

引用格式:张煦庭,潘学标,徐琳,等.中国温带地区不同界限温度下农业热量资源的时空演变[J].资源科学,2017,39(11):2104-2115. [Zhang X T, Pan X B, Xu L, et al. Spatio-temporal variation of agricultural thermal resources at different critical temperatures in China's temperate zone[J]. *Resources Science*, 2017, 39(11): 2104-2115.] DOI: 10.18402/resci.2017.11.09

中国温带地区不同界限温度下农业热量资源的时空演变

张煦庭,潘学标,徐琳,魏培,胡琦,尹紫薇,邵长秀

(中国农业大学资源与环境学院,北京 100193)

摘要:受全球气候变暖影响,农业生产面临较大风险,研究农业热量资源的时空演变对农业生态环境、作物布局和种植制度等具有重要意义。本研究利用中国温带地区及外延200km范围内840个气象站点1960—2015年逐日气温资料,采用气象插值软件ANUSPLIN空间插值,基于偏差法计算了格点尺度稳定通过不同界限温度($\geq 0^{\circ}\text{C}$ 、 5°C 、 10°C 、 15°C 和 20°C)的起止日期、持续日数和积温,综合分析了气候变化背景下农业热量资源的时空格局及不同时段一年两熟制、冬小麦和春玉米可种植区的变化。结果表明:温带地区均呈现出初日提前、终日推迟、持续日数和积温增加的趋势, $\geq 15^{\circ}\text{C}$ 的热量资源变幅最大;不同界限温度初日自南向北推迟,终日提前、持续日数和积温逐渐减小。起止日期和积温年代距平从1990年开始正负转变,1960—1980年与2000年以后差异显著;寒温带持续日数和积温低值区域减少、中温带和暖温带高值范围增大。时段II(1990—2015年)温带地区一年两熟制、冬小麦和春玉米可种植区相比时段I(1960—1989年)存在不同程度北扩。

关键词:温带地区;界限温度;农业热量资源;种植界限;气候变化;中国

DOI: 10.18402/resci.2017.11.09

1 引言

热量资源是农业生产中作物生存和生长发育所必需的外界环境和能量来源^[1],其时空分布及变化直接影响区域生态环境、作物布局、种植制度和作物生产等。IPCC第五次评估报告指出,1880-2012年全球地表面平均温度呈线性上升趋势,升高 0.85°C ^[2]。中国的升温趋势较全球同期偏高^[3]。以气候变暖为主的气候变化势必会引发热量资源时空分布改变,进而对农业生产造成强烈影响。因此,研究近几十年来热量资源时空变化特征及对气候变化的响应具有较大的积极和现实意义。

农业界限温度是农业生产中重要的热量指标,是指具有生物学普遍意义的,标志着某种物候现象或农事活动的开始、终止或转折的温度^[4],常用 0°C 、

5°C 、 10°C 、 15°C 和 20°C 来划分。界限温度的起止日期、持续日数和积温对适宜种植区的布局、种植制度及品种搭配都十分关键^[5]。不同界限温度表征不同的农业意义^[6],如 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 初终日之间为农耕期, $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 持续日数为越冬作物或喜凉作物的生长期, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的时段为喜温作物生长期等。气候变化背景下,不同界限温度下农业热量资源分布范围随时间和空间会产生相应改变,对种植制度划分、作物布局北界及病虫害发生都会带来重大影响^[7]。

以光热水资源为主的农业气候资源在农业生产中起主导作用^[8],气候变暖使农业热量资源变化更受关注。已有学者开展了广泛研究,内容以热量资源分布、对气候变化的响应和适应较多;研究区域范围包括以全国^[8,9]、东北^[10,11]、华北^[12]、西北^[13]、西

收稿日期:2017-06-02;修订日期:2017-10-05

基金项目:国家自然科学基金项目(41475104);国家自然科学基金青年科学基金项目(41401048);国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506016)。

作者简介:张煦庭,男,陕西韩城人,博士生,研究方向为气候变化影响与生物气候适应。E-mail: suton@cau.edu.cn

通讯作者:潘学标,E-mail: panxb@cau.edu.cn

2017年11月

南^[14]等为主的地理区域和以各省^[15,16]、市^[17]为主的行政区域;选取的热量指标常以0℃和10℃界限温度起止日期和积温^[9,10,15]为主。目前研究中较少针对中国不同温度带农业热量资源特征的对比分析;关于多种不同界限温度下农业热量指标时空格局的综合分析也少有报道;现有研究多以站点数据分析为主,结果较为真实准确,但利用空间栅格数据计算热量指标能够较好地反映空间连续性,避免以点带面研究中存在空间尺度转换上的问题,同时可为后续开展与遥感或作物模型等对接工作提供便利。

本研究利用ANUSPLIN气象插值软件对中国温带地区及外延200km范围内840个气象站点1960—2015年逐日气温资料进行空间插值,根据时间序列栅格数据集计算稳定通过不同界限温度的起止日期、持续日数和积温,系统研究了年际、年代际尺度下中国温带地区农业热量资源的时空格局,分析了气候变化对一年两熟制、冬小麦和春玉米可种植区的可能影响,以期为合理利用农业热量资

源、改善种植制度和作物布局、有效规避气候变化背景下的农业生产风险提供理论依据。

2 数据与方法

2.1 研究区域及资料预处理

2.1.1 研究区域与数据来源

本文所选温带地区包括中国气候区划^[18]中的暖温带、中温带和寒温带3个温度带(图1)。受东部季风和西北干旱气候的共同影响,温带地区四季分明,水热条件有显著的季节和空间差异^[19],农业热量资源时空变化也非常明显^[3,8,9],除固有的一年生喜凉作物外,大多数一年生喜温作物也可种植^[20]。中国温带地区分布及种植制度如表1所示。

本研究气象数据来源于中国气象数据网^[21]和美国国家海洋和大气管理局(NOAA)全球日值数据集GSOD^[22],包括1960—2015年中国温带及外延200km范围的国内外总计840个气象站点逐日气温资料(平均气温、最高气温和最低气温),其中国内站点576个,分布于19个省、自治区和直辖市,国外

表1 中国温带地区分布及种植制度

Table 1 Distribution and planting boundary of China's temperate zone

温度带	主要分布地区	作物熟制	主要农作物
暖温带	北京、天津、山东、河北南部、辽宁南部、江苏北部、安徽北部、河南北部、山西南部、陕西中部、甘肃南部、新疆南部	一年一熟、一年两熟、 两年三熟	冬小麦、棉花、玉米、 花生
中温带	黑龙江大部、吉林、辽宁北部、河北北部、山西北部、陕西北部、内蒙古大部、宁夏、甘肃中部、新疆北部	一年一熟	春小麦、玉米、大豆
寒温带	黑龙江北部、内蒙古东北部	一年一熟	马铃薯、春小麦

