

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2020.06.001

王勇,张镇涛,张方亮,等.气候变化背景下玉米品种更替对新疆光热资源利用效率的影响[J].中国农业气象,2020,41(6):331-344

气候变化背景下玉米品种更替对新疆光热资源利用效率的影响*

王 勇¹, 张镇涛², 张方亮², 郭世博², 杨晓光²

(1.新疆生态气象与卫星遥感中心, 乌鲁木齐 830011; 2.中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要:以新疆地区乌兰乌苏和哈密站春玉米、喀什和库尔勒站夏玉米为研究对象,基于 1981–2019 年气象资料、1981–2018 年农业气象试验站玉米作物资料和土壤资料,分析 APSIM-Maize 模型在新疆典型站点的适用性;并结合统计学方法,分析了气候变化背景下新疆春玉米和夏玉米生长营养和生殖生长阶段,以及生长季内有效热时数和有效辐射的变化特征;采用调参验证后的 APSIM-Maize 模型,明确了气候变化背景下品种更替对玉米产量和光热资源利用效率的影响。结果表明:调参验证后的 APSIM-Maize 模型可较好地模拟研究区域春玉米和夏玉米的生育期和产量。气候变化背景下玉米生长季内热量资源和辐射资源呈增加趋势,其中春玉米以生殖生长阶段延长为主,夏玉米以营养生长阶段的延长为主。研究时段内玉米生育期缩短、产量降低,但品种更替使玉米生育期延长、产量提高,其中春玉米表现为生育期延长,生殖生长阶段占全生育期比例提高,而夏玉米则表现为生育期缩短趋势的减小。同时,品种更替也显著提升了玉米生长季内的光热资源利用效率。

关键词:气候变化;新疆玉米;APSIM 模型;生长发育;产量;资源利用效率

Impact of Climate Change and Varieties Replacement on Maize Yield and Resource Use Efficiency in Xinjiang

WANG Yong¹, ZHANG Zhen-tao², ZHANG Fang-liang², GUO Shi-bo², YANG Xiao-guang²

(1. Xinjiang Ecological Meteorology and Satellite Remote Sensing Center, Urumqi 830011, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193)

Abstract: Studying the effect of varieties replacement on the heat and radiation resources use efficiency can provide a scientific reference for adapting to climate change. The Wulanwusu spring maize, Hami spring maize, Kashgar summer maize, and Korla summer maize in Xinjiang were selected as the research objects. Based on the meteorology data(1981–2019), maize field trial data(1981–2018) from agro-meteorological experiment stations, and soil data, the adaptability of APSIM-Maize model in the typical sites in Xinjiang was analyzed. The accumulated effective thermal time(AcTT) and accumulated photosynthesis radiation(AcPAR) during vegetative growing period(VGP), reproductive growing period(RGP), and whole growing period(WGP) of Xinjiagn spring maize and summer maize were calculated. Then, the influence of climate change on maize yield and heat/radiation resources use efficiency were analyzed under the scenarios of varieties replacement or not by the validated APSIM-Maize model. The results showed that: (1) the validated APSIM model had better adaptability in spring or summer maize development and yield formation at the typical sites in Xinjiang. (2)The AcTT and AcPAR in the WGP showed an increasing trend, of which spring maize mainly increased in the RGP, and summer maize mainly increased in the VGP. (3)The length of maize growing period was shortened, and yield was reduced by climate change. But the

* 收稿日期: 2020-02-06

基金项目: 中亚大气科学项目 (caas201918); 国家自然科学基金项目 (41965002); 国家重点研发计划项目 (2016YFD0300101-03)

第一作者联系方式: 王勇, E-mail:443409880@qq.com

varieties replacement had alleviated these adverse effect and increased yield. Among them, the spring maize showed an extension of growing period, and the proportion of RGP in WGP was increased, while summer maize showed a decrease in the shortening trend of growing period. At the same time, the heat resources and radiation resources use efficiency during maize growing period were also significantly increased by varieties replacement.

Key words: Climate change; Maize in Xinjiang; APSIM; Growth and development; Yield; Resource use efficiency

工业革命以来, 全球正在经历最显著的气候变化过程, 截至 2012 年, 过去的 130a 全球升温 0.85 °C^[1]。中国是全球气候变化敏感区之一, 陆地升温幅度高于全球平均水平^[2]。新疆属于干旱半干旱地区, 降水稀少、水资源缺乏、生态环境脆弱, 对气候变化影响十分敏感^[3-4]。1956–2005 年以来新疆增温速率为 0.28 °C·10a⁻¹, 与全国的变化较为一致, 同时气候变暖背景下年降水量总体呈上升趋势^[5-6]。

中国玉米种植面积和产量均占粮食作物的三分之一左右, 在粮食安全中占有重要地位^[7-8]。西北玉米区在中国玉米生产中虽比重较其它主产区小, 但因其特殊光温条件, 该区域在玉米生产中极为重要。新疆辐射强, 气温日较差大, 加之冰川融水资源增加, 近年来屡创中国玉米高产记录, 为玉米研究的热点区域之一^[9-10]。

前人在气候变化对玉米影响方面开展了大量研究, 结果表明, 气温升高背景下, 全国约 80% 站点玉米抽穗期和成熟期提前, 全生育期呈缩短趋势^[11], 但生殖生长阶段的延长, 利于玉米产量提升^[12]。Lobell 等采用统计分析方法研究发现气候变化导致全球玉米产量下降 3.8%^[13], 且产量变异性增加^[14]。与田间试验周期长和统计方法不考虑作物生理过程相比, 作物模型因其具有考虑作物生长动态, 且可重复性高的特点^[15], 已经成为气候变化对作物影响评估的有效方法^[16]。Liu 等采用 APSIM 模型研究发现, 气候变化导致中国东北春玉米潜在产量下降 22%~26%^[17]; 赵俊芳等基于 APSIM 模型研究发现, 西北内陆区春玉米产量对温度和潜在蒸散响应明显^[18]; 李阔等采用 DSSAT 模型评估结果表明, 未来升温情景下全国玉米产量整体呈降低趋势, 且区域间存在差异^[19]; 张建平采用 WOFOST 模型, 分析了温度对东北三省玉米产量波动的影响程度^[20]。综上现有研究表明, 气候变化背景下作物生育期缩短, 产量降低, 但通过更替品种可减缓气候变化负面影响, 提升玉米产量潜力^[21-24]。气候资源利用效率是衡量作物生长季资源有效性的指标之一, 明确一个区域气候资源利用效率, 对于充分利用当地气候资

源, 具有重要的指导意义^[25]。

目前针对气候变化对新疆玉米影响程度以及品种更替对资源利用效率的影响仍缺乏系统性研究, 由于新疆地区为灌溉农业, 因此本研究重点分析热量和辐射资源利用效率。选取新疆典型站点, 基于 1981–2019 历史气象数据和农业气象试验站玉米观测资料, 结合 APSIM 模型, 研究明确气候变化对玉米生育期、产量和资源利用效率的影响程度, 阐明玉米品种更替对气候变化适应效应, 以期为科学评估气候变化对新疆玉米影响, 以及玉米生产适应气候变化提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

新疆维吾尔自治区温带大陆性气候特征显著, 温度日较差大, 日照充足, 降水量少, 气候干燥^[26]。该地区多为灌溉农业, 是玉米种植密度和产量潜力最大区域^[9]。选择新疆维吾尔自治区的乌鲁木齐 (44° 26' N, 84° 40' E, 478.7m)、哈密 (42° 49' N, 93° 31' E, 737.2m)、库尔勒 (41° 45' N, 86° 08' E, 931.5m) 和喀什 (39° 29' N, 75° 45' E, 1385.6m) 为典型站点, 分析气候变化背景下当地在品种更替和不更替条件下春玉米和夏玉米生育期、产量及热量资源利用效率的可能变化, 其中乌鲁木齐站和哈密站种植春玉米, 库尔勒站和喀什站种植夏玉米。

1.2 数据来源

气象数据包括 1981–2019 年 4 个代表性站点的逐日气象资料。主要有平均气温、最高气温和最低气温、日照时数和降水量等。作物数据选取 4 个研究站点的农业气象试验站资料, 包括玉米的品种、关键生育期、产量及田间管理措施 (水肥施用量及其日期), 以上数据来自于新疆气象局。土壤数据来自中国科学院南京土壤研究所, 包括容重、pH、全氮含量、有机质含量、田间持水量和凋萎系数等。

