地利用现状调查技术规程》的五级标准:0°~2°、2°~6°、6°~15°、15°~25°、≥25°^[23]。坡向分为9个等级:平面(无坡向)、北(0°~22.5°;337.5°~360°)、东北(22.5°~67.5°)、东(67.5°~112.5°)、东南(112.5°~157.5°)、南(157.5°~202.5°)、西南(202.5°~247.5°)、西(247.5°~292.5°)和西北(292.5°~337.5°)^[24]。坡长划分为5个等级:524~1500 m、1500~2500 m、2500~

5000 m、5000 ~ 10 000 m、10 000 ~ 17 625 m。剖面曲率划分为 5 个等级: -12 ~ -6、-6 ~ 0、0 ~ 6、6 ~ 10、10 ~ 15。平面曲率也划分为 5 个级别: -13 ~ -6、-6 ~ 0、0 ~ 6、6 ~ 10、10 ~ 14^[25-26]。最后,利用 ArcGIS 计算消落带不同高程区间、坡度区间、坡向区间、坡长区间、剖面曲率区间和平面曲率区间的面积。

坡度计算公式为:

$$S = \tan^{-1} \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \times \frac{180}{\pi} \quad (1)$$

式中, S 为坡度; f_x 为 x 方向上的高程变化率; f_y 为 y 方向上的高程变化率。

坡向计算公式为:

$$A = \tan^{-1} \left(\frac{n_x}{n_y} \right) \quad (2)$$

式中, A 为坡向; n_x 为坡向在邻域内东西方向上的变化率; n_y 为坡向在邻域内南北方向上的变化率。

坡长计算公式为:

$$L = \frac{DEM}{\sin\left(\frac{S \times \pi}{180}\right)} \quad (3)$$

式中, L 为坡长; DEM 为消落带的 DEM 矢量数据; S 为坡度。

剖面曲率和平面曲率的计算分别公式为:

$$C_p = \frac{f_{x_1 x_1} f_{x_1}^2 - 2 f_{x_1 y_1} f_{x_1} f_{y_1} + f_{y_1 y_1} f_{y_1}^2}{(f_{x_1}^2 + f_{y_1}^2)(1 + f_{x_1}^2 + f_{y_1}^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (4)$$

$$C_c = \frac{f_{x_1 x_1} f_{x_1}^2 - 2 f_{x_1 y_1} f_{x_1} f_{y_1} + f_{y_1 y_1} f_{y_1}^2}{(f_{x_1}^2 + f_{y_1}^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (5)$$

式中, C_p 为剖面曲率; C_c 为平面曲率; $f(x_1, y_1)$ 为消落带 DEM 数据坐标系中所定义的函数; f_{x_1} 为 x_1 的一阶偏导数; f_{y_1} 为 y_1 的一阶偏导数; $f_{x_1 x_1}$ 为 x_1 的二阶偏导数; $f_{y_1 y_1}$ 为 y_1 的二阶偏导数; $f_{x_1 y_1}$ 为先对 x_1 做一阶偏导后再对 y_1 做一阶偏导。

面积计算公式为:

$$S = X \times N \quad (6)$$

式中, S 为面积; X 为消落带 DEM 数据的像元面积; N 为高程、坡度、坡向、坡长、剖面曲率和平面曲率每一等级的个数。

1.3 消落带水文要素计算

参考东江湖水文站(东江大坝)2017—2021 年的日水位数据,计算出消落带最长持续淹水天数

(一年中持续淹水的最长天数)、最短持续淹水天数(一年中持续淹水的最短天数)、平均持续淹水天数、淹水天数(一年中被淹水的总天数)、最大淹水深度(一年中被淹水的最大深度)、最小淹水深度(一年中被淹水的最小深度)、平均淹水深度、累积淹水深度(一年中淹水深度总和)、最大退水深度(一年中退水的最大深度)、最小退水深度(一年中退水的最小深度)、平均退水深度、累积退水深度(一年中退水深度总和)、淹水次数(一年中被淹水的次数)等水文参数。

平均持续淹水天数计算公式为:

$$D_{av} = \frac{d_1}{f} \quad (7)$$

式中, D_{av} 为平均持续淹水天数; d_1 为一年中持续淹水天数总和; f 为一年中持续淹水次数。

平均淹水深度计算公式为:

$$H_{af} = \frac{h_f}{d_f} \quad (8)$$

式中, H_{af} 为平均淹水深度; h_f 为一年中每天淹水深度总和; d_f 为一年中淹水天数。

平均退水深度计算公式为:

$$H_{ar} = \frac{h_r}{d_r} \quad (9)$$

式中, H_{ar} 为平均退水深度; h_r 为一年中每天退水深度总和; d_r 为一年中退水天数。

1.4 数据分析

利用 SPSS 22.0 软件对淹水天数、淹水深度和退水深度等水文要素随高程变化趋势进行线性回归,显著水平为 0.01。根据回归方程的 R^2 和 P 值,筛选出最优回归模型,其中最小淹水深度和最小退水深度选择指数回归,其余参数选择直线回归。图件均使用软件 origin2021 进行绘制。

2 结果与分析

2.1 东江湖消落带地形因子空间格局

东江湖消落带高程总体呈现南北端高中间低的特点,高高程区主要集中在坪石乡、清江镇、滁口镇和黄草镇等地,低高程区主要在白廊镇和小东江等区域(图 1a)。随着消落带高程区间的增加,消落带面积呈现先增大后减小的趋势。266 ~ 269 m 高程区间的消落带面积最大,为 7.17 km²,占消落带总

