

李 帅, 张 勃, 何 航, 等. 基于格点数据的中国喜凉作物有效积温区划[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(5): 1136-1143.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2019.05.020

基于格点数据的中国喜凉作物有效积温区划

李 帅, 张 勃, 何 航, 候 启, 马 彬

(西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为了解全球升温背景下中国农业热量资源的变化, 基于格点数据使用 5 日滑动平均、最小二乘法、多元回归插值法、旋转经验正交函数(EOF)对中国 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 有效积温进行分析。结果表明, (1) 中国 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 有效积温整体呈升高趋势。南北方升高速率不一致, 以秦岭为界, 南方地区有效积温升幅较大; 北方地区升幅相对较小, 但不排除个别地区如塔里木盆地及阿拉善高原升幅较大; 青藏高原和横断山脉升幅最小; 秦岭及大巴山等地有效积温表现出下降趋势。(2) 中国东部地区各有效积温界限北界均有北移趋势, $4\,000^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 积温等值线在长江中下游地区北移最明显(向北最大移动 1.6 纬距), 四川盆地和塔里木盆地有效积温界限呈外扩趋势。(3) $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 有效积温起始日期多分布在 3、4 月份, 持续时间 6 个月及以下的格点占比最多; 自 20 世纪 80 年代后, 起始时间有明显提前趋势, 持续时间有延长趋势。(4) EOF 将 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 有效积温分为 8 个区域, 其中 I、II 区为第一模态正负 2 个高值区, IV、V 区为第三模态正负 2 个高值区, 第 VII、VIII 区是具有相同特征的区域, 且第 I、III、IV、VIII 区及第 II 区东中部与中国综合农业区划结果相似。

关键词: 有效积温; 经验正交函数(EOF); 旋转经验正交函数(EOF); 全球变暖停滞

中图分类号: S162.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2019)05-1136-08

Effective accumulated temperature compartment of the chimonophilous crop in China based on grid data

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

(College of Geography and Environment Science, Northwest normal university, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To figure out the change of agricultural heat resource in China under the context of global warming, the sliding mean temperature of five days, least square method, multiple linear regression and rotated empirical orthogonal function(EOF) were used to analyze the effective accumulated temperature ($\geq 5^{\circ}\text{C}$). The result showed that the effective accumulated temperature ($\geq 5^{\circ}\text{C}$) was rising as a whole. The rising rate was inconsistent between north and south. The overall increase in the north of the Qinling Mountains was relatively small, but the increase was larger in some areas such as Tarim Basin and Alashan Plateau. The overall increase in the south of the Qinling Mountains was relatively larger. The Tibetan Plateau and the Hengduan Mountains had the smallest increases. The effective accumulated temperature showed a decreasing trend in Qinling Mountains, Daba Mountain and some of the mountains. The north boundary of each effective accumulated temperature tended to move northward, and the accumulated temperature contours of $4\,000^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ had the most obvious northward movement in the middle and lower reaches of the Yangtze River. The effective accumulated temperature boundary of Sichuan Basin and Tarim Basin was expanding. The starting date of effective accumulated temperature ($\geq 5^{\circ}\text{C}$) mostly occurred in March and April, and the duration

was usually six months or less. However, the effective accumulated temperature started in advance and its duration showed an increasing tendency since the 1980s. The effective accumulated temperature was spatially and temporally partitioned by EOF and divided into eight regions. It

收稿日期: 2019-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41561024)

作者简介: 李 帅(1994-), 男, 汉族, 江苏徐州人, 硕士研究生, 主要从事区域环境与资源开发方面的研究。(E-mail) nwnulishuai@163.com

通讯作者: 张 勃, (E-mail) zhangbo@nwnu.edu.cn

was found that the 1st, 3rd, 4th, 8th subregions were similar to the traditional chinese comprehensive agricultural regionalization.

Key words: effective accumulated temperature; empirical orthogonal function(EOF); rotated empirical orthogonal function(REOF); global warming hiatus

《中国气候变化蓝皮书(2019)》显示,1951—2018年,中国年平均气温以每年 $0.024\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的速率升高,升温率显著高于同期全球平均水平^[1]。气候变暖引起热量资源的变化,中国大部分农业气候带北移^[2-6]。中国幅员辽阔,地形结构复杂多样,气候变暖对农业生产的影响存在区域性差异^[7-9]。了解气候变化如何影响作物物候是农业生产应对增温变暖的首要前提^[10]。

