基于CRU数据的1901—2018年全球陆表气温时空变化特征分析*

张 寅[1] 闫 凯[1,2**] 刘 钊[3] 濮嘉彬[1] 张一满[1] 曾也鲁[4]

(1.中国地质大学(北京)土地科学技术学院,北京 100083;2.资源环境与灾害监测山西省重点实验室,山西 晋中 245099;
3.清华大学地球系统科学系地球系统数值模拟教育部重点实验室,北京 100084;
4.斯坦福卡内基科学研究所全球生态学实验室,加州斯坦福 94305)

摘要:基于英国东英格利亚大学气候研究所单位时间序列网格数据集,1901—2018年的陆表平均气温、最高气温和最低气温数据(0.5°×0.5°,月值数据),采用时间序列趋势分析、趋势显著性检验、空间相关性分析等方法对气温进行年内变化、年际变化和空间分布分析.结果表明:(1)1901—2018年平均、最高、最低气温的气候倾向率(曼-肯德尔检验结果)分别为0.11 ℃/10 a(1.739),0.09 ℃/10 a(1.640)和0.12 ℃/10 a(1.807),表明全球具有较明显的升温趋势;(2)在步长为6 a,显著水平$\alpha=0.01$的情况下,滑动t检验结果显示平均温和最高温的突变点为2个,最低温的突变点为3个,1964年的突变较明显;(3)北纬45°以北地区的最低温升温所涉及的范围比平均、最高温更大;(4)相比于最低气温,平均气温和最高气温的空间差异性变化较小,1980年以来最低气温的空间异质性呈现减小趋势.

关键词:气候变化;CRU数据;陆表气温;时空变化特征
中图分类号:P467 **DOI**:10.19789/j.1004-9398.2020.06.009

0 引 言

受人类活动和自然气候波动的影响,20世纪80年代以来全球温度整体呈现升高趋势[1-7].政府间气候变化专门委员会的全球增温报告也提到:"气温或提前升高1.5~2.0 ℃"[8],气候变化逐渐成为国内外学者关注的热点.丁一汇和戴晓苏[9]、江志红等[10]对中国19世纪末—20世纪末的气温进行研究,表明我国与北半球的增温趋势大致相似,同时证实20世纪80年代以来的增暖现象主要与温室效应的加剧有关;尹红和孙颖[11]利用中国1961—2017年2 419个站点的均一化逐日气候数据,对中国极端温度进行分析,显示中国区域的多个极端温度指数接近或者达到历史极值;Zhang等[12]的研究结果显示,我国1961—2013年大多数地区的暖事件增多、冷事件减少;Hu等[13]对中国772个站1960—2013年逐日气温资料的研究表明,中国西北和东南地区是我国极端暖事件的高发区;张大任等[14]利用1956—2015年中国200个气象站点的逐日最高和最低气温资料,采用10个极端温度指标进行研究,表明各区域间极端温度指标变化幅度的差异较大,高原山地气候区冷指数减小的幅度最大,部分暖指数在(亚)热带季风性气候区增长幅度最大;王劲松等[15]、范可和刘辉[16]研究表明中亚、东亚地区自20世纪80年代开始显著增暖;Zhang等[17]对气候变化检测和指数联合专家组定义的10个极端温度指数和7个极端降水指数进行分析,显示中亚地区所有降水指数在1986年都经历了突变,各降水极端值均表现出空间多样性和异质性,中亚地区最低温度的升高是气候变暖的主要驱动力;Jones等[18]对澳大利亚气象局气象站数据集进行研究,表明水分有效性是极端降水在高温下尺度变化的主要驱动力;Tabari和Talaee[19]对伊朗地区的气温进行趋势分析,显示1966—2005年伊朗月、季、年均最高、最低温都呈现增长趋势,最低温比最高温的增长趋势更为明显,冬、夏季的升温趋势比春、秋季明显;Hansen等[20]提出2001年1—12月的全球陆表温度呈持续升高趋势,且印度洋和西太平洋也异常温暖,延续了过去几十年的趋势.

收稿日期:2019-11-25
* 遥感科学国家重点实验室开放基金(OFSLRSS201924);中国科学院数字地球重点实验室开放基金(2018LDE002);中国地质大学(北京)基本科研业务费优秀教师基金(2652018031);国家自然科学基金青年科学基金项目(41901298)
** 通信作者:kaiyan@cugb.edu.cn

上述研究只针对局部区域且时间跨度较短,因此亟待从全球尺度、长时间序列着手研究陆表气温的时空变化特征及其趋势. 本文采用时序趋势分析、统计学趋势显著性检验及空间相关性分析等方法[21-23],对全球陆表 1901—2018 年的平均、最高、最低气温从时间和空间 2 个方面进行变化特征、趋势及规律分析,以期为人类进一步了解近百年全球陆表气温的时空变异特征,揭示长时序气候数据的规律起到积极作用,提高人类对全球变暖背景下世界不同地区陆表气温变化规律的认识,为全球尺度陆表气温的研究及预测提供参考.

