

张宝林, 高聚林, 王志刚, 等. 内蒙古玉米主产区农业热量资源变化及其对策探讨[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(6): 757-765.

ZHANG Bao-lin, GAO Ju-lin, WANG Zhi-gang, et al. Agricultural thermal resource changes and corresponding agricultural strategies in major maize production regions of Inner Mongolia[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(6): 757-765.

内蒙古玉米主产区农业热量资源变化及其对策探讨

张宝林^{1,2}, 高聚林^{3*}, 王志刚³, 池梦雪¹, 赵俊灵¹, 郭佳¹, 彭健¹

(1. 内蒙古师范大学化学与环境科学学院, 呼和浩特 010020; 2. 内蒙古自治区环境化学重点实验室, 呼和浩特 010020; 3. 内蒙古农业大学农学院, 呼和浩特 010019)

摘要:为了探讨在气候变化、生态环境恶化和农业提质增效的压力下, 内蒙古玉米主产区农业热量资源的变化及其生产对策, 分析了1961—2017年间内蒙古玉米主产区通辽市、赤峰市、巴彦淖尔市、鄂尔多斯市和兴安盟等地区年均温、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温和生长季(5—9月)积温的变化。结果表明, 各地区年均温、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温和生长季积温存在地区差异, 但1961—2017年间三者均呈线性上升趋势, 而生长季积温占比下降。气温的升高和积温的增加使农业热量资源增加, 有利于玉米增产和种植面积的扩大, 使内蒙古气候温暖区玉米生产潜力增大; 但应避免越区种植, 警惕气象灾害风险。在气温升高的背景下, 通过品种选择、播期调整和肥料管理, 充分利用农业热量资源, 可使热量资源利用率提高15%, 对于内蒙古地区应对气候变化、实现玉米生产的高产高效具有重要意义。

关键词: 内蒙古; 气温; 积温; 玉米; 热量资源

中图分类号: S16

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2019)06-0757-09

doi: 10.13254/j.jare.2018.0229

Agricultural thermal resource changes and corresponding agricultural strategies in major maize production regions of Inner Mongolia

ZHANG Bao-lin^{1,2}, GAO Ju-lin^{3*}, WANG Zhi-gang³, CHI Meng-xue¹, ZHAO Jun-lin¹, GUO Jia¹, PENG Jian¹

(1. College of Chemistry and Environmental Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010020, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Environmental Chemistry, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010020, China; 3. College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China)

Abstract: Under the pressure of climatic change, eco-environmental deterioration, and agricultural efficiency improvements, changes in agricultural thermal resources and related countermeasures should be reconsidered for maize production. In this study, analysis of the agricultural thermal resources during the period 1961—2017 in the major production regions of Inner Mongolia (Tongliao City, Chifeng City, Bayannur City, Ordos City, and Hinggan Leagues) showed that average annual temperature (AAT), annual accumulated temperature ($\geq 10^{\circ}\text{C}$, AAT₁₀) and growing season (May—September) accumulated temperature ($\geq 10^{\circ}\text{C}$, GSAT₁₀) increased significantly, but the ratio of GSAT₁₀/AAT₁₀ declined significantly. The increase in air temperature and accumulated temperature improved thermal resources for maize production, which was beneficial for crop production and expansion and resulted in increased production potential in warm temperate areas. In the major maize production regions of Inner Mongolia, the use efficiency of thermal resources could be increased by 15% through the complete use of thermal resources, cultivar selection, sowing date adjustment, and appropriate water and fertilizer management. The results of the present study are of great significance to facilitate climatic change adaptation, highly efficient production, and yield breakthrough of maize production in Inner Mongolia.

Keywords: Inner Mongolia; air temperature; accumulated temperature; maize; thermal resources

收稿日期: 2018-09-09 录用日期: 2018-11-14

作者简介: 张宝林(1971—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为气候变化对农业生产的影响。E-mail: zhangbl@imnu.edu.cn

*通信作者: 高聚林 E-mail: nmgaojulin@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300803, 2018YFD0300403)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2017YFD0300803, 2018YFD0300403)

当温度高于植物生长的下限温度并且满足一定的积温条件时,植物才能正常生长发育。日平均温度超过某临界温度时的逐日温度累积值称为活动积温($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,简称积温),它概括了温度和持续日数,较好地反映了农作物发育速度与热量资源的关系。积温影响作物的分布、生物学性状、品质和产量,也影响主要农艺措施的选择,如最适播期^[1]、覆膜方式^[2]以及灾害防治^[3]等。积温反映不同作物对热量资源的需求差异,可以用来评价某一地区的热量条件是否满足某作物生长发育的要求。 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温是评价喜温作物生育期长短和所需热量多少的常用指标。

玉米是喜温作物,生长速率与温度密切相关,对温度的变化非常敏感。在玉米生长发育期间,如果平均气温升高,出苗速度和营养生长速率增加^[4];平均气温降低,成熟期将延迟,单产降低^[4]。积温影响玉米叶面积、株型与穗位高^[5];积温增加,最大叶面积指数增加^[6]。积温影响春玉米生物量和产量^[7],生育期积温与生物量、产量呈显著正相关^[6,8-10];积温减少,成熟期延迟,可能遭遇低温冷害而减产^[4]。气候变暖、热量资源增加使玉米生长临界积温等值线北移^[11],也有利于玉米单产的提高和种植面积的扩大^[8,10]。因此,热量资源变化对玉米生产有重要影响。

内蒙古玉米种植面积和产量居全国前列,玉米在工农业生产中占有重要地位。内蒙古东部玉米主产区温度呈显著上升趋势^[12],温暖区、温凉区存在成为玉米稳产区的潜力^[13-14]。虽然,学者在内蒙古东部^[12,14]、西辽河流域^[15]、河套灌区^[6]等地开展了气候变化对玉米生产的影响研究^[13,16],但仍缺乏对玉米主产区热量资源指标的深入探讨,而合理利用气候资源可以提高玉米的产量和质量^[17]。内蒙古玉米单产经历了缓慢增长、快速增长和徘徊停滞三个阶段^[12],表明其生产水平处于阶段性的相对稳定期,挖掘气候资源是突破玉米产量瓶颈的重要途径。在此背景下,有效降低玉米生产中气候资源及其变化影响的脆弱性,是内蒙古粮食安全生产和经济发展面临的挑战^[12],有必要深入探讨影响内蒙古玉米生产的热量资源变化,为充分利用自然资源、优化农艺措施、实现高产高效提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域简介

