

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221846

计及前后期降水的极端降水事件特征及与风速的响应规律

钱姝妮^{1,2}

(1. 广州市水务规划勘测设计研究院有限公司, 广东 广州 510641;

2. 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)

摘要: 分析极端降水时空分布特征及前后期风速的响应变化,对掌握极端降水发生规律、提高极端降水—风速响应关系认识、预防及应对水灾害具有重要意义。定义考虑前后期降水的极端降水事件并根据雨峰位置划分为峰前、峰后和双峰3种雨型,分析我国极端降水事件时空分布特征及与风速的关系。结果表明,单峰雨型发生频次高于双峰雨型,量级从西北到东南逐渐递增,西北地区极端降水事件上升趋势明显;东南、东北地区风速越大,极端日降水阈值越高,西南地区则相反;极端日降水发生前后风速存在异常波动现象,西南地区表现为风速减弱,其他地区先增强后减弱、极端日降水当天风速最大。

关键词: 前后期;极端降水;时空分布;风速;响应

中图分类号: [TV11]

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)11-0005-05

1 引言

极端降水事件具有突发性强、危害性大等特点,对我国社会经济发展与生态环境影响重大,深入分析极端降水时空演变特征,对我国防洪减灾意义重大^[1]。传统上极端降水定义方法有百分位值法^[2]、固定阈值法^[3]和参数化法^[4]等。然而,极端降水事件的前后期通常伴随着未达到极端降水标准、但不可忽略甚至量级较大的降水,这些降水叠加极端降水造成的破坏性要大于极端降水事件本身^[5]。相比于极端降水频率、历时、强度等研究,极端降水时程分配(雨型)方面的研究相对较少^[6]。另一方面,极端降水通常伴随着异常的天气系统,其发生前后存在着多种气象要素(如风速)的变化。甄别极端降水发生前后风速的变化规律,有助于提高极端降水与风速的响应关系认识、增强极端降水早期症候快速诊断与临近预报能力。但现有研究主要聚焦于极端降水发生当日的风速变化(即遭遇问题)^[7-8],较少探讨极端降水前后期风速的变化规律。对此,本文提出考虑前后期降水的极端降水事件概念,分析我国极端降水时空分布特征,探究极端降水事件与风速的响应规律,以期为防洪减灾规划提供参考。

2 数据与方法

2.1 研究数据

采用中国气象局提供的全国1961~2016年 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 格点日值降水数据集(V2.0)和全国839个气象站同期日值风速数据。考虑到我国国土面积辽阔,极端降水和风速特征空间差异可能较大,将我国划分为东南、东北、西南、西北4个地区,以 33°N 、 100°E 为分界线(图1)。

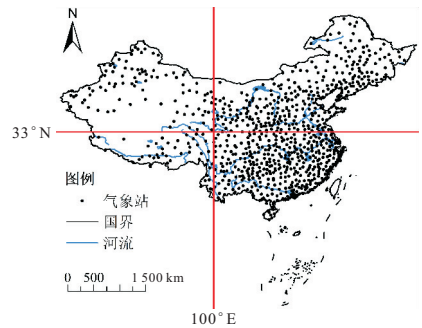


图1 全国839个气象站分布及4个子区域划分界线
Fig. 1 The 839 meteorological stations and four sub-regions in China

2.2 研究方法

(1)考虑前后期降水的极端降水事件。根据文献^[9],将日降水量 $\geq 0.1\text{ mm}$ 视为有雨天;对

收稿日期: 2022-09-05, 修回日期: 2023-03-13

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3001000); 国家自然科学基金项目(52109019)

作者简介: 钱姝妮(1995-), 女, 硕士, 研究方向为水文学及水资源, E-mail: shnqian@163.com

有雨天的降水量进行排序,分别计算 10%、90% 百分位值,并将 90% 百分位值作为极端降水阈值。定义一次极端降水过程(事件)同时满足以下两个条件:①条件 1。日降水量均超过 10% 百分位值且时间上连续;②条件 2。至少有 1 d 的日降水量超过 90% 百分位值。考虑到我国某些地区存在日降水量不大但持续时间长(如梅雨)的情况,设定条件 1 以防止识别的场次极端降水事件持续时间过长,条件 2 则为极端降水事件的主要条件。可见,该定义下极端降水事件不仅考虑了极端日降水,且包括了极端日降水的前期和后期降水,其降水总量一般比单日极端降水量要大(图 2)。