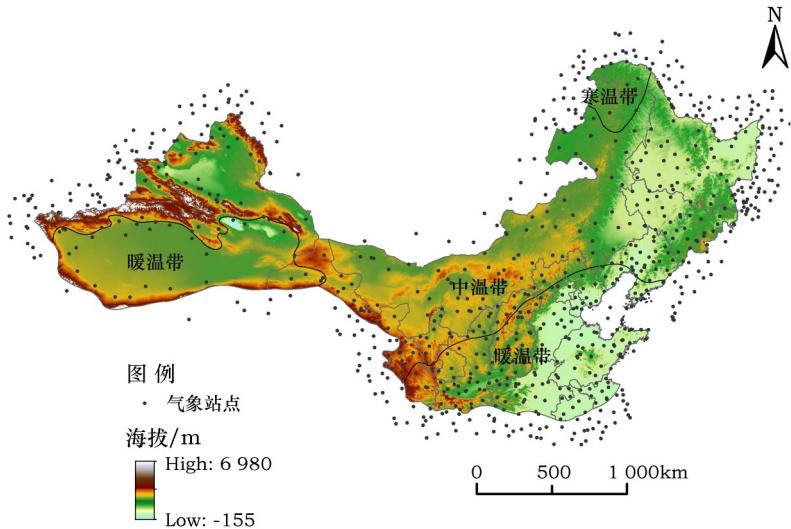


图1 研究区域及气象站点分布
Figure 1 Distribution of study area and meteorological stations

站点264个,集中在朝鲜、俄罗斯、蒙古、哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦等7个国家。区域外的国内外站点资料不作为研究内容,仅作为空间插值时使用,目的是保证气象要素空间插值准确性,减小研究区域边缘的插值误差。数字高程(DEM)数据GMTED2010来自美国地质调查局(USGS)^[23],原始空间分辨率为30s(约900m),对该数据进行重采样,得到8km×8km栅格数据。

2.1.2 空间插值预处理

气象插值软件ANUSPLIN采用局部薄盘光滑样条函数统计模型,允许引入经纬度、海拔高度等线性协变量^[24],相比于反向距离权重(Inverse Distance Weight, IDW)和普通克里格(Ordinary Kriging)插值方法,插值结果误差小且更适合于时间序列的气象要素插值^[25]。

利用ANUSPLIN 4.3对中国温带及外延200km范围的国内外840个气象站点56年逐日气温资料空间插值,以经纬度为自变量,以海拔高度为协变量,以DEM数据栅格为基准,建立中国温带地区1960—2015年逐日气温8km×8km分辨率的时间序列栅格数据集。由于气象站点中海拔最高为3507m,为了控制插值垂直精度,海拔高度超过3500m的栅格(731个)数据不参与研究。

2.2 研究方法

2.2.1 起止日期、持续日数及积温计算

稳定通过某界限温度的起止日期称作该界限温度初日、终日;持续日数为初日到终日之间的日数。韩湘玲等认为利用偏差法统计计算得到的界限温度起止日期较为可靠^[26],因此本文选用偏差法^[27]计算稳定通过不同界限温度($\geq 0^{\circ}\text{C}$ 、 5°C 、 10°C 、 15°C 和 20°C)的起止日期(初日、终日)及持续日数。

活动积温,文中简称积温,指在某界限温度起止日期之间,大于或等于界限温度的日平均气温累积和。

2.2.2 气候倾向率及保证率计算

气候倾向率用 X 表示样本大小为 n 的气候要素,用 t 表示相对应的时间,建立 X 与 t 之间线性回归方程。

$$X = b_0 + b_1 t \quad (t = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

式中 b_0 为截距; b_1 为回归系数, b_0 和 b_1 用最小二乘法进行估计。将 b_1 的10倍作为气候要素的气候倾向率^[28],并采用F检验对回归方程进行显著性检验。

保证率是指在一定时段内某一气象要素值大于等于(小于等于)某一界限值的累积概率值,即大于等于(小于等于)某界限值的分布函数,用于说明该气象要素出现的可靠程度^[4]。农业气候指标中常取80%保证率为指标值,本研究在分析界限温度农业热量资源年际空间分布中采用80%的保证率进行计算。

2.2.3 可种植区界限指标确定

刘巽浩等提出的中国种植制度气候区划指标体系^[29]中按照热量资源划分零级带,其中以 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温 $4000\sim 4200^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 及年极端最低气温 -20°C 区分中国一年一熟带和一年两熟带。

利用崔读昌等^[30]研究的指标计算冬小麦种植北界,即最冷月平均最低气温 -15°C 、极端最低气温在 $-22\sim -24^{\circ}\text{C}$ 。

春玉米种植界限根据《粮食作物与气象》^[31]中关于玉米所需积温的指标得到,即 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温大于等于 $2100^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 为春玉米可能种植区域。

2.2.4 研究时段划分

利用Mann-Kendall趋势检验^[28]对温带地区56年平均气温进行突变计算,1989年为显著突变年份,温带地区变暖加剧。本文将1960—2015年分别划分为1960—1989年(时段I)和1990—2015年(时段II)用于农业热量资源可种植区演变的对比分析。

3 结果分析

3.1 农业热量资源年际变化特征

1960—2015年中国温带地区不同农业界限温度($\geq 0^{\circ}\text{C}$ 、 5°C 、 10°C 、 15°C 和 20°C)下初日多年平均值分布在3月下旬到6月下旬,平均显著提前 $1.5\text{d}/10\text{a}$;终日集中在8月下旬到11月中旬,随时间持续推迟,变化幅度为 $(0.9\sim 1.3)\text{d}/10\text{a}$;持续日数随年际不断增长,表明农业生产期一直增加,其中 $\geq 15^{\circ}\text{C}$ 持续日数变幅最大。

如表2所示,各温度带表现为随时间初日总体提前、终日推迟及持续日数增加,暖温带初日相比于其它温度带最早,终日最晚,同时持续日数最长,其中 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 初日提前幅度最大, $\geq 15^{\circ}\text{C}$ 终日推迟最多;

2017年11月

表2 1960—2015年中国温带地区不同界限温度下农业热量资源的变化统计

Table 2 Distribution and variation of agricultural thermal resources at different critical temperature in China's temperate zone from 1960 to 2015