内蒙古横跨我国西北、华北和东北,总面积为118.3万 km^2 (图1),位于温带大陆性季风气候区,光热条件优良,粮食生产有较大的提升潜力。“十二五”

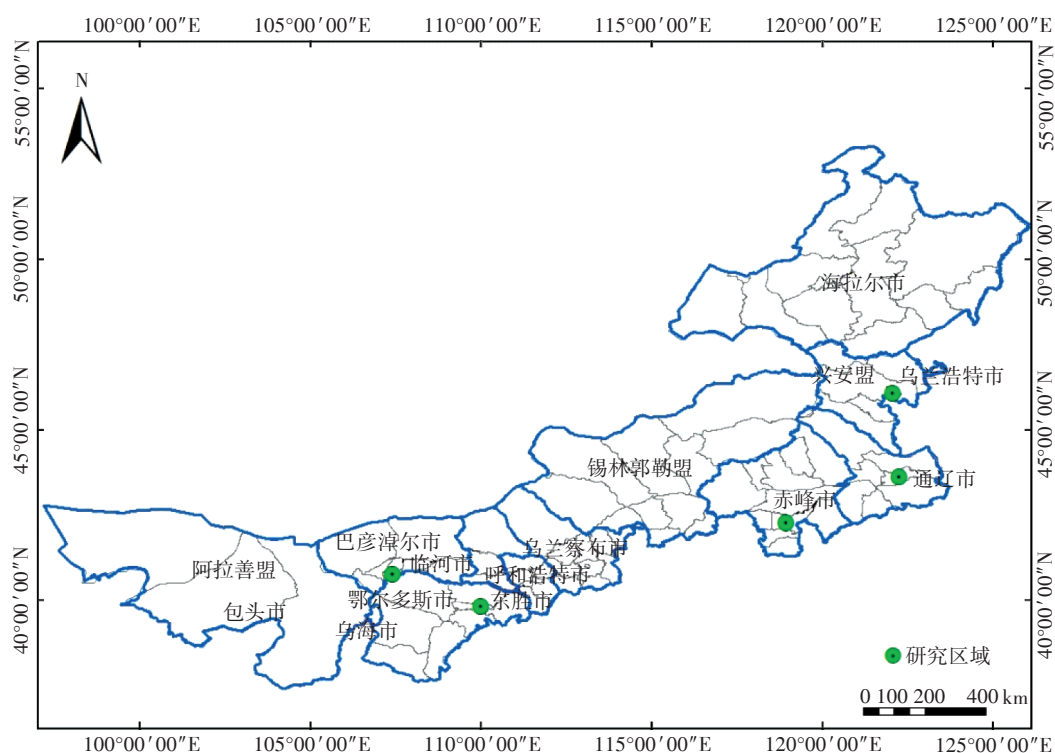


图1 研究区域及气象站点分布

Figure 1 Study area and meteorological station distribution

以后,内蒙古成为我国重要的商品粮调出地之一。2015年内蒙古人均粮食占有量为1127 kg,是全国人均水平的2.5倍,玉米产量达2 250.8万t,占全国总产量的10.02%^[18]。

从各盟市玉米产量及其占粮食总产量比例的变化可以看出,1988—2016年间内蒙古玉米产区主要包括通辽市、赤峰市、兴安盟、呼伦贝尔市、巴彦淖尔市和鄂尔多斯市等地区。在每一主产区,玉米总产量虽然在2015年后有下降趋势,但其变化基本上可以分为3个阶段,即缓慢增长期(1988—2000年)、快速增长期(2000—2012年)和基本稳定期(2012—2016年)(图2)。本文主要探讨5个玉米主产区,即通辽市(通辽)、赤峰市(赤峰)、兴安盟(乌兰浩特)、巴彦淖尔市(临河)和鄂尔多斯市(东胜)主要热量资源指标的变化趋势。

1.2 数据来源

研究所用数据包括玉米主产区生产情况和气象资料。玉米生产相关数据来自《内蒙古统计年鉴》(1989—2017年),日均温度数据(1961—2017年)来源于国家气象信息中心。由于数据的可获得性,气象数据所涵盖时间范围不完全一致。代表通辽市(通辽)、赤峰市(赤峰)、巴彦淖尔市(临河)及鄂尔多斯市(东胜)的气象数据时间范围为1961—2017年;代表兴安盟(乌兰浩特)的日值气象数据时间范围为1961—2010年,年均气温数据时间范围为1961—2016年。按照内蒙古玉米种植区划,乌兰浩特位于温暖区,通辽、赤峰、临河及东胜位于温热区^[19]。为了研究不同玉米品种在内蒙古不同地区的气候资源利用情况,开展了区域联网试验(图1),在扎兰屯市、乌兰浩特市、通辽市、赤峰市、呼和浩特市、包头市和杭锦后旗种植

不同熟性玉米品种德美亚1号(极早熟)、丰垦008(早熟)、九玉1034(中早熟)、先玉335(中熟)、利禾1号(中晚熟)和京科968(晚熟)),以考察不同熟性玉米的热量资源利用情况。

1.3 研究方法

积温的多少影响农作物的生长发育和熟制等。我国北方春玉米一般在日均温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 时活跃生长, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温[Annual accumulated temperature($\geq 10^{\circ}\text{C}$), AAT₁₀]能够很好地表征玉米生育期间的热量资源:

$$\text{AAT}_{10} = \sum_{i=1}^n t_i \quad (1)$$

式中:AAT₁₀为某年某点计算时段内日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$; t_i 为计算时段内第*i*日的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 日平均气温, $^{\circ}\text{C}$; n 为计算时段内的日数。 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温的计算采用五日滑动平均法^[20]。

