

东北地区未来气候变化对农业气候资源的影响

初征¹, 郭建平^{1,2}, 赵俊芳²

(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要: 为探求未来气候变化对东北地区农业气候资源的影响, 本文基于区域气候模式系统输出的东北地区 IPCC AR5 提出的低辐射和高辐射强迫 RCP_4.5(低排放)、RCP_8.5(高排放)情景下 2005-2099 年气象资料, 通过与东北地区 1961-2010 年 91 个气象站点观测资料同化, 分析了历史资料(Baseline)、RCP_4.5、RCP_8.5 情景下东北地区农业热量资源和降水资源空间分布及其变化趋势。结果表明: ① 年均温度空间分布自南向北降低, 未来各地区温度均有升高, RCP_8.5 情景下升温更明显, Baseline 情景年均温度为 7.70 °C, RCP_4.5 和 RCP_8.5 年均温度分别为 9.67 °C、10.66 °C; 其他农业热量资源随温度变化一致, 具体 ≥ 10 °C 初日提前 3 d、4 d, 初霜日推迟 2 d、6 d, 生长季日数延长 4 d、10 d, 积温增加 400 °C·d、700 °C·d; 水资源稍有增加, 但不明显。② 历史增温速率为 0.35 °C/10a, 未来增温速率最快为 RCP_8.5 情景 0.48 °C/10a, 高于 RCP_4.5 的 0.19 °C/10a。21 世纪后期, RCP_8.5 增温趋势明显快于 RCP_4.5, 北部地区增温更加速。其他农业热量资源随温度变化趋势相一致, 但具体空间分布有所不同。生长季降水总体呈增加趋势, 但不显著, 年际间变化较大; 东部地区降水增加, 西部减少。未来东北地区总体向暖湿方向发展, 热量资源整体增加, 但与降水的不匹配可能将会对农业生产造成不利的影响。

关键词: 气候变化; 农业气候资源; 东北地区; 数据同化

DOI: 10.11821/dlxb201707010

1 引言

近年来, 以温度升高为代表的气候变化成为当今研究的热点问题, 其影响包括环境、农业和人类的生产生活等诸多方面^[1-3]。已有研究表明, 截止 2100 年, 全球平均升温 2 °C 以上成为可能^[4]。农业作为对气候变化最为敏感的领域, 受气候变化影响最为明显。光、热、水等农业气候资源的变化, 直接导致农业生产条件和生产水平的改变^[5], 最终决定农业的量与质^[6-7]。研究表明在过去 50 年中, 中国整体呈暖干趋势, 其中西南、华北、东北呈现为暖干趋势, 西北、华南为暖湿趋势^[8-11]。而受温度升高的影响, 可能导致中国小麦产量减少 15% 左右, 玉米也存在减产的可能^[12-13]; 降水的变化导致干旱与极端降水事件发生频率增高, 改变土壤湿度和土壤径流, 使农作物可利用水资源减少。因此, 农业气候资源的改变对粮食安全有举足轻重的作用。

对于未来气候变化 2014 年 IPCC 第五次评估报告 (AR5) 基于大气辐射强度 (2.6~8.5 w/m²) 设定, 提出了 4 种代表性浓度路径情景数据 RCPs 数据, 并首次融入了政策因

收稿日期: 2016-10-12; 修订日期: 2017-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(31371530); 江苏省研究生培养创新工程基金项目(KYLX_0846) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.31371530; Jiangsu Province Innovative Postgraduate Training Program, No.KYLX_0846]

作者简介: 初征(1985-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士, 主要从事农业气象相关研究。E-mail: chuzheng1985@126.com

通讯作者: 郭建平(1963-), 男, 博士, 研究员, 主要从事农业气象相关研究。E-mail: gjp@camsma.cn

素,其中包含RCP_2.6、RCP_4.5、RCP_6、RCP_8.5数据产品。相比于2007年第四次评估报告(AR4)的SRES情景数据,RCPs情景在对极端天气模拟表现效果更好^[14],在评估对天气日变化更为敏感的农业时,更能贴近真实情况。中国东北地区(黑龙江、吉林、辽宁以及内蒙古东四盟)作为气候变化显著区域,过去50年平均增温1.70℃,远高于全球平均增温幅度(0.74℃/100a)^[15];另一方面,东北耕地面积约占全国耕地面积的22.9%,粮食产量约占全国粮食产量的1/3,其中主要粮食作物水稻、玉米和大豆种植面积约为80%^[16],在中国粮食安全中起到重要作用。那么,未来气候变化对东北地区气候资源会产生怎样的影响?直接影响东北地区农业布局及粮食产量,影响中国粮食安全生产战略。而截止2015年,除了少数学者采用AR4提出的SRES情景资料,分析了辽宁和宁夏未来50年生长季的变化^[17-18],在有关未来多种气候变化情景下,东北气候资源的变化还没有相关的研究成果。本文采用IPCC第五次报告最新发布的RCPs未来情景数据,并结合历史资料(Baseline),精确地分析了气候变化影响下东北地区农业气候资源的时空演变,旨在为东北地区应对未来可能发生的气候变化,提供更合理的开发利用农业气候资源、指导农业生产的科学依据。

2 数据来源与处理

本文采用国家气候中心基于IPCC第五次评估报告(AR5)提出的大气辐射强度(2.6~8.5 w/m²),即RCP_rf、RCP_4.5、RCP_8.5这3种排放浓度驱动,采用BCC_CSM 1.0的区域气候模式,模拟的空间分辨率为0.5°×0.5°逐日气象要素的数据产品。其中,RCP_rf为当代情景数据,模拟时间序列为1951-2005年,主要用于数据同化;RCP_4.5为温室气体排放与经济均衡发展模式,发展优先等级为最高;RCP_8.5为温室气体排放最高路径。RCP_4.5、RCP_8.5模拟时间序列均为2006-2009年。

历史资料(Baseline)为1961-2010年东北地区91个气象站逐日气象资料,包括日平均气温、日最高气温、日最低气温、日降水量,来源于国家气象局气象资料共享网站。这部分历史资料主要用于模拟数据的验证。

模拟数据融合及验证过程:为了消除气候模式模拟结果存在的系统性误差,本文提出将模拟结果首先与历史同期资料进行同化的方法,以获取消除系统误差的新数据序列。具体为:对于连续变化的气候要素的同化方法为:

$$X_i = [\bar{X}(\text{同日历史实测数据平均}) - \bar{X}_i(\text{历史模拟数据平均})] + X_i(\text{某日模拟数据}) \quad (1)$$

对于非连续变化的气象要素的同化方法为:

$$X_i = X_i(\text{某日模拟数据}) \times \left(\frac{\bar{X}(\text{同旬历史实测平均})}{\bar{X}_i(\text{同旬历史模拟平均})} \right) \quad (2)$$

