

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2019.02.001

长江鄱阳湖问题的原因及湖口建闸的影响

周建军, 张曼

(清华大学水利系, 北京 100084)

摘要:根据实际资料分析了近年鄱阳湖环境面貌剧烈变化的原因和湖口建闸的影响,结果表明:当前鄱阳湖汛后提前干枯主要是长江上游水库群改变了河川径流节律,减少汛后水量,使河湖提前入枯和河道大幅冲刷,全线汛后水位平均降低2~4 m(湖口2.76 m),径流减少是主要原因;鄱阳湖大量采砂已经破坏了入江水道的自然水力顶托机制,使枯季(2—3月)湖区(都昌)平均水位降低2 m,这是鄱阳湖连续出现极低水位的原因;鄱阳湖流域水库拦截和长江汛期洪水减少、湖水位降低和持水量减少等,也使近年8—10月湖口入湖和出湖流量大幅度减少,加剧了湖区汛后水位降低,特别是鄱阳湖七河尾闾干旱。上述变化已经对湖区生态环境和周边生产生活影响很大,但鄱阳湖基本自然特征没有改变。湖口建闸是可控制湖区汛后水位消落和抬高枯水位,但是建闸隔断江湖,对洄游鱼类生存、鸟类生境和湖区环境影响很大;长江受三峡大坝隔断后,再在湖口建闸将严重肢解流域自然生态系统,使长江生境多样性彻底丧失;而且建闸还将进一步加剧长江下游水位降低,改变河湖面貌,降低环境容量和河口抵御咸潮能力。解决鄱阳湖问题应该在长江流域层面统筹寻找对策,建议严格坚持三峡工程规划确定的主要防大洪水原则,适当调整流域总体规划,提高湖区流域水利工程调节能力和增加汛后补水,修复鄱阳湖入江水道,加强鄱阳湖及周边适应能力建设等。

关键词:长江大保护;鄱阳湖;建闸;水库调蓄;三峡大坝

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2019)02-0001-12

Eco-problem of Poyang Lake in Yangtze River and effect of sluice gate construction at lake's outlet // ZHOU Jianjun, ZHANG Man (Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: According to in-situ data analysis, the causes of eco-problem in hydro-environmental variation in recent year in Poyang Lake in the lower Yangtze River, and the effect of awidely concerned sluice gate at its outlet are discussed. It is revealed that 1) the ahead of time dry-up after flood seasons is mainly due to the reservoirs impoundment in the upper reach of the Yangtze River, that changed the runoff regime and caused an ahead-seasonal drying in water level for 2-4 m all the way along the Yangtze; 2) massive sand-mining in the outlet channel of Poyang Lake has destructed the natural hydraulic mechanism that elevated the pool in dry seasons, causing a 2 m lowering from February to march at Duchang; 3) retention of reservoirs in the Poyang basin and the general lowered summer pool in Poyang lake also diminish the after-flood discharge of the lake (August to October), exacerbating the extreme drying especially for the lake's delta regions after season. A sluice gate at the lake's outlet can hold-up and even elevate the lake's pool, but it can also obstruct the migration of fishes for about half-year and impact the habitat and food sources for migratory birds and the water quality of the lake as it becomes an artificial impoundment from riverine regime by the gate in dry seasons. It is also worth worrying about more possible problems for the Yangtze ecosystem as a whole in habitat diversity from the gates, as dams will be thoroughly partitioned in addition to the Three Gorges dam, with more negative effect on fluvial morphology, water level in dry seasons, tidal limits and salt water intrusion. Finally, five countermeasures for comprehensive restoration of both the Yangtze and the Poyang Lake were proposed.

Key words: Yangtze River protection; Poyang Lake; sluice gate construction; reservoir regulation; Three Gorges dam

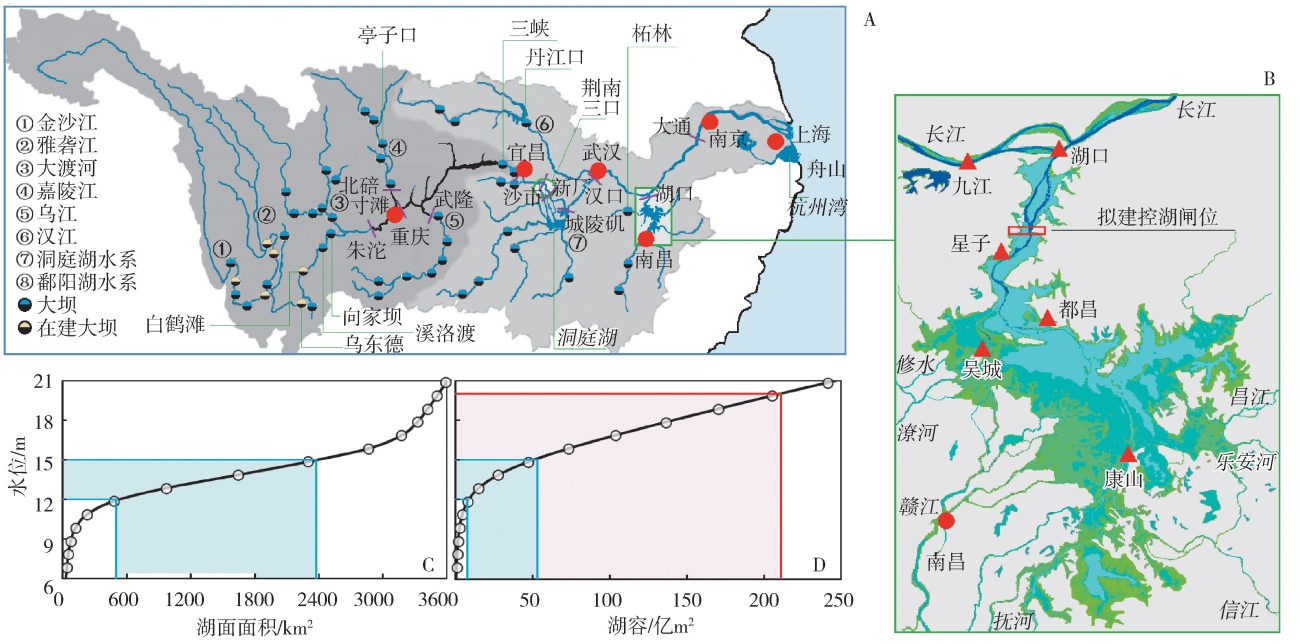
基金项目:国家重点研发计划(2016YFE0133700);国家自然科学基金(51509137)

作者简介:周建军(1960—),教授,博士,主要研究水利工程与河流保护。E-mail:zhoujj@tsinghua.edu.cn.

过去 10~20 年,受大规模水利水电开发及自然变化影响,长江河川径流水情、物质通量及热循环等都发生了剧烈变化。一些变化对江湖生态环境产生了本质影响,一些通量变化已与人为污染作用相当,一些大尺度变化甚至产生了超过当前认识水平的影响,这些变化深刻改变着长江面貌^[1-3]。鄱阳湖和洞庭湖就是受到严重影响区域。

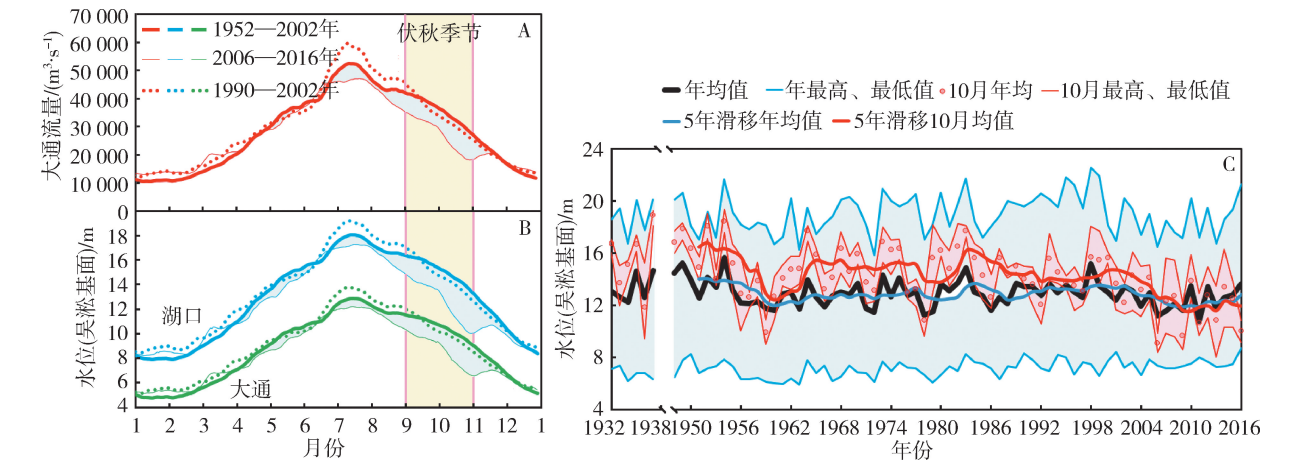
鄱阳湖位于长江下游最大支流赣江尾间,是自然塌陷盆地受长江水位上升和摆动于近代形成的中国最大淡水湖泊(图 1)。集赣江、抚河、信江、饶、修五大流域,含赣江、抚河、信江、昌江、安流江、修水和潦河等七大主要支流,鄱阳湖流域面积 16.22 万 km²,通江水体面积 3 706 km²、容积 302 亿 m³,年均入江径流 1 480 亿 m³,占长江 15%,是长江最大径流来源之一。鄱阳湖面貌主要受长江水位控制,汛期是湖、枯

