

文章编号: 2097-096X(2022)04-0343-09

基于逆序递推的水库分级分期旱限水位确定方法研究

韦瑞深¹, 严子奇¹, 周祖昊¹, 郑金丽¹, 严登华¹, 丁伟²

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 开展水库旱限水位确定技术研究, 对于科学指导水库抗旱调度具有重要的意义。因此本文在旱限水位内涵解析的基础上, 提出一种水库分级分期旱限水位计算新方法, 充分考虑不同的干旱等级、不同行业年内需水过程的差异, 采用逆序递推算法得到水库分级分期旱限水位。以山西省张峰水库作为研究对象, 计算得到汛期、枯水期、农业灌溉期的旱警水位分别为 756.5 m, 756.2 m, 754.5 m, 旱保水位分别为 735.8 m, 730.7 m, 728.2 m。通过方法对比分析, 发现新的计算方法能够对更多的行业、更长的时段进行供水改善, 在指导水库抗旱调度, 提升水利工程群干旱防御能力方面具有显著优势。

关键词: 旱限水位; 分级分期; 逆序递推; 抗旱调度; 张峰水库; 逐月滑动

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20210245

1 研究背景

目前, 在防汛领域, 已经建立了较为完善的汛限水位^[1]等指标体系来指导水库调度, 在防洪减灾中发挥了重要作用, 但在抗旱领域, 我国至今尚未建立可以用于应对干旱灾害和水库枯水状态的水位(水量)等干旱特征指标。旱情预警、抗旱会商、应急响应、水量调度等抗旱应急管理工作往往缺乏科学依据, 存在抗旱指挥决策时机把握不准或应急响应过度的现象, 一定程度上影响了抗旱工作科学有序地开展。

随着人口的增加和工、农业的快速发展, 人类对水资源的需求迅速增加^[2], 水库在区域供水系统中发挥重要作用。2011年, 中国防汛抗旱指挥部办公室首次提出了旱限水位^[3](流量)的概念, 即水库水位持续偏低, 流量持续偏少, 影响城乡居民生活、工农业生产或生态环境等用水安全, 应采取抗旱措施的水位。旨在建立水库干旱预警水位, 为干旱预警和抗旱调度提供抓手。之后, 不少学者围绕水库旱限水位的概念、方法及优化等展开过研究。李其峰等^[4]针对一种常见的水库群供水格局开展供水预警研究, 给出供水预警含义、预警指标及预警线形式、分级分期预警指标阈值确定方法和预警响应策略等。刘宁^[5]在分析干旱成因和过程的基础上, 提出了干旱预警的水文指标体系, 并提出了旱限水位的概念和确定方法。刘和平等^[6]论述了旱限水位确定的原则、步骤和方法, 确定了辽宁省大伙房水库的旱限水位。刘攀等^[7]、宋树东等^[8]论述水库旱限水位分时段控制的必要性, 提出对水库旱限水位的控制时段进行分期, 然后根据分期进行旱限水位的确定。刘永鹏^[9]对柴河水库的旱限水位进行分级, 将旱限水位分为四级, 进行柴河水库的旱限水位计算。彭少明等^[10]建立多年调节水库的旱限水位最优控制模型, 并制定相应的控制策略。张永永等^[11]针对龙羊峡水库的年际缺水均衡问题, 通过改进人工鱼群算法对水库旱限水位进行优化。张礼兵等^[12]针对大型灌区骨干水库建立优

收稿日期: 2021-10-04; 网络首发时间: 2022-04-08

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.20220407.1358.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3000205); 国家自然科学基金项目(51779270); 水利前期计划项目(2019-000011-76-01-000983)

作者简介: 韦瑞深(1997-), 硕士生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 1605425965@qq.com

通讯作者: 严子奇(1983-), 正高级工程师, 主要从事水文水资源研究。E-mail: yanzq@iwhr.com

化模型,以水库灌区水资源系统长系列模拟模型及优化模型为依托,优化确定了梅山水库不同预警期的早限水位,进一步提出早限水位进行分级分期的确定方法。彭少明等^[13]建立了应对干旱的黄河干流梯级水库群协同优化调度模型,提出典型干旱年份黄河梯级水库群协同调度方案,运用交互粒子群算法(PSO)优化水库的下泄过程。曹润祥等^[14]根据水库在汛期末存蓄水量的不同,提出了早限水位动态控制的概念,即早限水位在每年并非一个值,而是根据每年水库在汛期存蓄的水量来动态控制。Chang等^[15]根据历史水文气象干旱发生的频率,将干旱分成四个等级,来制定了黄河流域水库群的四等级下的早限水位。

