

## 1961—2014 年我国地表温度时空分布特征

高操<sup>1</sup>, 邢丽珠<sup>2</sup>, 赵晓涵<sup>2</sup>, 李成<sup>2</sup> (1. 国电环境保护研究院有限公司, 江苏南京 210031; 2. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/江苏省农业气象重点实验室, 江苏南京 210044)

**摘要** 基于 1961—2014 年我国地区 535 个站点的逐日温度观测数据, 采用线性趋势估计和 MK 检验对我国地表平均温度、最低和最高温度的时空变化情况进行分析。结果表明, 1961—2014 年, 我国的地表平均温度、最高温度、最低温度在年和季尺度上均表现为显著上升 ( $P < 0.01$ ) 趋势; 温度变化率冬季最高, 夏季最低; 其中最低温度变化率较高, 最高温度变化率较低。温度突变年份在 20 世纪 80 年代左右, 显著增温年份在 20 世纪末左右; 空间分布上, 我国大部分地区的平均温度、最高温度和最低温度均增加, 与温度变化率变化趋势一致, 均是从西北到东南地区递减; 极端高温天数整体呈上升趋势, 极端低温天数整体呈下降趋势。

**关键词** 地表温度; 气候变暖; 趋势系数; MK 检验; 极端温度

中图分类号 P 467 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)20-0061-07

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.20.017



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Temperature in China from 1961 to 2014

GAO Cao<sup>1</sup>, XING Li-zhu<sup>2</sup>, ZHAO Xiao-han<sup>2</sup> et al (1. Limited Company of State Power Environmental Protection Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210031; 2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044)

**Abstract** Based on the daily temperature observation data of 535 stations in China from 1961 to 2014, linear trend estimation and MK test were used to analyze the spatial and temporal variations of mean, minimum and maximum surface temperatures in China. Results showed that China's average surface temperature, maximum temperature and minimum temperature showed significant upward trends ( $P < 0.01$ ) from 1961 to 2014 on both annual and seasonal scales. Temporally, the rate of temperature change was the highest in winter and the lowest in summer. The minimum temperature change rate was higher and the maximum temperature change rate was lower. The year with abrupt temperature change was around 1980s, and the year with significant temperature increase was around the end of 20th century. Spatially, the average temperature, maximum temperature and minimum temperature in most regions of China all increased, which was consistent with the change trend of temperature change rate and decreased from northwest to southeast. The number of days with extremely high temperature showed an overall upward trend, while the number of days with extremely low temperature showed an overall downward trend.

**Key words** Surface temperature; Climate change; Trend coefficient; MK test; Extreme temperature

根据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, 1880—2012 年全球地表平均温度约升高 0.85 °C。全球地表气温变化趋势是气候变化研究中的核心问题, 是研究全球变化十分重要的组成部分, 与人类的生存发展密切相关。不同领域的学者从不同的角度对此问题进行了深入研究<sup>[1-2]</sup>, 极端高/低温度<sup>[3]</sup>和平均温度<sup>[4]</sup>均存在明显上升趋势, 并对农业和水资源等方面产生重大影响<sup>[5]</sup>。近百年来, 地球气候正经历一场以变暖为主要特征的显著变化<sup>[6-7]</sup>, 并日益深刻地影响着人类社会的可持续发展<sup>[8-10]</sup>, 对全球气候、生态、海洋、政治、经济以及人体健康带来很大程度的影响<sup>[11-12]</sup>。

在全球变暖背景下, 近 50 年我国年平均地表温度增加了 1.1 °C, 增温速率明显高于北半球同期<sup>[13]</sup>。尽管全国平均气温变暖十分明显, 但不同区域变化特征不同, 不同地区增温速率不同, 甚至还有地区呈现降温趋势。自 20 世纪 80 年代以来, 我国学者采用不同的研究方法和资料, 对我国气温变化进行了研究<sup>[14-16]</sup>。我国西北地区中部的柴达木盆地气候向暖湿方向变化<sup>[17]</sup>, 甘肃省西南地区增暖趋势落后于我国其他地区<sup>[18]</sup>, 青海省整体呈升温趋势但具有明显空间差

异<sup>[19-20]</sup>, 西北地区东部平均和极端气温均呈显著上升趋势<sup>[21]</sup>。其西部的青藏高原大部分地区的地表年均气温为增加趋势, 但高原东部的局部地区年均气温表现为降低趋势<sup>[22-23]</sup>。北部的内蒙古区域温度上升显著, 由于降水波动较大, 导致更严重的蒸散情况<sup>[24-25]</sup>。位于东北的黑河流域地区 20 世纪 50—90 年代平均温度数据分析表明其气温呈波动状上升, 且气温上升的速率大于同期的全球平均水平<sup>[26]</sup>。而东部沿海地区发现近年来存在变暖趋缓的情况且深受城市化影响<sup>[27]</sup>, 江苏省则发现在升温背景下极端高温天气出现频率明显增加, 极端低温天气减少<sup>[28]</sup>。我国由于面积辽阔, 地形复杂, 我国地表温度时空分布十分复杂。因此, 笔者利用我国地区 1961—2014 年 535 个台站地表逐日空气温度观测数据从时间角度和空间角度上全面分析 50 多年来我国地表温度的变化趋势特征, 帮助认识我国近代气候变化的规律, 为积极应对气候变化、合理开发及保护生态环境提供依据。

