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

大理苍山洱海地区一次极端降水过程特征分析

杨澄 付志嘉 彭娟 高月忠 王晓滨

Analysis of the characteristics of an extreme precipitation event in the Dali Cangshan-Erhai Lake region

YANG Cheng，FU Zhijia，PENG Juan，GAO Yuezhong，WANG Xiaobin

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-156

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

湖北“8·12”极端降水特征及成因初探

Analysis of characteristics and causes of "8.12" extreme precipitation in Hubei Province

暴雨灾害. 2023, 42(1): 13-23 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-109

广西汛期极端短时强降水特征分析

Analysis of characteristics of the extreme short-time heavy rainfall in Guangxi in rain season

暴雨灾害. 2022, 41(3): 308-314 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.007

黄河流域夏季6—8月极端强降水的主要环流型

Characteristics of the synoptic conditions of summer extreme heavy precipitation in the Yellow River Basin

暴雨灾害. 2022, 41(5): 536-543 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-028

梵净山东南侧夏季暖区暴雨中尺度系统演变与环境场特征个例分析

Analysis on mesoscale system evolution and environmental field characteristics of a warm-sector heavy rainfall event in summer in the southeast of Fanjing Mountains

暴雨灾害. 2021, 40(2): 125-135 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.003

青藏高原东侧复杂地形区极端降水研究进展

A review of the studies on extreme precipitation in the complex terrain region on the eastern side of the Tibetan Plateau

暴雨灾害. 2024, 43(3): 255-265 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-216

应用GRIST模式对“23·7”华北极端降水的模拟试验

Simulation experiment on "23·7" extreme precipitation in North China using the GRIST model

暴雨灾害. 2024, 43(3): 276-287 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-263

关注微信公众号，获得更多资讯信息

杨澄,付志嘉,彭娟,等.2026.大理苍山洱海地区一次极端降水过程特征分析[J].暴雨灾害,45(1):36−46. YANG Cheng, FU Zhijia, PENG Juan, et al. 2026. Analysis of the characteristics of an extreme precipitation event in the Dali Cangshan-Erhai Lake region [J]. Torrential Rain and Disasters,45(1):36−46 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−156

大理苍山洱海地区一次极端降水过程特征分析

杨澄[1, 2, 3],付志嘉[1, 2],彭娟[1, 2],高月忠[3, 4],王晓滨[1, 2]

(1. 云南省大理市气象局 大理国家气候观象台,大理 671003; 2. 中国气象局大理山地气象野外科学试验基地,大理 671003; 3. 中国气象局横断山区 (低纬高原) 灾害性天气研究中心,昆明 650034; 4. 云南省大理州气象局,大理 671000)

摘　要: 为深入认识苍山洱海地区的极端降水特征,使用苍山洱海地区 46 个气象观测站降水数据和大理站近地层相对湿度与水汽压数据以及多普勒天气雷达、边界层风廓线雷达、ERA5 再分析数据,采用降水事件分类方法进一步细分降水区域,对该地区 2020 年 9 月 18 日一次极端降水过程的影响系统、环境条件和降水特征进行分析。结果表明:此次降水过程是一次显著性区域降水事件 (Regional Rainfall Event, RRE),受辐合切变线影响,切变线附近的中尺度对流系统直接触发强降水。边界层内具有充分的对流触发条件,有利的系统配置使得过程中生成多个小尺度对流系统,造成区域内 30.5% 的站点出现暴雨量级以上强降水,19 h 最大累计降水量为 123.9 mm,最大雨强为 33.6 mm·h^{-1}。对流系统发源地、移动路径和强度的不同,使得降水时空分布不均、尺度小,强降水主要集中在苍山东侧,其他区域降水相对较小;洱海北部发展的对流系统移速快、雷达回波强,影响范围相对较小,苍山中部洱海西侧生成的强对流持续时间长,影响范围大;洱海北部降水强度峰值出现时间早于南部,洱海南部降水强度达到峰值后回落较慢,其他区域峰值强度出现后快速减小。

关键词: 苍山洱海;极端降水;降水事件;小尺度对流

中图法分类号: P426.62^{+}1　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−156

Analysis of the characteristics of an extreme precipitation event in the Dali Cangshan-Erhai Lake region

YANG Cheng[1, 2, 3], FU Zhijia[1, 2], PENG Juan[1, 2], GAO Yuezhong[3, 4], WANG Xiaobin[1, 2]

(1. *The Dali weather bureau of Yunnan Province*, *Dali National Climate Observatory*, *Dali* 671003; 2. *Dali Mountain Meteorological Field Science Experimental Base of CMA*, *Dali* 671003; 3. *Research Center for Disastrous Weather over Hengduan Mountains & Low-Latitude Plateau of CMA*, *Kunming* 650034; 4. *Meteorological Bureau of Dali Prefecture*, *Yunnan Province*, *Dali* 671000)

Abstract: To gain a deep understanding of the characteristics of extreme precipitation in the Cangshan-Erhai Lake region, this study analyzed the impact system and characteristics of during an extreme precipitation event in this region on September 18, 2020, by applying a precipitation event classification method to further refine precipitation zones. The precipitation observation data from 46 meteorological observation stations, near-surface relative humidity and water vapor pressure data, doppler weather radar, boundary layer wind profile radar in Dali, and the fifth-generation European Centre for Medium-Range Weather Forecasts reanalysis (ERA5) data were used. The results are as follow. This precipitation process was a significant regional rainfall event (RRE). Under the influence of the convergence shear line, the mesoscale convective system near the shear line directly triggered this event. Sufficient convective triggering conditions existed in the boundary layer. The favorable system configuration enabled multiple small-scale convective systems to be generated during this process, resulting in precipitation above heavy rain in 30.5% of the stations in the region. The maximum accumulated precipitation in 19 h was 123.9 mm, with the maximum rainfall intensity of 33.6 mm·h^{-1}. Due to the differences in the origin, moving path, and intensity of the convective system, the spatiotemporal distribution of the precipitation was uneven and the scale was small. Strong precipitation was

收稿日期: 2024−08−16; **定稿日期**: 2025−02−05

资助项目: 云南省科技厅科技计划项目 (202305AM070004); 云南省气象局第四批青年科技创新团队建设项目 (2022QN06); 中国气象科学研究院基本科研业务费专项 (2020Z006); 云南省气象局科研项目 (YZ202433)

第一作者: 杨澄,主要从事数值模式与应用气象研究。E-mail: yangcheng0105@163.com

通信作者: 付志嘉,主要从事综合气象观测与应用气象研究。E-mail: fuzhijia86@126.com

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

mainly concentrated in the east of Cangshan Mountain, while the precipitation in other regions was relatively weak. The convective system developed in the northern part of Erhai Lake usually moved fast with strong radar echo and relatively limited influence range. The strong convection generated on the west side of Erhai Lake and in the middle of Cangshan Mountain exhibited a prolonged lifetime and large influence range. The peak precipitation intensity appeared earlier in the northern part of Erhai Lake compared to the southern part. The precipitation intensity in the south of Erhai Lake declined slowly after reaching the peak. In other regions, the precipitation intensity dropped rapidly after the peak.

Key words: Cangshan-Erhai Lake; extreme precipitation; rainfall event; small-scale convection

引　言

不同地理区域的极端降水因其主导天气系统和影响因子的差异而表现出明显的区域特征, 其中地形作用往往是关键影响因素 (何华和孙绩华, 2003; 许霖等, 2020)。地形会对大气产生不同的动力和热力效应, 进而影响当地的天气气候特征 (王凌梓等, 2018; 周晓宇等, 2023), 因此局地降水的产生与地形有极大关联 (王凌梓等, 2018), 地形尺度不同影响方式也各异 (丁仁海和周后福, 2010; 阎丽凤等, 2013; 卢珊等, 2022)。横断山区贯穿云南西部, 地势复杂, 雨季强降水多、突发性强, 强降水引发的滑坡、泥石流等灾害多, 易造成重大人员伤亡和经济损失 (万石云等, 2015)。从主要天气系统看, 造成云南的强降水类型主要为冷锋切变型、台风低压型和两高辐合型 (何华和孙绩华, 2003; 杨芳园, 2021), 切变线附近中尺度对流系统也常造成云南局地短时强降水 (周泓等, 2015; 鲁亚斌等, 2018), 而一些极端的降水过程常伴随着环流系统的异常演变 (沈晓琳等, 2019)。

