

基于格点数据的中国 1961—2016 年 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温时空演变

李帅, 张勃, 马彬, 候启, 何航

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要: 为了解气候变暖对农作物种植区域的影响, 基于 5 日滑动平均、累积距平、MK 检验、多元回归插值方法, 选用格点数据对中国农业热量资源进行分析。结果表明: (1) $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温整体呈上升趋势, 且 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 整体升幅更为显著, 两者升幅均表现为南方地区最大, 北方次之, 青藏高原最小, 秦巴山区积温呈现下降现象。(2) 在空间分布上, $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温整体表现出自南向北随纬度更替变化的地带性分布和自东向西随海拔变化的阶梯状分布, 东、中部地区受纬度影响明显, 西部地区受海拔影响强于纬度。适宜喜凉作物种植的区域远大于喜温作物的适宜种植面积。(3) $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温均在 1997 年发生突变, 突变后 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 各积温带界线呈现向北、向高海拔移动的趋势, 积温整体升高。南方地区 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温增幅整体大于北方, 青藏高原及高山山区增幅最小, 秦岭地区积温增幅为负。(4) $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温初始日(结束日)整体呈提前(推迟)现象, 且多数格点提前(推迟)日数在 0~10 d 以内, 持续时间在突变后整体延长。青藏高原 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温初始日(结束日)提前(推迟)天数最大。

关键词: 有效积温; 热量资源; 多元回归插值; 突变; 中国

IPCC 第五次评估报告^[1]指出, 1880—2012 年全球地表平均温度升高约 $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$; 1983—2012 年是过去 1400 年来最热的 30 年; 20 世纪中叶以来, 极端事件的强度和频率发生明显变化。中国幅员辽阔, 农业资源区域差异巨大, 气候变暖对不同区域产生的影响各自相异^[2-5]。气候变暖使作物物候做出较大的改变^[6-9], 认知气候变化的具体过程及产生的影响是农业发展应对增温变暖的关键。

国内学者应用活动积温作为表征热量的指标对中国热量资源做了众多研究。基于全国时空尺度的 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温表明中国近 50 年 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温总体呈上升趋势, 在 20 世纪 90 年代最为突出^[10]; $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温增加趋势大体一致, 约为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}/10\text{ a}$, 各起始时间提前、持续时间增加^[11]; 作物种植北界北移^[12]。另有学者基于小区域尺度对东北地区^[13]、西北地区^[14]、黄土高原^[15,16]、新疆地区^[17]及汉中盆地^[18]等活动积温展开研究, 研究内容包括农业气候资源变化情况与气候变化对各种作物物候及种植区域的影响等。以上研究是都基于活动积温进行的, 活动积温的稳定性较差, 把部分无效温度纳入计算将会掩盖热量资源的真实变化, 而有效积温可以避免此不足。当前基于有效积温的研究仅限于小区域^[19-21], 在全球变暖背景下对全国喜凉作物、喜温作物有效积温的变化情况与分布特征未有学者进行研究。考虑农作物生命活动必须在一定温度

收稿日期: 2019-03-04; 修订日期: 2019-06-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41561024)

作者简介: 李帅 (1994-), 男, 江苏徐州人, 硕士, 研究方向为区域环境与资源开发。E-mail: nwnulishuai@163.com

通讯作者: 张勃 (1963-), 男, 甘肃庆阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为区域环境与资源开发。

E-mail: zhangbo@nwnu.edu.cn

范围内才能进行， $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是喜凉作物开始生长的下限温度， $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是喜温作物开始播种与生长的下限温度^[22]，因此选用 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为下限温度分别对全国喜凉、喜温作物有效积温研究。

本文基于 1961—2016 年气温格点数据，采用 5 日滑动平均，Mann-Kendall 趋势/突变检验 (MK 检验)、累积距平及多元回归插值法对中国 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温进行研究，确定并分析 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温时空格局分布及演变，旨在全面了解中国农作物热量资源变化规律，为不同区域选择适宜的喜温、喜凉农作物提供科学依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 数据来源

气象数据选用中国气象数据共享网 (<http://cdc.nmic.cn/>) 1961—2016 年逐日格点温度，使用 SNHT (Standard Normal Homogeneity Test) 对温度序列进行非均一性检验，所有序列均通过一致性检验；DEM 数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>)。

1.2 研究方法

1.2.1 有效积温

使用 5 日滑动平均^[23]对数据处理，计算 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温值。公式如下：

$$A = \sum_{i=1}^n T_i \quad (1)$$

式中： n 为一年内有效积温持续天数 (天)，以连续 5 日滑动平均 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 分别确定； T_i 为有效温度 ($^{\circ}\text{C}$)； A 为一年内有效积温值 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)。

$$T_i = \bar{T} - T_{lower} \quad (2)$$

式中： T_{lower} 为下限温度 ($^{\circ}\text{C}$)； \bar{T} 为日平均温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

1.2.2 累积距平

累积距平是一种成熟的、通过观察曲线变化判断趋势的方法^[23]。对于时间序列 x_i ，某一时刻 i 的累积距平为：

$$\hat{x}_i = \sum_{j=1}^i (x_j - \bar{x}) \quad (3)$$

式中： $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ； $t=1, 2, 3, \dots, n$ 。

在得出所有累积距平值后，绘制累积距平曲线，通过曲线的上下起伏判断其发生突变的大致时间，然后通过 MK 检验加以验证。

1.2.3 MK 检验

MK 检验^[24,25]是一种成熟的趋势/突变检验方法，具体展开见参考文献 [23]。使用 MK 趋势检验计算各格点倾斜度 β ，定义 10β 为积温气候倾向率，并将未通过统计学显著性检验的格点剔除，使用 MK 突变检验确定有效积温时间序列突变点。