## 1 数据与方法

**1.1 数据来源** 选取 1961—2014 年我国 535 个站点的地表逐日平均温度、逐日最高温度、逐日最低温度观测资料, 所有资料均来自中国气象局气象数据。站点分布见图 1。采用克里金插值方法对每日资料插值后进行区域分析, 分别建立 1961—2014 年全国年、季地表温度序列。

**1.2 研究方法** 设定研究区域的四季分别是 3—5 月为春季, 6—8 月为夏季, 9—11 月为秋季, 12 月—次年 2 月为冬

**基金项目** 科技部重大研发计划(2018YFC1506606); 中国气象局气候变化专项(CCSF201809)。

**作者简介** 高操(1985—), 男, 满族人, 江苏南京人, 工程师, 硕士, 从事环境评估及大气环境研究。

**收稿日期** 2019-04-01

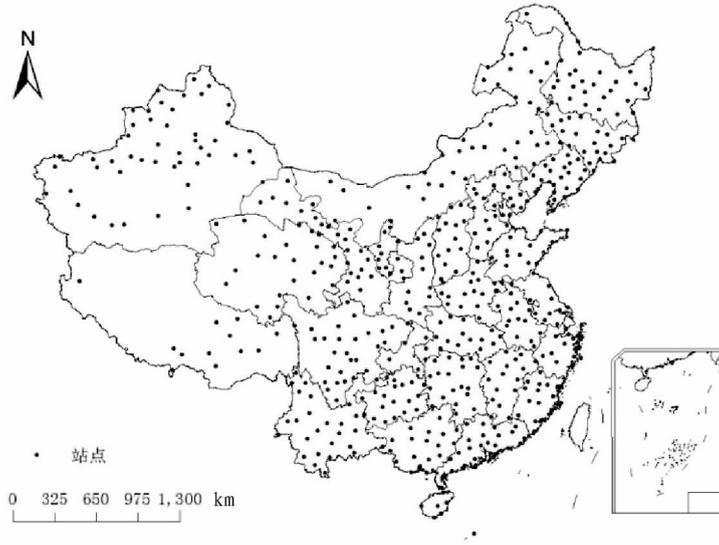


图1 观测站点分布

Fig.1 Distribution of observation stations used in this study

季。采用最小二乘法计算全国温度的气候倾向率,从而对1961—2014年全国平均温度、最高温度、最低温度的变化趋势进行分析<sup>[29-30]</sup>,采用 Mann-Kendall 进行气候变化总趋势分析<sup>[31]</sup>,Z 值为标准的正态分布系统变量,若大于0,是上升趋势,小于0是下降趋势。Z 的绝对值在大于等于1.64、2.32时,分别表示通过了置信度95%、99%的显著性检验。衡量变化趋势大小的指标为 $\beta$ 。气候突变分析也采用 Mann-Kendall 法。该研究采用任福民等<sup>[32]</sup>对极端最高温度和极端最低温度的定义。

## 2 结果与分析

### 2.1 地表温度的时间变化

**2.1.1 年平均温度的时间变化。**从我国地表平均温度长期变化趋势(图2)结合2种趋势分析结果(表1、2)来看,2种方法均表示我国全年和四季的地表平均温度均呈显著上升趋势( $P < 0.01$ ),但上升幅度略有差异。在1961—2014年,冬季平均温度变化率最高,达 $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。夏季平均温度变化率最低,为 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。全年平均温度、春季平均温度和秋季平均温度的变化率介于两者之间,均为 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。

