J. Lake Sci.(湖泊科学), 2017, **29**(4): 955-964
DOI 10. 18307/2017. 0419
© 2017 by *Journal of Lake Sciences*

地形变化对鄱阳湖枯水的影响*

姚　静[1], 李云良[1], 李梦凡[1], 张　奇[1,2**]
(1:中国科学院南京地理与湖泊研究所, 中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008)
(2:江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 南昌 330022)

摘　要: 基于2010年鄱阳湖最新地形, 构建精细的鄱阳湖二维水动力数学模型, 相同网格下构建1998年地形, 分别模拟不同地形条件下2006年枯水年水位、流量时空分布, 分析地形变化对水位、流量的影响, 阐释地形影响的时空差异. 结果表明: 相比1998年, 2010年地形由于北部入江通道的下切, 相同的2006年水文条件下, 水位普遍降低; 水位越低, 上下游水面坡降越大, 受地形影响越明显; 低水位最大降幅1~2 m, 而高水位最大不超过0.4 m, 分别对应湖口9 m以下、15 m以上水位; 地形对水位的影响程度都昌>星子>棠荫>康山; 都昌至湖口段水头差降低了2 m, 水面坡度变缓, 棠荫至都昌段水面坡度变陡, 康山至湖口水头差基本不变; 全年出湖总流量增加了6%; 地形变化影响最显著为河道区, 影响范围可波及大部分湖区, 局部地形的变化使得子湖水面积也存在一定差异. 本研究首次基于水动力模拟量化了鄱阳湖地形变化对水位的影响程度和范围, 结果可为水资源管理、江湖关系演变分析、湿地生态环境保护等提供科学参考.
关键词: 地形变化; 水动力模拟; 低水位; 鄱阳湖

The influence of bathymetry changes on low water level of Lake Poyang

YAO Jing[1], LI Yunliang[1], LI Mengfan[1] & ZHANG Qi[1,2**]
(1: *Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences*, *Nanjing Institute of Geography and Limnology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Nanjing* 210008, *P.R.China*)
(2: *Key Laboratory of Lake Poyang Wetland and Watershed Research*, *Ministry of Education*, *Jiangxi Normal University*, *Nanchang* 330022, *P.R.China*)

Abstract: A fine 2D hydrodynamic model of Lake Poyang was used to simulate the hydrological effect of the bathymetry changes between 1998 and 2010. Spatio temporal patterns of water levels and discharge in 2006 of two DEM were simulated to assess the bathymetry effect, considering 2006 as a typical dry year. Results showed that the north water way was deeper in 2010 than that in 1998, resulting in lower water levels. In low water level period, the water surface gradient was larger, and the effect of DEM changes was more significant than that in high level period.The low water levels decreased by 1−2 m corresponding to water level lower than 9 m at Hukou. The reductions of high water levels were lower than 0.4 m when water level at Hukou higher than 15 m. The influenced magnitude was largest at Duchang, followed by Xingzi, Tangyin and Kangshan.The water head from Duchang to Hukou decreased by 2 m in low level period. The water surface gradient decreased from Duchang to Xingzi, and increased from Tangyin to Duchang. There was no distinct gradient change from Kangshan to Hukou. The total discharge into the Yangtze River increased by 6%. The channel areas were most affected, however the influence of bathymetry changes spread across the most of the lake area. Water areas of some sub-lakes varied due to the local morphological changes. This study quantified magnitude and domain of the effect of bathymetry changes on Lake Poyang level from a hydrodynamic perspective. The outcomes may provide scientific support for water resource and ecological environment management, evolution and analysis of river-lake relationship.
Keywords: Bathymetry change; hydrodynamic simulation; low water level; Lake Poyang

---

* 国家重点基础研究发展计划(2012CB417003)、江西省重大生态安全问题监控协同创新中心项目(JXS-EW-00)和国家自然科学基金项目(41301023, 41371062)联合资助. 2016-09-07收稿; 2016-10-17收修改稿. 姚静(1980~), 女, 助理研究员; E-mail: jyao@niglas.ac.cn.
** 通信作者; E-mail: qzhang@niglas.ac.cn.

湖泊地形数据作为水动力模型最重要的基础输入之一,是决定水动力模拟结果的重要因素[1-3]. 湖泊地形的变化直接引起湖泊水位、流量、容积等水文、水动力条件的变化[4],进而影响湖泊水环境、湿地生态、洪旱灾害及航运安全等[5-7]. 模拟湖泊地形变化带来的水文水动力影响,对于湖区水资源管理及调度、生态环境保护、航运安全等方面具有重要的指导意义.

鄱阳湖作为我国最大的通江湖泊,近五十年间,在自然演化和人类活动共同作用下,湖盆地形发生了巨大的变化. 从 1960s－1998 年,由于大规模的围垦,鄱阳湖湖区面积减少了 850 km^2以上[8],使得湖泊容积减少了 15%[9]. 1998 年特大洪水之后,在鄱阳湖区实行部分圩堤的退垦还湖,至 2009 年,湖区面积基本恢复到 1954 年水平[8-9]. 2000 年以后,鄱阳湖采砂活动频繁. 2001－2007 年,采砂主要集中在松门山以北的通江河道,2007 年以后扩张到鄱阳湖中部,至 2010 年,平均挖深 4.95 m,采砂量累计可达 1.29×10^9 m^3[10]. 1998－2010 年间,入江通道底高程平均下降速率高达 30.75 cm/a[11].

