

大理国家气候观象台综合气象观测和研究

徐安伦¹ 李建²

(1 大理国家气候观象台, 大理 671003; 2 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要: 简要介绍了近十年来大理国家气候观象台开展的综合气象观测项目, 系统总结了观测资料评估和质量控制技术、点苍山-洱海区域局地环流特征、大气垂直结构和边界层高度特征、地气间物质和能量交换特征、强降雨(雪)和大风等典型天气个例特征方面的研究成果, 归纳了观测资料在气象预测预报、数值模拟同化试验、机场飞机颠簸中的应用情况, 并展望了大理国家气候观象台未来的观测和研究方向。

关键词: 大理, 国家气候观象台, 综合气象观测

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.05.001

Progress of Integrated Meteorological Observation and Research at Dali National Climate Reference Station

Xu Anlun¹, Li Jian²

(1 Dali National Climate Observatory, Dali 671003 2 Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081)

Abstract: In this paper we introduce briefly the integrated meteorological observation items carried out by Dali National Climate Observatory in recent ten years. Then, we systematically summarize main research results as follows: the special atmospheric observation data assessment and quality control technology, the local circulation over the Diancang Mountain -Erhai Lake area, the characteristics of atmospheric vertical structure and planetary boundary layer height, the matter and energy exchange of land-atmosphere system, and the characteristics of typical weather events such as heavy rain, heavy snow and high wind. Furthermore, we summarize the applications of special atmospheric observation data in meteorological forecast, numerical simulation assimilation test and airport aircraft bumps. Finally, we propose some research direction for Dali National Climate Observatory in the future.

Keywords: Dali, National Climate Observatory, integrated meteorological observation

0 引言

2005年, 中国气象局制定出台的业务技术体制改革实施方案中, 把发展中国气候观测系统作为综合气象观测系统改革的重点内容之一^[1], 提出在中国建设国家气候观象台的改革目标。2006年, 中国气象局在不同气候关键区启动5个国家气候观象台的试点建设, 包括云南大理(代表川滇综合生态观测区)^[2]、内蒙古锡林浩特(代表锡林郭勒草原观测区)^[3]、广东电白(代表海洋综合观测区)^[4]、安徽寿县(代表黄淮综合农田生态观测区)^[5]、甘肃张掖(代表荒漠观测区)^[6]。其中, 大理国家气候观象台(100°11'E、25°42'N, 海拔1990.5 m, 下称大理观象台)位于云贵高原与横断山脉南端结合部, 处于最高海拔4122 m的点苍山和平均海拔1972 m的洱海之间的平坦农田

中^[7], 其周边地区山地复杂地形特点明显^[8], 天气气候复杂多变, 气象灾害种类繁多, 是观测大气基本气候变量以及高影响天气变量的理想区域。大理观象台代表区域的地理位置特殊、地形地貌复杂, 既是南亚季风和东亚季风的交汇区, 以及东亚水汽输送的关键区, 也是青藏高原大气热源加热的敏感区, 同时还是各类数值模式模拟的难点地区^[9]。大理观象台的立项建设对南支槽、孟加拉湾风暴和高原冷空气东移以及西南涡南移等天气系统影响产生的暴雨、暴雪等灾害性天气有很好的监测预警作用, 对改进我国西南地区乃至东亚区域的天气、气候模式和边界层、云物理过程参数化方案等起着重要性作用。

从试点建设至今的十年来, 大理观象台无论在硬件设施设备建设、人才队伍培养和业务能力提升上, 还是在开展大气边界层、复杂山地气象等领域的科学研究以及其成果转化应用方面, 都获得了长足的发展和可喜的成绩, 在云南基层气象台站中始终保持示范和引领作用, 成为国家气候观象台的示范站, 初步实

收稿日期: 2017年3月1日; 修回日期: 2017年8月3日
第一作者: 徐安伦(1981—), Email: xualun@126.com
资助信息: 云南省气象局科研项目(GY201602)

现了“立足云南、面向全国、跻身世界、带领跨越式发展”的愿景^[10]。本文主要总结和归纳大理观象台十年来所开展的综合气象观测研究及其应用成果，并展望未来观测研究方向，以期为国家气候观象台的建设发展提供参考和借鉴。

1 观测项目

大理气象观测历史悠久，1932年起曾开展过简单的观测，1939年12月建立“中央气象局”大理测候所，1950年11月成立大理气象站，1951年后有了完整的气象记录，至今已积累了60多年的地面观测资料。2006年大理气象站升级为大理观象台后，在中国气象局、云南省气象局等上级主管部门以及中国气象科学研究院、中国科学院大气物理研究所等科研部门的支持下，以业务需求为导向、以研究方向为引领、