期是河,年内变化剧烈,水文节律与长江异相,吞吐能力很大,是长江洪水和水资源的重要调蓄空间(图 1C 和 1D)。独特宽浅、时空变异很大的湖泊形态和地理位置决定了鄱阳湖在长江甚至全球生态系统和生物多样性等方面的重要地位和独立价值^[4]。长期以来,鄱阳湖周边长江水文条件相对稳定(图 2C)。但是,三峡水库蓄水以来,由于长江中下游径流节律改变,枯水期提前,使湖区提前干涸,湖面缩减,生态、环境、生产和生活条件都受到很大影响^[1]。为此,有关地区和部门提出要在湖口建闸以缓解剧烈变化影响,保证鄱阳湖区生产生活条件,改善湖区及周边环境。然而,鄱阳湖与长江整体关联,在三峡大坝截断长江后,如果在湖口及洞庭湖城陵矶建闸,将使中下游主要通江湖泊更大程度与长江隔断,河湖属性和面貌被人为操控,在污染越来越严



注:①A 图为长江流域主要大坝;B 图为鄱阳湖位置与形态;C、D 图分别为通江湖面面积、湖容与水位(吴淞高程)的关系;②C、D 图中蓝色阴影分别示意在 15 m 水位基础上降低 3 m 的湖面面积和容积改变,D 图中粉色阴影示意湖区 5 m 水位变化对应的滞洪库容。

图 1 研究区示意及鄱阳湖水域特征



注:A 图是为大通实测平均流量;B 图是为湖口、大通实测平均水位;C 图是为湖口年和 10 月水位变化。

图 2 长江下游大通及湖口现状水文特征和水情与历史情况比较

重的大背景下,“河变库”将大幅降低环境容量和生物栖息迁徙范围,长江生态环境条件和生境多样性将被再次改变,江湖关系、水资源、生态流量与防洪条件也将进一步改变被人为约束并对自然与社会环境产生系列响应。生境多样性是生物多样性和河湖健康的根本^[5],江湖完整应该是“长江大保护”的重要目标,隔断江湖显然不是局部问题。

当前对鄱阳湖环境变化原因并不完全清晰,对建闸影响江湖的认识也很不全面,同时,长江环境面貌正在发生剧烈变化,水利水电工程产生的影响还没有充分体现。笔者认为长江环境变化是当前长江生态环境问题的主要原因和修复重点^[6-7],保护和改善通江湖泊区域生态环境应该站在长江全局高度上统筹考虑,避免用工程修复工程的遗留问题而再次产生更多新的问题。因此,本文围绕鄱阳湖建闸问题,在分析长江整体变化和湖区变化基础上,对鄱阳湖和长江保护提出初步认识和建议。

1 鄱阳湖问题的原因

1.1 上游水库调蓄改变了径流节律

2003年以来,长江径流和节律发生了较大变化^[1]。宜昌、汉口和大通2003—2016年平均水量比1990年前长系列(1952—1990年)水量分别减少了498亿 m^3 、342亿 m^3 和505亿 m^3 ;过去宜昌水量97%频率干旱情景变成80%~85%,径流干旱概率显著增加,严重干旱成为常态。而且,水量减少主要集中在汛末和汛后,特别是9—11月。2008—2016年9—11月宜昌水量比1990年前平均减少29.6%、10月减幅达40%。初步推算,到2030年上游规划水库群都建成后,若无有效缓解措施,宜昌10月水量将减少56.5%^[1]。汛后水量减少主要是因为水库蓄水,但年水量减少原因目前还不完全清楚。通常认为,水库调蓄不改变河川水量,然而实测资料显示,现在春季消落期流域水库群增加的水量远小于汛后减少的水量。在短期内发生如此巨大水量亏损,灌溉等用水增加应该是其中一个原因,但这个理由并不充分,因为三峡水库2003年蓄水后,水库区间实测产流量显著减少。三峡水库入库断面(朱沱、北碚和武隆)至宜昌区间7万 km^2 ,降水、气温和灌溉用水量无明显变化,太阳辐射强度有所降低,然而2003—2016年间平均产流量(101亿 m^3 ,已扣除水库蓄水)比1991—2002年平均减少18.3%。这种减少显著超过了水库水面的可能蒸发量,表明区间水量损失还存在其他固有机制^[8]。进一步研究^[3]显示,三峡水库大规模滞热和上游干热河谷向三峡区间集热使冬季400亿 m^3 巨型水体水温超过

气温10~14℃,11—1月库面平均散热和附加泄热功率分别达到2.43亿 kW 和1.74亿 kW 。实测资料还显示,21世纪以来武汉、昆明近20个城市年均气温平均升高0.8℃,其中重庆和昆明分别上升1.3℃和1.5℃^[9],长江上游变暖程度显著高于全球陆面升温幅度^[10]。三峡库区和四川盆地冬季阴冷潮湿、大气交换弱,水库大规模释热的“暖气效应”和蒸散发对周边环境影响值得研究,水库是否大量损失水资源更值得认真研究。

三峡等上游水库的蓄水和调度对干流汛期及汛后流量影响很大。2006—2016年(现状)与三峡水库建成之前时段(1990—2002年)比较,大通断面7—11月平均流量分别减少了10600、7330、7430、7050和2140 m^3/s ,其中9—11月68%、89%和79%水量的减少是因为湖口以上长江干流流量减少造成的,这与上游宜昌水量减少过程完全对应^[1]。与此同时,在汛期洪水流量远低于当地河道设计泄洪能力条件下,汛期流量减小对鄱阳湖水位、持水量和生态面貌影响很大,造成汛后出湖流量减少和河湖水位提前降低。鄱阳湖等大型水体汛期持水量少,主要是因为上游三峡水库等汛期拦中小洪水和超汛限水位运行^[9]。三峡工程规划防洪目标是保荆江安全和相应减轻中下游其他地区防洪负担^[11],这种防洪原则可保证一般情况下长江自然洪水节律不变,是最大限度保证中下游防洪安全和生态健康的最佳选择。遗憾的是,现在三峡工程等的调度违背了论证确定的原则,不但使径流节律朝单一化方向发展,而且拦中小洪水显著加剧中下游河道冲刷^[1]。

目前,长江流域大量水库调蓄减少了径流,特别是显著减少了伏秋径流,对中下游河流造成实质性改变。而且,长江上游还有大量规划大坝正在建设,这些大型水库都要承担中下游防洪任务^[11],伏秋季节大量水库蓄水将进一步减少径流。

1.2 长江中下游河道全面大幅度冲刷下切

三峡水库蓄水以来,中下游泥沙通量锐减,清水冲刷超过了三峡工程论证预期的最大幅度^[1]。2003年后,不但一般意义的河床质泥沙全被水库拦截,而且三峡工程论证认为根本不会淤积水库^[12]的8 μm 以下极细泥沙也减少了90%以上。溪洛渡等上游水库2014—2016年蓄水后,三峡水库入库泥沙大幅减少,宜昌和大通输沙量分别比天然情况减少98.6%和72%。长江中下游是完全冲积平原河流,泥沙减少直接导致河床冲刷。到2016年,宜昌—湖口段冲刷量和荆江河槽平均下降分别超过20.9亿 m^3 和2.5m;同时,湖口以下也出现严重冲刷,

2001—2016年湖口—江阴实测冲刷11.8亿m³。10余年中下游河床的冲刷量已超过三峡工程论证预期要在50年后才会出现的极限,而当前中下游冲刷趋势仍在加速。除清水外,三峡工程拦中小洪水也加剧了河道冲刷。长江中下游河道滩区宽浅,天然洪水主要经河滩下泄,断面平均流速很小,河道可能产生淤积。三峡工程试验性运行以来,没有按规划原则调度,长期拦中小洪水和超汛限水位运行^[9],使对下游冲刷能力最大的平滩洪水持续时间显著延长,水流能量被人为地调节于冲刷河槽^[11]。这种调度既降低下游河流非汛期水位和汛期安全洪水位,产生的生态影响很大^[5],同时也严重降低三峡工程防御荆江特大洪水的能力。

