

董丹宏, 黄刚. 2015. 中国最高、最低温度及日较差在海拔高度上变化的初步分析 [J]. 大气科学, 39 (5): 1011–1024. Dong Danhong, Huang Gang. 2015. Relationship between altitude and variation characteristics of the maximum temperature, minimum temperature, and diurnal temperature range in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (5): 1011–1024, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1501.14291.

中国最高、最低温度及日较差在海拔高度上变化的初步分析

董丹宏^{1,4} 黄刚^{2,3}

¹ 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225

² 中国科学院大气物理研究大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

³ 全球变化研究协同创新中心, 北京 100875

⁴ 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100029

摘 要 本文利用中国 740 个气象台站 1963~2012 年均一化逐日最高温度和最低温度资料, 分析了中国地区最高、最低气温和日较差变化趋势的区域特征及其与海拔高度的关系。结果表明: 近 50 年气温的变化趋势无论是年或季节变化, 最低温度的增温幅度都高于最高温度, 且其增温显著区域都对应我国高海拔地区。除了春季, 其他季节最高、最低温度及日较差的升温幅度随着海拔高度的升高而增大, 其中最高温度的变化趋势与海拔高度的相关性最好。同一海拔高度上, 最高、最低温度在不同年代的增幅具有不一致性: 20 世纪 80 年代, 二者变化幅度最小; 20 世纪 90 年代, 二者增幅最大, 尤以低海拔地区最为明显。2000 m 以上高海拔地区: 最高温度和最低温度的变化趋势在 20 世纪 90 年代以前变化较小, 而在近十年增幅十分明显; 日较差季节变化大: 夏季减小, 冬季增加。20 世纪 90 年代以前, 最高、最低温度随海拔高度变化不大, 而近 20 年随海拔高度升高, 最高、最低温度的变化趋势几乎都是先减小后增加。高海拔地区比低海拔地区对全球变化反应更明显。

关键词 最高温度 最低温度 日较差 海拔高度 变化趋势

文章编号 1006-9895(2015)05-1011-14

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1501.14291

Relationship between Altitude and Variation Characteristics of the Maximum Temperature, Minimum Temperature, and Diurnal Temperature Range in China

DONG Danhong^{1,4} and HUANG Gang^{2,3}

¹ Chengdu University of Information Technology, Department of Atmospheric Science, Chengdu 610225

² State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

³ Joint Center for Global Change Studies, Beijing 100875

⁴ Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Based on daily maximum and minimum temperature data from 740 homogenized surface meteorological

收稿日期 2014-10-15; 网络预出版日期 2015-02-03

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2011CB309704, 全球变化研究国家重大科学研究计划项目 2012CB955604, 国家自然科学基金项目 41425019、41275083、91337105, 高原大气与环境四川省重点实验室开放课题 PAEL-2014-K2

作者简介 董丹宏, 女, 1990 年出生, 硕士研究生, 主要从事极端天气气候的研究。E-mail: ddh330@yeah.net

通讯作者 黄刚, E-mail: hg@mail.iap.ac.cn

stations, the present study investigates the regional characteristics of the temperature trend and the dependence of maximum and minimum temperature and diurnal temperature range changes on the altitude during the period 1963–2012. It is found that the magnitude of minimum temperature increase is larger than that of the maximum temperature increase. The significant warming areas are located at high altitude, all of which increase remarkably in size during the study period. The maximum and minimum temperature and diurnal temperature range trends increase with altitude, except in spring. The correlation coefficients between the maximum temperature trend and altitude are the highest. At the same altitude, the amplitudes of maximum and minimum temperature show inconsistency: They exhibit increasing trends in the 1990s, with significant change at low altitude; they change minimally in the 1980s; and at high altitudes (above 2000 m), the magnitudes of their changes are weak before the 1990s but stronger in the last 10 years of the study period. The seasonal variability of the diurnal temperature range is large over 2000 m, decreasing in summer but increasing in winter. Before the 1990s, there is no significant variation between maximum and minimum temperature and altitude. However, their trends almost all decrease and then increase with altitude in the last 20 years. Additionally, the response to climate in highland areas is more sensitive than that in lowland areas.

Keywords Maximum temperature, Minimum temperature, Diurnal temperature range, Altitude, Temperature trend

1 引言

联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 公布的第五次气候评估报告显示, 从上世纪 50 年代以来, 全球平均气温不断上升。在北半球, 过去 30 年, 每十年的增温幅度高于 1850 年以来的任何时期; 并有专家表示尽管在过去的 15 年里, 全球变暖曾出现停滞现象, 但这并不能反映全球气候长期以来的变化趋势。而在温度上升的时期内, 年均最低气温的增长趋势高于年均最高气温, 导致全球日较差的下降 (Stocker et al., 2013)。联合国“气候变化科学纲要”上提到尽管全球平均温度在 21 世纪以来没有上升, 但变暖的长期影响不仅仍旧存在, 且有日益加强的趋势 (Balint et al., 2009)。而变暖趋势之所以受阻, 可能是因 21 世纪以来的拉尼娜事件, 且太阳辐射由弱到强, 这在相当大程度上抵消了人类活动造成的变暖。而中国气候在近十年继续变暖, 特别是东北地区是全球变暖最强烈的地区之一, 其中原因较为复杂, 除了温室效应、ENSO、太阳辐射、火山活动外, 城市热岛效应及与海洋热盐环流有关的年代际变化, 也可能有一定影响 (王绍武等, 2010)。全球变暖不仅表现在平均温度的升高, 极端温度及日较差也有明显变化, 并存在显著的区域差异 (Easterling et al., 2000)。与最高、最低温度变化不同的是, 日较差可以反映全球和区域性的温度变化幅度特征, 有着重要的生态学意义, 对人类生存环境的变化、气候异常的影响有特殊的参考价值 (陈铁喜和陈星, 2007)。因此, 在年代际变化尺度上, 日较差能独立于平均温度的变化, 较好反映系统的内在变化 (Braganza et al., 2004); 并

且, 日较差与最高、最低温度也有很大关系, 因此对日较差的分析比单纯分析平均温度的变化更能作为气候变化研究提供支持 (汪凯等, 2010)。

观测结果表明, 上世纪日较差显著减小, 这不可能仅由自然变化因素导致 (Braganza et al., 2004)。Vose et al. (2005) 通过分析全球台站温度观测数据后, 认为 1950~1980 年, 由于全球几乎所有地区最低温度和最高温度都在增加, 导致日较差下降比较明显, 而 1979 年以后日较差下降趋势不再显著。国内对日较差变化的研究有很多。就全国区域分析来看, 年平均最高、最低温度变化在年代际尺度上变化基本一致, 从 20 世纪 70 年代开始缓慢升温, 80 年代中期升温迅速, 在 90 年代后期达历史最高, 后又回落; 相应地, 日较差从 20 世纪 60 年代初开始在波动中呈下降趋势, 并持续到 90 年代初, 从 20 世纪 90 年代开始, 日较差下降趋势仍持续, 但下降幅度有所减缓 (Liu et al., 2004; 唐红玉等, 2005)。从季节变化上来看, 各季最低气温呈增长趋势, 日较差呈减少趋势, 并在我国北方尤为明显, 以冬季趋势最为明显 (任国玉等, 2005; 唐红玉等, 2005)。此外, 最高、最低气温的非对称变化在夏季最为显著, 夏季最高气温降低, 最低气温增加 (王凯等, 2010)。日较差的变化有明显的区域和季节性, 平均减小幅度为高纬度地区大于低纬度地区 (唐红玉等, 2005; 陈铁喜和陈星, 2007), 并且西部的青藏高原和新疆地区的日较差变化与东部地区差异尤其明显 (陈铁喜和陈星, 2007)。一些研究在对 20 世纪后半期青藏高原地区日较差的特征分析后, 发现高原大部分地区平均气温和最高、最低气温普遍升高, 最低气温上升速率是最高气温

的 1~3 倍, 日较差显著减小(马晓波和李栋梁, 2003); 另外, 青藏高原东部地区日照时数与日较差有密切的正相关, 总云量与日较差则有反相关关系(李跃清, 2002)。