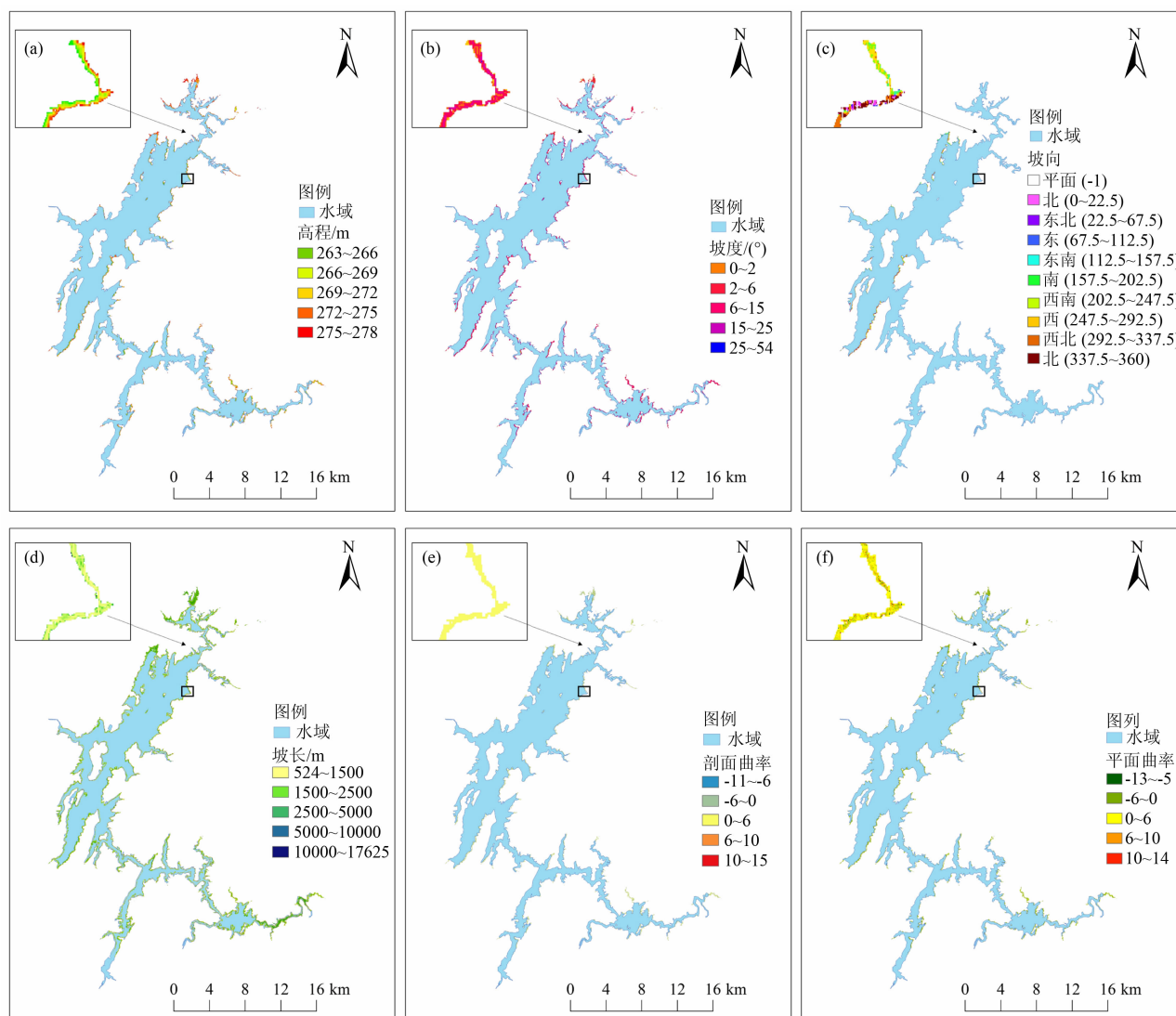


图1 东江湖消落带地形因子分布: (a) 高程; (b) 坡度; (c) 坡向; (d) 坡长; (e) 剖面曲率; (f) 平面曲率

Fig. 1 Distribution of the topographic factors in hydro-fluctuation belt in the Dongjiang Lake;

(a) elevation; (b) slope; (c) aspect; (d) slope length; (e) profile curvature; (f) plane curvature

面积的 28.5%; 263 ~ 266 m 高程区间的消落带面积最小, 为 2.14 km², 仅占消落带总面积的 8.5% (图 2a)。

东江湖消落带坡度总体呈现南北端高、中间低的特点, 陡坡主要位于南部的滁口镇和黄草镇等地, 缓坡位于中部的白廊镇和小东江等地 (图 1b)。消落带坡度随着高程区间的变化从高到低依次为: 6° ~ 15° (11.43 km²) > 2° ~ 6° (7.06 km²) > 15° ~ 25° (3.48 km²) > 0° ~ 2° (3.08 km²) > 25° ~ 54° (0.11 km²) (图 2b)。对坡向而言, 无坡向分布广泛, 占消落带总面积 20.6% (图 2c)。在其他坡向中, 以东坡向 (半阴坡) 面积最广, 占消落带总面积

的 12.4%; 西北坡向 (半阳坡) 面积最小, 占消落带总面积的 6.9%。对坡长而言, 消落带北部 (如坪石乡和兴宁镇) 以长坡为主, 南部 (如滁口镇和黄草镇) 以短坡为主。随着坡长的增加, 消落带面积逐渐减少, 如 1500 ~ 2500 m 坡长区间消落带面积为 7.06 km², 5000 ~ 10 000 m 坡长区间消落带面积减小到 2.79 km²。

东江湖消落带剖面曲率和平面曲率在空间分布上呈现相同变化趋势, 即在南北两端 (如坪石乡和黄草镇) 较低, 在中部 (如白廊) 较高 (图 1e、图 1f)。消落带剖面曲率和平面曲率在 -6 ~ 0 和 0 ~ 6 这两个区间面积最大, 分别为 12.77 km² 和

