
RADS 数据集在长江上游水库 蓄水调度中的应用前景

孙思瑞¹ 秦鹏程² 陈柯兵³ 吴旭树⁴¹

1. 长江水利委员会水文局长江中游水文水资源勘测局, 湖北 武汉 430010;
2. 武汉区域气候中心, 湖北 武汉 430074;
3. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;
4. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641)

【摘要】: 长江上游水库蓄水集中在 8~10 月, 此期正值雨季后期, 若水库不能在降水集中的雨季结束前蓄至一定水位, 将严重影响水库兴利目标的实现。为优化现有蓄水调度方案, 该文选用德州农工大学 Rainy And Dry Season (RADS) 数据集, 长系列的雨季划分资料, 分析了长江上游雨季结束时间特征。结果表明, RADS 与现有全国、长江上游雨季特征的研究结果较为一致, 数据集在研究区域适用性较好。乌江流域的雨季结束时间波动范围明显较大, 需重视乌江流域的中长期水文气象预报, 以提前预警流域雨季较早结束的情况。而对于乌江、岷江大渡河流域水库联合调度方案所规定的 9 月 1 日与 10 月 1 日的起蓄时间, 1961~2007 年中曾出现过雨季更早结束的情况, 即对于这两个流域的水库而言, 统筹考虑防洪任务与预报水情, 蓄水时间可考虑进一步提前。

【关键词】: 长江上游 蓄水调度 雨季结束时间 RADS

【中图分类号】: TV697.1 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227 (2021) 03-0614-09

随着以三峡水库为核心的长江上游大型梯级水库群陆续开发, 乌东德、白鹤滩水库即将建成投入使用, 水库群的兴利库容占流域年均径流量的比例大幅提高, 汛末期水库蓄水和下游需水的矛盾日益凸显^[1~3]。以洞庭湖为例, 2003 年三峡水库蓄水运行以来洞庭湖水位持续偏枯^[4]。2006 年 9~10 月和 2009 年 10 月出现了历史罕见的秋旱, 致使湖区产生了一系列生态问题^[5,6], 引起了社会各界的广泛关注。

孙思瑞等^[7]利用神经网络技术分析, 得出结论三峡水库蓄水运行调度对洞庭湖出口水位造成了较大影响。为了减轻长江上游水库群蓄水对下游的影响, 近年来, 关于长江上游水库群汛末提前蓄水的研究逐渐兴起^[8,9]。在调度实践中, 《年度长江上中游水库群联合调度方案》对长江上游各流域水库蓄水时间进行了统一的规划与安排, 开始蓄水时间集中在 8~10 月。这段时期内,

作者简介: 孙思瑞(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水文水资源. E-mail: threesun123@163.com
基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1508002)

长江上游流域面雨量对干支流流量的影响明显, 研究表明长江上游 8~10 月的面雨量与当月、下月流量均有极显著的相关性^[10~12]。若长江上游各水库不能在降水集中的雨季结束之前蓄至一定水位, 随后进入水库水量将呈降低的趋势, 对水库群蓄满不利, 进而将严重影响水库群兴利目标的实现。

目前国内为水库运行调度服务开展的雨季结束时间的研究很少^[13,14], 针对长江上游水库群蓄水调度的需求, 为进一步优化各流域水库的蓄水时间, 开展长江上游雨季结束时间特征分析十分必要。已有研究曾分析全国的雨季结束时间, 但这些研究均基于多年平均降水量, 讨论气候态的雨季特征^[15~18]。针对长江上游, 于大峰等^[19]同样仅得出了 1993~2009 年平均的雨季结束时间。上述研究均无法给出水库调度决策者所关心的长江上游雨季结束时间变化范围及其波动特征。若某流域降水结束时间年际波动明显, 则显然对流域中水库的蓄水时间安排需更为细致、灵活。

