

气候变暖背景下祁连山区秋季层状云变化特征

石光普^{1,2}, 石圆圆², 郭玉珍², 陈少勇², 林 纾¹, 郭俊庭²

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 兰州 730020; 2. 甘肃省白银市气象局, 甘肃白银 730900)

摘 要:利用祁连山区及周边29个气象观测站近41年秋季云形状和气温观测资料,分析了祁连山区秋季层状云出现频率的空间分布与时间变化特征,探讨了秋季层状云出现频率与气候变暖的关系,并选用同期NCEP/NCAR全球再分析资料,对祁连山区秋季层状云的环流特征和水汽输送进行了分析。结果表明:①祁连山区秋季层状云出现频率为8%~26%,呈西少东多的空间分布。②近41年来,祁连山区秋季增温1.2℃,气温变化的倾向率为0.29℃/10a,80年代中期以后发生了增温的突变。③祁连山区秋季层状云的出现频率呈明显的减少趋势,近41年来减少约11%,倾向率为-2.7%/10a,尤其在20世纪80年代中期以后与同期祁连山区显著增温相对应,层状云出现频率减少更为明显,层状云出现频率与气温呈明显的反相变化趋势。④在气候变暖的背景下,祁连山区的层状云出现频率减少,减少的幅度从西北向东南递增。当祁连山区秋季平均气温在升高1℃时,祁连山区层状云出现频率减少2%~10%,祁连山西段、中段减少2%~4%,祁连山东段减少4%~10%。⑤祁连山区秋季层状云偏多与偏少年在欧亚500 hPa环流场上存在明显的差异,层状云偏多年,极涡向亚洲北部伸展,东亚大槽较弱,乌拉尔山高压脊偏强,脊前偏北气流引导极地冷空气沿偏西北路径向中国西北地区输送,中亚地区到高原上不断有低值系统发展东移,同时南支槽加强,来自阿拉伯海、南海、东海的暖湿气流向内陆地区的输送明显加强,与进入高原北部的冷空气交绥,从而使祁连山区层状云出现频次增多;层状云偏少年,中亚-中国西北地区暖性高压异常加强,东亚大槽偏强,冷空气活动路径偏东,亚洲大陆至西太平洋冬季风特征明显,偏北风加强,不利于东南暖湿气流向西北内陆地区的输送,冷暖气流在祁连山区交绥次数减少,从而使祁连山区层状云出现频次减少。⑥印度洋沿孟加拉湾的向北的水汽输送,副热带西太平洋的偏东气流在南海和中南半岛附近转为向北的水汽输送,地中海、里海的西风带纬向水汽输送是3支影响祁连山区秋季层状云多寡的水汽输送通道,进而对祁连山区秋季降水产生影响。

关 键 词: 气候变暖;层状云;500 hPa环流;水汽通量输送;祁连山

1 引言

云是重要的气象要素之一,直接调节地气系统的辐射能量平衡和水汽循环平衡,云的生成及演变与大气各种动力、热力作用及地形抬升等密切相关。云是产生降水的基础,而大气降水是一切可利用水资源的根本来源。

祁连山脉位于青藏高原东北部边缘,地处青藏、蒙新、黄土三大高原交汇地带,山系长1000 km以上,平均海拔达4000~4500 m,海拔4000 m以上的高山终年积雪,广泛分布现代冰川,祁连山冰雪、降水和地下水所形成的径流是石羊河、黑河、疏勒河、大通河及青海湖最主要的补给水源地,被称为河西绿洲的“冰源水库”,对其周围地区具有强大的良好生态辐射功能。山区的降水不仅影响着冰川发育和对河流的补给,而且也是河流水资源主要来

源。20世纪80年代中期以来,由于气候变暖和人类活动加剧等影响,祁连山的雪线上升、冰川退缩明显。河西内陆河流域的流量和水资源已经得到专家学者的广泛重视,对在西北干旱区水资源开发利用、生态环境等方面也取得一些有指导意义的研究^[1-4]。为了缓解河西走廊经济社会发展对水资源日益增长的需求、保护生态环境、控制土地沙漠化,中国气象局和甘肃省政府在祁连山区组织开展人工增雨雪作业、开发利用空中云水资源,以提高大气降水效率,增加地表水,补给地下水及冰川和积雪,对当地经济社会的可持续发展具有重要意义。

对祁连山区空中云水资源的开发利用,已有一些专家学者做了积极的研究和探索。张强等^[5-6]研究了祁连山与河西内陆河流域绿洲的大气水循环特征,指出祁连山为西风带、青藏高原季风、东南季风(南亚季风和东亚季风)3个大气环流系统的耦合

收稿日期:2012-01; 修订日期:2012-03.

