

基于模糊隶属度分布函数的博斯腾湖景观适宜水位确定

刘 洋¹, 李 江², 陈 诚¹, 林育青¹, 莫康乐¹, 胡明涛¹, 李沁园¹, 陈求稳^{1,3}

(1. 南京水利科学研究院生态环境研究所, 江苏 南京 210029; 2. 新疆塔里木河流域管理局, 新疆 库尔勒 841000; 3. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098)

摘要:采用层次分析法识别博斯腾湖景观关键点,基于湖泊特征水位分析,构建了景观关键点水位和景观适宜度的模糊隶属度分布函数,计算了不同季节博斯腾湖景观适宜水位范围。结果表明:湖泊水质、年旅游业收益是识别博斯腾湖景观关键点的主要因素;博斯腾湖最佳景观水位为1 046.70 m,低警戒水位为1 045.00 m,高警戒水位为1 047.90 m,低、高破坏边缘水位分别为1 045.40 m和1 047.40 m;不同季节博斯腾湖景观适宜水位存在差异,春季和秋季景观适宜水位范围为1 045.90~1 047.16 m,夏季为1 046.00~1 047.00 m,冬季为1 045.85~1 047.25 m。

关键词:景观适宜水位;景观关键点;模糊隶属度分布函数;层次分析法;博斯腾湖

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2024)03-0116-09

Identification of landscape suitable water levels in Bosten Lake based on fuzzy membership degree distribution function // LIU Yang¹, LI Jiang², CHEN Cheng¹, LIN Yuqing¹, MO Kangle¹, HU Mingtao¹, LI Qinyuan¹, CHEN Qiuwen^{1,3} (1. Eco-Environmental Research Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Xinjiang Tarim River Basin Management Bureau, Korla 841000, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Using the analytic hierarchy process to identify key landscape points in Bosten Lake, based on the analysis of lake characteristic water levels, a fuzzy membership degree distribution function was constructed for the water level and landscape suitability of key landscape points, and the suitable water level range for Bosten Lake landscape in different seasons was calculated. The results indicate that lake water quality and annual tourism revenue are the main factors for identifying key landscape points in Bosten Lake. The optimal landscape water level for Bosten Lake is 1 046.70 m, with a low warning water level of 1 045.00 m, a high warning water level of 1 047.90 m, and low and high damaged edge water levels of 1 045.40 m and 1 047.40 m, respectively. There are differences in the suitable water level for the landscape of Bosten Lake in different seasons. The suitable water level range is 1 045.90~1 047.16 m for spring and autumn, 1 046.00~1 047.00 m for summer, and 1 045.85~1 047.25 m for winter.

Key words: landscape suitable water level; key landscape point; fuzzy membership degree distribution function; analytic hierarchy process; Bosten Lake

湖泊具有调节径流、供水灌溉、水质净化和生物多样性维持等多种功能,在维系区域社会经济和生态环境协同发展方面有着不可取代的地位^[1]。候鸟迁徙、水生植物生长以及鱼类繁殖都受湖泊水位变化影响,因此确定适宜的湖泊水位能够满足湖泊生态系统的多种需求,从而维护生态系统的多样性和平衡。20 世纪末以来,随着水体最低流量、湖泊

生态需水量、生态水位等概念的提出,与其相关的湖泊适宜水位的概念逐步出现^[2-4]。依据适宜目标导向,可以将其归纳为水文适宜、水质适宜、水生生物适宜3类。水文适宜是以湖泊湿地生态需水量为目标来确定湖泊的适宜水位。如刘英等^[5]考虑芦苇生长耗水、水面耗水、地下水渗漏等需要,根据年内动态水位需求情况进行了博斯腾湖生态需水核算;

基金项目:国家自然科学基金创新研究群体项目(52121006);国家自然科学基金面上项目(52279071);新疆维吾尔自治区财政厅专项课题项目(403-1005-YBN-FT61)
作者简介:刘洋(1996—),男,博士研究生,主要从事生态水文研究。E-mail:sdauliuy@163.com
通信作者:陈诚(1990—),男,高级工程师,博士,主要从事水环境信息学研究。E-mail:chencheng@nhri.cn

以及水位较高、湖泊淹没面积广阔、存在一定水灾害风险的1047.00 m及以上的水位。人口数据来自中国公里网格人口分布数据集^[15]。其他各数据资料来源于《巴音郭楞蒙古自治州统计年鉴》《博湖县国民经济和社会发展统计公报》及相关行政事业部门的统计数据。

2 研究方法

基于层次分析法和模糊分布计算博斯腾湖的景观适宜水位,图3为研究路线。首先,综合考虑湖泊周围环境、水位变化敏感性及景观经济效益等因素,采用层次分析法识别景观关键点^[16];其次,根据湖泊水位资料及遥感数据确定水位波动对景观关键点的影响,明确特征水位数值用以拟合模糊隶属度分布函数;最后,基于湖泊水位和景观适宜度关系,选择合理的模糊隶属度分布函数来拟合二者关系,根据实际情况预设需达到的景观适宜度,取隶属度函数分布的截集即得到景观适宜水位范围。