1.2.4 多元线性回归插值

格点数据等距、规则的特性使它与格点纬度、经度、海拔具有很好的相关性，多元回归插值可以充分考虑纬度、经度、海拔对有效积温空间插值的影响，使插值结果更加准确^[4,26]。主要步骤如下：假设某一因变量 y 受 n 个自变量 x_1, x_2, \dots, x_n 的影响，其 k 组观测值为 $(y_a, x_{1a}, x_{2a}, \dots, x_{na})$ ， $a=1, 2, \dots, k$ 。则多元线性回归模型的简式如下：

$$y_a = \beta_0 + \beta_1 x_{1a} + \beta_2 x_{2a} + \dots + \beta_n x_{na} + \epsilon_a \quad (4)$$

式中： $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ 为待定参数； ϵ_a 为误差项。如果 $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ 分别是 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 的拟合值，那么回归方程为：

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n \quad (5)$$

式中： b_0 为常数项； b_1, b_2, \dots, b_n 分别为偏回归系数； \hat{y} 为因变量的模拟值，则因变量的观测值=模拟值 \hat{y} +残差项 y' 的和，即：

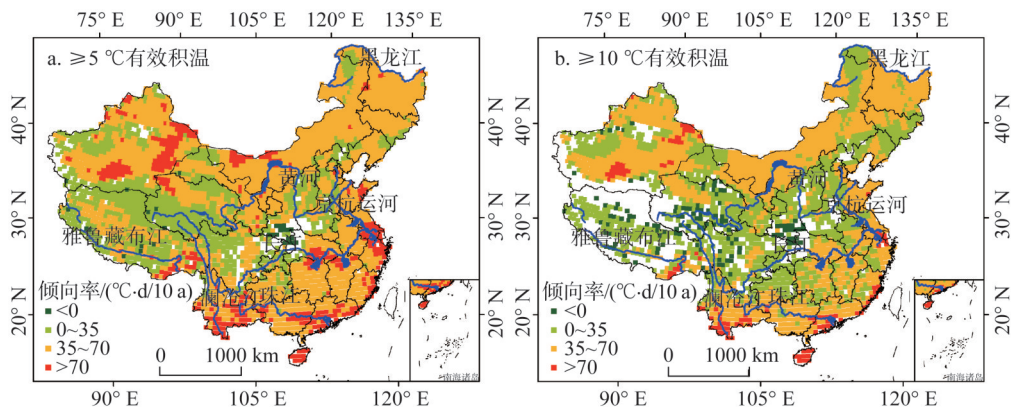
$$y = \hat{y} + y' \quad (6)$$

本文对经度、纬度和海拔三个基础变量分别取 $\mu(x_n)$ 平方 x^2 、三次方 x^3 、余弦 $\cos x$ 、正弦 $\sin x$ 、自然对数 $\ln x$ 和指数 e^x ，使用逐步回归甄选出最优回归模型，在ArcGIS中得到各有效积温多元回归插值分布。

2 结果分析

2.1 $\geq 5^\circ\text{C}$ 、 $\geq 10^\circ\text{C}$ 有效积温气候倾向率

对 $\geq 5^\circ\text{C}$ 和 $\geq 10^\circ\text{C}$ 有效积温进行MK趋势检验，通过显著性检验的格点如图1所示。结果表明， $\geq 5^\circ\text{C}$ 和 $\geq 10^\circ\text{C}$ 有效积温均呈明显的升高趋势。 $\geq 5^\circ\text{C}$ 有效积温通过显著性检验的格点较多，积温升高范围大。 $\geq 5^\circ\text{C}$ 积温在南方地区升幅最为显著，速率达 $70^\circ\text{C} \cdot \text{d}/10\text{a}$ 的格点主要分布在华南、东南沿海及长江中下游地区，大江大河（如珠江、长江、澜沧江等）两侧河漫滩及其三角洲平原的升幅最大；北方地区整体升幅相对较低，各山区倾向率尤为显著，但部分地区如塔里木盆地、吐哈盆地、中央戈壁升幅较大；升幅相对最小的区域主要分布在青藏高原地区，倾向率 < 0 的格点较少，主要分布在秦巴山区。 $\geq 10^\circ\text{C}$ 有效积温倾向率 < 0 与未通过显著性检验的格点相对较多，其中 < 0 的格点则主要分布在青海高原、横断山脉和秦巴山区，未通过检验的格点主要分布在藏北高原和喜马拉雅山脉； $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温升幅在 $70^\circ\text{C} \cdot \text{d}/10\text{a}$ 的格点主要分布在北回归线以南地区，北方地区整体升幅低于南方地区，其中新疆部分地区升幅较大，其他地区及青藏高原积温升幅最小。



注：本图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)28858号的标准地图制作，底图无修改，下同。

图1 $\geq 5^\circ\text{C}$ 、 $\geq 10^\circ\text{C}$ 有效积温气候倾向率空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of climate tendency rate of effective accumulative temperature on the basis of $\geq 5^\circ\text{C}$ and $\geq 10^\circ\text{C}$

2.2 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温 1961—2016 年年均值空间分布

$\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温整体表现出自南向北随纬度更替变化的地带性分布和自东向西随海拔变化的阶梯状分布。积温 $>4000\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 主要分布在南方地区，占总格点的 14.02%； $3000\sim 4000\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 积温带主要分布在黄淮海平原、塔里木盆地和云贵高原等地； $2000\sim 3000\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 积温带主要分布在北方地区的黄土高原和东北平原； $< 2000\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 积温带主要分布在青藏高原和部分北方山区，这部分积温带面积占比最大。 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温空间分布与 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温相似， $>4000\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 积温范围主要分布在北回归线以南地区，其占比最小； $3000\sim 4000\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 积温带主要分布在长江以南地区； $2000\sim 3000\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 积温带主要分布在塔里木盆地、黄淮海平原和四川盆地；东北、西北和青藏高原地区积温带多在 $2000\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 以下（图 2b）。