近十多年来,鄱阳湖干旱事件频发,相关学者从降雨蒸发、江湖关系、三峡影响等多方面研究干旱原因[12-16],但从地形变化角度探寻低水位原因的并不多. 如 Lai 等[17]结合水文、遥感数据,定量分析河道采砂活动对鄱阳湖泄流能力的影响,结果表明大规模的采砂导致枯季泄流能力增大了 1.5~2.0 倍,并进一步量化了由此引起的水位降低值. 刘小东等[18]对比了 1998、2011 年入江通道断面形态,结合水文数据,给出了相同湖口枯水期水位、流量条件下水面线的变化值. 这些研究对地形变化的水文影响给出了一定的阐释,但地形变化对水位、流量在时间、空间上的影响差异涉及较少. 基于此,本文构建了精细的鄱阳湖水动力模型,基于 1998、2010 年两种地形条件,模拟相同的枯水年水情在不同地形条件下的水位、流量变化过程,对比地形变化对水位、流量的影响程度和范围,探寻地形影响的时空差异. 本研究从基于物理机制的水动力模拟角度入手,研究近十多年鄱阳湖地形变化的影响,结果可为水资源管理、江湖关系演变分析、湿地及生态环境保护等提供理论指导,也可为长周期的水动力模拟可能带来的误差提供理论依据.

1 研究区概况

鄱阳湖(28°24′~29°46′N,115°49′~116°46′E)作为我国最大的淡水湖泊,位于长江中游,承赣江、抚河、信江、饶河、修水“五河”来水,经湖口汇入长江,属季节性、吞吐型湖泊(图 1). 鄱阳湖地形变化极具空间异质性特点,南北最大长度为 173 km,东西平均宽 16.9 km;湖盆由东南向西北倾斜,南北高程落差达 10 m 以上,最低处屏风寺附近,高程为-20.3 m,滩地高程多在 10~16 m 之间[18].

1953－2010 年流域“五河”平均入湖流量在枯季 1.4×10^3 m^3/s 和洪季 12.0×10^3 m^3/s 范围内波动,1960－2010 年长江汉口平均流量变化范围为 8.1×10^3~44.4×10^3 m^3/s[14];且流域洪季为 4－6 月,而长江为 7－9 月[19],存在错峰现象. 受“五河”和长江来水的季节性变化影响,鄱阳湖水位变幅巨大(可达 10 m 以上),高水湖相、低水河相. 丰水期水面积可达 3000 km^2以上,而枯水期不足 1000 km^2[20],呈“洪水一片、枯水一线”的独特景观. 湖流类型以重力型吞吐流为主. 流域多年平均年入湖沙量 2104.2×10^4 t,出湖入(长)江泥沙量为 1016.5×10^4 t[21].

2 研究方法

2.1 水动力模型构建

鄱阳湖属宽浅型湖泊,水体垂向混合状况较好[22],适用于二维水动力数学模型. 鄱阳湖岸线曲折复杂,地形空间变异较大,针对以上特点,选择基于无结构网格的 MIKE 21 模型. 无结构网格可以很好地拟合岸线和地形,其灵活的加密技术,可对曲折河道进行局部加密,准确刻画滩槽相间的地形;此外,模型中的干湿判别方法,通过设置最小干、湿水深,判断网格是否参与计算,可准确模拟鄱阳湖洲滩湿地频繁的露滩、淹没过程.

模型计算范围及岸线边界根据已有的堤坝及湖泊历史洪水淹没范围确定(图 1,基面为 85 国家高程). 湖泊地形基于最新的 2010 年 DEM,采用三角形网格,网格数 347709,节点数 176465. 流域“五河”的 9 个主要入湖口流量过程作为水动力模型上游开边界条件,鄱阳湖与长江的水量交换通道——湖口水位过程线作为下游开边界条件(图 1). 其中,入湖流量为流域站点流量与站点至入湖口的平原区流量的总和,其中,平

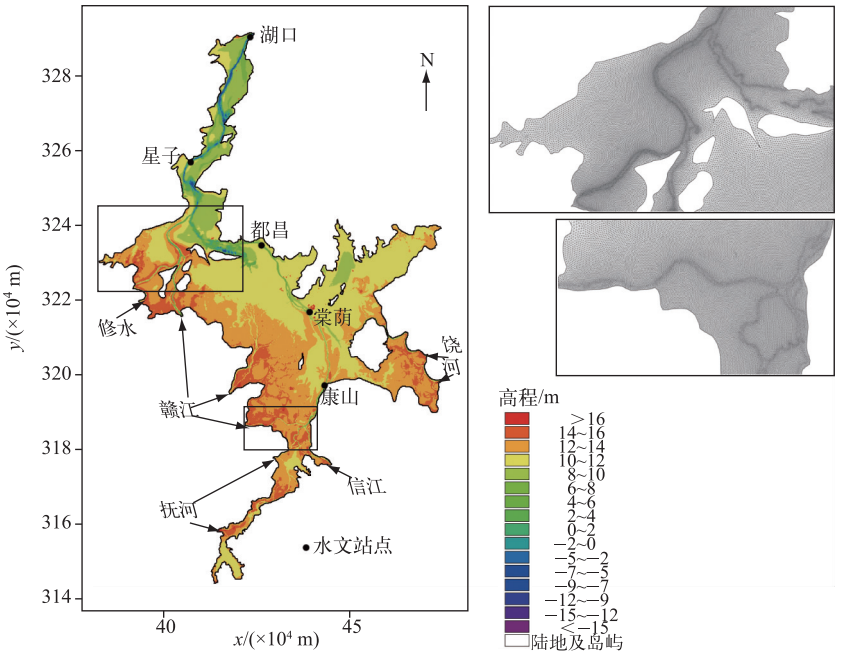


图 1 鄱阳湖地形、计算网格及水文站点分布(基于 2010 年 DEM)

Fig.1 Bathymetry, unstructured meshes for Lake Poyang (2010 DEM) and locations of hydrological gauging stations in the lake

原区流量根据临近入湖河流的流量权重,分配至各入湖口,具体计算方法详见文献[13]. 时间步长为 1.5 s,初始水位场采用湖区 5 个站点的(湖口、星子、都昌、棠荫和康山)实测水位空间插值而得. 糙率根据地形特点采用空间变化的糙率场,由河道区的 0.018 过渡至洲滩植被区的 0.028. 水平涡粘系数采用 Smagorinsky 公式计算[23].

