

长白山地区近 50 年平均最高和最低气温变化

王纪军^{1,2,3} 裴铁璠¹ 王安志¹ 关德新¹ 金昌杰¹

(1 中国科学院沈阳应用生态研究所 2 中国科学院研究生院 3 河南省气候中心)

摘要:利用线性趋势法对长白山地区 13 个气象台站建站以来的逐日温度资料进行分析,确定该区域的气温变化趋势,同时通过 Mann-Kendall 方法确定突变点位置,并结合 t 检验法进行检验。结果表明:区域的年平均最高气温和最低气温都有极为显著的增加趋势,分别为每 10 年增加了 0.23 和 0.46℃ ($\alpha=0.001$);近 50 年的最高气温和最低气温的时间系列都有一个突变点,其中最高气温的突变点出现在 1995 年左右,最低气温的突变点在 1985 年前后。这种变化使得温度日较差表现出明显的减小趋势,并在 1972 年出现一个突变点,前后平均相差 0.8℃。区域各月最高、最低气温及气温日较差与日照百分率均有极为显著的相关关系,一定程度上反映了温室效应持续增强的迹象。

关键词: 平均最高气温;平均最低气温;长白山地区

中图分类号: S716.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2009)02-0050-08

WANG Ji-jun^{1,2,3}; PEI Tie-fan¹; WANG An-zhi¹; GUAN De-xin¹; JIN Chang-jie¹. **Changes in the mean maximum and minimum temperatures in Changbai Mountain, northeastern China in the past 50 years.** *Journal of Beijing Forestry University* (2009)31(2) 50-57 [Ch, 25 ref.]

1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 110016, P. R. China;

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, P. R. China;

3 Henan Provincial Climate Center, Zhengzhou, 450003, P. R. China.

Using data of daily air temperature from 13 weather stations in the Changbai Mountain since establishment, the authors used the linear trend function to analyze the climatic trends in temperature. The authors also performed t -tests in combination with the Mann-kendall function to examine the points with abrupt changes in temperature. The results showed that asymmetry was detectable in all months, i.e., the maximum and minimum temperatures had a continuously increased trend (with a significance level of $\alpha = 0.001$ confidence degree). However, the increasing rate in the minimum temperature (0.46℃/10 yrs) was faster than that of the maximum (0.23℃/10 yrs). The abrupt changes in the minimum and maximum temperature occurred in 1985 and 1995, respectively. The decrease in diurnal temperature ranges resulted from the asymmetric changes in the maximum and minimum temperatures, reflecting a continuous increase in greenhouse effects.

Key words the mean maximum temperature; the mean minimum temperature; Changbai Mountain area

IPCC 第一工作组 4 次评估报告分别给出了百年全球温度变化趋势,虽然观测资料来源不同以及计算方法不尽相同,但近百余年全球温度升高是不容争辩的事实。4 次报告显示,升高的趋势平均从每百年 0.45℃到 0.74℃,其幅度大致为每百年 0.30~0.92℃^[1]。IPCC 报告时段的 4 组涉及到中国近百

年观测气温变化的数据一致表明,中国近百年的气候变暖趋势是毋庸置疑的,其气候倾向率为每百年 0.19~0.72℃;近 50 年中国的气候变暖更加明显,大约为每百年气温升高 0.64~0.92℃。我国在 1951—1990 年期间气温增加了 0.3℃^[2]。国外一些研究结果表明,全球陆地表面温度升高过程中多数

收稿日期:2008-05-16

http://www.bjfujournal.cn, http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(40675069、30771711)、“973”国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421101)。

第一作者:王纪军,博士生,高级工程师。主要研究方向:气候变化。电话:0371-65922935 Email:wjj-wang@hotmail.com 地址:110016 沈阳市沈河区文化路 72 号中国科学院沈阳应用生态研究所。

责任作者:裴铁璠,研究员。主要研究方向:生态水文和生态气候。电话:024-83970337 Email:tfpei@iae.ac.cn 地址:同上。

地区的最低温度比最高温度的升高速度明显,因而表现出日夜增暖的不对称性,使得日较差变小^[3-4]。翟盘茂等^[5]分析了中国近40年最高、最低气温的变化特征;马晓波^[6]利用西北地区4个台站资料分析了中国西北地区最高、最低气温的非对称变化;杜军^[7]则对西藏高原的最高、最低气温的非对称变化进行了研究,另外还有一些省份的相关报道^[8-11]。

气候资料作为森林生态学各分支学科研究的基础,可以服务于森林树木生长的模拟^[12]、水量平衡、霜害研究^[13-14]、物候研究^[15]和森林病虫害研究^[16]等,且为全球变化对森林生态系统的影响及响应研究提供基本依据。长白山地区目前是中国乃至全世界保存较为完整的自然生态系统之一,具有完善的植被垂直地带性分布和山地森林生态系统^[17]。全球气候变暖背景下,森林的响应受到越来越多的关注^[18]。长白山森林生态系统是全球变化研究中中国东北样带的东部端点^[19],在整个样带的研究中具有重要的地位。目前对长白山地区多年气候动态进行分析的较少,孙凤华等^[20]对东北地区近44年的气候暖干化区域及其可能影响进行了分析,张弥等^[21]曾对中国科学院长白山森林生态系统定位站的气象数据进行过分析,但资料序列偏短,仅有22年,且只是单点资料。而本文利用长白山及其周边地区13个气象观测站近50年的月气温资料进行分析,揭示该地区的气候变化趋势及其与全球以至中国变化的差异,为该样带生态系统的科研提供气候背景资料,为全球气候变化下森林生态系统的响应研究提供参考依据。

1 研究地区概况、资料与方法

1.1 自然概况

长白山位于中国吉林省东南部,地跨安图县、扶松县和长白县;地理位置 126°55′~129°E, 41°23′~

42°36′N;靠近亚洲大陆东部沿海,隔日本海,面向太平洋。长白山是中国东北最高山系和欧亚大陆北半部山地生态系统的典型代表,1980年被列为联合国生物保护圈。属于中温带大陆性季风气候,四季分明;气温年、日较差较大;雨热同季,有明显的气候垂直分布。气候总的特点是:冬季漫长凛冽,夏季短暂、温暖多雨,春季风大干燥,秋季凉爽多雾^[22]。

