

董保举,徐安伦,苏锦兰,2023.大理苍山不同海拔高度湿季降水日变化特征分析[J].气象,49(11):1405-1413. Dong B J,Xu A L,Su J L,2023. Diurnal variation of wet season precipitation at different altitudes of Cangshan Mountain in Dali[J]. Meteor Mon,49(11):1405-1413(in Chinese).

大理苍山不同海拔高度湿季降水 日变化特征分析^{*}

董保举^{1,2} 徐安伦^{1,2} 苏锦兰^{1,2}

1 大理国家气候观象台,云南大理 671003

2 中国气象局大理山地气象野外科学试验基地,云南大理 671003

提 要: 基于大理国家气候观象台苍山-洱海梯度观测系统 2011—2020 年湿季小时降水资料,分析山顶、山腰和坝区 3 个站的降水日变化特征。结果显示:降水量日变化,坝区站呈现单峰型,山腰站和山顶站则是双峰型;降水频次日变化,坝区站和山顶站为单峰型,山腰站日变化比较平缓;各时次的降水量、降水频次基本随海拔高度的增加而增多;降水强度日变化,山顶站为双峰型,坝区站和山腰站波动较大,午后为小值区,夜间为大值区,3 个站在 14:00—17:00 的降水强度相差不大,而其他时段山腰站和坝区站的降水强度比山顶站大。夜间降水量在持续时间 2~16 h 是大值区,随海拔的增加降水量大值区持续时间较长;白天降水量在持续时间小于 6 h 是大值区,随海拔的增加,大值出现的时间向后移。降水频次在持续时间小于 6 h,3 个站在白天、夜间分别有一个大值区,而持续时间 7~18 h 的只有山顶站夜间有大值区;坝区站和山顶站夜间降水频次大于白天降水频次,山腰站白天、夜间降水频次相差不大。长历时(中历时、短历时)的累计降水量、降水频次随海拔高度的增加而增大(减小);3 个站长历时降水量(长历时降水频次)对总降水量(总降水频次)的贡献最大,贡献最小的是短历时降水量(中历时降水频次)。

关键词: 大理苍山,梯度观测,湿季降水,日变化特征

中图分类号: P426

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.060402

Diurnal Variation of Wet Season Precipitation at Different Altitudes of Cangshan Mountain in Dali

DONG Baoju^{1,2} XU Anlun^{1,2} SU Jinlan^{1,2}

1 Dali National Climate Observatory, Yunnan, Dali 671003

2 Dali Mountain Meteorological Field Experiment Base, CMA, Yunnan, Dali 671003

Abstract: Based on the hourly precipitation data in the wet season during 2011—2020 from the gradient observation system between Cangshan Mountain and Erhai Lake of Dali National Climate Observatory, the diurnal variation characteristics of precipitation at the mountain top, hillside and dam area are analyzed. The results show that the diurnal variation of rainfall amount at the dam station presented one peak, while that at mountain side and hilltop stations presented two peaks. The diurnal variation of rainfall frequency at dam and hilltop stations displayed a single peak, while that at the hillside station was relatively stable. All hourly rainfall amount and rainfall frequency for a whole day basically increased with the rise of altitudes. The diurnal variation of rainfall intensity at hilltop station exhibited double peaks, while that the

^{*} 国家自然科学基金面上项目(41875123)、国家重点研发计划(2018YFC1507603)、中国气象科学研究院基本科研业务费重点项目(2020Z006)、第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0105)和云南省科技厅科技计划项目(202305AM070004)共同资助
2022 年 5 月 27 日收稿; 2023 年 8 月 8 日收修定稿

第一作者:董保举,主要从事风廓线雷达资料的应用研究. E-mail:dongbaoju@163.com

hillside and dam stations showed remarkable fluctuation with small values in the afternoon and large values over night. There were no significant differences in rainfall intensity from 14:00 BT to 17:00 BT among the three stations, but the rainfall intensities at the hillside and dam stations were obviously greater than that at the hilltop station during other periods. The rainfall amount with a duration of 2–16 h over night was a large value area, which maintained a longer duration with the rise of altitude. The rainfall amount with a duration of less than 6 h during the daytime was a large value area, and the occurrence of the large value was delayed with the increase of altitude. The rainfall frequencies at all the three stations had a large value area during the day (night) when the rainfall duration was less than 6 h, while that at the hilltop station only had a large value area at night when the duration was 7–18 h. The rainfall frequencies over night were greater than that during the day at the dam and hilltop stations, while there was little difference in the rainfall frequency during the day and night at the hillside station. The accumulated rainfall amount and frequency of long (medium and short) duration increased (decreased) with the increase of altitudes. The contribution of long duration rainfall amount (long duration rainfall frequency) to accumulated rainfall amount (accumulated rainfall frequency) at each station was the largest, but the contribution of short duration rainfall amount (medium duration rainfall frequency) was the least.

