

1981—2019年全球气温变化特征

沈贝蓓¹, 宋帅峰², 张丽娟¹, 王子晴², 任 崇¹, 李永生^{3,4}

(1. 哈尔滨师范大学寒区地理环境监测与空间信息服务黑龙江省重点实验室, 哈尔滨 150025;
2. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 3. 黑龙江省气候中心,
哈尔滨 150030; 4. 黑龙江省龙云气象科技有限责任公司气象院士工作站, 哈尔滨 150030)

摘要: 1981—2019年全球气温变化特征是揭示全球气温变化的空间差异性以及实现全球共同应对气候变化的关键。本文基于7套再分析数据, 采用气候变化速率及空间插值等分析方法, 分析了1981—2019年全球气温变化时空特征及主要国家气温变化。结果表明: 1981—2019年全球陆地气温以 $0.320\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率呈极显著升高趋势, 年平均气温增加了 $0.835\text{ }^{\circ}\text{C}$; 南、北半球陆地气温变化速率分别为 $0.147\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.362\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 均呈极显著增加趋势, 分别增加了 $0.874\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.828\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。全球陆地80%面积上气温呈现显著增加趋势, 年平均气温升高速率最大的区域位于 $80^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$, 其次是 $70^{\circ}\text{N}\sim 80^{\circ}\text{N}$ 、 $60^{\circ}\text{N}\sim 70^{\circ}\text{N}$, 高纬大于中、低纬, 格陵兰地区、乌克兰、俄罗斯等中高纬度国家或地区增温速率较快, 尤以格陵兰地区增加速率最快, 气温变化速率为 $0.654\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$; 增温最慢的地区主要位于新西兰和赤道附近的南美洲、东南亚、非洲南部等地, 气温变化速率不足 $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。本文统计的146个国家中, 年平均气温呈显著增加趋势的国家136个, 占93%; 气温无显著变化的国家10个, 占6.849%。1981—2019年全球增温 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上、 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上、 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的国家分别为4个、34个、68个, 分别约占统计国家的2.740%、23.288%、46.575%。本文认为1998年以来全球并没有出现气温变暖停滞的现象。

关键词: 全球气温变化; 局部空间; 全球主要国家; 1981—2019年

DOI: 10.11821/dlxb202111005

1 引言

以显著变暖为特征的全球气候变化已深刻影响了人类的生存和发展^[1-6], 全球气候变暖已成为全球关注的焦点。IPCC第五次报告指出, 1880—2012年全球海陆表面平均温度升高了 $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[7]; 2018年10月IPCC进一步提出全球较工业革命前升温 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的结论^[8], 引起了各国政府和社会公众的高度关注。多位学者认为20世纪80年代以来是全球陆地气温升高速率最快的时期^[9-15], 而有的学者认为全球变暖自1998年起已经停滞^[16], 因此, 进一步科学认知20世纪80年代以来的全球陆地气温变化, 是全球变化研究关注的关键科学问题, 而清晰地界定和比较20世纪80年代以来全球气温变化, 是实现建立全球气候治理体系的重要依据。

现有研究一致认为20世纪80年代以来气温呈增加趋势, 但增温速率有所差异。Hansen等得出1979—2010年全球气温变化速率为 $0.141\sim 0.321\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ^[11-13]; 基于ERA-

收稿日期: 2020-09-14; 修订日期: 2021-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771067; U20A2082); 黑龙江省自然科学基金项目(ZD2020D002) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41771067, No.U20A2082; Key Projects of Natural Science Foundation of Heilongjiang Province, No.ZD2020D002]

作者简介: 沈贝蓓(1985-), 女, 山东淄博人, 博士生, 主要从事地表过程与环境演变研究。E-mail: 467856268@qq.com

通讯作者: 张丽娟(1965-), 女, 河北唐山人, 教授, 博士, 主要从事生态系统模拟研究。E-mail: zlj19650205@163.com

2660-2672 页

Interim数据, Kim等认为1979—2012全球气温变化趋势为 $0.110\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$; Chu等^[15]分析了MERRA数据, 提出1981—2010全球气温变化趋势为 $0.130\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$; Wang等^[10]、Xu等^[17]基于CRUTEM4.4.0.0、CMA-LAST数据, 得到1979—2014年全球气温变化速率为 $(0.304\pm0.060)\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $(0.272\pm0.025)\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$; Sun^[9]利用CMA-LASTv1.0、CRUTEM4.1.1、GHCN-V3.2.0数据, 分析得到1979—2015年全球气温变化速率分别为 $0.250\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.254\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.273\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。综合以上研究结果, 得出20世纪80年代以来全球气温变化速率分布在 $0.110\sim0.304\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 之间。

也有学者对20世纪80年代以来全球气温的空间变化特征进行了研究。如Chu等^[15]采用CMA-LAST数据, 认为1979—2014年高纬度地区气温升高最快; Kim等^[14]利用ERA-Interim再分析数据明确了1979年以来全球地表最强变暖区域位于北极地区; Screen等^[18]发现, 1979—2013年北半球高纬度地区($70^{\circ}\text{N}\sim80^{\circ}\text{N}$)升温速率为 $0.86\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 明显高于中纬度地区($30^{\circ}\text{N}\sim40^{\circ}\text{N}$)的升温速率($0.30\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)。而Wang等^[10]采用CRUTEM4.4.0.0数据进一步得到了, 1977—2014年气候变暖覆盖了所有的全球陆地地区的结论。尽管以上学者涉及到全球陆地气温空间变化特征, 但明确界定国家尺度上气温变化值, 尚没有相关研究。因此, 本文采用多套再分析数据分析了1981—2019年全球气温变化的空间差异性, 并比较了多个国家的气温变化速率及变化量, 为全球变化提供科学依据, 制定积极应对气候变化的国家战略提供科学支撑。

2 资料来源与处理

目前, 国际上已发布了20多套再分析数据集, 本文选择空间分辨率较高、连续性好, 而且实时更新, 可信度较高, 应用频率较高的7套再分析数据(CRU、NCEP/NCAR、NCEP/DOE、CFSR、ERA5、GHCN-CAM、JRA55)开展研究。

