

文章编号:0559-9350(2018)06-0757-10

## 大型灌区骨干水库分期旱限水位研究

张礼兵<sup>1,2</sup>, 伍露露<sup>1</sup>, 金菊良<sup>1,2</sup>, 吴成国<sup>1,2</sup>, 周玉良<sup>1,2</sup>, 朱文礼<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 合肥工业大学 水资源与环境系统工程研究所, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 水库作为常见的重要水利设施, 在区域水资源承载力水量、水质、水生态和水流更新等要素调控中具有举足轻重的地位和作用, 在降水径流减少的枯水季节显得尤其重要。旱限水位是水库在低水位调度运行的控制性特征水位, 其合理设置与科学运用对区域水资源高效利用意义重大。为此以淠史杭灌区梅山水库的来水特性和用户需水特性为基础, 首先采用 Hausdorff 维数分形方法划分了梅山水库入库径流干旱预警时段, 进而通过不同水平年各预警期内来水、供水调节计算了初始旱限水位: 旱警水位和旱枯水位, 并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旱限水位, 最后分别从水库运行、灌区灌溉、生产生活供水、生态用水以及水力发电等多角度评估了旱限水位的合理性, 为水利部门指导水库灌区抗旱运行, 制订相应抗旱预案提供技术参考。

**关键词:** 大型灌区; 水库旱限水位; 旱警水位; 旱枯水位; 优化

**中图分类号:** TV697

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13243/j.cnki.slxb.20180066

## 1 研究背景

在气候变化和人类活动的共同影响下, 我国水资源问题日益突出, 洪涝和干旱灾害出现机率趋于频繁, 水资源供需矛盾愈加尖锐, 已严重威胁经济社会和生态环境的可持续发展<sup>[1-2]</sup>。对一定区域而言, 一段时期内各用户需求相对稳定, 因此天气异常造成水循环过程的水分供给不足往往是形成干旱的主要原因<sup>[3]</sup>。干旱的本质是水分持续性短缺, 其成因既涉及以降水减少为主要特征的异常天气因素, 同时又与工农业生产、城乡居民生活及环境生态用水等密切相关<sup>[4-5]</sup>。曹正池<sup>[6]</sup>从取水口高程、农业生产最低需水量、工业生产用水量、居民生活需水量、通航水位以及河道水生生物的最低生态需水量等因素出发, 首次提出了江河在枯水季节影响供水安全的干旱告警水位的概念。国家防汛抗旱总指挥部办公室及水利部水文局在联合制定的《旱限水位(流量)确定办法》<sup>[7]</sup>中定义了干旱预警水位, 即当江河湖库水位持续偏低、流量持续偏少时, 影响城乡生活、工农业生产、生态环境等用水安全, 应采取抗旱措施的水位称为旱限水位。该办法主要针对年调节水库应对未来一月或数月的干旱问题, 考虑设计来水和用水需求, 以逐月或双月滑动计算的水库应以供水量最大值作为旱限水位的计算依据, 然而由于在实际工作中往往缺乏针对性而可操作性不强<sup>[8-9]</sup>, 同时对旱限水位合理性分析时只是与历史水位出现频次作简单比较而显充分性不足<sup>[10]</sup>。刘攀等<sup>[11]</sup>认为用这种方法确定的单一旱限水位忽略了枯水季节性规律, 因为干旱的产生不仅是入库流量较枯, 还与需水较大以及水库前期蓄水位不高等有关。针对此不足, 宋树东等<sup>[12]</sup>提出水库旱限水位分期确定的主要步骤, 即首先要对水库划分出旱限水位控制时段的分期, 然后针对分期再进行各旱限水位的确定。曹润祥<sup>[13]</sup>则提

收稿日期: 2018-01-18; 网络出版日期: 2018-06-26

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20180626.1342.001.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1502405, 2016YFC0401305); 国家自然科学基金项目(51479045, 51579059)

作者简介: 张礼兵(1972-), 男, 安徽肥东人, 博士, 副教授, 从事水资源系统工程研究。E-mail: zhanglibing777@163.com

通信作者: 金菊良(1966-), 男, 江苏吴江人, 博士, 教授, 从事水资源系统工程研究。E-mail: JINJL66@126.com

出早限水位动态控制的概念,并建议采用“预警期/早限水位”的形式来表示水库早限水位,并基于潜在干早期和干旱预警期的早限水位年内修正方法和水库供水任务系统动力学模型的早限水位年际修正方法,将早限水位纳入水库特征水位,并建立早限水位控制的限制供水规则,给出了水库进入干旱预警后的模拟-优化模型的方程描述。彭少明等<sup>[14]</sup>以干旱年份流域总缺水损失最小为目标,建立多年调节水库早限水位的最优控制模型,构成龙羊峡水库早限水位、入库径流+年初蓄水、流域旱情三者关系的控制曲面,制定相应不同干旱等级的多年调节水库早限水位控制策略。张永永等<sup>[15]</sup>针对龙羊峡水库1990—1999年连续枯水段的年际缺水均衡问题,应用改进人工鱼群算法优化了水库早限水位。可见,目前关于近年提出的早限水位的研究成果总体尚少,上述研究文献作了一些有益的探索。然而现行的早限水位计算方法明显存在以下两个问题<sup>[7]</sup>:(1)早限水位在整个供水期采用单一静态值而忽略了供需水匹配过程的变化,如果在整个枯水季节均采用该早限水位进行控制,则对于大部分时期会因水位标准偏高而造成供水不足;(2)对早限水位合理性分析时,只简单考察早限水位在历史上出现的频次是否与相应干旱发生频率相近,而忽略了早限水位控制运行后对整个水资源系统(尤其是农业灌溉用水)的影响及其产生的相应水量在年内及年际间递归变化过程。此外,对于农业灌溉用水占比较大的大型灌区而言,由于作物需水受气候变化影响大,对干旱尤为敏感,也对灌区骨干水库的枯水期调度提出了更高的要求<sup>[16-18]</sup>。