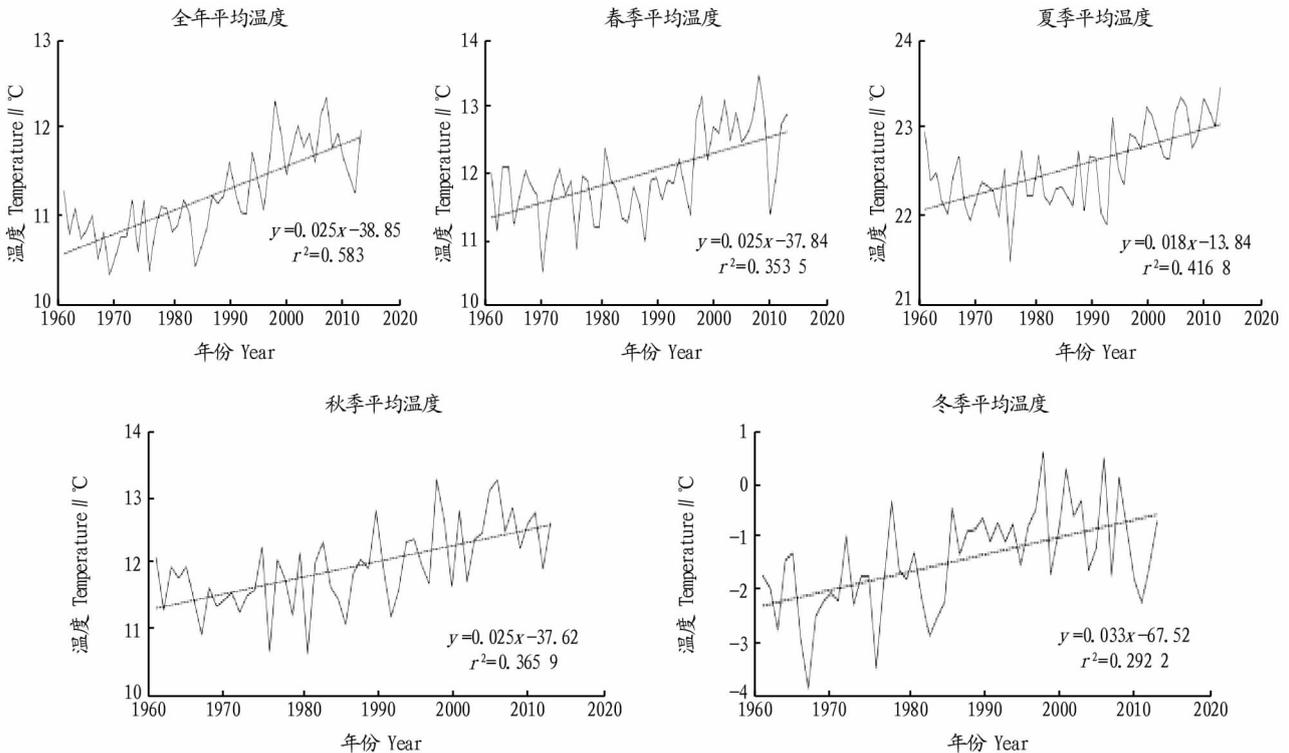


图2 1961—2014年我国地表平均温度变化

Fig.2 Changes of average surface temperature in China from 1961 to 2014

表 1 地表平均温度变化率和趋势系数

Table 1 Change rates and trend coefficients of average surface temperature

时间 Time	变化率 Rate of change °C/10a	趋势系数 Trend coefficient
全年 Annual	0.25	0.76**
春季 Spring	0.25	0.59**
夏季 Summer	0.18	0.65**
秋季 Autumn	0.25	0.60**
冬季 Winter	0.33	0.54**

注: \*\* 表示  $P < 0.01$ , \* 表示  $P < 0.05$ Note: \*\* stands for  $P < 0.01$ ; \* stands for  $P < 0.05$ 

表 2 基于 MK 的地表平均温度变化参数

Table 2 Statistical parameters of change of average surface temperature based on the MK method

时间 Time	Z	$\beta$	趋势 Trend	开始增温年份 Began to warming year	突变年份 Mutation year	显著增温年份 Significant warming year
全年 Annual	6.00**	0.025	增温	1980	1991	1992
春季 Spring	4.03**	0.025	增温	1996	1996	2002
夏季 Summer	4.54**	0.019	增温	1996	1999	2002
秋季 Autumn	4.43**	0.024	增温	1987	1995	1998
冬季 Winter	3.95**	0.034	增温	1977	1983	1990

2.1.2 年最高温度的时间变化。从我国地表最高温度长期变化趋势(图 3)结合 2 种趋势分析结果(表 3、4)可以看出,2 种趋势分析结果一致,我国全年和四季的地表最高温度和平均温度均呈显著上升趋势( $P < 0.01$ ),但同期最高温度变化率

低于我国地表平均温度变化率。在 1961—2014 年,夏季最高温度增温速率最低,为  $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ;冬季最高温度增温速率最大,为  $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ;秋季最高温度变化率( $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ )高于全年和春季( $0.20\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ )。

