韩云环, 马柱国, 杨庆, 等. 2014. 增暖背景下新疆昼夜降水的变化特征 [J]. 气候与环境研究, 19 (6): 763−772, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13142.
Han Yunhuan, Ma Zhuguo, Yang Qing, et al. 2014. Changing characteristics of daytime and nighttime precipitation in Xinjiang under global warming [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (6): 763−772.

增暖背景下新疆昼夜降水的变化特征[1]

韩云环[1, 2, 3]　马柱国[1]　杨庆[1]　潘志华[3]

1 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候—环境重点实验室，北京 100029
2 中国科学院大学，北京 100049
3 中国农业大学，北京 100091

摘　要　利用新疆地区 89 个台站 1961～2005 年昼、夜降水观测数据，分析了该地区昼夜降水过程的时空演变特征，目的是认识这个地区在年降水增加背景下昼夜间降水过程的变化特征及趋势。研究结果表明：（1）1961～2005 年，多年平均的降水量为夜大于昼，且昼、夜降水量均呈显著增加趋势；夜降水量增长趋势大于昼降水量，昼、夜年降水量增长趋势分别占年总降水增长趋势的 49%、51%，这种变化在南、北疆存在明显的区域差异。昼、夜降水量都存在由少到多的显著突变，但两者发生突变时间不同，昼降水量发生突变的时间为 1986 年，而夜降水量的突变点却发生在 1991 年。（2）昼降水日数小于夜降水日数，且昼、夜降水日数都呈显著增加趋势，昼降水日数增加趋势大于夜降水日数。昼、夜降水强度都呈显著增大趋势，夜降水强度及其增长趋势均大于昼降水强度。降水量增加的主要原因是由于降水日数的增多，降水强度对降水量影响较小。（3）昼、夜毛毛雨日数都呈显著减少趋势，昼毛毛雨日数及其减少趋势均大于夜毛毛雨日数。而强降水的日数和强度均呈现增加趋势；昼、夜强降水量和各自的总降水量有很好的相关，强降水量对总降水量的影响很大。引起这些昼、夜间降水变化特征差异的原因有待于进一步研究。

关键词　新疆地区　昼夜降水　变化趋势　时空分布
文章编号　1006−9585（2014）06−0763−10　　**中图分类号**　P467　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13142

Changing Characteristics of Daytime and Nighttime Precipitation in Xinjiang under Global Warming

HAN Yunhuan[1, 2, 3], MA Zhuguo[1], YANG Qing[1], and PAN Zhihua[3]

1 *Key Laboratory of Regional Climate−Environment for Temperate East Asia*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
2 *University of Chinese Academy of Scienses*, *Beijing* 100049
3 *China Agricultural University*, *Beijing* 100091

Abstract　Observational day and night precipitation data from 89 stations in Xinjiang province during 1961–2005 were used to assess the temporal and spatial changes in daytime and nighttime precipitation processes. The goal of this investigation is to understand the change characteristics and trends of the precipitation process in both the daytime and nighttime in this area, under a background of increasing annual precipitation. The results show that the multi-year average of annual precipitation at nighttime was larger than at daytime during 1961–2005 and that precipitation increased

收稿日期　2013−08−22 收到，2014−03−01 收到修定稿
资助项目　国家自然科学基金委重点基金项目 40830956，全球变化研究国家重大研究计划项目 2012CB956200
作者简介　韩云环，女，1988 年出生，硕士研究生，主要从事全球变化及气候变化问题的研究。E-mail: hanyh@tea.ac.cn
通讯作者　马柱国，E-mail:mazg@tea.ac.cn

significantly in both the day and the night. The increasing trend of precipitation is larger in the nighttime than in the daytime, with the annual increasing trend in the daytime and nighttime respectively accounting for 49% and 51% of the total increasing trend in annual precipitation. In addition, there are significant regional differences between southern and northern Xinjiang. The amounts of daytime and nighttime precipitation both show significant jumps, but at different times: In 1986 for the daytime, and in 1991 for nighttime precipitation. Further, the annual number of rainy days during the daytime is less than it is at nighttime, although they both show a clear increasing trend. This trend of increasing rainy days is greater for daytime precipitation than it is for the nighttime. Precipitation intensity in the daytime and nighttime also show a significant increase, with both precipitation intensity and the growth rate of precipitation intensity being greater at night than they are during the day. The increase in the number of rainy days is the main cause of the total increase in precipitation, while changes in precipitation intensity have little influence on the total. Meanwhile, the annual number of drizzle days show a distinct decrease in both the daytime and the nighttime. Drizzle days during the daytime are greater than at nighttime, and the decreasing rate is the same between day and night. Finally, the numbers of heavy precipitation days and their intensity both show an increasing trend. The daytime and nighttime heavy precipitation has a significant correlation with their respective total precipitation amounts, thus, heavy precipitation has a considerable influence on total precipitation. Further study is required to establish the causes of these differences in precipitation change characteristics between the daytime and nighttime.

Keywords Xinjiang, Day and night precipitation, Variation trend, Temporal and spatial distribution

1 引言

气候变暖正在改变着全球的水分循环，引起水资源在时空上的重新分配，并对降水、蒸发、径流、土壤湿度等产生直接影响（王国庆等，2008）。增暖改变了全球环境干湿变化的分布格局（马柱国和符淙斌，2007）。在中国，年代际尺度上的趋势是北方东干西湿、东部南涝北旱（马柱国等，2005）。在局域，中国东南沿海地区降水显著增加，华北和四川盆地降水有减少趋势（Karl and Knight，1998；翟盘茂等，1999；Zhai et al.，2005；陆虹等，2010）。

