

文章编号: 2096-1618(2020)03-0352-07

# 全球变暖背景下青藏高原中东部地区温度变化特征

杨倩<sup>1</sup>, 陈权亮<sup>1</sup>, 陈朝平<sup>2</sup>, 汪正林<sup>1</sup>

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 四川省气象台, 四川 成都 610072)

**摘要:** 青藏高原作为全球气候变化的指示器, 其温度变化对全球气候变化有重要的意义。为研究青藏高原近年来的温度变化特征, 利用青藏高原中东部地区 1960–2016 年 64 个站点的逐日平均、最高和最低温度资料, 采用最小二乘法、一元线性回归等方法分析青藏高原中东部地区温度的时空分布及年际变化特征。结果表明: 青藏高原中东部温度的增暖速度表现为东南部、北部、西部增暖速度快, 中部地区增暖慢; 从季节来看, 2000 年以前秋季对高原中东部增暖的贡献最大, 2000 年后春季对高原中东部增暖的贡献最大, 且最低温度的增温最显著, 其次是平均温度、最高温度; 2000 年以后青藏高原中东部温度持续升高, 且增暖速度更快。

**关键词:** 大气科学; 气候系统与气候变化; 青藏高原; 气候变化; 温度; 时空变化

**中图分类号:** P467

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcuit.2020.03.017

## 0 引言

青藏高原是世界上海拔最高且地形最复杂的高原, 由于其特殊的地理位置和海拔高度, 对中国乃至全球的气候有巨大影响, 尤其热力、动力作用影响巨大<sup>[1–4]</sup>。青藏高原通过大气环流、冰雪融化等与中国甚至世界上其他地区进行物质、能量交换<sup>[2]</sup>, 起到气候变化指示器的作用。

20 世纪 80 年代以来, 全球变暖已成不争的事实, 逐渐得到人们重视<sup>[5]</sup>。AR4<sup>[5]</sup>中指出: 近 100 a 地表平均温度升高 0.74 °C, 近 50 a 增暖速度是 0.13 °C/10 a; 与 AR4 相比, AR5<sup>[6]</sup>表明全球平均地表温度在 1880–2012 年升高 0.85 °C 且升温速度接近 1880 年的 2 倍; 由于高原特殊的地理位置及气候效应, 对其气候的研究极为重要。大量观测资料发现: 21 世纪后全球变暖速率突然减缓即“hiatus”现象。停滞最早出现于 20 世纪末(1998 年左右), 2009 年才被 Eastering 等<sup>[7]</sup>提出并分析了全球平均地表温度在 2009 年以前 34 a 的观测数据, 发现温度没有下降趋势; S Wang 等<sup>[8]</sup>研究 1999–2008 年的温度表明虽然全球温度增幅趋于 0, 但仍是近 30 a 来最热的 10 a, 且太阳辐射、火山、南方涛动等对全球平均温度变化都有影响, 但不会长期掩盖全球变暖趋势; 何金海等<sup>[9]</sup>发现 2000 年后全球陆地平均地面气温的增温率大幅下降至 1976–1999 年加

速期增温率的 50%。

青藏高原的热力作用对中国甚至全球气候都有重要影响<sup>[10]</sup>。季节性冻土、降水和高原积雪是高原地表的重要表征量, 可用来揭示高原气候变化<sup>[11–17]</sup>。高荣等<sup>[10]</sup>、保云涛等<sup>[17]</sup>、Xin 等<sup>[18]</sup>等研究高原积雪发现 20 世纪 80 年代高原积雪日数增加, 20 世纪 90 年代减少, 同时这 20 a 间高原的季节性冻土冻结日数递减, 且前冬积雪在 1996 年前增加, 此后减少; 李川等<sup>[19]</sup>发现近 40 a 高原降水无明显变化趋势, 但近 10 a 是自有资料以来较湿的时段。

