

# 近25年来中国山地气象研究进展

李国平

(成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225)

**摘要:** 山地气象学是研究山地与大气之间相互作用的一门交叉学科, 是山地科学的一个重要组成部分。近25年来, 中国山地气象研究取得了不少重要进展。除继续重视青藏高原的大气科学试验及深入研究之外, 还对天山、华山、秦岭、横断山、峨眉山、哀牢山、娄山、巴山、大别山、太行山、长白山、黄山、九华山等主要山脉开展了地形与气象关系的研究。针对与山地气象相关的观测试验、大气边界层、动力学理论、数值模拟、降水科学、气候与气候变化、气候资源、环境气象及气象灾害等研究领域, 本文分别对这些领域取得的研究成果进行了梳理、总结, 在此基础上展望了中国山地气象未来研究的主要科学问题与发展方向。

**关键词:** 山地气象, 观测, 理论, 资源, 灾害

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.016

## Progress and Prospects in Research of Mountain Meteorology in China During the Past 25 Years

Li Guoping

(College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

**Abstract:** The mountain meteorology is an interdisciplinary study of the interaction between the mountains and the atmosphere, and is an important composition of the Mountains Sciences. During the past 25 years, a lot of important progress has been made in research of mountain meteorology in China. Besides continue organizing experiments and in-depth studying atmospheric science around the Tibetan Plateau, the researches of relationship between meteorology and topography have been down around other major mountains in China, such as around the Tianshan, Huashan, Qinling, Hengduanshan, Emeishan, Ailaoshan, Loushan, Bashan, Dabieshan, Taihangshan, Changbaishan, Huangshan, Jiuhuashan, and so on. This paper summarizes main research results in the mountain meteorology in China since 1990s, it includes the observation experiments, the topics on atmospheric boundary layer, fundamental theory, numerical simulation, precipitation science, climate and climate change, climate resources, environmental meteorology and meteorological hazards etc. Furthermore, we propose some suggestions that are worthy to pay more attention in research of mountain meteorology in the future.

**Keywords:** mountain meteorology, observation, theory, resource, hazards

### 0 引言

世界上有一半的面积为山地, 全球约一半的人口依靠山地资源而生存。山地是海拔在500m以上的高地, 其地形特征为起伏大, 坡度险峻并且沟谷幽深, 多呈脉状分布。山地有别于单一的山或山脉, 是一个多山所在的地域。在这个地域内, 具有能量、坡面物质的梯度效应, 表现为气候、生物、土壤等自然要素的垂直变化, 是地球陆地表层系统中的一种特殊类

型。山地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, 垂直分布差异是山地科学研究的最基本问题。因此有学者把山地定义为“有一定海拔、相对高度及坡度的自然—人文综合体”<sup>[1]</sup>, 把山地科学研究对象确定为“作为自然—人文综合体而存在的山地地域系统”<sup>[2]</sup>。当前, 国际上把山地视为全球变化的前哨。

根据山地的定义, 高原是山地的一种突出形态, 属于高大地形。青藏高原作为中国和世界上最重要的高原山地, 拥有全球最为复杂的垂直自然带结构。经过1970—1980年代全面的综合科学考察和全国性协作研究以及1990年代以来的系统性研究, 青藏高原学在理论及应用方面取得了许多重大突破, 代表着中国山地科学研究的最高水平<sup>[3]</sup>。

收稿日期: 2014年7月14日; 修回日期: 2014年11月8日  
 第一作者: 李国平(1963—), Email: liguoping@cuit.edu.cn  
 资助信息: 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB417200);  
 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206042);  
 国家自然科学基金项目(91337215, 41175045)

山地气象学是山地科学的一个重要分支学科，主要研究山地地形与大气及其运动、自然环境和人类活动之间相互作用的学科。在山地气象科学考察与试验的研究中，大气科学工作者除了专注于山地的地—气物理量交换、大气冷热源、大气环境、屏障作用与山谷通道作用等研究外，还与地理学、地球物理学、生物学、生态学、资源和环境科学等学科合作，探讨上述山地作用与自然环境和人类活动之间的关系<sup>[4]</sup>。虽然在中国“山地气象”常称为“高原气象”，但从学科属性及研究内容来看，“高原气象学”应该是“山地气象学”的重要组成部分。由于青藏高原气象学在中国已发展成为大气科学中相对成熟并具有中国特色和世界影响的分支学科<sup>[5-7]</sup>，加之篇幅所限，本文所述内容以涉及一般性地形的山地气象问题为主，而不包括与大地形相关的青藏高原气象问题。

## 1 山地气象的研究范畴

地形对大气的的影响主要有以下几方面：

1) 热力作用。同纬度地区，地势越高，气温越低。冷湖和暖带是垂直气候带中两个因地形作用而形成的局地现象。由山麓向上，随着高度的升高，通常在山坡存在一个温度相对较高的地带，称之为暖带；而冷湖是指冷空气从山地较高处向下流泄，在地势低洼的山谷汇集而成的冷空气湖。

2) 动力作用（机械阻挡作用）。地形是气流运行的主要障碍，可形成阻挡、爬坡、绕流和狭管等四种效应，也可以改变季风的强度和方向。地形能够显著改变边界层的气流，如强风通过山脉时，在下风方向可形成一系列背风天气系统。地形的动力作用与山脉的特征关系密切，特别是地形的空间尺度对地形的动力作用影响很大。气象中的大地形指地球上水平尺度达数百到数千千米的山脉，如青藏高原、落基山、安第斯山、阿尔卑斯山等，其动力和热力作用可影响大范围地区的天气和环流。而中小尺度地形往往只影响局地的天气和环流，如山谷风、焚风、峡谷风和地形云（积状云、波状云或层状云）。

