

牛晓瑞, 王淑瑜, 李杉. 2012. 1961~2005年新疆夏季低云量长期变化特征及影响因素分析 [J]. 气候与环境研究, 17 (1): 59-67, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10047. Niu Xiaorui, Wang Shuyu, Li Shan. 2012. Analysis of long-term variation characteristics and influence factors of summer low cloud amount in Xinjiang during 1961-2005 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (1): 59-67.

1961~2005 年新疆夏季低云量长期变化特征 及影响因素分析

牛晓瑞^{1,2} 王淑瑜³ 李杉^{1,2}

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 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 南京大学全球变化研究中心, 南京 210093

摘要 利用新疆 51 个观测站 1961~2005 年低云量资料, 采用趋势分析、小波分析等方法分析了新疆夏季低云量的长期变化特征, 并对 500 hPa 环流指数与新疆夏季低云量做奇异值分解, 重点讨论了极涡对新疆夏季低云量的影响。结果表明: 近 45 年新疆夏季低云量增加趋势显著, 并在 1987 年发生突变; 新疆夏季低云量存在 2~3 年、准 6 年和准 11 年的显著周期; 环流分析表明新疆夏季低云量与副热带高压、极涡及青藏高原高度场指数关系密切, 当极涡面积减小、强度减弱时, 西亚高空急流偏弱, 新疆上空高空急流偏强, 而低层大气主要表现为南风增强, 水汽输送辐合加强, 因此新疆夏季低云量偏多, 反之, 低云量偏少。

关键词 新疆地区 低云量 小波分析 极涡指数

文章编号 1006-9585 (2012) 01-0059-09 **中图分类号** P461 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10047

Analysis of Long-Term Variation Characteristics and Influence Factors of Summer Low Cloud Amount in Xinjiang during 1961 - 2005

NIU Xiaorui^{1,2}, WANG Shuyu³, and LI Shan^{1,2}

1 *Key Laboratory of Regional Climate Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

3 *Research Center of Global Change, Nanjing University, Nanjing 210093*

Abstract Using the data of 51 weather stations during 45 years (1961-2005), the long-term temporal variation of summer low cloud over Xinjiang is analyzed by linear trend estimation and Morlet wavelet analysis. The relationship between 500-hPa circulation index and summer low cloud over Xinjiang is examined by means of singular value decomposition, and the impact of polar vortex on the summer low cloud in Xinjiang is discussed. The analysis shows that the summer low cloud in Xinjiang has remarkably increased in recent 45 years, and quasi-two-year, quasi-six-year, and quasi-11-year periodic oscillations were observed in summer low cloud amount. In addition, an

收稿日期 2010-04-08 收到, 2011-12-19 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划 2006CB400504

作者简介 牛晓瑞, 女, 1984 年出生, 博士研究生, 从事陆面变化及其影响和数值模拟方面的研究。E-mail: niuxr@tea.ac.cn

abrupt change is found around 1987. The results indicate that the summer low cloud amount in Xinjiang is closely related to the summer subtropical high, polar vortex, and the Qinghai - Xizang Plateau height field index. With weak polar vortex, the upper-level westerly jet in West Asia weakens while the westerly jet in Xinjiang strengthens and correspondingly in lower atmosphere, the south wind increases in Xinjiang accompanied by stronger water vapor transport, which leads to increased low cloud over the area.

Key words Xinjiang area, amount of low cloud, wavelet analysis, polar vortex index

1 引言

新疆占我国国土面积的 1/6, 其地形复杂, 有高原、山脉、盆地、沙漠, 在气候上属于干旱、半干旱气候区。20 世纪 80 年代中后期, 新疆地区经历了由干到湿的转变, 其北部、天山及其两侧地带和塔里木盆地西侧尤为显著 (施雅风等, 2002), 具体表现在降水增多 (柳葳等, 2005; 刘波等, 2009)、温度升高 (韩萍等, 2003)、河川径流增大 (张国威等, 2003) 等多方面。

虽然新疆近十几年降水增多, 但水资源仍然匮乏, 严重制约了当地社会经济及生态建设发展。云在地球气候系统的水分循环过程中起着至关重要的作用, 无论是地表水、土壤水还是地下水, 都来自大气的云中降水。如果可以科学地利用云催化技术, 降水量可以增加 5%~25% (陈勇航等, 2007)。云是影响降水的关键因素, 封彩云等 (2009) 利用观测资料分析得出: 中国北方地区云量与降雨量的相关中, 低云量与降水量的相关最为显著。因此关注低云的变化对研究新疆由干到湿的转变有重要意义。在这个转变过程中, 低云又是如何变化的? 它又在这个转型中起到了什么样的作用?

