

1960~2018 年中国高温热浪的线性趋势分析方法与变化趋势¹

张嘉仪^{1,2}, 钱诚^{2,3*}

1 成都信息工程大学大气科学学院, 成都610225

2 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室, 中国科学院大气物理研究所, 北京100029

3 中国科学院大学, 北京100049

中图分类号: P467 气候变化、历史气候

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19134

摘要

高温热浪直接影响人体健康和作物生长。研究全球变暖背景下我国高温热浪发生率的趋势是气候变化研究的基本问题之一,可为人们的生产生活等提供重要的科学信息。目前对于高温热浪趋势的研究大都使用最小二乘(OLS)方法估计趋势,结合学生 T 检验判断趋势的统计显著性。本文审视了以往常用方法在研究我国高温热浪发生率的线性趋势时的适用性。首先,以 2018 年东北局部地区因当年高温日数异常多而形成离群值的例子展开,说明 OLS 方法估计趋势时对离群值非常敏感,造成虚假趋势。进一步,通过正态分布检验和自相关计算,发现 1960~2018 年中国至少有 91.14%站点、90.06%格点的高温日数和 92.18%站点、87.74%格点的热浪次数的序列不服从正态分布,而且多数存在自相关。采用一种不易受离群值影响并考虑自相关的非参数方法,本文对 1960~2018 年中国站点和格点、四个典型区域以及全国平均的高温日数和热浪次数的线性趋势做出了更为准确的估计。研究发现,高温日数显著增多的站点主要出现在华南和西北地区,热浪次数呈显著增多趋势的站点目前几乎仅限于华南地区 and 新疆的个别站点;区域平均而言,仅有华南区域和西北区域的高温日数和热浪次数是显著增多的,华北区域和东北区域趋势并不显著;全国平均的高温日数和热浪次数都是显著增多

收稿日期 2019-09-01; 收修定稿 2020-01-14

¹ 作者简介: 张嘉仪, 女, 1995 年出生, 硕士研究生, 主要从事极端天气气候事件研究。Email: 18702882488@qq.com

通讯作者: 钱诚, Email: qianch@tea.ac.cn

资助项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1507701)、中国科学院青年创新促进会(2016075)

Funded by: National Key R&D Program of China (2018YFC1507701) and the Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (2016075)

的。本文对高温热浪的趋势及其显著性估计、统计预测的方法选择上有重要参考价值。

关键词 高温热浪 趋势估计 显著性检验 非正态分布 自相关 非参数方法

Linear trends in high temperature and heatwave occurrence in China for the period 1960~2018: analysis method and results

ZHANG Jiayi^{1, 2} & QIAN Cheng^{2, 3*}

¹ *College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, China*

² *Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China*

³ *University of Chinese Academy of Science, Beijing, China*

Abstract

High temperature and heatwave (HT and HW) directly impact human health and crop growth. Investigating the trends in the occurrence of HT and HW is one of the fundamental questions of climate change research and can provide valuable information for living and production. Most of the previous studies on trends in the occurrence of HT and HW used ordinary least squares (OLS) method to calculate the magnitude of linear trend and then used student's *t*-test to determine the statistical significance of this trend. This study examined whether traditional methods are suitable for the trend estimation of the occurrence of HT and HW in China. By showing a case of the annual count of HT days with extremely excessive occurrences in 2018 at a station in northeastern China, we illustrated that OLS method is sensitive to outliers and can give spurious trend. Further, through normality testing and autocorrelation calculation, we found at least 91.14% of stations and 90.06% of grid boxes for the annual count of HT days and 92.18% of stations and 87.74% of grid boxes for the annual count of HW in China are non-Gaussian, and the majority of them have serial correlation. Applying a nonparametric method that is insensitive to outliers and takes into account serial correlation, we gave a more accurate estimation

of the linear trends in the annual count of HT days and HW for every station and grid box, four typical regions average, and China area-average for the period 1960~2018. The results show that stations with statistically significant increasing trend in HT days occurred mainly in South China and northwestern China, and those in HW occurred nearly only in South China and several stations in Xinjiang Autonomous Region. In terms of area average of the trend in annual count of HT days and HW, only South China region and northwestern China region show statistically significant increasing trend, whereas North China and northeastern China not significant; those of China average are both significant. This study provides referential information for the choice of method in the estimation of trend and its statistical significance and in statistical prediction for HT days and HW.

Keywords: high temperature and heatwave; trend analysis; significance testing; non-Gaussian distribution; serial correlation; non-parametric method

1 引言

气候系统的变暖是毋庸置疑的。IPCC第五次报告指出, 1880~2012年, 全球地表平均温度升高了 0.85°C ($0.65\sim 1.06^{\circ}\text{C}$) (IPCC, 2013)。随着全球变暖的进程, 近十几年来频频听到发生在世界各地的高温热浪事件。例如, 2003年欧洲热浪事件 (Stott et al., 2004)、2010年莫斯科热浪事件 (Dole et al., 2011)、2011年美国德州热浪事件 (Luo et al., 2012)、2012~2013年澳大利亚“发怒的夏季” (Lewis et al., 2013)、2013年中国东部的热浪事件 (Sun et al., 2014) 和2017年7月中国中东部的热浪事件 (Chen et al., 2019) 等等。2018年夏季, 北半球出现严重“高烧”现象, 北极圈内一些气象站气温一度超过 30°C , 瑞典干旱引发多处森林火灾; 同处东亚地区的日本、韩国也出现大范围高温热浪, 仅日本就造成144人死亡、8万余人中暑; 中国地区在7月14日至8月15日期间, 中央气象台连续33天发布高温预警, 这是从2010年有统计记录以来高温预警连发时间最长的一次; 中国地区有57站日最高气温突破历史极值, 其中47站分布在辽宁和吉林 (《2018年中国气候公报》, 2019; 《气象知识》, 2019)。高温在生产生活中有许多危害, 它可能导致人体疾病的发生或加重, 甚至死亡, 例如2003年欧洲热浪有超过3万人丧生 (Conti et al., 2005); 另外, 高温会直接影响植物生长发育, 可能导致农作物减产 (刘娟等, 2010)。因此, 研究全球变暖背景下我国高温热浪发生率的趋势, 可以为保障人们的生产生活等提供重要的科学信息。

目前, 学术界对我国高温和热浪趋势的研究已取得一些成果, 认为近50年来我国高温热浪的频次、日数和强度总体呈增多、增强趋势。这些成果大都基于常规的最小二乘 (OLS) 线性回归方法估计趋势, 然后用学生T检验趋势的统计显著性 (以下称为“传统OLS方法”, Huang et al., 2010; Wang et al., 2012; Du et al., 2013; Zhao et al., 2013; 叶殿秀等, 2013; Ye et al., 2014; Ding et al., 2015; Huang et al., 2015; Zhou et al., 2016; Hu et al., 2017; 贾佳等, 2017; 沈皓俊等, 2018; Deng et al., 2019), 或用F检验来进行显著性判别 (Ding et al., 2010)。国内文献中也有许多针对局部地区高温及热浪趋势的研究, 例如, 华北地区 (施洪波, 2012)、长江流域 (王喜元等, 2016)、江浙沪地区 (李琪等, 2016)、长沙市 (傅帅等, 2016)、海南岛 (邢彩盈等, 2017) 均有研究成果, 但也基本都基于传统OLS方法。这种传统OLS方法的一个基本假定是变量服从正态分布 (Wilks, 2011, p141)。但是,

对于局部地区，由于样本量少，极端气温指数不一定服从正态分布（Qian et al., 2019）。如果对不服从正态分布的变量仍然用传统OLS方法，会导致统计显著性的误判。因而，也有部分成果基于OLS方法估计趋势，然后用Mann-Kendall检验趋势的统计显著性（Zhou et al., 2011; Jiang et al., 2012; Wang et al., 2018; Chen et al., 2018）。此外，极端气温指数，特别是局地或站点尺度，个别年份可能还存在离群值（outlier）；而OLS方法恰恰又对离群值，特别是端点处的离群值非常敏感（von Storch et al., 1999; Wilks, 2011），会导致趋势估计错误。因而，还有部分研究基于非参数的Sen-Theil趋势（Sen, 1968）计算线性趋势的斜率，然后用Mann-Kendall检验判断趋势的统计显著性（You et al., 2011; You et al., 2013; Yin et al., 2015; Wu et al., 2016; Lin et al., 2017）。需要指出的是，Sen-Theil的趋势估计方法和Mann-Kendall检验都有一个基本的假定，即变量是独立不具有自相关的（Sen, 1968; Kendall, 1955）。然而，对于极端气温指数而言，这个假定并不总是满足的，不少地区是带有很强的自相关的（Qian et al., 2019）。由此可见，选取适用的趋势估计方法对于严谨且准确判断极端气温趋势的斜率和统计显著性至关重要。

Qian et al. (2019) 运用考虑自相关特征的非参数方法（见2.2方法部分）估计了1960~2017年我国758个基准、基本气象站点的国际上通用的、由气候变化检测和指数专家组（ETCCDI, http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml）定义的高温日数指数（即相对于各自的第90百分位阈值的高温日数）的线性趋势，指出：长期趋势上1960~2017年中国大部分台站的高温事件呈增多趋势；有77%的站点的全年高温日数是统计上显著增多的。但是，对于中国国内常用的、普通大众认知的基于绝对阈值的高温日数以及代表高温持续性的热浪次数，并没有涉及。本文对各气象站点和格点、典型区域平均和全国平均的高温日数、热浪次数进行趋势分析，试图从适用的趋势分析方法的角度给出相关的科学信息。

