



News & Highlights

三峡工程运行以来的几个问题思考

郑守仁

Changjiang Water Resources Commission, Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China

1. 概述

三峡工程初步设计将三峡水库蓄水分为：围堰挡水发电期、初期运行期和正常运行期。2003年水库蓄水至135 m水位，进入围堰挡水发电期；2007年蓄水至156 m水位，进入初期运行期；2009年枢纽工程完建，具备蓄水至正常蓄水位175 m的条件，仍按初期蓄水位运行。初期运行的历时，主要根据库区移民安置情况、库尾泥沙淤积实测观测成果以及重庆港泥沙淤积影响等情况，确定需用时6年，即2013年水库蓄水至设计水位175 m，进入正常运行期。

三峡工程于1993年施工准备，1994年12月开工，1997年11月6日大江截流，1998年开始施工左岸大坝和电站厂房。2002年10月大坝泄洪坝段导流底孔过流，11月6日导流明渠截流，左岸泄洪坝段、左厂房坝段、非溢流坝段及升船机上闸首建成，开始挡水。2003年6月，蓄水至135 m水位，7月左岸电站首批机组发电，双线五级连续船闸通航，进入围堰挡水发电期。2004年右岸大坝及电站厂房开始施工，2005年左岸电站14台机组全部投产。2006年6月右岸大坝混凝土施工至坝顶高程185 m，上游碾压混凝土围堰爆破拆除，拦河大坝全线挡水，10月蓄水至156 m水位，提前一年进入初期运行期。2007年右岸电站7台机组投产。2008年8月，大坝及电站厂房和双线五级连续船闸全部完建，具备蓄水至正常蓄水位175 m的条件；移民工程县城和集镇迁建完成，移民安置、库区清理、地质灾害防治、水污染防治、生态环境保护、文物保护等专项，经主管部门组织验收，可满足水库蓄水至175 m水位的要求。国务院三峡工程

建设委员会批准三峡工程2008年汛末实施175 m试验性蓄水，标志着三峡工程由蓄水位156 m运行转入175 m试验性运行。

2. 长江上游水文情势变化与三峡水库调度优化问题

2.1. 三峡工程坝址洪水特性

三峡工程坝址洪水由长江干流金沙江和各支流洪水共同汇集而成。坝址以上大洪水均是由上游地区较大范围的暴雨所致，暴雨主要出现在每年的7—9月。长江上游北岸的岷江、沱江、嘉陵江(见图1)自北向南流经川西暴雨区和大巴山暴雨区，河流走向与暴雨走向基本一致，各支流洪水易与上游干流及干流区间洪水遭遇，形成上游干流的大洪水。坝址洪水按宜昌站1877年以来实测最大洪峰流量 $71\ 100\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ，历史调查最大洪峰流量为 $105\ 000\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。大坝按千年一遇洪水流量 $98\ 800\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 设计，相应设计洪水位为175 m；按万年一遇洪水流量 $113\ 000\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 加10%洪水流量 $124\ 300\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 校核，相应校核洪水位为180.4 m。

2.2. 长江上游水文情势变化

三峡工程初步设计水文资料采用坝址下游30 km的宜昌站的实测资料，平均年径流量为 $4.51\times 10^{11}\ \text{m}^3$ ，平均年输沙量为 $5.21\times 10^8\ \text{t}$ [1]。20世纪90年代以来，长江上游径流量减少不多；受降水条件变化、干支流修建水库、实施水土保持、封山育林及防治石漠化措施，以及河道采砂等的综合影响，上游来沙明显减少(见表1)。

