

文章编号:0559-9350(2018)01-0019-07

大江大河防洪关键技术问题与挑战

刘宁

(水利部,北京 100053)

摘要: 随着全球气候变化、人类活动对自然干扰程度加剧,以及防洪区人口和社会财富不断增长,变化环境下江河防洪技术面临新的难题。本文分析了大江大河防洪中面临的两个关键性问题:“守与弃”与“蓄与泄”,及其面临的挑战,并针对性地提出了支撑大江大河防洪决策的关键技术,包括:优化模型构建与多目标求解技术,多目标均衡决策技术,以及支撑洪水“蓄泄”过程动态演算的流域高精度水文预报技术、河流水沙动力学模拟技术等。结合典型案例进一步对相关技术的运用进行了实证。

关键词: 大江大河;防洪决策;蓄与泄;守与弃;多目标

中图分类号: TV697.1

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20170497

受地理和气候条件影响,我国自古以来洪水灾害就频繁发生。据统计,1951—1990年期间我国平均每年发生严重洪水灾害就多达5.9次^[1]。1991—2008年,我国洪水灾害的直接经济损失达21 163亿元,占到整个自然灾害经济损失的48%^[2]。为保障人民群众生命财产安全和社会经济的持续稳定发展,我国各大流域已基本完善了由堤防、水库、蓄滞洪区和分洪道组成的防洪工程体系。但受全球气候变暖背景下极端天气事件增多和我国高速城镇化进程中人类活动加剧的影响,近年来我国洪水灾害呈现出了多发、频发和重发的趋势,2009—2016年8年间,我国洪灾年直接经济损失总值有4年超过了多个流域发生特大洪水的1998年^[3]。显然,我国江河防洪态势仍不容乐观^[4]:一方面,在气候变化和人类活动共同影响下,流域降雨产流和洪水演变特性发生了显著变化,传统方法已难以胜任变化环境下的防洪管理;另一方面,大江大河沿岸经济高速发展,人口和社会财富高度集中对防洪决策及洪水调度的科学化和精细化提出了更高要求。

1 大江大河防洪问题与挑战

大江大河防洪是以洪水为对象,以防洪组织为行为主体,以防灾减灾和保障生命财产安全及社会经济持续稳定发展为目标,兼顾兴利要求,综合运用防洪工程和非工程措施,优化调控、科学管理洪水,最大化防洪效益、最小化洪水损失的过程。

1.1 大江大河防洪问题 大江大河防洪面临诸多具体而复杂的技术问题,尤其是如何对防洪系统的构成进行认识与解析、如何针对各类洪水进行调度决策。诸如水库及水库群优化调度、蓄滞洪区合理适时运用、保护对象重要性权衡与取舍,以及如何在防洪的同时考虑洪水资源化、生态与环境利益等等。我国以1998年长江大洪水为代表的防洪实践,一方面充分证明了“蓄泄兼筹、以泄为主”的防洪方针是行之有效的^[5],另一方面也揭示了不分主次、一味“严防死守”、“全线抢险”的方式缺乏利弊得失权衡,不能正确处理“弃守”关系,很可能导致防守成本过大、重要地区失守等问题。因而在