2.2 1998 年地形

将 1998 年 DEM 导入网格文件进行差值,得到相同网格对应的 1998 年地形(图 2,基面为 85 国家高程). 1998 和 2010 年地形高程差别主要在湖区北部入江通道段. 2010 年地形相比 1998 年,入江通道段下切严重,其余区域差异不甚明显,与以往的研究结论[11]一致. 两年地形 DEM 的空间详细对比及分析已有专门的研究[11],因此本文不再赘述,重点关注地形变化的影响. 基于 1998 年 DEM 的模型,除地形差异以外,其余模型设置及计算条件与 2010 年的完全一致.

2.3 枯水年选择

1998－2010 年地形变化的主要原因是入江通道的持续采砂[11,17],而河道采砂主要影响枯水期水位[17-18]. 因此本文从近十多年中挑选典型枯水年. 以往的研究显示[14,16,24],从水位低枯程度及枯水持续时间来看,2006 年均为典型的枯水年. 因此本文基于 2006 年“五河”来水和长江水位情况,分别计算不同地形条件下湖泊的水位、流量变化过程及空间分布,对比不同地形的水位、流量响应差异,研究地形变化的时空影响.

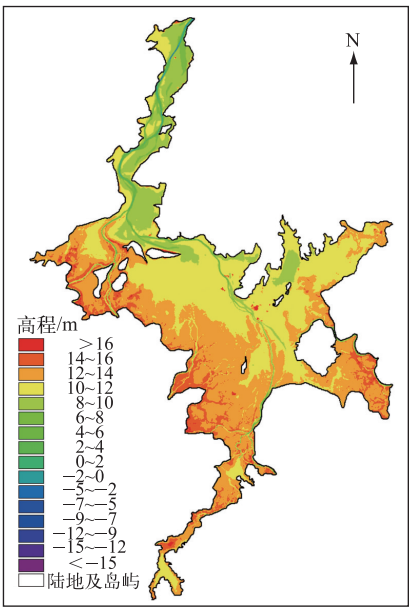


图 2 基于 1998 年 DEM 生成的地形

Fig.2 Bathymetry of Lake Poyang(1998 DEM)

表 1 2010 年模型验证误差

Tab.1 Model validation errors in 2010

站点	相对误差/%	确定性系数	Nash-Sutcliffe 效率系数
星子	0.2	0.998	0.998
都昌	1.9	0.993	0.987
棠荫	0.4	0.985	0.984
康山	1.5	0.981	0.965
湖口*	−5.2	0.923	0.887

* 湖口为流量验证,其余 4 个站点为水位验证.

3 结果

3.1 模型验证

模型采用 2010 年最新地形,故对 2010 年的水位、流量过程进行验证. 从星子、都昌、棠荫、康山 4 个站点的水位验证曲线来看(图 3),各站的水位拟合较好,除低水位时误差稍大外,其余时刻基本吻合. 湖口流量验证(图 4)效果次于水位,但也能基本反映流量变化过程. 表 1 给出了水位、流量验证误差评估,水位验证方面,各站的相对误差均不超过±2%,确定性系数和 Nash-Sutcliffe 效率系数均大于 0.96,湖口流量验证相对水位验证,效果稍逊,但整体来看,模型精度较高.

