水　利　学　报
2026 年 1 月　　SHUILI　XUEBAO　　第 57 卷　第 1 期

文章编号：0559-9350(2026)01-0103-11

流域水库群运行水位优化设计与多目标联合调控

郭生练，谢雨祚，钟斯睿
（武汉大学 水资源工程与调度全国重点实验室，湖北 武汉，430072）

摘要：水利水电工程兴建运行改变了下游河流的水文情势，洪水时空分布发生了显著变化。基于单站天然资料系列推求的水库建设期设计洪水及汛限水位，无法适应水库运行期来水来沙变化实况，致使水库汛期弃水与汛后无水可蓄，防洪与兴利矛盾凸显。本文突破传统“单库设计—静态运用”的局限，从“规划设计—联合运用—优化调度”层层递进的角度，综述水库运行期设计洪水计算理论和方法，归纳水库群防洪库容联合设计及互补等效关系研究进展，论述流域水库群多目标联合调度模型与求解方法，提出需要继续深入研究的科学技术问题。建议以洪水资源化利用为目标，强化流域水库群运行水位优化设计与多目标联合调控的研究及应用。

关键词：水库群；设计洪水；汛限水位；优化设计；联合调度；洪水资源；高效利用
中图分类号：TV213.9　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3724/j.slxb.20250560

1　研究背景

我国降雨径流时空分布不均，年内年际变化幅度大，暴雨洪水和干旱缺水等水旱灾害频发；同时人均占有水资源量少，水资源短缺及其影响问题越来越突出，促使人们认识到有效利用洪水资源的重要性。我国已建成各类水库约9.5万座，总库容约1万亿 m^3，总防洪库容约2000亿 m^3[1]。水库作为具有主动调控能力的基础工程措施，已成为洪水资源化利用的主要手段。水库调度根据水库运行状态及相关气象水文信息，通过蓄水和放水决策来保障下游防洪对象的防洪安全、满足经济社会的综合用水需求，是防洪减灾和水资源优化配置至关重要的技术手段和措施[2]。

1998年1月1日起施行的《中华人民共和国防洪法》规定：“在汛期，水库不得擅自在汛期限制水位以上蓄水，其汛期限制水位以上的防洪库容的运用，必须服从防汛指挥机构的调度指挥和监督”[3]。2019年水利部出台了《汛限水位监督管理规定(试行)》，强化水库汛限水位的监管问责。2023年郭生练等[4]回顾了汛期运行水位动态控制的研究进展，指出当前汛限水位设置和水库运行调度存在明显的局限性，强调了深入开展汛期水位动态控制的必要性和可行性。在工程规划设计建设期，根据单站天然流量资料系列推求设计洪水和汛限水位，主要用于确定溢洪道尺度规模和确保大坝防洪安全。而在水库运行期间严格按照汛限水位控制，即要求水库时刻预防小概率的设计洪水，必然导致汛期弃水多、汛后无水蓄和洪水资源化利用效率低等突出问题。我国水库总库容约1万亿 m^3，低于前苏联和美国的1.5万和1.2万亿 m^3，人均占比更低。目前我国现有水库蓄满率不到70%，如丹江口水库1954—2023年日流量系列模拟调度，仅10年可蓄水到170 m正常蓄水位[5]。

随着经济社会的持续快速发展，我国主要流域干支流已兴建了一批大型控制性水库群。水库从早期的单库设计调度扩展成梯级水库甚至跨流域水库群的联合调度运行[6]。受上游水库群的调蓄影响，下游断面的水文情势发生了显著变化，入库洪峰洪量和泥沙显著减少[7]，若仍沿用原设计洪水及汛限

收稿日期：2025-09-04
基金项目：国家自然科学基金长江联合基金项目(U2340205)
作者简介：郭生练(1957—)，教授，挪威工程院外籍院士，主要从事水文水资源研究。E-mail：slguo@whu.edu.cn

水位指导水库运行调度，就无法充分发挥流域水库群联合调度的综合利用效益[8]。因此，在确保水库安全的前提下，如何突破现有的“单库设计—静态运用”的局限，对实现水资源高效利用具有重要的理论价值和现实意义[9]。

本文以洪水资源化利用为研究目标，从“规划设计—联合运用—优化调度”层层递进的角度，综述流域水库群运行水位优化设计与多目标联合调控的研究进展，技术路线如图1所示。对比洪水地区组成和非一致性洪水频率分析两种途径，总结梯级水库运行期设计洪水计算理论及方法，探讨流域水库群防洪库容互用性，阐述多目标联合优化调度的求解方法，为流域水库群科学调度决策提供理论基础和技术支撑。

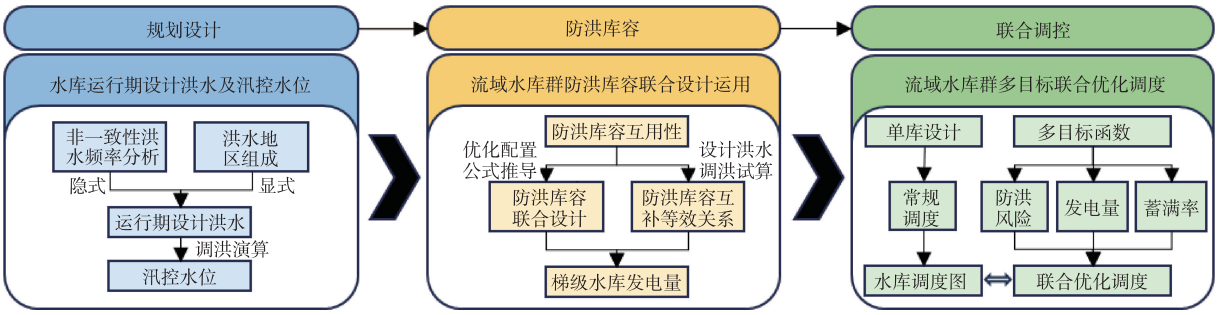

图1　技术路线图

Fig. 1　Technology roadmap

2　水库运行期设计洪水及汛控水位

依据我国《水利水电工程设计洪水计算规范(SL 44—2006)》(简称《规范》)[10]，在工程规划设计阶段(水库建设期)，采用单站年最大洪水系列资料推求设计洪水，根据工程的防洪标准、开发任务和规模等进一步确定水库特征水位，其中以汛限水位作为协调防洪与兴利矛盾关键参数[11]。然而在水库运行期，由于人类活动(如水利工程建设、土地利用植被变化和城市化等)和气候变化影响，流域降水径流时空分布、产汇流规律发生了变化，水文资料系列呈现非一致性特征[15]。初设阶段“建设期设计洪水”及对应的汛限水位，已无法适应当前水库群格局下的洪水资源化利用需求，亟待开展水库运行期设计洪水及汛控水位研究。郭生练等[12]系统阐述了梯级水库运行期设计洪水的理论和方法，包括非一致性洪水频率分析法和洪水地区组成法两种途径，分别“隐式”和“显式”地考虑上游梯级水库的调蓄作用。

