杨莲梅，李霞，张广兴. 2011. 新疆夏季强降水研究若干进展及问题 [J]. 气候与环境研究，16 (2)：188－198. Yang Lianmei，Li Xia，Zhang Guangxing. 2011. Some advances and problems in the study of heavy rain in Xinjiang [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese)，16 (2)：188－198.

新疆夏季强降水研究若干进展及问题

杨莲梅　李霞　张广兴

中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所，乌鲁木齐　830002

摘　要　总结了1960～2009年新疆强降水领域的主要研究成果，从大尺度环流背景、天气尺度和中尺度系统、水汽特征进行了分类概括。由于有关新疆地区降水的关注和研究相对较少，近些年与东部地区差距日益加大，致使我们应对防灾减灾的能力严重不足。提出了待解决的问题：中亚低涡和低空偏东急流的结构特征、形成机理及对降水的影响；中尺度系统的特征及其发生、发展的物理机制；造成新疆地区暴雨的水汽源汇结构和接力输送机制；典型暴雨过程与高、中、低纬大范围水汽输送异常之间的关系等问题。这些问题的研究对推进新疆短期天气预报的发展和提高强降水预报准确率，增强防灾减灾能力具有重要意义。

关键词　新疆　夏季强降水　中亚低涡　低空急流　水汽

文章编号　1006－9585 (2011) 02－0188－11　**中图分类号**　P458.1＋21.1　**文献标识码**　A

Some Advances and Problems in the Study of Heavy Rain in Xinjiang

YANG Lianmei，LI Xia，and ZHANG Guangxing

Institute of Desert Meteorology，*China Meteorological Administration*，*Ürümqi*　830002

Abstract　The main study results on the heavy rain in Xinjiang are summarized from 1960 to 2009，which include large-scale circulation，synoptic scale systems，mesoscale systems，and water vapor characteristics. Because heavy rain in Xinjiang were less focused and studied，the gaps of heavy rain researches between the reasearches on precipitation in eastern China and Xinjiang are becoming larger and larger in recent years，which bring about severe lacks of capabilities coping with disaster prevention and reduction. Some problems remaining to be resolved are pointed out as follows：The structure and physical formation mechanisms of the middle-Asia vortex and easterly low-level jet stream and their impacts on rainfall；the structure features and physical mechanisms of the occurrence and development of meso-scale systems；the source-sink structure and relayed transportation mechanisms of water vapor which induce heavy rain；the relationship between typical rainstorm processes and the high-middle-low large-scale water vapor transportation anomaly，etc. To solve the above-mentioned problems，it is very important for improving the weather forecast accuracy of heavy rain and enhancing the capabilities of disaster prevention and reduction.

Key words　Xinjiang，heavy rain in summer，middle-Asia vortex，low-level jet stream，water vapor

收稿日期　2009－10－19收到，2010－12－20收到修定稿

资助项目　国家自然基金项目41075049，中央级科研院所基本科研业务费专项IDM200802，中国气象局沙漠气象研究基金Sqj2008001，新疆自然科学基金200821176

作者简介　杨莲梅，女，博士，研究员，主要从事中高纬大气动力学研究。E-mail：yanglm@idm.cn

1 引言

新疆位于中国西北部，面积约 166×10^4 km^2，占中国国土面积的 1/6，气候不受季风系统的直接影响（张家宝和邓子风，1987），是典型的大陆性干旱、半干旱气候。其北部有阿勒泰山，南部有昆仑山，中部横亘全境的天山将其分为北疆和南疆，形成“三山夹两盆”的独特地形，南、北疆气候差异显著。天山山区面雨量最大（史玉光等，2008），占全疆面雨量的 40.4%，年平均降水量为 409.1 mm；北疆地区占 34.3%，年降水量为 277.3 mm；南疆地区最少为 25.3%，年平均降水量 66.2 mm；夏季是新疆的雨季，面雨量为全年的 54.4%。新疆夏季强降水量的多少基本决定了夏季和年降水量的变化（杨莲梅，2003b），因此，夏季强降水一直是我们研究和预报的重点与难点。

暴雨是我国的主要灾害性天气之一，《中国之暴雨》（陶诗言，1980）全面总结了暴雨的气候学、基本形成条件、大尺度环流背景、中尺度系统的活动、造成暴雨的主要天气尺度系统及暴雨的分析和预报方法，至今仍然是气象学者对暴雨进行研究和预报的基础。在此基础上的一系列研究工作深入开展。主要系统性工作有国家重点基础研究发展规划项目“我国重大灾害天气形成机理和预测理论研究”及“我国南方致洪暴雨监测与预测的理论和方法研究”等项目，集中对我国南方暴雨系统发生、发展的机理和预测方法进行了深入研究，取得了丰硕成果，大都反映在项目专著中（陶诗言等，2001；伍荣生等，2004；赵思雄等，2004），极大地推动了我国暴雨领域的研究水平。孙淑清和周玉淑（2007）总结了近年来我国暴雨中尺度动力分析研究进展。王东海等（2007）对东北地区暴雨研究进行了较全面总结，并开展了国家自然科学基金重点项目“我国东北强降水天气系统的动力过程和预测方法研究”，近十几年我国东部地区暴雨的观测、监测、理论和预报技术都有了突飞猛进的进步，然而对新疆区域降水研究的关注和投入很少，基础理论和预报方法进展缓慢，随着社会经济的飞速发展，新疆强降水造成的损失及对水资源的影响日益加剧，与定时、定点、定量预报的需求差距非常大。

新疆虽然为干旱、半干旱区，每年夏季均会出现区域性的强降水过程，如 2001 年 7 月 28 日～8 月 2 日强降水天气过程，全疆普遍为小到中雨，部分地区为大到暴雨，41 个站（全疆共 69 站）出现大雨以上，其中 24 个站出现暴雨。2004 年 7 月 18 日～20 日新疆的大范围暴雨过程，有 20 个站日降水量超过暴雨量。1996 年 7 月中、下旬新疆出现了大范围较长历时的强降水天气过程，降水范围达 50×10^4～60×10^4 km^2，有 17 个站日降水量超过暴雨量，导致境内几十条河流同时发生了特大洪水，6 条国道遭到不同程度水毁，兰新铁路和南北疆铁路中断，数座水库溃堤，数十座引水枢纽被毁，上千公里干渠及 886.7 km^{2}农田被冲。新疆气候存在年代际尺度的变化，近 20 年强降水天气呈增多趋势（杨莲梅，2003b），2007 年 7 月就出现了 3 次全疆范围的强降水过程，7 月 15 至 17 日有 20 站降水量超过暴雨量，16 日 20 时～17 日 20 时（北京时间）乌鲁木齐降水量达 75.4 mm（接近年降水量的 1/3），乌鲁木齐、小渠子、奇台、吉木萨尔、和丰、伊吾 6 站日降水量突破有记录以来日降水量极值，天池、木垒、哈密站日降水量位居历史第二，天池日降水量达 101 mm。新疆强降水是高、中纬西风带及低纬副热带环流多尺度系统相互作用的产物，水汽匮乏且地形复杂，降水成因十分复杂。