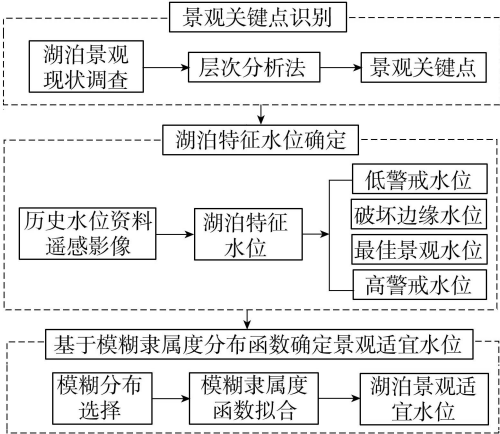


图3 景观适宜水位研究路线

Fig. 3 Schematic flow of landscape suitable water level study

2.1 层次分析法识别景观关键点

2.1.1 指标选取

考虑湖泊主要旅游景点和重要的水生态区域作为备选景观关键点,综合前人关于湖泊适宜水位的研究结果以及层次分析法评价指标的选择标准来确定准则层指标^[17]。最终确定识别景观关键点主要指标包括地理位置、年旅游业收益、周围人口密度、湖泊水质、年游客总人数,进而对备选景观关键点运用层次分析法确定各指标权重。

2.1.2 指标权重确定

a. 对比矩阵构建。对于每一层次的指标,基于专家打分建立两两比较矩阵,来判断它们在该层次中的相对重要性。对比矩阵 $M_{n \times n}$ 的元素 a_{ij} 为指标 i 与指标 j 的重要性对比。

b. 准则层指标排序及一致性检验。使用和积法计算矩阵 M 的主特征向量,得到准则层每一指标的优先级。计算对比矩阵最大特征根,用以一致性检验。计算一致性比率,一般认为一致性比率小于0.1时,一致性可以接受,即认为构建的对比矩阵合理。计算公式为

$$W_{ij} = a_{ij} / \sum_{j=1}^n a_{ij} \tag{1}$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j}{w_i} \tag{2}$$

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{R_1(n - 1)} \tag{3}$$

式中: W_{ij} 为 M 的主特征向量元素; $\lambda_{\max}$ 为 M 的最大特征根; w_i 为指标 i 的权重; C_1 为一致性比率; R_1 为平均随机一致性指标,是根据足够多个随机发生的样本矩阵计算的一致性指标的平均值,查表可得^[18]。本文为5阶矩阵,其对应 R_1 为1.12。

c. 层次总排序及一致性检验。针对每一备选景观关键点,准则层不同指标重要性存在差异,因此需要单独打分计算矩阵特征向量并做一致性检验。最终,综合准则层权重向量和每一备选景观关键点权重向量,确定备选景观关键点优先次序:

$$R_i = \sum_{j=1}^n a_i b_{ij} \tag{4}$$

式中: R_i 为备选关键点 i 得分; a_i 为层次总排序权重系数; b_{ij} 为标准化后的准则层指标权重系数; n 为准则层数目。

2.2 湖泊特征水位确定

基于模糊分布理论,通过构建模糊隶属度分布函数来确定湖泊水位和景观适宜度关系,从而推求景观适宜水位。湖泊的任一水位 h ,都映射着一个景观适宜度值 $u(h)$:

$$h \rightarrow \mu(h) \in [0,1] \tag{5}$$

构建模糊隶属度分布函数需要多个已知景观适宜度及其对应的特征水位,本文特征水位包括最佳景观水位 h_b 、高警戒水位 h_h 、低警戒水位 h_l 和破坏边缘水位 h_e 。根据博斯腾湖历史水位资料,取多年日平均水位为最佳景观水位,其对应隶属度为1。对多年平均水位进行水文频率分析计算,并选用皮尔逊-Ⅲ型曲线拟合,得到 $P=15\%$ 、 $P=85\%$ 频率下的多年平均水位。参考水文频率分析中丰、枯的划分方法^[19-21],当水位达到 $P=15\%$ 频率时,表示水位相对较高,会对周围环境和景观带来淹没和水灾害风险,因此设定为高警戒水位;当水位达到 $P=85\%$ 频率时,表示水位相对较低,将会对景观或生态系统产生不利影响,无法满足景观需求,因此设定为低警戒

水位。高警戒水位及低警戒水位的隶属度为0。通过资料调研和不同水位下遥感影像分析,了解因水位波动使得景观关键点遭受明显破坏的情况,该水位记为破坏边缘水位,设定其隶属度为0.5。