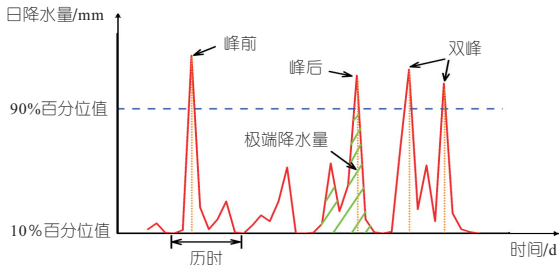


图 2 考虑前后期降水的极端降水事件、雨型及特征示意图
Fig. 2 Sketch map of extreme precipitation events considering preceding and succeeding precipitation and the temporal distribution types

(2)极端降水雨型划分及特征描述。根据极端降水事件定义,事件中的极端日降水(即超过 90% 百分位值)属于雨峰,根据其出现时间,将雨型划分为 3 类:①峰前雨型,即所有极端日降水发生在整个事件前期(事件中间时刻之前);②峰后雨型,即所有极端日降水发生在整个事件后期;③双峰雨型,即极端日降水同时发生在整个事件的前期和后期。选用频率、历时、降水量 3 个指标刻画极端降水事件特征(图 2)。

(3)Mann-Kendall 趋势分析法。采用 Mann-Kendall 方法诊断极端降水特征的时间变化趋势。给定时间序列 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 计算统计量 z, s :

$$z = \begin{cases} \frac{s - 1}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}} & s > 0 \\ 0 & s = 0 \\ \frac{s + 1}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}} & s < 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$s = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j) \quad i > j \quad (2)$$

当统计量 $z > 0$ 时,表示序列有增加趋势, $z < 0$ 则为减少趋势。通过计算倾斜度 β 确定序列的趋势值:

$$\beta = \text{Media} \left(\frac{x_i - x_j}{i - j}, \forall i > j, 1 \leq j < i \leq n \right) \quad (3)$$

(4)binning 方法。用 binning 方法探索不同风速条件下事件的日极端降水响应情况^[10],具体步骤为:将风速按 0.1 m/s 间隔划分成多组(风速观测记录最小间隔),对每组风速的日降水量(如 0.8 m/s 风速下的所有日降水观测记录)从小到大排序,与极端降水事件定义条件 2 对应,选取 90% 百分位值为当前风速下的日极端降水阈值。

3 结果与讨论

3.1 极端降水事件空间分布特征

统计 1961~2016 年发生的极端降水事件的雨型种类累积频数、平均降水量和平均历时,结果见图 3。由图 3 可知,峰前雨型主要发生在西北地区,大部分区域发生频数 50 次以上,其他地区发生频数基本在 30~50 次之间,而峰后极端降水雨型发生次数大多为 60~80 次;双峰雨型发生频次较低,大多数地区在 10 次以下。对于平均降水量,结果表明无论哪种雨型,其降水量均呈现从东南到西北逐渐递减的分布规律;此外,峰前雨型降水量超过 100 mm 的空间范围大于峰后雨型,而降水量低于 50 mm 的空间范围则是峰后雨型大于峰前雨型;相比之下,双峰雨型的平均降水量较大,东南地区甚至达到 200 mm 以上。从历时上看,峰前雨型历时基本上在 3~7 d 范围内,西北地区及内蒙古部分地区历时短于 3 d,而东南沿海、四川盆地及西南地区历时可达 7 d 以上;峰后

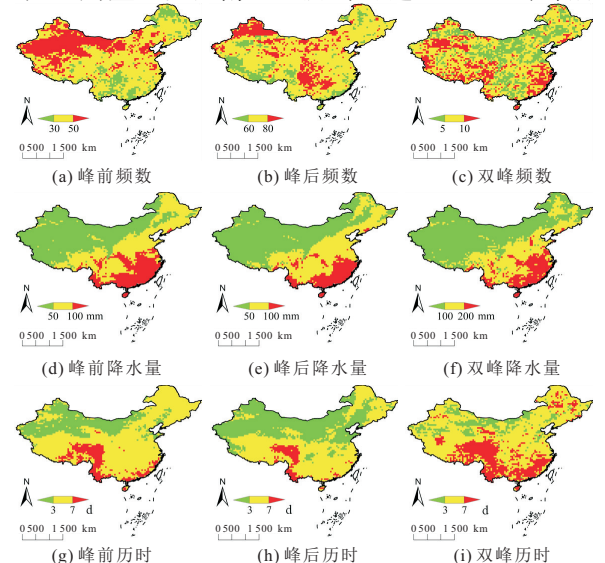


图 3 1961~2016 年我国不同雨型的极端降水事件累积频数、平均降水量、平均历时空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of accumulated frequency, average precipitation and average duration of extreme precipitation events with different temporal distribution types in China during 1961-2016