Key words: Cangshan Mountain in Dali, gradient observation, precipitation in the wet season, diurnal variation

引 言

降水日变化是地球气候系统中大气热力和动力过程对水循环过程综合影响的结果,对降水日变化特征的分析研究,不仅有助于了解区域气候特征、理解降水的形成机理,还在揭示局地动力、热力过程等方面具有重要作用。针对降水日变化特征,国内有不少学者进行了深入分析研究,Yu et al(2007b)利用我国台站 1991—2004 年自动观测降水资料分析夏季降水的日变化特性,指出我国夏季降水日变化特征区域差异显著。Yu et al(2007a)进一步分析指出降水持续时间是区分不同类型降水事件的一个关键因素,且降水的持续性可很好地解释降水日变化的双峰值。李建等(2008)使用 1961—2004 年的小时降水数据来分析北京夏季降水的气候特征和日变化规律,指出降水量和降水频次在下午至凌晨呈现高值时段、中午前后出现最低值,且近 40 年短时降水事件中降水量明显增加、长时降水事件中降水量有所减少。姚莉等(2009;2010)分析了我国小时雨强的时空分布特征,指出雨强日变化具有明显地区差异。王夫常等(2011)分析了我国西南地区的降水日变化,指出降水的夜雨特征明显,且降水日变化存在东西区域差异。计晓龙等(2017)认为整个青藏高原地区夏季降水量和降水频率的日变化表现出明显

的凌晨和傍晚的双峰结构,而降水强度的双峰结构却不太明显。彭莉莉等(2020)发现南岳山降水从山底到山顶总降水量逐渐增加,存在 3 个降水峰值时段:清晨降水量峰值主要由该时段降水频次较高所致,午后与傍晚峰值主要与该时段降水强度较大有关。张宏芳等(2020)认为暖季秦岭南北降水日变化存在显著差异,秦岭南部降水日峰值主要是盆地地形影响下的夜雨,北部则是午后黄土高原上的昼雨。赵玮等(2022)利用北京地区 20 个国家站 1980—2020 年的长期逐时降水资料,揭示了北京夏季降水日变化的气候态、季节和区域特征及差异,获得了不同持续时间降水交替主导的降水结构特征。虽然有关降水日变化的研究已开展很多,但不同地域、不同海拔高度对降水分布的影响明显不同,且具有非常强的局地性特征,因此,对于特定地域或山脉的降水时空分布特征仍需要深入研究。

云南省大理白族自治州境内的苍山($25.57^{\circ}\sim 26.00^{\circ}\text{N}$ 、 $99.95^{\circ}\sim 100.20^{\circ}\text{E}$)南北绵延 48.5 km,东西宽 13.0~20.5 km,东西两侧地势复杂,最高点(马龙峰)海拔为 4122 m,与苍山东侧坝区海拔相差约 2100 m。位于苍山东侧坝区的洱海,是云南省第二大高原淡水湖,呈耳状分布,南北长 42 km,东西宽 4~9 km,最大水深为 21.3 m,平均水深为 10.8 m,湖泊面积约为 252 km^2 ,湖泊最大蓄水量为 29.59 亿 m^3 。苍山-洱海及其周边地区具有其显著的天气气候特

征:在干季(11月至次年4月),阵性大风天气频繁出现,特别是2月、3月,多年平均大风日数为61.6 d,瞬时最大风速达 $40.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;在湿季(5—10月),“十里不同天”,地形降水时空分布不均,短时强降水、雷暴等强对流天气频次高,弱天气背景下的强降水特征突出。因此,大理苍山-洱海区域是研究中小尺度地形对大气的热动力效应以及地形降水垂直梯度分布的典型代表。最近几年,大理国家气候观象台、大理州气象局科研团队围绕苍山-洱海区域的降水特性进行了分析研究,苏锦兰等(2015;2017)分析了苍山东西两侧降水特征及差异,结果显示苍山东西侧多年平均降水气候态相似,年降水量接近,降水季节演变一致,但小时降水量和降水频次日变化存在显著差异。徐安伦等(2017)分析发现洱海流域的降水分布与低纬高原季风气候、洱海流域复杂地形、盛行风效应等因素的关系密切。高志伟等(2021)基于自然邻点插值法分析了洱海湖面降水的空间分布特征。Zhang et al(2021)基于自动站分钟雨量和天气雷达数据,分析了苍山夏季区域降水事件的精细特征,揭示了短时和长时降水过程的差异特征。本文将利用大理国家气候观象台苍山-洱海梯度观测系统长序列观测资料,分析苍山山顶及其东侧山腰、坝区的降水日变化,以期获得对苍山不同海拔高度降水日变化差异的新认识,为深入理解中小尺度地形下降水时空分布以及复杂地形对降水的影响等提供观测依据。

1 观测概况及资料选取和处理方法

1.1 观测概况

2010年年底,大理国家气候观象台沿 25.7°N 线,在苍山山顶和东西坡不同海拔高度上及洱海东岸布设了多个自动气象站,与大理、漾濞国家级气象站组成了一个较完整的地山气象梯度观测系统(董保举,2017;Xu and Li,2020)。观测区域属于低纬高原季风气候,根据大理国家基准气候站1940—2020年共81年的气候资料统计显示,年平均气温在 14.1°C (1992年)~ 16.1°C (1952、2009、2010、2012、2014、2019年)变化,多年平均气温为 15.2°C ,极端最高气温为 34.0°C (1951年6月14日),极端