我国北方的西湿东干是指西北西部 1987 年以后降水的持续增加和华北持续近 30 年的降水偏少（马柱国等，2005）。针对西北西部降水增加的特征和原因过去进行了大量的研究，如施雅风等（2003）发现新疆地区于 1987 年气候发生突然变化，随着温度升高，降水量、冰川消融量和径流量连续多年增加，并提出了我国西北气候可能从 20 世纪的暖干向暖湿转型。Zhai et al.（2005）发现，我国大范围明显的降水增加主要发生在西部，其中西北地区尤为显著。宋连春和张存杰（2003）指出，20 世纪西北地区降水量处于下降通道中，后期西北地区中西部降水量有明显的增多趋势，东部降水量持续减少。西北西部的新疆近 50 年（1955～2000 年）来大部分地区降水量呈增加趋势，增减趋势的变化大小在同一地区一致性有所不同（薛燕等，2003）。戴新刚等（2007）分析近 20 年新疆高温多雨型气候的出现主要是 1950～1960 年年代际尺度成分的正位相和线性增加趋势部分叠加形成的。关于西北西部降水增多的原因，刘波等（2009）发现新疆地区降水与比湿和低云量之间具有密切的相关性，尤其是低云量的增加可能是导致降水增加的重要原因。研究还表明，新疆降水的变化主要取决于瞬变涡动与大气水汽含量变化的作用，瞬变涡动增强即天气尺度扰动频度或强度增加，水汽辐合加强进而对应的降水增加（戴新刚和张凯静，2012）；新疆水汽主要来源于西风环流，北冰洋的干冷气流也有一定的影响，因而形成新疆降水北疆多于南疆，西部多于东部，1980 年代和 1990 年代西北西部空中水汽含量明显增加，这是全球变暖促使南方热带海洋水汽向北输送的结果（杨晓丹，2005），但戴新刚等（2005）发现，新疆的水汽主要来自其以西的湖泊或海洋，其上空的水汽更多地直接来自于较高纬度带。史玉光和孙照渤（2008）的研究结果表明决定新疆降水差异的根本原因不在于水汽的多少，而是由降水产生的动力条件、水汽辐合等因素决定的（刘海红，2012）。南、北疆降水增加的时节和地点与空中水汽变化状况基本一致（柳葳等，2005），但两者降水变化机制不尽同，北疆降水增加主要与定常波水汽输送增加、水汽辐合增强导致的背景大气水汽含水量上升有关，而南疆降水增加主要是因为瞬变涡动水汽辐合增强（戴新刚等，2013）。

降水变化的原因无外乎两种，一个是来自于大气本身的水平输送水汽的变化，另一个是局地地表过程的热力影响。前述关于大气平流水汽输送变化对西北西部降水增加的作用已有大量研究（如：杨晓丹，2005；戴新刚等，2005），但局地热力作用对西北西部降水变化影响的研究却很薄弱。研究表明，白天加热后使午后的湿对流达到最强，大部分陆地降水在午后达到最大值（Imaoka and Spencer，2003；Mapes et al.，2003；Smith and Yang，2006）。但是这一结果有很大的区域性差别，如美国洛杉矶山脉以东和大平原地区午夜至早晨降水发生的频率最高，而美国东南部和西部则在午后降水最多（Dai et al.，1999）。在增暖背景下，陆地表面的热力状况会发生变化，昼夜间热力对比差异是否对区域降水的变化产生影响？目前关于这方面的研究还很缺乏。新疆位于东亚内陆，属于典型的干旱区，境内山脉和盆地相间，自南向北，昆仑山脉和天山山脉之间是塔里木盆地，盆地上是中国最大的塔克拉玛干沙漠；天山山脉和阿尔泰山之间是准噶尔盆地，地形地貌复杂，在增暖背景下，这种复杂的地形地貌对降水过程变化的影响至今还不清楚，而这种影响表现的一个重要方面就是昼夜降水的变化。基于以上这些问题，本文将利用实际观测数据研究新疆地区在增暖背景下昼夜降水的变化特征，为研究新疆地区局地作用对降水增加的影响提供事实依据。

2 资料和方法

2.1 资料及质量控制方法

所用资料为新疆109个气象观测站1961～2005年夜间[20:00（北京时间，下同）至 08:00]、白天（08:00 至 20:00）的降水记录，为了保证数据在时间和空间上的一致性：（1）剔除闰年 2 月 29 日数据；（2）剔除资料长度不够的站点；（3）剔除缺测年份数大于 1 和一年之中缺测大于 6 个月以上的台站；（4）对于缺测值用其他年份同一天的多年平均值进行插补，最终有效站点为 89 个。以 43°N 为界限，43°N 以北是北疆，以南是南疆，北疆有 45 个站点，南疆 44 个。在原始资料中，毛毛雨观测记录为－0.1，本文在处理毛毛雨后将其记录改为 0，因此在计算降水量和降水日数时忽略了毛毛雨的影响。环流场分析中使用 NCEP1 的逐日 4 次再分析资料[2.5°（纬度）×2.5°（经度）]，包括风速和比湿。

2.2 降水指标的定义和研究方法

降水指标定义：年降水量是指昼、夜降水量超过 0.1 mm 的年降水总量；年降水日数指昼、夜降水量超过 0.1 mm 的年降水日数；降水强度是指年降水量与降水日数的比值。

昼、夜降水的变化特征采用了趋势分析法、Mann-Kendall 和滑动 t 检验法，强降水的定义采用百分位法。上述方法具体介绍参见相关文献（Bonsal et al.，2001；符淙斌和王强，1992；张意林等，2008；苑文华等，2010）。

3 结果分析

过去关于新疆降水特征的研究不少，但多针对日、月和年降水的变化特征研究，而很少做昼、夜降水的特征分析，另外增暖对温度的影响具有昼夜差异，那么这种影响会不会影响到昼夜降水的时空变化特征呢？本文将针对这些问题进行重点分析，为了便于表述，昼、夜降水量分别用 P_d、P_n 表示。

3.1 新疆昼、夜降水的空间变化特征

3.1.1 昼、夜降水多年平均空间特征

图 1 为昼、夜降水量及降水日数的多年平均值及昼夜差异的空间分布。由图 1a、1b 可知，无论从降水量级还是空间分布来看，新疆 P_d、P_n 具有很好的一致性，均有明显的区域差异且北疆大于南疆。整个新疆地区年平均的 P_d 为 71 mm，北疆为 105.7 mm，南疆为 35.8 mm；年平均 P_n 为 81 mm，北疆为 120.5 mm，南疆为 40.5 mm。天山北部年降水量较大，这与蓝永超等（2008）的研究结果一致，其中北疆的乌鲁木齐和伊犁地区白天和夜间降水最多，并且这些地区的年夜降水量大于昼（图 1c）。89 个站有 59 个站年 P_n 大于 P_d，其中北疆 30 个，南疆 29 个。新疆地形复杂导致不同性质的地表温度日变化引起的局地环流可能是产生降水日变化的主要原因，在近山区形成山谷风，其结果是白天在山坡上成云致雨，夜间在盆地边缘造成降水。

图 1d、1e 为多年平均的昼、夜降水日数空间分布图。可以看出，新疆地区昼、夜年降水日数的空间分布相似，北疆多，南疆少。整个新疆地区的昼年平均降水日数为 37.5 d，北疆平均 54.2 d，南疆平均 20.3 d。夜年平均降水日数 39 d ，北疆平均