极涡是北半球重要的环流系统, 它控制着泛极地半永久性活动中心和副极地短期间尺度的气旋活动, 并对北半球从近地面到对流层顶附近的大气环流均有显著的影响, 尤其是对中纬度阻塞性、中低纬的副热带高压及亚洲季风等环流系统的影响比较明显 (孙兰涛等, 2006)。已有学者针对极涡的面积、强度对新疆地区的温度 (张恒德, 2006)、降水 (张友妹等, 2007; 陈冬冬和戴永久, 2009) 及水汽通量 (王遵娅和丁一汇, 2009) 的影响做了大量研究工作, 但极少人分析极涡变化对新疆低云量的影响。新疆地处青藏高

原北侧, 青藏高原高度场的变化将会影响其周边地区的环流 (白虎志等, 2001, 2005), 除此外, 西太平洋副热带高压的强度对我国水汽的输送也有较强影响, 上述因素均会影响到新疆地区低云的发展, 因此本文将会针对这一问题进行详细论述。

根据上述特点, 本文利用 1961~2005 年新疆台站资料对该地区低云量近 45 年的变化进行了系统全面的分析, 分别从其变化趋势、周期等方面研究低云的变化特点, 并讨论了大尺度环流指数 (极涡、青藏高原高度场指数和副热带高压指数) 对新疆低云量的影响, 这对了解该地区低云的变化特征及成因具有参考意义, 并有利于开发空中水资源和施展人工增雨。

2 资料来源和方法

本文所用低云量来源于新疆台站月平均低云量观测资料, 剔除观测年份较少的站点, 并考虑到新疆地区 20 世纪 50 年代的观测站点较少, 选取了 1961~2005 年的 51 个站点观测资料。选取的台站平均分布在除去沙漠、高山等的新疆境内, 该资料基本上能反映出这些区域的气候状况。除此之外, 本文还用到了 1951~2005 年 NCEP/NCAR 风场、比湿及高度场的格点资料, 其网格距为 2.5° (纬度) $\times 2.5^\circ$ (经度)。而表征逐月大气环流变化特征的月环流特征量指数来源于中国气象局国家气候中心整理的 74 类以 500 hPa 环流为主的月环流特征量指数资料。

文中主要采用标准化距平和线性倾向估计低云的变化趋势, 利用 Morlet 小波判断低云变化的多尺度周期特征, 并通过 t 检验验证其发生转折变化的年份, 最后利用奇异值分解 (Singular Value Decomposition, SVD) 分析环流因子对新疆低云量的影响。

3 低云量变化特征

空间分布上，新疆年平均低云量最小值主要出现在南疆的塔里木盆地，最大值在北疆的玛纳斯河流域（刘波等，2009）；而季节变化上，低云量按照夏春秋冬依次减少（宜树华等，2003；陈勇航等，2009）。由图 1 可见，近几十年低云量明显增多，以 1987 年为分界线，在此之前低云量距平大部分为负值，其中 1975 年最少，而其后年份中，除 1997 年外其余低云量距平均大于 0，云量最大值出现在 2003 年。分析单个站点年平均低云量变化发现（图略）：大部分台站低云量都呈增加趋势，以皮山、塔什库尔干最为显著，每年分别增加 0.66% 和 0.44%，而几个减少的台站中以哈密、喀什的低云量减弱最多，每年减少近 0.10%。新疆低云量在各个月份都呈增加趋势（见表

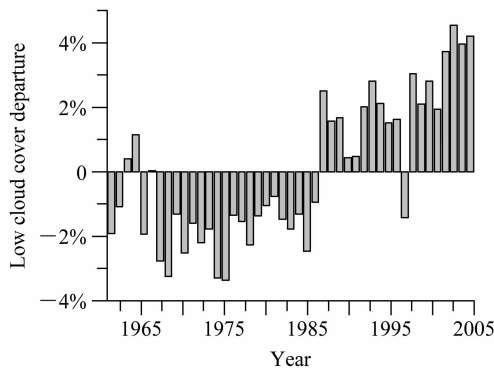


图 1 1961~2005 年新疆地区年平均低云量距平
Fig. 1 Anomaly of annual mean low cloud amount in Xinjiang during 1961 - 2005

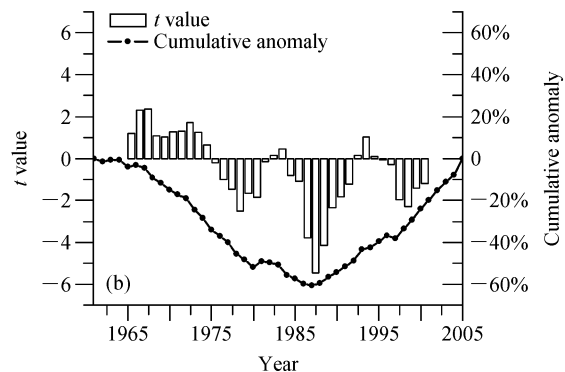
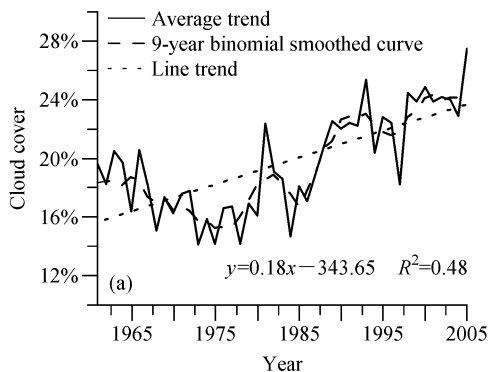


