

# 1960—2024 年吉林省不同量级降水时空变化特征

牛天一<sup>1</sup>, 宋爽<sup>2</sup>, 王宁<sup>3</sup>, 马梁臣<sup>1</sup>, 纪玲玲<sup>2</sup>, 胡瑞<sup>1</sup>, 赵怡凡<sup>1</sup>

(1. 吉林省气象服务中心, 吉林 长春 130062;

2. 吉林省气象台, 吉林 长春 130062; 3. 吉林省气象科学研究所, 吉林 长春 130062)

**摘要:** [目的] 分析吉林省 1960—2024 年各等级降水变化特征, 为吉林省水土资源可持续管理、旱涝灾害风险防控提供科学依据。[方法] 基于吉林省 1960—2024 年 47 个气象站逐日降水资料, 采用线性趋势分析、相关性分析和 Hurst 指数等方法, 研究不同等级降水量、降水日数及降水强度时空变化特征及其趋势持续性。[结果] 研究期内, 吉林省降水结构发生明显变化, 小雨量和小雨日数 ( $p < 0.05$ ) 均呈减少趋势, 暴雨量和暴雨日数显著增加 ( $p < 0.05$ )。除大暴雨强度略有下降外, 其余等级降水强度均呈增强态势。中雨对总降水的贡献度最大 (33.44%), 小雨次之 (33.14%); 小雨发生率最高 (83.11%), 但其贡献度和发生率均呈下降趋势, 暴雨的贡献度和发生率显著上升。总降水量变化主要受大雨影响, 总降水日数变化由小雨日数主导, 总降水强度与大雨、暴雨的量值与日数密切相关。空间上, 各等级降水量与日数均呈东南高西北低的分布格局, 但各等级降水强度空间异质性较大。值得注意的是, 暴雨增加、小雨减少的降水结构转型在全省范围内普遍存在, 但其强度存在区域差异。地理因子的交互作用对中小雨量及日数的空间分异控制显著; 而暴雨以上等级降水更多地受局地天气系统影响, 与地理因子关联性较弱。Hurst 指数分析显示, 除大暴雨强度未来变化可能逆转外, 其余等级降水指标的历史变化趋势均具有较强的持续性。[结论] 吉林省降水结构正向“暴雨事件增加, 小雨事件减少”的极端化方向发展。未来在区域水土安全与气象灾害防治研究及政策制定时应予以重视。

**关键词:** 降水量; 降水日数; 降水强度; 降水等级; 吉林省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0178-13

中图分类号: P426.6

**文献参数:** 牛天一, 宋爽, 王宁, 等. 1960—2024 年吉林省不同量级降水时空变化特征[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 178-190. Niu Tianyi, Song Shuang, Wang Ning, et al. Spatiotemporal variation characteristics of different grade precipitation in Jilin Province from 1960 to 2024 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 178-190.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.037

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.037

## Spatiotemporal variation characteristics of different grade precipitation in Jilin Province from 1960 to 2024

Niu Tianyi<sup>1</sup>, Song Shuang<sup>2</sup>, Wang Ning<sup>3</sup>, Ma Liangchen<sup>1</sup>, Ji Lingling<sup>2</sup>, Hu Rui<sup>1</sup>, Zhao Yifan<sup>1</sup>

(1. Meteorological Service Center of Jilin Province, Changchun, Jilin 130062, China;

2. Meteorological Observatory of Jilin Province, Changchun, Jilin 130062, China;

3. Institute of Meteorological Science of Jilin Province, Changchun, Jilin 130062, China)

**Abstract:** [Objective] The variation characteristics of different precipitation grades in Jilin Province from 1960 to 2024 were analyzed in order to provide a scientific basis for the sustainable management of water and soil resources and the prevention and control of drought and flood disaster risks in the province. [Methods] Based on daily precipitation data from 47 meteorological stations in Jilin Province from 1960 to 2024, methods including linear trend analysis, correlation analysis, and Hurst exponent were employed to investigate the spatiotemporal variation characteristics and trend persistence of precipitation amount, precipitation days, and precipitation intensity across

收稿日期: 2025-08-25

修回日期: 2025-12-15

采用日期: 2025-12-19

资助项目: 松辽流域气象科技创新项目“基于机器学习和 GIS 技术的松辽流域暴雨洪涝灾害风险预估模型的建立”(SL202403)

第一作者: 牛天一(1996—), 女(汉族), 吉林省长春市人, 硕士, 工程师, 主要从事气象服务及灾害风险评估。Email: 935938344@qq.com。

通信作者: 马梁臣(1986—), 男(汉族), 辽宁省建昌县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事天气预报和大气物理环境研究。Email: liangchenma@163.com。

different grades. [Results] During the study period, the precipitation structure in Jilin Province underwent significant changes. Both light precipitation amount and light precipitation days showed decreasing trends ( $p < 0.05$ ), while rainstorm amount and rainstorm days increased significantly ( $p < 0.05$ ). Precipitation intensity exhibited an increasing trend for all grades except for heavy rainstorm intensity, which showed a slight decline. Moderate rain contributed the most to total precipitation (33.44%), followed by light rain (33.14%). Light rain had the highest occurrence frequency (83.11%). However, both its contribution and occurrence frequency showed decreasing trends, whereas those of rainstorms increased significantly. Changes in total precipitation amount were mainly influenced by heavy rain, changes in total precipitation days were dominated by light rain days, and total precipitation intensity was closely related to the amount and days of heavy rain and rainstorms. Spatially, precipitation amounts and days for all grades exhibited a pattern of higher values in the southeast and lower values in the northwest, while precipitation intensity showed considerable spatial heterogeneity across different grades. Notably, the transformation of precipitation structure characterized by increased rainstorm events and decreased light rain events was widespread across the province, albeit with regional variations in its intensity. The interaction of geofactors significantly controlled the spatial differentiation of light and moderate precipitation amounts and days. In contrast, precipitation of rainstorm grade and above was more influenced by local weather systems, showing weaker correlations with geofactors. Hurst exponent analysis indicated that, except for the future trend of heavy rainstorm intensity which might reverse, the historical change trends of other precipitation indicators all exhibited strong persistence. [Conclusion] The precipitation structure in Jilin Province is evolving towards a more extreme pattern characterized by increased rainstorm events and decreased light rain events. Greater attention should be paid to this issue in future research and policy-making related to regional water-soil security and meteorological disaster prevention.

**Keywords: precipitation amount; precipitation days; precipitation intensity; precipitation grades; Jilin Province**

降水是连接大气、陆地和海洋水循环过程的关键组成部分<sup>[1]</sup>,也是调查极端气候事件(如干旱和洪涝)以及制定强有力的水资源规划和管理的重要气候变量<sup>[2]</sup>,对水循环、水生态和社会经济可持续发展起着至关重要的作用<sup>[3]</sup>。随着全球气候变暖,降水结构和格局发生了明显变化,降水时空分布的非均匀性加剧,导致旱涝灾害频发<sup>[4]</sup>。降水的持续时间、量级、地点、频率和强度对地球系统的能量循环、水循环、生态环境、人类活动有重大影响<sup>[5]</sup>,因此降水的变化特征及其影响始终是气象研究中的热点。

按不同降水量等级可将降水分为不同等级降水,不同等级降水存在不同程度的变化趋势和波动特征,进而深刻影响区域气候、生态和人居环境<sup>[6]</sup>。在全球气候变化背景下,由于极端降水具有突发性、强致灾性及不可预见性等特点。其时空分布特征受到广泛关注,而对于弱降水和中等强度降水研究相对较少<sup>[7]</sup>。全面揭示区域降水结构的演变特征,必须综合考虑不同强度降水的贡献及其空间分异。研究发现,全球气候变暖会导致强降水事件强度和频率的增加<sup>[8]</sup>,且极端降水具有明显的地域性特征,其发生与局地强对流活动密切相关<sup>[9]</sup>。在同一国家内

部不同区域,不同等级降水强度具有明显的差异<sup>[10]</sup>。如伊朗中部和东部低强度和中等强度降水对总降水量的影响更为显著,而在西部和西南部及北部沿海地区强降水和特大降水的贡献更为突出<sup>[11]</sup>。这一地理差异特征,表明在对降水结构解析时需充分考虑气候与下垫面特征。中国幅员辽阔,受多重气候系统与复杂地形影响,降水时空分异性突出。现有研究表明,中国总降水日数主要受弱至中等强度降水日数主导,而总降水量则更多由中等及以上强度降水控制,且降水结构呈显著的“弱降水减少、强降水增加”的极端化趋势,且这种演变格局在不同区域差异明显<sup>[12]</sup>。西北地区存在降水频次减少而强度增强的趋势,小雨、中雨的降水量和降水日数显著减少,而暴雨的降水量、日数和强度则呈增加趋势,降水极端化趋势特征突出<sup>[13-14]</sup>;而南方地区则表现为中雨及以上等级降水,尤其是暴雨的贡献度显著上升,揭示了强降水贡献显著增强的演变趋势,南方地区极端降水对总降水量的支配作用日益凸显<sup>[15-16]</sup>;在北方地区,小雨年发生率虽然最高,但对总降水量贡献最大的是中雨,而小雨则主导着总降水日数的变化,暴雨及以上等级的发生率增加,降

