暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

盘锦市长历时暴雨特征及雨型分型研究

徐红 朱玲 陈军庆 王乙舒 晁华 顾正强 马林 蔺娜

Study of characteristic and rainstorm patterns classification of long-duration rainstorm in Panjin

XU Hong，ZHU Ling，CHEN Junqing，WANG Yishu，CHAO Hua，GU Zhengqiang，MA Lin，LIN Na

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-224

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

安徽省暴雨灾害预警等级的划分及其应用
Classification of early warning levels for rainstorm disaster and its application in Anhui Province
暴雨灾害. 2021, 40(2): 174-181 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.009

福建省暴雨致灾因子权重分析及非台风暴雨致灾危险性评估
Analysis of rainfall disaster-causing factors weight and hazard assessment of non-typhoon rainstorms in Fujian Province
暴雨灾害. 2025, 44(4): 526-534 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-129

重庆不同天气系统短历时设计暴雨雨型比较研究
Comparative study on short-duration designed storm patterns of different weather systems in Chongqing
暴雨灾害. 2020, 39(1): 96-101 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.01.011

武汉市暴雨的雨峰和历时及其排水防涝的分析
Analysis of rainfall peak and duration of rainstorm for drainage and waterlogging prevention in Wuhan
暴雨灾害. 2020, 39(5): 532-538 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.05.012

青海东部暴雨过程特征及灾害风险评估方法研究
Study of rainstorm events characteristics and disaster risk assessment method in eastern Qinghai
暴雨灾害. 2025, 44(5): 612-620 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-168

湖北省区域性暴雨雨团识别及特征分析
Rain clusters identification and characteristics analysis of regional rainstorms in Hubei Province
暴雨灾害. 2021, 40(5): 505-512 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.05.007

关注微信公众号，获得更多资讯信息

徐红,朱玲,陈军庆,等.2025.盘锦市长历时暴雨特征及雨型分型研究[J].暴雨灾害,44(6):815−822. XU Hong, ZHU Ling, CHEN Junqing, et al. 2025. Study of characteristic and rainstorm patterns classification of long-duration rainstorm in Panjin [J]. Torrential Rain and Disasters,44(6):815−822 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−224

盘锦市长历时暴雨特征及雨型分型研究

徐红[1, 2], 朱玲[1, 2], 陈军庆[3], 王乙舒[1], 晁华[1], 顾正强[1, 2], 马林[4], 蔺娜[1]

(1. 辽宁省气候中心, 沈阳 110166; 2. 辽宁省盘锦国家气候观象台, 盘锦 124000; 3. 空军 93161 部队, 沈阳 110015; 4. 辽宁省气象装备中心, 沈阳 110166)

摘　要: 暴雨雨型对于城市防洪排涝设计具有重要意义。基于 1972—2023 年盘锦市盘山国家气象站分钟降雨观测资料、东亚地面及高空天气形势资料, 首先分析了盘锦市长历时 (持续时间 6~24 h) 暴雨的气候特征并进行天气分型, 然后利用模糊识别法结合目估识别法将长历时暴雨雨型分型, 最后利用 1984—2023 年灾情资料分析不同暴雨雨型的灾害特征。结果表明: (1) 盘锦市长历时暴雨场次年代分布不均, 21 世纪 10 年代和 20 世纪 80 年代最多, 为 7 场, 21 世纪 00 年代暴雨场次最少, 仅有 3 场。长历时暴雨持续时间以 6~10 h 居多, 超过 18 h 的持续性降雨较少。降雨量在 90~110 mm 之间的暴雨场次最多。(2) 盘锦市长历时暴雨天气分型中北上气旋型最多, 占比 42.3%, 其次冷锋型, 占比 20.4%, 然后是大型气旋型, 占比 28.7%, 东北冷涡型最少, 占比 8.6%。(3) 将盘锦市长历时暴雨雨型分为 7 类, 其中单峰型最多 (53.1%), 其次是均匀型暴雨 (25.0%), 双峰型暴雨 (21.9%)。单峰型暴雨峰值多位于降雨后期、中期, 双峰型暴雨峰值多出现在降雨前期和后期、前期和中期。 (4) 灾情数据结合暴雨雨型分析表明, 中部单峰、均匀型长历时暴雨易导致盘锦市严重内涝及暴雨洪涝, 在防洪排涝时应引起重视。

关键词: 长历时暴雨; 暴雨雨型; 暴雨灾害; 盘锦市

中图法分类号: P425　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−224

Study of characteristic and rainstorm patterns classification of long-duration rainstorm in Panjin

XU Hong[1, 2], ZHU Ling[1, 2], CHEN Junqing[3], WANG Yishu[1], CHAO Hua[1], GU Zhengqiang[1, 2], MA Lin[4], LIN Na[1]

(1. *Liaoning Climate Center*, *Shenyang* 110166; 2. *Panjin National Climate Observatory of Liaoning Province*, *Panjin* 124000; 3. *Air Force* 93161, *Shenyang* 110015; 4. *Liaoning Meteorological Equipment Support Center*, *Shenyang* 110166)

Abstract: Understanding rainstorm patterns is significant for the design of effective urban flood control and drainage systems. This study firstly analyzes the climatic characteristics of long-duration rainstorms (6~24 h) and conducts weather classification, and then long-duration rainstorms were rainstorm patterns classified using the fuzzy identification method and objective identification method. This analysis was based on the 1-minute interval rainfall data of Panjin observatory, daily surface and upper synoptic situations data of East Asia from 1972 to 2023. Lastly, the characteristics of rainstorm disasters were analyzed used disaster situation data from 1984 to 2023. The results showed that: (1) Long-duration rainstorms exhibited clear temporal variability, with fewer 3 events during the 1990s and most 7 events during 2010s and 1980s. The duration of long-duration rainstorms typically spanned between 6~10 hours, and the events of more than 18 hours were relatively rare. Long-duration rainstorms with precipitation between 90~110 mm were the most frequent. (2) The synoptic situations of long-duration rainstorms could be classified as the northward-moving cyclones with most proportion 42.3%, cold fronts with second proportion 20.4%, large cyclones with thirt proportion 28.7%, and Northeast cold vortexes with fewest proportion 8.6%. (3) The long-duration rainstorms in Panjin can be divided into seven types of rainstorm patterns with the unimodal rainstorms, uniform rainstorms and bimodal long-duration rainstorms accounting for 53.1%, 25.0% and 21.9% respectively. The peaks of the single-peak rainstorms were in the late and middle of rainstorm events, the peaks of the bimodal rainstorms were in the front and rear, in the front