2.3 利用模糊隶属度分布函数确定湖泊景观适宜度

景观适宜度对破坏边缘水位的波动非常敏感,当水位明显高于(或低于)破坏边缘水位时,其景观适宜度趋势将发生变化,因此本文选择升半型正态分布函数 μ_A 、降半型正态分布函数 μ_B 、升岭型正态分布函数 μ_C 、降岭型正态分布函数 μ_D 进行描述。隶属度函数的左半侧有3个已知点,即 $(h_l,0)$ 、 $(h_e,0.5)$ 和 $(h_b,1)$,采用先升半型分布,后升岭型分布的复合分布来描述,即 $\mu=\mu_A+m_1\mu_D$ (m_1 为系数)。与之相对称,对于隶属度函数右半侧已知点 $(h_e,0.5)$ 和 $(h_h,0)$,先用降岭型分布,后用降半型分布函数描述,即 $\mu=m_2\mu_C+\mu_B$ (m_2 为系数)。4种分布函数的计算公式为

$$\mu_A(x)=\begin{cases}0 & x\leq a \\ 1-e^{-k(x-a)^2} & x>a,k>0\end{cases}\tag{6}$$

$$\mu_B(x)=\begin{cases}0 & x\geq b \\ e^{-k(x-a)^2} & x\geq a,k>0\end{cases}\tag{7}$$

$$\mu_D(x)=\begin{cases}1 & x\leq b \\ 0.5+0.5\sin\frac{\pi}{b-a}\left(x-\frac{a+b}{2}\right) & a\leq x<b\end{cases}\tag{8}$$

$$\mu_C(x)=\begin{cases}1 & x\leq a \\ 0.5-0.5\sin\frac{\pi}{b-a}\left(x-\frac{b-a}{2}\right) & a<x<b \\ 0 & x\geq b\end{cases}\tag{9}$$

式中: x 为湖泊水位; a 、 b 分别为湖泊水位的下限和上限。

3 结果与分析

3.1 湖泊景观关键点识别

层次分析结果表明,博斯腾湖主要指标(地理

位置、年旅游业收益、周围人口密度、湖泊水质、年游客总人数)准则层的最大特征根为5.27, C_1 值为0.06,通过了一致性检验,表明构建的对比矩阵是逻辑合理的。表1为博斯腾湖各指标层次分析的结果,各准则层指标权重从大到小依次为:湖泊水质、年旅游业收益、年游客总人数、周围人口密度、地理位置,可见湖泊水质、旅游业收益是确定景观关键点最重要的指标。针对每一备选景观关键点开展层次分析,得到各自的准则层权重,进而得到所有备选景观关键点重要性从大到小依次为:金沙滩、银沙滩、博湖风景区、白鹭洲景区、大河口西海渔村景区、芦花港、卡斯门场、黄水湾。考虑到博斯腾湖泊大小和关键点空间配置,选择前3个关键点,即金沙滩、银沙滩和博湖风景区,确定为博斯腾湖景观关键点。

3.2 博斯腾湖特征水位分析

1986—2022年博斯腾湖月平均水位为1046.70 m,对应隶属度函数中最佳景观水位 h_b ,这与前人研究结果一致^[8]。图4为博斯腾湖水位概率分布,可以看出皮尔逊-Ⅲ型曲线很好地拟合了博斯腾湖历史水位。累积概率分布函数确定博斯腾湖高警戒水位为1047.90 m,低警戒水位为1045.50 m。

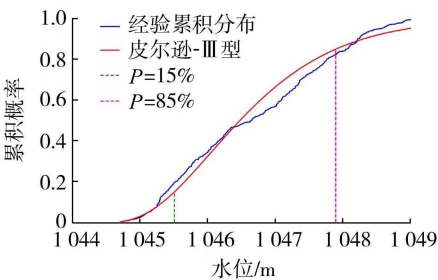


图4 博斯腾湖水位概率分布
Fig.4 Frequency distributing of water level in Bosten Lake

通过目视解译遥感数据识别湖面轮廓,分析不同水位下博斯腾湖景观关键点金沙滩、银沙滩和博湖风景区的受影响程度从而确定破坏边缘水位,结果见图5,图中星号代表景观关键点,圆圈代表重点关注区域。图6为典型水位下博斯腾湖淹没轮廓变

表1 博斯腾湖各指标层次分析结果

Table 1 Analytical hierarchy process results of different indexes in Bosten Lake											
指标	准则层		方案层								
	特征向量	权重	白鹭洲景区权重	金沙滩权重	银沙滩权重	芦花港权重	大河口西海渔村景区权重	博湖风景区权重	黄水湾权重	卡斯门场权重	C_1 值
地理位置	0.25	0.0334	0.04	0.23	0.15	0.06	0.09	0.39	0.02	0.02	0.08
年旅游业收益	2.54	0.3339	0.11	0.32	0.16	0.07	0.05	0.24	0.02	0.03	0.04
周围人口密度	0.49	0.0647	0.11	0.02	0.03	0.23	0.33	0.16	0.07	0.05	0.03
湖泊水质	3.38	0.4449	0.15	0.35	0.19	0.06	0.06	0.08	0.05	0.06	0.09
年游客总人数	0.93	0.1231	0.18	0.36	0.22	0.06	0.07	0.07	0.02	0.02	0.09

