

新疆天山托木尔峰地区夏季大气0℃层高度变化

强芳, 张明军, 王圣杰, 董蕾, 任正果, 朱小凡

(西北师范大学 地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要:基于1986—2010年夏季新疆天山托木尔峰南北2个探空站(阿克苏和伊宁)的探空资料与1986—2006年14个水文监测站的径流量,运用气候倾向率和相关分析法分析了该时段内夏季托木尔峰南北不同时段(北京时间20时和8时)大气0℃层高度的变化特征,并探究了该地区径流量对大气0℃层高度变化的响应情况。研究表明:1986—2010年托木尔峰南北的夏季大气0℃层高度都呈上升趋势,但是存在着空间与时段上的差异。托木尔峰南部的升温比北部的升温更为明显,南部阿克苏和北部伊宁大气0℃层高度的线性倾向率分别为1.99 m/a($p>0.1$)和1.56 m/a($p>0.1$);阿克苏和伊宁20时的升幅分别为0.52 m/a和0.37 m/a,低于8时的升幅(3.46 m/a和2.76 m/a),即温度较低的时段大气升温更为明显。1986—2006年大气0℃层高度与径流量的相关分析表明,托木尔峰周边水文站径流量与大气0℃层高度普遍表现为正相关,且冰川融水补给比重越高的地区往往表现出更高的相关系数,破城子、协合拉和西大桥水文站在8时的相关系数分别达到0.79、0.76、0.66($p<0.01$)。通过对 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 分辨率的地面气温格点资料与不同探空站大气0℃层高度的分析表明:0℃层高度与地面温度的相关性在高海拔山区表现得更好,夏季大气0℃层高度的变化可以通过高海拔地区冰冻圈(冰川、积雪与冻土)冻融过程对区域径流产生重要影响。

关键词:托木尔峰; 0℃层高度; 径流量; 地面气温

中图分类号: P427.2⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)01-0325-07

Variation of Free-Air 0℃ Isotherm Height over Tomur Peak in the Tianshan Mountain, Xinjiang Uygur Autonomous Region

QIANG Fang, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, DONG Lei, REN Zhengguo, ZHU Xiaofan

(College Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Based on monthly data in 2 radiosonde stations (Aksu and Yining) in summer during the period from 1986 to 2010 over south and north for Tomur Peak in Tianshan Mountain as well as runoff data in 14 hydrological stations during the period from 1986 to 2006, climate tendency rate and correlational analysis method were applied. Variation of free-air 0℃ isotherm height for twice a day (8:00 and 20:00 Beijing Time) in summer over south and north for Tomur Peak during the period from 1986 to 2010 was analyzed, as well as the response of runoff to free-air 0℃ isotherm height was examined. The result indicates that variation of free-air 0℃ isotherm height in summer over south and north for Tomur Peak during the period from 1986 to 2010 shows increase trend. Compared with the north, the increase trend in south of Tomur is significant, in which the linear tendency rate in south (Aksu) and north (Yining) are 1.99 m/a ($p>0.1$) and 1.56 m/a ($p>0.1$), respectively. The increase rate for Aksu and Yining at 20:00 (0.52 m/a and 0.37 m/a) is lower than that at 8:00 (3.46 m/a and 2.76 m/a), and the warming in colder condition is more significant than that in warmer condition which is consistent with surface meteorological observation. The correlation analysis between 0℃ isotherm height and runoff during the period from 1986 to 2006 shows positive correlation. The higher proportions of glacier melt supplement show higher correlation coefficients which are 0.79, 0.76 and 0.66, respectively, in three hydrologic stations (Pochengzi, Xiehela, and Xidaqiao) at 8:00, and are statistically significant at the 0.01 level. According to the $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ gridded temperature dataset and free-air 0℃ isotherm height in each radiosonde station, the correlation between free-air 0℃ isotherm height and surface temperature is better in high altitude mountainous area. The variation of free-air 0℃ isotherm height in summer modifies the processes of freezing and

thawing of cryosphere (glacier, snows and Permafrost) and influences on runoff.

Keywords: Tomur Peak; 0°C isotherm height; runoff; surface temperature

随着全球变暖,1951—2010年温室气体造成的全球平均地表增温为 $0.5\sim 1.3^{\circ}\text{C}$ ^[1],而干旱区气候对全球升温的响应则更为敏感^[2]。新疆地处亚欧大陆干旱腹地,大量事实表明自20世纪80年代中期至90年代初,这一区域的气候由暖干向暖湿转型,降水量有所增加^[3]。天山山脉横亘于新疆中部,是新疆重要的径流源区,在升温的背景下河流的年径流量呈增加趋势,尤其是冰川融水补给率较高的天山南坡西段托木尔峰地区更为明显^[4]。托木尔峰海拔7 435.3 m,为天山最高峰,该区域处于西风带内,大陆性气候显著,南北坡的气候差异明显^[5]。在托木尔峰地区,大规模的冰川呈散射状分布,孕育了阿克苏河等内陆河流,并为天山南坡西段提供了重要的水资源^[6]。20世纪90年代以后,托木尔峰南部地区气温持续升高,降水量较80年代略有减少,冰川消融的增加,使得依靠冰川融水补给的河流流量有所增加^[7]。

