

引用格式:宋梦美,安萍莉,江丽,等. 1993-2013年吉林省主粮作物种植布局及其水热资源利用效率评估[J]. 资源科学, 2017, 39(3): 501-512. [Song M M, An P L, Jiang L, et al. Cultivation patterns of main grain crops and evaluation of water and heat resource utilization efficiency in Jilin Province from 1993 to 2013[J]. *Resources Science*, 2017, 39(3): 501-512]. DOI: 10.18402/resci.2017.03.12

# 1993-2013年吉林省主粮作物种植布局及其水热资源利用效率评估

宋梦美<sup>1</sup>, 安萍莉<sup>1</sup>, 江丽<sup>1</sup>, 蔡璐佳<sup>2</sup>, 张哲<sup>1</sup>, 黄灿<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学土地资源管理系, 北京 100193; 2. 北京市规划委员会怀柔分局, 北京 101400)

**摘要:**探究气候变化背景下作物水热资源利用效率变化情况是挖掘粮食高产潜力、实现农业可持续发展的基础,对于优化粮食作物布局以及应对未来气候变化趋势具有重要意义。本文基于1993-2013年吉林省24个气象站点的逐日气象数据和农业统计数据,按照作物积温需求划分出水稻、玉米和大豆的气候种植界限,对因气候变暖而增加的种植区域(敏感区)内水、热资源有效利用情况进行评估。结果表明:①1993-2013年吉林省积温带明显东扩,水稻和玉米的气候种植界限东扩到敦化-靖宇-临江一线,大豆的气候种植界限东扩到吉林省最东部的长白县;②三种作物敏感区内热量资源利用效率低于非敏感区,但水资源利用效率均高于非敏感区。1993-2013年作物敏感区内水热资源利用效率均呈现出增长趋势,年均增长率显著高于非敏感区;③水稻和玉米敏感区内水热资源产出效率均高于非敏感区,但大豆敏感区内产出效率低于非敏感区。结论:气候变暖对研究区内水热资源效率的提高表现出明显的正效应。从水、热资源优化利用的角度,研究区可适当向东扩展玉米和水稻的种植面积,但要加强农田灌溉系统和灌溉技术,降低水稻的水资源约束情况。同时避免研究区最东部安图、长白等地粮豆的盲目扩种,减少热量资源的约束风险。

**关键词:**气候变化;种植界限;热量资源;水资源;利用效率;产出效率;吉林省

DOI: 10.18402/resci.2017.03.12

## 1 引言

IPCC第五次评估报告(AR5)指出:在1880-2012年间全球平均地表温度升高了0.85(0.65~1.06)℃,尤其是地处中国中高纬度的东北地区,对气候变暖极为敏感。近百年来东北地区温度增加1.43℃/100a,是全球增温率的2倍,全国增温率的3倍<sup>[1]</sup>。增温使作物生长季内热量增加,生长期延长,促使以温度为限制因子的东北地区潜在可被开垦区域扩大,为耕地增长提供了重要的前提条件<sup>[2]</sup>。不少学者都证实气候变暖对东北地区农作物生长产生了深远的影响。贾建英等研究表明,2001-2006

年间东北地区不同熟性玉米分布界限显著北移东扩<sup>[3]</sup>。方修琦等、云雅如等证实,东北地区无霜期的延长,使原水稻种植的次适宜区变为适宜区,原不适宜区部分变为适宜区,一季稻区种植北界已经移至大约52°N的呼玛等地<sup>[4,5]</sup>。王媛等计算出从20世纪70年代到90年代气候变暖对黑龙江省水稻单产增加的贡献率为19.5%~24.3%<sup>[6]</sup>。王晓煜等分析了气候变暖背景下黑龙江水稻的种植区域北移及冷害风险<sup>[7]</sup>。本研究的切入点:①针对吉林省积温带的空间位移和主粮作物种植区域东移的系统化分析还鲜有研究;②主粮作物种植区域东移后可能会

收稿日期:2016-10-24;修订日期:2017-01-12

基金项目:2016年度全国农用地质量等级更新调查与监测项目(2016-02-02);国家自然科学基金项目(41271110,41372132);国家科技支撑计划项目(2015BAD06B01)。

作者简介:宋梦美,女,天津人,硕士生,主要研究方向为土地利用规划和可持续利用。E-mail:348971648@qq.com

通讯作者:安萍莉, E-mail: anpl@cau.edu.cn

带来热量资源和水资源约束风险,而对于东扩种植区和原主要种植区之间的水、热资源利用效率差异等方面的量化研究更少;③已有学者评估气候变化对单一作物的种植格局及其资源利用,但对于多种作物资源利用效率的系统化研究及其对比分析的报道很少。

气温和降水作为影响吉林省作物分布的主要因素,提高粮食作物的水分和热量资源的利用效率是提高粮食产量,促进农业可持续发展的基础。本研究基于1993-2013年吉林省24个气象站(图1)的气象数据和统计数据,分析气候变暖背景下三种主要作物(水稻、玉米、大豆)种植界限演变趋势,并探究吉林省主粮作物种植区东扩后的水、热资源利用效率及产出效率的时空变化情况,避免种植区域盲目扩大带来的热量资源和水资源约束风险,以期为东北地区作物合理利用水、热资源,挖掘高产潜力,粮食作物的合理布局以及适应未来气候变化提供理论指导。

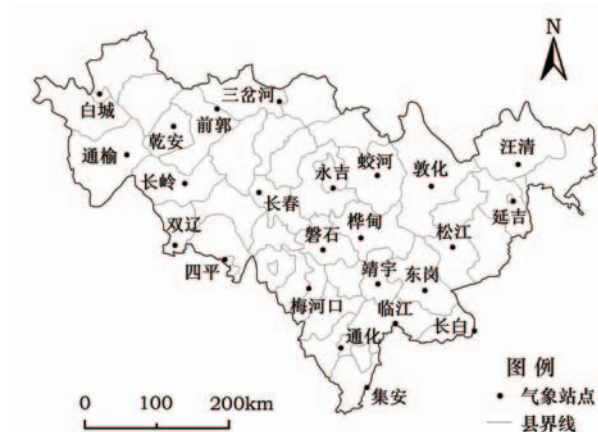


图1 研究区域及气象站点分布

Figure 1 The study area and the distribution of meteorological stations

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

(1)气象数据:吉林省1993-2013年24个基本气象站的逐日气象观测数据来源于中国气象数据网<sup>[8]</sup>,包括经度、纬度、海拔、平均气温、最高及最低气温、日照时数、平均风速、平均相对湿度以及逐日降水量数据。

(2)统计数据:吉林省1993-2013年水稻、玉米和大豆三种粮食作物的播种面积和产量数据来源

于《吉林统计年鉴(1994-2014年)》<sup>[9]</sup>和中国种植业信息网<sup>[10]</sup>。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 粮食作物种植结构占比

反映主要粮食作物种植结构变化的指标可用水稻、玉米、大豆各自占三种粮食作物播种面积之和的百分比来表示,计算公式如下<sup>[11]</sup>:

$$R_{ij} = \frac{S_{ij}}{S_j} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $R_{ij}$  为  $i$  种作物第  $j$  年的种植面积比例(%);  $S_{ij}$  为  $i$  种作物第  $j$  年的播种面积( $\text{hm}^2$ );  $S_j$  为三种作物第  $j$  年的播种面积之和( $\text{hm}^2$ );  $i=1,2,3$ , 分别表示水稻、玉米和大豆。