通过多年的气象预报实践和研究，新疆降水预报和研究已取得了一定成果，集中体现在 1987 年出版的《新疆降水概论》（张家宝和邓子风，1987）和《新疆短期天气预报指导手册》（张家宝等，1986），它们系统的总结了新疆降水的气候学和天气学特征，提出了新疆强降水过程的天气学模型，一直指导新疆的短期天气预报。这些研究多集中在应用常规资料进行天气学、气候统计和诊断分析，近年来也有人利用卫星、雷达资料对新疆降水的中尺度特征做了初步分析（马禹等，1998；杨莲梅和张广兴，2004；庄薇等，2006）。近 20 年来新疆降水研究体现在观测能力不足，对基本事实的了解不充分，研究分散而少，不系统，不深入；采用新的技术、方法和理论，用环流系统相互作用的观点进行动力学机制研究还很缺乏；国家级科研和业务机构对新疆降水的关注很不够，对新疆强降水天气的水汽特征、大尺度环流背景

和天气系统形成机制和发展演变的物理过程等问题研究很少，尤其对中尺度系统的研究和认识更显得苍白，导致了我们对新疆强降水天气的监测和预报水平与实际需求有很大差距。随着新疆天气监测网的逐步加强，较高密度的自动站（全疆435套自动气象站）、卫星、雷达、水汽微波辐射计、地基GPS（Global Positioning System）水汽监测站和风廓线雷达系统逐渐投入应用，获得的常规和非常规观测资料较以前有很大改善；同时高分辨率的中尺度数值预报模式也得到了快速发展。均为提高新疆区域的暴雨科研和业务能力提供了坚实基础。本文对近50年来新疆夏季降水研究领域的进展进行总结，并对迫切需要研究的问题进行讨论。

2 夏季强降水气候特征

新疆水资源匮乏一直是制约社会经济发展的瓶颈，降水的多少直接决定水资源总量。我国东部强降水常与洪涝灾害密切联系，新疆强降水总体来看利多于弊。由于国家降水量级标准不适合干旱、半干旱气候背景下的新疆地区，我们从多年预报、服务实践和概率统计方法提出了适合新疆气候特点的降水量级标准（张家宝等，1986；张家宝和邓子风，1987；杨莲梅，2003a）：夏半年（4～10月）24 h降水量$R>12.0$ mm为大雨，$R>24.0$ mm为暴雨。图1为90个气象站1961～2007年4～10月日降水量大于12 mm的年平均日数，由图可见天山山区为强降水高频区，夏半年强降水出现4～13天，4个高频中心为河谷地带，天山南、北麓年均2～3天，其它区域1～2天，塔克拉玛干沙漠不到1次。新疆气象工作者主要对大雨以上区域性降水（强降水过程）进行研究。

强降水具有显著日分布特征（张家宝等，1986；张家宝和邓子风，1987；杨涛和杨莲梅，2003），主要集中在午后至傍晚，频率分布符合Poisson分布。天山山区年降水量、降水日数、强降水日数和强度均最大，天山北麓、北疆西部和北部次之。新疆强降水量的变差系数较大（杨莲梅，2003b）：北疆和天山山区为0.4～0.6，天山山区最小为0.4，南疆为0.6～1.1。强降水频次的变差系数也较大：北疆和天山山区为0.40～0.57，天山山区最小为0.40，南疆地区为0.59～1.02。北疆地区和天山山区强降水次数5月、6月、7月和8月出现较多，南疆则5月和8月出现较多。表1为新疆1961～2000年大雨以上降水量与年总降水量的关系，天山山区强降水量对年降水量的贡献最大，占年降水量的41.9%，两者相关系数达0.94，北疆北部与和田区域强降水量的贡献为17.2%和21.9%，其它区域在25.0%～

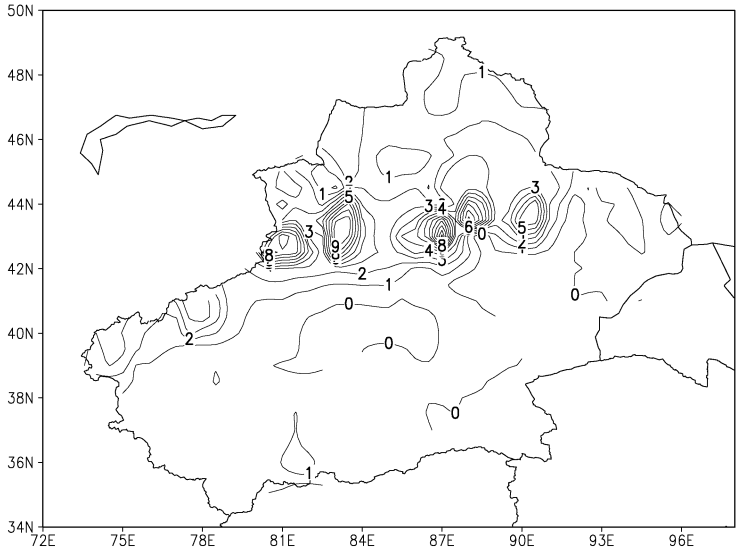

图1 4～10月日降水量大于12 mm的年平均日数（单位：$d \cdot a^{-1}$）

Fig. 1 Annual days ($d \cdot a^{-1}$) of daily precipitation more than 12 mm averaged from Apr to Oct

31.3%，强降水量与年降水量的相关系数达 0.83～0.91，新疆强降水量多少基本决定了年降水量的异常，在年降水量和水资源量中占有非常重要的地位，因此研究新疆强降水问题急迫而重要。

表 1　新疆大雨以上降水量与年降水量的关系（杨莲梅，2003b）
Table 1　The relationship between heavy rainfall and annual precipitation in Xinjiang (Yang, 2003b)

区域	年大雨量/年降水量	年大雨量与年降水量相关系数
北疆北部	17.2%	0.83
北疆西部	25.0%	0.91
天山北麓	29.6%	0.89
天山山区	41.9%	0.94
阿克苏	28.7%	0.46
焉耆盆地	31.3%	0.53
喀什	31.3%	0.90
和田	21.9%	0.90

近 40 多年新疆各区域的强降水次数变化具有显著差异，而强降水强度各地均无显著变化，其中阿克苏地区、天山北麓、天山山区强降水频次有显著增多趋势，强降水频次的增多是强降水量和年降水量增多的原因（杨莲梅，2003b）。天山及其两侧强降水过程增多的原因和未来发展演变规律如何？