1.3 长江中下游伏秋水位全线大幅降低

长江上游水库蓄水、调节和清水下泄冲刷降低河床,导致中下游干流伏秋高温季节(8—10月)水位全线下降。表1显示了沙市、城陵矶、汉口、湖口和大通2008—2016年水位降低程度,其中10月多年平均水位分别降低4.0、2.3、2.9、2.8和2.0m,江湖提前进入枯季(图2B)。长系列水位特征(图2C)显示,2000年以前湖口水位基本稳定,2004年以后有一定程度降低,而10月平均水位和最低水位显著下降。湖口水位降低主要与三峡工程等的调节相关。这期间长江中下游仍处于高温季节(日均气温20~30℃),江湖及周边湿地干出水面,涉水植被受到严重胁迫。由于长江水位提前降低使湖泊提前干枯,10月初,末鄱阳湖通江湖面面积分别从3000km²和1400km²缩减到2000km²和150km²;荆江水位降低还显著减少由松滋口等荆南三口进入洞庭湖的水量,西洞庭湖环境面貌和人民生活受到影响;上游水库蓄水及干流水位提前降低使两湖秋季持水量提前流失60亿m³~80亿m³。每年7月后,鄱阳

湖、洞庭湖(特别是鄱阳湖)降水量明显少而蒸散发很大,江湖提前干枯加剧了周边湿地和农田失水,增加了春旱风险^[11]。

值得强调的是,尽管长江中下游河道发生了严重冲刷,但当前干流水位降低主要还不是由于河道下切。实测资料分析显示,城陵矶和湖口中枯流量期间同流量水位降低幅度分别小于0.7和0.5m^[9],远小于表1中伏秋(特别是9—11月)水位降低值。显然,水库蓄水、汛后水量减少和调度才是水位降低的主要原因。尽管如此,由于干流全线大规模冲刷先兆和趋势已经非常明显,加上长江上游更多大型梯级水库将长期持续拦沙,因此今后干流河槽存在更大幅度冲刷下切和更严重改变中下游江湖关系与河流面貌的风险。

1.4 鄱阳湖流域及周边环境情况变化

相应于长江整体径流节律和水情变化,鄱阳湖周边及其流域上游入湖情况也发生了变化。实测资料显示,近年汛后鄱阳湖出入湖流量都在减少,枯水期湖水位与长江(湖口)水位的相对关系发生剧烈改变(图3)。

2006—2016年与1990—2002年9—11月平均水量比较(表2和图3A),长江大通逐月分别减少193亿m³、189亿m³和63亿m³(占比分别为18.3%、22.9%和11%),湖口鄱阳湖入江流量逐月分别减少62亿m³、21亿m³和13亿m³(占比分别为38.8%、18.5%和15.6%),七河入湖总水量逐月分别减少23亿m³、16亿m³和-2亿m³(占比分别为28.2%、28.5%和增加3.5%)。从过程上看,多年平均10月下旬退水曲线上升(图3A),表明鄱阳湖流域汛末水量减少主要与其上游水库汛后蓄水有关。而9月和10月,湖口实测流量减少量明显大于七河的减少量,这是因为当前鄱阳湖汛期长期处于低水位

表1 长江中下游干流各水文站现状与历史逐月水位降低幅度

月份	沙市			城陵矶			汉口			湖口			大通		
	平均水位	最低水位	最高水位	平均水位	最低水位	最高水位	平均水位	最低水位	最高水位	平均水位	最低水位	最高水位	平均水位	最低水位	最高水位
1	1.40	1.1	1.9	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
2	1.16	1.1	1.3	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	0.1	↑	↑	↑	↑
3	1.28	1.0	1.5	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	0.0	↑	↑	↑
4	1.36	0.8	1.8	↑	↑	↑	↑	↑	↑	0.24	0.1	0.4	0.08	0.0	0.2
5	1.21	0.8	1.6	↑	↑	↑	0.06		0.5	0.48	0.1	0.9	0.39	0.1	0.7
6	1.36	0.7	2.0	↑	↑	0.1	↑	↑	0.1	↑	↑	0.1	↑	↑	0.1
7	1.22	0.4	2.0	0.06		0.4	0.30		0.6	0.45	0.1	0.6	0.40	0.1	0.6
8	1.62	0.7	2.4	0.14		0.9	0.50		1.1	0.56	0.2	1.1	0.44	0.2	0.8
9	2.45	1.7	3.2	1.10	0.7	1.3	1.53	1.1	1.8	1.66	1.1	1.9	1.29	0.9	1.5
10	3.97	3.0	4.3	2.34	1.0	2.9	2.85	1.5	3.5	2.76	1.5	3.6	2.03	1.2	2.5
11	2.55	1.9	3.1	0.20		1.9	1.07	0.4	2.9	1.36	0.3	3.4	1.00	0.1	2.5
12	2.41	1.9	2.8	↑	↑	0.0	0.07	↑	0.6	↑	↑	0.3	↑	↑	0.1

注:“↑”代表升高。

缘故。鄱阳湖流域汛末来水量和湖区汛期持水量减少,使9—11月湖口月平均(最大)入江流量分别降低了2380(3180)、774(1670)和521(1960) m^3/s 。在长江下游汛后流量日益减少条件下,鄱阳湖及其流域汛后流量大幅度减少也促进了干流水位降低。特别是鄱阳湖流域汛后流量减少比例超过28%,这是导致湖区上段和七河尾间湖区干枯和环境状态变化的重要原因。

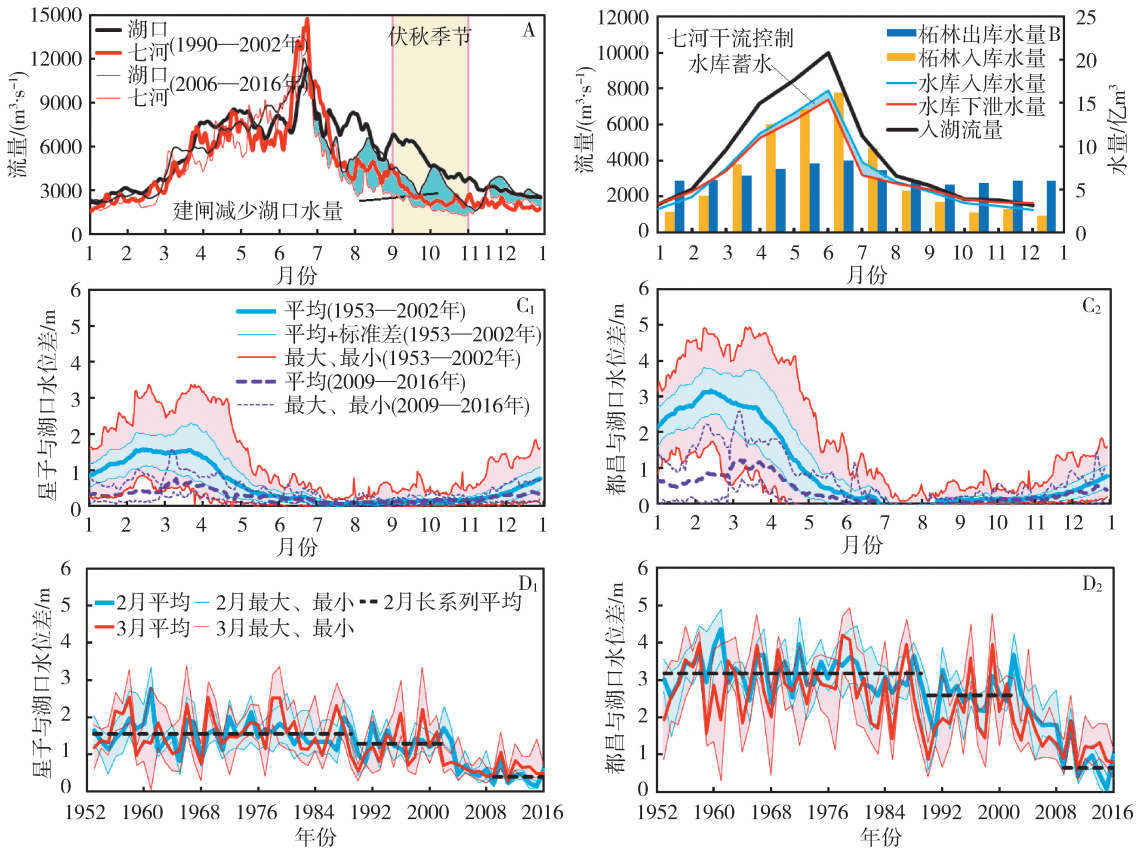
2012年,鄱阳湖流域已建各类蓄水工程24.2万座,总库容769.4亿 m^3 。大中小型水库9489座,总库容和兴利库容分别为291.9亿 m^3 和155.2亿 m^3 ;七河干流万安、峡江、江口、洪门、廖坊、浯溪口和柘林等大型水库总库容和兴利库容分别为143亿 m^3 和56.3亿 m^3 ,控制了主要入湖径流,其中仅修水的柘