雨季划分主要依据降水资料, 其主要有 3 种来源: 站点观测、遥感反演和模式同化的再分析资料^[20]。长江上游地区地理地势环境复杂, 流域内气候特征具有明显差异^[21,22], 如何利用现有降水资料合理、可靠地得到长系列的逐年雨季结束时间具有挑战性。通常需要收集流域内大量降水资料, 并进行统计分析, 十分繁琐, 不便于调度决策者使用。2019 年, 德州农工大学发布了首个全球尺度包含雨季和旱季特征的格点数据集 RADS, 包括历史长系列的逐年雨季和旱季开始与结束日期, 持续时间和累积降水量。本研究旨在对 RADS 数据集在长江上游地区的适用性进行分析检验, 对蓄水调度决策而言具有重要的实用意义, 可为优化现有长江上游主要支流水库群已拟定的起蓄时间提供依据。

1 数据与研究区域

1.1 RADS 数据集简介

Rainy And Dry Season (RADS) 数据集包含全球雨季的开始和结束日期(每年一个日期), 雨季和旱季的持续时间, 以及雨季和旱季期间的累积降水。数据集可从网站 <ftp://cola.gmu.edu/RADS> 获取。

RADS 数据集是在现有格点日降水量数据集的基础上加工得到。故 RADS 共享原始降水数据集的空间分辨率, 时间范围和局限性。目前 RADS 已完成在多个格点日降水量数据集上的开发工作, 如时间覆盖范围为 1998~2015 年的 TRMM 3B42, 1979 年至今的 CPC_UNI 等等。考虑到本研究的需求, 对数据长度具有较高要求, 采用的 RADS 基于 Asian Precipitation-Highly-Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation (APHRODITE) 数据。APHRODITE 是通过整编亚洲各国和地区的雨量站观测资料, 建立的一套逐日、高分辨率的格点降水产品。其覆盖时间范围 1961~2007 年。覆盖空间范围 14° S~55° N 以及 60° E~150° E, 分辨率为 0.25° × 0.25°。韩振宇等^[23]考察了 APHRODITE 降水资料在中国的适用性, 发现 APHRODITE 基本能揭示近 50 年中国降水量以及年平均降水频率的变化趋势。Gao 等^[24]证明在短时间尺度内 APHRODITE 降水数据与观测数据的相关系数较高, 尤其在黄河源区及我国北方地区。部分学者也对 APHRODITE 在中国不同流域进行了应用和评估, 结果良好^[25~28], 故本文使用基于 APHRODITE 开发的 RADS 数据集是合理的。RADS 数据通过计算各个格点的累计降水异常值 S , 来分析该格点处的雨季开始和结束时间。

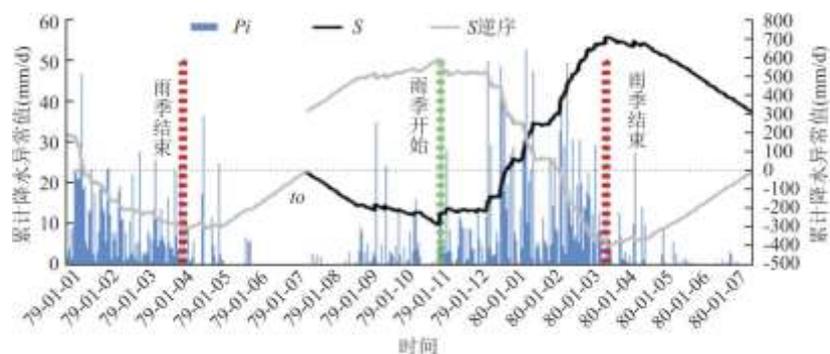


图 1 RADS 中累计降水异常值 S 计算原理示意图

$$S = \sum_{i=t_0} (p_i - \bar{p}) \quad (1)$$

式中： p_i 指第 i 日的日降水量 mm/d; \bar{p} 指多年平均日降水量 mm/d; t_0 指开始计算的日期。如果要计算雨季的开始日期(或干旱的结束日期),则可以在干旱季节开始计算 S。见图 1 中黑色实线,按时间正序(从左往右)计算, S 最初将取负值,一旦雨季开始, S 就会出现负极值点,即图中绿色虚线,可被认作雨季的开始日期。对于经历了明确雨季过程的地区,只要 t_0 定义合理, S 曲线极值点的日期就不取决于 t_0 。对于雨季的结束时间,计算公式相同但方向不同,即在干旱季节开始逆序计算,见图中灰色实线,从 t_0 处逆序(从右往左)计算得到红色虚线。计算的详细原理,可进一步参考论文^[29]。