基金项目:国家自然科学基金项目(40675066)。

作者简介:石光普(1978-),男,甘肃人,工程师,主要从事短期天气预报和气候变化研究。E-mail: sgp121@126.com

区,其内陆河流域的大气水循环特征受大气环流影响显著,山区大气水汽含量、地面降水和降水转化率均在东亚季风影响区最大;张国庆等^[7]分析了祁连山南麓河谷地形云生长的层结特征,发现祁连山区地形对层结的影响非常明显,在西南气流背景下不稳定层结对地形云的生长极为有利;封彩云等^[8]、靳立亚等^[9]研究了中国北方水汽、云量的空间分布、时间变化特征及其与降水的关系;林纾等^[10]分析了夏秋季大气环流异常对西北地区降水的影响;陈少勇等^[11-12]、石光普等^[13]研究了祁连山区云量季节分布与异常变化特征,指出祁连山云量主要受副热带高压、中纬度经(纬)向环流、高原季风和太阳活动的综合影响;王宝鉴等^[14]分析指出,祁连山区常年维持水汽的辐合,空中水资源具有较好的开发潜力。以上大都是以云量或水汽的演变为研究对象,目前对于该区云状的气候变化特征研究较少。有研究表明,高原上降水云系主要是积雨云(Cb)、层状云(AS、Ns)或以Cb+As(Ns)为主的混合云^[15-17],祁连山区秋季层状云出现频次与山区降水量关系最为密切,秋季各月层状云出现频次与山区降水量的相关系数在0.69~0.79之间,相关关系极为显著,层状云发生次数越多则降水越多^[19]。因而,本文拟着重研究气候变暖背景下祁连山区秋季层状云的变化规律及其异常变化的环流背景及其水汽输送特征,为该地区合理开发利用空中云水资源、气象灾害防御等提供科学依据。

2 资料与方法

层状云包括卷层云、高层云、雨层云和层云。降水主要来自高层云和雨层云,故本文研究的层状云仅指高层云和雨层云。

本文中气温、云状观测资料来源于中国气象局气象信息中心整编的地面测逐日云状资料(单位:次数),经过了严格的质量控制,具有很好的代表性、准确性和比较性。选取其中覆盖祁连山区及周围地区分布在河西走廊和柴达木盆地的29个气象站(图1)1961-2001年逐日定时(02、08、14、20时)云状观测资料,统计各站秋季(9-11月)层状云出现频率。

由于各台站观测次数不一,有的台站一日观测3次,有的则为4次,而且同一个台站也有3次站和4次站的变动,因此有必要作均一化处理。

月云状出现频率= $\frac{\text{月出现次数}}{\text{月观测次数}} \times 100\%$ (1)

秋季云状出现频率序列,为9-11月云状出现频率的平均序列。选取祁连山区10个气象站(表1)1961-2001年逐年秋季平均气温,计算各站秋季平均气温之间的相关系数,结果表明:相关系数达0.40~0.93之间,超过了0.01的置信水平,说明所选10个代表站的秋季气温有较高的一致性,因此用这10个代表站利用空间平均方法,建立祁连山秋季平均气温序列。采用线性趋势分析、相关分析、多项式拟合和突变检测等方法^[20],综合分析祁连山区秋季层状云出现频率的空间分布、时间变化特征及对气候变暖的响应。并选用1961-2001年NCEP/NCAR全球再分析资料(水平分辨率为2.5°×2.5°),对祁连山区秋季层状云出现频率的异常变化的大气环流特征进行分析,以揭示该区秋季层状云形成、发展的环流背景条件和水汽输送特征。本文中相关系数检验临界值 $r_{0.10}=0.25$ 、 $r_{0.05}=0.30$ 、 $r_{0.01}=0.40$ 。

表1 祁连山区气象站基本情况
Tab.1 The basic circumstances of weather stations in the Qilian Mt.region

站名	纬度/°N	经度/°E	海拔/m
托勒	38.80	98.42	3368.3
野牛沟	38.42	99.58	3320.0
祁连	38.18	100.25	2788.5
德令哈	37.37	97.37	2982.4
刚察	37.33	100.13	3302.4
门源	37.38	101.62	2851.0
乌鞘岭	37.20	102.87	3043.9
恰卜恰	36.27	100.62	2836.0
西宁	36.72	101.75	2295.2
民和	36.32	102.85	1814.8

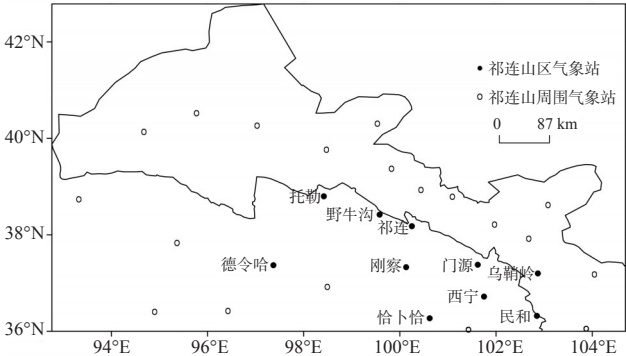


图1 祁连山区及其周围地区所选取气象观测台站分布
Fig.1 The distribution of meteorological observation stations selected in the Qilian Mountains and its surrounding areas

3 结果分析

3.1 秋季层状云出现频率的分布特征

雨层云多由高层云演变而成,高层云多出现在锋面云系中,由湿空气作大范围缓慢斜升运动而膨胀冷却所造成,水平范围很大,可达几百公里到几千公里。图2给出了祁连山及其周围29个测站近41年来秋季层状云出现频率空间分布图。由此可见,祁连山区秋季层状云出现频率为8%~26%,层状云呈西少东多分布,出现频率自西北向东南逐渐递增,最大值在民和到西宁一带,为22%~26%。祁连山区层状云出现频率的空间分布与该区大气水汽含量分布相一致,张强等^[6]分析指出祁连山及其周边地区大汽水汽含量空间变化呈现出由西北向东南逐渐增加的梯度趋势,在迎风坡上大气水汽含量与海拔高具有很好的相关性(表2)。

3.2 秋季增温的特征分析

计算祁连山各年代的秋季平均气温距平(表2),20世纪60-70年代祁连山区秋季气温为偏低时期,气温变化不大,总体偏低0.1~0.4℃;80年代气温正常,自90年代以来气温为偏高,正距平0.5℃。

