氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

区域气候模式CWRF对我国极端温度时空变化的模拟评估

刘旗洋 乔枫雪 朱奕婷 梁信忠 柳雨佳 张焓 王瑞

Evaluation of the Spatio–Temporal Variations of Extreme Temperature Simulations in China Based on the Regional Climate–Weather Research and Forecasting Model

LIU Qiyang QIAO Fengxue ZHU Yiting LIANG Xinzhong LIU Yujia ZHANG Han WANG Rui

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006–9585.2021.20116

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

华东地区极端降水动力降尺度模拟及未来预估

Dynamical Downscaling Simulation and Projection of Extreme Precipitation over East China

气候与环境研究. 2019, 24(1): 86 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006–9585.2018.17169

中国周边海域海面温度日变化对区域气候的影响

Influence of Diurnal Variation of SST on the Regional Climate over Coastal Waters of China

气候与环境研究. 2019, 24(2): 214 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006–9585.2018.18087

区域气候模式不同积云对流参数化方案对新疆气候模拟的影响研究

Impacts of Different Cumulus Convective Parameterization Schemes on Regional Climate Model Simulation over Xinjiang

气候与环境研究. 2019, 24(2): 169 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006–9585.2018.18075

中国不同区域气候条件对冬季雾日形成的差异性分析

Analysis of Variations of Winter Fog Days Formation across Different Regional Climatic Conditions in China

气候与环境研究. 2019, 24(5): 585 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006–9585.2018.18038

1961～2013年中国蒸发皿蒸发量时空分布特征及其影响因素

Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Influencing Factors of Pan Evaporation in China from 1961 to 2013

气候与环境研究. 2020, 25(5): 483 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006–9585.2019.19130

2000~2016年青藏高原地表反照率时空分布及动态变化

Spatial–Temporal Distribution and Variation of Land Surface Albedo over the Tibetan Plateau during 2000–2016

气候与环境研究. 2018, 23(3): 355 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006–9585.2017.17113

关注微信公众号，获得更多资讯信息

刘旗洋, 乔枫雪, 朱奕婷, 等. 2021. 区域气候模式 CWRF 对我国极端温度时空变化的模拟评估 [J]. 气候与环境研究, 26(3): 333−350. LIU Qiyang, QIAO Fengxue, ZHU Yiting, et al. 2021. Evaluation of the Spatio–Temporal Variations of Extreme Temperature Simulations in China Based on the Regional Climate–Weather Research and Forecasting Model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (3): 333−350. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20116

区域气候模式 CWRF 对我国极端温度时空变化的模拟评估

刘旗洋 [1,2] 乔枫雪 [1,2,3] 朱奕婷 [1,2] 梁信忠 [4,5,6] 柳雨佳 [1,2] 张焓 [4] 王瑞 [7]

1 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室，上海 200241
2 华东师范大学地理科学学院，上海 200241
3 崇明生态研究所，上海 200062
4 南京信息工程大学大气科学学院，南京 210044
5 马里兰大学帕克分校大气与海洋科学系 美国
6 马里兰大学地球系统科学跨学科中心 美国
7 上海中心气象台，上海 200030

摘　要　基于中国均一化气温数据集 CN05.1 的观测数据，结合暖昼指数（TX90）、冷昼指数（TX10）、暖夜指数（TN90）、冷夜指数（TN10）、暖日持续指数（WSDI）和冷日持续指数（CSDI）6 个极端温度指数，从气候平均、概率分布、年际变率和年际趋势方面，系统评估区域气候模式（Climate–Weather Research and Forecasting model, CWRF）对 1980～2015 年间我国极端温度指数区域分布和年际变化的模拟能力，为改进并利用模式研究我国未来区域极端温度的预测提供科学依据。结果显示：观测的冷暖指数在北方的年际变率幅度高于南方，其中暖指数在我国大部分地区为增暖趋势，冷指数在北方地区的变冷趋势显著，尤其暖夜增暖、冷夜变冷，极端暖事件（WSDI）的持续性比冷事件（CSDI）显著。CWRF 模式较好再现了极端温度指数的年均分布和年际变化趋势特征，尤其对暖日和冷日持续指数的模拟优势显著，但仍存在系统性的区域偏差，如低估暖昼和冷夜的极值强度；对华东地区暖（冷）指数变暖（冷）的趋势存在低（高）估；尤其是低估青藏高原地区暖、冷指数的强度，并且高估其暖昼变冷、暖夜变暖的年际变化趋势。因此，该模式对华东及高原地区极端温度的强度和年际变率的模拟仍亟需改善。

关键词　极端温度指数　区域气候模式　时空分布　年际趋势　模拟评估

文章编号　1006-9585(2021)03-0333-18　　**中图分类号**　P435^{+}.1　　**文献标识码**　A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20116

Evaluation of the Spatio–Temporal Variations of Extreme Temperature Simulations in China Based on the Regional Climate–Weather Research and Forecasting Model

LIU Qiyang[1,2], QIAO Fengxue[1,2,3], ZHU Yiting[1,2], LIANG Xinzhong[4,5,6], LIU Yujia[1,2], ZHANG Han[4], and WANG Rui[7]

收稿日期　2020-09-13；**网络预出版日期**　2021-02-01

作者简介　刘旗洋，男，1998 年出生，硕士研究生，主要从事区域气候模式研究。E-mail: 51203901064@stu.ecnu.edu.cn

通讯作者　乔枫雪，E-mail: fxqiao@geo.ecnu.edu.cn

资助项目　国家重点研发计划“重大自然灾害监测预警与防范”重点专项资助项目 2018YFC1507702，国家自然科学基金项目 41730646，国家自然科学基金项目 41605079

Funded by　National Key R&D Program of China (Grant 2018YFC1507702), National Natural Science Foundation of China (Grant 41730646), National Natural Science Foundation for Young Scientist of China (Grant 41605079)

1 *Key Laboratory of Geographic Information Science*, *Ministry of Education*, *East China Normal University*, *Shanghai* 200241
2 *School of Geographic Sciences*, *East China Normal University*, *Shanghai* 200241
3 *Institute of Eco-Chongming* (*IEC*), *Shanghai* 200062
4 *College of Atmospheric Science*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044
5 *Department of Atmospheric & Oceanic Science*, *University of Maryland at College Park*, *USA*
6 *Earth System Science Interdisciplinary Center*, *University of Maryland*, *Maryland*, *USA*
7 *Shanghai meteorological Bureau*, *Shanghai* 200030

Abstract This study evaluates the capability of the regional Climate-Weather Research and Forecasting model (CWRF) in simulating the spatiotemporal variations of daily extreme temperature indices from 1980 to 2015 over eight key regions in China based on the homogenization temperature dataset (CN05.1) to provide a scientific basis for improving the model in predicting regional extreme temperatures in China. In this study, we focus on the four percentile-based threshold indices (TX90, TX10, TN90, and TN10) and two duration indices (warm spell duration indicator, WSDI and cold spell duration indicator, CSDI) defined by an expert team on climate change detection and indices. From observation, the annual mean distributions of extreme indices show distinct regional features, and extreme warm events persist longer than extreme cold events. Both warm and cold indices have larger interannual variability in the north, but the warm index shows a warmer trend in most parts of China and the cold index shows a colder trend in North China, where has a more pronounced changing trend of warm and cold nights. The CWRF generally reproduces the observed annual mean distributions of these extreme indices, especially exhibiting superiority in simulating extreme events duration indices, and well simulates the interannual variability and changing trends of extreme indices in most regions. However, several regional biases still exist. For instance, CWRF underestimates the intensity of extremely warm days and cold nights but overestimates WSDI in Central East China and CSDI in Northwest China. In the Qinghai–Tibet Plateau, CWRF tends to underestimate both indices but overestimates the cooling and warming trends of warm days and cold nights, respectively. In East China, CWRF underestimates the cooling trend of cold nights but overestimates the warming trend of warm days and nights.

Keywords Extreme temperature indices, Regional climate model, Spatio –temporal distribution, Interannual trend, Simulation assessment

1 引言

政府间气候变化专门委员会第五次评估报告（AR5）指出，全球平均陆地和海洋表面温度的线性趋势计算结果表明，在 1880～2012 年期间温度升高了 0.85°C（0.65～1.06°C）（IPCC, 2013），全球气候正经历以变暖为主要特征的变化。《中国气候变化蓝皮书（2019）》指出，1951～2018 年中国年平均气温上升速率为 0.24°C/10 a，升温率明显高于同期全球平均水平，其中 1980 年以来的升温尤为显著（中国气象局气候变化中心, 2019）。全球变暖不仅体现在平均气温的升高，更重要的是极端气候事件的变化。极端气候事件具有突发性、难预测性和强破坏性的特点，其中区域性的极端高温或低温事件直接影响农业生产和人体健康，对生态环境和社会经济可持续发展构成巨大的挑战，从而引发人们更多的关注。2000 年以来，我国区域性极端温度事件频发，且影响范围大、持续时间长，例如我国 2008 年南方持续性低温雨雪事件和 2013 年华东异常罕见的连续高温事件，造成了巨大的经济损失（马宁等, 2011; 邹海波等, 2015）。

已有大量研究基于观测数据，利用不同的极端气候指数，分析我国极端温度阈值或事件的变化趋势和时空分布，这些研究显示我国极端温度指数的变化趋势对气候变化的响应较为复杂，存在显著的区域差异（翟盘茂和潘晓华, 2003; 马柱国等, 2003; 周雅清和任国玉, 2010; You et al., 2011）。自 1960 年以来，我国整体上极端温度指数表现为冷指数的变暖幅度大于暖指数，夜指数的变暖幅度大于昼指数（杨萍等, 2010; 王琼等, 2013; 王晓利和侯西勇, 2017），极端低温事件的频次、强度和范围呈减弱趋势（王晓娟等, 2012），但冷日持续指数（CSDI）的变化趋势不显著；各极端温度指数在南方地区的变化幅度小于北方，且随着海拔的升高变化幅度变大（张大任等, 2019）。极端最高/最低温度的升温幅度在东北地区最显著，暖日和暖夜在西南地区逐

步增加，高温日数在中部地区显著增加；北方的冷昼和冷夜指数大幅减少而暖昼和暖夜指数显著增加，中部地区的各极端温度指数年际变化较不显著（Zhou and Ren, 2011; 肖冰霜等, 2016）；青藏高原地区的最低温度极小值的上升速率最快，最高温度极大值的上升速率最慢，存在显著的冷暖不对称性（周玉科等, 2017）。我国极端低温和极端高温的年代际变化趋势较为一致，但具有明显的阶段性特征，不同区域极端气温指数主周期介于 2～8 年，无显著的年代际振荡周期变化，不同区域的极端温度指标在 1986～2015 年的变化趋势相对 1956～1985 年更为显著，突变集中发生在 1980 年代和 1990 年代期间（Zhou and Ren, 2011; 王晓利和侯西勇, 2017; 张大任等, 2019）。因此，本研究着眼变化趋势显著的 1980～2015 年，较为细致的研究我国 8 个气候区域基于阈值的极端温度指数的变化特征。

