

# 复杂山地气象观测试验研究综述

徐安伦<sup>1,2</sup> 张万诚<sup>2,3</sup> 李建<sup>2,4</sup> 谢屹然<sup>5</sup> 董保举<sup>1,2</sup> 苏锦兰<sup>1,2</sup>

(1 大理国家气候观测台, 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 云南省气象科学研究所, 昆明 650034; 4 中国气象科学研究院, 北京 100081; 5 云南省气象台, 昆明 650034)

**摘要:** 外场观测试验是研究山地气象最为直接有效的手段, 在揭示山地对大气产生的各类现象及其有关的物理过程、开发和改进数值模式参数化方案、验证和评估卫星遥感反演产品、提高山区的气象预测预报准确率等方面发挥着重要作用。简要综述了国际上在青藏高原、阿尔卑斯山脉、落基山脉、内华达山脉、比利牛斯山脉等大尺度山地开展的气象观测试验研究, 概括了近年来在低纬高原地区关于山地气象的长期监测和研究成果, 总结了国内外在复杂地形条件下外场观测和研究的发展趋势, 并展望了在复杂山地建设高密度气象观测体系的重要意义。

**关键词:** 山地气象, 复杂地形区, 外场试验, 观测研究

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.02.003

## An Overview of the Field Observation Experiments and Associated Investigation on Mountain Meteorology over Complex Terrain Region

Xu Anlun<sup>1,2</sup>, Zhang Wancheng<sup>2,3</sup>, Li Jian<sup>2,4</sup>, Xie Yiran<sup>5</sup>, Dong Baoju<sup>1,2</sup>, Su Jinlan<sup>1,2</sup>

(1 Dali National Climate Observatory, Dali 671003 2 Dali Mountain Meteorological Field Experiment Base, China

Meteorological Administration, Dali 671003 3 Yunnan Institute of Meteorological Science, Kunming 650034

4 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081 5 Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650034)

**Abstract:** Field observation experiment is the most direct and effective method to study mountain meteorology, which plays an important role in revealing the various phenomena and related physical processes in the mountains, developing and improving the parameterization schemes for numerical model, verifying and evaluating the satellite remote sensing products, and improving the accuracy of weather forecast in mountain areas. In this paper, we briefly review the renowned field observation experiments, which were conducted over the Tibetan Plateau, Alps, Rocky Mountains, Sierra Nevada, Pyrénées, and other large-scale mountain areas. We then summarize the development trend of field observation experiment and associated investigation under complex terrain conditions at home and abroad, and recent progress in mountain meteorological monitoring in low latitude plateau region. Finally, we propose the importance of constructing high density meteorological observation system in complex mountainous areas.

**Keywords:** mountain meteorology, complex terrain region, field experiment, observation and investigation

### 0 引言

全球山地面积接近0.4亿km<sup>2</sup> (图1), 大约占陆地表面的27%<sup>[1]</sup>, 居住着全球26%的人口, 产生全球32%的地表径流<sup>[2]</sup>。它们是由多种地貌形态要素有机组合及其斜坡环境效应与相应多种生态系统类型相耦合的一种特殊地域类型<sup>[3-4]</sup>, 其最基本的特征是拥有较大的相对高度和较陡的坡度并有岭谷的组合。陆地上各种

山地地形, 如大尺度的青藏高原和落基山脉、中尺度的太行山脉、小尺度的南方山丘, 以其不同的高度、尺度、坡度和几何形态对大气运动产生各种动力、热力效应<sup>[5]</sup>, 直接或间接影响着局地、区域乃至全球的大气环流、天气气候、人类活动和经济社会发展等。

山区海拔高度差异较大、下垫面植被分布不均、气象站代表区域有限、常规观测设备不易在极端天气条件下运行、安装和维护设备较平原地区困难、不易在山区开展标准化天气观测以及地形效应的错综复杂性等多方面原因, 山区特别是高海拔地区的气象站点稀少、观测资料缺乏, 人们对山地天气和气候的认识仍非常有限<sup>[6-7]</sup>。然而, 在全球气候变暖的背景下, 高原山地地区的天气气候变化显示出了异常敏感性<sup>[8-10]</sup>,

收稿日期: 2021年1月4日; 修回日期: 2021年2月23日

第一作者: 徐安伦 (1981—), Email: xualun@126.com

通信作者: 张万诚 (1965—), Email: wanzhangcheng@163.com

资助信息: 国家自然科学基金项目 (41765003); 中国气象局2020年省所科技创新发展专项; 中国气象科学研究院基本科研业务费重点项目 (2020Z006)

