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

云南省盐津县暴雨及短时强降水特征分析

周璐瑶 刘平英 李思

Analysis of the characteristics of torrential rain and short-duration heavy rainfall in Yanjin County, Yunnan Province

ZHOU Luyao，LIU Pingying，LI Si

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-181

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

南岭地区汛期短时强降水的时空变化特征分析
Analysis of spatiotemporal characteristics of the short-duration heavy rainfall during the flood season in Nanling Mountain
暴雨灾害. 2025, 44(6): 780-791 https://doi.org/10.12406/byzh.2025-014

基于分钟雨量的浙江省汛期短时强降水特征研究
Investigating the characteristics of short-duration heavy rainfall during flood season in Zhejiang Province using the minute rain gauge data
暴雨灾害. 2025, 44(1): 60-70 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-062

贵州省短时强降水时空分布特征分析
Temporal and spatial distribution characteristics of short-time heavy rainfall in Guizhou Province
暴雨灾害. 2021, 40(4): 383-392 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.006

北京地区两次极端特大暴雨过程中短时强降水环境条件对比分析
Comparison of short-duration heavy rainfall environmental conditions during two extreme torrential rainfall events over Beijing area
暴雨灾害. 2021, 40(1): 27-36 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.01.004

基于地面分钟雨量数据的湖北省短时强降水时空分布特征分析
Analysis of temporal and spatial distribution characteristics of flash heavy rain in Hubei Province based on minute rain gauge data
暴雨灾害. 2021, 40(1): 61-68 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.01.008

近10 a浙江省极端短时强降水时空特征分析
Spatio-temporal characteristics of short-duration extreme rainfall in the recent ten years in Zhejiang Province
暴雨灾害. 2021, 40(6): 599-607 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.06.004

关注微信公众号，获得更多资讯信息

周璐瑶,刘平英,李思.2026.云南省盐津县暴雨及短时强降水特征分析[J].暴雨灾害,45(1):58−67. ZHOU Luyao, LIU Pingying, LI Si. 2026. Analysis of the characteristics of torrential rain and short-duration heavy rainfall in Yanjin County, Yunnan Province [J]. Torrential Rain and Disasters,45(1):58−67 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−181

云南省盐津县暴雨及短时强降水特征分析

周璐瑶[1, 2], 刘平英[1, 2], 李思[1]

(1. 云南省气象灾害防御技术中心, 昆明 650034; 2. 中国气象局高影响天气(专项)重点开发实验室, 长沙 410000)

摘　要: 盐津县位于云南省与四川省交界处, 暴雨洪涝灾害高发且极易引发泥石流、山体滑坡等次生灾害。基于盐津县 2013—2022 年暴雨洪涝灾害记录、盐津国家气象站 1993—2022 年的年降水量与暴雨日数资料、2020—2022 年盐津县 29 个区域气象站的小时降水数据, 以及盐津国家气象站有分钟雨量观测记录以来 (1981—2022 年) 11 个历时的降水量逐年最大值, 采用趋势分析、分层级统计、极值推算等方法, 系统分析了盐津县暴雨及短时强降水的时空分布特征, 并与该县暴雨洪涝灾害的高发期进行对比, 同时推算出盐津县暴雨强度公式。结果表明: (1) 暴雨及短时强降水的月际变化与暴雨洪涝灾害发生频次的月际变化高度一致。(2) 近 30 a 盐津县年均降水量与云南省多年平均降水量接近且无明显变化趋势, 暴雨集中于夏季及秋初, 春季偶发, 冬季无暴雨。(3) 短时强降水高发期为 4—9 月, 并存在显著的夜间高发特征, 以小时雨量 20~30 mm 为主 (占 67.5%), ≥50 mm 量级的小时雨量偶发; 其空间分布上呈不均匀性, 高频次站点单点分散, 中部地区整体频次较低。(4) 推算得到盐津县 100 a 一遇的 1 h 极端降水量为 82.3 mm, 该结果可为后续城市雨水管网设计流量的确定提供科学参考。

关键词: 盐津县; 暴雨; 短时强降水; 时空分布; 暴雨强度公式

中图法分类号: P426.6　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−181

Analysis of the characteristics of torrential rain and short-duration heavy rainfall in Yanjin County, Yunnan Province

ZHOU Luyao[1, 2], LIU Pingying[1, 2], LI Si[1]

(1. *Yunnan Meteorological Disaster Prevention Technology Center*, *Kunming* 650034; 2. *China Meteorological Administration Key Development Laboratory of High-Impact Weather* (*Special Project*),*Changsha* 410000)

Abstract: Located at the border of Yunnan and Sichuan Provinces, Yanjin County is highly prone to rainstorm-induced floods, which often trigger secondary disasters such as mudslides and landslides. This study systematically analyzed the spatiotemporal distribution characteristics of torrential rain and short-duration heavy rainfall in Yanjin County, compared them with the high-incidence periods of flood disasters, and derived the rainfall intensity formula, employing methods such as trend analysis, hierarchical statistics, and extreme value estimation. The analysis was based on flood disaster records from 2013 to 2022, annual precipitation, and torrential rain frequency data from the Yanjin National Meteorological Station (1993—2022), hourly precipitation data from 29 regional stations (2020—2022), and annual maximum precipitation values across 11 durations from the station's minute-level records at the Yanjin National Meteorological Station (1981—2022). The results are as follows. (1) The monthly variations in torrential rain and short-duration heavy rainfall are consistent with those of flood disaster frequency. (2) Over the past 30 years, Yanjin's average annual precipitation has been similar to Yunnan's long-term average with no significant trend. The torrential rain processes predominantly occur in summer and early autumn, occasionally occur in spring, and are never observed in winter. (3) Short-duration heavy rainfall events are most frequent from April to September, with a pronounced nocturnal peak, dominated by 20—30 mm·h^{-1} events (67.5% of cases), while ≥50 mm·h^{-1}events are occasional; spatially, their distribution is uneven, with high-frequency stations scattered sporadically and lower overall frequency in central regions. (4) An extreme 1-hour precipitation of 82.3 mm for a 100-year return period is estimated from the derived rainstorm intensity formula, offering a critical reference for urban stormwater drainage design.