1.2 研究区域简介

长江三峡坝址以上流域面积约 100 万 km^2 ,多年平均径流量 4510 亿 m^3 ,除西部高原属高寒气候外,流域大部分地区属东亚或南亚季风气候。长江上游流域按水文分区可划分为金沙江、岷沱江、嘉陵江、乌江、长上干、重庆—万州、万州—宜昌共 7 大区域,其中宜宾至宜昌统称为长江上游干流。考虑到纳入联合调度的长江上游水库群开始蓄水的时间,位于金沙江上游、雅砻江的水库为 8 月初(观音岩除外);岷江大渡河为 10 月初;嘉陵江为 9 月初;乌江为 9 月初。本文从 7 大区域中挑选、划分,将长江上游共划分为 4 个区域(图 2),对各区域的雨季结束时间进行计算分析,以期为这些区域的水库群蓄水调度提供指导。

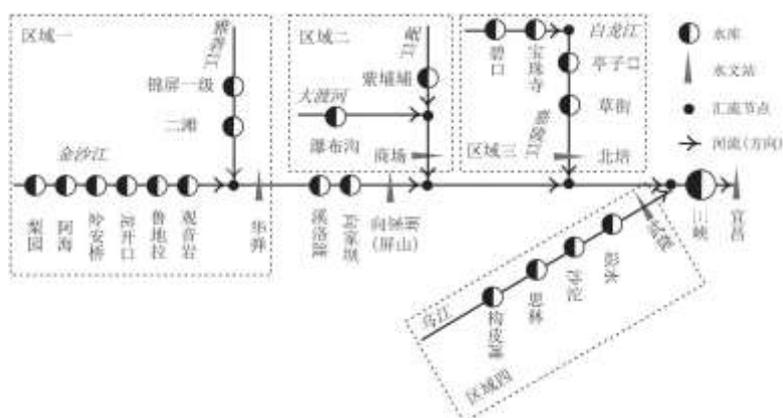


图 2 长江上游水库群分区图

2 全国雨季特征检验

关于雨季的定义,国内学者已有大量研究,如采用固定阈值,降水超过 6mm/d 的时期^[30];流域候平均日降水量达到 4mm 以上的时期^[18]。王遵娅等^[15]考虑到中国雨量存在明显的地区差别,对各站点的气候逐候降雨量进行标准化后,将标准化序列值大于 0.5 的时期定义为主雨季。晏红明^[31]等在讨论中国西南地区雨季起止时间时,通过对不同的雨季标准进行对比分析,推荐使用多年平均候降水量作为雨季的标准。肖潺等^[17]同样采用多年平均候降水量来定义雨季,对中国大陆雨季开始、结束、持续时间的时空差异进行了特征分析,取得了较好的结果。

在针对长江流域讨论 RADS 数据集之前,首先对该数据集在中国地区的适应性进行检验。考虑到其采用划分雨季的多年平均日降水量,与论文^[17](下文称参证论文)中的多年平均候降水量相类似,存在倍数关系,本文首先将数据集与参证论文的结果,进行对比。为便于比较,本节 RADS 数据集中的雨季开始、结束时间的日期与持续时间,均转化成候。

2.1 雨季开始时间

图 3(a) 来自参证论文, 给出了 1961~2012 年台站平均雨季的开始时间(单位: 候), 与之对应图 3(b~c) 中绘出了数据集 1961~2007 年, 共 47 年序列中雨季开始的平均值与中位数(单位: 候)。

从图 3 中可见, 参证论文和 RADS 数据集全国雨季较早开始的地方均为新疆西部、藏东南与滇西北的横断山脉中西部地区与江南地区。肖潺等^[32]对横断山脉中西部地区较早开始的雨季, 进行了解释, 该地区雨季开始早, 与此时低层西风、南风迅速增强, 特别是西风增强有关, 西风、西南风增强后在横断山脉地形作用下辐合抬升, 形成丰沛降水, 当地称之为“桃花汛”。雨季最迟开始的地方均为中国华北和西藏西部地区。数据集很好地描述了图 3(a) 中的细节, 可以看出, 在中国西南地区, 大致以横断山脉为界, 其中西部地区的雨季明显比东部地区更早到来。

