DOI:10.11705/j.issn.1672－643X.2020.05.18

水库汛限水位确定方法研究综述

李英海[1,2]，夏青青[1]，常文娟[1,2]，李清清[3]，汪 利[1]，Md Sahidul Islam[1]

（1. 三峡大学 水利与环境学院，湖北 宜昌 443002；2. 三峡大学 三峡库区生态环境教育部工程研究中心，湖北 宜昌 443002；3. 长江科学院 水资源综合利用研究所，湖北 武汉 430010）

摘 要：防洪是水库进行流域水资源调控的主要功能，合理设置水库的汛限水位对于确保水库及下游防洪安全及协调汛期防洪与兴利矛盾具有重要意义。在回顾国内外汛限水位发展历程的基础上，系统总结了水库单一汛限水位、分期汛限水位以及汛限水位动态控制的确定方法，并对各类方法的适用条件和优缺点进行了梳理和分析，提出了未来需要解决的关键问题，以期为水库汛限水位确定方法的发展提供参考。

关键词：汛限水位；分期汛限水位；动态控制；水库

中图分类号：TV697.1^{+}3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1672-643X(2020)05-0127-08

Review of the methods of reservoir′s limiting water level during flood season

LI Yinghai[1,2], XIA Qingqing[1], CHANG Wenjuan[1,2], LI Qingqing[3], WANG Li[1], Md Sahidul Islam[1]

(1. *College of Hydraulic & Environmental Engineering*, *China Three Gorges University*, *Yichang* 443002, *China*; 2. *Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region*, *Ministry of Education*, *China Three Gorges University*, *Yichang* 443002, *China*; 3. *Water Resources Department*, *Changjiang River Scientific Research Institute*, *Wuhan* 430010, *China*)

Abstract: Flood control is the main function of reservoir water resources regulation. Therefore, setting appropriate flood limit water level is of great significance to the safety of the reservoir and its downstream areas, it is also beneficial to resolving the contradiction between flood control and profitability of the reservoir. Based on the development process of flood limit water level research at home and abroad, we summarized the determination methods of single flood limit water level, staged flood limit water level and dynamic control of flood limit water level. And then, we listed and analyzed the applicable conditions, advantages and disadvantages of the methods. Finally, we put forward the key issues to be addressed in the future in order to provide some reference for the development of determination methods of flood limit water level.

Key words: flood limit water level; staged flood limit water level; dynamic control; reservoir

1 研究背景

在我国，流域洪水威胁和水资源短缺共存，合理设置水库汛限水位成为缓解防洪与兴利矛盾的重要途径。汛限水位是为了保障水库防洪库容正常使用而设定的一个阈值，是水库在汛期允许兴利蓄水的上限水位。合理的汛限水位既可以保证汛期水库及下游防洪安全，又可以提高水库洪水资源的利用率。过去相当长一段时间，在规划设计和调度运用过程中，水库汛期均采用单一汛限水位。然而，由于我国受到季风气候影响，大多数流域洪水具有明显季节性变化规律，汛期主要集中在4－10月之间。而在这样长的一段时间内洪水发生的成因、量级以及发生概率会发生变化。因此，仅采用单一汛限水位必然会导致防洪风险率的变化和水资源浪费。而根据洪水季节性变化规律对水库分阶段进行汛限水位控制，可以在不降低水库防洪标准的前提下提高洪水资源利用率，使水库运行调度更符合流域洪水变化特性。现已有部分大型水库根据洪水出现的时空规律并结合历史水文资料改进水库单一汛限水位的防

收稿日期：2019-12-11；　**修回日期**：2020-03-04

基金项目：“十三五”国家重点研发计划课题(2017YFC0405606)；三峡库区生态环境教育部工程研究中心开放基金课题(KF2019-13)；三峡大学学位论文培优基金项目(2020SSPY004)

作者简介：李英海(1981-)，男，湖北宜昌人，博士，副教授，硕士生导师，研究方向为流域水资源优化配置。

通讯作者：常文娟(1985-)，女，山西平遥人，博士后，讲师，硕士生导师，研究方向为洪旱灾害与水资源调配。

洪调度方式,制定分期汛限水位,进行分期蓄水、分期控泄,在满足防洪安全的前提下逐步抬高汛期运行水位,实现防洪与兴利效益的结合。例如,丹江口水库根据洪水来水规律,夏汛期汛限水位采用 160 m,秋汛期汛限水位抬高至 163.5 m[1];乌东德水库拟采用分期汛限水位进行洪水控制,5 月下旬至 8 月下旬为 930 m、9 月初至 9 月中旬为 942 m[2];白鹤滩水库按 6－7 月水位维持在 785 m,8－9 月每旬抬高 10 m 的汛限水位控制方式控制水位[3]。然而,单一汛限水位和分期汛限水位均属于静态控制水位,未考虑气象及水文预报信息。随着短期天气预报、降水预报精度和预见期的提高,水情自动测报和水库洪水调度系统的应用,水库汛限水位动态控制已成为可能。碧流水库、大伙房水库、白龟山水库、五强溪水库等为实施汛限水位动态控制试点水库,碧流河水库在 2005 年“8.8”洪水中首次启动了汛限水位动态控制实施方案[4]。之后,预泄能力约束法、预报调度法、补偿调节法等相继应用于汛限水位动态控制中。