雨型北方地区历时(小于 3 d)普遍短于南方地区(3~7 d),四川盆地及西南地区同样达 7 d 以上;双峰雨型总体上历时最长,历时超过 7 d 的空间范围大于其他雨型历时超过 7 d 的空间范围。

3.2 极端降水事件时间变化趋势

图 4 为极端降水事件频率、降水量、历时年际变化趋势的空间分布。由图 4 可知,西部地区极端降水事件频率呈增加趋势,特别是西北地区增加趋势显著,其变化趋势多数在 0.13~0.60 次/10a,黄河中下游和东北地区则多数呈弱下降趋势。在降水量方面,西北大部分地区变化趋势明显,其中双峰雨型降水量增加趋势明显,为 3~7 mm/10a。对于历时,西北地区历时普遍呈 0~0.6 d/10a 的增加趋势,四川盆地的峰后雨型历时则呈减少趋势,大致以 0.2~0.5 d/10a 的速度下降。

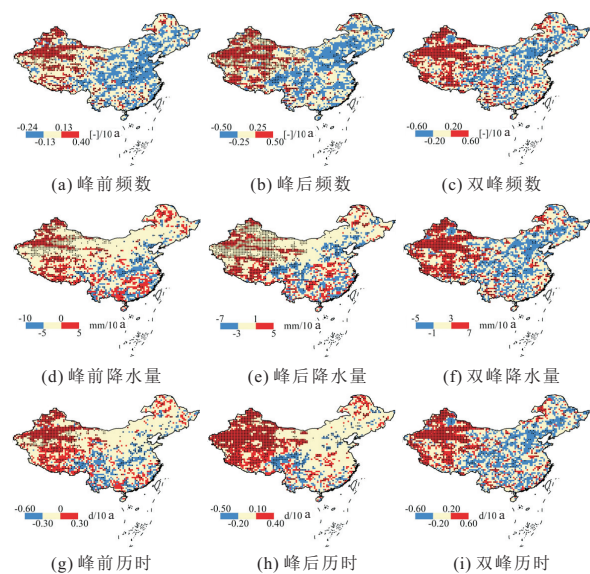


图 4 我国不同雨型的极端降水事件频数、降水量和历时变化趋势空间分布(黑点代表趋势通过 95%显著性水平)

Fig. 4 Spatial distributions of trends in frequency, precipitation amount and duration of extreme precipitation events with different temporal distribution types (dark dotted indicates trends passing the 95% confidence level)

对划分的 4 个子区域极端降水事件进行区域平均,进一步分析频数、降水量、历时的区域平均趋势,结果见表 1。除双峰雨型历时外,西北地区的极端降水频数、降水量、历时均呈显著上升趋势,其中峰后雨型增长最快,3 个指标增加趋势分别为 0.2 次/10a、4.79 mm/10a 和 0.43 d/10a。东北地区、东南地区极端降水变化趋势总体上不明显,但东北地区峰后雨型频率、东南地区双峰雨型降水量趋势明显,变化率分别为 -0.31 d/10a、1.89 mm/10a。西南地区峰前雨型频率、降水量,峰后雨型频率及双峰雨型降水量均呈显著增加趋势。

表 1 我国 4 个子区域极端降水事件变化趋势

Tab. 1 Trends in extreme precipitation over four sub-regions in China

雨型	指标	西北	东北	东南	西南
		地区	地区	地区	地区
峰前	频率/ $10^{-1}a^{-1}$	0.11*	-0.06	-0.08	0.07*
	降水量/($mm \cdot 10^{-1}a^{-1}$)	3.02*	-0.83	-2.05	2.76*
	历时/($d \cdot 10^{-1}a^{-1}$)	0.25*	0.04	-0.31*	0.24
峰后	频率/ $10^{-1}a^{-1}$	0.20*	0.04*	0.03	0.13*
	降水量/($mm \cdot 10^{-1}a^{-1}$)	4.79*	-0.58	-0.19	2.63
	历时/($d \cdot 10^{-1}a^{-1}$)	0.43*	-0.12	-0.12	0.22
双峰	频率/ $10^{-1}a^{-1}$	0.10*	0.06	0.02	0.04
	降水量/($mm \cdot 10^{-1}a^{-1}$)	3.66*	-0.33	1.89*	4.28*
	历时/($d \cdot 10^{-1}a^{-1}$)	0.07	0.01	-0.04	-0.16

