

基于变带宽核密度估计的鄱阳湖生态水位研究*

刘剑宇, 张强, 顾西辉, 肖名忠, 慈晖

(中山大学地理科学与规划学院//华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室//广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要: 鄱阳湖流域水文过程在气候变化与人类活动共同影响下产生显著变异, 湖泊生态系统适应了变异前出现频率较高的水文条件。采用多种变异诊断法对湖泊水位进行综合变异检测, 采用变带宽核密度估计法对变异前日水位序列进行拟合, 取概率密度最大处水位作为生态水位。研究结果表明: ① 鄱阳湖水位于1979年发生弱变异, 变异后湖泊平均水位上升0.5 m; ② 变带宽核密度估计是用于研究鄱阳湖变异前水位序列概率密度最大处水位的最佳统计方法。③ 变异后, 5-6月份生态水位满足率显著减小, 平均生态水位满足率不足50%。本文研究成果可为鄱阳湖生态保育、水生态与水环境保护及水资源管理提供科学依据。

关键词: 生态水位; 水文变异; 核密度估计; 变带宽; 鄱阳湖

中图分类号: P343.3; TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2015)03-0151-07

Study on Ecological-Level of the Poyang Lake Based on Variable Bandwidth Kernel Density Estimation

LIU Jianyu, ZHANG Qiang, GU Xihui, XIAO Mingzhong, CI Hui

School of Geography and Planning//Guangdong Provincial Key Laboratory of Urbanization and Geo-simulation//Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong High Education Institute, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: Hydrological processes of the Poyang Lake are significantly altered under the influences of human activities and climate changes. Ecological system has aological alterations indapted to the hydrological conditions before hydrological alterations in the Poyang Lake. Given this, we use various kinds of alterations diagnosis methods to test the lake water level. Then we use variable bandwidth kernel density estimation to fit respectively daily water level for each month before hydrological variations. We regard largest probability of water level as the ecological-level the Poyang Lake. The following results were obtained: ① The variation of water level in the Poyang Lake occurred in 1979, with the increase of 0.5 meter in the mean water level. ② Variable bandwidth kernel density estimation is the best statistical method for studying of maximize density water level before hydrological alterations in the Poyang Lake. ③ After the hydrological variation, the fill rate of ecological-level reduced significantly. with an average value of ecological-level fill rate less than 50%. Runoff changes are the major factors influencing the ecological-level fill rate; Water conservancy projects and forest coverage can help to improve the low-flow, so the

* 收稿日期: 2014-06-26

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(51425903); 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室主任开放基金资助项目(ZK2013006); 香港特别行政区研究资助局资助项目(CUHK441313); 安徽省高校引进领军人才专项基金资助项目

作者简介: 刘剑宇(1991年生), 男; **研究方向:** 流域地表水文过程及其对气候变化响应机制与机理, 流域生态需水; **通讯作者:** 张强; E-mail: zhangq68@mail.sysu.edu.cn

ecological-level fill would increased significantly in dry seasons after alterations. This research results will provide important scientific basis for the ecological conservation, water ecology and water management within in the Poyang Lake basin in a changing environment.

Key words: ecological-level; hydrological alterations; kernel density estimation; variable bandwidth; Poyang Lake

受气候变化和人类活动的双重影响, 水文情势往往发生变异^[1]。生态系统适应了变异前的水文状态, 变异后当地生物生长繁殖受到严重影响^[2]。为了维持生态系统的良性发展, 必须在考虑水文变异的条件下对生态需水进行研究。鄱阳湖是我国最大的淡水湖泊, 是我国十大生态功能保护区之一, 也是世界自然基金会划定的全球重要生态区之一。近年来, 鄱阳湖湖区旱涝不断, 渔业资源下降、生物多样性减少, 鄱阳湖湖区生态环境遭受严重破坏^[3]。随着国务院正式批复《鄱阳湖生态经济区规划》, 鄱阳湖生态经济区正式上升为国家战略, 使鄱阳湖生态环境变得尤为重要。因此, 深入研究鄱阳湖生态水位, 对于鄱阳湖湿地保护与生态系统修复具有重要的理论与现实意义。