可见,科学合理的水库汛限水位控制方式是水库降低汛期防洪风险、实现洪水资源化利用和提高水资源利用效率必不可少的途径。本文通过综述汛限水位的发展历程,系统总结汛限水位确定的主要方法及适用条件,分析各类方法的主要特点以及存在的问题,以期为水库汛限水位研究发展以及更好地实现水库洪水资源化利用提供参考。

2 汛限水位发展历程

由于水文气象特性、水资源供需矛盾、人口分布等情况的差异,国外水库普遍采用的是单一汛限水位控制方式,关于分期汛限水位的研究相对较少,一般通过考虑洪水季节性变化特征对水库库容重新分配来缓解水资源供需矛盾。20 世纪 80 年代初,美国陆军工程师团提出“水库库容重新分配时机”的思路[5];Wurbs 等[6]以美国克萨斯州 Brazos 流域为研究实例,考虑洪水季节性变化特征,对水库库容进行重新分配,确定不同时期水库的防洪与兴利水位。进入 21 世纪后,关于汛期分期具有代表性的研究成果有 Cunderlik 等[7]首次提出的采用相对频率法和矢量统计法,将其应用于水库汛期分期研究;Beurton 等[8]通过对德国境内 481 个水文站洪水资料统计,提出的采用聚类分析方法进行汛期划分。近几年,国外对水库汛限水位的研究主要集中在洪水实时调度方面。Malekmohammadi 等[9]建立了河流－水库洪水管理实时调度优化模型进行洪水实时调度。2015 年,Che 等[10]对河流－水库洪水管理实时调度优化模型进行进一步研究,建立了一种实时确定水库在洪水事件发生之前、期间和之后洪水释放时间表模型。由于气候变化带来的不确定性,水资源管理者在水库运营中面临着平衡相互冲突的目标的挑战,Ashofteh 等[11]、Ahmadi 等[12]研究在气候变化下水库多目标优化的水库实时调度。

在国内,汛限水位的发展经历了单一汛限水位、分期汛限水位和汛限水位动态控制 3 个阶段。从 20 世纪 50 年代开始,防洪作为水库的最主要功能之一,全汛期采用一个固定的汛限水位值是普遍采用的汛限水位控制方式[13]。1958 年丰满水库决定在主汛期将防洪限制水位由 263 m 降至 261 m,是我国对水库汛期实行分期汛限水位的首次尝试[14]。之后,分期汛限水位的研究经历了起步发展、积极探索和蓬勃发展 3 个阶段。在 20 世纪 80 年代以前,主要采用数理统计方法对汛期进行分期。20 世纪 80 年代至今,成因分析法、统计分析法、聚类分析法等相继被提出运用于汛期分期,并得到了迅速发展。在 20 世纪 70、80 年代,大连理工大学相继提出了预蓄预泄法、预报调度方式进行汛限水位动态控制[15],开启了我国对汛限水位动态控制的研究先河。由于受水文气象预报精度的限制以及对洪水资源化利用认识的局限性,这一时期汛限水位动态控制研究发展较为缓慢。直到 2001 年,国家防汛抗旱总指挥办公室启动水库汛限水位动态控制研究专题[16],对首批 12 座试点水库进行相关研究,从此,汛限水位动态控制法研究进入活跃期。图 1 为我国汛限水位控制方式的发展历程简图。

3 单一及分期汛限水位研究

在相当长一段时间内,我国水库设计及运用在整个汛期过程中采用单一汛限水位方式。采用单一汛限水位主要出于对汛期防洪安全考虑。但这种方式使水库在汛期部分时段内处于防洪超安全状态,造成汛期水资源大量浪费。随着我国水资源供需矛盾加剧和人们对洪水季节性变化规律认识的深入,在单一汛限水位研究的基础上出现了分期汛限水位的概念。

分期汛限水位是根据汛期不同时段洪水的形成规律以及水库下游防洪安全需求的变化,分别拟定不同时段的防洪库容,采用不同的汛限水位分期控制,使水库在不降低防洪标准的前提下,将原来预留

的部分防洪库容在特定的时间段内用于兴利。分期汛限水位的研究与确定主要包括以下几个方面:

3.1　汛期分期条件及分期方法

在汛期,当来水存在明显的变化规律时,可将汛期按来水变化规律分为若干时段。管益平[17]通过分析乌江流域天气形势变化、峰现时间和洪水量级等情况用分界点前后的差异来确定汛期分割点。在实际应用中,有的水库形成洪水的降水在时间变化上无明显规律,但在量级上逐渐减少或增强,可进行分期处理,但必须具有长系列历史洪水资料(一般不少于 30 a),还需有条件对汛期分期的合理性进行检验。汛期分期方法可分为定性和定量两大类。

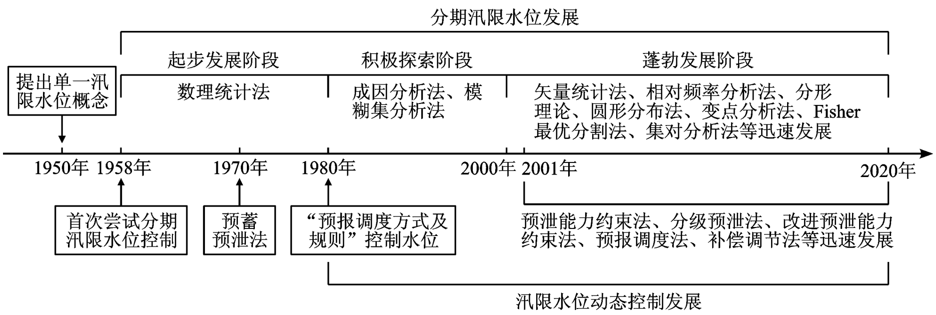

图 1　我国水库汛限水位控制方式的发展历程

定性分析法主要依靠丰富的实践经验和主观判断分析能力对汛期进行划分,其典型代表方法为成因分析法,它主要是通过分析气候成因对汛期进行分期,如副热带高压脊线移动、西风带活动、热带环流等因素对汛期降水的影响。周如瑞等[18]通过分析暴雨洪水天气成因对大伙房水库进行汛期分期。由于定性分析法需要进行大量成灾天气原因分析,而成灾原因的组合方式较多,分析难度大。再者,定性分析法的主观性强且无法将汛期划分地很细,一般不单独将该方法用于汛期分期,须结合定量分析方法,用于检验定量分析法的汛期分界点是否符合流域洪水变化规律。

定量方法可划分为统计分析法和聚类分析法[19]。统计分析法一般采用大量水文特征数据通过统计分析得到汛期划分结果。常用的统计方法有数理统计法、矢量统计法、相对频率分析法[20]和圆形分布法[21]等。数理统计法原理简单,但阈值的选取主观性强;矢量统计法直观地根据矢量的密集程度描述汛期洪水的变化规律,但分割点的确定存在主观性且其应用有一定局限性;相对频率分析法能直观地表现汛期内洪水发生的概率和变化趋势,分期效果也较明显,但一般只能精确到旬;圆形分割法的集中期、集中度和高峰期均为研究洪水发生的重要指标,能较好地反映汛期洪水季节性特征。聚类分析法是将汛期的各时段作为聚类对象,选取能描述汛期洪水变化特征的指标,通过计算汛期各时段属于主汛期的程度进行汛期分期。这一类方法一般都有较强的数学物理背景以及充分的理论依据,但计算过程复杂、计算量大。聚类分析法运用较多的主要包括模糊集分析法[22]、分形理论[23]、系统聚类法[24]、Fisher 最优分割法[25]、集对分析法[26]等。模糊集分析法考虑了汛期的模糊性,是确定性分析、概率统计分析与模糊集分析的结合,分期结果可精确到日,其不足是阈值的选择具有一定的主观性。传统的模糊集分析法只能考虑单个指标对汛期分期的影响,李俊[27]提出改进的模糊集分析法可以考虑多个指标的影响。分形理论可以揭示洪水序列背后隐藏的规律性,但仅能考虑单个指标影响。系统聚类法可考虑多指标影响,但阈值的选取具有主观性且聚类的结果不一定为最优分期结果。Fisher 最优分割法具有不破坏样本原有顺序、可考虑多指标影响、定量确定最优分期数并能将分割点精确到日的特点。集对分析法借助联系度对汛期分期,可以考虑多指标对汛期的影响。系统聚类法、Fisher 最优分割法、集对分析法能考虑多个指标对汛期的影响,但对于指标如何选取、选择指标的个数、各指标权重占比没有明确规定。针对各个指标所占权重问题,朱燕燕等[28]提出模糊层次分析法、唐莉等[29]提出主成分分析法对各指标赋权。