收稿日期:2017-04-24;网络出版日期:2018-01-23

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20180123.1445.001.html>

作者简介:刘宁(1962-),男,辽宁丹东人,教授级高级工程师,主要从事水利水电工程的规划、设计和管理研究。

E-mail: liuning@mwr.gov.cn

大江大河防洪问题中，“守与弃”和“蓄与泄”是两个关键性的问题。

首先，针对“守与弃”问题，在大江大河防洪中应遵循洪水损失最小化原则，对参与防洪的工程、防洪保护对象、可能存在的风险及所涉及的各方利益进行协调、评估、权衡和取舍^[6]。由于公共资源的稀缺性以及洪水风险的必然性，防洪过程面临“守与弃”的权衡与抉择：河道干支流、上下游、左右岸差异化的防洪标准体现了需渐次舍弃次要地区、换取重要防洪区安全的意图；建设防洪水库，舍弃了库区土地的利用价值以防守下游重要区域；设置蓄滞洪区，以限制该区域发展、临时淹没其土地为代价，使重要保护对象得以保全；而在应对超标准洪水期间，集中部署防守与抢险力量于重要地区，甚至人为破堤分洪，更是权衡“守与弃”，追求洪水损失最小化的直接举措。以海河南系“96.8”大洪水为例^[7]，滹沱河、漳河、蓟运河和溢阳河都接近和超过了设计流量，太行山区462座水库中有343座库满溢洪，许多工程已经用到了安全极限，山西、河北、天津及北京等省市人民生命财产安全，水库工程的“蓄与泄”应用，蓄滞洪区的启用等都需要做出“守与弃”决策。当然，在防汛抗洪重大关键时刻，即使不得不做出“弃”的抉择，也并非就是简单放弃、“牺牲局部”，而是要根据《防洪法》和防汛应急管理的相关法规、条例，及时启动相应的应急预案，有效地组织好高风险区域人员、资产的避难转移和救援、安置等工作，尽可能减轻分洪损失，保持社会安定。为此，也有必要深入开展避难转移各个环节的研究，如洪水避难转移的时机、转移的范围、转移的路况信息及安置场所的规划布置等^[8]。

针对“蓄与泄”问题，防洪工程的建设和运用本质上是通过改变和调整流域自然蓄泄特性来获利，即在保证防洪工程安全的前提下，通过整体布局，优化防洪工程调度，合理安排洪水，使防洪效益最大化。上游水土保持工程使降水更多地蓄于当地，减少可能威胁下游地区的洪量，坦化了洪水过程；构筑堤防、开挖分洪道不仅提高了流域的泄洪能力，还增加了河道槽蓄量，减少了漫滩洪量，从而降低淹没风险；修建水库、设置蓄滞洪区则改变了洪水蓄滞的空间分布，不仅将洪水约束在预设区域内，而且通过科学的调度运用，可以有效发挥调峰错峰削峰的作用，从整体上降低洪水的风险。以2013年嫩江流域特大洪水中尼尔基水库的运用来看^[9]，根据实时水情与工情，分为5个阶段对水库水位(蓄)和出库流量(泄)进行控制，从而实现了河滩地保护、减轻嫩江干流防洪压力、减轻黑龙江省泰来县防洪抢险压力、避免河道内村屯转移和洪水资源利用等不同阶段的目标。显然，通过优化调整洪水蓄泄关系，可使防洪工程体系的蓄泄功能和防洪效益得以充分发挥。值得注意的是，随着经济社会的发展，许多水库的城镇供水任务加剧，为提高供水量与供水保证率，采取了分期或动态调整汛限水位的措施，从而加大了应急泄洪的概率，同时也对发展暴雨洪水的监测预报预警系统提出了更高的要求。尤其是在一些河流上形成梯级水库的情况下，应急泄洪可能形成“多米诺骨牌”效应，“蓄与泄”的科学调度决策面临更大的挑战。

大江大河防洪目标并不是时刻确保所有防洪保护对象全过程的安全，在面临超标准洪水时，“弃、守、取、舍”抉择不可避免，并且，在防洪的同时还可能需兼顾洪水资源的蓄存兴利效益，考虑中长时间尺度下的水资源利用问题，因此，防洪工程效益最大化不仅包括防洪效益最大化，还涉及洪水资源效益的发挥。综上，防洪和兴利的时空均衡是大江大河防洪决策客观需求，综合考虑“守与弃”和“蓄与泄”两大问题，可最大程度地实现兴水利而避水害。由于防洪条件和保护对象的动态性，加之洪水演变的特异性，“守与弃”和“蓄与泄”之间关系也是动态变化的，相应的防洪决策也是一个因地、因时、因势不断调整的过程(图1)。

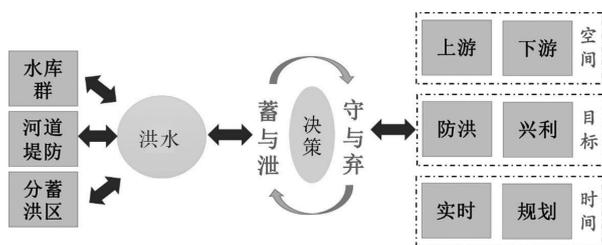


图1 “守与弃”和“蓄与泄”的关系图

1.2 面临的挑战 随着大江大河防洪系统的日益完善和防洪需求的不断提高,传统方法已难以适应变化环境下的防洪决策,现阶段大江大河防洪所面临的挑战主要源于以下4个方面:

(1)江河来水的非一致性。Milly等指出,在气候变化和人类活动的影响下,基于一致性假设的水文不确定理论和方法已无法帮助人类正确揭示变化环境下的水资源和洪水演变规律^[10]。非一致性条件下,流域水文统计量发生变异,防洪工程原有的设计指标可能不再适用,此外,来水预报也存在更大的不确定性,这种信息的不完备性和不确定性,对水文预测预报方法和技术提出了更高的要求。

(2)影响条件复杂。由于江河水系的联通性,各类防洪工程或串联或并联,互相影响,除水流畅外,大江大河上的泥沙问题也不容忽视,尤其是泥沙运移规律与水流运动规律并不完全一致,使得河道处于不断演变之中,水库淤积又使得水库调节库容不断减少,直接影响水库蓄洪能力,改变了防洪系统的蓄泄特征。例如,随着三门峡水库的库区淤积,潼关高程快速抬升,导致渭河下游及黄河小北干流的淤积,顶托渭河洪水下泄,加大了关中平原的洪水风险。随着流域梯级水库增加及水库淤积,防洪工程彼此间的水力关系更为复杂且相互影响程度加深。由此可见,影响大江大河防洪的因素复杂多变,这使得准确把握江河水沙运动过程变得更为困难。

(3)目标多元化。在空间维度上,要根据上下游、左右岸具体情况,考虑上下游不同防洪保护对象的重要性,权衡利弊得失和效益公平,实现综合损失和风险最小化^[11]。如2016年的长江中下游大洪水^[12],监利以下江段及洞庭湖、鄱阳湖都超警戒水位,沿线防护目标都纳入了统一调度和权衡利弊的考虑之中;在时间维度上,需兼顾当前和长远利益,在汛期防洪决策的同时需考虑洪水资源利用效益。在各方利益权衡时,要优先保证各类工程和防洪保护对象的安全,兼顾发电、航运、水产养殖等利益,必要时舍弃部分利益、承担部分风险。所以,大江大河防洪还呈现出“多目标”决策的难题。

(4)群决策问题。大江大河防洪要在兼顾多方利益的情况下最大程度地保障防洪安全,这其中必然出现不同利益主体间的博弈和均衡,而在气候变化、水利工程复杂化,以及不同竞争主体利益诉求的背景下,权衡得失取舍,进行“守与弃”“蓄与泄”的决策技术变得更为困难。

综上,江河来水的非一致性和影响条件复杂,增加了洪水预报模拟的不确定性,带来了决策的信息难题;利益多元化、群决策问题又给防洪保护对象的“守与弃”、防洪工程的“蓄与泄”决策带来了困难,变化环境下大江大河防洪优化决策面临各种挑战。高效精准的洪水预报与水沙运动过程模拟,行之有效的水库群、蓄滞洪区(含非常蓄洪场所)、分洪道等优化调度,以及全面可靠的洪水损失评估,结合先进的多目标系统优化技术等可有力支撑大江大河“守与弃”、“蓄与泄”的科学决策,切实实现洪水损失最小化、防洪工程体系效益最大化的目标。

2 “守与弃”问题关键技术

大江大河的水利工程不仅服务于防洪,还有灌溉、发电、航运、水产养殖等诸多其他功能,防洪过程中需把握好不同目标的“守与弃”,辩证处理各方面关系,尽可能实现减灾与兴利的双重目标。“守与弃”不拘泥于一时一地,要根据流域或区域具体条件、防洪标准高低、洪水演变过程等实时调整决策方案,不断变化防洪行为,最终实现整体效益的最大化和灾害影响及风险的最小化。

从技术层面来看,大江大河防洪中“守与弃”问题其关键技术在于:建立能权衡评价“守与弃”的优化模型,生成“守与弃”决策方案。前者是将现实防洪问题概化数学优化模型;后者则在于优选出防洪系统最优决策方案簇,然后均衡各目标,得出最终的决策方案均衡解,力求使洪灾损失与不利影响最小化。