在生态需水研究中已有部分学者考虑水文变异这一情况。李剑锋等^[4]考虑水文变异对黄河干流河道内生态需水进行研究, 采用 Mann-Whitney U 检验进行变异检测, 选用广义极值分布对变异前流量序列进行拟合, 取广义极值分布最大处月流量作为河道内生态需水流量。张强等^[5]采用 t 检验和 Mann-Whitney U 检验进行变异检测, 采用多种参数统计方法对变异前月均流量序列进行拟合分析, 取最优分布函数概率密度最大处流量作为黄河流域生态流量。梁婕等^[6]采用滑动 T 检验法对洞庭湖城陵矶水位进行变异检验, 同样采用多种参数统计方法对变异前序列进行拟合分析。已有研究都采用单一或两种变异检测方法进行变异检测, 变异点存在的可信度不高; 对概率分布拟合集中采用参数统计方法, 而对更加注重概率密度高峰处拟合的非参数统计方法核密度估计从未在该领域中应用。另外, 国内对核密度估计的运用只局限于固定带宽, 而对变带宽核密度估计的研究尚未展开^[7]。因此, 本文拟通过八种跳跃检测方法和四种趋势检测方法对鄱阳湖水水位进行系统变异检测, 以选取变异前逐月日水位数据作为受扰动较小, 代表天然湖泊水位的时间序列, 使用变带宽核密度估计对变异前水位序列进行拟合, 取概率密度最大处水位作为湖泊生态水位, 为鄱阳湖生态保育、水生态与水环境保护及水资源管理与可持续利用提供科学依据。

1 数据

星子站位于鄱阳湖中段, 水位受长江顶托倒灌以及入湖主要干流来水影响较小, 水位相对稳定, 同时又是水利部门水利公报数据采用的站点^[8]。因此, 本文采用星子站日水位序列对鄱阳湖生态水位进行研究计算。为探求变异前后生态水位满足率变化的原因, 另对鄱阳湖流域主要干流 5 河来水进行简要分析。5 河 5 站流量数据只有虎山站缺失部分数据 (1977 - 1978 年), 缺失数据通过与相邻的水文站水文序列建立回归关系进行插补 ($R^2 > 0.8$)。所有数据均来源于江西省水文局。

2 研究方法理论依据

受气候变化和人类活动的双重影响, 水文序列往往发生变异, 变异后水文序列一致性发生改变。水位作为湖泊生态系统最为重要的环境因子之一, 可以作为湖泊生态环境状况的重要指标。天然水文情势与水生生物生长有重要的内在联系, 水生生物适应了变异前的天然水文环境, 水文变异后将影响当地生态系统的良性发展。若水文变异检测存在变异点, 则水文序列一致性发生改变, 不符合水文资料一致性要求。因此, 在进行生态水位计算前有必要进行水文变异检测, 以选取受扰动较小、代表天然湖泊水位的时间序列来对生态水位进行研究。

生态适宜性理论认为^[9], 生物在适宜的环境中, 生物数量最多, 生物生长繁殖状况最好。随着生态因子偏离适宜值, 生物生长繁殖速度减慢; 当偏离度超过生物的耐受区间, 生物数量即会减少, 直至消亡。依据环境因子与种群的关系^[4], 出现概率最高的水位适合作为适宜生物生长繁殖的生态水位。为了保证河流生态系统的稳定, 生态水位不应该是一个固定不变的值, 而应具有一定的变化范围。将生态水位减去相应月份水位的标准差作为生态水位管理下限, 该水位是保证水生生物健康发展的最低条件, 而不至于导致生态系统的退化; 将生态水位加上相应月份水位的标准差作为生态水位管理上限, 当湖泊水位长期超过最大生态水位时, 同样会对湖泊生态系统产生负面影响^[8]。鄱阳湖每