在已有研究的基础上,围绕水库的早限水位的确定方法展开深化研究,结合干早期生产、生活、生态用水需求优先级,从分级分期的角度探讨如何确定水库的早限水位,完善水库分级分期早限水位的内涵,提出水库早限水位(流量)指标分期、分级的确定方法。将该方法在张峰水库进行应用,验证了水库分级分期早限水位计算方法的可行性、合理性与有效性,为旱灾防御指挥决策提供科学依据和技术支撑。

2 水库分级分期早限水位内涵及计算方法

2.1 分级分期早限水位内涵 为了应对不同程度的干旱,并与《国家防汛抗旱应急预案》中不同干旱响应级别相匹配,将早限水位划分成两级:应对轻度干旱的早警水位和应对特大干旱的早保水位。

早限水位(流量)包括早警水位(流量)和早保水位(流量)两个级别的指标阈值,早警水位是指轻度干旱情况下,保障城乡生活、工农业生产、生态环境供水需求的水位(流量)阈值,对应于《国家防汛抗旱应急预案》中IV级抗旱应急响应启动的参考指标。早保水位是指特大干旱情况下,保障城乡生活、工农业生产、生态环境基本供水需求的水位(流量)阈值,对应于《国家防汛抗旱应急预案》中I级抗旱应急响应启动的参考指标。

由于不同的用户需水过程有着时间上的差异,不同时期各行业用水过程有着不同的保障目标。结合抗早期生产、生活、生态用水需求的优先级和集中程度,划分早限水位(流量)的预警分期。早限水位(流量)预警分期划分需结合江河湖库水文特征、社会经济需水、生态环境需水和航运需水等规律,可将水文年划分为汛期、枯水期、农业灌溉期等分期。

分级分期早限水位的设置能够保障水库在不同干旱情景和不同时段,通过精准调控,在干旱初期有针对性的降低部分行业的供水保证率,提前预留水量,来保证后期持续干旱下生活、生产、生态的基本需水,避免出现不可恢复的极端缺水情况发生。

2.2 分级分期早限水位计算方法 水库分级分期早限水位计算步骤包括:分期划分、设计来水计算、设计需水计算、早限水位计算、合理性分析五个步骤。

(1)干旱分期。由于不同的用户需水过程有着时间上的差异,不同时期各行业用水过程有着不同的保障目标。因此需要结合抗早期生产、生活、生态用水需求的优先级和集中程度,划分早限水位的预警分期。早限水位预警分期划分需结合江河湖库水文特征、社会经济需水、生态环境需水和航运需水等规律,建议划分为汛期、非汛期、农业灌溉期等分期。对于来水与需水分期交叉的情况,以需水分期为主。

(2)来水计算。依据《水利水电工程水文计算规范》(SL/T278—2020)计算得到与早警水位和早保水位对应的水库设计来水过程,取来水频率为75%和95%的来水过程,分别对应一般干旱年份与特大干旱年份情况下的入库径流量,以此作为计算早警水位和早保水位的依据。

(3)需水计算。需水量可按用户特性分为社会经济用水、生态用水,有通航要求的河湖还要计算航运需水量。

对于社会经济需水量根据采用调查统计配合定额计算或水资源配置模型来计算轻度干旱和特大干旱情况下的设计需水量,作为对应于早警和早保水位(流量)的社会经济需水量。

定额计算法：依据地方定额标准，结合社会经济指标，计算正常年份下分行业需水量。正常年份下分行业需水量与调整系数的乘积作为早警和早保水位(流量)对应的河道外社会经济设计需水量。调整系数参考《国家防汛抗旱应急预案》，取值参考表1，具体可根据实际情况进行调整。

表1 调整系数参考表

对应等级	生活需水系数	工业需水系数	灌溉需水系数
早警水位	0.90~0.95	0.90~0.95	≥0.70
早保水位	≤0.70	≤0.70	≤0.20

模型调算法：对于水资源供需关系较为复杂的地区，建议采用模型调算方法对于旱年份水库供水范围内的需水量进行计算，常用的水资源配置模型有 Mike basin^[16]、GWAS^[17]和 WEAP^[18]等。

对于河湖生态环境需水量，根据《河湖生态环境需水计算规范》(SL/Z 712-2014)，合理确定河流、湖泊内基本生态环境需水量。

对于航运需水量(通航水位)，根据《内河通航标准》(GB 50139-2014)，合理确定河流、湖泊通航水位。

干旱条件下由于水资源匮乏，一般只考虑基本生态环境需水量和最低通航水需水量。对于国家和地方已经颁布生态环境流量指标、通航水位(流量)指标或已制定水量调度规则的地区，采用已有指标或调度规则。

(4)逆序递推。水库早限水位采用逆序递推的方法计算。参考水库兴利库容计算方法，以一个水文年为供水周期，假定调度期末水位达到水库死水位，依据水库兴利调节原理，逆序递推得到各月初水位，在逆序递推过程中，水位要满足取水口高程、死水位、正常蓄水位与汛限水位等约束。早限水位逆序递推法如图1所示。