2.1　非一致性洪水频率分析法　非一致性洪水频率分析直接拟合年最大洪峰或洪量系列的分布函数，建立分布函数参数与水库系数等指标的映射关系，进而推求设计频率下的洪水特征值。非一致性洪水频率分析方法无法详细考虑水库实时调度情况并给出连续的调洪过程，仅能由洪水特征值变化“隐式”反映上游水库调蓄作用。

非一致性洪水频率分析方法可分为三种类型：①序列重构法。通过还原或还现的方法剔除洪水资料的非一致性特征，将洪水序列重构为天然或现状条件下的一致性序列，并进行洪水频率分析，关键在于还原或还现方法的准确性。②混合分布法。根据洪水样本的异源性将序列分组按多个分布函数拟合，并通过线性加权构造混合分布，但该方法不适合洪源简单的流域，也难以考虑历史特大洪水、上游水库调蓄和未来环境变化对洪水频率分析的影响。③时变矩法。假定洪水资料非一致性可由相关水文指标反映，构建协变量与洪水分布参数的时变关系式，并进行参数估计和模型检验[13]。

考虑到我国采用P-Ⅲ型适线法估算设计洪水，谢雨祚等[14]根据连续型随机变量分布函数单调递增的特性，提出了基于Q-Q图的时变P-Ⅲ型适线法，推求考虑历史洪水资料信息的三峡水库运行期非一致性设计洪水；相较原设计成果，三峡水库运行期1000年一遇设计洪峰Q_m、洪量W_{3d}和W_{7d}削减

18%左右，洪量W_{15d}和W_{30d}削减14%左右。谢雨祚等[15]采用时变P-Ⅲ型适线法计算金沙江下游梯级水库运行期设计洪水，以向家坝水库为例，水库运行期1000年一遇设计洪峰、W_{3d}、W_{7d}和W_{15d}洪量，相比建设期分别削减了37.30%、35.96%、36.82%和28.03%；采用同频率法放大设计洪水过程线，在不降低防洪标准的前提下，通过调洪演算推求乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝水库运行期汛控水位分别为955.6、794.6、576.6和374.3 m。

2.2 洪水地区组成法 洪水地区组成法从流域洪水成因角度将设计断面上游流域划分为多个分区，采用统计学方法从上游至下游分析设计断面天然年最大洪水的来源，再根据流域洪水组成特征和防洪任务，推求设计断面具有代表性的洪水地区组成与分区设计洪水过程线。然后，根据梯级水库防洪调度规则推求下游断面受调蓄影响的设计洪水。相比非一致性洪水频率分析方法，洪水地区组成法能“显式”考虑各级水库的调度规则和河道汇流作用。

《规范》推荐采用典型年法、同频率法和离散求和法计算洪水地区组成[12]：①典型年法以单场典型大洪水的洪水地区组成计算设计频率下的洪水过程，人为主观性强，忽略了洪水过程的随机性，且难以确保所选典型洪水的代表性；②同频率法假设分区洪水与设计断面洪水的频率相同，但其适用性取决于分区与设计断面洪水的相关程度，需符合设计断面上游各分区的洪水地区组成规律；且同频率法的方案数随洪水分区数量指数型增加；③离散求和法通过对样本进行独立性处理，并计算独立变量的联合概率分布函数，然而其独立性处理仅考虑了洪水序列的线性关系而忽视了不同分区洪水的非线性响应，导致独立性处理过程信息失真，计算结果精度较差；同时由于多变量独立性处理过程较为复杂，离散求和法不适用梯级水库数量较多的复杂流域[16]。

Copula函数在水文多变量分析中得到了广泛地应用，可反映流域洪水分布的客观水文规律[17]。闫宝伟等[18]基于Copula函数提出了最可能洪水地区组成法，刘章君等[19]进一步推导了最可能地区组成法的计算通式。钟斯睿等[20]在最可能组成法的基础上，根据防洪风险分析给下游未控区间分配较多洪量，提出了最不利洪水地区组成法，求解对防洪最不利的洪量组合分配方案。Xiong等[16]通过理论推导和统计试验，系统对比分析了同频率地区组成法和最可能地区组成法：同频率组成法只适用于水库数量小于3座且分区洪水相关系数$\rho > 0.7$的情景；更高维度或更低相关性条件下，难以满足分区洪水同频假设，且方案数增加导致计算结果的不确定性。谢雨祚等[21]综述并确定各种地区组成法的适用条件：水库数量小于3座时，离散求和法和同频率地区组成法的适用条件分别为$0 < \rho \leqslant 0.2$和$\rho > 0.7$，改进离散求和法和最可能地区组成法没有限制条件，然而采用(改进)离散求和法求解多维问题会导致“维数灾难”；水库数量大于等于3座时，最可能地区组成法可得到方案数唯一的最佳方案。

根据流域暴雨洪水成因特征和水库数量，选择最合适的地区组成法推求流域洪水地区组成。Xiong等[22]采用t-Copula函数和最可能地区组成法研究了金沙江中游、雅砻江和金沙江下游梯级水库运行期设计洪水，在维持原设计防洪标准不变的前提下，各水库在运行期汛控水位相比汛限水位可适当抬高，金沙江和雅砻江梯级水库每年可增发电量32.8亿kW·h(+4.3%)。郭生练等[23]先采用最可能地区组成法推求干支流控制断面的设计洪水，然后选用典型年法和汇流演算推求三峡水库运行期设计洪水过程线。Zhong等[24]将Vine Copula函数用于构成最可能地区组成的联合分布，估算了雅砻江流域梯级水库运行期设计洪水，维持防洪标准不变，采用汛控水位指导水库调度年均可增发电量10.5亿kW·h。

