

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2014.02.001

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

# 1961-2010 年中国农业热量资源分布和变化特征\*

胡琦<sup>1,2</sup>, 潘学标<sup>1,2\*\*</sup>, 邵长秀<sup>1,2</sup>, 张丹<sup>1</sup>, 王潇潇<sup>1,2</sup>, 韦潇宇<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 农业部武川农业环境科学观测实验站, 呼和浩特 011705)

**摘要:** 利用全国 508 个气象站点 1961-2010 年地面气象观测资料, 采用气候倾向率和 GIS 方法研究了近 50a 全国尺度热量资源分布, 并比较分析 1961-1980 年 (I) 和 1981-2010 年 (II) 两个时段的热量资源变化特征。结果表明: 全国热量资源分布不均匀, 总体特征为南多北少, 东部主要受纬度的影响, 西部则受地形影响。与时段 I 相比, 时段 II 平均温度 0℃、10℃ 和 15℃ 等值线均存在北移现象; 日平均气温 ≥0℃ 和 ≥10℃ 的持续日数平均增加 5.5d 和 4.7d; 日平均气温 ≥0℃ 和 ≥10℃ 积温分布和变化趋势相似, 华南地区 5500~6100℃·d (≥0℃ 积温) 和 5300~6500℃·d (≥10℃ 积温) 积温带面积分别增加  $5.32 \times 10^4 \text{ km}^2$  和  $1.92 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。1961-2010 年, 平均温度气候倾向率为 0.27℃/10a, 增暖趋势显著, 且北方增暖趋势较南方明显; 最低、最高温度气候倾向率分别为 0.37℃/10a 和 0.21℃/10a。≥0℃ 积温和 ≥10℃ 积温增加趋势大体一致, 约为 70℃·d/10a。近 50a, 全国热量资源 (平均温度、最高、最低温度和积温) 呈增加趋势, 且最低温度变化幅度高于最高温度, 对气候增暖起主要作用。气候增暖将对农业生产的空间分布产生影响, 使基于原来指标和气候确定的农业气候区划边界与当前气候现实存在偏离, 研究热量资源的分布和变化对合理利用热量资源, 确定合适的农业气候指标和作物种植区域具有指导意义。

**关键词:** 热量资源; 温度; ≥0℃ 积温; ≥10℃ 积温

## Distribution and Variation of China Agricultural Heat Resources in 1961-2010

HU Qi<sup>1,2</sup>, PAN Xue-biao<sup>1,2</sup>, SHAO Chang-xiu<sup>1,2</sup>, ZHANG Dan<sup>1</sup>, WANG Xiao-xiao<sup>1,2</sup>, WEI Xiao-yu<sup>1,2</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Wuchuan Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment, Ministry of Agriculture, Huhhot 011705)

**Abstract:** Based on observed meteorological data from 508 stations in China, the distribution characteristics of heat resources were analyzed by using climatic trend rate and GIS methods in national scale in recent 50 years (1961-2010), and the change characteristics of heat resources between two periods (period I 1961-1980, period II 1981-2010) were compared. The results showed that the heat resources distributed unevenly, and more heat resources in southern China than that in northern China. The key influence factor in eastern China was latitude, while topography was key factor in western China. Counter lines of average daily temperature 0℃, 10℃ and 15℃ in period II moved northward comparing with period I, days of average daily temperature ≥0℃ and ≥10℃ increased 5.5d and 4.7d on average, respectively. The distribution and change of average daily temperature ≥0℃ was similar to that of accumulated temperature ≥10℃. The areas of the accumulated temperature zone of 5500-6100℃·d (≥0℃ accumulated temperature) and 5300-6500℃·d (≥10℃ accumulated temperature) increased by  $5.32 \times 10^4 \text{ km}^2$  and  $1.92 \times 10^3 \text{ km}^2$ , respectively. The climatic trend rate of average temperature was 0.27℃/10y in 1961-2010, and the climatic trend rate of maximum and minimum temperature was 0.37℃/10y and 0.21℃/10y in northern China. The accumulated temperature ≥0℃ and ≥10℃ increased 70℃·d/10y. The heat resources (mean temperature, minimum and maximum temperature, accumulated temperature) in China showed a increasing tendency in recent 50 years, and minimum temperature played

\* 收稿日期: 2013-08-14 \*\* 通讯作者。E-mail: panxb@cau.edu.cn

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2012CB956204); 国家自然科学基金项目 (41271053); 国家“十二五”科技支撑计划课题 (2012BAD09B02; 2012BAD20B04)

作者简介: 胡琦 (1987-), 山东人, 博士生, 研究方向为旱地降水的高效利用、农业减灾。E-mail: s10020292@cau.edu.cn

a major role on climate warming, whose variation degree was larger than that of maximum temperature. Climate warming might have some impacts on agricultural production and agro-climatic zone (including introduction, maturity-type shift and planting area expansion, etc.). The research result was helpful to determine the appropriate agro-climatic indexes and crop cultivation area.

**Key words:** Heat resources; Temperature;  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  accumulated temperature;  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  accumulated temperature

全球正经历以变暖为主要趋势的气候变化<sup>[1-2]</sup>, IPCC 第4次评估报告指出,全球平均温度在过去 100a (1906–2005 年)上升了  $0.74^{\circ}\text{C}$ , 20 世纪 50 年代以来变暖趋势尤为明显<sup>[3]</sup>。中国最近 50a (1951–2001 年)平均地表气温增加  $1.1^{\circ}\text{C}$ , 增温速率为  $0.22^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ , 明显高于全球或北半球同期平均增温速率, 且主要增暖发生在 20 世纪 80 年代后期<sup>[4]</sup>。气候增暖引起热量资源的变化<sup>[5-7]</sup>, 对农业生产将产生一定影响<sup>[8-15]</sup>。

目前,针对不同地区的热量资源变化进行了许多研究,这些研究主要选取平均温度<sup>[16-17]</sup>、温度日较差<sup>[18]</sup>、最高最低温度<sup>[19-20]</sup>和积温等作为热量指标。研究区域既有涵盖各区域(东北<sup>[21-22]</sup>、华北<sup>[23]</sup>、西北<sup>[24]</sup>、华南<sup>[25]</sup>、西南<sup>[26]</sup>等)的分析,也有针对某省<sup>[27-29]</sup>、市(县)<sup>[30]</sup>的分析,研究内容涉及农业气候资源的分布与利用、作物生长季内热量资源的变化特征及其对作物生产、种植和耕作制度的影响等方面。但目前的研究很少涉及全国尺度,缺乏对气候变化背景下近几十年中国大陆总体农业热量资源的分布情况与变化特征的分析,特别是利用平均温度、最高最低温度及其持续日数和积温等热量资源综合分析研究气候变化对全国热量资源的影响研究较少。

