

1961—2018 年中国地表温度变化的区域差异*

高璇^{1,2,a}, 赵东升^{1,a}, 郑度^{1,2}

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 IPCC 指出增温应包涵三方面, 即均值偏移、变率增大、对称性改变。然而, 目前对于地表增温主要关注的仍是均值的变化, 这会影响对于地表增温的全面认识。本研究基于 1961—2018 年 590 个气象站点的逐日温度数据, 利用平均温度, 温度方差和高温时间分别量化了均值偏移、变率增大、对称性改变 3 个指标, 进而分析了中国地表温度变化趋势的空间格局。结果发现, 在研究时段内平均温度呈现明显的增加趋势, 但在 1986 年前后存在两个相反的变化趋势: 1986 年前, 平均温度为减小趋势, 而 1986 年后为显著增温趋势。在 1961—2018 年, 高温时间出现提前的站点数 (63.6%) 多于出现滞后的站点数 (36.4%)。温度方差在 1961—1986 年为明显的减小趋势, 但在 1986—2018 年为明显的增大趋势。此外, 平均温度, 温度方差和高温时间的变化具有明显的空间异质性。具体而言: 1961—1986 年, 高温时间推迟, 平均温度下降, 温度方差下降的站点数最多, 占总站点数的 23.9%, 主要分布在亚热带地区; 而 1986—2018 年, 高温时间推迟, 平均温度上升, 温度方差增大的站点数量最多, 占到总站点数的 41.5%, 空间分布不均。各温度指标年际变异的格局, 体现了中国不同地区对地表增温的敏感性差异。同时关注平均温度、温度方差和高温时间变化能较全面反映气候系统

收稿日期 2022-6-16 网络预出版日期

^a 高璇和赵东升为共同一作

***作者简介** 高璇, 女, 1994 年出生, 博士研究生, 主要从事气候变化方面的研究。E-mail: gaox19b@igsnrr.ac.cn

通讯作者 赵东升, 男, 1978 年出生, 副研究员, 主要从事气候变化的影响及适应研究。E-mail: zhaods@igsnrr.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划项目“大都市区多灾种重大自然灾害风险综合防范关键技术与示范”(编号: 2017YFC1503003); 国家自然科学基金重点项目“中国陆地表层自然地域系统动态及其驱动机制”(编号: 41571193)

Founded by National Key Research and Development Program of China “Research and demonstration of key technologies for integrated risk prevention of multiple natural disasters in metropolitan areas” (Grant No.2017YFC1503003); The National Natural Science Foundation of China “Dynamic territorial system of China and its driving mechanism” (Grant No.41571193)

变化的特点，有助于预估未来气候变化风险，对于国家制定气候变化减缓和适应战略具有重要意义。

关键词：地表温度，分段回归，变化趋势，区域差异，中国

文章编号：2021130B

中图分类号：P467

文献标志码：A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2204.21130

Regional differences in surface temperature variation in China from 1961 to 2018

GAO Xuan^{1,2}, ZHAO Dongsheng¹, ZHENG Du^{1,2}

1 Key laboratory of land surface pattern and simulation, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The IPCC indicates that warming should include three types of shifted mean, increased variability, and changed symmetry. However, at present, the main concern of warming is still shifted mean, which affects the overall understanding of surface warming. In this study, based on daily temperature data from 590 meteorological stations during 1961—2018, we quantified indicators of shifted mean, increased variability, and changed symmetry using mean temperature, temperature variance, and high-temperature date, respectively. Then we revealed the spatial pattern of trends in mean temperature, temperature variance, and high-temperature date across China. It was found that, although the mean temperature exhibited a significant increasing trend over the whole study period, the trend was reversed around 1986, with a decreasing trend before 1986 and a significant warming trend after 1986. During 1961—2018, the number of stations with an advance in the high-temperature date (63.6%)

was greater than that with a delay (36.4%). In addition, the temperature variance showed a significant decreasing trend from 1961 to 1986, but a notable increasing trend from 1986 to 2018. Overall, variation in mean temperature, temperature variance, and high-temperature date had large spatially heterogeneity. From 1961 to 1986, the stations with delayed high-temperature date, decreasing mean temperature, and decreasing temperature variance were the most numerous, accounting for 23.9% of the total, and mainly distributed in the subtropical region; while during 1986 to 2018, the stations showing a delayed high-temperature date as well as increases in mean temperature and temperature variance were the most numerous, accounting for 41.5% of observed stations, with a more scattered spatial distribution. The regional variability in the trend changes of different temperature indicators reflects the heterogeneity of global change sensitivity in different regions. Therefore, studies that simultaneously focus on the changes of mean temperature, high-temperature date, and temperature variance can better reflect the characteristics of climate change and help predict the future climate change risk, which is of great significance to develop mitigation and adaptation policy frameworks for climate change in China.

Keywords: surface temperature, piecewise regression, trends, regional differences, China

1 引言

过去的一个世纪,全球变暖已经成为国际社会广泛关注的问题。受人类活动影响,1880—2012 年,全球平均地表温度升高了约 0.85℃ (IPCC, 2013)。以全球变暖为主要特征的气候变化对陆地生态系统和社会经济系统产生重要影响 (Cheng et al., 2021; Holst et al., 2013)。一方面,全球变暖对植被的生长产生积

极作用，特别是高纬度和高海拔地区，气候变暖促进了植物的光合作用，导致生长季延长，植被生产力提高（Wang et al., 2011; Wei et al., 2018）。另一方面，气候变暖加剧了冰川消融和冻土退化，引发一系列生态环境问题（Kaab et al., 2007）。此外，伴随升温，全球降水格局发生改变，极端天气气候事件（如高温热浪、极端干旱、洪涝等）发生的频率和强度发生明显增加（Anderegg et al., 2013; Liu and Zhang, 2020; Utsumi et al., 2011），导致植被对环境的适应能力发生改变，生态系统脆弱性增强，显著影响生态系统服务的提供，并威胁人类生存环境及社会经济的可持续发展（傅伯杰等, 2017）。因此，全面、准确的认识气候变化的区域格局及空间差异，对于减轻自然灾害损失，调整农业结构，制定合理政策等非常重要，成为众多领域的研究热点，受到各国政府和学者的普遍关注。

由于不同区域气候变化指标（如降水、温度、蒸散等）在不同的时空尺度上具有不同的变化模式，不同区域内气候变化的影响也不尽相同（Yuan et al., 2021）。因此，气候变化研究就需要从区域角度来分析其变化的特征。早期，中国气候区划主要是根据不同气候指标的年均值来表征气候的区域差异（黄秉维, 1958; 郑景云等, 2010）。黄秉维（1958）根据气候、土壤、植物的相似性和差异性拟定了中国综合自然区划图，并进而按区划单位来认识自然综合体（即自然的总情况）的发生、发展与分布的规律。近几年，随着全球气候变化的加剧，很多学者从气候变化的趋势及波动特征定量识别气候变化，并对我国进行了一系列新的气候区划分（Shi et al., 2014; Yuan et al., 2021）。其中，Shi et al.（2014）根据历史（1961—2010 年）温度和降水量的变化趋势，将中国划分为 5 个气候变化趋势带，又根据温度和降水量的波动特征在一级区划基础上划分为 14 个气候波动特征区。另外，Yuan et al.（2021）建立了一种基于 k-mean++ 算法的地表温度变化模式识别方法，通过聚类评价指标来选择最优聚类数，在国家尺度上，将中国 1960—2016 年地表温度的变化格局分为了 3 类。