1.2 资料

利用吉林省气候中心提供的长白山地区13个气象台站整编气温资料,各站的具体参数指标见表1和图1。要素包括逐日最高、逐日最低和逐日平均等观测项目。本文主要研究气温变化趋势的时空不均一性,所以仅分析逐月和年的平均值。

表1 长白山地区气象台站的基本情况

TABLE 1 Meteorological stations in Changbai Mountain area			
序号	站名	海拔高度/m	气象资料起止时间
1	盘石	332.9	1957—2007
2	桦甸	263.9	1956—2007
3	辉南	298.2	1960—2007
4	靖宇	550.3	1955—2007
5	东岗	775.4	1957—2007
6	松江	591.6	1958—2007
7	和龙	474.7	1957—2007
8	龙井	242.4	1956—2007
9	珲春	37.8	1957—2007
10	延吉	178.2	1954—2007
11	临江	332.8	1953—2007
12	集安	178.6	1954—2007
13	长白	1 017.7	1957—2007

1.3 研究方法

所谓趋势是指气候要素的大体变化情况,即长时间、大范围的演变过程^[23]。“趋势”具有两种含意,一个是线性的逐渐上升或下降;另一种是间断的不连续的突变趋势^[24]。趋势性研究可以告诉我们一个序列的变化特征,而统计方法是检验变化趋势

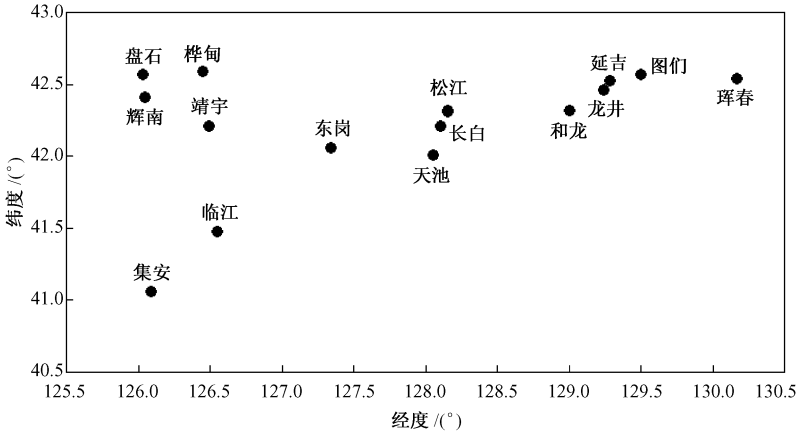


图1 长白山站点分布示意图

的有效工具之一。

1.3.1 线性趋势

目前常用的气候变化线性趋势分析方法有线性回归、累积距平、滑动平均、二次平滑、三次样条函数,以及 Mann-Kendall 秩次相关法和 Spearman 秩次相关法等。本文主要应用线性回归法对长白山地区气温的线性趋势进行分析。

假设 $x_i(i=1,2,\cdots,N)$ 为一个气候要素的观测序列, N 为序列长度。以序列 i 为自变量,气候要素为因变量,利用最小二乘法建立一元线性回归方程:

$$x_i=b_1i+b_0$$

(1)

线性方程斜率 b_1 的 10 倍定义为气候倾向率,表征时间序列的变化趋势。气候倾向率的大小表征变化速度;正负则表征变化方向: $b_1>0$ 表示增加, $b_1<0$ 表示减少。

1.3.2 突变趋势

符淙斌等^[25]对气候突变有一个普适的定义,即气候从一种稳定态(或稳定持续的变化趋势)跳跃式转变到另一种稳定态(或稳定持续的变化趋势)的现象,它表现为气候在时空上从一个统计特性到另一个统计特性的急剧变化。并且给出了 4 种突变形式,即均值突变、方差突变、跷跷板突变和转折突变。

常用的针对均值突变的检测方法有 6 种,即低通滤波法、滑动 t 检验法、Cramer 法、Yamamoto 法、Mann-Kendall 法(简称 M-K 法)和 Spearman 法。

M-K 法以检测范围宽、定量化程度高而富有生命力。该方法以气候序列平稳为前提,且序列随机独立、概率同分布。具体计算方法参见参考文献[25]。

本文结合 M-K 方法和滑动 t 检验法对气温序列进行突变分析,这是为了克服单一方法的局限性。另外,两种方法同时有效时又可以相互印证。

2 结果与分析

2.1 平均最高气温的变化趋势

表 2 给出了长白山地区逐站以及区域平均的逐月平均最高气温的变化趋势。可以看出,长白山地区的气温变化趋势时空分布不尽一致,整体上表现为增温。2 月份的增温趋势最为显著,气候倾向率为每 10 年 0.40~1.01℃;区域平均气候倾向率为每 10 年 0.75℃。这种气候趋势除松江和琿春两站仅能通过 $\alpha=0.10$ 的显著性检验外,其余 11 个站至少可以通过 $\alpha=0.05$ 的检验,其中辉南、临江、集安和长白 4 站的增温更是达到极为显著的水平。1 月份增温趋势的显著性仅次于 2 月份,有将近 70%的台站能够通过 $\alpha=0.10$ 以上的检验,每 10 年增加 0.35~0.67℃。10 月份区域各站及其平均都没有通过显著性检验,主要表现为波动形式。5 月份的最高气温则以降低为主,但也不显著,仍属自然波动。7 月和 11 月表现为空间的非均一性,部分台站升温,部分台站降温。

表 2 长白山地区气象台站逐月平均最高气温 10 年的变化趋势

℃

TABLE 2 Climatic changing trend of the monthly mean maximum temperature in Changbai Mountain area every ten years

