

1981-2014年西藏各时次气温的变化趋势分析

杜 军^{1,2}, 马鹏飞², 潘 多³

(1. 中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610071; 2. 西藏自治区气候中心, 拉萨 850001;
3. 拉萨市气象局, 拉萨 850001)

摘要: 利用西藏自治区38个气象站点1981-2014年逐日02:00、08:00、14:00和20:00北京时4个时次气温数据, 采用线性回归、Mann-Kendall非参数检验等方法, 分析了近34年来西藏时次气温变化的时空分布、突变特征, 并探讨了气温变化率与经纬度、海拔高度之间的关系。结果表明: 近34年西藏四季各时次气温表现一致的升高趋势, 升温率为0.14~0.80 °C/10a, 以冬季升温最为显著。在各时次中, 除夏季08时升温率大之外, 其他三季均以14时升温率最大。各站年时次气温最大升温率为0.36~0.94 °C/10a ($P < 0.001$), 只有32%的站点出现在08时, 主要分布在昌都市大部、阿里地区大部以及那曲、拉萨、日喀则等站点, 其余站点都出现在14时。春、秋季时次气温升温率与经度有关, 西部大于东部; 冬季时次气温升温最大区域主要在高海拔和纬度较高地区, 夏季气温升幅最大区域位于较高纬度。20世纪80年代四季和年各时次气温均为负距平, 而21世纪最初的10年各时次气温一年四季都为正距平。在时间转折上, 34年来西藏年、季绝大部分时次的气温都发生了气候突变, 夏季4个时次气温突变时间都发生在21世纪最初的10年; 冬季02时和08时气温突变点发生20世纪90年代末, 14时和20时气温的突变点却出现在21世纪最初的10年。影响西藏高原气温变化的因素有很多, 主要包括地形、高原内部气象要素以及外部环流影响等。

关键词: 时次气温; 变化趋势; 时空分布; 西藏

DOI: 10.11821/dlxb201603006

1 引言

IPCC第5次评估报告指出, 过去30年, 每10年全球地表温度的增暖幅度高于1850年以来的任何时期。在北半球, 1983-2012年可能是最近1400年来气温最高的30年, 21世纪的第1个10年是最暖的10年^[1]。中国近百年来气温上升了0.4~0.5 °C, 1951年以来气温明显升高, 冬季增温更加明显, 从1986/1987年冬季开始, 已连续经历了19个暖冬^[2]。

“世界第三极”青藏高原作为中国气候变化的“启动区”^[3]和全球气候变化的“放大器”^[4], 其独特的地形、热力和动力强迫作用对东亚、南亚地区乃至全球的气候变化均有重大影响^[5-10]。正是青藏高原在全球气候变化中拥有特殊地位, 科学家对青藏高原及西藏气温变化方面进行了大量的研究, 研究表明近50年来高原的气温倾向率达到0.37 °C/10a, 远高于全国的增温率(0.16 °C/10a)^[11], 且研究时段距今越近, 气温倾向率越大, 表明近期增暖更为明显^[12-20]。高原的气温变化也存在季节性差异, 四季气温普遍上升, 且冬、春

收稿日期: 2015-09-24; 修订日期: 2015-12-29

基金项目: 国家科技部公益性行业科研专项(GYHY201306029); 中国气象局气候变化专项(CCSF201333) [Foundation: Public Welfare Industry Special Item of National Science Technology Department, No.GYHY201306029; The Climatic Change Research Item of the China Meteorological Administration, No.CCSF201333]

作者简介: 杜军(1969-), 男, 贵州绥阳人, 正研高级工程师, 主要从事青藏高原气候变化和农业气候研究。

E-mail: dujun0891@163.com

季增暖最为显著^[16, 18, 21-22], 尤其是在高海拔地区^[15, 23]。这些研究主要侧重于月、季和年尺度上的平均气温变化, 而针对时次气温变化的研究却鲜有报道。为此, 本文基于1981-2014年西藏38个气象站逐日02:00、08:00、14:00和20:00北京时4个时次气温资料, 分析了近34年来西藏时次气温变化的时空分布特征, 并浅析了影响高原气温变化的因素, 这对研究青藏高原环境的演变以及制定气候变化影响的对策等方面具有现实意义。

2 资料与方法

选用西藏38个气象站点(图1)1981-2014年逐日02:00、08:00、14:00和20:00(北京时, 下同)4个时次气温、总云量资料和2009-2013年38个气象自动站逐小时的气温资料。环流特征指数采用国家气候中心提供的74项环流指数(1981-2014年)中亚洲极涡指数、西太平洋副热带高压、印缅槽以及西藏高原指数。

通过算术平均法建立了西藏四季(上年12月至翌年2月为冬季, 3-5月为春季, 6-8月为夏季, 9-11月为秋季)和年4个时次气温序列, 多年平均值为1981-2000年平均值。

在分析时次气温变化趋势时, 选用线性方程对序列变量进行拟合, 对于变化趋势的显著性, 采用时间 t 与原序列变量 y 之间的相关系数进行不同程度的显著性检验($P < 0.05$, $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$), 并采用Mann-Kendall (M-K)法^[24]对各时次气温进行突变检验。

3 时次气温的时空变化

3.1 气温的日变化

通过分析2009-2013年西藏38个自动站不同季节逐小时气温的变化(图2), 西藏日最低气温出现时间在季节差异较为明显, 春季45%的站点出现在07时, 主要分布于那曲地区、昌都市和林芝市, 其余站点出现在08时; 夏季有82%的站点出现在07时, 而阿里地区、那曲地区西部和日喀则市西部等地出现在08时; 秋季95%的站点出现在08时, 5%的站点(狮泉河、普兰)出现在09时, 而冬季与秋季相反, 有95%的站点出现09时, 5%的站点(芒康、左贡)出现在08时。