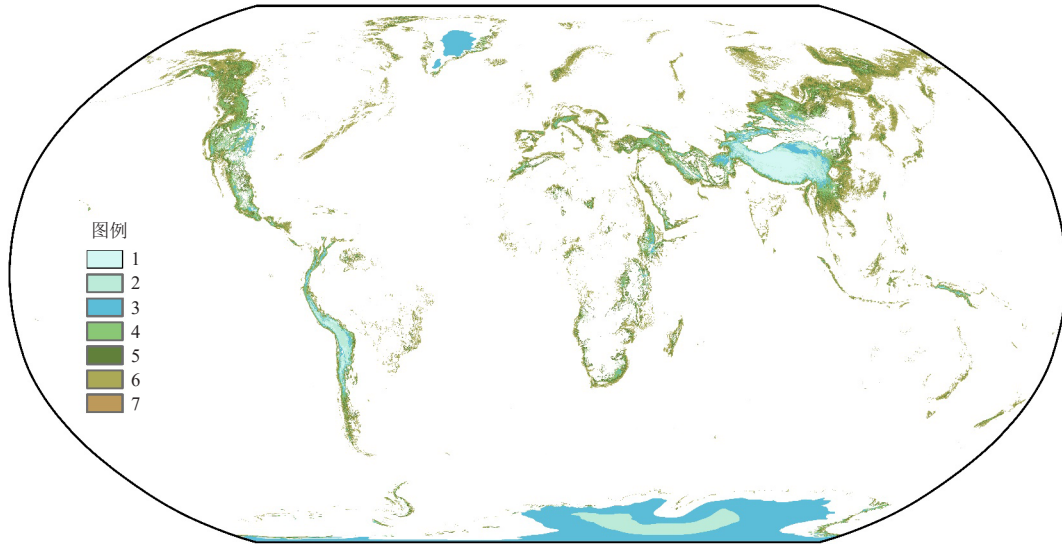


图1 全球山地分布示意图(图中山地类型是根据海拔和坡度的标准进行划分,类型1为海拔>4500 m,2为海拔3500~4500 m,3为海拔2500~3500 m,4为海拔1500~2500 m和坡度 $\geq 2^\circ$ ,5为海拔1000~1500 m和坡度 $\geq 5^\circ$ ,6为海拔300~1000 m和局地7 km半径范围的海拔>300 m,7为内部独立的盆地/平原面积<25 km<sup>2</sup>)

Fig. 1 Distribution of the global mountain areas (Mountain classes in the figure is based on elevation and slope. The class 1 is under elevation > 4500 m. Class 2 is under elevation 3500—4500 m. Class 3 is under elevation 2500—3500 m. Class 4 is under elevation 1500—2500 m and slope  $\geq 2^\circ$ . Class 5 is under elevation 1000—1500 m slope  $\geq 5^\circ$ . Class 6 is under elevation 300—1000 m and local elevation range with 7 km radius > 300 m. Class 7 is under isolated inner basins and plateaus < 25 km<sup>2</sup>)

被国际学术界视为全球变化的前哨<sup>[11]</sup>。同时,从短期天气预报上看,山区极易发生灾害性气象事件,比如暴风雪、强对流、山洪泥石流、大风、森林野火,冷池造成的空气污染等。其中突出的灾害是山地短时强降水,因为短时强降水可以在短时间内迅速形成暴雨,引发滑坡、泥石流、山洪、城市内涝等灾害,从而造成重大经济损失和人员伤亡。

山地短时强降水其突发性强、时空尺度较小,一直是天气预报业务的难点,山地区域的预报水平亟需提高<sup>[12]</sup>。由于地形复杂、观测资料相对匮乏及模式技术的局限,数值模式对山地区域的预报能力普遍低于我国其他地区<sup>[13-14]</sup>。因此,开展山地精细化各类要素的外场观测试验是山地天气气候特征的掌握,山区强降水预报水平的提高,数值模式物理过程参数化方案的改进和卫星遥感反演产品的验证基础,观测资料的获取是开展以上研究的前提条件。本文概括了科学家们在一些大型山脉地区开展的气象观测试验和相关研究进展,总结了在低纬高原地区开展的山地气象观测和研究成果,以及概括了开展外场观测存在的问题和未来发展趋势,以期复杂地形条件下开展观测试验研究提供参考。

## 1 研究进展

外场观测试验是研究山地气象最为重要的手段之一。国际上从20世纪50年代起就在一些著名的山脉地

区开展了许多重要的外场试验和研究计划(表1<sup>[15-52]</sup>),并针对山地热量交换、辐射平衡、水分循环、大气结构、地形云、地形降水、地形湍流、地形波拖曳、焚风效应、上(下)坡流、进(出)谷流、山地—平原(盆地)流、峡谷急流、障碍急流、尾流、冷池、山脉波动、大气转子、重力波、空气污染扩散等方面作了大量的观测分析、理论研究和数值模拟工作。例如,1951—1952年、1955年在美国内华达山脉地区开展了地形波项目<sup>[31]</sup>,重点观测和研究山脉波动和背风波现象。2004年、2006年又在该地区开展了地形波转子试验(SRP2004、T-REX,如图2的机载平台观测)<sup>[32]</sup>,深入研究了决定大气转子耦合系统动力和结构的上游气流特征、地形波与转子的动力相互作用、内部转子结构、转子与边界层的相互作用、低层重力波破碎和湍流,提高对地形波、大气转子和边界层耦合系统的理解和预测能力。1981年9月—1982年10月,就阿尔卑斯山脉及其周边气流问题(如背风波气旋生成、山脉波动和下坡风、大气湍流输送等)开展了阿尔卑斯山试验(ALPEX)<sup>[23]</sup>。1999年9—10月在阿尔卑斯山脉地区开展了中尺度观测项目(MAP)<sup>[24]</sup>,实施了地形降水机制、对流层上部位势涡度的异常特性、水文测量和洪水预测、峡谷流动力学特征、大型山谷焚风的非稳定性、重力波破碎、高山尾流的三维结构和陡峭地形的行星边界层结构8个科学项目。2011年8月在阿

表1 山地气象外场观测试验/项目<sup>[15-52]</sup>  
Table 1 Field observation experiments/projects for the mountain meteorology<sup>[15-52]</sup>