图 2 1961~2005 年新疆夏季低云量的 (a) 年际变化和 (b) 滑动 t 检验
Fig. 2 (a) Interannual changes and (b) the moving t -test statistical curve for the summer low cloud amount in Xinjiang during 1961 - 2005

1)，且春季和夏季较强、秋季和冬季较弱。其中以 5 月和 7 月、8 月增加最多，考虑到夏季低云量最多且 7 月、8 月连续增强，下面以 7 月、8 月为例，分析 1961~2005 年新疆夏季低云量的变化特征及增多的可能原因。

表 1 1961~2005 年新疆地区各月低云量的变化率
Table 1 Variabilities of monthly low cloud amount in Xinjiang during 1961 - 2005

月份	变化率/ a^{-1}	月份	变化率/ a^{-1}
1 月	0.095%	7 月	0.175%
2 月	0.113%	8 月	0.196%
3 月	0.114%	9 月	0.112%
4 月	0.158%	10 月	0.092%
5 月	0.179%	11 月	0.101%
6 月	0.128%	12 月	0.092%

3.1 低云量的变化趋势和突变分析

图 2a 给出了 1961~2005 年间新疆地区夏季低云量的变化特征，其上升趋势十分明显，增加速率为 $1.8\% (10 a)^{-1}$ ，通过了 0.001 显著性检验。

由于低云量的多寡对于降水的多少有很大的影响，因此研究低云量的年代际变化对干旱少雨的新疆地区长期调配空中水汽资源有一定的指导意义。本文对夏季低云量采用了九点二次平滑，有效地去掉了高频变化，较好地反应了该地区夏季低云量长期变化特征。从图 2a 可以看出，1961~2005 年间新疆夏季低云量变化主要分为 3 个增长时期和 3 个减少时段。减少时期主要是 60 年代初至 70 年代前期、80 年代初期和 90 年代初。就

持续时间来说,第一个持续时间较长,约 15 a,而其他两时段持续时间不超过 5 a。增长期分别为 70 年代中后期、80 年代中后期及 90 年代后几年。3 个增长期持续时间大约都是 5 a,其中以 80 年代中后期增长最为迅速,以平均 $1\% \text{ a}^{-1}$ 的速度增加。

根据以上分析发现,新疆夏季低云量最多的年份大都集中在 2000 年以后,最少的年份集中在 70 年代中后期,即低云量的变化表现出明显的趋势和阶段性特点。利用夏季新疆低云量的累计距平曲线可以更好地判断低云量的长期变化趋势(图 2b),发现低云量从 60 年代至 80 年代后期为减少趋势,而 80 年代后期开始又有较强的上升趋势。

同时,为了检测夏季低云量年代际间可能的显著变化,还应用了滑动 t 检验,并进行了显著性检验。滑动 t 检验是通过考察两组样本平均值的差异是否显著来检验突变(Afifi and Azen, 1972; 符淙斌和王强, 1992; 严中伟等, 1993)。图 2b 显示新疆夏季低云量在 1987 年左右发生突变,并通过 95% 信度的显著性检验($t=4$),与累积距平发生转折的年份相同。由于滑动 t 检验在选取子序列时具有较强的人为性,为了避免任意选择子序列造成突变点的漂移,需要反复变动子序列长度进行试验比较。本文还实验了其他子序列的 t 检验,发现在 1987 年均显示有突变发生。

在此时段内,新疆地区降水、温度都呈显著性增多的趋势,而总云量、日照时数、蒸发皿蒸发却减少,且年平均降水量、比湿和蒸发皿蒸发也都在 1987 年发生转折性变化。新疆大气中水汽含量较少,凝结层较高,高云大多为冰晶结构,因此低云量的多寡对该地区降水影响更大,除此外该地区温度、日照时数和蒸发皿蒸发的变化也都可能与低云量的变化有关(刘波等, 2009)。

3.2 低云量的周期特征

图 3 清楚地显示了夏季低云量在 1961~2005 年间的年际及年代际变化特征。新疆夏季低云量主要包含了 2~3 a 和准 6 年的年际变化及准 11 年的年代际变化。它们的强度随着年份变化:2~3 a 周期在 60 年代和 90 年代中期较强,其他时段较弱,而准 6 年潜在 70 年代后期至 80 年代中期较