全球气候模式（Global Climate System，GCM）和降尺度的区域气候模式（Regional Climate System，RCM）是研究气候过程和气候变化机理的重要方式，为了准确可靠地预测未来极端温度的变化，需要对数值模式的模拟结果进行评估。已有大量的研究对耦合模式比较计划（Coupled Model Intercomparison Project，CMIP）的多模式结果进行温度模拟评估和未来变化的预估（Jiang et al., 2015）。王冀等（2008）指出 7 个全球海气耦合模式模拟平均结果优于单个模式，但对我国平均霜冻、暖夜和热浪的空间分布都存在系统性高估；姚遥等（2012）评估了 8 个 CMIP5 耦合模式对我国极端气温的模拟效果，表明模式集合能够模拟极端温度指数的平均状态和年际变化特征，但对气候极值的模拟存在较大的不确定性，高温热浪指数的模拟偏差超过 8%，暖指标的年际趋势模拟优于冷指标。GCM 对大尺度环流特征的模拟较好，但受制于分辨率较低，无法细致地描述天气气候过程，对极端温度的区域及年际变化特征的模拟及预测能力有限，需要进行多模式集合和偏差订正对输出结果进行修正（Seo and Ok, 2013; 高谦, 2017）。经过动力降尺度后的 RCM 具有较高的分辨率，对于刻画我国区域性的气温、降水的分布及变化有一定优势，能较好地模拟到四川盆地的高值中心，而且对青藏高原平均气温的低估得到明显的改善（Gao et al., 2011, 2013; Liu et al., 2013; Wang et al., 2015; Yu et al., 2015）。其中，RegCM（Regional Climate Modeling system）系列模式在我国极端温度模拟和变化预估上有着广泛的应用（Feng et al., 2011; Gao et al., 2012, 2017; 高学杰等, 2012; Xu et al., 2013; Ji and Kang, 2015）。李东欢等（2017）指出 RegCM3 对日最高气温极大值模拟偏差表现为西部 2～4°C 的冷偏差和长江流域 1～3°C 的暖偏差；日最低气温极小值模拟在大部分地区存在 3°C 的冷偏差，在青藏高原达到 5°C 以上；Kong et al.（2019）比较了 WRF 和 RegCM4 对我国极端温度的模拟结果，WRF 对极端温度指数的年际趋势模拟较好，RegCM4 对我国极端气温的平均气候态模拟较好，但低估了青藏高原极端高温的年际变化的增暖趋势；高谦（2017）指出经过动力降尺度的 LMDZ4 模式对我国极端温度的平均模拟偏差减少且空间相关系数提高，一定程度上体现了青藏高原、四川盆地等复杂地形的极值中心；张玉静（2017）指出 PRECIS（Providing Regional Climates for Impacts Studies）模式能够模拟极端温度阈值的空间分布特征，但对西北、东北和四川盆地等的高温阈值模拟高估 2°C，对青藏高原南部和东部的高温阈值模拟低估超过 5°C，对我国大部分的低温阈值存在普遍的低估。虽然 RCM 模式模拟分辨率有所提升，但对青藏高原等高复杂地形区域的温度模拟仍存在较大的挑战，除了模式物理过程参数化的不足以外，也与气象观测站稀疏且海拔较低有关（Yu et al., 2015）。

本研究着重评估基于中国本地化季节气候预测的区域气候模式 CWRF（regional Climate–Weather Research and Forecasting model）（Liang et al., 2019），该模式引入了较完备的物理过程参数化方案，同时增加了对温度模拟影响最为直接的云—气溶胶—辐射（Cloud–Aerosol–Radiation，CAR）相互作用的耦合模块（刘冠州和梁信忠, 2017）。已有研究表明 CWRF 具有模拟东亚季风区大气环流与气候特征的能力，对中国地区季节平均降水、夏季极端降水的模拟能力较好（刘术艳等, 2008; 董晓云等, 2019）。Liang et al. (2019) 目前只初步分析了控制方案对平均温度与日最高、最低温度的季节模拟偏差，尚未进行基于不同极端温度指标的区域分布及变化特征的模拟评估。因此，本文将基于 1980～2015 年的全国气温观测数据和模式控制版本的连续积分结果，从空间分布、概率分布、年际变率和年际趋势方面，系统地评估区域气候模式 CWRF 对我国不同区域的极端温度指数的模拟能力及偏差

所在，为完善模式的物理过程、提升模式模拟预测能力提供依据。

2 数据和方法

2.1 模式介绍及模拟数据

本研究使用的区域气候模式 CWRF 自 2001 年研发以来，结合卫星遥感数据，考虑人类活动、植被等动态演变，优化 30 km 水平分辨率的下垫面及侧边界数据（Liang et al., 2019）；针对关键物理过程，在 WRF 模式的基础上，集成了多种参数化方案（刘冠州和梁信忠，2017）。CWRF 模式的模拟区域中心点位于（35.18°N，118°E），采用地形跟随坐标系，垂直方向包括 36 层；水平网格采用 Lambert 投影的 232（纬向）×172（经向）个格点的 30 km 的等距网格。海温数据采用欧洲中心再分析资料 ECMWF-Interim 日平均海表温度（1979～1980 年）和美国国家海洋大气管理局 NOAA 的最优插值日海表温度（OISST，1981～2015 年，0.25°）（Reynolds et al., 2007; Banzon et al., 2016）。经过多次敏感性试验和验证，确定了基于中国地区气候模拟预测的控制实验方案，包括 ECP 对流方案（Qiao and Liang, 2016, 2017）、GSFCGCE 微物理方案（Tao et al., 2003）、GSFCLXZ 辐射方案（Chou et al., 2001）、CAM3 边界层方案（Rontu, 2006）、CSSP 陆面方案（Liang et al., 2005）和 XRL 气溶胶方案（Liang et al., 2004）。关于该模式在中国地区的相关改进及具体物理方案的设置详见 Liang et al. (2019)。研究使用 ERA-Interim（Dee et al., 2011）作为初始场和边界场驱动 CWRF 模式，从 1979 年 11 月 1 日连续积分至 2015 年 12 月 31 日的 3 h 模拟数据，前两个月为模式的启动时段，着重评估 1980 年 1 月 1 日至 2015 年 12 月 31 日的温度数据。

2.2 观测资料和极端温度指数

历史气温观测数据来自中国地面气象台站观测的格点化逐日平均气温、日最高气温、日最低气温观测资料（CN05.1），水平分辨率为 0.25°（纬度）×0.25°（经度），其原始数据来自我国 2000 多个站点的均一化长序列气温数据，能够较真实地反映历史极端温度的趋势和变率（Xu et al., 2009; 吴佳和高学杰, 2013）。本文选取的时间范围为 1980～2015 年的日资料，为了便于与模式的比较，利用双线性插值将格点观测数据插值到与模式对应的等间距 30 km 的 Lambert 投影格点。由于我国南北跨度大，气候、地形和下垫面因子复杂多变，参照了 Hui et al.（2015）、Yu et al.（2015）、Zhou et al.（2016）等的研究分区，本文划分 8 个区域对极端温度的区域差异特征进行细致的研究（图 1），包括东北、华北、华东、华南、西南、青藏高原、西北、西北东部。

合适的极端温度指数需要同时具有对气候变化敏感且稳定性高的特点，对于研究结论的可靠性具有重要作用。气候变化检测和指数专家组（ETCCDI）和“欧洲地区极端事件统计和区域动力降尺度”（STARDEX）提出的极端气候指数，是国际上常用的极端气候评价指标，能够定量描述极端温度事件的变化，具有低噪声和强指示性的优势（Alexander et al., 2006; 胡彩虹等, 2013）。本文参照陈正洪等（2010）提出的极端温度指数计算方法，首先是将 1981～2010 年作为气候基准期，得到某一天及其前后两天（共计 5 天）在 30 年气候基准期内共计 150 天的日最高、最低气温数据，对样本取 90% 或 10% 的分位值作为阈值，并以超过 90% 或低于 10% 分位值的气温作为极端温度，相比采用绝对阈值得到的极端气候指数，该方法能同时体现我国区域性和季节性的极端温度差异。本文选用暖昼指数（TX90）、冷昼指数（TX10）、暖

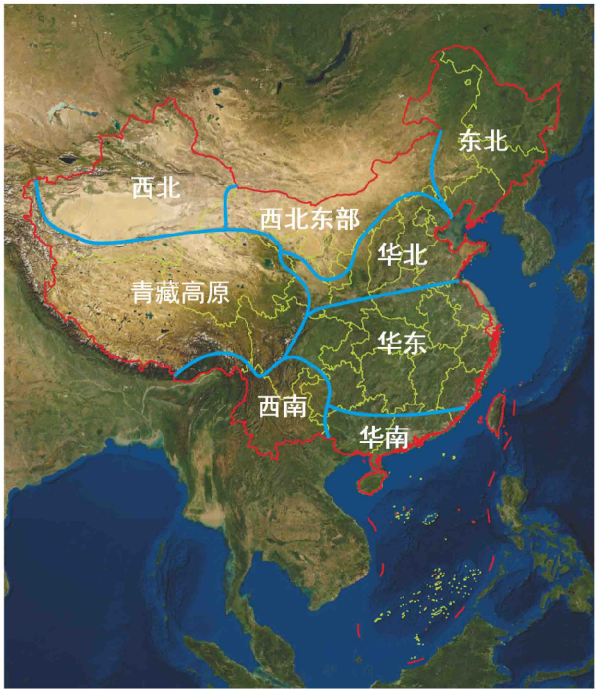

图 1 中国 8 个子区域的地理位置划分

Fig. 1 Geographic locations of eight subregions in China

表 1　极端温度指数的定义

Table 1　Definition of extreme temperature indices used in this study

指数名称	指数简写	定义	单位
暖昼指数	TX90	大于气候基准期内日最高气温的90%分位值	℃
冷昼指数	TX10	小于气候基准期内日最高气温的10%分位值	℃
暖夜指数	TN90	大于气候基准期内日最低气温的90%分位值	℃
冷夜指数	TN10	小于气候基准期内日最低气温的10%分位值	℃
暖日持续指数	WSDI	每年至少连续6天的日最高气温大于气候基准期90%分位数的累计日数	d
冷日持续指数	CSDI	每年至少连续6天的日最低气温小于气候基准期10%分位数的累计日数	d

夜指数（TN90）、冷夜指数（TN10）、暖日持续指数（WSDI）和冷日持续指数（CSDI）来研究中国极端温度的变化（表 1）。

2.3　统计分析方法

（1）泰勒图

泰勒图（Taylor, 2001）可以全面直观地比较模拟的极端温度与观测的极端温度的一致性，它是由模拟场与观测场的空间相关系数、相对标准差及其中心化的均方根误差组成的极坐标图，中心化的均方根误差越接近 0，空间相关系数和相对标准差越接近 1，模式模拟能力越好。本文利用泰勒图综合评估 CWRF 模式对不同区域极端温度指数的模拟效果。

（2）概率分布模拟

为了衡量两个分布之间的相似性，常用的方法有 KL 散度（Kullback-Leibler divergence）和 JS 散度（Jensen-Shannon divergence），常用作模型的拟合损失评价指标。JS 散度的计算基于 KL 散度做了改进，解决了 KL 散度非对称的问题。对于两个概率分布 $p(x)$ 和 $q(x)$，JS 散度计算公式如下：

$$\mathrm{JS}(p\|q)=\frac{1}{2}\mathrm{KL}\left(p\|\frac{p+q}{2}\right)+\frac{1}{2}\mathrm{KL}\left(q\|\frac{p+q}{2}\right),\qquad(1)$$

