

气候变暖背景下祁连山区夏季积雨云变化特征

石光普^{1,2}, 陈少勇^{1,2}, 董安祥¹, 王银花³, 冯 婧⁴, 夏 权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, 白银 730900;
3. 甘肃省靖远县气象局, 靖远 730600; 4. 南京信息工程大学, 南京 210040)

摘 要:利用祁连山区及其周边 26 个气象观测站 1961–2005 年夏季积雨云形状和气温观测资料, 采用线性趋势分析、墨西哥帽小波分析等方法, 分析了祁连山区夏季积雨云出现频率的空间分布与时间变化特征, 探讨了与气候变暖的关系, 并选用同期 NCEP/NCAR 全球再分析资料, 对祁连山区夏季积雨云的环流特征进行分析。结果表明: ①祁连山区夏季积雨云出现频率明显高于河西走廊和柴达木盆地。②祁连山区夏季平均气温呈逐年上升趋势, 20 世纪 90 年代以来, 上升趋势更为明显。祁连山区夏季积雨云出现频率明显减少, 近 45 年来祁连山区夏季积雨云出现频率减少近 8%。③在 3 和 20 年尺度上, 祁连山区夏季气温和积雨云出现频率为反相位变化结构为主; 在气温振荡最强的 10a 时间尺度上, 20 世纪 80 年代初期以前 2 者为反相位关系, 而之后随着祁连山区显著增温, 2 者则呈现出同相位变化特征。④在年代际尺度和年际尺度上, 祁连山区夏季气温和积雨云出现频率均为显著的负相关关系。分析表明, 在气候变暖的背景下, 祁连山区和河西走廊的夏季积雨云出现频率减少, 而柴达木盆地则为增多。⑤祁连山区夏季积雨云出现频次的多少, 是对欧亚 500 hpa 环流异常的响应。

关 键 词:气候变暖; 积雨云; 变化特征; 祁连山

1 引 言

祁连山脉位于青藏高原的东北部边缘, 地处青藏、蒙新、黄土 3 大高原交汇地带, 东起乌鞘岭, 西止当金山口, 山系长 1000 km 以上, 平均海拔达 4000~4500 m, 海拔 4000 m 以上高山终年积雪, 广泛分布现代冰川, 是石羊河、黑河、疏勒河和大通河的发源地以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。祁连山发育的冰川每年夏季消融, 形成冰川径流, 山区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, 该地区的水资源具有其独特的内陆水循环过程^[1-2]。近几十年来, 由于气候变暖^[3-7]和人类活动加剧等影响, 祁连山的雪线上升、冰川退缩明显^[8-9]。气候变暖对河西内陆干旱区气候与出山径流的影响有着明显的地域性差异^[10-11], 河西内陆河流域的流量和水资源已得到专家学者的广泛重视。同时, 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^[12-13]。为保护生态环境, 控制土

地沙漠化, 缓解河西走廊经济社会发展对水资源日益增长的需求, 在祁连山区进行人工增雨雪作业、开发利用空中云水资源, 对当地经济社会的可持续发展具有重要意义。

云是重要的气象要素之一, 是产生降水的基础, 直接调节地气系统的辐射能量平衡和水气循环平衡, 其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。空中水汽输送是内陆地区水资源的根本来源^[1], 对于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。魏丽等^[14]利用 ISCCP 资料对青藏高原云的气候特征作了分析, 表明高原上主要为积雨云 Cb 和高云 Ci; 宜树华等^[15]、陈勇航等^[16]分析发现西北地区云量、空中云水资源分布与地形有很好的 consistency, 在天山、昆仑山、祁连山一带存极大区; 俞亚勋等^[17]指出西北地区自 20 世纪 80 年代以来水汽增多的趋势; 王宝鉴等^[18]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; 陈少勇等^[19-24]研究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

收稿日期: 2009-06; 修订日期: 2010-02.

基金项目: 国家自然科学基金委员会重点项目(40533015)。

作者简介: 石光普(1978-), 男, 甘肃人, 工程师, 从事气候变化研究及气象软件工程设计。E-mail: sgp121@126.com.

(纬)向环流、高原季风和太阳活动的综合影响,低云量在夏季最多;陈乾等^[25]用 Aqua/CERES 反演云参量估算西北区降水效率和人工增雨潜力,认为祁连山区全年都有较好的人工增雨潜力;陈添宇等^[26]研究表明西北地区东部在春、夏季具备较好的实施人工增雨(雪)云水条件。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很少。有研究表明祁连山区降水量集中在夏季^[27],高原上降水云系主要是积雨云或以积雨云为主的混合云^[28-29],积雨云可以形成局地强风暴天气系统,引发强降水、大风、冰雹等强对流天气。因而,本文采用祁连山及其周边地区近 45 年的地面气象观测资料,研究气候变暖背景下祁连山区夏季积雨云的分布特征、变化规律及其对气候变暖的响应,为该地区空中云水资源开发利用、气象灾害防御等提供科学依据。