从1961年以来祁连山区逐年秋季平均气温距平曲线可以看出(图3a),祁连山区气温为明显的上升趋势,41年来增温1.2℃,气温变化的倾向率为0.29℃/10a,超过0.01的显著水平。20世纪60年代到80年中期祁连山秋季气温略偏低,变化幅度不大,80年中期以后祁连山区秋季持续增温,自1997年以来以一致为正距平,增温明显,与贾文雄等^[21-22]、张存杰等^[23]分析结

果相一致。

图3b表示的是祁连山区秋季平均气温序列Mann-Kendall突变检测统计量曲线。自20世纪80年代中期以后,祁连山区秋季开始持续增温,并且在1987年发生了增温的突变,之后大大超过了0.05临界线,说明1987年的突变点是可信的。

3.3 秋季层状云出现频率的变化特征

计算祁连山秋季层状云出现频率的各年代距平(表2),20世纪60-70年代祁连山区秋季层状云出现频率为偏高时期,偏多3%左右,对应于祁连山秋季气温的偏低时期;80年代,层状云出现频正常,对

表2 祁连山秋气温、层状云出现频率年代距平

Tab.2 Interdecadal change of the anomalies of autumn temperature and stratiform cloud frequency in the Qilian Mts. region

气象要素	60年代	70年代	80年代	1991-2001年
气温/℃	-0.4	-0.1	0.0	0.5
层状云/%	3.3	2.1	0.0	-4.6

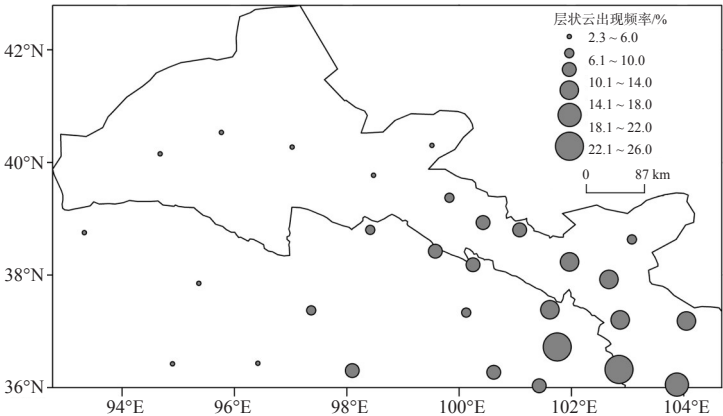


图2 1961-2001年祁连山秋季层状云出现频率空间分布

Fig.2 The spatial distribution of the mean frequency of stratiform cloud over the Qilian Mts. region during 1961-2001

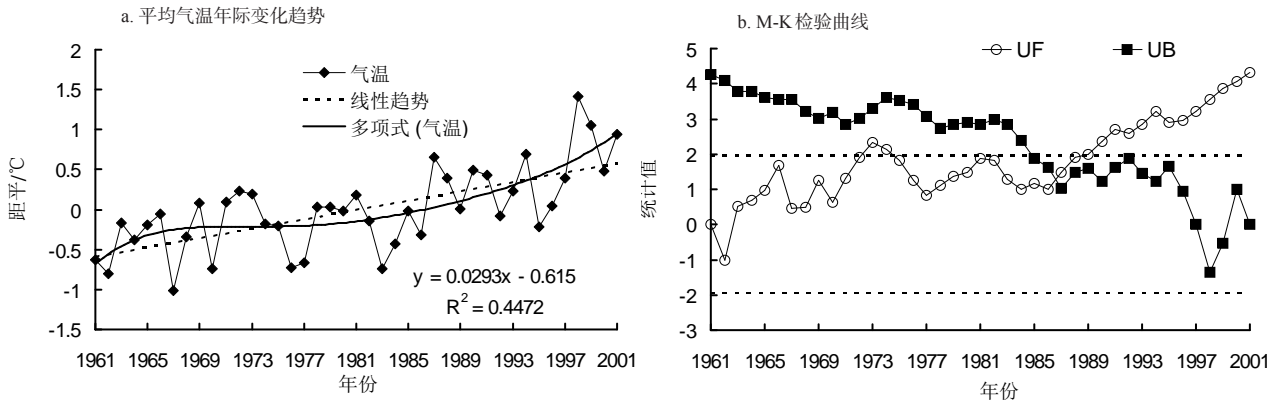


图3 祁连山区秋季平均气温年际变化趋势(a)及其M-K检验曲线(b)

Fig.3 Interannual variation of summer mean temperature (a) and its Mann-Kendall check curve (b) in the Qilian Mts. region

应于同期气温正常;自 90 年代以来,与同期显著增温相对应,祁连山秋季层状云出现频率偏低,偏少 4.6%。从年代距平可以看出,秋季层状云出现频率和气温为反相变化关系。

图 4a 为近 41 年来祁连山区秋季层状云出现频率距平变化曲线,可以看出祁连山区层状云的出现频率呈明显的减少趋势,倾向率为-2.7%/10a,为超过 0.01 的显著水平。近 41 年来减少约 11%,尤其在 20 世纪 80 年代中期以后随着祁连山持续增温,层状云出现频率减少明显,从 5 阶多项式拟合曲线可以看出,层状云出现频率与气温呈明显的反相变化趋势。

