

苏锦兰,张万诚,宋金梅,等,2021.云南小时降水的时空分布变化研究[J].气象,47(2):133-142. Su J L,Zhang W C,Song J M, et al,2021. Study on spatio-temporal distribution of hourly precipitation in Yunnan Province[J]. Meteor Mon,47(2):133-142(in Chinese).

## 云南小时降水的时空分布变化研究\*

苏锦兰<sup>1,2</sup> 张万诚<sup>1,3</sup> 宋金梅<sup>4</sup> 徐安伦<sup>1,2</sup>

1 中国气象局大理山地气象野外科学试验基地,大理 671003

2 大理国家气候观象台,大理 671003

3 云南省气象科学研究所,昆明 650034

4 云南大理机场气象台,大理 671003

**提 要:** 利用 2005—2018 年 125 个国家级台站小时降水观测数据研究云南小时降水时空分布特征。结果表明:云南年总降水量、不同持续时间降水量、极端强降水量及降水日变化空间分布差异很大。年降水量自西北向南增加,雨强自北向南增强,降水时长西部大于东部、南部略大于北部,年降水量受降水时长和雨强共同影响,降水时长影响最强,雨强影响较弱,这种特征在滇西北最突出,但滇东北的降水量与雨强相关更好。云南大部夜雨量多于昼雨量,滇东北和北部边缘夜雨特征最显著;降水日变化特征在云南北部为夜间单峰,西部边缘为清晨单峰,中部为夜间与午后峰值相当的双峰,南部也为夜间和午后双峰,但南部不同区域间主峰和次峰出现时间不同。云南南部降水贡献以短、中历时降水为主,北部则以长、超长历时降水为主。云南短时强降水发生次数的空间分布表现为自西北向东南增加;年发生站次数具有增加趋势,日变化特征为显著单峰,多在傍晚至入夜出现,且极端短时强降水更易在凌晨出现。这些小时降水时空分布特征很大程度上代表了低纬高原地区的降水特征。由于低值天气系统多影响低纬高原中北部,热带天气系统多影响南部,且低纬高原地形复杂,局地热力条件差异明显,这些因素造成该区域小时降水时空分布特征差异显著。

**关键词:** 云南,小时降水,降水事件,短时强降水,日变化,空间差异

**中图分类号:** P426

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.02.001

## Study on Spatio-Temporal Distribution of Hourly Precipitation in Yunnan Province

SU Jinlan<sup>1,2</sup> ZHANG Wancheng<sup>1,3</sup> SONG Jinmei<sup>4</sup> XU Anlun<sup>1,2</sup>

1 Dali Mountain Meteorological Field Experiment Base, CMA, Yunnan Province, Dali 671003

2 Dali National Climate Observatory, Yunnan Province, Dali 671003

3 Yunnan Research Institute of Meteorology, Kunming 650034

4 Meteorological Observatory of Dali Airport, Yunnan Province, Dali 671003

**Abstract:** Based on the hourly precipitation data of 125 national stations from 2005 to 2018, the spatio-temporal distribution characteristics of hourly precipitation in Yunnan were studied. The results show that the spatial distributions of annual total precipitation, different duration precipitation, extremely severe precipitation and diurnal variation of precipitation are significantly different. The annual rainfall increases from northwest to south, and intensity enhances from north to south. The rainfall duration in west is more than in the east, and that in south is slightly more than in the north. The annual rainfall is affected commonly

\* 国家自然科学基金项目(41765003、41665005 和 42075013)和中国气象局省所科技创新发展项目(SCX201919)共同资助

2019 年 10 月 14 日收稿; 2020 年 12 月 31 日收修定稿

第一作者:苏锦兰,主要从事气候诊断及资料分析应用工作. E-mail:ss101003@163.com

通讯作者:张万诚,主要从事天气气候诊断分析研究. E-mail:wanzhangcheng@163.com

by rainfall duration and intensity. The influence of duration is stronger than that of intensity, especially in northwest Yunnan, but the rainfall in northeast Yunnan has better correlation with intensity. Most areas of Yunnan receive more rainfall at night than in the daytime, especially in northeast and northern margin of Yunnan. The diurnal variation of precipitation features a single peak at night in the northern part, a single peak in early morning in the western edge, double peaks at night and in the afternoon in the central and southern part, but the occurrence times of major peak and secondary peak are different in southern part. The precipitation southern Yunnan is mainly from the short and medium duration precipitations, while that in the north is mainly from long and ultra-long duration precipitations. Times of short-time severe precipitation increase from northwest to southeast, and its annual change has an increasing trend. Its daily distribution shows a significant single peak from dusk to night, but extreme short-time severe precipitation is more likely to occur in the early hours of the morning. These spatio-temporal characteristics of hourly precipitation largely represent the characteristics of the low-latitude plateau. The spatial distribution difference of hourly precipitation characteristics is related to the weather system. The low-value weather system mostly affects the central and northern part of the low-latitude plateau, while the southern part is mostly affected by tropical weather system. Moreover, the topography is complex, and the local thermal conditions are greatly distinct. All these factors contribute to the significant differences in the spatio-temporal distribution characteristics of hourly precipitation in this region.

**Key words:** Yunnan Province, hourly precipitation, rainfall events, short-time severe precipitation, diurnal variation, spatial difference

## 引 言

近百年来全球气候正经历一次以变暖为主要特征的显著变化,水资源作为响应气候变化最为敏感的因素之一,其时空分布及趋势演变一直是自然科学界普遍关注的核心问题。覆盖第一阶梯和第二阶梯地形的青藏高原、横断山脉、云贵高原、四川盆地等复杂地形区的降水资源的稳定开发利用,是我国经济社会文明发展的前提和基础,因此,对这些区域的降水资源时空演变特征进行深入研究具有重要意义。陈峪等(2005)在分析我国十大流域降水特征时指出北方流域降水量少、年际变化大、水资源缺乏不稳定,南方流域降水较多、年际变化较小、水资源相对充足稳定;张万诚等(2006)分析 1901—2002 年西南纵向岭谷区降水时空变化特征,指出纵向岭谷区年、夏季和冬季降水量主要分布型式为降水量一致偏多或一致偏少;刘晓冉等(2007)利用 1960—2000 年月降水量资料分析得出西南地区年降水资源变化趋势存在显著区域差异;张琪和李跃清(2014)指出近 48 年西南地区夏季降水量和雨日呈减少趋势,降水量和雨日分别存在准 16 a 和 17 a 的周期变化;张涛等(2015)指出 1998—2012 年横断山区年降水量从