2 资料与方法

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,经过了严格的质量控制和均一化处理,具有很好的代表性、准确性和比较性。选取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 26 个气象站 (图 1) 1961-2005 年逐日定时(02、08、14、20 时)云状观测资料,统计各站夏季(7-8 月)积雨云出现频率(频率=出现次数/观测次数,单位:%)。选取祁连山区 6 个气象站 (表 1)1961-2005 年逐年夏季平均气温,计算各站夏季平均气温之间的相关系数,结果表明:相关系数达 0.70~0.94,远远超过了 0.001 的置信水平,说明所选 6 个代表站的夏季气温有较高的一致性,因此用这 6 个代表站利用空间平均方法,建立祁连山夏季平均气温序列。采用线性趋势分析、相关分析、多项式拟合和墨西哥帽小波分析方法^[30,31],综合分析祁连山区夏季积雨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 1961-2005 年 NCEP/NCAR 全球再分析资料(水平分辨率为 2.5°×2.5°),对祁连山区夏季积雨云的环流特征进行分析,以揭示该区积雨云形成、发展的背景条件。本文中相关系数检验临界值 $r_{0.05}=0.29$ 、 $r_{0.01}=0.38$ 、 $r_{0.001}=0.48$,做小波分析时,为了消除边界效应,选择对称延伸法

对资料进行了延伸。

3 结果分析

3.1 祁连山区夏季积雨云出现频率的分布特征

图 2 给出祁连山及其周围 26 个测站,近 45 年来夏季积雨出现频率空间分布图。可见,积雨云出现频率的空间分布与地形有很好的一致性,祁连山区积雨云出现频率在 20%以上,明显高于河西走廊和柴达木盆地,在野牛沟—祁连—刚察一带达 30%

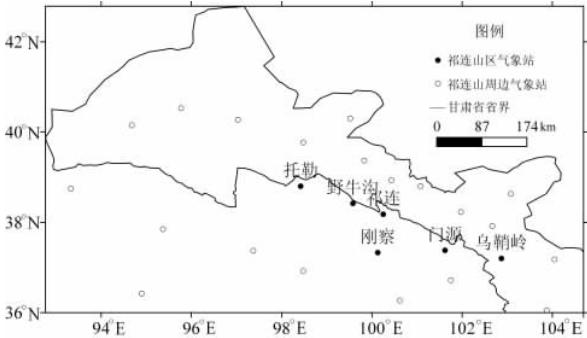


图 1 祁连山区及其周边地区所选取气象观测台站分布
Fig.1 The distribution of meteorological observation stations selected in the Qilian Mountains and the surrounding areas

表 1 祁连山区气象站基本情况

Tab.1 The basic circumstances of weather stations in the Qilian Mts. Region

站名	纬度/°N	经度/°E	海拔/m
乌鞘岭	37.12	102.52	3043.9
门源	37.23	101.37	2851.0
祁连	38.11	100.15	2788.5
刚察	37.20	100.08	3302.4
野牛沟	38.25	99.35	3320.0
托勒	38.48	98.25	3368.3

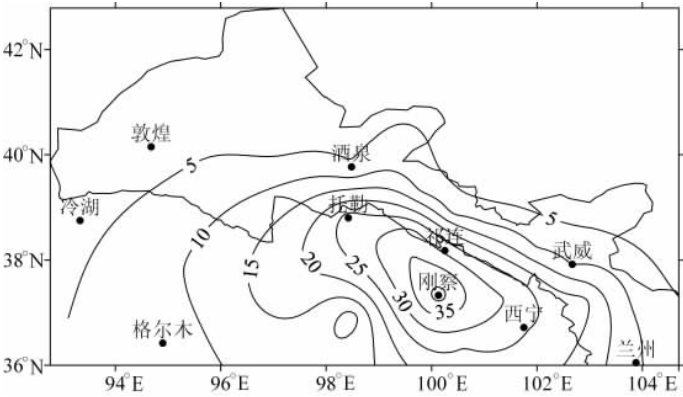


图 2 1961-2005 年祁连山夏季积雨云出现频率空间分布
Fig.2 The spatial distribution of the mean frequency of summer Cb cloud over the Qilian Mts. Region (1961-2005)

~42%,为全区最高,柴达木盆地和河西走廊大部在5%~20%之间。祁连山区6个代表站逐月积雨云出现频率的45年平均值曲线表明,1~6月祁连山主体积雨云出现频率逐月增加,6~7月达到全年最高值32%,之后逐月下降,9月以后出现频率下降明显,10~12月积雨云的出现频率在5%~10%左右,为全年最低。夏季(6~8月)出现频率在31%左右,为全年最高,春、秋、冬季分别为22%、13%、5%。

张强等^[30]研究表明,祁连山区气候同时受西风带、南亚季风和高原季风以及东亚季风活动的共同影响。夏季受东南季风及高原季风的影响,来自偏南的暖湿气流沿青海高原东部的外流河谷经青海湖一带向祁连山输送,同时低层的辐合有利于对流天气发展,受地形抬升在的青海湖以北到祁连山南侧的刚察-祁连-野牛沟一带形成积雨云出现频率的高值区。冬季祁连山区水汽输送最弱^[18],主要源于西风带,积雨云出现频率为全年最低,只有5%。

3.2 祁连山区夏季增温的特征分析

计算祁连山夏季平均气温距平的各年代平均(表2),可以看出,20世纪60~80年代祁连山区夏季气温为偏低时期,各年代间气温变化不大,总体偏低0.2~0.3℃;自90年代到21世纪初祁连山夏季气温为偏高,90年代增温最为明显,较80年代增温0.7℃,21世纪以来的5年平均偏高0.8℃,为过去45年的最暖时期。

从1961年以来祁连山区逐年夏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,45年来增温1.2℃,增温率达0.26℃/10a,超过0.001的显著水平,高于同期中国西北夏季增温率0.22℃/10a^[5]。20世纪60年代初,祁连山夏季气温略偏高,之后有所下降,到90年代初之间气温偏低且多波动,但总体起伏不大。自20世纪90年代初以来,祁连山夏季持续增温,自1994年以来一致为正距平,增温明显,在21世纪初气温达到最高点,之后略有回落。