以科研项目为依托，合作开展了许多个国家级科研课题和野外科学试验，如中日气象灾害合作研究项目JICA（Japan International Cooperation Agency）^[11-12]、青藏高原东缘对流云和水汽观测试验^[13]等。此外，采用“一台多点”的布局，除地面气象常规观测外，新增了近地层通量观测系统、地基GPS水汽监测系统、边界层风（温）廓线雷达（Wind Profiler Radar, WPR）、洱海水上自动观测系统、点苍山—洱海剖面典型山地气象观测系统、基准辐射站、大口径闪烁仪（Large Aperture Scintillometer, LAS）等十余套特种大气观测系统的长期运行，组成了一个较为完整的复杂地形下的区域气象综合观测网，覆盖了从湖面、地面至高空大气物理参数的立体观测^[14]，具体开展的观测项目见表1。在开展综合气象观测过程中，每套

表1 大理观象台综合气象观测项目

Table 1 Items of integrated meteorological observation at Dali National Climate Observatory

观测系统	观测要素	观测时间
地面气象常规观测	云量、云状、云高、能见度、天气现象、气压、气温、相对湿度、风速、风向、降水量、日照时数、蒸发量、浅层和深层地温、草面（雪面）温度、雪深等	1951年1月至今
区域自动气象站	大理市辖区11个乡镇的气温、降水量	2006年7月至今
近地层通量观测	4层（铁塔2、4、10、20 m高处）气温、相对湿度、风速风向，5层（地表下4、10、20、60、100 cm深处）土壤温度、体积含水量，3层（地表下4、10、20 cm深处）土壤热通量，单层（铁塔5.08 m高处）三维风速、超声虚温、水汽和CO ₂ 密度，单层（距地1.5 m高处）辐射四分量、红外地表温度，气压，降水量，涡动相关法计算的动量、感热、潜热、CO ₂ 通量等参数	2006年12月至今
地面基准气候的对比观测	主要观测要素为气温、降水量，辅助要素为总辐射、地表温度、风速，观测设备由芬兰VAISALA公司和天津气象仪器厂生产	2007年1月—2008年12月
地基GPS水汽监测	大气可降水总量、中性大气的总延迟量、大气的湿延迟量、电离层电子浓度	2007年2月至今
边界层风（温）廓线雷达	距地3~8 km高度范围的U风（东西风分量）、V风（南北风分量）、W风（垂直风分量）、水平风速、水平风向、信噪比、湍流谱宽、大气折射率常数，距地1 km高度范围的虚温，高度分辨率为100 m	2007年12月至今
洱海水上自动观测	离平台1.5 m高处气温、相对湿度、风速、风向、气压、降雨量、冰雹强度，水位，1 m深处水温、电导率、蓝绿藻含量、pH值、溶解氧、盐分	2008年1月至今
	离平台2 m高处三维风速、超声虚温、水汽和CO ₂ 密度，离平台1.5 m高处辐射四分量、光合有效辐射，离水面0.05、0.2、0.5、1、2、4、6、8 m深处水温梯度，涡动相关法计算的动量、感热、潜热、CO ₂ 通量等参数	2010年12月至今
GPS探空加密观测	对流层至低平流层的气温、相对湿度、气压、风速、风向、露点温度、混合比以及U、V风分量	2008年3、5、7月，2011年8—9月，2012年6—7月
100 m铁塔风能观测	铁塔8.5 m高处气压，10、70 m高处气温、相对湿度、风速、风向，30 m高处风速，50、100 m高处风速风向，70 m高处三维超声风速	2009年3月—2012年4月
天气现象自动观测	地面液态降水的图像采集	2009年6月—2011年6月
土壤水分自动观测	8层（地表下0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.8、1.0 m深处）土壤体积含水量、重量含水量、有效水分贮存量、相对湿度	2010年4月至今
点苍山—洱海剖面典型山地气象观测	沿25.7°N点苍山—洱海区域不同海拔高度（4092、3520、2640、2130、1990、1975、2088 m）处的气温、相对湿度、风速、风向、气压、降雨量、草温、地表温度、浅层地温	2010年12月至今
新型自动气候站	气温、相对湿度、降水量、地温、风速、风向、气压、蒸发量、能见度	2010年12月至今
大气负氧离子自动监测	迁移率≥1.0、≥0.4的负离子浓度	2011年12月至今
雷电监测	地闪强度、极性和陡度 大气电场强度	2006年11月至今 2012年12月至今
雨滴谱仪	降雨类型、降雨强度、雨滴谱和雷达反射率	2012年6月—2013年2月
微波辐射计	气温、相对湿度、水汽密度、液态水的垂直廓线	2012年6月—2013年2月
大口径闪烁仪	大气折射率结构常数、区域感热和潜热通量	2012年6月至今
基准辐射站	总辐射、直接辐射、散射辐射、反射辐射、UV、UVA、UVB、光合有效辐射、大气长波辐射、地球长波辐射	2014年10月至今
环洱海生态气象“六要素”观测	环洱海周边布设12个“六要素”（气温、相对湿度、风速、风向、气压、降水量）自动站	2017年1月至今