AR5<sup>[6]</sup>中指出, 北半球 20 世纪 80 年代平均温度比 60 年代高 0.4 °C, 而高原在同时期增温 0.5 °C 以上, 90 年代后增温幅度为 1 °C 左右。前人对青藏高原已有不少研究。刘晓东等<sup>[20]</sup>、马晓波等<sup>[21]</sup>、MA 等<sup>[22]</sup>发现高原大部分地区平均、最高和最低气温均升高, 最低气温增温最快, 且青藏高原平均气温的升温速度超过北半球和同纬度地区在同时段的增暖速度; 丁一汇等<sup>[23]</sup>、郑然等<sup>[24]</sup>研究发现青藏高原年平均地表气温在 1985 年左右开始变暖, 但是高原显著增暖的突变发生在 90 年代中期, 且晚于西北、华北、淮河、东北地区, 高原突变与高原的地形有关系; 吕少宁等<sup>[25]</sup>发现在全球变暖背景下青藏高原温度突变空间上存在不一致性, 高原东南部、东部温度突变较早, 西北部、北部、西部次之, 南部最晚; Imtiaz 等<sup>[26]</sup>发现高原最明显的变暖发生在海拔最高的地区, 并且冬、春季增暖最显著; 朱丽华等<sup>[27]</sup>发现 1971 年以来, 青藏高原夏季对流层上

下部气温呈反相变化:上降温下增温。与全球近 15 年 hiatus 相比,高原在突变后呈现更明显的增暖;胡琴等<sup>[28]</sup>对青藏高原未来气候的预估研究表明 2006–2100 年高原增温速度是 AR5 中全球平均温度变暖速度的两倍。

全球变暖“hiatus”始于 1998 年,但造成此现象的原因还没有定论。那么在全球变暖“hiatus”的背景下,青藏高原近年来温度是如何变化呢?前人的研究表明青藏高原温度的突变发生在 20 世纪 80 年代<sup>[28]</sup>和 1998 年前后<sup>[23–24]</sup>,但对于近年来青藏高原温度的变化的研究相对较少。国内外目前的研究多数是青藏高原建站至 2010 年左右,对近几年高原变暖的研究相对较少,且高原的增暖存在很大不确定性,所以研究青藏高原近年来温度变化特征有重要意义。利用 1960–2016 年台站日平均、最高和最低温度,对青藏高原 1960–2016 年温度的时空变化特征进行分析研究。

表 1 青藏高原中东部地区 64 个站点的站号、经度、纬度

站号	纬度/°N	经度/°E	站号	纬度/°N	经度/°E	站号	纬度/°N	经度/°E	站号	纬度/°N	经度/°E
51804	37.46	75.14	52842	36.47	99.05	55696	28.25	92.28	56125	32.12	96.29
51886	38.15	90.51	52856	36.16	100.37	55773	27.44	89.05	56137	31.09	97.10
52533	39.46	98.29	52866	36.43	101.45	56004	34.13	92.26	56144	31.48	98.35
52602	38.45	93.20	52868	36.02	101.26	56018	32.54	95.18	56146	31.37	100.00
52633	38.48	98.25	52876	36.19	102.51	56021	34.08	95.47	56167	30.59	101.07
52645	38.25	99.35	52908	35.13	93.05	56029	33.01	97.01	56172	31.54	102.14
52657	38.11	100.15	52943	35.35	99.59	56033	34.55	98.13	56178	31.00	102.21
52679	37.55	102.40	52955	35.35	100.45	56034	33.48	97.08	56182	32.39	103.34
52713	37.51	95.22	52974	35.31	102.01	56043	34.28	100.15	56247	30.00	99.06
52737	37.22	97.22	55279	31.23	90.01	56046	33.45	99.39	56251	30.56	100.19
52754	37.20	100.08	55299	31.29	92.04	56065	34.44	101.36	56257	30.00	100.16
52765	37.23	101.37	55578	29.15	88.53	56067	33.26	101.29	56312	29.40	94.20
52787	37.12	102.52	55591	29.40	91.08	56079	33.35	102.58	56357	29.03	100.18
52818	36.25	94.54	55598	29.15	91.46	56080	35.00	102.54	56374	30.03	101.58
52825	36.26	96.25	55664	28.38	87.05	56106	31.53	93.47	56444	28.29	98.55
52836	36.18	98.06	55680	28.55	89.36	56116	31.25	95.36	56462	29.00	101.30

2 多年平均温度的年空间分布特征

图 1 为 1960–2016 年青藏高原中东部地区多年平均、最高、最低温度空间分布特征。从图 1(a)来看,分别以巴塘、小金为中心的区域是平均温度的两个大值区,自北向南平均温度呈现出高–低–高的分布特征;