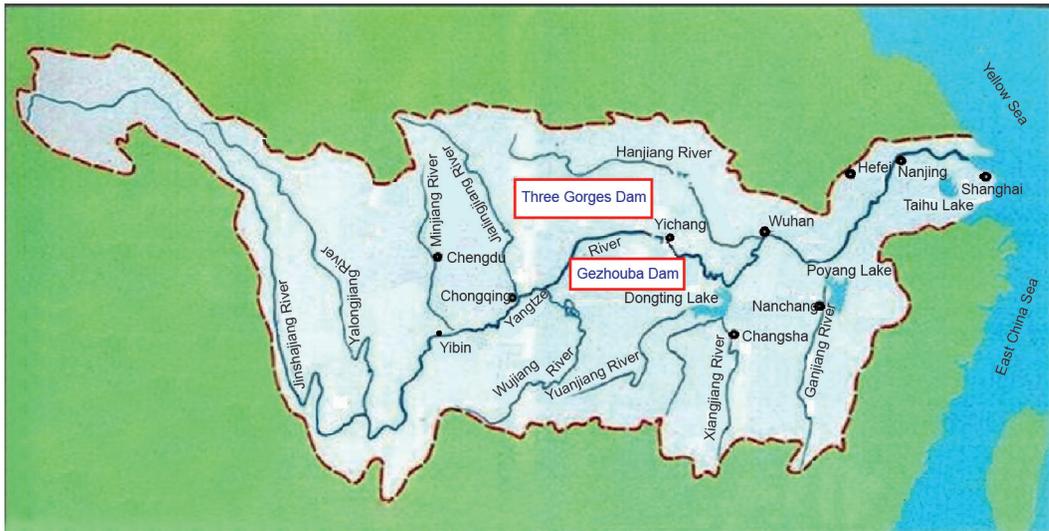


图1. 长江流域水系简图。

表1 三峡工程坝址及入库径流和泥沙变化汇总

Location	Annual average runoff ($\times 10^9 \text{ m}^3$)				Annual average sediment load ($\times 10^6 \text{ t}$)					
	Preliminary design value (1877–1990)	Before impoundment (1991–2002)		After impoundment (2003–2015)		Preliminary design value (1877–1990)	Before impoundment (1991–2002)		After impoundment (2003–2015)	
		Observed value	Compared to preliminary design value	Observed value	Compared to preliminary design value		Observed value	Compared to preliminary design value	Observed value	Compared to preliminary design value
TGP damsite	451.0	428.7	-4.94%	400.3	-11.24%	521	391	-25.0%	40.4	-92.2%
Site flowing into the Three Gorges Reservoir	401.5	387.1	-3.59%	369.0	-8.09%	491	357	-27.3%	164.5	-66.5%

Note: Cuntan and Wulong Hydrometrical Stations represent the site flowing into the Three Gorges Reservoir.

三峡工程入库泥沙减少，有利于水库长期运行。2003—2015年坝址多年平均年径流量为 $4.003 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，较初步设计采用值减少 $5.07 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，减幅为11.24%。上游径流的季节变化规律与降水相似，年内分配极不均匀，汛期6—9月，径流量占全年径流量的70%~75%。近20年来，汛期及10月、11月经流量较初步设计减小，12月至次年5月经流量增加[2]。

2.3. 三峡工程初步设计水库调度运行方式

每年汛期(6月中旬至9月下旬)水库按防洪限制水位145 m运用，控制下泄流量为 $55\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，以满足坝下游荆江河段起始枝城站(距大坝105 km)流量不超过 $56\,700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的要求。当发生流量小于 $55\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的洪水时，按水位145 m敞泄；当发生流量大于 $55\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的洪水时，需要运用下游防洪调度，水库拦蓄洪水，控制下泄流量。因拦蓄洪水将使水位抬升，洪水过后需复降至145 m，以防下次洪水。汛后10月初开始蓄水，有利于库尾重庆河段走沙，并考虑下游航运要

求，蓄水期间最小下泄流量不低于电站保证出力相应的流量，库水位逐步上升至175 m。枯水期一般按高水位运行。汛前的6月上旬末降至145 m。汛期的防洪调度以对荆江河段进行防洪补偿的方式，使荆江防洪标准由十年一遇提高至百年一遇，即长江上游发生百年一遇洪水流量 $83\,700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时，通过三峡水库调控，可使沙市站(距大坝190 km)水位低于44.5 m；遭遇百年一遇以上至千年一遇洪水时，控制枝城站流量不大于 $80\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，配合滞蓄洪区运用，保证荆江河段行洪安全，沙市站水位不超过45 m，避免两岸干堤溃决，发生毁灭性灾害[3]。

2.4. 试验性蓄水运用期的防洪调度与蓄水调度

2.4.1. 三峡水库防洪调度兼顾对城陵矶防洪补偿调度

通过对近20年长江上游洪水资料分析，最大洪水为1998年宜昌站洪峰流量 $63\,300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，尚不到十年一遇洪水流量。三峡工程如遇类似1998年洪水，按对荆江河段防洪补偿调度，水库拦蓄洪量为 $3 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，尚有大部

分防洪库容未运用，而下游城陵矶地区(距大坝450 km)防洪紧张，显然没有充分发挥三峡水库的防洪作用。因此，在三峡工程试验性蓄水运用期间，2009年10月经主管部门审批，对三峡水库调度方案进行优化，防洪调度兼顾对城陵矶防洪补偿调度(见表2)。