CRU数据由东英吉利大学(East Anglia)气候研究所发布(Climatic Research Unit, CRU), 空间分辨率为 $0.5^{\circ}\times0.5^{\circ}$; NCEP/NCAR由美国国家环境预测中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)与美国大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)发布, 数据空间分辨率为 $1.875^{\circ}\times1.875^{\circ}$; NCEP/DOE由美国国家环境预测中心(NCEP)与美国能源部(United States Department of Energy, DOE)联合发布, 空间分辨率为 $1.875^{\circ}\times1.875^{\circ}$; CFSR(Climatic Forecast System Reanalysis, CFSR)由美国国家环境预测中心(NCEP)发布, 空间分辨率为 $0.5^{\circ}\times0.5^{\circ}$; ERA5由ECMWF(European Centre for Medium-range Weather Forecast)发布, 空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times0.25^{\circ}$; GHCN-CAM(下文简称GHCN)数据是全球历史气候学网络和气候异常监测系统(GHCN+CAMS)收集的两个大型观测站数据集的组合, 空间分辨率为 $0.5^{\circ}\times0.5^{\circ}$; JRA55由日本气象厅JMA(Japan Meteorological Agency)发布, 空间分辨率为 $1.25^{\circ}\times1.25^{\circ}$ 。分别在<http://www.cru.uea.ac.uk/data>等相关网站注册下载了1981—2019年全球近地面2 m逐月平均气温数据。

运用ArcGIS 10.5软件对以上数据进行Kriging空间插值及重采样, 得到空间分辨率为 $0.5^{\circ}\times0.5^{\circ}$ 的栅格数据。

3 分析方法

3.1 趋势分析方法

时间序列的气温长期变化趋势采用线性倾向估计方法分析^[19], 建立气温变量(y)与

所对应时间 (x) 的一元线性回归方程:

$$y = ax + b \tag{1}$$

式中: a 为线性回归系数, 表示气温要素变化速率, a 为正值表示气温呈上升趋势, a 为负值表示气温呈下降趋势。

3.2 方差分析

方差分析是检验多组样本总体平均数的假设测验方法, 是将总变异剖分为各个变异来源的相应部分, 从而发现各变异原因在总变异中相对重要程度的一种统计分析方法^[19]。构成统计量:

$$F = \frac{\frac{SS_A}{r-1}}{\frac{SS_E}{n-r}} \tag{2}$$

式中: 统计量 F 服从自由度 $(r-1, n-r)$ 的 F 分布; SS_A 为组间离差平方和, 反映各组间的差异; SS_E 为组内离差平方和, 反映各组内的差异; n 为样本数; r 为试验组数。 $F > F_{0.05}$, 说明组间的变异大于组内变异, 各组样本总体平均数具有显著差异, 来自于不同的总体。

4 结果与分析

4.1 全球年平均气温再分析资料的比较与选择

由于再分析数据来源不同, 本文首先对 7 套再分析数据进行比较和筛选, 以免影响分析结果的准确性。相关分析结果表明, 数据之间相关系数为 0.858~0.996, 均为极显著相关 ($P < 0.01$, 表 1), 方差分析结果也表明 7 套再分析数据无显著差异 ($P > 0.05$), 说明 7 套再分析数据可同时用于分析全球气温变化特征。因此, 本文选用 7 套再分析数据进行后续计算。7 套再分析数据年平均气温时序变化曲线如图 1 所示。

4.2 1981—2019 年全球年平均气温变化特征

4.2.1 全球年平均气温的时序变化特征 7 套再分析数据表明 (表 2), 1981—2019 年全球年平均气温变化速率分别为 0.310 °C/10a (CRU)、0.283 °C/10a (NCEP/NCAR)、0.307 °C/10a (NCEP/DOE)、0.347 °C/10a (ERA5)、0.403 °C/10a (GHCN)、0.231 °C/10a (CFSR)、0.358 °C/10a (JRA55), 均呈极显著增温趋势 ($P < 0.01$), 介于 0.231~0.403 °C/10a 之间, 7 套数据的气温变化速率平均为 0.320 °C/10a, 呈极显著升高趋势 ($P < 0.01$)。1981—2019 年, 全球陆地年平均气温分别由 8.518 °C 增加到 9.353 °C, 增加了 0.835 °C。7 套数据平均结果表明, 南、北半球年平均气温变化速率平均为 0.147 °C/10a、0.362 °C/10a,

表 1 全球 7 套再分析气温数据间相关系数

Tab. 1 Correlation coefficients between seven sets of global reanalysis temperature data

	CRU	NCEP/NCAR	NCEP/DOE	ERA5	GHCN	CFSR	JRA55
CRU	1	0.974**	0.983**	0.987**	0.993**	0.872**	0.992**
NCEP/NCAR		1	0.984**	0.982**	0.968**	0.866**	0.975**
NCEP/DOE			1	0.989**	0.977**	0.884**	0.978**
ERA5				1	0.983**	0.858**	0.988**
GHCN					1	0.865**	0.996**
CFSR						1	0.863**
JRA55							1

注: *, ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著, 下同。

呈极显著增加趋势 ($P < 0.01$), 北半球年平均气温增加速率远远大于南半球。

7套再分析数据表明(图2), 北半球各纬度年平均气温增加速率均大于南半球相应纬度。除南半球部分纬度外, 其余各纬度均呈显著增温趋势。7套数据分析结果均一致表明北半球高纬度地区年平均气温升高速率最大, 升高速率最大的区域位于 $80^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$, 速率为 $0.707\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 其次是 $70^{\circ}\text{N}\sim 80^{\circ}\text{N}$ 和 $60^{\circ}\text{N}\sim 70^{\circ}\text{N}$ 区域, 速率分别为 $0.680\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.484\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$; $40^{\circ}\text{N}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 和 $50^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 区域, 升温速率变小(表3)。南半球年平均气温增加速率随纬度增加而减小, 但 $30^{\circ}\text{S}\sim 60^{\circ}\text{S}$ 区域, NCEP/NCAR和NCEP/DOE资料显示出年平均气温的降温趋势。

4.2.2 全球年平均气温变化的空间变化特征 7套全球再分析数据年平均气温空间变化表明(图3), 1981—2019年全球陆地表面具有增温趋势面积占陆地面积的比例分别达到98.176%(CRU)、94.490%

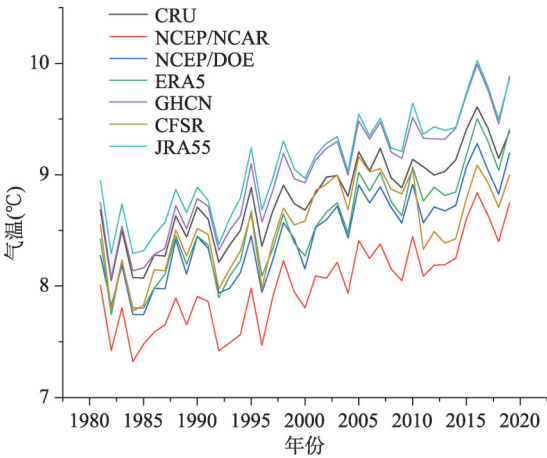


图1 1981—2019年全球平均气温时序变化
Fig. 1 Changes of global annual temperature reanalysis data from 1981 to 2019

