

基于水文变异的东洞庭湖湿地生态水位研究*

梁 婕^{1,2}, 彭也茹^{1,2}, 郭生练³, 李晓东^{1,2}, 黄 璐^{1,2}, 李忠武^{1,2}, 曾光明^{1,2}, 肖 义⁴, 石 林⁵

(1: 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082)

(2: 环境生物与控制教育部重点实验室(湖南大学), 长沙 410082)

(3: 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

(4: 湖南省洞庭湖水利工程管理局, 长沙 410007)

(5: 湖南省水利水电科学研究所, 长沙 410007)

摘 要: 东洞庭湖湿地具有重要生态意义. 基于东洞庭湖湿地退化的现实, 认为气候变化、人类活动等因素造成水文序列发生突变, 湿地生态系统适应突变前的水文环境. 以城陵矶水文站 1952—2006 年月平均水位序列为分析对象, 通过滑动 T 检验法找到序列的最可能突变点, 以该点对序列进行分割, 以变异前的月平均水位序列为对象, 拟合月平均水位的最适合概率分布函数, 认为概率最高处的月平均水位是区域生态水位. 研究结果表明, 城陵矶水文站的水位时间序列发生显著变化; 与其他方法相比, 本文确定的东洞庭湖湿地生态水位具有一定的合理性, 对东洞庭湖湿地生态系统修复具有一定的指导意义.

关键词: 湿地; 水位调控; 生态工程; 洞庭湖; 三峡工程

Determination of ecological water-level in the eastern Lake Dongting with hydrological alterations

LIANG Jie^{1,2}, PENG Yeru^{1,2}, GUO Shenglian³, LI Xiaodong^{1,2}, HUANG Lu^{1,2}, LI Zhongwu^{1,2}, ZENG Guangming^{1,2}, XIAO Yi⁴ & SHI Lin⁵

(1: College of Environment Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China)

(2: Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082, P. R. China)

(3: State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China)

(4: Lake Dongting Water Resources Administration Bureau of Hunan Province, Changsha 410007, P. R. China)

(5: Hunan Water Resources and Hydropower Research Institute, Changsha 410007, P. R. China)

Abstract: The eastern Lake Dongting wetland is of great importance worldwide. It has been suffered from progressive degradation lately. Wetland ecosystem is considered to be adapted to hydrological sequence before alteration caused by climate changes and human related activities. Average monthly water-level of three hydrological stations in the Lake Dongting region were analyzed in this study to obtain ecological water-level. The point of the highest T statistic value calculated by moving T -test method was considered to be the alteration point. The sequence was then divided into two parts. The subsequence before alteration point was used to find the most fitted probability distribution function. The ecological water-level was considered to be the average monthly water-level of the highest probability of the probability distribution function. The results indicate that average monthly water-level has been alternated, and the ecological water-level determined in this paper is reasonable and can provide some guides to the restoration of the Lake Dongting wetland.

Keywords: Wetland; water-level regulation; ecological engineering; Lake Dongting; Three Gorges Project

* 国务院三峡委员会项目(SX2010-026)、国家自然科学基金项目(51039001, 51009063, 51109016)、湖南大学青年教师成长计划项目、广州白云湖水水质改善项目(BYHGLC-2010-02)和新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-08-0181)联合资助. 2012-06-05 收稿; 2012-11-09 收修改稿. 梁婕, 女, 1982 年生, 博士, 助理教授; E-mail: liangjie82@163.com.

洞庭湖是长江中下游最大的调蓄湖泊,是我国第二大淡水湖泊。“涨水是湖、落水为洲”是洞庭湖的主要水文特征,其规律性涨落的水文过程形成了多样、稳定的湿地资源。水是湿地生态系统重要环境因子之一。近年来,由于气候变化、人类活动等因素的影响,洞庭湖来水显著减少,湿地生态系统遭受显著破坏^[1]。

