

陈思思, 张井勇, 黄刚. 2018. 时间尺度分离在华南夏季极端高温预测中的应用 [J]. 气候与环境研究, 23 (2): 185–198. Chen Sisi, Zhang Jingyong, Huang Gang. 2018. Application of time-scale decomposition statistical method in climatic prediction of summer extreme high-temperature events in South China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (2): 185–198, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16220.

时间尺度分离在华南夏季极端高温预测中的应用

陈思思^{1,2} 张井勇^{1,2} 黄刚^{2,3,4}

1 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100190

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体物理学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

4 全球变化与中国绿色发展协同创新中心, 北京 100875

摘要 基于高温日数存在受不同物理因子影响不同时间尺度变率的特征, 应用滤波对华南夏季高温日数进行时间尺度分离, 得到高温日数的年代际分量和年际分量。统计分析高温日数总量、年代际分量和年际分量在各自对应时间尺度上的影响因子, 采用“向前”交叉检验逐步回归法, 分别建立高温日数总量、年代际分量和年际分量的回归模型。高温日数总量的回归模型即为高温日数不区分时间尺度的直接回归模型, 而两个分量回归模型拟合结果的叠加, 即为高温日数时间尺度分离统计模型对总量的拟合。利用十折交叉检验法, 对高温日数直接回归模型和时间尺度分离统计模型的拟合结果进行比较: 相比高温日数直接回归模型, 时间尺度分离统计模型的年代际分量均方根误差由 2.6 降低到 2.3, 与观测数据的相关系数由 0.69 提高到 0.73 (显著性水平 $\alpha=0.01$); 年际分量均方根误差由 3.2 降低到 2.9, 与观测数据的相关系数由 0.4 ($\alpha=0.1$) 提高到 0.48 ($\alpha=0.01$); 高温日数总量均方根误差由 4.1 降低到 3.7, 与观测数据的相关系数由 0.48 提高到 0.62 ($\alpha=0.01$)。1979~2010 年拟合时段华南夏季高温日数的回报结果表明: 两模型回报结果与观测数据均存在明显相关 ($\alpha=0.01$), 直接回归模型的相关系数为 0.57, 时间尺度分离统计模型提高到 0.72。2011~2013 年独立检验时段的预测结果表明: 直接回归模型预测结果的平均均方根误差为 26.4%, 时间尺度分离统计模型降低到 12.3%。初步结果表明, 两模型对华南夏季高温日数均有一定的预测能力, 而时间尺度分离统计模型的预测结果有所改进。

关键词 华南 时间尺度分离 夏季高温日数 预测

文章编号 1006-9585 (2018) 02-0185-14

中国分类号 P456

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16220

Application of Time-Scale Decomposition Statistical Method in Climatic Prediction of Summer Extreme High-Temperature Events in South China

CHEN Sisi^{1,2}, ZHANG Jingyong^{1,2}, and HUANG Gang^{2,3,4}

1 Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

收稿日期 2016-12-15; 网络预出版日期 2017-03-31

作者简介 陈思思, 女, 1989 年出生, 博士研究生, 主要研究极端高温。E-mail: chensisi12@mailsucas.ac.cn

通讯作者 黄刚, E-mail: hg@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2012CB955604, 国家自然科学基金项目 41275089、41305071、41425019、41661144016, 海洋公益性行业科研专项 201505013

Funded by National Basic Research Program of China (Grant 2012CB955604), National Natural Science Foundation of China (Grants 51245089, 41305071, 41425019, and 41661144016), Public Science and Technology Research Funds Projects of Ocean (Grant 201505013)

4 Joint Center for Global Change Studies, Beijing 100875

Abstract A time-scale decomposition (TSD) method to statistically downscale the predictand and predictors is used for seasonal forecast of summer extreme high temperature events (hot days) in South China. The hot days present a significant variability that is associated with distinct possible predictors. Both the hot days and the possible predictors are decomposed into inter-decadal and inter-annual components by fast Fourier transformation filtering. Three downscaling regression models are then separately set up for the total hot days and the inter-decadal and inter-annual components of hot days. The downscaling regression model of the total hot days is named as direct regression model, while the downscaled inter-decadal and inter-annual regression models are combined together and named as TSD statistical regression model to obtain the total hot days. The fitting results of the direct regression model and TSD statistical regression model are tested by 10-fold cross-validation. The results show that compared to the direct regression model, the TSD statistical regression model decreases the root-mean-square error (RMSE) from 2.6 d to 2.3 d and increases the correlation coefficient with observations from 0.69 to 0.73 for the inter-decadal component; the TSD statistical regression model also decreases the RMSE from 3.2 d to 2.9 d and increases the correlation coefficient from 0.4 to 0.48 for the inter-annual component; for total hot days, the TSD statistical regression model decreases the RMSE from 4.1 d to 3.7 d and increases the correlation coefficient from 0.48 to 0.68. The hindcast results of hot days during 1979–2010 show that the correlation coefficient between observations and outputs of the direct regression model is 0.57, while the value is improved to 0.72 by the TSD statistical regression model. The forecast results of hot days during the independent validation period (2011–2013) show that the relative RMSE is 26.4% by the direct regression model, and it is 12.3% by the TSD statistical regression model. Compared with observations, both of the direct regression model and the TSD statistical regression model can predict the hot days to some extent in South China, and the TSD statistical regression model performs better for forecasts during 1979–2013.

Keywords South China, Time-scale decomposition, Summer hot days, Prediction

1 引言

联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 第五次评估报告表明 (IPCC, 2013), 1880~2012 年全球平均气温升高约 0.85 °C (从 0.65 °C 到 1.06 °C), 未来全球气候很可能进一步变暖。在全球变暖的背景下, 中国平均气温每 10 年升高 0.2~0.8 °C, 与此同时极端高温事件频繁发生 (任国玉等, 2010a; Cao et al., 2013; Ren and Zhou, 2014)。近几十年, 极端高温在我国每 10 年增加 5.22 d, 呈明显增多趋势, 而且未来增长趋势也将持续存在 (张勇等, 2008; Ding et al., 2010; Wei and Chen, 2011; Zhou and Ren, 2011; 李娟等, 2012; 李纵横等, 2015)。频繁发生的极端高温事件, 对于人口老龄化以及高速城市化发展的我国造成了严重的社会和经济损失, 甚至威胁到人们生命 (杨宏青等, 2013; 李涪涪等, 2014; 刘华军等, 2014; 杨续超等, 2015; Xia et al., 2016)。因此, 建立夏季极端高温短期气候预测具有重要意义。

近年来, 越来越多的研究开始关注极端高温事

件 (雷杨娜等, 2009; 史军等, 2009; 任国玉等, 2010b; 孙建奇等, 2011; Qian et al., 2011; Hu et al., 2012, 2013; 周晓和黄菲, 2015)。目前对于我国夏季极端高温已有研究中, 多数观点认为西北太平洋副热带高压 (简称副高) 和东亚夏季风是直接影 响夏季极端高温的主要系统 (施能等, 1996; 杨辉和李崇银, 2005; 史军等, 2009; 龚志强等, 2014; Chen and Lu, 2015; Lu and Chen, 2016; Chen et al., 2016)。2013 年夏季西太平洋副高加强西伸并持续稳定地控制我国南方大部分地区, 导致该地区受异常下沉气流控制, 造成了我国南方破历史记录极端高温事件的发生 (龚志强等, 2014)。而东亚夏季风偏强时, 我国也可能出现大范围高温天气 (施能等, 1996)。偏强的东亚夏季风导致华南地区西南季风异常增强, 水汽被更多的输送到北方, 造成华南上空比湿降低, 有利于更多太阳辐射入射地表, 促使华南地区极端高温的发生 (Chen and Lu, 2015; Chen et al., 2016)。而副高和东亚夏季风形势异常则是由多种外强迫因子综合作用的结果 (陈烈庭, 1991; 陈月娟等, 2002; 吴国雄等, 2003; 周连童和黄荣辉, 2003; 朱益民和杨修群, 2003; 任国玉等, 2005; 杨辉和李崇银, 2005; 李双林, 2009;

袁媛和李崇银, 2009; 梁乐宁和陈海山, 2010; 张井勇和吴凌云, 2011; 左金清等, 2012; 陈丽娟等, 2013; 何超等, 2015; 黄刚等, 2016)。例如, 梁乐宁和陈海山(2010)指出春季华南地区土壤湿度负异常有利于西太平洋副高西伸发展, 导致该地区地表温度异常升高; 张井勇和吴凌云(2011)发现土壤湿度反馈能够显著增加中国东部及西南地区的高温热浪; 陈烈庭(1991)提出印度洋影响东亚夏季风模型, 指出阿拉伯海至南海海温东暖西冷型造成印度洋上空沃克环流加强, 导致副高脊偏南西伸同时印度季风和东亚夏季风偏强; Hu et al.(2012, 2013)、黄刚等(2016)进一步研究表明印度洋偏暖导致我国夏季华南气温偏高, 同时长江流域以南地区极端高温增加; 陈月娟等(2002)指出冬季 Nino1+2 区海温偏暖时, 后期夏季西太平洋副高偏强并向西向南伸展, 影响东亚夏季风。除此以外, 大西洋年代际振荡(AMO)、北大西洋涛动(NAO)、北极涛动(AO)和太平洋年代际涛动(PDO)通过影响大气环流对中国夏季高温同样具有重要影响(李崇银等, 2002; 朱益民和杨修群, 2003; 任国玉等, 2005; 杨辉和李崇银, 2005; 李双林等, 2009; 左金清等, 2012; Chen and Lu, 2015; Xia et al., 2016)。目前, 关于中国夏季极端高温影响因子的研究已较多, 然而针对极端高温短期气候预测的研究相比其他极端天气和气候灾害(如, 降水、台风等)还远远不够(Chen and Lu, 2015)。

