

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.12.012

# 2001—2100 年中国温度变化趋势及时空差异研究

张计深<sup>1</sup>, 陈笑蝶<sup>1</sup>, 彭守璋<sup>2</sup>

1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100

**摘要:** 在气候变暖的大环境下, 研究未来时期温度变化可为区域应对气候变暖带来的不利影响提供依据。基于长时间序列 1 km 温度数据集, 采用突变与趋势分析方法, 揭示了 2001—2020 年与 2021—2100 年中国地区年均温时空格局、突变年份以及变化趋势特征。结果表明: ① 相比 2001—2020 年, 2021—2100 年中国年均温呈现上升趋势, 中国东北部、中部以及西北部年均温增幅比其他区域更为明显, 且共享社会经济路径中等强迫情景(SSP245)和高强迫情景(SSP585)下年均温增幅均随时间推移而升高, 而在共享社会经济路径低强迫情景(SSP119)下年均温表现出先升高后降低的趋势。② 2001—2020 年, 年均温在 2010 年左右发生显著突变, 集中在中国东北部、西南部和东南部, 面积占比为 48.6%; 2021—2100 年, SSP119 情景下年均温在 2040 年左右发生显著突变, 分布在除中国南部部分地区外的区域, 面积占比为 85.9%, 而在 SSP245 和 SSP585 情景下, 年均温在中国大部分地区分别在 2050 年和 2075 年前后发生显著突变。③ 2001—2020 年, 年均温以 0.02~0.50 °C/10 a 的速率呈显著上升趋势, 面积占比为 6.5%; 在年均温突变之前与之后时期, 其以 0.41~1.71 °C/10 a 与 0.03~1.81 °C/10 a 的速率显著上升, 面积占比分别为 9.7%和 15.4%。2021—2100 年, SSP119 情景下年均温以 0.02~0.08 °C/10 a 的速率显著上升, 面积占比为 21.3%, 其余两种 SSP 情景下年均温在整个中国分别以 0.17~0.38, 0.39~0.86 °C/10 a 的速率显著上升; 在年均温突变之前与之后时期, SSP119 情景下分别以 0.03~1.74, 0.02~0.62 °C/10 a 的速率显著上升与下降, 面积占比分别为 70.9%和 62.2%; 而在 SSP245 和 SSP585 情景下年均温突变前后时期, 中国大部分地区年均温均呈显著上升趋势。

**关键词:** 温度; 突变分析; 趋势分析; 共享社会经济路径情景;

中国

中图分类号: P467

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2022)12-0112-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Trend and Spatiotemporal Differences of Annual Mean Temperature in China from 2001 to 2100

ZHANG Jishen<sup>1</sup>, CHEN Xiaodie<sup>1</sup>, PENG Shouzhang<sup>2</sup>

1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A &amp; F University, Yangling Shaanxi 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Northwest A &amp; F University, Yangling Shaanxi 712100, China

**Abstract:** Climate warming has become an indisputable fact, and investigating future temperature change

收稿日期: 2021-12-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077451); 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2020BCFO1001); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2022QZKK0101)。

作者简介: 张计深, 硕士研究生, 主要从事事气候变化与植被生态研究。

通信作者: 彭守璋, 研究员, 博士研究生导师。

could provide a basis for coping to adverse effect of climate warming. Based on the 1 km resolution temperature dataset with long time series, this study revealed spatiotemporal pattern, mutational year, and trend variations of annual mean temperature (AMT) in China during the current (2001—2020) and future (2021—2100) periods by using abrupt change and trend analysis methods. The results show that: ① The annual mean temperature in China will show an increasing trend in the future period compared with the current period, and the annual mean temperature in northeastern, central and northwestern China will increase more significantly than in other regions, and the annual mean temperature increases over the time in both SSP245 and SSP585 scenarios, while the annual mean temperature in SSP119 scenario will increase first and then decrease. ② During 2001—2020, there was a significant abrupt change in AMT around year 2010, concentrated in the northeast, southwest, and southeast of China with 48.6% of the total area. During 2021—2100, under the SSP119 scenario, the AMT will have a significant abrupt around 2040, which will be distributed in areas other than parts of southern China, accounting for 85.9%, while it will have a significant abrupt change around 2050 and 2075, respectively, over entire China under SSP245 and SSP585 scenarios. ③ During 2001—2020, AMT showed a significant upward trend with an increase of 0.02—0.50 °C/10 a in 6.5% area of China. In the period before and after abrupt change of AMT, it significantly increased at 0.41—1.71 °C/10 a and 0.03—1.81 °C/10 a in 9.7% and 18.4% of area, respectively. During 2021—2100, AMT will significantly increase with 0.02—0.08 °C/10 a under SSP119 scenario and accounting for 21.3%, while AMT under SSP245 and SSP585 scenarios will significantly increase over entire China with 0.17—0.38 °C/10 a and 0.39—0.86 °C/10 a, respectively. In the period before and after abrupt change of AMT, under SSP119 scenario it will significantly increase and decrease with 0.03—1.74 °C/10 a and 0.02—0.62 °C/10 a, accounting for an area proportion of 70.9% and 62.2%, respectively, while under SSP245 and SSP585 scenarios it will show a significantly increasing trend in most parts of China. These results can provide a scientific basis for China to formulate policies coping to the adverse effects of climate warming.

**Key words:** temperature; mutation analysis; trend analysis; SSP scenarios; China

政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次评估报告指出,过去 130 年全球升温 0.85 °C<sup>[1]</sup>. 全球气候变暖已改变各地气候场,影响了大气运行规律,使各地蒸发量和降水量时空分布发生了显著改变<sup>[2-3]</sup>,造成旱涝灾害频次与强度增加<sup>[4]</sup>、荒漠化趋势增强<sup>[5]</sup>、生物多样性下降<sup>[6]</sup>、区域粮食危机加剧<sup>[7]</sup>等不利影响,并且随着气候变化的持续推进,未来时期全球温度将继续升高<sup>[1]</sup>. 因而在不同区域开展未来时期温度变化规律研究非常重要. 中国地区地域辽阔,地形复杂多变,温度变化对地形依赖性较高<sup>[2]</sup>,使得温度具有很强的空间异质性,因此很有必要在小地理尺度上开展中国地区温度变化研究.

目前温度变化研究多采用气象站点数据与大尺度网格数据. 气象站点数据多用于历史时期温度变化研究,如 Wang<sup>[8]</sup>基于青藏高原东南部 14 个气象站 1961—2012 年的月平均气温资料,采用 Mann-Kendall 趋势检验法,研究了青藏高原东南部地区平均气温季节和年趋势的时空变化;刘凯等<sup>[9]</sup>基于 699 个气象站数据,采用 Mann-Kendall 趋势检验法、小波分析、极端气温指数方法分析了中国 1951—2018 年逐日温度变化规律. 这些研究以较少气象站点表征整个研究区的气候,忽略了温度在小地理尺度上的变化特征. 而大尺度网格数据多来自于大气环流模式(General Circulation Model, GCM)的输出,且常用于未来气候变化研究,如 Ouyang 等<sup>[10]</sup>基于 >100 km 分辨率的 9 组 GCMs 数据,评估了中国中高纬度地区多种气候情景下地表温度的变化趋势;Ma 等<sup>[11]</sup>基于 >100 km 分辨率的 4 组 GCMs 数据,探讨了不同排放情景下湘江流域温度与降水的变化趋势. GCM 数据广泛用于未来时期气候研究,但其空间分辨率较低,无法刻画地形地貌对区域气候的影响<sup>[12]</sup>,且已有研究多采用 IPCC 第五次报告中的典型浓度路径(Representative Concentration Pathways, RCP)情景<sup>[13]</sup>,而未采用 IPCC 第六次报告中的共享社会经济路径(Shared Socioeconomic Pathways, SSPs)情景. 这些因素限制了在小地理尺度上对未来时期中国地区温度变化规律探讨的准确性.