中国地形多种多样, 山区面积占全国总面积的 2/3。由于区域所处的陆地位置、纬度位置以及大气环流系统位置的不同, 加上地形等的影响, 区域对全球变化的响应是千差万别的(卢爱刚等, 2006)。Dong et al. (2014) 在研究平均温度在不同海拔高度上的变化时, 发现以 200 m 高度为界, 200 m 以下随着海拔高度的升高, 平均温度的增温趋势减弱, 200 m 以上地区平均温度的增温趋势加强。中国山区面积广大, 纬度跨度大, 受多种气流影响, 因此对垂直空间上温度变化的分析, 可从另一方面揭示全球变暖对不同海拔高度地区的作用强度; 而且高山具有较大的热力和动力作用, 对区域和全球的气候变化、水循环、生态环境产生至关重要的影响。此外, 许多平均温度的变化与最高、最低温度的变化紧密相连, 因此进一步分析最高、最低温度以及日较差的变化有助于全面了解中国垂直方向上的气候变化特征。关于 20 世纪 50 年代以来中国温度变化趋势的研究重点着眼于气温的空间分布特征, 对于垂直高度上温度变化的研究, 目前大部分仅限于青藏高原等高海拔地区的温度变化与海拔高度的关系。如 Rebetez and Beniston (1998) 等发现阿尔卑斯山的日较差与日照时数在低海拔测站有很强的相关性, 而高海拔地区没有这样明显的关系。本文拟研究近 50 年全国最低气温、最高气温以及日较差变化的区域差异和季节变化对比及其与海拔高度的关系, 并初步探讨日较差变化随海拔高度变化在时空上所遵循的规律及其主要成因。这可以揭示各海拔高度对全球变化的响应速度与程度存在一定的差别, 为进一步揭示中国不同海拔高度地区的气候特征做一些探索。

2 资料与方法

2.1 资料来源

所用资料来自《中国均一化气温数据集 1.0 版》的升级版本^①, 升级版本的数据包含中国 825 个国家基本、基准站 1951 年至 2012 年逐日最高、最低以及平均气温均一化数据集。气象资料由于建站、

迁址等问题存在非均一性, 所以本文基于均一化气温数据对温度的变化在海拔高度上的变化进行分析。由于我国地面气象观测规范曾做过多次修改, 尤其是在 1962 年以前, 包括观测时制、时间、次数、观测场地以及观测仪器有较大的变化, 所以分析时段选取 1963~2012 年共 50 年(吴增祥, 2005; 李百超等, 2009)。为保证资料准确、可靠, 剔除 50 年中缺测资料达 3 个月以上的气象站点, 最终得到全国 740 个测站资料, 包括日平均气温、日最高气温和日最低气温以及测站的位置数据, 其中测站的海拔高度范围为 0~4700 m, 纬度范围为 16°~53°N, 经度范围为 75°~133°E。

根据选取的全国 740 个气象站点的海拔高度分布统计情况(图 1)可知: 在我国东北南部、华北东部、黄淮及江南、华南大部分地区台站高度在 200 m 以下, 在东北大部分地区、内蒙古、新疆、西北东南部以及西南地区, 其测站海拔高度在 200~2000 m 之间, 其余在西藏、西北地区中部, 测站海拔在 2000 m 以上, 且最为集中。

2.2 资料处理与研究方法

(1) 空间平面分布图采用 Arcgis 地理信息系统软件绘制, 插值方法选用地统计学模块中的克里格法。克里格法是从变量相关性和变异性出发, 在有限区域内对区域化变量的取值进行无偏、最优估计的一种方法, 也是对空间分布的数据求线性最优、无偏内插估计的一种方法(彭彬等, 2011)。

(2) 单个站点计算气温变化趋势采用一元线性回归:

$$x_t = a_0 + a_1 t, \quad (1)$$

其中, t 为 1963~2012 年的时间序列, x_t 为利用线性回归估计得到的气温估计值, a_0 和 a_1 是回归系数。气温趋势倾向率为 $b=10a_1$, 单位为 $^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$ 。线性倾向率估算采用最小二乘法, 为判断变化趋势的程度是否显著, 采用 t 检验法对相关系数进行显著性检验, 本文给定显著性水平为 0.05(Santer et al., 2000)。

(3) 季节上采用气象季节划分方法, 即上年 12 月至当年 2 月为冬季、3~5 月为春季、6~8 月为夏季、9~11 月为秋季, 年平均值为当年 12 个月的算术平均。

(4) 日较差 (Diurnal Temperature Range, T_{DTR})

① 中国气象局国家气象信息中心. 2013. 中国均一化气温数据集 1.0 版 (CHHT1.0) 升级版本 [M]. 北京

为日最高气温 (Maximum Temperature, $T_{\max}$) 与日最低气温 (Minimum Temperature, $T_{\min}$) 之差, 可表示为

$$T_{\text{DTR}} = T_{\max} - T_{\min} . \quad (2)$$

本文的设计思路为: 首先利用 (2) 式计算各个站点的逐日日较差, 再用线性方法计算出每个站点 40 年各年、季节平均最高气温、最低气温和日较差的变化趋势。最高、最低气温距平基于 1971~2000 年 30 年的气候态值为基础。为研究气象要素变化与海拔高度的关系, 在不同的海拔高度范围上计算平均最高温度、平均最低温度和平均日较差, 以及对其变化趋势做区域平均, 分析这三个气象要素的趋势变化、年际变化及年代际变化。

3 结果分析

3.1 1963~2012 年全国地区气温变化特征

由全国台站气温倾向率统计数据 (表 1) 可以看出近 50 年全国最高温度和最低温度大致呈增温趋势。变化趋势无论是年际或季节变化, 最低温度的增温幅度都高于最高温度; 相应地, 最低温度的降温幅度也都小于最高温度。最高温度除夏季外, 其他季节增温明显; 最低温度各季增温都很明显, 尤其冬季达到 $0.5^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$ 。尽管有个别测站有降温趋势, 但几乎没有站点通过显著性检验。大部分测站的日较差呈下降趋势, 冬季减小幅度最大, 达 $-0.27^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$; 在春季, 日较差增大的测站数最多且为四季中上升幅度最大的季节, 但下降幅度却也比夏秋两季大。

从全国地区近 50 年气温倾向率的分布与等高线叠加的空间图来看 (图 2), 我国最高、最低温度为一致的增长趋势。最高温度和最低温度在我国东北部、内蒙古和华北北部一带, 以及青藏高原东部地区为增温高值区, 这些区域都对应我国高海拔地区, 海拔几乎都在 200 m 以上, 且在 35°N 以北尤其明显。在我国黄淮地区和西南地区东部, 最高温度增温趋势不明显。除西南地区东部外, 最低温度的增温幅度要比最高温度更为明显。日较差的变化趋势的空间分布与最低温度较为一致, 在我国东北、内蒙古、华北及黄淮东部地区有下降低值区, 西北西部及青藏高原为较明显的下降趋势。值得注意的是在我国西北地区东南部、长江流域中部地区, 日较差有微弱的增加趋势。这种空间分布, 周

雅清和任国玉 (2010) 在分析中国极端气温事件变化特征时也得出相似的结论: 日最高气温的极大值整体都有上升趋势, 最高、最低气温的极大值在北方上升较明显, 而在长江中下游和西南地区有下降的趋势。翟盘茂和任福民 (1997) 在分析 1950~1990 年的气象要素变化时, 认为最高温度在黄河以北、 95°E 以西以增温为主, 最低温度在全国表现出一致的增温。

表 1 1963~2012 年全国气温倾向率统计 (包含增温、降温的站点统计及相应的气温倾向率)

Table 1 Statistics of the temperature trend in China during 1963~2012 (including the numbers of stations with a positive and negative trend and the corresponding temperature trend)

最高温度				
	增温站点数	气温倾向率/ $^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$	降温站点数	气温倾向率/ $^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$
年	737(619)	0.21	3(0)	-0.03
春季	690(350)	0.24	50(1)	-0.06
夏季	585(372)	0.19	155(0)	-0.08
秋季	736(509)	0.23	4(0)	-0.05
冬季	726(342)	0.27	14(0)	-0.03
最低温度				
	增温站点数	气温倾向率/ $^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$	降温站点数	气温倾向率/ $^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$
年	735(716)	0.36	5(0)	-0.02
春季	689(572)	0.33	51(1)	-0.05
夏季	725(667)	0.29	15(1)	-0.05
秋季	736(640)	0.33	4(0)	-0.05
冬季	738(704)	0.5	2(0)	-0.02
日较差				
	上升的测站数	日较差倾向率/ $^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$	下降的测站数	日较差倾向率/ $^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$
年	164(34)	0.08	576(400)	-0.18
春季	256(117)	0.14	484(299)	-0.23
夏季	123(77)	0.07	617(373)	-0.18
秋季	206(75)	0.09	534(259)	-0.18
冬季	66(12)	0.1	674(426)	-0.27

注: 括号内为通过 0.05 显著性水平检验的站点数。

从最高温度、最低温度和日较差的距平变化来看 (图 3), 最高温度在 1990 年前有微弱的下降趋势, 且变化波动大, 在 1990 年后期为明显的上升趋势, 到了 2000 年以后增温达到最大值; 最低温度在这两个时期内则是先微弱增加后增加迅速; 日较差在 20 世纪 90 年代以前迅速减小, 之后有微弱的减小。周雅清和任国玉 (2010) 在分析极端温度时也得出最高温度和最低温度的极大值在 20 世纪 90 年代中期迅速升高, 在进入 2000 年以后仍然保

