

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.028.

任子康, 赵华荣, 师康铭, 等. 云南省 1961—2020 年降水结构时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 168-180.

Ren Zikang, Zhao Huarong, Shi Kangming, et al. Spatial and Temporal Variation Characteristics of Precipitation Structure in Yunnan Province from 1961 to 2020[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 168-180.

# 云南省 1961—2020 年降水结构时空变化特征

任子康<sup>1</sup>, 赵华荣<sup>1,2,3</sup>, 师康铭<sup>1</sup>, 杨国梁<sup>1</sup>

(1. 桂林理工大学 环境科学与工程学院, 广西 桂林 541006;

2. 桂林理工大学 广西岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心,

广西 桂林 541006; 3. 桂林理工大学 广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541006)

**摘要:** [目的] 揭示近 60 a 云南省降水结构的变化, 加强对云南省降水的监测和预警, 为云南省水旱灾害风险评估提供科学参考依据。[方法] 基于云南省 32 个气象站点逐日降水观测数据, 引入降水发生率和降水贡献率两个指标, 利用创新趋势分析法(ITA)、Mann-Kendall 检验法和反距离权重法(IDW), 探讨了在不同降水历时和降水等级下, 降水结构时空变化的特征。[结果] (1) 降水发生率随降水历时增加呈减少趋势, 降水贡献率呈先增加后减少趋势, 云南省以短历时降水为主。空间上, 短历时降水发生率和贡献率整体呈现自东北向西南递减趋势, 长历时与之相反。(2) 随降水等级的提升, 降水发生率呈增加趋势, 降水贡献率呈先增加后减少趋势, 云南省降水以小雨为主。空间上, 小雨发生率呈自北向南递减趋势, 中雨、大雨和暴雨发生率趋势与之相反。小雨和中雨贡献率呈自西北向东南递减趋势, 大雨和暴雨与之相反。滇中、滇南和滇西南地区大雨和暴雨发生率和贡献率均较高, 可能造成洪涝灾害的风险较大。(3) 不同降水历时下, 大多数站点短历时降水发生率和贡献率呈增加趋势, 上升幅度大于 5%, 长历时呈 5% 以上下降趋势。不同降水等级下, 大多数站点的小雨发生率、贡献率呈 10% 以内下降趋势, 大雨和暴雨发生率、贡献率呈 5% 以上的上升趋势。[结论] 云南省短历时大雨和暴雨发生概率有所上升, 地区发生洪涝灾害和土壤侵蚀的几率增大, 未来应持续对其降水结构进行监测研究。

**关键词:** 降水发生率; 降水贡献率; 反距离权重法; 创新趋势分析; 降水历时; 降水等级; 云南省

中图分类号: P426

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0168-13

## Spatial and Temporal Variation Characteristics of Precipitation Structure in Yunnan Province from 1961 to 2020

Ren Zikang<sup>1</sup>, Zhao Huarong<sup>1,2,3</sup>, Shi Kangming<sup>1</sup>, Yang Guoliang<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin,

Guangxi 541006, China; 2. Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety Assurance

in Karst Areas, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006, China; 3. Guangxi Key Laboratory of

Theory and Technology for Environmental Pollution Control, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to reveal the changes of precipitation structure in Yunnan Province in the last 60 years, to strengthen the monitoring and early warning of precipitation in Yunnan Province, and to provide scientific reference basis for the risk assessment of water and drought disasters in Yunnan Province. [Methods] Based on daily precipitation observation data from 32 meteorological stations in Yunnan Province, two indicators of precipitation occurrence and precipitation contribution were introduced, and the characteristics of spatial and temporal variation of precipitation structure under different precipitation durations and precipitation grades were explored by using innovative trend analysis (ITA), Mann-Kendall

收稿日期: 2023-04-27

修回日期: 2023-06-05

资助项目: 广西重点研发项目(桂科 AB21075007); 桂林市科学技术研究开发项目(20210212-2)

第一作者: 任子康(1999—), 男, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 研究方向为水资源与水环境研究。E-Mail: glutrzk@163.com

通信作者: 赵华荣(1971—), 男, 四川荣县人, 博士, 副教授, 主要从事水资源与水环境研究。E-Mail: gutzhr@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

test and inverse distance weighting (IDW) method. [Results] (1) The precipitation occurrence rate tended to decrease with the increase of precipitation calendar time, and the precipitation contribution rate tended to increase and then decrease, with short calendar time precipitation dominating in Yunnan Province. Spatially, the precipitation occurrence rate and contribution rate of short calendar period showed an overall decreasing trend from northeast to southwest, while the opposite was true for long calendar period. (2) As the precipitation level increased, the precipitation occurrence rate tended to increase and the precipitation contribution rate tended to increase and then decrease, with light rainfall dominating in Yunnan Province. Spatially, the occurrence rate of light rain was decreasing from north to south, while the occurrence rate of medium rain, heavy rain and heavy rain was the opposite trend. The contribution rate of light and moderate rainfall showed a decreasing trend from northwest to southeast, and the contribution rate of heavy and torrential rainfall showed the opposite trend compared with that of the light and moderate rainfall. The occurrence and contribution rate of heavy and torrential rainfall were higher in central, southern and southwestern Yunnan, which might cause higher risk of flooding. (3) Under different precipitation durations, the occurrence and contribution rate of precipitation at most stations in short durations were increasing with the increase of more than 5%, and in long durations were decreasing with a trend of more than 5%. Under different precipitation grades, the occurrence and contribution rate of light rainfall at most stations showed the decreasing trend within 10%, and the occurrence and contribution rate of heavy rainfall and storms showed the increasing trend above 5%. [Conclusion] In Yunnan Province, the probability of short-calendar-time heavy rainfall and storms had risen, and the chance of flooding and soil erosion in the region had increased, so the precipitation structure should be continuously monitored and researched in the future.

**Keywords:** precipitation occurrence rate; precipitation contribution rate; inverse distance weighting method; innovation trend analysis; precipitation duration; precipitation grade; Yunnan Province

降水是日常生活中最常见的气象水文现象之一<sup>[1]</sup>。随着全球气候变暖的不断加剧,使得全球水文循环加强,降水量的时空分布特征也不断发生改变,其中降水对区域水循环、水生态以及社会经济发展有着重要影响<sup>[2]</sup>。同时,在与人类活动的共同作用下,降水结构的时空变化可能导致洪水和干旱<sup>[3-4]</sup>。近年来我国旱涝灾害呈现广发和频发的态势<sup>[5]</sup>,旱灾会导致农作物歉收、水资源短缺,影响农业生产和居民生活;洪涝灾害会造成河道淤积、农田被淹、水土流失等严重后果。因此,深入研究不同区域不同时间尺度的降水结构变化规律,对水旱灾害风险评估和水资源管理具有重要意义。

目前,国内外已有众多学者对降水时空变化进行研究,研究内容主要分为降水量、降水指数和降水结构时空变化3类。(1)降水量。郭斌等<sup>[6]</sup>基于TRMM 3B43产品对黄淮海平原近19 a降水时空特征研究发现,研究区降水量在时间上除秋季降水明显增加之外,其余季节呈下降趋势,空间上呈自南向北递减趋势。任建成等<sup>[7]</sup>基于EOF和小波分析对山东省29个气象站点逐月降水量资料进行处理,得出山东省降水的空间分布特征和周期变化。(2)降水指数。Wang等<sup>[8]</sup>

分析了秦巴山区极端降水事件的时空变化特征,以及极端降水指数的变化与潜在因子(包括地理因子和大气环流形势)的关系。时延锋等<sup>[9]</sup>对1961—2020年沂蒙山区的极端降水指数进行了分析,发现1980—2000年为降水异常年份多发时段。赵芹蕊等<sup>[10]</sup>对1970—2019年济南市极端降水事件时空变化特征进行分析,结果表明极端降水指数的空间分布差异十分明显。王军德等<sup>[11]</sup>通过计算甘肃省极端降水指数、使用GIS内置的空间统计方法,分析出极端指数的时空变化特征。(3)降水结构。张志高等<sup>[12]</sup>利用普通克里金和M-K趋势法对河南省1960—2019年降水结构时空变化特征分析发现,其降水结构出现了转向极端强降水的趋势。姚越等<sup>[13]</sup>选取贵州省32个气象站近57 a的逐日降水数据,采用M-K趋势法分析出不同降水历时和降水等级的变化趋势。上述学者针对不同研究区域,运用多种新的研究方法,对不同的研究内容进行分析探讨,为降水变化以及防灾减灾领域提供重要的参照依据。