2.2 雨季结束时间

图 4(a) 中绘出了来自参证论文中的 1961~2012 年台站平均雨季的结束时间(单位: 候), 与之对应图 4(b~c) 中绘出了数据集 1961~2007 年中雨季结束时间的平均值与中位数(单位: 候)。与图 4(a) 相似, 数据集中雨季最早在江南地区结束, 华西地区、海南地区的雨季结束较迟。数据集很好地描述了图 4(a) 中的细节, 如云南、重庆等地相对较晚的雨季结束时间。

2.3 雨季持续时间

图 5(a) 中绘出了来自参证论文中的 1961~2012 年台站平均雨季的持续时间(单位: 候), 与之对应图 5(b~c) 中绘出了数据集 1961~2007 年中雨季持续时间的平均值与中位数。从图 5 可见, 参证论文与数据集中的雨季持续时间在中国的变化规律是相似的, 中国大部分地区雨季持续时间超过 23 候, 即 4 个月之上。雨季持续时间最短的在华北地区和西藏西部及其与新疆相接的部分地区, 雨季持续时间为 20 候左右。华西地区、华南沿海、横断山脉中西部地区雨季较长, 部分地区雨季长度在 35 候以上。

3 长江上游雨季特征及对蓄水调度的指示意义

通过数据集在中国的雨季开始、结束与持续时间的整体分析, 说明了该数据集的有效性、合理性较好, 可考虑在长江流域进行运用。于大峰等^[19]曾对 1993~2009 年长江上游流域降水量的时空分布进行分析, 对长江上游岷沱江、嘉陵江、乌江区域的降水开始、结束及持续时间的特征进行了总结, 归纳如下。

川西的岷沱江流域迟至 6 月初才进入雨季, 9 月底雨季结束, 持续时间仅为 123 天。同处四川盆地的嘉陵江流域于 5 月初进入雨季, 至 10 月初结束, 持续 154 天, 比岷沱江流域长 31 天。地处长江上游流域西南部的乌江, 1993~2009 年多年平均雨季开始时间在 4 月 25 日前后, 雨季开始时间较川西地区早 36 天左右; 雨季结束时间出现在 10 月初, 与岷沱江和嘉陵江流域相差不多; 雨季持续时间 165 天长于岷沱江和嘉陵江流域。

图 6 绘出了数据集 1961~2007 年中长江上游的雨季开始、结束、持续时间的平均值与中位数。与于大峰等总结一致, 从图中可明显看出, 对于开始时间, 乌江早于嘉陵江早于岷江流域; 对于持续时间, 乌江流域同样最长, 嘉陵江也要明显长于岷江。对于结束时间, 图 6(c~d) 中显示乌江、岷江略略早于嘉陵江, 与于大峰等总结得到, 乌江雨季结束时间与岷沱江和嘉陵江流域相差不多(10 天之内)的结论基本一致。

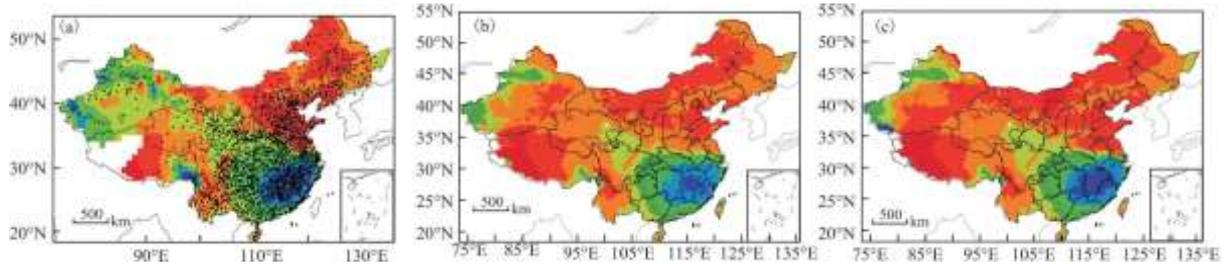


图 3 全国雨季的开始时间 (a) 参证论文 (b) RADS 平均值 (c) RADS 中位数 (单位: 候)