2.4.2. 汛期中小洪水滞洪调度

三峡水库对荆江防洪补偿调度按沙市站水位不超过44.5 m控制，水库拦蓄洪水流量在 $55\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 以上，洪水流量为 $45\,000\sim 55\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 时，水库敞泄的流量将使沙市水位高于警戒水位43 m，长江中游沿线相应超过警戒水位。中下游约有30 000 km堤防，其中，长江干堤约3900 km，均是修建在第四纪冲积平原上，堤身土质结合不良，挡高水位时堤内易出现渗漏、堤基出现管涌等险情。汛期河道水位达到警戒水位时，需要耗费大量的人力物力上堤查险。据统计，荆江河段每10年就有3年以上河道水位超过警戒水位，三峡水库利用防洪库容拦蓄 $55\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 以下的中小洪水，可以减轻长江中下游防洪压力。鉴于三峡水库洪水组成较复杂，实施中小洪水滞洪调度，超过防洪限制水位的概率增多，增加了防洪风险。因此中小洪水滞洪调度原则为：以降低三峡工程防洪标准、基本不增加下游防洪压力为前提，以大洪水入库之前将库水位预泄至汛限水位为条件，根据防洪形势、实际来水以及预测预报情况进行控制。当三峡水库不需要为荆江和城陵矶进行防洪补偿调度时，

可启用中小洪水滞洪调度，并设定了启用条件。2009—2015年汛期，实施了中小洪水滞洪调度，减轻了荆江河段和城陵矶地区的防洪压力；利用了部分洪水资源，增加发电效益；避免了因长时间的大流量泄洪，导致长时间过船闸船舶限航积压造成经济损失，取得了良好的经济社会效益。鉴于中小洪水滞洪调度，每年汛期下泄流量在 $45\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 以下，可能导致中下游洪水河道萎缩退化，为此，在条件具备的情况下，采取间隔几年下泄 $55\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 左右的流量，全面检验荆江河段堤防和河道泄洪能力，防止河道萎缩[4]。

2.4.3. 汛末提前蓄水调度

近20年来，宜昌9月份月平均流量为 $23\,100\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ，10月份月平均流量为 $14\,600\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ，与初步设计相比，分别偏枯11.2%及22.3%。三峡水库为季调节水库，若仍按初步设计规定的汛后10月初开始蓄水，大部分年份水库蓄水位不到175 m，严重影响三峡工程发挥综合效益。为此，在2008年试验性蓄水时将蓄水时间提前至9月下旬，起蓄水位为145.3 m，此后各年蓄水时间提前至9月10—15日，起蓄水位承接前期防洪调度实际水位，9月底蓄水位为162 m左右，9月份下泄流量不小于 $8000\sim 10\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ，10月份下泄流量不小于 $6500\sim 8000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ，10月底或11月初蓄水至水位175 m。蓄水期间，长江上游发生较大洪水，入库流量超过 $30\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ，暂停蓄水，按防洪要求调度。三峡水库试验性蓄水运行各年的蓄水情况见表3。

表2 三峡水库优化调度的防洪调度方式

Three Gorges Reservoir			
Water level up-stream of the damsite (m)	Flood control storage capacity ($\times 10^9\text{ m}^3$)	Flood control operation mode	Conditions required to use TGP's flood control storage capacity
175–171	3.92	Operation for preventing upstream extraordinary flood: Discharge at Zhicheng Hydrometrical Station in Jingjiang River reach is controlled not in excess of $80\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; in combination with flood detention and storage measures, water level at Shashi Hydrometrical Station is controlled to be not higher than El. 45 m	If a flood with a return period of over 100 or 1000 years (maximum peak discharge of $98\,800\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) or a flood similar to the 1870 extraordinary flood (maximum peak discharge at Yichang Hydrometrical Station of $105\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) occurs upstream of the Three Gorges Reservoir
171–155	12.58	Flood control compensation operation for Jingjiang River reach: Water level at Shashi Hydrometrical Station is not higher than El. 44.5 m after the controlled flow discharged from reservoir is superposed with the inflow from between the damsite and the city of Shashi	If a 100 year frequency or below 100 year frequency flood (maximum peak discharge of $83\,700\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) occurs upstream of the Three Gorges Reservoir
155–145	5.65	Flood control compensation operation for the Chenglingji reach is considered at the same time: Compensation regulation is conducted in terms of El. 34.4 m at Chenglingji Hydrometrical Station	If a flood from upstream of the Three Gorges Reservoir is not great, it is not yet necessary to impound a large volume of water for meeting the flood control need for the Jingjiang River reach, and the water level at Chenglingji Hydrometrical Station will exceed the design level for dykes built along the main Yangtze River, then the Three Gorges Reservoir is required to retain and impound flood water