1 研究区及数据介绍

1.1 研究范围

研究范围包括亚洲、欧洲、非洲、北美洲、南美洲及大洋洲. 考虑到南北半球海陆分布的不同,本文对全球整体展开分析的同时也兼顾南北半球的对比分析. 由于气温受纬度的影响较大,故本文按照低纬、中低纬、中高纬将全球细化为 5 个纬度带(45°N ~ 90°N、30°N ~ 45°N、15°N ~ 30°N、15°S ~ 15°N、90°S ~ 15°S)进行相应的分析,研究各纬度带的气温变化特征.

1.2 数据资料

采用英国东英格利亚大学气候研究所(Climatic Research Unit,CRU)网格化时间序列数据(http://data. ceda. ac. uk/badc/cru/data/cru _ ts/cru _ ts _ 4. 03/data/)中的平均、最高和最低气温气候要素数据进行相应分析,CRU 通过整合全球历史气候网等具有代表性的数据库重建了一套完整、无中断、高分辨率的全球陆地表面气候资料. 本文所采用的气候数据的观测站点在欧洲和北美洲的分布密度较大,而在亚洲、南美洲和非洲的分布密度较小,且早期资料,特别是 1950 年之前很匮乏,气象观测站点少,未充分考虑到城市化进程对数据本身的影响偏差,这为本研究相关结果和结论带来一定不确定性. 但鉴于 CRU 数据已得到众多研究的验证[24-25],故本研究先将同年内逐月平均、最高和最低气温累加求平均得到年均温数据,再对 1901—2018 年全球陆表气温进行时空分析.

2 分析方法

2.1 时间序列趋势分析

2.1.1 一元线性回归

根据气象要素与其对应的时间序列数据,建立一元线性回归方程:

$$y = at + b, \tag{1}$$

式中 y 为第 t 年的气温观测值(℃),a 为线性趋势项即回归系数,t 为时间序列,b 为常数. a 代表了气温的变化趋势,$a>0$ 表示随时间 t 的增加呈上升趋势;$a<0$ 表示随时间 t 的增加呈下降趋势[26].

2.1.2 滑动平均

滑动平均是对样本量为 n 的序列,求多个连续 $m(m<n)$ 项序列的平均值,即沿全部 n 个数据滑动地取相邻 m 个数据,对其作算术平均运算[27],便于实时处理非平稳数据,公式为

$$f_k = \frac{1}{m}\sum_{i=0}^{m-1} y_{k+i}, k = 1,2,3,\cdots,n-m+1, \tag{2}$$

式中 m 为滑动长度,y 为第 $k+i$ 年的气温.

2.1.3 累积距平

累积距平是一种常用的判断气温变化趋势的方法[28],计算公式为

$$\hat{x}_i = \sum_{i=1}^{t}(x_i - \bar{x}), i = 1,2,3,\cdots,t, \tag{3}$$

式中 $\bar{x}$ 为气温的均值(℃),t 为时间(a). 累积距平曲线呈上升趋势,表示距平值增加;呈下降趋势,则表示距平值减小.

2.2 趋势显著性检验

2.2.1 曼-肯德尔检验

采用曼-肯德尔法(Mann-Kendall,M-K)对全球陆表平均、最高和最低气温时间序列进行趋势检验[29]. 针对时间序列 $X_n=(x_1,x_2,\cdots,x_n)$,M-K 检验中的 Z 统计量值可由公式(4)和(5)算出:

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{m=1}^{n} m(m-1)(2m+5)}{18}, \tag{4}$$

$$Z = \begin{cases} \dfrac{\sum_{1\leqslant i\leqslant j\leqslant n}\operatorname{sgn}(x_j - x_i) - 1}{\sqrt{V(S)}}, & S>0, \\ 0, & S=0, \\ \dfrac{\sum_{1\leqslant i\leqslant j\leqslant n}\operatorname{sgn}(x_j - x_i) + 1}{\sqrt{V(S)}}, & S<0, \end{cases} \tag{5}$$

式中 sgn 是符号函数,当 $x_j>$、=、$<x_i$ 时,$\operatorname{sgn}(x_j - x_i)$ 分别为 1、0、-1. Z 值的正、负分别对应时间序列的增大、减小趋势,Z 的绝对值 ≥1.64、1.96 和 2.58 时,表示被检验的时间序列的趋势性通过了置信度分别为 90%、95% 和 99% 的显著性检验.

2.2.2 滑动 t 检验

利用 10 a 滑动 t 检验法对平均、最高和最低气

温进行突变检验分析进而确定突变点[30],如公式(6)和(7)所示,设置显著性水平 α 为 0.01,即临界值为 ±3.169.

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S\sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}, \tag{6}$$

$$S = \sqrt{\frac{n_1 S_1^{\ 2} + n_2 S_2^{\ 2}}{n_1 + n_2 - 2}}, \tag{7}$$

式中 x_1、x_2 为时间序列,基准点前后 2 段子序列 x_1、x_2 样本量分别为 n_1 和 n_2,2 段子序列平均值分别为 x_1 和 x_2,方差分别为 $S_1^{\ 2}$ 和 $S_2^{\ 2}$,式(6)服从自由度为 $n_1 + n_2 - 2$ 的分布. 当 $t > 3.169$ 时表示气温由暖转冷,$t < -3.169$ 时表示气温由冷转暖.