表2 1981—2019年全球、北半球和南半球平均气温和变化速率
Tab. 2 Annual mean temperature and its tendency rate of global, northern and southern hemispheres from 1981 to 2019

		CRU	NCEP/ NCAR	NCEP/ DOE	ERA5	GHCN	CFSR	JRA55	平均值
平均气温 ($^{\circ}\text{C}$)	全球陆地	8.793	8.008	8.460	8.556	9.002	8.541	9.093	8.636
	北半球	5.612	4.974	5.397	5.488	5.939	5.579	6.139	5.590
	南半球	21.623	20.493	21.063	21.179	21.532	20.795	21.450	21.162
气温变化速率 ($^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)	全球陆地	0.310**	0.283**	0.307**	0.347**	0.403**	0.231**	0.358**	0.320**
	北半球	0.347**	0.332**	0.364**	0.380**	0.439**	0.271**	0.403**	0.362**
	南半球	0.161**	0.081**	0.072*	0.211**	0.267**	0.066	0.169**	0.147**

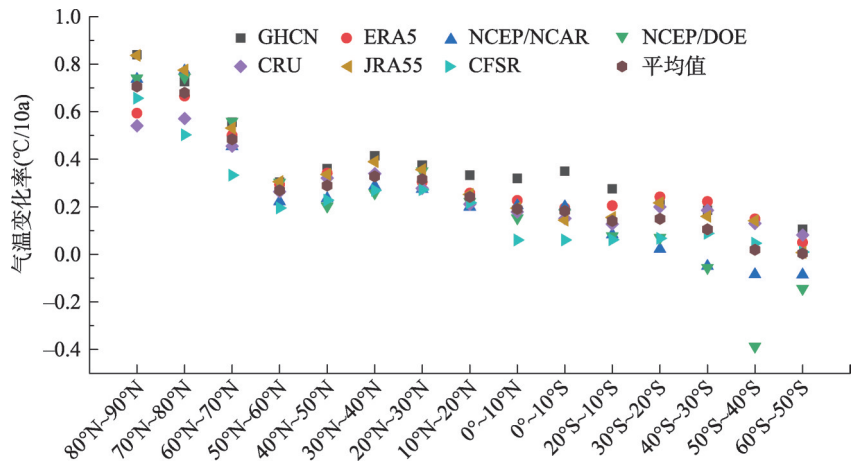


图2 1981—2019年全球不同纬度气温变化速率分布
Fig. 2 Distribution of temperature change rate at different latitudes from 1981 to 2019

表 3 1981—2019 年全球各纬度年平均气温变化量及变化速率

Tab. 3 Temperature tendency rate and temperature variation at different latitudes from 1981 to 2019

纬度范围(°N)	变化速率(°C/10a)	变化量(°C)	纬度范围(°S)	变化速率(°C/10a)	变化量(°C)
80~90	0.707**	2.757	0~10	0.182**	0.710
70~80	0.680**	2.652	20~10	0.141**	0.550
60~70	0.484**	1.888	30~20	0.150**	0.585
50~60	0.270**	1.053	40~30	0.105**	0.410
40~50	0.289**	1.127	50~40	0.02	0.078
30~40	0.328**	1.279	60~50	0.004	0.016
20~30	0.316**	1.232			
10~20	0.242**	0.944			
0~10	0.191**	0.745			

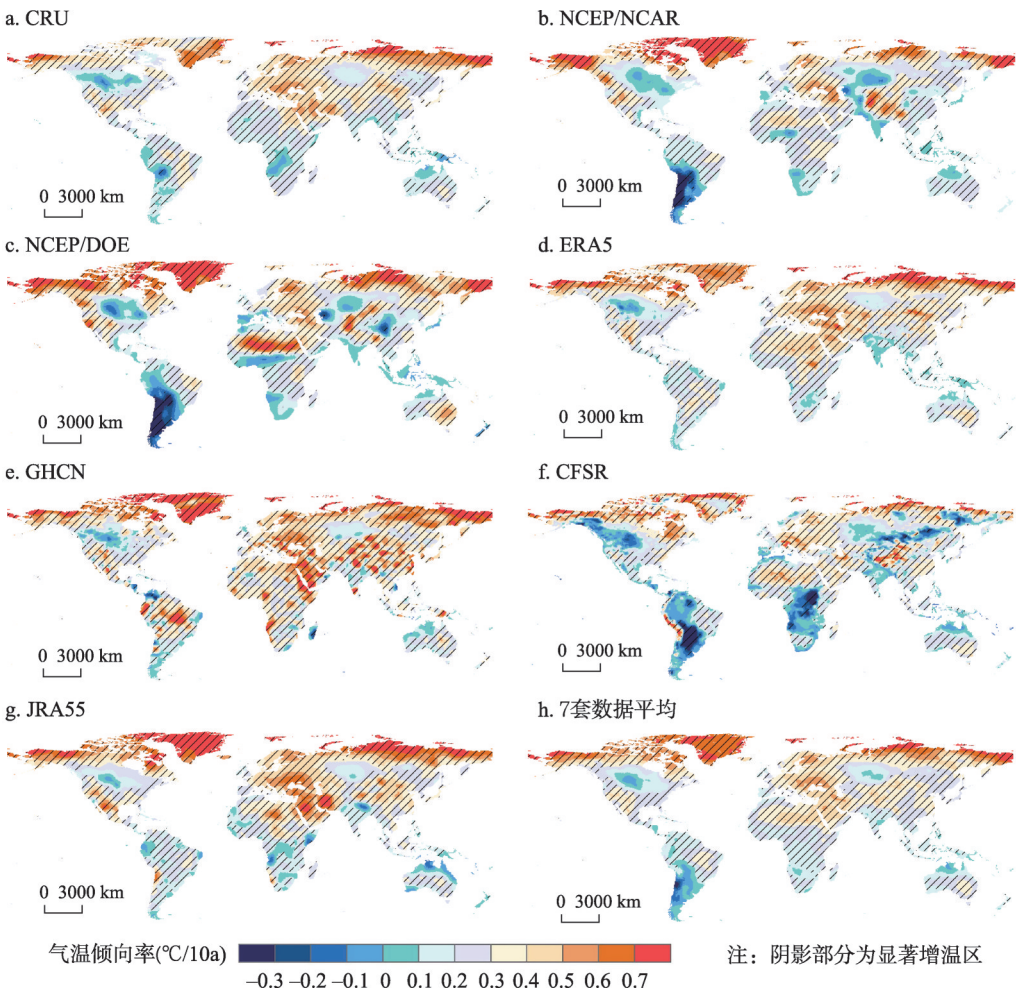


图 3 1981—2019 年全球再分析气温变化速率空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of global reanalysis temperature tendency rate from 1981 to 2019