云南省作为我国重要的生态区域之一,其气候和水资源一直是学者研究的热点。在此区域内,多数学者从年际变化及季节变化角度研究降水量和降水指

数时空演变特征,对云南省降水结构的研究较少。王理萍等<sup>[14]</sup>运用滑动平均法、线性倾向估计、M-K 突变检验和普通克里格法对 1960—2013 年云南省 29 个气象站点的逐月降水量进行分析。王晓莹等<sup>[15]</sup>基于近 40 年云南省 10 种极端降水指数及 24 个气象站点逐日降水量,对其降水及极端降水的变化趋势及空间格局进行探讨。杨晓静等<sup>[16]</sup>通过对云南省 9 个极端降水指数的计算,探讨其周期特性及空间分布特征。刘有梅等<sup>[17]</sup>对云南省降水的集中指数、降水集中指数、降水集中期、降水集中度和变差系数 5 个统计指标及其空间分布进行分析,得出降水变化与海拔及纬度的相关关系。上述学者的研究成果,使云南省降水变化的研究得以充实,但鲜有人从降水历时和降水等级两方面对其降水结构进行探讨。因此,本文基于云南省 1961—2020 年 32 个气象站点的日降水资料,在不同降水历时和降水等级下,引入降水发生率和贡献率两个指标,利用创新趋势分析法(ITA)、Mann-Kendall 非参数秩次检验和反距离权重法(IDW)对整个云南省的降水结构时空变化进行分析,以期为云南省旱涝灾害风险评估提供科学参考,为其未来降水趋势的预测提供一定的参照依据。

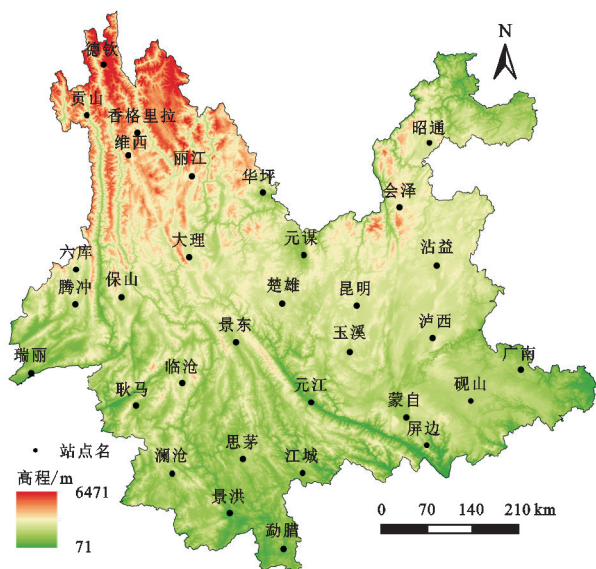
## 1 研究区概况

云南省位于我国西南地区,介于北纬  $21^{\circ}8'—29^{\circ}15'$ ,东经  $97^{\circ}31'—106^{\circ}11'$ ,北接四川,东临贵州和广西,地势起伏较大,西北高而东南低,多为山地高原地形。云南的山谷交错相致,有着“一山分四季,十里不同天”之说<sup>[15]</sup>。云南省气候基本属于亚热带高原季风型,其中滇西北属寒带性气候,滇中、滇东属温带性气候,滇南属热带性气候。全省年均温差较小,日温差较大,四季干湿分明,降水量的时空分布极不均匀。本研究区概况以及气象站点分布情况见图 1。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

选取云南省 1961—2020 年 32 个气象站点日降水量数据,数据来源于中国气象科学数据共享服务平台(<http://data.cma.cn/>)。为了确保数据资料的连续性与完整性,需要对原始数据进行预处理,特别是针对降雪和微量降水的不同表示方式。为此,在数据预处理阶段将原始数据中微量降雨(代码 32700)定义为无降水,并将其他形式的降水转化为实际降水量。将处理后的数据进行统计分析和计算。数据预处理、统计分析、数据计算及热图的绘制由 R 语言实现。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2019)1719 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 研究区概况及气象站点分布

Fig. 1 Overview of the study area and the distribution of meteorological stations

### 2.2 研究方法

**2.2.1 降水结构及其相关定义** 目前对于降水结构的研究还存在着概念的模糊性,降水历时、降水等级、雨强、雨日等都可以用来表征降水结构。本文从降水历时和降水等级两个方面,引入降水发生率和降水贡献率两个指标来表征本研究中云南省的降水结构。通常认为,若降水量  $\geq 0.1$  mm,则该日发生了有效降水。根据前人<sup>[18]</sup>的研究成果,降水历时定义为从开始发生有效降水到结束所历经的天数。结合云南省降水的实际情况,将降水历时划分为 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 d 和  $>10$  d。根据《降水量等级》(GB/T28592—2012)将云南省降水等级划分为:小雨( $0.1 \sim 10$  mm)、中雨( $10 \sim 25$  mm)、大雨( $25 \sim 50$  mm)和暴雨( $\geq 50$  mm)4 类<sup>[19]</sup>。降水发生率定义为在某一历时长内,某地区的降水次数与该历时长总天数之比,反映了该地区在该历时长内降水的频率。而降水贡献率是指各降水过程中降水量占降水总量的百分比,用来衡量该过程内降水对总降水的贡献程度。

**2.2.2 反距离权重法** 云南省降水结构空间格局分析中,使用反距离权重法(IDW)进行空间插值。反距离权重法适用于水文、气候和其他数据集的空间格局分析,对于云南省降水插值计算,反距离权重法相较于其他空间插值法误差更小<sup>[20-21]</sup>。

**2.2.3 Mann-Kendall 非参数秩次检验** Mann-Kendall 趋势检验法是世界气象组织推荐并已广泛应用的非参数统计方法,能有效区分某一自然过程是处于自然波动还是存在确定性的变化趋势<sup>[22]</sup>。计算得出



的统计量  $Z > 0$  或  $Z < 0$  表示序列呈增加或减少趋势,具体计算公式可参考文献[23]。

**2.2.4 创新趋势分析法** 创新趋势分析法首先由 Sen<sup>[24]</sup> 提出,用于检验时间序列中数据的趋势。在这种方法中,研究数据被分为时间序列长度相等的两个子序列,并按照升序对其进行排列<sup>[25]</sup>。将第一、第二子序列的数据分别置于 X 轴和 Y 轴,并以此绘制散点图。位于在 1:1 线上的点,表明数据无趋势;位于 1:1 上方区域的点,表明数据呈增加趋势,下方区域则呈减少趋势。数据点与 1:1 线的距离,显示了变化趋势的幅度<sup>[26]</sup>。为了更好地体现降水发生率和贡献率的变化趋势幅度,本文添加了  $\pm 5\%$  趋势线和  $\pm 10\%$  趋势线。

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同历时降水发生率和降水贡献率统计特征

图2为云南省不同历时降水发生率和贡献率的统计特征。图2中降水发生率和降水贡献率是将研究区域内32个站点1~10 d和>10 d历时的降水发生率和贡献率分别求平均值所得。

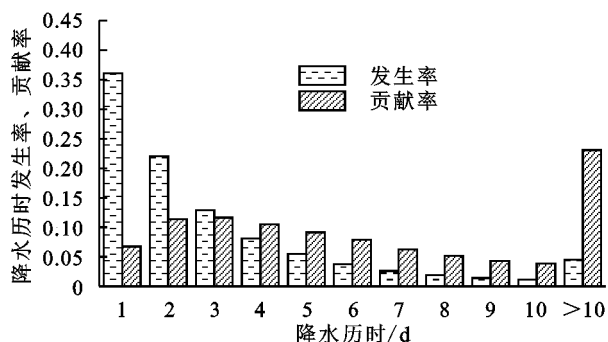


图2 云南省不同历时降水发生率和贡献率

Fig. 2 Occurrence and contribution rate of precipitation in Yunnan Province at different calendar periods

由图2可以看出,降水发生率随着降水历时的增加总体呈下降趋势。各个降水历时对应的发生率分别为36.08%,22.04%,12.90%,8.13%,5.53%,3.77%,2.62%,1.89%,1.42%,1.11%,4.52%。其中1 d(36.08%)历时降水发生率最大,10 d(1.11%)历时降水发生率最小。如果将>10 d历时的降水发生率剔除,1~10 d历时的降水发生率呈明显下降趋势,降幅随历时的增加而逐渐减少。如果不考虑>10 d历时的降水贡献率,其余历时的降水贡献率随降水历时的增加总体呈先上升后下降的趋势。其中3 d(11.65%)历时降水贡献率最大,其次为2 d(11.35%)历时,最小为10 d(3.88%)历时。结合1~3 d历时的降水发生率之和(71.03%)和降水贡献率之和(29.77%)数据来看,云南省主要以短历时降水为主。>10 d历时降水贡献

