唐永兰，徐桂荣，祁海霞，2024. 三峡库区蓄水前后夏季小时降水变化特征[J]. 气象，50(9)：1081-1092. Tang Y L，Xu G R，Qi H X，2024. Variation characteristics of summer hourly precipitation before and after impoundment in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Meteor Mon，50(9)：1081-1092(in Chinese).

三峡库区蓄水前后夏季小时降水变化特征*

唐永兰[1,2] 徐桂荣[1,2] 祁海霞[1,2]

1 中国气象局武汉暴雨研究所 中国气象局流域强降水重点开放实验室/暴雨监测预警湖北省重点实验室，武汉 430205
2 三峡国家气候观象台，湖北宜昌 443099

提 要： 利用国家气象信息中心小时降水资料，结合三峡库区地形的多样性，分析了库区蓄水前(1992—2002年)和蓄水后(2003—2021年)夏季(6—8月)小时降水时空变化以及不同类型强降水事件(HRE)变化特征。结果表明：蓄水后小时降水的降水量和频次减少，而强度增加；降水变化存在明显的地理分布规律，降水量、频次、强度在库区中北部增加，且多位于长江以北地区；降水量、频次在库区西南部减少，强度在库区中南部和西北部减弱，且多位于31°N以南。蓄水前后小时降水的日变化峰值时间位相的空间差异程度表现为降水强度>降水量>降水频次；蓄水后降水量、频次、强度呈增加趋势的站点增多，且降水量和强度的日变化峰值时间位相在高海拔山区具有位相前移特征。蓄水前后各等级小时降水的降水概率和降水占比变化不明显，其中降水概率在[0.1，0.5)mm等级最大，≥20 mm等级最小；降水占比在[1，5)mm等级最大，[0.1，0.5)mm等级最小，≥20 mm等级约为15%。蓄水后小时降水的日变化特征更加明显，其中≥20 mm等级的小时降水量和频次的双峰结构更为突出，其他等级的小时降水量和频次的峰值时间范围有扩大趋势，而各等级小时降水强度的次日尺度波动更频繁。蓄水前后HRE均是短历时型最多，长历时型最少，且短历时型HRE多开始于下午，中历时型和长历时型HRE多开始于夜间；蓄水后有利于HRE维持，短历时型HRE在中午和下午开始的概率增加，中历时型和长历时型HRE在清晨开始的概率增加。

关键词： 三峡库区，蓄水，小时降水，强降水事件，日变化，地形

中图分类号： P468 **文献标志码：** A **DOI：** 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.031403

Variation Characteristics of Summer Hourly Precipitation Before and After Impoundment in the Three Gorges Reservoir Area

TANG Yonglan[1,2] XU Guirong[1,2] QI Haixia[1,2]

1 CMA Basin Heavy Rainfall Key Laboratory/Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205
2 Three Gorges National Climatological Observatory, Hubei, Yichang 443099

Abstract: Based on hourly precipitation data from the National Meteorological Information Centre of CMA, combined with the diversity of the terrain, the temporal and spatial characteristics of hourly precipitation, as well as characteristics of different types of heavy rainfall event (HRE) before (1992－2002) and after (2003－2021) the impoundment in the Three Gorges Reservoir Area in summer (June－August) are analyzed. The results are as follows. After impoundment, the precipitation and frequency decrease but intensity increases. There is an obvious geographical distribution pattern of precipitation changes, with precipitation, frequency and intensity increasing in the north central part of the Three Gorges Reservoir Area,

* 国家自然科学基金面上项目(41975058)、湖北省气象局科技发展基金重点项目(2022Z02)和长江流域气象开放基金项目(CJLY2022Y06)共同资助

2023年4月1日收稿； 2024年5月22日收修定稿

第一作者：唐永兰，主要从事天气气候预测和数值模拟研究. E-mail：tyl-byzh@whihr.com.cn

通讯作者：徐桂荣，主要从事大气探测和云-降水研究. E-mail：grxu@whihr.com.cn

mostly located in the area north of the Yangtze River, and the precipitation and frequency decrease in the southwest and the intensity weakens in the south central part and northwest of the Three Gorges Reservoir Area, mostly located to the south of 31°N. The spatial difference degree of diurnal peak phases of hourly precipitation before and after impoundment is precipitation intensity>precipitation>precipitation frequency. After impoundment, the stations with increasing trend of precipitation, frequency and intensity become more, and the diurnal peak phases of precipitation and intensity have the feature of phase advance in high altitude mountainous areas. There is no significant change in the precipitation probability and proportion of hourly precipitation at various grades before and after impoundment. The precipitation probability is the maximum at the grade of [0.1, 0.5) mm, and the minimum at the grade of ≥20 mm. The precipitation proportion shows the maximum at the grade of [1, 5) mm, the minimum at the grade of [0.1, 0.5) mm, and about 15% at the grade of ≥20 mm. The diurnal variation characteristics of hourly precipitation after the impoundment are more obvious. The bimodal structures of precipitation and frequency of hourly precipitation at the grade of ≥20 mm are more prominent, while the peak time ranges of precipitation and frequency of hourly precipitation at other grades tend to expand, and the diurnal scale fluctuations of hourly precipitation intensity at each grade are more frequent. Analysis of different duration types of HRE shows that before and after impoundment, the short-duration type of HRE is the highest and the long-duration type is the lowest. The short-duration type of HRE mostly starts in the afternoon, while medium-duration and long-duration types of HRE mostly start at night. After impoundment, the condition is beneficial for HRE maintenance. The probability of short-duration type of HRE starting at noon and in the afternoon increases, and the probability of medium-duration and long-duration types of HRE starting in the morning increase.

Key words: Three Gorges Reservoir Area, impoundment, hourly precipitation, heavy rainfall event (HRE), diurnal variation, terrain

引 言

长江三峡水利枢纽工程，是当今世界上建成的最大型水利枢纽工程。三峡库区是该工程中三峡大坝修建蓄水形成的区域，其位于长江流域腹地，是长江流域防洪调度的关键区和国家战略性淡水资源库（王若瑜等，2017；张天宇等，2020）。目前针对世界各地大型水利工程对气候影响的研究倾向于水库会改变周围地区的小气候，尤其是库区蓄水后对其局地气候的影响较大（符坤等，2018）。三峡库区地处亚热带季风区，是典型的气候敏感区和气象灾害脆弱区（孙晨和刘敏，2018；崔豪等，2021；唐永兰等，2023），其降水年内和年际变化大，且地形以山地为主，降水冲刷易造成区域性洪涝灾害，并引发崩塌、滑坡、泥石流等次生灾害（矫梅燕，2014；郑衍欣等，2018；董钊煜等，2020）。在气候变暖背景下，三峡库区蓄水引起的局地气候效应与大尺度背景场气候变化的叠加，可能会导致库区降水特征及其致灾机理发生改变，因此研究三峡库区蓄水前后降水变化特征，对于认识库区蓄水引起的局地气候效应和科学防灾减灾具有重要意义。

三峡库区自2003年开始蓄水，在防洪、发电、航运等方面发挥了重要作用。库区蓄水后水位提高、下垫面水域扩大，其引起的局地气候效应及库区降水所受影响等科学问题引起了广泛关注。张静等（2019）研究三峡库区相关气候要素的变化特征指出，库区蓄水后年降水量和降水日数均呈显著上升趋势，且后者的增加速率明显高于前者。武慧铃等（2021）分析三峡库区蓄水前后降水的变化趋势指出，库区蓄水后降水受到影响，降水量在秦岭—大巴山一带以及四川盆地增加，在寸滩宜昌段沿河以及右岸区域减少。Wu et al（2006）基于美国国家航空航天局（NASA）热带测雨卫星（TRMM）探测资料的研究结论也支持了这一观点。Zheng et al（2024）应用WRF模式研究三峡库区春季连续降雨的未来变化特征指出，库区蓄水后中西部的春季连续降雨的持续时间、雨量和强度将增加。然而，也有研究表

