

近年长江中下游径流节律变化、效应与修复对策*

周建军, 张曼

(清华大学水利系, 北京 100084)

摘要: 近十余年长江上游大量兴建大型水库, 蓄水、调节和拦沙对中下游河川径流和泥沙产生了深刻影响. 河川径流减少, 径流季节提前, 伏秋(特别是10月)流量显著降低、变差系数增大, 97%严重干旱频率情景变成80%~85%. 同时, 宜昌和出海输沙量分别减少93%和70%, 中下游河槽冲刷下降1~3 m, 三峡蓄水后仅13年清水冲刷幅度和范围已超过三峡预期30年的冲刷上限, 目前仍呈加速趋势. 干流各站平均水位下降2~4 m, 与此同时河道同流量洪水水位反而升高. 水库调节是水位降低的主要原因, 河道冲刷更加剧水位降低, 当前水位变化对防洪和生态都不利. 汛后流量和干流水位提前降低使洞庭湖和鄱阳湖(两湖)提前干枯、松滋等“三口”入湖水量减少, 伏秋高热季节两湖生态环境面貌发生了根本变化. 汛后流量减少甚至显著增加长江大通十月流量小于15000 m³/s几率和上海长江水源受咸潮影响风险, 10月咸潮入侵变成最严重时段必须引起高度重视. 我们认为, 径流和径流节律变化是当前长江生态环境最主要问题之一. 建议以“水资源工程”重新定位上游大型工程、以“水资源优先”优化流域管理和切实回归既定三峡工程运行原则等统一调度和改善中下游水情; 通过水库挖泥等措施修复长江物质通量, 抑制中下游剧烈冲刷和稳定河流格局; 加强中下游蓄滞洪区等防洪能力建设, 为最大限度降低上游水库防洪和蓄水压力创造条件; 主要通过改善上游水库调度维护两湖环境条件, “引清水入洞庭”和“增加供水设施建设”加强两湖适应能力. 这是长江修复和保护重点.

关键词: 径流节律; 水库调节; 河道冲刷; 生态效应; 河流保护

Effect of dams on the regime of the mid-lower Yangtze River runoff and countermeasures

ZHOU Jianjun & ZHANG Man

(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P.R.China)

Abstract: In the past about two decades, mega-reservoirs impounded in the upper basins have profoundly altered the runoff and its regimes in the lowland reaches of the Yangtze River. Annual, autumn (Sept.-Nov.) and October flow discharge via the Yichang gauge station downstream of the Three Gorges project (TGP) have decreased by 11%, 29.6% and 40%, respectively, with remarkable higher coefficient of variation. The rare scenery of dry-year in frequency 97% has become 80%~85% comparing with their previous counterparts before 1990. On the other hand, sediment load downstream Yichang reduced by 93%, while by 70% across the Datong gauging station to the estuary. As a result of clear-water flow, scouring and incision in the mid-and lower reaches exceeded 2.1 km³ in total and 1~3 m in main channel elevations, surpassed the maxim limit previously predicted to take place after 30 years running of the TGP, and still the incision is accelerating ahead according to investigation. Mainly, because of regulations and also riverbed incision, water stages all way along the lowland reaches are lowered ahead of time by 2~4 m, that is the criminal leading the riparian shoals and major lakes, the Dongting and Poyang, dried up in advance, correspondingly. Also, because of earlier drying up and stage lowering, diversion of water from the river to the Dongting diminishes, the flow across Datong in Oct. is greatly reduced with the frequency of less than 15000 m³/s discharge greatly increased that is of key for the resisting of saltwater and the safety of drinking water for Shanghai. Moreover, at the same time of stage lowering, main channel flood level of specific discharge is elevated that means flood safety reduction. The present variation in runoff regime has changed the natural fluvial features and the environmental conditions in the lowland reaches and to low the impact of hydro-project should be listed as key restoration for the Yangtze River protection. We suggest to reposition the role of upstream hydro-projects to run the key reservoir firstly using to water as objecting goals, not electricity; to respect law-designated TGP principles of operation in its planning stage; to re-

* 国家重点基础研发计划(2016YFE0133700)和国家自然科学基金项目(51509137)联合资助. 2018-01-31 收稿; 2018-03-25 收修改稿. 周建军(1960~), 男, 博士, 教授; E-mail: zhoujj@tsinghua.edu.cn.

store the sediment and other fluvial fluxes functionally via reservoir dredging; to strengthen the flood-coping capacity, in particular the flood detention requirement by the planning of the TGP to ease the tensions of both flood and refilling of water in autumn; and to improve the environmental conditions of the Yangtze connecting lakes, mainly through upstream reservoirs operation optimizations and it should also be supported through diverting more clear water from the river to Dongting Lake and improving the water supply facilities for Poyang Lake as auxiliary measures.

Keywords: Runoff regime; regulation; downstream scouring; eco-consequence; river protection

长江(图1)是世界第三大河. 从青藏高原到出海, 横跨 11 省区市, 干流 6300 余 km、流域 180 万 km², 上游宜昌以上 100.6 万 km²、中游宜昌至湖口 68 万 km², 1990 年前平均径流 9600 亿 m³, 其中 4510 亿 m³ 来自上游^[1]. 流域受季风控制, 自然降水与气温过程高度一致. 中下游冲积平原河流平缓, 1400 余 km 水面落差约 40 m. 区域地貌环境、生产生活与安全都与河流息息相关, 是全球生产力和经济社会最繁荣的大流域, 径流是最基本的环境条件.

近年来, 流域水利水电工程建设规模巨大, 近 52000 座坝、超过 4000 亿 m³ 水库库容, 19430 余座水电站(装机容量超过 1.9 亿 kW), 其中上游建坝 13000 余座、库容约 1590 亿 m³. 这些工程在防洪、发电、航运和供水等方面发挥重要作用的同时, 隔断、调节和用水增加等也对河流产生很大影响. 大型水库改变上游河川面貌, 使中下游河川径流、节律和水位都发生了很大变化, 彻底改变了中下游冲积河流泥沙基本属性, 河床大幅度冲刷显著改变了干流与通江湖泊相对高差, 水库淤积更彻底改变了河流磷等营养/污染循环规律, 水库集热、蓄热和滞热严重影响下游水体溶解氧, 水热循环、流域生境、河流与气候长期建立的平衡关系都在发

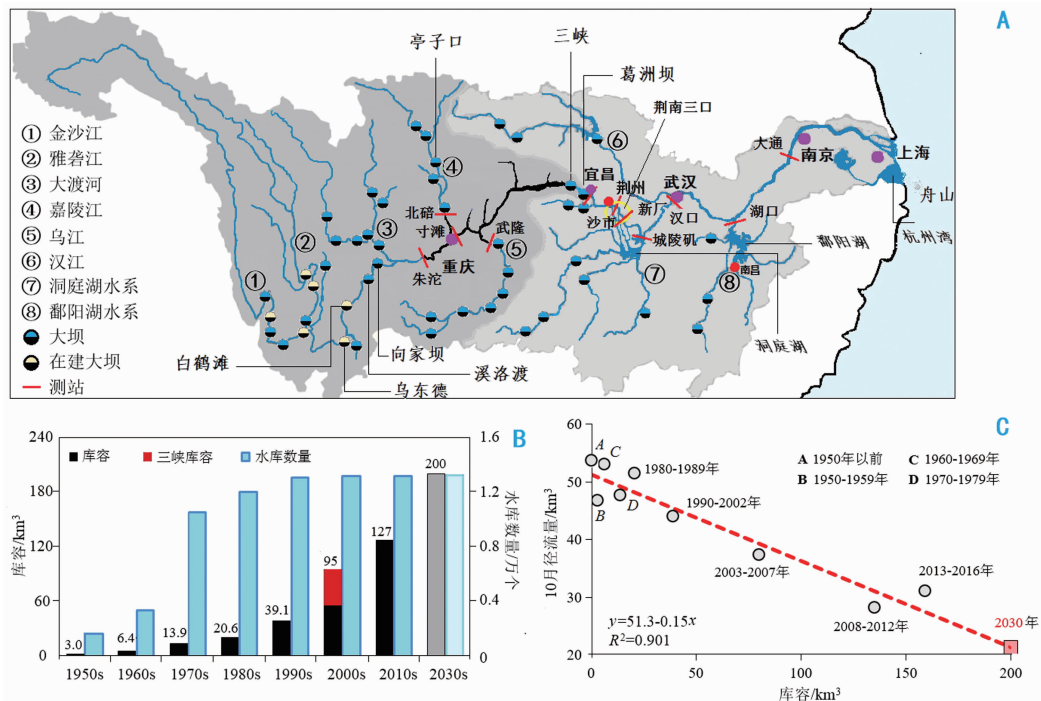


图1 长江流域(浅色部分中下游)主要大坝、观测点和其他相关位置(A)、上游水库数量和库容(2030s 库容 200 km³是规划资料得到)(B)和宜昌10月平均径流量与上游水库库容的关系(2030年是根据 200 km³预测)(C)

Fig.1 Sketch of the Yangtze valley with mega dams, gauging stations and important positions (A), the number and capacity of the dams in the upper basin (B) and a relationship between the average runoff in October at Yichang and the storage of impoundment in the upper basin (data 2030 is predicted) (C)

生变化^[2,4]. 流域生态环境已经产生了不容忽视的改变和变化,一些改变成为当前长江生态环境主要问题^[5].

建坝是一个世纪以来人类对河流的最大作用. 全球大河已多数受大坝控制,长江是受大坝影响严重的最大河流^[6]. 大坝和水库调节对流域尺度生态环境影响已有大量实例^[7-15]. 美国建坝与不建坝河流对比研究发现,水坝通过改变河川径流、水位和水文极值频率等均化环境差异、降低生物多样性,影响尺度超过流域^[16],对全球生物多样性也有影响^[13,17-18]. 河流上游建坝和水库调节首先改变河川径流,这一物质基础变化相应改变河流相关水域生态系统的环境条件^[17,19-24],造成自然节律退化、河道萎缩和流域地貌单一化,水库拦沙引起下游河道冲刷更加刷水文过程改变^[25]. 特别是长江中下游平原冲积河流,泥沙更是重要属性和环境物质,供给与冲淤平衡是河道与环境稳定的基础. 目前全球水库高比例拦沙、下游河流普遍冲刷^[26]. 三峡工程规划依据的“蓄清排浑”作用^[27]已经被现实否定,溪洛渡等干支流水库蓄水后(2014—2016年)宜昌平均输沙量已不足1000万t/a,比1990年前多年平均减少98.6%^[3]. 河床下切改变平原河流水位、河湖关系、洲滩湿地等缓冲区水与环境物质交换^[21,28-30],入海泥沙大量减少和三角洲沉降^[31-32]. 在最早开发的密西西比流域,半个多世纪水坝拦沙和径流调节使下游冲积河流河型、滩槽关系、河滩、周边湿地及防洪与生态作用都发生巨大改变^[33],人工控制、洪水减少加上沉降使三角洲失去了1/3(3900~5000 km²,2100年预计将再损失10000~13500 km²)^[34-37]. 大坝对河流水情、生境和生态具有深刻影响^[20],在其长期调节下河流将建立与自然格局完全不同的平衡体系^[38-39],这种改变多以失去生物多样性为代价^[16]. 所以,研究认识大坝对河流径流节律和地貌变化影响规律对保护河流生态环境具有重要意义^[25]. 当前长江上游建坝已经改变中下游平原河流径流和节律,当前和2030年规划大坝都完成后,10月宜昌流量比天然分别减少46.8%和56.5%(图1). 这样尺度改变对中下游平原河湖和河口环境会造成显著影响,应该作为当前长江生态环境修复重点.