3) 对降水的影响。山脉可使湿润气团的水分在迎风坡由于地形抬升形成大量降水（地形雨），背风坡则由于气流下沉导致少雨而变得异常干燥。所以山脉两侧的气候可以出现极大的差异，往往成为气候区域的分界线。如在冬半年，当冷暖气团势均力敌，或由于地形阻滞作用，锋面很少运动或在原地来回摆动，从而形成准静止锋（例如昆明准静止锋），对这些地区及其附近的天气产生很大影响。

4) 对局地气候的影响。受海拔高度和山脉地形

的影响，在山地地区形成的一种地方性气候，称为山地气候。随着高度的升高，大气成分中的二氧化碳、水汽、微尘和污染物质等逐渐减少，气压降低，风力增大，日照增强，气温降低，干燥度减小，气候垂直变化显著。在一定高度内，湿度大、多云雾、降水多。迎风坡降水多，背风坡降水少。在一定坡向、一定高度范围内，降水量随高度而加大，过了最大降水带之后，降水又随高度而减小。山地气候还因坡向、坡度及地形起伏、凹凸、显隐等局地条件不同，而具有“一山有四季，十里不同天”的显著差异性。

下面，根据山地气象的研究对象、方法，重点对近25年以来中国山地气象研究的进展及成果按不同领域进行梳理、总结。

## 2 山地大气观测试验

外场观测试验是山地气象研究的重要手段。为进一步揭示和理解山地气象现象，观测试验是仍在广泛使用的一种基本方法。

牛生杰等<sup>[8]</sup>利用激光空气动力学粒子谱仪对贺兰山的大气气溶胶浓度和质量开展了观测研究。胡隐樵等<sup>[9]</sup>在初冬期对兰州皋兰山进行了近地面层风速和温度梯度的综合观测，分析得出山顶、山腰和河谷不同的小气候特征，发现由于山峰的辐射加热效应，山顶在白天会出现强绝热不稳定层结。2006—2007年夏季，在祁连山开展了地形云、水汽、风场、雨滴谱和雨强的综合探测试验<sup>[10]</sup>，利用该试验资料，陈添宇等<sup>[11]</sup>分析了夏季西南气流背景下地形云的演化过程，给出了地形云发展演变的概念模型，认为每个山峰南北侧昼间的谷风会在山峰辐合抬升，众多山峰形成的群谷风抬升作用下容易形成沿山脊排列的 $\beta$ 中对流云带，在高空西南气流的推动下移到北侧，是造成北侧降水比南侧大的原因之一。马学谦等<sup>[12]</sup>引入客观反映高空大气云和降水的表示方法，分析了祁连山区降水的云系特征，认为高层冷云和低层暖云是祁连山区形成降水的主要云系，高层冷云由天气尺度系统决定，而低层暖云则由地形阻挡和加热作用形成。不同的天气系统下，地形对降水的作用不同。在西南气流影响下易形成谷风环流，增强降水。在偏西风影响下易形成山风环流，将水汽从谷底向中高空输送，受主导气流抑制易形成浅薄的降水云层。

近年来，新一代卫星资料在观测稀少的西南山地气象的研究中开始发挥日益重要的作用。大气红外探测器（AIRS）获取的温度、高度和水汽资料与西南涡加密观测试验获取的L波段秒级探空资料的比较分析表明，AIRS的位势高度、温度和混合比资料与L波段

探空数据有很好的吻合度。其中,温度资料在高原地区的低层尚有较小偏差,在中高层一致性较高;AIRS的位势高度数据与探空资料相当一致;AIRS获取的混合比资料在低层略小于探空资料,在高层基本吻合。因此,AIRS资料在中国西南山地具有较好的适用性,能有效弥补探空资料在该地区的覆盖不足<sup>[13]</sup>。对地处中国南方高山的峨眉山自动气象站运行以来遇到的因雷暴、雨雾凇冻结、连续高湿等高山气象问题,气象业务工作者提出了保证高山自动气象站正常运行的一些方法和技术措施<sup>[14]</sup>。导线覆冰在西南山区是常见的气象灾害,导线覆冰增长率与气象因子密切相关。对贵州覆冰区的外场观测资料的分析表明:山区南北向导线覆冰比东西向的覆冰多,导线覆冰增长率与空气水汽含量成正比;风速超过3m/s时,覆冰增长率与风速呈明显的正比关系<sup>[15]</sup>。

用云凝结核计数器在黄山对云凝结核进行了梯度观测<sup>[16]</sup>,得出不同高度的云凝结核浓度随时间的变化趋势基本一致,而浓度随高度的升高而减小,山底受周边污染源的影响较山顶和山腰大。山顶和山底的日变化均呈双峰型(分别出现在午前和午后),与边界层高度和山谷风变化有关。

根据南岭山地雾的观测及数值试验,分析出南岭浓雾和能见度的季节分布、雾滴谱微观特征与浓雾形成的物理概念图像<sup>[17]</sup>,认为冬春季南岭山地出现的雾是微物理过程、局地地形、水汽输送与天气影响系统等宏观相互作用的结果,属于平流雾、爬坡雾。局地山地抬升冷却凝结对雾的形成有重要作用,迎风坡有利于成雾,海拔较低的迎风坡易于出现浓雾。雾体随环境风的平移过程中,不规则的爬越流动是造成雾体微结构不均匀、振荡变化的重要原因。另外,迎风坡出现雾的频率比背风坡高<sup>[18]</sup>。

### 3 山地大气边界层

边界层与自由大气间的相互作用具有明显的非线性特征,这是经典Ekman理论不能描述的。因此,发展介于完全模式与经典Ekman理论之间的边界层动力学模式,对人们从理论上深入认识大气边界层动力学过程具有重要意义。伍荣生等<sup>[19]</sup>研究了西风急流通过一个椭圆形时,边界层顶垂直速度的分布特征。进一步利用地转动量近似理论分析出在地形与湍流交换系数的共同作用下,地形的影响是边界层顶垂直速度分布的主导性因素<sup>[20-21]</sup>。因此,近年来发展的几类具有代表性的边界层改进模型可以较好揭示大气边界层动力学特征,对边界层动力学及其与自由大气相互作用以及兰州皋兰山地面湍流特征观测资料,分析了能量