图 4b 为祁连山区秋季层状云出现频率序列的 Mann-Kendall 突变检测统计量曲线,由图可见,自 20 世纪 80 年代中期以后,秋季层状云为持续减少趋势,与气温发生突变性增温的时间基本相对应,层状云出现频率在 1985 年发生了减少的突变,之后大大超过了 0.05 临界线,说明 1985 年的突变点是可信的。

3.4 层状云出现频率对气候变暖的响应

为定量的分析祁连山区秋季层状云出现频率对气候变暖的可能响应,利用祁连山区及其周围地区近 41 年来 29 个台站的年秋季层状云出现频率对应空间平均的祁连山区秋季平均气温序列,进行线性回归分析和相关分析。结果表明(图 5),祁连山区秋季平均气温在升高 1℃ 的情况下,除祁连山西侧的冷湖为微弱的增加外,祁连山及其周围地区层状云出现频率一致为减少,大部地方减少 2%~8%,位于祁连山东侧的兰州减少最多,减少 11%。可以看出,减少的幅度从西北向东南逐递增,祁连山西段、中段减少 2%~4%,祁连山东段减少 4%~10%。计算二者相关系数,并采用 *t* 检验进行了统计检验。结果表明,祁连山西侧的冷湖为正相关,但没有通过 0.10 显著性检验,全区其余各站一致为负相关,祁连山区代表站中只有西宁没有通过 0.10 显著性水平检验,祁连、刚察通过了 0.10 显著性水平检验,山区其余代表站均通过了 0.05 以上的显著性水平检验,

回归效果显著。在气候变暖情况下,祁连山的层状云出现频率减少,减少的幅度从西北向东南递增。

3.5 秋季层状云的环流特征

为了进一步讨论祁连山区秋季层状云出现频率偏多和偏少的环流背景,选取近 41 年中,层状云出现频率正距平最多的 5 年代表偏多年(1971、1966、1961、1977、1975 年),负距平最多的 5 年代表

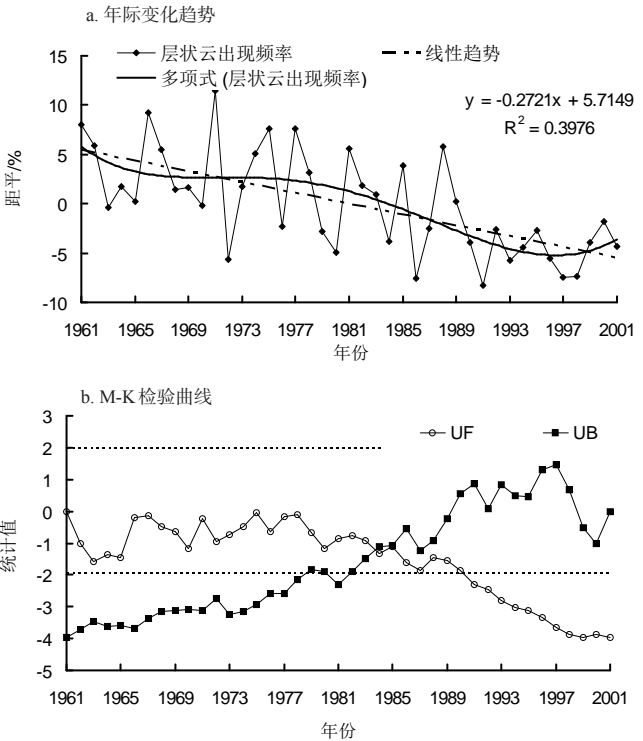


图 4 祁连山区秋季层状云年际变化趋势(a)及其 M-K 检验曲线(b)
Fig.4 Interannual variation of stratiform cloud (a) and its Mann-Kendall check curve chart (b) in the Qilian Mts. region

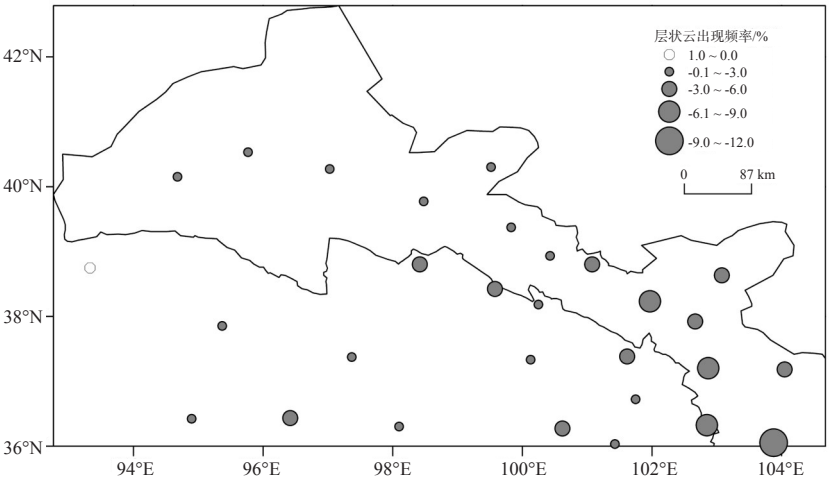


图 5 祁连山区年平均气温升高 1℃ 的情况下层状云出现频率的变化
Fig.5 Variation of the occurrence frequency of stratiform cloud with the autumn mean air temperature increase 1℃ in the Qilian Mts. region

偏少年(1991、1986、1997、1998、1993 年)。选取同期 NCEP/NCAR 全球再分析资料, 分别对祁连山区秋季层状云偏多年和偏少年 500 hPa 环流特征进行分析。可以看出, 层状云出现频率的最多的 5 年和最少的 5 年, 分别集中在前和后段, 与前面的突变分析相吻合, 所以采用典型偏多年和偏少年做合成分析也能较好地反应出前后时段的年代际差异。

