

付超, 谌芸, 单九生. 2017. 地形因子对降水的影响研究综述[J]. 气象与减灾研究, 40(4): 318-324.

Fu Chao, Chen Yun, Shan Jiusheng. 2017. A review of the effects of terrain factors on precipitation[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 40(4): 318-324.

## 地形因子对降水的影响研究综述

付超<sup>1</sup>, 谌芸<sup>1,2</sup>, 单九生<sup>3</sup>

1. 成都信息工程大学 大气科学学院, 四川 成都 610225
2. 国家气象中心, 北京 100081
3. 江西省气象科学研究所, 江西 南昌 330096

**摘要:** 围绕地形如何影响降水、地形对降水的增幅影响, 特别是地形对暴雨的影响研究进行综述。地形对降水的作用主要涉及动力和热力方面, 包括迎风坡的阻塞回流、背风涡的生成或加深。地形的起伏通过触发地形重力波的生成, 促进天气系统的发展。最后提出, 在地形影响降水的数值模拟研究方面, 应把更多的数据类型和高分辨率地形相结合, 开展数据资料同化研究; 气候统计研究方面, 应着重开展山地降水的强度、大气环流形势等分析, 以提高降水预报准确率。

**关键词:** 降水, 地形, 影响, 研究综述

中图分类号: P463.21<sup>+</sup>3

文献标识码: A

文章编号: 1007-9033(2017)04-0318-07

doi: 10.12013/qxyjzyj2017-046

## A Review of the Effects of Terrain Factors on Precipitation

Fu Chao<sup>1</sup>, Chen Yun<sup>1,2</sup>, Shan Jiusheng<sup>3</sup>

1. Chengdu University of Information Technology, College of Atmospheric Sciences, Chengdu 610225, China
2. National Meteorological Center, Beijing 100081, China
3. Jiangxi Institute of Meteorological Science, Nanchang 330096, China

**Abstract:** The effect of terrain on precipitation and increment of precipitation, especially the effect of terrain on rainstorm is reviewed. The effect of terrain on precipitation mainly involves the dynamic and thermal aspects, including the blocked reversal flow of the windward slope and the generation or deepening of the leeward vortex. Terrain undulation promotes the development of weather system by triggering the generation of terrain gravity waves. To provide more precise backgrounds for improving the accuracy of precipitation prediction, the next focus of terrain impact on precipitation should be more data types combine with high-resolution terrain data to carry out data assimilation in the research of numerical simulation of terrain effect precipitation, while in the climate statistical research, the focus should be more analysis of the terrain precipitation intensity and atmospheric circulation situation.

**Key words:** precipitation; terrain effects; research review

### 0 引言

暴雨是中国的主要气象灾害之一, 也是灾害性

天气预报中的重点, 尤其是受地形影响的山区降水预报更是重中之重(陈明等, 1995)。地形起伏的多变性和复杂性使得地形对降水的影响机理研究成为

收稿日期: 2017-07-14; 修订日期: 2017-10-18.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(编号: 41175048); 公益性行业专项(编号: GYHY201406003).

作者简介: 付超, 硕士生, 主要从事中尺度气象学研究, E-mail: 744420681@qq.com.

谌芸(通信作者), 正研级高工, 主要从事中尺度气象学研究, E-mail: chenyun@cma.gov.cn.

一个难点。尤其是平原与高原交错的地形往往给暴雨预报带来极大的困难(千怀遂和李明霞,1992;舒守娟等,2006)。大量的研究结果(柳艳菊等,2012;罗霄等,2013;蒋竹将等,2014;王春学等,2015)表明,在每年的9、10月份,秦岭、大巴山一带容易出现大暴雨中心,这个降雨集中期也称作“华西秋雨”。除秦巴山区外,江西庐山、安徽黄山、新疆天山等地的天气气候受地形影响也很明显(毕宝贵等,2006;刘裕禄和黄勇,2013;于晓晶和赵勇,2016)。地形可以通过改变水汽循环的动力、热力、云微物理等效应,进而改变局地气候。地形不仅可以诱发持续性大暴雨,还具有增幅效应(刘裕禄和黄勇,2013)。通过研究地形重力波的移动特征与降水的位置关系,可以判断重力波对降水是否具有促进作用。通过降水与地形因子的数值试验研究,可以揭示地形因子在降水中的热、动力及云微物理作用,明确地形对水汽条件及能量输送的影响,进而揭示降水成因。因此,开展地形降水研究具有重要的研究意义及业务应用前景。文中,围绕地形如何影响降水、地形对降水的增幅影响以及地形影响降水数值模拟试验等研究进行回顾,并就未来时期地形对降水的影响研究提出建议。