东南向西北递减,并呈减少趋势,减少地区分布在南部及中西部。这些研究多用日、月、季、年降水资料开展。随着我国高时空分辨率探测资料的出现,不少学者开始从小时尺度出发对降水资源分布进行研究,如:Yu et al(2007a;2007b)利用 1991—2004 年自动观测逐时降水资料分析指出我国夏季降水日变化特征区域差异显著;姚莉等(2009;2010)分析得出我国 1 h 雨强日变化具有明显地区差异;于文勇等(2012)指出我国降水持续时间的季节演变能反映出典型雨带随季节的变化特征。与此同时,一些研究开始关注青藏高原和西南区域的小时降水特性。王夫常等(2011)分析指出西南降水夜雨特征明显,且降水日变化存在东西区域差异;白爱娟等(2011)指出青藏高原中部与四川盆地在降水日变化上有明显不同,两者的降水日变化具有不同峰值时间;薛羽君等(2012)指出四川盆地降水夜雨特征明显,但川西高原、盆中与盆地西南边缘山地、盆地东北边缘山地的降水峰值特点存在显著区域差异;胡迪和李跃清(2015)分析得到四川盆地西南部的夜雨占日降水量的比例最大,川西高原东北与川东北则为明显比例小值区;苏锦兰等(2015)指出横断山脉中高大山脉点苍山东西侧谷地年降水日变化存在显著差异,东侧为夜间单峰,西侧具有夜间主峰和傍晚次峰;计晓

龙等(2017)利用 2008—2014 年逐小时空间分辨率为  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  的全国自动站观测降水资料研究了青藏高原夏季降水日变化特征,探讨不同持续时间和等级降水对降水量日变化的影响。这些研究丰富了青藏高原、西南复杂地形区降水精细化分布特征的认识。

然而,专门针对拥有大地形、低纬度、热带海洋三个气象热点研究课题的低纬高原地区的小时降水特性系统研究尚不多见。云南作为我国低纬高原的典型代表,降水分布极其复杂多变(张万诚等, 2014),唐红玉等(2011)利用 1960—2000 年西南地区 91 个气象站的小时降水量资料,分析得出四川、重庆和贵州部分地区夜雨频繁,而云南的降水则以白天为主。仅有的小时降水特性分析所使用站点过于稀疏,且关注点较单一,很难完全揭示云南的降水日分布特征。因此,本文利用云南省 125 个国家级地面气象观测站点的小时降水资料,关注年总降水、不同持续时间降水、短时强降水、降水日变化的分布特征,揭示低纬高原区域降水资源分布及日变化的一些事实,为区域数值模式评估、精细化天气预报业务、水资源合理开发提供科学依据。

## 1 数据来源和研究方法

### 1.1 数据来源

降水资料是云南省气象信息中心提供的全省 125 个国家级地面气象观测站(图 1)2005—2018 年逐日逐小时自动观测数据,观测仪器为双翻斗雨量传感器,极少数高海拔台站冬季改为人工观测降雪(降水),针对气候学界限值、时间一致性、空间一致性及内部一致性检查,对降水数据进行设备级、台站级、省级、国家级四级质量控制。

地形资料使用地理空间数据云的 GDEMDEM 30 m 分辨率数字高程数据,如图 1 所示,云南地势北高南低,呈西北—东南阶梯状下降,西部属横断山系纵谷区,东部为云贵高原西部,境内金沙江、南盘江、元江、澜沧江、怒江、独龙江六大水系纵横交错。

### 1.2 研究方法

降水资料统计方法和定义:①降水时长。某小时降水量  $\geq 0.1$  mm 表示该小时发生降水,降水时

长记为 1 h;②平均小时雨强。某时次平均小时雨强指该时次累积降水量除以该时次累积降水时长;③降水事件。若降水进行过程中有  $\geq 1$  h 没有发生降水,则定义该次降水事件结束,该次降水事件持续时间即为降水开始 1 h 至结束 1 h 之间的小时数。根据降水持续时间定义短历时(1~3 h)、中历时(4~6 h)、长历时(7~12 h)、超长历时( $\geq 13$  h)降水事件;④短时强降水。指每小时降水量  $\geq 20$  mm 的降水。文中视小时降水量  $\geq 50$  mm 的强降水为极端短时强降水。时间均指北京时,夜间和白天分别是 20 时至次日 08 时、08—20 时,上半夜、下半夜、上午、下午分别是 20 时至次日 02 时、02—08 时、08—14 时、14—20 时。文中降水统计值均指 2005—2018 年全年总值的多年平均。

## 2 结果分析

### 2.1 降水总体空间分布特征

图 2 是云南地区年降水量、年降水时长、平均小时雨强的空间分布结果。云南年降水量空间差异大,范围在 500~2 300 mm,年降水量及其变化梯度均表现出南部大于北部、西部大于东部的特点,大体上自西北向南增多,西部、南部、东南部年降水量多,尤其以南部边缘最多,达  $2 100 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$  以上,中部、东北部、北部年降水量少,以滇西北迪庆高海拔区域和金沙江、元江、南盘江等干热河谷流域为最少,不足  $700 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,但在东北角和滇西北华坪有

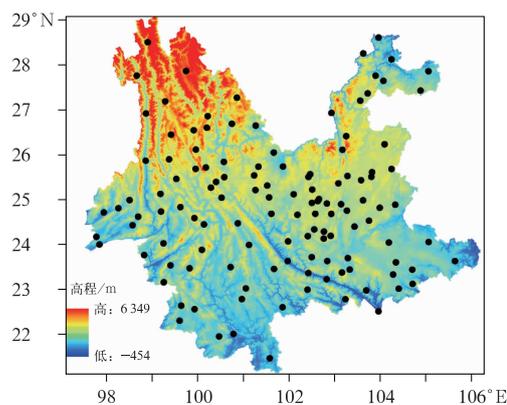


图 1 云南地区高程地形及地面气象观测站点分布

Fig. 1 Distribution of terrain elevation and surface meteorological stations in Yunnan Province

