

周梦子, 王会军, 霍治国. 2017. 极端高温天气对玉米产量的影响及其与大气环流和海温的关系 [J]. 气候与环境研究, 22 (2): 134–148. Zhou Mengzi, Wang Huijun, Huo Zhiguo. 2017. The influence of heat stress on maize yield and its association with atmospheric general circulation and sea surface temperature [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (2): 134–148, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16119.

极端高温天气对玉米产量的影响及其与 大气环流和海温的关系

周梦子¹ 王会军^{2,3} 霍治国¹

¹ 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

² 南京信息工程大学气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

³ 中国科学院大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心, 北京 100029

摘 要 高温热害已成为玉米生长过程中的一个重要威胁。本文中, 我们定量分析了省份尺度上夏季极端高温日数对玉米产量的影响, 结果表明在中国不同省份, 当高温指数增加一个标准差时, 玉米减产范围为-1.56%~-15.06%, 其中以东北、华北地区减产最为严重。进一步分析表明, 在 1990 年代中后期东北、华北极端高温日数显著增加, 发生突变。当东北、华北上空 500 hPa 位势高度场出现正异常时, 天气比较晴朗, 入射太阳辐射增加, 使得地面温度升高, 有利于极端高温天气的出现; 而风场上, 东北地区尤其是黑龙江盛行西风, 经向环流减弱, 冷空气不易入侵, 使得该区温度偏高, 华北地区则以偏南风为主, 来自中国内陆的温暖气流被带到该地, 为极端高温天气的发生创造有利条件。影响华北极端高温天气的关键海域位于黑潮地区, 而 ENSO 对华北极端高温日数的影响更大, 当 ENSO 指数异常偏高时, 西太平洋副热带高压偏东, 华北水汽输送通道受阻, 水汽辐散, 且盛行下沉运动, 华北地区易出现高温、干旱天气。

关键词 高温热害 玉米产量 统计模型 大气环流 海表温度 ENSO

文章编号 1006-9585 (2017) 02-0134-15

中图分类号 P49

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16119

The Influence of Heat Stress on Maize Yield and Its Association with Atmospheric General Circulation and Sea Surface Temperature

ZHOU Mengzi¹, WANG Huijun^{2,3}, and HUO Zhiguo¹

¹ State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

² International Joint Laboratory on Climate and Environment Change/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University for Information Science and Technology, Nanjing 210044

³ Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Heat stress has posed a major threat to maize growth. In this paper, the authors analyze the impact of summer extreme high temperature on maize yield at provincial scales in China. Results show that in 18 provinces, the maize yield would decrease dramatically from -1.56% to -15.06% for each standard deviation increase in extreme high temperature days, especially in Northeast China and North China. Further analysis indicates that extreme high temperature days in both Northeast China and North China appeared to increase abruptly in the middle to late 1990s. For Northeast China and

收稿日期 2016-06-17; **网络预出版日期** 2016-10-10

作者简介 周梦子, 女, 1988 年出生, 博士, 助理研究员, 主要从事气候变化对农业的影响以及灾害风险评估研究。E-mail: zhoumz@cma.cn

资助项目 中国气象科学研究院基本科研业务费专项基金项目 2016Y007

Founded by The Basic Research and Operating Expenses of Chinese Academy of Meteorological Sciences (Grant 2016Y007)

North China, when the geopotential height anomaly at 500 hPa is positive, the weather is clear, which is conducive to the increase in solar radiation and favorable for the occurrence of high temperature. Looking at wind fields in the lower levels, westerly winds often prevail in Northeast China especially in Heilongjiang Province. Strong zonal circulations can block the invasion of cold air mass from high latitudes. For North China, warm temperature advection by southerly winds is dominant, which is favorable for the formation of extreme high temperature. The key oceanic region that has significant impacts on extreme high temperature in Northeast China is the Kuroshio region, while the main oceanic region affecting North China is the equatorial eastern Pacific. Positive anomalies in this region would lead to eastward shift of the western Pacific subtropical high. With insufficient supply of water vapor and strong downdrafts, North China is prone to high temperature weather.

Keywords Heat stress, Maize yield, Statistical model, General circulation, SST, ENSO

1 引言

IPCC 第五次评估报告指出, 在过去 100 年中全球地表温度上升了 $0.89\text{ }^{\circ}\text{C}$, 尤其以 20 世纪 70 年代以来的增暖更为显著 (IPCC, 2013)。伴随着全球变暖, 极端高温事件发生的频率和强度显著增加。Alexander et al. (2006) 利用全球观测资料分析认为, 极端天气、气候事件的发生具有明显的区域特征。中国地处亚洲东部, 地理位置特殊, 干旱、洪涝、台风、雪灾、高温热浪、低温冻害等气象灾害频发, 据不完全统计, 中国每年因气象灾害造成的经济损失达 2000 亿人民币左右, 占国内生产总值的 $1\%\sim 3\%$ (孙建奇等, 2011)。

农业是对气候变化最敏感的部门之一, 然而, 相对于平均气候变化, 极端天气、气候对农业生产的打击可能是致命的 (Porter and Semenov, 2005)。2003 年夏季, 全球气候持续偏暖, 异常高温笼罩欧亚大陆, 欧洲大部分地区经历了罕见的高温 and 干旱天气, 德国农作物减产 80%, 意大利北部地区农业损失高达 50 亿欧元; 印度半岛地区最高气温超过 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, 农业生产损失惨重; 而我国华南至华北南部的广大地区也先后出现了不同程度的高温天气, 持续高温使得作物大幅减产, 长江流域受害面积达 $3\times 10^7\text{ ha}$, 损失稻谷达 $5.18\times 10^7\text{ t}$, 经济损失近百亿元 (田小海等, 2009)。

玉米是中国的主要粮食作物之一, 是禾谷类作物中增产潜力最大的作物, 主要分布在东北—华北—西南的狭长地带, 在保证中国粮食生产和粮食安全方面具有举足轻重的地位 (杨红旗等, 2011)。玉米原产于热带, 为喜温作物, 在其生长发育过程中, 温度是重要的气象因子, 但是随着全球变暖加剧, 高温胁迫已成为其农业生产的一个严重威胁

(Wollenweber et al., 2003)。尤其, 在玉米对温度比较敏感的生育阶段, 如若遭遇高温天气, 将会导致产量急剧减少。

目前, 针对极端高温天气对玉米的影响研究通常是在人工气候室或者在盆栽条件下进行的 (Karim et al., 2000), 或者在农田中通过改变播期, 改变玉米生长发育的温度, 进而分析温度对玉米的影响 (Muchow, 1990), 且更加注重极端高温对玉米性状、品质的影响 (Sinsawat et al., 2004)。近年来作物机理模型不断更新发展, 其嵌套全球、区域气候模式, 在研究气候变化对作物生长发育的影响中扮演着重要角色 (Moriondo et al., 2011)。但是, 作物机理模型在构建时需要引入大量的参数, 且通常存在作物模型和气候模式尺度的匹配问题, 从而使得二者的连接存在偏差 (熊伟和杨婕, 2008)。尤其, 很多作物模型对高温热害的模拟能力较差, 以 APSIM 模型为例, 它不能直接描述极端高温天气对作物生殖器官的损害 (Ferris, 1998)。统计模型是基于历史的产量和气象因子数据集建立的, 相比于作物模型而言, 统计模型不考虑当地的农田环境, 在研究区域尺度上气候变化对作物的影响中有更好的应用空间 (Lobell and Burke, 2010)。Schlenker and Roberts (2009) 应用统计模型分析表明, 当温度超过 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 将严重损害美国大豆、棉花的产量; 同样的, 当温度超过 $32\text{ }^{\circ}\text{C}$, 将使得法国玉米产量迅速减少 (Hawkins et al., 2013)。就中国而言, 应用统计方法, 定量分析区域尺度的极端高温天气、气候事件和玉米产量的研究还相对较少。

Liu et al. (2004) 指出在 1955~2000 年间, 中国极端高温以 $0.13\text{ }^{\circ}\text{C}(10\text{ a})^{-1}$ 的速度增长, 并表现出明显的区域差异; 相应地, 极端高温天气的发生频率则以 $5.22\text{ d}(10\text{ a})^{-1}$ 的速度增加 (Zhou and Ren, 2011); 但就夏季而言, 温度超过 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的天数, 则

以 $1.9 \text{ d} (10 \text{ a})^{-1}$ 的速度增加 (Zhou et al., 2016), 增速相对减小。那么, 中国的粮食主产区其极端高温天气的变化规律又是如何呢?

针对极端高温天气的影响机制中国学者进行了若干研究, 但是这些研究很多都是基于个例进行分析, 且研究的区域尺度相对较小, 比如, 钱婷婷等 (2005) 针对 2000 年 7 月北京的异常天气, 分析了其对应的河套高压的异常; 杨辉和李崇银 (2005) 针对 2003 年长江流域高温热害对应的环流异常进行了探讨; 钱维宏和丁婷 (2012) 探讨了中国东部地区 15 个高温热害事件对应的大气扰动的变化, 但并没有区分不同区域的环流差异。当然, 除了当地的大尺度环流之外, 遥相关因素对极端高温天气的发生也有所贡献 (Lu and Chen, 2016), 例如, 印度洋海温异常能够影响华南地区的极端高温天气 (Hu et al., 2012)。那么, 太平洋地区的海温异常又将如何影响中国不同区域的极端高温天气的发生呢?