## 1 地形重力波对降水的影响研究

影响降水的地形因素有山高、山宽、山脉的坡度以及地形、地貌特征,复杂的地形可以诱发地形重力波的生成,一般把过山气流产生的气流波称之为地形重力波(林之光,1995)。寿绍文等(2009)研究指出,重力波经常出现在逆温层、不稳定层和强风切变情况下,它可以触发强对流和传输能量、动量,特别是大振幅的重力波能诱发强降水。大量的研究(Stobie et al,1983;Uccellini and Kosh,1987;王文等,2011;易军等,2015)表明重力波常与暴雨天气相伴,一般影响暴雨的强度、移动和落区。其过程大致分为三个阶段:1)发展阶段。中尺度重力波促进了对流运动的发展,当地形重力波通过发展的积雨云时能加大云中的上升运动,促进不稳定能量的释放,同时加大低层的水汽辐合,产生降水。一般低频、大振幅的重力波才会对对流系统的温度场、风场有影响(刘佳和王文,2010)。2)成熟阶段。当重力波达到鼎盛时期,此时不稳定能量的转化接近最大化,重力波对大暴雨的产生有促进作用。3)消亡阶段。当随着重力波的减弱和消亡,传播到雨区的能量也会减小,雨强也随之减弱(吴迪等,2016)。

有国外学者研究证明(Miles,1961;Howard,1961),当理查森数  $Ri < 0.25$  时,重力波具有发展趋势。此外,Zhang等(2000)采用拉格朗日 Rossby 数和非线性平衡方程(NBE)诊断有无中尺度重力波的生成。 $R_{OL} \geq 0.5$  是可能产生重力波的动力条件,其中  $R_{OL} = \frac{|d\mathbf{V}/dt|}{f|\mathbf{V}|}$  为气块加速度与科里奥利力加速度的比值。 $NBE = -\nabla^2\Phi + 2\mathbf{J}(u,v) + f\zeta - \beta u$ ,式中  $\Phi$  为位势高度, $\nabla^2$  为二维拉普拉斯算子, $u$  为纬向风, $v$  为经向风, $\mathbf{J}$  为雅克比算子, $f$  为地转参数, $\zeta$  为相对涡度, $\beta = \partial f/\partial y$ 。当 NBE 方程中的 4 项总和为零时,表示大气处于准地转平衡状态,当四项总和不为零时(量级约为  $10^{-8} \text{ s}^{-2}$ ),流场处于非平衡状态。NBE 不为零时,大气的质量场(气压)与动量场(速度)会重新向平衡态调整,从而产生重力波。王文等(2011)研究了理查森数和非线性平衡方程与暴雨的关系指出,通常垂直运动强烈区也是 NBE 的大值区, $Ri$  的低值区能很好地对应降水区域,NBE 的极值中心在降水区域移动方向的前方,NBE 的大值区域要先于  $Ri$  的小值区域出现,表明重力波带动了暴雨的发展。

## 2 地形的动力和热力作用研究

### 2.1 地形的动力作用

朱民(1999)和臧增亮等(2004)指出迎风坡为暴雨的多发区。廖菲等(2009)研究发现,地形引起气旋式辐合是形成地形降水的一个动力因子。地形迎风坡一方面让迎面而来的气流沿着地形爬升,产生爬流;另一方面当地形高大时,气流没足够大的动能过山,绕山而过,产生绕流。暖湿空气受地形强迫抬升过程中,在迎风坡易形成气旋式辐合从而成云降水。章淹(1983)提出,除摩擦外,过山气流的上升速度与山地坡度、地形高度以及风向密切相关。

在背风坡一侧,出现较强的下坡风必须满足:1)大气层结稳定,尤其是低层层结;2)垂直于山脉风的风速要大;3)要求有较高的地形且背风坡的坡角足够大(肖庆农和伍荣生,1995)。章淹(1983)认为,当满足以上某个条件时,绕山气流会在背风坡处形成低涡,或促进低涡的加深。西南涡的形成很大程度上受青藏高原的影响,当气流绕过时,青藏高原对南支气流的阻滞、绕流作用以及侧边界的摩擦作用促进了西南涡的形成(陈志昆和张书余,2010)。而四川盆地处于高原的背风坡,根据大气涡街理论,风吹过障碍物时,在背风坡产生大气扰动,在障碍物两侧

形成正反气旋似的、排列规则的双列线涡,是形成西南涡的另一解释(蒋兴伟等,2013)。此外,陈明等(1996)研究指出,背风坡斜压性的加强引起背风坡反环流和涡旋偶极子的流场分离,使背风涡得到发展,从而诱发局地强降水。

## 2.2 地形的热力作用

除地形的动力作用外,地形的热力效应也起着重要的作用。地形的热力效应主要由不同高度的地表接受太阳辐射和气流抬升所释放的潜热引起的。当低层层结处于不稳定状态时,有利于垂直环流的发展,使中、高层增温以及高层辐射增强,再反馈于垂直环流,使得地形对降水有强烈的增幅效应(廖菲等,2007)。赵平等(1992)研究发现:1)地形和潜热加热增大气流的辐合,使其涡度增加;2)位能、散度风动能和旋转风动能三者的相互转化在低层地形和潜热加热下,转化强度更强;3)在潜热加热作用下,高空辐散加强,进而影响西南涡的强度。何钰和李国平(2013)研究发现,高原的热力作用能够激发大气定长波,稳定的定长波导致持续性降水的发生,波动中心正好对应降水最大值区。