温度带	界限温度 /℃	初日日序		终日日序		持续日数		积温	
		平均值±SD	气候倾向率 /(d/10a)	平均值±SD	气候倾向率 /(d/10a)	平均值±SD /d	气候倾向率 /(d/10a)	平均值±SD /(℃·d)	气候倾向率 /(℃·d/10a)
温带	0	82 ± 5.0	-1.6**	316 ± 3.5	0.9*	235.0 ± 6.6	2.5**	3 542.7 ± 138.7	68.2**
	5	103 ± 4.6	-1.5**	299 ± 2.9	1.0*	197.9 ± 5.9	2.5**	3 377.7 ± 139.5	67.8**
	10	124 ± 4.6	-1.7**	281 ± 2.8	1.0*	158.5 ± 5.8	2.7**	3 001.4 ± 143.8	70.2**
	15	148 ± 4.7	-1.6**	261 ± 3.1	1.3	114.3 ± 6.4	2.9**	2 363.8 ± 156.4	72.4**
	20	173 ± 5.3	-1.4**	236 ± 3.9	1.3	63.6 ± 7.0	2.7**	1 396.6 ± 162.6	63.0**
暖温带	0	60 ± 6.6	-2.0**	332 ± 4.5	0.8*	273.0 ± 8.5	2.7*	4 437.0 ± 148.4	66.7**
	5	83 ± 5.6	-1.7**	315 ± 3.4	0.9*	232.8 ± 6.9	2.6**	4 271.3 ± 149.5	67.1**
	10	104 ± 5.3	-1.8**	296 ± 3.0	0.6**	192.8 ± 5.8	2.3**	3 901.5 ± 143.8	66.5**
	15	129 ± 5.4	-1.5**	275 ± 3.4	1.2	147.3 ± 6.6	2.8**	3 246.5 ± 163.9	70.8**
	20	158 ± 5.3	-1.4**	252 ± 3.3	0.8	94.9 ± 6.9	2.3**	2 219.4 ± 174.7	60.1**
中温带	0	94 ± 5.0	-1.4**	309 ± 3.7	1.0	215.5 ± 6.7	2.4**	3 089.5 ± 140.1	70.0**
	5	113 ± 4.6	-1.4**	292 ± 3.4	1.1	180.3 ± 6.4	2.5**	2 924.3 ± 141.3	69.3**
	10	134 ± 4.8	-1.6**	274 ± 3.3	1.3	141.2 ± 6.6	2.9**	2 543.5 ± 153.4	73.4**
	15	157 ± 5.0	-1.7**	254 ± 3.3	1.3	97.9 ± 6.9	3.0**	1 914.7 ± 164.8	75.0**
	20	182 ± 6.5	-1.6**	228 ± 5.1	1.8	46.4 ± 8.5	3.4**	934.4 ± 180.0	72.1**
寒温带	0	116 ± 6.8	-1.8**	283 ± 4.8	0.7	167.6 ± 8.9	2.5*	1 855.3 ± 120.6	52.3**
	5	136 ± 6.3	-1.1**	267 ± 4.8	0.3*	131.8 ± 7.9	1.4	1 702.5 ± 131.1	47.9**
	10	157 ± 7.1	-1.3**	248 ± 4.7	1.0	92.4 ± 8.4	2.3**	1 335.6 ± 156.3	52.8**
	15	181 ± 10.0	-0.5	220 ± 8.8	2.8**	40.0 ± 12.3	3.3**	591.9 ± 198.3	58.6**
	20	192 ± 12.9	0.6	195 ± 12.7	1.2	3.7 ± 2.1	0.6**	71.9 ± 40.3	10.5**

注:**、*分别通过置信水平0.01、0.05的显著性检验。

中温带各热量指标低于暖温带,但持续日数增长却最快,主要是终日延后幅度较大((1.0~1.8)d/10a)造成的;寒温带各界限温度起止日期变幅较小,持续日数最短不足4d,≥20℃初日出现推迟趋势(0.6d/10a),同时≥15℃持续日数增幅可达3.3d/10a,比暖温带和中温带都明显。

56年来中国温带地区不同农业界限温度下积温呈显著增加趋势($P<0.01$),气候倾向率为(63.0~72.4)℃·d/10a,其中≥15℃的积温变幅最大,≥20℃变幅最小。各温度带积温有明显差异,暖温带相比其它温度带均为最大,≥15℃的倾向率变化最为明显(70.8℃·d/10a);中温带各积温低于暖温带,倾向率最大可达75.0℃·d/10a(≥15℃);寒温带积温最低,随年际增加的幅度也最小。

3.2 农业热量资源空间分布特征

中国温带地区稳定通过不同界限温度的起止日期及积温空间分布基本一致,即初日自南向北推

迟,终日随纬度增加而提前,持续日数和积温从南到北逐渐减小。日平均气温稳定通过0℃、5℃和10℃的起止日期和持续日数可以表征适宜农耕期、喜凉作物生长期和喜温作物生长期长度,该界限温度下的积温分别为反映不同农业生产期热量状况的重要指标。≥10℃积温也常作为气候区划和农业气候区划的热量指标。图2和图3(见第2108页和2109页)为80%保证率下≥0℃、5℃和10℃起止日期和积温的空间分布及气候倾向率特征。

1960—2015年温带地区≥0℃初日、终日和积温的空间分布如图2a,图2d,图2g所示,暖温带塔里木盆地、关中平原和华北平原地区初日为2月上旬到3月中旬,终日最晚在12月,并且积温均大于4500℃·d,是温带地区热量资源最丰富的地区;中温带除天山和阿尔泰山地区由于地势海拔因素热量资源较少外,持续日数和积温整体由南到北依次减小,内蒙古西部荒漠地区积温明显高于中温带其

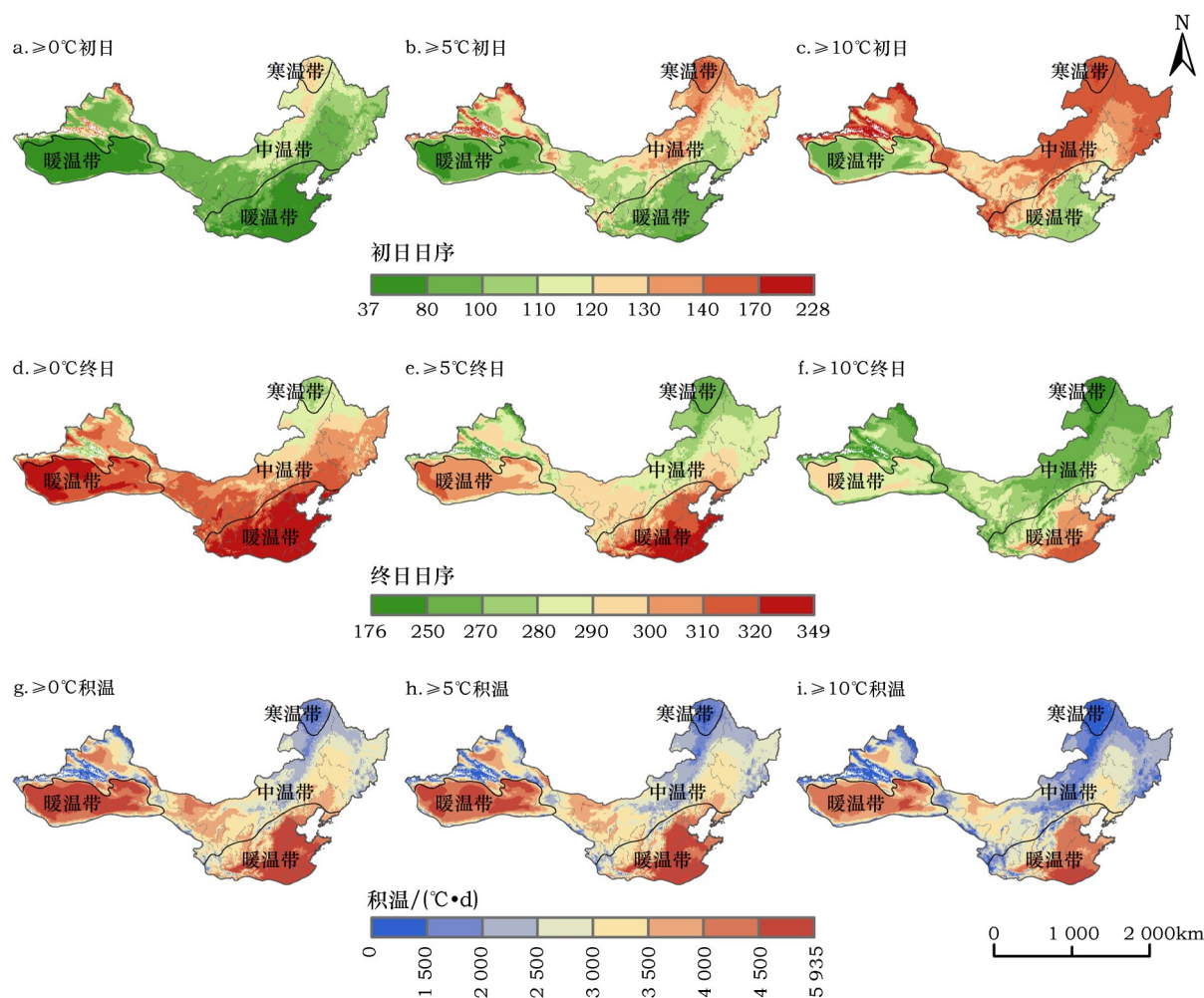


图2 1960—2015年中国温带地区 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 、 5°C 和 10°C 初日、终日和积温的空间分布(80%保证率下)

