

DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2023313

王刚, 张琪, 何益平, 等. 缺资料综合利用水库兴利调节计算研究[J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34(7): 23-28. WANG Gang, ZHANG Qi, HE Yiping, et al. Study on calculation of beneficial regulation of comprehensive utilization reservoir lacking data[J]. China Flood & Drought Management, 2024, 34(7): 23-28. (in Chinese)

缺资料综合利用水库兴利调节计算研究

王刚^{1,2} 张琪³ 何益平⁴ 任明磊^{1,2} 王魁⁴ 朱亚峰⁵

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京100038; 2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京100038;
3. 重庆交通大学, 重庆400074; 4. 湖南省平江县水利局, 平江414500; 5. 西藏农牧学院, 林芝860000)

摘要: 水库兴利调节计算是开展水资源论证的核心工作, 而对于缺少入库径流观测资料的供水水库而言, 来水量计算是进行水库兴利调节计算的关键步骤。针对缺资料地区水库实际情况, 基于降雨径流系数法推求入库径流量, 并综合采用水文比拟法、水量平衡法等多种方法合理确定径流系数。根据水库调度运用原则按照长系列时历法以旬为单位进行水资源供需平衡调节计算, 得到了不同取水规模下的调节计算成果, 评价了不同取水规模的供水保证程度及对灌溉、发电等其他用水户的影响, 以达到对水资源合理分配及优化的目的。

关键词: 兴利调节; 缺资料地区; 径流系数法; 长系列时历法

中图分类号: TV697

文献标识码: A

文章编号: 1673-9264(2024)07-23-06

0 引言

一般说来, 大中型水库大都是承担防洪、供水、发电、灌溉等任务的综合利用水库, 且径流量变化受降雨量和人类活动共同影响, 对水库水源进行科学论证十分必要, 而进行水库兴利调节及调度运用计算分析是水资源论证工作的核心问题^[1-2]。对于无资料或缺资料流域的水资源论证, 其关键部分是来水量的计算。在这种情况下, 设计年径流量一般通过间接途径推求, 目前常用的方法有水文比拟法、年径流深等值线图法和径流系数法^[3-5]。鉴于资料收集程度, 其中径流系数法适用于年径流量和年降雨量之间关系密切的气候湿润、雨量丰沛的地区, 相对于其他方法, 径流系数法精度较高^[4]。径流系数一般是根据水资源公报数据, 通过行政区域内的多年降雨量和径流量统计资料获得。受气候变化和人类活动共同影响, 降雨和下垫面条件

的变化导致径流系数年际变化大, 加上流域不同地表覆被下产汇流规律有明显差异^[6], 直接用行政区域内平均径流系数来表征水库流域产流特性并不合理。因此, 如何合理分析确定水库流域径流系数也很关键。在径流调节计算中, 目前多采用长系列法或代表年法。但兼有灌溉任务的水库径流代表年往往不易选择, 在考虑入库径流代表性的同时还需兼顾灌溉用水及径流组合的代表性, 代表年的选择有较大主观性^[7]。《水利工程水利计算规范》(SL 104—2015)也要求供水水库径流调节计算应优先采用长系列法^[8]。本文针对中国南方某水库坝址以上流域的缺资料地区, 以径流系数法为基础进行水库来水量分析, 并综合采用水文比拟法、水量平衡法等多种方法来验证径流系数的合理性; 通过长系列时历法进行水库兴利调节计算研究, 以为该地区的水资源合理配置利用提供支撑。

收稿日期: 2023-08-09

第一作者信息: 王刚, 男, 正高级工程师, E-mail: wanggang@iwhr.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51809281)。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

大江洞水库位于湖南平江县汨罗江二级支流迴水湾上游,属大陆性季风气候区,中热带向北亚热带过渡气候带,受季风和副热带高压的影响,降水量年内分布不均匀,夏秋多旱。为解决平江北部地区城乡安全供水一体化的水源问题,计划新建水厂从该水库取水,近期2025年建设规模为 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,年取水量915万 m^3 ;远期2030年建设规模为 $5.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,年最大取水量1830万 m^3 。