收稿日期: 2024−09−21; **定稿日期**: 2025−11−29

资助项目: 云南省气象局"低纬高原精细化雷电临近预警技术研究与服务应用"揭榜挂帅科技项目 (YNJBGS202304); 中国气象局高影响天气 (专项) 重点开发实验室"雷暴时空预测技术研究及在雷击敏感场景的应用评估"项目 (2024-G-13)

第一作者: 周璐瑶, 主要从雷电监测预警服务及气象灾害防御研究。E-mail: 269818420@qq.com

通信作者: 刘平英, 主要从雷电监测预警服务及气象灾害防御研究。E-mail: 364695018@qq.com

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

Key words: Yanjin County; torrential rain; short-duration heavy rainfall; spatiotemporal distribution; rainstorm formula

引　言

暴雨和短时强降水均为我国较为常见的气象灾害 (黎成超和荣昕, 2018), 暴雨易导致河流水位快速上涨、农田淹没和城市内涝, 严重影响交通与基础设施; 而短时强降水虽然在累计降水量上小于暴雨, 但其高强度、短历时特征导致地表径流快速汇集, 显著增强坡面侵蚀力, 更易诱发泥石流和山体滑坡等地质灾害 (俞小鼎, 2013)。因此, 系统分析暴雨和短时强降水的发生规律与时空分布特征, 对提升区域防灾减灾能力具有重要的科学意义。

盐津县位于云南省东北部昭通市境内, 地处乌蒙山区与四川盆地过渡带, 属中亚热带与温带共存的立体季风气候, 夏季炎热多洪涝, 冬季偏暖, 干雨季分明, 雨季时局部暴雨频发, 常导致洪涝灾害。同时, 盐津县高山和河谷堆积体面积占全县国土面积的 90% (孙炜锋等, 2016), 加之森林覆盖率低, 山高坡陡, 土地流失严重 (王成琴和张绍华, 2011), 在遭遇强降水时极易引发洪涝及其衍生地质灾害 (干晓锐, 2008)。

云南暴雨频次呈现南多北少的特征 (杨鹏武等, 2024), 而短时强降水高频区则相对分散, 主要出现在滇南、滇西南、滇东、滇东北边缘地区及丽江华坪 (邹灵宇等, 2022)。考虑盐津县暴雨及短时强降水高发的原因在于云南省降水的主要水汽来源为孟加拉湾和南海 (鄢晓茜等, 2024), 因此暴雨频次南高北低。在已有研究中, 多位学者关注到云南及盐津地区的强降水及其引发的灾害情况。陶云等 (2009) 及戴智诚 (2013) 等统计分析了云南省 2001—2005 年逐月及逐年降水量, 探讨了降水与区域灾害的关系, 指出云南省强降水中心与地质灾害高发区对应较好; 杨竹云等 (2019) 的研究进一步揭示了昭通市雨季地质灾害频发与降水密切相关; 刘博文等 (2021) 结合盐津县两次典型灾害案例, 探讨了暴雨和短时强降水在其中的诱发作用机制; 任继周等 (2018) 针对盐津县暴雨洪水事件, 总结了特定时段的暴雨成因及特性。然而, 现有研究多从灾害个例出发, 侧重于探讨暴雨或短时强降水作为灾害诱因的作用机理, 缺乏对盐津县暴雨和短时强降水本身的分布特征、发生规律等问题的系统性、针对性分析。

本文基于盐津县 2013—2022 年暴雨洪涝灾害记录、盐津国家气象站 1993—2022 年年降水量与暴雨日数数据、2020—2022 年盐津县境内 29 个区域气象站逐时降水资料, 以及盐津国家气象站有分钟雨量观测记录以来 (1981—2022 年)11 个历时的降水量逐年最大值资料, 系统分析了盐津县暴雨及短时强降水时空特征, 并与该县暴雨洪涝灾害高发期进行对比, 最后推算盐津县暴雨强度公式。此研究旨在探讨盐津县暴雨及短时强降水的时空分布特征, 为当地乃至整个乌蒙山区的暴雨及短时强降水预警、灾害预防及城市雨水管网设计提供科学依据。

1 资料来源与研究方法

1.1 资料说明

本文所用资料包含: (1) 2013—2022 年盐津县暴雨洪涝灾害灾情数据, 来源于中国气象局气象灾害管理系统, 用于盐津县暴雨灾害情况统计分析; (2) 盐津国家气象站 1993—2022 年年降水量及暴雨日数资料, 来源于云南省气象台, 用于分析盐津县降水特征; (3) 来源于云南省气象台的盐津县辖区内 29 个区域气象站 2020—2022 年逐小时降水观测数据, 用于分析盐津县短时强降水特征; (4) 盐津国家气象站有分钟雨量记录以来 (1981—2022 年), 5 min、10 min、15 min、20 min、30 min、45 min、60 min、90 min、120 min、150 min、180 min 共 11 个历时的降水量逐年最大值, 来源于云南省气象台, 用于推算盐津县暴雨强度公式。盐津国家气象站及盐津县辖区内区域气象站位置分布如图 1b 所示。

1.2 研究方法

本文相关定义: (1) 暴雨日, 将气象观测站日降水量 (当日 20:00—次日 20:00, 北京时, 下同)≥50 mm 的降水日定义为暴雨日; (2) 短时强降水, 指小时降水量≥20 mm 的降水 (陈相甫和赵宇, 2021; 李智玉等, 2024); (3) 短时强降水日, 对于区域统计, 若当日辖区内任意一个或多个区域气象站出现小时降水量≥20 mm, 即记该日为一次短时强降水日 (王光明等, 2020)。对于单站统计, 某站一日内任意时段出现一次或多次小时降水量≥20 mm, 均记该站为一个短时强降水日。

本文基于 2013—2022 年盐津县暴雨洪涝灾害记录、盐津国家气象站 1993—2022 年的年降水量及暴雨日数资料和盐津县境内区域气象站 2020—2022 年的逐时降水观测数据, 通过时间序列分析, 揭示暴雨、短时强降水与洪涝灾害发生的时间关联性; 基于区域气象站 2020—2022 年的逐时降水观测数据, 将短时强降水按小时降水量细分为 20~30 mm、30~40 mm、40~50 mm、≥50 mm 四个量级, 统计各量级短时强降水的月际变化、日变化特征和空间分布规律。

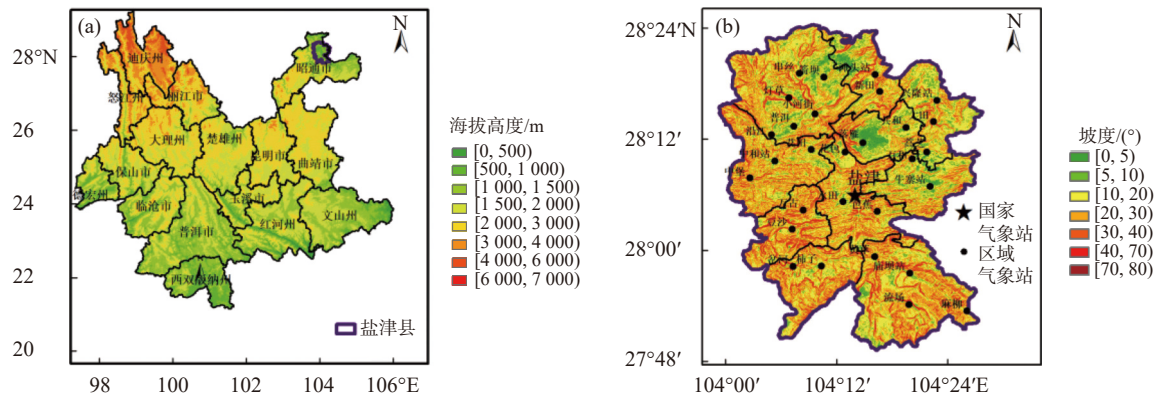


图 1 云南省海拔高度 (a, 填色, 单位: m; 紫色线区标注盐津县) 及盐津县坡度 (填色, 单位: °) 与气象站点 (b) 分布图

Fig. 1 (a) Elevation (shaded, unit: m) of Yunnan Province (Yanjin County is marked in purple in the figure) and (b) slope (shaded, unit: °) and distribution of meteorological stations in Yanjin County