年均温[Annual average temperature (AAT), $^{\circ}\text{C}$]、AAT₁₀、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 生长季(5—9月)积温[Growing season accumulated temperature($\geq 10^{\circ}\text{C}$), GSAT₁₀]和生长季积温占比(GSAT₁₀/AAT₁₀)等的线性回归分析均以年为自变量,利用SAS(Statistics analysis system)软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 热量资源的年变化

2.1.1 年平均气温的变化

5个玉米主产区年均温表现为临河>赤峰>通辽、东胜>乌兰浩特;1961—2017年间,年均温总体呈波动上升的趋势,不同地区变化趋势基本一致(图3)。线性回归分析表明,各地区温度升高趋势显著,临河、赤峰、通辽、东胜和乌兰浩特平均每10年分别上升

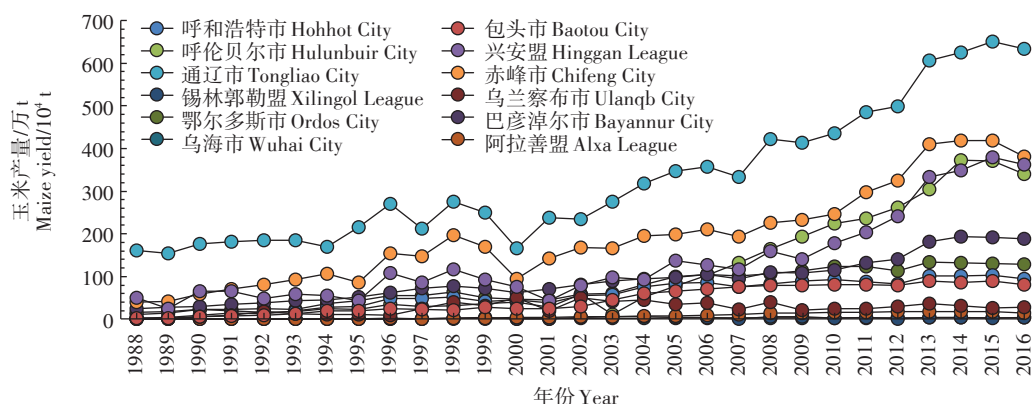


图2 内蒙古各盟市1988—2016年间玉米产量的变化

Figure 2 Maize production in cities or leagues of Inner Mongolia during 1988—2016

0.55、0.20、0.39、0.53 ℃和0.43 ℃。进入21世纪后,年均温表现为临河>赤峰>通辽>东胜>乌兰浩特。在温度升高过程中,也会出现温度偏低现象,如1969、1980、1984、1985、1996、2000、2005年和2010年等。

2.1.2 ≥ 10 ℃年积温的变化

5个玉米主产区 ≥ 10 ℃年积温存在较大差异,基本表现为临河>通辽>赤峰>乌兰浩特>东胜。1961—2017年间总体上均呈波动性上升趋势,20世纪90年代后积温的上升趋势尤为明显。相对而言,临河、通辽和赤峰有较充足的热量资源,积温较高,但在20世纪90年代后与东胜和乌兰浩特的积温差距逐渐缩小,因为东胜和乌兰浩特 ≥ 10 ℃年积温的线性增长趋势大于通辽和赤峰地区,临河地区积温增长最快,赤峰地区变化平缓(图4)。此外,与各地区年均温的排序不同,年均温高而积温不一定高,东胜年均温高于乌兰浩特,积温却低于乌兰浩特,通辽和赤峰间的差异与此相似。

2.2 热量资源距平的变化

2.2.1 年均温距平的变化

1961—2017年间,各地区年均温距平的变化表现较为一致,不同产区正、负距平出现的规律相似;1961年至20世纪80年代末,负距平较为频繁,此后正距平较为多见(图5)。尤其是进入21世纪以后,负距平出现频率降低,但在温度升高的大背景下,气温偏低年份仍可能出现(如2010—2013年)。

2.2.2 积温距平的变化

1961—2017年间,各地区 ≥ 10 ℃年积温距平的变化趋势表现一致,正、负距平出现的规律相似;1961年至20世纪90年代末,负距平出现较为频繁,此后正距平较为多见(图6)。进入21世纪以后,由于气温的升高,负距平频率低,在温度升高的大背景下,正距平频率出现稳定。