近几年一些研究尝试采用空间降尺度方案建立长时间序列高空间分辨率气候数据集,并开展小地理尺度区域气候变化研究. 如 Peng 等<sup>[14]</sup>利用空间降尺度方法对英国东英格利亚大学气候研究所(Climatic Research Unit, CRU)发布的气候数据进行降尺度生成了中国 1 km 分辨率气候数据集,分析了历史时期中国气候变化

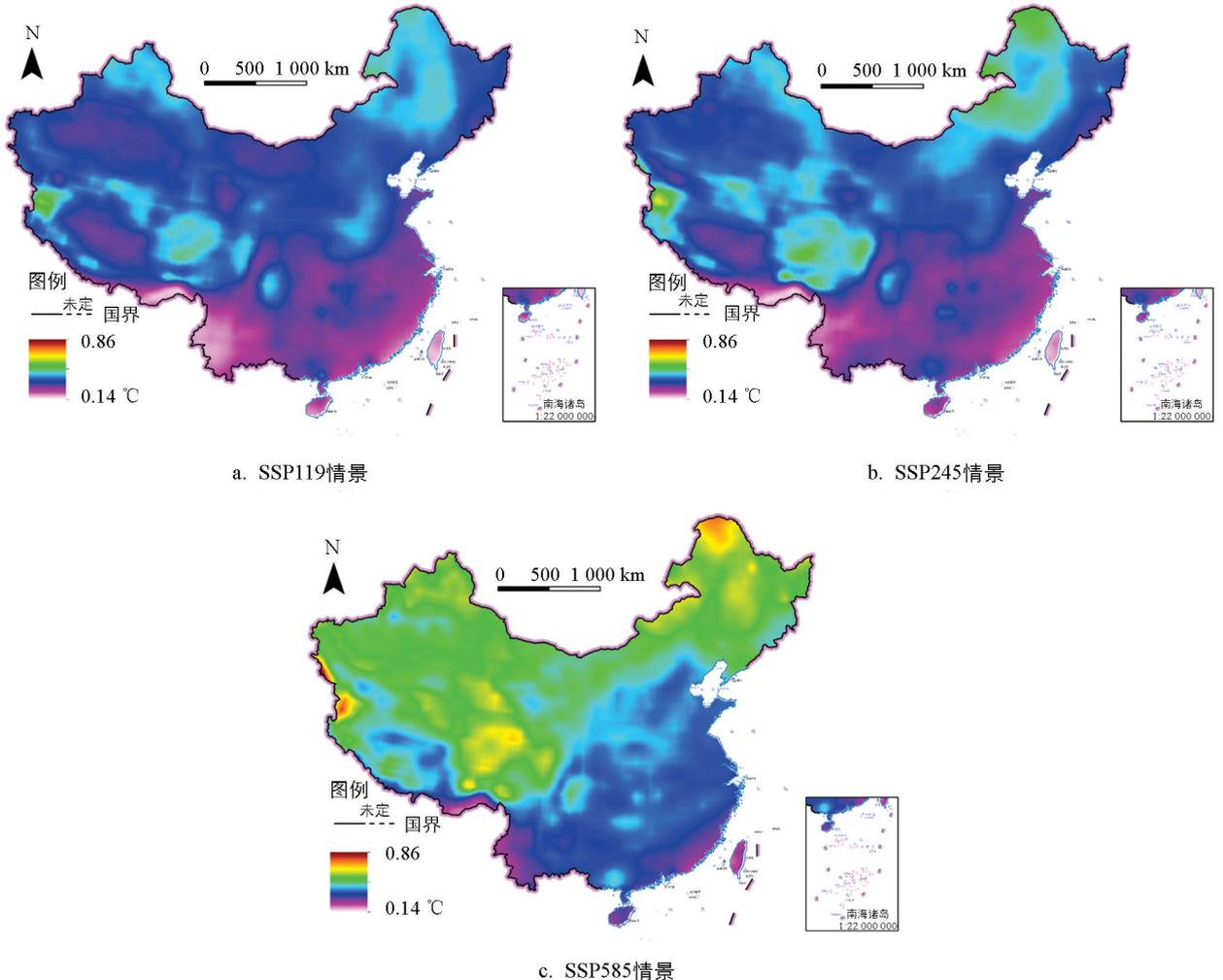
规律;赵芳芳等<sup>[15]</sup>对黄河源区的日降水量、日最高和最低气温进行了空间降尺度处理,并分析了该区未来气候变化特征.可见,采用空间降尺度数据探讨小地理尺度上详细的气候变化规律已成为一种可行方案.

基于上述,本研究拟基于长时间序列空间降尺度的气候数据集,利用分段线性回归方法、趋势分析法,探讨研究 2001—2020 年与 2021—2100 年中国地区年均温的时空格局、突变年份以及变化趋势特征,以期为我国应对气候变暖带来的负面影响提供科学依据.

## 1 数据收集与方法

### 1.1 数据收集

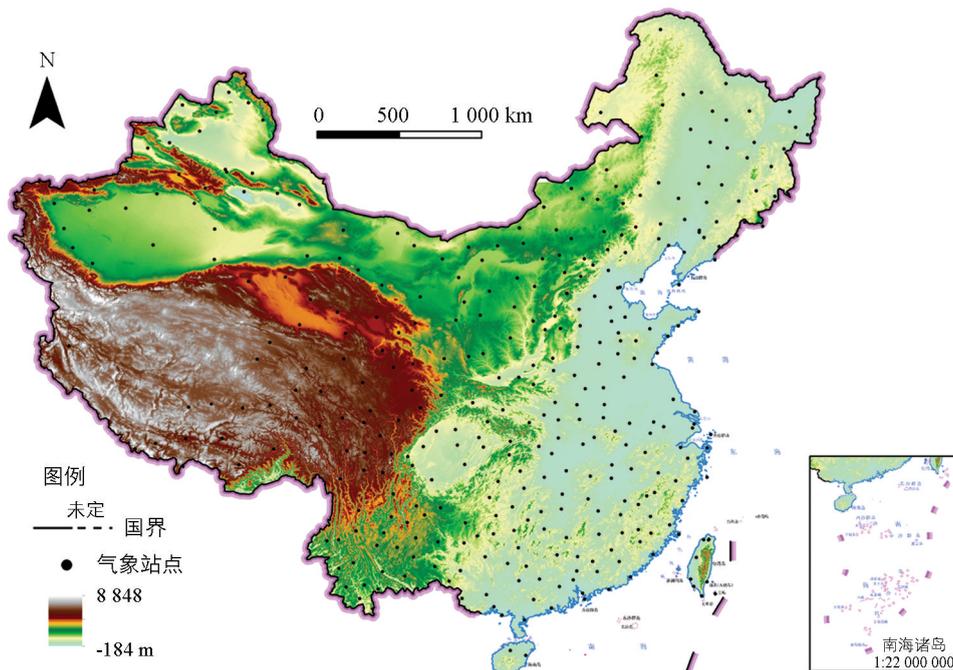
中国地区逐月温度数据来自于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>),空间分辨率为  $0.008\ 333\ 3^{\circ}$ (约 1 km),时间为 2001 年 1 月—2100 年 12 月.2001—2020 年与 2021—2100 年数据分别基于 CRU 发布的全球 55 km 气候数据集和 IPCC 耦合模式比较计划第六阶段(CMIP6)发布的全球  $>100\ km$  气候数据集,利用空间降尺度方法生成,相应的空间降尺度方法已在 Peng 等<sup>[14]</sup>研究中描述.2021—2100 年数据采用 IPCC 最新发布的 3 组 SSP 情景,其中 SSP119 属于低强迫情景,到 2100 年辐射强迫稳定在  $1.9\ W/m^2$  左右,该情景可为全球增暖  $1.5\ ^{\circ}C$  研究提供模式数据;SSP245 属于中等强迫情景,代表了中等社会脆弱性与中等辐射强迫的组合,到 2100 年辐射强迫稳定在  $4.5\ W/m^2$  左右;SSP585 属于高强迫情景,到 2100 年辐射强迫稳定在  $8.5\ W/m^2$  左右,且每个情景下包含 3 个 GCMs(EC-Earth3, GFDL-ESM4, MRI-ESM2-0)的温度数据.本研究将对未来时期每组情景下的 3 个 GCMs 的降尺度温度数据进行平均,以此作为基础分析数据.各情景下 3 个 GCMs 多年均温的标准误在图 1 给出.



审图号: GS(2020)4630 号.

图 1 2021—2100 年模式间多年均温标准误空间分布

中国 361 个气象站点 2001—2020 年年平均温度数据作为评价数据(图 2), 对基于 CRU 降尺度数据的年均温时空格局、突变年份及变化趋势结果进行验证、评价, 气象观测数据来源于国家科学气象数据中心 (<http://data.cma.cn>).