各站点日最高气温出现时间较为分散, 但主要位于16-17时。春季74%的站点出现在16-17时, 最早是聂拉木, 出现在13时; 最晚是阿里地区, 为18时。夏季79%的站点日最高气温出现在16-17时, 2个站(聂拉木、错那)出现在14时, 最晚仍是阿里地区, 为18时, 剩余的4个站均出现于15时。秋季84%的站点日气温最大值出现在16-17时, 最早和最晚出现的时间和站点与春季相同。冬季日最高气温出现在16-17时的站点数占87%, 以17时居多; 聂拉木出现时间仍较早, 为14时, 而阿里地区出现时间较晚, 在18时。

总之, 西藏绝大部分站点近地面气温在16-17时出现最高值, 日出前后07-09时出现

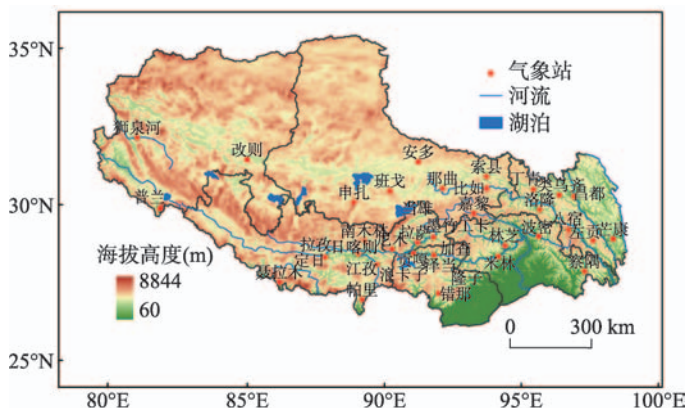


图1 西藏38个气象站点及海拔高度分布

Fig. 1 Map showing the location of the 38 meteorological stations and altitude over Tibet

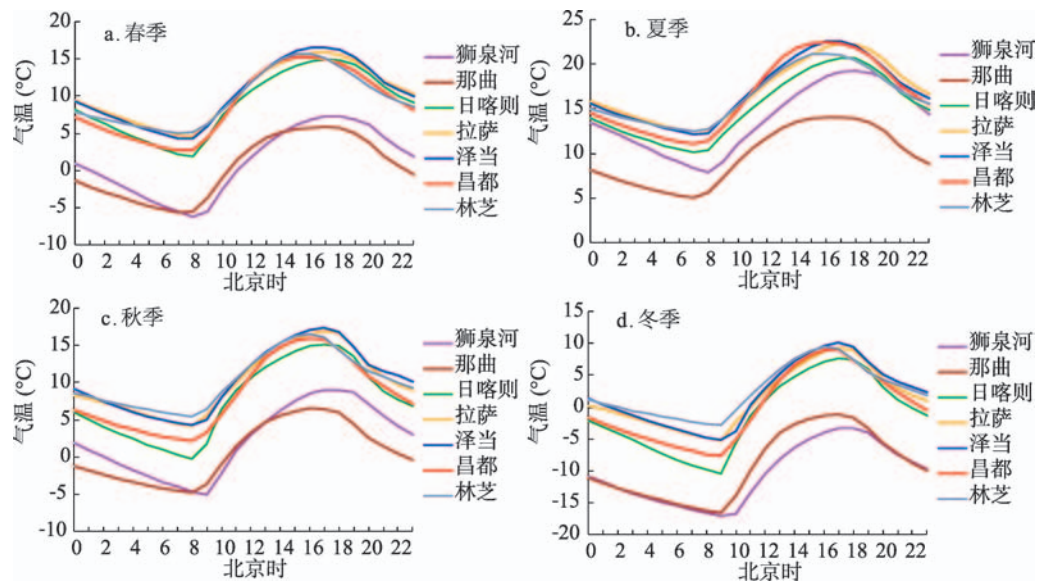


图2 西藏代表站气温日变化特征

Fig. 2 Diurnal temperature changes at the representative stations of Tibet

最低值，冬季最低值出现较晚。阿里地区日气温最高值出现在18时，而聂拉木站却出现较早，为13时或14时，究其原因主要与地形、局地小气候有关。

3.2 时次气温的年际和年代际变化

根据1981-2014年西藏4个时次(02、08、14和20时)四季和年气温的变化趋势(表1)分析，近34年西藏四季4个时次气温均表现一致的升高趋势，升温率为0.14~0.80℃/10a(除夏季20时外都通过了0.05以上的显著性检验水平)，以冬季升温最为明显。在各时次中，除夏季08时气温升温率大外，其他三季均以14时气温升温率最大，这说明西藏升温主要表现在白天。就年平均而言，西藏4个时次气温以0.32~0.52℃/10a的速率呈显著的升高趋势(图3， $P < 0.001$)，其中14时气温升温率最大，其次是08时，20时气温升温率最小。

从西藏1981-2010年4个时次(02、08、14和20时)四季和年气温的10年际变化分析来看(表2)，20世纪80年代四季和年各时次气温均为负距平，90年代除冬季各时次气温仍为负距平外，其他三季和年气温正常；进入到21世纪最初的10年，各时次气温在一年四季上均表现为正距平，尤其是冬季，气温偏高1.0~1.2℃，以14时最为明显。

3.3 时次气温的突变检验

通过M-K检验结果表明，近34年(1981-2014)西藏年、季绝大部分时次的气温都发生了气候突变(表3)，秋季02时和08时气温突变发生的最早，出现在20世纪80年代后期，14时和20时气温突变点在90年代；夏季4个时次气温突变时间都发生在21世纪最初的10年；冬季02时和08时气温突变点发生20世纪90年代末，14时和20时气温的突变点却出现在21世纪最初的10年；春季只是08时和14时气温发生了突变，出现在21世纪初。从年平均来看，除14时气温突变点发生在21世纪初外，其他3个时次均在1996

表1 1981-2014年西藏4个时次四季气温的变化趋势
Tab. 1 Linear trend of seasonal temperature at 02:00, 08:00, 14:00 and 20:00 Beijing time (BJT) over Tibet during 1981-2014

时次	冬季	春季	夏季	秋季	年
02时	0.56***	0.33***	0.28***	0.32**	0.38**
08时	0.53***	0.42***	0.43***	0.38***	0.45***
14时	0.80***	0.48***	0.31**	0.43***	0.52***
20时	0.55***	0.32***	0.14	0.23**	0.32***