#### 2.2.2 水热资源利用效率评价方法

农业资源利用情况直接影响着农业生产过程,为农业生产提供必要的物质和能量。农业资源主要包括光资源、热量资源、水分资源和土地资源等等。由于气候变化已经引起热量资源和水资源在数量、质量上的时间和空间变化,对此本文对吉林省水、热资源效率分别进行评价,通过对比分析主粮作物东扩区域与原种植区域的资源利用效率,为气候变化背景下吉林省粮食作物的合理布局提供理论指导。

现阶段基于不同的研究目的,水热资源评价体系还没有形成统一的评价标准,并且宏观区域层次的研究较多,微观作物尺度的研究略显不足。在区域水热资源优劣的评价中,主要是依据崔读昌提出的传统的降水资源利用效率和热量资源利用效率的计算公式<sup>[12-14]</sup>,反映的是气温和降水对粮食产量形成的贡献。在不同种植模式的资源利用效率评价中,付雪丽<sup>[15]</sup>,李小勇<sup>[16]</sup>,李淑娅<sup>[17]</sup>等使用了温度生产效率 and 降水生产效率的概念,但是作物单产的变化除气候因素影响外,还受到农业投入等多因素的综合影响,仅仅从产量尺度上计算的水热资源利用效率不能准确地反映气候变化对于作物资源利用的影响。除此之外,罗怀良<sup>[18]</sup>,赖纯佳<sup>[19]</sup>,侯英雨<sup>[20]</sup>,徐玲玲<sup>[21]</sup>等利用气候适宜度理论对一个地区的农业气候资源配置和利用情况进行评价,通过构建农作物的适宜度函数模型能够更精细地刻画作物生长气候条件适宜程度随时间变化的过程,在量化评价

2017年3月

气候变化的影响方面比以前有较大改进,对合理开发利用生态气候资源、进一步合理调整农业种植结构等方面具有重要意义<sup>[22]</sup>。

基于此,本文创造性地将两者结合起来,重新构建单个作物的水热资源利用效率的评价体系,提出作物生长发育的水热资源利用及其产量形成是一个动态的过程,衡量气候变化对单个作物水热资源利用效率的影响应该包括水热资源的利用效率和水热资源的产出效率两个方面:①从作物生态适宜性角度出发,本研究将温度条件和水分条件与作物生长发育的需求结合起来,拟用温度适宜度函数和水分适宜度函数的计算公式作为水热资源利用效率的评价指标;②从产量尺度出发,拟用积温生产率和水分生产率的计算公式作为水热资源产出效率的评价指标,具体的评价指标体系如表1。

(1)水热资源利用效率。本文界定的热量资源利用效率(Heat Use Efficiency,简称HUE)和水资源利用效率(Water Use Efficiency,简称WUE)分别反映作物生育期内热量条件和水分条件对作物生长发育的满足程度,拟用温度适宜度函数和水分适宜度函数的计算公式作为利用效率的衡量指标,具体公式如下:

$$HUE = \frac{(T - T_1)(T_2 - T)^B}{(T_0 - T_1)(T_2 - T_0)^B} \quad (2)$$

$$B = \frac{T_2 - T_0}{T_0 - T_1}$$

式中  $HUE$  为热量资源利用效率,其值为0~1之间变化的非对称性抛物线函数; $B$  为作物生长发育对温度条件的反应常数,由作物的三基点温度  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_0$  决定; $T$  为生育期内平均温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_0$  分别是作物在该时段内的下限温度、上限温度和最适温度( $^{\circ}\text{C}$ )。当  $T \leq T_1$  时或  $T \geq T_2$  时,  $HUE=0$ ; 当  $T = T_0$  时,  $HUE=1$ 。它反映了温度条件从不适宜到

适宜及从适宜到不适宜的过渡状态,即热量资源利用效率随气温的升高而增长,到达某一适宜值后,热量资源利用效率随气温快速降低。根据相关文献整理<sup>[23-26]</sup>,水稻、玉米、大豆的三基点温度如表2。

$$WUE = \begin{cases} \frac{P}{ET_m} & 0 < P < ET_m \\ 1 & P \geq ET_m \end{cases} \quad (3)$$

式中  $WUE$  为水资源利用效率,其值为0~1;  $P$  为生育期内降水量(mm);  $ET_m$  为作物需水量(mm)。

其中  $ET_m = ET_0 \times K_c$ ,  $ET_0$  为参考作物蒸散量,使用FAO修订的Penman-Monteith公式(FAO-98)作为计算参考作物蒸散的唯一标准方法; $K_c$  为同一时段的作物系数。Penman-Monteith公式为:

$$ET_0 = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (4)$$

式中  $ET_0$  为参考作物蒸散(mm/d);  $R_n$  为作物表面净辐射( $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ );  $G$  为土壤热通量( $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ );  $T$  为2m高平均气温( $^{\circ}\text{C}$ );  $U_2$  为2m高处的风速(m/s);  $e_a$  为饱和水汽压( $\text{kPa}$ );  $e_d$  为实际的水汽压( $\text{kPa}$ );  $\Delta$  为饱和水汽压-温度曲线的斜率( $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ );  $\gamma$  则为干湿表常数( $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ )。

(2)水热资源产出效率。本文界定的热量资源产出效率(Heat Yield Efficiency,简称HYE)和水资源产出效率(Water Yield Efficiency,简称WYE)分别反映热量条件和水分条件对于作物产量形成的贡献,其中热量资源产出效率是指大于10 $^{\circ}\text{C}$ 积温每

表2 吉林省三种作物的三基点温度

Table 2 Three base point temperature of three kinds

of crops in Jilin Province ( $^{\circ}\text{C}$ )			
作物	$T_1$	$T_2$	$T_0$
水稻	12.5	33.0	24.0
玉米	11.5	32.0	23.0
大豆	11.0	31.5	22.0

表1 水热资源利用效率评价指标

Table 1 Evaluation indexes of water and heat resource utilization efficiency

评价指标	分项指标	评价内容	评价方法
水热资源利用效率(A)	热量资源利用效率(A1)	反映作物生育期内平均温度对作物生长发育的满足程度	温度隶属函数
	水资源利用效率(A2)	反映作物生育期内降水量对作物需水量的满足程度	水分隶属函数
水热资源产出效率(B)	热量资源产出效率(B1)	反映作物生育期内热量条件对作物产量形成的贡献	产量/作物生育期内积温
	水资源产出效率(B2)	反映作物生育期内水分条件对作物产量形成的贡献	产量/作物生育期内需水量



1℃在单位土地面积上获得的作物产量,计算式为:

$$HYE = \frac{Y}{\sum T} \quad (5)$$

式中  $HYE$  为作物的热量资源产出效率( $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ );  $Y$  为单位面积耕地粮食产量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ), 可用粮食单产与复种指数的乘积表示, 吉林省为一年一熟制;  $\sum T$  为作物生育期内大于  $10^\circ\text{C}$  的积温( $^\circ\text{C}$ )。