3　强降水环流特征

3.1　大尺度环流背景

经过 50 多年的研究和预报实践，我们对新疆夏季大范围强降水的大尺度环流背景有了比较全面的认识，已经提出了短期预报的天气学模型。夏季对流层高层的南亚高压是北半球重要的大气环流系统之一，其东西振荡与我国天气、气候异常密切联系（陶诗言和朱福康，1964；朱福康等，1980；张琼和吴国雄，2001），新疆强降水发生时南亚高压有两个中心（双体型），一个位于伊朗高原上空，另一个位于青藏高原上空，副热带长波槽位于 70°E～90°E（见图 2a 和 2c），配合中层低槽和低层高压引发新疆强降水天气，亚洲副热带西风急流南移到 40°N 以南。而新疆少雨时段南亚高压呈一个中心，位于 75°E 附近的青藏高原西部上空，亚洲副热带西风急流明显北移。第二个影响新疆降水的重要系统为 500 hPa 上伊朗地区的副热带高压的南北振荡，伊朗高压与中纬波动叠加，在里海—黑海附近形成一个明显的长波脊，长波脊前低槽随之加强东移造成新疆的强降水天气过程（图 2b 和 2d）。第三个重要系统是西太平洋副热带高压（西太副高），西太副高西移北伸往往造成西低东高环流形势，新疆下游易形成阻塞高压，新疆及其上游西风槽的冷空气与西太副高西侧的暖气流交汇造成新疆降水。高空副热带西风急流夏季位于新疆上空，也是影响新疆降水的重要大尺度系统，其南北振荡、急流轴方向都对降水有影响（张家宝等，1986；张家宝和邓子风，1987），强降水期间副热带急流常呈西南—东北向，位置偏南，南侧常有一条明显云带配合。影响新疆大范围强降水的环流背景高层为南亚高压双体型、中亚副热带长波槽和副热带西风急流偏南，中层为伊朗副高东伸北挺和西太副高西伸北抬，两高压之间为中亚低值系统，这种高、低空的大尺度环流系统的配置造成大范围强降水过程。有时这种环流的配置可以长时间维持，如 1996 年 7 月中、下旬发生了 3 次暴雨过程（刘惠云等，1998），南亚高压从 7 月初到 7 月下旬近 25 天一直为双体型，南亚高压的两个高压中心主体向北发展并且稳定维持促使副热带长波槽也在中亚地区维持了 20 多天，从对流层中层至高层在中亚地区形成深厚闭合低压系统且维持了 15 天左右（图 2d），西太副高西伸北进也维持了 20 天，在这种环流背景下造成了新疆 3 次大范围暴雨过程。但有时出现有利于降水的大尺度环流背景，降水却较小，这是由于新疆大范围的强降水过程是在一定的环流背景下各种尺度天气系统相互作用的结果，目前对大尺度系统的理解还限于天气学特征和模型，对大尺度系统发生、发展的动力机制和物理过程，以及如何与其它尺度系统相互作用及配置等问题的研究还少有涉及。此外，水汽则是影响新疆降水的关键因素，要对各种尺度系统发生、发展机理和物理过程、相互作用的动力机制和水汽进行深入的研究，才能提高强降水的定量、定时和定点预报准确率。

3.2　天气尺度和中尺度系统

低涡是造成我国暴雨的主要天气系统之一，

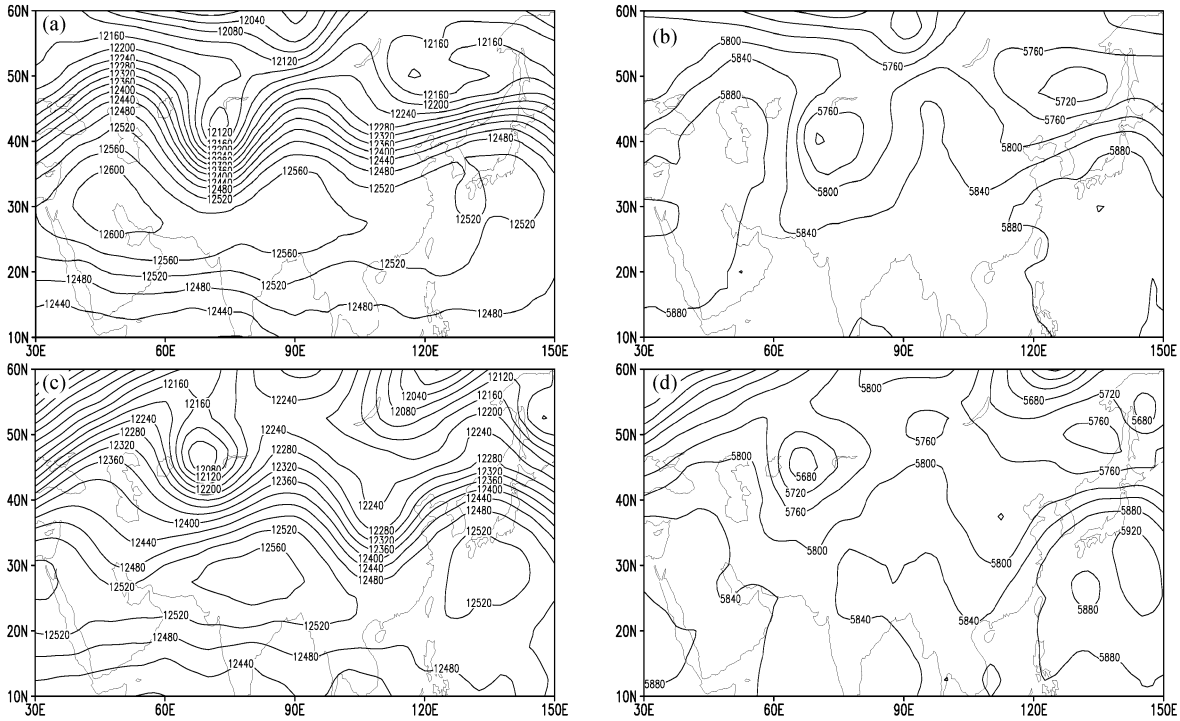

图2 (a)、(c) 200 hPa 和 (b)、(d) 500 hPa 高度场（单位：gpm）：(a)、(b) 2001年7月30日00时（协调世界时，下同）；(c)、(d) 1996年7月17日00时

Fig. 2 Geopotential height (gpm) at (a), (c) 200 hPa and (b), (d) 500 hPa: (a), (b) 0000 UTC 30 Jul 2001; (c), (d) 0000 UTC 17 Jul 1996

具有代表性的、受到广泛关注的为西南涡和东北冷涡。陈忠明等（2004）总结了西南涡研究最新进展，张立祥和李泽春（2009）对东北冷涡研究进展进行了总结，科学家对低涡的研究取得了丰硕成果。中亚西北侧是乌拉尔山，南侧是伊朗高原，东侧有帕米尔高原、天山和阿勒泰山，夏季副热带西风急流位于40°N附近，恰好控制中亚和新疆地区，独特的地形、锋区急流的动力和热力作用使得里海以东—新疆地区上空常出现冷性涡旋，称之为中亚低涡（张家宝等，1986；张家宝和邓子风，1987），如图2b和2d在中亚地区的切断低涡。大家对中亚低涡系统的认识和关注很少，而其恰是造成新疆暴雨天气的重要影响系统，以下简述新疆气象工作者对中亚低涡的一些认识。