本文依据长期实测水、沙与河道冲淤资料分析近年长江径流、水位及其过程变化及其对中下游河湖环境条件影响和原因,在长期大量研究基础上提出河川径流和湖泊修复对策建议,为长江生态环境修复与河流保护参考.

1 方法和数据

本文主要依据实测数据对比分析水库调节影响. 2003年三峡工程初步蓄水(最高水位135~139 m)、2008年接近正常水位(实际172.75 m),之后按正常水位175 m运行. 因此,重点对比2003年以来长江中下游径流、水位及过程变化、泥沙减少与河道冲淤对江湖水情影响,同时以2008年三峡正常蓄水后的资料考察水库调节的影响. 水文和泥沙数据是宜昌、沙市、监利、螺山、汉口、大通以及清江、荆南三口(松滋口、太平口和藕池口)、城陵矶、汉江仙桃和湖口等干支流逐日实测平均流量和水位数据. 主要断面数据从1952年(宜昌径流量1878年)开始,截至2016年12月31日. 受观测建站条件限制,一些支流数据开始较晚但多始于1950s. 三峡蓄水以来中下游冲淤分别采用断面法实测和输沙量法推算,输沙量依据逐日数据. 资料主要来自长江水利委员会水文局,三峡库区水位来自三峡梯级调度数据库,气温和短波辐射资料来自国家气象局(<http://data.cma.cn/data/cdcindex>). 上游水库群调度研究主要依据作者等为三峡梯级调度中心建立的《长江上游水库群蓄水调度模拟决策支持系统》^[40],其中上游水库按水文方式计算,三峡和葛洲坝梯级水库按不恒定水动力学模型计算^[41-42].

2 长江中下游径流与节律变化

上游大坝和水库调节主要表现在径流(尤其汛后)减少;泥沙减少和中下游河道冲刷;中下游伏秋季节水位降低、提前干枯、通江湖泊面貌改变,同时沿江同流量洪水水位抬高和不利防洪;以及秋季入海流量减小等.

2.1 长江上游径流减少

图2是2003年以来宜昌、汉口和大通等重要断面年、月和10月流量与长系列比较. 1990年前,宜昌多年平均径流量4504亿m³、变差系数 $C_v=0.107$ 、水量平均递减率2.5亿m³/a,径流缓慢平稳减少. 宜昌,1990

年后径流加速减少,1991—2016年平均递减率16亿m³/a,2003—2016年均径流量4006亿m³,比1990年前平均减少11%、变差系数增加(C_v=0.12)。同期,汉口和大通水量分别减少4.8%和5.6%,绝对量分别为350亿和500亿m³(图2A)。

在平均径流减少同时,1990年前宜昌97%频率干旱情景(每百年三次)变成了80%~85%,极度干旱情景变成常态(图2A)。年内径流减少主要集中在汛后,9—11月(2008—2016年)宜昌流量比1878—1990年平均减少439亿m³,减幅29.6%(图2C),10月流量比三峡蓄水前(1991—2002年)减少40%(图2D)。有大量上游水库后,宜昌逐月径流量变差系数反而普遍提高(图2B),其中9—11月从原来多年平均C_v=0.208增加到0.34。平均值减少条件下,变差系数增加更加加剧伏秋季节少水和增加径流干旱风险。预计2030年宜昌10月流量将比1990年前减少56.5%(图1)。

实际上,当前中下游径流减少并不完全集中在三峡和上游水库蓄水期间。宜昌、汉口和大通7—8月平均流量(2003—2016年)减小也十分显著(数量与蓄水期间相当)。这是因为三峡等水库大量拦中小洪水(图2C)同时也与近十余年未发生特大洪水有关。春季上游水库消落也为下游枯期补水,1—5月(2008—2016年)宜昌平均流量比天然增加230亿m³。水库调蓄后总水量减少,即使不计9月前水库蓄水,9—11月与1—5月增减相抵后水量净减少206亿m³。

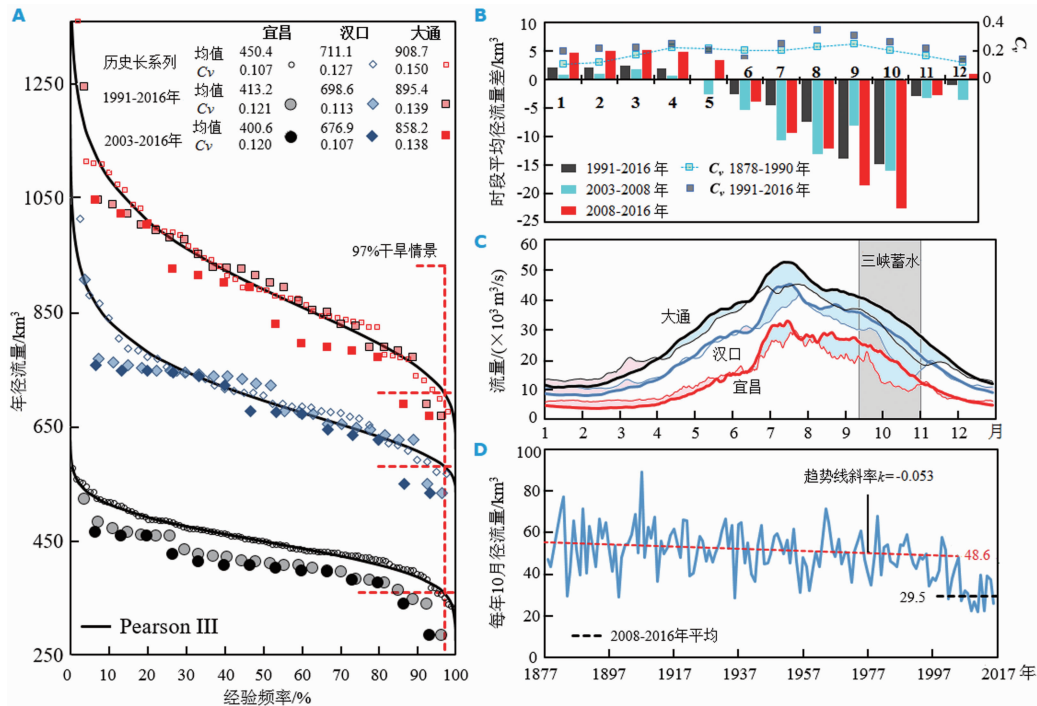


图2 三峡下游年、月径流变化及其季节分布情况

((A)宜昌、汉口和大通断面年径流量频率分布及变化(历史长系列:宜昌1878—1990年、汉口和大通1950—1990年;C_v是变差系数;Pearson III曲线根据历史长系列统计参数确定;97%干旱情景指历史长系列每百年三次水量最小情景);(B)宜昌各时段与历史长系列(1878—1990年)逐月平均径流量偏差和变差系数比较(2008—2016年代表三峡按设计正常水位运行后);(C)宜昌、汉口和大通2003—2016年和1952—2002年逐日平均流量比较(蓝色代表水量减少、粉色代表水量增加,三峡计划蓄水时间从9月10日起、10月31日结束);(D)宜昌断面140年来10月水量变化趋势(k=-0.053表明水量呈长期减少趋势,每十年减少5.3亿m³;2008—2016年月平均径流比三峡蓄水前(趋势线预计2002年)和长系列平均水量分别减少191亿m³和227亿m³)

Fig.2 Runoff variation and seasonal distribution downstream of TGP

长江上游径流减少与降水、气温、太阳辐射和用水增加等复杂因素相关,目前尚难给出定量评价. 2003年后三峡区间(上游朱沱、北碚和武隆断面到下游宜昌,面积7.1万 km^2)产水量变化可以给出部分解释. 本区间除已知流量进出口外,所有支流完全封闭,区间产流可根据进出口流量推算. 2004—2016年区间平均产流比三峡蓄水前(1991—2002年)减少117.5 m^3 (已扣除三峡蓄水100.8亿 m^3). 根据库区25站实测区间降水资料,1958—1990年平均降水1129mm(折合水量800亿 m^3/a)、区间产流496亿 m^3/a ,1991—2002与2004—2016年平均降水基本相当(图3A),三个时段月平均降水季节分布没有明显变化(图3B),三峡蓄水前后时段降水只差3.6亿 m^3/a . 在蒸散发条件方面,长期以来宜昌和重庆实测短波辐射是递减的(图3A),1980年前平均短波辐射高(1104($\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$)),1991—2002和2004—2016年分别降低到993.5和991.3($\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$),三峡蓄水后略低;重庆、梁平、万县、奉节、巴东和宜昌六站实测日照时数递减趋势更