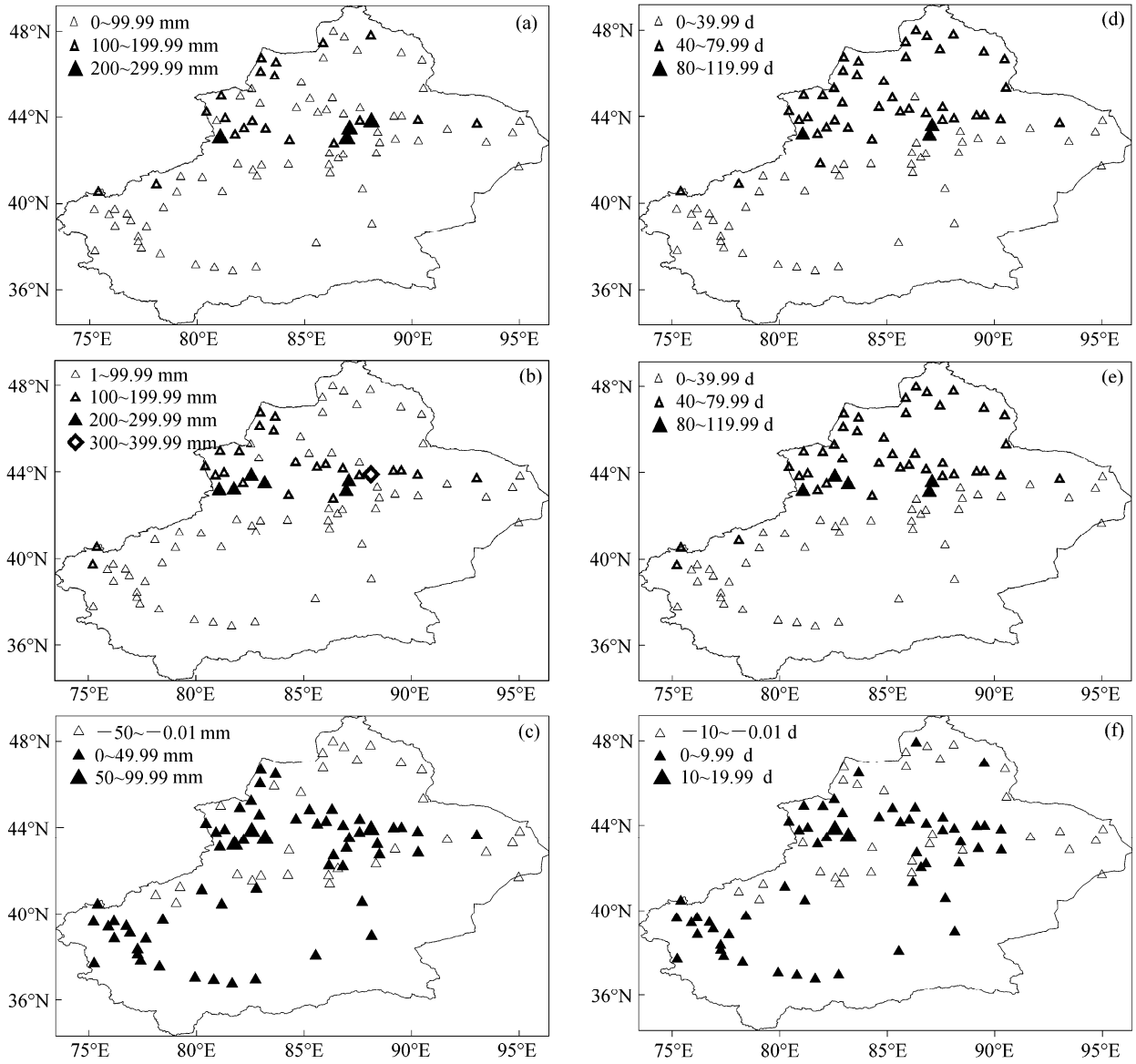

图 1 多年平均昼、夜降水量（左列）和降水日数（右列）空间分布：（a、d）昼；（b、e）夜；（c、f）夜昼差（夜减昼）

Fig. 1 Spatial distribution about the multi-year average day and night precipitation amout (left column) and precipitation days (right column): (a, d) Day; (b, e) night; (c) difference between night and day (night minus day)

55.9 d，南疆平均 21.7 d。降水日数大值区位于新疆北部和中部。降水日数昼夜差的空间分布（图 1f）和降水量昼夜差的空间分布（图 1c）相似，夜降水日数大于昼降水日数的台站有 57 个，主要分布在天山北坡和塔里木盆地的南边，也就是说大地形的北坡夜雨的日数多于昼雨的日数，原因可能是昼夜局域地表热力作用的结果。

夏季是新疆降水最多的季节，占年降水的 43.5%。因此，以夏季为代表，利用昼夜间环流场的差异探寻新疆昼夜降水差异的可能原因。利用 NCEP1 首先对该区域昼夜间平均的垂直运动的差异进行了分析。图 2 为多年平均的垂直运动和水汽通量散度的昼夜差值。可以看出，1961～2005 年，新疆大部分区域平均夜间向上的垂直速度大于昼，上升运动较强（图 2a），有利于降水形成；而夜间水汽低层辐合也强于昼（图 2b）。因此，从环流场来看，相对于白昼，夜间强的上升运动和水汽辐合是导致新疆地区夜雨大于昼雨的环流机制，这样的环流机制应与新疆地区的地形和下垫面特征有关。