收稿日期: 2024−12−23; **定稿日期**: 2025−03−04

资助项目: 辽宁省气象局年度基金项目 (202404, 202511); 辽宁省气象局核心攻关项目 (HXGG202402)

第一作者: 徐红, 主要从事气候应用研究。E-mail: lnqxny@163.com

通信作者: 朱玲, 主要从事气候应用研究。E-mail: lnsqhzx@163.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

and middle of rainstorm events. (4) Analysis of disaster situation data and rainstorm patterns indicates single-peak in the middle and uniform long-duration rainstorms caused most severe waterlogging and flooding in Panjin, and thus should be paid special attention in future flood control and drainage planning.

Key words: long-duration rainstorms; the rainstorms patterns; rainstorm disaster; Panjin City

引　言

近年来, 随着全球气候变暖的加剧, 在全球尺度上表现为总降雨量增加和降雨极端性增强的趋势, 我国也呈现极端降雨频发的状态 (秦大河, 2015)。同时, 由于我国城市化进程也在加快, 强降雨可能导致城市内涝灾害突发、频发和广发 (唐明等, 2021), 因此, 内涝已成为城市的主要自然灾害之一, 如“7·21”北京特大暴雨 (2012 年)、“9·13”上海特大暴雨 (2013 年)、“7·23”武汉特大暴雨 (2015 年)、“7·20”郑州特大暴雨 (2021 年) 等均是发生在城市的极端暴雨事件, 强降雨雨量超出城市排水能力, 易导致低洼地带、地下空间及排水设施不足的区域出现严重内涝。未来降雨极端性更强 (IPCC, 2021; Zhang et al., 2021), 对生态、社会经济和人类健康构成威胁, 也对城市抗涝防洪提出新的挑战。

暴雨是城市内涝产生的直接原因, 除雨量、雨强为影响内涝程度的主要因子外, 雨型也是一个重要因素 (成丹等, 2020)。研究发现, 雨型对小流域的洪峰流量以及流量过程有很大影响, 尤其是雨峰位置。雨型决定了雨峰的出现时刻, 同样的降雨量, 雨峰出现时刻的不同可以直接影响城市内涝的积水深度、范围及时间 (吴雪剑等, 2014)。在相同条件下, 雨峰在中部或后部的三角形雨型计算出的洪峰比均匀雨型计算出的洪峰大 30% 以上 (吴彰春等, 1995; 岑国平等, 1998)。可见, 暴雨雨型是确定城市防涝设施设计流量、城市排水防涝系统规划与设计的重要依据。

选择设计暴雨雨型方法时, 需先充分了解当地的雨型特点, 进而选择合适的设计暴雨雨型。王安琪等(2018)指出, 不同类型的暴雨雨型相差较大, 且其对城市排水的影响不同, 建议对不同类型的暴雨雨型分类设计。常用的城市设计暴雨雨型方法各有优势和不足, Keifer 和 Chu (1957) 方法受降水历时影响小, 但是对当地降雨过程资料依赖性强, 需要统计与所求雨型相一致的降雨历时的暴雨样本。Huff (1967) 法处理方法简单, 接近实际; 但若历时选取不当, 雨型拟合结果与实际会造成较大误差。Yen 和 Chow (1980) 法推导方法简单, 但是适用区域有限制。Pilgrim 和 Cordery(1975) 法推导较为复杂, 且需统计与所求雨型相同历时的样本。马京津等(2016) 采用 Pilgrim 和 Cordery 法研究北京地区 60 min 和 120 min 雨型, 雨型分布形状一致, 但雨量分配差异较大。前苏联的研究者基于多地区大量降雨实测资料将雨型概括为 7 类, 该雨型分类法是基于实测降雨得出的统计分类法, 对实际降雨过程的雨量分配具有很好的代表性 (莫洛科夫和施果林, 1956), 应用研究也表明此方法具有较好适用性 (王彬雁等, 2015)。

辽宁省地处中纬度地带北部, 复杂的地形及特殊的地理位置使其成为中国北方暴雨多发区之一 (常姝婷等, 2024), 近几十年来辽宁暴雨也呈弱增加趋势 (杨浩等, 2025)。辽宁省暴雨虽不及南方省份多, 但因地表土壤、石块干燥松散, 强降雨易导致径流中充满沉积物, 浑浊的洪流破坏力显著增强, 再加上防洪排涝基础设施相对落后, 现有的防洪排水设计难以应对极端强降雨带来的隐患, 暴雨天气可能导致城市内涝。例如, 2024 年 7 月 25—28 日, 盘锦市遭遇强降雨天气过程, 盘山气象站累计降雨量达 269.8 mm, 突破该市 1957 年有正式气象记录以来历史极值。此次过程降雨量之大、过程之集中、极端性之强历史罕见, 导致盘锦城区内涝, 农田渍涝, 灾情严重。目前, 针对东北地区雨型分类研究工作较少, 李昌伟 (2017) 采用 Pilgrim 和 Cordery、Huff、Keifer 和 Chu 三种雨型方法开展了沈阳市短历时设计暴雨雨型研究工作, 结果表明 Pilgrim 和 Cordery、Huff 两种雨型设计方法结果更接近实际降雨。本文基前于苏联学者的 7 类雨型法 (莫洛科夫和施果林, 1956) 开展盘锦地区雨型及特征研究, 以期合理设计防洪排涝设施, 提升城市防洪排涝能力。

本文基于 1972—2023 年盘锦市盘山国家气象站 (以下简称盘山站) 的分钟降雨资料, 首先分析了长历时暴雨的气候特征并进行天气分型, 然后采用模糊识别法和目估识别法相结合方式对盘锦市长历时暴雨进行识别和分型, 并分析其雨峰特征, 最后结合历史灾情数据统计易致灾的雨型分布, 以期为盘锦市防涝抗涝提供决策参考。