1.3 研究方法

1.3.1 APSIM 模型有效性评价

采用农业生产系统模型 (Agricultural Production

System SIMulator, APSIM) 模拟玉米的生长发育及产量形成。该模型由澳大利亚联邦科学工业组织和昆士兰州政府联合开发, 可用于模拟农业系统中各主要组分的机理过程, 该模型在中国应用广泛^[27]。根据气候、土壤以及玉米生育期、产量和栽培管理措施等资料, 对 APSIM-Maize 模型进行调参和验证, 选择国际上常用的决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE)、归一化均方根误差 (NRMSE)、平均绝对误差 (MAE) 和 D 指标^[28], 对模型在研究站点的适用性进行评价, 各指标计算式为

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \quad (1)$$

$$\text{NRMSE}(\%) = 100 \times \frac{\text{RMSE}}{\bar{O}} \quad (2)$$

$$\text{MAE} = \frac{\sum |S_i - O_i|}{n} \quad (3)$$

$$D = 1 - \frac{\sum (O_i - S_i)^2}{\sum (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (4)$$

式中, S_i 为模拟值, O_i 为实测值, \bar{O} 为实测平均值, n 为样本数。 R^2 和 D 值反应模拟值与实测值的一致性, 数值越接近 1 模拟效果越好; RMSE、NRMSE 和 MAE 反应模拟值与实测值的误差大小, 数值越小说明模拟结果越好。

1.3.2 模型模拟情景设置

利用调参验证后的模型, 模拟 4 个典型站点的玉米光温潜在产量。在模型中设置水肥不受限制, 即充分灌溉和施肥。播期为该站点实际播期的历年平均值, 其中乌兰乌苏站春玉米为 5 月 9 日, 哈密站为 5 月 16 日; 库尔勒站夏玉米为 7 月 11 日, 喀什为 7 月 2 日。设置品种更替 (各典型站点采用各年代实际种植的品种) 和品种不更替 (各典型站点采用 1980S 种植品种) 两种情景。土壤数据采用该地区实际土壤数据。

1.3.3 农业光热气候资源

采用累积有效热时数 (Accumulated effective thermal time, AcTT)、累积有效辐射 (Accumulated photosynthesis active radiation, AcPAR) 表征玉米生长季光热气候资源。

使用 APSIM-Maize 模型中热时数计算玉米生长季逐日有效热时数 (TT_i), 继而通过逐日累加计算得到累积有效热时数 (AcTT), 相关计算式为^[29]

$$TT_i = \begin{cases} 0 & (t < 0 \text{ 或 } t \geq 44) \\ \frac{5}{9}t & (0 \leq t < 18) \\ t - 8 & (18 \leq t < 34) \\ -\frac{13}{5}t + 114.4 & (34 \leq t < 44) \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{AcTT} = \sum_{i=1}^n TT_i \quad (6)$$

式中, AcTT 为累计有效热时数 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$), TT_i 为第 i 天的有效热时数 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$), t 为日平均温度 ($^{\circ}\text{C}$), 为日最高温度与最低温度的平均值, n 为生育期长度 (d)。

采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式, 利用实测日照时数计算逐日辐射^[30], 进而计算辐射中能被光合作用直接利用的部分 (400–700nm) 即光合有效辐射, 其计算式为^[29]

$$\text{PAR}_i = 0.5R_{s_i} \quad (7)$$

$$\text{AcPAR} = \sum_{i=1}^n \text{PAR}_i \quad (8)$$

式中, AcPAR 为累计光合有效辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$), PAR_i 为第 i 天的光合有效辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$), R_{s_i} 为第 i 天的短波辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$), n 为生育期长度 (d)。

采用线性回归方程的回归系数来表征各要素变化趋势。计算式为

$$X_t = at + b \quad (9)$$

式中, X_t 为样本, t 为时间 (年份), a 为回归系数, b 为截距, a 和 b 通过最小二乘法进行估计。以 $10a$ 作为该要素的气候倾向率或变化率。

1.3.4 资源利用效率计算

热量资源利用效率 (HUE) 计算式为^[31]

$$\text{HUE} = \frac{Y}{\text{AcTT}} \quad (10)$$

式中, HUE 为热量资源利用效率 [$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} (\text{^{\circ}\text{C} \cdot \text{d})^{-1}$], Y 为单位面积玉米产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), AcTT 为玉米生长季内累计有效热时数。

辐射资源利用效率 (RUE) 计算式为^[32]

$$\text{RUE} = \frac{Y}{\text{AcPAR}} \quad (11)$$

式中, RUE 为辐射利用率 ($\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$); Y 为单位面积玉米产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 由 APSIM-Maize 模型输出; AcPAR 为玉米生长季内累计太阳光合有效辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)。

2 结果与分析

2.1 玉米生长季光热气候资源及品种更替变化

2.1.1 光热气候资源变化

由图 1 和表 1 可见, 乌兰乌苏和哈密站春玉米生长季内热量和辐射资源变化不显著, 但营养生长和生殖生长阶段有所不同。两个站点表现为营养生长阶段内有效热时数和有效辐射大致呈减少趋势, 特别是乌兰乌苏站有效热时数减少趋势显著, 为 $-45.77^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P<0.01$)。而生殖生长阶段增加趋势显著, 其中有效热时数乌兰乌苏站增加趋势为 $47.68^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P<0.01$), 哈密为 $72.00^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$

($P<0.01$), 有效辐射哈密增加趋势为 $48.04^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P<0.01$)。夏玉米生长季、营养阶段和生殖阶段的热量与辐射资源大都呈增加趋势, 且库尔勒站的增加趋势最为显著, 全生长季和营养生长阶段的有效热时数增加趋势分别为 $67.22^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P<0.01$) 和 $49.33^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P<0.01$), 有效辐射增加趋势分别为 $36.06\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P<0.01$) 和 $28.27\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P<0.01$)。除部分站点变化趋势不显著外, 总体而言, 玉米生长季内热量资源和辐射资源呈增加趋势, 其中春玉米以生殖生长阶段增加为主, 而夏玉米以营养生长阶段增加为主。