基于以上研究背景, 本文将在区域和省份尺度上定量分析极端高温天气对玉米产量的影响, 并进一步探讨引起极端高温天气的大气环流背景, 分析海温对极端高温天气的可能影响, 以期为更好地应对气候风险提供科学指导, 保证国家粮食安全。

2 数据和方法

本文使用的气象资料为国家气候中心 CN05 日平均格点资料, 分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 使用的变量为日平均最高温度及降水 (Xu et al., 2009)。环流场资料为 NCEP/NCAR 逐月再分析资料, 分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ (Kistler et al., 2001)。月平均的海温格点资料来自 NCDC (National Climatic Data Center) 的 Extended Reconstructed Sea Surface Temperatures, version 3, 分辨率为 $2.0^\circ \times 2.0^\circ$ 。玉米的产量数据从中国农业年鉴中获得, 区域平均的作物单产, 以每个省份玉米的种植面积进行加权平均获得。

玉米不同生育期对温度的响应不同, 其中以开花和灌浆期对高温最为敏感, 以上过程主要发生在夏季, 而且夏季是极端高温事件发生的集中季节, 因此本文主要分析了夏季极端高温天气对玉米产量的影响, 而不是整个生长期。

极端高温事件的定义有多种, 目前气候极值变化研究通常采用阈值法, 一般将阈值分为绝对阈值

和百分比阈值, 气象上通常将 35°C 作为高温绝对阈值。但是在农业上, 即使高温并未达到其绝对阈值, 而只是达到一种相对极端即可使得作物发生生理障碍而造成减产 (姚凤梅和张佳华, 2009)。因此本文采用相对阈值的方法来定义极端高温指数, 具体的计算流程如下: 将某个格点上 1971~2010 年某日的最高气温数据按照升序排列并将第 95 个百分位值作为该格点上该日统计指数的上限阈值, 如果某日最高温度超过其上限阈值, 则认为该日为一个极端高温事件, 我们计算了某年某格点夏季出现极端高温事件的日数将其作为该格点该年的夏季极端高温指数。省份、区域尺度平均的极端高温指数是以耕地面积为权重的区域平均值。降水指数为区域平均的夏季降水。

为了减小长期缓慢变化的因素 (诸如科技发展等) 对作物产量的影响, 避免高温指数和产量由于自身的变化趋势而产生的虚假相关, 本文采用年际增量的方法对数据进行处理。某一个变量的年际增量指的是该变量的当年值减去前一年的值, 用 Δ 表示 (Fan et al., 2008)。年际增量的方法已被广泛用于短期气候预测中, 例如, Fan et al. (2008) 通过预测降水的年际增量进而预测降水率, 能够显著提高长江中下游地区夏季降水的预测水平; 年际增量方法还能在一定程度上改进台风的预测模型 (Fan and Wang, 2009)。

基于年际增量的数据, 本文建立了不同复杂程度的统计模型, 定量分析极端高温天气对玉米产量的影响。首先, 基于夏季极端高温指数建立了简单的一元线性回归方程:

$$\Delta y = a_1 \times \Delta I_{\text{heat}} + a_0, \quad (1)$$

进一步地, 在方程中引入高阶项:

$$\Delta y = b_1 \times \Delta I_{\text{heat}} + b_2 \times \Delta I_{\text{heat}}^2 + b_0, \quad (2)$$

通常, 极端高温天气和降水并不是相互独立的, 极端高温天气对产量的影响可能依赖于降水的多少, 二者存在交互作用 (Hawkins et al., 2013), 因此, 我们建立了更为复杂的广义相加模型 (Generalized additive model):

$$\Delta y = c_1 \times \Delta I_{\text{heat}} - c_2 \times \Delta P - c_3 \times \Delta I_{\text{heat}} \times \Delta P + c_0, \quad (3)$$

其中, a_0 、 a_1 、 b_0 、 b_1 、 b_2 、 c_0 、 c_1 、 c_2 、 c_3 分别为回归参数, Δy 为玉米产量的年际增量, ΔI_{heat} 为高温指数的年际增量, ΔP 为降水指数的年际增量。针对以上三个模型, 本文应用 AIC (Akaike information criterion) 准则来评判模型的拟合优度。

AIC 准则, 是日本学者赤池弘次在研究信息论时提出的, 是基于统计模型的极大似然函数和参数变量个数的一种衡量模型拟合优良性的标准 (Akaike, 1987), 当从一组可供选择的模型中选择一个最佳模型时, 通常认为选择 AIC 最小的模型是可靠的。

在分析极端高温指数的时间序列时, 我们使用了 Mann-Kendall 检验法和小波分析法。Mann-Kendall 检验法是世界气象组织推荐的一种非参数统计检验方法, 最初由 Mann 和 Kendall 提出, 经过不断地完善和改进已被广泛应用于时间序列的突变检验中, 该方法计算简单, 不受少数异常值的干扰, 而且可以明确突变开始的时间, 并指出突变区域 (康淑媛等, 2009)。小波分析方法是在傅里叶变换的基础上引入窗口函数, 将时间序列在时间和频率两个方向上展开, 能够克服滑动平均、滤波等传统方法在诊断突变点时的不足, 明确变化的时间位置 (姜晓艳等, 2009)。

3 结果分析

3.1 区域、省份尺度的玉米产量与高温指数的定量关系

本文首先计算了中国大陆地区的高温指数与玉米产量的定量关系, 其相关系数为 -0.40 , 通过 0.05 的显著性水平检验。省份尺度上, 年际增量的玉米产量和高温指数的相关系数如图 1 所示, 宁夏、河北、上海表现为弱的正相关 (相关系数分别为 0.03 、 0.12 、 0.13), 甘肃、河南、湖北、湖南、广东为弱的负相关 ($-0.23 < \text{相关系数} < 0$), 其他 18 个省市均表现为显著的负相关关系 ($-0.63 < \text{相关系数} < -0.29$), 即在中国的大部分省份, 极端高温天气将使得玉米产量显著减少。为了更加直观地分析极端高温天气对玉米产量的影响, 我们以统计时段 1971~2010 年 40 年平均玉米产量作为基准, 应用公式 (1), 计算了以上通过显著性检验的 18 个省市地区其极端高温指数增加一个标准差, 玉米产量变化的百分比, 并基于 Bootstrap 重取样方法 (自助法), 给出了产量变化的 90% 的置信区间, 以盒须图表示 (图 2)。其中, 西南山地玉米区 (包含四川、贵州、广西、云南) 以及南方丘陵玉米区 (包含江西、浙江) 减产幅度相对较小, 中值为 -2% 左右, 且基于 Bootstrap 重取样的不确定性区间也较小。而北方春播玉米区 (包括黑龙江、吉林、辽宁) 和黄

淮海玉米区受极端高温天气影响较大, 尤其是安徽省, 减产幅度高达 12% , 且不确定性区间范围显著增大。

进一步地, 我们应用更为复杂的统计模型探讨极端高温天气对玉米产量的影响。以安徽为例, 当引入高阶项时 (公式 (2)), 回归模型预测的减产率和观测值的相关系数为 0.53 , 当极端高温指数增加一个标准差时, 玉米减产 11.09% , 但是高阶项的回归系数 (b_2) 并未通过显著性检验 (显著性水平 $p=0.39$)。当应用公式 (3), 考虑降水和极端高温指数的交互作用时, 极端高温指数增加一个标准差, 玉米的减产率为 12.26% , 与简单回归方程的计算结果相差 0.16% , 但是降水以及交互作用的回归系数 (c_2 、 c_3) 均未通过显著性检验。我们计算了基于一元线性回归的产量残差值和降水指数的相关系数为 -0.04 ($p=0.8075$), 进一步表明是否将降水指数引入到回归方程对结果的影响很小, 这可能与灌溉增加的观测事实是对应的, 灌溉的增加间接削弱了降水对产量的影响。以上三个模型对应的 AIC 值分别为 -10.03 、 -7.21 、 -4.88 , 证明简单一元线性回归的拟合优度最佳。综上, 我们有理由认为, 基于简单一元回归的分析结果是合理的。

基于简单一元线性回归的分析结果表明, 极端高温天气对东北和华北玉米产区的影响最为强烈。而东北和华北玉米的播种面积和产量总和分别占全国的 64% 和 69% , 对稳定中国的粮食市场具有战略性意义。因此, 加强东北、华北地区极端高温天气的相关机理研究, 从而有针对性地采取切实有效的措施增强对气象灾害的抵御能力将变得非常迫切。

本文针对相关研究区域 1971~2010 年夏季极端高温日数距平进行 EOF 分解 (图 3), 第一模态的解释方差为 51.4% , 从图中可以看出, 东北、华北表现出区域一致的特征, 高值中心主要集中于东北西部地区, 这与在全球变暖背景下, 高纬地区的增温更为显著的结论相对应。而第二模态则表现出显著的区域差异, 东北、华北分别出现异常的正、负中心, 这可能是由于海温、大陆内部热力、动力作用等强迫在不同区域的综合作用有所差异, 使得区域气候的表现不尽相同。以上结果证明了不论是从农业还是从气象角度进行分区讨论的合理性和必要性。在分析华北极端高温事件时, 考虑到秦岭—淮河的存在, 其南北两侧的自然条件、农业生产