2.1 “守与弃”优化模型 变化环境下,“守与弃”的决策问题可概化为如下的多目标系统优化问题:

$$\min Z = \{f_1(x), f_1(x), \dots, f_n(x)\} \quad (1)$$

$$\text{st.} \begin{cases} g(x) \leq 0 \\ h(x) = 0 \\ x \in R \end{cases} \quad (2)$$

式中： x 为待优化的变量组，即参与防洪的各项工程其具体“蓄与泄”措施； $\{f_1(x), f_1(x), \dots, f_n(x)\}$ 为优化问题的目标函数，分别表征不同的效益或风险，即为“守与弃”的决策导向，其中，风险指标越小越好，而效益指标越大越好，此时，在式(1)中应在前面加上负号。“守与弃”不仅体现在哪些防洪工程参与运行、哪些防洪目标参与决策的选择上，还体现在不同目标函数的决策权重和偏好。式(2)中 $g(x)$ 和 $h(x)$ 为优化问题的约束条件，在江河防洪问题中，水流连续性条件、动量守恒条件以及不同防洪工程的水力联系等都可能成为约束条件，这些约束可统一由式(2)中的等式和不等式表述。

2.2 “守与弃”决策方案生成

2.2.1 优化问题求解 简单防洪系统可采用因子筛选的方式确定优化目标集，利用权重方法根据不同权重组合方式求解多目标的非支配解集。这一技术对于单一水库防洪系统的决策实施易行有效。但随着防洪系统规模的扩大，求解大江大河防洪系统优化问题的计算量也呈非线性增长，“多目标”和“维数灾”问题不可避免，因此需针对性地研发复杂优化问题的高效降维技术。针对有明确的目标和约束表达式的结构化决策问题，可依据目标函数边际效益递减特性进行分析，解析防洪系统优化运行可蓄水总量与最优下泄流量、最优余留水量之间的单调关系(这种单调关系正是保证防洪系统优化运行全局最优性的充分必要条件)，并进一步利用防洪系统优化运行单调性所表现出的邻域搜索特征研究高效的解析求解算法。针对不能明确出目标或约束表达式的半结构化问题，由于其多约束交织所呈现出的复杂性，需要构建一套优化变量降维的技术体系。诸如聚合-分解技术、敏感性分析等技术都能起到减少防洪系统运行规则参数规模的作用^[13]。同时，无论结构化和非结构化问题，还需针对多目标寻优的全局性和效率开展研究^[14]。

2.2.2 均衡解的群决策 经过多目标优化后，可得到 m 个非支配的“蓄与泄”方案 $\{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ ，还需进一步通过群决策得出各目标“守与弃”均衡的决策方案。对应 n 个目标 $\{G_1, G_2, \dots, G_n\}$ ，可确定每个可行方案所对应的各目标值，这样就能构成如下决策指标矩阵^[15]：

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} = (a_{ij})_{mn} \quad (3)$$

因此，多目标群决策的问题可转化为对式(3)中的所有元素进行对比寻优的过程，针对目标 $\{G_1, G_2, \dots, G_m\}$ 的偏好和处理方法的不同，多目标群决策方法包括线性加权法、优异度法、TOPSIS法、主成分因子分析法、非线性规划法等^[15]。

通过模型概化出的“守与弃”决策问题与现实中的“守与弃”可能存在一定差异。通过分析二者偏差，运用“守与弃”动态决策的反馈修正技术，通过不断的循环迭代决策，最终制定出最佳洪水防御和其他目标均衡的解。另一方面，决策者具有丰富的洪水防御经验和应变对策储备，不同洪水类型和江河情势决定了决策者拥有不同的风险好恶等，通过反馈修正技术给予决策者充足的空间对多目标优化方案进行择优和动态调整，以最大可能发挥防洪系统功能。

