

地形在降水天气系统中的作用研究回顾与展望

陈志昆^{1,3}, 张书余²

(1. 兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省气象局, 甘肃 兰州 730020;
3. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃 兰州 730020)

摘要:地形对降水的影响一直是个研究热点, 本文主要综述了地形效应在降水天气系统的生成和发展过程中的作用。主要内容有: 地形对热带气旋的路径、结构、强度和降水的影响; 地形对中尺度切变线、西南涡、低空急流的形成、降水的影响; 地形对冷锋的移动、垂直运动以及锋生锋消的影响。

关键词:地形; 降水; 天气系统

中图分类号:S161.6⁺³

文献标识码:A

引言

暴雨是诱发洪涝、泥石流等自然灾害的主要因素之一, 会对人民的生命和财产造成重大的损失, 所以我们对其触发和发展机制的研究就很有必要。实际上, 地形对降水影响的研究一直都是一个热点, 陶诗言^[1]曾指出, 地形因素对中国各地夏季大到暴雨的日频分布和雨量分布都有很大的影响。R. B. smith^[2]指出: 在不同的气候和天气条件下, 不同大小和形状的山脉对降水都有不同的增强机制。地形对于气流的影响可分为动力效应和热力效应, 动力作用又可分为强迫抬升、摩擦效应以及动力阻挡, 其中动力阻挡作用主要取决于 Froude 数, 而对于大尺度山脉则取决于 Froude 数和 Rossby 数的乘积^[3]。很多研究都指出暴雨大多发生在山脉的迎风坡, 这是由于迎风坡气流动力抬升, 产生气旋式涡度引发低层的气旋式辐合^[4]。同时地形的热力作用又使地形垂直环流向上伸展和加强, 形成正反馈, 最终导致地形对降水的强烈增幅^[5-6]。在背风坡一般降水较少, 而在某些中尺度地形的影响下, 背风坡也常形成第二个辐合中心, 也可以形成降水。地形上空气流的抬升速度是由坡度、坡向以及迎风坡风速决定的^[7], 而它与降水气流之间的相互作用能够影响云滴的微物理转化机制以及空中各水成物的数量及分布^[8-10], 最终导致地形对降水的强度和落区产生很

大的影响。傅抱璞^[11]进一步指出地形对降水的最大影响是发生在盛行风向与向风坡坡向的交角接近于 0° 且向风面地形坡度为 45° 左右时。地形抬升对降水的增幅作用明显^[12], 并且随着纬度的变化, 降水随海拔变化情况可划分为热带型、赤道型、过渡型、中纬度型和极地型等5种类型^[13]。并且在地形程度均一的情况下, 地形降水都有一个最大降水高度, 而当地形呈阶梯形时, 也可出现2个或2个以上最大降水高度^[14]。

地形效应在降水天气系统的生成和发展过程中起到了关键的作用, 本文主要总结了地形对热带气旋(台风)、中尺度切变线、西南涡、低空急流以及冷锋等降水天气系统的影响。

1 地形对主要降水天气系统的影响

1.1 热带气旋

中国是热带气旋登陆次数最多的国家之一, 其中平均每年有7~8次强度达到了热带风暴及以上^[15]。热带气旋登陆之后带来的水汽和扰动能量对于所到之处的降水有重要的影响, 中国曾经发生的3次破历史纪录的特大暴雨都是台风造成的^[16]。台风暴雨主要有3种类型: 台风环流本身所造成的暴雨和台风与西风带系统或者热带其它系统共同作用而造成的暴雨以及受地形影响, 在迎风坡暖湿空气被迫抬升而形成的暴雨。目前地形对于热带气旋