位置	名称	时间
青藏高原	第一次青藏高原气象科学试验 (QXPMEEX) <sup>[15]</sup>	1979年5—8月
	第二次青藏高原大气科学试验 (TIPEX) <sup>[16]</sup>	1998年5—8月
	中日气象灾害合作研究JICA项目 (JICA/Tibet Project) <sup>[17-18]</sup>	2005年8月—2009年6月
	第三次青藏高原大气科学试验 (TIPEX-III) <sup>[19-20]</sup>	2014年至今
祁连山	祁连山夏季地形云综合探测试验 <sup>[21]</sup>	2006/2007年7—8月
台湾	台湾地区中尺度试验 (TAMEX) <sup>[22]</sup>	1987年5—6月
阿尔卑斯山脉	阿尔卑斯山试验 (ALPEX) <sup>[23]</sup>	1981年9月—1982年10月
	阿尔卑斯山中尺度观测项目 (MAP) <sup>[24]</sup>	1999年9—10月
	因斯布鲁克博克斯项目 (i-Box) <sup>[25]</sup>	2011年8月至今
比利牛斯山脉	比利牛斯山试验 (PYREX) <sup>[26]</sup>	1990年10—12月
	塞尔达尼亚2017外场试验 <sup>[27]</sup>	2016年10月—2017年5月
德国西南部/法国东部	对流和地形降水研究 (COPS) <sup>[28]</sup>	2007年7—8月
英国中部山区和西南半岛	冷池试验 (COLPEX) <sup>[29]</sup>	2009年1月—2010年4月
	对流降水试验 (COPE) <sup>[30]</sup>	2013年7—8月
内华达山脉	内华达地形波项目 <sup>[31]</sup>	1951—1952年、1955年
	内华达大气转子试验 (SRP2004, T-REX) <sup>[32]</sup>	2004年3—4月、2006年3—4月
落基山脉	科罗拉多背风波项目 <sup>[33-35]</sup>	1968年2—3月、1970年2—3月
	山地碳观测试验 (CME04) <sup>[36]</sup>	2004年6—10月
夏威夷大岛	夏威夷雨带项目 (HaRP) <sup>[37]</sup>	1990年7—8月
加利福尼亚沿海山脉	加利福尼亚登陆急流试验 (CALJET) <sup>[38-39]</sup>	1997/1998年冬季
喀斯喀特山脉	通过观测验证改进微物理参数化试验 (IMPROVE) <sup>[40]</sup>	2001年1—2月、11—12月
圣卡塔琳娜山	积云摄像和多普勒观测试验 (CuPIDO) <sup>[41]</sup>	2006年7—8月
亚利桑那陨石坑	陨石坑试验 (METCRAX-I, II) <sup>[42-43]</sup>	2006年10月、2013年10月
犹他州盐湖谷	垂直输送和混合试验 (VTMX) <sup>[44]</sup>	2000年10月
	持续性冷池研究 (PCAPS) <sup>[45]</sup>	2010年12月—2011年2月
奥林匹克山脉	奥林匹克山试验 (OLYMPEX) <sup>[46]</sup>	2015年11月—2016年2月
美国陆军达格韦试验场	山地地形大气模拟和观测项目 (MATERHORN) <sup>[47]</sup>	2011年6月—2016年5月
多米尼克	多米尼克试验 (DOMEX) <sup>[48]</sup>	2011年4—5月
	南阿尔卑斯山试验 (SALPEX) <sup>[49]</sup>	1993—1995年
新西兰	特卡波湖试验 (LTEX) <sup>[50]</sup>	1997年10月—1999年3月
	深传输重力波试验 (DEEPWAVE) <sup>[51]</sup>	2014年5—7月
纳胡尔布塔山脉	智利沿海地形降水试验 (CCOPE) <sup>[52]</sup>	2015年5—8月

尔卑斯山脉地区的因河山谷建立了复杂地形湍流交换过程的长期观测网<sup>[25]</sup>。1993—1995年在新西兰的南阿尔卑斯山开展了大型外场试验SALPEX<sup>[49]</sup>。Mcgowan等<sup>[53]</sup>根据实测资料,分析了南阿尔卑斯山东部湖风的热力特征和时间变化,发现周围的山脉为湖盆阻挡了大多数的天气风,从而使局地 and 区域产生的热力环流发展到山脊高度(大约1300 m)。2011年6月—2016年5月在美国陆军达格韦试验场持续开展了山地地形大气模拟和观测项目(MATERHORN)<sup>[47]</sup>,项目围绕高分辨率观测、近地面层物理过程(图3)、地表和浅层土壤属性、边界层参数化、数据同化、中尺度模式的高分辨率模拟等方面进行,取得了大量的研究成果。2014年5—7月在新西兰开展了深传输重力波试验(DEEPWAVE)<sup>[51]</sup>,对重力波的生成、传输、动量

通量、不稳定性等进行详细观测和模拟分析。2015年11月—2016年2月在美国奥林匹克山脉地区开展了奥林匹克山试验(OLYMPEX)<sup>[54]</sup>,主要验证和评估了全球降水观测(GPM)卫星反演产品,改进算法,提高GPM卫星对雨和雪的观测能力,研究降水物理学和动力学如何影响卫星雷达测量,研究地形对降水过程的影响,同时拓展卫星产品的应用范畴。2016年10月—2017年5月在法国和西班牙边界的比利牛斯山脉地区开展了塞尔达尼亚2017外场试验<sup>[27]</sup>,其目标是研究稳定条件下冷池的形成、局地风环流以及地形波、大气转子、低空湍流、地形对降水过程的影响。Uccellini<sup>[55]</sup>、Sharman<sup>[56]</sup>研究表明惯性重力波在中尺度系统中有着非常重要的作用,能引起大风、冰雹、暴雨等灾害性天气。Tuleya<sup>[57]</sup>使用地球物理流体动力学

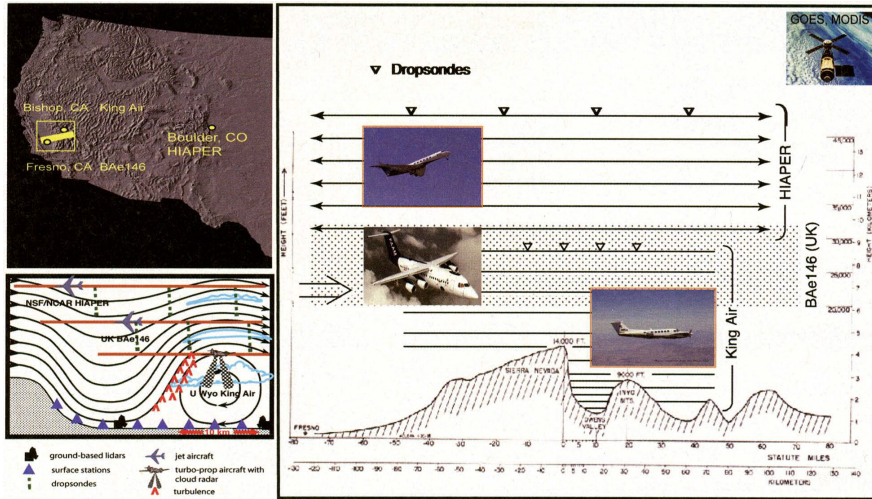


图2 地形波转子试验 (T-REX) 机载平台观测综合图<sup>[32]</sup>

Fig. 2 Composite image of the Terrain-Induced Rotor Experiment (T-REX) airborne platforms<sup>[32]</sup>