$\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温在东、中部地区受纬度影响明显，但四川盆地受海拔影响出现高值区，西部地区海拔对有效积温的影响强于纬度，特别是新疆、云南地区及雅鲁藏布江下游，有效积温变化明显，各积温带呈阶梯式分布。对比 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温空间分布， $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 中积温高值带所占区域大于 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相同积温带（表 1），而 $0\sim 1000\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 积温低值带比 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相同积温带少 15.11%，这表明适宜喜凉作物种植的区域远大于喜温作物的适宜种植面积。

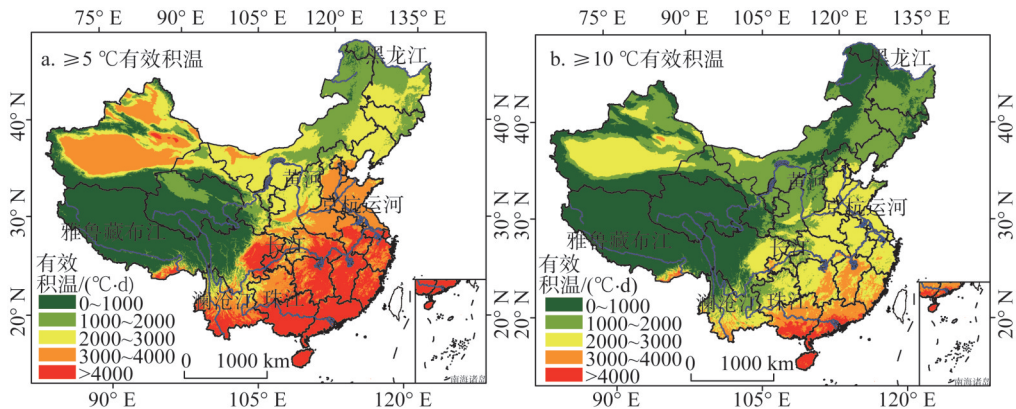


图 2 1961—2016 年有效积温均值空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the mean effective accumulative temperature from 1961 to 2016

表 1 1961—2016 年 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温均值的各积温带面积百分比

Table 1 The area percentage in various interdecadal effective accumulative temperature zones for $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ from 1961 to 2016 (%)

有效积温带/ $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{d})$	0~1000	1000~2000	2000~3000	3000~4000	>4000
5 $^{\circ}\text{C}$	24.78	17.79	23.17	20.24	14.02
10 $^{\circ}\text{C}$	39.89	29.53	23.82	5.06	1.70

注：各积温带面积百分比为测量面积/全国总面积，下同。

2.3 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温突变前后的空间变化

使用累积距平和 MK 突变检验确定全国 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温时间序列突变点，二者突变点均为 1997 年（图 3）。将突变前后有效积温均值用多元回归模型进行空间插值，回归模型均通过显著性检验。图 4a 为 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温突变前后各积温等值线变化分布，

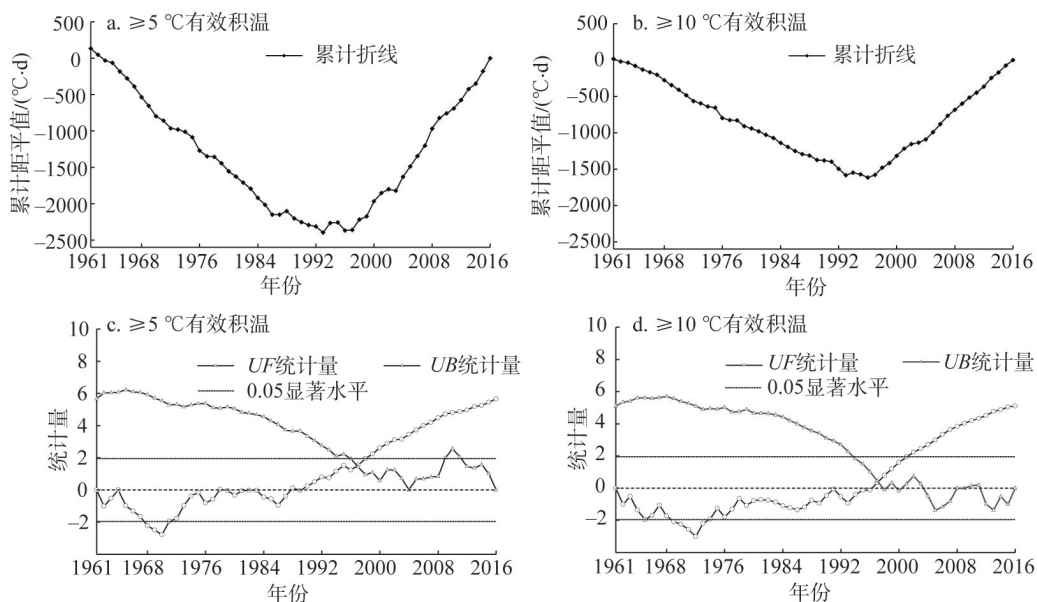


图3 1961—2016年中国 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温累积距平、突变的MK检验

Fig. 3 The accumulated anomaly and MK abrupt change test of mean effective accumulative temperature for $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ from 1961 to 1990 in China

4000 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 积温等值线整体北移,在长江中下游向北最大移动2.1个纬距,浙江省积温低值区在突变后面积缩小,四川盆地4000 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 以上积温范围有明显外扩趋势;3000 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 积温等值线北移较小,此积温界限变动最大的地区在内蒙古的中央戈壁和准噶尔盆地;2000 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 积温界线在东北地区有北移趋势; $> 2000\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 积温带范围扩大;包围青藏高原的1000 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 积温等值线依山谷走势向高海拔地区攀移。图4b为 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温突变前后两个时段的平均积温差值,南方地区积温增幅整体大于北方,积温差值最大的地区主要分布在长江、珠江等主要河流沿岸及下游冲积平原,城市化对区域温度的影响在 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温变化上亦得以体现。北方地区相对较小,其中积温差值较大的地区则集中分布在塔里木盆地和吐哈盆地。积温差值小于150 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 主要分布在青藏高原、天山、太行山等地,仅有极少数高山地区(秦巴山区)积温差值为负。