明三峡库区蓄水前后局地降水没有明显变化,如陈鲜艳等(2013)研究指出库区蓄水对气候影响范围一般不超过 20 km,尚未发现库区蓄水后周边地区降水有明显变化;张天宇等(2020)研究指出三峡远、近库区站点蓄水前后年降水量的比值呈平稳波动状态,库区蓄水对周边地区降水量没有明显影响;黄亚(2019)研究指出库区蓄水后的局地气候效应对 2021—2050 年各项极端降水指数的年际变化趋势没有明显影响。以上研究从不同角度探讨了三峡库区蓄水引起的局地气候效应及其对库区降水的影响,为后续相关研究工作的开展提供了重要的参考价值。由于大型水利工程的局地气候效应是一个长期复杂的气候调节过程,加之气候变化的复杂性和三峡库区腹心地带观测资料的缺乏,目前学术界对三峡库区蓄水引起的局地气候效应认识并不全面,尤其是库区蓄水前后降水的时空变化特征尚没有明确结论。如今三峡库区的观测资料逐年累积,较长时间序列、高质量的站点小时降水资料为描述细致、精准的库区降水特征提供了支持。在气候变暖背景下,利用长时间序列的最新气象资料来更新研究库区蓄水前后小时降水的精细化特征,进而探讨库区蓄水引起的局地气候效应,是亟需开展的工作。

本文利用国家气象信息中心小时降水资料,结合三峡库区地形的多样性,分析库区蓄水前(1992—2002 年)、蓄水后(2003—2021 年)夏季(6—8 月)小时降水时空变化以及不同类型强降水事件(HRE)变化特征,以探明库区蓄水对降水的影响范围和程度,为深入认识气候变暖背景下库区蓄水引起的局地气候效应和防灾减灾提供科学依据。

1　资料与方法

站点小时降水资料来源于国家气象信息中心建立的国家级地面气象台站小时降水数据集,该数据集经过了严格的质量控制,主要包括气候界限值检查、内部一致性检查和时间一致性检查,具有较高的可靠性和准确性(张强等,2016)。地形资料来源于美国国家地球物理数据中心(NGDC,http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo1source.html)。三峡库区地处长江中游平原与四川盆地的结合部,以山地(约占 75%)和丘陵(约占 22%)为主,库区内东南地势高,西北地势低,地势起伏较大。三峡库区内分布有 25 个国家级地面气象台站(图 1),符合本文研究时间序列长度要求的站点有 20 个(四川 1 个站、湖北 4 个站和重庆 15 个站),站点海拔高度为 139.9～698.8 m,最高站点为重庆南川站(29.16°N、107.11°E),最低站点为湖北三峡站(30.86°N、111.08°E)。全文所用时间均为北京时。

三峡水库从 2003 年开始蓄水,本文以 2003 年为界,分别以 1992—2002 年和 2003—2021 年作为蓄水前、蓄水后时间序列开展研究。为避免因蓄水前后使用的数据年限不一致对分析结果造成影响,本文使用物理量年均值或比例来对比分析蓄水前后小时降水特征的差异。参照 Zheng et al(2019)研究方法,定义了 7 个小时降水量标准,即 0.1、0.5、1、5、10、20、50 mm,以此来划分小时降水等级,考察库区蓄水前后夏季不同等级小时降水的变化特征。≥20 mm 等级的小时降水定义为小时强降水(HHR)(郑永光等,2017;伍红雨等,2020)。参考李争辉和罗亚丽(2021)的方法,定义 HRE 如下:对于某一站点,从降水出现(小时降水量 R_{1h}≥0.1 mm)到终止,期间最多只有连续 1 h 的间断,这样的一次过程称为一次降水事件,HRE 定义为至少包含 1 个 R_{1h}≥20 mm 的降水事件。HRE 起止时刻之间的时长称为 HRE 历时,根据历时的不同,将 HRE 分为短历时(1～6 h)、中历时(7～12 h)和长历时(>12 h)三种类型,以研究不同历时类型 HRE 特征。

为对比分析不同等级小时降水的降水量、频次、强度的日变化,将研究时段不同等级小时降水的降水量、频次、强度分别按时次(01—24 时)分类累加,并进行标准化处理(Li et al,2008)。参照宇如聪和李建(2016)研究中国降水日变化峰值时间位相(日最大值出现时刻)的办法,将一日时间段分为 4 类:清晨(04—09 时)、中午(10—13 时)、下午(14—21 时)和夜间(22—03 时)。另外,采用最小二乘法求气象

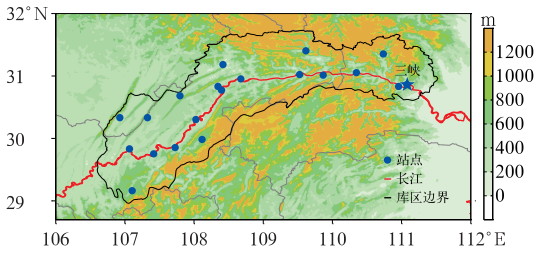


图 1　研究区域站点(圆点)及周边地形高度(填色)的空间分布

Fig. 1　Spatial distribution of stations (dot) and terrain elevation (colored) in the study area

要素趋势变化的线性方程，使用趋势系数研究气象要素变化的定量程度，利用 t 检验判断变化趋势是否显著。

2 结果与分析

2.1 蓄水前后夏季小时降水时空变化特征

2.1.1 年际变化特征

分析三峡库区蓄水前后夏季小时降水的年际变化特征，可加强对气候变暖背景下库区蓄水引起的局地气候效应的科学认识。分析图 2 可知，库区蓄水前后夏季小时降水的降水量、频次、强度的年际变化有明显差异。蓄水前降水量、频次、强度的变化范围分别为 316.5～797.9 mm、174～346 次、1.6～2.3 mm·h^{-1}；蓄水后三者的变化范围分别为 272.1～699.3 mm、121～337 次、1.8～2.5 mm·h^{-1}，表明库区蓄水后小时降水的降水量、频次减少，而强度增加。分析距平可知，蓄水前小时降水的降水量、频次、强度距平的变化范围分别为－159.9～321.5 mm、－66～106 次、－0.5～0.3 mm·h^{-1}；蓄水后三者距平的变化范围分别为－209.0～218.2 mm、－115～101 次、－0.3～0.5 mm·h^{-1}，表明蓄水后小时降水量的年际变幅减小、频次的年际变幅增加、强度的