3.5.1 秋季层状云偏多年环流特征

秋季层状云偏多年的 500 hPa 高度距平场上(图 6a), 欧亚范围 60°N 以北为负距平, 极涡沿新地岛偏向于西西伯利亚向亚洲北部伸展。中高纬度有两个正距平中心, 分别位于东欧平原至乌拉尔山脉和日本海, 在中纬度距平为“- +”的波列分布, 表现为“西低东高”的环流特征, 中亚地区到中国西北以及高原上为大片的负值区, 负值中心为-12 gpm, 贝湖以东到鄂霍次克至中国东部沿海为大片的正距平, 中心在日本海, 为 20 gpm。阿拉伯海、印度半岛、中南半岛均为负距平, 有利于南支槽发展。积雨云偏多年的 500 hPa 风矢量距平场上(图 6b), 阿拉伯海为气旋式距平, 有利于阿拉伯海的暖湿气流沿高原西部向中国西北内陆输送, 在中南半岛为气旋式距平, 亚洲大陆东海岸为东南风距平, 使得来自孟加拉湾和南海的暖湿气流在中南半岛交汇, 较常年异常加强北上, 并与来自东海暖湿气流汇合, 向高原东北部输送, 形成气流辐合。

层状云偏多年 500 hPa 环流场的异常分布表明, 极涡沿新地岛偏向于西西伯利亚向亚洲北部伸展, 东亚大槽较常年偏弱, 乌拉尔山高压脊偏强, 脊前偏北气流引导极地冷空气沿偏西北路径向中国

西北地区输送, 中亚地区到高原上不断有低值系统发展东移, 同时南支槽加强, 来自阿拉伯海、南海、东海的暖湿气流向内陆地区的输送明显加强, 与进入高原北部的冷空气交绥, 从而使祁连山区层状云出现频次增多。

3.5.2 秋季层状云偏少年环流特征

秋季层状云偏少年的 500 hPa 高度距平场(图 7a)与偏多年相反, 在中高纬表现为“西高东低”的环流特征, 中亚地区到中国西北以及高原上为强大的正值区, 中心值为+24 gpm, 位于巴湖一带, 而在中国东海-朝鲜半岛-日本海一带为负值区, 负值中心位于朝鲜半岛, 在阿拉伯海、孟加拉湾均为正距平。秋季层状云偏少年的 500 hPa 风矢量距平场上(图 7b), 中亚地区到中国西北地区反气旋距平、孟湾到中南半岛反气旋加强, 中国东部沿海至日本海气旋加强, 中国西北至东部沿海表现为北风距平, 冬季风特征明显。

层状云偏少年 500 hPa 环流场的异常分布表明, 中亚-中国西北地区暖性高压异常加强, 东亚大槽较常年偏强, 冷空气活动路径偏东, 亚洲大陆至西太平洋冬季风特征明显, 偏北风加强, 不利于东南暖湿气流向西北内陆地区的输送, 冷暖气流在祁连山区交绥次数减少, 从而使祁连山区层状云出现频次减少。

3.6 秋季层状云水汽输送特征

为了解祁连山区秋季水汽输送特征, 本文计算了得出近 41 年秋季平均水汽通量分布(图 7a), 计算方法同文献[24], 由于在 300 hPa 以上水汽含量很小可以忽略, 因此本文采用从地面到 300 hPa 的水汽

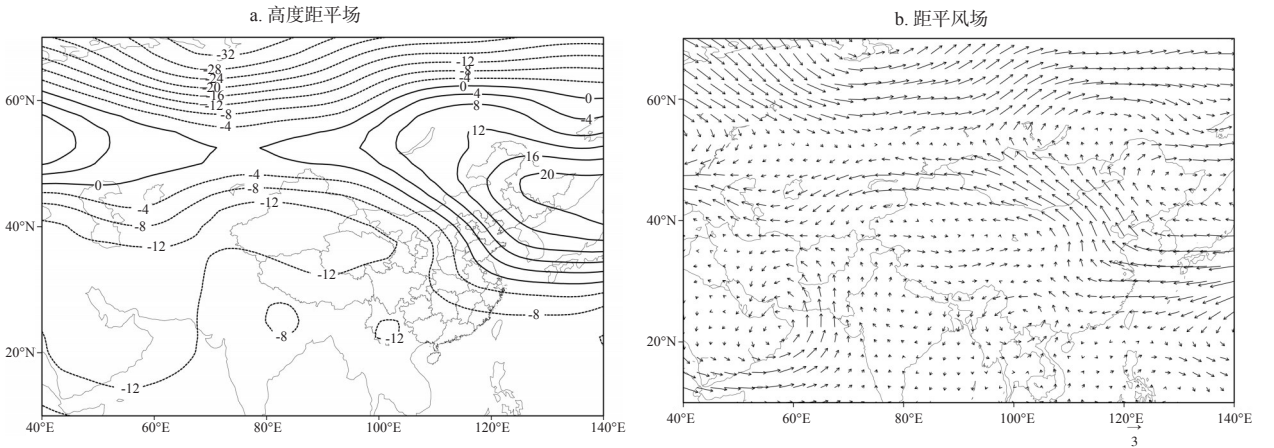


图6 祁连山区秋季层状云偏多年500hPa高度距平场(a)和距平风场(b)
Fig.6 500 hPa height anomaly fields (a) and the wind anomaly fields (b) of the years with abundant stratiform cloud over the Qilian Mts. region

