

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.01.002

1998—2020 年三峡库区最大 1 h 降水的时空变化特征

王雨潇¹, 孙莹莹¹, 张天宇², 刘波¹, 王文鹏^{1,3}, 蒋佳怡¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 重庆市气候中心, 重庆 401147;

3. 水利部水利大数据重点实验室(河海大学), 江苏 南京 211100)

摘要: 以年、月最大 1 h 降水强度及其发生时间为指标, 采用趋势检验、周期分析、经验正交函数和降水过程综合强度评估方法, 分析了 1998—2020 年三峡库区最大 1 h 降水的时空变化特征。结果表明: 库区年最大 1 h 降水发生时间有每隔约 10 a 前移至汛前的现象, 主汛期 7 月最大 1 h 降水强度有 8 a 的循环周期; 与 2010 年以前比, 2010 年后的库区强降水落区表现出自上游向坝址迁移的走势; 若最大 1 h 降水强度相近, 则降水持续时间长、覆盖范围广的降水过程, 综合强度更高, 对防洪安全影响更大。

关键词: 三峡库区; 最大 1 h 降水量; 降水过程综合强度; EOF 分析; 时空变化

中图分类号: P426.6 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2023)01-0010-09

Temporal and spatial variations of maximum one-hour precipitation in the Three Gorges Reservoir Region from 1998 to 2020

WANG Yuxiao¹, SUN Yingying¹, ZHANG Tianyu², LIU Bo¹, WANG Wenpeng^{1,3}, JIANG Jiayi¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Chongqing Climate Center, Chongqing 401147, China;

3. Key Laboratory of Water Conservancy Big Data of Ministry of Water Resources, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Taking the annual and monthly maximum one-hour precipitation intensity and its occurrence time as indexes, the temporal and spatial variation characteristics of the maximum one-hour precipitation in the Three Gorges Reservoir (TGRR) from 1998 to 2020 were explored by using the trend test, period analysis, empirical orthogonal function and comprehensive intensity assessment of precipitation process. The results show that the occurrence time of the maximum one-hour precipitation in the reservoir area moves to the pre-flood period every 10 years, and the maximum one-hour precipitation intensity in the main flood season in July has an 8-year cycle. Compared with that before 2010, the heavy precipitation area in the reservoir area shows a trend of migration from the upstream to the dam site after 2010. The maximum precipitation intensity of one hour is close, but the precipitation process with long duration and wide coverage has higher comprehensive intensity and has more impact on flood control safety.

Key words: Three Gorges Reservoir Region; maximum one-hour precipitation; comprehensive intensity of precipitation process; EOF analysis; temporal and spatial variations

三峡库区属亚热带季风区, 降水丰沛, 雨热同期, 短时强降水时有发生^[1-3]。地形多以山地为主, 陡坡比例较高, 地质灾害多发。短时强降水是诱发山区泥石流、滑坡等地质灾害的重要因素^[4-6], 位于库区上游的重庆 90% 以上的滑坡等地质灾害均由强降水诱发^[7]。短时强降水还是影响洪峰的关键因素, 最大 1 h 降水对洪峰流量的贡献率可达 40% 以上^[8], 长江流域汛期和枯水期的径流变化幅度近年来有所增加^[9]。短时强降水如果发展为区域性、高强度持续发生的强降水事件, 则引发洪涝灾害规模和损失尤甚^[10]。2021 年郑州“7·20”特大暴雨中, 当日 12:00 至 18:00 连续出现高于 80 mm/h 强降水, 是突破城市防洪排涝能力阈值的关键原因

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3900601); 三峡气候监测项目(SK2021015); 中央高校基本科研业务费专项(B220201028)

作者简介: 王雨潇(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事水资源评价与管理研究。E-mail: wangyuxiao2020@foxmail.com

通信作者: 刘波(1980—), 女, 副教授, 博士, 主要从事水资源评价与管理研究。E-mail: bobol3705@163.com

引用本文: 王雨潇, 孙莹莹, 张天宇, 等. 1998—2020 年三峡库区最大 1 h 降水的时空变化特征[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1):10-18.

WANG Yuxiao, SUN Yingying, ZHANG Tianyu, et al. Temporal and spatial variations of maximum one-hour precipitation in the Three Gorges Reservoir Region from 1998 to 2020[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(1):10-18.

之一^[11-12]。强降水事件发生在三峡库区,不仅容易诱发库区陡坡的地质灾害,也将直接形成入库洪水。由于库区没有调节洪水的其他工程手段,三峡水库必须独立面对区间强降水引发的防洪安全挑战^[13-17]。

围绕长江流域、西南地区及三峡库区,已有研究关注区域强降水事件的形成和发展,初步揭示了该地区强降水事件的时空分布特征。从降水事件的时程变化来看,西南地区每年 5—10 月是暴雨多发季节,其中夏季暴雨发生频次最多,强度最大^[18-19],秋季降水量呈现减少的趋势^[20],长江中上游一带的年降水量近年来存在减小趋势,但极端降水强度并未减弱,随机波动较大^[21];三峡库区的汛期持续降水事件处于强度增加、循环周期缩短的演化方向^[1]。从降水事件的空间结构来看,长江流域存在 3 个极端降水中心,即四川盆地、洞庭湖盆地和包括鄱阳湖盆地、大别山南麓在内的大三角地区^[22],其中重庆和三峡库区短历时降水强度的空间分布差异较大^[23],重庆市小时强降水多发生在东南部与西部,东北部与中部发生频次较低^[24],且存在东西和南北反相变化的情况^[25],库区内大部分高海拔站点的极端降水频次呈减少趋势^[26],降水极值的发生时间也自西向东逐渐延迟^[27-28]。

目前的研究成果多为日尺度,对小时尺度的强降水特征研究尚不多见。三峡库区降水形成洪水的时间短,突发强降水给三峡水库调洪应对的时间十分有限,一旦与长江干流来水叠加形成高峰洪水,容易突破三峡水库的防洪高水位阈值。库区强降水不仅是三峡水库防洪,亦是中游荆江和城陵矶等重点断面防洪补偿调节的重要考虑因素。本文采用趋势检验、周期分析、经验正交函数等方法分析库区年、月最大 1 h 降水的时空变化特征,利用降水过程综合强度评估方法,分析典型过程性降水的综合强度,以期优化三峡库区的雨量站网布局和动态调整库区洪水预报方案、综合运用库区防洪减灾措施提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况与数据源