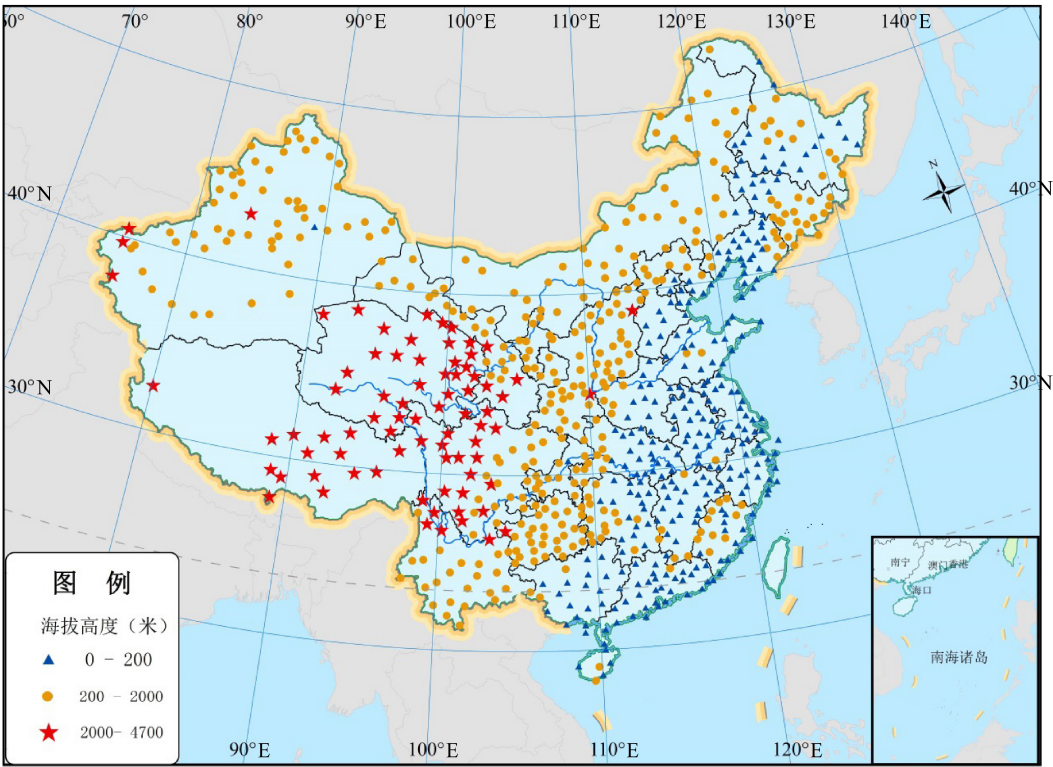


图1 中国站点海拔分布。蓝色三角形、黄色圆点、红色五角星分别代表海拔位于 200 m 以下、200~2000 m、2000 m 以上台站位置

Fig. 1 The distribution of the 740 Chinese meteorological stations whose data are used in this study, delineated by altitude: 0~200 m (blue triangles); 200~2000 m (yellow circles); 2000~4700 m (red stars)

持在较高水平上。

综上所述，变化趋势无论是年际或季节变化，最低温度的增温幅度都高于最高温度的增幅，且其增温明显区域都对应我国高海拔地区，海拔几乎都在 200 m 以上，在 35°N 以北尤其明显。大部分测站的日较差呈下降趋势，冬季减小幅度最大，其变化趋势的空间分布与最低温度较为一致。最高温度除夏季外，其他季节增温明显；最低温度各季增温都很明显，尤其冬季，增温达 $0.5^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$ 。最高、最低温度在 20 世纪 90 年代后期增温迅速，在 2000~2012 年间增温达最大值，对应日较差在 90 年代后由迅速减小变为微弱的下降趋势。

3.2 1963~2012 年全国地区温度与海拔高度的关系

表 2 是最高温度、最低温度和日较差的年和四季的变化趋势与海拔高度的相关分析结果统计。对比这三个气象要素的变化趋势与海拔高度的回归结果可以发现，除了春季，其他三季以及年际变化规律都随着海拔高度的升高，最高温度和最低温度的升温幅度也越大，日较差的增加趋势也越大。其中最高温度的变化趋势与海拔高度的相关性最好，

其次是日较差，最低温度的变化趋势与海拔高度性关系最弱，仅在夏季相关。最高温度和日较差的变化趋势与海拔高度的关系在秋季最为相关。黄琰等（2011）在分析中国气温极值分区的时空变化特征时发现，气温分区形式与中国地形和站点的纬度相关性较大，其中秋冬季节极值分区与海拔高度的相关性高。

表 2 1963~2012 年中国气温要素变化趋势及其与海拔高度的相关性统计

Table 2 Temperature trends and correlation coefficients (R) between altitude and temperature trends on an annual and seasonal basis in China for the period 1963–2012

	最高温度		最低温度		日较差	
	$b/^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$	R	$b/^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$	R	b	R
年	2.22×10^{-5}	0.253**	1.07×10^{-5}	0.063*	1.75×10^{-5}	0.108**
春	-4.30×10^{-5}	0.279**	-1.00×10^{-6}	0.058	-3.10×10^{-6}	0.138**
夏	4.97×10^{-5}	0.353**	3.42×10^{-6}	0.219**	1.55×10^{-6}	0.108**
秋	3.82×10^{-5}	0.432**	5.12×10^{-7}	0.030	3.31×10^{-6}	0.198**
冬	3.60×10^{-5}	0.258**	2.48×10^{-7}	0.011	3.35×10^{-6}	0.168**

注：b 表示温度变化趋势；R 表示温度要素变化趋势与海拔高度的相关系数。

*达到 95% 的信度检验，**达到 99% 的信度检验。

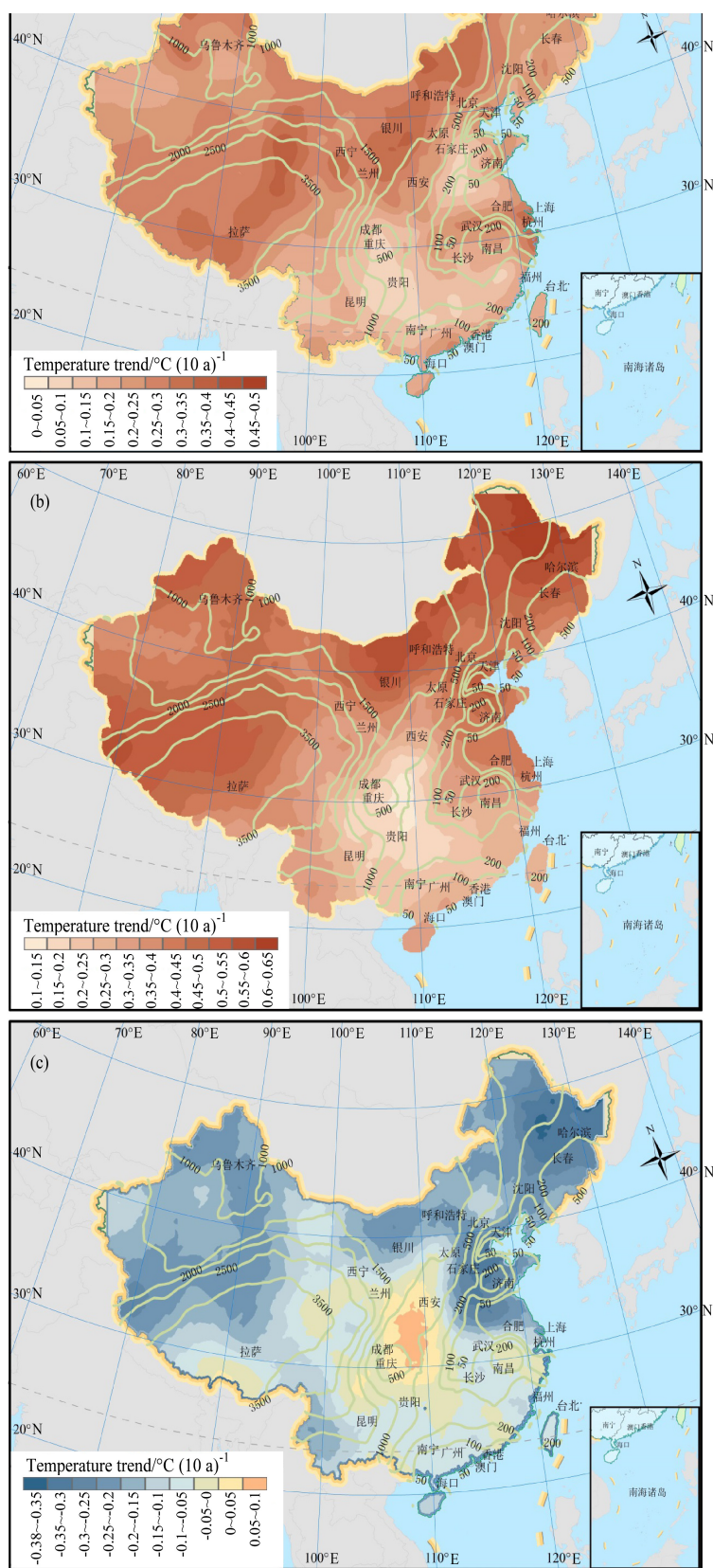


图2 1963~2012年全国 (a) 最高、(b) 最低温及 (c) 日较差倾向率的空间分布。图中等值线为海拔高度, 单位: m

Fig. 2 Distribution of the (a) maximum temperature trend, (b) minimum temperature trend, and (c) diurnal temperature range trend in China for the period 1963–2012. The isolines are contour lines, units: m