闭合度的日变化及各观测点的地表能量收支<sup>[22]</sup>。浙江丘陵山区边界层风、温实测资料的分析表明该地边界层急流具有频发性。丘陵山区地形热力差异导致的气层斜压性,起因于湍流强度日变化的惯性振荡以及湍流交换引起的动量下传,也是该地边界层急流形成与变化的重要机制<sup>[23]</sup>。利用贵州西南部复杂山地获取的近地层梯度风和三维超声测风仪观测资料,分析局地低层强风的平均和脉动特征,发现平均风场主要受当地深切峡谷地形影响,全年主导风向和最大风速出现的方向几乎完全沿峡谷走向<sup>[24]</sup>。

### 4 山地气象理论

当气流翻越山脊后常在背风区低层产生背风坡风暴,而在高层出现重力波破碎和晴空湍流,气流过山形成的背风系统(包括背风波、背风槽、背风涡及背风气旋)的研究一直占居重要地位。

通过建立反映大别山地形作用的简化数学模型并数值计算分析出,当有移动性的暴雨区移至大别山定常背风波的适当位置时,江淮梅雨期间暴雨会增强<sup>[25]</sup>。当地转风速较小时,气流往往被山峰阻塞在迎风坡造成地形强迫和辐合抬升,从而易在迎风坡触发深对流活动;在背风坡则由于迎风坡的绕流重新辐合也可以出现垂直运动。当地转风速较大时,气流容易越过山脊,地形重力波易于在山地下游被激发<sup>[26]</sup>。通过分析三维多层流经过孤立山地产生的三维山地重力波和大气船舶波的物理机制及其表现特征,可揭示多层流过孤立地形产生背风波的若干气象条件<sup>[27]</sup>。对具有底面地形坡度缓变的沿岸山地,用摄动法分析出沿岸山地俘获波可近似看作是非频散的经典Kelvin波。沿岸底面地形高度越高,地形坡度越大,扰动位势高度廓线的变化就越剧烈<sup>[28]</sup>。

### 5 山地降水学

千差万别的山区地形造成了山区降水等具有明显地域差别。地形对降水的增幅作用是其中备受关注的问题,如燕山、秦岭、巴山等山区的降水具有“夜雨”特点,与山地对流场的作用密切相关。夏季山区局地对流性暴雨过程在凌晨及午夜多发,这刚好对应山地环流辐合的时间点<sup>[29]</sup>。强降水发生前,山区风场变化明显,且风场发生改变与强降水的开始和增强有一定的时间对应关系,风垂直切变的维持与强降水时段也有较好的相关性。

山地对暖湿气流的强迫抬升和辐合引发的暴雨过程,是最早被人们所认识的地形作用。当山地走向与背景风向交角较大时,暖湿气流沿坡爬升,使对流旺盛,雨量加大,在迎风坡形成降雨中心。同时,地形

阻挡使降水系统移速减慢，降水过程延长。山区复杂下垫面的热力和动力作用可影响暴雨的触发、加强或削弱、消亡，地形性强迫抬升和辐合是触发暴雨并使之加强的重要机制，背风波暴雨过程在西北、华北的冷锋天气过程中较为多见，祁连山大气水汽、降水和降水转化率与海拔高度和坡向以及环流影响区密切相关<sup>[30]</sup>。山区降水量分布受地形影响很大，迎风坡及喇叭口雨量偏多，不同高度上雨量分布也有差异。

地形作用形成的风场辐合影响强降水和强对流天气的发生发展，气流过山造成的气流加强效应有利于低空急流的加强和维持。对于华北太行山东侧低空东风气流背景下不同垂直分布气流对降水落区的影响，研究表明当垂直于山体的气流随高度减小时，地形的作用表现为迎风坡上水平辐合，造成气旋式涡度增加，产生风场切变，因此对迎风坡降水产生明显的增幅作用<sup>[31]</sup>。黄山的日雨量和短时雨量极值分布也与地形关系密切。降水系统经过黄山时，扰动加强是降雨增幅的主要原因。扰动风场辐合与地形高度配合形成的地形抬升速度是降雨增幅的主要动力因子，地形抬升导致的水汽垂直通量和水平通量辐合是降雨增幅的直接原因<sup>[32]</sup>。九华山山区降水量明显多于周边丘陵地区，其雨量分布具有明显的山区地形雨特征<sup>[33]</sup>。皖南山区和大别山中尺度地形对暴雨强度和分布亦有明显影响，其构成的中尺度组合地形效应是皖南特大暴雨形成的重要原因<sup>[34]</sup>。同样，大别山地形对热带气旋降水的增幅影响明显，并可改变降水增幅的中心位置<sup>[35]</sup>。此外，横断山脉的中西部降水具有独特的季节变化特征，这与该地区独特地形下风场的季节演变密不可分<sup>[36]</sup>。

## 6 山地大气数值模拟

地形高度变化对水平和垂直流场有较大影响。地形高度增加有利于迎风坡水平风场辐合和垂直上升运动发展，这对云的垂直和水平发展影响很大，尤其是对中高层云的发展影响最明显，并且能明显扩大降水的范围，降水量也有所增多<sup>[37]</sup>。

中国西北一个复杂山区进行的理想数值模拟揭示了在不同天气条件下，山区上空的垂直速度场分布和对流特征，地形对热力对流活动的影响以及与地形有关的对流触发机制<sup>[38]</sup>。另一个地形敏感性试验的数值分析得出，秦岭使大巴山和汉江河谷、陕北降水增加，使秦岭本身降水减少，秦岭山脉对降水的影响主要是通过地形产生的次级环流实现的<sup>[39]</sup>。最近利用WRF模式对发生在四川盆地的一次西南低涡暴雨过程的模拟以及地形高度的敏感性试验表明<sup>[40]</sup>，秦岭、大巴山山脉对西南低涡的形成并不具决定性影响，但对西南低涡的维持和发展具有非常重要的作用；而横断山脉、云贵高原对西南低涡的生成、强度以及移动路径均十分重要（图1—2）。模式中引入更真实地形可使降水强度增大、强降水中心位置和发生时间的模拟有所改善，对流层中低层上升运动和气旋切变显著增加，低涡位置的模拟有所改善，由此使强降水和落区的模拟效果也改善<sup>[41]</sup>。