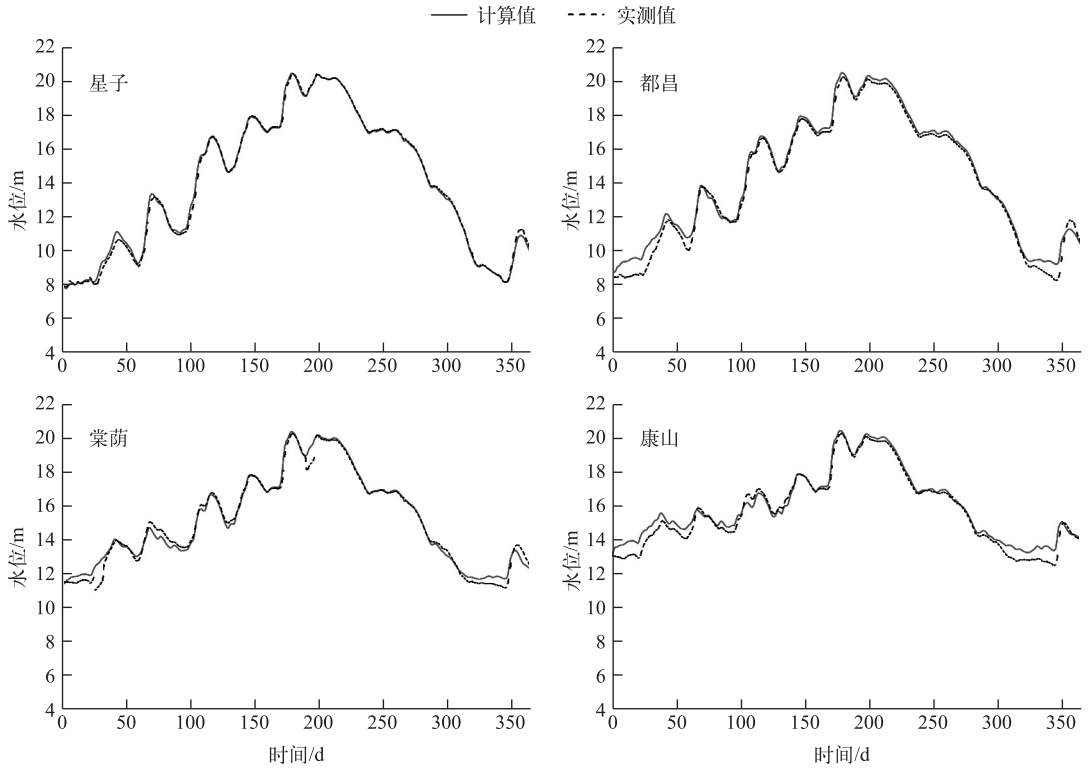


图 3 2010 年鄱阳湖 4 个站点的水位验证

Fig.3 Validation of water levels at four hydrological gauging stations in Lake Poyang in 2010

3.2 地形变化对水位的影响

从 4 个站点的水位变化过程来看(图 5),与 1998 年地形相比,2010 年地形条件下,各站点、各阶段水位存在不同程度的降低. 星子、都昌在低水位时期最为明显,而高水位时变化微弱,棠荫、康山水位降低值较小,且在全年变化较为均一. 从各站点、各阶段的平均水位降低值来看(表 2),受地形下切影响,低水期水位最大可降低 1~2 m,涨、退水过程水位降低值也均在 0.6 m 以上,而高水期水位平均降幅最大不超过 0.4 m. 涨水过程变慢,退水过程变快. 各站点中,都昌受地形变化影响最大,低水位平均降幅可达 2.03 m,高水位 0.36 m,均超过同时期其他站点. 其次为星子,水位平均降幅为 0.23~1.37 m. 这两处低水位降幅均为高水位的 5 倍以上. 至棠荫,水位降幅明显降低,全年水位降幅约为 0.33 m,康山为 0.1~0.2 m,与前者相比,这 2 个

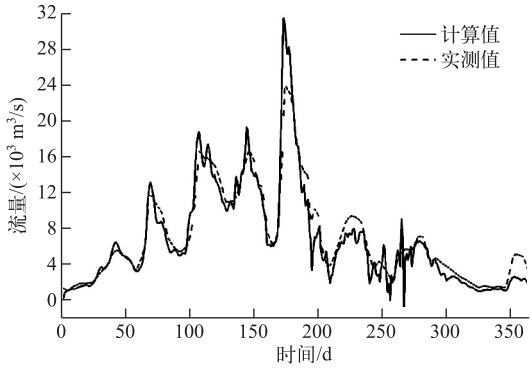


图 4 2010 年湖口流量验证

Fig.4 Validation of discharge at Hukou hydrological gauging station in 2010

站点在不同时期的水位降幅差异并不显著.

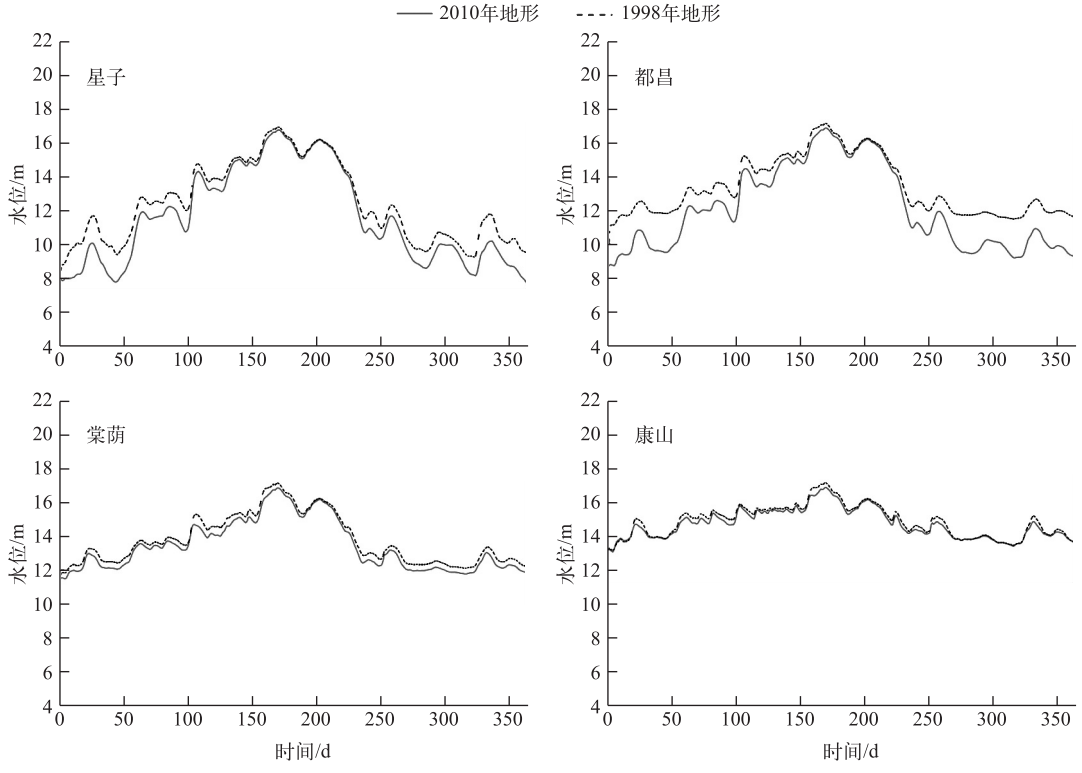


图 5 不同地形条件下 2006 年各站点水位变化过程

Fig.5 Water levels of four hydrological gauging stations under different DEMs in 2006

根据计算结果,进一步建立湖口水位与地形变化影响量的对应关系(表 3). 由于星子、都昌 2 个站点受地形影响比较明显,因此仅给出这两站在不同湖口水位条件下的水位降低值. 湖口水位越低,受地形影响越显著,但并非线性关系(表 3). 相同湖口水位条件下,都昌受地形变化影响明显大于星子. 湖口水位低于 9 m 时,星子受地形变化影响,水位降低值可达 1 m 以上;而都昌水位在湖口水位低于 11 m 时即可降低 1 m 以上,湖水水位 8 m 时,都昌水位降幅甚至达到了 2.26 m. 湖口 14 m 以上的高水位时期,星子、都昌水位降幅分

别降至 0.2、0.3 m 左右.