图4c为 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温突变前后各积温等值线变化分布,4000 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 积温等值线向北移动明显, $> 4000\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 有效积温所占面积扩大;3000 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 积温等值线在长江中游地区移动最为显著,北移最大处达3.5个纬距,在四川盆地外扩明显;2000 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 积温等值线在华北地区变化较小,沿嘉陵江明显北移;1000 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 积温等值线主要分布在青藏高原边缘,突变后有内缩趋势。图4d为积温突变前后两个时段的平均积温差值,整体上南方比北方有效积温增加更多,南方地区积温差值多在150 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 以上,北方多在0~150 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 之间;差值 $> 300\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 主要分布在我国南方的长三角、珠三角、东南沿海和云南南部地区,北方吐鲁番盆地积温差值也较大;积温差值为负的地区主要分布在藏北高原和秦巴山区。

计算1997年突变前后各积温带增减面积百分比(表2),分析可知, $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温在突变后扩展面积最大的为 $> 4000\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 积温带,实际增加4%,实际减少面积最大的在1000~2000 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 积温带,实际减少2.62%。 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温扩展面积最大的在

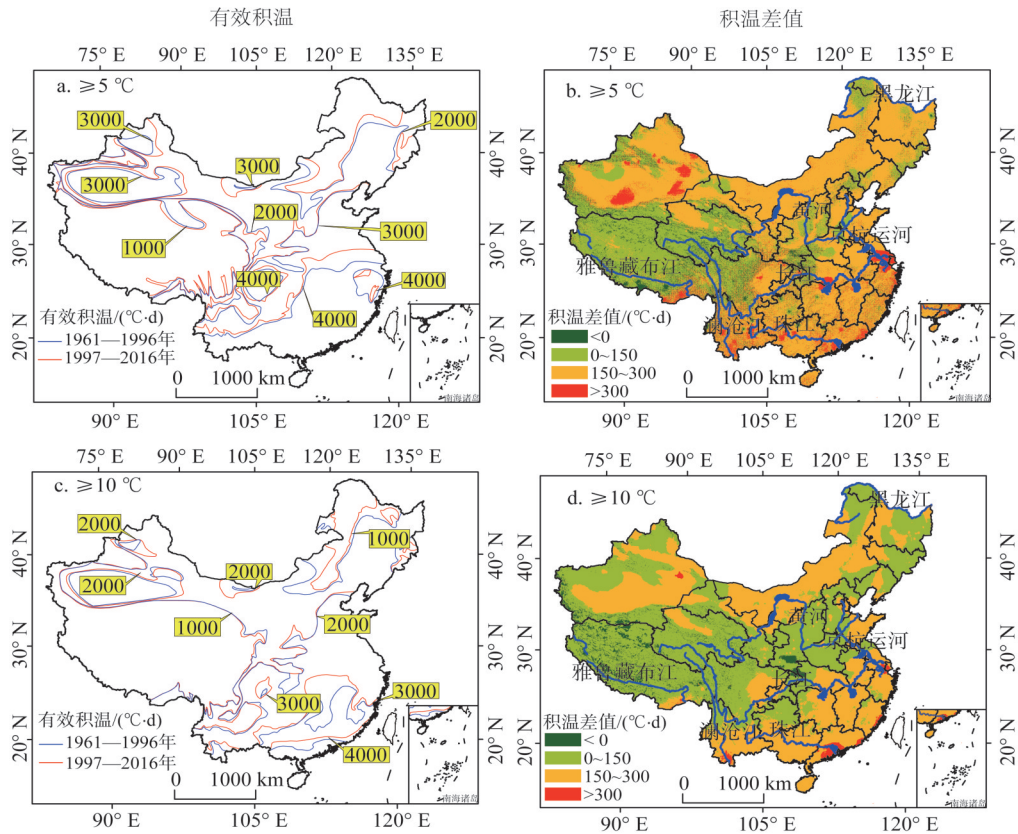


图 4 1961—1997 年、1997—2016 年有效积温均值空间分布及其变化

Fig. 4 Spatial distribution of the mean effective accumulative temperature from 1961 to 1997, 1997 to 2016 and the change between them

表 2 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 各积温带 1997 年突变后增减面积百分比

Table 2 The percentage of acquired area and lost area after 1997 for each accumulated temperature zone on the basis of $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (%)

$5\text{ }^{\circ}\text{C}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{d})$	扩展面积	减少面积	实际增减	$10\text{ }^{\circ}\text{C}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{d})$	扩展面积	减少面积	实际增减
0~1000	0.18	1.37	-1.20	0~1000	0.02	3.67	-3.65
1000~2000	1.46	4.09	-2.62	1000~2000	3.67	3.28	0.39
2000~3000	4.02	3.44	0.58	2000~3000	3.26	3.46	-0.20
3000~4000	3.41	4.17	-0.76	3000~4000	3.46	0.97	2.48
>4000	4.11	0.11	4.00	>4000	0.97	0.00	0.97

3000~4000 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 积温带，实际增加 2.84%，实际减少面积最大的在 $< 1000\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 积温带，实际减少 3.65%。总体来说，积温高值区面积增加，积温低值区反之。

2.4 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温起始时间及持续时间变化

统计有效积温突变前后的起始、结束时间的提前或推迟天数和持续时间增加或减少天数，其空间分布如图 5 所示。北方地区 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温初始日提前天数整体少于南方地区，天山山脉初始日甚至表现推迟现象；结束日推迟天数整体多于南方地区。南方地区初始日提前天数整体较大，但部分地区如云南省初始日呈推迟现象；结束日推迟天数较小，