大别山地形对低涡路径的南北绕行、低涡强度的山前减弱和山后加强以及水汽辐合的强弱有直接影响。山脉南部迎风坡的强辐合抬升以及山脉北部弧形背风处对气流的拉伸辐合汇聚，使大别山地形有利于水汽辐合上升<sup>[42]</sup>。地形敏感性试验可分析地形对鞍型场和低空急流的影响，概括出鄂东地区 $\beta$ 中尺度低涡

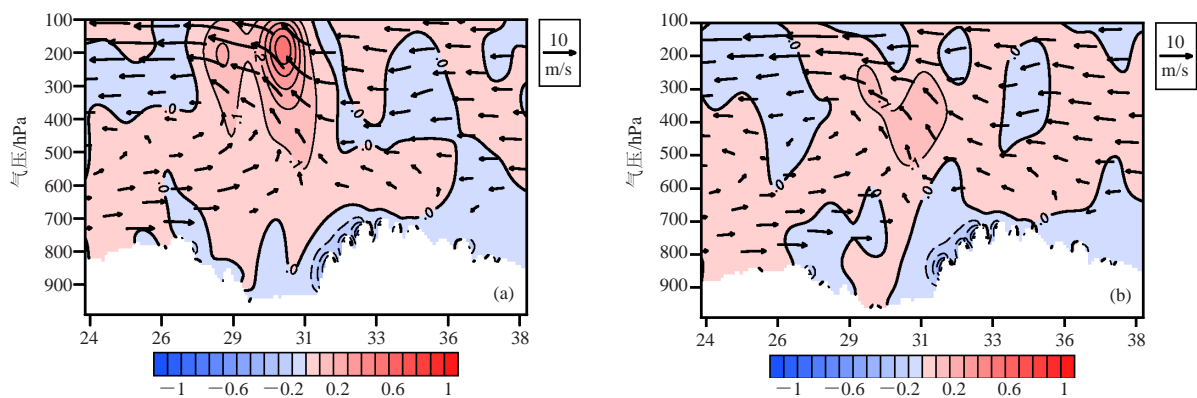


图1 WRF模拟的2010年7月16日北京时间15时沿104°E的风场（其中垂直速度放大20倍）和垂直速度大小<sup>[40]</sup>（阴影区，单位：m/s）  
(a) 控制试验；(b) 降低横断山脉、云贵高原地形

Fig. 1 The wind vector ( $u, 20 \times \omega$ ) and vertical wind speed (shaded, units: m/s) simulated by WRF for time 15:00 in Beijing Time, 16 July 2010, along 104°E<sup>[40]</sup>. (a) CTR experiment, (b) reduced heights of Hengduan Cordillera and of Yunnan-Guizhou Plateau

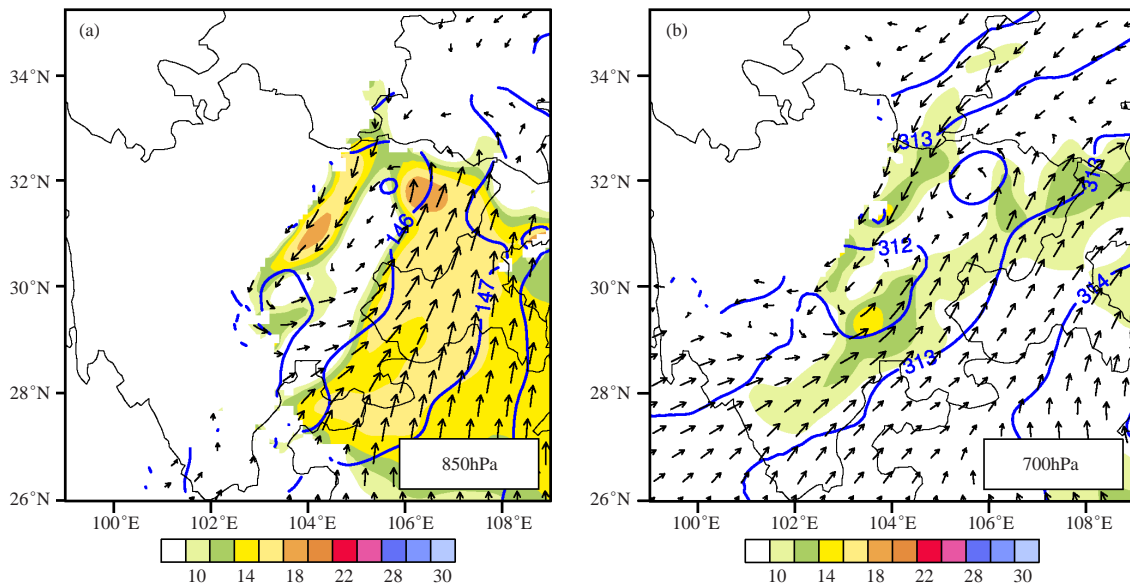


图2 降低横断山脉、云贵高原地形后WRF模拟的2010年7月16日北京时21时风场<sup>[40]</sup> (a) (矢量, 单位: m/s, 阴影为风速大小) 和高度场 (b) (单位: dagpm)

Fig. 2 The wind vector<sup>[40]</sup> (a) (shaded: wind speed, units: m/s) and geopotential heights (b) (units: dagpm) simulated by WRF for time 21:00 in Beijing Time, 16 July 2010, after reducing heights of Hengduan Cordillera and of Yunnan–Guizhou Plateau