注:“*”表示趋势通过 95%显著性水平检验。

3.3 不同风速条件下极端日降水阈值变化特征

在极端降水事件中,极端日降水(超 90%百分位值)对整个事件起着至关重要的作用甚至是主导作用。因此,有必要围绕极端日降水探讨其量级在不同风速条件下的变化规律。通过 binning 方法分类统计 4 个子区域内所有站点日平均风速、日降水量资料,分析不同风速下日降水量 90%百分位值的差异,结果见图 5(图 5 中曲线为相应数据点的滑动平均值(窗口长度为 5))。由图 5 可知,东南地区极端日降水阈值随着风速增加而加大,特别当风速达到 8 m/s 以上时,这种增长趋势尤为明显,说明风速越大时,发生极端日降水的量级也越高,可能与东南地区易发的强对流及台风(沿海)天气有关。东北地区极端日降水阈值也与风速大小呈正相关,但这种正相关关系不比东南地区明显。西北地区极端日降水阈值与风速关系不明显,总体上阈值维持在 20~40 mm 之间,不随风速变化而变化。西南地区风速范围相对其他地区要小,基本在 5 m/s 以内,极端日降水阈值随风速增加而减小,说明风速越大,发生极端日降水的量级越小。

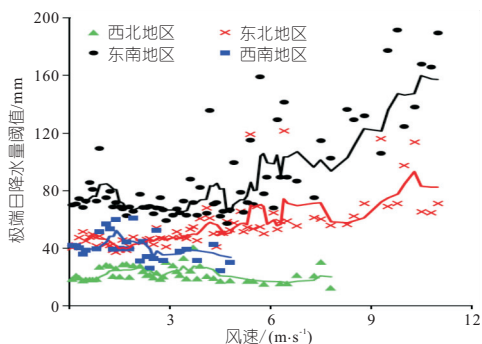


图 5 我国 4 个子区域的极端日降水量阈值随风速的变化规律
Fig. 5 Changes in daily extreme precipitation threshold in response to wind speed over four sub-regions in China

3.4 极端降水事件前后期风速响应规律

分析极端日降水发生当天、发生前 3 d 和发

生后 2 d 的风速与极端日降水量的线性相关关系,结果见图 6(图 6 中“-3”、“-2”、“-1”、“1”、“2”分别表示极端日降水发生前 3、2、1 d,以及后 1、2 d)。由图 6 可知,相关系数绝对值较大(根据样本容量和显著性检验标准,相关系数±0.18 对应 95%显著性水平)的地区主要分布在东南沿海一带和西部地区,极端日降水发生当天相关性总体上最强,其中沿海一带基本上呈显著正相关性。由此可见,极端日降水事件的发生与风速有一定联系。

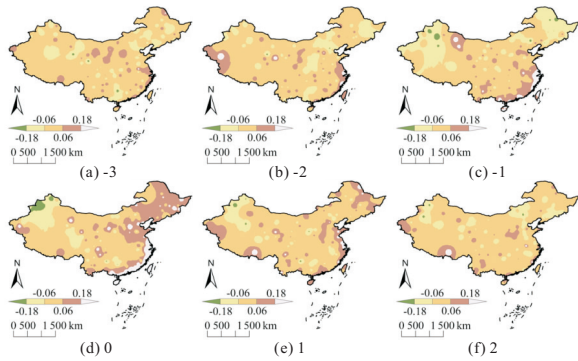


图 6 极端日降水与其发生前后风速的相关系数分布图
Fig. 6 Spatial distribution of correlation between daily extreme precipitation and wind speed several days before and after daily extreme precipitation occurrence

为探究西北、东北、西南、东南 4 个地区不同雨型的极端日降水发生前后风速的变化规律,提取 4 个子区域内属同一雨型的极端日降水发生当天、发生前 3 d 和发生后 2 d 的风速(对于极端日降水出现多次(d)的雨型(如双峰),分别对每一极端日降水进行统计分析),并以区域多年平均风速为基准,计算相应的风速变化量(即波动值),得到极端日降水发生前 3 d 至后 2 d 的风速变化情况,结果见图 7(图 7 中粗竖线代表极端日降水发生当天,横坐标“-3”、“-2”、“-1”、“1”、“2”分别表