表 2 与 1998 年相比 2010 年地形条件下各站点平均水位降低值(m)

Tab.2 Water level reductions due to the bathymetry changes between 1998 and 2010

站点	涨水期(3－5 月)	高水期(6－8 月)	退水期(9－10 月)	低水期(11－2 月)
星子	0.67	0.23	0.78	1.37
都昌	0.88	0.36	1.65	2.03
棠荫	0.34	0.26	0.36	0.35
康山	0.21	0.20	0.11	0.09

表 3 不同湖口水位条件下地形变化引起的水位降低值

Tab.3 Water level reductions due to the bathymetry changes at different Hukou water levels

	湖口水位/m								
	8	9	10	11	12	13	14	15	16
星子水位降低值	1.38	1.19	0.90	0.76	0.56	0.40	0.24	0.22	0.15
都昌水位降低值	2.26	1.83	1.39	1.01	0.83	0.63	0.41	0.35	0.23

3.3 地形变化对水面线的影响

为进一步分析空间上的水位变化梯度,给出 1998、2010 年两种地形条件下康山至湖口段高水期(7 月 20 日)、低水期(12 月 15 日)和涨水期(4 月 15 日)、退水期(9 月 25 日)水面线(图 6),该曲线斜率即为水面坡降. 从各时段本身的水面坡降来看,高水期上下游水面基本持平,低水期水面坡降最为明显,涨水、退水期居中. 从各时段水位变化来看,低水期水面线变化最大,其次为退水期、涨水期,高水期变化微弱. 说明上下游水面坡降越大,受地形影响越明显. 从空间变化来看,水位变化最大处为都昌(2.2 m),以都昌为中心,星子—都昌—棠荫段为显著影响区域. 以低水期为例,1998－2010 年地形变化使得星子—都昌段水面平均降低1.6 m,都昌—棠荫段 1.2 m,湖口—星子段 0.8 m,棠荫—康山段不足 0.3 m. 而退水、涨水期,空间各区段的水位变化差异明显减弱,表明上下游水面坡降越大,由地形引起的空间水位变化差异越显著. 相比 1998 年,2010 年地形条件下,低水期都昌至湖口水头差由 3.1 m 降至 1.1 m,而康山至湖口水头差基本不变. 换言之,都昌至湖口段水面坡度变缓,棠荫至都昌段变陡,而棠荫至康山段微弱变陡. 这与两年的地形变化相吻合,即北部入江通道段地形变化最大,河道地形的降低,改变了湖泊地形坡降,进而影响到水位及水面线.

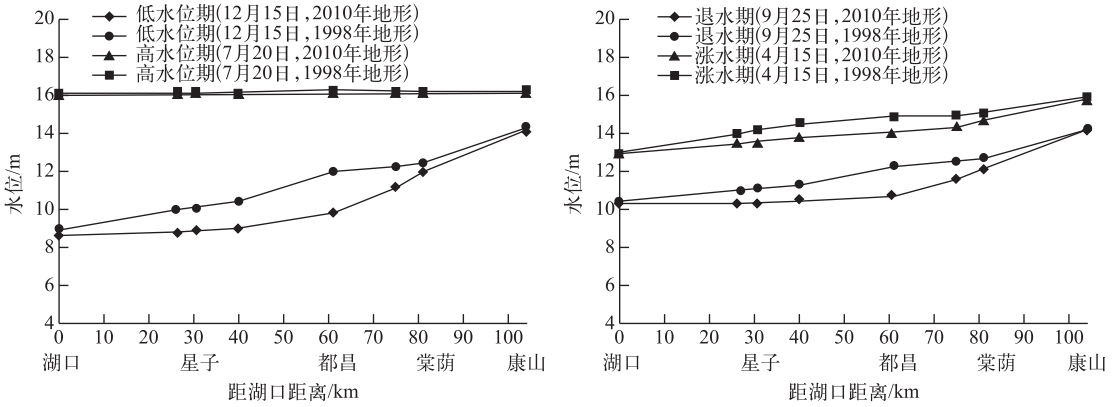


图 6 不同地形条件下 2006 年水面线

Fig.6 Water surface profiles in 2006 under different DEMs

3.4 地形变化对流量的影响

由于湖底高程的降低改变了地形坡度,湖口出口流量也发生了变化. 从湖口流量过程来看(图 7),与 1998 年地形相比,2010 年地形条件下出口流量普遍增大,最明显之处为高水期及涨、退水期流量峰值处,最大增量可达 2192 m^3/s. 全年出口总流量合计增加了 95.2×10^8 m^3,约占全年总流量的 6%. 该流量增加值与水位减少值相对应,表明地形的下切引起了水位降低,加快了湖口出流.