在短期气候预测的研究中, 从前期信号找出有效预报因子, 建立有效预报因子与气候变量的统计关系, 有利于对区域气候做出准确预测, 这是目前研究短期气候预测的常用统计方法(郭彦和李建平, 2012; 何文平等, 2012; 封国林等, 2013; 刘娜和李双林, 2015)。近年来, 封国林等(2013)通过发展动力与统计相结合的短期气候预测技术连续 8 年准确预测出我国汛期降水的主雨带位置。但是, 区域气候变量存在多时间尺度变率特征, 不同时间尺度变率可能受不同物理因子影响(阮成卿和李建平, 2016)。因此, 有必要对区域气候变量进行时间尺度分离, 分别研究各时间尺度的影响因子和预报模型, 再将不同模型结果叠加作为对该变量总体的预测, 这一方法被称为时间尺度分离的降尺度预测方法(李建平, 2013; 刘娜和李双林, 2015)。已有研究表明, 针对夏季降水利用时间尺度分离降尺度预测方法能够有效提高区域降水预

测的准确率(万仕全等, 2005; Wan et al., 2005; 刘娜和李双林, 2015; Gong et al., 2016; He et al., 2016; 阮成卿和李建平, 2016)。那么对于夏季极端高温, 时间尺度分离降尺度预测方法是否同样适用? 相比不区分时间尺度直接建立单一统计降尺度回归模型, 极端高温的时间尺度分离统计降尺度预测模型结果是否也更准确? 本文将尝试在华南地区利用时间尺度分离统计降尺度预测方法, 建立夏季极端高温时间尺度分离的统计预测模型, 并将预测结果与不区分时间尺度建立的统计预测模型进行比较。

2 资料与方法

本文研究区域为我国华南(18°N~26°N, 110°E~120°E), 时间段为 1979~2013 年(共 35 年), 用夏季(6~8 月)高温日数指代夏季极端高温。高温日数是衡量夏季极端高温天气的一个重要指数, 代表夏季日最高气温达到或者超过 35 °C 的天数。文中根据高温日数的定义, 计算出研究时段每年夏季华南地区日最高气温大于等于 35 °C 的天数, 得到 1979~2013 年华南夏季高温日数序列。建立高温日数预测模型之前, 待挑选的物理因子由已有研究结果统计得到(李崇银等, 2002; 朱益民和杨修群, 2003; 任国玉等, 2005; 杨辉和李崇银, 2005; 李双林等, 2009; 梁乐宁和陈海山, 2010; 张井勇和吴凌云, 2011; Hu et al., 2012, 2013; 左金清等, 2012; Chen and Lu, 2015; 黄刚等, 2016)。预测模型的建立和拟合回报时段为 1979~2010 年, 独立样本检验时段为 2011~2013 年。

2.1 资料

气温数据来源于国家气象信息中心提供的全国 753 个气象站点日最高气温资料, 并经过均一化处理(Li et al., 2015)。华南区域包括 61 个气象站点(图 1)。土壤湿度资料来自于欧洲中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的 ERA-Interim 日数据([http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/\[2017-02-24\]](http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/[2017-02-24])), 水平分辨率 0.5°(纬度)×0.5°(经度), 选取春季(3~5 月)第 2 层(7~28 cm)数据; 印度洋海温资料来自美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)ERSST v4 月平均数据(<https://www.ncdc>).

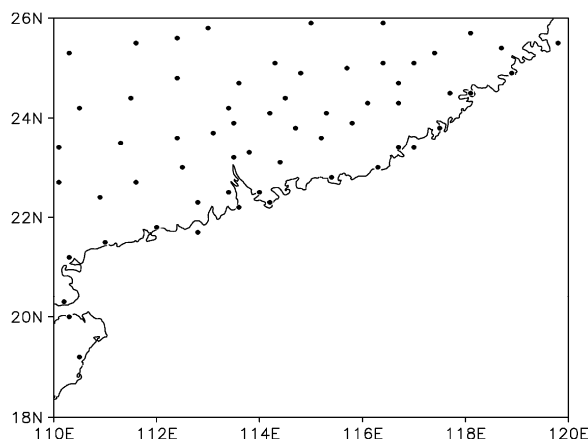


图1 华南地区(18°N~26°N, 110°E~120°E) 61个气象站点分布
Fig. 1 Distribution of the 61 meteorological stations in South China (18°N~26°N, 110°E~120°E)

noaa.gov/data-access/marineocean-data/extended-reconstructed-sea-surface-temperature-ersst-v4 [2017-02-24]), 水平分辨率 2° (纬度) × 2° (经度), 选取春季 (3~5 月) 海表温度 (Surface Sea Temperature, SST); 大尺度气候指数, 包括 AMO 指数、NAO 指数、AO 指数、PDO 指数和 Nino1+2 指数均来自 NOAA (http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/[2017-02-24]), 并选取前一年秋季 (秋季, 9~11 月)、前冬 (冬季, 12~2 月) 和当年春季 (春季, 3~5 月) 的信号作为建立模型的待挑选前期预报因子。

2.2 方法

华南夏季高温日数具有明显的年代际和年际变率特征 (雷杨娜等, 2009)。而高温日数不同时间尺度分量受物理因子在不同时间尺度变率的影响可能不尽相同。因此, 利用傅里叶分解将高温日数和待挑选物理因子进行时间尺度分离, 得到各自的年代际变率和年际变率。周期 7 年以上的作为年代际变率, 7 年及以下为年际变率。为便于计算, 本文将傅里叶分解得到的年代际变率定义为物理量的年代际分量, 而分解得到的年际变率减均值的差作为年际分量。年代际分量与年际分量之和即为原物理量的总量, 即:

$$Y=Y_d+Y_a, \quad (1)$$

$$X=X_d+X_a, \quad (2)$$

其中, Y 为华南夏季高温日数总量, Y_d 、 Y_a 分别为华南夏季高温日数的年代际分量和年际分量; X 为待挑选物理因子总量, X_d 、 X_a 分别为待挑选物理因子的年代际分量和年际分量。然后, 采用相关分析

法在各时间尺度上初步选出与高温日数高度相关的物理因子。统计各时间尺度影响高温日数的物理因子, 得到高温日数在各时间尺度的可能预报因子。

在初步选出各时间尺度高温日数的可能预报因子后, 采用“向前”交叉检验逐步回归法, 分别筛选出建立高温日数总量、年代际分量和年际分量统计预测模型的有效预报因子。“向前”交叉检验逐步回归法能够避免多个因子之间可能存在的共线性, 逐步筛选出对预报量贡献较大的有效预报因子 (阮成卿和李建平, 2016)。每一步筛选时, 挑选出的预报因子需使拟合回归方程在交叉检验中的均方根误差最小。同时, 拟合回归方程的交叉检验均方根误差还需比上一步显著减小。均方根误差显著减小的判定, 采用的是误差平方序列的均值 t 检验和方差 F 检验, 只有当两个检验的显著性水平同时高于显著性水平 $\alpha=0.1$ 时才能判定均方根误差显著减小。最终选中的预报因子, 必须保证回归系数和回归方程显著性水平均高于 $\alpha=0.05$, 并进行物理过程分析, 确保回归方程的物理基础。然后, 使用最小二乘法在各时间尺度上拟合回归预报方程, 建立高温日数不区分时间尺度的直接回归模型 (后称直接回归模型) 和时间尺度分离的统计降尺度回归模型 (后称时间尺度分离统计模型), 即:

$$Y'_1=f(X), \quad (3)$$

$$Y'_2=Y'_d+Y'_a, \quad (4)$$

其中, Y'_1 为华南夏季高温日数的直接回归模型, Y'_2 为华南夏季高温日数的时间尺度分离统计模型, Y'_d 和 Y'_a 分别为华南夏季高温日数的年代际分量和年际分量的回归模型, $Y'_d=f(X_d)$, $Y'_a=f(X_a)$ 。

为检验模型的拟合能力, 通常采用交叉检验法对模型拟合结果与观测值进行比较 (郭彦和李建平, 2012; 刘娜和李双林, 2015)。本文采用十折交叉检验法对高温日数直接回归模型和时间尺度分离统计模型的拟合结果与观测值进行比较分析。主要步骤为, 在各时间尺度上, 依次选取拟合时段 (32 年) 十分之一 (3 年) 的资料作为预报测试集, 利用剩余资料建模并对预留测试集进行预报, 重复该过程直到所有时段都被预报了一次, 得到十折交叉检验的预报结果。

最后, 为了验证直接回归模型和时间尺度分离统计模型的预测能力, 计算两模型在拟合时段的回报值以及独立检验时段的预测值, 并对分析观测

值与两模型预测结果的差异。

3 结果与分析

首先对 1979~2010 年夏季华南地区高温日数进行时间尺度分离(图 2),利用傅里叶分解得到高温日数的年代际分量和年际分量。高温日数年代际分量在 20 世纪 90 年代后期以前,大部分低于均值(约 15 d),随后呈增长趋势并且整体高于均值,这一结果与已有研究一致(Wei and Chen, 2011; 叶殿秀等, 2013; 周晓和黄菲, 2015; 张英华等, 2016);同时高温日数还存在明显的年际变率特征,年际变化范围在 5~24 d,结合高温日数功率谱曲线(图略)在 2~3 年出现的显著谱峰,表明高温日数存在 2~3 年的年际变率周期。