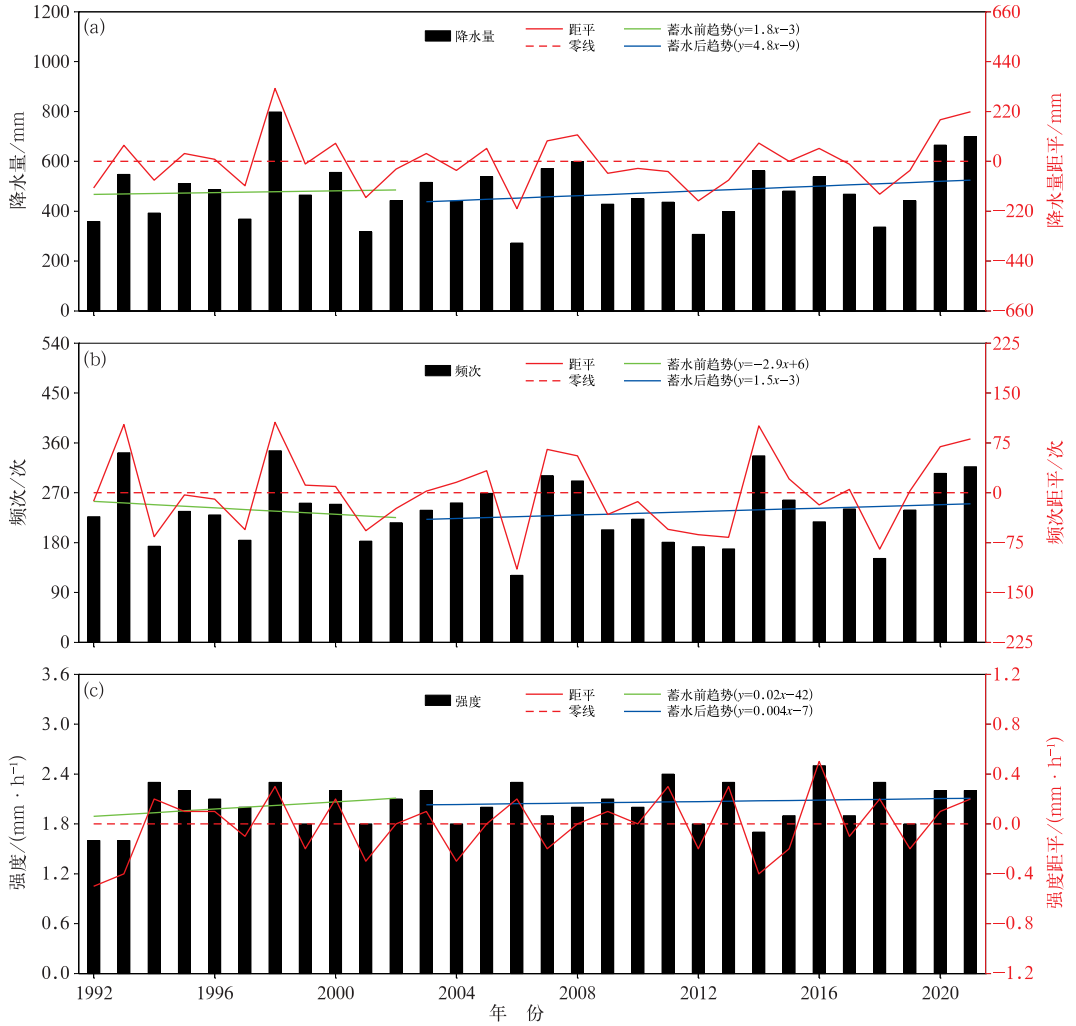


图 2 1992—2021 年三峡库区蓄水前后站点平均的夏季小时降水的(a)降水量，(b)频次，(c)强度年际变化

Fig. 2 Interannual variations of average (a) precipitation, (b) frequency and (c) intensity of hourly precipitation at the stations before and after the impoundment in the Three Gorges Reservoir Area in summer from 1992 to 2021

年际变幅相当。分析变化趋势可知，蓄水前小时降水的降水量、强度分别以 18 mm·(10 a)$^{-1}$、0.2 mm·h^{-1}·(10 a)$^{-1}$ 的变率增加，而频次以 −29 次·(10 a)$^{-1}$ 的变率减少；蓄水后降水量、频次、强度分别以 48 mm·(10 a)$^{-1}$、15 次·(10 a)$^{-1}$、0.04 mm·h^{-1}·(10 a)$^{-1}$ 的变率增加，表明蓄水后夏季小时降水的降水量、频次的变化趋势增加，强度的变化趋势减少。但无论蓄水前后，三者的趋势系数均未通过 0.05 的显著性水平检验，变化趋势均不显著。

为探讨这种变化是三峡库区蓄水影响的结果，还是蓄水前后气候变化的结果，选取距离库区南北边界（库区东西边界以外区域有长江流域水体影响）20～40 km 的站点，分别为恩施站、彭水站、道真站、广安站、宣汉站、城口站、保康站 7 个站点（简称库区外站点），使用年时间序列的物理量减去其平均值（即距平）的方法去除气候变化的影响（Tang et al，2022）后，与库区内站点的夏季小时降水变化进行对比分析。图 3 显示蓄水后库区内站点平均的小时降水的降水量、频次、强度的距平变化范围分别为 −209.0～218.2 mm、−115～101 次、−0.4～0.5 mm·h^{-1}；蓄水后库区外站点平均的小时降水的降水量、频次、强度的距平变化范围分别为 −239.5～233.8 mm、−119～88 次、−0.3～0.6 mm·h^{-1}，可见蓄水后库区内站点较库区外站点小时降水的降水量年际变幅小、频次年际变幅大、强度年际变幅相当，结合上文得出的“蓄水后库区小时降水的降水量年际变幅

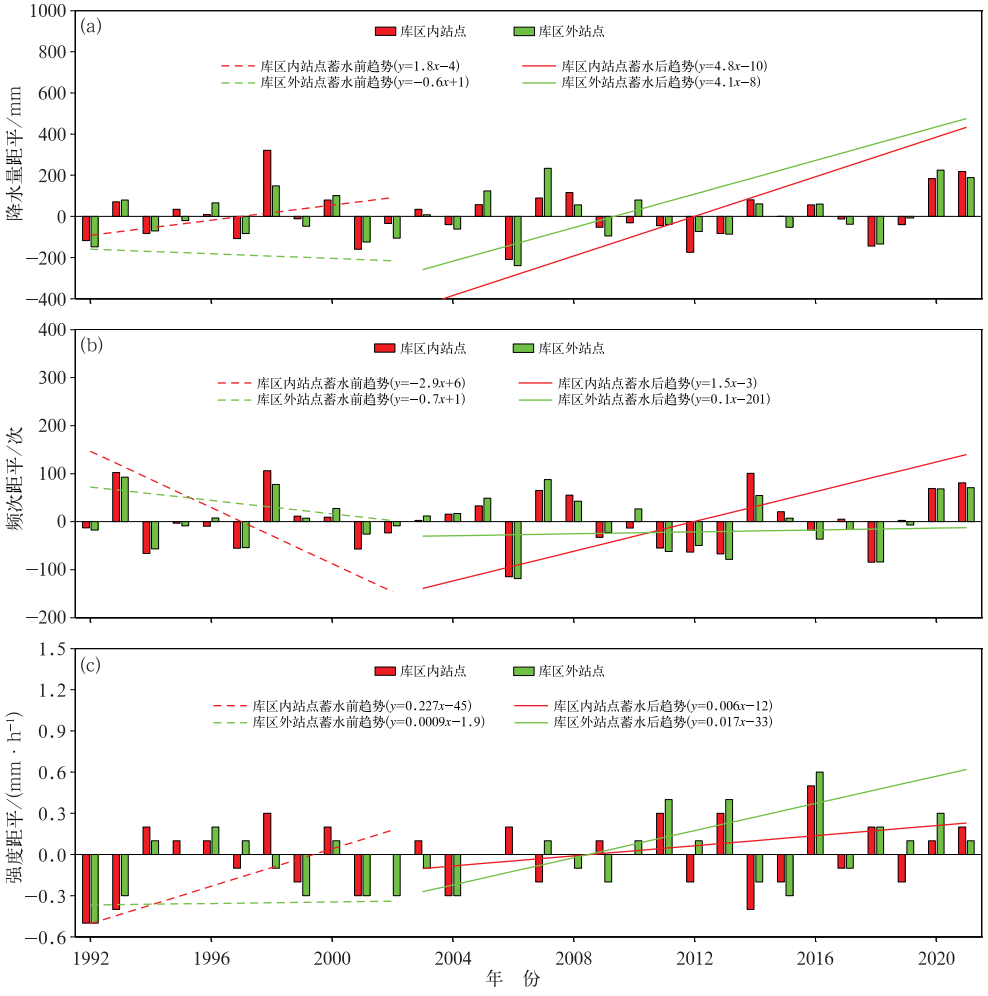


图 3　1992—2021 年三峡库区蓄水前后库区内和库区外站点平均的夏季小时降水的(a)降水量距平，(b)频次距平，(c)强度距平的年际变化

Fig. 3　Interannual variations of average (a) precipitation anomaly, (b) frequency anomaly and (c) intensity anomaly of hourly precipitation at the stations before and after the impoundment inside and outside the Three Gorges Reservoir Area in summer from 1992 to 2021