上述汛期分期方法以水文条件的一致性为前提。然而,汛期分期受气象条件、水文因素、气候变化、下垫面变化、人类活动等多种因素相互影响,导致水文资料的一致性条件发生了改变。因此需要进一步考虑水文变异对水库汛期分期及汛限水位确定的影响。针对这一问题,有不少学者进行了相关研究。莫崇勋等[30]利用径流数据分析水文变异情况,

通过对突变年前后澄碧水库汛期进行分期,研究表明水文变异会影响各分期的分界点。Wang 等[31]运用降雨数据确定气候变化突变年,定量分析了气候变化对汾河流域汛期持续时间和汛期划分的影响。李浩等[32]考虑了降水、平均气温、日照时数等气象因子变化对汛期分期的影响。张永波等[33]通过对气候评价指标的综合分析,表明气候突变在一定程度上会影响汛期分期结果。由于气候变化分析将系列资料分为突变前后两个系列,使原本的长系列数据变短,如何利用短系列资料推求分期汛限水位成为研究的难点。目前关于水文变异对汛期分期影响的研究主要集中在降水、气温、日照时数等气象因子的研究上,而下垫面变化、人类活动等对汛期分期影响的研究有待进一步发展。

3.2 分期汛限水位确定方法

完成汛期分期后,需要进一步推求各分期的汛限水位。目前,分期汛限水位的确定方法主要包括以下几类:

(1)设计洪水过程线法。该方法采用设计洪水过程线,经过调洪演算反推汛限水位。在汛期分期确定后,按分期最大值取样或者分期超定量取样,进行分期洪水设计值计算,再选取典型年采用同频率或同倍比放大典型洪水过程求得分期设计洪水线,最后采用调洪演算反推分期汛限水位。目前,设计洪水过程线法是推求分期汛限水位最普遍的方法。分期设计洪水计算是在分期内采用最大值选样,与年最大值选样不完全相同,有学者认为现行方法计算出的分期设计洪水系统偏小,运用其推求分期汛限水位会增加水库的防洪风险,因此,学者尝试采用全概率公式[34]和基于 Copula 函数的联合分布[35]来推求分期设计洪水。随着我国河流梯级水库群格局的形成,考虑上游水库调蓄对设计洪水影响已成为研究重点。洪水经过上游水库调节后洪峰变小,进而导致水库防洪库容偏大,针对这个问题,郭生练等[36]提出了“水库建设期洪水”和“水库运行期洪水”的概念,认为在确保水利枢纽和防洪安全的前提下水库运行期的汛限水位可以适当上浮。

(2)模糊分析法。模糊分析法是根据时段洪水过程隶属于汛期的程度来给出相应的防洪库容。基于模糊集合理论,汛期与非汛期不存在绝对的限定,二者之间是连续变化的过程,与之相应的防洪库容亦为连续变化的过程[37]。因此,汛期中不同时间属于汛期的隶属度是不同的,其对应的防洪库容也不同。在已知汛期防洪库容的情况下,通过长系列降水或径流资料先求出汛期分期时间点,再求出汛期任意时间对汛期的隶属函数,从而将部分防洪库容转化为兴利库容,最后根据水位－库容关系求得水库汛限水位的连续变化过程。

(3)其他方法。除上述方法之外,谢明江等[38]采用 Copula 函数构建洪水发生时间与洪峰的联合分布推求洪水过程线,再利用调洪演算确定分期汛限水位。刘可新等[39]提出基于特大暴雨分级的水库上限起调水位分析方法。吕巳奇等[40]建立汛限水位控制多目标协同决策模型来确定水库汛限水位。杜杉[41]提出采用神经网络调洪演算方法来推求水库分期汛限水位。

3.3 分期汛限水位合理性检验

汛期分期是否合理直接关系到分期汛限水位的确定,影响着水库的防洪安全和综合效益。对分期结果进行合理性检验是必不可少的。冯尚友等[42]在 1982 年首次提出要对分期的合理性进行检验,并用丹江口水库 3 年的汛期实测数据对分期的合理性进行验证。在此后的 20 余年关于汛期分期的研究大部分都采用不同的汛期分期方法进行相互验证,而这种检验是建立在假设成立的前提下,如果假设本身不成立,则检验无任何实际意义。直到 2008 年,陈璐等[43]在 Cunderlik 方法的基础上提出了一种新的汛期分期合理性检验方法,该方法先采用非参数统计自助法进行取样,然后统计再抽样样本中发生洪水的相对频率,最后运用优属度函数描述分期方案的合理性。2009 年张建生等[44]首次提出了考虑权重因子的均方差评判指标 S,对分期结果的合理性与科学性进行判别。2018 年,王家彪等[45]采用选取相对平均离差 *RMAD* 作为分期内信息熵差异大小的评判指标对分期合理性进行检验。现阶段,汛期分期方法的发展已较为完善,但针对汛期分期合理性检验的相关研究较少,可从合理性检验方法的角度出发,提出更为有效的汛期分期合理性检验方法。

