

文章编号: 1000-5862(2019)05-0532-13

鄱阳湖水位变化趋势性对人类活动响应分析

赵军凯¹ 李立现¹ 李九发^{2*} 赵瑞哲³ 刘新圣¹ 杨静草¹

(1. 九江学院旅游与国土资源学院, 九江市土地测量与 3S 技术应用重点实验室, 江西 九江 332005;

2. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062; 3. 中国科学院信息工程研究所, 北京 100080)

摘要: 进入 21 世纪以来, 长江干流上游水库群的运行对鄱阳湖与长江之间物质和能量的交换过程产生了重要影响, 鄱阳湖流域的秋旱现象逐渐严重, 江湖关系加速演变。采用 Mann-Kendall 趋势检验法、R/S (Rescaled Range Analysis) 分析法、变差系数 C_v 和偏态系数 C_s 等方法, 分析了 2000 年以来鄱阳湖水位变化趋势性特征; 分析了长江干流上游水库群调节和湖区采砂活动对鄱阳湖水位趋势性变化的影响。结果显示: 2000—2014 年鄱阳湖水位分阶段降低, 2006—2014 年水位降至最低, 比 2000 年前低 1.08 m。2000 年后, 鄱阳湖全年、汛期和枯季平均水位都有减少趋势, 10 月份平均水位有非常显著的减少趋势; 不同季节主湖区与入江水道水位变化趋势性不一致; H 值表明鄱阳湖冬季水位减少有较强的持续性。长江干流上游水库群调节对鄱阳湖水位影响存在时空差异, 水库群蓄水期加剧了鄱阳湖水位下降的幅度, 对湖心区影响达 4% 以上。采砂活动对鄱阳湖水位的影响在 2006—2014 年表现明显, 除了 10 月份外其余季节的影响都大于长江干流上游水库群调节作用。合理调度长江干流上游水库群及湖区采砂活动在保护鄱阳湖生态环境中具有重要意义。

关键词: 水位变化趋势性; 水库群调节; 采砂活动; 鄱阳湖; 长江

中图分类号: TV 213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2019.05.16

0 引言

气候变化和人类活动不断增强导致长江流域下垫面变化, 流域径流形成过程发生了改变^[1]。三峡水库及长江干支流上其它控制性水库的投入运行, 必将使长江和鄱阳湖的关系加速演变。长江中下游干流水能力、鄱阳湖流域来水量和湖区水位等都将对江湖关系的演变产生影响^[2-3]。2007 年, Hu Qi 等^[4]用 5 河入湖的总流量与湖口站出湖流量对比关系定义鄱阳湖与长江的相互作用。郭华等^[5]分析了近 50 年来长江与鄱阳湖水文相互作用的变化。Li Yunliang 等^[6]从长江干流对湖口泄流的顶托、倒灌出现的条件以及鄱阳湖对洪水调节系数等方面做了定量分析。三峡水库运行对江湖相互作用的影响备受关注^[7-8]。赵军凯等^[9]用一段时间内入湖水量与湖泊流出水量的比值作为河湖水交换系数, 并用它

表示河湖水交换的强度, 分析了不同年份鄱阳湖与长江相互作用的过程。长江与鄱阳湖之间的相互作用是此消彼长的关系^[10-11]。近年来鄱阳湖区秋旱现象频繁发生, 使得江湖关系日趋紧张^[12]。1998—2010 年鄱阳湖流域来沙量减少和人类采砂活动等因素造成了入江水道区域冲刷, 该区湖盆侵蚀平均 3.69 m, 冲刷速率高达 $30.75 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[13], 从而导致了江湖水沙交换过程发生变化, 对鄱阳湖水文节律的改变具有重要作用^[14]。研究表明在鄱阳湖流域平水年时, 由于长江上游来水偏少, 干流水位偏低, 湖口泄流量大增, 造成鄱阳湖秋旱现象严重^[15]。鄱阳湖区人工采砂活动使容积增大, 对鄱阳湖水位必将产生影响^[16]。

鄱阳湖是长江流域重要的通江湖泊之一, 其水位影响因素多且复杂。鄱阳湖水位受五河入湖径流量、湖口流量和长江干流相互作用强弱、水位站位置等自然因素和人类活动共同影响^[17]。闵騫^[18]研究

收稿日期: 2019-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(41361003, 41561011)和江西省教育厅科技课题(GJJ180903)资助项目。

作者简介: 赵军凯(1973-), 男, 河南新郑人, 副教授, 博士, 主要从事自然地理和水文与水资源方面的研究。E-mail: jun-kaizhao@163.com

通信作者: 李九发(1949-), 男, 江西南丰人, 教授, 博士生导师, 主要从事自然地理和水文与水资源方面的研究。E-mail: jfli@re.ecnu.edu.cn

表明:进入21世纪后鄱阳湖枯水程度显著加剧,最低水位不断被刷新。姜加虎等^[19]研究了三峡工程运行对鄱阳湖水位的影响程度,认为枯水期影响程度大于丰水期。郭年华等^[20]依据鄱阳湖区实测日水位资料,将年内变化情况分为低水、涨水、顶托倒灌和退水4个阶段,认为顶托倒灌阶段湖区水位基本由长江干流控制,其余3个阶段湖区水位受湖口流量和长江干流的共同影响。周云凯等^[21]利用鄱阳湖星子站1970—2015年水位监测数据研究,结果表明近46年间鄱阳湖水位总体表现出较为明显的下降趋势。欧阳千林等^[22]基于鄱阳湖棠荫水文站近50年(1962—2012年)水位资料,采用Mann-Kendall法和最大熵谱法分析鄱阳湖湖区水位的演变趋势和周期性。张范平等^[23]利用鄱阳湖湖口、星子、都昌、吴城、棠荫和康山水位站多年逐日水位资料,采用统计分析法、趋势分析法、Mann-Kendall非参数检验法和Morlet小波分析法分析了鄱阳湖水位年内变化特征、年际变化趋势、极值变化、突变特征及其周期性。邓志民等^[24]采用鄱阳湖星子站1963—2009年水位资料,运用Mann-Kendall检验对其演变趋势进行分析,发现研究期间星子站水位呈现显著下降趋势,其中冬季水位下降倾向率最大,春季最小。近20年来鄱阳湖水位波动剧烈,年最高、最低水位均呈现下降趋势。王鹏等^[25]基于环境流体动力学(EFDC)模型构建了鄱阳湖水利枢纽工程与主湖区的2维模型,模拟水利枢纽工程运行后对主湖区及湿地保护区水位变化节律的影响。张楠楠等^[26]利用2000—2010年40期MODIS数据分析了鄱阳湖这10年的水面面积年际演变特征及季节性变化特征。姚静等^[27]在水深测量的基础上运用水动力模型模拟分析了1998—2010年鄱阳湖水位时空变化,得出入江水道湖区湖盆平均侵蚀达3.0 m,而主湖区平均侵蚀0.3 m等。可见,对鄱阳湖水位特点研究较多,以及对其水位变化过程及其原因探索前人已有不少涉及,已经取得许多丰富的结论。

本文在对近50年来鄱阳湖水位变化过程分析的基础上,主要针对2000年之后鄱阳湖水位变化的阶段性、持续性、趋势性等特征展开研究;主要采用经验公式定量探讨了长江干流水库群调节和湖区人工采砂等人类活动对鄱阳湖水位的影响,期望为更好保护和治理鄱阳湖生态环境、维护健康的长江与鄱阳湖关系做出贡献。

1 研究区域水情概况

鄱阳湖是中国最大的淡水湖泊,是长江中下游

重要的调蓄型湖泊。鄱阳湖位于长江中下游的交界处,在九江市湖口县与长江相接(见图1(a))。鄱阳湖流域面积 $16.2 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占长江流域面积的9%^[28]。

鄱阳湖汇聚赣江、抚河、信江、饶河和修水5大水系的径流量(简称五河),以及湖区之水,经调蓄后于湖口注入长江(见图1(b))。湖口站年均入江水量 $1.507 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占长江径流量的16.87%^[29]。从空间形状上来看,鄱阳湖湖盆形似一个葫芦,以松门山为界分为南、北2部分(见图1(c))。南部为湖泊主体区,湖面宽而浅,为主湖区,又称南湖;北部为入江水道湖区,湖面狭窄且深浅不一,又称北湖^[13]。

鄱阳湖流域五河流汛期径流量 $1.058 \times 10^8 \text{ m}^3$,集中在3~8月,约占年径流量的75%;主汛期4~6月经流量之和约占年径流量的50%,期间湖区水位不断上升但并未达到最高值(见图2)。一般地,鄱阳湖10月~次年3月水位较低属于枯水期,4~9月水位相对较高属于丰水期。对于全湖平均水位来说,多年月平均最高水位出现在7月(其值为14.87 m),多年月平均最低水位出现在1月(其值为8.04 m)。湖口站、星子站、都昌站和棠荫站4个水文站在鄱阳湖的位置如图1所示。就海拔高程来说,棠荫、都昌、星子和湖口4站依次降低,4站的多年平均水位分别约为12.64 m、11.95 m、11.33 m和10.90 m。枯水季节,由于五河入湖径流量减少,长江干流也处于流量小、水位低的时期,造成鄱阳湖水位较低。南、北湖区水位差变大,相应4站水位相差也较大,突出表现在1~2月。然而,4~6月五河汛期来水量较大,此时鄱阳湖水位大增;到了7~9月,长江干流也进入主汛期,流量大、水位高,对鄱阳湖的顶托作用较强,造成鄱阳湖水位居高不下,南、北湖区水位差减少,4站水位几乎相等^[26](见图2)。