林水库库容和兴利库容分别达79.2亿 m^3 和34.47亿 m^3 。但是,流域水库调节性能和调度能力都很差,没有发挥应有调节作用。鄱阳湖建闸工程的论证研究^[13]也没有首先考虑利用流域水库群的调节能力,上述7座大型水库多年平均蓄水和向下游补水分别只考虑了总兴利库容的75%和51%,其中柘林水库多年平均蓄水量和供水量分别只有22.4亿 m^3 和16.7亿 m^3 (分别占兴利库容65%和54.2%)。实际运行资料显示,流域调节能力最大的柘林水库,2006年以后竟长期将最低水位提高10m以上,每年22亿 m^3 ~25亿 m^3 调节库容长期不用。七河干流控制水库调节计划^[13]显示,这些水库虽然控制了鄱阳湖79.6%的入湖径流,但是总蓄水量和补水量分别只占其控制径流量的5.1%和3.7%,流域水利工

表2 研究区入湖平均水量和流量现状与历史变化

月份	平均水量/亿 m^3				平均流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)			
	大通	湖口	七河	建闸湖口减少	大通	湖口	七河	建闸湖口减少
8	196	28	33					
9	193	62	23	39	7430	2380	880	1520
10	189	21	16	51	7050	774	611	1890
11	63	13	-2	13	2410	517	77	519
12	-15	-7	-7	23	-572	-275	-279	856

注:“-”代表增加;建闸后湖口水量和流量按七河入湖计算,建闸减少湖口水量和流量的比较时间都是2006—2016年与1990—2002年。



注:①A图指鄱阳湖上游入湖七河及出湖(湖口)实测平均流量;B图为文献^[13]论证研究鄱阳湖建闸工程对七河干流控制水库做的调节研究(水库调节作用很小);C图为鄱阳湖星子、都昌与湖口水位差的季节分布特性,根据1953—2002年与2009—2016年逐日实测水位统计;D图为2—3月星子、都昌与湖口水位差的长期变化趋势;②本图体现鄱阳湖流域水库调度^[13]作用。

图3 鄱阳湖区水文特征和水情的现状与历史比较

程基本上没有发挥调节作用(图3B)。

与此同时,2000年以来鄱阳湖区大量采砂,导致都昌以下(不含湖口断面)入江水道河槽最低高程1998—2010年降低了2.15~10.57m^[14],2010年后一些断面还在大幅度降低^[15]。根据江西省鄱阳湖建设办公室2012年提供的资料,仅2000—2011年间湖区登记采砂量5.18亿t,其中45%主要来自湖口、庐山、星子和都昌县等鄱阳湖入江水道段。实测资料(图4)显示,除湖口断面外,入江水道断面显著扩大,都昌—湖口段在1998—2010年12m高程(吴淞高程)以下河道过水面积扩大了10000m²。湖口断面变化不大(反而略有减小,2010—2015年最低高程淤积2.72m^[15]),表明入江水道断面大幅扩大不是湖口水位降低引起冲刷造成的。湖区大量采砂对湖盆地貌、湖区水位和环境也产生很大影响。鄱阳湖长期水位变化特征(图3C~D)完全揭示了鄱阳湖与长江水位关系和短期内湖区枯水位剧烈变化情况。鄱阳湖汛期是湖、枯期是河,汛期因为湖口水位较高、入江水道过水断面很大,都昌、星子与湖口之间平均水位差只有0.1~0.2m(甚至低于湖口);枯水期(特别是春季)水位降低后,入江水道完全退化成河,上述水位差显著增大(其中2—3月最大)。1990年前星子站2—3月平均水位高出湖口1.56m、水面比降0.035‰(最大比降0.07‰),2009年以后(2009—2016年)上述水位差只有0.38m;都昌站与湖口站1990年前和2009年以后水位差分别为3.18m和0.65m。过去枯水季节长江水位降低后,湖面水位显著高于湖口,这是保证湖区最枯水位相对较高和湖面较大的重要机制。其间适逢湖区春灌,为相对较高湖水水位提供了较好的取水条件。这一机制1990年以前长期保持基本稳定,20世纪90年代开始该机制作用略有减小,而2009年以后湖面相对水位剧烈降低,都昌2—3月平均水位相对于湖口降低了2.53m(图3C~D)。2006以来,春季湖口

流量与过去并没有太大变化(图3A),由此可以判定,湖区(都昌)水位相对湖口降低2.5m,完全是由于入江水道过度采砂造成的。三峡水库蓄水以来,12—3月湖口水位略有抬升(0.8m以内)(图2B),但是湖区相对水位降低幅度远超过湖口升高幅度。鄱阳湖过度采砂是导致当前湖区枯季极低水位,影响春灌取水的关键原因。

2 湖口水位降低成因

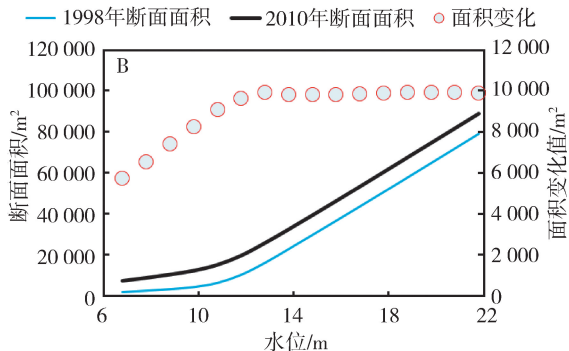
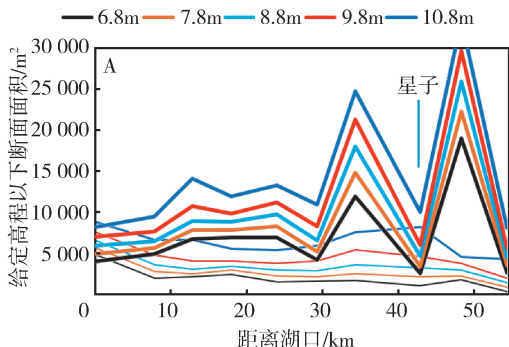
鄱阳湖低水位与干支流流量变化和河道冲淤变化相关。水位-流量关系是河流形态、流量、阻力和动力过程的综合体现。在区分流量涨落、消除下游水位顶托影响后,考虑到短期阻力变化主要与河道冲刷粗化有关,同流量水位变化集中反映了河道冲淤变形的影响。采用对数流量的二阶抛物曲线可以很好模拟涨水和落水过程的水位流量关系^[16]:

$$Z = a \lg^2 Q - b \lg Q + c \quad (1)$$

式中: Z 为水位; Q 为流量; a 、 b 和 c 为拟合常数。

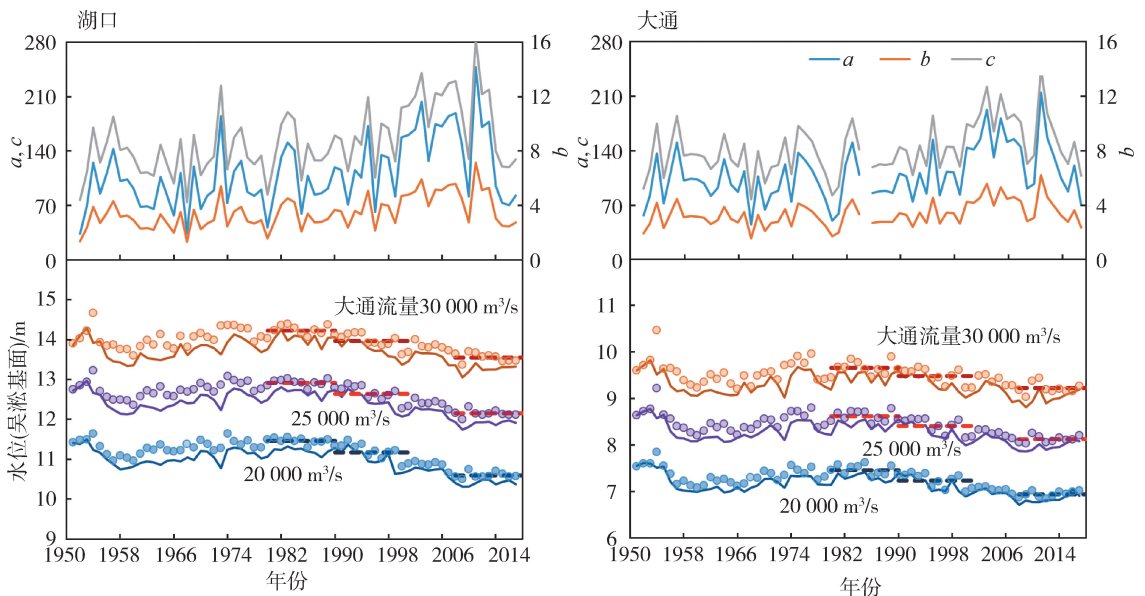
由于湖口不是干流水文站,大通水文站距离较近且流量资料完整,故采用大通流量来近似反映湖口—大通段水流状态,湖口水位可与大通流量建立关系。图5根据1954—2017年逐年涨水和落水(35000m³/s流量以下)水位-流量关系确定逐年湖口和大通同流量水位变化情况,来表明同流量水位变化机制。从图5可见,无论是拟合系数还是同流量水位变化,都体现出2000年前基本稳定、近年发生了较大改变。河道冲刷已经影响到长江下游河流的基本特性。