2.3　空间相关性分析

空间相关分析主要研究现象之间是否存在某种依存关系,并对具有依存关系的现象探讨其相关程度和相关方向[23]. 空间异质性可分为空间局域异质性和空间分层异质性 2 种,前者是指该点属性值与周围不同,后者是指多个类型之间或者多个区域之间互相不同,本文所用的空间相关性分析方法分别为半方差函数和变异系数.

2.3.1　半方差函数

半方差函数是地统计学中关联图像空间变异和地面场景模型的关键函数,应用该函数可以分析一定区域范围内气温的变化和突变程度,数值越小表示研究区域的气温波动、异质性越小[31]. 空间上具有相同间距 h 的相对观测值的半方差公式为

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2,$$
$$i = 1,2,\cdots,N(h), \tag{8}$$

式中 $Z(x_i)$ 为满足本征假设和二阶平稳的区域化随机变量,$N(h)$ 是以 h 为间距的所有观测点的成对数目,随机区域化变量 $Z(x_i)$ 在空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 上的观测值分别为 $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$.

2.3.2　变异系数

变异系数(coefficient of variation,CV)反映气温的相对浮动程度,是概率分布离散程度的 1 个归一化量度[32],其定义为标准差与平均值之比,即:

$$C_V = \frac{S}{M}, \tag{9}$$

式中 S 为数据标准差,M 为数据平均值. C_V 越小代表研究区气温变化越小,相对稳定;C_V 越大则表示该地区气温变化程度越大.

3　结果与分析

3.1　年内变化分析

对全球、北半球和南半球范围内的平均、最高和最低气温进行年内变化分析,每 9 或 10 a 逐月气温均值的分布情况如图 1 所示,从图 1(a)和(b)中可知全球、北半球的气温最大值均依次出现在 7、8 和 6 月,气温最小值依次出现在 1、2、12 月. 由图 1(c)可知,南半球的气温最大值出现在1 月,其次是 2 和 12 月,气温最小值依次出现在 7、6 和 8 月. 平均、最高、最低气温自1901 年以来均呈升高趋势. 1901—2018 年全球平均、最高、最低气温分别为 −2.5 ~ 20.0、2.5 ~ 25.0、−10.0 ~ 15.0 ℃,平均、最高气温变化幅度均为 22.5 ℃,最低气温的变化幅度为 25.0 ℃;近 118 a 来北半球平均、最高和最低气温分别为 −10.0 ~ 20.0、−5.0 ~ 25.0、−15.0 ~ 15.0 ℃,气温变化幅度均为 30.0 ℃;南半球平均、最高、最低气温分别为 16.0 ~ 25.0、22.0 ~ 31.0、10.0 ~ 20.0 ℃,平均、最高气温变化幅度均为 9.0 ℃,最低气温的变化幅度为 10.0 ℃.

3.2　年际变化分析

全球陆表气温距平值及距平累积值随年份变化的情况见图 2(a),近 20 a 气温距平值均为正值,且最

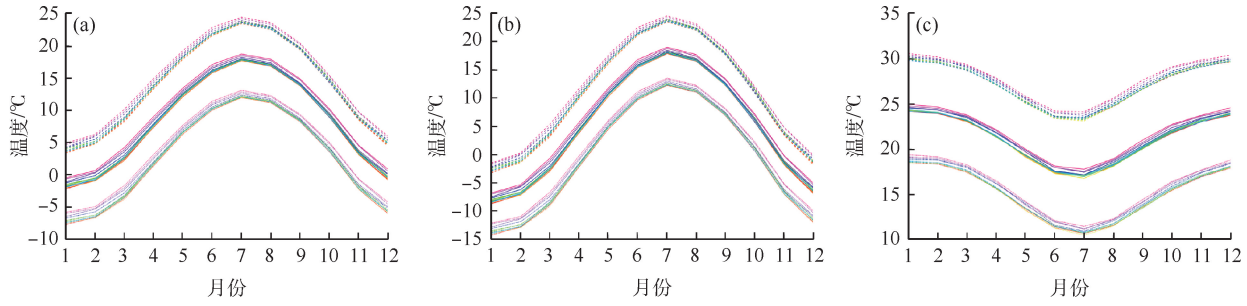


图 1　气温年内变化

(a)全球;(b)北半球;(c)南半球

注:实线、虚线和点线分别为平均、最高和最低温度;不同颜色代表每 9 或 10 a.