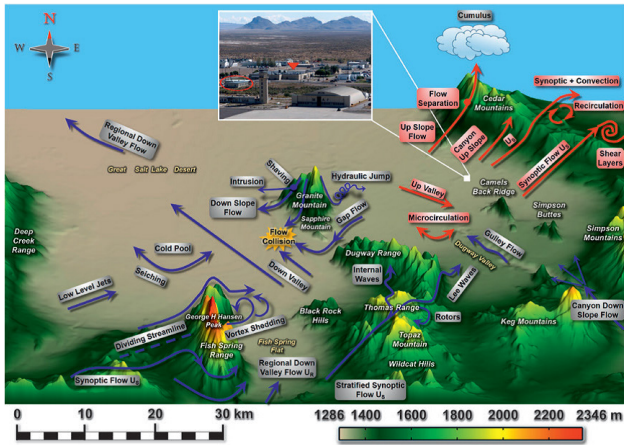


图3 美国陆军达格韦试验场复杂地形下的物理过程<sup>[47]</sup>

Fig. 3 Physical processes in complex terrain of the U.S. Army Dugway Proving Ground<sup>[47]</sup>

实验室 (GFDL) 热带气旋模式开展了风暴发展过程中的地形敏感性试验, 结果表明地表粗糙度和相对湿度的降低的确能加速风暴的减弱。Ward等<sup>[58]</sup>对复杂地形下的雨量筒实测值和再分析资料、卫星遥感的降水产品进行了评估。这些观测试验和研究计划不仅积累了大量宝贵的第一手资料, 为天气尺度和中小尺度山地气象学研究、模式参数化方案开发与改进、卫星遥感反演的验证与评估等提供数据支撑, 而且揭示了山地对大气产生的影响及其有关的大气物理过程, 丰富了人们对山地气象的认识和了解, 促进了山地气象学的快速发展。

国内在山地气象观测方面, 主要围绕青藏高原及其周边地区开展了许多在国际上比较具有影响力的大气科学试验。为研究青藏高原天气气候、地表辐射和热量收支以及高原热动力效应对东亚大气环流影

响, 1979年5—8月中国科学院和中央气象局开展了第一次青藏高原气象科学试验 (QXPMEEX)<sup>[15]</sup>。为揭示青藏高原陆—气物理过程和大气边界层结构等, 1998年5—8月中国气象局和中国科学院开展了第二次青藏高原大气科学试验 (TIPEX)<sup>[16]</sup>, 1998年5—9月中日科学家开展了全球水分能量循环亚洲季风试验—青藏高原陆面物理过程研究<sup>[59]</sup>, 2002—2004年中国科学院开展了高原中部的加强期观测试验<sup>[60]</sup>。为认识青藏高原陆—气相互作用过程及其对东亚以东地区极端天气气候的影响等, 2006—2009年中日科学家联合开展了中日气象灾害合作研究JICA项目, 在青藏高原及周边地区建立了新一代综合气象观测系统, 特别是对水汽的观测<sup>[17-18]</sup>。为深入研究青藏高原陆—气相互作用特征以及发展陆面—大气耦合模式系统提供基础数据, 中国气象局、国家自然科学基金委员会和中国科学院于2014年正式启动了第三次青藏高原大气科学试验 (TIPEX-III)<sup>[19-20]</sup>, 实现了对青藏高原陆面、边界层、对流层和平流层相互作用过程的地基、空基和天基观测 (图4)<sup>[61]</sup>。这些大气科学试验的实施, 取得了大量宝贵的第一手资料和许多重要的科研成果<sup>[62-66]</sup>, 并推动了高原气象学的高质量发展。

国内在山地气象研究方面, 主要集中在山地天气和气候特征、山地对大气和大气环流的热力和动力作用、山地对天气和气候变化的影响等<sup>[67]</sup>。例如, 高登义<sup>[67]</sup>利用我国高山地区的科学考察资料, 系统研究了喜马拉雅山脉、天山山脉和横断山脉地区的地气热量交换和大气冷热源特征, 揭示了大气环流变化对山地与大气之间相互作用的影响等。王宇<sup>[68]</sup>分析研究了云南境内的白马雪山、高黎贡山和哀牢山的垂直气候特

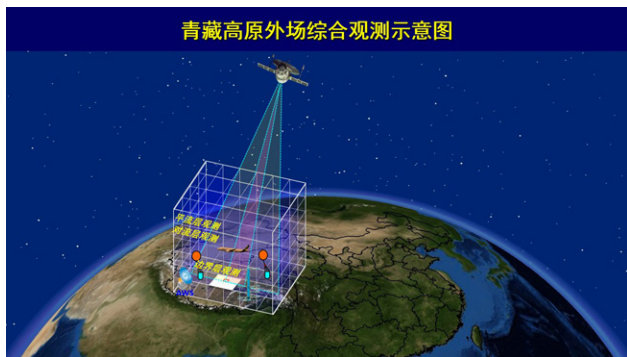


图4 第三次青藏高原大气科学试验外场观测示意图<sup>[61]</sup>

Fig. 4 Schematic diagram of the field observations of the Third Tibetan Plateau Atmospheric Science Experiment<sup>[61]</sup>

征。周明煜等<sup>[69]</sup>利用第二次青藏高原大气科学试验观测数据,分析研究了青藏高原大气边界层热力和动力特征以及地-气过程综合物理图像等。徐祥德等<sup>[70]</sup>从青藏高原对东亚、全球天气气候影响的视角,提出了青藏高原大气水分循环机制,剖析了青藏高原作为耸立在地球大气对流层中部的“中空热岛”的动力、热力结构特征等。