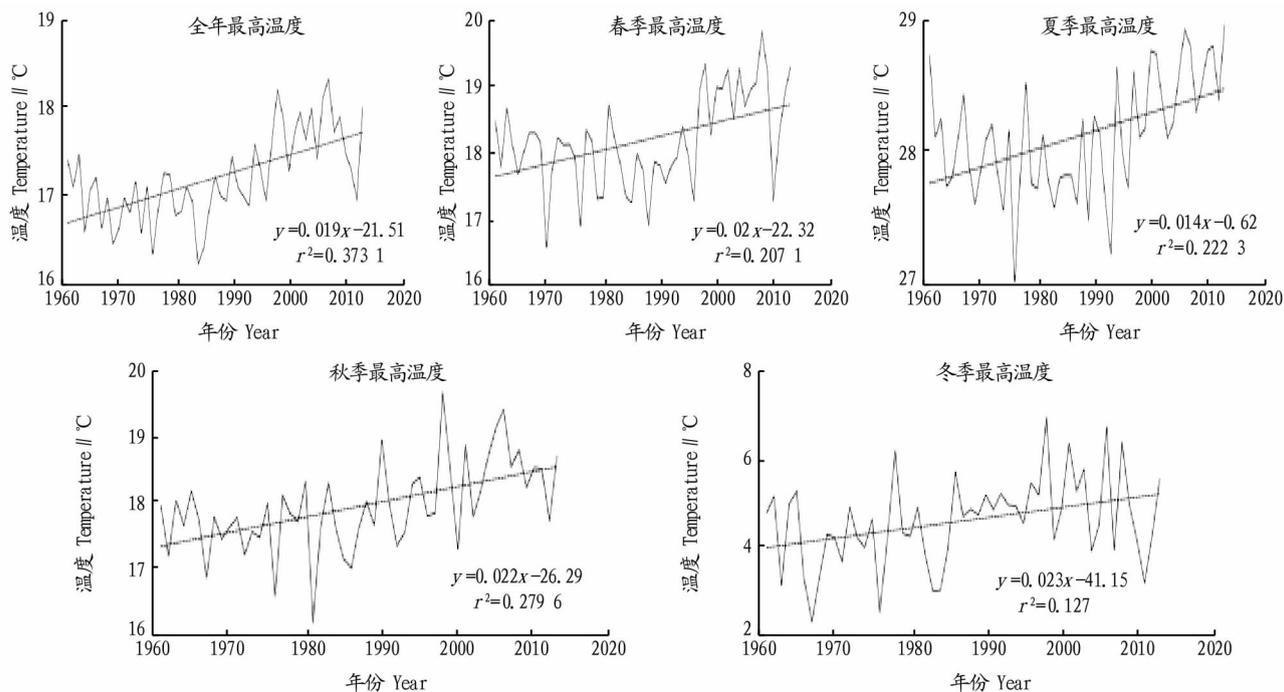


图 3 1961—2014 年我国地表最高温度变化

Fig.3 Changes of maximum surface temperature in China from 1961 to 2014

由表 4 可知,春季、夏季最高温度在 21 世纪初才开始增温,全年、秋季和冬季平均温度在 20 世纪 90 年代左右开始增温,增温时间稍早于春季、夏季。春季、夏季最高温度均在 20 世纪 90 年代开始突变,在 2005 年后显著增温,全年、秋季最高温度突变年份为 1995 年,显著增温年份为 2000 年后,比

春季、夏季早 5 年左右。冬季突变年份为 1986 年,比全年、秋季早 10 年左右,显著增温年份是 1995 年,比全年、秋季早 5 年。综合分析可知,我国地表最高温度增温主要开始于 20 世纪 90 年代,进入 21 世纪后,变化率显著提高。

表3 地表最高温度变化率和相关系数

Table 3 Change rates and correlation coefficients of maximum surface temperature

时间 Time	变化率 Rate of change// $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$	趋势系数 Trend coefficient
全年 Annual	0.20	0.61**
春季 Spring	0.20	0.46**
夏季 Summer	0.14	0.47**
秋季 Autumn	0.22	0.53**
冬季 Winter	0.23	0.36**

注:\*\*表示 $P<0.01$ Note:\*\* stands for  $P<0.01$ 

表4 基于MK的地表最高温度变化参数

Table 4 Statistical parameters of change of maximum surface temperature based on the MK method

时间 Time	Z	$\beta$	趋势 Trend	开始增温年份 Began to warming year	突变年份 Mutation year	显著增温年份 Significant warming year
全年 Annual	4.46**	0.020	增温	1993	1995	2000
春季 Spring	3.00**	0.020	增温	2000	2000	2006
夏季 Summer	3.31**	0.015	增温	2000	2004	2007
秋季 Autumn	3.77**	0.021	增温	1992	1995	2003
冬季 Winter	2.40**	0.023	增温	1988	1986	1995

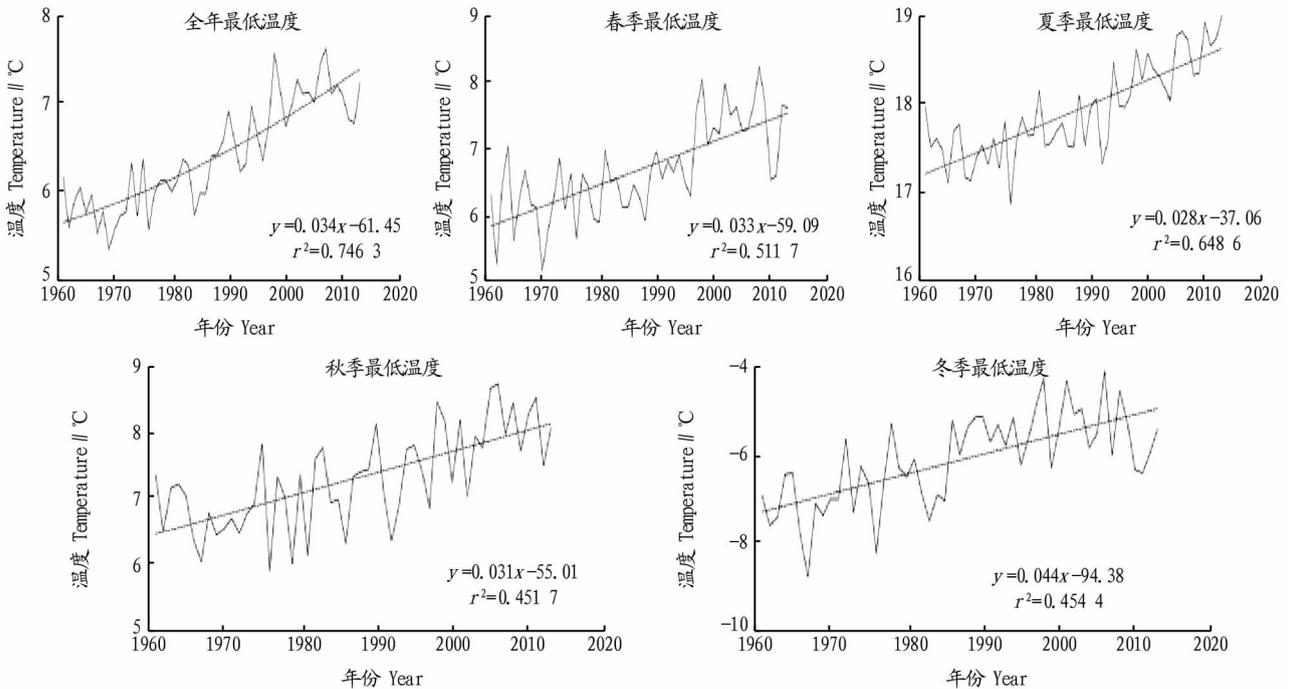
注:\*\*表示 $P<0.01$ Note:\*\* stands for  $P<0.01$ 