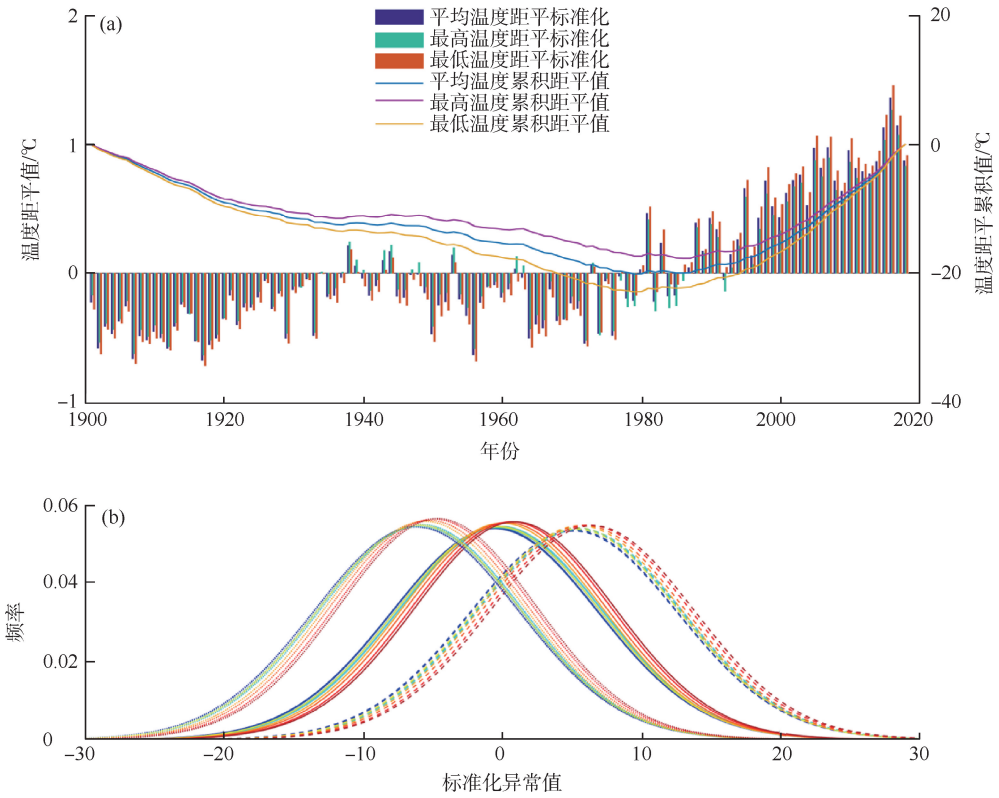


图 2　1901—2018 年气温距平分析

(a)气温距平变化;(b)气温距平频率分布

注:实线、虚线和点线分别为平均、最高和最低温度;不同颜色代表每 9 或 10 a.

低气温距平值的绝对值普遍较大,可见最低气温的不稳定性较大,1901—2018 年以来全球平均、最高和最低气温的距平累积值整体呈现先减后增的趋势,每年距平值从大到小依次为最高、平均、最低气温.

全球陆表每 9 或 10 a 气温距平频率分布见图 2(b),1901—2018 年平均、最高和最低气温平均值分别为 8.3、13.9 和 2.6 ℃.最高气温均值与平均气温均值相差 5.6 ℃,最低气温均值与平均气温均值相差 5.7 ℃,正态分布曲线随年份的增加而向右偏移,表明全球平均、最高和最低气温均呈现升温趋势,此研究结果与张晓华等[7]的研究结论一致.

1901—2018 年平均温、最高温及最低温的变化分析如图 3 所示,其中平均、最高和最低气温气候倾向率分别为 0.11、0.09、0.12 ℃/10 a,可知最低气温升温趋势较大,升温趋势最小的是最高气温.平均、最高和最低气温的 M-K 检验结果分别为 1.739、1.640 和 1.807,均通过了置信度为 90% 的 M-K 显著性检验,均有较明显的升温趋势,且 M-K 趋势检验结果与一元线性回归的显著性一致.

20 世纪 80 年代中后期全球变暖现象开始加剧[33],因此本文对 1901—1985 和 1986—2018 年 2 个时期进行分析,由图 3 可以看出前一时期全球平均、最高和最低气温均值分别为 8.0、13.7 和 2.4 ℃;后一时期全球平均、最高和最低气温均值分别为 8.9、14.4 和 3.3 ℃.第 2 时期较第 1 时期平均升高 0.8 ℃.1950—1980 年的气温滑动平均值结果波动较大,这段时期气温不太稳定,其余时期均为升温趋势.

应用滑动 t 检验对全球 1901—2018 年共 118 a 的平均、最高和最低气温进行突变识别,取子序列长度为 6 a,在显著水平 $\alpha=0.01$ 的情况下,滑动 t 检验结果如图 4 所示,平均气温存在 1963 和 1964 年共 2 个突变点,最高气温存在 1921 和 1964 年共 2 个突变点,最低气温存在 1963、1964 和 1997 年共 3 个突变点,1997 年发生的厄尔尼诺现象可能是导致最低气温于该年发生突变的原因之一.1964 年发生较明显的暖转冷现象,而最低气温在 20 世纪 90 年代末的突变导致的增温效果(约 2.0 ℃)较平均和最高气温更加明显.