本文的结构如下：首先从2018年中国部分台站高温日数异常多（即出现离群值情况）的例子说明OLS方法对离群值敏感、使趋势估计产生偏差；进而检验站点和格点高温日数、热浪次数是否服从传统OLS方法假定的正态分布、是否存在自相关，探讨选择恰当的趋势分析方法的重要性；最后基于考虑分布和自相关特征的趋势分析方法开展相应的1960~2018年高温日数、热浪次数的趋势分析。

2 数据和方法

2.1 数据

本研究中使用的数据是基于国家气象信息中心发布的“中国地面气候资料日值数据集（V3.0）”的基准、基本气象站，并经过均一化订正得到的1960年以来的逐日气温数据集（CHTM3.0, Li et al., 2016）基础上更新到2018年。该数据集采用的均一化方法为MASH（Multiple Analysis of Series for Homogenization）方法（Szentimrey, 1999），对迁站和观测方式变更等引起的非均一性进行了校订。这样的均一化订正对于中国地区的气候变化分析是非常必要的（Xu et al., 2013; Ren et al., 2014; Yan et al., 2014）。本次研究使用的数据中的气象站共有640个，基本覆盖全国各个区域，可以用来计算全国高温日数和热浪次数的演变情况。

2.2 方法

2.2.1 高温和热浪的定义

本文参考中国气象局的规定（中国气象局令第16号，http://www.cma.gov.cn/2011zwxx/2011zflfg/2011zgfwj/201208/t20120803_180761.html）和《中华人民共和国国家标准-气象灾害预警信号图标（GB/T 27962-2011）》，将日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 作为1个高温日；连续3d及以上出现高温天气称为1次热浪事件。这种定义也被其他一些文献采用，例如Zhai et al., (1999)、刘绿柳等(2008)、Ding et al., (2010)、Sun et al. (2014; 2018)。统计每年出现的高温日数和热浪次数进行分析。

2.2.2 趋势的计算方法

2.2.2.1 传统OLS方法

传统OLS方法是指用最小二乘线性回归估计趋势，结合自由度为样本数(N)-2的学生T检验来判断趋势的统计显著性。使用此方法的前提要求是序列的回归残差呈正态分布，并且是独立的随机变量。

2.2.2.2 泊松回归

当事件的发生率较低且为离散型数据时，一般认为事件的发生数服从均值和方差相等的泊松分布，它适合于描述单位时间内随机事件发生的次数。因而，以往也有研究用广义线性模型中的泊松回归来估计热浪的趋势，例如Wang et al.

(2015)。

2.2.2.3 WS2001方法

由于上述两种方法都对离群值敏感（如图1所示），本研究主要采用WS2001方法来估计高温日数以及热浪次数的线性趋势。该方法最初由Zhang et al. (2000)提出，后由Wang and Swail (2001)改进。该方法考虑到序列中存在自相关，并且自相关和趋势是共存的，所以在Sen (1968)的非参数方法估计Sen-Theil趋势斜率和Mann-Kendall检验 (Mann 1945; Kendall 1955)趋势的统计显著性基础上，采用迭代方案计算一阶自相关进而做了预白化处理。Sen (1968)的趋势斜率估计是根据所有长度片段的趋势斜率的中位数计算的，因而对离群值不敏感。但是，Sen (1968)的趋势斜率估计和Mann-Kendall检验 (Mann 1945; Kendall 1955)使用的前提是序列是独立不带自相关的；因而有了WS2001方法，它使得输入Sen (1968)的趋势斜率估计和Mann-Kendall检验的数据满足独立的条件。Qian et al. (2019)对WS2001方法进一步地完善，考虑序列中存在相同值的情况，Mann-Kendall检验的统计量S的方差为：

$$\text{VAR}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^g u_j(u_j-1)(2u_j+5)}{18}$$

其中n为数据样本的长度，g为序列中存在相同值的列数， u_j 是第j列中存在相同值的数量。本文的显著性水平为0.05，当 $p < 0.05$ 时，认为趋势是统计显著的。

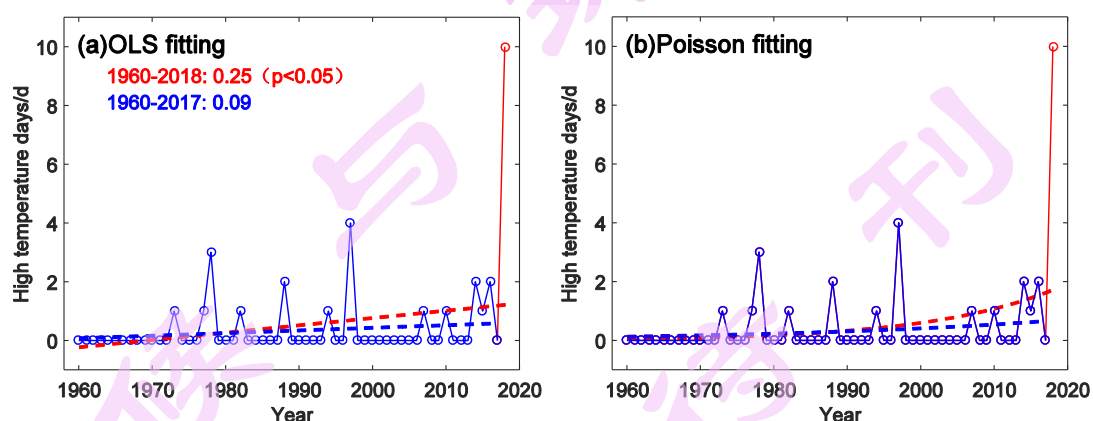


图1 1960~2018年吉林和龙站（站号54286）的高温日数序列（实线）及其拟合的趋势（虚线）：(a)基于传统最小二乘方法；(b)基于泊松回归。蓝色线和红色线的差别是分析时段包含（红色）和不包含（蓝色）2018年。

Fig.1 The time series and corresponding trends of high temperature days at Helong Station (No. 54286) in Jilin Province from 1960 to 2018 fitted by (a) traditional OLS method, and (b) Poisson regression, respectively. The difference between blue and red line is including (red line) or not including (blue line) the year of 2018.

2.2.3 区域平均

我国的高温热浪主要发生于东南地区，其次为西北的新疆一带（Ding et al., 2010）。随着全球变暖，在华北地区出现高温热浪的站点也已不在少数。另外，近年来在我国东北地区正开始出现高温热浪的萌芽。基于以上考虑，本研究在后文的区域平均部分选取以下四个典型区域，分别为华南（18-34°N, 106-123°E）、西北（36-50°N, 74-96°E）、华北（34-42°N, 110-120°E）和东北（38-54°N, 120-136°E），如图2(a)所示。这四个区域的经纬度根据站点1981~2010年气候平均（以下称为“常年”）的高温出现频次结合省界确定（图2a）。区域平均序列是将站点分配到分辨率 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的网格制作成格点数据，然后把相对于1981~2010年的距平序列按区域内格点面积加权平均得到的。全国平均序列按相同方法计算。

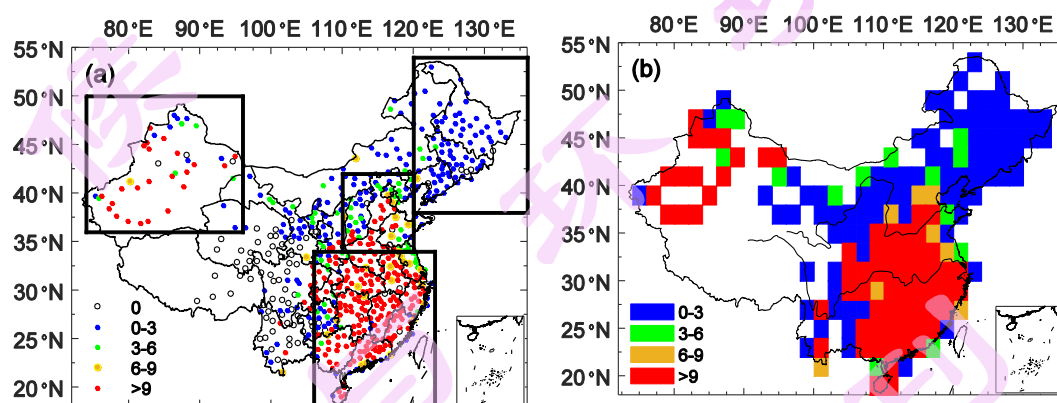


图2 1981~2010年气候平均的常年高温日数：(a)站点、(b)格点（只显示大于零）。(a)中四个方框为本文分析的四个典型区域，具体见方法部分。

Fig.2 Annual count of high temperature days averaged from 1981 to 2010. (a) Stations, and (b) grids (shown are only grids whose values larger than 0). Four rectangles indicate the typical regions analyzed in this study with details in section 2.