及特大暴雨形成的概念模型<sup>[43]</sup>, 以及局地中尺度地形 (如大别山) 对暴雨过程的影响及其机理<sup>[44]</sup>。中尺度地形通过动力场和水汽场的扰动对降水落区和强度产生重要影响, 地形和切变线的相对位置是造成这一影响的关键所在<sup>[45]</sup>, 强降水中心一般位于地形附近<sup>[46]</sup>。在一定的系统配置条件下, 大别山地区的地形可以影响淮河流域梅雨锋暴雨的发生发展<sup>[47]</sup>。台风登陆期间, 地形对台风降雨量有明显的增幅作用。由地形强迫产生的降雨量和地形走向一致, 迎风坡降雨量增加, 背风坡降雨量减少, 地形的强迫作用有利于在低层台风眼的西北侧形成明显的辐合带, 高层为明显的辐散区; 地形的影响有利于台风中心西北侧低层中尺度气旋性涡旋系统的发生发展, 从而激发中尺度对流云团, 形成中尺度雨团, 造成台风中心南北雨区和雨量的不对称分布<sup>[48]</sup>。阿尔泰—萨彦岭山地通过对低层冷空气的阻滞使山地上空等熵面更为陡立, 加强对流层低层的斜压强迫, 从而使涡度增长向低层聚集, 加强蒙古气旋的发展<sup>[49]</sup>。华南地区数百米的低矮山地仍可使对流层中上层环流发生变化, 该山区常见的喇叭口、迎风坡地形可对暴雨产生影响<sup>[50]</sup>。

祁连山地形对大范围降雪落区无明显影响, 但对祁连山北坡降雪中心的形成有直接影响<sup>[51]</sup>。地形敏感性试验表明, 横断山脉和南岭山脉及邻近山区对冻雨的形成和维持具有重要影响, 这种影响是通过改变锋区特征来实现的<sup>[52]</sup>。而湖南独特的地形对冰冻天气过

程也有明显影响, 敏感性试验表明随着南岭山脉地形高度的降低会导致南岭北部上空的大气垂直温度层结发生变化, 进而抑制湖南南部冻雨的发生<sup>[53]</sup>。另外, 南岭山地浓雾的数值研究结果显示大范围层状云系在山头接地形成了地面的浓雾<sup>[54]</sup>。

根据气候系统模式 (CCSM3) 的模拟输出结果, 刘晓东等<sup>[55]</sup>认为随着大气CO<sub>2</sub>含量的增加, 中低纬高原山地气候会显著变暖。地面温度的增加以最低气温最大, 其次是平均气温, 而最高气温最小; 寒冷季节的增温大于温暖季节。气候变暖对海拔高度具有明显的依赖性, 即增温幅度通常随海拔高度的增加而增大。

相比于气候模式和中尺度气象模式, 计算流体力学软件FLUENT可以更为精确地描述复杂的局地地形特征, 因而能够在小尺度范围内得到分辨率更高、且更为准确的复杂地形上近地层风场模拟结果<sup>[56]</sup>。

## 7 山地气候和气候变化

由于山的高度、大小、坡度、坡向等因素影响而具有独特的气候状态, 称为山地气候, 它是最为复杂的气候类型之一。山地气候的主要特点有: 1) 气压随海拔高度增加而降低。白天的直接辐射和夜间的有效辐射都随海拔高度升高而增大, 散射辐射随高度增加而减少; 不同坡面 (包括不同坡向和坡度) 接受到的日照和辐射强度不同; 2) 气温随海拔高度的增加而降低。气温直减率在一年中以夏季最大, 冬季最

小。山顶和山坡的年变化和日变化都较小，秋温高于春温；山谷和山间盆地的年变化和日变化比较剧烈，且春温高于秋温；3) 降水随高度的分布，先是随高度升高而增加，到达一定高度，降水又随高度的升高而减少，即存在一个最大降水高度，并且最大降水高度随地区和季节不同。气候愈潮湿，大气愈不稳定，最大降水高度愈低。降水还随山的坡向、坡度不同，迎风坡上的降水量和降水强度远大于背风坡，坡度愈大，这种差别亦愈大。山地地形也影响降雨量的日变化，山顶以日雨为主，而山谷盆地则以夜雨为主；4) 风速随山地海拔升高而增大。山顶、山脊以及峡谷风口处的风速大，盆地、谷底和背风处的风速小。山顶、山脊的风速一般夜间大、白天小，午后最小，而山麓、山谷则相反。山地还能产生一些局地环流，如山谷风、布拉风、焚风、坡风、冰川风等；5) 水汽压随海拔高度增加而降低。一般山地上部因气温低、云雾多，相对湿度高于下部；但冬季高山区也有相反情况，山顶冬季云雾较少而相对湿度小。山谷和盆地相对湿度日变化大，夜高而昼低，午后最低；而山顶相对湿度的日变化不明显。

采用模型模拟方法可对山地气候开展气象学和生态学的交叉研究，已用于温度、降水、湿度、太阳辐射和风场等方面的研究。温度场的模拟主要是以多元回归法为主，降水模拟的方法主要有地形因子相关法和趋势面法，湿度一般用湿度—辐射循环法来模拟，太阳辐射主要以直接辐射、散射辐射、反射辐射和总辐射分别加以模拟，风场主要模拟方法有诊断方法和预报方法<sup>[57]</sup>。以地理信息系统为支撑，在常规统计模型的基础上，利用地形的坡度、坡向因子进行山区气温小尺度模拟的地形调节统计模型，可为山区任一地域的气温空间分布提供快速计算<sup>[58]</sup>。山区水库库面气象要素受周围地形的影响很大，由经度、纬度、海拔高度和大地形影响等因子建立的多元方程拟合效果显著，可有效揭示山区月平均温度和太阳辐射的时空变化<sup>[59]</sup>。