图4 1961—2014年我国地表最低温度变化

Fig.4 Changes of minimum surface temperature in China from 1961 to 2014

表5 地表最低温度变化率和相关系数

Table 5 Change rates and correlation coefficients of minimum surface temperature

时间 Time	变化率 Rate of change// $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$	趋势系数 Trend coefficient
全年 Annual	0.34	0.86**
春季 Spring	0.33	0.72**
夏季 Summer	0.28	0.81**
秋季 Autumn	0.31	0.67**
冬季 Winter	0.44	0.67**

注:\*\*表示 $P<0.01$ Note:\*\* stands for  $P<0.01$ 

2.1.3 年最低温度的时间变化。由图4可知,我国全年和四季的地表平均最低温度也均呈显著上升趋势( $P<0.01$ )。结合表5和表6的趋势分析可知,在1961—2014年,夏季最低温度变化率最低,为 $0.28\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ;冬季最低温度变化率最高,达 $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,即1961年至今,冬季平均最低温度增温达 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上;全年、春季、秋季最低温度变化率相差不大,但春季和全年最低温度变化率略高于秋季( $0.31\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ )。

由表6可知,全年、春季、夏季、秋季最低温度在1980年左右才开始增温,冬季最低温度时间为1971年,比全年、春季、夏季、秋季早10年左右;全年、春季、夏季、秋季最低温度突变和显著增温在20世纪末。冬季最低温度在1980年发生突变,1987年显著增温,早于全年、春季、夏季、秋季最低温度。

## 2.2 地表温度的空间变化分析

2.2.1 平均温度变化率的空间分布。由图5可知,1961—2014年,我国大部分地区地表年均温度呈增加趋势,北方地

表 6 基于 MK 的地表最低温度变化参数

Table 6 Statistical parameters of change of minimum surface temperature based on the MK method

时间 Time	Z	$\beta$	趋势 Trend	开始增温年份 Began to warming year	突变年份 Mutation year	显著增温年份 Significant warming year
全年 Annual	7.02**	0.034	增温	1977	1990	1995
春季 Spring	5.39**	0.034	增温	1981	1993	1996
夏季 Summer	6.20**	0.028	增温	1978	1995	1997
秋季 Autumn	4.98**	0.032	增温	1982	1994	1995
冬季 Winter	5.01**	0.044	增温	1971	1980	1987

注: \*\* 表示  $P < 0.01$ Note: \*\* stands for  $P < 0.01$ 

区变化率高于南方地区和新疆地区的变化率。其中增温率最高的是黑龙江北部、山西东北部、青海北部以及西北部、新疆东部地区和四川西南部,达  $0.5 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$  以上。局部地区的地表平均温度呈降低趋势,包括新疆西北部、贵州西部和青海东部地区,但降温幅度和范围远小于增温幅度和范围。总体上,全国范围内年均温度变化率最大的增温区主要集中在黑龙江-内蒙古-青海-西藏沿线,由此向西北内陆及东南沿海逐渐降低的趋势。

由表 7 可知,535 个站台中,绝大多数站台的平均温度呈增加趋势,其中夏季增温站台数目最少,仅有 488 个站台,占 91.21%,平均变化率也最低,约为  $0.21 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 。全年、春季、秋季、冬季的增温站台数大致相同,有 520 多个,占 99.4% 以上,其中冬季平均变化率最高,为  $0.34 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 。夏季降温站台数最多,为 47 个,占 8.79%,变化率为  $-0.073 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ,全年、春季、秋季、冬季降温站台数大致相同,约 10 个,全年、春季、秋季的变化率约为  $-0.090 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ,变化率幅度略大于夏季,其中冬季的变化幅度最大,变化率为  $-0.215 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ,是其他季节变化幅度的 2 倍多。

表 7 地表平均温度变化的站台数

Table 7 Statistics of average surface temperature based on stations

时间 Time	增温站台数 The stations number of temperature increase	平均 变化率 Rate of change $^\circ\text{C}/10 \text{ a}$	降温站台数 The stations number of temperature decrease	变化率 Rate of change $^\circ\text{C}/10 \text{ a}$
全年 Annual	527	0.26	8	-0.094
春季 Spring	524	0.26	11	-0.094
夏季 Summer	488	0.21	47	-0.073
秋季 Autumn	522	0.26	13	-0.088
冬季 Winter	528	0.34	7	-0.215

**2.2.2 年最高温度变化率的空间分布。**由图 6 可知,1961—2014 年全国范围内整体平均温度变化率呈从西北到东南地区的递减趋势,大部分地区地表最高温度呈增加趋势,北方增温高于南方和新疆地区。其中增温率最高的是黑龙江北部、山西北部 and 西部、青海西北部、西藏东部和四川南部,增温地区和我国地表温度增温地点一致。增温速率达  $0.5 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$  以上。只有局部地区地表最高温度呈降温趋势,即贵州中部、青海东部地区,但降温的幅度和范围显著小于增温的幅度和范围。