3 “蓄与泄”问题关键技术

大江大河防洪工程数量众多，且相互联系和影响，从数学角度解释，即式(1)和式(2)构成的优化问题中，变量组 x 的每一个子变量，以及约束条件 $g(x)$ ， $h(x)$ 都互相关，而这些相关关系的纽带则是水流运动，因而，解决“守与弃”问题的同时，还需摸清不同防洪工程的具体“蓄与泄”过程及其影响。其中，调蓄工程的“蓄与泄”过程模拟主要基于水量平衡关系计算：

$$I - Q = \frac{V_2 - V_1}{\Delta t} \quad (4)$$

$$V = g(H) \quad (5)$$

$$Q = f(H, I) \quad (6)$$

式中： I 为流入流量， m^3/s ； Q 为流出流量， m^3/s ； H 为水利工程上游水位， m ； V 为工程储蓄的水量， m^3 ，其中 V_1 、 V_2 为时段始末水量， m^3 ； Δt 为时段步长， h 。

式(5)为调蓄工程的水位流量关系曲线，式(6)为工程的调度规则。式(4)求解是基于来水、蓄泄关系和调度规则已知或能预测，调度规则涉及“守与弃”问题抉择，来水和蓄泄关系的关键在于流域高精度来水预报和水沙运动过程模拟。

3.1 流域高精度来水预报 流域高精度来水预报是合理安排“蓄与泄”的前提，也是“守与弃”决策的基础。当前，流域来水预报，主要采用精细化的分布式水文模型并结合降水多源数据融合^[16]、数值降水预报^[17]、模型参数的不确定性分析及高效率定算法^[18-19]、数据同化技术^[20]、集合预报技术^[21]等，辅助提高预报精度。此外，防洪问题也涉及长时间尺度的规划问题，中长期径流预报方法及其改进也是当前的研究热点。

3.2 流域水沙运动过程模拟 在高精度、高时效来水预报的基础上，构建包含工程体系、复杂下垫面条件的水沙动力学模型以及洪水损失与影响评估模型，全面把握洪水演进与淹没情况，评估洪水损失与影响，分析工程调度运用效果，从而为大江大河防洪提供支撑。通常，河道水流采用圣维南方程组进行模拟预测，泥沙运动则应分别考虑悬移质和推移质泥沙输运过程^[22]。

综上，各工程对洪水“蓄与泄”模拟直接影响了防洪决策，也是式(1)、式(2)所构成的优化模型求解的基础条件。为此，需要针对具体的来水条件在不同工程调度运用情景下精细模拟洪水运动过程，从而支撑“守与弃”的最终抉择。

4 控制潼关高程的三门峡水库运行方式决策案例

三门峡水库于1960年9月投入运用，初期库区淤积严重，潼关高程快速抬升，加速了渭河下游及黄河小北干流的淤积，也大幅增加了关中平原的洪水风险。如2003年8月，在渭河仅发生约5年一遇洪水的情况下，渭河就出现倒灌，损失惨重，渭河流域呈现出“小水大灾”的特点^[23]。故而潼关高程的控制是渭河、黄河防洪的关键所在，这其中也涉及到“守与弃”、“蓄与泄”的抉择。除河道疏浚、整治外，潼关下游三门峡水库的调度运行是对潼关高程进行控制的主要工程手段。

2005年，笔者在水利部“潼关高程控制及三门峡水库运用方式研究”项目研究成果基础上，采用优异度决策方法对多方案进行了多目标比选，并推荐了优异度最高的三门峡运行水位方案^[24]。该决策过程就是一个面向“守与弃”、“蓄与泄”的防洪问题，其实际也是上述几项关键技术的实例运用。首先结合实体模型、原型观测成果，研制了黄河干流来水来沙数值模拟预报模型，即实现了对潼关高程与三门峡水库对水沙蓄泄关系的描述；随后，采取指标敏感性分析、因子分析等方法，对考虑的目标进行第一步的“守与弃”评判，选择潼关高程控制、库区冲沙、影响人群、供水影响、生态与环境的影响、河道淤积、防洪及经济社会影响等7项主要指标作为目标；经过优化求解，得出了5组可行的三门峡水库“蓄与泄”控制运行方案：控制运行水位为318 m、315 m、312 m、现状和敞泄，对这5种方案将上述7项指标进行了多组权重赋值。决策中，选用了离差权法分析和基于客观分析的两种权重赋值方法，其中采用客观分析的方法中，对各项指标进行了多组客观赋值^[24]。评价指标权重的确定可充分体现出各指标的重要程度以及决策者对决策目标的偏好程度，“守住”重要目标-潼关高程等而部分“放弃”次要目标-库区冲沙影响等是决策者决策出“满意解”的关键思路。通过基于权重赋值的各方案优异度计算，经决策求解，最终得出了“近期三门峡水库非汛期最高控制运用水位不超过318 m、平均水位不超过315 m，汛期敞泄”的三门峡“蓄与泄”运行方案^[24]。