三峡水库地处长江中下游平原与四川盆地交界。库区跨越鄂中山区峡谷及川东岭谷地带,北屏大巴山,南依川鄂高原,海拔落差较大,地质条件复杂。库区地处亚热带湿润季风气候区,具有降水丰沛、雨热同期、强降水多突发的特点。库区多年平均降水量为 1 200 mm,降水空间分布特点为江河谷少雨,外围山地多雨^[29]。

库区建有 35 个国家基本气象观测站,其中湖北省秭归、鹤峰等有 12 个,重庆市武隆、綦江等有 23 个(图 1)。研究采用库区 35 个国家气象站 1998—2020 年逐小时实测降水资料,数据都经过了严格的质量控制和检查,数据可靠性和准确性良好。

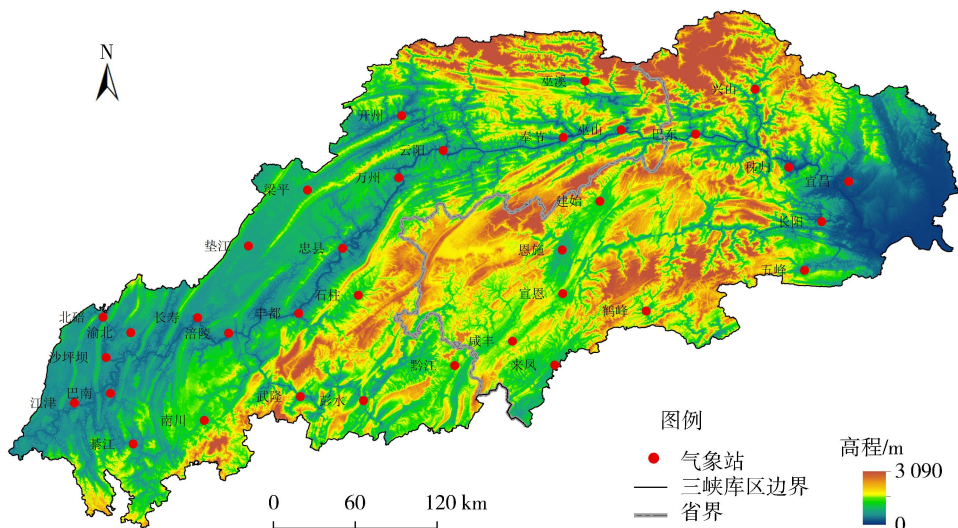


图 1 三峡库区地形及气象站点分布

Fig. 1 Distribution of topography and meteorological stations across the Three Gorges Reservoir Region

1.2 研究方法

1.2.1 趋势检验

Sen's 斜率估计法主要用于分析气候水文要素的趋势性变化方向和强度。对于观测序列 (x_1, x_2, \dots, x_n) ,用式(1)估计斜率 β ,表征序列的趋势变化强度。当 $\beta > 0$ 时,序列呈上升趋势; $\beta < 0$ 时,序列呈下降趋势;

若 $\beta \approx 0$, 可认为序列趋势变化很小^[30]。趋势统计显著性评价采用 Mann-Kendall 秩次相关检验方法。

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad (\forall j > i) \quad (1)$$

式中 Median 表示对序列两两比较后, 取中值。与均值函数相比, 中值特征量受序列异常值的影响小, 对偏态分布的适用性更强, 适合用于气候水文序列的趋势分析。

1.2.2 周期分析

Morlet 小波分析常用于分析气候水文要素的周期特征。Morlet 小波定义如下^[31]:

$$W_f = \frac{1}{\sqrt{m_R}} \int f(t) e^{kc(\frac{t-n}{m})} e^{\frac{i}{m}(\frac{t-n}{m})^2} dt \quad (2)$$

式中: W_f 为小波变换系数; m 为尺度因子, 表示小波周期长度; n 为时间因子, 反映时间上的平移; c 为常数; t 为时间; R 为积分上限; k 为常数。

Morlet 小波属于复数小波, 包括模和实部 2 个重要变量。模的大小表征时间尺度变化显著情况, 本文采用模平方的时频分布图对周期性大小进行判断。

1.2.3 经验正交函数法

经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)法^[32]是一种从描述事件的多维数据结构中提取事件关键特征的方法。特征提取结果以特征向量表示, 又称为模态。特征强度以特征根表示, 某个特征的特征根占比越大, 则该特征对事件变化的贡献率越高, 解释力越强。

对于用时空数据描述的气候水文事件, EOF 法可将事件观测数据分解为空间模态和时间系数两部分。空间模态反映事件不随时间变化的空间特征; 时间系数反映模态强度随时间的变化过程。

当区域内各站点空间模态符号一致时, 表明区域各站事件变化方向一致, 同步增多或减少; 空间模态符号不一致, 指示区域各站事件不是同向变化。比如降水事件, 若空间模态为正的站点降水偏多, 则空间模态为负的站点降水偏少; 反之亦然。当时间系数增大时, 说明该空间模态的典型性加强; 当时间系数减小时, 则模态的典型性减弱。

采用 North 规则对空间模态进行统计显著性检验:

$$\Delta\lambda = \lambda(2/N)^{1/2} \quad (3)$$

式中: λ 为模态的特征根; N 为数据的有效自由度。按顺序依次检查 λ 及其误差区间, 如果前后 2 个 λ 误差区间没有重叠, 则该模态通过显著性检验, 认为该事件在所分析的时空范围内形成了统计意义显著的空间模态。