水结构有向极端化转变的态势<sup>[6,17-18]</sup>。以往针对吉林省降水的研究在时间跨度及站点覆盖上存在局限,难以精准解析吉林省不同等级降水的时空分布规律。同时,这些研究多集中于极端降水事件及其对农业的影响等<sup>[19]</sup>方面,缺乏对不同等级降水时空分布特征的系统分析。

本研究基于 1960—2024 年吉林省 47 个气象站逐日降水资料,采用线性趋势分析、Pearson 相关性分析及 Hurst 指数等方法,旨在系统分析吉林省各等级降水变化特征,揭示关键影响因子,明确各等级降水持续性趋势,以弥补该领域研究的不足,为吉林省水土资源可持续管理、旱涝灾害风险防控提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

吉林省位于松辽平原腹地(121°38′—131°19′E, 40°52′—46°18′N),土地肥沃,是中国重要的商品粮生产基地,素有“黄金玉米带”之称。吉林省地势总体呈东南高,西北低的态势。东南部紧邻朝鲜湾,受海洋暖湿气流影响较大,但因长白山脉阻挡,削弱了暖湿气流的北向输送,致使该区域大陆性气候特征明显。西部与内蒙古自治区接壤,靠近内陆干旱区,受干冷气流影响显著。全省年均降水量 400~900 mm,空间分布极不均匀,总体表现为由东南向西北递减的趋势,东南部山区年降水量 710~900 mm,而西部则不足 500 mm。降水空间分布不均导致区域性水问题突出,东南部地区地形陡峭、降水集中,易引发土壤侵蚀和洪涝灾害,严重威胁人民生命财产安全和社会经济发展;西部地区水资源缺乏,干旱灾害频发,严重制约和阻碍吉林省农业的稳产和高产。根据吉林省地理特征,本研究认定白城市和松原市为西部,长春市、四平市、辽源市、吉林市为中部,通化市和白山市为南部,延边朝鲜族自治州(延边)为东部。

### 1.2 数据来源与处理

降水资料来源于吉林省气象局提供的吉林省 1960—2024 年 47 个无缺测气象站点逐日降水资料。该数据集站点分布均匀,覆盖全面,能够较好地表征吉林省不同区域的降水空间分布特征(图 1)。依据国家标准《降水量等级》(GB/T 28592—2012)对日降水事件进行等级划分,采用 ArcGIS 10.8 中精度更高,结果更可靠的普通克里金插值法对不同量级降水进行空间插值,得到各量级降水空间连续分布图,以揭示其空间分布规律。

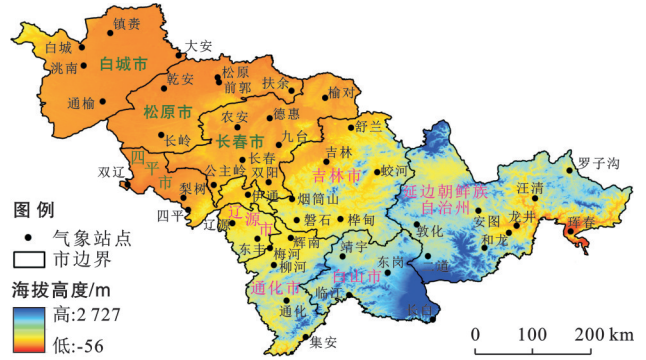


图 1 吉林省气象站点分布

Fig.1 Distribution of meteorological stations in Jilin Province

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 降水等级的划分

依据《降水量等级》(GB/T 28592—2012),将日降水事件划分为 5 个等级。分别统计各等级降水的降水量和降水日数。降水强度为某等级降水量与该等级降水日数之比;降水贡献度为某等级降水量占同期总降水量的比例;降水发生率为某等级降水日数占年总降水日数的比例。具体划分标准见表 1。

表 1 降水量、降水日数及降水强度等级划分标准

Table 1 Classification criteria for precipitation amounts, precipitation days and precipitation intensity levels

24 h 降水量/mm	降水等级	降水日数等级	降水强度等级
≥0.1	总降水	总降水日数	总降水强度
0.1~9.9	小雨	小雨日数	小雨强度
10~24.9	中雨	中雨日数	中雨强度
25~49.9	大雨	大雨日数	大雨强度
50~99.9	暴雨	暴雨日数	暴雨强度
100~249.9	大暴雨	大暴雨日数	大暴雨强度

#### 1.3.2 趋势和相关性分析

采用线性回归法,对各等级降水指标进行拟合,判断其上升或下降趋势,并借助  $F$  检验对趋势显著性进行评估。采用 Pearson 相关分析法,分析各等级降水指标与总降水指标的相关关系。

#### 1.3.3 地理探测器

地理探测器能够揭示某一现象的空间异质性并分析其内部驱动因素,被广泛应用于各领域的统计分析中<sup>[20]</sup>。本研究利用因子探测器和交互作用探测器 2 种模块,对地理因子与吉林省不同等级降水空间异质性的关系进行识别与解释,挖掘吉林省降水空间分异的地理机理。

#### 1.3.4 Hurst 指数分析法

Hurst( $H$ )指数可用于评估降水时间序列的长期记忆性与持续性。本研究通过重标极差法(R/S 分

析)计算 Hurst( $H$ )指数,揭示吉林省不同等级降水趋势持续性。当  $0 < H < 0.5$  时,序列具有反持续性,即未来变化趋势与过去相反; $H = 0.5$  时,序列呈随机状态; $0.5 < H < 1$  时,序列具有正持续性,表明未来变化趋势与过去变化趋势一致<sup>[21]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同等级降水时间变化特征

#### 2.1.1 不同等级降水量时间变化

研究期内,吉林省多年平均降水量为 611.83 mm,倾向率为 10.362 6 mm/10 a。从年际变化趋势(图 2)看,吉林省各等级降水的突出特征是“强增弱减”,除

小雨量呈减少趋势外(倾向率  $-0.137 3$  mm/10 a),其余各等级降水量均呈增加趋势,其中,暴雨的增加趋势最为显著,其变化速率为 4.381 3 mm/10 a 且通过显著性检验( $p < 0.05$ );其次是大雨和中雨,倾向率分别为 4.056 mm/10 a 和 1.487 mm/10 a。强降水增加、弱降水减少的变化趋势可能与气溶胶浓度有关,Alizadeh<sup>[22]</sup>研究发现,气溶胶会使弱降水事件减少,强降水事件增加。中雨、大雨降水量的增加对总降水量增加影响较大,不仅体现在两者较高的增加速率,也表现在关键年份的同步上,总降水量在 2022 年达到峰值,而该年正是中雨和大雨的极值之年。