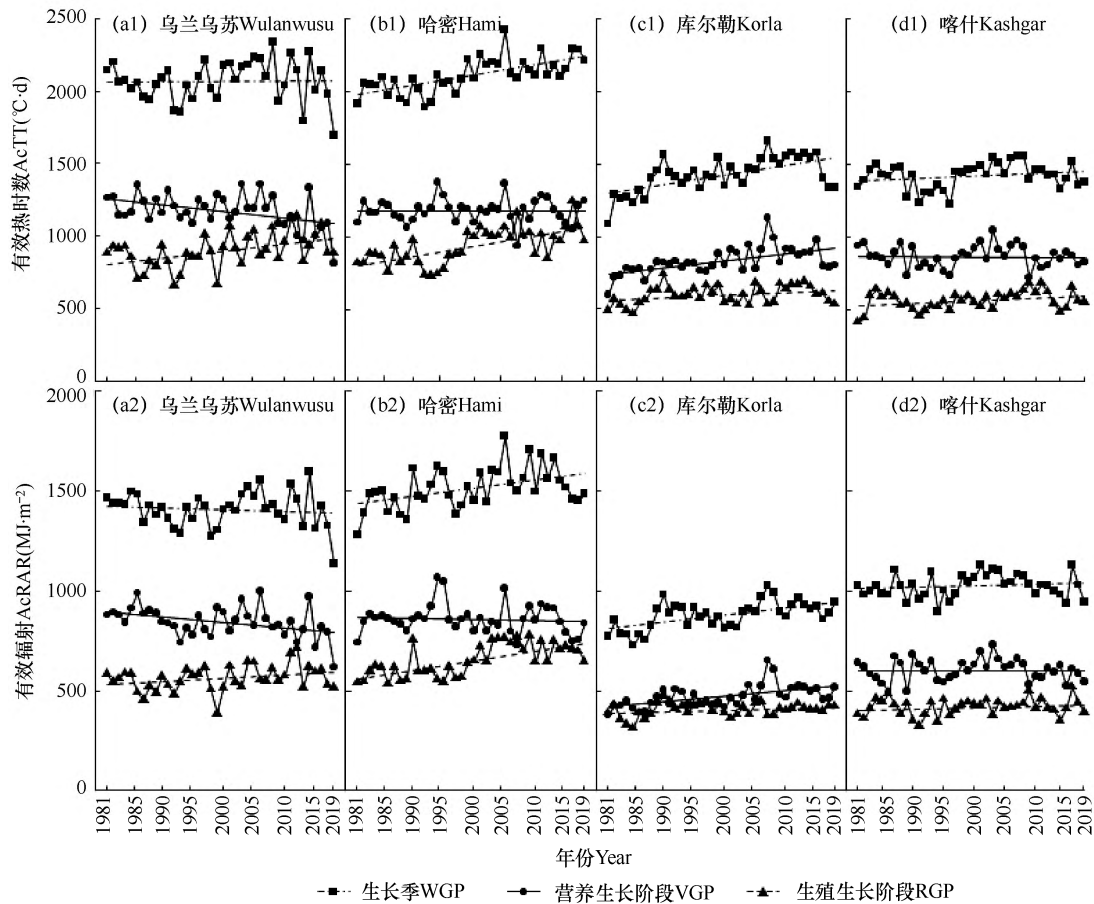


图 1 1981-2019 年历年玉米生长季、营养生长和生殖生长阶段农业光热资源 (1 为有效热时数, 2 为有效辐射) 变化过程
 Fig. 1 Variation course of the agro-climatic resources (1-AcTT, 2-AcPAR) of maize during WGP, VGP and RGP in study sites

注: 乌兰乌苏和哈密站种植春玉米, 库尔勒和喀什站种植夏玉米。WGP 为玉米生长季, VGP 为各站玉米出苗-开花期, 即营养生长阶段, RGP 为出苗-成熟期, 即生殖生长阶段。AcTT 为有效积温, AcPAR 为有效辐射。下同。

Note: There are spring maize in Wulanwusu and Hami, and summer maize in Korla and Kashgar. WGP is whole growing period of maize, VGP is vegetative growing period which is from emergence to flowering, and RGP is reproductive growing period which is from flowering to maturity. AcTT is accumulated effective thermal time, and AcPAR is accumulated photosynthesis active radiation. The same as below.

表 1 1981-2019 年玉米生长季、营养生长和生殖生长阶段农业光热气候资源变化倾向率

Table 1 Trend rate of agro-climatic resources during VGP and RGP of maize in study sites

| 站点 Sites | 有效热时数 AcTT(°C·d·10a ⁻¹) | | | 有效辐射 AcPAR(MJ·m ⁻² ·10a ⁻¹) | | |
|----------------|-------------------------------------|----------|---------|--|---------|---------|
| | 全生长季 | 营养生长阶段 | 生殖生长阶段 | 全生长季 | 营养生长阶段 | 生殖生长阶段 |
| | WGP | VGP | RGP | WGP | VGP | RGP |
| 乌兰乌苏 Wulanwusu | 1.91 | -45.77** | 47.68** | -9.53 | -26.27 | 16.74 |
| 哈密 Hami | 72.57 | 0.57 | 72.00** | 41.56 | -6.45 | 48.04** |
| 库尔勒 Korla | 67.22** | 49.33** | 17.89 | 36.06** | 28.27** | 7.79 |
| 喀什 Kashgar | 16.59 | -3.34 | 19.93* | 7.37 | 0.06 | 7.31 |

注：*、**分别表示相关系数通过 0.05、0.01 水平的显著性检验。下同。

Note: * is P<0.05, ** is P<0.01. The same as below.

2.1.2 玉米品种更替情况

由表 2 可见，春玉米 SC-704 品种在 1981-2018 年各年代内均为主栽品种，在 2010 年之前，其种植站次占比均过半，特别是在 20 世纪 90 年代（1990S）达到了 100%。而 21 世纪 10 年代（2010S），随着

Zhengdan958 的推广，其占比有所降低，但仍为占比最大品种。夏玉米品种更替较春玉米更为频繁，在 1980S 和 1990S（20 世纪 80 和 90 年代），Qilike 均为主栽品种，但其占比随年代推进而降低。2000S 和 2010S（21 世纪），Xinyu9 为主栽品种，且占比较大。

表 2 玉米各年代品种占比及更替特征

Table 2 The proportion and replacement of maize cultivars in different decade

| 作物 Crop | 年代 Decade | 品种 Varieties |
|------------------|-----------|---|
| 春玉米 Spring-maize | 1980S | SC-704(57%),Weier156(29%),Hadan1(14%) |
| | 1990S | SC-704(100%) |
| | 2000S | SC-704(75%),Dongdan7(20%),Ludan6006(5%) |
| | 2010S | SC-704(38%),Zhengdan958(25%),Ludan6006(13%) |
| 夏玉米 Summer-maize | 1980S | Qilike(74%),Jingzao8(16%),Zhongnan1(10%) |
| | 1990S | Qilike(35%),Hedan1(30%),Jingzao8(20%) |
| | 2000S | Xinyu9(32%),Zhongnan2(21%),Jingzao8(11%) |
| | 2010S | Xinyu9(63%),Xianda203(13%),Jinyuanzao247(13%) |

注：各年代品种只列出占比最高的前三个，括号中的数字表示该品种在该年代的种植站次比。

Note: The varieties in each age only list the top three with the highest proportion, and the numbers in parentheses indicate the proportion of the variety in that decade.

2.2 气候变化背景下品种更替对玉米生长发育和产量的影响

2.2.1 玉米品种参数的调试和验证

为分析品种更替对气候变化的适应，将 1981-2019 年分为 1980 年代（1980S），1990 年代（1990S），2000 年代（2000S）和 2010 年代（2010S）4 个年代。以种植年份较长的主栽玉米品种作为该年代的代表性品种，结果见表 3。为了体现每个年代的品种特色，即使是相同品种，在不同年代亦采用不同序号表示，且模型中的遗传参数也随年代有差异。

利用 APSIM-Maize 模型，以表 2 中各农业气象

试验站实测资料数据为基础，采用试错法，对各年代的代表性玉米品种参数进行调参和验证。玉米生育期、产量的实测值与模拟值的比较结果如图 2 和表 4 所示，其中决定系数（R²）均在 0.7 以上，D 指标均在 0.85 以上；归一化均方根误差（NRMSE）在评价生育期时均在 4.5%以内，产量均在 13%以内；平均绝对误差（MAE）在评价出苗-开花期天数时均在 2d 以内，出苗-成熟期天数均在 3d 以内，产量 MAE 均在 600kg·hm⁻²。由此可见，APSIM-Maize 模型在研究区域具有较好的适用性，可用于玉米生育期和产量模拟。

表 3 玉米各年代调参和验证所用品种及数据来源

Table 3 Maize varieties and data sources for APSIM calibration and validation

| | 年代 Decade | 品种 Varieties | 调参数据集 Calibration data | 验证数据集 Validation data |
|---------------------|--------------|-------------------------------------|--|-----------------------------|
| 春玉米 Spring maize | 1980S | SC-704(I) | 乌兰乌苏 Wulanwusu 1989,1990 | 乌兰乌苏 Wulanwusu 1987,1988 |
| | | | 哈密 Hami 1989,1990 | 哈密 Hami 1987,1988 |
| | 1990S | SC-704(II) | 乌兰乌苏 Wulanwusu 1997 | 乌兰乌苏 Wulanwusu 1986,1988 |
| | | | 哈密 Hami 1995,1997 | 哈密 Hami 1994,1996 |
| | 2000S | SC-704(III) | 哈密 Hami 2005,2006,2007 | 哈密 Hami 2002,2003,2004,2008 |
| 2010S | SC-704(IV) | 乌兰乌苏 Wulanwusu 2018 哈密 Hami 2015 | 乌兰乌苏 Wulanwusu 2012,2017 哈密 Hami 2014 | |
| 夏玉米 Summer maize | 1980S | Qilike(I) | 库尔勒 Korla 1988 | 喀什 Kashgar 1983,1985,1986 |
| | | | 喀什 Kashgar 1984 | |
| | 1990S | Qilike(II) | 喀什 Kashgar 1991,1993,1995 | 喀什 Kashgar 1992,1994,1996 |
| | 2000S | Xinyu9(I) | 库尔勒 Korla 2005,2006 | 库尔勒 Korla 2009 |
| | | | 喀什 Kashgar 2007 | 喀什 Kashgar 2005,2010 |
| 2010S | Xinyu9(II) | 喀什 Kashgar 2012,2017 | 喀什 Kashgar 2013,2014,2015 | |