审图号: GS(2020)4630 号.

图 2 中国海拔及气象站点分布

## 1.2 突变检测

本研究使用分段线性回归方法检测年均温的突变年份. 分段回归模型<sup>[16]</sup>是“折线”模型, 其中两条线在未知点连接, 称为“断点”, 表示年份. 该方法首先将年均温分成两个时间段, 然后在每个栅格上通过遍历所有年份, 分两段对年份前后温度数据进行线性拟合, 不同年份前后线性拟合获得的残差之和不同, 以两组拟合残差之和最小为判断依据, 识别突变年份并采用  $t$  检验判断突变是否有统计学意义<sup>[17]</sup>, 同时预定有统计学意义年份前后最短时段大于 2 a,  $p$  值是  $t$  检验的显著性值, 表征分段函数的总体拟合效果. 当两段拟合都有统计学意义时突变检测有意义, 即  $t$  检验的显著性值  $p$  都小于 0.05 时, 拒绝原假设, 认为在该年份发生显著性突变. 分段回归模型可以检测出转折最明显的点, 确定最有意义的突变年份. 其公式如下<sup>[18]</sup>:

$$T = \begin{cases} a_0 + b_0 \text{year} + \varepsilon_0 & (\text{year} \leq \alpha) \\ a_1 + b_1 \text{year} + \varepsilon_1 & (\text{year} > \alpha) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $T$  为年均温;  $\text{year}$  为年份;  $\alpha$  为年均温时间序列的转折年份;  $a_0, b_0, a_1, b_1$  为回归系数;  $\varepsilon_0, \varepsilon_1$  为拟合残差. 通过检测研究区每个栅格上年均温的突变年份及其显著性(即是否有统计学意义), 可分析不同区域上年均温突变的差异性.

## 1.3 趋势分析

本研究采用 Mann-Kendall 趋势检验法和泰尔-森估算法(Sen's 斜率估计法)逐网格计算 2001—2020 年和 2021—2100 年温度的变化趋势显著性及量值, 并根据温度突变年份分别将 2001—2020 年和 2021—2100 年划分为突变前和突变后两个时期计算温度的变化趋势显著性及量值. Mann-Kendall 趋势检验法<sup>[19-20]</sup>是用来评估气候、水文等要素时间序列趋势的非参数检验方法, 采用统计量  $Z$  检验时间序列变化趋势的显著

性,本研究以统计量  $Z$  通过 95% 的置信水平(即  $|Z| > 1.96$ )为趋势有统计学意义,  $Z > 1.96$  表示显著增加,  $Z < -1.96$  表示显著减少. Sen's 斜率估计法<sup>[21]</sup>是一种非参数趋势斜率计算方法,不受序列奇异值的影响,可以计算出序列趋势的变化量值.

#### 1.4 降尺度数据评估

本研究使用皮尔逊相关系数( $r$ ),在单个气象站点上评估观测数据与 CRU 降尺度数据的相关性,以此验证年均温的时空格局.计算公式如下:

$$r = \frac{Cov(O, P)}{\sqrt{SD_O \cdot SD_P}} \quad (2)$$

式中:  $Cov(O, P)$  为观测数据与降尺度数据的协方差;  $SD_O$  与  $SD_P$  分别为观测数据与降尺度数据的方差.

对 361 个气象站点的年均温取平均值,计算 2001—2020 年基于气象站点数据的温度转折年份和趋势,以此评价降尺度数据的总体结果.

## 2 结果分析

### 2.1 2001—2020 年年均温时空格局、突变年份及趋势结果评估

2001—2020 年 361 个气象站点年均温与 CRU 降尺度数据的回归分析表明,降尺度数据与观测值具有较好的线性关系,相关系数为 0.991(图 3),即 CRU 降尺度数据可以较好地表征中国年均温的时空格局.降尺度数据的年均温趋势及突变年份与基于气象站观测数据结果的对比表明,观测数据的总体、突变前后的趋势分别为 0.324, 0.322, 0.918 °C/10 a, 降尺度数据结果与其接近,分别为 0.273, 0.280, 0.863 °C/10 a, 且两者的温度突变年份均为 2009 年(图 4),即降尺度数据可以较为准确地表征中国年均温的变化特征.

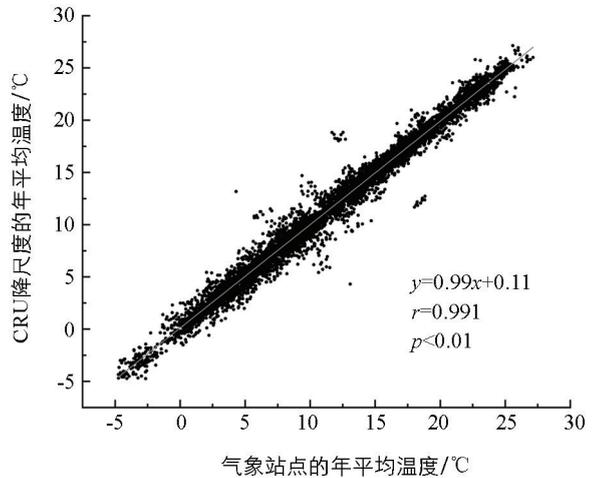


图 3 2001—2020 年年均温观测值与 CRU 降尺度值的散点图

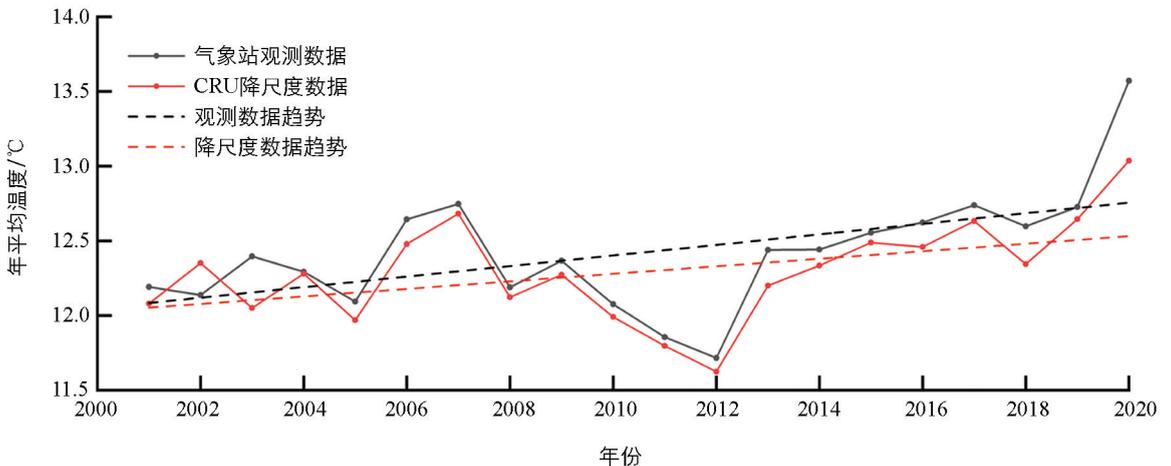


图 4 2001—2020 年基于降尺度数据的年均温突变年份及趋势与基于气象站观测数据结果的比较

### 2.2 当前与未来时期温度时空格局

整个中国地区的年均温(图 5)在 2001—2020 年呈现“上升—下降—上升”式的波动;在 2021—2100 年, SSP119 情景下呈现先升高后降低的波动且在 2055 年达到最大值, SSP245 与 SSP585 情景下均呈现持续上

升趋势. 相比于 2001—2020 年, 整个中国地区年均温在 SSP119 情景下最大增加 1.36 °C, 而在 SSP245 与 SSP585 情景下最大可增加 2.72 °C 和 5.80 °C.

相比于现阶段, 各气候情景下未来不同时期温度在地理空间上均呈现上升趋势, 且具有很强的空间异质性(表 2 和图 6). SSP119 情景下, 4 个时段(2021—2040, 2041—2060, 2061—2080, 2081—2100 年)中国东北部、中部以及西北部年均温增幅为(1, 2] °C, 其他地区增温 ≤1 °C; 其中 2041—2060 年增温(1, 2] °C 的面积最大, 占中国地区面积比例为 41.2%; 随着时间推移, 东北部增温面积扩大至山东半岛附近, 中部增温面积先变大后减少. SSP245 情景下, 每个时段中国东北部、中部、西北部以及西藏南部增温相比其他区域更为突出, 2081—2100 年中国大部分地区增温 >2 °C, 面积占比为 86.9%. SSP585 情景下, 2021—2040 年增温(1, 2] °C 的区域与其他情景类似, 但面积有所增大; 2041—2060 年中国增温 2 °C 以上地区的面积占比为 56.0%, 其他区域增温(1, 2] °C; 2061—2080 年与 2081—2100 年整个中国增温均在 2 °C 以上.