已有学者选取活动积温作为热量指标对中国热量资源的变化进行了研究:基于全国 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温进行分析后指出,积温及其持续天数总体呈增加趋势,且东部增幅大于西部;种植界限明显北移^[11-13]。另有学者基于活动积温对江苏省^[14-15]、东北地区^[16]、新疆^[17]等小区域进行分析,研究作物涉及水稻、冬(春)小麦、玉米等,研究内容包括作物生长季热量资源的变化趋势及特征分析以及热量资源变化对作物生长和生产的影响分析等。尽管活动积温计算方便,但在表征作物生长所需热量上不如有效积温稳定。目前关于有效积温的研究主要集中在小区域^[18-20],气候变化背景下近几十年全国有效积温的分布情况与变化特征分析研究较少。考虑到 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是农业早春作物、喜凉作物开始生长、多数树木开始生长的界限温度^[21-22],因此选用 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为生物学零度进行全国喜凉作物有效积温研究。本研究基于1961—2016年逐日格点平均气温数据,采用5日滑动平均、最小二乘法、多元线性回归插值、EOF与REOF等方法,研究中国喜凉作物有效积温的时空分布、变化特征以及区域划分。研究结果旨在全面了解中国喜凉作物热量资源的时空格局及变化趋势,为喜凉作物的种植范围提供参考借鉴,进而为全国综合农业区划的更新提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

气象数据来源于中国气象数据共享网(<http://cdc.nmic.cn/>)1961—2016年逐日格点平均气温,DEM数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。

gscloud.cn/。

1.2 研究方法

1.2.1 有效积温(GDD) 采用5日滑动平均法对数据进行处理,以一年内5日滑动平均值连续 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的最长序列作为该年有效积温的计算序列,计算有效积温值 GDD ^[23-24]。公式如下:

$$GDD = \sum_{i=1}^n (\bar{T}_i - T_b) \quad (1)$$

式中: GDD 为一年内有效积温; n 为一年内有效积温连续序列的天数; \bar{T}_i 为有效积温连续序列第 i 日的日平均气温; T_b 为下限温度($5\text{ }^{\circ}\text{C}$)。

1.2.2 最小二乘法 使用最小二乘法求取各格点一元线性回归系数 α ,定义 $10 \times \alpha$ 为有效积温气候倾向率。具体算法见文献^[24]。

1.2.3 多元回归插值 多元回归插值可以充分考虑空间插值问题中的纬度、经度、海拔影响,结合格点数据,将使有效积温空间变化的测量更加准确^[25-26]。主要原理如下。

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 $(y_a, x_{1a}, x_{2a}, \dots, x_{na}), a = 1, 2, \dots, k$ 。则多元回归模型^[24]的简式如下:

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

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:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \mu(x_1) + b_2 \mu(x_2) + \dots + b_n \mu(x_n) \quad (3)$$

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:

$$y = \hat{y} + y' \quad (4)$$

研究对经度、纬度和海拔3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 $\ln x$,指数 e^x 。使用逐步回归法选出最佳回归式。插值过程在arcgis中完成。

1.2.4 EOF与REOF 经验正交函数(EOF)分解常用于分析气候时空演变特征。其原理是以矩阵的

形式表示研究区每个格点不同时期气候要素的观测资料(n 为该地区格点, m 为观测时序):

$$X_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

将变量 $X_{m \times n}$ 看作是 k 个空间特征向量和对应时间权重系数的线性组合:

$$X_{m \times n} = V_{m \times k} \cdot T_{m \times k} \quad (6)$$

式中: T 为时间系数; V 为空间特征向量, 又称空间模态。这一过程将全国 5°C 有效积温主要的空间分布结构与时间分离, 以提取重要的空间典型场(特征向量)及其时间系数(PC)。

使用旋转经验正交函数(REOF) 在 EOF 分解基础上对具有较大方差特征值的数个空间典型场进行极大方差正交旋转, 进行 REOF 展开, 使原本平均分布于各个地区的方差载荷集中到某一个区域, 从而与其他区域区分开来, 以便分析不同地域之间的差异及同一地域内部的相似性。具体算法见文献[24]。

2 结果与分析

2.1 $\geq 5^\circ\text{C}$ 有效积温气候倾向率

如图 1 所示, 1961 年来中国 $\geq 5^\circ\text{C}$ 有效积温整体呈升高趋势, 上升趋势格点占总格点数的 97.66%。以秦岭-大巴山为界, 有效积温上升最快的区域主要分布在秦岭以南地区, 但部分地区如横断山脉上升幅度较小; 秦岭以北地区有效积温上升幅度相对较小, 但不排除个别地区上升幅度大, 如塔里木盆地及阿拉善高原。作为南北方分界线的秦岭-大巴山地区有效积温表现出下降趋势。

2.2 $\geq 5^\circ\text{C}$ 有效积温年际空间分布

将研究时段分为 3 个气候基准期, 分别为 1961–1990(时段 I)、1971–2000(时段 II)、1981–2010(时段 III), 使用多元回归模型对 3 个时段年有效积温进行空间插值, 拟合方程均通过显著性检验。图 2a 为 3 个时段各有效积温等值线空间分布及积温变化情况。结果显示, $\geq 4000^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 有效积温主要分布在长江以南地区和四川盆地, 积温等值线在长江中下游地区明显北移(向北最大移动 1.6 个纬距), 在四川盆地西部明显西移; $3000 \sim 4000^\circ\text{C} \cdot \text{d}$