## 3 地形降水机制的研究

### 3.1 地形降水机制理论

关于地形降水机理,Smith(1989)总结了四种理论:1)迎面而来的暖湿气流受地形强迫抬升作用,使得暖湿空气冷却,产生凝结降水,这和山体形状及风速大小有关。2)Bergeron于1950年研究提出地形降水增强的双层云系统,即上层为区域性天气尺度扰动引起的抬升且不受地形影响的“播撒云”,低层受地形抬升达到饱和的“受播云”。3)由于地形接受太阳辐射的程度不一而产生山风,气流越山后持续上升,进而触发深对流,在山顶或者顺风处的云会在背风坡形成降水。4)强迫抬升或阻挡触发的对流造成的某种不稳定可能产生凝结降水。Colle等(2013)的地形降水理论简要概括为,如果低层气流稳定,则会发生地形阻挡,那么在地形阻挡的迎风一侧会出现雨量增幅现象。由蒸发引起的低层非绝热冷却可以增强近地面的稳定性和气流阻挡,相反,云中的潜热加热降低了气流的稳定性和气流阻挡(Stoelinga et al,2013)。对于较不稳定的气流,地形重力波可以改变地形云的深度和范围,导致降水增强。对于不稳定的气流,上升气流可以触发对流系统或稳定的带状降水。

### 3.2 不同尺度的地形降水机理

不同尺度的地形对降水的影响过程十分复杂。李子良(2006)研究发现,地形降水是受水汽、气流和山脉地形的几何形状共同影响的。对于小尺度地形而言,地形降水主要以上坡峰降水为主,在迎风坡容易形成阻塞回流,水的潜热释放会抑制大气波动的后向传播,使得大气波动维持在迎风坡。而在背风坡的背风回流,其深度远大于地形高度以及迎风坡阻塞回流的深度,所以在背风坡不易形成降水。对于中尺度地形而言,迎风坡和背风坡均以层云降水为主,地形的动力作用是引起层云降水的主要原因,降水强度是迎风坡强于背风坡。而迎风坡的浅对流降水与背风坡深对流降水主要由地形热力作用产生,对流降水强度在背风坡强于迎风坡(朱素行等,2010)。对于大尺度地形而言,降水则出现在迎风坡和背风坡。由于中层水汽潜热的释放,破坏了大气稳定度,表现出背风坡流动特征,在背风坡形成回流。当降水区与背风坡的上升运动区相对应时,为典型的背风坡回流降水。

### 3.3 地形对云物理过程的影响

对流云团受地形影响不断发展成一条强对流云带,触发对流抬升的条件多与中尺度系统有关,例如锋面、地面辐合线、干线、重力波等,在这些系统的引导下对流天气得到加强(许新田等,2012)。对流云团经迎风坡动力抬升后,发展更加旺盛,说明地形的强迫抬升可以把一个较弱的积云发展成强的对流云(刘引鸽,1995)。地形的改变可以直接影响水汽通量及散度的分布,进而影响云和降水(刘卫国和刘奇俊,2007;邓诗茹和邹海波,2015)。在中尺度或大尺度地形影响下冷、暖云产生的降水都会增多,但冷云过程起主导作用,在冷云降水过程中,过冷水的含量会影响冰晶增长,但不是唯一条件。冰相粒子的凝华增长可出现在含水不多的饱和云中。当温度为 $-16\sim-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,水汽的凝华率达最大(廖菲,2007)。Hobbs等(1973)研究发现,当冰粒子浓度放大100倍时,降水落区可越过山顶向更远的地方输送,产生背风坡降水、降雪现象。

## 4 地形对暴雨的影响研究

### 4.1 地形对大气垂直运动的影响

地形对于暴雨的强度及落区有很大的影响,暴雨总是出现在山脉的迎风坡,而且山脉附近的地形对降水也有促进作用(陈潜和赵鸣,2006)。地形对风场的影响主要表现在对过山气流的抬升作用和地



形强迫作用引起的垂直速度。地形强迫产生的垂直速度是由地形抬升和边界层摩擦辐合两者共同引起的,受地形抬升产生的垂直速度为

$$W_t = -\rho_0 g \left( u_0 \frac{\partial h}{\partial x} + v_0 \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad (1)$$

由边界层摩擦辐合引起的垂直速度可表示为

$$W_f = -\rho_0 g \frac{C_d \sqrt{u_0^2 + v_0^2}}{fRT_0} \left( \frac{\partial v_0}{\partial x} - \frac{\partial u_0}{\partial y} \right) \quad (2)$$

式(1)、(2)中, $\rho_0$ 为地面空气密度, $g$ 为重力加速度(通常取 $9.8 \text{ m/s}^2$ ), $h$ 为山地高度, $u_0$ 、 $v_0$ 为地面水平风的纬向、经向分量,拖曳系数 $C_d$ 为常量( $2.5 \times 10^{-3}$ ), $R$ 为干空气比气体常数( $287 \text{ J/(K} \cdot \text{kg)}$ ), $f$ 为地转参数, $T_0$ 为气温。因此,受地形强迫作用而引起的垂直速度 $W_h = W_t + W_f$ 。