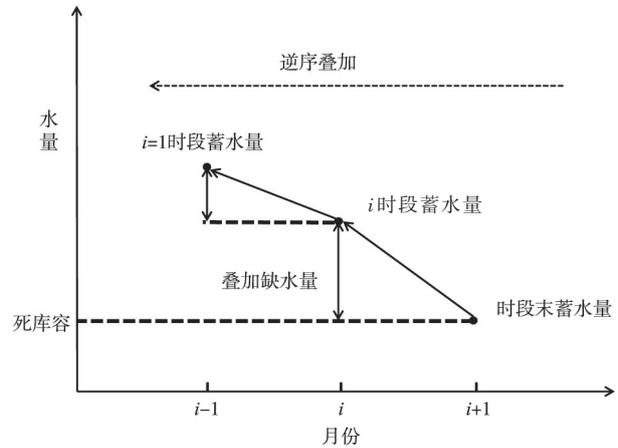


图1 早限水位计算示意图

按上述步骤得到的各月初水位即为月早警(保)水位，如下式所示：

$$Z_{hj,t} = f(W_{a,t} + W_{loss,t} - W_{p1,t} + f'(Z_{hj,t+1})) \quad (1)$$

$$Z_{hb,t} = f(W_{b,t} + W_{loss,t} - W_{p2,t} + f'(Z_{hb,t+1})) \quad (2)$$

$$Z_E = Z_D \quad (3)$$

$$\begin{cases} \text{汛期: } Z_D < Z_{hj,t}, Z_{hb,t} < Z_F \\ \text{非汛期: } Z_D < Z_{hj,t}, Z_{hb,t} < Z_N \end{cases} \quad (4)$$

式中： $Z_{hj,t}$ 为水库 t 月的早警水位； $Z_{hj,t+1}$ 为水库 $t+1$ 月的早警水位； $W_{p1,t}$ 为一般枯水年 t 月的水库来水量； $f()$ 为水库库容-水位曲线； $f'()$ 为水库水位-库容曲线； $Z_{hb,t}$ 为水库 t 月的早保水位； $Z_{hb,t+1}$ 为水库 $t+1$ 月早保水位； $W_{p2,t}$ 为特枯年份 t 月的水库来水量； $W_{loss,t}$ 为水库第 t 月蒸发、渗漏损失水量； Z_E 为供水期末水位； Z_D 为死水位； Z_F 为汛限水位； Z_N 为正常蓄水位。

在逐月早限水位(流量)计算的基础上，为了便于管理实践，可根据干旱分期，对各干旱分期内逐月早限水位取外包线，得到分期早限水位。分期内早限水位(流量)计算公式如下：

$$Z_T = \max\{Z_1, Z_2, \dots, Z_i\} \quad (5)$$

式中： Z_T 为分期 T 的早限水位； Z_i 为分期 T 内第 i 月早限水位。

(5)早限水位合理性分析。早限水位确定过程中应结合实际干旱统计资料和当地水量调度规则对早限水位(流量)的计算结果进行合理性分析和优化调整。建议采用长系列调节计算，分析设置早限

水位前后各行业缺水率的变化，评估早限水位的合理性。若设置早限水位后，典型干旱年份内的要保障的供水类型的缺水率有所下降，缺水率较大的时段明显减少，则可认为早限水位的设定合理，能够改善水库在干旱年份的供水情况。

3 应用案例

3.1 研究区概况及基本数据 为验证水库分级分期早限水位确定方法的合理性，选取山西省张峰水库作为研究对象，张峰水库控制流域面积4990 km²，以城市生活和工业供水、农村人畜饮水为主，兼顾防洪、发电等综合利用。张峰水库死库容为0.38亿 m³，兴利库容为3.03亿 m³，防洪库容为2.55亿 m³。

张峰水库供水区总面积6500 km²，占晋城市总面积的68.5%，其中泽州盆地供水区面积3116 km²，主要是城镇生活和工业供水，包括高平供水区和晋城市城区供水区。沁河沿岸供水区面积3384 km²，主要是工业供水和农村人畜饮水，包括沁水县和阳城县。张峰水库位置及供水区域见图2。

根据张峰水库供水调度规程，水库供水顺序为：首先满足城市生活、工业供水和生态供水，其次满足农村生活供水，最后满足农业灌溉供水。在特大干旱年份，仅供应城市用水、工业用水，不进行农业灌溉。