分别将同化后的年均气温(T)、年均最低气温(T_{\min})、年均最高气温(T_{\max})、年降水量(P)进行验证(表1、图1)。同化后的数据序列较同化前各要素的精度均有提高,误差减小,降水(P)绝对误差减少最多,精度提升99%; T_{\min} 和 T_{\max} 精度分别提升68%、92%; T 精度提高了36%,各气象要素的均方根误差RMSE,同化后较同化前均有减小(图2)。 P 、 T 、 T_{\max} 、 T_{\min} 下降幅度依次为50.01%、34.58%、13.94%、18.10%。可见,通过对气候模式的输出数据与历史观测数据的同化订正,使气候模式的输出结果更加接近于实际观测数据。因此,本文均采用公式(1)和(2)重新生成各要素数据序列,时间尺度仍为2006-2009年。

表1 RCP同化值与实测值对比

Tab.1 Comparison of simulated RCPs data and observational data

| | 实测值 | 同化前 | | | 同化后 | | |
|----------------------|--------|--------|--------|-------------|--------|------|-------------|
| | | 平均值 | 误差 | 均方根误差(RMSE) | 平均值 | 误差 | 均方根误差(RMSE) |
| 年降水量(P) | 547.50 | 959.95 | 412.45 | 1.1238 | 540.20 | 7.30 | 0.5616 |
| 年均温度(T) | 4.52 | 4.24 | 0.28 | 4.0893 | 4.70 | 0.18 | 2.9605 |
| 年均最低气温(T_{\min}) | -1.18 | -0.43 | 0.75 | 3.6150 | -0.94 | 0.24 | 3.4786 |
| 年均最高气温(T_{\max}) | 10.86 | 9.71 | 1.15 | 9.6059 | 11.07 | 0.21 | 8.2661 |

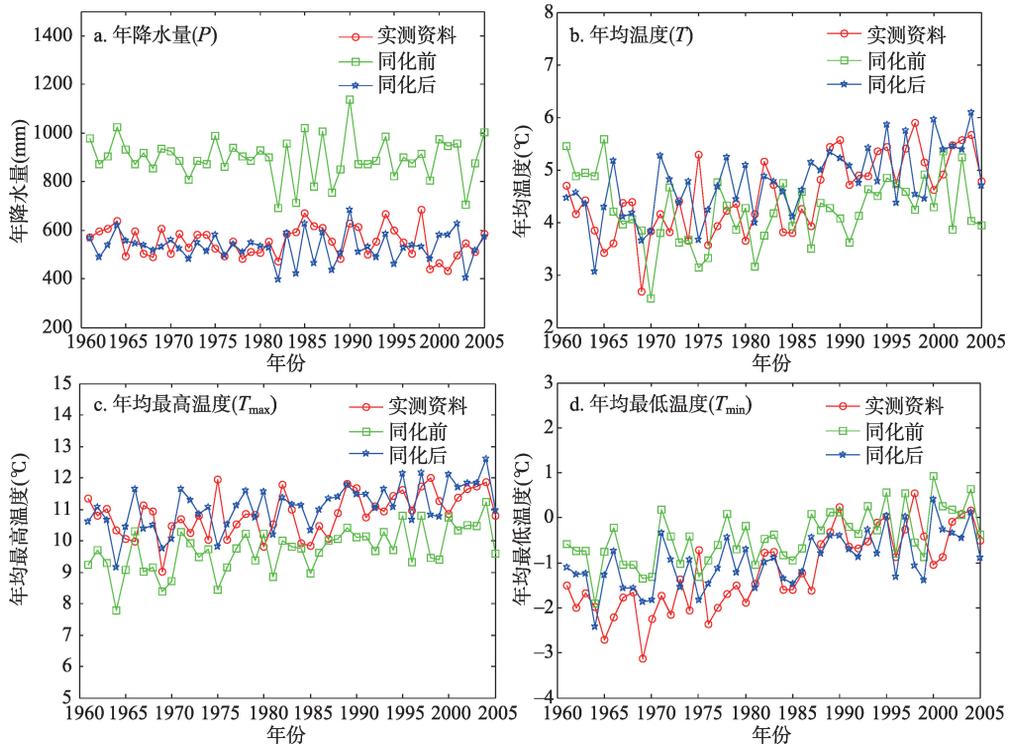


图1 各要素数据同化前、同化后与实测数据的比较图

Fig. 1 Comparison of assimilation RCPs data, non-assimilation RCPs data, and observational data for each factor

3 研究方法

3.1 农业界限温度

在东北地区,通常将 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 初日看作为作物开始生长的日期,初霜日为作物终止生长的日期,两者之间的天数作为可能生育期。确定界限温度出现日期具体过程为:采用5日滑动平均^[21],当滑动平均值持续大于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,选择第一个滑动平均值大于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的连续5日中,首个大于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的日期,作为 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的初日。初霜日为秋季出现日最低温度 $\leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的初日;认为 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 初日与初霜日之间的时间作物都可以生长发育,因此将此段时间称为可能生长季。

3.2 保证率

降水保证率表示某一界限降水量出现的可靠程度,在农业气候分析中广泛被应用。

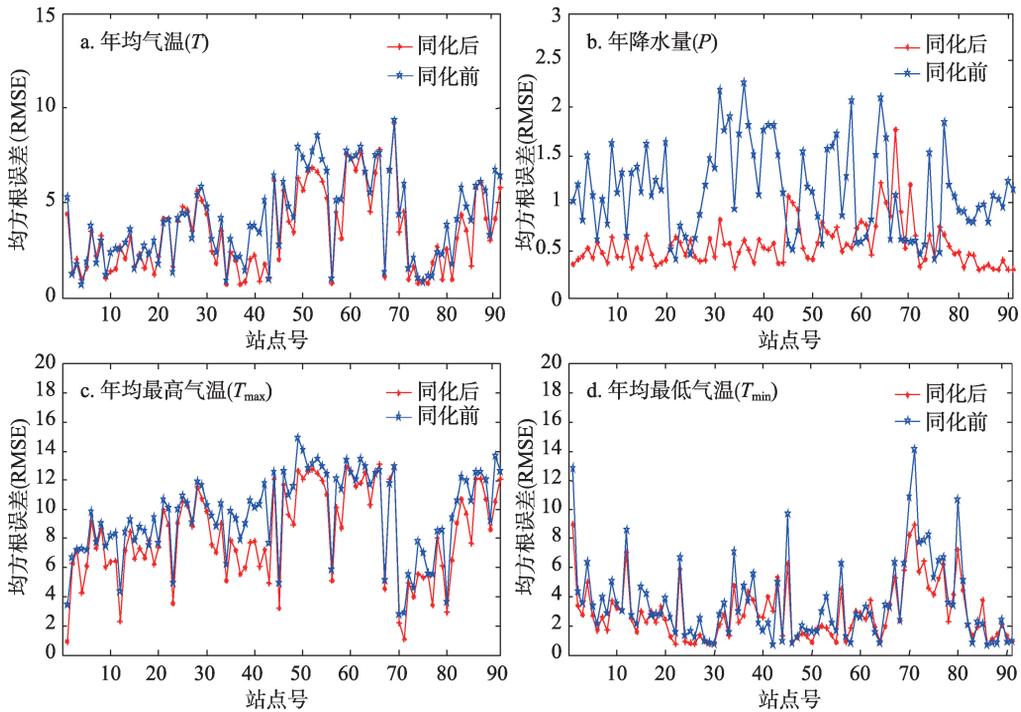


图2 数据同化前、同化后均方根误差比较

Fig. 2 Comparison of RMSE of assimilation RCPs data and non-assimilation RCPs data