2.2.4 正态分布检验方法

为了判断是否可以用传统OLS方法进行趋势分析，首先要判断站点、格点或区域平均的序列的OLS回归残差是否服从正态分布。本文采用Qian et al. (2019)的正态分布检验方法。它是一种基于分位数-分位数图的方法，包含95%的置信区间；如果出现个别年份超出了置信区间，则必然不是正态分布；如果都落在置信区间内，则可认为近似服从正态分布（参见Qian et al. 2019的图1）。

3 结果分析

3.1 最小二乘法和泊松回归估计趋势对离群值敏感的例子

图1给出了2018年出现极端高温日数的东北一个典型站。从图中可以看出，在2018年以前该站高温日数较少，大多年份无高温日数，其余年份最多高温日数4d；而在2018年高温日数异常多，达10d。通过奈尔检验法（GB/T 4883-2008）查表确定2018年为明显的离群值。对此序列，我们分别用OLS方法和泊松回归进行趋势分析。当分析的数据包含2018年时，传统OLS方法得出的1960~2018年气候倾向率为0.25d/10a（统计上显著）；但是，当去掉2018年这一离群值时，OLS方法得到的1960~2017年气候倾向率是0.09d/10a（统计上不显著）（图1a）。可以看出，OLS方法对于离群值的出现十分敏感，特别是序列端点处的离群值。图1（b）的泊松回归拟合出来两个时段的结果显示，所得趋势受端点处离群值的影响也较为明显。而使用WS2001算得1960~2017年气候倾向率为0，1960~2018年的也是0。所以，WS2001方法的结果是比较稳定的，不易受离群值影响。

3.2 高温日数空间分布特征

3.2.1 常年平均高温日数空间分布特征

图2（a）的站点和2（b）的格点显示，常年高温日数在地理上呈现不均匀的分布。在华南地区、新疆以及华北南部常年的高温日数可达9d以上，而在华北北部、东北地区常年高温日数在6d以内。高温日数空间分布总体呈现出东南地区、新疆地区多的特点。常年高温日数最多的三个站点分别为新疆的吐鲁番（106.37d）、云南的元江（87.83d）、新疆的淖毛湖（57.30d）。在全国640站中，有553个站都出现过高温（常年高温日数大于0）；另外，有87个站的最高气温从没有达到过35℃，这些站点大致分布在西藏、青海、四川及云南部分地区（图2a）。

以下就常年出现过高温的站点和格点开展分析。

3.2.2 高温日数变化趋势的空间分布特征

除去常年高温日数为0的站点，剩下553个站点。图3(a)、(b)显示，在这些站中，只有东南地区 and 新疆个别站点的高温日数序列的回归残差是服从正态分布的。可能是因为这些地方出现高温的次数多，样本量大。但从全国看，非正态分布的站点占比高达91.14%（相对于纳入检验的总数）（图3a），非正态分布的格点占比同样高达90.06%（图3b）。如前所述，学生T检验的使用前提是变量服从正态分布，因此绝大部分站点和格点是不适用的。另外一种显著性检验的方法Mann-Kendall，它要求序列是没有自相关的，而从高温日数序列一阶自相关的计算结果（图3c、3d）得知，有63.29%的站点和64.33%的格点有自相关。所以大部分站点和格点的高温日数趋势并不能用原始的Sen-Theil趋势估算，相应的显著性也不能用原始的Mann-Kendall来检验。

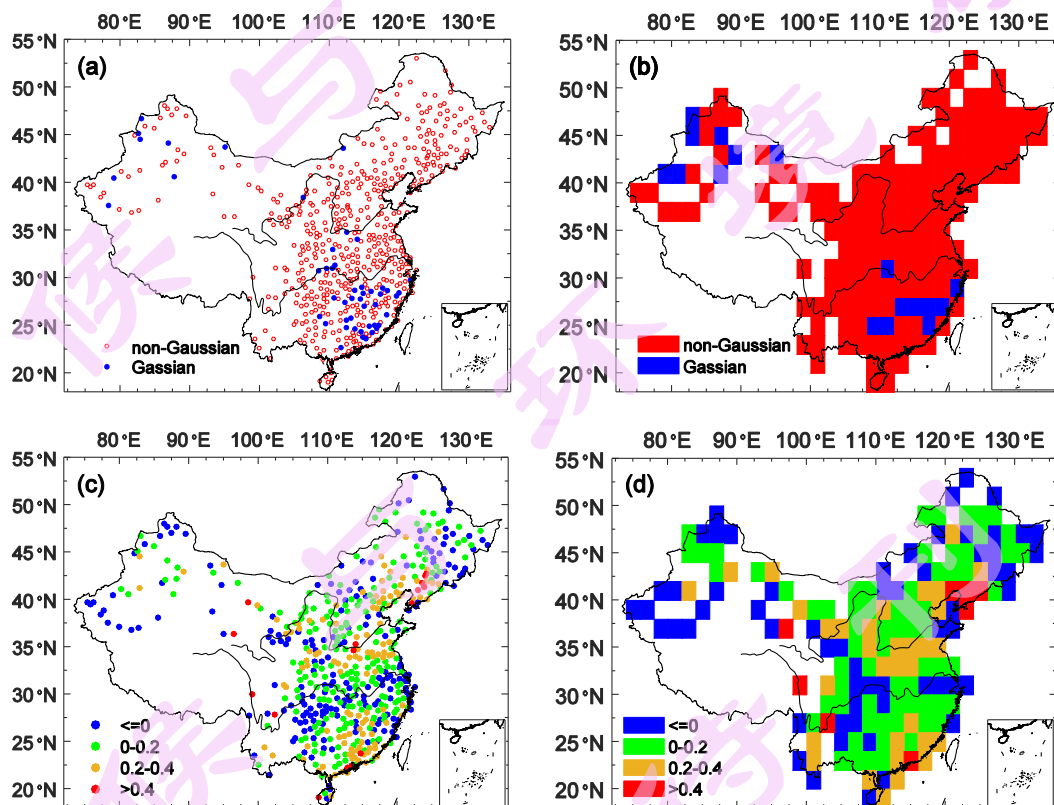
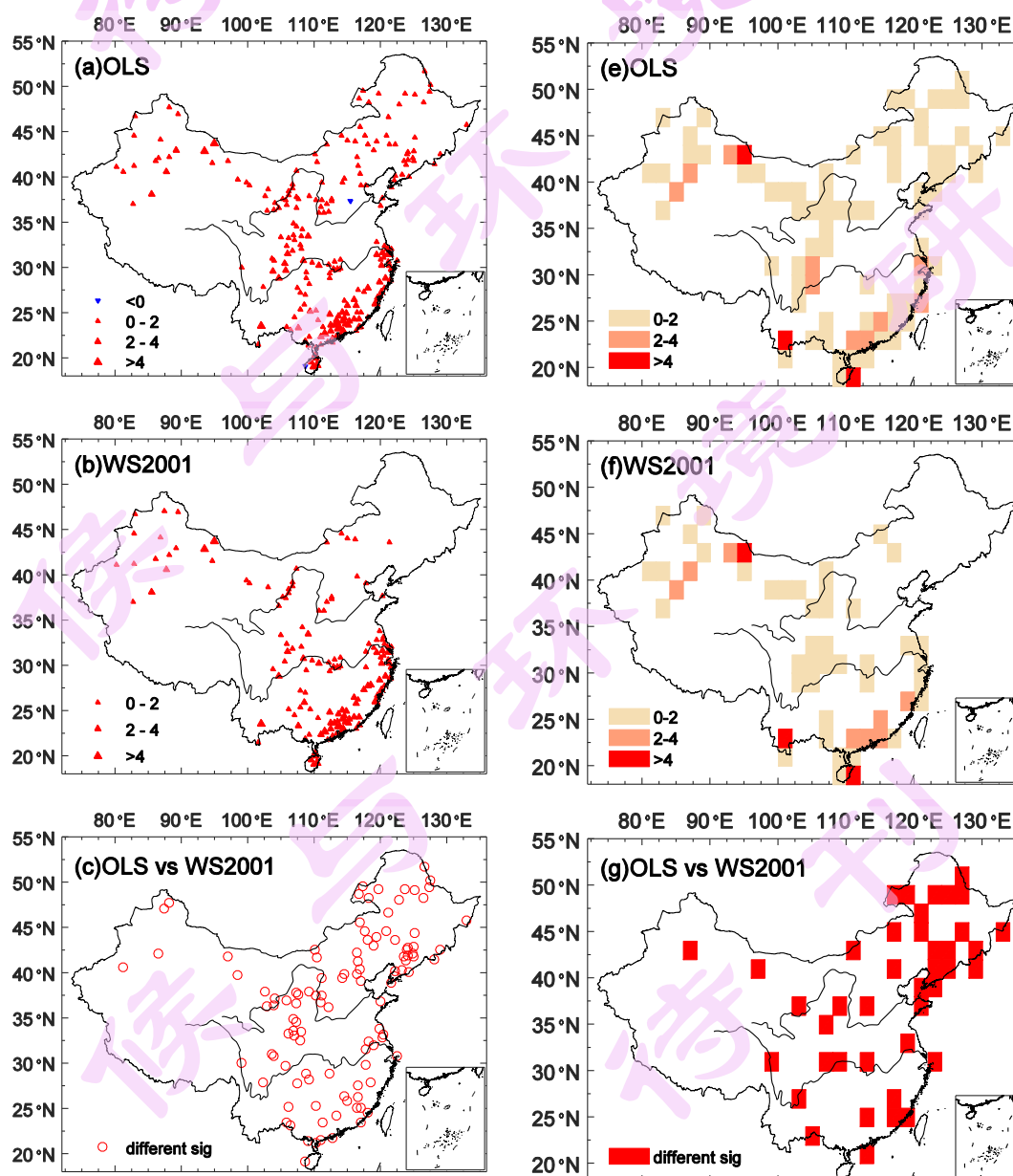


图3 1960~2018年高温日数序列回归残差的正态分布检验结果：(a)常年高温日数不为零的站点、(b) 常年高温日数不为零的格点。(c)、(d)分别是基于WS2001方法计算的1960~2018年站点和格点的高温日数序列的一阶自相关。

Fig.3 Normality testing results of the regression residual for the annual count of high temperature days for the period 1960–2018: (a) stations whose annual count is not zero, and (b) grid points whose annual count is not zero. (c) and (d) are the first-order autocorrelation of high temperature days series from 1960 to 2018 at each station and grid box, respectively, based on WS2001 method.