1.2.4 降水过程综合强度评估方法

降水过程综合强度评估方法有机整合了降水强度、持续时间和覆盖范围 3 个方面的降水时空信息, 是评估区域过程性降水等级的新方法^[33-34]。该评估方法主要包括以下步骤:

a. 站点降水过程辨识。以同时满足以下 2 个条件为准则, 识别站点降水过程: ①站点日降水量达到历史日降水量从小到大排序 90 百分位值; ②站点降水过程起始时刻定义为 1 h 降水量达到历史小时降水量从小到大排序 80 百分位值, 结束时刻定义为连续 8 h 以上没有达到 80 百分位值。

b. 计算单站综合降水强度指数 S 。 S 定义为降水强度指数 I 和持续降水时间指数 T 之积:

$$S = IT \quad (4)$$

$$\text{其中} \quad I = \frac{aI_{1\max} + bI_{\text{滑动}3\max} + c'I_{\text{滑动}6\max} + dI_{\text{过程平均}}}{a + b + c' + d} \quad T = \sum_{i'=1}^h K^{i'}$$

式中: $I_{1\max}$ 、 $I_{\text{滑动}3\max}$ 、 $I_{\text{滑动}6\max}$ 、 $I_{\text{过程平均}}$ 分别为降水过程最大 1 h 降水量、降水过程滑动最大 3 h 降水量、降水过程滑动最大 6 h 降水量、降水过程平均降水量; a 、 b 、 c' 、 d 为权重, 均取为 0.25; K 为降水衰减指数, 取为 0.98^[35]; h 为降水过程的小时数。

c. 计算区域综合降水强度指数 P 。区域综合降水强度指数为综合降水强度、覆盖范围和持续时间 3 项指标的一个综合指数, 计算式为

$$P = \frac{10w}{W} \left(\sum_{l=1}^w \frac{S_l}{w} \right) \quad (5)$$

式中: w 为降水过程覆盖区域的站点数; W 为区域站点总数。

d. 降水过程综合强度等级划分。将单站综合强度指数(S)和区域综合强度指数(P)划分为极端、特强、强、较强、中等 5 个等级(表 1)。等级划分阈值根据我国 2410 个国家气象站长期观测资料,按照降水发生概率 1%、5%、10%、15%、69% 划定^[34]。

2 结果与分析

2.1 年(月)最大 1 h 降水的时程变化

按照 GB/T28592—2012《降水量等级》,12 h 降水量 5~15 mm 降雨过程称为中雨,超过 15 mm 为大雨,超过 30 mm 即为暴雨。参考上述标准,若降水强度超过 20 mm/h,可认为该降水过程易发展为暴雨;若超过 40 mm/h,则指示该降水过程很可能已经发展为大暴雨或特大暴雨,是水库防汛关注的重要阈值。

根据观测资料,三峡库区 1998—2020 年间冬季(12 月至次年 2 月)未出现降水强度超过 20 mm/h 的情况,故而重点分析 3—11 月最大 1 h 降水强度的逐年变化趋势,以及年最大 1 h 降水强度及其出现时间。1998—2020 期间,库区年最大降水强度平均为 74.5 mm/h,降水强度未被检出显著的趋势变化。年最大 1 h 降水集中发生在 6—9 月汛期,发生在 7 月的频次最高。需要注意的是,1998 年最大 1 h 降水发生在汛期起始的 6 月,2007 年和 2018 年最大 1 h 降水的发生时间都提前到了汛前的 4—5 月,仅从本次分析期间观察,年最大 1 h 降水发生时间大约每隔 10 a 就会有一次前移,这是否表征了库区暴雨形成系统的周期性改变值得持续跟踪分析研判。

由图 2 月降水强度等值面可知,1998—2020 期间汛期各月最大降水强度大多大于或等于 40 mm/h,有 20 个年份至少 1 个月的最大降水强度超过了 60 mm/h,有 10 个年份不少于 2 个月的最大降水强度超过了 60 mm/h。1998 年长江流域发生特大洪水,不仅库区年最大 1 h 降水强度(114.6 mm/h)为 1998—2020 年间之最(表 2),且汛期 7 月、8 月最小降水强度都超过了 80 mm/h,月最大 1 h 降水强度指标反映了当时气候异常导致流域持续大范围降水的严峻防洪态势。

分析各月最大 1 h 降水强度的趋势和周期变化,发现 8 月最大 1 h 降水强度有所减少,降水强度减少趋势通过了 90% 置信水平的显著性检验;7 月最大 1 h 降水强度检测出约 8 a 的周期,表现为前 4 a 高于 60 mm/h,随后 4 a 低于 60 mm/h,正反位交替出现的周期性变化(图 3)。

2.2 年(月)最大 1 h 降水的空间变化

由图 4 可知,库区年最大 1 h 降水强度的空间分布呈现东西高,中间低的格局。降水强度最高的区域位于库区东部山区建始—长阳一带,年最大 1 h 降水强度多年均值达 40~45 mm/h。库区腹地渝鄂交界处的多年平均降水强度最低,不足 30 mm/h。以 2000

表 1 单站和区域降水过程综合强度等级划分

Table 1 Grade classification of comprehensive intensity of precipitation process at the station level and region level

单站综合强度指数	区域综合强度指数	等级
<30	<80	中等
30~<50	80~<180	较强
50~<90	180~<400	强
90~<150	400~<800	特强
≥150	≥800	极端

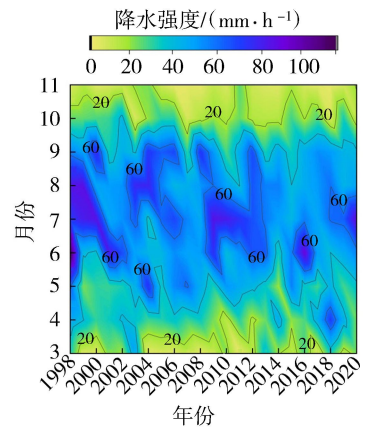


图 2 各月最大 1 h 降水强度时程变化
Fig. 2 Temporal variation of monthly maximum one-hour precipitation

表 2 1998—2020 年间年最大 1 h 降水量及其出现月份

Table 2 Annual maximum one-hour precipitation and its occurrence month from 1998 to 2020