1 资料与方法

1.1 资料及研究区域介绍

本文的降雨资料使用盘锦市盘山站原始降雨观测数据, 时间间隔为 1 min, 时间段为 1972—2023 年。其中, 1972—2003 年降雨数据为采用中国气象

局 “降水自记纸彩色扫描数字化处理系统”对自记纸进行图像扫描及数据处理, 并经人工审核或修正后所得; 2004—2023 年数据为新型自动气象站自动记录的逐分钟降雨数据。所有数据经过严格的质量检查、审核, 满足使用需求。考虑到市政排水设计最小时段为 5 min, 将分钟数据处理为以时间步长为 5 min 间隔的降雨数据。

天气形势资料采用中央气象台官网(https://www.nmc.cn)发布的逐日 08 时 (北京时, 下同) 和 20 时东亚地面海平面气压场及 500 hPa、700 hPa、850 hPa 高空高度场天气形势资料, 时间段为 1972—2023 年。

暴雨灾情数据 来源于《中国气象灾害大典·辽宁卷》及《中国气象灾害年鉴》。《中国气象灾害大典·辽宁卷》记录了辽宁省 1984—2000 年的暴雨灾害。《中国气象灾害年鉴》时间为 2001—2023 年, 记录了全国各地的各类灾情。每次暴雨灾情包括暴雨灾情发生地、起止时间、受灾受困人口、倒塌损坏房屋间数、农作物受灾成灾面积、农业经济损失等记录。

盘锦市位于松辽平原南部, 南临渤海, 夏季雨量充沛, 每年 6—8 月的雨季都有可能发生暴雨。盘锦市属平原地区, 比降小, 水系发达, 境内辽河、大辽河 (浑河、太子河交汇后名称)、饶阳河、大凌河等四条大河均由此入海, 特殊的地理条件导致防汛受自身降雨、上游河道来水和潮水顶托三重因素影响, 防汛工作时间长且难度大。盘锦市地形分布见图 1。

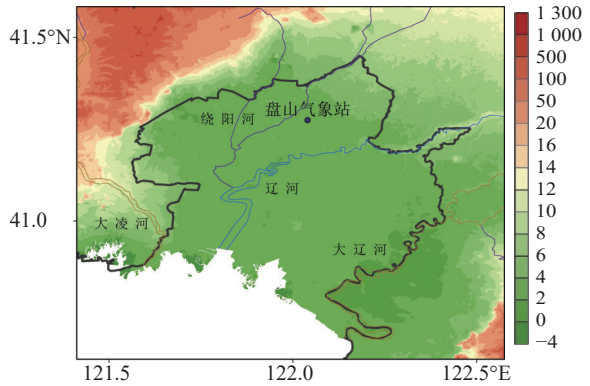


图 1 盘锦市地形及海拔高度(单位: m)分布图

Fig. 1 Topography and elevation (unit: m) in Panjin

1.2 研究方法

1.2.1 长历时暴雨定义

长历时暴雨是指持续时间较长的暴雨事件, 通常超过数小时或数天。不同历时的暴雨雨型相差较大, 且其对城市排水的影响不同。陈靖等 (2022) 研究结果表明, 12 h 和 24 h 长历时与 6 h 以内短历时雨型在不同重现期的暴雨分布特征上存在相反的规律。客观了解一个地区历史暴雨雨型特点及其所致洪涝灾害的差异, 将更有利于改善防洪排水设施的设计。对于排涝设施, 为进行科学的设计, 需确定整场降雨所产生的径流体积, 因此所需的降雨历时比管道确定峰值流量的降雨历时要长。根据国内外城市内涝防治的相关经验, 应用于城市排水防涝工程的长历时设计暴雨雨型持续时间一般为 24 h (周玉文等, 2016), 因此, 本文定义降雨时长在 6~24 h 且降雨量在 50 mm 以上降雨场次为长历时暴雨。

1.2.2 降雨场次划分

合理划分降雨场次是研究暴雨雨型的第一步。按照实际降雨量演变对降雨序列进行降雨场次划分时, 最小降雨间隔时间的合理确定极为关键。研究发现, 6 h 是对降雨场次数量影响不显著的降雨间隔时间阈值, 当降雨间隔时间超过 6 h, 其对有效降雨场次数量的影响不显著 (张宇航等, 2019; Wang et al., 2021)。因此, 本文首先对盘锦市降雨场次划分以滚动的 6 h 为时间间隔, 间隔超过 6 h 且间隔时间内降水总量小于 0.1 mm, 则划分为 2 场降雨。按上述标准, 统计 1972—2023 年盘山站长历时暴雨共 32 场, 短历时暴雨为 9 场(多数样本时间为 3 h 以内)。

1.2.3 雨型设计方法

因雨型设计受时长选择的影响, 为了比较精确的判定雨型类型, 本文样本为各场长历时暴雨连续强降雨主体部分, 即剔除连续强降雨主体部分前、后不连续的 5 min 降雨量小于 0.1 mm 的零星降雨, 这些样本涵盖了盘山站实测的极端降雨情况, 对于防洪排涝有重要的参考意义。

每场降雨大多会呈现不同的降雨演变特征。本文采用 7 类降雨演变图 (莫洛科夫和施果林, 1956) 的雨型设计方法 (图 2) 分析盘锦市长历时雨型特点。其中Ⅰ—Ⅲ为单峰型, 雨峰分别位于前、后、中; Ⅳ为均匀性降水, 降水量在时间分配上比较均匀; Ⅴ—Ⅶ为双峰型, 雨峰分别位于前部和后部、前部和中部、中部和后部。

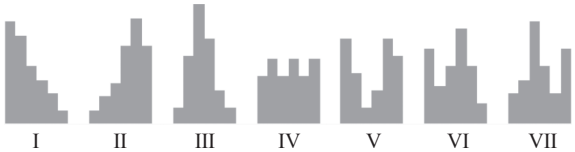


图 2 7 种暴雨雨型示意图 (莫洛科夫和施果林, 1956)

Fig. 2 Diagram of 7 typical patterns of rainstorm (MO L K and Si K L, 1956)