目前,分期汛限水位的相关研究主要集中在单库,对于梯级水库群的相关研究较少。梯级水库群中受上游水库调蓄影响,下游水库入库洪水的洪峰、洪量、峰现时间等均发生了显著变化,与之对应的水库运行期设计洪水和汛限水位均随之而改变。熊丰等[46]提出采用梯级水库运行条件下采用水库运行期设计洪水推求汛限水位。周新春等[47]提出了基于水库互用性的水库群防洪调度方法。而梯级水库联合运行后不同水库之间、不同主体之间的利益关

系复杂,其分期汛限水位如何抬高使梯级水库洪水资源得到最大化利用的问题值得探讨。

4　汛限水位动态控制研究

汛限水位动态控制是基于汛限水位静态控制提出的,水库可根据预报信息在汛限水位控制域内进行实时调整。现阶段,汛限水位动态控制域确定的方法运用较多的主要有预泄能力约束法、预报调度法、补偿调节法。

4.1　单水库汛限水位动态控制方法

目前,预泄能力约束法及其改进方法、预报调度法为最常用的单水库汛限水位动态控制域的确定方法。

预泄能力约束法是指在降水径流预报的预见期、水库泄流能力、河道安全泄量控制范围内,利用洪水尾水超蓄部分水量,但在下次洪水来临前能利用泄洪设施让库水位回落到原设计汛限水位[48]。该方法根据实时水文信息预报,有效地在预见期内确定水位动态控制域的上限值,下限值一般采用原汛限水位值。预泄能力约束法计算简单,但对洪水预报精度和可靠性程度要求高。随着预泄能力约束法的发展,有学者提出在预见期不同的时间段应选取不同的预泄流量来确定汛限水位上限,称为分级预泄法[49]。李志鹏等[50]采用预泄能力约束法计算碧口水库动态控制域上、下限,实施汛限水位动态控制。针对洪水汇流速度快、时间短的水库,任明磊等[51]提出改进预泄能力约束法确定汛限水位动态控制域。

预报调度法是在考虑洪水预报方案误差的基础上,由频率计算推求设计洪水,将设计净雨作为入库洪水量级的判断指标,在不增加原设计防洪风险的基础上制定相应洪水预报调度规则[52]。周惠成等[53]运用以累计净雨为判别洪水指标的水库防洪预报调度方法,并采用防洪风险和蓄水效益综合评价体系对水库汛限水位进行抬高。运用预报调度法确定汛期运行水位动态控制域时需要有准确、及时、精度高的水雨情预报。

综述可见,目前汛限水位动态控制依赖于水库流域的降水预报信息的准确度和精度,对于预报信息基础条件差的水库,其汛限水位动态控制的运用则受到限制。对于汛限水位动态控制域的研究主要集中在汛限水位上限研究,下限一般直接采用原汛限水位。

4.2　水库群汛限水位动态控制方法

随着我国各大流域梯级水库及水库群格局的基本形成,单库汛限水位动态控制已不能发挥梯级水库综合效益。由于梯级水库群各水库之间存在水文补偿和水库补偿作用,有学者提出补偿调节法[54],用于下游有共同承担防洪目标的水库或水库群的汛限水位动态控制。结合各水库实时库容,采用补偿调度和错峰调度的方法确定不同时期各个水库的汛限水位。李玮等[55]通过对清江梯级水库之间的调度特点和防洪任务的分析,采用基于预报和库容补偿的汛限水位动态控制模型推求隔河岩水库汛期的汛限水位动态控制方案,最大限度提高发电效益。由于水库防洪风险主要来源于入库洪水的不确定性,谭乔凤等[56]利用梯级水库库容补偿原理和设计洪水不确定性,在不增加防洪风险的情况下确定水库汛限水位动态控制域。

此外,周研来等[57]建立了混联水库群汛限水位联合运用和动态控制模型,并运用于三峡梯级和清江梯级水库群,显著提高了水库综合利用效率。周如瑞[58]通过建立考虑预报误差的并联水库防洪调度方式优化模型,采用优化方法制定清河水库和柴河水库联合调度规则,确定汛限水位动态控制域上限。张忠波等[59]将单水库预泄能力约束法推广到串联梯级水库群的汛限水位动态控制中,以苗家坝–碧口梯级水库为对象进行实时调度。与单库相比,水库群汛限水位动态控制需考虑的因素更多,包括各水库库容差异、水库蓄泄状态、上游预报来水情况、区间来水情况、各水库预报精度差异、各水库防护对象的防洪安全等,如何合理设置水库群中各水库的汛限水位仍是一个需要深入研究的问题。目前,水库群汛限水位动态控制研究仍处于初探阶段,随着多目标调度需求与水库群联合调度的发展,如何协调不同水库间、不同主体间的利益关系,将使汛限水位动态控制面临更多的挑战。