1 资料说明

使用中国气象数据网提供的中国地面 824 个国家级基准、基本站的逐日平均温度、最高温度和最低温度资料,从中选取了青藏高原中东部地区 64 个站点进行研究(站号、经纬度信息如表 1 所示),“青藏高原中东部”定义为:86 °E ~ 105 °E、26 °E ~ 40 °E。数据经过质量控制后,1960–2016 年各要素数据的质量及完整性相对于以往发布的地面同类数据产品明显提高,各要素项数据的实有率普遍在 99% 以上,数据的正确率均接近 100%。

日平均值统计方法:由地面气象月报数据文件或实时库中提取得到的各要素逐日 4 次定时(02:00、08:00、14:00、20:00)观测数据统计日平均值。

最高温度(图 1b)空间分布特征为:高原中西部的格尔木及治多县为最高温度的低值区,东南部的西昌市是温度的大值区,西部、南部及东部部分地区为温度的次大值区;最低温度(图 1c)存在 3 个低值中心,分别位于托托河站、祁连站及玉树站。温度的大值区域位于高原南部地区(以 32 °N 为界),大值中心位于马尔康县,最低温度从西北向东南递增。

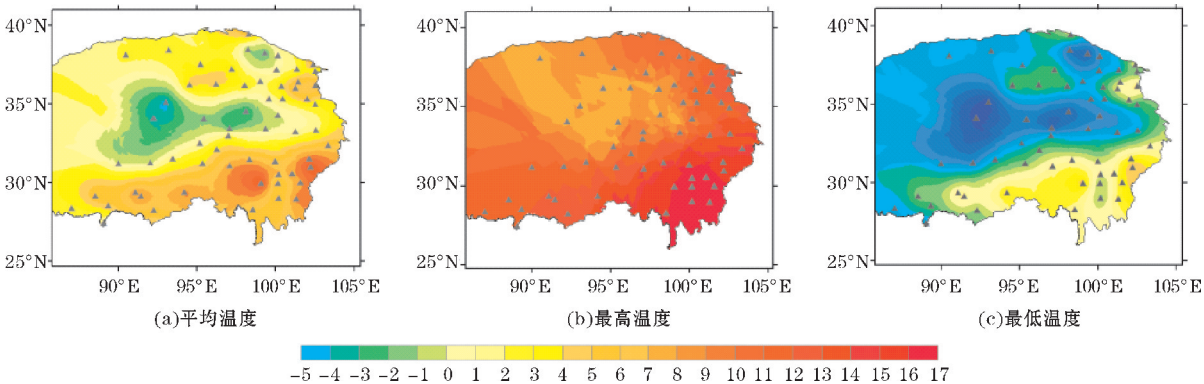


图1 青藏高原中东部平均、最高、最低温度空间分布

3 温度增温趋势的空间分布特征

3.1 年平均温度增温趋势空间分布特征

图2给出了各站年平均、最高、最低温度的增温趋势空间分布。AR5<sup>[6]</sup>中指出:1951–2012 年全球平均表面温度上升趋势0.12℃/10 a。1960–2016 年高原中东部年平均温度增温率0.29℃/10 a,高于全球变暖速率的2倍,超过了北半球和相同纬度地区在同一时期的平均气温并高于中国近百年的升温速率和50 a

升温速度,说明高原平均温度的增温速度明显大于其他地区。从站点的增温率来看,站点温度总体上呈增温趋势。增温率小值区位于高原东南部的康定县及昌都,柴达木盆地是线性趋势大值所在区域。最低温度与平均温度的空间分布特征类似,最低温度年空间趋势特征为高原边缘及北部地区站点升温快,线性趋势值大于中部、南部地区。