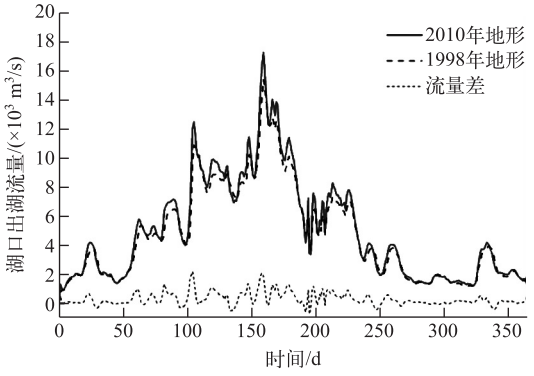


图 7 不同地形条件下 2006 年湖口出湖流量过程及差异

Fig.7 Discharge at Hukou hydrological gauging station in 2006 under different DEMs

3.5 地形变化对水位空间分布的影响

前文的地形变化影响分析主要基于河道站点,为研究地形变化对水位的空间影响,给出两种地形条件下与水面线同时刻的涨水期(4 月 15 日)、高水期(7 月 20 日)、退水期(9 月 25 日)和低水期(12 月 15 日)水位空间分布(图 8). 涨水期,湖区中部、东部及北部 13~16 m 水位分布范围发生明显变化;与 1998 年地形相比,2010 年地形条件下,13~15 m 水位分布向南部上游区偏移,而 15~16 m 水位分布范围大为减少;受影响湖区面积可占全湖总面积的 2/3. 高水期,只在北部入江通道处 15~16 m 水位分布有小范围的差异. 退水期,相比 1998 年地形,2010 年地形条件下棠荫以北的河道区 10~11 m 的水位范围扩大,11~12 m 的范围减小. 低水期,主要影响范围同样是棠荫以北的河道区,其中 8~10 m 的水位范围扩大,10~12 m 的水位范围减小. 同时发现,退水、低水期,局部水体与主河道脱离之后形成的碟型湖或子湖水面面积也存在一定差异,这主要是局部地形的冲淤变化引起的. 以赣江中支、南支入湖三角洲带为例,退水、低水期水位 16 m 以上的范围在 2010 年地形条件下比在 1998 年更大. 对比图 1 和图 2 可以发现,此处 2010 年的滩地范围更大,呈封闭状,因此在退水以后,洼地仍存留了一定的水体. 陈龙泉等[25]通过遥感也发现,赣江南支、抚河和信江干流三河入湖区入湖区域在 1989－2006 年淤积了约 28 km^2,与本文结论相印证.

4 讨论

“五河”和长江来流都不变的情况,湖盆地形的改变,影响了湖泊水位,最大影响区为入江通道. 湖口作为入江通道最北端的出口,必然也受其影响,水位降低. 但从另一方面来讲,湖口紧邻长江,受长江影响更大,湖口水位与长江干流流量有显著相关关系[26]. 在长江来流不变的情况下,尽管湖口水位可能受地形变化影响有所降低,但其量值应该较小. 本文以湖口水位为边界,假设长江、流域来流不变的情况下,湖口水位不变,未考虑由湖区地形变化引起的水位降低值,可能使得计算的湖区内水位降低值略小,但这不影响水位时空分布趋势. 在模型网格构建及地形生成方面,相同的局部加密网格对于不同年份的地形可能不完全适用,也带来一定的误差,但从地形变化来看,2010 年河道变得更宽、深,因此基于该年份加密的河道网格基本能包含 1998 年的河道范围,这样尽可能减小了模型误差. 本文虽然只模拟了特定年的水位影响,但是所选的 2006 年在近十多年中,低水位最低、持续时间最长,具有典型性. 从年内水位变化来看,水位越低,受地形变化越明显,反之,水位越高,地形影响越弱. 这一结论同样适用于其他不同水文年.