位于横断山脉南端的云南洱海为狭长的内陆湖泊, 南北长约 40 km, 平均宽度约 6 km, 平均水深 10 m, 水位平均海拔为 1 974 m, 湖面面积约 252 km^2, 洱海西侧的苍山呈准南北走向, 最高海拔 4 122 m, 与洱海海拔高差超过 2 000 m, 是典型的小尺度复杂地形。由于苍山洱海地区地处低纬高原, 特殊的地理位置使其既受西南季风的影响, 又受西太平洋、孟加拉湾和南海地区生成的热带风暴影响。同时洱海湖泊对局地环流及大气边界层影响显著, 相对于陆地, 湖泊白天湍流通量输送少, 湍流发展弱, 大气边界层高度低 (许鲁君和刘辉志, 2015)。在洱海湖滨近地层白天多为东风和东南风, 夜间多为西风和西南风 (徐安伦等, 2010; 董保举等, 2011), 湍流通量具有明显的日变化特征, 热量交换形式以潜热为主 (杨智等, 2008)。局地环流进一步影响降水不均匀分布, 使得苍山东西侧小时尺度降水量和降水频次存在明显差异 (苏锦兰等, 2015)。洱海湖滨降水主要集中于夏、秋两季, 而且夜雨特征明显, 空间分布特征则为西部多东部少 (徐安伦等, 2017), 而苍山不同海拔高度的降水也具有明显的日变化特征, 相比于苍山两侧, 山顶表现为高降水量、高频次、弱强度的气候态特征 (Zhang et al., 2021; 董保举等, 2023)。可见, 苍山洱海地区的降水特征和形成机理非常复杂。

尽管目前学术界对苍山洱海地区的降水系统、类型及分布特征等有了一定的认识, 但由于现阶段复杂地形区的强降水预报仍然面临较大挑战, 且极端降水成因复杂, 涉及不同纬度多种系统以及不同尺度系统之间的相互作用 (陈权亮等, 2024; 孙可可和吴小飞, 2024), 因此对苍山洱海地区极端降水发生和发展过程的认识仍然存在不足, 而通过利用多源探测资料深入分析极端降水过程, 了解其降水特征, 对提高强降水预报预测具有重要作用 (宋薇等, 2024)。2020 年 9 月 17—18日, 苍山洱海地区发生极端降水过程, 大理国家基准气候站 (以下简称大理站)17 日 20:00—18 日 20:00 (北京时, 下同) 累计降水量达 123.9 mm, 打破该站 1960 年以来单日累计降水量历史记录, 但在苍山洱海地区超过 100 mm 的观测站仅有 5 个, 其余站点降水相对较弱, 降水分布极不均匀。本文基于苍山洱海地区 46 个气象观测站降水数据和大理站近地层相对湿度与水汽压数据以及多普勒天气雷达、边界层风廓线雷达、ERA5 再分析数据, 对此次极端降水过程的影响系统、环境条件和降水特征进行分析, 为深入认识苍山洱海地区极端降水特征、改进该地区极端降水预报提供参考。

1　资料与方法

1.1　资料说明

本文所用资料为大理国家气候观象台提供的 2020 年 9 月 17 日 20:00—18 日 20:00 苍山洱海地区 46 个地面气象观测站 (图 1a) 的逐小时降水数据, 大理站 2020 年 9 月 17 日 20:00—18 日 00:00 近地层逐 10 min 的 2 m、4 m、10 m 和 20 m 相对湿度和水汽压、逐 10 min 边界层风廓线雷达三维风数据和逐 6 min 多普勒天气雷达反射率数据, 以及欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 提供的 2020 年 9 月 17 日 20:00 和 23:00 东亚地区第五代大气再分析数据集 (ERA5) 的高空位势高度、比湿和风场数据。降水数

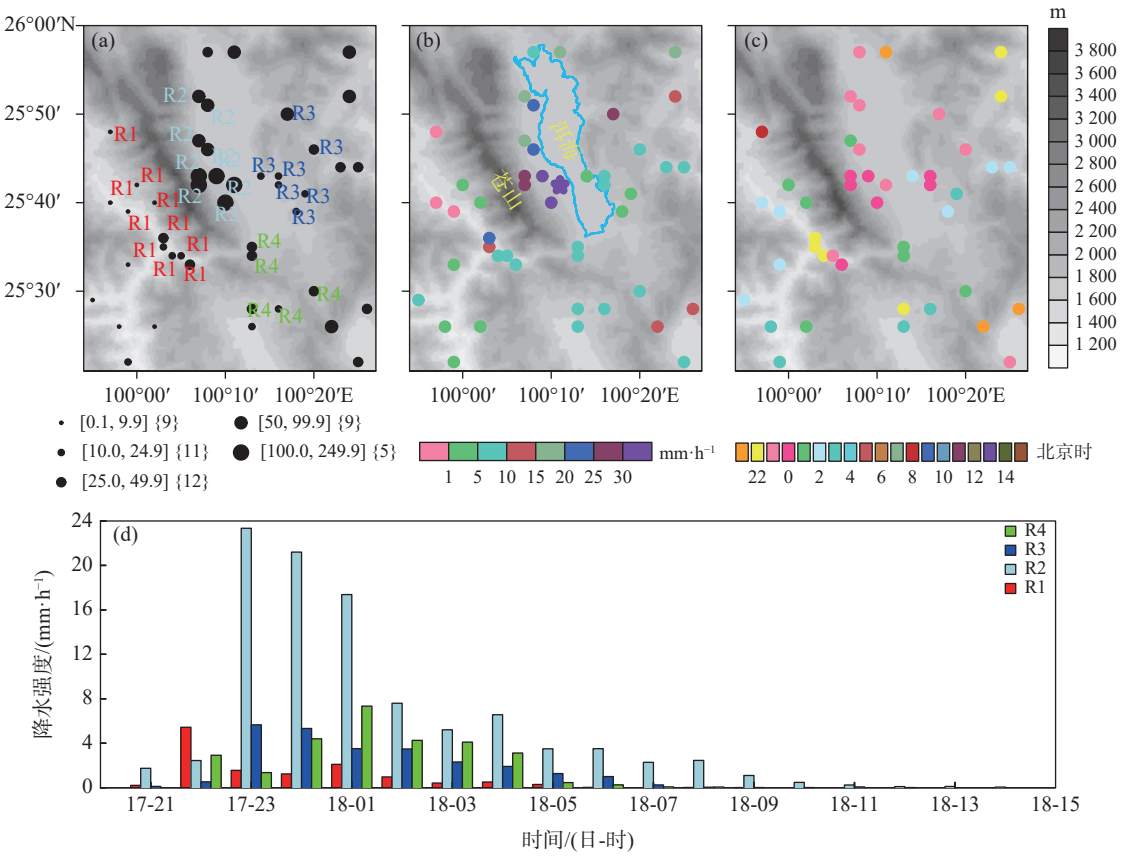


图 1 2020 年 9 月 17 日 21:00—18 日 15:00 苍山洱海地区累计降水量 (a, 黑色圆点, 单位: mm)、最大降水强度 (b) 及其出现时间 (c, 彩色圆点) 的空间分布 (阴影为地形; 图 a 图例中花括号内为该降水强度内站点数; 图 b 中五角星为大理站, 蓝色实线为洱海边界), 以及平均降水强度 (d) 的时间变化

Fig. 1 Spatial distribution of (a) cumulative precipitation (black dots, unit: mm), (b) maximum precipitation intensity, and (c) its occurrence time (colored dots) (Shaded represents terrain. The number of stations within the precipitation intensity is in braces in the legend in Fig. 1a). The pentagram indicates the location of the Dali station, and the solid blue line indicates the boundary of Erhai Lake in Fig. 1b), and the hourly variation of (d) average precipitation intensity in the Cangshan-Erhai Lake region from 21:00 BT on September 17 to 15:00 BT on September 18, 2020

据用于计算降水特征量及分析降水量、降水强度的变化, ERA5、大理站近地层相对湿度和水汽压、多普勒天气雷达和边界层风廓线雷达等数据用于分析降水环流场特征及多种气象要素的时空演变特征。

1.2 区域划分

为分析降水系统移动与演变更精细的特征, 以苍山和洱海为分界, 将研究区域划分为苍山西侧 (R1)、苍山东侧 (R2)、洱海东侧 (R3) 和洱海南侧 (R4) 四个区域, 在 4 个区域中以相对集中为原则挑选代表站点, 各区域代表站点数依次为 10、9、7、5 站, 把包含洱海、苍山范围所有站点的区域记为 All (共 46 站), 其他未分区站点所在区域则以 Else (共 15 站) 表示, 区域划分和各站点的分布如图 1a 所示。