温度变化是气候变化最重要的表征指标。IPCC（2012）将温度的变化与概率分布的均值、变率和对称性的改变联系在一起，认为温度变化应包括均值偏移（图 1a）、变率增大（图 1b）和对称性改变（图 1c）三个方面。全球变暖背景下，三方面相互作用，相互影响，进而导致极端温度事件发生的频率、强度、空间范围、发生时间及持续时间发生变化，并可能导致前所未有的极端事件（IPCC, 2012; Ummenhofer and Meehl, 2017）。一般来说，极端温度变化会对陆地生态系统的结构、功能和过程产生较大影响（Liu et al., 2018; Salvucci and Crafts-Brandner, 2004）。比如，在极端高温下，植被的呼吸作用增强，而光合作用减弱甚至停滞，从而导致生态系统生产力下降（Salvucci and Crafts-Brandner, 2004）；而对于极端低温事件，尽管随着气候变暖，霜冻事件（日最低温度低于 0℃）天数减少，但植被生长期发生的霜冻事件不一定减少，甚至在某些地区发生增加，而生长期的极端低温会造成植被发育缓慢，甚至导致植被死亡（Liu et al., 2018）。然而，当前多数的研究主要关注平均温度变化，无法全面表征增温的实际情况。这可能会影响对于增温的认识，以及一些对极端温度影响的分析。温度变化每个方面的影响是不同的，各种组合的影响也是不一致的。明确区分温度变化的不同形式也很重要，因为它们可能通过不同的机制发挥作用，并可能产生不同的自然生态系统影响（van de Pol et al., 2017）。综合关注温度均值偏移、变率增大、对称性改变，对于气候变化陆地生态系统的影响研究，及减轻自然灾害，调整农业结构，制定政策等至关重要。

气候变暖背景下，为了探究中国温度变化不同方面的时空特点，本文利用中国地面气象站逐日气温观测资料，将均值偏移、变率增大、对称性改变 3 个温度变化的不同方面分别量化为平均温度、温度方差和高温时间 3 个指标。基于气候区划，利用线性回归模型、分段线性回归模型、Mann-Kendall 非参数检验等方法，本研究综合分析了 1961—2018 年中国温度变化的时空格局，并对不同时期（1961

—1986 年和 1986—2018 年）的温度变化特征进行了对比研究。全面、准确的认
识和评估温度变化的时空特点，对于我国制定应对气候变化战略、实现碳中和目
标具有重要意义，同时为生态治理和保护决策提供依据。

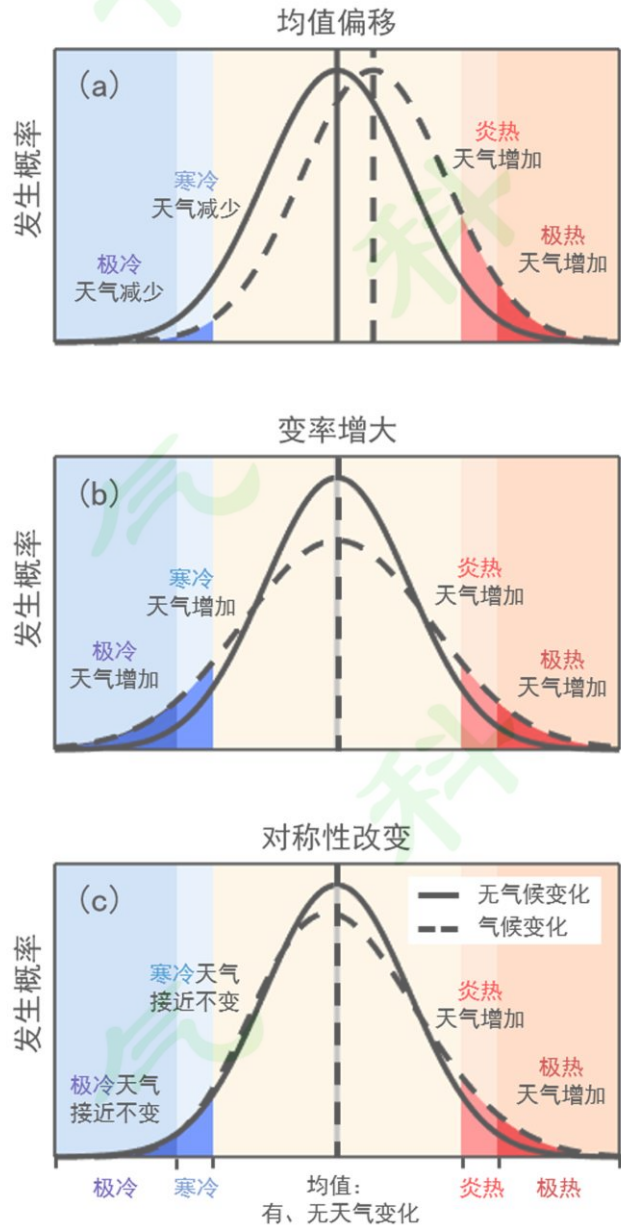


图 1 温度分布变化对极端气候事件的潜在影响。图片来源：IPCC（2012）
Fig. 1 The effect of changes in temperature distribution on extremes. Figure source:
IPCC（2012）

2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究中，数据来源于国家气象科学数据中心（<http://data.cma.cn> [2021-09-18]）934 个站点的日观测资料，包括 1961—2018 年各站点的经度，纬度，逐日气温数据。该数据集经过了严格的质量检查和同质性检验（中国气象局, 2003），并被广泛应用于气候变化的研究（Yuan et al., 2021; Zhang et al., 2021）。为了保证数据的完整性和连续性。本研究对一年内缺失值少于 5% 的站点进行线性回归的插值处理。插值后，删除年数缺失值超过 5 年的站点。最后剩余可用站点 590 个（图 2）。空间上，青藏高原地区的站点分布不均匀，主要集中在中部和东部，西部稀疏。此外，台湾地区无数据。

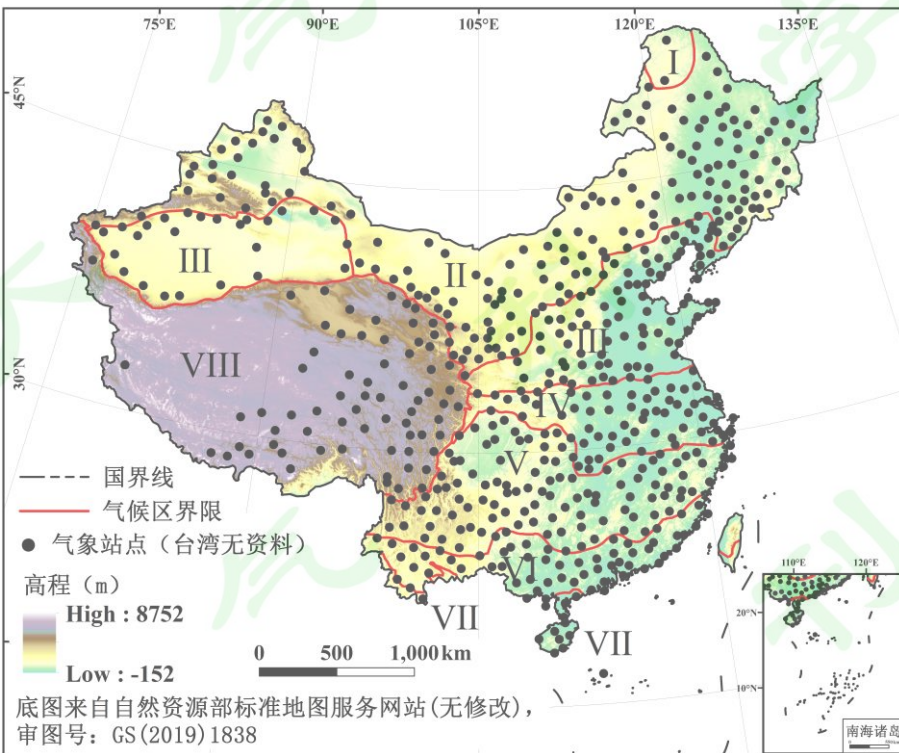


图 2 中国气象站点分布及气候分区

Fig. 2 Distribution of meteorological stations and climatic regionalization in China