系统、每次试验均安排专人负责和日常维护管理，详细记录设备运行状况等，确保观测数据的质量和有序存储备份。目前，大理观象台已获取了大量宝贵的第一手观测资料，为开展西南水汽输送通道关键区水循环、复杂山地气象等研究提供了坚实的基础数据。

2 观测资料评估和质量控制

观测资料评估和质量控制是高质量数据产品分析与应用的前提和基础。十年来，大理观象台依据各套大气观测资料的自身特色和存在的问题，结合日常维护经验和故障记录，积极开展了观测资料评估、数据质量控制等工作。

针对WPR探测资料，董保举等^[15-16]定量评估了WPR的探测能力，指出大气边界层内WPR的数据获取率大于80%、探测能力远远强于自由大气层；与当地探空加密观测数据对比发现，风速、风向垂直廓线的一致性较好，气温垂直廓线的一致性较差；与云南昆明、丽江、腾冲、普洱、蒙自探空站的数据对比发现，WPR测风资料与丽江站的最为接近，700 hPa以上的U、V风矢量基本一致，说明WPR探测的风速、风向垂直廓线资料是可信的。

针对涡动相关（Eddy Covariance, EC）通量观测资料，徐安伦等^[17]采用英国爱丁堡大学开发的EdiRe软件（<http://www.geos.ed.ac.uk/abs/research/micromet/Edire/>），以2011年实测的高频（10 Hz）湍流资料为例进行预处理和质量评价，指出大理湍流通量计算的最佳平均周期为30 min，坐标轴旋转以及空气密度效应校正处理对计算结果影响较大；EC观测数据总体质量较高，约60%的通量数据可用于基础性研究；通量贡献源区整体呈西北—东南向分布，测站东南方向区域是湍流通量观测的主要贡献源区，上风向的距离约是仪器安装高度的160倍。

针对地面辐射观测资料，徐安伦等^[14]借鉴地面辐射基准站网（Baseline Surface Radiation Network, BSRN）推荐的质量控制方法和中国气象局2010年发布的气象行业标准《地面气象辐射观测资料质量控制》，发展了对原始辐射观测数据进行质量控制的内容和方法，应用2010年实测数据分析表明，短波辐射传感器由零点漂移带来的测量误差不容忽视，太阳总辐射、短波反射辐射、大气长波辐射和地面长波辐射观测资料的总体质量较好。

针对地基GPS水汽监测资料，任菊章等^[18]分析了云南7站的地基GPS反演的大气可降水量（Precipitation Water Vapor, PWV）（合称GPS/PWV）与美国NCEP/NCAR、NCEP/DOE和日本JRA-25再分析资料

在不同区域、不同时间尺度上的差异特征，结果表明GPS/PWV资料与3类再分析资料均能再现降水量在空间和时间上的分布特征，但各月平均可降水量GPS探测值要大于再分析资料估算值；孙绩华等^[19]比较了地基GPS反演水汽值和探空水汽值的精度，结果表明两者的数值和变化趋势极为一致，且均方根小于2 mm，说明GAMIT水汽解算方案的地基GPS水汽反演结果可为业务科研使用。

针对LAS观测资料，徐安伦等^[20-21]比较分析了LAS和EC在不同空间尺度上测量大气折射率结构常数 C_n^2 和湍流热通量的异同特征，结果表明10 m高度上的LAS和5.08 m高度上的EC测量的 C_n^2 、感热通量、潜热通量均有较高的相关性，相关系数分别为0.73、0.85、0.90；两种仪器测量的 C_n^2 在日变化趋势上基本一致但在数量级上差异显著，其差异主要受测量高度不同的影响；两种仪器测量感热通量、潜热通量的差异与测量时段有关，其差异大小均存在明显的昼夜和季节变化特点。综合分析指出，LAS和EC两种仪器获取的数据可以相互融合和联合使用。

3 观测资料分析进展

3.1 点苍山—洱海局地环流特征

湖陆风是一种和地形有关以及下垫面不均匀加热、湖面与陆面之间温度差异引起的局地环流，多发生在大气背景环流较弱、少云晴朗的天气条件下。山谷风的成因与湖陆风相类似。大理点苍山—洱海区域受高大山体、湖—陆分布不均匀等因素影响，近地边界层内存在湖陆风、山谷风和峡谷风三者耦合效应引起的局地环流。针对点苍山—洱海局地环流特征，杨智等^[22]利用近地层通量观测资料，分析了湖陆风、峡谷风的特征及形成原因和影响因素，指出白天以东风和东南风为主，夜间为西风 and 西南风为主。徐安伦等^[23]利用GPS探空加密观测资料，分析了洱海湖滨大气边界层结构特征，大约距地2400 m以下，气流主要受点苍山和洱海的影响，可能存在着山谷风和湖陆风两者叠加效应引起的局地环流；距地500 m以下，白天多为东风和东南风，夜间多为西风和西南风。徐安伦等^[9, 24]利用洱海湖面和陆面常规气象观测资料进行对比分析，认为受局部地形和洱海的影响，近地层常年存在湖陆风、山谷风、峡谷风三者叠加效应引起的局地环流。湖面盛行风白天以东南风为主，夜间以东南风和西西南风为主；地面盛行风白天以东南风为主，夜间以静风和西西北风为主。湖面与陆面盛行风向的转变与日出、日落时间有较好的对应关系。董保举等^[25-26]利用WPR资料分析指出，点苍山—洱海局地