另外, 本文基于盐津国家气象站 1981—2022 年 11 个降水历时的年最大降水量数据采用年最大值法 (张金萍等, 2024) 推算盐津县暴雨强度公式。将每个历时的年最大值序列按从大到小排序, 采用数学期望公式计算每个数据对应的经验频率, 从而得到经验频率数据点分布。数学期望公式如下

$$P=\frac{m}{n+1}\times 100\% \tag{1}$$

式中, m 为数据排序后的序号 (第一名为最大), n 为资料年限, P 为计算得到的每一数据的经验频率。

随后, 采用皮尔逊-Ⅲ型分布、指数分布 (段燕楠等, 2017) 以及耿贝尔分布曲线 (王振华等, 2018) 分别拟合经验频率数据点, 根据拟合结果的绝对均方根误差及相对均方根误差选择最优拟合曲线, 确保后续暴雨强度公式推算结果的可靠性; 根据最优拟合的频率曲线, 建立降水强度、降水历时与重现期三者之间的理论关系; 根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021) 推荐确定暴雨强度公式形式为

$$q=\frac{167A}{(t+b)^n} \tag{2}$$

或

$$i=\frac{A}{(t+b)^n} \tag{3}$$

式中, q、i 均为暴雨强度, 但二者单位不同, q 指单位面积单位时间内的降雨体积 (单位: $\mathrm{L\cdot s^{-1}\cdot hm^{-2}}$); i 指单位时间内的降雨深度 (单位: $\mathrm{mm\cdot min^{-1}}$); t 为降雨历时 (单位: min); A 为雨力参数 (单位: mm); b 为降水历时修正参数 (单位: min); n 为暴雨衰减指数。A、b、n 均可基于已建立的降水强度、降水历时与重现期理论关系, 采用最小二乘法进行优化估计, 以确定其最优取值。

最后根据应用场景需要, 选择暴雨强度公式形式, 再根据暴雨强度公式得到不同降水历时在不同重现期下的降水量极值, 为城市防洪工程设计提供科学依据。

2 灾情统计

盐津县位于云南省东北部昭通市境内, 地处乌蒙山区与四川盆地过渡带, 地理位置如图 1a 所示, 海拔高度约为 500~2 000 m, 地形以峡谷和山地为主, 横江贯穿全境, 形成狭窄的河谷地带。这种地形容易导致降水迅速汇集, 形成洪水。盐津县海拔及坡度分布如图 1 所示, 河谷地区海拔较低但周边山地坡度较大, 降水后地表径流速度快, 容易引发山洪和泥石流。

据不完全统计, 盐津县 2013—2022 年共计发生暴雨洪涝灾害事故 26 起, 造成 28 人死亡、5 人失踪, 其逐月分布见图 2, 26 起灾害均发生在 6—9 月, 其中 25 起发生于 6—8 月。

盐津县地质灾害高发, 据盐津县地质灾害调查项目成果显示, 盐津县有滑坡、崩塌、泥石流地质灾

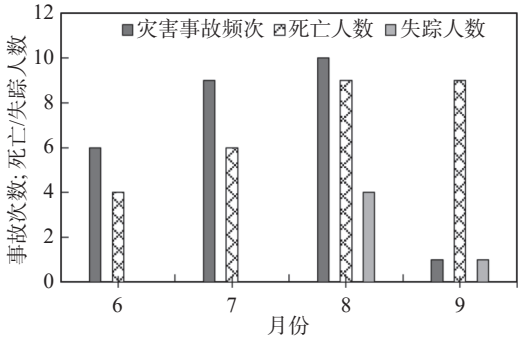


图 2 2013—2022 年盐津县暴雨洪涝灾害事故频次 (单位: 次) 及失踪和死亡人数逐月分布

Fig. 2 Monthly distribution of rainstorm and flood disaster incidents (unit: times) and associated missing and fatalitiesin Yanjin County from 2013 to 2022

害点 300 余处, 暴雨洪涝正是引发滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害的重要因素。在统计的 26 起暴雨洪涝灾害中, 14 起灾害被明确记载引发了泥石流、山体滑坡、岩石崩塌等次生地质灾害。这凸显了强降水-洪涝-地质灾害的链式致灾特征, 对区域灾害链风险防控提出了更高的要求。

3 降水特征

3.1 年降水量特征

统计 1993—2022 年盐津国家气象站 30 a 年降水量数据得到盐津县逐年年降水量分布如图 3, 统计得出, 盐津县年平均降水量为 1 092.4 mm, 与云南省 (1991—2020 年) 平均降水量 (1 065.2 mm) 相近, 略高于全省平均值。年降水量在 718.4 (2011 年)~1 671.0 mm (2016 年) 之间变化, 整体看近 30 a 盐津县年降水量无明显变化趋势。

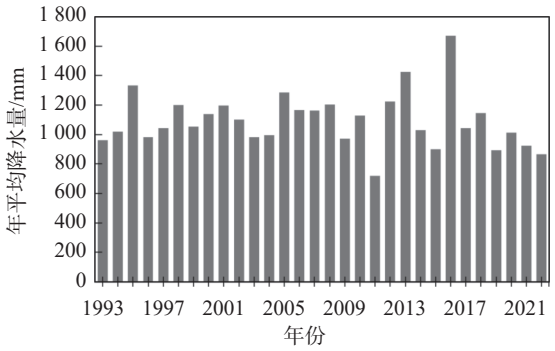


图 3 1993—2022 年盐津县降水量年际变化

Fig. 3 Annual precipitation in Yanjin County from 1993 to 2022

3.2 暴雨日数分布

图 4 为 1993—2022 年盐津县国家气象站 30 a 暴雨日数分布图, 从中可见, 盐津县累计暴雨日数 88 d, 年平均暴雨日数为 2.9 d, 30 a 中仅 2011 年与 2015 年无暴雨日, 有 15 a 暴雨日数在 3 d 及以上, 暴雨日数最多的是 1995 年 (7 d), 逐年暴雨日数无明显变化趋势。另外, 从月际分布看, 盐津县暴雨日全部出现在 4—9 月, 其余月份无暴雨出现。其中又以 7—8 月最为集中, 占总暴雨日数的 69.3%。4 月暴雨日仅出现一次 (1997 年)。可见, 盐津县暴雨主要出现于夏季及秋初, 冬季无暴雨, 春季暴雨偶发。