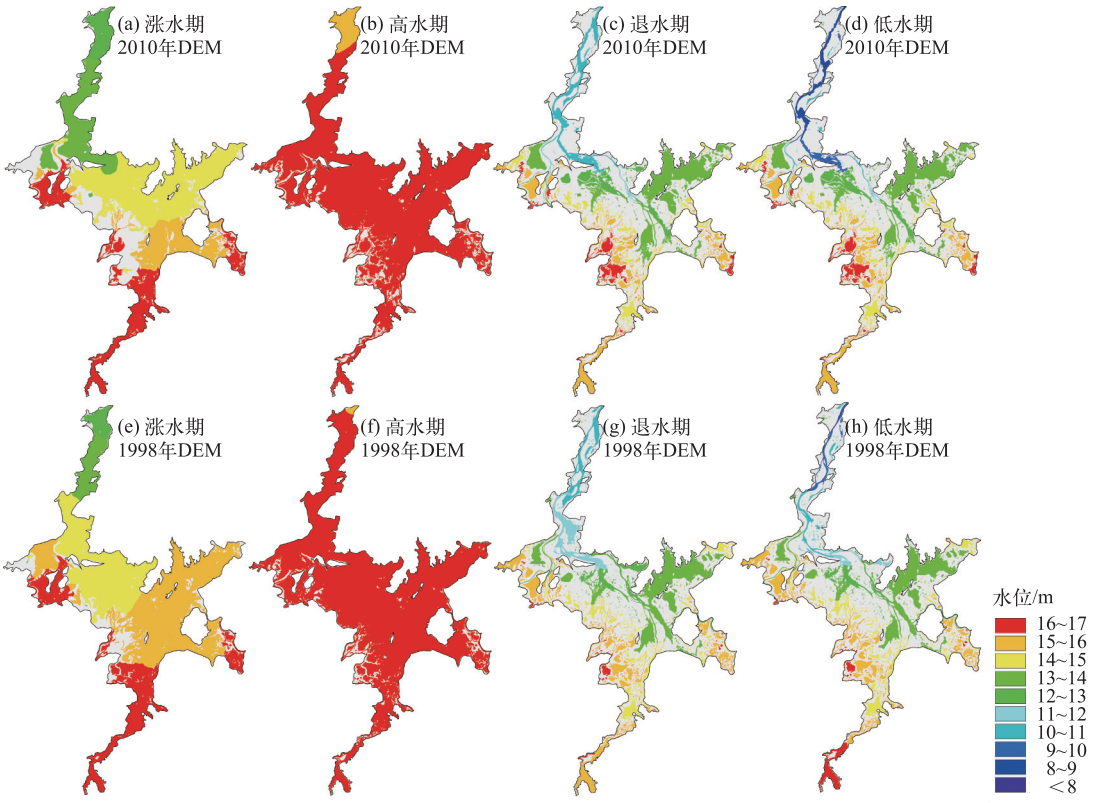


图 8 不同地形条件下 2006 年水位空间分布

Fig.8 Spatial distributions of water levels in 2006 under different DEMs

Lai 等[17]定量评估了鄱阳湖地形变化引起的湖泊出流能力和水位变化,认为地形的加深主要影响枯水位,且水位越低,受地形影响越大,本文结论与之一致. Lai 等[17]结果表明,2008－2012 年 10 至次年 3 月与 1955－2000 年同期相比,地形变化引起的泄流能力的增强使得星子平均水位降低了 0.66 m. 根据本文计算结果,1998－2010 年地形变化使得 2006 年 10 至次年 3 月水位平均降低 1.1 m,比前者更大. 主要因为,2006 年枯水程度比 2008－2012 年更为严重,因此受地形影响更大,同时两种不同的方法、不同的年代比较也存在一定的误差,但基本量级及趋势较为合理.

本文利用水动力模型的优势,捕捉了水位的空间分布及受地形影响范围,可弥补统计分析等方法无法给出水位空间变化的不足. 从站点水位及水面线来看,受地形影响的区域主要分布在北部入江河道,且主要影响枯水期. 但从水位的空间分布及流量过程来看,涨水时,水位影响量值较小,但影响范围较大,引起的流量变化也较大,而低水时,水位影响量值较大,但影响范围较小,主要集中在河道,流量变化同样较小. 这与鄱阳湖独有的"洪水一片、枯水一线"的水文、地貌特点密切相关. 由于低水期鄱阳湖大面积露滩,水体主要集中在河道中,水体本身面积小、流量小,河道水位虽被拉低,但许多局部水体与河道脱离,不受其影响,整个湖区的受影响面积及影响流量并不大;而随着水位上涨,河道、滩地水体连通,湖区水体淹没范围增大,河道水位变化即使不大,仍可牵动湖区大范围水面变化,而此时流量基数较大,相应的流量变化值也较大.

近年来鄱阳湖低水位事件多为季节性的,尤其在秋季频发,本文所选的 2006 年即为典型的秋季低水. 以星子站为例,2006 年秋季 8－10 月实测平均水位与多年平均相比降低了 4.58 m. 根据本文计算,该时期地形引起的平均水位降幅为 0.66 m,地形变化对 2006 年秋季低水的贡献约占 14.4%. 说明地形变化对近年来的秋季低水现象也有一定贡献,但并非主因. 以往研究认为长江来水减少是近年来鄱阳湖秋季干旱的主要

原因[13,15-16],本文结论与之并不矛盾.

5 结论

本文构建了精细的鄱阳湖二维水动力数学模型,经过验证,模型精度较高. 基于该模型分别模拟了1998、2010年地形条件下,2006枯水年的水位、流量时空分布,阐明了地形变化影响的时空差异. 主要结论如下:

1)相比1998年,2010年地形由于北部入江通道的下切,水位普遍降低;水位越低,上下游水面坡降越大,受地形影响越明显;湖口低于9 m的低水位时,湖区内水位受地形影响降幅最大,为1~2 m,湖口15 m以上的高水位时,水位降幅最大不超过0.4 m;都昌受地形影响最大,枯季可达2 m以上,其次为星子1 m以上、棠荫全年水位降幅约为0.33 m,康山为0.1~0.2 m.

2)都昌至湖口段水头差降低了2 m,水面坡度变缓,棠荫至都昌段水面坡度变陡,康山至湖口水面坡度基本不变.

3)湖口出口流量普遍增大,最明显之处为高水期及涨、退水期流量洪峰时期,全年出湖总流量增加了6%.

4)河道区水位降幅最大、受地形变化影响最显著,但影响范围可波及至大部分湖区,局部洲滩地形的变化使得某些子湖脱离主湖区后也存在一定水面积差异.

6 参考文献

[1] Baugh CA, Bates PD, Schumann G *et al*. SRTM vegetation removal and hydrodynamic modeling accuracy. *Water Resources Research*, 2013, **49**(9): 5276-5289.

[2] Falc OAP, Mazzolari A, Gon Alves AB *et al*. Influence of elevation modelling on hydrodynamic simulations of a tidally-dominated estuary. *Journal of Hydrology*, 2013, **497**: 152-164.

[3] Cea L, French JR. Bathymetric error estimation for the calibration and validation of estuarine hydrodynamic models. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, **100**(1): 124-132.

[4] Leon JX, Cohen TJ. An improved bathymetric model for the modern and Palaeo Lake Eyre. *Geomorphology*, 2012, **173/174**: 69-79.

[5] Sherwood CR, Jay DA, Harvey RB *et al*. Historical changes in the Columbia River Estuary. *Progress in Oceanography*, 1990, **25**(1/2/3/4): 299-352.