3.1 可能的预报因子

根据已有研究统计影响高温日数的物理因子(春季土壤、春季印度洋海温和 AMO、NAO、AO、PDO、Nino1+2 指数),通过傅里叶分解得到物理因子的年代际和年际分量。在各时间尺度上分别对高温日数与物理因子进行相关分析。

图 3 为 1979~2010 年春季土壤湿度总量、年代际分量和年际分量与对应时间尺度华南夏季高温日数相关的空间分布情况。空间分布显示,春季土壤湿度与夏季高温日数在总量和年代际分量上呈负相关,年际分量大体为正相关。总量在华南南部小部分区域相关显著;年代际分量在整个区域均相关显著;年际分量在 23°N 以北地区相关显著。计算各时间尺度华南春季土壤湿度区域平

均与夏季高温日数的相关系数(表 1),总量为 -0.26(不显著),年代际分量为 -0.73 ($\alpha=0.01$),年际分量为 0.37 ($\alpha=0.1$)。春季土壤湿度与夏季高温日数在总量上的相关不显著,可能是由年代际分量的显著负相关和年际分量的显著正相关叠加造成。图 3 和表 1 结果显示,1979~2010 年华南地区春季土壤湿度对夏季高温日数在年代际和年际分量上均存在显著影响,而在总量上影响不显著。

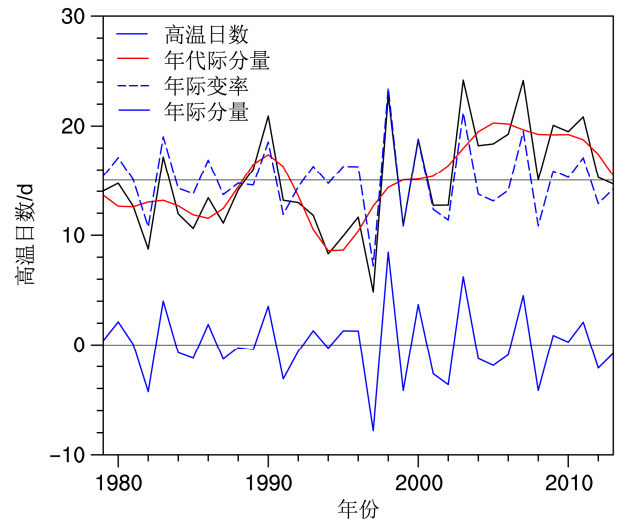


图 2 1979~2010 年华南夏季(6~8 月)高温日数总量(黑实线)、年代际分量(红实线)、年际变率(蓝短线)、年际分量(年际变率减均值,蓝实线)时间序列

Fig. 2 Time series of the total amount (black solid line), the inter-decadal component (red solid line), the inter-annual variability (blue short line), and the inter-annual component (the inter-annual variability minus average value; blue solid line) of summer (June-July-August) hot days over 1979-2010 in South China

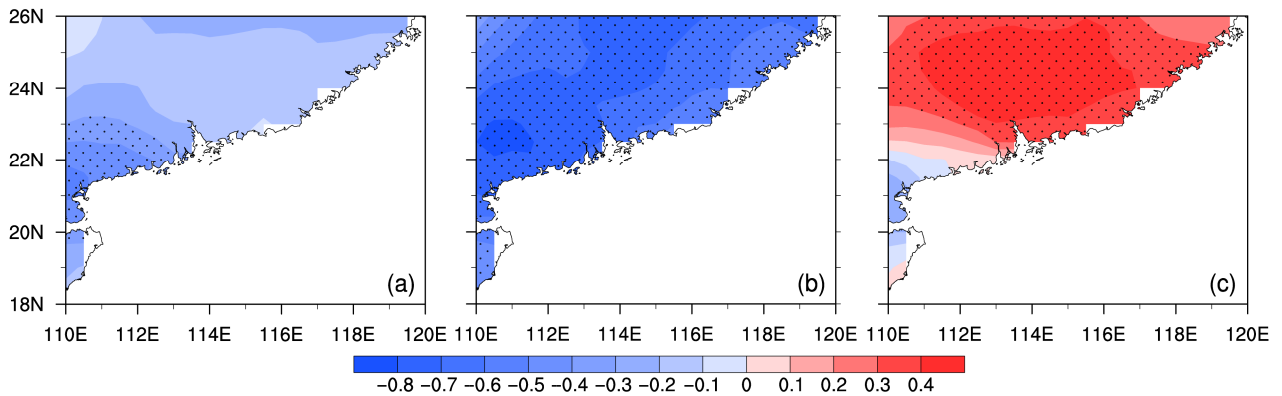


图 3 1979~2010 年华南夏季高温日数 (a) 总量、(b) 年代际分量和 (c) 年际分量与对应时间尺度春季土壤湿度相关空间分布图。图中打点区域表示通过相关系数显著性水平 $\alpha=0.1$ 的显著性检验

Fig. 3 Correlation maps of (a) summer hot days, (b) its inter-decadal component, and (c) its inter-annual component with the spring soil moisture on corresponding time scales over 1979-2010 in South China. The dotted regions indicate correlation coefficients significant at $\alpha=0.1$ level

表 1 1979~2010 年华南夏季高温日数总量、年代际分量和年际分量与对应时间尺度华南春季土壤湿度区域平均的相关系数

Table 1 Correlation coefficients on different time scales between time series of summer hot days and spring soil moisture on corresponding time scales in South China during 1979–2010

高温日数总量与土壤湿度相关系数	高温日数年代际分量与土壤湿度相关系数	高温日数年际分量与土壤湿度相关系数
-0.26	-0.73**	0.37*

*, **分别代表通过显著性水平 $\alpha=0.1$ 、 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。

1979~2010 年春季印度洋海温与华南夏季高温日数相关系数的空间分布显示 (图 4), 春季印度洋海温与夏季高温日数在各时间尺度均呈正相关。相关系数大值区主要出现在 (10°S~10°N, 40°E~90°E) (图 4 矩形框所示区域), 将该区域定义为春季印度洋海温影响华南夏季高温日数的关键区。在各时间尺度上, 关键区内相关系数显著性水平均高于 $\alpha=0.1$, 同时年代际分量相关性较强, 总量次之, 年际分量较弱。计算各时间尺度春季印度洋关键区海温区域平均与华南夏季高温日数的相关系数 (表

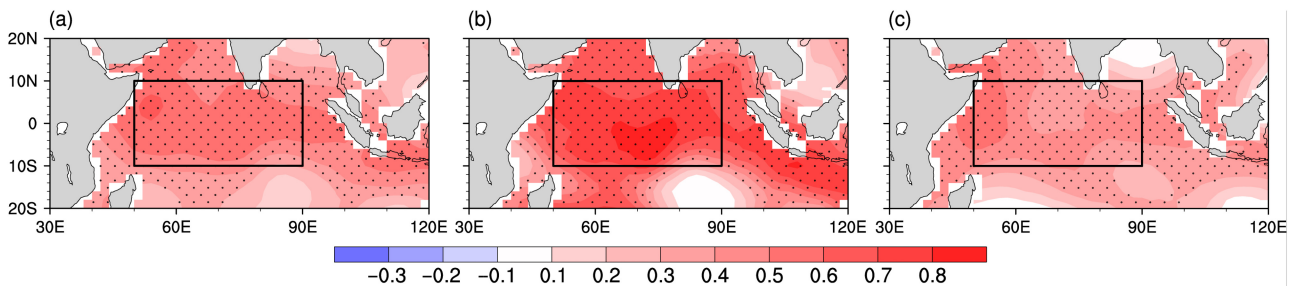


图 4 1979~2010 年华南夏季高温日数 (a) 总量、(b) 年代际分量和 (c) 年际分量与对应时间尺度春季印度洋海表温度相关空间分布。图中打点区域表示通过相关系数显著性水平 $\alpha=0.1$ 的显著性检验

Fig. 4 Correlation maps of (a) summer hot days, (b) its inter-decadal component, and (c) its inter-annual component with the spring sea surface temperature in the Indian Ocean on corresponding time scales during 1979–2010. The dotted regions indicate correlation coefficients significant at $\alpha=0.1$ level