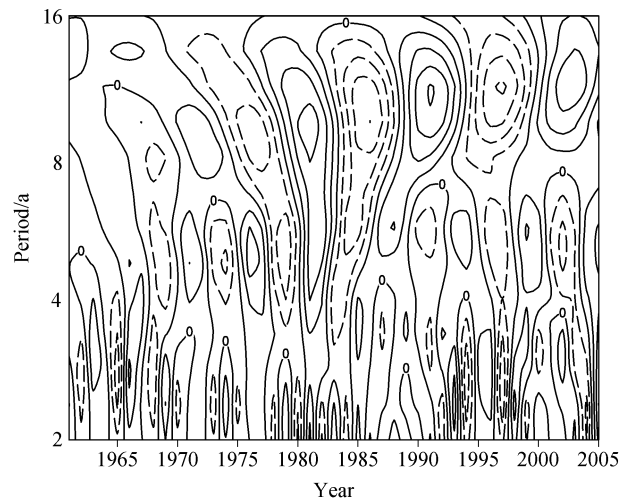


图 3 1961~2005 年新疆夏季低云量 Morlet 小波分析(实线和虚线分别为正值和负值)

Fig. 3 Morlet wavelet analysis of the summer low cloud amount in Xinjiang during 1961–2005 (solid and dashed lines denote positive and negative values, respectively)

强,80 年代后准 11 年周期成分迅速增强,因此,近 20 年新疆低云的增加主要是年代际尺度部分和线性增多共同作用的结果。

新疆夏季降水也同样存在 2~3 a、准 6 年和准 11 年周期,且 2~3 a 周期和准 6 年周期比较强的时段与低云相似(何金海等, 2005; 戴新刚等, 2007)。新疆夏季低云和降水存在这些周期震荡现象可能是受到 ENSO 的影响。ENSO 循环虽然发生在赤道太平洋,但其差不多可以影响全球 3/4 面积的气候异常(Bradley et al., 1987; Kiladis and Diaz, 1989),且不同地区对 ENSO 的响应也不尽相同(Shabbar et al., 1997; Grimm et al., 2000)。施能和曹洪兴(1996)、李耀辉等(2000)等先后证明了 ENSO 年东亚 500 hPa 高度场发生变化:当 El Niño (La Niña) 发生时,由于赤道东太平洋海温偏高(低),西太平洋海温异常降低(升高),导致东亚季风减弱(增强),西太平洋副高偏南(北),进而对我国各地区天气状况产生影响。所以 ENSO 主要是通过调整高空环流状况来影响新疆低云量的变化。

4 环流指数对低云量的影响

本文主要是利用 SVD 分析方法研究夏季副热

带高压、极涡和青藏高原高度场对新疆地区低云量的影响。SVD 主要应用于两个气象场相互关系的诊断分析，该方法已被广泛应用（黄嘉佑等，2004；张友妹等，2007）。

国内通常将极涡划分为以下 4 个区域：I 区（60°E~150°E）、II 区（150°E~120°W）、III 区（120°W~30°W）、IV 区（30°W~60°E）；而青藏高原也分为两个区域，分别是 a 区（25°N~35°N，80°E~100°E）和 b 区（30°N~40°N，75°E~105°E）。下面将夏季各环流指数作为左场，新疆 51 个台站夏季低云量作为右场进行 SVD 分析，其中左场要素变量（14 个因子）依次为夏季西太平洋副热带高压的面积和强度指数、I-IV 区及北半球极涡面积、极涡强度指数以及 a 区和 b 区青藏高原高度场指数。

由表 2 可知，夏季环流指数与新疆低云量的 SVD 分析中，前 3 个模态总的方差贡献率达 95% 以上，以第一模态方差贡献最大，超过了 86%，表明第一模态能在很大程度上反应夏季各环流指数与新疆夏季低云量的关系，且第一模态的左右场时间系数之间的相关系数也较高，故本文用第一模态结果进行分析。

表 2 1961~2005 年新疆夏季环流指数与低云量 SVD 分析的前三个模态的方差贡献百分率和总的方差贡献百分率及相应模态总体相关系数

Table 2 Variance contribution percentages for the first, second, and third modes and their total contribution in the Singular Value Decomposition (SVD) of atmospheric indices and the summer low cloud amount, and their overall correlative coefficients in Xinjiang during 1961 - 2005

	方差贡献百分率		相关系数
	单个	总	
第一模态	86.01%	86.01%	0.77
第二模态	6.83%	92.84%	0.70
第三模态	2.81%	95.65%	0.75

表 3 SVD 分析的第一模态的左场异性相关系数

Table 3 Left heterogeneous correlative coefficients for the first mode by the SVD analyses

因子	1	2	3	4	5	6	7
相关系数	-0.469 *	-0.477 *	0.519 *	0.568 *	0.354 *	0.493 *	0.681 *
因子	8	9	10	11	12	13	14
相关系数	0.401 *	0.534 *	0.523 *	0.262	0.612 *	-0.605 *	-0.272