注：*： $P < 0.05$ ；**： $P < 0.01$ ；***： $P < 0.001$ 。

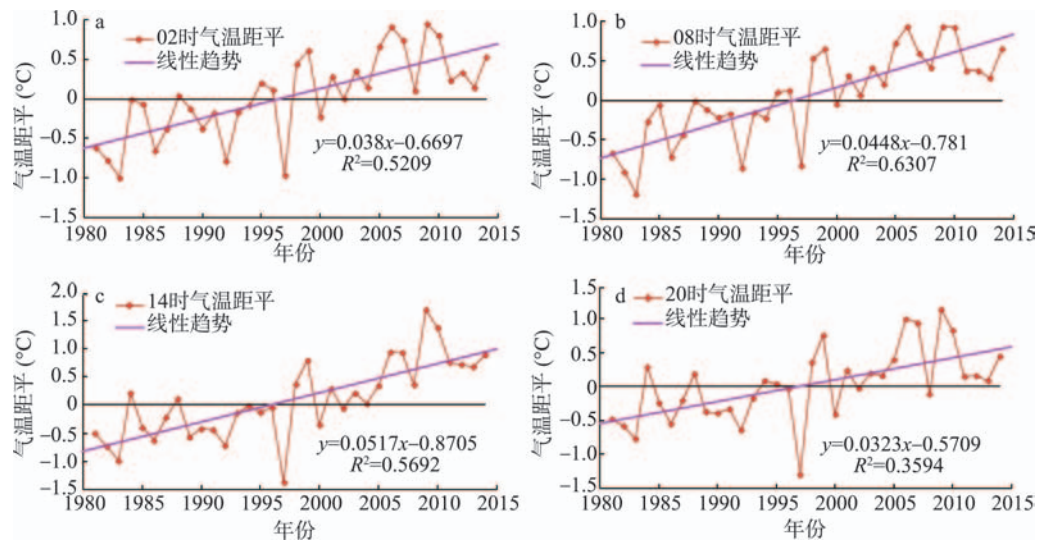


图3 1981-2014年西藏年平均4个时次气温的变化趋势

Fig. 3 Variations of annual temperature at 02:00, 08:00, 14:00 and 20:00 BJT over Tibet in 1981-2014

年前后发生了突变。

总之，西藏绝大部分时次气温在20世纪90年代中期以后有明显的气候突变，从一个相对偏冷期跃变为一个相对偏暖期，且气温的上升趋势均超过 $\alpha = 0.05$ 临界线，表明西藏各时次气温的突变是十分显著的。

3.4 时次气温变化趋势的空间分布

从年各时次气温变化趋势的空间分布来看，各站时次气温均表现出一致的升高趋势，02时升温率为0.02~0.74℃/10a（95%站点 $P < 0.05$ ），08时升温率为0.06~0.94℃/10a（99%站点 $P < 0.05$ ），14时升温率为0.31~0.89℃/10a（所有站点 $P < 0.001$ ），20时升温率为0.09~0.50℃/10a（92%站点 $P < 0.05$ ）。各站最大升温率为0.36~0.94℃/10a（图4， $P < 0.001$ ），以改则最大、察隅和昌都最小，其中只有32%的站点出现在08时，主要分布于昌都市大部、阿里地区大部以及那曲、拉萨、日喀则等站，其余站点都出现在14时。

就四季各时次气温变化趋势的地域分布而言，冬季02时升温率为

表2 1981-2010年西藏4个时次四季和年气温距平的年代际变化

Tab. 2 The decadal change of annual, seasonal temperature anomaly at 02:00, 08:00, 14:00 and 20:00 BJT over Tibet in 1981-2010

季节	年代	02时	08时	14时	20时
冬季	1981-1990	-0.5	-0.5	-0.6	-0.4
	1991-2000	-0.4	-0.3	-0.6	-0.6
	2001-2010	0.9	0.8	1.2	1.0
春季	1981-1990	-0.5	-0.5	-0.6	-0.5
	1991-2000	0.1	0.0	0.1	0.1
	2001-2010	0.4	0.5	0.5	0.4
夏季	1981-1990	-0.2	-0.4	-0.1	0.0
	1991-2000	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2
	2001-2010	0.3	0.5	0.3	0.2
秋季	1981-1990	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3
	1991-2000	0.0	0.1	-0.1	0.0
	2001-2010	0.4	0.4	0.5	0.4
年	1981-1990	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3
	1991-2000	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2
	2001-2010	0.5	0.6	0.6	0.5

表3 1981-2014年西藏年、季各时次气温的突变年份

Tab. 3 Abrupt year of annual and seasonal temperature anomaly at 02:00, 08:00, 14:00 and 20:00 BJT over Tibet in 1981-2014

季节	02时	08时	14时	20时
冬季	1999	1998	2004	2001
春季	/	2002	2001	/
夏季	2002	2002	2006	2005
秋季	1989	1987	1998	1994
年	1996	1995	2001	1997

注：/：表示无突变。

0.11~1.14 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (89% 站点 $P < 0.05$); 08 时除隆子为降温趋势外 ($-0.07\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$), 其他各站均表现为升高趋势, 升幅为 0.10~1.25 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (87% 站点 $P < 0.05$); 14 时和 20 时升温率分别为 0.39~1.37 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (所有站点 $P < 0.05$) 和为 0.33~1.09 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (89% 站点 $P < 0.05$)。各站最大升温率为 0.53~1.37 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (图 5a, $P < 0.001$), 以索县升幅最大, 其中班戈、拉萨、江孜和芒康 4 个站出现在 02 时, 阿里地区大部出现在 08 时, 嘉黎和察隅出现 20 时, 其余站点都出现在 14 时。

春季各站时次气温都呈现为上升趋势, 02 时升温率为 0.10~0.66 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (73% 站点 $P < 0.05$), 08 时升温率为 0.19~0.87 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (92% 站点 $P < 0.05$), 14 时升温率为 0.27~0.87 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (89% 站点 $P < 0.05$), 20 时升温率为 0.17~0.68 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (42% 站点 $P < 0.05$)。各站最大升温率为 0.31~0.87 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (图 5b, 97% 站点 $P < 0.001$), 以拉萨和墨竹工卡升幅最大; 其中那曲、帕里站出现在 02 时, 狮泉河出