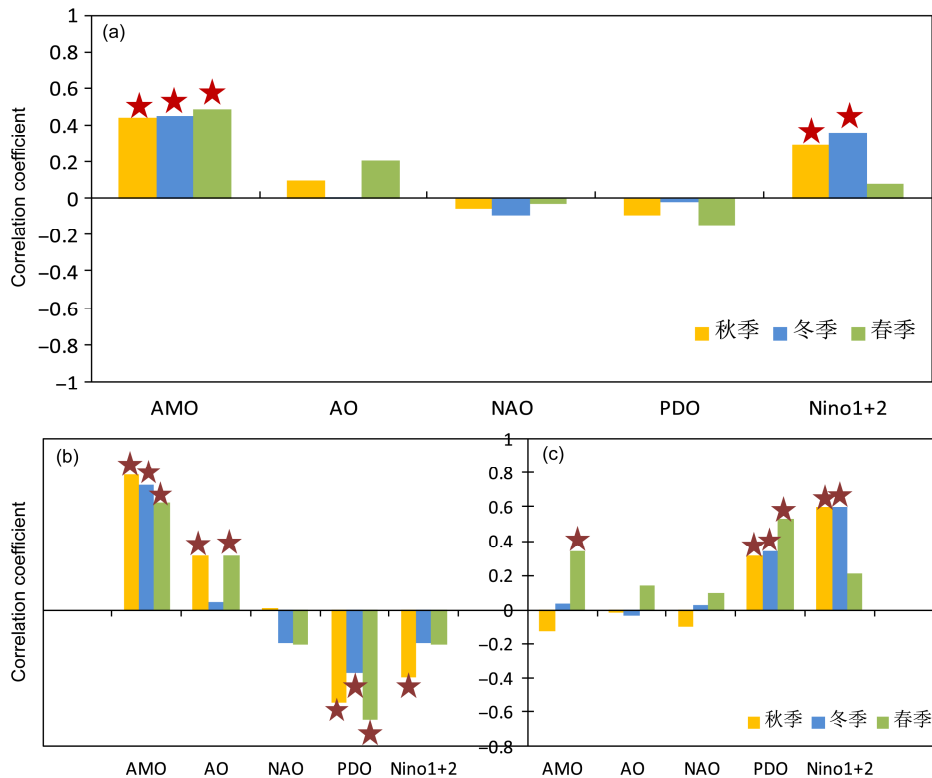


图 5 1979~2010 年华南夏季高温日数 (a) 总量、(b) 年代际分量和 (c) 年际分量与对应时间尺度气候指数的相关柱状图。五角星代表通过相关系数显著性水平 $\alpha=0.1$ 的显著性检验

Fig. 5 Correlation coefficients of (a) summer hot days, (b) its inter-decadal component, and (c) its inter-annual component with seasonal climate indices on the corresponding time scales during 1979–2010. The stars represent correlation coefficients significant at $\alpha=0.1$ level

2), 总量为 0.57, 年代际分量为 0.8, 年际分量为 0.47, 显著性水平平均高于 $\alpha=0.01$ 。图 4 和表 2 结果显示, 在各时间尺度上春季印度洋海温对华南夏季高温日数均有不同程度的影响。

表 2 1979~2010 年华南夏季高温日数总量、年代际分量和年际分量与对应时间尺度春季印度洋关键区海温区域平均的相关系数

Table 2 Correlation coefficients on different time scales of time series of summer hot days and spring sea surface temperature over the Indian Ocean region marked by the box in Fig. 4 during 1979–2010

高温日数总量与关键区海温相关系数	高温日数年代际分量与关键区海温相关系数	高温日数年际分量与关键区海温相关系数
0.57**	0.8**	0.47**

**代表通过显著性水平 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。

1979~2010 年大尺度气候指数 AMO、NAO、AO、PDO、Nino1+2 的前期信号与华南夏季高温日数在各时间尺度的相关显示 (图 5), 夏季高温日数总量受三季 AMO 以及秋季和冬季 Nino1+2 指数的影响显著; 年代际分量受对应时间尺度的三季 AMO、秋季和春季 AO、三季 PDO 和秋季 Nino1+2 指数影响显著; 年际分量受对应时间尺度的春季 AMO、三季 PDO 以及秋季和冬季 Nino1+2 指数影响显著。图 5 结果显示, 大尺度气候指数的前期信号在各时间尺度上对华南夏季高温日数的影响不同。

根据初步相关分析, 表 3 统计得到 1979~2010 年华南夏季高温日数在各时间尺度建立回归模型的可能预报因子。对同一大尺度气候指数在不同季节均有显著影响的, 选取信号最强的季节作为该指数影响华南夏季高温日数的可能预报因子 (详见表 3)。

3.2 各时间尺度建立回归模型

图 6 是各时间尺度华南夏季高温日数的可能预报因子进行逐步回归筛选时, 不同预报因子拟合回归方程在交叉检验中的均方根误差, 其中图 6a 为高温日数总量; 图 6b 为高温日数年代际分量; 图 6c 为高温日数年际分量。对高温日数总量预报因子的筛选结果显示 (图 6a), 第一步挑选出春季印度洋关键区海温, 其交叉检验均方根误差最小为 4.02 且拟合回归系数和回归方程的显著性检验均高于 $\alpha=0.05$ 。第二步继续加入其余剩余预报因子, 加入因子后得到的交叉检验均方根误差均大于 4.02, 因此停止筛选。直接对华南夏季高温日数总量进行“向前”交叉检验逐步回归, 仅筛选出春季印度洋关键区海温一个有效预报因子, 来建立华南夏季高

温日数的直接回归模型。

表 3 1979~2010 年华南夏季高温日数总量及其年代际和年际分量的可能预报因子

Table 3 Potential predictors for summer hot days, its inter-decadal component, and inter-annual component in South China during 1979–2010

夏季高温日数总量可能的预报因子	夏季高温日数年代际分量可能的预报因子	夏季高温日数年际分量可能的预报因子
春季关键区海温 (SST)	春季土壤湿度年代际分量 (SM_d)	春季土壤湿度年际分量 (SM_a)
春季 AMO	春季关键区海温年代际分量 (SST_d)	春季关键区海温年际分量 (SST_a)
冬季 Nino1+2 指数	秋季 AMO 年代际分量 (AMO_d)	春季 AMO 年际分量 (AMO_a)
	春季 AO 年代际分量 (AO_d)	春季 PDO 年际分量 (PDO_a)
	春季 PDO 年代际分量 (PDO_d)	冬季 Nino1+2 指数年际分量 (Nino1+2_a)
	秋季 Nino1+2 指数年代际分量 (Nino1+2_d)	

对高温日数年代际分量和年际分量分别进行“向前”交叉检验逐步回归, 预报因子筛选结果显示: 高温日数年代际分量 (图 6b) 挑选出的第一个有效预报因子, 为春季印度洋关键区海温年代际分量, 其交叉检验均方根误差最小为 2.07 且拟合回归系数和回归方程的显著性检验均高于 $\alpha=0.05$ 。第二步加入其余剩余预报因子, 当加入 PDO 年代际分量时交叉检验均方根误差减小最多为 1.87, 但相比第一步交叉检验均方根误差的减小并不显著 (误差平方序列的方差 F 检验显著性水平高于 $\alpha=0.1$, 但均值 t 检验不显著), 因此停止筛选。高温日数年际分量 (图 6c) 在第一步挑选出冬季 Nino1+2 指数年际分量为有效预报因子, 其交叉检验均方根误差最小为 2.79 且拟合回归系数和回归方程的显著性水平平均高于 $\alpha=0.05$ 。第二步加入其余剩余预报因子, 当加入 PDO 年际分量时交叉检验均方根误差减小最多为 2.76, 但相比第一步交叉检验均方根误差的减小并不显著 (误差平方序列的方差 F 检验和均值 t 检验均不显著), 停止筛选。最终, 筛选出春季印度洋关键区海温年代际分量作为华南夏季高温日数年代际分量回归模型的有效预报因子, 以及冬季 Nino1+2 指数年际分量作为年际分量回归模型的有效预报因子, 来建立华南夏季高温日数时间尺度分离统计模型。

为确保回归模型的物理意义, 下面简单地分析两个模型筛选出的有效预报因子 (春季印度洋海温和冬季 Nino1+2 指数) 影响华南夏季极端高温的

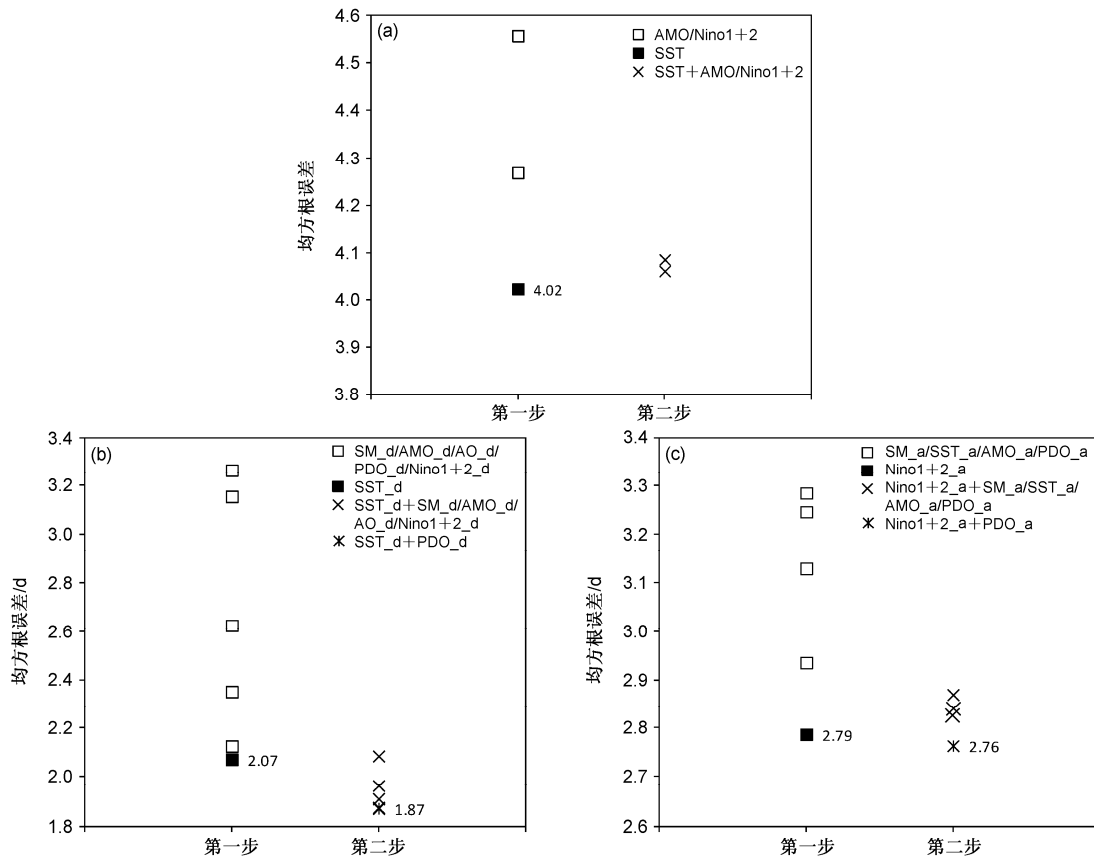


图 6 1979~2010 年华南夏季高温日数逐步回归筛选过程中不同预报因子拟合回归方程在交叉检验中的均方根误差: (a) 总量; (b) 年代际分量; (c) 年际分量