2.3 三峡水库运行期设计洪水及汛控水位 钟斯睿等[25]采用混合Copula函数构建联合分布，同时反映年最大洪水系列和典型年大洪水分布组成规律，基于最可能洪水地区组成法和最不利洪水地区组成法，分别推求三峡水库运行期设计洪水及汛控水位。表1列出三峡水库建设期与运行期设计洪水计算结果比较，受上游重点大型水库群调蓄影响，三峡水库运行期设计洪峰和洪量削减了12%～19%。选择1954典型年按同频率法放大推求运行期设计洪水过程线(见图2)，经调洪演算和综合分析比较，确定三峡水库汛控水位为155.0 m。在不降低大坝和下游防洪(荆江、城陵矶补偿调度)标准的前提下，三峡水库运行期汛控水位(155.0 m)比汛限水位(145.0 m)抬高了10 m，年均

表 1　三峡水库建设期与运行期设计洪水计算结果比较

Table1　Comparison of design flood estimation in the TGR construction and operation periods

设计洪水	重现期/a	原设计值	非一致性洪水频率分析	最不利洪水地区组成
Q_{max}/(m^3/s)	100	83900	69000(−17.8%)	67800 (−19.0%)
	1000	98800	80900 (−18.1%)	81100 (−17.9%)
W_{7d}/亿 m^3	100	421	367 (−12.8%)	344 (−18.2%)
	1000	487	422 (−13.3%)	409 (−16.1%)
W_{15d}/亿 m^3	100	796	682 (−14.3%)	659 (−17.2%)
	1000	912	782 (−14.2%)	776 (−14.8%)
W_{30d}/亿 m^3	100	1393	1213 (−12.9%)	1173 (−15.8%)
	1000	1590	1382 (−13.1%)	1379 (−13.3%)

注：括号内数据表示与原设计值的削减率。

可增发电量约 50 亿 kW·h，同时还利于充分发挥供水、航运和生态等综合效益，并有效减轻汛末蓄水期对洞庭湖和鄱阳湖的不利影响。

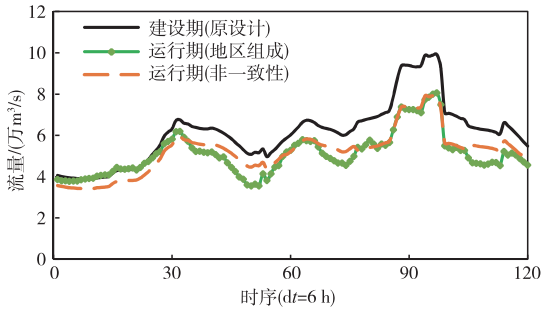

图 2　三峡水库建设期和运行期 1000 年一遇设计洪水过程线对比(1954 典型年)

Fig. 2　1000-year design flood hydrographs in the TGR construction and operation periods (1954 typical year)

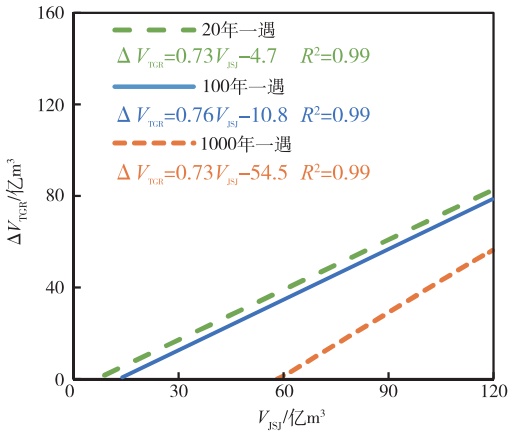

图 3　金下梯级与三峡防洪库容互补等效关系(1954 典型年)

Fig. 3　Complementary equivalent relationship of flood control capacity for cascade reservoirs in lower Jinsha river and TGR (1954 typical year)

3　梯级水库群防洪库容联合设计与互补等效关系

长江中下游总体防洪标准为，在发生类似 1954 年洪水时，保证重点地区的防洪安全。《长江流域综合规划(2012—2030 年)》要求[26]，长江上游干支流水库除了承担所在河流(河段)的防洪任务外，还应配合三峡水库共同发挥对长江中下游的防洪作用；采取分期分类预留防洪库容，并结合洪水遭遇情况采取逐步蓄水方式运用。该规划仅分配确定了各个大型水库的防洪库容，由于各工程是由不同设计单位依据单站资料在不同时期兴建的，并没有考虑梯级水库之间防洪库容的互用性和上游水库调蓄对下游的影响。因此，对梯级水库防洪库容联合设计，量化防洪库容互补等效关系，有助于提高梯级水库的发电效益。

3.1　梯级水库群防洪库容联合设计　在规划设计阶段，同一河流上的各座水库电站可能由不同设计单位在不同时期完成的、依据单站资料和防洪任务确定水库防洪库容。在梯级水库运行阶段，可通过梯

级水库群防洪库容联合设计，在满足规划防洪库容总量不变的前提下调整各水库的运行水位，从而提高发电效益。

郭生练等[27]建立梯级水库汛限水位设计与运用模型，采用清江流域1951—2009年的日降雨径流系列进行分析计算，水布垭和隔河岩水库的汛限水位分别采用387.5和196 m的方案，在保证原设计防洪标准不降低的前提下，可使清江梯级水库多年平均发电量增加0.21亿kW·h，其中平水年和枯水年增加的发电效益更为显著。顿晓晗等[28]基于长系列历史实测径流资料，推算了防洪库容频率曲线方法，研究了溪洛渡、向家坝水库与三峡的防洪库容分配及互用性问题。

谢雨祚等[29]以金下梯级水库为研究对象，发现乌东德–白鹤滩、溪洛渡–向家坝梯级水库区间流域面积小、上下游水库水力联系紧密且没有防洪任务，下游白鹤滩(向家坝)水库的回水顶托几乎到达上游乌东德(溪洛渡)水库的坝下，乌东德–白鹤滩(溪洛渡–向家坝)梯级水库预留的防洪库容可认为近似等效，因此基于水量平衡原理及总防洪库容不变假设，可以推导出金下梯级4座水库防洪库容联合设计增发电量的计算公式：

$$\Delta E = 901.209\left[\left(58.626 - 154.94\lambda_1^{*}\right)^{0.046} - 1.176\right] + 592.848\left[\left(190.060 - 154.94\lambda_2^{*}\right)^{0.099} - 1.599\right] + 408.366\left[\left(115.738 - 154.94\lambda_3^{*}\right)^{0.137} - 1.787\right] + 301.372\left[\left(49.767 - 154.94\lambda_4^{*}\right)^{0.135} - 1.649\right] \quad (1)$$