年份	年最大 1 h 降水量/mm	出现月份	年份	年最大 1 h 降水量/mm	出现月份
1998	114.6	6	2010	81.4	7
1999	85.5	8	2011	74.3	7
2000	84.7	7	2012	67.8	9
2001	82.3	6	2013	64.7	6
2002	67.4	6	2014	57.5	8
2003	78.0	8	2015	57.2	6
2004	78.9	5	2016	90.0	6
2005	64.2	9	2017	54.0	9
2006	68.9	7	2018	70.9	4
2007	61.1	5	2019	63.1	7
2008	73.1	9	2020	88.5	7
2009	84.8	7			

年和 2010 年为分界,将研究期划分为 3 个年代际,年最大 1 h 降水发生位置呈现自西部上游向东部下游迁移的走势。1998—2000 年,库区年最大 1 h 降水落区位于库区西北部的渝北、梁平、开州站;2001—2010 年,落区移至库区腹地的开州、彭水一线;2011—2020 年,最大 1 h 降水落区转移到距三峡坝址更近的湖北省境内。库区强降水落区向坝址迁移的走势如果继续发展,对于三峡水库甚至中游荆江段的防洪都十分不利。

主汛期 7 月最大 1 h 降水强度的空间分布格局呈东部高、西部低的态势(图 5)。在库区东部山区建始—长阳一带,7 月最大降水强度的多年均值可达 40 mm/h。长江干流沿岸的石柱—丰都一带的 7 月最大降水强度最小,低于 28 mm/h。从各站点降水强度的年际变化方向来看,沿长江干流各站的降水强度有所减小,而支流嘉陵江北碛、乌江武隆和彭水、坝址附近的建始和秭归等站降水强度有所增加。各站降水强度的变化均没有通过趋势显著性检验,统计意义下还没有形成确定性的趋势性变化。

三峡库区短时强降水成因机制复杂,受到不同尺度天气、气候过程及下垫面的共同作用。目前对三峡建库及蓄水前后对三峡库区气候及降水的影响问题,不少学者已开展了一定研究并持有不同观点。Wu 等^[36]研究表明在三峡大坝建成后坝址附近的降水有所减少,且水库建成后水体下垫面面积大幅度增加所产生的局地效应^[37]、大气环流背景的改变、水库水温垂向差异变化均会造成库区降水、气候及生态的变化^[38-39]。陈鲜艳等^[40-42]研究表明水库蓄水后局部降水并无明显变化,水库本身对周围的气温、降水影响并不大^[43]。

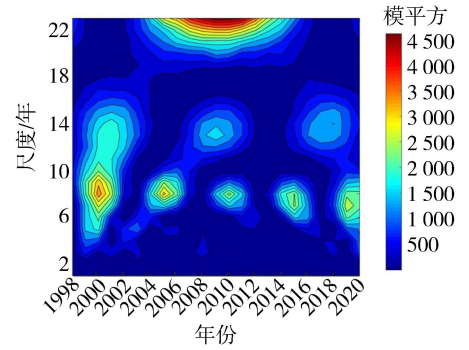


图 3 7 月最大 1 h 降水强度小波系数模平方
Fig. 3 Wavelet modulus square of maximum one-hour precipitation in July

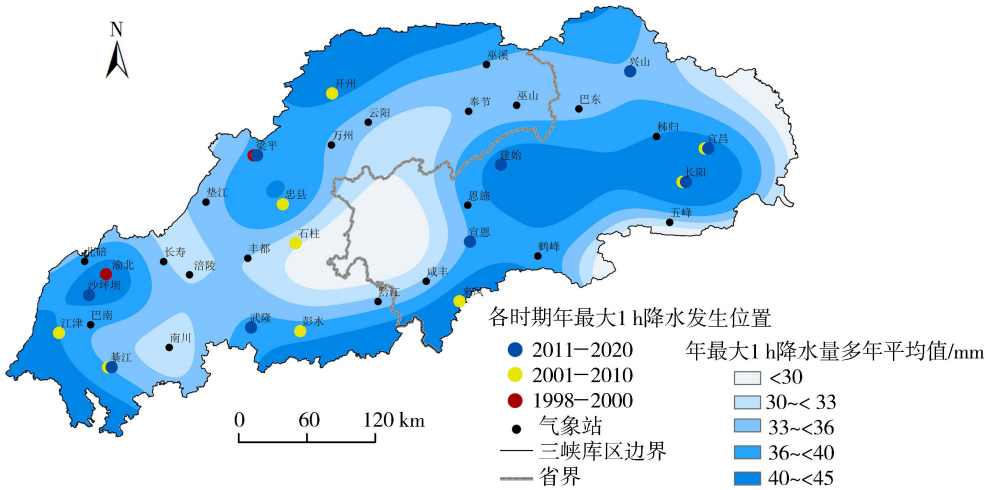


图 4 库区年最大 1 h 降水强度均值空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of mean of annual maximum one-hour precipitation in the TGRR

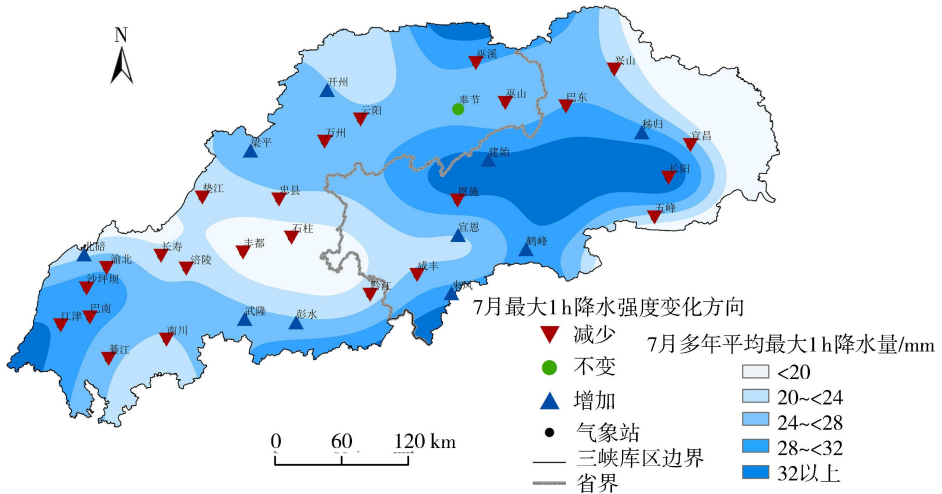


图 5 库区 7 月多年平均最大 1 h 降水强度空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of multi-year average one-hour precipitation in July in the TGRR