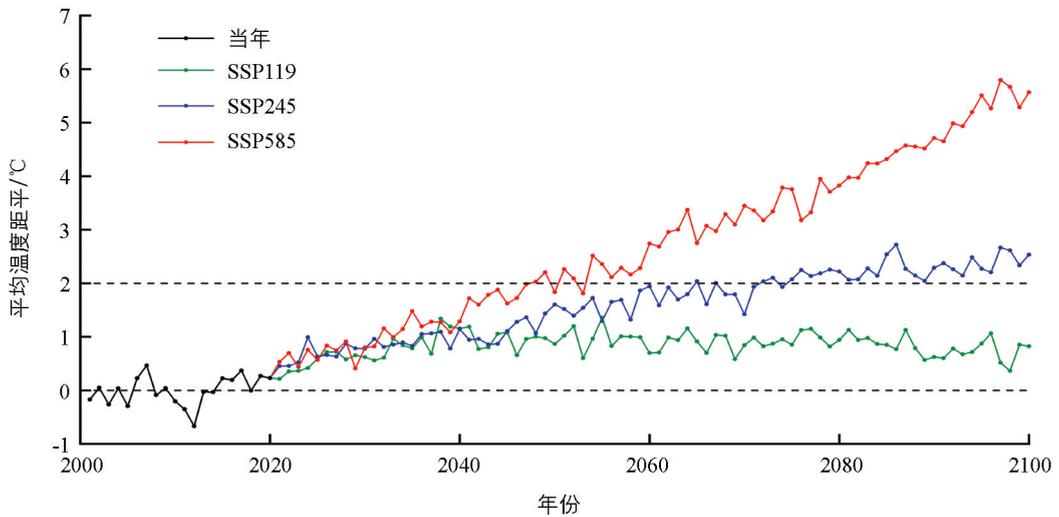


图 5 2001—2100 整个中国地区年均温距平变化(以 2001—2020 年为基准年份)

表 2 2021—2100 年中国年均温上升面积比例(相比于 2001—2020 年)

%

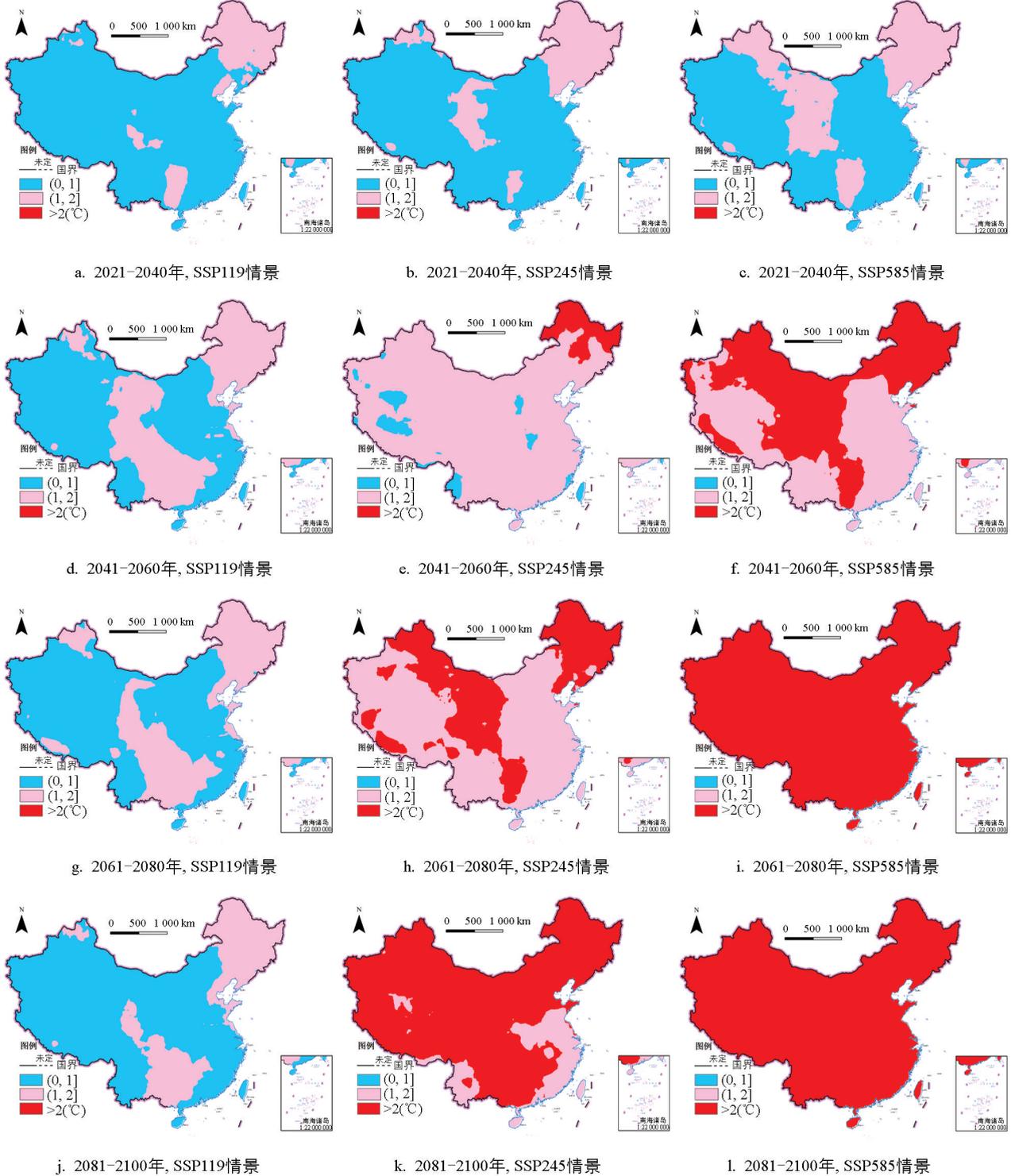
年份	SSP119			SSP245			SSP585		
	(0, 1] °C	(1, 2] °C	>2 °C	(0, 1] °C	(1, 2] °C	>2 °C	(0, 1] °C	(1, 2] °C	>2 °C
2021—2040	82.7	17.3	—	74.6	25.4	—	61.7	38.3	—
2041—2060	58.8	41.2	—	5.2	87.0	7.8	—	44.0	56.0
2061—2080	63.6	36.4	—	—	59.4	40.6	—	—	100.0
2081—2100	72.1	27.9	—	—	13.1	86.9	—	—	100.0

### 2.3 未来时期温度突变年份空间格局

在 2001—2020 年, 年均温发生显著突变的区域主要集中在中国东北部、西南部和东南部(图 7a), 面积占比为 48.6%, 其中发生显著突变的最小、最大年份分别是 2005 年和 2015 年, 大部分显著突变年份在 2010 年前后(表 3). 具体而言, 东北部主要在 2008 年发生显著突变, 东南部主要在 2009 年发生显著突变, 西藏东部主要在 2010 年发生显著突变, 辽宁南部、山东半岛以及海南东北部在 2013 年发生显著突变.