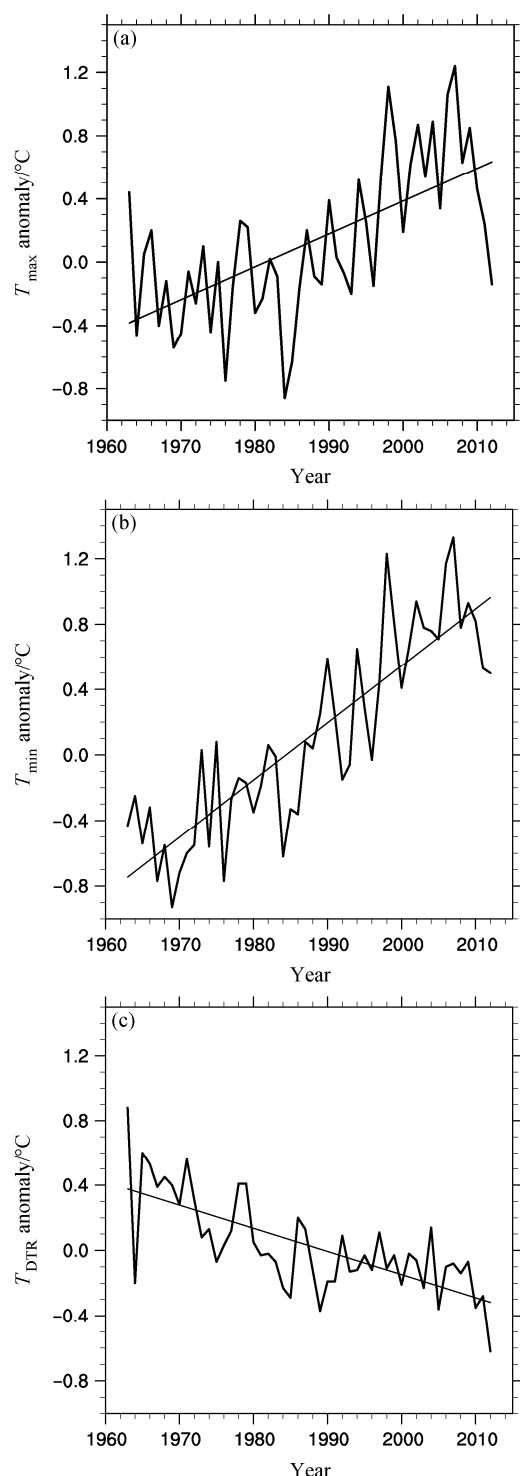


图 3 1963~2012 年 (a) 最高 ($T_{\max}$)、(b) 最低温度 ($T_{\min}$) 和 (c) 日较差 (T_{DTR}) 的距平 (相对于 1971~2000 年气候态标准)。红色线表示平均变化趋势

Fig. 3 Anomalies of (a) maximum temperature ($T_{\max}$), (b) minimum temperature ($T_{\min}$), and (c) diurnal temperature range (T_{DTR}) (relative to the 1971–2000 standard climatology) and their linear trends (red lines)

3.3 1963~2012 年全国地区日较差在不同海拔高度范围内的年际变化

为了进一步分析不同海拔高度上, 各气温要素变化趋势的异同点, 将台站按不同海拔高度段进行分类讨论。对于目前已有的温度在垂直高度上变化的研究, 大部分仅限于青藏高原、云贵高原等区域的温度变化与海拔高度的关系, 这些研究对海拔高度的分类只是粗略地将海拔高度以 500 m 为单位进行划分 (You et al., 2008, 2010; 王朋岭等, 2012)。本文研究的是全国区域不同海拔高度上气温变化的特征, 500 m 以下台站数占总数的一半左右, 为了尽量缩小不同的海拔高度范围内测站数目的差异, 现把海拔高度分为 8 段: 0~50 m、50~100 m、100~200 m、200~500 m、500~1000 m、1000~1500 m、1500~2000 m、2000~4700 m。

从不同海拔高度上日较差距平值的变化可以看出 (图 4), 200 m 以下的区域日较差变化较为相似, 在近 50 年为一致的下降趋势, 变化波动幅度在 20 世纪 80 年代后期变小。200 m 到 2000 m 地区的日较差年际变化较为一致, 以 80 年代中期为结点, 之前日较差为明显的下降, 之后日较差有微弱的上升, 在 2000 年以后又变成微弱的下降趋势。2000 m 以上的台站, 几乎都位于青藏高原地区, 可以看出在 20 世纪 80 年代初期开始日较差的下降趋势不再持续, 但其年际变化振幅依然很大。

根据日较差在不同海拔高度上距平变化的特点, 绘制了最高温度和最低温度在 0~200 m、200~2000 m、2000~4700 m 这三个海拔高度范围上的距平变化 (图 5)。从图中可以看出, 每个海拔段内最低温度的增温趋势都要比最高温度明显, 但其振动幅度没有最高温度强烈。最低温度在 2000 m 以下地区为明显的增温趋势 (图 5e)。最高温度在 20 世纪 90 年代以后有明显的增温趋势, 但近十年趋势变缓; 在 20 世纪 80 年代中期以前, 200 m 以下的地区最高温度有下降趋势 (图 5a), 200~2000 m 范围内最高温度没有明显的变化 (图 5b), 到了 2000 m 以上地区有微弱的增温趋势 (图 5c)。究其原因, 可能是由于 20 世纪 90 年代以前, 城市化进程较快, 工业发展等产生的气溶胶导致降温, 致使我国城市化较快地区即 200 m 以下地区最高温度有微弱下降趋势; 而 2000 m 以上的青藏高原地区的气温变化大部分是由自然因素所导致, 因此由 2000 m 以上最高温度和最低温度的变化曲线可以明显看出近

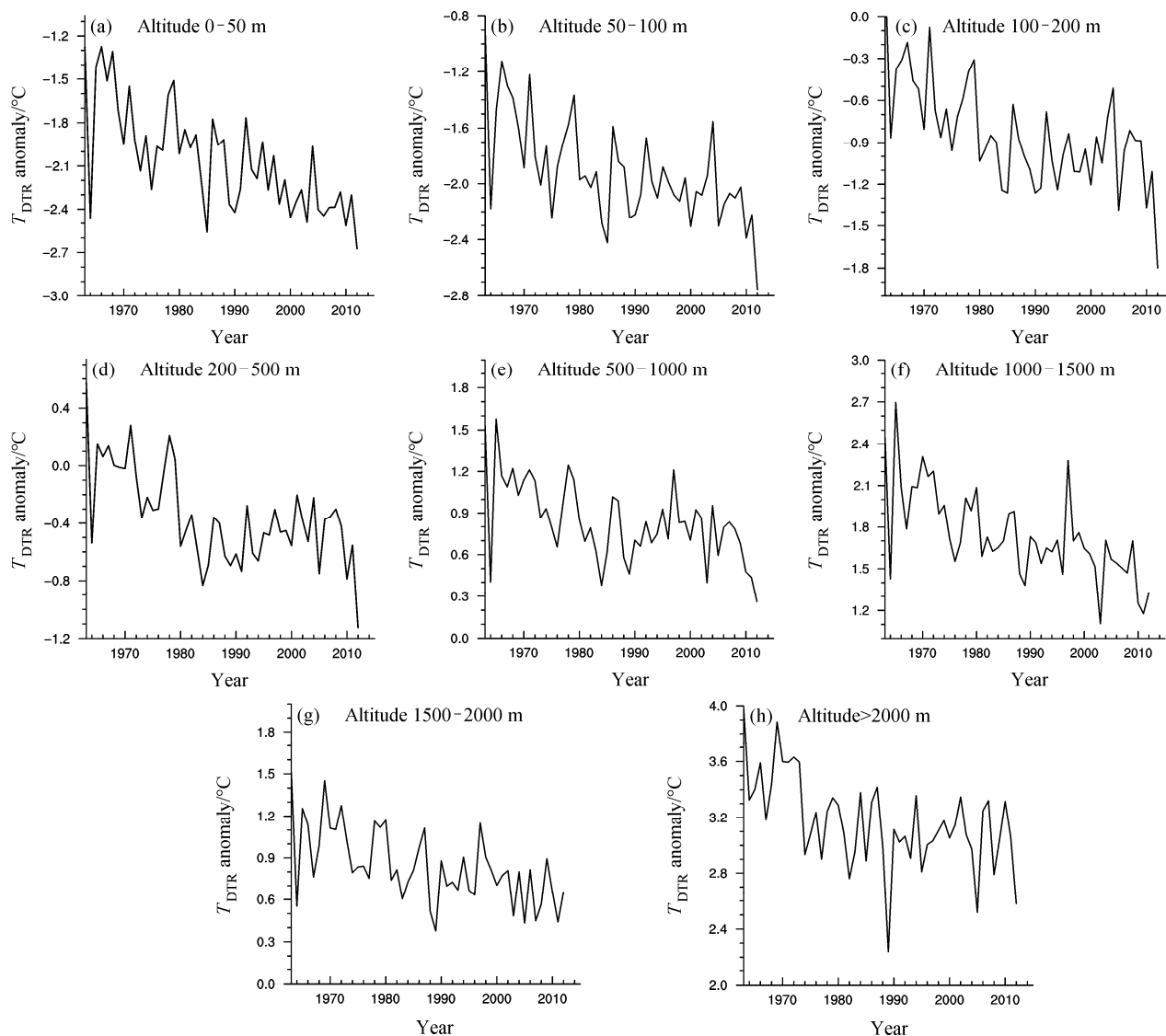


图4 不同海拔高度上, 1963~2012 年日较差距平序列 (相对于 1971~2000 年气候态标准)