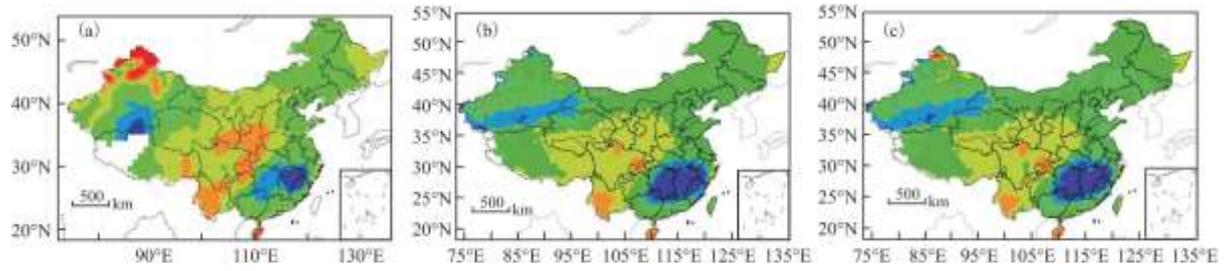


图 4 全国雨季的结束时间 (a) 参证论文 (b) RADS 平均值 (c) RADS 中位数 (单位: 候)

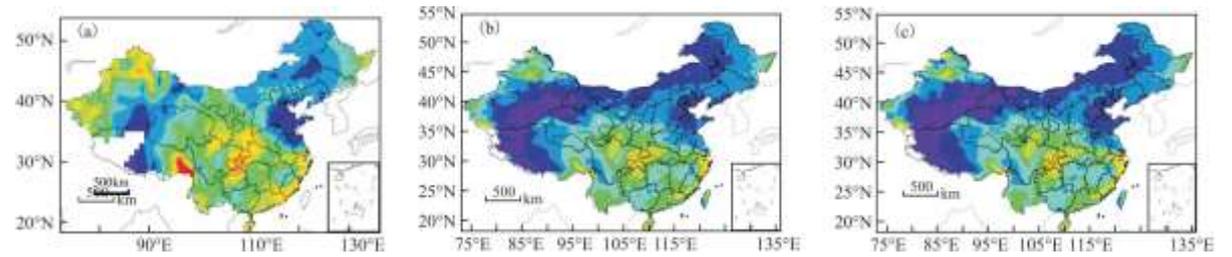


图 5 全国雨季的持续时间 (a) 参证论文 (b) RADS 平均值 (c) RADS 中位数 (单位: 候)