3.3　全球空间分布分析

将全球分 5 个纬度带(45°N ~ 90°N、30°N ~ 45°N、15°N ~ 30°N、15°S ~ 15°N、90°S ~ 15°S)进行地理

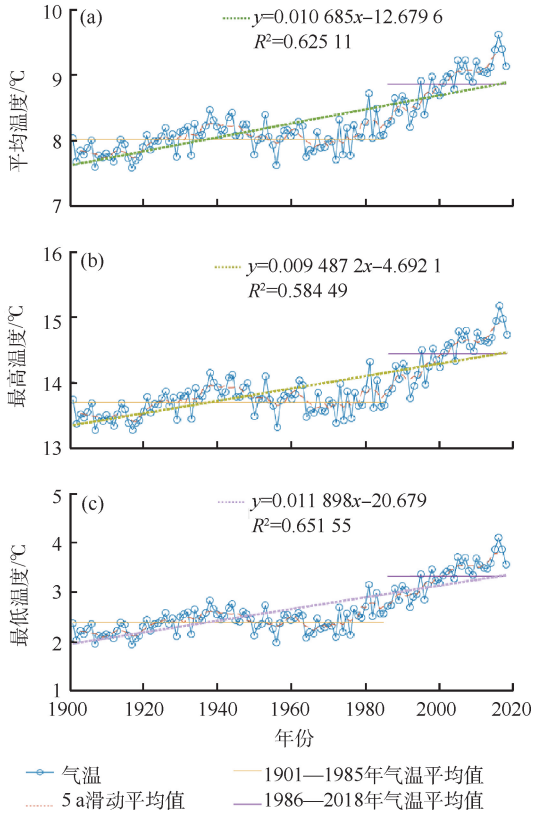


图 3　1901—2018 年际变化分析

(a)平均气温;(b)最高气温;(c)最低气温

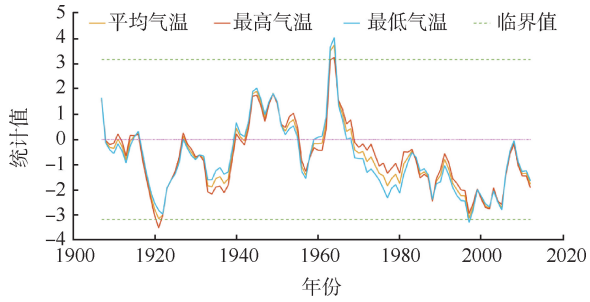


图 4　气温变化滑动 t 检验分析

空间分析. 平均、最高和最低气温在各个纬度带的气候倾向率均为正值(表 1),可见气候倾向率最大为 0. 16 ℃/10 a,最小为 0. 05 ℃/10 a,气温均表现为升高趋势. 30°N ~ 45°N、90°S ~ 15°S 这 2 个纬度带的平均气温和最低气温均通过了置信度为 90% 的显著性检验. 45°N ~ 90°N 地区的升温最高,可能是人类相关活动、极地臭氧空洞及大气环流异常等多种原因所共同导致.

表 1　不同纬度带的气候倾向率　单位:℃/10 a

纬度带	平均气温	最高气温	最低气温
45°N ~ 90°N	0. 14	0. 13	0. 16
30°N ~ 45°N	0. 11	0. 09	0. 12
15°N ~ 30°N	0. 08	0. 07	0. 09
15°S ~ 15°N	0. 06	0. 05	0. 06
90°S ~ 15°S	0. 08	0. 06	0. 14

1901—2018 年全球陆表空间平均、最高和最低气温及气温变化率、变异系数和相应变量的纬度剖面如图 5 ~ 7 所示,剖面图表示变量在不同纬度上的平均值. 北美洲西部、亚欧大陆中北部等地区的气温变化率及变异系数较大,变化率及变异系数在 30°S 左右有突变,即南美洲东南部、大洋洲及非洲东南部 1901—2018 年平均、最高和最低气温变化波动较大. 最低气温的温度变化率较平均、最高气温波动变化不大,但其较大值所涉及的范围较平均、最高气温有所增加,包含俄罗斯中东部地区及北美洲西部地区.

对全球范围最高、最低和平均气温空间异质性分析结果如图 8(a)所示,可知 1901—2018 年全球气温差异性变化最大的是最低气温,平均和最高气温只有微小变化,全球最低气温的差异性自 1980 年以来逐渐减小,减小了 2 个单位,而平均和最高气温差异性基本保持不变.

平均、最高和最低气温在南北、东西、东南-西北、西南-东北 4 个方向的半方差函数值如图 8(b)