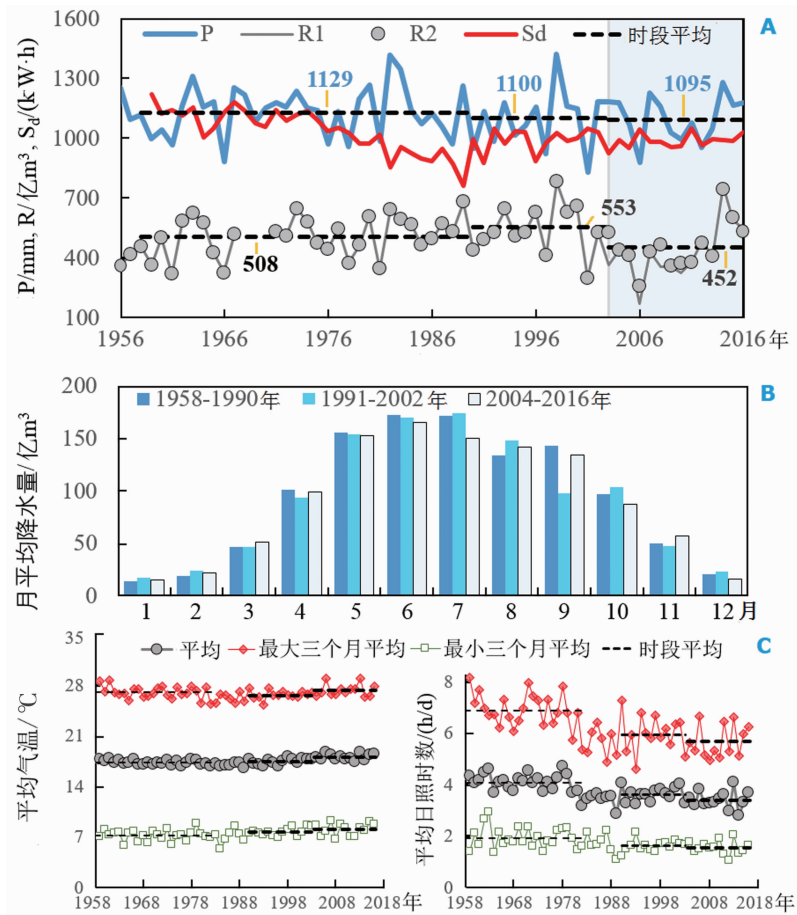


图3 三峡库区区间流域(71000 km^2)长系列年降水(P)、区间径流量(R1和R2)、重庆宜昌平均太阳短波辐射强度(S_d)、平均气温和日照时数变化情况

(降水根据江津、北碚、沙坪坝、涪陵、宜昌等25站逐日资料按行政区面积加权平均计算;R1是根据出(宜昌)与入(朱沱、北碚和武隆)库逐日实测流量计算的区间径流量,R2是从R1扣除三峡和葛洲坝水库蓄水量后的区间径流量; S_d 根据宜昌和重庆两站逐日实测短波辐射强度计算;气温和日照时数根据重庆、梁平、万县、奉节、巴东和宜昌多站逐日资料计算(2004—2016年与1991—2002年时段年均、最大三个月和最小三个月平均比较,气温分别上升0.67、0.69和0.4 $^{\circ}\text{C}$,日照时数减少5.8%、4.7%和6.0%,2004—2016年日照时数比1958—1980年减少18%))

Fig.3 Variation of annual precipitation, runoff, solar radiation, annual average air temperature and sunshine hour in a small basin of the Three Gorges reservoir

明显(图 3C), 1991—2002 年比 1958—1980 年降低 18%、2004—2016 年比 1991—2002 年又降低 5.8%。根据蒸散发能力^[43]计算结果可见, 自然热量变化对区间蒸散发影响不明显。考虑到库区土地少, 蓄水前后区间用水不可能大幅增加, 而且水库水面蒸发很小^[44]。上述巨额区间水量缺口显然与自然和社会因素关系不大。但是, 库区气温逐年升高(图 3C), 上述三时段六站年平均气温分别为 17.3、17.4 和 18.1℃。蓄水前增幅很小, 2004—2016 年平均、最大和最小三个月气温比 1991—2002 年分别上升 0.67、0.69 和 0.4℃, 远超近期全球陆面温升(0.38℃)^[45]。

综上所述, 三峡区间径流减少主要不是因为降水减少, 气温升高和蒸散发增加等或是重要原因, 而这些因素与水库冬季大量散热的“暖气效应”有关^[4]。长江上游近期径流减少原因还不完全清楚, 还需要深入研究。

2.2 长江中下游河槽冲刷降低

长江中下游是冲积河流, 天然时期(1955—1990 年)进入中下游干流输沙量 6.34 亿 t/a, 83% 来自上游。宜昌、螺山、汉口和大通断面平均输沙量分别为 5.25 亿、4.41 亿、4.31 亿和 4.59 亿 t/a、洞庭湖淤积 1.2 亿~1.4 亿 t/a, 干流河道冲淤平衡或微淤(图 4A)。三峡蓄水后宜昌进入中下游泥沙剧烈减少(图 4B), 2013 年后基本无泥沙(2014—2016 年平均 720 万 t/a、比天然减少 98.6%)。近十年河口(大通)输沙量比 1990 年前减少 72%, 随着河道冲刷还将持续和剧烈减少。

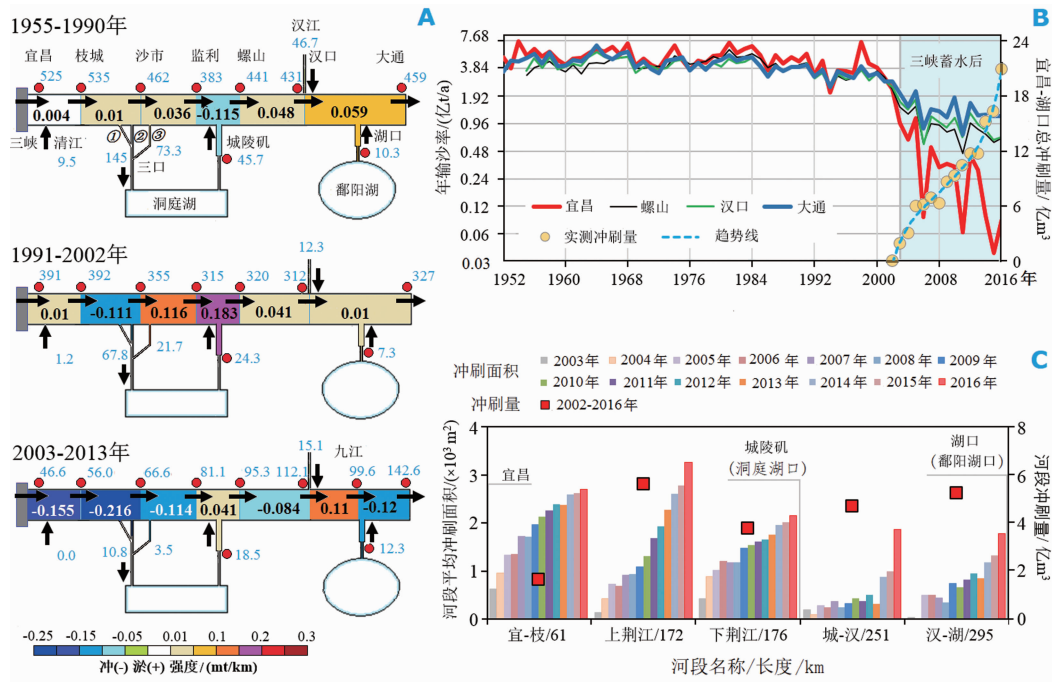


图 4 三峡(宜昌)下游长江河道泥沙变化及冲淤情况

- (A) 历史系列(1955—1990 年)、三峡蓄水前系列(1991—2002 年)和蓄水后系列(2003—2013 年)长江中下游输沙量平衡概算(其中蓝色数据是断面时段平均沙量, 单位 10^6 t; 地名后的数据是到宜昌的距离, 单位 km; ①、②和③分别代表三口中的松滋口、太平口和藕池口; 格子中数据是河段年平均冲淤强度, 单位 Mt/km);
- (B) 1950—2016 年宜昌、螺山、汉口和大通输沙量变化;
- (C) 2002—2016 年长江中游各河段断面法实测的平滩河槽以下平均断面冲刷面积和体积)

Fig.4 Long term budgets of sediment, is variation and channel scouring after 2003 downstream of TGP

输沙量法和断面实测资料都显示中下游河道发生了巨额冲刷, 范围超过大通(图 4A 和 C)。2002—2016 年, 宜昌至湖口平滩河槽冲刷 20.9 亿 m^3 , 其中荆江、城汉(城陵矶—汉口)和汉湖(汉口—湖口)分别冲刷 9.4 亿、4.7 亿和 5.2 亿 m^3 , 引起干流河槽剧烈下切。葛洲坝下宜昌一枝城、上荆江、下荆江、城汉和汉湖河段河槽

分别平均降低逾 2.5、3.0、2.0、1.4 和 1.2 m. 输沙量法推算 2003—2016 年下游(湖口—大通)冲刷 4.88 亿 t(约 3.3 亿 m^3)、河槽平均降低近 1.0 m.

强烈冲刷主要是因为上游水库拦沙,同时三峡水库违背规划调度原则运行也加剧了冲刷. 造床流量或平滩流量是冲积河流塑造河槽能力最强流量^[46],汉口以上造床流量大约是 22000~36000 m^3/s ^[47],流量更大后因洪水上滩、流速减小,冲刷能力反而降低(甚至淤积). 三峡工程规划确定三峡水库主要按“枝城调度”防洪方式运行^[48],只拦截枝城断面流量大于 60600 m^3/s (三峡下泄流量不超过 56700 m^3/s)以上洪水. 但是,近 10 余年三峡汛期在没有大洪水情况下连年降低标准大量拦截中小洪水和超汛限水位运行^[62]. 这种调度确实松弛了一般的防汛压力和大量增加发电. 但是,特大洪水出现风险加大,平滩流量洪水持续时间显著增加^[49]. 平滩洪水接近造床流量,冲刷能力最大^[46],汛期拦中小洪水也加强了河道冲刷下切.

目前,中下游实际冲刷量已超过预期三峡蓄水三十年后极限程度和范围^[50-51],实测显示下游冲刷量(图 4B)和河段平均冲刷面积(图 4C)仍呈加速趋势(宜—枝段除外),在相当时期内,中下游冲刷幅度还会很大. 2016 年起城陵矶以下开始大幅冲刷更是一个危险信号. 荆江是长江最危险河段^[52-53],覆盖层深厚、可冲幅度大、自然弯道多、与洞庭湖水道呈分汊并行格局,干流冲刷具有正反馈效应. 城汉河段等大幅下切将进一步加剧荆江冲刷.

水沙变化是大坝对下游河湖最本质的改变. 洞庭湖和鄱阳湖(两湖)都是浅水湖泊,是中游重要调蓄、生境和生态单元. 洞庭湖主要水资源和生态流量来自荆南三口;两湖尺度、形态和环境容量高度依赖干流水位;沿江滩地、枝汊和湿地的面貌与生境直接与干流水位相关. 河槽大幅度下切对河流中枯流量水位影响显著,它将逐步改变湖泊等生态单元与干流相对位置,最严重和需警惕的后果是荆江河型改变、两湖脱离干流控制和江湖格局改变^[54-55].

2.3 长江中下游河湖水位变化

十余年来中下游河湖一般水位全面降低. 三峡正常蓄水后(2008—2016 年)逐日平均水位与 1952—2002 年比较,荆江水位全面显著降低、城陵矶至大通降低主要但不限于三峡水库蓄水时段,汛期开始下半年水位都降低,其他月份降低也明显(图 5A);1—3 月水库补水使城陵矶以下有所抬高(城陵矶较大与城陵矶至螺山段局部淤积有关). 三峡蓄水前后时段平均水位比较,沙市、城陵矶、汉口、湖口和大通 10 月降低最大,平均(最大和最小)降低 4.0(4.3~3.0)、2.3(2.9~1.0)、2.9(3.5~1.5)、2.8(3.6~1.5)和 2.0(2.6~1.2) m. 水位最大降低幅度超过河道下切幅度.