鉴于将早限水位作为警戒水位纳入水库特征水位系统,并以其作为干早期水库控制运行的关键指标,针对性制定不同供水策略及其对水资源系统的长期影响还未见诸相关研究,本文以江淮丘陵区史河灌区梅山水库为研究对象,通过实地调研及系统分析水库历年供水、灌溉、发电等不同用户用水情况及水库实际调度运行过程,首先基于Hausdorff维数分形方法分析了梅山水库入库径流干旱预警期,再通过不同水平年各预警期内来水供水调节确定初始早限水位,并以水库、灌区耦合水资源系统长系列模拟模型及优化模型为基础,优化确定梅山水库不同预警期的早限水位,最后从水库运行、灌区灌溉、生产生活供水、生态用水以及水力发电等多角度评估早限水位的合理性,为大型灌区干早期供水调度的优化决策提供依据。值得一提的是,为了使所制定的早限水位更具有操作性,同时参考《早限水位(流量)确定办法》<sup>[7]</sup>,本文将早限水位进一步划分为早警水位( $Z_{aw}$ )和早枯水位( $Z_{ad}$ )。其中:早警水位是指由于干旱(降水或来水偏少)导致水库水位持续降低,开始影响水库的灌溉、发电用水任务的临界水库水位,对应的旱情等级为轻度或中度干旱;早枯水位是指由于干旱(降水或来水偏少)导致水库水位继续降低,并已经严重影响水库的灌溉、发电用水任务时的水库水位,对应的旱情等级为严重或特大干旱。同时为了便于与后续的抗旱预案能够较好地衔接,在遭遇不同干旱年份时需要采取削减供水措施,参考《旱情等级标准(SL424-2008)》,中度干旱时城市供水消减率小于20%,农业灌溉供水消减率小于35%;严重干旱时城市供水消减率20%~30%,农业灌溉供水消减率35%~50%。

## 2 梅山水库早限水位初步确定

梅山水库位于淮河支流史河上游的安徽省金寨县境内,控制流域面积1970 km<sup>2</sup>,是以防洪、灌溉为主的多年调节大型水库,同时承担着金寨县城及叶集试验区的城镇供水,兼顾水力发电和渔业养殖等功能的大I型综合性水利工程枢纽,水库总库容22.63亿m<sup>3</sup>,死库容3.58亿m<sup>3</sup>,设计灌溉面积25.5万hm<sup>2</sup>,水电站装机容量4万kW。自1958年建成蓄水以来,各种效益特别是防洪、灌溉和发电三大效益的有效发挥,对皖西乃至全省的经济发展和社会稳定起到十分重要的作用。然而在过去相当长的一段时期,由于没有低水位下水库控制运行规则,梅山水库经常因城乡阶段性供水、供电紧张强制泄放死库容中的水量,致使水库经常处于低水位的不正常状态。梅山水库历年运行资料显示,水库坝上水位在1965—2015年的51年间,月均水位有近1/4年份出现了低于死水位107.07 m的情况,有些年份甚至降至最低灌溉取水口水位95.27 m以下。这样“死水位不死”的不合理运行调度,不仅大大降低了水资源开发利用的效率,导致年内、年际各用水户间用水矛盾突出,也对水库的

坝、堤、闸、站等各种水利工程设施的安全稳定运行造成了危害。

**2.1 梅山水库来水分析** 如前所述, 由于目前旱限水位研究尚处于起步阶段, 相关文献报道不多, 所以旱限水位分期尚没有统一的方法。与汛期水位主要以短期暴雨径流特征进行分期不同, 旱限水位分期不仅要考虑较长预警期的径流来水特征, 还要考虑不同用水户尤其是农业灌溉的水量需求特征, 因此旱限水位分期要同时考虑来水与用水的前后协调问题, 较汛限水位更为复杂。需要说明的是, 旱限水位分期时段不仅仅针对水源的非汛期或枯水季节, 有些情况下也包括全部或部分汛期时段。史河灌区梅山水库所处江淮之间的丘陵地区, 受西太平洋副热带高压影响, 常常在夏季汛期的7、8月发生晴热少雨的气象, 其特点是太阳辐射强烈, 温度高、湿度小、蒸发和蒸腾量大, 而春播农作物正处在抽穗、扬花、灌浆期, 需要大量水分补充、供给, 如果此期间没有降雨或降雨稀少, 就会发生夏旱, 将严重影响作物的生长而造成减产或绝收, 因这期间正处于伏天, 故称“伏旱”。据统计<sup>[19]</sup>, 安徽省淮河以南长江以北地区平均3~4年发生一次夏旱或春夏连旱。因此, 梅山水库在汛期也可能遭遇干旱缺水的威胁, 故而也存在汛期旱限水位的预警问题。

水库入库径流过程对于水库后续的调蓄控泄与分用户供水影响很大, 也是进行旱限水位分期设定重要基础。

(1) 水库干旱预警分期。根据安徽省水利水电勘测设计研究院2002年编制的《梅山水库防洪标准复核报告》, 梅山水库汛期为5月1日至9月30日, 其余为非汛期。本文首先根据Hausdorff维数分形方法<sup>[20-21]</sup>获得梅山水库非汛期水文干旱预警时段为10月—11月、12月—次年2月和3月—4月, 汛期为5月—6月, 7月—8月和9月。