减小，频次年际变幅增加，强度年际变幅相当”结论可知，库区夏季小时降水的年际变幅特征是库区蓄水影响的结果。此外，蓄水后库区内站点平均的小时降水的降水量距平、频次距平分别以 48 mm·(10 a)$^{-1}$、15 次·(10 a)$^{-1}$的变率增加，较库区外站点平均的小时降水的降水量距平的变率[41 mm·(10 a)$^{-1}$]、频次距平的变率[1 次·(10 a)$^{-1}$]大；强度距平以 0.06 mm·h^{-1}·(10 a)$^{-1}$的变率增加，较库区外的变率[0.17 mm·h^{-1}·(10 a)$^{-1}$]小，结合上文得出的“蓄水后库区夏季小时降水的降水量、频次的变化趋势增加，强度的变化趋势减少”可知，库区夏季小时降水的降水量、频次的变化趋势增加而强度的变化趋势减少也是库区蓄水影响的结果。

2.1.2 空间分布特征

分析三峡库区蓄水前后夏季小时降水的空间分布特征，可进一步探明库区蓄水对降水空间分布的影响。分析图 4 可知，库区蓄水前后夏季小时降水的降水量、频次、强度具有明显空间差异。蓄水前降水量(图 4a)在库区东南部有一个高值区(中心值为 555.7 mm)，在库区中北部和西南部分别有一个低值区；蓄水后降水量(图 4d)在库区东南部的高值区增强(中心值达 599.3 mm)，且在库区中北部出现了大范围的高值区(中心值为 536.9 mm)，而在库区西南部的低值区范围更广，库区中南部出现一个低值区。蓄水前降水频次(图 4b)在库区东部和西南部分别有一个高值区(中心值分别为 269 次、278 次)，库区中部为大范围低值区；蓄水后降水频次(图 4e)在库区东南部出现高值区(中心值为 276 次)，且在库区中北部出现了狭窄的带状高值区(中心值为 245 次)，库区西南部至中部为大范围低值区。蓄水前降水强度(图 4c)在库区中南部有一个高值区(中心值为 2.19 mm·h^{-1})，在库区西南部有一个低值区；蓄水后降水强度(图 4f)在库区中北部出现高值区(中心值为 2.30 mm·h^{-1})，库区西南部低值区强度减弱。从蓄水后减去蓄水前差值的空间分布(图 4g～4i)来看，蓄水后降水量、频次、

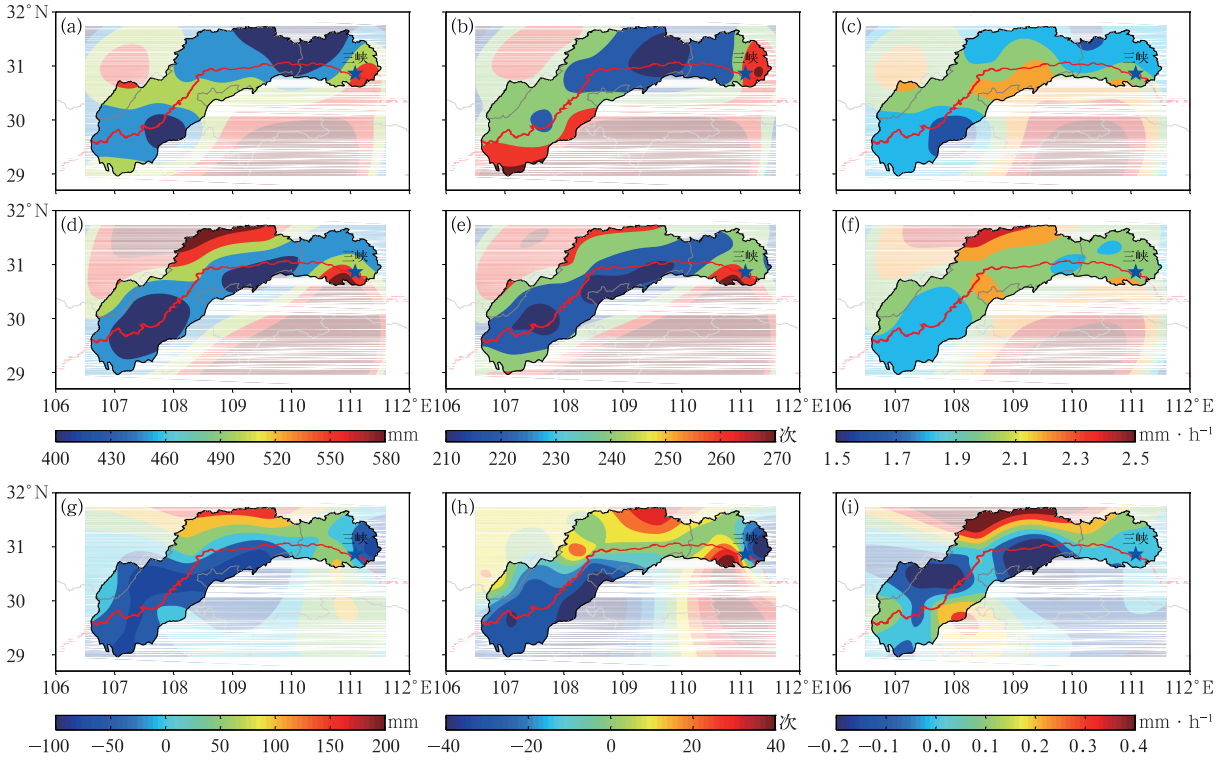


图 4 1992—2021 年三峡库区(a～c)蓄水前，(d～f)蓄水后，(g～i)蓄水后减去蓄水前差值的年均夏季小时降水(a,d,g)降水量，(b,e,h)频次，(c,f,i)强度空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of (a, d, g) precipitation, (b, e, h) frequency and (c, f, i) intensity of annual average hourly precipitation (a−c) before, (d−f) after the impoundment and (g−i) the difference values after impoundment minus that before impoundment in the Three Gorges Reservoir Area in summer from 1992 to 2021

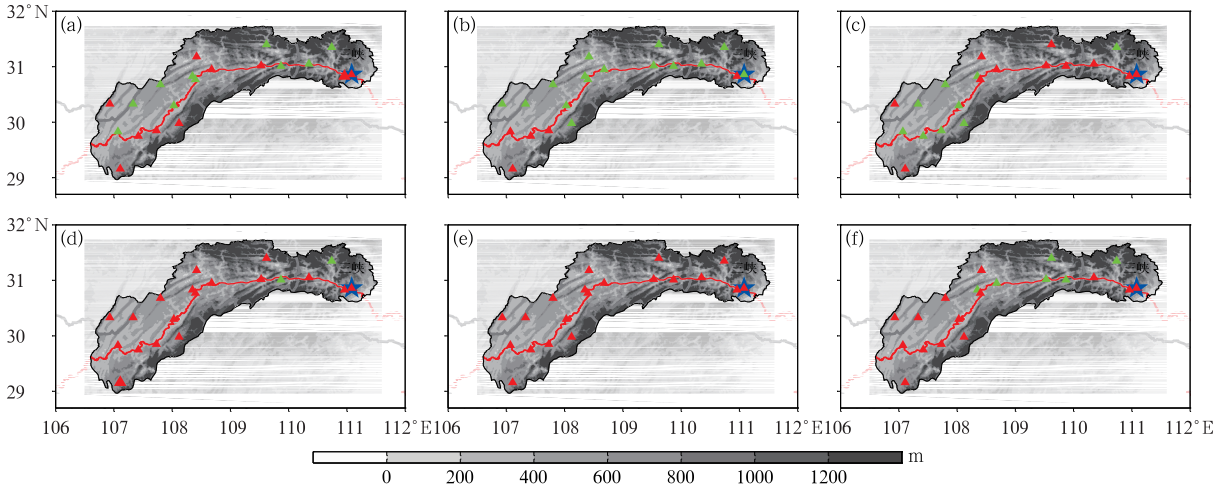
强度在库区中北部增加,降水量、频次在库区西南部减少,强度在库区中南部和西北部减弱。蓄水后较蓄水前的降水变化存在明显的地理分布规律,降水量、频次、强度增加的区域多位于长江以北地区,尤其是大巴山一带,而减少的区域多位于 31°N 以南,这与李博和唐世浩(2014)基于 TRMM 和测站资料研究得出的结论一致。这种现象形成的原因可能与库区蓄水后水域扩大使其与周边特殊地形相耦合所造成水汽与风场的变化引起的局地水循环变化有关(张静等,2019;武慧铃等,2021;李超等,2022),其中的物理机制有待进一步探索。此外,张天宇等(2023)研究指出,三峡库区小时强降水(≥20 mm·h^{-1})增加的区域主要集中在东部更靠近坝址的区域,与本文对三峡库区夏季小时降水(≥0.1 mm·h^{-1})的研究结论存在差异,这可能与研究选取的降水量级、代表站、时段和季节不同有关。