位于我国西南部的低纬高原地区,具有独特的山地环境和气候条件,是开展山地气象外场观测试验研究的天然理想场所。2004年、2006年先后在该地区的香格里拉和大理建立复杂山地综合观测。香格里拉大气本底观测站主要围绕大气本底观测作为气候系统监测的重要分支,不仅为气候变化研究、气候系统监测和影响评估以及卫星遥感探测体系的验证提供第一手观测资料,而且可以为生态环境保护恢复工程、大气污染防治、环境气象预报和服务的相关业务和科研提供宝贵的第一手观测资料。在气候变化模式研究、未来的先进天气气候预报预测技术乃至化学天气预报业务的发展中,大气本底观测将提供不可或缺的温室气体、气溶胶、反应性气体等大气化学组成及其相关物理特性长期变化客观资料,为相关大气化学过程模式的研发、验证和业务运行服务提供必要的基础支撑。目前已开展温室气体、气溶胶、反应性气体、臭氧等监测及分析。田永丽等<sup>[71]</sup>基于卫星遥感产品和太阳光度计观测资料,分析表明我国西南地区气溶胶光学厚度(AOD)全年呈现西高东低的分布特征,成都地区AOD日变化呈准双峰型,而香格里拉AOD日变化呈逐渐增大趋势。李邹等<sup>[72]</sup>、Ma等<sup>[73]</sup>基于地面O<sub>3</sub>和CO观测资料,O<sub>3</sub>和CO均在春季出现最大值,而最小值分别出现在夏季和冬季。O<sub>3</sub>向下输送的季节变化与平流层向对流层输送以及副热带急流的季节变化相一致。

大理主要采用“一台多点”的布局,以苍山洱海

为中小尺度复杂地形的典型代表,除基准气候、农业气象观测外,在洱海东岸、苍山山顶及其东西两侧不同海拔高度建成典型山地剖面观测系统,在洱海北部、中部和南部近岸水域建成生态气象观测系统,环洱海周边布设自动气象站和多普勒天气雷达,在大理国家气候观象台观测试验场(代表洱海湖滨农田下垫面)建成边界层风(温)廓线雷达、20米边界层铁塔通量观测系统、地基GPS水汽监测系统、地面基准辐射站、双波长(红外波和微波)闪烁仪、闪电定位仪、大气电场仪、单点和区域尺度土壤水分自动观测系统、Ka波段云雷达、微波辐射计等先进探测设备,组成了一个复杂地形环境下的山地气象综合观测体系(图5),覆盖了从地面、水面到高空大气物理参数的立体、三维监测<sup>[74-75]</sup>。目前,基于已有观测基础,针对云南低纬高原的地形地貌特点(以大理的复杂地形、水体为代表),围绕复杂山地对大气影响的关键科学问题,开展复杂地形区气象要素高时空分辨率监测及精细化特征研究,初步揭示了复杂山地天气气候变化规律及其形成机理<sup>[76-88]</sup>;围绕青藏高原大气热源敏感区的核心科学问题,开展非绝热加热监测及其对周边天气气候的影响研究,初步揭示了陆一气和湖一气交换过程的关键参数变化规律<sup>[89-95]</sup>;针对云南低纬高原地理位置特点,围绕季风水汽输送关键区的核心科学问题,开展西南季风水汽输送关键区水汽监测及其变化特征研究,揭示水汽变化和水分循环对区域及下游地区的影响<sup>[96-98]</sup>;针对大理及周边的陆地生态系统,围绕生态文明建设气象保障服务需求,按照“山水林田湖草是一个生命共同体”理念,将山地—湖体—湖滨融为一体,开展区域生态气象监测及服务,研究气象条件对洱海水生态环境的影响等,为生态文明建设气象保障服务提供理论和技术支持。

## 2 存在的主要问题及未来发展趋势

国内外在山地气象观测试验设计和有效组织方面,以往的许多试验主要集中在加强期(如夏季、冬季等)进行特种观测,没有进行多年长时间的连续观测,难以揭示山地气象各要素的季节、年际、年代际等时间尺度的变化特征,部分观测试验的科学问题和设计思路不够清晰,组织实施也不够有力。未来的观测试验将会强化组织管理,更加关注试验设计和有效实施,多部门联合在山地环境针对不同的科学问题进行加强期观测、特种观测和长期连续观测。山区断面不同海拔高度的降水、气温、辐射等要素的垂直梯度变化,非均匀下垫面与大气间的能量、水分、CO<sub>2</sub>交换以及大气垂直结构、地形重力波、云雨微物理过程