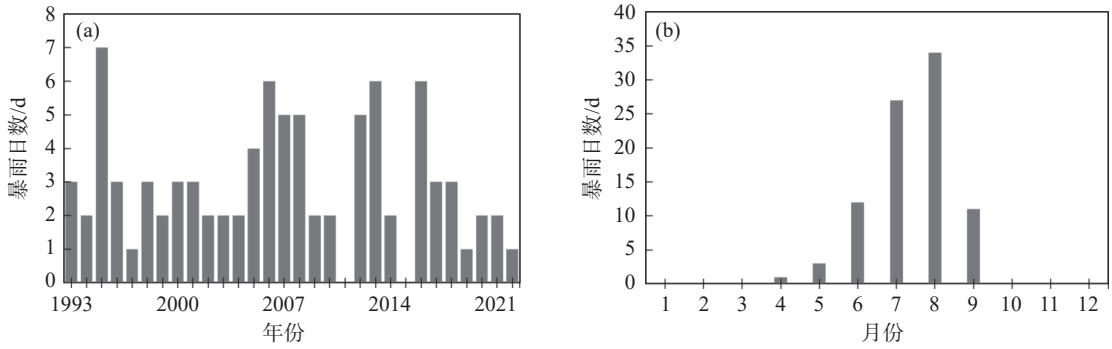


图 4 1993—2022 年盐津县暴雨日数年际变化 (a) 和月际变化 (b)

Fig. 4 The (a) annual and (b) monthly variations of rainstorm days in Yanjin County from 1993 to 2022

3.3 短时强降水时空分布

图 5 为 2020—2022 年盐津县境内区域气象站近 3 a 短时强降水日数逐月分布图, 盐津县近 3 a 累计有 72 d 出现短时强降水。短时强降水均发生在 4—9 月, 其余月份无短时强降水出现, 其中又以 8 月最多, 达 30 d, 占短时强降水总日数的 41.7%。可见,短时强降水日数月际分布规律整体与暴雨日数月际分布规律近似, 短时强降水主要出现于夏季及秋初。

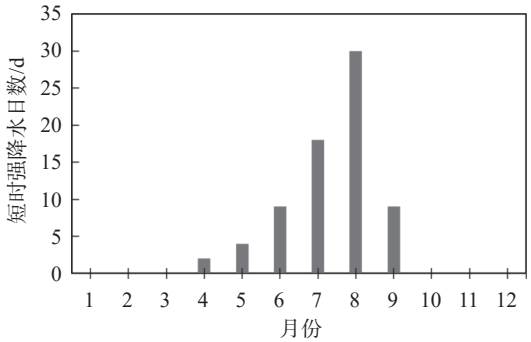


图 5 2020—2022 年盐津县短时强降水日数月际变化

Fig. 5 Monthly variation of short-duration heavy rainfall days in Yanjin County from 2020 to 2022

统计的各区域气象站短时强降水日数表明, 全县 29 个区域气象站, 共计出现短时强降水日 288 d, 平均每站 9.9 d。各站点短时降水日数分布见图 6。从中可见, 盐津县中部地区整体短时强降水发生日数较少, 如盐井镇的大部分区域及庙坝镇的西北部短时强降水发生日数均在 5d 及以下; 盐津县东北部、北部、西部、西南部区域短时强降水发生日数较多, 其中日数最多的是柿子镇西北部地区, 达 18 d。

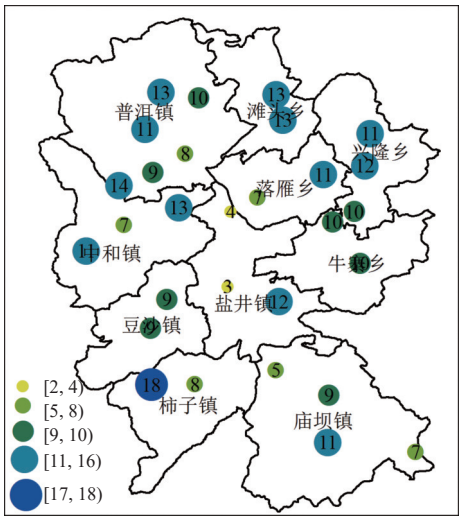


图 6 2020—2022 年盐津县短时强降水日数 (单位: d) 空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of short-duration heavy rainfall days (unit: d) in Yanjin County from 2020 to 2022

3.4 不同降水量级的短时强降水时空分布

将盐津县境内 29 个区域气象站 3 a (2020—2022 年) 短时强降水按小时降水量进一步划分为 20~30 mm、30~40 mm、40~50 mm、50 mm 及以上 4 个量级, 统计各量级降水出现的次数, 若同一站点同一天内出现某一降水量级 2 次及以上, 则按实际出现次数计次 (李华宏等, 2017; 杨帆等, 2023)。最后得到不同量级短时强降水次数的逐月分布见图 7。

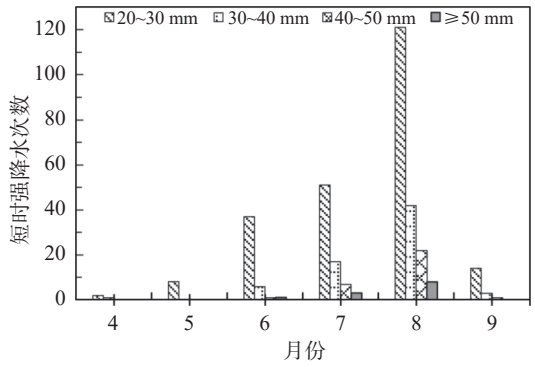


图 7 2020—2022 年盐津县不同量级短时强降水次数 (单位: 次) 月际变化

Fig. 7 Monthly variation of the frequency of short-duration heavy rainfall precipitation (unit: times) of different magnitudes in Yanjin County from 2020 to 2022

短时强降水全部出现在 4—9 月, 各月均以 20~30 mm 量级的短时强降水最多, 该量级短时强降水次数占短时强降水总次数的 67.5%。50 mm 及以上量级的短时强降水出现在 6—8 月, 主要集中于 8 月, 累计为 8 次。各降水量级的短时强降水均为 8 月最多。不同量级短时强降水空间分布见图 8, 从中可见不同降水量级的短时强降水空间分布情况差异较大。降水量相对较小的短时强降水频次高值区主要位于庙坝镇中部、柿子镇西北部、滩头乡东北部以及落雁乡东部、中和镇东北部、普洱镇中部及南部区域。而降水量较大的短时强降水频次高值区主要位于中和镇北部、牛寨乡北部区域, 小时降水量大于 50 mm 的短时强降水则主要发生在豆沙镇、普洱镇东南部以及柿子镇西北部区域。

3.5 短时强降水时空分布

统计各时次短时强降水次数 (图 9) 可见, 盐津县短时强降水有较为明显的夜间高发特征, 短时强降水主要集中于 18:00—05:00, 正午时分较少出现。统计各站点在昼间 (08:00—20:00) 及夜间 (20:00—08:00) 的短时强降水次数 (周秋雪等, 2025; 郭丽芳等, 2025), 进行空间分布分析, 绘制昼间及夜间短时强降水空间分布图 (图 10), 由图 10 可知, 昼间短时强降水发生频次较高的区域位于柿子镇西北部、中和镇东北部以及庙坝镇中部区域; 夜间各乡镇的短时强降水发生频次普遍高于昼间, 整体呈现中部略弱、四周较强的分布情况, 发生频次高值中心主要位于中和镇北部和滩头乡东北部。