2.3 生长季热量资源变化

2.3.1 ≥ 10 ℃生长季积温的变化

玉米主产区 ≥ 10 ℃生长季积温与全年积温变化趋势较为一致,赤峰、临河和通辽地区 ≥ 10 ℃生长季积温较高,乌兰浩特和东胜积温较低(图7)。各地区

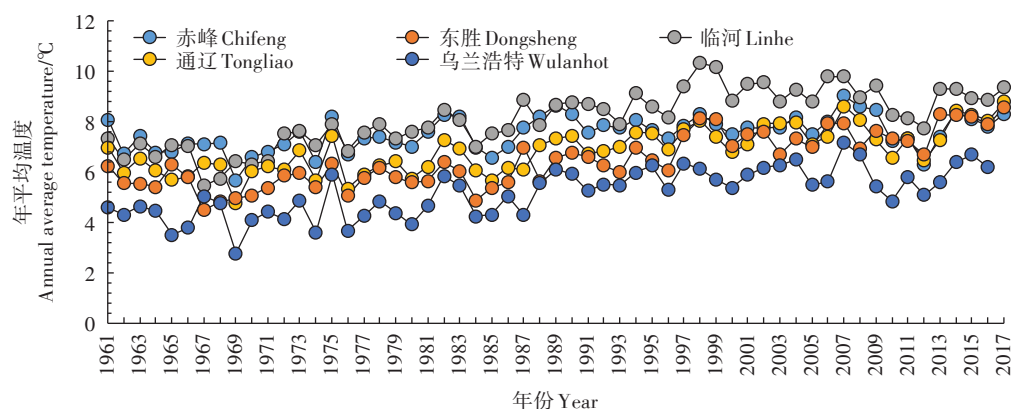


图3 内蒙古玉米主产区年均温的变化

Figure 3 Changes of AAT in maize production regions in Inner Mongolia

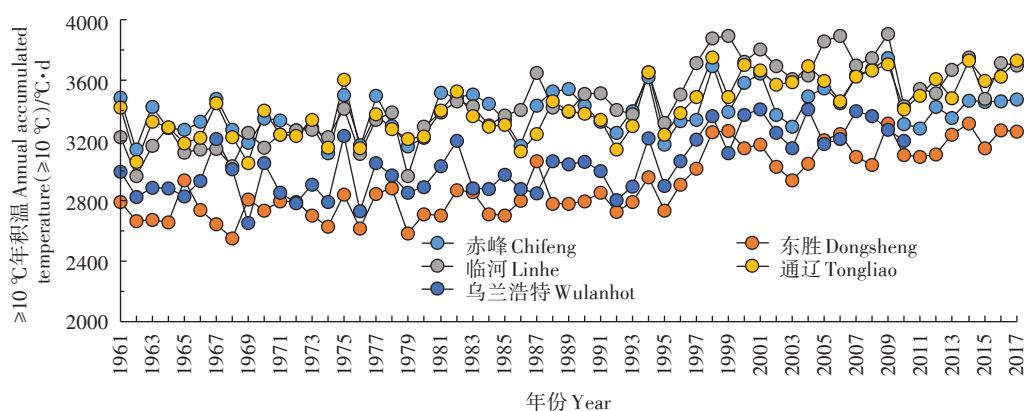


图4 内蒙古玉米主产区 ≥ 10 ℃年积温的变化

Figure 4 Changes of AAT₁₀ in maize production regions in Inner Mongolia

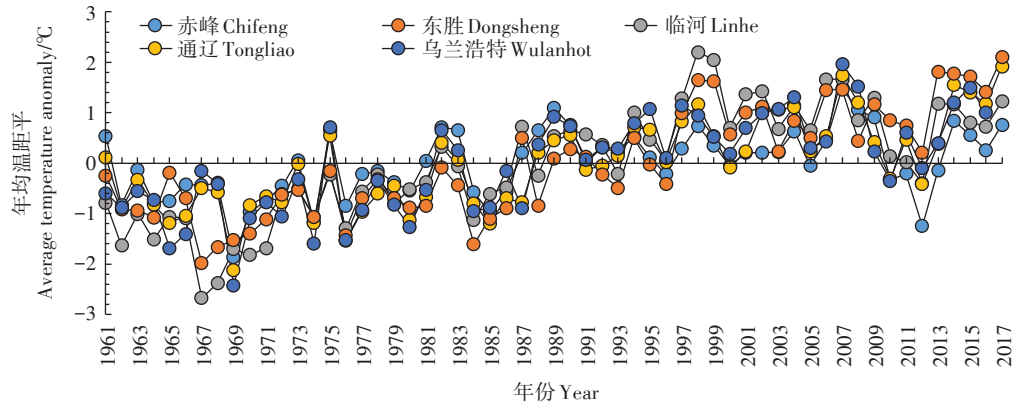


图5 内蒙古玉米主产区年均温距平的变化

Figure 5 Changes of average temperature anomaly in maize production regions in Inner Mongolia

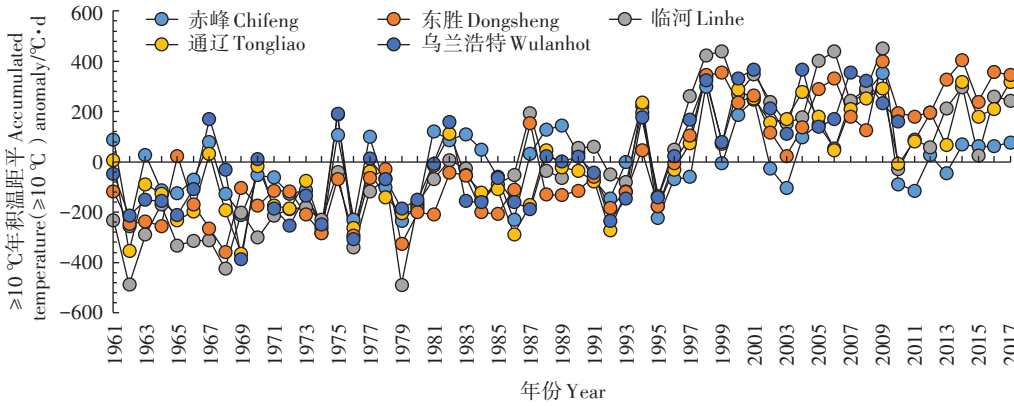


图6 内蒙古玉米主产区≥10℃年积温距平的变化

Figure 6 Changes of accumulated temperature($\geq 10^{\circ}\text{C}$) anomaly in maize production regions in Inner Mongolia

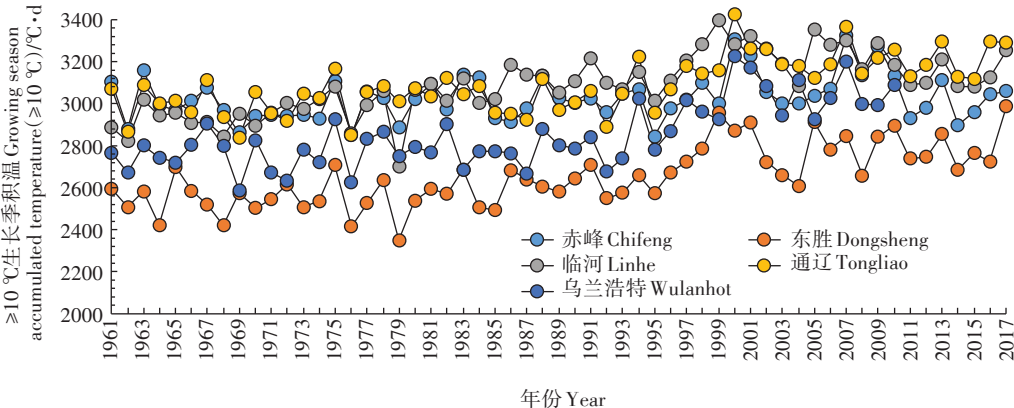


图7 内蒙古玉米主产区≥10℃生长季积温的变化

Figure 7 Changes of growing season accumulated temperature($\geq 10^{\circ}\text{C}$) in maize production regions in Inner Mongolia