鄱阳湖水情年内变化的突出特点是水位与五河入湖径流总量的变化过程不一致,汛期水位高值期滞后于径流量高值出现时间约3个月^[24]。五河入湖径流总量是在4~6月份达到最大,而鄱阳湖高水位时期是在7~9月份。7月份之后五河进入枯水期,径流突然减少,而湖泊却持续高水位,一直持续到10月之后才逐渐下降。其主要原因是由于五河的主汛期为4~6月,期间径流量猛增,注入鄱阳湖后,使湖水位快速升高,然而,7~9月长江干流进入主汛期,水量大增,流量大且水位持续上涨,甚至出现高于鄱阳湖水位的现象,对鄱阳湖的顶托作用增强,使湖口宣泄不畅,致使鄱阳湖水位居高不下。期间长江干流对湖水的顶托作用也达到一年中最强时期,有时会发生江水倒灌现象^[5]。直到11月份,长江干流和五

河都处于枯水季节,鄱阳湖湖水大量外泄,湖水位直线下降,进入低水位时期^[9].

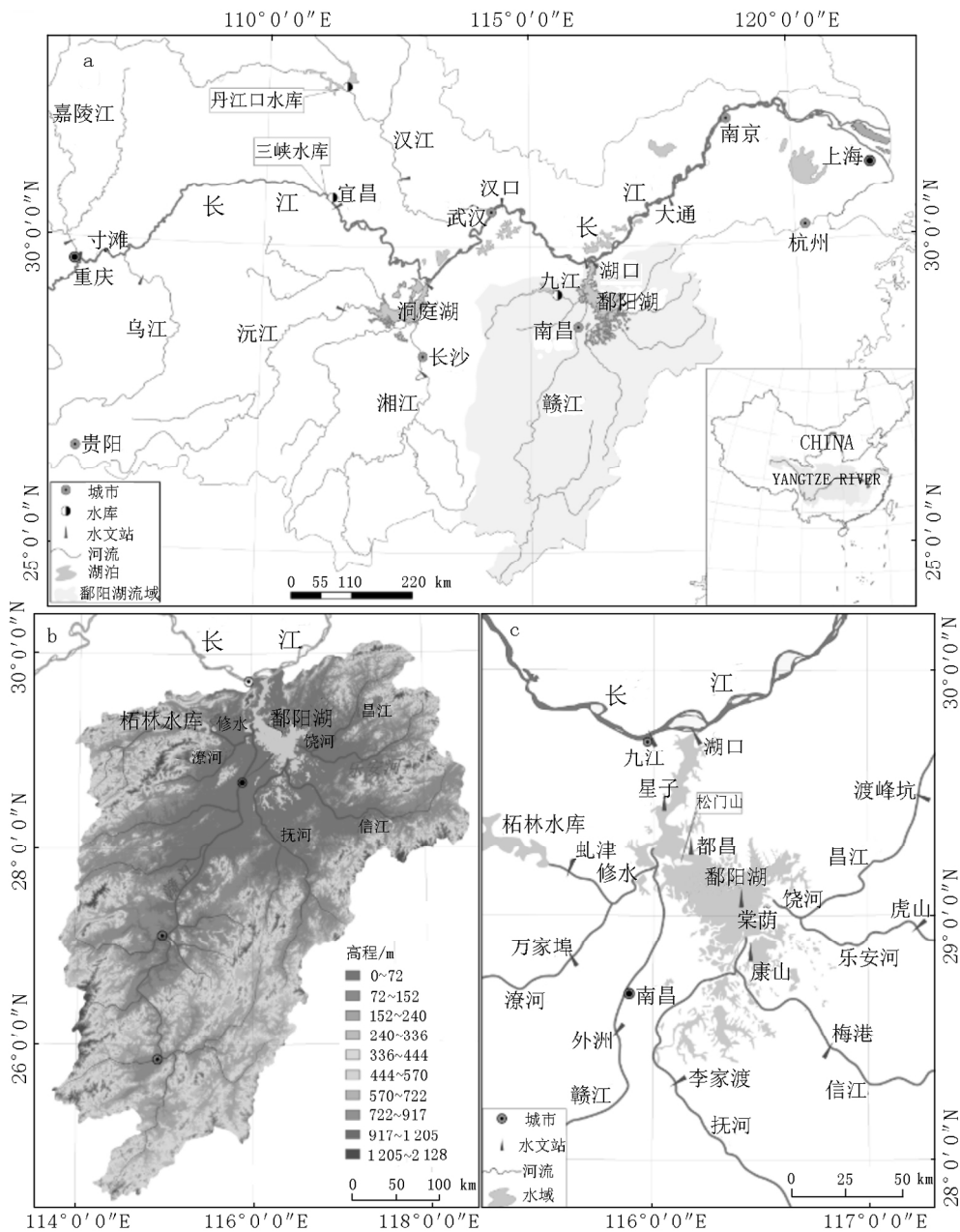


图1 长江中下游河湖关系

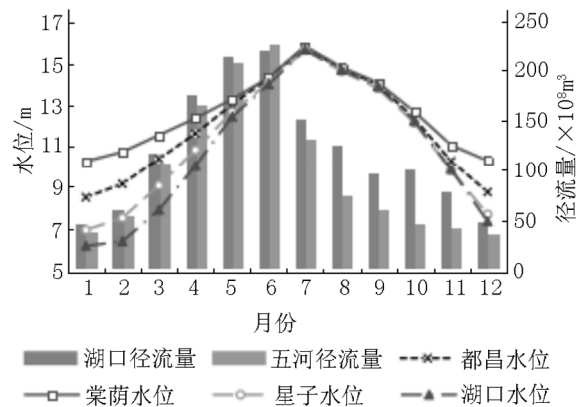


图2 鄱阳湖水位与出入湖径流量年内变化

2 数据和方法

2.1 数据说明

收集了1950—2015年湖口、星子、都昌和崇荫水文站的水文资料,将水位数据统一换算为国家85高程基面以上的水位数据(下文水位统一采用此基面).在计算鄱阳湖平均水位时,由于崇荫站数据时间为1962—2014年,因此以崇荫站数据时段为起止年份进行计算.收集了鄱阳湖流域修水、景德镇、贵溪、玉山、鄱阳、南城、广昌、庐山、南昌、樟树、宜春、

吉安、宁岗(井冈山)、遂川、赣县和寻乌共16个气象站近50年来的降水量数据(<http://data.cma.cn/>),并采用泰森多边形方法计算流域平均降水量.收集了赣江、抚河、信江、饶河(昌江和乐安河)和修水河(潦河)的近50年的径流量资料,计算五河入湖总径流量.

2.2 主要研究方法

2.2.1 Mann-Kendall 趋势检验法 Mann-Kendall 检验法是目前较常用的水文变量趋势性检验方法,是非参数统计分析法,简称M-K法.该方法优点是变量不需要服从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,因检测范围宽、定量化程度高而富有生命力^[30]. M 为一个服从正态分布的统计量, $M>0$ 表明原序列有上升的趋势, $M<0$ 表示原序列有下降的趋势. $|M|\geq 1.96$ 和 $|M|\geq 2.56$ 分别表示通过了0.05和0.01的显著性水平检验.

2.2.2 R/S(Rescaled Range Analysis) 分析法 R/S分析法(Rescaled Range Analysis)是Hurst在大量实证研究基础上提出的一种时间序列统计方法,属于非参数分析法.Hurst指数是R/S分析法的一个十分稳定并且有效的统计量.无论时间序列是否为正态分布,分析结果的稳定性均不受影响.利用Hurst指数可判定水文变量时序状态的持续性及其最有可能的变异点^[31]. H 取值范围为 $[0,1]$. $H=0.5$ 表示序列是随机的和不相关的,过去和现在不会影响未来,原序列不具有趋势性; $H>0.5$ 表示时间序列具有持续性; H 值越接近1,持续性越强; $0\leq H<0.5$ 表示时间序列具有反持续性; H 值越接近于0,反持续性越强.一般认为Hurst指数 H 的值在0.7以上,这表明序列有较强的持续性.

2.2.3 变差系数(C_v) 变差系数 C_v 又称离差系数或离势系数,它是随机变量系列的均方差 σ 与均值 $\bar{x}$ 的比值^[32]. C_v 值在数量上表示系列相对离散程度,即偏离平均值的程度.对于水文现象来说, C_v 值小,水文变量变动范围小而且均匀,这说明水文变量所反映的径流序列稳定; C_v 值大,水文变量变动剧烈,这意味着 C_v 值表示水文变量变化幅度.