(2) 不同频率入库径流过程设计。参考《旱情等级标准(SL424—2008)》定义的中度干旱对应降水频率75%~90%, 严重干旱对应降水频率90%~95%, 本文结合史河灌区梅山水库区域水文气象特点, 将旱警水位对应的中度干旱年梅山水库来水频率取80%, 旱枯水位对应的严重干旱年水库来水频率取95%。根据梅山水库1965—2015年径流系列资料, 进行PⅢ型理论频率曲线分析, 获得中度干旱年份( $P=80%$ )和严重干旱年份( $P=95%$ )设计年径流, 并按典型年进行年内月径流过程缩放, 得到不同干旱水平年的入库设计月径流过程, 结果见表1。

表1 梅山水库不同干旱水平年入库设计月径流过程 (单位: 万 m<sup>3</sup>)

| 频率  | 一般干旱年( $P=80%$ ) |       |       |       | 严重干旱年( $P=95%$ ) |       |       |       |
|-----|------------------|-------|-------|-------|------------------|-------|-------|-------|
|     | 水文年              | 1995  | 缩放    | 2012  | 缩放               | 1967  | 缩放    | 1992  |
| 10月 | 777              | 766   | 5417  | 5325  | 333              | 313   | 0     | 0     |
| 11月 | 16               | 16    | 3437  | 3378  | 1278             | 1201  | 0     | 0     |
| 12月 | 934              | 921   | 2646  | 2601  | 742              | 697   | 376   | 399   |
| 1月  | 1763             | 1739  | 1444  | 1419  | 1214             | 1141  | 1084  | 1151  |
| 2月  | 1788             | 1763  | 1636  | 1608  | 3991             | 3750  | 1908  | 2026  |
| 3月  | 1206             | 1189  | 7481  | 7354  | 9478             | 8905  | 16847 | 17892 |
| 4月  | 9170             | 9044  | 3295  | 3239  | 13740            | 12910 | 4117  | 4372  |
| 5月  | 12083            | 11917 | 5960  | 5858  | 21912            | 20588 | 507   | 538   |
| 6月  | 34242            | 33772 | 3042  | 2990  | 1784             | 1676  | 5633  | 5982  |
| 7月  | 8990             | 8867  | 12170 | 11963 | 3177             | 2985  | 2444  | 2596  |
| 8月  | 9179             | 9053  | 26380 | 25931 | 2541             | 2387  | 0     | 0     |
| 9月  | 1002             | 988   | 8516  | 8371  | 1306             | 1227  | 21491 | 22824 |
| 合计  | 81150            | 80037 | 81424 | 80037 | 61496            | 57781 | 54407 | 57781 |

**2.2 梅山水库用水分析** 社会经济系统和生态环境系统具有一定程度抗御干旱的能力, 及时进行干旱预警并采取相应的抗旱措施, 干旱对系统的影响可以得到一定程度的减轻甚至消除。梅山水库用水户主要包括史河灌区农业灌溉(包括河南史灌河部分灌溉片)、城镇生产生活、史河河道生态环境等, 水电站发电引水服从于上述供水需要而不单独供水。根据《淠史杭灌区续建配套与节水改造规划

(2010)》, 史河灌区的灌溉设计保证率为 80%, 经分析扣除灌区内部供水后需要梅山水库供水量为 12.11 亿  $m^3$ , 根据多年史河灌区农业灌溉用水规律按月占百分比进行分配。城镇生产生活需水主要有金寨县城和叶集试验区, 生活用水采用人口定额法, 生产用水采用万元 GDP 用水量法进行计算。根据淠史杭灌区管理总局提供的《淠史杭灌区水量分配方案(2016)》, 史河下游河道环境生态流量为 5.47  $m^3/s$ , 按各月日历数进行分配, 则梅山水库综合用水过程见表 2。

表 2 梅山水库 80% 典型年综合需水过程 (单位: 万  $m^3$ )

| 月份  | 1—3  | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9    | 10   | 11—12 | 合计     |
|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|--------|
| 灌溉  | 0    | 12109 | 30273 | 36328 | 18164 | 14531 | 6055 | 3633 | 0     | 121093 |
| 城镇  | 479  | 464   | 479   | 464   | 479   | 479   | 464  | 479  | 479   | 5640   |
| 生态  | 1465 | 1418  | 1465  | 1418  | 1465  | 1465  | 1418 | 1465 | 1418  | 17250  |
| 总需水 | 1944 | 13991 | 32217 | 38210 | 20108 | 16475 | 7937 | 5577 | 1897  | 143983 |

**2.3 初始旱限水位计算** 考虑根据水库入库径流过程、不同用户需水特性, 参考水库水文干旱预警水位<sup>[7]</sup>确定方法, 本文初步确定梅山水库旱警水位、旱枯水位计算方法如下:

(1) 旱警水位。在中度干旱年份, 预警时段内所有预警对象的总供水量减去对应预警时段内的来水总量, 再加上供水起调库容的水量所对应的水库水位。旱警水位及以上, 所有供水对象正常供水; 在旱警水位以下、旱枯水位以上, 水库采取部分限制供水措施以便与抗旱预案衔接, 即史河灌区灌溉供水削减 30%, 城镇供水量和生态供水量不变, 此称为“一级限供”。