高于（或低于）某界限降水量的频率总和，称为降水保证率。如80%保证率的降水量，就是5年中只有一年的降雨量小于该频率的降水量，计算公式为：

$$P_m = \frac{m}{n+1} \times 100\% \quad (3)$$

式中： m 为按要素值大小顺序排列的序号； n 为样本数； P_m 为序号 m 的保证率。

4 结果与分析

4.1 东北地区未来热量资源变化

4.1.1 年均温度变化 RCP_4.5、RCP_8.5与历史资料（Baseline）情景比较，年均温度分别升高（表2，图3，图4）。空间上，RCP_4.5、RCP_8.5与Baseline相同积温带均向北移动，面积扩张；RCP_4.5情景下0℃以下区域面积明显减少，南部出现了Baseline所未出现的温度高于12℃的区域；RCP_8.5情景下0℃以下区域全部消失，南部高于12℃的区域明显北扩。

未来RCP_4.5、RCP_8.5情景下，年均温度气温均呈不断升高趋势，变化率较

表2 1961-2099年东北地区80%保证率农业气候资源年平均值

Tab. 2 Annual average value of 80% assurance rate of agro-climate resources in Northeast China from 1961 to 2099

| | 年均温度(℃) | ≥ 10℃初日(d) | 初霜日(d) | 可能生长季(d) | 生长季积温(℃·d) | 生长季降水(mm) |
|------------|---------|------------|--------|----------|------------|-----------|
| Baseline情景 | 7.70 | 128 | 292 | 183 | 3435 | 608 |
| RCP_4.5情景 | 9.67 | 125 | 294 | 187 | 3867 | 624 |
| RCP_8.5情景 | 10.66 | 124 | 298 | 193 | 4127 | 619 |

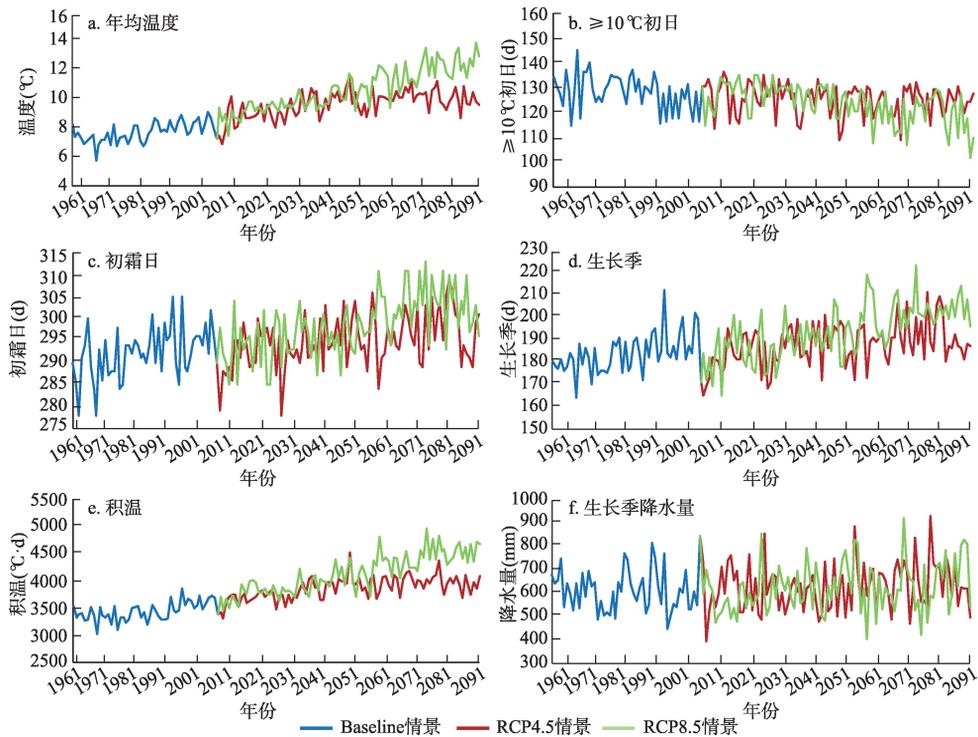


图3 1961-2099东北地区80%保证率农业气候资源变化

Fig. 3 Variation of 80% of assurance rate of agro-climate resources in Northeast China from 1961 to 2099

表3 1961-2099东北地区80%保证率农业气候资源倾向率通过显著性检验百分比(%)

Tab. 3 Significance test passing rate for inclination rate of 80% assurance rate of agro-climate resources in Northeast China from 1961 to 2099 (%)

| | 年均温度 | | ≥ 10 °C初日 | | 初霜日 | | 可能生长季 | | 积温 | | 生长季降水量 | |
|------------|------|------|-----------|------|-----|------|-------|------|-----|------|--------|------|
| | 显著 | 非常显著 | 显著 | 非常显著 | 显著 | 非常显著 | 显著 | 非常显著 | 显著 | 非常显著 | 显著 | 非常显著 |
| Baseline情景 | 99 | 98 | 3 | 4 | 43 | 28 | 48 | 26 | 87 | 83 | 0 | 0 |
| RCP_4.5情景 | 100 | 100 | 76 | 46 | 96 | 93 | 94 | 83 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| RCP_8.5情景 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |

Baseline情景快，且松嫩平原全区域仍然保持增温趋势。但Baseline情景全区域年均温度倾向率是0.35 °C/10a，相比RCP_4.5情景下全区域增温速率变小，倾向率为0.19 °C/10a，而RCP_8.5情景全区域增温显著加快（表3），年均温度倾向率为0.48 °C/10a。

4.1.2 ≥ 10 °C起始日期变化 RCP_4.5、RCP_8.5与Baseline情景比较，为≥10 °C初日逐渐提前，分别提前3 d和4 d。80%保证率下松嫩平原≥ 10 °C起始日期自南向北均逐渐提前（图5）。小于100 d区域，在Baseline情景下集中在辽宁省南部、中部地区；RCP_4.5、RCP_8.5情景下，面积增大，明显北扩，RCP_8.5情景下，几乎遍布了整个辽宁省；100~110 d的区域，几乎占据吉林省全部，并北扩到黑龙江省东部区域；130 d以上区域在东北地区已经占据很少的一部分，只保留在内蒙古的北部。

未来RCP_4.5、RCP_8.5情景下，≥ 10 °C起始日期为逐渐提前的趋势，Baseline情景平均倾向率为-1.02 d/10a，RCP_4.5、RCP_8.5情景下分别为-0.54 d/10a、-1.51 d/10a，RCP_4.5变化率虽小于Baseline情景，但仍为提前趋势。且这种趋势在松嫩平原全区域均