Figure 2 Distribution of initial date, final date and accumulated temperature of $\geq 0^{\circ}\text{C}$, 5°C and 10°C with 80% guarantee rate in China's temperate zone from 1960 to 2015

它地区;寒温带是温带地区热量资源最少的地区,受大兴安岭地形影响,积温不足 $2000^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,持续日数约为167.6d。温带地区 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 起止日期和积温空间分布趋势与 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 基本一致(图2b,图2e,图2h和图2c,图2f,图2i),不同之处在于初日推迟至3月上旬到8月上旬和3月下旬到8月中旬,终日为7月上旬到12月上旬和6月下旬到11月上旬,以及积温高值减小分别为 $5838^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 和 $5539^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。

56年来温带地区 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 初日、终日和积温的气候倾向率空间分布如图3a,图3d,图3g所示,初日显著提前的区域占温带地区的52.4%,暖温带塔里木盆地中部、关中平原和华北平原南部减小幅度最为明显;终日以推迟为主,仅35.7%的地区显著,其中0.5%的格点终日提前,集中在暖温带华北平原南部

地区;积温显著增加的面积占99.0%,表现为全区一致增长,暖温带新疆南部和东部、华北平原西部以及中温带内蒙古西部地区的增速最大可达到 $174.1^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}/10\text{a}$,寒温带增速较小。温带地区 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 初日提前范围较 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 和 10°C 最小(45.6%, $P<0.05$),暖温带华北平原和关中平原一带倾向率减小,但终日变化不显著,其它地区与 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的趋势基本一致(图3b,图3e,图3h和图3c,图3f,图3i); $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 终日显著推迟的范围最大(50.3%);另外, $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 和 10°C 积温气候倾向率空间分布及显著性范围与 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 类似,以暖温带新疆南部和东部、华北平原西部以及中温带内蒙古西部地区增速最快。

3.3 农业热量资源年代际演变

温带地区不同年代际不同农业界限温度下起

2017年11月

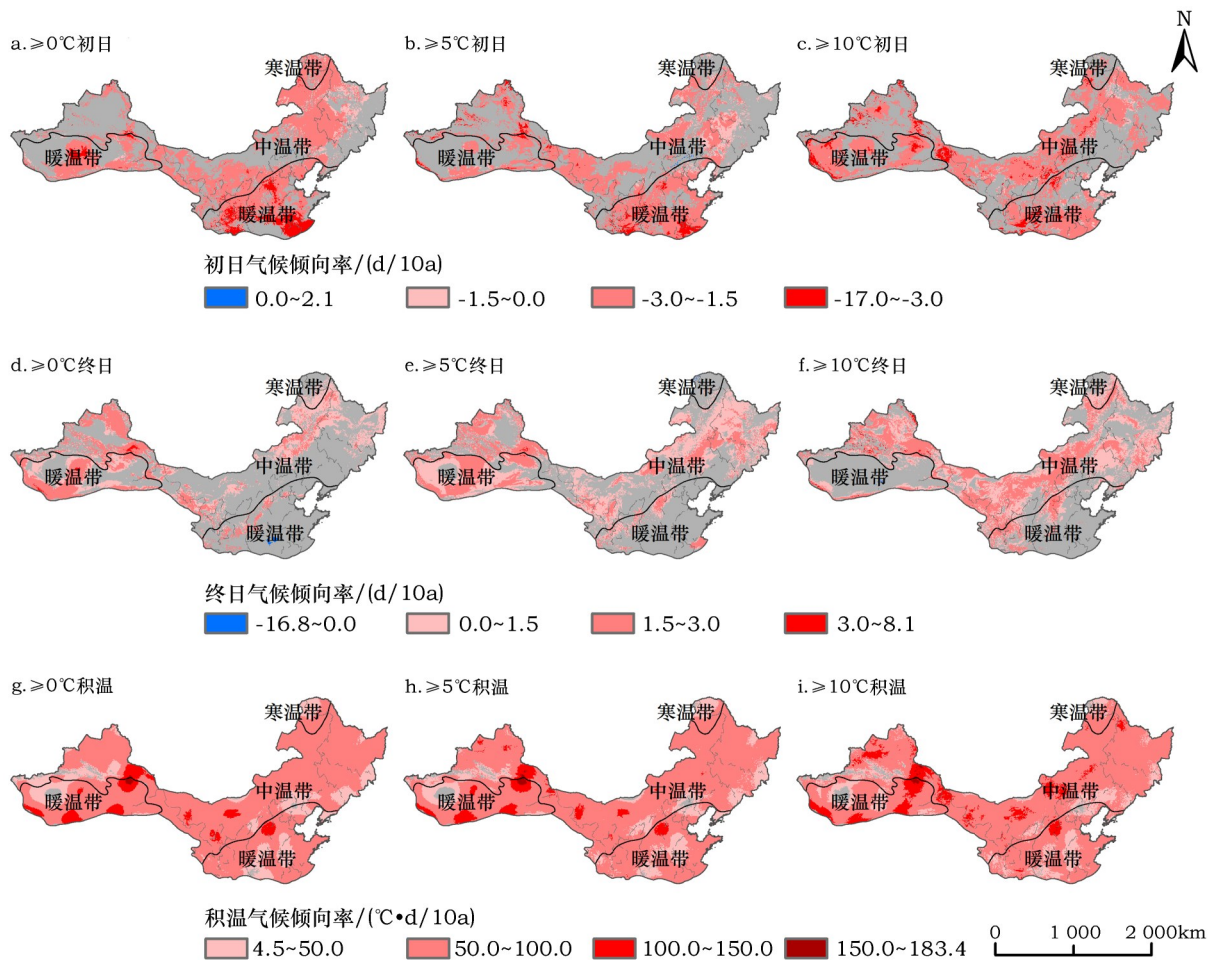


图3 1960—2015年中国温带地区 $\geq 0^\circ\text{C}$ 、 5°C 和 10°C 初日、终日和积温气候倾向率的空间分布
(灰色区域表示未通过置信水平0.05的显著性检验)

Figure 3 Distribution of climate trend rates of initial date, final date and accumulated temperature of $\geq 0^\circ\text{C}$, 5°C and 10°C in China's temperate zone from 1960 to 2015 (Gray areas are not statistically significant at the 95% confidence level)

止日期和积温的时间变化如图4所示,随年代际初日提前,终日推迟,积温呈增加趋势。与1960—2015年平均值相比,不同界限温度下各个指标均在1990s发生正负距平转变,1960s—1980s与2000s以后的结果较多存在显著性差异($P<0.01$)。由图4a可以看出, $\geq 0^\circ\text{C}$ 初日在1960s—1980s推迟2.3~3.1d,1990s开始平均每个年代际初日提前3.0d; $\geq 5^\circ\text{C}$ 和 10°C 的变化与之类似,1970s初日推迟幅度最大可达2.7d和3.0d,2000s左右则提前约4.2d和4.5d; $\geq 15^\circ\text{C}$ 和 20°C 初日分别在1970s和1980s最晚,2010—2015年比历史水平提高了4.7d和4.3d。图4b反映了终日随年代际的变化,日序变化幅度较初日偏小;1960s—1980s不同界限温度终日提前0.8~