(2) 旱枯水位。在严重干旱年份, 预警时段内所有预警对象的总供水量减去对应预警时段内的来水总量, 再加上供水起调库容所对应的水库水位。旱枯水位及以下, 水库对所有供水对象采取程度不同的限制供水措施, 即史河灌区灌溉供水削减 50%, 生态、城镇供水量消减 20%, 此称为“二级限供”。

以上旱警水位和旱枯水位的计算过程可由式(1)和式(2)分别表达:

$$Z_{dw} = f(W_a - W_p + V_s) \quad (1)$$

$$Z_{dd} = f(W_b - W_p + V_s) \quad (2)$$

式中:  $Z_{dw}$  和  $Z_{dd}$  分别为梅山水库的旱警水位、旱枯水位;  $f$  为水库水位-库容曲线(函数);  $W_a$  为预警时段所有预警对象正常供水量,  $W_b$  为预警时段内预警对象“一级限供”后的供水量,  $W_p$  为预警时间来水频率为  $f$  的水库来水量。式(1)中取  $p=80%$ , 式(2)中取  $p=95%$ ;  $V_s$  为水库预警期的起调库容, 本文将水库起调库容设定为水库死库容加关键时段预留库容。经过现场调研, 根据史河灌区农业灌溉在一些关键期的需水特点, 如 5 月泡田期用水, 以及 7 月—8 月保灌期(同时该期也极易遭遇伏旱威胁)供水等, 因此为了保证史河灌区农业灌溉的可靠度, 本文在汛期和非汛期期首设定了预留库容如下: 结合史河灌区多年实际运行经验, 预留水量按亩均 80  $m^3$  计, 史河灌区加河南灌溉片实际灌溉面积共 25.2 万  $hm^2$ , 需水约 3.0 亿  $m^3$ , 则梅山水库在汛期和非汛期起调库容都为 6.58 亿  $m^3$ 。

按上述方法不同水文年份的分析计算, 采用外包络线法获得各预警期旱限水位变化区间, 结果如表 3 所示。

由表 3 可见, 梅山水库各预警期旱限水位参差不齐, 变化剧烈, 旱警、旱枯水位还存在部分错位交叉等问题, 因此有必要进行适当的修正, 这里暂称之为“初始旱限水位”。

### 3 水库灌区水资源系统模拟模型构建

基于系统工程理论和方法, 本研究分别从宏、中、微观多层次描述水库灌区水资源的需水、供水和用水过程, 构建基于多水源、多用户、多目标的史河灌区梅山水库水资源系统模拟模型, 主要包括梅山水库及渠首枢纽水资源模拟模型、史河灌区水资源系统(水旱农田、塘坝堰闸、中小型水库、反调节库塘、外水提水泵站等)模拟模型, 限于篇幅详细构建过程参见文献[22]。

表3 梅山水库特征水位及早限水位变化区间

(单位: m)

| 时段       | 死水位    | 旱枯水位   |        | 旱警水位   |        | 正常/汛限水位 | 校核洪水位  |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|
|          |        | 上限值    | 下限值    | 上限值    | 下限值    |         |        |
| 10月—11月  | 107.07 | 110.01 | 108.99 | 117.89 | 115.49 | 128.00  | 139.94 |
| 12月—次年2月 | 107.07 | 108.16 | 107.73 | 116.43 | 116.06 | 128.00  | 139.94 |
| 3月—4月    | 107.07 | 107.78 | 107.67 | 116.15 | 116.06 | 128.00  | 139.94 |
| 5月—6月    | 107.07 | 116.36 | 115.60 | 122.09 | 120.14 | 125.27  | 139.94 |
| 7月—8月    | 107.07 | 112.80 | 106.69 | 119.00 | 112.20 | 125.27  | 139.94 |
| 9月       | 107.07 | 112.91 | 105.44 | 116.89 | 115.08 | 126.00  | 139.94 |

## 4 梅山水库早限水位优化确定

**4.1 现状无旱限水位约束下系统综合效益** 梅山水库主要用水户包括城镇生产生活供水、史河河道生态需水、灌区农业灌溉(包括河南省部分灌溉片)用水、水电站引水发电用水等,各用户产生的效益可根据供水量或发电量计算。经过系统模拟计算,现状条件下梅山水库水资源系统各用户经济效益计算结果如表4所示。

由表4计算结果可知,梅山水库的综合经济效益十分可观,现状条件下多年平均可达1.61亿元人民币,且尚未考虑作为水库主要任务的防洪经济效益。由此可见,梅山水库经过50多年运行管理,为皖西及河南省部分地区的社会经济发展作出了重大贡献。此外,由计算结果可知在现状无旱限水位约束下梅山水库城镇供水保证率96.15%,史河灌区灌溉保证率73.08%,年均发电量近1亿kW·h,经调查这与水库多年运行实际比较接近,其余指标如塘坝年均灌溉供水量、泵站提外水年均补给量、反调节水库年均供水量、不同作物年均灌溉定额等等,也符合水库灌区多年实际运行情况,说明本研究构建的史河灌区梅山水库水资源系统模拟模型具有较好的可靠性。

**4.2 梅山水库早限水位优化模型** 如2.3节所述,根据不同水平年水库来供水获得的初始旱限水位存在变化范围大、相邻时段水位变化剧烈,导致水库运行操作困难等问题,需要进行必要的修正与优化,为此本文构建了梅山水库早限水位优化模型如下。

**4.2.1 目标函数及优化变量** 基于水库灌区水资源系统模拟模型,构建以梅山水库综合经济效益 $F$ (包括城镇生活供水效益、城镇生产供水效益、灌溉供水效益、生态环境效益及水力发电效益)最大为优化目标函数:

$$F = \max \left\{ \sum_{i=1}^5 c_i w_{i,k} \mid k = 1, 2, \dots, K \right\} \quad (3)$$