2.1.3　趋势系数的空间分布特征

分析三峡库区蓄水前后夏季小时降水的变化趋势,可为区域水资源的合理管理与利用提供参考。分析图 5 可知,无论蓄水前后,库区站点小时降水的降水量、频次、强度的趋势系数普遍表现为不显著(蓄水前秭归站降水量呈显著增加趋势除外,图 5a 红色大三角形所示);蓄水后降水量、频次、强度呈增加趋势的站点(红色三角形)增多,呈减少趋势的站点(绿色三角形)变少。具体而言,蓄水前降水量(图 5a)呈增加或减少趋势的站点各为 10 个,呈增加趋势的站点分布较为分散,呈减少趋势的站点主要分布在库区东部和西北部;蓄水后站点降水量(图 5d)以增加趋势为主,仅 2 个站点呈减少趋势,分布在库区东部。蓄水前站点降水频次(图 5b)以减少趋势为主,仅 5 个站点呈增加趋势,主要分布在库区西南部;蓄水后站点降水频次(图 5e)均呈增加趋势。蓄水前降水强度(图 5c)呈增加或减少趋势的站点数相差不大,呈增加趋势的站点主要分布在库区中东部,呈减少趋势的站点主要分布在库区西部;蓄水后站点降水强度(图 5f)以增加趋势为主,仅 6 个站点呈减少趋势,分布在库区中东部。综上所述,蓄水对目前库区站点小时降水的降水量、频次、强度的变化趋势的影响是不显著的。

2.1.4　日变化峰值时间位相的空间分布特征

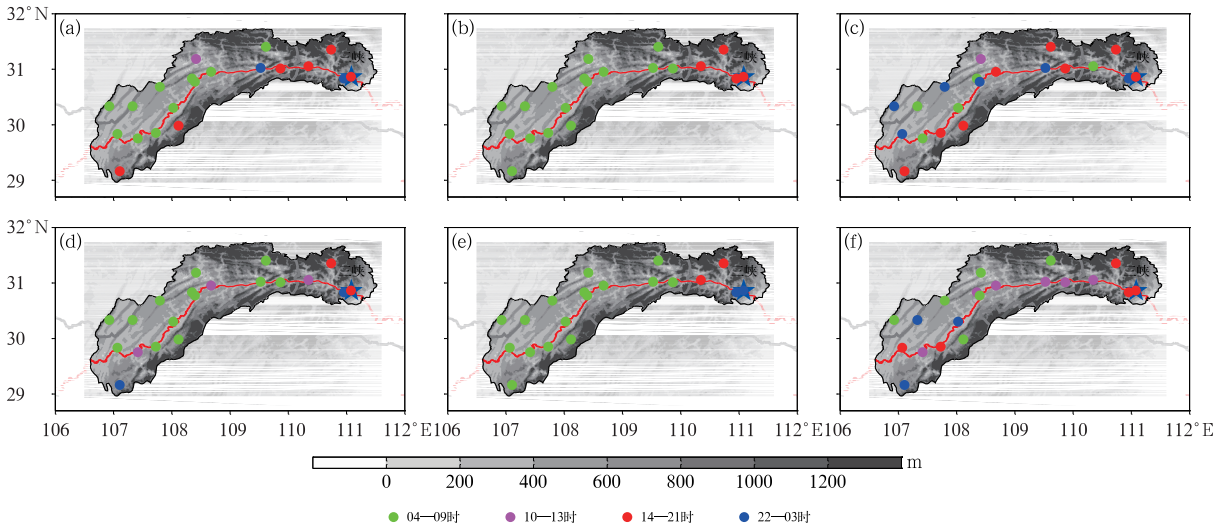
图 6 给出三峡库区蓄水前后夏季小时降水的降水量、频次、强度日变化峰值时间位相的空间分布。分析可知,蓄水前后三者的日变化峰值时间位相具有空间分布差异,其差异程度表现为降水强度>降水量>降水频次。具体而言,蓄水后较蓄水前降水量日变化峰值时间位相(图 6a,6d)出现在清晨(绿色)和中午(紫色)的站点增多,出现在下午(红色)的站点减少,且出现在中午(紫色)的站点分散在长江



注:红、绿色三角形分别表示增加、减少趋势,大三角形表示通过 0.05 的显著性水平检验;阴影表示地形。

图 5　1992—2021 年三峡库区(a~c)蓄水前,(d~f)蓄水后年均夏季小时降水的(a,d)降水量,(b,e)频次,(c,f)强度趋势系数(三角形)的空间分布

Fig. 5　Spatial distributions of trend coefficients of (a, d) precipitation, (b, e) frequency and (c, f) intensity of annual average hourly precipitation (a−c) before and (d−f) after impoundment in the Three Gorges Reservoir Area in summer from 1992 to 2021



注:不同颜色圆点表示峰值时间所在时段,阴影表示地形。

图 6 1992—2021 年三峡库区(a～c)蓄水前,(d～f)蓄水后夏季小时降水的(a,d)降水量,(b,e)频次,(c,f)强度日变化峰值时间位相(圆点)的空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of the diurnal peak phases of (a, d) precipitation, (b, e) frequency and (c, f) intensity of hourly precipitation (a—c) before and (d—f) after impoundment in the Three Gorges Reservoir Area in summer from 1992 to 2021

沿线附近,而库区西北部相对低海拔山区站点的降水量日变化峰值时间位相没有明显变化,仍然出现在清晨(绿色),表明蓄水后相对高海拔山区站点的降水量日变化峰值时间位相前移,相对低海拔山区站点的降水量日变化峰值时间位相没有明显变化。蓄水前后降水频次日变化峰值时间位相空间分布(图 6b,6e)没有明显变化,以大范围清晨(绿色)峰值时间位相为主,仅三峡站降水频次日变化峰值时间位相由蓄水前的下午(红色)变成蓄水后的夜间(蓝色)。蓄水后较蓄水前降水强度日变化峰值时间位相出现在清晨(绿色)和中午(紫色)的站点增多,出现在下午(红色)和夜间(蓝色)的站点减少,且出现在中午(紫色)的站点分散在长江沿线附近(图 6c,6f),表明蓄水后大部分站点的降水强度日变化峰值时间位相前移。

2.2 蓄水前后夏季不同等级小时降水变化特征

2.2.1 降水概率和降水占比

图 7 给出三峡库区蓄水前后夏季不同等级小时降水的降水概率和降水占比,降水概率、降水占比分别定义为某种等级的小时降水频次与总降水频次的比值,以及某种等级的小时降水量与总降水量的比值。分析可知,各等级小时降水的降水概率和降水占比在蓄水前后变化不明显。降水概率在蓄水前后均在[0.1,0.5)mm 等级最大,约为 42%;其次为[1,5)mm 等级,约为 31%;≥20 mm 等级最小,约