3.2.1 中亚低涡

《新疆降水概论》（张家宝和邓子风，1987）定义中亚低涡为500 hPa上低值中心位于（40°N～60°N，60°E～90°E）范围内并出现两条以上等高线，时间维持48 h以上的低压环流系统，为天气尺度系统。中亚低涡一年四季均出现，存在明显的季节变化，集中在夏季，常和乌拉尔脊联系造成新疆的降水、大风和降温天气。1971～1980年资料统计表明，低涡活动夏季最多，占40.5%，年均出现3.2个，春季次之占21.5%，秋、冬季各为19%。入春以后副热带西风急流北移，7月北半球为四槽四脊型，中亚地区由冬季平均脊转为平均槽，60°N以北平均槽线在90°E附近，60°N以南平均槽线则趋近于80°E附近（巴尔喀什湖），因此造成中亚地区低涡活动的环流背景。

中亚低涡对新疆天气的影响有两种：一类造成新疆明显降水天气，我们称之为“湿涡”，如图2b和2d；一类则造成大风降温和长时间低温天气，降水较弱，有时甚至没有影响，称之为“干涡”，一般生命史4～8天。江远安等（2001）对南疆西部1970～1999年强降水天气过程分析表明中亚低涡是南疆西部强降水的主要影响系统，在南疆西部116次强降水天气过程中，中亚低涡造成的占61%，而中亚低槽占39%，历史上2次最强降水均是由中亚低涡造成的，另外，72%的中

强降水过程也是由中亚低涡引发的，南疆这样的极端干旱区较强降水大部分是由中亚低涡造成的。新疆区域性强降水往往是由中亚低涡引发的（张家宝等，1986；杨莲梅，2003a），可见中亚低涡的重要性，但目前我们对低涡发生、发展的天气动力学机制还不清楚，往往报不准强降水落区、强度和发生时段，尤其干涡系统出现时报降水而不出现的情况时有发生。中亚低涡是非常有地域特色的天气系统，其形成与所处的地理位置、高中低纬环流和中亚地形有很大关系，它形成于中亚—新疆地区并移入新疆地区的高空冷性涡旋，一般比较深厚（700～200 hPa 均表现为闭合低压），虽然对中亚低涡的气候特征有了一定认识，但目前的定义是基于 1971～1980 年常规探空资料，时间短，另外中亚和新疆站点稀疏，对其定义还需要进一步完善、量化和细化，制定一个大家共同接受的中亚低涡活动统计标准，利用 30 年以上的逐日历史资料，对中亚低涡活动的气候特征进行统计分析，揭示中亚低涡活动的气候规律，仍然是值得进行的基础性工作。

关于中亚低涡系统的三维结构、发生、发展的物理过程，以及与大、中小尺度系统的相互作用，与水汽输送的配合，地形的影响等问题均未进行研究，可以说对中亚低涡的认识很初步，仅停留在天气学分析层面上，其热力、动力学机制还未涉及，尤其对湿涡和干涡之间的差异认识有限，这些均是目前降水落区、强度和发生时段预报不准的主要原因。深入研究中亚低涡是提高新疆地区暴雨研究和预报水平的另一突破口和切入点。

3.2.2　中纬度低槽冷锋

除了中亚低涡这个重要的影响系统外，影响新疆强降水还有一类为中纬低槽系统，根据低槽南北位置分为二型（张家宝和邓子风，1987）：北支槽（包括北方横槽）和中亚槽。《新疆短期天气预报指导手册》（张家宝等，1986）对每类低槽的环流形势、活动路径和降水特点进行了总结。北支槽主体位于47°N以北的中亚北部地区（如图 3a），降水中心多出现在北疆地区，降水量较小。中亚槽是指主体出现在（35°N～50°N，60°E～80°E）范围内的低压槽（如图 3b），一般槽前较强的西南气流把较低纬度的水汽向新疆输送，在合适的条件下引起强降水。对应于低槽，地面常配合冷锋，当中亚槽加深，中亚地区冷锋锋生。冷锋移动路径不同常造成新疆强降水落区的差异。

3.2.3　中尺度系统

受观测资料的限制，关于新疆暴雨过程的中尺度系统的研究限于对少数个例在天气图上出现的中尺度低压和辐合线进行简单分析。虽然中尺度数值模式对研究中尺度系统提供了有利条件，但新疆中尺度数值模式起步晚，加之新疆地形复杂和对天气过程的物理机制理解不够，暴雨中尺度数值模拟结果不甚理想，对中尺度系统的认识非常有限。近年来，新疆的自动站、卫星探测和雷达探测方面有较大进步，对监测和研究中尺度系统有积极作用。庄薇等（2006）利用雷达探测资料分析了 2004 年 8 月 8 日发生在乌鲁木齐和五家渠强降水的三维风场结构，对流单体发展为对流带状回波，在对流单体的左侧生成新的对流单体，逐步发展为长度约 90 km 范围的带状对流系