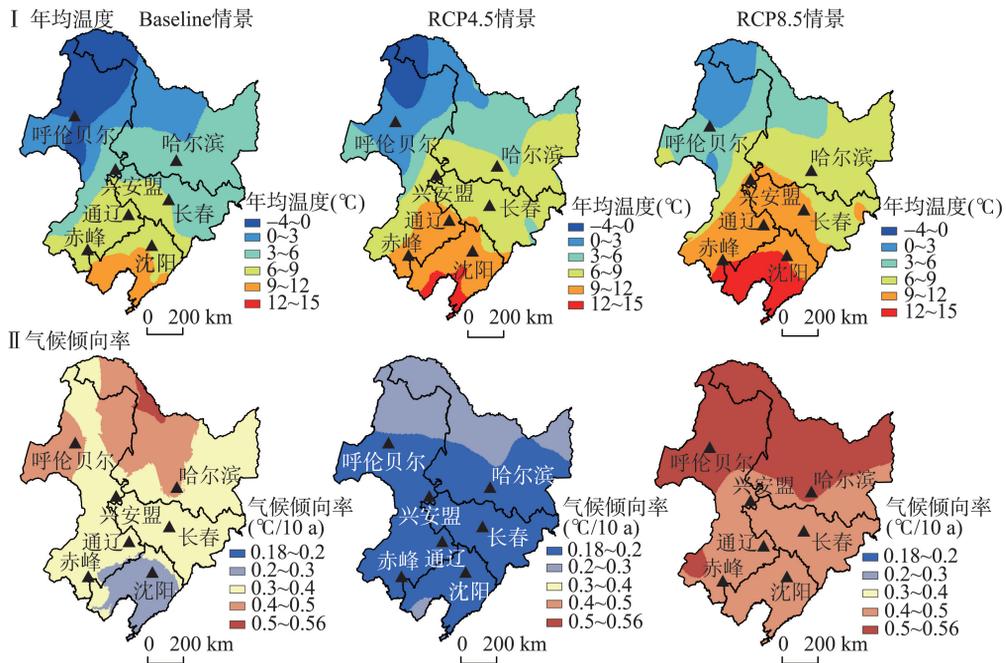


图4 东北地区80%保证率年平均气温(I)和气候倾向率(II)分布

Fig. 4 Spatial distribution of 80% assurance rate of average temperature (I) and climatic inclination rate (II) in Northeast China

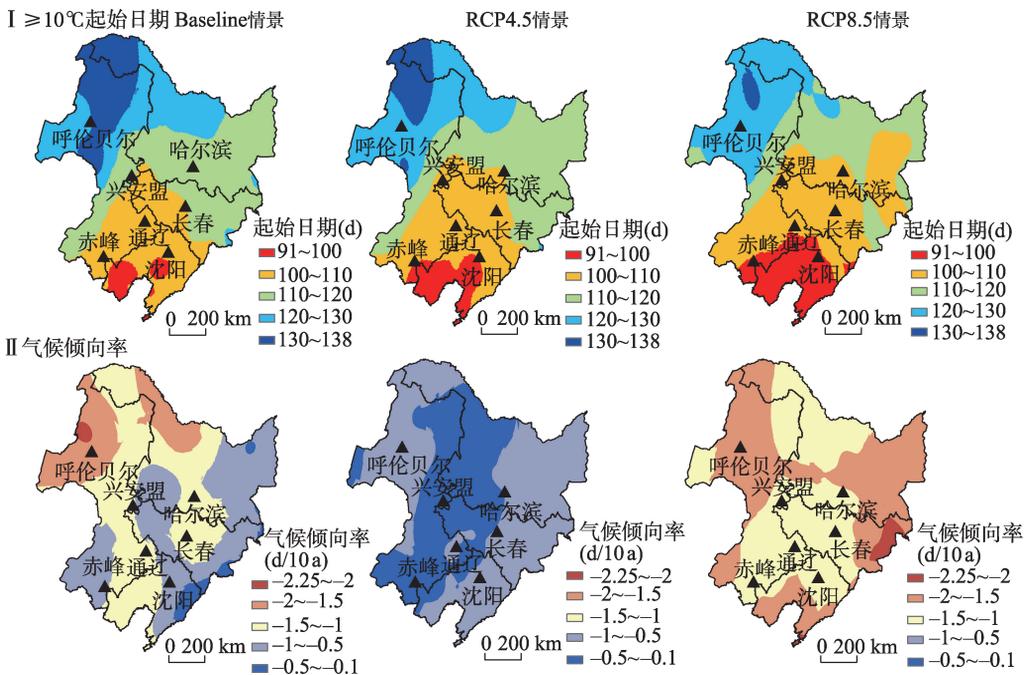


图5 东北地区80%保证率≥10℃起始日期(I)和气候倾向率(II)分布

Fig. 5 Spatial distribution of $\geq 10^{\circ}\text{C}$ annual start date (I) and climatic tendency (II) with 80% of assurance rate in Northeast China

有体现。较Baseline情景, RCP_4.5情景 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 起始日期全区域提前趋势减缓, 而RCP_8.5情景下全区域显著提前。

4.1.3 初霜日变化 RCP_4.5、RCP_8.5与Baseline情景比较，初霜日推迟，分别推迟2 d和6 d。80%保证率下松嫩平原初霜日期自北向南逐渐推迟（图6）。330 d以上区域几乎没有变化；大于300 d区域，在Baseline情景下集中在辽宁南部、中部地区；RCP_4.5、RCP_8.5情景下，区域北扩。RCP_8.5情景下，扩展到几乎整个辽宁省；270~280 d区域向北推移，几近移出吉林省，并且缩小到黑龙江北部地区；280 d以内区域在东北地区只分布在大兴安岭北部和内蒙古北部很小一部分地区。

未来RCP_4.5、RCP_8.5情景下，松嫩平原初霜日期逐渐为推迟趋势，变化率低于Baseline的1.78 d/10a。RCP_4.5、RCP_8.5情景下分别为0.75 d/10a、1.43 d/10a。RCP_4.5情景初霜日期推迟趋势速率明显降低，而RCP_8.5推迟缓慢。虽然未来两种情景较Baseline情景速率降低，松嫩平原在1960-2099年期间初霜日仍为推迟。

4.1.4 生长季变化 未来两种情景与Baseline情景比较，生长季延长，RCP_4.5、RCP_8.5情景相比Baseline情景分别延长4 d和10 d。如图7中RCP_4.5、RCP_8.5情景下，各情景生长季长度均呈现向北扩展的趋势，RCP_8.5情景北扩程度更大。以RCP_8.5情景为例，生长季大于200 d区域几乎覆盖辽宁省，而在Baseline情景下，仅位于辽宁省南部；生长季在180~200 d区域北扩到黑龙江省西南部和东部，而在Baseline情景下，黑龙江省全境没有出现生长季长达180~200 d的情况；生长季在140~200 d的区域明显缩小，仅存在于内蒙古北部和黑龙江省西北部，而在Baseline情景下，则存在于内蒙古北部大部分区域及黑龙江省西北部较大区域。