城陵矶和湖口是两湖出口控制断面,干流水位降低对湖区面貌和环境状态影响很大(图 5B). 9 月初和 10 月下旬干流水位降低,洞庭湖水面分别缩小 400 和 500 km^2 、持水量分别提前减少 21 亿和 13 亿 m^3 ,鄱阳湖分别缩小 1000 和 1300 km^2 、持水量分别提前减少 52 亿和 25 亿 m^3 ,两湖合计流失水 38 亿~73 亿 m^3 ,10 月下旬鄱阳湖干枯. 鄱阳湖是长江水位上升形成的年轻碟状湖,其面貌决定于干流水位. 汛末水位变化对其水面影响率达 600 km^2/m . 当前湖口水位平均下降了 2.8 m,水位偏低和汛期高水时间缩短都在改变湖区面貌和环境条件. 洞庭湖水面除受干流水位影响外,荆南三口(松滋、太平和藕池口)是其重要径流来源,三口分流及过程严重影响湖区(特别是西北湖区)面貌和环境条件. 资料显示三口入湖水量从 1991—2002 年平均 620 亿 m^3 减少到 489 亿 m^3 (2008—2014 年)(图 6A),9—11 月(10 月)减少 28%(62.5%),枯季断流十分普遍(图 6B),而三口分流完全决定于干流水位. 10 月初、末三口总分流能力已从蓄水前 2550、820 m^3/s 降低到 700、100 m^3/s . 三口分流减少还进一步促荆江冲刷和水位降低,它又进一步减少分流,这是一个正反馈过程.

中下游水位大幅降低的原因是水库调节与河床冲刷. 河床降低、中小流量期间干流水位与 2003 年以来冲刷强度(图 4)完全对应,尤其对荆江和湖口水位降低河床冲刷发挥了重要作用. 但是,中下游多站同流量水位变化^[62]显示,除沙市和新厂 2014 年比 2003 年降低大于 1.5 m 外,其余都小于 1 m. 当前,河床冲刷比流量减小作用更小.

三峡规划^[48]水库蓄水期每年 10 月. 1990s 以来汛后径流减少^[60],为确保三峡蓄水,试验运行将蓄水时间提前到 9 月 10 日. 尽管如此,8 月起宜昌、汉口和大通流量就大幅降低(图 2),2008—2016 年 9—11 月宜昌流量平均降低 5684 m^3/s ,水量减少超过三峡调节库容 2 倍,10 月水量减少 40%. 沙市、监利、螺山、汉口和

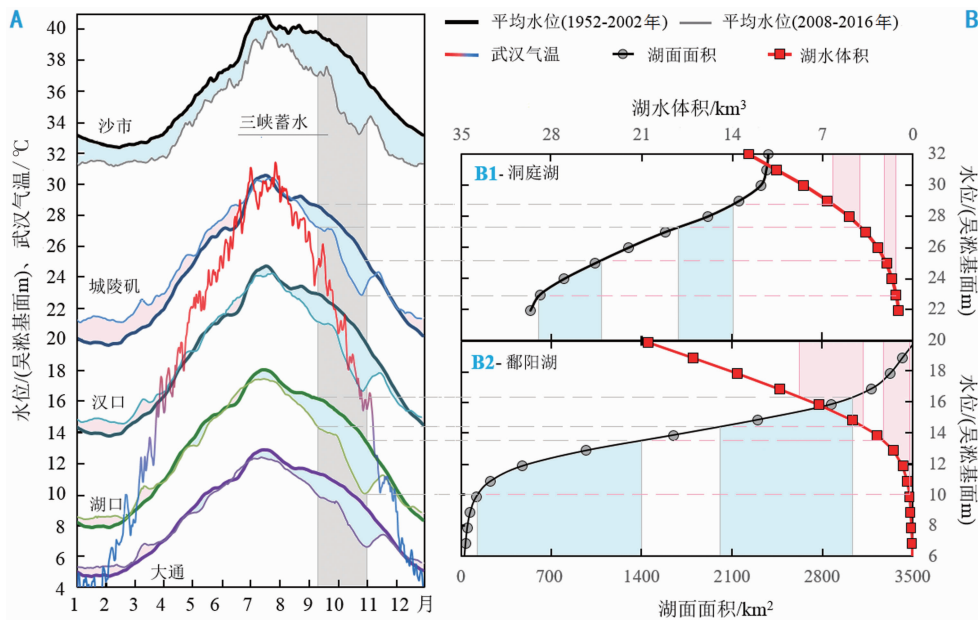


图5 中下游干流沙市、城陵矶(洞庭湖口)、汉口、湖口(鄱阳湖口)和大通2008—2016年相对1952—2002年平均水位变化及对洞庭湖和鄱阳湖淹没面积与蓄水量影响
 ((A)历史系列(1952—2002年)和三峡蓄水到175 m后(2008—2016年)
 中下游各站逐日平均水位比较(武汉气温是2000—2013年平均值);
 (B)洞庭湖1998年^[56](B1)和鄱阳湖^[57](B2)通江湖体面积、体积与口门水位的关系)

Fig.5 Long-term averaged flood stages in mid-lower Yangtze River before (1952–2002) and after (2008–2016) the TGP, and their impacts on the pool area and storage capacity of Dongting and Poyang Lakes

九江等断面水位流量关系^[58]推算显示上述流量减小引起干流水位降幅2.0~3.0 m. 水库调蓄仍是当前干流水位降低主要原因.

为证明上游水库调节对中下游径流节律和水位影响的趋势性,作者根据为三峡梯级调度建立的长江上游水库群模型^[40]模拟1992—2005年天然、三峡单独调节、三峡与上游水库群联合调度后宜昌的流量过程^[61]. 计算条件严格按这些工程规划方案,结果揭示出调节改变径流季节现象(图7). 上游水库作用使中游径流季节前移约2月、伏秋季节流量锐减、河流提前进入枯期. 由于计算假设水库水量守恒(现实不完全守恒),春季增加水量比实际多. 流域大量季调节水库以发电为主和规划防洪库容很大^[52]是改变中下游径流节律和汛后河湖面貌的根本原因.

与此同时,干流一般水位大幅降低并没有提高长江中游河道泄洪能力. 实测资料分析^[62]显示,洪水期宜昌至湖口同流量水位反而升高,其中宜昌、新厂和汉口最大升幅超过(其余接近)0.5 m. 特别值得警惕的是,2016年洪水低于堤防设计流量标准 $10000 \text{ m}^3/\text{s}$ 余,汉口和城陵矶水位已经接近堤防设计洪水位. 河槽冲刷下切反而洪水位升高,这是三峡建成后长江中游的“防洪悖论”. 初步分析,主要原因是三峡水库长期降低标准拦中小洪水和超汛限水位运行^[62]. 河滩是平原河道行洪主体,滩地长期不过洪水会导致植被等(阻力)增加,全槽泄洪能力降低. 三峡水库防洪能力本来小于设计、城陵矶同流量水位在1998年已显著超过设计水位、中游蓄滞洪区长期欠账、分洪困难,三峡建成后长江中游特大洪水仍然存在严重风险^[54-55,62]. 目前中下游河道的变化对生态和防洪都不利^[5].

水量减少,径流季节、水位降低和干枯时间提前是当前中下游河湖面貌的明显变化. 图5A显示干流水位显著降低主要发生在伏秋高温时段. 在变幅之间,大量滩地、水域、湿地和缓冲区提前暴露在高温和高热环境下,植被、连通性、地下水和水、热和环境要素循环会相应改变,这种改变的影响目前很难全面评估. 为

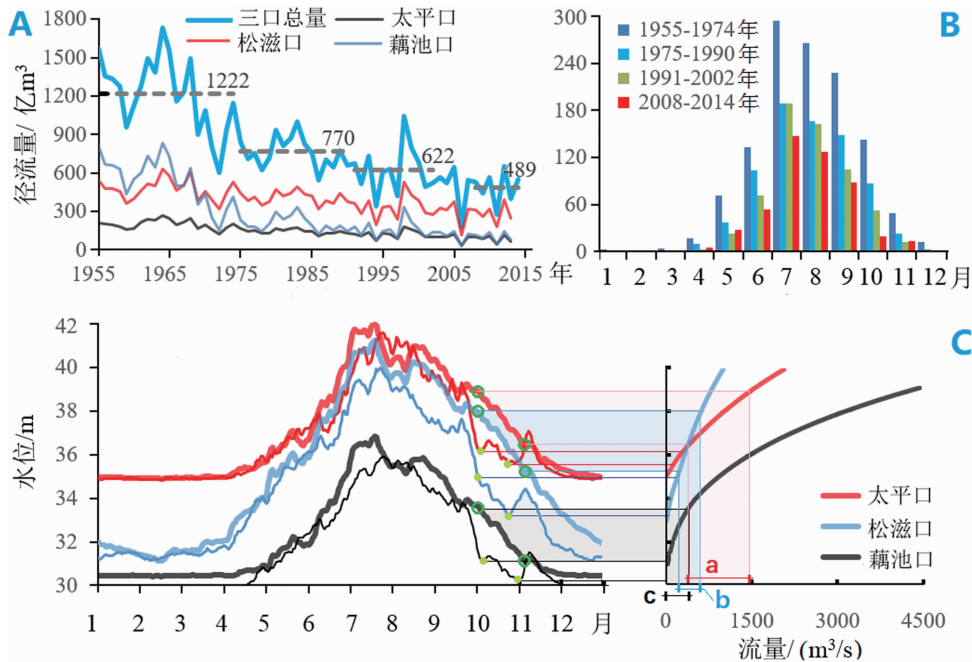


图6 荆南三口年(A)、月(B)分流情况和三峡蓄水前(1991—2002年)(粗线)、后(2008—2014年)(细线)各口门平均逐日水位,以及口门水位—流量关系(1998年)^[58](C)(根据1998年三口分流量关系,三峡蓄水前后10月松滋口、太平口和藕池口分流量 $a=420\sim 1500\text{ m}^3/\text{s}$ (现小于 $100\sim 400\text{ m}^3/\text{s}$)、 $b=300\sim 600\text{ m}^3/\text{s}$ (现 $0\sim 300\text{ m}^3/\text{s}$) 和 $c=100\sim 450\text{ m}^3/\text{s}$ (现几乎断流))

Fig.6 Variation of water diverted from the main channel through the three bypasses (A for yearly and B for monthly), and long-term averaged daily stages of 1991—2002 and 2008—2014, and stage-discharge relationships of the three bypasses (C)

揭示提前干枯对湖区生态条件影响,作者根据鄱阳湖(南昌)和洞庭湖(荆州)实测气候资料计算比较了降水(P)与蒸散发能力(ET)的关系(图8)。鄱阳湖降水主要集中在上半年,7月后降水低于蒸发(9—10月P显著低于ET);洞庭湖8—10月降水约等于平均蒸发,很多年9—10月两湖几乎无降水。以月均干旱指数($r = ET/P$)计,鄱阳湖区8月进入旱季($r < 1, r_{\min} \ll 1$),洞庭湖伏秋处于临界干旱($\bar{r} \approx 1, r_{\min} \ll 1$),降水变差系数都远大于蒸发变差系数,很多年份伏秋季节两湖干旱。干旱年份湖区土壤失水强度 $W = ET_{\text{平均}} - P_{\text{最小}}$,鄱阳湖 $W_{8-10\text{月}} = 270\text{ mm}$ 、 $W_{11-2\text{月}} = 90\text{ mm}$;洞庭湖 $W_{8-10\text{月}} = 181\text{ mm}$ 、 $W_{11-2\text{月}} = 108\text{ mm}$,提前干枯后伏秋土壤失水强度远超过冬季(11—2月),总失水量显著增加。水位提前降低必然影响次年春季滩区墒情、增加春旱风险。