5　结论与展望

科学合理地设置水库汛限水位是缓解水库兴利与防洪矛盾,实现洪水资源化利用的关键。单一汛限水位着重考虑汛期防洪安全而忽视了兴利效益,易造成汛期水资源浪费,现已逐步被分期汛限水位及汛限水位动态控制所代替。分期汛限水位相较于单一汛限水位更适合于洪水季节性变化规律较为明显的流域,能够有效提高汛期洪水资源的利用率,但其确定方法以及理论依据较为复杂。另外,单一汛限水位和分期汛限水位方法均没有考虑降水和洪水预报信息,水库汛期兴利潜力有待进一步挖掘。汛

限水位动态控制能充分利用水文预报信息，在考虑水库运行实际情况的基础上对水库进行实时汛限水位动态控制，该方法紧密结合工程实际，使优化的控制方案易于在工程实践中运行。由于各流域水文特性、水库功能设置、水库历史水文资料、水库气象预报条件等不同，不同水库汛限水位控制方式也不相同，应根据实际情况来确定水库的汛限水位。表 1 为上述 3 种汛限水位控制方式的概括总结。

表 1 3 种汛限水位控制方式概括总结

汛限水位控制方式	确定汛限水位的主要方法	优点	存在的问题
单一汛限水位	设计洪水过程线推求和调洪演算	着重考虑水库防洪安全。	水库处于超标准安全状态，忽略了兴利效益，易造成汛期水资源浪费。
分期汛限水位	汛期分期定性分析法和定量分析法	更符合洪水实际发生的季节性变化规律，提高汛期洪水利用率。	(1)分期汛限水位推求方法均依赖于长系列历史径流或降水资料； (2)未考虑水文气象预报信息，不适用于资料缺乏的小流域； (3)汛期分期方法中各个指标以及指标权重的确定无明确规定； (4)现有各个汛期分期方法的分期结果并不完全一致，汛期分期合理性检验多为各个方法相互印证，缺少理论依据。
汛限水位动态控制	预泄能力约束法、改进预泄能力约束法、预报调度法、补偿调度法等	充分利用水文气象预报技术，对中小洪水实施更为精细科学的调度，在分期汛限水位基础上进一步提高汛期洪水资源利用率。	(1)水位控制过程依赖于水文预报的精度、预见期和可靠度； (2)梯级水库群中各水库的预报精度、预见期和运行管理水平等均存在差异，如何协调不同水库、不同主体的利益关系进行合理的汛限水位动态控制将面临挑战。

水库汛限水位控制作为确保水库汛期防洪安全并实现洪水资源化利用的重要途径，目前形成的理论体系在实践中正在不断地发展与完善。在未来实践中还需对以下几个方面进行深入研究：

(1)针对缺乏长系列历史水文资料的小流域，探索分期汛限水位确定的合理方法。

(2)由于各类汛期分期方法得到的分期结果并不是完全一致，分期合理性检验显得极为重要，需从合理性检验方法方面进行进一步研究。

(3)梯级水库联合运行后各水库入库径流受水库调度的影响将发生较大改变，且不同水库、不同主体间利益关系复杂，如何确定梯级联合运行条件下的分期汛限水位，值得进一步探讨。

(4)现阶段，水文变异对汛限水位影响的研究主要考虑气候变化对水文系列的影响，将水文序列分为突变前、后两个系列，导致原本的长系列数据变短，因此如何利用短系列资料推求分期汛限水位有待进一步研究；另外，需加强气候变化和人类活动双重影响下汛限水位确定方法的研究。

(5)由于汛限水位动态控制域的确定依赖于水文预报的精度、预见期和可靠度，预报条件差、精度低的水库汛限水位动态控制将受到限制，针对这一问题，应加强对水库预报信息可利用性分析，进一步研究确定汛限水位动态控制域的新方法以及预报不确定条件下基于汛限水位动态控制域的防洪风险分析和评价方法。

(6)目前，单水库的汛限水位动态控制研究已较成熟，但对于梯级和更为复杂的流域水库群汛限水位联合控制研究仍有待进一步加强。

参考文献：

[1] 张 睿，张利升，饶光辉. 丹江口水利枢纽综合调度研究[J]. 人民长江，2019，50(9)：214－220.
[2] 查大伟. 基于遗传算法的水库补偿调度优化汛限水位研究[D]. 武汉：华中科技大学，2010.
[3] 舒卫民，李秋平，曹光荣，等. 乌东德白鹤滩梯级水库补偿效益分析[J]. 水力发电，2018，44(12)：74－77.
[4] 王国利，梁国华，王本德，等. 基于预报信息和泄流能力约束的库水位动态控制方法与应用[J]. 水力发电学报，

2010,29(4):28 - 31 + 38.