最低气温为 -4.3°C (2013年12月17日);年降水量在 650.2 mm (1960年)~ 1599.2 mm (1948年)变化,多年平均降水量为 1091.3 mm (其中湿季5—10月降水量为 930.3 mm ,占全年降水量的85.2%),最大日降水量为 136.8 mm (1959年8月13日),最大小时降水量为 56.0 mm (2003年7月22日)。

1.2 资料选取和处理方法

结合苍山周边地形地貌和研究目标,选取位于苍山山顶的电视转播台站(25.67°N 、 100.09°E ,海拔为 4092.0 m)(简称山顶站)、山腰的白雀寺站(25.70°N 、 100.12°E ,海拔为 2640.0 m)(简称山腰站)和坝区的大理国家基准气候站(25.71°N 、 100.18°E ,海拔为 1977.7 m)(简称坝区站)作为不同海拔高度的代表站,3个站分布如图1所示。由于山顶站海拔较高,每年11月至次年4月气温较低,容易结冰导致翻斗雨量筒被冻住,加之该自动站无人值守,降水资料不可用,所以3个站的资料时段统一选取2011—2020年湿季5—10月。大理国家基准气候站通过ISO9001质量管理体系认证,观测数据质量可靠。山顶站和山腰站由于人为维护、蓄电池老化、雨量传感器故障等原因,观测资料存在缺测现象,数据缺测率低于6.1%,相关数据通过界限值检查和时间一致性检查两个方面的质量控制(任芝花等,2010)。

在分析和统计过程中,每小时降水量 $\geq 0.1\text{ mm}$ 时认定为有效降水发生。在讨论降水出现频次时,一个时次有降水发生就被认为出现降水一次。逐小时降水量通过累加10年不同研究时段内各时次降水量除以10获得(做多年平均处理);同理,逐时降水出现频次由10年间不同研究时段内各时次降水出现次数总和除以10获得;逐时降水强度为10年间各时次降水量总和除以对应时次降水出现次数总和(周长艳等,2015)。当某一次降水发生时次后连续2 h没有降水发生定义为一次降水过程的结束,并将一次降水开始时刻至降水结束时刻的小时数定义为一次降水持续时间(杨森等,2011)。参考以往的研究(杨萍等,2017),根据降水持续时间,把降水事件分成3类:1~3 h为短历时降水,4~6 h为中历时降水,大于6 h为长历时降水。文中涉及的时间均采用北京时,白天时段为08:00—20:00,夜间

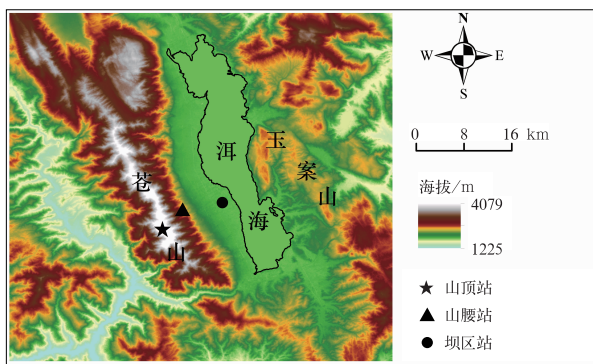


图 1 山顶站、山腰站和坝区站分布
Fig. 1 Distribution of the three stations at the hilltop, the hillside and the dam of Cangshan Mountain

时段为 20:00 至次日 08:00。

通过上述处理获得大理苍山东侧不同海拔高度 10 年平均的逐时降水量、逐时降水出现频次、逐时降水强度等数据,绘制上述物理量 24 h 变化曲线,分析其日变化特征,并统计近 10 年大理不同持续时间降水事件的逐小时累计降水量以及累计发生次数,绘制时间剖面图,研究其日变化特征。

2 结果分析

2.1 降水量、降水频次和降水强度的日变化特征

图 2 给出了 2011—2020 年湿季苍山山顶、山腰和坝区 3 个站 10 年平均的降水量、降水频次和降水强度日变化。由图 2a 可以看出,不同海拔高度的 3 个站降水量均表现出显著的日变化,但其日变化特征存在明显差异。坝区站降水量日变化呈现单峰型分布,15:00 出现最小值(18.0 mm),此后各时次的降水量逐渐增加,到 05:00 出现最大值(48.8 mm),之后逐渐减小。山腰站和山顶站降水量日变化均呈现双峰型分布,山腰站在 06:00 出现降水最大峰值(71.1 mm),在 12:00 出现次峰值(58.4 mm),而山顶站在 05:00 出现降水最大峰值(109.9 mm),在 14:00 出现次峰值(75.8 mm);山腰站在 20:00 出现最小谷值(38.7 mm),在 10:00 出现次谷值(39.4 mm),而山顶站在 11:00 出现最小谷值(56.4 mm),在 18:00 出现次谷值(58.7 mm)。01:00—08:00 是这 3 个站降水量相对较多的时段,坝区站、山腰站、山顶站 8 h 累计降水量分别占总降水量的 45.1%、