在对流层中,近地面大气温度会随着高度的增加而减小,当地面气温在 0°C 以上时高空中就会出现温度为 0°C 的等温层。大气 0°C 层高度是大气监测与气象预报工作中的一个重要指标,可以反映高空气团的环流变化,且较少受到地面摩擦层的影响,研究其变化能较好地反映当地区域气候变化特征^[8-12]。在高海拔区域,大气 0°C 层高度与冰川、积雪与冻土存在着显著的联系^[13-15],而 0°C 层高度对地面冻融过程的控制也表现在径流补给上。例如在天山北坡的乌鲁木齐河上游^[16-17]以及天山南坡的阿克苏河^[18]等都有日尺度响应过程的报道,可见寒区径流对大气 0°C 层高度的变化是十分敏感的。正是由于大气 0°C 层高度与山区径流存在着较好的线性关系,也有研究尝试利用前者对缺乏长期水文监测区域的径流量进行恢复重建工作,例如阿尔金山—昆仑山北坡的若羌河流域上游^[19]。从长时间尺度上讲,由于不同区域的径流产流机制各异,径流量对 0°C 层高度变化也存在敏感性差异^[20]。

以往探空资料与全球再分析资料的研究普遍发现,新疆天山南坡西段(尤其是托木尔峰地区)是夏季大气 0°C 层高度显著升高和不显著下降的过渡区域^[12,14]。其东部是大气 0°C 高度的显著升高区,而西部 0°C 高度则呈现出微弱的下降。伊宁探空站位于托木尔峰北坡,其高空探测起始于20世纪50年代,但位于南坡的阿克苏探空站从80年代才有长期连续的探空观测业务。因而早期关于这一区域的大气 0°C 层高度的变化趋势认识的研究是相对模糊的,在基于探空监测的全国或区域尺度的研究^[13,21]中往往不得不将该站点数据舍弃。此外,限于这一区域的干旱半干旱气候背景,近几十年来的升温对

该区域径流量产生了深远的影响,而关于大气 0°C 层高度与径流量的定量关系却因上述原因较少被涉及。此外,限于复杂地形等原因,稀疏的气象观测网也制约了山地气候研究的发展。因此,本文结合托木尔峰南北探空站与地面气象站的资料,分析其自1986年以来的大气 0°C 层高度的变化情况,并选取阿克苏河流域14个水文站分析 0°C 层高度与径流的相关性,此外还采用分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 的格点气温数据集分析大气 0°C 层高度与地面气温的关系,以用来分析讨论大气温度影响径流的过程。

1 数据与方法

1.1 数据来源

在新疆天山托木尔峰水平距离400 km范围内分布有2个国家探空站,即北坡的伊宁(81.2°E , 43.55°N , 662.5 m)和南坡的阿克苏(80.19°E , 41.09°N , 1 103.8 m),二者的大气探空业务都开展于1955年,但阿克苏的探空观测于1961年停止,直至1986年才恢复观测业务。因此,为了对比托木尔峰南北大气升温情况的区域差异,本文选取1986—2010年逐月北京时间20时和8时伊宁和阿克苏的探空资料(规定气压层400, 500, 700, 850 hPa的气温与位势高度)和地面气象资料(最高、最低与平均气温),并根据主要的产流期选取夏季(6—8月)进行计算。上述数据由中国气象局国家气象信息中心提供。

径流数据由冰雪冻土环境本底与可持续发展专题数据库提供。河流径流资料主要选用了阿克苏河水系、塔里木河水系和渭干河水系的14个水文站点1986—2006年的夏季径流量,包括西大桥合成站、协合拉站、多浪渠站、台兰站、契恰尔站、沙里桂兰克站、黑孜站、卡拉苏站、卡木鲁克站、兰干站、破城子站、托克逊站、拜城站、黑孜水库站,各水文站海拔为1 098~2 800 m。

为了对比大气 0°C 层高度与研究区地面气温的关系,本文选取中国气象局国家气象信息中心发布的空间分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 的中国地面逐月气温格点数据集(V2.0),并选取 $73.25^{\circ}\sim 85.75^{\circ}\text{E}$, $38.25^{\circ}\sim 45.75^{\circ}\text{N}$ 范围内的格点进行后续计算。对该数据的验证结果^[22]表明,该数据集与原始站点相关性较好,能较好反映空间差异,因此可以运用于本文的研究。

1.2 方法

1.2.1 大气 0°C 高度层计算 大气 0°C 层高度是对流层中低层的一个特性层,一般可以通过大气 0°C 等温面附近的规定气压层探空数据进行线性插值得到。在本研究中,首先分别判断出逐月逐时次的 0°C 层所在位置