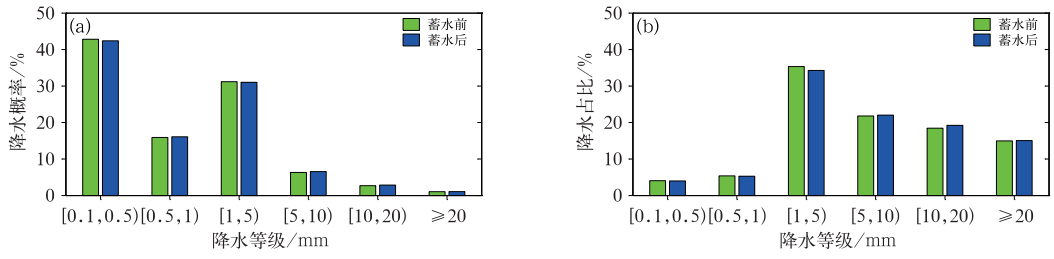


图 7 1992—2021 年三峡库区蓄水前后夏季不同等级小时降水的(a)降水概率和(b)降水占比

Fig. 7 Precipitation (a) probability and (b) proportion of different grades of hourly precipitation before and after the impoundment in the Three Gorges Reservoir Area in summer from 1992 to 2021

为 1%。降水占比随着降水等级的增强先增加后减少,在蓄水前后均在[1,5)mm 等级最大,约为 35%;其次为[5,10)mm 等级,约为 22%;[0.1,0.5)mm 等级最小,未超过 4%。值得注意的是,≥20 mm 等级的小时降水在三峡库区蓄水前后的降水概率虽然仅约为 1%,但其降水占比却达 15%,其突发性和高强度性容易造成区域性洪涝灾害,需要重点关注。

2.2.2　日变化特征

图 8 给出三峡库区蓄水前后夏季不同等级小时降水标准化的降水量、频次、强度日变化,分析可知,蓄水后小时降水的日变化特征更加明显,其中≥20 mm 等级的小时降水量和频次的双峰结构更为突出,峰值时间段比蓄水前延长,集中出现在 01—10 时和 15—21 时,其他等级的小时降水量和频次的峰值时间范围有扩大趋势,而各等级小时降水强度的次日尺度波动更频繁。如蓄水后[10,20)mm 等级的小时降水强度在 18—24 时出现峰值,[1,5)mm 等级的小时降水强度在 06—10 时出现峰值,[0.1,0.5)mm 等级的小时降水强度在 12—17 时出现峰值。由上可知,三峡库区蓄水前后各等级小时降水的日变化特征差异明显。这可能与库区蓄水后下垫面水域的扩大引起的局地水循环和能量循环有关,研究表明因水体的辐射性质、热容量、导热率等均与陆地不同,蓄水后水域的扩大会改变库区与大气之间的热交换,并引起水资源在时空上的重新分配,进而对降水变化造成影响(张静等,2019)。

综上所述,三峡库区蓄水前后夏季≥20 mm 等级的小时降水频次占比变化不大(均约为 1%),由年际变化及趋势(图略)分析可知,蓄水后夏季≥20 mm 等级的小时降水频次以 0.5 次·(10 a)$^{-1}$的变率增加,但其趋势系数未通过 0.05 的显著性水平检验,增加趋势均不显著。这与孟芳等(2018)研究得出的"三峡大坝蓄水后≥20 mm·h^{-1}短时强降水频次呈显著增多趋势"结论不同。此外,蓄水后夏季≥20 mm 等级的小时降水的降水量和频次的双峰结构更为突出,峰值时间段比蓄水前延长,集中出现在 01—10 时和 15—21 时。这与孟芳等(2018)研究指出的"≥20 mm·h^{-1}短时强降水频次在夜间至凌晨的高峰期比蓄水前延长 1～2 h,在 22—00 时频次大幅增加"的结论略有不同。究其原因,可能与研究选取的代表站、时段和季节不同有关。

2.3　蓄水前后夏季不同类型 HRE 变化特征

造成洪涝灾害的原因往往是持续一段时间的总降水量过大,即强度和历时的综合贡献(李争辉和罗亚丽,2021),因此超过一定强度和历时的强降水事件(HRE)容易造成气象及次生灾害,给人民生命财产安全造成严重威胁(Schumacher and Johnson, 2005)。下文将分析三峡库区蓄水前后夏季 HRE 变化特征。

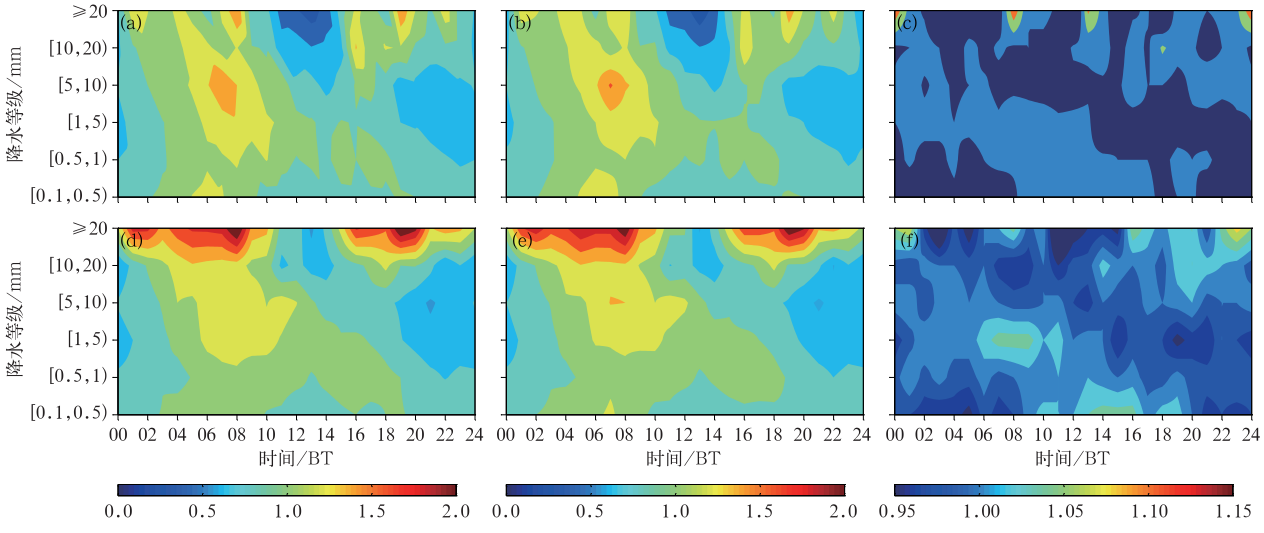


图 8　1992—2021 年三峡库区(a～c)蓄水前,(d～f)蓄水后夏季不同等级小时降水标准化的(a,d)降水量,(b,e)频次,(c,f)强度的日变化

Fig. 8　Diurnal variations of standardized (a, d) precipitation, (b, e) frequency and (c, f) intensity of different grades of hourly precipitation (a－c) before and (d－f) after impoundment in the Three Gorges Reservoir Area in summer from 1992 to 2021

2.3.1 统计特征

统计可得(表 1),1992—2021 年三峡库区夏季共发生 1300 次 HRE,其中蓄水前 486 次,蓄水后 814 次。无论蓄水前后,HRE 均是短历时型最多,占比超过 50%;中历时型次之,占比不足 30%;长历时型最少,占比不足 20%。HRE 在蓄水后较蓄水前,短历时型占比减少约 5.7%,中历时型占比增加约 0.4%,而长历时型占比增加约 5.3%。可见,三峡库区蓄水有利于 HRE 维持。进一步分析库区蓄水前后夏季不同历时类型 HRE 年均频次的空间分布(图略)可知,库区蓄水后长历时型 HRE 频次增加的站点主要位于库区中北部,即多位于长江以北地区,尤其是大巴山一带,与蓄水后总降水量、频次增加的区域一致(图 4d,4e)。