其中，

$$\mathrm{KL}(p\|q)=\sum p(x)\log\frac{p(x)}{q(x)}.\qquad(2)$$

因此，JS 散度是对称且有界的，其取值在 0 到 1 之间。利用上式，本文将极端温度指数（TX90、TN90、TX10、TN10）的观测和模拟概率分布分别作为 $P(x)$ 和 $Q(x)$，以此来定量评估 CWRF 对不同区域的极端温度分布特征的模拟效果。JS 散度值越小，则表示观测和模拟的概率分布的越接近，模拟效果越好。

（3）年际变化趋势分析

常用的趋势分析方法包括最小二乘法线性回归估计，该方法对离群值敏感且要求数据满足正态分布，而 Theil–Sen的趋势估计和 Mann–Kendall（MK）检验要求时序数据不具有自相关性。张嘉仪和钱诚（2020）指出高温热浪数据大多数不服从正态分布且存在较强自相关，传统的趋势分析方法存在一定缺陷。考虑到极端温度变化具有不连续性和突变性的特点，波动较大且离群点较多，Yue and Wang（2002）基于 MK 趋势分析做了改进，对时间序列进行了预白化处理，不易受离群值影响且无需满足正态分布，对于极端温度的年际趋势估计结果更具稳定性和可靠性，因此本研究主要采用改进的 MK 趋势分析方法，对我国不同区域极端温度指数的年际变化趋势进行分析。

3　区域极端温度指数的时空分布特征及变化趋势的模拟评估

3.1　年极端冷、暖指数的空间分布特征

图 2 比较 1980～2015 年观测和 CWRF 模拟的 TX90、TX10、TN90、TN10 的年平均空间分布特征。这 4 个指数着重体现日、夜的高温和低温的强度特征。首先从观测中可看出，暖指数（暖昼、暖夜）、冷指数（冷昼、冷夜）具有显著的不同的区域型分布特征。其中，暖指数（TX90、TN90）的极大值区均位于华南地区（年均阈值分别是 34°C、28°C 以上），高值区域向北扩展经过华东华北，分别向东、西两侧伸展，在西北内陆以及东北三省暖指数温度均较高；暖指数的显著低值区域均位于青藏高原地区。然而，冷指数（TX10、TN10）的高值区域集中分布在华南及华东（年均阈值分别是 23°C、13°C 以上）以及西北地区天山以南地区（年均阈值分别是 18°C、5°C 以上）；冷指数的低值区域主要位于高原以北—西北东部—东北偏北一线，其中冷昼 TX10、冷夜 TN10 在高原北部、

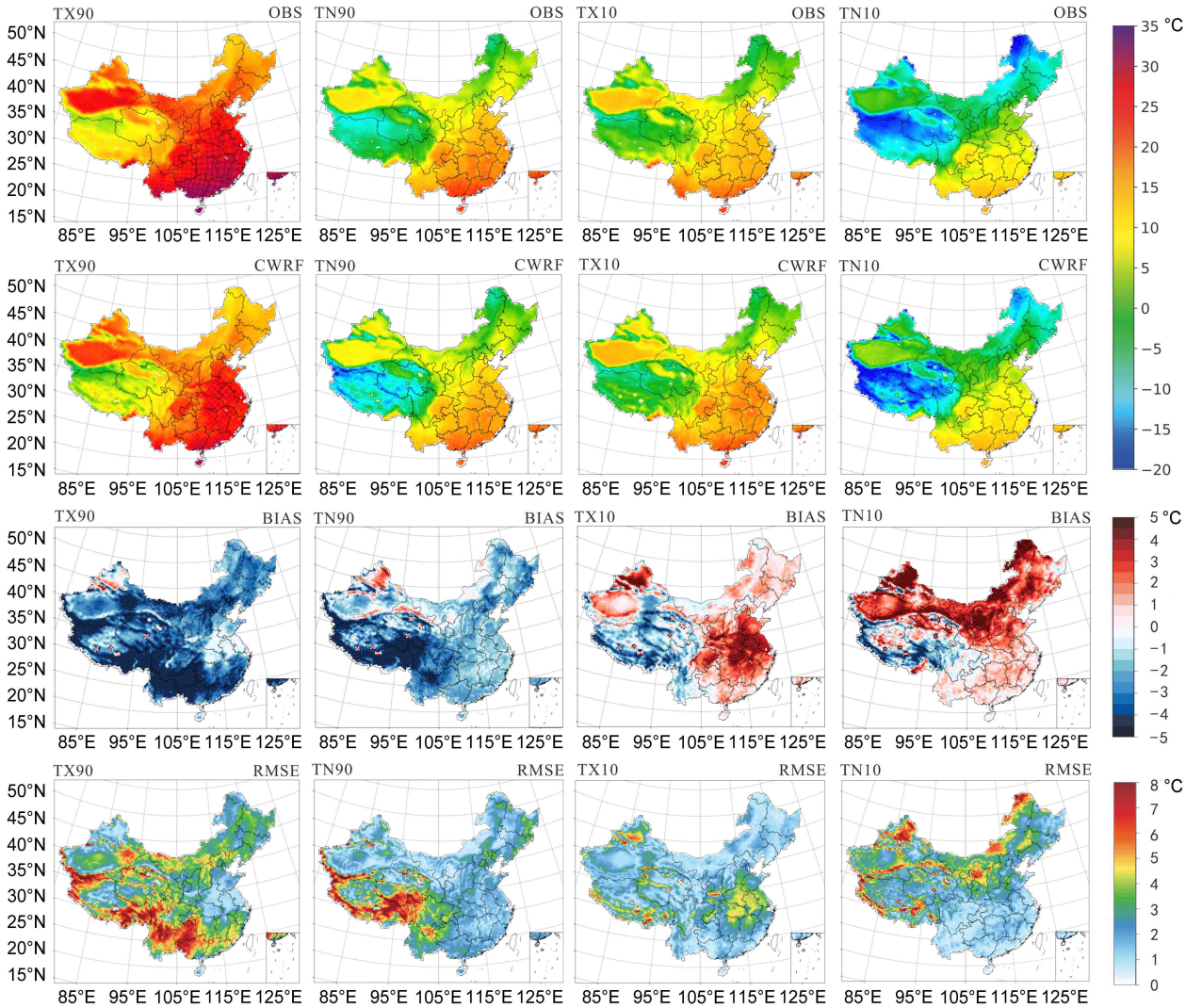

图 2 1980～2015 年平均 TX90、TX10、TN90、TN10 指数的观测（OBS）、模拟（CWRF）、模式偏差（BIAS）和均方根误差（RMSE）的空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of annual mean extreme temperatures indices (TX90, TX10, TN90, and TN10) from 1980 to 2015 from observation (OBS), CWRF simulation, and model biases (BIAS) as well as the root mean square errors (RMSE)

东北北部温度最低（年均阈值分别在 0°C、−15°C 以下）。

从年空间分布的 CWRF 模式模拟来看，模式基本再现了观测的暖、冷指数总体的空间分布特征。基于模拟偏差的空间分布图，可以发现：（1）模式对暖指数（暖昼、暖夜）的温度模拟存在系统性的低估，青藏高原比较显著，在全国大部分区域均有 2°C 左右的冷偏差；其中暖昼在华南、西南地区的低估偏多（局地超过−4°C）；（2）模式对冷指数（冷昼、冷夜）的温度模拟偏差存在区域性的差异，在青藏高原南侧均存在系统性的低估，但高估华东及华北地区的冷昼温度（局地超过 3°C），以及西北—东北地区冷夜温度（局地超过 4°C）；由此可见，CWRF 模式对 1980～2015 年的暖指标温度较高的地区存在系统性低估，冷指标温度较低的地区存在系统性的高估，说明模式对这些地区的日最高温度的模拟偏低，对日最低温度的模拟偏高，但对青藏高原地区的日极值温度（高温、低温）存在系统性的低估。对于高原以外地区极端温度的变率模拟偏低的问题，原因可能比较复杂，Liang et al.（2019）指出模式对我国中部及南部地区夏季平均温度的年际变化特征的模拟性能有限，并指出了该区域存在强的对流活动与复杂的海陆气相互作用。因此，该地区极端温度模拟的偏差，可能与大尺度环流的强迫与区域因素和物理过程之间的反馈相关，尤其需要进一步发展优化的多物理过程集合

来提高模式对关键的对流—微物理—辐射以及下垫面—大气相互作用的表达。

图 3 为 1980～2015 年平均的我国暖日持续指数（WSDI）和冷日持续指数（CSDI）的空间分布特征。这两个指数与图 2 中的阈值强度不同，着重表征暖冷指标的持续性特征，能够反映持续性极端温度事件的区域性分布特征。由观测可知：1980～2015 我国年平均 WSDI 在西北、青藏高原和西南地区偏高，其中部分地区长达 10 d 以上；CSDI 在西南南部、华南南部、东北北部和西北地区较高，长达 8 d 以上；整体而言，WSDI 的持续性比 CSDI 更为明显。

CWRF 模式对我国大部分地区暖日和冷日持续指数的模拟偏差较小，存在显著优势，尤其对西北地区天山一侧、青藏高原南部、西南云贵的持续高温事件，以及我国东部地区包括华东、华南以及