2.4d,而从1990s开始平均每个年代际终日推迟了1.7~2.3d;特别地,2000年以后终日推迟幅度最大; $\geq 15^\circ\text{C}$ 和 20°C 终日推迟最明显。从图4c可知,2000年以后积温与1960s—1980s存在显著性差异($P<0.01$);与56年均值相比,1960s—1980s积温减少了71.0~133.1 $^\circ\text{C}\cdot\text{d}$,1990年开始各时段正距平增加10.6~188.2 $^\circ\text{C}\cdot\text{d}$;各界限温度下积温倾向率基本一致,其中 $\geq 15^\circ\text{C}$ 积温增加速度最快。

气候变化背景下,随着年代推移,温带地区不同界限温度下持续日数和积温均有增加趋势,不同温度带分布表现出寒温带低值范围缩小、中温带和暖温带高值北扩的态势。由于不同界限温度下的年代际趋势大体一致,故本文以中国温带地区

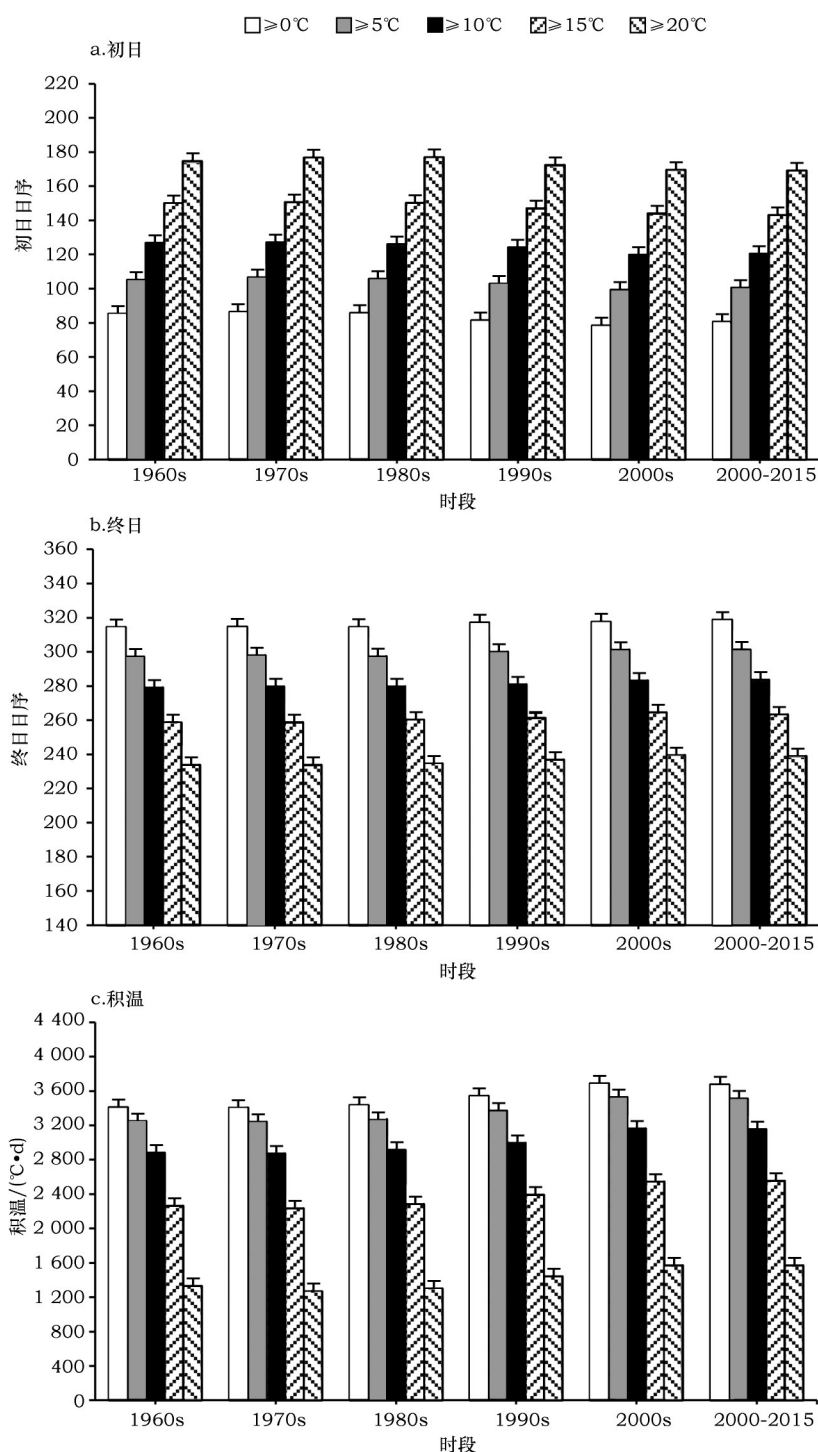


图4 1960—2015年中国温带地区不同界限温度初日、终日和积温的年代际变化

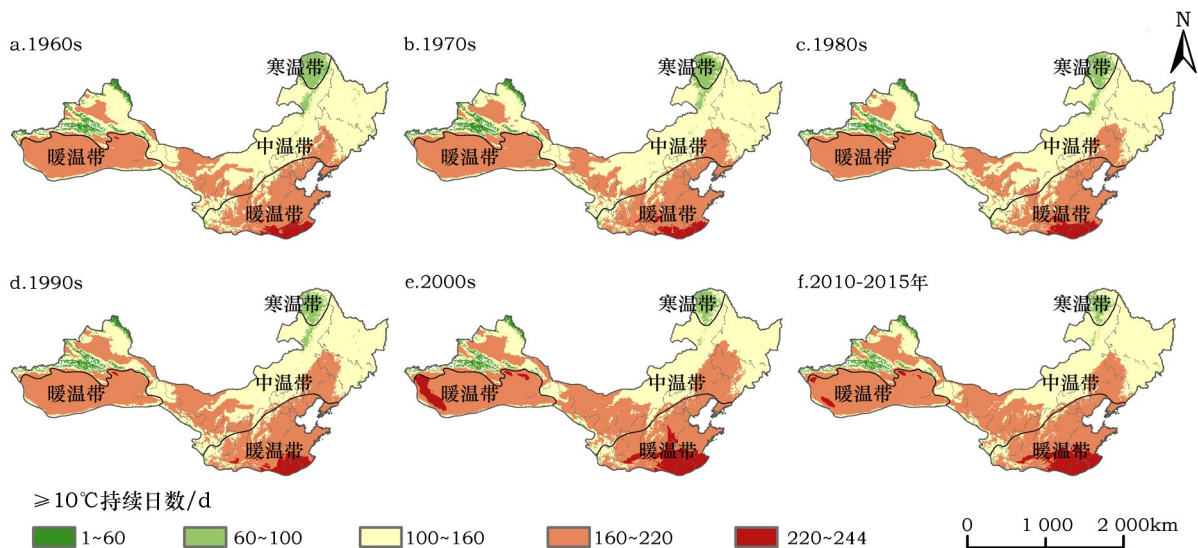
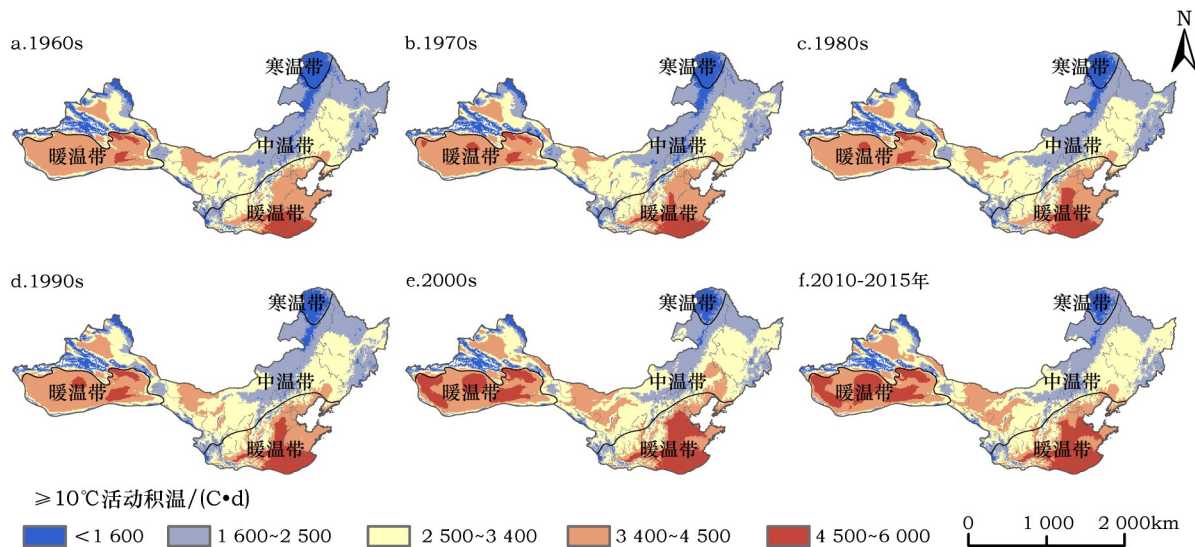
Figure 4 Interdecadal variation of initial date, final date and accumulated temperature at different critical temperature in China's temperate zone from 1960 to 2015

$\geq 10^{\circ}\text{C}$ 持续日数和积温年代际分布变化状况为例进行说明(图5、图6)。

由图5可知,1960s、1970s和1980s $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 持续日数分布范围基本一致,低值($<100\text{d}$)区域主要分布

在中温带新疆北部天山、阿尔泰山和寒温带大兴安岭地区,持续日数高值($>220\text{d}$)区域集中在暖温带华北平原南部地区;1990s相较于1980s,持续日数平均增加2.8d,暖温带关中平原出现高值区域;

2017年11月

图5 1960—2015年中国温带地区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 持续日数的年代际空间分布Figure 5 Interdecadal distribution of $\geq 10^{\circ}\text{C}$ duration days in China's temperate zone from 1960 to 2015图6 1960—2015年中国温带地区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温的年代际空间分布Figure 6 Interdecadal distribution of $\geq 10^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature in China's temperate zone from 1960 to 2015

2000s为持续日数增加较快的年代,寒温带低值区域明显缩小,高值区域大幅北扩;2010—2015年寒温带持续日数持续减小,但相比2000s,高值区域出现南退和回缩,突出表现在暖温带新疆西南部、关中平原、华北平原南部和中温带东北平原地区。