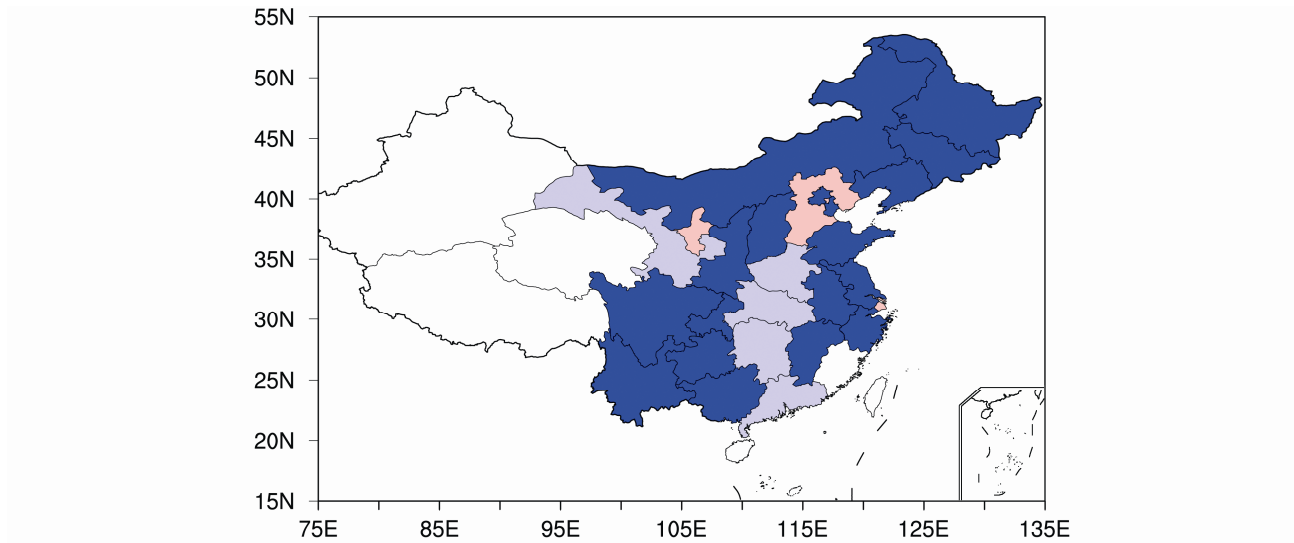


图 1 各省份年际增量的高温指数 (ΔI_{heat}) 和玉米产量 (Δy) 的相关。深 (浅) 蓝色为负相关且通过 (未通过) 0.01 的显著性水平检验, 红色为正相关, 白色为缺测。注: 在农业统计年鉴中将四川和重庆作为一个大区进行产量统计

Fig. 1 The correlation map between year-to-year increment of heat stress index (ΔI_{heat}) and maize yield (Δy) at provincial scales. Dark (light) blue shadings indicate negative values that are statistically significant (insignificant) at the 0.01 level. Red shadings indicate positive correlation, the white represents areas of missing data. Note: Sichuan Province and Chongqing City were taken as one single region for statistical analysis

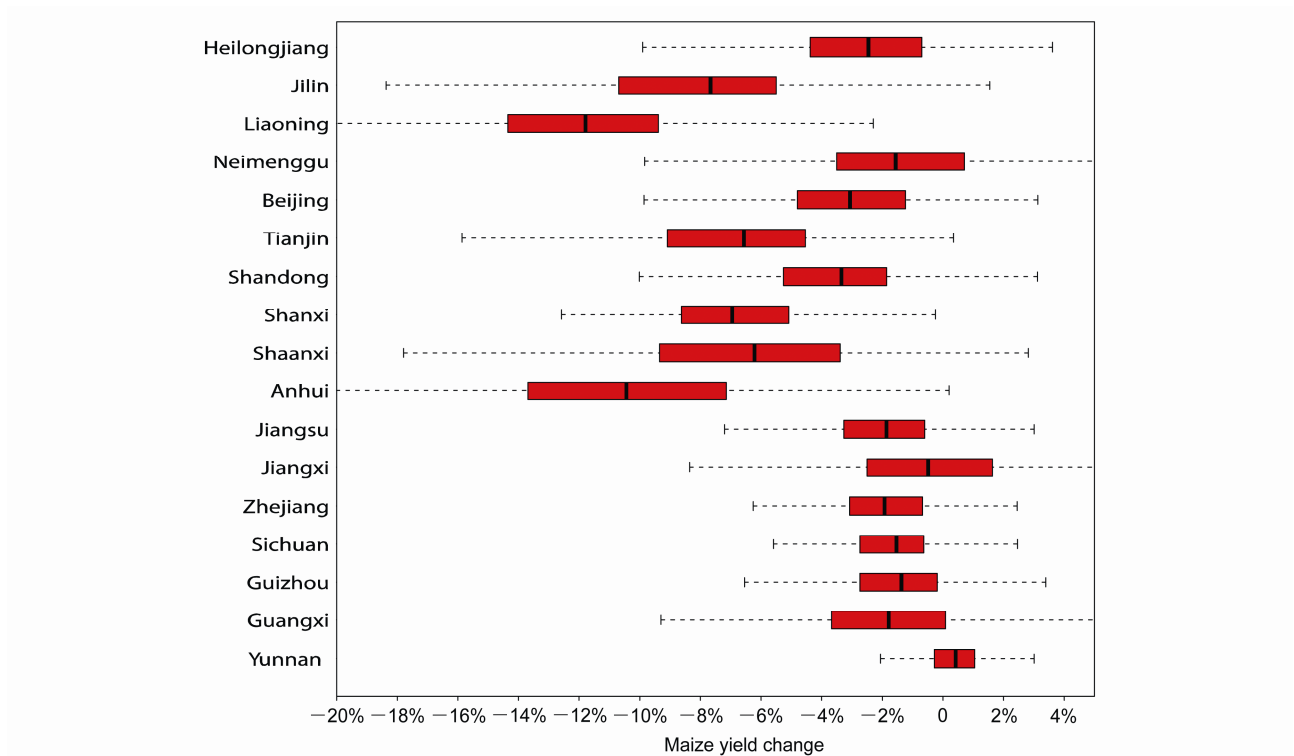


图 2 基于 Bootstrap 重取样方法 (抽样 1000 次) 计算的不同省份其高温指数增加一个标准差, 产量相对于历史时期 (1971~2010) 变化的百分比。黑色粗线为中值

Fig. 2 Box plot of percentage changes in maize yield relative to that during the baseline period (1971–2010) for each standard deviation increase in heat stress index based on Bootstrap resampling of historical data with 1000 samples. The middle vertical line within each box indicates the median value

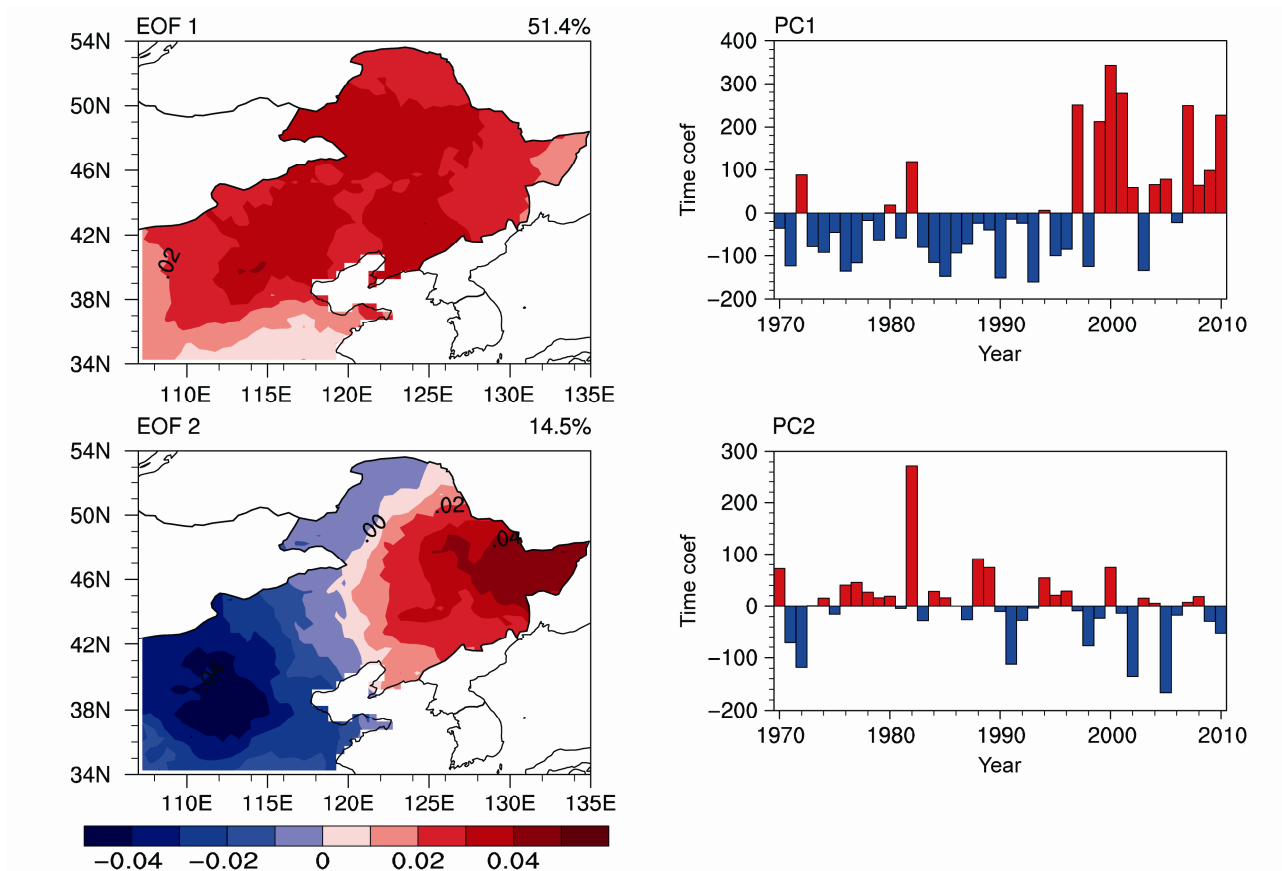


图3 中国东北、华北地区夏季极端高温指数 EOF 分解的前两个主分量。左图为主模态 (EOF1、EOF2)，其右上角的数字为对应的解释方差；右图
为对应的时间序列 (PC1、PC2)

Fig. 3 Spatial patterns of the first two eigenvectors of the EOF analysis (EOF1, EOF2, left) of heat stress index in Northeast and North China and the
corresponding time coefficients (PC1, PC2, right)