38.8%、41.1%;15:00—19:00 是降水量相对较少的时段,累计降水量分别占总降水量的 13.7%、17.6%、17.8%。另外,由图 2a 还可以看出,从坝区、山腰至山顶,除了 11:00 山腰站和山顶站的降水量相差不大之外,其余时次 3 个站的降水量均随海拔的增加而增大。10 a 平均状态下,3 个站湿季累计降水量也随着海拔的增加而增多,分别为 799.9、1194.2、1647.0 mm,苍山山顶站降水量大约是坝区站的 2.1 倍,山腰站降水量大约是坝区站的 1.5 倍。

由图 2b 可以看出,在 10 年平均状态下,每个时次的降水频次均与海拔密切相关,海拔越高,降水频次越多,但 3 个站的降水频次呈现出不同的日变化特征。山顶站和坝区站降水频次的日变化趋势基本一致,即为单峰型分布,夜间为降水频次大值时段,坝区站的最大降水频次出现在 04:00(30.3 次),最小降水频次出现在 15:00(15.5 次),山顶站的最大降水频次出现在 05:00(100.0 次),最小降水频次出现在 13:00(58.4 次),即夜间降水量大值是由于降水频次高造成的。山腰站降水频次的日变化比较平缓,基本看不出日变化,最大值出现在 13:00 的 37.3 次,最小值出现在 18:00 的 28.0 次。01:00—08:00 是坝区站和山顶站降水频次相对较多的时段,8 h 累计降水频次分别占总降水频次的 42.7%、40.8%;11:00—18:00 是降水频次相对较少的时段,该时段内的累计降水频次分别占总降水频次的 26.6%、25.8%。

由图 2c 可以看出,10 年平均的坝区站和山腰站降水强度的日变化趋势基本一致,呈现剧烈的波动特征,午后出现最小值,前者的最小值为 17:00 的 $1.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,后者的为 15:00 的 $1.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$;夜间出现最大值,两者的最大值均为 $1.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,前者在 01:00 出现,而后者在 06:00 出现,这与苏锦兰等(2015)研究的苍山东侧降水强度基本一致,即午后降水强度较小,凌晨至日出降水强度较大。山顶站的降水强度日变化为双峰双谷型,最大峰值为 14:00 的 $1.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,次峰值为 05:00 的 $1.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,最小值为 09:00 的 $0.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,次小值为 21:00 和 23:00 的 $0.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。总体来说,3 个站在 14:00—17:00 的降水强度差别不大,而其他时段,山顶站的降水强度明显比山腰和坝区的要小,这可能是由于午后山顶对流旺盛,降水强度大,而山腰和坝区则夜间降水多且降水强度大。

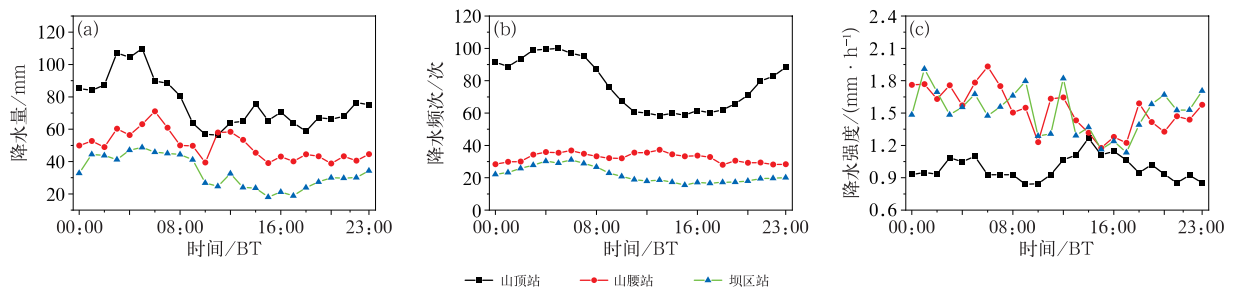


图 2 山顶站、山腰站和坝区站的(a)降水量、(b)降水频次和(c)降水强度日变化

Fig. 2 Diurnal variation of (a) rainfall amount, (b) rainfall frequency and (c) rainfall intensity of the three stations at the hilltop, the hillside, and the dam of the Cangshan Mountain

2.2 不同持续时间的降水量和降水频次特征

图 3 给出了苍山山顶站、山腰站和坝区站不同持续时间的降水量日变化特征。3 个站降水持续时间 1 h 以内的降水量很小,各时次累计降水量都小于 20.0 mm(除山腰站 11:00、17:00 和 19:00 外),持续时间 2~16 h 的降水量较大;夜间 3 个站都存在累计降水量超过 30.0 mm 的时段,随着海拔的增加,累计降水量大值区持续时间越长;白天累计降水量的变化各不相同,持续时间 6 h 以内的降水量在坝