率达23.09%,可能会造成一定的洪涝灾害,但因其历时较长,降水足以被河流系统和城市管道系统排出,对区域的影响较小。

#### 3.2 不同历时降水发生率和降水贡献率空间分布特征

图3和图4分别为云南省不同历时降水发生率空间分布图和降水贡献率空间分布图。由图3可知,研究区选取的32个站点的降水发生率均随降水历时的增加而降低。各站点1 d历时降水发生率范围为22.96%~45.32%,其中元谋站最高(45.32%),其次为元江站(43.24%),贡山站(22.96%)最低,空间上整体呈自东北向西南递减趋势。2 d历时降水发生率会泽站(25.77%)最高,其次为元谋站(25.64%),滇南地区降水发生率整体较低。3 d历时降水发生率范围为11.42%~14.27%,变化幅度较小,其中元谋站较前两个历时降水发生率下降明显。1~3 d历时降水发生率空间分布情况大致上相同。从4 d历时开始,降水发生率的空间分布发生变化,滇中、滇中南地区降水发生率较低,滇西、滇东地区较高,其中广南站降水发生率最高,达9.68%。5 d历时过后,包括>10 d历时,降水发生率空间分布与1~3 d历时相反,整体呈自东南向西北递增趋势。综上分析,云南省降水主要为短历时降水,且滇中、滇东南地区短历时降水的概率较大,但滇南、滇西南地区发生长历时降水的概率较大。结合图4可以看出,云南省各站点的降水贡献率随着降水历时的增加,整体呈先增加后减少的趋势。1~10 d历时中,3 d历时降水贡献率最高,范围为5.70%~20.20%。其次为2 d历时,范围为4.51%~19.48%。10 d历时降水贡献率最低,范围为1.46%~5.47%。1 d历时降水贡献率的空间分布整体呈自东向西递减的趋势,其中元谋站(16.30%)降水贡献率最高,其次为元江站(14.07%),贡山站(1.47%)最低。2~5 d历时降水贡献率空间分布整体呈自东北向西南递减趋势,滇中、滇东南地区贡献率较高,滇西北地区贡献率整体没有明显变化。6 d历时降水贡献率空间上,大致呈自北向南递减趋势,其中德钦站(11.67%)最高,澜沧站(4.55%)最低。7 d历时降水贡献率空间上没有明显的变化趋势,滇中地区元谋站(3.57%)、元江站(4.20%)降水贡献率较低,昆明站(8.64%)、景东(9.20%)较高,滇东北、滇西南地区整体贡献率较低。8~10 d历时降水贡献率整体呈自东向西递增趋势。>10 d历时降水贡献率呈自东北向西南递增趋势,且不同地区之间差异巨大,最大达48.9%。

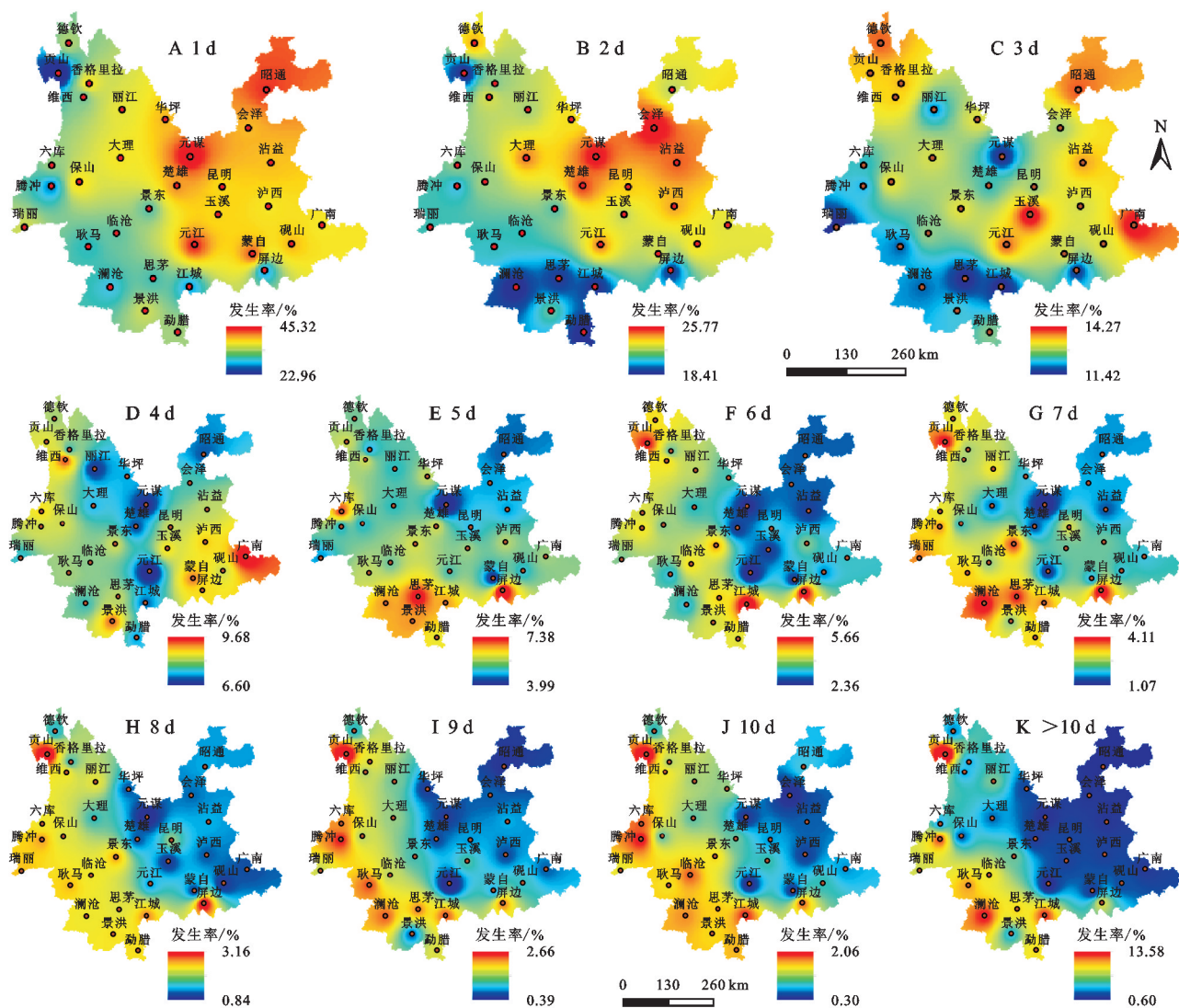


图3 云南省不同历时降水发生率空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of precipitation occurrence rate in Yunnan Province at different calendar periods

### 3.3 不同等级降水发生率和贡献率统计特征

对各站点小雨、中雨、大雨和暴雨的降水发生率和贡献率分别求平均,可知随着降水等级的提升,云南省降水发生率显著下降,其中小雨发生率最大,达77.12%,其次为中雨(16.05%)和大雨(5.51%),暴雨发生率最低,仅为1.31%。云南省不同等级降水发生率之间差异较大。小雨、中雨、大雨和暴雨降水贡献率分别为28.44%,35.55%,24.80%,11.21%,可以见得随着降水等级的提升降水贡献率呈先增加后减少的趋势,各等级降水贡献率之间差异较小。综上分析,云南地区降水类型多为小雨和中雨,暴雨较为罕见。

### 3.4 不同等级降水发生率和贡献率空间分布特征

图5和图6为云南省32个站点不同等级降水发生率和贡献率空间分布图。由图6可知,云南省各站点降水发生率随降水等级上升呈递减趋势。各站点

小雨发生率变化范围为65.27%~86.99%,其中德钦站(86.99%),香格里拉站(85.88%),昭通站(84.06%),会泽站(80.56%)和六库站(80.18%)小雨发生率较高,均超过80%。图5A可见,小雨降水发生率在空间分布上大致呈自北向南递减趋势,其中滇东地区发生率较高,滇西地区较低。中雨降水发生率空间分布见图5B,整体呈自东北向西南递增趋势,其中滇北、滇西地区中雨发生率较高,滇东地区较低。江城站(20.75%)、贡山站(19.37%)、澜沧站(19.34%)和瑞丽站(19.19%)中雨发生率较高,德钦站(11.12%)、香格里拉站(12.21%)和昭通站(12.40%)较低。大雨和暴雨发生率在空间分布上大致相同,见图5C和图5D,均呈自北向南递增趋势,其中滇东地区降水发生率低于滇西地区。大雨和暴雨发生率较高的站点均为华坪站和江城站,较低的站点均为德钦站、香格里拉站和昭通站。