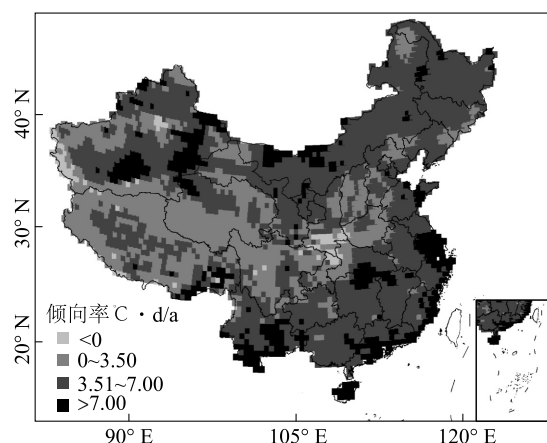


图 1 $\geq 5^\circ\text{C}$ 有效积温气候倾向率的空间分布

Fig.1 The spatial distribution of climate tendency rate of effective accumulative temperature on the basis of 5°C

有效积温主要分布在黄淮海平原和塔里木盆地, 其中塔里木盆地等值线有外扩趋势, 黄淮海平原北部表现出北移现象; $2000 \sim 3000^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 有效积温主要分布在东北平原和西北大部分地区, 东北地区 $2000^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 有效积温北界北移; $1000 \sim 2000^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 有效积温主要分布在北方山地; $<1000^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 有效积温主要分布在青藏高原地区, 其覆盖面积呈减小趋势(表 1)。

图 2b 表示 $\geq 5^\circ\text{C}$ 有效积温在时段 II 与时段 I 的平均积温差值, 中国多数地区时段 II 相比时段 I 积温升高, 且升高幅度在 $0 \sim 50^\circ\text{C} \cdot \text{d}$, 升幅相对较大的地区分布在华南地区南部、山东半岛、河套平原及塔里木盆地等地, 下降幅度较大的地区多分布在秦岭、大巴山、云贵高原东部和浙闽丘陵等地。图 2c 显示时段 III 相比时段 II 上升范围更大; 全国除秦岭、大巴山以外均呈明显上升趋势, 时段 III 较时段 II 的增幅多在 $50^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 以上; 长江以南地区、塔里木盆地及内蒙古高原北部地区上升最为明显, 有效积温上升幅度达 $100^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 。图 2d 显示时段 III 相较时段 I 积温差值比时段 II 更大, 有效积温升高更为明显。相较 2 个时段有效积温增长最为明显的地区依然是长江以南地区、内蒙古高原、塔里木盆地和东北平原等地, 但 2 个时段积温差值 $\geq 50^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 和 $\geq 100^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 所占面积比重进一步增大, 有效积温下降的区域主要集中在秦岭、大巴山等地。

