

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.

1960~2005年新疆气候变化的基本特征

刘波^{1,2} 冯锦明^{2,4} 马柱国² 魏荣庆³

1 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081

2 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

3 新疆维吾尔自治区气象台, 乌鲁木齐 830002

4 中国气象局兰州干旱气象研究所, 兰州 730020

摘 要 采用新疆地区最完善的 94 个气象站的观测资料, 系统地分析了新疆地区 1960~2005 年近地表主要气候要素 (包括降水、气温、风速、日照时数、总云量、低云量、蒸发皿蒸发、气温日较差等) 演变的时间和空间特征, 并结合几个站点的太阳总辐射资料分析了日照、总云量、低云量、蒸发皿蒸发和太阳总辐射之间的关系, 揭示了近 50 年来新疆气候变化的一些新特点。对导致这些变化的原因进行了初步分析, 得到的结果包括: 1) 新疆区域年降水在 1987 年发生转折性变化, 而冬季降水在 1986 年就开始发生转折性变化, 是 4 个季节中最早的。新疆区域降水与比湿和低云量之间具有极高的相关性, 尤其是低云量的增加可能是导致降水增加的主要原因。2) 气温显著升高的同时, 气温日较差是明显下降的。气温的升高可能是空气中水汽增多的结果, 但也可能是气温长期自然振荡过程中的一个上升阶段。3) 日照时数在总云量减小的前提下减少, 这可能是降水和低云量增多导致的结果。4) 蒸发皿蒸发的减小可能是风速、气温日较差、降水以及云量共同作用的结果, 单站分析表明太阳辐射的下降也可能是导致蒸发皿蒸发下降的一个重要原因。

关键词 新疆 降水 气温 蒸发皿蒸发 低云量

文章编号 1006-9585 (2009) 04-0414-13 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

Characteristics of Climate Changes in Xinjiang from 1960 to 2005

LIU Bo^{1,2}, FENG Jinming^{2,4}, MA Zhuguo², and WEI Rongqing³

1 *Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

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

3 *Xinjiang Meteorological Station, Ürümqi 830002*

4 *Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020*

Abstract A data set of precipitation, mean temperature and other climate variables at 94 stations of Xinjiang Uygur Autonomous Region is firstly used to analyze climate changes in Xinjiang Uygur Autonomous Region. The widely accepted procedures for creating regional averaged climatic time series and calculating linear trend and cumulative anomaly have been used. Analyses and discussion have been made for annual precipitation, mean temperature,

收稿日期 2008-05-20 收到, 2009-03-05 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金 40830956、40775055、40828004 和干旱气象科学研究基金 IAM200515

作者简介 刘波, 男, 1980 年出生, 博士, 从事气候变化分析和数值模拟方面的研究。E-mail: liuboboliu@gmail.com

wind speed, low cloud cover, total cloud cover, specific humidity, pan evaporation, and diurnal temperature range, and the seasonal analysis only includes precipitation and mean temperature. Solar radiation from a limited number of stations was available to evaluate the relationship between solar radiation and sunshine duration, total cloud cover, low cloud cover, and pan evaporation. The analyses show that the increasing rate of annual precipitation in Xinjiang as a whole was about $8.5 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, and time series of annual precipitation turned from dry to wet in 1987. It is consistent with some earlier studies. Furthermore, the seasonal analyses demonstrate that precipitation began to transfer in the winter of 1986 actually. Except the Turpan basin, precipitation is increasing all over Xinjiang. Mean temperature is warming throughout Xinjiang. The regional mean temperature has a significant increasing trend, and the rate of warming in winter is larger than that in the other seasons. The authors also find that pan evaporation decreased in Xinjiang from 1960 to 2005, and the decrease is statistically significant. The changing rate is $-26.5 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, which is smaller than the average values in the whole China. There were not significant long-term changes of annual sunshine duration, total cloud cover. Long-term changes in regional averaged specific humidity and low cloud cover have a significant increasing trend, and they also have the similar pattern to decadal or annual change of precipitation. The increasing changes of them perhaps lead to the increasing of precipitation. It is worth to study further. The authors also tentatively analyzed the possible causes for the observed change. However, it may be premature to give a definite conclusion at this moment.

Key words Xinjiang Autonomous Region, precipitation, temperature, pan evaporation, low cloud cover

1 引言

自 1850 年全球表面气温有仪器观测以来最暖的 12 年有 11 年出现在 1995~2006 年中, 近 100 年 (1906~2005 年) 来的增温率平均达到了 $0.74 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (IPCC, 2007), 这要大于第三次评估报告给出的 $0.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (1901~2000 年) 的增温率。关于近半个世纪以来中国区域气温和降水的研究已有了很多工作, 尤其在中国的东部地区 (丁一汇等, 1994; 王绍武等, 1998, 1999; 任国玉等, 2005; 唐国利等, 2005; 李庆祥等, 2006)。但在全球和中国气候持续增暖的背景下, 对于西北西部地区的研究相对较少, 且主要集中在降水 (韦志刚等, 2000; 于淑秋等, 2003; 宋连春等, 2003; 薛燕等, 2003)、气温 (何清等, 2003; 于海鸣等, 2007) 和小型蒸发皿蒸发变化 (苏宏超等, 2003; 马金铃等, 2005; 胡安焱等, 2006a, 2006b) 的研究上, 这些研究得到的主要结论包括: 近些年来新疆地区降水最重要的变化特征是在 20 世纪 80 年代中后期发生了由干到湿的转折性变化, 近半个世纪新疆地区的气温和蒸散潜力分别为上升和下降的。由于新疆地区的气候在近 20 多年里发生了巨大的变化, 因此其主要气候变化要素进行系统分析具有重要的意

义。本文利用 1960~2005 年新疆地区 94 站高空分辨率的观测资料对新疆地区气温、降水、风速、气压、日照时数、总云量、低云量、比湿和气温日较差等气候要素近 46 年的变化进行了系统而全面的分析, 由此得出近 46 年来新疆地区气候变化的基本特征, 并利用为数不多的太阳总辐射数据探讨了其与蒸发皿蒸发的关系。在本文中主要对降水、气温、低云量和蒸发皿蒸发等的变化特征进行了详细分析。

2 资料和方法

2.1 资料

本文中所用的资料来自于新疆气象局, 共 94 站 (分布见图 1), 时间从建站到 2005 年。观测数据包括 20 cm 小型蒸发皿蒸发、平均气温、日最高气温、日最低气温、降水、相对湿度、气压、总云量、低云量、日照时数和风速。其中平均气温、实际水汽压、相对湿度、气压和风速每日有 4 个观测值 (分别为北京时间 2 时、8 时、14 时和 20 时); 蒸发皿蒸发、日最高气温、日最低气温、总云量、低云量和日照时数每日 1 个观测值, 而降水 (累积量) 在日间和夜间各有 1 个观测值。太阳总辐射数据来自于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn/>), 在新疆区域