1.3 降水事件特征量的计算

降水事件的特征量能够表征降水事件的开始、峰值、结束时间及强度和持续时间等特征, 为加深对极端降水演变特征的认识, 本文根据降水事件的连续性要求 (Yu et al., 2015), 在研究区域内, 将站点首次出现有效降水 ($\geqslant$0.1 mm·h^{-1}) 的时刻记为 t_1, 且 t_1 需同时满足 t_1 前 2 h 无有效降水, 最后一次出现有效降水的时刻记为 t_2, 且 t_2 需同时满足 t_2 后 2 h 无有效降水。按此定义, 此次降水事件持续时间为 2020 年 9 月 17 日 21:00—18 日 15:00, 共 19 h。参考 Yu 等 (2015) 对区域降水事件 (Regional Rainfall Event, RRE) 的分析, 定义区域降水系数 (Regional Rainfall Coefficient, RRC), t 时刻的区域降水系数为 RRC$_t$, 区域降水事件累计降水的降水系数为 RRC$_E$。设 P_{it} 为站点 i 在 t 时刻观测到的有效降水量, t 时刻区域内所有站点的最大降水强度和平均降水强度分别记为 $P_x(t)$ 和 $P_m(t)$, 以此分析降水事件的 RRC$_t$、RRC$_E$、$P_x(t)$、$P_m(t)$ 的日变化特征。

RRC$_t$ (记为 $C_{RR}(t)$) 的计算采用如下公式

$$C_{RR}(t)=\begin{cases}0, & N_a<1\\ \dfrac{2P_m(n)}{P_{1t}+P_{N_at}}\times\dfrac{N_a-1}{N-1}, & N_a\geqslant 1\end{cases} \tag{1}$$

$$P_{\mathrm{m}}(n)=\begin{cases}0, & N_{\mathrm{a}}<1\\ \dfrac{1}{N_{\mathrm{a}}}\displaystyle\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{a}}}P_{it}, & N_{\mathrm{a}}\geqslant 1\end{cases} \tag{2}$$

其中N_{a}为 t 时刻发生有效降水的站点数, N 为总站点数, 将 P_{it} 由大到小进行排序, 得到 t 时刻发生有效降水的站点降水强度单调递减序列, 即 $P_{1t}\geqslant P_{2t}\geqslant\cdots\geqslant P_{N_at}\geqslant 0.1$ mm·h^{-1}。$P_{\mathrm{m}}(n)$ 表示不同站点数量 (n) 的平均降水强度, 其一般情况应为 $N_{\mathrm{a}}\geqslant 1$, 即表示 t 时刻区域内站点平均降水强度。

RRC_t 第一项 (记为 Term1) 反映发生有效降水的各站点降水强度的分布情况, 表示有半数站点的降水强度高于平均强度时, RRC_t 较大, 意味着发生降水的站点降水强度差异较小, 主要反映降水强度分布的均匀度。RRC_t 第二项 (记为 Term2) 表示有效降水站点数占区域内总站点数 (当为分区时即表示分区内总站点数) 的比例, 反映降水所覆盖的范围大小。

将各站点从降水开始的 t_1 时至降水结束的 t_2 时的过程累计降水量 P_i 取代 P_{it}, 可得到 $\mathrm{RRC}_{\mathrm{E}}$, 其中

$$P_i=\sum_{t=t_1}^{t_2}P_{it} \tag{3}$$

为分析降水事件的特征, 本文参考 Yu 等 (2015) 将 RRC_t 和 $\mathrm{RRC}_{\mathrm{E}}$ 大于 0.5 记为显著区域降水事件 (RRE), 反之则为局地降水事件 (Local Rainfall Event, LRE)。本文所说的区域和局地降水事件是根据所选区域内降水覆盖范围进行的分类, 有别于依据受影响的天气系统尺度所定义的区域和局地降水。

2 降水特征

2.1 降水实况特征

表 1 给出 2020 年 9 月 17 日 21:00—18 日 15:00 不同累计降水量 (R) 对应站点数占各区域总站点数的比例, 可以发现全区域 (All) 大暴雨有 5 站, 占全区域总站点数的 10.9%, 且这 5 个站均位于 R2 区, 占 R2 区域总站点数的 55.6%; 全区域暴雨有 9 站, 占全区域总站点数的 19.5%, 占 R2 区域总站点数的 44.4%, 因此 R2 区累计降水量均达暴雨以上; R1 区 50% 的站点为小雨, 50% 的站点为中到大雨; R3 区 71.4% 的站点为中雨, 大雨和暴雨站点各占 14.3%; R4 区 80% 的站点为大雨, 20% 的站点为中雨; 其他未分区站点 (表 1 中区域 Else 代表站点) 有 4 站暴雨, 占未分区站点的 26.7%, 这 4 个暴雨站点因较为分散, 与现有分区未成片相连, 单点性较为突出, 因此未将其编入某个区域。结合图 1a 的站点分布情况来看, 强降水主要集中于洱海西侧的 R2 区, 其中有 5 站累计降水量超过 100 mm, 最大累计降水量为 123.9 mm; R1 与 R2 区一山之隔, 直线距离约 20 km, 降水量差异却极大, R1 区内仅有 40% 的站点累计降水量超过 20 mm, 且均集中在苍山南部, R1 区内另外 50% 的站点累计降水量则不足 10 mm; R3 和 R4 区降水分布相对均匀。各区域平均累计降水量为 R2 区最大, 为 98.5 mm; R4 区次之, 为 28.3 mm; R3 区为 25.5 mm; R1 区仅为 11.6 mm。

表 1 苍山洱海地区不同累计降水量 (R,单位: mm) 对应站点数及其占各区域总站点数的比例

Table 1 Number of stations corresponding to different cumulative precipitation (R) and their proportions to the number of total stations in different areas in the Cangshan-Erhai Lake region

区域	小雨(0.1≤R≤9.9)		中雨(10≤R≤24.9)		大雨(25≤R≤49.9)		暴雨(50≤R≤99.9)		大暴雨(100≤R≤249.9)	
	站点数	比例/%	站点数	比例/%	站点数	比例/%	站点数	比例/%	站点数	比例/%
All	9	19.5	11	24.0	12	26.1	9	19.5	5	10.9
R1	5	50.0	3	30.0	2	20.0	0	0.0	0	0.0
R2	0	0.0	0	0.0	0	0.0	4	44.4	5	55.6
R3	0	0.0	5	71.4	1	14.3	1	14.3	0	0.0
R4	0	0.0	1	20.0	4	80.0	0	0.0	0	0.0
Else	4	26.7	2	13.3	5	33.3	4	26.7	0	0.0

从最大降水强度的分布 (图 1b) 可见, 雨强超过 30 mm·h^{-1} 的站点有 3 个, 均位于 R2 区, 其中最大雨强为 33.6 mm·h^{-1}, 南部雨强较为一致, 基本在 5~15 mm·h^{-1}。各区域的雨强分布特征则有较大差异, 苍山东西侧 R1 和 R2 区域内的雨强差别最大, R3 和 R4 区域内雨强较为接近。结合图 1a 可以发现, 累计降水量大的站点对应的最大雨强也大, 最大雨强超过 20 mm·h^{-1} 站点的累计降水量普遍超过 50 mm, 其对应的最大雨强出现时间 (图 1c) 主要集中于 22:00—00:00, 苍山沿线及东北侧最大雨强基本出现在前半夜, 早于南部地区, 表明本次过程的降水系统具有自北向南移动的特征。从各区域的平均雨强变化趋势 (图 1d) 可见, 各区域降水主要发生在 17 日 21:00—18 日 08:00, 为一次典型的夜雨过程, 其中 R2 区在 17 日 23:00—18 日 01:00 雨强最大, 是其他区域的 2~4 倍, 17 日 23:00 和 18 日 00:00 雨强分别为 23 mm·h^{-1}

和 20 mm·h^{-1}, 18 日 02:00 以后雨强快速减弱; R3 区变化趋势与 R2 区类似, 但雨强总体比 R2 区要弱; R4 区则从 18 日 00:00 雨强迅速增强, 01:00 雨强达到最大后快速减弱, 最大雨强出现时间滞后于 R2 和 R3 区 1~2 h; R1 区则总体雨强较弱, 降水量少且变化较为平缓。结合前文的分析可知, 此次降水时空分布不均、尺度小, 初步判断为局地强对流系统影响, 强对流系统在 R2 区发展并停留, 之后逐步向东和向南移动, 移动过程中系统逐步减弱, 苍山西侧由于受苍山阻挡, 未受此系统的显著影响。