式中：ΔE为金下四库聚合系统多年平均7—8月总发电增量，亿kW·h；$\lambda_1^{*} \in [0.081, 0.195]$，$\lambda_2^{*} \in [0.285, 0.674]$，$\lambda_3^{*} \in [0.226, 0.417]$，$\lambda_4^{*} \in [0.044, 0.058]$分别为乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝水库联合设计后的防洪库容分配比例，满足$\lambda_1^{*} + \lambda_2^{*} + \lambda_3^{*} + \lambda_4^{*} = 1$。保持金下梯级水库总预留防洪库容不变，经防洪库容联合设计后，相对原设计成果可增发电量共计10.37亿kW·h。

3.2 梯级水库群防洪库容互补等效关系 下游同一个重点防洪对象可能受上游多个水库的保护，而这些水库可能处于不同的流域上，在防洪库容的效用上部分重合，具有一定的互用性。根据水利部批复的《2025年长江流域水工程联合调度运用计划》，长江上游已经建成大型水库117座，总调节库容达842亿m^3、预留防洪库容501亿m^3。在满足所在河流防洪要求的前提下，长江上游重点大型水库需承担长江中下游河段的防洪任务。然而，现有调度规程方案的防洪要求主要针对设计洪水，而这些洪水的发生概率很小。若水库仍沿用预留的初设防洪库容、以防御设计标准的洪水要求，则造成洪水资源的浪费。因此，迫切需要探究不同流域水库群之间防洪库容的互补等效关系，提高不同洪水组成情况下梯级水库联合防洪调度的合理性和科学性，以更好发挥水库群的综合利用效益。

周新春等[30]以1981年、1982年和1998年典型洪水为例，假定金下梯级和三峡水库防洪库容总量满足防洪要求，按长江上游流域洪水地区组成规律分配防洪库容，分析求得金下梯级水库对于三峡水库防洪库容的等效系数在0.80～0.97之间，并受到拦蓄洪量比例和拦蓄时机的影响。周丽伟等[31]对6场代表性设计洪水进行分类，结合马斯京根模型，从理论上推导分析了河道洪水演进对水库防洪调度的影响，推求了不同类型洪水遭遇和地区组成条件下，长江上游不同水库之间防洪库容的利用等效比。上述研究通过调度过程或优化目标体现上下游水库防洪库容的互补关系，无法充分考虑各水库汛期调度运用方案，难以为实时调度提供可行的决策参考。熊丰等[32]采用同频率组成法和最可能组成法推求隔河岩水库的洪水地区组成，基于不降低设计防洪标准的原则推求了清江流域水布垭和隔河岩梯级水库防洪库容互补关系：当清江流域发生20—200年一遇洪水时，水布垭–隔河岩水库防洪库容具有近似线性互补关系，折算系数均值为0.63，其他重现期洪水的折算系数为1，应用互补关系实现隔河岩水库汛期运行水位动态控制，清江梯级电站年均汛期可增发电量9100万kW·h(+5.1%)。牛文静等[34]构建了梯级水库群防洪库容互用总体计算框架，针对不同梯级水库群组面临的不同防洪任务，在不降低防洪标准前提下优化梯级防洪库容利用方式。通过金沙江下游梯级水库群与三峡水库应用实例，验证技术方法的合理性、可行性和有效性。

金下梯级4座水库预留的防洪库容与三峡水库防洪库容互补等效关系可用下式表达[33]：

$$\Delta V_{TGR} = \alpha_{WDD} V_{WDD} + \alpha_{BHT} V_{BHT} + \alpha_{XLD} V_{XLD} + \alpha_{XJB} V_{XJB} + \beta \quad (2)$$

式中：ΔV_{TGR}为三峡水库的互补等效防洪库容，最大值为金下梯级总防洪库容154.93亿m^3扣除为川渝河段预留防洪库容29.6亿m^3后的剩余库容，即$\Delta V_{TGR}\in[0, 125.33]$；$V_{WDD}$、$V_{BHT}$、$V_{XLD}$、$V_{XJB}$和$\alpha_{WDD}$、$\alpha_{BHT}$、$\alpha_{XLD}$、$\alpha_{XJB}$分别代表乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝四库预留的防洪库容和互补等效系数；β为截距。

由于金下梯级水库区间流域面积小，并具有相同的防洪目标，可建立金下梯级总防洪库容V_{JSJ}与三峡水库互补等效防洪库容ΔV_{TGR}的关系如图3所示，相关系数接近于1。在实际调度中依据洪水预报信息和互补等效关系，动态调整运用三峡水库防洪库容，在不增加防洪风险的前提下，三峡水库汛期年均可增发电量41.4亿kW·h(+9.86%)。

4　流域水库群多目标联合优化调度

水库调度是按照据开发任务和要求，根据水库来水和蓄水情况确定水库蓄放水量的过程，以达到重新分配河道径流、高效利用水资源的目的，是水库工程管理的主要环节之一。水库规划建设阶段，往往以单站天然长系列流量资料为基础，拟定单库调度规程。然而随着一批大型水库建成运行，水库调度亟需由单库调度转变为流域水库群联合优化调度，在确保水库大坝和防洪安全的前提下，充分发挥水库的综合利用效益[35]。

水库调度模型根据系统的状态和观测信息(如入库流量)确定每个调度时刻的决策。这些决策依赖于前一个时刻的决策，因此可引入递归循环。将水库管理者实际决策与调度过程建模为(有限)马尔科夫决策过程[36]，管理者为水库在每个时间段依序制定相应决策且受水库的收益回馈，能够根据水库的收益优化策略。马尔科夫决策过程属于多阶段决策过程，因此常采用动态规划系列算法计算最优控制策略[37]，然而动态规划由于算法结构性原因，应用于多维度大尺度梯级水库容易出现“维数灾”，且无法求解多目标调度问题。