垂直速度是天气学分析中常考虑的物理量,大气的凝结和降水均与上升运动有关。葛晶晶等(2008)通过数值模拟得出垂直上升区与降水落区和降水强度的对应关系,垂直上升运动中心位于大巴山东部山脉处,向上伸展至 $550 \text{ hPa}$ ,表现为较强的地形抬升,且上升运动中心基本为降水大值中心。王沛东和李国平(2016)研究了地形高度、垂直速度与降水的位置和强度之间的关系,指出垂直速度的变化与地形起伏具有相似性,垂直运动的峰值与降水量的峰值落区位置相近,受地形抬升引起的垂直速度的贡献要大于边界层摩擦辐合。

#### 4.2 静力稳定度在地形降水中的作用

静力稳定度可以衡量大气密度的垂直分布,与大气的相对湿度有着密切的联系。干状态下的静力稳定度方程:

$$N^2 = g \frac{d \ln \theta}{dz} = \frac{g}{T} \left( \frac{dT}{dz} + \Gamma_d \right) \quad (3)$$

就干湿空气而言,在定义湿静力稳定度时必须要考虑水汽含量。更为重要的是,湿空气还要考虑水的相变及潜热释放。Lalas等(1973)给出的湿空气静力稳定度表达式:

$$N_m^2 = \frac{g}{T} \left( \frac{dT}{dz} + \Gamma_m \right) \left( 1 + \frac{Lq_s}{RT} \right) - \frac{g}{1+q_w} \frac{dq_w}{dz} \quad (4)$$

式(3)、(4)中, $g$ 为重力加速度(通常取 $9.8 \text{ m/s}^2$ ), $\theta$ 为位温, $T$ 为大气温度, $\Gamma_d$ 、 $\Gamma_m$ 为干、湿绝热温度递减率, $R$ 是干空气比气体常数, $L$ 为潜热量, $q_s$ 为饱和比湿, $q_w$ 为水汽和液态水的总合。Durrant和Klemp(1982)对比研究了干湿状态下的静力稳定度指出,在高温高湿的条件下两者差异较大。姚昊等

(2009)基于静力稳定度对地形降水的研究指出,湿大气静力稳定度与重力波的发生发展、传播机制有直接关系。当静力稳定度偏小时,地形重力波得不到应有的维持,容易破碎;当静力稳定度偏大时,由理查森数分析得出重力波在此环境下很难形成;当静力稳定度适中时,重力波才会得到有效的维持和传播。

#### 4.3 地形对水汽条件的影响

形成暴雨的三个条件分别是充沛的水汽、强烈的上升运动以及各尺度降水天气系统的稳定维持(陶诗言,1980)。而大气中的水汽主要集中在对流层中低层。水汽通量可以很好地体现出水汽的输送特征,水汽通量散度与降水分布有很好的对应关系。毕宝贵等(2006)研究了秦巴山对陕西地区强降水的影响发现,由于大巴山地形阻挡,秦岭西侧降水减少,而大巴山本身出现降水增幅效应。此外,大量暖湿空气从大巴山的峡口地形向北输送,导致秦岭东侧和南侧产生强降水。贾美亭等(2016)研究发现,当地形高度降低后,在迎风坡水汽的堆积也相应地减少。这说明地形对水汽输送的影响效果明显,在迎风坡水汽含量增加,降水量也增加。

#### 4.4 地形对雨量增幅的影响

刘裕禄和黄勇(2013)提出了两种雨量增幅的计算方法,分别为凝结函数法和水汽收支法。凝结函数法的计算公式:

$$F(P, T) = \frac{q_s T}{P} \left( \frac{LR - C_p R_v T}{C_p R_v T^2 + q_s L^2} \right) \quad (5)$$

$$M = \frac{1}{g} \int_0^{p_s} \delta \omega F dp \quad (6)$$

式(5)、(6)中, $\omega$ 、 $F$ 、 $M$ 、 $p_s$ 分别为垂直速度、凝结函数、降水增幅、饱和气压, $q_s$ 为饱和比湿, $\delta$ 为符号函数, $R$ 、 $C_p$ 、 $R_v$ 分别为干空气比气体常数( $287 \text{ J/(K} \cdot \text{kg)}$ ),干空气定压比热( $1005 \text{ J/(K} \cdot \text{kg)}$ ),湿空气比气体常数( $461 \text{ J/(K} \cdot \text{kg)}$ ), $L$ 为凝结潜热。水汽收支法的计算公式:

$$M = -\frac{1}{g} \int_0^{p_s} \frac{\partial p}{\partial t} dp - \frac{1}{g} \int_0^{p_s} \nabla \cdot (q\mathbf{V}) dp \quad (7)$$

式中右边第一项为可降水量,第二项为水汽通量辐合量项; $p_s$ 、 $q$ 分别为饱和水汽压、比湿, $\nabla$ 为一维拉普拉斯算子, $\mathbf{V}$ 为风速。