2.2.4 偏态系数(C_s) 偏态系数(C_s)是衡量随机变量系列分布在均值两侧对称程度的指标^[32]. C_s 反映随机变量系列偏离均值的方向和程度,即系列中大于均值的样本出现的次数多,还是小于均值的样本出现的次数多. $|C_s|$ 越小,随机变量分布越接近于对称; $|C_s|$ 越大,随机变量分布越偏离均值. $C_s=0$ 表示随机变量大于均值和小于均值出现的机会相

等;称 $C_s>0$ 为正偏,它表示随机变量大于均值出现的机会比小于均值出现的机会小;称 $C_s<0$ 为负偏,它表示随机变量大于均值的出现机会比小于均值的出现机会大.

2.2.5 人类活动对鄱阳湖水位变化影响的分析方法 长江上游水库群的调节对鄱阳湖水位的影响存在时空差异.水库群主要是通过调节长江干流流过程,通过顶托、倒灌和拉空作用对鄱阳湖施加影响,进而影响鄱阳湖入江水道湖区水位,在强烈时会对主湖区水位产生影响^[14,33],存在空间差异.枯水季节(11月~次年4月)泄流发电和5~6月汛期前弃水保证汛期安全度汛等都增加了长江中下游干流的径流量.汛期末9~10月水库群蓄水,又减少了长江中下游干流的径流量,而此时期鄱阳湖流域五河也处于枯水季节,入湖水量较小,叠加作用使水库群调节对湖水位影响表现突出.

鄱阳湖区人工采砂活动造成湖底地形变化,同时也增加湖泊容积,产生同水量的湖水位降低等水文效应.由于人工采砂活动主要集中于汛期,同时地方政府也对采砂区域采取管理,因此采砂活动对湖水位影响存在时空差异^[34].然而,湖水的流动性使采砂活动的空间差异影响减缓,也使采砂活动对湖盆地形影响所造成的水位变化的季节差异趋缓.

冬季长江径流量是一年中最小的时期,长江上游水库群增泄流量略微增加了该时期对鄱阳湖的顶托作用,主要表现在入江水道湖区,使湖口水位略升^[35],但对整个鄱阳湖平均水位影响较小(长江干流水位低对鄱阳湖产生的拉空效应主要表现在秋季)^[36],故冬季长江干流上游水库群的调节对鄱阳湖平均水位的影响甚微,忽略不计.因此,冬季使鄱阳湖水位发生趋势性下降的人为因素主要是湖区采砂活动.可以近似地采用冬季鄱阳湖平均水位降低值作为采砂活动对鄱阳湖水位所造成的影响,在数值上等于除去冬季自然因素影响后鄱阳湖水位的降低值.其它季节,把自然因素对湖水位的影响和人工采砂活动的影响去除,剩下的就粗略地认为是长江干流水库群调节的影响.

基于此,建立如下计算公式:

$$\mu_{ij} = D_{ij}/N_i \times 100\% \quad i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

$$D_{ij} = (H_{ijh} - H_{ijb})(1 - q) - L_j \quad (2)$$

$$L_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{ijh} - H_{ijb})(1 - q) \quad (3)$$

$$\omega_{ij} = L_j/N_i \times 100\% \quad (4)$$

其中 μ_{ij} 表示长江干流上游水库群调节对鄱阳湖水文站 i 比较时段 j 水位的影响程度; N_i 表示水文站 i

多年平均水位; D_{ij} 表示长江上游水库群调节使鄱阳湖水文站 i 比较时段 j 水位的变化值, 在数值上是在水文站 i 比较时段 j 的后一时期平均水位 H_{ijh} 与前一时期平均水位 H_{ijb} 的差值中属于人类活动引起的那部分影响减去人工采砂影响 L_j 后的水位差值 $D_{ij} > 0$ 表示长江干流上游水库群调节所产生的顶托作用使湖水位增加 $D_{ij} < 0$ 表示长江干流上游水库群调节作用使湖水位减少 $D_{ij} = 0$ 表示长江干流上游水库群的调节对鄱阳湖水位无影响; L_j 表示比较时段 j 人工采砂使鄱阳湖水位降低的平均值 $L_j < 0$; q 表示由于自然因素(降水量、气温、蒸发量、入湖径流量、长江干流非水库群调节造成顶托作用的影响等)使鄱阳湖水位发生变化的程度; ω_{ij} 表示人工采砂对鄱阳湖水文站 i 比较时段 j 水位的影响程度; i 表示水文站 n 为水文站的个数 $i = 1, 2, 3, 4$ 分别表示湖口、星子、都昌和棠荫站; j 表示比较时段 $j = 1, 2, \dots, m$ 分别表示 m 个比较时段; θ 表示冬季。

3 结果

3.1 鄱阳湖水位年际变化过程

以湖口、星子、都昌和棠荫 4 个水文站水位的算术平均值作为鄱阳湖平均水位来描述年际变化过程。从图 3 可以看出: (i) 1962—2014 年鄱阳湖年平均水位的多年平均值是 11.71 m。近 50 年来, 鄱阳湖水位有 2 个高水位时期 1970s—1980s 和 1990s 2 个低水位时期 1960s 和 2000 年至今。1990s 鄱阳湖处于丰水期, 水位最高。1998 年长江流域发生全流域性大洪水, 鄱阳湖年平均水位达到近 50 年来最大值 13.93 m; 2011 年秋季鄱阳湖流域旱情严重, 鄱阳湖水位达到近 50 年来最小值 9.49 m。(ii) 近 50 多年来鄱阳湖年平均水位略有减小趋势, 2000 年之后水位分阶段减少。1962—1999 年、2000—2005 年和 2006—2014 年鄱阳湖水位平均值分别为 11.92 m、11.70 m 和 10.84 m, 2006—2014 年水位低于多年平均值 0.87 m, 降低了 7.4%。可见, 2000 年之后鄱阳湖水位有明显下降趋势, 旱情持续加重。(iii) 汛期和枯季与全年平均水位相比有相似的变化过程、阶段性和趋势性, 但是枯季水位减小趋势更明显。

再从表 1 来看, 鄱阳湖全年和汛期水位的 C_v 值都在 2006—2014 年这一阶段达到最大值, 这说明水位在均值上下波动幅度较大, 易发生洪旱灾害。同一阶段全年、汛期和枯季水位的 C_s 值分别为 1.498、0.176 和 0.699, 都为正偏。在 2006—2014 年枯季 C_s

和 C_v 值都达到最小值, 这说明该阶段鄱阳湖枯季水位小于均值的年数较多, 年际变化幅度较小, 表现为枯水情较为突出。

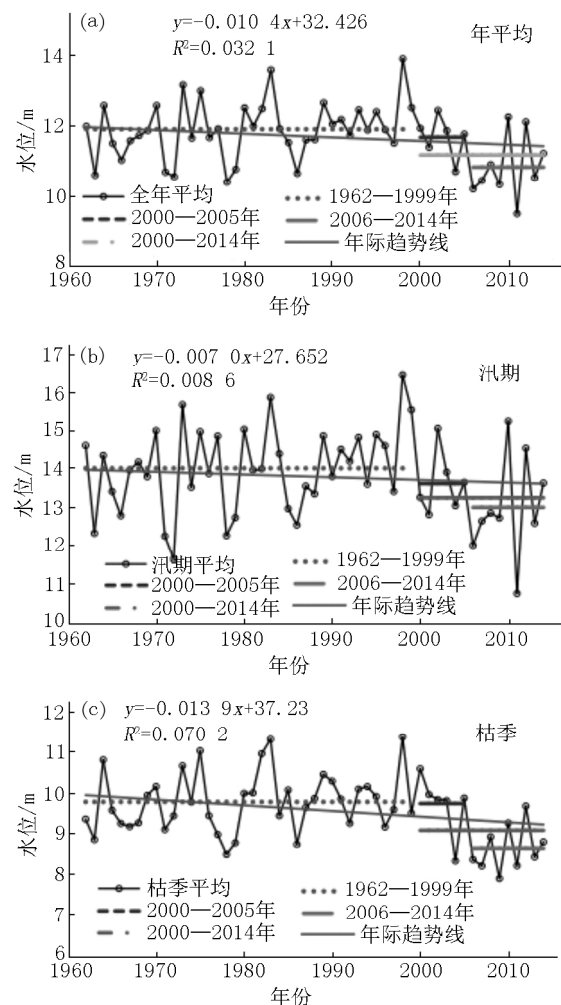


图 3 1955—2015 年鄱阳湖平均水位年际变化

3.2 月平均水位年际变化的阶段性

鄱阳湖月平均水位年际阶段性总体特征是近 50 多年来多数月份的月平均水位存在分阶段减少的现象, 从 1962—1999 年到 2000—2005 年, 再到 2006—2014 年月平均水位依次减少, 在 2006—2014 年各月平均水位都达到最小值, 并且低于相应月份的多年平均值, 尤其在 7~12 月份表现更为明显(见图 4)。1962—1999 年月均水位值相对较大, 主要表现在 4~8 月、10 月和 11 月。从各月多年平均水位与 2006—2014 年相比秋季 9、10 和 11 月差值较大, 平均差值为 1.63 m, 10 月差值最大达 2.23 m, 11 月次之为 1.42 m。这说明鄱阳湖在 2000 年之前多数月平均水位相对较高, 进入 21 世纪以后水位逐渐减少, 在 2006—2014 年各月平均水位达到近 50 多年来最小值, 年际变化阶段性明显。

3.3 水位年际变化趋势性检验

利用 1950 年以来长时间序列鄱阳湖水位数据,先采用 M-K 方法对鄱阳湖水位变化进行趋势性检验,然后利用 Hurst 指数预测其变化的持续性,最后

对其跳跃性进行检验,旨在分析鄱阳湖水位变化趋势性、持续性以及突变情况.本次估算 Hurst 指数的方法采用 R/S 分析法.计算结果如表 2 和图 5 所示.