3.1.2 昼、夜降水变化趋势的空间分布

图 3 为昼、夜降水量和降水日数变化趋势系数的空间分布图。由图 3a、b 可以看出，大多数站昼

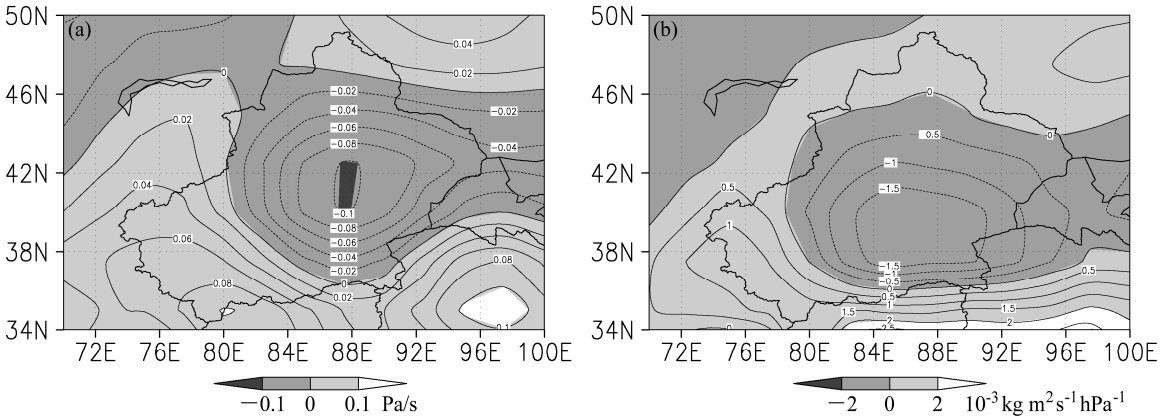

图 2 1961～2005 年夏季新疆平均（a）500 hPa 垂直速度和（b）850 hPa 水汽通量散度的夜昼差（夜减昼）空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the differences of (a) 500-hPa vertical velocity and (b) 850-hPa vapor flux divergence between night and day (night minus day) in summer during 1961–2005 in Xinjiang

夜降水量均有增加趋势，均占总站数的 96%，其中昼 51 个站通过 95%的信度检验，占昼增加趋势总站数的 60%，尤其伊犁地区的几个站增加的最大也最显著。夜 45 个站通过 0.05 显著性检验，占夜增加趋势总站数的 53%，主要集中在阿勒泰、伊犁、哈密以及南疆的喀什地区。昼、夜的线性趋势系数空间分布相似，夜平均系数大于昼，夜降水增加趋势系数占总降水趋势系数的 51%。北疆昼、夜降水量的增加率均大于南疆，降水增长率最大区位于北疆的的乌鲁木齐和伊犁地区。降水量夜昼差的趋势（图 3c）中 47 个站呈增加趋势，但只有少数站通过显著性检验，整个新疆地区夜昼差的变化趋势系数为 0.01mm/a。可以断定，在 1961～2005 年，新疆大部分地区昼夜降水量均呈显著增加趋势，且夜间的降水量的增率大于白昼，在空间分布上表现为北疆的增率大于南疆。

图 3d、3e 为昼、夜降水日数的变化趋势图。可以看出，昼、夜降水日数呈增加趋势均有 82 站，占总站数的 92%，其中昼、夜分别有 48、44 个站通过 0.05 的显著性检验，这些站集中在乌鲁木齐和阿勒泰地区。昼、夜降水日数均有 7 个站呈减少趋势并且全没通过 0.05 的显著性检验。夜昼差的趋势图（3f）中呈增加趋势的 32 个站中有 4 个是显著的，57 个呈减少趋势的站中 14 个显著，新疆整个地区降水日数夜昼差的变化趋势系数为－0.3 d (10 a)$^{-1}$。

总之，过去半个世纪，中国新疆地区总体上夜间年降水量和降水日数均大于白天的年降水量和降水日数，昼、夜年降水量和降水日数总体呈显著的增加趋势，但夜、昼降水量及降水日数之差值没有显著的变化趋势。

3.2 区域平均昼夜降水的长期变化趋势

3.2.1 昼、夜降水量区域平均的时间变化特征

图 4 给出了整个新疆地区区域平均年 P_d、P_n 的时间变化。由图 4a 可知，在 1961～2005 年，新疆年 P_d、P_n 均呈显著地增长趋势（相关系数平方 $R^2 > R_{0.05}=0.062$），昼夜间的倾向系数基本接近，分别为 5.3 mm (10 a)$^{-1}$ 和 5.4 mm (10 a)$^{-1}$；P_d、P_n 的年际变化一致，而年 P_n 大于年 P_d，45 年平均年夜昼降水量差为 9.8 mm。从图 4b 可以看出，年平均 P_n 与 P_d 之差的变化趋势有明显的年代际变化特征，在 1975 年以前两者之差呈减小趋势，而 1991 年以后转变为增加趋势。

3.2.2 昼、夜降水日数、降水强度的变化特征

除降水量外，降水日数和降水强度也是表征降水特征的主要指标，为此在这里同样分析区域平均昼、夜降水日数和强度的变化，目的是进一步了解昼、夜降水的特征差异。图 5a 给出了年昼、夜降水日数时间序列。由图可知，昼、夜降水日数均呈显著增加趋势，增加幅度分别为 1.8、1.5 d (10 a)$^{-1}$。虽然昼的降水日数增长趋势大，但是 45 年里昼降水日数始终小于夜。图 5b 是年昼夜降水强度的区域平均变化，由图 5b 可知 45 年里夜降水强度大于昼，昼、夜都呈显著的增长趋势，趋势系数夜[0.053 mm d^{-1} (10 a)$^{-1}$]大于昼[0.046 mm d^{-1} (10 a)$^{-1}$]。昼、夜降水量和各自降水日数的线性相关系数都达到