本文拟利用中国大陆地区 508 个气象站点 1961–2010 年的观测资料,选取平均温度、日平均气温  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  ( $10^{\circ}\text{C}$ )持续日数、最高最低温度和积温等作为热量指标,研究近 50a 中国热量资源的空间分布特征,比较分析 1961–1980 年(I)和 1981–2010 年(II)两个时段热量资源的变化特征,旨在明确气候变化背景下全国热量资源的分布现状及其已发生的变化,为合理开发和利用热量资源、规避可能的气候风险提供科学依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 数据来源及预处理

选取全国具有 1961–2010 年逐日气象资料的气象台站,总计 508 个,分布于 30 个省、自治区和直辖市(台湾省、香港和澳门特别行政区缺资料,未包括)(图 1)。各站气象资料来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)。利用 FORTRAN 编程读取 508 个气象台站的逐日气象资料,对缺测的平均温度、最低最高温度资料进行订正。

若缺测序列  $\leq 5\text{d}$ , 缺测值采用前 5 日平均值取代;若缺测序列大于或等于 5d, 缺测值则采用后 5a 同一日值的平均值取代。

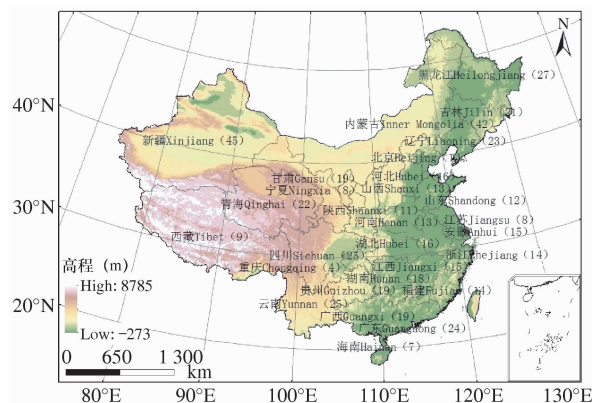


图 1 研究区气象站点数分布

Fig. 1 Distribution of the meteorological stations in the study area

注:各省(市、区)后括号内数据为该省气象台站数

Note: Meteorological station number of each province (cities, district) is shown in bracket

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 活动积温计算

活动积温( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ )指某一时期内大于(包括等于)生物学下限温度的日平均温度的总和,即

$$A = \sum_{i=1}^N T_i \quad (T_i \geq B) \quad (1)$$

式中,  $T_i$  为时段中第  $i$  天的日平均温度,  $B$  为生物学下限温度,  $N$  为计算时段的天数。

采用 5 日滑动平均法确定  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  (喜凉作物)和  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  (喜温作物)界限温度的起止日期,计算稳定通过  $0^{\circ}\text{C}$  和  $10^{\circ}\text{C}$  的持续日数和活动积温等热量要素。

#### 1.2.2 气候倾向率计算

用  $X$  表示样本量为  $n$  的某一气候要素,用  $t$  表示对应的年序,拟合得到一元线性回归方程

$$X = at + b \quad (t = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

式中,  $a$  为回归系数,本文采用最小二乘法估算,以  $a$  的 10 倍作为气象要素的气候倾向率。

采用  $F$  检验法对拟合的回归方程进行显著性检验( $\alpha = 0.05$ )。

### 1.3 数据处理

研究区面积大,地形复杂,而热量资源空间分布

受地形地势的影响显著,因此,研究时按宏观地形分为东部和西部地区,东部包括东北(黑、吉、辽)、华北(冀、京、津、内蒙古、鲁、晋)、华东(苏、浙、皖、沪)、华中(豫、湘、鄂、赣)、华南(粤、琼、闽、桂);西部包括西北(陕、甘、青、新、宁)和西南(蜀、滇、黔、藏、渝)。计算所有站点1961-2010年温度(年平均温度、年平均最高和最低温度)、日平均气温稳定通过 $0^{\circ}\text{C}$ 和 $10^{\circ}\text{C}$ 的持续日数、 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温、温度和积温的气候倾向率。热量资源要素的平均值为研究时段内的多年平均值,全国热量资源要素的平均值为研究时段内508个站点的多年平均值。将1961-2010年分为2个研究时段,时段I为1961-1980年,时段II为1981-2010年,采用ArcGIS软件反距离权重插值法(inverse distance weighted interpolation, IDW)对气候要素进行空间插值,设定Cell size参数均为0.02。

## 2 结果与分析

### 2.1 近50a热量资源的平均分布状态

#### 2.1.1 年平均温度

由图2a可见,1961-2010年,各地多年的年平均温度在 $-4.5 \sim 26.7^{\circ}\text{C}$ ,差别较大。温度分布主要受纬度和地形的影响,东部地区温度沿纬向从南向北梯度减少。 $20^{\circ}\text{C}$ 等值线约在 $25^{\circ}\text{N}$ 附近,等值线以南为广东、广西、海南等省,年平均气温较高,等值线以北年平均温度逐渐降低。 $20^{\circ}\text{C}$ 界限温度是热带作物生长的指标温度,也是大秋喜温作物灌浆的适宜下限温度,如水稻栽培地区必须将水稻的抽穗扬花期安排在 $\geq 20^{\circ}\text{C}$ 的时段。 $25 \sim 32^{\circ}\text{N}$ 的华南丘陵地区、长江流域等地,年平均温度为 $15 \sim 20^{\circ}\text{C}$ ;华北平原黄河下游地区年平均温度为 $10 \sim 15^{\circ}\text{C}$ 。 $10^{\circ}\text{C}$ 等值线大体与东部二、三阶梯分界线—太行山脉一致,华北平原以北的内蒙古高原和黄土高原,因地势陡升,年平均温度下降较快,为 $5 \sim 10^{\circ}\text{C}$ 。东北地区,受大兴安岭的影响,同纬度东部地区温度大于西部地区,辽宁、吉林大部分地区年平均温度为 $5 \sim 10^{\circ}\text{C}$ ,黑龙江东部、内蒙古中部地区温度为 $0 \sim 5^{\circ}\text{C}$ 。 $0^{\circ}\text{C}$ 等值线穿过黑龙江北部大小兴安岭地区,年平均温度小于 $0^{\circ}\text{C}$ 。西部地区,年平均温度分布受地形地势的影响显著。新疆地区总体趋势是北疆低于南疆,温度分布与山脉、盆地地形有关。贵州高原大部地区海拔高度在1000m左右,年平均温度为 $10 \sim 15^{\circ}\text{C}$ ,较同纬度的东部地区温度偏低;受云南高原的影响,云南地区南北温度差异大,如云南省南部的元江站( $23.60^{\circ}\text{N}, 101.98^{\circ}\text{E}$ )年平均温度 $23.8^{\circ}\text{C}$ ,而北部的德钦站( $28.48^{\circ}\text{N}, 98.92^{\circ}\text{E}$ )小于 $10^{\circ}\text{C}$ 。