收稿日期:2010-10-09; 改回日期:2010-10-26

基金项目:甘肃省气象局科学技术研究项目“祁连山区夏季降水预报技术研究”资助

作者简介:陈志昆(1988-), 甘肃定西人, 硕士, 主要研究地形对降水的影响. E-mail: chenzhk09@lzu.cn

的影响的研究主要集中在对其路径、强度、结构及降水等方面。

1.1.1 路径

西太平洋台风的路径主要可分为西移路径、西北移路径和转向路径。研究^[16]指出,当基本气流的突然变化、环境场比较弱的时候,热带气旋的路径会随着内部非对称结构、热带气旋周围其他天气尺度系统或中尺度系统与热带气旋相互作用以及中高纬度环流系统与热带气旋的相互作用的改变而发生变化。热带气旋在移动过程中经常会出现突然加速、停滞、回旋、蛇形跳跃及突然转向等复杂路径,地形在其路径的这种变化过程中有着重要的作用。陈联寿^[17]总结了台湾岛地形和环流因子对台风路径的偏折的影响,并给出了偏折的5种类型,其中第4种偏折就是由台湾岛地形作用引发的。孟智勇^[18]进一步指出台湾地形有利于在环境场中诱发一对偏差偶极涡,它是导致逼近台湾岛的热带气旋方向发生偏折的一个重要原因。当台风登陆之后,地形强迫形成的垂直运动能够向台风输送水平运动动量,从而可能影响热带气旋的路径。贺海晏等发现高地势对台风有一定的“吸引”作用,可以使台风朝向高地势方向产生偏折和加速^[19]。袁金南^[20]采用准地转的正压模式,研究了无非绝热加热时地形和边界层摩擦对登陆热带气旋路径的影响。发现边界层摩擦可以通过改变热带气旋的移动速度以及改变水平环流结构从而对登陆热带气旋西北移动路径产生影响。

1.1.2 强度和结构

热带气旋强度是影响台风降水中心强度的主要因素之一,除台风的强度之外,维持时间对于局地降水的强度和总量有着直接的影响。登陆热带气旋加强或维持的主要依靠潜热释放和斜压位能释放作为其能量源。地形主要通过地面抬升和地形摩擦影响热带气旋强度。一般而言台风登陆之后海面水汽和潜热输送通道变窄或被地形等因素切断,再加之地形摩擦,低层出现强烈的湍流和乱流,会造成登陆热带气旋能量的损耗,使得低压中心从底层开始衰减直至热带气旋消亡。在不考虑非绝热加热的情况下,登陆热带气旋强度的减弱主要是受到摩擦作用的影响^[21]。但是也有一些机制使得台风在衰减之后能够在内陆重新加强,造成意想不到的灾害。山脉地形在一定条件下形成的地形辐合线往往是热带气旋低压内部制造中尺度强对流系统的源,使其获

得新的涡度和动量,能够加强热带气旋的强度^[22]。沈树勤^[23]就曾指出地形辐合造成的中小尺度强对流系统可以在台风的前方或者右前侧生成龙卷或者雷暴等灾害。而当下垫面地形中有陆面饱和湿地或水面的时候,它们可以将潜热输送给热带气旋,也有可能致使热带气旋的再度加强。

1.1.3 地形对台风降水的影响

很多研究指出地形对于降水强度、范围以及落区有重要的影响。同样地形在台风降水过程中的作用也不可小觑。钮学新^[24]指出地形使台风降水中心及迎风坡雨量增大,背风坡雨量减少。冀春晓^[25]等用MM5模式对0414号台风Rananim进行了数值模拟研究发现台风离陆地较远时,螺旋雨带基本环绕台风中心呈对称分布,而当台风登陆之后,台风中心西北侧雨强比东南侧的要强。台风的降水分布往往都呈现出不对称的特点,并且大多数热带气旋在移动方向的右半圆区比左半圆区的降水在范围和强度上都要更大。研究指出地形强迫容易在底层台风的西北侧激发中尺度对流云团,形成中尺度雨团,是造成台风中心南北雨区和雨量的不对称分布主要原因。岳彩军^[26]用WRF模式对“海棠”台风的降水分布做了模拟研究,指出地形引起的垂直上升运动是决定其降水强度和分布的主要因素。进一步的研究表明,地形抬升和地表摩擦作用强迫产生的降水场台风北侧明显强于南侧,这是造成台风非对称降水的主要因素。在此次台风降水过程中地形因子强迫降水的不对称分布是由气象因子强迫南北分布的不对称性诱发产生的。地形是使台风降水增加和分布不对称的一个非常重要的因素,而地形在迎风坡的降水增幅作用和背风坡的降水减幅作用,更加剧了这种不对称分布。

1.2 中尺度切变线

切变线在我国各地区、各个季节都会出现,会引起不同强度的降水过程。尤其在夏季,切变线是我国主要的降水天气系统。它通常是指在850 hPa或700 hPa等压面上近于东西向的风向不连续线。由于在切变线附近风向辐合最强烈,存在着强烈的上升气流,因此暴雨和强对流天气就常出现在切变线附近^[27]。