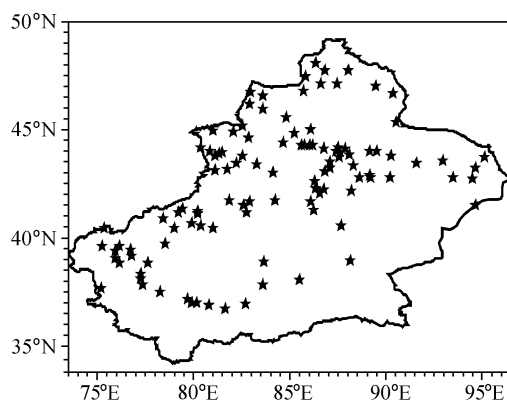


图1 站点的空间分布
Fig. 1 Location of the stations

只有 7 个站。

首先剔除观测年份较少的站点, 并对站点进行插值; 其次计算各站全年的总降水量和总蒸发皿蒸发, 以及年平均的总日照时数、总云量、低云量, 气温、气温日较差、比湿和风速等。考虑到新疆地区 20 世纪 50 年代的观测站点较少, 因此选取 1960~2005 年进行分析。

2.2 方法

主要讨论各个气象要素的长时间序列及其线性变化趋势, 并利用累积距平曲线来判断其发生转折变化的年份。

将新疆区域分成 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的经纬度网格, 然后采用克里格方法将站点数据插值到格点上。克里格 (Kriging) 也称空间局部估计或空间局部插值, 是地统计学两大主要内容之一。其实质是利用区域化变量的原始数据和变异函数的结构特点, 对采样点的区域化变量的取值进行线性五点最优估计的一种方法 (王政权, 1999; 李伟等, 2007)。

利用 Kriging 法计算待估计样点的内插值 (Z), 用公式表示为

$$Z = \sum_i^n W_i Z_i, \quad (1)$$

其中, n 是邻域内有效样点的个数, W_i 是邻域内有效样点 p_i 的权重系数, Z_i 是样点的实测值。空间内插的估计方差反映了取样本的变异以及空间内插所用分散样点内在的不确定性 (σ), 其计算公式为

$$\sigma^2 = \sum_i^n [W_i \times r(h_j)] + \lambda, \quad (2)$$

其中, $r(h_j)$ 是待估计样点到已知样点 p_i 距离为 h_j 时的半方差差值, λ 是最小的可能估计误差。Kriging 方法对于未观测点的估值是优越的, 较普通平均法的精度高, 并且能避免系统误差的出现, 给出估计误差和精度。Kriging 法制图提供了从二维平面描述气象要素、土壤物理属性、土壤水分等要素的空间分布特征的一个有效工具, 因而被广泛使用。

3 降水

从年降水量的时间变化 (图 2a) 上可见, 总体上新疆地区的降水量表现为明显的上升趋势, 降水的增长率达到了 $8.5 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 年降水量的最大值出现在 1993 年, 约为 160.2 mm, 最小值出现在 1975 年, 只有 80 mm, 相当于丰水年降水的一半。图 2b 表明, 降水量的累积距平值在 1986 年达到最低点, 从 1987 年开始发生由低到高的转折性增长变化, 这和以前的大部分研究结果一致。自 20 世纪 80 年代末以来, 除 1989、1991、1995 和 1997 年降水低于多年平均值外, 其他年份都高于多年平均值。发生转折前最大降水量是 140 mm, 而在发生转折后有 9 年的降水量大于转折前的最大降水量, 分别为 1987、1988、1992、1993、1996、1998、2002、2003 和 2005 年。

为了进一步确定新疆地区降水发生转折性变化的时间, 分析了四季降水 (春季 3~5 月, 夏季 6~8 月, 秋季 9~11 月, 冬季 12 月~次年 2 月) 的变化 (见图 3), 结果发现四季的降水量都是增多的。春夏秋冬的多年平均值分别为 29.7、49.8、24.1 和 12.2 mm, 在近 45 年里依次增长了 4.54 mm (15.3%)、17.14 mm (34.4%)、6.63 mm (27.5%) 和 7.29 mm (60.0%), 增长率分别为 1.0、3.9、1.5 和 $1.7 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 除春季外, 其他季节的降水量都是明显增多的, 其中夏季增长的绝对值最大, 而冬季增加的比重最大。从图 2b 中可见, 春夏秋冬累积距平值的最小值分别出现在 1986、1987、1986 和 1985 年, 因而从季节上看降水最早在 1986 年的冬季开始发生转折性变化。

新疆地域辽阔, 地形复杂, 降水分布极不均匀。从图 2c 中可见, 其分布规律主要表现为: 北部多于南部, 西部多于东部, 从西北向东部逐渐减小; 山区多于平原, 迎风坡多于背风坡; 大降

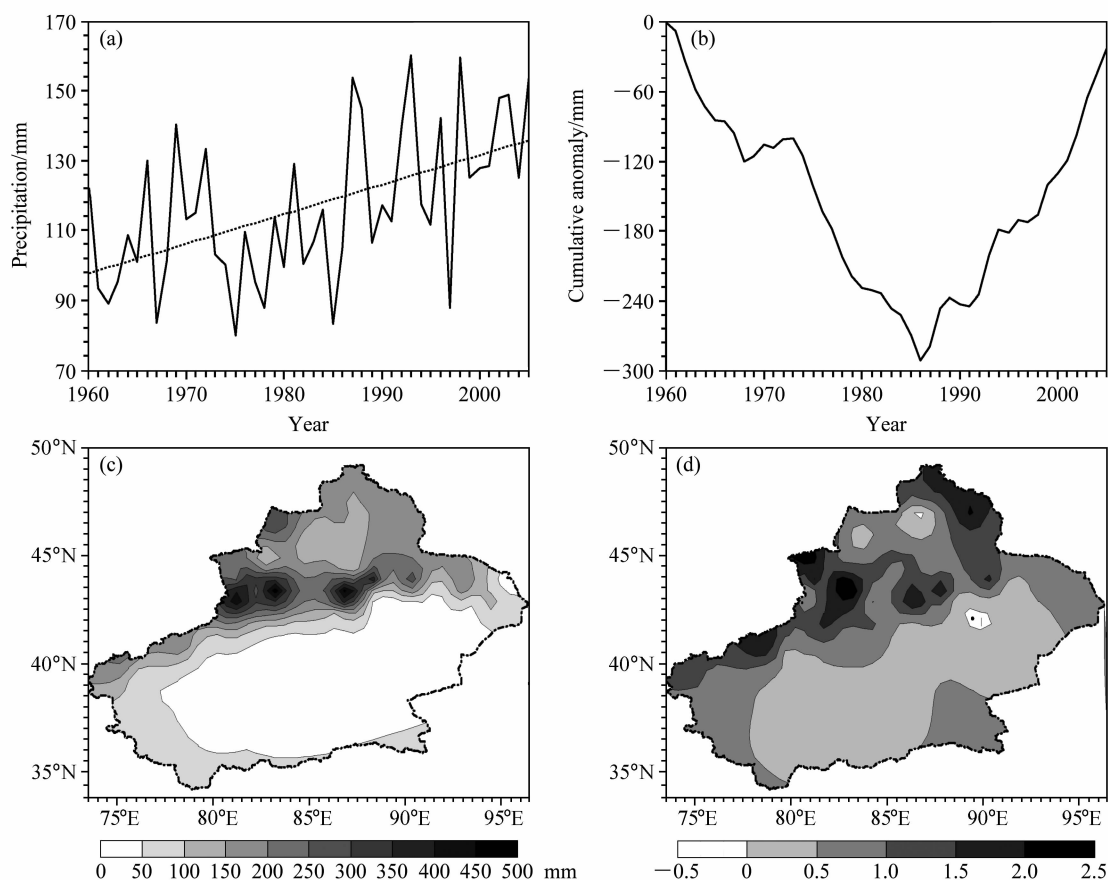


图2 1960~2005 年降水量的变化: (a) 年总量; (b) 累积距平; (c) 空间分布; (d) 倾向系数

Fig. 2 Annual precipitation from 1960 to 2005: (a) Time series; (b) cumulative anomaly; (c) spatial distribution; (d) tendency coefficient