的上下两个标准气压层(在400,500,700,850 hPa中选择),然后利用线性插值法分别计算出逐月逐时次大气0℃层高度。夏季大气0℃层高度即为6—8月不同时段大气0℃层高度的算术平均值,此外本文还分别统计了20时和8时的0℃层高度序列。利用规定层气温与位势高度计算大气0℃层高度的公式如下:

$$H_i = -T_k \frac{H_j - H_k}{T_j - T_k} + H_k \quad (1)$$

式中: H_i ——0℃层高度(m); H_j, H_k ——0℃层所在位置的上下两个规定气压层高度(m); T_j, T_k ——0℃层所在位置的上下两个标准气压层的温度(℃)。

1.2.2 其他方法 本研究利用线性趋势法计算各气象要素的气候倾向率,并运用相关分析法评估各探空站夏季0℃层高度与地面气温、径流资料的相关性,在ArcGIS 9.3软件中对相关的空间分布图等进行了绘制。

2 结果与分析

2.1 0℃层高度夏季变化趋势

图1为1986—2010年托木尔峰南北两个探空站不同时段夏季0℃层高度的变化趋势。从平均值(图1A)可以发现,南部的阿克苏夏季0℃层高度普遍高于北部伊宁的。其中,阿克苏0℃层高度为4300~4700 m,而伊宁则为4000~4200 m。在中国西部地区,大气0℃层高度的空间分布被认为受到纬度地带性与高海拔地块的综合影响^[13-14]。而在本研究区,托木尔峰南北两侧大气0℃层高度的明显差异主要反映了纬度的影响。阿克苏0℃层高度夏季最高值出现在1994年,最低值出现在1989年,伊宁最高值出现在1998年,最低值出现在2009年。托木尔峰南北在两个时段0℃层高度均表现为上升趋势,且阿克苏和伊宁两个探空站点的气候倾向率分别为1.99,1.56 m/a,但均未通过0.05水平的显著性检验。

从不同时段上来看,这种大气的升温幅度也是有差异的。夏季20时(图1B)托木尔峰南部大气0℃层高度位于4400~4800 m,北部位于4000~4400 m,两个探空站的0℃层高度均呈显著上升趋势,南部0℃层高度明显高于北部,阿克苏和伊宁的气候倾向率分别为1.99,1.56 m/a。夏季8时(图1C)南部地区0℃层高度位于4300~4700 m,北部高度位于3800~4200 m,其中阿克苏和伊宁两个探空站点的气候倾向率分别为3.46,2.76 m/a。

总体而言,在空间上看,南部的大气升温幅度比北部更为明显。而从时段上看,8时的升温幅度比20时大得多。近几十年来,包括新疆在内的全球绝大多数地区,日最低气温都呈现出比最高气温更为显著的升高趋势^[23-24]。图2A,3B分别反映了伊宁和阿克苏

在研究时段内日最高气温与最低气温的变化情况,显然夜间的升温幅度要高于日间的升温幅度。根据2013年夏季伊宁和阿克苏的日气温变化(图2C,3D),伊宁和阿克苏8时的日气温(17.0℃,18.4℃)要低于20时的气温(27℃,28.7℃)。这也印证了不同时段高空大气的升温趋势差异与地面气温呈现的差异是相辅相成的。