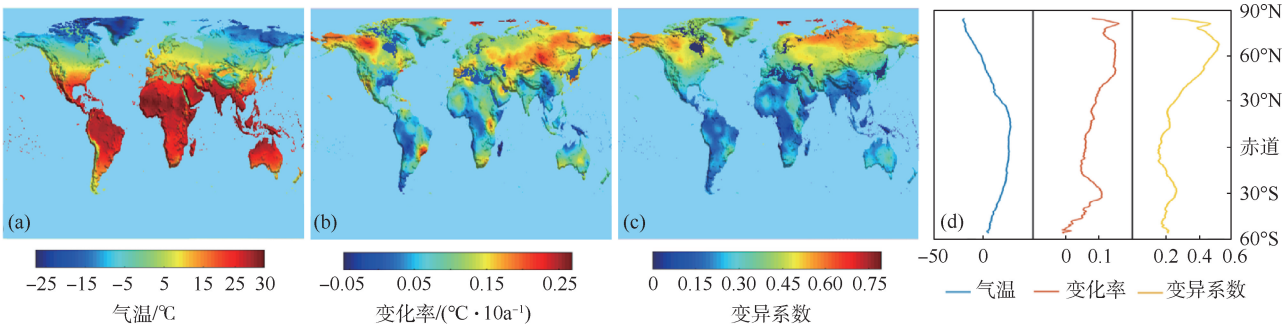


图 5　平均气温空间分布

(a)平均气温;(b)变化率;(c)变异系数;(d)纬度剖面

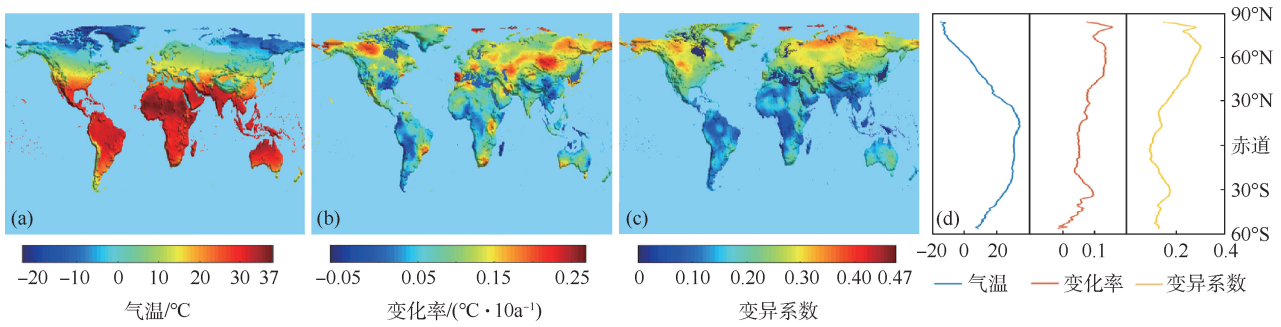


图 6　最高气温空间分布

(a)最高气温;(b)变化率;(c)变异系数;(d)纬度剖面

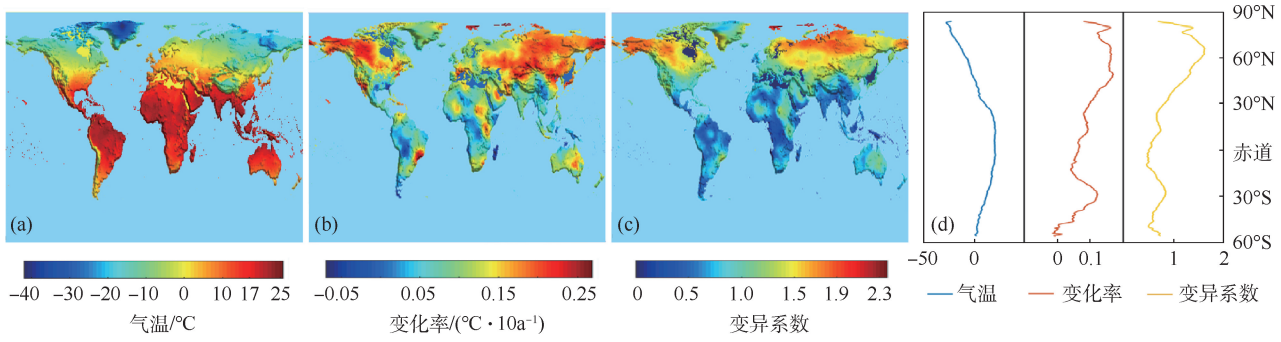


图 7　最低气温空间分布

(a)最低气温;(b)变化率;(c)变异系数;(d)纬度剖面

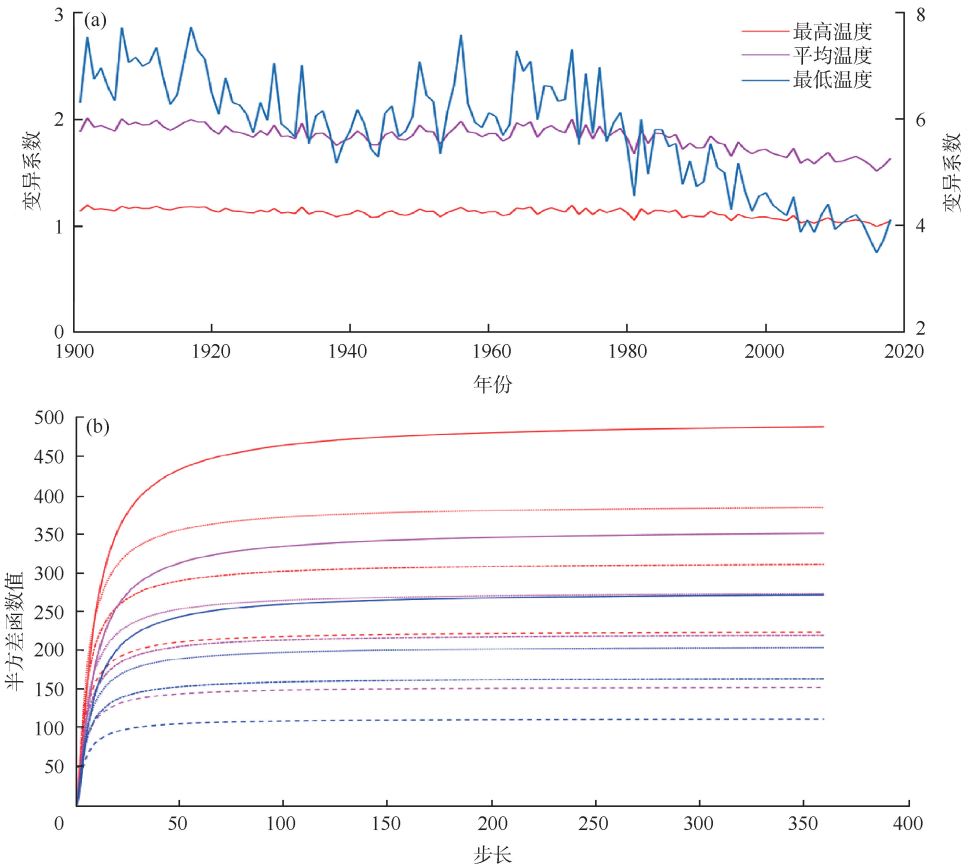


图 8　气温空间异质性变化规律

(a)基于变异系数;(b)基于半方差函数

注:实线、虚线、长短线和点线分别代表南北、东西、东南 – 西北和西南 – 东北方向;红色、紫色和蓝色分别代表最高、平均和最低温度.

所示,半方差函数值在东西方向较小,其次是东南-西北方向、西南-东北方向,最大的是南北方向,由此可见气温变化受纬度影响比受经度影响大.

4　结　论

本研究基于 CRU 全球陆表气温数据,应用一元线性回归、滑动平均、累积距平、MK 检验、滑动 t 检验、半方差函数、时空变异系数等分析方法,探究全球陆表气温的时空变化及趋势特征,结果表明:

(1)最低气温的气温变化率在纬度方向上变化最小,变化范围在 0.25 ℃/10 a 以内,3 种气温在 66°N 附近的变异系数最大,在赤道附近的变异系数最小,原因可能是赤道处于低纬热带,故气温变化较小,因而变异系数较小,而 66°N 处于北温带与北寒带的交界处导致气温变异系数较大.

(2)各纬度带、南北半球以及全球的平均、最高和最低气温气候倾向率均为正值,呈升高趋势,各纬度带最低气温的气候倾向率最小为 0.06 ℃/10 a,最大为 0.16 ℃/10 a,45°N ~ 90°N 地区平均、最高和最低气温气候倾向率分别为 0.14、0.13 和 0.16 ℃/10 a,与其余纬度带(30°N ~ 45°N、15°N ~ 30°N、15°S ~ 15°N、90°S ~ 15°S)相比,升温更明显.最低气温较平均和最高气温升温更加明显、涉及范围更大.

(3)通过对全球陆表平均、最高和最低气温变异系数的分析,1901—2018 年来平均气温和最高气温的空间区域差异变化不大,平均气温变异系数的浮动范围为 0.5,最高气温变异系数的浮动范围为 0.2,北半球高纬地区最低气温逐年升高使得其空间差异性自 1980 年以来呈减小趋势,减小了约 2 个单位.

参 考 文 献