[5] US ARMY CORPS OF ENGINEERS. HEC - 5, simulation of flood control and conservation systems, User's manual version 8.0[M]. Hydrologic Engineering Center, October, 1998.

[6] WURBS R A, CABEZAS L M. Analysis of reservoir storage reallocations [J]. Journal of Hydrology, 1987, 92(1 - 2): 77 - 95.

[7] CUNDERLIK J M, OUARDA T B M J, BOBEE B. Determination of flood seasonality from hydrological records [J]. Hydrological Sciences Journal, 2004, 49(3):511 - 526.

[8] BEURTON S, THIEKEN A H. Seasonality of floods in Germany [J]. Hydrological Sciences Journal, 2009, 54 (1):62 - 76.

[9] MALEKMOHAMMADI B, ZAHRAIE B, KERACHIAN R. A real-time operation optimization model for flood management in river-reservoir systems [J]. Natural Hazards, 2010, 53(3):459 - 482.

[10] CHE D, MAYS L W. Development of an optimization/simulation model for real-time flood-control operation of river-reservoirs systems [J]. Water Resources Management, 2015, 29(11):3987 - 4005.

[11] ASHOFTEH P S, HADDAD O B, LOÁICIGA H A. Evaluation of climatic-change impacts on multiobjective reservoir operation with multiobjective genetic programming [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2015, 141(11):1 - 11.

[12] AHMADI M, HADDAD O B, LOAICIGU H A. Adaptive reservoir operation rules under climatic change [J]. Water Resources Management, 2015, 29(4):1247 - 1266.

[13] 王宗志,王银堂,胡四一,等.流域洪水资源利用的理论框架探讨Ⅰ:定量解析[J].水利学报,2017,48(8):883 - 891.

[14] 王本德,周惠成,李 敏, 等. 水库汛限水位动态控制理论与方法及其应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.

[15] 谭一帆. 水库汛期运行水位动态控制及风险分析[D]. 武汉:武汉大学, 2018.

[16] 任明磊,何晓燕,丁留谦,等.水库汛限水位动态控制域确定方法研究发展动态综述[J].水力发电,2016, 42(6):61 - 65.

[17] 管益平.乌江彭水水库分期汛限水位探究[J].人民长江,2015,46(17):24 - 27.

[18] 周如瑞,梁国华,周惠成,等.大伙房水库汛期分期研究[J].水资源与水工程学报,2013,24(6):145 - 148.

[19] 陈立华,潘子豪,刘为福,等.龙滩水电站汛期分期及合理性检验[J].水力发电,2019,45(5):17 - 21.

[20] 薄会娟,董晓华,邓 霞.三峡水库汛期分期方法研究[J].人民黄河,2011,33(2):43 - 44.

[21] 郭金城,郭 倩,武学毅.基于模糊集合分析法与圆形分布法的水库汛期分期研究[J].水电能源科学, 2013, 31(3):50 - 53.

[22] 贾 敏,母晓妃.模糊集分析法在水库汛期分期中的应用[J].水资源与水工程学报,2015,26(2):178 - 181.

[23] 胡家露. 水库汛期分期与汛限水位研究[D]. 武汉:华中师范大学, 2015.

[24] 高 波,刘克琳,王银堂,等.系统聚类法在水库汛期分期中的应用[J].水利水电技术,2005,36(6):1 - 5.

[25] 许钰沐,牛秀岭.基于改进的最优分割法的不同论域对汛期分期影响研究[J].水力发电,2019,45(11):19 - 22 + 116.

[26] 莫崇勋,钟欢欢,王大洋,等.集对分析方法在澄碧河水库汛期分期中的应用[J].水力发电, 2016,42(1):14 - 17.

[27] 李 俊.基于改进模糊集分析法的汛期分期[J].长江科学院院报,2017,34(12):12 - 16.

[28] 朱燕燕,武鹏林.基于 FAHP - Fisher 的最优分割法在汛期分期中的应用[J].水电能源科学, 2016, 34(6):57 - 59 + 56.

[29] 唐 莉,张永波,祝雪萍,等. 基于 PCA - Fisher 最优分割法的汛期分期影响研究[J].水力发电, 2018, 44(1):13 - 16 + 76.

[30] 莫崇勋,阮俞理,莫桂燕,等.水文变异对水库汛期分期及汛限水位确定的影响[J].水利水电技术, 2018, 49(2):1 - 7.