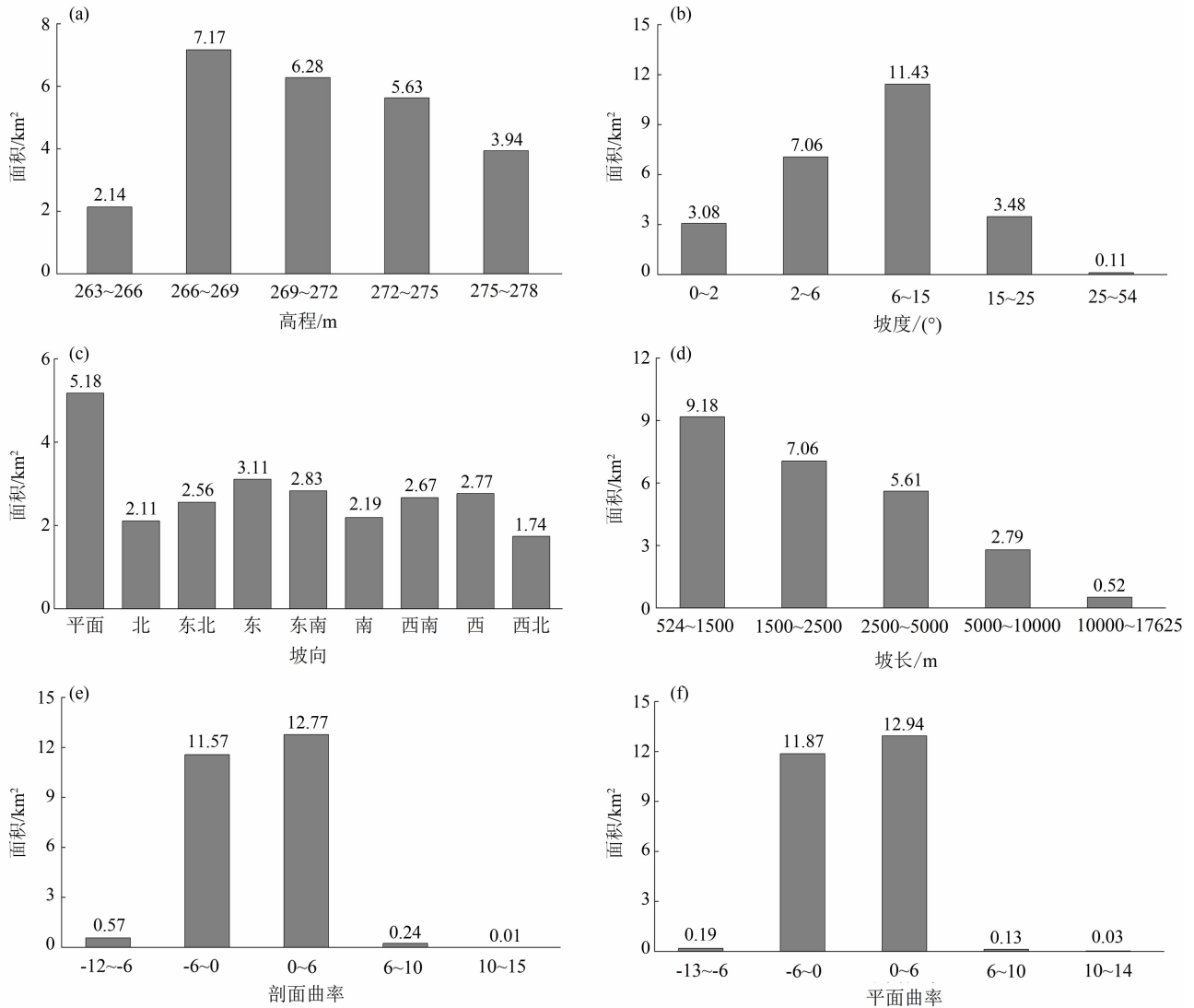


图2 东江湖消落带地形因子划定的面积: (a) 高程; (b) 坡度; (c) 坡向; (d) 坡长; (e) 剖面曲率; (f) 平面曲率

Fig. 2 Area of hydro-fluctuation belt based on the topographic factors in the Dongjiang Lake;

(a) elevation; (b) slope; (c) aspect; (d) slope length; (e) profile curvature; (f) plane curvature

12.94 km², 两者之和占消落带总面积的 98.6%, 而在其他区间面积小, 仅占总面积的 1.4% (图 2e、图 2f)。

2.2 东江湖消落带水文要素演变规律

东江湖消落带全年淹水天数、最高持续淹水天数、最低持续淹水天数、平均持续淹水天数均随高程的增加而下降, 呈现出显著负相关关系 (图 3)。消落带水文要素在不同年份之间存在一定的差异。以全年淹水天数为例, 该参数从高到低依次为 2019 年 > 2017 年 > 2020 年 > 2021 年 > 2018 年。

东江湖消落带最大淹水深度、平均淹水深度和累积淹水深度随高程增加而降低, 呈现出线性负相

关, 而最小淹水深度呈现指数负相关关系 (图 4)。消落带淹水深度在不同年份之间存在一定差异。如 270 ~ 279 m 高程区的最小淹水深度在 2018 年明显均高于其他年份, 呈现出水位快速涨落的特点。

与淹水深度相反, 东江湖消落带最大退水深度、平均退水深度和累积退水深度均随着高程的增加而增加, 呈现出线性正相关关系, 而最小退水深度也表现指数正相关关系 (图 5)。消落带退水深度在不同年份之间存在一定差异, 年际变化较为明显, 如最大退水深度从高到低依次表现出 2018 年 > 2020 年 > 2021 年 > 2017 年 > 2019 年。

东江湖消落带淹水次数在不同高程区间差异明

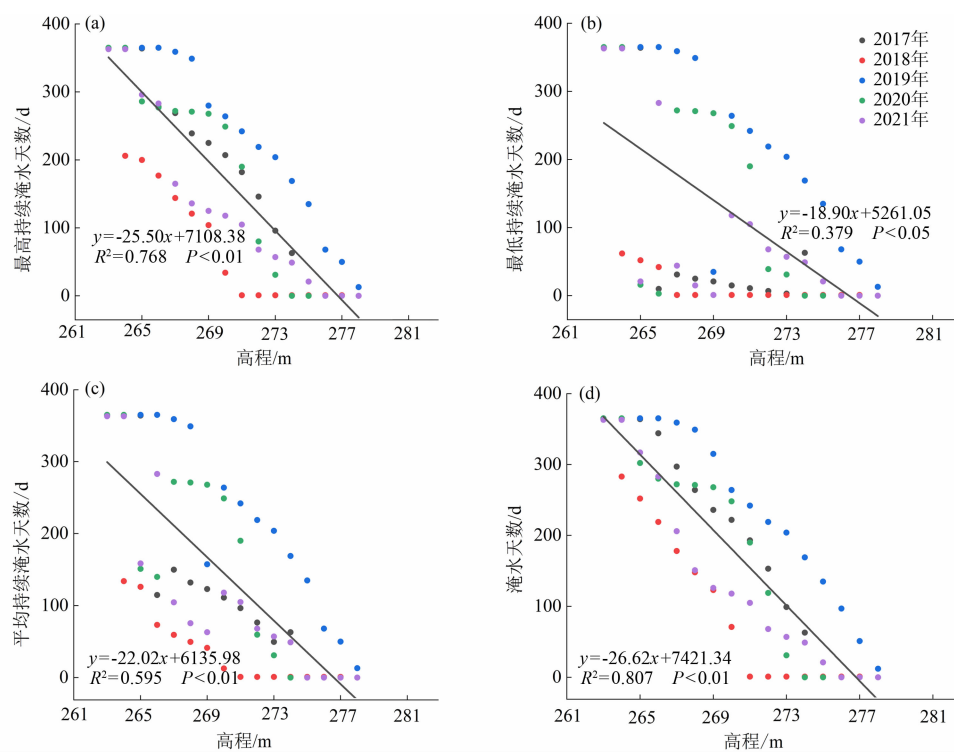


图3 2017—2021年东江湖消落带不同高程淹水天数:

(a) 最高持续淹水天数; (b) 最低持续淹水天数; (c) 平均持续淹水天数; (d) 淹水天数

Fig. 3 Flooding days in different elevations in hydro-fluctuation belt in the Dongjiang Lake from 2017 to 2021;

(a) maximum continuous flooding days; (b) minimum continuous flooding days; (c) average days of continuous flooding; (d) flooded days