2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析

为了检测各指标（平均温度、高温时间、温度方差）在某一时期的变化趋势，使用最小二乘法进行线性回归分析，用斜率来表示变化趋势。计算如下：

$$y = a + bt + \varepsilon \quad (1)$$

式（1）中， y 为气候指标， t 为年份， a 和 b 为拟合变量（ a 为截距， b 为趋势）， ε 为残差。

长时间序列的数据变化可能具有阶段性，即存在趋势的转折点。为了确定平均温度年际变化趋势的转折点，我们采用了分段回归模型（Toms and Lesperance, 2003）。该模型试图寻找时间序列数据趋势的潜在转折点，并在转折点前后分别进行线性拟合，使拟合残差平方和最小的转折点和斜率作为分段拟合的最优解。该模型在许多研究中已经得到广泛的应用（Wang et al., 2011; Xu et al., 2017）。

$$y = \begin{cases} \beta_0 + \beta_1 t + \varepsilon, & t \leq \alpha \\ \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2(t - \alpha) + \varepsilon, & t > \alpha \end{cases} \quad (2)$$

式（2）中， y 为年平均温度， t 为年份， α 为温度数据的转折点， β_0 、 β_1 和 β_2 为拟合变量， ε 为残差， β_1 和 $\beta_1 + \beta_2$ 分别为转折点前后的斜率，即转折点前后的年均温的变化趋势。为了避免线性回归中数据过少，我们选取转折点时间为 1970—2010 年。

2.2.2 高温时间

气候变化主要通过改变一些关键生物温度阈值来影响植被的生长和分布（Zhao and Wu, 2016）。气候学中，常以连续 5 日温度通过某一阈值来表征入秋、入冬等物候学重要节点（蒲红铮等, 2015）。为表征温度对称性的变化，我们研究了高温时间的年际变化规律。在本研究中，年内高温被定义为连续 5 日温度均值

的最大值，而高温时间被定义最大值出现的五天中的第一天时间。此外，采用儒略日（Julian days）换算方法，将高温时间转化为距 1 月 1 日的实际日数，即年序列累积日数（Fan et al., 2015）。

2.2.3 温度方差

本文采用温度方差的变化来表征温度变率的改变（高庆九等, 2010）。温度方差越大表示年内温度变率越大，温度方差越小则年内温度变率越小。计算公式如下：

$$\delta_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (T_j - \bar{T})^2}{N} \quad (3)$$

式（3）中， δ_i^2 为第 i 年温度方差， $^{\circ}\text{C}^2$ ； T_j 为第 i 年第 j 天的温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $\bar{T}$ 为第 i 年的平均温度， $^{\circ}\text{C}$ ； N 为第 i 年的总天数。

2.2.4 显著性检验

趋势的显著性检验采用 Mann-Kendall 法，该方法被广泛应用于监测气候和环境等数据时间序列变化趋势的显著性（Kendall, 1990; Mann, 1945）。这种非参数的检验方法比典型的参数方法更适用于非正态分布的数据，因为它不需要样本遵从一定的分布，也不受少数异常值的干扰（Sneyers, 1990）。

2.2.5 中国气候区划

基于郑景云等（2010）的中国气候区划，本研究将中国划分为 8 个气候区（图 2；表 1）。郑景云等（2010）参照中国科学院《中国自然地理》编辑委员会制定的气候区划三级指标体系，对我国气候进行了重新区划，结果将我国划分为 12 个温度带。考虑到青藏高原地区 3 个温度带和热带地区 3 个温度带地理环境的相似性，进行分别合并。基于 8 个气候区，我们讨论了 1961—2018 年中国平均温度、高温时间及温度方差的区域变化特征。

182 表 1 1961—2018 年中国各气候区内的站点数

183 Table 1 Number of stations within various climatic regions of China over the period

184 1961—2018

符号	气候区	站点数
I	寒温带	2
II	中温带	169
III	暖温带	109
IV	北亚热带	56
V	中亚热带	112
VI	南亚热带	56
VII	热带	15
VIII	青藏高原地区	71
China	全国	590

185

186 3 结果分析

187 3.1 温度年际变化趋势的空间分布

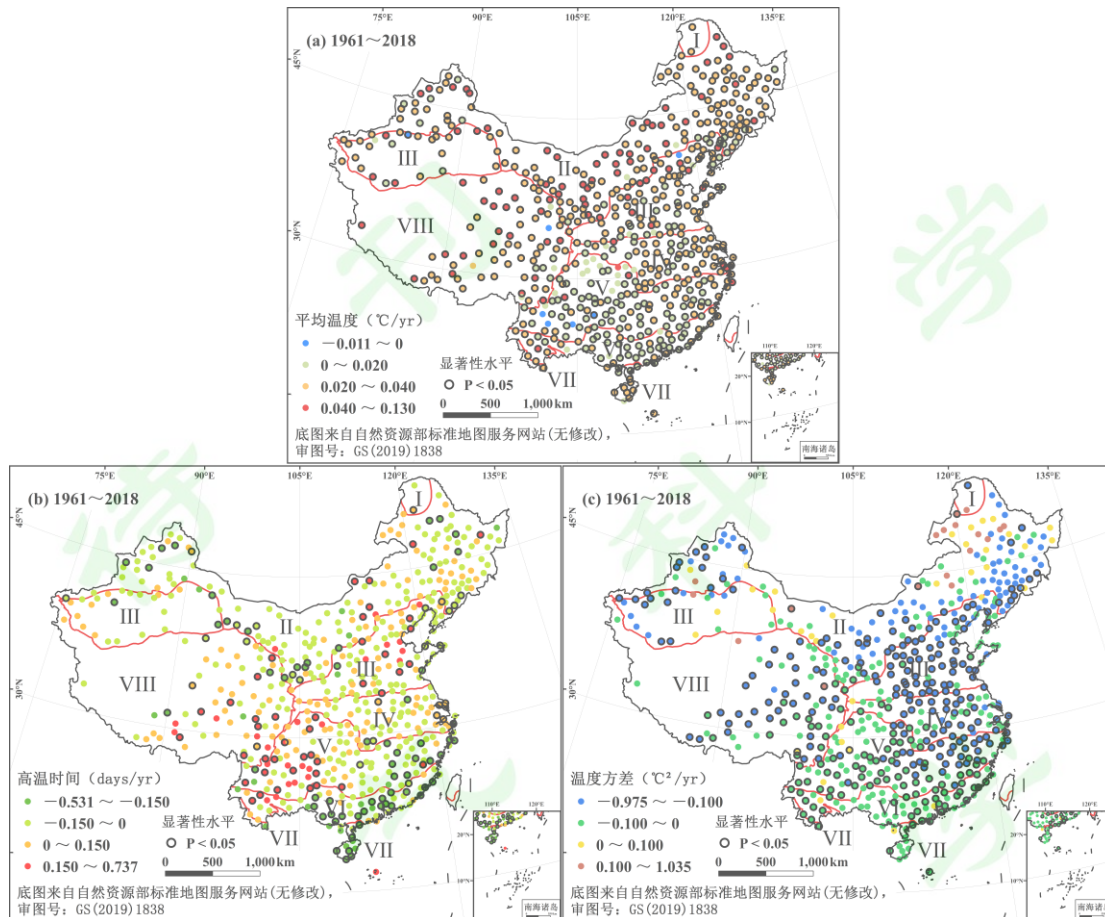


图 3 1961—2018 年中国平均温度 (a)，高温时间 (b) 和温度方差 (c) 变化趋势的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of trends of mean temperature (a), high-temperature date (b) and temperature variance (c) in China during 1960—2018