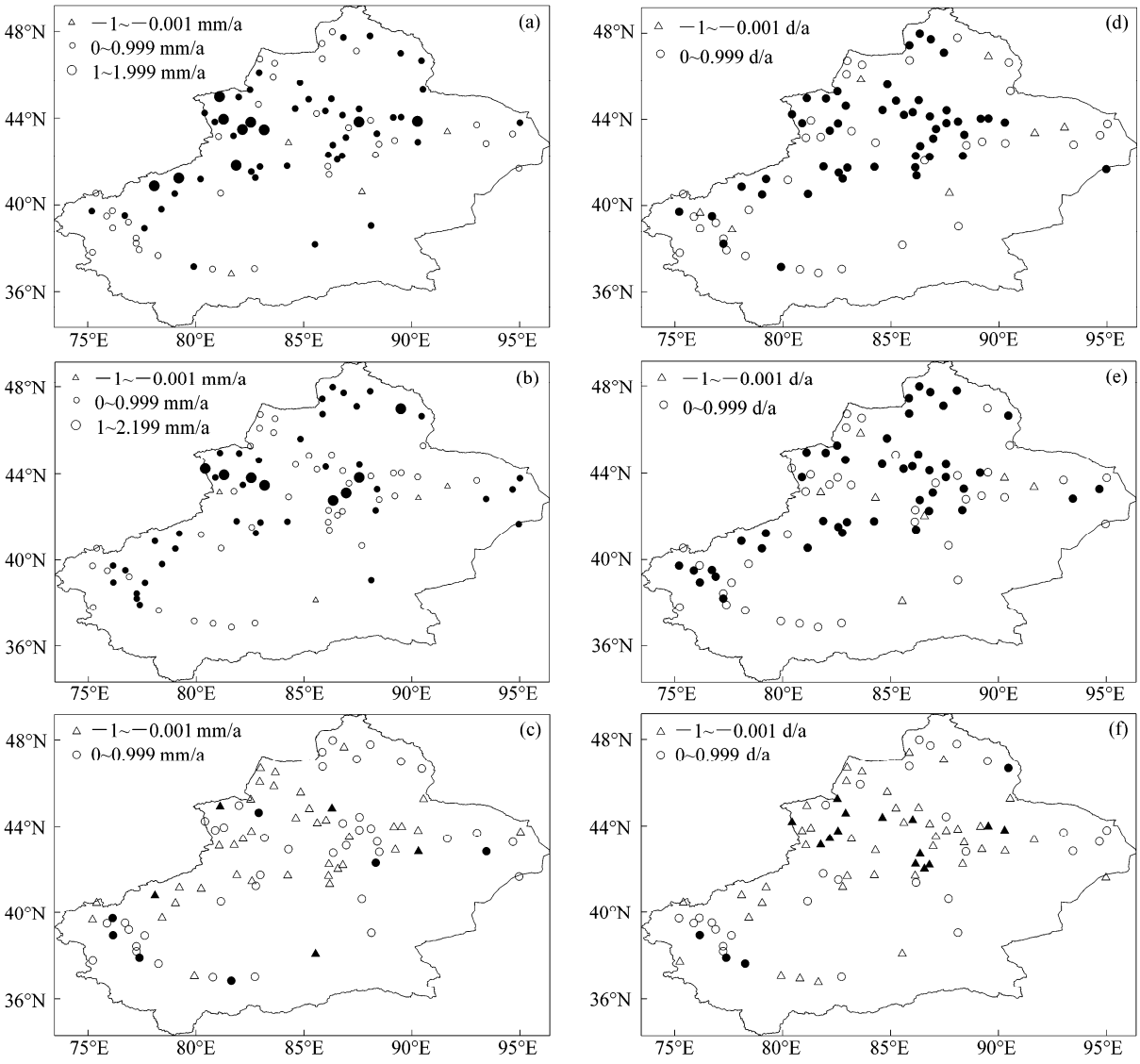

图 3 昼、夜降水量（左列）和降水日数（右列）变化趋势的空间分布（实心三角和圆圈表示通过显著性水平为 0.05 的检验）：（a、d）昼；（b、e）夜；（c、f）夜昼差（夜减昼）

Fig. 3 Spatial distribution of variation trends about the day and night precipitation amout (left column) and precipitation days (right column), soild triangles and circles denote statistically significant trends at 0.05 significance level: (a, d) Day; (b, e) night; (c, f) difference between night and day (night minus day)

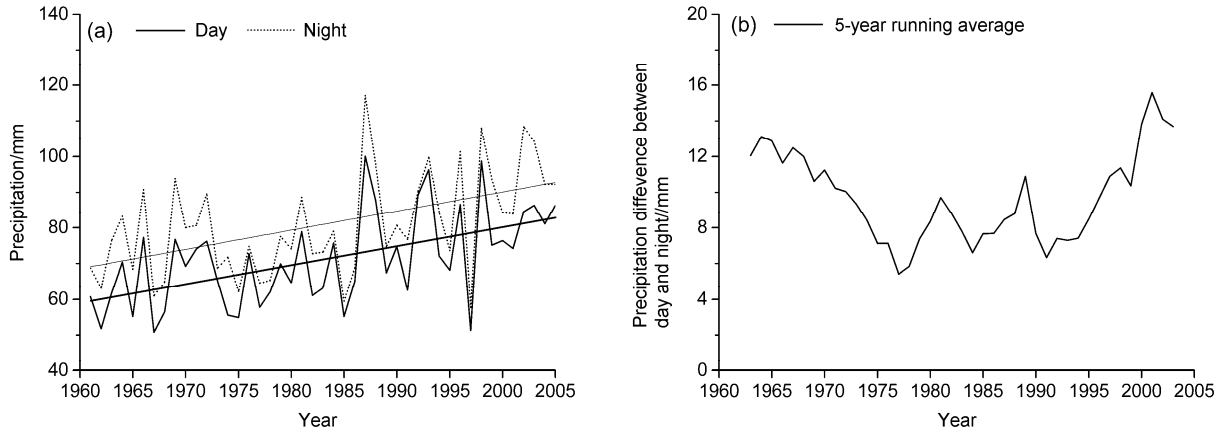

图 4 1961～2005 年新疆地区区域平均的年（a）P_d、P_n 以及（b）P_n-P_d 时间序列

Fig. 4 Time series of annual (a) P_d and P_n, (b) P_n-P_d in Xinjiang during 1961−2005

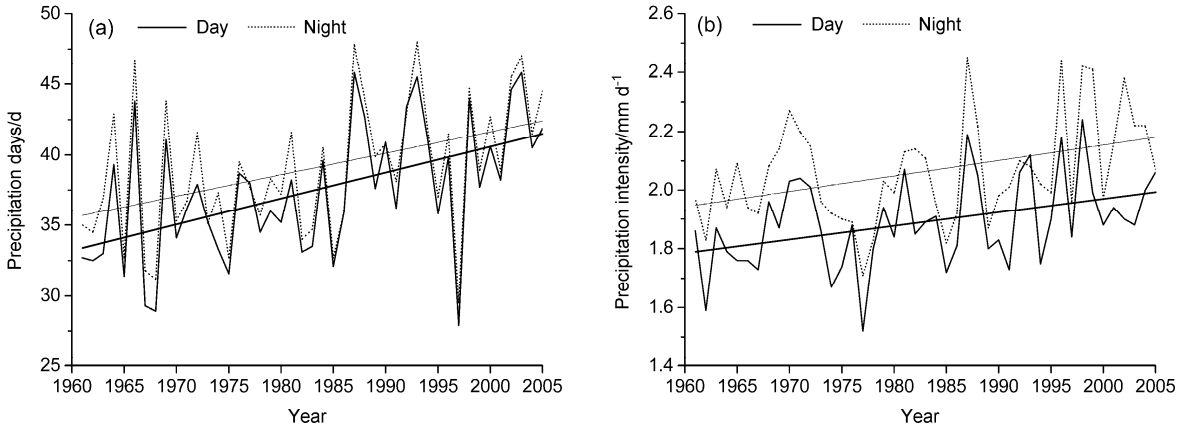

图 5 1961～2005 年新疆地区昼、夜（a）降水日数和（b）降水强度时间序列

Fig. 5 Time seies of (a) precipitation days and (b) precipitation intensity in daytime and nighttime in Xinjiang during 1961−2005