Fig. 4 Diurnal temperature range anomalies at different altitudes for the study area from 1963 to 2012 (relative to the 1971~2000 standard climatology)

五十年中国气温大致呈增长趋势, 且在近二十年有所加强。

综上所述, 随着海拔高度的升高, 日较差变化幅度越大, 且 20 世纪 90 年代前日较差的下降趋势也更迅猛, 20 世纪 90 年代后下降趋势减弱。最高温度随高度的升高, 变化趋势由下降变为上升。

3.4 1963~2012 年全国地区日较差在不同海拔高度范围内的年代际变化

图 6 为不同年代, 随海拔高度的升高, 气温要素的变化特征。从图中可以看出, 气象要素在年、季节特征上都表现为, 最高、最低温度在 20 世纪 90 年代 (图 6c、g、k) 的增温最为明显。最高温度和最低温度的变化趋势较为一致: 最低温度除了

在 2000~2012 年间冬季有下降趋势外 (图 6l), 其他年份都为增加趋势, 其中以 20 世纪 90 年代增温幅度最大 (图 6k), 尤以低海拔地区最为明显; 除 20 世纪 90 年代冬季外, 最高温度的增幅都小于最低温度; 最高温度在 20 世纪 80 年代变化最弱, 最低温度除冬季外变化也很小; 2000 m 以上的高海拔地区, 最高温度和最低温度的增幅在 20 世纪 90 年代以前较小, 仅在 2000~2012 年间增幅最为明显。因此, 在同一海拔高度上, 最高、最低温度在不同年代的增幅具有不一致性。日较差在 20 世纪 80 年代以前都为明显的下降趋势, 到了 90 年代, 日较差有所增加, 尤以冬季最为显著, 增加的幅度在 500 m 以上更明显; 在 2000~2012 年, 日较差又近乎

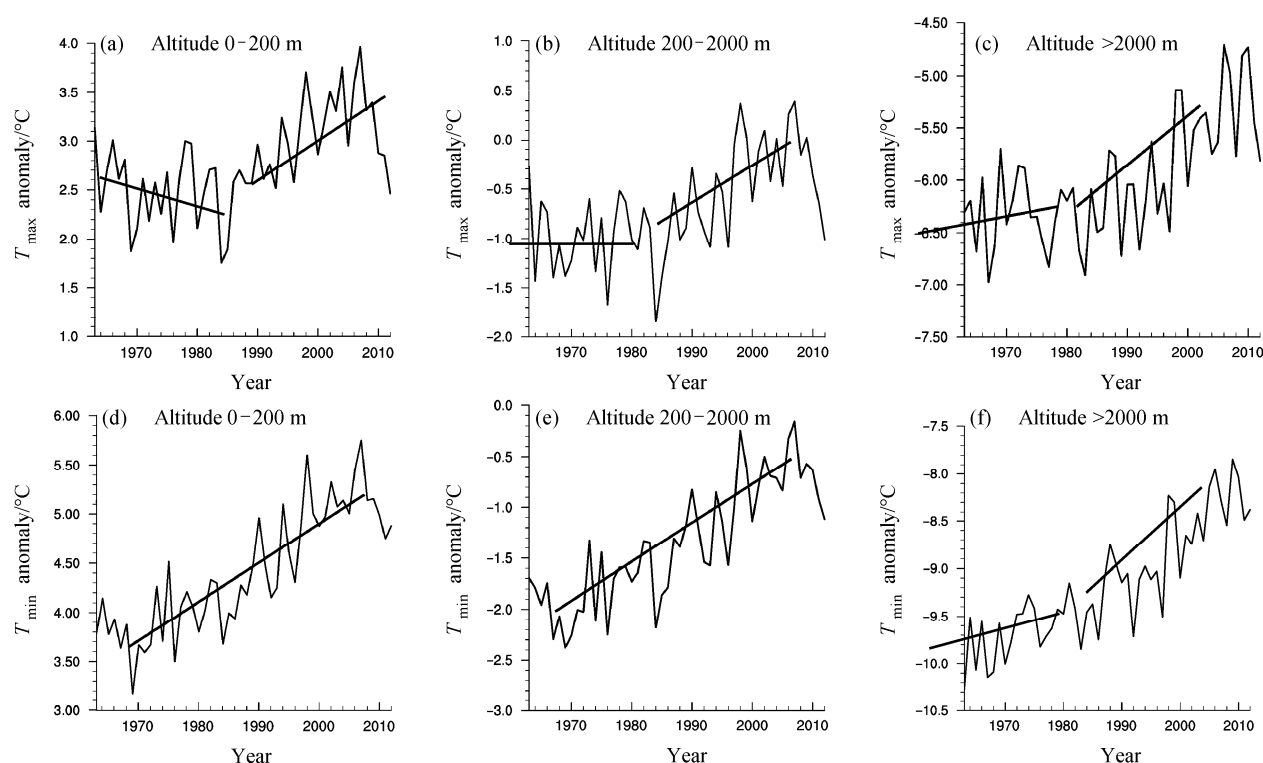


图5 不同海拔高度上, 1963~2012年(a-c)最高温度和(d-e)最低温度的距平序列(相对于1971~2000年气候态标准)

Fig. 5 The (a-c) maximum and (d-e) minimum temperature anomalies at different altitudes for the study area from 1963 to 2012 (relative to the 1971-2000 standard climatology)

为一致的下降趋势, 2000 m 以上的高海拔地区则表现为夏季减小, 冬季增加的不一致性(图 6d、h、l)。

图 7 为不同的海拔高度上, 气象要素的年代际变化特征柱状图。20 世纪 90 年代, 低海拔地区最高、最低温度增温幅度大于高海拔地区, 且低海拔地区最低温度增幅大于最高温度, 高海拔地区则相反。在 2000 m 以上地区, 2000~2012 年最高温度和最低温度的是近五十年增幅最高的十年。对于日较差, 大部分为减小趋势, 仅在 20 世纪 90 年代且海拔在 200 m 以上地区为增加趋势, 直接因素是此时最高温度的增加幅度大于最低温度所导致的。

由于以上的分析说明, 在 20 世纪 90 年代前后温度要素的变化差异较大, 因此将所分析的近 50 年的时间长度分为两个时期: 1963~1990 年和 1991~2012 年, 分别在这两段时期内分析不同海拔高度上气温要素的变化特征(图 8)。

从气温要素的年际变化特征来看, 20 世纪 90 年代以前(图 8a), 最高温度变化不明显; 而最低温度的增温趋势和日较差的下降趋势较为明显, 且垂直方向上变化不大。1991~2012 年(图 8f), 最

高、最低温度为明显的上升趋势, 最低温度的增温幅度都大于最高温度, 且除 100 m 以下的低纬度地区最低温度增幅较大外, 随着海拔的升高增温幅度明显增大; 而 1500 m 以上的高海拔地区, 日较差下降趋势有所减缓。从季节特征来看(图 8b-e、8g-j), 除冬季外, 最高温度和最低温度在近二十年的增幅都要高于 1990 年以前; 冬季 1990 年以前最高温度和最低温度都为增加趋势, 但在 1991~2012 年 2000 m 以下最低温度和最高温度为下降, 2000 m 以上地区温度增长明显。同样, 1990 年以前气温随海拔高度的变化没有明显特征, 但在 1990 年以后, 温度随海拔高度升高, 气温变化率先减小后增加。日较差在 20 世纪 90 年代以前四季都为减小趋势, 平均下降幅度在冬季最大; 20 世纪 90 年代后, 日较差仅在秋冬两季为减小趋势, 在春季为一致的增加趋势。周杰等(2013)在分析华北地区气温日较差的时空特征时也发现, 夏季日最高温度在 1990 年左右出现较为明显的趋势突变, 1990 之前呈较明显的下降, 之后则呈现非常明显的上升; 最低温度变化亦如此, 1990 年以前为不太明显的上升, 突变