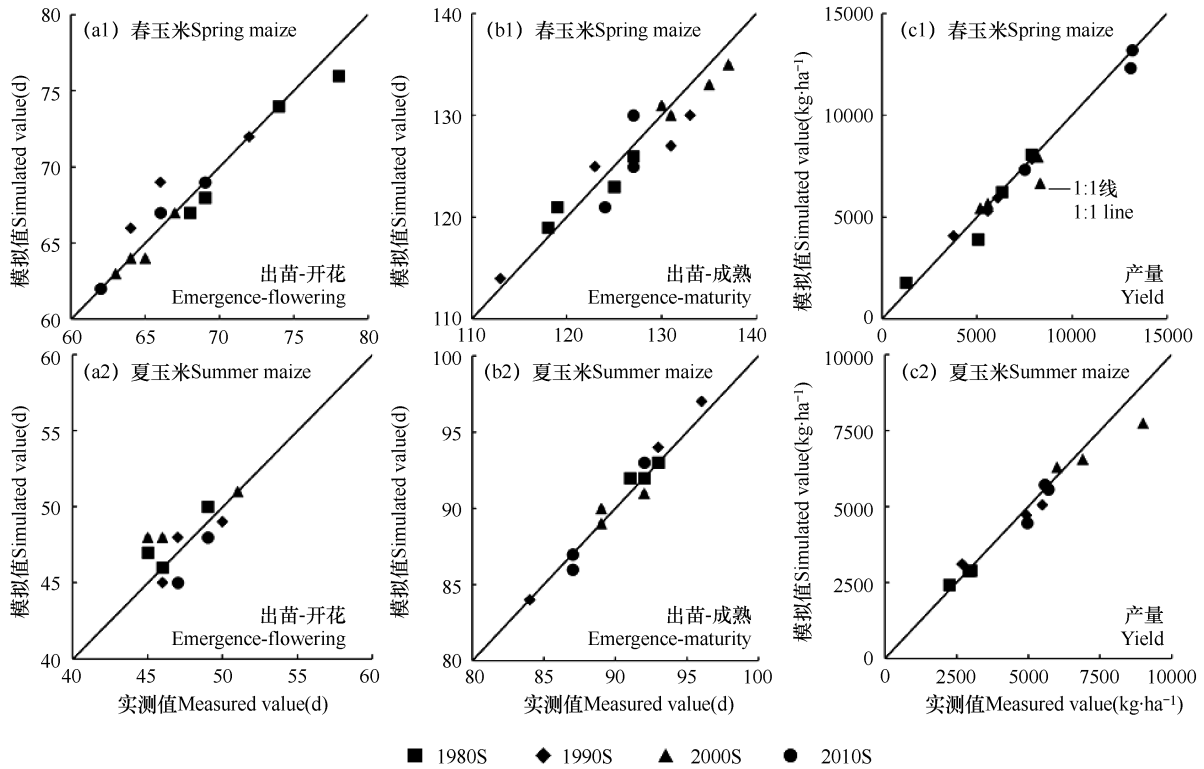


图 2 玉米 (1 为春玉米, 2 为夏玉米) 出苗-开花期、出苗-成熟期和产量的模拟值与实测值的验证结果

Fig. 2 Validation results between simulated and observed value for days from emergence to flowering, days from emergence to maturity and yield of maize (1-spring maize,2-summer maize) at study sites

表 4 APSIM-Maize 模型验证结果评价

Table 4 Validation of APSIM-Maize model for spring maize and summer maize

| 作物种类 Maize types | 项目 Item | 评价指标 Validation metrics | 1980S | 1990S | 2000S | 2010S |
|---------------------|---|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| 春玉米 Spring maize | 出苗-开花期天数 Days from emergence to flowering(d) | R ² | 0.97 | 0.75 | 0.92 | 0.97 |
| | | RMSE (d) | 1.22 | 1.87 | 0.50 | 0.58 |
| | | NRMSE (%) | 1.70 | 2.76 | 0.77 | 0.88 |
| | | MAE | 1.00 | 1.50 | 0.25 | 0.25 |
| | | D-VALUE | 0.99 | 0.96 | 0.99 | 1.00 |
| | 出苗-成熟期天数 Days from emergence to maturity(d) | R ² | 0.91 | 0.94 | 0.89 | 0.69 |
| | | RMSE (d) | 1.58 | 2.74 | 1.58 | 2.71 |
| | | NRMSE (%) | 1.29 | 2.19 | 1.19 | 2.15 |
| | | MAE | 1.50 | 2.50 | 1.50 | 2.00 |
| | | D-VALUE | 0.98 | 0.99 | 0.97 | 0.89 |
| | 产量(kg·hm ⁻²)Yield(kg·ha ⁻¹) | R ² | 0.93 | 0.98 | 0.76 | 0.98 |
| | | RMSE (kg·hm ⁻²) | 638.25 | 218.62 | 858.15 | 448.07 |
| | | NRMSE (%) | 12.47 | 3.76 | 12.58 | 3.98 |
| | | MAE | 490.33 | 187.75 | 572.5 | 240.25 |
| | | D-VALUE | 0.99 | 0.98 | 0.97 | 0.99 |
| 夏玉米 Summer maize | 出苗-开花期天数 Days from emergence to flowering(d) | R ² | 0.78 | 0.72 | 0.98 | 0.84 |
| | | RMSE (d) | 1.29 | 1 | 2.08 | 1.41 |
| | | NRMSE (%) | 2.77 | 2.1 | 4.4 | 2.93 |
| | | MAE | 0.75 | 0.75 | 1.25 | 1 |
| | | D-VALUE | 0.94 | 0.96 | 0.91 | 0.91 |
| | 出苗-成熟期天数 Days from emergence to maturity(d) | R ² | 0.75 | 1 | 0.75 | 0.98 |
| | | RMSE (d) | 0.58 | 0.82 | 0.82 | 0.82 |
| | | NRMSE (%) | 0.63 | 0.9 | 0.91 | 0.92 |
| | | MAE | 0.25 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| | | D-VALUE | 0.89 | 1 | 0.94 | 0.99 |
| | 产量(kg·hm ⁻²)Yield(kg·ha ⁻¹) | R ² | 0.98 | 0.99 | 0.98 | 0.93 |
| | | RMSE (kg·hm ⁻²) | 118.81 | 371.69 | 764.33 | 297.26 |
| | | NRMSE (%) | 4.37 | 8.49 | 10.47 | 5.49 |
| | | MAE | 75.25 | 269 | 468.75 | 187 |
| | | D-VALUE | 0.98 | 0.99 | 0.94 | 0.95 |

2.2.2 品种更替对玉米生长发育的影响

利用调参验证后的 APSIM-Maize 模型，分别模拟品种不更替和品种更替条件下玉米生长发育过程，得到各站点历年玉米营养生长阶段（VGP）、生殖生长阶段（RGP）和生长季（WGP）天数的线性变化倾向率，结果如表 5。由表可见，研究时段内，若玉米品种不更替即一直沿用 20 世纪 80 年代的品种，气候变化背景下，哈密站春玉米和喀什站夏玉米营养生长阶段和生殖生长阶段期均呈极显著缩短趋势，全生长季也呈极显著缩短趋势；乌兰乌苏春

玉米生殖阶段以及全生长季也呈显著缩短趋势，其它站玉米生育期的变化趋势不显著。

若玉米品种在各年代更替，则各站点玉米生育阶段也随之改变。哈密站春玉米和喀什站夏玉米营养生长、生殖生长阶段以及全生长季缩短的趋势得到缓解；喀什站夏玉米全生长季缩短趋势明显减缓，由原来的 $3.8\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 减缓为 $1.8\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ，哈密站和乌兰乌苏站春玉米全生长季甚至出现极显著延长趋势，库尔勒站夏玉米全生长季无明显变化趋势。开花-成熟期即生殖生长阶段的长度及该阶段在全生育期所