相对大值区(图 2a),与张万诚等(2014)研究一致。年降水时长的空间分布差异较大,变化范围在  $300 \sim 1900 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$ ,其分布形势与年降水量略有不同,表现为西部大于东部、南部大于北部,但最大值中心不是出现在南部和西南部,而位于滇西北怒江流域,达  $1300 \sim 1900 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$ ,次大值中心出现在东北角,达  $1100 \sim 1500 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$ ,中部和北部为小值区,最小值中心位于宾川、永仁、易门等干热河谷,不足  $500 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$ (图 2b)。年平均小时雨强自北向南增加,变化范围在  $0.6 \sim 2.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,空间差异较大,大值区出现在南部普洱、西双版纳、红河,普遍超过  $1.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,部分区域可达  $2.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,小值区发生在滇西北怒江、香格里拉、丽江和滇东北昭通及曲靖局部,部分区域小于  $0.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 2c)。

结合年降水量与降水时长、小时雨强之间相关

系数的空间分布结果(图 3)可知,云南地区年降水量受降水时长和小时雨强共同影响,并以降水时长影响最强,雨强影响略弱,但存在区域差异。滇东北昭通区域年降水量与雨强相关更好;滇西北怒江流域、滇西边缘德宏、滇西南大部、滇东南大部、滇中昆明局部、滇西楚雄局部的年降水量受降水时长和雨强共同影响,但降水时长影响更强,这种特征在滇西北最突出;北部边缘金沙江流域、滇西大理和保山接壤区、滇东曲靖、滇南大部的年降水量主要受降水时长影响,雨强影响较弱。

## 2.2 夜雨、昼雨分布特征

夜雨对于空气和土壤的湿度、温度、云辐射收支日循环、气候生态环境构成等都具有潜在影响(Rickenbach,2004)。夜雨指夜间降水,以20时至

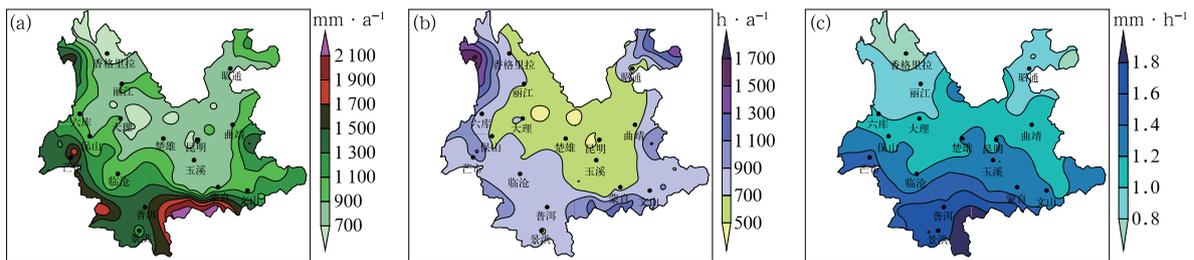


图 2 2005—2018 年云南地区年降水量(a),年降水时长(b),平均小时雨强(c)的空间分布  
Fig. 2 Spatial distributions of annual precipitation amount (a), duration (b), average hourly rainfall intensity (c) in Yunnan Province during 2005—2018

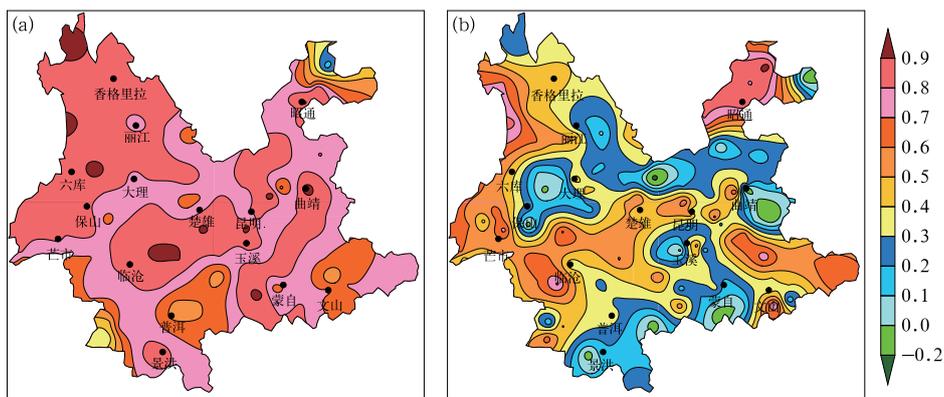


图 3 2005—2018 年云南地区年降水量与年降水时长(a)和平均小时雨强(b)相关系数空间分布  
Fig. 3 Spatial distributions of correlation coefficients between annual precipitation amount and duration (a), average hourly rainfall intensity (b) in Yunnan Province during 2005—2018

次日 08 时的降水统计值作为夜雨值。同样的,昼雨指白天降水,以 08—20 时的降水统计值作为昼雨值。图 4 是云南地区夜雨量、昼雨量、夜昼雨量差值、差值占日降水量百分比的空间分布。从图 4a 可知,云南地区夜雨量表现为滇东北和西南偏多、西北大部 and 东南局部及中部偏少,极大值区位于南部边缘,夜雨量达 1000 mm 以上,小值区主要分布于滇中昆明和玉溪、西部楚雄和大理接壤地带、丽江等局部地区,夜雨量不足 400 mm。由图 4b 可知,昼雨量空间分布型态和夜雨差异大,主要表现出自滇西北向南增加的特点,这与年降水量空间分布型态(图 2a)相似,滇东北至滇中北部为极小值区,昼雨量不足 300 mm,南部边缘为极大值区,昼雨量达 900 mm 以上,滇中昆明和玉溪、大理和楚雄接壤区、丽江局部的昼雨量可达 400~500 mm。综合图 4c 和 4d 可知,云南昼雨量多于夜雨量的区域较少,呈星点状分布于滇南西双版纳和普洱大部、滇西