水位数据采用张峰水库1956—2019年入库流量资料，用水数据来源为《山西省张峰水库调度规程》。

3.2 干旱分期 根据水库多年平均月入库流量和月供水量，参考张峰水库调度规程，在水文年内进行水库的干旱分期的划分，划分结果为：张峰水库7—9月为汛期，10月—次年2月为枯水期，3—6月为农业灌溉期。

3.3 枯水年入库径流分析 依据《水利水电工程水文计算规范》(SL/T278—2020)，确定张峰水库75%和95%频率的年径流量和逐月分配过程，分别对应一般干旱年份与特大干旱年份情况下的入库径流量。

3.4 枯水年需水分析 由张峰水库调度规程得到张峰水库城市生活、工业、农村生活需水设计供水量，城市生活、工业供水、农村生活需水量分别为3000万 m³，6100万 m³，1100万 m³，并将其在年内逐月平均分配。由张峰水库调度规程得到张峰水库的农业灌溉设计需水量，并且根据1956—1999多年农业灌溉逐月平均数据在年内所占比例，将农业灌溉设计供水量逐月分配至各月。以Tennant法为基础，结合张峰水库供水调度规则，采用月平均生态基流1.0 m³/s作为河道的生态环境需水量。张峰水库不承担航运任务，不予考虑航运需水。张峰水库蒸发渗漏量为1956—1999年供水平衡表中选取75%频率与95%频率蒸发渗漏数据。张峰水库设计供水量如表2所示。

根据早限水位制定规则等，一般干旱情况下，启用早警水位，特大干旱情况下，启用早保水位，根据张峰水库调度规程，在特大干旱年份，仅供应生活、工业用水，不再供应灌溉用水，参考《国家防汛抗旱应急预案》，综合考虑各类需水要求保证率，张峰水库的需水调整系数设置如表3。

3.5 早限水位计算 由于在一般干旱年份需要考虑农业灌溉供水，故水文年末的水库库容设置为1.85亿 m³(不含死库容)，对应水库水位为农业取水口高程750.8 m。根据3.1节—3.4节数据，式(1)一式(5)，可得到水库各分期的早警水位，见表4第①列。张峰水库早警水位计算过程如表4所示。

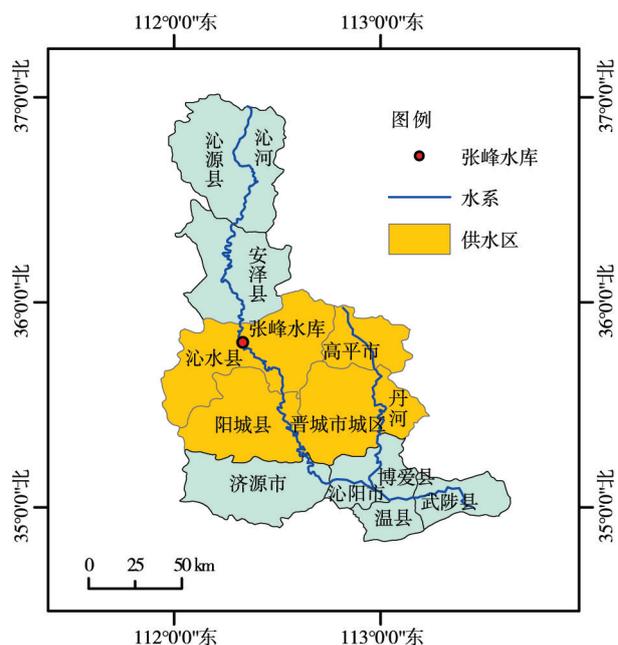


图2 张峰水库地理位置

表2 张峰水库设计供水量

(单位: $\times 10^6 \text{m}^3$)

月份	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6
城市生活	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
工业	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
生态	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68
农村生活	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
灌溉	7.62	3.11	3.89	3.8	0	0	0	0	1.22	8.68	4.37

表3 张峰水库旱限水位调整系数

调整系数	城市生活用水	工业用水	生态用水	农村生活用水	灌溉用水
旱警水位	1	1	1	1	0.75
旱保水位	1	0.9	1	0.8	0

表4 张峰水库旱警水位计算过程

(单位: $\times 10^6 \text{m}^3$)