水资源产出效率是指作物消耗单位水量在单位土地面积上获得的作物产量, 其计算式为:

$$WYE = \frac{Y}{ET_m} \quad (6)$$

式中  $WYE$  为作物的水资源产出效率( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $ET_m$  为作物需水量或蒸发蒸腾量( $\text{mm}$ )。

### 2.2.3 主粮作物种植敏感区域和非敏感区域的界定

大多数作物在春季气温稳定通过  $10^\circ\text{C}$  时生长开始活跃, 在秋季日平均气温  $10^\circ\text{C}$  以下时, 即使未霜冻也停止生长。 $\geq 10^\circ\text{C}$  的活动积温表征了喜温作物生长期的长短和地区热量资源的多寡<sup>[27]</sup>。根据季生太等、曹萌萌等<sup>[28, 29]</sup>对东北地区积温带划分指标, 将吉林省划分为4个积温带, 如表3。

表3 吉林省积温带划分标准

Table 3 Accumulated temperature zone division standard

in Jilin Province (°C)				
积温带指标	第一积温带	第二积温带	第三积温带	第四积温带
$\geq 10^\circ\text{C}$ 积温	>2 700	2 500~2 700	2 300~2 500	2 100~2 300

$\geq 10^\circ\text{C}$  积温也决定着作物不同品种熟型的布局, 水稻、玉米、大豆均为喜温作物, 其中水稻和玉米属温暖型作物, 大豆属温凉型作物, 对热量要求偏低。根据李龙振、马树庆、杨显峰等对东北地区积温与作物产量的相关研究结果<sup>[30-32]</sup>: 水稻和玉米中熟到中晚熟品种播种至成熟需稳定通过  $10^\circ\text{C}$  积温约为  $2700\sim 2800^\circ\text{C}$  左右, 大豆中晚熟品种需  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温约为  $2500\sim 2700^\circ\text{C}$  左右。因种植早熟品种时主粮作物产量较低而且不稳, 因此本文主要参考中晚熟品种的种植界限反映主粮作物种植布局在理论上的变化情况, 选取  $>2700^\circ\text{C}$  积温为水稻和玉米的气候种植界限,  $>2500^\circ\text{C}$  积温为大豆的气候种植界限。同时, 本文根据吉林省统计年鉴整理得到, 1993-2003 年间不同积温带内主粮作物平均单产的实际变化情况, 如表4所示, 当积温  $>2700^\circ\text{C}$  时水稻

表4 吉林省不同积温带内作物平均单产

Table 4 Average yield of crops in different accumulated

temperature zones in Jilin Province (kg/hm <sup>2</sup> )			
$\geq 10^\circ\text{C}$ 积温	水稻	玉米	大豆
<2 500	5 169.69	5 590.39	2 103.99
2 500~2 700	6 110.36	6 034.49	2 313.76
>2 700	7 762.78	7 393.83	2 468.51

平均单产超过  $7700\text{kg}/\text{hm}^2$ , 玉米平均单产超过  $7300\text{kg}/\text{hm}^2$ ; 积温  $>2500^\circ\text{C}$  时大豆单产超过  $2300\text{kg}/\text{hm}^2$ , 因此在本研究界定的积温标准之下, 三种作物都达到了高产水平, 这对于挖掘作物高产潜力、提高整个吉林省的粮食产量有重要意义。

为便于对比分析主粮作物东扩区与原种植区域的水热资源利用情况, 本研究界定主粮作物种植的敏感区域和非敏感区域: 敏感区域 I 为 1993-2003 年(时段 I)主粮作物气候种植界限东移增加的区域, 敏感区域 II 为 2003-2013 年(时段 II)主粮作物气候种植界限东移增加的区域, 非敏感区域为 1993 年以前原主粮作物主要分布区域。

## 3 结果分析

### 3.1 气候变化对作物种植布局的影响

#### 3.1.1 气候变暖背景下吉林省积温带空间位移

1993-2013 年吉林省作物生育期(5月-9月)的  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温明显增加, 20 年间积温升高了  $238.2^\circ\text{C}$ , 气候倾向率为  $50^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。研究区域内  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温呈明显的经向带状分布, 由西向东递减。如图 2(见 506 页)所示, 与 1993-2003 年(时段 I)相比, 2003-2013 年(时段 II)各积温带由西向东整体推移, 其中, 第一积温带向东推移约  $25\text{km}$ , 由蛟河-桦甸-辉南一线扩展到敦化-桦甸-靖宇一线; 第二积温带缩小约  $40\text{km}$ , 由敦化-抚松一线向东南方向移动到安图县等地; 原第四积温带位于长白县, 现已经被第三积温带完全覆盖。

#### 3.1.2 吉林省主粮作物气候种植界限演变特征

吉林省水稻、玉米、大豆对热量要求有差异, 基于主粮作物生育期内对积温的满足情况, 图 3(见 506 页)中分别给出 1993-2003 年(时段 I)和 2003-2013 年(时段 II)水稻、玉米和大豆的气候种植界限的推移情况及两个时段内作物种植敏感区的增加区域。

在气候变暖背景下, 三种作物的气候种植界限

2017年3月

明显东移:1993-2003年(时段I)水稻和玉米的气候种植界限(敏感区)东扩到蛟河-桦甸-辉南-临江一线,大豆气候种植界限(敏感区)东扩到了吉林省的安图、抚松等地;2003-2013年(时段II)水稻和玉米气候种植界限(敏感区)东扩到敦化-靖宇-长白一线,大豆的气候种植界限(敏感区)东扩到了吉林省最东部的长白县,东扩后几乎整个吉林省都满足大豆积温的种植需求。

### 3.1.3 吉林省主粮作物种植区应对气候变化的实际响应

选取1998年和2008年两个时点对比分析作物种植格局的实际变化情况,分别对应1993-2003年和2003-2013年两个积温变化时段的中点,本文选取1998年和2008年进行对比,如图4(见第506页)和图5(见第507页)所示:与1998年相比,2008年玉米种植区域向东扩展,玉米种植比例超过50%的区域向东扩张到吉林、蛟河等地,种植比例超过80%的区域向东扩张到长春、九台等地,玉米种植面积扩种的区域主要对应2600~3000℃积温带;水稻的种植范围北移西扩,与1998年相比,2008年水稻的种植比例超过20%的区域向北扩张到榆树、德惠等地,向西扩张到前郭、镇赉、双辽等地,水稻面积扩种的区域主要对应2900~3200℃积温带,这也与陈浩等的研究向吻合<sup>[33]</sup>;而由于水稻和玉米的扩种,与1998年相比,2008年大豆的种植范围呈现出北退的趋势,有向冷区扩展的趋势,其主要原因是大豆是喜温且耐凉的作物,潘铁夫等指出在温度偏低的地方,大豆比玉米的适应性强<sup>[34]</sup>,但个别县市敦化、安图等地大豆在三种作物中的种植比例有所增加,超过50%。

可以看出,主粮作物种植格局的实际变化情况

和种植变化敏感区的变化情况并不一致,除玉米的实际种植区域东扩外,水稻种植区向西扩张,而大豆种植区向东缩小。这是因为作物种植格局的变化除气候的影响外,还受到品种、土壤、栽培管理措施、当地经济发展水平以及市场需求等因素的综合影响<sup>[35]</sup>。本文只以气候变暖为主因,对比分析气候变暖影响下主粮种植界限东扩区(敏感区)与原主要种植区(非敏感区)之间的差异。