占比例，直接影响干物质向籽粒转移和最终产量，经统计（图 3），品种更替条件下乌兰乌苏和哈密站春玉米生殖生长阶段在全生长季的占比均明显增加，夏玉米的变化趋势不显著。

可见，在气候变化背景下，品种更替使典型站点玉米生育期的变化趋势发生了明显有利的改变。春玉米表现为生育期延长，且生殖阶段占比提高，而夏玉米表现为生育期缩短趋势的减小。

表 5 品种不更替和更替条件下玉米营养生长、生殖生长阶段和全生长季天数变化趋势(d·10a⁻¹)

Table 5 Trend rate of days during VGP, RGP, and WGP under the scenarios of varieties replacement or not(d·10y⁻¹)

| | 玉米类型 Maize types | 站点 Sites | 营养生长阶段 VGP | 生殖生长阶段 RGP | 全生长季 WGP |
|-----------------------|---------------------|----------------|---------------|---------------|-------------|
| 品种不更替 Not replacement | 春玉米 Spring maize | 乌兰乌苏 Wulanwusu | -0.65 | -1.05* | -1.7* |
| | | 哈密 Hami | -0.9** | -1.76** | -2.66** |
| | 夏玉米 Summer maize | 库尔勒 Korla | -0.44 | -1.25 | -1.68 |
| | | 喀什 Kashgar | -1.14** | -2.69** | -3.82** |
| 品种更替 Replacement | 春玉米 Spring maize | 乌兰乌苏 Wulanwusu | -0.23 | 3.78** | 3.54** |
| | | 哈密 Hami | -0.51 | 3.53** | 3.01** |
| | 夏玉米 Summer maize | 库尔勒 Korla | 0.15 | -0.37 | -0.22 |
| | | 喀什 Kashgar | -0.26 | -1.58* | -1.84* |

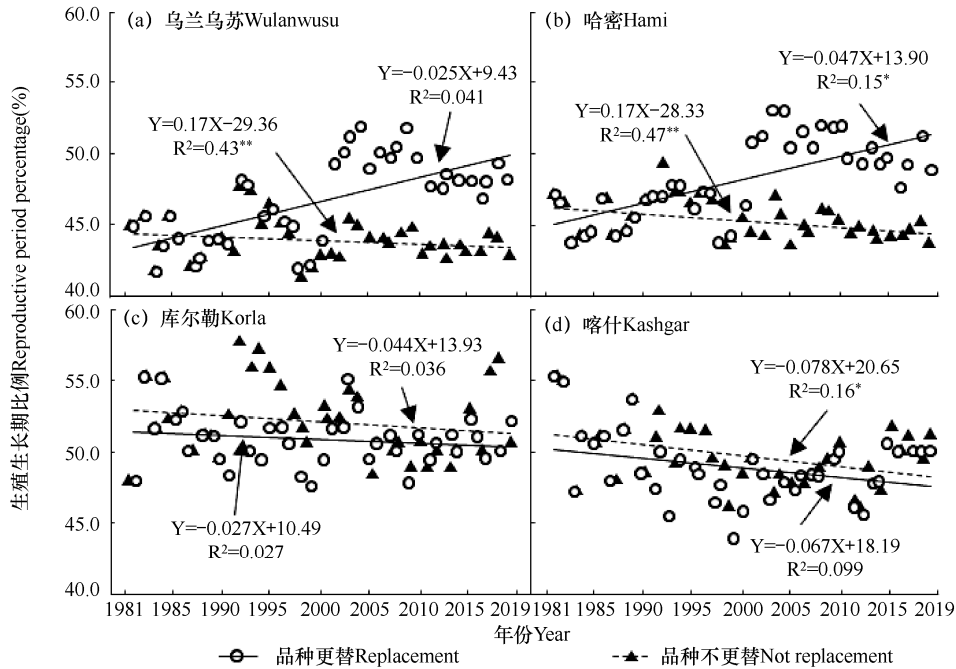


图 3 各站品种更替/不更替情景下模拟的玉米生殖生长阶段占生长季的比例

Fig. 3 The proportion of simulated maize RGP in WGP under the scenarios of variety replacement or not

2.2.3 品种更替对玉米产量的影响

由图 4 和表 6 可见，研究期内，假如玉米品种不更替即一直沿用 20 世纪 80 年代的品种，在气候变化背景下，哈密站的春玉米产量会显著下降，下降速率达 938.28kg·hm⁻²·10a⁻¹ (P<0.01)；其它站点不管是春玉米还是夏玉米产量变化趋势均不显著。

如果各站点品种随气候变化发生更替，则各站点玉米产量的变化趋势也会随之改变，具体表现为：哈密站春玉米产量下降趋势被遏制，变为不显著；其它原来变化趋势不显著站点的产量会发生不同程度的改变，乌兰乌苏站的春玉米和喀什站夏玉米产量均极显著增加，变化趋势分别可达 672.42kg·hm⁻²·10a⁻¹

和 $587.34\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ；仅库尔勒站夏玉米产量仍然无明显的变化趋势。可见，总体上看，在气候变化

背景下，品种更替给典型站点玉米产量的变化趋势带来了明显有利的改变。

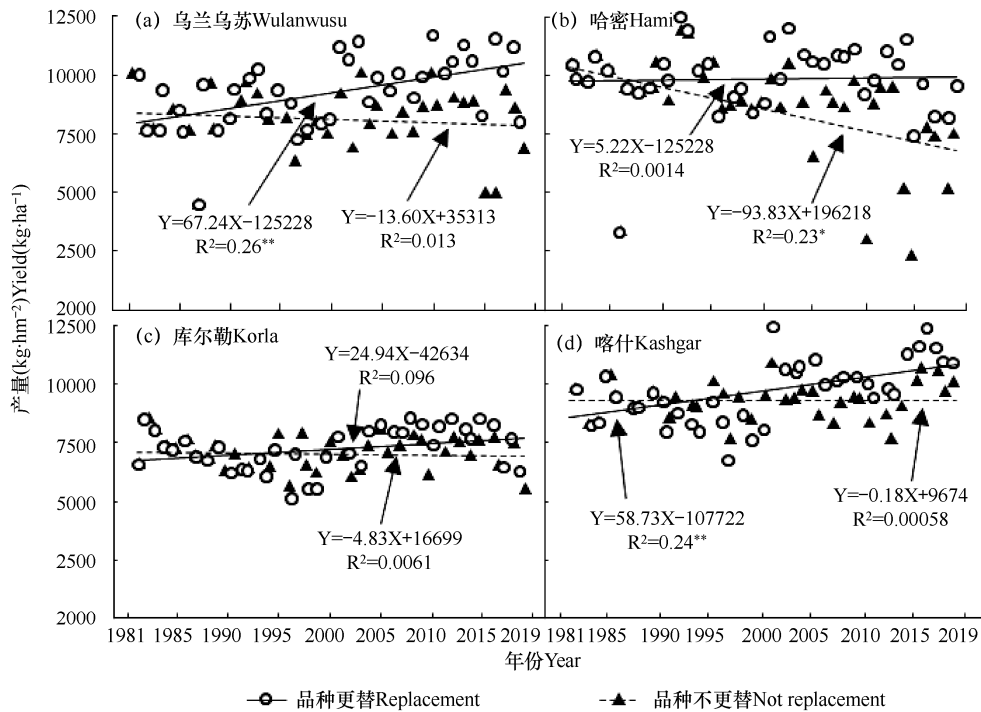


图 4 各站品种更替/不更替情景下模拟的玉米产量逐年变化过程

Fig. 4 Variation course of the simulated maize yield under the scenarios of variety replacement or not

表 6 品种更替/不更替情景下玉米产量变化倾向率

Table 6 Trend rate of simulated maize yield under the scenarios of varieties replacement or not

| | 玉米类型 Maize types | 站点 Sites | 产量 Yield($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot 10\text{a}^{-1}$) |
|-----------------------|------------------|----------------|---|
| 品种不更替 Not replacement | 春玉米 Spring maize | 乌兰乌苏 Wulanwusu | -135.98 |
| | | 哈密 Hami | -938.28* |
| | 夏玉米 Summer maize | 库尔勒 Korla | -48.33 |
| | | 喀什 Kashgar | -1.81 |
| 品种更替 Replacement | 春玉米 Spring maize | 乌兰乌苏 Wulanwusu | 672.42** |
| | | 哈密 Hami | 52.17 |
| | 夏玉米 Summer maize | 库尔勒 Korla | 249.42 |
| | | 喀什 Kashgar | 587.34** |