2.3 年最大 1 h 降水强度的 EOF 分析

对年最大 1 h 降水强度指标进行 EOF 分析,结果见图 6。根据 North 检验准则,EOF 分解的 10 个特征向量都没有通过显著性检验,年最大 1 h 降水强度指标没有展现出一致的空间分布模态。从统计学角度来看,强降水落区在库区是随机分布的,尚未形成可供预测的模式信息。

不过 EOF 解构的特征向量模态仍可为分析库区强降水落区的空间迁移过程提供参考。将分析期划分为 1998—2009 年和 2010—2020 年两段时期,分别进行 EOF 分析,结果见图 7。2 个时期 EOF 第一模态都呈现条块状分布,方差贡献率分别为 22.3% 和 22.7%。2010 年前,时间系数呈上升趋势,表明第一模态的典型性在增强;2010 年后,第一模态的时间系数呈下降趋势,则该模态的典型性在减弱。虽然 2 个时期降水落区空间分布没有形成一致的空间模态,但是 2010 年以前特征向量为正的区域在 2010 年以后大多转为负值,或者特征向量为负的区域转换为正值,指示 2010 年前后强降水落区可能发生了明显移动。结合年最大 1 h 降水历年发生位置的分析结果,推断与 2010 年以前相比,强降水落区出现了向东部坝址附近迁移的态势,需引起三峡水库防汛决策部门的警惕。

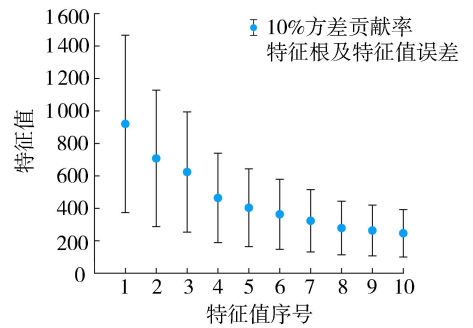


图 6 年最大 1 h 降水强度 EOF 分解特征值方差贡献率

Fig. 6 Variance contribution rate of EOF decomposed eigenvalues for annual maximum 1-hour precipitation

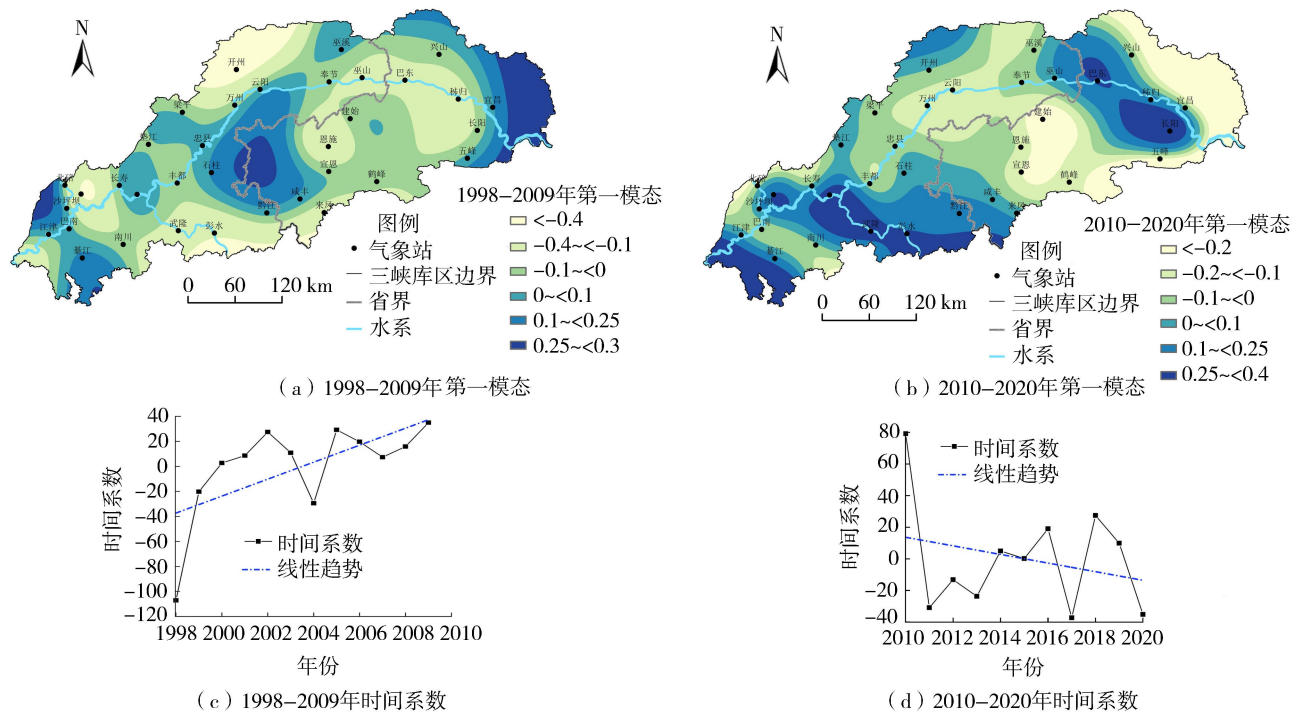


图 7 年最大 1 h 降水强度 EOF 分解第一模态空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of EOF decomposed first mode of annual maximum one-hour precipitation

2.4 典型降水过程的综合强度分析

最大 1 h 降水强度是识别强降水过程最直接的指标之一,在此基础上,可进一步综合考虑过程性降水的总量、持续时间、覆盖范围等多维指标,分析过程性降水的综合强度,为洪水预报和灾情预估提供更为全面的降水评估信息。