该水库是一座以灌溉为主,兼顾防洪、发电、供水等综合效益的中型水库,水库用水需求主要包括城乡生活供

水、灌区灌溉供水、水库发电用水、河道生态用水,同时还要考虑水库的蒸散发与渗漏损失。

水库控制集雨面积19.79 km^2 ,另有外引面积12.60 km^2 ,共计32.39 km^2 ,坝址以上干流长度5.37 km,干流平均坡降56.9‰。水库一级电站通过引水渠从外引区取水发电,发电尾水进入水库;二级电站从水库引水发电,发电尾水用于灌溉。水库正常蓄水位377.20 m,相应正常库容3040万 m^3 ,死水位359.00 m,死库容725万 m^3 ,汛限水位375.20 m,对应库容2685万 m^3 。当库水位超过正常蓄水位377.20 m时,将通过溢洪道泄流。

研究区水系分布及大江洞水库(电站)位置如图1所示。

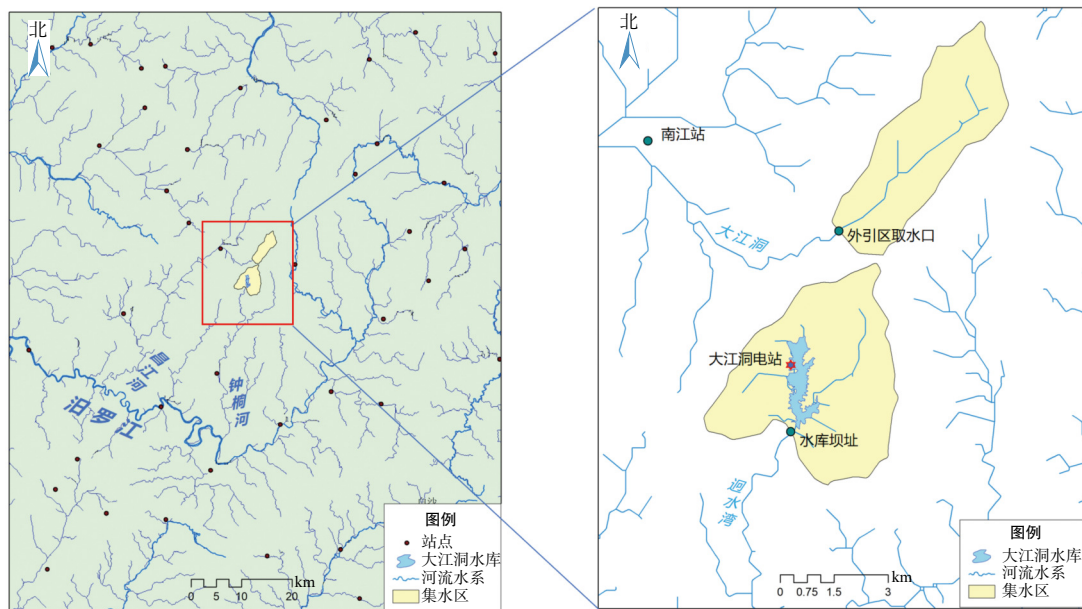


图1 研究区水系分布及大江洞水库(电站)位置图

1.2 水资源供需平衡分析

1.2.1 资料情况

大江洞水库所在的河流没有设立水文站,建库后水库管理所也没有开展入库流量观测。平江县辖区内目前有长系列水文实测资料的水文站较少,分别是汨罗江上游的加义站和下游的伍市站。全县设有花安定、金塘、钟洞、南江、板江等12处雨量站。以上水文站和雨量站均为常测站,资料成果精度较为可靠,为全县降雨和水资源分析计算的依据。另外紧邻平江县界的浏阳市清水站与大江洞水库距离较近,地形地貌与水库坝址处相似。清水站以上集