不仅如此，未来RCP_4.5、RCP_8.5情景下，生长季表现为全区域延长趋势，Baseline、RCP_4.5、RCP_8.5情景下平均倾向率为2.81 d/10a、1.30 d/10a、2.95 d/10a。RCP_8.5情景下生长季增加速率仍然大于Baseline情景，RCP_4.5情景下变化率相对较小，但趋势仍为提前，并且提前趋势表现在整个松嫩平原地区。

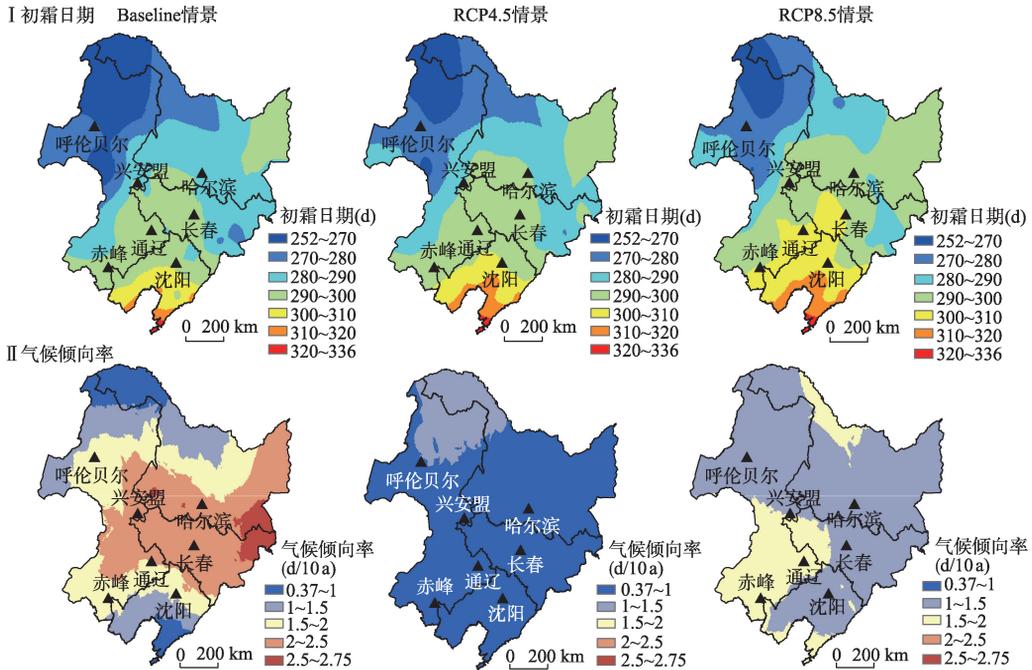


图6 东北地区80%保证率初霜日期(I)和气候倾向率(II)分布

Fig. 6 Spatial distribution of 80% assurance rate of frost date (I) and climatic inclination rate (II) in Northeast China

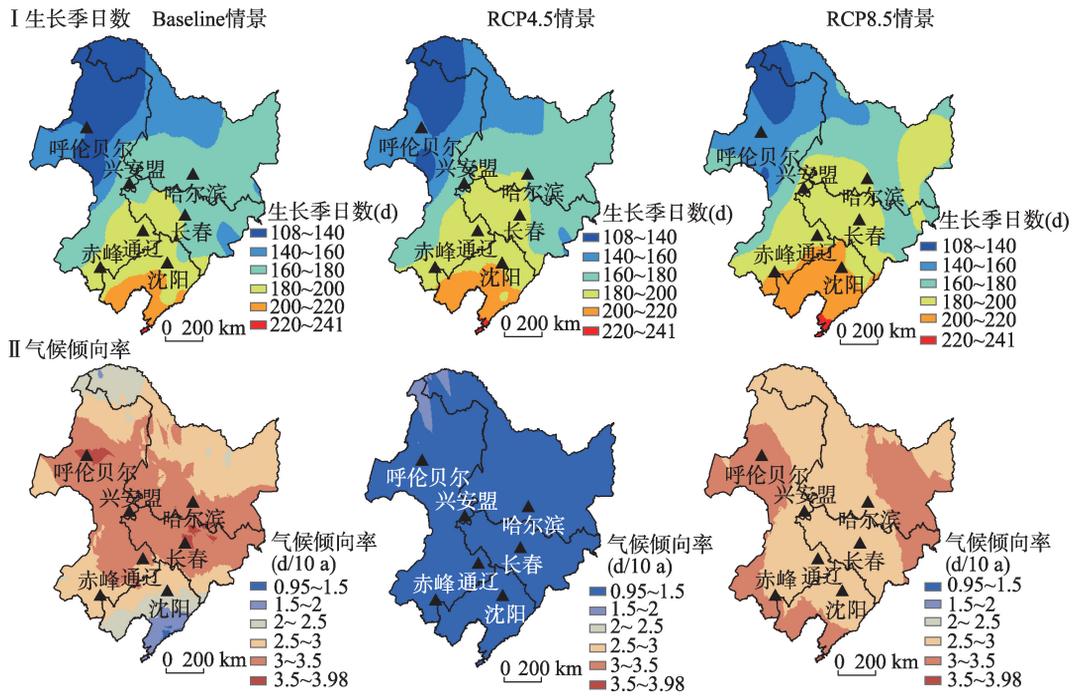


图7 东北地区80%保证率可能生长季日数(I)和气候倾向率(II)分布

Fig. 7 Spatial distribution of 80% assurance rate of the total number of days during growing season (I) and climatic inclination rate (II) in Northeast China