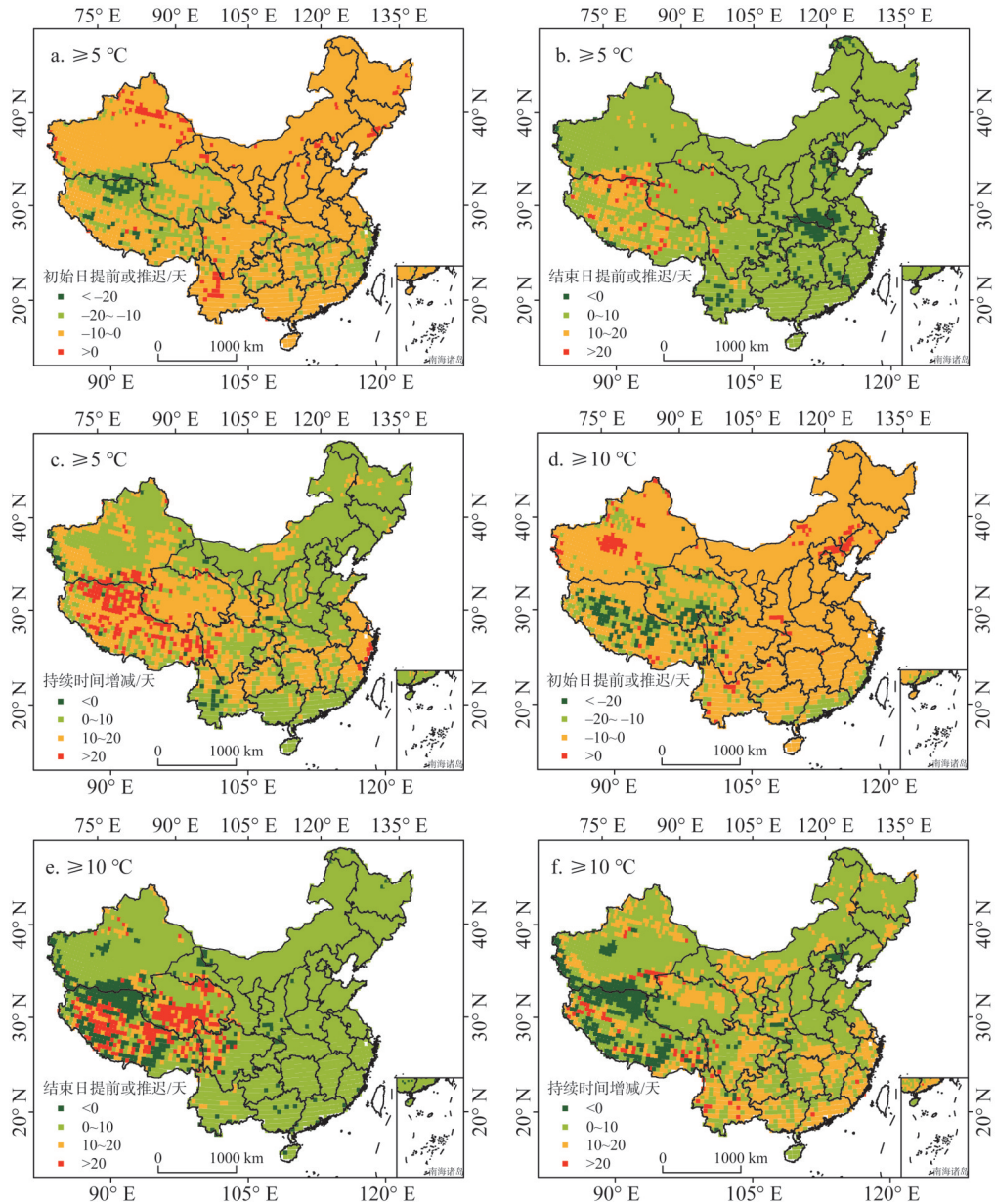


图5 1961—1997年、1997—2016年有效积温 ($\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$: a-c; $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$: d-f) 初始日 (a、d)、结束日 (b、e)、持续时间 (c、f) 均值变化

Fig. 5 The variations in the average value of the initial day (a, d), final day (b, e), duration (c, f) of the effective accumulative temperature (a-c for $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and d-f for $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) between 1961-1997 and 1997-2016

且秦巴山区表现出提前现象。青藏高原初始日(结束日)提前(推迟)天数最多。全国 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温持续时间整体呈增加趋势,北方地区升幅整体低于南方地区,但北方部分地区如塔里木盆地边缘、山间谷地增加幅度较大,南方地区云贵高原持续时间出现减少现象。青藏高原持续时间整体增加最大,藏北高原及昆仑山脉最明显。

全国除青藏高原以外地区 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温初始日(结束日)提前(推迟)均在

表3 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 初始日与结束日（提前或推迟）、及持续时间（增减）各变化格点百分比Table 3 Percentages of the changing grid points of initial and end days (ahead or delayed) and duration (increase or decrease) of $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (%)

	推迟 1 d 以上	提前 0~10 d	提前 10~20 d	提前 20 d 以上
5 $^{\circ}\text{C}$ 初始日	3.15	82.48	12.75	1.62
10 $^{\circ}\text{C}$ 初始日	3.89	82.79	9.72	3.60
	提前 1 d 以上	推迟 0~10 d	推迟 10~20 d	推迟 20 d 以上
5 $^{\circ}\text{C}$ 结束日	5.56	86.54	6.80	1.10
10 $^{\circ}\text{C}$ 结束日	2.63	86.08	5.35	5.94
	提前 1 d 以上	增加 0~10 d	增加 10~20 d	增加 20 d 以上
5 $^{\circ}\text{C}$ 持续时间	1.34	60.95	32.28	5.44
10 $^{\circ}\text{C}$ 持续时间	1.98	70.28	25.73	2.01