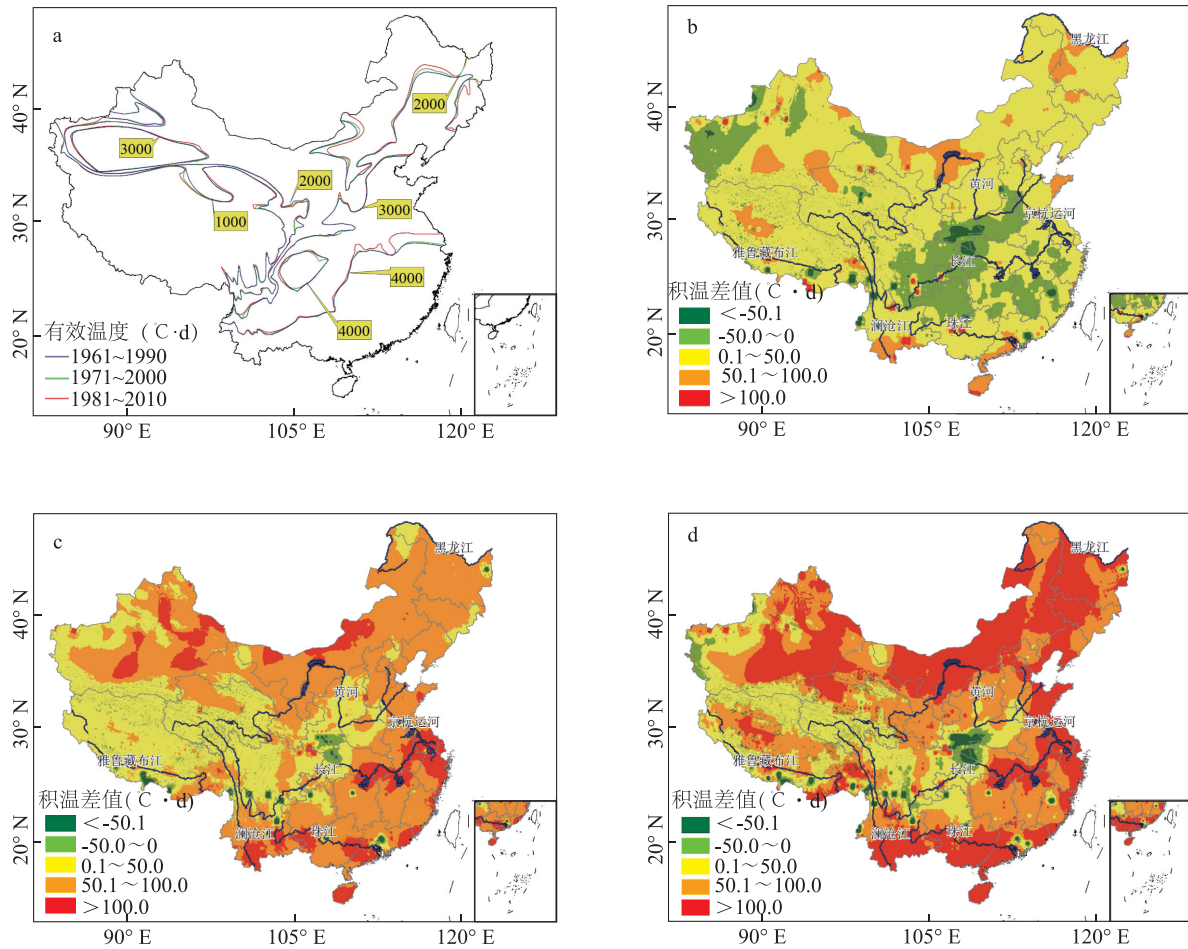


图2 1961-1990(I)、1971-2000(II)、1981-2010(III)年有效积温等值线空间分布(a),时段 I、II 积温差值(b),时段 II、III 积温差值(c),时段 I、III 积温差值(d)

Fig.2 The spatial distribution (a) of mean effective accumulated temperature isopleth from 1961 to 1990(I), 1971 to 2000(II), 1981 to 2010(III), and the accumulated temperature difference between time I and II (b), time II and III (c), time I and III (d)

表1 1961-1990、1971-2000、1981-2010 年有效积温带面积百分比统计表

Table 1 The area percentage in various interdecadal effective accumulative temperature zone

积温带	有效积温 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)	有效积温带面积百分比(%)		
		1961-1990	1971-2000	1981-2010
第一积温带	0~1 000.0	25.53	25.27	24.78
第二积温带	1 000.1~2 000.0	18.95	18.37	17.27
第三积温带	2 000.1~3 000.0	22.83	23.33	23.74
第四积温带	3 000.1~4 000.0	20.22	20.43	20.15
第五积温带	4 000.1~7 500.0	12.47	12.60	14.06

2.3 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 有效积温起始时间及持续时间变化

为避免格点区间过大所导致的普通坐标轴中曲线趋势被隐藏,故选用半对数曲线图表示研究区有效积温起始及持续时间的年际分布(图3)。图3a显示研究区内 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 有效积温起始日期多在3、4月份,其次是5、6月份,有效积温起始日期在1、2月份的格点数目相对较少。但自20世纪80年代后期,有效积温起始日期在1、2月份的格点数目有明显增多,表明这一时段内有效积温起始时间有明显的提前趋势。开始时间的变化使持续时间发生相应变化,图3b显示 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 有效积温持续时间在6个月及以下的格点数目最多,在年际分布上呈减少的趋势;持续时间在10~12个月的格点数目相对较少。同样在20世纪80年代后期,持续时间为10~12个月

的格点数目明显增多,表示研究区内 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 有效积温持续时间有延长趋势。 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 有效积温起始时间

及持续时间的变化亦体现出中国在 20 世纪 80 年代中期开始快速增温^[27]。

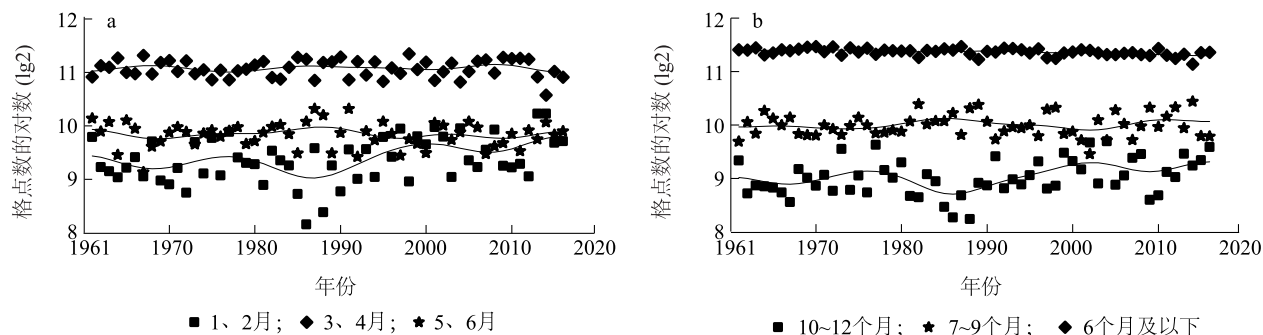


图 3 有效积温不同起始时间(a)、持续时间(b)格点数量半对数图

Fig.3 Semi-logarithmic graph of the quantity of lattice points for different starting time(a), different duration(b)