图4分别显示了传统OLS方法和WS2001方法估计的高温日数线性趋势结果的比较, 以及直接用Sen (1968) 趋势结合Mann-Kendall检验趋势的显著性的方法 (Sen+MK) 和用WS2001方法的结果比较。为清楚起见, 图中仅给出了趋势显著的站点; 实际上, 三种方法都得出, 呈增多趋势的站点数量远多于呈减少趋势的站点数量 (图略)。可见高温日数增多是目前全国大部分地区共同面临的问题。图4(a)中, 由传统OLS方法得出高温日数呈显著增多趋势的站点主要分布在广东、长江中下游和北方地区。结合图2(a)中, 高温日数最多的三个站点对应的增加趋势分别为新疆的吐鲁番 (2.21d/10a)、云南的元江 (5.55d/10a)、新疆的淖毛湖 (4.30d/10a)。在图4(b)中, 由WS2001方法得出, 从全国范围来看, 有25.32%的站点高温日数呈显著增多趋势, 这些站点主要出现在华南和西北地区, 其中增速最快的站点位于海南、云南和新疆地区。WS2001方法得到的三个高温日数最多的站点的增温趋势分别为吐鲁番 (1.99d/10a)、元江 (5.88d/10a)、淖毛湖 (4.41d/10a), 这一点上和OLS方法大致相同。然而, 对比图4(a)和(b)可以明显发现, 两种方法得到的趋势差异在我国东北地区表现得较明显: 传统OLS方法的结果中, 东北地区有比较多的站点高温日数表现为显著增多趋势, 但WS2001方法的结果中东北地区几乎没有高温日数显著增多趋势的站点。注意图1的例子即来自该地区。另外, 从图4(c)两种方法的对比可以看出, 就用传统OLS方法和WS2001方法判断得出的趋势显著性而言, 有19.89%的站点的显著性检验结果是不同的。这些站点散布全国, 其中98个站点在使用传统OLS方法算趋势时给出的结果是统计显著的, 但使用WS2001方法则不显著; 有12个站表现为用传统OLS方法时不显著, 但用WS2001方法时是显著的。图4(d)给出了Sen+MK方法(即不考虑自相关)与WS2001方法(即考虑自相关)的差异, 发现还是有不少站点(占全国3.6%)的显著性方面判断存在不同, 且在描述这些站点的趋势量级时也会出现一

些不同。图4(e-h)给出了相应的三种方法的格点趋势分析，得到的结果与(a-d)的站点情况类似：传统OLS方法与WS2001方法这两种趋势计算方法所得结果的差异主要体现在我国东北地区；从图4(e)和4(f)可以看出，传统OLS方法的结果在东北地区普遍是呈显著增多的，而WS2001方法的结果在东北没有显著变化趋势的格点。从图4(c)和(g)还可以看出，传统OLS方法对趋势显著性的误判并不仅仅局限于东北地区，因而各地都要谨慎使用。从图4(d)和(h)可以发现，自相关的考虑与否会对趋势的量级和显著性的判断都有影响，在使用中需要加以考虑。



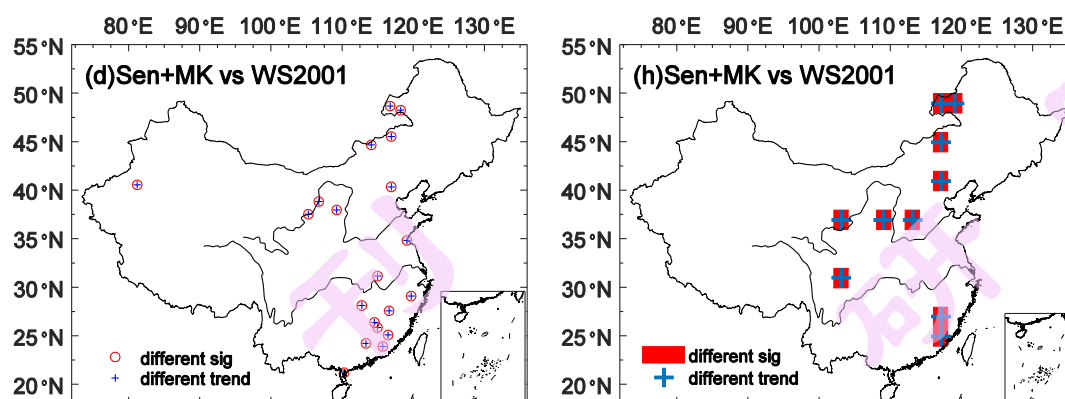


图 4 1960~2018 年高温日数的趋势：(a)基于传统 OLS 方法、(b) 基于 WS2001 方法、(c)两种方法在显著性方面的差异、(d) 直接用 Sen（1968）趋势结合 Mann-Kendall 检验的方法（Sen+MK）与 WS2001 方法在趋势的量级和显著性方面的差异。(e-h)与(a-d)类似，但为格点情况。(a)、(b)、(e)和(f)中的单位是：天/10a，图中只显示趋势统计上显著的站点或格点。

Fig.4 Trend in annual count of high temperature days from 1960 to 2018: (a) based on traditional OLS methods, (b) based on WS2001 method, (c) differences of statistical significance between the two methods, (d) differences of trend magnitude and statistical significance between directly use Sen-Theil trend combined with Mann-Kendall test (Sen+MK) and WS2001 method. (e-h) are similar to (a-d), but for gridded data. Units in (a), (b), (e) and (f) are days/decade. Only stations or grids whose trends are statistically significant are shown.

3.3 热浪次数空间分布特征

3.3.1 常年热浪次数空间分布特征

图5(a)的站点结果和图5(b)的格点结果显示，常年热浪次数达3次及以上的区域主要在华南和新疆；最多的三个站点分别为云南的元江（11.43次）、新疆的淖毛湖（7.83次）、新疆的铁干里克（7.40次）。在全国640站中，有486个站都出现过热浪；另外154个站没有发生过热浪事件，这些站点主要分布在西藏、青海、四川、云南、贵州和吉林地区。

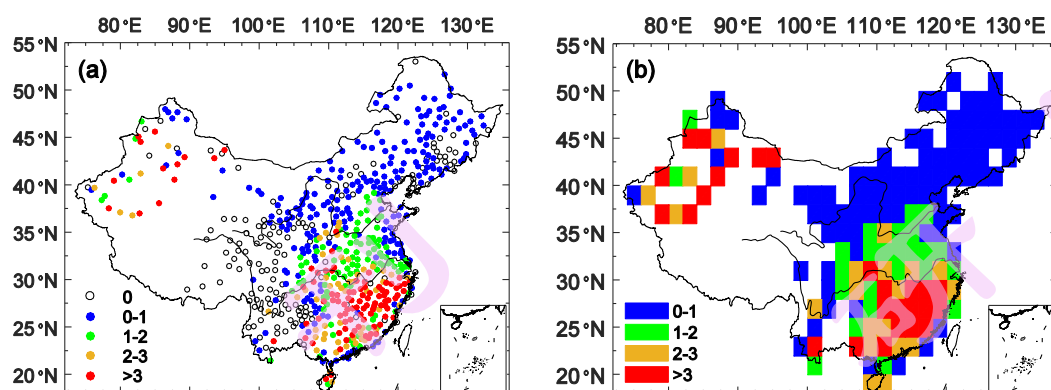
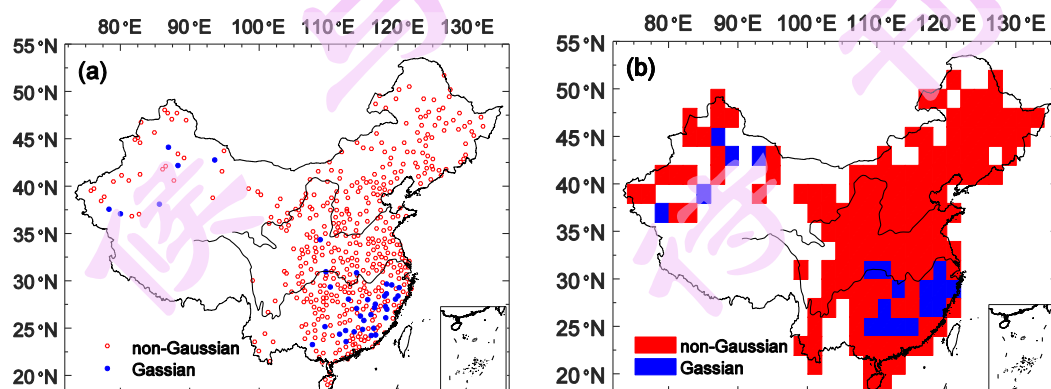


图 5 1981~2010 年气候平均的常年热浪次数:(a)站点、(b)格点（只显示大于零）。

Fig.5 Annual count of heatwave frequency averaged from 1981 to 2010. (a) Stations, and (b) grids (shown are only grids whose values larger than 0).