水中心位于中、高山带; 盆、谷底为少雨中心。新疆降水量的这种分布特征主要是由于水汽输送、地形和气流的垂直运动造成的。从大地形上看, 新疆是三山夹两盆的结构, 高山环绕, 地形相对封闭。由于南疆西部多是海拔高度 4000 m 以上的高山 (天山南支和帕米尔高原), 最低的山口也在 2500 m 以上, 西来的弱气流很难翻越, 强气流虽能过山, 但多为下沉气流, 以大风为主, 降水不多; 而北疆西部的山势较低, 且有诸如阿拉山口、伊犁河谷等不超过 500 m 向西开放的缺口, 因此由西风和西北风携带的水汽从这些缺口进入新疆, 由于地形抬升作用先后在天山西部、准噶尔西部山地、阿尔泰山西南坡、天山南坡形成较大的降水区域, 当气流进入准噶尔盆地时多是下沉气流, 且无地形抬升作用, 因而很难形成降水。另外南疆地形相对北疆闭塞, 因此进入南疆的水汽较少, 很难形成降水。这些规律在李江风 (1991) 的研究中也得到了很好的体现。而对其降水的倾向系

数的空间分布 (图 2d) 上来看, 新疆地区的降水量除吐鲁番地区是减小的趋势外, 其他地区降水量均以增加的趋势为主, 其中最大的降水量增加量为 2~2.5 mm, 主要位于阿拉套山的南坡和伊犁河上游巩乃斯林场附近, 而南疆的大部分地区的降水增加量只有 0~0.5 mm。

4 气温

图 4a 和 4b 表明, 1960~2005 年新疆地区的年平均气温总体上明显升高, 45 年的平均气温增加了约 1.5 °C, 增温速率达到了 $0.33\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$, 远高于全国平均的气温增长率 $0.22\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$, 其最大值出现在 2004 年, 达 9.4 °C, 而最小值出现在 1984 年, 只有 7.4 °C。增温主要从 20 世纪 80 年代中后期开始, 在此之前气温的变化幅度不大。从空间分布 (图 4c) 看, 年平均气温南北疆差异较大, 南疆明显高于北疆, 气温的最低值出

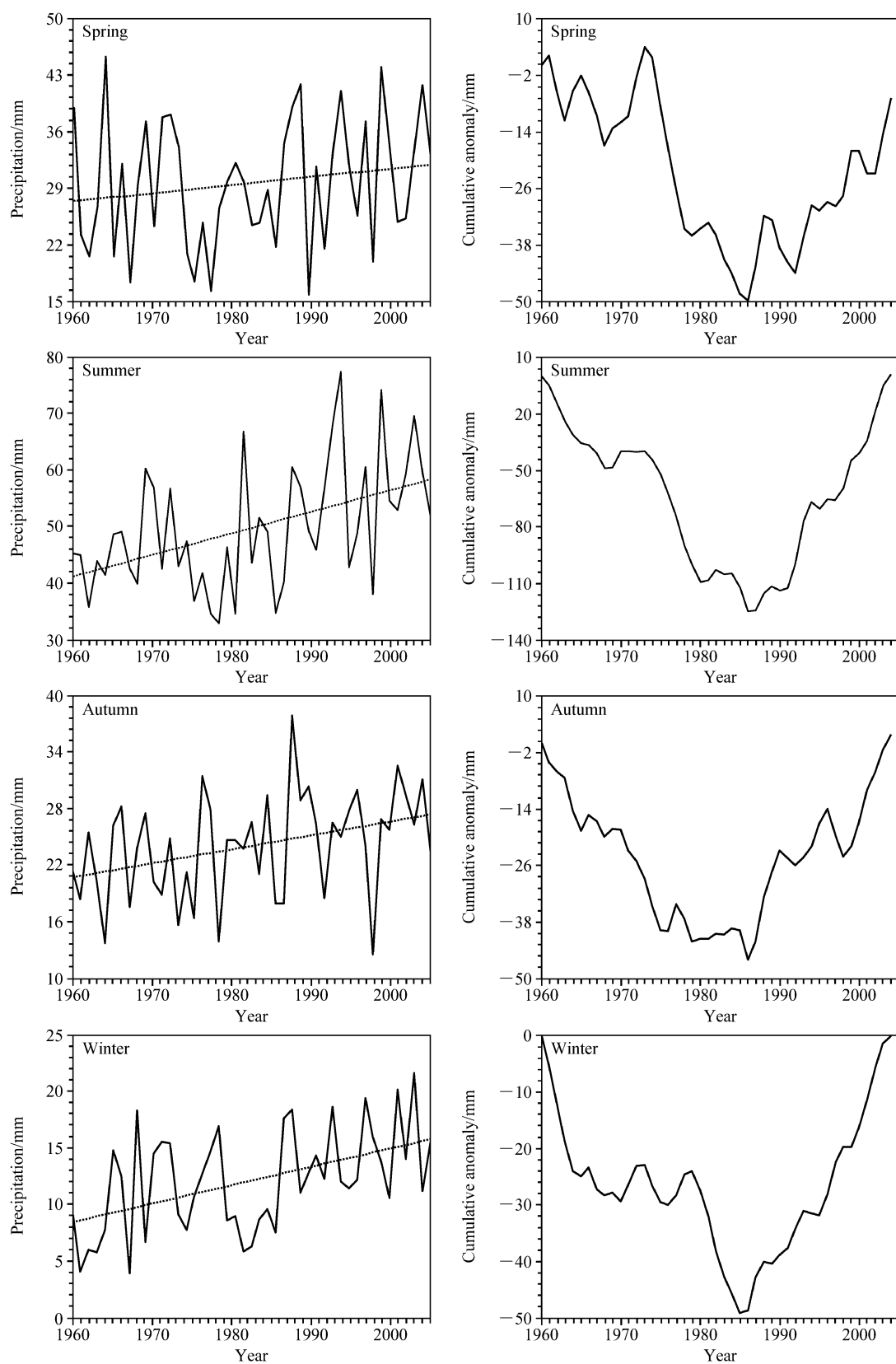


图 3 1960~2005 年四季降水 (左列) 和累积距平 (右列) 的变化

Fig. 3 Seasonal changes of precipitation (left panel) and cumulative anomalies (right panel) from 1960 to 2005