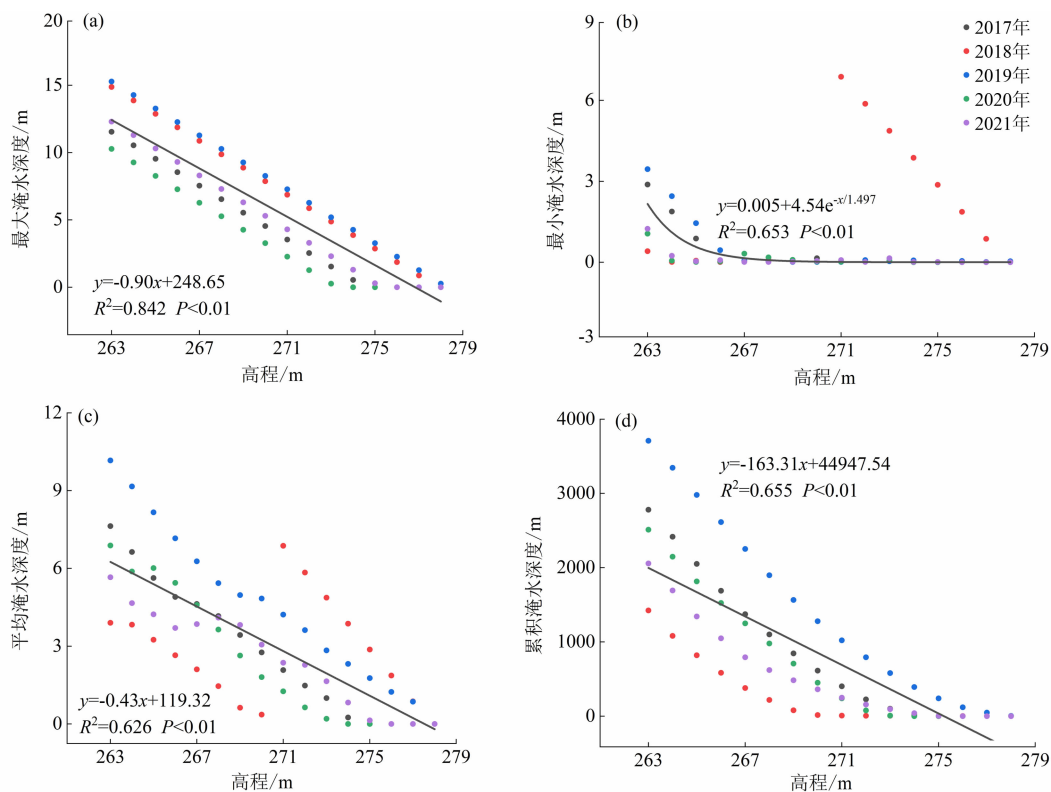


图4 2017—2021年东江湖消落带不同高程淹水深度:

(a) 最大淹水深度; (b) 最小淹水深度; (c) 平均淹水深度; (d) 累积淹水深度

Fig. 4 Flooding depth in different elevations in hydro-fluctuation belt in the Dongjiang Lake from 2017 to 2021;

(a) maximum flooding depth; (b) minimum flooding depth; (c) average flooding depth; (d) cumulative flooding depth

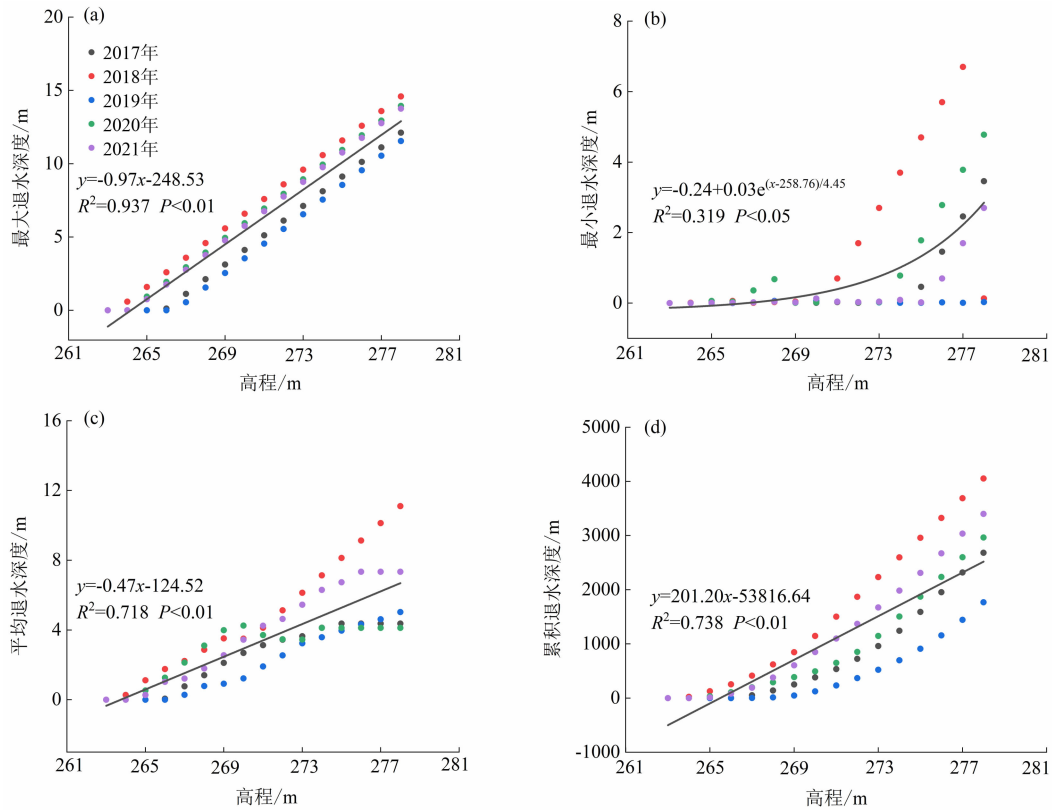


图 5 2017—2021 年东江湖消落带不同高程退水深度:

(a)最大退水深度; (b)最小退水深度; (c)平均退水深度; (d)累积退水深度

Fig. 5 Recession depth in different elevations in hydro-fluctuation belt in the Dongjiang Lake from 2017 to 2021;

(a) maximum recession depth; (b) minimum recession depth; (c) average recession depth; (d) cumulative recession depth

显,总体上呈现出随高程的增加先增加后降低的趋势(图 6)。其中,263 ~ 266 m 和 275 ~ 278m 高程区间仅淹水 1 次。消落带淹水次数在不同年份之间存在一定差异,年际变化较明显。如 266 ~ 269 m 高程区间的消落带淹水次数以 2017 年和 2018 年最高,2020 年次之,2019 年和 2021 年最低。

3 讨论

3.1 地形因子

在湖库消落带中,地形因子刻画了生境最基本的特征,在一定程度上决定了生态系统的生物格局。作为地形因子中最为基础的要素之一,高程在东江湖消落带呈现出南北高、中间低的特点,高高程区主要分布在坪石乡、清江镇、滁口镇和黄草镇,低高程区主要位于白廊镇和小东江等地。随着消落带高程的变化,植被往往呈现出一定的梯级分布特点^[27]。例如,在东江湖消落带,低高程区(263 ~ 266 m)和

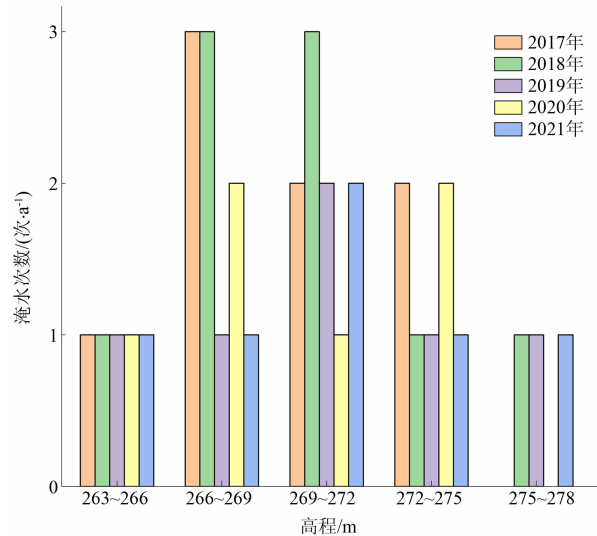


图 6 2017—2021 年东江湖消落带不同高程区间淹水次数

Fig. 6 Number of flooding time in different elevations in hydro-fluctuation belt in the Dongjiang Lake from 2017 to 2021

高高程区(275 ~ 278 m)植被种类较为单一,物种多样性低;中高程区(266 ~ 275 m)植被种类相对丰

富、物种多样性高^[28]。在澜沧江水库消落带,随着高程的增加,植被覆盖度呈现出先上升后下降的趋势^[29]。可见,消落带高程的过高和过低均不利于植被群落的构建,这是因为:(1)随着高程的升高,水热条件呈下降趋势,过高和过低的水热条件均不利于植被生长,相较而言中高程段的水热条件对植被生长更有优势^[30]; (2)由于低高程段地势平缓,人类活动频繁(如开荒),而高高程段邻近岸边,受外界环境影响大,均不利于植被建群^[31]。