月份	月初 库容 ①	入库 水量 ②	城市 生活 ③	工业 用水 ④	生态 用水 ⑤	农村 生活 ⑥	灌溉 用水 ⑦	蒸发 渗漏 ⑧	月末 库容 ⑨	旱警 库容 ⑩	旱警 水位 ⑪
7	255.00	11.86	2.50	5.08	2.68	0.92	5.72	3.93	254.75	255.00	756.5
8	254.75	12.43	2.50	5.08	2.68	0.92	2.33	5.99	247.68	255.00	756.5
9	247.68	11.57	2.50	5.08	2.68	0.92	2.92	4.25	240.90	255.00	756.5
10	240.90	6.48	2.50	5.08	2.68	0.92	2.85	3.13	230.22	240.90	756.2
11	230.22	12.92	2.50	5.08	2.68	0.92	0.00	1.95	230.01	240.90	756.2
12	230.01	8.91	2.50	5.08	2.68	0.92	0.00	1.35	226.39	240.90	756.2
1	226.39	11.44	2.50	5.08	2.68	0.92	0.00	0.99	225.66	240.90	756.2
2	225.66	8.30	2.50	5.08	2.68	0.92	0.00	0.89	221.89	240.90	756.2
3	221.89	8.88	2.50	5.08	2.68	0.92	0.92	1.00	217.68	221.89	754.5
4	217.68	5.42	2.50	5.08	2.68	0.92	6.51	1.01	204.40	221.89	754.5
5	204.40	5.39	2.50	5.08	2.68	0.92	3.28	1.18	194.15	221.89	754.5
6	194.15	5.31	2.50	5.08	2.68	0.92	1.73	1.26	185.29	221.89	754.5

张峰水库旱保水位计算过程如表5所示。特大干旱年份不再保障农业灌溉用水,水文年末的库容设置为0,根据3.1节—3.4节数据,式(1)—式(5),求得张峰水库的旱保水位,如表5第⑪列所示。

张峰水库的特征水位与计算得出的旱限水位,以及枯水年设计径流如图3所示。

3.6 旱限水位合理性分析 选取2009水文年(2009年7月—2010年6月)作为干旱典型年,对应长系列来水频率97%。

首先进行无旱限水位情况下张峰水库的长系列调节计算,可以得到典型干旱年2009水文年内的各类用水的缺水率。在2010年1—6月,除城市生活供水外,其余用水均受到破坏,生态用水、农村生活和灌溉用水的缺水率为100%。根据求得的旱限水位进行有旱限水位情况下的长系列调节计算,可以得到2009水文年内各类用水的缺水率。

通过对设置旱限水位前后典型干旱年份内各行业的缺水率相减,分析设置旱限水位前后对典型干旱年份供水的改善情况。2009水文年内设置旱限水位前后的缺水率差值见图4。

设置旱限水位后,在9—12月份牺牲农业灌溉用水,农业灌溉用水的缺水率增加了25%,将存蓄下来的水量用于城市生活、工业、生态和农村生活用水,降低了城市生活、工业、农村生活与生态需水的缺水率,12月—次年6月,城市生活、工业、生态、农村生活的缺水率都有降低。2010年1—3

表5 张峰水库旱保水位计算过程

(单位: $\times 10^6 m^3$)

月份	月初库容	入库水量	城市生活	工业用水	生态用水	农村生活	灌溉用水	蒸发渗漏	月末库容	旱警库容	水位
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
7	71.45	2.41	2.50	4.58	2.68	0.73	0.00	2.84	60.54	71.45	735.8
8	60.54	3.09	2.50	4.58	2.68	0.73	0.00	4.33	48.81	71.45	735.8
9	48.81	4.01	2.50	4.58	2.68	0.73	0.00	3.07	39.26	71.45	735.8
10	39.26	3.35	2.50	4.58	2.68	0.73	0.00	2.26	29.87	39.26	730.7
11	29.87	3.78	2.50	4.58	2.68	0.73	0.00	1.41	21.75	39.26	730.7
12	21.75	3.06	2.50	4.58	2.68	0.73	0.00	0.98	13.35	39.26	730.7
1	13.35	6.21	2.50	4.58	2.68	0.73	0.00	0.72	8.35	39.26	730.7
2	8.35	13.50	2.50	4.58	2.68	0.73	0.00	0.65	10.71	39.26	730.7
3	10.71	15.13	2.50	4.58	2.68	0.73	0.00	0.72	14.63	14.63	728.2
4	14.63	6.52	2.50	4.58	2.68	0.73	0.00	0.73	9.93	14.63	728.2
5	9.93	6.52	2.50	4.58	2.68	0.73	0.00	0.85	5.11	14.63	728.2
6	5.11	6.29	2.50	4.58	2.68	0.73	0.00	0.91	0.00	14.63	728.2