综上所述:高原中东部年平均温度均有持续增暖的趋势,且最低气温的年升温速率大于平均温度和最高温度。高原增温率表现为中部增温慢,南部、北部及边缘地区增温快。

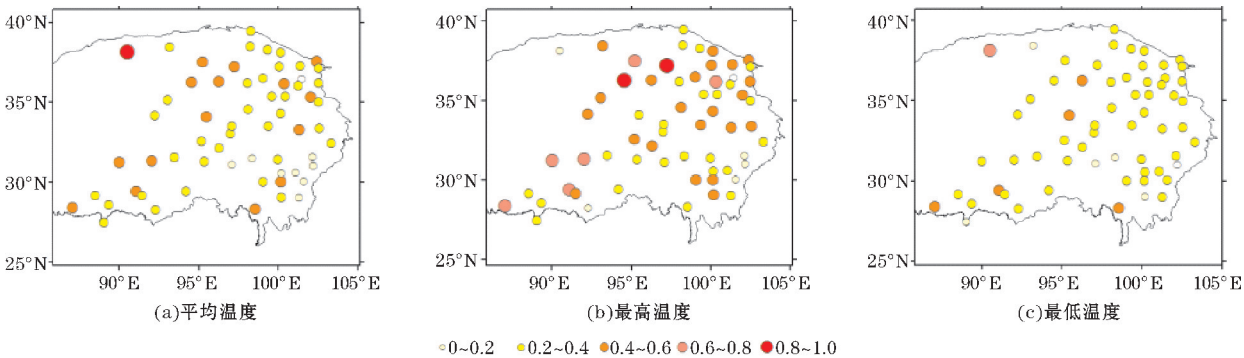


图2 青藏高原中东部年线性趋势空间分布(实心圆:通过了95%显著性检验;空心圆:未通过显著性检验)

3.2 季节平均温度增温趋势空间分布特征

各站平均温度的季节空间趋势冬季最大,其次为秋季,春夏两季趋势值较小。春季平均温度(图3a)所有站均为正值,东南部部分站没有通过显著性检验,可能与数据缺测有关。通过显著性检验的大部分站线性趋势值为0.2~0.4℃/10 a。高原东南部地区个别站趋势值为0.4~0.6℃/10 a且分布比较分散,高原北部乌兰县茫崖站线性趋势值相对较大,为1.0℃/10 a;夏季(图3b)平均温度线性趋势空间分布与春季相似,但通过95%显著性检验的站数相比春季

有所增加;秋季(图3c)乌兰县大多数站线性趋势大于春夏两季,增温速率的最大值0.8~1.0℃/10 a;冬季(图3d)增温速率最大值位于那曲县,线性趋势值大于春、夏、秋3个季节增温速率的最大值,大部分站线性趋势值为0.4~0.8℃/10 a。

春季(图4a)高原东北部地区最高温度线性趋势值为0.2~0.4℃/10 a且通过了95%显著性检验,东南部大多数站未通过显著性检验,可能是因为最高温度缺测值过多;夏季分布比较均匀,仅2站没有通过95%显著性检验;秋季高原中部、东部边缘及西南边缘部分站的增温率明显高于春夏季,且所有站都通过了



显著性检验;冬季线性趋势值大于 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的站数增加,且高原中部部分站线性趋势值大于春、夏、秋3季。

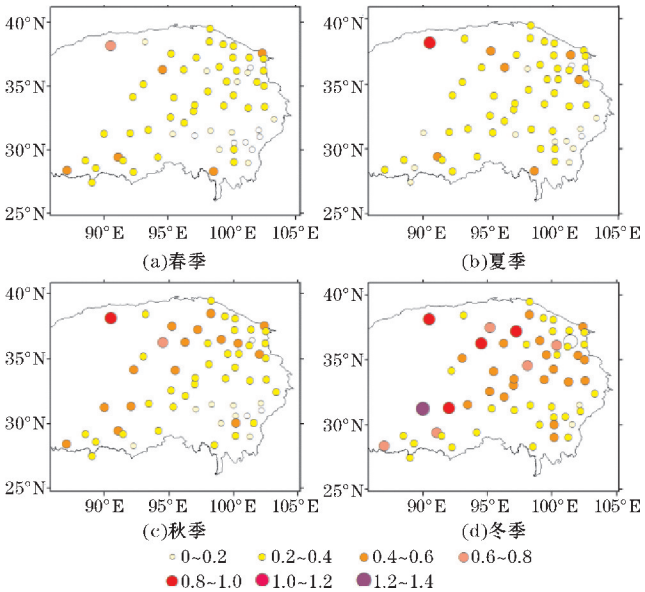


图3 青藏高原中东部平均温度季节线性趋势空间分布

最低温度春季(图5a)线性趋势的相对大值区位于高原西南部、中部及东部部分地区,夏季高原东北部是相对增温显著的区域,增温率 $0.4\sim0.8\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,线性趋势大值区集中在青藏高原东北部;秋季分布特征与春季相似,高原中北部是线性趋势的大值区域;冬季增暖速度明显大于其他季节,且增温率的大值区位于柴达木盆地,可能与海拔高度较低有关。