生长季积温均呈增加的趋势,除赤峰外,其他地区生长季积温线性增长均达到显著水平($\alpha=0.01$,表1)。随着气温的逐渐升高,生长季积温相应增加;20世纪90年代后,生长季积温增加明显。

2.3.2 生长季积温占比的变化

为进一步探讨50余年来生长季热量资源变化情况,计算了玉米主产区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 生长季积温占全年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温的比例($\text{GSAT}_{10}/\text{AAT}_{10}$,图8)。 $\text{GSAT}_{10}/\text{AAT}_{10}$

表1 内蒙古玉米主产区热量资源变化趋势

Table 1 Changes of thermal resources in maize production regions in Inner Mongolia

地区 Region	指标 Index	线性回归 Linear regression	R^2
临河 Linhe	年均温(AAT)	$y=0.054\ 6x+6.562\ 0$	0.642 1**
	$\geq 10\ ^\circ\text{C}$ 年积温(AAT ₁₀)	$y=12.234\ 0x+3\ 100.4$	0.665 5**
	$\geq 10\ ^\circ\text{C}$ 生长季积温(GSAT ₁₀)	$y=6.396\ 9x-9\ 637.3$	0.534 3**
	$\geq 10\ ^\circ\text{C}$ 生长季积温占比(GSAT ₁₀ /AAT ₁₀)	$y=-0.001\ 3x+3.514\ 0$	0.511 3**
赤峰 Chifeng	年均温(AAT)	$y=0.020\ 0x+6.980\ 6$	0.245 0**
	$\geq 10\ ^\circ\text{C}$ 年积温(AAT ₁₀)	$y=3.753\ 7x+3\ 288.5$	0.172 9*
	$\geq 10\ ^\circ\text{C}$ 生长季积温(GSAT ₁₀)	$y=1.827\ 9x-607.80$	0.081 9
	$\geq 10\ ^\circ\text{C}$ 生长季积温占比(GSAT ₁₀ /AAT ₁₀)	$y=-0.000\ 5x+1.777\ 2$	0.085 4
通辽 Tongliao	年均温(AAT)	$y=0.039\ 1x+5.747\ 7$	0.538 1**
	$\geq 10\ ^\circ\text{C}$ 年积温(AAT ₁₀)	$y=8.188\ 2x+3\ 177.8$	0.503 9**
	$\geq 10\ ^\circ\text{C}$ 生长季积温(GSAT ₁₀)	$y=5.246\ 8x-7\ 346.2$	0.450 0**
	$\geq 10\ ^\circ\text{C}$ 生长季积温占比(GSAT ₁₀ /AAT ₁₀)	$y=-0.000\ 6x+2.151\ 0$	0.140 7*
东胜 Dongsheng	年均温(AAT)	$y=0.052\ 6x+4.966\ 8$	0.692 6**
	$\geq 10\ ^\circ\text{C}$ 年积温(AAT ₁₀)	$y=10.783\ 0x+2\ 599.0$	0.675 5**
	$\geq 10\ ^\circ\text{C}$ 生长季积温(GSAT ₁₀)	$y=6.185\ 9x-9\ 651.0$	0.511 9**
	$\geq 10\ ^\circ\text{C}$ 生长季积温占比(GSAT ₁₀ /AAT ₁₀)	$y=-0.001\ 2x+3.326\ 3$	0.364 8**
乌兰浩特 Wulanhot	年均温(AAT)	$y=0.042\ 8x+3.978\ 3$	0.536 1**
	$\geq 10\ ^\circ\text{C}$ 年积温(AAT ₁₀)	$y=9.098\ 1x+2\ 807.7$	0.451 3**
	$\geq 10\ ^\circ\text{C}$ 生长季积温(GSAT ₁₀)	$y=7.430\ 1x-11\ 899.7$	0.489 9**
	$\geq 10\ ^\circ\text{C}$ 生长季积温占比(GSAT ₁₀ /AAT ₁₀)	$y=-0.000\ 4x+1.678\ 6$	0.061 4

注:** 为0.01显著水平,* 为0.05显著水平。

Note:** represents significance at 0.01 probability level,* represents significance at 0.05 probability level.

在各个地区变化趋势一致,即随着时间的推移,GSAT₁₀/AAT₁₀呈下降趋势,与年均温、积温的变化趋势相反。在不同地区间,GSAT₁₀/AAT₁₀基本上表现为乌兰浩特>东胜>通辽>赤峰>临河,而且近年来占比差距进一步缩小。除赤峰、乌兰浩特外,其他地区GSAT₁₀/AAT₁₀线性下降趋势达到显著水平($\alpha=0.01$,表1)。1961—2017年间,多年生长季积温占比低于0.85(图8),超过15%的 $\geq 10\ ^\circ\text{C}$ 积温未得到充分利用。

3 讨论

3.1 玉米主产区气温显著升高,气候温暖区生产潜力可能增加

20世纪90年代后玉米主产区积温显著上升与气温突变发生时间一致^[12-13],气温升高使年积温和生长季积温明显增加。西部的黄灌区(东胜区和临河市)、东部的温暖区(乌兰浩特市)升温较快。赤峰市、通辽市、临河市由于气温、积温相对较高,热量较充足,而东胜区和乌兰浩特市年均温相对较低,热量积累相对不足。石家庄市^[21]和河西走廊^[8,10]等多地的研究表明年均温、积温的增加对玉米生产具有重要影响,与内蒙古玉米主产区积温的变化及其影响相似。全球气候变暖、热量资源的增加影响粮食作物的生长发育,乌兰浩特市等气候温暖区生长季积温占比较高,热量资源利用潜