4 暴雨强度推算

暴雨强度公式是计算暴雨地面径流和确定雨水沟道设计流量的重要依据。盐津县暴雨频发, 推求当地暴雨强度公式从而得到降水量极值, 可为当地城市建设、工程设计提供依据, 通过提前设计, 减轻暴雨对当地居民生产生活安全可能带来的危害 (邓培德等, 1985; 刘焕彬, 2021)。

本文采用年最大值法推求暴雨公式, 计算降水历时采用 5 min、10 min、15 min、20 min、30 min、45 min、60 min、90 min、120 min、150 min、180 min 共 11 个历时, 计算重现期按 1 a、2 a、3 a、5 a、10 a、20 a、50 a、100 a 统计。盐津国家站自 1981 年以来有不同历时降水的年最大值数据, 其中历时为 5 min、10 min 的降水历史极值出现在 1981 年, 历时为 15 min、20 min 的降水历史极值出现在 1993 年, 30 min 为 1988 年, 45 min、60 min、90 min、120 min、150 min 为 2005 年, 180 min 为 2002 年。为使降水极值推求结果更加准确, 本文中选取盐津国家气象站 1981—2022 年共计 42 a 的 11 个降水历时的年最大降水量数据建立暴雨强度公式, 所用观测资料包含全部降水历时的历史极值且符合《城市排水工程设计——暴雨强度公式编制技术指南》(第一版) 及《室外排水设计标准》(GB 50014—2021) 要求。

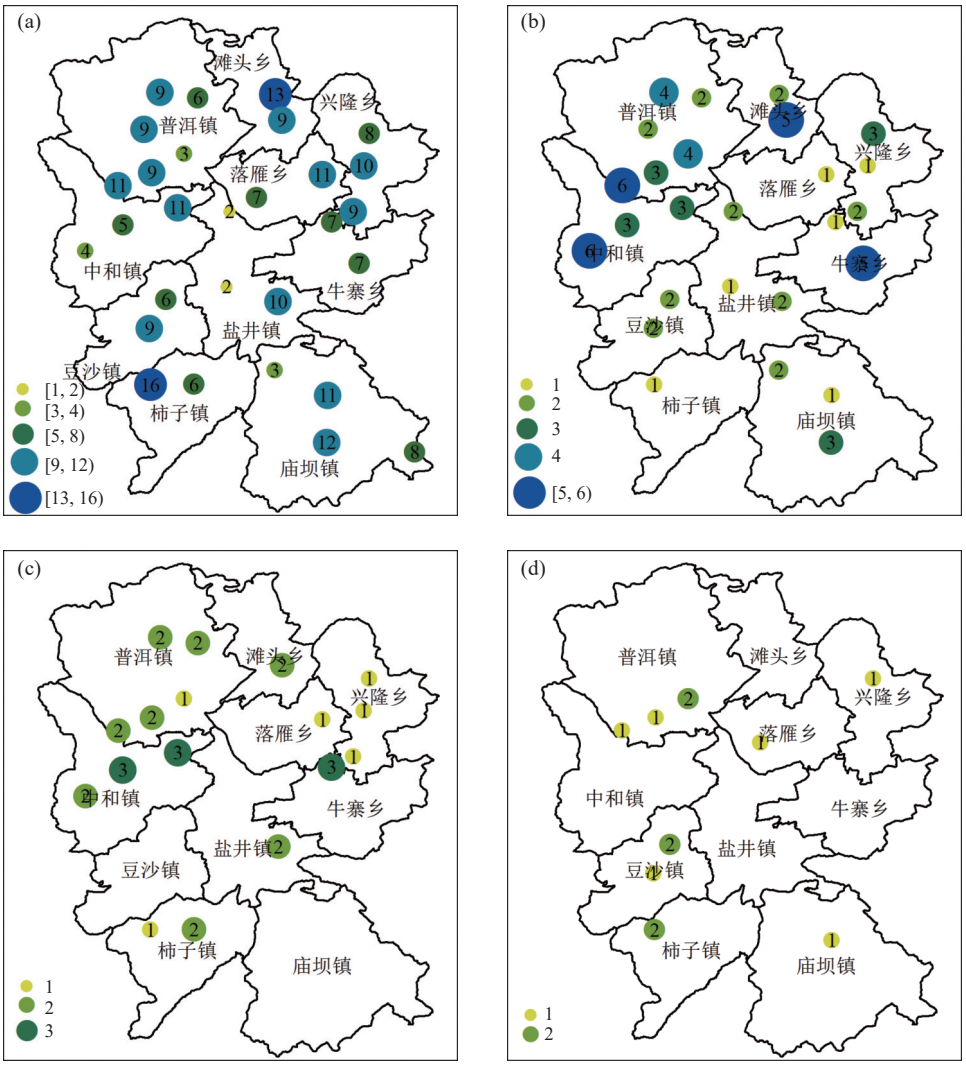


图 8 2020—2022 年盐津县 20~30 mm (a)、30~40 mm (b)、40~50 mm (c) 以及 50 mm 以上 (d) 量级短时强降水次数 (单位: 次) 的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of short-duration heavy rainfall precipitation (unit: times) with the intensity of (a) 20—30 mm, (b) 30—40 mm, (c) 40—50 mm, and (d) above 50 mm in Yanjin County from 2020 to 2022

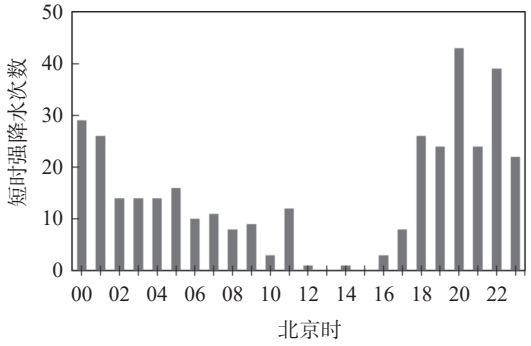


图 9 2020—2022 年盐津县短时强降水次数的日变化

Fig. 9 The hourly cumulative number of short-duration heavy rainfall precipitation (unit: times) in Yanjin County from 2020 to 2022

4.1 样本资料的理论频率分布曲线拟合

分别采用皮尔逊-Ⅲ型分布、指数分布以及耿贝尔分布曲线, 对盐津气象站 1981—2022 年 11 历时年最大降水量资料进行曲线拟合, 三种曲线拟合的暴雨强度公式精度检验如表 1 所示, 三种曲线拟合结果的绝对均方根误差、相对均方根误差都通过了《室外排水设计标准》(GB 50014—2021) 提出的精度检验要求, 由于《水利水电工程设计洪水计算规范》(SL 44—2006) 规定, 频率曲线的线型一般应采用皮尔逊-Ⅲ型分布, 因此当三种拟合方式都符合精度检验要求时, 优先选择皮尔逊-Ⅲ型分布曲线拟合结果推求暴雨强度公式。图 11 是利用皮尔逊-Ⅲ型分布曲线拟合出各重现期不同历时的降水强度频率曲线。