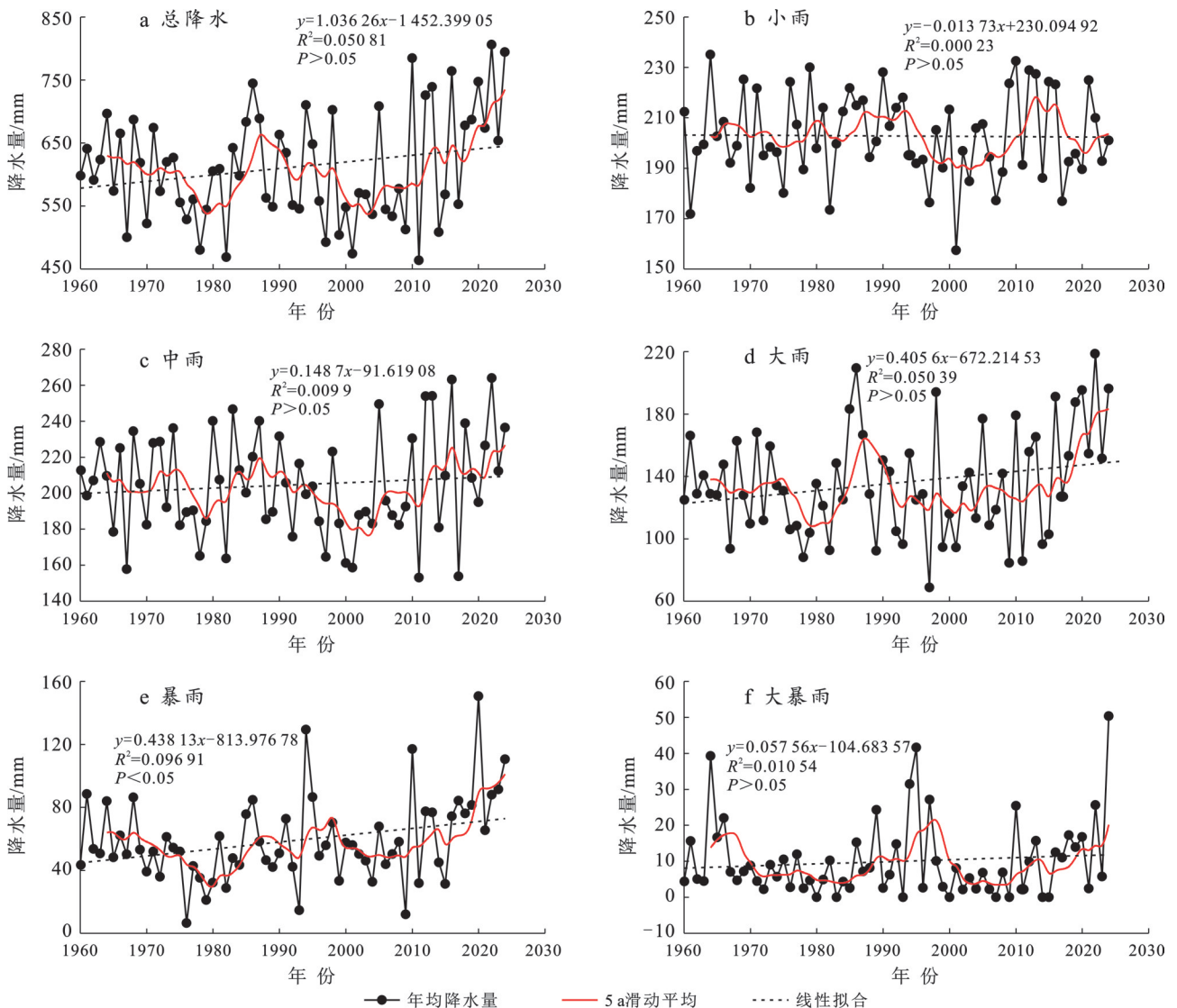


图 2 1960—2024 年吉林省不同等级降水量年际变化

Fig.2 Interannual variations in precipitation amounts of different grades in Jilin Province (1960—2024)

此外,降水极值出现的时间存在明显的年代际差异。除小雨外,各等级降水量最大值均出现在 2010 年之后,尤其自 2020 年以来多个等级降水出现

研究期内极大值;而最小值则集中于 1980 年之前。值得注意的是,2000 年前后,各等级降水普遍出现低谷,可能与全球气候变暖背景下降水格局调整及大

西洋年代振荡(AMO)有关。李邦东等<sup>[17]</sup>研究发现,温度变化可显著影响降水时空均匀性,吉林省降水量在 21 世纪前 10 a 偏少,2010 年后显著上升;薛媛等<sup>[12]</sup>研究表明,东北地区 1990 年代末至 2000 年代 AMO 相关系数由负转正,其正位相对应总降水偏多,与本研究结论一致。

### 2.1.2 不同等级降水日数时间变化

图 3 表明,1960—2024 年吉林省总降水日数以  $-1.3606 \text{ d}/10 \text{ a}$  的倾向率显著减少( $p < 0.05$ ),主要

是由小雨日数以更大幅度显著减少所主导( $-1.6228 \text{ d}/10 \text{ a}$ ,  $p < 0.05$ )。与此相反,强降水日数普遍增加,其中暴雨日数呈显著增加( $0.066 \text{ d}/10 \text{ a}$ ,  $p < 0.05$ ),而中雨、大雨、大暴雨的日数则呈不显著增加趋势。进一步对降雨量与降雨日数对比分析发现,中雨、大雨和暴雨的降水日数与降水量的极值年份高度一致,三者相关系数均通过  $p < 0.01$  的显著性检验,表明强降水事件的“发生时间和降水量”在时间维度上具有高度一致性。

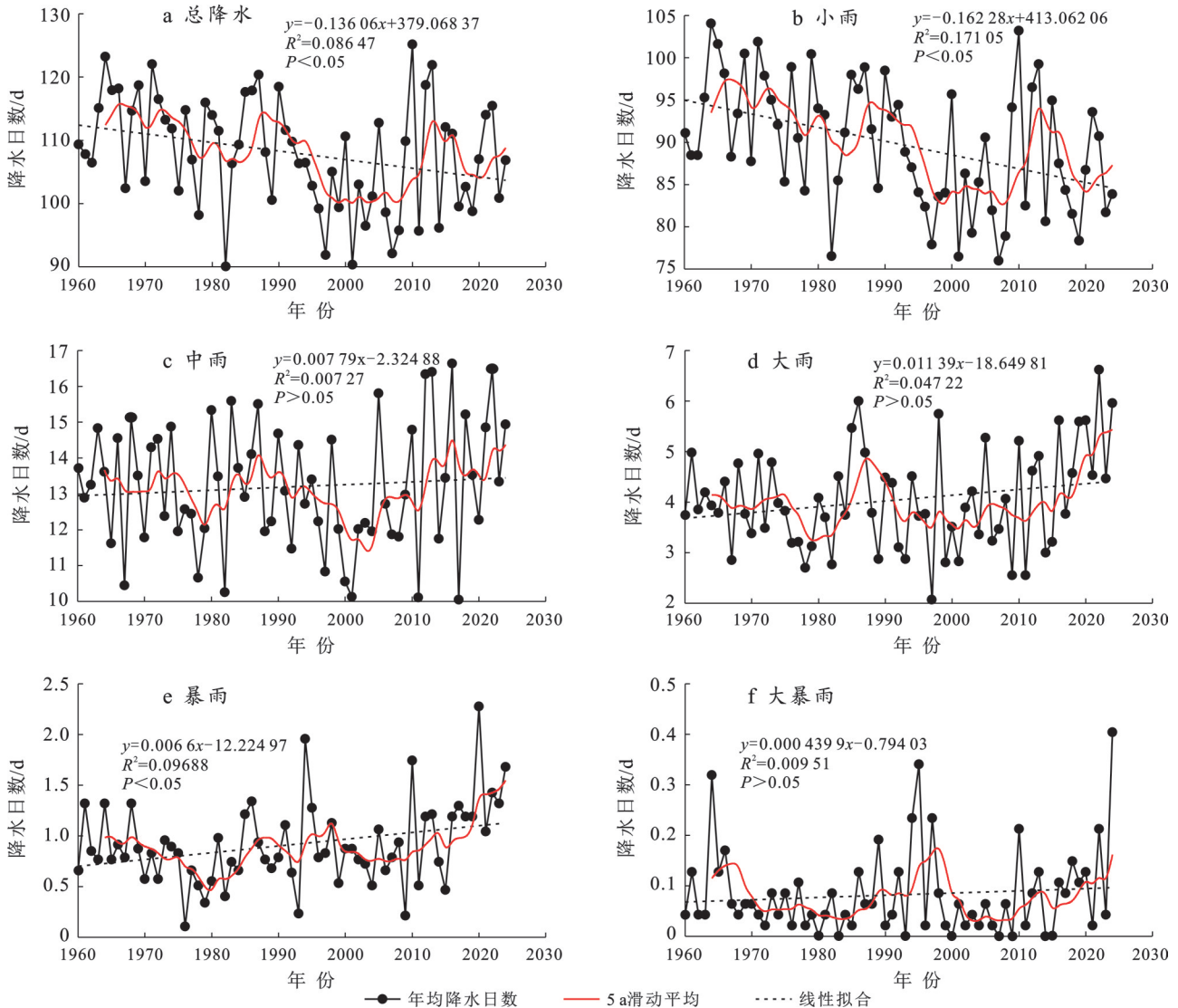


图 3 1960—2024 年吉林省不同等级降水日数年际变化

Fig.3 Interannual variations in precipitation days for different grades in Jilin Province (1960—2024)

从 5 a 滑动平均曲线来看,总降水日数和小雨日数年际变化高度同步,均经历 2 次明显波动;波谷位于 1984 年与 2000 年前后,波峰位于 1988 年与 2013 年,进一步印证了小雨日数的减少是总降水日数减少的主因,与李邦东等<sup>[17]</sup>结论相符。中雨日数亦存在 2 次波动,波谷位于 1979 年和 2004 年,波峰位于 1987 年与 2016 年。大雨日数在 2000 年前有 1 次

明显的波动,之后持续上升,至 2024 年达历史最高。相比之下,暴雨和大暴雨日数研究期内未表现出明显波动,可能与吉林省地形和天气系统有关,强降水事件发生频率较低,年际变化相对平稳。

### 2.1.3 不同等级降水强度时间变化

图 4 表明,1960—2024 年吉林省总降水强度以  $0.1645 \text{ mm}/(\text{d} \cdot 10 \text{ a})$  的倾向率显著增加( $p < 0.05$ ),

均值为 5.66 mm/d, 2024 年最高 (7.44 mm/d), 表明降水过程正趋于集中化。小雨强度同样显著上升, 倾向率为 0.040 2 mm/(d·10 a) ( $p < 0.05$ ), 其与总降水强度 5 a 滑动平均曲线均呈波动增强态势。中雨强度以 0.018 7 mm/(d·10 a) 的倾向率增加, 均值为 15.49 mm/d, 2022 年最高 (16.0 mm/d), 2009 年最低 (14.83 mm/d)。大雨强度倾向率为 0.058 6 mm/(d·10 a), 上升趋势不显著, 1972, 1989, 2015 年出现明显低值。暴雨强度以 0.040 9 mm/(d·10 a) 的倾向