利用小波变换对祁连山区标准化的夏季气温序列作多时间尺度分析(图3b),图中上半部分等值线比较稀疏,对应较长尺度周期的振荡(低频振荡),下半部分等值线相对密集,对应较短尺度周期振荡

(高频振荡),实线和虚线分别表示小波变换系数的正值和负值,零线用标注0的粗实线表示,等值线间隔为0.2。在30a以上的时间尺度上祁连山夏季气温经历了高一低一高的3个变化阶段,在1963年前偏暖,1964~1993年偏凉,1994年以后偏暖,1994年经历了较大尺度的冷暖交替变。在15~25a左右的时间尺度上,气温变化经历了高一低一高一低一高的5个变化阶段,1963年以前偏暖,1964~1971年偏凉,1972~1978年偏暖,1979~1994以后偏凉,1994年以后偏暖。另外,可以看出在70年代

表2 祁连山夏季平均气温、积雨云出现频率距平年代平均
Tab.2 Interdecadal change of the anomalies of summer temperature and Cb cloud frequency in the Qilian Mts. Region

气象要素	年代(20世纪)				2001-2005年
	60	70	80	90	
气温	-0.3	-0.2	-0.3	0.4	0.8
积雨云	2.7	0.9	2.2	-3.3	-5.0

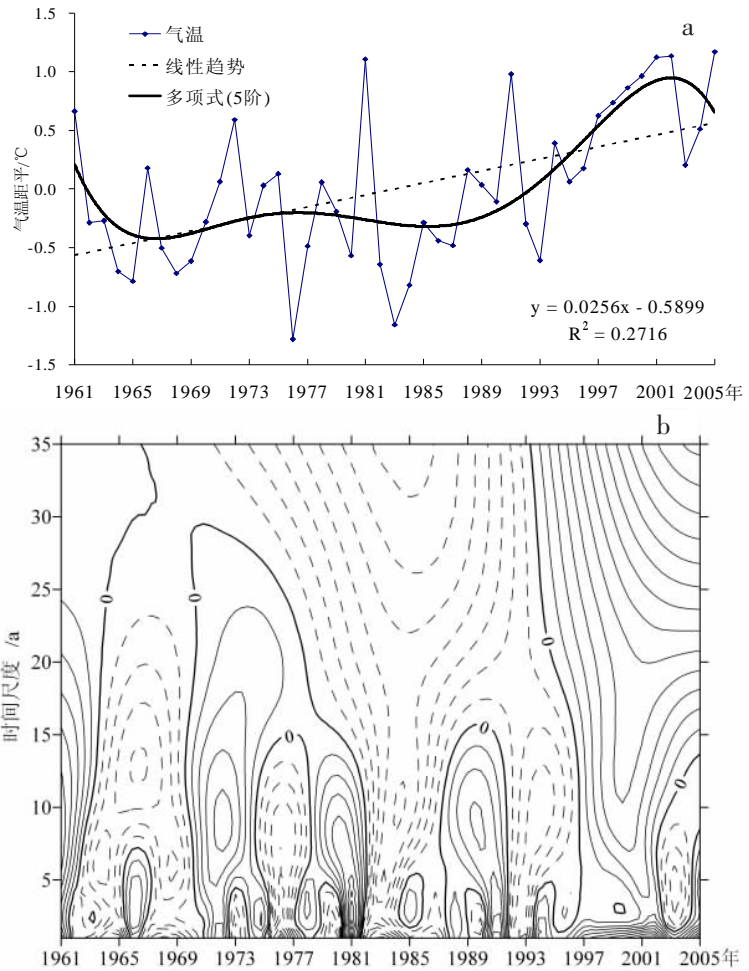


图3 1961~2005年祁连山区夏季平均气温年际变化趋势(a)及其小波变(b)
Fig.3 Interannual variation of summer mean temperature (a) and their wavelet transforms (b) in the Qilian Mts. Region (1961~2005)

以后 8-10a 的周期振荡明显,计算小波方差表明祁连山区夏季气温变化以 10a 左右周期振动最强,取尺度为 10a 的小波系数计算功率谱,表明 10a 周期变化通过 0.01 的显著水平;可以看出 3a 左右的小周期的振动在整个时间域中也比较显著,对气温标准化序列计算功率谱表明 3a 左右的周期通过 0.05 的显著水平。由此可见,较大尺度的变化嵌套着复杂的小尺度变化,不同尺度周期信号的强弱在时频域中的分布也具有不同的特征。

3.3 祁连山区夏季积雨云出现频率的变化特征

计算祁连山夏季积雨云出现频率距平的各年代平均(表 2)可以看出,20 世纪 60-80 年代祁连山区夏季积雨云出现频率为偏高时期,相对应于祁连山夏季气温的偏低时期;自 90 年代到本世纪初祁连山夏季积雨云出现频率为偏低,与同期显著增温相对应,90 年代增减最为明显,较 80 年代减少 5.5%,本世纪以来的 5 年平均偏少 5.0%,为过去 45 年中积雨云出现最少的时期。