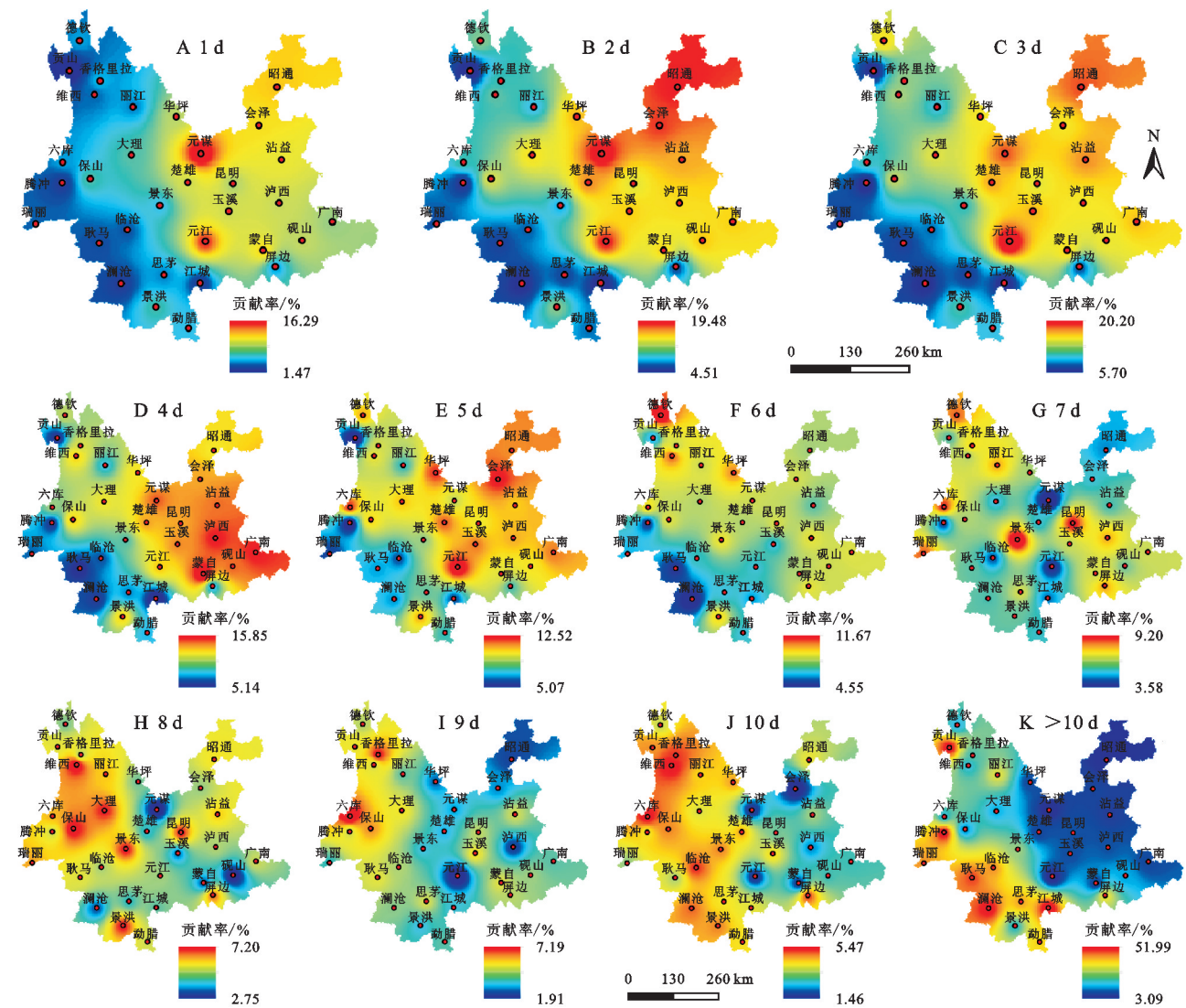


图 4 云南省不同历时降水贡献率空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of precipitation contribution rate in Yunnan Province at different calendar periods

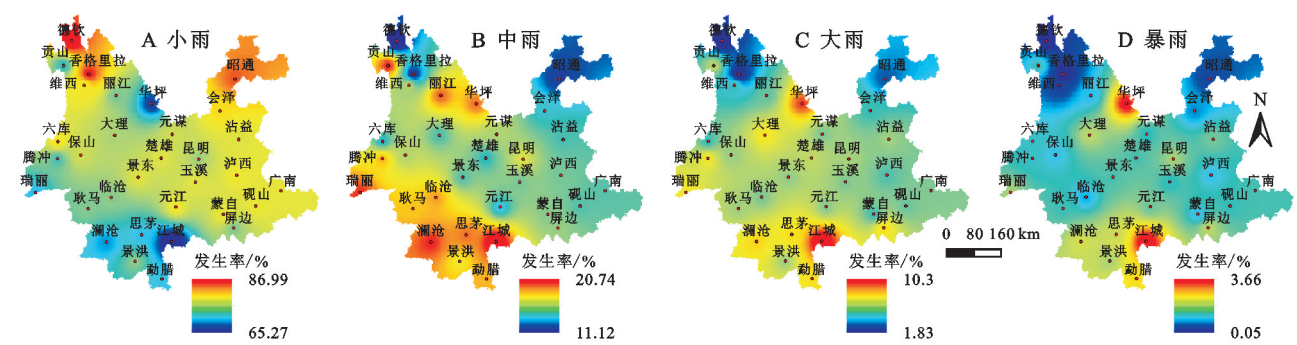


图 5 云南省不同等级降水发生率空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of precipitation occurrence rate in Yunnan Province at different grades

由图 6 可知,云南省各站点降水贡献率整体上随降水等级的提升呈先增加后减少的趋势。小雨贡献率的空间分布见图 6A,整体呈自北向南递减趋势,其中滇东北地区贡献率较高,滇东、滇西地区较低。德钦站(46.58%)和香格里拉站(46.10%)小雨贡献率较高,均超过 45%。江城站(15.21%)小雨贡献率最低,低于 20%。由图 6B 可见,中雨贡献率范围为

28.73%~40.90%,空间分布大致呈自西北向东南递减趋势,其中滇东北、滇西地区较高于滇东、滇西南地区。贡山站(39.08%)、德钦站(39.48%)、维西站(40.26%)、丽江站(40.56%)和香格里拉站(40.91%)中雨贡献率较高,华坪站(28.72%)、江城站(29.96%)、大理站(30.97%)和元江站(31.42%)贡献率较低。图 6C 可以看出,除滇西北地区、滇东北地区大雨贡献率较

低外,其余地区大雨贡献率整体较高。其中大理站(30.23%)、屏边站(30.78%)和江城站(30.83%)大雨贡献率较高,均高于30%,香格里拉站(12.42%)和德钦站(13.23%)贡献率较低。暴雨贡献率的空间分布整体呈自西北向东南递增趋势,由图6D可以看出,滇北地区华坪站(22.24%)和滇南地区江城站(24%)

暴雨贡献率较高,均超过20%,滇东地区整体高于滇西地区。

结合云南省不同等级降水发生率和贡献率可得,云南省降水主要以小雨为主,其中滇西北地区小雨发生率更高。滇南、滇西南地区发生大雨和暴雨的概率较大,造成洪涝灾害的风险高于其他地区。

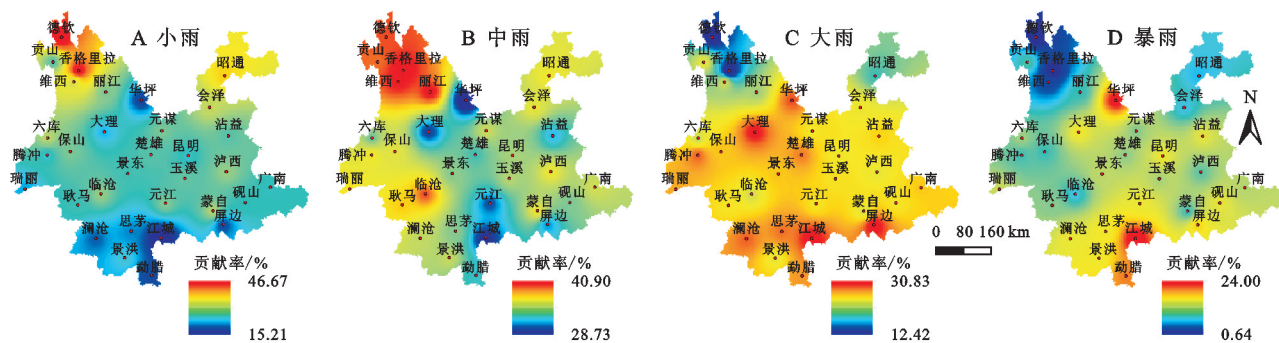


图6 云南省不同等级贡献率空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of precipitation contribution rate in Yunnan Province at different grades