率呈微弱增加趋势, 均值为 64.12 mm/d, 1982 年最高 (71.22 mm/d), 2009 年最低 (56.48 mm/d)。大暴雨强度以 -2.657 1 mm/(d·10 a) 速率波动下降, 均值为 104.62 mm/d, 最大值为 1991 年的 146.25 mm/d。综上, 吉林省降水演变表现为小雨事件强度增加、大暴雨振荡减弱的时间非均匀特征。显著变化集中于总降水和小雨强度, 其他等级趋势不明显, 表明降水结构向常态降水强化、极端强降水减弱的双向调整。

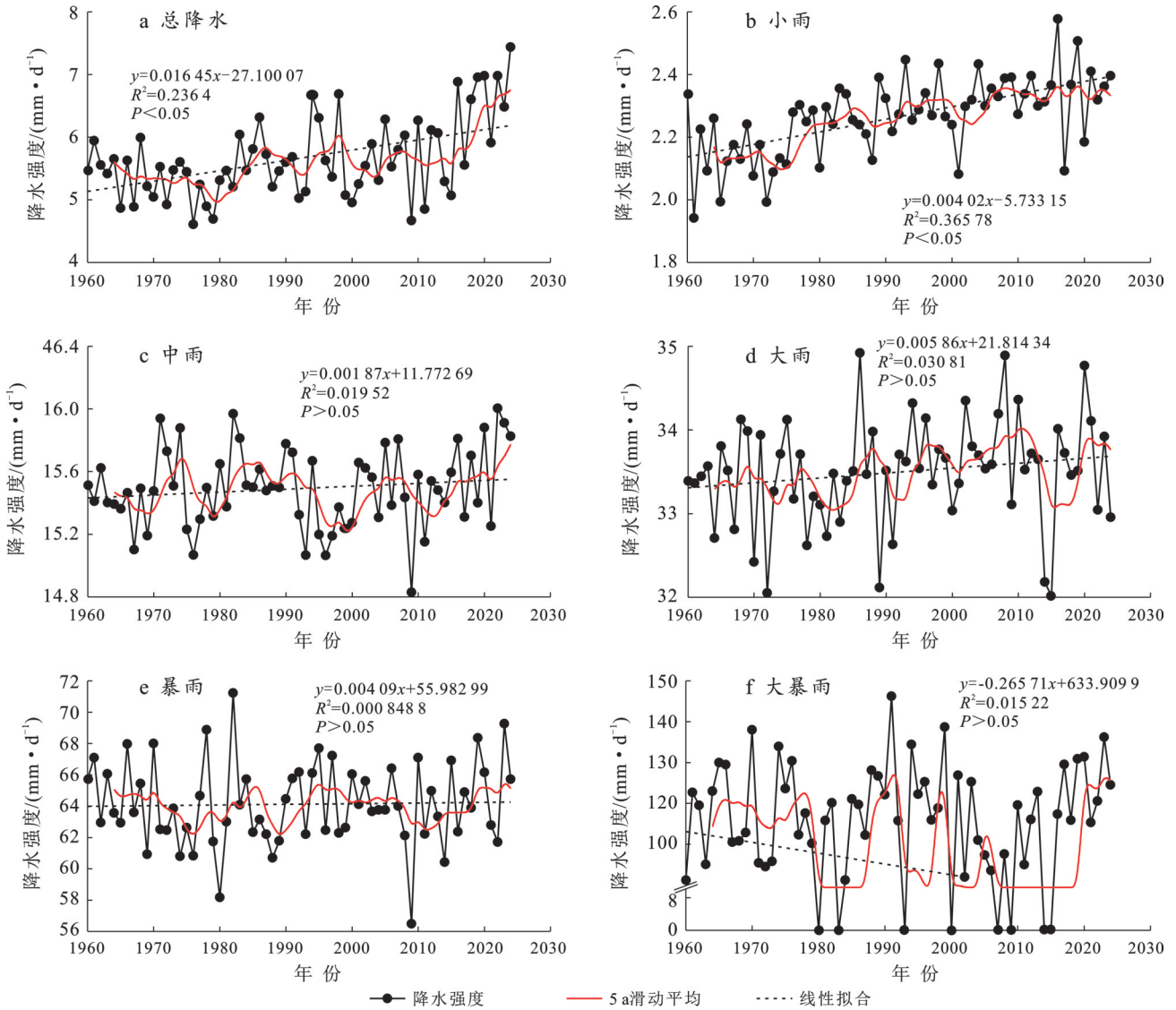


图 4 1960—2024 年吉林省不同等级降水强度年际变化

Fig.4 Interannual variations in precipitation intensity for different grades in Jilin Province (1960—2024)

2.1.4 不同等级降水对总降水的影响

图 5 为吉林省不同等级降水发生率及对总降水量的贡献度年际变化。从贡献度来看, 中雨 (33.44%) > 小雨 (33.14%) > 大雨 (22.19%) > 暴雨 (9.61%) > 大暴雨 (1.63%)。在变化趋势方面, 小雨和中雨对总降水的贡献度呈不显著下降趋势, 其中

小雨贡献度降幅更大, 由 20 世纪 60 年代的 35.53% 下降到 21 世纪 20 年代的 25.30%。相反, 大雨、暴雨和大暴雨的贡献度均呈上升趋势, 其中暴雨上升趋势通过显著性检验 ( $p < 0.05$ ), 从 20 世纪 60 年代到 21 世纪 20 年代, 暴雨贡献度由 7.25% 增至 13.90%。

在降水发生率方面, 随着降水等级的提高, 降水

发生率逐渐降低,表现为小雨(83.11%)>中雨(12.22%)>大雨(3.75%)>暴雨(0.84%)>大暴雨(0.08%)。小雨发生率呈显著下降趋势( $p<0.05$ ),气候倾向率为 $-0.445\%/10\text{ a}$ ,降幅由20世纪60年代的83.38%下降到21世纪20年代的78.49%,但其发生率

仍远高于其他等级;中雨、大雨和暴雨的发生率均显著上升( $p<0.05$ ),气候倾向率分别为 $0.2185\%/10\text{ a}$ , $0.1503\%/10\text{ a}$ 和 $0.0712\%/10\text{ a}$ ,中雨增幅最大,从1960年代的12.55%增至2020年代的13.98%;大暴雨发生率微弱上升,倾向率为 $0.0049\%/10\text{ a}$ 。

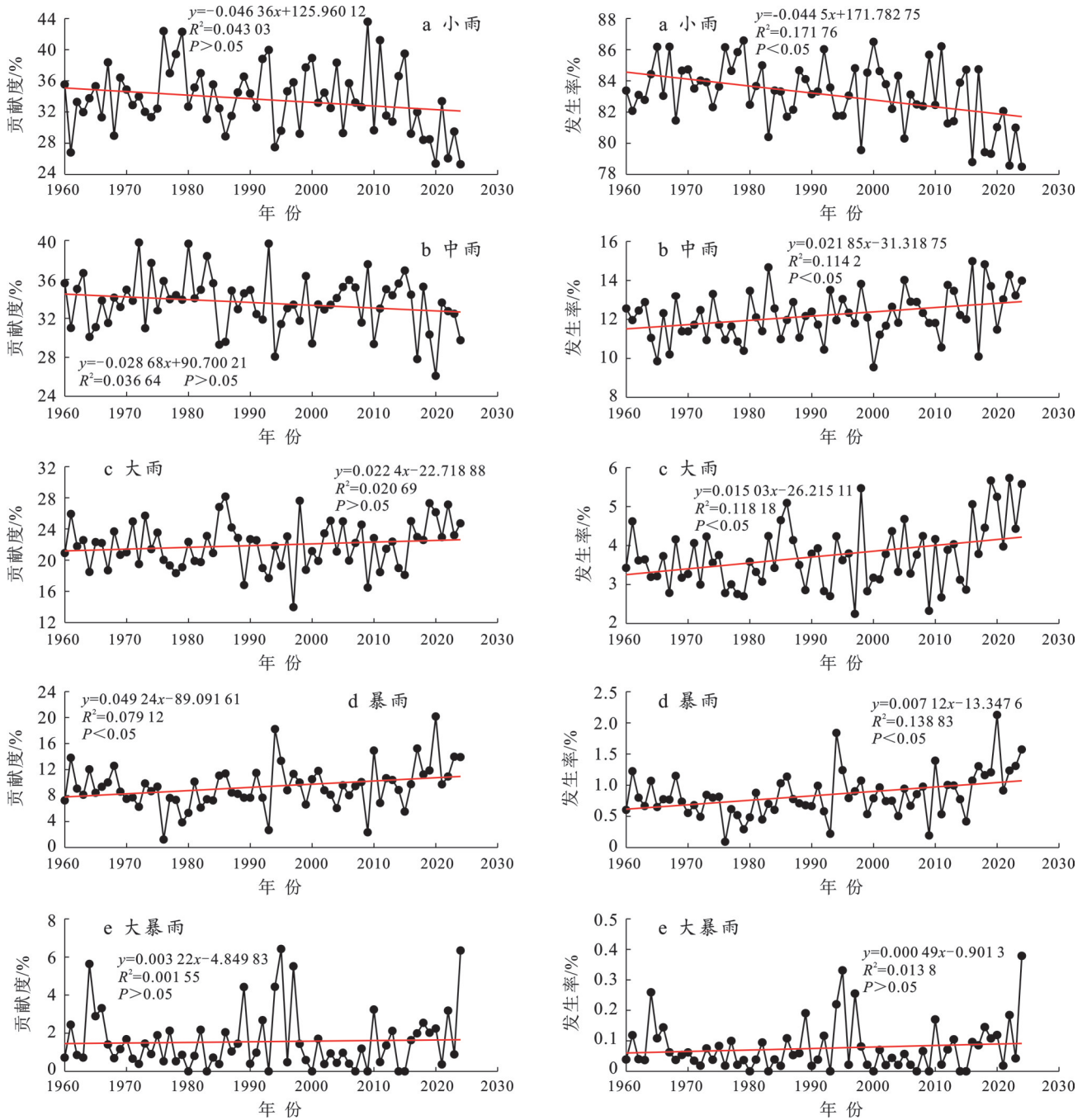


图5 1960—2024年吉林省不同等级降水的贡献度和发生率年际变化  
 Fig.5 Interannual variations in contribution and occurrence frequency of precipitation for different grades in Jilin Province (1960—2024)