表 1 1962—2014 年鄱阳湖平均水位年际变化统计特征值

时段	统计项目	1962—2014 年	1962—1999 年	2000—2014 年	2000—2005 年	2006—2014 年
全年	平均水位/m	11.71	11.92	11.18	11.70	10.84
	变差系数 C_v	0.077	0.069	0.079	0.051	0.084
	偏态系数 C_s	-0.050	0.193	-0.228	-0.855	0.498
汛期	平均水位/m	13.82	14.04	13.27	13.65	13.02
	变差系数 C_v	0.084	0.078	0.088	0.059	0.103
	偏态系数 C_s	-0.139	-0.086	-0.117	1.373	0.176
枯季	平均水位/m	9.60	9.80	9.09	9.75	8.65
	变差系数 C_v	0.084	0.073	0.092	0.077	0.066
	偏态系数 C_s	0.131	0.510	0.248	-1.670	0.699

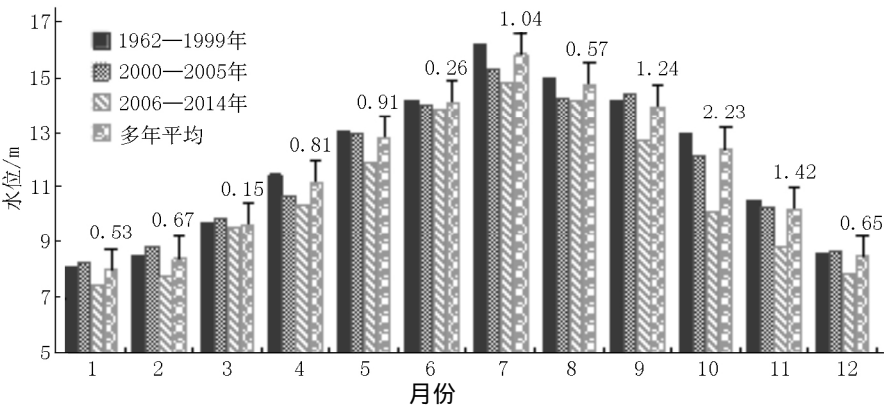


图 4 鄱阳湖月平均水位年际阶段性

表 2 鄱阳湖水位年际变化趋势性和持续性统计

水文站	项目	1 月	7 月	10 月	全年	汛期	枯季	春季	夏季	秋季	冬季
湖口	H 值	0.750 7	0.708 7	0.707 6	0.734 0	0.674 7	0.737 4	0.687 6	0.703 9	0.599 4	0.846 2
	M 值	2.25	0.66	-3.21	-0.59	-0.54	-0.17	-0.43	0.23	-2.24	1.75
	显著性	↑ *	↑	↓ **	↓	↓	↓	↓	↑	↓ *	↑
星子	H 值	0.802 8	0.696 8	0.718 3	0.765 1	0.706 5	0.775 9	0.716 7	0.685 8	0.610 1	0.904 8
	M 值	1.15	0.36	-2.56	-0.34	-0.45	-0.29	-0.50	0.11	-1.33	1.19
	显著性	↑	↑	↓ **	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↑
都昌	H 值	0.820 7	0.692 9	0.698 6	0.784 8	0.708 2	0.780 8	0.685 5	0.684 9	0.586 3	0.925 6
	M 值	-0.95	-0.09	-3.02	-1.24	-0.91	-1.72	-1.68	-0.28	-1.71	-1.02
	显著性	↓	↓	↓ **	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
棠荫	H 值	0.764 2	0.734 3	0.615 1	0.714 2	0.658 2	0.625 4	0.698 9	0.683 4	0.552 5	0.694 9
	M 值	-0.68	-0.74	-3.60	-1.10	-0.56	-1.85	-0.15	-0.20	-1.90	-0.24
	显著性	↓	↓	↓ **	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
全湖平均	H 值	0.837 7	0.729 4	0.632 6	0.757 7	0.682 9	0.712 2	0.732 4	0.694 7	0.549 9	0.803 0
	M 值	-0.11	-0.69	-3.84	-1.07	-0.62	-1.53	-0.07	-0.27	-2.14	-0.05
	显著性	↓	↓	↓ **	↓	↓	↓	↓	↓	↓ *	↓

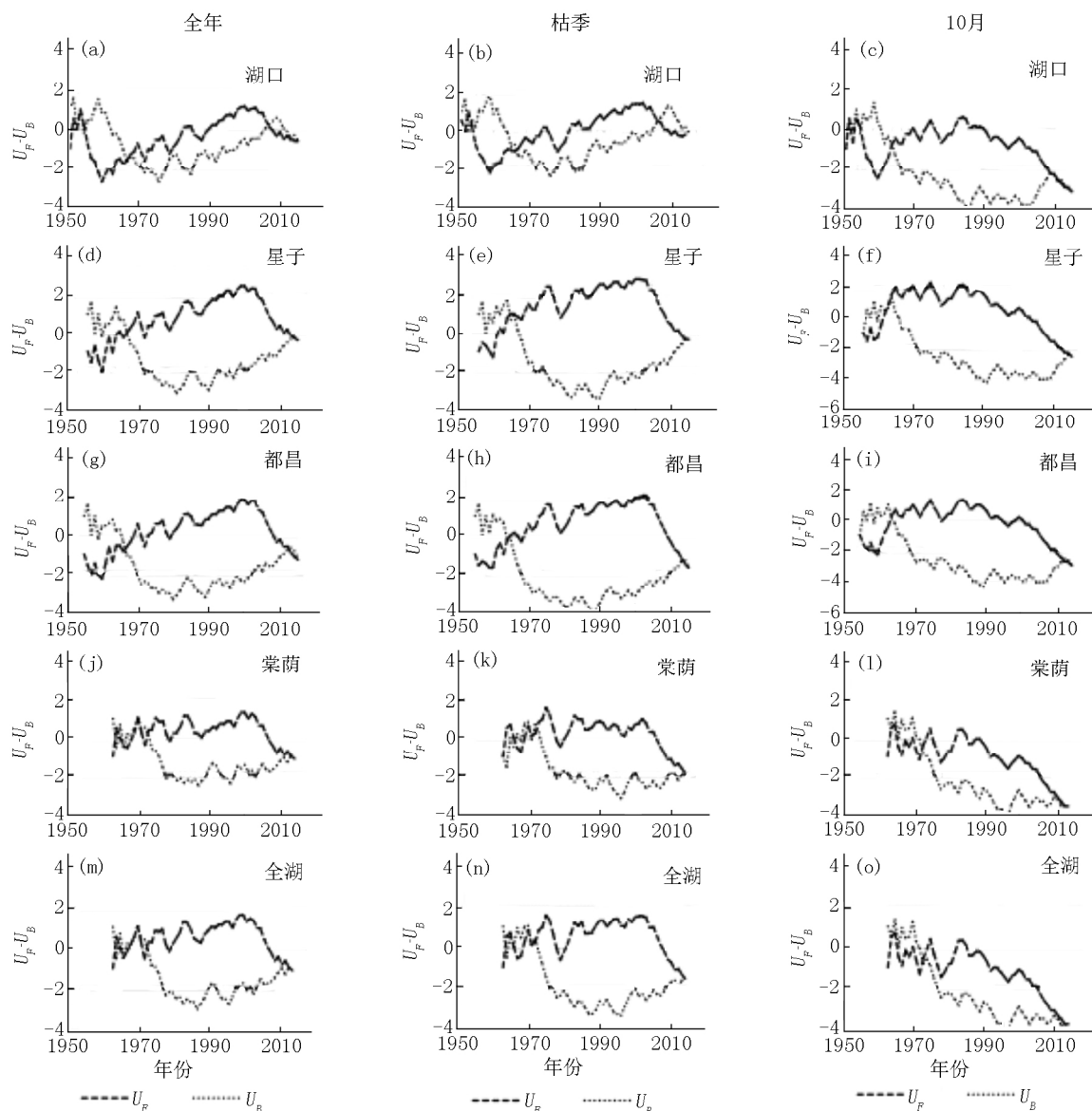
注: M 值为正表示序列有增加趋势, M 值为负表示序列有减少趋势; 向上箭头“↑”表示序列有上升趋势, 向下箭头“↓”表示序列有下降趋势。“*”和“**”分别表示增大或减少的趋势显著和非常显著。