(NCEP/NCAR)、91.428% (NCEP/DOE)、99.405% (ERA5)、98.324% (GHCN)、85.373% (CFSR)、98.225% (JRA55), 且气温显著升高区域 ($P < 0.05$) 的面积分别占陆地面积比例为 82.543% (CRU)、68.874% (NCEP/NCAR)、67.889% (NCEP/DOE)、

82.373% (ERA5)、83.454% (GHCN)、54.519% (CFSR)、81.043% (JRA55), 说明全球陆地表面气温基本呈增加趋势, 7套数据平均值显示显著增温区达到80%以上。

为了进一步确定全球气温显著增加区的空间分布特征, 本文将7套再分析平均气温的显著增温区进行叠加, 提取重叠区, 进行1981—2019年全球显著增温区的空间描述(图3h)。可以看出, 1981—2019年全球年平均气温显著增加区主要集中分布在北美洲的加拿大东部及北部(0.594 °C/10a)、格陵兰岛部分地区(0.687 °C/10a)、亚洲的俄罗斯东部(0.692 °C/10a)和北部(0.594 °C/10a)、中东地区(0.446 °C/10a)、非洲的北部(0.435 °C/10a)、欧洲南部(0.469 °C/10a)等区域, 括号内的值代表区域的平均值。其中, 俄罗斯东部地区是全球气温升高速率最大的区域。

4.2.3 全球主要国家或地区的年平均气温空间变化特征 为进一步探究全球年平均气温空间变化的差异性, 提取各个国家或地区年平均气温的变化特征。为了保证数据精度, 本文舍弃国土面积较小的国家, 共得到146个国家或地区的气温变化率和气温变化量。结果表明, 1981—2019年146个国家中表现出增温趋势的国家或地区所占比例分别为98.630% (CRU)、97.945% (GHCN)、95.205% (NCEP/NCAR)、91.096% (NCEP/DOE)、100% (ERA5)、95.890% (JRA55)、88.356% (CFSR), 其中呈显著增温趋势的所占比例分别可达95.205% (CRU)、95.890% (GHCN)、84.247% (NCEP/NCAR)、67.808% (NCEP/DOE)、97.260% (ERA5)、87.671% (JRA55)、65.735% (CFSR)。

将7套数据计算结果进行平均, 按平均值计算气温变化率, 然后进行比较(表4)。结果显示, 全球统计的146个国家或地区中, 1981—2019年有136个国家或地区年平均气温呈显著增加趋势($P < 0.05$)占93.151%, 其中, 呈极显著增温($P < 0.01$)国家或地区130个, 比例达89.041%; 气温无显著变化($P > 0.05$)国家比例仅为6.849%; 仅有3个国家气温呈下降趋势(阿根廷、智利和巴拉圭)($P > 0.05$), 占2.055%。全球气温不显著变化或降温变化的国家均位于南半球, 主要分布在南美洲大陆西岸和非洲南部等地, 其它区域气温均呈显著增加趋势。增温最快的地区主要位于40°N以北地区, 气温变化速率超过0.45 °C/10a。其中格陵兰、俄罗斯等高纬度国家和地区增温速率较快, 尤以格陵兰地区增加速率最快, 变化速率为0.654 °C/10a(图4)。增温最慢的地区主要位于新西兰和赤道附近的南美洲、东南亚、非洲南部等地, 气温变化速率不足0.15 °C/10a。

1981—2019年7套数据平均值显示, 年平均气温升高2.0 °C以上的国家或地区有4个; 1.5~2.0 °C的国家有30个; 升高1.0~1.5 °C的国家或地区有34个; 升高0.5~1.0 °C的国家有60个; 升高0~0.5 °C以下的国家或地区有15个; 降温0~1.0 °C国家有3个。即1981—2019年全球增温在1.5 °C以上的国家34个, 增温在1.0 °C以上的国家68个, 分别占统计的国家的23%和47%, 升温1.5 °C以上的国家占1/4, 1.0 °C以上的国家约占50%(表4)。

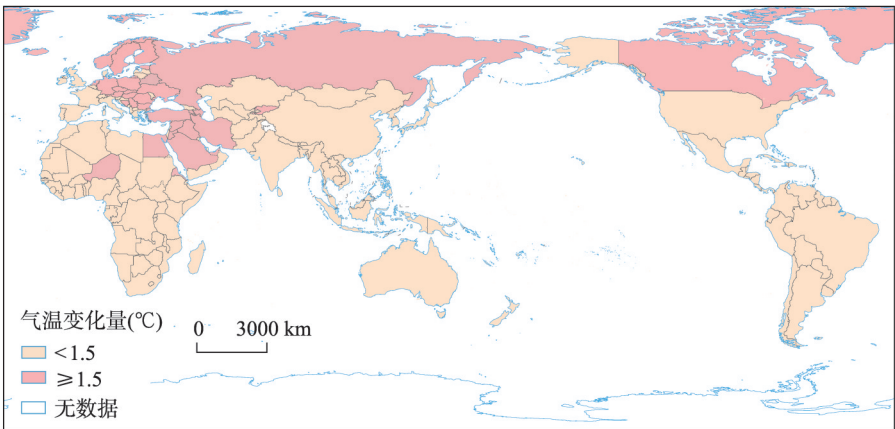
5 讨论

(1) 不同学者采用不同数据源, 分析了不同时段全球气温变化率(表5), 与本文研究结果进行比较。可以看出, 采用的数据源不同, 分析时段不一样, 其结果稍有差异。本文基于7套再分析数据, 得出1981—2019年全球陆地气温年变化速率为0.231~0.403 °C/10a, 与已有研究分析结果相比, 其值略高。分析其原因, 主要是因为研究时段不一样。同样, 比较北半球和南半球陆地气温变化率的研究结果, 出现差异的原因同样是由于研究时段和所采用的数据源不同造成的, 但结果均在合理的范围内。