[6] Xu Qiangyi, Yu Peng, Wu Yufeng. Discussion on fluvial process and control of the Yihe River. *Hydrology*, 2009, **29**(1): 73-75. [徐强以, 于鹏, 吴玉峰. 沂河河道演变与治理研究. 水文, 2009, **29**(1): 73-75.]

[7] Feng L, Hu C, Chen X *et al*. MODIS observations of the bottom topography and its inter-annual variability of Lake Poyang. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**(10): 2729-2741.

[8] Ye Xuchun, Li Xianghu, Zhang Qi. Temporal variation of backflow frequency from the Yangtze River to Lake Poyang and its influencing factors. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2012, (11): 69-75. [叶许春, 李相虎, 张奇. 长江倒灌鄱阳湖的时序变化特征及其影响因素. 西南大学学报(自然科学版), 2012,(11): 69-75.]

[9] Min Qian. Study on the relationship between shape, water regime and innings of Lake Poyang. *Advances in Water Science*, 2000, **11**(1): 76-81. [闵骞. 近50年鄱阳湖形态和水情的变化及其与围垦的关系. 水科学进展, 2000, **11**(1): 76-81.]

[10] Jiang Feng, Qi Shuhua, Liao Fuqiang *et al*. Hydrological and sediment effects from sand mining in Lake Poyang during 2001-2010. *Acta Geographica Sinica*, 2015, **70**(5): 837-845. [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. 地理学报, 2015, **70**(5): 837-845.]

[11] Wu Guiping, Liu Yuanbo, Fan Xingwang. Bottom topography change patterns of the Lake Poyang and their influence mechanisms in recent 30 years. *J Lake Sci*, 2015, **27**(6): 1168-1176. DOI:10.18307/2015.0623. [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. 湖泊科学, 2015, **27**(6): 1168-1176.]

[12] Liu Y, Wu G, Zhao X. Recent declines in China's largest freshwater lake: Trend or regime shift? *Environmental Research Letters*, 2013, **8**: 14010.

[13] Zhang Q, Ye X, Werner AD *et al*. An investigation of enhanced recessions in Lake Poyang: Comparison of Yangtze River and local catchment impacts. *Journal of Hydrology*, 2014, **517**: 425-434.

[14] Yao J, Zhang Q, Li Y *et al*. Hydrological evidence and causes of seasonal low water levels in a large river-lake system: Lake Poyang, China. *Hydrology Research*, 2016. DOI:10.2166/nh.2016.044.

[15] Li Shiqin, Min Qian, Tan Guoliang *et al*. Cause analysis of low water characteristics of Lake Poyang in 2006. *Journal of China Hydrology*, 2008,(6): 73-76.[李世勤, 闵骞, 谭国良等. 鄱阳湖 2006 年枯水特征及其成因研究. 水文, 2008,(6): 73-76.]

[16] Xu Junjie, He Qing, Liu Hong *et al*. Preliminary analysis of characteristics of the exceptional low discharge and its cause over the Yangtze River,2006. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008,(5): 716-722.[徐俊杰, 何青, 刘红等. 2006 年长江特枯径流特征及其原因初探. 长江流域资源与环境, 2008,(5): 716-722.]

[17] Lai X, Shankman D, Huber C *et al*. Sand mining and increasing Lake Poyang's discharge ability: Areassessment of causes for lake decline in China. *Journal of Hydrology*, 2014, **519**: 1698-1706.

[18] Liu Xiaodong, Ren Bingfang. Analysis on variation characteristics and genesis of lower water level of Lake Poyang. *Yangtze River*, 2014,(4): 12-16.[刘小东, 任兵芳. 鄱阳湖低枯水位变化特征与成因探讨. 人民长江, 2014,(4): 12-16.]

[19] Guo H, Hu Q, Zhang Q *et al*. Effects of the Three Gorges Dam on Yangtze River flow and river interaction with Lake Poyang, China: 2003-2008. *Journal of Hydrology*, 2012, **416/417**: 19-27.

[20] Feng L, Hu C, Chen X *et al*. Assessment of inundation changes of Lake Poyang using MODIS observations between 2000 and 2010. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **121**: 80-92.

[21] Hu Jiuwei, Wu Dunyin, Li Rongfang. Analysis of fluvial process of Hukou reach in Lake Poyang basin. *Hydrology*, 2011, **31**(2): 46-49.[胡久伟, 吴敦银, 李荣昉. 鄱阳湖湖口河段近期演变规律及趋势分析. 水文, 2011, **31**(2): 46-49.]

[22] Li Y, Yao J, Zhang L. Investigation into mixing in the shallow floodplain Lake Poyang (China) using hydrological, thermal and isotopic evidence. *Water Science and Technology*, 2016. DOI: 10.2166/wst.2016.444.

[23] Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations I: The basic experiment. *Monthly Weather Review*, 1963, **91**(3): 99-164.

[24] Min Qian, Zhan Lasheng. Characteristics of low-water level changes in Lake Poyang during 1952-2011. *J Lake Sci*, 2012, **24**(5): 675-678. DOI:10.18307/2012.0505.[闵骞, 占腊生. 1952－2011 年鄱阳湖枯水变化分析. 湖泊科学, 2012, **24**(5): 675-678.]

[25] Chen Longquan, Kuang Runyuan, Tang Chongjun. Remote sensing investigation on scouring and silting changes on beach of Lake Poyang. *Soil and Water Conservation in China*, 2010, (4): 65-67.[陈龙泉, 况润元, 汤崇军. 鄱阳湖滩地冲淤变化的遥感调查研究. 中国水土保持, 2010, (4): 65-67.]

[26] Zhang Z, Chen X, Xu C *et al*. Examining the influence of river-lake interaction on the drought and water resources in the Lake Poyang basin. *Journal of Hydrology*, 2015, **522**: 510-521.