由表 2 知: 首先, 鄱阳湖各湖区及平均水位在全年、汛期和枯季水位变化都有降低趋势, 都没有达到

显著水平. 从年内各季节、水位最小月(1 月)和最大月(7 月)来看, 夏季、冬季、1 月和 7 月部分站点出

现了水位上升的趋势. 对不同的湖区来看, 入江水道湖区 1 月、7 月、夏季和冬季有上升趋势, 其余各检验时期有下降趋势, 出现年内变化趋势不一致的现象; 主湖区各时期均有下降趋势. 这些现象与近年来鄱阳湖区人工采砂有关. 大量的采砂使湖盆平均深度增大, 容积增大, 在同样水量的情况下使湖区平均水位略有下降趋势^[37]. 同时由于鄱阳湖流域植树造林和多个水库运行调节了年内径流量, 使得汛期入

湖径流量减少, 枯季径流量增加^[38], 再加上入江水道湖区人工采砂使湖盆高程减少, 使湖区平均比降增大, 枯季湖水流速增大, 造成入江水道湖区水量增大, 水位抬高略有上升趋势^[39]. 另外, 长江干流的顶托作用, 加强了入江水道湖区 7 月份和夏季水位上升趋势; 三峡水库在枯季增泄发电, 一定程度上增加了干流枯季的径流量, 从而增大了顶托作用, 叠加作用加强了入江水道湖区 1 月份和冬季水位具有上升趋势.



图中实线表示在 $\alpha = 0.05$ 时对应 M 的临界值为 ± 1.96 .

图 5 鄱阳湖各水文站水位年际变化趋势及突变检验检测量站

其次, 鄱阳湖水位变化除主湖区(棠荫水文站)外, 其他湖区在冬季均具有较强的持续性, 湖口、星子和都昌水文站的 H 值年内变化顺序为 $0.7 < H_{\text{枯季}} < H_{1\text{月}} < H_{\text{冬季}}$; 全湖平均水位变化在冬季都有较强的持续性. 湖口、星子、都昌和全湖平均水位冬季的 H 值都大于 0.8, 且 $0.8 < H_{\text{全湖}} < H_{\text{湖口}} < H_{\text{星子}} < H_{\text{都昌}}$.

这说明鄱阳湖在枯水季节尤其冬季水位变化的持续性很大, 不同的是以都昌水文站为界, 以北的入江水道湖区此时期水位具有上升趋势, 特别是湖口水位上升趋势达到显著水平(见表 2), 相反都昌以南的主湖区水位具有下降趋势, 而全湖平均水位此时期有下降的趋势. 此情况反映了鄱阳湖近年来枯水水

情较为突出。

然后,鄱阳湖10月份水位减少趋势最显著。10月湖口、星子、都昌和棠荫4站及全湖平均水位的 M 值都为负值,并且 $|M|$ 值都大于2.56,这说明10月鄱阳湖各湖区水位减少趋势达到非常显著水平。这种情况与长江上游水库群蓄水有关。近年来水库群在9~10月蓄水,减少了干流径流量,干流水位降低减弱了对湖口出流的顶托作用,使鄱阳湖湖口泄流量增大,湖水大量外泄,使湖内水位降低趋势明显。

最后,由图5可以看出:(i)从鄱阳湖全年平均水位来看,除星子站外其余各水文站和全湖平均水位都在2006年之后出现减少趋势(见图5(a)、(d)、(g)、(j)和(m))。1955年以来,湖口站水位在1980s末期有增加的趋势,2000年左右达到峰值之后水位增加的速度减慢,到2006年之后水位有减少趋势。星子、都昌、棠荫站水位以及全湖平均水位大约都是在1990s上升速度增加,在1990s末期和2000s初期达到峰值,2000年以后水位上升的速度减少,约2006年之后水位出现减少趋势。(ii)从枯季水位来看,进入21世纪后各站水位增加的趋势有所减少,但是水位开始减少的起点不完全一致(见图5(b)、(e)、(h)、(k)和(n))。湖口和棠荫站水位约在2006年之后变为减少趋势,星子和都昌站水位大约在2010年之后出现减少趋势。(iii)从10月份水位来看,鄱阳湖各站水位都有明显的减少趋势(见图5(c)、(f)、(i)、(l)和(o))。湖口和棠荫站水位约在1990年前后开始具有减少的趋势,星子和都昌站水位约在2000年左右才开始有减少趋势。(iv)从水位变化的跳跃性来看,各站年平均水位在1960s中后期有一个共同的跳跃点;湖口站全年和枯季水位在2006年左右有一个明显的跳跃点(与三峡水库的运行有关);其余 U_F 与 U_B 曲线的交点不能明确判定为突变点,需要结合水位数据的变化情况才能分辨出来。

3.4 水位年际变化趋势的空间差异

由表2可知:近50年来鄱阳湖全湖水位在全年、汛期和枯季都具有减少趋势;从季节来看,近50年来夏季和冬季主湖区和入江水道水位变化趋势不同,入江水道水位具有不显著地增加趋势,而主湖区水位具有不显著地减少趋势。这种鄱阳湖水位年际变化趋势的空间差异在7月(水位最大月)和1月(水位最小月)表现最明显。这种现象与长江干流顶托作用使入江水道湖区水位壅高是分不开的,首先,长江干流顶托作用随着距离长江的远近发生变化,随距离增加而减小,对入江水道影响大于主湖区;其

次,由于长江干流上游水库群在枯季增泄流量使近年来相应时期长江顶托作用增大;最后,由于鄱阳湖区大量人工采砂作用使入江水道下切侵蚀严重,增大了主湖区与入江水道平均比降^[40],造成近年来枯季主湖区水大量外泄,使入江水道水量增多等原因有关。

4 分析与讨论

4.1 鄱阳湖水位的主要影响因素分析

鄱阳湖流域降水量、蒸发量和气温是气候条件里主要影响鄱阳湖水位的因素。同时,鄱阳湖水位还受到长江干流的很大影响。长江干流通过顶托作用、江水倒灌和拉空效应对鄱阳湖水位产生重要影响^[14]。这些自然因素在很大程度上影响了鄱阳湖水位的变化,决定了其年内和年际波动变化的基本规律。与此同时,鄱阳湖水位还受到长江干流三峡水库、溪洛渡水库等水库群的调节、五河流域水利工程的调节、湖区人工采砂活动和人们生产生活取用水量等人类活动都会对入湖径流量及鄱阳湖水位产生影响等。因此,鄱阳湖水位变化受到众多因素影响,各因素相互影响,关系错综复杂,它们共同决定着鄱阳湖水位变化过程。

近几十年来江西省(占鄱阳湖流域面积的97%)社会用水总量在进入21世纪后有所增加,但是随着节水技术和节水措施的不断革新,2010—2015年总的用水量有所减少,总的耗水量基本稳定在 $110 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右(占湖口总径流量的7.3%)^[41],对鄱阳湖水位年际变化产生的影响很小。因此,本文主要从长江干流的水库群调节和湖区人工采砂2方面分析鄱阳湖水位趋势性变化对人类活动的响应。

4.2 长江干流的水库群调节对鄱阳湖水位趋势性变化的影响

至2015年,长江上游已经建成长江三峡大坝、金沙江溪洛渡大坝、向家坝等一批大型水利枢纽,其中总库容在 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上的水库接近有80座。这些水库库容大,调节能力强,组成一个水库群,总调节库容超过 $1\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。水库群调节改变了长江中下游干流的水文节律,对中下游河湖泥沙交换必产生影响^[42]。其中三峡水库的库容最大,起主要调节作用。三峡水库在汛期末端9~10月份蓄水,枯季11月~次年4月增泄流量以发电,5~6月为保证防洪增泄流量而弃水。水库群的调节必将对鄱阳湖水位产生一定的影响。

水库群的调节虽然没有改变鄱阳湖“高水湖

相“低水河相”的基本特征,但对鄱阳湖区水位产生影响,以致于使江湖水沙交换过程发生变化,有可能使鄱阳湖枯水期提前,甚至对鄱阳湖湿地生态和水资源利用造成影响^[43].长江干流上游水库群在9~10月蓄水期间径流量出现趋势性减少(见表2),水位降低,长江顶托作用减弱,造成湖水外泄量增加,使得10月份湖水位近年来有非常显著减少的趋势(见表2).除都昌站外枯季鄱阳湖水位的变差系数 C_v 值较2000年之前减少(见表1),这说明近年来枯季鄱阳湖水位稳定在较低水位波动,这也与水库群的秋季蓄水有关.故长江干流上游水库群蓄水对2000年以来鄱阳湖水位枯季趋势性减少有较大的贡献.