4.2 暴雨强度公式拟合

采用皮尔逊-Ⅲ型分布频率曲线对样本资料进行频率拟合, 采用适线法调整各降水历时拟合的变差系数 C_v 和偏态系数 C_s, 使理论频率曲线接近实际频率曲线。频率调整后可得出暴雨强度 i 或 q、重现期 P、降水历时 t 三者的关系, 即表 2 和图 12。

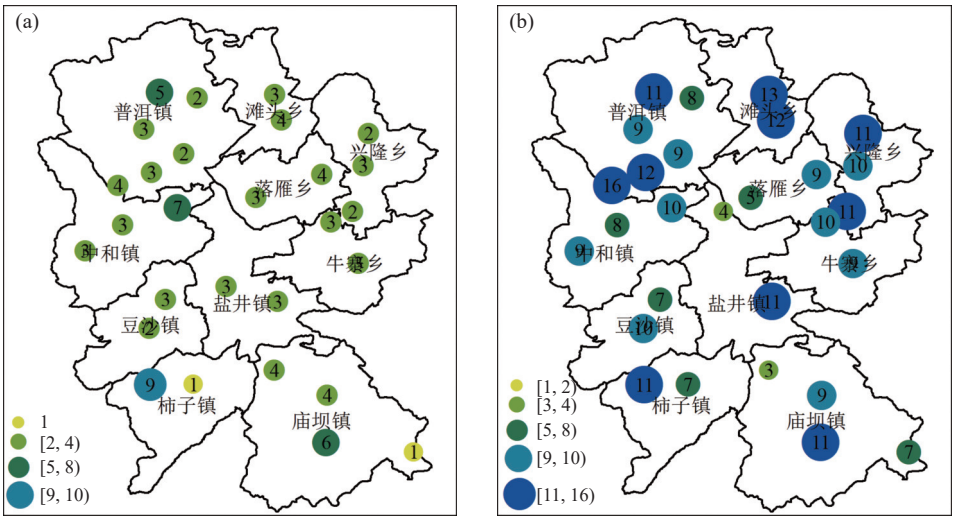


图 10 2020—2022 年盐津县短时强降水次数 (单位: 次) 白天 (08:00—20:00) (a)、夜间 (20:00—08:00)(b) 空间分布

Fig. 10 Spatial distributions of short-duration heavy rainfall frequency (unit: times) in Yanjin County during (a) daytime (08:00 BT–20:00 BT) and (b) nighttime (20:00 BT–08:00 BT the next day) from 2020 to 2022

表 1 三种曲线拟合暴雨强度公式精度检验结果

Table 1 The accuracy test results of the rainstorm intensity formula by three fitting curves

拟合曲线	平均绝对均方根误差/(mm·min^{-1})	平均相对均方根误差/%
皮尔逊-Ⅲ型分布	0.032	2.28
指数分布	0.033	2.63
耿贝尔分布	0.032	2.21

暴雨强度参数 q 或 i 均可用于表征暴雨强度, 但 i 常用于气象观测中, q 常用于排水管道设计, 为使推算结果可直接用于城市给排水设计参考, 本文采用以 q 表征暴雨强度的暴雨强度公式, 具体见公式 (2), 式中 t 为降水历时。该公式参数包含暴雨衰减指数 n, 降水历时修正参数 b (单位: min), 雨力参数 A (单位: mm)。运用最小二乘法求参, 可得单一重现期暴雨强度公式 (表 3)。

表 4 为不同重现期区间暴雨强度公式参数, 将重现期 (T) 代入表 4 所示的计算公式中, 求出 A、b、n 参数, 代入式 (2) 即可求出暴雨强度 q。

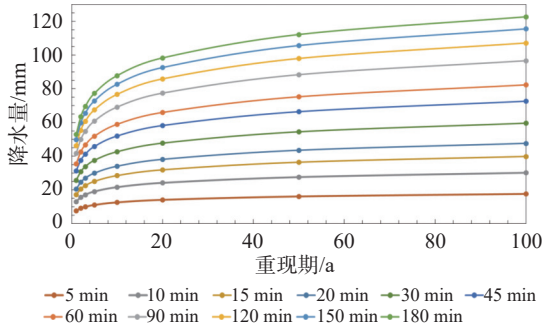


图 11 皮尔逊-Ⅲ型分布曲线拟合各重现期不同历时的降水强度频率曲线

Fig. 11 The precipitation intensity frequency curve with different durations in each return period using the Pearson-Ⅲ distribution curve

最终得到盐津县暴雨强度公式为

$$q = \frac{2454.390 \times (1 + 0.659 \log_{10} P)}{(t + 16.340)^{0.741}} \tag{4}$$

表 2 不同重现期下不同降水历时的暴雨强度 (单位:mm·min^{-1})

Table 2 Rainstorm intensity and duration for different return periods (unit: mm·min^{-1})

重现期/a	降水历时/min										
	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180
100	3.292	2.753	2.498	2.317	1.898	1.568	1.381	1.060	0.865	0.742	0.660
50	3.081	2.568	2.324	2.150	1.763	1.454	1.276	0.980	0.801	0.687	0.610
20	2.792	2.313	2.086	1.920	1.577	1.298	1.131	0.870	0.712	0.610	0.541
10	2.555	2.105	1.890	1.732	1.425	1.170	1.013	0.780	0.640	0.548	0.485
5	2.301	1.881	1.681	1.530	1.262	1.032	0.886	0.683	0.562	0.481	0.424
3	2.055	1.665	1.478	1.335	1.105	0.900	0.764	0.590	0.487	0.416	0.366
2	1.897	1.526	1.348	1.210	1.004	0.814	0.685	0.530	0.439	0.374	0.329
1	1.537	1.210	1.052	0.925	0.773	0.620	0.505	0.394	0.329	0.279	0.243

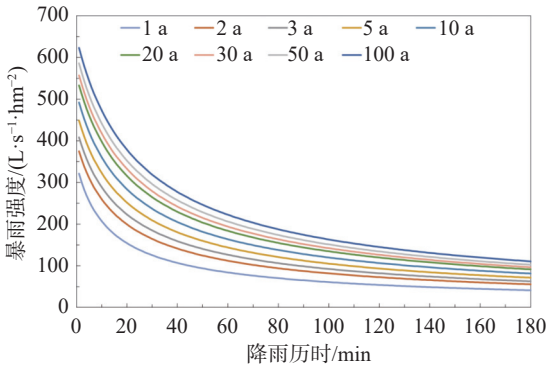


图 12 不同重现期下不同降水历时的暴雨强度曲线图

Fig. 12 Rainstorm intensity curves as a function of rainfall duration for different return periods