此外,东江湖消落带坡度总体呈现南北高、东西低的特点。在滁口镇和黄草镇等坡陡地区($\geq 25^\circ$),泥石流、山体滑坡等地质灾害易发,水土流失严重;而在白廊镇等坡缓地区($< 25^\circ$)山体滑坡则少有发生,保水固土能力较强。随着坡度增加,生境质量下降,不利于植被生长^[32]。可见,在东江湖消落带,陡坡的南北部地区生境劣于坡缓的东西部地区。对坡向而言,东江湖消落带坡向主要集中在平面,阴坡面积多于阳坡。研究表明,坡向主要通过影响光照强度和日照时数,引起局域微环境的差异,导致物种组成的分异^[33]。在广东江门古兜山自然保护区,半阴坡的物种多样性明显高于半阳坡^[34-35],表现出物种丰富度从阴坡到阳坡显著降低的特点^[36-37]。对坡长而言,长坡主要位于东江湖的坪石乡和兴宁镇等地,坡长越长,坡面径流量越大,土壤侵蚀量越高^[38]。因此,东江湖消落带的坪石和兴宁等地应该是水土流失防控的重点区域。东江湖消落带剖面曲率和平面曲率在空间上呈现出相同的变化趋势,即消落带的南北两端(如坪石乡和黄草镇)较低,表明在此地的地表物质沉积、流动性较低,有利于地表物质稳定。

3.2 水文要素

由于湖库消落带特殊的地形条件,特别是高程的梯度分布特点,导致水文呈现出明显的节律变化。在东江湖消落带,水文要素,如淹水时间、淹水深度随着高程的增加而降低,而退水时间和退水深度随着高程的增加而增加。在水文的这种长期性、周期性的调控下,消落带植被在结构上呈现出明显的梯度分布特征^[39]。如在三峡库区澎溪河消落带,沿高程梯度从水域至岸线分布着苍耳(*Xanthium sibiricum*)带、双穗雀稗(*Paspalum distichum*)带,当水库蓄水高度为156 m时,苍耳成为优势群落,而在水库水位到达175 m后,双穗雀稗则成为优势群

落^[40]。在洞庭湖,三峡水库运行后,由于水文条件的变化导致了洲滩淹水时间发生了改变,引起了植物群落分布高程区间的变化,在1995~2015年期间苔草群落和荻(*Miscanthus sacchariflorus*)群落的最低分布高程线分别下移了0.60 m和0.56 m^[41]。同时,由于不同高程区间消落带植被物种组成的差异,其覆盖度、物种多样性、生产力等功能指标也随之变化。在鄱阳湖,洲滩植被面积受水位影响显著,随着水位的升高而逐渐减少^[42]。在三峡水库,消落带植物群落的覆盖度、物种多样性、地上生物量与淹水时间存在密切相关,表现出沿水位梯度从水域到岸线呈先增后降低的抛物线状变化趋势^[43]。可见,湖库消落带所呈现出的光滩、植被带等生态格局的变化,是对水文变动长期适应的结果^[39]。

然而,湖库消落带植被对水文变化的响应与适应过程中会表现出自组织和自我调节能力,当水文要素的变化达到一定阈值时,生态系统会由一个稳态转变为另一个稳态而出现突变^[44-45]。例如,洞庭湖湿地典型的木本植被川三蕊柳(*Salix triandroides*)在完全淹水(树梢淹没于水下)后第80 d开始出现死亡,第140 d死亡率达到70%,而在部分淹水(树梢出露于水面)后第140 d存活率仍然保持在100%^[46]。可见,在湖库消落带,淹水深度越深、时间越长对植被的生存越为不利^[47]。在东江湖消落带的低高程区(263~266 m),平均淹水深度3.25~10.16 m、淹水次数1次/a(常年持续淹水)、持续淹水时间233~365 d/a,植被受水淹胁迫强,生长受阻严重,少有植被能适应此生境^[48]。在东江湖消落带的中高程区(266~275 m),平均淹水深度1.77~7.16 m、淹水次数1~3次/a、持续淹水时间27~195 d/a,部分植物能适应此生境。在长江岸线,消落带持续淹水90 d后,芦苇和芦竹(*Arundo donax*)全部死亡,而疏花水柏枝(*Myricaria laxiflora*)和香根草(*Chrysopogon zizanioides*)存活率分别保持在50.4%和10.5%^[49],且短期淹水(< 14 d)后植被恢复到正常生长状态^[50]。可见,不同植被对水位节律的适应程度各异,能否存活与植被本身对水位胁迫的反馈机制和水位节律变化强度有关。在东江湖消落带的高高程区(275~278 m),平均淹水深度0.86~2.87 m、淹水次数基本1次/a、持续淹水时间13~69 d/a,部分湿地植被,如水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)、池杉(*Taxodium distichum*)等可以

适应此生境特征^[51]。

4 结论

东江湖消落带地形因子和水文要素呈现出明显的空间差异特征。在区域层面,白廊镇和小东江作为低高程区,消落带面积广,受人为旅游干扰大,是消落带综合治理的重点区域;坪石乡和兴宁镇等地,坡长、坡面径流量越大,土壤侵蚀量越高,是消落带水土防控的重点区域;滁口镇和黄草镇等地,坡度陡($\geq 25^\circ$),生境脆弱,属于消落带综合治理的难点区域。在高程层面,消落带 263 ~ 266 m 高程段属于常年淹水区域,植被无法出露水面,难以存活,均不能开展植被修复。266 ~ 278 m 高程段属于偶然淹水区,淹水节律随季节性变化明显,仅考虑水文条件,适宜开展植被修复,而滁口镇和黄草镇等陡坡($\geq 25^\circ$)和高曲率区域,地表物质流动频繁,立地条件差,不宜开展植被修复,主要以保持水土等工程修复为主;白廊和小东江等缓坡($< 25^\circ$)区域相较而言更利于植被建群生长,可开展植被修复,建议在 266 ~ 269 m 高程区选取多年生耐淹植被,269 ~ 275 m 高程区选取一年生植被,275 ~ 278 m 高程区选取耐淹乔木,以保水固土和稳定边坡。

参考文献 (References)