4.3 鄱阳湖水位趋势性变化对人工采砂活动的响应

自2000年长江干流禁止挖砂以后,大量采砂船进入鄱阳湖作业.2001—2007年鄱阳湖人工采砂活动主要集中于入江水道,2008年之后主要集中于主湖区^[34].在持续采砂和水流冲刷等因素的影响下,截止2010年,入江水道湖盆平均高程下降大于2 m^[27].近15年来鄱阳湖枯水位下降趋势明显,枯水水情加剧与鄱阳湖大量采砂时间一致等,这些现象说明湖区大量采砂活动已经改变了湖盆局部地形,进而产生了一系列水文效应.

从表3可以看出,在进入21世纪以来,对全年来说,五河入湖径流量和鄱阳湖水位在各时段与前一时段比较都是减小,但是鄱阳湖水位的变化幅度都大于五河入湖径流量的变化幅度,这说明鄱阳湖水位除了受径流量的影响外,还受到其他较多因素的影响.在枯季,尤其是冬季,鄱阳湖流域五河入湖径流量2000—2015年与1950s—1999年相比增加,2000—2015年与多年平均相比也是增加,而鄱阳湖各站水位在同期相比几乎都减小(湖口站除外,湖口水位在冬季略增).也就是说,2000年以来枯季五河入湖径流量比2000年之前略增^[44],出湖径流量却增加,这说明主湖区水量外泄来到入江水道增多,从而使出湖径流量增大.鄱阳湖平均水位(湖口站除外)并没有增加,此现象与人工采砂使湖盆受侵蚀的水文效应密切相关;而湖口站水位略增可能与长江干流顶托作用有关.人工采砂活动造成入江水道湖区湖盆侵蚀严重,湖底平均高程下降,主湖区到入江水道的比降也增大了,使得主湖区水外泄流速增大,水流速度增大又加剧了湖盆的侵蚀,使过水断面面积增大,增大湖盆容积的同时同水位条件下流量也增大,造成大量湖水外泄,增加了入江水道湖区的水量,使都昌水位大幅度降低(枯季都昌站

表3 近50多年来鄱阳湖水位和五河总径流量变化百分率

%

项目	计算方法	全年	汛期	枯季	春季	夏季	秋季	冬季
五河入湖径流量	$(Y-X)/X$	-3.79	-7.55	8.95	-11.34	-3.43	11.79	5.85
	$(Y-M)/M$	-2.82	-5.69	6.51	-8.64	-2.55	8.59	4.22
	$(Z-M)/M$	-3.07	-3.46	-1.81	-9.84	3.34	-0.73	-3.00
湖口出湖径流量	$(Y-X)/X$	-3.91	-7.87	5.63	-9.79	-6.00	-3.70	22.68
	$(Y-M)/M$	-2.99	-6.08	4.21	-7.60	-4.61	-2.83	16.29
	$(Z-M)/M$	-1.61	-0.34	-4.59	-5.54	4.68	-13.54	10.78
全湖平均	$(Y-X)/X$	-5.83	-4.61	-7.38	-4.90	-4.39	-9.97	-3.53
	$(Y-M)/M$	-4.38	-3.44	-5.57	-3.66	-3.27	-7.59	-2.63
	$(Z-M)/M$	-7.02	-4.47	-10.27	-5.40	-3.77	-12.78	-6.60
湖口站	$(Y-X)/X$	-4.97	-3.90	-6.40	-3.51	-4.16	-11.29	2.72
	$(Y-M)/M$	-3.81	-2.97	-4.94	-2.69	-3.17	-8.81	2.05
	$(Z-M)/M$	-6.05	-3.69	-9.20	-3.64	-3.73	-14.26	-0.05
鄱阳湖水位	$(Y-X)/X$	-6.19	-5.02	-7.74	-6.26	-4.11	-10.38	-3.39
	星子站 $(Y-M)/M$	-4.65	-3.74	-5.85	-4.68	-3.06	-7.91	-2.52
	$(Z-M)/M$	-7.48	-4.83	-10.99	-6.70	-3.46	-13.37	-7.15
都昌站	$(Y-X)/X$	-7.64	-5.82	-9.92	-7.20	-4.72	-10.67	-8.87
	$(Y-M)/M$	-5.77	-4.37	-7.54	-5.44	-3.54	-8.12	-6.74
	$(Z-M)/M$	-9.36	-5.85	-13.80	-8.20	-4.02	-13.78	-13.82
常荫站	$(Y-X)/X$	-4.54	-3.69	-5.54	-2.63	-4.55	-7.64	-2.97
	$(Y-M)/M$	-3.32	-2.68	-4.07	-1.90	-3.32	-5.62	-2.20
	$(Z-M)/M$	-5.24	-3.49	-7.31	-3.06	-3.86	-9.84	-4.27

注: X 代表1950s—1999年水文变量的平均值, Y 代表2000—2015年水文变量的平均值, Z 代表2006—2015年水文变量的平均值, M 代表水文变量的多年平均值.

2006—2015 年水位与多年平均相比减少幅度达 13.80%)而使湖口站水位略增.可见,人工采砂活动对 2000 年以来鄱阳湖水位趋势性减少的影响真实存在,全年都有影响,但枯季尤其是冬季的影响稍微明显;丰水期在空间上对整个湖区都有影响,存在微小的局部差异.

4.4 人类活动对鄱阳湖水位影响的量化研究

4.4.1 比较方案设计与指标赋值 用 I、II、III 和 IV 分别表示 1950s—1999 年、2000—2014 年、2000—2005 年和 2006—2014 年 4 个时段.由前文研究得知,鄱阳湖水位趋势性减少是从 2000 年以后发生的,为了说明长江干流的水库群调节和湖区采砂作用对鄱阳湖水位趋势性变化的影响,设置 2 个比较时段 $j=1$ 表示时段 II 与时段 I 做差比较 $j=2$ 表示时段 IV 与时段 I 做差比较,通过结果比较来说明鄱阳湖水位在 2000 年之后趋势性减少对人类活动的响应,并比较水库群调节和采砂作用对鄱阳湖水位趋势性减小的贡献率.

在 (2)~(3) 式中 q 值的确定:经过研究发现,2000—2014 年鄱阳湖流域年降水量为 1 617 mm,比多年平均值 1 638 mm 减少了 1.28% (见图 6),这说明 2000 年以后鄱阳湖水位趋势性减少部分原因是自然因素造成的.然而,2000—2014 年五河入湖年平均径流量为 $1\,069.9\times 10^8\text{ m}^3$ 比多年平均值 $1\,101.0\times 10^8\text{ m}^3$ 减少了 2.83% (见图 7);2000—2014 年鄱阳湖年平均水位 11.18 m,比多年平均值 11.71 m 减

少了 4.52% (见表 1).由此可知,2000—2014 年由于自然因素使入湖年径流量减少了 2.83%,粗略地认为,同样自然因素也造成鄱阳湖年平均水位减少了 2.83%,其余 1.69% 的水位减幅是由于人类活动因素造成的.按此自然和人为因素分割的比例来计算,在 2000—2014 年鄱阳湖水位减少的原因中自然因素就占 62.60%,于是在 (2)~(3) 式中 q 值就近似地认为是 62.60%.

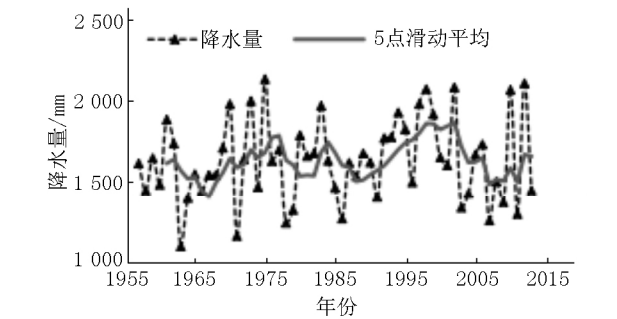


图 6 1950s—2014 年鄱阳湖流域年平均降水量年际变化

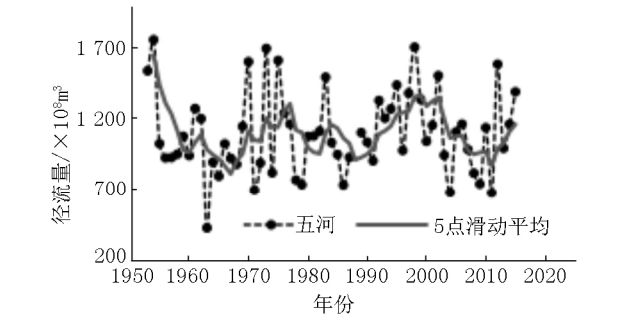


图 7 1950s—2015 年鄱阳湖流域五河年径流量年际变化

4.4.2 计算结果分析 利用 (1)~(3) 式计算长江干流上游水库群对鄱阳湖水位影响的结果 (见表 4).