#### 2.1.2 界限温度持续日数

日平均气温 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 持续日数可以代表农业生产期长度,即适宜农耕期,是气候生长期的重要指标;日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的持续期是喜温作物的生长期,也是喜凉作物的旺盛生长期。

由图2b可见,各地 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 持续日数基本分布特征为南多北少,同纬度地区东部大于西部,低海拔地区大于高海拔地区。在所选气象站点中,共有91个气象站点全年日平均气温稳定通过 $0^{\circ}\text{C}$ 持续日数为365d,主要分布在华南和云南大部以及

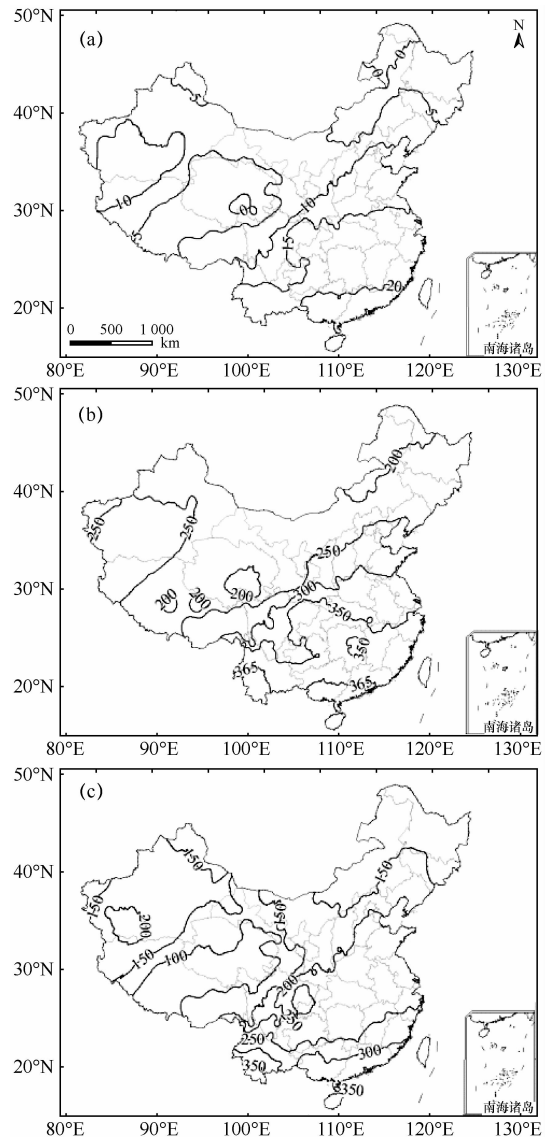


图2 1961-2010年年平均温度(a,  $^{\circ}\text{C}$ )、 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 持续日数(b, d)和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 持续日数(c, d)分布示意图

Fig. 2 Distribution of annual average temperature (a,  $^{\circ}\text{C}$ ), duration days of  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  (b, d) and  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  (c, d) in China in 1961-2010

注: 缺港澳台数据,下同

Note: Missing data on Hong Kong, Macao and Taiwan, the same as below

四川盆地等;由此以北至  $30^{\circ}\text{N}$  的大部地区,  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  持续日数为 350 ~ 365d;秦岭—淮河附近的江苏、安徽、河南、山东西南部地区为 300 ~ 350d;华北平原中北部 250 ~ 300d,内蒙古大部、东北三省为 200 ~ 250d,内蒙古东北部、东北地区的大、小兴安岭  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  持续日数小于 200d。西部地区,新疆塔里木盆地等地区,受天山山脉屏障作用,  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  持续日数为 250 ~ 300d,大于周围地区;青藏高原地区地形起伏大,地区间差异大,西藏东南小部地区为 300 ~ 350d,向西北不断减少;贵州受云贵高原的影响,  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  持续日数为 300 ~ 350d。

由图 2c 可见,研究站点中全年日平均气温均大于  $10^{\circ}\text{C}$  的气象站点有 6 个,分布在海南岛(5 个)和云南西部(1 个),持续日数为 365d,由此向北,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  持续日数逐渐减少。浙江南部、江西中南部、湖南南部、贵州南部一线(250d 等值线,图 2c)以南的地区,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  持续日数为 250 ~ 365d;  $25^{\circ}\text{N}$  以北至太行山脉的广大地区为 200 ~ 250d;四川盆地受地形的影响,冬季冷空气不易入侵,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  持续日数大于 250d,较周围地区高;辽宁、河北、陕西、山西、内蒙古中部地区为 150 ~ 200d,内蒙古中部和东部、吉林、黑龙江地区为 100 ~ 150d。天山以南的新疆地区为 150 ~ 200d,塔里木和吐鲁番盆地为 200 ~ 250d;青藏高原受地形的影响,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  持续日数较少,部分地区甚至没有日平均