1.2.1 切变线的形成

我国很早就开展了对于切变线形成、发展和维持机理的研究,地形在切变线的演变过程中也发挥了关键的作用。赵桂香^[28]对一次山西的切变线暴

雨进行了数值模式模拟研究,结果显示:去掉太行山,中尺度切变线将变得不明显,可见该中尺度切变线的形成与地形关系密切。地形的动力抬升、屏障作用和热力作用是触发切变线的重要机制。罗四维^[29]就指出高原东侧的切变线的生成主要是由于地形边界层内的摩擦作用,使得在靠近高原边缘的偏西北气流中,经常有反气旋性涡度向下游输送所产生的。纪立人^[30]则进一步指出当气流过境地形时,通过摩擦和曲率效应,会形成特殊的涡度和涡度平流分布,有利于切变线的产生。何光碧^[31]等通过切变线生成的源地分析表明:切变线主要出现在海拔高度较高和地形坡度陡峭的地区,高原加热和陡峭地形的动力作用是切变线形成的原因之一。近期,王珏^[32]等也通过一次福建暴雨的地形敏感性实验得出结论,由于福建北部的喇叭口地形和武夷山迎风坡共同作用,导致低层西南暖湿气流的转向辐合,触发了中尺度切变线形成,加速了上升运动和高层对流发展,促进了降水的形成。

1.2.2 切变线降水

低空切变线能够诱发不稳定能量的释放,并形成强对流天气,最终形成降水。而当切变线在移动过程中遇到地形阻挡,可使得切变线停滞加强常常能引发强降水。在切变线降水过程中,中尺度地形通过对动力场和水汽场的扰动对降水的落区和强度有重要影响,然而各个地形对降水的影响是不同的,同一个地形在不同时段对降水的影响也是不同的,地形和切变线的相对位置是造成这一影响的关键所在^[33]。在非切变线降水过程中,主要降水系统和切变线作用的叠加往往能造成降水强度的加大。张杰^[34]等在对山东的一次暴雨研究后指出:850 hPa“人字形”切变线造成了该地区局地辐合加强、降水系统移动缓慢,触发了副高西北侧边缘的高温高湿的不稳定能量的释放,是强降水形成的关键因素。

1.3 西南涡

西南涡是指形成于四川西部地区,700 hPa或850 hPa上具有气旋性环流的闭合小低压,多在低涡的中心区或者移向的右前方形成降水。它主要的移动路径有向东南、东北或沿长江东移。陈忠明^[35]等就发现1998年长江中上游降水异常偏多与西南涡的多发有密切的关系。

1.3.1 地形的动力作用

青藏高原地形对西南涡的形成有决定性影响,气流绕流经过高原时,高原地形对其北部及南部气

流的阻滞、绕流作用以及侧边界的“不均匀摩擦效应”,促成了西南涡生成^[36]。四川盆地处于西风带的背风坡,有利于降压形成动力性涡旋,也是西南涡形成的有利地形因素。高守亭^[37]就发现西南低涡的形成与盆地、河谷地形以及其动热力因素造成的上下气流分层有关,同时也指出小型的凸起山脉对西南低涡的形成没有明显的作用。高原除了在西南涡的生成阶段有重要作用,高原地形对于西南涡在四川盆地700 hPa的维持以及发展也非常必要^[38]。而当西南涡离开源地,青藏高原的下坡作用、秦岭—大巴山的爬坡作用,以及通过青藏高原的绕流作用,在四川盆地上空形成南、北2支气流的切变与辐合,这2方面的共同作用,决定了西南涡的移动和发展。徐亚梅^[39]等的研究发现低空急流在四川盆地东北侧引起低层强辐合也是西南低涡得以发展的重要原因。郑庆林^[40]等通过地形的敏感性试验发现,当地形降低时,相应的地形动力作用要减弱,就不能很好的对西南涡进行模拟。而当无地形时,西南涡的移动、发展与实况差异大,这是由于青藏高原大尺度地形的绕流作用造成涡北面的冷空气及南支暖湿空气形成的辐合切变,为西南涡的移动、发展提供了水汽和能量。当西南涡离开源地,其发展演变与所到之处的局地地形也密切相关。周后福^[41]等对一次大别山低涡降水的研究发现,大别山区的地形抬升是低涡增强、发展的触发机制。当低涡接近大别山区时,低涡明显加强;当低涡逐渐远离大别山区时,低涡则减弱。

1.3.2 地形的热力作用

除了动力作用,地形的热力作用在西南涡的生成和发展中也有着重要的作用。赵思雄^[42]研究了一次西南低涡暴雨,指出川东地区的特殊地形的动力抬升和潜热释放,是西南低涡产生和维持的重要条件。李国平^[43]等利用热成风适应理论探讨暖性西南低涡的形成机制,结果表明,由于地面感热加热与暖平流作用在西南低涡源地形成较大的非热成风涡度,在一定的层结和尺度条件下,其热成风调整过程可在低层形成暖性西南低涡。另外,冷空气活动、大气热力作用和干湿对比明显的能量锋系统对西南低涡也有明显的影响^[44]。地形的热力作用和潜热加热对西南涡发展过程中的强度有重要影响。赵平^[45]等利用数值试验结果进行涡度方程以及位能、散度风动能和旋转风动能之间的能量转换函数诊断分析。结果表明:从涡度收支上看,地形和潜热加热