2.2 RRC 时间变化特征

图 2 为不同区域降水强度的时间演变, 从中可见, 各区域内最大降水强度 $P_x(t)$ 和区域平均降水强度 $P_m(t)$ 的相关性较高, 且表现出类似的演变趋势, 只是量级大小有差异。另外, 从 $P_x(t)$ 序列可知, R1 和 R4 区有两个降水峰值, R2 和 R3 区只有一个降水峰值, 四个区域均在降水开始后很快达到峰值强度, 强降水维持时间较短, R2 区维持了 2 h, 其他区域仅维持了 1 h, R4 区强降水峰值出现后强度回落较慢, 其他三个区域降水强度在峰值强度出现后快速减小, R2 区维持了 9 h 的弱降水强度, 其他区域弱降水强度维持时间较短, 体现了此次 RRE 演变过程中降水强度的不对称性, 也表明了各区域降水特征具有显著差异。另外, R4 区的 $P_x(t)$ 峰值出现时间落后 R2 和 R3 区 2 h, 也指示系统自北向南移动。

此次过程整个区域内 RRC_E 为 0.63, 根据前文对 RRE 的定义可知, 这是一次显著性区域降水事件, 而挑选的每个区域 RRC_E 均超过 0.63, 说明每个区域还具有各自的降水特征。图 2 中 RRC_t 能够反映降水事件的空间范围随时间的变化, 分析可知, R1 区降水阶段仅有 18 日 02:00 为 RRE, 其余时间为 LRE, R2、R3 和 R4 降水阶段基本均为 RRE, 仅有降水初期和结束期表现为 LRE, 表明这三个区域在降水开始后进入了持续稳定的降水期, R1 区则降水强度弱, 且以单点降水为主。

图 3 给出 Term1 (表征降水强度分布的均匀性) 和 Term2 (表征降水范围大小) 的日变化。分析可知, Term1 在 R1 区有较大波动, 表示该区域在降水期间降水强度分布变化较快, 为非均匀性降水, 其他区域降水较为均匀。Term2 的值表明, R2、R3、R1 和 R4 区降水持续时间分别为 18 h、16 h、14 h 和 11 h。两项综合来看, 当 Term2 较大, 也即出现区域性降水时, Term1 的大小决定了 RRC_t 大小, 如 R2 区在降水期间 17 日 23:00—18 日 11:00 的 RRC_t 的 Term2

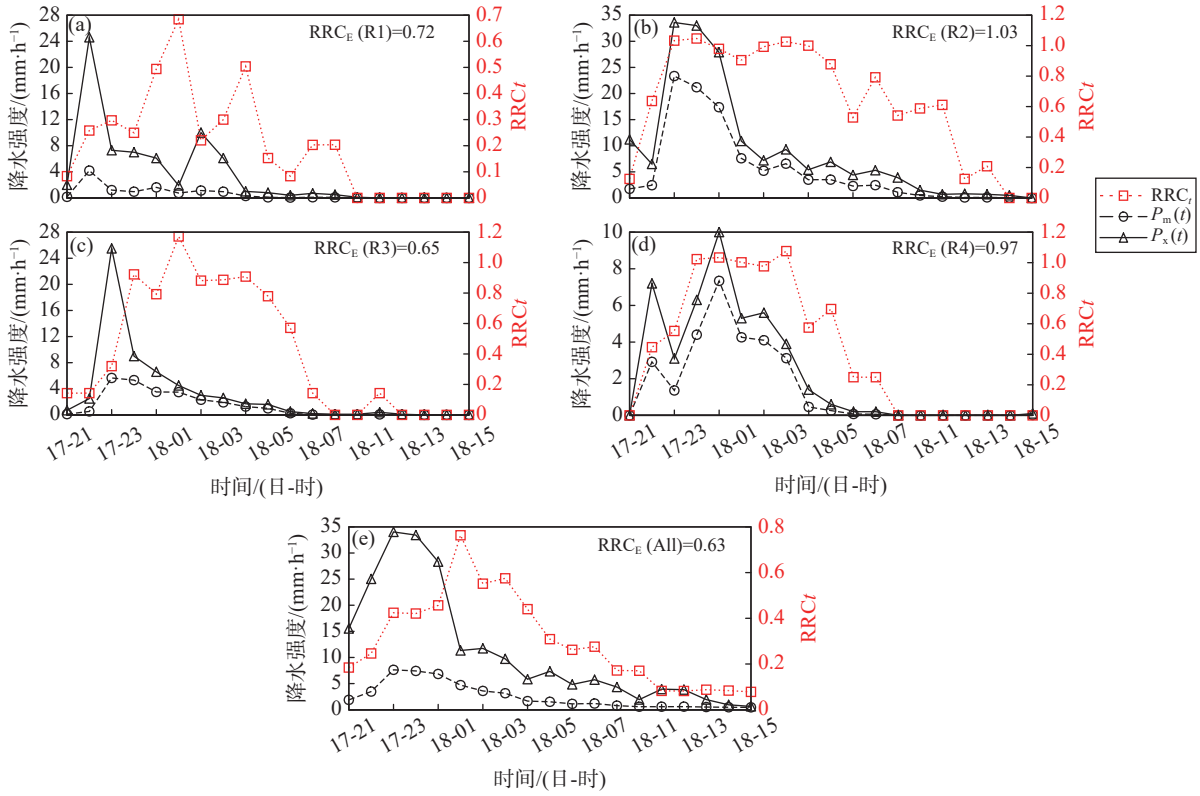


图 2 2020 年 9 月 17 日 21:00—18 日 15:00 苍山洱海区域 R1 (a)、R2 (b)、R3 (c)、R4 (d) 和 All (e) 平均降水强度 $P_m(t)$、最大降水强度 $P_x(t)$ 和区域降水系数 RRC_t 的逐小时变化

Fig. 2 Hourly variation of the average intensity $P_m(t)$, maximum precipitation intensity $P_x(t)$, and regional precipitation coefficient RRC_t in (a) R1, (b) R2, (c) R3, (d) R4, and (e) All regions in Cangshan-Erhai Lake region from 21:00 BT on September 17 to 15:00 BT on September 18, 2020

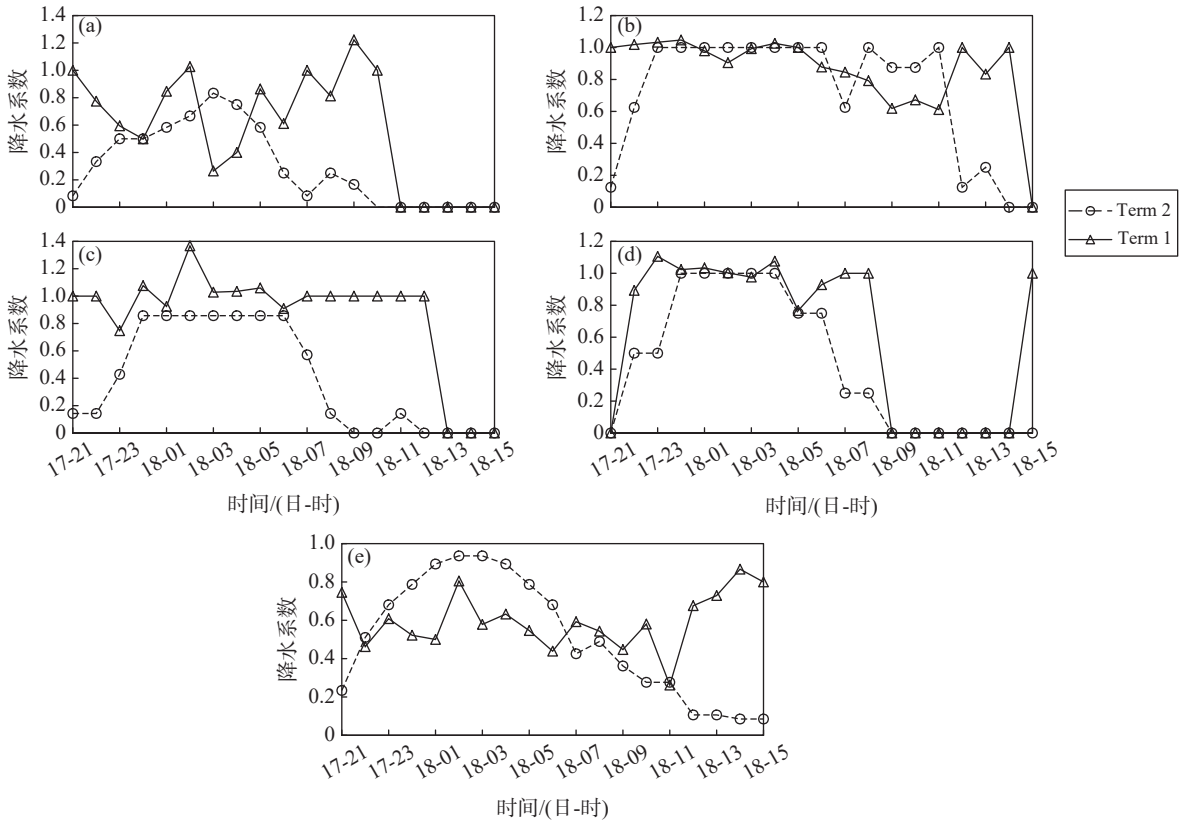


图 3 2020 年 9 月 17 日 21:00—18 日 15:00 苍山洱海区域 R1 (a)、R2 (b)、R3 (c)、R4 (d) 和 All (e) 的 RRC_t 第一项 (Term1) 和第二项 (Term2) 的逐小时变化