站名	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
盘石	0.42 _b	0.80 _b	0.48 _b	0.20	−0.03	0.24 _a	−0.04	0.07	0.27 _b	0.10	−0.02	−0.02
桦甸	0.42 _b	0.78 _b	0.48 _b	0.16	−0.06	0.23 _a	−0.09	0.02	0.13	0.00	0.12	0.14
辉南	0.49 _b	1.01 _d	0.49 _b	0.32	0.10	0.32 _b	0.04	0.12	0.28 _b	0.18	0.17	0.18
靖宇	0.48 _b	0.70 _b	0.50 _b	0.26	0.05	0.31 _b	0.04	0.10	0.23 _b	0.12	0.14	0.15
东岗	0.38 _a	0.56 _b	0.33	0.10	−0.13	0.19	−0.08	0.02	0.19 _a	0.02	−0.04	0.05
松江	0.33	0.45 _a	0.17	0.04	−0.17	0.25 _a	−0.03	0.07	0.21 _a	0.03	0.03	0.03
和龙	0.26	0.65 _b	0.27	0.05	−0.23 _a	0.12	−0.02	0.10	0.14	0.11	−0.04	0.03
龙井	0.27	0.47 _b	0.29	−0.02	−0.27 _b	0.01	0.00	0.06	0.11	0.01	0.12	0.18
琿春	0.17	0.40 _a	0.28	0.15	−0.10	0.08	0.09	0.31 _b	0.29 _c	0.09	0.09	0.05
延吉	0.35 _b	0.63 _b	0.41 _b	0.08	−0.17	0.13	0.07	0.11	0.07	0.02	0.11	0.26
临江	0.55 _d	0.71 _d	0.42 _b	0.22	0.07	0.27 _b	0.09	0.06	0.14	0.02	0.05	0.33
集安	0.67 _d	0.70 _d	0.48 _b	0.20	−0.01	0.23 _b	0.08	0.03	0.16 _a	0.09	0.07	0.44 _b
长白	0.57 _b	0.81 _d	0.58 _b	0.29	0.08	0.55 _d	0.32 _b	0.37 _b	0.46 _b	0.23	0.07	0.23
平均	0.41 _a	0.75 _c	0.34	0.15	−0.09	0.23	0.05	0.12	0.29 _c	0.11	0.11	0.28

注:a、b、c、d 分别表示能够通过置信度为 0.10、0.05、0.01、0.001 的显著性检验。表 3~4 同此。

区域年平均最高气温的年际变化及 M-K 检验见图 2。历年平均值为 11.4℃;最大值出现在 1998 年,气温为 12.9℃;最小值则为 1969 年的 10.0℃。由此可见,极端最高气温具有阶段性变化特征;20 世纪 70 年代中叶以前,以低温为主,仅有 1961、

1967、1968 年例外,其中,后两年非常接近常年平均值;随后进入波动期,但仍以负距平为主,直到 1989 年;接着进入相对高温阶段,即使个别年份低于常年平均,但也多在常年平均值附近。年平均最高气温有极显著的上升趋势,速度为每 10 年 0.23℃;相关

系数达到 0.48, 能够通过 $\alpha=0.001$ 的显著性检验。

利用 M-K 检验方法可以检测出区域年平均最高气温在 1995 年前后有一次明显的突变, 再利用滑动 t 检验方法进行验证。1995 年及以前的平均值为 11.2°C , 均方差为 0.59°C ; 随后的 12 年平均最高气温为 11.9°C , 均方差仅有 0.50°C ; 均方差随着气温的升高不仅没有升高, 反而有所下降, 表明变化幅

度反而减小。利用公式不难得到 t 值为 -4.05 , 显然在 $\alpha=0.01$ 的显著性水平上, 应该拒绝两个序列没有显著差异的假设, 也就是说, 1995 年前后区域年平均最高气温确实存在一个突变。短短的 48 年内, 前后两个阶段的温差达到 0.7°C , 高于全球平均上升的幅度。

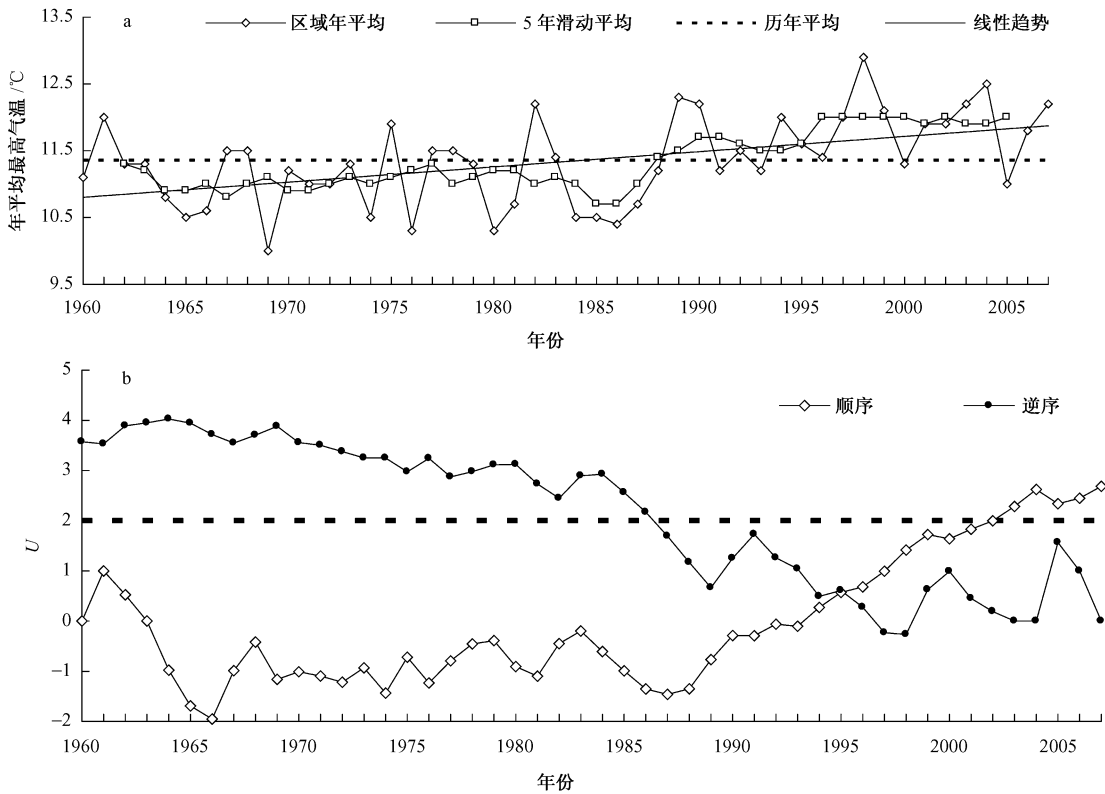


图 2 长白山地区区域年平均最高气温年际变化(a)及其 M-K 检验(b)
FIGURE 2 Annual variations and its test of the mean maximum temperature in Changbai Mountain area
注: U 为原序列中后面数据大于前面数据累积数的标准化变量。