有学者分析了中国天山区域气候效应及其基本变化过程<sup>[60]</sup>，以及祁连山北坡中部气候特征和森林生态系统的主要气象要素垂直分布<sup>[61]</sup>。受全球变暖的影响，近50年甘肃疏勒河山区气候持续向暖湿转化，且各季气温均呈持续的上升趋势，山区降水量总体亦呈增加趋势，但年际波动较为剧烈<sup>[62]</sup>。利用NOAA气象卫星资料，提取植被、积雪等信息，可分析祁连山植被和积雪的空间分布及其变化特征<sup>[63]</sup>。秦岭南北坡半个世纪气温与降水的分析显示，1993年后秦岭地区气候变暖趋势明显，并且秦岭北坡气候有暖湿化趋

势<sup>[64]</sup>。中国东南部的地形对降水分布具有气候影响，表现在浙闽山区的东西两侧山坡各有一条多雨带，南岭南北两侧山坡附近各有一个多雨区<sup>[65]</sup>。

## 8 山地气候资源与山地环境气象

山地具备有利于发展农业生产的气候潜力，称为山地农业气候资源。近25年来，中国开展了大量山地气候资源的研究与评价工作，凡有山地分布的地域都开展了调查、评价与开发规划的研究。其中，既有典型山体气候垂直变化规律及气候潜力的观测与研究，又有典型山地区域农业气候资源的水平分异与垂直变化及区划方法的研究<sup>[66]</sup>。研究方法也从过去野外考察、设站观测，到现在大量采用遥感等新技术对山地气候特点进行解析<sup>[67-68]</sup>。

山地使得气候要素重新分配，其特点主要是水、热、风、光要素随海拔高度的增加而发生显著变化，造成与山地生态气候环境相适应的农林业结构也具有显著的高度地带性。马友鑫等<sup>[69]</sup>对哀牢山地农业气候带层进行了划分，并且探讨其与中国东部水平气候带之间的农林特征差异。统一订正高度可消除山区地形海拔高度的影响，更清楚地揭示巴山南北气候的差异<sup>[70]</sup>。高大山体及其造成的大气对流与高山冰川和高山植被共同作用可产生高山增水效应，并形成良性增水系统。山体愈高大，增水效应愈明显，这对内陆干旱山区科学开发利用高山水资源具有指导意义<sup>[71]</sup>。

## 9 山地气象灾害

山地自然灾害是山区常见的自然现象，广义的山地灾害指发生于山地的各种自然灾害，包括水土流失、泥石流、滑坡、崩塌、冰雪害、冻土以及发生在山区的地震、冰雹等灾害。它包含山地气象灾害、山地水文灾害、山地地质灾害、山地水土灾害、山地生物灾害和山地人为自然灾害等。其中，山地气象灾害包括干旱、洪涝、冰雪、低温和风沙灾害等。

当前对山区洪水、暴风雪等山地气象灾害的研究及业务预报取得了一定进展。如提出山地等价雨量概念和计算方法，以使滑坡泥石流预警指标可借用国家暴雨预警标准<sup>[72]</sup>。利用常规气象资料以及卫星亮温资料、多普勒天气雷达资料，对“8·8”舟曲特大山洪泥石流灾害开展了研究<sup>[73]</sup>。在分析浙江山地地质灾害发生规律的基础上，探讨了地质灾害气象等级预报（预警）模型的应用<sup>[74]</sup>。通过分析山地旅游景区的气象、环境、地理特征及山地旅游景区雷电灾害特点，归纳出山地旅游景区雷电灾损类型，提出了景区雷电灾害风险评估的基本方法<sup>[75]</sup>。

## 10 山地气象未来研究应关注的科学问题与展望

如上综述,中国山地气象研究在近25年虽然取得了不少成果,但也折射出山地气象的基础理论尚未取得突破性进展,山地气象中尚有不少未来应关注的科学问题,例如山地与对流发生及强度的关系,山地天气系统的中尺度结构及发生发展过程,山地波动形成及其对强天气的具体影响,山地造就的地形云、地形环流和降水日变化的精细结构,山地对水汽、能量循环的作用,山区强降水的触发机理与演变规律,基于多源资料分析的山地气候学特征,山地对雾霾天气及大气污染物输送的影响机理,气候变化对山地气象灾害的影响,全球变化与山地系统的响应及反馈,山地边界层气象过程与影响机制,多系统耦合的山地大气动力学,山地天气气候演变的动力学机理,基于山地灾害形成机理的气象预报方法等。

对于山地气象今后的研究工作与发展动向,做出如下展望:

1) 在现有高原高山气象观测台站的基础上,应进一步补充和完善观测内容和加密必要的观测站点,开展复杂地形边界层与自由大气热量和水分交换的场地定量观测试验,尤其应关注诸如湍流、地形强迫流、山区风的日变化、热力风系、地形云系、地形降水、空气污染扩散、大气局地循环等现象和过程的观测研究。注重加强高山地区对全球变化响应快速而强烈的山地特征“线”的连续监测,为全球变化的研究提供重要依据。

2) 在山地气象研究方法和技术手段方面,要重视山地气象基础理论研究(如复杂地形边界层大气结构、山地对气流的动力影响、山地大气动力过程及参数化方案等),应用高性能和云计算等技术手段动态仿真模拟山地天气气候系统,充分吸收利用现代理论、新型探测资料和先进技术,例如适合山地复杂地形的高分辨率数值模式、3S技术、数据挖掘、大数据分析、图像识别、数据可视化、虚拟现实(VR)技术、客观识别、降尺度、新一代卫星观测资料、全球降水测量(GPM)卫星资料及其全球近实时降水图产品(GSMaP)等,深化山地天气气候研究,丰富山地天气气候的分析预报方法。特别应注意用现代气候系统的观点来研究山地气象过程及其对全球气候变化和生态环境的影响。