2.4 基于 REOF 的有效积温分区

计算所有格点历年有效积温的特征值、方差贡献率以及是否通过 north 检验,结果如表 2 所示,所得的前 11 个特征向量中有 5 个通过检验,分别为特征向量 1、3、4、7 和 9。5 个特征值的方差贡献率累计为 68.12%,最大限度表征了中国有效积温变量场的分

布结构。对通过显著性检验的前 5 项 EOF 特征向量正交旋转,使均匀载荷集中到某一区域。旋转结果的累计贡献率不变,高载荷集中且各特征向量方差贡献率比旋转前分布均匀。将旋转结果进行空间插值,选出每一空间典型场的高值区进行拼接,完成有效积温基于空间和时间相关性的数据分区(图 4)。

表 2 5°C 有效积温 EOF 特征值显著性检验

Table 2 Significance test of empirical orthogonal function(EOF) eigenvalue of effective accumulative temperature on the basis of 5°C

项目	特征向量											G
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
λ_j	2 223.13	287.23	254.06	189.26	131.29	117.73	102.63	77.24	76.36	58.55	53.48	
R_j	0.532 2	0.068 8	0.060 8	0.045 3	0.031 4	0.028 2	0.024 6	0.018 5	0.018 3	0.014 0	0.012 8	0.854 9
e_j	420.13	54.28	48.01	35.77	24.81	22.25	19.39	14.60	14.43	11.06	10.11	
$\lambda_j - \lambda_{j+1}$	1 935.90	33.17	64.80	57.97	13.56	15.11	25.39	0.88	17.81	5.07	6.10	
显著性	*		*	*			*		*			

λ_j 为 EOF 特征值; R_j 为方差贡献率; e_j 为特征值 λ_j 的误差范围, $e_j = \lambda_j \left(\frac{2}{n} \right)^{\frac{1}{2}}$, n 为样本量; G 为累计方差贡献率。当特征向量满足 $\lambda_j - \lambda_{j+1} \geq e_j$ 时,认为该特征向量通过显著性检验。* 表示显著。

第一空间模态(图 4a)最显著特征是其具有 2 个高值区,其中正高值区处于华南地区,负高值区主要位于内蒙古、新疆、甘肃。最大中心点分别在巴丹吉林沙漠(负值区)、雷州半岛(正值区),这些地方是全国有效积温变化相关性最好、与周围区域差异性最大的地区,相关程度自 2 个中心点向周围下降。它突出显示了华南地区与内蒙古、新疆、甘肃大部的相反变化特征,即在同一年份,两地积温变化相反。第二空间模态(图 4b)正高值区在东北、华北地区,其次是塔里木盆地,最大中心点在大兴安岭。突出显示东北、华北地区与全国其他地区的反向变化特

征。第三空间模态(图 4c)最显著特征是具有 3 个高值区,分别是华南地区(负高值区)、北疆地区(负高值区)、长江流域(正高值区),其中华南地区与第一模态重复出现。该类型表现出北疆地区与华南地区积温变化同向进行,华南地区、北疆与长江流域的积温变化反向进行。第四空间模态(图 4d)中剔除重复区域,绝对值高值区处于青藏高原西南及正南部,其次在云贵高原西侧。第五空间模态(图 4e)中剔除重复区域,高值区在黄土高原、大巴山及其中间区域,最大中心点在秦岭地区。它表明黄土高原、大巴山之间的积温变化相关性最好。按照 REOF 进行