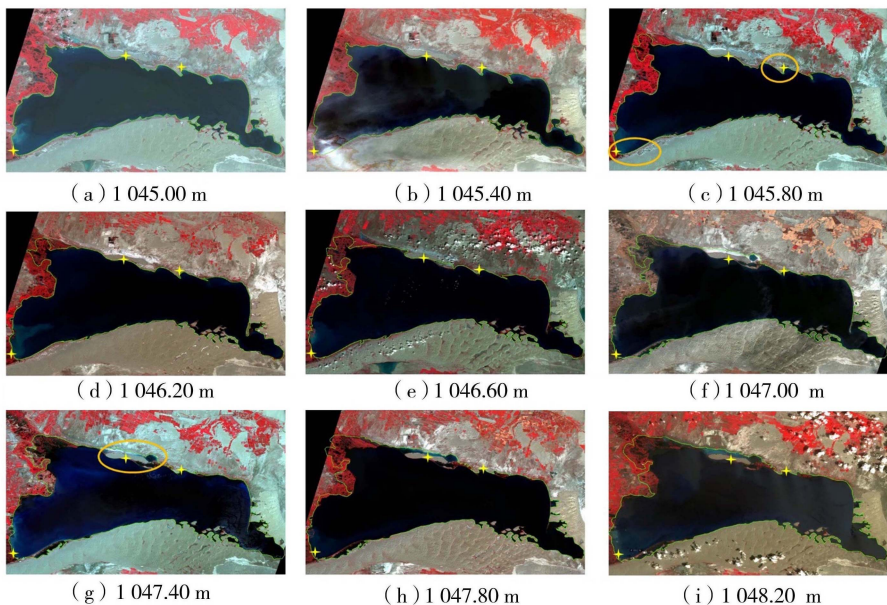
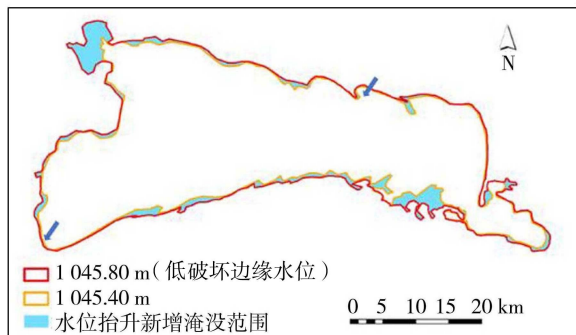
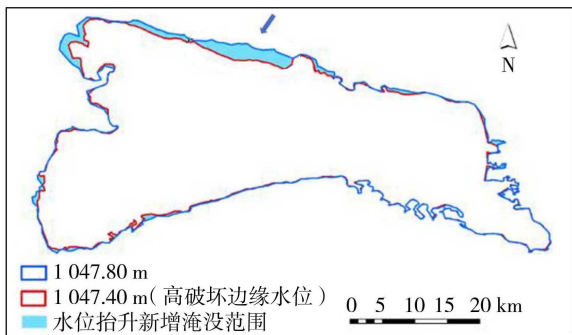


图5 博斯腾湖景观关键点及不同水位下淹没情况

Fig.5 Key landscape points in Bosten Lake and inundation at different water levels



(a) 低破坏边缘水位与临近水位的淹没范围



(b) 高破坏边缘水位与临近水位的淹没范围

图6 典型水位下博斯腾湖淹没轮廓变化

Fig.6 Inundation extent of Bosten Lake at typical water levels

化。对于银沙滩,在达到最佳景观水位之前,随着水位上升岸线更加平滑,景观淹没范围整体变化不大;当水位低于1045.80 m时,湖体距离博湖风景区岸边较远,大大降低了休憩观赏价值。对于金沙滩,作为地区著名的湖泊型天然浴场,湖泊水位下降提供更大的沙滩用以娱乐,但是过低的水位不利于湖泊水体自然流动;当水位低于1046.20 m时,大面积的岸边带凸出,特别是在金沙滩东部会形成滞留水体,因此确定1045.80 m为低破坏边缘水位,水位低于该值将对景观造成显著破坏。对于博湖风景区,当湖泊水位超过最佳景观水位后,湖泊水域

大范围向外蔓延会导致周围大片农田、村庄以及道路被淹;实地调查发现当水位高于1047.00 m时,博湖风景区景观关键点的公路岸线有淹没风险,需要加固修筑防护堤才能保护永久性景点。此外,当水位高于1047.40 m时,银沙滩被湖水分隔,影响了湖泊系统完整性。综合考虑,确定1047.40 m为高破坏边缘水位,水位高于该值将对景观造成显著破坏。

3.3 湖泊景观适宜水位范围分析

将博斯腾湖特征水位带入模糊隶属分布度函数,得到景观适宜水位的隶属度函数的表达式为

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 1045.50 \text{ m} \\ 1 - e^{-7.7(x-1045.5)^2} + 1.526e - 0.5 \left[0.5 + 0.5 \sin \frac{\pi}{1.2}(x - 1046.1) \right] & 1045.50 \text{ m} < x \leq 1046.70 \text{ m} \\ -0.013 \left[0.5 - 0.5 \sin \frac{\pi}{1.2}(x - 0.6) \right] + e^{-1.65(x-1046.7)^2} & 1046.70 \text{ m} < x < 1047.90 \text{ m} \\ 0 & x \geq 1047.90 \text{ m} \end{cases}$$

(10)