式中: $c_i$ 表示水库供水单价, $i=1 \sim 5$ 分别表示城镇生产供水单价、城镇生活供水单价、灌溉供水单价、生态环境效益单价及上网电价, $w_{i,k}$ 表示在方案 $k$ 早限水位下水库城镇供水量、城镇生活供水量、灌溉供水量、生态环境供水量以及电站发电量, $K$ 为不同预警期的旱警水位、旱枯水位组合数。

结合史河灌区多年灌溉供水实践及梅山水库管理需要,上述模型优化变量设为非汛期、汛期两个预警期的旱警、旱枯水位共5个变量(阶段),优化变量取值范围以表3早限水位变化区间为基础并适当放大,即旱警水位分3段:10月—次年2月 $Z_{hj102} \in [114 \text{ m}, 118 \text{ m}]$ ,3月—4月和7月—9月 $Z_{hj3479} \in [115 \text{ m}, 120 \text{ m}]$ ,5月—6月 $Z_{hj56} \in [112 \text{ m}, 122 \text{ m}]$ ;旱枯水位分2段:7月—次年4月 $Z_{hk74} \in [107.07 \text{ m}, 113 \text{ m}]$ ,5月—6月 $Z_{hk56} \in [107.07 \text{ m}, 116 \text{ m}]$ 。

**4.2.2 约束条件** (1)梅山水库水量平衡约束。(2)灌区内水量平衡约束,包括:田间水量平衡约束、塘坝及反调节库约束、提水能力约束等。(3)特征水位关系约束,各预警期早限水位满足: $Z_{死水位} \leq Z_{hk}(j) \leq Z_{hj}(j) \leq Z_{汛限水位}$ 。(4)其它约束,如城市供水保证率95%以上约束、设计参数的非负性约

表4 史河灌区梅山水库水资源系统不同水文年型经济效益

(单位: 万元)

| 年份   | 生产生活供水效益 | 河道环境生态效益 | 灌区农业灌溉效益 | 引灌溉水发电效益 | 引水库弃水发电效益 | 总经济效益 |
|------|----------|----------|----------|----------|-----------|-------|
| 1965 | 7089     | 1296     | 7562     | 2075     | 540       | 18562 |
| 1966 | 5514     | 934      | 5688     | 761      | 0         | 12897 |
| 1967 | 4252     | 572      | 3692     | 393      | 0         | 8909  |
| 1968 | 6901     | 1225     | 5586     | 786      | 0         | 14498 |
| 1969 | 7089     | 1261     | 7498     | 1738     | 383       | 17969 |
| 1970 | 7089     | 1296     | 6636     | 1673     | 0         | 16695 |
| 1971 | 6755     | 1190     | 10526    | 2133     | 864       | 21468 |
| 1972 | 7089     | 1296     | 5126     | 1116     | 0         | 14628 |
| 1973 | 7089     | 1296     | 7834     | 2238     | 312       | 18769 |
| 1974 | 7089     | 1296     | 8612     | 2202     | 0         | 19199 |
| 1975 | 7089     | 1261     | 5019     | 961      | 0         | 14329 |
| 1976 | 7089     | 1261     | 10063    | 2272     | 699       | 21384 |
| 1977 | 7089     | 1126     | 7628     | 1474     | 0         | 17317 |
| 1978 | 4962     | 824      | 4781     | 563      | 0         | 11130 |
| 1979 | 4035     | 650      | 5755     | 801      | 0         | 11241 |
| 1980 | 6524     | 1080     | 4024     | 574      | 891       | 13093 |
| 1981 | 6807     | 1050     | 10527    | 1864     | 0         | 20248 |
| 1982 | 7089     | 1225     | 4903     | 844      | 160       | 14222 |
| 1983 | 7089     | 1296     | 5331     | 1417     | 1992      | 17126 |
| 1984 | 7089     | 1261     | 9013     | 2399     | 907       | 20669 |
| 1985 | 7089     | 1296     | 8500     | 1988     | 0         | 18873 |
| 1986 | 7089     | 1261     | 9753     | 2198     | 827       | 21127 |
| 1987 | 7089     | 1296     | 4403     | 1035     | 996       | 14819 |
| 1988 | 7089     | 1225     | 10308    | 2339     | 417       | 21378 |
| 1989 | 7089     | 1261     | 4072     | 929      | 261       | 13612 |
| 1990 | 7089     | 1296     | 9000     | 2201     | 962       | 20549 |
| 1991 | 7089     | 1296     | 5511     | 1687     | 1206      | 16790 |
| 1992 | 6530     | 1151     | 7183     | 1216     | 0         | 16079 |
| 1993 | 7089     | 1296     | 4934     | 1272     | 0         | 14592 |
| 1994 | 7089     | 1261     | 7983     | 1980     | 528       | 18841 |
| 1995 | 7089     | 1296     | 3583     | 951      | 0         | 12919 |
| 1996 | 7089     | 1296     | 4739     | 1176     | 773       | 15074 |
| 1997 | 7089     | 1296     | 7212     | 1977     | 527       | 18101 |
| 1998 | 7089     | 1296     | 3229     | 941      | 1057      | 13612 |
| 1999 | 7089     | 1261     | 6037     | 1607     | 437       | 16431 |
| 2000 | 7089     | 1261     | 7592     | 1619     | 0         | 17562 |
| 2001 | 6581     | 930      | 5720     | 978      | 0         | 14210 |
| 2002 | 7089     | 1266     | 3398     | 649      | 0         | 12402 |
| 2003 | 7089     | 1296     | 3578     | 957      | 2481      | 15400 |
| 2004 | 7089     | 1296     | 5877     | 1698     | 1455      | 17415 |
| 2005 | 7089     | 1261     | 4172     | 950      | 1304      | 14777 |
| 2006 | 7089     | 1296     | 5271     | 1607     | 940       | 16202 |
| 2007 | 7089     | 1296     | 4549     | 1147     | 129       | 14211 |
| 2008 | 7089     | 1296     | 3589     | 887      | 1160      | 14022 |
| 2009 | 7089     | 1296     | 5002     | 1349     | 697       | 15434 |
| 2010 | 7089     | 1296     | 4231     | 1337     | 1973      | 15926 |
| 2011 | 7089     | 1296     | 4122     | 1166     | 16        | 13689 |
| 2012 | 7089     | 1261     | 5377     | 1441     | 294       | 15462 |
| 2013 | 7089     | 1190     | 9350     | 2143     | 442       | 20214 |
| 2014 | 7089     | 1261     | 4259     | 931      | 0         | 13540 |
| 2015 | 7089     | 1296     | 3316     | 970      | 1024      | 13695 |
| 平均   | 6853     | 1213     | 6111     | 1404     | 523       | 16104 |