(2) 图1中7套数据计算全球年平均气温时存在差异, 可能原因如下: 已有的研究认

表 4 1981—2019 年全球主要国家和地区气温变化速率 7 套数据平均值($^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)Tab. 4 Temperature tendency rate of main countries and regions by the average of seven sets of data ($^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)

国家或地区	变化速率	国家或地区	变化速率	国家或地区	变化速率	国家或地区	变化速率
格陵兰	0.654**	克罗地亚	0.365**	西撒哈拉	0.232**	南非	0.169**
乌克兰	0.533**	拉脱维亚	0.363**	缅甸	0.232**	刚果(金)	0.167**
俄罗斯	0.523**	丹麦	0.361**	哈萨克斯坦	0.230*	塞拉利昂	0.167**
罗马尼亚	0.517**	比利时	0.356**	科特迪瓦	0.230**	厄瓜多尔	0.162**
斯洛伐克	0.511**	蒙古	0.330**	中非	0.225**	多米尼加	0.158**
匈牙利	0.504**	苏丹	0.329**	乌干达	0.217**	赞比亚	0.153**
芬兰	0.503**	阿富汗	0.329**	老挝	0.214**	安哥拉	0.150**
塞尔维亚	0.502**	吉布提	0.327**	喀麦隆	0.211**	秘鲁	0.146**
亚美尼亚	0.474**	希腊	0.326**	坦桑尼亚	0.211**	马来西亚	0.146**
波黑	0.473**	黑山	0.323**	印度	0.207**	爱尔兰	0.145*
挪威	0.471**	阿尔及利亚	0.322**	几内亚	0.207**	圭亚那	0.144**
保加利亚	0.459**	不丹	0.320**	加蓬	0.203**	苏里南	0.142**
阿塞拜疆	0.455**	科索沃	0.317**	英国	0.199**	博茨瓦纳	0.142
吉尔吉斯斯坦	0.454**	美国	0.316**	柬埔寨	0.199**	葡萄牙	0.141*
叙利亚	0.453**	乍得	0.309**	泰国	0.197**	津巴布韦	0.132*
土耳其	0.446**	埃塞俄比亚	0.296**	索马里	0.196**	古巴	0.130**
白罗斯	0.444**	中国	0.293**	西班牙	0.193**	哥伦比亚	0.129**
约旦	0.442**	尼泊尔	0.293**	南苏丹	0.192**	斯里兰卡	0.124**
沙特阿拉伯	0.441**	也门	0.288**	马达加斯加	0.192**	印度尼西亚	0.121**
伊朗	0.440**	瑞士	0.278**	纳米比亚	0.191**	孟加拉国	0.121**
波兰	0.435**	土库曼斯坦	0.276**	布隆迪	0.19**	哥斯达黎加	0.115**
伊拉克	0.434**	肯尼亚	0.275**	巴西	0.187**	伯利兹	0.114**
捷克	0.433**	马里	0.275**	摩洛哥	0.187**	菲律宾	0.105**
阿联酋	0.420**	毛里塔尼亚	0.269**	布基纳法索	0.184**	巴拿马	0.104*
冰岛	0.408**	意大利	0.264**	塞内加尔	0.182**	莱索托	0.096
厄立特里亚	0.406**	韩国	0.264**	马拉维	0.181**	巴布亚新几内亚	0.09**
埃及	0.402**	乌兹别克斯坦	0.263**	刚果(布)	0.181**	尼加拉瓜	0.081*
德国	0.402**	巴基斯坦	0.262**	危地马拉	0.180**	新西兰	0.069
瑞典	0.401**	墨西哥	0.262**	尼日利亚	0.180**	洪都拉斯	0.055
加拿大	0.393**	朝鲜	0.262**	越南	0.178**	玻利维亚	0.047
爱沙尼亚	0.390**	法国	0.261**	加纳	0.176**	乌拉圭	0.044
奥地利	0.387**	阿尔巴尼亚	0.253**	利比里亚	0.174**	东帝汶	0.024
荷兰	0.387**	索马里兰	0.250**	几内亚比绍	0.174**	巴拉圭	-0.005
尼日尔	0.386**	塔吉克斯坦	0.249**	莫桑比克	0.174**	阿根廷	-0.022
利比亚	0.381**	阿曼	0.244**	澳大利亚	0.174**	智利	-0.114
立陶宛	0.366**	日本	0.243**	委内瑞拉	0.172**		
格鲁吉亚	0.365**	突尼斯	0.233**	贝宁	0.171**		



注: 基于自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1667号的标准地图制作,底图边界无修改。

图4 1981—2019年全球年平均气温升温1.5 °C以上的国家和地区分布

Fig. 4 Spatial distribution of countries and regions of the warming of 1.5 °C from 1981 to 2019

表5 20世纪80年代以来不同作者研究结果比较
Tab. 5 Comparison of the results of different authors since the 1980s

研究区域	研究时段	研究数据	气温变化速率(°C/10a)	文献来源	研究区域	研究时段	研究数据	气温变化速率(°C/10a)	文献来源
全球	1979—2010	GISS	0.171	[13]	北半球	1979—2015	CMA-LASTv1.0	0.319	[19]
		GHCN	0.175			1979—2014	CMA-LAST	0.305±0.030	[17]
		HadCRUT3v	0.170			1979—2010	CRUTEM4	0.350	[20]
		RSS	0.157			1979—2010	ERA-Interim	0.380	
		UAH	0.141			1981—2019	CRU	0.347	本文
	1979—2015	CMA-LASTv1.0	0.250	[9]			NCEP/NCAR	0.332	
		CRUTEM4.1.1	0.254				NCEP/DOE	0.364	
		GHCN-V3.2.0	0.273				ERA5	0.380	
	1979—2014	CRUTEM4.4.0.0	0.304±0.060	[10]			GHCN	0.439	
	1979—2014	CMA-LAST	0.272±0.025	[9]			CFSR	0.271	
	1979—2010	GISS	0.254±0.049	[11]			JRA55	0.403	
	1979—2010	GHCN	0.273±0.047	[12]			平均	0.362	
	1979—2012	ERA-Interim	0.110	[14]	南半球	1979—2015	CMA-LASTv1.0	0.142	[9]
	1981—2010	MERRA	0.130	[15]		1979—2010	CRUTEM4	0.13	[20]
	1981—2019	CRU	0.310	本文		1979—2010	ERA-Interim	0.12	
		NCEP/NCAR	0.283			1979—2014	CMA-LAST	0.142±0.021	[17]
		NCEP/DOE	0.307			1981—2019	CRU	0.161	本文
		ERA5	0.347				NCEP/NCAR	0.081	
		GHCN	0.403				NCEP/DOE	0.072	
		CFSR	0.231				ERA5	0.211	
		JRA55	0.358				GHCN	0.267	
		平均	0.320				CFSR	0.066	
							JRA55	0.169	
							平均	0.147	