长江主要受季风控制,径流过程单一,平原冲积河流水与气温和自然热量高度同步,这是长江流域地理环境独特的先天优势,径流季节改变对中下游冲积平原与河湖生态环境将产生深刻影响。

2.4 长江口流量变化

9—10月适逢天文大潮,径流减少也影响长江口咸潮。上海水源70%依靠长江,主要水库(陈行和青草沙水库)均位于长江口内(图9)。三峡蓄水使大通最枯(1—2月)流量增加,这是有利条件。但是,大通以下区间调水和用水能力也大幅增加^[63-64]。枯水年10月盐水楔和北支海水倒灌等已经影响上海水源^[65]。现在,长江口、杭州湾长期劣V类水占60%~78%和100%^[66]。上游水库调节、调水和用水增加,上海水源不可靠性风险在不断增加^[67]。

淡水流量是河口水环境决定要素。1951—2002年,大通断面径流趋势平稳,平均递减率 $2.58\text{ 亿 m}^3/\text{a}$ (0.29%)。三峡论证^[68]认为大通10月平均流量 $35700\text{ m}^3/\text{s}$,水库蓄水后一般年份平均减少 $8400\text{ m}^3/\text{s}$,流量

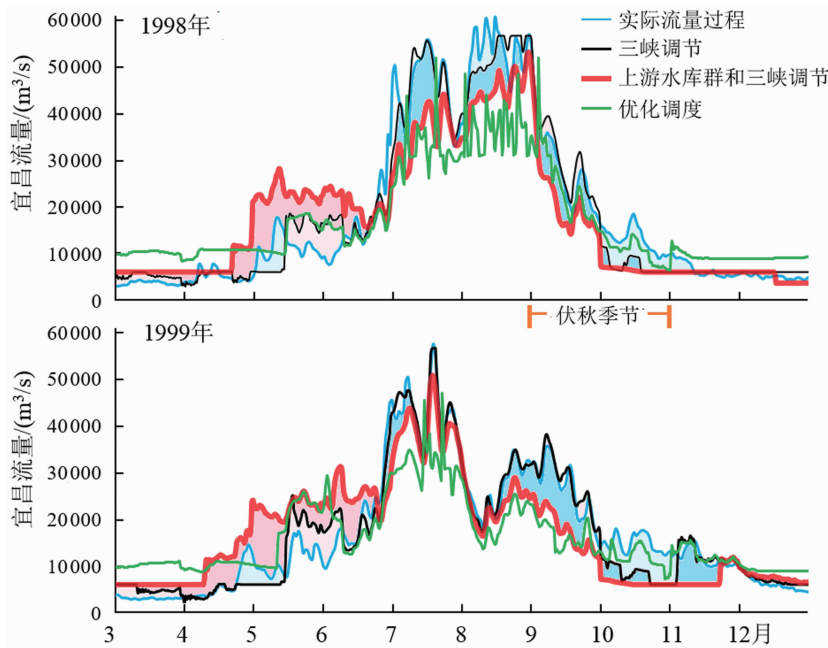


图7 根据上游水库群模型模拟三峡和上游水库调节对宜昌径流过程影响(1998、1999年情景)
(计算条件见文献[61],计算水库调度按规划运行方案;结果同样也揭示水库调节改变径流季节和引起伏秋径流干旱现象;1998年因为汛期防洪蓄水,因此9月流量有一定增加,其中优化调度方案结果是对上游水库群定位和蓄泄方式调整后的结果(见下文))

Fig.7 The model predicted forward-shifting of runoff seasons caused by the TGP and all the planned reservoirs in the upstream with examples of the real processes of 1998 and 1999

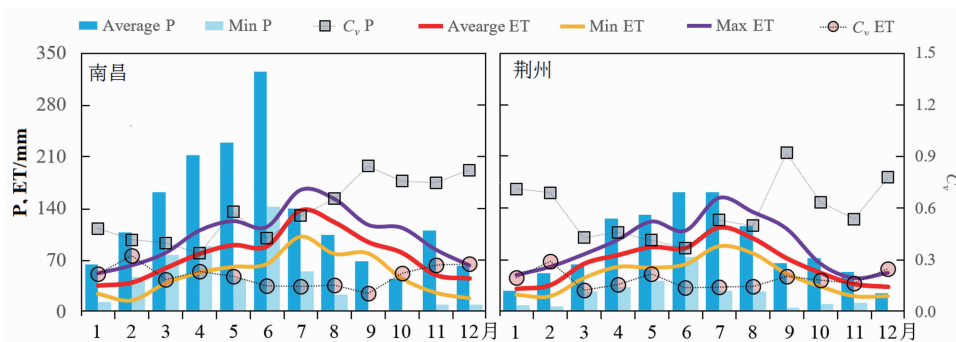


图8 鄱阳湖(南昌)和洞庭湖(荆州)平均蒸发能力(ET)与实测降水(P)比较

(降水和蒸发按逐日计算统计(2001—2016年),蒸发能力根据气象和辐射等资料按Penman公式计算^[43];Average、Max和Min分别是多年逐月平均、最大和最小值.降水和气象数据来自国家气象局(<http://data.cma.cn/data/edcindex>))
Fig.8 Comparisons of predicted potential evaporation with the measured precipitation in Poyang and Dongting Lakes

仍在 20000 m³/s 以上、能满足吴淞水厂要求. 然而实际情况是三峡蓄水前(1991—2002年)大通10月平均流量已经只有 30800 m³/s. 2006—2016年10月平均和最小流量平均分别降低到 23740 和 17560 m³/s, 7天滑动平均流量低于 15000 m³/s 出现 3次(1951—2002年只有 2次)(图9B), 流量小于 15000、18000 m³/s 出现 35 和 94 天(分别占 10.3% 和 27.5%)(1951—2002年共出现 11 和 45 天, 分别占 0.68% 和 2.80%). 10月大通流量小于 15000~18000 m³/s 出现频率显著增加.

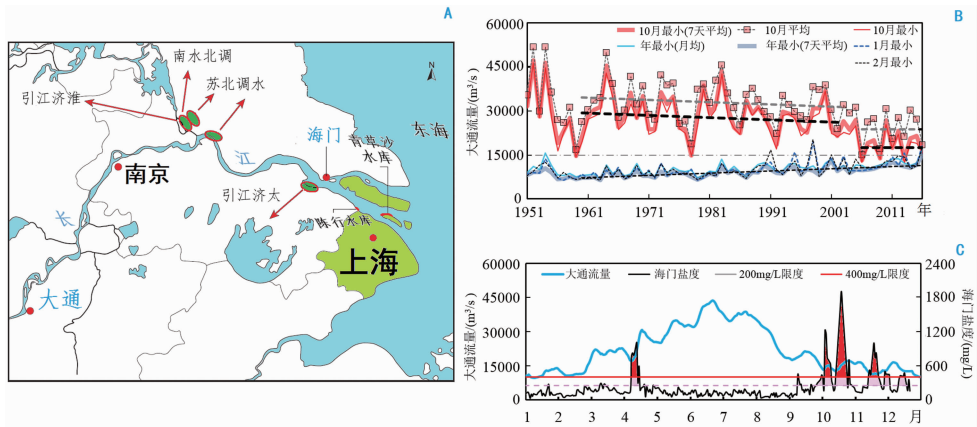


图9 大通流量和枯水变化及其与长江口咸潮的关系

(A:长江口位置关系;B:大通10月最小流量和其他枯水流量变化;C:2006年长江口咸潮与大通流量对应关系,其中海门盐度资料来自文献^[69],春天和秋冬海水倒灌,4月中旬海门氯化物浓度超过1000 mg/L、大通流量17100~21500 m³/s(大通以下引水流量最大超过10000 m³/s),10月流量平均(最大、最小)14960(17200、12500) m³/s、海门平均(最高、最低)氯化物浓度717(1908、160) mg/L。上海自来水厂和宝钢用水氯化物标准≤100和200 mg/L^[70])

Fig.9 Dry season discharge declination at Datong in Oct. and others and the estuarine saltwater intrusion in 2006

10月大通径流量一般大于最枯1—2月的流量,但考虑到10月易遭遇天文大潮和淡水密度低(10月淡水温度比1—2月高约20℃,泥沙浓度已降低近1.0 g/L,出海淡水密度比1—2月低3.0~3.5 g/L,相当于外海盐度从30提高到34~36)等利于盐水入侵;2006年10月(大通平均流量14960 m³/s)北支海水倒灌严重、海门实测氯化物浓度全月显著超过200 mg/L(图9C);大通以下引水、调水工程规模很大(图9A),这些工程越干旱年引水越多;上游还有很多待建大型水库、跨流域调水和控江工程等都会减少10月流量,今后河口盐水入侵影响上海水源最严重时期或变成10月。

3 长江径流变化修复对策

前面资料分析显示,上游大量调节、泥沙减少和河道冲刷等使近十余年中下游径流减少、节律提前、水位降低和河口流量改变,三峡水库长期拦中小洪水使中游河道萎缩和泄洪能力降低,对中下游河湖面貌和生态环境条件影响很大,旱、洪和咸潮威胁风险增加。这些变化主要与水库调节有关,清水冲刷也有一定关系。当前中下游冲刷已超过预期且仍在加速,上游水库拦沙和清水冲刷至少持续百年以上,中游河道冲刷下切存在改变河湖格局风险。

当前,流域工程管理主要问题是水库群以发电为主,规划防洪库容大而分散,汛后蓄水多而集中,重点防洪水库没有充分发挥作用。同时,三峡工程规划要求的防洪措施——蓄滞洪区建设长期拖延,河道泄洪能力萎缩,湖泊应对冲刷和水情改变能力严重不足。因此,长江径流修复首先要改善流域规划管理,在保证防洪安全前提下,通过调度和辅助工程措施尽量维护河湖汛后流量、水位,抑制河道过度冲刷。建议:1)优化调整流域规划,以“水资源工程”定位上游大型枢纽,以水资源目标统筹协调一水库调度,三峡工程切实执行“防洪第一”和加强金沙江下游水库主汛期防洪作用;2)水库科学挖泥修复泥沙通量,尽量增加下游河道造床泥沙和磷等物质通量;3)加强中下游防洪能力建设,弥补防洪体系短板,与全面小康同步建设中下游蓄滞洪区,降低上游防洪水库汛后蓄水压力;4)通过上游水库优化调度尽量维持两湖环境条件,“引清水入洞庭”和“供水设施建设”加强两湖适应能力。

3.1 优化调整流域工程规划

《长江流域综合规划》^[52]全面布局了防洪减灾、水资源利用和生态环境保护,但目前规划仍然存在一些突出问题。主要是发电、防洪和汛后蓄水与下游生态环境矛盾很大。同时,三峡规划汛限水位汛期偏离发电

机组最优条件,防洪发电矛盾也很大,加上中下游防洪能力建设长期滞后,汛期长期拦中小洪水和超汛限水位运行牺牲防洪能力. 三峡水库有效防洪能力比预期小很多^[62],特大洪水出现风险很大. 作者等对长江上游调度进行过研究^[60-61],建议国家统一调度控制水库,以水资源工程重新定位和以宜昌枯期流量最大目标优化调整调度. 具体包括 1) 金沙江下游梯级按防洪、发电与供水定位,6—7 月主汛期汛限水位降低到死水位,8 月视中下游汛情提前拦洪蓄水、帮三峡防洪;2) 更上游大型龙头水库以蓄水蓄能为主;3) 嘉陵江亭子口等定位于供水、防洪与发电,在泥沙较少期间尽量提前蓄水;4) 三峡严格坚持防洪第一原则,按动态汛限方式^[41-42]增加防洪库容和减少汛后蓄水;5) 各枢纽在长江泥沙较少期间适当提前蓄水和消落.