确定合理的生态水位是东洞庭湖区域湿地生态系统修复的关键。目前,国内外对湿地生态需水量和生态水位进行了一定研究。国外常用的方法有历史流量法^[4]、生境评价法^[5]、水力定额法^[6]、整体分析法^[7-10]。国内的研究起步较晚,对湖泊生态水位的研究尚处于起步阶段,很多学者根据研究区生态环境质量的个性特征,选择不同的方法进行了有益探讨,且发展较快^[11-22]。本文认为气候变化、人类活动等因素造成水位序列发生突变,湿地生态系统适应突变前的水位。采用城陵矶水文站水位 1952—2006 年月均水位序列,以变异前的水位序列为对象,拟合月平均水位的最适合概率分布函数,认为概率最高处的月平均水位是区域生态水位。本文的研究结果将为东洞庭湖湿地生态系统的修复提供一定科学依据。

1 研究区域与数据来源

洞庭湖(28°30′~30°20′N,110°40′~113°10′E)位于荆江南岸,跨湘、鄂两省,是我国第二大淡水湖泊。洞庭湖区有三块国际重要湿地。其中,东洞庭湖是国家级湿地自然保护区,是全球公认的重要生态保护区。该区湿地位于东亚-澳大利亚候鸟迁徙线路上,是全球重要的迁徙候鸟的越冬地和洄游鱼类的产卵地、育肥场所,为全球的生物生存安全提供了栖息地和持续繁衍的保障。区域内越冬候鸟具有种类多、数量大、密集度高等特点,是长江中下游流域最重要的水鸟越冬地之一,同时也是中华鲟(*Acipenser sinensis*)、白鲟(*Psephyrus gladius*)和水生哺乳动物江豚(*Neophocaena phocaenoides*)、国家濒危动物白鳍豚(*Lipotes vexillifer*)的主要栖息地。

本文使用的水位数据来源于洞庭湖出口的城陵矶水文站 1952—2006 年每日 3 次的水位实时监测数据,分析时取水位的月平均值。

2 研究方法

湿地生态水位与湿地生态环境需水量的内涵大致相同,一般认为是可以维持湿地生态系统的生态平衡和生物多样性等的水位,低于这一水位,湿地生态系统就会逐渐萎缩、退化甚至消失^[2-3]。

本文认为气候变化、人类活动等因素造成水位序列发生突变,湿地生态系统适应突变前的水位。提出的计算方法分两步:1) 首先寻找水位序列的变异点,如果水位序列存在变异点,则洞庭湖湿地生态系统适应了变异前的水位,变异后的水位影响了当地的生态平衡;2) 以变异前的水位序列作为计算序列,寻找概率最高点处的水位作为生态水位。如果水位序列不存在变异点,认为洞庭湖生态系统适应全序列水位。以全水位序列作为计算序列,寻找概率最高点处的水位作为生态水位。

2.1 水位变异计算步骤

水文序列变异点的检测方法较多^[23]。本文采用经典的滑动 T 检验法对城陵矶水文站的月均水位进行检验。假定水位序列为 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 设变异点为 τ 。假设变异点前后两序列总体的分布函数各为 $F_1(x)$ 和 $F_2(x)$ 。从总体 $F_1(x)$ 和 $F_2(x)$ 中分别抽取容量为 n_1 和 n_2 的 2 个样本,构造 T 统计量为:

$$T = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)^{1/2}} \quad (1)$$

式中, \bar{x}_i 和 S_i 分别为样本均值和标准方差。在置信度水平 α 的情况下,当 $|T| > t_{\alpha/2}$ 时,即说明该序列存在显著差异;当 $|T| < t_{\alpha/2}$ 时,该序列不存在显著差异。对于满足 $|T| > t_{\alpha/2}$ 的所有可能的点 τ ,选择使 T 统计量达到最大值的点 τ ,则该点为所求的最可能变异点。

2.2 生态水位计算步骤

如果水位序列存在变异点,则前后序列的总体分布不一致,不具备一致性。假设洞庭湖湿地生态系统适应了变异前的水位,变异后的水位影响了当地的生态平衡。在计算生态水位时,仅将变异点前的水位序列作为计算序列。如果水位序列不存在变异点,则认为水位序列总体分布一致,具备一致性。计算生态水位时,考

考虑整个系列的水位序列. 本文以月均水位作为计算序列, 生态系统的生态水位即为各月频率最大处月平均水位. 求出频率最大处月平均水位之前需要确定最符合计算序列的概率分布函数. 目前, 常用的水文序列常用的概率分布函数有 P-III 分布、广义极值分布、广义帕累托分布等^[24]. 本文结合研究需要, 选择 4 种概率分布函数: P-III 分布(3 参)、广义极值分布(3 参)、广义帕累托分布(3 参)、对数正态分布(3 参), 使用线性矩方法进行参数估计, 并使用 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 方法的统计量 D 进行拟合优度检验. 确定最适合的概率分布函数后, 根据对应的概率分布函数, 求出概率最大处月均水位作为生态水位.