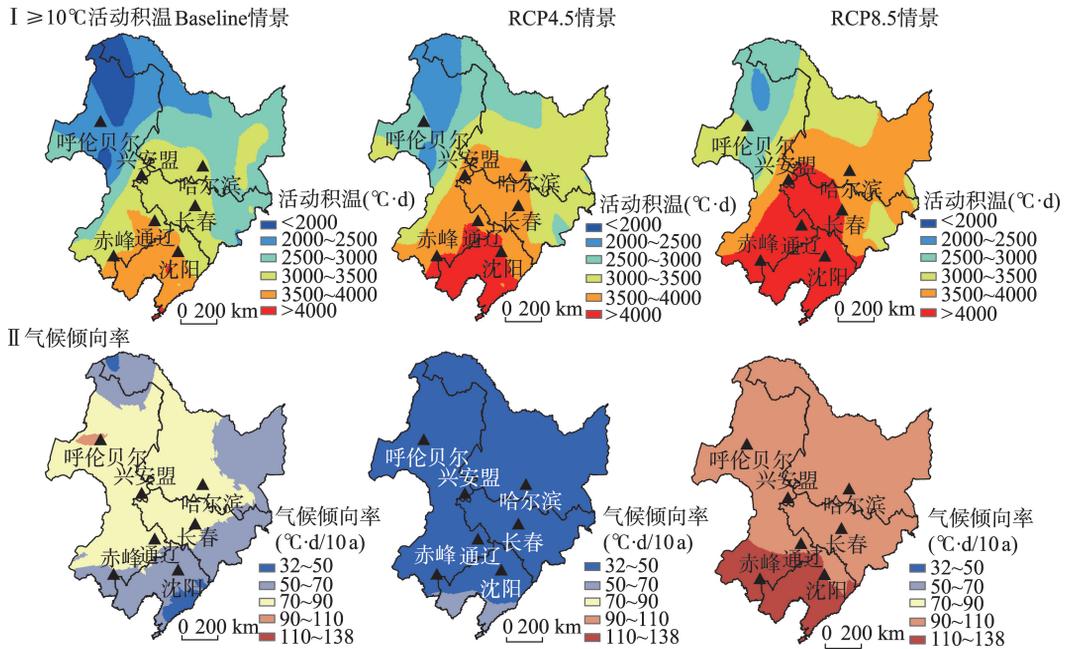


图8 东北地区80%保证率生长季内 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温(I)和气候倾向率(II)分布

Fig. 8 Spatial distribution of 80% assurance rate of accumulated temperature (I) during growing season when temperature was above 10°C and climatic inclination rate (II) in Northeast China

4.1.5 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温变化 未来两种情景与Baseline情景比较,东北的地区 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温明显增加,年均增加 $400\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 和 $700\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。未来RCP_4.5、RCP_8.5情景下,高等级积温分布区明显北扩,低等级积温区明显缩小,RCP_8.5情景下积温增加最多(图8)。 $> 4000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温区,在Baseline情景下,仅在辽宁省南部出现了很小的区域,在RCP_4.5情景下,则占了辽宁省大部分区域,而在RCP_8.5情景下,覆盖了辽宁省全境,并北扩到吉林省西部和内蒙古的南部;在Baseline情景下,黑龙江省大部分区域积温为 $2000\sim 2500\text{ }^{\circ}\text{C}$,在未来RCP_4.5、RCP_8.5情景下,则分别变为大部分区域为 $3000\sim 3500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $3500\sim 4000\text{ }^{\circ}\text{C}$; $< 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温区域,在未来两种情景下在东北地区消失, $2000\sim 2500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 面积也变得很小。

未来两种不同情景下,东北地区 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温仍然呈增加趋势,Baseline、RCP_4.5、RCP_8.5情景下倾向率分别为 $69\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}/10\text{a}$ 、 $41\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}/10\text{a}$ 、 $106\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}/10\text{a}$,表现为东北地区全区域性增加,RCP_8.5情景下增加更为显著。

4.2 未来水资源变化

未来RCP_4.5、RCP_8.5与Baseline情景比较,降水量稍有增加,分别增加 16 mm 和 9 mm 。但3种情景下,降水的空间分布格局基本不变,表现为自东南到西北逐渐减少的趋势,局部有所变化(图9)。如西南部,RCP_8.5模式下 $300\sim 400\text{ mm}$ 降水区有所增大,此区域降水减少;黑龙江省东部降水量增加,由Baseline情景下的 $400\sim 500\text{ mm}$ 增加到 $500\sim 600\text{ mm}$;黑龙江省与吉林省南部交界处,降水也有所增加。

RCP_4.5、RCP_8.5平均生长季降水量倾向率分别为 $3.47\text{ mm}/10\text{a}$ 、 $6.51\text{ mm}/10\text{a}$,均高于Baseline的 $-5.93\text{ mm}/10\text{a}$,呈增加趋势。未来东北地区整体有向降水量增多的趋势,

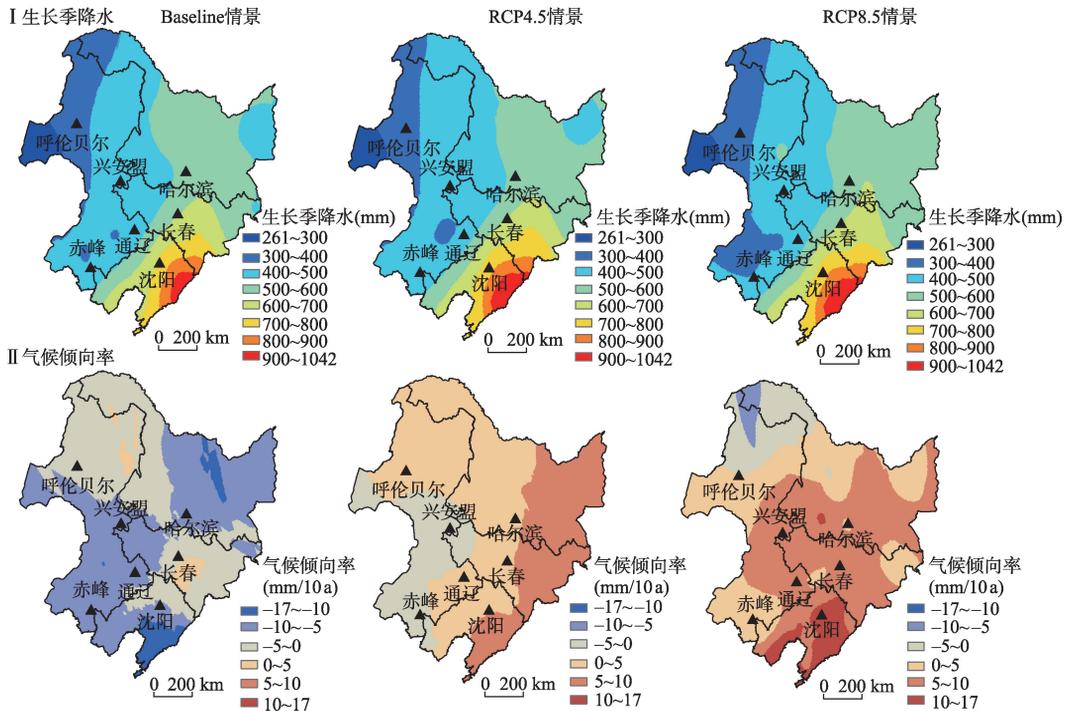


图9 东北地区80%保证率生长季内降水(I)和气候倾向率(II)分布

Fig. 9 Spatial distribution of 80% assurance rate of precipitation (I) during growing season and climatic inclination rate (II) in Northeast China

但不显著,主要表现为东部地区增加较快,其中沿海地区增加最快,主要表现在辽东半岛附近。RCP_4.5情景下,内蒙古和吉林部分地区呈减少趋势,RCP_8.5减少区域只有大兴安岭附近。