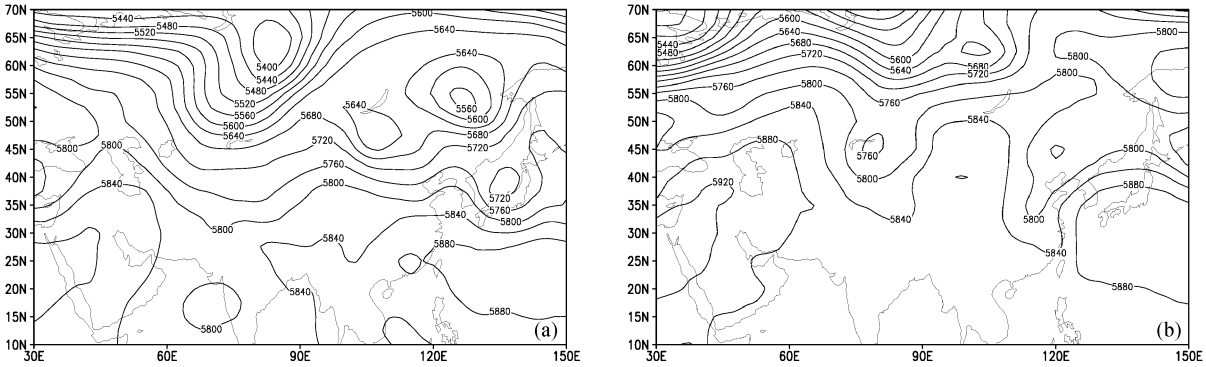

图 3　500 hPa 高度场（单位：gpm）：(a) 1975 年 6 月 22 日；(b) 2001 年 7 月 31 日

Fig. 3　Geopotential height at 500 hPa (gpm)：(a) 22 Jun 1975；(b) 31 Jul 2001

统，不同对流单体有各自相独立的风场结构。对此类范围小、变化快、生命史短的中尺度对流系统，由于站点间距较大，常规的天气分析方法很难研究对流系统的动力结构。徐文霞（2005）利用卫星和雷达资料对一次暴雨研究指出，中尺度气旋、逆风区、切变线等中尺度系统频繁出现和长时间维持是暴雨天气发展的主要动力条件。马禹和王旭（1998）利用 GMS-5 卫星红外云图资料，普查新疆“96.7”特大暴雨期间发生的 6 个中尺度对流系统（MCS）特征，它们具有 MCS 的一般特征：在晚上形成，午夜成熟，凌晨消散；M_αCS 可持续 6～10 h，M_βCS 只能持续 4 h 左右；在发展过程中，它们的冷云盖均向 TBB（云顶亮温）等值线密集的方向扩展，并沿中上层气流方向移动，成熟后的 MCS 移动缓慢或基本不动；M_αCS 可造成小到大量的降水，M_βCS 只造成微到小量的降水。杨莲梅和张广兴（2004）总结了阿克苏地区暴雨过程的卫星云图特征，暴雨由中尺度云系和系统云系叠加中尺度云团造成，中尺度云团引发暴雨约占 60%。中尺度云团生命史约 5～13 h，发生于下午到傍晚时段，发生到成熟约为 3～5 h，成熟期约在傍晚时段，成熟到终止约为 1～5 h。陈勇航等（2003）分析 1998～2001 年 4～9 月乌鲁木齐地区暴雨云场特征指出，对流云团的发生发展、移向、移速与大尺度云系有着密切的关系，对流云团往往是在大尺度云场的特定部位发生发展起来的。并归纳了有利于对流云团发生发展的大尺度云系的匹配及云场中对流云团发生发展区域。

目前自动站、探空站和雷达大部分布设在人类居住的绿洲地区，而这些区域面积约占新疆面积的 4.5%，对广大的山区和沙漠地区监测能力很有限，因此现有监测站网还不能满足中小尺度系统的深入研究。夏季造成降水的天气系统常常具有对流系统的特点，发展演变迅速，较难监测和预报，卫星观测系统提供了高时、空分辨率的丰富资料，可以在这方面发挥优势，使我们能及时跟踪天气系统变化，弥补其它方法之不足，比较适合新疆地区中小尺度系统研究。

新疆降水研究主要用传统的涡度、散度、涡度平流、温度平流、垂直运动和各种不稳定指数进行分析，得出结果大致接近。近年来，位涡、螺旋度、非均匀饱和广义湿位涡、对流涡度矢量等动力变量以及有限区域风场分解方法在我国东部地区的暴雨动力分析中有广泛应用，但在新疆暴雨研究中应用不多，杨莲梅和杨涛（2005a，2005b）利用湿位涡和螺旋度对新疆暴雨进行了个例研究，表明：对流层高层干位涡能较好地反映冷暖空气的活动及天气系统的演变特征，位涡场比温度场、高度场能更清楚地示踪冷空气；θ_{se}面陡立易导致湿斜压涡度发展，形成θ_{se}陡峭密集区，密集区内暴雨容易发生；对流层低层湿位涡与降水强弱有较好的关系。中高层负螺旋度柱与强对流发生和落区有密切关系，螺旋度反映的动力特征对干旱区强对流有明显的指示意义。新疆地区暴雨的动力诊断分析还很薄弱，在充分利用各种常规和非常规资料的情况下，分析大量的观测事实，建立和改进中尺度资料的同化及物理过程，提高对新疆地区强降水天气过程各尺度系统的模拟能力和分析水平，对暴雨物理过程进行深入的分析和研究是十分重要的。

4 水汽输送特征

对新疆水汽气候特征最早研究是用 1959、1977 和 1980 年新疆 4 个探空站资料计算新疆区域年总水汽输送量（张家宝和邓子风，1987），一直沿用至今。最近史玉光和孙照渤（2008）较细致地分析了流经新疆区域上空的水汽输送特征，定量、客观地给出了年和四季对流层高、中、低层水汽输入、输出和收支流出情况，由于地形影响对流层中层水汽输送量最大，低层和高层接近。戴新刚等（2006）研究了影响新疆的定常水汽输送特征和水汽源地，指出新疆的水汽主要来自其以西的湖泊或海洋，冬、春季水汽源地为里海和地中海，秋季为黑海和里海，而夏季为北大西洋和北冰洋，随着全球变暖，来自较高纬度的水汽输送增强了。新疆夏季降水自 1987 年以来出现了年代际尺度的变化，赵兵科等（2006）指出阿拉伯海向北直至中亚的对流层低层偏南气流增强，该区域水汽输送和相对湿度自 1987 年开始存在年代际显著增加。杨莲梅和张庆云（2007）发现 1987～2001 年索马里急流—阿拉伯半岛东南部—中亚和新疆北部出现了南北长达 60 个纬距、宽约

10 个经距的 3 段接力式水汽输送年代际增强，索马里急流和热带印度洋是中亚和新疆年代际增湿的重要水汽补充源地之一。湿年代际背景下降水偏多年偏西和偏北路径水汽输送增强；干年代际背景下降水偏多年偏北路径水汽输送增强，戴新刚等（2006）指出近 20 年新疆降水的增加主要是年代际尺度成分的贡献，可见年代际背景对新疆降水异常的水汽输送有重要影响，这些研究对新疆水汽源地和输送路径的气候特征的认识有了较大进步。

已有研究给出了定常水汽输送特征和水汽源地，而干旱气候背景下瞬变涡动水汽输送与定常场有较大差异，对强降水而言瞬变涡动水汽输送更重要。新疆地处中纬西风带，气候平均情况下进入新疆的水汽不足以造成强降水。新疆境内产生大范围强降水所需的水汽在一定环流条件下，在新疆境外地区集中，并在合适的环流条件下通过接力输送机制输送到暴雨区并迅速集中，瞬变涡动水汽输送对新疆暴雨的形成至关重要。《新疆降水概论》（张家宝和邓子风，1987）和大量的暴雨个例分析总结强降水有 3 条主要水汽输送路径，主要为西方、西南方（图 4a、b）和偏东路径（由低空偏东急流输送，见图 4c、d），水汽输送主要在 500 hPa 以下。杨莲梅（2003a）、张云惠和王勇（2004）指出青藏高原上空丰富的水汽随西南风进入新疆造成强降水过程。1996 年 7 月中下旬出现百年一遇的强降水过程，马禹等（1998）利用卫星资料指出阿拉伯海东岸和孟加拉湾北岸也是水汽源地之一，低层水汽按“接力”方式由源地输送到次源地巴尔喀什湖和四川盆地，四川盆地的水汽主要经过河西走廊进入新疆，巴尔喀什湖附近的水汽从新疆西部山谷进入新疆，高层则由青藏高原直接输送到新疆，对新疆强降水的水汽源地和输送路径有了进一步认识，但仅利用一