束、灌溉供水渠道最大输水流量限制等。

4.2.3 模型求解 上述水库灌区水资源系统模拟和优化模型是一个多维、非线性的复杂大系统优化问题，本文采用遗传算法(GA)求解。该算法参数设置简便，计算效率高，通用性强，对于水利工程方案设计中的非线性、非凸及组合优化等问题的求解具有很强的适应性、有效性，其计算步骤见相关文献[23]。

### 4.3 梅山水库早限水位优化确定及结果比较

4.3.1 优化确定早限水位 基于上述水库灌区水资源系统模拟模型及智能优化方法，获得梅山水库优化早限水位如图1所示。

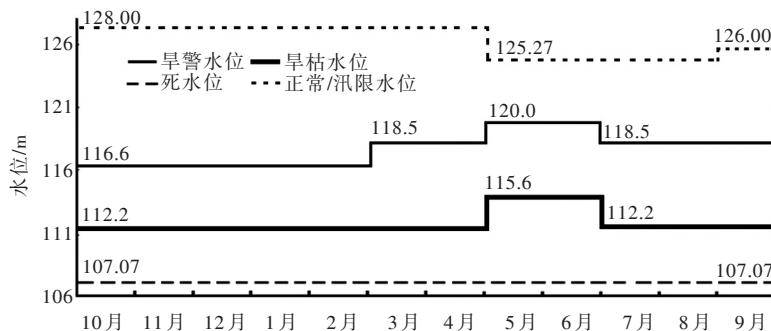


图1 梅山水库优化早限水位及其它主要特征水位

计算结果说明，优化调整后的早限水位对水库灌区水资源系统运行效果影响显著(见表5所示)，而且较初始早限水位更简洁明了，易于指导水库实际控制运行。

4.3.2 水库灌区系统综合效益比较 为全面了解早限水位对史河灌区梅山水库水资源系统运行影响，这里分别设置早限水位通用约束、早限水位特定约束两种系统控制运行条件，并从水库运行、史河灌区灌溉、生态供水、水力发电和经济效益等5个子系统，以及从各子系统派生的18个指标对史河灌区梅山水库水资源系统综合运行效果进行比较。

(1)早限水位通用约束。不考虑具体年份水文情势，即无论当年遭遇的是枯水年、平水年还是丰水年，只要水位触及早警水位或早枯水位都要启动相应的限制供水措施，称之为“早限水位通用约束”控制，根据供水最大保证的原则，各预警期早限水位按表3区间上包络线确定，运行结果见表5所示。

由表5可知，由于早警、早枯“两线”早限水位约束的加入，现状条件下梅山水库水资源系统运行效果发生了较大改变，其中主要指标如水库年均弃水量、农业灌溉保证率、生态供水保证率和综合经济效益都发生了不利变化。主要因为相对于无早限水位约束，梅山水库在较高早警、早枯水位控制下更易采取保守措施而限制供水，从而增加各预警期面临时段的缺水概率(尤其是灌溉用水)，而水库随着供水的减少，也抬高了水库的时段蓄水量，从而造成水库后续时段弃水量(如汛期)的增加，因此两者综合影响最终导致水库灌区水资源系统运行效果下降。显然这种忽略水文丰枯影响的预警限供具有相对片面性，也不符合灌区工程实际需求。由此可见，史河灌区梅山水库水资源系统对于早限水位具有较高的系统敏感性，必须谨慎对待。

(2)早限水位特定约束。鉴于以上不足，在系统运行时加入判别分析，即只有遭遇特定干旱的水文年份时(例如来水频率 $P \geq 80\%$ )才启用早限水位控制运行，这里称之为“早限水位特定约束”控制，其结果见表5所示。由表5可见，与“早限水位通用约束”控制下的水资源系统运行效果相比，“早限水位特定约束”在城镇供水方面，城镇年均供水量增加81万 $m^3$ ，供水保证率略有提高，而水库年均弃水量减少了1575万 $m^3$ ；在史河灌区灌溉方面，灌溉保证率从61.50%提高到65.38%，增加明显；在生态供水量和生态供水保证率方面提高显著；同时系统综合经济效益年均增加106万元，其它指标两者相差不多。