0.88 以上，而昼、夜降水量和各自降水强度的相关系数最高为 0.45，说明降水量的增加主要是由降水日数的增加引起，而降水强度对降水量增加的影响较小。

3.2.3 昼、夜毛毛雨、强降水的变化特征

关于毛毛雨变化的气候特征，过去的研究发现中国区域毛毛雨普遍减少（严中伟和杨赤，2000），但这些研究均是基于日降水观测数据的分析结果，昼、夜毛毛雨的变化及差异却不清楚，这里将针对这个问题进行重点分析。

图 6 给出了年昼、夜毛毛雨日数的变化趋势。从图 6 可以看出，平均来讲昼毛毛雨日数为 42 d，夜毛毛雨的日数 33.7 d，昼、夜毛毛雨日数具有显著的减少趋势，这与用日降水数据研究的结果一致（严中伟和杨赤，2000）。但值得注意的是昼和夜毛毛雨减少趋势的系数不同，昼毛毛雨日数减少率大于夜，昼、夜减少率分别为 1.6、1.3 d (10 a)$^{-1}$。

上述分析说明毛毛雨昼、夜分布具有显著的变化趋势，那么，作为降水的另一个极端过程，强降水的变化到底怎样？这里我们利用百分位法得出各个站点昼、夜强降水阈值，即将 1961～2005 年日降水量≥0.1 mm 的逐年日降水进行从小到大的排序，计算该年百分位数，将 45 年第 90 百分位值平均值作为强降水阈值。然后计算 1961～2005 年各年超过阈值的降水日数、降水量，分别作为该年强降水发生的日数和强降水量。计算 89 个站逐年强降水的日数、降水量的算术平均值作为新疆逐年强降水日数、降水量序列，而强降水量除以强降水日数定义为强降水强度。

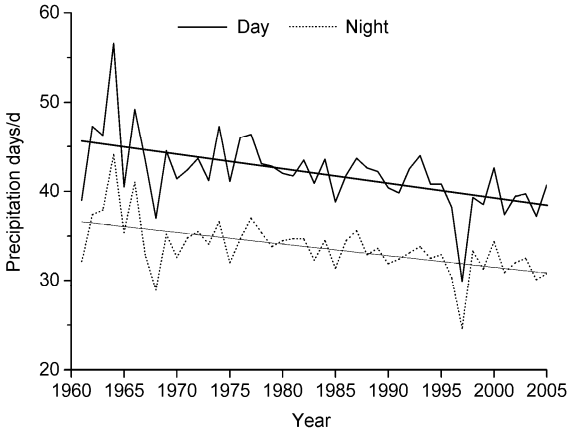

图 6 1961～2005 年新疆地区昼、夜毛毛雨日数时间序列

Fig. 6 Time series of drizzle days in daytime and nighttime in Xinjiang during 1961−2005

图 7 给出了区域平均的昼、夜强降水的变化。可以看出，夜间的强降水量大于白昼，昼、夜强降水量都呈显著的增加趋势，昼、夜强降水量的增加趋势分别为 3.3、3.6 mm (10 a) $^{-1}$（图 7a）。分析发现，昼、夜强降水量和各自总降水量有很好的线性相关性，相关系数均在 0.95 以上，说明强降水量对总降水量的影响很大。昼、夜强降水日数约为各自降水日数的 10%，但昼、夜强降水量分别占昼、夜总降水量的 48%、47%。图 7b 给出昼夜强降水日数的变化趋势。可以看出，1961～2005 年大部分年份夜降水日数大于昼，并且这 45 年的夜平均强降水日数大于昼。昼、夜强降水日数均呈增加趋势，分别为 0.34、0.33 d (10 a)$^{-1}$, 并通过了 0.05 的显著性检验。

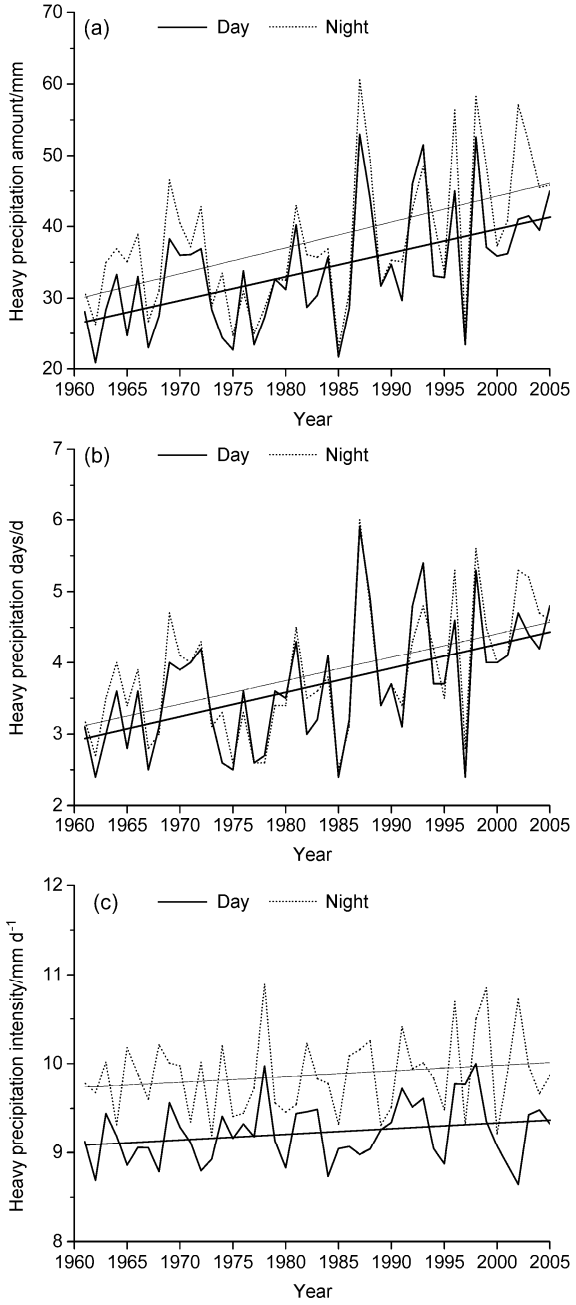

图 7 1961～2005 年新疆地区昼、夜年平均（a）强降水量、（b）强降水日数和（c）强降水强度时间序列

Fig. 7 Time series of annual heavy precipitation (a) amount, (b) days, and (c) intensity in daytime and nighttime in Xinjiang during 1961–2005