王彬雁等 (2015) 利用上述 7 类雨型分类法, 对北京地区 1961—2004 年 1 440 min 内降雨量大于等于 50.0 mm 的降雨事件进行雨型分类研究, 所得降雨分布特征与其他学者研究结论相一致, 表明该方法在实际应用中较好的适用性。本文采用王彬雁等

(2015) 7 类雨型 6 个阶段雨量分配方法，每类雨型各个阶段雨量占总雨量比例见表 1。

表 1 7 种暴雨雨型 6 个阶段雨量分配 (王彬雁等, 2015)

Table 1 The precipitation distribution in 6 periods for 7 rainstorm patterns (Wang et al., 2015)

雨型	阶段1	阶段2	阶段3	阶段4	阶段5	阶段6
Ⅰ	7/23	6/23	4/23	3/23	2/23	1/23
Ⅱ	1/26	2/26	3/26	6/26	8/26	6/26
Ⅲ	1/20	4/20	7/20	5/20	2/20	1/20
Ⅳ	3/21	4/21	3/21	4/21	3/21	4/21
Ⅴ	5/20	3/20	1/20	2/20	5/20	4/20
Ⅵ	4/18	2/18	3/18	5/18	3/18	1/18
Ⅶ	2/23	3/23	7/23	4/23	2/23	5/23

注: 分母为6个阶段降水总量，分子为各阶段降水份额。

1.2.4 雨型识别方法

雨型识别通常有两种方法，目估识别和模糊识别法 (岑国平等, 1998)。目估识别法即绘制降水过程图，人工判断暴雨雨型，该方法简便但人为因素影响较大。模糊识别法是将降水过程与 7 种雨型过程对比，计算相似度，以相似度最大的雨型作为该场降水雨型。本文采用欧几里得距离计算相似度 (岑国平等, 1998) 来识别雨型。具体步骤如下：

(1) 雨型归一化。将表 1 的 7 种雨型分别进行纵、横坐标归一化处理。横、纵坐标刻度值归一化计算公式如下

$$x_i = i / \sum_{i=1}^{6} i \tag{1}$$

$$y_{k,t} = \sum_{t=1}^{t} p_{k,t} / \sum_{t=1}^{6} p_{k,t} \tag{2}$$

式 (1)、(2) 中，i为降水过程的各阶段，数值为 1,⋯,6；k代表 1,⋯,7 种雨型，纵、横坐标保留两位小数即可，如图 3a。

(2) 雨型插值细化。为便于相似度计算，将步骤 (1) 的 7 种雨型归一化结果进行插值处理。横坐标每隔 0.01 取一个点，纵坐标进行线性插值，如图 3b。

(3) 降雨样本归一化。按照步骤 (1) 方法，将各场次降雨数据分别进行归一化处理。

(4) 计算相似度。根据欧几里得距离计算相似度方法，计算每场降雨与 7 种离散化雨型相似度，按从大到小排序将结果输出。相似度 D_k 计算方法为

$$D_k = 1 - \mathrm{sqrt}\left(\sum_{i=1}^{N} (y_{k,i} - p_i)^2 / N \right) \tag{3}$$

式 (3) 中，sqrt表示开方计算，k代表 1, ⋯, 7 种雨型；N为各样本降水序列数。

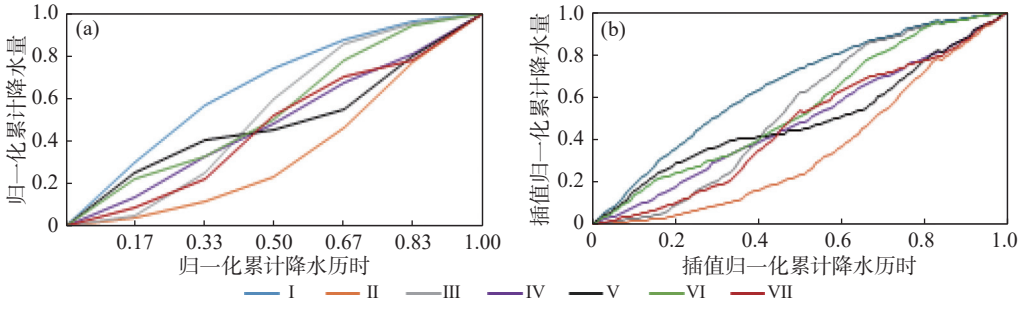


图 3 表 1 中 7 种暴雨雨型归一化累计降水量 (a) 及插值归一化累计降水量 (b) 历时演变

Fig. 3 Evolution of (a) the normalization cumulative precipitation and (b) interpolation of normalization cumulative precipitation for 7 rainstorm patterns in table.1

1.2.5 雨型综合判定方法

由于相似度受噪声及数据分布影响 (Han et al., 2011)，为研究不同采样方式对雨型判定结果的影响程度，对 32 场长历时暴雨样本采用 15 min 取样 (3 个 5 min 雨量累计求和) 以及将降水过程划分为 6 阶段两种采样方式，再利用模糊识别法判定雨型，检验两种采样方式结果是否接近或者一致。对 32 场长历时暴雨样本的雨型计算结果表明，采用两种数据采样方法所得结果较为一致，仅 2020 年 8 月 24 日盘锦市降水雨型判定结果有差异。图 4a 为 2020 年 8 月 24 日 05 时开始盘锦市 5 min 雨量演变，此降水过程第 50—62 序列 (持续约 60 min) 降水偏少，目估识别判定为Ⅶ型。图 4b 为该降雨样本两种重采样 (15 min 取样、分为 6 阶段) 方式结果和Ⅱ、Ⅶ雨型的插值归一化累积降水量历时演变。采用模糊识别法判定 15 min 取样后的 2020 年 8 月 24 日降水雨型与Ⅶ、Ⅱ最为相近，相似度结果为 0.90、0.891，若将样本降水分 6 阶段，雨型与Ⅱ、Ⅶ最为相近，相似度结果分别为 0.894、0.882，两种数据采样方式导致雨型判定结果相反。综合两种方法，判定为Ⅶ型较为合