南保山与德宏大部、临沧西部、丽江局部、大理和楚雄接壤区域、滇中昆明和玉溪局部、文山大部,其余大部地区的夜雨量比昼雨量多,这些区域包括横断山脉大部、云南北部、哀牢山西部、滇东高原及南部局部。夜昼雨量差值大值区分布于滇东北、金沙江流域、东南边缘,其夜雨量比昼雨量多 200 mm 以上,并以滇东北差值最大,达 400 mm,其成因不仅与地形有关,更与影响天气系统有关,云南中北部多受低涡切变线影响。但是,夜雨量多于昼雨量的区域不全是夜雨特征最突出地区,如东南部边缘,其夜昼雨量差值只占全天雨量的 20% 左右;而滇东北和金沙江流域则是夜雨特征明显区,其夜昼雨量差值占全天雨量的 20%~60%,并以东北角永善、绥江最突出。夜昼雨量差值极小值区出现在西南,夜雨量比白天少 200~300 mm,其余区域普遍少 100 mm 左右;除滇中昆明外,昼雨量多的区域的昼雨特征并不突出。

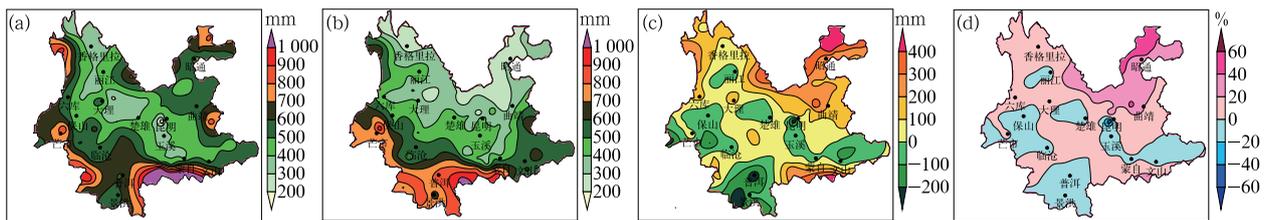


图 4 2005—2018 年云南地区年夜雨量(a),昼雨量(b),夜昼雨量差值(c),夜昼雨量差值占日总降水量百分比(d)的空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of annual nighttime precipitation amount (a), annual daytime precipitation amount (b), difference of the precipitation amount between night and day (c), percentage of the difference between night and day precipitation amount in total daily precipitation amount (d) in Yunnan Province during 2005—2018

### 2.3 降水日变化特征

以降水量为要素分析云南地区降水日变化特征及其空间差异。图 5 是云南区域平均年降水量的逐小时分布,降水量日变化主峰值出现在 04—05 时,次峰值在 16—17 时,12 时为最低谷,22 时为次低谷,由此可见,云南地区年降水量日变化具有明显的双峰双谷特征。结合表 1 可知,云南区域平均夜雨量为 545.4 mm,占全天的 53%,多于昼雨量(478.1 mm),其中,下半夜最多,占全天的 30%,其次是午后至傍晚,占全天的 26%,入夜后至凌晨的降水量也较多,占全天的 23%,上午时段最少,占全天的 21%。

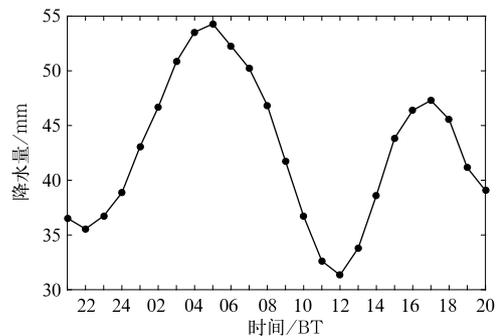


图 5 2005—2018 年云南地区年降水量日变化  
Fig. 5 Diurnal variation of annual precipitation amount in Yunnan Province during 2005—2018

表 1 2005—2018 年云南区域平均年降水量的日分布特征  
Table 1 General temporal features daily distribution of annual mean precipitation amount in Yunnan Province during 2005—2018

时间	全天	上半夜	下半夜	上午	下午
降水量/mm	1023.5	237.4	308.0	214.8	263.3

进一步分析云南地区降水量在上半夜、下半夜、上午、下午 4 个时间段累计值的空间分布,如图 6 所示,总体来看,云南夜间降水量多于白天,下半夜最多,下午次之,上半夜略少,上午最少。综合可知,云南北部、中部、南部降水量日分布特征具有明显空间差异。对于北部,西北怒江流域下半夜降水量最多(300~600 mm),上半夜、上午、下午均维持弱降水(150~400 mm),为下半夜单峰型日变化(图略,本段下同);北部边缘金沙江流域下半夜降水量最多(210~420 mm),上半夜次之(150~290 mm),下午(100~230 mm)和上午(100~170 mm)很少,属下半夜单峰型日变化;东北角区域上半夜降水量最大(250~450 mm),下半夜次之(200~400 mm),上午(100~200 mm)和下午(50~250 mm)维持弱降水,属上半夜单峰型日变化;但是,滇西北局部(香格里拉、丽江、鹤庆、剑川)表现出下午降水量峰值远大于下半夜降水量次峰值的双峰型日变化。对于中部,西南和滇西边缘(保山西部和德宏)的降水量最大值从下半夜(350~550 mm)持续到上午(350~550 mm),下午显著减少(180~350 mm),入夜后更少,属清晨单峰型日变化;其余大部分中部区域(保山东部、大理南部、临沧北部、楚雄大部、昆明南部、玉溪大部、曲靖南部)降水量的夜间峰值和午后峰值均存在,从西向

东存在“夜雨偏多—昼夜偏多—夜雨偏多—昼夜偏多”的双峰型日变化特点。南部降水量日变化分布复杂,西南偏西区域(临沧南部、普洱西部)下半夜降水量最大(300~620 mm),下午次之(250~500 mm),上半夜和上午较弱,属下半夜主峰值强于午后次峰值的双峰型日变化;西南偏东区域(西双版纳、普洱东部)午后降水量最大(400~600 mm),下半夜次大(300~450 mm),上半夜和上午较弱,属午后主峰值强于夜间次峰值的双峰型日变化;东南偏西区域(红河大部)下半夜降水量最大(200~600 mm 以上),下午次之(200~500 mm),上半夜和上午较少(150~450 mm),属下半夜主峰值强于午后次峰值的双峰型日变化;东南偏东区域(文山大部)下午降水量最大(300~400 mm),下半夜次之(200~350 mm),上半夜偏少(200~300 mm),上午最少(200~250 mm),属午后主峰值强于夜间次峰值的双峰型日变化。