0~10 日以内，部分地区如塔里木盆地中部、环渤海西部地区初始日呈推迟现象。青藏高原地区 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 初始日（结束日）提前（推迟）天数整体最多，但部分地区如昆仑山脉及藏南谷地表现为初始日推迟、结束日提前现象。 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 持续时间整体呈增加趋势，南方地区较北方地区增幅大，青藏高原增幅最小，昆仑山脉、藏北高原及藏南谷地持续时间呈减少趋势。

青藏高原 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温初始日（结束日）提前（推迟）、持续时间整体增加，但突变前后的差值表明青藏高原积温升幅并不显著，部分地区呈下降现象。这表明虽然通过 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 界线的天数增加，但在增加的时间内日有效温度 $T_i = \bar{T} - T_{lower}$ 增幅较小。部分地区原积温序列中日有效温度减少可造成有效积温的下降现象。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温均整体呈上升趋势，且 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 整体升幅更为显著，积温升高范围更大。两者升幅均表现为南方地区最大，北方次之，青藏高原最小，秦巴山区积温呈现下降现象； $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温在青海高原、横断山脉等地呈下降趋势。 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温升幅在 $70\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}/10\text{ a}$ 的格点主要分布于大江大河两侧河漫滩及其三角洲平原，部分位于新疆地区及嘎顺戈壁； $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温相同升幅格点主要位于北回归线以南地区。

(2) 在空间分布上， $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温整体表现出自南向北随纬度更替变化的地带性分布和自东向西随海拔变化的阶梯状分布，其中东、中部地区受纬度影响明显，西部地区受海拔影响强于纬度。适宜喜凉作物种植的区域远大于喜温作物的适宜种植面积。

(3) $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温均在 1997 年发生突变，突变后 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 各积温带界线呈现向北、向高海拔移动的趋势，积温整体升高。南方地区 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温增幅整体大于北方，青藏高原及高山山区增幅最小，秦岭地区积温增幅为负。 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温高值区面积增加，积温低值区面积减少。

(4) $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温初始日（结束日）整体呈提前（推迟）现象，且多数格点提前（推迟）日数在 0~10 d 以内，持续时间在突变后整体延长。青藏高原 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温变化趋势最明显，其初始日（结束日）提前（推迟）天数最大， $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温持续日数增加最多，而 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温持续时间增加不显著且部分地区呈减少趋势。

3.2 讨论

3.2.1 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温变化对全国种植制度的影响

气候变暖对全国不同地区的有效积温产生不同影响^[27], 华南、西南地区及长江中下游平原水稻界线向北向西移动, 界线通过区域由原本的两年三熟、一年两熟转变为一年两熟、两年五熟的种植制度^[28], 这与 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温在南方地区整体升幅较大相关。20世纪80年代后期华北平原一年一熟、两年三熟区的南界线向北移动, 东北平原喜凉作物一年一熟中部分区域变为一年两熟^[29], 1990—2010年黄土高原冬小麦种植区域北移西扩并向高海拔地区扩展^[16], 全国各农作物产量稳定增加^[18,30,31], 甘肃河西地区自90年代中期后, 玉米等喜温作物逐渐取代春小麦成为主要作物^[32]。这些研究结果均与全国 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温整体呈上升趋势、1997年突变前后各积温界线均向北和向高海拔移动相符合。

3.2.2 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温变化对全国作物物候的影响

作物物候变化与气候变化互为表征, 气候变暖使有效积温初始日(结束日), 持续时间做出重大变化。赵彦茜等^[33]和金涛^[34]研究表明, 全国小麦整体上全生育期主要呈缩短趋势, 而玉米和水稻全生育期以延长趋势为主。其中华北及西北地区冬小麦越冬前播种期/出苗期推迟、越冬后抽穗期/开花期提前与 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温结束日推迟、初始日提前呼应, 气温升高加快小麦生长发育速度致使全生育期缩短与华北平原 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的增加相符。中国北方地区的春小麦开花期和成熟期均提前, 全生育期缩短亦表明积温升高致使春小麦生长速度加快。东北、西北及华北地区玉米在单纯气温升高模拟的情况下, 八成的站点抽穗期、成熟期提前, 全生育期缩短与喜温作物有效积温整体上升对应。农业气象观测站实测数据表明华北地区夏玉米、西北和东北地区春玉米、东北平原及长江中下游平原单季稻播种期提前, 这与积温初始日的提前相关联; 成熟期推迟, 全生育期延长主要受晚熟品种选用的影响, 受积温的影响不明显。在气候变暖背景下, 晚熟品种的种植可以充分地利用升高的有效积温、初始日(结束日)提前(推迟)、持续时间增加等变化, 在一定意义上提高作物产量。

参考文献(References):

- [1] 秦大河, STOCKER T. IPCC第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6. [QIN D H, STOCKER T. Highlights of the IPCC working group 1 fifth assessment report. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis, 2014, 10(1): 1-6.]
- [2] 云雅如, 方修琦, 王媛, 等. 黑龙江省过去20年粮食作物种植格局变化及其气候背景. 自然资源学报, 2005, 20(5): 697-705. [YUN Y R, FANG X Q, WANG Y, et al. Main grain crops structural change and its climate background in Heilongjiang province during the past two decades. Journal of Natural Resources, 2005, 20(5): 697-705.]
- [3] 郭海英, 赵建萍, 索安宁, 等. 陇东黄土高原农业物候对全球气候变化的响应. 自然资源学报, 2006, 21(4): 608-614. [GUO H Y, ZHAO J P, SUO A N, et al. Response of agricultural phenospectrum to global climate change in Loess Plateau of East Gansu province. Journal of Natural Resources, 2006, 21(4): 608-614.]
- [4] 刘勤, 严昌荣, 何文清, 等. 黄河流域近40 a积温动态变化研究. 自然资源学报, 2009, 24(1): 147-153. [LIU Q, YAN C R, HE W Q, et al. Dynamic variation of accumulated temperature data in recent 40 years in the Yellow River Basin. Journal of Natural Resources, 2009, 24(1): 147-153.]
- [5] 张立波, 娄伟平. 气候变暖对长江中下游地区热量资源分布的影响分析. 自然资源学报, 2013, 28(8): 1361-1372. [ZHANG L B, LOU W P. Impact of climate warming on the distribution of thermal resources in the lower-middle reaches of the Changjiang River. Journal of Natural Resources, 2013, 28(8): 1361-1372.]