表3 三峡工程175 m试验性蓄水运行各年蓄水资料汇总

Year	Annual runoff ($\times 10^9 \text{ m}^3$)	Starting impoundment date and starting impoundment water level			Highest impoundment water level and date	
		Starting impoundment date	Starting impoundment water level (m)	Impoundment water level on September 30 (m)	Highest impoundment water level (m)	Date
2008	429.0	September 28	145.3	149.1	172.80	November 4
2009	388.1	September 15	145.9	157.1	171.43	November 24
2010	406.7	September 10	160.2	162.6	175.00	November 26
2011	339.5	September 10	152.2	166.1	175.00	November 30
2012	448.1	September 10	158.9	169.0	175.00	November 30
2013	367.8	September 10	156.7	166.9	175.00	November 11
2014	438.0	September 15	164.6	168.5	175.00	October 31
2015	377.7	September 10	156.0	166.4	175.00	October 28

2.5. 试验性蓄水运行期间的水资源调度与生态调度

2.5.1. 水资源调度

三峡工程试验性蓄水期间,为应对长江中下游干流以及洞庭湖和鄱阳湖两湖地区水位下降较快的局面,优先保障中下游地区城乡居民生活用水,统筹考虑生活、生产、生态用水需求。2009年中下游地区出现干旱灾害,为缓解旱情,水库蓄水至171.43 m,停止蓄水,加大下泄流量。库水位消落期,根据中下游地区供水、航运、生态与环境以及发电等方面的要求调节下泄流量,按不低于 $6000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 控制。

2.5.2. 生态调度

三峡工程于2011年开始针对四大家鱼(青鱼、草鱼、鲢、鳙)繁殖的生态调度试验。在四大家鱼繁殖期间的5月下旬至6月中旬,大坝下游河道水温达到 $18 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上。结合汛前腾空库容的需要,根据上游来水情况,利用调度形成1~2次持续10 d左右的涨水过程,将宜昌站流量 $11000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 作为起始流量,在6 d内增加 $8000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,最终达到 $19000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,水位平均日涨幅不低于0.4 m。生态调度试验监测结果表明,这对四大家鱼的繁殖产生了促进作用,使其在调度期间的产卵量显著增加。

三峡工程在2014年2月21日至3月3日实施对长江口“压咸潮”调度,日均出库流量由 $6000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 增加至 $7000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,累计增加下泄水量 $1.007 \times 10^9 \text{ m}^3$,在一定程度上压制了长江口咸潮上溯的严重影响,同时也缓解了长江中下游地区的缺水情况。

2.6. 实施中小洪水滞洪调度及汛末提高蓄水和减少水库泥沙淤积的措施

三峡水库汛期实施中小洪水滞洪调度,库水位抬高致使排沙比降低,水库泥沙淤积量相对增多;水库蓄水提前至汛末(9月10日)开始蓄水,影响库尾变动回水

区河道走(冲)沙,造成该河段泥沙淤积量有所增加。鉴于入库泥沙大量减少,根据实测资料,2003年6月至2015年12月,水库淤积泥沙 $1.6034 \times 10^9 \text{ t}$,年均淤积泥沙 $1.28 \times 10^8 \text{ t}$,仅为预测结果的38%。2003—2015年排沙比为24.2%,低于初步设计预测值[5]。长江水利委员会水文局实测水文资料发现,发生大洪水时,洪峰从寸滩站到达大坝前约需18~30 h,沙峰传播时间则为3~7 d。为减少水库泥沙淤积,2012年7月,通过实时监测和预报,在进行洪水削峰调度的同时,利用洪峰与沙峰传播时间的差异,采用“涨水控泄拦蓄削峰,退水加大泄量排沙”的方式进行了首次沙峰排沙调度,使7月份的排沙比提高到28%,取得了较好的排沙效果,突破了常规的水库“排浑”运行方式。为解决库尾重庆市主城区河段走(排)沙问题,2012年5月7—24日和2013年5月13—20日进行了两次库尾泥沙冲淤试验,库水位分别从161.92 m消落至154.5 m和从160.16 m消落至155.97 m,消落幅度分别为7.42 m和4.19 m,日均降幅分别为0.41 m和0.52 m,水库回水末端从重庆的大渡口附近(距大坝625 km)逐步下移至长寿附近(距大坝535 km)。库水位消落期间,库尾河段沿程冲刷。重庆大渡口至涪陵河段(含169 km长的嘉陵江河段)(见图2)冲刷量分别为 $2.41 \times 10^6 \text{ m}^3$ 和 $4.413 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。库尾冲淤调度实践表明,在每年5月结合库水位消落实施库尾冲淤调度,可将库尾河段淤积的泥沙冲至水库水位145 m以下河槽内,解决了水库提前至汛末蓄水而影响重庆主城区河段走(冲)沙问题,并在汛期实施沙峰排沙调度,为三峡水库“蓄清排浑”运行闯出一条新途径。