在模式模拟研究方面,研究地形对降水的增幅一般涉及到修改模式地形。大部分研究人员选择削减或者扩大地形高度,通过地形的敏感性试验来分析不同地形高度下的降水分布情况。郑庆林和吴军

(1996)研究降水增幅指出,地形的动力抬升对降水具有显著的增幅作用。董美莹等(2011)研究发现地形对降水增幅效应明显,有地形比无地形增加15%。朱红芳等(2015)通过模式研究地形对台风降水的增幅,半地形下24 h降水中心雨量从原地形230 mm减为170 mm;当把地形高度降为0后,24 h降水中心雨量减弱达70%,说明地形对此次台风降水的增幅作用明显。

## 5 讨论

受地形影响的降水个例非常多,通常具有突发性强、历时长、降水量大等特点。地形诱发降水的机制主要涉及动力和热力作用,越是复杂的地形对大气的流场、水汽输送和温湿结构的影响越明显。中国在这方面的研究晚于国外,目前也取得很多优秀的成果,但仍存在很多问题,如中国地形地貌复杂,造成一些山区观测资料的缺乏,单单利用观测分析去研究地形降水还存在很大的误差(彭乃志和傅抱璞,1995;林新彬等,2006)。因此,今后时期可充分利用卫星和雷达探测资料进行研究,也可从气候统计方面入手,对山地降水的强度、雷达回波演变特征和环流形势等指标进行统计分析,为预报提供参考。

目前,数值模拟是研究地形降水的重要技术方法之一。但是模式本身也存在很多误差,如初始场设定、模式内部地形、不同参数化方案和模式的分辨率等都会引起一定的误差(高学杰等,2006)。为了减小模式误差,可以从模式本身入手,由于一般模式内部地形较为粗糙,因此采用高分辨率真实地形替换模式里的地形,也可以对不同参数化方案进行尝试,找出最合适的组合。还可以从数据方面入手,采用高分辨率资料以及资料同化的方法,均能有效减小误差。

## 参考文献(References)

Bergeron T. 1950. Über der mechanismus der ausgiebigen Niederschläge [J]. Ber Deut Wetterd,23:1585-1600.  
 毕宝贵,刘月巍,李泽椿. 2006. 秦岭大巴山地形对陕南强降水的影响研究[J]. 高原气象,25(3):485-494. Bi B G, Liu Y F, Li Z C. 2006. Study on influence of the mechanical forcing of mesoscale topography on the extremely heavy rainfall in southern Shanxi on 8-9 June 2002[J]. Plateau Meteor,25(3):485-494. (in Chinese)  
 陈明,傅抱璞,于强. 1995. 山区地形对暴雨的影响[J].地理学报,50(3):256-263. Chen M, Fu B P, Yu Q. 1995. Influence of topography on storm rainfall[J]. Acta Geogr Sin,50(3):256-263. (in Chinese)

陈明,傅抱璞,郑维忠. 1996. 山地背风涡旋的数值研究[J]. 地理学报,(6):527-534. Chen M, Fu B P, Zheng W Z. 1996. Numerical experiments of mountain lee vortices[J]. Acta Geogr Sin, (6):527-534.  
 陈潜,赵鸣. 2006. 地形对降水影响的数值试验[J]. 气象科学,26(5):484-493. Chen Q, Zhao M. 2006. A numerical experiment on the effect of terrain on the precipitation[J]. Scientia Meteor Sinica,26(5):484-493. (in Chinese)  
 陈志昆,张书余. 2010. 地形在降水天气系统中的作用研究回顾与展望[J]. 干旱气象,28(4):460-466. Chen Z K, Zhang S Y. 2010. Review and outlook of landform influences on rainfall weather systems[J]. Arid Meteor, 28(4):460-466. (in Chinese)  
 Colle B A, Smith R B, Wesley D A. 2013. Theory, Observations, and Predictions of Orographic Precipitation[M]// Springer Atmospheric Sciences, Mountain Weather Research and Forecasting. Dordrecht:Springer:291-344  
 邓诗茹,邹海波. 2015. 2014年6月21-22日江西省暴雨天气过程模拟及地形影响试验[J]. 气象与减灾研究,38(3):19-25. Deng S R, Zhou H B. 2015. Numerical simulation and analysis of topography influence on rainstorm in Jiangxi[J]. Meteor Disaster Reduction Res,38(3):19-25. (in Chinese)  
 董美莹,陈联寿,程正泉,等. 2011. 地形影响热带气旋“泰利”降水增幅的数值研究[J]. 高原气象,30(3):700-710. Dong M Y, Chen L S, Cheng Z Q, et al. 2011. Numerical study of topography effect on rainfall reinforcement associated with tropical cyclone ‘Talim’ [J]. Plateau Meteor, 30(3):700-710. (in Chinese)  
 Durran D R, Klemp J B. 1982. On the effects of moisture on the Brunt-Vaisala frequency [J]. J Atmos Sci,39(10):2152-2158.  
 高学杰,徐影,赵宗慈. 2006. 数值模式不同分辨率和地形对东亚降水模拟影响的试验[J]. 大气科学,30(2):185-192. Gao X J, Xu Y, Zhao Z C. 2006. Impacts of horizontal resolution and topography on the numerical simulation of East Asian precipitation[J]. Chinese J Atmos Sci,30(2):185-192. (in Chinese)  
 葛晶晶,陆汉城,钟玮. 2008. 地形影响下四川暴雨的数值模拟分析[J]. 气象科技,28(2):176-183. Ge J J, Lu H C, Zhong W. 2008. Numerical simulation and analysis of Sichuan rainstorm under terrain influence[J]. Meteor Sci Technol,28(2):176-183.  
 何钰,李国平. 2013. 青藏高原大地形对华南持续性暴雨影响的数值试验[J]. 大气科学,37(4):933-944. He Y, Li G P. 2013. Numerical experiments on influence of Tibetan Plateau on persistent heavy rain in south China[J]. Atmos Sci,37(4):933-944. (in Chinese)  
 Hobbs P V, Easter R C, Fraser A B. 1973. A theoretical study of the flow of air and fallout of solid precipitation over mountainous terrain: Part II. Microphysics[J]. J Atmos Sci,30(5):813-823.  
 Howard L N. 1961. Note on paper of John W. Miles[J]. J Fluid Mech,10(4):509-512.  
 贾美亭,朱晓炜,余文梅. 2016. 贺兰山地形对宁夏“7.29”暴雨过程水汽输送的作用分析[J]. 宁夏工程技术,15(2):123-129. Jia M T, Zhu X W, Yu W M. 2016. The analysis of terrain effect to water vapor transport of “7.29” heavy rain in Helanshan[J].