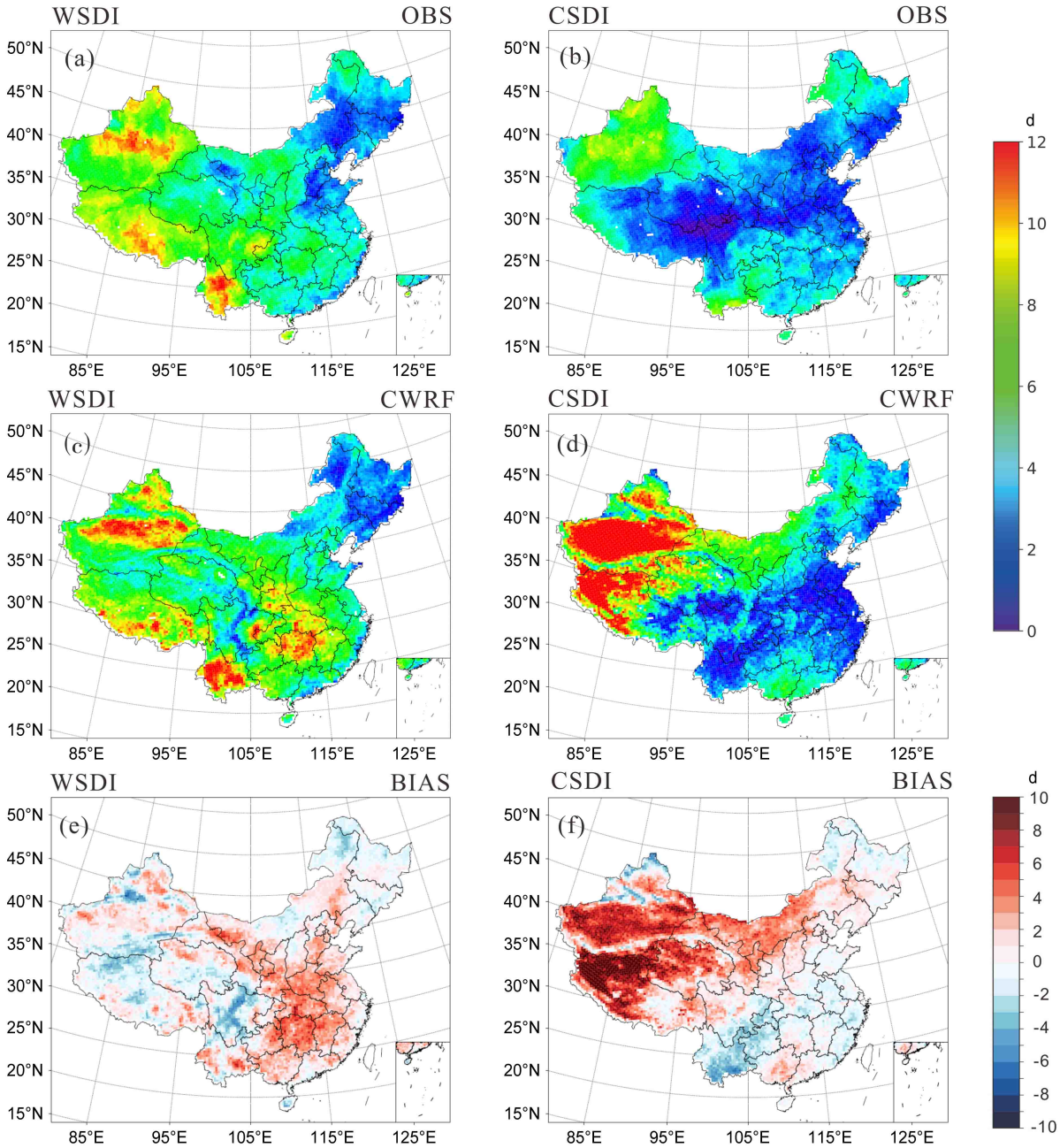

图 3　1980～2015 年平均 WSDI 指数（第一列）、CSDI 指数（第二列）的（a、b）观测、（c、d）模拟、（e、f）模式偏差的空间分布

Fig. 3　Spatial distributions of annual mean WSDI (warm spell duration indicator, first column) and CSDI (cold spell duration indicator first column, second column) from 1980 to 2015 from (a, b) observation, (c, d) CWRF simulation, and (e, f) model biases

东北地区的持续低温事件模拟误差普遍较小；WSDI 的偏差范围和偏差幅度都小于 CSDI，模式对 WSDI 模拟优于对 CSDI 模拟。然而，模式仍存在的问题是对华东中部地区的 WSDI、西北地区的 CSDI 存在系统性的高估（年均 3 d 和 5 d 以上）。

3.2 区域模拟误差统计特征评估

图 4 为 1980～2015 年 CWRF 模拟的 TX90、TX10、TN90、TN10 在 8 个不同区域的平均偏差盒须图。结果显示，暖指数的模拟在 8 个区域均为系统性的冷偏差，但偏差幅度存在区域差异。其中，暖昼 TX90 在西南和青藏高原地区的冷偏差较大（5°C 以上），其余地区冷偏差约 2～5°C；暖夜 TN90 相比于 TX90，冷偏差幅度较小，在西南和青藏高原地区约偏低 3～4°C；冷指数的模拟在青藏高原地区均为冷偏差，其余地区均以暖偏差为主；其中青藏高原地区，冷昼 TX10 和冷夜 TN10 的温度模拟分别偏低 2°C 和 1°C；除此之外，冷昼 TX10 在西南地区出现弱的冷偏差；对于西北—西北东部—东北地区，冷夜 TN10 的暖偏差超过 2°C，普遍高于冷昼 TX10 的偏差幅度。该统计结果与前面模拟偏差的空间分布特征一致，表明模式对青藏高原地区的暖、冷指数的模拟均偏低；然而，对其他大部分地区，模式系统性低估暖指数的温度，其中对暖日的低估幅度较大；模式系统性高估北方地区冷指数的温度，尤其冷夜的高估幅度较大。

图 5 是 CWRF 模拟的 TX90、TN90、TX10、TN10 在 8 个不同区域的极端温度指数的 JS 散度，用于衡量极端温度的观测概率分布与模拟概率分布之间的差异，其数值越接近于 0，说明两个分布重合度越高，其数值越接近于 1，则说明两个分布重合度越低。结果显示：（1）模式模拟的暖指标（暖昼 TX90、暖夜 TN90）的概率 JS 评分均在南部地区（华南、西南、青藏高原）偏高，模拟偏差显著，对应图 2 中暖指标在对应区域存在显著的冷偏差；并且，模式对于暖昼 TX90 的 JS 评分普遍高于暖夜 TN90，表明模式模拟的暖夜 TN90 的偏差相对较小，与图 2 中两者的区域偏差数值较一致；（2）模式模拟的冷指标（冷昼 TX10、冷夜 TN10）的概率 JS 评分与图 2 中的偏差分布也较为一致。其中，冷昼 JS 评分偏大的区域为华北和华东，对应图 2 中的 TX10 暖偏差高值区；冷夜 JS 评分偏大的区域为西北—西北东部—华北—东北的北部地区，对应图 2 中 TN10 暖偏差高值区；因此，模式模拟的 JS 评分也定量的指出，模式对暖指标模拟冷偏差较大的地区主要在南部地区（华南、西南、青藏高原），且暖昼模拟的偏差比暖夜要大；然而，模式对冷指标模拟暖偏差较大的区域分别在中部偏东（华北、华东）、北部地区（西北—西北东部—华北—东北）。

图 6 为 CWRF 模拟的 8 个不同区域 1980～2015 年的年平均的 TX90、TX10、TN90、TN10 指数的泰勒图。结果显示，暖、冷指标在 8 个区域

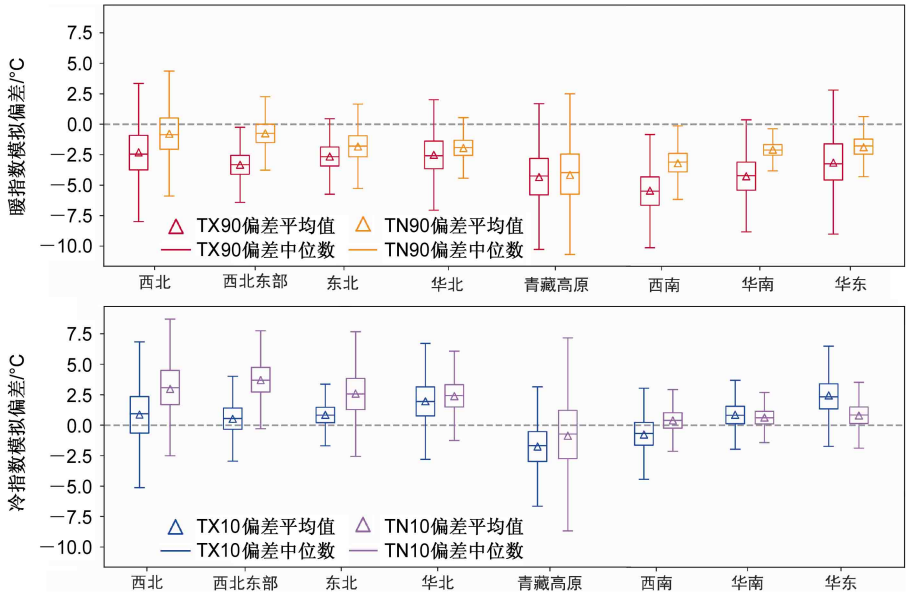

图 4 1980～2015 年平均的（a）TX90 和 TN90、（b）TX10 和 TN10 指数在中国 8 个不同区域的模拟偏差盒须图

Fig. 4 Boxplot of model biases for annual mean (a) TX90 and TN90, (b), TX10 and TN10 indices over eight subregions in China from 1980 to 2015

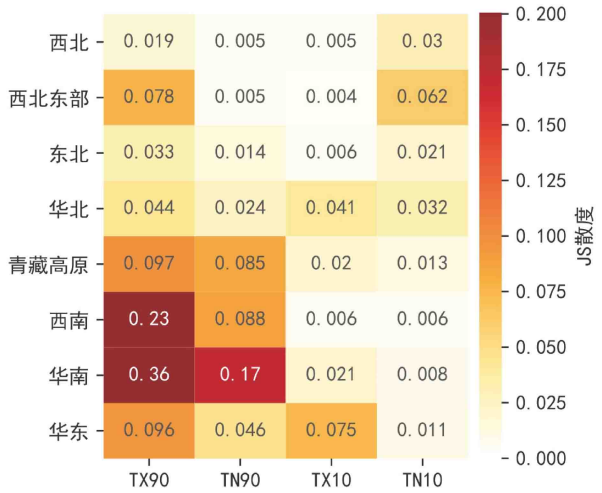

图 5　CWRF 模拟的中国 8 个区域极端温度指数的概率分布 JS 散度

Fig. 5　Jensen–Shannon divergence of CWRF simulated probability distribution of extreme temperature indices over eight subregions in China

的相关系数基本都超过 0.8，表明模式对于这 4 个指数的区域空间分布基本特征模拟较好；标准差体现了模拟误差的波动程度，结果表明 CWRF 模式对北方（西北、东北）和青藏高原的极端温度模拟的标准差较大，而对南方（华南、西南和华东）的极端温度模拟的标准差较小。结合图 5 可知，与北方地区相比较，南方地区模拟的极端温度指数的标准差较小，说明该地区极端温度的变化阈值范围小于北方地区；同时，南方地区的 JS 散度较大，说明该地区模式模拟极端温度概率密度分布与观测的分布不重合度较高。二者综合分析得出，南方地区的极端温度指数概率大值区的模拟存在较大偏差，对应图 7 中极端温度指数，TX90，TX10，TN10 在南方尤其是青藏高原、华东地区的极值温度的较大偏差。