年湖内淤积量为 1 210 t，相当于每年淤高 3 mm，且这些泥沙并非均匀铺在湖床上，大部分泥沙淤积于河床尾间和扁圆湖汊，湖床高程的不稳定对鄱阳湖水位变化影响并不显著^[10]。因此，本文不考虑湖床变化对湖泊水位的影响，采用水位数据对鄱阳湖生态水位进行研究。

3 水文变异检测

采用 Hurst 系数法对水文序列进行初步检验，如果初步检测结果表明序列可能存在变点时，再采用 8 种变异点检测方法进行跳跃检测：M-K 检验、累积距平法、有序聚类法、Lee-heghinan 法、滑动 T 检验法、滑动 F 检验法、滑动游程检验法、滑动秩和检验法。采用 4 种趋势变异检测进行趋势检测：Spearman 秩次相关检验、Kendall 秩次相关检验，线性趋势回归检验、非参数统计检验。

3.1 初步检测

采用 Hurst 系数法对变异程度进行初步检验，星子水位序列的 Hurst 系数 $h = 0.62$ 。在信度水平

$\alpha = 0.05$ 条件下，计算 Hurst 系数临界值 $h_\alpha = 0.67$ 。据谢平等^[11]依据 Hurst 系数对变异程度的分级， $0.5 \leq h \leq h_\alpha$ 表明序列具有弱相关性，其变异程度为弱变异。

3.2 系统检测

对星子站水位序列进行系统检测分析，跳跃检测中 1979 年综合显著性为 6，说明跳跃显著；趋势综合显著性为 0，说明趋势不显著（表 1）。从图 2a 可以看出，星子站水位于 1979 年发生变异，1979 年以后水位呈增加趋势，1988 年以后增加显著。系统检测结果表明，星子站水位序列发生跳跃变异，变异点为 1979 年。图 2b 显示星子站水位总体呈上升趋势，1979 年前水位缓慢上升，1979 年后水位上升趋势显著，变异后水位上升幅度明显大于变异前。变异前水位序列平均值为 13.2 m，变差系数为 0.058；变异后水位序列平均值为 13.7 m，变差系数为 0.056。变异后鄱阳湖水位比变异前高 0.5 m，同时水位的多年变化较变异前小。

表 1 水文变异系统检测结果¹⁾

Table 1 The systematic detection results of hydrological alterations

检验方法	检验结果	检验方法	检验结果
M-K 检验	1979 (+1)	滑动游程检验法	1958 (-1)
累积距平法	1979 (+1)	滑动秩和检验法	1979 (+1)
有序聚类法	1979 (+1)	Spearman 秩次相关检验	趋势显著 (+1)
Lee-heghinan 法	1979 (+1)	Kendall 秩次相关检验	趋势不显著 (-1)
滑动 T 检验法	1979 (+1)	线性趋势回归检验	趋势显著 (+1)
滑动 F 检验法	1955 (-1)	非参数统计检验	趋势不显著 (-1)