方式有着显著的差异，我们不再像分析东北地区时采用行政区划，而是将（34°N~41°N，107°E~120°E）的矩形区域作为分析的重点。

图4给出了东北地区极端高温天气在夏季不同月旬发生的概率，其表现出一个类似的“W”的分布形式，6月上旬以及8月下旬高温出现的频率最高，7月下旬次之。对东北地区而言，玉米的开花、灌浆都发生在夏季。7月下旬，玉米处于抽雄吐丝期，此时遭遇高温天气将使得玉米花粉活力降低，雌蕊吐丝困难，雌雄蕊花期不遇，造成后期授粉率降低（赵丽晓等, 2014）；8月下旬，玉米进入乳熟期，高温天气将减弱茎叶的干物质积累量和同化物的供应能力，显著降低玉米灌浆速率，使得玉米产量急剧减少（尹小刚等, 2015）。另外，高温很有可能引发病虫害，比如，纹枯病和青枯病的盛行，导致玉米产量大幅减产（王兆富等, 2011）。

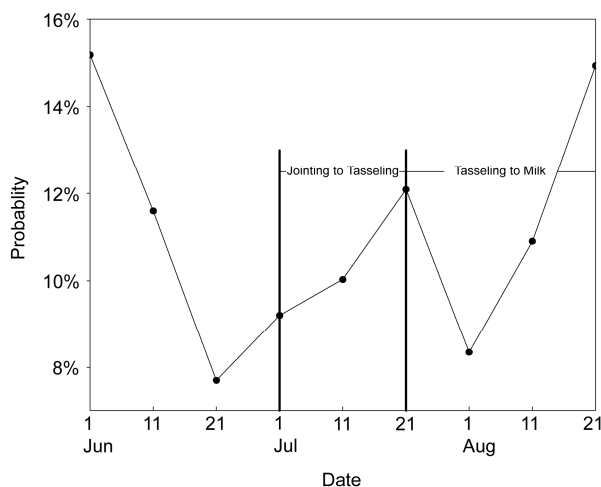


图4 东北地区极端高温天气在6、7、8月发生的概率
Fig. 4 The probability of heat stress occurrence in June, July, and August
at 10-day interval in Northeast China

华北地区春玉米的生长周期基本与东北地区一致,夏玉米则基本上略晚一个月,6月份开始播种,8月份开始抽雄,9月中上旬进入乳熟期,其在夏季经历了漫长的营养生长阶段。在玉米的营养生长阶段,高温能够显著减弱光合作用,抑制根系生长,为后期生殖生长提供不利条件,最终将影响玉米的产量。华北地区不同月旬极端高温天气发生的概率相对均匀(图略),即,在玉米生长发育的不同生育阶段遭受极端高温侵袭的概率是相当的,但因其所处的发育期不同,将导致玉米产量的受损程度有所差别。

3.2 东北夏季极端高温天气及其相应的大气环流和海温场

东北是中国纬度最高的地区,在20世纪80年代之前低温冷害时常发生,但是伴随着全球变暖,冷害出现的频率降低,而最高温度呈增加趋势(翟盘茂和任福民,1997)。我们在前人分析的基础上,计算了行政区域平均的东北地区极端高温指数时

间序列的变化趋势,从图5a中可以看出,70年代到90年代中期,极端高温日数较少,且年际变率相对较小,而在90年代中后期极端高温日数显著增加,与EOF分解第一模态的时间系数的结果相一致(图3)。对上述时间序列进行Mann-Kendall突变检验,从图5b中可以看到,在1996~1999年期间,在临界直线范围内,UF和UB出现多个交点,表明,东北极端高温日数在此期间内发生显著变化,自1999年以后,UF持续大于0,表明东北极端高温日数呈上升趋势。图6为东北地区夏季极端高温日数时间序列的小波变换系数实部的时频分布图,与突变检验结果相对应,其表现出一个明显的32~40年的周期,经历了少—多的循环交替,90年代后期高温日数偏多。

基于突变检验的结果,我们选取了两个时期:1971~1997年和1998~2010年,分析了东北夏季极端高温日数的空间分布特征(图7),结果清楚地表明,相对于1971~1997年,东北全区高温日数

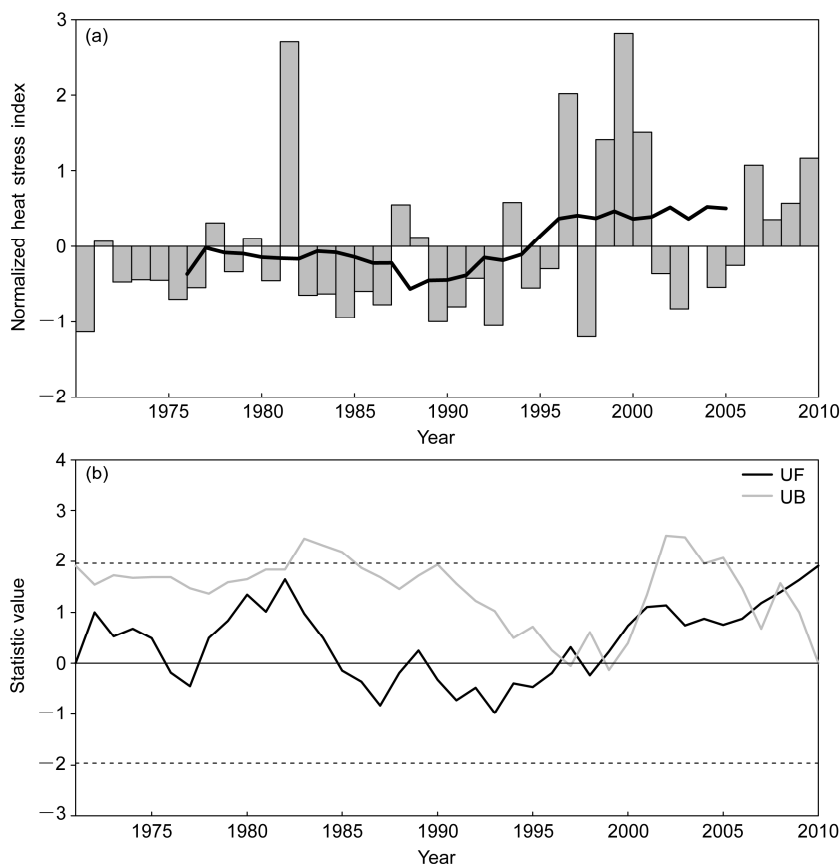


图5 (a) 标准化的东北极端高温指数的时间序列,粗实线为11年滑动平均值。(b) 东北极端高温指数Mann-Kendall统计量曲线,UF、UB为基于东北极端高温指数计算的统计量,虚线为0.05显著性水平临界线

Fig. 5 (a) Time series of normalized heat stress index in Northeast China and the 11-year running mean shown by the black bold line. (b) Mann-Kendall measure curves of heat stress index in Northeast China. Forward (UF) and backward (UB) represent statistic rank series in the Mann-Kendall test from the heat stress index in Northeast China, the dashed lines indicate the critical values for the significance level of 0.05

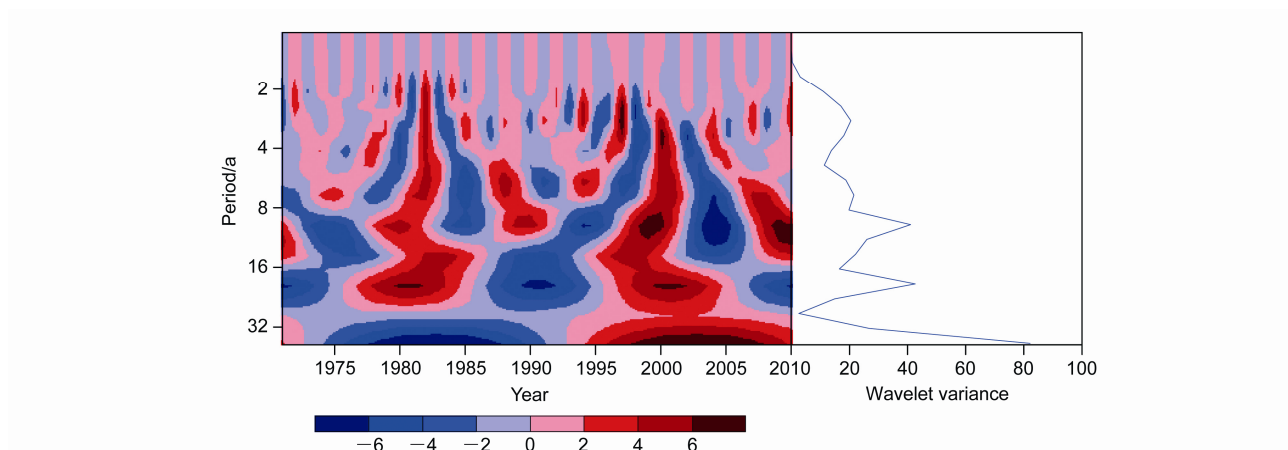


图6 东北地区夏季极端高温日数时间序列的小波变化系数实部的时间-频率分布（左）和小波方差（右）
 Fig. 6 The time-frequency distribution of the real part of wavelet transform coefficient (left) and wavelet variance (right) for heat stress index in Northeast China