另外，由于引入了低水位早限水位控制的运行规则，所以模拟计算结果同时显示梅山水库历年月均水位变化较为平稳，只有1966、1977、1978和1988年略低于死水位(最低104.6 m)。可见，一定条件下启用早警水位、早枯水位“两线”进行低水位条件下限制供水，有利于梅山水库最低水位控制，也有益于史河灌区水资源系统运行综合效益的提高。

(3)优化早限水位特定约束。按4.2节建立的梅山水库早限水位优化模型模拟计算，系统各指标计算结果见表5所示。由表5可知：相较于“早限水位特定约束”，优化后水库年均弃水量进一步减少了155万 m<sup>3</sup>；城镇年均供水量相应增加了163万 m<sup>3</sup>；在史河灌区灌溉方面，水库年均灌溉供水量增加了151万 m<sup>3</sup>，灌溉保证率也从65.38%提高到71.15%，比无早限水位运行稍低；在生态供水量和生态供水保证率方面则略有增加；而水库灌区水资源系统的综合经济效益年均增加197万元。

表5 梅山水库水资源系统长系列多年平均运行结果

| 项目                        | 指标                       | 早限水位通用<br>约束运行 | 早限水位特定<br>约束运行 | 优化的早限水位<br>特定约束运行 |
|---------------------------|--------------------------|----------------|----------------|-------------------|
| 水库<br>运行                  | 灌溉供水量/万 m <sup>3</sup>   | 56762          | 58707          | 58904             |
|                           | 充库充塘量/万 m <sup>3</sup>   | 8196           | 8073           | 8095              |
|                           | 弃水量/万 m <sup>3</sup>     | 45865          | 44290          | 44135             |
|                           | 城镇需水量/万 m <sup>3</sup>   | 5640           | 5640           | 5640              |
|                           | 城镇供水量/万 m <sup>3</sup>   | 5317           | 5398           | 5561              |
|                           | 城镇保证率/%                  | 96.15          | 98.08          | 98.08             |
| 史河<br>灌区<br>灌溉<br>及<br>生态 | 灌溉需水量/万 m <sup>3</sup>   | 117049         | 117623         | 117539            |
|                           | 塘坝供水量/万 m <sup>3</sup>   | 36526          | 36305          | 36311             |
|                           | 反调节库供水量/万 m <sup>3</sup> | 13865          | 13657          | 13695             |
|                           | 补水站提水量/万 m <sup>3</sup>  | 1682           | 2107           | 2035              |
|                           | 水库供水量/万 m <sup>3</sup>   | 43663          | 45160          | 45311             |
|                           | 缺水量/万 m <sup>3</sup>     | 21312          | 20395          | 20188             |
|                           | 灌溉保证率/%                  | 61.50          | 65.38          | 71.15             |
|                           | 生态需水量/万 m <sup>3</sup>   | 17250          | 17250          | 17250             |
| 水力<br>发电                  | 生态供水量/万 m <sup>3</sup>   | 15429          | 15544          | 15576             |
|                           | 生态供水保证率/%                | 96.15          | 98.08          | 98.08             |
|                           | 供水发电量/(万 kW·h)           | 6934           | 7108           | 7103              |
| 效益                        | 弃水发电量/(万 kW·h)           | 3757           | 3654           | 3671              |
|                           | 总发电量/(万 kW·h)            | 10691          | 10762          | 10774             |
| 效益                        | 综合经济效益/万元                | 16107          | 16213          | 16410             |

由以上基于水库灌区水资源系统长系列模拟及优化计算可见，在一定范围内优化水库不同预警期内的早警、早枯水位，有利于梅山水库水资源系统综合运行效益的提高，也有利于史河灌区内部水源的合理调配与利用，由此优化确定的早限水位具有较高的科学合理性和技术可行性。

## 5 结论

通过梅山水库及史河灌区实地调研，结合水库灌区历年供水、灌溉、发电等不同用户用水特征分析，经供需分析计算和模拟模型演算验证，研究确定了梅山水库早限水位的早警水位和早枯水位，获得以下主要结论：

(1)以水库水文分期为基础，结合水库非汛期入库径流特性和用水特征，确定了非汛期干旱预警期为3月—4月，12月—次年2月和10月—11月；结合汛期灌溉用水高峰对水库供水的影响，将梅山水库汛期干旱预警期分为5月—6月、7月—8月和9月，为梅山水库早限水位分期控制提供了基础支撑。



(2)构建了基于规则的史河灌区梅山水库水资源系统模拟模型, 据此模拟计算水库与灌区水资源系统在水文气象、水利工程措施共同作用下复杂的系统需水、供水过程及其相应特性, 为研究水库灌区水资源系统运行效果在不同早限水位约束下的响应关系提供了技术手段。

(3)优化确定了梅山水库的分期早警水位和旱枯水位, 开展了早限水位启用判别条件分析及早限水位约束下水库灌区水资源系统优化运行研究, 结果说明早限水位的设置与运行可提高水库灌区水资源系统综合效益, 通过限制水库用水户枯水期供水从而保障重点用户以及后期水库供水安全, 为相关水利管理部门和水库管理单位抗旱预案研制、协调水资源用水矛盾提供了有力抓手。

需要说明的是, 相对于汛限水位研究与应用而言, 早限水位研究在国内外尚处于起步阶段。限于作者水平本文构建的史河灌区梅山水库水资源系统模拟模型, 主要基于客观的易量化的运行规则, 而水库的实际泄放水量一般是由相关的流域防洪部门、水行政管理部门、灌区管理局以及水电站运行单位等在丰枯季相对独立控制, 具有一定的不确定性而难以量化, 尚需要在以后的工作中考虑以上因素的影响。同时, 针对早警水位、旱枯水位分期控制条件下的水库最优化控制运行问题, 受时间限制本文只进行了早限水位的初步优化, 今后可结合水库灌区水资源系统模拟模型开展系统全要素优化调控研究, 如灌区种植结构、水旱种植比、水稻灌溉适宜水深、塘坝与反调节库运用规则、水库蓄放水规则等, 而这必将是涉及数十上百个变量的大系统优化问题, 开展相关智能优化算法对该复杂问题的研究和应用也是今后十分重要的工作。