由表 8 可知,535 个站台中,绝大多数站台的最高温度增加,但夏季增温站台数最少,仅有 445 个站台,占 83.18%,

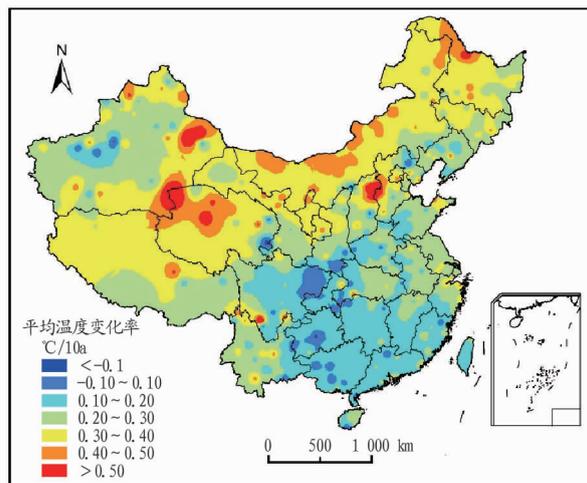


图 5 1961—2014 年我国年平均地表温度变化率空间分布

Fig.5 Spatial distribution of change rate of annual average surface temperature in China from 1961 to 2014

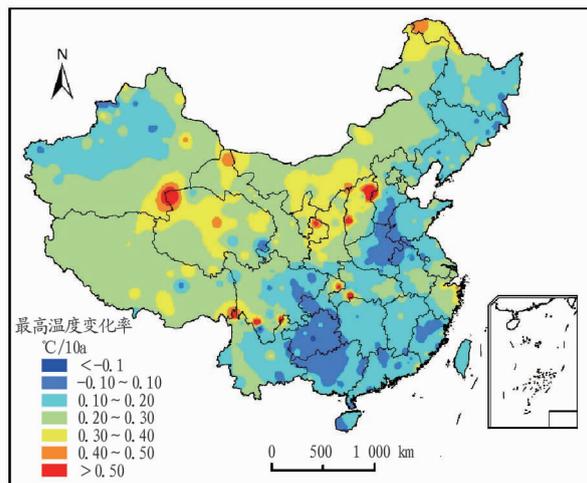


图 6 1961—2014 年我国年平均地表最高温度变化率空间分布

Fig.6 Spatial distribution of change rate of annual average maximum surface temperature in China from 1961 to 2014

平均变化率也最低,约为  $0.18 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 。年、春季、秋季、冬季的增温站台数超过 500 个,占 93.46% 以上,其中秋季增温站台数最高(526 个),但冬季平均变化率最高( $0.24 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ )。夏季降温站台数最多,为 90 个,占 16.82%,冬季降温台站数最少,但平均变化率幅度夏季( $-0.073 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ )高于冬季降温台站( $-0.1 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ )。

表8 地表最高温度变化的站台数

Table 8 Statistics of maximum surface temperature based on stations

时间 Time	增温站台数 The stations number of temperature increase	平均变化率 Rate of change ℃/10 a	降温站台数 The stations number of temperature decrease	变化率 Rate of change ℃/10 a
全年 Annual	525	0.21	10	-0.098
春季 Spring	505	0.22	30	-0.095
夏季 Summer	445	0.18	90	-0.081
秋季 Autumn	526	0.23	9	-0.080
冬季 Winter	514	0.24	21	-0.100

2.2.3 年最低温度变化率的空间分布。由图7可知,1961—2014年全国范围内整体最低温度变化率呈从西北到东南地区的递减趋势,绝大地区地表最低温度变化增温,且增温地区和幅度高于平均温度和最高温度。北方增温速率高于南方增温速率和新疆地区。其中增温速率最高的是黑龙江、内蒙古、新疆、青海、河北、北京、西藏和云南,增温速率达 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 以上。只有局部地区地表平均温度呈降温趋势,包括新疆西北部,山西、河北、内蒙古交界处和青海东部,但降温的幅度和范围显著小于增温的幅度和范围。

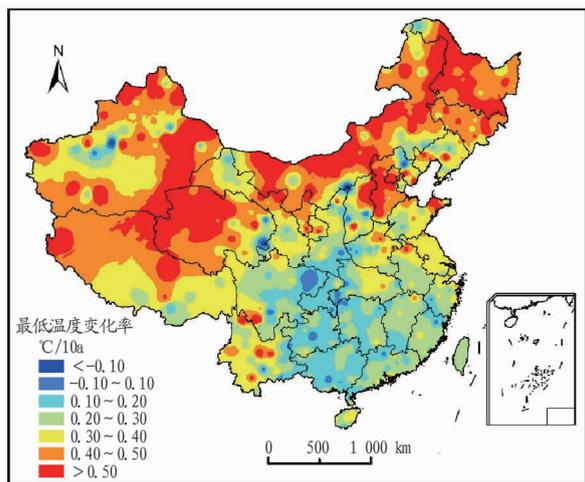


图7 1961—2014年我国年平均地表最低温度变化率空间分布

Fig.7 Spatial distribution of change rate of annual minimum surface temperature in China from 1961 to 2014

由表9可知,年和四季的最低温度增温台站数差别均小于最高温度,且增温台站多于最高温度的增温台站数。增温台站数夏季最少,平均变化率最小;增温台站数冬季最多,平均变化率最大。夏季降温台站数最多,但平均变化率最小;冬季降温台站数最少,但平均变化率最大。春秋季相比,春季增温台站数多,平均变化率高于秋季;降温台站少,但平均变化率小于秋季。

## 2.3 地表极端温度天数变化的空间分析

2.3.1 年极端高温天数变化。由图8可知,1961—2014年,地表年极端最高温度天数在东北至华北地区基本呈减小趋势,变化率大于 $2\text{ d}/10\text{ a}$ 的地区主要集中在新疆南部,新疆、甘肃、内蒙古交界处和广东,与20世纪60年代相比,极端温度天数每年多约 $10\text{ d}$ 。变化率在 $1\sim 2\text{ d}/10\text{ a}$ 的地区主要集