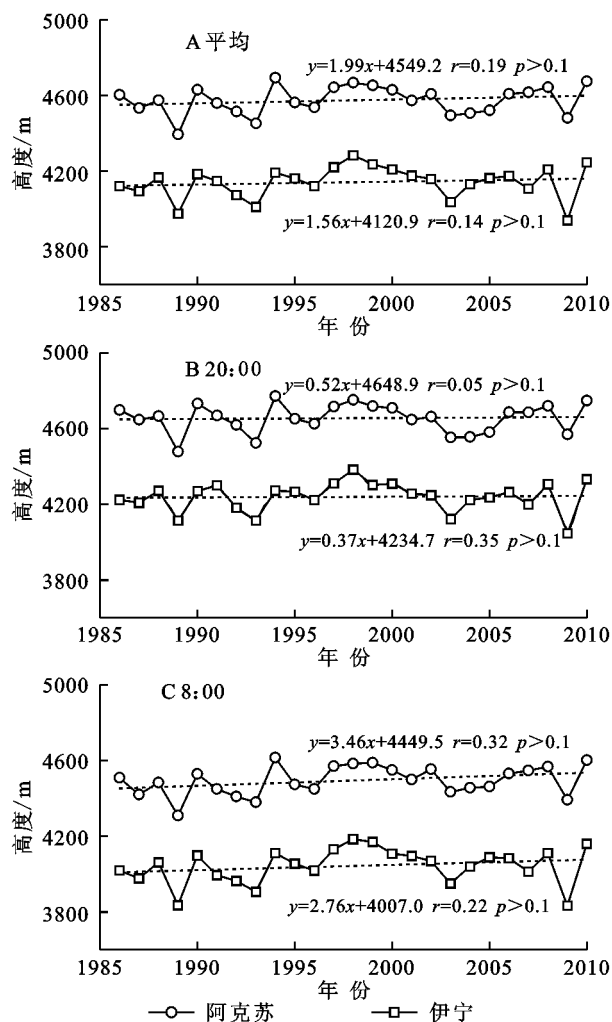


图1 1986—2010年托木尔峰南北不同时段夏季大气0℃层高度的变化情况

2.2 0℃层高度变化与径流的相关性

大气的升温,尤其是大气0℃层高度的升高,会对中国西部高海拔山区的水文过程产生直接的影响。托木尔峰地区蕴藏着丰富的水利资源,对于南部干旱地区的补给尤为重要,对南部干旱地区的农业发展和灌溉意义更加重要^[6-7],因此,本研究选取了托木尔峰南部14个水文站夏季径流量进行分析。从图3中可以看出,夏季径流与20时0℃层高度的相关系数在破城子站最高($r=0.80$),其次是协合拉站($r=0.57$),且都通过了0.01的显著性检验。而对于8时和日平均时段而言,破城子站径流量与大气0℃层高度的相关性最好($r=0.79, p<0.01; r=0.82, p<$

0.01),其次是协合拉站($r=0.76, p<0.01; r=0.68, p<0.01$)和西大桥站($r=0.66, p<0.01; r=0.54,$

$p<0.05$)。除此之外的部分站点并未表现出较好的相关性,且未通过显著性检验。

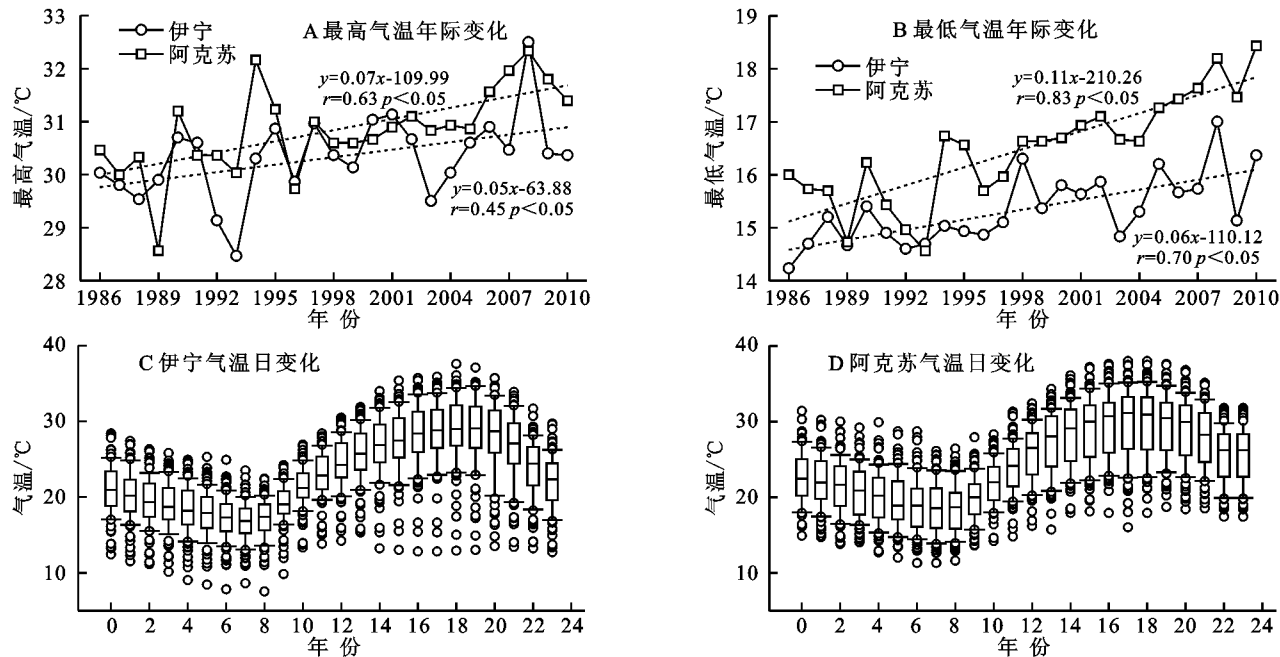
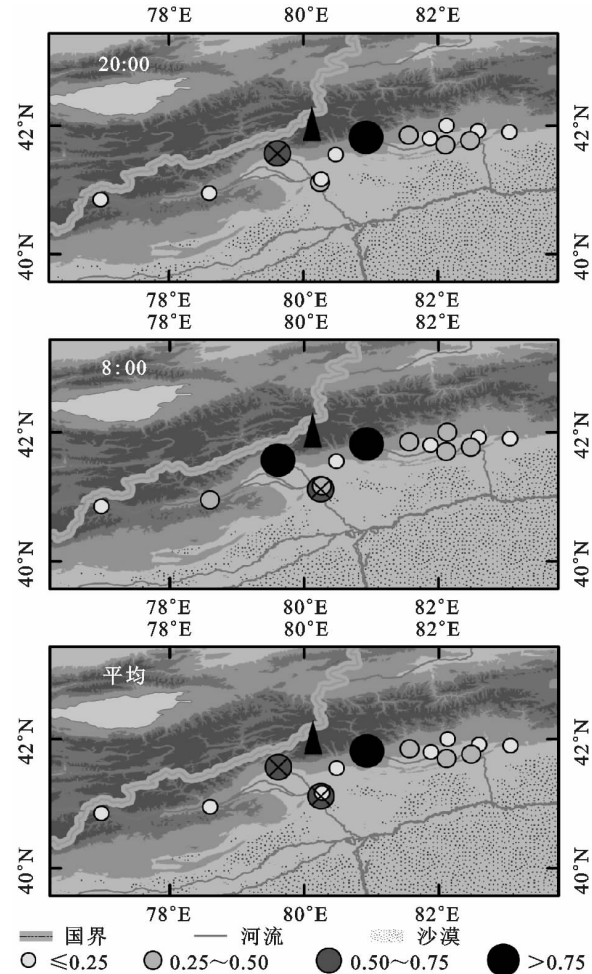