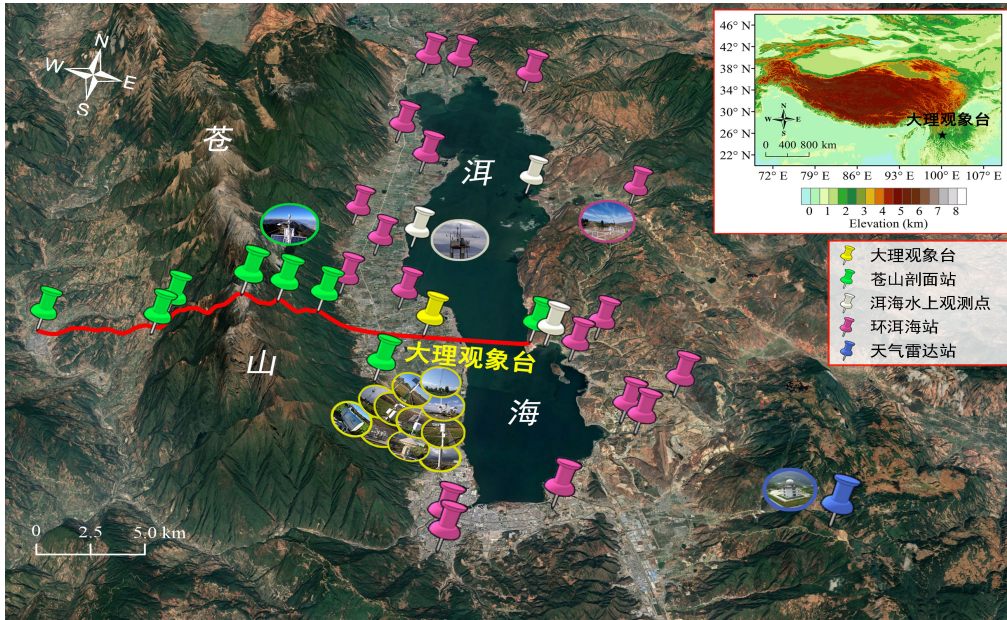


图5 大理国家气候气象台综合气象观测网 (地图引自Google Earth)

Fig. 5 Integrated meteorological observation network at Dali National Climate Observatory (map from Google Earth)

等仍然是未来山地外场试验设计的重点观测对象。

而山地气象观测的空间布局和设备架设,也是未来观测试验中需要重点关注的问题之一。选取具有代表性的复杂地形,架设高密度的山地气象剖面观测、地表辐射、大气成分、地基遥感垂直廓线(如风、温度、水汽、水凝物、气溶胶、臭氧等)和不同空间尺度的感热潜热通量观测等设备,结合飞机、无人机、直升机、探空气球、热气球、系留汽艇、卫星等观测平台,形成天—地—空一体化的观测格局,开展长期稳定的立体、综合观测,获取多次层(如陆地表层、近地层、边界层、对流层、平流层等)、多尺度(如微尺度、小尺度、中尺度、天气尺度等)、多要素(如湍流通量、气溶胶、云、降水粒子、闪电和常规气象参数等)以及高分辨率、长序列的山地气象监测资料,对推动山地气象学学科的发展以及认识山地地区天气气候特征、复杂地形对大气的影响等具有重大意义。

在山地气象观测资料积累和分析应用方面,由于山区环境条件恶劣,观测设备性能要求高,可靠、长期、连续的实测资料比较缺乏,加之地形效应的错综复杂性,近年来山地气象相关的科学研究进展缓慢,特别是要提高山区的气象预测预报准确率比较困难。除加大对山地气象观测研究的资金投入外,还要增加山地监测设备的布点以及观测站点的加密观测,使观测资料不断补充和完善,加强资料处理和质量控制,积累高质量、标准化的山地气象外场观测资料集。重视山地气象的观测事实分析和基础理论研究,尤其要

重点研究地形对降水的触发和影响机制。同时利用常规和非常规大气探测资料以及现代理论和先进技术(如大数据分析、机器学习、大涡模拟技术等),借助高分辨率数值模式进行模拟分析,加强山地天气气候研究,丰富山地天气气候的分析预报方法,高质量推进山地气象业务化和服务工作<sup>[11]</sup>。

#### 参考文献

- [1] Körner C, Ohsawa M, Spehn E, et al. Mountain systems. In: Hassan R et al. Ecosystems and human well-being: current state and trends. Island Press, Washington DC, 2005, 681-715.
- [2] Meybeck M, Green P, Vörösmarty C. A new typology for mountains and other relief classes: An application to global continental water resources and population distribution. Mountain Research and Development, 2001, 21(1): 34-45.
- [3] 钟祥浩. 20年来中国山地研究回顾与新世纪展望——纪念《山地学报》(原《山地研究》)创刊20周年. 山地学报, 2002, 20(6): 646-659.
- [4] 钟祥浩, 刘淑珍. 中国山地分类研究. 山地学报, 2014, 32(2): 129-140.
- [5] 黄菊梅, 邹用昌, 赵光平, 等. 中小尺度地形对降水影响研究. 人民长江, 2013, 44(z1): 28-31.
- [6] Barry R G. Mountain Weather and Climate. Boulder: Cambridge University Press, 2017.
- [7] Lehner M, Rotach M W. Current challenges in understanding and predicting transport and exchange in the atmosphere over mountainous terrain. Atmosphere, 2018, 9: 276.
- [8] 丁一汇, 张莉. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较. 大气科学, 2008, 32(4): 794-805.
- [9] 朱文琴, 陈隆勋, 周自江. 现代青藏高原气候变化的几个特征. 中国科学(地球科学), 2001, 31(z1): 327-334.
- [10] 陈艳, 段旭, 董文杰, 等. 云南不同气候带极端气温变化趋势. 气象科技, 2013, 41(1): 126-130.
- [11] 李国平. 近25年来中国山地气象研究进展. 气象科技进展, 2016, 6(3): 115-122.
- [12] Chow F K, De Wekker S F J, Snyder B J. Mountain weather research and forecasting: recent progress and current challenges.