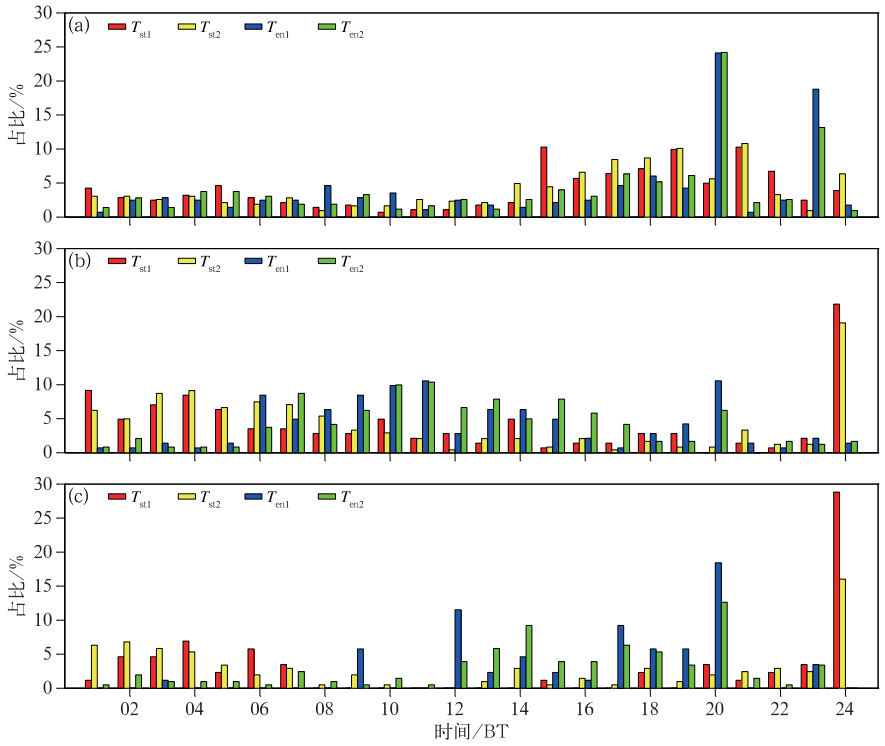
2.3.2 时间变化特征

分析三峡库区蓄水前后夏季三种类型 HRE 不同开始时间和结束时间的比例(图 9)可知,蓄水前后三种类型 HRE 的日变化特征明显不同。蓄水后较蓄水前,短历时型 HRE 在 10—21 时开始的比例增加,在 14—22 时结束的比例增加;中历时型 HRE 在 02—09 时开始的比例增加,在 10—17 时结束的比例增加;长历时型 HRE 在 01—03 时开始的比例增加,在 10—16 时结束的比例增加。表明蓄水后短历时型 HRE 在中午和下午开始的概率增加,在下午结束的概率增加;中历时型、长历时型 HRE 在清晨开始的概率增加,在中午和下午结束的概率增加。无论蓄水前后,短历时型 HRE 多开始于下午,中历时型、长历时型 HRE 多开始于夜间。

表 1 1992—2021 年三峡库区蓄水前后夏季不同历时类型 HRE 频次

Table 1 The frequencies of different duration types of HREs before and after the impoundment in the Three Gorges Reservoir Area in summer from 1992 to 2021

时段	短历时型		中历时型		长历时型		合计频次
	频次	占比	频次	占比	频次	占比	
蓄水前	282	58.0%	142	29.2%	62	12.8%	486
蓄水后	426	52.3%	241	29.6%	147	18.1%	814
合计	708	54.5%	383	29.5%	209	16.0%	1300



注:T_{st1}、T_{st2}分别表示蓄水前、蓄水后 HRE 开始时间,T_{en1}、T_{en2}分别表示蓄水前、蓄水后 HRE 结束时间。

图 9 1992—2021 年三峡库区蓄水前后夏季(a)短历时型,(b)中历时型,(c)长历时型 HRE 不同开始和结束时间的占比

Fig. 9 Proportion of different start and end times of (a) short-duration type, (b) medium-duration type and (c) long-duration type of HRE in the Three Gorges Reservoir Area in summer from 1992 to 2021

3　结论与讨论

本文利用国家气象信息中心小时降水资料,结合三峡库区地形的多样性,分析了库区蓄水前后夏季小时降水时空变化以及不同类型强降水事件(HRE)变化特征,得到主要结论如下:

(1)蓄水前后夏季小时降水的降水量、频次、强度的年际变化和空间分布有明显差异。蓄水后小时降水的降水量和频次减少,而强度增加,但三者的变化趋势均不显著。蓄水后降水变化存在明显的地理分布规律,降水量、频次、强度在库区中北部增加,且多位于长江以北地区,尤其是大巴山一带;降水量、频次在库区西南部减少,强度在库区中南部和西北部减弱,且多位于 31°N 以南。

(2)蓄水前后小时降水的降水量、频次、强度的日变化峰值时间位相具有空间分布差异,其差异程度表现为降水强度>降水量>降水频次,三者的趋势系数普遍表现为不显著。蓄水后降水量、频次、强度呈增加趋势的站点增多,且降水量和强度的日变化峰值时间位相在高海拔山区具有位相前移特征。

(3)蓄水前后各等级小时降水的降水概率和降水占比变化不明显,其中降水概率在[0.1,0.5)mm 等级最大(约为 42%),≥20 mm 等级最小(约为 1%),而降水占比在[1,5)mm 等级最大(约为 35%),[0.1,0.5)mm 等级最小(未超过 4%),≥20 mm 等级约为 15%。

(4)蓄水后夏季小时降水的日变化特征更加明显,其中≥20 mm 等级的小时降水量和频次集中出现在 01—10 时和 15—21 时,双峰结构更为突出,其余等级的小时降水量和频次的峰值时间范围有扩大趋势,而各等级小时降水强度的次日尺度波动更频繁。

(5)对不同历时类型的 HRE 分析发现,蓄水前后 HRE 均是短历时型最多(超过 50%),中历时型次之(不足 30%),长历时型最少(不足 20%)。蓄水后有利于 HRE 维持,短历时型占比减少约 5.7%,中历时型占比增加约 0.4%,而长历时型占比增加约 5.3%。

(6)蓄水前后短历时型 HRE 多开始于下午,中历型、长历时型 HRE 多开始于夜间。蓄水后短历时型 HRE 在中午和下午开始的概率增加,在下午结束的概率增加;中历时型、长历时型 HRE 在清晨开始的概率增加,在中午和下午结束的概率增加。

本文研究表明三峡库区蓄水后夏季小时降水的变化存在明显的地理分布规律,且日变化特征更加明显,有利于 HRE 维持。这种现象形成的原因可能与库区蓄水后水域扩大引起的局地水循环和能量循环变化有关。研究指出,库区蓄水后下垫面由原来的陆地转变为水面,而水体的辐射性质、热容、导热率等均与陆地不同,所以会改变库区与大气之间的热交换,且作为典型的河道型水库,蓄水后水体面积扩大,使得其与局地特殊地形相耦合造成水汽与风场的变化,引起局地水循环变化(张静等,2019;武慧铃等,2021;李超等,2022)。但库区蓄水后水域的扩大如何在地形的作用下改变库区与大气之间的水汽和热交换,进而影响库区的降水变化且有利于 HRE 维持,其中的物理机制有待进一步研究。

参考文献

陈鲜艳,宋连春,郭占峰,等,2013. 长江三峡库区和上游气候变化特点及其影响[J]. 长江流域资源与环境,22(11):1466-1471. Chen X Y, Song L C, Guo Z F, et al, 2013. Climate change over the Three Gorge Reservoir and upper Yangtze with its possible effect[J]. Resour Environ Yangtze Basin, 22(11): 1466-1471(in Chinese).

崔豪,王丽川,王贺佳,等,2021. 三峡库区蓄水前后实际蒸散发时空变化及其与气象因子关系分析[J]. 水土保持研究,28(4):193-202. Cui H, Wang L C, Wang H J, et al, 2021. Temporal and spatial changes of actual evapotranspiration and its relationship with meteorological factors in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Res Soil Water Conserv, 28(4): 193-202(in Chinese).

董钊煜,彭涛,董晓华,等,2020. 1960—2016 年三峡库区极端降水事件时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报,31(5):93-101. Dong Z Y, Peng T, Dong X H, et al, 2020. Spatiotemporal variation characteristics of extreme precipitation events in the Three Gorges Reservoir Area during 1960 - 2016[J]. J Water Resour Water Eng, 31(5): 93-101(in Chinese).