图 4a 为 1961-2005 年祁连山夏季积雨云出现频率距平变化曲线,可以看出近 45 年来,祁连山区积雨云的出现频率呈显著减少趋势,45 年减少了近 8 个百分点,超过 0.001 的显著水平。20 世纪 60 年代到 80 年代,积雨云出现频率变化多波动,变化幅度不大,分别在 60、80 年代中期达到波峰,70 年代中期为波谷,与气温呈明显的反相变化趋势,祁连山区夏季气温在 60、80 年代中期达到波谷,70 年代中期为波峰;90 年代以后,与祁连山区显著增温相反,积雨云的出现频率大幅下降,1994 年以来一致为负距平,在 21 世纪初积雨云出现频率达到最低值,之后略有上升。

利用小波变换对近 45 年来祁连山区夏季积雨云出现频率序列作多时间尺度分析,为便于比较先进行标准化处理,其小波变换结果如图 4b 所示。图中实线和虚线分别表示小波变换系数的正值和负值,零线用标注 0 的粗实线表示,等值线间隔为 0.2。图中可以看出,在祁连山区夏季积雨云出现频率分别在 1969、1979 和 1993 年出现 3 次较大尺度的多、

少交替变化,前后分别对应多—少—多—少 4 个变化阶段,可以看到与 5 阶多项式拟合曲线的高低波动有较好的对应。近 45 年来,祁连山区夏季积雨云出现频率的各种时间尺度周期变化在时间域中的分布有差异,可以看出各个时期的主要振动周期是变化的,存在最强的几个振动中心,在 20 世纪 60 年代中后期 10a 左右的振荡最强,80 年代中期振荡中心大致在 30a、90 年代中后期,3-4a 左右的振荡较为突出,不同尺度周期信号的强弱在时—频域中的分布具有较强的局部特征。对祁连山区夏季积雨云出现频的标准化序列计算功率谱表明 2.5a 左右的周期通过 0.05 的显著水平。

3.4 祁连山区夏季积雨云出现频率与气温的时间尺度变化关系

通过比较图 3b 与图 4b,在 15-25a 的较大尺度

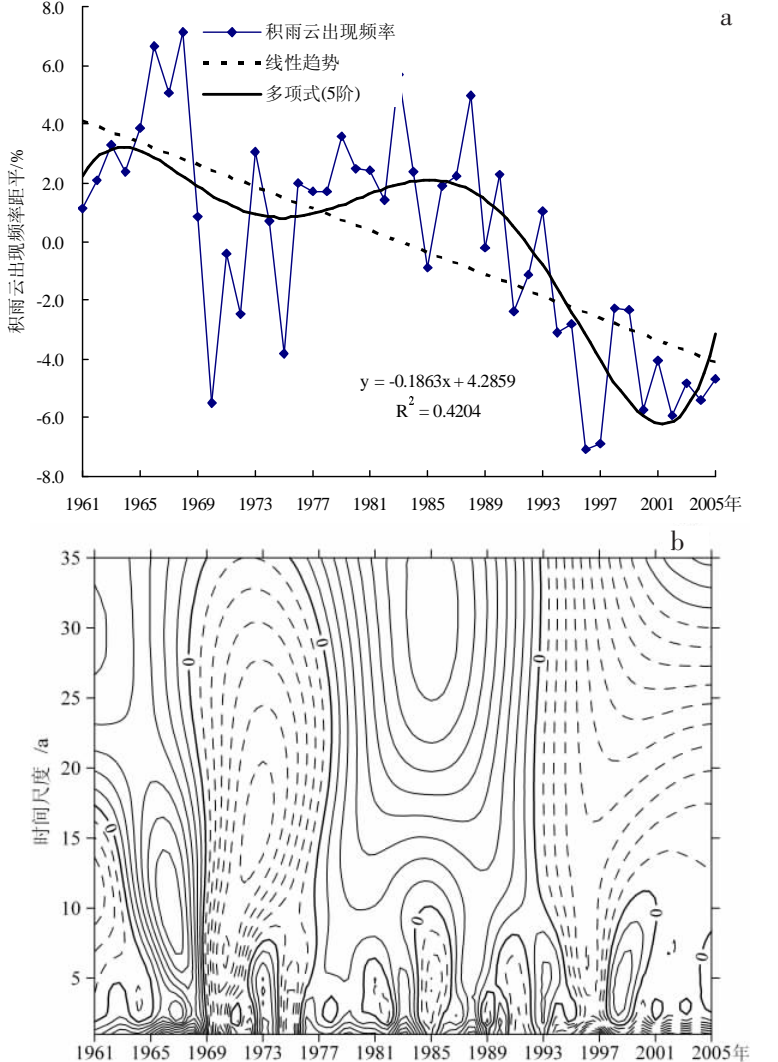


图 4 1961-2005 年祁连山区夏季积雨云出现频率距平(a)及小波变换(b)
Fig.4 Interannual variation of summer Cb cloud frequency (a) and their wavelet transforms (b) in the Qilian Mts. Region (1961-2005)

上,气温的正相位与积雨云出现频率的负相位对应较好,大致为反相位关系,在 15a 以下二者的对应关系较为复杂。下面将祁连山区夏季积雨云和气温在 3a、10a、20a 这 3 个时间尺度上的变化情况作对比分析,其中图 5a-c 分别对应 3a、10a 和 20a 时间尺度。可以看出,在 3a 的时间尺度上,在 20 世纪 60 年中期以前 2 者为同相位关系,而之后则主要以反相位变化关系为主。在 20a 的时间尺度上,基本为反相位变化关系。说明在 3a 和 20a 的时间尺度上气温和积雨云出现频率以反相位变化为主,在短期变化和长期气候变化上,体现出气温偏低时期对应积雨云出现偏多时期,气温偏高时期对应积雨云出现偏少时期,表明当祁连山区冷空气活动频繁时期,使得南下冷空气与东南季风边缘的暖湿气流在祁连山区交绥次数增多,使积雨云形成次数增多,同时天空积雨云增多时,减少了到达地面的太阳辐射,使得近地面气温降低。在气温振荡最强的 10a 时间尺度上可以看到,20 世纪 80 年代初期以前两者为反相位关系,而之后随着祁连山区明显增温,两者逐渐转变为同相位变化,这可能与气候变暖时水循环加速,气候变冷时水循环减缓有关。