通过增大辐合使涡度增加;从能量转换上看,在低层地形和潜热加热加强了位能向散度风动能的转换以及散度风动能向旋转风动能的转换,在高层地形通过加强旋转风动能向散度风动能转换,使高空辐散增强,而潜热加热通过加强位能向散度风动能的转换亦使高空辐散增强,从而对低涡的强度产生影响。尽管地面感热及潜热通量虽对西南涡的发展有一定促进作用,但相对于动力作用还是要小很多。

1.4 低空急流

低空急流对我国降水、暴雨的发生有着重要的作用,据有关统计 79% 的低空急流有暴雨发生,而 83% 的暴雨天气伴有低空急流。

1.4.1 低空急流的形成

低空急流的产生与维持与高低空环流的耦合有关,是大气环流演变的产物。在高空急流出口区的高低空急流耦合的形势下,低空急流造成暖湿空气输送,高空急流则导致干冷空气平流,从而加强了大气潜在的不稳定,而且高低空急流耦合产生的次级环流的上升支流将触发潜在不稳定能量的释放,常常有利于强对流和降水的发生、发展。地形在低空急流的产生、发展及降水过程中都起着重要的作用,郑钢^[46]等通过一次南方暴雨的模拟研究,验证了江南丘陵、云贵高原对偏南风存在狭管作用,促进了低空急流的形成。我国高原东侧常常有偏南低空急流,陈玉春^[47]等指出这是由于西伸的西太平洋副热带高压西侧较强的东南风气流遇高原地形东边界屏障后,沿其绕流并进一步加速后形成的。孙淑清^[48]等通过高原敏感性试验发现,去掉地形后原低空急流将不复存在;而向南延伸青藏高原地形,能够显著改变原低空急流的方向和强度。并且认为东亚季风气流是低空急流主要的大尺度背景场及动量源,由于东亚季风气流在对流层低层最强,因此它相比西风带偏南气流及副热带高压,对低空急流作用更加显著。地形的热力作用对低空急流也有影响,北京夏季夜间常有降水发生,李炬^[49]等研究发现低空急流是形成降水的重要原因,进一步成因分析认为,斜坡地形产生的热成风、山谷风环流可能是北京夏季夜间低空急流形成的主要原因。地形下垫面的性质对于低空急流也有一定的影响,在同样的环流形势下,绿洲上急流出现的高度低,而沙漠、戈壁急流位置相对高一些,这可能也是由于不同下垫面的热力差异引起的^[50]。

1.4.2 低空急流降水

低空急流对水汽输送有很大的贡献,当遇到地形时气流发生转向,并且地形的动力和热力抬升还能触发不稳定能量,致使低空形成不稳定层结,更成为降水形成的重要的触发机制。张家国^[51]等对湖北襄樊一次特大暴雨做了中尺度分析,指出此次襄樊暴雨过程的发生与其背部 115 m 处一支东北风超低空急流的建立有密切的关系,由于襄樊西侧武当山的屏障作用,超低空东北急流折向东南与偏南暖湿气流在静止锋附近形成中尺度气旋性辐合上升运动。并且急流的维持对于持续性的辐合上升运动起到了关键的作用,是造成持续性降水的重要原因。低空急流常常和切变线、西南涡一起活动。其中低空急流的水汽输送和潜热加热对西南低涡发展和暴雨的产生有重要的热力和动力作用。陈贵川^[52]等用 MM5 模式对一次湖南大暴雨进行了数值试验,在去掉江南丘陵和云贵高原后,由于地形的狭管作用消失,南北热力差异减弱,低空急流随之减弱;并且低空急流可以通过正涡度平流输送影响西南涡和切变线的强度。

1.5 冷锋

锋面是指冷暖空气的过渡带,是近地面降水的主要天气系统,锋面受地形的影响很大,主要有以下 3 个方面:(1)地形对锋面结构、移动、变形、阻挡、锢囚等过程的影响;(2)地形对过山锋面的锋生、锋消动力学影响;(3)地形对与过山锋面的垂直运动有关的云系特征、雨带形成及分布的影响^[53]。