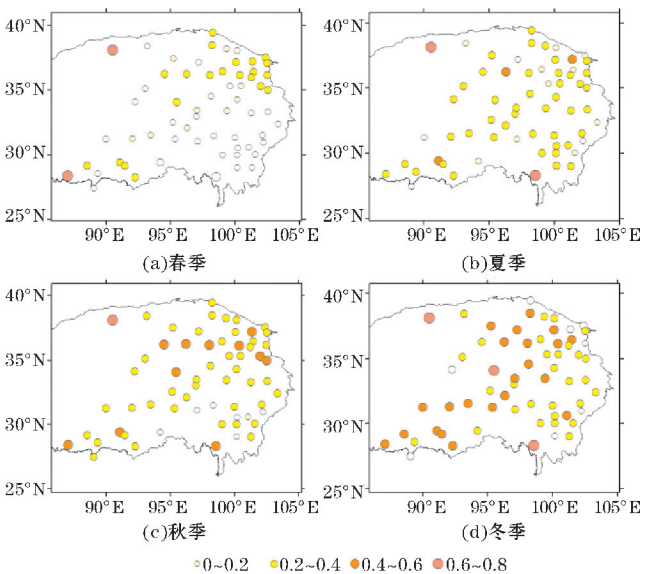


图4 青藏高原中东部最高温度季节线性趋势空间分布

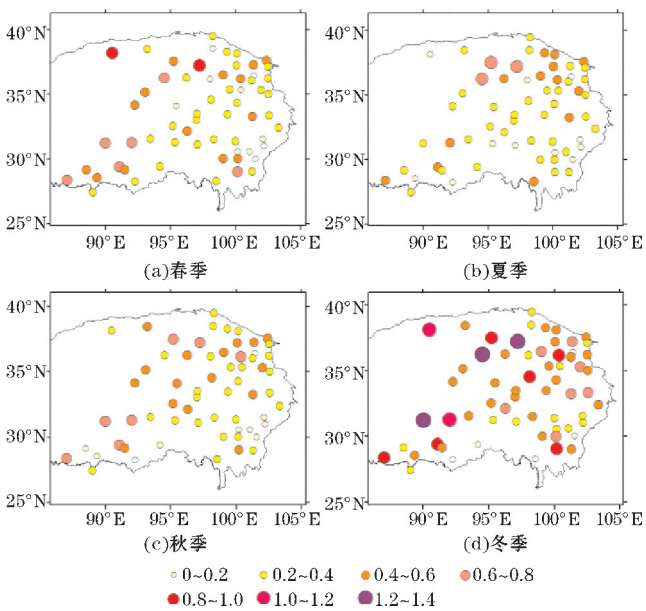


图5 青藏高原中东部最低温度季节增温趋势空间分布

## 4 温度的年际变化特征

### 4.1 年平均温度年际变化特征

图6给出了青藏高原中东部64站温度的年际变化及增温趋势。由图6知,1960–2000年平均、最高、最低温度的增温趋势分别为 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.13\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,2000–2016年分别为 $0.42\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.49\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,最低温度增温率大于平均、最高温度,说明对于年平均温度,最低温度增暖对高原中东部地区增暖贡献最大。

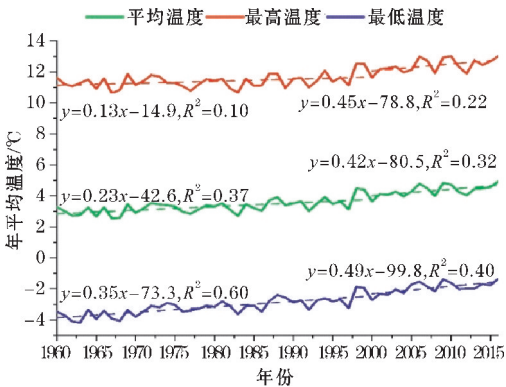


图6 青藏高原中东部年平均温度的年际变化(虚线为线性拟合线)