- New York: Springer, 2013.
- [13] 官宇, 代刊, 徐琚, 等. GRAPES-GFS模式暴雨预报天气学检验特征. *气象*, 2018, 44(9): 1148-1159.
  - [14] 肖玉华, 康岚, 徐琳娜, 等. 西南区域中尺度数值模式预报性能及其与天气过程关系初探. *气象*, 2013, 39(10): 1257-1264.
  - [15] Tao S Y, Luo S W, Zhang H C. The Qinghai-Xizang Plateau Meteorological Experiment (QXPME) May-August 1979. In: Xu Y G (Ed). *Proceedings of international symposium on the Qinghai-Xizang Plateau and Mountain Meteorology*, Science Press: Beijing, China, American Meteorological Society: Boston, MA, USA, 1986, 3-13.
  - [16] 周明煜, 徐祥德, 卞林根, 等. 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究. 北京: 气象出版社, 2000.
  - [17] Xu X D, Zhang R H, Koike T, et al. A new integrated observational system over the Tibetan Plateau. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, 89(10): 1492-1496.
  - [18] Zhang R H, Koike T, Xu X D, et al. A China-Japan cooperative JICA atmospheric observing network over the Tibetan Plateau (JICA/Tibet Project): an overview. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2012, 90(C): 1-16.
  - [19] Zhao P, Xu X D, Chen F, et al. The third atmospheric scientific experiment for understanding the earth-atmosphere coupled system over the Tibetan Plateau and its effects. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018, 99(4): 757-776.
  - [20] Zhao P, Li Y Q, Guo X L, et al. The Tibetan Plateau surface-atmosphere coupling system and its weather and climate effects: The Third Tibetan Plateau Atmospheric Science Experiment. *Journal of Meteorological Research*, 2019, 33(3), 375-399.
  - [21] 郑国光, 陈跃, 陈添宇, 等. 祁连山夏季地形云综合探测试验. *地球科学进展*, 2011, 26(10): 1057-1070.
  - [22] Kuo Y H, Chen G T J. The Taiwan Area Mesoscale Experiment (TAMEX): An overview. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1990, 71(4): 488-503.
  - [23] Kuettner J P, O'Neill T H. ALPEX: the GARP mountain subprogram. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1981, 62(6): 793-805.
  - [24] Bougeault P, Binder B, Buzzi A, et al. The MAP Special Observing Period. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(3): 433-462.
  - [25] Rotach M W, Stiperski I, Fuhrer O, et al. Investigating exchange processes over complex topography: the Innsbruck box (i-Box). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(4): 787-805.
  - [26] Bougeault P, Benech B, Bessemoulin P, et al. PYREX: a summary of findings. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(4): 637-650.
  - [27] Udina M, Bech J, Gonzalez S, et al. Multi-sensor observations of an elevated rotor during a mountain wave event in the Eastern Pyrenees. *Atmospheric Research*, 2020, 234: 104698.
  - [28] Wulfmeyer V, Behrendt A, Kottmeier C, et al. The Convective and Orographically-induced Precipitation Study (COPS): the scientific strategy, the field phase, and research highlights. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137: 3-30.
  - [29] Price J D, Vosper S, Brown A, et al. COLPEX: field and numerical studies over a region of small hills. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, 92(12): 1636-1650.
  - [30] Leon D C, French J R, Lasher-Trapp S, et al. The Convective Precipitation Experiment (COPE): investigating the origins of heavy precipitation in the southwestern United Kingdom. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016, 97(6): 1003-1020.
  - [31] Grubišić V, Lewis J. Sierra wave project revisited: 50 years later. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, 85(8): 1127-1142.
  - [32] Grubišić V, Doyle J D, Kuettner J, et al. The terrain-induced rotor experiment: a field campaign overview including observational highlights. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, 89(10): 1513-1533.
  - [33] Lilly D K, Toutenhoofd W. The Colorado Lee Wave Program. In: Pao Y H, et al. *Clear Air Turbulence and Detection*. New York: Plenum Press, 1969: 232-245.
  - [34] Lilly D K. Observations of mountain-induced turbulence. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76(27): 6585-6588.
  - [35] Lilly D K, Kennedy P J. Observations of a stationary mountain wave and its associated momentum flux and energy dissipation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1973, 30(6): 1135-1152.
  - [36] Sun J L, Oncley S P, Burns S P, et al. A multi-scale and multidisciplinary investigation of ecosystem-atmosphere CO<sub>2</sub> exchange over the Rocky Mountains of Colorado. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, 91(2): 209-230.
  - [37] Austin G R, Rauber R M, Ochs H T, et al. Trade-wind clouds and Hawaiian rainbands. *Monthly Weather Review*, 1996, 124(10): 2126-2151.
  - [38] Neiman P J, Ralph F M, White A B, et al. The statistical relationship between upslope flow and rainfall in California's Coastal Mountains: Observations during CALJET. *Monthly Weather Review*, 2002, 130(6): 1468-1492.
  - [39] Neiman P J, Persson P G, Ralph F M, et al. Modification of fronts and precipitation by coastal blocking during an intense landfalling winter storm in southern California: Observations during CALJET. *Monthly Weather Review*, 2004, 132(1): 242-273.
  - [40] Stoeelinga M T, Hobbs P V, Mass CF, et al. Improvement of Microphysical Parameterization through Observational Verification Experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, 84(12): 1807-1826.
  - [41] Damiani R, Zehnder J, Geerts B, et al. The Cumulus, Photogrammetric, In Situ, and Doppler Observations Experiment of 2006. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, 89(1): 57-74.
  - [42] Whiteman C D, Muschinski A, Zhong S, et al. METCRAX 2006: Meteorological Experiments in Arizona's Meteor Crater. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, 89(11): 1665-1680.
  - [43] Lehner M, Whiteman C D, Hoch S W, et al. The METCRAX II Field Experiment: a study of downslope windstorm-type flows in Arizona's meteor crater. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016, 97(2): 217-235.
  - [44] Doran J C, Fast J D, Horel J. The VTMX 2000 Campaign. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83(4): 537-554.
  - [45] Lareau N P, Crosman E, Whiteman C D, et al. The Persistent Cold-Air Pool Study. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(1): 51-63.
  - [46] Houze R A, McMurdie L A, Petersen W A, et al. The Olympic Mountains Experiment (OLYMPEX). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(10): 2167-2188.
  - [47] Fernando H J S, Pardyjak E R, Sabatino S, et al. The MATERHORN: unraveling the intricacies of mountain weather. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, 96(11): 1945-1967.
  - [48] Smith R B, Minder J R, Nugent A D, et al. Orographic precipitation in the tropics: The Dominica Experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(10): 1567-1579.
  - [49] Wratt D S, Ridley R N, Sinclair M R, et al. The New Zealand Southern Alps Experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(4): 683-692.
  - [50] Sturman A P, Bradley S, Drummond P, et al. The Lake Tekapo Experiment (LTEX): an investigation of atmospheric boundary layer processes in complex terrain. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, 84(3): 371-380.
  - [51] Fritts D C, Smith R B, Taylor M J, et al. The deep propagating gravity wave experiment (DEEPWAVE): an airborne and ground-based exploration of gravity wave propagation and effects from their sources throughout the lower and middle atmosphere. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016, 97(3): 425-453.
  - [52] Massmann A K, Minder J R, Garreaud R D, et al. The Chilean Coastal Orographic Precipitation Experiment: observing the influence of microphysical rain regimes on coastal orographic precipitation. *Journal of Hydrometeorology*, 2017, 18(10): 2713-2743.
  - [53] Mcgowan H A, Owens I F, Sturman A P. Thermal and dynamic characteristics of alpine lake breezes, Lake Tekapo, New Zealand. *Boundary-Layer Meteorology*, 1995, 76: 3-24.