图 3 为 1961—2018 年中国平均温度 (图 3a)，高温时间 (图 3b) 和温度方差 (图 3c) 变化趋势的空间分布图。1961—2018 年，8 个气候区都呈现明显的升温趋势，增温趋势站点占到 98.8%，其中 554 个站点 (93.9%) 通过 0.05 显著性检验。但尽管增温现象明显，不同区域增温幅度存在明显差异性。秦岭—淮河一线以北地区显著高于南部地区，青藏高原地区显著高于同纬度的以东地区。从 1961—2018 年中国高温时间的变化趋势分布图发现，在整个研究期，高温时间出现提前的站点数 (63.6%) 多于出现滞后的站点数 (36.4%)。空间上，高温时

间出现较明显滞后 (>0.150 days/yr) 的站点主要分布在 V 地区西部和 III 地区东部, 而呈现明显提前趋势 (<-0.150 days/yr) 的站点主要集中在 VI 和 VII 地区。为了描述温度年内的波动情况, 本研究进一步分析了温度方差的变化趋势。1961—2018 年, 91% 站点的温度方差呈现出减小趋势, 其中 50% 通过 0.05 显著性检验。尽管温度方差减小趋势明显, 但空间上存在差异性。较大减小趋势 ($<-0.100^{\circ}\text{C}^2/\text{yr}$) 的站点主要分布在 III、IV 地区和 IV 地区的东部。

3.2 平均温度变化转折点

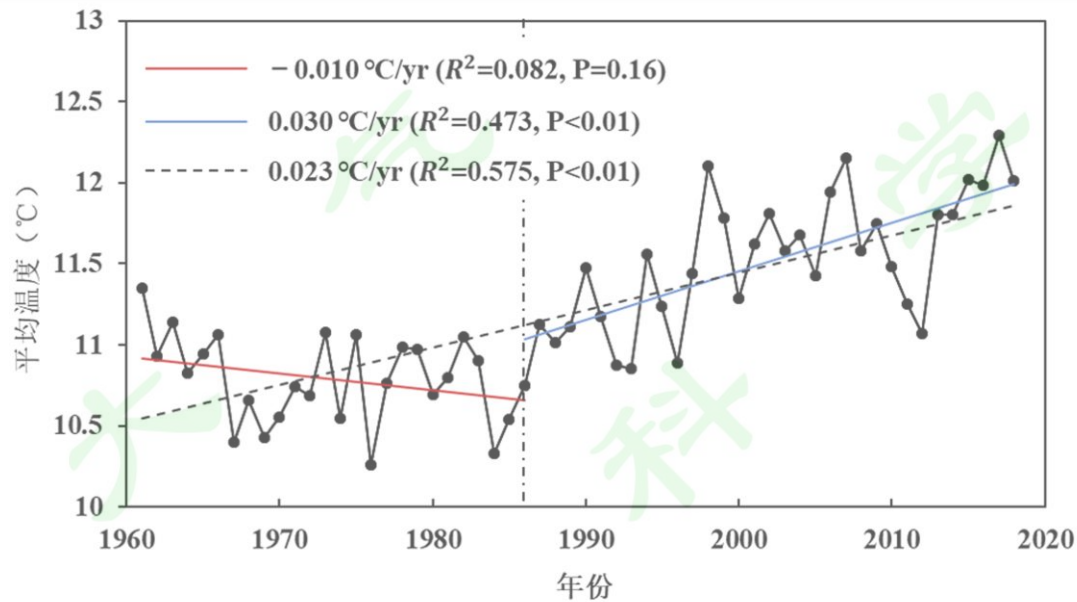


图 4 中国平均温度在区域尺度上的年际变化。红线、蓝线和虚线分别表示 1961—1986 年、1986—2018 年和 1961—2018 年期间的线性拟合。

Fig. 4 Interannual variations of mean temperature in China. The red and blue solid lines represent linear fits during the period 1961—1986 and 1986—2018 of mean temperature trend, respectively. The dash line indicates linear fits during the period of 1961—2018.

基于线性回归模型和分段线性回归模型，我们分析了 1961—2018 年中国平均温度区域尺度上的年际变化趋势（图 4）。在区域尺度上，平均温度的转折点出现在 1986 年。尽管在整个研究期，年平均温度呈现明显的增加趋势，每年升高约 0.023°C ($R^2=0.575$, $P<0.01$)，但在 1986 年前后存在两个趋势相反的不同时期。1961—1986 年，平均温度变化趋势不明显，呈弱的减小趋势；而 1986—2018 年，均温表现出较大的增大趋势，为 $0.030^{\circ}\text{C}/\text{yr}$ ($R^2=0.473$, $P<0.01$)。总体上，1961—1986 年为一个相对冷的时段，1986—2018 年为一个相对暖的时段。

3.3 不同时期温度变化趋势的空间格局

为了进一步分析中国温度变化趋势的空间格局，我们对比研究了 1961—1986 年和 1986—2018 年平均温度，高温时间和温度方差趋势的时空变化特征（图 5；表 2）。1961—1986 年，温度呈现降低趋势的站点有 326 个，占到总站点数的 55.3%（图 5a），而 1986—2018 年，95.6%站点的平均温度呈现增加趋势，并且 78.0%通过 0.05 显著性检验（图 5b）。1961—1986 年，平均温度呈现下降趋势的站点主要分布在 III 和 V 地区，1986—2018 年，平均温度变化趋势的空间格局与 1961—2018 年的空间格局相似，北方地区和青藏高原地区增温幅度大于南方地区。两个时期平均温度变化趋势的时空差异性进一步反应了两个时期气候存在明显不同。图 5c 和图 5d 分别是 1961—1986 年和 1986—2018 年高温时间趋势变化的空间分布图。1961—1986 年，52.0%站点高温时间呈现推迟的趋势，仅 97 个站点通过 0.05 显著性检验，并且较大的推迟趋势 (>0.15 days/yr) 主要分布在 III 地区、IV 地区，以及 V 地区的北部。1986—2018 年，高温时间出现推迟趋势的站点占总站点数的 54.1%，其中 71 个站点通过 0.05 显著性检验。总体而言，两个时期，高温时间的变化不明显。另外，我们分析了两个时期温度方差变化趋势的时空格局（图 5e；图 5f）。1961—1986 年，中国大部分站点（71.7%）温度