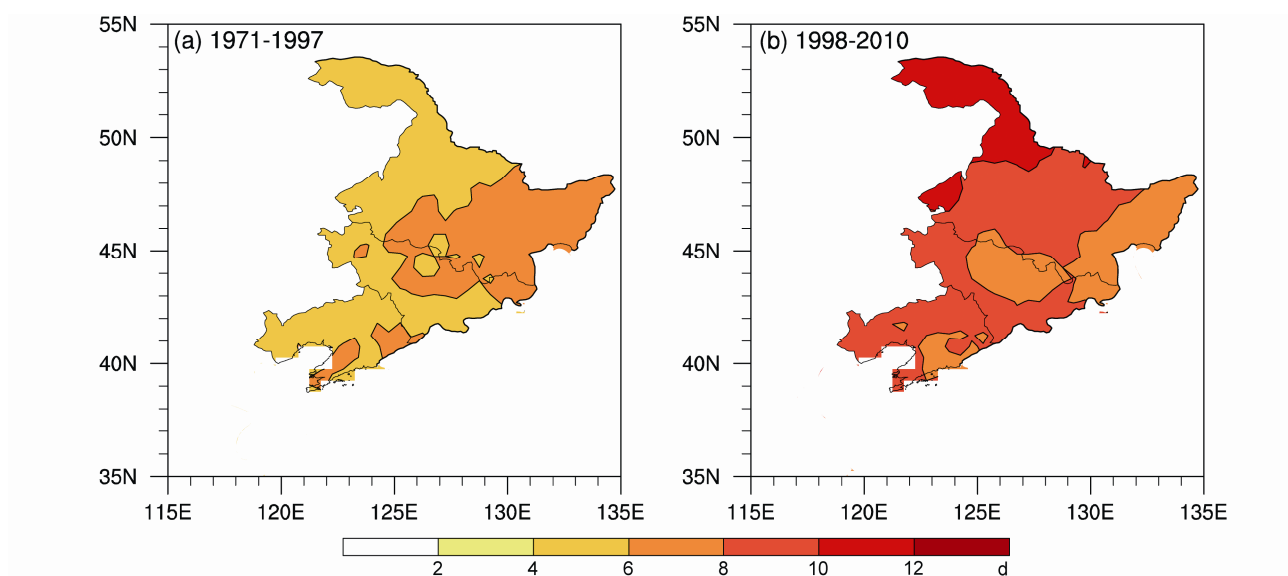


图7 (a) 1971~1997 年、(b) 1998~2010 年东北地区夏季极端高温日数的分布
 Fig. 7 Geographical distributions of heat stress index in summer in Northeast China during (a) 1971-1997 and (b) 1998-2010

在后一时期明显增加，其中以黑龙江西北部地区增加最为显著。

先前针对夏季高温成因的研究，多偏重从天气过程进行分析（孙建华等, 1999; 钱婷婷等, 2005），而对大气环流气候背景及外强迫的研究相对较少。因此，为了更好地探讨大气环流对极端高温天气的影响，本文将年际增量的东北夏季极端高温日数的时间序列进行标准化，挑选出大于 0.75 个标准差和小于 0.75 个标准差的年份，分析环流场的差异。从图 8a 中可以看出极端高温日数多年，500 hPa 位势高度场上东北地区出现正异常，有利于晴朗天气的维持，使得到达地面的太阳辐射增加，气温偏高，

极端高温日数增加。同样的，基于 EOF 分解第一模态的时间系数回归的 500 hPa 位势高度场（图略），其分布形式与图 8a 类似。与 500 hPa 位势高度场相对应，850 hPa 风场表现出一个类似的反气旋形式（图 8b），东北北侧盛行西风，冷空气不易南下，有利于高温天气的生成。

海洋具有较大的热惯性，其能通过大气环流影响区域气候。尤其是中国地处东亚季风区，海温的异常能够通过海气相互作用导致亚洲季风环流的异常，从而影响中国的温度和降水（雷杨娜等, 2009）。此处我们分析了东北夏季高温指数与同期海温的关系，从图 9 中可以看出，东北夏季极端高

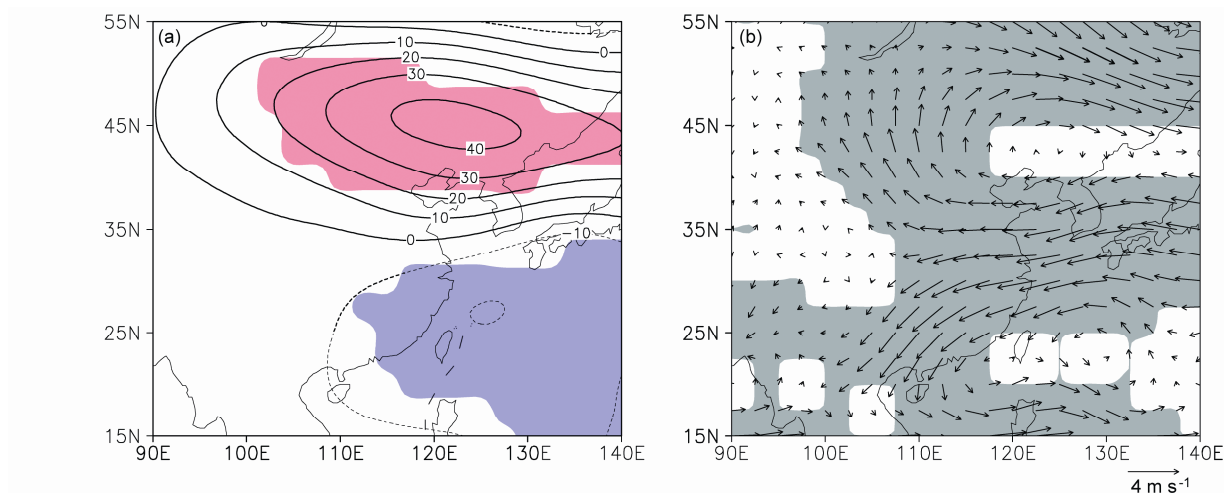


图8 东北地区极端高温日数偏多、偏少年合成的 (a) 500 hPa 位势高度差值场 (单位: gpm) 和 (b) 850 hPa 风场差值场 (单位: m s^{-1}), 阴影区通过 0.05 显著性水平检验

Fig. 8 Composite differences in (a) geopotential height (units: gpm) at 500 hPa and (b) wind field (units: m s^{-1}) at 850 hPa between years of higher and lower heat stress indices in Northeast China. The shadings represent values statistically significant at the 0.05 level

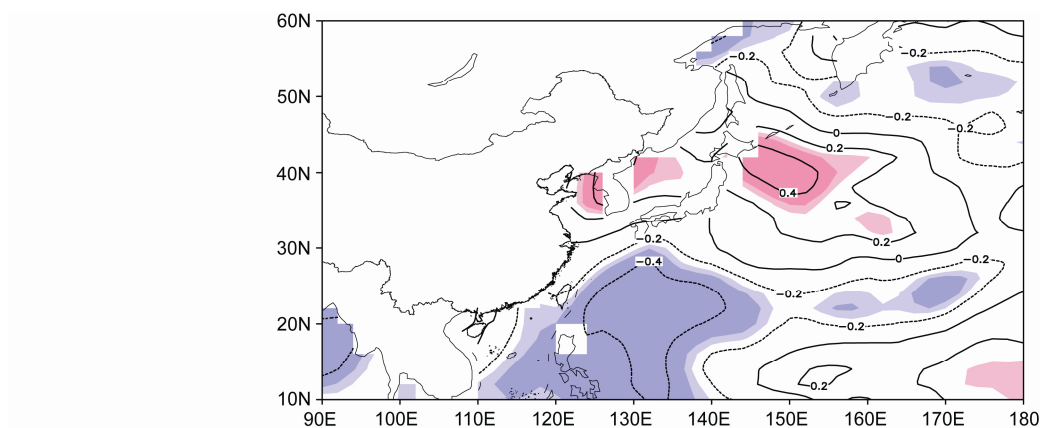


图9 东北地区夏季极端高温日数与同期海温相关系数的空间分布, 深(浅)影区通过 0.05 (0.1) 显著性水平检验

Fig. 9 Geographical distribution of correlation coefficients between heat stress index and sea surface temperature in summer in Northeast China. Dark (light) shadings indicate values statistically significant at 0.05 (0.1) level

温日数与黑潮延伸区海温呈现显著的正相关关系, 这与李菲等 (2010) 的结论相吻合; 而与黑潮海温呈现显著的负相关关系。Zhou and Wang (2014) 曾分析指出黑潮海温正异常会使得东北地区夏季降水增加, 而通常极端高温天气的出现日数和同期降水量为反相关关系 (史印山等, 2009), 这主要是由于降水的增加, 使得白天蒸发增加, 消耗大量热量, 且云量增加, 使得到达地面的太阳辐射减少, 减少了高温发生的可能。进一步地, 我们计算了极端高温指数 EOF 分解的第一模态对应的时间系数与同期海温的相关系数, 其分布形式与图 9 类似 (图略); 而第二模态时间系数回归的海温异常海域主要出现在大西洋, 表现为“- + -”的三极子海温分布模

态, 这样的海温异常能够调节东亚夏季风的强弱, 导致不同地区的大气环流发生异常。

3.3 华北夏季极端高温天气及其相应的大气环流和海温场

图 10a 给出了华北区域平均的夏季极端高温日数的时间序列, 其呈现出一个明显的上升趋势。Mann-Kendall 检验证明其在 1998 年前后发生突变 (图 10b), 且在 2005 年以后, UF 值超过显著性水平 0.05 临界线 (1.96), 表明华北极端高温日数的增加趋势十分显著。