表 3 皮尔逊-Ⅲ型分布曲线拟合单一重现期暴雨强度公式参数

Table 3 The parameters of the single-return-period rainfall intensity formula using the Pearson-Ⅲ distribution curve

重现期/a	参数		
	n	*b*/min	*A*/mm
1	0.710	9.497	1 705.237
2	0.720	12.556	2 448.387
3	0.726	13.641	2 866.555
5	0.732	14.807	3 383.921
10	0.740	16.230	4 043.905
20	0.749	17.755	4 791.564
50	0.757	18.852	5 627.065
100	0.761	19.542	6 216.742

表 4 不同重现期 (*T*) 区间暴雨强度公式参数计算表

Table 4 Parameters of the storm intensity formula with different return periods

重现期/a	区间	参数	计算公 式
(1, 10]	II	*n*	0.715+0.011ln(*T*-0.378)
		b	12.181+1.821ln(*T*-0.771)
		A	10.936+5.881ln(*T*-0.116)
(10, 100]	Ⅲ	*n*	0.734+0.006ln(*T*-7.290)
		b	15.552+0.882ln(*T*-7.842)
		A	15.092+4.843ln(*T*-3.422)

4.3 降水量极值推求

根据盐津县暴雨强度公式, 求出降水历时为 1 h、2 h、3 h 时不同重现期的降水量极值见表 5, 从中可见, 盐津国家气象站 100 a 一遇的 3 h 极端降水量为 122.6 mm, 大于出现过的 3 h 降水量历史极值 112.6 mm, 因此本表推求结果合理, 可作为城市建设参考数据。

表 5 不同重现期下不同降水历时降水量极值 (单位:mm) 推算表

Table 5 The derived extreme rainfall (unit: mm) under different return periods and rainfall durations

降水历时/h	重现期/a						
	100	50	20	10	5	3	2
1	82.3	75.3	70.2	58.9	51.9	46.7	42.5
2	107.1	97.9	85.8	76.6	67.5	60.7	55.4
3	122.6	112.1	98.2	87.7	77.3	69.5	63.4

5 结论与讨论

本文基于盐津县 2013—2022 年暴雨洪涝灾害记录、盐津国家气象站 1993—2022 年的年降水量与暴雨日数资料、2020—2022 年盐津县 29 个区域气象站的小时降水数据, 以及盐津国家气象站有分钟雨量观测记录以来 (1981—2022 年)11 个历时的降水量逐年最大值, 系统分析了盐津县暴雨及短时强降水的时空分布规律及其与洪涝灾害的关联性, 构建了符合地域特征的暴雨强度公式。得出主要结论与讨论如下:

(1) 盐津县暴雨洪涝灾害在 6—8 月高发, 与暴雨及短时强降水多发期一致。盐津县因其地形地貌等原因, 暴雨洪涝极易引发次生灾害, 近 10 a 发生的 26 起暴雨洪涝灾害中, 14 起灾害明确记载引发泥石流、山体滑坡、岩石崩塌等次生地质灾害, 凸显了强降水-洪涝-地质灾害的链式致灾特征。

(2) 盐津县年均降水量 1 092.4 mm, 与云南省常年平均降水量相近, 累年平均暴雨日数为 2.9 d, 近 30 a 中年暴雨日数在 3 d 及以上的年份占 50%, 显示区域暴雨事件的高频性特征。盐津县暴雨主要出现于夏季及秋初, 冬季无暴雨, 春季暴雨偶发。

(3) 盐津县短时强降水全部分布于 4—9 月, 各月均以 20~30 mm 量级的短时强降水最多 (占比 67.5%)。小时降水量 50 mm 及以上量级的短时强降水偶有发生。短时强降水空间分布不均, 高频次站点呈单点分布, 但整体看中部区域站点短时强降水相对较弱, 达到大雨和暴雨量级的短时强降水主要出现在北部和西北部地区。盐津县短时强降水呈现较为明显的夜间高发特征, 且昼夜高发区存在明显差异, 昼间短时强降水高发于西部和南部, 夜间则呈现“中间弱、四周强”的分布格局。

(4) 盐津县 100 a 一遇 1 h极端降水为 82.3 mm, 100 a 一遇 3 h 极端降水为 122.6 mm。

研究从数据整合、规律认知到实用模型构建形成完整技术体系, 既丰富了滇东北复杂地形区暴雨

灾害研究的理论成果，也为区域防灾减灾与城乡建设提供了技术支撑。需要指出的是，本文对盐津县暴雨及短时强降水特征的分析主要基于对盐津县内国家站及区域气象站多年气象数据的统计分析实现，尚未结合雷达、卫星等多源资料对典型强降水个例进行成因剖析。后续工作可开展灾害天气个例的精细化分析，深化对当地灾害性天气成因的认识。此外，随着气候异常事件增多，突破历史极值的极端降水将更频繁的出现。当出现极端降水天气过程时，需要重新进行暴雨强度公式拟合以及暴雨强度推算，以使推算结果对当地城市建设有更为现实的指导意义。

参考文献 (References):

陈相甫,赵宇.2021.冷涡背景下东北地区短时强降水统计特征[J].高原气象,40(3):510−524. Chen X P, Zhao Y. 2021. Statistical analysis on hourly heavy rainfall in Northeast China induced by cold vortices [J]. Plateau Meteorology,40(3):510−524 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2020.00092

戴智诚.2013. 2000—2011 年云南省滑坡泥石流时空分布特征及其与降水的关系研究[D]. 昆明:云南大学, Dai Z C. 2013. Temporal and spatial distribution characteristics of landslide debris flow in Yunnan Province and its relationship with precipitation in 2000-2011 [D]. Kunming:Yunnan University, (in Chinese)

邓培德,韦鹤平,俞庭康等.1985.城市暴雨公式统计方法的研究[J].同济大学学报,(1):17−29 Deng P D, Wei H P, Yu T K, et al. 1985. Research on the statistical method of urban rainstorm formula [J]. Journal of Tongji University,(1):17−29 (in Chinese)

段燕楠, 王赟, 杨芳园, 等.2017.昆明市暴雨强度公式推算与对比[J].气象科技,45(1):87−91 Duan Y N, Wang Y, Yang F Y, et al. 2017. Calculation and contrastive analysis of rainstorm intensity formula for main urban areas of Kunming [J]. Meteorological Science and Technology,45(1):87−91 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.20160112

干晓锐.2008.对盐津县地质灾害防治的思考[J].中国煤炭地质,20(3):56−58. Gan X R. 2008. Pondering on geological hazard control in Yanjin County [J]. Coal Geology of China,20(3):56−58 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−1803.2008.03.014

郭丽芳,巩远发,孙昕.2025.中国南方极端降水的不同变化特征分析[J].暴雨灾害,44(3):390−399. Guo L F, Gong Y F, Sun X. 2025. Analysis of different characteristics of extreme precipitation in Southern China [J]. Torrential Rain and Disasters,44(3):390−399 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−204