通过综合考虑多方面因素,针对不同季节特点预设不同的景观适宜度值。景观适宜度越高表明对水位的要求越高,水位范围越接近最佳适宜水位;景观适宜度越低表明对水位要求越低,可接受的水位上(下)限越高(越低)。在春季(3—5月),考虑到湖岸植被的复苏和湖水可见度,对水位要求相对较高,设定中等的景观适宜度值为0.7,以保持湖岸的绿色景观,有助于维护生态平衡。夏季(6—8月)是博斯腾湖旅游旺季^[22],湖泊水位要求高,使其充分发挥景观功能,因此设定高的景观适宜度值为0.85,以提供足够的水域空间满足游泳娱乐和水上运动的条件,同时确保湖泊的可持续利用。在秋季(9—11月),湖岸的植被变得丰富多彩,伴有秋叶的美景,与春季相似,设置中等的景观适宜度值为0.7,以发挥秋季湖泊景观功能,促进生态系统的多样性。冬季(12月至次年2月)受到寒冷气候的影响,湖泊进入结冰期^[23],景观功能整体减弱,对于湖泊水位范围要求弱化,因此设定较低的景观适宜度值为0.6,并相应确定更为广泛的水位范围。基于各月份预设的景观适宜度,代入模糊隶属度分布函数,取各自截集,获得各季节景观适宜水位,最终得出春、夏、秋、冬四季景观适宜水位范围分别为1 045.90~1 047.16、1 046.00~1 047.00、1 045.90~1 047.16、1 045.85~1 047.25 m。

4 讨 论

对于识别景观关键点的主要指标,湖泊水质直接关系到景观的美观和生态系统的健康,保持湖水的清澈和无污染状态利于维持景观功能,因此景观关键点的水质是十分重要。景观功能的发挥反映旅游业发展,好的湖泊景观吸引更多游客,带来高的旅游业收益。地理位置排在最后,并非因为不重要,而是其他指标更直接地与景观价值和收益相关;地理位置影响景区的可达性,但即使地理位置较好,如果景区本身的湖泊水质不佳或景观吸引力较低,也难以吸引大量游客带来持续的经济收益。本文研究结论与实际情况一致,金沙滩、银沙滩、博湖风景区为博斯腾湖重要的景观关键点。金沙滩附近水体清澈见底,水质常年保持为Ⅱ级,沙滩岸线长约2 000 m,是得天独厚的湖泊型天然浴场,作为国家4A级旅游景区,给当地旅游业带来可观收益;银沙滩是国家3A级旅游景区,水质优良,岸边芦苇丛生,鸟类及野生动物借助这一自然条件栖息繁衍;博湖风景区位于大湖西南缘,由多个小型湖沼串通组成,水生态状况优良,多个优美景点可供观赏。

水文频率分析是水文学领域常用的重要方法,

主要用于对不同概率(频率)下的水文事件进行估计,比如多年平均水位、洪峰流量等^[24-25]。本文采用皮尔逊-Ⅲ型概率分布模型确定湖泊的警戒水位,选取 $P=15\%$ 和 $P=85\%$ 两种常用频率^[19-21]分别对应较湿润的高水位情况和较为干旱的低水位情况。历史资料表明,博斯腾湖矿化度和盐度在1990年前后开始下降,芦苇沼泽湿地面积持续减少,生态系统遭到破坏,该年对应水位为1 045.70 m^[26]。1999—2003年的博斯腾湖水位高于1 047.50 m,2002年达到1950年以来水位最高值1 049.40 m^[27],与本文确定的破坏边缘水位相近,该时期尽管保证了湖泊充分的水源,但也加剧了农业损失及退水后的土壤盐碱化,对湖泊景观造成严重破坏^[28]。

本文确定的博斯腾湖景观适宜水位范围与前人关于生态水位范围存在部分差别。如夏军等^[29]考虑水文、水质等多个方面,建议博斯腾湖水位应控制在1 046.00~1 047.50 m范围内。Ye等^[26]分析了博斯腾湖水位时间序列与湖区生态环境关系,得出适宜生态水位范围为1 045.70~1 048.00 m。胡春明等^[8]基于水环境管理研究,认为保证水质安全、同时保障生态系统健康的博斯腾湖生态水位为1 046.40 m。李新虎等^[30]研究发现维持博斯腾湖生态需求的生态水位应为1 047.00 m左右。湖泊水位微小变化可能会影响整个湖泊生态系统状况及服务功能^[31-34],本文从不同季节景观适宜水位角度出发,重点关注博斯腾湖水位调控,充分发挥湖泊的景观和生态功能。此外,考虑到不同目标下确定的生态水位差异,关于博斯腾湖水环境和水生态需求的水位研究虽然已较为普遍,但对于同时满足水资源、水环境、水生态、水景观和水经济等多维目标特征的水位调控研究尚少。随着全球气候不断变暖,中国西北地区冰川正加速融化和退缩^[35],未来博斯腾湖天然来水过程存在着不确定性,同时,人类活动影响也会不断改变博斯腾湖自然水循环系统。面对博斯腾湖流域经济社会发展的新形势,从统筹防洪、供水、水生态、水环境的角度,后续有必要开展多维目标下博斯腾湖调度水位的优化研究。

基于层次分析法识别博斯腾湖关键景观位点,借鉴了景观生态学中基于生态格局中的关键空间或组分决定系统生态连续性的研究框架^[36]。本文最初选择的8个备选景观关键点是根据博斯腾湖多年水位线波动范围筛选的受到水位波动影响的景观位点,反映了博斯腾湖水位变化下的景观影响。但是考虑满足湖泊景观的需求不能着眼于整个湖泊,而应着眼于具有瓶颈作用的景观地段。关键点的景观需求得到满足,整个湖泊的景观价值便基本得到保