- [1] GONZALEZ E, FELIPE-LUCIA M R, BOURGEOIS B, et al. Integrative conservation of riparian zones [J]. *Biological Conservation*, 2017, **211**: 20 - 29. DOI: 10.1016/j.biocon.2016.10.035
- [2] BETZ F, LAUERMANN M, CYFFKA B. Delineation of the riparian zone in data-scarce regions using fuzzy membership functions: An evaluation based on the case of the Naryn River in Kyrgyzstan [J]. *Geomorphology*, 2018, **306**: 170 - 181. DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.01.024
- [3] 王正, 肖丽微, 谭秋霞, 等. 三峡水库消落带优势草本植物对土壤氮磷的吸收富集特征[J]. *山地学报*, 2019, **37**(2): 151 - 160. [WANG Zheng, XIAO Liwei, TAN Qiuxia, et al. Nitrogen and Phosphorus absorption from soil by the dominant herbaceous species in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir [J]. *Mountain Research*, 2019, **37**(2): 151 - 160] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000409
- [4] 李卓凌, 王冬梅, 任远. 漓江水陆交错带截污效果评价[J]. *生态学报*, 2018, **38**(21): 7618 - 7628. [LI Zhuoling, WANG Dongmei, REN Yuan. Assessment of the interception effect of Lijiang River land and water ecotone [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(21): 7618 - 7628] DOI: 10.5846/stxb201710141842
- [5] LEE J M, GAN J Y, YULE C M. The ecology of littoral zone Chironomidae in four artificial, urban, tropical Malaysian lakes [J]. *Urban Ecosystems*, 2019, **22**(1): 149 - 159. DOI: 10.1007/s11252-018-0802-6
- [6] 吕明权, 吴胜军, 陈春娣, 等. 三峡消落带生态系统研究文献计量分析[J]. *生态学报*, 2015, **35**(11): 3504 - 3518. [LYU Mingquan, WU Shengjun, CHEN Chundi, et al. A review of studies on water level fluctuating zone (WLFZ) of the Three Gorges Reservoir (TGR) based on bibliometric perspective [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(11): 3504 - 3518] DOI: 10.5846/stxb201309252366
- [7] NOBREGA R L B, ZIEMBOWICZ T, TORRES G N, et al. Ecosystem services of a functionally diverse riparian zone in the Amazon-Cerrado agricultural frontier [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, **21**: e00819. DOI: 10.1016/j.gecco.2019.e00819
- [8] CHEN Fangxin, LU Shaoyong, HU Xiaozhen, et al. Multi-dimensional habitat vegetation restoration mode for lake riparian zone, Taihu, China [J]. *Ecological Engineering*, 2019, **134**: 56 - 64. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.05.002
- [9] 窦文清, 贾伟涛, 张久红, 等. 三峡水库消落带植被现状、适生策略及生态修复研究进展[J]. *生态学杂志*, 2023, **42**(1): 208 - 218. [DOU Wengqing, JIA Weitao, ZHANG Jiuhong, et al. Research progress of vegetation status, adaptive strategies and ecological restoration in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, **42**(1): 208 - 218] DOI: 10.13292/j.1000-4890.202301.018
- [10] 艾丽皎, 吴志能, 张银龙. 水体消落带国内外研究综述[J]. *生态科学*, 2013, **32**(2): 259 - 264. [AI Lijiao, WU Zheneng, ZHANG Yinlong. A summary of water-level-fluctuating zone [J]. *Ecological Science*, 2013, **32**(2): 259 - 264] DOI: 10.3969/j.issn.1008-8873.2013.02.021
- [11] 王媛媛. 江津城区长江消落带护坡植被恢复工程植物多样性分析与恢复效果评价[D]. 重庆: 西南大学, 2022: 1 - 8. [WANG Yuanyuan. Analysis of plant diversity and evaluation of restoration effect of slope revegetation project of Yangtze River fading zone in Jiangjin city [D]. Chongqing: Southwest University, 2022: 1 - 8] DOI: 10.27684/d.cnki.gxndx.2022.004410
- [12] 黄桂云, 蔡玉鹏, 张国禹, 等. 三峡库区消落带植被恢复技术及植物适宜性研究[J]. *水土保持应用技术*, 2022(5): 1 - 3. [HUANG Guiyun, CAI Yupeng, ZHANG Guoyu, et al. Research on vegetation restoration technology and plant suitability in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Soil and Water Conservation Application Technology*, 2022(5): 1 - 3] DOI: 10.3969/j.issn.1673-5366.2022.05.01
- [13] 钟荣华, 鲍玉海, 贺秀斌, 等. 水库消落带串珠式柔性护岸技术及其应用[J]. *世界科技研究与发展*, 2015, **37**(1): 1 - 4.

- [ZHONG Ronghua, BAO Yuhai, HE Xiubing, et al. Application of beaded and flexible technology to revetment in reservoir drawdown zone [J]. *World Sci-Tech R&D*, 2015, **37**(1): 1–4] DOI: 10.16507/j.issn.1006–6055.2015.01.001
- [14] 张顺. 西安城市绿地地形设计对生境营造中土壤因子影响研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019: 12–25. [ZHANG Shun. The influence of topographic design of Xi'an urban green space on soil factors in habitat-site design [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019: 12–25] DOI: 10.27393/d.cnki.gxazu.2019.001743
- [15] 李峰, 谢永宏, 陈心胜, 等. 三峡工程运行对洞庭湖湿地植被格局的影响及调控机制[J]. *农业现代化研究*, 2018, **39**(6): 937–944. [LI Feng, XIE Yonghong, CHEN Xinsheng, et al. Influence with its regulating mechanism of the Three Gorge Dam operation on plant distributing patterns in the Dongting Lake [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, **39**(6): 937–944] DOI: 10.13872/j.1000–0275.2018.0085
- [16] 谢永宏, 陈心胜. 三峡工程对洞庭湖湿地植被演替的影响[J]. *农业现代化研究*, 2008, **29**(6): 684–687. [XIE Yonghong, CHEN Xinsheng. Effects of Three-Gorge Project on succession of wetland vegetation in Dongting Lake [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2008, **29**(6): 684–687]
- [17] 唐敏, 杨春华, 雷波. 基于 GIS 的三峡水库不同坡度消落带分布特征[J]. *三峡环境与生态*, 2013, **35**(3): 8–10+20. [TANG Min, YANG Chunhua, LEI Bo. Spatial distribution investigation on the water-level-fluctuating zone slopes in Three Gorges Reservoir areas based on GIS [J]. *Environment and Ecology in the Three Gorges*, 2013, **35**(3): 8–10+20] DOI: 10.14068/j.ceia.2013.03.002
- [18] 刘仪航, 韩剑桥, 谢梦霞, 等. 基于 GIS 与 AHP 集成的黄土高原洪水灾害风险评估[J]. *水土保持研究*, 2023, **30**(2): 129–134. [LIU Yihang, HAN Jianqiao, XIE Mengxia, et al. Risk assessment of flood disaster on the Loess Plateau based on integration of GIS and AHP [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, **30**(2): 129–134] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.002
- [19] 雷波, 杨春华, 杨三明, 等. 基于 GIS 的长江三峡水库消落带生态类型划分及其特征[J]. *生态学杂志*, 2012, **31**(8): 2082–2090. [LEI Bo, YANG Chunhua, YANG Sanming, et al. GIS-based division of ecological types and their characteristics of water-level-fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir of Yangtze River [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(8): 2082–2090] DOI: 10.13292/j.1000–4890.2012.0254
- [20] 江维薇, 李文涛, 肖衡林. 澜沧江流域糯扎渡水库消落带植被的物种组成、空间分布特征及地形解释[J]. *湖泊科学*, 2022, **34**(6): 2025–2038. [JIANG Weiwei, LI Wentao, XIAO Henglin. Species composition, spatial distribution characteristics and topographic attribution of vegetation in the water-level-fluctuating zone of the Nuozhadu Reservoir in the Lancang River Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, **34**(6): 2025–2038] DOI: 10.18307/2022.0618
- [21] 郭海荣, 焦文海, 杨元喜. 1985 国家高程基准与全球似大地水准面之间的系统差及其分布规律[J]. *测绘学报*, 2004, **33**(2): 100–104. [GUO Hairong, JIAO Wenhai, YANG Yuanxi. The systematic difference and its distribution between the 1985 national height datum and the global quasigeoid [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2004, **33**(2): 100–104]
- [22] 赵保成, 李国忠, 徐坚, 等. 顾及似大地水准面趋势变化的高程异常拟合方法[J]. *北京测绘*, 2022, **36**(11): 1449–1454. [ZHAO Baocheng, LI Guozhong, XU Jian, et al. Fitting method of height anomaly considering variation of quasi-geoid [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2022, **36**(11): 1449–1454] DOI: 10.19580/j.cnki.1007–3000.2022.11.002
- [23] 谢祖明. 福建三调耕地坡度分级数据提取方法研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 2022, **45**(9): 95–98. [XIE Zuming. Study on the method of extracting cultivated land slope grading data from the Third Land Survey in Fujian province [J]. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 2022, **45**(9): 95–98]
- [24] 付建新, 曹广超, 郭文炯. 1998—2017 年祁连山南坡不同海拔、坡度和坡向生长季 NDVI 变化及其与气象因子的关系[J]. *应用生态学报*, 2020, **31**(4): 1203–1212. [FU Jianxin, CAO Guangchao, GUO Wenjong. Changes of growing season NDVI at different elevations, slopes, slope aspects and its relationship with meteorological factors in the southern slope of the Qilian Mountains, China from 1998 to 2017 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(4): 1203–1212] DOI: 10.13287/j.1001–9332.202004.018
- [25] 李俊. 基于 DEM 的黄土高原坡长的自动提取和分析[D]. 西安: 西北大学, 2007: 3–60. [LI Jun. Automatic extraction of slope length and analyst based on DEM in the Loess Plateau [D]. Xi'an: Northwest University, 2007: 3–60]
- [26] 田宇. 基于 ArcGIS 的长白县滑坡易发性分区评价研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020: 29–37. [TIAN Yu. ArcGIS-based spatial prediction of landslide susceptibility in Changbai county [D]. Changchun: Jilin University, 2020: 29–37]
- [27] LI Youzhi, BIAN Hualin, REN Bo, et al. Morphological responses of two plant species from different elevations in the Dongting Lake wetlands, China, to variation in water levels [J]. *Nordic Journal of Botany*, 2019, **37**: e01987. DOI: 10.1111/njb.01987
- [28] 黄莹. 数学统计方法在东江湖环湖植被生态评价中的应用[J]. *湘南学院学报*, 2020, **41**(5): 28–33. [HUANG Ying. Application of mathematical statistical method in ecological evaluation of vegetation in the Dongjiang Lake [J]. *Journal of Xiangnan University*, 2020, **41**(5): 28–33] DOI: 10.3969/j.issn.1672–8173.2020.05.007
- [29] 刘伦. 基于 3S 技术的澜沧江梯级水库消落带植被物种组成及其分布特征[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2021: 3–27. [LIU