Fig. 6 Root mean square errors between observed and cross-validation estimated summer hot days by different equations regressed by distinct predictors in stepwise regression screening for (a) the total summer hot days model, (b) the inter-decadal model, and (c) the inter-annual model

可能物理过程。印度洋具有电容器效应，春季印度洋海温异常能维持到夏季，海温的异常增暖将激发印度洋上空暖性开尔文波动，导致西北太平洋低层反气旋异常形成和维持，西太平洋副热带高压异常发展，华南地区受异常下沉气流控制，高温日数增多 (Hu et al., 2012, 2013; 黄刚等, 2016)。Nino1+2 区海温是用于指示 ENSO 事件的指数之一。ENSO 事件发生时，东太平洋海温异常影响 Walker 环流和东亚地区局地 Hadley 环流从而影响东亚冬季风；西太平洋暖池北部的海温异常影响该地对流活动，进而影响西太平洋副热带高压，导致东亚夏季风异常 (陈文, 2002)。这些与 ENSO 事件有关的海温异常通过影响东亚冬、夏季风循环，导致东亚冬季风与随后的夏季风存在着紧密的联系 (陈文, 2002)。而夏季东亚夏季风异常将直接影响我国季风区极端高温的发生 (施能等, 1996; 杨辉和李崇银, 2005; Wei and Chen, 2011; 龚志强等, 2014)。同时，Nino1+2 区海温指数与西太平洋副热带高压的年际变化

较为一致 (陈月娟等, 2002)。前期冬季 Nino1+2 指数偏暖时夏季西太平洋副高较强，范围向西和向南伸展，影响我国华南高温 (陈月娟等, 2002)。

综上，1979~2010 年拟合时段华南夏季高温日数的直接回归模型由一个预报因子 (春季印度洋关键区海温) 建立，形式如下：

$$Y'_1 = -292.9 + 10.5T, \quad (5)$$

其中， T 为春季印度洋关键区海温。而华南夏季高温日数时间尺度分离统计模型，年代际分量回归模型的有效预报因子为春季印度洋关键区海温的年代际分量，年际分量回归模型的有效预报因子为冬季 Nino1+2 指数的年际分量，形式如下：

$$Y'_2 = Y'_d + Y'_a, \quad (6)$$

$$Y'_d = -579.5 + 20.2T_d, \quad (7)$$

$$Y'_a = -61.6 + 2.5I_a, \quad (8)$$

其中， T_d 为春季印度洋关键区海温的年代际分量， I_a 为冬季 Nino1+2 指数的年际分量。

3.3 回归模型拟合结果检验

为检验时间尺度分离统计模型和直接回归模型对华南夏季高温日数的拟合能力, 图 7 给出了拟合时段两模型在不同时间尺度的十折交叉检验拟合结果, 以及观测值的时间序列。对于华南夏季高温日数的年代际分量, 时间尺度分离统计模型的拟合结果比直接回归模型更接近观测值 (图 7a)。尤其是在 20 世纪 90 年代初期以前和 20 世纪 90 年代后期以后, 时间尺度分离统计模型的拟合结果能较好的反应华南夏季高温日数的年代际波动特征和年代际增长趋势。表 4 显示, 直接回归模型年代际分量拟合结果的均方根误差为 2.6, 而时间尺度分离统计模型减小到 2.3。同时, 直接回归模型年代际分量的拟合结果与观测数据年代际分量的相关系数为 0.69 ($\alpha=0.01$), 时间尺度分离统计模型增加到 0.73 ($\alpha=0.01$)。华南夏季高温日数的年际分量中, 时间尺度分离统计模型比直接回归模型更好的拟合出高温日数的年际波动特征 (图 7b)。表 4 显示直接回归模型年际分量拟合结果的均方根误差为 3.2, 时间尺度分离统计模型减小为 2.9。同时, 与观测数据年际分量的相关性, 直接回归模型为 0.4 ($\alpha=0.1$), 时间尺度分离统计模型增加到 0.48 ($\alpha=0.01$)。对于华南夏季高温日数总量, 时间尺度分离统计模型的拟合结果比直接回归模型整体更接近观测值 (图 7c)。直接回归模型拟合结果的均方根误差为 4.1, 时间尺度分离统计模型减小为 3.7。与观测数据的相关系数, 直接回归模型为 0.48 ($\alpha=0.01$), 时间尺度分离统计模型增加到 0.62 ($\alpha=0.01$)。综上, 在拟合时段时间尺度分离统计模型相比直接回归模型能更好地拟合出高温日数的变化特征。

表 4 1979~2010 年华南夏季高温日数直接回归模型和时间尺度分离统计模型在各时间尺度十折交叉检验拟合值的均方根误差和与观测数据的相关系数

Table 4 Root mean square errors and correlation coefficients between observed and estimated values by 10-fold cross-validation for summer hot days, and the inter-decadal and inter-annual components in South China during 1979–2010

	均方根误差			与观测数据的相关系数		
	年代际	年际	总量	年代际	年际	总量
	分量	分量	总量	分量	分量	总量
直接回归模型	2.6	3.2	4.1	0.69**	0.4*	0.48**
时间尺度分离统计模型	2.3	2.9	3.7	0.73**	0.48**	0.62**

*、**分别代表通过显著性水平 $\alpha=0.1$ 、 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。

3.4 模型的回报和预测

为检验两模型的预测能力, 在整个研究时段 (1979~2013 年) 对模型所需的前期信号进行时间尺度分离, 并利用公式 (5) 和公式 (6) 分别在拟合时段 (1979~2010 年) 和独立检验时段 (2011~2013 年) 计算出直接回归模型和时间尺度分离统计模型的回报值和预测值 (图 8)。拟合时段, 华南夏季高温日数观测值和两模型回报结果的均值都约为 15 d。但相比观测值的标准差 4.7 d, 直接回归模型的标准差偏小为 2.7 d, 而时间尺度分离统计模型的标准差更接近观测为 3.4 d。同时, 直接回归模型回报结果的均方根误差为 3.8, 与观测值的相关为 0.57 ($\alpha=0.01$), 而时间尺度分离统计模型的均方根误差减小到 3.2, 与观测值的相关提高到 0.72 ($\alpha=0.01$)。拟合时段两模型的回报结果显示, 直接回归模型和时间尺度分离统计模型都能基本的预测出华南夏季高温日数, 而时间尺度分离统计模型的预测结果相对较好。独立检测时段, 直接回归模型预测结果与观测值的误差绝对值分别为 6.4 d、1 d 和 2.3 d, 平均均方根误差 (均方根误差/1979~2013 年平均高温日数) 为 26.4%; 而时间尺度分离统计模型预测结果与观测值的误差绝对值大部分有所减小分别为 1.2 d、2.6 d 和 1.4 d, 平均均方根误差减小为 12.3%。独立检测时段两模型对华南夏季高温日数的预测结果显示, 时间尺度分离统计模型的预测结果相比直接回归模型总体更接近观测值。

4 总结与讨论

对 1979~2010 年华南夏季高温日数及其影响因子进行时间尺度分离, 通过“向前”交叉检验逐步回归法筛选出不同时间尺度上影响华南夏季高温日数的有效预报因子, 建立直接回归模型和时间尺度分离统计模型。采用十折交叉检验法对直接回归模型和时间尺度分离统计模型的拟合结果进行检验, 并利用两模型对 1979~2010 年拟合时段和 2011~2013 年独立检验时段的华南夏季高温日数进行回报和预测, 得到如下主要结论:

(1) 华南夏季高温日数具有明显的年代际和年际变率特征, 通过滤波对高温日数及其影响因子进行时间尺度分离, 相关分析表明在不同时间尺度上影响高温日数的物理因子不同。