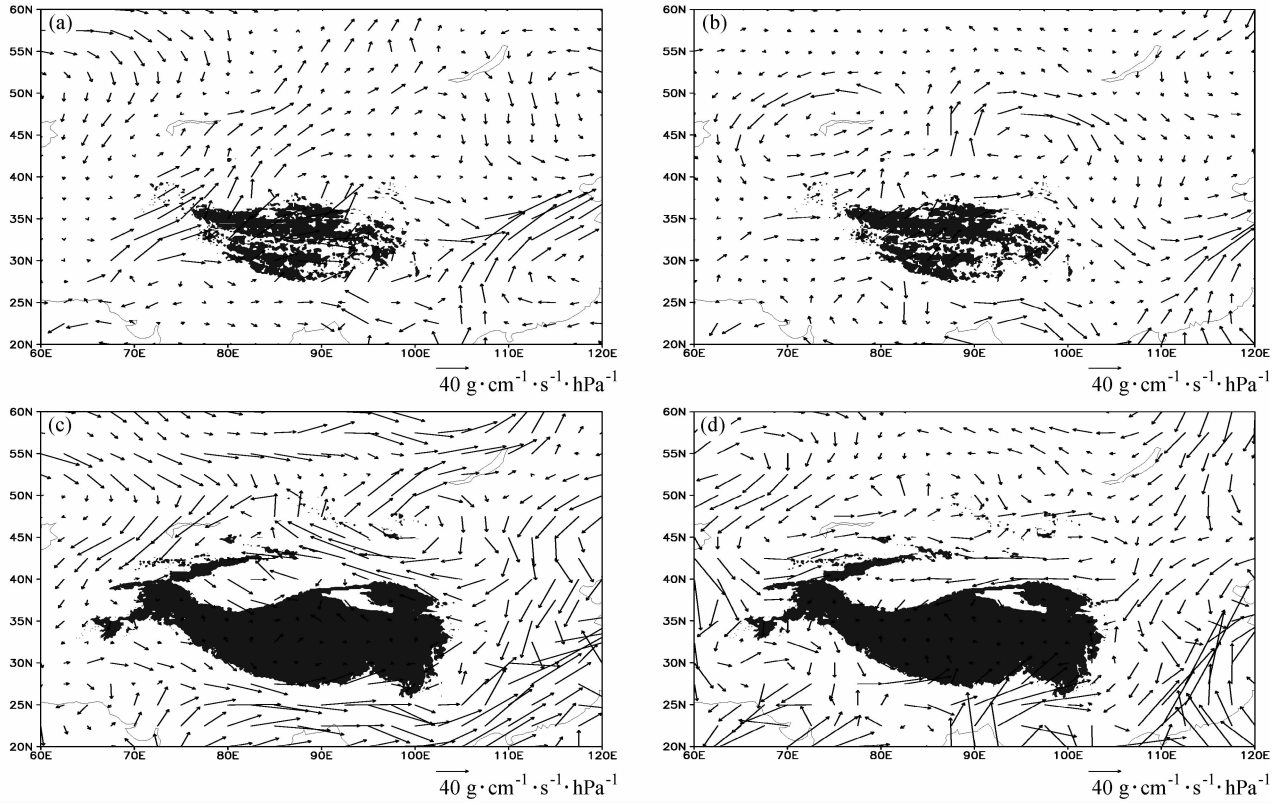

图 4　(a)、(c) 2001 年 7 月 29 日 00 时和 (b)、(d) 1996 年 7 月 17 日 00 时水汽通量：(a)、(b) 500 hPa，阴影区表示地形高度大于 5000 m；(c)、(d) 700 hPa，阴影区表示地形高度大于 3000 m

Fig. 4　The moisture fluxes at (a), (c) 0000 UTC 29 Jul 2001 and (b), (d) 0000 UTC 17 Jul 1996: (a), (b) At 500 hPa, shaded areas indicate topography above sea level greater than 5000 m; (c), (d) at 700 hPa, shaded areas indicate topography above sea level greater than 3000 m

次个例的云图图像得出的这样一个现象，低纬源地有多少水汽输送到新疆并不知道？陈勇航等（2003）研究了1998～2001年6～9月乌鲁木齐地区暴雨云场特征，北支云系对应于北支锋区上的低值系统，南支云系主要来自中亚偏南地区，或来自阿拉伯海、印度半岛、孟加拉湾经青藏高原进入塔里木盆地后再翻越天山影响乌鲁木齐。卫星资料的广泛应用，表明低纬阿拉伯海、孟加拉湾和青藏高原上空有大量的水汽可以向北输送到新疆，印度季风可以间接影响新疆降水，但到底对新疆降水的贡献有多少？接力输送的动力机制如何？对强降水天气系统影响如何？

夏季对流层低层河西走廊至新疆东部地区为偏东风带，有时加强为低空偏东急流，与新疆暴雨天气密切联系。关于低空偏东急流产生的原因，《新疆短期天气预报指导手册》（张家宝等，1986）指出夏半年青藏高原的热力作用，低层为低压环流，其北侧的偏东气流在有利的环流配合下从河西走廊一直延伸到塔里木盆地，另外还与西太副高西伸北移有关。从河西走廊开始（民勤站附近）有一支向西的偏东低空急流伸展到南疆，若以大于等于10 m·s^{-1}东风地区作为急流范围，长度一般达一千多公里，有时达二千多公里，急流宽度为100～200 km，主要位于700 hPa以下，属于天气尺度系统（如图5a，b），在4～9月低空急流较强。低空急流与南疆强降水密切联系，南疆地区出现强降水时都有低空偏东急流配合，但出现低空偏东急流时不一定有降水出现，该急流是强降水的必要条件而不是充分条件（张家宝等，1987）。

南疆东侧比湿场的平均分布是东干西湿，低空东风气流是从干区吹向湿区。有时暴雨过程偏东急流可以输送丰富的水汽进入新疆，有时却是干气流，偏东急流区属极端干旱区，输送的水汽从哪来，有多少？目前仅提出了存在低空急流并通过少量天气个例分析得出一些初步的结论，需要利用长时间的逐日资料对低空偏东急流的气候特征、三维结构和形成机理开展研究，并结合大量的暴雨个例开展其对新疆水汽输送的贡献和作用研究。

上述研究表明，新疆强降水过程有特定的大尺度环流背景和复杂的水汽源地和输送路径，并与低纬阿拉伯海、孟加拉湾和热带印度洋水汽输送有联系，揭示造成新疆不同区域暴雨的水汽源汇结构、远距离接力输送和集中的机制，以及不同年代际背景新疆暴雨过程水汽源汇结构的差异非常重要，以此作为切入点和突破口来分析新疆地区暴雨形成的机制，对增进对高、中、低纬系统相互作用过程对新疆影响的认识，提高我国内陆干旱区暴雨过程的预报预测水平有重要意义。