1.5.1 锋面移动、变形、锢囚

当冷锋移近孤立山脉时,正对山脉的锋段受阻而停滞不前,而山脉两侧的锋段可绕山而过,所以过山时冷锋会呈现出弓形,如果冷锋强度较弱或山脉较高时,正面冷锋将长期停留,以至于两侧绕过的锋段在山后相会,从而形成地形锢囚。地形影响下冷锋的变形和锢囚是一个很复杂的气象现象,不同高度的地形对于冷锋变形及锢囚的影响不同,同一高度的地形对于不同强度的冷锋运动也有不同的影响^[54]。边志强^[55]等运用 MM5 模式对 1998 年 11 月 20~21 日的华北锢囚锋形成过程进行数值模拟,当去掉太行山后,锢囚锋形成的时间会偏早、地点偏西、强度偏弱。因此,太行山的存在对该次锢囚锋生成发展起至关重要的作用。周昆^[56]等对大别山地区的冷锋数值研究发现,由于大别山地形的地形效用,使得平原和山区之间产生水平气压梯度以及山区北部的大气层有大的对流有效位能,容易触发对

流并使其剧烈发展;此外,当冷锋移近大别山时,锋后东北风在山区北侧发生堆积和偏转,形成了额外水平风场辐合,使中尺度对流系统更易形成和维持,从而造成大别山地区降水的发生。

1.5.2 过山锋面的垂直运动

地形能够影响与过山锋面的垂直运动有关的云系特征、雨带形成及分布。农尚尧^[57]等利用半地转模式研究了对称和非对称地形以及双地形对冷锋锋生过程的影响。结果显示,山体对锋面垂直速度的增幅作用随地形坡度增大而增大,地形坡度越大出现多次极大上升速度的可能性也越大。当冷锋过双地形时,其锋面强度有2次减弱和加强的过程,上升速度则得到明显加强,并有可能在锋前产生多条中尺度上升运动带和多重中尺度雨带。大尺度地转强迫造成的上升运动、地形次级环流以及地形对锋面的动力抬升作用和阻滞作用可以对过山锋前的中尺度强对流天气系统的发生发展产生影响,从而也可以影响过山锋面降水的强度和落区。熊秋芬^[58]等通过WRF模式对2003年的一次梅雨锋暴雨天气过程在有、无地形情况下进行数值模拟研究,研究表明:有地形的模拟结果较好地再现了梅雨锋降水过程、主要影响系统和梅雨锋的结构,而无地形的模拟中,模拟的雨带偏南、强降水范围偏大、降水系统偏南。并且指出地形对梅雨锋暴雨的雨带形成和分布的影响,主要是通过地形减弱北方冷空气的强度来起作用的。

1.5.3 锋生、锋消

Bannon^[59]曾先后用准地转理论和半地转理论研究了地形对锋生的影响,但是由于理论本身的不足,使得研究结果存在一定缺陷。之后Zehnder^[60]利用半地转方程,通过物理空间中求数值解的方法研究了锋面过山时的生消规律,发现在冷锋过山时,其强度在山前减弱、山后加强,即山前锋消、山后锋生。在我国,有些研究者认为冷锋在山前强度增强,在下坡时强度减弱,但最近赵思雄^[61]对高原东侧一次锋生过程的模拟发现,高原东侧锋生离开高原之后,自西向东移动尽管海拔高度不断降低,然而冷锋却逐步加强,最大值集中出现在华北地区。这一结论也被肖庆农等所证实,肖庆农^[62]等对冷锋过山时的锋生锋消机制进行了数值研究,试验结果表明:当无地形影响时,由于变形场的锋生作用与摩擦等因子的锋消作用相互抵消,冷锋最终达到其强度的准定常状态;当考虑地形影响时,地形强迫环流与锋面

环流相互作用,使得锋面强度在山前和山后发生变化,在冷锋开始爬坡时锋生,爬过半山腰后开始锋消,过山顶后锋面强度变化不明显或者有微弱锋生,到达山脚后开始强烈锋生,并在地形下游其强度达到最大;总之,冷锋在翻越山脉或从高原移到平原之后,锋面发展的强度比冷锋不遇到地形时的更大。

2 总结与展望

综上所述,在研究不同尺度天气系统降水的时候,考虑地形的影响是非常必要的。而地形的动力和热力作用对于降水的作用大小有所不同,范广洲等^[63]利用RegCM2模式研究华北夏季暴雨,发现地形对华北地区平均地表热源的影响不大,华北地区西部和北部山脉对区域降水的影响主要表现在动力作用方面;而在夜间,热力作用显得十分重要,这是由于夜间辐射能导致地面冷却,而地面冷却将导致迎风坡上正的气压扰动增强,从而加强地形阻塞作用,这种阻塞作用将增大山地的地形抬升作用^[5]。所以在具体的降水预报业务中,我们应该更加注重地形的动力作用,同时也应兼顾夜间地形热力作用的影响。