(2) 在 1979~2010 年拟合时段对华南夏季高

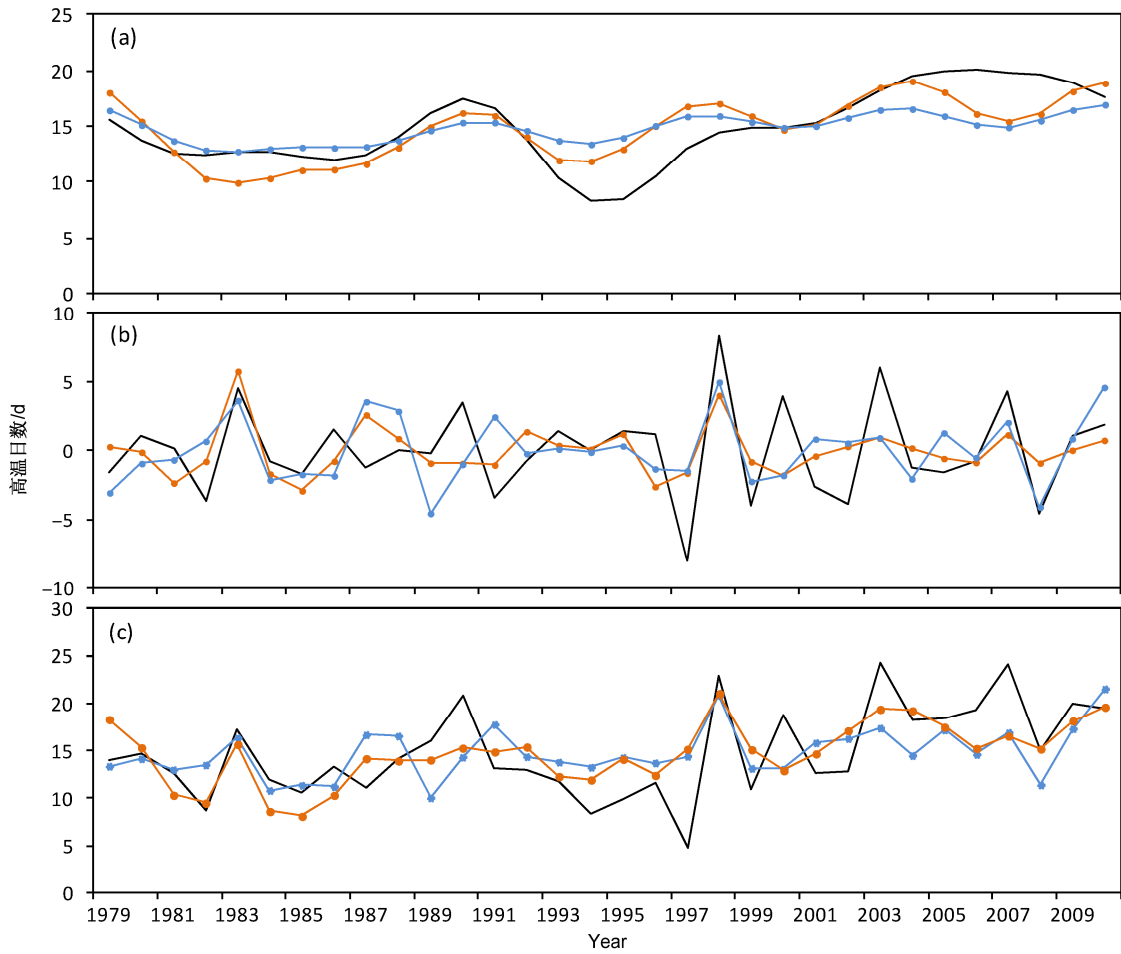


图 7 1979~2010 年华南夏季高温日数观测值 (黑色实线)、直接回归模型 (蓝色实心圆) 和时间尺度分离统计模型 (黄色实心圆) 十折交叉检验拟合值的 (a) 年代际分量、(b) 年际分量和 (c) 总量

Fig. 7 (a) Inter-decadal component, (b) inter-annual component, and (c) total amount of the observed (black solid lines), 10-fold cross-validation estimated values (black solid lines) regressed by the regression model (blue dot), and the statistically downscaled mode (yellow dot) of the summer hot days in South China during 1979–2010

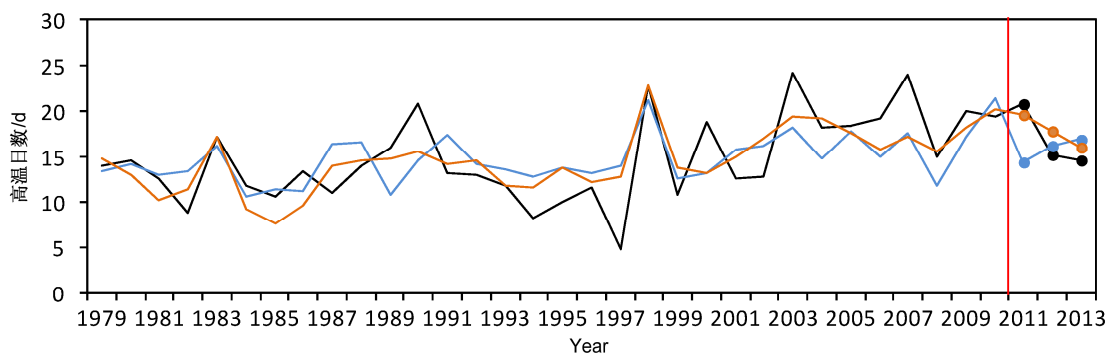


图 8 华南夏季高温日数在 1979~2013 年的观测值 (黑实线)、拟合时段 (1979~2010 年) 统计模型的拟合值 (蓝、黄实线) 和独立检验时段 (2011~2013 年) 统计模型的预测值 (蓝、黄实心圆): 直接回归模型 (蓝); 时间尺度分离统计模型 (黄)

Fig. 8 Time series of observed summer hot days during 1979–2013 (black solid line) and the estimated values during the training period of 1979–2010 (yellow and blue solid lines) and the validation period of 2011–2013 (yellow and blue dots) regressed by the regression model (blue) and statistically downscaled mode (yellow)

温日数建立直接回归模型, 筛选出春季印度洋关键区海温一个有效预报因子; 而建立时间尺度分离统计模型时, 筛选出春季印度洋关键区海温的年代际分量和冬季 Nino1+2 指数的年际分量, 两个有效预报因子建立时间尺度分离统计模型的年代际分量部分和年际分量部分。

(3) 时间尺度分离统计模型相比直接回归模型能更好地拟合出高温日数的年代际和年际变率特征以及年代际增长趋势, 从而较好地拟合高温日数总量的变化特征。对比两模型在各时间尺度交叉检验的拟合结果显示: 年代际分量中, 直接回归模型的均方根误差为 2.6, 与观测数据的相关系数是 0.69 (显著性水平 $\alpha=0.01$), 而时间尺度分离统计模型的均方根误差则减小到 2.3, 与观测数据的相关系数提高到 0.73 ($\alpha=0.01$); 年际分量中, 直接回归模型的均方根误差为 3.2, 与观测数据的相关系数是 0.4 ($\alpha=0.1$), 而时间尺度分离统计模型的均方根误差减小到 2.9, 与观测数据的相关系数提高到 0.48 ($\alpha=0.01$); 高温日数的总量中, 直接回归模型的均方根误差为 4.1, 与观测数据的相关系数是 0.48 ($\alpha=0.01$), 而时间尺度分离统计模型的均方根误差减小到 3.7, 与观测数据的相关系数提高到 0.62 ($\alpha=0.01$)。

(4) 在 1979~2010 年拟合时段, 时间尺度分离统计模型和直接回归模型对华南夏季高温日数的回报结果表明, 两模型对华南夏季高温日数均有一定的预测能力。模型回报结果与观测数据均存在明显相关 ($\alpha=0.01$), 其中直接回归模型的相关系数为 0.57, 均方根误差为 3.8; 而时间尺度分离统计模型的相关系数为 0.72, 均方根误差为 3.2。

(5) 在 2011~2013 年独立检验时段, 时间尺度分离统计模型和直接回归模型对华南夏季高温日数的预测结果表明, 时间尺度分离统计模型的预测能力相比直接回归模型有所提高。直接回归模型预测结果的平均均方根误差为 26.4%, 时间尺度分离统计模型降低为 12.3%且预测结果整体更接近观测值。

本文采用时间尺度分离法对华南夏季高温日数进行建模并预测。相比直接回归模型, 时间尺度分离统计模型的预测结果有所改进。但由于资料的限制, 本文仅对 2011~2013 年进行了独立检验, 今后的工作将结合其他资料进一步验证时间尺度分离统计模型的预测能力, 并增加模型在不同区域

的应用研究。文中采用“向前”交叉检验逐步回归法避免了因子间的共线性, 筛选出影响高温日数各时间尺度分量的有效预报因子, 但由于统计方法的局限性以及不同时间尺度上高温日数与因子间可能为非线性关系, 该方法不能清晰的揭示出有效预报因子影响预报量的物理机制, 也并未考虑因子可能存在的非线性作用。例如, 文中在说明回归模型的物理意义时, 简单分析了筛选出的有效预报因子影响华南夏季高温日数的可能物理过程, 但该说明并未涉及因子时间尺度分离的概念和时间尺度分离后的物理意义。又例如, 建立时间尺度分离统计模型用到的两个预报因子——春季印度洋海温的年代际分量和冬季 Nino1+2 指数的年际分量, 分别反应的是春季印度洋海温和冬季太平洋海温的变化情况, 而春季印度洋海温和冬季太平洋海温是相互影响的, 春季印度洋海温的信息中可能包含了冬季太平洋海温的信号。那么, 这两个预报因子对华南夏季高温日数影响的物理机制是否独立或也存在相互作用? 针对这些问题, 未来将利用模式深入研究模型对应的物理机制。