3.3.2 热浪次数变化趋势的空间分布特征

除去常年热浪次数为0的站点，剩下486个站点。图6(a)对这些站的热浪次数序列回归残差正态分布检验结果显示，和高温日数结果相似，也只有在华南一带和新疆个别热浪次数多的站点服从正态分布。全国而言，热浪次数表现为非正态分布的站点比例高达92.18%（图6a）；而格点资料显示的非正态分布比例也高达87.74%，几乎只有华南、新疆的个别格点呈现正态分布（图6b）。所以绝大多数站点和格点并不适合用学生T检验来判断热浪次数趋势的统计显著性。图6(c)和6(d)中一阶自相关的计算结果表明，有59.67%的站点（图6c）和63.87%的格点（图6d）有自相关，所以大部分站点和格点热浪次数的趋势和显著性也不能直接使用原始的Sen-Theil趋势和Mann-Kendall检验来估计。



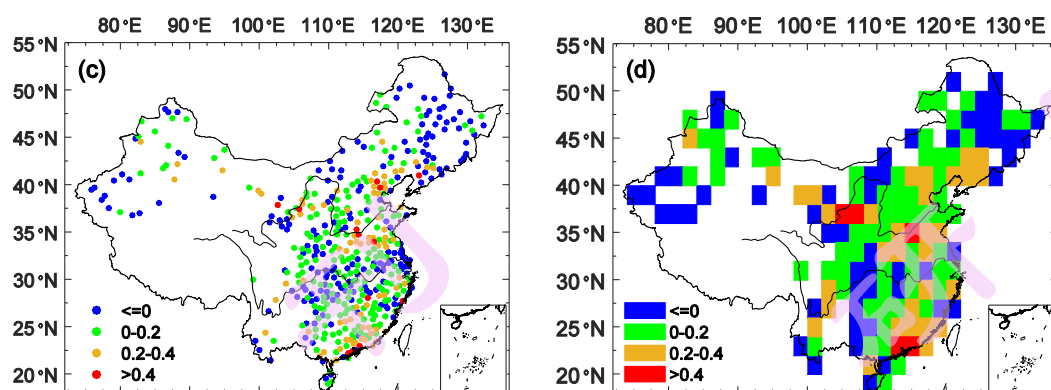
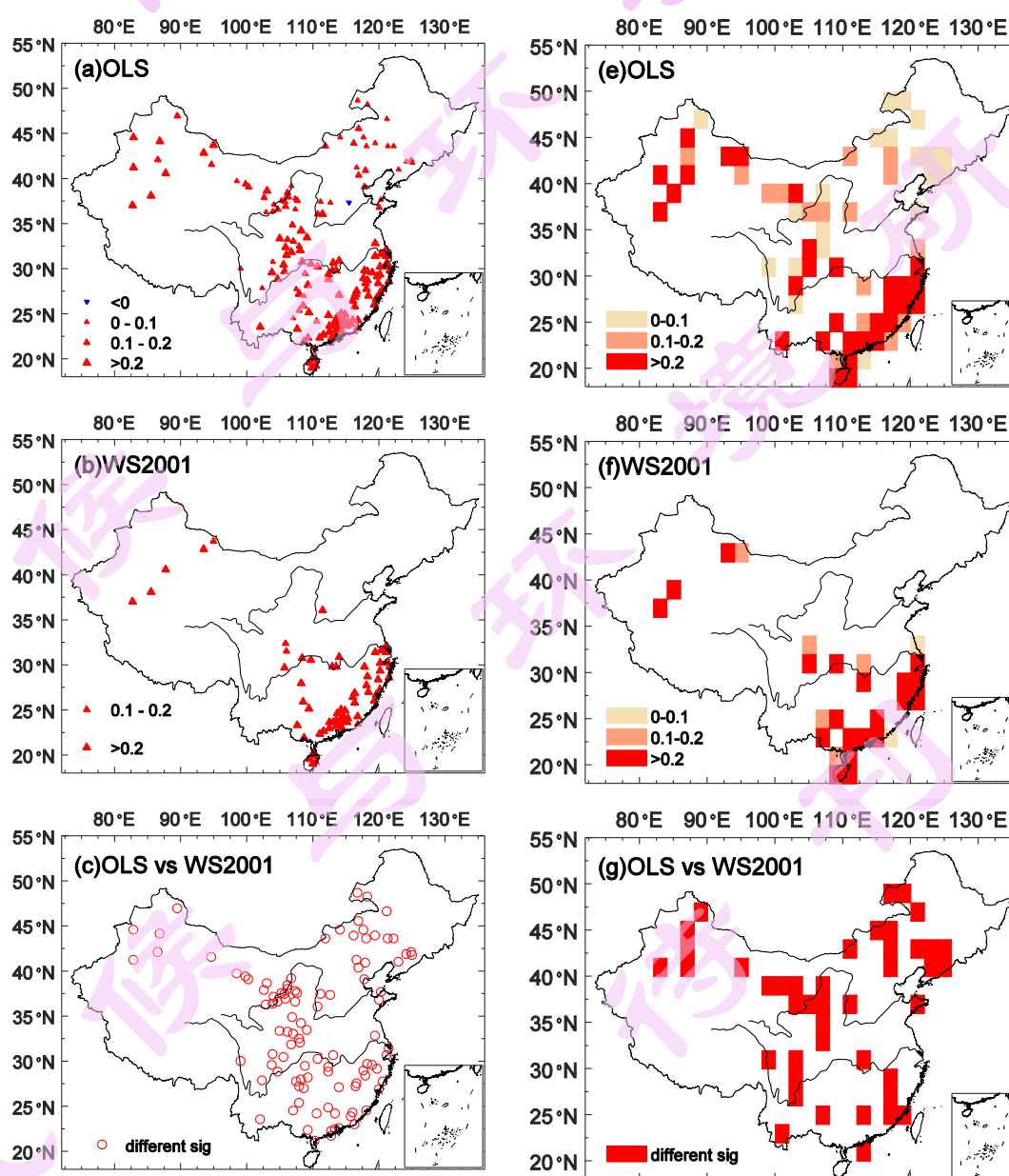


图 6 1960~2018 年热浪次数序列回归残差的正态分布检验结果：(a)常年热浪次数不为零的站点、(b) 常年热浪次数不为零的格点。(c)、(d)分别是基于 WS2001 方法计算的 1960~2018 年站点和格点的热浪次数序列的一阶自相关。

Fig.6 Normality testing results of the regression residual for the annual count of heatwave frequency. (a) Stations with non-zero heatwave frequency, (b) grid points with non-zero heatwave frequency. (c) and (d) are the first-order autocorrelation of the heat wave frequency series from 1960 to 2018 at each station and grid box, respectively, based on WS2001 method.

图7分别是传统OLS方法和WS2001方法对热浪次数进行趋势分析的结果比较，以及Sen+MK方法和WS2001方法的结果比较。由图7(a)的传统OLS方法得出，热浪次数呈显著增多趋势的站点主要集中于东南沿海、长江中下游、内蒙古、新疆一带。结合图5(a)来看，热浪次数最多的三个站点对应的变化趋势分别为云南的元江(0.60次/10a)、新疆的淖毛湖(0.26次/10a)、新疆的铁干里克(0.33次/10a)。但从图7(b)可明显看出，使用WS2001方法算的趋势显著变化站点数量相比传统OLS结果明显减少，全国仅有12.96%的站点热浪次数呈显著增多趋势，几乎只出现在华南和新疆的个别站点；结合图5(a)来看，常年发生热浪次数最多的三个站点对应的变化趋势分别为云南的元江(0.54次/10a)、新疆的淖毛湖(0.19次/10a)、新疆的铁干里克(0.30次/10a)。虽然图7(a)、(b)仅显示了趋势显著的站点，但就各站的趋势而言，两种方法都显示呈增多趋势站点数量远多于呈下降趋势站点数量（图略），热浪次数增多是全国大多数站点当前的主旋律。从图7(c)两种方法的对比可以看出，有21.19%的站点显著性判断不同。这些站点无明显的地域偏向，散布全国。102个显著性有差异的站点表现为使用传统OLS方法时显著，而

使用WS2001方法时不显著；另外1个站表现为使用传统OLS时不显著，在WS2001方法下为显著。图7(d)显示的是Sen+MK方法和WS2001方法在趋势与显著性方面的差异。可以看出，全国范围有少量站点（占3.7%）的趋势显著性是不同的，且这些站点的趋势量级也是不一样的。三种方法得到的格点趋势变化结果可以得出类似的结论（图7e-h）：对比传统OLS方法和WS2001方法的结果(图7e-g)，除东南沿海和新疆的个别地区两种方法较为一致，其他地区普遍表现出差异；对比Sen+MK方法和WS2001方法的结果(图7h)，有少量格点趋势量级和显著性都表现出差异，再次印证自相关的特征是需要加以考虑的。



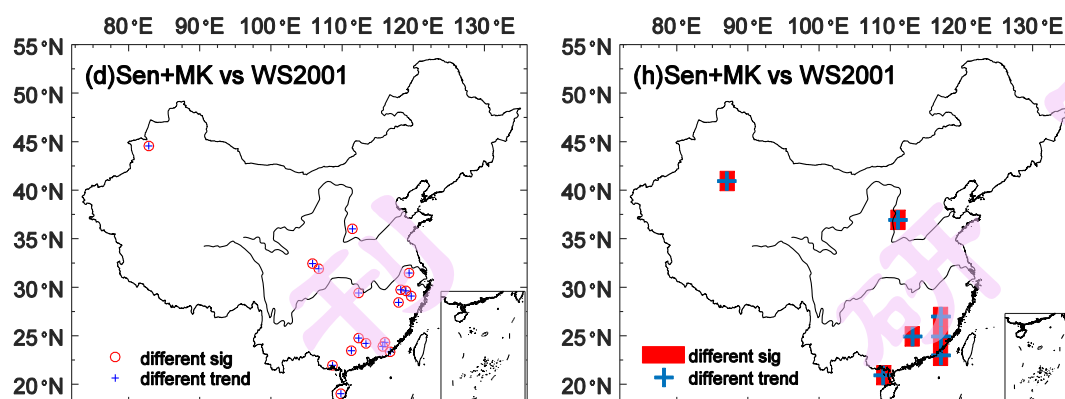


图 7 1960~2018 年热浪次数的趋势：(a)基于传统 OLS 方法、(b)基于 WS2001 方法、(c)两种方法在显著性方面的差异、(d) 直接用 Sen（1968）趋势结合 Mann-Kendall 检验的方法（Sen+MK）与 WS2001 方法在趋势量级和显著性方面的差异。(e-h)与(a-d)类似，但为格点资料。(a)、(b)、(e)和(f)中的单位是：次/10a，图中只显示趋势统计上显著的站点或格点。

Fig.7 Trend in annual count of heatwave frequency from 1960 to 2018: (a) based on traditional OLS methods, (b) based on WS2001 method, (c) differences of statistical significance between the two methods, (d) differences of trend magnitude and statistical significance between directly use Sen-Theil trend combined with Mann-Kendall test (Sen+MK) and WS2001 method. (e-h) is similar to (a-d), but for gridded data. Units in (a), (b), (e) and (f) are times/decade. Only stations or grids whose trends are statistically significant are shown.