力大,未来玉米适宜种植面积和产量可能增加。

3.2 积温提高有利于玉米增产,但作物生产的不确定性可能增加

对河套灌区^[6]、榆树市^[4]、桦甸市^[22]和河西走廊^[8]等地区的研究表明,随着温度的升高、 $\geq 10\ ^\circ\text{C}$ 热量资源增加,有利于玉米增产和种植面积的增加^[10]。1981—2010年内蒙古地区 $\geq 10\ ^\circ\text{C}$ 积温增加了350~570 $^\circ\text{C}\cdot\text{d}$,玉米的物候期延长10~20 d,中晚熟品种种植面积增加^[23]。在气候变暖的背景下,温度升高使生长季积温增加,玉米生产中使用的品种被生育期更长的品种代替,播种提前而收获延迟^[24]。气候的变化会导致玉米适宜性的改变,可能引起适宜种植区向东、北迁移。然而,只有生长季节降水充足、气温适宜、积温能满足作物对热量的需要,玉米才能长势好、产量高,但气候变化也可能使内蒙古干旱地区降水量减少,降低土壤含水量^[25],使玉米水分需求得不到满足进而减产。随着全球气候的变化,内蒙古初、终霜日波动变大^[26],存在低温冷害风险;由于气温的波动振幅加大,阶段性低温冷害亦可能严重。同时,随着农业科技的进步,农作物品种推陈出新;而高产新品种往往对气候条件的要求和敏感性更高,在充分发挥遗传优势、挖掘生产潜力的同时,需要加强对低温冷害的防范意识,开展低温冷害预报预测研究^[27]。

因此,要根据温度和降水量因地制宜地选择适宜的耕种制度和作物品种,充分利用光、温、水等自然资源,发挥雨热同期的优势和自然资源的利用潜力是当下粮食生产适应气候变化的重要任务。要提高资源利用率,需要将气候资源与农作物品种、土壤、耕作等立地条件相联系,在不同种植区采取相宜的措施。高涛等^[28]认为内蒙古各旗县热量利用效率差异较大,粮食作物热量利用效率东部大于中西部,中西部黄河灌区大多高于其他地区,旱区低于灌区;在 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温 $3000\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 左右的地区,运用夏秋粮套种可以提高气候资源利用率和粮食单产;同时指出热量利用效率并未因为热量资源的增减而表现出规律性的变化。本研究表明喜温作物热量资源及其年内分布均发生了变化,要充分挖掘光温资源,充分考虑温度升高、积温增加和生长季积温变化等问题。

3.3 充分利用农业热量资源,实现高产高效

随着年均温的升高,内蒙古玉米主产区年积温增加,生长季积温增加,而 $\text{GSAT}_{10}/\text{AAT}_{10}$ 呈下降趋势,在农业生产中应充分考虑这一变化,充分利用农业热量资源。光温资源充足是内蒙古粮食生产的一大优势,粮食作物降水利用率高于全国平均值^[29],但玉米光能利用效率较低,仅为 0.21% ^[30],光温生产潜力还有很大的提升空间。温度升高增加了热量资源,引起生长季积温增加,使喜温的玉米物候期延长,播种提前而收获延迟^[24],同时还可能引起适宜种植区向东移,应该对玉米的播期、品种等进行调整。在热量资源充足地区,宜选择中熟或晚熟品种,适时晚收增产,以充分地利用增加的积温^[31],但要注意生育期延长可能会增加水肥需求。内蒙古玉米主产区气候资源区域联网试验结果(图9)证明,在扎兰屯市、乌兰浩特市、通辽

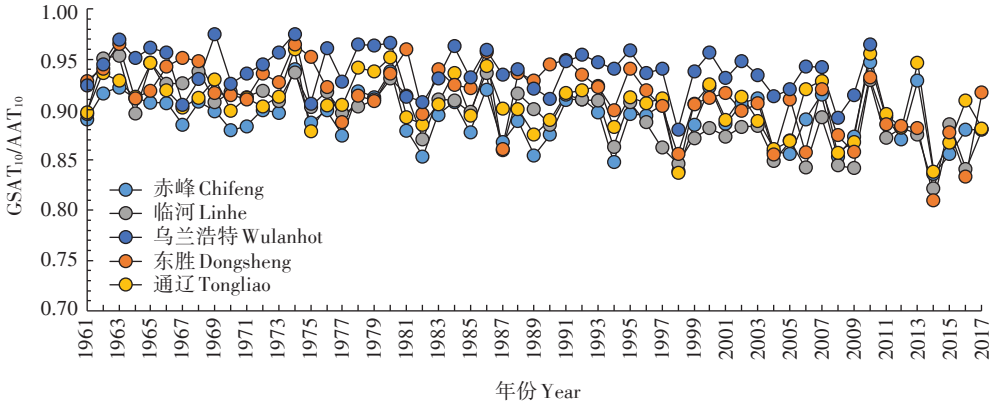


图8 内蒙古玉米主产区 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 生长季积温占比($\text{GSAT}_{10}/\text{AAT}_{10}$)的变化

Figure 8 Changes of the ratio of growing season accumulated temperature/annual accumulated temperature ($\text{GSAT}_{10}/\text{AAT}_{10}$) in maize production regions in Inner Mongolia