为,再分析资料的精度主要受到三方面误差的影响,包括观测误差、预报误差和同化误差^[21-22]。例如,JRA55数据偏高可能因为采用了耦合气候预报模式和同化系统,同化了观测资料、海冰和气溶胶,且南半球面积小数据覆盖有限^[23]。GHCN与CRU数据是基于全球气象站数据插值得来的,因此相较于ERA5、CFSR、NCEP/DOE和NCEP/NCAR数据结果偏高。NCEP/NCAR是第一代再分析资料,由于在数据同化中没有加入地表变化的信号,因此与NCEP/DOE和ERA5资料相比结果偏低^[24]。

(3) 本文对146个国家或地区1981—2019年的气温变化率及气温变化量进行了分析,遴选出气温显著变化的国家或地区,发现与已有研究中的这些国家同时段气温变化特征相似(表6)。

表6 不同国家气温变化研究结果比较
Tab. 6 Comparative results of different countries

国家	数据来源	研究时段	升温速率(°C/10a)	本文结论(°C/10a)	文献来源
斯洛文尼亚	气象站	1959—2008	0.15~0.36	0.23**	[25]
瑞士	气象站	1959—2008	0.35	0.28**	[26]
尼日利亚	CRU	1901—2000	0.03	-0.002	[27]
日本	气象站	1979—2013	0.29	0.35**	[28]
加拿大	气象站	1953—2005	1.2	1.29**	[29]
印度	气象站	1941—1999	0.42	0.57*	[30]
韩国	气象站	1960—2010	0.2	0.22**	[31]
沙特阿拉伯	气象站	1979—2009	0.51	0.407**	[32]
中亚	气象站	1979—2011	0.41	0.364**	[33]
柬埔寨	气象站	1951—2001	0.23	0.147**	[34]
亚美尼亚	气象站	1961—2014	0.18	0.19**	[35]
中国	气象站	1951—2010	0.21±0.02	0.22**	[36]
	气象站	1998—2012	-0.221	-0.192	[37]

(4) 1981—2019年全球增温速度最快的国家或地区主要位于北半球高纬度地区。而在南半球,年平均气温增加速率随纬度增加而减小,在30°S~60°S,NCEP/NCAR和NCEP/DOE资料显示出年平均气温的下降趋势。关于北极变暖的原因,主要体现在局地反馈和向极热输送两方面^[38]。海冰减少导致区域反照率下降,海洋表面向大气释放更多的热量使得近地面气温增加,形成了海冰—反照率的正反馈机制^[39];海冰变薄对北极气温升高,贡献率高达37%^[40];云和水汽的增多导致长波辐射增加使得北极变暖加剧^[41];太平洋年代际振荡和大西洋年代际振荡也是导致北极地区变暖的重要因子^[42]。另外,极涡减弱、西伯利亚高压中心北移导致南风增强和暖空气向极输送也是主要原因^[43-44]。

1981—2019年全球年平均气温下降速率最快的国家和地区位于30°S~60°S南美洲西部和南部,如智利、阿根廷、巴拉圭等地。这与Falvey等^[45]得出的1979—2006年南美洲东南太平洋沿岸地区降温速率为0.2 °C/10a的结论基本一致。这种变化归因于太平洋年代内振荡以及东南太平洋反气旋的强度加强有关^[46-47];此外,太平洋东南沿海地区上升流补偿流加强,导致海表温度下降和近海岸国家气温降低^[48]。

(5) 在全球变暖被普遍关注和认可的同时,也有的学者提出全球年平均表面温度上升趋势自1998年以来显示出停滞状态,即变暖趋缓(Hiatus)现象^[49],引起了国际社会的广泛关注。但这个结论也受到了学者的质疑^[50-51],认为全球变暖的长期变化趋势没有完全停滞,并且全球平均表面温度在2014年和2015年连续两次创下历史新高。本文对1901—2019年全球年平均气温进行突变检验分析,结果表明,1901—2019年正序曲线

UF与反序曲线UB虽然在1998年前后有交点,但未在95%水平置信度区间内,所以1998年不是气温突变点(图5)。目前已有研究认为1998年以来显示出停滞状态主要是指1998—2012年,本文也进一步分析了1998—2012年的气温变化特征,认为1998—2012年全球陆地气温变化速率为 $0.207\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,为不显著增温趋势($P > 0.05$)。但是如果把时间段延长到2019年,1998—2019年全球陆地气温变化速率为 $0.279\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,为显著增温趋势($P < 0.05$),是百年来增温速率最快的时段。因此,可以判断,1998—2012年全球气温没有升高,是由于统计时段内气温分布产生的统计结果,如果时段延长到2019年,1998—2019年气温仍为显著升高趋势。因此,本文认为1998年以来全球并没有出现气温变暖停滞。

此外,由于本文所用7套数据的空间分辨率不同,因此在数据重采样过程中会造成一定的误差。在数据矢量化过程中会出现图形纠正、边界跟踪误差;在图层裁切、拼接等过程中也会出现误差。因此,在数据提取中,也会进一步影响气温变化率的准确性。

6 结论

(1) 1981—2019年全球陆地年平均气温变化速率为 $0.320\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,呈极显著升高趋势,年平均气温增加了 $0.835\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。南、北半球年平均气温变化速率为 $0.147\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.362\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,均呈极显著增加趋势,分别增加了 $0.874\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.828\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。北半球各纬度年平均气温增加速率均大于南半球相应纬度。全球升高速率最大的区域位于 $80^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$,气温升高速率平均为 $0.707\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,其次是 $70^{\circ}\text{N}\sim 80^{\circ}\text{N}$ 、 $60^{\circ}\text{N}\sim 70^{\circ}\text{N}$ 。本文认为1998年以来全球并没有出现气温变暖停滞的现象。

(2) 1981—2019年近97%的全球陆地表面具有增温趋势,其中80%陆地表面为显著增温趋势。显著增温区主要集中分布在北美洲的加拿大东部及北部、格陵兰岛部分地区、亚洲的俄罗斯东部和北部、中东地区、非洲的北部、欧洲南部大部分地区等区域。

(3) 1981—2019年,统计的146个国家或地区中,136个国家或地区年平均气温呈显著增加趋势,占93.151%;10个气温无显著变化国家或地区比例占6.849%,其中仅有3个国家气温呈下降趋势,占2.055%。年平均气温升高 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的国家共有34个,约占23.288%;升高 1.0°C 以上的国家共68个,约占46.575%;升高 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的国家共128个,约占87.671%。

参考文献(References)

- [1] Zheng Jingyun, Liu Yang, Wu Maowei, et al. Evidences and regional differences on multi-scales in Medieval Climate Anomaly over China. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(7): 1281-1291. [郑景云, 刘洋, 吴茂伟, 等. 中国中世纪气候异常期温度的多尺度变化特征及区域差异. *地理学报*, 2019, 74(7): 1281-1291.]
- [2] Jin Kai, Wang Fei, Han Jianqiao, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982-2015. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(5): 961-974. [金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015年中国气候变化和人类活动对植被NDVI变化的影响. *地理学报*, 2020, 75(5): 961-974.]