3.4 典型区域平均的高温日数和热浪次数

图8显示了区域平均的高温日数演变，四条序列趋势以及显著性检验使用的是WS2001方法，因为根据四条序列的回归残差进行正态分布检验的结果显示，这四条序列都是非正态分布的。结果显示，华南区域（图8a）和西北区域（图8b）表现为显著增加趋势，趋势分别为 $1.28(0.19-2.27)$ d/10a和 $0.99(0.56-1.41)$ d/10a。华北区域（图8c）和东北区域（图8d）虽然也表现为增加趋势，但并未通过显著性检验。这表明，虽然在全球变暖背景下2018年华北和东北地区出现了极端高温日数，但统计上并不能排除高温日数增多的长期趋势仍然可能是随机产生的。

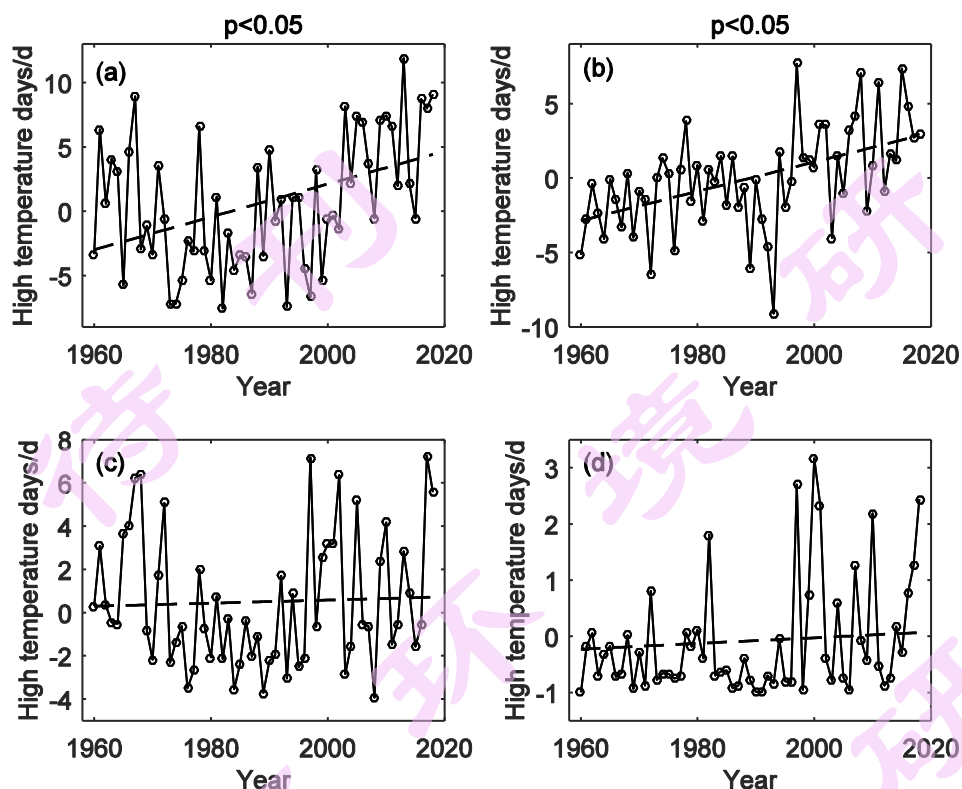


图8 1960~2018年区域平均的高温日数序列（实线）及其趋势（虚线）：(a)华南、(b)西北、(c)华北、(d)东北。

Fig.8 Regional averaged annual count of high temperature days (solid lines) and the corresponding linear trend (dashed lines) in (a) South China, (b) Northwest China, (c) North China and (d) Northeast China.

和高温日数区域平均的结果类似，四个区域平均的热浪次数的演变结果（图9a、b）也显示为热浪频发的华南区域和西北区域1960年以来热浪次数显著增多，趋势分别为0.21（0.06-0.34）次/10a和0.14（0.04-0.24）次/10a；华北区域（图9c）和东北区域（图9d）都表现为微弱的增加趋势，但未通过显著性检验。关于热浪次数趋势和显著性检验使用的也是WS2001方法。需要指出的是，华南区域（图9a）和西北区域（图9b）的序列近似服从正态分布，因此趋势和显著性检验同时使用了传统OLS方法来进行估计（图略），发现结果与图9a、图9b中WS2001方法的结果极其相似。因此我们可以认为，当序列服从正态分布的时候，使用传统OLS方法得到的趋势和显著性是与WS2001方法的结果相似的；但WS2001方法的

优势在于不需要先对序列的回归残差进行正态分布检验，无论序列正态与否，WS2001都是适用的。

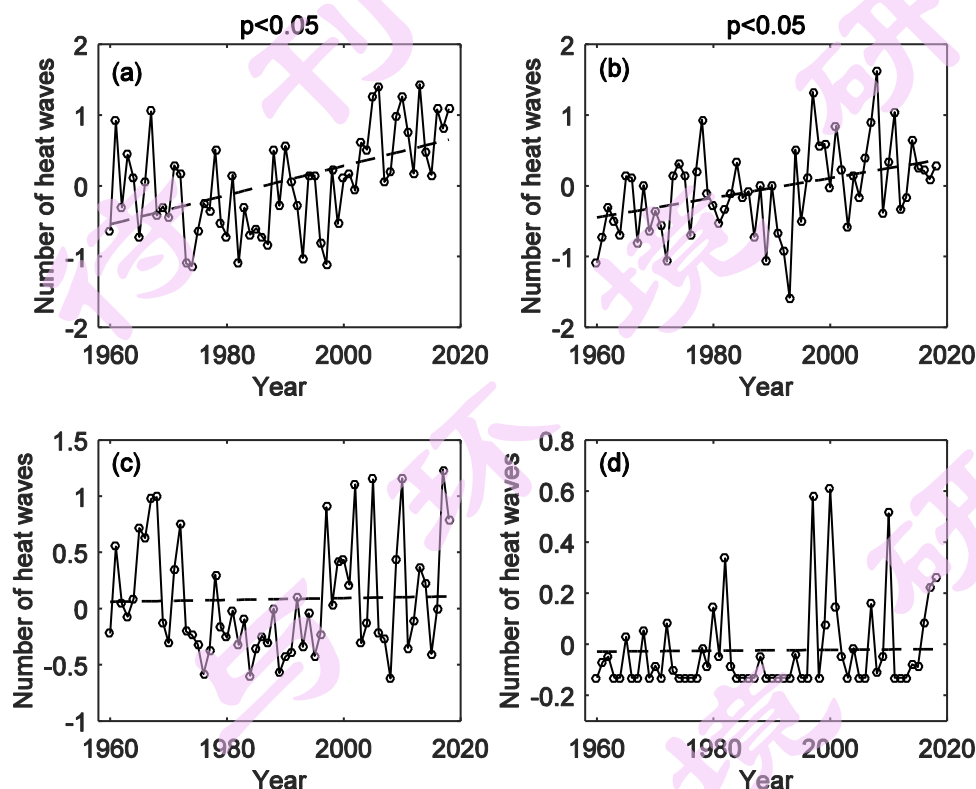


图9 1960~2018年区域平均的热浪次数序列（实线）及其趋势（虚线）：(a)华南、(b)西北、(c)华北、(d)东北。

Fig.9 Regional averaged annual count of heatwave frequency (solid lines) and the corresponding linear trend (dashed lines) for the period 1960–2018 in (a) Southeast China, (b) Northwest China, (c) North China and (d) Northeast China.

3.5 全国平均的高温日数和热浪次数

图10显示了全国平均的高温日数和热浪次数演变，从中可以看出，2018年全国平均的高温日数和热浪次数都不是最多的年份；高温日数是2017年最多，而热浪次数则是2010年最多。图10还显示出，全国平均的高温日数和热浪次数都呈现出显著增多趋势，趋势分别是0.81（0.31-1.32）d/10a和0.12（0.05-0.20）次/10a。由于全国平均的两条序列都近似正态分布，通过验证得到，趋势和显著性的结果

中传统OLS的结果（图略）与WS2001的结果（图10a、b）是一致的。

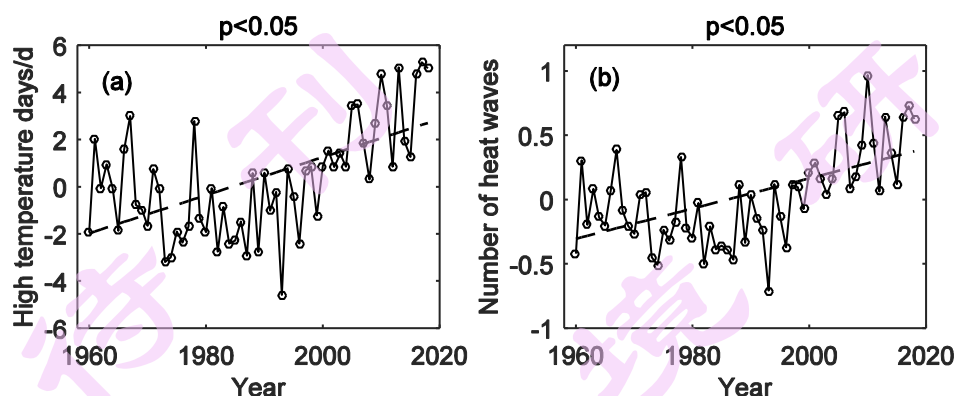


图10 1960~2018年全国平均的（a）高温日数和（b）热浪次数序列（实线）及其趋势（虚线）。

Fig.10 China-averaged annual count of (a) high temperature days and (b) heatwave frequency from 1960 to 2018. Solid lines are the time series, and dashed lines are the corresponding linear trend.