障,因此需要对其景观关键点的重要性进行排序。应用层次分析法的目的是从景观价值和代表性的角度确定最重要的关键点,根据这些景观关键点的适宜景观水位确定湖泊的景观水位,进而使用模糊分布理论构建水位和景观适宜度的映射关系。相较于传统的基于实地调查和经验公式来确定景观适宜水位的方法,该方法极大地提高了工作效率,使得景观适宜水位的推算过程更加高效。本文提出的湖泊景观适宜水位推求方法具有一定的普适性,可以推广到其他湖泊研究中。另外,本研究存在一定不足,如使用的 Landsat 影像分辨率为 30 m,更高分辨率的遥感影像能够更精准地刻画湖泊轮廓线,从而提升特征水位的精度,但博斯腾湖范围大,高分辨率遥感数据获取和分析相对困难;预设的景观适宜度值是基于博斯腾湖季节特点确定的,不同的预设值将会对景观适宜水位范围带来差异。当借鉴本研究确定湖泊景观适宜水位时,应依据不同湖泊特点科学确定预设景观适宜度。

5 结 论

- a. 提出了基于层次分析法和模糊隶属度分布函数的湖泊景观适宜水位推求方法,能够定量确定湖泊的景观适宜水位。从研究结果来看,景观适宜水位范围不仅满足了生态需水所需水位,而且考虑景观功能的有效发挥。
- b. 湖泊水质、年旅游业收益是识别博斯腾湖景观关键点的主要指标,反映了景观适宜水位推求过程同时关注湖泊生态环境和景观效益两方面。博斯腾湖景观关键点重要性排序为金沙滩、银沙滩、博湖风景区。考虑水位波动对景观关键点的影响,确定博斯腾湖低警戒水位为 1 045. 00 m,高警戒水位为 1 047. 90 m,景观敏感的破坏边缘水位为 1 045. 80 m 和 1 047. 40 m。
- c. 采用升/降半型和升/降岭型复合隶属度分布函数建立博斯腾湖景观适宜度和水位的定量响应关系。基于各个季节预设景观适宜度,得到博斯腾湖景观适宜水位区间为 1 045. 85 ~ 1 047. 25 m。不同季节存在差异,春季和秋季景观适宜水位范围为 1 045. 90 ~ 1 047. 16 m,夏季为 1 046. 00 ~ 1 047. 00 m,冬季为 1 045. 85 ~ 1 047. 25 m。

参考文献:

[1] 杨桂山, 马荣华, 张路, 等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略[J]. 湖泊科学, 2010, 22(6): 799-810. (YANG Guishan, MA Ronghua, ZHANG Lu, et al. Lake status, major problems and protection strategy in

China [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(6): 799-810. (in Chinese))

[2] 杨毓鑫, 杜春艳, 张金帆, 等. 洞庭湖湖区最低生态水位的确定[J]. 水资源保护, 2019, 35(3): 89-94. (YANG Yuxin, DU Chunyan, ZHANG Jinfan, et al. Determination of lowest ecological water level in Dongting Lake area [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(3): 89-94. (in Chinese))

[3] 华祖林, 董越洋, 褚克坚. 高度人工化城市河流生态水位和生态流量计算方法[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 140-144. (HUA Zulin, DONG Yueyang, CHU Kejian. Calculation method of ecological water level and discharge in highly artificial urban river [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 140-144. (in Chinese))

[4] 徐志侠, 陈敏建, 董增川. 湖泊最低生态水位计算方法[J]. 生态学报, 2004(10): 2324-2328. (XU Zhixia, CHEN Minjian, DONG Zengchuan. Researches on the calculation methods of the lowest ecological water level of lake [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004(10): 2324-2328. (in Chinese))

[5] 刘英, 钟瑞森, 段永超, 等. 博斯腾湖小湖区湿地生态需水量阈值研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(6): 1525-1533. (LIU Ying, ZHONG Ruisen, DUAN Yongchao, et al. Threshold of ecological water demands for the small lake wetland of Bosten Lake [J]. Arid Land Geography, 2021, 44(6): 1525-1533. (in Chinese))

[6] 淦峰, 唐琳, 郭怀成, 等. 湖泊生态水位计算新方法与应用[J]. 湖泊科学, 2015, 27(5): 783-790. (GAN Feng, TANG Lin, GUO Huaicheng, et al. New method and application of estimating ecological water level of the Lake Poyang [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(5): 783-790. (in Chinese))

[7] 张天衍, 董增川, 罗赞, 等. 基于水质-水位二元响应关系推求过水型湖泊适宜生态水位研究[J]. 湖泊科学, 2022, 34(5): 1670-1682. (ZHANG Tianyan, DONG Zengchuan, LUO Yun, et al. Optimum ecological water level of water-carrying lake based on the relationship between water quality and water level [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(5): 1670-1682. (in Chinese))

[8] 胡春明, 娜仁格日乐, 尤立. 基于水质管理目标的博斯腾湖生态水位研究[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 748-755. (HU Chunming, NAREN Gerile, YOU Li. Study of ecological water levels of Bosten Lake for water quality management [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 748-755. (in Chinese))