图 2 1986—2010 年托木尔峰南北地面气温夏季日平均最高气温和最低气温的年际变化以及 2013 年夏季地面气温的日变化

上述相关系数的空间差异显然与径流产生的过程有关,尤其是融水径流在河川径流中的比例可能起到了很大的作用。但是径流量对 0℃层高度变化的敏感性与冰川融水径流补给比重相关的事实证明,冰川规模的不同导致径流量对 0℃层高度变化的敏感性存在区域差异^[20],因此,这里对比冰川补给情况与 0℃层高度变化和径流的相关性也是相对的,我们根据杨针娘^[25]在该区域的研究,列出了典型水文站点的冰川径流组成(表 1)。对比冰川补给情况与 0℃层高度变化和径流的相关性可以发现,冰川融水补给比重越高,径流量和 0℃层高度的相关性也越好。其中西大桥站和协合拉站相关性最好,且冰川融水补给比重分别达到了 53.1%和 52.4%。而与之相反,兰干站点冰川补给率仅为 7.4%,因此大气 0℃层高度与径流量并没有表现出明显的相关性,甚至呈现出不显著的负相关。需要指出的是,虽然高海拔区域的冰川覆盖度普遍会比低海拔要高,但这种大气 0℃层高度与径流量的相关系数与水文断面的海拔高度并没有直接的联系。此外,8 时的相关性普遍要大于 20 时的相关性,这也反映了不同时段温度对冻融过程控制的差异。也就是说,相较于 20 时而言,8 时大气温度对径流的影响更为强烈。

此外,夏季不同月的 0℃层高度变化与径流的相关性也存在着差异(图 4)。以上文提及的相关性最好的协合拉水文站径流与 8 时阿克苏 0℃层高度序列的相关性为例,协合拉站 8 月和 7 月的径流量与大气 0℃层高度的相关性表现较好($r=0.84, p<0.05$;



注:×表示通过 0.05 水平的显著性检验。
图 3 1986—2006 年托木尔峰南部水文站点夏季平均径流量与阿克苏不同时段大气 0℃层高度的相关系数空间分布

$r=0.75, p<0.05$), 而 6 月的相关性较差($r=0.34, p>0.1$)。显然, 这种差异与 6 月的产流较少有很大的关系, 个别月份径流量甚至在 $100\text{ m}^3/\text{s}$ 以下。而相比之下, 径流较为充沛的时段, 大气 0°C 层高度则

与径流量表现出更好的相关性。这种径流量的季节差异可能与不同站点径流量多少也存在着类似的关系, 即径流量较少的水文站普遍与大气 0°C 层高度表现出较弱的相关性。

表 1 1986—2006 年托木尔峰南坡典型水文站的冰川补给情况以及阿克苏大气 0℃层高度和该水文站径流的相关系数								
水文 站点	流域 面积/ km^2	海拔/ m	冰川 覆盖度/%	河川径流量/ (10^8 m^3)	冰川融水 补给比重/%	相关系数		
						20:00	8:00	平均
卡木鲁克	1834	1480	16.29	5.83	57.6	0.33	0.41	0.38
西大桥	43123	1110	6.9	59.30	53.1	0.39	0.66**	0.54*
协合拉	12816	1427	7.39	45.40	52.4	0.57**	0.76**	0.68**
卡拉苏	1114	1541	5.89	2.13	34.6	0.15	0.31	0.24
沙里桂兰	19166	1909	3.46	26.50	26.5	-0.02	0.25	0.12
黑孜	3342	1320	1.26	4.30	11.1	-0.03	-0.003	-0.02
兰干	3118	1280	0.78	3.69	7.4	0.09	0.17	0.13