综上所述,云南北部包括横断山脉区大部、四川盆地边缘区域、东北部区域的降水日变化多属夜间单峰,其原因与影响上述区域的天气系统有关,尤其雨季多受低值天气系统影响,如:高原低涡切变、西南涡等;西部边缘降水量日变化多属清晨单峰;中部区域的夜间和午后降水量都较显著;南部区域降水量的下半夜峰值和午后峰值存在区域差异,其原因与影响南部的热带天气系统和地形有关。总体而言,云南北部和西部边缘的夜间降水量多于白天,夜间单峰型日变化显著,而云南中部、南部的夜间和白天降水量均较多,双峰型日变化特征突出,且由于南部、西南部降水量丰富,对区域平均日变化特征的贡献也大。

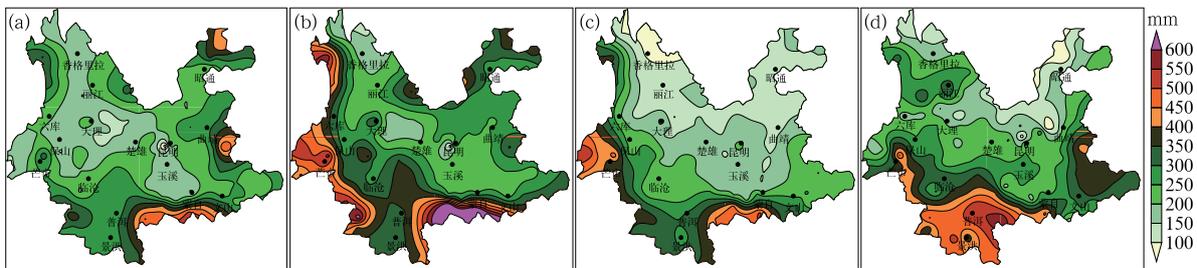


图 6 2005—2018 年云南地区年降水量在日尺度不同时段的空间分布  
(a)上半夜,(b)下半夜,(c)上午,(d)下午

Fig. 6 Spatial distributions of annual precipitation amount at four time periods in Yunnan Province during 2005—2018  
(a) before midnight, (b) after midnight, (c) morning, (d) afternoon

### 2.4 降水事件空间分布及对降水量的贡献

降水事件持续时间长短与大尺度环流、云顶辐射冷却效应、中尺度对流及局地热力条件紧密相连,能有效指示降水天气系统性质。图 7 是云南地区不同类型降水事件年发生次数的空间分布,从图 7a 和 7b 可知,短历时和中历时事件发生次数的空间分布相似,表现为西部多于东部、南部多于北部,金沙江流域的华坪、宾川、永仁、会泽等地为最小值区(短历时低于  $140 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$ ,中历时低于  $30 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$ ),东北角、西北怒江流域、西南部边缘临沧局部、南部边缘金平为 4 个极大值中心区(短历时高于  $260 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$ ,中历时高于  $50 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$ ),另外,从短历时到中历时,随着降水事件持续时间延长,西北怒江流域极大值中心变得更明显,而南部和西南部的极大值区域面积有所减少。由图 7c 可知,长历时事件发生次数西部略大于东部,南部略小于北部,最小值区出现于滇中昆明、玉溪和滇西楚雄、大理(低于  $15 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$ ),滇西北怒江流域为最大值区(超过  $30 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$ ),滇东北为次大值区( $25 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$ 左右)。超长历时降水事件发生次数的空间分布格局与长历时一致,呈中间小、周围大的特征(图 7d)。

图 8 是云南地区不同持续时间降水事件的累积降水量对年降水量贡献率的空间分布,总体而言,短历时、中历时降水事件的贡献率南部大于北部,对滇西南贡献最大,对滇西北怒江流域和滇东北贡献最小;长历时、超长历时降水事件的贡献率则北部大于南部,对滇西南的贡献最小,长历时贡献最大区位于滇东北,而超长历时贡献最大区则出现在滇西北怒江流域。从各区域贡献率的主次来看,滇西北怒江流域以超长历时降水贡献最大(达 40%)、长历时次之、中历时偏弱、短历时最弱;短历时降水对中部、南部大部分区域贡献最大(可达 40%以上),中历时次之,长历时稍弱,超长历时最弱,但滇西边缘德宏大部则表现为长历时贡献较大(25%~35%),短历时次之,中历时略弱,超长历时最弱。

从各区域贡献率的主次来看,滇西北怒江流域以超长历时降水贡献最大(达 40%)、长历时次之、中历时偏弱、短历时最弱;短历时降水对中部、南部大部分区域贡献最大(可达 40%以上),中历时次之,长历时稍弱,超长历时最弱,但滇西边缘德宏大部则表现为长历时贡献较大(25%~35%),短历时次之,中历时略弱,超长历时最弱。

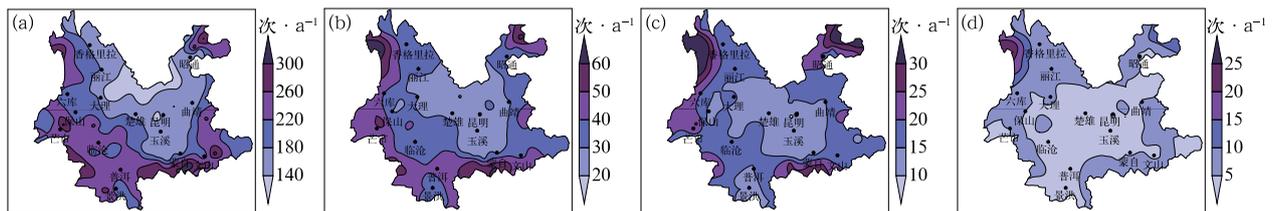


图 7 2005—2018 年云南地区短历时(a),中历时(b),长历时(c),超长历时(d)年降水事件发生次数的空间分布

Fig. 7 Spatial distributions of annual times of precipitation events in Yunnan Province during 2005—2018 (a) short duration, (b) medium duration, (c) long duration, (d) ultra-long duration