雨面积22.1 km^2 ,多年平均降雨量1730.6 mm,有43年径流资料(1958—2000年,2000年撤站),可用于本文水库流域水文比拟分析,两个流域基本情况如表1所示。此外,还收集到大江洞水库二级电站2017—2020年实际发电量资料,可以反推估算水库来水量。

表1 大江洞水库流域与清水站流域基本情况对比表

流域	面积/ km^2	平均高程/m	平均降雨量/mm
大江洞水库	19.79	571	1700
清水站	22.10	590	1730

1.2.2 入库水量计算

大江洞水库流域地理气候、降水和下垫面因素与南江站相近;南江站具有1989—2019年共31年实测逐日降雨资料,并包含了丰、平、枯年份,具有较好的代表性;资料来源为平江县水文水资源局提供的整编资料,已经过可靠性、一致性、代表性“三性”审查,可靠性和一致性较好。本研究主要采用南江站实测降雨资料,参照湖南省水利厅编制的《湖南省暴雨洪水查算手册》(2015版)推算得到水库库区面降雨量,根据水文比拟法获得水库流域产流系数,进而开展水库来水量计算分析。同时根据水库实际发电资料,对计算成果合理性进行分析。

径流系数法^[5]计算公式为:

$$W_p = 0.1\alpha PF \quad (1)$$

式中: α 为河流径流系数; P 为设计河流降水量,mm,取流域面降雨量; F 为设计河流集水面积,km²; W_p 为设计河流径流量,万m³。

根据《水利水电工程水文计算规范》,采用水文比拟法,并结合当地降雨—高程关系进行修正,计算公式如下:

$$Q_{\text{设计}} = \frac{F_{\text{设计}}}{F_{\text{参证}}} \times \frac{H_{\text{设计}}}{H_{\text{参证}}} \times Q_{\text{参证}} \quad (2)$$

式中: $Q_{\text{设计}}$ 、 $Q_{\text{参证}}$ 为设计站点和参考站点的平均径流量,m³/s; $F_{\text{设计}}$ 、 $F_{\text{参证}}$ 为设计站点和参考站点的集水面积,km²; $H_{\text{设计}}$ 、 $H_{\text{参证}}$ 为设计站点和参考站点流域平均降雨量,mm。

1.2.3 水库调节计算

根据推求的水库1989—2019年共31年入库径流量及以该水库为供水水源的各用水部门的需水系列资料,采用长系列时历法逐旬对水库供水区进行供需调节计算。计算公式^[9]为:

$$V_{k+1} = V_k + W_{\text{来}} - W_{\text{损}} - \sum W_{\text{用}} \quad (3)$$

式中: V_k 为第 k 时段初始时刻水库蓄水量,万m³; $W_{\text{来}}$ 为第 k 时段水库来水量,万m³; $W_{\text{损}}$ 为第 k 时段水库蒸发、渗漏损失水量,万m³; $\sum W_{\text{用}}$ 为第 k 时段各用水部门需水量,万m³。

2 结果讨论分析

2.1 水库来水

2.1.1 径流系数确定

收集加义站2009—2019年逐日径流资料,加义站位于汨罗江上游,控制面积1567km²。根据2009—2019年加义站各年平均流量与南江站各年降雨量之间相关关系(图2),可以看出两个站的降雨、流量高度相关,变化趋势基本一致,表明平江县降雨径流关系较好,这也是本文采用径流系数法分析水库入库水量的前提和基础。

于汨罗江上游,控制面积1567km²。根据2009—2019年加义站各年平均流量与南江站各年降雨量之间相关关系(图2),可以看出两个站的降雨、流量高度相关,变化趋势基本一致,表明平江县降雨径流关系较好,这也是本文采用径流系数法分析水库入库水量的前提和基础。