中在西藏、新疆、广东、浙江、江苏、甘肃、内蒙古、四川和重庆。极端最高温度天数减小的只有新疆北部和西部、安徽、河南、山东、河北和吉林。且极端最高温度天数减小的幅度和范围远小于增加的幅度和地区。

表9 地表最低温度变化的站台数

Table 9 Statistics of minimum surface temperature based on stations

时间 Time	增温站台数 The stations number of temperature increase	平均变化率 Rate of change ℃/10 a	降温站台数 The stations number of temperature decrease	变化率 Rate of change ℃/10 a
全年 Annual	526	0.35	9	-0.135
春季 Spring	519	0.34	16	-0.110
夏季 Summer	515	0.29	20	-0.105
秋季 Autumn	517	0.33	18	-0.120
冬季 Winter	526	0.46	6	-0.176

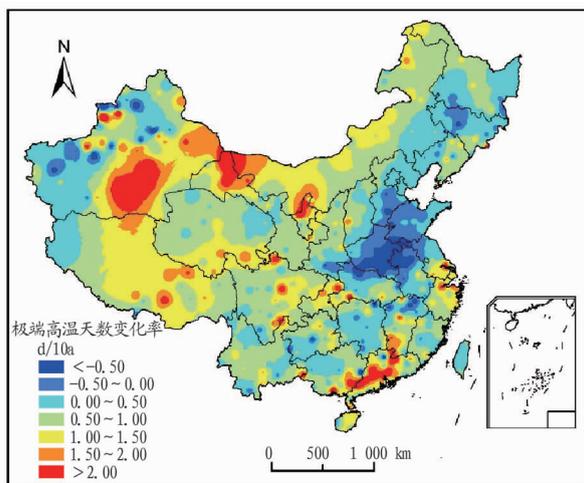


图8 1961—2014年我国极端地表最高温度天数变化率分布

Fig.8 Spatial distribution of change rate of extreme maximum surface temperature days in China from 1961 to 2014

2.3.2 年极端低温天数变化分析。由图9可知,1961—2014年,我国绝大地区地表年极端低温天数均呈减少趋势,变化

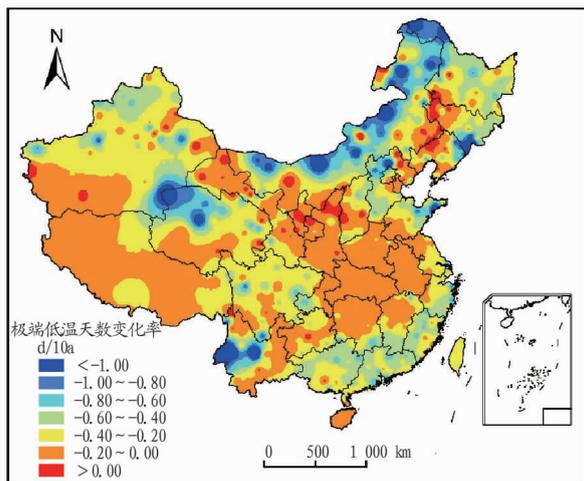


图9 1961—2014年我国极端地表最低温度天数变化率分布

Fig.9 Spatial distribution of change rate of extreme minimum surface temperature days in China from 1961 to 2014

率小于 $-1\text{ d}/10\text{ a}$ 的地区主要集中在新疆、青海交界处,青海省中部,内蒙古北部,吉林南部,山东东部以及云南西部。与 20 世纪 60 年代相比,极端最低温度天数每年少 5 d。极端低温天数增加的地区非常少,只有新疆、宁夏等部分地区。且极端低温天数增加的幅度和范围远小于减小的幅度和地区。从图 9 可以看出,全国范围内整体年极端低温天数变化率呈从南到北的递减趋势。

### 3 结论

利用我国 535 个站台 1961—2014 年的逐日温度观测数据,分析了我国地区 1961—2014 年地表平均温度、最高温度、最低温度的年际变化规律,以及我国大陆地区的空间分布特征。

(1) 1961—2014 年,我国年、春、夏、秋、冬的地表平均温度、最高温度、最低温度大部分均显著增温( $P<0.01$ ),且相同时间下,最低温度的变化率最高,平均温度变化率次之,最高温度变化率最低;在相同的气象要素下,冬季的变化率最高,夏季变化率最低,全年、春季、秋季的变化率居中,且相差不大。

(2) 由 MK 趋势检验可知,我国年、春、夏、秋、冬的地表平均温度、最高温度、最低温度大部分显著增温( $P<0.01$ );由 MK 突变检验可知,温度突变年份在 20 世纪 80 年代左右,显著增温年份在 20 世纪末左右。

(3) 由温度变化率可知,我国大部分地区年地表平均温度、最高温度、最低温度的变化趋势均增加,只有部分地区降温,且温度变化率呈从西北到东南地区递减趋势。最低温度增温的幅度和范围最大,平均温度增温的幅度和范围居中,最高增温的幅度和范围最小。

(4) 由极端温度天数变化率可知,我国大部分地区极端高温天数增加,只有少数部分地区极端温度天数减少,南方和西藏极端高温天数变化率高于北方。我国大部分地区极端低温天数减少,只有少数部分地区极端低温天数增加,南方和西藏极端低温天数变化率高于北方。