从图 7c 可知，45 年内夜平均强降水强度大于昼，昼强降水强度增长趋势为 0.065 mm d^{-1} (10 a) $^{-1}$，夜为 0.063 mm d^{-1} (10 a) $^{-1}$，昼、夜降水强度的增加趋势基本相当，但仅昼的增长趋势通过 0.05 显著性检验。结合图 7a、7b 分析得，强降水日数与强降水量的变化趋势相似，昼强降水日数与昼强降水量线性相关系数为 0.92，夜的为 0.88，可见昼夜强降水量增加主要是强降水日数显著增加的结果，而降水强度的影响不大。这与利用日降水研究所得出的结果一致（杨莲梅，2003）。

概括起来，新疆年平均昼、夜降水量、降水日数、降水强度均呈显著增加趋势，降水量和降水强度的增加趋势为夜大于昼，而降水日数则为昼大于夜；强降水过程也有相似的结果。降水量的增加是降水日数增加引起的，降水强度的影响较小。新疆地区昼、夜毛毛雨日数均呈现显著的减少趋势，昼毛毛雨日数及其减少率均大于夜的。

3.3 新疆昼、夜降水量的突变分析

已有的结果说明，新疆地区年降水量在 1980 年代后期有一个突然的增加（突变），其转折点在 1987 年（施雅风等，2003）。利用 M−K 方法，在此分析了 1961～2005 新疆年昼、夜降水量的 M−K 曲线（图略），正向序列表明昼夜均有增加的趋势，根据两图中正向序列和逆向序列的交点位置，确定昼夜降水量的突变年分别为 1986 年、1991 年，夜的突变时间点晚于昼 5 年。并且无论昼夜两者的 UF 曲线都呈超过了显著性水平 0.05 的临界线，表明昼、夜降水量的增加趋势是显著的。而昼、夜滑动 t 检验计算值（昼 t_d=4.49，夜 t_n=3.30）均大于 $t_{0.05}$=2.02，均通过 0.05 的显著性检验，证明昼和夜降水量在 1986 年、1991 年有一个由少到多的突变。昼突变前后平均值之差为 14.5 mm，夜为 13.6 mm。那么为什么夜间降水的突变点较昼间降水的突变点晚 5 年呢？造成年昼、夜间降水突变点差异的原因值得深入研究。

4 结论和讨论

本文利用新疆 89 个气象站的观测资料对新疆地区 1961～2005 年的昼、夜降水量、降水日数、降水强度及毛毛雨和强降水过程的时空变化特征进行了分析，通过分析可以得出以下结论：

（1）1961～2005 年新疆区域平均昼、夜降水量均呈显著地增加趋势，昼、夜间增加趋势分别为 5.3 mm (10 a)$^{-1}$ 和 5.4 mm (10 a) $^{-1}$；昼、夜降水量的年际变化基本一致，且年夜间降水的总量大于年白天降水的总量，45 年平均夜昼降水量差为 9.8 mm。

（2）昼、夜年降水日数均呈显著的增加趋势，增加幅度分别为 1.8、1.5 d (10 a) $^{-1}$。45 年间平均昼降水日数小于夜。45 年里夜降水强度大于昼，昼、

夜都呈显著的增长趋势，趋势系数夜大于昼。降水量的增加主要是由降水日数的增加引起的。

（3）昼夜毛毛雨日数具有显著的减少趋势，这与用日降水数据研究的结果一致。年昼毛毛雨日数大于夜，昼、夜减少率分别为 1.6、1.3 d (10 a)$^{-1}$。夜强降水量大于昼，昼、夜强降水量显著的增加趋势分别为 3.3、3.6 mm (10 a)$^{-1}$。45 年内夜平均强降水日数和强降水强度均大于昼。昼、夜强降水量增加主要是强降水日数显著增加的结果。昼、夜强降水量和各自的总降水量有很好的相关，强降水量对总降水量的影响很大。

（4）昼、夜降水量都存在由少到多的显著突变，但两者发生突变时间不同，昼降水发生突变的时间为 1986 年而夜降水量在 1991 年。

降水的形成过程既有大尺度气候背景的影响，又同时受局地陆气相互作用的影响。本文的分析说明，在新疆地区降水量持续增加大背景下，昼、夜降水的变化具有明显的差异，尤其是变化趋势的差异，如为什么在增暖背景下夜降水量增加趋势大于白天的增加趋势，而降水日数的增加趋势却有相反的结果，昼、夜降水的突变点为什么不一致，白天毛毛雨日数减少的趋势比夜间毛毛雨减少大的原因是什么？对这些问题的回答需要利用陆气耦合的高分辨率区域气候模式的模拟研究去诠释，这将是值得进一步研究的科学问题。

参考文献（References）

Bonsal B R, Zhang X, Vincent L A, et al. 2001. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada [J]. J. Climate, 14 (9): 1959–1976.

Dai A G, Giorgi F, Trenberth K E. 1999. Observed and model-simulated diurnal cycles of precipitation over the contiguous United States[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 104 (D6): 6377–6402.

戴新刚, 张凯静. 2012. 20 世纪后 30 年中国西北西部降水年代际变化机理分析 [J]. 物理学报, 61 (19): 199201-1–199201-9. Dai Xingang, Zhang Kaijing. 2012. A mechanism analysis of the interdecadal precipitation change in northwestern China for the last 30 years of twentieth century [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 61 (19): 199201-1–199201-9.

戴新刚, 李维京, 马柱国. 2005. 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. 2005. Variations of water vapor source in Xinjiang in recent decades [J]. Progress in Natural Science (in Chinese), 16 (12): 1651–1656.

戴新刚, 任宜勇, 陈洪武. 2007. 近 50 年新疆温度降水配置演变及其尺度特征 [J]. 气象学报, 65 (6): 1003–1010. Dai Xingang, Ren Yiyong, Chen Hongwu. 2007. Multi-scale feature of climate and climate shift in Xinjiang over the past 50 years [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65 (6): 1003–1010.

戴新刚, 汪萍, 张凯静. 2013. 近 60 年新疆降水趋势与波动机制分析 [J]. 物理学报, 62 (12): 129201-1–129201-11. Dai Xingang, Wang Ping, Zhang Kaijing. 2013. A study on precipitation trend and fluctuation mechanism in northwestern China over the past 60 years [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 62 (12): 129201-1–129201-11.