黎成超,荣昕.2018.云南省暴雨日及短时强降水时空分布特征[J].安徽农业科学,46(5):166−168,226. Li C C, Rong X. 2018. Spatial and temporal distribution characteristics of the rainstorm days and short-time heavy rainfall in Yunnan [J]. Journal of AnHui Agricultural Sciences,46(5):166−168,226 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.0517−6611.2018.05.050

李华宏,胡娟,闵颖,等.2017.云南短时强降水时空分布特征分析[J].灾害学,32(3):57−62. Li H H, Hu J, MinY, et al. 2017. The analysis of short-time heavy rainfall spatio-temporal characteristics in Yunnan [J]. Journal of Catastrophology,32(3):57−62 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000−811X.2017.03.011

李智玉,杜小玲,朱育雷,等.2024.贵州典型地形下强降水特征及其模式预报订正研究[J].暴雨灾害,43(6):648−656. Li Z Y, Du X L, Zhu Y L, et al. 2024. Study on characteristics of heavy precipitation and model prediction correction under typical topography in Guizhou [J]. Torrential Rain and Disasters,43(6):648−656 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−079

刘博文,许彦艳,李华宏,等.2021.云南不同类型地质灾害的天气诱因分析[J].高原山地气象研究,41(3):95−102. Liu B W, Xu Y Y, Li H H, et al. 2021. Analysis of weather inducements of different types of geological disasters in Yunnan [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,41(3):95−102 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2021.03013

刘焕彬.2021.气候变化背景下济南短历时暴雨强度及雨型特征[J].山东科学,34(1):121−129. Liu H B. 2021. Intensity and rain pattern characteristics of short-duration rainstorm in Jinan under climate change [J]. Shandong Science,34(1):121−129 (in Chinese). doi:10.3976/j.issn.1002−4026.2021.01.015

任继周,陈扬,赵伟.2018.云南盐津县历史暴雨洪水对比分析[J].中国防汛抗旱,28(9):36−39. Ren J Z, Chen Y, Zhao W. 2018. Comparative analysis of historical flood disasters in Yanjin county of Yunnan Province [J]. China Flood and Drought Management,28(9):36−39 (in Chinese). doi:10.16867/j.issn.1673−9264.2017297

孙炜锋,向小龙,雷林洋等.2016.盐津县地质灾害调查项目成果报告[R].北京:中国地质科学院地质力学研究所. Sun W F,Xiang X L,Lei L Y,et al. 2016. Report on the results of the geological hazard survey project in Yanjin County [R]. Beijing:China Academy of Geosciences Institute of Geology, (in Chinese). doi:10.35080/n01.c.169243

陶云,唐川,段旭.2009.云南滑坡泥石流灾害及其与降水特征的关系[J].自然灾害学报,18(1):180−186. Tao Y, Tang C, Duan X. 2009. Landslide and debris flow hazards in Yunnan and their relationship with precipitation characteristics [J]. Journal of Natural Disasters,18(1):180−186 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−4574.2009.01.028

王成琴,张绍华.2011.盐津县山区洪灾的成因与防治[J].现代农业科技,2011(23):288−289. Wang C Q, Zhang S H. 2011. Causes and prevention of floods in mountainous areas of Yanjin County [J]. Modern Agricultural Science and Technology,2011(23):288−289 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1007−5739.2011.23.188

王光明,王文闻,王强,等.2020.怀化市汛期短时强降水特征分析[J].中低纬山地气象,44(1):54−59. Wang G M, Wang W W, Wang Q, et al. 2020. Analysis on the characteristics of short-term heavy precipitation in flood season in Huaihua City [J]. Mid-low Latitude Mountain Meteorology,44(1):54−59 (in Chinese) doi:10.3969/j.issn.1003−6598.2020.01.010

王振华, 戴有学, 郝寿昌.2018.基于暴雨强度公式对山西暴雨空间分布的分析[J]. 暴雨灾害,37(6):528-533. Wang Z H, Dai Y X, Hao S C.

2018. Study on spatial distribution of rainstorm based on rainstorm intensity formula in Shanxi Province [J]. Torrential Rain and Disasters,37(6):528-533 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2018.06.005

鄢晓茜,肖天贵,王静.2024.西南地区暴雨灾害集中度变化特征及其与环流指数的关系[J].高原山地气象研究,44(2):91−97. Yan X X, Xiao T G, Wang J. 2024. Characteristics of rainstorm disaster concentration index in Southwest China and its relationship with circulation index [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,44(2):91−97 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.02.011

杨帆,周悦,罗岚扬,等.2023.广东省降雨时空分布特征分析[J].中国防汛抗旱,33(11):46−51,82. Yang F, Zhou Y, Luo L Y, et al. 2023. Analysis of spatiotemporal distribution characteristics of rainfall in Guangdong Province [J]. China Flood & Drought Management,33(11):46−51,82 (in Chinese). doi:10.16867/j.issn.1673−9264.2023286

杨鹏武,周德丽,吉文娟,等.2024.云南区域性暴雨过程时空变化特征[J].气象与环境学报,40(3):83−90. Yang P W, Zhou D L, Ji W J, et al. 2024. Temporal and spatial characteristics of regional rainstorm processes in Yunnan province [J]. Journal of Meteorology and Environment,40(3):83−90 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673−503X.2024.03.010

杨竹云,李华宏,胡娟,等.2019.昭通市地质灾害特征及气象风险预警模型研究[J].云南大学学报: 自然科学版,41(4):753−764. Yang Z Y, Li H H, Hu J, et al. 2019. Research on features of geological hazard and meteorological risk early-warning model in Zhaotong [J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition,41(4):753−764 (in Chinese). doi:10.7540/j.ynu.20180668

俞小鼎.2013.短时强降水临近预报的思路与方法[J].暴雨灾害,32(3):202−209. Yu X D. 2013. Nowcasting thinking and method of flash heavy rain [J]. Torrential Rain and Disasters,32(3):202−209 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2013.03.002

张金萍,王茹玉,李志伟.2024.郑州市暴雨强度公式计算与对比分析[J].水电能源科学,42(8):7-11. Zhang J P, Wang R Y, Li Z W, 2024, Calculation and comparative analysis of rainstorm intensity formula in Zhengzhou City [J]. Water Resources and Power,42(8):7-11 (in Chinese). doi:10.20040/j.cnki.1000−7709.2024.20231336

周秋雪,龙柯吉,王皓,等.2025. 2008—2022 年四川省强降雨的时空特征[J].沙漠与绿洲气象,19(1):174−181. Zhou Q X, Long K J, Wang H, et al. 2025. Spatial and temporal characteristics of heavy rainfall in Sichuan Province from 2008 to 2022 [J]. Desert and Oasis Meteorology,19(1):174−181 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2307.17001

邹灵宇,于璐,杨柯,等.2022.云南不同强度短时强降水和大风时空分布特征研究[J].高原山地气象研究,42(2):32−37. Zou L Y, Yu L, Yang K, et al. 2022. Temporal-spatial distribution characteristics of short-time heavy rainfall and gale in Yunnan [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,42(2):32−37 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2022.02.005

(责任编辑　闵爱荣)