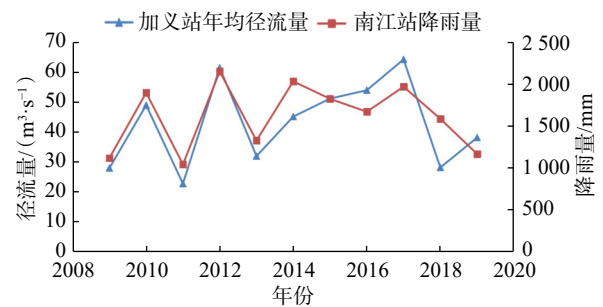


图2 加义站年平均流量与南江站年降雨量相关关系

如果根据加义站2009—2019年平均径流模数 $27.38 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 计算,大江洞外引区多年平均产水量1088万m³,大江洞库区多年平均自产水量1709万m³,引水渠道渗漏系数取0.15,则多年平均入库水量2634万m³,这与直接采用《2016年平江县水资源公报》中给出的全县多年平均径流系数0.53计算得到的大江洞水库多年平均入库水量2668万m³接近。

与大江洞水库坝址相近的清水站多年平均径流0.78m³/s,按照公式(2)水文比拟法,大江洞水库坝址处控制集雨面积多年平均流量为0.7m³/s,多年平均径流量为2204万m³;大江洞水库坝址处外引集雨面积多年平均流量为0.45m³/s,多年平均径流量为1419万m³,引水渠道渗漏系数取0.15,则多年平均入库水量3410万m³。

大江洞二级电站从水库引水发电,发电尾水进入昌江河用于灌溉,水库本身未设生态放水设施,水位未超过正常蓄水位时不发生泄流。因此,按照水量平衡原理可以根据大江洞水库实际发电量反推估算水库来水量。大江洞二级电站增效扩容后,2017—2020年平均发电量1229万kW·h,按平均180m水头、综合出力系数8.5计算,平均发电水量2890万m³。大江洞多年平均蒸发渗漏量按300万m³计,南江水厂现状取水量210万m³,由于通过发电输水隧洞放水灌溉,灌溉用水不单列,则推测大江洞水库多年来水约3400万m³。

通过上述方法对比分析发现,采用多年平均径流系数

法与参考加义站实测径流得到的结果相近,这是因为径流系数 0.53 代表的是平江县域范围(4 125 km²)的平均情况,而 $27.38 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 的平均径流模数代表的是加义站控制集水区(1 567 km²)的平均情况,两者的特点都是大范围、均一化,而大江洞水库集水区范围很小,加上外引区面积也仅 32.39 km²。同时,考虑到人工取用水的情况,加义站实测径流量也不能完全代表天然产流量。因此,按平江县多年平均径流系数法或加义站平均径流模数计算结果可能偏小。清水站虽在浏阳市内,但位置紧邻平江县界,与大江洞水库直线距离仅 60 km,两者处于同一气候区,降雨量、地形地貌、集水面积等情况与大江洞比较接近。清水站多年平均径流模数 $35.34 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$,比加义站多年平均径流模数多 29%。考虑到大江洞水库集水区所在的幕阜山是平江县的两个降雨高值区之一,流域内雨量充沛,植被良好,河道有一定的基流量,清水站产水模数较高也是正常的。同时,参考清水站实测径流资料方法得到的大江洞水库来水量结果与根据大江洞二级电站实际发电量推算的水量结果基本一致,因此,采用清水站产流模数估算大江洞库区产流量是基本合理的。

根据南江站 1989—2019 年降雨量,结合清水站多年平均径流模数,得到大江洞水库集水区平均径流系数 0.678。较直接采用《2016 年平江县水资源公报》中给出的全县多年平均径流系数 0.53 更为合理。