上述成果在防洪实践中得到了论证，也指导三门峡水库多年来科学运行，并获得了良好效果，

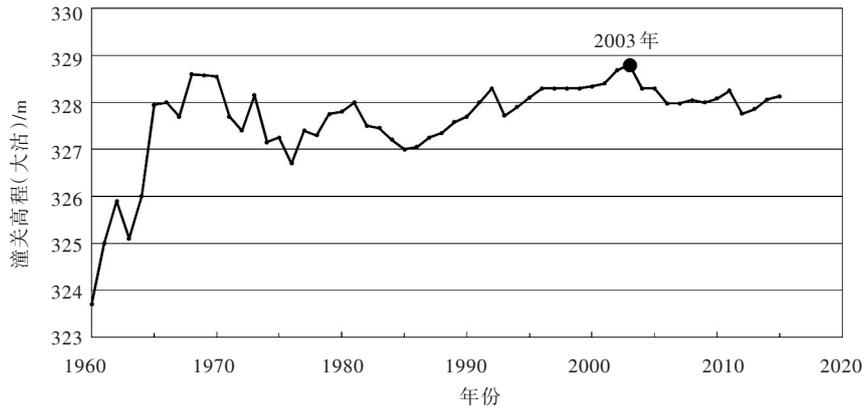


图2 潼关高程变化过程图(大沽高程)

1960年以来潼关高程变化过程如图2所示，其中2003年达到最高，也是当年发生渭河“小水酿大灾”的主要原因之一。随着2003年以后来水来沙的减少，以及东垆湾裁弯工程、渭河入黄口疏浚、小北干流滩区放淤、小浪底等水库调水调沙等措施，也得益于三门峡水库调度运行方式的科学决策，近十多年来潼关高程下降明显。这进一步证明了基于“蓄与泄”、“守与弃”关键技术而得出的集工程措施和非工程措施于一体的科学决策是合理的也是有效的。考虑到变化环境的不断影响，未来还应根据流域来水来沙、各项工程的变化适时的调整三门峡水库控制运行方案，做出新的决策。

5 结论

本文分析了大江大河防洪问题的关键所在，将其归纳为两个方面，即防洪保护目标、工程、利益风险间的“守与弃”与防洪工程对洪水的“蓄与泄”。论文对“守与弃”与“蓄与泄”两大问题间的辩证关系进行了论述，指出新时期防洪面临的挑战来自于：江河来水的非一致性、影响条件复杂、利益多元化和群决策难题等。

针对2大关键问题和4项挑战，分别论述了大江大河防洪决策的关键技术，包括：优化模型构建、多目标优化模型求解，以及用于支撑“蓄与泄”调度方案的流域来水高精度预报技术、面向江河治理的大江大河水沙动力学模拟技术等。通过三门峡水库控制运用决策案例，实例说明了大江大河针对“守与弃”和“蓄与泄”的防洪决策思路和决策过程，论证了“守与弃”、“蓄与泄”关键技术的应用过程和效果。