3. 库区移民安置与生态环境保护问题

3.1. 库区移民安置

三峡库区移民搬迁安置129.64万人,其中农村移



图2. 三峡大坝上游长江干流及主要支流。

民搬迁安置55.07万人(包括外迁19.62万人)。迁建城市2座、县城10座、集镇106座,搬迁安置74.57万人(含工矿企业搬迁人口),迁建区面积为 $7.14273 \times 10^7 \text{ m}^2$ 。完成文物古迹保护项目1128处,其中地面文物364处、地下文物764处,发掘面积为 $1.7538 \times 10^6 \text{ m}^2$ 。一批国家级重点文物得到恢复和保护,保存了大量实物资料。移民安置区公路、桥梁、港口、码头、水利及电力设施、电信线路、广播电视等专项设施迁(复)建任务全部完成。移民搬迁后的居住条件、基础设施和公共服务设施明显改善;移民生产安置措施得到落实,生产扶持措施已见成效,移民生活水平逐步提高,充分体现了“以人为本、关注民生、保护环境、持续发展”的库区移民安置规划理念,促进了库区经济发展与环境保护的良性循环,保障移民搬迁安置和库区经济社会发展需要,并经受了175 m水位运行的检验,库区社会总体和谐稳定。

3.2. 库区地质灾害防治

三峡工程库区历史上就是我国地质灾害多发区之一。三峡工程开工后,国家设立专项经费对库区地质灾害实施分期治理和防护工程措施。经过对428处滑坡和302段不稳定库岸的工程治理,解除了崩塌滑坡对移民迁建城镇和农村移民迁建点构成的危害;减轻了滑坡下滑入江成灾的隐患,避免了地质灾害对港口、码头和道路的危害,增加了航运安全。库区设置地质灾害监测3049处,实施地质灾害搬迁避让项目525处,极大地改善了库区地质环境,提高了库区人民生命财产安全和长江航运安全保障程度。2003年6月水库蓄水运行以来,

滑坡高发时段随着时间推移呈递减态势,说明因水库蓄水引发的地质灾害已由高发向低风险水平的平稳期过渡。通过建立覆盖全库区的地质灾害监测预警网络,提高了早期预警能力,经受了2007年和2014年百年罕遇暴雨诱发地质灾害的袭击,成功预警和应急处置了400多处地质灾害,有效地避免了地质灾害造成的人员伤亡。三峡库区地质灾害防治,保障了库区迁建城镇和农村移民迁建点的安全及长江航运的安全,验证了“预防为主、监测为要、避险搬迁为先,工程治理以城镇及农村居民点为重点”地质灾害防治思路的正确性。

3.3. 库区地震

三峡工程坝址处于黄陵背斜核部的结晶基底区,为一相对稳定地块。地震活动水平不高,是弱震环境。三峡坝区及库区和邻近10余个县市历史上无破坏性地震记载。位于坝址上游17~30 km及50~110 km的两个断裂带,有引发较强水库地震的可能,估计最高震级为5.5级左右。从最不利的假定情况进行分析,取天然地震危险性概率分析中的上限6级作为水库诱发地震的最大可能震级,即使发生在距坝址最近的九湾溪断裂(距坝址17 km)处,影响到坝区的地震烈度也不超过Ⅵ度。

2003年6月1日至2015年12月31日,三峡工程库区重点监测区共记录到M0.0级以上地震6245次,其中小于M3.0级的微震和极微震,占地震总数的99.84%,说明地震活动以微震和极微震为主,主要分布于库区两岸10 km范围内,其分布地区大部分都在采矿区和灰岩区[5]。虽然发生了频次较高的水库诱发地震,但主要是外

成因非构造型的微震和极微震，地震强度不大，最大为M5.1级，最高震中烈度为Ⅶ度。由于强度较低，迄今为止，尚未引发库区各类次生地质灾害。水库蓄水后，坝区遭受的地震最高影响烈度为Ⅳ度，远低于三峡大坝抗震设防烈度Ⅶ度，对三峡工程及其设施的正常安全运行未造成影响。