吉林省各等级降水量和降水日数均与年总降水量和年总降水日数呈现极显著正相关( $p<0.01$ ) (表2)。年总降水量与各等级降水量的相关系数排序为:大雨>中雨>暴雨>大暴雨>小雨,与大雨降

水量的相关系数最高,为0.918,表明大雨在年总降水量的变化中起主导作用。年降水日数与各等级降水日数的相关系数随降水等级的增加而减少,即小雨>中雨>大雨>暴雨>大暴雨,小雨日数与年总降

水日数的相关系数为 0.956, 远大于其他等级降水日数的相关系数, 说明年降水日数变化由小雨日数主导。此外, 年降水强度与小雨量几乎无关, 与小雨日数呈不显著负相关, 而与中雨及以上等级降水量和降水日数均呈极显著正相关 ( $p < 0.01$ ), 与大雨和暴雨量级及日数相关系数较高, 说明吉林省总降水强度变化主要受大雨和暴雨过程的影响。

## 2.2 不同等级降水空间变化特征

### 2.2.1 不同等级降水量空间分布

利用 ArcGIS 10.8 软件对各站点不同等级降水量进行空间插值, 得到吉林省降水空间分布 (图 6)。由图 6 可知, 吉林省降水量空间分布差异显著, 整体呈东南多、西北少的格局。从变化趋势上看, 全省年总降水量以增加为主, 89% 以上的站点呈上升趋势。不同等级降水的变化存在显著的空间异质性, 小雨在南部地区减少趋势明显, 其中通化站以  $-7.16 \text{ mm}/10 \text{ a}$  的速率显著减少; 而大雨、暴雨、大暴雨事件在多数地区呈增强态势, 特别是暴雨量在双阳、汪清、乾安、前郭、公主岭、烟筒山、磐石和东岗 8 站以超  $7.06 \text{ mm}/10 \text{ a}$  的速率显著增加 ( $p < 0.05$ ), 增幅最大达  $15.19 \text{ mm}/10 \text{ a}$ , 表明区域性极端强降水事件趋于频繁。这一降水格局的形成主要受水汽来源与地形抬升作用的共同影响, 东南部山区主要受西

南暖湿气流影响、临近黄海和日本海, 水汽充沛, 加上长白山脉的抬升作用, 导致降水多; 而西部平原区主要受西风带影响, 离海较远, 地形平坦, 缺乏动力抬升机制, 降水普遍较少<sup>[23]</sup>。研究发现, 在年降水量总体增加的背景下, 小雨事件减少与强降水事件 (尤其是暴雨) 显著增加并存。这一趋势可能加剧干旱与洪涝并存的风险, 对区域水土资源管理和洪涝防控提出更为严峻的挑战。

表 2 吉林省不同等级降水指标与总降水指标相关性  
Table 2 Correlations between precipitation indicators of different grades and total precipitation indicators in Jilin Province

降水指标	相关系数		
	总降水量	总降水日数	总降水强度
降水量	小雨	0.453**	0.000
	中雨	0.802**	0.569**
	大雨	0.918**	0.830**
	暴雨	0.756**	0.815**
	大暴雨	0.474**	0.523**
降水日数	小雨	0.956**	-0.221
	中雨	0.637**	0.535**
	大雨	0.470**	0.827**
	暴雨	0.205**	0.821**
	大暴雨	0.107**	0.518**

注: \*\*表示显著水平为 0.01。

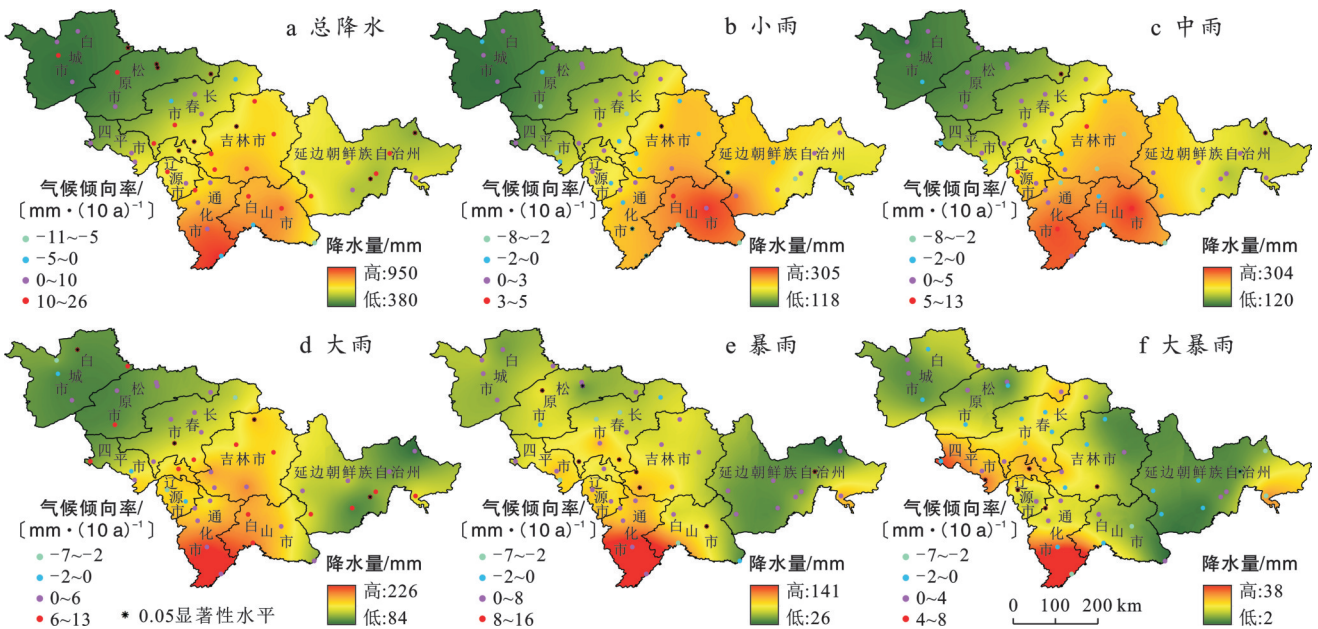


图 6 吉林省不同等级降水量变化趋势空间分布

Fig.6 Spatial distribution of trend variations in precipitation amounts of different grades in Jilin Province

### 2.2.2 不同等级降水日数空间分布

吉林省各等级降水日数与降水量空间分布较为一致, 总体呈东南高, 西北低的格局 (图 7)。各站点降水日数年际变化总体呈现“总日数和小雨日数减

少、大雨、暴雨和大暴雨日数增加”的显著等级差异与空间异质性。总降水日数高值区位于长白-靖宇-东岗-二道一带, 年降水日数在 143.0 d 以上, 低值区集中于白城地区, 降水日数在 79.8 d 以下。值得注

意的是,小雨日数空间分布与总降水日数高度一致,且两者在大部地区呈显著下降趋势,其中小雨日数超 40 站呈下降趋势,下降范围更广,直接主导总降水日数的减少。与之形成对比的是,中雨及以上等级降水日数在大部地区呈增加趋势。其中,大雨日数增加趋势范围更广,全省约 40 个站点呈上升趋势,表明大雨事件发生频率在大部地区正在增加。暴雨日数虽空间占比小,但在 10 个站点呈显著上升( $p < 0.05$ ),表明局部地区极端降水事件风险高,易出现“面弱点强”型降水。大暴雨日数年际波动较小。这

些强降水日数的增加,与总降水日数的下降并存,表明区域降水结构正在向“干日更多,强降雨更频”的方向演变。上述空间格局与变化主要受地形作用影响。东南部山地地形,对气流有强迫抬升作用,使得山区各站点达到“有效降水”的日数(日降水量 $\geq 0.1$  mm)更多,即使较弱的水汽输送,在经过地形抬升作用后也能形成有效降水,因此东南部山区降水日数比西部平原区高<sup>[24]</sup>。小雨日数普遍减少与强降水时间的局部增加,共同导致了吉林省降水日数结构趋于极端化。