5 讨论

新疆地区强降水过程具有地域特色，其形成机制与季风区有很大差异，虽然我们已经开展了一些研究，但主要围绕新疆强降水形成的大尺度、

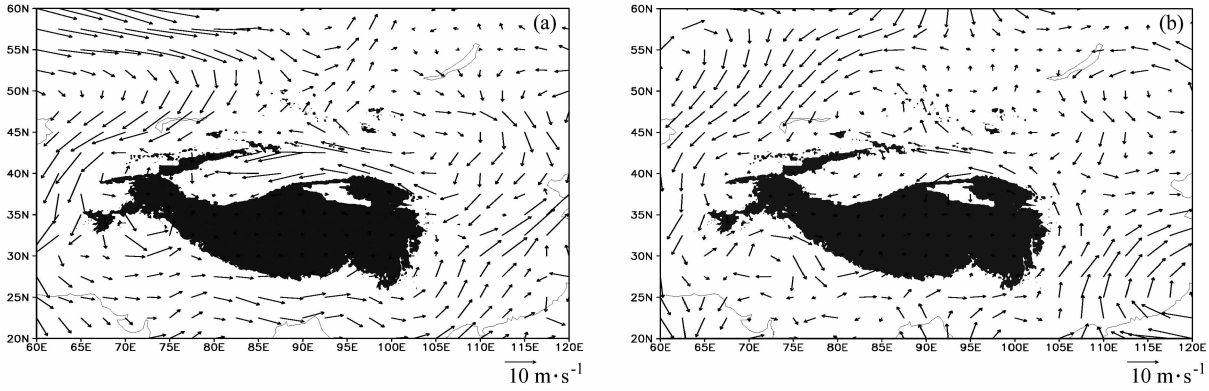

图5 700 hPa风场（阴影为地形高度大于3000 m区域）：(a) 2001年7月30日00时；(b) 1996年7月19日00时

Fig. 5 700-hPa wind field: (a) 0000 UTC 30 Jul 2001; (b) 0000 UTC 30 Jul 1996. Shaded areas indicate topography above sea level greater than 3000 m

天气尺度的天气学分析，提出了大尺度和天气尺度天气学模型，受观测资料和数值模式条件的限制，对中小尺度分析做稍微细致的分析是很困难的，利用卫星和雷达资料的分析也限于少量的个例分析，更没有进行过加密观测试验。对强降水天气过程的各种尺度系统发生、发展、演变的物理过程及相互作用研究很少，尤其对重要的影响系统——中亚低涡和低空偏东急流结构及热力动力过程认识更少，对造成新疆暴雨的水汽特征认识也有限。随着现代气象观测系统的不断加强，新疆地区观测网有很大改善，同时，大气科学理论的不断进步，资料同化技术和数值模式的改进，为我们深入研究提供了条件，以下一些问题对提高干旱内陆区暴雨预报准确率有重要作用：（1）造成新疆暴雨的大尺度、天气尺度和中尺度系统和环流短期异常和变化规律是什么？各种尺度系统的相互作用如何？（2）造成新疆不同区域暴雨的水汽源汇结构、远距离接力输送和集中的机制是什么？低纬阿拉伯海、孟加拉湾、热带印度洋和青藏高原的水汽输送和循环对新疆暴雨过程水汽状况的影响。

新疆地区暴雨具有地域特色，而我们对该区域暴雨的关注和研究都较少，防灾减灾和利用气象资源的能力与社会经济发展的需要还有很大差距，还有大量的工作要做，需要多方面进行长期而艰苦工作，推动中高纬和干旱内陆区暴雨研究的发展。

参考文献（References）

陈勇航，吕新生，路光辉. 2003. 乌鲁木齐地区暴雨云场研究［J］. 新疆气象，26（5）：6－8. Chen Yonghang，Lü Xinsheng，Lu Guanghui. 2003. Study of cloud field of torrential tain in Urumqi［J］. Xinjiang Meteorology（in Chinese），26（5）：6－8.

陈忠明，闵文彬，崔春光. 2004. 西南低涡研究的一些新进展［J］. 高原气象，23（增刊）：1－5. Chen Zhongming，Min Wenbin，Cui Chunguang. 2004. New advances in Southwest China vortex research［J］. Plateau Meteorology（in Chinese），23（Suppl.）：1－5.

戴新刚，李维京，马柱国. 2006. 近十几年新疆水汽源地变化特征［J］. 自然科学进展，16（12）：1651－1656. Dai Xingang，Li Weijing，Ma Zhuguo. 2006. Variation characteristics of vapor sources in Xinjiang［J］. Advance in Nature（in Chinese），16（12）：1651－1656.

马禹，王旭，陶祖钰. 1998. 新疆“96.7”特大暴雨水汽场特征综合研究［J］. 新疆气象，21（5）：9－13. Ma Yu，Wang Xu，Tao Zuyu. 1998. Study on vapors features of 96.7 heavy rain in Xinjiang［J］. Xinjiang Meteorology（in Chinese），21（5）：9－13.

马禹，王旭. 1998. 新疆特大暴雨过程中的中尺度对流系统特征［J］. 新疆气象，21（6）：3－7. Ma Yu，Wang Xu. 1998. Mesoscale convective systems charactersicses of exceedingly rainstorm process in Xinjiang［J］. Xinjiang Meteorology（in Chinese），21（6）：3－7.

江远安，包斌，王旭. 2001. 南疆西部大降水天气过程的统计分析［J］. 新疆气象，24（5）：19－20. Jiang Yuanan，Bao Bin，Wang Xu. 2001. Analysis on heavy precipitation weather process in west Nanjiang［J］. Xinjiang Meteorology（in Chinese），24（5）：19－20.

刘惠云，吕新生，杨莲梅. 1998.“96.7”新疆特大暴雨中期过程分析［J］. 新疆气象，21（1）：17－20. Liu Huiyun，Lü Xinsheng，Yang Lianmei. 1998. Mid-term process analysis of “96.7” rainstorm in Xinjiang［J］. Xinjiang Meteorology（in Chinese），21（1）：17－20.

陶诗言，朱福康. 1964. 夏季亚洲南部 100 毫巴流型的变化及其与西太平洋副热带高压进退的关系［J］. 气象学报，34（4）：385－395. Tao Shiyan，Zhu Fukang. 1964. Variations of the 100 hPa flow patterns in the South Asia and their relations to the advancing and the withdrawing of the summer Pacific subtropical highs［J］. Acta Meteorologica Sinica（in Chinese），34（4）：385－395.

陶诗言. 1980. 中国之暴雨［M］. 北京：科学出版社，225pp. Tao Shiyan. 1980. The Torrential Rain in China［M］（in Chinese）. Beijing：Science Press，225pp.

陶诗言，倪允琪，赵思雄，等. 2001. 1998 夏季中国暴雨形成机理与预报研究［M］. 北京：气象出版社，184pp. Tao Shiyan，Ni Yunqi，Zhao Sixiong，et a1. 2001. Study on Formation Mechanism and Forecast of Torrential Rain in China in 1998［M］（in Chinese）. Beijing：China Meteorological Press，184pp.

伍荣生，高守亭，谈哲敏，等. 2004. 锋面过程与中尺度扰动［M］//倪允琪，周秀骥. 国家重点基础研究发展规划项目《我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究》研究专著系列丛书之三. 北京：气象出版社，170pp. Wu Rongsheng，Gao Shouting，Tan Zhemin，et a1. 2004. Front Process and Meso-scale Distribution［M］// Ni Yunqi，Zhou Xiuji. Study on Formation Mechanism and Prediction Theory of Key Weather Disaster（III）（in Chinese）. Beijing：China Meteorological Press，282pp.