### 3.2 气候变化背景下主要作物资源利用效率对比分析

吉林省三种作物种植变化敏感区的温度低于非敏感区,因此主粮作物的种植界限东移后可能存在热量资源和水资源的约束。因此,须深入分析和评估主粮作物种植界限东移后的水热资源利用情况。

#### 3.2.1 主粮作物水热资源利用效率对比

(1)热量资源利用效率。热量资源利用效率能够很好地反映作物对热量条件的满足情况,其值越大,说明作物对热量条件的适宜程度越好。如图6a(见第508页)所示,1993-2013年三种作物敏感区、非敏感区热量资源利用效率均保持增长趋势,且呈现同步变化规律。由于非敏感区热量资源条件优于敏感区,故而非敏感区热量资源利用效率高于敏感区,但从其年际变动幅度来看,敏感区变动幅度显著高于非敏感区。

对比吉林省敏感区和非敏感区内三种作物热量资源利用效率,如表5。三种作物敏感区内热量资源利用效率玉米>水稻>大豆,均值分别为0.96、0.89和0.84。其中,玉米和水稻敏感区热量利用效率均低于非敏感区,但高于吉林省平均水平,说明水稻和玉米气候种植界限东移后的热量资源优势

表5 1993-2013年吉林省敏感区和非敏感区域作物水热资源利用效率

Table 5 Water and heat resource utilization efficiency of crops in sensitive and non-sensitive areas in Jilin province from 1993 to 2013

区域	资源利用效率	水稻		玉米		大豆	
		均值	年均增长率/%	均值	年均增长率/%	均值	年均增长率/%
敏感区	热量资源利用效率	0.89	+0.67	0.96	+0.44	0.84	+0.95
	水资源利用效率	0.88	+7.29	1.00	+7.67	1.00	+4.77
非敏感区	热量资源利用效率	0.93	+0.32	0.98	+0.19	0.98	+0.20
	水资源利用效率	0.64	+6.34	0.89	+6.13	1.00	+5.89
吉林省	热量资源利用效率	0.87	+0.36	0.94	+0.41	0.92	+0.36
	水资源利用效率	0.67	+5.11	0.99	+5.08	1.00	+6.01

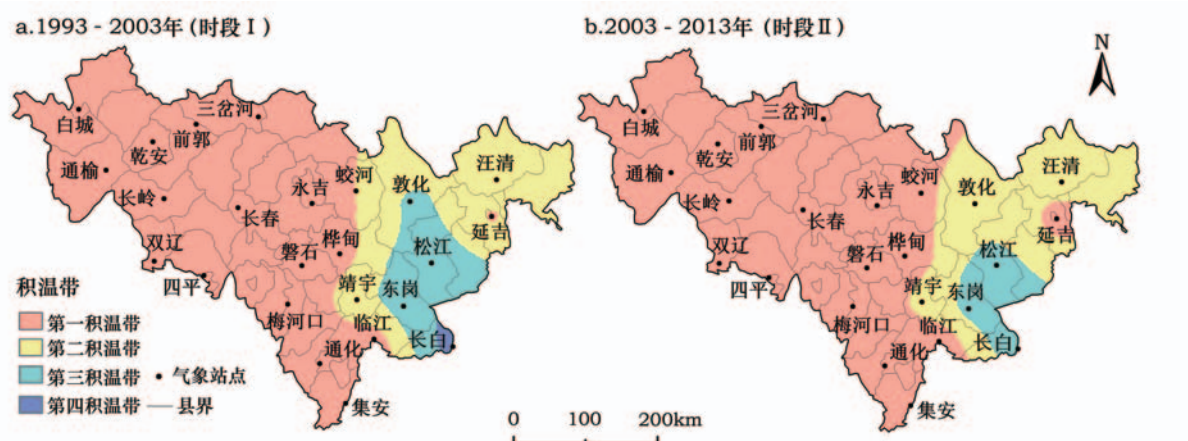


图2 吉林省积温带在1993-2003年(时段I)和2003-2013年(时段II)的变化

Figure 2 Changes of the accumulated temperature zones in Jilin Province from 1993 to 2003 (Period I) and from 2003 to 2013 (Period II)

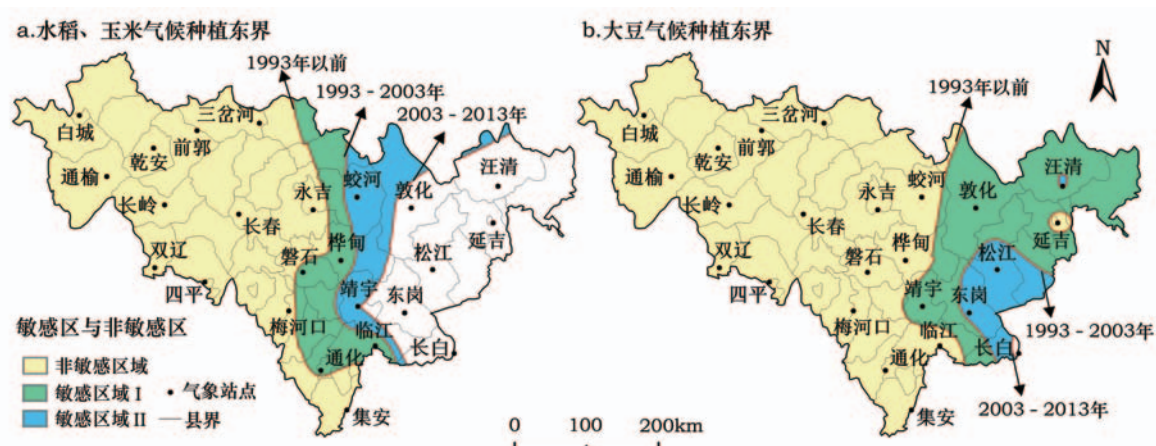


图3 吉林省水稻、玉米和大豆气候种植界限的地理位移

Figure 3 Geographical shift of rice, maize and soybean climatic planting boundaries in Jilin Province

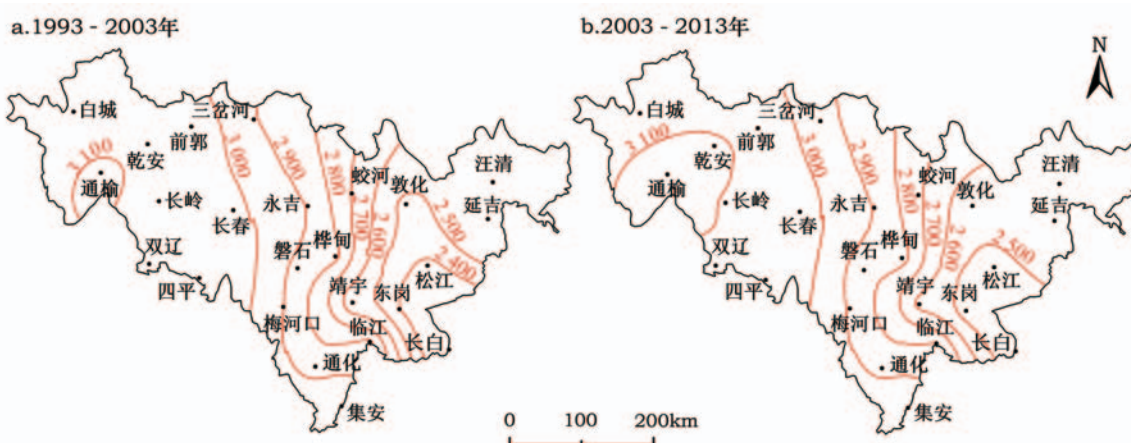


图4 吉林省作物生育期内等积温线( $\geq 10^{\circ}\text{C}$ )的空间分布

Figure 4 The spatial distribution of equal temperature line ( $\geq 10^{\circ}\text{C}$ ) in the period of crop growth in Jilin Province