同样的, 我们对该区极端高温事件对应的季节平均环流进行了初步分析, 在 500 hPa 位势高度场上 (图 11a), 华北在异常高压脊的控制下, 云量减

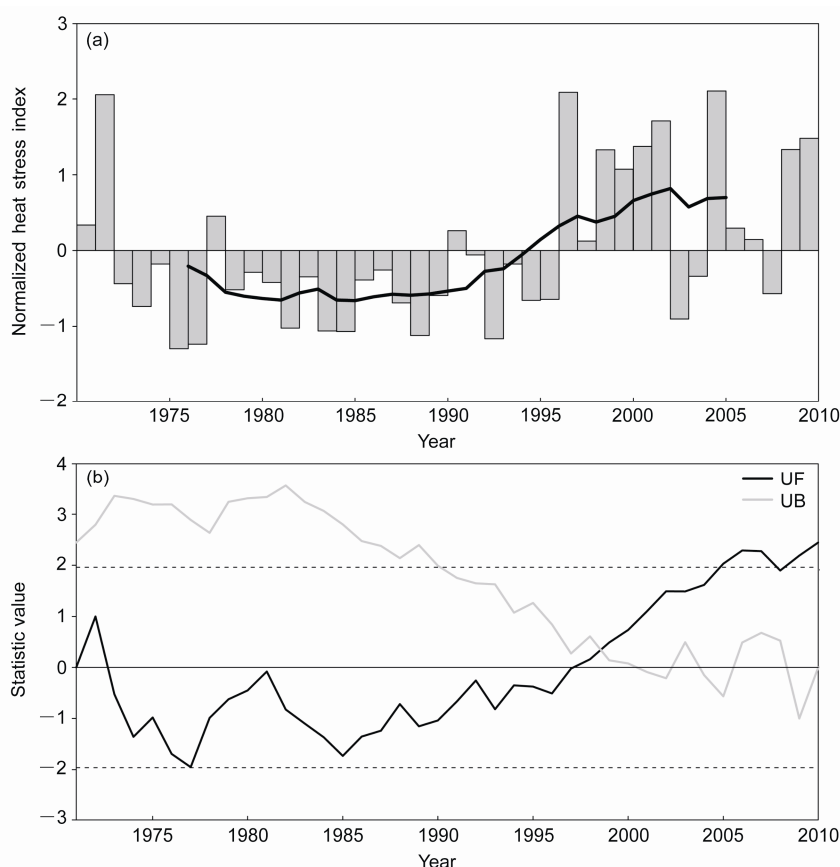


图 10 同图 5, 但为华北地区

Fig. 10 As in Fig. 5, but for North China

少, 辐射增加, 地面温度升高, 同时涡度平流异常使得该区盛行下沉运动, 引起绝热增温, 从而有利于极端高温天气的发生。而 1000 hPa 经向风场的合成分析则表明(图 11b), 在极端高温日数发生多年, 该地盛行偏南风, 暖气流使得该区温度升高。

我们进一步分析了同期海温对华北地区夏季极端高温日数的影响(图略), 其在西太平洋地区的表现与东北地区类似, 但是在东太平洋的信号更为显著, 表明 ENSO 能够影响该区高温的发生, 区域平均的华北极端高温指数和 Niño3.4 指数的相关系数高达 0.4, 通过 0.05 显著性水平检验。

那么 ENSO 是如何影响华北地区的高温天气呢? 本文基于标准化的 ENSO 指数, 以一个标准差为选择标准, 分析了 ENSO 高、低指数年对应的大气环流的差异。从图 12 我们看出, ENSO 指数偏高年, 西太平洋副热带高压偏东, 这与陈烈庭(1982)的结论相一致。卫捷等(2004)指出, 当西太平洋副热带高压偏东时, 将引起亚洲太平洋地区的长波

位置和强度的变化, 高压脊将控制华北至朝鲜半岛的广大区域, 为该区出现高温创造有利条件。而且, 副热带高压是影响华北地区降水的重要环流系统, 当其脊点偏东时, 该区易出现干旱天气, 可能导致高温的加剧(孙安健和高波, 2000; 荣艳淑等, 2008)。

图 13 给出了 ENSO 指数高、低年对应的华北地区水汽通道的差异, 由于副热带高压偏东, 其西侧气流折向北的经度在 130°E 以东, 而来自南海的水汽也并未向北进入东亚大陆, 整个东亚大陆为自北向南的距平通道, 水汽通量显著减少, 同时该区水汽通量散度为正值, 水汽辐散, 华北地区比较干燥。陆日宇(2005)指出, 当赤道东太平洋海温偏高时, 高空急流发生异常, 华北地区降水偏少, 出现干旱, 可能进一步导致高温的加剧。

图 14 是经向(34°N~41°N)平均的华北地区夏季 ENSO 高、低指数年合成的垂直速度差值的纬向—高度图, 从合成分析的结果可以看出, ENSO

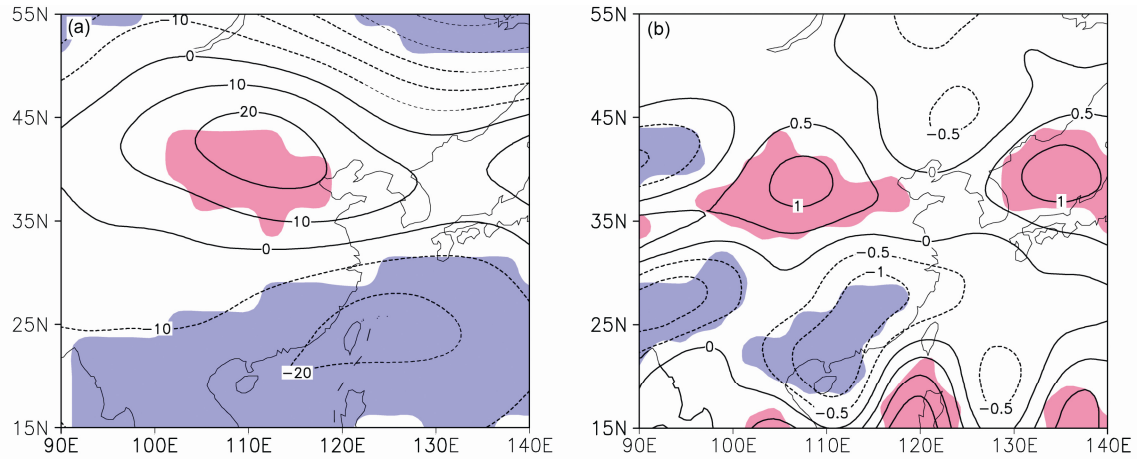


图 11 华北地区极端高温日数偏多、偏少年合成的 (a) 500 hPa 位势高度差值场和 (b) 1000 hPa 经向风差值场, 阴影区通过 0.05 显著性水平检验
Fig. 11 Composite differences in (a) geopotential height at 500 hPa and (b) meridional wind at 1000 hPa between years of high and low heat stress indices in North China. The shadings indicate the difference statistically significant at the 0.05 level

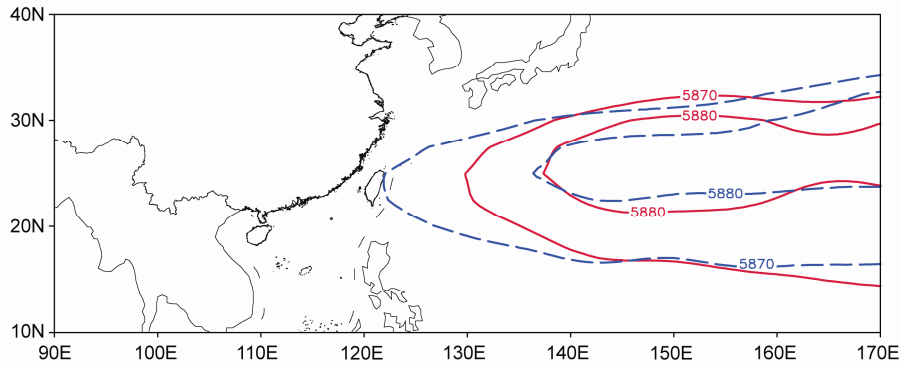


图 12 夏季 ENSO 高、低指数年合成的西太平洋副热带高压位置。红线为 ENSO 指数偏高年西太平洋副热带高压的位置, 蓝线为 ENSO 指数偏低年西太平洋副热带高压的位置

Fig. 12 Composites of the western Pacific subtropical high (WPSH) in years of high and low ENSO indices. The red lines indicate the WPSH location in high ENSO index years, the blue lines indicate the WPSH location in low ENSO index years

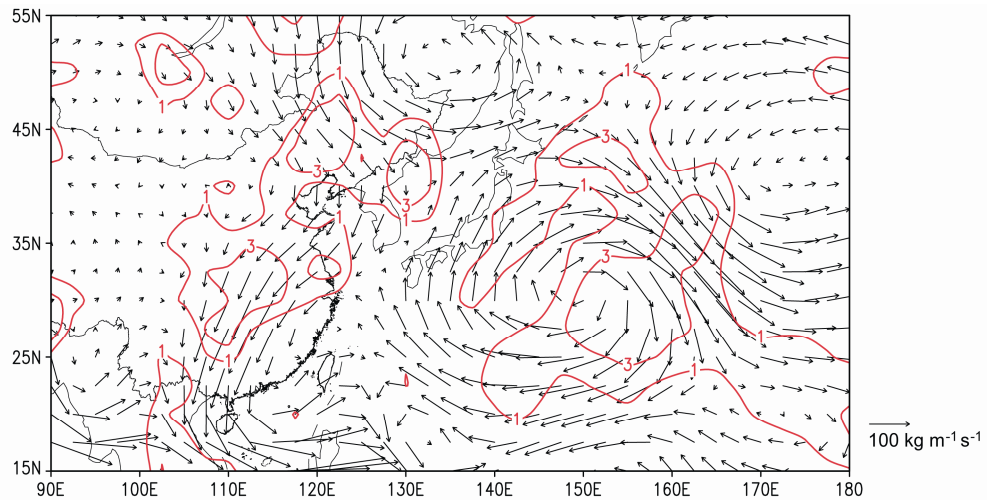


图 13 夏季 ENSO 高、低指数年合成的整层水汽 (地面到 300 hPa) 通量的差值场 (箭头, 单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)、水汽通量散度的差值场 (等值线, 单位: $10^{-5} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

Fig. 13 Composite differences in vertically integrated moisture fluxes (units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) and moisture flux divergence (units: $10^{-5} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) between years of high and low ENSO indices