1) +1 表示检验结果显著，-1 表示检验结果不显著

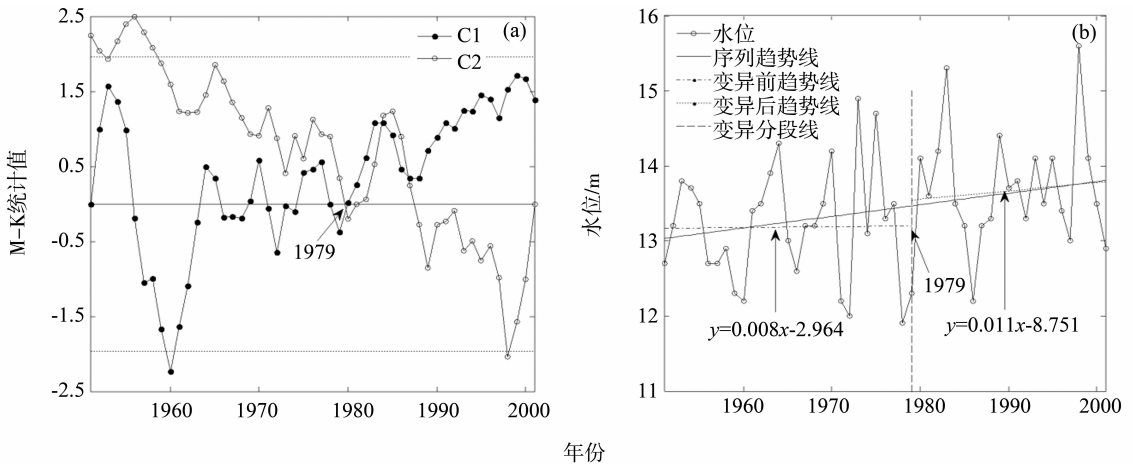


图 1 鄱阳湖水位 M-K 统计值图 a 和变异前后水位趋势图 b

Fig. 1 M-K trends and linear trends of water level for the Poyang Lake

4 生态水位计算方法

水文变异检测结果显示,星子站水位序列存在跳跃变异。故变异前后序列总体分布发生改变,不具备一致性要求,可以认为当地生态系统适应了变异前的水文状况,所以计算生态水位时只考虑变异前序列。本文采用变带宽核密度估计对变异前日水位序列进行拟合,以各月变异前概率密度最大处水位作为当月生态水位。

4.1 变带宽核密度估计

核密度估计属于非参数统计范畴。郭生练等^[12]通过实例对非参数统计与参数统计模型进行比较分析,发现非参数核密度估计在描述和预测方面都优于参数统计模型。核密度估计的计算原理及公式可参考相关文献^[13],这里不再赘述。

对于给定样本,核密度估计精度取决于核函数与带宽 h 的选取。一般认为,带宽的确定比核密度函数的选择更为重要。目前对核密度带宽的选择大都采用固定的带宽,带宽取得太大,则 $f(x)$ 将过度平均化,使得 $f(x)$ 的细节特征不能很好的显示。相反,带宽取得过小,拟合受随机性的影响加大,线现也呈现不规则形状,又会掩盖 $f(x)$ 的总体分布特征^[13]。同时,对于概率密度起伏较大的序列,固定带宽往往不能很好的表现其变化特征^[14]。鉴于此,本文借鉴 Shimazaki 等^[15]提出的变带宽核密度估计来确定带宽。该文对变带宽的优选过程有详细的公式介绍,限于篇幅,本文不再给出。该方法的核心思想仍然是均方误差最小原则,所不同的是以损失函数代替前面的均方误差,促使带宽随序列分布改变而自动优选,估计结果更为准确,能更好的对序列进行拟合。对于核函数选择,Scott 等^[16]通过统计试验发现,当带宽确定后,不

同核函数的作用是等价的,本文选取的核函数为高斯核函数。

4.2 与其它分布函数拟合效果比较

Green 等^[17]研究表明,任一种概率分布函数只可能对某种分布或者某个子样本容量的检验功效较大,并不存在一种占绝对优势的分布函数。由此,有必要将本文所选分布函数与其它常用分布函数拟合效果作比较。不同流域将变带宽核密度估计与固定带宽核密度估计及其它常用参数统计方法相比较,以星子站 3 月变异前水位序列为例。

图 2 将变带宽核密度估计与固定带宽核密度估计拟合效果进行对比,固定带宽核密度估计所取带宽为 MATLAB 自带核密度函数所优选的最佳带宽。可以看出,变带宽核密度估计的带宽在概率分布集中区域小,而在概率分布平缓区域大。带宽的适时调整体现了概率密度分布的即时变动,更加注重序列的异常变化。图 3 (a) 将变带宽核密度估计与