从图6可得,各年代际 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温分布范围变化与持续日数类似,1960s和1970s高值($>4500^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)区域出现在暖温带新疆南部塔里木盆地、关中平原和华北平原南部地区,积温低值($<1600^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)区域位于中温带新疆北部天山、阿尔泰山和寒温带大兴

安岭地区;1980s和1990s与1960s—1970s分布情况相似,高值区域仅在暖温带新疆塔里木盆地和华北平原南部地区略有增大;2000s积温比1990s平均增加 $171.0^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,包括暖温带新疆南部绝大多数地区、华北平原中部和北部地区等均出现高值,寒温带积温逐渐增加;2010—2015年暖温带新疆南部地区积温增长范围仍在继续,华北平原北部地区则发生回落,同时在中温带东北平原地区有所减少。

3.4 基于农业热量资源的可种植区变化

本文对比分析了1960—1989年(时段I)和

1990—2015年(时段II)80%保证率下温带地区基于农业热量资源指标的一年两熟制、冬小麦和春玉米可种植区的变化。如图7a所示,随着气候变暖,与时段I相比,时段II温带地区一年两熟制范围出现不同程度扩大;一年一熟区在时段II面积约为334.0万 km^2 ,相比时段I缩小了8.8%;时段I一年两熟区平均大小为79.7万 km^2 ,随着近30年可种植区向北扩张,面积增加到111.8万 km^2 ,占温带地区的25.1%;一年两熟区在新疆南部、宁夏北部与内蒙古交界处及辽宁西南部等地区范围增加明显,其它地区熟制基本保持不变。在仅考虑热量资源,不考虑光照、降水等气候资源及社会经济等因素的前提下,种植界限扩张区域可由一年一熟转为一年两熟,同时种植模式的改变可为单位面积周年粮食单产带来不同程度的提高^[32]。

冬小麦北界受越冬条件限制而形成,与时段I相比,气候变暖的背景下,时段II冬小麦种植北界存在一定程度北移(图7b);温带地区冬小麦可种植区移动范围较为明显的区域位于新疆南部、内蒙古西部-宁夏北部-甘肃中部一带以及辽宁西南部地区,其它地区北界移动幅度较小;时段I温带地区冬小麦可种植区面积为135.7万 km^2 ,占30.4%,时段II扩大到172.0万 km^2 ,相比时段I增加了26.7%,这些地区在不考虑其它影响因素时可由以往种植春小麦改为种植生育期长、产量高的冬小麦^[33],同时表明温带地区约38.6%的区域可种植冬小麦。

如图7c所示,56年来温带地区80%保证率下春玉米除新疆北部天山和阿尔泰山地区不可种植外,东部地区可种植区不断向北扩张,最北可达52°N左右;1960—1989年温带地区可种植春玉米面积为

365.2万 km^2 ,占82.0%,时段II可种植区比时段I增加了8.3%,达到395.5万 km^2 ;时段II温带地区春玉米可种植区约占88.7%,同时东部不可种植春玉米区范围有缩减到与寒温带保持一致的趋势。

4 结论与讨论

本文利用1960—2015年中国温带地区及外延200km范围共计840个气象站点逐日气温资料,运用气象插值软件ANUSPLIN进行8km \times 8km空间插值,基于偏差法计算了稳定通过不同界限温度的起止日期、持续日数和积温,研究了气候变化背景下中国温带地区农业热量资源的时空演变,分析了不同时段一年两熟、冬小麦和春玉米可种植区的变化,得出以下主要结论:

(1)1960—2015年中国温带地区不同农业界限温度下总体表现为初日提前、终日推迟、持续日数和积温呈显著增加趋势,各温度带中 $\geq 15^\circ\text{C}$ 的变幅最大。不同界限温度初日自南向北推迟、终日随纬度增加而提前、持续日数和积温从南到北逐渐减小,暖温带>中温带>寒温带。