241 方差呈现减小趋势，其中 83 个站点（14.1%）通过 0.05 显著性检验。而温度方
 242 差呈现增大趋势的站点主要分布在 VI 地区和 V 地区的南部。相比之下，1986—
 243 2018 年，81.7%站点的温度方差呈现增加趋势，并且 212 个站点（35.9%）通过
 244 0.05 显著性检验。空间上，温度方差呈现减小趋势的站点主要集中在青藏高原地
 245 区，而较大的增加趋势（ $>0.100^{\circ}\text{C}^2/\text{yr}$ ）的站点主要分布在 II 地区。

246

247 表 2 1961—1986 年和 1986—2018 年高温时间，平均温度，温度方差不同变化
 248 趋势所占比例，其中，‘ $\leq$ ’表示没有变化或下降趋势，‘ $>$ ’表示增长趋势

249 Table 2 Percentage of different trends in mean temperature, high-temperature date,
 250 and temperature variance during 1961—1986 and 1986—2018, the ‘ $\leq$ ’ represents a no
 251 change or decreasing trend, and ‘ $>$ ’ represents an increasing trend

指标	趋势 (T)	1961—1986 年	1986—2018 年
		站点数 (百分比)	站点数 (百分比)
平均温度 (M)	MT $\leq$ 0	326 (55.3%)	26 (4.4%)
	MT $>$ 0	264 (44.7%)	564 (95.6%)
高温时间 (H)	HT $\leq$ 0	283 (48.0%)	271 (45.9%)
	HT $>$ 0	307 (52.0%)	319 (54.1%)
温度方差 (V)	VT $\leq$ 0	423 (71.7%)	108 (18.3%)
	VT $>$ 0	167 (28.3%)	482 (81.7%)

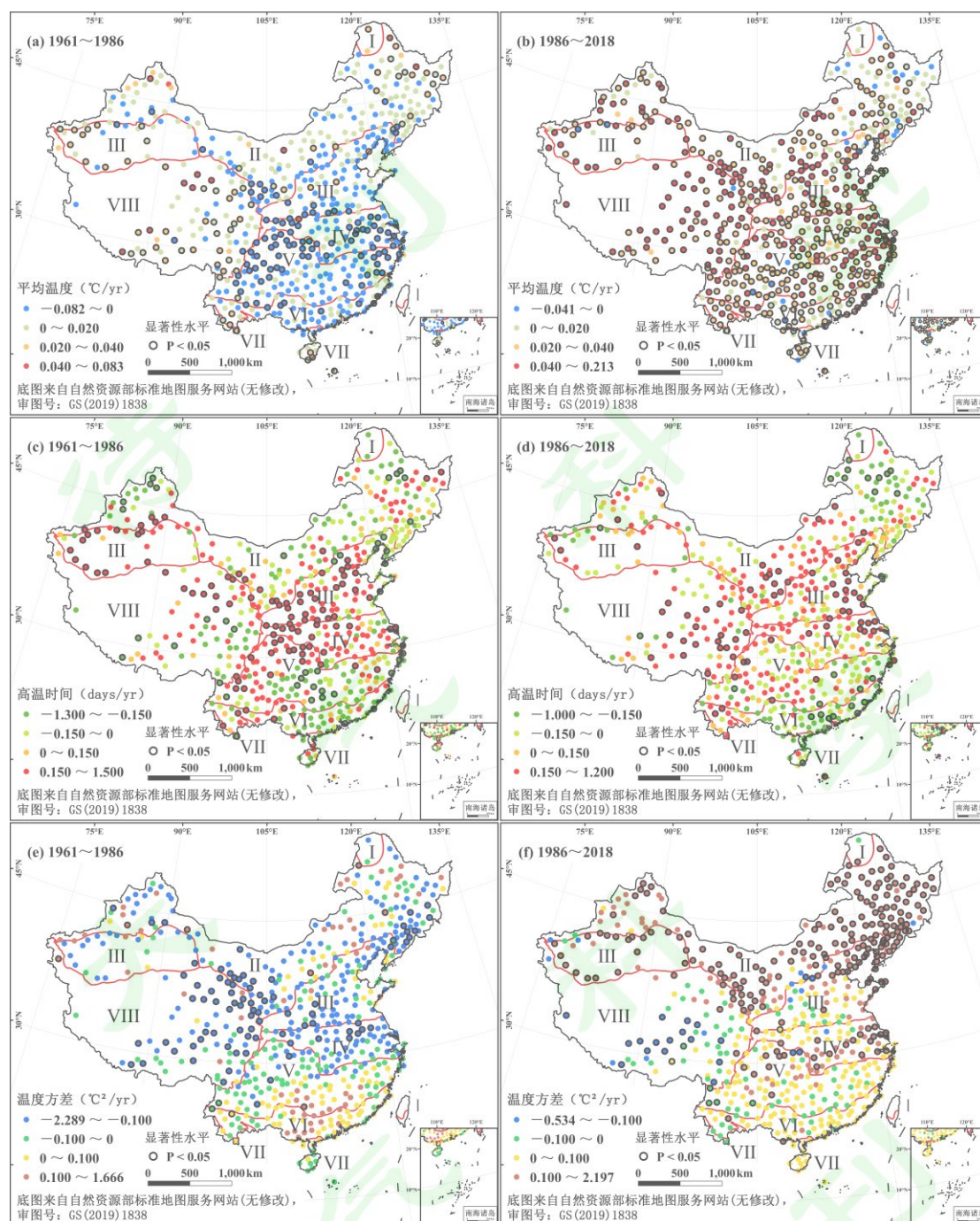


图 5 1961—1986 年平均温度 (a), 高温时间 (c) 和温度方差 (e), 及 1986—2018 年平均温度 (b), 高温时间 (d) 和温度方差 (f) 变化趋势的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of trends of mean temperature (a), high-temperature date (c) and temperature variance (e) in China during 1961—2018; and spatial distribution of trends of mean temperature (b), high-temperature date (d) and temperature variance (f) in China during 1986—2018

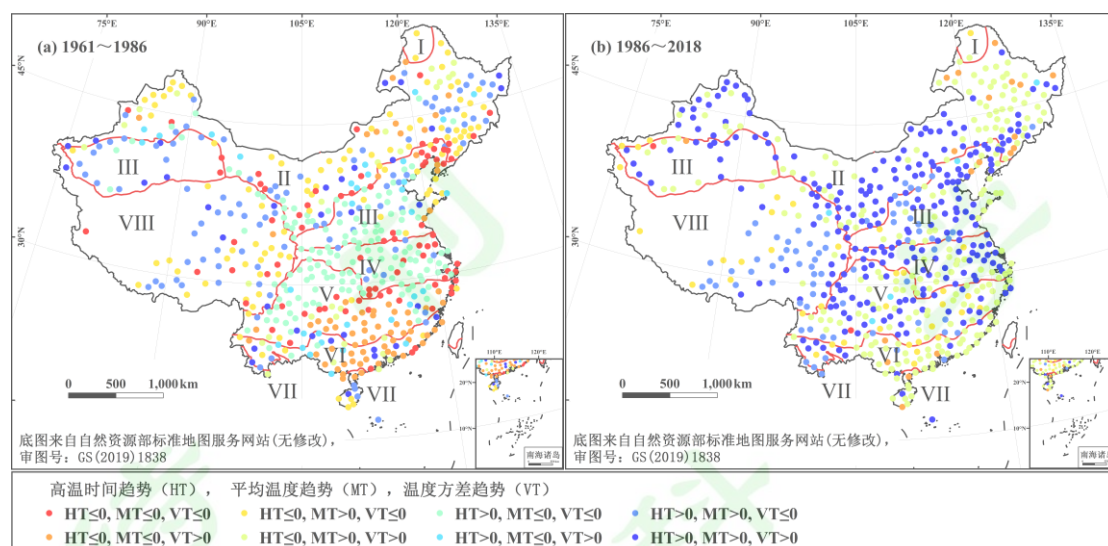


图 6 1961—1986 年和 1986—2018 年高温时间、平均温度、温度方差变化趋势的不同组合，其中，‘≤’表示没有变化或下降趋势，‘>’表示增加趋势

Fig. 6 Different combinations of high-temperature date, mean temperature, and temperature variance trends during 1961—1986 and 1986—2018, the ‘≤’ represents a no change or decreasing trend, and ‘>’ represents an increasing trend