[9] 孙泽悦, 姜翠玲. 基于水生植物修复的玄武湖生态水位研究[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(3): 49-54. (SUN Zeyue, JIANG Cuiling. Study on ecological water level of Xuanwu Lake based on aquatic plant restoration [J]. Advances in Science and Technology of Water

- Resources,2023,43(3):49-54. (in Chinese))
- [10] 余明勇,张海林. 基于综合效益发挥的南方平原区城市湖泊景观水位[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(3): 222-229. (YU Mingyong, ZHANG Hailin. Suitable water level for landscape function of lakes in southern plains of China based on optimization of comprehensive benefits [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(3): 222-229. (in Chinese))
- [11] 杜飞. 鄱阳湖湿地生态景观对低枯水位响应特征研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2018.
- [12] 李旭东,邵东国,朱军,等. 维护河岸带景观的河道生态水位战略点定值方法[J]. 中国农村水利水电, 2015(4): 51-54. (LI Xudong, SHAO Dongguo, ZHU Jun, et al. The evaluation method of the ecological river levels for the scenery of riparian zone by identifying the strategic position [J], China Rural Water and Hydropower, 2015(4):51-54. (in Chinese))
- [13] 崔瑛,张强,陈晓宏,等. 生态需水理论与方法研究进展[J]. 湖泊科学, 2010, 22(4): 465-480. (CUI Ying, ZHANG Qiang, CHEN Xiaohong, et al. Advances in the theories and calculation methods of ecological water requirement [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(4):465-480. (in Chinese))
- [14] 左其亭,夏军,邵民诚,等. 博斯腾湖水资源可持续利用调度系统[J]. 水利水电技术, 2003(2): 1-4. (ZUO Qiting, XIA Jun, SHAO Mincheng, et al. The control system of sustainable utilization of water resources in Bosten Lake [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003(2):1-4. (in Chinese))
- [15] 付晶莹, 江东, 黄耀欢. 中国公里网格人口分布数据集[J]. 地理学报, 2020, 69(增刊1): 41-44. (FU Jingying, JIANG Dong, HUANG Yaohuan. 1 km grid population dataset of China (2005, 2010) [J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(Sup1): 41-44. (in Chinese))
- [16] SAATY T L. What is the analytic hierarchy process? [C]//MITRA G, GREENBERG H J, LOOTSMA F A, et al. Mathematical Models for Decision Support. Heidelberg: Springer, 1988: 109-121.
- [17] DARKO A, CHAN A P C, AMEYAW E E, et al., Review of application of analytic hierarchy process (AHP) in construction[J]. International Journal of Construction Management, 2019, 19(5), 436-452.
- [18] MILLET I, SAATY T L. On the relativity of relative measures: accommodating both rank preservation and rank reversals in the ahp[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 121(1): 205-212.
- [19] 肖益民,林琳,夏军. 基于马尔柯夫链入库径流预测状态划分法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(1): 37-42. (XIAO Yimin, LIN Lin, XIA Jun. State division method for predicting inflow into reservoir based on Markov chain [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(1):37-42. (in Chinese))
- [20] 黄晓荣,奚圆圆,李晶晶,等. 荣经河流域径流变化过程分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 67-70. (HUANG Xiaorong, XI Yuan Yuan, LI Jingjing, et al. The analysis of runoff variation in Yingjing River Basin [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2016, 37(4):67-70. (in Chinese))
- [21] 王振龙,陈玺,郝振纯,等. 淮河干流径流量长期变化趋势及周期分析[J]. 水文, 2011, 31(6): 79-85. (WANG Zhenlong, CHEN Xi, HAO Zhenchun, et al. Long-term changing trends and periodic analysis of runoff at Lutaizi Station on Huaihe River [J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(6):79-85. (in Chinese))
- [22] 杨玖贵. 博斯腾湖度假旅游开发的实证研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2014.
- [23] 王瑞,牛振国. 中国湖泊温度变化特征及其对气候变化的响应[J]. 中国环境科学, 2020, 40(2): 780-788. (WANG Rui, NIU Zhenguo. Characteristics of changes in lake temperature in China and their response to climate change [J]. China Environmental Science, 2020, 40(2): 780-788. (in Chinese))
- [24] 周建中, 刘志明, 娄思静, 等. 一种湖泊分级分期旱限水位确定与动态控制方法[J]. 水利学报, 2022, 53(2): 127-138. (ZHOU Jianzhong, LIU Zhiming, LOU Sijing, et al. A method for determining and dynamic controlling the limit water level of lakes by classification and stages [J]. Journal of Hydrology Engineering, 2022, 53(2):127-138. (in Chinese))
- [25] 叶磊,周建中,曾小凡,等. 水文多变量趋势分析的应用研究[J]. 水文, 2014, 34(6): 33-39. (YE Lei, ZHOU Jianzhong, ZENG Xiaofan, et al. Application of hydrological multivariate trend analysis [J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(6):33-39. (in Chinese))
- [26] YE Z, LI W, CHEN Y, et al. Investigation of the safety threshold of eco-environmental water demands for the bosten lake wetlands, western china [J]. Quaternary International, 2017, 440: 130-136.
- [27] 李玉焦,陈亚宁,张齐飞,等. 1960—2018 年博斯腾湖水位变化特征及其影响因素分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 48-58. (LI Yujiao, CHEN Yaning, ZHANG Qifei, et al. Analysis of the change in water level and its influencing factors on Bosten Lake from 1960 to 2018 [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1):48-58. (in Chinese))
- [28] GUO M, WU W, ZHOU X, et al. Investigation of the dramatic changes in lake level of the bosten lake in northwestern China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 119(1): 341-351.