4.1　水库群多目标调度优化算法　郭生练等[38]综述了水库调度的基本原则、目标函数和优化算法，分析探讨水库群多目标联合优化调度搜索技术，其中“参数化-模拟-优化”是策略空间近似方法的主要途径。直接策略搜索通过将调度规则参数化为某一类函数，并在函数的参数空间内采用启发式算法进行搜索，以优化多个不同目标函数的性能指标[39]。由于调度策略的参数化，选择合适的函数类型对于发现高性能的优化解集至关重要，不少对于开环策略调度模型的闭环优化改进方案均属于直接策略搜索的范畴，如基于传统调度图改进的优化调度图[40]，基于风险对冲规则改进的优化风险对冲规则等[41]。

直接策略搜索方法从根本上克服了动态规划系列方法的三个结构性“灾难”：①“维数灾难”，即状态价值函数的计算时间和存储需求随着水库数量的增加呈指数级增长，当水库数量大于3座时动态规划方法可能不再适用。直接策略搜索由于避免了状态价值函数的计算，可采用高性能启发式算法通过并行计算缓解[42]；②“建模灾难”，为了进行每个阶段的顺序决策过程，必须对动态规划框架中包含的信息进行显式建模，预测下一个状态转移并估计价值函数。而直接策略搜索能够在调度规则中考虑水文预报信息，无需要将这些信息耦合进马尔科夫决策过程的闭环决策中，可以有效解决“建模灾难”[43]，③“多目标灾难”，动态规划系列方法仅能解决单目标优化问题，虽然可以通过算法改进以获得单目标近优解集[44]，但无法直接求解多目标问题且难以提供一系列可构成替代方案的Pareto最优解集[45]。直接策略搜索与基于Pareto最优理论的多目标进化算法相结合，可以生成Pareto前沿，从而扩大目标的数量和复杂性，攻克了“多目标灾难”的难题[46]。

4.2　流域水库群多目标联合优化调度实例　流域水库群联合调度决策通常要考虑防洪、发电、供水、航运、生态等多目标需求，通过优化和动态权衡实现综合利用效益的最大化。Quinn等[47]提出了竞争框架，制定最不利情况、期望值、最不利第一百分位数和发电期望值四种目标型式，应用于中越跨境河流梯级水库调度，并采用自适应Borg多目标优化算法求解，强调了多目标优化调度问题中针对不同

目标制定合理、稳健的目标型式的重要性。He等[42]提出了一个集成聚合分解、直接策略搜索和并行逐次优化算法的框架，并应用于长江上游30座大型水库，极大缓解了“维数灾难”。Sharifi等[48]比较了包括多目标自适应引导差分算法、多目标人工蜂鸟算法等在内的20多种新兴、稳健的元启发式算法在防洪、发电和供水三个目标上的最优运行策略的性能。Zanutto等[49]开发了一种融合多时间尺度水文预报的水库多目标调度一体化强化学习框架，通过对策略和预报提取过程进行联合参数化，该框架较无预报方法、两步法分别提升超体积指标(hyper volume indicator)18%和6%，同时增强了策略灵活性与多目标权衡认知能力。

根据水库调度规则和防洪特征水位，本文分别构建了金沙江下游和三峡-葛洲坝6座梯级水库的单库常规调度模型和多目标联合优化调度模型，统筹兼顾防洪、发电和供水等多重要求。采用1959—2020年还原天然日流量系列开展模拟仿真和优化调度研究。图4绘制了防洪风险、发电量和蓄满率对应的三维Pareto前沿图，图5绘制了防洪风险为0时发电量与蓄满率二维Pareto前沿图。研究结果表明：多目标联合优化调度模型与单库常规调度模型相比，6座梯级水库多年平均弃水量减少202.1亿m^3(-23.4%)，增发电量263.8亿kW·h(+9.1%)，梯级水库蓄满率从93.8%提高至97.6%。

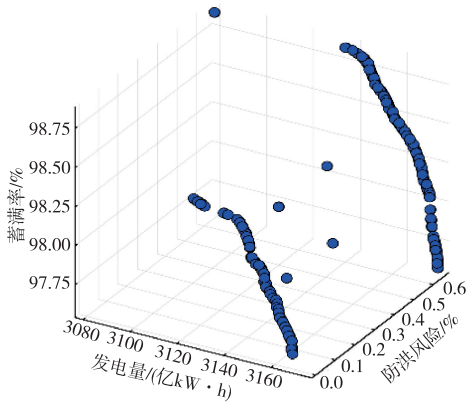

图4　防洪风险、发电量和蓄满率三维Pareto前沿图

Fig. 4　Three-dimensional Pareto frontier of flood control risk, hydropower generation, and reservoir refill rate

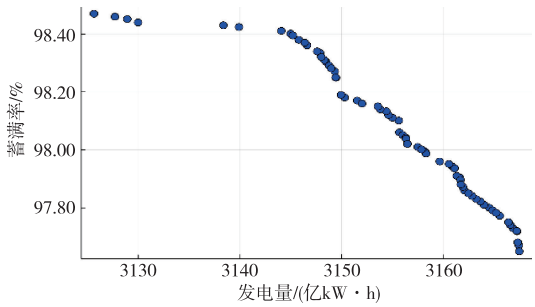

图5　发电量与蓄满率二维Pareto前沿图

Fig. 5　Two-dimensional Pareto frontier of hydropower generation and reservoir refill rate

5　需要继续深入研究的科学技术问题

全球变暖改变了水文循环过程，人类活动改变了径流时空分布格局。极端暴雨洪水和干旱事件频发对社会经济发展和生态系统造成严重威胁。尽管流域水库群联合运行调度研究取得了显著进展与成果，但仍要坚持创新—实践—再创新，围绕下述科学技术问题持续深入开展研究。

(1)加强流域水库群运行期设计洪水及汛控水位的应用研究。非一致性洪水频率分析需溯源水文系列非一致性变化机理，对于河川径流演变的缓适化过程，应采用气象因子或流域下垫面因子作为协变量；而对于修建水库等造成的突变过程，需具体分析协变量与突变过程的对应关系。进一步考虑各种可能发生的重大风险、定量推求受梯级水库影响下的最不利洪水地区组成。

(2)深化梯级水库运行水位优化设计的应用研究。复核各水库防洪库容设计的合理性，统筹考虑流域防洪安全需求，对水库群防洪库容进行联合设计和优化配置。针对水库所承担的防洪任务，进一步分析防洪库容互用特征、量化互补等效系数。