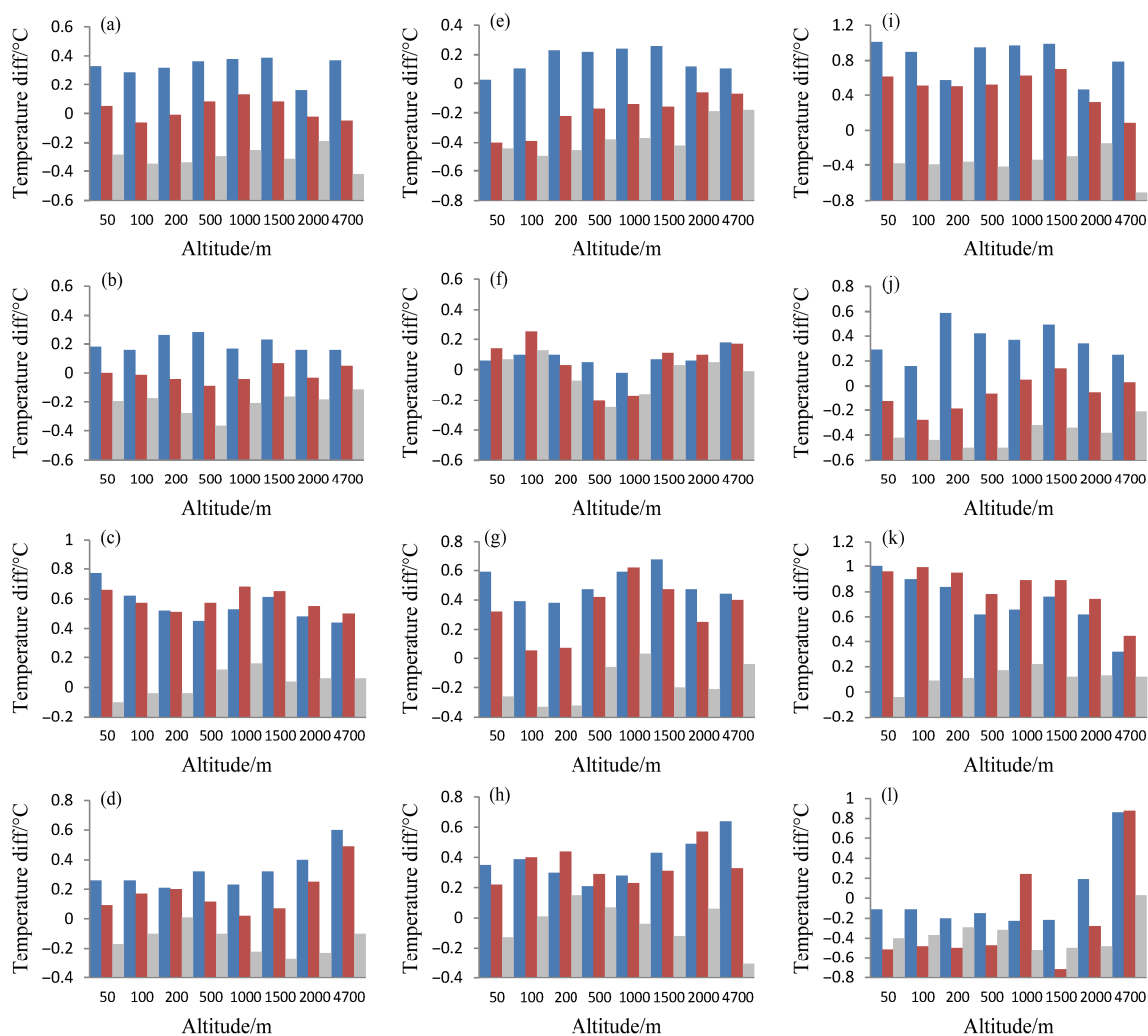


图6 年(左)、夏季(中)、冬季(右)最高温度、最低温度和日较差在四个时期的平均温度相对于前十年的平均温度差随海拔高度变化:(a、e、i) 20世纪70年代、(b、f、j) 20世纪80年代、(c、g、k) 20世纪90年代、(d、h、l) 2000~2012年。红(蓝)色矩形框代表最高(低)温度,灰色矩形框代表日较差

Fig. 6 At different altitudes, annual (left), summer (middle), and winter (right) in maximum temperature (red bars), minimum temperature (blue bars), and diurnal temperature range (grey bars) of the differences between the averages of maximum temperature, minimum temperature, and diurnal temperature range and the averages in the previous decade: (a, e, i) 1970s, (b, f, j) 1980s, (c, g, k) 1990s, and (d, h, l) 2000–2012

后呈现更加显著的上升趋势。

4 结论与讨论

本文利用我国740个台站的观测资料,初步分析了中国1963~2012年最高温度、最低温度及日较差与海拔高度的关系。现将结果归纳如下:

(1) 无论是年或季节变化,最低温度的增温幅度都高于最高温度,且其增温显著区域都对应我国高海拔地区。大部分地区的日较差呈下降趋势,冬季减小幅度最大。最高温度除夏季外,其他季节增温明显;最低温度各季增温都很明显,尤其是冬季。最高、最低温度在20世纪90年代后期增温迅

速,2000~2012年增幅最大,对应日较差在20世纪90年代以前迅速减小,20世纪90年代后变为微弱的下降趋势。

(2) 从气温的变化趋势与海拔高度的相关关系可知:夏、秋、冬三季及年变化规律为,随着海拔高度的升高,最高温度和最低温度的升温幅度越大,日较差也增加。其中最高温度的变化趋势与高度的相关性最好。

(3) 同一高度上,最高温度和最低温度在不同年代的增幅具有不一致性:20世纪80年代,二者变化幅度最弱;20世纪90年代二者增幅最大,尤以低海拔地区最为明显;2000 m以上高海拔地区,

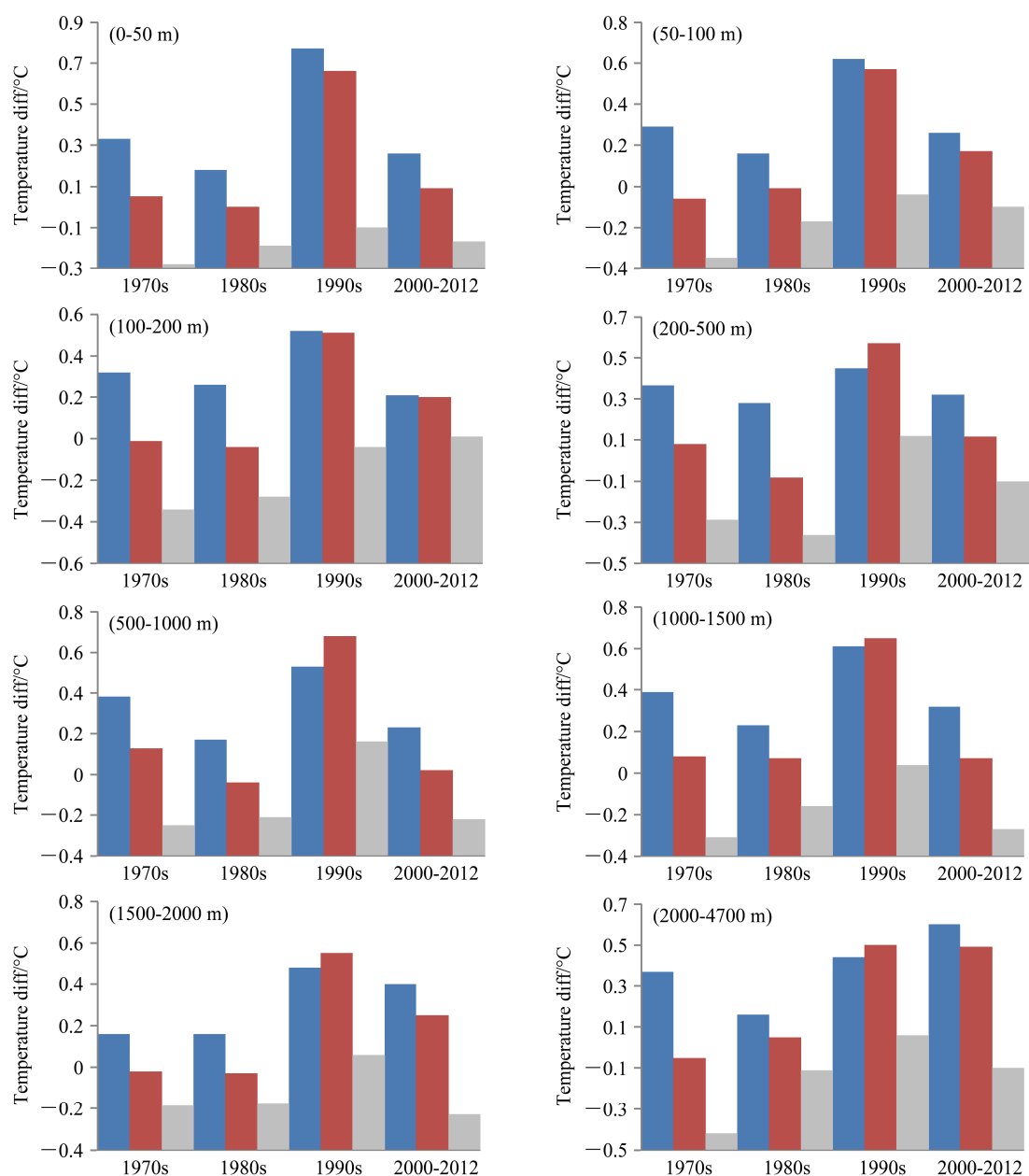


图7 不同海拔高度上, 最高温度、最低温度和日较差在不同时期相对于前10年的变化。红(蓝)色矩形框代表最高(低)温度, 灰色矩形框代表日较差

Fig. 7 At different altitudes, the decadal changes in maximum temperature (red bars), minimum temperature (blue bars), and diurnal temperature range (grey bars)