参考文献 (References)

- Cao L J, Zhao P, Yan Z W, et al. 2013. Instrumental temperature series in eastern and central China back to the nineteenth century [J]. *J. Geophys. Res.*, 118 (15): 8197–8207, doi:10.1002/jgrd.50615.
- 陈丽娟, 袁媛, 杨明珠, 等. 2013. 海温异常对东亚夏季风影响机理的研究进展 [J]. *应用气象学报*, 24 (5): 521–532. Chen Lijuan, Yuan Yuan, Yang Mingzhu, et al. 2013. A review of physical mechanisms of the global SSTA impact on EASM[J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 24 (5): 521–532, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2013.05.002.
- Chen R D, Lu R Y. 2015. Comparisons of the circulation anomalies associated with extreme heat in different regions of eastern China [J]. *J. Climate*, 28 (14): 5830–5844, doi:10.1175/JCLI-D-14-00818.1.
- Chen S S, Zhang J Y, Huang G. 2016. An interdecadal shift in the number of hot nights around 1997 over eastern China [J]. *Atmospheric Science Letters*, 17 (9): 501–509, doi:10.1002/asl.684.
- 陈烈庭. 1991. 阿拉伯海—南海海温距平纬向差异对长江中下游降水的影响 [J]. *大气科学*, 15 (1): 33–42. Chen Lieting. 1991. Effect of zonal difference of sea surface temperature anomalies in the Arabian Sea and the South China Sea on summer rainfall over the Yangtze River[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 15 (1): 33–42, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1991.01.04.
- 陈文. 2002. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬、夏季风循环的影响 [J]. *大气科学*, 26 (5): 595–610. Chen Wen. 2002. Impacts of El Niño and La Niña on the cycle of the East Asian winter and summer monsoon [J].

- Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (5): 595–610, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.05.02.
- 陈月娟, 周任君, 武海峰. 2002. Niño1 + 2 海区冷、暖水期西太平洋副高的特征及其对东亚季风的影响 [J]. 大气科学, 26 (3): 373–386. Chen Yuejuan, Zhou Renjun, Wu Haifeng. 2002. Features of the western Pacific subtropical high during the warm and cool periods of Niño1 + 2 area and its influence on the East Asian monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (3): 373–386, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.03.08.
- Ding T, Qian W H, Yan Z W. 2010. Changes in hot days and heat waves in China during 1961–2007 [J]. International Journal of Climatology, 30 (10): 1452–1462, doi:10.1002/joc.1989.
- 封国林, 赵俊虎, 支蓉, 等. 2013. 动力—统计客观定量化汛期降水预测研究新进展 [J]. 应用气象学报, 24 (6): 656–665. Feng Guolin, Zhao Junhun, Zhi Rong, et al. 2013. Recent progress on the objective and quantifiable forecast of summer precipitation based on dynamical–statistical method [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 24 (6): 656–665, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2013.06.002.
- 龚志强, 王艳娇, 王遵娅, 等. 2014. 2013 年夏季气候异常特征及成因简析 [J]. 气象, 40 (1): 119–125. Gong Zhiqiang, Wang Yanjiao, Wang Zunya, et al. 2014. Briefly analysis on climate anomalies and causations in summer 2013 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 40 (1): 119–125, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.01.015.
- Gong Z Q, Li S F, Hu P, et al. 2016. Dynamic-analogue correction of the decadal change of East Asian summer precipitation in the late 1990s [J]. Journal of Meteorological Research, 30 (3): 341–355, doi:10.1007/s13351-016-5220-1.
- 郭彦, 李建平. 2012. 一种分离时间尺度的统计降尺度模型的建立和应用——以华北汛期降水为例 [J]. 大气科学, 36 (2): 385–396. Guo Yan, Li Jianping. 2012. A time-scale decomposition statistical downscaling model: Case study of North China rainfall in rainy season [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (2): 385–396, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11045.
- 何超, 周天军, 吴波. 2015. 影响夏季西北太平洋副热带高压年际变率的关键海区及影响机制 [J]. 气象学报, 73 (5): 940–951. He Chao, Zhou Tianjun, Wu Bo. 2015. The key oceanic regions responsible for the interannual variability of the western North Pacific subtropical high and their impacting mechanisms [J]. Acta Meteorologica Sinica, 73 (5): 940–951, doi:10.11676/qxxb2015.064.
- 何文平, 王柳, 万仕全, 等. 2012. 旱涝预测的演化建模方法 [J]. 物理学报, 61 (11): 119210. He Wenping, Wang Liu, Wan Shiquan, et al. 2012. Evolutionary modeling for dryness and wetness prediction [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 61 (11): 119210, doi:10.7498/aps.61.119201.
- He W P, Zhao S S, Liu Q Y, et al. 2016. Long-range correlation in the drought and flood index from 1470 to 2000 in eastern China [J]. International Journal of Climatology, 36 (4): 1676–1685.
- Hu K M, Huang G, Qu X, et al. 2012. The impact of Indian Ocean variability on high temperature extremes across the southern Yangtze River valley in late summer [J]. Adv. Atmos. Sci., 29 (1): 91–100, doi:10.1007/s00376-011-0209-2.
- Hu K M, Huang G, Wu R G. 2013. A strengthened influence of ENSO on August high temperature extremes over the southern Yangtze River valley since the late 1980s [J]. J. Climate, 26 (7): 2205–2221, doi:10.1175/JCLI-D-12-00277.1
- 黄刚, 胡开明, 屈侠, 等. 2016. 热带印度洋海盆一致模的变化规律及其对东亚夏季气候影响的回顾 [J]. 大气科学, 40 (1): 121–130. Huang Gang, Hu Kaiming, Qu Xia, et al. 2016. A review about Indian Ocean basin mode and its impacts on East Asian summer climate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (1): 121–130, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1505.15143.
- IPCC. 2013. Technical summary [M]//Climate Change 2013: The Physical Science Basis. 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, 1535pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- 雷杨娜, 龚道溢, 张自银, 等. 2009. 中国夏季高温日数时空变化及其环流背景 [J]. 地理研究, 28 (3): 653–662. Lei Yangna, Gong Daoyi, Zhang Ziyin, et al. 2009. Spatial–temporal characteristics of high-temperature events in summer in eastern China and the associated atmospheric circulation [J]. Geographical Research (in Chinese), 28 (3): 653–662, doi:10.3321/j.issn:1000-0585.2009.03.010.
- 李崇银, 朱锦红, 孙照渤. 2002. 年代际气候变化研究 [J]. 气候与环境研究, 7 (2): 209–219. Li Chongyin, Zhu Jinhong, Sun Zhaobo. 2002. The study interdecadal climate variation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 7 (2): 209–219.
- 李娟, 董文杰, 严中伟. 2012. 中国东部 1960~2008 年夏季极端温度与极端降水的变化及其环流背景 [J]. 科学通报, 57 (8): 641–646. Li Juan, Dong Wenjie, Yan Zhongwei. 2012. Changes of climate extremes of temperature and precipitation in summer in eastern China associated with changes in atmospheric circulation in East Asia during 1960–2008 [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 57 (5): 1856–1861, doi:10.1007/s11434-012-4989-2.
- 李建平, 任荣彩, 齐义泉, 等. 2013. 亚洲区域海—陆—气相互作用对全球和亚洲气候变化的作用研究进展 [J]. 大气科学, 37 (2): 518–538. Li Jianping, Ren Rongcai, Qi Yiquan, et al. 2013. Progress in air–land–sea interactions in Asia and their role in global and Asian climate change [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 518–538, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12322.
- 李双林, 王彦明, 郇永祺. 2009. 北大西洋年代际振荡 (AMO) 气候影响的研究评述 [J]. 大气科学学报, 32 (3): 458–465. Li Shuanglin, Wang Yanming, Gao Yongqi. 2009. A review of the researches on the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) and its climate influence [J]. Transactions of Atmospheric Science, 32 (3): 458–465, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2009.03.014.
- 李湉湉, 杜艳君, 莫杨, 等. 2014. 基于脆弱性的高温热浪人群健康风险评估研究进展 [J]. 环境与健康杂志, 31 (6): 547–550. Li Tiantian, Du Yanjun, Mo Yang, et al. 2014. Human health risk assessment of heat wave based on vulnerability: A review of recent studies [J]. Journal of Environment and Health (in Chinese), 31(6): 547–550.
- Li Z, Yan Z W, Wu H Y. 2015. Updated homogenized Chinese temperature series with physical consistency [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 8 (1): 17–22.
- 李纵横, 李崇银, 宋洁, 等. 2015. 1960~2011 年江淮地区夏季极端高温