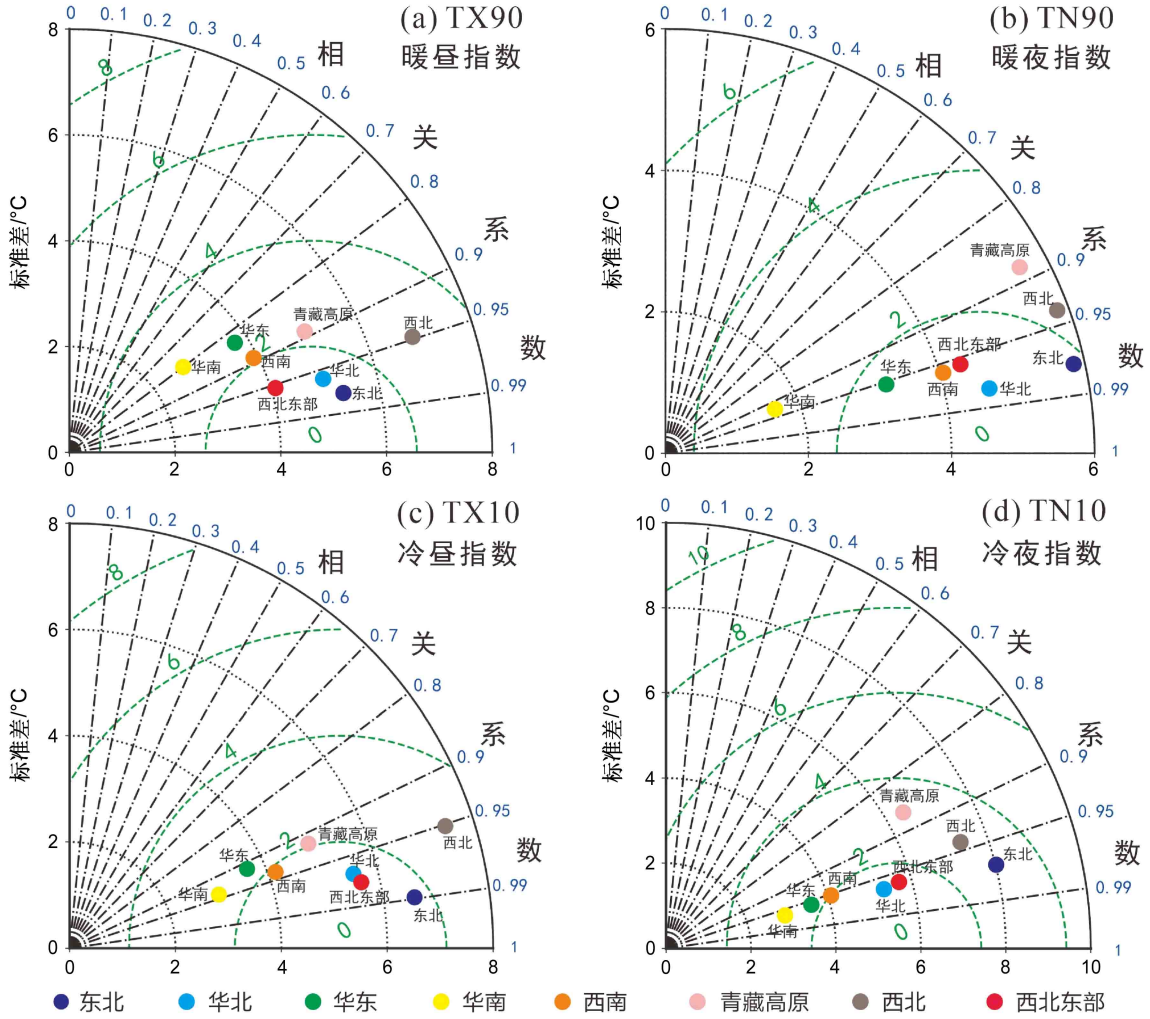

图 6　CWRF 模拟的中国 8 个不同区域 1980～2015 年平均（a）TX90、（b）TN90、（c）TX10、（d）TN10 指数的空间分布泰勒图

Fig. 6　Taylor diagrams of (a) TX90, (b) TN90, (c) TX10, and (d) TN10 indices simulated by CWRF averaged over eight regions in China from 1980 to 2015

3.3 极端温度指数的年际变率空间分布特征

极端温度指数年际变化的标准差可以反映区域极端温度波动的特征，图 7 为基于格点的 1980～2015 年观测和 CWRF 模拟的 TX90、TX10、TN90、TN10 指数的年际变化的标准差分布及其偏差、二者相关系数的空间分布。1980～2015 年观测的 4 个极端温度指数的年际变化的共性特征是北方的年际变率的幅度明显高于南方。其中，暖指数中的 TX90 的年际变率在西北和东北地区显著高于 TN90，而冷指数的 TX10 和 TN10 的年际变率分布近似。CWRF 模式对 4 个极端温度指数年际变率的模拟较好，能够体现北方地区年际变率大于南方的特征；然而 CWRF 模拟的偏差主要位于西北、青藏高原以及东北地区，在青藏高原地区和西北地区都出现了不同程度的高估；特别的是，东北地区的 TX10 出现高估，而 TN10 出现低估。从相关系数的分布来看，模式较好地模拟了我国大部分地区 1980～2015 年的 4 个极端温度指数的年际变化特征。其中，在北方的相关系数整体高于南方，大部分地区达到 0.98 以上，而不同指数在南方的相关系数分布存在一定差异。西南地区的 TX90、华南南部的 TN90、华东地区的 TX10 和青藏高原的 TN10 相关系数较低。因此可见，对于年际变率较大的北方地区，CWRF 模式能较好的模拟其大范围地区观测的极端温度指数的年际变化，但低估（高估）了在东北偏北、西北偏西地区（青藏高原、

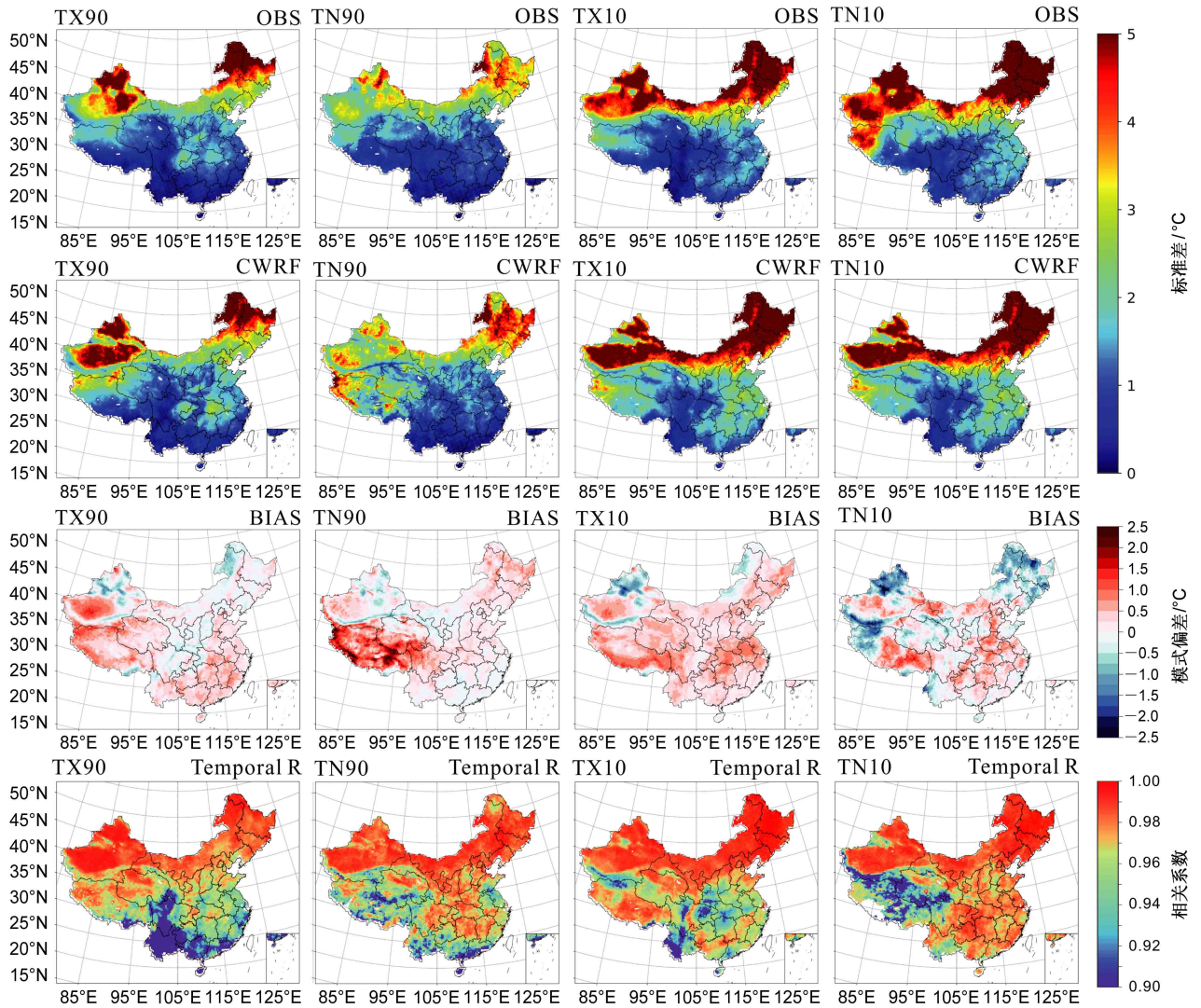

图 7 1980～2015 年观测（OBS）和模拟（CWRF）的 TX90、TX10、TN90、TN10 指数年际变化的标准差分布（第一行、第二行）、模式偏差（BIAS，第三行）和年际变化相关系数（Temporal R，第四行）的空间分布

Fig. 7 Spatial distributions of the interannual variances (the first line and second line) of TX90, TX10, TN90, and TN10 indices from observation (OBS) and CWRF simulation (CWRF), and their biases (the third line) as well as the interannual correlation coefficients (the fourth line)

华东地区）的极端指数的年际变率幅度。

3.4　极端温度指数的年际趋势特征的模拟评估

图 8 为 1980～2015 年观测和 CWRF 模拟的区域平均的极端温度指数年际变化的时间序列。观测显示极端温度指数存在较大幅度的年际波动，暖指数（TX90、TN90）在我国大部分地区都是较为显著的年际上升趋势，但冷指数（TX10、TN10）主要在北方地区（西北、东北）为年际下降趋势，而且不同暖冷指数的年际趋势的变化幅度存在区域差异。结合表 2，对于暖指数，青藏高原、西南和华南地区的暖夜上升幅度超过暖昼；西北东部地区的暖昼上升趋势明显，而暖夜无显著的上升趋势；对于冷指数，青藏高原地区，冷昼出现显著的上升趋势，冷夜表现为下降趋势；西北和西北东部的冷夜下降幅度明显超过冷昼。对于持续性极端温度指数（WSDI、CSDI）的年际波动显著，CSDI 总体呈下降趋势，WSDI 总体呈上升趋势且更为明显。北方地区（西北、西北东部和青藏高原）的 WSDI 上升的趋势和 CSDI 下降的趋势均较大，而南方地区的 WSDI 和 CSDI 的变化趋势并不显著。CWRF 模式能够很好地模拟到我国大部分地区的极端温度指数的年际变化趋势，但对于暖冷指数的强度模拟在一些区域存在较大的偏差，如南方地区，包括青藏高原、西南、华南及华东地区普遍低估的暖昼和暖夜指数，以及青藏高原低估的冷昼等。

图 9 进一步展示了基于改进的 MK 分析方法的观测和 CWRF 模拟的 TX90、TX10、TN90、TN10 指数的年际变化趋势的空间分布及模拟偏差；CWRF 基本模拟到了观测中 4 个极端温度指数的气候变化趋势的总体分布特征及区域差异。首先，对于观测中的暖指数（TX90、TN90），我国大部分地区表现出增暖趋势。其中，模式模拟到暖昼 TX90 在西北、东北和四川盆地的显著增暖（局地超过 1°C/10 a），在华东和华南沿海的弱增暖，在青藏高原地区弱变冷的趋势特征；然而在青藏高原和华东地区的趋势模拟出现负偏差。同时，模式较好地模拟到了观测中暖夜 TN90 在全国大部分地区显著增暖的趋势特征，但模式高估了青藏高原的变暖趋势，低估了华东地区的变暖趋势。其次，观测中的冷指数（TX10、TN10）在北方地区普遍表现为显著变冷的趋势（Xu et al., 2020），尤其是 TN10 变冷幅度和范围更广；其中，模式模拟到冷昼 TX10 在西北、东北显著变冷，而南方大部分地区增暖的年际趋势特征，但模式低估了在西北和西北东部的冷昼 TX10 变冷趋势，以及在华东地区冷昼 TX10 变暖的趋势。同时，模式较好地模拟到冷夜 TN10 在西北、西北东部和华东显著变冷，在华北、青藏高原东部、西南地区弱增暖趋势，但对于西北、西北东部和华东的变冷趋势模拟存在负偏差。

总体来说，暖指数在我国大部分地区为增暖趋势，其中暖夜 TN90 增暖的幅度和范围较广，而暖昼 TX90 主要在西北、东北和四川盆地增暖显著，模式能较好地捕捉到这些特征，但高估了青藏高原地区暖昼 TX90 变冷、暖夜 TN90 变暖的趋势，低估暖昼 TX90 和暖夜 TN90 在华东地区均增暖的趋势。然而，冷指数在我国北方地区的变冷趋势显著，其中冷夜 TN10 的变冷幅度和范围更广，而冷昼 TX10 主要在西北、东北变冷趋势显著，但在南方地区多为增暖趋势；模式能捕捉到冷指数年际趋势