Fig. 3 Hourly variation of Term1 and Term2 of RRCt in (a) R1, (b) R2, (c) R3, (d) R4, and (e) All regions in Cangshan-Erhai Lake region from 21:00 BT on September 17 to 15:00 BT on September 18, 2020

较大, Term1 也为大值, 表明该时段有区域性的降水发生, 而降水初期和后期 Term2 为小值, Term1 为大值, 表明降水初期和后期均有单点性降水。

综上, 此次强降水过程在不同区域内具有不同的降水特征, 主要表现为降水持续时间和强度分布的均匀性各有不同。需要说明的是, 本文划分的四个区域实际范围已足够小, 得出的区域强降水本质也是受局地强对流系统影响, 进一步验证上节的结论。

3 影响系统及环境条件

3.1 环流及雷达回波特征

此次降水发生前 (9 月 17 日 20:00), 在高空 200 hPa (图 4a) 云南省为高压控制, 北侧为西北气流且风速较大, 南部为强劲的偏东风, 洱海地区为弱的西北风。500 hPa (图 4b) 西风槽位于重庆中部-四川南部-云南北部一线, 槽后的西北气流引导冷空气南下; 副热带高压为东西带状分布, 西伸脊点至普洱、昆明一线, 2020 年 11 号台风“红霞”位于副热带高压南侧的南海海面上, 其外围强劲的偏东风将水汽向云南输送, 使得云南比湿超过 6.5 $g\cdot kg^{-1}$; 云南西部至缅甸为反气旋环流控制, 苍山洱海地区处于两高间的辐合区, 副热带高压南侧为一致的偏东气流。700 hPa (图 4c) 南海至云南为偏东气流控制, 苍山洱海地区有风速的辐合和风向切变, 比湿达到 12 $g\cdot kg^{-1}$, 说明大气含水量高, 易于强降水的发生。在强降水发生时 (9 月 17 日 23:00), 天气系统依然维持 (图 4d—f), 洱海地区仍然处于两高辐合区内, 700 hPa (图 4f) 受切变线影响, 比湿仍维持在 11 $g\cdot kg^{-1}$。综上, 两高辐合区、台风北侧东南气流以及切变线为强降水的发生提供了有利的天气背景。

图 5 是 9 月 17 日 20:05—23:54 多普勒天气雷达组合反射率因子演变图, 分析可知, 20:05 (图 5a) 洱海东北方有中尺度对流系统发展, 中心组合反射率超过 50 dBz, 该对流系统向西移动 (图 5b、c), 遇到苍山的阻挡后转为沿苍山向南移动 (图 5d、e), 该系统在 22:03 消失, 此时洱海中部出现新的对流系统, 该系统向南移动 (图 5f、g、h), 使得 A、B、C、D (其中 C 点为大理站) 四站点均出现 20 $mm\cdot h^{-1}$ 以上的短时强降水。在此期间洱海南部 R4 区也有小对流单体的发展, 23:54 以后回波强度逐渐减弱 (图 5i), 对流单体减弱消散。从各区域的平均组合反射率 (图 6) 来看, 在 22:03 之前, 各区域除了 R1 区在 21:04 左右出现 30 dBz 的反射率外, 其余各区域平均组合反射率

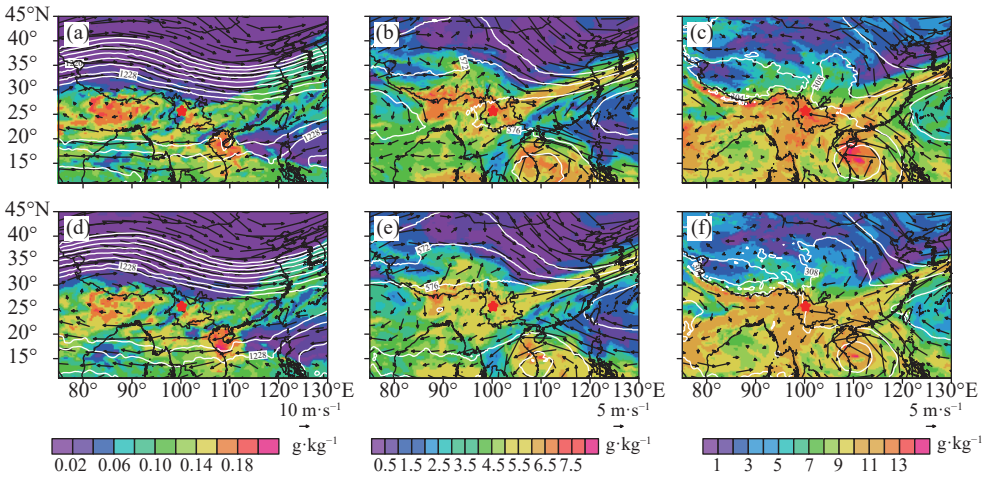


图 4 2020 年 9 月 17 日 20:00 (a—c) 和 23:00 (d—f) 200 hPa (a, d)、500 hPa (b, e)、700 hPa (c, f) 环流形势 (填色表示比湿, 箭头表示风场, 等值线为位势高度, 单位: dagpm; 红色五角星为洱海地区位置)

Fig. 4 Upper-air circulation patterns at (a-c) 20:00 BT and (d-f) 23:00 BT at (a, d) 200 hPa, (b, e) 500 hPa, and (c, f) 700 hPa on September 17, 2020 (Shaded indicates specific humidity, arrows represents the wind field, contour represents potential height, unit: dagpm, and red pentagram indicates the location of the Erhai region)

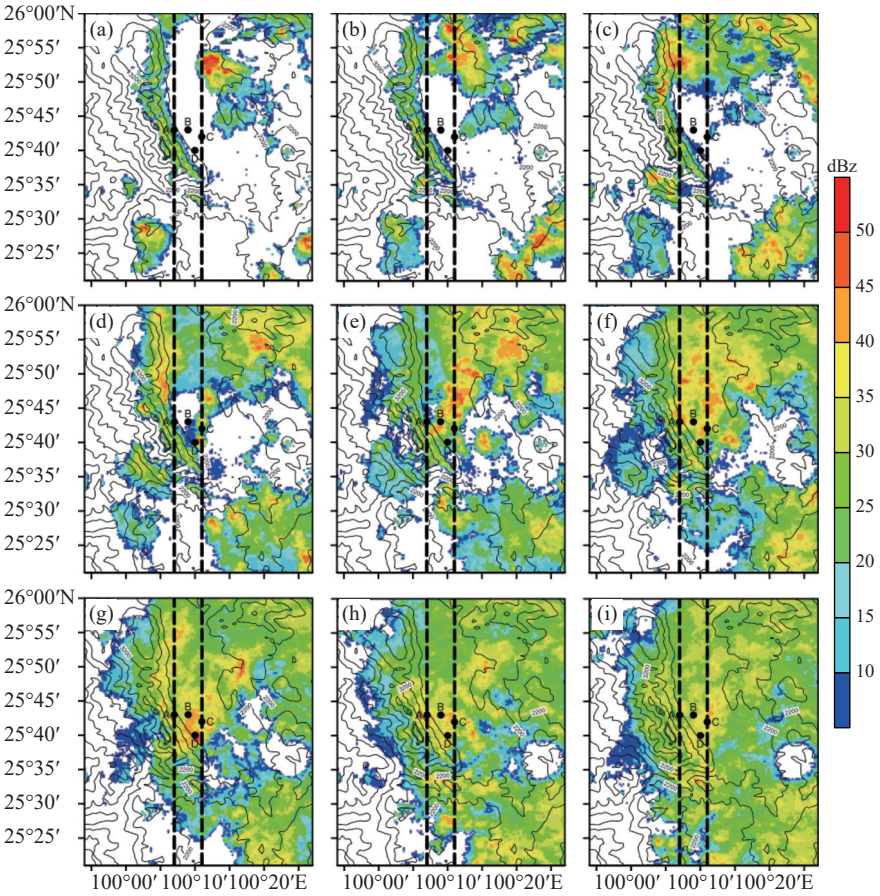


图 5 2020 年 9 月 17 日 20:05 (a)、20:35 (b)、21:04 (c)、21:33 (d)、22:03 (e)、22:32 (f)、23:01 (g)、23:31 (h)、23:54 (i) 大理多普勒天气雷达组合反射率 (等值线为地形高度, 单位: m; 黑色实心圆为 R2 区累计降水量超过 100 mm 的 A、B、C、D 站点位置, 黑色虚线为经过站点 A、C 的经度线)