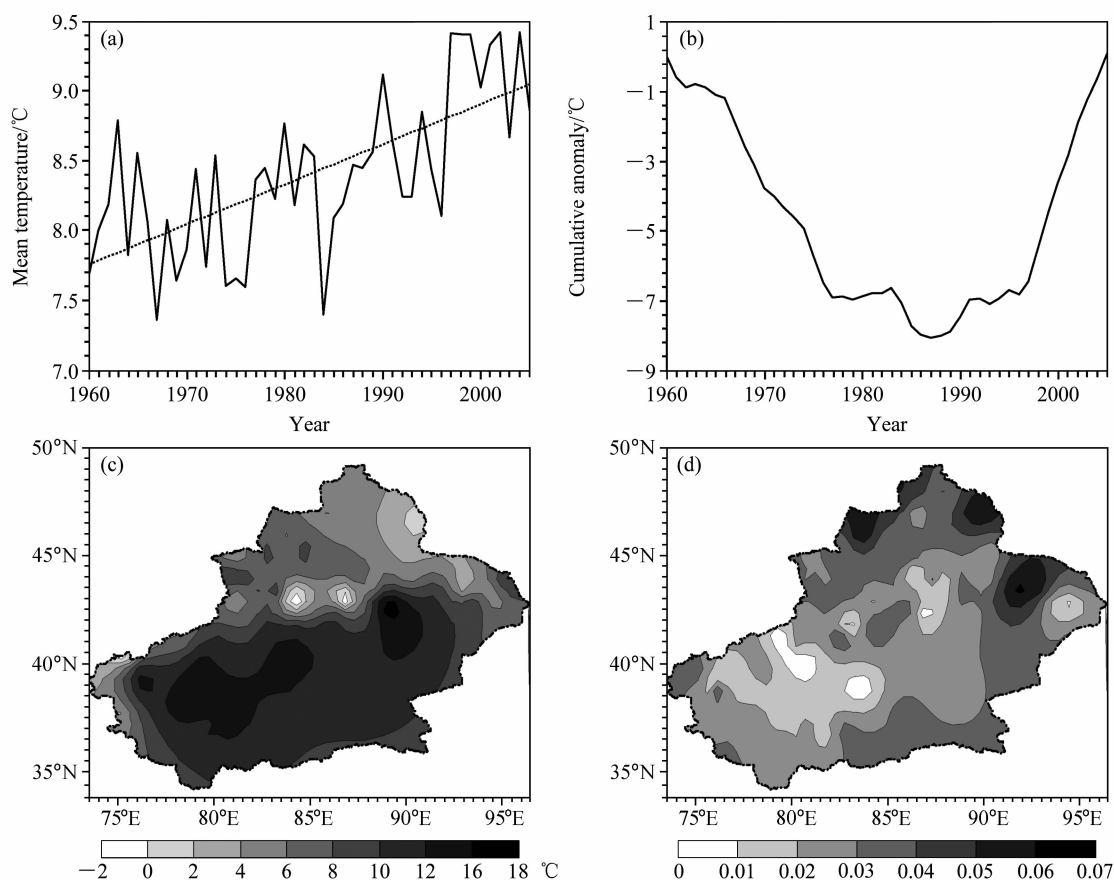


图 4 1960~2005 年平均气温的 (a) 时间序列、(b) 累积距平、(c) 空间分布和 (d) 倾向系数

Fig. 4 (a) Time series, (b) cumulative anomalies, (c) spatial distribution, and (d) tendency coefficient of annual mean temperature from 1960 to 2005

现在天山山区, 最高值位于吐鲁番地区。从等温线分布来看, 其空间分布与地形有很大关系, 具有沿盆地呈环状分布的特点。图 4d 表明, 全疆的气温都是增加的趋势, 但北疆的气温增加率高于南疆, 西疆的气温增加率低于东疆。

新疆春夏秋冬的平均气温依次为 10.7、22.3、8.2 和 -8.0°C , 并且各个季节的气温都是明显升高的。除春季为 95% 的信度检验水平外, 其他季节都达到了 99% 的信度检验水平。在近 46 年, 春夏秋冬气温分别增加了 0.74°C (6.9%)、 0.94°C (4.2%)、 1.97°C (16.6%) 和 2.07°C (25.8%), 气温冬季的增温率最大, 春季最小。各个季节气温的累积距平 (图 5) 表明, 春季和夏季气温发生转折性变化的时间分别是 1998 年和 1996 年, 秋季和冬季则分别在 1989 年和 1986 年, 冬季增暖率最大, 并且最早开始发生变化, 其原因可能与冬季取暖使用化石燃料从而释放热能

有关。

5 其他变量

5.1 比湿

考虑到相对湿度与气温和气压 (海拔) 有关, 本文采用比湿对新疆地区的大气水分状况进行分析。比湿采用气象行业最通用的方法来计算。具体公式如下

$$E_b = 6.11 \times 10^{\frac{7.5t}{237.3+t}},$$
$$E_s = r_h \times E_b / 100,$$
$$Q = \frac{0.622 \times E_s}{p - 0.378 \times E_s},$$

其中, Q 代表比湿 (单位: $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$), E_b 和 E_s 分别代表饱和水汽压 (单位: hPa) 和实际水汽压 (单位: hPa), t 代表气温 (单位: $^{\circ}\text{C}$), p 代表大气压强 (单位: hPa), r_h 代表相对湿度 (%)。