- Lun. Composition and distribution of vegetation in the water level fluctuating zone of the Lantsang cascade reservoir based on 3S technology [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2021: 3–27]
- [30] 祁建, 马克明, 张育新. 辽东栎(*Quercus liaotungensis*)叶特性沿海拔梯度的变化及其环境解释[J]. 生态学报, 2007, **27**(3): 930–937. [QI Jian, MA Keming, ZHANG Yuxin. The altitudinal variation of leaf traits of *Quercus liaotungensis* and associated environmental explanations [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(3): 930–937]
- [31] 周启刚, 王陶, 刘树位, 等. 三峡库区消落带生境质量时空演变特征及其地形梯度效应研究[J]. 地域研究与开发, 2022, **41**(2): 155–160. [ZHOU Qigang, WANG Tao, LIU Xuwei, et al. Research on the teporal and spatial evolution characteristics oh habitat quality in the water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir area and its topographic gradient effect [J]. *Areal Research and Development*, 2022, **41**(2): 155–160] DOI: 10.3969/j. issn. 1003–2363. 2022. 02. 026
- [32] 张华, 韩武宏, 宋金岳, 等. 祁连山国家公园生境质量时空演变[J]. 生态学杂志, 2021, **40**(5): 1419–1430. [ZHANG Hua, HAN Wuhong, SONG Jinyue, et al. Spatial-temporal variations of habitat quality in Qilian Mountain National Park [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, **40**(5): 1419–1430] DOI: 10.13292/j. 1000–4890. 202105. 029
- [33] GONG X, BRUECK H, GIESE K M, et al. Slope aspect has effects on productivity and species composition of hilly grassland in the Xilin River Basin, Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2008, **72**(4): 483–493. DOI: 10.1016/j. jaridenv. 2007. 07. 001
- [34] 严岳鸿, 何祖霞, 苑虎, 等. 坡向差异对广东古兜山自然保护区蕨类植物多样性的生态影响[J]. 生物多样性, 2011, **19**(1): 41–47. [YAN Yuehong, HE Zuxia, YUAN Hu, et al. The ecological response of fern diversity to different slopes in Gudoushan Nature Reserve, Guangdong [J]. *Biodiversity Science*, 2011, **19**(1): 41–47] DOI: 10.3724/SP. J. 1003. 2011. 07109
- [35] 童珊, 曹广超, 闫欣, 等. 祁连山南坡 2000—2020 年植被覆盖时空演变及其驱动因素分析[J]. 山地学报, 2022, **40**(4): 491–503. [TONG Shan, CAO Guangchao, YAN Xin, et al. Spatial-temporal evolution of vegetation cover changes and its driving factors of vegetation cover on the south slope of the Qilian Mountains, China from 2000 to 2020 [J]. *Mountain Research*, 2022, **40**(4): 491–503] DOI: 10.16089/j. cnki. 1008–2786. 000688
- [36] 肖欣爽. 基于功能性状的亚高寒草甸坡向生境梯度群落构建过程研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016: 24–31. [XIAO Xinshuang. Community assembly on the habitat gradient of slope aspects in sub-alpine meadow based on functional traits [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016: 24–31]
- [37] 高若允, 杨柳生, 田雪, 等. 干热河谷阴、阳坡失稳性坡面植被与环境因子关系的冗余分析[J]. 山地学报, 2022, **40**(6): 835–846. [GAO Ruoyun, YANG Liusheng, TIAN Xue, et al. Redundancy analysis of the relationship between plant and environmental factors on shady and sunny unstable slope in dry-hot valley [J]. *Mountain Research*, 2022, **40**(6): 835–846] DOI: 10.16089/j. cnki. 1008–2786. 000717
- [38] 平红卫. 北方土石山区坡长对水土流失的影响研究—以长治市山区为例[J]. 山西水土保持科技, 2020(2): 17–19+26. [PING Hongwei. Research on the influence of slope length on soil erosion in northern soil-rock mountainous areas—take the mountainous area of Changzhi city as an example [J]. *Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi*, 2020(2): 17–19+26]
- [39] COOPS H, BEKLIOGIU M, CRISMAN T L. The role of water-level fluctuations in shallow lake ecosystems—workshop conclusions [J]. *Hydrobiologia*, 2003, **506–509**(1): 23–27. DOI: 10.1023/b:hydr. 0000008595. 14393. 77
- [40] 王强, 袁兴中, 刘红, 等. 三峡水库 156m 蓄水后消落带新生湿地植物群落[J]. 生态学杂志, 2009, **28**(11): 2183–2188. [WANG Qiang, YUAN Xingzhong, LIU Hong, et al. Plant communities in newly created wetlands in Water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir after flooding to 156 m height [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, **28**(11): 2183–2188] DOI: 10.13292/j. 1000–4890. 2009. 0355
- [41] HU Jiayu, XIE Yonghong, TANG Yue, et al. Changes of vegetation distribution in the east Dongting Lake after the operation of the Three Gorges Dam, China [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, **9**: 582. DOI: 10.3389/fpls. 2018. 00582
- [42] 朱江涛, 艾金泉, 陈晓勇, 等. 基于 GEE 的鄱阳湖湿地植被长期变化特征及其对水文情势的响应[J]. 测绘通报, 2022(8): 7–13. [ZHU Jiangtao, AI Jinquan, CHEN Xiaoyong, et al. Long-term vegetation variation and its response to hydrological regime in Poyang Lake wetland based on GEE [J]. *Surveying and Mapping Bulletin*, 2022(8): 7–13] DOI: 10.13474/j. cnki. 11–2246. 2022. 0225
- [43] 王建超, 朱波, 汪涛. 三峡库区典型消落带淹水后草本植被的自然恢复特征[J]. 长江流域资源与环境, 2015, **20**(5): 603–610. [WANG Jianchao, ZHU Bo, WANG Tao. Characteristics of restoration of natural herbaceous vegetation of typical water-level fluctuation zone after flooding in the Three Gorges reservoir area [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **20**(5): 603–610]
- [44] MARZLOFF M P, OLIVER E C J, BARRETT N S. Differential vulnerability to climate change yields novel deep-reef communities [J]. *Nature Climate Change*, 2018, **8**: 873–878. DOI: 10.1038/s41558–018–0278–7
- [45] DAKOS V, MATTHEWS B, HENDRY A P, et al. Ecosystem tipping points in an evolving world [J]. *Nature Ecology and*