气温稳定通过  $10^{\circ}\text{C}$  的时期。

### 2.1.3 年平均最高、最低温度

由图 3a 可见,全国年平均最低温度范围为  $-12.6 \sim 25.0^{\circ}\text{C}$  呈纬向分布,由北向南逐渐变大。东部地区,大兴安岭的东北部年平均最低温度小于  $-5.0^{\circ}\text{C}$ ,全国年平均最低温度最小的地区出现在内蒙古的图里河,为  $-12.6^{\circ}\text{C}$ ;内蒙古大部、黑龙江等地区为  $-5.0 \sim 0.0^{\circ}\text{C}$ ;东北的辽河平原、松嫩平原,黄土高原以南至太行山脉等地区为  $0.0 \sim 5.0^{\circ}\text{C}$ ;华北平原以南至秦岭—淮河附近的中东部广大区域,年平均最低温度为  $5.0 \sim 13^{\circ}\text{C}$ ,其中四川盆地受地形影响最低温度较周围地区高;秦岭—淮河以南的华中地区温度为  $13.0 \sim 15.0^{\circ}\text{C}$ ,华南两广、福建、海南等地区温度大于  $15^{\circ}\text{C}$ 。西南地区,受云贵高原和云南高原的影响,除云南南部最低温度大于  $13.0^{\circ}\text{C}$  外,其余地区为  $5.0 \sim 13.0^{\circ}\text{C}$ 。西北的新疆地区最低温度分布特殊,北疆纬度高且冬季多受西伯利亚寒流的影响,最低温度为  $0.0 \sim -5.0^{\circ}\text{C}$ ;南疆因天山山脉阻挡冷空气入侵使最低温度较北疆大。由图 3b 可见,年平均最高温度分布趋势与最低温度相似,但北方地区受夏季日照时数长的影响,可以获得较强的太阳总辐射,因此,全国最高温度的南北差异比最低温度小。全国近 50a(1961 ~ 2010 年)年平均最高温度  $1.9 \sim 30.6^{\circ}\text{C}$ ,平均为  $17.4^{\circ}\text{C}$ ,热量资源丰富。

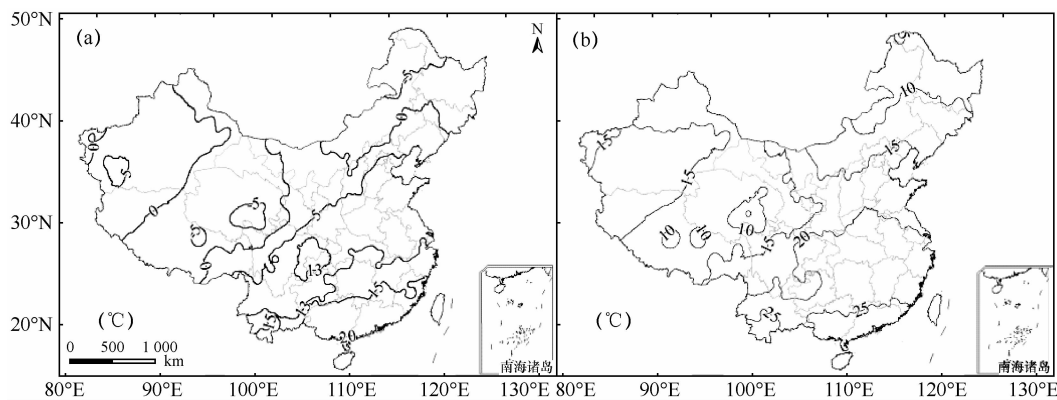


图 3 年平均最低温度(a)和最高温度(b)分布示意图(1961–2010)

Fig. 3 Distribution of annual mean minimum temperature(a), maximum temperature(b) in China in 1961–2010

### 2.1.4 界限温度积温

日平均气温  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  和  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温,可以分别反映喜凉作物和喜温作物生长期的热量状况。  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  和  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温分布趋势为南高北低,东高西低。东部地区受纬度的影响,等值线沿纬向分布,西部地区受地形(高原、盆地、山地)等影响明显,等值线多沿等高线分布。

由图 4a 可见,1961–2010 年,全国日平均气温  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温范围为  $635.7 \sim 9781.3^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ,东北的大兴安

岭地区不足  $2500^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ,是中国东部热量资源最少的地区;东北平原、内蒙古地区为  $2500.0 \sim 4000.0^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ;华北平原为  $4000.0 \sim 5000.0^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 。长江中下游附近为  $5500.0 \sim 6000.0^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ,上游四川盆地受地形影响积温约为  $6000.0^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ,云贵高原因地势海拔较高,日平均气温  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温在  $4000.0 \sim 5500.0^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ,热量资源小于同纬度东部地区。两广、云南南部、海南等地区  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温在  $7000.0^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$  以上。西北地区,南疆地区

日平均气温 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温在 $4000.0 \sim 5500.0^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,热量条件较好,其它地区在 $4000.0^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 以下。由图4b可见,全国 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温范围为 $0.0 \sim 9781.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,分布趋

势与 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温大体一致。西藏的日喀则气象站是研究站点中唯一全年均无稳定通过 $10^{\circ}\text{C}$ 的站点, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温为 $0.0^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。

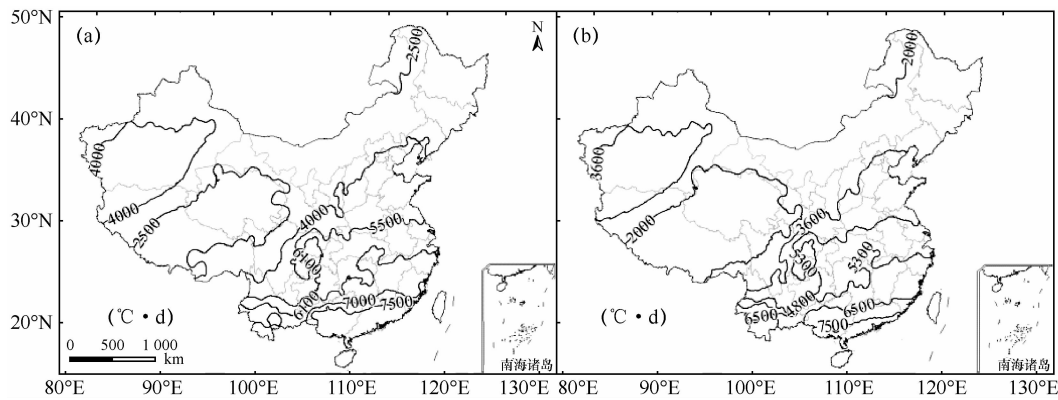


图4 日平均气温 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温(a)和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温(b)分布示意图(1961-2010)