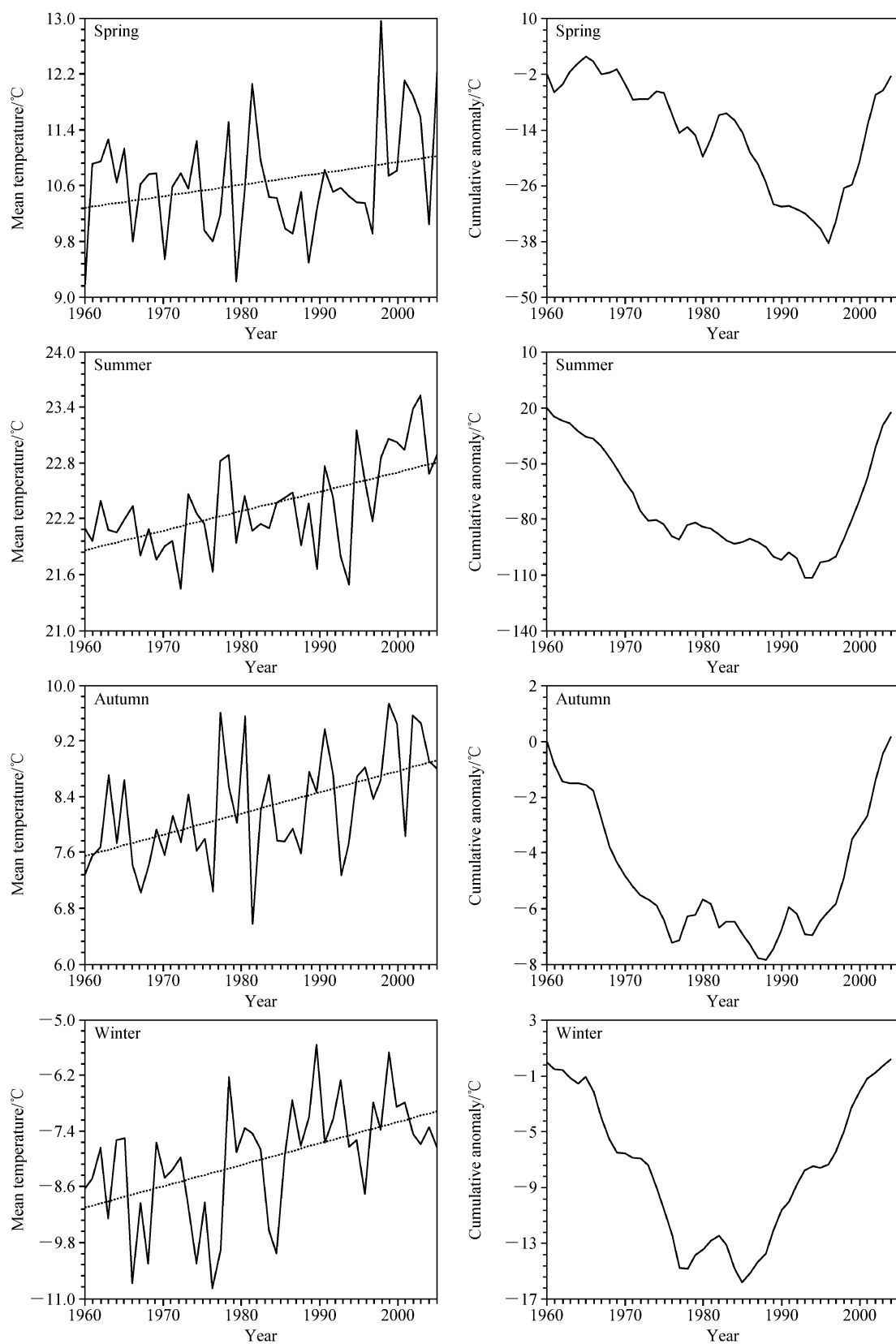


图5 同图3, 但为气温

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for mean temperature

图 6a 和 6b 表明, 总体上新疆地区的比湿明显升高, 达到了 99% 的信度检验水平, 其增长量占多年平均值的 12.5% (100 a), 比湿的最大值出现在 2002 年, 最小值在 1984 年, 极差 (最大值与最小值之差) 相当于多年平均值的 21%, 并且在 1987 年也发生了明显的转折性变化, 之后, 仅有 1996 和 1997 年的比湿低于多年平均值, 这与降水的变化极其相似 (相关系数 0.6590)。图 6c 表明比湿的空间分布为北疆低于南疆, 西疆高于东疆, 山区高于盆地的特点。新疆最为干燥的是哈密北部的淖毛湖地区, 其最小比湿低于 $0.003 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而比湿最大的地区位于南疆的喀什地区, 量值上超过 $0.005 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。从其倾向系数的空间分布图 (图 6d) 可见, 比湿在新疆的绝大部分地区都表现为增加的倾向。

5.2 低云量

图 7a 表明新疆地区低云量在总云量下降的前

提下明显上升, 46 年里增加了 0.5 成, 而且其变化趋势与降水和比湿的变化趋势相似, 同时它与降水和比湿也具有相同的变化转折点, 即在 1987 年三者都发生了从少到多的转折性变化。从空间分布来看, 低云量的最低值主要出现在南疆的塔里木盆地, 低于每年 0.5 成, 而最大值出现在北疆的玛纳斯河流域, 高于每年 2 成。其倾向系数的空间分布 (图 7d) 表明新疆大部分地区的低云量都是增大的, 低云量减小的区域主要分布在新疆东部与甘肃临界区域。

5.3 蒸发皿蒸发

图 8a 给出了新疆地区年总蒸发皿蒸发的变化, 其多年平均值为 2371 mm, 1998 年以前年蒸发皿蒸发下降明显, 而之后蒸发皿蒸发则略有上升, 总体上, 蒸发皿蒸发的下降速率为 $26.5 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 从图 8b 看出蒸发皿蒸发在 1987 年也发生了明显的转折。对于季节变化, 春季蒸发皿蒸发也是明

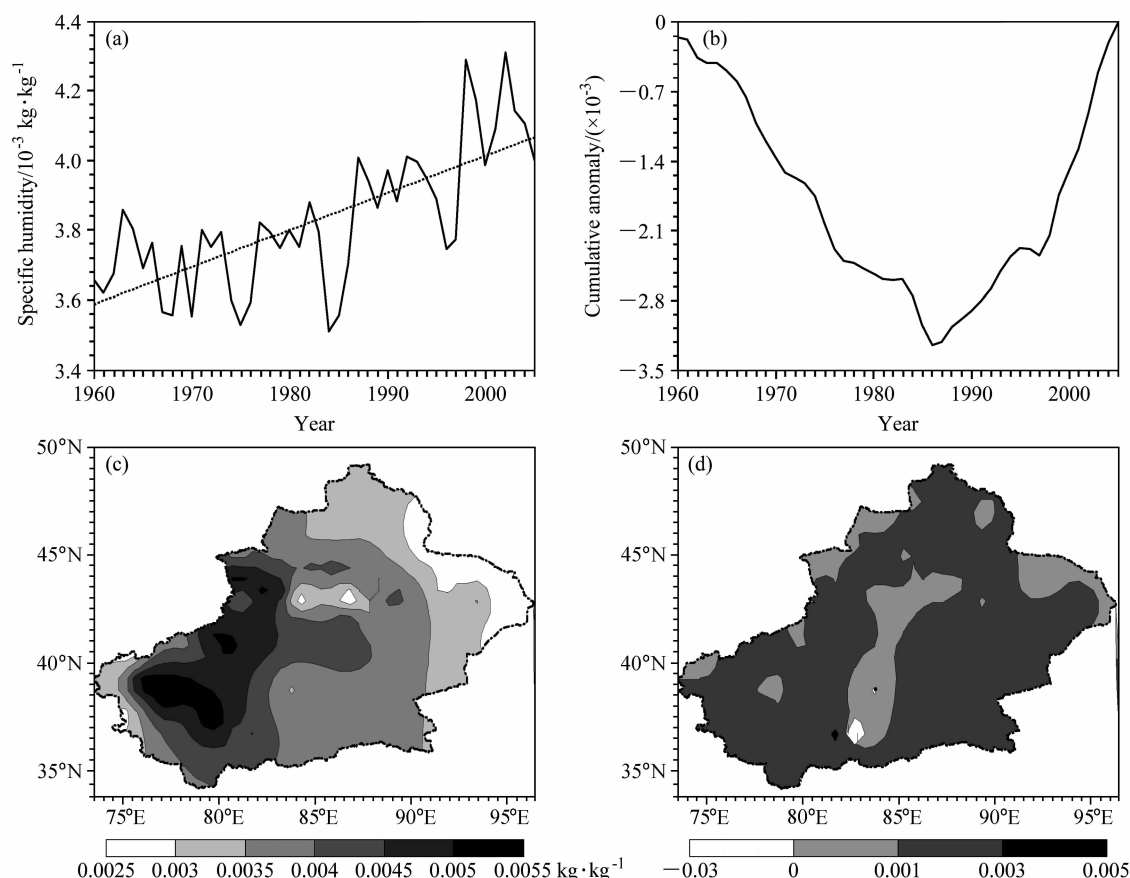


图 6 1960~2005 年比湿的 (a) 时间序列、(b) 累积距平、(c) 空间分布和 (d) 倾向系数

Fig. 6 (a) Time series, (b) cumulative anomalies, (c) spatial distribution and (d) tendency coefficient of annual specific humidity from 1960 to 2005