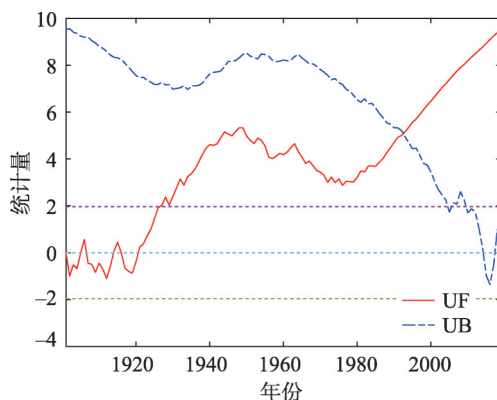


图5 1901—2019年全球平均气温
Mann-Kendall突变检验结果

Fig. 5 Mann-Kendall mutation tests from 1901 to 2019

- [3] Pontes-da-Silva E, Magnusson W E, Sinervo B, et al. Extinction risks forced by climatic change and intraspecific variation in the thermal physiology of a tropical lizard. *Journal of Thermal Biology*, 2018, 73: 50-60.
- [4] Sequeira T N, Santos M S, Magalhães M. Climate change and economic growth: A heterogeneous panel data approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(23): 22725-22735.
- [5] Rossati A. Global warming and its health impact. *The International Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 2017, 8(1): 7-20.
- [6] Zhang Wenxia, Liu Puxing, Feng Qingrong, et al. Spatial and temporal response and its causes of the growing season of *Populus Euphratica* to global warming in China's oases during 1960-2015. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(7): 1151-1162. [张文霞, 刘普幸, 冯青荣, 等. 1960—2015年中国绿洲胡杨生长季对全球变暖的时空响应及原因. *地理学报*, 2017, 72(7): 1151-1162.]
- [7] IPCC AR5 WGI. *Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2013.
- [8] IPCC. *Special Report on Global Warming of 1.5°C*. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- [9] Sun Xiubao. Global land surface air temperature changes over the last century based on the new CMA-LSAT v1.0 dataset [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2018. [孙秀宝. 基于CMA-LSAT v1.0数据集的近百年全球陆表气温变化研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.]
- [10] Wang J F, Xu C D, Hu M G, et al. Global land surface air temperature dynamics since 1880. *International Journal of Climatology*, 2017, 38: E466-E474.
- [11] Hansen J, Ruedy R, Sato M, et al. Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics*, 2010, 48(4): RG4004. DOI: 10.1029/2010RG000345.
- [12] Lawrimore J H, Menne M J, Gleason B E, et al. An overview of the global historical climatology network monthly mean temperature dataset, version 3. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116: D19121. DOI: 10.1029/2011JD016187.
- [13] Foster G, Rahmstorf S. Global temperature evolution 1979-2010. *Environmental Research Letters*, 2011, 6(4): 044022. DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/044022.
- [14] Kim S J, Choi H S, Kim B M, et al. Analysis of recent climate change over the Arctic using ERA-Interim reanalysis data. *Advances in Polar Science*, 2013, 24: 326-338.
- [15] Chu Duo, Yang Yong, Luobu Jianshen, et al. Applicability analysis of MERRA surface air temperature over the Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology*, 2016, 35(2): 337-350. [除多, 杨勇, 罗布坚参, 等. MERRA再分析地面气温产品在青藏高原的适用性分析. *高原气象*, 2016, 35(2): 337-350.]
- [16] Morello L, Abbott A, Butler D, et al. 365 days: 2014 in science. *Nature*, 2014, 516(7531): 300-303.
- [17] Xu W H, Li Q X, Jones P, et al. A new integrated and homogenized global monthly land surface air temperature dataset for the period since 1900. *Climate Dynamics*, 2018, 50(7): 2513-2536.
- [18] Screen J A. Arctic amplification decreases temperature variance in northern mid- to high-latitudes. *Nature Climate Change*, 2014, 4(7): 577-582.
- [19] Wei Fengying. *Modern Climate Statistical Diagnosis and Forecasting Technology*. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007. [魏凤英. *现代气候统计诊断与预测技术*. 2版. 北京: 气象出版社, 2007.]
- [20] Jones P D, Lister D H, Osborn T J, et al. Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2012, 117(D5). DOI: 10.1029/2011jd017139.
- [21] Dee D P, Balmaseda M, Balsamo G, et al. Toward a consistent reanalysis of the climate system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95(8): 1235-1248.
- [22] Parker W S. Reanalyses and observations: What's the difference? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016, 97(9): 1565-1572.
- [23] Kobayashi S, Ota Y, Harada Y, et al. The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2015, 93(1): 5-48.
- [24] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1999-2049.
- [25] De Luis M, Čufar K, Saz M A, et al. Trends in seasonal precipitation and temperature in Slovenia during 1951-2007. *Regional Environmental Change*, 2014, 14(5): 1801-1810.
- [26] Ceppi P, Scherrer S C, Fischer A M, et al. Revisiting Swiss temperature trends 1959-2008. *International Journal of*