依据《长江上游水库群调度模拟决策支持系统》对长系列径流和上游规划水库情景进行全过程调节计算显示,优化调整后宜昌径流过程和 10 月流量得到很大改善(图 7). 各情景 14 年(1992—2005 年)平均宜昌枯期水量结果(表 1)表明,三峡等水库(2008 上游水库情景)没有增加枯期水量、10—11 月流量减少很大;规划水库都蓄水后可增加宜昌枯期流量 248 亿 m^3 ,但 9—11 月剧烈减少,中游汛后非常困难. 按上述原则调整后,9 月流量仍减少(主要是按 10 月 1 日开始蓄水,没有优化 9 月),枯期总水量比天然增加 664 亿 m^3 ,汛后流量减少局面得到很大程度扭转.

优化调整不但增加枯期水资源,上游总发电效益反而更好^[61]. 14 年中年/非汛期平均电量从 6404/3757 亿 kW h/a 增加到 6582/4347 亿 kW h/a,增幅 2.78%/15.7%. 主要是三峡和金沙江下游梯级枯期发电量大幅增加,这可提高水电竞争力. 防洪方面,上述调整减少了雅砻江、大渡河和金沙江中游防洪库容约 70 亿 m^3 ,金沙江下游 7 月防洪库容增加 84 亿 m^3 (总防洪库容 203 亿 m^3). 在几乎不动用三峡防洪库容条件下,优化后可使宜昌洪水基流明显降低(1998 年宜昌洪水流量降低到 40000 m^3/s 左右)(图 7),三峡更有能力防御更大洪水. 同时,三峡动态汛限水位调度还可预泄安全的人造洪峰,改善河湖生态. 长江全流域洪水主要发生在 7 月、主汛期洪量大,汛后流量降低很快. 用三峡和金沙江下游水库集中防洪效率更高. 后者 8 月蓄水,既发挥防洪作用也直接减少汛后蓄水量,而且金沙江下游是长江主要产沙区,低汛限水位可减少这些水库淤积. 三峡是中游关键防洪水库,需要利用其动库容灵敏性按动态汛限调度^[41-42],预泄安全洪水提高防洪库容和提高下游河道泄洪能力,同时动态汛限调度也可适当提高汛期小流量期坝前水位和减少汛后蓄水^[71]. 今后进一步优化方向是研究上游大型龙头水库转为多年调节.

表 1 长江上游水库调节对非汛期宜昌时段平均径流的影响(亿 m^3)

Tab.1 The effect of upstream regulations on dry season flow discharge

时段	实际情况	2008 水库情景 ^a	规划水库群 ^a	优化调整后 ^b
10—5 月	1641	1627	1889	2305
9 月	631	617	406	378
10 月	464	266	191	294
11 月	267	224	173	276

上游水库都按 1992—2005 年径流过程调度(a:规划确定原则和蓄水方案、三峡 10 月 1 日蓄水,b:调整方式、三峡 9 月 20 日蓄水),2008 水库含三峡和二滩等 2008 年 16 个现状水库,规划水库群含上游 93 个大型水库,优化调整调度是针对规划水库群.

3.2 水库挖泥修复泥沙通量

上游大量水电工程改变了中下游冲积河流基本条件和面貌,长远也影响这些工程的可持续性^[3,5,72]. 根据上游规划和三峡等水库排沙情况,目前中下游清水情景至少持续百年以上;当前荆江冲刷仍在加速,冲刷规模还可能很大;而且荆江冲刷是不稳定正反馈过程,冲刷越多,洞庭湖分水越少、冲刷越大;同时水库拦沙彻底改变了长江磷等循环机制,这是当前生态环境主要问题之一^[3,5]. 因此,当前最积极的措施是通过水库科学挖泥功能性修复泥沙通量^[3].

天然宜昌输沙量 5 亿 t/a ,功能性修复需要造床粗沙和高含磷细泥合计大约 5000 万 t (3000 万 t/a 粗沙和 2000 万 t/a 细泥)^[3,47],若考虑“引清水入洞庭”则需粗沙量更少(后面介绍). 在只有三峡水库情景下,河道型水库分选机制^[73-74]决定了两部分挖泥分别可在水库变动回水区和近坝段固定河段,操作比商业挖泥筒

单^[3],现行挖泥技术和水库条件足以支撑,费用在发电收益 2.5% 以内(按 8~10 元/t 公益单价)。变动回水区挖粗沙对水库减淤还很显著^[75]。

金沙江下游四大梯级建成后挖粗沙比较复杂。在乌东德或白鹤滩水库挖沙、长距离漂运和多次过坝,需一套挖沙、过坝和长距离运输系统(最上游水库变动回水区固定河段挖粗沙、大坝上下接力转运和用大型泥驳船通过水库下行漂运和抛掷到三峡坝前)。然而,建立这套系统也利于上游水库减淤、消除水库底泥污染累积和工程可持续性。长江泥沙主要来自金沙江下游攀枝花至屏山区间,1991—2005 年屏山输沙量仍在增加(2.58 亿 t/a,其中白鹤滩坝址以上 2 亿 t/a)^[76]。如果任其淤积,乌东德和白鹤滩水库死库容将在 30 和 60 年淤满,百余年后上游水库丧失拦沙能力,三峡将暴露在严重泥沙负荷下,对三峡工程寿命、生态环境和长江安全等危害很大。建立一套固定系统,从现在开始逐步消除淤积后患是保护长江的需要。在成本方面,估算挖泥和运输仍然不会超过梯级总发电收益 2.5%,这是水电开发必须付出的代价和成本。建议尽快在三峡近坝段和变动回水区挖泥修复泥沙通量、尽快开展上游水库挖粗沙转运系统研究规划。

3.3 加强中下游防洪能力建设

长江洪水峰高量大,历史灾害严重,防洪是治理重点。在“蓄泄兼筹、以泄为主”方针下,中游防洪体系主要包括堤防、水库和蓄滞洪区。堤防与河道泄洪能力是防洪的根本,水库削峰和蓄滞洪区消纳超额洪量是防洪的重要保障。现在,三峡等上游水库已初具规模、长江堤防明显加强,但河道泄洪能力低、蓄滞洪区建设严重拖延,三峡防洪调度也存在一些严重问题^[62]。中下游防洪能力严重不足也是三峡背离防洪原则拦中小洪水和过分依赖上游水库防洪的原因之一。长江委认为三峡建成后再遇 1954 年洪水,按枝城/城陵矶补偿方案调度中游仍然需要 398 亿/336 亿 m³分洪量^[48],作者研究显示现实需要分洪 515 亿/437 亿 m³^[62]。目前城陵矶附近目前只落实 100 亿 m³蓄滞洪区^[52]且尚不能使用,荆江等分洪区使用也面临严重困难。蓄滞洪区大量缺口决定了中游在特大洪水面前安全保障不足、被动分洪压力很大和防洪形势严峻。

长江防洪与生态环境保护有直接矛盾。三峡工程规划^[48]确定只防荆江特大洪水和相应减轻城陵矶以下防洪压力原则是平衡防洪和生态环境保护的基础。然而,因为防洪能力不足,三峡水库过度拦洪严重降低了下游流量变幅(河流健康主要指标之一)、增加了河道冲刷和降低枯期水位和减少了洞庭湖水量;过度依靠上游水库防洪更加大了水库汛后蓄水压力和中下游径流干旱程度。提高中下游河道防洪能力(关键是完成规划确定的蓄滞洪区建设和保证使用)是协调防洪与生态矛盾的关键。

考虑到当前人口和发展压力,分蓄洪区建设已超出单纯水利范畴,涉及分洪、排涝和安全设施建设,生产、生活、区内全面小康建设和可持续生产保障体系等,必须同时抓社会和能力建设。建议:1)将中游蓄滞洪区作为现代农业发展试点,走跨越式发展道路,按现代农业组织方式改造生产方式和提高生产力,以提高应对分洪和御灾能力;2)通过分洪保险和受保护区反补等措施建立风险分担机制;3)通过优惠政策鼓励资本投入、发展规模化农工商联营和农民土地债权企业;4)推动适应大生产方式的新型城镇化(以高楼社区为主)和基础设施建设;5)支持区内利用水、土和环境优势发展生态农业、生产绿色产品和保护环境。

3.4 加强洞庭湖和鄱阳湖生态适应能力建设

实际资料表明,汛后螺山和大通流量降低 5000 m³/s,城陵矶和湖口水位分别降低 1.4 和 2.0 m。洞庭湖三口分流受干流水位控制(图 5、7),1950s—1960s 三口年分流 1220 亿 m³(占入湖水量 40%);2008 年后只有 489 亿 m³,而且伏秋锐减和冬季断流,荆江冲刷还会加大幅度。鄱阳湖 2003—2009 年全年和枯季入湖(五河七口)径流比 1956—2002 年减少 22.7% 和 17.3%^[57]。干流水位降低和入湖径流减少是当前两湖环境面貌变化的主要原因,受干流上游水库调节严重影响。考虑到上游还有更多大型水库蓄水,伏秋流量减少、河道下切和水位降低趋势严重,目前清水冲刷已超过预期,后续冲刷量还很大,若不全力抑制,两湖前景不堪设想。因此,两湖修复首先需定位于缓解变化影响和增强适应能力。上游工程调整定位和统一优化调度后,9—10 月宜昌最小流量可提高 3800~5000 m³/s(图 7)(城陵矶和湖口水位提高 1.0~1.5 m、两湖面积增加显著)。将上游大型龙头水库从季调节变成年调节,作用更大。当前,更迫切需要抑制河道冲刷、摒弃三峡等防洪水库超汛限运行和回归三峡规划确定防大洪水原则、努力增加中游安全大洪水^[62]和三口分流等。通过流域优化管理维持伏秋流量和控制河道冲刷是保护两湖生态环境的根本。

两湖是长江重要生态单元,三峡建坝后若再推动两湖建闸隔断江湖将彻底破坏长江的完整性和生境系

统,并为防洪、水资源和环境管理设置人为障碍. 两湖建闸的核心功能与上游水库群9—10月蓄水滞流完全一致. 鄱阳湖建闸“调枯不控洪”方案的核心内容是抬高9—10月水位(0.5~1.5 m)缓解湖区过早干枯、维持冬季湖区一定水位^[57]. 现在长江口10月咸潮和上海饮水安全已成严重关切(图9). 以2006年实际情况为限,保证上海引水,大通10月流量大于15000~18000 m³/s应作为流域工程规划和管理的前提. 因此,为保大通流量,国家对“两湖建闸”决策必须慎重. 作者建议首先考虑流域水库优化管理,考虑受上游工程影响、两湖生态适应能力必须提高,进一步建议扩大“引清水入洞庭”增加湖区环境流量和水资源和加强鄱阳湖区蓄引水和地下水利用设施建设.