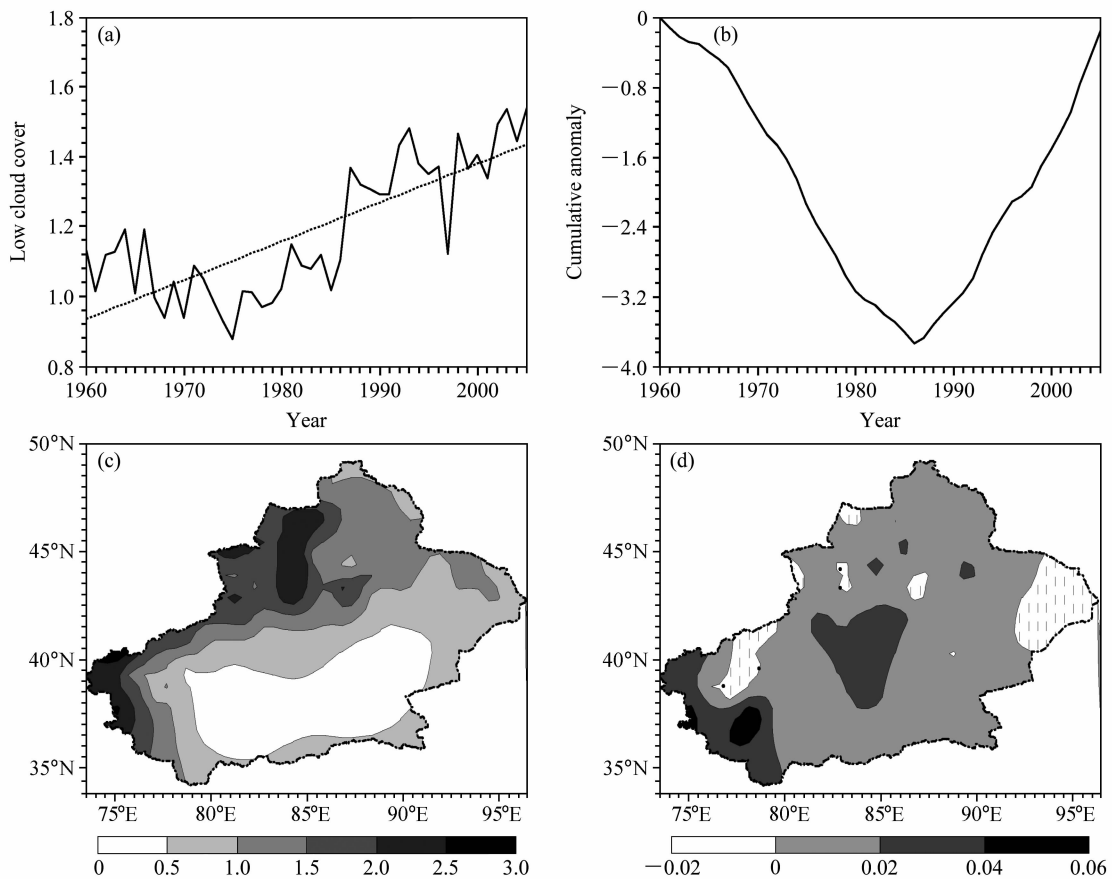


图7 1960~2005年低云量的 (a) 时间序列、(b) 累积距平、(c) 空间分布和 (d) 倾向系数

Fig. 7 (a) Time series, (b) cumulative anomalies, (c) spatial distribution and (d) tendency coefficient of annual low cloud cover from 1960 to 2005

显下降的, 达到了 $11 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 其平均值为 729 mm , 占全年总量的 30.75% , 1984 年蒸发开始发生了转折; 夏季蒸发皿蒸发的下降也很显著, 为 $11 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 其平均值达到了 1086 mm , 占全年总量的 45.8% , 蒸发转折发生在 1988 年; 秋季蒸发皿蒸发的平均值为 451.9 mm , 但其下降趋势并不明显, 为 $4 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 蒸发的转折点发生在 1981 年; 冬季蒸发皿蒸发的下降率达到了 $0.5 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 下降趋势并不明显, 其多年平均值为 104 mm , 冬季蒸发皿蒸发并没有发生明显的转折变化, 而是表现为波动性变化。

蒸发皿蒸发总体上表现为南疆高于北疆、东疆大于西疆、平原多于山区的总体特征。其最大值出现在东疆的七角井和淖毛湖, 达到了 $4000 \sim 4500 \text{ mm}$, 而最小值出现在湿润、风速较小的伊犁河谷附近。蒸发皿蒸发倾向系数的空间分布

(图 8d) 表明, 新疆绝大部分地区蒸发皿蒸发都是下降的趋势, 但也存在部分区域的蒸发皿蒸发有增加趋势, 其增加的最大值出现在以七角井和淖毛湖为中心的区域, 塔里木盆地西部偏南的大片地区蒸发皿蒸发也是明显增加的。

总云量、日照时数、气温日较差、风速等气候变量的变化特征将另文探讨。

6 气候要素变化的可能原因

新疆区域降水、比湿和低云量都是上升的区域, 在 80 年代中后期发生了明显的转折性变化, 通过降水与比湿和低云量的相关性分析 (相关系数分别为 0.7759 和 0.7655) 也表明三者具有相似的变化规律。由于新疆地区大气中水汽含量较少, 凝结层较高, 总云量中多属冰晶结构、厚度薄、透明度大的高云, 并不容易形成降水。而低云量