与三峡水库蓄水前(1990—2002年)比较(图5),2008—2017年的平均大通流量10000、15000、20000、25000和30000m³/s对应的湖口水位分别降低0.72、0.65、0.57、0.49和0.43m;大通流量20000、25000和30000m³/s对应的大通水位分别降低了0.29、0.28和0.26m。这是河道冲刷的作



注:图A为湖口—都昌段54km入江水道给定高程以下实测断面面积^[13]比较(其中粗线是2010年、细线是1998年);图B为入江水道平均断面面积及其(不含湖口)与水位的关系。

图4 鄱阳湖入江水道(湖口—都昌)2010年与1998年实测河道断面比较



注:①图的上部分别对应于湖口和大通落水过程拟合系数 a 、 b 、 c 的变化趋势,表明同流量水位变化机制;②图的下部线是涨水,圈是落水,粗虚线是分段平均值,湖口水位-流量关系采用大通流量;③本图是根据涨水和落水过程的湖口和大通水位流量关系(流量 $< 35\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 部分)来确定的。

图5 1951—2017年湖口和大通同流量水位变化

用。另一方面,根据前面的流量过程比较,9月和10月大通流量分别减少了 $6\,940$ 和 $5\,210\text{ m}^3/\text{s}$ (表2),流量减小导致湖口9月(大通流量按 $35\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 基准计)水位降低 1.8 m 、10月(大通流量按 $30\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 基准计)湖口水位降低了 1.5 m 。这是上游水库影响和流量减少的作用。若在鄱阳湖建闸,将使9月、10月平均出湖流量将进一步分别减少 $1\,520\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $1\,890\text{ m}^3/\text{s}$ (表2),相应湖口水位会分别再降低 0.43 m 和 0.57 m 。

在上述相关因素中,长江枯水期流量变化对湖口水位影响最大。尽管当前湖口以下长江河道发生的大幅度冲刷也导致水位下降,但湖口水位降低的主要原因仍是汛后长江流量减小。如果鄱阳湖和洞庭湖建闸以及今后长江上游更多水库蓄水,9—10月流量还会进一步减少,而长期清水冲刷,河床还会进一步下切。在可预见条件下,湖口水位将会进一步降低,长江中下游(含鄱阳湖)河湖面貌和生态环境条件将面临严峻挑战。

3 湖口建闸的影响

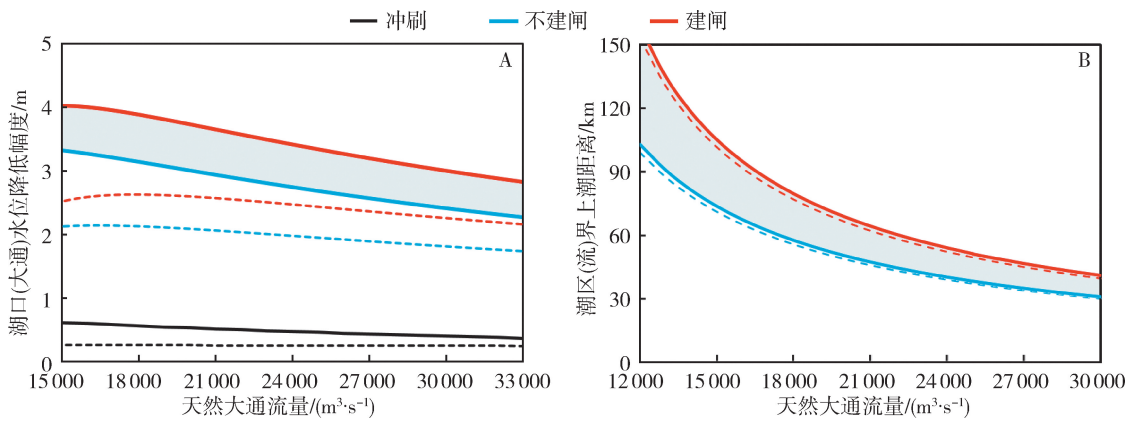
长江下游河道冲刷、上游水库汛后蓄水、鄱阳湖流域汛后水量减少和湖区大规模采砂,使鄱阳湖湖区提前干涸,出现连续极枯,对河湖面貌、生态环境、人民生活造成了严重影响。因此,有关地区提出要在湖口建闸,汛后控湖,缓解9—10月湖水水位降低进程,抬高枯季湖水位,扩大湖面,保证灌溉取水,改善五河尾闾航道和环湖面貌。这是最直接和简单

的应对措施,对当地具有一定合理性。然而,湖口建闸将彻底改变枯季鄱阳湖自然属性和独特的湿地环境,威胁候鸟栖息生境;枯期江湖隔断后,已被三峡大坝切断的长江残余生境将被进一步肢解,江湖水情和面貌完全被人为操控,长江水生系统更加碎片化,江豚等鱼类生存条件将被再次破坏,决定流域生物多样性的生境多样性将不复存在。同时,在流域污染越来越严重的大背景下,枯季湖泊形态从河流变成水库必然显著降低环境容量(根据环境评价标准,河道比湖库总磷承受能力高若干倍^[17])。历史经验已经表明,长江通江湖泊被隔断后,生态系统普遍退化,环境问题严重。当前,鄱阳湖和洞庭湖是长江仅存的两个通江湖泊,也是长江中下游主要径流来源,对下游、河口及周边海域环境起着作用重要。特别是在流域径流已被大量水库严重改变的情况下,鄱阳湖等建闸将阻延9—10月退水过程,与下游水位维持、河口抵御咸潮及周边海域环境保护都是对立的。

3.1 对湖口以下水位的影响

湖口距长江口 920 km ,图2显示在枯水期湖口与河口总落差 $8\sim 10\text{ m}$,平均比降 0.01‰ ,这是典型的平原河流。平原河流水位发生变化,不但影响河流、沿江湿地和缓冲带的生态环境,而且对沿岸地下水位和灌溉引水条件都有直接影响。

图6A显示,由于汛后流量减少和河道冲刷,现在湖口、大通10月份与原来大通天然流量 $15\,000\sim 33\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 对应的平均(最高、最低)水位已经分别



注:①湖口(实线)和大通(虚线)水位降低幅度(A)根据公式(1)和图5方法计算;②同潮差条件下,潮区(实线)和潮流(虚线)界上溯幅度(B)根据公式: $L = C_1 \ln(10000D_i/Q) + C_2$ 计算^[18],其中 L 为潮区(流)界范围、 D_i 为河口江阴断面的潮差、 Q 为大通流量、潮区(流)界常数 $C_1 = 115.92(112.03)$ 和 $C_2 = 714.84(330.29)$,由此可得 $\Delta L = C_1 \ln[Q/(Q - \Delta Q)]$ (ΔL 上溯幅度, ΔQ 大通月平均流量变幅);③冲刷情景针对大通流量不变,2006—2016年与1990—2002年平均比较;不建闸情景是指大通月平均流量减少 $7050 \text{ m}^3/\text{s}$,建闸情景是在不建闸基础上鄱阳湖入江流量进一步减少 $1890 \text{ m}^3/\text{s}$ (表2),图中蓝色阴影是建闸影响幅度;④各种因素指长江下游河道冲刷、汛后流量减小和湖口建闸。

图6 各种因素对10月湖口—大通水位和感潮河段范围的影响

降低了 2.77 m (3.3 、 2.3 m) 和 1.97 m (2.1 、 1.7 m)，湖口以下河道水面的平均比降减小 31% 。在此基础上,如果湖口建闸控制,10月湖口、大通平均(最高、最低)水位将降低 3.43 m (4.0 、 2.8 m) 和 2.44 m (2.5 、 2.2 m)，湖口以下水面平均比降减小 38% 。湖口建闸将增加湖口—大通水位降低幅度 $0.47 \sim 0.66 \text{ m}$ 。上述水位降低还会进一步延伸到湖口以上,这样长江下游汛后退水期流量还会减少。更多分析还显示,9月下游水位降低幅度与10月相当。现在枯水位降低幅度已经很大,由于枯水年沿江引蓄水量更大,水位降低将更严重。上游更多水库蓄水进一步减少汛后流量,建闸拦截汛后水量对长江下游水位的影响必须高度重视。