### 4.2 季节平均温度年际变化特征

图7为高原中东部地区季节平均温度的年际变化,春季的升温幅度最小且平均温度升温幅度显著大于AR5中1951–2012年升温幅度。1960–2000年季

节平均温度的增温速度分别是: 0.16 °C/10 a、0.14 °C/10 a、0.26 °C/10 a、0.35 °C/10 a, 2000–2016 年增温速率分别为 0.64 °C/10 a、0.39 °C/10 a、0.44 °C/10 a、0.20 °C/10 a, 2000 年后春、夏、秋增暖速度明显快于 2000 年前(冬季增暖速度略降低), 说明 2000 年以后高原增暖速度加快。高原在 2000–2016 年温度增温速度更快, 说明青藏高原中东部地区

以更快的速度增暖。

最高温度在 2000 年后的增暖速度也有加快趋势, 但对高原中东部的增暖的贡献低于平均及最低温度, 并且春季最高温度增暖速度最快, 冬季最慢。最低温度的季节增温速度始终快于平均温度和最高温度的增暖速度, 对高原中东部最低温度升高贡献最大, 其次是秋季、夏季、春季。

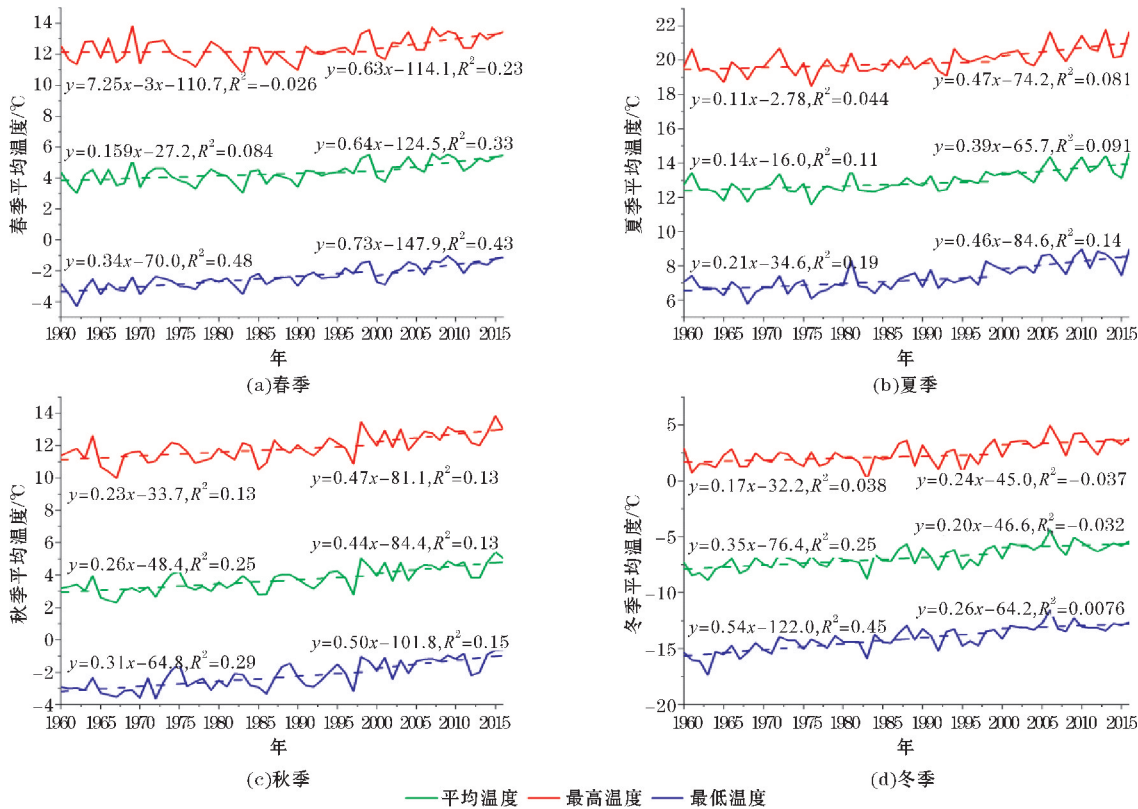


图7 青藏高原中东部季节平均温度的年代际变化(虚线为线性拟合线)