- Ningxia Eng Technol,15(2):123-129.
- 蒋兴伟,叶小敏,宋清涛. 2013. 中国“海洋一号”卫星图像上的冯·卡门大气涡街现象与动力分析[J]. 海洋学报, 35(3):96-103.
- Jiang X W, Ye X M, Song Q T, et al. 2013. Phenomenon and dynamical analysis of the atmospheric von Karman vortex streets on Chinese Haiyang-1 satellite image[J]. Acta Oceanologica Sinica,35(3):96-103.
- 蒋竹将,马振峰,刘佳,等. 2014. 一种改进的华西秋雨指数及其气候特征[J]. 大气科学,38(1):32-44. Jiang Z J, Ma Z F, Liu J, et al. 2014. Improved index and climatological characteristics of the autumn rain in western China[J]. Chinese J Atmos Sci,38(1):32-44.(in Chinese)
- Lalas D P, Einaudi F. 1973. On the stability of a moist atmosphere in the presence of a background wind[J]. J Atmos Sci,30(5):975-800.
- 李子良. 2006. 地形降水试验和背风坡回流降水机制[J]. 气象,32(5):10-15. Li Z L. 2006. Simulation of precipitation induced by reversal flow in the lee of mountain[J]. Meteor Mon,32(5):10-15.(in Chinese)
- 廖菲. 2007. 一次华北暴雨中地形动力作用对云和降水物理过程影响的数值研究[D]. 北京:中国科学院大气物理研究所. Liao F. 2007. Numerical study on influence of orographic dynamics on clouds and precipitation physics during a heavy rainfall process in North China[D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- 廖菲,洪延超,郑国光. 2007. 地形对降水的影响研究概述[J]. 气象科技,35(3):309-316. Liao F, Hong Y C, Zheng G G. 2007. Review of orographic influence on surface precipitation[J]. Meteor Sci Technol,35(3):309-316.(in Chinese)
- 廖菲,胡娅敏,洪延超. 2009. 地形动力作用对华北暴雨和云系影响的数值研究[J]. 高原气象,28(1):115-126. Liao F, Hu Y M, Hong Y C. 2009. Numerical study for the influences of orographic dynamic on cloud and precipitation in North China[J]. Plateau Meteor,28(1):115-126. (in Chinese)
- 林新彬,刘增基,邹燕,等. 2002. 福建省前汛期短历时降水气候的统计特征[J]. 应用气象学报,13(4):469-477. Lin X B, Liu Z J, Zhou Y. 2002. Statistical features of the ultra-short-range precipitation during early rainy season in Fujian province[J]. J Appl Meteor Sci,13(4):469-477. (in Chinese)
- 林之光. 1995. 地形降水气候学[M]. 北京:科学出版社:96-105. Lin Z G. 1995. Terrain precipitation of climatology[M]. Beijing: Science Press:96-105.
- 刘佳,王文. 2010. 一次暴雨过程的重力波特征分析[J]. 干旱气象,28(1):65-70. Liu J, Wang W. 2010. Characteristics of gravity wave During a rain storm process[J]. Arid Meteor,28(1):65-70.(in Chinese)
- 刘卫国,刘奇俊. 2007. 祁连山夏季地形云结构和云微物理过程的模拟研究(1):模式云物理方案和地形云结构[J]. 高原气象,26(1):1-15. Liu W G, Liu Q J. 2007. The numerical simulation of orographic cloud structure and cloud microphysical process in Qilian mountains in summer. Part ( I ): cloud microphysical scheme and orographic cloud structure[J]. Plateau Meteor,26(1):1-15.(in Chinese)