应用降水过程辨识方法,将 2018 年最大 1 h 降水的相应过程(4 月 21 日 20 时至 25 日 17 时)和主汛期 7 月最大 1 h 降水的相应过程(7 月 25 日 11 时至 8 月 4 日 7 时)作为典型,分析 2 场降水过程的综合强度,站点综合降水强度指数 S 计算结果见图 8。4 月强降水过程中,54.3% 以上范围的综合降水强度在“强级”以上,降水持续时间 93 h,区域综合降水强度指数 P 为 354.57,区域降水过程综合强度评估为“强级”。区域最

高强度降水发生在长阳站, S 指数 154.6, 达到“极端级”。7 月强降水过程中, 65.7% 以上范围的综合降水强度达到了“特强级”以上, 降水持续时间 236 h, 区域综合降水强度指数 P 为 1268.1, 区域降水过程综合强度评估为“极端级”。区域最高强度降水发生在巴东站, S 指数 360.29, 也达到了“极端级”。由此可见, 虽然 2018 年最大 1 h 降水发生在汛前 4 月, 但通常而言, 主汛期 7 月降水过程的持续时间更长, 强降水覆盖范围更广, 降水过程的综合强度更高, 更容易形成持续性的库区洪水。因此, 在关注最大 1 h 降水指标的同时, 也应加强降水过程综合强度指标的分析评估, 不可忽视汛期持续大范围降水过程的致灾效应。

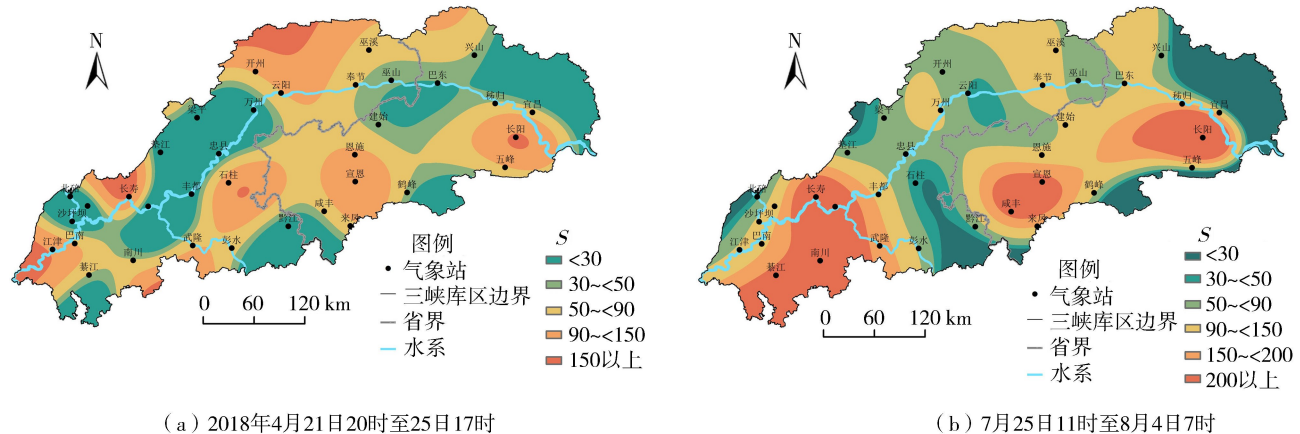


图8 库区站点降水过程综合强度指数(S)分布

Fig.8 Spatial Distribution of comprehensive intensity index (S) of rainfall processes at stations in the TGRR

3 结 论

- 大约每隔 10 a, 三峡库区年最大 1 h 降水发生时间有前移到汛前的现象, 主汛期 7 月最大 1 h 降水强度存在 8 a 周期性变化, 可作为三峡水库防洪情势预判的参考, 其成因值得进一步研究和证实。
- 库区强降水落区表现出自上游向坝址迁移的走势, 近 10 a 最大 1 h 降水落区主要位于坝址附近的湖北省境内, 需关注强降水落区的空间转移对三峡水库和中游荆江段的防洪安全影响。
- 重视过程性降水综合强度的评估方法研究, 最大 1 h 降水强度中等, 但降水持续时间长、覆盖范围广泛的降水过程, 综合强度更高, 对防洪安全影响更甚。

参考文献:

- [1] 董钊煜, 彭涛, 董晓华, 等. 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, 2020, 31(5): 93-101. (DONG Zhaoyu, PENG Tao, DONG Xiaohua, et al. Temporal and spatial variations of extreme precipitation events in the Three Gorges Reservoir Area from 1960 to 2016[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(5): 93-101. (in Chinese))
- [2] CHEN Shaoying, YAN Yan, LIU Gang, et al. Spatiotemporal characteristics of precipitation diurnal variations in Chongqing with complex terrain[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 137(1): 1217-1231.
- [3] 方德贤, 董新宁, 邓承之, 等. 2008—2016 年重庆地区降水时空分布特征[J]. 大气科学, 2020, 44(2): 327-340. (FANG Dexian, DONG Xinling, DENG Chengzhi, et al. Spatial and temporal distribution of precipitation in Chongqing from 2008 to 2016 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2020, 44(2): 327-340. (in Chinese))
- [4] 刘宪周. 陕西彬县百子沟滑坡预报的尝试[J]. 灾害学, 1998, 13(1): 53-56. (LIU Xianzhou. Prediction of baizigou landslide in Binxian County, Shaanxi Province[J]. Journal of Catastrophology, 1998, 13(1): 53-56. (in Chinese))
- [5] 李观德. 昭通地区滑坡泥石流预警系统及其减灾效益分析[J]. 灾害学, 1998, 13(1): 50-52. (LI Guande. Analysis of landslide debris flow early warning system and its mitigation efficiency in Zhaotong Area [J]. Journal of Catastrophology, 1998, 13(1): 50-52. (in Chinese))
- [6] 钟正雄. 水库岸坡变形体灾害的信息评价和预测[J]. 灾害学, 1998, 13(1): 13-17. (ZHONG Zhengxiang. Information evaluation and prediction of deformation deformation of reservoir bank slope[J]. Journal of Catastrophology, 1998, 13(1): 13-17. (in Chinese))
- [7] 周国兵, 马力, 廖代强. 重庆市山体滑坡气象条件等级预报业务系统[J]. 应用气象学报, 2003, 14(1): 122-124. (ZHOU