通量积分来研究水汽输送情况。秋季是夏季环流向冬季环流的过渡季节,从图 7a 可以看出,秋季来自副热带西太平洋的东风水汽输送带在中南半岛和南海附近转为向北,并与来自印度洋途经孟加拉湾向北输送的水汽汇合后经高原东侧向西北内陆输送。在中纬度是较为平直西风气流,有来自地中海、里海的水汽输送,与文献[24]计算的 10 月水汽输送通量分布基本一致。由此可见,秋季影响祁连山区的水汽输送主要有 3 支:①印度洋途经孟加拉湾向北的水汽输送;②副热带西太平洋的偏东气流在中南半岛和南海附近转为向北的水汽输送;③自地中海、里海的西风带纬向水汽输送。

为了对比分析祁连山区秋季层状云多、少年水汽输送的差异,计算了层状云偏多年与偏少年的水汽通量差值场(图 8b)及层状云偏多、偏少年的水汽通量距平场。由图 8b 可见,层状云偏多年较偏少年上述 3 支水汽输送明显加强,其中来自南方的

水汽增加最为显著,偏西方向的水汽也有所增加,表现为:层状云偏多年,印度洋及阿拉伯海-孟加拉湾-中南半岛的水汽输送比偏少年增加约 $10 \sim 20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 副热带西太平洋偏东气流水汽通量增加 $10 \sim 50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 二者异常增加后在中国华南到云贵一带交汇北上,经四川盆地向青海高原输送;同时,西风带水汽输送也明显加强,增加约 $5 \sim 10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。层状云偏少年,水汽通量距平场正好与偏多年相反,层状云偏少年上述 3 支水汽输送明显减弱,孟加拉湾减少 $8 \sim 20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 副热带西太平洋水汽通量减少 $10 \sim 30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 西风带水汽输送减少约 $8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由上述分析得出,孟加拉湾的水汽输送,副热带西太平洋的偏东气流在中南半岛和南海附近转为向北的水汽输送,地中海、里海的西风带纬向水汽输送是 3 支影响祁连山区秋季层状云多寡的水汽输送通道,进而对祁连山区秋季降水产生影响。

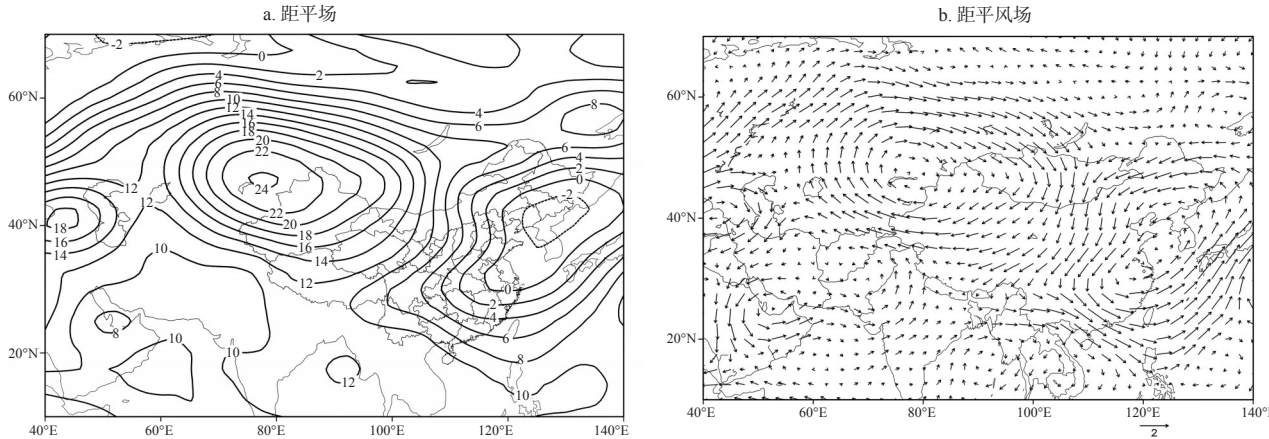


图 7 祁连山区秋季层状云偏少年 500hPa 高度距平场(a)和距平风场(b)
Fig.7 500hPa height anomaly fields (a) and the wind anomaly fields (b) of the years with less stratiform cloud over the Qilian Mts. region

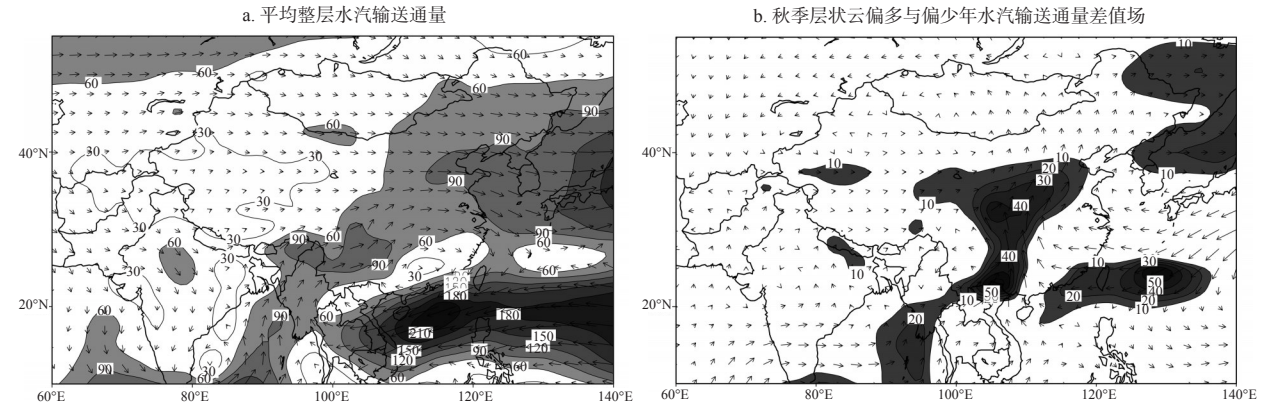


图 8 1961-2001 年祁连山区秋季水汽输送通量分布(阴影区是水汽通量大值区)
Fig.8 Distribution of vertically integrated water vapor flux vectors over the Qilian Mts. region during 1961-2001