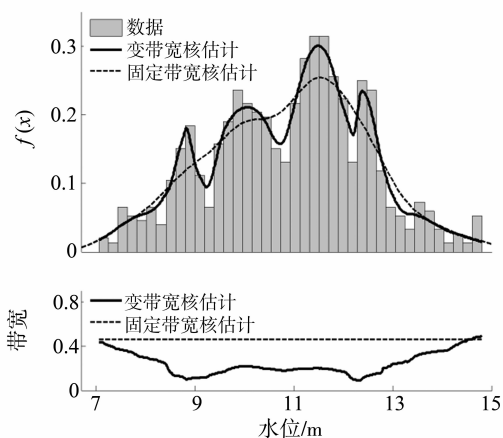


图 2 变带宽核密度估计与固定带宽核密度估计对比
Fig. 2 Comparison between variable and fixed bandwidth Kernel of Density Estimation

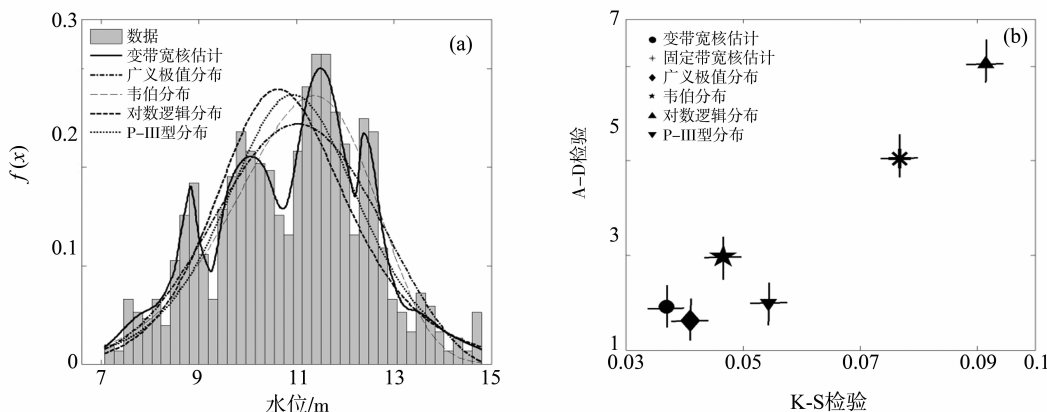


图 3 不同概率密度分布函数拟合优度对比

Fig. 3 Contract for goodness-of-fit in different probability density distribution

常用的参数统计方法对比，可以看出，变带宽核密度估计拟合效果好于其它的参数统计方法，同时该法更加注重对概率分布高峰处的拟合，符合文章探究概率密度最大处水位的目的。采用 K-S 检验与 A-D 检验对变带宽核密度估计与其它常用概率密度分布的拟合优度进行检验比较（图 3（b））。可以看出，在 K-S 检验下，变带宽核密度估计为拟合优度最佳函数，在 A-D 检验下，变带宽核密度估计拟合优度仅次于广义极值分布；变带宽核密度估计与固定带宽核密度估计相比，变带宽核密度估计拟合优度明显优于固定带宽核密度估计。

采用上述方法对其它月份的变异前水位序列进行研究比较，发现变带宽核密度估计拟合效果好，尤其是在概率密度分布峰值处拟合效果更具优势。限于篇幅，这里不再列出对其它月份拟合效果

比较过程。

变带宽核密度弥补了固定带宽核密度估计与频率密度估计的不足，带宽适时调整避免了频率密度组距选择的主观性与固定带宽核密度带宽选择的局限性，拟合更为灵活，更加注重概率密度高峰处的拟合，符合文章探究概率密度最大处水位的目的。基于此，本文采用变带宽核密度估计研究鄱阳湖变异前水位序列。

5 结果分析

5.1 生态水位计算结果

采用变带宽核密度估计分布对各月变异前日水位序列进行拟合，取概率密度最大处水位作为相应月份生态水位。将各月生态水位加减相应月份水位标准差作为生态水位管理范围（表 2）。