[1] 王兵,李晓东. 基于 EEMD 分解的欧洲温度序列的多尺度分析[J]. 北京大学学报(自然科学版),2011,47(4):627 – 635.

[2] 白美兰,沈建国,裴浩,等. 气候变化对沙漠化影响的评估[J]. 气候与环境研究,2002,7(4):457 – 464.

[3] 白宝玉,孙宝虎. 哲里木盟北部天然草地资源及其开发利用[J]. 中国草地,1989(5):20 – 23.

[4] 左良优. 近 50 年来四川省蒲江县气候变化特征初探[J]. 首都师范大学学报(自然科学版),2017,38(2):60 – 64.

[5] 白美兰,郝润全,邸瑞琦,等. 内蒙古东部近 54 年气候变化对生态环境演变的影响[J]. 气象,2006,32(6):31 – 36.

[6] 陈隆勋,朱文琴,王文,等. 中国近 45 年来气候变化的研究[J]. 气象学报,1998,56(3):2 – 16.

[7] 张晓华,高云,祁悦,等. IPCC 第五次评估报告第一工作组主要结论对《联合国气候变化框架公约》进程的影响分析[J]. 气候变化研究进展,2014,10(1):14 – 19.

[8] 苏勃,高学杰,效存德. IPCC《全球 1.5 ℃增暖特别报告》冰冻圈变化及其影响解读[J]. 气候变化研究进展,2019,15(4):395 – 404.

[9] 丁一汇,戴晓苏. 中国近百年来的温度变化[J]. 气象,1994,20(12):19 – 26.

[10] 江志红,丁裕国,金莲姬. 中国近百年气温场变化成因的统计诊断分析[J]. 应用气象学报,1997,8(2):48 – 58.

[11] 尹红,孙颖. 基于 ETCCDI 指数 2017 年中国极端温度和降水特征分析[J]. 气候变化研究进展,2019,15(4):363 – 373.

[12] ZHANG Y J,GAO Z Q,PAN Z T,et al. Spatiotemporal variability of extreme temperature frequency and amplitude in China[J]. Atmospheric Research,2017,185:131 – 141.

[13] HU L,HUANG G,QU X. Spatial and temporal features of summer extreme temperature over China during 1960—2013[J]. Theoretical and Applied Climatology,2017,128(3/4):821 – 833.