2017年3月

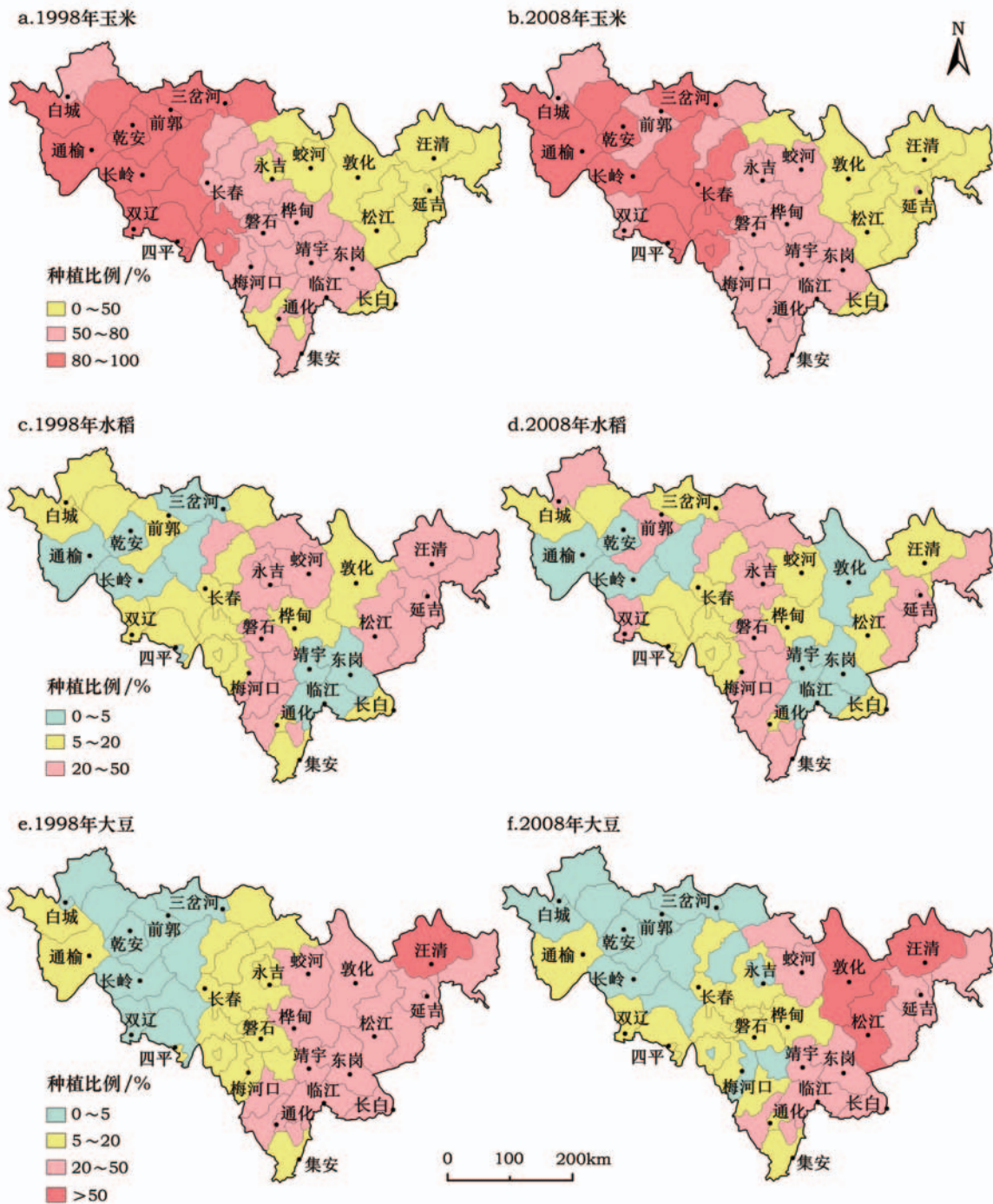


图5 1998年、2008年吉林省三种作物种植比例空间变化规律

Figure 5 Spatial variation of the ratio of planting area of three kinds of crops in Jilin Province in 1998 and 2008

低于原主要种植区,但是依然处于区域内的较高水平;大豆敏感区热量资源利用效率则显著低于非敏感区,且低于吉林省平均水平,主要原因是大豆敏感区位于吉林省最东部,积温较低,存在一定程度的热量资源约束。从三种作物的年均增长率来看,敏感区年均增长率均高于非敏感区,可见气候变暖

对主粮作物东扩区域的热量资源利用效率的提高有明显的正效应。因此,从热量资源优化利用的角度,可以适当向东扩展原主粮作物的种植区域,尤其是水稻和玉米。

(2)水资源利用效率。水资源利用效率能够很好地反映作物生育期内降水量对需水量的满足程

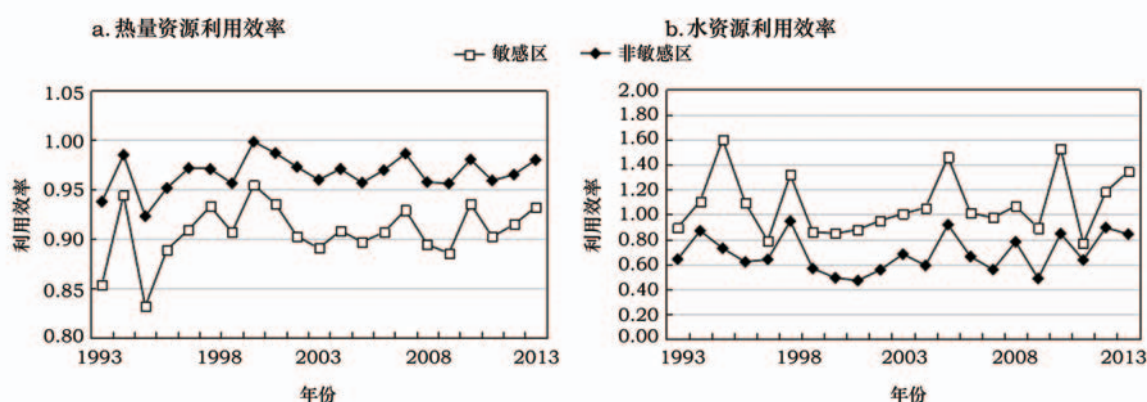


图6 1993–2013年敏感区与非敏感区水热资源利用效率时间变化情况

Figure 6 Time variation of water and heat resources utilization efficiency in sensitive and non-sensitive areas from 1993 to 2013

度,其值越大,说明农田水分供求平衡,作物对水分条件的适应性更好。如图6b所示,1993-2013年三种作物敏感区、非敏感区的水资源利用效率均呈现增长趋势,且敏感区水资源利用效率高干非敏感区,主要原因是敏感区降水资源条件优于非敏感区。