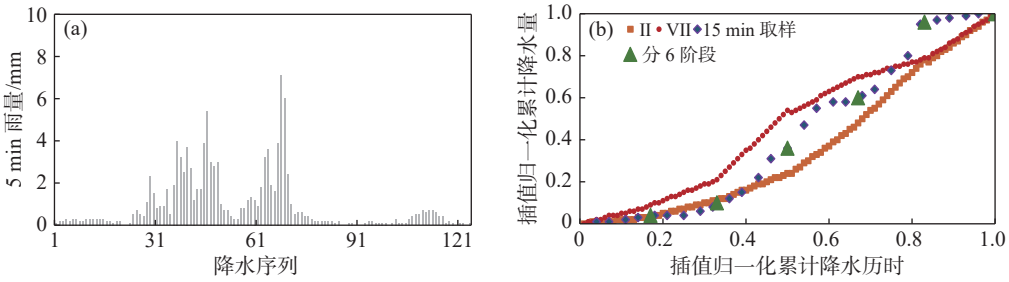


图 4 2020 年 8 月 24 日 05 时到 15 时 30 分盘锦市 5 min 雨量降水序列 (a) 及其重采样样本(15 min 取样、分 6 阶段)和Ⅱ、Ⅶ雨型的插值归一化累积降水量历时 (b) 演变

Fig. 4 Distribution of (a) 5-min precipitation and (b) the interpolation curves of normalization cumulative precipitation for Ⅱ, Ⅶ rainstorm patterns and sampling precipitation (15 min, divided into 6 parts) in Panjin City from 05:00 BT to 15:30 BT on August 24, 2020

理。相比较而言, 采用 15min 取样方式相对比较合理。

综上可见, 仅采用模糊识别法以相似度结果判定雨型结果不一定准确。经过统计, 32 场长历时暴雨样本中共有 9 场采用模糊识别法以相似度结果判定雨型不太合理, 比例高达约 28.1%。以盘锦市 1975 年 7 月 30 日降水过程 (图 5a)、1994 年 8 月 15 日降雨过程 (图 5b) 为例。1975 年 7 月 30 日降雨为 32 场长历时暴雨中唯一一个在 24 h 内只有 5 min 无降雨的样本, 降雨持续时间长, 较为少见。从图 5a 可见, 此降雨样本有 3 个峰值, 第一个峰值最小, 第二和三个峰值相对比较明显, 最为显著的主峰在第 279 序列处, 根据目估识别法可以识别为双峰Ⅴ型。模糊识别法识别前三位雨型分别是Ⅳ、Ⅴ、Ⅶ型, 相似度结果分别为 0.891、0.888、0.888, 三个相似度数值十分接近, 若判定为Ⅳ均匀型, 显然不太合理, 采用模糊识别和目估识别相结合可以判定为Ⅴ型。1994 年 8 月 15 日 22 时出现平稳的降雨 (图 5b), 由绘图目估识别可以识别为Ⅳ均匀型。模糊识别法识别的前三位雨型分别是Ⅱ、Ⅳ、Ⅶ型, 相似度结果分别为 0.930、0.899、0.899, 第二、三个相似度一致, 若判定为Ⅱ型, 也不太合理, 采用模糊识别和目估识别相结合判定为Ⅳ型。上述两次暴雨个例的雨型分析表明, 采用模糊识别和目估识别相结合判断雨型较为合理。

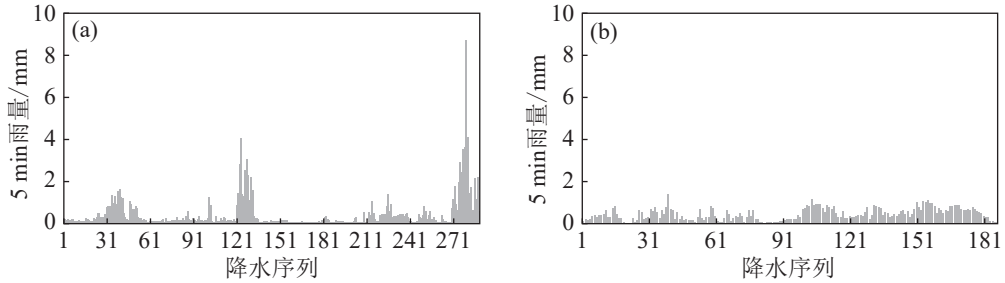


图 5 1975 年 7 月 30 日 03 时至 31 日 03 时 (a)、1994 年 8 月 15 日 22 时至 16 日 14 时 (b) 盘锦市 5 min 雨量降水序列分布

Fig. 5 Distribution of 5-min precipitation in Panjin City (a) from 03:00 BT on July 30 to 03:00 BT on July 31, 1975 and (b) from 22:00 BT on August 15 to 14:00 BT on August 16, 1994

2 结果分析

2.1 长历时暴雨气候特征

在 1972—2023 年间, 按照年代际统计 (表 2), 除 21 世纪 00 年代, 盘锦市长历时暴雨出现场次相对最少, 仅 3 场 (9.4 %), 20 世纪 90 年代, 有 5 场 (15.6 %), 在 2021—2023 间的仅 3 年间共计出现 4 场 (12.5 %), 其余年代长历时暴雨出现场次相对较多, 在 5—7 场 (15.6 %~21.9 %) 之间。从年内看, 长历时暴雨主要分布在 7 月、8 月, 分别为 12 场 (37.5 %)、14 场 (43.8 %), 其次是 5 月、6 月, 各为 2 场 (6.3 %), 9 月和 4 月各出现过 1 场 (3.1 %)。长历时暴雨持续时间以 6~10 h 居多, 为 14 场 (43.8 %), 10~18 h 为 15 场 (46.9 %), 超过 18 h 的相对较少, 为 3 场 (9.4 %)。降水总量在 90~110 mm 之间的长历时暴雨场次最多, 为 12 场 (37.5 %), 其次, 在 70~90 mm、110~130 mm 之间的场次较多, 分别为 8 场 (25.0 %)、7 场 (21.9 %), 在 130~200 mm 之间的有 3 场 (9.4 %), 超过 200 mm 的有 1 场 (3.1 %), 在 50~70 mm 之间的有 1 场 (3.1 %)。