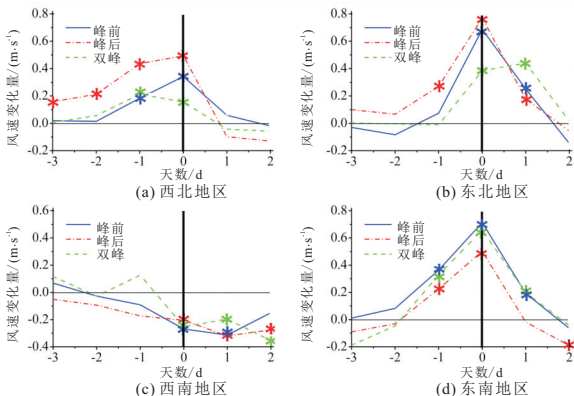


图 7 不同雨型的极端日降水发生前后风速变化情况
Fig. 7 Changes in wind speed before and after daily extreme precipitation occurrence for different temporal distribution types of extreme precipitation

示极端日降水发生前 3、2、1 d,以及后 1、2 d,带“*”为风速变化量通过 95%显著性水平检验)。西北地区 3 种雨型的极端日降水发生前及发生当天均存在显著风速异常波动,呈现出从前 3 d 至发生当天逐步增加的态势,这种情况对峰后雨型尤为明显,但极端日降水发生后风速逐渐下降。东北地区 3 种雨型的极端日降水发生当天及发生后 1 d 风速出现显著变化,总体上极端日降水发生前风速增加后下降,极端日降水发生当天风速最大,其中峰前、峰后雨型风速可波动 0.7~0.8 m/s。对于西南地区,极端日降水发生前 3 d 至后 1 d 风速逐渐降低,且发生当天及发生后风速变化显著。东南地区风速对极端日降水的响应关系与东北地区相似,即极端日降水发生前风速增加、发生后风速下降,极端日降水当天风速最大,波动值约 0.5~0.7 m/s,不同的是 3 种雨型的极端日降水发生前 1 d 风速均变化显著。综上可知,除西南地区外,风速基本上在极端日降水发生前逐渐上升,发生后逐步下降,但不同区域极端日降水前后期风速的变化程度并不一致。

4 结论

- a. 考虑前后期降水的极端降水事件单峰较双峰雨型常见,量级从东南向西北逐渐递减,四川盆地及西南地区普遍可持续 7 d 以上。
- b. 西北地区极端降水事件呈显著上升趋势,其他地区变化不明显。
- c. 东南和东北地区极端日降水阈值随风速增加而增大,西南地区则相反。
- d. 除西南地区外,风速在极端日降水发生前逐渐上升,发生后逐步下降。

参考文献:

[1] WU X, WANG Z, GUO S, et al. Scenario-based projections of future urban inundation within a coupled hydrodynamic model framework: A case study in Dongguan City, China [J]. Journal of hydrology, 2017, 547: 428-442.

[2] TUEL A, SCHAEFLI B, ZSCHEISCHLER J, et al. On the links between sub-seasonal clustering of extreme precipitation and high discharge in Switzerland and Europe [J]. Hydrology and earth system sciences, 2022, 26 (10): 2649-2669.

[3] WU X, GUO S, LIU D, et al. Characterization of rainstorm modes along the upper mainstream of Yangtze River during 2003-2016 [J]. International journal of climatology, 2018, 38(4): 1976-1988.

[4] 陈栋, 黄荣辉, 陈际龙. 我国夏季暴雨气候学的研究进展与科学问题[J]. 气候与环境研究, 2015, 20

(4): 477-490.

- [5] WU X, GUO S, YIN J, et al. On the event-based extreme precipitation across China: Time distribution patterns, trends, and return levels [J]. *Journal of hydrology*, 2018, 562: 305-317.
- [6] 胡睿, 王双银, 王鹏飞. 基于聚类分析的短历时暴雨雨型研究[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(4): 8-10.
- [7] 蔡奇霖, 涂金良, 王兆礼, 等. 东湖水库强风暴雨遭遇联合分布及其对坝顶高程设计的影响[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(1): 117-123, 129.