(2)与56年平均值相比,不同界限温度下起止日期和积温均在1990s开始正负距平的转变,1960s—1980s与2000s及以后的结果存在显著性差异。持续日数和积温空间分布随年代变化显示出寒温带低值范围缩小、中温带和暖温带高值北扩的态势。

(3)与时段I(1960—1989年)相比,中国温带地区一年两熟制、冬小麦和春玉米的可种植区在时段II(1990—2015年)存在不同程度的扩张趋势,一年两熟制种植范围约占温带地区的25.1%,冬小麦可种植区和春玉米可种植区分别增至38.6%和

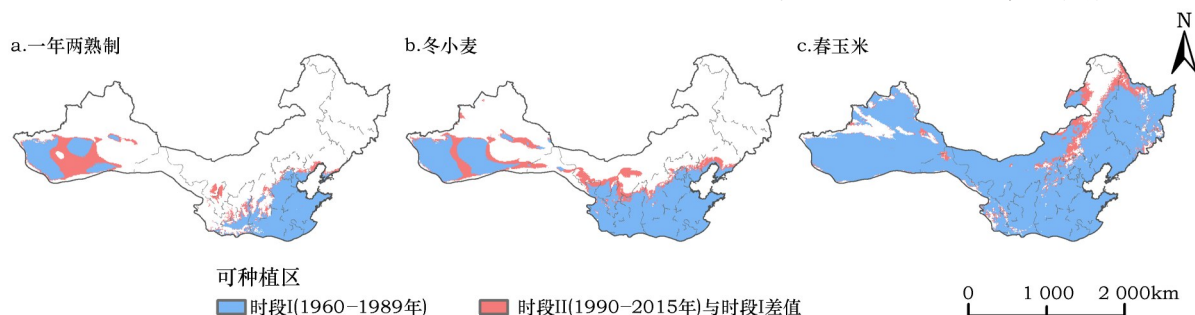


图7 中国温带地区一年两熟制、冬小麦和春玉米可种植区的变化(80%保证率下)

Figure 7 Change in planting boundaries of double cropping regions, as well as winter wheat and spring maize with 80% guarantee rate in China's temperate zone

2017年11月

88.7%。

前人相关研究表明,气候变暖极大地改变了中国农业气候资源,热量资源总体增加、时空分布不均,不同界限温度下积温普遍增加、初日提前以及终日推迟^[3,8,9,34],促进了复种指数增加和农业气候带北移等^[32,33,35],与本文结论基本一致。文中得出不同界限温度下中温带积温气候倾向率大于暖温带,与郭芬芬^[3]、杨晓光等^[8]认为华北地区(暖温带)积温变幅小于西北和东北地区(中温带)的结果类似,原因可能为中温带增温较暖温带明显,且主要来自最低气温升高的贡献^[34]。56年来一年两熟制、冬小麦和春玉米种植北界空间位移结果与杨晓光等^[32,33]得到的种植界限位置较为接近,但两者在划分中仅考虑热量资源限制,未加入水资源、光照资源和社会等因素,可作为下一步研究重点。

气候变暖的背景下,农业热量资源增加,其变率和变幅也产生较强的波动,并且热量资源变率随暖温带-中温带-寒温带逐渐增大,温带地区作物种植北界向北推移的同时可能存在较大的风险。后续研究中应进一步分析未来气候情景下作物种植北界变化敏感地带的农业生产风险,探讨热量资源的合理配置及规避风险的对策。

有学者^[26,27,36]认为偏差法计算结果能较为真实地反映界限温度的起止日期,而目前研究^[3,10,13]中多采用五日滑动平均法等其它方法,但针对北方地区两种方法得到的结果基本一致^[3,26],对于何种方法能够更好界定农业界限温度热量指标尚未有明确定论,因此界限温度起止日期不同计算方法的可靠性还需要结合生产实际进一步研究比较。

参考文献(References):

- [1] 孙鸿烈. 中国资源科学百科全书[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 2000. [Sun H L. China Encyclopedia of Resources Science [M]. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 2000.]
- [2] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel On Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [3] 郭芬芬, 肖晶晶, 张蕾, 等. 1961-2013年中国农业界限温度的时空变化特征[J]. 生态学报, 2016, 35(2): 489-498. [Guo F F, Xiao J J, Zhang L, et al. Spatiotemporal variation of agriculture critical temperature of China from 1961 to 2013[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(2): 489-498.]
- [4] 姜会飞. 农业气象观测与数据分析[M]. 北京: 科学出版社, 2009. [Jiang H F. Agricultural Meteorological Observation and Data Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2009.]
- [5] 胡毅. 应用气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2005. [Hu Y. Applied Meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005.]
- [6] 冯秀藻. 农业气象学原理[M]. 北京: 气象出版社, 1991. [Feng X Z. Principles of Agricultural Meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991.]
- [7] 居焯, 许吟隆, 熊伟. 气候变化对我国农业的影响[J]. 环境保护, 2007, (11): 71-73. [Ju H, Xu Y L, Xiong W. Impacts of climate change on agriculture in China[J]. Environment Protection, 2007, (11): 71-73.]
- [8] 杨晓光, 李勇, 代姝玮, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化. ix. 中国农业气候资源时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3177-3188. [Yang X G, Li Y, Dai S W, et al. Changes of China agricultural climate resources under the background of climate change. IX. Spatiotemporal change characteristics of China agricultural climate resources[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(12): 3177-3188.]
- [9] 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. [Hu Q, Pan X B, Shao C X, et al. Distribution and variation of China agricultural heat resources in 1961-2010[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(2): 119-127.]
- [10] 赵俊芳, 穆佳, 郭建平. 近50年东北地区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 农业热量资源对气候变化的响应[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(3): 190-198. [Zhao J F, Mu J, Guo J P. Response of agricultural thermal resources equal to and more than 10°C to climate change over the past 50 years in northeast China[J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(3): 190-198.]
- [11] 梁宏, 王培娟, 章建成, 等. 1960-2011年东北地区热量资源时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2014, 29(3): 466-479. [Liang H, Wang P J, Zhang J C, et al. Spatial and temporal distribution of variation in heat resource over northeast China during the period from 1960 to 2011[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(3): 466-479.]
- [12] 谭方颖, 王建林, 宋迎波, 等. 华北平原近45年农业气候资源变化特征分析[J]. 中国农业气象, 2009, 30(1): 19-24. [Tan F Y, Wang J L, Song Y B, et al. Analysis of changing characteristics of agricultural climate resources over last 45 years in North China Plain[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(1): 19-24.]
- [13] 徐超, 杨晓光, 李勇, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化. iii. 西北干旱区农业气候资源时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 763-772. [Xu C, Yang X G, Li Y, et al.