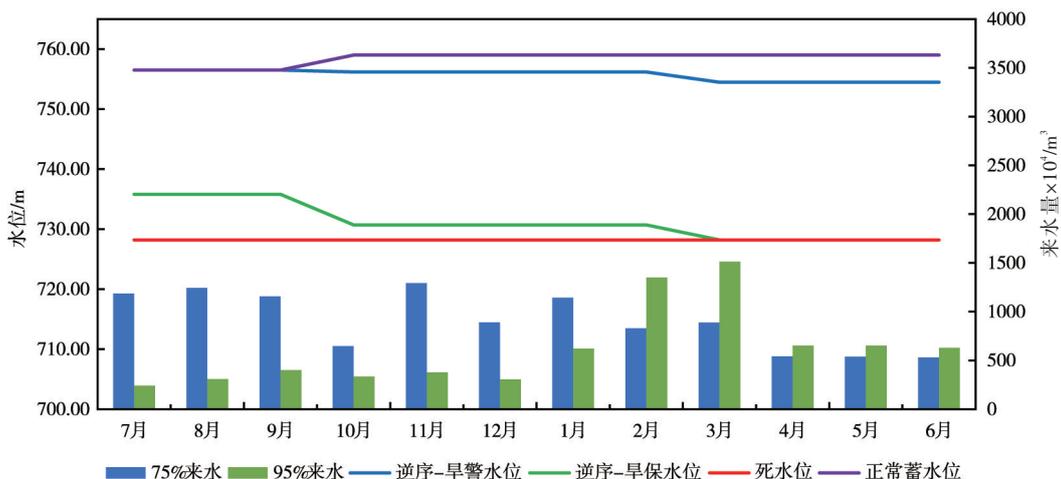


图3 张峰水库旱限水位、入库水量及特征水位

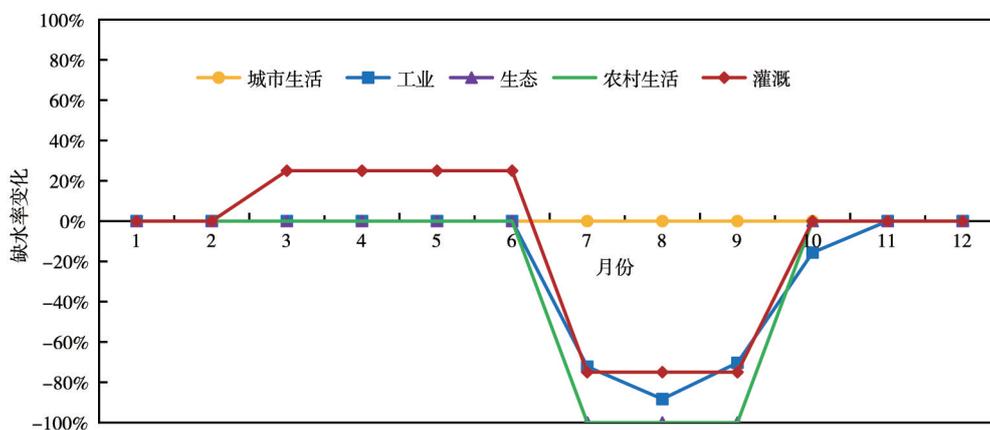


图4 设置旱限水位(逆序递推)后缺水率变化

月，农村生活、工业、灌溉和生态的缺水率大幅度降低，工业缺水率由原来的100%降低为0，灌溉缺水率由原来的100%降低为25%。未设置早限水位情况下，农村生活的供水缺水率在1—3月份为100%，在设置早限水位后，其缺水率降低为0。设置早限水位后，2009年9—12月农业用水缺水率增加了25%，但在2010年1—3月，其缺水率降低了75%。

总体看来，农业灌溉的供水情况得到了改善。由此可见，早限水位的设置能够保证生活、工业不发生过度缺水情况，在干旱年份将有限水源分配给城市生活、工业等需水优先级更高的用水户。早限水位的设置在很大程度上缓解了水库在干旱年份的供水紧张问题，降低了生活、工业供水的缺水率。

3.7 方法对比分析 为比较逆序递推法与以往研究的差异，亦根据2011年出台的《早限水位(流量)确定办法》中的逐月滑动法计算张峰水库的早限水位。其主要计算流程为根据逐月来水量、用水量求得各月缺水量，将各月最大缺水量与死库容叠加转换后即可得到早限水位。该方法与分级分期早限水位确定方法的差异在于：该方法不需要进行水库调节计算，不考虑干旱的严重程度，并且全年采用统一的早限水位。