近年来, 盘锦市长历时暴雨呈增加趋势, 尤其是主汛期的 7 月、8 月, 要重点关注时长为 6~18 h 的长历时暴雨。

2.2 长历时暴雨天气分型

对长历时暴雨天气进行天气形势分型, 可以有效提升长历时暴雨的预报能力, 为防灾减灾提供更

表 2 1972—2023 年盘锦市长历时暴雨场次统计结果

Table 2 Statistics of long-duration rainstorms events in Panjin City from 1972 to 2023

降水总量		持续时间		月份		年代	
降水总量/mm	场次	持续时间/h	场次	月份	场次	年代	场次
(50, 70]	1	(6, 8]	7	4	1	1972—1980	6
(70, 90]	8	(8, 10]	7	5	2	1981—1990	7
(90, 110]	12	(10, 14]	4	6	2	1991—2000	5
(110, 130]	7	(14, 16]	6	7	12	2001—2010	3
(130, 200]	3	(16, 18]	5	8	14	2010—2020	7
>200	1	>18	3	9	1	2021—2023	4

好的气象服务。盘锦地区暴雨多出现在 4—9 月份，主要集中在 7—8 月份。春季，在北支锋区的影响下冷暖空气交替频繁，蒙古气旋、东北低压、贝湖气旋等北方气旋增多，盘锦地区受其影响可出现暴雨天气，但降水量较少，持续时间不长。同时，4—6 月份是东北冷涡高发期，盘锦地区处于冷涡底部，午后至前半夜是暴雨的高发时段。夏季，西太平洋副热带高压 (以下简称副高) 脊线平均位置逐渐北抬至 25°—30°N，最北位置可达 40°N 附近，盘锦地区暴雨天气逐渐开始增多。在副高后部和贝加尔湖大槽前部气流的引导下，倒槽、华北气旋、黄河气旋、江淮气旋 (王宁等, 2022) 等不断入侵，提供了充沛水汽，配合辐合上升等有利条件，导致暴雨天气频发。尤其是近年来全球气候变暖也加剧了副高面积增大、强度增强和位置西伸等的变化 (李扬等, 2019)。秋季，副高南撤，锋区压在 35°—40°N 一带，北方气旋增多，但次于春季，北方气旋仍可给盘锦地区带来暴雨。

利用 1972—2023 年逐日 08 时、20 时的东亚地区地面天气形势资料及 500 hPa、700 hPa、850 hPa 高空天气形势资料，统计分析盘锦地区长历时暴雨天气发生时的高空和地面天气形势，依据天气系统的不同，将盘锦地区长历时暴雨天气形势分为北上气旋型、冷锋型、大型气旋型和东北冷涡型 (孙力等, 2010)，各类天气形势特征及占比见表 3。

表 3 1972—2023 年盘锦市长历时暴雨天气形势、占比及特征

Table 3 The classification and characteristics of synoptic situations associated with long-duration rainstorms in Panjin City from 1972 to 2023

类型	占比	特征
北上气旋型	42.3 %	南来系统水汽充沛，辐合上升条件好，一般可维持2~3 d，暴雨具有降水量大、强度强等特点
冷锋型	20.4 %	冷锋在东移南下过程中，受副高阻挡，造成长时间连续阴雨的天气，一般可维持3~4 d
大型气旋型	28.7 %	蒙古气旋、东北低压、贝湖气旋等北方气旋是导致暴雨的主要天气系统，一般可维持1~2 d，暴雨持续时间不长，降水量不大
东北冷涡型	8.6 %	受东阻塞高压影响，东北冷涡深厚少动，一般可维持3~4 d，当冷涡发展强烈时，暴雨天气具有起止突然、强度变化大的特点

盘锦市长历时暴雨首先多出现于北上气旋和大型气旋控制的天气形势下，其次，冷锋东移南下的天气常给盘锦地区带来连阴雨天气。东北冷涡为东北地区多发的天气系统，也会给盘锦地区带来一定的强降水过程。

2.3 长历时暴雨雨型分布及灾情

表 4 显示不同年代际盘锦市长历时暴雨 7 种雨型的场次分布。20 世纪 70 年代双峰型长历时暴雨较多，占总样本数的 15.6 %，双峰Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ型分别有 2 场、2 场、1 场，单峰Ⅱ型有 1 场。80 年代单峰型长历时暴雨较多，占总样本数的 15.6 %，单峰Ⅰ、Ⅱ型分别有 3 场、2 场，均匀型有 1 场，双峰Ⅵ型有 1 场。90 年代单峰型长历时暴雨较多，占样本数的 9.4 %，单峰Ⅱ、Ⅲ型分别有 1 场、2 场，均匀型有 2 场。21 世纪 00 年代单峰长历时暴雨较多，占样本数的 9.4 %，单峰Ⅲ型有 3 场，均匀型有 1 场。10 年代单峰长历时暴雨较多，占样本数的 12.5 %，单峰Ⅱ、Ⅲ型分别有 3 场、1 场，均匀型有 2 场。20 年代双峰长历时暴雨较多，占样本数的 6.3 %，双峰Ⅴ、Ⅵ型分别有 1 场、1 场，均匀型有 2 场。整体来看，20 世纪 80 年代至今，单峰型和均匀性长历时暴雨偏多。本文 32 场长历时暴雨样本中，单峰型、均匀型、双峰型分别约占所有样本数的 53.1 %，25.0 %，21.9 %。单峰型长历时暴雨中以峰值位于降雨后期、中期居

表 4 1972—2023 盘锦市长历时暴雨雨型年代分布

Table 4 The distribution of long-duration rainstorm patterns in Panjin City from 1972 to 2023

年代	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ
20世纪70年代		1			2	2	1
20世纪80年代	3	2		1		1	
20世纪90年代		1	2	2			
21世纪00年代			3	1			
21世纪10年代		3	1	2			
21世纪20年代	1			2		1	
合计	4	7	6	8	2	4	1