2.3 气候变化背景下品种更替对光热资源利用效率的影响

2.3.1 热量利用效率

基于玉米生长季有效积温以及逐年产量，利用式 (11) 得到玉米热量利用效率，如图 5 和表 7 所示。由图表可见，若玉米品种不更替即一直沿用 20 世纪 80 年代品种，气候变化背景下，仅哈密站春玉米热量资源利用效率呈极显著降低 ($P<0.01$)，平均为 $0.53\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot(\text{C}\cdot\text{d})^{-1}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ，其它

站点虽有减少，但变化趋势均不显著。若各站点品种随年代更替，乌兰乌苏站春玉米和喀什站夏玉米的热量利用效率则均呈极显著增加趋势 ($P<0.01$)，分别为 $0.18\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot(\text{C}\cdot\text{d})^{-1}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $0.33\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot(\text{C}\cdot\text{d})^{-1}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。可见品种更替显著提高了玉米热量利用效率。其中乌兰乌苏站从 $4.32\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot(\text{C}\cdot\text{d})^{-1}$ 提高到 $4.53\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot(\text{C}\cdot\text{d})^{-1}$ ，提高了 4.96%，哈密站从 $4.36\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot(\text{C}\cdot\text{d})^{-1}$ 提高到 $4.79\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot(\text{C}\cdot\text{d})^{-1}$ ，提高了 9.92%；库尔勒站从 $5.10\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot(\text{C}\cdot\text{d})^{-1}$ 提高到

5.28kg·hm⁻²·(°C·d)⁻¹，提高了 3.53%，喀什站从 6.68kg·hm⁻²·(°C·d)⁻¹ 提高到 7.00kg·hm⁻²·(°C·d)⁻¹，提

高了 4.76%。表明气候变化背景下，品种更替对玉米热量利用效率有显著的提升。

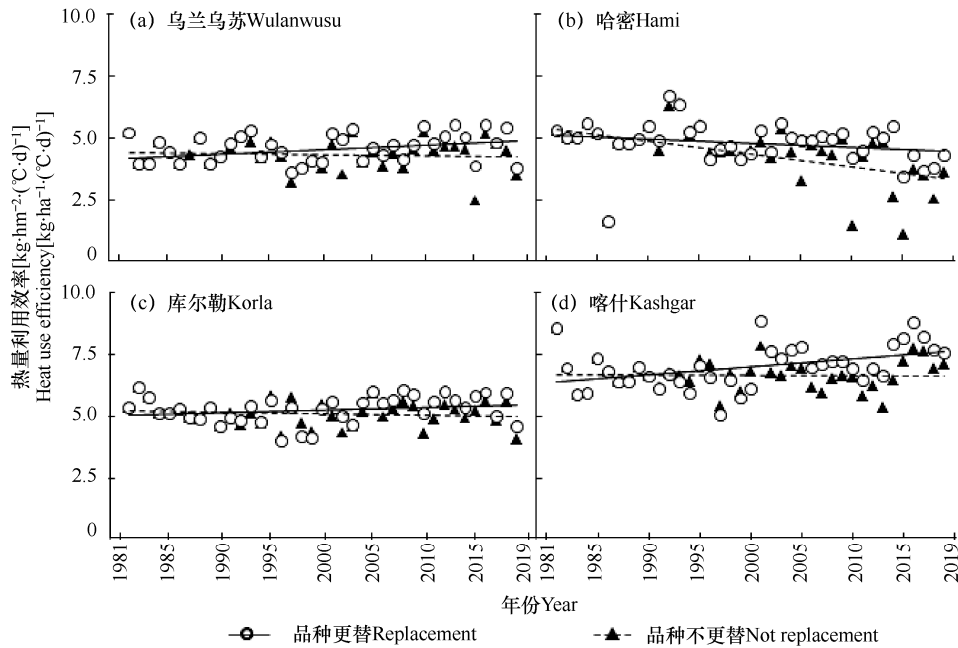


图 5 1981–2019 年品种更替/不更替条件下热量利用效率变化

Fig. 5 Variation course in the heat use efficiency under the scenarios of varieties replacement or not

表 7 品种更替/不更替条件下玉米热量利用效率变化趋势

Table 7 Trend of heat use efficiency under the scenarios of varieties replacement or not

| 品种 Variety | 玉米类型 Maize types | 站点 Sites | 热量利用效率变化率 Heat use efficiency [kg·hm ⁻² ·(°C·d) ⁻¹ ·10a ⁻¹] |
|--------------------------|---------------------|----------------|---|
| 品种不更替 Not replacement | 春玉米 Spring maize | 乌兰乌苏 Wulanwusu | -0.044 |
| | | 哈密 Hami | -0.53** |
| | 夏玉米 Summer maize | 库尔勒 Korla | -0.061 |
| | | 喀什 Kashgar | -0.011 |
| 品种更替 Variety replacement | 春玉米 Spring maize | 乌兰乌苏 Wulanwusu | 0.18* |
| | | 哈密 Hami | -0.17 |
| | 夏玉米 Summer maize | 库尔勒 Korla | 0.11 |
| | | 喀什 Kashgar | 0.33* |

2.3.2 辐射利用效率

利用式 (12) 得到辐射利用率变化如图 6 和表 8。由图表可见，若玉米品种不更替即一直沿用 20 世纪 80 年代品种，气候变化背景下仅哈密站春玉米辐射利用效率呈极显著减少的趋势，平均为 0.064g·MJ⁻¹·10a⁻¹ (P<0.01)。与热量利用效率不同的是，库尔勒和喀什站夏玉米在品种不更替情形下，辐射利用率表现为增加，但变化趋势不显著。品种更替后，哈密站春玉米辐射利用率仍呈极显著减少

趋势，平均为 0.016g·MJ⁻¹·10a⁻¹ (P<0.01)，较品种更替之前，减少了 0.048g·MJ⁻¹·10a⁻¹。其它站点在品种更替条件下，辐射利用率均表现为增加，但变化趋势不显著。比较其平均值，乌兰乌苏站从 0.63g·MJ⁻¹ 提高到 0.68g·MJ⁻¹，提高了 7.86%，哈密站从 0.62g·MJ⁻¹ 提高到 0.67g·MJ⁻¹，提高了 8.60%；库尔勒站从 0.82g·MJ⁻¹ 提高到 0.85g·MJ⁻¹，提高了 4.35%，喀什站从 0.92g·MJ⁻¹ 提高到 0.97g·MJ⁻¹，提高了 4.90%。可见，在气候变化背景下，品种更替对

玉米的热量利用效率有显著的提升。综合热量利用效率的变化可知，品种更替对玉米高效利用生长季

的农业气候资源起了积极作用。

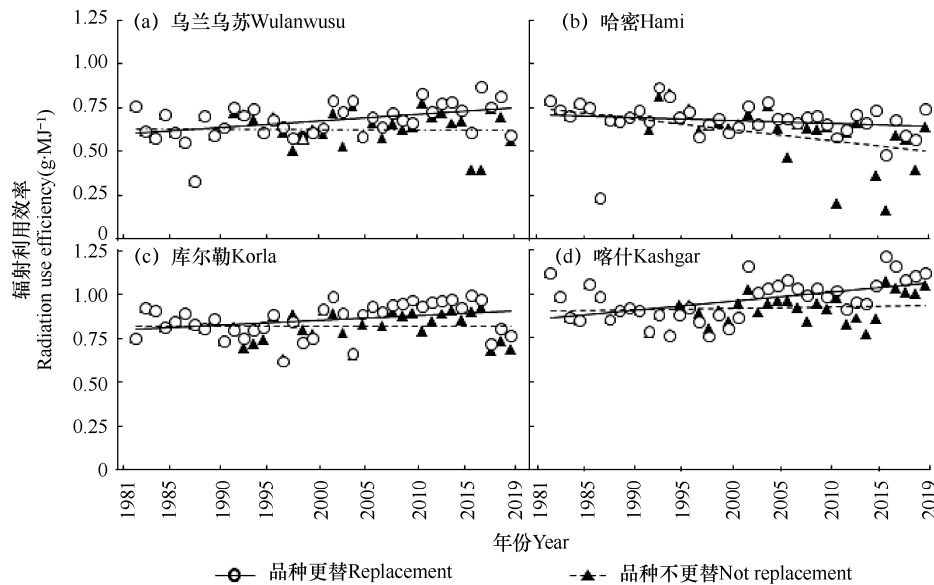


图 6 1981-2019 年品种更替/品种不更替条件下辐射利用率变化

Fig. 6 Variation course in the radiation use efficiency under the scenarios of varieties replacement or not