2.2 平均最低气温的变化趋势

表 3 给出了长白山地区逐站以及区域平均的逐月平均最低气温的变化趋势。长白山地区的最低气温变化趋势时空分布与最高气温明显不同, 除和龙的 7、8 月, 集安的 8 月和龙井的 9 月属于降温外, 其余站月整体上表现为增温趋势。2 月份的增温趋势最为显著, 气候倾向率在每 10 年 $0.49\sim1.44^{\circ}\text{C}$ 之间; 区域平均气候倾向率也超过每 10 年 1.0°C , 达到 1.16°C 。这种气候趋势除长白和龙井两站仅能通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验外; 其余 11 个站均可以通过 $\alpha=0.001$ 的显著性检验。此外, 还有 3、4 和 6 月份各站月增温较为显著, 趋势从每 10 年 0.14°C 到 0.92°C 不等。增温最不显著的是 7 月和 8 月, 都是仅有 3 个站的趋势能够通过显著性检验。

区域年平均最低气温的年际变化及其 M-K 检验如图 3 所示。常年平均值为 -1.2°C ; 最大值出现在 1998 年, 比常年平均值高 1.8°C ; 最小值则为 1969

年, 比常年值低 1.6°C 。由此可见, 年平均最低气温阶段性变化特征更为显著; 1985 年为一个分界限, 之前以负距平为主, 仅有 1973、1975、1982 和 1983 年超过常年平均值, 也均在 -1.0°C 以下; 之后, 除 2000 年平均最低气温为 -1.3°C , 在常年平均值以下外, 其他年份均表现为高温态势。年平均最低气温有极为显著的上升趋势, 速度为每 10 年 0.46°C , 比平均最高气温的增长速度高了一倍; 相关系数达到 80.7%, 能够通过 $\alpha=0.001$ 的显著性检验。

利用 M-K 检验方法检测出区域年平均最低气温在 1985 年前后有一次明显的突变, 然后利用滑动 t 检验方法进行进一步验证。1985 年及以前的平均值为 -1.8°C , 均方差为 0.23°C ; 随后的 22 年平均最低气温 -0.6°C , 均方差为 0.57°C 。利用公式得到 t 值为 -7.68 , 用 t 分布的数值表进行检验, 可知, 在 $\alpha=0.01$ 的显著性水平上, 应该在 1985 年前后区域年平均最高气温确实存在一个突变。从一个低值区

表 3 长白山地区气象台站逐月平均最低气温 10 年的变化趋势

℃

站名	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
盘石	0.70 _b	1.26 _d	0.72 _b	0.39 _c	0.44 _d	0.54 _d	0.16 _a	0.14	0.35 _b	0.42 _c	0.32	0.35
桦甸	0.58 _b	1.41 _d	0.83 _c	0.36 _d	0.40 _d	0.48 _d	0.07	0.06	0.12	0.26 _b	0.44 _a	0.43
辉南	0.46	1.32 _d	0.67 _b	0.46 _d	0.44 _d	0.49 _d	0.07	0.07	0.26 _b	0.32 _b	0.31	0.31
靖宇	0.92 _d	1.44 _d	0.92 _d	0.57 _d	0.56 _d	0.61 _d	0.33 _c	0.34 _b	0.42 _d	0.46 _d	0.63 _b	0.72 _b
东岗	0.63 _b	1.04 _d	0.56 _b	0.34 _b	0.26 _b	0.45 _d	0.09	0.08	0.22 _b	0.24 _a	0.28	0.26
松江	0.69 _b	1.15 _d	0.77 _d	0.69 _d	0.71 _d	0.78 _d	0.36 _c	0.31 _b	0.50 _d	0.80 _d	0.83 _d	0.40 _a
和龙	0.76 _d	1.17 _d	0.47 _b	0.39 _d	0.19 _b	0.25 _b	−0.05	−0.06	0.15	0.39 _d	0.40 _b	0.32 _a
龙井	0.30	0.60 _b	0.37 _b	0.25 _b	0.07	0.20 _b	0.03	0.05	−0.01	0.08	0.27	0.27
琿春	0.44 _b	0.77 _d	0.51 _b	0.45 _d	0.39 _d	0.35 _d	0.15	0.22 _b	0.30 _b	0.39 _b	0.38 _b	0.50 _b
延吉	0.46 _b	0.74 _d	0.47 _b	0.37 _d	0.26 _c	0.32 _d	0.08	0.10	0.10	0.18 _a	0.28 _a	0.45 _b
临江	0.99 _d	1.10 _d	0.42 _b	0.32 _c	0.24 _c	0.29 _d	0.12	0.10	0.20 _b	0.17 _a	0.20	0.62 _b
集安	1.51 _d	1.38 _d	0.48 _b	0.27 _b	0.15 _a	0.14 _a	0.04	−0.03	0.11	0.15	0.14	0.87 _c
长白	0.34 _a	0.49 _b	0.34 _a	0.25 _b	0.15 _a	0.35 _d	0.10	0.10	0.19 _a	0.10	0.03	0.02
平均	0.66 _c	1.16 _d	0.55 _c	0.44 _d	0.36 _d	0.44 _d	0.11	0.11	0.30 _b	0.41 _d	0.36 _a	0.57 _c