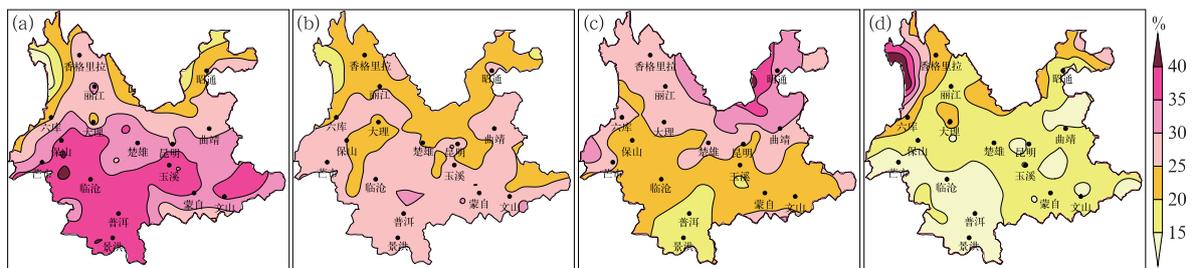


图 8 2005—2018 年云南地区短历时(a),中历时(b),长历时(c),超长历时(d)降水事件的降水量对年降水量贡献率的空间分布

Fig. 8 Spatial distributions of contribution rates of precipitation amount in precipitation events to annual precipitation amount in Yunnan Province during 2005—2018

(a) short duration, (b) medium duration, (c) long duration, (d) ultra-long duration

## 2.5 短时强降水特征

短时强降水是短时间内降水强度较大的天气现象,是强对流的重要形式之一,预报难度大,了解其时空分布对预报预警具有重要指示意义。图 9 是云南短时强降水总体空间分布特征。由图 9a 可知,云南  $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的降水发生次数自西北向东南增加,空间差异明显,表现为东部大于西部、南部大于北部;南部大部、滇西南边缘和滇东区域发生次数普遍可达  $4 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$  以上,其中,最大值中心位于南部边缘,达  $7 \sim 12 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$ ,滇西南边缘龙陵和西盟及滇东罗平存在 3 个次大值中心,达  $7 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$  左右;中部和北部大部每年发生不足 3 次,尤其是滇西北,年均不足 1 次,但滇西北华坪和滇东北盐津是 2 个相对大值区,约为  $6 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$ 。由图 9b 可知,云南极端短时强降水年发生次数仍表现为南部大于北部、东部大于西部,大值区集中于滇南及滇东南边缘,为  $0.2 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$  以上,最大值出现在河口站,为  $1.1 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$ ,东北角盐津发生概率较高,为  $0.3 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$ 。图 9c 给出 2005—2018 年云南各站点最大小时雨强的空间分布,可见,云南地区多年极端小时雨强空间分布差异大,变化范围在  $22 \sim 107 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,滇西北怒山和云岭沿线极端小时雨强相对较小,普遍在  $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  以下,滇中、滇东、滇南极端小时雨强大,基本在  $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  以上,其中,出现 3 个极大值区,一个分布在滇东边缘,为  $70 \sim 80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,一个在滇南边缘可达  $90 \sim 98 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,第三个出现在滇中景东、禄丰、嵩明等区域,极端小时雨强可

达  $90 \sim 107 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

图 10 是云南地区年短时强降水和极端短时强降水发生站次数的逐年演变和逐小时分布。从图 10a 可知,云南短时强降水每年发生站次数均有差别,年际变化明显,总体来说具有增加趋势 ( $4.9 \text{ 站次} \cdot \text{a}^{-1}$ ),2013 年出现陡增,从平均  $360 \text{ 站次} \cdot \text{a}^{-1}$  增加至  $416 \text{ 站次} \cdot \text{a}^{-1}$ ,这与 2013 年起云南气候干旱背景转变相对应。极端短时强降水也具有增加趋势 ( $0.05 \text{ 站次} \cdot \text{a}^{-1}$ ),2014 年发生最多 ( $15 \text{ 站次} \cdot \text{a}^{-1}$ ),2008 年次多 ( $13 \text{ 站次} \cdot \text{a}^{-1}$ ),2013 年最少 ( $5 \text{ 站次} \cdot \text{a}^{-1}$ )。对于云南地区,在旱涝急转下容易出现短时强降水频率高峰年,这种特征在  $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的极端事件上更突出。从图 10b 可知,短时强降水主要发生在夜间,为每年 212 站次,白天仅有 171 站次,其中,下午发生最多 (122 站次),其次是上半夜 (107 站次) 和下半夜 (105 站次),上午最少 (49 站次),日变化表现出明显单峰结构,峰值出现在 17—18 时,谷值则在 11—12 时。极端短时强降水主要也发生在夜间,为每年  $6.3 \text{ 站次} \cdot \text{a}^{-1}$ ,白天有  $3.9 \text{ 站次} \cdot \text{a}^{-1}$ ,但是,上半夜发生最多 ( $4.0 \text{ 站次} \cdot \text{a}^{-1}$ ),下午次之 ( $3.0 \text{ 站次} \cdot \text{a}^{-1}$ ),下半夜略少 ( $2.3 \text{ 站次} \cdot \text{a}^{-1}$ ),上午最少 ( $0.9 \text{ 站次} \cdot \text{a}^{-1}$ ),即极端短时强降水日变化也呈单峰型,但峰值发生在 01 时,谷值出现在 10 时。可见,云南地区短时强降水事件具有显著日变化特征,主要发生在下午和夜间,但随着降水强度显著增强,入夜后至凌晨的时间段更容易出现极端小时降水。