对比吉林省敏感区和非敏感区内三种作物水资源利用效率,如表5。只有水稻的水资源效率的均值小于1,由于水稻对灌溉水的要求最高,因此存在一定程度的水资源约束风险,而玉米和大豆的水资源利用率均大于1,基本不受水分约束的限制。其中,水稻敏感区水资源利用效率均值为0.88,显著高于非敏感区的0.64,也高于吉林省平均水平的0.67,由于吉林省中部地区降水量显著高于东部地区,水稻敏感区内水资源优势明显。同时,水稻敏感区年均增长率为7.29%,高于非敏感区的6.34%,说明气候变暖对水稻种植东扩区内水资源利用效率的提高有明显的正效应。因此,从水资源优化利用的角度,若向东扩展主粮作物的种植区域,应加强农田的灌溉系统和灌溉技术,以逐步提升水稻敏感区内的水资源利用效率。

### 3.2.2 主粮作物水热资源产出效率对比

因作物单产的变化受到气候因素、农业投入等多方面的影响,本研究用SPSS 19的Pearson相关分析探究作物产量变化和气候要素(温度和水分)之间的关系,结果如表6。三种作物生育期内的平均温度和积温与产量都呈现出显著相关,并且积温和作物产量的相关性最高;作物生育期内的需水量和

表6 1993–2013年吉林省气候要素与作物产量间的相关关系

Table 6 Correlation between climatic factors and crop yield in Jilin Province from 1993 to 2013

作物	5-9月平均气温 /℃	≥10℃ 积温/℃	降水量 /mm	需水量 /mm
水稻	0.382**	0.392**	-0.163**	0.285**
玉米	0.264**	0.271**	-0.058	0.181**
大豆	0.223**	0.216**	-0.096*	0.186**

注: \*\*, \* 分别表示在0.01和0.05水平上显著相关。

三种作物的产量都显著相关,降水量和作物产量的相关性只有玉米不显著,这说明温度和水分都是影响作物产量变化的主要因素。从不同作物的相关系数来看,气候变暖对水稻的影响最为明显,其次是玉米,大豆的影响最弱,这与Chen C Q等的研究结论一致<sup>[36]</sup>。

本文进一步计算主粮作物水、热资源的土地产出效率,用以反映气候因素(水分和温度)对粮食产量形成的贡献,结果如表7。从不同作物来看,水稻和玉米的水热资源产出效率明显高于大豆,这是由于大豆的单产水平较低(均值为2363.33kg/hm<sup>2</sup>),与玉米(6866.70kg/hm<sup>2</sup>)和水稻(7055.19kg/hm<sup>2</sup>)相比,不具有产出效率优势。薛庆喜认为合理的、科学的轮作制是大豆单产稳步提高的保障<sup>[37]</sup>,但由于大豆单产不高而且经济效益偏低,导致农民种豆积极性不高,吉林省只有很少比例实施玉米、大豆轮作,合理的大豆-玉米轮作不仅可以减少化肥使用,降低生产成本;而且能够培肥地力,改良土壤,提高粮豆产量,对于整个区域资源利用效率的提升和土地资源的可持续利用具有重要意义。



2017年3月

表7 1993-2013年吉林省敏感区和非敏感区域作物水热资源产出效率

Table 7 Water and heat resource yield efficiency of crops in sensitive and non-sensitive areas of Jilin Province from 1993 to 2013

区域	土地产出效率	水稻		玉米		大豆	
		均值	年均增长率/%	均值	年均增长率/%	均值	年均增长率/%
敏感区	热量资源产出效率/(kg/(hm <sup>2</sup> ·℃))	2.80	+0.99	2.68	+1.85	0.87	+0.18
	水资源产出效率/(kg/m <sup>3</sup> )	1.09	+0.85	1.53	+1.83	0.54	+0.20
非敏感区	热量资源产出效率/(kg/(hm <sup>2</sup> ·℃))	2.78	+0.21	2.66	+0.04	0.97	+1.53
	水资源产出效率/(kg/m <sup>3</sup> )	1.04	+0.53	1.52	+0.53	0.64	+1.71
吉林省	热量资源产出效率/(kg/(hm <sup>2</sup> ·℃))	2.53	+0.03	2.52	+1.25	0.94	+0.32
	水资源产出效率/(kg/m <sup>3</sup> )	0.90	+0.22	1.38	+1.57	0.58	+1.62

对比吉林省敏感区和非敏感区内的水热资源产出效率:水稻和玉米敏感区内的资源产出效率均高于非敏感区,也高于吉林省平均水平。这是由于水稻和玉米敏感区多为平原丘陵,气温适中且降水较多,土壤主要为黑土和河淤土,地力较高,粮食作物的单产水平高。同时20年间水稻和玉米的水热资源产出效率显著增加,年均增长率明显高于非敏感区,因此水稻和玉米种植区向东扩展将提高水热资源的产出效率。而大豆敏感区内气温较低而且降水偏少,多为山区,地力较低,若种植作物只能种植中早熟品种,水热资源产出效率的均值和年均增长率均低于非敏感区。因此,应避免研究区最东部地区如安图、长白等地粮豆的盲目扩种,减少水热资源约束风险。

## 4 结论

本文基于1993-2013年的农业统计资料和地面气象站观测资料,研究了水稻、玉米、大豆种植布局的演变趋势,比较分析了吉林省三种作物种植变化敏感区和非敏感区的水、热资源利用效率和产出效率的时空变化,得出如下主要结论:

(1)吉林省积温带发生了明显的东扩,第一积温带向东推移约25km,由蛟河-桦甸-辉南一线扩展到敦化-桦甸-靖宇一线;第二积温带由敦化-抚松一线向东南方向移动到安图县等地;原第四积温带已被第三积温带完全覆盖。水稻和玉米的气候种植界限东扩到敦化-靖宇-临江等吉林省中东部地区,大豆的气候种植界限东扩到了吉林省的长白县。

(2)从水热资源的利用效率来看,三种作物种植变化敏感区内的热量资源利用效率低于非敏感区,但水资源利用效率高于非敏感区。1993-2013年作物敏感区内水热资源利用效率呈现出增长趋

势,年均增长率显著高于非敏感区,气候变暖对吉林省资源利用效率的提高表现出明显的正效应。从水热资源优化的角度,可适当增加向东扩展主粮作物的种植面积,尤其是水稻和玉米,但要加强农田的灌溉系统和灌溉技术,以提高水稻的水资源利用效率。

(3)从水热资源的产出效率来看,吉林省水稻和玉米敏感区气温适中且降水较多,水热资源产出效率均高于非敏感区,但大豆敏感区内气温较低而且降水偏少,水热资源产出效率均低于非敏感区。因此水稻和玉米种植区向东扩展将提高水热资源产出效率,但应避免研究区最东部地区如安图、长白等地粮豆的盲目扩种,减少水热资源约束风险。

(4)积温和降水是影响吉林省作物分布的主要气候因素,因此本文只探讨了水资源和热量资源的利用效率及产出效率,未进一步评估作物种植界限东扩后的冷害风险和干旱风险,这也是未来研究的重点。