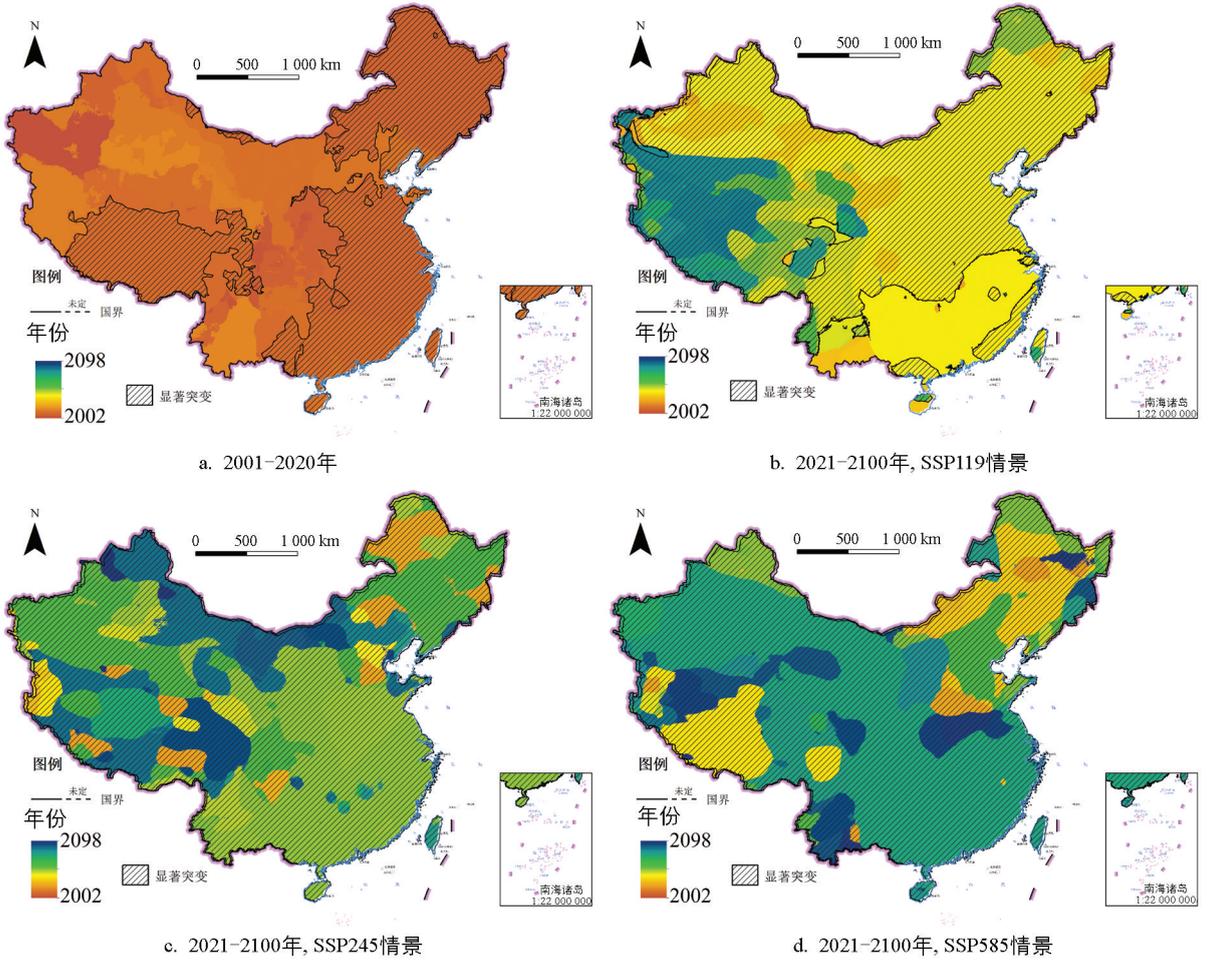
在 2021—2100 年, SSP119 情景下年均温发生显著突变的区域主要集中在除南部部分地区以外的中国大部分区域(图 7b), 面积占比为 85.9%(表 3), 最小与最大年份分别为 2025 年和 2088 年. 不同地区年均温发生显著突变的年份各不相同, 如北部大部分区域在 2041 年, 中部地区在 2032—2081 年, 新疆中部在 2032 年和 2039 年, 西藏西部和新疆南部在 2084 年, 台湾省北部与南部分别在 2037 年和 2071 年. SSP245 情景下年均温在中国大部分区域都会发生显著突变(图 7c), 面积占比为 92.0%, 最小与最

大年份分别为 2025 年和 2095 年,其中中南部在 2048 年,西部在 2058 年,东北部在 2025—2092 年,中西部在 2023—2092 年,台湾省中南部在 2077 年. SSP585 情景下年均温在中国大部分区域都会发生显著突变(图 7d),面积占比为 95.5%,最小与最大年份分别为 2025 年和 2095 年,大部分区域显著突变发生在 2075 年,包括南部、中部、西部区域,而东北部复杂多变年份在 2025—2095 年,西藏中部在 2035 年,云南大部地区在 2090 年左右.



审图号: GS(2020)4630 号.

图 6 2021—2100 年中国年均温距平空间分布(相比于 2001—2020 年)



审图号: GS(2020)4630 号.

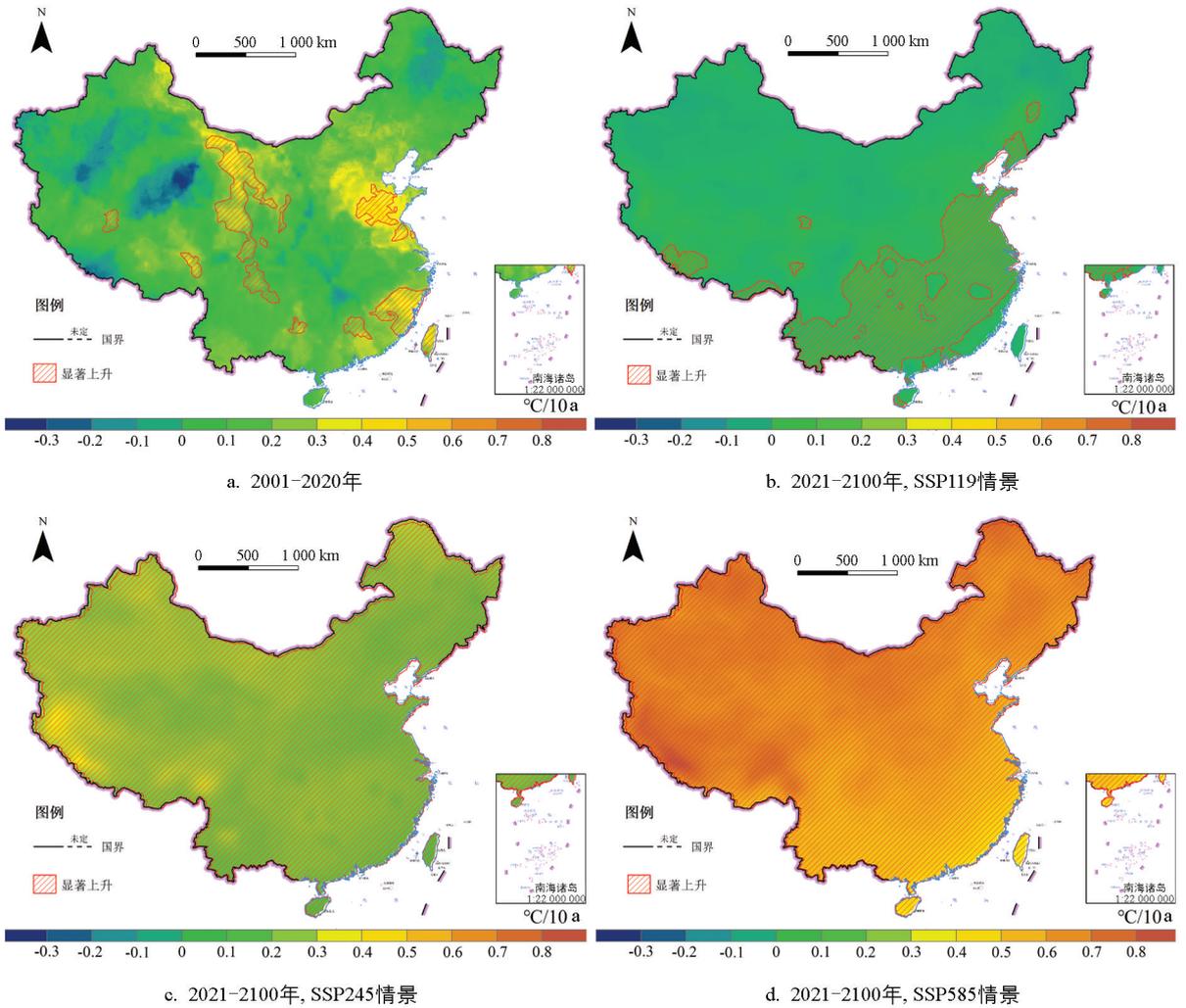
图 7 2001—2020 年与 2021—2100 年中国年均温突变年份空间分布