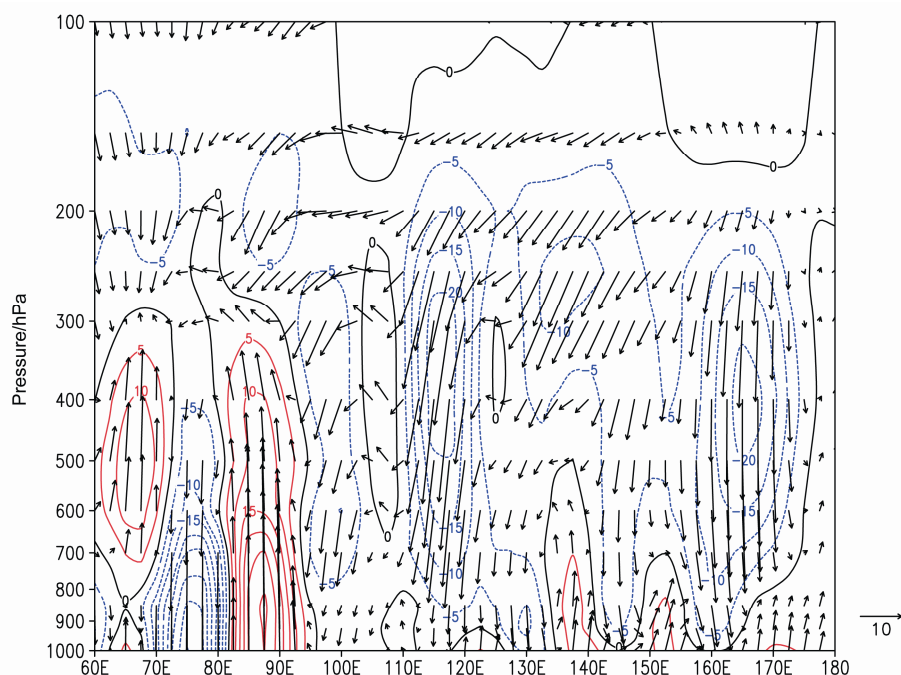


图 14 经向 ($34^{\circ}\text{N}\sim 41^{\circ}\text{N}$) 平均的华北地区夏季 ENSO 高、低指数年合成的垂直速度差值 (等值线, 单位: -10^3 Pa s^{-1})。矢量箭头为纬向风 (单位: m s^{-1}) 和垂直风 (单位: -10^3 Pa s^{-1}) 的合成场

Fig. 14 Meridionally mean ($34^{\circ}\text{N}\sim 41^{\circ}\text{N}$) vertical velocity differences (contours, units: -10^3 Pa s^{-1}) between years of high and low ENSO indices. Arrows are composites of zonal wind (units: m s^{-1}) and vertical velocity (units: -10^3 Pa s^{-1})

指数偏高年, 华北地区所在的经度范围内, 盛行下沉运动, 引起空气绝热增温, 近地面感热增加, 气温升高, 有利于高温天气的出现。

4 结论与讨论

热量是作物生存的重要因子之一, 玉米的生命活动需要在一定的温度范围内才能顺利进行, 超出上、下界限温度将对玉米造成严重的影响, 甚至直接死亡。本文分析了省份尺度上极端高温日数和玉米产量的定量关系, 结果表明, 所研究的 26 个省市地区, 除河北、宁夏以及上海外, 均表现为负相关, 即高温日数的增加, 将使得玉米产量显著减少, 从区域分布来看, 以东北和华北地区玉米产量受损程度较大。

伴随着全球变暖, 东北、华北地区夏季极端高温日数在 1990 年代中后期显著增加。而气候异常的直接影响因素是大气环流, 分析表明, 影响东北、华北极端高温天气的 500 hPa 位势高度场类似, 即区域上空出现正异常, 其所控制地区天气比较晴朗, 入射太阳辐射增加, 使得地面温度升高, 而在

风场上则表现为显著的区域差异。当然, 不同的下垫面也能显著影响气温的分布 (Takane and Kusaka, 2011)。华北西部为东北—西南走向的太行山脉, 北部为燕山山脉, 山坡的陡峭下降能够通过动力强迫作用引发焚风效应, 加剧华北的高温天气, 而本文并未进行讨论。考虑到高温形成机制的复杂性, 未来还需结合地形的变化进行深入研究。

与前人的研究略有不同 (曾昭美和章名立, 1987), 影响东北夏季极端高温天气的显著海温区不在东太平洋, 而在西太平洋黑潮区, 当其海温偏低时, 东北易出现高温天气。特别地, ENSO 对华北地区夏季极端高温天气具有显著的影响, 当 ENSO 指数偏高时, 将为华北极端高温天气的出现提供了良好的环流背景。鉴于海温有较好的持续性, 那么前期海温是否也能影响华北地区的气候, 从而影响产量的增减呢? 目前, 针对 ENSO 对粮食产量的影响国内外学者已开展了若干研究 (Zhang et al., 2008; Iizumi et al., 2014), 然而针对生长季前期海温异常对不同区域产量的影响的研究还鲜见报道。未来我们将进一步探讨前期东太平洋海温异常对中国及其亚区域玉米产量的预报意义, 以期进

一步改善粮食产量的预报模型。

全球变暖背景下, 极端高温天气出现的频率和强度显著增加, 本文针对极端高温天气对玉米产量的影响在不同区域尺度上进行了定量表达, 加强了人们对高温热害的直观认识, 并概述地从机理上解释了高温对玉米生长发育的可能影响。能够为政府和相关部门提供有价值的参考。与此同时, 本文定义的高温指数以历史统计数据为依据, 较少地受到人为因素的干扰, 加之指数和产量损失的相互匹配, 为合理地设计保险指数提供了可能。但是玉米随品种、发育阶段的不同等其对高温的响应机制不尽相同, 且通常高温胁迫和水分胁迫是相联系的, 而统计模型并不能明确地说明其中的机制。应用作物模型虽然能够在一定程度上更好地分析玉米在不同气候变化下的性状, 但是目前大多数的模型并没有考虑极端高温对作物的影响, 因而可能低估气候变化对玉米产量造成的损失 (Porter and Gawith, 1999)。因此, 未来我们将结合作物的生理特征, 将极端天气气候事件 (包括高温热害等) 引入到模型中, 改进模型对极端气象灾害的模拟功能, 进而将统计和生理模型相结合, 更好地预估气候变化对产量的影响, 为决策者提供更多有价值的信息, 保证国家粮食安全。

参考文献 (References)

- Akaike H. 1987. Factor analysis and AIC [J]. *Psychometrika*, 52 (3): 317–332, doi:10.1007/BF02294359.
- Alexander L, 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.
- 陈烈庭. 1982. 北太平洋副热带高压与赤道东部海温的相互作用 [J]. *大气科学*, 6 (2): 148–156. Chen Lieting. 1982. Interaction between the subtropical high over the North Pacific and the sea surface temperature of the eastern equatorial Pacific [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 6 (2): 148–156, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1982.02.05.
- Fan K, Wang H J, Choi Y J. 2008. A physically-based statistical forecast model for the middle-lower reaches of Yangtze River valley summer rainfall [J]. *Chinese Science Bulletin*, 53 (4): 602–609, doi:10.1007/s11434-008-0083-1.
- Fan K, Wang H J. 2009. A new approach to forecasting typhoon frequency over the western North Pacific [J]. *Wea. Forecasting*, 24 (4): 974–986, doi:10.1175/2009WAF2222194.1.
- Ferris R, Ellis R H, Wheeler T R, et al. 1998. Effect of high temperature stress at anthesis on grain yield and biomass of field-grown crops of wheat [J]. *Annals of Botany*, 82 (5): 631–639, doi:10.1006/anbo.1998.0740.
- Hawkins E, Fricker T E, Challinor A J, et al. 2013. Increasing influence of heat stress on French maize yields from the 1960s to the 2030s [J]. *Global Change Biology*, 19 (3): 937–947, doi:10.1111/gcb.12069.
- 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]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 29 (1): 91–100, doi:10.1007/s00376-011-0209-2.
- Iizumi T, Luo J J, Challinor A J, et al. 2014. Impacts of El Niño Southern Oscillation on the global yields of major crops [J]. *Nature Communications*, 5: 3712, doi:10.1038/ncomms4712.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker T, Qin D, Plattner G, et al., Eds. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 866pp.
- 姜晓艳, 刘树华, 马明敏, 等. 2009. 东北地区近百年降水时间序列变化规律的小波分析 [J]. *地理研究*, 28 (2): 354–362. Jiang Xiaoyan, Liu Shuhua, Ma Mingmin, et al. 2009. A wavelet analysis of the precipitation time series in Northeast China during the last 100 years [J]. *Geographical Research* (in Chinese), 28 (2): 354–362, doi:10.11821/yj2009020009.
- 康淑媛, 张勃, 柳景峰, 等. 2009. 基于 Mann-Kendall 法的张掖市降水量时空分布规律分析 [J]. *资源科学*, 31 (3): 501–508. Kang Shuyuan, Zhang Bo, Liu Jingfeng, et al. 2009. Analysis of the spatiotemporal distribution of precipitation in Zhangye City using Mann-Kendall method [J]. *Resources Science* (in Chinese), 31 (3): 501–508, doi:10.3321/j.issn:1007-7588.2009.03.022.
- Karim M A, Fracheboud Y, Stamp P. 2000. Effect of high temperature on seedling growth and photosynthesis of tropical maize genotypes [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 184 (4): 217–223, doi:10.1046/j.1439-037x.2000.00376.x.
- Kistler R, Collins W, Saha S, et al. 2001. The NCEP–NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82 (2): 247–268, doi:10.1175/1520-0477(2001)082<0247:TNMYRM>2.3.CO;2.
- 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]. *Resources Science* (in Chinese), 28 (3): 653–662, doi:10.3321/j.issn:1000-0585.2009.03.010.
- 李菲, 李辑, 管兆勇. 2010. 我国东北夏季气温年代际变化特征及与太平洋海温异常关系的研究 [J]. *气象与环境学报*, 26 (3): 19–26. Li Fei, Li Ji, Guan Zhaoyong. 2010. Inter-decadal variations of summer temperature in Northeast China relationships with Pacific SSTA [J]. *Journal of Meteorology and Environment* (in Chinese), 26 (3): 19–26, doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2010.03.004.
- Liu B H, Xu M, Henderson M, et al. 2004. Taking China's temperature: Daily range, warming trends, and regional variations, 1955–2000 [J]. *J. Climate*, 17 (22): 4453–4462, doi:10.1175/3230.1.
- Lobell D B, Burke M B. 2010. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150 (11): 1443–1452, doi:10.1016/j.agrformet.2010.07.008.