- Guobing, MA Li, LIAO Daiqiang. Chongqing landslide meteorological condition grade forecast system[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2003, 14(1): 122-124. (in Chinese)
- [8] 杨悦莹, 朱志华, 蔡宴朋, 等. 城市流域径流峰值对降雨时空异质性的响应[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 27-33. (YANG Yueying, ZHU Zhihua, CAI Yanpeng, et al. Study on the relationship between runoff peak value and temporal and spatial heterogeneity in urban watershed[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 27-33. (in Chinese))
- [9] 邓鹏, 孙善磊, 黄鹏年. 气候变化对鄱阳湖流域径流的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 39-45. (DENG Peng, SUN Shanlei, HUANG Pengnian. Influence of climate change on runoff in Poyang Lake Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(1): 39-45. (in Chinese))
- [10] 谢志清, 杜银, 曾燕, 等. 江淮流域年极端降水事件分类特征及其致洪风险[J]. 中国科学(地球科学), 2018, 48(9): 1153-1168. (XIE Zhiqing, DU Yin, ZENG Yan, et al. Classification characteristics and flood risk of extreme precipitation events in the Jianghuai River Basin[J]. Science China Earth Sciences, 2018, 48(9): 1153-1168. (in Chinese))
- [11] 王振亚, 姚成, 董俊玲, 等. 郑州“7·20”特大暴雨降水特征及其内涝影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 17-22. (WANG Zhenya, YAO Cheng, DONG Junling, et al. Precipitation characteristics and waterlogging effects of “7·20” Super Rainstorm in Zhengzhou[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 17-22. (in Chinese))
- [12] 刘家宏, 骆卓然, 张永祥, 等. 城市化对河南省极端降水空间分布的影响[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 100-105. (LIU Jiahong, LUO Zhuoran, ZHANG Yongxiang, et al. Effects of urbanization on spatial distribution of extreme precipitation in Henan Province[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 100-105. (in Chinese))
- [13] 夏羽, 陈鲜艳, 李芳, 等. 三峡库首区诱发地质灾害的强降水特征分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(增刊1): 100-106. (XIA Yu, CHEN Xianyan, LI Fang, et al. Characteristics of heavy precipitation induced by geological disasters in the head area of the Three Gorges Reservoir[J]. Water Resources and Hydropower Technology, 2022, 53(Sup1): 100-106. (in Chinese))
- [14] 汪华斌. 长江三峡库区滑坡灾害危险性评价[J]. 长江流域资源与环境, 1998, 7(2): 186-192. (WANG Huabin. Risk assessment of landslide disaster in the Three Gorges Reservoir area of the Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 1998, 7(2): 186-192. (in Chinese))
- [15] 王礼先, 王志民. 山洪及泥石流灾害预报[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [16] 郭渠, 罗伟华, 程炳岩, 等. 三峡库区暴雨时空特征及其与洪涝的关系[J]. 资源科学, 2011, 33(8): 1513-1521. (GUO Qu, LUO Weihua, CHENG Bingyan, et al. Spatial and temporal characteristics of heavy rain and its relationship with flood in the three gorges reservoir area[J]. Resources Science, 2011, 33(8): 1513-1521. (in Chinese))
- [17] 张蔚, 郁夏琰, 徐怡, 等. 三峡流量调节对长江口潮汐不对称的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 143-149. (ZHANG Wei, YU Xiayan, XU Yi, et al. Influence of discharge regulation by Three Gorges Dam on tidal asymmetry in Yangtze Estuary[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(2): 143-149. (in Chinese))
- [18] 陶威. 50年西南地区降水的时空分布特征[J]. 气候变化研究快报, 2018, 7(4): 308-319. (TAO Wei. Temporal and spatial distribution characteristics of precipitation in Southwest China during the past 50 years[J]. Climate Change Research Letters, 2018, 7(4): 308-319. (in Chinese))
- [19] 王辉, 吴文俊, 王广, 等. 昆明市极端降水事件演变特征及城市效应[J]. 水资源保护, 2021, 37(4): 61-68. (WANG Hui, WU Wenjun, WANG Guang, et al. Evolution characteristics and urban effects of extreme precipitation events in Kunming City[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 61-68. (in Chinese))
- [20] 谭志强, 余锦华. 西南秋季降水及其影响要素的气候变化特征[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(2): 141-147. (TAN Zhiqiang, YU Jinhua. Climate change characteristics of autumn precipitation and its influencing factors in Southwest China[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(2): 141-147. (in Chinese))
- [21] 李红梅, 周天军, 宇如聪. 近四十年我国东部盛夏日降水特性变化分析[J]. 大气科学, 2008, 32(2): 358-370. (LI Hongmei, ZHOU Tianjun, YU Rucong. Characteristics of daily precipitation in midsummer in Eastern China during recent 40 years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(2): 358-370. (in Chinese))
- [22] CHEN Zeqiang, ZENG Yi, SHEN Gaoyun, et al. Spatiotemporal characteristics and estimates of extreme precipitation in the Yangtze River Basin using GLDAS data[J]. International Journal of Climatology, 2021, 41: E1812-E1830.
- [23] 郭渠, 陈佳, 李瑞, 等. 重庆地区短历时强降水气候特征[J]. 干旱气象, 2018, 36(6): 944-953. (GUO Qu, CHEN Jia, LI Rui, et al. Climatic characteristics of short duration heavy rainfall in Chongqing[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(6): 944-953. (in Chinese))
- [24] 杨春, 张勇, 张亚萍, 等. 近25a重庆地区小时降水时空分布特征分析[J]. 暴雨灾害, 2020, 39(1): 71-80. (YANG Chun, ZHANG Yong, ZHANG Yaping, et al. Analysis of temporal and spatial distribution characteristics of hourly precipitation in Chongqing in recent 25 years[J]. Rainstorm Disaster, 2020, 39(1): 71-80. (in Chinese))
- [25] 刘晓冉, 程炳岩, 杨茜, 等. 近50a三峡库区汛期极端降水事件的时空变化[J]. 湖泊科学, 2012, 24(2): 244-251. (LIU Xiaoran, CHENG Bingyan, YANG Qian, et al. Temporal and spatial variations of extreme precipitation events during flood season