5 结束语

全球变暖背景下, 青藏高原作为气候变化的“指示器”, 其气候变化对中国甚至全球气候有巨大影响。1998 年前后, 全球气温的升温速度明显下降, 进入“hiatus”阶段, 但青藏高原温度变化是不确定的。通过研究得到如下结论:

- (1) 从年平均温度的增暖趋势来看, 最低温度对于高原中东部地区的增暖贡献最大, 其次是平均温度、最高温度。
- (2) 1960–2000 年秋季增暖速度最快, 对高原中东部增暖的贡献最大; 2000 年以后春季对高原增暖贡献最大。
- (3) 2000 年以后, 青藏高原中东部温度以更快的速度增暖, 且增暖速度明显快于全球变暖的速度。

在全球变暖“停滞”背景下, 青藏高原中东部地区在 2000 年以后以更快的速度增暖, 并且快于中国同纬度其他地区的增暖速度。

参考文献:

[1] 吴国雄, 刘屹岷, 刘新, 等. 青藏高原加热如何影响亚洲夏季的气候格局[J]. 大气科学, 2005 (1): 47–56+167–168.

[2] 张致爽, 陈权亮, 蔡宏珂. 青藏高原地区对流层顶的时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2016, 33 (4): 690–697.

[3] 唐志光, 王建, 梁继, 等. 基于 MODIS 的青藏高原雪线高度遥感监测[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(4): 767–774.

[4] 秦大河, 陈振林, 罗勇, 等. 气候变化科学的最新

- 认知[J]. 气候变化研究进展,2007(2):63-73.
- [5] IPCC. Summary for Policymakers of Climate Change 2007:The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press,2007.
- [6] IPCC. Climate Change 2013:The Physical Science Basis[M]. Cambridge University Press,2013.
- [7] Easterling D R, Wehner M F. Is the climate warming or cooling[J]. Geophysical Research Letters, 2009,36(8):262-275.
- [8] Wang Shaowu, Wen Xinyu, Luo Yong, et al. Does the Global Warming Pause in the Last Decade: 1999-2008[J]. Advances in Climate Change Research,2010,1(1):49-54.
- [9] 何金海,詹丰兴,祁莉,等. 全球变暖减缓期陆地地表气温变化特征和CMIP5多模式的未来情景预估[J]. 大气科学,2016,40(1):33-45.
- [10] 高荣,钟海玲,董文杰,等. 青藏高原积雪冻土对中国夏季降水影响研究[J]. 冰川冻土, 2011,33(2):254-260.
- [11] Trenberth K E, Fasullo J T. An apparent hiatus in global warming[J]. Earths Future, 2014, 1(1):19-32.
- [12] Wang Z, Duan A, Wu G. Time-lagged impact of spring sensible heat over the Tibetan Plateau on the summer rainfall anomaly in East China: case studies using the WRF model[J]. Climate Dynamics,2014,42(11-12):2885-2898.
- [13] Wu G, Liu Y, He B, et al. Thermal Controls on the Asian Summer Monsoon[J]. Scientific Reports,2012,2:404.
- [14] Wu T W, Qian Z A. The Relation between the Tibetan Winter Snow and the Asian Summer Monsoon and Rainfall: An Observational Investigation[J]. Journal of Climate,2003,16(12):2038-2051.
- [15] Yim S Y, Jhun J G, Lu R, et al. Two distinct patterns of spring Eurasian snow cover anomaly and their impacts on the East Asian summer monsoon[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres,2010,115(D22).
- [16] Zhu Yuxiang, Liu Haiwen, Ding Yihui, et al. Interdecadal variation of spring snow depth over the Tibetan Plateau and its influence on summer rainfall over East China in the recent 30 years[J]. International Journal of Climatology, 2015, 35(12):3654-3660.
- [17] 保云涛,游庆龙,谢欣汝. 青藏高原积雪时空变化特征及异常成因[J]. 高原气象,2018,37(4):899-910.
- [18] Xin Xiao ge, Tian jun Zhou, Ru cong Yu. Increased Tibetan Plateau snow depth: An indicator of the connection between enhanced winter NAO and late-spring tropospheric cooling over East Asia[J]. Advances in Atmospheric Sciences,2010, 27(4):788-794.
- [19] 李川,张廷军,陈静. 近40年青藏高原地区的气候变化——NCEP和ECMWF地面气温及降水再分析和实测资料对比分析[J]. 高原气象, 2004(S1):97-103.
- [20] Xiao dong Liu, Bao de Chen. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades[J]. International Journal of Climatology,2000,20(14).
- [21] 马晓波,李栋梁. 青藏高原近代气温变化趋势及突变分析[J]. 高原气象,2003(5):507-512.
- [22] MA Zhenfeng, LIU Jia, ZHANG Shunqian, et al. Observed Climate Changes in Southwest China during 1961-2010[J]. Advances in Climate Change Research,2013,4(1):30-40.
- [23] 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[J]. 大气科学,2008(4):794-805.
- [24] 郑然,李栋梁,蒋元春. 全球变暖背景下青藏高原气温变化的新特征[J]. 高原气象,2015,34(6):1531-1539.
- [25] 吕少宁,李栋梁,文军,等. 全球变暖背景下青藏高原气温周期变化与突变分析[J]. 高原气象,2010,29(6):1378-1385.
- [26] Imtiaz Rangwala, James R. Miller, Gary L, et al. Using a global climate model to evaluate the influences of water vapor, snow cover and atmospheric aerosol on warming in the Tibetan Plateau during the twenty-first century[J]. Climate Dynamics,2010,34(6).
- [27] 朱丽华,范广州,华维. 2015. 全球变暖背景下青藏高原夏季气温在对流层上下反相变化及其与降水和环流的关系[J]. 大气科学,39(6): 1250-1262.
- [28] 胡芬,姜大膀,范广州. 青藏高原未来气候变化预估:CMIP5模式结果[J]. 大气科学,2015,39