* 表示通过 0.05 的显著性检验。

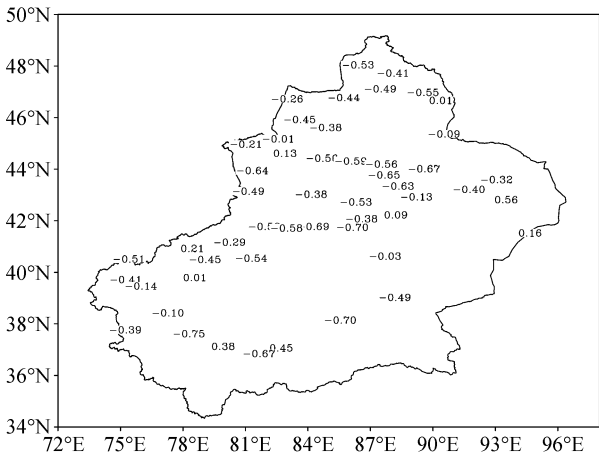


图 4 新疆夏季低云量与夏季环流指数 SVD 分析第一模态的右场异性相关系数分布

Fig. 4 Right heterogeneous correlative coefficients for the first mode with the SVD analyses of summer low cloud amount and atmospheric circulation indices in Xinjiang

第一模态中有 12 个因子的相关系数（R）通过了 0.05 的显著性水平检验（ $|R| \geq 0.288$ ，见表 3），其中多数都通过了 0.001（ $|R| \geq 0.465$ ）的显著性检验。除 IV 区极涡强度指数和 a 区青藏高原高度场指数的相关系数未通过检验外，其余因子相关性都较好，以北半球极涡面积、强度和 b 区青藏高原位势高度影响最为强烈。此外，西太平洋副热带高压和青藏高原高度场指数对新疆地区低云量的作用与极涡相反。

图 4 反映了新疆 51 个站点夏季低云量对西太平洋副热带高压、极涡及青藏高原高度场的响应情况。整个新疆地区对上述影响因子的反馈较为一致，相关系数除个别站点为正值外，大多数为负值且数值偏大，其中大部分通过了 0.01 显著性检验。结合表 3 得到：新疆大部分地区低云量与西太平洋副热带高压强度、面积及 a 区青藏高原高度场呈正相关，而与极涡强度、面积呈反相关，即当西太平洋副热带高压面积增大、强度增强，青

藏高原位势高度偏强及极涡面积减少、强度减弱时,新疆低云量增多,反之新疆低云量减少。

下面以极涡为例,探讨环流变化如何影响新疆地区低云量的变化。从表 3 可看出,对新疆低云量影响最大的极涡因子主要是北极涡面积,选取极涡面积偏大的 5 个年份(1964 年、1965 年、1968 年、1976 年、1977 年)及面积偏小的 5 个年份(1988 年、1996 年、1998 年、2002 年、2003 年)。根据上述年份分别对夏季 200 hPa 位势高度场、经圈环流及水汽输送进行合成分析,讨论极涡面积的伸缩对中、高纬度环流的影响,并重点讨论对低云量生成的动力、水汽条件的影响。

夏季亚洲西风急流恰好位于新疆上空,是影响新疆降水天气过程的重要大气环流系统之一。急流的位置、强弱、轴向将会影响低层的对流情况,急流越强越容易激发低空气流辐合,加剧上升运动(陈冬冬和戴永久,2009),为低云的生成提供条件。比较两种不同情况下 200 hPa 平均纬向风场发现:当极涡面积偏大时(图 5a),西亚地区急流偏强,新疆地区上空急流偏弱;而极涡面积偏小时(图 5b),西亚地区急流偏弱,新疆上空急流偏强。

为了进一步了解极涡异常年的新疆上空环流场的差异,对 $72^{\circ}\text{E}\sim 96^{\circ}\text{E}$ 做经向垂直剖面风速合

成。当极涡面积偏小时,新疆地区上空风场的主要特征是南风增强,其中南疆地区低层还表现为较强的上升运动(如图 6 所示)。王遵娅和丁一汇(2009)研究夏季亚洲极涡的长期变化对东亚环流的影响中指出,近几十年极涡面积减少,相对应地我国西北地区低层主要表现为南风显著增强,与本文结论一致。南风的增强将给新疆地区带来较多的水汽,有利于低云的生成。

西风气流是西北地区夏季水汽输送的主要载体,大西洋、北冰洋、黑海和里海是我国西北地区水汽输送的主要源地(李万莉等,2008)。伴随着极涡面积的收缩,位于里海附近的气旋式水汽输送增加,在北疆主要表现为南风水汽输送增强,而南疆则表现为水汽输送的辐合,同时计算极涡面积较大和较小时新疆大气中的含水量发现,极涡面积较小时,新疆大气含水量增加(图略),较多的水汽和较好的上升条件均有利于低云的生成。

极涡强度的减弱对新疆地区环流的影响与面积类似,因此夏季极涡主要是通过影响新疆上空急流的强度、位置等进而影响到低层对流的发展及水汽输送,对流和水汽输送的改变又影响了低云的生成。当极涡面积偏大(小)、强度较强(弱)时,西亚地区高空急流偏强(弱),而新疆上空急流强度偏弱(强),对应的新疆低层大气主