环流的高度可达到600 m左右。上述分析表明,在没有天气系统影响的条件下,大理点苍山—洱海区域局地环流特征显著,昼夜风向转变明显,白天以偏东风为主,风从湖面吹向陆面,而夜间以偏西风为主,风从陆面吹向湖面。

按照山地气象学基本理论,呈南北走向、高海拔的点苍山会形成不同气候的分界线,点苍山以西为东亚季风和西南季风的迎风坡,气流受地形的抬升作用绝热冷却,有利于凝结降水,而点苍山以东为背风坡,气流越山下沉增温减少降水,故点苍山西坡降水量比东坡多。但大理周边地面观测站1981—2010年资料统计显示,点苍山以西漾濞站平均年降水量(1029.1 mm)比点苍山以东大理站(1054.9 mm)偏少,而点苍山以东宾川站(563.9 mm)、祥云站(822.5 mm)明显偏多。从地理位置上看,大理站与点苍山东坡较近,宾川、祥云两站与点苍山东坡较远。可见,点苍山东西坡降水分布与典型的迎风坡、背风坡降水分布截然不同,具有很强的局地特殊性。然而这种特殊性是否由于点苍山—洱海区域的局地环流所致,还是由于青藏高原和横断山脉的大地形影响或其他原因所致,这一科学问题有待研究和深入探讨。

3.2 大气垂直结构和边界层高度特征

地球大气在水平方向上比较均匀,而在垂直方向上呈明显的层状分布,按热力性质通常划分为对流层、平流层、中间层和热层^[27]。

高垂直分辨率(几米至几十米)的无线电探空资料,可以很好地显示大气垂直状况和精细结构。徐安伦等^[28]通过2008年季风3个加密观测阶段的GPS探空资料分析指出,大理地区对流层顶高度分布在12.8~16.4 km,平均高度为14.8 km,对流层平均温度递减率为 $6.4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$;季风爆发前(后)水汽主要集中在6.6(8.3) km以下对流层;季风爆发前对流层至低平流层被西风带控制;季风爆发阶段对流层至低平流层风速减小,低平流层风向由西风转成东风;季风强盛阶段低平流层东风逐渐下传,对流层高层至低平流层风速增大,风向基本转成偏东风。

高时间分辨率(1~30 min)和垂直分辨率(60~150 m)的WPR探测资料,能够揭示大气边界层的垂直结构及其演变规律。董保举等^[25]通过2008—2012年WPR和20 m铁塔探测的风速、风向资料分析指出,距地400 m以下风力基本为2级,盛行风向为偏东风;纬向风在距地600 m以下出现东、西风交替的日变化;风速日变化随高度的升高表现形式明显

不同,20 m以下呈现白天为高值时段、夜间为低值时段的单峰型结构,100~1500 m呈现日出和日落为高值时段、白天为低值时段的双峰型结构,2000 m以上日变化不明显。

大气边界层或行星边界层高度(Planetary Boundary Layer Height, PBLH)既是控制空气质量、污染物扩散的一个关键参数,也是数值天气预报、气候预测模式中边界层参数化方案的一个重要参数,其范围受下垫面和气象条件影响,随时间和空间变化而改变,典型值从几百米至1~2 km。在实际观测中,PBLH并不能直接测量,只能依靠高空探测资料(如温度、湿度、湍流或大气成分的垂直廓线)来估算^[29]。徐安伦等^[23]通过2008年加密观测获取的114份探空资料统计显示,洱海湖滨对流边界层高度分布在190~2500 m,平均高度为1061 m;稳定边界层高度分布在60~1760 m,平均高度为467 m。徐祥德等^[30]、王寅钧等^[31]分析指出,青藏高原东南缘午时对流边界层顶高可达1500~2500 m,其与感热相关性显著、与浮力项呈正相关。