表 8 品种更替/不更替情景下玉米辐射利用率变化率

Table 8 Trend of radiation use efficiency under the scenarios of varieties replacement or not

| 品种 Variety | 玉米类型 Maize types | 站点 Sites | 辐射利用率变化率 Radiation use efficiency (g·MJ ⁻¹ ·10a ⁻¹) |
|--------------------------|---------------------|----------------|--|
| 品种不更替 Not replacement | 春玉米 Spring maize | 乌兰乌苏 Wulanwusu | -0.0015 |
| | | 哈密 Hami | -0.064** |
| | 夏玉米 Summer maize | 库尔勒 Korla | 0.00052 |
| | | 喀什 Kashgar | 0.0084 |
| 品种更替 Variety replacement | 春玉米 Spring maize | 乌兰乌苏 Wulanwusu | 0.037 |
| | | 哈密 Hami | -0.016** |
| | 夏玉米 Summer maize | 库尔勒 Korla | 0.026 |
| | | 喀什 Kashgar | 0.052 |

3 讨论与结论

3.1 讨论

全球气候变化背景下，新疆地区光温气候资源发生了显著变化。前人研究发现，北疆大部分地区 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温呈增加趋势^[33]，但全年辐射呈减少趋势^[34]。本研究中玉米生长季内热量资源变化与前人研究结果相似，但辐射资源总体呈增加趋势，主要原因是新疆地区辐射主要是在冬季减少^[34]，而本文研究时段是玉米的生长季以及不同生育阶段。

品种更替是作物适应气候变化重要途径之一。

前人研究表明，品种更替延长玉米生育期，进而提高产量^[35]，同时玉米气候资源利用率也得到提高^[36]。为进一步探究品种更替对新疆玉米光温利用效率的影响，本研究结合 APSIM 模型，分析了 1981-2019 年新疆 4 个典型站点玉米生育阶段及光温潜在产量演变，发现品种更替延长了玉米的生育期，但春玉米和夏玉米有所差异，品种更替使春玉米生育期由缩短变为延长，而夏玉米虽仍为缩短趋势，但趋势减小。这可能是由于品种更替未能完全抵消气候变化对夏玉米的负面影响。前人研究表明，1960-2005 年新

疆春、夏和秋季分别增温 0.74℃、0.94℃和 1.97℃^[37], 温度增加导致玉米生长发育加快^[38], 而夏秋季的增温显著高于春季, 导致夏玉米受到增温效应大于春玉米, 从而气候变化背景下生育期缩短程度较春玉米更大。分析玉米生殖生长阶段占全生育期比例发现, 品种更替显著提高玉米生殖生长阶段占全生育期比例。而生殖生长阶段是物质向籽粒中转移的关键时期^[39], 该时期的延长, 有利于玉米籽粒干物质积累和产量提升^[38]。这与前人研究玉米的品种更替, 生殖生长比例增加结果较一致^[35]。本研究中, 虽然夏玉米的生育期在品种更替之后仍然表现为缩短的趋势, 但其产量却呈增加趋势。这可能是由于品种更替, 玉米光合效率有所提高^[40], 使干物质积累增加。而品种更替条件下春玉米和夏玉米热量和辐射利用效率均有所提高, 这与其产量提高密切相关。

本研究也存在一些不足, 需今后进一步深入。首先, 农业气象试验站玉米产量低于当地高产试验, 利用农业气象试验站数据进行调参验证后的 APSIM 模型, 模拟的玉米光温潜在产量偏低, 导致其光热资源利用效率偏低。其次, 仅对玉米发育期和产量进行调参, 而未考虑生物量和叶面积动态变化, 可能会导致模拟结果有一定偏差。同时, 在考虑气候要素变化影响时, 没有考虑 CO₂ 的肥效作用, 这也是产量模拟值偏低原因之一。最后, 新疆气候存在区域差异性, 而本研究仅选择 4 个典型站点, 今后需选取更多站点代表不同区域气候, 系统研究气候变化对新疆玉米影响。

3.2 结论

(1) 调参验证后的 APSIM-Maize 模型在新疆地区有较好的适用性, 在生育期和产量模拟方面误差均在允许范围内。

(2) 整体来说, 1981-2019 年新疆玉米生长季内热量资源和辐射资源呈增加趋势, 其中春玉米以生殖生长阶段增加为主, 夏玉米以营养生长阶段的增加为主。

(3) 气候变化导致春玉米和夏玉米生育期缩短、产量降低。品种更替条件下玉米生育期的变化趋势发生了明显有利的改变, 其中春玉米表现为生育期延长, 而夏玉米表现为缩短趋势的减小。同时, 品种更替显著增加了春玉米花后生育阶段的比例, 夏玉米变化趋势不显著。

(4) 品种更替在提高玉米产量同时, 热量利用

效率和辐射利用率均得到提高。乌兰乌苏站和哈密站春玉米热量利用效率分别提高 4.96%和 9.92%, 库尔勒站和喀什站夏玉米分别提高 3.53%和 4.76%; 乌兰乌苏站和哈密站春玉米辐射利用效率分别提高 7.86%和 8.60%, 库尔勒站和喀什站夏玉米分别提高 4.35%和 4.90%。

参考文献 References

- [1] IPCC.Climate change 2013:the physical science basis[M]. Cambridge:Cambridge University Press,2013.
- [2] 《气候变化国家评估报告》编写委员会.气候变化国家评估报告[M].北京:科学出版社,2007.
Committee for *National Assessment Report on Climate Change*.National assessment report on climate change[M]. Beijing:Science Press,2007.(in Chinese)
- [3] 黄建平,季明霞,刘玉芝,等.干旱半干旱区气候变化研究综述[J].气候变化研究进展,2013,9(1):9-14.
Huang J P, Ji M X, Liu Y Z, et al. An overview of arid and semi-arid climate change[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2013, 9(1): 9-14. (in Chinese)
- [4] 邓兴耀,刘洋,刘志辉,等.中国西北干旱区蒸散发时空动态特征[J].生态学报,2017,37(9):2994-3008.
Deng X Y, Liu Y, Liu Z H, et al. Temporal-spatial dynamic change characteristics of evapotranspiration in arid region of Northwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(9): 2994-3008. (in Chinese)
- [5] Li Q H, Chen Y N, Shen Y J. Spatial and temporal trends of climate change in Xinjiang, China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(6): 1007-1018.
- [6] 张音,古丽贤·吐尔逊拜,苏里坦,等.近 60a 来新疆不同海拔气候变化的时空特征分析[J].干旱区地理,2019, 42(4):822-829.
Zhang Y, Tuerxunbai G, Su L T, et al. Spatial and temporal characteristics of climate change at different altitudes in Xinjiang in the past 60 years[J]. *Arid Land Geography*, 2019, 42(4): 822-829. (in Chinese)
- [7] 李少昆,赵久然,董树亭,等.中国玉米栽培研究进展与展望[J].中国农业科学,2017,50(11):1941-1959.
Li S K, Zhao J R, Dong S T, et al. Advances and prospects of maize cultivation in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 1941-1959. (in Chinese)
- [8] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴(2016)[M].北京:

- 中国统计出版社,2017.
- National Bureau of Statistics of the People's Republic of China.China Statistical Yearbook(2016)[M].Beijing:China Statistics Press,2017.(in Chinese)
- [9] 李少昆,王克如,谢瑞芝,等.实施密植高产机械化生产 实现玉米高产高效协同[J].作物杂志,2016,(4):1-6.
- Li S K,Wang K R,Xie R Z,et al.Implementing higher population and full mechanization technologies to achieve high yield and high efficiency in maize production[J].Crops,2016,(4):1-6.(in Chinese)
- [10] 李少昆,王克如,杨小霞,等.玉米高产记录田块技术与效益分析[J].作物杂志,2017,(6):1-6.
- Li S K,Wang K R,Yang X X,et al.Technology and benefit analysis of high yield record field in maize[J].Crops,2017,(6):1-6.(in Chinese)
- [11] 赵彦茜,肖攀登,柏会子,等.中国作物物候对气候变化的响应与适应研究进展[J].地理科学进展,2019,38(2): 224-235.
- Zhao Y X,Xiao D P,Bai H Z,et al.Research progress on the response and adaptation of crop phenology to climate change in China[J].Progress in Geography,2019,38(2):224-235.(in Chinese)
- [12] Tao F L,Zhang S,Zhang Z,et al.Maize growing duration was prolonged across China in the past three decades under the combined effects of temperature, agronomic management, and cultivar shift[J].Global Change Biology,2014,20(12): 3686-3699.
- [13] Lobell D B,Schlenker W,Costa-Roberts J.Climate trends and global crop production since 1980[J].Science,2011, 333(6042):616-620.
- [14] Ray D K,Gerber J S,Macdonald G K,et al.Climate variation explains a third of global crop yield variability[J].Nature Communications,2015,6:5989.
- [15] 孙扬越,申双和.作物生长模型的应用研究进展[J].中国农业气象,2019,40(7):444-459.
- Sun Y Y,Shen S H.Research progress in application of crop growth models[J].Chinese Journal of Agrometeorology, 2019,40(7):444-459.(in Chinese)
- [16] Bassu S,Brisson N,Durand J L,et al.How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors[J].Global Change Biology,2014,20(7):2301-2320.
- [17] Liu Z,Yang X,Hubbard K G,et al.Maize potential yields and yield gaps in the changing climate of northeast China[J].Global Change Biology,2012,18(11):3441-3454.
- [18] 赵俊芳,李宁,候英雨,等.APSIM 模型评估北方八省春玉米生长对气候变化的响应[J].中国农业气象,2018, 39(2):108-118.
- Zhao J F,Li N,Hou Y Y,et al.Evaluation of response of spring maize production to climate change in the eight provinces of Northern China based on APSIM model[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2018,39(2):108-118. (in Chinese)
- [19] 李阔,熊伟,潘婕,等.未来升温 1.5℃与 2.0℃背景下中国玉米产量变化趋势评估[J].中国农业气象,2018,39(12): 765-777.
- Li K,Xiong W,Pan J, et al.Trend evaluation on changes of maize yield in China under global warming by 1.5℃ and 2.0℃ [J].Chinese Journal of Agrometeorology,2018, 39(12):765-777.(in Chinese)
- [20] 张建平,王靖,何永坤,等.基于 WOFOST 作物模型的玉米区域干旱影响评估技术[J].中国生态农业学报,2017, 25(3):451-459.
- Zhang J P,Wang J,He Y K,et al.Evaluation of regional drought disaster to maize using WOFOST crop growth model[J].Chinese Journal of Eco-Agriculture,2017,25(3): 451-459.(in Chinese)
- [21] Liu Y,Wang E L,Yang X G,et al.Contributions of climatic and crop varietal changes to crop production in the North China Plain, since 1980s[J].Global Change Biology,2010, 16(8):2287-2299.
- [22] Ying H,Yin Y L,Zheng H F,et al.Newer and select maize,wheat,and rice varieties can help mitigate N footprint while producing more grain[J].Global Change Biology,2019,25:4273-4281.
- [23] Bellon M R,Hodson D,Hellin J.Assessing the vulnerability of traditional maize seed systems in Mexico to climate change[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2011,108(33): 13432-13437.
- [24] Liu Z J,Hubbard K G,Lin X M,et al.Negative effects of climate warming on maize yield are reversed by the changing of sowing date and cultivar selection in Northeast China[J].Global Change Biology,2013,19:3481-3492.
- [25] 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):25-32.

- Cui D C. Climatic resources utilization coefficient of cereal crops in China and development measures[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2001, 22(2): 25-32. (in Chinese)
- [26] 安成邦, 张曼, 王伟, 等. 新疆地理环境特征以及农牧格局的形成[J]. 中国科学, 2020, 50(2): 295-304.
- An C B, Zhang M, Wang W, et al. The pattern of Xinjiang physical geography and its relationship with the temporal-spatial distribution of agriculture and husbandry[J]. Scientia Sinica Terrae, 2020, 50(2): 295-304. (in Chinese)
- [27] 赵彦茜, 齐永青, 朱冀, 等. APSIM 模型的研究进展及其在中国的应用[J]. 中国农学通报, 2017, 33(18): 1-6.
- Zhao Y X, Qi Y Q, Zhu J, et al. Research progress of APSIM model and its application in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(18): 1-6. (in Chinese)
- [28] 刘志娟, 杨晓光, 王静, 等. APSIM 玉米模型在东北地区的适应性[J]. 作物学报, 2012, 38(4): 740-746.
- Liu Z J, Yang X G, Wang J, et al. Adaptability of APSIM maize model in Northeast China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(4): 740-746. (in Chinese)
- [29] Zhang Z T, Yang X G, Liu Z J, et al. Spatio-temporal characteristics of agro-climatic indices and extreme weather events during the growing season for summer maize (*Zea mays* L) in Huanghuaihai region, China[J]. International Journal of Biometeorology, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01872-6>.
- [30] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements: FAO irrigation and drainage paper 56[M]. Rome: FAO, 1998.
- [31] 钱锦霞, 郭建平. 东北地区春玉米生长发育和产量对温度变化的响应[J]. 中国农业气象, 2013, 34(3): 312-316.
- Qian J X, Guo J P. Response of maize growth and yield to temperature change in Northeast China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34(3): 312-316. (in Chinese)
- [32] 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. (in Chinese)
- [33] 李兰, 杜军, 宋玉玲, 等. 近 45 年来新疆 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 期间积温和降水量的变化特征[J]. 中国农业气象, 2010, 31(S1): 35-39.
- Li L, Du J, Song Y L, et al. Research on the accumulated temperature $\geq 10^{\circ}\text{C}$ and the rainfall change during 45 years in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(S1): 35-39. (in Chinese)
- [34] 张立波, 肖薇. 1961-2010 年新疆日照时数的时空变化特征及其影响因素[J]. 中国农业气象, 2013, 34(2): 130-137.
- Zhang L B, Xiao W. Temporal and spatial variation of sunshine duration and its influence factors in Xinjiang from 1961-2010[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34(2): 130-137. (in Chinese)
- [35] 吕硕, 杨晓光, 赵锦, 等. 气候变化和品种更替对东北地区春玉米产量潜力的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 179-190.
- Lv S, Yang X G, Zhao J, et al. Effects of climate change and variety alternative on potential yield of spring maize in Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(18): 179-190. (in Chinese)
- [36] 初征, 郭建平. 未来气候变化对东北玉米品种布局的影响[J]. 应用气象学报, 2018, 29(2): 165-176.
- Chu Z, Guo J P. Effects of climatic change on maize varieties distribution in the future of Northeast China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2018, 29(2): 165-176. (in Chinese)
- [37] 刘波, 冯锦明, 马柱国, 等. 1960-2005 年新疆气候变化的基本特征[J]. 气候与环境研究, 2009, 14(4): 414-426.
- Li B, Feng J M, Ma Z G, et al. Characteristics of climate changes in Xinjiang from 1960 to 2005[J]. Climatic and Environmental Research, 2009, 14(4): 414-426. (in Chinese)
- [38] 魏湜. 玉米生态基础[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- Wei S. Fundamental of maize ecology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010. (in Chinese)
- [39] 肖攀登, 齐永青, 柏会子, 等. 河北平原区早播玉米产量潜力及气候条件分析[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(17): 52-56.
- Xiao P D, Qi Y Q, Bo H Z, et al. Analysis of yield potential and climatic conditions of early sowing maize in Hebei Plain[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2018, 46(17): 52-56. (in Chinese)
- [40] Curin F, Severini A D, Gonzalez F G, et al. Water and radiation use efficiencies in maize: breeding effects on single-cross Argentine hybrids released between 1980 and 2012[J]. Field Crops Research, 2020, 246: 107-683.