## 参考文献(References):

- [1] 孙凤华,杨修群,路爽,等. 东北地区平均、最高、最低气温时空变化特征及对比分析[J]. 气象科学, 2006, 26(2): 157-163. [Sun F H, Yang X Q, Lu S, et al. The contrast analysis on the average and extremum temperature trend in northeast China[J]. *Meteorological Science*, 2006, 26(2): 157-163.]
- [2] 满卫东,王宗明,刘明月,等. 1990-2013年东北地区耕地时空变化遥感分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 1-10. [Man W D, Wang Z M, Liu M Y, et al. Spatio-temporal dynamics analysis of cropland in Northeast China during 1990-2013 based on remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(7): 1-10.]
- [3] 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. [Jia J Y, Guo J P. Studies

- on climatic resources change for maize over last 46 years in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(3):302-307.]
- [4] 方修琦, 张学珍, 戴玉娟, 等. 1951~2005年中国大陆冬季温度变化过程的区域差异[J]. 地理科学, 2010, 30(4): 571-576. [Fang X Q, Zhang X Z, Dai Y Q, *et al.* Regionalization of winter temperature change over mainland of China during 1951-2005 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(4): 571-576.]
- [5] 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[J]. 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[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(5): 697-705.]
- [6] 王媛, 方修琦, 徐锁, 等. 气候变暖与东北地区水稻种植的适应行为[J]. 资源科学, 2005, 27(1): 121-127. [Wang Y, Fang X Q, Xu T, *et al.* Impact of climate warming and adaptation activities of rice plantation in Northeast China[J]. *Resources Science*, 2005, 27(1): 121-127.]
- [7] 王晓煜, 杨晓光, 吕硕, 等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响Ⅺ. 气候变暖对黑龙江寒地水稻安全种植区域和冷害风险的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(10): 1859-1871. [Wang X Y, Yang X G, Lv S, *et al.* The possible effects of global warming on cropping systems in China Ⅺ. the possible effects of climate warming on geographical shift in safe planting area of rice in cold areas and the risk analysis of chilling damage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(10): 1859-1871.]
- [8] 中国气象数据网. 中国地面气候资料日值数据集[EB/OL]. (2016-9-30) [2016-10-24]. [http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/SURF\\_CLI\\_CHN\\_MUL\\_DAY.html](http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY.html). [China Meteorological Data Network. China Ground Climatological Daily Data Set[EB/OL]. (2016-9-30) [2016-10-24]. [http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/SURF\\_CLI\\_CHN\\_MUL\\_DAY.html](http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY.html).]
- [9] 中国经济与社会发展统计数据库. 吉林统计年鉴[EB/OL]. (2015-10-01) [2016-10-24]. <http://tongji.cnki.net/kns55/Nav/HomePage.aspx?id=N2016010080&name=YJLTJ&floor=1>. [Statistical Database of China's Economic and Social Development. Jilin Statistical Yearbook[EB/OL]. (2015-10-01) [2016-10-24]. <http://tongji.cnki.net/kns55/Nav/HomePage.aspx?id=N2016010080&name=YJLTJ&floor=1>.]
- [10] 中华人民共和国农业部种植业管理司. 县级农作物数据库[EB/OL]. (2015-01-01) [2016-10-24]. <http://zzys.agri.gov.cn/nongqingxm.aspx>. [Planting Management Department, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. County Crop Database[EB/OL]. (2015-01-01) [2016-10-24]. <http://zzys.agri.gov.cn/nongqingxm.aspx>.]
- [11] Zhang J T, An P L, Pan Z H, *et al.* Adaptation to a warming-drying trend through cropping system adjustment over three decades: A case study in the northern agro-pastoral ecotone of China[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2015, 29(3): 496-514.
- [12] 崔读昌. 中国粮食作物气候资源利用效率及其提高的途径[J]. 中国农业气象, 2001, 22(2): 26-33. [Cui D C. Climatic resources utilization coefficient of cereal crops in China and development measures[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2001, 22(2): 26-33.]
- [13] 高涛, 于晓, 李海英. 内蒙古粮食作物热量和降水资源利用效率的分布特点[J]. 华北农学报, 2003, 18(2): 99-102. [Gao T, Yu X, Li H Y. A comprehensive commentary on distribution features of agroclimatic resource efficiency of grain crops in Inner Mongolia[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2003, 18(2): 99-102.]
- [14] 赵同应, 朱凌云, 胡良温, 等. 山西粮食作物水热资源利用效率分析及评价[A]. 中国气象学会农业气象与生态学委员会, 广西壮族自治区气象学会. 粮食安全与现代农业气象业务发展-2008年全国农业气象学术年会论文集[C]. 桂林: 广西壮族自治区气象学会, 2008. [Zhao T Y, Zhu L Y, Hu L W, *et al.* The Analysis and Evaluation of Water and Heat Resource Use Efficiency of Grain Crops in Shanxi Province[A]. Agricultural Meteorology and Ecology Committee of China Meteorological Society, Guangxi Zhuang Autonomous Region Meteorological Society. Food Security and the Development of Modern Agricultural Meteorological Service-the Proceedings of Annual Academic Conference on National Agricultural Meteorology in 2008[C]. Guilin: Guangxi Zhuang Autonomous Region Meteorological Society, 2008.]
- [15] 付雪丽, 张惠, 贾继增, 等. 冬小麦-夏玉米“双晚”种植模式的产量形成及资源效率研究[J]. 作物学报, 2009, 35(9): 1708-1714. [Fu X L, Zhang H, Jia J Z, *et al.* Yield performance and resources use efficiency of winter wheat and summer maize in double late-cropping system[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(9): 1708-1714.]
- [16] 李小勇. 南方稻田春玉米-晚稻种植模式资源利用效率及生产力优势研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2011. [Li X Y. Study on Resource Use Efficiency and Relative Advantage of Productivity in Spring Maize and Later Rice Planting Model on South China Paddy Field[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2011.]
- [17] 李淑娅, 田少阳, 袁国印, 等. 长江中游不同水稻种植模式产量及资源利用效率的比较研究[J]. 作物学报, 2015, 41(10): 1537-1547. [Li S Y, Tian S Y, Yuan G Y, *et al.* Comparison of yield and resource utilization efficiency among different maize and rice cropping systems in middle reaches of Yangtze River[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(10): 1537-1547.]