3.3 地气间水、热、碳通量交换和湍流输送特征

离地球表面1~2 km高度的大气边界层是人类活动和生产活动的主要空间^[32],也是地球系统中大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈和生物圈之间相互作用的关键区域。发生在地表附近的动量、热量、水分及CO₂等物质的湍流交换和输送过程,是地气相互作用最直接和显著的物理过程,直接影响着大气边界层和区域天气气候的形成^[33],对全球大气环流和气候变化具有重要的影响。针对点苍山—洱海地气间物质和能量交换,徐安伦等^[9]通过2008—2010年近地层通量观测资料分析指出,地表辐射通量和湍流通量均呈现出显著的日循环结构和干、湿季变化特征。地表反照率表现出早晨最大、傍晚次之及中午最小的非对称“U”型分布。感热、潜热通量全年有相似的日变化过程,变化幅度随季节变化,但潜热通量明显大于感热通量,表明地气热量交换中,感热作用小,潜热输送占主导地位。地面对大气的加热作用明显,主要以潜热方式加热大气;地面全年均为大气热源,白天表现为强热源,夜间表现为较弱的冷源。杨智等^[22, 34-36]通过2007—2010年近地层通量观测资料分析指出,大气不稳定层结频次白天高于夜间,湍流强度白天强于夜间、干季强于湿季,无量纲湍流方差与大气稳定度满足1/3次方定律;能量闭合率干季大于湿季,动量通量、感热通量干季大于湿季,潜热通量湿季大于干季,热量交换形式以潜热为主;水稻田生态系统CO₂

吸收通量比CH₄排放通量大2~3个数量级, 总体表现为碳汇区。孙绩华等^[7]通过2008年4—5月近地层通量观测资料分析指出, 西南季风爆发前, 动量通量数值较大且日变化特征较明显; 西南季风爆发后, 动量通量数值减小而日变化特征较不显著。西南季风开始前后地气热量交换都以潜热为主, 西南季风开始前一周, 潜热通量的逐日变化特点是随时间逐渐减少, 感热通量逐渐增大, 二者差值逐渐减小; 西南季风开始后潜热通量的逐日变化为逐渐增大而感热通量逐渐减少, 二者差值逐渐增大。其原因既与雨季天气的变化有关, 也与下垫面状况的改变相联系。Liu等^[37]通过2012年在洱海湖面获取的EC观测资料分析指出, 洱海在白天表现为冷湖效应, 夜间表现为暖湖效应; 湖面辐射四分量日变化规律显著, 反照率日变化呈“U”型分布; 感热通量和潜热通量平均日变化的峰值分别不超过25、150 W/m², 白天湖面的有效能量主要分配为潜热通量; CO₂通量除夏季存在弱的吸收外, 其余季节(冬季)表现为弱的排放; 2012年洱海年蒸发量为(1165±15) mm; 空气动力学粗糙度平均值为1.9×10⁻² m; 动量拖曳系数、热量输送系数和水汽输送系数平均值分别为2.02×10⁻³、1.47×10⁻³、1.36×10⁻³。

3.4 强降雨(雪)、大风等典型天气个例特征

在强降雨(雪)天气个例方面, 董保举等^[38-39]利用2008年6月1—2日大理暴雨过程的WPR资料和小时降水资料分析发现: WPR水平风资料可直观显示随时间变化风场的垂直结构; 高空气流的向下脉动与降水强度的增强有着紧密的联系; WPR产品(垂直速度、折射率结构常数和信噪比)可清楚地反映降水的开始、结束以及降水的强度; 降水前三维风的脉动变化较大, 水平风在垂直方向上存在风速切变, 最大探测高度明显升高; 降水期间WPR资料可以对降水性质进行判断, 功率谱密度出现双峰谱, 能测出垂直气流速度及下降粒子速度。董保举等^[40-41]对2008年1月27日、7月18日、8月5日、9月25日以及2010年7月18—19日大理暴雨天气过程的GPS/PWV资料分析指出, 发生暴雨前GPS/PWV会呈现1~2天的增湿过程和1~2次的跃变过程, 跃变过程与降水发生和结束有较好的对应关系。董保举等^[42]对2012年9月1—3日大理暴雨天气过程的微波辐射计和WPR探测资料分析指出, 降水时微波辐射计探测的云底高度保持在1 km以下, 液态水含量越大降水强度越强; 降水时WPR的探测高度增高, 水平风从地面到高空顺时针旋转(暖平流), 垂直气流速度小于-4 m/s, 信噪比大于40 dB。陈红玉等^[43]

通过2008—2012年汛期强降水发生前WPR探测资料的分析指出, 强降水前0~1 h最大探测高度最高, 强降水的强度与最大探测高度值及其增幅呈正相关; 强降水前1 h左右, 信噪比和垂直气流速度均出现峰值, 且它们的峰值越大, 强降水的强度也越大; 强降水前3~4 h, 距地4.0 km高度附近有中尺度急流出现。黄慧君等^[44]对2015年1月9—10日大理雨雪天气过程的WPR探测资料分析指出, 信噪比增大对降水增强以及降水相态变化有较好的指示意义。

在大风天气个例方面, 杨澄等^[45]选取2009—2010年大理的5个大风个例并进行了诊断分析, 指出青藏高原东南侧发生大风的环流背景相似, 15°N附近的低纬地区有多个高压系统出现, 35°N以北的中高纬地区有长波或者低压槽活动; 大风的发生主要受高空动量下传影响, 且边界层内存在低空急流; 感热向下传输和潜热释放给大风的产生和维持提供了热力条件; WPR探测高度和信噪比强度可作为大风预警指标, 当感热通量和潜热通量呈反位相变化时, 可对大风天气进行预警指导。