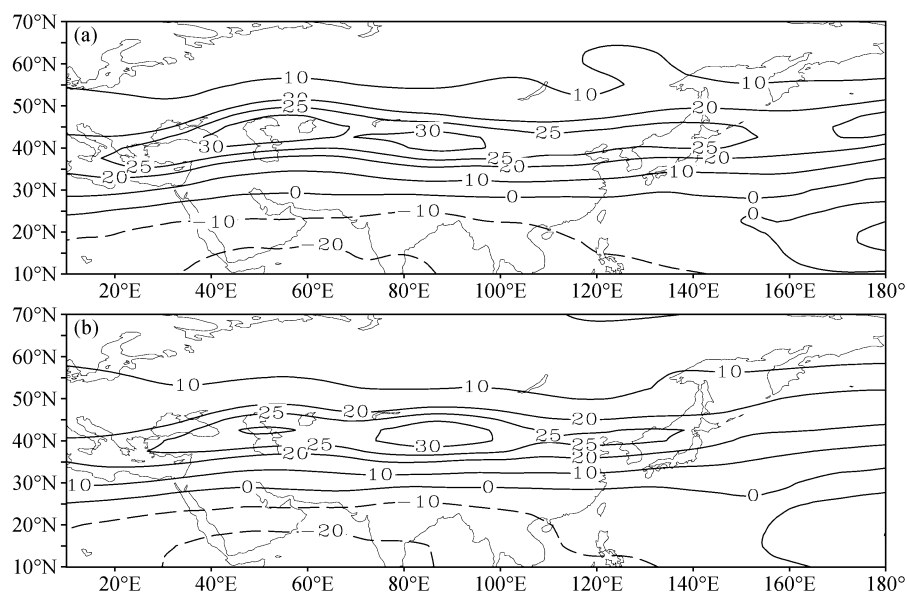


图 5 夏季极涡面积 (a) 偏大和 (b) 偏小年 200 hPa 合成的平均纬向风 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 5 Average zonal winds ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 200 hPa in summer in (a) larger and (b) smaller polar vortex area years

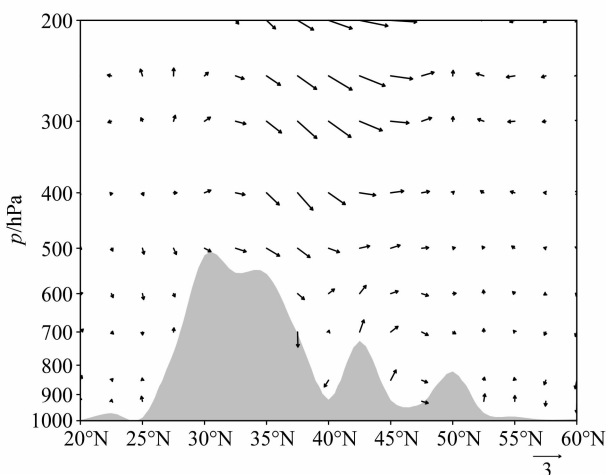


图6 5个夏季极涡面积异常偏小的和5个极涡面积异常偏大的年份对应的72°E~96°E平均经圈环流场差值(经向风速单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 垂直速度单位: $-10^2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 6 72°E - 96°E averaged differences of meridional circulation between five larger and five smaller summer polar vortex area years (meridional wind speed units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, vertical speed units: $-10^2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

要表现为南风减弱(增强), 南风的水汽输送减弱(增强), 同时南疆地区上升运动减弱(增强), 不利(有利)于低云的生成。关于西太平洋副热带高压及青藏高原高度场指数对新疆的影响, 黄嘉佑等(2004)指出夏季副热带高压与新疆北部降水呈较强的正相关, 白虎志等(2005)发现夏季青藏高原高度场指数与新疆西南部降水及北部气温呈正相关, 降水生成的条件与低云相仿, 温度的升高有利于蒸发蒸腾的加强, 进而为低云的生成提供了较好水汽条件, 因此当夏季副热带高压面积增大、强度增强, 青藏高原高度场指数偏高时, 新疆低云量偏多。

5 结论与讨论

使用新疆台站观测资料对该地区1961~2005年低云量变化特征进行分析, 得到如下结论:

(1) 近45年来新疆地区年平均低云量显著增多。1987年前低云量距平大多为负值, 以1975年为最小, 1987年后年平均低云量距平几乎均为正值, 且在2003年达到最大。低云量在各月份也都呈增长趋势, 以5、7和8月最强。