- [6] 刘德祥, 董安祥, 邓振镛. 中国西北地区气候变暖对农业的影响. 自然资源学报, 2005, 20(1): 119-125. [LIU D X, DONG A X, DENG Z Y. Impact of climate warming on agriculture in Northwest China. Journal of Natural Resources, 2005, 20(1): 119-125.]
- [7] 蔺涛, 谢云, 刘刚, 等. 黑龙江省气候变化对粮食生产的影响. 自然资源学报, 2008, 23(2): 307-318. [LIN T, XIE Y, LIU G, et al. Impact of climate change on crop yields in Heilongjiang province. Journal of Natural Resources, 2008, 23(2): 307-318.]
- [8] 叶彩华, 栾庆祖, 胡宝昆, 等. 北京农业气候资源变化特征及其对不同种植模式玉米各生育期的影响. 自然资源学报, 2010, 25(8): 1350-1364. [YE C H, LUAN Q Z, HU B K, et al. Agricultural climate resources change characteristics of Beijing and related impacts on maize planted in different zones and different growth periods. Journal of Natural Resources, 2010, 25(8): 1350-1364.]
- [9] 李阔, 许吟隆. 适应气候变化的中国农业种植结构调整研究. 中国农业科技导报, 2017, 19(1): 14-23. [LI K, XU Y L. Study on adjustment of agricultural planting structures in China for adapting to climate change. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(1): 14-23.]
- [10] 邱新法, 王喆, 曾燕, 等. 1960—2013 年中国 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温时空变化特征及其主导因素分析. 江苏农业科学, 2017, 45(2): 220-225. [QIU X F, WANG Z, ZENG Y, et al. China in 1960-2013 or greater spatial and temporal variation characteristics of $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature and the dominant factors analysis. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(2): 220-225.]
- [11] 胡琦, 潘学标, 邵长秀, 等. 1961—2010 年中国农业热量资源分布和变化特征. 中国农业气象, 2014, 35(2): 119-127. [HU Q, PAN X B, SHAO C F, et al. Distribution and variation of china agricultural heat resources in 1961-2010. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(2): 119-127.]
- [12] 缪启龙, 丁园圆, 王勇. 气候变暖对中国亚热带北界位置的影响. 地理研究, 2009, 28(3): 634-642. [LIAO Q L, DING Y Y, WANG Y. Impact of climate warming on the northern boundary of sub-tropical zone of China. Geographical Research, 2009, 28(3): 634-642.]
- [13] 何永坤, 郭建平. 1961—2006 年东北地区农业气候资源变化特征. 自然资源学报, 2011, 26(7): 1199-1208. [HE Y K, GUO J P. Characteristics of agricultural climate resources in the three provinces of Northeast China from 1961 to 2006. Journal of Natural Resources, 2011, 26(7): 1199-1208.]
- [14] 孙杨, 张雪芹, 郑度. 气候变暖对西北干旱区农业气候资源的影响. 自然资源学报, 2010, 25(7): 1153-1162. [SUN Y, ZHANG X Q, ZHENG D. The impact of climate warming on agricultural climate resources in the arid region of Northwest China. Journal of Natural Resources, 2010, 25(7): 1153-1162.]
- [15] 孟艳灵, 殷淑燕, 杨锋, 等. 晋陕蒙地区 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的时空变化特征. 中国农业气象, 2016, 37(6): 615-622. [MENG Y L, YIN S Y, YANG F, et al. Spatial and temporal distribution of accumulated temperature above $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ in Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia region. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, 37(6): 615-622.]
- [16] 吴乾慧, 张勃, 马彬, 等. 气候变暖对黄土高原冬小麦种植区的影响. 生态环境学报, 2017, 26(3): 429-436. [WU Q H, ZHANG B, MA B, et al. Impact of climate warming on winter wheat planting in the Loess Plateau. Ecology and Environmental Science, 2017, 26(3): 429-436.]
- [17] 普宗朝, 张山清, 李景林, 等. 近 50 a 新疆 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 持续日数和积温时空变化. 干旱区研究, 2013, 30(5): 781-788. [PU Z C, ZHANG S Q, LI J L, et al. Spatiotemporal change of duration and accumulated temperature of temperature $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ in Xinjiang in recent 50 years. Arid Zone Research, 2013, 30(5): 781-788.]
- [18] 胡慧芝, 刘晓琼, 王健力. 气候变化下汉中盆地水稻产量变化研究. 自然资源学报, 2018, 33(4): 609-620. [HU H Z, LIU X Q, WANG J L. Study on the change of rice yield in Hanzhong Basin under climate change. Journal of Natural Resources, 2018, 33(4): 609-620.]
- [19] 刘景利, 王志明, 陈明, 等. 1951—2007 年东北地区有效积温时空变化特征. 见: 第 28 届中国气象学会年会: S11 气象与现代农业论文集. 厦门: 中国气象学会年会, 2011: 672-677. [LIU J L, WANG Z M, CHEN M, et al. Temporal and spatial variation in the growing degree day during 1951-2007 in Northeast China. In: The Proceedings of 28th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society: S11 Meteorology and Modern Agriculture. Xiamen: Annual meeting of China Meteorological Society, 2011: 672-677.]
- [20] 王芳, 刘宏举, 郭定荣, 等. 近 30 年华北平原冬小麦有效积温的变化. 气象与环境科学, 2017, 40(2): 20-27. [WANG