表 4 长江干流水库群调节对鄱阳湖水位变化的影响程度 %

站名	项目	1 月	7 月	10 月	高水位时期	汛期平均	枯季平均	年平均
湖口	μ_{11}	2.59	-1.34	-5.52	-1.52	-1.07	0.26	-0.42
	μ_{12}	3.64	-0.43	-6.69	-1.11	-0.36	0.77	0.19
星子	μ_{21}	0.89	-1.47	-5.08	-1.37	-1.14	-0.77	-0.94
	μ_{22}	1.21	-0.55	-6.12	-0.95	-0.48	-0.68	-0.62
都昌	μ_{31}	-1.35	-1.70	-4.77	-1.57	-1.29	-1.82	-1.57
	μ_{32}	-2.08	-0.83	-5.87	-1.21	-0.80	-2.37	-1.58
棠荫	μ_{41}	0.20	-2.17	-3.50	-1.28	-0.60	-0.33	-0.45
	μ_{42}	0.75	-1.53	-4.01	-0.85	0.04	0.13	0.07

注:高水位时期是指鄱阳湖高水位的 7、8 和 9 月;负值表示水位降低的程度.

从表 4 可以看出: (i) 10 月 μ_{ij} 全都是负值,且 $|\mu_{ij}|$ 取得最大值.10 月恰好是长江干流上游水库群的蓄水时期,此时期调节对鄱阳湖水位影响较大,特别是对入江水道湖区的影响更大,对湖口站水位影响达到 6.69%;对主湖区影响也较大,对棠荫站水位影响程度达 4% 以上. (ii) 在表 4 中负值较多,7 月、10 月、高水位时期以及除棠荫站外的汛期都是

负值.这表明近 15 年来鄱阳湖水位减少趋势明显,与已有文献研究结果一致. (iii) 高水位时期,对应比较时段南、北湖区 $|\mu_{ij}|$ 相差不大,与该时期长江干流顶托作用对整个湖区影响在空间上差别甚微有关. (iv) 1 月份北湖区 $|\mu_{ij}|$ 多数大于南湖区 $|\mu_{ij}|$,且 μ_{ij} 正值多于负值.这与 1 月份对北湖水水位略增的趋势有关.可能是由于人工采砂使南、北湖地形比降增

大,主湖区水量大量外泄到入江水道湖区,使北湖区水量大、水位略高所致。都昌站恰好处在南、北湖连接处的咽喉部位,是大量湖水外泄的必经之地(见图1)。强势水流造成都昌站附近航道侵蚀严重,再加上大量主湖区水外泄使都昌水位下降幅度较大,使湖口水位增大所致。也可能是长江干流水库群在最枯水的1月份增泄水量使长江干流对鄱阳湖顶托作用增强,使湖口水位略有增加趋势。也与近年来五河流域枯季入湖总径流量偏大有关^[39]。(v)从表4数据所反映的结果看,基本上符合鄱阳湖水位趋势性变化的真实情况,能反映水位变化受到长江干流水库群调节作用的影响。

利用(4)式计算得到 ω_{ij} 的值,用 4×2 阶矩阵来表示,即

$$\omega = (\omega_{ij})^T = \begin{pmatrix} -1.46 & -1.42 & -1.34 & -1.26 \\ -2.92 & -2.83 & -2.67 & -2.53 \end{pmatrix}^T.$$

矩阵 ω 表示人工采砂对鄱阳湖水位的影响程度。可以看出:(i) $\omega_{ij} < 0$,即 ω_{ij} 全部都是负值,表明人工挖砂活动使鄱阳湖水位降低,其影响是全湖性的,不是局部现象,但有空间差异。(ii) $|\omega_{i2}| > |\omega_{i1}|$ 表明自2000年之后,随着湖区人工采砂活动频繁和时间的推移,采砂量不断积累,其对鄱阳湖水位的影响程度逐渐增大。另外,在比较时段 $j=2$ 时,也就是2006年之后,三峡大坝、金沙江溪洛渡大坝、向家坝等长江上游水库群陆续建设完工并投入运行,水库群蓄水期间长江干流水量少、水位低,对鄱阳湖水顶托作用较弱,使鄱阳湖外泄水量增多了,也会加剧人工采砂对鄱阳湖水位影响的程度。(iii) $|\omega_{4j}| < |\omega_{3j}| < |\omega_{2j}| < |\omega_{1j}|$,数据显示北湖区水位受影响的程度大于南湖区,这说明人工采砂活动对鄱阳湖水位的影响在空间分布上存在差异,这种现象可能与人工采砂活动的随意性和可调控性有关,也与水流对湖盆的冲刷侵蚀有关。据研究,早期阶段(2000—2007年)人工采砂活动主要集中于入江水道,且采砂活动具有随意性;后期(2008年以后)由于政府部门管理采砂活动主要集中于主湖区^[13]。

总之,研究结果揭示出:首先,长江干流上游水库群的调节作用对鄱阳湖水位的影响表现在时间上具有季节性,洪水季节对全湖的影响基本无空间差异;枯水季节对南、北湖影响程度不同,对北湖区影响程度更大;水库群蓄水期10月,对鄱阳湖影响程度最大,波及范围广,甚至对湖心棠荫水位影响也较大($\mu_{42} = -4.01\%$, $\mu_{41} = -3.50\%$);其次,人工采砂活动对鄱阳湖水位趋势性下降的影响毋庸置疑,

对整个湖区都有影响,但空间上也存在差异;最后,长江干流上游水库群对鄱阳湖水位影响程度除了10月份影响较大、1月份对湖口水位影响较大外,其余研究时期各湖区影响程度都没有在比较时段 $j=2$ 时采砂活动的影响程度大。

5 结论

1) 进入21世纪以来鄱阳湖平均水位有分阶段降低的特征,1962—1999年、2000—2005年和2006—2014年鄱阳湖水位平均值分别为11.92 m、11.70 m和10.84 m,2006—2014年水位比多年平均值低0.87 m,降低了7.4%。10月份和秋季鄱阳湖平均水位减少趋势显著,而湖口站1月水位增加趋势显著;

2) 长江干流上游水库群的调节对鄱阳湖高水位时期影响在空间上基本无差异;枯季对入江水道湖区水位影响大于主湖区;10月水库群蓄水迫使鄱阳湖水大量外泄,加速了湖水位下降,影响波及全湖(湖心棠荫水位影响程度达到 $\mu_{42} = -4.01\%$)。人工采砂活动对鄱阳湖水位的影响全年存在,高水位时期与长江干流顶托作用叠加减弱顶托作用;枯季加剧了因湖盆局部地形演变而产生有空间差异的枯水效应。

水位变化对鄱阳湖生态系统结构和功能产生重要影响。因此,需要合理规划长江上游水库群的联合调度和鄱阳湖区人工采砂活动,对鄱阳湖区水资源利用和生态环境保护具有重要意义。

6 参考文献

- [1] Pachauri R K, Meyer R A. Climate change 2014: synthesis report. contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [J]. Journal of Romance Studies, 2014, 4(2): 85-88.
- [2] Ye Xuchun, Xu Chongyu, Li Yunliang, et al. Change of annual extreme water levels and correlation with river discharges in the middle-lower Yangtze River: characteristics and possible affecting factors [J]. Chinese Geographical Science, 2017, 27(2): 325-336.
- [3] Zhang Xiaolin, Zhang Qi, Werner A D, et al. Characteristics and causal factors of hysteresis in the hydrodynamics of a large floodplain system: Poyang Lake (China) [J]. Journal of Hydrology, 2017, 553: 574-583.
- [4] Hu Qi, Feng Song, Guo Hua, et al. Interactions of the Yan-