区站、山腰站和山顶站分别在日出、中午和午后左右有一个大值区,最大值分别为 78.1、114.9、62.8 mm,出现时间从坝区站的 09:00,到山腰站的 11:00,再到山顶站的 16:00,随海拔升高最大值出现的时间往后移。白天持续时间大于 6 h 时,3 个站降水量明显变小,山顶站变小尤其明显。这与 Yu et al (2007b)研究得出的结论“中国中东部夏季长持续性降水的峰值大多位于夜间和清晨,而短持续性降水的极大值则多出现在下午或傍晚”基本一致。

图 3 右侧曲线分别为不同持续时间降水事件在

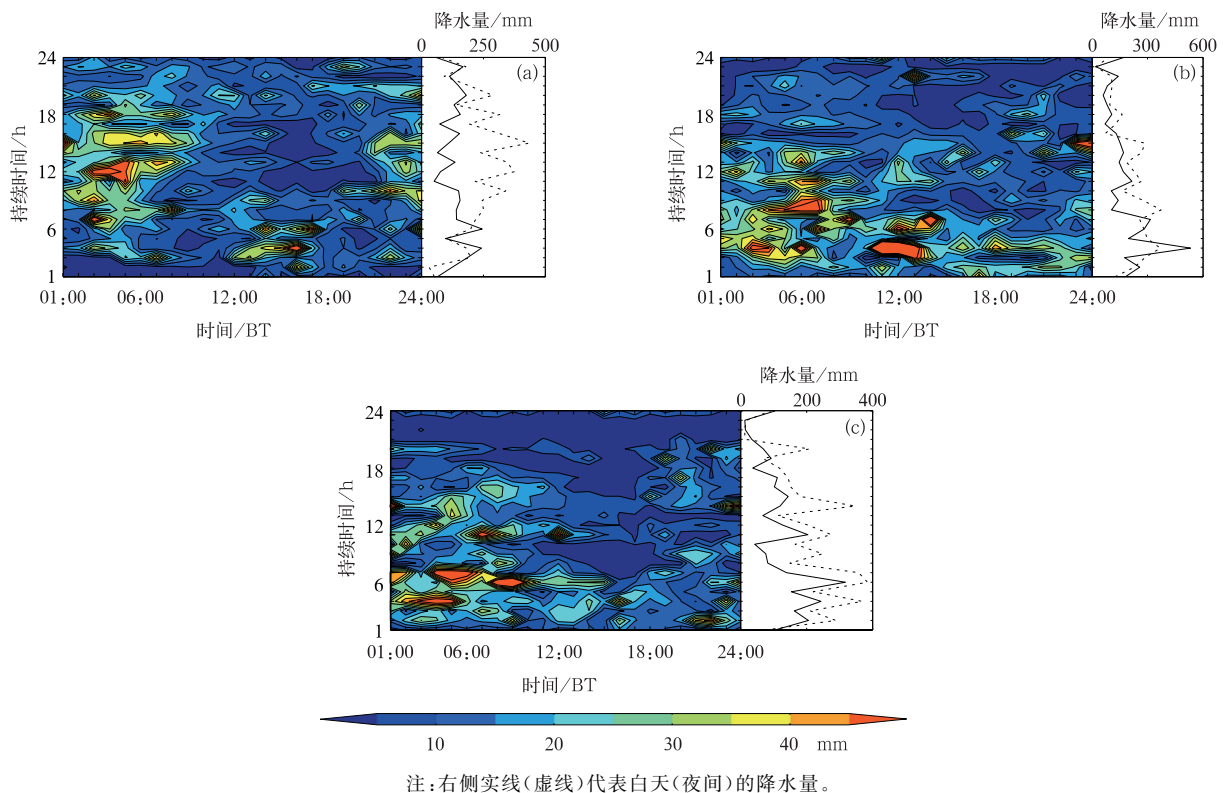


图 3 (a)山顶站、(b)山腰站、(c)坝区站不同持续时间的降水量变化

Fig. 3 Rainfall amount for different durations from the three stations at (a) the hilltop, (b) the hillside, and (c) the dam of Cangshan Mountain

白天和夜间的累计降水量。持续时间 6 h 以内的事件,坝区站基本是夜间降水量大于白天,山腰站和山顶站的变化比较大;而持续时间为 7~20 h 的事件,则是 3 个站夜间累计降水量基本均大于白天(山腰站持续时间 17 h 除外),坝区站、山腰站和山顶站白天(夜间)降水量分别为 3122.7、5528.3 和 6962.5 mm (4876.1、6413.6 和 9507.4 mm),分别占 39.0%、46.3%和 42.3%(61.0%、53.7%和 57.7%)。

从山顶站、山腰站和坝区站的不同历时降水量(表 1)可以看出,降水贡献主要是长历时降水量,中历时降水量次之,短历时降水量贡献最少。长历时降水量随海拔的增加,降水量贡献率也随着增加,从坝区站的 65.8%增加到山顶站的 89.5%。中历时和短历时降水量随海拔的增加,降水量贡献率减小,分别从坝区站的 21.1%和 13.1%减小到山顶站的 6.5%和 4.0%。