### 3.5 不同历时降水发生率和贡献率 M-K 变化趋势分析

由图7A可知,云南省32个站点1~10 d和>10 d历时降水发生率趋势有增有减。其中1~4 d历时主要呈增加趋势,6 d历时后呈递减趋势。1,2,3,4 d历时分别有18,24,19,18个站点呈增加趋势。其中屏边站、江城站、勐腊站、耿马站、景东站和沾益站1~4 d历时均呈增加趋势。6 d历时后分别有22,23,21,21,24,31个站点呈递减趋势,其中勐腊站、玉溪站、大理站、会泽站和六库站6~10 d和>10 d历时降水发生率均呈递减趋势。>10 d历时降水发生率中,除德钦站呈增加趋势外,其余站点均呈递减趋势。由图7B可以看出,短历时降水贡献率呈增加趋势的站点较多,长历时呈减少趋势的站点较多。1~4 d历时降水贡献率呈增加趋势的站点分别有30,31,29,29个,占总站点数的90%以上。5~8 d历时降水贡献率呈增加或减少趋势的站点占比接近50%。9 d历时后,降水贡献率呈减少趋势的站点较多,其中>10 d历时所有站点都呈减少趋势。各历时降水贡献率增加趋势最多的为江城站、屏边站、耿马站和腾冲站,有8个历时呈增加趋势,其中江城站和屏边站1~8 d历时降水贡献率都呈增加趋势。会泽站在5 d历时后,均呈减少趋势。

综上分析,云南省降水发生率和贡献率随着降水历时的增加,多数站点呈减少趋势,说明云南省主要以短历时降雨为主。

### 3.6 不同等级降水发生率和贡献率 M-K 变化趋势分析

从图8A中可以看出,随着降水等级的提升,降水发生率呈增加趋势的站点整体增加。小雨发生率

变化趋势中,除了元江站呈增加趋势,其余31个站点均呈减少趋势。中雨发生率趋势变化中呈减少趋势的站点为昭通站、元谋站和元江站,其余站点均为增加趋势,达29个。除德钦站、贡山站和沾益站大雨发生率呈减少趋势外,其余站点均为增加趋势,暴雨发生率除维西站、香格里拉站、六库站和元江站外,其余28个站点呈增加趋势。由图8B可知,大多数站点大雨和暴雨贡献率呈增加趋势,小雨和中雨贡献率呈减少趋势。德钦站小雨、中雨和暴雨3个等级降水贡献率均呈增加趋势,丽江站、会泽站、耿马站和屏边站小雨、中雨和大雨贡献率均呈减少趋势。

### 3.7 不同历时降水发生率和贡献率创新趋势分析

由图9可知,1 d历时降水发生率大部分站点呈增加趋势,其中多数站点呈5%以上增加趋势。2 d历时降水发生率所有站点都呈增加趋势,且多数站点呈10%增加趋势。3 d历时中,大部分站点降水发生率呈无明显下降趋势,下降幅度在5%以内,接近1:1无趋势线。4 d历时降水发生率变化趋势与3 d相反。5 d历时过后,绝大部分站点降水发生率呈减少趋势,且随着降水历时的增加,下降幅度增大。由图10可知,随着降水历时的增加,数据点与1:1无趋势线的偏移明显增大。1~6 d历时,大部分站点降水贡献率呈增加趋势,其中多数站点增加幅度大于10%。6 d历时后降水贡献率与之相反,大部分站点呈减少趋势,且多数站点下降幅度大于10%。综上分析可知,云南省各站点短历时降水发生率呈增加趋势,中、长历时呈减少趋势。各站点短、中历时降水贡献率呈增加趋势,长历时呈减少趋势。说明云南省主要以1~3 d短历时降水为主,这与M-K趋势检验的结果基本一致。

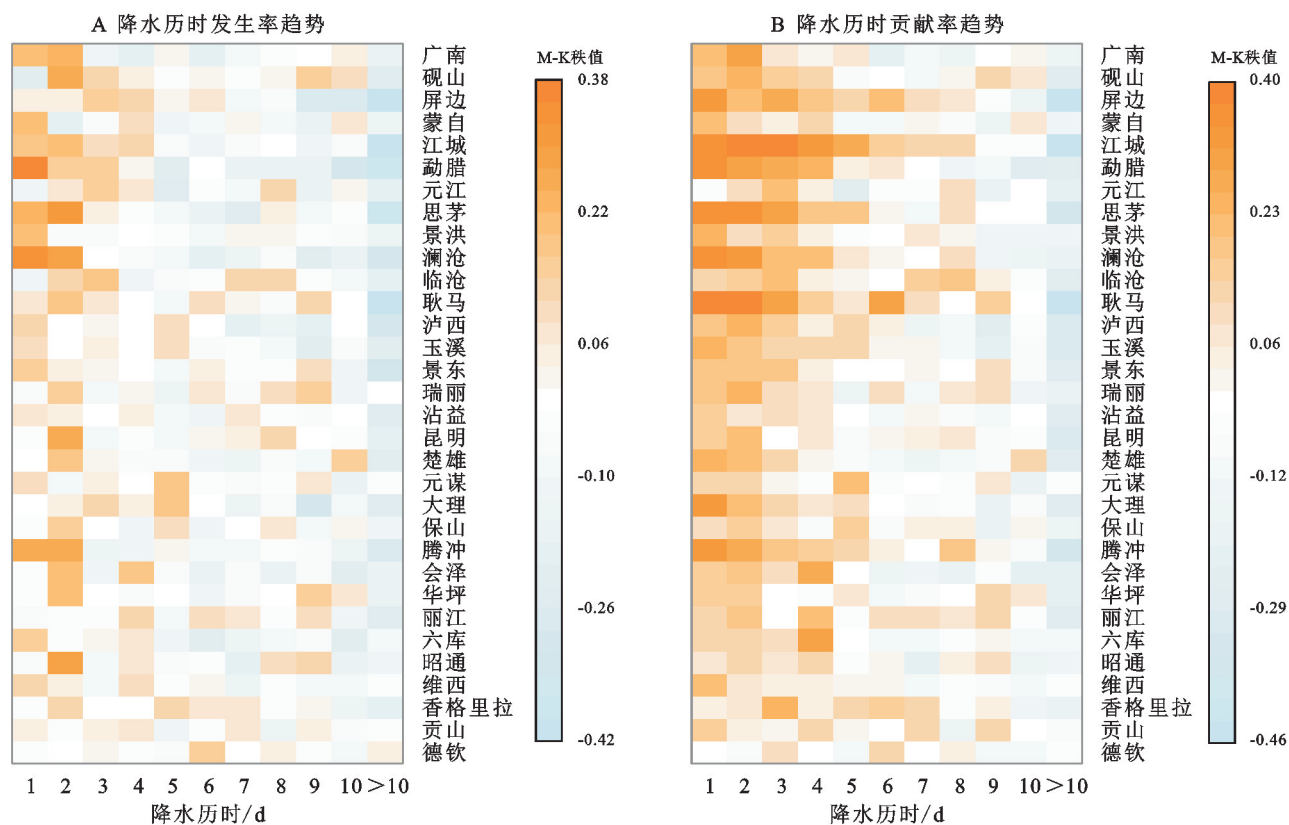


图 7 云南省各站点不同历时降水发生率和贡献率 M-K 秩热图

Fig. 7 M-K rank heat map of precipitation occurrence and contribution rate at various stations in Yunnan Province at different calendar periods