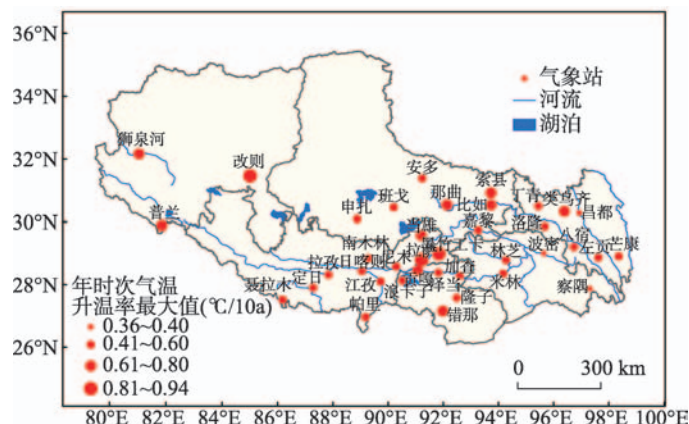


图 4 1981-2014 年西藏年时次气温最大升温率的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the maximum warming rate of annual air temperature at times over Tibet during 1981-2014

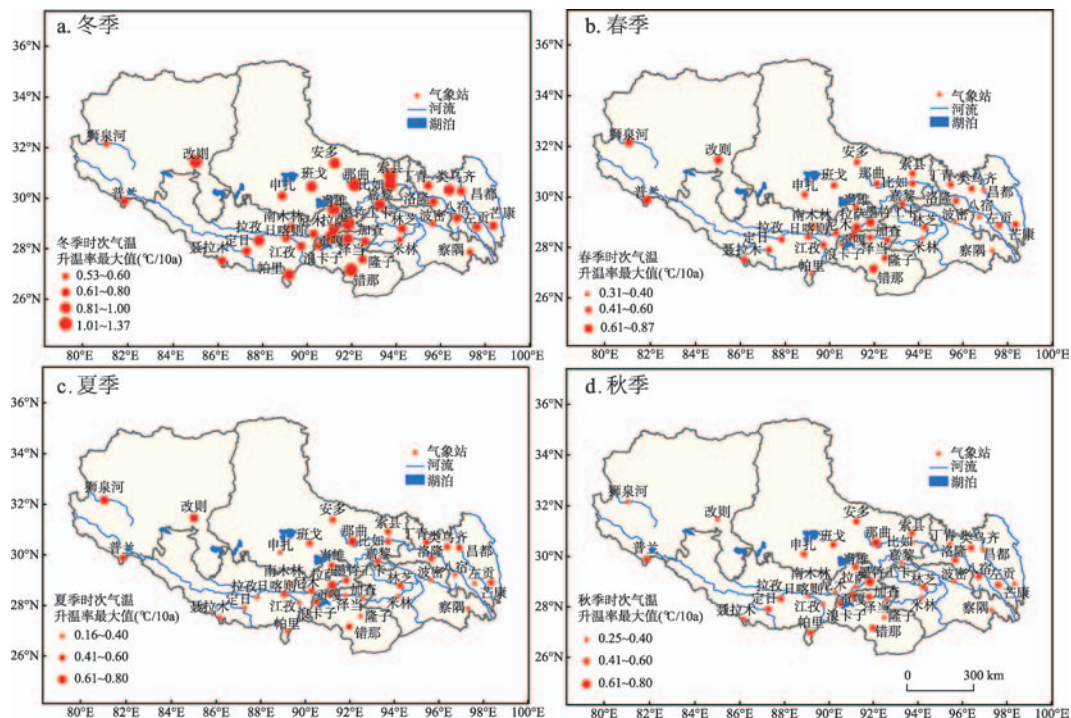


图 5 1981-2014 年西藏四季时次气温最大升温率的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the maximum warming rate of seasonal air temperature at times over Tibet during 1981-2014

现在20时, 改则、拉孜、日喀则和拉萨等12个站点出现在08时, 其余23个站点出现在14时。

夏季02时气温除贡嘎为降温趋势外 ($-0.08\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$), 其余站点为上升趋势, 升温率为 $0.03\sim 0.58\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (78%站点 $P < 0.05$); 08时和14时各站都表现为升高趋势, 升温率分别为 $0.08\sim 0.80\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (95%站点 $P < 0.05$) 和 $0.09\sim 0.56\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (63%站点 $P < 0.05$)。20时南木林、贡嘎和墨竹工卡3个站气温趋于下降, 为 $-0.04\sim -0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$; 其他各站为升温趋势, 升温率为 $0.03\sim 0.40\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (仅有26%站点 $P < 0.05$)。各站最大升温率为 $0.16\sim 0.80\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (图5c, 97%站点 $P < 0.01$), 以改则升幅最大、南木林最小; 其中贡嘎和墨竹工卡站出现在14时, 其余站点发生在08时。

秋季02时气温在贡嘎和隆子站点上表现为降温趋势 ($-0.01\sim -0.16\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 贡嘎降幅最大), 其余站点为上升趋势, 升温率为 $0.05\sim 0.84\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (74%站点 $P < 0.05$); 08时气温仍在贡嘎和隆子站点上表现为降温趋势 ($-0.04\sim -0.14\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 贡嘎降幅最大), 其余站点呈上升趋势, 升温率为 $0.04\sim 0.89\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (84%站点 $P < 0.05$); 14时各站气温都趋于上升, 升幅为 $0.15\sim 0.79\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (84%站点 $P < 0.05$); 20时南木林、贡嘎2个站气温趋于下降 ($-0.03\sim -0.32\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 贡嘎降幅最大且通过0.05显著性检验水平), 其他各站升温率为 $0.07\sim 0.47\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (42%站点 $P < 0.05$)。各站最大升温率为 $0.25\sim 0.89\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (图5d, $P < 0.05$), 以拉萨升幅最大、类乌齐最小; 其中阿里地区、那曲地区大部、昌都市大部、拉萨和日喀则等地出现在08时, 其余22个站点出现在08时。对于全区四季时次气温最大升温率出现时间来说, 夏季为 $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 出现在08时; 其他三季均出现在14时, 冬季、春季和秋季升温率分别 $0.80\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.47\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.43\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 以冬季增温最明显, 其次是春季。