注: ** 表示通过了 0.01 的显著性检验, * 表示通过了 0.05 的显著性检验, 下表同。

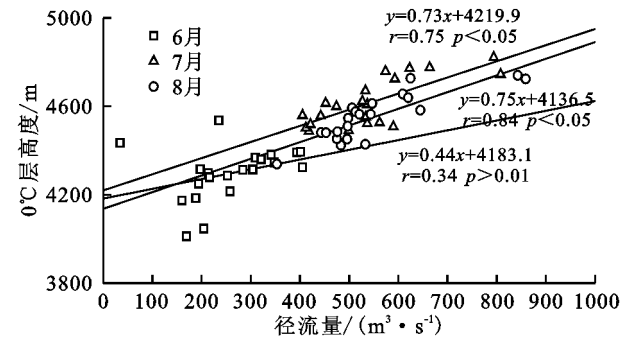


图 4 1986—2006 年夏季托木尔峰南坡协合拉水文站各月径流与 8 时阿克苏大气 0°C 层高度的关系

2.3 0°C 层高度与地面气温的相关性

前文已述, 径流与大气 0°C 层高度相关性的内在原因就是高海拔区域大气 0°C 层高度控制着近地面的冻融过程, 那么本节不妨尝试计算大气 0°C 层高度与地面气温的相关性是否存在与海拔相关的分布特点。首先, 这里对阿克苏和伊宁地面气温与大气 0°C 高度的关系进行分析。从表 2 来看, 阿克苏和伊宁不同时次的大气 0°C 高度与地面气温均表现出显著的正相关, 但在数值上存在一定的差异。阿克苏站夏季 8 时的大气 0°C 高度与最高气温($r=0.63$)、最低气温($r=0.62$)及夏季平均温度($r=0.63$)的相关性最好。在伊宁站, 夏季在 20 时的大气 0°C 高度与最高气温($r=0.52$)表现的相关性比 8 时($r=0.50$)更好, 但与最低气温、平均气温的相关性则仍为 8 时($r=0.61$)好于夏季平均温度($r=0.59$)。

当然, 上述关系仅根据阿克苏和伊宁站得到的结论, 并没有涉及到本研究尝试关注的高海拔区域。已有的研究发现, 在天山北坡的乌鲁木齐河流域大气 0°C 层高度与地面气温的相关性会随着海拔的升高而

升高^[14]。为了获得更好的空间覆盖度的地面气温资料, 本研究选取中国气象局国家气象信息中心发布的空间分辨率为 $0.5^\circ\times 0.5^\circ$ 的逐月格点气温数据, 分别对比其与阿克苏和伊宁的大气 0°C 层高度的相关系数。由图 5 可知, 在绝大部分区域表现为正相关。在伊宁站, 20 时在纬度为 $38.25^\circ\text{--}45.75^\circ\text{N}$ 范围内有 42% 的格点通过了 0.01 的显著性检验, 36% 的格点通过了 0.05 的显著性检验; 8 时有 87% 的格点通过了 0.01 的显著性检验, 13% 的格点通过了 0.05 的显著性检验; 78% 的格点逐月气温数据与夏季平均 0°C 层高度的相关性通过了 0.01 的显著性检验, 6% 的格点通过了 0.05 的显著性检验。而对阿克苏站而言, 20 时有 71% 的格点通过了 0.01 的显著性检验, 29% 的格点通过了 0.05 的显著性检验; 格点逐月气温数据与 20 时、夏季平均 0°C 层高度的相关性都很好, 且全部通过了显著性检验。

表 2 1986—2006 年夏季托木尔峰南北大气 0°C 层高度与地面气温的相关系数

站点	地面气温参数	20:00	8:00	平均
阿克苏	夏季最高气温	0.53**	0.63**	0.60**
	夏季最低气温	0.44*	0.62**	0.54**
	夏季平均气温	0.48*	0.63**	0.57**
伊宁	夏季最高气温	0.52**	0.50**	0.52**
	夏季最低气温	0.54*	0.61**	0.59**
	夏季平均气温	0.58**	0.61**	0.61**

总体来看, 阿克苏站和伊宁站的格点气温数据与夏季 0°C 层高度的相关性表现出这样的特征, 即 8 时的相关性好于 20 时, 阿克苏站的相关性好于伊宁站。值得注意的是, 图 5 中相关性较高的区域与天山山区