- 刘引鸽. 1995. 地形对对流天气和暴雨的作用[J]. 宝鸡文理学院学报(自科版), (3):68-70. Liu Y G. 1995. Preliminary analysis of antiaging in traditional Chinese medicine[J]. J Baoji Univ Arts Sci, (3):68-70.(in Chinese)
- 刘裕禄,黄勇. 2013. 黄山山脉地形对暴雨降水增幅条件研究[J]. 高原气象,32(2):608-615. Liu Y L, Huang Y. 2013. Study of Huangshan mountain terrain on precipitation enhancement condition[J]. Plateau Meteor,32(2):608-615.(in Chinese)
- 柳艳菊,孙冷,孙丞虎,等. 2012. 2011年秋季华西秋雨异常及成因分析[J]. 气象,38(4):456-463. Liu Y J, Sun L, Sun C H, et al. 2012. Analysis of anomalies of autumn rain in west China in 2011 and its possible mechanism[J]. Meteor Mon,38(4):456-463. (in Chinese)
- 罗霄,李栋梁,王慧. 2013. 华西秋雨演变的新特征及其对大气环流的响应[J]. 高原气象,32(4):1019-1031. Luo X, Li D L, Wang H. 2013. New evolution features of autumn rainfall in west China and its responses to atmospheric circulation [J]. Plateau Meteor,32(4):1019-1031.(in Chinese)
- Miles J W. 1961. On the stability of heterogeneous shear flows[J]. J Fluid Mech,10(4):496-508.
- Smith R B. 1989. Mechanisms of orographic precipitation[J]. Meteor Mag, 118(1401):85-88.
- Stoelinga M T, Stewart R E, Thompson G, et al. 2013. Microphysical processes within winter orographic cloud and precipitation systems[J]. Springer Netherlands,35(8):398-406.
- 彭乃志,傅抱璞. 1995. 我国地形与暴雨的若干气候统计分析[J]. 气象科学,15(3):288-292. Peng N Z, Fu B P. 1995. Some climatologically statistical features of storm with orography in China [J]. Scientia Meteor Sinica,15(3):288-292.(in Chinese)
- 千怀遂,李明霞. 1992. 秦岭-黄淮平原过渡带地形对降水影响[J]. 地理研究,11(3):84-88. Qian H S, Li M X. 1992. Orographic influence on precipitation in transitional zone between Qinling mountain range and Huang-Huai plain[J]. Geogr Res,11(3):84-88.(in Chinese)
- 寿绍文,励申申,姚秀萍. 2009. 中尺度气象学[M]. 北京:气象出版社:56-70. Shou S W, Li S S, Yao S P. 2009. Mesoscale meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press:56-70.
- 舒守娟,王元,李艳. 2006. 青藏高原地形扰动对其降水分布影响的研究[J]. 水科学进展,17(5):585-591. Shu S J, Wang Y, Li Y. 2006. Effect of topographic perturbation on the precipitation distribution in Tibetan Plateau[J]. Adv Water Sci,17(5):585-591.(in Chinese)
- Stobie J G, Einaudi F, Uccellini L W. 1983. A case study of gravity waves convective storms interaction; 9 May 1979 [J]. J Atmos Sci,40(12):2804-2830.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨[M]. 北京:科学出版社. 94-121. Tao S Y. 1980. Heavy rainfall in China[M]. Beijing: Beijing Sci Press:94-121.
- Uccellini L W, Koch S E. 1987. The synoptic setting and possible energy sources for mesoscale wave disturbances [J]. Mon Wea Rev,115(3):721-729.