4 时次气温变化的影响因素

4.1 地形影响

通过计算西藏38个站时次气温变化趋势与地理参数(海拔高度、经纬度)的相关系数(表4), 总体来看冬季时次气温的变化率与经度关系不密切, 与海拔高度和纬度呈显著的正相关 ($P < 0.05$), 即纬度平均每增加 1°N , 气温升温率增加 $0.04\sim 0.11\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 以08时最大(图6a); 海拔高度每上升100 m, 气温升温率增大 $0.01\sim 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。春季时次气温变化率只与经度呈显著的负相关 ($P < 0.01$), 也就是说经度每增加 10°E , 气温升温率降低 $0.09\sim 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 以20时最明显(图6b)。夏季时次气温升温率与纬度呈显著的正相关 ($P < 0.01$), 纬度每增加 1°N , 气温升温率增加 $0.03\sim 0.08\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 以08时最大(图6c)。在秋季, 02时和08时气温的升温率与经度呈负相关 ($P < 0.05$),

表4 西藏时次气温变化趋势与海拔高度、经纬度的相关系数

Tab. 4 Correlation coefficients between linear trend of annual and seasonal temperature anomaly at 02:00, 08:00, 14:00 and 20:00 BJT and geographical location (such as longitude, latitude and altitude) over Tibet

季节	地理参数	02时	08时	14时	20时
冬季	经度	-0.03	-0.09	-0.06	0.07
	纬度	0.53***	0.54***	0.27	0.51***
	海拔高度	0.46**	0.42**	0.39*	0.43***
春季	经度	-0.46**	-0.27	-0.43**	-0.62***
	纬度	0.14	0.07	0.27	0.21
	海拔高度	0.24	0.21	0.21	0.16
夏季	经度	-0.11	-0.17	-0.13	-0.03
	纬度	0.51**	0.61***	0.46**	0.20
	海拔高度	0.21	0.36*	0.08	0.03
秋季	经度	-0.35*	-0.36*	-0.45**	-0.24
	纬度	0.43**	0.49**	0.08	0.27
	海拔高度	0.31	0.39*	0.28	0.22
年	经度	-0.26	-0.25	-0.30	-0.27
	纬度	0.49**	0.49**	0.32	0.40
	海拔高度	0.38*	0.41*	0.36*	0.37*

注: *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$ 。

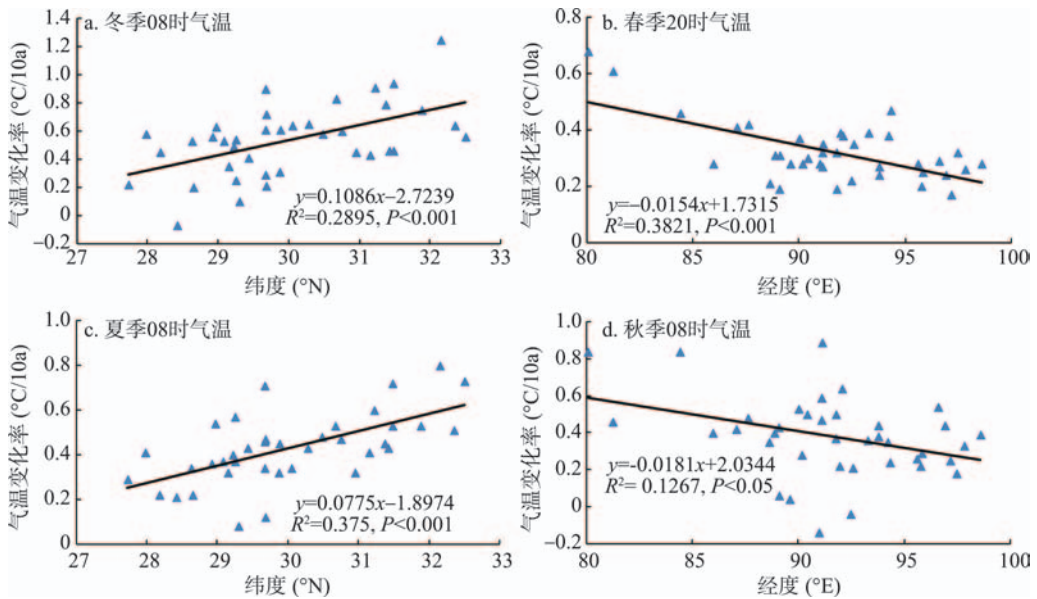


图6 西藏时次气温变化率与纬度、经度的散点图

Fig. 6 The relationship between the trend magnitudes of air temperature at 08:00 and 20:00 BJT and latitude, longitude over Tibet

与纬度呈正相关 ($P < 0.01$), 而 14 时气温的升温率仅与经度呈负相关 ($P < 0.01$), 即经度每增加 10°E , 时次气温升温率降低 $0.13 \sim 0.18^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 以 08 时降幅最大 (图 6d); 纬度每增加 1°N , 时次气温升温率分别增加 $0.06^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.08^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。就年平均而言, 各时次气温升温率与海拔高度呈显著的正相关 ($P < 0.05$), 此外 02 时和 08 时气温升温率还与纬度呈显著的正相关关系 ($P < 0.01$), 即海拔高度每上升 100 m , 时次气温的升温率增加 $0.005 \sim 0.01^{\circ}\text{C}/10\text{a}$; 纬度平均每增加 1°N , 02 时和 08 时气温的升温率分别增加 $0.06^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.07^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

综上所述, 西藏春季和秋季时次气温升温率主要与经度有关, 西部升温率大于东部; 冬季时次气温升温最大区域主要表现在高海拔和纬度较高地区, 夏季气温升幅最大区域主要位于较高纬度, 而年时次气温升温最大区域也表现在高海拔和纬度较高地区, 纬度的影响大于海拔高度。