3.5 积雨云出现频率对气候变暖的响应

对比图 3a、4a 可见,近 45 年来,祁连山夏季积雨云出现频率与气温呈相反的变化趋势,二者相关系数达-0.62,超过了 $\alpha=0.001$ 的显著性水平。对积雨云出现频率与气温 2 个序列计算各自的 5 阶趋势,各趋势都及其显著,相关系数分别达 0.77、0.68,两个趋势序列相关系数高达-0.96,远远超过 0.001 的显著水平,表明在年代际变化上祁连山区夏季积雨云出现频率与气温呈反相的变化趋势;再将二者原序列分别分离出 5 阶趋势后得到年际变化序列,2 序列相关系数为 0.25,达到了 0.1 的信度水平,说明在年际变化上,二者反相变化趋势也是较为显著。

为定量的分析祁连山区夏季积雨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 26 个气象观测站近 45 年来的夏季积雨云出现频率对应空间平均的祁连山区逐年夏季平均气温序列,进行线性回归分析。结果表明(图 6),祁连山区夏季平均气温在升高 1℃ 的情况下,祁连山区及河西走廊大部积雨云出现频率为减少,图中以虚线表示,对应为负相关,祁

连山中、东部减少 3%~6%,其中门源减少最多,减少 6.6%,河西走廊大部少 1%~2%;而柴达木盆地到恰卜恰一带,积雨云出现频率为增加,图中以细实线表示,对应为正相关,增幅为 2%~5%,其中德令哈增加最多,增加 4.9%。计算 2 者相关系数,并进行统计检验(图中阴影部分表示显著水平超过 0.05 区域),结果祁连山区及河西走廊西部为明显的负相关关系,而柴达木盆地为正相关,均通过 0.05 以上的显著性水平检验,回归效果显著。陈少

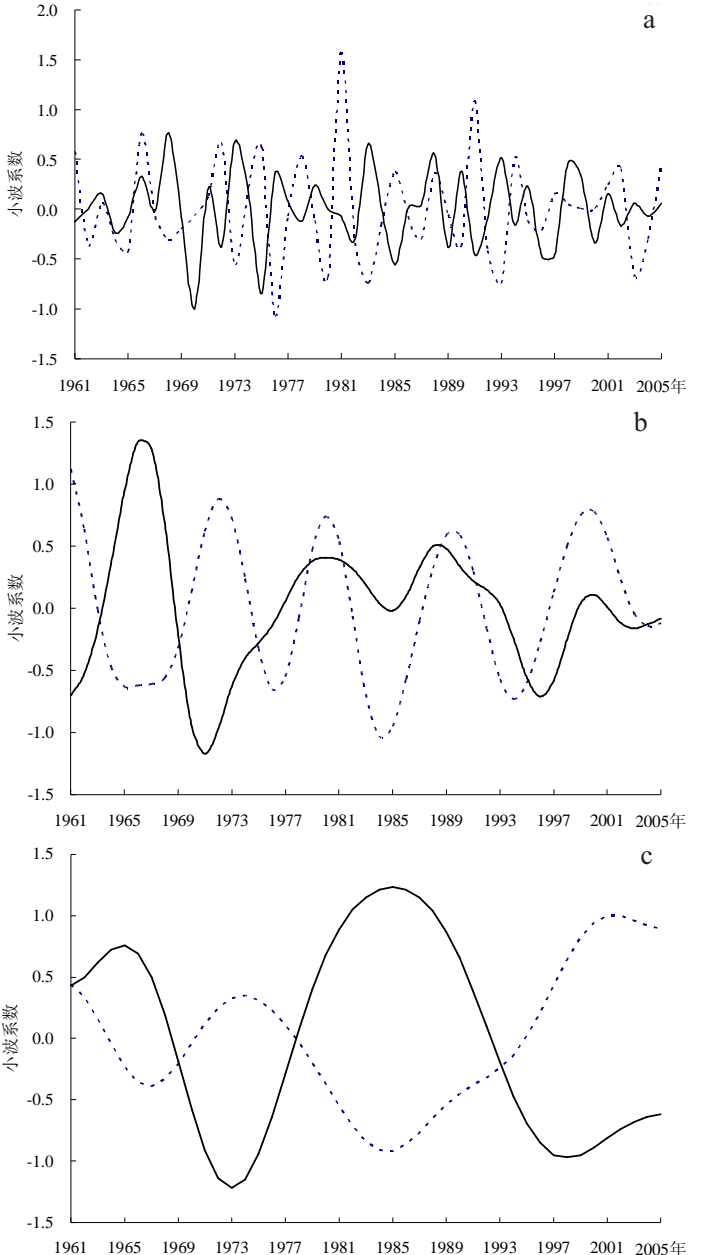


图 5 时间尺度为 3a(a), 10a(b)和 20a(c)的夏季积雨云出现频率(实线)和平均气温(虚线)的小波系数变化趋势

Fig.5 The change tendencies of wavelet coefficients for summer mean temperature (dashed line) and Cb cloud frequency (solid line) on 3a(a), 10a(b) and 20a(c) time scales