Fig. 4 Distribution of  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  accumulated temperature(a) ,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  accumulated temperature(b) in China in 1961-2010

2.2 近50a 热量资源的时段变化特征

2.2.1 年平均温度

由图5a、b可见,全国时段I(1961-1980年)与时段II(1981-2010年)的年平均温度分布趋势大体一致,但时段II中相同数值温度线明显比时段I向北偏移。东北地区大兴安岭北端的 $0^{\circ}\text{C}$ 等值线北移, $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 面积减少了 $1.46 \times 10^5 \text{ km}^2$ ;  $10^{\circ}\text{C}$ 等值线在陕西省及山西省北移最明显;江苏、安徽、河南一线的 $15^{\circ}\text{C}$ 等

值线北移较明显; $20^{\circ}\text{C}$ 等值线仍位于 $25^{\circ}\text{N}$ 附近,变化较小。近50a(1961-2010年)全国平均温度增加了 $1.3^{\circ}\text{C}$ ,平均温度气候倾向率平均值为 $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,473个气象站点通过了显著性检验,占研究站点数的93.3%。北方温度变化比南方显著,东北地区、华北北部、西北大部分地区以及青藏高原等地区气候倾向率大于 $0.30^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,华北以南的华东、华中、华南以及西南(除西藏外)倾向率小于 $0.30^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

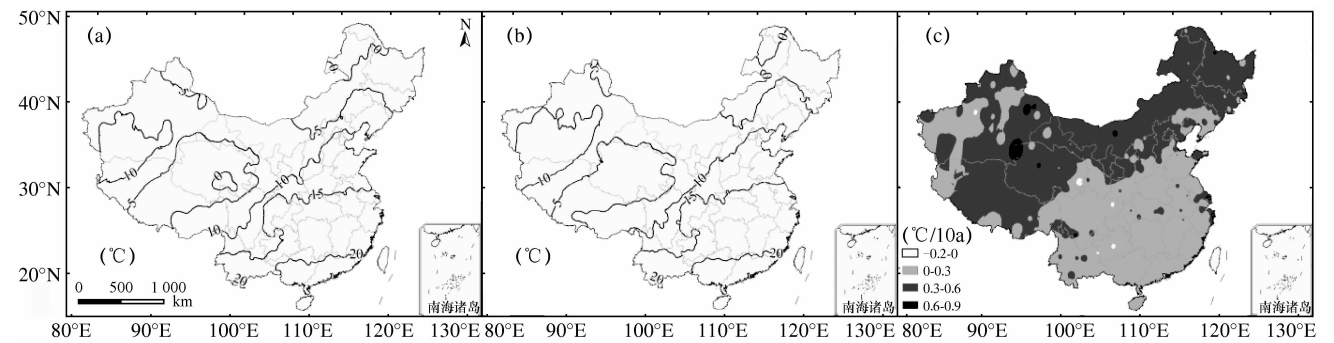


图5 不同时段(a:1961-1980;b:1981-2010)年平均温度平均值及年平均温度的气候倾向率(c:1961-2010)分布示意图  
Fig. 5 Distribution of average value of annual temperature in different periods (a:1961-1980;b:1981-2010) and its climatic trend rate(c:1961-2010) in China

2.2.2 年平均最高、最低温度

由图6a1、b1可见,1961-1980年全国年平均最低温度在 $-13.2 \sim 24.6^{\circ}\text{C}$ (西沙地区为 $24.6^{\circ}\text{C}$ ,图中未显示),平均为 $6.1^{\circ}\text{C}$ ;而1981-2010年平均最低温度明显上升,全国年平均最低温度 $-12.0 \sim 25.2^{\circ}\text{C}$ (西沙地区为 $25.2^{\circ}\text{C}$ ),平均为 $7.0^{\circ}\text{C}$ 。由图6c1可见,1960-2010年全国年平均最低温度增加了 $1.9^{\circ}\text{C}$ ,气候倾向率平均值为 $0.37^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,通过显著性检验的气象站点占研究站点数的96.1%( $n=487$ );年平均

温度较低的北方和西北地区,气候变化增暖趋势明显;东部和南部地区气候倾向率较小,在 $0.30^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 以下。

由图6a2、b2可见,年平均最高温度在两个时段内的变化不如最低温度变化明显。1960-2010年,全国年平均最高温度增加了 $1.1^{\circ}\text{C}$ ,最高温度气候倾向率平均值为 $0.21^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,通过显著性检验的气象站点占80.7%( $n=409$ ),升温幅度不如最低气温明显(图6c2)。自东北大小兴安岭往南至黄土高原地区,

以及甘肃、青海等地区,最高温度变化幅度最大,气候倾向率大于  $0.30^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。冀鲁豫部分地区和南方绝大部分地区,最高温度变化幅度较小,气候倾向率小于  $0.15^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