3.4. 库区水环境保护

三峡工程自开工以来，国家高度重视库区的生态建设与环境保护，相继制定并实施了《长江上游水污染整治规划》《三峡工程施工区环境保护实施规划》和《三峡水库库周绿化带建设规划》等。2001年11月，国务院批复实施《三峡库区及其上游水污染防治规划(2001—2010年)》，将环境保护范围由三峡库区扩展到三峡地区(库区、影响区、上游区)，总面积为 $7.9 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，涉及重庆、湖北、四川、贵州和云南等5省(直辖市)，进一步强化了三峡地区的生态建设和水污染防治工作，妥善处理了库区移民安稳致富与生态环境保护之间的关系。三峡库区加强城镇污水和垃圾处理及配套设施建设，采取了污染物总量减排、生态与环境保护、支流水华处置和库岸生态屏障建设等一系列有效措施，三峡水库蓄水以来库区干流水质保持良好，除个别断面的少数年份外，水质均为Ⅱ~Ⅲ类。库区37条主要支流非回水区水质多为Ⅱ~Ⅲ类，优于岷江、沱江和乌江上游来水，但回水区水质劣于非回水区。库区主要支流富营养状况有所加重，回水区富营养化程度较高，主要分布在长寿、涪陵、丰都和万州。库区主要支流总磷和总氮浓度呈上升趋势，存在爆发水华的现象。

4. 三峡枢纽清水下泄对坝下游河道的冲刷与河道整治问题

4.1. 三峡枢纽清水下泄对坝下游河道的冲刷

三峡水库蓄水后，枢纽下泄水流含沙量降低，清水挟沙处于不饱和状态，造成对下游河道的冲刷[6]。自水库蓄水运用以来，三峡枢纽清水下泄对中下游河道的冲刷总体呈现从上游向下游发展的态势，目前河道冲刷已发展到湖口以下。宜昌至湖口河段(见图3)，2002年10月至2015年10月平滩河槽总冲刷量为 $1.6478 \times 10^9 \text{ m}^3$ (含河道采砂量)，年均冲刷量为 $1.221 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，年均冲刷强度为 $1.28 \times 10^5 \text{ m}^3 (\text{km})^{-1}$ ，冲刷主要集中在枯水河槽，占总冲刷量的92%。从冲刷量沿程分布来看，宜昌至城陵矶河段冲刷较为剧烈，平滩河床冲刷量为 $9.911 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占冲刷量的60%，城陵矶至武汉、武汉至湖口河段冲刷量分别占15%、25%。2015年宜昌至城陵矶冲刷强度有所下降，冲刷量占38.5%；城陵矶至湖口河段冲刷量占61.5%，冲刷强度增大，说明河床冲刷强度向下游发展的现象较为明显。

4.2. 坝下游河道冲刷的不利影响及其治理措施

三峡工程投运后，枢纽清水下泄对坝下游河道冲刷的影响有利有弊。在防洪方面，河道冲深后同流量的水位有所下降，有利于河道行洪；不利影响是近岸河床冲深后岸坡变陡，致使崩岸和塌岸时有发生。2003—2013年长江中下游干流河道共发生崩岸险情698处，崩岸总长度为521.4 km，但主要发生在三峡水库蓄水前的崩岸段和险工段范围内。坝下游河道冲刷使河势出



图3. 三峡大坝下游长江干流及洞庭湖和鄱阳湖。

现一定的调整,局部河势变化引发崩岸,但总体河势基本稳定,荆江大堤和干堤护岸险工段基本安全稳定,尚未发生重大崩岸险情,发生崩岸的护岸险工段经过抢护加固,险情得到控制。在江湖关系方面,有利影响是入湖泥沙显著减少,减缓了通江湖泊特别是洞庭湖的淤积和萎缩;不利影响是在三峡水库蓄水期,下泄流量减小,坝下游河道水位降低,较蓄水前通江湖泊出湖流量加快,提前进入枯水期,从而影响湖区的水资源利用,这在鄱阳湖和洞庭湖较为明显。在对长江口的影响方面,有利影响是通过水库调节后枯期流量增加,减少咸湖上溯的概率;不利影响是入海泥沙减少,使得滩涂围垦造地减缓。在航运方面,有利影响是枯期下泄流量达到 $6000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,有利于枯水航道冲刷,并加大了航道水深;不利影响是清水下泄导致河床下切,宜昌枯水位下降,通过流量补偿保证葛洲坝枢纽最低通航水位的难度加大,以及中游航槽以外的冲刷和滩槽格局的调整引起部分河道通航条件变差;洲滩冲刷、支汊发展和主流摆动,使航道变化具有不确定性,影响通航。针对三峡工程投运后对长江中下游河势及岸坡稳定,沿岸城镇供水和农业灌溉、航运及生态环境的不利影响,结合三峡工程科学调度,采取工程治理与生态修复,加强观测及防治,使其不利影响有所减缓或消除。通过对碍航浅滩及时疏浚维护,长江中下游航道得以保持畅通,宜昌至湖口河段的最小维护水深有所提高。