4 小结

(1) 祁连山区秋季层状云出现频率为8%~26%,呈西少东多的空间分布,自西北向东南逐渐递增。

(2) 近41年来,祁连山区秋季增温1.2℃,气温变化的倾向率为0.29℃/10a,20世纪80年中期以后祁连山区秋季持续增温,并且在1987年发生增温的突变。

(3) 41年来,祁连山区秋季层状云的出现频率呈明显的减少趋势,倾向率为-2.7%/10a,为超过0.01的显著水平。近41年来减少约11%,尤其在20世纪80年代中期以后随着祁连山持续增温,层状云出现频率减少明显,并发生突变性的减少,层状云出现频率与气温呈明显的反相变化趋势。

(4) 在气候变暖情况下,祁连山的层状云出现频率减少,减少的幅度从西北向东南递增。回归分析表明:当祁连山区秋季平均气温在升高1℃时,除祁连山西侧的冷湖为微弱的增加外,祁连山及其周围地区层状云出现频率一致为减少,大部地方减少2%~8%,祁连山西段、中段减少2%~4%,祁连山东段减少4%~10%,位于祁连山东侧的兰州减少最多,减少11%。

(5) 层状云偏多年,极涡沿新地岛偏向于西西伯利亚向亚洲北部伸展,东亚大槽较常年偏弱,乌拉尔山高压脊偏强,脊前偏北气流引导极地冷空气沿偏西北路径向我国西北地区输送,中亚地区到高原上不断有低值系统发展东移,同时南支槽加强,来自阿拉伯海、南海、东海的暖湿气流向内陆地区的输送明显加强,与进入高原北部的冷空气交绥,从而使祁连山区层状云出现频次增多;层状云偏少年500 hPa环流场的异常分布表明,中亚-中国西北地区暖性高压异常加强,东亚大槽较常年偏强,冷空气活动路径偏东,亚洲大陆至西太平洋冬季风特征明显,偏北风加强,不利于东南暖湿气流向西北内陆地区的输送,冷暖气流在祁连山区交绥次数减少,从而使祁连山区层状云出现频次减少。

(6) 印度洋沿孟加拉湾的向北的水汽输送,副热带西太平洋的偏东气流在中南半岛和南海附近转为向北的水汽输送,地中海、里海的西风带纬向水汽输送是三支影响祁连山区秋季层状云多寡水汽输送通道,进而对祁连山区秋季降水产生影响。

参考文献

- [1] 蓝永超, 仵彦卿, 康尔泗, 等. 祁连山北麓出山径流对气候变化的响应. 兰州大学学报: 自然科学版, 2001, 37(4): 125-132.
- [2] 曹泊, 潘宝田, 高红山, 等. 1972-2007年祁连山东段冷龙岭现代冰川变化研究. 冰川冻土, 2010, 32(2): 242-243.
- [3] 李林, 王振宇, 汪青春. 黑河上游地区气候变化对径流量的影响研究. 地理科学, 2006, 26(3): 40-46.
- [4] 王亚军, 陈发虎, 勾晓华. 利用树木年轮资料重建祁连山中段春季降水的变化. 地理科学, 2001, 21(4): 373-377.
- [5] 张强, 俞亚勋, 张杰. 祁连山与河西内陆河流域绿洲的大气水循环特征研究. 冰川冻土, 2008, 30(6): 907-913.
- [6] 张强, 张杰, 孙国武, 等. 祁连山山区空中水汽分布特征研究. 气象学报, 2007, 65(4): 633-643.
- [7] 张国庆, 孙安平, 肖宏斌, 等. 祁连山南麓河谷地形云生长的层结特征. 山地学报, 2010, 28(3): 274-282.
- [8] 封彩云, 王式功, 尚可政, 等. 中国北方水汽与云和降水的关系. 兰州大学学报: 自然科学版, 2009, 45(4): 30-36.
- [9] 靳立亚, 符娇兰, 陈发虎, 等. 西北地区空中水汽输送时变特征及其与降水的关系. 兰州大学学报: 自然科学版, 2006, 42(1): 1-6.
- [10] 林纾, 陈建华, 瞿汶. 2003年夏秋季大气环流异常对西北地区降水的影响. 灾害学, 2001, 19(3): 62-67.
- [11] 陈少勇, 董安祥, 陈添宇, 等. 祁连山总云量变化及其与气候变暖的关系. 干旱区研究, 2007, 24(1): 98-102.
- [12] 陈少勇, 董安祥. 祁连山区低云量的气候变化与异常研究. 高原气象, 2006, 25(3): 545-548.
- [13] 石光普, 陈少勇, 董安祥, 等. 气候变暖背景下祁连山区夏季积雨云变化特征. 地理科学进展, 2010, 29(7): 845-854.
- [14] 王宝鉴, 黄玉霞, 王劲松, 等. 祁连山云和空中水汽资源的季节分布与演变. 地球科学进展, 2006, 21(9): 948-955.
- [15] 罗生洲, 马晓虹, 王红莉, 等. 环青海湖地区降水云系及影响系统的初步分析. 青海气象, 2006(3): 9-12, 21.
- [16] 马晓虹, 罗生洲, 王红莉. 环青海湖地区5-9月降水与云层关系的分析研究. 青海气象, 2006(4): 15-17.
- [17] 吴鹤轩. 青藏高原的低云. 北京: 气象出版社, 1985.
- [18] 陈少勇, 石光普, 董安祥, 等. 祁连山层状云的时空分布及其环流特征分析. 中国沙漠, 2010, 30(4): 946-953.
- [19] 陈少勇, 徐科展, 董安祥, 等. 祁连山积雨云的时空分布及其环流特征. 干旱区研究, 2010, 27(1): 114-120.
- [20] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术. 北京: 气象出版社, 1999: 27-113.
- [21] 贾文雄, 何元庆, 李宗省, 等. 祁连山区气候变化的区域差异特征及突变分析. 地理学报, 2008, 63(3): 257-269.
- [22] 贾文雄, 何元庆, 李宗省, 等. 近50年来河西走廊平原地气候变化的区域特征及突变分析. 地理科学, 2008, 28(4): 525-531.
- [23] 张存杰, 郭妮. 祁连山区近40年气候变化特征. 气象, 2002, 28(12): 34-39, 46.
- [24] 魏娜, 巩远发, 孙炯, 等. 西北地区近50a降水变化及水汽输送特征. 中国沙漠, 2010, 30(6): 1450-1457.