表 2 鄱阳湖生态水位及生态水位满足率

Table 2 Ecological instream water-level and assurance for the Poyang Lake

月份	生态水位/m	标准差/m	管理范围/m	生态水位满足率/%	
				变异前	变异后
1	8.14	1.04	7.10 ~ 9.18	99.9	100.0
2	9.08	1.22	7.86 ~ 10.30	89.2	96.0
3	11.50	1.56	9.94 ~ 13.06	71.4	81.9
4	12.76	1.52	11.24 ~ 14.28	87.4	99.6
5	16.06	1.80	14.26 ~ 17.86	65.8	55.7
6	17.84	1.82	16.02 ~ 19.66	54.5	44.2
7	16.02	1.75	14.27 ~ 17.77	96.2	99.0
8	16.95	1.51	15.44 ~ 18.46	71.6	78.0
9	16.08	1.76	14.32 ~ 17.84	79.1	84.9
10	13.76	2.05	11.71 ~ 15.81	91.2	98.6
11	9.16	1.85	7.31 ~ 11.01	100.0	100.0
12	9.47	1.44	8.03 ~ 10.91	87.7	97.3
平均	13.07	1.61	11.46 ~ 14.68	82.8	86.3

5.2 变异前后生态水位满足率变化

如果实测水位大于管理范围下限，则认为该水位基本满足生态需水的要求。各月生态需水得以满足的日数与序列相应月份总日数之比即为该月生态水位满足率。变异后，除 5-6 月外，其余各月生态水位满足率均上升，变异后生态水位满足率平均上升 8.9%。河流生态系统的正常需水得到更好保障。整个鄱阳湖流域近 50 年来降水量呈增加趋势，蒸发量呈减小趋势，流域内径流量增加^[18-19]，从而使得湖泊生态水位满足率变异后高于变异前。5、6 月变异后生态水位满足率低于变异前，生态水位满足率平均降低 10.2%。对鄱阳湖流域赣江、抚河、信江、饶河、修水 5 河的 5-6 月流量进行趋

势分析，发现 5 月份五河来水均呈下降趋势；6 月份除饶河外，其余四河来水都呈下降趋势，说明 5-6 月变异后生态水位满足率下降主要是受这两月上游来水减少的影响。因此，变异前后生态水位满足率的变化主要是受上游来水变化趋势的影响。

根据星子站多年实测水位，将 5-9 月作为鄱阳湖的丰水期，10 月-次年 4 月为枯水期。枯水期生态水位满足率变异后较变异前提高 6.5%，丰水期生态水位满足率变异前后变化不明显。流域森林植被对径流变化有重要影响，森林可以调节年际间枯水流量，显著提高枯水流量^[20]。江西从上世纪 80 年代开始实行山江湖工程、退耕还林工程、中德造林工程、长（珠）防林工程以及各种造林

工程,大量植树造林使江西省森林覆盖率迅速提高到60.1%,居全国第2位。另外,水库对径流量变化有一定调节作用,具有削峰补枯的功能,一定程度上增加枯水期流量。自上世纪50年代到2001年,鄱阳湖流域共建成各类水库9603座,其中大型水库25座,中型水库211座。一定程度上减少丰水期径流量,增加枯水期径流量。森林覆盖率的上升与水库的大量增加使变异后的枯水期径流量增加,从而使变异后枯水期生态水位满足率显著提高。

5.3 与其它方法比较

生态水位计算方法主要有天然水位资料法、生物空间最小需求法、年保证率法、湖泊形态法。天然水位资料法将天然情况下多年最低水位作为最低生态水位,计算得到该法下最小生态水位为9.73 m。生物空间最小需求法将湖泊生物对生存空间的需求来确定最低生态水位。鱼类是湖泊生态系统中的顶级群落,其生长繁殖所需的最小水深为1 m^[21],鱼类需求的最小水深加上湖底平均高程即为最低生态水位,鄱阳湖湖底平均高程为8.4 m。因此,生物空间最小需求法下最低生态水位9.4 m。保证率法参照水文保证率设定法,取频率95%对应的水位作为湖泊最低生态需水位,为12.1 m。湖泊形态法将湖泊水位作为湖泊水文与地形状况的重要指标,以湖泊水面面积大小来表征湖泊生态状况,认为面积随水位变动最大处对应的水位即为生态水位。根据长江委与江西省水利规划设计院共同测量推求的鄱阳湖水位—面积关系拟合曲线,在水位11.7 m(黄海高程)处湖泊面积增加率达到最大值,换算成鄱阳湖星子站水位即为14.1 m(吴淞高程),即得最低生态水位。