- F, LIU H J, WU D R, et al. Variation of effective accumulated temperature for winter wheat in North China Plain over the past 30 years. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2017, 40(2): 20-27.]
- [21] 阿依克孜, 丁新华, 付开赞, 等. 新疆玉米产区三个玉米螟地理种群发育起点、有效积温测定与比较研究. *新疆农业科学*, 2017, 54(10): 1863-1874. [AYKIZ, DING X H, FU K Y, et al. Comparison of biological characteristics of three geographical populations and developmental stages of *ostriaria furnacalis*. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2017, 54(10): 1863-1874.]
- [22] 冯秀藻, 陶炳炎. 农业气象学原理. 北京: 气象出版社, 1991: 72-152. [FENG X Z, TAO B Y. *Principles of Agricultural Meteorology*. Beijing: China Meteorological Press, 1991: 72-152.]
- [23] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 1999: 42-134. [WEI F Y. *Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Techniques*. Beijing: China Meteorological Press, 1999: 42-134.]
- [24] MANN H B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1945, 13(3): 245-259.
- [25] KENDALL M G. Rank Correlation Methods. London: Griffin, 1975: 25-145.
- [26] FLOCAS A A, GILES B D, ANGOURIDAKIS V E. On the estimation of annual and monthly mean values of air temperature over Greece using stepwise multiple regression analysis. *Archives for Meteorology Geophysics & Bioclimatology*, 1983, 32(2-3): 287-295.
- [27] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展. *应用气象学报*, 2015, 26(1): 1-11. [GUO J P. Advances in impacts of climate change on agricultural production in China. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2015, 26(1): 1-11.]
- [28] 赵锦, 杨晓光, 刘志娟, 等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 II: 南方地区气候要素变化特征及对种植制度界限可能影响. *中国农业科学*, 2010, 43(9): 1860-1867. [ZHAO J, YANG X G, LIU Z J, et al. The possible effect of global climate changes on cropping systems boundary in China II: The characteristics of climatic variables and the possible effect on northern limits of cropping systems in South China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(9): 1860-1867.]
- [29] 李克南, 杨晓光, 刘志娟, 等. 全球气候变化对中国种植制度可能影响分析 III: 中国北方地区气候资源变化特征及其对种植制度界限的可能影响. *中国农业科学*, 2010, 43(10): 2088-2097. [LI K N, YANG X G, LIU Z J, et al. Analysis of the potential influence of global climate change on cropping systems in China III: The change characteristics of climatic resources in Northern China and its potential influence on cropping systems. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(10): 2088-2097.]
- [30] 王学春, 李军, 王红妮, 等. 黄土高原冬小麦田土壤水分与小麦产量对降水和气温变化响应的模拟研究. *自然资源学报*, 2017, 32(8): 1398-1410. [WANG X C, LI J, WANG H N, et al. Simulation of the response of soil water in winter wheat field and winter wheat yield to rainfall and temperature change on the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(8): 1398-1410.]
- [31] 封志明, 孙通, 杨艳昭. 2003—2013年中国粮食增产格局及其贡献因素研究. *自然资源学报*, 2016, 31(6): 895-907. [FENG Z M, SUN T, YANG Y Z. Study on the spatiotemporal patterns and contribution factors of China's grain output increase during 2003-2013. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(6): 895-907.]
- [32] 王鹤龄, 王润元, 张疆, 等. 甘肃省作物布局演变及其对区域气候变暖的响应. *自然资源学报*, 2012, 27(3): 413-421. [WANG H L, WANG R Y, ZHANG J, et al. Main crops structural change and its climate background in Gansu province during the past two decades. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(3): 413-421.]
- [33] 赵彦茜, 肖登攀, 柏会子, 等. 中国作物物候对气候变化的响应与适应研究进展. *地理科学进展*, 2019, 38(2): 224-235. [ZHAO Y X, XIAO D P, BAI H Z, et al. Research progress on the response and adaptation of crop phenology to climate change in China. *Progress in Geography*, 2019, 38(2): 224-235.]
- [34] 金涛. 中国粮食作物种植结构调整及其水土资源利用效应. *自然资源学报*, 2019, 34(1): 16-27. [JIN T. The adjustment of China's grain cropping structure and its effect on the consumption of water and land resources. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(1): 16-27.]

Spatiotemporal evolution of effective accumulated temperatures of $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ based on grid data in China from 1961 to 2016

LI Shuai, ZHANG Bo, MA Bin, HOU Qi, HE Hang

(College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to figure out the impact of climate warming on crop planting areas, this paper used grid data to analyze agricultural heat resources in China based on methods of Sliding Mean Temperature of Five Days, accumulated anomaly, Manner-Kendall test and multiple regression interpolation. The results showed that: (1) The effective accumulative temperatures ($\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) show an overall upward trend, and the accumulative temperature of $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ is more remarkable. The southern region has the highest inclination rate, followed by the northern region, and the Qinghai-Tibet Plateau has the smallest, while the cumulative temperatures of the Qinling-Daba mountains show a decreasing trend. (2) The effective accumulated temperatures ($\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) present a similar spatial distribution, namely, the accumulated temperature varied with latitude from south to north and varied with altitude from east to west. The eastern and central regions of China are obviously affected by latitude, while the western region is affected more by altitude than latitude. The area suitable for planting chimonophilous crop is larger than that suitable for thermophilic crop. (3) The effective accumulated temperatures of both $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ mutated in 1997, and both of their boundaries show a tendency toward northward and high altitude. The cumulative temperature increment in the south is larger than that in the north. The Qinghai-Tibet Plateau and mountain areas with high altitude have the smallest increase, while cumulative temperature increment is negative in the Qinling Mountains. (4) The initial days (closing day) of the effective accumulated temperature ($\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) presented an overall phenomenon of advance (delay), and the number of advance (delay) days is mostly within 0-10 days. Both of their durations increased overall after mutation. The number of initial days (closing day) in advance (delay) is the largest in the Qinghai-Tibet Plateau.

Keyword: effective accumulative temperature; heat resources; multiple regression interpolation; abrupt change; China