2.1.2 水库来水量计算

按照大江洞水库多年平均径流系数 0.678,计算大江洞水库自身集水区产水量和外引区来水量。其中,外引水量需要考虑外引水区扣除河道生态基流的可引水量、引水渠的设计引水能力及渠道的沿程损失。

引水渠设计最大可引用流量为 4.5 m³/s,因引水渠缺乏观测流量资料,以逐日平均流量(由径流系数法计算)为基础资料进行估算。经过计算,平均每年日均流量超过 4.5 m³/s 仅 7 d,说明渠道断面较大,引洪能力强,在长系列计算中可不考虑弃水。

根据《水利水电建设项目水资源论证导则》(SL 525—2011),河道生态需水量确定,原则上按多年平均流量的 10%~20% 计算^[10]。因外引区河道下游无明确生态保护目标和生态敏感区,本次河道生态需水量取多年平均流量的 10%,约为 0.05 m³/s;水库一级电站引水渠道采用混凝土衬

砌,混凝土衬砌渠道渗水损失系数取 0.15。

扣除河道生态基流及引水渠沿程渗漏损失后,大江洞水库外引区多年平均引水量为 1 050 万 m³,多年平均自产水量为 2 206 万 m³,多年平均入库总水量 3 256 万 m³,多年平均流量 1.03 m³/s。

2.2 水库供水

2.2.1 生态用水

大江洞水库下游无明确生态保护目标和生态敏感区,本次河道生态需水量按多年平均流量的 10% 计,则大江洞水库下游河道生态需水流量为 0.1 m³/s,换算成生态用水量为 326 万 m³/a。由于大江洞水库未建生态放水设施,大江洞二级电站发电尾水直接排入昌江,而未进入坝址下游的钟洞河流域。但是,根据大坝渗漏量的估算,通过坝基、坝体的渗漏水量最终会进入坝址下游河道,这部分水量基本可以满足下游河道的生态用水需求。因此,考虑大江洞水库实际情况,在进行水库调节计算时,不再单列河道生态用水量。

2.2.2 灌溉用水

大江洞灌区灌溉用水需求根据设计灌溉面积、灌溉定额、灌溉保证率等综合确定。水库灌区地处亚热带,以种植水稻为主,且多为双季稻,生育期为 4—10 月。根据水稻灌溉制度及灌区农作物种植比、灌水模数等,通过逐时段的水量平衡方程计算得到灌区设计平水年灌溉定额为 8 151 m³/hm²(净需水量)。根据《灌溉与排水工程设计规范》(GB 50 288—2018)规定,并参考平江县徐家洞灌区资料,渠系水利用系数取 0.84,田间水利用系数取 0.9,得到灌溉水利用系数 0.756。

灌区目前实际灌溉面积 544.7 hm²,根据《大江洞灌区设计工程资料》,考虑到未来灌区的建设发展需要,需预留灌溉用水量,按万亩设计规模计算得到平水年水库灌区净需水量为 543.4 万 m³,毛需水量为 718.8 万 m³。根据岳阳市水利局批复的《大江洞水库调度规程》,大江洞水库灌区多年平均灌溉供水 683.36 万 m³,与本次多年平均灌溉用水量计算成果 718.8 万 m³ 接近(相差 5%),因此,本次农业灌溉用水量计算成果较为合理。

由于采用长系列旬资料进行水库调节计算,来水情况本身已经反映了丰平枯的变化,因此,灌溉用水采用多年平均计算成果,灌区多年平均灌溉用水量旬分配情况见表 2。

表2 水库灌区多年平均灌溉用水量旬分配表

项目	4月			5月			6月			7月			8月			9月			10月			合计
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	
灌溉用水量/万m ³	0	46.3	63.9	35.3	52.9	52.9	26.5	0	17.6	0	52.9	52.9	61.8	79.4	79.4	35.3	17.6	44.2	0	0	0	718.8