表 3 2001—2020 年与 2021—2100 年中国年均温突变年份空间统计

	2001—2020 年	2021—2100 年		
		SSP119	SSP245	SSP585
最小年份/年	2005	2025	2025	2025
最大年份/年	2015	2088	2095	2095
标准误差/年	1.8	16.1	19.5	19.9
面积比例/%	48.6	85.9	92.0	95.5

## 2.4 当前与未来时期温度变化趋势

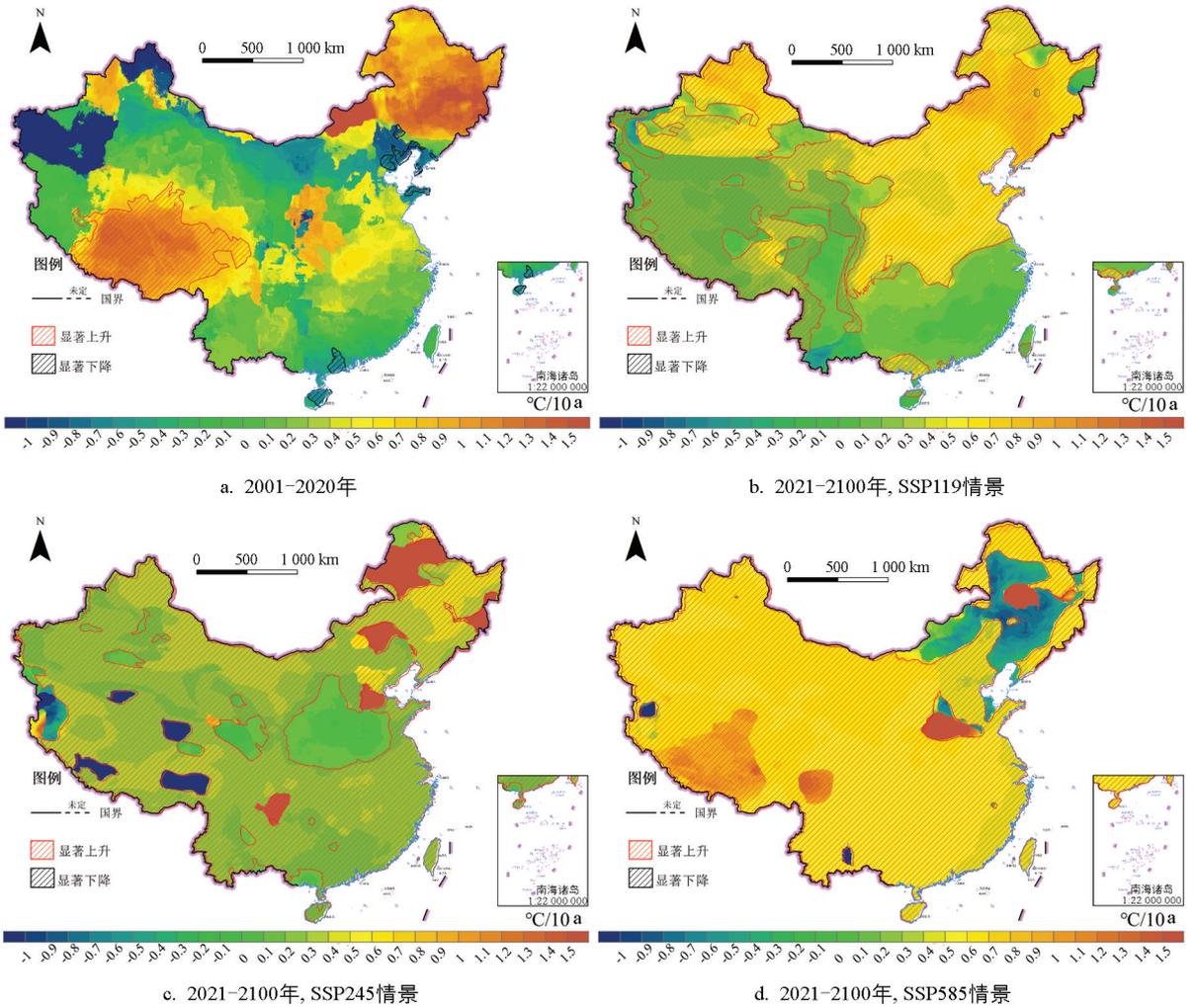
在 2001—2020 年, 年均温呈显著上升的区域零星分布在中国中部、南部以及西藏地区(图 8a), 面积占比为 6.5%, 上升速率为 0.02~0.50 °C/10 a, 均值为 0.32 °C/10 a, 空间变异系数为 20.9%。在 2021—2100 年, SSP119 情景下年均温呈显著上升的区域分布在中国南部地区(图 8b), 面积占比为 21.26%, 而在 SSP245 和 SSP585 情景下年均温在整个中国区域均显著上升(图 8c, 8d), 其上升速率依次为 0.02~0.08, 0.17~0.38, 0.39~0.86 °C/10 a, 均值依次为 0.04, 0.26, 0.64 °C/10 a, 空间变异系数依次为 20.5%, 10.9%, 9.8%。



审图号: GS(2020)4630号.

图 8 2001—2020 年与 2021—2100 年中国年均温变化趋势空间分布

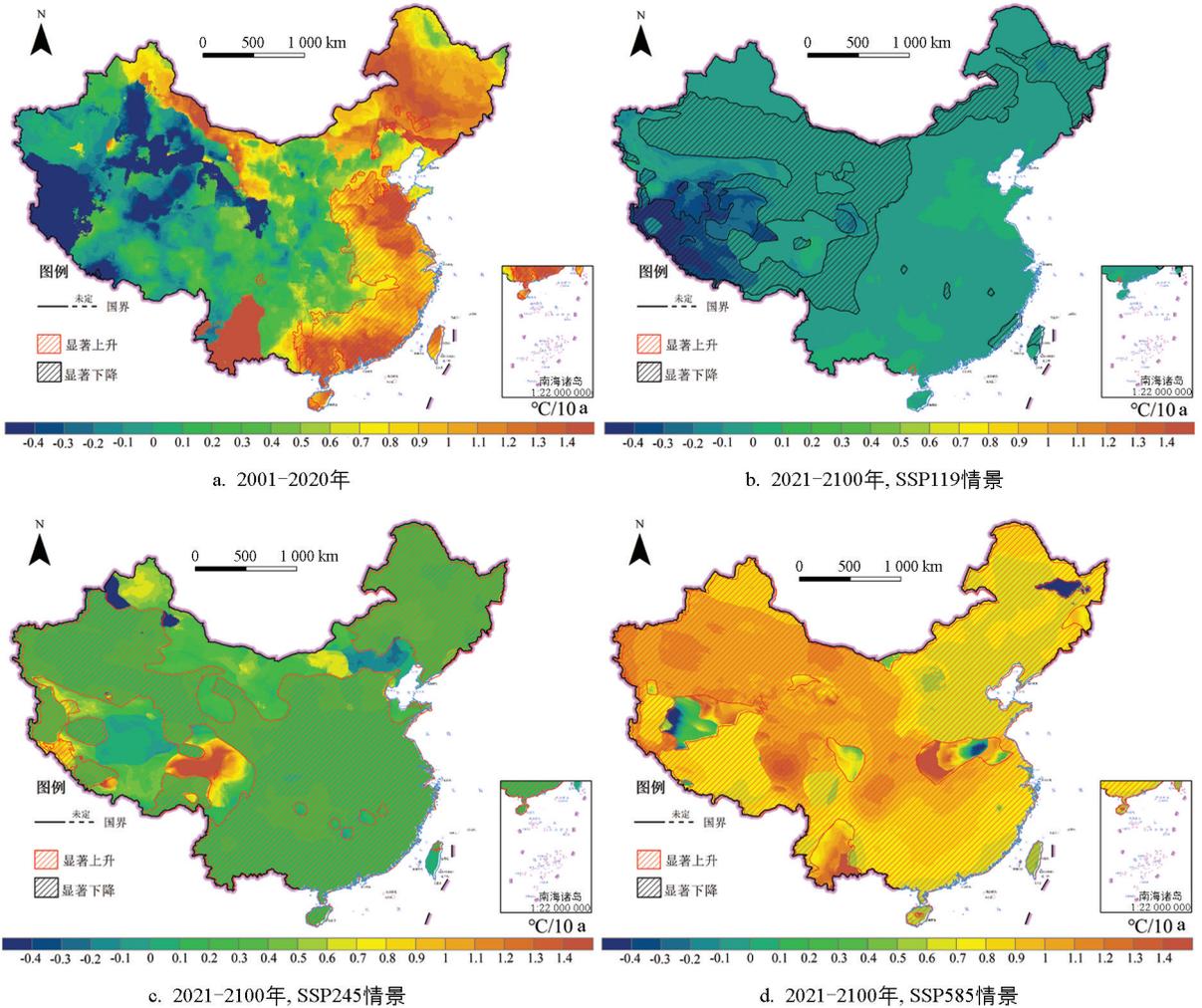
在 2001—2020 年年均温发生显著突变之前时期, 年均温呈显著上升的区域集中在西藏中东部、青海南部、四川西北部地区(图 9a 中红框区域), 面积占比为 9.7%, 上升速率为  $0.41 \sim 1.71 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ , 均值为  $1.08 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ , 空间变异系数为 16.9%; 呈显著下降的区域零星分布于渤海湾附近以及广东省与海南省部分地区(图 9a 中黑框区域), 面积占比为 0.9%, 下降速率为  $0.05 \sim 0.92 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ , 均值为  $0.68 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ , 空间变异系数为 13.2%。在 2021—2100 年年均温发生显著突变之前时期, SSP119 情景下年均温呈显著上升的区域分布在中国北部和西部地区(图 9b 中红框区域), 面积占比为 70.9%, 上升速率为  $0.03 \sim 1.74 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ , 均值为  $0.44 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ , 空间变异系数为 53.2%, 且未检测到显著下降区域; SSP245 情景下年均温呈显著上升的区域分布在除河南、山东西部之外的区域(图 9c 中红框区域), 面积占比为 80.4%, 上升速率为  $0.10 \sim 2.58 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ , 均值为  $0.29 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ , 空间变异系数为 59.4%, 而年均温呈显著下降的区域分布在西藏西部(图 9c 中黑框区域), 面积占比为 0.05%, 下降速率为  $0.39 \sim 1.49 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ , 均值为  $0.57 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ , 空间变异系数为 35.1%; SSP585 情景下年均温呈显著上升的区域分布在除中国东北部部分地区之外的区域(图 9d 中红框区域), 面积占比为 87.4%, 上升速率为  $0.31 \sim 2.06 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ , 均值为  $0.61 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ , 空间变异系数为 22.8%, 而年均温呈显著下降的区域分布在中国东北部的零星地区(图 9d 中黑框区域), 面积占比为 0.35%, 下降速率为  $0.29 \sim 0.94 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ , 均值为  $0.54 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ , 空间变异系数为 37.0%。