表现出了较好的对应性,与天山山区的山廓线基本吻合。也就是说,在高海拔区域,邻近站点测得的大气 0°C 层高度与山区气温表现出更好的相关性。从图5

中也不难发现,在海拔相对较低的伊犁河谷恰为二者相关系数的低值区,这种区域特征对于高海拔缺乏器测资料区域气候变化的评估也有重要意义。

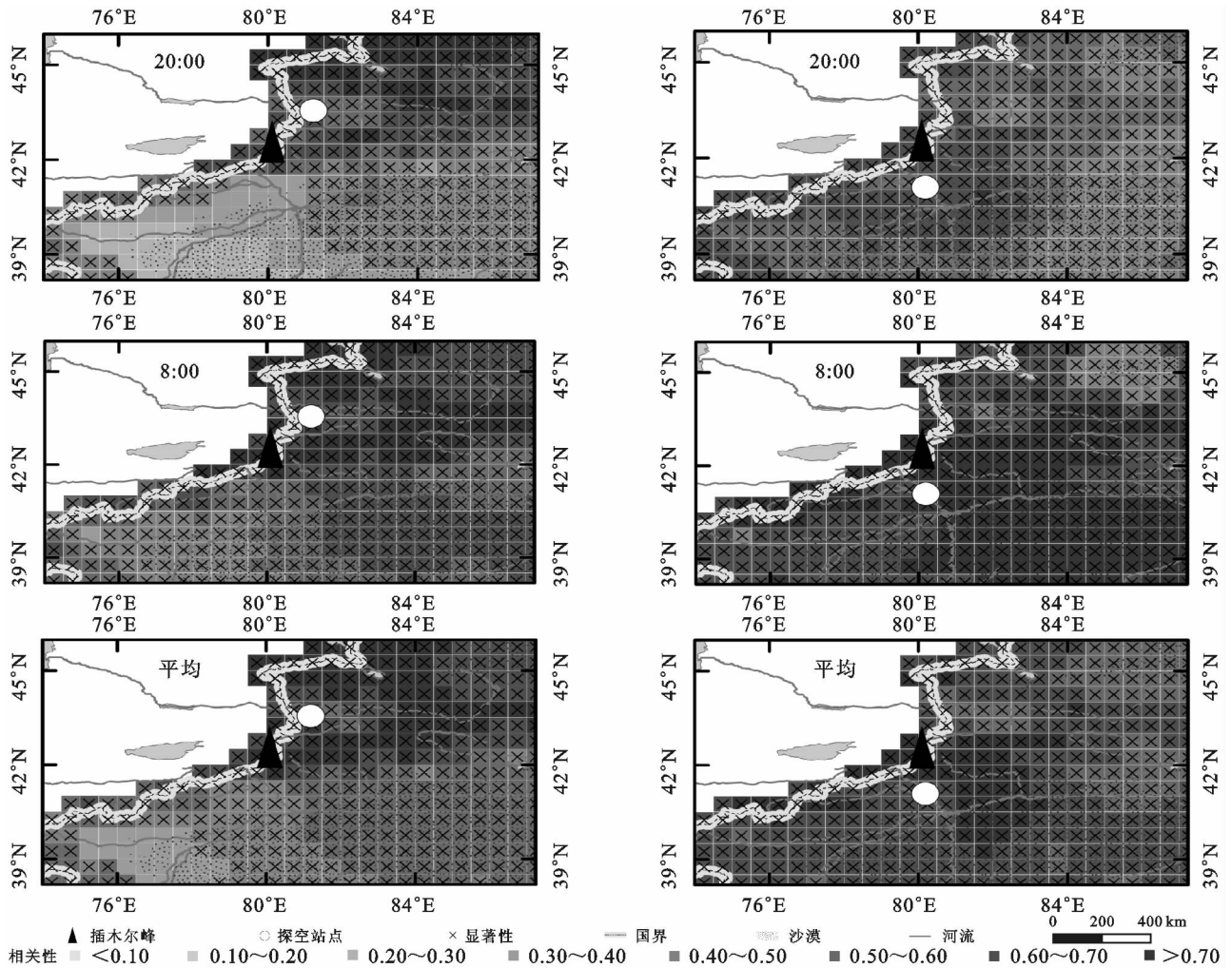


图5 1986—2010年夏季托木尔峰南北不同时段大气 0°C 层高度与格点气温数据的相关系数空间分布

3 结论

(1) 托木尔峰南北两个探空站 1986—2010 年不同时段夏季 0°C 层高度总体均表现为上升趋势,且阿克苏和伊宁两个探空站点的气候倾向率分别为1.99, 1.56 m/a,但均未通过 0.05 水平的显著性检验。夏季 20 时两个探空站的 0°C 层高度均呈显著上升趋势,南部 0°C 层高度明显高于北部,阿克苏和伊宁的气候倾向率分别为 1.99, 1.56 m/a。夏季 8 时阿克苏和伊宁两个探空站点的气候倾向率分别为 3.46, 2.76 m/a。从时段上看,8 时的升温幅度比 20 时大得多,两个站点日最高气温与最低气温的变化表明夜间的升温幅度要高于日间的升温幅度。

(2) 阿克苏河流域的 14 个水文站点 1986—2006 年夏季平均径流与 20 时和 8 时两个不同时段,夏季平均的 0°C 层高度分别进行相关性分析表明,空间差

异与径流产生的过程有关,尤其是融水径流在河川径流中的比例可能起到了很大的作用,冰川融水补给比重越高,径流量和 0°C 层高度的相关性也越好,不同时段温度对冻融过程控制有所差异。而相较于 20 时而言,8 时大气温度对径流的影响更为强烈。此外,夏季不同月的 0°C 层高度变化与径流的相关性表现为,径流较为充沛的时段,大气 0°C 层高度则与径流量表现出更好的相关性,径流量较少的水文站普遍与大气 0°C 层高度表现出较弱的相关性。