分区,总共分为 8 个区域,其中 I、II 区为第一模态正负 2 个高值区,IV、V 区为第三模态正负 2 个高值

区,第 VII、VIII 区是具有相同特征的区域。

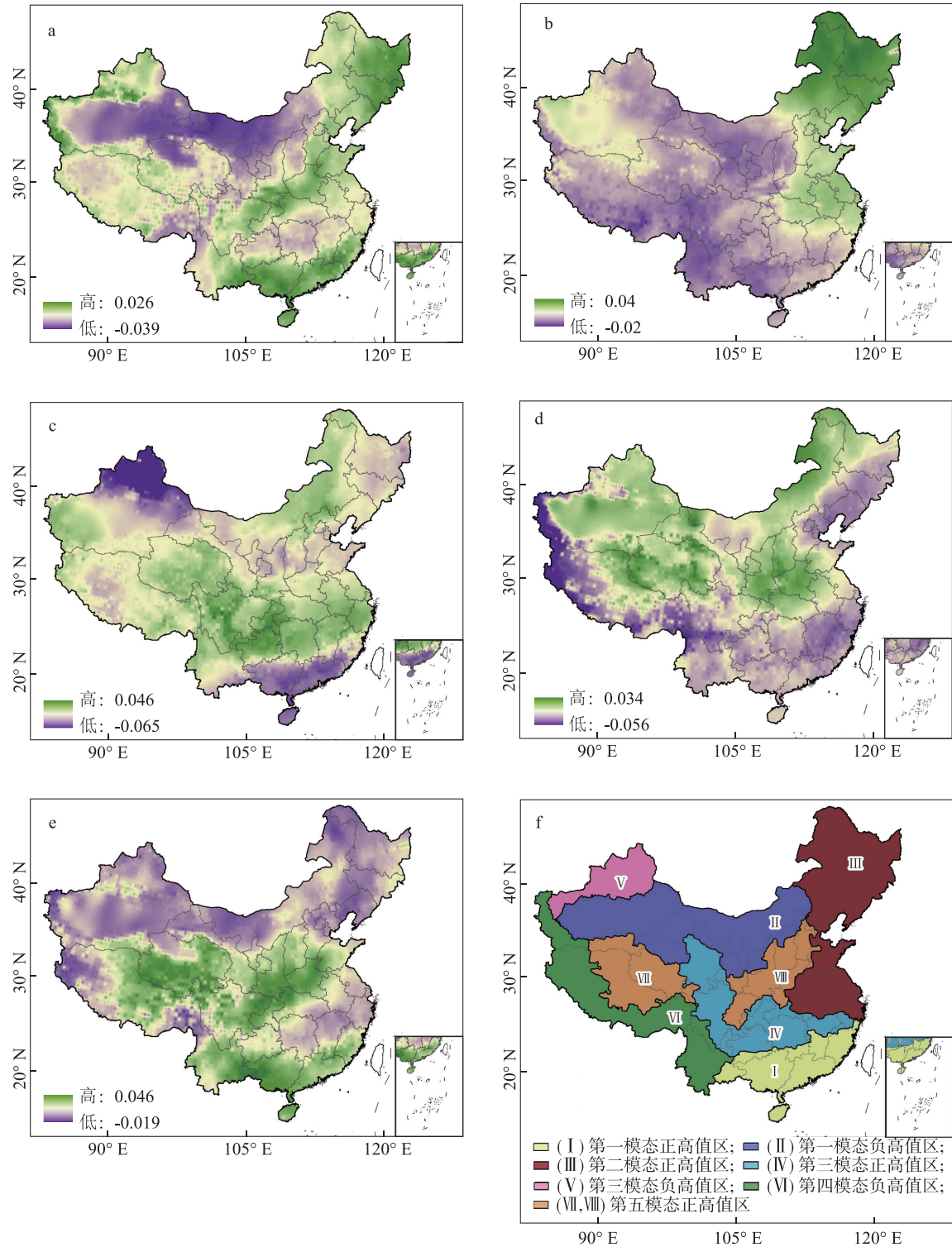


图 4 REOF 计算所得 5 种有效积温空间分布模式(a~e)和挑选的数个高值区域分布(f)

Fig.4 Five spatial patterns of effective accumulative temperature(a-e) calculated by the rotated empirical orthogonal function and the distribution of several high-value regions(f)

3 讨论

3.1 有效积温 REOF 分区与全国综合农业区划对比

对比 1981 年《中国综合农业区划》^[28], 本研究发现 REOF 分区中Ⅲ区与中国综合农业区划图中的东北区、黄淮海区大致重合, 这表明 2 个不同的综合农业区可能在有效积温上有相似的特征, 因此在 REOF 中作为一个区出现, 而在中国综合农业区划图中受其它要素的影响表现为两个区。重合度较高的另一个区是 REOF 第Ⅰ区, 该区完全覆盖了华南区并向北部延展。有效积温在中国南部地区综合农业区划中占重要作用, 《中国综合农业区划》距今已有 37 年, 因此全球变暖背景下华南区范围是否变化还需进一步研究。REOF 第Ⅷ区与黄土高原区相似, 表明这部分区域具有独特的农业热量资源且有效积温在作物搭配上占主导地位。第Ⅳ区覆盖长江中下游区与西南区两区的大部分范围, 二者有效积温大体相等, 在中国综合农业区划中分为两部分或许是考虑到降水不足及海拔过高造成的种植难度。其他 REOF 分区中, 仅第Ⅱ区东、中部与内蒙古及甘新农牧区部分重合。西部整体分区与中国综合农业区划重合度不好, 可能是受降水量不足、河川径流量小及地下水位不高的影响。尽管甘新区农业热量资源足够, 但农作物的水分需求欠缺。青藏高原虽然有效积温表现出多个不同特征, 但由于该区域为 $0 \sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 积温带所在地, 不能满足大部分喜凉作物的热量需求, 因此在青藏高原地区进行农业分区意义不大。