表 2　1980 ~ 2015 年 8 个不同区域的 TX90、TN90、TX10、TN10 指数的年际趋势及模拟偏差

Table 2　Interannual trend and simulation bias of TX90, TN90, TX10, and TN10 indices over eight regions from 1980 to 2015

°C (10 a)$^{-1}$

	TX90		TN90		TX10		TN10	
	年际趋势	模拟偏差	年际趋势	模拟偏差	年际趋势	模拟偏差	年际趋势	模拟偏差
西北	0.492*	−0.082	0.210	−0.232	−0.539	−0.002	−1.118*	−0.388
西北东部	0.492*	−0.100	0.498*	0.014	−0.299	0.095	−0.704*	−0.235
东北	0.952*	0.055	0.975*	0.093	−0.756*	−0.051	−0.776	−0.175
华北	0.254*	−0.124	0.620*	−0.082	0.155	−0.149	0.097	−0.248
青藏高原	−0.064	−0.150	0.982*	0.286	0.226*	−0.099	−0.121	−0.284
西南	0.140*	−0.178	0.447*	−0.015	0.195*	−0.020	0.127	−0.063
华南	0.361*	0.088	0.496*	−0.123	0.204	0.236	0.142	−0.071
华东	0.435*	−0.096	0.285*	0.013	0.242	−0.060	−0.136	−0.127

*表示通过了95%的显著性检验。

的空间分布特征，但低估冷昼 TX10 在西北、西北东部的变冷趋势，高估冷夜 TN10 在西北、西北东部、华东的变冷趋势。因此，CWRF 模式模拟的暖指数趋势偏差主要在青藏高原、华东地区；冷指数趋势偏差主要在北方地区（西北、西北东部）和华东地区。

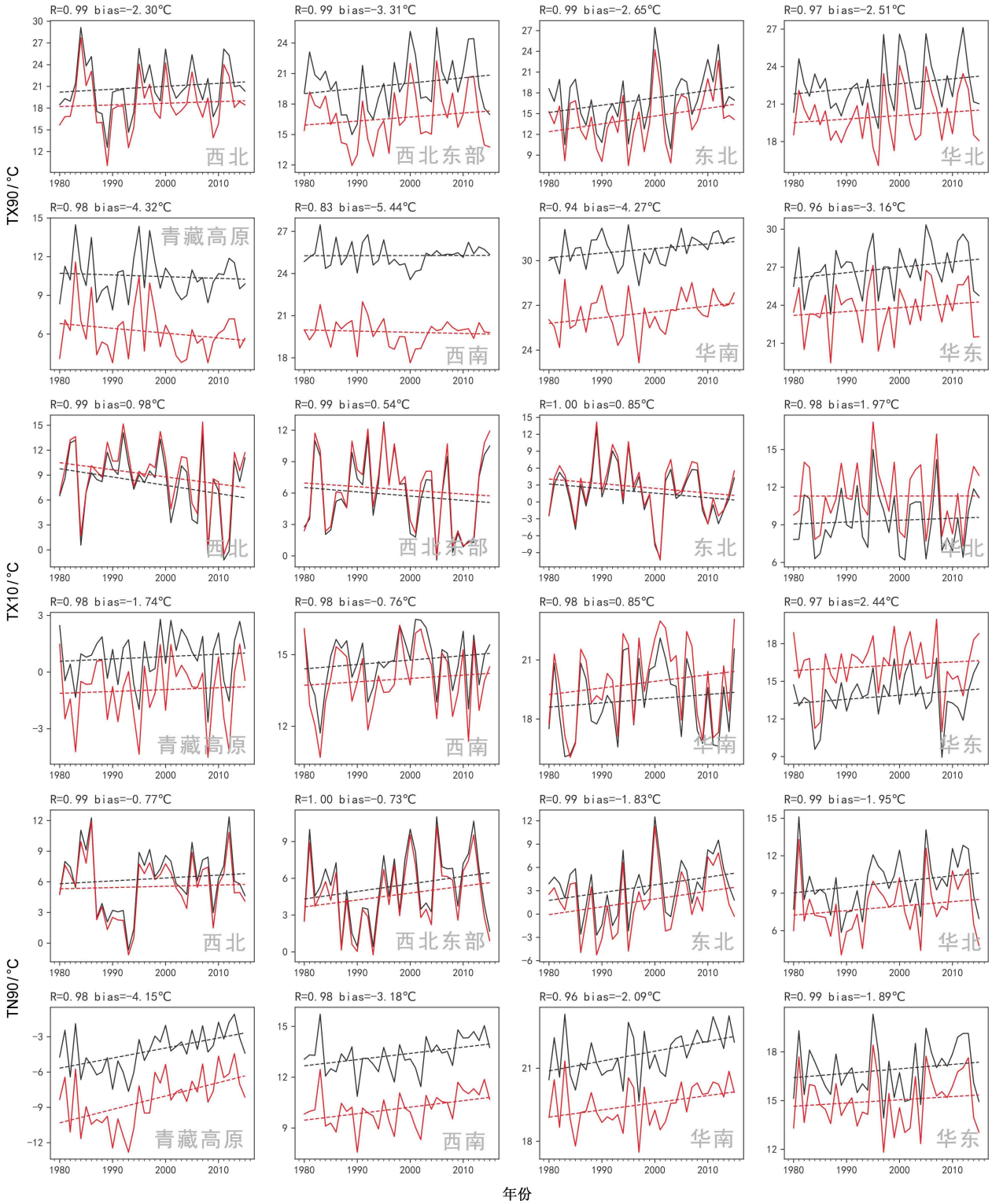

图 8 1980～2015 年观测（黑线）和模拟（红线）的 TX90、TX10、TN90、TN10、WSDI、CSDI 指数在中国 8 个不同区域的年际变化

Fig. 8 Interannual variations of observed (black lines) and simulated (red lines) TX90, TX10, TN90, TN10, WSDI, and CSDI indices averaged over eight regions in China from 1980 to 2015

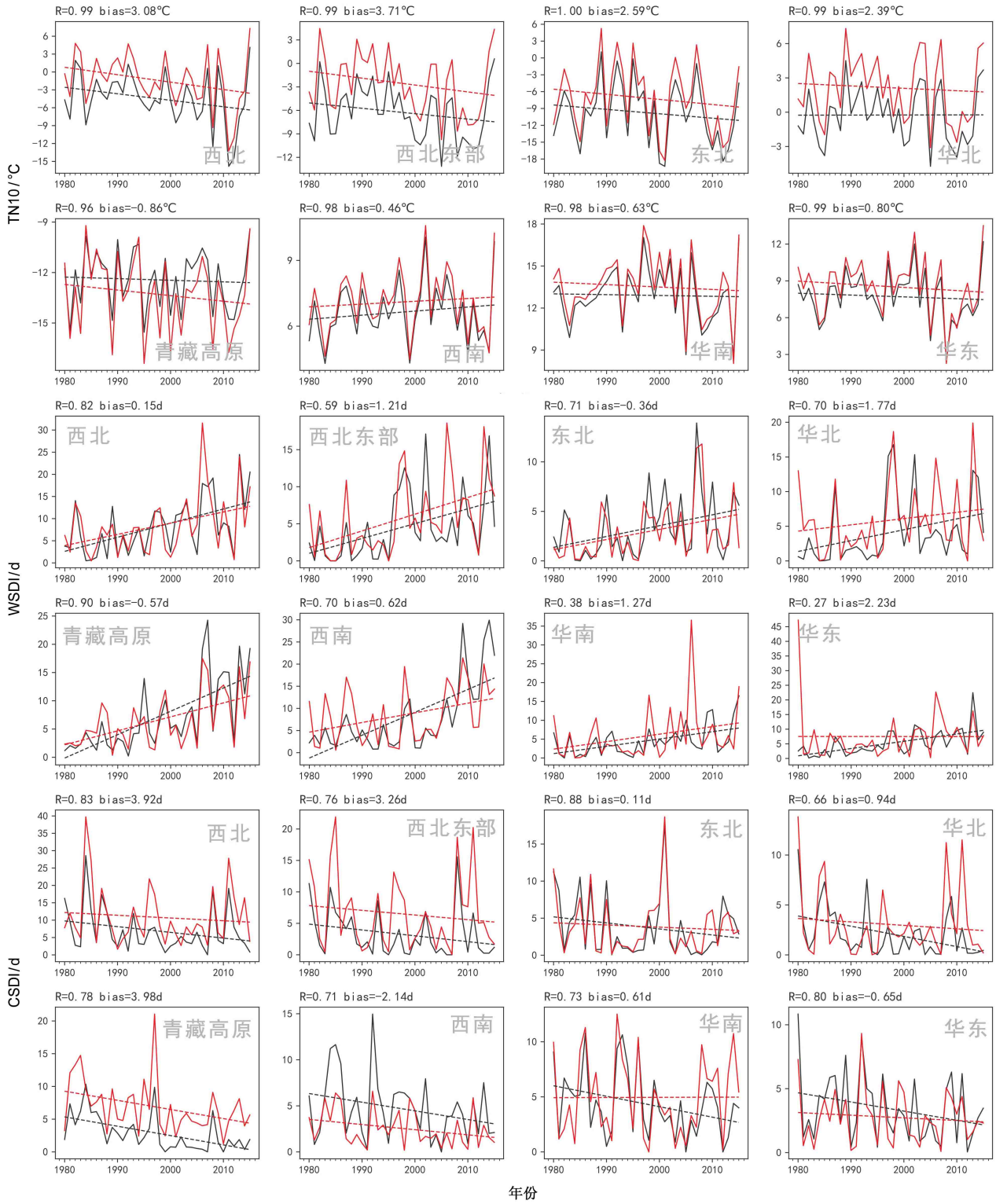

图 8　（续）

Fig. 8　（Continued）

4　结论及展望

本文基于 1980～2015 年的全国气温观测数据和区域气候模式 CWRF 控制版本的连续积分结果，结合暖昼指数（TX90）、暖夜指数（TN90）、冷昼指数（TX10）、冷夜指数（TN10）、暖日持续指数（WSDI）和冷日持续指数（CSDI）6 个极端温度指数，利用相关系数、均方根误差、JS 散度