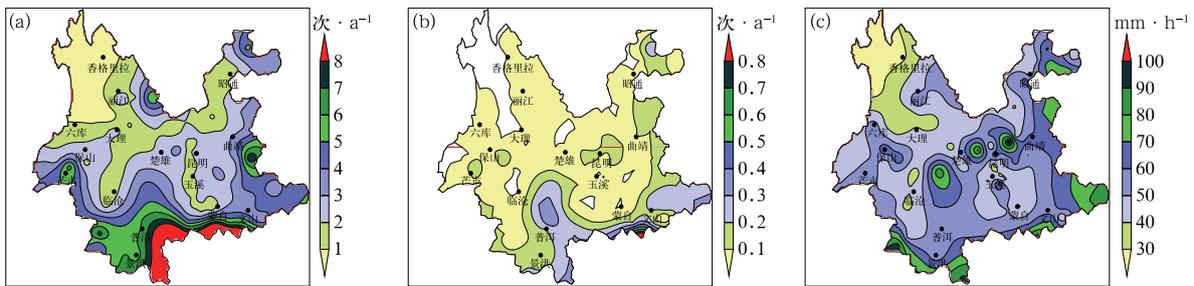


图 9 2005—2018 年云南地区短时强降水年发生次数(a,b)及多年内最大小时雨强(c)的空间分布

(a)  $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , (b)  $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$

Fig. 9 Spatial distributions of annual times of short-time severe rainfall events (a, b) and the maximum hourly rainfall intensity (c) in Yunnan Province within multiple years during 2005–2018

(a)  $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , (b)  $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$

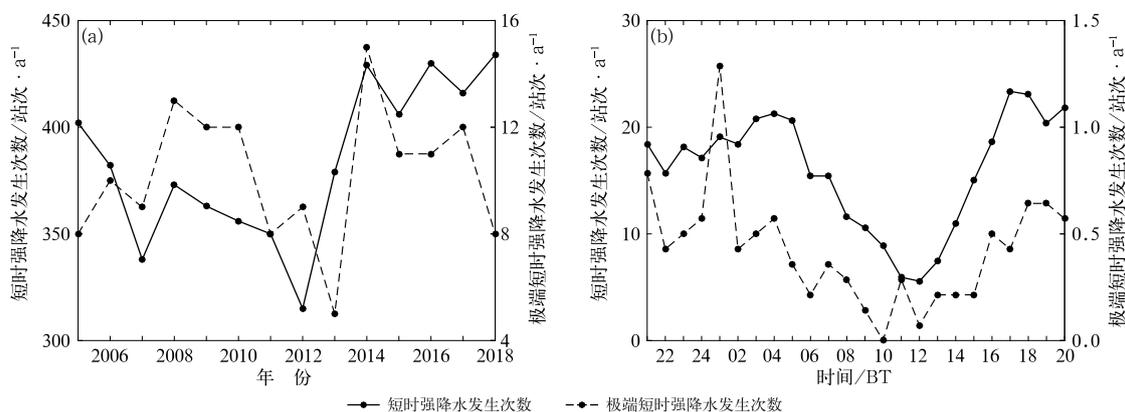


图 10 2005—2018 年云南地区短时强降水、极端短时强降水发生站次数的逐年(a)和逐小时变化(b)

Fig. 10 Interannual variation (a) and diurnal variation (b) of the stations with short-time severe rainfall and extremely short-time severe rainfall events in Yunnan Province during 2005—2018

### 3 结论与讨论

通过分析云南地区降水日变化分布、降水持续时间长短对降水量贡献的区域差异、短时强降水分布及日变化等特征,得到如下结论:

(1)云南年降水量、降水时长、平均小时雨强空间分布差异显著,降水量自滇西北向南增加,小时雨强自北向南增强,而降水时长则西部大于东部、南部略大于北部。云南年降水量受降水时长和小时雨强共同影响,并以降水时长影响最强,雨强影响略弱,这种特征在滇西北表现最突出,但滇东北年降水量则与雨强相关更好。

(2)云南大部分区域夜雨量多于昼雨量,并以滇东北和北部边缘的夜雨特征最为突出,而昼雨量多于夜雨量的区域范围较小,星点状分散于滇中、滇西南和南部,且以滇中昆明的昼雨特征最为明显。

(3)云南降水日变化特征区域差异显著。降水量日变化在北部为夜间单峰型、西部边缘为清晨单峰型、中部为夜间和午后峰值相当的双峰型,南部也属双峰型,但南部不同地区的主、次峰出现时间有差异,由于南部年降水量大,其双峰型降水量日变化造成云南区域平均日变化总体表现出双峰双谷特征,主峰值出现在 04—05 时,次峰值在 16—17 时,12 时和 22 时为最低值时段。

(4)云南短历时和中历时降水发生次数的空间分布差异很大,总体表现为西部多于东部、南部多于北部,而长历时和超长历时降水出现次数的空间分布差异略小。云南表现出南部以短历时和中历时降

水贡献为主,北部则以长历时和超长历时降水贡献为主的特点,其中滇西北怒江流域以超长历时降水贡献最大、长历时次之,中部和南部大部的短历时降水贡献最大、中历时次之,而西部边缘则为长历时贡献最大、短历时次之。

(5)云南短时强降水发生次数空间分布差异很大,自西北向东南增加,小值区分布在滇西北,年均不足 1 次,大值中心位于南部边缘,每年 7~12 次,滇西南和滇东边缘、滇西北和滇东北局部均出现相对大值区;极端短时强降水发生次数大值区集中于滇南及滇东南边缘,东北角局部发生概率也高;多年极端小时雨强在滇南和滇东边缘及滇中局部出现 3 个大值区,值在  $70 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  以上。云南短时强降水事件逐年变化具有增加趋势,且在连续干旱转涝的气候背景下容易出现极端短时强降水频率高峰年;短时强降水事件主要发生在下午和夜间,极端短时强降水事件更容易在子夜过后出现。

上述研究立足于云南全省小时降水,对全年范围内的降水总体特征、降水日变化、降水事件贡献、极端降水分布的区域差异做了详细分析,获得云南地区小时降水特性及空间差异,这些结论很大程度上可以代表低纬高原地区小时降水时空分布特征。但是,低纬高原地区(云南省、贵州省、四川南部)季风气候显著,季节降水空间分布差异很大,如春季滇西北纵向岭谷区怒江“桃花汛”和冬季昆明准静止峰影响下的云贵高原地区持续性阴云寡照,限于篇幅原因,针对这些具有明显季节特征的低纬高原小时降水特性及物理机制需要下一步再做详细阐述。