勇等^[23-24]研究发现,祁连山区夏季低云量有显著的下降趋势,而柴达木盆地呈上升趋势,汪青春等^[32]通过对青海高原气候变化的特征研究指出,祁连山区雨日呈明显的减少趋势,而柴达木盆地雨日呈增多趋势,且降水量 $\geq 10\text{mm}$ 的雨日明显增多,可见本文中研究得出的积雨云出现频率变化趋势与对应区域的低云量、雨日变化相一致。

3.6 夏季积雨云的环流特征

为了进一步讨论祁连山区夏季积雨云出现频率偏多和偏少的环流背景,选取近 45 年中积雨云出现频率标准化值 >1 的年份代表偏多年(1965、1966、1967、1968、1983、1988 年)标准化值 <-1 的年份代表偏少年(1970、1996、1997、2000、2001、2002、2003、2004、2005 年)。选取的积雨云出现频率偏多年,出现频率平均距平 5.6%,气温平均距平为 -0.5°C ,积雨云出现频率偏少年,出现频率平均距平 -5.6% ,气温平均距平为 0.6°C ,可见积雨云偏多年气温偏低,积雨云偏少年气温偏高。利用 1961–2005 年 NCEP/NCAR 全球再分析资料,分别对祁连山区夏季积雨云偏多年和偏少年 500hpa 高度场环流特征进行分析。

夏季积雨云偏多年的 500hpa 距平场上(图 7a),中高纬度地区在西西伯利亚平原以西到乌拉尔山西侧的广大地区为正距平,正值中心在乌拉尔山,而在蒙古高原、贝加尔湖地区为明显的负距平,负值中心在贝加尔湖一带,

正负中心值分别达到 12gpm 和 -16 gpm ,相对应在夏季积雨云偏多年的 500 hpa 平均高度场上,乌拉尔山高压脊偏强,脊前在巴尔喀什湖以东至贝加尔湖东侧一带形成宽广的低槽,有利于冷空气不断地向低槽底部的祁连山区输送,同时青藏高原上为负距平,有利于南支槽发展,使偏南暖湿气流向祁连山区输送,在积雨云偏多年的 700 hpa 平均风场图上可以看到冷暖空气交绥于祁连山区,北方的冷空气和南来的暖湿气流在祁连山区相汇,气流辐合有利于对流天气发展,使得积雨云出现频率增多,气温降低。

夏季积雨云偏少年的 500 hpa 距平场 (图 7b),与偏多年相反,乌拉尔山正距平明显减弱,巴尔喀什湖北部有弱的负距平,而在蒙古高原、贝加尔湖

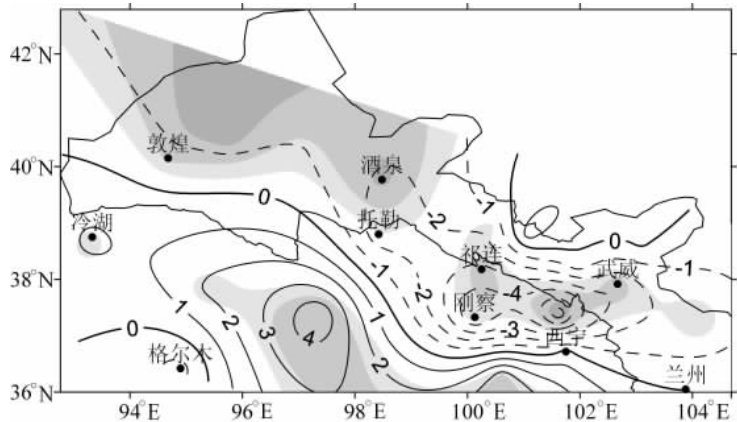


图 6 祁连山区夏季平均气温升高 1℃ 的情况积雨云出现频率的变化
Fig.6 Variation of the summer Cb cloud frequency with the 1℃ mean air temperature increase in the Qilian Mts. Region

注:阴影部分分别表示通过信度水平为 99.9%、99%及 95% 的 t 检验区域

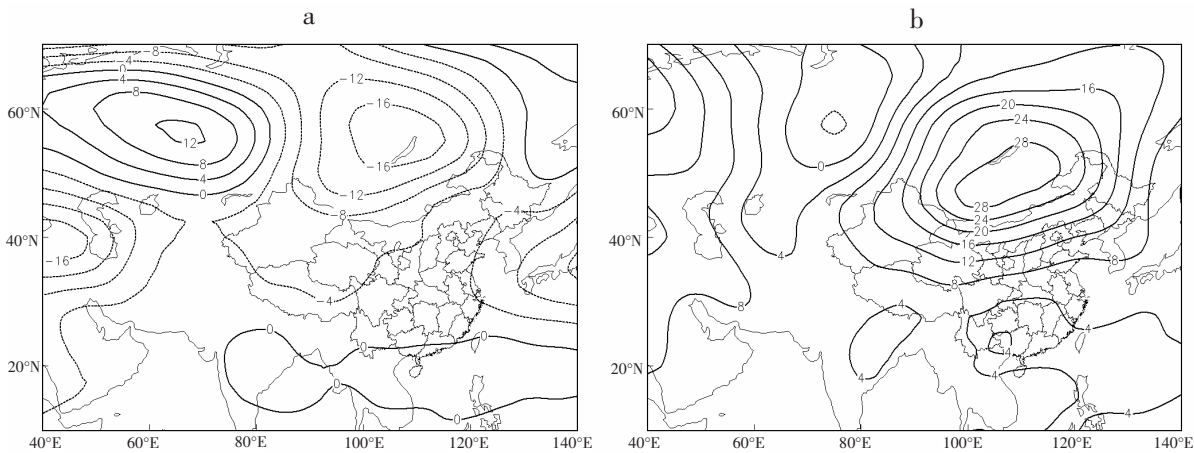


图 7 祁连山区夏季积雨云偏多年(a)和偏少年(b) 500hPa 高度距平场(平均值为 1961–2005 年夏季平均)