地形对于不同降水天气系统的影响也有所不同:地形的作用能够造成热带气旋路径的突变,强度的衰减或再度加强,以及台风降水的非对称分布;当气流过境地形的时候,地形的摩擦效应是切变线生成的主要因素,同时中尺度地形通过对动力场和水汽场的扰动对降水的落区和强度产生重要影响;西南涡在其产生、发展和移动过程中,高原地形的阻滞、扰流和侧边界摩擦作用以及特殊的四川盆地地形均发挥了重要作用,同时地形的热力作用对其在局地的维持和发展也有影响,但相对动力作用要小;低空急流对水汽的输送有很大贡献,东亚季风是低空急流形成重要能量源,而地形的狭管效应和热力作用对其形成有重要的促进作用;地形能够对冷锋的锋生、锋消、锢囚,以及锋面上空的气流垂直运动产生影响,最终影响降水的落区和强度。因此在不同天气系统的降水过程中,正确考虑地形的作用,能够使得我们对于降水的影响区域和强度作出更加准确的预报。

地形的作用研究开展的较早,发展到现在已经有了很多的成果,但仍然有很多难题摆在我们面前,需要我们不断的探索并予以克服。

(1)由于我国有些地区台站分布比较稀疏,所

以往造成气候资料记录的不完备等问题,使得通过观测资料分析研究地形对降水的作用存在一定的困难。然而相比于地面台站资料,受限于观测手段的不足,高空资料尤其是云团内部微物理观测资料就显得相当匮乏,这就造成了云微物理过程,以及其在不同天气形势背景下、不同地形上空的发展、演变机制研究的困难。

(2)目前,数值模拟研究已经成为研究地形作用的最重要的手段之一。然而模式也存在自身的缺陷,台站观测资料的不完备,使得模式初始场的设定存在一定的偏差,最终影响到模拟的效果。想要完善初始资料,必须使得台站分布更加合理,但是由于这个周期较长,所以好的资料同化方案以及初始场中模式地形的合理设定对于提高降水模拟的精准度的作用就显得尤为突出;同时模式的分辨率对于模拟的效果也很关键,闵莉^[64]等研究发现当使用平滑地形但分辨率较高的模式,与使用实际地形但分辨率较低的模式相比较,前者能取得更好的模拟结果。说明在东亚地区降水模拟中,与地形相比,模式分辨率起着至少同样重要的作用。只有对模式进行不断的改进,才能取得更好的模拟结果。

我们相信,观测手段的不断丰富、发展,有利于得到更加完备的观测资料,从而为从观测资料着手研究地形的作用提供良好的条件;同时伴随着数值模拟技术的不断发展、完善,必将使得降水天气系统中地形的作用研究更上一层楼。

致谢:兰州中心气象台的李照荣副台长在本文的撰写过程中给予了很大的帮助,在此表示诚挚的感谢。

参考文献:

[1] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京:科学出版社, 1985. 225.
 [2] Smith R B(张义民译). 地形降水的机制[J]. 北京气象, 1991(4):39-41.
 [3] 胡伯威. 中尺度地形对大气铅直运动和强降水的影响[J]. 暴雨灾害, 2000(1):8-23.
 [4] 孙继松. 气流的垂直分布对地形雨落区的影响[J]. 高原气象, 2005, 24(1):62-69.
 [5] 廖菲, 洪延超, 郑国光. 地形对降水的影响研究概述[J]. 气象科技, 2007, 35(3):309-316.
 [6] 张楠楠, 桑建人, 杨佩, 等. 宁夏中雨及以上降水过程气候特征分析[J]. 干旱气象, 2010, 28(2):173-178.
 [7] 沈玉伟, 张耀存, 钱永甫. 次网格地形动力效应参数化及其对降水模拟效果的影响[J]. 高原气象, 2007, 26(4):655-664.
 [8] 陈乾, 陈添宇, 肖宏斌. 祁连山区夏季各类降水过程的典型个例分析[J]. 干旱气象, 2008, 26(3):1-7.