- Climatology, 2012, 32(2): 203-213.
- [27] Oguntunde P G, Abiodun B J, Lischeid G. Spatial and temporal temperature trends in Nigeria, 1901-2000. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2012, 118(1/2): 95-105.
- [28] Fujibe F. Relationship between interannual variations of extreme hourly precipitation and air/sea-surface temperature in Japan. *SOLA*, 2015, 11: 5-9.
- [29] Vincent L A, Van Wijngaarden W A, Hopkinson R. Surface temperature and humidity trends in Canada for 1953-2005. *Journal of Climate*, 2007, 20(20): 5100-5113.
- [30] Arora, Goel, Singh. Evaluation of temperature trends over India. *Hydrological Sciences Journal*, 2005, 50(1): 81-93.
- [31] Kim H S, Chung Y S, Tans P P, et al. Climatological variability of air temperature and precipitation observed in South Korea for the last 50 years. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2016, 9(6): 645-651.
- [32] Almazroui M, Islam M N, Athar H, et al. Recent climate change in the Arabian Peninsula: Annual rainfall and temperature analysis of Saudi Arabia for 1978-2009. *Atmospheric Research*, 2012, 111(32): 29-45.
- [33] Hu Z Y, Zhang C, Hu Q, et al. Temperature changes in central Asia from 1979 to 2011 based on multiple datasets. *Journal of Climate*, 2014, 27(3): 1143-1167.
- [34] Thoeun H C. Observed and projected changes in temperature and rainfall in Cambodia. *Weather and Climate Extremes*, 2015, 7: 61-71.
- [35] Gevorgyan A, Melkonyan H, Aleksanyan T, et al. An assessment of observed and projected temperature changes in Armenia. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9(1): 27. DOI: 10.1007/s12517-015-2167-y.
- [36] Ge Q S, Wang F, Luterbacher J. Improved estimation of average warming trend of China from 1951-2010 based on satellite observed land-use data. *Climatic Change*, 2013, 121(2): 365-379.
- [37] Du Qinqin, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Changes in air temperature of China in response to global warming hiatus. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(9): 1748-1764. [杜勤勤, 张明军, 王圣杰, 等. 中国气温变化对全球变暖停滞的响应. *地理学报*, 2018, 73(9): 1748-1764.]
- [38] Wu Fengmin, Li Wenkai, Li Wei. Causes of arctic amplification: A review. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(3): 232-242. [武丰民, 李文铠, 李伟. 北极放大效应原因的研究进展. *地球科学进展*, 2019, 34(3): 232-242.]
- [39] Bushuk M, Msadek R, Winton M, et al. Summer enhancement of Arctic Sea ice volume anomalies in the september-ice zone. *Journal of Climate*, 2017, 30(7): 2341-2362.
- [40] Lang A, Yang S, Kaas E. Sea ice thickness and recent Arctic warming. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(1): 409-418.
- [41] Liu Y H, Key J R. Less winter cloud aids summer 2013 Arctic sea ice return from 2012 minimum. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(4): 044002. DOI: 10.1088/1748-9326/9/4/044002.
- [42] Tokinaga H, Xie S, Mukougawa H. Early 20th-century Arctic warming intensified by Pacific and Atlantic multidecadal variability. *PNAS*, 2017, 114(24): 6227-6232.
- [43] Feng C, Wu B Y. Enhancement of winter arctic warming by the siberian high over the past decade. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2015, 8(5): 257-263.
- [44] Overland J E, Wang M. Recent extreme arctic temperatures are due to a split polar vortex. *Journal of Climate*, 2016, 29(15): 5609-5616.
- [45] Falvey M, Garreaud R D. Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979-2006). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114: 217-221.
- [46] Burger F, Brock B, Montecinos A. Seasonal and elevational contrasts in temperature trends in Central Chile between 1979 and 2015. *Global and Planetary Change*, 2018, 162: 136-147.
- [47] Vuille M, Franquist E, Garreaud R, et al. Impact of the global warming hiatus on Andean temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(9): 3745-3757.
- [48] Schneider W, Donoso D, Garcés-Vargas J, et al. Water-column cooling and sea surface salinity increase in the upwelling region off central-south Chile driven by a poleward displacement of the South Pacific High. *Progress in Oceanography*, 2017, 151: 38-48.
- [49] Medhaug I, Stolpe M B, Fischer E M, et al. Reconciling controversies about the "global warming hiatus". *Nature*, 2017, 545(7652): 41-47.
- [50] Mudelsee M. Trend analysis of climate time series: A review of methods. *Earth-Science Reviews*, 2018, 190: 310-322.
- [51] Aaron-Morrison A P, Ackerman S A, Adams N G, et al. State of the climate in 2014. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, 96(7): S1-S267.

Changes in global air temperature from 1981 to 2019

SHEN Beibei¹, SONG Shuaifeng², ZHANG Lijuan¹, WANG Ziqing²,
REN Chong¹, LI Yongsheng^{3,4}

(1. Heilongjiang Province Key Laboratory of Geographical Environment Monitoring and Spatial Information Service in Cold Regions, Harbin Normal University, Harbin 150025, China; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Heilongjiang Climate Center, Harbin 150030, China; 4. Heilongjiang Longyun Meteorological Information Technology Co., Ltd. Academician Workstation, Harbin 150030, China)

Abstract: The determination of temperature changes in major countries since the 1980s is a key scientific method to reveal the spatial difference of global temperature change and to achieve a common global climate change. Based on seven sets of reanalysis data, this paper analyzed the spatio-temporal characteristics of global temperature change and the temperature change of major countries from 1981 to 2019 by using climate tendency rate and spatial interpolation. The results revealed that the global land air temperature in the study period varied at a rate of $0.320\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, exhibiting a significant increasing trend, with a cumulative increase of $0.835\text{ }^{\circ}\text{C}$. The mean annual land air temperature in the northern and southern hemispheres varied respectively at rates of $0.362\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ and $0.147\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, displaying significant increasing trends, with cumulative increases of $0.828\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $0.874\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively. The global land surface air temperature displayed an increasing trend, with more than 80% of the land surfaces showing a significant temperature increase. Across the globe, the change rates of annual mean air temperature were higher at high latitudes than at middle and low latitudes, with the highest change rates in regions at latitudes of 80°N - 90°N , followed by the second-highest rates in regions from 70°N - 80°N , and the third-highest rates from 60°N - 70°N . Greenland, Ukraine, and Russia had the highest increase rates of annual mean air temperature, especially Greenland, which experienced a temperature tendency rate of $0.654\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$. The regions with the lowest increase rates of annual mean air temperature were mainly in New Zealand and areas on or near the equator including South America, Southeast Asia and Southern Africa, where the temperature tendency rates were $< 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$. Among the 146 countries surveyed in this paper, 136 countries (93%) showed a significant warming trend, 10 (6.849%) had no significant change in temperature, and only 3 countries showed a downward trend. Among them, since the 1980s, there are 4, 34, and 68 countries with global warming above $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, and $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively, accounting for 2.740%, 23.288% and 46.575% of the countries concerned in this study. This paper held that there had been no global warming hiatus since 1998.

Keywords: global air temperature changes; local space; major countries; since the 1980s