4.2 气象要素影响

高原上气候类型十分复杂, 影响气温变化的因子众多, 与太阳辐射密切相关的日照时间和云量变化是最直接的气温影响因素。云量多时, 日照时数短, 温度低; 而云量少时, 日照时数长, 温度高^[20]。通过计算各站年时次气温和总云量的相关系数, 发现 14 时和 20 时气温与总云量呈负相关关系, 分别有 86% 和 74% 的站点通过了 0.05 显著性水平检验。而近 34 年绝大部分站点 14 时和 20 时总云量表现为减少趋势, 减幅分别为 $0.05 \sim 0.41$ 成/10a (79% 站点 $P < 0.05$) 和 $0.05 \sim 0.35$ 成/10a (68% 站点 $P < 0.05$)。同样, 时次气温与总云量的负相关关系和总云量减少趋势在冬、春季表现的更突出。这表明时次气温的明显升高与总云量的减少有直接关系。

4.3 环流影响

高原外部环流对高原的气温变化情况更为显著。高原地处中纬度地区, 冬季受西风急流影响显著, 而夏季高原西南季风、太平洋副高以及伊朗副高对高原影响也十分明显。通过计算 1981-2014 年西藏四季时次气温与环流指数的相关系数 (表 5) 发现, 夏季

时次气温与亚洲极涡面积(强度)指数、西太平洋副高西脊点呈负相关,与西太平洋高面积(强度)指数呈正相关;其他三个季节时次气温与高原A指数呈显著的正相关关系,此外冬季时次气温还与印缅槽指数有密切的关系。这与 You 等^[25]指出的北极涛动(AO)通过亚洲冬季风影响气温的结论一致,冬季风的减弱^[26]使冷空气侵袭高原的次数减少、强度减弱,气温升高;同时夏季风^[27]的减弱和高原热源作用减弱^[28]可能是相关环流系统变化的原因,夏季风系统减弱使反气旋环流加强,研究区受干热气团控制,云量减少,气温进一步升高。

表5 西藏四季时次气温与环流指数的相关系数
Tab. 5 Correlation coefficients between seasonal temperature at 02:00, 08:00, 14:00 and 20:00 BJT in Tibet and some circulation indices

季节	时次	亚洲极涡面积指数	亚洲极涡强度指数	西太平洋副高面积指数	西太平洋副高强度指数	西太平洋副高脊线指数	西太平洋副高西脊点	印缅槽指数	高原A	高原B
冬季	02点	-0.07	-0.31	-0.02	-0.09	0.22	0.09	0.38 [*]	0.42 [*]	0.24
	08点	-0.06	-0.34 [*]	-0.01	-0.08	0.21	0.10	0.38 [*]	0.41 [*]	0.23
	14点	-0.10	-0.23	-0.04	-0.14	0.24	0.09	0.36 [*]	0.44 ^{**}	0.26
	20点	-0.15	-0.22	0.03	-0.07	0.33	0.01	0.42 [*]	0.49 ^{**}	0.32
	平均	-0.10	-0.28	-0.01	-0.10	0.26	0.08	0.39 [*]	0.46 ^{**}	0.27
春季	02点	0.03	-0.06	-0.05	0.01	0.03	0.07	0.26	0.66 ^{***}	0.41 [*]
	08点	-0.04	-0.11	-0.07	-0.04	0.10	0.10	0.19	0.68 ^{***}	0.50 ^{**}
	14点	0.06	-0.02	-0.06	-0.01	0.05	0.08	0.20	0.66 ^{***}	0.44 ^{**}
	20点	0.08	0.02	-0.05	0.01	0.01	0.05	0.25	0.65 ^{***}	0.39 [*]
	平均	0.04	-0.04	-0.06	-0.01	0.05	0.08	0.23	0.68 ^{***}	0.44 ^{**}
夏季	02点	-0.30	-0.40 [*]	0.34 [*]	0.37 [*]	0.09	-0.42 ^{**}	0.22	0.17	-0.01
	08点	-0.42 ^{**}	-0.47 ^{**}	0.25	0.27	0.23	-0.33	0.26	0.19	0.01
	14点	-0.07	-0.15	0.29	0.32	0.00	-0.37 [*]	0.06	0.07	-0.05
	20点	0.02	-0.07	0.32	0.35 [*]	-0.11	-0.36 [*]	0.03	0.07	-0.02
	平均	-0.21	-0.30	0.33	0.36 [*]	0.05	-0.41 [*]	0.15	0.13	-0.02
秋季	02点	-0.30	-0.09	0.19	0.15	0.19	-0.12	0.10	0.53 ^{**}	0.40 [*]
	08点	-0.33	0.02	0.16	0.11	0.25	-0.08	0.16	0.65 ^{***}	0.53 ^{**}
	14点	-0.13	-0.13	0.14	0.13	0.19	-0.02	0.00	0.33 [*]	0.19
	20点	-0.18	-0.09	0.18	0.16	0.15	-0.12	0.02	0.39 [*]	0.27
	平均	-0.25	-0.08	0.18	0.15	0.21	-0.09	0.07	0.51 ^{**}	0.37 [*]

注: *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$ 。

5 结论与讨论

- (1) 受太阳辐射日变化的影响,西藏近地面气温一般在14-15时出现最高值,日出后出现最低值。由于与北京有地方时差,西藏绝大部分站点近地面气温在16-17时出现最高值,日出前后07-09时出现最低值。因此在分析西藏时次气温变化选取16-17时具有较好的代表性,更能反应日最高气温的变化规律,鉴于目前自动站气温逐小时资料年限短,这些问题都值得在后续工作中研究和探讨。
- (2) 1981-2014年西藏四季各时次气温表现一致的升高趋势,升温率为0.14~0.80℃/10a,以冬季升温最为显著,其次是春季,夏秋季相当。在各时次中,除夏季08时升温率大以外,其他三季均以14时升温率最大。各站年时次气温最大升温率为0.36~0.94℃/

10a ($P < 0.001$), 只有 32% 的站点出现在 08 时, 主要分布在昌都市、阿里地区以及那曲、拉萨、日喀则等站, 其余站点都出现在 14 时。