- gtze River flow and hydrologic processes of the Poyang Lake ,China [J]. Journal of Hydrology 2007 347(1/2) : 90-100.
- [5] 郭华 ,Hu Qi 张奇. 近 50 年来长江与鄱阳湖水文相互作用的变化 [J]. 地理学报 2011 66(5) : 609-618.
- [6] Li Yunliang ,Zhang Qi ,Werner A D ,et al. The influence of river-to-lake backflow on the hydrodynamics of a large floodplain lake system (Poyang Lake ,China) [J]. Hydrological Processes 2017 31(1) : 117-132.
- [7] Yang Guishan ,Zhang Qi ,Wan Rongrong ,et al. Lake hydrology ,water quality and ecology impacts of altered river-lake interactions: advances in research on the middle Yangtze River [J]. Hydrology Research 2016 47(S1) : 1-7.
- [8] Zhang Qi ,Ye Xuchun ,Werner A D ,et al. An investigation of enhanced recessions in Poyang Lake: comparison of Yangtze River and local catchment impacts [J]. Journal of Hydrology 2014 517: 425-434.
- [9] 赵军凯 ,李九发 ,蒋陈娟,等. 长江中下游河湖水量交换过程 [J]. 水科学进展 2013 24(6) : 759-770.
- [10] Yao Jing ,Zhang Qi ,Li Yunliang ,et al. Hydrological evidence and causes of seasonal low water levels in a large river-lake system: Poyang Lake ,China [J]. Hydrology Research 2016 47(S1) : 24-39.
- [11] Guo Hua ,Hu Qi ,Zhang Qi ,et al. Effects of the Three Gorges Dam on Yangtze River flow and river interaction with Poyang Lake ,China: 2003—2008 [J]. Journal of Hydrology 2012 416/417: 19-27.
- [12] Lai Xijun ,Jiang Jiahua ,Liang Qihua ,et al. Large-scale hydrodynamic modeling of the middle Yangtze River Basin with complex river-lake interactions [J]. Journal of Hydrology 2013 492: 228-243.
- [13] 吴桂平 ,刘元波 ,范兴旺. 近 30 年来鄱阳湖湖盆地形演变特征与原因探析 [J]. 湖泊科学 2015 27(6) : 1168-1176.
- [14] 戴雪 ,万荣荣 ,杨桂山,等. 鄱阳湖水文节律变化及其与江湖水量交换的关系 [J]. 地理科学 2014 34(12) : 1488-1496.
- [15] 戴志军 ,李九发 ,赵军凯,等. 特枯 2006 年长江中下游径流特征及江湖库径流调节过程 [J]. 地理科学 , 2010 30(4) : 577-581.
- [16] 朱玲玲 ,陈剑池 ,袁晶,等. 洞庭湖和鄱阳湖泥沙冲淤特征及三峡水库对其影响 [J]. 水科学进展 2014 25(3) : 348-357.
- [17] 白丽 ,张奇 ,李相虎. 湖泊水量变化关键影响因子研究综述 [J]. 水电能源科学 2010 28(3) : 30-35.
- [18] 闵骞 ,占腊生. 1952—2011 年鄱阳湖枯水变化分析 [J]. 湖泊科学 2012 24(5) : 675-678.
- [19] 姜加虎 ,黄群. 三峡工程对鄱阳湖水位影响研究 [J]. 自然资源学报 1997 12(3) : 24-29.
- [20] 邬年华 ,罗优 ,刘同宦,等. 三峡工程运行对鄱阳湖水位影响试验 [J]. 湖泊科学 2014 26(4) : 522-528.
- [21] 周云凯 ,白秀玲 ,宁立新. 1970—2015 年鄱阳湖水位变化特征及其突变分析 [J]. 河南大学学报: 自然科学版 2018 48(2) : 151-159.
- [22] 欧阳千林 ,刘卫林. 近 50 年鄱阳湖水位变化特征研究 [J]. 长江流域资源与环境 2014 23(11) : 1545-1550.
- [23] 张范平 ,方少文 ,周祖昊,等. 鄱阳湖水位多时间尺度动态变化特性分析 [J]. 长江流域资源与环境 2017 26(1) : 126-133.
- [24] 邓志民 ,张翔 ,肖洋,等. 鄱阳湖水位演变及其影响因子分析 [J]. 武汉大学学报: 工学版 2015 48(5) : 615-621.
- [25] 王鹏 ,赖格英 ,黄小兰. 鄱阳湖水利枢纽工程对湖泊水位变化影响的模拟 [J]. 湖泊科学 2014 26(1) : 29-36.
- [26] 张楠楠 ,王文 ,王胤. 鄱阳湖面积的卫星遥感估计及其与水位关系分析 [J]. 遥感技术与应用 2012 27(6) : 947-953.
- [27] Yao Jing ,Zhang Qi ,Ye Xuchun ,et al. Quantifying the impact of bathymetric changes on the hydrological regimes in a large floodplain lake: Poyang Lake [J]. Journal of Hydrology 2018 561: 711-723.
- [28] 席海燕 ,王圣瑞 ,郑丙辉,等. 流域人类活动对鄱阳湖生态安全演变的驱动 [J]. 环境科学研究 2014 27(4) : 398-405.
- [29] 水利部长江水利委员会. 长江泥沙公报 2016 [M]. 武汉: 长江出版社 2016.
- [30] 符淙斌 ,王强. 气候突变的定义和检测方法 [J]. 大气科学 1992 16(4) : 482-493.
- [31] 白红英 ,侯钦磊 ,马新萍,等. 50 年来秦岭金钱河流域水文特征及其对降水变化的响应 [J]. 地理科学 , 2012 32(10) : 1229-1235.
- [32] 管华. 水文学 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社 2015.
- [33] 邴建平 ,邓鹏鑫 ,吕孙云,等. 鄱阳湖与长江干流水量交换效应及驱动因素分析 [J]. 中国科学: 技术科学 , 2017 47(8) : 856-870.
- [34] 姚静 ,李云良 ,李梦凡,等. 地形变化对鄱阳湖枯水的影响 [J]. 湖泊科学 2017 29(4) : 955-964.
- [35] 胡振鹏 ,傅静. 长江与鄱阳湖水文关系及其演变的定量分析 [J]. 水利学报 2018 49(5) : 570-579.
- [36] 赖格英 ,张志勇 ,王鹏,等. 拟建鄱阳湖水利枢纽工程对长江干流流量影响的模拟 [J]. 湖泊科学 2017 29(3) : 521-533.
- [37] 江丰 ,齐述华 ,廖富强,等. 2001—2010 年鄱阳湖采砂规模及其水文泥沙效应 [J]. 地理学报 2015 70(5) : 837-845.
- [38] 刘昌明 ,李艳忠 ,刘小莽,等. 黄河中游植被变化对水量转化的影响分析 [J]. 人民黄河 2016 38(10) : 7-12.

- [39] Li Xianghu ,Zhang Qi. Variation of floods characteristics and their responses to climate and human activities in Poyang Lake ,China [J]. Chinese Geographical Science , 2015 25(1) : 13-25.
- [40] 刘志刚 ,倪兆奎. 鄱阳湖发展演变及江湖关系变化影响 [J]. 环境科学学报 2015 35(5) : 1265-1273.
- [41] 江西省统计局. 江西统计年鉴(2000—2015) [M]. 北京: 中国统计出版社 2016.
- [42] Feng Lian ,Han X X ,Hu C M ,et al. Four decades of wet-land changes of the largest freshwater lake in China: possible linkage to the Three Gorges Dam? [J]. Remote Sensing of Environment 2016 ,176: 43-55.
- [43] 罗蔚 ,张翔 ,邓志民 等. 1956—2008 年鄱阳湖流域水沙输移趋势及成因分析 [J]. 水科学进展 2014 25(5) : 658-667.
- [44] 孙鹏 ,张强 ,陈晓宏 等. 鄱阳湖流域水沙时空演变特征及其机理 [J]. 地理学报 2010 65(7) : 828-840.

The Analysis on the Response of the Water Level Change Trend to Human Activities in Poyang Lake

ZHAO Junkai¹ ,LI Lixian¹ ,LI Jiufa^{2*} ,ZHAO Ruizhe³ ,LIU Xinsheng¹ ,YANG Jingcao¹

(1. College of Tourism and Territorial Resources ,Jiujiang Key Laboratory of Surveying and Mapping on Land and 3S Technology Application ,Jiujiang University ,Jiujiang Jiangxi 332005 ,China; 2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research ,East China Normal University ,Shanghai 200062 ,China; 3. Institute of Information Engineering ,Chinese Academy of Science ,Beijing 100080 ,China)

Abstract: Since the 21st century ,regulations of reservoir group of the Yangtze River upstream have some important impact on the process that the matter and energy exchange between Yangtze River and Poyang Lake. Autumn droughts in Poyang Lake drainage become more and more serious ,and the relationship between the Yangtze River and Poyang Lake has evolved faster. Mann-Kendall trend test ,R/S (Rescaled Range Analysis) analysis method ,the variation coefficient C_v and skewness coefficient C_s etc. are used to analyze the trend characteristics of water level change in Poyang Lake since 2000. The effects of reservoir group regulation in the upper reaches of the Yangtze River main stream and sand excavating in Poyang Lake on the water level change trend of Poyang Lake are quantitative analyzed. The results show that water level of Poyang Lake have decreased by step during 2000—2014 ,which fell to its lowest level in 2006—2014. It is 1.08 m lower than that before 2000. After 2000 ,the average water level in the whole year ,flood season and dry season of Poyang Lake has a decreasing trend ,and the average water level in October has a very significant decreasing. The variation trend of water level in main lake is inconsistent with water channel into Yangtze River in Poyang Lake in different seasons. The H value indicates that the decreasing of water level of Poyang Lake is more sustainable in winter. The impact of reservoir group regulation of the upper reaches of the Yangtze River main stream on the water level of Poyang Lake is different in spatial and temporal disparities. In impounding period ,the reservoir group regulation aggravates the decline extent of the water level of Poyang Lake ,whose impact on the central area of the lake is more than 4% . It is more obvious that the sand excavating activities influence on the water level of Poyang Lake from 2006 to 2014. Except October ,its influence is greater than that of the reservoir group regulation in the upper reaches of the Yangtze River main stream in other seasons. It is of great significance to control rationally reservoir groups in the upper reaches of the Yangtze River trunk stream and sand excavation activities in Poyang Lake area in protecting the ecological environment of the lake.

Key words: the water level change trend; regulation of reservoir group; sand excavating; the Poyang Lake; the Yangtze River

(责任编辑: 曾剑锋)