- [8] JAKOB Z, PHILIPPE N, OLIVIA M, et al. Evaluating the dependence structure of compound precipitation and wind speed extremes[J]. *Earth system dynamics discussions*, 2021, 12(1):1-23.
- [9] 刘微, 邵广文, 吕多智, 等. 黄河中游流域极端降水与气温的关系[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(4): 5-9.
- [10] BACK L E, BRETHERTON C S. The relationship between wind speed and precipitation in the Pacific ITCZ[J]. *Journal of climate*, 2005, 18(20): 4317-4328.

Characteristics of Extreme Precipitation Events Taking into Account Pre and Post Precipitation and Their Response to Wind Speed

QIAN Shu-ni^{1,2}

(1. Guangzhou Water Planning Survey and Design Institute Co., LTD., Guangzhou 510641, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Analyzing the spatial and temporal characteristics of extreme precipitation and the response of wind speed before and after extreme precipitation are of great significance for extreme precipitation characterization, improving the understanding of the relationship between extreme precipitation and wind speed, as well as managing water-related disasters. This study defined event-based extreme precipitation by considering preceding and succeeding precipitation, and classified precipitation patterns into three types, i. e. early peak, later peak and bimodal types according to the locations of precipitation peak, after which the spatiotemporal distributions of extreme precipitation and its relationship with wind speed were analyzed. The results show that single-peak of extreme precipitation occurs more often than bimodal one, and the amount increases from northwest to southeast, with significant upward trend of extreme precipitation detected; Extreme daily precipitation threshold increases with higher wind speed over the southeast and northeast, contrary to the southwest; Moreover, wind speed tends to show anomalies before and after extreme daily precipitation, and it decreases when extreme daily precipitation occurs over the southwest; However, over other regions, it increases before extreme daily precipitation and decreases after then, reaching the peak at the extreme daily precipitation day.

Key words: preceding and succeeding period; extreme precipitation; spatiotemporal distribution; wind speed; response

(上接第 68 页)

参考文献:

- [1] 袁自立, 马福恒, 焦延涛. 石漫滩碾压混凝土重力坝温度效应分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(5): 61-64, 69.
- [2] 唐欣薇, 周元德, 张楚汉. 基于细观损伤力学模型的混凝土坝抗震分析[J]. *水力发电学报*, 2013, 32(2): 195-200, 251.
- [3] BAANT Z P, OH B H. Crack band theory for fracture of concrete[J]. *Materials and structures*, 1983, 16(3): 155-177.
- [4] RODRIGUES E A, MANZOLI O L, JR L. 3D concurrent multiscale model for crack propagation in concrete[J]. *Computer methods in applied mechan-*

- ics and engineering*, 2020, 361: 112813.
- [5] 卿龙邦, 喻渴来, 徐东强. 基于扩展有限元法的混凝土重力坝宏观断裂数值分析[J]. *水力发电学报*, 2017, 36(6): 94-102.
- [6] WU T, WRIGGERS P. Multiscale diffusion-thermal-mechanical cohesive zone model for concrete [J]. *Computational mechanics*, 2015, 55(5): 999-1016.
- [7] 李孔龙. 再生混凝土抗压强度尺寸效应细观数值模拟与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [8] 兰晓芳. 基于扩展有限元的钢纤维混凝土断裂破坏数值研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- [9] 马福恒, 沈振中, 袁自立. 河南省石漫滩水库大坝原型观测资料分析报告[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2012.

Study on Cracking Mechanism of Gravity Dam Based on Macro-Micro Model

ZHAO Ting¹, JIAO Yan-tao², ZHANG Ya-kun¹, HOU Li-li¹

(1. Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475004, China; 2. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: In order to understand the mechanism of crack formation in the RCC gravity dam body during operation, this paper takes the Shimantan reservoir dam as the research object, adopts a method of using the ESEL command in APDL language and the rotation of local coordinate system to complete the random aggregate delivery, and constructs a three-dimensional macro-micro finite element model of the No. 9 non-overflow dam section of the Shimantan dam. The simulation results of aggregate placement show that the method can quickly generate three-dimensional spherical and polyhedral aggregates, greatly improving the efficiency of aggregate generation. The results calculated by the macro-micro model are more consistent with the actual crack distribution of the dam, and the impact of the rapid rise in summer temperature and rapid drop in winter temperature on the cracking of concrete dams during operation cannot be ignored.

Key words: concrete gravity dam; macro-micro finite element model; temperature cracks; APDL commands flow