2.2.3 发电用水

由于灌溉和发电共用发电输水隧洞,发电水量由两部分组成,分别为灌溉期利用发电尾水进行农业灌溉的发电水量及非灌溉期水位达到发电水位 371.00 m 以上时进行发电的净发电水量。

2.2.4 蒸发及渗漏损失

水库建成后,库区原有陆地变成水面,原有的陆地蒸发也变成了水面蒸发,由此而增加的蒸发量构成水库蒸发损失,同时经坝基、坝体渗漏而产生的水量损失称为渗漏损失。

水库库区水面蒸发,由加义站 2009—2019 年逐月蒸发皿实测的蒸发数据乘以折减系数得到;陆面蒸发不易直接推求,一般用闭合流域水量平衡方程,由流域多年平均年降水量与多年平均径流量的差值得到。水库渗漏损失根据《水文及水利水电规划》,采用经验公式取水库蓄水量的 1% 估算,计算得水库多年平均蒸发与渗漏损失量总计约 260 万 m³。

2.3 可供水量

2.3.1 水库调节计算原则

(1)根据供水优先次序,长系列调节计算中,优先满足河道生态环境用水、城乡供水、灌溉用水后,水位在发电水位 371.00 m 以上的水用于发电。

(2)从 1989 年开始调节至 2019 年共计 31 年系列,取水口最低高程为 359.00 m。起始库容按汛限水位对应库容 2 685.3 万 m³ 开始调节,如水库蓄水低于取水高程对应库容(即死库容),供水破坏;汛期(4 月 1 日至 9 月 30 日)如水库蓄水达到防洪限制水位对应库容则发生弃水,水库开始泄洪。

(3)供水、灌溉取水高程对应水库死水位 359.00 m;非灌溉期发电水位按 371.00 m 控制,超过 371.00 m 时,电站开始发电,灌溉期来水较少时电站可结合灌溉引水发电,当来水较丰时水电站按最大引水流量加大出力工作。

(4)调节过程中应扣除当年当月的库区水量损失,包括

库区蒸发损失和渗漏损失两部分。

2.3.2 调节计算结果

(1)近期 2025 年。根据计算成果表,长系列共 31 年 1 107 个旬计算单元,供水无破坏年份,大江洞水库作为城乡供水水源,供水保证率高于 95%。灌溉供水保证率远大于灌溉设计保证率 85%,大江洞水库的灌溉任务可以保证。大江洞水库在保障自身下游生态需水、近期城镇供水、平水年灌溉供水的条件下,大江洞水库二级电站平均每年还可以有 2 136 万 m³(含灌溉发电水量 719 万 m³)水量用于发电。

(2)远期 2030 年。根据计算成果表,在长系列旬计算单元中均未出现供水破坏情况,供水保证率(城镇供水保证率为历时保证率,一般以月、旬或日为单位,即某日、旬、月供水破坏时,并不影响城镇居民全年的生活或工业企业全年的经济效益)满足至少 95% 的要求。灌溉供水保证率(农业灌溉保证率定义为年保证率)为 96.88%,大于灌溉设计保证率 85%,大江洞水库的灌溉任务仍可以保证。大江洞水库二级电站平均每年可以有 1 183 万 m³(含灌溉发电水量 719 万 m³)水量用于发电。

3 结 论

本文针对缺资料综合利用水库兴利调节计算需求,基于南方湿润地区和人类活动影响较弱的水库小流域相对稳定的降雨径流关系,开展了大江洞水库入库水量分析计算研究,较好地解决了缺资料水库入库水量难以合理确定问题,并采用长系列时历法逐旬进行水库供需调节计算,论证了大江洞水库作为平江北部地区城乡安全供水一体化项目实施的关键水源工程的可行性。主要结论如下。

(1)以径流系数法为基础,充分利用降雨、径流、水库发电等资料,综合水文比拟、水量平衡法等方法,确定大江洞水库流域径流系数为 0.678,多年平均入库总水量约 3 256 万 m³。本研究不仅为大江洞水库的水资源论证分析提供依据,同时也为其他类似的缺资料综合利用水库的入