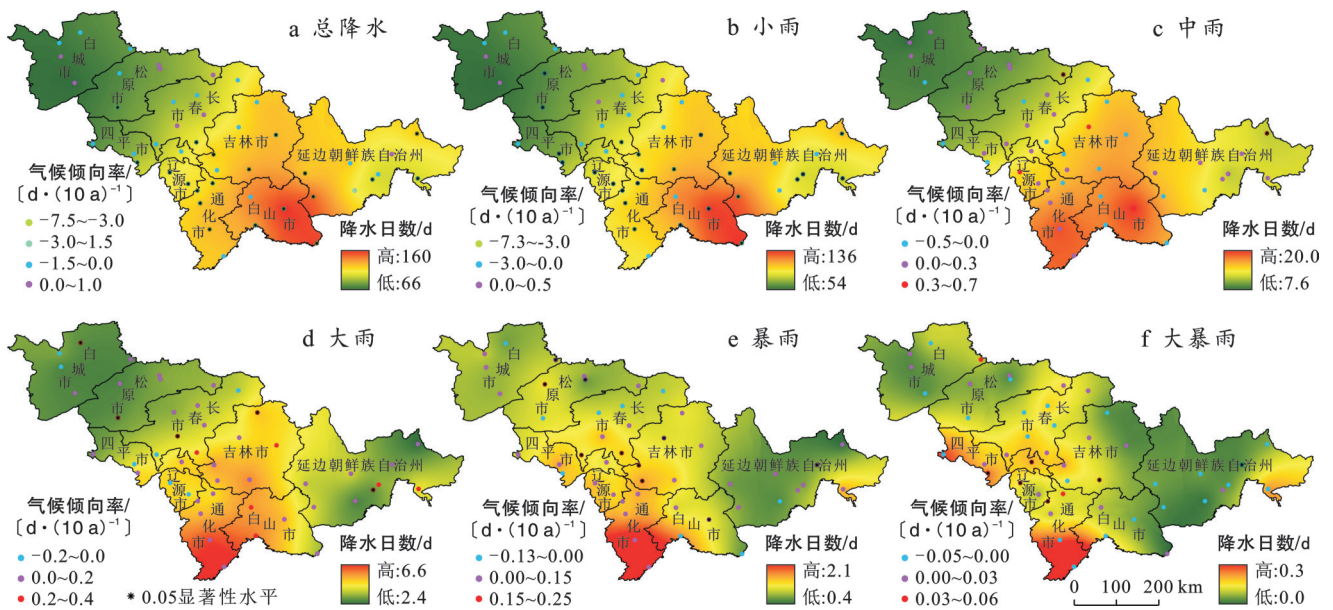


图 7 吉林省不同等级降水日数变化趋势空间分布

Fig.7 Spatial distribution of trend variations in precipitation days of different grades in Jilin Province

### 2.2.3 不同等级降水强度空间分布

从空间格局看,总降水强度由东南向西北递减,各等级降水强度的空间格局差异较大,但各等级降水强度的长期变化趋势存在明显的等级分异(图 8)。年总降水强度[倾向率为 $-0.02 \sim 0.35$  mm/(d·10 a)]与小雨强度除个别站点外,在全省大部地区呈增强趋势,尤其在吉林、通化等地增幅显著。与之形成对比的是中雨、大雨强度在部分区域(如白城、四平等地)呈现下降趋势;暴雨强度空间格局复杂,未形成显著高值区;大暴雨强度则表现出较大的年际波动性,其变化趋势的不确定性较高[倾向率为 $-18.38 \sim -0.52$  mm/(d·10 a)],高值区几乎覆盖全省,变化趋势具有明显的等级差异与区域分异。

吉林省降水强度的变化呈现“弱降水强度增强,强降水强度局部减弱”的复杂结构。这种中雨及以上等级降水强度在部分地区呈减弱趋势,可能与降水事件内部结构变化及水汽条件和能量分布的调整有关。

### 2.2.4 地理因子对不同等级降水指标的影响

基于地理探测器模型的分异及交互作用探测,对降水指标与高程( $X_1$ )、纬度( $X_2$ )、经度( $X_3$ )地理因子的关联性进行分析。由图 9 可知,总降水量、小雨量及中雨量在高程、纬度和经度上均表现出较高的解释力( $p < 0.01$ ),表明研究区内中雨、小雨降水空间格局受大尺度地理要素的显著控制。相比之下,暴雨、大暴雨量  $q$  值普遍偏低且不显著,即地理位置与地形对其空间分异的约束较弱,强降水过程可能更多受局地天气系统与对流活动影响。降水日数的表现与降水量相似,进一步印证了上述规律。在降水强度方面,除大雨强度在经度上呈显著弱解释力外( $q = 0.124$ ,  $p < 0.01$ ),其余强度指标与地理因子无显著统计关联,进一步揭示降水强度作为强度特征,受地理因子的直接控制较弱,更多依赖于热力条件、垂直运动与短时天气系统。任意两项驱动因子的交互作用均明显高于单因子,即地理因子对降水

的影响以协同增强为主。其中, 纬度与经度交互组合对降水量与降水日数的解释力最强, 凸显了地理因素在区域降水过程中的基础性作用。尽管各等级

降水强度的交互  $q$  值整体偏低, 但各地理因子仍呈协同增强特征, 即地理因素对降水强度存在一定程度的约束。

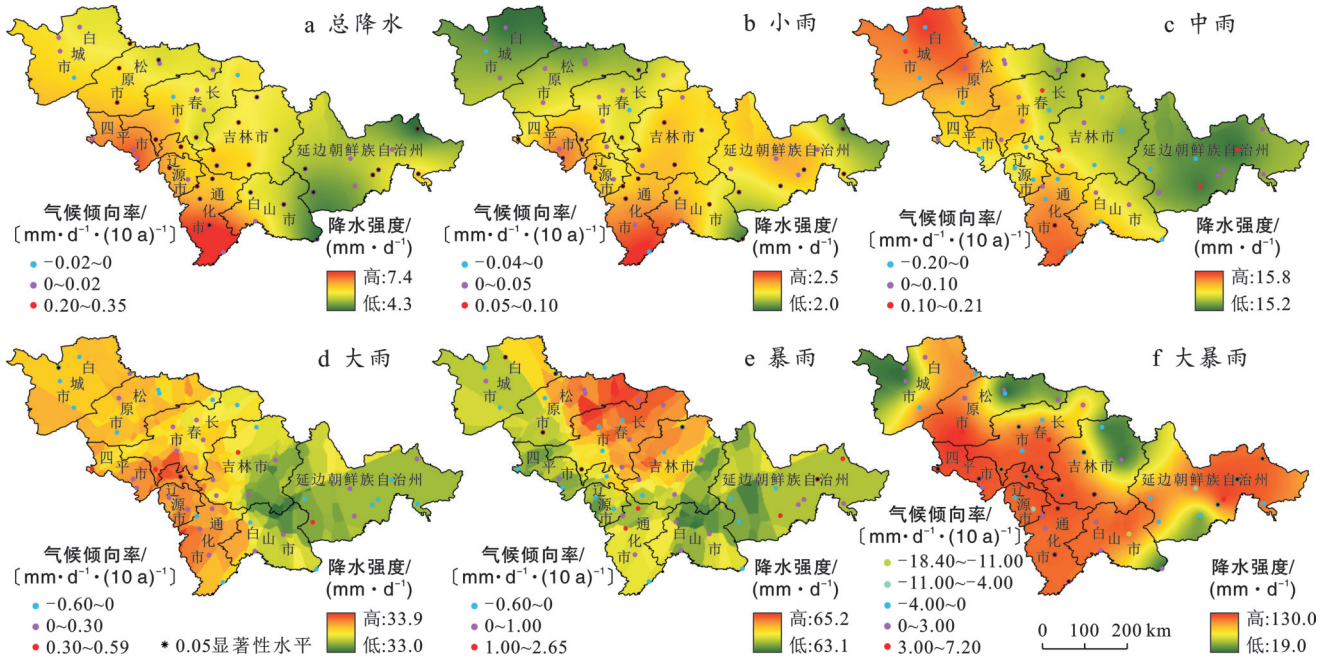
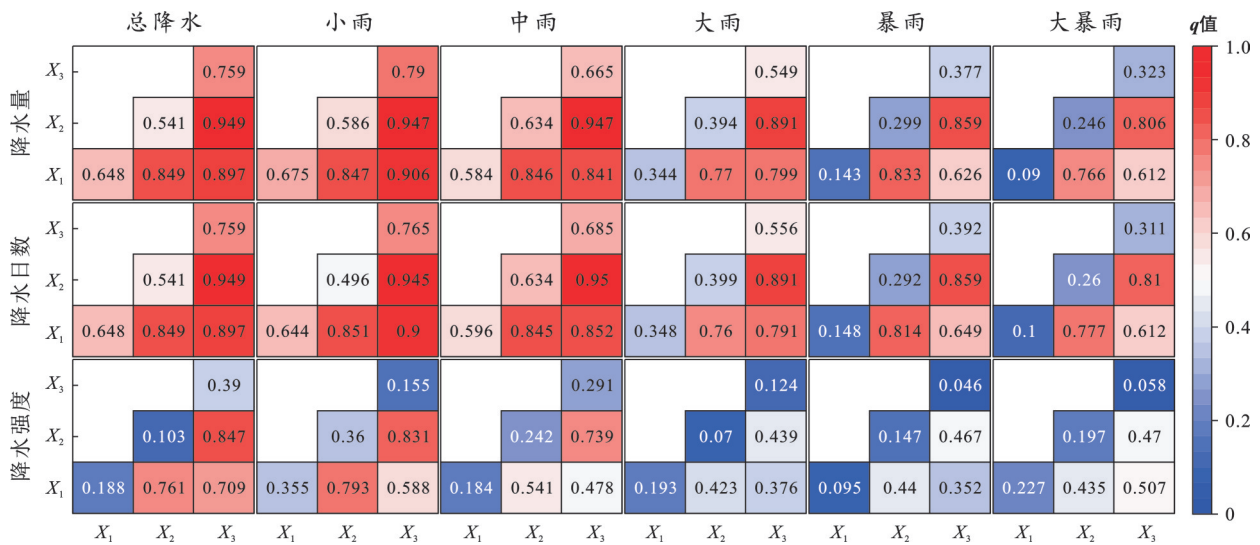