REOF 第Ⅰ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅷ区及第Ⅱ区东、中部与中国综合农业区划相似, 说明有效积温在中国中东部地区的农业区划上有重要作用; REOF 第Ⅰ分区表明受全球变暖影响, 传统意义上的华南区或许将向北延展一定距离。中国西部地区有效积温按其特征可划分为多个区域, 但综合农业分区时受由海拔、降水等因素造成的种植难度的影响, 该区域有效积温 REOF 分区仅有部分借鉴意义。大多数 REOF 分区与中国综合农业分区相符, 部分地区受海拔、降水等因素的影响表现出不同的分区特征, 可能原因是温度是影响农业的主导因素之一, 区划时还应考虑其他因素的影响。

3.2 有效积温 REOF 分区与全球增温停滞分析

IPCC 第五次评估报告^[29]指出, 1961–2018 年

全球气温平均升高 $0.89\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($0.69 \sim 1.08\text{ }^{\circ}\text{C}$)。但有一部分学者表示 1998–2012 年全球平均地表气温变化出现变暖停滞现象^[30–32]。杜勤勤等^[33] 对全国 622 个气象站的气温数据分析后发现, 1998–2012 年间中国气温变化率为 $-0.022\text{ }^{\circ}\text{C/a}$, 较 1960–1998 年增温率下降 $0.042\text{ }^{\circ}\text{C/a}$, 存在同全球变暖停滞类似的增温减缓现象, 且减缓程度更明显。对 REOF 各分区内历年所有格点有效积温取均值, 基于最小二乘法求取 1961–2016 年、1998–2012 年的趋势强度, 之后对二者取差值。研究发现, 除第 5、7 分区差值为正数外, 其他分区内差值均为负值, 且在停滞期 (1998–2012 年) 内, 第 1、2、3、8 区出现有效积温负增长现象。这与 Roberts 等^[30] 提出的 1998–2012 年增温停滞现象相符。第 7 分区为青藏高寒区, 趋势强度差值为 0.45, 表明 1998–2012 年有效积温增长趋势相比 1961–2016 年总体趋势没有太大变化, 不存在停滞。这与杜勤勤等^[33] “青藏高寒区 1998–2012 年未出现增温减缓现象” 结论相符。第 5 分区是 REOF 第三模态中的高负值区, 同样未出现停滞减缓现象, 其机理还有待探讨。全球增温停滞在 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温变化上亦得到体现。

本研究结果表明, 中国 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温整体呈升高趋势。南北方 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温升高速率不一致, 秦岭以北地区整体升幅小, 但不排除个别地区升幅大, 如塔里木盆地及阿拉善高原; 秦岭以南地区 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温升幅较大, 但部分地区如横断山脉上升幅度较小。秦岭及大巴山等地作为南北方分界线, 其有效积温表现出下降趋势。

中国东部地区各有效积温界限北界均有北移趋势, 积温等值线在长江中下游地区北移最明显 (向北最大移动 1.6 纬距), 四川盆地和塔里木盆地有效积温界限呈外扩趋势。青藏高原地区 $< 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 和 $1\,000 \sim 2\,000\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 有效积温覆盖面积呈连续减小趋势; $\geq 4\,000\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 和 $2\,000 \sim 3\,000\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 有效积温覆盖面积呈连续增长趋势; $3\,000 \sim 4\,000\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 有效积温带未有较大变动。 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温的 3 个气候基准期内, 积温差值为正的地区主要包括华南、长江中下游、东部沿海及北方海拔相对较低的地区, 有效积温差值为负的主要集中在秦岭、大巴山等地。

$\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温起始日期多分布在 3、4 月份; 20 世纪 80 年代后期, 起始日期在 1、2 月份的格点

数目明显增多,表明有效积温起始时间有明显的提前趋势。有效积温持续6个月及以下的格点占比最多,年际分布上呈减少趋势,持续时间为10~12个月的格点数目在20世纪80年代后期明显增多,研究区内 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 有效积温持续时间有延长趋势。

按照REOF方法将 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 有效积温分为8个区域,其中I、II区为第一模态正负2个高值区,IV、V区为第三模态正负2个高值区,第VII、VIII区是具有相同特征的区域,且第I、III、IV、VIII区及第II区东中部与中国综合农业区划结果相似。

参考文献:

- [1] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2019)[R]. 北京:中国气象局,2019.
- [2] 刘允芬. 现代气候变化对中国热量资源的影响[J]. 自然资源学报,1993,8(2):166-175.
- [3] 孙彦坤,李浩然,兰 倩,等. 黑龙江省热量资源变化特征及对水稻不同发育期生长的影响[J]. 南方农业学报, 2018,49(9): 1794-1803.
- [4] 张山清,普宗朝,李景林,等. 气候变暖背景下南疆棉花种植区划的变化[J]. 中国农业气象,2015,36(5):594-601.
- [5] 邱阳阳,吴奕霄,熊世为,等. 安徽省近55年气候变化及其对气候生产力的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(17):290-294.
- [6] 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[J]. 中国农业气象,2014,35(2):119-127.
- [7] 冯 琳,庞玉亭,钟 琪,等. 1980-2016年气候变化对湖南省农业产量的影响[J]. 资源科学,2019,41(3):582-590.
- [8] 姚玉璧,杨金虎,肖国举,等. 气候变暖对西北雨养农业及农业生态影响研究进展[J]. 生态学报,2018,37(7):2170-2179.
- [9] 刘胜利. 气候变化对我国双季稻区水稻生产的影响与技术适应研究[D]. 北京:中国农业大学,2018.
- [10] ANANDHI, AAVUDAI. Growing degree days-Ecosystem indicator for changing diurnal temperatures and their impact on corn growth stages in Kansas[J]. Ecological Indicators, 2016, 61:149-158.
- [11] 缪启龙,丁圆圆,王 勇,等. 气候变暖对中国热量资源分布的影响分析[J]. 自然资源学报,2009,24(5):934-944.
- [12] 徐兴奎,王小桃,金晓青. 中国区域1960-2000年活动积温年代变化和地表植被的适应性调整[J]. 生态学报,2008,29(11):6042-6050.
- [13] 汤 绪,杨续超,田 展,等. 气候变化对中国农业气候资源的影响[J]. 资源科学,2011,33(10):1962-1968.
- [14] 丁从慧,申双和,陶苏林. 江苏省农业气候资源及未来情景预估[J]. 江苏农业学报,2017,33(6):1309-1315.
- [15] 褚荣浩,申双和,吕厚荃,等. RegCM3下1951-2100年江苏省热量资源及一季稻气候生产潜力[J]. 江苏农业学报,2015,31(4):779-785.
- [16] 李正国,杨 鹏,唐华俊,等. 气候变化背景下东北三省主要作物典型物候期变化趋势分析[J]. 中国农业科学,2011,44(20):4180-4189.
- [17] 肖登攀,齐永青,王仁德,等. 1981-2009年新疆小麦和玉米物候期与气候条件变化研究[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(6):189-194.
- [18] 王 芳,刘宏举,邬定荣,等. 近30年华北平原冬小麦有效积温的变化[J]. 气象与环境科学,2017,40(2):20-27.
- [19] 单璐璐,白 华,谭丽静,等. 凤城地区气候变化及其对玉米产量的影响[J]. 现代农业科技,2017,24(16):215-216.
- [20] 李忠辉,郭春明,袁福香. 吉林西部春玉米的叶面积与有效积温的相关性[J]. 贵州农业科学,2018,46(1):130-132.
- [21] 冯秀藻,陶炳炎. 农业气象学原理[M]. 北京:气象出版社,1987:72-152.
- [22] 姜会飞. 农业气象学[M]. 北京:科学出版社,2008:48-70.
- [23] 杨永岐. 农业气象中的统计方法[M]. 北京:气象出版社,1983:113-116.
- [24] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999:42-134.
- [25] 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[J]. Archives for Meteorology Geophysics & Bioclimatology, 1983, 32(2/3):287-295.
- [26] 马 彬. 1960-2015年中国极端干旱区干湿变化及成因分析[D]. 兰州:西北师范大学,2017.
- [27] 冉津江,李明霞,黄建平,等. 中国干旱半干旱地区的冷季快速增温[J]. 高原气象,2014(4):947-956.
- [28] 全国农业区划委员会《中国综合农业区划》编写组. 中国综合农业区划[M]. 北京:农业出版社,1981.
- [29] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution to working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. New York, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [30] ROBERTS C D, PALMER M D, MCNEALL D, et al. Quantifying the likelihood of a continued hiatus in global warming[J]. Nature Climate Change, 2015, 5(4):337-342.
- [31] YAN X H, BOYER T, TRENBERTH K, et al. The global warming hiatus: slowdown or redistribution? [J]. Earth's Future, 2016, 4:472-482.
- [32] MEDHAUG I, STOLPE M B, FISCHER E M, et al. Reconciling controversies about the 'global warming hiatus' [J]. Nature, 2017, 545(7652):41-47.
- [33] 杜勤勤,张明军,王圣杰,等. 中国气温变化对全球变暖停滞的响应[J]. 地理学报,2018,73(9):1748-1764.

(责任编辑:陈海霞)