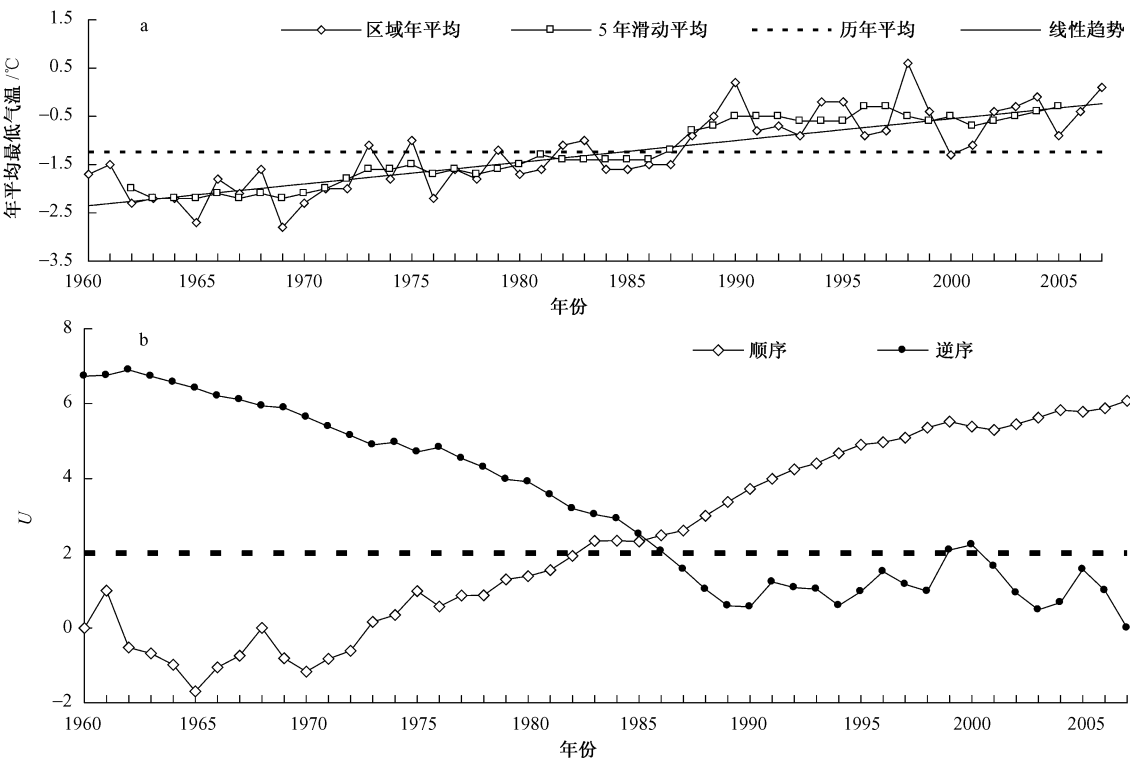


图 3 长白山地区区域年平均最低气温年际变化(a)及其 M-K 检验(b)

FIGURE 3 Annual variations and its test of the mean minimum temperature in Changbai Mountain area

跃迁到一个高值阶段,平均值之间相差 1.2℃。

2.3 平均气温日较差的变化趋势

表 4 给出了长白山地区逐站、区域平均的逐月平均气温日较差的线性趋势及其检验结果。整个区域有 27 个站月的气候倾向率为正值,表征气温日较差有上升的趋势,占整体统计站月的 17.3%;但仅有长白站的 1、2、7、8 和 9 月份的趋势比较显著,依次可以通过 $\alpha=0.01$ 、 $\alpha=0.01$ 、 $\alpha=0.10$ 、 $\alpha=0.01$ 和 $\alpha=0.10$ 的检验;其余 22 个站月只是气候的蠕变,更多地表现为气候变率内的波动。27 个站月以外的其他站月的相关则都是负相关,表明气温日较差

呈现下降趋势。下降最为明显的是 5 月份,所有站一致表现为减少,且除长白站以外的所有站的气温日较差趋势均能够通过显著性检验。在通过显著性检验的台站中,气候倾向率在每 10 年 -0.90°C (松江) $\sim -0.31^{\circ}\text{C}$ (集安) 之间。区域平均气温日较差气候倾向率为每 10 年 -0.45°C ,减少趋势还是极为明显的。次为显著的是 2 月份,除长白站为显著升高外,其余 12 个站均为减少趋势,速度从每 10 年 -0.77°C 到 -0.23°C 不等。区域平均日较差趋势同样极为显著,速度为每 10 年 -0.42°C 。

趋势最不显著且空间差异比较大的是 8、9 月

份,这两个月气候倾向率为正值的分别有 6 个站和 8 个站,只有长白站的趋势相对显著,分别通过 $\alpha=0.01$ 和 $\alpha=0.10$ 的显著性检验。负相关情况类似,也只有 1 个站(松江)通过检验($\alpha=0.10$)。

区域年平均气温日较差的年际变化及其 M-K 检验如图 4 所示。历年的平均值为 12.6°C ;最大值出现在 1962、1967 和 1970 年,比常年平均值高 1.0°C ;最小值则为 1995 年,比常年值低 0.8°C 。由图 4 可见,极端最高气温阶段性变化特征更为显著:1978 年为一个分界限,以前以正距平为主,只有 1966、1973、1974 和 1976 年的气温日较差低于常年平均值,且在 12.3°C 以上。接着进入一个相对波动期,时间持续至 1982 年。随后则进入一个持续的低值区,仅有 1989、1997、2000 和 2001 年的气温日较差高于常年平均值,且均在 13.0°C 以下。年平均气温

日较差具有极为显著的下降趋势,速度为每 10 年 -0.23°C ;相关系数达到 0.616,能够通过 $\alpha=0.001$ 的显著性检验。

结合 M-K 检验和滑动 t 检验方法对区域平均年气温日较差进行突变检验,可以发现气温日较差在 1972 年前后有一次明显的突变。1972 年及以前的平均值为 13.2°C ,均方差为 0.36°C ;随后的 35 年平均气温日较差为 12.4°C ,均方差和前 13 年接近,为 0.39°C 。最终计算的 t 值为 6.25,达到 $\alpha=0.01$ 的显著性水平,应该拒绝两个序列没有差异的假设,也就是说,1972 年前后区域年平均气温日较差确实存在一个显著的突变,由一个相对的高值阶段进入一个相对的低值区间。短短的 48 年内,前后两个阶段的温差就达到 0.8°C 。