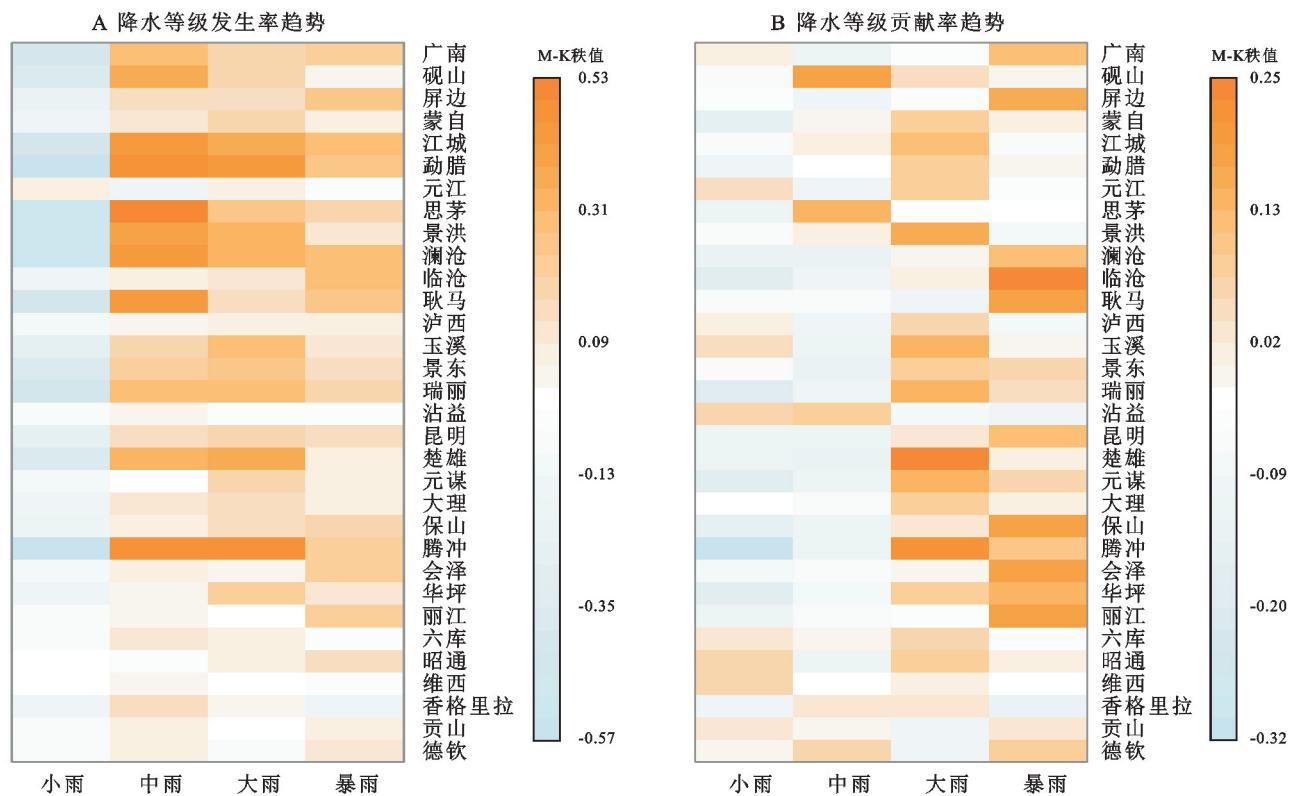


图 8 云南省各站点不同等级降水发生率和贡献率 M-K 秩热图

Fig. 8 M-K rank heat map of precipitation occurrence and contribution rate at various stations in Yunnan Province at different grades



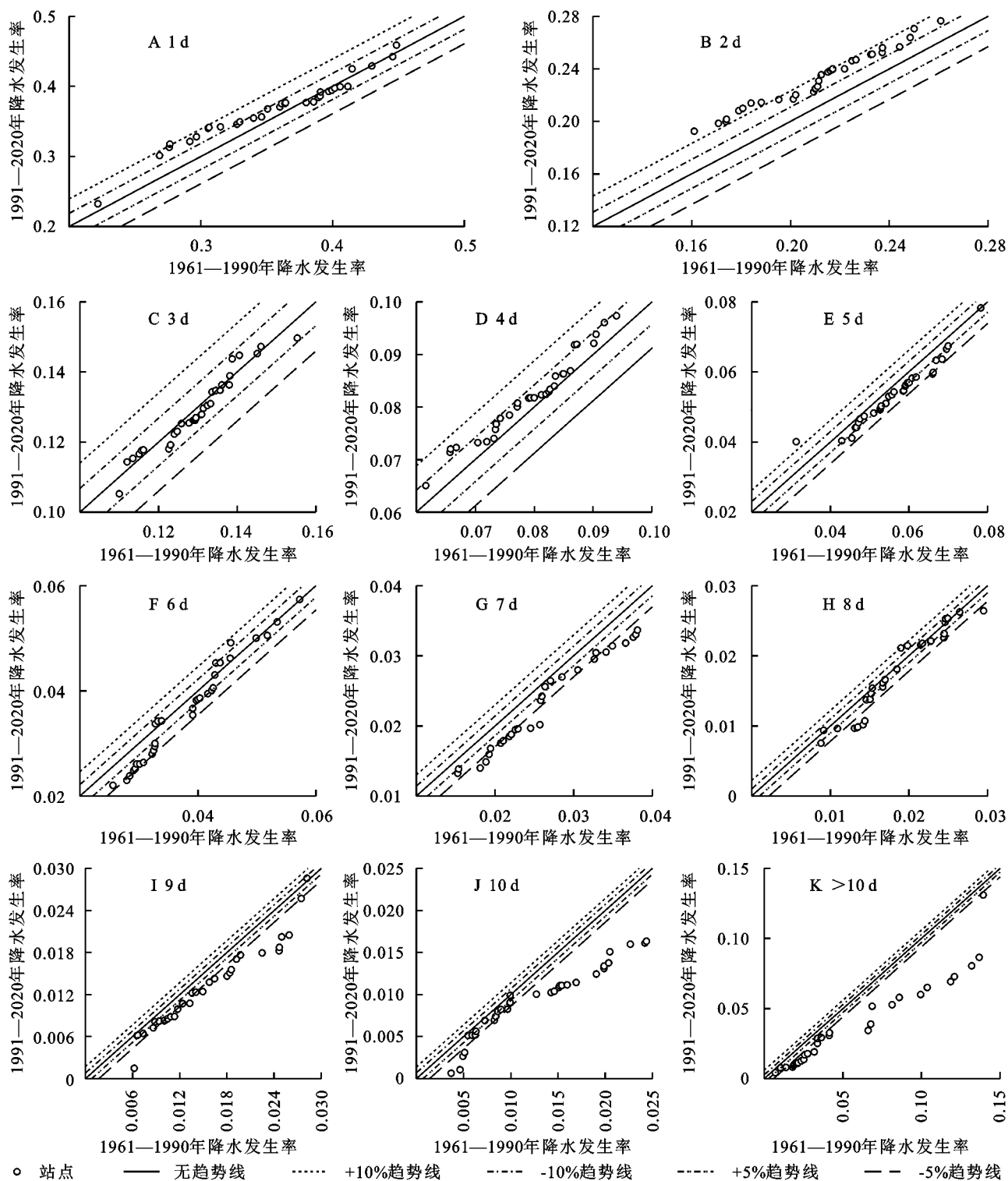


图9 云南省各站点不同历时降水发生率创新趋势分析

Fig. 9 Trend analysis of precipitation occurrence rate at various stations in Yunnan Province at different calendar periods by using ITA

### 3.8 不同等级降水发生率和贡献率创新趋势分析

由图11可知,绝大部分站点小雨发生率呈减少趋势,下降幅度在10%以内。大部分站点中雨、大雨和暴雨发生率呈增加趋势,其中多数站点上升幅度大于10%。大部分站点小雨、中雨贡献率呈减少趋势,

下降幅度在10%以内,大雨、暴雨贡献率呈增加趋势,大多数站点上升幅度大于5%。综合可知,云南省大雨、暴雨发生率和贡献率均有上升趋势,发生极端降水以及洪涝灾害的风险增大。