[9] 段海霞, 刘新伟. 喇叭口地形对一次暴雨影响的数值试验[J]. 干旱气象, 2009, 27(4):327-333.
 [10] 刘卫国, 刘奇俊. 祁连山夏季地形云结构和云微物理过程的模拟研究(II):云微物理过程和地形影响[J]. 高原气象, 2007, 26(1):16-28.
 [11] 傅抱璞. 地形和海拔高度对降水的影响[J]. 地理学报, 1992, 47(4):302-314.
 [12] 陈跃, 陈乾, 陈添宇, 等. 祁连山地形云试验区自然地理和气候特征[J]. 气象科技, 2008, 36(5):575-580.
 [13] Reger G Barry. Mountain Weather and Climate[M]. Printed in the United States of America, 1981. 150-200.
 [14] 李岩璞, 张强, 许霞, 等. 祁连山与周边地区降水与地形的关系[J]. 冰川冻土, 2010, 32(1):52-61.
 [15] Ren Fu min. Typhoon Impacts on China's Precipitation during 1957-1996[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2002, 19(5):943-952.
 [16] 王志烈, 费亮. 台风预报手册[M]. 北京:气象出版社, 1987.
 [17] Chen Lianshou. The research activities of landfalling tropical cyclones[A]. In Second Regional Technical Conference on Tropical Cyclones[C]. Storm Surges and Floods, Brisbane, Australia, 2004. 17-18.
 [18] 孟智勇, 徐祥德, 陈联寿. 台湾岛地形诱发次级环流系统对热带气旋异常运动的影响机制[J]. 大气科学, 1998, 22(2):156-170.
 [19] 贺海晏, 杨平章. 台风移动规律的研究 II. 小地形与边界层的动力作用[J]. 热带气象学报, 1995, 11(2):97-105.
 [20] 袁金南, 谷德军, 梁建茵. 地形和边界层摩擦对登陆热带气旋路径和强度影响的研究[J]. 大气科学, 2005, 29(3):429-437.
 [21] 袁金南, 黄燕燕, 刘春霞, 等. 陆地摩擦对登陆热带气旋路径和强度影响的模拟研究[J]. 热带气象学报, 2007, 23(6):531-537.
 [22] 陈联寿, 孟智勇. 我国热带气旋研究十年进展[J]. 大气科学, 2001(3):12-18.
 [23] Shen W, Ginis I. A numerical investigation of land surface water on landfalling hurricane[J]. J Atmos Sci, 2002:789-802.
 [24] 钮学新, 杜惠良, 滕代高, 等. 影响登陆台风降水量的主要因素分析[J]. 暴雨灾害, 2010, 29(1):76-80.
 [25] 冀春晓, 薛根元, 赵放, 等. 台风 Ranim 登陆期间地形对其降水和结构影响的数值模拟试验[J]. 大气科学, 2007, 31(2):233-244.
 [26] 岳彩军. “海棠”台风降水非对称分布特征成因的定量分析[J]. 大气科学, 2009, 33(1):51-70.
 [27] 陶诗言, 丁一汇, 周晓平. 暴雨和强对流天气的研究[J]. 大气科学, 1979, 3(3):228-238.
 [28] 赵桂香. 一次阻高背景下地形对晋南特大暴雨的作用分析[J]. 高原气象, 2009, 28(4):897-905.
 [29] 罗四维. 冬季我国高原东侧切变线形成的分析[J]. 气象学报, 1963, 33(3):305-319.
 [30] 纪立人. 江淮切变线形成过程的数值分析[J]. 气象学报, 1965, 35(1):18-33.
 [31] 何光碧, 高文良, 屠妮妮. 2000-2007年夏季青藏高原低涡切变线观测事实分析[J]. 高原气象, 2009, 28(3):549-555.