3.2 对长江潮区(流)界的影响

潮区(流)界范围是河口潮汐对河流影响的重要指标,决定着河口咸淡水掺混、往复流和感潮波动范围,其变化对盐度、工农业用水、最大浑浊带与河口拦沙、河道污染物输移和生物栖息环境等都有重要影响,是河口及感潮段基本生态环境条件。长江感潮河段范围一般认为在大通以下(长约 699 km ^[19-20]),由于上游水利工程影响,近年潮区(流)界在上移^[18,20]。现在大通10月出现流量小于 $15000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的机会显著增加^[1]、大通至河口(徐六泾)间河槽冲刷下切等都利于盐水和潮区(流)界上溯。

根据简单方法^[18]计算结果(图6B),在原来大通流量 $15000 \sim 25000 \text{ m}^3/\text{s}$ 期间,2006—2016年10月平均流量减少了 $7050 \text{ m}^3/\text{s}$ (表2),潮区界和潮流界平均(最大、最小)分别上溯 52.6 km (38.4 、 73.6 km) 和 50.8 km (37.1 、 71.1 km)。如果鄱阳湖建闸,10月出

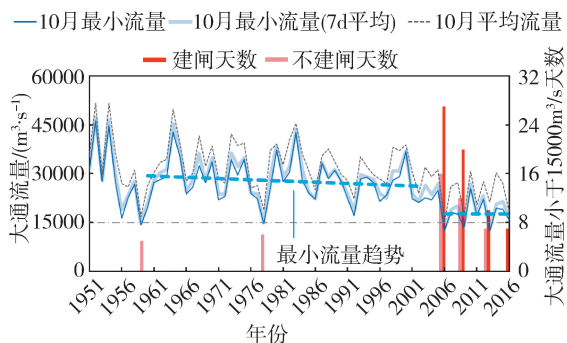
湖流量将进一步减少,潮区和潮流界平均(最大、最小)上溯距离将分别增加到 72.3 km (51.1 、 105.1 km) 和 69.9 km (49.6 、 101.5 km),建闸净增潮区(流)界幅度 $13 \sim 31 \text{ km}$ 。建闸拦截汛后流量变化对潮区(流)界范围影响灵敏,越干旱年份影响越大。

3.3 对上海饮用水源的影响

位于长江口内的青草沙水库建成后,上海 70% 水源依靠长江。河口咸潮是影响供水的要素,盐水入侵问题已经很严重^[22-23];当前,河口及周边主要是劣IV类海水^[24],污染问题也很严重。这些问题与流域大量水库调蓄、跨流域调水、引江济湖和用水量增加都有关系^[1]。作为长江重要服务对象,上海饮用水和环境安全是长江保护的重要目标。

天然情况下,长江口咸潮主要会出现在1—2月。现在汛后10月大通流量减少使盐水入侵机会会增加。2006年干旱年,秋季流量 $14400 \sim 15000 \text{ m}^3/\text{s}$ 期间,河口(海门)盐度长期严重超标^[22]。三峡工程规划将 $15000 \text{ m}^3/\text{s}$ 作为大通10月流量下限,认为这种极端情况出现的概率极小,而现实情况是大通流量小于 $15000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的天数大大增加^[1]。20世纪末,大通以下引水调水工程的引调水能力就已经超过了 $7000 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[25],加上最近的引江济太和长三角地区控采地下水,大通以下引江规模更大。这些引水调水工程越干旱年份引水越多,对河口抵御咸潮能力的影响越大。而且,10月的长江口淡水密度显著低于1月,低淡水密度相当于口外海水盐度升高了 5 g/L ,加上期间或遇天文大潮出现盐水入侵的条件更多,10月已成为上海市饮用水源受咸潮威胁最严重时期^[1]。根据1951—2016年实测流量资料得到

10月平均和最小流量变化趋势(图7)。从图7可见,三峡水库蓄水前,大通流量缓慢减少,三峡蓄水后(2006—2016年)流量出现突变趋势。月平均流量(最小流量)的多年平均值分别从 $30\ 800\text{ m}^3/\text{s}$ ($25\ 700\text{ m}^3/\text{s}$)(1991—2002年)降低到 $23\ 740\text{ m}^3/\text{s}$ ($17\ 560\text{ m}^3/\text{s}$)(2006—2016年),最小流量平均减少 $8\ 110\text{ m}^3/\text{s}$ 。1951—2002年大通10月流量小于 $15\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 的天数是11d(概率0.68%),而2006—2016年累计天数35d(概率10.3%),发生概率增加了15倍。若鄱阳湖建闸截流,同样2006—2016年系列大通流量小于 $15\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 天数将出现64d,概率18.8%。



注:①图中建闸情景大通流量小于 $15\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 天数是直接根据实际大通流量扣除鄱阳湖建闸减少下泄流量 $1\ 890\text{ m}^3/\text{s}$ (表2)计算结果。②流量指长江大通断面10月最小流量,最小流量7d滑移平均和月平均流量;影响指对2003年后大通10月流量小于 $15\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 天数的影响。

图7 长江大通10月流量变化趋势和鄱阳湖建闸的影响

上述只是现状分析,而今后进一步影响汛后大通流量的不利因素还很多,如,鄱阳湖建闸或促进洞庭湖以同样方式建闸,南水北调中线调水量越来越多,西线和滇中调水工程等增加上游截流,上游白鹤滩和雅砻江、大渡河等更多大型水库蓄水,大通以下很多引水工程发挥巨大潜力等。下游河道大幅度冲刷、水位降低和河道比降减小等也会进一步降低抵御咸潮的能力。现在 $15\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 大通流量的安全性实际上已经严重削弱。汛后湖区(流)界上延和盐水入江范围增加,污染物在河流内部和河口回荡滞留时间加长,对下游、河口及周边人民生活影响会很大。长江口和杭州湾是目前我国沿海水质最差区域,劣IV类水比例长期占60%和100%^[24],这固然与当地污染排放有关,但是,河口地区污染物向外海扩散程度受制于口外冲淡水区域的大小,而后者决定于出海淡水流量和口外淡水羽状射流发生概率。长江洪水和汛后径流大量减少都会削弱排海污染向深海扩散能力,使更多污染物在河口周边积累。汛后大通流量是长江下游与河口生产力与环境容量的基础,当前河口及周边环境条件已经很不乐

观,洪水减少和汛后淡水减少趋势需要得到控制,对此必须高度重视。修复和保护长江应把汛后大通流量不低于 $15\ 000\sim 18\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 作为生态流量标准^[1],严格控制流域各种工程开发和用水量增加。

4 对鄱阳湖问题的认识和建议

十余年来长江中下游和鄱阳湖等水域环境面貌发生了显著变化,明显改变主要集中在汛后伏秋季节,湖口水位提前降低、鄱阳湖提前干枯;而春季鄱阳湖相对于湖口水位大幅降低,出现极枯情景。但是,鄱阳湖“汛期是湖、枯期是河”基本自然特征没有改变,导致这些变化的主要原因是长江上游水库调蓄严重改变径流节律(汛后流量减小和汛期洪水减少),干流河道冲刷也是重要原因。鄱阳湖流域水库拦截使汛后入湖径流减少也加剧了湖区干旱。特别值得强调的是,鄱阳湖近年大量采砂是造成连续极枯水位的主要原因。这些改变对湖区生态环境影响很大,长期极低水位也影响了鄱阳湖湖区及周边人民的生产生活。

湖口建闸可以人工控制鄱阳湖水位消落过程,抬高枯季水位,这是工程的主要目的。但是,湖口建闸和促使洞庭湖建闸隔断江湖是严重问题。尽管有关设计考虑了用大孔口闸门便于过江豚和鱼,但由于枯季流量很小,开闸过鱼与闭闸壅水是完全矛盾的,枯季彻底隔断江湖不可避免。三峡工程已经截断长江,如果最后两大通江湖泊再被隔断,将严重肢解长江生态系统,使流域生境多样性彻底丧失;在人工调控之下,较高枯水位淹没原来大片冬季临水湿地和鸟类觅食区,候鸟越冬环境变数很大;同时,枯水季节是河湖水环境问题严重时期,“河变库”导致流域污染滞留、积累,环境容量降低,而迄今长江中下游已被隔断的通江湖泊生态环境改善的例子不多。

更重要的是,鄱阳湖和洞庭湖是长江下游重要水源和自然调节单元,对缓解三峡水库等上游水库汛后蓄水的影响也发挥了重要作用。而江湖隔断必将进一步加剧长江汛后面貌改变,降低河道水位和环境容量以及河口抵御咸潮的能力。两湖建闸不是一个局部问题,在受严重人类活动影响和剧烈改变的当下,应该按“共抓大保护”原则统筹研究和解决鄱阳湖等问题。

4.1 坚持三峡工程规划确定的主要防大洪水原则

三峡工程规划确定三峡工程主要用于防大洪水,保荆江大堤安全和相应减少中游防洪压力^[26]。然而,三峡工程试验性蓄水以来,连年拦中小洪水和超汛限运行,河道实际泄洪流量低于设计能力