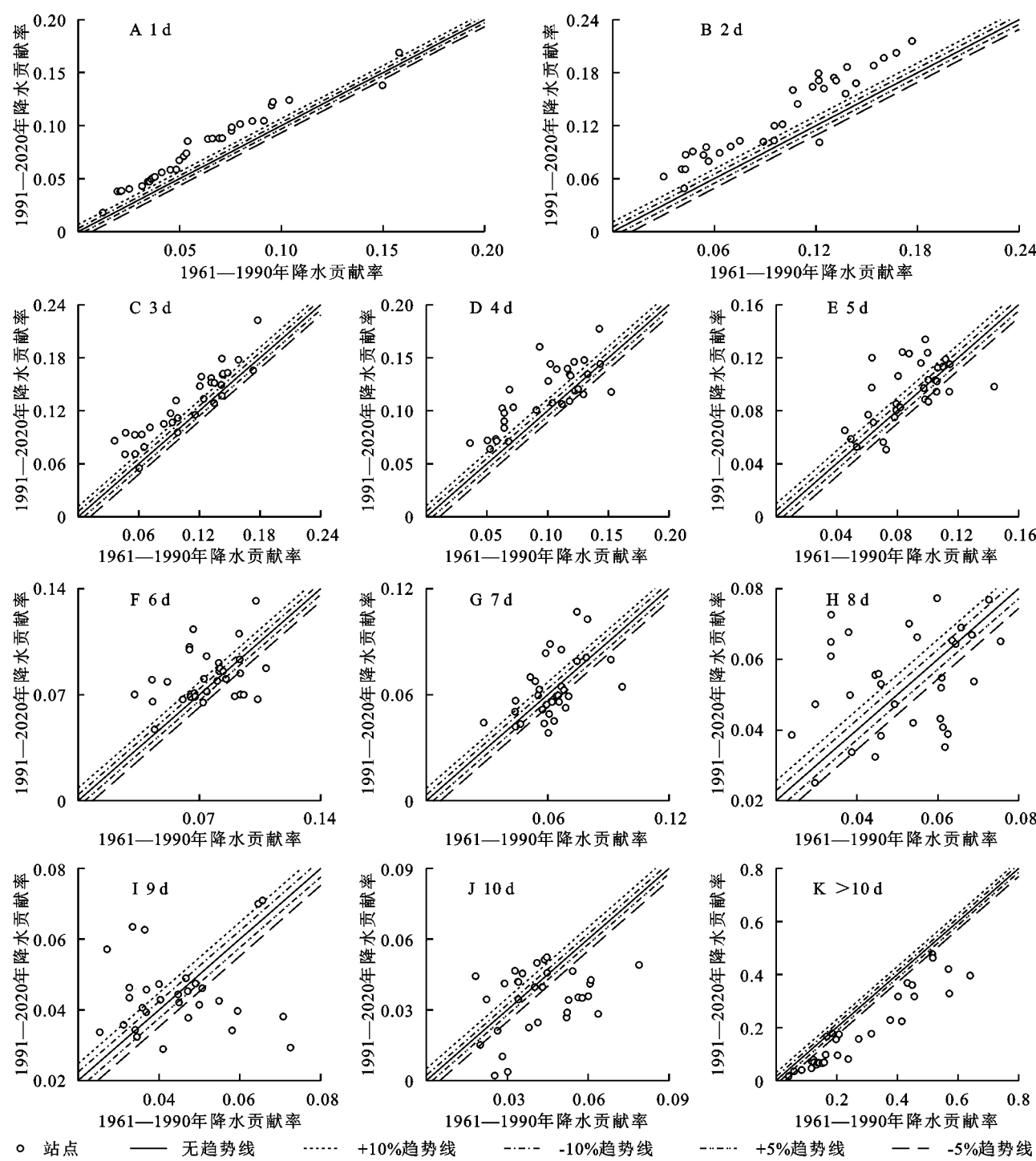


图 10 云南省各站点不同历时降水贡献率创新趋势分析

Fig. 10 Trend analysis of precipitation contribution rate at various stations in Yunnan Province at different calendar periods by using ITA

4 讨论

对云南省 32 个气象站点降水历时发生率和贡献率进行综合分析发现,随着降水历时的增加,降水发生率呈减少趋势,降水贡献率呈先增加后减少的趋势,各历时之间差异较小。随着降水等级的提升,降水发生率呈减少趋势,降水贡献率呈先增加后减少趋势。这与前人在广西<sup>[26]</sup>、贵州<sup>[27]</sup>、四川<sup>[28]</sup>地区得出的结果基本一致,

整个西南地区呈现整体的相似性。空间上,长历时降雨及大雨和暴雨的发生率和贡献率均呈南多北少,说明滇南地区发生洪涝灾害的风险更高,这与王理萍<sup>[14]</sup>和王晓莹<sup>[15]</sup>等的结论基本一致。在采用创新趋势分析法(ITA)和 M-K 趋势法对云南省近 60 a 不同历时、不同等级降水发生率和贡献率数据进行趋势检验后,分析发现短历时降水发生率和贡献率呈增加趋势,大雨和暴雨出现的频率增加,两类方法得出的变化趋势

结果基本一致。ITA 相较于 M-K 趋势法而言对数

据处理更加简便、数据趋势更为直观。

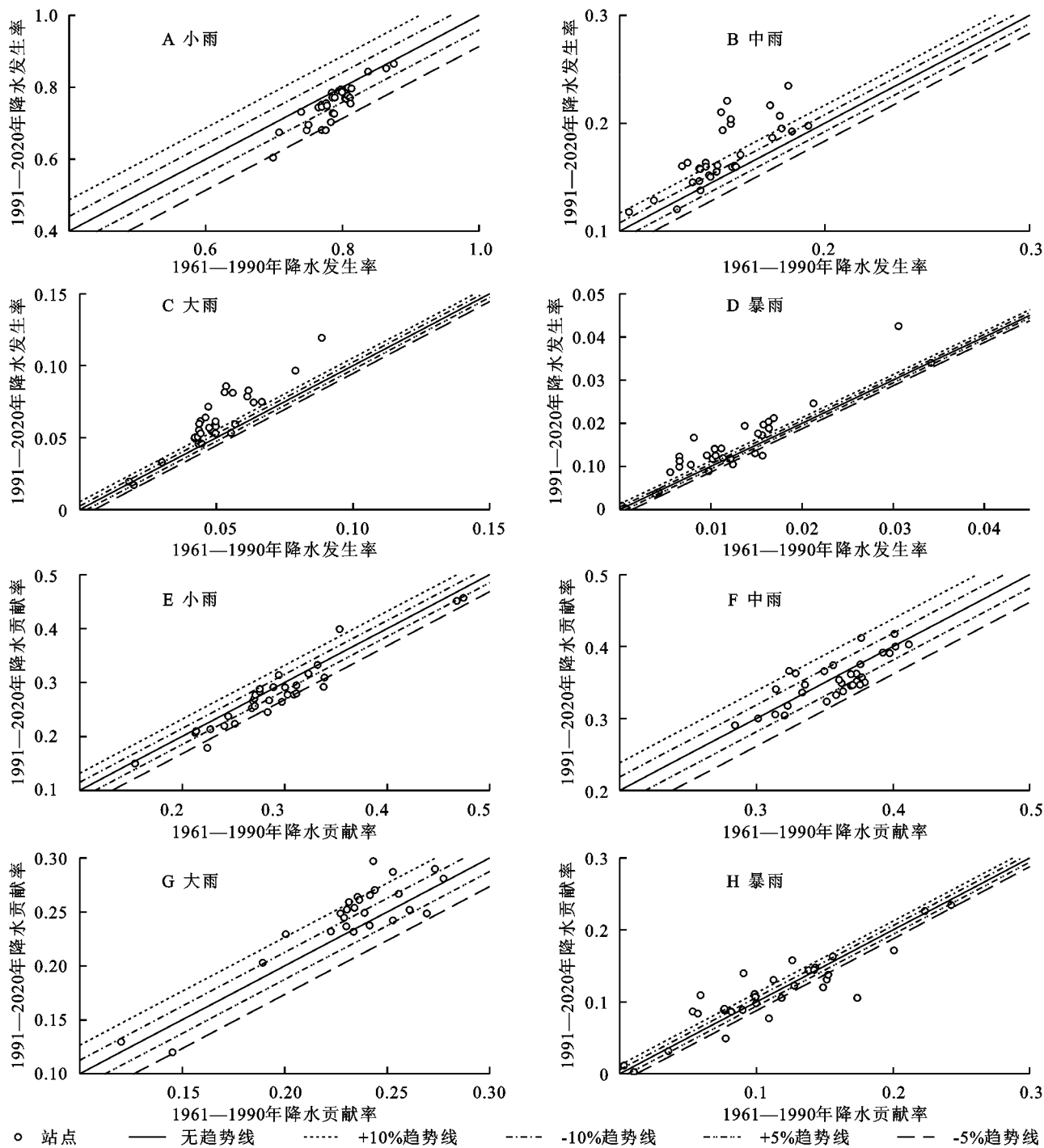


图 11 云南省各站点不同等级降水发生率和贡献率创新趋势分析

Fig. 11 Trend analysis of precipitation occurrence and contribution rate at various stations in Yunnan Province at different grades by using ITA

云南降水结构的变化趋势表明发生短历时强降水的概率正在上升。引起该变化的主要原因可能是大气环流影响以及海气相互作用<sup>[29]</sup>。同时,云南地处热带和亚热带交错带,对于厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)现象尤为敏感。在全球气候变暖的情况下,人类活动也是造成该变化的原因之一。但这些因素相互作用,情况十分复杂。因此,需要进行深入的研

究和分析,更好地为云南省水旱灾害风险评估和预警提供参考依据。

## 5 结论

(1) 随着降水历时的增加,降水发生率呈减少趋势,降水贡献率呈先增加后减少的趋势。空间上,1~3 d 历时降水发生率和贡献率主要呈自东北向西南



递减趋势,4 d 历时后与之相反。不同历时的降水贡献率空间分布基本与发生率一致。

(2) 随着降水等级的提升,降水发生率呈减少趋势,降水贡献率先增加后减少趋势。空间上,小雨发生率呈自北向南递减趋势,中雨、大雨和暴雨发生率呈自北向南递增趋势。小雨、中雨降水贡献率呈自西北向东南递减趋势,大雨、暴雨贡献率与之相反。滇中、滇南和滇西南地区大雨和暴雨发生率和贡献率均较高,可能造成洪涝灾害的风险较大。

(3) M-K 趋势检验与创新趋势分析法对于不同历时、等级的降水发生率和贡献率变化趋势得出的结果基本一致。不同降水历时中,大多数站点短历时降水发生率和贡献率呈增加趋势,长历时呈减少趋势。不同降水等级中,大多数站点小雨发生率呈减少趋势,中雨、大雨和暴雨发生率呈增加趋势,小雨和中雨贡献率呈减少趋势,大雨和暴雨呈增加趋势。