参 考 文 献：

- [1] 刘宁. 防汛抗旱与水旱灾害风险管理[J]. 中国防汛抗旱, 2012, 22(2): 1-4.
- [2] 万新宇, 王光谦. 近60年中国典型洪水灾害与防洪减灾对策[J]. 人民黄河, 2011, 33(8): 1-4.
- [3] 国家防汛抗旱总指挥部, 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报2016[M]. 北京: 中国地图出版社, 2017: 85-87.
- [4] 刘宁, 杜国志. 集成水文技术解读水基系统[J]. 水科学进展, 2005, 16(5): 696-699.
- [5] 胡和平, 尚松浩, 雷志栋, 等. 论抵御“98”洪水与洪水风险管理[J]. 水利水电技术, 1999, 30(5): 3-5.
- [6] 程晓陶. 防洪抗旱减灾研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2008, 6(3): 191-198.
- [7] 魏智敏, 谢子书. 海河南系“96.8”洪水与防洪减灾[J]. 河北水利水电技术, 1998(3): 106-107.
- [8] 丁志雄, 李娜, 曹大岭, 等. 洪水避难分析系统的研究开发及其应用[J]. 水利学报, 2017, 48(7): 808-815.
- [9] 党连文. 2013年松花江流域骨干水库洪水调度[J]. 水利水电技术, 2014, 45(1): 1-5, 10.
- [10] MILLY P C D, BETANCOURT J, FALKENMARK M, et al. Stationarity is dead: whither water management

- [J]. *Science*, 2008, 319: 573–574.
- [11] 程晓陶. 加强水旱灾害管理的战略需求与治水方略的探讨[J]. *水利学报*, 2008, 39(10): 1197–1203.
- [12] 黄先龙, 褚明华, 左吉昌, 等. “2016.7”长江中下游洪水防御工作及启示[J]. *中国防汛抗旱*, 2016, 26(6): 76–80.
- [13] ZHANG J, WANG X, LIU P, et al. Assessing the weighted multi-objective adaptive surrogate model optimization to derive large-scale reservoir operating rules with sensitivity analysis[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 544(1): 613–627.
- [14] ZHAO T, ZHAO J. A multiple-objective dynamic programming model for reservoir operation optimization[J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2014, 16(5): 1142–1157.
- [15] 刘宁. 工程目标决策研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [16] 李哲. 多源降雨观测与融合及其在长江流域的水文应用[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [17] YANG Mingxiang, JIANG Yunzhong, LU Xing, et al. A weather research and forecasting model evaluation for simulating heavy precipitation over the downstream area of the Yalong River Basin [J]. *Journal of Zhejiang University-Science A: Applied Physics & Engineering*, 2015, 16(1): 18–37.
- [18] van GRIENSVEN A, MEIXNER T, GRUNWALD S, et al. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 324(1/4): 10–23.
- [19] HUANG Xiaomin, LEI Xiaohui, LIAO Weihong, et al. Parameter optimization of the easy distributed hydrological model with a modified dynamically dimensioned search algorithm[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2014, 52(2): 98–110.
- [20] XIE Xianhong, ZHANG Dongxiao. Data assimilation for distributed hydrological catchment modeling via ensemble Kalman filter [J]. *Advances in Water Resources*, 2010, 33(6): 678–690.
- [21] BOGNER Konrad, PAPPENBERGER Florian, THIELEN Jutta, et al. Wavelet based error correction and predictive uncertainty of a hydrological forecasting system [J]. *Egu General Assembly*, 2010, 12: 10245.
- [22] 王光谦, 李铁键. 流域泥沙动力学模型[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [23] 薛选世, 武芸芸. 渭河2003年特大洪灾成因及治理对策[J]. *中国水利*, 2004(1): 50–52.
- [24] 刘宁. 对潼关高程控制及三门峡水库运用方式研究的认识[J]. *水利学报*, 2005, 36(9): 1019–1028.

Problems and challenges on flood control for large rivers

LIU Ning

(*Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China*)

Abstract: Climate change combined with more frequent human activities have strongly disturbed the natural water cycle. In addition, the increasing population and social wealth in flood protection zone caused new challenges for flood control for large rivers under the changing environment. This article reviewed the challenges that the flood control for large rivers is facing the two key challenges as “retain or release” and “protect or abandon” problems. Furthermore, some key techniques utilized for decision making were presented, including: building of optimization model, multi-objective problem solving, balance decision-making techniques, as well as high precision prediction of basin runoff and sediment dynamical simulation supported by dynamic calculation of flood “retain or release”. In the end, the application of related technologies was further verified with typical case studies.

Keywords: large river; decision making of flood control; retain or release; protect or abandon; multi-objective

(责任编辑: 韩 昆)