表 1 苍山顶站、山腰站和坝区站不同历时的累计降水量

Table 1 Accumulated rainfall amount for different durations from three stations at the hilltop, the hillside, and the dam of Cangshan Mountain

站点	短历时		中历时		长历时	
	降水量/mm	占总降水量/%	降水量/mm	占总降水量/%	降水量/mm	占总降水量/%
山顶站	658.0	4.0	1065.1	6.5	14746.8	89.5
山腰站	1251.3	10.5	1960.1	16.4	8730.5	73.1
坝区站	1046.5	13.1	1689.3	21.1	5263.0	65.8

图 4 给出了苍山顶站、山腰站和坝区站不同持续时间的降水频次的日变化特征。3 个站降水频次在持续时间 6 h 内较大,白天(夜间)都有一个大值。白天分别为:山顶站,持续时间 1 h,19:00,25 次;

山腰站,持续时间 1 h,13:00,56 次;坝区站,持续时间 4 h,15:00,27 次。夜间则相应为:持续时间 3 h,06:00,29 次;持续时间 5 h,05:00,27 次;持续时间 1 h,07:00,38 次。持续时间大于 7 h 后,只在

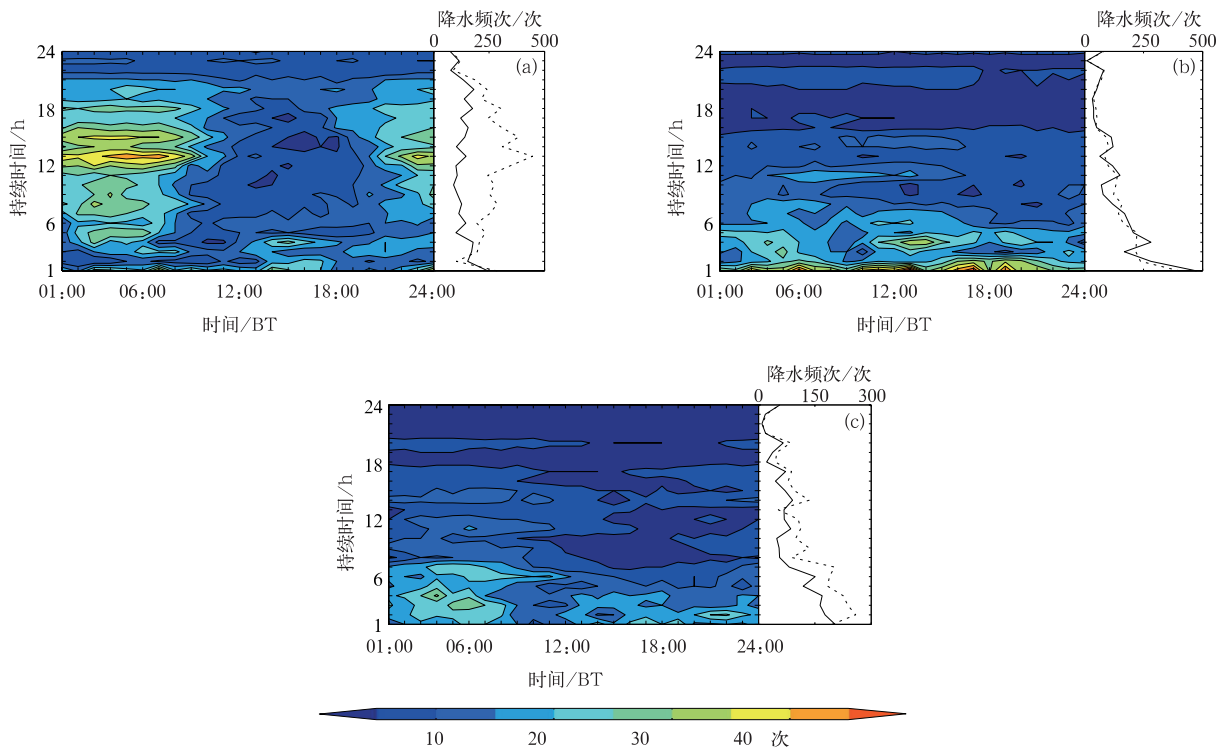


图 4 (a)山顶站、(b)山腰站、(c)坝区站不同持续时间的降水频次变化
Fig. 4 Rainfall frequency for different durations from the three stations at (a) the hilltop, (b) the hillside, and (c) the dam of Cangshan Mountain

夜间存在一个大值。坝区站和山腰站,降水频次随持续时间的变长逐渐减小,而白天和夜间降水频次变化不大;山顶站,持续时间 7~18 h 是降水频次大值区,尤其是夜间至日出,最大值为持续时间 13 h (05:00、07:00,43 次)。

图 4 右侧曲线为不同持续时间降水事件在白天和夜间的降水频次。山顶站和坝区站比较接近,持续时间为 3~20 h 的降水频次夜间大于白天(坝区持续时间 13 h 除外),山腰站白天和夜间降水频次比较接近。坝区站、山腰站和山顶站白天(夜间)降水频次分别为 2181、3943 和 6855 次(3044、3844 和 9911 次),分别占 41.7%、50.6%和 40.9%(58.3%、49.4%和 59.1%),可以看出山腰站夜间和白天降水频次接近,而山顶站和坝区站夜间累计降水频次大于白天累计降水频次。