天然水位资料法考虑的是多年最低水位这一极端状况,因此计算结果明显小于本文方法下的生态水位。生物空间最小需求法重点考虑湖泊鱼类生长繁殖,这种方法对于湖盆较浅的湖泊比较适用,而对于鄱阳湖这种湖盆较深的大型湖泊则有很大的局限性,因此计算结果也小于本文生态需水管理范围。年保证率法侧重考虑水资源功能与水量的关系,计算结果略高于本文生态水位管理下限,属于本文生态水位管理范围。但该法并没有考虑湖泊水文条件与生态系统的关系,其保证率的设定也具有不确定性。湖泊形态法充分考虑湖泊的最基本组成部分,计算结果在本文生态水位管理范围内,但该法并没有与湖泊实际生态指标建立联系,另外,计算结果也容易受湖盆发育形态影响^[22]。

本文生态水位计算方法采用水文数据表征鄱阳湖湿地生态系统的健康状况,从生物适宜性理论出发,认为自然选择过程中湖泊生态系统适应出现频率较高的水文条件,充分考虑了湖泊生物生长繁殖规律,全面考虑了湖泊水资源状况,同时剔除了气候变化和人类活动对水位序列的干扰,计算结果合理可行。

6 结 论

本文从生物适宜性理论出发,认为湖泊生态系统适应了变异前出现频率较高的水位,采用变带宽核密度估计法对变异前逐月日水位序列进行拟合分析,取概率密度最大处水位作为生态水位,并通过加减相应月份水位标准差得出生态水位管理范围。得出以下结论:

1) 鄱阳湖水位序列于1979年发生变异,变异强度为弱变异,变异形式为跳跃变异,变异后平均水位上升0.5 m。

2) 将变带宽核密度估计下概率密度最大处水位作为生态水位是可行的。K-S检验与A-D检验结果表明,变带宽核密度估计是用于研究鄱阳湖流域变异前水位序列的最佳统计方法,该法与其他概率分布函数相比更为灵活,更加注重概率密度峰值处拟合,适用性良好。将变异前序列概率密度最大处水位作为生态水位符合湖泊生态系统发展规律,该法充分反映了湖泊健康状况与水位的关系,剔除了气候变化和人类活动对水位序列的干扰,计算结果合理可行。

3) 受流域降水量增加,径流量增大影响,水文变异提高了大部分月份生态水位满足率;变异后5-6月份生态水位满足率降低主要是受该时段流域内主要干流来水量减少的影响。径流量是影响生态水位满足率变化的最主要原因;森林覆盖率的增加与水库数量的增多有利于提高枯水期径流量,使变异后枯水期生态水位满足率明显上升。

参考文献:

- [1] 王孝礼,胡宝清,夏军. 水文时序趋势与变异点的R/S分析法[J]. 武汉大学学报:工学版,2002(2):10-12.
- [2] ZHANG Q, XU C Y, ZHANG Z X, et al. Changes of atmospheric water vapor budget in the Pearl River basin and possible implications for hydrological cycle[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2010, 102(1/2):185-195.
- [3] 黄虹,邹长伟,何宗键,等. 鄱阳湖水文承载力现状和趋势分析[J]. 中山大学学报:自然科学版,2003