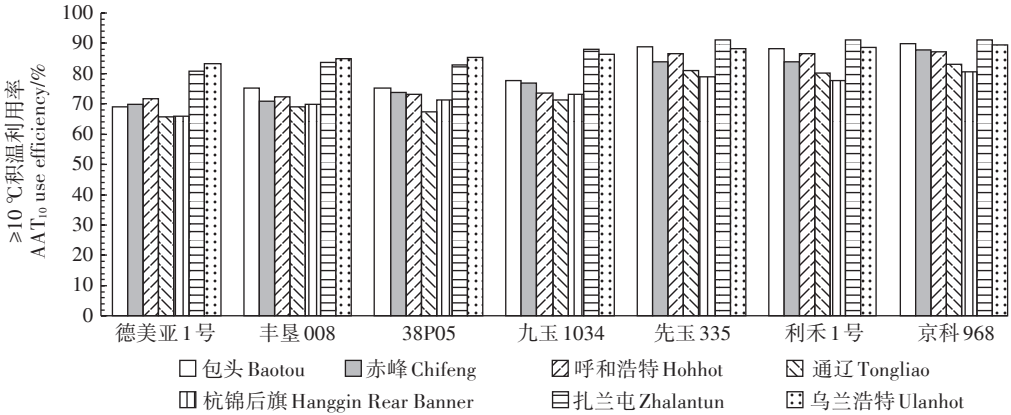


图9 不同品种玉米在不同地区的积温利用率

Figure 9 AAT_{10} use efficiency of maize cultivars in different production regions

市、赤峰市、呼和浩特市、包头市和杭锦旗,京科968、利禾1号和先玉335三个玉米品种生育期积温利用率高于其他品种,适合在有效积温较高地区种植;而德美亚1号未充分利用有效积温,适宜在有效积温较低的地区种植。随着温度的逐渐升高,乌兰浩特市等气候温暖的地区热量利用潜力较大,玉米种植面积有望增加。适宜的播期是实现作物高产的必要条件。从玉米成熟所需的热量资源角度出发,为避免资源的不充分利用所造成的损失,可采用覆膜技术增高土壤耕层地温,适时播种,优化热量资源利用。

4 结论

(1)1961—2017年间内蒙古玉米主产区温度升高, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温增加,农业热量资源增加,但地区间农业热量资源及其变化存在差异。

(2)各玉米主产区在农业热量资源增加的同时,年内积温分配发生变化,5—9月生长季积温占比下降明显,但温暖区生长季积温占比下降缓慢。

(3)农业热量资源的增加有利于玉米增产和种植面积的扩大,使气候温暖区玉米生产潜力增大;但应避免越区种植,警惕气象灾害风险。通过品种选择、播期调整和肥料管理,充分利用农业热量资源,科学管理因生长期延长而增加的水肥需求,热量资源利用可提高15%。

参考文献:

- [1] 徐成忠,董兴玉,杨洪宾,等. 积温变迁对夏玉米冬小麦两熟制播期的影响[J]. 山东农业科学, 2009(2):34-37.
XU Cheng-zhong, DONG Xing-yu, YANG Hong-bin, et al. Effects of accumulated temperature changes on sowing dates of summer maize and winter wheat in double cropping system[J]. *Shandong Agricultural Science*, 2009(2):34-37.
- [2] 马树庆,王琪,郭建平,等. 东北地区玉米地膜覆盖增温增产效应的地域变化规律[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8):66-71.
MA Shu-qing, WANG Qi, GUO Jian-ping, et al. Geographical change law of effects of corn plastic mulching on increasing temperature and production in northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(8):66-71.
- [3] 杜春英,李帅,郭建平,等. 东北三省玉米初霜冻时空分布特征及预报方法探讨[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(1):237-240.
DU Chun-ying, Li Shuai, GUO Jian-ping, et al. Discussion on temporal and spatial characteristics of early frost and its forecasting method of maize in the three northeastern provinces[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(1):237-240.
- [4] 王琪,马树庆,郭建平,等. 温度对玉米生长和产量的影响[J]. 生态学报, 2009, 28(2):255-260.
WANG Qi, MA Shu-qing, GUO Jian-ping, et al. Effects of air temperature on maize growth and its yield[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(2):255-260.
- [5] 孔令杰,马行军,卢红,等. 环境因素对玉米植株性状的影响[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(33):11641-11643.
KONG Ling-jie, MA Xing-jun, LU Hong, et al. Effects of environmental factors on plant traits in maize[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(33):11641-11643.
- [6] 王海梅,侯琼,云文丽. 温度变化对河套灌区玉米生长发育及产量结构的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(6):19-23.
WANG Hai-mei, HOU Qiong, YUN Wen-li. Effect of temperature change on growth and yield structure of maize in Hetao irrigation district[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(6):19-23.
- [7] 马树庆,王琪,徐丽萍,等. 积温对春玉米叶面积、生物量和产量的影响[J]. 现代农业科技, 2011(13):284-285.
MA Shu-qing, WANG Qi, XU Li-ping, et al. Effect of accumulated temperature on maize LAI, biomass and yield[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2011(13):284-285.
- [8] 曹玲,邓振镛,窦永祥,等. 气候变暖对河西走廊绿洲灌区玉米产量影响及对策研究[J]. 西北植物学报, 2008, 28(5):1043-1048.
CAO Ling, DENG Zhen-yong, DOU Yong-xiang, et al. Influence of climate warming on corn output in Hexi corridor oasis irrigation area and its countermeasure research[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2008, 28(5):1043-1048.
- [9] 李洁,晋凡生,张冬梅,等. 播期对不同熟期玉米品种生育期及产量的影响[J]. 农学学报, 2016, 6(12):1-7.
LI Jie, JIN Fan-sheng, ZHANG Dong-mei, et al. Effects of sowing dates on growth stage and yield of maize varieties with different maturity periods[J]. *Journal of Agriculture*, 2016, 6(12):1-7.
- [10] 殷雪莲,何金梅,郭萍萍. 河西走廊中部 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 界限温度演变特征及其对玉米生产的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(6):236-243.
YIN Xue-lian, HE Jin-mei, GUO Ping-ping. Evolvement of critical temperature on $\geq 10^{\circ}\text{C}$ limit and its effect on maize production in central Hexi corridor[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(6):236-243.
- [11] Brown R A, Rosenberg N J. Climate change impacts on the potential productivity of corn and winter wheat in their primary United States growing regions[J]. *Climatic Change*, 1999, 41(1):73-107.
- [12] 张宝林,罗瑞林,高聚林. 内蒙古东部玉米主产区气候条件的变化及其对玉米生产的影响[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2013, 42(2):185-191.
ZHANG Bao-lin, LUO Rui-lin, GAO Ju-lin. Climate changes in the main corn production regions in eastern Inner Mongolia[J]. *Journal of Inner Mongolia Normal University(Natural Science Edition)*, 2013, 42(2):185-191.
- [13] 罗瑞林. 气候变化对内蒙古春玉米产量影响的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2013.
LUO Rui-lin. Impacts of climate change on spring maize production in Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013.