扩大“引清水入洞庭”的主要目标是改善荆江和洞庭湖防洪局面,对改善湖区生态环境、减少荆江冲刷和稳定中流格局也有重要作用^[77]. 天然三口分沙(1.45亿 t/a)淤积洞庭湖,三峡清水下泄为扩大入湖水量创造了条件. 通过挖深松滋口(并建闸控制洪水)和松滋河整治可将入湖流量恢复到1000亿 m³/a(主要增加引汛期中等流量、调节洪水和保证枯季生态流量),洞庭湖环境面貌和水质可得到根本改善,澧水下游防洪局面也可改善. 同时,增加入湖清水分散干流冲刷能量也是抑制荆江冲刷最有效途径之一,对维护荆江防洪安全和中游河湖格局非常重要. 这是三峡建成后长江中游最值得考虑的综合补救措施.

鄱阳湖是典型丰水地区. 湖区多年平均自产/过境水量234亿/1232亿 m³,2030年规划用水105.1亿 m³,灌溉需水为主(50%)、集中在7—9月,城乡生活用水只占8.7%;湖区供水主要依靠地表水(95%),近年水质呈下降趋势(枯季尤其更差)^[57],用比例和缺口很小但水质问题较大. 另一方面,入湖五河在湖区分布均匀、水量丰沛,计划新增灌溉面积和用水多集中这些河流尾间下游,湖湾等蓄水条件优良. 湖区工程性缺水问题通过中小工程措施解决更合理、影响更小、前景更大. 建议国家支持湖区在入湖河流尾间地区加强小型蓄引水设施建设、在分散地区抽地下水,形成体系和不断完善下去. 这才是统筹流域和保障湖区长远水资源安全的可靠途径.

4 结论

依据长江干支流长期实测资料,对近年中下游河川径流、泥沙、河道变化及其对河湖水位、水情和环境面貌的影响和原因进行了分析,主要受上游水利水电工程影响,中下游河川径流、节律和环境面貌已经发生了很大变化,对流域生态环境影响较大,这是长江中下游当前生态环境面临的主要问题之一. 修复长江生态环境需要把降低水利水电工程影响作为当前的重点. 根据作者等长期研究,提出了通过调整上游工程定位、优化管理调度和必要辅助措施等当前修复和长期维护长江健康径流节律的若干建议.

5 参考文献

- [1] Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission ed. The Yangtze River Chronicles—Hydrology. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 2000. [长江水利委员会水文局. 长江志——水文. 北京: 中国大百科全书出版社, 2000.]
- [2] Zhou J, Zhang M, Lu P. The effect of dams on phosphorus in the middle and lower Yangtze River. *Water Resources Research*, 2013, **49**(6): 3659-3669.
- [3] Zhou JJ, Zhang M, Li Z. Dams altered Yangtze River phosphorus and restoration countermeasures. *J Lake Sci*, 2018, **30**(4): 865-880. DOI: 10.18307/2018.0401. [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. 湖泊科学, 2018, **30**(4): 865-880.]
- [4] Zhou JJ, Yang Q, Zhang M. Thermal-effect of the upper Yangtze reservoirs and countermeasures. *J Lake Sci*, 2019, **31**(1). DOI: 10.18307/2019.0101. [周建军, 杨倩, 张曼. 长江上游水库热环境效应与修复对策. 湖泊科学, 2019, **31**(1).]
- [5] Zhou JJ, Zhang M. On the forefront ecological and environmental problems of current Yangtze River and restoration priorities. *Environmental Protection*, 2017, **617**(45): 17-24. [周建军, 张曼. 当前长江生态环境主要问题与修复重点. 环境保护, 2017, **617**(45): 17-24.]
- [6] Nilsson C, Reidy CA, Dynesius M *et al.* Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, 2005, **308**: 405-408.

- [7] Humborg C, Ittekkot V, Cociasu A *et al.* Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure. *Nature*, **386** (6623): 385-388.
- [8] Nilsson C, Berggren K. Alterations of riparian ecosystems caused by river regulation: Dam operations have caused global-scale ecological changes in riparian ecosystems. How to protect river environments and human needs of rivers remains one of the most important questions of our time. *BioScience*, 2000, **50**(9): 783-792.
- [9] Jansson R, Nilsson C, Renöfält B. Fragmentation of riparian floras in rivers with multiple dams. *Ecology*, 2000, **81**(4): 899-903.
- [10] Rosa LP, Santos MA dos, Matvienko B *et al.* Greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs in tropical regions. *Clim Change*, 2004, **66**(1/2): 9-21.
- [11] Tockner K, Stanford JA. Riverine floodplains: present state and future trend. *Environmental Conservation*, 2002, **29**: 308-330.
- [12] Prowse TD, Peters D, Beltaos S *et al.* Restoring Ice-jam Floodwater to a Drying Delta Ecosystem. *Water Int*, 2002, **27** (1): 58-69.
- [13] Poff NL, Allan JD, Bain MB *et al.* The Nature of flow regime. *BioScience*, 1997, **47**: 769-784.
- [14] Gehrke PC, Gilligan DM, Barwick M. Changes in fish communities of the Shoalhaven River 20 years after construction of Tallowa Dam, Australia. *River Res Appl*, 2000, **18**(3): 265-286.
- [15] Penczak T, Kruk A. Threatened obligatory riverine fishes in human-modified Polish rivers. *Ecol Freshw Fish*, 2000, **9** (1/2): 109-117.
- [16] Poff NL, Olden J, Merritt DM *et al.* Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, **104**: 5732-5737.
- [17] Power ME, Dietrich WE, Finlay JC. Dams and downstream aquatic biodiversity: potential food web consequences of hydrologic and geomorphic change. *Environmental Management*, 1996, **20**(6): 887-895.
- [18] Bunn SE, Arthington AH. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environ Manage*, 2002, **30**: 492-507.
- [19] Benke A. Perspective on America's vanishing streams. *Journal of the North American Benthological Society*, 1990, **9**(1): 77-88.
- [20] Ligon FK, William ED, William JT. Downstream ecological effects of dams. *BioScience*, 1995, **45**(3): 183-192.
- [21] Graf WL. Dam nation: a geographic census of American dams and their large-scale hydrologic impacts. *Water Resour Res*, 1999, **35** (4): 1305-1311.
- [22] Graf WL. Damage control: restoring the physical integrity of America's rivers. *Annals of the Assoc of Amer Geographers*, 2001, **91** (1): 1-27.
- [23] Magilligan FJ, Nislow KH. Long-term changes in regional hydrologic regime following impoundment in a humid-climate watershed. *Journal of the American Water Resources Association*, 2001, **37**(6): 1551-1569.
- [24] Nislow KH, Magilligan FJ, Fassnacht H *et al.* Effects of hydrologic alteration on flood regime of natural floodplain communities in the upper Connecticut River. *Journal of the American Water Resources Association*, 2010, **38**: 1533-1548.
- [25] Graf WL. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. *Geomorphology*, 2006, **79**: 336-360.
- [26] Vörösmarty CJ, Meybeck M, Fekete B *et al.* Anthropogenic sediment retention: Major global impact from registered river impoundments. *Global and Planetary Change*, 2003, **39**: 169-190.
- [27] Changjiang Water Resource Commission ed. Studies on sediment problems of the Three Gorges Project. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1997. [长江水利委员会. 三峡工程泥沙研究. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997.]
- [28] Williams GP, Wolman MG. Downstream effects of dams on alluvial rivers. Geological Survey Professional Paper 1286. 1984, US Geological Survey, Washington, DC.
- [29] Grant GE, Schmidt JC, Lewis SL. A geological framework for interpreting downstream effects of dams on rivers. A Unique River. *Water Science and Application, American Geophysical Union*, 2003, (7): 209-225.
- [30] Yang Z, Wang H, Saito Y *et al.* Dam impacts on the Changjiang (Yangtze) River sediment discharge to the sea: The past 55 years and after the Three Gorges Dam. *Water Resour Res*, 2006, **42**(4): W04407.
- [31] Syvitski JP, Vörösmarty CJ, Ketter AJ *et al.* Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal o-