符坤,张六一,任强,2018. 蓄水前后三峡库区气候时空变化特征[J]. 环境影响评价,40(3):82-86,96. Fu K, Zhang L Y, Ren Q, 2018. Spatial and temporal characteristics of climate change in Three Gorges Reservoir Area before and after impoundment [J]. Environ Impact Assess, 40(3): 82-86, 96(in Chinese).

黄亚,2019. 三峡水库区域水文气候效应及其未来趋势预测[D]. 南宁:广西大学. Huang Y, 2019. Regional hydroclimatic effect and its trend prediction in the Three Corges Reservoir[D]. Nanning: Guangxi University(in Chinese).

矫梅燕,2014. 三峡工程气候效应综合评估报告[M]. 北京:气象出版社. Jiao M Y, 2014. Comprehensive Assessment Report on Climate Effect of Three Gorges Project[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).

李博,唐世浩,2014. 基于 TRMM 卫星资料分析三峡蓄水前后的局地降水变化[J]. 长江流域资源与环境,23(5):617-625. Li B, Tang S H, 2014. Local precipitation changes induced by the Three Gorges Reservoir based on TRMM observations[J].

Resour Environ Yangtze Basin,23(5):617-625(in Chinese).

李超,崔春光,徐慧燕,等,2022.河南"21·7"特大暴雨水汽输送、收支和转化特征对局地强降水的影响机制研究[J].气象,48(12):1497-1511. Li C,Cui C G,Xu H Y,et al,2022. Characteristics associated with the transport,budget,conversion of water vapor and their impact on localized precipitation during the Henan severe torrential rain event on 20 July 2021[J]. Meteor Mon,48(12):1497-1511(in Chinese).

李争辉,罗亚丽,2021.1980—2017年南海季风爆发前后华南前汛期降水统计特征对比分析[J].暴雨灾害,40(2):101-110. Li Z H,Luo Y L,2021. Statistical characteristics of pre-summer rainfall over South China before and after South China Sea monsoon onset from 1980 to 2017[J]. Torr Rain Dis,40(2):101-110(in Chinese).

孟芳,罗剑琴,雷东洋,2018.三峡大坝周边蓄水前后短时强降水变化特征分析[C]//2018年全国重大天气过程总结和预报技术经验交流会论文集.南昌:中国气象学会. Meng F,Luo J Q,Lei D Y,2018. Analysis of the change characteristics of short-term heavy precipitation around the Three Gorges Dam before and after water storage[C]//National Major Weather Process Summary and Forecast Technology Experience Exchange Conference in 2018. Nanchang:Chinese Meteorological Society(in Chinese).

孙晨,刘敏,2018.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,27(9):1998-2013. Sun C,Liu M,2018. Applications of reanalysis data in the study of climate effect over the Three Gorges Reservoir Area[J]. Resour Environ Yangtze Basin,27(9):1998-2013(in Chinese).

唐永兰,徐桂荣,王晓芳,等,2023.1992—2021年三峡库区夏季小时强降水时空分布特征[J].干旱气象,41(4):589-598. Tang Y L,Xu G R,Wang X F,et al,2023. Spatio-temporal distribution characteristics of summer hourly heavy rainfall in the Three Gorges Reservoir Area from 1992 to 2021[J]. J Arid Meteor,41(4):589-598(in Chinese).

王若瑜,谭云廷,程炳岩,等,2017.基于高分辨率区域气候模式的三峡库区降水变化模拟与预估[J].干旱气象,35(2):291-298. Wang R Y,Tan Y T,Cheng B Y,et al,2017. Simulation and projection of precipitation change in the Three Gorges Area based on high-resolution regional climate model[J]. J Arid Meteor,35(2):291-298(in Chinese).

伍红雨,李芷卉,李文媛,等,2020.基于区域自动气象站的广东极端强降水特征分析[J].气象,46(6):801-812. Wu H Y,Li Z H,Li W Y,et al,2020. Characteristics analysis of extremly severe precipitation based on regional automatic weather stations in Guangdong[J]. Meteor Mon,46(6):801-812(in Chinese).

武慧铃,周建中,田梦琦,等,2021.三峡水库蓄水前后气候变化分析[J].水力发电,47(5):30-35. Wu H L,Zhou J Z,Tian M Q,et al,2021. Analysis of climate change before and after the impoundment of the Three Gorges Reservoir[J]. Water Power,47(5):30-35(in Chinese).

宇如聪,李建,2016.中国大陆日降水峰值时间位相的区域特征分析[J].气象学报,74(1):18-30. Yu R C,Li J,2016. Regional characteristics of diurnal peak phases of precipitation over contiguous China[J]. Acta Meteor Sin,74(1):18-30(in Chinese).

张静,刘增进,肖伟华,等,2019.三峡水库蓄水后库区气候要素变化趋势分析[J].人民长江,50(3):113-116,165. Zhang J,Liu Z J,Xiao W H,et al,2019. Analysis on variation trend of climate factors in Three Gorges Reservoir Area after impoundment[J]. Yangtze River,50(3):113-116,165(in Chinese).

张强,赵煜飞,范邵华,2016.中国国家级气象台站小时降水数据集研制[J].暴雨灾害,35(2):182-186. Zhang Q,Zhao Y F,Fan S H,2016. Development of hourly precipitation datasets for national meteorological stations in China[J]. Torr Rain Dis,35(2):182-186(in Chinese).

张天宇,桂术,杨若文,等,2020.TRMM和CMORPH卫星资料对三峡库区降水的评估分析[J].气象,46(8):1098-1112. Zhang T Y,Gui S,Yang R W,et al,2020. Assessment of precipitation in the Three Gorges Reservoir Area with TRMM and CMORPH satellite data[J]. Meteor Mon,46(8):1098-1112(in Chinese).

张天宇,王雨潇,孙营营,等,2023.1998—2020年三峡库区小时极端降水时空变化特征分析[J].高原气象,42(1):108-115. Zhang T Y,Wang Y X,Sun Y Y,et al,2023. Temporal and spatial variation characteristics of hourly extreme precipitation in the Three Gorges Region in 1998－2020[J]. Plateau Meteor,42(1):108-115(in Chinese).

郑衍欣,李双林,张超,2018.三峡库区春季连阴雨气候趋势分析[J].暴雨灾害,37(4):364-372. Zheng Y X,Li S L,Zhang C,2018. Climatic trend analysis of consecutive rainfall events in spring over Three Gorges Reservoir Area[J]. Torr Rain Dis,37(4):364-372(in Chinese).

郑永光,陶祖钰,俞小鼎,2017.强对流天气预报的一些基本问题[J].气象,43(6):641-652. Zheng Y G,Tao Z Y,Yu X D,2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting[J]. Meteor Mon,43(6):641-652(in Chinese).

Li J,Yu R C,Zhou T J,2008. Seasonal variation of the diurnal cycle of rainfall in southern contiguous China[J]. J Climate,21(22):6036-6043.

Schumacher R S,Johnson R H,2005. Organization and environmental properties of extreme-rain-producing mesoscale convective systems[J]. Mon Wea Rev,133(4):961-976.

Tang Y L,Xu G R,Wan R,et al,2022. Characteristics of summer hourly precipitation under different urbanization background in central China[J]. Sci Rep,12(1):7551.

Wu L G,Zhang Q,Jiang Z H,2006. Three Gorges Dam affects regional precipitation[J]. Geophys Res Lett,33(13):L13806.

Zheng Y G,Gong Y D,Chen J,et al,2019. Warm-season diurnal variations of total,stratiform,convective,and extreme hourly precipitation over central and eastern China[J]. Adv Atmos Sci,36(2):143-159.

Zheng Y X,Li S L,Keenlyside N,et al,2024. Projecting spring consecutive rainfall events in the Three Gorges Reservoir based on triple-nested dynamical downscaling[J]. Adv Atmos Sci,41(3):520-531.

(本文责编:何晓欢)