Fig. 5 Combined reflectivity of Dali Doppler weather radar at (a) 20:05 BT, (b) 20:35 BT, (c) 21:04 BT, (d) 21:33 BT, (e) 22:03 BT, (f) 22:32 BT, (g) 23:01 BT, (h) 23:31 BT, and (i) 23:54 BT on September 17, 2020 (Contour represents terrain elevation, unit: m, black solid circles indicates the locations of A, B, C, and D stations where the accumulated precipitation in R2 region exceeds 100 mm, and the black dashed lines are the longitude lines passing through stations A and C)

均不超过 20 dBz, 22:03 之后 R1 区回波强度基本保持较低水平, 此时其余三个区域回波强度则开始显著增强, 平均组合反射率基本维持在 20 dBz 以上, R2 区在 22:26 以后更是保持在 30 dBz 以上, 使得整个区域出现较强的降水。

为进一步分析中尺度对流系统的移动和发展特征, 图 7 给出 A、C 站点之间平均组合反射率的时间-纬度剖面, 从中可以更直观地发现强对流系统的发展与移动。20:41 在 25.85°—25.90°N 之间出现超过 36 dBz 的强回波, 该回波对应图 5 中洱海东北侧发展的强对流, 由于其受地形影响, 未能顺利南下影响 B、D 站点之间区域, 并于 21:16 后趋于消散。21:39 后 A、C 站点之间出现多个对流单体, 随着强对流的发展, C 站的雨强迅速增大, 至 22:56 最大雨强达 6.8 mm·(6 min)$^{-1}$, 强回波维持近 1 h 才趋于减弱。

综上, 受辐合切变线影响, 切变线附近的中尺度对流系统直接引发了苍山洱海地区的强降水。北部发展的对流系统移速快、回波强, 影响范围相对较小, 苍山中部洱海西侧生成的对流系统持续时间长、影响范围大, 造成了该地区短时强降水。

3.2 边界层风廓线特征

从 C 站的边界层风廓线变化趋势 (图 8) 来看, 21:00 开始, 距地面 1.0 km 高度之上纬向风分量向上逐渐增大, 东风增强, 达到 2.0 km (约为苍山顶高度) 后由弱西风转为弱东风 (图 8a), 经向风分量则在 2.0 km 以下始终以北风为主, 且风速大值中心也在 1.0 km 附近 (图 8b)。在 21:10 以前 2.0 km 以下高度基本为东北风 (图 8a、b、d), 引导北部对流系统向西

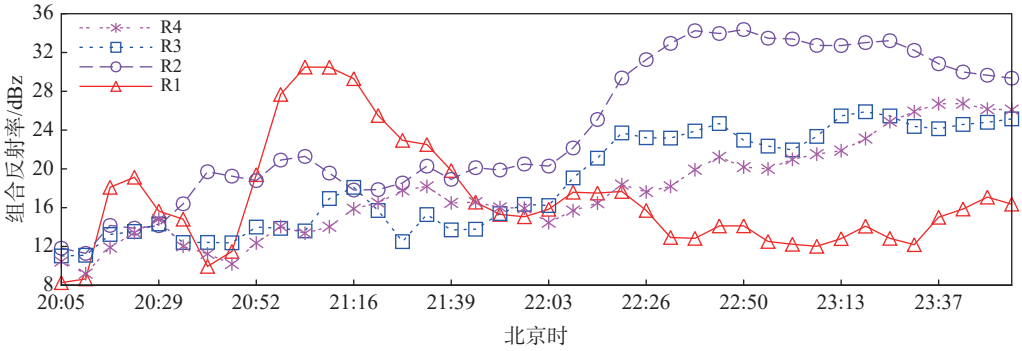


图 6 2020 年 9 月 17 日 20:05—23:54 不同区域平均的组合反射率的时间演变

Fig. 6 Time variations of average composite reflectivity across various regions from 20:05 BT to 23:54 BT on September 17, 2020

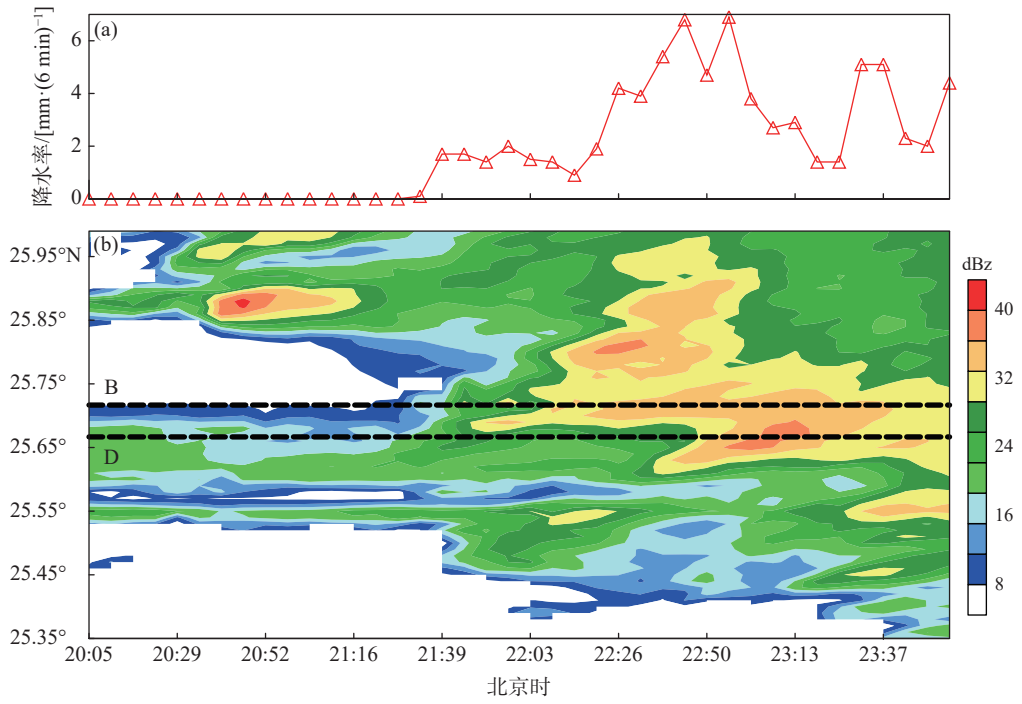


图 7 2020 年 9 月 17 日 20:05—23:54 图 5 中 C 站点逐 6 min 降水量 (a) 以及 A、C 两站点之间平均组合反射率的时间-纬度剖面 (b) (图 b 虚线表示图 5 中经过 B、D 站点的纬度线)

Fig. 7 The (a) time-latitude cross-section of zonal-mean composite reflectivity between A and C stations in Fig.5 and (b) the precipitation per 6 minutes at C station in Fig. 5 from 20:05 BT to 23:54 BT on September 17, 2020 (Dashed lines in panel (a) show the latitude lines crossing B and D stations in Fig. 5)