二者在20世纪90年代以前变化趋势较弱, 在2000~2012年增幅十分明显。

(4) 随着海拔高度的升高, 日较差变化幅度越大, 且20世纪90年代前日较差的下降趋势也更迅猛, 20世纪90年代后下降趋势减弱。2000 m以上地区, 日较差季节变化大: 夏季减小, 冬季增加。最高温度随高度的升高, 变化趋势由下降变为升高。

(5) 20世纪90年代以前, 最高、最低温度随海拔高度变化不大, 而近20年随海拔高度升高, 最高、最低温度的变化趋势几乎都是先减小后增加; 日较差在20世纪90年代以前四季都为减小, 20世纪90年代后日较差仅在秋冬两季减小。

对于产生日较差变化的可能原因, 目前也有一些学者对此进行研究。最高、最低温度的变化趋势不同, 是决定日较差变化的直接原因(陈铁喜和陈

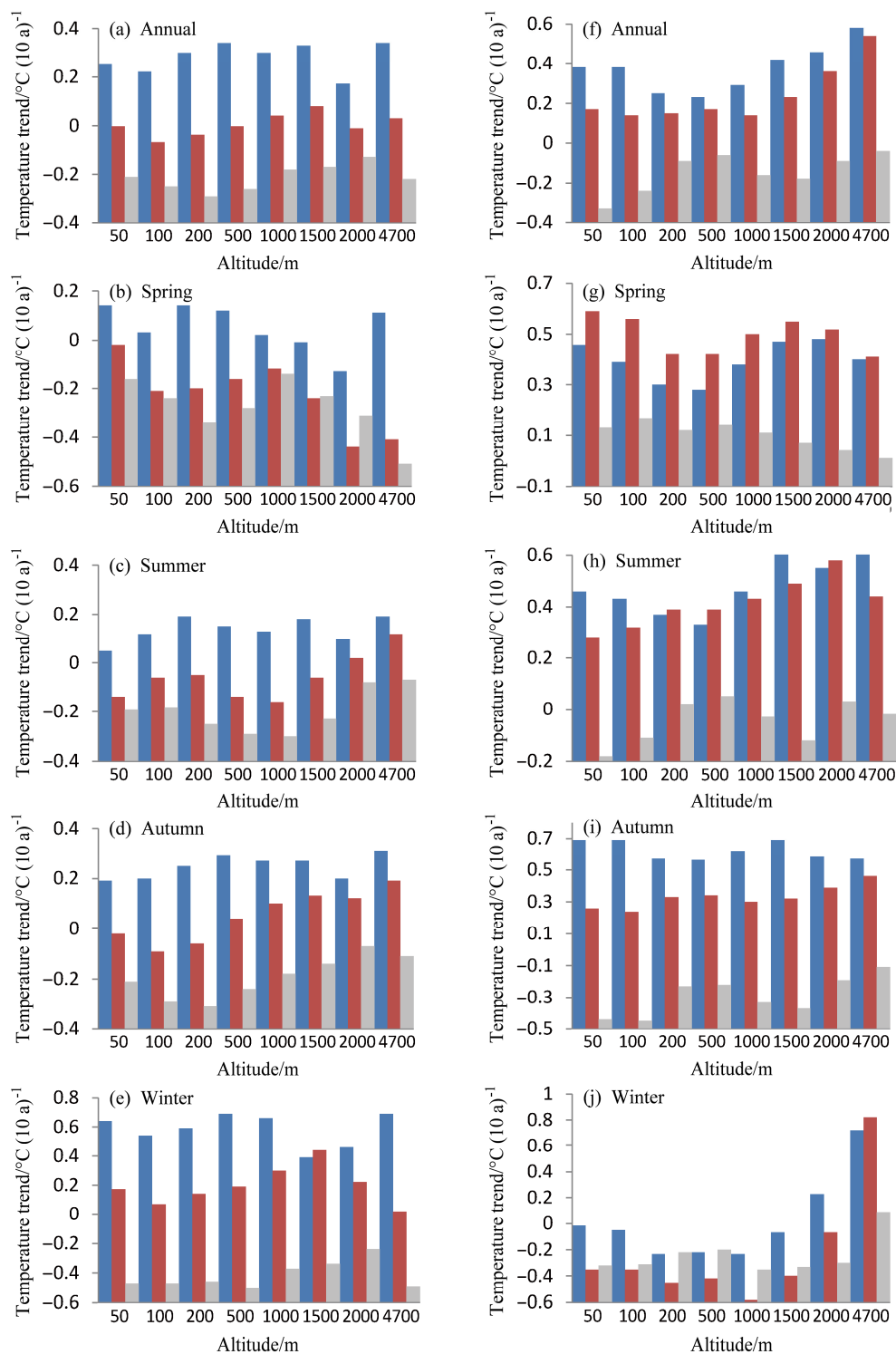


图 8 (a-e) 1963~1990 年和 (f-j) 1991~2012 年两个时期内, 年、季节最高、最低温度和日较差变化趋势与海拔高度关系。红(蓝)色矩形框代表最高(低)温度, 灰色矩形框代表日较差

Fig. 8 At different altitudes, the trends of maximum temperature (red bars), minimum temperature (blue bars), and diurnal temperature range (grey bars) during (a-e) 1963-1990 and (f-j) 1991-2012

星, 2007; 汪凯等, 2010)。许多自然因素, 如太阳辐射、云、气溶胶等都会对最高、最低温度的变化产

生影响; 人为因素, 如城市化效应、下垫面的变化等也会使最高、最低温度产生差异。日最高气温一

般主要受太阳的短波辐射控制, 日最低气温则主要与地面和大气云层的长波辐射有关 (汪凯等, 2010)。有研究发现太阳辐射自 20 世纪 60 年代开始呈下降趋势, 到 80 年代停止, 这是导致 80 年代以前日较差下降的原因之一; 从 90 年代开始太阳辐射上升, 从一定程度上减缓了日较差的下降 (Wild et al., 2005, 2007)。云可对地表的辐射状况产生影响, 白天通过反射太阳辐射使最高温度减小, 夜间通过吸收和发射长波辐射使最低温度增加, 从而导致日较差的减小 (Ramanathan et al., 1989)。早前对日较差的研究认为云与日较差有很好的相关性: 云量和日较差有反相关。显著区域在我国东南部多云区, 该区域平均云量随纬度的增高而减小, 相应日较差随纬度的增高而增大 (曾昭美等, 1993; 陈铁喜和陈星, 2007)。然而由于中国地理状况不同, 区域气候特征的复杂性和特征性, 使东西部地区日较差变化存在明显的差异 (陈铁喜和陈星, 2007), 所以云量对日较差的影响具有很大的不确定性。近年来, 人为因素对气候造成的影响越来越显著。与人类活动有关的气溶胶对辐射、云、降水等产生的直接或间接的影响可能对日较差的变化趋势发挥了重要作用 (Gong et al., 2007)。Zhou (Zhou et al., 2009) 也认为日较差的减小可归因于云量、降水和土壤水分的增加。大气环流和土地利用的改变以及温室气体, 气溶胶的增加通过影响云量和土壤水分或通过改变地表性质来对温度变化产生一定影响。我国地域辽阔, 气候类型复杂多样, 接下来应利用资料深入详细分析、探讨引起最高、最低温度及日较差变化的原因。

参考文献 (References)