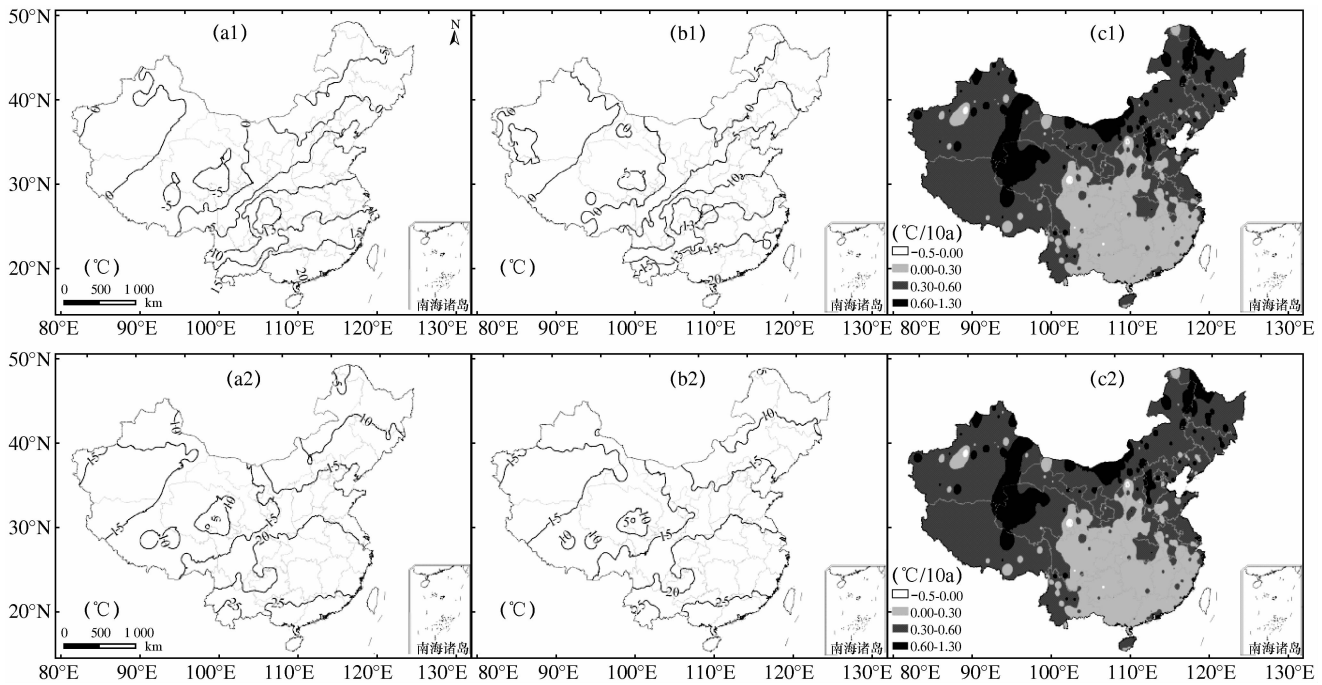


图 6 不同时段 (a:1961 – 1980;b:1981 – 2010) 最低温度 (1) 和最高温度 (2) 及其气候倾向率 (c:1961 – 2010) 分布示意图  
Fig. 6 Distribution of average value of the minimum temperature(1),maximum temperature(2) in different periods (a:1961 – 1980;b:1981 – 2010) and its climatic trend rate(c:1961 – 2010) in China

2.2.3 界限温度持续日数

由图 7a 可见,与时段 I 相比,时段 II 日平均气温  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  的持续日数平均增加 5.5d。东部的环渤海地区和东海的江苏、上海、浙江等地区,西部的青藏高原南麓、新疆、青海等部分地区  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  的持续日数增加 10d 以上;云南、两广、海南等地区  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  的

持续日数为 365d,故  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  的持续日数没有增加。由图 7b 可见,与时段 I 相比,时段 II 日平均气温  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  的持续日数平均增加 4.7d,持续日数减少的站点集中在贵州西部、重庆等地区,青海、西藏南缘、四川盆地和云南等部分地区  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  的持续日数增加 10d 以上。

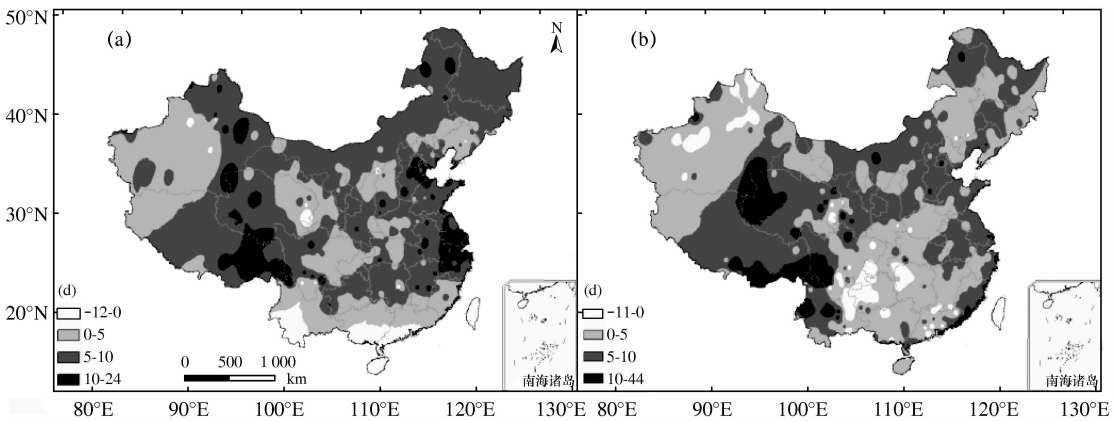


图 7 时段 II 与时段 I  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  (a) 和  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  (b) 持续日数的差值  
Fig. 7 Difference of duration days of  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  (a) and  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  (b) between period II and period I

2.2.4 界限温度积温

由图 8a1、b1 可见,与时段 I 相比,时段 II 日平均气温  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温的  $5500.0^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$  等值线北移 0 ~

$0.5^{\circ}$ ,  $5500.0 \sim 6100.0^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$  面积增加了  $5.32 \times 10^4 \text{km}^2$ , 大兴安岭  $\leq 2500^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$  的区域面积减少了  $1.05 \times 10^3 \text{km}^2$ 。图 8a2、b2 可见,华南北部日平均气温



$\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温的  $5300.0^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$  等值线北移,  $5300.0 \sim 6500.0^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$  面积增加  $1.92 \times 10^3 \text{ km}^2$ , 西部青藏高原边缘积温增加。

1961-2010年,日平均气温 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温倾向率为 $-43.6 \sim 285.7^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}/10\text{a}$ ,平均为 $69.6^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}/10\text{a}$ ,92.1%的站点( $n=467$ )通过显著性检验(图8c1);日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温倾向率为 $-50.1 \sim 308.1^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}/10\text{a}$ ,平均为 $71.1^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}/10\text{a}$ ,仅76.9%的站点( $n=390$ )通

过显著性检验(图8c2)。 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温倾向率分布均是东部地区北方大于南方,东海沿岸地区大于同纬度东部内陆地区;西部则相反,北部地区小于南部地区。新疆、青海、云南、东海海域等地区有明显的高值区, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温倾向率均显著大于 $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}/10\text{a}$ 。研究站点中, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温倾向率显著小于0的站点分别仅有1个和3个,分布在新疆和贵州省。