- Evolution, 2019, **3**: 355 – 362. DOI: 10.1038/s41559-019-0797-2
- [46] DING Xiaohui, ZOU Jianfeng, LI Youzhi, et al. Acclimation of *Salix triandroides* cuttings to incomplete submergence is reduced by low light [J]. *Aquatic Ecology*, 2017, **51**: 321 – 330. DOI: 10.1007/s10452-017-9619-2
- [47] DING X H, LUO J, LI Y Z, et al. Survival of completely submerged *Salix triandroides* cuttings is associated with non-structural carbohydrate metabolism [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2019, **34** (1): 395 – 404. DOI: 10.1080/02705060.2019.1618930
- [48] 饶洁, 段丁琪, 唐强, 等. 三峡水库消落带植被高程梯度分异及其对生境胁迫的响应[J]. *生态学报*, 2023, **43** (16): 6649 – 6660. [RAO Jie, DUAN Dingqi, TANG Qiang, et al. Vegetation differentiation along elevation gradient in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir and its response to habitat stressing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43** (16): 6649 – 6660] DOI: 10.5846/stxb202205061258
- [49] 黄磊. 宜昌市猗亭长江岸线消落带植物耐水淹适应性研究[J]. *中国水土保持*, 2022, **489** (12): 69 – 70. [HUANG Lei. Research on the water-tolerant adaptability of plants in the Yangtze River shoreline retreat zone in Yichang city [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2022, **489** (12): 69 – 70] DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.2022.0292
- [50] 蓝苹予, 荣航, 姚作芳, 等. 间歇淹水和氨氮胁迫对3种园林植物形态与生理的影响特征[J/OL]. *热带作物学报*, 2023: 1 – 12. [LAN Pingyu, RONG Hang, YAO Zuofang, et al. Effects of intermittent flooding and ammonia nitrogen stress on morphology and physiology of three garden plants [J/OL]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2023: 1 – 12]
- [51] 李建兴, 黄广杰, 熊寿德, 等. 4种乔木在三江并流区水库消落带生态修复中的适应性[J]. *水土保持通报*, 2022, **42** (6): 182 – 189. [LI Jianxing, HUANG Guangjie, XIONG Shoude, et al. Adaptability of four tree species in ecological restoration of reservoir fluctuating zone in parallel flow area of three rivers [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, **42** (6): 182 – 189] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.06.035

Spatiotemporal Changes in Topographic and Hydrological Factors in Hydro-Fluctuation Belt in the Dongjiang Lake of Hunan Province, China

LIU Chunxiang, HUANG Ziyue, TAN Bowen, LI Youzhi*

(College of Environment and Ecology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128)

Abstract: Ecological restoration of the hydro-fluctuation belt in the Dongjiang Lake is important because of the increasing risk of riverbank erosion and water-soil loss. As the most critical factors for the restoration of the hydro-fluctuation belt of lakes and reservoirs, topographic and hydrological factors best describe the basic state of such an ecosystem.

In this study, digital elevation model (DEM) data of the Dongjiang Lake Basin and daily water level data (2017 – 2022) from hydrological stations were collected. The range of the hydro-fluctuation belt was extracted using ArcGIS, and then the changes in spatiotemporal pattern of the topographic and hydrological factors in the hydro-fluctuation belt were analyzed.

The study produced the following findings. (1) The hydro-fluctuation belt in the Dongjiang Lake was located at an elevation of 263 – 278 m, a vertical elevation difference of 15 m, and had a total area of 25.16 km². The elevations and slopes in the belt had the highest values in the northern and southern areas (e.g., Chukou Town, Huangcao Town) and the lowest in the middle area (e.g., Bailang Town, Xiaodongjiang). The non-slope aspect in the belt was widely distributed, and the area of shady slope exceeded that of sunny slope. Long and short slopes were mainly located in the northern and southern areas of the belt, respectively. The profile curvature and plane

curvature in the belt showed the same change trend in spatial distribution, exhibiting low values in the northern and southern belts and high values in the middle belt. (2) The topographic and hydrological factors in the hydro-fluctuation belt in the Dongjiang Lake were spatially heterogeneous. The annual, minimum continuous, and average continuous flooding days as well as the maximum and average flooding depths in the hydro-fluctuation belt showed significant negative correlations with elevation. (3) It should be considered for comprehensive control of the hydro-fluctuation belt at Bailang Town, Xingning Town, Pingshi Town, and Xiaodongjiang. Comprehensive control will be difficult in Chukou Town and Huangcao Town. The section of the belt at elevation ranging from 263 to 266 m was a perennial flooding area and was not suitable for habitat of vegetation, and that ranging from 266 to 278 m was an accidental flooding area that was suitable for some vegetation restoration.

This study provides a scientific basis for plant community establishment, ecological restoration, and comprehensive management of the hydro-fluctuation belt in the Dongjiang Lake.

Key words: DEM; slope; flooding depth; flooding days; vegetation restoration

(责任编辑 朱颖彦 李嵘)