- Balint M, Jabbour J, McMullen C, et al. 2009. Climate change science compendium [R]. Scope, Wmo, 1–68.
- Braganza K, Karoly D J, Arblaster J M. 2004. Diurnal temperature range as an index of global climate change during the twentieth century [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31 (13): L13217, doi:10.1029/2004GL019998.
- 陈铁喜, 陈星. 2007. 近 50 年中国气温日较差的变化趋势分析 [J]. *高原气象*, 26 (1): 150–157. Chen Tiexi, Chen Xing. 2007. Variation of diurnal temperature range in China in the past 50 years [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 26 (1): 150–157.
- Dong Danhong, Huang Gang, Qu Xia, et al. 2014. Temperature trend–altitude relationship in China during 1963–2012 [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, doi:10.1007/s00704-014-1286-9.
- Easterling D R, Evans J L, Ya Groisman P, et al. 2000. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81 (3): 417–425.
- Gong Daoyi, Ho Chang-Hoi, Chen Deliang, et al. 2007. Weekly cycle of aerosol–meteorology interaction over China [J]. *J. Geophys. Res.*, 112 (D12): D22202, doi:10.1029/2007JD008888.
- 黄琰, 封国林, 董文杰. 2011. 近 50 年中国气温、降水极值分区的时空变化特征 [J]. *气象学报*, 69 (1): 125–136. Huang Yan, Feng Guolin, Dong Wenjie. 2011. Temporal changes in the patterns of extreme air temperature and precipitation in the various regions of China in recent 50 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 69 (1): 125–136.
- 李百超, 王波, 李旭. 2009. 均一化气温资料与观测资料的对比分析 [J]. *黑龙江气象*, 26 (3): 29–30. Li Baichao, Wang Bo, Li Xu. 2009. The comparative analysis of the homogenization temperature and observation data [J]. *Heilongjiang Meteorology (in Chinese)*, 26 (3): 29–30.
- 李跃清. 2002. 近 40 年青藏高原东侧地区云、日照、温度及日较差的分析 [J]. *高原气象*, 21 (3): 327–332. Li Yueqing. 2002. Analyses of cloudiness, sunshine, temperature and daily range on the eastern side of Qinghai-Xizang Plateau in recent 40 years [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 21 (3): 327–332.
- Liu B H, Xu M, Henderson M, et al. 2004. Taking China's temperature: Daily range, warming trends, and regional variations, 1955–2000 [J]. *J. Climate*, 17 (22): 4453–4462.
- 卢爱刚, 庞德谦, 何元庆, 等. 2006. 全球升温对中国区域温度纬向梯度的影响 [J]. *地理科学*, 26 (3): 345–350. Lu Aigang, Pang Deqian, He Yuanqing, et al. 2006. Impact of global warming on latitudinal temperature gradients in China [J]. *Scientia Geographica Sinica (in Chinese)*, 26 (3): 345–350.
- 马晓波, 李栋梁. 2003. 青藏高原近代气温变化趋势及突变分析 [J]. *高原气象*, 22 (5): 507–512. Ma Xiaobo, Li Dongliang. 2003. Analyses on air temperature and its abrupt change over Qinghai-Xizang Plateau in modern age [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 22 (5): 507–512.
- 彭彬, 周艳莲, 高苹, 等. 2011. 气温插值中不同空间插值方法的适用性分析——以江苏省为例 [J]. *地球信息科学学报*, 13 (4): 539–548. Peng Bin, Zhou Yanlian, Gao Ping, et al. 2011. Suitability assessment of different interpolation methods in the gridding process of station collected air temperature: A case study in Jiangsu Province, China [J]. *Journal of Geo-information Science (in Chinese)*, 13 (4): 539–548.
- Ramanathan V, Cess R D, Harrison E F, et al. 1989. Cloud-radiative forcing and climate: Results from the earth radiation budget experiment [J]. *Science*, 243 (4887): 57–63, doi:10.1126/science.243.4887.57.
- Rebetez M, Beniston M. 1998. Changes in sunshine duration are correlated with changes in daily temperature range this century: An analysis of Swiss climatological data [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 25 (19): 3611–3613.
- 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 2005. 中国气温变化研究最新进展 [J]. *气候与环境研究*, 10 (4): 701–716. Ren Guoyu, Chu Ziyang, Zhou Yaqing, et al. 2005. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 10 (4): 701–716.
- Santer B D, Wigley T M L, Boyle J S, et al. 2000. Statistical significance of trends and trend differences in layer-average atmospheric temperature time series [J]. *J. Geophys. Res.*, 105 (6): 7337–7356.
- IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M] Stocker T F, Qin Dahe, Plattner G K., et al., Eds. Cambridge, UK and New York,

- USA: Cambridge University Press, 1535pp.
- 唐红玉, 翟盘茂, 王振宇. 2005. 1951~2002 年中国平均最高、最低气温及日较差变化 [J]. 气候与环境研究, 10 (4): 728–735. Tang Hongyu, Zhai Panmao, Wang Zhenyu. 2005. On change in mean maximum temperature, minimum temperature and diurnal range in China during 1951–2002 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (4): 728–735.
- Vose R S, Easterling D R, Gleason B. 2005. Maximum and minimum temperature trends for the globe: An update through 2004 [J]. Geophys. Res. Lett., 32 (23): L23822, doi:10.1029/2005GL024379.
- 王凯, 陈正洪, 刘可群, 等. 2010. 华中区域 1960~2005 年平均最高、最低气温及气温日较差的变化特征 [J]. 气候与环境研究, 15 (4): 418–424. Wang Kai, Chen Zhenghong, Liu Kequn, et al. 2010. Variation characteristics of the mean maximum, minimum temperature, and diurnal range of temperature in central China during 1960–2005 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (4): 418–424.
- 汪凯, 叶红, 唐立娜, 等. 2010. 气温日较差研究进展: 变化趋势及其影响因素 [J]. 气候变化研究进展, 6 (6): 417–423. Wang Kai, Ye Hong, Tang Li'na, et al. 2010. Research progresses on diurnal temperature range: Variation trend and influential factors [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 6 (6): 417–423.
- 王朋岭, 唐国利, 曹丽娟, 等. 2012. 1981~2010 年青藏高原地区气温变化与高程及纬度的关系 [J]. 气候变化研究进展, 8 (5): 313–319. Wang Pengling, Tang Guoli, Cao Lijuan, et al. 2012. Surface air temperature variability and its relationship with altitude & latitude over the Tibetan Plateau in 1981–2010 [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 8 (5): 313–319.
- 王绍武, 罗勇, 唐国利, 等. 2010. 近 10 年全球变暖停滞了吗? [J]. 气候变化研究进展, 6 (2): 95–99. Wang Shaowu, Luo Yong, Tang Guoli, et al. 2010. Does the global warming pause in the last decade: 1990–2008? [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 6 (2): 95–99.
- Wild M, Gilgen H, Roesch A, et al. 2005. From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at Earth's surface [J]. Science, 308 (5723): 847–850.
- Wild M, Ohmura A, Makowski K. 2007. Impact of global dimming and brightening on global warming [J]. Geophys. Res. Lett., 34 (4): L04702, doi:10.1029/2006GL028031.
- 吴增祥. 2005. 气象台站历史沿革信息及其对观测资料序列均一性影响的初步分析 [J]. 应用气象学报, 16 (4): 461–467. Wu Zengxiang. 2005. Preliminary analyses of the information on meteorological station historical evolution and its impacts on homogeneity of observational records [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 16 (4): 461–467.
- You Qinglong, Kang Shichang, Pepin N, et al. 2008. Relationship between trends in temperature extremes and elevation in the eastern and central Tibetan Plateau, 1961–2005 [J]. Geophys. Res. Lett., 35 (4): L04704, doi:10.1029/2007GL032669.
- You Qinglong, Kang Shichang, Pepin N, et al. 2010. Relationship between temperature trend magnitude, elevation and mean temperature in the Tibetan Plateau from homogenized surface stations and reanalysis data [J]. Global and Planetary Change, 71 (1–2): 124–133.
- 曾昭美, 严中伟, 章名立. 1993. 近 40 年我国云、日照、温度及日较差的统计 [J]. 科学通报, 38 (5): 440–443. Zeng Shaomei, Yan Zhongwei, Zhang Mingli. 1993. The statistics of cloud, sunshine, temperature and daily range temperature in China at recent 40 years [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 38 (5): 440–443.
- 翟盘茂, 任福民. 1997. 中国近四十年最高最低温度变化 [J]. 气象学报, 55 (4): 418–429. Zhai Panmao, Ren Fumin. 1997. On changes of China's maximum and minimum temperatures in the recent 40 years [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 55 (4): 418–429.
- Zhou, Liming, Dai Aiguo, Dai Yongjiu, et al. 2009. Spatial dependence of diurnal temperature range trends on precipitation from 1950 to 2004 [J]. Climate Dyn., 32 (2–3): 429–440.
- 周杰, 邵海燕, 吴永萍, 等. 2013. 华北地区气温日较差的时空特征和气候变化 [J]. 扬州大学学报 (自然科学版), 16 (4): 35–40. Zhou Jie, Shao Haiyan, Wu Yongping, et al. 2013. Spatial and temporal characteristics of diurnal temperature range in North China [J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition) (in Chinese), 16 (4): 35–40.
- 周雅清, 任国玉. 2010. 中国大陆 1956~2008 年极端气温事件变化特征分析 [J]. 气候与环境研究, 15 (4): 405–417. Zhou Yaqing, Ren Guoyu. 2010. Variation characteristics of extreme temperature indices in mainland China during 1956–2008 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (4): 405–417.