在霜冻灾害天气个例方面, 徐安伦等^[46]对2009年3月14日大理发生晚霜冻灾害期间近地层通量观测资料分析指出, 此次晚霜冻发生前, 近地层气象要素会出现突变现象, 如气压未出现第二极小值等; 白天大气透明度高、无云、风速小、气压高、湿度小, 地表储存的热量较多, 气温升高且达到最高值的时间较晚, 地面以湍流方式向大气输送的能量以潜热通量为主, 傍晚日落后, 地表释放的热量开始增多而且远远超过白天吸收的热量, 加之水汽放射的长波辐射稳定, 获得大气逆辐射补偿的热量相对较少, 气温迅速下降, 从而近地面空气中的水汽发生凝结现象。

在雷电灾害个例方面, 杨艳军等^[47]对2013年6月23日大理发生雷击事件(造成1人遇难)期间的闪电定位仪、多普勒天气雷达等探测资料分析指出, 雷电灾害上空有自西向东移动的对流单体, 雷击前后约20 min有26次负地闪记录, 电流强度为-63.3~-21.2 kA。

4 观测资料应用进展

在气象预测预报应用方面, 陈红玉等^[48]利用WPR探测资料和小时降水资料, 统计分析了2008—2009年大理32次大雨、暴雨天气过程的信噪比、水平风速、垂直气流速度特征, 提出了强降雨预报的着眼点和阈值指标, 并建立了短临预报业务系统。李育等^[49]分析了2010—2012年5—6月大理GPS/PWV资料与雨季开始期的变化特征, 认为GPS/PWV变化特征对干、湿季过渡期降水预报有一定的指示作用。

在数值模式试验应用方面,杨澄等^[50]利用WRF模式耦合Noah陆面模式和CLM湖泊模式,模拟了点苍山—洱海区域的大风天气,并探讨了大风发生、发展、强盛、减弱整个过程的三维动力热力结构特征。王曼等^[51]利用WRF模式和青藏高原东缘地区18个站点的GPS/PWV资料进行了同化试验,认为GPS/PWV资料同化对初始湿度和高度场的影响较大,而对温度和风场的影响较小。许鲁君等^[52-53]利用耦合湖泊模型的WRF-CLM模式模拟了点苍山—洱海区域的局地环流特征和洱海的湖泊效应,表明模式对近地面气温、风向、风速、感热通量、潜热通量的模拟与观测基本一致,模拟结果能较好地再现区域山谷风和湖陆风相互作用的局地环流特征;非季风期湖泊对局地环流及大气边界层影响显著;季风期受降水天气系统影响,局地环流发展不充分,白天湖泊作用没有非季风期明显。

在飞机颠簸应用方面,高兵等^[54]利用2009年1—3月WPR探测资料,结合机组报告的颠簸情况,分析了飞机不同程度颠簸条件下的风切变、急流出现高度以及垂直气流速度特征,认为WPR实时探测资料可以对大理机场飞机颠簸进行有效预警、预报,保障飞机安全飞行。

5 小结和展望

综上所述,过去十年间大理观象台在综合气象观测和研究方面取得不少成果,但由于其所处区域气候背景、地形地貌、下垫面状况等因素的复杂性,所建成的大气观测设备仍不能较好地对区域大气基本状况进行全面细致的观测,缺乏高空(对流层至低平流层)大气温度、水汽、相对湿度、风速、风向、云液态水等要素的观测,限制了对大气立体、三维结构的认识和理解。另外,由于国家气候观象台顶层设计不到位,缺乏稳定的运行和管理体制,新型观测仪器没有相关备件、没有明确标定或检定机构,设备运行状态、观测数据质量方面缺少科学评估,各类观测资料没有形成统一格式的数据集,观测资料在气象预测预报、模式检验和评估等业务中的分析应用也明显不足,这些问题也影响了各套观测系统的建设效益以及国家气候观象台的长远发展。

大理观象台的未来发展,一方面要紧密围绕我国气象事业的发展需求,另一方面要牢牢把握自身特色和优势。复杂地形影响,一直以来都是制约我国天气气候预报预测准确率提升的关键科学问题,也是各类数值模式模拟预测的难点问题;而就地形影响进行深入攻关研究的重要基础,是山地地区高精度的多种类综合气候探测资料。大理观象台位于青藏高原东南

延伸区、横断山脉中段,毗邻最高海拔4122 m的点苍山,其地形条件可作为横断山脉典型南北向山地和狭长谷底的典型样本。在大理观象台的未来发展中,一是要以周边10 km×10 km范围内的山地区域为核心区,在其内部架设高密度观测网,同时布设多种垂直探测设备,特别是针对云、水汽和风的垂直探测设备,为区域水循环和复杂山地气象研究以及短时强降水、雷暴、冰雹、大风等灾害天气监测预警提供第一手的观测资料。二是加强观测仪器的日常维护管理,研究有效的数据质量控制技术,建立高质量、规范化的数据资料集,围绕区域水循环和复杂山地气象,发展多源气象信息融合同化技术,开展西南复杂地形区天气、气候模式和边界层、云物理过程参数化检验和验证,深入研究西南水汽输送通道关键区的水汽输送变化、低纬高原复杂山地天气气候变化规律及其机理、青藏高原东南延伸区地气相互作用过程等核心科学问题。