Fig.7 500hpa height anomaly fields for the years with abundant Cb clouds (a) and the years with less Cb clouds (b) over the Qilian Mts. Region (the mean value is the average of the values in the summer of 1961–2005)

地区有中心值达 28 gpm 的正距平, 500 hpa 平均高度场上, 巴尔喀什湖以北为一弱的浅槽, 河西走廊—蒙古高原—贝加尔湖的广大区域为高压脊所控制, 使得北方冷空气很少能南下到祁连山区, 夏季在大陆暖高压控制下使该区少云晴热, 同时在印度半岛为正距平, 对应到 500 hpa 平均高度场上为一 5840 gpm 线的闭合区域, 不利于印缅槽的发展, 使得孟加拉湾向西北内陆的水汽输送减少, 王宝鉴等^[18]研究指出, 孟加拉湾是夏、秋季祁连山区空中水汽输送的重要源地之一。在积雨云偏少年 700 hpa 平均风场图上可以看到, 中低纬西南气流的平均风速较积雨云偏多年明显减弱, 对热带水汽向北输送有抑制作用。

分析表明, 祁连山区夏季积雨云出现频次的多少, 是对欧亚 500 hpa 环流异常的响应, 蒙古高原—贝加尔湖一带与乌拉尔山之间 500 hpa 高度场的高低振荡是祁连山区夏季积雨云出现频次多少的主要环流背景条件。同时, 青藏高原、印度半岛 500 hpa 高度场的高低变化, 是高原南支槽、印缅槽形成、发展的重要条件, 它们为西南暖湿气流向山区输送水汽提供通道, 是夏季积雨云出现频次多少的重要因素。

4 结论

(1) 祁连山区夏季积雨云出现频率明显高于河西走廊和柴达木盆地, 出现频率的季节变化明显, 夏季最高, 冬季最少。

(2) 近 45 年来祁连山区夏季平均增温 1.2℃, 增温率达 0.26℃/10a, 自 20 世纪 90 年代以来, 气温上升趋势极为明显。

(3) 祁连山区夏季积雨云出现频率近 45 年来减少了近 8%, 与 20 世纪 90 年代以后祁连山区显著增温相对应, 积雨云出现频率明显减少。

(4) 在 3 和 20 年尺度上, 祁连山区夏季气温和积雨云出现频率为反相位变化结构为主; 在气温振荡最强的 10a 时间尺度上, 20 世纪 80 年代初期以前 2 者为反相位关系, 而之后随着祁连山区明显增温, 2 者呈现出同相位变化结构。

(5) 在年代际尺度和年际尺度上, 祁连山区夏季气温和积雨云出现频率均为显著的负相关关系。分析表明, 祁连山区夏季气温在升高 1℃ 的情况下, 祁连山区和的积雨云出现频率减少 3%~6%, 河西

走廊减少 1%~2%, 而柴达木盆地的积雨云出现频率增加 2%~5%。表明在气候变暖的背景下, 祁连山区和河西走廊的夏季积雨云出现频率减少, 而柴达木盆地增多。

(6) 祁连山区夏季积雨云出现频次的多少, 是对欧亚 500hpa 环流异常的响应, 蒙古高原—贝加尔湖一带与乌拉尔山之间 500hpa 高度场的高低振荡是祁连山区夏季积雨云出现频次多少的主要环流背景条件。同时, 青藏高原、印度半岛 500hpa 高度场的高低变化, 是高原南支槽、印缅槽形成、发展的重要条件, 其为西南暖湿气流向山区输送水汽提供通道, 是夏季积雨云出现频次多少重要因素。

致 谢: 本文得到了成都信息工程学院张杰教授的指导, 在此表示感谢。

参考文献

- [1] 张强, 赵映东, 张存杰, 等. 西北干旱区水循环与水资源问题. 干旱气象, 2008, 26(2): 1-8.
- [2] 高前兆, 仵彦卿. 河西内陆河流域的水循环分析. 水科学进展, 2004, 15(3): 391-396.
- [3] 赵宗慈, 王绍武, 罗勇. IPCC 成立以来对气温升高的评估与预估. 气候变化研究进展, 2007, 3(3): 183-184.
- [4] 王鹏祥, 杨金虎, 张强, 等. 近半个世纪来中国西北地面气候变化基本特征. 地球科学进展, 2007, 22 (6): 649-656.
- [5] 王劲松, 费晓玲, 魏锋. 中国西北近 50 a 来气温变化特征的进一步研究. 中国沙漠, 2008, 28(4): 724-732.
- [6] 陶健红, 王遂缠, 王宝鉴. 中国西北地区气温异常的特征分析. 干旱区研究, 2007, 24(4): 510-515.
- [7] 王鹏祥, 杨金虎. 中国西北近 45a 来极端高温事件及其对区域性增暖的响应. 中国沙漠, 2007, 27(4): 649-655.
- [8] 张杰, 韩涛, 王健. 祁连山区 1997-2004 积雪面和雪线高度变化分析. 冰川冻土, 2005, 27(5): 649-654.
- [9] 丁永建, 叶柏生, 刘时银. 祁连山中部地区 40a 来气候变化及其对径流的影响. 冰川冻土, 2000, 22(3): 193-199.
- [10] 蓝永超, 丁永建, 刘进琪, 等. 全球气候变暖情景下黑河山区流域水资源的变化. 中国沙漠, 2005, 25 (6): 863-868.
- [11] 李栋梁, 冯建英, 陈雷, 等. 黑河流量和祁连山气候的年代际变化. 高原气象, 2003, 22(2): 104-110.
- [12] 汤奇成, 张捷斌. 西北干旱地区水资源与生态环境保护. 地理科学进展, 2001, 20(3): 227-233.
- [13] 何书金, 王秀红, 邓祥征, 等. 中国西部典型地区土地利用变化对比分析. 地理研究, 2006, 25(1): 79-86.
- [14] 魏丽, 钟强. 青藏高原云的气候学特征. 高原气象, 1997, 16(1): 10-15.
- [15] 宜树华, 刘洪利, 李维亮, 等. 中国西北地区云时空分布特征的初步分析. 气象, 2003, 29(1): 7-11.