审图号: GS(2020)4630 号.

图 9 2001—2020 年与 2021—2100 年中国年均温突变之前时期年均温变化趋势空间分布

在 2001—2020 年年均温发生显著突变之后时期, 年均温呈显著上升的区域集中在中国东部与东北部地区(图 10a 中红框区域), 面积占比为 15.4%, 上升速率为 0.03~1.81 °C/10 a, 均值为 1.08 °C/10 a, 空间变异系数为 24.8%; 呈显著下降的区域分布在西藏南部极小部分地区(图 10a 中黑框区域), 面积占比为 0.02%, 下降速率为 0.52~0.75 °C/10 a, 均值为 0.67 °C/10 a, 空间变异系数为 6.0%。在 2021—2100 年年均温发生显著突变之后时期, SSP119 情景下年均温呈显著上升的区域分布在广西省极小部分地区(图 10b 中红框区域), 面积占比为 0.04%, 上升速率为 0.04~0.07 °C/10 a, 均值为 0.06 °C/10 a, 空间变异系数为 12.5%, 呈显著下降的区域分布在中国东北部和西部地区(图 10b 中黑框区域), 面积占比为 62.2%, 下降速率为 0.02~0.62 °C/10 a, 均值为 0.11 °C/10 a, 空间变异系数为 109.1%; SSP245 情景下年均温呈显著上升的区域分布在除中国北部和西南部之外的区域(图 10c 中红框区域), 面积占比为 71.9%, 上升速率为 0.09~1.50 °C/10 a, 均值为 0.21 °C/10 a, 空间变异系数为 37.0%, 且未检测到显著下降区域; SSP585 情景下年均温呈显著上升的区域分布在除西部和东部零星地区之外的区域(图 10d 中红框区域), 面积占比为 90.0%, 上升速率为 0.34~1.49 °C/10 a, 均值为 0.87 °C/10 a, 空间变异系数为 2.0%, 且未检测到显著下降区域。



审图号: GS(2020)4630号.

图 10 2001—2020 年与 2021—2100 年中国年均温突变之后时期年均温变化趋势空间分布

## 3 讨论与结论

### 3.1 讨论

张学珍等<sup>[22]</sup>研究表明,在 RCP4.5 和 RCP8.5 两种排放情景下 21 世纪期间中国各区温度均呈上升趋势,温度上升过程和升高幅度随排放情景和地区而异, RCP8.5 情景下的升温速率高于 RCP4.5 情景,北方地区升温速率高于南方地区. 本研究结果的 21 世纪气温时空变化趋势与张学珍等<sup>[22]</sup>研究相似, SSP585 情景下年均温变化幅度大于 SSP245,北方地区的升温大于南方. 但是, SSP119 情景下的气温变化趋势与其他两种模式具有明显的差异,全国年均温距平最大值出现在 2055 年,之后年均温有下降趋势,并且在突变后的温度趋势分析中中国西部和东北部大部分区域年均温呈现显著下降的趋势. 与前人的研究结果相似<sup>[23-24]</sup>,不同 SSP 情景之间温度格局和趋势均表现出明显差异,这是由于气候情景是影响未来温度变化的主要因素<sup>[25]</sup>,气候情景是发展路径和气候强迫的矩形组合,不同的发展路径所产生的人为排放及土地利用变化使得未来不同情景下温度变化具有明显差异. 3 种气候情景下,中国气温变化特征与全球气温变化特征相似,表明中国气温变化对全球气候变暖具有积极响应. 气候变化中存在突变现象并且是非线性的变化,而 Mann-Kendall 趋势检验法是无分布、非参数的统计检验方法,其对气候数据的分析具有不可替代的优势<sup>[19]</sup>. 如 Duan 等<sup>[25]</sup>利用 Mann-Kendall 趋势检验法发现 SSP245 和 SSP585 情景下 2050—2100 年整个中国年均温均显著增加,且西北地区温度上升幅度较大,但其数据分辨率较低( $>50$  km),无法准确反映未来时期温度显著变化的区域与面积. 本研究将分段线性回归和 Mann-Kendall 趋势检验法相结合,基于 1 km 分辨率

的气候数据集, 逐个栅格研究未来气温变化, 可以明确发生显著性突变的年份以及区域, 并且可以检验突变年份前后的气温时空变化趋势, 这可为应对气候变暖带来的不利影响提供丰富的论据支撑。

目前, 区域尺度上的未来气候变化及趋势研究中通常存在一定的不确定性, 而这种不确定性通常来自于所用的气候模式、气候模式的初始条件、排放情景以及降尺度技术<sup>[26-27]</sup>。本研究使用 CMIP6 发布的最新气候模式, 其中包括不同社会经济模式驱动的新排放情景(即 SSP 情景)。而张艳武等<sup>[28]</sup>研究了 3 种 RCPs 下未来时期气温相对于 1980—2005 年平均气温升高的时空格局, 其未来时期气温整体变化与本研究基本相同, 但增温预计结果比本研究结果略高, 这可能是所选气候平均值以及气候情景的差别引起的。另外, 张艳武等<sup>[28]</sup>的研究表明, 不同模式的温度在青藏高原、新疆西部地区差异较大, 部分模式在高原边缘地区具有显著的高偏差, 并指出这与模式空间分辨率较低有关, 而高空间分辨率模式下不存在这种高偏差。本研究采用了 1 km 降尺度的温度数据集, 该数据集采用高分辨率的参考数据集, 引入了地形信息, 能较好地反映地形起伏变化较大地区的气候特征<sup>[29]</sup>。同时, 由于单个 GCM 的预测数据可能存在较高的不确定性, 而多模式预测结果的集合平均值能够为未来变化提供更可信的预测依据和最为保守的风险预警<sup>[30]</sup>, 因而本研究采用 3 个气候模式数据的均值进行研究, 这降低了不同模式和不同干扰设定对区域气候预测的不确定性。