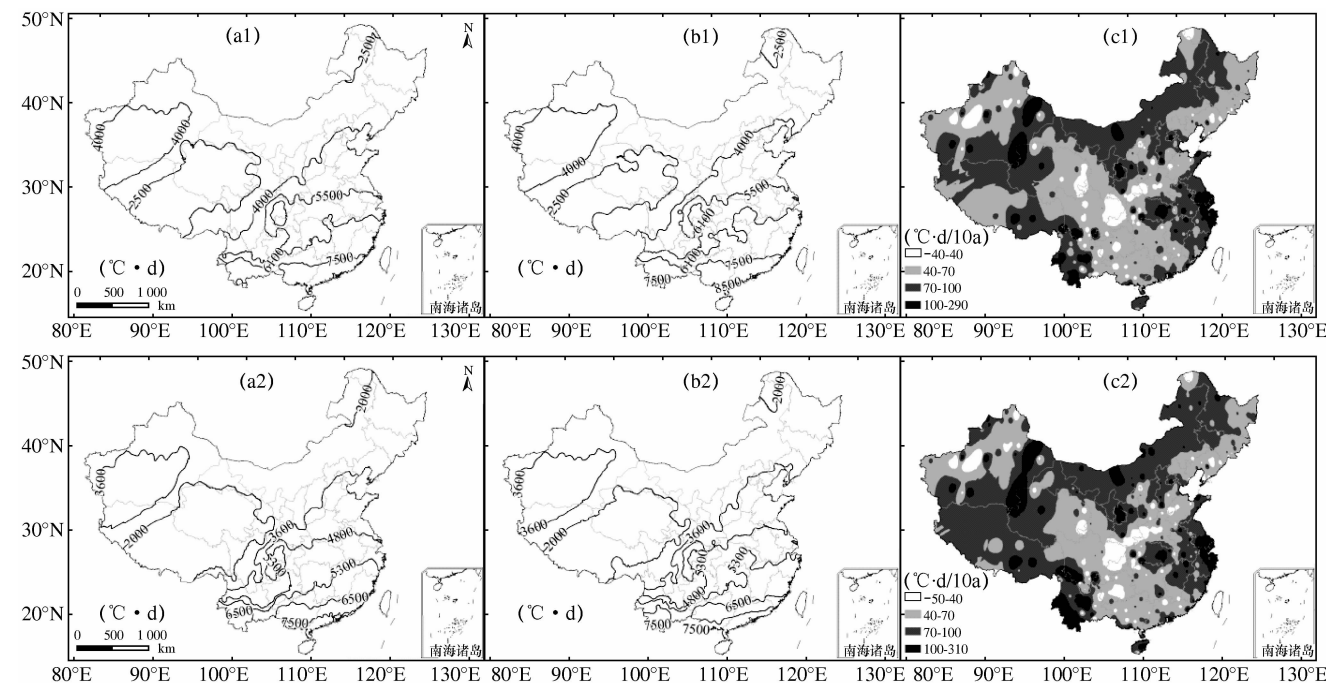


图8 不同时段(a:1961-1980;b:1981-2010) $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温(1)和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温(2)及其气候倾向率(c:1961-2010)的变化  
Fig. 8 Distribution of  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  accumulated temperature(1),  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  accumulated temperature(2) in different periods (a:1961-1980;b:1981-2010) and its climatic trend rate(c:1961-2010) in China

### 3 结论与讨论

全国热量资源分布不均匀,主要受纬度和地形影响,东部地区热量等值线沿纬向分布,西部地区则多与等高线平行,由此形成了不同的气候区。1961-2010年,全国各地年平均温度为 $-4.5 \sim 26.7^{\circ}\text{C}$ , $0^{\circ}\text{C}$ 等值线穿过黑龙江北部大小兴安岭地区, $10^{\circ}\text{C}$ 等值线大体与二、三阶梯分界线平行, $20^{\circ}\text{C}$ 等值线在 $25^{\circ}\text{N}$ 附近。 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 持续日数基本分布特征为南多北少,同纬度地区东部大于西部,低海拔地区大于高海拔地区。

研究表明,与时段II(1961-1980年)相比,时段I(1981-2010年)的 $0^{\circ}\text{C}$ 、 $10^{\circ}\text{C}$ 、 $15^{\circ}\text{C}$ 温度等值线均存在向北偏移的现象;日平均气温 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温 $5500.0^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 等值线北移导致大兴安岭地区 $\leq 2500.0^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 的积温带面积减少了 $1.05 \times 10^3 \text{ km}^2$ ;华南北部日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 $5300.0^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 等值线北移等。这些变化表

明气候变化背景下,时段II较时段I热量资源有增加的趋势,这与IPCC在2013年发布的第5次评估报告决策者摘要中的表述一致<sup>[31]</sup>,这些热量资源分布的变化对农业生产和农业区划,包括引种、作物种植熟制界限北移和种植区域扩展将产生一定影响。

1961-2010年,全国平均温度增加了 $1.3^{\circ}\text{C}$ ,气候倾向率为 $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,较之前研究倾向率(1961-2005年)增加了 $0.05^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ <sup>[4]</sup>,表明最近几年增暖趋势加快,且北方增暖趋势较南方明显,年平均最低、最高温度变化亦有类似的趋势。全国最低温度增加了 $1.9^{\circ}\text{C}$ ,最低温度气候倾向率平均值为 $0.37^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ;最高温度增加了 $1.1^{\circ}\text{C}$ ,气候倾向率为 $0.21^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。最低温度变化幅度高于最高温度,对气候增暖的贡献因子较大。日平均气温 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温倾向率分别为 $69.6^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}/10\text{a}$ 、 $71.1^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}/10\text{a}$ 。对 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温倾向率高于 $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}/10\text{a}$ 的站点研究发

现,  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温的增加与平均温度的变化呈一定正相关关系(相关系数  $r = 0.60$ ,  $n = 66$ ), 与  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  持续日数的相关性较低( $r = 0.19$ ); 但  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温的增加则是平均温度升高( $r = 0.60$ )和  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  持续日数( $r = 0.61$ )增加共同作用的结果, 然而,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温减少仅与  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  持续天数变化呈较高的正相关( $r = 0.72$ ,  $n = 9$ ), 与平均温度变化相关性不高( $r = 0.23$ )。需要指出的是, 研究选取的 508 个气象站点并不能代表中国大陆所有的区域, 且西部地区气象站点数较少, 特别是青藏高原一带, 采用 GIS 反距离权重进行数据插值的结果代表性较差, 导致结果和结论存在一定的局限性。