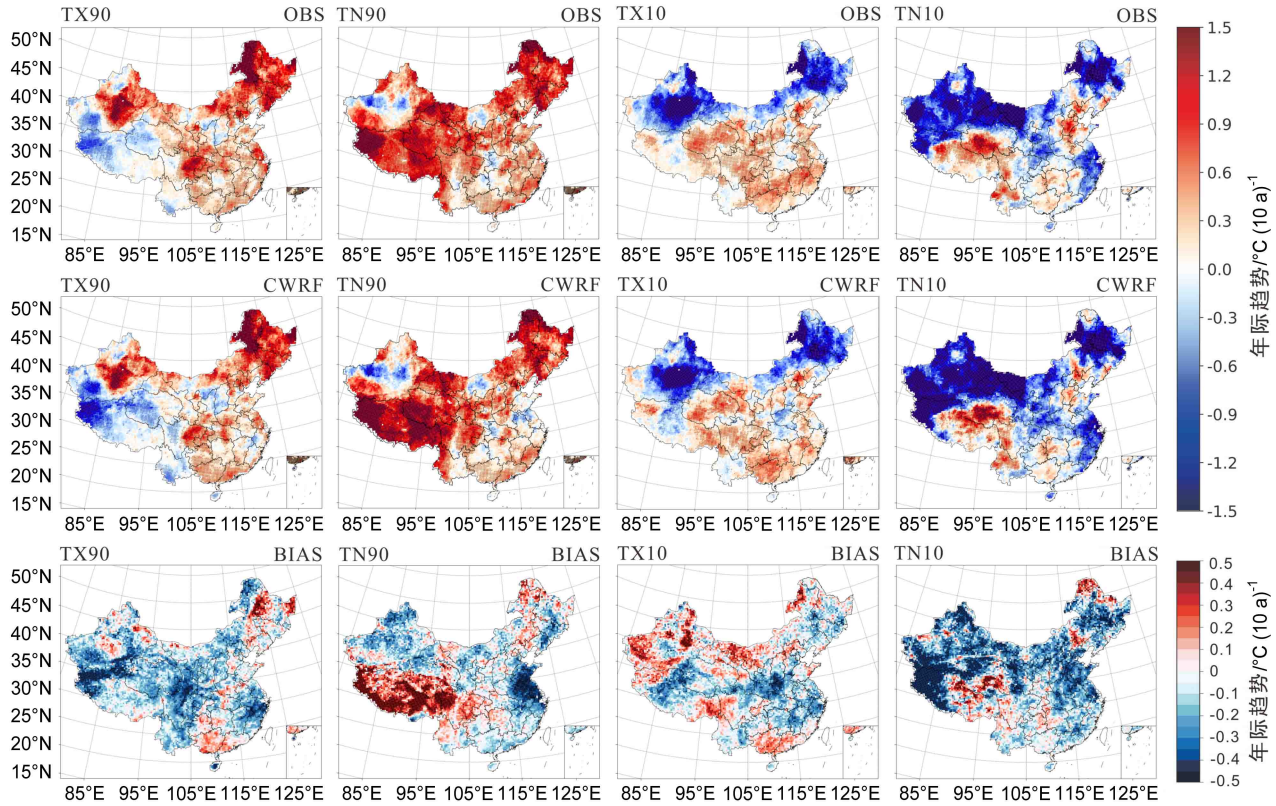

图 9 1980～2015 年平均观测（OBS，第一行）、模拟（CWRF，第二行）和模拟偏差（BIAS，第三行）的 TX90、TN90、TX10、TN10 指数年际趋势空间分布（黑点表示通过了 95% 的显著性检验）

Fig. 9 Spatial distributions of the interannual changing trend of extreme temperature indices (TX90, TX10, TN90, and TN10) from observation and CWRF simulation as well as their biases from 1980 to 2015. The black dots indicate that 95% of the significance test has been passed

概率分布、改进的 MK 趋势分析等多种统计方法，从年空间分布、概率分布、年际变率、年际趋势方面，对我国东北、华北、华东、华南、西南、青藏高原、西北、西北东部 8 个不同气候区域的极端温度的观测特征进行细致定量的研究，系统地评估区域气候模式 CWRF 对 1980～2015 年我国不同区域的极端温度指数的模拟能力及偏差所在。得出的主要结论如下：

（1）观测的暖指数（TX90、TN90）和冷指数（TX10、TN10）的高值区均位于华南地区和西北内陆，低值区位于青藏高原和东北；CWRF 模式基本再现了观测的暖冷指数的纬度地带性分布特征，但在青藏高原地区无论暖、冷指数均较观测显著偏低，存在系统性的低估；然而，模式对暖指数高值区（如华南、西南）的暖昼指数低估显著，说明该地区模拟的日最高温度偏低；同时，模式较显著高估冷指数低值区，即北方地区（西北—东北）的冷夜温度，说明该地区模拟的日最低温度偏低；

（2）观测的极端温度持续性指数（WSDI、CSDI）表明，暖事件的持续性比冷事件显著，前者大值区位于西北、青藏高原和西南地区，后者大值区位于西南南部、华南南部、东北北部和西北地区；CWRF 模式对我国大部分地区持续性指数的模拟偏差小于 3 天，尤其对西北地区天山一侧、青藏高原南部、西南云贵的持续高温事件，以及我国东部地区包括华东、华南以及东北地区的持续低温事件模拟误差普遍较小；然而，模式仍存在的问题是对华东中部地区的暖日持续指数、西北地区的冷日持续指数存在高估；

（3）观测的极端温度指数在北方的年际变率的幅度明显高于南方，暖指数中的暖昼 TX90 的年际变率在北部地区显著高于暖夜 TN90，而冷指数的冷昼 TX10 和冷夜 TN10 的年际变率分布近似。CWRF 模式较好地模拟到 4 个极端温度指数在北方地区年际变率大于南方地区的特征，且对北方地区的极端温度的变化模拟更有优势，相关系数整体高于南方。然而，CWRF 模拟的偏差主要位于西北、青藏高原以及东北地区，在前两个地区均为不

同程度的高估，但高估东北地区的冷昼指数，低估冷夜指数；

（4）模式能够较好地模拟到暖指数在我国大部分地区的增暖趋势，以及冷指数在我国北方地区显著的变冷趋势以及冷昼指数在南方地区的增暖趋势。然而，模式高估青藏高原地区暖昼变冷、暖夜变暖的趋势，高估冷夜在北方地区和华东的变冷趋势；低估暖昼和暖夜在华东地区均增暖的趋势，低估冷昼在西北的变冷趋势。

尽管本文从气候平均、概率分布、年际变率和年际趋势方面评估了 CWRF 对极端温度指数的模拟能力，但本研究尚未深入分析误差的来源与成因。区域气候模式的误差主要来源于对物理过程和侧边界条件的描述不够准确（刘术艳等, 2008），由于极端温度受到气候系统内部与外部强迫过程的复杂影响（黄荣辉, 2006），因此模式中多个物理过程参数化方案间复杂的相互作用也十分重要，例如，陆面/海洋—对流—微物理过程、云—气溶胶—辐射过程等，都会从不同程度上影响区域极端温度变化的模拟和预测（王乐, 2018）。因此，在本研究的基础上，需要结合精度更高的观测数据，利用 CWRF 模式较全面的物理过程及方案，进行不同物理过程的敏感性实验，分析关键区域模式模拟的误差来源，并对典型的区域持续性的极端温度事件个例进行物理机制和成因探究，进一步加深对极端温度事件形成机制的理解，改进模式对极端气候事件的模拟和变化的预估。

参考文献（References）

Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. J. Geophys. Res., 111(D5): D05109. doi:10.1029/2005JD006290

Banzon V, Smith T M, Chin T M, et al. 2016. A long-term record of blended satellite and in situ sea-surface temperature for climate monitoring, modeling and environmental studies [J]. Earth System Science Data, 8(1): 165−176. doi:10.5194/essd-8-165-2016

陈正洪, 向华, 高荣. 2010. 武汉市 10 个主要极端天气气候指数变化趋势分析 [J]. 气候变化研究进展, 6(1): 22−28. Chen Zhenghong, Xiang Hua, Gao Rong. 2010. Trends of ten main extreme weather indices in Wuhan [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 6(1): 22−28. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2010.01.004

Chou M D, Suarez M J, Liang X Z, et al. 2001. A thermal infrared radiation parameterization for atmospheric studies [R]. NASA Tech. Memo. NASA/TM-2001-104606.

Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 137(656): 553−597. doi:10.1002/qj.828

董晓云, 余锦华, 梁信忠, 等. 2019. CWRF 模式在中国夏季极端降水模拟的误差订正 [J]. 应用气象学报, 30(2): 223−232. Dong Xiaoyun, Yu Jinhua, Liang Xinzhong, et al. 2019. Bias correction of summer extreme precipitation simulated by CWRF model over China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 30(2): 223−232. doi:10.11898/1001-7313.20190209

Feng J M, Wang Y L, Fu C B. 2011. Simulation of extreme climate events over China with different regional climate models [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 4(1): 47−56. doi:10.1080/16742834.2011.11446903

高谦. 2017. 多模式动力降尺度与偏差订正相结合的中国区域极端温度模拟及预估 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Gao Qian. 2017. Simulation and projection of temperature extremes over China based on multi-model dynamical downscaling and bias correction [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.

Gao X J, Shi Y, Giorgi F. 2011. A high resolution simulation of climate change over China [J]. Sci. China Earth Sci., 54(3): 462−472. doi:10.1007/s11430-010-4035-7

Gao X J, Shi Y, Zhang D F, et al. 2012. Climate change in China in the 21st century as simulated by a high resolution regional climate model [J]. Chinese Science Bulletin, 57(10): 1188−1195. doi:10.1007/s11434-011-4935-8

高学杰, 石英, 张冬峰, 等. 2012. RegCM3 对 21 世纪中国区域气候变化的高分辨率模拟 [J]. 科学通报, 57(5): 374−381. Gao Xuejie, Shi Ying, Zhang Dongfeng, et al. 2012. Climate change in China in the 21st century as simulated by a high resolution regional climate model [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 57(5): 374−381. doi:10.1360/csb2013-58-8-724

Gao X J, Wang M L, Giorgi F. 2013. Climate change over China in the 21st century as simulated by BCC_CSM1.1_RegCM4.0 [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 6(5): 381−386. doi:10.1080/16742834.2013.11447112

Gao X J, Shi Y, Han Z Y, et al. 2017. Performance of RegCM4 over major river basins in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 34(4): 441−455. doi:10.1007/s00376-016-6179-7

胡彩虹, 王纪军, 何福力. 2013. 基于 STARDEX 核心指数的黄河流域极端气候时空分布形态研究 [J]. 水资源研究, 2(6): 337−351. Hu Caihong, Wang Jijun, He Fuli. 2013. Research on time and space distribution of the Yellow River basin of extreme weather based on STARDEX core index [J]. Journal of Water Resources Research (in Chinese), 2(6): 337−351. doi:10.12677/JWRR.2013.26048

黄荣辉. 2006. 我国重大气候灾害的形成机理和预测理论研究 [J]. 地球科学进展, 21(6): 564−575. Huang Ronghui. 2006. Progresses in research on the formation mechanism and prediction theory of severe climatic disasters in China [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 21(6): 564−575. doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2006.06.002

Hui P H, Tang J P, Wang S Y, et al. 2015. Sensitivity of simulated extreme precipitation and temperature to convective parameterization using RegCM3 in China [J]. Theor. Appl. Climatol., 122(1–2): 315−335. doi:10.1007/s00704-014-1300-2

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, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Ji Z M, Kang S C. 2015. Evaluation of extreme climate events using a regional climate model for China [J]. Int. J. Climatol., 35(6): 888−902. doi:10.1002/joc.4024

Jiang Z H, Li W, Xu J J, et al. 2015. Extreme precipitation indices over China in CMIP5 models. Part I: Model evaluation [J]. J. Climate, 28(21): 8603−8619. doi:10.1175/JCLI-D-15-0099.1

Kong X F, Wang A H, Bi X Q, et al. 2019. Assessment of temperature extremes in China using RegCM4 and WRF [J]. Adv. Atmos. Sci., 36(4): 363−377. doi:10.1007/s00376-018-8144-0