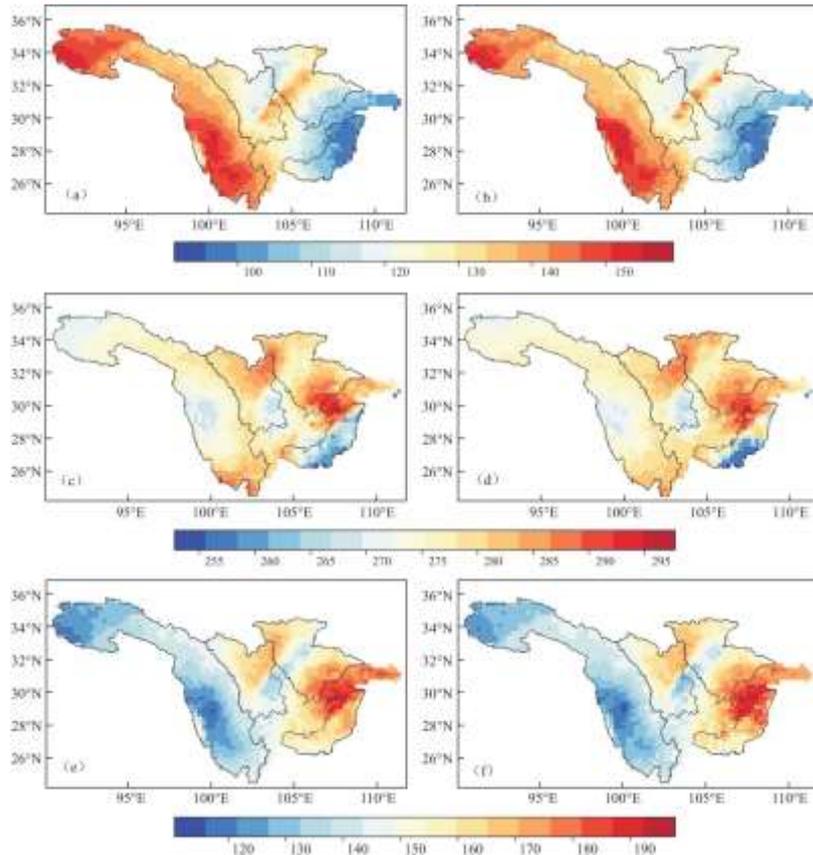


图 6 RADS 数据集中长江上游的雨季特征，开始时间(a)平均值(b)中位数；结束时间(c)平均值(d)中位数；持续时间(e)平均值(f)中位数(单位：日)

图 7 绘制了长江上游四区域的 1961~2007 年的日均面降水量，随一年中日期的变化情况(蓝线)。以及 RADS 产品所划分的格点雨季结束时间，在区域范围内的平均值(橙色垂线)。从图 7 中可明显看出，产品的雨季结束时间合理性较好，四区域的平均降水量均在橙色垂线后明显下降。产品的雨季结束时间与于大峰等^[19]的分析结果较为接近，误差在一周左右，对于岷江流域，分别为 10 月 6 日与 9 月 29 日；对于嘉陵江流域，分别为 10 月 8 日与 10 月 2 日；对于乌江流域，分别为 9 月 30 日与 10 月 6 日。通过上述分析表明，数据集在长江上游的应用效果较好，符合现有长江上游流域面雨量时空分布特征的研究，故本文认为该数据集可供长江上游水库群调度决策参考。

为将四区域长系列的雨季结束时间与联合调度方案中水库群起蓄时间进行对比。图 8 绘制了 1961~2007 年，47 年中四区域雨季结束时间的箱线图。从图中可明显看出，乌江区域的雨季结束时间波动范围明显较余下区域更为明显，故需重视乌江流域的中长期水文气象预报，以提前预警流域雨季较早结束的情况，安排水库的蓄水工作。而对于乌江、岷江大渡河流域水库联合调度方案所规定的 9 月 1 日与 10 月 1 日的起蓄时间，1961~2007 年中曾出现过雨季更早结束的情况。相较于华弹之上与嘉陵江流域水库，乌、岷流域水库从雨季结束的角度考虑，拥有更大的提前蓄水空间，基于水文气象预报，结合防洪任务的分配，蓄水调度可适当提前。