(3) 西藏春、秋季时次气温升温率主要与经度有关, 西部大于东部; 冬季时次气温升温最大区域主要在高海拔和纬度较高地区, 夏季气温升幅最大区域也位于较高纬度。

(4) 从 10 年年代际变化尺度上来看, 20 世纪 80 年代西藏四季和年各时次气温均为负距平, 而 21 世纪最初的 10 年各时次气温一年四季都为正距平, 尤其是冬季, 气温偏高 1.0~1.2 °C, 以 14 时最为明显。

(5) 在时间转折上, 34 年来西藏年、季绝大部分时次的气温都发生了气候突变, 夏季 4 个时次气温突变时间都发生在 21 世纪最初的 10 年; 冬季 02 时和 08 时气温突变点发生 20 世纪 90 年代末, 14 时和 20 时气温的突变点却出现在 21 世纪最初的 10 年。

(6) 影响西藏时次气温变化的因素很多, 不仅与地形(经纬度、海拔高度)、总云量有关, 大尺度的大气环流对气温的变化也产生至关重要的作用。另外, 地表覆盖的变化^[29-30]、人类温室气体的排放^[31]都与气温有着密切的关系, 其复杂的影响因素还有待于更进一步深入的研究。

参考文献(References)

- [1] IPCC. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Final Draft Underlying Scientific- Technical Assessment [R/OL]. [2013.10.30]. http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5_WGI-12Doc2b_FinalDraft_All.pdf.
- [2] China Meteorological Administration. Climate and Environment in China. Beijing: China Meteorological Press, 2006. [中国气象局. 中国气候与环境演变. 北京: 气象出版社, 2006.]
- [3] Yao Tandong, Liu Xiaodong, Wang Ninglian. Amplitude of climatic change in Qinghai- Tibetan Plateau. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(1): 98-106. [姚檀栋, 刘晓东, 王宁练. 青藏高原地区的气候变化幅度问题. 科学通报, 2000, 45(1): 98-106.]
- [4] Feng Song, Tang Maocang, Wang Dongmei. The new proof of Qing-Zang Plateau as the startup area of climatic change in China. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(6): 633-636. [冯松, 汤懋苍, 王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据. 科学通报, 1998, 43(6): 633-636.]
- [5] Pan Baotian, Li Jijun. Qinghai-Tibetan Plateau: A driver and amplifier of the global climatic change. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 1996, 32(1): 108-115. [潘保田, 李吉均. 青藏高原: 全球气候变化的驱动力与放大器: III. 青藏高原隆起对气候变化的影响. 兰州大学学报(自然科学版), 1996, 32(1): 108-115.]
- [6] Prell W L, Kutzbach J E. Sensitivity of the Indian monsoon to forcing parameters and implications for its evolution. Nature, 1992, 360(6405): 647-652.
- [7] Wu G, Liu Y, He B, et al. Thermal controls on the Asian summer monsoon open. Scientific Reports, 2012. doi: 10.1038/srep00404.
- [8] Wu Guoxiong, Zhang Yongsheng. Thermal and mechanical forcing of the Tibetan Plateau and the asian monsoon onset. (Part I): Situating of the onset. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1998, 22(6): 825-838. [吴国雄, 张永生. 青藏高原的热力和机械强迫作用以及亚洲季风的爆发: I. 爆发地点. 大气科学, 1998, 22(6): 825-838.]
- [9] Yeh T. Some aspects of the thermal influences of the Qinghai-Tibetan Plateau on the atmospheric circulation. Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology, 1982, 31(3): 205-220.
- [10] Zhou Xiuji, Zhao Ping, Chen Junming, et al. Impacts of thermodynamic processes over the Tibetan Plateau on the Northern Hemispheric climate. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2009, 39(11): 1473-1486. [周秀骥, 赵平, 陈军明, 等. 青藏高原热力作用对北半球气候影响的研究. 中国科学(D辑: 地球科学), 2009, 39(11): 1473-1486.]
- [11] Li Lin, Chen Xiaoguang, Wang Zhenyu, et al. Climate change and its regional differences over the Tibetan Plateau. Advances in Climate Change Research, 2010, 6(3): 181-186. [李林, 陈晓光, 王振宇, 等. 青藏高原区域气候变化及其差异性研究. 气候变化研究进展, 2010, 6(3): 181-186.]
- [12] Ding Yihui, Zhang Li. Intercomparison of the time for climate abrupt change between the Tibetan Plateau and other regions in China. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(4): 794-805. [丁一汇, 张莉. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较. 大气科学, 2008, 32(4): 794-805.]