表 4 长白山地区气象台站逐月平均气温日较差 10 年的变化趋势 ℃

站名	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
盘石	-0.21	-0.42 _b	-0.18	-0.26 _b	-0.50 _d	-0.29 _a	-0.14	-0.10	-0.07	-0.40 _b	-0.26 _a	-0.36 _b
桦甸	-0.11	-0.62 _c	-0.34	-0.25 _a	-0.50 _d	-0.30 _b	-0.14	-0.04	0.00	-0.32 _a	-0.26 _b	-0.31 _a
辉南	0.03	-0.31 _b	-0.18	-0.14	-0.34 _b	-0.17	-0.03	0.05	0.02	-0.15	-0.13	-0.13
靖宇	-0.42 _c	-0.70 _d	-0.40 _d	-0.35	-0.60 _d	-0.32 _b	-0.25 _a	-0.16	-0.16	-0.44	-0.40 _c	-0.56 _d
东岗	-0.18	-0.37 _d	-0.19 _c	-0.25 _a	-0.35 _b	-0.19	-0.05	-0.01	0.03	-0.26 _a	-0.25 _c	-0.20 _b
松江	-0.40 _c	-0.67 _d	-0.66 _d	-0.71 _d	-0.90 _d	-0.56 _c	-0.35 _b	-0.24 _a	-0.29 _a	-0.87 _d	-0.71 _d	-0.40 _c
和龙	-0.40 _c	-0.50 _d	-0.20 _a	-0.36 _b	-0.43 _b	-0.14	0.09	0.13	0.01	-0.33	-0.39 _d	-0.26 _b
龙井	-0.04	-0.23	-0.16	-0.32	-0.37 _b	-0.27 _a	-0.07	-0.01	0.11	-0.09	-0.19	-0.12
琿春	-0.32 _b	-0.47	-0.36 _b	-0.35 _b	-0.50 _b	-0.33 _b	-0.12	-0.01	-0.05	-0.41 _c	-0.24 _a	-0.44 _d
延吉	-0.14	-0.23 _a	-0.20	-0.39 _b	-0.62 _d	-0.30	-0.06	0.02	-0.08	-0.29 _a	-0.20	-0.20
临江	-0.39 _d	-0.40 _c	-0.03	-0.19	-0.34 _c	-0.09	0.01	0.05	0.02	-0.29 _a	-0.18	-0.32 _d
集安	-0.92 _d	-0.77 _d	-0.03	-0.17	-0.31 _b	0.03	0.07	0.10	0.06	-0.22	-0.08	-0.55 _d
长白	0.22 _a	0.27 _a	0.15	0.03	-0.12	0.17	0.27 _a	0.28 _c	0.29 _a	0.08	0.02	0.14
平均	-0.25 _c	-0.42 _d	-0.21 _b	-0.29 _b	-0.45 _d	-0.21	-0.06	0.01	-0.01	-0.31 _b	-0.25 _c	-0.29 _c

2.4 气温日较差变化趋势的原因分析

通过长白山地区最高、最低温度的变化趋势分析,可以发现,平均温度的增温在夜间明显高于白天,造成了气温日较差的变化;而且最高、最低气温在年际变化上的不同步性,导致了气温日较差在突变点上的不一致性。长白山地区最高、最低气温变化从而导致日较差普遍减小的可能原因值得深入讨论,对于解释平均气温的变化趋势有很重要的意义。日较差的变小与最低气温的明显升高有关,这是温室效应的结果。人为释放的温室气体(如 CO₂)浓度的增加当然可能是其中的一个原因,大气水分的增长也可以产生明显的温室效应。单考虑人为释放的温室气体的增加无法解释最高、最低温度变化的不对称性以及最高、最低温度变化的地域性差异^[5]。翟盘茂等^[5]根据实际资料研究了日照百分率与大气水含量和最高、最低温度之间的关系,发现大气水分与日照百分率存在显著的反相关关系,因此本文选

择日照百分率与最高、最低气温及气温日较差的相关关系进行讨论。

图 5 给出了长白山地区 13 个台站 1960—2007 年逐月平均日照百分率和气温日较差的散点分布,相关系数均可以通过 $\alpha=0.001$ 的极显著性检验,表征了日照在气温变化中所起的作用。其中最高、最低气温均与日照百分率呈显著的负相关关系,随着日照百分率的减少,二者都随之增加(只是增加的速度有所区别),从而导致气温日较差有着相反的趋势,即随着日照百分率的减少,日较差呈现减少的趋势。这种相关与以往的研究结果有着明显的不同^[5,9],以前的研究表明,四季各代表月的平均最高气温与日照百分率均是正相关关系;最低气温与日照百分率的相关和以前的研究结果一致,为负相关关系。这显示了在全球变暖情景下区域表征的不一致性