(3)深化对极端暴雨洪水演化规律和洪水资源利用综合约束机制的科学认知，深入研究暴雨洪水的多尺度形成机理，进一步研究气候变暖背景下暴雨洪水的动力-热力协同机制，探求大尺度环流(如副热带高压异常)对水汽辐合的调制作用，量化人类活动对产汇流过程的扰动程度，特别是下垫面土

地利用和植被变化对产汇流的影响。

(4)进一步提高水文气象短中长期的预测预报精度，建立“预报-预警-预演-预案”的调控模式。在短期预报中，结合AI技术改进水文预报模型，提高洪水模拟预报精度，并利用数字孪生技术实现洪水快速模拟和实时演进，构建流域洪水快速预警应急系统；在中长期预测中，集成气候模式输出与统计方法的集合预报成果，重点开展基于AI技术的气象大模型研究应用，显著提升中长期降水径流的预测水平。

(5)深入开展水库群智能优化调度研究。根据流域内梯级水库的水资源管理需求，编制流域水库群多目标联合调度运用方案；研发适应非平稳性气候条件的长江流域水库群动态调度模型，形成了以人工智能驱动的洪水资源化调控新范式；通过流域水库群多目标联合优化调度，统筹提升防洪、发电、供水、航运、生态等综合利用效益。

6 结语

经过20多年的研究和实践，汪恕诚部长提出由“洪水控制”向“洪水管理”转变的洪水资源化利用理念，已经取得了一些重大进展和成效。研究应用表明，在确保防洪安全的前提下，与原设计值相比，单座水库、梯级水库、水库群的洪水资源化利用率和水库蓄满率，可分别提升3%～5%，5%～8%、10%～15%，具有巨大的经济、社会和生态等综合效益。2025年6月，《中共中央办公厅国务院办公厅关于全面推进江河保护治理的意见》明确提出“坚持旱涝同防同治，在确保防洪安全前提下，促进洪水资源化利用”。为加快实现我国洪水资源的科学、安全、高效、精准调控的目标，本文分别从规划设计、联合运用、优化调度和部门管理层面，提出如下5条建议：

(1)在规划设计层面，延长洪水资料系列，结合水库功能定位变化复核计算水库设计洪水，考虑上游水库调蓄影响推求水库运行期设计洪水，依据我国亚太季风气候区降雨变化特征，采用分期汛控水位指导水库调度运行，在确保防洪安全前提下提高水库的综合利用效益。

(2)在联合运用层面，深入探讨同流域或跨流域水库防洪库容的置换与互用方式，在不降低防洪标准的前提下，根据降雨时空分布特征和水库实际预留的防洪库容，动态调整各座水库运行水位，进而提高水资源利用率和发电效益。

(3)在优化调度层面，参照全周期多目标联合调控方案制定调度计划，依据水文气象预报预测信息和各行业需求，实现流域水库群多目标联合优化调度，进一步释放综合利用潜能，把握蓄水时机并提高水库整体蓄满率。

(4)在部门管理层面，修订完善《汛限水位监督管理规定》《水库调度运用技术指南》等技术标准规范；出台部级乃至国家层面加强流域洪水资源利用的指导意见，建立健全大中型水库汛期控制运用水位动态管理办法；划定管理部门、企业和社会的权责利边界，建立洪水管理中风险-效益决策的激励和免责机制；推广洪水保险制度，激励保险公司开发差异化洪水保险产品，大幅提高洪水保险覆盖率。

(5)在流域防洪规划修编、洪水与水量调度方案编制中，明确洪水资源利用具体要求，加大落实旱涝同防同治力度。选取工程条件和监测预报基础较好、特色明显、预期效益显著的流域编制洪水资源利用方案，以典型试点应用场景推动技术创新和管理实践。

参 考 文 献：

[1] 中华人民共和国水利部. 2024年全国水利发展统计公报[M]. 北京：中国水利水电出版社，2025.（Ministry of Water Resources of the People's Republic of china. 2024 Statistic Bulletin on China Water Activities[M]. Beijing: China Water&Power Press，2025.（in Chinese））

[2] 郑守仁，仲志余，邹强，等. 长江流域洪水资源利用研究[M]. 武汉：长江出版社，2015.（ZHENG S R，

ZHONG Z Y，ZOU Q，et al. Flood Resources Utilization in the Yangtze River Basin［M］. Wuhan：Changjiang Press，2015.（in Chinese））

［3］ 中华人民共和国防洪法［J］. 中华人民共和国全国人民代表大会常务委员会公报，1997(5)：597-608.（Flood control law of the People′s Republic of China［J］. Communique of the Standing Committee of the National People′s Congress of the People′s Republic of China，1997(5)：597-608.（in Chinese））

［4］ 郭生练，刘攀，王俊，等. 再论水库汛期水位动态控制的必要性和可行性［J］. 水利学报，2023，54(1)：1-12.（GUO S L，LIU P，WANG J，et al. Revisiting necessity and feasibility for dynamic control of reservoir water level during flood season［J］. Journal of Hydraulic Engineering，2023，54(1)：1-12.（in Chinese））

［5］ 郭生练，尹家波，李丹，等. 丹江口水库设计洪水复核及偏大原因分析［J］. 水力发电学报，2017，36(2)：1-8.（GUO S L，YIN J B，LI D，et al. Rational check of design floods for Danjiangkou Reservoir［J］. Journal of Hydroelectric Engineering，2017，36(2)：1-8.（in Chinese））

［6］ 胡向阳. 面向多区域防洪的长江上游水库群协同调度策略［M］. 北京：中国水利水电出版社，2020.（HU X Y. Collaborative Operation Strategy of Yangtze River Upstream Reservoir Group for Multi Regional Flood Control［M］. Beijing：China Water&Power Press，2020.（in Chinese））

［7］ 郭生练，陈炯宏，栗飞，等. 清江梯级水库汛限水位联合设计与运用［J］. 水力发电学报，2012，31(3)：1-8.（GUO S L，CHEN J H，LI F，et al. Joint design and operation of flood limited water levels for Qingjiang cascade reservoirs［J］. Journal of Hydroelectric Engineering，2012，31(3)：1-8.（in Chinese））

［8］ 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.（XIONG F，GUO S L，CHEN K B，et al. Design flood and control water levels for cascade reservoirs during operation period in the downstream Jinsha River［J］. Advances in Water Science，2019，30(3)：401-410.（in Chinese））