10 000 ~ 20 000 m³/s。这已经造成中游河道泄洪能力下降^[9],冲刷程度远超过预期^[1]。仅就通江湖泊而言,消灭大洪水也使湖泊汛期持水量减少,水面缩小和湿地不能充分淹没,碟形湖和牛轭湖等水体与干流季节联通机制被破坏。1998年后长江没有发生过真正大洪水,规划的防洪体系没有经过考验。三峡工程规划要求的长江中游蓄滞洪区建设长期拖延,而蓄滞洪区长期难以使用又成为三峡工程拦中小洪水的理由(实际上拦中小洪水主要为了大量增加发电量)。长期下去,不但防洪安全风险很大,而且对中下游(含河口)生态环境严重不利。建议首先抓紧落实长江中游蓄滞洪区建设,提高干流河道泄洪能力,使中下游达到规划要求的防洪能力;切实执行三峡工程规划确定的三峡工程防大洪原则,不拦中小洪水,不片面追求发电效益;根据当前三峡水库入库泥沙极少和存在的大量调度潜力实施动态汛限调度^[28-29],增加汛期下泄安全洪水,减少汛后蓄水^[1,9],在保证长江中游大洪水安全的同时,尽量恢复自然径流节律和河湖生机。这是当前长江修复的首要任务。

4.2 适当调整长江流域总体规划

现有长江流域规划^[11]主体原则是在“生态文明建设”提出前制定的,“五位一体”原则没有得到体现,三峡工程建成后长江生态环境出现的大量问题^[1-3,6-7]没有给与应有重视,流域规划过分要求长江上游水库为中下游承担防洪任务。除三峡水库外,长江流域规划还要求上游干支流水库在7月主汛期预留340亿m³~360亿m³防洪库容。大量防洪水库汛后蓄水与长江下游枯水期提前直接相关,今后矛盾还会更大。在实际运用中“防洪第一”的三峡工程却连年超汛限运行拦中小洪水,难以发挥高效防洪作用的同时严重破坏了长江的径流节律^[1]。在当前生态环境问题已经凸显的情况下,长江流域规划应该根据“共抓大保护”和“五位一体”要求进行适当调整。其实长江流域规划和全流域统一调度还有很大潜力^[27],有利因素包括:①三峡水库是河道型水库,汛期调度具有很大灵敏性和快速预泄能力;②长江上游干支流均已建库控制,洪水预报技术和水平已显著提高,三峡水库入库洪水准确预见期应该可以超过3d,预泄调度潜力巨大;③今后相当长时间内三峡水库入库泥沙极少,汛期4个月已没必要坚持低水位“蓄清排浑”,可以通过动态设置汛限水位方式改善汛期防洪调度和汛后蓄水^[28-29]。调整三峡上游水库调度原则可大量减少汛后蓄水,更上游水库也没有必要完全汛后蓄水^[27]。建议:①主汛期,将三峡工程汛限水位降低

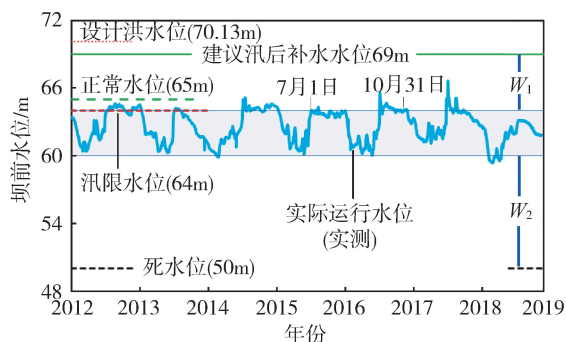
到135m,但在无洪水期间可按150m运行,在需要拦洪前,三峡按下游河道安全泄量预泄腾空防洪库容(最低可降到135m);金沙江下游水库按死水位运行,而更上游水库蓄水。②主汛期后,根据当时洪水标准和考虑预泄能力提高三峡水库运行水位,金沙江下游水库只留区间防洪库容蓄水拦洪。③预报荆江将出现较大洪水前,三峡水库通过预泄后再拦洪,上游水库尽量蓄水保证荆江安全。④加强中下游堤防,维护河道泄洪能力,高质量完成已规划蓄滞洪区的建设用于承担剩余洪水。⑤以水资源工程重新定位长江上游拥有大型水库的水电站,按水资源优先和全流域优化原则进行调度。让长江中下游河道和三峡工程防洪能力切实发挥作用才是保长江安全之大计。中游蓄滞洪区建设与地区生产生活密切相关,不能一拖再拖。在保证长江中游特大洪水安全条件下,走“与洪水和谐相处”道路才能平衡防洪与生态安全。提高长江中下游防洪能力,提高安全洪水流量上限,优化调度,减少汛后蓄水,尽量降低长江中下游伏秋季节提前干旱程度^[27]。

4.3 提高鄱阳湖流域水利工程调节能力

对比图2A和图3A可见,气候差别决定了鄱阳湖流域与长江干流的径流过程存在较大季节差异。鄱阳湖主汛期在4—6月,7月开始进入枯期,而长江洪水主要发生在7—8月。长江上游水库群对中下游径流过程影响最大的是伏秋季节(8—10月)提前干旱,9—10月干流水位全线降低^[1],而4—6月流量增加(图2A)。可见,鄱阳湖流域上半年有充分剩余水量。当前,鄱阳湖流域虽然水库很多,但调节能力还有很大提升空间。上述季节差异是重要优势资源,完全可以用于修复鄱阳湖和长江径流过程。

建议加强鄱阳湖流域水库调节能力建设,进行优化管理,提高水库群上半年蓄水量,在下半年提前充分供水。建议防洪库容较大的水库增设汛后补水水位,将鄱阳湖枯季(9—10月)作为重要补水目标,同时增加长江下游汛后流量。初步估算,仅利用好柘林水库已有调节库容和适当增加汛后补水库容(汛后补水水位设在吴淞高程69m)就可增加补水量17.6亿m³(图8),专门用于补充三峡水库等蓄水期间(9月20日至10月底)鄱阳湖的入湖流量;同时,还可以帮助加大长江枯季(12—2月)入湖水量22.9亿m³,缓解湖区春季极度干旱。为此,国家需支持江西省切实解决好赣江上游柘林等水库库区移民和工程改建等具体问题。鄱阳湖流域水库群具有独特优势和潜力,建议开展以修复江湖径流过程

为目标的增加鄱阳湖流域工程调节能力的研究。这是江湖两利措施,对汛后流域径流过程修复具有重要价值。



注:①阴影范围是调节区间;②柘林水库死水位、汛限水位、正常水位和设计(校核)洪水水位分别是50 m、64 m、65 m、70.13 m(73.01 m),1998—2005年实际运用最高和最低水位67.96和51.17 m,但2006年以来一直按上述极不充分调节方式运行(调节幅度只有5 m左右),水库调节能力严重浪费;③ W_1 是增加补水功能(设汛后补水水位69 m)滞洪补水库容(17.6亿 m^3),增加汛后40 d下泄流量500 m^3/s , W_2 是按死库容调节充分增加枯季补水(库容22.9亿 m^3),合计可增加补水量40.5亿 m^3 ,库容按文献[30]校核后的库容曲线计算。

图8 柘林水库运行方式及调度改进对鄱阳湖和长江下游9—10月补水能力的影响

4.4 修复鄱阳湖入江水道

最近10余年鄱阳湖人工采砂严重破坏了入江水道。根据实测断面资料,1998—2010年间都昌以下实际采砂量超过3亿 m^3 。采砂主要加深和扩大了枯水河槽断面,使低水位断面过水面积成倍增加,水面比降剧烈减少,2—3月份都昌平均水位降低2 m,严重加剧了湖区水量流失,导致持水量减少。这是近年鄱阳湖频现极低水位的主要原因。入江水道水地下地貌决定着湖区基本环境面貌,必须修复。建议严格控制湖区采砂、禁止枯水期河槽采砂,通过人工和自然措施尽量修复入江水道。人工措施可考虑在都昌以下40 km范围的入江水道人工喂沙堆建4~6道沙坎(顶高程黄海5 m以下、宽100 m、总方量400万 m^3 ~600万 m^3),适当壅高湖区枯水位,促进入江水道自然回淤,逐步恢复枯水河槽。

4.5 加强鄱阳湖及其周边适应能力建设

当前,长江上游大量规划水利水电工程还在不断建设之中,中下游冲刷在加速,其他人类活动和气候变化的影响也存在诸多挑战,未来流域用水与生态环境保护矛盾更大,变数更多,若无重要措施,鄱阳湖等的退化趋势很难根本扭转。当前的保护策略应尽量统筹考虑缓解上述变化进程,在积极全面修复长江的同时,特别需要重视降低水利水电工程的影响,减少汛后蓄水和抑制河道冲刷,同时要努力提高长江河湖适应能力。建议将鄱阳湖问题放到