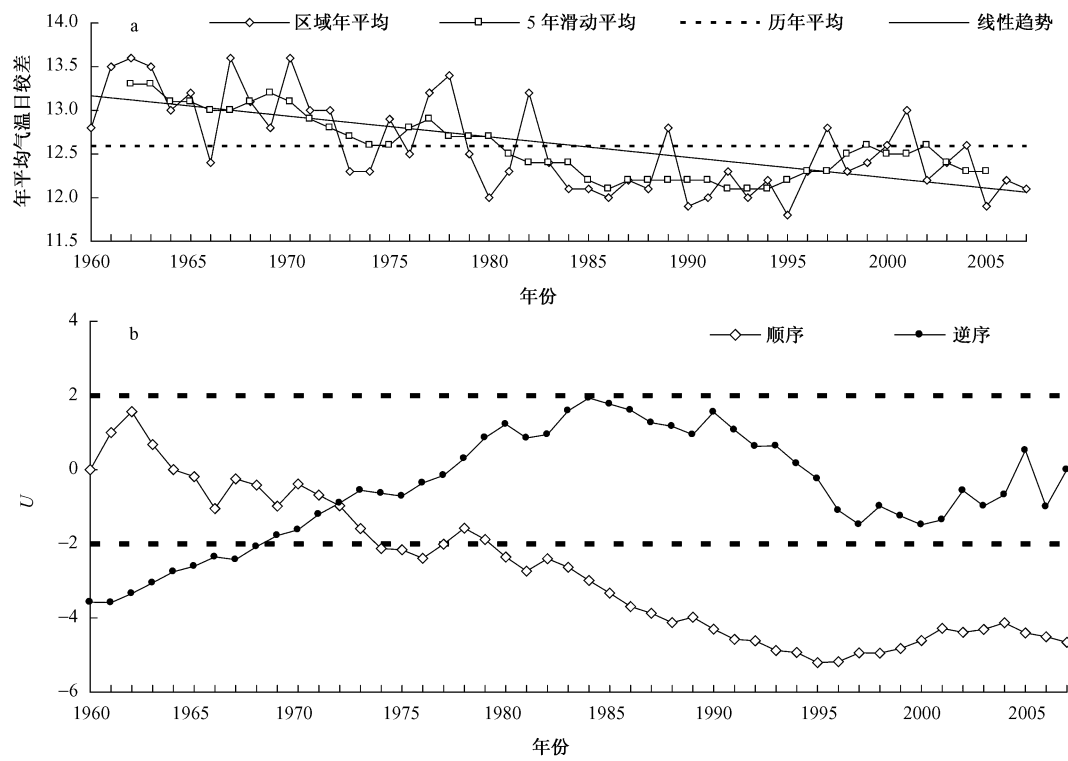


图 4 长白山地区区域年平均气温日较差年际变化(a)及其 M-K 检验(b)
FIGURE 4 Annual variations and its test of diurnal temperature range in Changbai Mountain area

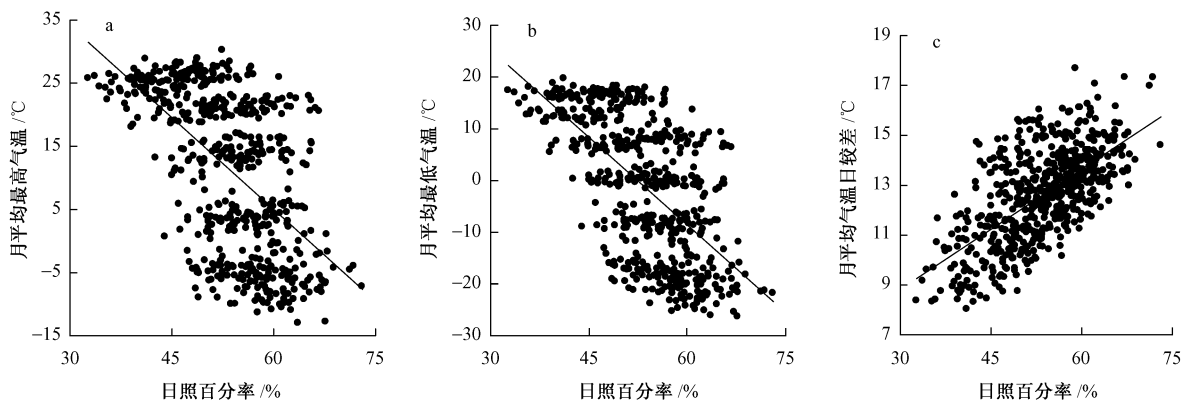


图 5 月平均最高、最低气温及气温日较差与日照百分率的关系
FIGURE 5 Correlations between the monthly mean maximum (a), minimum temperature (b), diurnal temperature range (c) and sunshine percentage

3 结 论

在全球变暖情景下,长白山地区的气温同样具有升高的趋势。但具体到区域内的气象台站和观测序列而言,最高气温和最低气温表现为时空上的不对称性和不均一性。具体表现在:

1)年平均最高气温有极显著的升高趋势,速度为每 10 年 0.23℃。年平均最高气温在 1995 年前后发生一次突变,在 $\alpha=0.01$ 时,两段序列有显著的差异。

2)年平均最低气温表现为极显著的上升趋势,速度为每 10 年 0.46℃。年平均最低气温在 1985 年有一个突变点,前后温度相差 1.2℃,t 检验的结果

表明这两段的差异极为显著。

3)年平均气温日较差在 1972 年左右发生突变,在 $\alpha=0.01$ 时,两段序列有显著差异,1972 年前后相差 0.8℃

4)从最高、最低气温和气温日较差的分析来看,最低气温比最高气温增加更为显著,且增温速度也更快。长白山地区的气温变化有着明显的时间不对称性和空间不均一性。

5)区域各月最高、最低气温及气温日较差与日照百分率均有极为显著的相关关系,一定程度上反映了温室效应持续增强的迹象。

致谢 本文研究资料由吉林省气候中心谢今范和徐杰提供,在此一并致谢。

参 考 文 献

[1] 赵宗慈,王绍武,罗勇·IPCC 成立以来对温度升高的评估与预
估[J].气候变化研究进展,2007,3(3):183-184.
ZHAO Z C, WANG S W, LUO Y. Assessments and projections of
temperature rising since the establish of IPCC [J]. *Advances in
Climate Change Research*, 2007, 3(3):183-184.

[2] 丁一汇,戴晓苏·中国近百年来的温度变化[J]. 气象,1994,
20(12):19-26.
DING Y H, DAI X S. Temperature variation in China during the last
100 years[J]. *Meteorological Monthly*, 1994, 20(12):19-26.

[3] KARL T R, KUKLA G. Global warming evidence for asymmetric
diurnal temperature change[J]. *Geophys Res Lett*, 1991, 18, 2 253-
2 256.

[4] KARL T R, JONES P D, KNIGHT R W. *et al.* A new perspective
on recent global warming asymmetric trends of daily maximum and
minimum temperature [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1993, 74 (6):
1 007-1 023.

[5] 翟盘茂,任福民·中国近四十年最高最低温度变化[J]. 气象
学报,1997,55(4):418-429.
ZHAI P M, REN F M. On change of China 's maximum and
minimum temperature in the recent 40 years[J]. *Acta Meteorologica
Sinica*, 1997, 55(4):418-429.