- 陆日宇. 2005. 华北汛期降水量年际变化与赤道东太平洋海温 [J]. 科学通报, 50 (11): 1131–1135. Lu Riyu. 2005. Interannual variation of North China rainfall in rainy season and SSTs in the equatorial eastern Pacific [J]. Chinese Science Bulletin, 50 (18): 2069–2073, doi:10.1007/BF03322803.
- 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): 114–211, doi:10.1080/16742834.2016.1133071.
- Moriando M, Giannakopoulos C, Bindi M. 2011. Climate change impact assessment: The role of climate extremes in crop yield simulation [J]. Climatic Change, 104 (3–4): 679–701, doi:10.1007/s10584-010-9871-0.
- Muchow R C. 1990. Effect of high temperature on grain-growth in field-grown maize [J]. Field Crops Research, 23 (2): 145–158, doi:10.1016/0378-4290(90)90109-0.
- Porter J R, Gawith M. 1999. Temperatures and the growth and development of wheat: A review [J]. European Journal of Agronomy, 10 (1): 23–36, doi:10.1016/S1161-0301(98)00047-1.
- Porter J R, Semenov M A. 2005. Crop responses to climatic variation [J]. Philos. Trans. Roy. Soc. B, 360 (1463): 2021–2035, doi:10.1098/rstb.2005.1752.
- 钱婷婷, 王迎春, 郑祉芳, 等. 2005. 造成北京连续高温的河套高压结构分析 [J]. 应用气象学报, 16 (2): 167–173. Qian Tingting, Wang Yingchun, Zheng Zhifang, et al. 2005. A case study of the structure of the Hetao High which caused long-lasting hot weather in Beijing [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 16 (2): 167–173, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2005.02.005.
- 钱维宏, 丁婷. 2012. 中国热浪事件的大气扰动结构及其稳定性分析 [J]. 地球物理学报, 55 (5): 1487–1500. Qian Weihong, Ding Ting. 2012. Atmospheric anomaly structures and stability associated with heat wave events in China [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 55 (5): 1487–1500, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.05.006.
- 荣艳淑, 段丽瑶, 徐明. 2008. 1997~2002 年华北持续性干旱气候诊断分析 [J]. 干旱区研究, 25 (6): 842–850. Rong Yanshu, Duan Liyao, Xu Ming. 2008. Analysis on climatic diagnosis of persistent drought in North China during the period from 1997 to 2002 [J]. Arid Zone Research (in Chinese), 25 (6): 842–850.
- Schlenker W, Roberts M J. 2009. Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 106 (37): 15594–15598, doi:10.1073/pnas.0906865106.
- 史印山, 谷永利, 林艳. 2009. 京津冀高温天气的时空分布及环流特征分析 [J]. 气象, 35 (6): 63–69. Shi Yinshan, Gu Yongli, Lin Yan. 2009. Analysis of the temporal and spatial distribution and circulation features of high temperatures in Beijing, Tianjin and Hebei [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 35 (6): 63–69, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2009.6.008.
- Sinsawat V, Leipner J, Stamp P, et al. 2004. Effect of heat stress on the photosynthetic apparatus in maize (*Zea mays* L.) grown at control or high temperature [J]. Environmental and Experimental Botany, 52 (2): 123–129, doi:10.1016/j.envexpbot.2004.01.010.
- 孙安健, 高波. 2000. 华北平原地区夏季严重旱涝特征诊断分析 [J]. 大气科学, 24 (3): 393–402. Sun Anjian, Gao Bo. 2000. A diagnostic analyses of serious flood/drought during summer season in the North China Plain [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (3): 393–402, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.03.11.
- 孙建华, 陈红, 赵思雄, 等. 1999. 华北和北京的酷暑天气 II: 模拟试验和机理分析 [J]. 气候与环境研究, 4 (4): 334–345. Sun Jianhua, Chen Hong, Zhao Sixiong, et al. 1999. A study on the severe hot weather in Beijing and North China. Part II: Simulation and analysis [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 4 (4): 334–345, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.1999.04.02.
- 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.
- Takane Y, Kusaka H. 2011. Formation mechanisms of the extreme high surface air temperature of 40.9 °C observed in the Tokyo metropolitan area: Considerations of dynamic foehn and foehnlike wind [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 50 (9): 1827–1841, doi:10.1175/JAMC-D-10-05032.1.
- 田小海, 罗海伟, 周恒多, 等. 2009. 中国水稻热害研究历史、进展与展望 [J]. 中国农学通报, 25 (22): 166–168. Tian Xiaohai, Luo Haiwei, Zhou Hengduo, et al. 2009. Research on heat stress of rice in China: Progress and prospect [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin (in Chinese), 25 (22): 166–168.
- 王兆富, 闻禄, 胡美静, 等. 2011. 玉米纹枯病的发生规律及防治策略展望 [J]. 辽宁农业科学, (6): 41–46. Wang Zhaofu, Wen Lu, Hu Meijing, et al. 2011. Studies on the out break regularity of maize sheath blight and strategy for prevention [J]. Liaoning Agricultural Sciences (in Chinese), (6): 41–46.
- 卫捷, 杨辉, 孙淑清. 2004. 西太平洋副热带高压东西位置异常与华北夏季酷暑 [J]. 气象学报, 62 (3): 308–316. Wei Jie, Yang Hui, Sun Shuqing. 2004. Relationship between the anomaly longitudinal position of subtropical high in the western Pacific and severe hot weather in North China in summer [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (3): 308–316, doi:10.11676/qxxb2004.031.
- Wollenweber B, Porter J R, Schellberg J. 2003. Lack of interaction between extreme high-temperature events at vegetative and reproductive growth stages in wheat [J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 189 (3): 142–150, doi:10.1046/j.1439-037X.2003.00025.x.
- 熊伟, 杨婕. 2008. 作物模型与气候模型的连接研究进展 [J]. 中国生态农业学报, 16 (2): 511–514. Xiong Wei, Yang Jie. 2008. Advances in linking crop models with climate models [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture (in Chinese), 16 (2): 511–514.
- 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]. Advances in Atmospheric Sciences, 26 (4): 763–772, doi:10.1007/s00376-009-9029-z.
- 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:10.3878/j.issn.1006-9585.2005.01.08.
- 杨红旗, 路凤银, 郝仰坤, 等. 2011. 中国玉米产业现状与发展问题探讨

- [J]. 中国农学通报, 27 (6): 368–373. Yang Hongqi, Lu Fengyin, Hao Yangkun, et al. 2011. Situation analysis and development strategy of maize industry in China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin (in Chinese), 27 (6): 368–373.
- 姚凤梅, 张佳华. 2009. 1981~2000 年水稻生长季相对极端高温事件及其气候风险的变化 [J]. 自然灾害学报, 18 (4): 37–42. Yao Fengmei, Zhang Jiahua. 2009. Change of relative extreme high temperature events and climate risk in rice growing period in China from 1981 to 2000 [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 18 (4): 37–42, doi:10.3969/j.issn.1004-4574.2009.04.007.
- 尹小刚, 王猛, 孔箫铎, 等. 2015. 东北地区高温对玉米生产的影响及对策 [J]. 应用生态学报, 26 (1): 186–198. Yin Xiaogang, Wang Meng, Kong Qingxin, et al. 2015. Impacts of high temperature on maize production and adaptation measures in Northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology (in Chinese), 26 (1): 186–198.
- 曾昭美, 章名立. 1987. 热带东太平洋关键区海温与中国东北地区气温的关系 [J]. 大气科学, 11 (4): 382–389. Zeng Zhaomei, Zhang Mingli. 1987. Relationship between the key region SST of the tropical eastern Pacific and air temperature of Northeast China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 11 (4): 382–389, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1987.04.06.
- 翟盘茂, 任福民. 1997. 中国近四十年最高最低温度变化 [J]. 气象学报, 55 (4): 418–429. Zhai Panmao, Ren Fumin. 1997. On changes of China's maximum and minimum temperatures in the recent 40 years [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 55 (4): 418–429, doi:10.11676/qxxb1997.042.
- Zhang T Y, Zhu J, Yang X G, et al. 2008. Correlation changes between rice yields in North and Northwest China and ENSO from 1960 to 2004 [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 148 (6–7): 1021–1033, doi:10.1016/j.agrformet.2008.01.018.
- 赵丽晓, 雷鸣, 王璞, 等. 2014. 花期高温对玉米子粒发育和产量的影响 [J]. 作物杂志, (4): 6–9. Zhao Lixiao, Lei Ming, Wang Pu, et al. 2014. Effects of high temperature stress during flowering on maize kernel development and grain yield [J]. Crops (in Chinese), (4): 6–9.
- 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 M Z, Wang H J. 2014. Late winter sea ice in the Bering Sea: Predictor for maize and rice production in Northeast China [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 53 (5): 1183–1192, doi:10.1175/JAMC-D-13-0242.1.
- 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.