(2) 夏季新疆低云量以 $1.8\% (10 \text{ a})^{-1}$ 的速

率增长, 45年间夏季低云量的变化主要分为3个减弱阶段和3个增长时期, 并在1987年发生强突变。

(3) 夏季新疆低云量变化周期主要是2~3 a、准6年及准11年, 与该地区夏季降水的变化周期相似。ENSO通过影响高空环流状况进而影响新疆地区低云的变化。

(4) 夏季新疆低云量与极涡指数呈负相关, 与西太平洋副热带高压和青藏高原高度场指数为正相关。当极涡指数偏小、副热带高压偏强、青藏高原高度场偏大时, 新疆夏季低云量较多, 反之, 低云量较少。当极涡面积偏大(小), 强度较强(弱)时, 西亚地区高空急流偏强(弱), 而新疆上空急流强度偏弱(强), 对应的新疆低层大气主要表现为南风减弱(增强), 南风的水汽输送减弱(增强), 同时南疆地区上升运动减弱(增强), 不利(有利)于低云的生成。

本文只是对新疆近几十年夏季低云量的变化特征及环流对其影响作了较为详细的分析, 而云量本身较为复杂, 受下垫面、地形和气溶胶等多种因素的影响, 受篇幅的限制本文都没有涉及。目前对于低云量而言还存在较为严峻的问题——资料的不确定性。卫星不能穿透中高云来辨识被遮挡的低云, 因此卫星给出的低云云量偏低(Li et al., 2004), 而台站分布不均, 例如新疆地区的高山和沙漠地带几乎没有台站, 使得研究区域上低云的变化存在不确定性。在以后的研究工作中需要把多种观测手法结合起来, 以更好地描述低云的变化特点。

参考文献 (References)

- Afifi A A, Azen S P. 1972. Statistical Analysis, A Computer Oriented Approach [M]. New York: Academic Press, Harcourt Brace Jovanovich Publishers, 366.
- 白虎志, 谢金南, 李栋梁. 2001. 近40年青藏高原季风变化的主要特征 [J]. 高原气象, 20 (1): 22-27. Bai Huzhi, Xie Jinnan, Li Dongliang. 2001. The principal feature of Qinghai - Xizang Plateau monsoon variation in 40 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 20 (1): 22-27.
- 白虎志, 马振锋, 董文杰. 2005. 青藏高原地区季风特征及与我国气候异常的联系 [J]. 应用气象学报, 16 (4): 484-491. Bai Huzhi, Ma Zhenfeng, Dong Wenjie. 2005. Relationship between Qinghai - Xizang Plateau region monsoon features and abnormal