3 结果与讨论

3.1 水文变异点

采用滑动 T 检验法对城陵矶水文站的水位时间序列进行检验. 气候变化、人类活动等因素造成水位序列发生多次突变, 0.05 显著性水平下最可能突变点为 1980 年 4 月, 最大 T 统计量为 3.3089.

一般认为人类活动和气候变化是造成水位序列突变的主要原因. 近 50 多年来, 洞庭湖流域气候变化主要表现在水、温和热 3 方面. 1950s 为丰水期, 1960s—1980s 处于下降趋势, 1990s 以后略有上升, 但变化幅度不大. 年平均气温在 1960s 下降, 进入 1970s 后上升, 尤其是进入 1990s 后呈明显上升趋势. 年平均日照时数从 1960s 初至 1970s 末呈上升趋势, 1980s 初至今呈下降趋势. 建国后, 长江干流上建设了系列水利

工程. 根据水利工程的建设时间, 洞庭湖可基本分为 6 个时期, 即调弦口堵口前 (1951—1958 年)、荆江裁弯前 (1959—1966 年)、荆江裁弯中 (1967—1972 年)、荆江裁弯后 (1973—1980 年)、葛洲坝截流后 (1981—2002 年)、三峡截流后 (2003 年以后). 因此, 城陵矶的水位突变可能是由荆江裁弯、葛洲坝水利工程的影响所致.

3.2 生态水位

以最可能变异点对水位序列进行分段, 选择最可能变异点前的序列计算东洞庭湖生态水位. 计算生态水位要先确定最符合各站点各月份计算序列的概率分布函数, 本文选择常用的 4 种概率分布函数来进行频率分析, 分别是: P-III 分布(3 参)、广义极值分布(3 参)、广义帕累托分布(3 参)和对数正态分布(3 参). 使用线性矩方法进行参数估计, 最后使用置信水平为 5% 的 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 方法进行拟合优度检验, 选择统计量 D 最小的概率分布函数. 4 种概率分布函数描述各月平均水位的 K-S 法的概率 p 和统计量检验值 D 见表 1. 2—7、10、12 月的最优概率分布为广义极值分布, 采用广义极值概率分布函数计算其概率密度最大处

表 1 4 种概率分布函数描述城陵矶各月平均水位的 K-S 法的概率 p 和统计量检验值 D^*

Tab. 1 K-S D statistic calculated from monthly water-level series of Chenglingji Station for four candidates probability functions

月份	统计量	P-III 分布	广义极值分布	广义帕累托分布	对数正态分布
1	p	0.9358	0.9369	<u>0.9412</u>	0.8959
	D	0.0946	0.0944	<u>0.0935</u>	0.1017
2	p	0.9824	<u>0.9904</u>	0.7263	0.9048
	D	0.0813	<u>0.0768</u>	0.1231	0.1002
3	p	0.9434	<u>0.9978</u>	0.9918	0.9972
	D	0.0930	<u>0.0683</u>	0.0758	0.0696
4	p	0.2320	<u>0.6888</u>	0.3086	0.3754
	D	0.0744	<u>0.1272</u>	0.1738	0.1640
5	p	0.9672	<u>0.9913</u>	0.9770	0.9587
	D	0.0884	<u>0.0774</u>	0.0850	0.0909
6	p	0.9457	<u>0.9839</u>	0.9825	0.9130
	D	0.0941	<u>0.0820</u>	0.0827	0.1005
7	p	0.9561	<u>0.9823</u>	0.7890	0.9666
	D	0.0915	<u>0.0828</u>	0.1179	0.0886
8	p	0.9669	0.9661	0.7157	<u>0.9790</u>
	D	0.0885	0.0887	0.1264	<u>0.0842</u>
9	p	<u>0.9942</u>	0.9848	0.7062	<u>0.9493</u>
	D	<u>0.0748</u>	0.0815	0.1275	0.0932
10	p	0.5152	<u>0.6594</u>	0.4956	0.5555
	D	0.1490	<u>0.1327</u>	0.1514	0.1444
11	p	0.8924	0.9502	<u>0.9980</u>	0.7935
	D	0.1039	0.0930	<u>0.0690</u>	0.1173
12	p	0.9465	<u>0.9734</u>	0.9180	0.9733
	D	0.0939	<u>0.0864</u>	0.0996	0.0864

* 下划线代表基于 K-S 方法的最优拟合值.