- [14] 张宝林, 罗瑞林, 高聚林. 内蒙古东部玉米主产区气候空间的变化[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(22):5027-5033.
ZHANG Bao-lin, LUO Rui-lin, GAO Ju-lin. Climate space changes in the main maize production regions of eastern Inner Mongolia[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2012, 51(22):5027-5033.
- [15] 李 依, 王秀芬, 杨艳昭, 等. 西辽河流域玉米气候生产潜力变化分析[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(2):239-247.
LI Yi, WANG Xiu-fen, YANG Yan-zhao, et al. Analysis of corn climatic potential productivity change in the west Liao River basin[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39(2):239-247.
- [16] Luo R L, Zhang B L, Gao J L, et al. Climate change impacts on corn production as evidenced by a model and historical yields in Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 2012, 10(2):976-983.
- [17] 李效珍. 合理利用气候条件提高玉米产量和品质[J]. 山西农业科学, 2009, 37(4):88-89.
LI Xiao-zhen. Reasonable use of climatic condition to improve maize yield and quality[J]. *Shanxi Agricultural Sciences*, 2009, 37(4):88-89.
- [18] 段凤龙. 从温饱到小康:内蒙古粮食生产70年研究[J]. 内蒙古财经大学学报, 2017, 15(6):12-15.
DUAN Feng-long. Research on food production development of Inner Mongolia in the past seven decades: From having enough to eat to being fairly well-off[J]. *Journal of Inner Mongolia University of Finance and Economics*, 2017, 15(6):12-15.
- [19] 佟屏亚. 中国玉米种植区划[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1992.
TONG Ping-ya. Maize plantation regionalization in China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1992.
- [20] 姜会飞. 农业气象观测与数据分析[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
JIANG Hui-fei. Agricultural meteorological observation and data analysis[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [21] 侯大山, 李月华, 赵军华, 等. 气候变暖对石家庄市小麦-玉米周年生产热量资源循环利用的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(29):11633-11635.
HOU Da-shan, LI Yue-hua, ZHAO Jun-hua, et al. Effect of climate warming on wheat-corn anniversary production heat resource recycling in Shijiazhuang City[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(29):11633-11635.
- [22] 赵俊姣, 钟婷婷, 张 晔. 积温对玉米生长发育和产量形成的影响分析[J]. 乡村科技, 2017(1):57-58.
ZHAO Jun-jiao, ZHONG Ting-ting, ZHANG Ye. Analysis on the impacts of accumulated temperature on maize growth and yield[J]. *Village Technology*, 2017(1):57-58.
- [23] 侯 琼, 郭瑞清, 杨丽桃. 内蒙古气候变化及其对主要农作物的影响[J]. 中国农业气象, 2009, 30(4):560-564.
HOU Qiong, GUO Rui-qing, YANG Li-tao. Climate change and its impact on main crops in Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(4):560-564.
- [24] 侯 琼, 李 杨, 包松林. 内蒙古东部区粮食产量对气候变化的响应[J]. 中国农业气象, 2011, 32(增1):113-117.
HOU Qiong, LI Yang, BAO Song-lin. Response of crop yield to climate change in the eastern Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(Suppl 1):113-117.
- [25] 付 刚, 钟志明. 实验增温对西藏高原玉米田土壤呼吸的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(1):49-54.
FU Gang, ZHONG Zhi-ming. Effect of experimental warming on soil respiration in a maize system of Tibet[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(1):49-54.
- [26] 白美兰, 郝润全, 高建峰, 等. 内蒙古地区极端气候事件分布特征及对农业影响评估[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(2):21-27.
BAI Mei-lan, HAO Run-quan, GAO Jian-feng, et al. Distribution character of extreme climatic events and evaluation of its influence on agriculture in Inner Mongolia[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(2):21-27.
- [27] 侯 琼, 张晴华. 内蒙古地区玉米低温冷害动态监测指标的建立[J]. 中国农业气象, 2013, 34(5):588-594.
HOU Qiong, ZHANG Qing-hua. Study on dynamic monitoring index of maize chilling damage in Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2013, 34(5):588-594.
- [28] 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 Tao, YU Xiao, LI Hai-ying. A comprehensive commentary on distribution features of agroclimatic research efficiency of grain crops in Inner Mongolia[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2003, 18(2):99-102.
- [29] 窦杰凤, 蒋万波, 崔文华. 内蒙古东部地区玉米降水利用率与生产潜力的研究[J]. 内蒙古农业科技, 2006(5):34-35.
DOU Jie-feng, JIANG Wan-bo, CUI Wen-hua. Studies on precipitation use efficiency and production potential of maize in the eastern Inner Mongolia[J]. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2006(5):34-35.
- [30] 高 涛, 于 晓, 李海英. 内蒙古粮食作物对光能利用效率的分布特点[J]. 华北农学报, 2003, 18(1):103-106.
GAO Tao, YU Xiao, LI Hai-ying. The distribution characteristics of solar energy efficiency of cereal crops in Inner Mongolia[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2003, 18(1):103-106.
- [31] 刘月娥, 谢瑞芝, 张厚宝, 等. 不同生态区玉米适时晚收增产效果[J]. 中国农业科学, 2010, 43(13):2820-2828.
LIU Yue-e, XIE Rui-zhi, ZHANG Hou-bao, et al. Study on increasing rate of maize yield after putting off harvest time in different ecoregions[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(13):2820-2828.