此外，为了对比分析不同时期地表温度变化的特点，我们利用平均温度，高温时间和温度方差年际变化趋势的大小，对 1961—1986 年和 1986—2018 年的各站点分别进行分类（图 6；表 3）。1961—1986 年，高温时间推迟，平均温度下降，温度方差下降的站点数最多，共 141 个，占总站点数的 23.9%，主要分布在 III、IV 地区，以及 V 地区的北部；其次是高温时间提前，平均温度上升，温度方差下降的站点和高温时间推迟，平均温度升高，温度方差下降的站点，分别占总站点数的 17.5%和 16.8%。其中，高温时间提前，平均温度上升，温度方差下降的站点主要分布在北方地区及青藏高原地区。另外，高温时间提前，平均温度下降，温度方差增大的站点有较集中分布，主要集中在 V 地区的南部和 VI 地区。与 1961—1986 年不同，在 1986—2018 年期间，高温时间推迟，平均温度上升，温度方差增大的站点数量最多，占到总站点数的 41.5%，空间分布较散。其次，

高温时间提前，平均温度上升，温度方差增大的站点数量较多，占到总站点数的 36.1%，主要分布在 II、V 和 VI 地区。

表 3 1961—1986 年和 1986—2018 年高温时间，平均温度，温度方差不同变化趋势组合类型所占比例，其中，‘≤’表示没有变化或下降趋势，‘>’表示增加趋势

Table 3 Percentage of different trend combination types of high-temperature date, mean temperature, and temperature variance during 1961—1986 and 1986—2018, the ‘≤’ represents a no change or decreasing trend, and ‘>’ represents an increasing trend

趋势类别	1961—1986 年	1986—2018 年
高温时间 (HT)，平均温度 (MT)，温度方差 (VT)	站点数 (百分比)	站点数 (百分比)
HT≤0, MT≤0, VT≤0	80 (13.6%)	2 (0.3%)
HT≤0, MT≤0, VT>0	72 (12.2%)	19 (3.2%)
HT≤0, MT>0, VT≤0	103 (17.5%)	37 (6.3%)
HT≤0, MT>0, VT>0	28 (4.7%)	213 (36.1%)
HT>0, MT≤0, VT≤0	141 (23.9%)	0 (0%)
HT>0, MT≤0, VT>0	33 (5.6%)	5 (0.8%)
HT>0, MT>0, VT≤0	99 (16.8%)	69 (11.7%)
HT>0, MT>0, VT>0	34 (5.8%)	245 (41.5%)

4 讨论

本研究中，利用平均温度，高温时间，及温度方差分别量化了均值偏移、对称性改变和变率增大三种温度变化的不同方面，并结合区域差异，分析了 1961—2018 年中国地表温度变化的时空特点。

在整个研究期，地表温度呈现显著的上升趋势，但上升趋势在不同气候区之

间存在差异性。秦岭—淮河以北的地区,及青藏高原地区升温幅度大于南方地区。

温度的升高对自然生态系统和社会经济系统产生重要影响。气候变暖严重影响了全球自然灾害的数量和变化,Zhu and Fan (2021)研究了 1951—2010 年中国气温上升与气候相关自然灾害的变化规律,发现与气候相关的自然灾害数量大幅增加。另一方面,基于分段回归模型,发现平均温度在 1961—1986 年和 1986—2018 年变化趋势存在明显差异性。1986 年前地表平均温度为降低趋势,并且为一个相对冷的时段;而 1986 年之后为明显的变暖趋势,这一时段相对较暖。这一结果在过去一些研究中也得到印证。蒋冲等(2012)研究 1960—2011 年秦岭地区平均温度发现,1993 年是气温变化的转折点,转折点前为降温趋势,此后为升温趋势。王少鹏等(2010)使用分段回归方法分析了 1961—2014 年中国年均温变化趋势,发现存在显著的转折点,中国平均升温开始于 1984 年。由于研究区域及研究时段选择的差异性,温度转折点出现具体时间不同,但总体上在 20 世纪 80,90 年代左右。因此,过去关于中国近 60 年整体的增温速率明显低估了 20 世纪 80 年代中期之后的实际增温速率,掩盖了我国近 20 年来的快速增温。

与此同时,气候从一个相对冷的时段进入一个相对暖的时段也推动了中国多数关键自然带发生明显的北移,如,北亚热带北界和暖温带北界(吴绍洪等,2016)。

过去的研究大多关注高温强度和极端高温天气出现日数的变化,较少关注其出现时间的变化(Ding and Ke, 2015; Zhu et al., 2017)。Ding and Ke (2015)发现 1960—2013 年,中国高温热浪发生的频率和强度都呈现明显的增加趋势。未来,中国仍将出现更多的极端高温天气,并且持续时间将会更长(Zhu et al., 2017)。

然而,气候变化背景下,高温出现时间也可能发生改变,并可能会影响中国雨热同期的气候特征,进而通过影响植被物候而影响植被生长(Liu et al., 2019)。1961—2018 年,中国大部分站点(63.6%)的高温时间出现提前,较明显提前趋势的站点主要集中在 VI 和 VII 地区,而呈现滞后趋势的站点主要分布在 V 地区的西

部。这一空间格局与 Zhao et al. (2021) 通过高温集中期计算的结果基本一致。生长季期间, 高温较早的出现, 会增加土壤和植被的蒸发量, 从而增加水分的需求, 而此时降水的亏缺, 可能会抑制植被的生长 (Zhao et al., 2021; 张妹婷等, 2017)。此外, 伴随温度的升高和高温的提前, 植被可能为了重新适应水热条件而改变生长季峰值的出现 (Liu et al., 2021)。过去的研究发现碳固存更多地取决于夏季光合作用的峰值 (Park et al., 2019)。

温度方差可以表征温度的波动性和变率。卢爱刚等 (2007) 分析 1951—2002 年中国年平均气温的方差, 发现与纬度的变化有很强的相关性, 纬度越高, 方差越大。此外, 过去研究表明温度方差的增大与平均温度的升高相互作用, 会导致群落物候随时间发生变化 (Kutta and Hubbart, 2018; Mulder et al., 2017)。Kutta and Hubbart (2018) 对北美东部落叶林的研究发现, 随着气候变暖和温度方差的变化, 导致物种组成处于不平衡状态。本研究利用温度方差来表征年内温度的波动, 发现 1961—2018 年, 中国温度方差呈现明显的下降趋势, 较大减小趋势的站点主要分布在 III、IV 地区和 IV 地区的东部。温度方差的减小表明年内温度的波动性减小, 这与中国冬季气温上升幅度较大, 夏季上升幅度较小有关 (Qian et al., 2011)。而显著的冬季变暖会减少植被休眠期的低温积累, 从而增加植被在春季的热量需求, 并降低春季物候对温度升高的敏感性 (Wang et al., 2020)。另一方面, 不同时期, 中国温度方差具有明显的差异性。1961—1986 年, 大多数站点温度方差都表现为减小趋势, 而 1986—2018 年, 大多数站点的温度方差为增大趋势。地表温度升高的背景下, 温度方差的增加可能会引发更多的极端高温事件 (Zhu et al., 2017)。此外, Qi and Wang (2012) 对比分析了 1960—1989 年和 1990—2009 年中国冬季和夏季平均气温的变化趋势, 发现, 1990 年以前, 夏季平均气温表现为变冷趋势, 冬季平均气温为增加趋势, 而 1990 年之后, 中国冬季和夏季平均气温均呈现明显变暖趋势。Qian and Zhang (2019) 研究发现 1998—