**致谢:** 本文有幸得到了国家防汛抗旱总指挥部办公室杨光, 中国水利水电科学研究院水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心苏志诚, 安徽省水利厅王友贞、王凤云、李汪苗, 以及安徽省淠史杭灌区管理总局陈来宝、万义周和梅山水库管理处卢万友等专家的大力支持和帮助, 在此深表感谢!

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 王浩. 我国水资源合理配置的现状和未来[J]. 水利水电技术, 2006, 37(2): 7-14.
- [ 2 ] 夏军, 石卫, 雒新萍, 等. 气候变化下水资源脆弱性的适应性管理新认识[J]. 水科学进展, 2015, 26(2): 279-285.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] 中华人民共和国水利部. 旱情等级标准: SL424—2008[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [ 5 ] 金菊良, 宋占智, 崔毅, 等. 旱灾风险评估与调控关键技术研究进展[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 398-412.
- [ 6 ] 曹正池. 试述江河干旱告警水位制定办法[C]//水生态监测与分析论文集. 中国水利学会水文专业委员会, 济南, 2008.
- [ 7 ] 国家防汛抗旱总指挥部办公室. 早限水位(流量)的确定办法[Z]. 2011.
- [ 8 ] 杨玉和. 闹德海水库早限水位确定方法的探讨[J]. 农业与技术, 2012, 32(5): 28-29.
- [ 9 ] 钱斌. 信阳市鲇鱼山水库早限水位分析确定[J]. 河南水利与南水北调, 2016(9): 67-68.
- [ 10 ] 吴逊. 于桥水库早限水位分析及水情预警系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [ 11 ] 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, 33(1): 52-56.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] 曹润祥. 面向水资源常态与应急综合管理的水库汛限早限水位调整技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- [ 14 ] 彭少明, 王煜, 张永永, 等. 多年调节水库早限水位优化控制研究[J]. 水利学报, 2016, 47(4): 552-559.
- [ 15 ] 张永永, 彭少明, 白海涛. 基于改进人工鱼群算法的早限水位优化控制[J]. 人民黄河, 2017, 39(11): 38-41, 46.
- [ 16 ] KUO S F, LIU C W, CHEN S K. Comparative study of optimization techniques for irrigation project planning [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2003, 39(1): 59-73.
- [ 17 ] MORADI J M, RODIN S I, MARINO M A. Use of genetic algorithm in optimization of irrigation pumping stations

- [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2004, 130(5): 357–365.
- [ 18 ] 金菊良, 原晨阳, 蒋尚明, 等. 基于水量供需平衡分析的江淮丘陵区塘坝灌区抗旱能力评价[J]. *水利学报*, 2013, 44(5): 534–541.
- [ 19 ] 汤广民, 曹成. 安徽省农业旱灾特征及其对粮食生产的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(6): 47–50.
- [ 20 ] 侯玉, 吴伯贤, 郑国权. 分形理论用于洪水分期的初步探讨[J]. *水科学进展*, 1999, 10(2): 140–143.
- [ 21 ] 胡家露. 梅山水库汛期分期与汛限水位研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2015.
- [ 22 ] 张礼兵, 张展羽, 金菊良, 等. 水库灌区库塘水资源系统模拟模型研究[J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33(4/5): 385–389.
- [ 23 ] 金菊良, 丁晶. 水资源系统工程[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2002.

### Study of staged drought-limited water level of the main reservoir in the large-scale irrigation district

ZHANG Libing<sup>1, 2</sup>, WU Lulu<sup>1</sup>, JIN Juliang<sup>1, 2</sup>, WU Chengguo<sup>1, 2</sup>, ZHOU Yuliang<sup>1, 2</sup>, ZHU Wenli<sup>1</sup>

(1. *College of Civil and Water Conservancy Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;*

2. *Institute of Water Resources and Environmental System Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China*)

**Abstract:** As a common water conservancy project, especially in dry season with reduced rainfall and runoff, the reservoir plays an important role in water resources carrying capacity (WRCC), including water quantity, water quality, water ecology and water-flowing renewal. The drought limited water level is a controlled characteristic water line of reservoir when it is running at low water level. In this study, based on the characteristics of water inflow of Meishan reservoir in Pishihang Irrigation District and the characteristics of water demand from different users, the Hausdorff dimension fractal method is used to divide the inflow process of Meishan reservoir into several periods firstly, then the initial drought limited water level (subdivided into drought warning water level and dry water level) is calculated by water inflow and water supply in early-warning periods of different typical years. Based on the long series of simulation model and optimization model of water resources system in reservoir and irrigation district, the paper optimizes and determines the drought limited water level of Meishan reservoir in different early-warning periods. Finally, the rationality of drought limited water level is evaluated from several aspects such as reservoir operation, irrigation, production and living water consumption, ecological water supply and hydropower generation, which provides technical reference for the water conservancy department to guide drought relief operation in reservoir irrigation area and formulate corresponding drought relief plan.

**Keywords:** large-scale irrigation district; drought limited water level of reservoir; drought warning water level; dry water level; optimal

(责任编辑: 祁 伟)