5 结论

(1) 1961-2099期间,在气候变化的影响下,未来热量资源明显增加,空间分布为南高北低,东北地区年均温度呈升高趋势,RCP_4.5、RCP_8.5情景分别升温约2℃、3℃,≥10℃初日早3~4 d,初霜日晚2~6 d,导致可能生长季增加4~10 d;温度的升高与生长季的延长使得积温大幅增加,到21世纪末,增幅达400℃·d、700℃·d。

在热量资源气候倾向率显著性检验中:Baseline情景下,年均温度与积温表现较好,通过检验率达80%以上,初霜日、可能生长季通过显著性检验在40%~50%之间,≥10℃初日通过检验最少。未来RCP_4.5、RCP_8.5情景下,热量资源通过检验比例较大,其中RCP_8.5情景下所有热量资源均为100%。

热量资源变化速率有明显变化,RCP_8.5情景下增温速率更快,RCP_4.5、RCP_8.5变化速率分别为0.19℃/10a、0.48℃/10a,且北部升温更加迅速;≥10℃初日提前分别为-0.54 d/10a、-1.51 d/10a,东部和西部提前较快;初霜日推迟速率为0.75 d/10a、1.43 d/10a,西部和北部地区推迟更为显著;可能生长季变化速率为1.30 d/10a、2.95 d/10a。

(2) 1961-2099年期间,未来不同情景下,农业气候资源变化速率不尽相同。与Baseline情景相比较,无限制排放的RCP_8.5情景热量资源增加更为迅速和明显;相比之下,RCP_4.5情景增长速率较为缓慢。

(3) 水资源呈增加趋势,但增加较少。从年间表现来看,降水量波动明显,极端降水事件增多,波动范围由450~800 mm变化为400~950 mm。未来降水量虽有增加,但是并不显著。RCP_4.5情景增加最多,增量为16 mm,增量不到3%。综上所述,东北地区未来向暖湿发展,热量增加更加显著。

6 讨论

(1) 未来气候变化对农业气候资源的影响将直接作用到农业生产上,准确地分析农业气候资源的变化对指导农业生产具有重要意义。采用未来气候情景数据分析未来气候变化对农业影响已成为分析未来气候变化对农业影响的常用方法,因此气候情景数据至关重要。过去IPCC对未来的情景设定都以温室气体、空气悬浮颗粒等作为情景结构,且所有气候模式的排放速率相同,具有一定的局限性^[9]。而IPCC AR5报告中最新提出RCPs浓度路径数据改进了情景结构,依据大气辐射强度,并融入不同排放政策来设定温度改变准则,方法更为科学合理。本研究采用RCPs情景下的气象数据,使得研究结果更加真实可信。

(2) 利用AR5情景分析了中国东北地区气候变化对农业气候资源的影响,所得结论与前人研究较为一致。截止到2050年期间,东北地区积温年均积温增加约为205℃·d,与胡亚南等采用RCP_4.5分析的东北三省的积温增加200℃·d左右较为接近^[4]。在2071-2099年期间,RCP_4.5情景下辽宁≥10℃积温浮动范围为3900~4500℃·d,平均为4200℃·d;RCP_8.5≥10℃积温为4300~5000℃·d,平均4694℃·d。与袁彬分析的辽

宁全省积温 4000~5000 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 结果较为一致^[20]。辽宁在 2011-2050 年期间, RCP_4.5 情景下初霜日平均推迟 2 d, 生长季内年均降水量减少 12 mm, 与刘景利等^[17]用 B2 情景分析结果也较为吻合。

(3) 以温度升高为代表的气候变化在东北对农业影响有一定积极影响, 生长季的延长和积温的增加使得农作物可利用热量资源更加丰富, 原有因受到热量资源限制的不可种植区域将会减少, 可种植区域扩大; 种植品种得到改善, 原来种植早熟品种区域可由中晚熟品种代替, 扩大晚熟品种种植面积, 如晚熟玉米积温需要达到 3000 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ^[21], 由原有松嫩平原北扩至大兴安岭附近。甚至辽宁部分地区可种植一年两熟制作物。

但消极方面也是不容忽视的。一方面, 假定没有科学技术对作物品种的影响, 作物积温参数不变, 在生育期内, 积温累计更为迅速, 导致生长季缩短, 干物质累计时间缩短, 致使作物减产。刘丹等^[22]在增温 2 $^{\circ}\text{C}$ 的实验条件下, 发现玉米果穗瘪粒数增加, 导致减产 40%。另一方面, 降水的不匹配, 导致的水分胁迫也可能使得作物减产。马树庆等^[23]发现水分减少与增温相比, 减产幅度大于增产幅度。

(4) 本文对于气候模式输出的数据采取了与历史数据融合的方法进行同化, 与以往单纯采用模式输出资料订正比较, 保证了历史资料与未来资料连接的合理性和连续性, 得到新的时间序列更加接近于真实天气状况。

(5) 本文采用的情景资料是区域气候模式输出的结果, 气候模式虽然考虑了诸多因素, 如通过融合有效地减小了模拟的系统误差, 但是气候变化本身的多变导致未来情景资料仍有不确定性。

参考文献(References)

- [1] ALEXANDROV V A, HOOGENBOOM G. The impact of climate variability and change on crop yield in Bulgaria. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2000, 104(4): 315-327.
- [2] FÜSSEL H M, KLEIN R J T. Climate change vulnerability assessments: An evolution of conceptual thinking. *Climatic Change*, 2006, 75(3): 301-329.
- [3] Tang Guoping, Li Xiubin, Fischer G, et al. Climate change and its impacts on China's agriculture. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(2): 129-138. [唐国平, 李秀彬, Fischer G, 等. 气候变化对中国农业生产的影响. *地理学报*, 2000, 55(2): 129-138.]
- [4] Solomon S. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report: Climate Change 2013: The Physical Science Basis, 2007.
- [5] Li Yong, Yang Xiaoguang, Dai Shuwei, et al. Spatiotemporal change characteristics of agricultural climate resources in middle and lower reaches of Yangtze River. *The Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11): 2912-2921. [李勇, 杨晓光, 代姝玮, 等. 长江中下游地区农业气候资源时空变化特征. *应用生态学报*, 2010, 21(11): 2912-2921.]
- [6] Lin Xiaosong. Research progress in the agroclimatic resources. *Journal of Hainan Normal University: Natural Science*, 2003, 16(4): 87-91. [林孝松. 农业气候资源研究进展. *海南师范大学学报(自然科学版)*, 2003, 16(4): 87-91.]
- [7] Yu Huning. Analysis and Use of Agricultural Climate Resources. Beijing: China Meteorological Press, 1985. [于沪宁. 农业气候资源分析和利用. 北京: 气象出版社, 1985.]
- [8] Yang Xiaoguang, Li Yong, Dai Shuwei, et al. Changes of China agricultural climate resources under the background of climate change IX: Spatiotemporal change characteristics of China agricultural climate resources. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(12): 3177-3188. [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. *应用生态学报*, 2011, 22(12): 3177-3188.]
- [9] Liu Zhijuan, Yang Xiaoguang, Wang Wenfeng, et al. Characteristics of agricultural climate resources in three provinces of Northeast China under global climate change. *The Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(9): 2199-2206. [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. *应用生态学报*, 2009, 20(9): 2199-2206.]
- [10] Li Yong, Yang Xiaoguang, Wang Wenfeng, et al. Change of China agricultural climate resources under the background of climate change I: Spatiotemporal change characteristics of agricultural climate resources in South China. *The Journal*