［9］ 王俊，郭生练. 三峡水库汛期控制水位及运用条件［J］. 水科学进展，2020，31(4)：473-480.（WANG J，GUO S L. On Three Gorges Reservoir control water level and operating conditions in flood season［J］. Advances in Water Science，2020，31(4)：473-480.（in Chinese））

［10］ 中华人民共和国水利部. 水利水电工程设计洪水计算规范：SL 44—2006［S］. 北京：中国水利水电出版社，2006.（Ministry of Water Resources of PRC. Regulation for calculating design flood of water resources and hydropower projects：SL 44—2006［S］. Beijing：China Water & Power Press，2006.（in Chinese））

［11］ 郭生练，刘章君，熊立华. 设计洪水计算方法研究进展与评价［J］. 水利学报，2016，47(3)：302-314.（GUO S L，LIU Z J，XIONG L H. Advances and assessment on design flood estimation methods［J］. Journal of Hydraulic Engineering，2016，47(3)：302-314.（in Chinese））

［12］ 郭生练，熊立华，熊丰，等. 梯级水库运行期设计洪水理论和方法［J］. 水科学进展，2020，31(5)：734-745.（GUO S L，XIONG L H，XIONG F，et al. Theory and method of design flood in cascade reservoir operation period［J］. Advances in Water Science，2020，31(5)：734-745.（in Chinese））

［13］ 江聪，熊立华，黄俊哲，等. 融合降雨随机变量的洪水频率分布估计方法研究［J］. 水利学报，2023，54(1)：45-53.（JIANG C，XIONG L H，HUANG J Z，et al. A derivation method of flood frequency distribution incorporating rainfall stochastic variable［J］. Journal of Hydraulic Engineering，2023，54(1)：45-53.（in Chinese））

［14］ 谢雨祚，郭生练，熊立华，等. 考虑历史洪水资料的三峡水库运行期非一致性设计洪水估算［J］. 水利学报，2024，55(6)：643-653.（XIE Y Z，GUO S L，XIONG L H，et al. Non-stationary design flood estimation of Three Gorges Reservoir in operation period considering historical information［J］. Journal of Hydraulic Engineering，2024，55(6)：643-653.（in Chinese））

［15］ 谢雨祚，郭生练，钟斯睿，等. 金沙江下游梯级水库运行期设计洪水计算方法研究［J］. 水利学报，2025，56(3)：354-363.（XIE Y Z，GUO S L，ZHONG S R，et al. Research on design flood estimation method during operation period for cascade reservoirs in the lower Jinsha River［J］. Journal of Hydraulic Engineering，2025，56(3)：354-363.（in Chinese））

［16］ XIONG F，GUO S，YIN J，et al. Comparative study of flood regional composition methods for design flood estimation in cascade reservoir system［J］. Journal of Hydrology，2020，590：125530.

［17］ 郭生练，闫宝伟，肖义，等. Copula函数在多变量水文分析计算中的应用及研究进展［J］. 水文，2008(3)：1-7.（GUO S L，YAN B W，XIAO Y，et al. Multivariate hydrological analysis and estimation［J］. Journal of

China Hydrology，2008（3）：1-7.（in Chinese））

[18] 闫宝伟，郭生练，郭靖，等. 基于Copula函数的设计洪水地区组成研究[J]. 水力发电学报，2010，29(6)：60-65.（YAN B W，GUO S L，GUO J，et al. Regional design flood composition based on Copula function [J]. Journal of Hydroelectric Engineering，2010，29(6)：60-65.（in Chinese））

[19] 刘章君，郭生练，李天元，等. 梯级水库设计洪水最可能地区组成法计算通式[J]. 水科学进展，2014，25(4)：575-584.（LIU Z J，GUO S L，LI T Y，et al. General formula derivation of most likely regional composition method for design flood estimation of cascade reservoirs system [J]. Advances in Water Science，2014，25(4)：575-584.（in Chinese））

[20] 钟斯睿，郭生练，何彦锋，等. 梯级水库下游最不利洪水地区组成法[J]. 水科学进展，2024，35(3)：430-439.（ZHONG S R，GUO S L，HE Y F，et al. Most unfavorable regional composition method for design flood estimation in the downstream cascade reservoirs[J]. Advances in Water Science，2024，35(3)：430-439.（in Chinese））

[21] 谢雨祚，郭生练，王俊，等. 梯级水库下游设计洪水地区组成法比较研究[J]. 水文，2023，43(5)：18-26.（XIE Y Z，GUO S L，WANG J，et al. Comparative study on design flood regional composition methods for downstream cascade reservoirs [J]. Journal of China Hydrology，2023，43(5)：18-26.（in Chinese））

[22] XIONG F，GUO S，LIU P，et al. A general framework of design flood estimation for cascade reservoirs in operation period [J]. Journal of Hydrology，2019，577：124003.

[23] 郭生练，熊丰，王俊，等. 三峡水库运行期设计洪水及汛控水位初探[J]. 水利学报，2019，50(11)：1311-1317，1325.（GUO S L，XIONG F，WANG J，et al. Preliminary exploration of design flood and control water level of Three Gorges Reservoir in operation period [J]. Journal of Hydraulic Engineering，2019，50（11）：1311-1317，1325.（in Chinese））

[24] ZHONG S，HE Y，GUO S，et al. Design flood estimation of cascade reservoirs based on vine-copula flood regional composition[J]. Journal of Hydrology：Regional Studies，2024，56：102071.