参考文献

- [1] 陈贵川,卞林根,李平,等.国家气候观象台建设观测环境问题.气象科技,2008,36(2):244-248.
- [2] 杨艳军,付志嘉,王晓滨,等.大理国家气候观象台不同观测系统的观测数据差异性分析.气象水文海洋仪器,2016,(3):13-20.
- [3] 汪文雅,郭建侠,王英舜,等.锡林浩特草原CO₂通量特征及其影响因素分析.气象科学,2015,35(1):100-107.
- [4] 谢韶,吕卫华,谢开川.气候环境变化对电白日照时数的影响.广东气象,2008,30(6):40-42.
- [5] 田红,伍琼,童应祥.安徽省寿县农田能量平衡评价.应用气象学报,2011,22(3):356-361.
- [6] 张良,李耀辉,王胜,等.张掖国家气候观象台常规气象资料检验分析.干旱气象,2010,28(1):49-53.
- [7] 孙绩华,樊风,徐安伦,等.西南季风爆发前后大理近地层风场及湍流通量的变化特征.气候与环境研究,2015,20(4):369-379.
- [8] 苏锦兰,李建,杨桂荣,等.横断山系云岭余脉点苍山东西侧小时降水特性对比分析.气象,2015,41(1):17-24.
- [9] 徐安伦,李建,孙绩华,等.青藏高原东南缘大理地区近地层微气象特征及能量交换分析.高原气象,2013,32(1):9-22.
- [10] 程建刚.序言//徐安伦,杨桂荣,孙绩华,等.大理国家气候观象台科研论文汇编.北京:气象出版社,2016.
- [11] Xu X D, Zhang R H, Koike T, et al. A new integrated observation system over the Tibetan Plateau. Bull Amer Meteor Soc, 2008, 89(10): 1492-1496.
- [12] 张人禾,徐祥德.青藏高原及东缘新一代大气综合探测系统应用平台—中日合作JICA项目.中国工程科学,2012,14(9):102-112.
- [13] 施晓晖.青藏高原东缘对流云和水汽观测试验简介.气象科技进展,2014,4(5):48-52.
- [14] 徐安伦,李建,刘辉志,等.大理国家气候观象台地面辐射观测数据的质量控制研究.高原气象,2013,32(5):1432-1441.
- [15] 董保举,张晔,徐安伦.高原地区风廓线雷达资料评估.气象科技,2009,37(5):580-583.
- [16] 董保举,张晔,徐安伦,等.风廓线雷达测风和气球测风资料对比分析.云南大学学报(自然科学版),2011,33(S1):18-25.
- [17] 徐安伦,孙绩华,李建,等.大理涌动相关观测数据的处理及质量评价研究.云南大学学报(自然科学版),2014,36(2):224-232.
- [18] 任菊章,孙绩华,李建,等.云南地区GPS探测与3类再分析可降水量的对比分析.高原气象,2014,33(6):1480-1489.
- [19] 孙绩华,吴萍,刘建宇.云南地基GPS水汽解算方案及精度检验.南京信息工程大学学报(自然科学版),2013,5(2):106-112.
- [20] 徐安伦,彭浩,董保举.大口径闪炼仪和涌动相关仪测量大气折