### 参考文献

- [1] FANG S B, CAMMARANO D, ZHOU G S, et al. Effects of increased day and night temperature with supplemental infrared heating on winter wheat growth in North China[J]. *European journal of agronomy*, 2015, 64: 67–77.
- [2] YU Z, LI X L. Recent trends in daily temperature extremes over northeastern China (1960–2011) [J]. *Quaternary international*, 2015, 380/381: 35–48.
- [3] SUN W Y, MU X M, SONG X Y, et al. Changes in extreme temperature and precipitation events in the Loess Plateau (China) during 1960–2013 under global warming[J]. *Atmospheric research*, 2016, 168: 33–48.
- [4] 李庆祥, 董文杰, 李伟, 等. 近百年中国气温变化中的不确定性估计[J]. *科学通报*, 2010, 55(16): 1544–1554.
- [5] IQBAL M A, PENAS A, CANO-ORTIZ A, et al. Analysis of recent changes

- in maximum and minimum temperatures in Pakistan[J]. *Atmospheric research*, 2016, 168: 234–249.
- [6] 梁珑腾, 马龙, 刘廷玺, 等. 1951—2014 年中国北方地区季节气温突变与变暖停滞年份的时空变异性[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(12): 2149–2166.
- [7] 武丽梅, 刘飞, 马金辉. 近 60a 中国大陆气温的空间热点分析[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(1): 112–118.
- [8] BARNETT T P, ADAM J C, LETTENMAIER D P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions[J]. *Nature*, 2005, 438(7066): 303–309.
- [9] PATZ J A, CAMPBELL-LENDRUM D, HOLLOWAY T, et al. Impact of regional climate change on human health[J]. *Nature*, 2005, 408(7066): 310–317.
- [10] 窦睿音. 近半个世纪三江源地区气候变化与可持续发展适应对策研究[J]. *生态经济*, 2016, 32(2): 165–171.
- [11] 吴绍洪, 黄季焜, 刘燕华, 等. 气候变化对中国的影响利弊[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(1): 7–13.
- [12] 王玉洁, 周波涛, 任王玉, 等. 全球气候变化对我国气候安全影响的思考[J]. *应用气象学报*, 2016, 27(6): 750–758.
- [13] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. *气候变化研究进展*, 2006, 2(1): 3–8.
- [14] 刘昌波, 纪潇潇, 许吟隆, 等. SRES A1B 情景下中国区域 21 世纪最高、最低气温及日较差变化的模拟分析[J]. *气候与环境研究*, 2015, 20(1): 89–96.
- [15] 张丽花, 延军平, 陈利民. 近 52a 山西气温变化特征[J]. *干旱区研究*, 2014, 31(6): 1068–1072.
- [16] 杨子凡, 齐玉磊, 郭仲勋. 近六十年全球旱地温度和降水的变化特征[J]. *甘肃科技*, 2018, 34(17): 23–27.
- [17] 时兴合, 赵燕宁, 戴升, 等. 柴达木盆地 40 多年来的气候变化研究[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(1): 123–128.
- [18] 王建兵, 王振国, 汪治桂. 甘南地区近 40 年气温变化特征[J]. *气象*, 2007, 33(1): 112–117.
- [19] 戴广婷, 庞博. 青海省近 50 年来的气温变化特征初探[J]. *青海气象*, 2018(4): 32–37.
- [20] 赵燕宁, 时兴合, 秦宁生, 等. 青海南部地区 40 多年来气候变化的特征分析[J]. *中国沙漠*, 2005(4): 529–534.
- [21] 赵庆云, 李栋梁, 吴洪宝. 西北区东部近 40 年地面气温变化的分析[J]. *高原气象*, 2006(4): 643–650.
- [22] 拥珠卓嘎, 次仁达娃, 仓啦, 等. 青藏高原温度变化特征研究[J]. *西藏科技*, 2017(2): 63–65.
- [23] 朱伊, 范广洲, 华维, 等. 1981–2015 年青藏高原地表温度的时空变化特征分析[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2018, 40(11): 127–140.
- [24] 王永玺, 李鲸波, 马伟, 等. 阿拉善盟地区气温初步分析及突变检验[J]. *内蒙古科技与经济*, 2017(6): 35–37.
- [25] 许延强, 邓红, 段志钟, 等. 拐子湖地区近 40a 气候变化特征分析[J]. *内蒙古气象*, 2013(2): 21–22, 41.
- [26] 贾东奇, 强连红. 黑河市近 50a 气候变化和主要自然灾害的演变[J]. *黑龙江气象*, 2014, 31(3): 22–23.
- [27] 周璞, 徐相明, 黄文娟. 长三角地区平均温度变化特征及其与全球变暖停滞的响应[J]. *安徽农学通报*, 2018, 24(19): 116–119, 123.
- [28] 尹义星, 王小军, 叶正伟, 等. 1951–2013 年江苏省极端最高和最低气温变化趋势及概率特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(6): 1351–1360.
- [29] 王三好. 1975–2016 年玉树地区气温变化特征分析[J]. *现代农业科技*, 2018(23): 206, 208.
- [30] 董丹宏, 黄刚. 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*, 2015, 39(5): 1011–1024.
- [31] 赵芳芳, 徐宗学. 黄河兰州以上气候要素长期变化趋势和突变特征分析[J]. *气象学报*, 2006(2): 246–255.
- [32] 任福民, 翟盘茂. 1951–1990 年中国极端气温变化分析[J]. *大气科学*, 1998, 22(2): 217–227.