图 8 吉林省不同等级降水强度变化趋势空间分布

Fig.8 Spatial distribution of trend variations in precipitation intensity of different grades in Jilin Province



注: 图中  $X_1, X_2, X_3$  分别为高程、纬度、经度。

图 9 地理因子与降水指标的交互探测结果

Fig.9 Interaction detection results between geofactors and precipitation indicators

### 2.3 不同量级降水未来变化趋势

采用 R/S 分析法计算 1960—2024 年吉林省不同等级降水指标的 Hurst ( $H$ ) 指数, 并依据冯新灵等<sup>[25]</sup>提出的 Hurst 指数分级标准对各指标进行强度等级划分。由表 3 可知, 吉林省不同等级降水指标  $H$  值差异显著。所有等级降水量和降水日数的  $H$  值均在 0.5 以上, 表明其未来变化趋势将延续过去变化趋势。

具体而言, 小雨量、小雨日数、总降水日数预计将持续减少, 其中小雨日数持续性最强,  $H$  值为 0.89; 而其他等级降水量和降水日数在未来将表现出持续增加的趋势, 暴雨量和暴雨日数持续性强度尤为突出, 均达到很强等级,  $H$  值分别为 0.86 和 0.87, 大雨量和大雨日数次之。这一结果预示吉林省降水结构有向强降水转变的发展态势, 有必要进一步加强暴雨的预

报、预警和气象灾害防御工作。在降水强度方面,大暴雨强度呈现反持续性,即大暴雨强度在未来将呈现出上升的趋势,其他等级降水强度均呈持续性增强趋势,其中总降水强度的持续性最为显著, $H$ 值为 0.95。

表 3 吉林省不同等级降水指标 Hurst 指数  
Table 3 Hurst exponents of precipitation indicators with different grades in Jilin Province

降水指标		小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨	总降水
降水量	$H$ 值	0.55	0.59	0.76	0.86	0.66	0.97
	持续性强度	很弱	较弱	强	很强	较强	很强
降水日数	$H$ 值	0.89	0.61	0.77	0.87	0.65	0.77
	持续性强度	很强	较弱	强	很强	较弱	强
降水强度	$H$ 值	0.76	0.67	0.60	0.51	0.24	0.95
	反/持续性强度	强	较强	较弱	很弱	强	很强

### 3 讨论

本研究系统分析了吉林省 1960—2024 年不同等级降水的变化特征,发现总降水量虽呈上升趋势,但总降水日数显著减少,吉林省降水过程表现出趋于强化和集中化的特征。小雨日数显著减少,暴雨量和日数均显著增加,中雨和大雨各降水指标亦呈增加态势,这一结果与近年来中国北方地区降水的极端化趋势高度一致<sup>[22]</sup>,进一步证实吉林省降水结构正在发生显著变化,从频繁的低强度降水向偶发的高强度降水转型。张丽亚等<sup>[26]</sup>和 Qian Yun 等<sup>[27]</sup>均指出小雨日数减少的原因是气候变暖和气溶胶增多。而吉林省暴雨量和日数的增加及降水量东南多西北少的格局则与地形有关。吉林省西部的焚风效应导致西来的低压系统减弱,高压系统加强,降水减少;西来的天气系统在进入中部平原后会逐渐减弱,降水增加;进入东部丘陵区时,由于动力摩擦,使降水增加;到了长白山区,由于动力抬升作用和高海拔对天气系统的阻滞作用,使雨时加长,在迎风坡上造成降水大量集中,形成吉林省的多雨中心<sup>[28]</sup>。

杨吉存等<sup>[2]</sup>和李邦东等<sup>[17]</sup>研究指出东北地区降水在 2000 年前后发生转型,本研究发现吉林省中雨以上等级降水在 2000 年前后存在明显的低值区,2010 年后则呈波动增加,与袁祝香等<sup>[29]</sup>提出松辽流域极端降水在 2010 年后进入“强阶段”结论一致。刘俊男等<sup>[30]</sup>指出中国降水特别是东北地区正趋于极端化,小雨对总降水贡献率和发生率下降,暴雨则显著上升。本研究从降水结构转型的角度出发,发现吉林省小雨和中雨对总降水的贡献率下降,其中小雨

发生频率显著减少;而暴雨的贡献率与发生频率均显著上升,支持现有研究降水格局变化,同时表明吉林省降水结构正向强降水事件偏移。Hurst 指数分析表明,当前趋势具有较强的持续性,未来小雨量和日数将持续下降,暴雨量和日数以持续性强度“很强”的态势持续上升;总降水量、总降水强度上升趋势及总降水日数下降趋势将持续。随着变化趋势的持续,小雨日数对总降水日数的主导作用将进一步弱化,有限的降水日数内各等级降水强度将增强,这意味着吉林省由小雨主导的降水格局将被打破,极端强降水事件发生率提升。

这种降水结构的转变对区域水土资源管理和洪涝防控提出严峻挑战。强降水事件的增加不仅提高洪涝灾害的发生概率,更增加山洪灾害和水土流失风险。因此,未来应加强对强降水事件的预报预警,优化防洪排涝基础设施,提升应对极端降水的能力。

本研究未涉及大气环流、人类活动等因素对不同等级降水时空变化影响分析,未来将进一步深入研究。

### 4 结论

(1) 1960—2024 年吉林省各等级降水量和降水日数均呈现“弱减强增”特征,小雨量和小雨日数分别以  $-0.137\ 3\ \text{mm}/10\ \text{a}$  和  $-1.622\ 8\ \text{d}/10\ \text{a}$  ( $p < 0.05$ ) 减少,暴雨量和日数分别以  $4.381\ 3\ \text{mm}/10\ \text{a}$  和  $0.066\ \text{d}/10\ \text{a}$  显著增加 ( $p < 0.05$ );降水强度则表现为总降水 [ $0.165\ \text{mm}/(\text{d}\cdot 10\ \text{a})$ ] 和小雨 [ $0.040\ \text{mm}/(\text{d}\cdot 10\ \text{a})$ ] 显著增强 ( $p < 0.05$ )、大暴雨强度减弱的趋势。

(2) 研究期内,中雨的贡献度最高(33.44%),小雨与中雨的贡献度均呈下降趋势,其中小雨降幅更为明显,从 35.53% 降至 25.30%;大雨及以上等级贡献度呈上升趋势,暴雨贡献度显著增加,由 7.25% 升至 13.90% ( $p < 0.05$ )。小雨发生率以  $-0.445\%/10\ \text{a}$  的速率显著下降 ( $p < 0.05$ ),由 83.38% 降至 78.49%,但仍居主导地位,中雨、大雨和暴雨的发生率均显著上升 ( $p < 0.05$ )。

(3) 吉林省总降水量与大雨相关性较强,受其影响较大 ( $r = 0.918, p < 0.01$ );总降水日数变化由小雨日数主导 ( $r = 0.918, p < 0.01$ );总降水强度受大雨和暴雨量及日数变化影响较大 ( $r$  为 0.815~0.830,  $p < 0.01$ )。

(4) 空间分布上,吉林省各等级降水量与降水日数均呈东南多,西北少的格局,降水强度空间分布差异显著。各等级降水指标空间异质化明显,表现为

多数站点总降水量和强度增加,总降水日数减少;小雨量减少,小雨日数显著减少,小雨强度普遍增强;区域性大雨、暴雨量值和日数增加趋势明显;大暴雨强度减弱。地理因子交互作用呈双因子增强效应,尤以经纬度交互对降水量的解释力最强,地理因子对中小雨量及日数空间格局控制显著,与降水强度关联普遍较弱。

(5) Hurst 指数分析表明,吉林省大暴雨强度表现出反持续性( $H=0.24$ ),未来大暴雨强度呈上升趋势;其他等级降水指标均呈持续性,其中暴雨量和日数持续性强度很强, $H$ 值分别为0.86和0.87,表明未来吉林省发生极端降水的可能性增加。