2017年3月

- [18] 罗怀良,陈国阶. 四川洪雅县农业气候适宜度评价[J]. 农业现代化研究, 2001, 22(5): 279-282. [Luo H L, Chen G J. Assessment of agroclimate suitability degree in Hongya County of Sichuan Province[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2001, 22(5): 279-282.]
- [19] 赖纯佳,千怀遂,段海来,等. 淮河流域双季稻气候适宜度及其变化趋势[J]. 生态学报, 2009, 28(11): 2339-2346. [Lai C J, Qian H S, Duan H L, et al. Climate suitability and its change trend of double-cropping rice in Huaihe River Basin[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(11): 2339-2346.]
- [20] 侯英雨,张艳红,王良宇,等. 东北地区春玉米气候适宜度模型[J]. 应用生态学报, 2013, 24(11): 3207-3212. [Hou Y Y, Zhang Y H, Wang L Y, et al. Climatic suitability model for spring maize in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(11): 3207-3212.]
- [21] 徐玲玲,吕厚茎,方利. 气候变化对黄淮海地区夏玉米气候适宜度的影响[J]. 资源科学, 2014, 36(4): 782-787. [Xu L L, Lv H Q, Fang L. Effect of climate change on the climate suitability of summer maize on the Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Resources Science*, 2014, 36(4): 782-787.]
- [22] 马兴祥,邓振镛,李栋梁,等. 甘肃省春小麦生态气候适宜度在适生种植区划中的应用[J]. 应用气象学报, 2005, 16(6): 820-827. [Ma X X, Deng Z Y, Li D L, et al. Study on eco-climate applicability of spring wheat for condign planting division in Gansu Province[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2005, 16(6): 820-827.]
- [23] 马树庆,郭顺姬,白亚梅,等. 东北区农业气候土壤资源潜力及开发利用研究[J]. 地理科学, 1995, 15(3): 243-252. [Ma S Q, Guo S J, Bai Y M, et al. The analysis of the potential productivity, exploitation and utilization of climate-soil resources in Northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1995, 15(3): 243-252.]
- [24] 王晓煜,杨晓光,孙爽,等. 气候变化背景下东北三省主要粮食作物产量潜力及资源利用效率比较[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3091-3102. [Wang X Y, Yang X G, Sun S, et al. Comparison of potential yield and resource utilization efficiency of main food crops in three provinces of Northeast China under climate change[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(10): 3091-3102.]
- [25] 中国农业百科全书编辑部. 中国农业百科全书·农业气象卷[M]. 北京: 农业出版社, 1988. [Editorial Department of Chinese Agricultural Encyclopedia. China Agriculture Encyclopedia · Agricultural Meteorology volume[M]. Beijing: Agriculture Press, 1988.]
- [26] 中国农业百科全书编辑部. 中国农业百科全书·作物卷[M]. 北京: 农业出版社, 1988. [Editorial Department of Chinese Agricultural Encyclopedia. China Agriculture Encyclopedia · Crop volume[M]. Beijing: Agriculture Press, 1988.]
- [27] 白彩云,李少昆,柏军华,等. 中国东北地区不同生态条件下玉米品种积温需求及利用特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(9): 2337-2342. [Bai C Y, Li S K, Bai J H, et al. Characteristics of accumulated temperature demand and its utilization of maize under different ecological conditions in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(9): 2337-2342.]
- [28] 季生太,杨明,纪仰慧,等. 黑龙江省近45年积温变化及积温带的演变趋势[J]. 中国农业气象, 2009, 30(2): 133-137. [Ji S T, Yang M, Ji Y H, et al. Change of accumulated temperature and evolution trends of accumulated temperature zone over last 45 years in Heilongjiang Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(2): 133-137.]
- [29] 曹萌萌,李俏,张立友,等. 黑龙江省积温时空变化及积温带的重新划分[J]. 中国农业气象, 2014, 35(5): 492-496. [Cao M M, Li Q, Zhang L Y, et al. Accumulated temperature variation and accumulated temperature rezone in Heilongjiang Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(5): 492-496.]
- [30] 李龙振,田景,刘忠杰,等. 图们江下游地区积温与粮豆产量的相关性[J]. 延边大学学报(自然科学版), 1999, 30(2): 36-42. [Li L Z, Tian J, Liu Z J, et al. Interrelationship between accumulated temperature and output in the area of Tumen river [J]. *Journal of Yanbian University (Natural Science)*, 1999, 30(2): 36-42.]
- [31] 马树庆. 论吉林省中部玉米带的气候生态适应性[J]. 生态学报, 1990, 25(2): 42-47. [Ma S Q. Climatic-ecological suitability for developing maize zones in central Jilin Province[J]. *Journal of Ecology*, 1990, 25(2): 42-47.]
- [32] 杨显峰,杨德光,汤艳辉,等. 黑龙江省年有效积温变化趋势和大豆温度生态适宜性种植区划[J]. 作物杂志, 2010, 23(2): 62-65. [Yang X F, Yang D G, Tang Y H, et al. Changes of effective accumulated temperature and ecological suitability of soybean in Heilongjiang Province[J]. *Crops*, 2010, 23(2): 62-65.]
- [33] 陈浩,李正国,唐鹏钦,等. 气候变化背景下东北水稻的时空分布特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(8): 2571-2579. [Chen H, Li Z G, Tang P Q, et al. Rice area change in Northeast China and its correlation with climate change[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(8): 2571-2579.]
- [34] 潘铁夫,张德荣,张文广,等. 中国大豆气候区划的研究[J]. 大豆科学, 1984, (3): 169-182. [Pan T F, Zhang D R, Zhang W G, et al. A study on the climatic regionalization of soybean in China [J]. *Soybean Science*, 1984, (3): 169-182.]
- [35] Yang X G, Chen F, Lin X M, et al. Potential benefits of climate change for crop productivity in China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 208: 76-84.
- [36] Chen C Q, Qian C R, Deng A X, et al. Progressive and active adaptations of cropping system to climate change in Northeast



- China[J]. *European Journal of Agronomy*, 2012, 38(1): 94-103.
- [37] 薛庆喜. 中国及东北三省 30 年大豆种植面积、总产、单产变化分析[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(35): 102-106. [Xue Q X.

Analysis on the change of 30 year's soybean areas, production and yield in China and Northeast China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(35): 102-106.]

## Cultivation patterns of main grain crops and evaluation of water and heat resource utilization efficiency in Jilin Province from 1993 to 2013

SONG Mengmei<sup>1</sup>, AN Pingli<sup>1</sup>, JIANG Li<sup>1</sup>, CAI Lujia<sup>2</sup>, ZHANG Zhe<sup>1</sup>, HUANG Can<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Beijing Municipal Commission of Urban Planning, Huairou Branch, Beijing 101400, China)

**Abstract:** Crop water and heat resource utilization efficiency changes are the foundations for increasing grain yield potential, realizing sustainable development of agriculture, and optimizing crop distribution and responses to climate change. Based on meteorological and statistical data in Jilin, China from 1993 to 2013, according to three crop accumulated temperature requirements, we divided climate planting boundaries and estimated water and heat resource utilization efficiency in an area expanded by climate warming. From 1993 to 2013, the accumulated temperature zone had an obvious eastward enlargement, climatic planting limits of rice and maize expanded eastward to the Dunhua-Jingyu-Linjiang line, and climatic planting limits of soybean expanded eastward to Changbai. The heat resource utilization efficiency of three crops in the sensitive area was lower than in the non-sensitive area, but the water resource utilization efficiency was higher than that in the non-sensitive area. Meanwhile, crop water and heat resource utilization efficiency in sensitive areas had a significant increasing trend and the average annual growth rate was higher than in the non-sensitive area. The water and heat resources yield efficiency of rice and maize in the sensitive area was higher than in the non-sensitive area, but the yield efficiency of soybean in the sensitive area was lower than that in the non-sensitive area. The conclusions were that climate warming had a positive effect on water and heat resource efficiency in the study area. The study area could appropriately expand the planting area of maize and rice to the east, and the irrigation system and technology should be strengthened to reduce water resource constraints on rice. Local residents should avoid blindly planting grain and soybean in the most eastern region in order to reduce the risk of heat resource constraints.

**Key words:** climate change; planting boundary; heat resources; water resources; utilization efficiency; yield efficiency; Jilin Province