2013 年中国冬季气温变暖发生停滞。这些中国地表温度季节性变化特征进一步解释了温度方差不同时期趋势的差异性。

5 结论

本研究利用平均温度、温度方差和高温时间分别量化了均值偏移、变率增大、对称性改变 3 个指标，并结合线性回归模型和分段线性回归模型分析了 1961—2018 年中国地表温度的时空变化特征。研究发现，区域尺度上，尽管在整个研究期，年平均地表温度呈现明显的增加趋势，但在 1986 年前后存在两个趋势相反的不同时期：1986 年前，平均温度为减小趋势，而 1986 年后为显著增温趋势。基于 1986 年这一转折点，我们进一步分析了平均温度、高温时间和温度方差在空间上的变化趋势。1961—1986 年，约一半站点平均温度表现为下降趋势，而 1986—2018 年，平均温度呈现明显上升趋势。1961—1986 年和 1986—2018 年，高温时间的空间变化差异不明显，高温时间提前站点主要集中在亚热带地区。然而，温度方差在 1986 年前主要为减小趋势，1986 年后为增加趋势。平均温度、高温时间、温度方差趋势变化的区域差异性，体现了不同地区在全球变暖的大背景下，对全球变化的敏感性不同。

参考文献 (References)

- Anderegg W R L, Kane J M, Anderegg L D L. 2013. Consequences of widespread tree Mortality triggered by drought and temperature stress [J]. *Nat. Clim. Chang.*, 3(1): 30-36. <https://doi.org/10.1038/nclimate1635>
- Cheng W, Li Z, Yan L. 2021. Uniforming spring phenology under non-uniform climate warming across latitude in China [J]. *Sci. Total Environ.*, 762(2): 143177-143177. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143177>
- Ding T, Ke Z. 2015. Characteristics and changes of regional wet and dry heat wave events in China during 1960-2013 [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 122(3-4): 651-665. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1322-9>
- Fan D Q, Zhu W Q, Zheng Z T, et al. 2015. Change in the Green-Up Dates for *Quercus mongolica* in Northeast China and Its Climate-Driven Mechanism from 1962 to 2012 [J]. *PLoS One*, 10(6): 13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130516>

- Holst R, Yu X H, Grun C. 2013. Climate Change, Risk and Grain Yields in China [J]. *J. Integr. Agric.*, 12(7): 1279-1291. [https://doi.org/10.1016/s2095-3119\(13\)60435-9](https://doi.org/10.1016/s2095-3119(13)60435-9)
- IPCC. 2012. Summary for policymakers. In *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Cambridge, UK and New York, NY: Cambridge University Press.
- IPCC. 2013. Summary for policymakers. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Stocker T F, Qin D H, Plattner G K, et al., Eds. Cambridge, UK and New York, NY: Cambridge University Press.
- Kaab A, Chiarle M, Raup B, et al. 2007. Climate change impacts on mountain glaciers and permafrost [J]. *Glob. Planet. Change*, 56(1-2): VII-IX. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.008>
- Kendall M G. 1990. Rank Correlation Methods [J]. *Br. J. Psychol.*, 25(1): 86-91. <https://doi.org/10.2307/2333282>
- Kutta E, Hubbart J A. 2018. Changing Climatic Averages and Variance: Implications for Mesophication at the Eastern Edge of North America's Eastern Deciduous Forest [J]. *Forests*, 9(10): 605. <https://doi.org/10.3390/f9100605>
- Liu L, Zhang X. 2020. Effects of temperature variability and extremes on spring phenology across the contiguous United States from 1982 to 2016 [J]. *Sci Rep*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74804-4>
- Liu Q, Piao S L, Janssens I A, et al. 2018. Extension of the growing season increases vegetation exposure to frost [J]. *Nat. Commun.*, 9(1): 426. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02690-y>
- Liu Y, Qin Y, Ge Q. 2019. Spatiotemporal differentiation of changes in maize phenology in China from 1981 to 2010 [J]. *J. Geogr. Sci.*, 29(3): 351-362. <https://doi.org/10.1007/s11442-019-1602-5>
- Liu Y, Wu C, Wang X, et al. 2021. Impacts of global change on peak vegetation growth and its timing in terrestrial ecosystems of the continental US [J]. *Glob. Planet. Change*, 207: 103657. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103657>
- Mann H B. 1945. NONPARAMETRIC TESTS AGAINST TREND [J]. *Econometrica*, 13(3): 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Mulder C P H, Iles D T, Rockwell R F. 2017. Increased variance in temperature and lag effects alter phenological responses to rapid warming in a subarctic plant community [J]. *Glob. Change Biol.*, 23(2): 801-814. <https://doi.org/10.1111/gcb.13386>
- Park T, Chen C, Macias-Fauria M, et al. 2019. Changes in timing of seasonal peak photosynthetic activity in northern ecosystems [J]. *Glob. Change Biol.*, 25(7): 2382-2395. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gcb.14638>
- Qi L, Wang Y Q. 2012. Changes in the Observed Trends in Extreme Temperatures over China around 1990 [J]. *J. Clim.*, 25(15): 5208-5222. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-11-00437.1>
- Qian C, Fu C B, Wu Z H. 2011. Changes in the Amplitude of the Temperature Annual Cycle in China and Their Implication for Climate Change Research [J]. *J. Clim.*, 24(20): 5292-5302.