- Changes of China agricultural climate resources under the background of climate change. III. Spatiotemporal change characteristics of agricultural climate resources in Northwest Arid Area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 763-772.]
- [14] 代姝玮, 杨晓光, 赵孟, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化. ii. 西南地区农业气候资源时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(2): 442-452. [Dai S W, Yang X G, Zhao M, *et al.* Changes of China agricultural climate resources under the background of climate change. II. Spatiotemporal change characteristics of agricultural climate resources in Southwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(2): 442-452.]
- [15] 马鹏飞, 杜军, 杜晓辉. 1981-2014年西藏0℃界限温度变化趋势的时空分布[J]. 中国农学通报, 2016, 32(8): 147-153. [Ma P F, Du J, Du X H. Spatial and temporal distribution of 0℃ boundary temperature change in Tibet during 1981-2014[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(8): 147-153.]
- [16] 李秋月, 潘学标, 王丽, 等. 内蒙古地区气候资源变化趋势分析[J]. 中国农业气象, 2011, 32(S1): 19-23. [Li Q Y, Pan X B, Wang L, *et al.* Analysis of the trend of climate resources change in Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(S1): 19-23.]
- [17] 郑艳萍, 高桂芹, 王秀玲. 唐山地区近48年农业气候资源变化特征分析[J]. 中国农学通报, 2010, 26(20): 318-323. [Zheng Y P, Gao G Q, Wang X L. Analysis of changing characteristics of agricultural climate resource over last 48 years in Tangshan area [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(20): 318-323.]
- [18] 中国气象局. 中华人民共和国气候图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 1979. [China Meteorological Administration. Climatological Atlas of the People's Republic of China[M]. Beijing: Sino Maps Press, 1979.]
- [19] 陈效述, 庞程, 徐琳, 等. 中国温带旱柳物候期对气候变化的时空响应[J]. 生态学报, 2015, 35(11): 3625-3635. [Chen X Q, Pang C, Xu L, *et al.* Spatiotemporal response of *Salix matsudana*'s phenophases to climate change in China's temperate zone[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(11): 3625-3635.]
- [20] 丘宝剑, 卢其尧. 中国农业气候区划试论[J]. 地理学报, 1980, 35(2): 116-125. [Qiu B J, Lu Q Y. A tentative regionalization of agroclimate of China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1980, 35(2): 116-125.]
- [21] 中国气象局. 气象数据[EB/OL]. (2016-08-30)[2017-06-02]. <http://data.cma.cn/>. [China Meteorological Administration. Meteorological Data[EB/OL]. (2016-08-30)[2017-06-02]. <http://data.cma.cn/>.]
- [22] NOAA. Global Summary of the Day [EB/OL]. (2017-01-01)[2017-06-02]. <https://www7.ncdc.noaa.gov/CDO/cdoselect.cmd/>
- [23] Danielson J J, Gesch D B. Global Multi-Resolution Terrain Elevation Data 2010 (Gmted2010) [EB/OL]. (2010-09-01)[2017-06-02]. https://topotools.cr.usgs.gov/gmted_viewer.
- [24] Hutchinson M F, Xu T B. Anusplin Version 4. 2 User Guide[M]. Canberra: The Australian National University, 2004.
- [25] 钱永兰, 吕厚荃, 张艳红. 基于Anusplin软件的逐日气象要素插值方法应用与评估[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(2): 7-15. [Qian Y L, Lv H Q, Zhang Y H. Application and assessment of spatial interpolation method on daily meteorological elements based on Anusplin software[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2010, 26(2): 7-15.]
- [26] 韩湘玲, 孔扬庄. 关于“界限温度”确定方法的讨论[J]. 中国农业气象, 1984, 5(3): 55-57. [Han X L, Kong Y Z. The discussion of "Boundary temperature" determination[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1984, 5(3): 55-57.]
- [27] 曲曼丽. 农业气候实习指导[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1991. [Qu M L. Agro-climatic Internship Guide[M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1991.]
- [28] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007. [Wei F Y. Modern Climate Statistic Diagnosis and Forecasting Technique[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007.]
- [29] 刘翼浩, 韩湘玲. 中国的多熟种植[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1987. [Liu X H, Han X L. China's Multi-cropping[M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1987.]
- [30] 崔读昌, 曹广才, 张文, 等. 中国小麦气候生态区划[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1991. [Cui D C, Cao G C, Zhang W, *et al.* Climatological Ecological Divisions of Wheat in China[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1991.]
- [31] 龚绍先. 粮食作物与气象[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1988. [Gong S X. Grain Crop and Meteorology[M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1988.]
- [32] 杨晓光, 刘志娟, 陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响. i. 气候变暖对中国种植制度北界和粮食产量可能影响的分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(2): 329-336. [Yang X G, Liu Z J, Chen F. The possible effects of global warming on cropping systems in China. I. The possible effects of climate warming on northern limits of cropping systems and crop yields in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(2): 329-336.]
- [33] 杨晓光, 刘志娟, 陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响. VI. 未来气候变化对中国种植制度北界的可能影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(8): 1562-1570. [Yang X G, Liu Z J, Chen F. The possible effects of global warming on cropping systems in China. VI. Possible effects of future climate change on northern limits of cropping system in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(8): 1562-1570.]
- [34] 周广胜. 气候变化对中国农业生产影响研究展望[J]. 气象与环境科学, 2015, 38(1): 80-94. [Zhou G S. Research prospect on impact of climate change on agricultural production in China[J].

2017年11月

- Meteorological and Environmental Sciences*, 2015, 38(1): 80-94.]
- [35] 房世波, 韩国军, 张新时, 等. 气候变化对农业生产的影响及其适应[J]. 气象科技进展, 2011, 1(2): 17-21. [Fang S B, Han G J, Zhang X S, *et al.* Climate change affects crop production and its adaptation[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2011, 1(2): 17-21.]
- [36] 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[J]. 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[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(9): 1860-1867.]

Spatio-temporal variation of agricultural thermal resources at different critical temperatures in China's temperate zone

ZHANG Xuting, PAN Xuebiao, XU Lin, WEI Pei, HU Qi, YIN Ziwei, SHAO Changxiu

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Agricultural production is facing serious risks under global warming. The spatio-temporal variation of agricultural thermal resources is of great significance to examine agricultural ecological environment, crop pattern and cropping system. In this study, the data, including daily mean temperature, maximum temperature and minimum temperature, are obtained from 840 meteorological stations during 1960—2015 in China's temperate zone within a range of 200km. We analyzed spatio-temporal variation of agricultural thermal resources and changes in planting boundaries of double cropping regions, as well as winter wheat and spring maize. In addition, we, with the aid of ANUSPLIN interpolation software, used a deviation method to calculate start date, end date, the number of duration days, and accumulated temperature passing stably different critical temperatures (0°C, 5°C, 10°C, 15°C and 20°C). ANUSPLIN interpolation software was used in local statistical modeling of smooth thin plate spline function, considering longitude, latitude and altitude. Compared with the Inverse Distance Weight method and the Ordinary Kriging method, ANUSPLIN interpolation method was more suitable in the research on time series of meteorological data. Results show that it became the trend that start dates were advanced, end dates delayed, the number of duration days and accumulated temperature increased in China's temperate zone, and the greatest change was observed in areas with $\geq 15^{\circ}\text{C}$ thermal resources; start dates at different critical temperatures delayed from south to north, end dates were advanced, and the number of duration days and accumulated temperature decreased. The number of duration days, as well as accumulated temperature anomalies had a shift from negative value to positive value, and there were significant differences between 1960s—1980s and 2000s—2015; a rising trend was found in high value areas of thermal resources in middle and warm temperate zones, while a decreasing trend was in low value areas in cold temperate zone. Compared with period I (1960—1989), planting boundaries of double cropping regions, together with winter wheat and spring maize, tended to expand northward at period II (1990—2015) to a certain degree.

Key words: temperate zone; agriculture critical temperature; agricultural thermal resources; planting boundary; climate change; China