气候变暖引起积温资源的增加对农业引种和品种推广有着积极的作用, 如东北地区春玉米种植界限北移, 且不同地区春玉米成熟品种类型发生了改变<sup>[32]</sup>, 秦岭、淮河以南的亚热带一年两熟到三熟界限北移, 西藏边缘  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温增加喜温作物适宜区增大等<sup>[11, 25, 27]</sup>, 有利于发展农业多样性和提高耕地复种指数。但是气候变化导致现有的一些农业气候指标可能不再适合指导农业生产。因此, 根据现有热量分布条件重新确定合适有效的气候指标和作物种植区划有着重要的科学意义和实用价值。同时, 气候增暖也会给农业生产和生态环境带来消极影响, 使原有的农业灾害加重, 如长江中下游地区水稻高温热害造成水稻结实率下降及稻米品质降低, 宁夏、甘肃等西部地区春麦干热风发生的时间和范围改变等<sup>[33-34]</sup>。此外, 一些病虫害活动的地理范围也会随着气候增暖而产生变化, 使防治难度增加<sup>[35]</sup>, 同时, 高温还容易引发森林火灾。需要指出的是, 本文仅从热量资源分布和变化的角度, 讨论了气候增暖对农业可能带来的影响, 但气候变化会影响诸多气象条件(降水资源、辐射资源等)和极端天气事件发生频率等, 这些对农业生产和种植制度界限都会产生影响, 需进一步综合研究气候变化对农业的影响, 并提出相应的适应性对策。

## 参考文献:

- [1] 任国玉, 姜彤, 李维京, 等. 气候变化对中国水资源情势影响综合分析[J]. 水科学进展, 2008, 19(6): 772-779.
- [2] 秦大河, 罗勇, 陈振林, 等. 气候变化科学的最新进展: IPCC 第四次评估综合报告解析[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(6): 311-314.
- [3] IPCC. Climate change 2007: synthesis report[R]. Oslo: Inter Government Panel on Climate Change, 2007.
- [4] 丁一汇, 任国玉, 石广玉. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8.
- [5] 刘实, 王勇, 缪启龙, 等. 近 50 年东北地区热量资源变化特征[J]. 应用气象学报, 2010, 21(3): 266-278.
- [6] 刘晓英, 林而达. 东北地区农作物生长期温度变化的时空特征[J]. 中国农业气象, 2003, 24(1): 11-14.
- [7] 孙兰东, 刘德祥. 西北地区热量资源对气候变化的响应特征[J]. 干旱气象, 2008, 26(1): 8-12.
- [8] 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): 166-174.
- [9] 贾建英, 郭建平. 东北地区近 46 年玉米气候资源变化研究[J]. 中国农业气象, 2009, 30(3): 302-307.
- [10] 马树庆, 安刚, 王琪, 等. 东北玉米带热量资源的变化规律研究[J]. 资源科学, 2000, 22(5): 41-45.
- [11] 赖纯佳, 千怀遂, 段海来, 等. 淮河流域小麦-水稻种植制度的气候适宜性[J]. 中国农业科学, 2011, 44(14): 2868-2875.
- [12] 姚小英, 蒲金涌, 姚茹莘, 等. 气候暖干化背景下甘肃旱作区玉米气候适宜性变化[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 59-67.
- [13] 段海来, 千怀遂, 李明霞, 等. 中国亚热带地区柑桔的气候适宜性[J]. 应用生态学报, 2010, 21(8): 1915-1925.
- [14] 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[J]. 自然资源学报, 2005, 20(1): 119-125.
- [15] 王志伟, 马雅丽, 王润元, 等. 气候变暖对西北地区棉花生长发育的影响分析[J]. 中国农学通报, 2012, 28(15): 42-45.
- [16] 乜国妍, 秦宁生, 汪青春, 等. 青海高原地区近 250a 来年平均气温变化及突变分析[J]. 干旱气象, 2007, 25(2): 55-60.
- [17] 刘盛梅, 成鹏. 乌鲁木齐地区近 50 年来平均气温及极端气温变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(6): 138-146.
- [18] 陈铁喜, 陈星. 近 50 年中国气温日较差的变化趋势分析[J]. 高原气象, 2007, 26(1): 150-157.
- [19] 翟盘茂, 任福民. 中国近四十年最高最低温度变化[J]. 气象学报, 1997, 55(4): 418-429.
- [20] 杨文峰. 陕西省近 40 年最高最低温度变化[J]. 气象科技, 2006, 34(1): 68-72.
- [21] 刘志娟, 杨晓光, 王文峰, 等. 气候变化背景下我国东北三省农业气候资源变化特征[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2199-2206.
- [22] 冷明珠, 郭建平, 袁摇彬. 气候变化背景下东北地区热量资源及玉米温度适宜度[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2786-2794.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 李勇, 杨晓光, 王文峰, 等. 气候变化背景下中国农业气候



- 资源变化 I : 华南地区农业气候资源时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2605-2614.
- [26] 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.
- [27] 徐华军, 杨晓光, 王文峰, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化 VII : 青藏高原干旱半干旱区农业气候资源变化特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1817-1824.
- [28] 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(增 1): 19-24.
- [29] 程建刚, 王学锋, 范立张, 等. 近 50 年来云南气候带的变化特征[J]. 地理科学进展, 2009, 28(1): 18-24.
- [30] 阎琦, 吕晓丹, 朱宇, 等. 1951 – 2005 年鞍山气候变化特征分析[J]. 气象与环境学报, 2007, 23(6): 15-19.
- [31] IPCC. IPCC 第五次评估报告第一工作组第 12 次会议批准决策者摘要[R]. 斯德哥尔摩: 2013-09.
- [32] Zhao J, Yang X, Lv S, et al. Variability of available climate resources and disaster risks for different maturity types of spring maize in Northeast China[J]. Regional Environmental Change, 2013, (5): 1-10.
- [33] 刘德祥, 孙兰东, 宁惠芳. 甘肃省干热风的气候特征及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2008, 30(1): 81-86.
- [34] 武万里, 韩世涛. 气候变暖对宁夏小麦干热风的影响[J]. 宁夏农林科技, 2007, (1): 64-66.
- [35] 霍治国, 李茂松, 王丽, 等. 降水变化对中国农作物病虫害的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(10): 1935-1945.