- [13] Wei Zhigang, Huang Ronghui, Dong Wenjie. Interannual and interdecadal variations of air temperature and precipitation over the Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(2): 157-170. [韦志刚, 黄荣辉, 董文杰. 青藏高原气温和降水的年际和年代际变化. *大气科学*, 2003, 27(2): 157-170.]
- [14] Wu Shaohong, Yin Yunhe, Zheng Du, et al. Climate changes in the Tibetan Plateau during the last three decades. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 3-11. [吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 青藏高原近30年气候变化趋势. *地理学报*, 2005, 60(1): 3-11.]
- [15] Ding Mingjun, Li Lanhui, Zhang Yili, et al. Temperature change and its elevation dependency on the Tibetan Plateau and its vicinity. *Resources Science*, 2014, 36(7): 1509-1518. [丁明军, 李兰晖, 张懿铨, 等. 1971-2012年青藏高原及周边地区气温变化特征及其海拔敏感性分析. *资源科学*, 2014, 36(7): 1509-1518.]
- [16] Du Jun. Change of temperature in Tibet Plateau from 1961 to 2000. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(6): 682-690. [杜军. 青藏高原近40年的气温变化. *地理学报*, 2001, 56(6): 682-690.]
- [17] Tan Chunping, Yang Jisping, Mi Rui. Analysis of the climatic change characteristics in the southern Tibetan Plateau from 1971 to 2007. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(6): 1111-1120. [谭春萍, 杨建平, 米睿. 1971-2007年青藏高原南部气候变化特征分析. *冰川冻土*, 2010, 32(6): 1111-1120.]
- [18] You Q, Kang S, Pepin N, et al. Relationship between temperature trend magnitude, elevation and mean temperature in the Tibetan Plateau from homogenized surface stations and reanalysis data. *Global and Planetary Change*, 2010, 71(1/2): 124-133.
- [19] Jiang Yongjian, Li Shijie, Shen Defu, et al. Climate change and its impact on the lake environment in the Tibetan Plateau in 1971-2008. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(12): 1503-1512. [姜永见, 李世杰, 沈德福, 等. 青藏高原近40年来气候变化特征及湖泊环境响应. *地理科学*, 2012, 32(12): 1503-1512.]
- [20] Song Ci, Fei Tao, Zhou Chenghu. Research progresses of surface temperature characteristic change over Tibetan Plateau since 1960. *Progress in Geography*, 2012, 31(11): 1503-1509. [宋辞, 裴韬, 周成虎. 1960年以来青藏高原气温变化研究进展. *地理科学进展*, 2012, 31(11): 1503-1509.]
- [21] Liu Guifang, Lu Heli. Basic characteristics of major climatic factors on Qinghai-Tibet Plateau in recent 45 years. *Geographical Research*, 2010, 29(12): 2281-2288. [刘桂芳, 卢鹤立. 1961-2005年来青藏高原主要气候因子的基本特征. *地理研究*, 2010, 29(12): 2281-2288.]
- [22] Liu Xiaodong, Hou Ping. Relationship between the climatic warming over the Qinghai-Xizang Plateau and its surrounding areas in recent 30 years and the elevation. *Plateau Meteorology*, 1998, 17(3): 245-249. [刘晓东, 侯萍. 青藏高原及其邻近地区近30年气候变暖与海拔高度的关系. *高原气象*, 1998, 17(3): 245-249.]
- [23] Ding Yihui, Ren Guoyu, Shi Guangyu, et al. National assessment report of climate change (I): Climate change in China and its future trend. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(1): 3-8. [丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评价报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势. *气候变化研究进展*, 2006, 2(1): 3-8.]
- [24] Wei Fengying. *Statistics Technology of Diagnose and Forecast of Modern Climate*. Beijing: China Meteorological Press, 1999. [魏凤英. *现代气候统计诊断与预测技术*. 北京: 气象出版社, 1999.]
- [25] You Q L, Ren G Y, Fraedrich K, et al. Winter temperature extremes in China and their possible causes. *International Journal of Climatology*, 2013, 33(6): 1444-1455.
- [26] Gao Hui. Comparison of four East Asian winter monsoon indices. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 65(2): 272-279. [高辉. 东亚冬季风指数及其对东亚大气环流异常的表征. *气象学报*, 2007, 65(2): 272-279.]
- [27] Wu Bingyi. Weakening of Indian summer monsoon in recent decades. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2005, 22(1): 21-29.
- [28] Duan A M, Wu G X. Weakening trend in the atmospheric heat source over the Tibetan Plateau during recent decades I. Observations. *Journal of Climate*, 2008, 21(31): 3149-3164.
- [29] Suh M S, Lee D K. Impacts of land use/cover changes on surface climate over East Asia for extreme climate cases using RegCM2. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(109): 127-142. doi: 10.1029/2003JD003681.
- [30] Wu L Y, Zhang J Y, Dong W J. Vegetation effects on mean daily maximum and minimum surface air temperatures over China. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(9): 900-905.
- [31] Zhao M, Pitman A J. The impact of land covers change and increasing carbon dioxide on the extreme and frequency of maximum temperature and convective precipitation. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(6): 21-24. doi: 10.1029/2001GL013476.

Spatial-temporal change of air temperature at 02, 08, 14 and 20 Beijing time over Tibet during 1981-2014

DU Jun^{1,2}, MA Pengfei², Panduo³

(1. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610071, China;

2. Tibet Climatic Center, Lhasa 850001, China; 3. Lhasa Meteorological Service of Tibet, Lhasa 850001, China)

Abstract: Based on 6-hourly (02:00, 08:00, 14:00 and 20:00 Beijing time (BJT)) air temperature data of 38 meteorological stations over Tibet from 1981 to 2014, the spatial-temporal distribution and climate abrupt characteristics of air temperature are analyzed by using the methods including linear regression and Mann-Kendall test. Also, the correlation between the change rates of surface air temperature and latitude (longitude, and altitude) is discussed. The results showed that, the seasonal air temperature in Tibet exhibits unanimously increasing trend with a rate of 0.14- 0.80 °C/10a during the past 34 years, and the most significant increase occurred in winter. In terms of the rate per decade for the 6-hourly air temperature observations, 08:00 BJT during summer experienced the highest increasing rate, while 14:00 BJT showed the highest values for the other three seasons. The maximum rate for the increasing air temperature ranges from 0.36 °C/10a ($P < 0.001$) to 0.94 °C/10a ($P < 0.001$). Among all the 38 stations, there were only 32% (about 12) showing the peak time with the highest rate of changes at 08:00 BJT air temperature, which are predominantly located in much of Qamdo, Ngari prefecture and at weather stations such as Nagqu, Lhasa and Xigazê, while the rest of weather stations showed the highest increasing rate at 14:00 BJT. In spring and autumn, as the increasing rate was related to longitude, it has a larger rate in western than that in eastern Tibet. In winter, the highest increasing rate of air temperature occurred in the regions with higher altitudes and latitudes, and the higher increasing rate of air temperature was observed at higher latitudes in summer. As for the decadal characteristics of 6-hourly air temperature, the 1980s experienced negative anomalies, compared with positive anomalies in the first decade of the 21st century. Additionally, it was found with abrupt change test that at the annual and seasonal scales most of hourly air temperatures have abrupt change. For instance, the abrupt change of all four hourly air temperatures in summer occurred in the first decade of the 21st century. In winter, the abrupt change of air temperature at 02:00 and 08:00 BJT occurred in the late 1990s, while that at 14:00 and 20:00 BJT was found in the first 10 years of the 21st century. As can be seen in the article, many factors such as topography, various meteorological elements in the plateau and the atmospheric circulation play important roles in the surface air temperature change in Tibet.

Keywords: 6-hourly air temperature ; linear trend; climate abrupt change; Tibet