[25] 钟斯睿，郭生练，孙博凯，等. 复杂水库群调蓄影响下的三峡运行期设计洪水及汛控水位[J]. 水科学进展，2025，36(3)：459-468.（ZHONG S R，GUO S L，SUN B K，et al. Design flood and flood control water level in Three Gorges Reservoir operation period under regulation impact of complex reservoir group [J]. Advances in Water Science，2025，36(3)：459-468.（in Chinese））

[26] 水利部长江水利委员会. 长江流域综合规划(2012~2030年)[R]. 武汉：水利部长江水利委员会，2012.（Changjiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources. Comprehensive planning for the Yangtze River Basin（2012-2030）[R]. Wuhan：Changjiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources，2012.（in Chinese））

[27] 郭生练，陈炯宏，栗飞，等. 清江梯级水库汛限水位联合设计与运用[J]. 水力发电学报，2012，31(4)：6-11.（GUO S L，CHEN J H，LI F，et al. Joint design and operation of flood limited water levels for Qingjiang cascade reservoirs [J]. Journal of Hydroelectric Engineering，2012，31(4)：6-11.（in Chinese））

[28] 顿晓晗，周建中，张勇传，等. 水库实时防洪风险计算及库群防洪库容分配互用性分析[J]. 水利学报，2019，50(2)：209-217，224.（DUN X H，ZHOU J Z，ZHANG Y C，et al. Real-time flood control risk estimation of reservoir and analysis on the interoperability of storage capacity of multi-reservoir regulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering，2019，50（2）：209-217，224.（in Chinese））

[29] 谢雨祚，郭生练，钟斯睿，等. 金沙江下游梯级水库防洪库容优化配置公式推导与应用[J]. 水科学进展，2023，34(4)：520-529.（XIE Y Z，GUO S L，ZHONG S R，et al. Derivation and application of optimal allocation formulas for flood prevention storage of cascade reservoirs in the downstream Jingsha River [J]. Advances in Water Science，2023，34（4）：520-529.（in Chinese））

[30] 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.（ZHOU X C，XU Y S，FENG B F. An exploration on the interoperability of the flood control capacities of cascade reservoir groups in the upper reaches of Yangtze River [J]. Advances in Water Science，2017，28（3）：421-428.（in Chinese））

[31] 周丽伟，康玲，丁洪亮，等. 水库群防洪库容利用等效关系研究[J]. 人民长江，2021，52(10)：13-17，25.（ZHOU L W，KANG L，DING H L，et al. Research on equivalent relationship for flood control capacity utilization of reservoir groups [J]. Yangtze River，2021，52（10）：13-17，25.（in Chinese））

[32] 熊丰，郭生练，王俊，等. 清江水布垭和隔河岩梯级水库防洪库容互补关系研究[J]. 水力发电，2021，47(5)：36-40，120.（XIONG F，GUO S L，WANG J，et al. Flood prevention storage complementary relationship of Shuibuya Geheyan cascade reservoirs in Qingjiang River [J]. Water Power，2021，47 (5)：36-40，120.（in Chinese））

[33] 谢雨祚，熊丰，郭生练，等. 金沙江下游梯级与三峡水库防洪库容互补等效关系研究[J]. 水利学报，2023，54(2)：139-147.（XIE Y Z，XIONG F，GUO S L，et al. Complementary and equivalent relationship between the reservoir flood prevention storages of cascade reservoirs in the Downstream Jinsha River and Three Gorges[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2023，54(2)：139-147.（in Chinese））

[34] 牛文静，王正华，冯志州，等. 长江上游梯级水库群防洪库容互用方式研究[J]. 水利学报，2025，56(7)：874-884.（NIU W J，WANG Z H，FENG Z Z，et al. Research on the interoperability of flood control reservoir capacity in the cascade reservoir group of the upper Yangtze River [J]. Journal of Hydraulic Engineering，2025，56 (7)：874-884.（in Chinese））

[35] 谢雨祚，郭生练，钟斯睿，等. 水库调度模型与优化求解方法研究进展[J]. 水资源研究，2025，14(1)：1-11.（XIE Y Z，GUO S L，ZHONG S R，et al. Research progress on reservoir operation models and optimal solution methods [J]. Journal of Water Resources Research，2025，14 (1)：1-11.（in Chinese））

[36] HOWARD R A. Dynamic Programming and Markov Processes [M]. UK：Cambridge，1960.

[37] BELLMAN R. Dynamic Programming [M]. USA：Princeton University Press，1957.

[38] 郭生练，陈炯宏，刘攀，等. 水库群联合优化调度研究进展与展望[J]. 水科学进展，2010，21(4)：496-503.（GUO S L，CHEN J H，LIU P，et al. State-of-the-art review of joint operation for multi-reservoir systems [J]. Advances in Water Science，2010，21 (4)：496-503.（in Chinese））

[39] REED P M，HADKA D，HERMAN J D，et al. Evolutionary multiobjective optimization in water resources：The past，present，and future[J]. Advances in Water Resources，2013，51：438-456.

[40] HE S，GUO S，YANG G，et al. Optimizing operation rules of cascade reservoirs for adapting climate change[J]. Water Resources Management，2020，34(1)：101-120.

[41] LIU W，LIU P，CHENG L，et al. An analytic operating rule for reservoirs under the Budyko “supply - demand” framework[J]. Journal of Hydrology，2023，616：128788.

[42] HE S，GUO S，YIN J，et al. A novel impoundment framework for a mega reservoir system in the upper Yangtze River basin[J]. Applied Energy，2022，305：117792.

[43] YANG G，ZAITCHIK B，BADR H，et al. A Bayesian adaptive reservoir operation framework incorporating streamflow non-stationarity[J]. Journal of Hydrology，2021，594：125959.

[44] 杨光，郭生练，李立平. 考虑生态流量的梯级水库柔性决策研究[J]. 华中科技大学学报：自然科学版，2015，43(9)：114-116，122.（YANG G，GUO S L，LI L P. Flexible decision-making for cascade reservoir operation considering ecological flow [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology：Natural Science Edition，2015，43 (9)：114-116，122.（in Chinese））

[45] COHON J L，MARKS D H. A review and evaluation of multiobjective programing techniques[J]. Water Resources Research，1975，11(2)：208-220.

[46] QIU R，WANG D，SINGH V P，et al. Integration of deep learning and improved multi-objective algorithm to optimize reservoir operation for balancing human and downstream ecological needs [J]. Water Research，2024，253：121314.

[47] QUINN J D，REED P M，GIULIANI M，et al. Rival framings：A framework for discovering how problem formulation uncertainties shape risk management trade-offs in water resources systems [J]. Water Resources Research，2017，53(8)：7208-7233.

[48] SHARIFI M R，AKBARIFARD S，MADADI M R，et al. Comprehensive assessment of 20 state-of-the-art multiobjective meta-heuristic algorithms for multi-reservoir system operation [J]. Journal of Hydrology，2022，613：128469.

[49] ZANUTTO D，FICCHÌ A，GIULIANI M，et al. Reinforcement learning of multi-timescale forecast information for designing operating policies of multi-purpose reservoirs[J]. Water Resources Research，2025，61：e2023WR036724.

（下转第167页）