- of Applied Ecology, 2010, 21(10): 2605-2614. [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. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2605-2614.]
- [11] Dai Shuwei, Yang Xiaoguang, Zhao Meng, 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. The Journal of Applied Ecology, 2011, 22(2): 442-452. [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. 应用生态学报, 2011, 22(2): 442-452.]
- [12] Yang Xuan, Tang Xu, Chen Baode, et al. Impacts of climate change on wheat yield in China simulated by CMIP5 multi-model ensemble projections. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(15): 3009-3024. [杨绚, 汤绪, 陈葆德, 等. 利用CMIP5多模式集合模拟气候变化对中国小麦产量的影响. 中国农业科学, 2014, 47(15): 3009-3024.]
- [13] Ma Yuping, Sun Linli, E Youhao, et al. Predicting the impact of climate change in the next 40 years on the yield of maize in China. The Journal of Applied Ecology, 2015, 26(1): 224-232. [马玉平, 孙琳丽, 俄有浩, 等. 预测未来40年气候变化对我国玉米产量的影响. 应用生态学报, 2015, 26(1): 224-232.]
- [14] Hu Yanan, Liu Yingjie. Planting distribution of spring maize and its productivity under RCP4.5 scenario in Northeast China in 2011-2050. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(15): 3105-3114. [胡亚南, 刘颖杰. 2011-2050年RCP4.5新情景下东北春玉米种植布局及生产评估. 中国农业科学, 2013, 46(15): 3105-3114.]
- [15] Li Qiang. The drought characteristics and its mechanism in the main arid regions of the globe in the background of global warming [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012. [李强. 气候变暖背景下全球主要干旱区的干旱化特征及机理分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.]
- [16] Wu Haiyan, Sun Tiantian, Fan Zuowei, et al. The major food crops in response to climate change and its yield effect in Northeast of China. Journal of Agricultural Resources & Environment, 2014(4): 299-307. [吴海燕, 孙甜田, 范作伟, 等. 东北地区主要粮食作物对气候变化的响应及其产量效应. 农业资源与环境学报, 2014(4): 299-307.]
- [17] Liu Jingli, Ji Yanghui, Mi Na, et al. Evolvement character of agricultural climate resources in Liaoning province from 2011 to 2050 based on B2 climate change scenarios. Journal of Meteorology & Environment, 2012, 28(6): 81-87. [刘景利, 纪仰慧, 米娜, 等. B2气候情景下2011-2050年辽宁农业气候资源演变特征. 气象与环境学报, 2012, 28(6): 81-87.]
- [18] Gou Shiwei, Zhang Yingxian, Xu Yinlong. Analysis of climate resource changes during maize growth period in Ningxia under SRES A1B scenario. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(10): 1394-1403. [苟诗薇, 张颖娴, 许吟隆. SRES A1B情景下未来宁夏玉米生育期气候资源变化分析. 中国生态农业学报, 2012, 20(10): 1394-1403.]
- [19] Han Leqiong, Han Zhe, Li Shuanglin. Projection of heavy rainfall events in the middle and lower reaches of the Yangtze River valley in the 21st century under different representative concentration pathways. Transactions of Atmospheric Sciences, 2014, 37(5): 529-540. [韩乐琼, 韩哲, 李双林. 不同代表性浓度路径(RCPs)下21世纪长江中下游强降雨预估. 大气科学学报, 2014, 37(5): 529-540.]
- [20] Yuan Bin. Climatic potential productivity and climate resources utilization rate of spring maize in Northeast China under climate change [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2012. [袁彬. 气候变化下东北春玉米气候生产潜力及农业气候资源利用率[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2012.]
- [21] Xu Yanhong. Evaluation on the effect of adaptation countermeasures of maize on climate resources utilization in Northeast China under climate change [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2014. [徐延红. 东北玉米适应气候变化措施对农业气候资源利用率的影响评估[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2014.]
- [22] Liu Dan, Zhang Jiahua, Meng Fanchao, et al. Effects of different soil moisture and air temperature regimes on the growth characteristics and grain yield of maize in Northeast China. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(11): 2904-2910. [刘丹, 张佳华, 孟凡超, 等. 不同水分和增温处理对东北玉米生长和产量的影响. 生态学杂志, 2013, 32(11): 2904-2910.]
- [23] Ma Shuqing, Wang Qi, Luo Xinlan. Effect of climate change on maize growth and yield based on stage sowing. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2131-2139. [马树庆, 王琪, 罗新兰. 基于分期播种的气候变化对东北地区玉米(Zea mays)生长发育和产量的影响. 生态学报, 2008, 28(5): 2131-2139.]

Impacts of projected climate change on agricultural climate resources in Northeast China

CHU Zheng¹, GUO Jianping^{1,2}, ZHAO Junfang²

(1. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Aiming at examining the responses of agro-climate resource to climate change in Northeast China, this study explores the 1960-2099 daily climatic data of regional model simulation in RCP_4.5 and RCP_8.5 scenarios, assimilated with 1961-2010 ground observations from 91 meteorological stations. Agroclimate heat resources and water resources in scenarios are analyzed and the findings are obtained as follows:

(1) The annual mean temperature decreases from south to north and is projected to increase across the study region. Obviously, the temperature is higher in the high emission scenario. The annual mean temperature of the baseline, RCP_4.5 and RCP_8.5 is 7.70 °C, 9.67 °C and 10.66 °C, respectively. The changes of other agro-climate heat resources are similar with those of the temperature. For example, the start date ≥ 10 °C has advanced by 3 d and 4 d; the first frost date has delayed by 2 d and 6 d; the growing season is prolonged by 4 d and 10 d; and the accumulated temperature ≥ 10 °C has increased by 400 °C·d and 700 °C·d, respectively. In addition, water resources have a slight increase.

(2) The average temperature growth rate of climatic tendency is 0.35 °C/10 a historically. The highest increasing rate of annual average temperature under the RCP8.5 scenario is 0.48 °C/10a in the high emission scenario, compared with 0.19 °C/10a under the RCP4.5 scenario in the low emission scenario. By the end of this century, the warming trend in RCP_8.5 would be faster than that in RCP_4.5 especially in the north of the study region. Other agro-climate heat resources have similar trends with the temperature, but their spatial distribution varies in different parts of the region. Precipitation in growing season is projected to increase although the trend is not statistically significant and has distinct inter-annual variations. Precipitation increases in the east part of the study region, while it decreases in the west. Overall Northeast China is getting warmer and wetter in the future with increased heat resources. However, the imbalance with water resources may have negative impacts on agricultural productivities.

keywords: climate change; agro-climate resources; Northeast China; data assimilation