4 结论和讨论

本文使用1960~2018年全国640个站点的均一化逐日气温资料，通过WS2001方法对我国站点和格点的1960~2018年高温日数、热浪次数进行趋势分析，并与传统OLS方法以及直接使用原始的Sen-Theil趋势结合Mann-Kendall检验的方法做对比；同时，就四个典型区域和全国平均的情况进行分析，得出以下结论：

（1）至少有91.14%站点、90.06%格点的高温日数和92.18%站点、87.74%格点的热浪次数是非正态分布的，对这些情况，传统OLS方法不适用。至少有63.29%站点、64.33%格点的高温日数和59.67%站点、63.87%格点的热浪次数是存在自相关的，不能直接使用原始的Sen-Theil趋势和Mann-Kendall检验。

（2）对于各地的高温日数而言，通过WS2001方法计算得到，全国有25.32%的站点高温日数呈显著增多趋势，主要出现在华南和西北地区，增速最快的地点位于海南、云南和新疆地区。但如果使用传统OLS方法，会导致呈显著增加趋势的站点偏多，尤其是在我国东北地区；与WS2001方法相比会有19.89%的站点出现误判；其中，大部分是把实际不显著的站点误判为显著，过多估计了显著变化的站

点，实际并没有那么多。主要是因为OLS方法易受离群值的影响（特别是2018年东北地区发生的异常高温日数），会使得原本并没有明显变化趋势的站点产生显著趋势，出现高温日数显著增多的误判。如果直接使用原始的Sen-Theil趋势和Mann-Kendall检验的方法，而不考虑自相关，与WS2001方法相比会有3.6%的站点出现趋势显著性的误判，且这些站点的趋势量级的估计也会出现一些偏差。

（3）对于各地的热浪次数而言，通过WS2001方法计算得到，全国有12.96%的站点热浪次数呈显著增多趋势，目前几乎仅限于华南地区 and 新疆的个别站点。但如果使用传统OLS方法，会过多估计热浪次数显著增多的站点；相比WS2001方法的结果，使用传统OLS方法算得的趋势显著性有21.19%的站点会产生错误，几乎都是把热浪次数变化不显著的站点误判为显著，北方地区尤其明显。如果直接使用原始的Sen-Theil趋势和Mann-Kendall检验的方法估计热浪次数的趋势和显著性，相比WS2001方法会有3.7%站点的显著性出现误判。

（4）就四个典型区域和全国平均而言，华南区域、西北区域和全国平均的高温日数和热浪次数都是显著增多的，华北区域和东北区域趋势并不显著；华南区域高温日数和热浪次数增加趋势分别为1.28（0.19-2.27）d/10a、0.21（0.06-0.34）次/10a；西北区域高温日数和热浪次数增加趋势分别为0.99（0.56-1.41）d/10a、0.14（0.04-0.24）次/10a；全国平均的高温日数和热浪次数增加趋势分别是0.81（0.31-1.32）d/10a和0.12（0.05-0.20）次/10a。

本文的研究还有另外一层含义：绝大部分的站点和格点的高温日数和热浪次数序列都不满足传统OLS方法的正态分布假定；即使是区域平均，8条区域平均的序列中也仅有华南和西北区域的热浪次数这2条近似正态分布，因为区域内站点不够多，样本量不足以满足中央极限定理。因此，除了本文的趋势分析之外，在进行区域尺度、乃至站点或格点尺度的高温日数和热浪次数统计预测、统计降尺度建模时，也要谨慎使用传统的基于正态分布假定的回归分析方法（如一元线性回归、多元线性回归）。这是以往相关研究中比较容易忽视的一个问题。一些针对非正态分布气候极值统计预测的方法，例如数学变换方法和广义线性回归模型（Qian et al. 2015）以及一阶差分法（Qian et al. 2018）等，是将来需要考虑的。

致谢：感谢两位匿名审稿人提出的宝贵建议。

参考文献 (References)

- Chen Yang, Chen Wei, Qin Su, et al, 2019. Anthropogenic Warming has Substantially Increased the Likelihood of July 2017-Like Heat Waves over Central Eastern China. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100 (1), S91-95, doi: 10.1175/BAMS-D-18-0087.1
- Chen AJ, He XG, Guan HD, et al. 2018. Trends and periodicity of daily temperature and precipitation extremes during 1960-2013 in Hunan Province, central south China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 132:71-88, doi: 10.1007/s00704-017-2069-x
- Conti S, Meli P, Minelli G, et al. 2005. Epidemiologic study of mortality during the summer 2003 heat wave in Italy[J]. *Environmental Research*, 98(3), 390–399, doi: 10.1016/j.envres.2004.10.009
- Deng KQ, Yang S, Ting MF, et al. 2019. Dominant Modes of China Summer Heat Waves Driven by Global Sea Surface Temperature and Atmospheric Internal Variability[J]. *Journal of Climate*, 32, 3761-3775, doi: 10.1175/jcli-d-18-0256.1
- Ding T, Qian WH, Yan ZW. 2010. Changes in hot days and heat waves in China during 1961-2007[C]. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY*, 30:1452-1462, doi: 10.1002/joc.1989
- Ding T, Ke ZJ. 2015. Characteristics and changes of regional wet and dry heat wave events in China during 1960-2013[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 122:651-665, doi: 10.1007/s00704-014-1322-9
- Dole R, Hoerling M, Perlwitz J, et al. 2011. Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave? [J]. *Geophysical Research Letters*, 38(6), doi: 10.1029/2010GL046582
- Du YD, AI H, Duan HL, et al. 2013. Changes in Climate Factors and Extreme Climate Events in South China during 1961-2010[J]. *Advances in Climate Change Research*, 4(1):1-11, doi: 10.3724/SP.J.1248.2013.001
- 傅帅, 蒋勇, 张小泉, 等. 2016. 近 64 年长沙市高温热浪事件统计分析[J]. *气象科*

- 技, 44(6):991-997. Fu Shuai, Jiang Yong, Zhang Xiaoquan, et al. 2016. Statistical Analysis of High Temperature Heat Wave Events in Changsha City in Recent 64 Years [J]. Meteorological science and technology, 44(6):991-997, doi: 10.19517/j.1671-6345.2016.06.021
- Hu LS, Huang G, Qu X. 2017. Spatial and temporal features of summer extreme temperature over China during 1960-2013[J]. Theoretical and Applied Climatology, 128:821-833, doi: 10.1007/s00704-016-1741-x
- Huang L, Chen AF, Zhu YH, et al. 2015. Trends of Temperature Extremes in Summer and Winter during 1971-2013 in China[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 8:4, 220-225, doi: 10.3878/AOSL20150005
- Huang DQ, Qian YF, Zhu J. 2010. Trends of Temperature Extremes in China and their Relationship with Global Temperature Anomalies[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 27(4):937-946, doi: 10.1007/s00376-009-9085-4
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis[M]//Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al, Eds. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp
- 贾佳, 胡泽勇. 2017. 中国不同等级高温热浪的时空分布特征及趋势[J]. 地球科学进展, 32(5), 546-559. Jia Jia, Hu Zeyong. 2017. Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Trends of Different Grades of High Temperature Heat Waves in China[J]. Progress in Geosciences, 32(5), 546-559, doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2017.05.0546
- Jiang DJ, Li Z, Wang QX. 2012. Trends in temperature and precipitation extremes over Circum-Bohai-Sea region, China[J]. Chinese Geographical Science, 22(1):75-87, doi: 10.1007/s11769-012-0515-3
- Kendall MG. 1955. Rank correlation methods. 2nd edn. Charles Griffin, London, p 196
- 李琪, 苏欢, 史雨涵, 等. 2016. 1961~2010 年江浙沪地区夏季高温热浪时空变化

- 特征[J]. 长江流域资源与环境, 25(3): 506-513. Li Qi, Su Huan, Shi Yuhan, et al. 2016. Spatial and Temporal Variation Characteristics of Summer High Temperature Heat Waves in Jiangsu, Zhejiang and Shanghai Region from 1961 to 2010[J]. Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 25(03): 506-513, doi: 10.11807/cjlyzyyhj201603018
- 刘绿柳, 孙林海, 廖要明, 等. 2008. 国家级极端高温短期气候预测系统的研制及应用[J]. 气象, 34(10):102-107. Liu LL, Sun LH, Liao YM, et al. 2008. Development and application of national prediction system for extreme high temperature[J]. Meteorological, 34(10): 102 - 107. doi: CNKI:SUN:QXXX.0.2008-10-014
- 刘娟, 杨沈斌, 王主玉, 等. 2010. 长江中下游水稻生长季极端高温和低温事件的演变趋势[J]. 安徽农业科学, 38: 13881-13884, 13901. Liu Juan, Yang Shenbin, Wang Zhuyu, et al. 2010. Evolution trend of extreme high and low temperature events during rice growing period in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences (in Chinese), 38: 13881-13884, 13901, doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2010.25.128
- Lewis S C, Karoly D J. 2013. Anthropogenic contributions to Australia's record summer temperatures of 2013[J]. Geophysical Research Letters, 40(14), 3705-3709, doi: 10.1002/grl.50673
- Li Z, Cao L, Zhu Y, et al , 2016. Comparison of two homogenized datasets of daily maximum/mean/minimum temperature in China during 1960-2013[J]. Journal of Meteorological Research, 30(1):53-66, doi: 10.1007/s13351-016-5054-x
- Lin PF, He ZB, Du J, et al. 2017. Recent changes in daily climate extremes in an arid mountain region, a case study in northwestern China's Qilian Mountains[J]. Sci Rep, 7(1), doi: 10.1038/s41598-017-02345-4
- Luo L, Zhang Y. 2012. Did we see the 2011 summer heat wave coming?[J]. Geophysical Research Letters, 39(9), L09708, doi: 10.1029/2012GL051383
- Mann HB. 1945. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 13(3):245-259, doi: 10.2307/1907187
- Qian C, Zhou W, Fong SK, et al. 2015. Two approaches for statistical prediction of