逐月滑动法计算得到张峰水库的早限水位为752.4 m。以该水位作为早限水位进行干早期水库调度，设置早限水位前后，各用水行业缺水率的变化见图5。

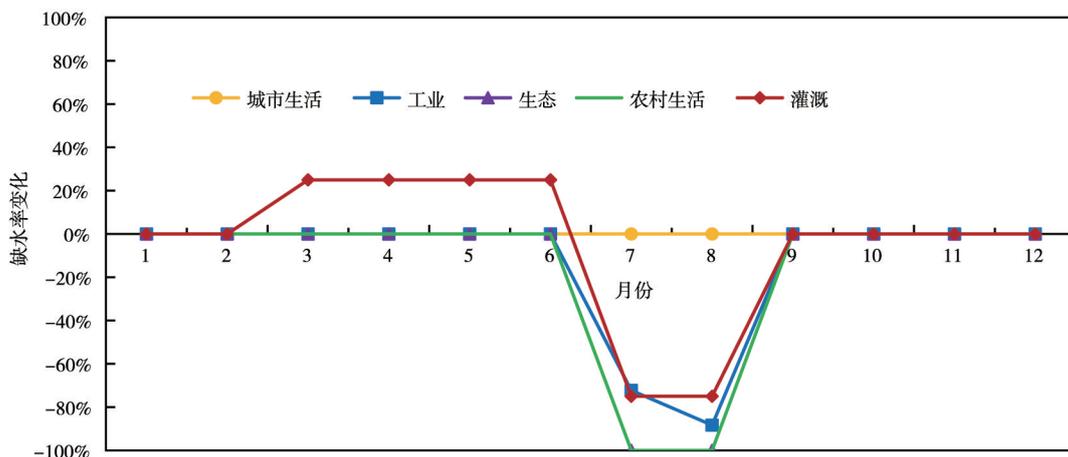


图5 逐月滑动法早限水位对缺水率的影响

通过比较图4与图5，可看出逆序递推法求得的分级分期早限水位所起到的保障作用略优于逐月滑动法。在典型干旱年份2009水文年内，均在9—12月份牺牲了农业灌溉用水，农业灌溉用水增加了25%。在随后的月份中，运用逆序递推法求得的早限水位的各类用水户缺水率下降更大。

在2010年1—3月份，逆序递推法求得早限水位所起到的改善作用大于逐月滑动法。以农村生活供水情况为例，2010年1—3月份，逆序递推法使得农村生活的破坏深度均下降了100%，而逐月滑动法求得早限水位只使得1—2月份得缺水率下降了100%。

在2010年4月份，应用逆序递推法求得的早限水位时，工业供水和生态供水的缺水率都有所下降，工业供水缺水率下降了16%，而应用逐月滑动法求得的早限水位，在2010年4月，各类用水的缺水率均无减小。

设置早限水位后，水库使得典型干旱年内各行业供水情况起到改善作用，水库在2009年9—12月份牺牲农业供水量一定的情况下，逐月滑动法求得的早限水位只降低了2010年1月和2月的缺水率，而逆序递推法求得的早限水位降低了2010年1—4月的缺水率。两种方法求得的早限水位在2009水文年内所起到的供水改善作用相近，且逆序递推法求得的分级分期早限水位要更优于逐月滑动法。

出现这种情况主要是由于逐月滑动法计算早限水位时在年内没有考虑分级分期, 全年设置一个值来作为水库的早限水位。此时, 水库调度过程中会出前期无法预留足够水量, 导致后续改善的效果有限。而通过设置分级分期早限水位后, 水库能够适应不同干旱情况与不同干旱时期下的供水情况, 分级分期早限水位通过在不同干旱情况下对用户需水进行不同的限制, 从而使各时段缺水较为均匀化, 最大程度避免极端缺水情况的发生。

4 结论

本论文对早限水位的内涵和作用进行研究, 提出分级分期早限水位计算的方法, 以及早限水位抗旱效果分析的方法, 将计算得出的早限水位在张峰水库进行应用, 主要结论如下:

(1) 本文在前期学者的研究基础上, 结合干早期生产、生活、生态用水需求优先级, 提出了分级分期早限水位的概念, 对应《国家防汛抗旱应急预案》中IV级抗旱和I级抗旱应急响应, 将早限水位划分成两级: 早警水位和早保水位。并根据年内用水各时段用水情况不同, 提出了分期早限水位的概念, 将年内划分成汛期、枯水期与灌溉用水高峰期等时期, 丰富了早限水位的内涵。

(2) 提出一种基于逆序递推的分级分期早限水位计算方法, 其核心思想是在不同干旱等级下, 通过非必要时段对非必要行业进行一定程度的供水限制, 保障后续用水高峰期生活用水和重要的生产用水。计算过程包括干旱分期划分、来水计算、需水计算、逆序递推、合理性分析等五个环节, 计算过程中充分考虑干早期用水保障要求的差异、不同等级干旱的来水和需水特征, 基于水库调节计算开展早限水位确定和优化调整。

(3) 以山西省张峰水库为对象开展实例研究, 求得汛期、枯水期、农业灌溉期的早警水位分别为756.5 m, 756.2 m, 754.5 m, 早保水位分别为735.8 m, 730.7 m, 728.2 m。以该结果作为控制水位开展典型干旱年效果分析, 通过干旱期内能够通过适当减少非必要时段、非必要行业用水, 提前预留水量, 有效降低用水高峰期的水资源缺口: 在9—12月份减少农业灌溉用水, 预留的水量使得12月一次年6月, 城市生活、工业、生态、农村生活的缺水率显著降低。