- (S1):161-163.
- [4] 李剑锋,张强,陈晓宏,等. 考虑水文变异的黄河干流河道内生态需水研究[J]. 地理学报, 2011(1):99-110.
- [5] 张强,李剑锋,陈晓宏,等. 水文变异下的黄河流域生态流量[J]. 生态学报, 2011,17:4826-4834.
- [6] 梁婕,彭也茹,郭生练,等. 基于水文变异的东洞庭湖湿地生态水位研究[J]. 湖泊科学,2013(3):330-334.
- [7] 王文圣,丁晶,邓育仁. 非参数统计方法在水文水资源中的应用与展望[J]. 水科学进展,1999,04:458-463.
- [8] 刘剑宇,张强,孙鹏,等. 鄱阳湖最小生态需水研究[J]. 中山大学学报:自然科学版,2014,53(4):149-153.
- [9] MACKENZIE A, BALL A S, VIRDEE S R. Instant notes in ecology (Instant notes series)[M]. 2nd ed. UK: BIOS Scientific Publishers Ltd, 2001: 20-63.
- [10] 左长清. 论鄱阳湖泥沙淤积及其对环境的影响[J]. 水土保持学报,1989(1):38-42.
- [11] 谢平,雷红富,陈广才,李晶. 基于 Hurst 系数的流域降雨时空变异分析方法[J]. 水文,2008(5):6-10.
- [12] 郭生练,叶守泽. 洪水频率的非参数估计[J]. 水电能源科学,1991(4):324-332.
- [13] 董洁. 非参数统计理论在洪水频率分析中的应用研究[D]. 南京:河海大学,2005.
- [14] SAIN S R. Multivariate locally adaptive density estimation[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2002,39:165-186.
- [15] SHIMAZAKI H, SHINOMOTO S. Kernel bandwidth optimization in spike rate estimation [J]. Journal of Computational Neuroscience, 2010,29:171-182.
- [16] SCOTT D W. Multivariate density estimation: theory practice and visualization wiley series in probability and mathematical statistics [M]. NewYork: John Wiley and Sons,1992.
- [17] GREEN J R, HEGAZY Y A S. Powerful modified-EDF goodness-of-fit tests[J]. Journal of the American Statistical Association, 1976, 71(353): 204-209.
- [18] 郭华,苏布达,王艳君,等. 鄱阳湖流域 1955-2002 年径流系数变化趋势及其与气候因子的关系[J]. 湖泊科学,2007(2):163-169
- [19] 陈峪,高歌,任国玉,等. 中国十大流域近 40 多年降水量时空变化特征[J]. 自然资源学报,2005(5):637-643.
- [20] 孙鹏,张强,陈晓宏. 鄱阳湖流域水沙周期特征及其影响因素[J]. 武汉大学学报:理学版,2011(4):298-304.
- [21] 辛良杰. 南四湖湖泊湿地生态环境需水量初步研究[D]. 济南:山东师范大学,2005.
- [22] 李新虎,宋郁东,李岳坦,等. 湖泊最低生态水位计算方法研究[J]. 干旱区地理,2007(4):526-530.

(上接第 150 页)

- [15] 王振峰,李绪深,孙志鹏,等. 琼东南盆地深水区油气成藏条件和勘探潜力[J]. 中国海上油气, 2011,23(1):7-13.
- [16] 朱星宇,陈勇强. SPSS 多元统计分析方法及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2011:241.
- [17] 向东进,李宏伟,刘小雅. 实用多元统计分析[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2005.
- [18] 辛厚文. 分形介质反应动力学[M]. 上海:上海科技教育出版社,1997.
- [19] (英)KENNETH J FALCONER. 分形几何——数学基础及其应用[M]. 曾文曲,刘世耀,戴连贵,等译. 沈阳:东北大学出版社,1991.
- [20] GALUSZKA A. A review of geochemical background concepts and an example using data from Poland[J]. Environmental Geology, 2007,52(5):861-870.
- [21] XIE S, CHENG Q, CHEN G, et al. Application of local singularity in prospecting potential oil/gas targets[J]. Nonlinear Processes Geophysics, 2007, 14: 285-292.