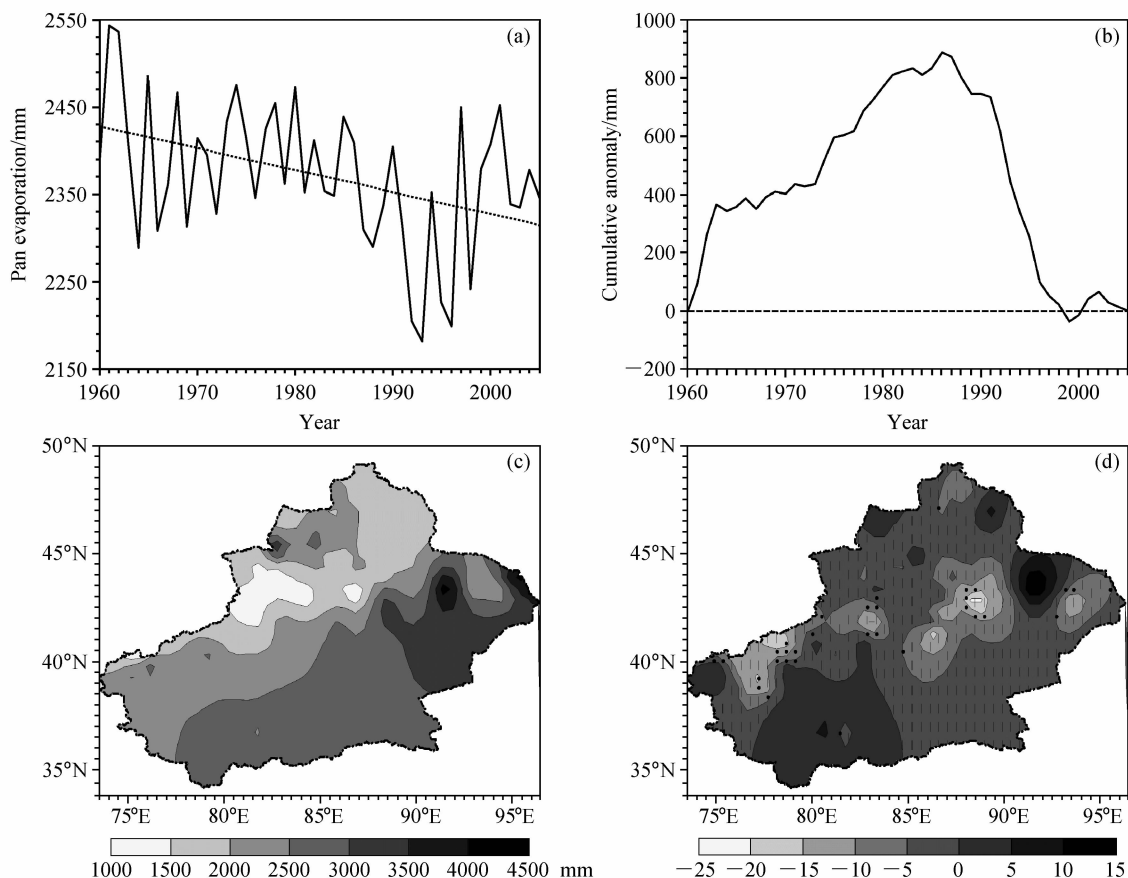


图 8 1960~2005 年蒸发皿蒸发 (a) 时间序列、(b) 累积距平、(c) 空间分布和 (d) 倾向系数

Fig. 8 (a) Time series, (b) cumulative anomalies, (c) spatial distribution and (d) tendency coefficient of annual pan evaporation from 1960 to 2005

的增多,在一定程度上导致了降水增多,因此可以初步认为新疆地区降水量增加主要是由于空气中水汽含量和低层云量的增多所引起。

中国区域的气温升高可能是由于温室气体,尤其是 CO_2 的增加造成,但新疆地区由于城市化和工业化水平有限, CO_2 的增多可能并不是导致气温升高的最主要原因。通过比湿、低云量、降水和气温的滞后相关分析表明,这些能够表明空气中水汽含量的变量与气温都有着很好的滞后相关,尤其是低云量与气温的滞后相关系数达到了 0.6110,因此空气中水汽含量的增加可能是导致新疆区域气温升高的一个重要因素,当然也不能排除气温正处于其自然振荡上升阶段的可能性。

蒸发皿蒸发在过去的几十年基本是下降的趋势 (Peterson et al., 1995; Chattopadhyay et al., 1997; Moonen et al., 2002; Liu et al., 2004; Roderick et al., 2004, 2005; 左洪超等, 2005;

刘波等, 2006), 但导致其下降的原因目前尚未确定。利用蒸发皿蒸发和其周围气象因子的相关分析,简单探讨了新疆地区导致蒸发皿蒸发下降的可能原因。表 1 给出了各个气象因子与蒸发皿蒸发的相关系数,结果表明:除气温和气压与蒸发皿蒸发的相关系数没有达到具有统计意义的信度检验水平外,其他气象因子都与蒸发皿蒸发具有很

表 1 蒸发皿蒸发和其他气候因子的相关性分析

Table 1 Correlation analysis between pan evaporation and other climatic factors

变量	蒸发皿蒸发	变量	蒸发皿蒸发
降水	-0.6924 *	相对湿度	-0.7123 *
风速	0.4616 *	总云量	-0.2890 **
气温	0.0331	低云量	-0.5960 *
日照时数	0.5328 *	气温日较差	0.6593 *
气压	0.2586		

注: * 和 ** 分别代表通过 99% 和 95% 的信度检验

好的相关性, 相关系数从大到小依次为比湿、降水、气温日较差、低云量、日照时数、风速和总云量, 其中比湿、降水、低云量和总云量为负相关关系, 而气温日较差、日照时数和风速则是正相关关系。这表明空气中水分对蒸发皿蒸发产生很大的影响, 在其他条件相同的情况下, 当空气中水分含量高时, 蒸发皿蒸发减小, 反之则增多; 蒸发皿蒸发随气温日较差、日照时数和风速的增大而增大。通过 7 个站点蒸发皿蒸发和太阳总辐射的单点分析, 表明其中有 4 个站点的相关系数通过了 99% 的信度检验, 分别为阿勒泰 (0.6491)、乌鲁木齐 (0.5328)、喀什 (0.4684) 和哈密 (0.5060), 其他站 (如伊宁、若羌、和田) 相关性不好, 和田站在太阳总辐射下降的情况下蒸发皿蒸发反而上升。由于太阳总辐射的站点较少, 还无法确认太阳总辐射减少对蒸发皿蒸发下降的影响。总之在干旱的新疆地区, 水分变量对蒸发皿蒸发的影响要大于与热量有关的变量的影响。

7 结果和讨论

首次使用新疆地区最完善的 94 个气象站观测资料对新疆地区近 46 年来的降水、气温、比湿、低云量蒸发皿蒸发变化等进行分析, 详细的结论如下:

(1) 近 46 年来新疆地区的降水明显增多, 并且在 20 世纪 80 年代中后期发生了明显的转折, 转折后有 9 年的降水量大于转折前的最大降水量。降水的空间分布主要表现为如下规律: 北部多于南部, 西部多于东部, 从西北向东部逐渐减小; 山区多于平原, 迎风坡多于背风坡; 大的降水中心位于中、高山带; 盆、谷底为少雨中心。对新疆地区的降水量倾向系数的分析结果表明, 除吐鲁番地区外其他地区降水量都是增加。季节分析表明 1986 年冬季降水最早出现转折性变化。

(2) 新疆地区的年平均气温总体上明显升高, 增温速率远高于全国平均气温增长率, 增温主要是从 80 年代中后期开始的。四季的平均气温也都是明显升高的, 冬季的增温幅度大于其他季节。南疆的年平均气温要明显高于北疆, 最低值出现在天山山区, 最高值位于吐鲁番地区。全疆的气

温都是增加的趋势, 北疆的增加率高于南疆, 西疆的增加率低于东疆。气温与比湿的滞后相关表明, 空气中的水汽含量增加可能是导致气温发生变化的重要原因。

(3) 总体上来讲新疆地区的比湿明显升高, 并且在时间上与降水的变化形态有着高度的一致性, 在空间上相对湿度与降水的空间变化形态更为相似。

(4) 低云量与降水变化有很好的相关性, 并且都在 1987 年发生了上升的转折性变化, 可能是导致降水发生增加变化的重要原因。低云量仅在东疆的部分地区和南疆的阿克苏一带减小, 低云量的增加在绝大部分区域都是增加的。

(5) 蒸发皿蒸发明显下降, 且主要发生在春夏季, 占年总蒸发皿蒸发减少量的 83%, 空间上表现为从东南到西北减小的总体趋势。除塔里木盆地西南部 and 东疆小部分地区蒸发皿蒸发上升外, 其他地区都是下降趋势。与其他气象因子的相关分析表明比湿、降水等与水分有关的变量可能是影响蒸发皿蒸发的主要因素。气温日较差和日照时数等变量对蒸发皿蒸发变化的影响也较大。太阳辐射与蒸发皿蒸发的单点分析表明, 两者在大部分站点具有显著的负相关关系, 但对两者区域平均的变化关系由于缺少足够多的数据还很难确定。

参考文献 (References)

- Liu Binhui, Xu Ming, Henderson M, et al. 2004. A spatial analysis of pan evaporation trends in China, 1955–2004 [J]. *J. Geophys. Res.*, 94: 1–9.
- Chattopadhyay N, Hulme M. 1997. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 87: 55–72.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-syr.htm>.
- Moonen A C, Ercole L, Mariotti M, et al. 2002. Climate change in Italy indicated by agro-meteorological indices over 122 years [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 111: 13–27.
- Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. 1995. Evaporation losing its strength [J]. *Nature*, 377: 687–688.
- Roderick M L, Farquhar G D. 2004. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002 [J]. *International Journal of Climatology*, 24: 1077–940.