### 参考文献(References)

- [1] Leung L R, Boos W R, Catto J L, et al. Exploratory precipitation metrics: Spatiotemporal characteristics, process-oriented, and phenomena-based [J]. *Journal of Climate*, 2022, 35(12): 3659-3686.
- [2] 杨吉存, 郭兵. 1901—2022年中国长时序降水量时空变化格局分析[J]. *生态学报*, 2025, 45(12): 5853-5870.  
Yang Jicun, Guo Bing. Analysis of spatial and temporal variation patterns of long-term precipitation in China from 1901 to 2022 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(12): 5853-5870.
- [3] 李双双, 胡佳岚, 延军平. 1970—2020年秦岭南北降水季节性时空变化及其影响因素[J]. *地理科学*, 2025, 45(1): 227-238.  
Li Shuangshuang, Hu Jialan, Yan Junping. Spatio-temporal variation of precipitation seasonality and impact factors in south and north of the Qinling Mountains in 1970—2020 [J]. *Geographical Science*, 2025, 45(1): 227-238.
- [4] 袁征, 张志高, 闫瑾, 等. 1960—2020年黄河流域不同等级降水时空特征[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(8): 1259-1271.  
Yuan Zheng, Zhang Zhigao, Yan Jin, et al. Spatiotemporal characteristics of different grades of precipitation in Yellow River basin from 1960 to 2020 [J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(8): 1259-1271.
- [5] 李晓婷, 刘利民, 李雪洋, 等. 基于逐小时数据的辽宁省夏季降水日变化特征分析[J]. *沈阳农业大学学报*, 2021, 52(2): 129-136.  
Li Xiaoting, Liu Limin, Li Xueyang, et al. Diurnal variation of summer precipitation in Liaoning Province based on hourly data [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2021, 52(2): 129-136.
- [6] 王延吉, 神祥金, 姜明. 1961—2018年长白山区不同等级降水时空变化特征[J]. *气候与环境研究*, 2021, 26(2): 227-238.  
Wang Yanji, Shen Xiangjin, Jiang Ming. Spatial-temporal variation characteristics of different grades of precipitation in Changbai Mountain from 1961 to 2018 [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2021, 26(2): 227-238.
- [7] 曾颖婷, 李成, 黄新洲, 等. 近60年福建省极端降水的时空变化特征[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(3): 203-210.  
Zeng Yingting, Li Cheng, Huang Xinzhou, et al. Spatial and temporal characteristics of extreme precipitation in Fujian Province in the last 60 years [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(3): 203-210.
- [8] Zaman M, Shahid M A, Ahmad I, et al. Spatiotemporal variability of precipitation concentration in Pakistan [J]. *International Journal of Climatology*, 2023, 43(16): 7646-7666.
- [9] Santose Silva C M, Rodrigues D T, Medeiros F, et al. Diurnal cycle of precipitation in Brazil [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2024, 155(8): 7811-7826.
- [10] Vishwanathan G, McDonald A J, Noble C, et al. Regional characteristics of extreme precipitation events over Aotearoa New Zealand [J]. *Weather and Climate Extremes*, 2024, 44: 100687.
- [11] Pazhoh F, Darand M. Spatiotemporal characteristics of daily precipitation concentration in Iran [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2025, 27(9): 23133-23159.
- [12] 薛媛, 杨庆, 马柱国, 等. 1961—2020年中国区域不同等级降水的变化趋势及其可能成因[J]. *大气科学*, 2024, 48(2): 619-644.  
Xue Yuan, Yang Qing, Ma Zhuguo, et al. Trends and possible causes of different levels of precipitation variations in China during 1961—2020 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2024, 48(2): 619-644.
- [13] 宋瑶, 周顺武, 王传辉, 等. 中国西北地区东部夏季不同等级降水时间演变特征[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(1): 182-191.  
Song Yao, Zhou Shunwu, Wang Chuanhui, et al. Temporal evolution characteristics of summer graded precipitation over the east of northwest China during 1965—2014 [J]. *Journal of Desert Research*, 2018, 38(1): 182-191.
- [14] 申露婷, 张方敏, 黄进, 等. 1981—2018年内蒙古不同等级降水时空变化特征[J]. *气象科学*, 2022, 42(2): 162-170.  
Shen Luting, Zhang Fangmin, Huang Jin, et al. Spatio-temporal variations of different precipitation grades in Inner Mongolia from 1981 to 2018 [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2022, 42(2): 162-170.
- [15] Hu Mulan, Dong Manyu, Tian Xiangyou, et al. Trends in different grades of precipitation over the Yang-

- tze River basin from 1960 to 2017 [J]. *Atmosphere*, 2021,12(3):413.
- [16] 邹贤菊,宋晓猛,刘翠善,等.珠江三角洲地区汛期降水时空演变特征[J].*水利水电技术(中英文)*,2021,52(6):21-32.
- Zou Xianju, Song Xiaomeng, Liu Cuishan, et al. Spatiotemporal changes of precipitation characteristics in the Pearl River delta region during flood season [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, 52(6): 21-32.
- [17] 李邦东,周旭,赵中军,等.近 50 年中国东北地区不同类型和等级降水事件变化特征[J].*高原气象*,2013,32(5):1414-1424.
- Li Bangdong, Zhou Xu, Zhao Zhongjun, et al. Change features of different types and grades of precipitation event in Northeast China in recent 50 years [J]. *Plateau Meteorology*, 2013,32(5):1414-1424.
- [18] 刘薇,丛鑫,刘玉玉,等.1976—2020 年弥河流域不同等级降雨时空分布特征[J].*济南大学学报(自然科学版)*,2024,38(2):140-148.
- Liu Wei, Cong Xin, Liu Yuyu, et al. Temporal-spatial distribution characteristics of different rainfall levels in the Mihe River basin from 1976 to 2020 [J]. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2024,38(2):140-148.
- [19] 张耀东,郭恩亮,王永芳,等.吉林省极端降水事件对玉米产量的影响研究[J].*中国农村水利水电*,2023(1):52-61.
- Zhang Yaodong, Guo Enliang, Wang Yongfang, et al. The effects of extreme precipitation events on maize yield in Jilin Province [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2023(1):52-61.
- [20] 兰雪,徐瑶,王辉,等.长江中游地区洪涝灾害韧性时空演变与驱动因素[J].*水土保持通报*,2025,45(3):331-342.
- Lan Xue, Xu Yao, Wang Hui, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of flood resilience in middle reaches of Yangtze River [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2025,45(3):331-342.
- [21] 王文静,延军平,刘永林.广东省极端降水事件的变化特征[J].*水土保持通报*,2016,36(2):293-299.
- Wang Wenjing, Yan Junping, Liu Yonglin. Variation characteristics of extreme precipitation events in Guangdong Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016,36(2):293-299.
- [22] Alizadeh-Choobari O. Impact of aerosol number concentration on precipitation under different precipitation rates [J]. *Meteorological Applications*, 2018, 25 (4) : 596-605.
- [23] 刘博.吉林省年降水量空间分布及周期变化规律分析[J].*水电能源科学*,2018,36(7):1-4.
- Liu Bo. Spatial distribution and periodicity analysis of annual precipitation in Jilin Province [J]. *Water Resources and Power*, 2018,36(7):1-4.
- [24] 凌思宁,陈卫,陆日宇,等.夏季长白山天池站降水量年际变化特征及其对应的环流异常[J].*大气科学*,2021,45(3):499-512.
- Ling Sining, Chen Wei, Lu Riyu, et al. Interannual variation of summer rainfall at the Tianchi Station in the Changbai Mountains and its associated circulation anomalies [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2021,45(3):499-512.
- [25] 冯新灵,冯自立,罗隆诚,等.青藏高原冷暖气候变化趋势的 R/S 分析及 Hurst 指数试验研究[J].*干旱区地理*,2008,31(2):175-181.
- Feng Xinling, Feng Zili, Luo Longcheng, et al. Fractal analysis of climate change and Hurst Index experiment in Tibetan Plateau in future [J]. *Arid Land Geography*, 2008,31(2):175-181.
- [26] 张丽亚,吴润.近几十年中国小雨减少趋势及其机制的研究进展[J].*暴雨灾害*,2014,33(3):202-207.
- Zhang Liya, Wu Jian. Main progress in research on reduced light rain in China during recent decades [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2014,33(3):202-207.
- [27] Qian Yun, Gong Daoyi, Leung R. Light rain events change over North America, Europe, and Asia for 1973—2009 [J]. *Atmospheric Science Letters*, 2010, 11(4):301-306.
- [28] 秦元明.吉林省天气预报技术手册[M].北京:气象出版社,2014.
- Qin Yuanming. Technical manual of weather forecast in Jilin Province [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2014.
- [29] 袭祝香,杨雪艳,刘玉汐,等.松辽流域 1961—2017 年极端降水变化特征[J].*水土保持研究*,2019,26(3):199-203.
- Xi Zhuxiang, Yang Xueyan, Liu Yuxi, et al. Characteristics of extreme precipitation change from 1961 to 2017 in Songliao basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019,26(3):199-203.
- [30] 刘俊男,郭乃旭.1951—2018 年东北地区极端降水的时空变化特征[J].*农业灾害研究*,2024,14(4):145-147.
- Liu Junnan, Guo Naixu. Temporal and spatial variation characteristics of extreme precipitation in Northeast China from 1951 to 2018 [J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2024,14(4):145-147.