The Changes of Autumn Stratiform Clouds in the Qilian Mts. Region under the Background of Global Warming

SHI Guangpu^{1,2}, SHI Yuanyuan², GUO Yuzhen², CHEN Shaoyong², LIN Shu¹, GUO Junting²

(1. Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou, Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reducing, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020, China;

2. Baiyin Meteorological Bureau, Baiyin 730900, Gansu, China)

Abstract: Based on meteorological data of autumn cloud shape and surface air temperature at 29 meteorological stations in the Qilian Mountains and the surrounding areas during 1961-2001, the temporal variation and spatial distribution of autumn stratiform cloud arising frequency and the relationship between it and climate warming were analyzed, and the NCEP/NCAR global reanalysis data in the corresponding period were selected to analyze the circulation of autumn stratiform cloud in this region. The results are shown as follows. (1) The autumn stratiform cloud arising frequency in the Qilian Mts. region is 8% ~ 26%, presenting a spatial distribution of less in the (north)west and abundant in the (south)east. (2) The autumn mean air temperature increased by 1.2°C with a rate of 0.29°C/10a in recent 41 years, and the abrupt change occurred in the mid-1980s. (3) The autumn stratiform cloud arising frequency decreased by 11% at a rate of -2.7%/10a, which was corresponding to the synchronous significant warming since the mid-1980s. The autumn stratiform cloud arising frequency decreased more significantly, and the autumn stratiform cloud arising frequency and air temperature presented an anti-phase trend. (4) In the background of climate warming, the autumn stratiform cloud arising frequency in the Qilian Mts. region decreased, with a decreasing amplitude increasing from northwest to southeast. When the autumn average temperature increased by 1°C, the autumn stratiform cloud arising frequency decreased by 2% ~ 10% over most parts of the Qilian Mts. region, 2% ~ 4% in the western and central parts, and 4% ~ 10% in the eastern part. (5) There was a significant difference in 500hPa atmospheric circulation between abundant and less years of autumn stratiform cloud in the Qilian Mts. region. In abundant years, polar vortex extends to northern Asia, the eastern Asia deep trough is weaker, and the Ural high pressure ridge is stronger. Due to the north-northwest air-flow before the ridge, the polar cold air flows to Northwest China in a northwest path, uninterrupted low-value systems develop and move towards east from Central Asia to the Qinghai-Tibet Plateau. In the meantime, southern trough strengthened and the transportation of the warm and wet air flow from the Arabian Sea, the South China Sea and the East China Sea to the inland areas were markedly strengthened. It met with the cold air which entered the northern plateau region, leading to an increase in the autumn stratiform cloud arising frequency in the Qilian Mts. region. In less years, the warm anticyclone range from Central Asia to Northwest China is abnormally strengthened, the East Asia deep trough is stronger, and cold air moves by east, presenting a significant winter monsoon characteristic from Asia to Western Pacific. North wind strengthened and made against the transportation of warm and wet flows from Southeast to Northwest China, thus there was less possibility for their meeting in the Qilian Mts. region, thus the autumn stratiform cloud arising frequency decreased. (6) The northward water vapor transportation from the Indian Ocean to the Bay of Bengal, the northward shift of east airflow over the subtropic Western Pacific near the South China Sea and Indo-China Peninsula, and the westerlies latitudinal water vapor transportation over the Mediterranean Sea and the Caspian Sea are the three channels for water vapor transportation which affect the autumn stratiform cloud arising frequency and then affect the autumn precipitation in the Qilian Mts. region.

Key words: climate warming; autumn stratiform cloud; 500hPa atmospheric circulation; the flux of water vapor transport; Qilian Mts. region

本文引用格式:

石光普, 石圆圆, 郭玉珍, 等. 气候变暖背景下祁连山区秋季层状云变化特征. 地理科学进展, 2012, 31(5): 609-616.