全流域层面,各利益相关方站在“共抓大保护”的高度统筹考虑,避免草率决策的同时,当前首先应该考虑安排和加强供水设施建设、加强环境治理和控制采砂等,切实改善湖区群众生产生活条件。总之,在长江流域建坝已严重肢解生态系统情况下,不应该“以工程修复工程”,以免进一步隔断江湖,加剧中下游生境碎片化。

参考文献:

[1] 周建军,张曼. 近年长江中下游径流节律变化、效应与修复对策[J]. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1471-1488. (ZHOU Jianjun, ZHANG Man. Effect of dams on the regime of the mid-lower Yangtze River runoff and countermeasures[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(6): 1471-1488. (in Chinese))

[2] 周建军,张曼,李哲. 长江上游水库改变干流磷通量、效应与修复对策[J]. 湖泊科学, 2018, 30(4): 865-880. (ZHOU Jianjun, ZHANG Man, LI Zhe. Dams altered Yangtze River phosphorus and restoration countermeasures[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(4): 865-880. (in Chinese))

[3] 周建军,杨倩,张曼. 长江上游水库热环境效应与修复对策[J]. 湖泊科学, 2019, 31(1): 1-17. (ZHOU Jianjun, YANG Qian, ZHANG Man. Thermal-effect of the upper Yangtze reservoirs and countermeasures[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(1): 1-17. (in Chinese))

[4] 崔丽娟. 鄱阳湖湿地生态系统服务功能价值评估研究[J]. 生态学杂志, 2004, 23(4): 47-51. (CUI Lijuan. Evaluation on functions of Poyang Lake ecosystem[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(4): 47-51. (in Chinese))

[5] LIGON F K, WILLIAM E D, WILLIAM J T. Downstream ecological effects of dams[J]. Bioscience, 1995, 45(3): 183-192.

[6] 周建军,张曼. 当前长江生态环境修复重点[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 163-165. (ZHOU Jianjun, ZHANG Man. Priorities in ecological and environmental restoration of the Yangtze River[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6): 163-165. (in Chinese))

[7] 周建军,张曼. 当前长江生态环境主要问题与修复重点[J]. 环境保护, 2017, 45(15): 17-24. (ZHOU Jianjun, ZHANG Man. On the forefront ecological and environmental problems of current Yangtze River and restoration priorities[J]. Environmental Protection, 2017, 45(15): 17-24. (in Chinese))

[8] ZHANG Q, LI L, WANG Y G, et al. Has the Three-Gorges Dam made the Poyang Lake wetlands wetter and drier? [J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39: L20402.

[9] 张曼,周建军,黄国鲜. 长江中游防洪问题与对策[J]. 水资源保护, 2016, 32(4): 1-10. (ZHANG Man, ZHOU

- Jianjun, HUANG Guoxian. Flood control problems in middle reaches of Yangtze River and countermeasures [J]. *Water Resource Protection*, 2016, 32(4): 1-10. (in Chinese)
- [10] STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, et al. Climate change 2013: the physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of IPCC [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [11] 水利部长江水利委员会. 长江流域综合规划[R]. 武汉:水利部长江水利委员会, 2010.
- [12] 韩其为, 何明民, 徐俭立. 三峡水库 175 m 方案补充计算结果[C]//长江三峡工程泥沙与航运关键技术研究专题研究报告集. 武汉:武汉工业大学出版社, 1993.
- [13] 水利部长江水利委员会. 鄱阳湖水情变化及水利枢纽有关影响研究[R]. 武汉:水利部长江水利委员会, 2013.
- [14] 廖智, 蒋志兵, 熊强. 鄱阳湖不同时期冲淤变化分析[J]. *江西水利科技*, 2015(6): 419-432. (LIAO Zhi, JIANG Zhibing, XIONG Qiang. Analysis of scouring and deposition change with different periods in Poyang Lake [J]. *Jiangxi Hydraulic Science & Technology*, 2015(6): 419-432. (in Chinese))
- [15] 欧阳千林, 王婧, 司武卫, 等. 鄱阳湖入江水道冲淤变化特征[J]. *水资源保护*, 2018, 34(6): 60-64. (OUYANG Qianlin, WANG Jing, SI Wuwei, et al. Characteristics of scouring and deposit change in waterway of Poyang Lake to Yangtze River [J], *Water Resources Protection*, 2018, 24(6): 60-64. (in Chinese))
- [16] PINTER N, HEINE R A. Hydrodynamic and morphodynamic response to river engineering documented by fixed-discharge analysis, Lower Missouri River, USA [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 302: 70-91.
- [17] GB3838—2002 地表水环境质量标准[S].
- [18] 杨云平, 李义天, 韩剑桥, 等. 长江口潮区和潮流界面变化及对工程响应[J]. *泥沙研究*, 2012(6): 46-51. (YANG Yunping, LI Yitian, HAN Jianqiao, et al. Variation of tide limit and tidal current limit in Yangtze Estuary and its impact on projects [J]. *Journal of Sediment Research*, 2012(6): 46-51. (in Chinese))
- [19] 陈吉余, 恽才兴, 徐海根, 等. 两千年来长江河口发育的模式[J]. *海洋学报*, 1979, 1(1): 103-111. (CHEN Jiyu, YUN Chencai, XU Haigen, et al. The developmental model of the Changjiang River estuary during the last 2000 years [J]. *Acta Oceanologia Sinica*, 1979, 1(1): 103-111. (in Chinese))
- [20] 黄胜. 长江河口演变特征[J]. *泥沙研究*, 1986(4): 1-12. (HUANG Shen. The evolution characteristics of the Changjiang estuary [J]. *Journal of Sediment Research*, 1986(4): 1-12. (in Chinese))
- [21] 石盛玉, 程和琴, 玄晓娜, 等. 近十年来长江河口潮区界变动[J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(8): 1085-1095. (SHI Shenyu, CHENG Heqin, XUAN Xiaona, et al. Fluctuations in the tidal limit of the Yangtze River estuary in the last decade [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 48(8): 1085-1095. (in Chinese)).
- [22] DAI Z, CHU A, STIVE M, et al. Unusual salinity conditions in the Yangtze Estuary in 2006: impacts of an extreme drought or of the Three Gorges Dam? [J]. *AMBIO*, 2011, 40: 496-505.
- [23] WEBBER M, NARNET J, CHEN Z, et al. Constructing water shortages on a huge river: the case of Shanghai [J]. *Geographical Research*, 2015, 53(4): 406-418.
- [24] 环境保护部. 2012—2016 年中国环境状况公报[EB/OL]. [2017-12-30]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lzghjzkgb/>.
- [25] CHEN X, ZHANG E, XU J. Large and episodic decrease of water discharge from the Yangtze River to the sea during the dry season [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2002, 47(1): 41-48.
- [26] 水利部长江水利委员会. 综合利用规划[C]//长江三峡水利枢纽初步设计报告: 枢纽工程. 武汉:水利部长江水利委员会, 1992.
- [27] 周建军, 曹广晶. 对长江上游水资源工程建设的研究与建议(II) [J]. *科技导报*, 2009, 27(10): 43-51. (ZHOU Jianjun, CAO Guangjing. Strategies of water project development in the upstream of the Yangtze valley (II) [J]. *Science & Technology Review*, 2009, 27(10): 43-51. (in Chinese))
- [28] 周建军, 程根伟, 袁杰, 等. 三峡水库动库容特征及其在防洪调度上的应用 1: 库水位调度控制的灵敏性[J]. *水力发电学报*, 2013, 32(1): 163-167. (ZHOU Jianjun, CHENG Genwei, YUAN Jie, et al. Dynamic storage of Three Gorges reservoir and its application to flood regulations 1: sensitivity in regulation [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, 32(1): 163-167. (in Chinese))
- [29] 周建军, 程根伟, 袁杰, 等. 三峡水库动库容特征及其在防洪调度上的应用 2: 动态汛限水位调度方法[J]. *水力发电学报*, 2013, 32(1): 168-173. (ZHOU Jianjun, CHENG Genwei, YUAN Jie, et al. Dynamic storage of Three Gorges reservoir and its application to flood regulations 2: flood regulations with dynamic flood control levels [J]. *Journal of hydroelectric Engineering*, 2013, 32(1): 168-173. (in Chinese))
- [30] 张莉芳, 潘华海, 单定军, 等. 基于遥感技术的柘林水库库容曲线复核[J]. *水利水电技术*, 2017, 48(6): 1-6 (ZHANG Lifang, PAN Huahai, SHAN Dingjun, et al. Remote sensing technology-based rechecking of reservoir storage capacity curve of Zhelin Reservoir [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2017, 48(6): 1-6. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-12-28 编辑: 彭桃英)