- in the Three Gorges Reservoir area during the past 50 years[J]. *Journal of Lake Sciences*,2012,24(2):244-251. (in Chinese))
- [26] ZHANG Tianyu, WANG Yuxiao, LIU Bo, et al. Variation of hourly extreme precipitation in the Three Gorges Reservoir Region, China, from the observation record[J]. *Water*,2021,13(20):2855.
- [27] 张天宇, 桂术, 杨若文, 等. TRMM 和 CMORPH 卫星资料对三峡库区降水的评估分析[J]. *气象*,2020,46(8):1098-1112. (ZHANG Tianyu, GUI Shu, YANG Ruowen, et al. Evaluation and analysis of precipitation in the Three Gorges Reservoir Area using TRMM and CMORPH satellite data[J]. *Meteorological*,2020,46(8):1098-1112. (in Chinese))
- [28] BARBER R, FOWLER H J, LENDERINK G, et al. Is the intensification of precipitation extremes with global warming better detected at hourly than daily resolutions? [J]. *Geophysical Research Letters*,2017,44(2),974-983.
- [29] 矫梅燕. 三峡工程气候效应综合评估报告[M]. 北京:气象出版社,2014.
- [30] WANG Wenpeng, CHEN Yuanfang, BECKER S, et al. Variance correction prewhitening method for trend detection in autocorrelated data[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*,2015,20(12):04015033.
- [31] 谢智博, 穆兴民, 高鹏, 等. 基于 R/S 和 Morlet 小波分析的北洛河上游径流变化特征研究[J]. *水土保持研究*,2022,29(2):139-144. (XIE Zhibo, MU Xingmin, GAO Peng, et al. Study on runoff change characteristics in the upper reaches of Beiluo River based on R/S and Morlet wavelet analysis[J]. *Research on Soil and Water Conservation*,2022,29(2):139-144. (in Chinese))
- [32] 王怀军, 曹蕾, 俞嘉悦, 等. 基于 EOF 分析和 GAMLSS 模型的淮河流域极端气候事件非平稳特征[J]. *灌溉排水学报*,2021,40(5):125-134. (WANG Huaijun, CAO Lei, YU Jiayue, et al. Non-stationary characteristics of extreme climate events in the Huaihe River Basin based on EOF analysis and GAMLSS model[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*,2021,40(5):125-134. (in Chinese))
- [33] 王莉萍, 王秀荣, 张立生, 等. 一种区域降水过程综合强度评估方法的探索和应用[J]. *气象*,2018,44(11):1505-1514. (WANG Liping, WANG Xiurong, ZHANG Lisheng, et al. Exploration and application of a comprehensive intensity assessment method for regional precipitation process[J]. *Meteorological*,2018,44(11):1505-1514. (in Chinese))
- [34] 王莉萍, 王铸, 连治华, 等. 2021. 基于小时分辨率的降水过程辨识方法研究[J]. *暴雨灾害*,2021,40(1):12-18. (WANG Liping, WANG Zhu, LIAN Zhihua, et al. Study on precipitation process identification method based on hourly resolution[J]. *Heavy Rain and Disasters*,2021,40(1):12-18. (in Chinese))
- [35] 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 中国泥石流[M]. 北京:商务印书馆,2000.
- [36] WU Liguang, ZHANG Qiang, JIANG Zhihong. Three Gorges Dam affects regional precipitation[J]. *Geophysical Research Letters*,2006,33(13):L13806.
- [37] 张强, 王有民, 祝昌汉. 长江三峡局地气候监测系统与设计研究[J]. *气象*,2004(9):31-35. (ZHANG Qiang, WANG Youmin, ZHU Changhan. Local climate monitoring system and design for the Three Gorges of the Yangtze River[J]. *Meteorological*,2004(9):31-35. (in Chinese))
- [38] 李强, 李永华, 王中, 等. 近 30 年三峡库区洪涝特征及建库前后致涝气候因子的差异[J]. *热带气象学报*,2010,26(6):750-758. (LI Qiang, LI Yonghua, WANG Zhong, et al. Flood characteristics and climatic factors before and after reservoir construction in the Three Gorges Reservoir Area in recent 30 years[J]. *Journal of Tropical Meteorology*,2010,26(6):750-758. (in Chinese))
- [39] 纪道斌, 成再强, 龙良红, 等. 三峡水库不同运行期库首水温分层特性及生态效应[J]. *水资源保护*,2022,38(3):34-42. (JI Daobin, CHENG Zaiqiang, LONG Lianghong, et al. Characteristics of thermal stratification in head area of Three Gorges Reservoir and ecological effects in different operation periods[J]. *Water Resources Protection*,2022,38(3):34-42. (in Chinese))
- [40] 陈鲜艳, 张强, 叶殿秀, 等. 三峡库区局地气候变化[J]. *长江流域资源与环境*,2009,18(1):47-51. (CHEN Xianyan, ZHANG Qiang, YE Dianxiu, et al. Local climate change in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*,2009,18(1):47-51. (in Chinese))
- [41] 陈鲜艳, 宋连春, 郭占峰, 等. 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*,2013,22(11):1466-1471. (CHEN Xianyan, SONG Lianchun, GUO Zhanfeng, et al. Climate change and its impacts in the Three Gorges Reservoir Area and the upper reaches of the Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*,2013,22(11):1466-1471. (in Chinese))
- [42] 蔡庆华, 刘敏, 何永坤, 等. 长江三峡库区气候变化影响评估报告[M]. 北京:气象出版社,2010.
- [43] 吴佳, 高学杰, 张冬峰, 等. 三峡水库气候效应及 2006 年夏季川渝高温干旱事件的区域气候模拟[J]. *热带气象学报*,2011,27(1):44-52. (WU Jia, GAO Xuejie, ZHANG Dongfeng, et al. Climate effects of the Three Gorges Reservoir and regional climate simulation of high temperature and drought events in Sichuan and Chongqing in summer of 2006[J]. *Journal of tropical meteorology*,2011,27(1):44-52. (in Chinese))