5. 三峡工程利用部分洪水资源与全面发挥综合效益问题

三峡工程是开发治理和保护长江的关键性骨干工程,自2008年实施175 m水位试验性蓄水运行以来,遵循“确保防洪安全、减少水库淤积、利于环境保护”的

水库运行调度理念,利用一部分洪水资源,全面发挥了防洪、发电、航运、水资源利用等综合效益。

5.1. 防洪效益

三峡工程实施175 m试验性蓄水运行以来,汛期通过科学调度,利用防洪库容对发生的中小洪水进行拦蓄,发挥了削峰、错峰作用,有效避免了上游洪峰与中下游洪水叠加给沿岸造成的威胁,分别实现了避免或减缓荆江河段、鄱阳湖和城陵矶附近地区防汛压力的目标,有效缓解了长江中下游的防洪压力(见表4)。2010年及2012年三峡水库入库最大洪峰流量分别为 $70\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $71\,200\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,通过三峡水库拦蓄,削减洪峰率分别为42.8%和40%,降低长江中游干流水位0.9~2.5 m,使荆江河段沙市水位未超过警戒水位、城陵矶水位未超过保证水位,为沿岸人民和经济社会发展提供了安全保障,防洪减灾效益显著。三峡工程有效地控制了长江上游洪水,提升了中下游的防洪能力,保护了人民的生命财产安全,保证了经济社会发展和人民安居乐业。

5.2. 发电效益

三峡工程自2003年首台机组投产以来,截至2015年年底,三峡电站累计发电量为 $8.977\,95\times 10^{11}\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。有效缓解了华中、华东及广东等地区的供电紧张局面。在全国大联网格局中发挥着输电枢纽电网支撑重要作用,推动了全国电网联网格局的形成,提升了全国范围内能源保障能力。2012年全部机组投产,发电量达 $9.812\times 10^{10}\text{ kW}\cdot\text{h}$,占全国水电的比例约为11.4%,使水电在电力结构中的比例提高1.95个百分点,为优化我国电源结构、提高非石化能源消费占比,需增加清洁能源水电的供应能力。三峡工程建设有效替代火力发电,节能减排效益明显。三峡电站累计发电 $8.977\,95\times 10^{11}\text{ kW}\cdot\text{h}$,与火电相比,节约标准煤

表4 三峡工程175 m水位试验性蓄水运行水库防洪调度资料汇总

Year	Maximum peak ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	Occurrence date	Maximum discharged flow ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	Maximum reduction peak ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	Times of flood storage	Total flood storage volume ($\times 10^9\text{ m}^3$)	Highest regulating flood level from June 10 to before impoundment (m)
2009	55 000	August 6	39 600	16 300	2	5.650	152.89
2010	70 000	July 20	40 900	30 000	7	26.430	161.02
2011	46 500	September 21	29 100	25 500	5	18.760	153.84
2012	71 200	July 24	45 800	28 200	4	22.840	163.11
2013	49 000	July 21	35 300	14 000	5	11.837	156.04
2014	55 000	September 20	45 000	22 900	10	17.512	164.63
2015	39 000	July 1	31 000	8 000	3	7.542	156.01

3.03×10^8 t, 减少二氧化碳排放 7.69×10^8 t, 减少二氧化硫排放 8.261×10^6 t, 减少氮氧化物排放 2.367×10^6 t, 并减少了大量废水、废渣排放。

5.3. 航运效益

三峡工程蓄水运行后, 库区通航条件得到显著改善, 长江中下游枯水期的通航标准有所提高。2003年7月至2015年年底, 三峡船闸累计运行11.59万闸次, 通过船舶68.2万艘次, 通过旅客1133.7万人次, 通过货物 8.6×10^8 t。2011年单向年通过能力超过 5×10^7 t, 提前19年实现了三峡工程的航运规划目标。三峡库区航道水流条件改善, 提高了船舶航行和作业安全度, 船舶运输油耗下降2/3, 航运成本降低1/3, 使得长江真正发挥“低成本、大运量”的黄金水道作用, 水运已成为三峡库区的主要运输方式, 加快推进长江上游水运和沿江经济快速发展。