南移动, 在此期间 2.0 km 以下高度为弱上升气流控制 (图 8c)。21:30 降水开始之后, 1.0—2.0 km 范围内的东风快速增强 (图 8a), 北风转变为南风 (图 8b), 1.2 km 以下风随高度顺时针旋转, 1.2—2.0 km 风随高度逆时针旋转 (图 8d)。根据热成风原理可知, 此时低层有暖平流, 高层有冷平流, 为对流的发生和发展提供了良好的热力条件, 并且垂直速度减小, 气流正在由上升转变为下沉 (图 8c), 也表明降水的开始。22:00 东风进一步加强 (图 8a), 但强风速中心高度下降到 1.2 km 左右 (图 8d), 风向为东南风, 此高度基本在苍山中部, 受苍山的阻挡, 水汽在此汇集, 形成高湿区。可见在 C 站的边界层内具有充分的对流触发条件。另外, 随着降水强度增大, 边界层风廓线雷达最大探测高度快速升高, 这主要是由于降水前高层水凝物增多, 增强了粒子散射强度, 从而更容易被雷达检测出来 (董保举等, 2012), 这种探测高度的显著变化在一定程度上能对降水的发生起提示作用。

3.3 近地层水汽变化特征

结合高空环流形势可知, 此次强降水发生前能量、水汽条件充足。图 9 给出 C 站近地层水汽变化

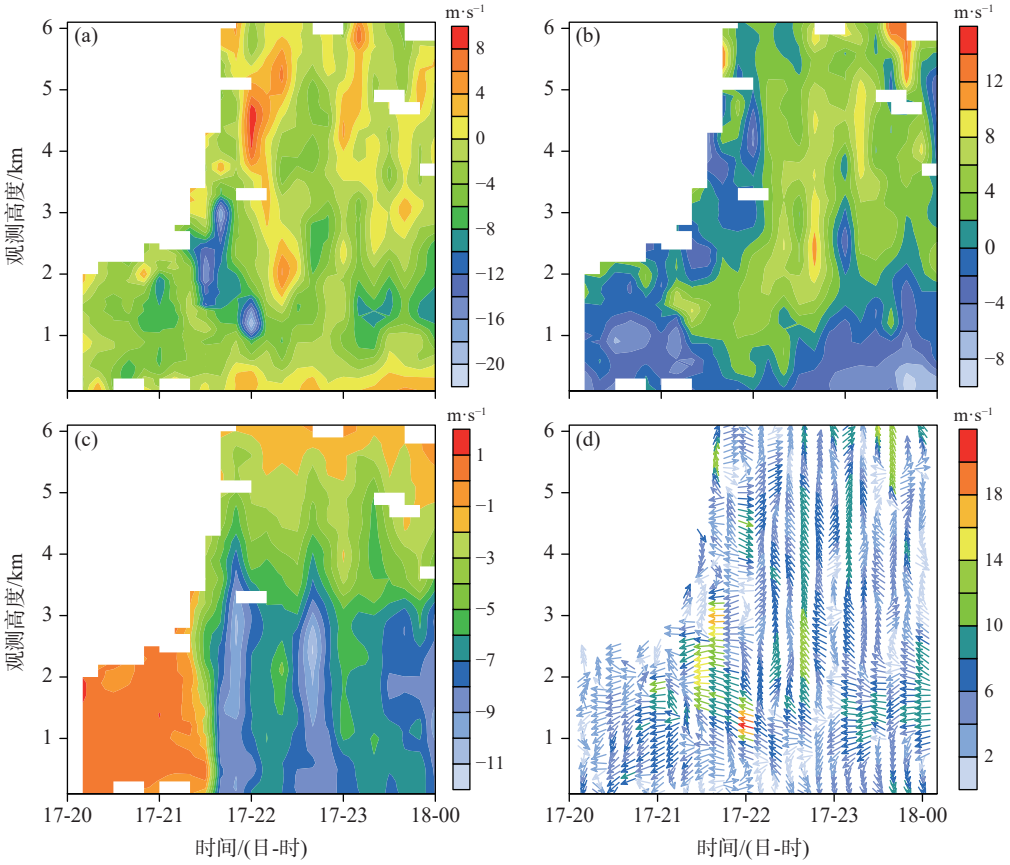


图 8 2020 年 9 月 17 日 20:00—18 日 00:00 大理站边界层风廓线雷达东西风分量 (a)、南北风分量 (b)、垂直风分量 (c) 和水平风矢量 (d) 的垂直廓线演变

Fig. 8 Vertical profiles evolution of (a) the east-west wind component, (b) the south-north wind component, (c) the vertical wind component, and (d) horizontal wind vector from the boundary layer wind profile radar at Dali station from 20:00 BT on September 17 to 00:00 BT on September 18, 2020

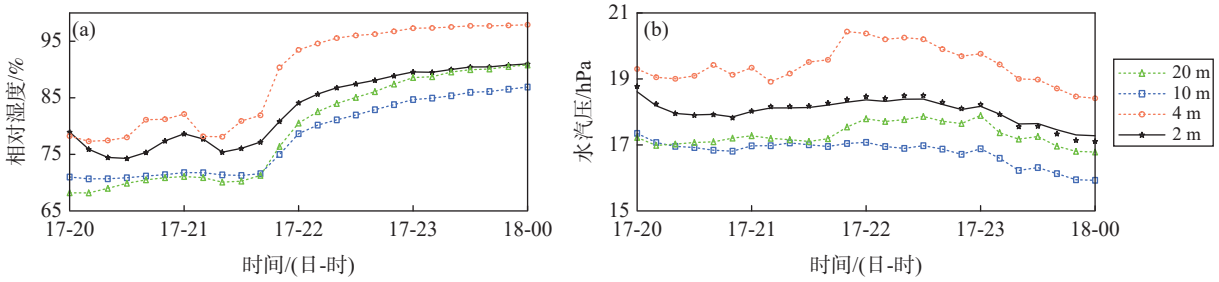


图 9 2020 年 9 月 17 日 20:00—18 日 00:00 苍山洱海地区近地面四个高度层相对湿度 (a) 和水汽压 (b) 的时间变化

Fig. 9 Time variations of (a) relative humidity and (b) water vapor pressure at four different height levels near the surface in the Cangshan-Erhai Lake region from 20:00 BT on September 17 to 00:00 BT on September 18, 2020

趋势, 分析可知, 21:30 降水发生之前, 2 m 和 4 m 地表附近相对湿度高于 10 m 和 20 m, 且具有显著波动, 随着降水发生, 近地层相对湿度均显著增加, 水汽压变化特征在降水发生前与相对湿度相似, 但降水发生时低层仍然维持高湿状态, 而水汽压则快速减小, 主要是因为水凝物增多、水汽密度减小所致。另外, 在整个过程中 4 m 的相对湿度和水汽压均高于其他高度, 这可能是由于降水落地前和落地后蒸发的水汽大量悬浮于 4 m 高度, 从而在 4 m 形成高湿层。

4 结论与讨论

本文使用苍山洱海地区 46 个气象观测站降水数据和大理站近地层相对湿度与水汽压数据以及多普勒天气雷达、边界层风廓线雷达、ERA5 再分析数据, 对该地区一次极端降水过程的影响系统、环境条件和降水特征进行分析, 得到主要结论如下:

(1) 此次降水受局地强对流系统影响, 降水系统自北向南移动, 时空分布不均, 尺度小, 区域内 30.5% 的站点出现暴雨以上强降水, 过程最大累计降水量为 123.9 mm, 最大雨强为 33.6 mm·h^{-1}, 强降水主要集中在苍山东侧的 R2 区, 其他区域降水相对较小。

(2) 受辐合切变线影响, 切变线附近的中尺度对流系统直接引发了苍山洱海地区的强降水。同时, 降水受多个小尺度对流系统影响, 北部发展的对流系统移速快、回波强, 影响范围相对较小, 而苍山中段洱海西侧生成的强对流系统持续时间长, 影响范围大。在降水开始的 21:30 前后, 地表 2 m 和 4 m 相对湿度出现显著波动, 降水开始后近地层相对湿度显著增加, 边界层内低层有暖平流, 高层有冷平流, 低边界层内的东南气流受苍山的阻挡, 易形成水汽的汇集, 边界层内具有充分的对流触发条件。

(3) 从降水事件类型来看, R1 为 LRE, R2、R3 在降水初期和后期为 LRE, 维持期为 RRE, R4 基本均为 RRE, R2、R3、R1 和 R4 区降水持续时间分别为 18 h、16 h、14 h 和 11 h, 四个区域强降水均发生在降水初期, 但 R4 区强降水峰值出现后强度回落较慢, 其他三个区域降水强度在峰值强度出现后快速减小。此次降水过程是一次显著性 RRE, 受多个小尺度对流系统影响, 但由于对流系统发源地、移动路径和强度的不同, 各区域降水范围、持续时间、降水强度及对称性、峰值降水强度出现时间等特征仍有显著差异。