3) 应加强研究山地地区的气象资源、气象致灾因子及其时空分布特征(特别是强对流和雷电活动),气象条件和成灾环境要素耦合分析的山地灾害

气象预报方法,山地气象资源的评估、利用技术,山地气象灾害及次生灾害的发生发展规律与灾害风险评估技术,山区气象灾害预警指标与气象灾害风险等级的预警技术,研发山地气象防灾减灾适用技术及应急管理系统,并积极推进山地气象业务及服务工作。

### 参考文献

- [1] 丁锡址,郑远昌.再论山地学.山地研究,1996,14(2):83-88.
- [2] 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所.山地学概论与中国山地研究.成都:四川科学技术出版社,2000.
- [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] 高登义,邹捍,周立波,等.中国山地环境气象研究进展.大气科学,2003,27(4):567-590.
- [5] 叶笃正,高由禧.青藏高原气象学.北京:科学出版社,1979.
- [6] 钱正安,焦彦军.青藏高原气象学的研究进展和问题.地球科学进展,1997,12(3):207-216.
- [7] 李国平.青藏高原动力气象学(第二版).北京:气象出版社,2007.
- [8] 牛生杰,章澄昌,孙继明.贺兰山地区沙尘气溶胶粒子谱分布的观测研究.大气科学,2001,25(2):243-252.
- [9] 胡隐樵,葛正谟,刘俊义,等.兰州山地初冬的一次近地面层观测试验.大气科学,1989,13(4):452-459.
- [10] 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.
- [11] 陈添宇,郑国光,陈跃,等.祁连山夏季西南气流背景下地形云形成和演化的观测研究.高原气象,2010,29(1):152-163.
- [12] 马学谦,孙安平.祁连山区降水的大气特征分析.高原气象,2011,30(5):1392-1398.
- [13] 倪成诚,李国平,熊效振.AIRS资料在中国川藏地区适用性的验证研究.山地学报,2013,31(6):656-663.
- [14] 王会兵,祁生秀,王小勇,等.高山气候对自动气象站运行的影响分析.高原山地气象研究,2011,31(3):65-68.
- [15] 罗宁,文继芬,赵彩,等.导线积冰的云雾特征观测研究.应用气象学报,2008,19(1):91-95.
- [16] 李力,银燕,顾雪松,等.黄山地区不同高度云凝结核的观测分析.大气科学,2014,38(3):410-420.
- [17] 邓雪娇,吴兑,史月琴,等.南岭山地浓雾的宏微观物理特征综合分析.热带气象学报,2007,23(5):424-434.
- [18] 吴兑,赵博,邓雪娇,等.南岭山地高速公路雾区恶劣能见度研究.高原气象,2007,26(3):649-654.
- [19] 伍荣生,顾伟.山地上空的Ekman抽吸.气象学报,1990,48(3):258-264.
- [20] 郑启康,王元,伍荣生.地形和湍流交换非均匀对边界层Ekman抽吸的影响.南京大学学报(自然科学版),2007,43(6):589-596.
- [21] 谈哲敏,方娟,伍荣生.Ekman边界层动力学的理论研究.气象学报,2005,63(5):543-555.
- [22] 郝为锋,苏晓冰,王庆安,等.山地边界层急流的观测特性及其成因分析.气象学报,2001,59(1):120-128.
- [23] 杨胜朋,吕世华,陈玉春,等.山地复杂下垫面湍流特征观测分析.高原气象,2008,27(2):272-278.
- [24] 宋丽莉,吴战平,秦鹏,等.复杂山地近地层强风特性分析.气象学报,2009,67(3):452-460.
- [25] 朱民,余志豪,陆汉城.中尺度地形背风波的作用及其应用.气象学报,1999,57(6):705-714.
- [26] 黄倩.不同下垫面上行星边界层对流的数值模拟研究.兰州:兰州大学,2008.
- [27] 李子良.三维多层流过山产生的山地重力波研究.高原气象,2006,25(4):593-600.
- [28] 卢灼,黄伟健,张铭,等.有关沿岸山地俘获波的研究.高原气象,2008,27(6):1211-1217.
- [29] 陈明,傅抱璞,于强.山区地形对暴雨的影响.地理学报,1995,50(3):256-263.
- [30] 张强,张杰,孙国武,等.祁连山山区空中水汽分布特征研究.气象学报,2007,65(4):633-643.