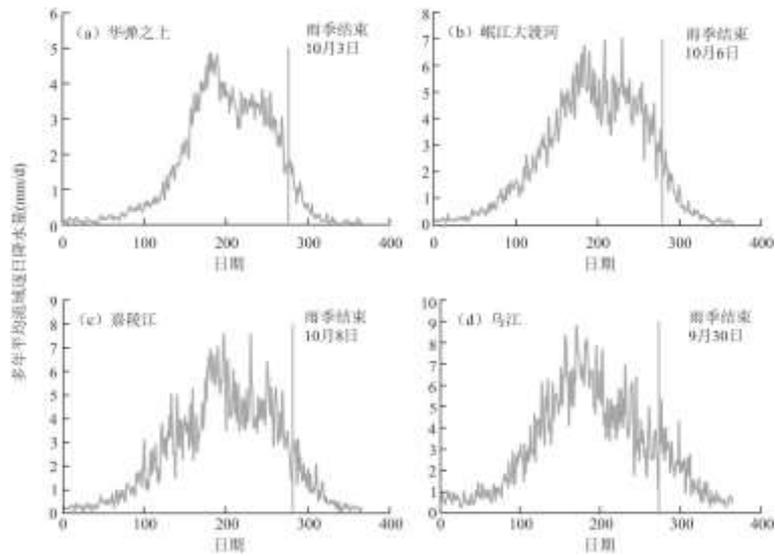


图7 1961~2007年长江上游四区域的日均面降水量与雨季的平均结束时间

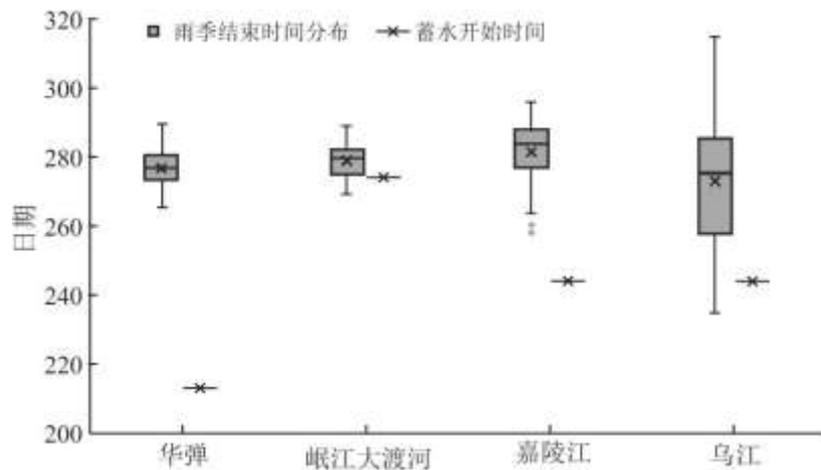


图8 1961~2007年中长江上游四区域雨季结束时间分布及对应水库蓄水开始时间

4 结论

开展长江上游雨季特征研究，对科学有序地安排长江上游各水库蓄水，合理利用汛末期的雨水资源十分必要。针对德州农工大学2019年发布的Rainy And Dry Season全球雨季特征数据集，本文首先将数据集与现有全国、长江上游雨季特征的研究结果进行对比。随后为水库群蓄水方案的制订，分析华弹之上、岷江、嘉陵江以及乌江四区域的雨季结束时间。结论如下：

(1) RADS与现有全国、长江上游雨季开始、结束与持续时间的研究结果较为一致，数据集能较好描述不同地域间特征差异的细节。

(2) 乌江的雨季结束时间波动范围明显较长江上游其它区域更大，故需重视乌江流域的中长期水文气象预报，以提前预警流域雨季较早结束的情况。

(3)对于乌江、岷江大渡河流域水库联合调度方案所规定的9月1日与10月1日的起蓄时间,1961~2007年中曾出现过雨季更早结束的情况,对于这两个流域水库而言,统筹考虑防洪任务与预报水情,蓄水时间可考虑进一步提前。

(4)值得强调的是,本文所得长江上游 RADS 数据集雨季划分结果,可供宏观尺度调度方案制定一定参考,而针对特定流域,还需结合更加可靠的历史长系列站点降水观测资料,进一步细致分析得到流域的雨季特征。

参考文献:

- [1]陈进.长江流域大型水库群统一蓄水问题探讨[J].中国水利,2010(8):10-13.
- [2]陈炯宏,陈桂亚,宁磊,等.长江上游水库群联合蓄水调度初步研究与思考[J].人民长江,2018,49(15):1-6.
- [3]赖锡军,姜加虎,黄群.三峡对长江中下游干流汛末水位影响——2006~2011年实例模拟[J].长江流域资源与环境,2014,23(4):475-481.
- [4]李景保,常疆,吕殿青,等.三峡水库调度运行初期荆江与洞庭湖区的水文效应[J].地理学报,2009,64(11):1342-1352.
- [5]黄群,孙占东,姜加虎.三峡水库运行对洞庭湖水位影响分析[J].湖泊科学,2011,23(3):424-428.
- [6]孙占东,黄群,姜加虎,等.洞庭湖近年干旱与三峡蓄水影响分析[J].长江流域资源与环境,2015,24(2):251-256.
- [7]孙思瑞,谢平,陈柯兵,等.三峡水库蓄水期不同调度方案对洞庭湖出口水位的影响[J].长江流域资源与环境,2018,27(8):1819-1826.
- [8]周研来,郭生练,陈进.溪洛渡-向家坝-三峡梯级水库联合蓄水方案与多目标决策研究[J].水利学报,2015,46(10):1135-1144.
- [9]何绍坤,郭生练,刘攀,等.金沙江梯级与三峡水库群联合蓄水优化调度[J].水力发电学报,2019,38(8):27-36.
- [10]陈正洪,杨宏青,任国玉,等.长江流域面雨量变化趋势及对干流流量影响[J].人民长江,2005(1):22-23.
- [11]冯亚文,任国玉,刘志雨,等.长江上游降水变化及其对径流的影响[J].资源科学,2013,35(6):1268-1276.
- [12]顾海敏.长江流域降雨特征及其对洪水的影响研究[D].南京信息工程大学,2015.
- [13]肖莺,陈晨,杜良敏.长江上游嘉陵江首末场强降水时间特征分析及预测[J].气象科技进展,2018,8(4):99-101.
- [14]张攀全,杨庆,木永军,等.澜沧江流域多年平均雨季起讫时间分析[J].科学技术创新,2018(30):115-116.
- [15]王遵娅,丁一汇.中国雨季的气候学特征[J].大气科学,2008(1):1-13.
- [16]黄琰,张人禾,龚志强,等.中国雨季的一种客观定量划分[J].气象学报,2014,72(6):1186-1204.

-
- [17]肖潺, 宇如聪, 原韦华, 等. 中国大陆雨季时空差异特征分析[J]. 气象学报, 2015, 73(1):84-92.
- [18]任国玉, 战云健, 任玉玉, 等. 中国大陆降水时空变异规律——I. 气候学特征[J]. 水科学进展, 2015, 26(3):299-310.
- [19]于大峰, 陈良华, 孙士型, 等. 长江上游流域面雨量时空分布特征[J]. 干旱气象, 2012, 30(4):563-569.
- [20]SUN Q, MIAO C, DUAN Q, et al. A Review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons[J]. *Reviews of Geophysics*, 2018, 56(1):79-107.
- [21]LIU X, YANG T, HSU K, et al. Evaluating the streamflow simulation capability of PERSIANN-CDR daily rainfall products in two river basins on the Tibetan Plateau[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(1):169-181.
- [22]孙晨, 刘敏. 再分析资料在三峡库区气候效应研究中的应用[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(9):1998-2013.
- [23]韩振宇, 周天军. APHRODITE 高分辨率逐日降水资料在中国大陆地区的适用性[J]. 大气科学, 2012, 36(2):361-373.
- [24]GAO Y, XUE Y, PENG W, et al. Assessment of dynamic downscaling of the extreme rainfall over east asia using a regional climate model[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, 28(5):1077-1098.
- [25]王婉昭, 高艳红, 许建伟. 青藏高原及其周边干旱区气候变化特征与 GLDAS 适用性分析[J]. 高原气象, 2013, 32(3):635-645.
- [26]阚宝云, 苏凤阁, 童凯, 等. 四套降水资料在喀喇昆仑山叶尔羌河上游流域的适用性分析[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3):710-722.
- [27]李兰海, 尚明, 张敏生, 等. APHRODITE 降水数据驱动的融雪径流模拟[J]. 水科学进展, 2014, 25(1):53-59.
- [28]刘小婵, 赵建军, 张洪岩, 等. TRMM 降水数据在东北地区的精度验证与应用[J]. 自然资源学报, 2015, 30(6):1047-1056.
- [29]BOMBARDI R J, KINTER J L I, FRAUENFELD O W. A Global gridded dataset of the characteristics of the rainy and dry seasons[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2019, 100(7):1315-1328.
- [30]QIAN W, KANG H S, LEE D K. Distribution of seasonal rainfall in the East Asian monsoon region[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2002, 73(3-4):151-168.
- [31]晏红明, 李清泉, 孙丞虎, 等. 中国西南区域雨季开始和结束日期划分标准的研究[J]. 大气科学, 2013, 37(5):1111-1128.
- [32]肖潺, 原韦华, 李建, 等. 南海秋雨气候特征分析[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(6):693-700.