此次苍山洱海地区的降水过程具有极端性, 其特征对于深入理解该区域的强降水机制具有重要参考价值。下一步将选取不同降水类型的典型降水过程, 综合运用微波辐射计、云雷达及测风激光雷达等新型观测资料, 开展更为全面、精细的降水过程综合特征分析。

参考文献 (References):

陈权亮,刘皓,胡淼,等.2024.青藏高原东侧复杂地形区极端降水研究进展[J].暴雨灾害,43(3):255−265. Chen Q L, Liu H, Hu M, et al. 2024. A review of the studies on extreme precipitation in the complex terrain region on the eastern side of the Tibetan plateau [J]. Torrential Rain and Disasters,43(3):255−265 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−216

丁仁海,周后福.2010.九华山区下垫面对局地降水的影响分析[J].气象,36(3):47−53. Ding R H, Zhou H F. 2010. Influences of underlying surface on local precipitation in Jiuhua mountains [J]. Meteorological Monthly,36(3):47−53 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2010.3.007

董保举,付志嘉,李明,等.2012.风廓线雷达资料在暴雨天气过程特征分析中的应用[J].气象科技,40(1):74−78,86. Dong B J, Fu Z J, Li M, et al. 2012. Feature analysis of a rainstorm with wind profile radar data [J]. Meteorological Science and Technology,40(1):74−78 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.2012.01.015

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]. Meteorological Monthly,49(11):1405−1413 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2023.060402

董保举,张成稳,付志嘉,等.2011.云南大理边界层风垂直变化观测研究[J].干旱气象,29(2):189−194. Dong B J, Zhang C W, Fu Z J, et al. 2011. Study on the vertical change of wind in boundary layer in Dali of Yunnan province [J]. Journal of Arid Meteorology,29(2):189−194 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1006−7639.2011.02.010

何华,孙绩华.2003.云南冷锋切变大暴雨过程的环流及水汽输送特征[J].气象,29(4):48−52. He H, Sun J H. 2003. Circulation and moisture flux characteristics at middle and lower levels during heavy rains in Yunnan [J]. Meteorological Monthly,29(4):48−52 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2003.4.011

卢珊,胡泽勇,付春伟,等.2022.黄土高原夏季极端降水及其成因分析[J].高原气象,41(1):241−254. Lu S, Hu Z Y, Fu C W, et al. 2022. Characteristics and possible causes for extreme precipitation in summer over the Loess plateau [J]. Plateau Meteorology,41(1):241−254 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2021.00027

鲁亚斌,李华宏,闵颖,等.2018.一次云南强对流暴雨的中尺度特征分析[J].气象,44(5):645−654. Lu Y B, Li H H, Min Y, et al. 2018. Analysis of mesoscale weather system characteristics of a severe convective rainstorm in Yunnan [J]. Meteorological Monthly,44(5):645−654 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2018.05.005

沈晓琳,周宁芳,杨舒楠,等.2019. 2015 年冬季云南两次极端降水事件及环流异常特征分析[J].暴雨灾害,38(4):380−385. Shen X L, Zhou N F, Yang S N, et al. 2019. Analysis of two extreme precipitation events and circulation anomalies in Yunnan province in winter of 2015 [J]. Torrential Rain and Disasters,38(4):380−385 (in Chinese). doi:10.3969/i.issn.1004−9045.2019.04.011

宋薇,邱晓滨,王兆宇,等.2024.一次冰雹过程的多源资料观测特征分析[J].

暴雨灾害,43(3):322−331. Song W, Qiu X B, Wang Z Y, et al. 2024. Analysis of the characteristics of a hail event with multi-source data [J]. Torrential Rain and Disasters,43(3):322−331 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−032

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]. Meteorological Monthly,41(1):17−24 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2015.01.002

孙可可, 吴小飞.2024. FGOALS-f2 气候预测系统对西南地区持续性极端降水的次季节预测评估[J].高原山地气象研究,44(1):21−30. Sun K K, Wu X F. 2024. Sub-seasonal prediction of the regional persistent extreme precipitation in Southwest China by GOALS-f2 climate prediction system [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 44(1):21−30 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.01.003

万石云,赵宁坤,段玮.2015.云南省滑坡泥石流与强降水的相关性和多时间尺度特征研究[J].灾害学,30(1):45−50. Wan S Y, Zhao N K, Duan W. 2015. Correlation and multi-timescale characteristics of strong precipitations and landslide debris flows in Yunnan province [J]. Journal of Catastrophology,30(1):45−50 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000−811X.2015.01.010

王凌梓,苗峻峰,韩芙蓉.2018.近 10 年中国地区地形对降水影响研究进展[J].气象科技,46(1):64−75. Wang L Z, Miao J F, Han F R. 2018. Overview of impact of topography on precipitation in China over last 10 years [J]. Meteorological Science and Technology,46(1):64−75 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.20170081

徐安伦,董保举,刘劲松,等.2010.洱海湖滨大气边界层结构及特征分析[J].高原气象,29(3):637−644 Xu A L, Dong B J, Liu J S, et al. 2010. Structure and characteristic of the atmospheric boundary layer in Erhai lakeside region of Dali [J]. Plateau Meteorology,29(3):637−644 (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 Meteorology,36(6):1557−1566 (in Chinese). doi:10.7522/i.issn.1000−0534.2017.00014

许鲁君,刘辉志.2015.云贵高原洱海湖泊效应的数值模拟[J].气象学报,73(4):789−802. Xu L J, Liu H Z. 2015. Numerical simulation of the lake effect of Erhai in the Yunnan-Guizhou plateau area [J]. Acta Meteorologica Sinica,73(4):789−802 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2015.047

许霖,姚蓉,陈红专,等.2020. 2017 年湖南一次极端降雨过程特征及成因分析[J].沙漠与绿洲气象,14(1):31−38. Xu L, Yao R, Chen H Z, et al. 2020. Characteristics and causes analysis of extreme rainfall event in 2017 in Hunan province [J]. Desert and Oasis Meteorology, 14(1):31−38 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2020.01.004

阎丽凤,车军辉,周雪松,等.2013.泰山地形对一次局地强降水过程动力作用的数值模拟分析[J].气象,39(11):1393−1401. Yan L F, Che J H, Zhou X S, et al. 2013. Numerical simulation analysis on dynamic effect of Taishan mountain terrain on local severe rainfall [J]. Meteorological Monthly,39(11):1393−1401 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2013.11.002

杨智,刘劲松,孙绩华.2008.大理近地层山谷盆地湖陆风及湍流特征分析[J].气象与环境学报,24(5):32−37. Yang Z, Liu J S, Sun J H. 2008. Lake-land breeze and turbulence characteristics in the surface layer of valley and basin in Dali, Yunnan province [J]. Journal of Meteorology and Environment,24(5):32−37(in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673−503X.2008.05.008

杨芳园,甄廷忠,邹灵宇,等.2021.昆明市主城区一次局地短时强降水特征研究[J].沙漠与绿洲气象,15(1):28−35. Yang F Y, Zhen T Z, Zou L Y, et al. 2021. A study of the local short-time heavy rain in the main urban area of Kunming [J]. Desert and Oasis Meteorology,15(1):28−35 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2021.01.004

周泓,杨若文,钟爱华,等.2015.云南省一次切变冷锋型暴雨过程的中尺度对流系统分析[J].气象,41(8):953−963. Zhou H, Yang R W, Zhong A H, et al. 2015. Analysis on mesoscale convective system during a shear and cold front type rainstorm process in Yunnan province [J]. Meteorological Monthly,41(8):953−963 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2015.08.004

周晓宇,周泓,段玮,等.2023.哀牢山复杂地形对一次夏季强降水影响的模拟[J].气候与环境研究,28(5):533−546. Zhou X Y, Zhou H, Duan W, et al. 2023. Simulation of the complex terrain influence on summer heavy precipitation in Ailao mountain [J]. Climatic and Environmental Research,28(5):533−546 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9585.2023.23007

Yu R C, Chen H M, Sun W. 2015. The definition and characteristics of regional rainfall events demonstrated by warm season precipitation over the Beijing plain [J]. Journal of Hydrometeorology,16(1):396−406. doi:10.1175/JHM−D−14−0086.1

Zhang M K, Li J, Li N N. 2021. Fine-scale characteristics of summer precipitation over Cang mountain [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,60(9):1280−1300. doi:10.1175JAMC−D−20−0220.1

(责任编辑　唐永兰)