符淙斌, 王强. 1992. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 16(4): 482–493. Fu Congbin, Wang Qiang. 1992. The definition and detection of the abrupt climatic change [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 16 (4): 482–493.

Imaoka K, Spencer R W. 2000. Diurnal variation of precipitation over the tropical oceans observed by TRMM/TMI combined with SSM/I [J]. J. Climate, 13: 4149–4158.

Karl T R, Knight R W. 1998. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 79: 231–241.

蓝永超, 沈永平, 苏宏超, 等. 2008. 全球变暖情景下新疆降水的变化 [J]. 干旱区资源与环境, 22 (10): 66–71. Lan Yongchao, Shen Yongping, Su Hongchao, et al. 2008. Study on precipitation variations in Xinjiang region under global warming [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese), 22 (10): 66–71.

刘波, 冯锦明, 马柱国, 等. 2009. 1960～2005 年新疆气候变化的基本特征 [J]. 气候与环境研究, 14 (4): 414–426. Liu Bo, Feng Jinming, Ma Zhuguo, et al. 2009. Characteristics of climate changes in Xinjiang from 1960 to 2005 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (4): 414–426.

刘海红. 2012. 新疆水汽输送特征及其变化分析 [D]. 新疆师范大学硕士学位论文, 13-23. Liu Haihong. 2012. Characteristics and changes analysis on water vapor transportation in Xinjiang [D]. M. S. thesis (in Chinese), Xinjiang Normal University, 13-23.

柳葳, 许有鹏, 黄云. 2005. 气候变暖对新疆降水和径流影响分析 [J]. 干旱区地理, 28 (5): 597–602. Liu Wei, Xu Youpeng, Huang Yun. 2005. Effects of global warming on precipitation and runoff volume in Xinjiang [J]. Arid Land Geography (in Chinese), 28 (5): 597–602.

陆虹, 何慧, 陈思蓉. 2010. 华南地区 1961～2008 年夏季极端降水频次的时空变化 [J]. 生态学杂志, 29 (6): 1213–1220. Lu Hong, He Hui, Chen Sirong. 2010. Spatiotemporal variation of extreme precipitation frequency in summer over South China in 1961–2008 [J]. Chinese Journal of Ecology (in Chinese), 29 (6): 1213–1220.

马柱国, 符淙斌. 2007. 20 世纪下半叶全球干旱化的事实及其与大尺度背景的联系 [J]. 中国科学, 37 (2): 222–233. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2007. The fact of global aridification in the later half of 20th century and its relationship with large-scale background [J]. Science in China (in Chinese), 37 (2): 222–223.

马柱国, 黄刚, 甘文强, 等. 2005. 近代中国北方干湿变化趋势的多时段特征 [J]. 大气科学, 29 (5): 671–681. Ma Zhuguo, Huang Gang, Gan Wenqiang, et al. 2005. Multi-scale temporal characteristics of the dryness/wetness over Northern China during the last century [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (5): 671–681.

Mapes B E, Waner T T, Xu M, et al. 2003. Diurnal patterns of rainfall in

northwestern South America. Part I: Observations and context [J]. Mon. Wea. Rev., 131: 799- 812.

施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 2003. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨 [J]. 第四纪研究, 23 (2): 152–163. Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. 2003. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China [J]. Quaternary Sciences (in Chinese), 23 (2): 152–163.

史玉光, 孙照渤. 2008. 新疆大气可降水量的气候特征及其变化 [J]. 中国沙漠, 28 (3): 519–525. Shi Yuguang, Sun Zhaobo. 2008. Climate characteristics of atmospheric precipitable water over Xinjiang and its variation [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 28 (3): 519–525.

宋连春, 张存杰. 2003. 20 世纪西北地区降水量变化特征 [J]. 冰川冻土, 25 (2): 143–148. Song Lianchun, Zhang Cunjie. 2003. Changing features of precipitation over Northwest China during the 20th century [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 25 (2): 143–148.

Smith E A, Yang S. 2006. Diurnal Variability of Precipitation: Multiple Modes & Ambiguities [C]. 27th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology.

王国庆, 张建云, 刘九夫, 等. 2008. 气候变化对水文水资源影响研究综述 [J]. 中国水利, (2): 47–51. Wang Guoqing, Zhang Jianyun, Liu Jiufu, et al. 2008. Review on studies for climate change impacting on hydrology and water resources [J]. China Water Resources (in Chinese), (2): 47–51.

薛燕, 韩萍, 冯国华. 2003. 半个世纪以来新疆降水和气温的变化趋势 [J]. 干旱区研究, 20 (2): 127–130. Xue Yan, Han Ping, Feng Guohua. 2003. Change trend of the precipitation and air temperature in Xinjiang since recent 50 years [J]. Arid Zone Research (in Chinese), 20 (2): 127–130.

严中伟, 杨赤. 2000. 近几十年中国极端气候变化格局 [J]. 气候与环境研究, 5 (3): 267–272. Yan Zhongwei, Yang Chi. 2000. Geographic patterns of extreme climate changes in China during 1951–1997 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 5 (3): 267–272.

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

杨晓丹. 2005. 中国西北地区降水变化及其可能原因的诊断研究 [D]. 中国气象科学研究院硕士学位论文, 39–51. Yang Xiaodan. 2005. The characteristic and possible causes of change in precipitation in Northwest China during the recent 50 years [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences, 39-51.

苑文华, 郭铌, 张立文, 等. 2010. 山东省不同强度降水日数年际变化及趋势分布特征 [J]. 安徽农业科学, 38 (21): 11249–11253. Yuan Wenhua, Guo Ni, Zhang Liwen, et al. 2010. Distribution of climatic trends and inter-annual variation feature of rainy days in different grades in Shandong province [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences (in Chinese), 38 (21): 11249–11253.

翟盘茂, 任福民, 张强, 等. 1999. 中国降水极值变化趋势检测 [J]. 气象学报, 57 (2): 208–216. Zhai Panmao, Ren Fumin, Zhang Qiang, et al. 1999. Detection of trends in China's precipitation extremes [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 57 (2): 208–216.

Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. J. Climate, 18 (7): 1096–1108.

张意林, 覃军, 陈正洪. 2008. 近 56 a 武汉市降水气候变化特征分析[J]. 暴雨灾害, 27 (3): 253–257. Zhang Yilin, Tan Jun, Chen Zhenghong. 2008. Analysis on the change characteristics of precipitation in the latest 56 years in Wuhan [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 27 (3): 253–257.