- climate in China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 16 (4): 484–491.
- Bradley R S, Diaz H F, Kiladis G N, et al. 1987. ENSO signal in continental temperature and precipitation records [J]. *Nature*, 327 (6122): 497–501, doi: 10.1038/327497a0.
- 陈冬冬, 戴永久. 2009. 近五十年中国西北地区夏季降水场变化特征及影响因素分析 [J]. *大气科学*, 33 (6): 1247–1258.
- Chen Dongdong, Dai Yongjiu. 2009. Characteristics and analysis of typical anomalous summer rainfall patterns in Northwest China over the last 50 years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 33 (6): 1247–1258.
- 陈勇航, 陈艳, 黄建平, 等. 2007. 中国西北地区云的分布及其变化趋势 [J]. *高原气象*, 26 (4): 741–748.
- Chen Yonghang, Chen Yan, Huang Jianping, et al. 2007. Distribution and variation trend of cloud over Northwestern China [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 26 (4): 741–748.
- 陈勇航, 毛晓琴, 黄建平, 等. 2009. 西北典型地域条件下云量的对比分析 [J]. *气候与环境研究*, 14 (1): 77–84.
- Chen Yonghang, Mao Xiaoqin, Huang Jianping, et al. 2009. Comparison of cloud coverage over Northwestern China with respect to typical regions [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 14 (1): 77–84.
- 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.
- 封彩云, 王式功, 尚可政, 等. 2009. 中国北方水汽与云和降水的关系 [J]. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 45 (4): 30–36.
- Feng Caiyun, Wang Shigong, Shang Kezheng, et al. 2009. Relationship between water vapor with cloud and precipitation in the north China [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)* (in Chinese), 45 (4): 30–36.
- 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 climate change [J]. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 16 (4): 482–493.
- Grimm A M, Barros V R, Doyle M E. 2000. Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events [J]. *J. Climate*, 13 (1): 35–38.
- 韩萍, 薛燕, 苏宏超. 2003. 新疆降水在气候转型中的信号反应 [J]. *冰川冻土*, 25 (2): 179–182.
- Han Ping, Xue Yan, Su Hongchao. 2003. Precipitation signal of the climatic shift in Xinjiang region [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 25 (2): 179–182.
- 何金海, 刘芸芸, 常越. 2005. 西北地区夏季降水异常及其水汽输送和环流特征分析 [J]. *干旱气象*, 23 (1): 10–16.
- He Jinhai, Liu Yunyun, Chang Yue. 2005. Analysis of summer precipitation anomaly and the feature of water vapor transport and circulation in northwest China [J]. *Arid Meteorology* (in Chinese), 23 (1): 10–16.
- 黄嘉佑, 刘舸, 赵昕奕. 2004. 副高、极涡因子对我国夏季降水的影响 [J]. *大气科学*, 28 (4): 517–526.
- Huang Jiayou, Liu Ge, Zhao Xinyi. 2004. The influence of subtropical high indexes and polar vortex indexes on the summertime precipitation in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 28 (4): 517–526.
- Kiladis G N, Diaz H F. 1989. Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation [J]. *J. Climate*, 2 (9): 1069–1090.
- 李万莉, 王可丽, 傅慎明, 等. 2008. 区域西风指数对西北地区水汽输送及收支的指示性 [J]. *冰川冻土*, 30 (1): 28–34.
- Li Wanli, Wang Keli, Fu Shenming, et al. 2008. The interrelationship between regional westerly index and the water vapor budget in Northwest China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 30 (1): 28–34.
- Li Yanying, Yu Rucong, Xu Youping, et al. 2004. Spatial distribution and seasonal variation of cloud over China based on ISCCP data and surface observations [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82 (2): 761–773, doi: 10.2151/jmsj.2004.761.
- 李耀辉, 李栋梁, 赵庆云, 等. 2000. ENSO 对中国西北地区秋季异常降水的影响 [J]. *气候与环境研究*, 5 (2): 205–213.
- Li Yaohui, Li Dongliang, Zhao Qingyun, et al. 2000. Effect of ENSO on the autumn rainfall anomaly in Northwest China [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 5 (2): 205–213.
- 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.
- 柳薇, 徐友鹏, 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.
- Shabbar A, Bonsal B, Khandekar M. 1997. Canadian precipitation patterns associated with the Southern Oscillation [J]. *J. Climate*, 10: 3016–3027.
- 孙兰涛, 吴辉碇, 李响. 2006. 对北极极涡的认识 [J]. *极地研究*, 18 (1): 52–62.
- Sun Lantao, Wu Huiding, Li Xiang. 2006. Our understanding of arctic vortex [J]. *Chinese Journal of Polar Research* (in Chinese), 18 (1): 52–62.
- 施能, 曹洪兴. 1996. 厄尔尼诺发生前的北半球大气环流及我国天气气候异常分析 [J]. *大气科学*, 20 (3): 337–342.
- Shi Neng, Cao Hongxing. 1996. Analysis of the atmospheric circulation and synoptic-climatic anomalies in China before El Niño onset [J]. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 20 (3): 337–342.
- 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 2002. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨 [J]. *冰川冻土*, 24 (3): 219–226.

- Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. 2002. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 24 (3): 219–226.
- 王遵娅, 丁一汇. 2009. 夏季亚洲极涡的长期变化对东亚环流和水汽收支的影响 [J]. *地球物理学报*, 52 (1): 20–29. Wang Zun-ya, Ding Yihui. 2009. Impacts of the long-term change of the summer Asian polar vortex on the circulation system and the water vapor transport in East Asia [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 52 (1): 20–29.
- 严中伟, 李兆元, 王晓春. 1993. 历史上 10 年—100 年尺度气候跃变分析 [J]. *大气科学*, 17 (6): 663–671. Yan Zhongwei, Li Zhaoyuan, Wang Xiaochun. 1993. An analysis of decade-to-century-scale climatic jumps in history [J]. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 17 (6): 663–671.
- 宜树华, 刘洪利, 李维亮, 等. 2003. 中国西北地区云时空分布特征的初步分析 [J]. *气象*, 29 (1): 7–11. Yi Shuhua, Liu Hongli, Li Weiliang, et al. 2003. Spatial and temporal distributions of cloud over northwest of China [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 29 (1): 7–11.
- 张国威, 吴素芬, 王志杰. 2003. 西北气候环境转型信号在新疆河川径流变化中的反映 [J]. *冰川冻土*, 25 (2): 183–187. Zhang Guowei, Wu Sufen, Wang Zhijie. 2003. The signal of climatic shift in northwest China deduced from river runoff change in Xinjiang region [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 25 (2): 183–187.
- 张衡德. 2006. 极涡的活动特征与数值模拟及其对我国气候的影响 [D]. 南京信息工程大学博士学位论文, 131pp. Zhang Hengde. 2006. Activity characteristics and numerical simulation of polar vortex and its effect on climate in China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Graduate Nanjing University of Information Science and Technology, 131pp.
- 张友姝, 史玉光, 张衡德, 等. 2007. 新疆夏季降水异常的时空特征及北极涡与阻塞高压对其的影响 [J]. *干旱区地理*, 30 (6): 779–887. Zhang Youshu, Shi Guangyu, Zhang Hengde, et al. 2007. Space-time features of summer rainfall anomaly of Xinjiang and the effect of North Polar Vortex and blocking [J]. *Arid Land Geography* (in Chinese), 30 (6): 779–887.