从山顶站、山腰站和坝区站的不同历时的降水

频次(表 2)可以看出,降水频次的贡献主要是长历时降水,这与南岳山短持续降水过程频次多于长持续降水过程(彭莉莉等,2020)相反。长历时降水频次是主要贡献,与降水量的贡献基本一致,降水频次贡献率随海拔的增加而增加,从坝区站的 56.4%,增加到山顶站的 86.8%,短历时降水频次和中历时降水频次占降水频次贡献率与降水量贡献率相反,中历时降水频次贡献最少,中历时和短历时降水频次随海拔的增加而减小,分别从坝区站的 19.9%和 23.7%,减小到山顶站的 6.3%和 6.9%。

从以上分析可知,大理苍山不同海拔高度的 3 个站长历时降水量(频次)大于短历时、中历时降水量(频次),短历时、中历时降水量(频次)随海拔的升高而减小,而长历时降水量(频次)随海拔的增高而增大。

表 2 苍山山顶站、山腰站和坝区站不同历时的累计降水频次
Table 2 Accumulated rainfall frequency for different durations from three stations
at the hilltop, the hillside and the dam of Cangshan Mountain

站点	短历时		中历时		长历时	
	降水频次/次	占总降水频次/%	降水频次/次	占总降水频次/%	降水频次/次	占总降水频次/%
山顶站	1155	6.9	1060	6.3	14551	86.8
山腰站	1781	22.9	1281	16.5	4725	60.7
坝区站	1238	23.7	1039	19.9	2948	56.4

3 结论和讨论

通过对 2011—2020 年大理苍山湿季不同海拔高度降水的日变化特征进行分析,得到如下结论:

(1)降水量日变化:坝区站呈现单峰型,山腰站和山顶站是双峰型,最大峰值出现在 05:00—06:00,最小值分别出现在 15:00、20:00 和 11:00, 01:00—08:00 是降水量最多的时段,15:00—19:00 是降水量相对较少的时段。降水频次日变化:坝区站和山顶站为单峰型,最大峰值分别出现在 04:00 和 05:00,最小谷值分别出现在 15:00 和 13:00, 01:00—08:00 是降水频次最多的时段,11:00—18:00 是降水频次相对较少的时段;山腰站降水频次日变化比较平缓,没有明显的大(小)值区。降水强度日变化:坝区站和山腰站波动较大,午后为小值区,夜间为大值区;山顶站为双峰型,中午和凌晨是

大值区,日出和傍晚是小值区。

(2)不同持续时间的降水量日变化。坝区站、山腰站和山顶站持续时间 1 h 以内的降水量小于 20.0 mm,持续时间 2~16 h 的降水量在夜间存在超过 30.0 mm 的大值区,随海拔的增加,降水大值区持续时间越长。白天持续时间小于 6 h,都存在降水量大于 30.0 mm 的大值区,并随海拔的升高,大值出现的时间后移;持续时间大于 6 h,降水量较小。坝区站、山腰站和山顶站夜间降水量分别占全天降水量的 61.0%、53.7%和 57.7%,夜间降水量大于白天,夜间降水较突出。

(3)不同持续时间的降水频次日变化。坝区站、山腰站和山顶站降水频次在 6 h 内较大,白天和夜间都存在一个大值。持续时间大于 7 h,坝区站和山腰站降水频次随持续时间的变长而逐渐减小,没有大值区;而山顶站,持续时间 7~18 h 在夜间至日出是降水频次大值区。坝区站、山顶站夜间降水频

次大于白天,山腰站降水频次白天略大于夜间。

(4)长历时降水量(降水频次)贡献率随海拔的增加而增大,而中历时、短历时降水量(降水频次)贡献率随海拔的增加而减小。长历时降水量对总降水量贡献最大,短历时降水量贡献最少;长历时降水频次对总降水频次贡献最大,中历时的贡献最小。

上述结论揭示了苍山山顶及其东侧降水量、降水频次和降水强度随海拔高度的变化特征,对认识和理解小尺度地形下降水的时空不均性具有重要意义。但不同天气系统下的降水垂直梯度分布差异十分显著,限于篇幅原因,下一步将选取弱天气系统的强降水个例,结合苍山-洱海区域建设的多普勒天气雷达、风廓线雷达、Ka波段测云仪、微波辐射计、闪电定位仪、地基GPS水汽监测仪等新型探测资料,深入分析苍山地形对降水分布的影响机理,为提高复杂地形区的降水预报准确率提供支撑。