[31] WANG Hejia, XIAO Weihua, WANG Jianhua, et al. The impact of climate change on the duration and division of flood season in the Fenhe River Basin, China [J]. Water, 2016, 8(3):1 - 11.

[32] 李 浩,周义仁.气候变化对汛期分期的影响研究[J].水力发电,2018,44(6):22 - 26.

[33] 张永波,唐 莉,祝雪萍,等.气候突变对水库汛期分期及调度的影响[J].水电能源科学,2019,37(2):67 - 69 + 81.

[34] 王文圣,姚瑞虎,覃光华,等.以洪水分期为条件的管运洪水直接推求法[J].工程科学与技术, 2019, 51(1):75 - 82.

[35] 刘菁稳,玄英姬,陈 星.汛限水位分期控制方法在石岩水库的应用[J].人民黄河,2018,40(4):32 - 36.

[36] 郭生练,熊 丰,尹家波,等.水库运用期的设计洪水理论和方法[J].水资源研究,2018,7(4):327 - 338.

[37] 马永胜,黄 强,王义民,等.基于模糊集理论的石泉水库分期汛限水位确定[J].水电能源科学,2008,26(3):47 - 49.

[38] 谢明江,李继清,沈 笛.基于 Copula 函数的水库汛期分期设计[J].水电能源科学,2014,32(7):56 - 60.

[39] 刘可新,于 茜,李 匡,等.基于特大暴雨分级的水库上限起调水位分析方法[J].水资源与水工程学报,

2018, 29(5):159－163.

[40] 吕巳奇,王建群,焦 钰,等. 基于协同的水库汛限水位控制多目标分析[J]. 人民黄河,2019,41(5):23－27.

[41] 杜 杉. 确定水库分期汛限水位的神经网络调洪演算方法[J]. 农业科技与信息,2018(11):96－97.

[42] 冯尚友,余敷秋. 丹江口水库汛期划分的研究和实践效果[J]. 水利水电技术,1982,13(2):56－61.

[43] 陈 璐,郭生练,刘 攀,等. 汛期分期合理性检验方法及应用研究[J]. 中国防汛抗旱,2008,18(4):55－58.

[44] 张建生,黄 强,马永胜,等. 水库汛期分期及其评价方法[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(10):229－234.

[45] 王家彪,廖卫红,付晓杰,等. 基于熵权法的万安水库汛期分期计算[J]. 水利水电技术,2018,49(1):36－41.

[46] 熊 丰,郭生练,陈柯兵,等. 金沙江下游梯级水库运行期设计洪水及汛控水位[J]. 水科学进展, 2019, 30(3):401－410.

[47] 周新春,许银山,冯宝飞. 长江上游干流梯级水库群防洪库容互用性初探[J]. 水科学进展, 2017, 28(3):421－428.

[48] 黄灵芝,李守义,司 政. 汛限水位动态控制在石门水库主汛期调度中的应用研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(3):146－150＋157.

[49] 王国利,梁国华,何 斌,等. 基于分级预泄条件的水库汛限水位动态控制域与应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2010, 29(1):159－161.

[50] 李志鹏,田 淳,何晓燕,等. 碧口水库主汛期水位动态控制效益分析[J]. 人民黄河,2019,41(4):23－26.

[51] 任明磊,何晓燕,丁留谦,等. 基于改进预泄能力约束法的水库汛限水位分期动态控制域确定及应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2018,16(1):16－22.

[52] 赵 强,钟平安,刘冠华,等. 基于预报调度的河口村水库汛限水位动态控制域研究[J]. 水电能源科学,2019,37(10):56－59.

[53] 周惠成,张改红,王本德,等. 基于防洪预报调度调整水库汛限水位的研究[J]. 水力发电,2006,32(5):14－17.

[54] 钟平安,孔 艳,王旭丹,等. 梯级水库汛限水位动态控制域计算方法研究[J]. 水力发电学报, 2014, 33(5):36－43.

[55] 李 玮,郭生练,刘 攀. 水库汛限水位确定方法评述与展望[J]. 水力发电,2005,31(1):66－70.

[56] 谭乔凤,雷晓辉,王 浩,等. 考虑梯级水库库容补偿和设计洪水不确定性的汛限水位动态控制域研究[J]. 工程科学与技术,2017,49(1):60－69.

[57] 周研来,郭生练,刘德地,等. 三峡梯级与清江梯级水库群中小洪水实时动态调度[J]. 水力发电学报,2013,32(3):20－26＋46.

[58] 周如瑞. 并联水库群防洪预报调度方式及其风险分析研究[D]. 大连:大连理工大学,2017.

[59] 张忠波,何晓燕,耿思敏,等. 苗家坝－碧口梯级水库汛期水位动态控制研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2017,15(6):468－477.