## 参考文献

- 白爱娟,刘晓东,刘长海,2011. 青藏高原与四川盆地夏季降水日变化的对比分析[J]. 高原气象,30(4):852-859. Bai A J, Liu X D, Liu C H,2011. Contrast of diurnal variations of summer precipitation between the Tibetan Plateau and Sichuan Basin[J]. Plateau Meteor,30(4):852-859(in Chinese).
- 陈峪,高歌,任国玉,等,2005. 中国十大流域近 40 多年降水量时空变化特征[J]. 自然资源学报,20(5):637-643. Chen Y, Gao G, Ren G Y, et al,2005. Spatial and temporal variation of precipitation over ten major basins in China between 1956 and 2000[J]. J Nat Resour,20(5):637-643(in Chinese).
- 胡迪,李跃清,2015. 青藏高原东侧四川地区夜雨时空变化特征[J]. 大气科学,39(1):161-179. Hu D, Li Y Q,2015. Spatial and temporal variations of nocturnal precipitation in Sichuan over the eastern Tibetan Plateau[J]. Chin J Atmos Sci,39(1):161-179(in Chinese).
- 计晓龙,吴昊旻,黄安宁,等,2017. 青藏高原夏季降水日变化特征分析[J]. 高原气象,36(5):1188-1200. Ji X L, Wu H M, Huang A N, et al,2017. Characteristics of the precipitation diurnal variation over Qinghai-Tibetan Plateau in summer[J]. Plateau Meteor,36(5):1188-1200(in Chinese).
- 刘晓冉,李国平,范广洲,等,2007. 我国西南地区 1960~2000 年降水资源变化的时空特征[J]. 自然资源学报,22(5):783-792. Liu X R, Li G P, Fan G Z, et al,2007. Spatial and temporal characteristics of precipitation resource in Southwest China during 1961-2000[J]. J Nat Resour,22(5):783-792(in Chinese).
- 苏锦兰,李建,杨桂荣,等,2015. 横断山系云岭余脉点苍山东西侧小时降水特性对比分析[J]. 气象,41(1):17-24. Su J L, Li J, Yang G R, et al,2015. Comparative analysis on hourly precipitation features on the east and west sides of Yunling Diancang Mountain in Hengduan Mountains[J]. Meteor Mon,41(1):17-24(in Chinese).
- 唐红玉,顾建峰,俞胜宾,等,2011. 西南地区降水日变化特征分析[J]. 高原气象,30(2):376-384. Tang H Y, Gu J F, Yu S B, et al,2011. Analysis on diurnal variation of precipitation in Southwest China[J]. Plateau Meteor,30(2):376-384(in Chinese).
- 王夫常,宇如聪,陈昊明,等,2011. 我国西南部降水日变化特征分析[J]. 暴雨灾害,30(2):117-121. Wang F C, Yu R C, Chen H M, et al,2011. The characteristics of rainfall diurnal variation over the southwestern China[J]. Torr Rain Dis,30(2):117-121(in Chinese).
- 薛羽君,白爱娟,李典,2012. 四川盆地降水日变化特征分析和个例模拟[J]. 地球科学进展,27(8):885-894. Xue Y J, Bai A J, Li D,2012. Analysis and numerical simulation of diurnal variation of precipitation in Sichuan Basin[J]. Adv Earth Sci,27(8):885-894(in Chinese).
- 姚莉,李小泉,张立梅,2009. 我国 1 h 雨强的时空分布特征[J]. 气象,35(2):80-87. Yao L, Li X Q, Zhang L M,2009. Spatial-temporal distribution characteristics of hourly rain intensity in China[J]. Meteor Mon,35(2):80-87(in Chinese).
- 姚莉,赵声蓉,赵翠光,等,2010. 我国中东部逐时雨强时空分布及重现期的估算[J]. 地理学报,65(3):293-300. Yao L, Zhao S R, Zhao C G, et al,2010. Temporal and spatial distributions of hourly rain intensity and recurrence periods in Eastern and Central China[J]. Acta Geogr Sin,65(3):293-300(in Chinese).
- 于文勇,李建,宇如聪,2012. 中国地区降水持续性的季节变化特征[J]. 气象,38(4):392-401. Yu W Y, Li J, Yu R C,2012. Analyses of seasonal variation characteristics of the rainfall duration over China[J]. Meteor Mon,38(4):392-401(in Chinese).
- 张琪,李跃清,2014. 近 48 年西南地区降水量和雨日的气候变化特征[J]. 高原气象,33(2):372-383. Zhang Q, Li Y Q,2014. Climatic variation of rainfall and rain day in Southwest China for last 48 years[J]. Plateau Meteor,33(2):372-383(in Chinese).
- 张涛,李宝林,何元庆,等,2015. 基于 TRMM 订正数据的横断山区降水时空分布特征[J]. 自然资源学报,30(2):260-270. Zhang T, Li B L, He Y Q, et al,2015. Spatial and temporal distribution of precipitation based on corrected TRMM data in Hengduan Mountains[J]. J Nat Resour,30(2):260-270(in Chinese).
- 张万诚,万云霞,肖子牛,2006. 中国西南纵岭峡谷区近百年降水的时空变化特征[J]. 自然资源学报,21(5):802-809. Zhang W C, Wan Y X, Xiao Z N,2006. The spatio-temporal variations of the longitudinal range-gorge region (LRGR) precipitation in recent 100 years in Southeast China[J]. J Nat Resour,21(5):802-809(in Chinese).
- 张万诚,郑建萌,万云霞,等,2014. 气候变化背景下低纬高原地区水资源的分布及其变化[M]. 北京:气象出版社:52-83. Zhang W C, Zheng J M, Wan Y X, et al,2014. Distribution and Variation of Water Resources in Low Latitude Plateau under the Background of Climate Change[M]. Beijing:China Meteorological Press:52-83(in Chinese).
- Rickenbach T M,2004. Nocturnal cloud systems and the diurnal variation of clouds and rainfall in Southwestern Amazonia[J]. Mon Wea Rev,132(5):1201-1219.
- Yu R C, Xu Y P, Zhou T J, et al,2007a. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China[J]. Geophys Res Lett,34(13):L13703.
- Yu R C, Zhou T J, Xiong A Y, et al,2007b. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China[J]. Geophys Res Lett,34(1):L01704.