- cean. *Science*, 2005, **308**: 376-380.
- [32] Syvitski JP, Kettner AJ, Overeem I *et al.* Sinking deltas due to human activities. *Nature Geosci*, 2009, **2**: 681-686.
- [33] Kesel RH. Human modifications to the sediment regime of the Lower Mississippi River flood plain. *Geomorphology*, 2003, **56**: 325-334.
- [34] Day JW, Britsch L, Hawes S *et al.* Pattern and process of land loss in the Mississippi Delta: a spatial and temporal analysis of wetland habitat change. *Estuar Coasts*, 2000, **23**: 425-438.
- [35] Paola C, Twilley RR, Edmonds DA *et al.* Natural Processes in Delta Restoration: Application to the Mississippi Delta. *Annual Review of Marine Science*, 2011, **3**: 67-91.
- [36] Blum MD, Roberts HH. Drowning of the Mississippi delta due to insufficient sediment supply and global sea-level rise. *Nature Geosci*, 2009, **2**: 488-491.
- [37] Nittrouer JA, Viparelli E. Sand as a stable and sustainable resource for nourishing the Mississippi River delta. *Nature Geosci*, 2014, **7**: 350-354.
- [38] Brandt SA. Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena*, 2000, **40**: 375-401.
- [39] Magilligan FJ, Nislow KH. Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology*, 2005, **71**: 61-78.
- [40] Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Tsinghua University, China Yangtze Power Co. Ltd. A technical report of the decision and supports system for the operation of cascade reservoirs in the upper Yangtze Valley. Hubei, Yichang, 2007. [中国科学院成都山地所, 清华大学, 三峡梯级调度通信中心. 长江上游水库群蓄水调度模拟决策支持系统. 湖北宜昌, 2007.]
- [41] Zhou JJ, Cheng GW, Yuan J *et al.* Dynamic storage of Three Gorges reservoir and its application to flood regulations; 1. Sensitivity in regulation. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, **32**(1): 163-167. [周建军, 程根伟, 袁杰等. 三峡水库动态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. 水力发电学报, 2013, **32**(1): 163-167.]
- [42] Zhou JJ, Cheng GW, Yuan J *et al.* Dynamic storage of Three Gorge reservoir and its application to flood regulations; 2. Flood regulations with dynamic flood control levels. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, **32**(1): 168-173. [周建军, 程根伟, 袁杰等. 三峡水库动态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. 水力发电学报, 2013, **32**(1): 168-173.]
- [43] Penman HL. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceed of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1948, **193**(1032): 120-145.
- [44] Sun ZY, Liu XZ, Li C. Estimations of evaporation from the Three Gorges Reservoir. Technical progress in dam construction and management—Academic papers of annual meeting of the China dam association, 2012. [孙志禹, 刘晓志, 李翀. 三峡水库库区蒸发损失水量估算. 水库大坝建设与管理中的技术进展——中国大坝协会 2012 学术年会论文集, 2012.]
- [45] Stocker TF, Qin D, Plattner GK *et al.* Climate change 2013: The physical science basis. contribution of working group I to the 5th assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: United Kingdom & New York, Cambridge University Press, 2013.
- [46] Chien N, Zhang R, Zhou ZD eds. Fluvial processes. Beijing: Science Press, 1987. [钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学. 北京: 科学出版社, 1987.]
- [47] Zhou JJ, Zhang M. On the restoration strategies of alluvial rivers downstream of dams. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, **31**(6): 113-122. [周建军, 张曼. 大坝下游冲积河流修复与保护对策研究. 长江科学院院报, 2014, **31**(6): 113-122.]
- [48] Changjiang Water Resources Commission. Integrated Planning. Preliminary design of the Three Gorges Project, Vol IV. Wuhan: Changjiang Water Resources Commission, 1992. [长江水利委员会. 综合利用规划. 长江三峡水利枢纽初步设计报告: 枢纽工程, 第 4 篇, 1992.]
- [49] Zhu LL, Xu QX, Xiong M. Fluvial processes of meandering channels in the Lower Jingjiang River reach after the impoundment of Three Gorges Reservoir. *Advances in Water Science*, 2017, **8**(2): 193-202. [朱玲玲, 许全喜, 熊明. 三峡水库蓄水后下荆江急弯河道凸冲凹淤成因. 水科学进展, 2017, **8**(2): 193-202.]
- [50] Zhang R, Zhou JJ. Comments on the modeling result of long-reach erosion downstream of TGP by CRSRI and IWHR, TGP Sediment Research (1996-2000), Vol. 7. Beijing: Intellectual Property Publishing House, 2002: 312-322. [张仁, 周建军. 对于长科院及水科院三峡水库下游河道长距离冲刷计算成果的评论. 《长江三峡工程泥沙问题研究(1996—

- 2000)》第七卷. 北京: 知识产权出版社, 2002: 312-322.]
- [51] Li YT. Comparisons of the one dimensional model prediction of channel scouring downstream of the TGP, TGP sediment Research (1996-2000), Vol. 7. Beijing: Intellect Property Publishing Housed, 2002: 323-338. [李义天. 三峡水库下游一维数学模型计算成果比较. 长江三峡工程泥沙问题研究(1996-2000)(第七卷). 北京: 知识产权出版社, 2002: 323-338.]
- [52] Changjiang Water Resources Commission. Integrated Planning of the Yangtze Valley. 2010. [水利部长江水利委员会. 长江流域综合规划. 2010.]
- [53] Yang HR, Tang RC eds. Research on river morphology variation of Jingjiang reach of the Yangtze River. Beijing: China Water Power Press, 1999.[杨怀仁, 唐日长. 长江中游荆江变迁研究(第1版). 北京: 中国水利水电出版社, 1999.]
- [54] Zhou JJ. Situation of the Mid-Yangtze flood after the commencement of the Three Gorges Project and the countermeasures (I). *Science and Technology Review*, 2010, **28**(22): 60-62. [周建军. 三峡建成后长江中游的防洪形势和解决方案(I). 科技导报, 2010, **28**(22): 60-62.]
- [55] Zhou JJ. Situation of the Mid-Yangtze flood after the commencement of the Three Gorges Project and the countermeasures (II). *Science and Technology Review*, 2010, **28**(23): 46-55. [周建军. 三峡建成后长江中游的防洪形势和解决方案(II). 科技导报, 2010, **28**(23): 46-55.]
- [56] Jiang JH, Huang Q. Analysis of the lake basin change and the rushing-silting features in the past decades of Dongting Lake. *J Lake Sci*, 2004, **16**(3): 209-214. DOI: 10.18307/2004.0303.[姜加虎, 黄群. 洞庭湖近十年来湖盆变化及冲淤特征. 湖泊科学, 2004, **16**(3): 209-214.]
- [57] Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Jiangxi Water Resources Bureau Institute. Proposal of the water conservancy project of Poyang Lake, 2012. [长江勘测规划设计研究有限公司, 江西水利厅规划设计院(长规院与江西水利厅). 鄱阳湖水利枢纽项目建议书(审定稿)(第二分册), 2012.]
- [58] Huang YL, Huang Y eds. 1D computation of the fluvial process of the Yangtze from Yichang to Datong after the TGP, Series Publications on the sediment problems of the Three Gorges Project(1996-2000), Vol 7. Beijing: Intellect Property Publishing Housed, 2000: 258-311.[黄煜龄, 黄悦. 三峡水库下游宜昌至大通河段冲淤一维数模计算分析(二). 长江三峡工程泥沙问题研究(1996-2000)(第七卷). 北京: 知识产权出版社, 2000: 258-311.]
- [59] Pinter N, Heine RA. Hydrodynamic and morphodynamic response to river engineering documented by fixed-discharge analysis, Lower Missouri River, USA. *J Hydrol*, 2005, **302**: 70-91.
- [60] Zhou JJ, Cao GJ. Strategies of water project development in the upstream of the Yangtze valley(I). *Science and Technology Review*, 2009, **27**(9): 48-56. [周建军, 曹广晶. 对长江上游水资源工程建设的研究与建议(I). 科技导报, 2009, **27**(9): 48-56.]
- [61] Zhou JJ, Cao GJ. Strategies of water project development in the upstream of the Yangtze valley(II). *Science and Technology Review*, 2009, **27**(10): 43-51. [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). 科技导报, 2009, **27**(10): 43-51.]
- [62] Zhang M, Zhou JJ, Huang GX. Flood control problems in middle reaches of Yangtze river and countermeasures. *Water Resource Protection*, 2016, **32**(4): 1-10. [张曼, 周建军, 黄国鲜. 长江中游防洪问题与对策. 水资源保护, 2016, **32**(4): 1-10.]
- [63] Chen X, Zhang E, Xu J. Large and episodic decrease of water discharge from the Yangtze River to the sea during the dry season. *Hydrological Sciences Journal*, 2002, **47**(1): 41-48.
- [64] Chen D, Webber M, Finlayson B *et al.* Impact of water transfers from the lower Yangtze River on water security in Shanghai. *Applied Geography*, 2013, **45**: 303-310.
- [65] Dai ZJ, Li WH, Li FJ *et al.* Analysis of the saltwater intrusion in the Changjiang estuary during the flood season in extreme drought year. *Advances in Water Science*, 2008, **119**(6): 836-840. [戴志军, 李为华, 李九发等. 特枯水文年长江河口汛期盐水入侵观测分析. 水科学进展, 2008, **119**(6): 836-840.]
- [66] Ministry of Environmental Protection, PRC. Bulletin on environmental conditions in China, <http://www.zhb.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/>.2016. [环境保护部(2012-2016), 中国环境状况公报, <http://www.zhb.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/>.]
- [67] Webber M, Barnet J, Chen ZY *et al.* Constructing water shortages on a Huge River: The case of Shanghai. *Geographical*

- Research*, 2015, **53**(4): 406-418.
- [68] Panel report of the TGP eco-environment assessment. Ecological and environmental assessment of TGP. Vol. 10 of the TGP Feasibility studies, 1988. [长江三峡工程论证生态与环境专家组. 长江三峡工程生态与环境专题论证报告, 长江三峡工程专题论证报告之十, 1988.]
- [69] 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? *AMBIO*, 2011, **40**: 496-505.
- [70] Shen HT, Mao ZC, Zhu JR. Saltwater intrusion at the Yangtze estuary. Beijing: China Ocean Press, 2003. [沈焕庭, 茅志昌, 朱建荣. 长江口盐水入侵. 北京: 海洋出版社, 2003.]
- [71] Zhou JJ. Study on the dynamic control of flood level in summer and operation schemes after flood season [Dissertation]. Beijing: Tsinghua University, 2007. [周建军. 三峡水库汛期动态汛限水位调度与汛后蓄水方式研究[学位论文]. 北京: 清华大学, 2007.]
- [72] Zhou JJ. Research on the schemes of optimal operation to reduce deposition and to increase flood control capacity for the TGP, Sediment research of the TGP 1996-2000, Vol. 5. Beijing: Intellect Property Publishing Housed, 2002: 358-425. [周建军. 三峡水库减少淤积、增加防洪库容优化调度方案研究. 长江三峡工程泥沙问题研究(1996—2000)(第五卷). 北京: 知识产权出版社, 2002: 358-425.]
- [73] Zhou J, Zhang M, Cao H. Removing coarse sediment by sorting of reservoirs. *Science China, Tech Sci*, 2011, **54**(4): 903-913.
- [74] Zhou J, Zhang M, Lin B *et al.* Lowland fluvial phosphorus altered by dams. *Water Resources Research*, 2015, **51**(4): 2211-2226.
- [75] Zhou JJ, Cao HQ, Zhang M. Reducing deposition in TGP reservoir by dredging coarse sediment. *Science and Technology Review*, 2010, **28**(9): 26-36. [周建军, 曹慧群, 张曼. 三峡水库挖粗沙减淤研究. 科技导报, 2010, **28**(9): 26-36.]
- [76] Xu QX. Research on the variation of Sediment Transport regularity and affecting factors in the Upper Changjiang River [Dissertation]. Wuhan: Wuhan University, 2007. [许全喜. 长江上游河流输沙规律变化及其影响因素研究[学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2007.]
- [77] Lin BN, Zhou JJ. To improve the flood situation over Dongting Lake and Jingjiang stretch by clean water from the TGP. *China Three Gorges Construction*, 2003, (12): 4-6. [林秉南, 周建军. 利用三峡枢纽下泄清水改善洞庭湖和荆江的防洪局面. 三峡工程建设, 2003, (12): 4-6.]