#### 参考文献(References):

- [1] Zhang Y, Li R Z, Wang K C. Climatology and changes in internal intensity distributions of global precipitation systems over 2001—2020 based on IMERG[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 620: 129386.
- [2] 姜彤,孙赫敏,李修仓,等.气候变化对水文循环的影响[J].*气象*, 2020, 46(3): 289-300.  
Jiang T, Sun H M, Li X C, et al. Impact of climate change on water cycle[J]. *Meteorological Monthly*, 2020, 46(3): 289-300.
- [3] 徐东坡,李金明,周祖昊,等.1956—2018年中国降水特征的时空分布规律研究[J].*水利水电技术*, 2020, 51(10): 20-27.  
Xu D P, Li J M, Zhou Z H, et al. Study on the spatial and temporal distribution of precipitation characteristics in China from 1956 to 2018[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(10): 20-27.
- [4] Yin Y X, Chen H S, Wang G J, et al. Characteristics of the precipitation concentration and their relationship with the precipitation structure: A case study in the Huai River Basin, China[J]. *Atmospheric Research*, 2021, 253: 105484.
- [5] 徐小钰,朱记伟,解建仓,等.1951—2012年西安地区旱涝灾害演变特征及其与多事件的相关性研究[J].*自然灾害学报*, 2015, 24(6): 64-71.  
Xu X Y, Zhu J W, Xie J C, et al. Evolution characteristics of drought/flood disasters in Xi'an Region from 1951 to 2012 and their correlation to related multiple events[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2015, 24(6): 64-71.
- [6] 郭斌,邢文雪,李云,等.基于 TRMM 3B43 产品的1998—2016年黄淮海平原降水时空特征研究[J].*地理科学*, 2021, 41(7): 1285-1294.
- Guo B, Xing W X, Li Y, et al. Temporal and spatial characteristics of precipitation based on TRMM 3B43 product in the Huang-Huai-Hai Plain during 1998—2016[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(7): 1285-1294.
- [7] 任建成,王峰,卢晓宁.基于 EOF 和小波分析的山东省年降水时空变化特征[J].*水土保持研究*, 2022, 29(2): 179-183.  
Ren J C, Wang F, Lu X N. Characteristics of spatio-temporal variation of annual precipitation in Shandong Province based on EOF and wavelet analysis[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(2): 179-183.
- [8] Wang L Y, Chen S F, Zhu W B, et al. Spatiotemporal variations of extreme precipitation and its potential driving factors in China's North-South Transition Zone during 1960—2017[J]. *Atmospheric Research*, 2021, 252: 105429.
- [9] 时延锋,李福孟,王志峰,等.1961—2020年沂蒙山区极端降水时空变化特征[J].*水资源与水工程学报*, 2022, 33(5): 17-26.  
Shi Y F, Li F M, Wang Z F, et al. Spatiotemporal variation characteristics of extreme precipitation in Yimeng Mountain Area from 1961—2020[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2022, 33(5): 17-26.
- [10] 赵芹蕊,徐立荣,时延锋,等.1970—2019年济南市极端降水事件时空变化特征[J].*水土保持研究*, 2022, 29(4): 140-149.  
Zhao Q R, Xu L R, Shi Y F, et al. Spatiotemporal characteristics of extreme precipitation in Jinan during 1970—2019[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4): 140-149.
- [11] 王军德,苏振娟,张丽娜,等.甘肃省极端降水指数时空变化特征[J].*水土保持研究*, 2022, 29(4): 270-276, 291.  
Wang J D, Su Z J, Zhang L N, et al. Characteristics of temporal and spatial variation of extreme precipitation index in Gansu Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4): 270-276, 291.
- [12] 张志高,张凯昭,蔡茂堂,等.1960—2019年河南省降水结构时空变化特征[J].*水土保持研究*, 2022, 29(4): 159-166.  
Zhang Z G, Zhang K Z, Cai M T, et al. Spatiotemporal variation characteristics of precipitation structure in Henan Province during 1960—2019[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4): 159-166.
- [13] 姚越,赵华荣,刘圣锋.贵州省1960—2017年降水时空变化特征[J].*人民长江*, 2020, 51(4): 105-111.  
Yao Y, Zhao H R, Liu S F. Spatial-temporal variation characteristics of precipitation pattern in Guizhou Prov-

- ince from 1961 to 2017[J]. Yangtze River, 2020, 51(4):105-111.
- [14] 王理萍,王树仿,张刘东,等.1960—2013年云南省降水时空变化特征分析[J].水电能源科学,2016,34(12):20-24.  
Wang L P, Wang S F, Zhang L D, et al. Spatial-temporal characteristics of precipitation in Yunnan Province from 1960 to 2013[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(12):20-24.
- [15] 王晓莹,景元书,鲁永新.近40年云南省极端降水时空变化特征分析[J].科学技术与工程,2021,21(30):12822-12831.  
Wang X Y, Jing Y S, Lu Y X. Analysis of spatial and temporal variability of extreme precipitation in Yunnan Province in the last 40 years[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(30):12822-12831.
- [16] 杨晓静,徐宗学,左德鹏,等.云南省1958—2013年极端降水时空变化特征分析[J].灾害学,2015,30(4):178-186.  
Yang X J, Xu Z X, Zuo D P, et al. Spatio-temporal characteristics of extreme precipitation in Yunnan Province from 1958—2013[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(4):178-186.
- [17] 刘有梅,王龙,余航,等.云南降水的5个统计指标及其空间分布[J].中国农村水利水电,2021(3):80-87.  
Liu Y M, Wang L, Yu H, et al. Five statistical indicators of precipitation in Yunnan and their spatial distribution[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(3):80-87.
- [18] 刘占明,徐丹,魏兴琥,等.北江流域汛期降水结构变化特征[J].热带地理,2020,40(1):145-153.  
Liu Z M, Xu D, Wei X H, et al. Variation characteristics of the precipitation structure during the rainy season in the Beijiang River Basin, China[J]. Tropical Geography, 2020, 40(1):145-153.
- [19] 刘赛艳,解阳阳,方红远,等.淮河流域汛期降水结构变化特征[J].水文,2022,42(5):102-108.  
Liu S Y, Xie Y Y, Fang H Y, et al. Spatial-temporal variation characteristics of precipitation pattern in the Huai River Basin during flood season[J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(5):102-108.
- [20] 彭晓芬,黄甫则,周汝良.云南省年均降雨量空间插值模拟方法比较[J].西南林学院学报,2010,30(5):25-28.  
Peng X F, Huang F Z, Zhou R L. Comparison of spatial interpolation mimic method for the mean annual precipitation in Yunnan Province[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2010, 30(5):25-28.
- [21] Rahman M S, Islam A R M T. Are precipitation concentration and intensity changing in Bangladesh over-times: Analysis of the possible causes of changes in precipitation systems[J]. Science of the Total Environment, 2019, 690:370-387.
- [22] 蔡新玲,蔡依暉,叶殿秀,等.渭河流域降雨结构时空演变特征[J].水土保持研究,2017,24(6):370-375.  
Cai X L, Cai Y X, Ye D X, et al. Spatiotemporal variability characteristics of precipitation pattern in Weihe River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(6):370-375.
- [23] Ali R, Kuriqi A, Abubaker S, et al. Long-term trends and seasonality detection of the observed flow in Yangtze River using Mann-Kendall and Sen's innovative trend method[J]. Water, 2019, 11(9):1855.
- [24] Sen Z. Innovative trend analysis methodology[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, 17(9):1042-1046.
- [25] 邹磊,夏军,张印,等.海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析[J].水资源保护,2021,37(1):53-60.  
Zou L, Xia J, Zhang Y, et al. Spatial-temporal change characteristics and driving forces of precipitation in the Haihe River Basin[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1):53-60.
- [26] Wu H, Qian H. Innovative trend analysis of annual and seasonal rainfall and extreme values in Shaanxi, China, since the 1950s[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(5):2582-2592.
- [27] 赵华荣,姚越,金鑫,等.广西地区1960—2017年降水结构变化特征[J].水电能源科学,2018,36(12):1-4,20.  
Zhao H R, Yao Y, Jin X, et al. Structure characteristics of precipitation in Guangxi region during 1960—2017[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(12):1-4,20.
- [28] 任小玢,董治宝,周正朝.近50年来四川盆地降水日数的时空变化特征[J].水土保持通报,2012,32(4):65-70.  
Ren X F, Dong Z B, Zhou Z C. Spatio-temporal variation of precipitation days of Sichuan Basin in nearly 50 years[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(4):65-70.
- [29] 史悦.云南降水的气候变化特征及主要成因研究[D].昆明:云南大学,2018.  
Shi Y. Study on the Climate Change Characteristics and Main Causes of Precipitation in Yunnan[D]. Kunming: Yunnan University, 2018.