- Roderick M L, Farquhar G D. 2005. Changes in New Zealand pan evaporation since the 1970s [J]. *International Journal of Climatology*, 25: 2031–2039.
- 丁一汇, 戴晓苏. 1994. 中国近百年来的温度变化 [J]. *气象*, 20 (12): 19–26. Ding Yihui, Dai Xiaosu. 1994. Temperature change during the recent 100 years over China [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 20 (12): 19–26.
- 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.
- 何清, 杨青, 李红军. 2003. 新疆 40 年来气温降水和沙尘天气变化 [J]. *冰川冻土*, 25 (4): 423–427. He Qing, Yang Qing, Li Hongjun. 2003. Variations of air temperature, precipitation and sand-dust weather in Xinjiang in past 40 years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 25 (4): 423–427.
- 胡安焱, 董新光. 2006a. 南疆水面蒸发量研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 20 (4): 22–24. Hu Anyan, Dong Xinguang. 2006a. A study on water surface evaporation in southern Xinjiang [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (in Chinese), 20 (4): 22–24.
- 胡安焱, 郭西万. 2006b. 新疆平原地区水面蒸发量预测模型研究 [J]. *水文*, 26 (1): 24–27. Hu Anyan, Guo Xiwan. 2006b. A model of water surface evaporation forecasting for Xinjiang plain area [J]. *Journal of China Hydrology* (in Chinese), 26 (1): 24–27.
- 李江风. 1991. 新疆气候 [M]. 北京: 气象出版社, 302. Li Jiangfeng. 1991. *Climate of Xinjiang* [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 302.
- 李庆祥, 李伟, 鞠晓慧. 2006. 1998 年以来中国气温持续极端偏暖的事实 [J]. *科技导报*, 24 (4): 37–40. Li Qingxiang, Li Wei, Ju Xiaohui. 2006. Analysis on the persistent extreme warm period over China since 1998 [J]. *Science and Technology Review* (in Chinese), 24 (4): 37–40.
- 李伟, 李庆祥, 江志红. 2007. 用 Kriging 方法对中国历史气温数据插值可行性讨论 [J]. *南京气象学院学报*, 30 (2): 246–252. Li Wei, Li Qingxiang, Jiang Zhihong. 2007. Discussion on feasibility of gridding the historic temperature data in China with Kriging method [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 30 (2): 246–252.
- 刘波, 马柱国, 丁裕国. 2006. 中国北方近 45 年蒸发变化的特征及其与环境的关系 [J]. *高原气象*, 25 (5): 840–848. Liu Bo, Ma Zhuguo, Ding Yuguo. 2006. Characteristics of the changes in pan evaporation over northern China during the past 45 years and the relations to environment factors [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 25 (5): 840–848.
- 马金陵, 周宏飞. 2005. 塔里木盆地西北部不同类型蒸发器水面蒸发变化趋势分析 [J]. *干旱区地理*, 28 (3): 300–304. Ma Jinling, Zhou Hongfei. 2005. Analysis on the variation trends of evaporation from water surface different evaporators in the northwest Tarim basin, Xinjiang [J]. *Arid Land Geography* (in Chinese), 28 (3): 300–304.
- 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 2005. 中国气温变化研究最新进展 [J]. *气候与环境研究*, 10 (4): 701–716. Ren Guoyu, Chu Zhiying, Zhou Yaqing, et al. 2005. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 10 (4): 701–716.
- 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.
- 苏宏超, 魏文寿, 韩萍. 2003. 新疆近 50 年来的气温和蒸发变化 [J]. *冰川冻土*, 25 (2): 174–178. Su Hongchao, Wei Wenshou, Han Ping. 2003. Changes in air temperature and evaporation in Xinjiang during recent 50 years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 25 (2): 174–178.
- 唐国利, 任国玉. 2005. 近百年中国地表气温变化趋势的再分析 [J]. *气候与环境研究*, 10 (4): 791–798. Tang Guoli, Ren Guoyu. 2005. Reanalysis of surface air temperature change of the last 100 years over China [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 10 (4): 791–798.
- 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢, 等. 1998. 近百年中国年气温序列的建立 [J]. *应用气象学报*, 9 (4): 392–401. Wang Shaowu, Ye Jinlin, Gong Daoyi, et al. 1998. Construction of annual mean temperature series of the last 100 years over China [J]. *Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 9 (4): 392–401.
- 王绍武. 1999. 近百年中国及全球气温变化趋势 [J]. *气象*, 16 (2): 11–15. Wang Shaowu. 1999. China and global temperature change trends in recent 100 years [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 16 (2): 11–15.
- 王政权. 1999. 地统计学及在生态学中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 102–103. Wang Zhengquan. 1999. *Geostatistics and Utilization in the Ecology* [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 102–103.
- 韦志刚, 董文杰, 惠小英. 2000. 中国西北地区降水的演变趋势和年际变化 [J]. *气象学报*, 58 (2): 234–243. Wei Zhigang, Dong Wenjie, Hui Xiaoying. 2000. Evolution of trend and interannual oscillatory variabilities of precipitation over northwest China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 58 (2): 234–243.
- 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.
- 于海鸣, 刘建基. 2007. 新疆 40 年来年平均气温变化趋势及径流响应分析 [J]. *水利发电*, 33 (5): 13–15. Yu Haiming, Liu Jianji. 2007. Trend analysis of average temperature variations

- and runoff response in last 40 years in Xinjiang [J]. Water Power (in Chinese), 33 (5): 13-15.
- 于淑秋, 林学椿, 徐祥德. 2003. 我国西北地区近 50 年降水和温度的变化 [J]. 气候与环境研究, 8 (1): 9-18. Yu Shuqiu, Lin Xuecun, Xu Xiangde. 2003. The climatic change in north-west China in recent 50 years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (1): 9-18.
- 左洪超, 李栋梁, 胡隐樵, 等. 2005. 近 40 年中国气候变化趋势及其同蒸发皿观测的蒸发量变化的关系 [J]. 科学通报, 50 (11): 1125-1130. Zuo Hongchao, Li Dongliang, Hu Yinqiao, et al. 2005. Climate change of china in the past 40 years and their relationship with pan evaporation [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 50 (11): 1125-1130.