参考文献

- 董保举,2017. 基于点苍山-洱海剖面观测系统对青藏高原东南缘气象要素垂直变化的研究[J]. 气象科技进展,7(5):15-20. Dong B J,2017. A study of meteorological element daily variation with elevation in Yunnan Dali Region,the southeastern margin of Tibetan Plateau[J]. Adv Meteor Sci Technol,7(5):15-20(in Chinese).
- 高志伟,杨坤琳,潘坤,等,2021. 基于自然邻点插值法的洱海湖面降水特征分析[J]. 气象科技,49(5):799-805. Gao Z W,Yang K L,Pan K,et al,2021. Characteristics analysis of precipitation over Erhai Lake surface based on natural neighbour interpolation method[J]. Meteor Sci Technol,49(5):799-805(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).
- 李建,宇如聪,王建捷,2008. 北京市夏季降水的日变化特征[J]. 科学通报,53(7):829-832. Li J,Yu R C,Wang J J,2008. Diurnal variation of summer precipitation in Beijing[J]. Chin Sci Bull,53(7):829-832(in Chinese).
- 彭莉莉,邓剑波,谢傲,2020. 基于梯度观测小时数据的南岳山降水日变化特征[J]. 暴雨灾害,39(2):201-206. Peng L L,Deng J B,Xie A,2020. Diurnal variation of precipitation at the southern slope in Nanyue Mountain based on hourly rain dataset from gradient observation[J]. Torr Rain Dis,39(2):201-206(in Chinese).
- 任芝花,赵平,张强,等,2010. 适用于全国自动站小时降水资料的质
- 量控制方法[J]. 气象,36(7):123-132. Ren Z H,Zhao P,Zhang Q,et al,2010. Quality control procedures for hourly precipitation data from automatic weather stations in China[J]. Meteor Mon,36(7):123-132(in Chinese).
- 苏锦兰,李建,杨桂荣,等,2015. 横断山系云岭余脉点苍山东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 Diansang Mountain in Hengduan Mountains[J]. Meteor Mon,41(1):17-24(in Chinese).
- 苏锦兰,杨桂荣,易小蓉,2017. 大理地区所代表的青藏高原东南缘降水日变化类型的分析[J]. 气象科技进展,7(5):21-26. Su J L,Yang G R,Yi X R,2017. Type analysis of precipitation diurnal variation in Dali Region,the Tibetan Plateau southeast margin[J]. Adv Meteor Sci Technol,7(5):21-26(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).
- 徐安伦,李育,杨帆,等,2017. 连年干旱背景下洱海流域降水的精细化特征[J]. 高原气象,36(6):1557-1566. Xu A L,Li Y,Yang F,et al,2017. Fine-scale characteristics of rainfall in Erhai Lake basin under continuous drought conditions[J]. Plateau Meteor,36(6):1557-1566(in Chinese).
- 杨萍,肖子牛,石文静,2017. 基于小时降水资料研究北京地区降水的精细化特征[J]. 大气科学,41(3):475-489. Yang P,Xiao Z N,Shi W J,2017. Fine-scale characteristics of rainfall in Beijing urban area based on a high-density autonomous weather stations (AWS) dataset[J]. Chin J Atmos Sci,41(3):475-489(in Chinese).
- 杨森,周晓珊,高杰,2011. 辽宁省夏季降水的日变化特征[J]. 气象,37(8):943-949. Yang S,Zhou X S,Gao J,2011. Diurnal variations of summer precipitation in Liaoning Province[J]. Meteor Mon,37(8):943-949(in Chinese).
- 姚莉,李小泉,张立梅,2009. 我国1小时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).
- 张宏芳,潘留杰,陈昊明,等,2020. 秦岭及周边地区暖季降水日变化及其成因分析[J]. 高原气象,39(5):935-946. Zhang H F,Pan L J,Chen H M,et al,2020. Diurnal variations and causes of warm season precipitation in Qinling and surrounding areas[J]. Plateau Meteor,39(5):935-946(in Chinese).
- 赵玮,郝翠,曹洁,等,2022. 近40年北京地区夏季降水日变化及不同

- 持续时间降水事件的特征[J]. 大气科学, 46(5): 1167-1176.
- Zhao W, Hao C, Cao J, et al, 2022. Diurnal variation characteristics of summer precipitation and precipitation events with different durations in Beijing in the past 40 years[J]. Chin J Atmos Sci, 46(5): 1167-1176 (in Chinese).
- 周长艳, 肖安, 高文良, 2015. 2004—2013 年“雨城”雅安的降水日变化特征分析[J]. 冰川冻土, 37(6): 1524-1533. Zhou C Y, Xiao A, Gao W L, 2015. Analysis of the diurnal variation features of precipitation in Ya'an as the rainy city, 2004—2013[J]. J Glaciol Geocryol, 37(6): 1524-1533 (in Chinese).
- Li J, Yu R C, Wang J J, 2008. Diurnal variation of summer precipitation in Beijing[J]. Chin Sci Bull, 53(12): 1933-1936.
- Xu A L, Li J, 2020. An overview of the integrated meteorological observations in complex terrain region at Dali National Climate Observatory, China[J]. Atmosphere, 11(3): 279.
- 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.
- Zhang M K, Li J, Li N N, 2021. Fine-scale characteristics of summer precipitation over Cang Mountain[J]. J Appl Meteor Climatol, 60(9): 1285-1300.

(本文责编:张芳)