水位作为生态水位;1、11月的最优概率分布为广义帕累托分布,由于广义帕累托分布为单调函数,本文采用次最优的广义极值分布计算其概率密度最大处水位作为最适生态水位;8月的最优概率分布为对数正态分布,采用对数正态分布函数计算其概率密度最大处水位作为生态水位。

本文计算得出城陵矶1—12月的生态水位分别为19.13、19.41、19.65、22.68、25.85、27.32、29.42、28.58、28.52、26.21、23.85、20.85 m。

3.3 讨论

将城陵矶各月生态水位进行平均计算,得出年均生态水位为24.29 m。湖泊形态分析法、年保证率设定法计算的生态水位分别为25.70和23.06 m。

湖泊形态法认为水文与湖泊地形构成了湖泊最基础的部分,水量和湿地面积的变化与湿地功能密切相关。以水位作为反映湖泊水文和地形状况的重要因素,湖泊水面大小来表征湿地功能的大小。湖泊水位与面积变化之间的关系近似于抛物线形,在某一个水位处,面积随水位的增加量有一个最大值,若该水位在多年平均水位附近,则可认为该最大值相应水位即为生态水位^[12,17]。根据城陵矶历年系列面积-水位数据绘制成东洞庭湖水位与面积变化关系图,在水位为25.70 m处湖泊面积的增加率达到最大值,该值之后,曲线逐步下降,湖泊面积的增加率随水位上升而逐步减小。因此,认定该方法下的生态水位为25.70 m。

年保证率设定法根据系列水文资料,在不同年保证率前提下,分别计算不同保证率的生态水位^[4]。本文选取1953—2006年城陵矶年均最低水位,在75%保证率下,得到城陵矶的生态水位为1971年均水位23.06 m。

从各种方法的计算原理来看,湖泊形态分析法的基本思想是湖泊水文和地形子系统是湖泊生态系统功能中最基本的部分,研究维持湖泊生态系统自身基本功能不严重退化所需要的最低生态水位,优点是考虑了湖泊的最基本组成部分,但是,由于湖盆发育的不规则性使该方法的普遍使用受到一定的限制。年保证率设定法是根据系列水文资料,在不同年保证率前提下,分别计算不同保证率的最低生态水位。保证率设定后,确定相应的水文年,从而对水文年的生态系统健康等级进行评价,继而求出权重值。由于在对水文年进行生态系统健康等级评价时需要综合考虑分析水文年的多项指标数据,因而计算结果相对准确可靠且符合实际。缺点是统计数据时间长度或保证率发生改变,水文年也会发生改变,相应水文年的多项指标数据会有一些的缺乏,从而影响计算结果的准确性。

本文计算得到的城陵矶生态水位小于湖泊形态分析法的计算结果,大于年保证率设定法的计算结果。在采用的数据上,本文的计算方法采用水文数据表征洞庭湖湿地生态系统的健康状态,与湖泊形态法、年保证率设定法相似,具有原始数据资料齐全易得,序列长的特点;在方法的原理上,本文提出的计算方法认为生态系统适应高频水位,但可以剔除气候变化、人类活动对水位序列的干扰。

4 结论

基于东洞庭湖湿地退化的现实,考虑湿地生态系统的生态适应性,认为气候变化、人类活动等因素造成水文序列发生突变,湿地生态系统适应突变前的水文环境。以城陵矶水文站长时间水位序列为分析对象,通过滑动 T 检验法找到序列的最可能突变点,以该点对序列进行分割,以变异前的水位序列为基础分析水位的概率分布函数,以概率最高点的水位作为区域生态水位。将计算结果与其他生态水位计算方法进行比较,本文提出的方法具有一定的实用性,可以为东洞庭湖湿地生态系统的修复提供一定科学依据。