多。双峰型以峰值出现在降雨前部和后部、前部和中部居多。

目前, 能收集到的盘锦市历史灾情数据时段为1984—2023 年。据统计, 出现大面积严重内涝及暴雨洪涝为 20 次, 与盘山气象站长历时暴雨对应的有14 次, 其余为盘山气象站未监测到或者为短历时暴雨所致。因本文的Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ型长历时暴雨基本出现在 1980 年以前, 未收集到对应灾情数据。据现有灾情统计, Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ型致灾分别有 2 次、3 次、4 次、5 次。其中, 2022 年 7 月 28 日长历时暴雨(Ⅳ型) 导致的灾情最为严重, 绕阳河发生有水文记录以来的最大洪水, 一处堤坝发生溃口, 农作物受灾面积达 14 890.5 hm^2 (占当年耕种土地面积的 26.7 %), 绝产面积 6 995.9 hm^2, 经济损失高达 79 974.34 万元。1985 年 8 月 18—19 日 (Ⅲ型) 过程暴雨量达 300~400 mm 并伴有 6~7 级风, 倒塌房屋达 9 590 间, 农作物成灾面积达 9 800 hm^2, 林木损失 22 000 棵。1994 年 8 月因 2 场长历时暴雨 (均为Ⅳ型) 及分散的短历时强降水导致盘锦市出现了较为严重的灾情, 受灾人口为 1 800 人, 房屋倒塌 1 121 间, 水稻受灾面积 7 000 hm^2, 成灾面积 1 400 hm^2, 冲毁虾池 180 hm^2, 冲毁盐滩 80 hm^2, 损失井盐 6 000 000 kg。Ⅳ、Ⅲ型长历时暴雨一般由比较稳定且持续时间较长的天气系统产生, Ⅳ型长历时暴雨虽没有明显的峰值, 但降水强度平稳且时间长, Ⅲ型长历时暴雨有明显的峰值且较强的降水会持续一段时间, 该两种雨型长历时暴雨易导致盘锦市严重内涝及暴雨洪涝, 在防洪排涝时应引起重视。

3 结论与讨论

本文基于 1972—2023 年盘锦市盘山站分钟降水数据、东亚地面及高空天气形势资料, 分析了盘锦市 6~24 h 长历时暴雨的气候特征并进行天气分型, 采用模糊识别法结合目估识别法将盘锦市长历时暴雨进行雨型分型和识别, 并分析其雨峰和灾情分布特征, 得出如下主要结论:

(1) 1972 年至今, 盘锦市 6 h 以上的长历时暴雨出现年代不均, 21 世纪 00 年代长历时暴雨出现场次相对最少, 其次是 20 世纪 90 年代, 其余年代长历时暴雨出现次数相对较多。长历时暴雨持续时间以 6~10 h 居多, 超过 18 h 的长历时暴雨相对较少。降水量在 90~110 mm 之间的长历时暴雨场次最多。

(2) 盘锦市长历时暴雨出现的环流特征为南来气旋北上 (42.3 %)、冷锋东移南下 (20.4 %)、北方大型气旋 (28.7 %) 和东北冷涡 (8.6 %)。

(3) 盘锦市长历时暴雨样本中, 单峰型长历时暴雨占比为 53.1 %, 均匀型占比约为 25.0 %, 双峰型占比约为 21.9 %。单峰型长历时暴雨中以峰值位于后期、中期居多。双峰型长历时暴雨中以峰值出现在前部和后部、前部和中部居多。

(4) 据历史灾情统计, Ⅳ(中部单峰)、Ⅲ(均匀) 型长历时暴雨易导致盘锦市严重内涝及暴雨洪涝。

本文涉及的长历时暴雨均为盘锦市气象站实测比较极端的强降雨, 具有一定的典型性和代表性, 研究结果可以为城镇防洪排涝提供参考, 但因降雨有一定的局地性, 盘山站一个站点观测数据未能完全反映出整个盘锦市灾情数据中的某些严重内涝及暴雨洪涝情况, 在后续工作中, 尽量多收集盘锦市内具有 10 a 以上观测期的省级自动气象观测站降雨数据, 进一步进行更全面的补充分析。

参考文献 (References):

岑国平,沈晋,范荣生.1998.城市设计暴雨雨型研究[J].水科学进展,9(1):41−46. Chen G P, Shen J, Fan R S. 1998. Research on rainfall pattern of urban design storm [J]. Advances in Water Science,9(1):41−46 (in Chinese). doi:10.14042/j.cnki.32.1309.1998.01.007

常姝婷,苏亚乔,汪兵,等.2024. 2021 年辽宁西部两次暴雨过程典型特征对比[J].沙漠与绿洲气象,18(2):52−60. Chen S T, Su Y Q, Wang B, et al. 2024. Comparison of typical characteristics of two heavy rainfalls in western Liaoning in 2021 [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(2):52−60 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.02.007

陈靖,李明财,曹经福,等.2022.基于设计暴雨雨型的天津城市内涝模拟研究[J].气象与环境学报,38(6):89−97. Chen J, Li M C, Cao J F, et al. 2022. Urban waterlogging simulation in Tianjin based on designed rainstorm patterns [J]. Journal of Meteorology and Environment,38(6):89−97 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.ln.1673−503x.2022.06.011

成丹,陈翠珍,陈正洪,等.2020.武汉市暴雨的雨量峰值和历时及其排水防涝的分析[J].暴雨灾害,39(5):532−538. Cheng D, Chen C Z, Chen Z H, et al. 2020. Analysis of rainfall peak and duration of rainstorm for drainage and waterlogging prevention in Wuhan [J]. Torrential

Rain and Disasters,39(5):532−538 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2020.05.012

李昌伟.2017.沈阳市短历时设计暴雨雨型研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学:1-107. Li C W. 2017. The short duration design rainstorm pattern research in Shenyang[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University: 1-107 (in Chinese).