[6] 马晓波·中国西北地区最高、最低气温的非对称变化[J]. 气
象学报,1999,57(5):611-613.
MA X B. The asymmetric change of maximum and minimum
temperature in the northwest China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*.
1999, 57(5):611-613.

[7] 杜军·西藏高原最高、最低气温的非对称变化[J]. 应用气象
学报,2003,14(4):437-444.
DU J. Asymmetric change of maximum and minimum temperature in
Tibetan Plateau from 1971 to 2000 [J]. *Journal of Applied
Meteorological Science*, 2003, 14(4):437-444.

[8] 谢庄,曹鸿兴·北京最高和最低气温的非对称变化[J]. 气象
学报,1996,54(4):501-507.
XIE Z, CAO H X. The asymmetric trend of change in maximum and
minimum temperature in Beijing [J]. *Acta Meteorologica Sinica*.
1996, 54(4):501-507.

[9] 覃军,陈正洪·湖北省最高气温和最低气温的非对称性变化
[J]. 华中师范大学学报(自然科学版),1999,33(2):286-290.
QIN J, CHEN Z H. Asymmetric trends of daily maximum and
minimum temperatures in Hubei Province [J]. *Journal of Central
China Normal University (Nat Sci)*, 1999, 33(2):286-290.

[10] 杨文峰·陕西省近 40 年最高最低温度变化[J]. 气象科技,
2006,34(1):68-72.
YANG W F. Variation of maximum and minimum temperature in
recent 40 years in Shaanxi Province[J]. *Meteorological Science and
Technology*, 2006, 34(1):68-72.

[11] 郑艳,张永领,吴胜安·海口市气温变化及最高最低气温的非
对称性变化[J]. 气象,2005,31(7):28-31.
ZHENG Y, ZHANG Y L, WU S A. Temperature change and
asymmetric change of maximum and minimum temperature of
Haikou, Hainan Province [J]. *Meteorological Monthly*, 2005, 31
(7):28-31.

[12] KIMMINS J P, COMEAU P G, KURZ W. Modeling the interactions
between moisture and nutrients in the control of forest growth [J].
Forest Ecology and Management, 1990, 30(1-4):361-379.

[13] CANNEL M G R. Spring frost damage on young picea stitchensis 1:
Occurrence of damaging frosts in Scotland compared with western
North America[J]. *Forestry*, 1984, 57:159-175.

[14] CANNEL M G R, SHEPPARD L J, SMITH R I, *et al.* Autumn
frost damage on young picea stitchensis 2: Shoot frost hardening, and
the probability of frost damage in Scotland [J]. *Forestry*, 1985, 58:
145-166.

[15] KRAMER K, FRIEND A, LEINONEN I. Modeling comparison to
evaluate the importance of phenology and spring damage for the
effects of climate change on growth of mixed temperatezone deciduous
forests[J]. *Climate Research*, 1996, 7:31-41.

[16] RUSSO J M, LIEBHOLD A M, KELLEY J G. Mesoscale weather data
as input to a gypsy moth (Lepidoptera: Lymantriidae) phenology
model[J]. *Journal of Economic Entomology*, 1993, 86:838-844.

[17] 郑景明,姜凤岐,曾德慧,等·长白山阔叶红松林的生态价位
[J]. 生态学报,2004,24(1):48-54.
ZHENG J M, JIANG F Q, ZENG D H, *et al.* Eco-value level
assessment of broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain
[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1):48-54.

[18] 张新时,周广胜,高琼,等·中国全球变化与陆地生态系统关
系研究[J]. 地学前缘,1997,4(2):137-144.
ZHANG X S, ZHOU G S, GAO Q, *et al.* Study of global change
and terrestrial ecosystem in China [J]. *Earth Science Frontiers*,
1997, 4(2):137-144.

[19] 周广胜,王玉辉,蒋延玲·全球变化与中国东北样带 (NECT)
[J]. 地学前缘,2002,9(1):198-216.
ZHOU G S, WANG Y H, JIANG Y L. Global change and water-
driven IGBP-NECT, northeast China [J]. *Earth Science Frontiers*,
2002, 9(1):198-216.

[20] 孙凤华,杨素英,陈鹏狮·东北地区近 44 年的气候暖干化趋
势分析及其可能影响[J]. 生态学杂志,2005,24(7):751-755.
SUN F H, YANG S Y, CHEN P S. Climatic warming-drying trend
in northeastern China during the last 44 years and its effects [J].
Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(7):751-755.

[21] 张弥,关德新,韩士杰,等·长白山阔叶红松林近 22 年的气候
动态[J]. 生态学杂志,2004,24(9):1 007-1 012.
ZHANG M, GUAN D X, HAN S J, *et al.* Climatic dynamics of
broadleaved Korean pine forest in Changbai Mountain during the last
22 years [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 24 (9):1 007-
1 012.

[22] 张凤山,迟振文,李晓宴·长白山地区气候分析及其初步评价
[J]. 森林生态研究,1980(1):193-213.
ZHANG F S, CHI Z W, LI X Y. Climate assessment of Changbai
Mountain area [J]. *Research of Forest Ecosystem*, 1980 (1):193-
213.

[23] 黄嘉佑·第三讲：气候状态变化趋势与突变分析[J]. 气象,
1995,21(7):54-57.
HUANG J Y. Section 3: Analysis on changing trend and abrupt of
climatic state [J]. *Meteorological Monthly*, 1995, 21(7):54-57.

[24] 刘春蓁·气候变化对江河流域变化趋势影响研究进展[J]. 地
球科学进展,2007,22(8):777-783.
LIU C Z. The advances in studying detection of streamflow trend
influenced by climate change [J]. *Advances in Earth Science*, 2007,
22(8):777-783.

[25] 符淙斌,王强·气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学,
1992,16(4):482-493.
FU C B, WANG Q. The definition and detection of the abrupt
climatic change [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1992, 16 (4):
482-493.

(责任编辑 冯秀兰)