史玉光，孙照渤，杨青. 2008. 新疆区域面雨量分布特征及其变化规律［J］. 应用气象学报，（3）：326－332. Shi Yuguang，Sun Zhaobo，Yang Qing. 2008. Characteristics of area precipitation in Xinjiang region with its variations［J］. Journal of Applied Meteorological Science（in Chinese），（3）：326－332.

史玉光，孙照渤. 2008. 新疆水汽输送的气候特征及其变化［J］. 高原气象，27（2）：82－91. Shi Yuguang，Sun Zhaobo. 2008. Climate characteristics of water vapor transfer and its variation

over Xinjiang [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (2): 82-91.

孙淑清，周玉淑. 2007. 近年来我国暴雨中尺度动力分析研究进展 [J]. 大气科学，31 (6): 1171-1188. Sun Shuqing, Zhou Yushu. 2007. Advances in meso-scale dynamical analysis of torrential rain systems in recent years in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (6): 1171-1188.

王东海，钟水新，刘英，等. 2007. 东北暴雨的研究 [J]. 地球科学进展，22 (6): 549-560. Wang Donghai, Zhong Shuixin, Liu Ying, et al. 2007. Advances in the study of rainstorm in Northeast China [J]. Advance in Earth Science (in Chinese), 22 (6): 549-560.

徐文霞，谢向阳，姜彩莲，等. 2005. 一次中天山暴雨过程的雷达回波分析 [J]. 新疆气象，28 (5): 20-22. Xu Wenxia, Xie Xiangyang, Jiang Cailian, et al. 2005. The radar echo analysis of a rainstorm process in middle Tianshan Mountain [J]. Xinjiang Meteorology (in Chinese), 28 (5): 20-22.

杨莲梅. 2003a. 南亚高压突变引起的一次新疆暴雨天气研究 [J]. 气象，29 (8): 21-25. Yang Lianmei. 2003. Research on a case of heavy rain in Xinjiang from South Asia high abnormity [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 29 (8): 21-25.

杨莲梅. 2003b. 新疆极端降水的气候变化 [J]. 地理学报，58 (4): 577-583. Yang Liangmei. 2003. Climate change of extreme precipitation in Xinjiang [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58 (4): 577-583.

杨莲梅，张广兴. 2004. 阿克苏北部绿洲强对流暴雨与冰雹红外云图特征对比分析 [J]. 干旱气象，22 (3): 22-25. Yang Lianmei, Zhang Guangxing. 2004. Infrared satellite image analysis of severe convective rainstorm and hail in north oasis of Akesu [J]. Arid Meteorology (in Chinese), 22 (3): 22-25.

杨莲梅，杨涛. 2005a. 阿克苏北部暴雨和冰雹湿位涡对比诊断分析 [J]. 气象，31 (9): 13-18. Yang Lianmei, Yang Tao. 2005a. Diagnostic analysis of moist potential vorticity for heavy rainfall and hail in oasis of northern Akesu [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 31 (9): 13-18.

杨莲梅，杨涛. 2005b. 阿克苏地区暴雨和冰雹螺旋度诊断分析 [J]. 中国沙漠，25 (增刊): 127-132. Yang Lianmei, Yang Tao. 2005b. Diagnostic analysis of the helicity for severe convective rainstorm and hail in north oasis of Akesu [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 25 (Suppl.): 127-132.

杨莲梅，张庆云. 2007. 新疆北部汛期降水年际和年代际异常的环流特征 [J]. 地球物理学报，50 (2): 412-419. Yang Lianmei, Zhang Qingyun. 2007. Circulation characteristics of interannual and interdecadal anomalies of summer rainfall in north Xinjiang [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 50 (2): 412-419.

杨涛，杨莲梅. 2003. 新疆强对流暴雨的气候特征和概率分布模式研究 [J]. 灾害学，18 (1): 47-52. Yang Tao, Yang Lianmei. 2003. A research on climatic characteristics and probability distribution model of severe convective rainstorm in Xinjiang [J]. Journal of Catastrophology (in Chinese), 18 (1): 47-52.

赵兵科，蔡承侠，杨莲梅，等. 2006. 新疆夏季变湿的大气环流异常特征 [J]. 冰川冻土，28 (3): 434-442. Zhao Bingke, Cai Chengxia, Yang Lianmei, et al. 2006. Atmospheric circulation anomalies during wetting summer over Xinjiang region [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 28 (3): 434-442.

赵思雄，陶祖钰，孙建华，等. 2004. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究 [M] //倪允琪，周秀骥. 国家重点基础研究发展规划项目“我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究”研究专著系列丛书之一. 北京：气象出版社，282pp. Zhao Sixiong, Tao Zuyu, Sun Jianhua, et al. 2004. Analysis Study on Mechanism of Meiyu Front Torrential Rain over Yangtze River [M] // Ni Yunqi, Zhou Xiuji. Study on Formation Mechanism and Prediction Theory of Key Weather Disaster (I) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 282pp.

张家宝，苏起元，孙沈清，等. 1986. 新疆短期天气预报指导手册 [M]. 乌鲁木齐：新疆人民出版社，456pp. Zhang Jiabao, Su Qiyuan, Sun Shenqing, et al. 1986. Guide Handbook on Xinjiang Short-term Weather Forecast [M] (in Chinese). Ürümqi: Xinjiang People Press, 456pp.

张家宝，邓子风. 1987. 新疆降水概论 [M]. 北京：气象出版社，400pp. Zhang Jiabao, Deng Zhifeng. 1987. Xinjiang Precipitation Generality [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorology Press, 400pp.

张立祥，李泽椿. 2009. 东北冷涡研究概述 [J]. 气候与环境研究，14 (2): 218-222. Zhang Lixiang, Li Zechun. 2009. A summary of research on cold vortex over Northeast China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (2): 218-222.

张琼，吴国雄. 2001. 长江流域大范围旱涝与南亚高压的关系 [J]. 气象学报，59 (5): 569-577. Zhang Qiong, Wu Guoxiong. 2001. The large area flood and drought over Yangtze River valley and its relation to the South Asia high [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 59 (5): 569-577.

张云惠，王勇. 2004. 哈密南部暴雨成因分析 [J]. 气象，30 (7): 41-44. Zhang Yunhui, Wang Yong. 2004. Analysis of heavy rainfall in southern Hami, Xinjiang [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 30 (7): 41-44.

朱福康，陆龙骅，陈咸吉，等. 1980. 南亚高压 [M]. 北京：科学出版社，95pp. Zhu Fukang, Lu Longhua, Chen Xianji, et al. 1980. The Southern Asia High [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 95pp.

庄薇，刘黎平，王楠. 2006. 新疆地区一次对流性降水的三维中尺度风场研究 [J]. 应用气象学报，17 (4): 444-451. Zhuang Wei, Liu Liping, Wang Nan. 2006. Study on three-dimensional wind fields of mesoscale convective systems in Xinjiang [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (4): 444-451.