5 参考文献

- [1] 黄进良. 洞庭湖湿地的面积变化与演替. 地理研究, 1999, **18**(3): 297-304.
- [2] 宋炳煜, 杨 劼. 关于生态用水研究的讨论. 自然资源学报, 2003, **18**(5): 617-625.
- [3] 郑红星, 刘昌明, 丰华丽. 生态需水的理论内涵探讨. 水科学进展, 2004, **15**(5): 626-633.
- [4] Jowett IG. Instream flow methods: a comparison of approaches. *Regulated Rivers: Research and Management*, 1997, **13**(4): 115-127.
- [5] Bovee KD. A guide to stream habitat analyses using the instream flow incremental methodology. *Instream Flow Information*, 1982, **19**(3): 67-73.
- [6] Lamb BL. Quantifying instream flows: matching policy and technology. *Instream Flow Protection in the West Colorado Island*

- Press, 1989, **27**(2): 23-29.
- [7] Zacharias I, Dimitriou E, Koussouris T. Integrated water management scenarios for wetland protection: application in Trichonis Lake. *Environmental Modelling & Software*, 2005, **20**(2): 177-185.
- [8] Rosana F, Graciela A. An analysis of water level dynamics in Esteros del Ibera wetland. *Ecological Modelling*, 2005, **186**(1): 17-27.
- [9] Desgranges JL, Ingram J, Drolet B *et al.* Modelling wetland bird response to water level changes in the Lake Ontario-St. Lawrence River hydrosystem. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, **113**(2): 329-365.
- [10] Hudon C, Wilcox D, Ingram J. Modelling wetland plant community responses to assess water-level regulation scenarios in the Lake Ontario-St. Lawrence River Basin. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, **113**(2): 303-328.
- [11] 杨志峰, 崔保山, 刘静玲等. 生态环境需水量理论、方法与实践. 北京: 科学出版社, 2003: 176.
- [12] 徐志侠, 陈敏建, 董增川. 湖泊最低生态水位计算方法. 生态学报, 2004, **24**(10): 2324-2328.
- [13] 赵翔, 崔保山, 杨志峰. 白洋淀最低生态水位研究. 生态学报, 2005, **25**(5): 1033-1040.
- [14] 衷平, 杨志峰, 崔保山等. 白洋淀湿地生态环境需水量研究. 环境科学学报, 2005, **25**(8): 1119-1126.
- [15] 徐志侠, 王浩, 董增川等. 南四湖湖区最小生态需水研究. 水利学报, 2006, **37**(7): 784-788.
- [16] Zhang Y, Yang Z, Wang X. Methodology to determine regional water demand for instream flow and its application in the Yellow River Basin. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, **18**(5): 1031-1039.
- [17] 崔保山, 翟红娟. 高原湿地功能退化的表征及其恢复中的生态需水量. 科学通报, 2006, **51**(6): 106-113.
- [18] 李新虎, 宋郁东, 张奋东等. 博斯腾湖最低生态水位计算. 湖泊科学, 2007, **19**(2): 177-181.
- [19] 王学雷, 宁龙梅, 肖锐. 洪湖湿地恢复中的生态水位控制与江湖联系研究. 湿地科学, 2008, **6**(2): 316-320.
- [20] 王强, 刘静玲, 杨志峰. 白洋淀湿地不同时空水生植物生态需水规律研究. 环境科学学报, 2008, **7**(3): 1447-1454.
- [21] 杨柳, 马克明, 白雪等. 洪河国家级自然保护区最小生态需水量与补水分析. 生态学报, 2008, **28**(9): 4501-4507.
- [22] 张强, 李剑锋, 陈晓宏等. 水文变异下的黄河流域生态流量. 生态学报, 2011, **31**(17): 4826-4834.
- [23] 雷红富, 谢平, 陈广才等. 水文序列变异点检验方法的性能比较分析. 水电能源科学, 2007, **25**(4): 36-40.
- [24] Zhang Q, Jiang T, Chen YD *et al.* Changing properties of hydrological extremes in south China: natural variations or human influences. *Hydrological Proecess*, 2010, **24**(11): 1421-1432.