(4) 通过对比逆序递推法和以往采用较多的逐月滑动法, 两种算法虽然都能改善干早期供水情况, 但分级分期早限水位通过在不同干旱情况下对用户需水进行不同的限制, 从而使前期非高峰时段供水限制较为均匀化, 能够提前预留更多的水量, 在干旱年份用水高峰期改善供水的时段更长、保障的水量更多, 最大程度避免极端缺水情况的发生。

参 考 文 献:

- [1] 张艳平, 张双虎, 周惠成, 等. 水库汛限水位实时动态控制方案优选研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(1): 9-15, 23.
- [2] 苏志诚, 马苗苗, 邢子康, 等. 人类活动影响的辽宁省大凌河流域水文干旱演变特征[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(1): 148-155, 164.
- [3] 国家防洪抗旱总指挥部办公室. 早限水位(流量)的确定办法[Z]. 2012.
- [4] 李其峰, 温进化, 李冬晓, 等. 基于常见供水格局的水库群供水预警及响应策略研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2017, 15(1): 10-17.
- [5] 刘宁. 中国干旱预警水文方法探析[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 444-450.
- [6] 刘和平, 杨旭, 王曙光, 等. 辽宁省水库早警水位确定方法研究[J]. 中国防汛抗旱, 2015, 25(4): 72-75.
- [7] 刘攀, 李立平, 吴荣飞, 等. 论水库早限水位分期控制的必要性与计算方法探讨[J]. 水资源研究, 2012, 1(3): 52-56.
- [8] 宋树东, 朱文才. 水库早限水位分期确定的研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2014, 37(3): 160-163.
- [9] 刘永鹏. 水库干旱分级预警水位确定方法[J]. 水电能源科学, 2017, 35(7): 40-42.

- [10] 彭少明, 王煜, 张永永, 等. 多年调节水库旱限水位优化控制研究[J]. 水利学报, 2016, 47(4): 552-559.
- [11] 张永永, 彭少明, 白海涛. 基于改进人工鱼群算法的旱限水位优化控制[J]. 人民黄河, 2017, 39(11): 38-41, 46.
- [12] 张礼兵, 伍露露, 金菊良, 等. 大型灌区骨干水库分期旱限水位研究[J]. 水利学报, 2018, 49(6): 757-766.
- [13] 彭少明, 王煜, 尚文绣, 等. 应对干旱的黄河干流梯级水库群协同调度[J]. 水科学进展, 2020, 31(2): 172-183.
- [14] 曹润祥, 李发文, 冯平. 基于水库旱限水位动态控制的供水策略研究[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(3): 916-922.
- [15] CHANG J, GUO A, WANG Y, et al. Reservoir operations to mitigate drought effects with a hedging policy triggered by the drought prevention limiting water level[J]. Water Resources Research, 2019, 55(2): 904-922.
- [16] 顾世祥, 李远华, 何大明, 等. 以 MIKE BASIN 实现流域水资源三次供需平衡[J]. 水资源与水工程学报, 2007(1): 5-10, 28.
- [17] 桑学锋, 王浩, 王建华, 等. 水资源综合模拟与调配模型 WAS(I): 模型原理与构建[J]. 水利学报, 2018, 49(12): 1451-1459.
- [18] 胡立堂, 王忠静, Robin Wardlaw, 等. 改进的 WEAP 模型在水资源管理中的应用[J]. 水利学报, 2009, 40(2): 173-179.

Study on the method of determining the graded and staged drought limited water level of reservoir based on the reverse order recursive algorithm

WEI Ruishen¹, YAN Ziqi¹, ZHOU Zuhao¹, ZHENG Jinli¹, YAN Denghua¹, DING Wei²

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle,

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Determining the drought limited water level of reservoir is of great significance to scientifically guide the drought-relief operation of reservoir. In this study, based on the connotation of drought limited water level, a new method is proposed to calculate the graded and staged drought limited water level of a reservoir, which uses the reverse order recursive algorithm and fully considers the differences in the annual water demand process of different drought levels and different industries. To verify the feasibility and improvement of this method, drought limited water level of Zhangfeng Reservoir in Shanxi Province was calculated. In the flood season, dry season and agricultural irrigation season, the drought warning water levels are 756.5m, 756.2m and 754.5m respectively, and the drought guaranteed water levels are 735.8m, 730.7m and 728.2m respectively. It is found that the new method can improve water supply in more industries and longer periods, which has significant advantages in guiding the drought-relief operation of reservoirs and enhancing the drought defense ability of water projects.

Keywords: drought limited water level; graded and staged; reverse order recursive; drought-relief operation; Zhangfeng Reservoir; monthly sliding

(责任编辑: 祁 伟)