### 3.2 结论

本研究基于 2001—2100 年 1 km 温度数据集, 采用分段线性回归方法、Mann-Kendall 趋势检验法和 Sen's 斜率估计法, 分析了中国 2001—2020 年和 2021—2100 年温度时空格局、突变年份及其趋势变化特征, 得到如下结论:

相比 2001—2020 年, 2021—2100 年中国年均温呈现上升特征, SSP585 情景下年均温增幅最大, 而 SSP119 情景下年均温增幅最小; SSP245 和 SSP585 情景下年均温增幅均随时间推移而升高, SSP119 情景下年均温表现出先升高后降低的趋势; 中国东北部、中部以及西北部年均温增幅比其他区域更为明显。

2001—2020 年年均温在 2010 年左右发生显著突变, 其区域集中在中国东北部、西南部和东南部(面积占比为 48.6%); 2021—2100 年, SSP119 情景下年均温在 2040 年左右发生显著突变, 其分布在除中国南部部分地区外的区域(面积占比为 85.9%), 而在 SSP245 和 SSP585 情景下, 显著转折发生在 2050 年和 2075 年前后。

2001—2020 年年均温以 0.02~0.50 °C/10 a 的速率呈显著上升趋势, 且零星分布于中国中部和南部(面积占比为 6.5%); 在年均温突变之前与之后时期, 其分别在西藏中东部、青海南部、四川西北部等区域(面积占比为 9.7%)和中国东部(面积占比为 15.4%)呈显著上升趋势。2021—2100 年, SSP119 情景下年均温以 0.02~0.08 °C/10 a 的速率显著上升, 分布于中国南部地区(面积占比为 21.3%), 其余两种 SSP 情景下年均温在中国分别以 0.17~0.38, 0.39~0.86 °C/10 a 的速率显著上升; 在年均温突变之前与之后时期, SSP119 情景下分别以 0.03~1.74, 0.02~0.62 °C/10 a 的速率呈显著上升与下降趋势, 分布于中国北部和西部地区(面积占比为 70.9%)、中国东北部和西部地区(面积占比为 62.2%), 而在 SSP245 和 SSP585 情景下年均温突变前后, 中国大部分地区年均温均呈显著上升趋势。

### 参考文献:

- [1] PACHAURI R K, ALLEN M R, BARROS V R, et al. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [EB/OL]. (2014-11-02) [2021-12-01]. <https://www.oalib.com/references/20545765>.
- [2] 苗运玲, 秦榕, 张云惠, 等. 东天山北坡气温与降水时空变化特征 [J]. 水土保持研究, 2019, 26(3): 219-223, 231.
- [3] 张志高, 邵亚军, 郭超凡, 等. 基于 MOD16 的河南省地表蒸散量时空变化特征 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2021, 46(9): 128-135.
- [4] 靖娟利, 徐勇, 王永锋, 等. 1960—2019 年西南岩溶区旱涝时空演变特征 [J]. 水土保持研究, 2021, 28(5): 179-186.
- [5] 慈龙骏, 杨晓晖, 陈仲新. 未来气候变化对中国荒漠化的潜在影响 [J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 287-294.
- [6] 孟焕, 王琳, 张仲胜, 等. 气候变化对中国内陆湿地空间分布和主要生态功能的影响研究 [J]. 湿地科学, 2016, 14(5): 710-716.

- [7] 于海英, 陈淑伶, 杨莉琳, 等. 贵阳市近 70 年气候突变检测及变化趋势分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(9): 115-123.
- [8] WANG S J. Spatiotemporal Variability of Temperature Trends on the Southeast Tibetan Plateau, China [J]. International Journal of Climatology, 2018, 38(4): 1953-1963.
- [9] 刘凯, 聂格格, 张森. 中国 1951—2018 年气温和降水的时空演变特征研究 [J]. 地球科学进展, 2020, 35(11): 1113-1126.
- [10] OUYANG W, SHI Y D, HAO F H, et al. A Comparison of General Circulation Models and Their Application to Temperature Change Assessments in a High-Latitude Agricultural Area in Northeastern China [J]. Climate Dynamics, 2016, 47(1-2): 651-666.
- [11] MA C, PAN S L, WANG G Q, et al. Changes in Precipitation and Temperature in Xiangjiang River Basin, China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 123(3/4): 859-871.
- [12] 任婧宇, 彭守璋, 曹扬, 等. 1901—2014 年黄土高原区域气候变化时空分布特征 [J]. 自然资源学报, 2018, 33(4): 621-633.
- [13] 莫兴国, 胡实, 卢洪健, 等. GCM 预测情景下中国 21 世纪干旱演变趋势分析 [J]. 自然资源学报, 2018, 33(7): 1244-1256.
- [14] PENG S Z, DING Y X, LI Z. High-Spatial-Resolution Monthly Temperature and Precipitation Dataset for China for 1901—2017 [J]. Earth System Science Data Discussions, 2019, 11, 1931-1946.
- [15] 赵芳芳, 徐宗学. 统计降尺度方法和 Delta 方法建立黄河源区气候情景的比较分析 [J]. 气象学报, 2007, 65(4): 653-662.
- [16] TOMS J D, LESPERANCE M L. Piecewise Regression: A Tool for Identifying Ecological Thresholds [J]. Ecology, 2003, 84(8): 2034-2041.
- [17] CHEN T, DE JEU R, LIU Y Y, et al. Using Satellite Based Soil Moisture to Quantify the Water Driven Variability in NDVI: A Case Study over Mainland Australia [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140: 330-338.
- [18] XU H J, WANG X P, YANG T B. Trend Shifts in Satellite-Derived Vegetation Growth in Central Eurasia, 1982—2013 [J]. Science of the Total Environment, 2017, 579: 1658-1674.
- [19] 陈迪桃, 黄法融, 李倩, 等. 1966—2015 年天山南北坡空气湿度差异及其影响因素 [J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(6): 562-572.
- [20] 符静, 旷微, 邓运员, 等. 湖南省近 56 年降水变化趋势及空间特征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(2): 110-119.
- [21] 易湘生, 尹衍雨, 李国胜, 等. 青海三江源地区近 50 年来的气温变化 [J]. 地理学报, 2011, 66(11): 1451-1465.
- [22] 张学珍, 李侠祥, 徐新创, 等. 基于模式优选的 21 世纪中国气候变化情景集合预估 [J]. 地理学报, 2017, 72(9): 1555-1568.
- [23] ZHU H H, JIANG Z H, LI L. Projection of Climate Extremes in China, an Incremental Exercise from CMIP5 to CMIP6 [J]. Science Bulletin, 2021, 66(24): 2528-2537.
- [24] 陈炜, 姜大膀, 王晓欣. CMIP6 模式对青藏高原气候的模拟能力评估与预估研究 [J]. 高原气象, 2021, 40(6): 1455-1469.
- [25] DUAN R X, HUANG G H, LI Y P, et al. Ensemble Temperature and Precipitation Projection for Multi-Factorial Interactive Effects of GCMs and SSPs: Application to China [J]. Frontiers in Environmental Science, 2021, 9: 1-15.
- [26] 刘文斐, 粟晓玲, 张更喜, 等. 中国西北地区未来潜在蒸散发集合预估及不确定性归因 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(4): 123-132.
- [27] TIAN Y, XU Y P, BOOIJ M J, et al. Uncertainty in Future High Flows in Qiantang River Basin, China [J]. Journal of Hydrometeorology, 2015, 16(1): 363-380.
- [28] 张艳武, 张莉, 徐影. CMIP5 模式对中国地区气温模拟能力评估与预估 [J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(1): 10-19.
- [29] PENG S Z, GANG C C, CAO Y, et al. Assessment of Climate Change Trends Over the Loess Plateau in China from 1901 to 2100 [J]. International Journal of Climatology, 2018, 38(5): 2250-2264.
- [30] 宋帅峰, 延晓冬. CMIP6 全球气候模式对中国冬季寒潮频次模拟能力的评估 [J]. 气候与环境研究, 2022, 27(1): 33-49.