库水量确定提供研究思路。

(2)根据大江洞水库 1989—2019 年长系列旬调节计算成果,平江县近期(2025 年)城乡供水取水后,未出现供水破坏的情况,大江洞水库平水年灌溉需求完全可以满足;平江县远期(2030 年)建设取水规模下,供水保证率达到 95% 要求,且灌溉供水保证率远高于大江洞灌区设计灌溉保证率 85%,不会减少灌溉用水量且不改变灌溉取水方式,对灌溉影响较小。

志谢:感谢亚行项目“平江县汨罗江灾害风险管理和环境综合治理”对本文提供的支持,以及平江县水利设计院李佛佑、岳阳市水利局张伟等专家提供有关资料和宝贵意见。

参考文献

- [1] 张子贤.综合利用水库兴利调节计算中若干问题[J].海河水利, 1995(6): 13-17.
- [2] 张冠宇,王丽晶,钟永华,等.密云水库高水位运行下洪水预报调度探究[J].中国防汛抗旱, 2023, 33(6): 62-66.
- [3] 孙昆,杜俊,贺佳杰.云南昭通市无资料地区小流域设计洪水计算[J].中国防汛抗旱, 2017, 27(6): 119-124.
- [4] 孟庆峰,徐洁.无资料流域水库径流计算方法的探讨[J].陕西水利, 2019(7): 57-59.
- [5] 姚辉,郑坛清.基于长序列降雨资料的湖南省长潭岗水库调度研究[J].中国防汛抗旱, 2021, 31(7): 41-44.
- [6] 严登华,王坤,李相南,等.全球陆地地表水资源演变特征[J].水科学进展, 2020, 31(5): 703-712.
- [7] 王平.兼有灌溉任务的水电工程径流调节方法改进研究[J].水利规划与设计, 2018, 181(11): 51-55.
- [8] 水利部水利水电规划设计总院,长江勘测规划设计研究院.水利工程水利计算规范: SL 104—2015[S].北京:中国水利水电出版社, 2015.
- [9] 王平.城镇供水水库调节计算方法的改进[J].人民黄河, 2014, 36(4): 22-25.
- [10] 水利部水资源管理中心,中国水电顾问集团成都勘测设计研究院.水利水电建设项目水资源论证导则: SL 525—2011[S].北京:中国水利水电出版社, 2011.

Study on calculation of beneficial regulation of comprehensive utilization reservoir lacking data

WANG Gang^{1,2}, ZHANG Qi³, HE Yiping⁴, REN Minglei^{1,2}, WANG Kui⁴, ZHU Yafeng⁵

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

2. Research Center on Flood and Drought Disaster Reduction of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038;

3. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074;

4. Pingjiang Water Conservancy Bureau of Hunan Province, Pingjiang 414500;

5. Tibet Agriculture and Animal Husbandry College, Linzhi 860000)

Abstract: The calculation of reservoir utilization and regulation is the core work of water resources demonstration, however, for water supply reservoirs without inflow runoff observation data, the calculation of inflow is the key step in the calculation of reservoir utilization and regulation. According to the actual situation of reservoirs in the area which lack of data, the inflow runoff was calculated based on the rainfall runoff coefficient method, and the runoff coefficient was reasonably determined by several methods such as hydrological analogy and water balance. According to the principle of reservoir dispatching, the balance of supply and demand of water resources was calculated in a ten-days basis according to the long series of time calendars. The results of regulation calculation under different water intake scales were obtained, the guarantee degree of water supply of different water intake scale and its influence on other water users such as irrigation and power generation were evaluated, so as to achieve the purpose of rational allocation and optimization of water resources.

Keywords: profiting regulation; data deficiency area; runoff coefficient method; long series of time calendars

编辑 姚力玮