- [31] 孙继松. 气流的垂直分布对地形雨落区的影响. 高原气象, 2005, 24(1): 62-69.
- [32] 刘裕禄, 黄勇. 黄山山脉地形对暴雨降水增幅条件研究. 高原气象, 2013, 32(2): 608-615.
- [33] 丁仁海, 王龙学. 九华山暴雨地形增幅作用的观测分析. 暴雨灾害, 2009, 28(4): 377-381.
- [34] 赵玉春, 许小峰, 崔春光. 中尺度地形对梅雨锋暴雨影响的个例研究. 高原气象, 2012, 31(5): 1268-1282.
- [35] 董美莹, 陈联寿, 程正泉, 等. 地形影响热带气旋“泰利”降水增幅的数值研究. 高原气象, 2011, 30(3): 700-710.
- [36] 肖潺, 宇如聪, 原韦华, 等. 横断山脉中西部降水的季节演变特征. 气象学报, 2013, 71(4): 643-651.
- [37] 廖菲, 胡娅敏, 洪延超. 地形动力作用对华北暴雨和云系影响的数值研究. 高原气象, 2009, 28(1): 115-126.
- [38] 黄倩, 田文寿, 王文, 等. 复杂山区上空垂直速度场和热力对流活动的理想数值模拟. 气象学报, 2007, 65(3): 341-352.
- [39] 毕宝贵, 刘月巍, 李泽椿. 秦岭大巴山地形对陕南强降水的影响研究. 高原气象, 2006, 25(3): 485-494.
- [40] 母灵, 李国平. 复杂地形对西南低涡生成和移动影响的数值试验分析. 成都信息工程学院学报, 2013, 28(6): 241-248.
- [41] 何光碧, 屠妮妮, 张利红, 等. 青藏高原东侧一次低涡暴雨过程地形影响的数值试验. 高原气象, 2013, 32(6): 1546-1556.
- [42] 苗春生, 刘维鑫, 王坚红. 梅雨期经大别山两侧暴雨中尺度低涡对比分析. 高原气象, 2014, 33: 394-406.
- [43] 姜勇强, 王元. 地形对1998年7月鄂东特大暴雨鞍型场的影响. 高原气象, 2010, 29(2): 297-308.
- [44] 崔春光, 闵爱荣, 胡伯威. 中尺度地形对“98.7”鄂东特大暴雨的动力作用. 气象学报, 2002, 60(5): 602-612.
- [45] 臧增亮, 张铭, 沈洪卫, 等. 江淮地区中尺度地形对一次梅雨锋暴雨的敏感性试验. 气象科学, 2004, 24(1): 26-34.
- [46] 高坤, 翟国庆, 俞樟孝, 等. 华东中尺度地形对浙北暴雨影响的模拟研究. 气象学报, 1994, 52(2): 157-164.
- [47] 尹宜舟, 沈新勇, 李焕连. “07.7”淮河流域梅雨锋暴雨的地形敏感性试验. 高原气象, 2009, 28(5): 1085-1094.
- [48] 冀春晓, 薛根元, 赵放, 等. 台风Rananim登陆期间地形对其降水和结构影响的数值模拟试验. 大气科学, 2007, 31(2): 233-244.
- [49] 姜学恭, 沈建国, 刘景涛, 等. 地形影响蒙古气旋发展的观测和模拟研究. 应用气象学报, 2004, 15(5): 601-611.
- [50] 李博, 刘黎平, 赵思雄, 等. 局地低矮地形对华南暴雨影响的数值试验. 高原气象, 2013, 32(6): 1638-1650.
- [51] 孙晶, 楼小凤, 胡志晋. 祁连山冬季降雪个例模拟分析(I): 降雪过程和地形影响. 高原气象, 2009, 28(3): 485-495.
- [52] 曾明剑, 陆维松, 梁信忠, 等. 地形对2008年初中国南方持续性冰冻灾害分布影响的数值模拟. 高原气象, 2009, 28(6): 1376-1387.
- [53] 徐辉, 金荣花. 地形对2008年初湖南雨雪冰冻天气的影响分析. 高原气象, 2010, 29(4): 957-967.
- [54] 史月琴, 邓雪娇, 胡志晋, 等. 一次山地浓雾的三维数值研究. 热带气象学报, 2006, 22(4): 351-359.
- [55] 刘晓东, 晏利斌, 程志刚, 等. 中低纬度高原山地气候变暖对海拔高度的依赖性. 高原山地气象研究, 2008, 28(1): 19-23.
- [56] 李磊, 张立杰, 张宁, 等. FLUENT在复杂地形风场精细模拟中的应用研究. 高原气象, 2010, 29(3): 621-628.
- [57] 苏宏新, 桑卫国. 山地小气候模拟研究进展. 植物生态学报, 2002, 26(增刊): 107-114.
- [58] 张洪亮, 倪绍祥, 邓自旺, 等. 基于DEM的山区气温空间模拟方法. 山地学报, 2002, 20(3): 360-364.
- [59] 脱友才, 邓云, 梁瑞峰. 山区水库水面气温与太阳辐射的修正及应用. 应用气象学报, 2009, 20(2): 225-231.
- [60] 魏文寿, 胡汝骥. 中国天山的降水与气候效应. 干旱区地理, 1990, 13(1): 29-36.
- [61] 张虎, 温娅丽. 祁连山北坡中部气候特征及垂直气候带的划分. 山地学报, 2001, 19(6): 497-502.
- [62] 蓝永超, 胡兴林, 肖生春, 等. 近50年疏勒河流域山区的气候变化及其对出山径流的影响. 高原气象, 2012, 31(6): 1636-1644.
- [63] 郭锐, 杨兰芳, 李民轩. 利用气象卫星资料研究祁连山区植被和积雪变化. 应用气象学报, 2003, 14(6): 700-707.
- [64] 高翔, 白红英, 张善红, 等. 1959-2009年秦岭山地气候变化趋势研究. 水土保持通报, 2012, 32(1): 207-211.
- [65] 庞茂鑫, 斯公望. 中国东南部地形对降水量分布的气候影响. 热带气象学报, 1993, 9(1): 370-374.
- [66] 张养才. 中国丘陵山地农业气候研究及其进展. 气象, 1990, 16(11): 3-10.
- [67] 马润年, 孙智辉, 曹雪梅, 等. 黄土高原山地城市延安的热岛效应. 气象科学, 2011, 31(1): 87-92.
- [68] 孔邦杰, 李军, 黄敬峰. 山地旅游区气候舒适度的时空特征分析. 气象科学, 2007, 27(3): 342-348.
- [69] 马友鑫, 张克映, 刘玉洪. 哀牢山地农业气候资源利用及其与中国东部的分异. 自然资源学报, 1994, 9(3): 231-238.
- [70] 李兆元, 董亚非, 吴素良, 等. 巴山山地的气候特点. 地理学报, 1990, 45(3): 311-320.
- [71] 丁贤荣. 高山增水效应及其水资源意义. 山地学报, 2003, 21(6): 681-685.
- [72] 何险峰, 薛勤. 山地等价雨量. 气象科技, 2013, 41(4): 771-776.
- [73] 张之贤, 张强, 赵庆云, 等. “8.8”舟曲特大山洪泥石流灾害天气特征分析. 高原气象, 2013, 32(1): 290-297.
- [74] 薛根元, 诸晓明, 王镇铭. 山地地质灾害气象等级预报(预警)模型应用. 山地学报, 2006, 24(4): 416-423.
- [75] 冯鹤, 李小龙. 山地旅游景区雷电灾害风险评估研究. 防灾科技学院学报, 2013, 15(4): 75-80.