- <https://doi.org/10.1175/jcli-d-11-00006.1>
- Qian C, Zhang X B. 2019. Changes in Temperature Seasonality in China: Human Influences and Internal Variability [J]. *J. Clim.*, 32(19): 6237-6249. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0081.1>
- Salvucci M E, Crafts-Brandner S J. 2004. Inhibition of photosynthesis by heat stress: the activation state of Rubisco as a limiting factor in photosynthesis [J]. *Physiol. Plant.*, 120(2): 179-186. <https://doi.org/10.1111/j.0031-9317.2004.0173.x>
- Shi P J, Sun S, Wang M, et al. 2014. Climate change regionalization in China (1961-2010) [J]. *Sci. China-Earth Sci.*, 57(11): 2676-2689. <https://doi.org/10.1007/s11430-014-4889-1>
- Sneyers R. 1990. On the Statistical Analysis of Series of Observations [J]. *J. Biol. Chem.*, 258(22): 13680-4. <https://doi.org/10.1021/ja00723a061>
- Toms J D, Lesperance M L. 2003. Piecewise regression: A tool for identifying ecological thresholds [J]. *Ecology*, 84(8): 2034-2041. <https://doi.org/10.1890/02-0472>
- Ummenhofer C C, Meehl G A. 2017. Extreme weather and climate events with ecological relevance: a review [J]. *Philos. Trans. R. Soc. B-Biol. Sci.*, 372(1723): 13. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0135>
- Utsumi N, Seto S, Kanae S, et al. 2011. Does higher surface temperature intensify extreme precipitation? [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 38(16): 239-255. <https://doi.org/10.1029/2011gl048426>
- van de Pol M, Jenouvrier S, Cornelissen J H C, et al. 2017. Behavioural, ecological and evolutionary responses to extreme climatic events: challenges and directions [J]. *Philos. Trans. R. Soc. B-Biol. Sci.*, 372(1723): 16. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0134>
- Wang H J, Wu C Y, Ciais P, et al. 2020. Overestimation of the effect of climatic warming on spring phenology due to misrepresentation of chilling [J]. *Nat. Commun.*, 11(1): 9. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18743-8>
- Wang X H, Piao S L, Ciais P, et al. 2011. Spring temperature change and its implication in the change of vegetation growth in North America from 1982 to 2006 [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 108(4): 1240-1245. <https://doi.org/10.1073/pnas.1014425108>
- Wei H, Zhao X, Liang S, et al. 2018. Effects of Warming Hiatuses on Vegetation Growth in the Northern Hemisphere [J]. *Remote Sens.*, 10(5): 683. <https://doi.org/10.3390/rs10050683>
- Xu H J, Wang X P, Yang T B. 2017. Trend shifts in satellite-derived vegetation growth in Central Eurasia, 1982-2013 [J]. *Sci. Total Environ.*, 579: 1658-1674. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.182>
- Yuan Q, Wu S, Zhao D, et al. 2021. Regional differences in surface air temperature changing patterns from 1960 to 2016 of China [J]. *Clim. Dyn.*, 57(7-8): 1733-1749. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05774-0>
- Zhang G X, Su X L, Ayantobo O O, et al. 2021. Drought monitoring and evaluation using ESA CCI and GLDAS-Noah soil moisture datasets across China [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 144(3-4): 1407-1418. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03609-w>
- Zhao D S, Gao X, Wu S H. 2021. Nonuniform variations of precipitation and temperature across China over the period 1960-2015 [J]. *Int. J. Climatol.*, 41(1): 316-327. <https://doi.org/10.1002/joc.6622>

- Zhao D S, Wu S H. 2016. Spatial and temporal variability of key bio-temperature indicators on the Qinghai-Tibetan Plateau for the period 1961-2013 [J]. *Int. J. Climatol.*, 36(4): 2083-2092. <https://doi.org/10.1002/joc.4482>
- Zhu J X, Huang G, Wang X Q, et al. 2017. Investigation of Changes in Extreme Temperature and Humidity Over China Through a Dynamical Downscaling Approach [J]. *Earth Future*, 5(11): 1136-1155. <https://doi.org/10.1002/2017ef000678>
- Zhu M G, Fan B H. 2021. Exploring the Relationship between Rising Temperatures and the Number of Climate-Related Natural Disasters in China [J]. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 18(2): 11. <https://doi.org/10.3390/ijerph18020745>
- 傅伯杰, 田汉勤, 陶福禄, 等. 2017. 全球变化对生态系统服务的影响 [J]. *中国基础科学*, 19(6): 14-18. Fu Bojie, Tian Hanqin, Tao Fulu, et al. 2017. The Impact of Global Change on Ecosystem Services[J]. *China Basic Science (in Chinese)*, 19(6): 14-18. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-2412.2017.06.003>
- 高庆九, 管兆勇, 蔡佳熙, 等. 2010. 两种再分析资料中夏季地表气温与中国测站资料的差异 [J]. *大气科学*, 34(3): 471-482. Gao Qingjiu, Guan Zhaoyong, Cai Jiayi, et al. 2010. Differences in 1958 - 2001 Summertime Surface Air Temperatures between Two Reanalysis Data and Observations in China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34(3): 471-482. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1037.2010.00186>
- 黄秉维. 1958. 中国综合自然区划的初步草案 [J]. *地理学报*, 25(4): 348-365. Huang Bingwei. 1958. A preliminary draft of comprehensive physical regionalization in China[J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 25(4): 348-365. <https://doi.org/10.11821/xb195804002>
- 蒋冲, 王飞, 穆兴民, 等. 2012. 1960~2011 年秦岭南北气温和降水变化对植被净第一性生产力的影响研究 [J]. *西北植物学报*, 32(9): 1888-1896. Jiang Chong, Wang Fei, Mu Xingmin, et al. 2012. Effects of Temperature and Precipitation Variation on Vegetation Net Primary Productivity in the Northern and Southern Regions of the Qinling Mountains from 1960 to 2011[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica (in Chinese)*, 32(9): 1888-1896. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-4025.2012.09.025>
- 卢爱刚, 庞德谦, 康世昌, 等. 2007. 全球升温下中国温度区域变化的稳定性 [J]. *生态环境学报*, 16(2): 275-279. Lu aigang, Pang Deqian, Kang Shichang, et al. 2007. Regional stability of temperature change across China under global warming[J]. *Ecology and Environment Sciences (in Chinese)*, 16(2): 275-279. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-5906.2007.02.002>
- 蒲红铮, 韩添丁, 成鹏, 等. 2015. 天山南北坡流域气温时空变化特征 [J]. *高原气象*, 34(3): 753-761. Pu Hongzheng, Han Tianding, Cheng Peng, et al. 2015. Characteristics of Air Temperature in the Southern and Northern Slopes of Tianshan Mountains[J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 34(3): 753-761. <https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00050>
- 王少鹏, 王志恒, 朴世龙, 等. 2010. 我国 40 年来增温时间存在显著的区域差异 [J]. *科学通报*, 55(16): 1538-1543. Wang Shaopeng, Wang Zhiheng, Pu Shilong, et al. 2010. Regional differences in the timing of recent air warming during the past four decades in China[J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 55(16): 1538-1543. <https://doi.org/10.1007/s11434-010-3236-y>

474 吴绍洪, 刘文政, 潘韬, 等. 2016. 1960~2011 年中国陆地表层区域变动幅度与速率 [J]. 科学通报, 61(19):
475 2187-2197. Wu Shaohong, Liu Wenzheng, Pan Tao, et al. 2016. Amplitude and velocity of the shifts in the
476 Chinese terrestrial surface regions from 1960 to 2011[J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 61(19):
477 2187-2197. <https://doi.org/10.1360/N972016-00051>

478 张妹婷, 翟永洪, 张志军, 等. 2017. 三江源区草地生态系统质量及其动态变化 [J]. 环境科学研究, 30(1):
479 75-81. Zhang Meiting, Zhai Yonghong, Zhang Zhijun, et al. 2017. Quality and Dynamic Changes of
480 Grassland Ecosystems in the Three-River Headwater Region[J]. Research of Environmental Sciences (in
481 Chinese), 30(1): 75-81. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2017.01.48>

482 郑景云, 尹云鹤, 李炳元. 2010. 中国气候区划新方案 [J]. 地理学报, 65(1): 3-12. Zheng Jingyun, Yin Yunhe,
483 Li Bingyuan. 2010. A New Scheme for Climate Regionalization in China[J]. Acta Geographica Sinica (in
484 Chinese), 65(1): 3-12. <https://doi.org/10.11821/xb201001002>

485 中国气象局. 2003. 地面气候观测规范 [M]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration. 2003.
486 Guideline of Surface Meteorological Observation (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.