(2):260–270.

[29] Souma K,Wang Y. Improved Simulation of the East Asian Summer Monsoon Rainfall with Satellite-Derived Snow Water Equivalent Data [ J ]. Monthly Weather Review,2009,137(6):1790–1804.

[30] 蔡英,李栋梁,汤懋苍,白重瑗. 青藏高原近 50 年来气温的年代际变化[ J ]. 高原气象,2003

(5):464–470.

[31] 陈锐杰,刘峰贵,陈琼,等. 近 60 年青藏高原东北缘极端气温事件与气温日较差分析——以西宁地区为例[ J ]. 高原气象,2018(5):1188–1198.

[32] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[ M ]. 北京:气象出版社,2007.

Spatial-temporal Changes of Temperature over the Central and Eastern Part of Tibetan Plateau from 1960 to 2016

YANG Qian<sup>1</sup>, CHEN Quanliang<sup>1</sup>, CHEN Chaoping<sup>2</sup>, WANG Zhenglin<sup>1</sup>

(1. College of Atmospheric Science, Plateau Atmospheric & Environment Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Sichuan Provincial Meteorological Service, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** As the indicator of global climate change, the temperature change of Tibetan Plateau is of great significance to worldwide climate change. To research the recent characteristics of temperature change in Tibetan Plateau, we use the daily average, maximum and minimum temperature data of 64 stations data from 1960 to 2018 over the central and eastern region of Tibetan Plateau, and the least square method and Linear regression method to analyze the spatial and temporal variation characteristics and the interannual change features of temperature. The result shows that: the temperature's change over the central and eastern region of the Tibetan Plateau has shown rapid temperature increase happened in southeast, north and west, and slow temperature increase happened in the central area. In terms of seasons, autumn contributes most to the warming before 2000, and spring contributes most to the warming after 2000. The minimum temperature has the most significant increase, followed by the average temperature and the maximum temperature. The temperature has been rising continuously since 2000 in the middle and western part of Tibetan Plateau, and the warming speed is faster than before.

**Keywords:** atmospheric science; climate system and climate change; Tibetan Plateau; climate change; temperature; spatial and temporal variation