- 吴迪,王澄海,何光碧. 2016. 青藏高原地区夏季两次强降水过程中重力波特征分析[J]. 高原气象, 35(4): 854-864. Wu D, Wang C H, He G B. 2016. Gravity wave characteristics in two summer heavy rainfall in the Qinghai-Xizang plateau[J]. Plateau Meteor, 35(4): 854-864. (in Chinese)
- 肖庆农,伍荣生. 1995. 地形对于气流运动影响的数值研究[J]. 气象学报, 53(1): 38-49. Xiao Q N, Wu R S. 1995. Numerical experiments of influence of topography on atmospheric motion[J]. Acta Meteor Sinica, 53(1): 38-49. (in Chinese)
- 许新田,刘瑞芳,郭大梅,等. 2012. 陕西一次持续性强对流天气过程的成因分析[J]. 气象, 38(5): 533-542. Xu X T, Liu R F, Guo D M, et al. 2012. Cause analysis of a continuous severe convective weather in shanxi[J]. Meteor Mon, 38(5): 533-542.
- 姚昊,潘晓滨,臧增亮,等. 2009. 静力稳定度对大地形降水影响的数值模拟研究[J]. 气象与减灾研究, 32(2): 20-26. Yao H, Zeng X B, Zang Z L, et al. 2009. Numerical simulation of the impact of static stability on the precipitation induced by the high mountain[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 32(2): 20-26. (in Chinese)
- 易军,寿绍文,张庆奎. 2015. 一次梅雨锋暴雨过程中的重力波特征[J]. 干旱气象, 33(6): 918-925. Yi J, Shou S W, Zhang Q G. 2015. Characteristics of gravity wave of a Meiyu front heavy rainfall from 7 to 9 July 2007[J]. Arid Meteorology, 33(6): 918-925. (in Chinese)
- 于晓晶,赵勇. 2016. 地形对天山夏季降水影响的模拟[J]. 中国沙漠, 36(4): 1133-1143. Yu X J, Zhao Y. 2016. Simulation of orographic effects on summer rain in the Tianshan mountains[J]. J Desert Res, 36(4): 1133-1143.
- 王春学,马振峰,王佳津,等. 2015. 华西秋雨准4年周期特征及其与赤道太平洋海表温度的关系[J]. 大气科学, 2015, 39(3): 643-652. Wang C X, Ma Z F, Wang J J, et al. 2015. The characteristics of huaxi autumn rain and its relationship with sea surface temperatures over the equatorial pacific[J]. Chinese J Atmos Sci, 39(3): 643-652. (in Chinese)
- 王沛东,李国平. 2016. 秦巴山区地形对一次西南涡大暴雨过程影响的数值试验[J]. 云南大学学报(自然科学版), 38(3): 418-429. Wang P D, Li G P. 2016. Numerical experiments of the impact of Qin-Ba mountains terrain on a rainstorm caused by southwest vortex [J]. J Yunnan Univ (Nat Sci Ed), 38(3): 418-429.
- 王文,刘佳,蔡晓军. 2011. 重力波对青藏高原东侧一次暴雨过程的影响[J]. 大气科学学报, 34(6): 737-747. Wang W, Liu J, Cai X J. 2011. Impact of mesoscale gravity waves on a heavy rainfall event in the east side of the Tibetan Plateau[J]. Trans Atmos Sci, 34(6): 737-747. (in Chinese)
- 臧增亮,张铭,沈洪卫,等. 2004. 江淮地区中尺度地形对一次梅雨锋暴雨的敏感性试验[J]. 气象科学, 24(1): 26-34. Zang Z L, Zhang M, Sheng H W, et al. 2004. Experiments on the sensitivity of meso-scale terrains in Jiang-Huai area to a heavy mold rain [J]. Scientia Meteor Sinica, 24(1): 26-34. (in Chinese)
- Zhang F Q, Koch S E, Davis C A, et al. 2000. A survey of unbalanced now diagnostics and their application[J]. Adv Atmos Sci, 17(2): 165-173.
- 章淹. 1983. 地形对降水的作用[J]. 气象, 9(2): 9-13. Zhang Y. 1983. The influence of topographic precipitation [J]. Meteor Mon, 9(2): 9-13. (in Chinese)
- 赵平,胡昌琼,孙淑清. 1992. 一次西南低涡形成过程的数值试验和诊断 II: 涡度方程和能量转换函数的诊断分析[J]. 大气科学, 16(2): 177-184. Zhao P, Hu C Q, Sun S Q. 1992. Numerical simulation and diagnosis of the formation process of SW vortex II: The diagnosis of vorticity equation and energy conversion function[J]. Chinese J Atmos Sci, 16(2): 177-184. (in Chinese)
- 郑庆林,吴军. 1996. 地形对9216号台风暴雨增幅影响的数值研究[J]. 南京气象学院学报, (1): 8-17. Zheng Q L, Wu J. 1996. Numerical Study of orographic effect on amplification of typhoon precipitation[J]. J Nanjing Institute Meteor, (1): 8-17. (in Chinese)
- 朱红芳,王东勇,娄珊珊,等. 2015. 地形对台风“海葵”降水增幅影响的研究[J]. 暴雨灾害, 34(2): 160-167. Zhu H F, Wang D Y, Lou S S, et al. 2015. Numerical test of topography effect on rainfall amplification associated with typhoon Haikui[J]. Torr Rain Disas, 34(2): 160-167.
- 朱民,余志豪,陆汉城. 1999. 中尺度地形背风坡的作用及其应用[J]. 气象学报, 57(6): 795-804. Zhu M, Yu Z H, Lu H C. 1999. The effect of mesoscale lee wave and its application[J]. Acta Meteor Sinica, 57(6): 795-804. (in Chinese)
- 朱素行,徐海明,徐蜜蜜. 2010. 亚洲夏季风区中尺度地形降水结构及分布特征[J]. 大气科学, 34(1): 71-78. Zhu S X, Xu H M, Xu M M. 2010. Structure and distribution of rainfall over mesoscale mountains in the Asian summer monsoon region [J]. Chinese J Atmos Sci, 34(1): 71-78. (in Chinese)