5.4. 水资源利用效益

三峡水库是我国的淡水资源储备库, 水资源利用除了航运和发电外, 还可发挥在保障长江流域供水安全、维护生态、改善长江中下游枯水期水质、有利于南水北调等方面的水资源调节作用。同时, 面对2011年我国长江中下游部分地区遭遇的百年一遇大面积干旱、河道载油船舶搁浅, 以及2014年上海咸潮入侵等突发事件, 三峡水库及时加大下泄, 实施应急抢险调度, 成功应对了此类突发事件。三峡水库水资源调度取得了较好的社会

和生态效益。三峡水库运行以来的水资源调配利用情况见表5。

6. 结语

三峡工程投运以来, 库区滑坡、崩塌等地质灾害经过治理, 取得了良好的减灾防灾效果; 库区干流及一级支流水质稳定在II~III类, 长江中下游整体水质在蓄水前后无明显变化, 总体保持稳定在II类、III类。但必须看到三峡工程对生态与环境的影响是较长期而缓慢的过程, 需要继续加强监测; 三峡水库水污染防治仍面临严峻的形势, 应持续加大环境治理和保护力度, 加强长江水系的生态环境管理, 进一步改善水库特别是支流库湾的水质, 遏制水华频发现象, 保护长江优质水源。当前, 三峡工程以及上游干支流已形成梯级水库群, 并在进一步建设中, 这为最大限度地利用好长江水资源奠定了基础。对长江流域水资源进行科学调控, 最大限度地减轻长江流域洪旱灾害、改善水生态环境和充分利用水资源, 对保障我国水安全、支撑国家可持续发展具有重要作用, 应尽快建立完善统一的调度机制, 加强三峡水库与中上游干流水库群联合调度, 实现长江水资源利用效益的最大化。三峡工程规模巨大、效益显著、“利”多“弊”少。对于三峡工程运行中出现的问题, 都要认真负责地逐个研究、防范治理, 将三峡工程的“利”拓展到最大、“弊”

表5 三峡工程运行以来水资源调配利用资料汇总

Impoundment period	Period	Days of making-up water	Total volume of making-up water ($\times 10^9$ m ³)	Average rising navigable depth (m)	Power generation by saving water		
					Year	Increasing rate of hydro energy utilization (%)	Power generation by saving water ($\times 10^9$ kW · h)
Power generation period with water retained by cofferdam	2003–2004	11	0.879	0.74	2003	—	0.08
	2004–2005	Since inflow is high during low-water season, no making-up water operation was conducted			2004	4.60	1.72
	2005–2006	Since inflow is high during low-water season, no making-up water operation was conducted			2005	4.00	1.87
Initial operation period	2006–2007	80	3.580	0.38	2006	4.30	2.03
	2007–2008	63	2.250	0.33	2007	4.50	2.68
Trial impoundment and operation period	2008–2009	190	21.600	1.03	2008	4.96	3.78
	2009–2010	181	20.020	1.00	2009	5.23	3.96
	2010–2011	194	24.331	1.13	2010	5.09	4.08
	2011–2012	181	26.143	1.31	2011	5.17	3.79
	2012–2013	178	25.410	1.29	2012	6.97	6.53
	2013–2014	182	25.280	1.26	2013	5.45	4.43
	2014–2015	82	6.100	1.26	2014	5.47	5.11
	2015–2016	170	21.760	1.26	2015	6.00	5.02
Total		1501	177.474	—	—	—	45.08

控制到最小，为长江经济带的持续发展和流域的人民福祉做出更大贡献。

References

- [1] Project Team for TGP's Staged Assessment of Chinese Academy of Engineering. TGP's staged assessment report. Beijing: China Water & Power Press; 2010. Chinese.
- [2] Project Team for TGP Assessment during Trial Impoundment Period of Chinese Academy of Engineering. Assessment report on TGP assessment during trial impoundment period. Beijing: China Water & Power Press; 2014. Chinese.
- [3] China Three Gorges Corporation. Report on construction quality of TGP and project operation in 2014. 2015. Chinese.
- [4] Zheng S. Discussion on TGP's flood resources utilization and exerting integrated benefit. Yangtze River 2013;44(15):1-6. Chinese.
- [5] China Three Gorges Corporation. Report on construction quality of TGP and project operation in 2015. 2016. Chinese.
- [6] Zheng S. Discussion on hydropower resources development and environmental & ecological protection in China. Eng Sci 2006;8(6):1-6. Chinese.