- [32] 王珏,沈新勇,寿绍文,等. 06·6 福建大暴雨的数值模拟及复杂地形影响试验[J]. 南京气象学院学报,2008,31(4):546-554.
- [33] 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[J]. 气象科学,2004,24(1):26-34.
- [34] 张杰,张艳,亓翠云,等. 一次区域性大暴雨过程的成因分析[J]. 山东气象,2010,30(1):5-10.
- [35] 陈忠明,徐茂良,闵文彬,等. 1998年夏季西南低涡活动与长江上游暴雨[J]. 高原气象,2003,22(2):162-167.
- [36] 姜勇强,王元. 地形对1998年7月鄂东特大暴雨鞍型场的影响[J]. 高原气象,2010,29(2):297-308.
- [37] 高守亭. 流场配置及地形对西南低涡形成的动力作用[J]. 大气科学,1987,11(3):263-271.
- [38] 彭新东,程麟生. 高原东侧低涡切变线发展的个例数值研究Ⅱ中尺度数值模拟[J]. 兰州大学学报,1992,28(2):163-168.
- [39] 徐亚梅. 低空急流的加强对深厚西南低涡发展及稳定维持的作用[J]. 浙江大学学报(理学版),2003(01):98-102.
- [40] 郑庆林,王必正,宋青丽. 青藏高原背风坡地形对西南涡过程影响的数值试验[J]. 高原气象,1997,16(3):225-234.
- [41] 周后福,郭品文,翟菁,等. LAP分析场资料在暴雨中尺度分析中的应用[J]. 高原气象,2010,29(2):462-470.
- [42] 赵思雄,傅慎明. 2004年9月川渝大暴雨期间西南低涡结构及其环境场的分析[J]. 大气科学,2007,31(6):1059-1075.
- [43] 李国平,万军,卢敬华. 暖性西南低涡形成的一种机制[J]. 应用气象学报,1991,2(1):91-99.
- [44] 姜勇强,张维桓,周祖刚. 2000年7月西南低涡暴雨的分析和数值模拟[J]. 高原气象,2004,23(1):55-61.
- [45] 赵平,胡昌琼,孙淑清. 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,1992(2):177-184.
- [46] 郑钢,张铭. 一次切变线暴雨过程的诊断研究和数值试验[J]. 气象科学,2004,24(3):294-302.
- [47] 陈玉春,钱正安. 夏季青藏高原地形对其东侧低空急流动力影响的数值模拟[J]. 高原气象,1993,12(3):312-321.
- [48] 孙淑清, L Dell'osso. 青藏高原对东亚大尺度低空急流的动力影响[J]. 中国科学B辑,1984(6):564-574.
- [49] 李炬,舒文军. 北京夏季夜间低空急流特征观测分析[J]. 地球物理学报,2008,51(2):360-368.
- [50] 奥银焕,吕世华,陈玉春. 河西地区不同下垫面边界层特征分析[J]. 高原气象,2004,23(2):215-219.
- [51] 张家国,岳阳,牛淑贞,等. 一次长历时特大暴雨多普勒雷达中尺度分析[J]. 气象,2010,36(4):21-26.
- [52] 陈贵川,沈桐立,何迪. 江南丘陵和云贵高原地形对一次西南涡暴雨影响的数值试验[J]. 高原气象,2006,25(2):277-284.
- [53] Egger J, Hoinka K. Fronts and orography[J]. Meteor Atmos Phys, 1992(48):3-36.
- [54] Xiao qingnong. Distortion and occlusion of cold fronts under the influence of orography[J]. Acta Meteorologica Sinica,1994,8(4):440-449.
- [55] 边志强,王建捷,谈哲敏. 对华北锢囚锋个例的数值模拟分析[J]. 气象,2000,25(10):8-14.
- [56] 周昆,潘益农,王东勇,等. 大别山区地形对春季冷锋附近中尺度对流系统影响的数值模拟研究[J]. 南京大学学报(自然科学),2007,43(5):535-543.
- [57] 农尚尧,吕克利. 对称和非对称地形对冷锋锋生过程的影响[J]. 大气科学,1994,18(增刊):879-888.
- [58] 熊秋芬,胡江林,张耀存. 梅雨锋暴雨数值模拟中地形的作用[J]. 气象科学,2007,27(6):591-596.
- [59] Bannon P. A semi-geostrophic model of frontogenesis over topography[J]. Beitr Phys Atmos, 1984(57):393-408.
- [60] Zehnder J A, Bannon P R. Frontogenesis over a mountain ridge[J]. J Atmos Sci, 1988(45):628-644.
- [61] 赵思雄. 用10层准拉格朗日有限区域模式对高原东侧锋生过程的数值模拟[J]. 大气科学,1991(15):40-49.
- [62] 肖庆农,伍荣生,张颖. 地形的动力作用与冷锋锋生研究[J]. 大气科学,1997,21(3):289-296.
- [63] 范广洲,吕世华. 地形对华北地区夏季降水影响的数值模拟研究[J]. 高原气象,1999,18(4):659-667.
- [64] 闵莉,张志刚,刘文菁,等. 区域气候模式对地形影响东亚大气环流季节变化的数值模拟研究[J]. 气象科学,2008,28(2):155-162.

Review and Outlook of Landform Influences on Rainfall Weather Systems

CHEN Zhikun^{1,3}, ZHANG Shuyu²

(1. College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Gansu Provincial Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China; 3. Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Landform influences on precipitation has been a hot issue, the previous studies focus on topographic dynamical and thermodynamical effects, or topographic influences on precipitation intensity and spatial distribution. And this paper reviewed and discussed topographic influences on precipitation weather systems, including landform influences on the path, structure, intensity and precipitation of tropical cyclone, landform influences on the formation of shear line, southwest vortex and low level air flows, landform influences on the path, vertical motion and frontogenesis (frontolysis) of cold front.

Key words: landform; precipitation; weather system