李扬,张娇艳,向波.2019.全球变暖背景下西太平洋副热带高压变化的探讨[J].高原山地气象研究,39(2):8−13. Li Y, Zhang J Y, Xiang B. 2019. Discussion on the changes of the western Pacific subtropical high under the background of global warming [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,39(2):8−13 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2019.02.002

马京津,宋丽莉,张晓婧.2016.对两种不同取样方法 Pilgrim&Cordery 设计雨型的比较研究[J].暴雨灾害,35(3):220−226. Ma J J, Song L L, Zhang X J. 2016. The comparison of two different sampling schemes on design storm pattern by the Pilgrim & Cordery [J]. Torrential Rain and Disasters,35(3):220−226 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2015.03.004

莫洛科夫,施果林.1956.雨水道与合流水道[M]. 北京: 建筑工程出版社:1-343. Mo L K, Si G L. 1956. The rain water and confluent channel [M]. Beijing: Architectual Engineering Press: 1-343 (in Chinese)

秦大河,张建云,闪淳昌,等.2015.中国极端天气和灾害风险管理评估报告[R]. 北京: 科学出版社. Qin D H, Zhang J Y, Shan C C, et al. 2015. China National Assessment Report on Risk Management and Adaptation of Climate Extremes and Disasters [R]. Beijing:Science Press (in Chinese).

孙力,隋波,王晓明,等.2010.我国东北地区夏季暴雨的气候学特征[J].气候与环境研究,15(6):778−786 Sun L, Sui B, Wang X M, et al. 2010. Climatic characteristics of the summer hard rain in the northeastern part of China [J]. Climatic and Environmental Research,15(6):778−786 (in Chinese). doi:10069598(2010)06−0778−09

唐明,许文斌,尧俊辉,等.2021.基于城市内涝数值模拟的设计暴雨雨型研究[J].中国给水排水,37(5):97−105. Tang M, Xu W B, Yao J H, et al. 2021. Design rainstorm patterns based on numerical simulation of urban flooding [J]. China Water & Wastewater,37(5):97−105 (in Chinese). doi:10.19853/j.zgjsps.1000−4602.2021.05.015

王安琪,瞿宁玲,陈元芳,等.2018.上海市杨浦区设计面暴雨量与设计暴雨雨型研究[J].水电能源科学,36(8):1−4 Wang A Q, Qu N L, Chen Y F, et al. 2018. Desion storm intensity and design storm pattern of Yangpu district in Shanghai [J]. Water Resources and Power,36(8):1−4 (in Chinese). doi:1000−7709(2018)08−0001−04

王彬雁,赵琳娜,巩远发,等.2015.北京降雨过程分型特征及短历时降雨重现期研究[J].暴雨灾害,34(4):302−308. Wang B Y, Zhao L N, Gong Y F, et al. 2015. Characteristics of temporal pattern and return period of short-duration rainfall at Beijing observatory [J]. Torrential Rain and Disasters,34(4):302−308 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2015.04.002

王宁,马梁臣,霍也.2022.一次爆发性气旋引发东北地区暴雨成因分析[J].气象与环境学报,38(3):19−28. Wang N, Ma L C, Huo Y. 2022. Analysis of rainstorm caused by an explosive cyclone in Northeast China [J]. Journal of Meteorology and Environment,38(3):19−28 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673−503X.2022.03.003

吴雪剑,费建芳,程小平,等. 2014. 一次暴雨过程降水强度“双峰”结构成因分析[J]. 气象科学,34(3): 252-260. Wu X J,Fei J F,Cheng X P,et al. 2014. Diagnostic analysis on precipitation intensity of the rainstorm with“double peak” [J]. Journal of the Meteorological Sciences,34(3): 252-260 (in Chinese). doi:10.3969/2013jms.0072

吴彰春,岑国平,安智敏.1995.坡面汇流的试验研究[J].水利学报,7:84−89. Wu Z C, Chen G P, An Z M. 1995. Research on rainfall pattern of urban design storm [J]. SHUILI XUEBAO,7:84−89 (in Chinese). doi:10.13243/j.cnki.slxb.1995.07.014

杨浩,吴翠红,彭涛,等.2025. 2023 年中国十大暴雨事件评选及过程简介[J].暴雨灾害,44(1):123−132. Yang H, Wu C H, Peng T, et al. 2025. Selection of top ten heavy rainstorm events over China in 2023 and process introduction [J]. Torrential Rain and Disasters,44(1):123−132 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−089

张宇航,杨默远,潘兴瑶,等.2019.降雨场次划分方法对降雨控制率的影响分析[J].中国给水排水,35(13):122−127. Zhang Y H, Yang M Y, Pan X Y, et al. 2019. Influence of rainfall division method on capture ration of rainfall [J]. China Water & Wastewater,35(13):122−127 (in Chinese). doi:10.19853/j.zgjsps.1000−4602.2019.13.023

周玉文,高琳,杨伟明,等.2016.基于水利雨型峰值的城市长历时设计暴雨雨型制作方法:CN 105426346 A[P], 1-10. Zhou Y W, Gao L, Yang W M, et al. The method of long-duration rainstorm pattern design based on rain peak in water conservancy:CN 105426346 A[P]:1-10 (in Chinese)

Han J W, Micheline K, Jian P. 2011. Data Mining: Concepts and Technique [M]. San Francisco:Morgan Kaufmann Publishers:10-82. doi:10.1002/9781118029145.ch1

Huff F A. 1967. Time distribution of rainfall in heavy storms [J]. Water Resources Research,3(4):1007−1019. doi:10.1029/WR003i004p01007

Keifer C J, Chu H H. 1957. Synthetic storm pattern for drainage design [J]. Journal of the Hydraulics Division,83(4):1−25. doi:10.1061/JYCEAJ.0000104

IPCC. 2021. Climate change 2021: the physical science basis [M]. New York:Cambridge University Press:423. doi:10.1017/9781009157896

Pilgrim D H, Cordery I. 1975. Rainfall temporal patterns for design floods [J]. Journal of the Hydraulics Division,101(1):81−95. doi:10.1061/JYCEAJ.0004197

Wang D S, Wang X W, Liu L, et al. 2021. Urban signatures in the spatial clustering of precipitation extremes over mainland China [J]. Journal of Hydrometeorology,22(3):639−656. doi:10.1175/JHM−D−20−0063.1

Yen B C, Chow V T. 1980. Design hyetographs for small drainage structures [J]. Journal of the HydraulicsDivision,106(6):1055−1076. doi:10.1061/JYCEAJ.0005442

Zhang W X, Furtado K, Wu P L, et al. 2021. Increasing precipitation variability on daily-to-multiyear timescales in a warmer world [J]. Science Advances,7(31):1−11. doi:10.1126/sciadv.abf8021

(责任编辑 张 文)