- 射率结构常数的比较. 高原气象, 2015, 34(4): 935-941.
- [21] 徐安伦, 李建, 彭浩, 等. 洱海湖滨农田下垫面大口径闪烁仪与涡动相关仪测量的湍流热通量对比分析. 高原气象, 2017, 36(1): 98-106.
- [22] 杨智, 刘劲松, 孙绩华. 大理近地层山谷盆地湖陆风及湍流特征分析. 气象与环境学报, 2008, 24(5): 32-37.
- [23] 徐安伦, 董保举, 刘劲松, 等. 洱海湖滨大气边界层结构及特征分析. 高原气象, 2010, 29(3): 637-644.
- [24] 徐安伦, 赵晓红, 付志嘉, 等. 洱海盆地水面与地面气象要素变化特征的比较. 大气科学学报, 2011, 34(2): 225-231.
- [25] 董保举, 李建, 孙绩华, 等. 青藏高原东南缘低层风场垂直结构与变化特征. 高原气象, 2016, 35(3): 597-607.
- [26] 董保举, 张成稳, 付志嘉, 等. 云南大理边界层风垂直变化观测研究. 干旱气象, 2011, 29(2): 189-194.
- [27] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学(第二版). 北京: 北京大学出版社, 2003: 48-50.
- [28] 徐安伦, 钟爱华, 孙绩华, 等. 大理地区对流层至低平流层大气垂直结构的特征分析. 高原气象, 2016, 35(1): 77-85.
- [29] Coen M C, Praz C, Haeefe A, et al. Determination and climatology of the planetary boundary layer height above the Swiss plateau by in situ and remote sensing measurements as well as by the COSMO-2 model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(23): 13205-13221.
- [30] 徐祥德, 王寅钧, 赵天良, 等. 高原东南缘大气近地层湍能特征与边界层动力、热力结构相关特征. 气象, 2014, 40(10): 1165-1173.
- [31] 王寅钧, 徐祥德, 赵天良, 等. 青藏高原东南缘边界层对流与湍能结构特征. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(6): 843-855.
- [32] 胡非, 洪钟祥, 雷孝恩. 大气边界层和大气环境研究进展. 大气科学, 2003, 27(4): 712-728.
- [33] 刘树华, 刘和平, 胡予, 等. 沙漠绿洲陆面物理过程和地气相互作用数值模拟. 中国科学: 地球科学, 2006, 36(11): 1037-1043.
- [34] 杨智, 刘劲松, 朱以维, 等. 云南大理干湿季近地层湍流特征对比分析. 气象科技, 2009, 37(4): 429-433.
- [35] 杨智, 刘劲松, 朱以维, 等. 云贵高原西部大理地区近地层湍流特征分析. 大气科学学报, 2010, 33(1): 117-124.
- [36] 杨智, 孙绩华, 徐安伦. 稻田CO₂和CH₄通量特征及碳平衡研究. 云南大学学报(自然科学版), 2013, 35(S2): 291-295.
- [37] Liu Huizhi, Feng Jianwu, Sun Jihua, et al. Eddy covariance measurements of water vapor and CO₂ fluxes above the Erhai Lake. *Science China: Earth Sciences*, 2015, 58(3): 317-328.
- [38] 董保举, 刘劲松, 高月忠. 基于风廓线雷达资料的暴雨天气过程分析. 气象科技, 2009, 37(4): 411-414.
- [39] 董保举, 付志嘉, 李明, 等. 风廓线雷达资料在暴雨天气过程特征分析中的应用. 气象科技, 2012, 40(1): 74-78.
- [40] 董保举, 王明栋, 刘建平, 等. 云南大理暴雨天气过程GPS大气可降水量特征分析. 云南地理环境研究, 2013, 25(5): 79-83.
- [41] 董保举, 高月忠, 张成稳, 等. 一次暴雨过程局地水汽和热力动力条件的综合观测分析. 云南大学学报(自然科学版), 2011, 33(S1): 81-85.
- [42] 董保举, 高月忠, 张丽芬. 新型探测资料在滇西北高原一次暴雨过程监测中的应用. 气象科技, 2014, 42(6): 1077-1082.
- [43] 陈红玉, 高月忠, 尹丽云, 等. 强降水过程风廓线雷达资料的极值特征. 气象科技, 2016, 44(1): 87-94.
- [44] 黄慧君, 李庆红, 钟爱华, 等. 风廓线雷达资料在强雨雪天气过程中的变化特征. 云南气象, 2015, 35(3): 9-14.
- [45] 杨澄, 付志嘉, 赵晓红. 青藏高原东南侧复杂地形下冬季大风诊断分析. 高原气象, 2014, 33(2): 346-354.
- [46] 徐安伦, 杨艳军, 孙绩华, 等. 大理地区晚霜冻灾害前后大气边界层特征分析. 气象科技, 2011, 39(4): 513-519.
- [47] 杨艳军, 徐安伦, 高月忠, 等. 大理典型山地条件下一次雷暴灾害天气分析与防御对策思考. 云南地理环境研究, 2016, 28(3): 72-76.
- [48] 陈红玉, 钟爱华, 董保举. 风廓线雷达资料在大雨、暴雨预报中的应用. 云南气象, 2010, 30(3): 20-25.
- [49] 李育, 杨桂荣. 大理2010—2012年雨季开始前后大气可降水量和水汽压变化特征. 云南气象, 2014, 34(4): 54-58.
- [50] 杨澄, 付志嘉. WRF模式对大理洱海盆地大风天气的模拟试验. 云南气象, 2016, 36(2): 4-10.
- [51] 王曼, 孙绩华, 赵韬, 等. 青藏高原东缘GPS水汽资料对暴雨模拟的影响分析. 高原山地气象研究, 2013, 33(4): 25-29.
- [52] 许鲁君, 刘辉志, 曹杰. 大理苍山-洱海局地环流的数值模拟. 大气科学, 2014, 38(6): 1198-1210.
- [53] 许鲁君, 刘辉志. 云贵高原洱海湖泊效应的数值模拟. 气象学报, 2015, 73(4): 789-802.
- [54] 高兵, 杨艳军. 风廓线雷达资料在大理机场飞机颠簸中的分析和应用. 高原山地气象研究, 2009, (增刊): 34-36.