(3) 阿克苏和伊宁不同时段的大气 0°C 高度与地面气温均表现出显著的正相关,但在数值上存在一定的差异,阿克苏站和伊宁站的格点逐月气温数据与夏季 20 时与 8 时的 0°C 层高度的相关性相比,8 时的相关性好于 20 时,且阿克苏站的相关性好于伊宁站。在高海拔区域,邻近站点的大气 0°C 层高度与山区气温可以表现出更好的相关性。

参考文献:

- [1] Qin D, Plattner G K, Tignor M, et al. Climate change 2013: The physical science basis[M]. Cambridge, UK, and New York: Cambridge University Press, 2014.
- [2] Li B, Chen Y, Shi X. Why does the temperature rise faster in the arid region of northwest China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984—2012), 2012, 117(D16), 1-7.
- [3] Shi Y, Shen Y, Kang E, et al. Recent and future climate change in northwest China[J]. Climatic Change, 2007, 80(3/4): 379-393.
- [4] Kong Y, Pang Z. Evaluating the sensitivity of glacier rivers to climate change based on hydrograph separation of discharge[J]. Journal of Hydrology, 2012, 434: 121-129.
- [5] 中国科学院登山考察队. 天山托木尔峰地区的冰川与气象[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1985.
- [6] 谢昌卫, 丁永建, 刘时银, 等. 托木尔峰南坡冰川水文特征及其对径流的影响分析[J]. 干旱区地理, 2004, 27(4): 570-575.
- [7] 王建, 丁永建, 刘时银, 等. 近40 a来托木尔峰南部地区气候及水文环境变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(2): 118-123.
- [8] Diaz H F, Eischeid J K, Duncan C, et al. Variability of freezing levels, melting season indicators, and snow cover for selected high-elevation and continental regions in the last 50 years[J]. Climatic Change, 2003, 59(1/2): 33-52.
- [9] Folkins I. The melting level stability anomaly in the tropics[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(3): 1167-1176.
- [10] Zhang G, Sun S, Ma Y, et al. The response of annual runoff to the height change of the summertime 0℃ level over Xinjiang[J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(6): 833-847.
- [11] Zhang M, Dong L, Wang S, et al. Increasing free-air 0℃ isotherm height in Southwest China from 1960 to 2010[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(5): 833-844.
- [12] Huang X, Wang S, Wang J, et al. Spatio-temporal changes in free-air freezing level heights in Northwest China, 1960—2012 [J]. Quaternary International, 2013, 313: 130-136.
- [13] Zhang Y, Guo Y. Variability of atmospheric freezing-level height and its impact on the cryosphere in China [J]. Annals of Glaciology, 2011, 52(58): 81-88.
- [14] Wang S, Zhang M, Pepin N C, et al. Recent changes in freezing level heights in High Asia and their impact on glacier changes [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(4): 1753-1765.
- [15] Bradley R S, Keimig F T, Diaz H F, et al. Recent changes in freezing level heights in the Tropics with implications for the deglaciation of high mountain regions[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(17): 367-389.
- [16] 宫恒瑞, 石玉, 冯志敏. 春季融雪期0℃层高度与乌鲁木齐河径流量的关系[J]. 干旱区研究, 2010, 27(1): 69-74.
- [17] 潘淑坤, 张明军, 王圣杰, 等. 天山乌鲁木齐河源区夏季径流量与0℃层高度的关系[J]. 资源科学, 2012, 34(8): 1565-1573.
- [18] 毛炜峰, 吴钧, 陈春艳. 0℃层高度与夏季阿克苏河洪水的关系[J]. 冰川冻土, 2004, 26(6): 697-704.
- [19] 秦艳, 刘志辉, 陆智, 等. 利用夏季0℃层高度推求无资料地区河流年径流序列: 以若羌河为例[J]. 干旱区地理, 2011, 34(2): 278-283.
- [20] Chen Z S, Chen Y N, Li W H. Response of runoff to change of atmospheric 0℃ level height in summer in arid region of Northwest China [J]. Science China Earth Sciences, 2012, 55(9): 1533-1544.
- [21] Zhang M, Wang S, Li Z, et al. Glacier area shrinkage in China and its climatic background during the past half century [J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(1): 15-28.
- [22] 国家气象信息中心. 中国地面气温月值0.5°×0.5°格点数据集(V2.0)评估报告[R]. 北京: 国家气象信息中心, 2012.
- [23] Zhai P, Pan X. Trends in temperature extremes during 1951—1999 in China [J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(17): 169-172.
- [24] Deng H, Chen Y, Shi X, et al. Dynamics of temperature and precipitation extremes and their spatial variation in the arid region of northwest China [J]. Atmospheric Research, 2014, 138(3): 346-355.
- [25] 杨针娘. 中国冰川水资源[M]. 兰州: 甘肃科学出版社, 1991.