- non-Gaussian climate extremes: a case study of Macao hot extremes during 1912–2012[J]. *Journal of Climate*, 28(2), 623–636, doi: 10.1175/jcli-d-14-00159.1
- Qian C, Zhou W, Yang XQ, et al. 2018. Statistical prediction of non-Gaussian climate extremes in urban areas based on the first-order difference method[J]. *International Journal of Climatology*, 38(6), 2889–2898, doi: 10.1002/joc.5464
- Qian C, Zhang XB, Li Z. 2019. Linear trends in temperature extremes in China, with an emphasis on non-Gaussian and serially dependent characteristics[J]. *Climate Dynamics*, 53:533–550, doi: 10.1007/s00382-018-4600-x
- Ren G, Zhou Y. 2014. Urbanization effect on trends of extreme temperature indices of national stations over Mainland China, 1961–2008. *J Clim* 27:2340–2360
- 沈皓俊, 游庆龙, 王朋岭, 等. 2018. 1961–2014 年中国高温热浪变化特征分析[J]. *气象科学*, 38(1), 28–36. Shen Haojun, You Qinglong, Wang Pengling, et al. 2018. Analysis of Variation Characteristics of High Temperature Heat Wave in China from 1961 to 2014[J]. *Meteorological Science*, 38(1), 28–36, doi: 10.3969/2017jms.0026
- 施洪波. 2012. 华北地区高温日数的气候特征及变化规律[J]. *地理科学*, 32(7):866–871. Shi Hongbo. 2012. Climate Characteristics and Variation Law of High Temperature Days in North China [J]. *Geographical Science*, 32(07):866–871, doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2012.07.017
- Sen PK . 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324): 1379–1389, doi: 10.1080/01621459.1968.10480934
- Storch H V , Zwiers F W . 1999. Statistical Analysis in Climate Research[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 27(3), doi: 10.1016/S0098-3004(00)00143-6
- Stott P A , Stone D A , Allen M R . 2004. Human contribution to the European heatwave of 2003[J]. *Nature*, 432(7017): 610–614, doi: 10.1038/nature03089
- Sun Y, Zhang X, Zwiers F W, et al. 2014. Rapid increase in the risk of extreme summer heat in eastern China[J]. *Nature Climate Change*, 4(12), 1082–1085, doi:

10.1038/nclimate2410

Sun Y, Hu T, Zhang X. 2018. Substantial Increase in Heat Wave Risks in China in a Future Warmer World[J]. *Earth's Future*, 6(11): 1528-1538, doi: 10.1029/2018EF000963

Szentimrey T. 1999. Multiple analysis of series for homogenization (MASH). *Proc Sec Semin Homogen Surf Climatol Data Budapest*, 41:27-46

王喜元, 闫业超, 岳书平, 等. 2016. 1961-2010 年长江流域高温热浪时空变化特征[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 38(4): 602-609. Wang Xiyuan, Yan Yechao, Yue Shuping, et al. 2016. Spatial and temporal variations of high temperature heat waves in the Yangtze River Basin from 1961 to 2010 [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Science Edition)*, 38(04):602-609, doi: 10.7540/j.ynu.20150821

Wang J , Tett S , Yan ZW , et al. 2017. Have human activities changed the frequencies of absolute extreme temperatures in eastern China?[J]. *Environmental Research Letters*, doi: 10.1088/1748-9326/aa9404

Wang L, Wang WJ, Wu Zf, et al. 2018. Spatial and temporal variations of summer hot days and heat waves and their relationships with large-scale atmospheric circulations across Northeast China[J]. *International Journal of Climatology*, 38:5633-5645, doi: 10.1002/joc.5768

Wang W, Zhou W, Li Y, et al. 2015. Statistical modeling and CMIP5 simulations of hot spell changes in China[J]. *Climate Dynamics*, 44(9-10): 2859-2872, doi: 10.1007/s00382-014-2287-1

Wang ZY, Ding YH, Zhang Q, et al. 2012. Changing Trends of Daily Temperature Extremes with Different Intensities in China[J]. *Journal of Meteorological Research*, 26(4):399-409, doi: 10.1007/s13351-012-0401-z

Wang XL, Swail VR. 2001. Changes of Extreme Wave Heights in Northern Hemisphere Oceans and Related Atmospheric Circulation Regimes[J]. *Journal of Climate*, 14(10):2204-2221, doi: 10.1175/1520-0442(2001)014<2204:coewhi>2.0.co;2

Wilks DS. 2011. *Statistical methods in the atmospheric sciences*, 3rd edn. Academic

Press, New York, p 676

Wu Y, Wang WS, Wang GQ. 2016. Detecting Variation Trends of Temperature and Precipitation for the Dadu River Basin, China[J]. *Advances in Meteorology*, 2016:1-11, doi: 10.1155/2016/2564586

邢彩盈, 张京红, 吴胜安. 2017. 近 50 年海南岛高温日数和热浪的气候特征[J]. *中国农学通报*, 33(22):107-112. Xing Caiying, Zhang Jinghong, Wu Shengan. 2017. Climatic Characteristics of High Temperature Days and Heat Waves in Hainan Island in Recent 50 Years [J]. *Chinese agricultural science bulletin*, 33(22):107-112.

Xu WH, Li QX, Wang XL, et al. 2013. Homogenization of Chinese daily surface air temperatures and analysis of trends in the extreme temperature indices[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(17):9708-9720, doi: 10.1002/jgrd.50791

叶殿秀, 尹继福, 陈正洪, 等. 2013. 1961-2010 年我国夏季高温热浪的时空变化特征[J]. *气候变化研究进展*, 9(1): 15-20. Ye Dianxiu, Yin Jifu, Chen Zhenghong, et al. 2013. Temporal and Spatial Characteristics of Summer High Temperature Heat Waves in China from 1961 to 2010[J]. *Advances in Climate Change Research*, 9(1): 15-20, doi: 10.3969/j.issn.1673-1719.2013.01.003

Yan ZW, Li Z, Xia JJ. 2014. Homogenization of climate series: The basis for assessing climate changes[J]. *Sci China Earth Sci* 57(12):2891-2900, doi: 10.1007/s11430-014-4945-x

Ye DX, Yin JF, Chen ZH, et al. 2014. Spatial and Temporal Variations of Heat Waves in China from 1961 to 2010[J]. *Advances in Climate Change Research*, 5(2):66-73, doi: 10.3724/sp.j.1248.2014.066

Yin H, Markus G, Lisa V, et al. 2015. Multi-dataset comparison of gridded observed temperature and precipitation extremes over China[J]. *International Journal of Climatology*, 35(10):2809-2827, doi: 10.1002/joc.4174

You QL, Kang SC, Aguilar E, et al. 2011. Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961-2003[J]. *Climate Dynamics*, 36(11-12):2399-2417, doi:

10.1007/s00382-009-0735-0

You QL, Ren GY, Klaus Fraedrich, et al. 2013. Winter temperature extremes in China and their possible causes[J]. *International Journal of Climatology*, 33(6):1444-1455, doi: 10.1002/joc.3525

中国气象局. 2019. 2018 年中国气候公报[M]. 北京. China Meteorological Administration. 2019. China Climate Bulletin 2018 [M]. Beijing

中国气象局. 2019. 气象知识[M]. 北京. China Meteorological Administration. 2019. Meteorological knowledge[M]. Beijing

中华人民共和国国家标准-气象灾害预警信号图标. 2011. GB/T 27962-2011. China National Standards. Graphical symbols for meteorological disaster warning signal icon. 2011. GB/T 27962-2011

中华人民共和国国家标准-数据的统计处理和解释, 正态样本离群值的判断和处理. 2008. GB/T 4883-2008. China National Standards. Statistical processing and interpretation of data, judgment and processing of outliers of normal samples. 2008. GB/T 4883-2008

Zhai PM, Sun AJ, Ren FM, et al. 1999. Changes of Climate Extremes in China[J]. *Climatic Change*, 42(1):203-218, doi: 10.1023/a:1005428602279

Zhao CY, Wang Y, Zhou XY, et al. 2013. Changes in Climatic Factors and Extreme Climate Events in Northeast China during 1961-2010[J]. *Advances in Climate Change Research*, 4(2):92-102, doi: 10.3742/sp.j.1248.2013.092

Zhang X, Vincent LA, Hogg WD, et al. 2000. Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century[J]. *Atmosphere-Ocean*, 38(3):395-429, doi: 10.1080/07055900.2000.9649654

Zhou YQ, Ren GY. 2011. Change in extreme temperature event frequency over mainland China, 1961-2008[J]. *Climate Research*, 50(1-2):125-139, doi: 10.3354/cr01053

Zhou BT, Xu Y, Wu J, et al. 2016. Changes in temperature and precipitation extreme indices over China: analysis of a high-resolution grid dataset[J]. *International Journal of Climatology*, 36(3):1051-1066, doi: 10.1002/joc.4400