- [16] 陈勇航, 黄建平, 陈长和, 等. 西北地区空中云水资源的时空分布特征. 高原气象, 2005, 24(6): 905–912.
- [17] 俞亚勋, 王劲松, 李青燕. 西北地区空中水汽时空分布及变化趋势分析. 冰川冻土, 2003, 25(2): 149–156.
- [18] 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.
- [19] 陈少勇, 董安祥. 青藏高原总云量的气候变化及其稳定性. 干旱区研究, 2006, 23 (2): 327–333.
- [20] 高蓉, 陈少勇, 董安祥. 青藏高原低云量的年际变化及其稳定性. 干旱区研究, 2007, 24 (6): 760–765.
- [21] 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.
- [22] 陈少勇, 董安祥, 王丽萍, 等. 祁连山区夏季总云量的气候变化与异常研究. 南京气象学院学报, 2005, 28(5): 617–625.
- [23] 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.
- [24] 陈少勇, 董安祥, 陈添宇, 等. 祁连山低云量对气候变暖的响应. 干旱区资源与环境, 2007, 21(2): 142–145.
- [25] 陈乾, 陈添宇, 张鸿. 用 Aqua/CERES 反演的云参量估算西北区降水效率和人工增雨潜力. 干旱气象, 2006, 24 (4): 1–8.
- [26] 陈添宇, 李照荣, 陈乾. 用 GMS5 卫星反演水汽场分析中国西北地区大气水汽分布的气候特征. 大气科学, 2005, 29(6): 864–871.
- [27] 陈少勇, 董安祥, 韩通. 祁连山东、西部夏季降水量时空分布的差异及其成因研究. 南京气象学院学报, 2007, 30 (5): 715–719.
- [28] 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.
- [29] 吴鹤轩. 青藏高原的低云. 北京: 气象出版社, 1985.
- [30] 张强, 张杰, 孙国武, 等. 祁连山区空中水汽分布特征研究. 气象学报, 2007, 65(4): 633–643.
- [31] 魏风英. 现代气候统计诊断预测技术. 北京: 气象出版社, 1999: 27–113.
- [32] 汪青春, 秦宁生, 张占峰, 等. 青海高原近 40a 降水变化特征及其对生态环境的影响. 中国沙漠, 2007, 27(1): 153–158.

Analysis on the Change Characteristics of Cumulonimbus (Cb) in the Qilian Mts. Region under the Background of Global Warming

SHI Guangpu^{1,2}, CHEN Shaoyong^{1,2}, DONG Anxiang¹, WANG Yinhua³, FENG Jing⁴

(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; 3. Jingyuan Meteorological bureau, Jingyuan 730600, Gansu, China; 4. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on meteorological data of summer cloud shape and surface air temperature at 26 meteorological stations during 1961–2005 in the Qilian Mts Region and the surrounding areas, using linear regression analysis, correlation analysis and wavelet analysis of the Mexican Hat Function, the temporal variation and spatial distribution of summer Cb 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 characteristics of the summer Cb clouds in the Qilian Mts. Region. The results show that: (1) The summer Cb cloud arising frequency in the Qilian Mts. Region is higher than the Hexi Corridor and the Qaidam Basin. (2) The summer air temperature presents an ascending tendency yearly. The tendency became more clearly since the 1990s, and the summer Cb cloud arising frequency obviously decreased, reducing 8% in the Qilian Mts. Region over the recent 45 years. (3) In the time scales of 3 years and 20 years, the summer Cb cloud arising frequency and air temperature presented an opposite changing structure in the Qilian Mts. Region. In the time scale of 10 years of temperature surge, the characteristics of variations are opposite before the early 1980s. With the rise of temperature both presented the same changing cycles. (4) The decadal and interannual variations of summer Cb cloud arising frequency and air temperature had an obvious negative correlation in the Qilian Mts. Region. The analysis shows that under the background of climate warming, the summer Cb cloud arising frequency decreased in the Qilian Mts. Region and the Hexi Corridor, but increased in the Qaidam Basin. (5) The Qilian Mts. Region summer Cb cloud arising frequency responded to the abnormal 500 hPa circulation of in the Eurasian areas.

Key words: climate warming; cumulonimbus; change characteristics; Qilian Mts. Region

本文引用格式:

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): 847–854.