- [54] Houze R A, McMurdie L A, Petersen W A, et al. The Olympic Mountains Experiment (OLYMPEX). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(10): 2167-2188.
- [55] Uccellini L W, Koch S E. The synoptic setting and possible energy sources form mesoscale wave disturbances. *Monthly Weather Review*, 1987, 115(3): 721-729.
- [56] Sharman R D, Wurtele M G. Three-dimensional structure of forced gravity waves and lee waves. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2004, 61(6): 664-681.
- [57] Tuleya R E. Tropical storm development and decay: Sensitivity to surface boundary conditions. *Monthly Weather Review*, 1994, 122(2): 291-304.
- [58] Ward E, Buytaert W, Peaver L, et al. Evaluation of precipitation products over complex mountainous terrain: A water resources perspective. *Advance in Water Resources*, 2011, 34(10): 1222-1231.
- [59] 王介民. 陆面过程实验和地气相互作用研究——从HEIFE到IMGRASS和GAME-Tibet/TIPEX. *高原气象*, 1999, 18(3): 280-294.
- [60] Ma Y M, Kang S C, Zhu L P, et al. Tibetan observation and research platform atmosphere-land interaction over a heterogeneous landscape. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, 89(10): 1487-1492.
- [61] 赵晓妮, 杨蕾, 张岳. 第三次青藏高原大气科学试验——边界层与对流层观测项目: 在地球最高处勾画大气图景. 北京: 中国气象局, 2020, [http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxw/2011xqxw/202006/t20200629\\_557024.html](http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxw/2011xqxw/202006/t20200629_557024.html).
- [62] Xu X D, Lu C G, Shi X H, et al. World water tower: an atmospheric perspective. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: L20815.
- [63] 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.
- [64] 徐祥德, 赵天良, 施晓晖, 等. 青藏高原热力强迫对中国东部降水和水汽输送的调制作用. *气象学报*, 2015, 73(1): 20-35.
- [65] 许鲁君, 刘辉志, 徐祥德, 等. WRF模式对青藏高原那曲地区大气边界层模拟适用性研究. *气象学报*, 2018, 76(6): 125-137.
- [66] 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.
- [67] 高登义. *中国山地环境气象学*. 郑州: 河南科学技术出版社, 2005.
- [68] 王宇. *云南山地气候*. 昆明: 云南科技出版社, 2006.
- [69] 周明煜, 徐祥德, 卞林根, 等. 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究. 北京: 气象出版社, 2000.
- [70] 徐祥德, 赵天良, 陆春谷, 等. 青藏高原影响与动力学机制探讨. 北京: 气象出版社, 2015.
- [71] 田永丽, 张万诚, 陈新梅, 等. 中国西南地区气溶胶光学厚度的时空特征. *气象科学*, 2010, 30(6): 785-790.
- [72] 李邹, 林立伟, 徐晓斌, 等. 香格里拉区域大气本底站地面臭氧浓度的变化特征. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(8): 1412-1417.
- [73] Ma J, Lin W L, Zheng X D, et al. Influence of air mass downward transport on the variability of surface ozone at Xianggelila Regional Atmosphere Background Station, southwest China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14: 5311-5325.
- [74] 徐安伦, 李建. 大理国家气候观测台综合气象观测和研究. *气象科技进展*, 2017, 7(5): 8-14.
- [75] Xu A L, Li J. An overview of the integrated meteorological observations in complex terrain region at Dali National Climate Observatory, China. *Atmosphere*, 2020, 11: 279.
- [76] 徐安伦, 李育, 杨帆, 等. 连年干旱背景下洱海流域降水的精细化特征. *高原气象*, 2017, 36(6): 1557-1566.
- [77] Xue H L, Li J, Qian T T, et al. A 100-m-scale modeling study of a gale event on the lee side of a long narrow mountain. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2020, 59(1): 23-45.
- [78] 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.
- [79] 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.
- [80] 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.
- [81] 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.
- [82] 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.
- [83] 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.
- [84] 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.
- [85] 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.
- [86] 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.
- [87] 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.
- [88] 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.
- [89] 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.
- [90] Liu H Z, Feng J W, Sun J H, et al. Eddy covariance measurements of water vapour and CO<sub>2</sub> fluxes above the Erhai Lake. *Science China: Earth Sciences*, 2015, 58(3): 317-328.
- [91] 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.
- [92] 徐安伦, 彭浩, 董保举. 大口径闪烁仪和涡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.
- [93] Du Q, Liu H Z, Liu Y, et al. Factors controlling evaporation and the CO<sub>2</sub> flux over an open water lake in southwest of China on multiple temporal scales. *International Journal of Climatology*, 2018, 38(13): 4723-4739.
- [94] 杨智, 孙绩华, 徐安伦. 稻田CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>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.
- [95] 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.
- [96] 张万诚, 万云霞, 任菊章, 等. 水汽输送异常对2009年秋、冬季云南降水的影响研究. *高原气象*, 2011, 30(6): 1534-1542.
- [97] 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.
- [98] 张万诚, 郑建萌, 万云霞, 等. 气候变化背景下低纬高原地区水源的分布及其变化. 北京: 气象出版社, 2014.