[14] 张大任,郑静,范军亮,等. 近 60 年中国不同气候区极端温度事件的时空变化特征[J]. 中国农业气象,2019,40(7):422 – 434.

[15] 王劲松,陈发虎,靳立亚,等. 亚洲中部干旱区在 20 世纪两次暖期的表现[J]. 冰川冻土,2008,30(2):224 – 233.

[16] 范可,刘辉. 近百年东亚冬季气温及其大气环流变化型态[J]. 大气科学,2013,37(2):383 – 394.

[17] ZHANG M,CHEN Y,SHEN Y,et al. Tracking climate change in Central Asia through temperature and precipitation extremes[J]. Journal of Geographical Sciences,2019,29(1):3 – 28.

[18] JONES R H,WESTRA S,SHARMA A. Observed relationships between extreme sub-daily precipitation,surface temperature,and relative humidity[J]. Geophysical Research Letters,2010,37(22):22805.

[19] TABARI H,TALAEE P H. Analysis of trends in temperature data in arid and semi-arid regions of Iran[J]. Global and Planetary Change,2011,79(1):1 – 10.

[20] HANSEN J,RUEDY R,SATO M,et al. Global warming continues[J]. Science,2002,295:275.
[21] 李红英,高振荣,王胜,等. 近 60 a 河西走廊极端气温的变化特征分析[J]. 干旱区地理,2015,38(1):1 - 9.
[22] 姚延锋,朱恩超,安晶,等. 天水市近 63 年极端温度变化特征分析[J]. 农学学报,2015,5(1):130 - 133.
[23] 李从容,汪明,刘凯. 半方差函数模型在滑坡、泥石流沟分布识别中的应用:以四川洪溪河流域为例[J]. 地理与地理信息科学,2019,35(2):47 - 52.
[24] ZHAO T B,FU C B. Comparison of products from ERA-40, NCEP-2, and CRU with station data for summer precipitation over China[J]. Advances in Atmospheric Sciences,2006,23(4):593 - 604.
[25] SHI H Y,LI T J,WEI J H. Evaluation of the gridded CRU TS precipitation dataset with the point raingauge records over the Three-River Headwaters Region[J]. Journal of Hydrology,2017,548:322 - 332.
[26] 易泽,刘文彬. 近 57 年舞水河流域极端温度变化特征分析[J]. 中国农村水利水电,2018(12):106 - 109 + 115.
[27] MERNILD S H,HANNA E,YDE J C,et al. Coastal Greenland air temperature extremes and trends 1890—2010:annual and monthly analysis[J]. International Journal of Climatology,2014,34(5):1472 - 1487.
[28] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2 版. 北京:气象出版社,2007:49 - 50.
[29] 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.
[30] 蔡文香,吴妍,卢万合,等. 1961—2011 年中国夏季 35 ℃以上极端高温事件的变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(9):144 - 147.
[31] 蔡渊源. 半方差函数和数学形态学在遥感图像纹理特征提取中的联系[J]. 西部探矿工程,2010,22(7):131 - 135.
[32] MAVROUDIS E. A change-point model for monitoring the coefficient of variation based on squared ranks test[J]. Computers and Industrial Engineering,2019,136:366 - 372.
[33] JONES P D,NEW M,PARKER D E,et al. Surface air temperature and its changes over the past 150 years[J]. Reviews of Geophysics,1999,37(2):173 - 199.

Analysis of Spatio-temporal Variation Characteristics of Global Surface Air Temperature from 1901 to 2018 Based on CRU Data

ZHANG Yin[1] YAN Kai[1,2] LIU Zhao[3] PU Jiabin[1] ZHANG Yiman[1] ZENG Yelu[4]

(1. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083;
2. Key Laboratory of Resource Environment and Disaster Monitoring in Shanxi Province, Shanxi Jinzhong 245099;
3. Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084;
4. Department of Global Ecology, Carnegie Institution for Science, Stanford California 94305)

Abstract: Based on the time series grid dataset of Climate Research Unit of the University of East Anglia, with a spatial resolution of 0.5° × 0.5°and a time resolution of month, time series trend analysis, trend significance test and spatial correlation analysis methods were adopted to analyze the annual change, interannual change and spatial distribution of the near surface average, maximum and minimum air temperature from 1901 to 2018. The results showed that: (1) the mean, highest and lowest air temperature climatic trend rates (M-K test results) in recent 118 years were 0.11 ℃/10 a (1.739), 0.09 ℃/10 a (1.640) and 0.12 ℃/10 a (1.807), respectively, indicating that there was an obvious global warming trend; (2) under the condition that the step length was six years and the significance level was 0.01, the sliding *t* test results showed that the number of mutation points with average, highest and lowest temperature were 2, 2 and 3 respectively, the mutation of 1964 was obvious; (3) the rise of lowest temperature in the area north of 45°N involved a greater range than the mean and highest temperature; (4) the average temperature and the highest temperature showed little difference in the spatial variation of global temperature, while the spatial heterogeneity of the lowest temperature showed a decreasing trend since 1980.

Keywords: climate change; CRU data; surface air temperature; spatio-temporal variation characteristics