[29] 夏军,左其亭,邵民诚. 博斯腾湖水资源可持续利用:理论·方法·实践[M]. 北京:科学出版社,2003.

[30] 李新虎,宋郁东,张奋东,等. 博斯腾湖最低生态水位计算[J]. 湖泊科学,2007,19(2):177-181. (LI Xinhua, SONG Yudong, ZAHNG Fendong, et al. The calculation of the lowest ecological water level of Lake Bosten[J]. Journal of Lake Sciences, 2007,19(2):177-181. (in Chinese))

[31] 陈一迪,诸葛亦斯,石岳峰,等. 柴达木盆地湖泊天然生态水文特性辨识[J]. 水资源保护,2023,39(1):225-233. (CHEN Yidi, ZHUGE Yisi, SHI Yuefeng, et al. Identification of natural eco-hydrological characteristics of lakes in the Qaidam Basin [J]. Water Resources Protection, 2023,39(1):225-233. (in Chinese))

[32] 郑汉杰,王子博,朱翔,等. 盐度与水位双重波动对芦苇去除水中氮磷的影响机理[J]. 环境科学研究,2023,36(5):986-994. (ZHENG Hanjie, WANG Zibo, ZHU Xiang, et al. Influencing mechanisms of dual fluctuations of water level and salinity on nitrogen and phosphorus removal by reed [J]. Research of Environmental Sciences, 2023,36(5):986-994. (in Chinese))

[33] YIN X A, YANG Z F. A method to assess the alteration of water-level-fluctuation patterns in lakes[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13: 2427-2436.

[34] GOWNARIS N J, PIKITCH E K, ALLER J Y, et al. Fisheries and water level fluctuations in the world's largest desert lake[J]. Ecohydrology, 2017, 10(1): e1769.

[35] 魏潇娜,龙爱华,尹振良,等. 和田河流域冰川径流对气候变化响应的模拟分析[J]. 水资源保护,2022,38(4):137-144. (WEI Xiaona, LONG Aihua, YIN Zhenliang, et al. Simulation of response of glacier runoff to climate change in the Hotan River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 137-144. (in Chinese))

[36] 彭建,赵会娟,刘焱序,等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望[J]. 地理研究,2017,36(3):407-419. (PENG Jian, ZHAO Huijuan, LIU Yanxu, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction [J]. Geographical Research, 2017,36(3):407-419. (in Chinese))

(收稿日期:2023-08-06 编辑:王芳)

(上接第 105 页)

[20] 李家科,李亚,沈冰,等. 基于 SWMM 模型的城市雨水花园调控措施的效果模拟[J]. 水力发电学报,2014,33(4):60-67. (LI Jiake, LI Ya, SHEN Bing, et al. Simulation of rain garden effects in urbanized area based on SWMM [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014,33(4):60-67. (in Chinese))

[21] 徐宗学. 水文模型:回顾与展望[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2010,46(3):278-289. (XU Zongxue. Hydrological models:past, present and future[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2010,46(3):278-289. (in Chinese))

[22] 梅超,刘家宏,王浩,等. SWMM 原理解析与应用展望[J]. 水利水电技术,2017,48(5):33-42. (MEI Chao, LIU Jiahong, WANG Hao, et al. Introduction of basic principle and application prospect for SWMM[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017,48(5):33-42. (in Chinese))

[23] DAZZI S, SHUSTIKOVA I, DOMENEGHETTI A, et al. Comparison of two modelling strategies for 2D large-scale flood simulations [J]. Environmental Modelling & Software, 2021, 146: 105225.

[24] 杨钢,徐宗学,赵刚,等. 基于 SWMM 模型的北京大红门排水区雨洪模拟及 LID 效果评价[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2018,54(5):628-634. (YANG Gang, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Simulating urban rainfall-runoff and assessing LID facilities by SWMM model in Dahongmen catchment [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2018,54(5):628-634. (in Chinese))

[25] 何旭,缪子梅,田佳西,等. 基于 CMIP 6 多模式的长江流域气温、降水与径流预估[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2024,48(2):1-8. (HE Xu, MIAO Zimei, TIAN Jiaxi, et al. Temperature, precipitation and runoff prediction in the Yangtze River Basin based on CMIP 6 multi-model [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2024, 48(2): 1-8. (in Chinese))

[26] 叶婉露,韦明杰. 数学模型在大兴国际机场排水防涝规划中的应用[J]. 给水排水,2021,57(7):123-128. (YE Wanlu, WEI Mingjie. Application of digital model in drainage and waterlogging control planning of Daxing International Airport [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(7): 123-128. (in Chinese))

(收稿日期:2023-08-04 编辑:王芳)