李东欢, 周天军, 邹立维, 等. 2017. RegCM3CORDEX 东亚试验模拟和预估的中国夏季温度变化 [J]. 大气科学, 41(3): 544−560. Li Donghuan, Zhou Tianjun, Zou Liwei, et al. 2017. Simulated and projected surface air temperature over China in RegCM3 CORDEX East Asia experiments [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(3): 544−560. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1607.16153

Liang X Z, Li L, Kunkel K E, et al. 2004. Regional climate model simulation of U.S. precipitation during 1982–2002. Part 1: Annual cycle [J]. J. Climate, 17: 3510−3528. doi:10.1175/1520-0442(2004)017<3510:RCMSOU>2.0.CO;2

Liang X Z, Choi H I, Kunkel K E, et al. 2005. Surface boundary conditions for mesoscale regional climate models [J]. Earth Interactions, 9(18): 1−28. doi:10.1175/EI151.1

Liang X Z, Sun C, Zheng X H, et al. 2019. CWRF performance at downscaling China climate characteristics [J]. Climate Dyn., 52(3–4): 2159−2184. doi:10.1007/s00382-018-4257-5

刘冠州, 梁信忠. 2017. 新一代区域气候模式 (CWRF) 国内应用进展 [J]. 地球科学进展, 32(7): 781−787. Liu Guanzhou, Liang Xinzhong. 2017. Progress of the climate extension of weather research and forecast (CWRF) model application in China [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 32(7): 781−787. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2017.07.0781

Liu S Y, Gao W, Liang X Z. 2013. A regional climate model downscaling projection of China future climate change [J]. Climate Dyn., 41(7–8): 1871−1884. doi:10.1007/s00382-012-1632-5

刘术艳, 梁信忠, 高炜, 等. 2008. 气候-天气研究及预报模式 (CWRF) 在中国的应用: 区域优化 [J]. 大气科学, 32(3): 457−468. Liu Shuyan, Liang Xinzhong, Gao Wei, et al. 2008. Application of climate−weather research and forecasting model (CWRF) in China: Domain optimization [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(3): 457−468. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.03.04

马宁, 李跃凤, 琚建华. 2011. 2008 年初中国南方低温雨雪冰冻天气的季节内振荡特征 [J]. 高原气象, 30(2): 318−327. Ma Ning, Li Yuefeng, Ju Jianhua. 2011. Intraseasonal oscillation characteristics of extreme cold, snowy and freezing rainy weather in southern China in early 2008 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30(2): 318−327.

马柱国, 符淙斌, 任小波, 等. 2003. 中国北方年极端温度的变化趋势与区域增暖的联系 [J]. 地理学, 58(Z1): 11−20. Ma Zhuguo, Fu Congbin, Ren Xiaobo, et al. 2003. Trend of annual extreme temperature and its relationship to regional warming in northern China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58(Z1): 11−20. doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2003.z1.002

Qiao F X, Liang X Z. 2016. Effects of cumulus parameterization closures on simulations of summer precipitation over the United States coastal oceans [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 8(2): 764−785. doi:10.1002/2015MS000621

Qiao F X, Liang X Z. 2017. Effects of cumulus parameterization closures on simulations of summer precipitation over the continental United States [J]. Climate Dyn., 49(1–2): 225−247. doi:10.1007/s00382-016-3338-6

Reynolds R W, Smith T M, Liu C Y, et al. 2007. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature [J]. J. Climate, 20(22): 5473−5496. doi:10.1175/2007JCLI1824.1

Rontu L. 2006. A study on parametrization of orography-related momentum fluxes in a synoptic-scale NWP model [J]. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 58(1): 69−81. doi:10.1111/j.1600-0870.2006.00162.x

Seo K H, Ok J. 2013. Assessing future changes in the East Asian summer monsoon using CMIP3 models: Results from the best model ensemble [J]. J. Climate, 26: 1807−1817. doi:10.1175/JCLI-D-12-00109.1

Tao W K, Simpson J, Baker D, et al. 2003. Microphysics, radiation and surface processes in the Goddard Cumulus Ensemble (GCE) model [J]. Meteor. Atmos. Phys., 82(1–4): 97−137. doi:10.1007/s00703-001-0594-7

Taylor K E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. J. Geophys. Res., 106(D7): 7183−7192. doi:10.1029/2000JD900719

王冀, 江志红, 宋洁, 等. 2008. 基于全球模式对中国极端气温指数模拟的评估 [J]. 地理学报, 63(3): 227−236. Wang Ji, Jiang Zhihong, Song Jie, et al. 2008. Evaluating the simulation of the GCMS on the extreme temperature indices in China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 63(3): 227−236. doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2008.03.001

王乐. 2018. 陆面过程及地表覆盖对中国地区区域气候变化模拟的影响评估 [D]. 南京大学硕士学位论文. Wang Le. 2018. Evaluation of the climate change with 5 LUCCs and 3 LSMs using WRF in China land area [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University.

王琼, 张明军, 王圣杰, 等. 2013. 1962~2011 年长江流域极端气温事

件分析 [J]. 地理学报, 38(5): 611−625. Wang Qiong, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. 2013. Extreme temperature events in Yangtze River Basin during 1962–2011 [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 38(5): 611−625. doi:10.11821/xb201305004

Wang S Y, Fu C B, Wei H L, et al. 2015. Regional integrated environmental modeling system: Development and application [J]. Climatic Change, 129(3–4): 499−510. doi:10.1007/s10584-013-0973-3

王晓娟, 龚志强, 任福民, 等. 2012. 1960~2009 年中国冬季区域性极端低温事件的时空特征 [J]. 气候变化研究进展, 8(1): 8−15. Wang Xiaojuan, Gong Zhiqiang, Ren Fumin, et al. 2012. Spatial/temporal characteristics of China regional extreme low temperature events in winter during 1960–2009 [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 8(1): 8−15. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2012.01.002

王晓利, 侯西勇. 2017. 1961～2014 年中国沿海极端气温事件变化及区域差异分析 [J]. 生态学报, 37(21): 7098−7113. Wang Xiaoli, Hou Xiyong. 2017. Analysis of spatio−temporal variations and regional differences in extreme temperature events in the coastal area of China during 1961–2014 [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 37(21): 7098−7113. doi:10.5846/stxb201609091830

吴佳, 高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比 [J]. 地球物理学报, 56(4): 1102−1111. Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 56(4): 1102−1111. doi:10.6038/cjg20130406

肖冰霜, 马玉霞, 赵天保, 等. 2016. 基于均一化资料的中国大陆极端温度的长期趋势 [J]. 气象, 42(3): 339−346. Xiao Bingshuang, Ma Yuxia, Zhao Tianbao, et al. 2016. Long-term trends in extreme temperature over China mainland based on homogenized dataset [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42(3): 339−346. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.3.009

Xu J Y, Shi Y, Gao X J, et al. 2013. Projected changes in climate extremes over China in the 21st century from a high resolution regional climate model (RegCM3) [J]. Chinese Science Bulletin, 58(12): 1443−1452. doi:10.1007/s11434-012-5548-6

Xu Y, Gao X J, Shen Y, et al. 2009. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation [J]. Adv. Atmos. Sci., 26(4): 763−772. doi:10.1007/s00376-009-9029-z

Xu Y, Zhao P, Si D, et al. 2020. Development and preliminary application of a gridded surface air temperature homogenized dataset for China [J]. Theor. Appl. Climatol., 139(1–2): 505−516. doi:10.1007/s00704-019-02972-z

杨萍, 刘伟东, 王启光, 等. 2010. 近 40 年我国极端温度变化趋势和季节特征 [J]. 应用气象学报, 21(1): 29−36. Yang Ping, Liu Weidong, Wang Qiguang, et al. 2010. The climatic change trend and seasonal characteristics of daily temperature extremes in China for the latest 40 years [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 21(1): 29−36. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2010.01.004

姚遥, 罗勇, 黄建斌. 2012. 8 个 CMIP5 模式对中国极端气温的模拟和预估 [J]. 气候变化研究进展, 8(4): 250−256. Yao Yao, Luo Yong, Huang Jianbin. 2012. Evaluation and projection of temperature extremes over China based on 8 modeling data from CMIP5 [J]. Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis (in Chinese), 8(4): 250−256. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2012.04.003

You Q L, Kang S C, 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 Dyn., 36(11–12): 2399−2417. doi:10.1007/s00382-009-0735-0

Yu E T, Sun J Q, Chen H P, et al. 2015. Evaluation of a high-resolution historical simulation over China: Climatology and extremes [J]. Climate Dyn., 45(7–8): 2013−2031. doi:10.1007/s00382-014-2452-6

Yue S, Wang C Y. 2002. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann–Kendall test [J]. Water Resour. Res., 38(6): 4-1−4-7. doi:10.1029/2001WR000861

翟盘茂, 潘晓华. 2003. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化 [J]. 地理学报, 58(Z1): 1−10. Zhai Panmao, Pan Xiaohua. 2003. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58(Z1): 1−10. doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2003.z1.001

张大任, 郑静, 范军亮, 等. 2019. 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, 40(7): 422−434. Zhang Daren, Zheng Jing, Fan Junliang, et al. 2019. Spatio−temporal variations of extreme temperature indices in different climatic zones of China over the past 60 years [J]. Chinese Journal of Agrometeorology (in Chinese), 40(7): 422−434. doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2019.07.002

张嘉仪, 钱诚. 2020. 1960～2018 年中国高温热浪的线性趋势分析方法与变化趋势 [J]. 气候与环境研究, 25(3): 225−239. Zhang Jiayi, Qian Cheng. 2020. Linear trends in occurrence of high temperature and heat waves in China for the 1960−2018 period: Method and analysis results [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25(3): 225−239. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19134

张玉静. 2017. PRECIS 对中国区域极端气候事件的高分辨率数值模拟与预估 [D]. 中国农业科学院. Zhang Yujing. 2017. High resolution simulation and projection of climate extremes over China using PRECIS [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Chinese Academy of Agricultural Sciences.

中国气象局气候变化中心. 2019. 中国气候变化蓝皮书 (2019) [R]. 北京. Climate Change Center of China Meteorological Administration. 2019. China climate change blue book (2019) (in Chinese) [R]. Beijing.

Zhou B T, 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

Zhou Y, Ren G. 2011. Change in extreme temperature event frequency over mainland of China, 1961−2008 [J]. Climate Research, 50(2–3):

125−139. doi:10.3354/cr01053

周玉科, 高琪, 范俊甫. 2017. 基于极端气温指数的青藏高原年际升温及不对称特征研究 [J]. 地理与地理信息科学, 33(6): 64−71. Zhou Yuke, Gao Qi, Fan Junfu. 2017. Characterizing the inter-annual warming and asymmetry condition on Tibetan Plateau using the extreme temperature indices [J]. Geography and Geo-Information Science (in Chinese), 33(6): 64−71. doi:10.3969/j.issn.1672-0504.2017.06.011

周雅清, 任国玉. 2010. 中国大陆 1956～2008 年极端气温事件变化特征分析 [J]. 气候与环境研究, 15(4): 405−417. Zhou Yaqing, Ren Guoyu. 2010. Variation characteristics of extreme temperature indices in mainland of China during 1956−2008 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15(4): 405−417. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2010.04.08

邹海波, 吴珊珊, 单九生, 等. 2015. 2013 年盛夏中国中东部高温天气的成因分析 [J]. 气象学报, 73(3): 481−495. Zou Haibo, Wu Shanshan, Shan Jiusheng, et al. 2015. Diagnostic study of the severe high temperature event over Mid-East China in 2013 summer [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 73(3): 481−495. doi:10.11676/qxxb2015.035