- 日数的特征及成因分析 [J]. 气候与环境研究, 20 (5): 511–522. Li Zongheng, Li Chongyin, Song Jie, et al. 2015. An analysis of the characteristics and causes of extremely high temperature days in the Yangtze–Huaihe River basins in summer 1960–2011 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (5): 511–522, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14157.
- 梁乐宁, 陈海山. 2010. 春季华南土壤湿度异常与中国夏季降水的可能联系 [J]. 大气科学学报, 33 (5): 536–546. Liang Lening, Chen Haishan. 2010. Possible linkage between spring soil moisture anomalies over South China and summer rainfall in China [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (5): 536–546, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2010.05.004.
- 刘华军, 何礼伟, 杨骞. 2014. 中国人口老龄化的空间非均衡及分布动态演进: 1989~2011 [J]. 人口研究, 38 (2): 71–82. Liu Huajun, He Liwei, Yangqian. 2014. Spatial inequality and distributional dynamics of population ageing in China: 1989–2011 [J]. Population Research (in Chinese), 38 (2): 71–82.
- 刘娜, 李双林. 2015. 基于时间尺度分离的中国东部夏季降水预测 [J]. 应用气象学报, 26 (3): 328–337. Liu Na, Li Shuanglin. 2015. Short-term climate prediction for summer rainfall based on time-scale decomposition [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 26 (3): 328–337, doi:10.11898/1001-7313.20150308.
- Lu R Y, Chen R D. 2016. A review of recent studies on extreme heat in China [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 9 (2): 114–121, doi:10.1080/16742834.2016.1133071.
- Qian C, Yan Z W, Wu Z H, et al. 2011. Trends in temperature extremes in association with weather-intraseasonal fluctuations in eastern China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 28 (2): 297–309, doi:10.1007/s00376-010-9242-9.
- 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 2005. 中国气温变化研究最新进展 [J]. 气候与环境研究, 10 (4): 701–716. Ren Guoyu, Chu Ziyang, Zhou Yaqing, et al. 2005. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (4): 701–716, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2005.04.001.
- 任国玉, 陈崧, 邹旭恺, 等. 2010a. 综合极端气候指数的定义和趋势分析 [J]. 气候与环境研究, 15 (4): 354–364. Ren Guoyu, Chen Yu, Zou Xukai, et al. 2010a. Definition and trend analysis of an integrated extreme climatic index [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (4): 354–364, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2010.04.02.
- 任国玉, 封国林, 严中伟. 2010b. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望 [J]. 气候与环境研究, 15 (4): 337–353. Ren Guoyu, Feng Guolin, Yan Zhongwei. 2010b. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in mainland China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (4): 337–353, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2010.04.01.
- Ren G Y, Zhou Y Q. 2014. Urbanization effect on trends of extreme temperature indices of national stations over Mainland China, 1961–2008 [J]. J. Climate, 27 (6): 2340–2360, doi:10.1175/jcli-d-13-00393.1.
- 阮成卿, 李建平. 2016. 华北汛期降水分离时间尺度降尺度预测模型的改进 [J]. 大气科学, 40 (1): 215–226. Ruan Chengqing, Li Jianping. 2016. An improvement in a time-scale decomposition statistical downscaling prediction model for summer rainfall over North China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (1): 215–226, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14317.
- 史军, 丁一汇, 崔林丽. 2009. 华东极端高温气候特征及成因分析 [J]. 大气科学, 33 (2): 347–358. Shi Jun, Ding Yihui, Cui Linli. 2009. Climatic characteristics of extreme maximum temperature in East China and its causes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (2): 347–358, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.02.13.
- 施能, 朱乾根, 吴彬贵. 1996. 近 40 年东亚夏季风及我国夏季大尺度天气气候异常 [J]. 大气科学, 20 (5): 575–583. Shi Neng, Zhu Qian'gen, Wu Bingui. 1996. The East Asian summer monsoon in relation to summer large scale weather–climate anomaly in China for last 40 years [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 20 (5): 575–583, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1996.05.08.
- 孙建奇, 王会军, 袁薇. 2011. 我国极端高温事件的年代际变化及其与大气环流的联系 [J]. 气候与环境研究, 16 (2): 199–208. Sun Jianqi, Wang Huijun, Yuan Wei. 2011. Decadal variability of the extreme hot event in China and its association with atmospheric circulations [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (2): 199–208, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.02.09.
- 万仕全, 封国林, 周国华, 等. 2005. 基于 EMD 方法的观测数据信息提取与预测研究 [J]. 气象学报, 63 (4): 516–525. Wan Shiquan, Feng Guolin, Zhou Guohua, et al. 2005. Extracting useful information from the observations for the prediction based on EMD method [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (4): 516–525, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2005.04.013.
- Wan S Q, Feng G L, Dong W J, et al. 2005. On the climate prediction of nonlinear and non-stationary time series with the EMD method [J]. Chinese Physics, 14 (3): 628–633, doi:10.1088/1009-1963/14/3/036.
- Wei K, Chen W. 2011. An abrupt increase in the summer high temperature extreme days across China in the mid-1990s [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 28 (5): 1023–1029, doi:10.1007/s00376-010-0080-6.
- 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷, 等. 2003. 副热带高压研究进展及展望 [J]. 大气科学, 27 (4): 503–517. Wu Guoxiong, Chou Jifan, Liu Yimin, et al. 2003. Review and prospect of the study on the subtropical anticyclone [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 503–517, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.06.
- Xia J J, Tu K, Yan Z W, et al. 2016. The super-heat wave in eastern China during July–August 2013: A perspective of climate change [J]. International Journal of Climatology, 36 (3): 1291–1298, doi:10.1002/joc.4424.
- 杨辉, 李崇银. 2005. 2003 年夏季中国江南异常高温的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 10 (1): 80–85. Yang Hui, Li Chongyin. 2005. Diagnostic study of serious high temperature over south China in 2003 summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (1): 80–85, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2005.01.008.
- 杨宏青, 陈正洪, 谢森, 等. 2013. 夏季极端高温对武汉市人口超额死亡率的定量评估 [J]. 气象与环境学报, 29 (5): 140–143. Yang Hongqing, Chen Zhengong, Xie Sen, et al. 2013. Quantitative assessment of impact of extreme high temperature in summer on excess mortality in Wuhan [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 29 (5): 140–143.
- 杨续超, 陈葆德, 胡可嘉. 2015. 城市化对极端高温事件影响研究进展 [J]. 地理科学进展, 34 (10): 1219–1228. Yang Xuchao, Chen Baode, Hu Kejia. 2015. A review of impacts of urbanization on extreme heat events

- [J]. Progress in Geography (in Chinese), 34 (10): 1219–1228, doi:10.18306/dlkxjz.2015.10.002.
- 叶殿秀, 尹继福, 陈正洪, 等. 2013. 1961~2010 年我国夏季高温热浪的时空变化特征 [J]. 气候变化研究进展, 9 (1): 15–20. Ye Dianxiu, Yin Jifu, Chen Zhenghong, et al. 2013. Spatiotemporal change characteristics of summer heatwaves in China in 1961–2010 [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis (in Chinese), 9 (1): 15–20, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2013.01.003.
- 袁媛, 李崇银. 2009. 热带印度洋海温异常不同模态对南海夏季风爆发的可能影响 [J]. 大气科学, 33 (2): 325–336. Yuan Yuan, Li Cohngyin. Possible impacts of the tropical Indian Ocean SST anomaly modes on the South China Sea summer monsoon onset [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (2): 325–336, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.02.11.
- 张井勇, 吴凌云. 2011. 陆—气耦合增加中国的高温热浪 [J]. 科学通报, 56 (23): 1905–1909. Zhang Jingyong, Wu Lingyun. 2011. Land-atmosphere coupling amplifies hot extremes over China [J]. Chinese Science Bulletin, 56 (31): 3328–3332, doi:10.1007/s11434-011-4628-3.
- 张英华, 李艳, 李德帅, 等. 2016. 中国东部夏季极端高温的空间分布特征及其环流型 [J]. 高原气象, 35 (2): 469–483. Zhang Yinghua, Li Yan, Li Deshuai, et al. 2016. Study on the space distribution and circulation pattern of extreme high temperature over eastern China in summer [J]. Plateau Meteorology, 35 (2): 469–483, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00159.
- 张勇, 曹丽娟, 许吟隆, 等. 2008. 未来我国极端温度事件变化情景分析 [J]. 应用气象学报, 19 (6): 655–660. Zhang Yong, Cao Lijuan, Xu Yinlong, et al. 2008. Scenario analyses on future changes of extreme temperature events over China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 19 (6): 655–660, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2008.06.003.
- 周连童, 黄荣辉. 2003. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究 [J]. 气候与环境研究, 8 (3): 274–290. Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2003. Research on the characteristics of interdecadal variability of summer climate in China and its possible cause [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (3): 274–290, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2003.03.003.
- 周晓, 黄菲. 2015. 中国极端高温事件的年代际突变及其与海温的关系 [J]. 中国海洋大学学报, 45 (5): 19–27. Zhou Xiao, Huang Fei. 2015. Decadal shift of the extreme high temperature in China and its relationship with sea surface temperature [J]. Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 45 (5): 19–27, doi:10.16441/j.cnki.hdx.20140057.
- 朱益民, 杨修群. 2003. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系 [J]. 气象学报, 61 (6): 641–654. Zhu Yimin, Yang Xiuqun. 2003. Relationships between Pacific Decadal Oscillation (PDO) and climate variabilities in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (6): 641–654, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2003.06.001.
- 左金清, 李维京, 任宏利, 等. 2012. 春季北大西洋涛动与东亚夏季风年际关系的转变及其可能成因分析 [J]. 地球物理学报, 55 (2): 384–395. Zuo Jinqing, Li Weijing, Ren Hongli, et al. 2012. Change of the relationship between spring NAO and East Asian summer monsoon and its possible mechanism [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 55 (2): 384–395, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.02.003.
- Zhou Y Q, Ren G Y. 2011. Change in extreme temperature event frequency over mainland China, 1961–2008 [J]. Climate Research, 50 (2–3): 125–139, doi:10.3354/cr01053.