

气候变化对邢台夏玉米的影响及品种适应性*

王泓霏 陈新平 崔振岭 孟庆锋**

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要 研究气候变化对华北平原粮食生产的影响及其机理,对制定有针对性的适应措施以保证国家粮食安全具有重要意义.应用 Hybrid-Maize 模型研究了 1981—2010 年气候变化对河北邢台夏玉米产量潜力的影响及农民采用长生育期品种的适应措施.结果表明:研究期间,邢台地区气温显著上升,平均温度上升速度达 $0.49\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{ a}^{-1}$;日照时数和太阳辐射显著降低,降幅分别达 $0.56\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}\cdot 10\text{ a}^{-1}$ 和 $265.1\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 10\text{ a}^{-1}$;降水量相对稳定,但年际间波动较大.在该气候背景下,利用 20 世纪 80 年代典型夏玉米品种模拟发现,21 世纪初灌溉与雨养条件下夏玉米产量潜力均显著下降,降幅高达 $0.63\sim 0.64\text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10\text{ a}^{-1}$.产量潜力的降低主要是生育期内太阳辐射下降和由温度升高导致的生育期缩短共同作用的结果.其中,太阳辐射下降对产量下降的贡献较大,高达 60%.在实际生产中,农民采用长生育期品种来适应气候变暖.21 世纪初主要夏玉米品种出苗到生理成熟期有效积温比 20 世纪 80 年代增加 19% ($280\text{ }^{\circ}\text{C}$),相应灌溉和雨养玉米产量潜力提高了 34%~40% ($2.73\sim 3.40\text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$).

关键词 产量潜力 华北平原 品种适应性 气候变化 玉米

文章编号 1001-9332(2014)01-0155-07 中图分类号 S162.3 文献标识码 A

Impacts of climate change on summer maize production and adaptive selection of varieties in Xingtai County, Hebei, China. WANG Hong-fei, CHEN Xin-ping, CUI Zhen-ling, MENG Qing-feng (College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2014, 25(1): 155-161.

Abstract: Understanding the impacts of climate change on agriculture production and the underlying mechanism in North China Plain is important to take effective adaptations for national food security. Using Hybrid-Maize model, this paper investigated the impacts of climate change on summer maize yield potential and farmers' adaptation by changing varieties with longer growth periods from 1981 to 2010 in Xingtai County, Hebei Province. Results showed a significant warming trend with the average temperature increasing by $0.49\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{ a}^{-1}$ since the 1980s. Both solar radiation and sunshine hours decreased significantly since the 1980s. The sunshine hours decreased by $0.56\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}\cdot 10\text{ a}^{-1}$ and the solar radiation decreased by $265.1\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 10\text{ a}^{-1}$, while the precipitation kept constant with large variation among years since 1981. Yield potentials of both irrigated and rainfed maize were simulated to decrease by $0.63\sim 0.64\text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10\text{ a}^{-1}$ since 1981 if varieties were assumed fixed with the 1980s. This was mainly due to the decrease of solar radiation during the maize growth season and the shortened growth stage by warming, and around 60% of grain yield decrease was attributed to the decreased solar radiation. In practice, by changing varieties with longer growth periods, the growing degree days of varieties adopted by local farmers since the 2000s increased by 19% ($280\text{ }^{\circ}\text{C}$) compared to the 1980s, and consequently the yield potential was simulated to increase by 34%~40% ($2.73\sim 3.40\text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$) for both irrigated and rainfed maize.

Key words: yield potential; North China Plain; variety adaptation; climate change; maize.

近年来气候变化对于农业生产和粮食安全的影响

已经成为国际社会关注的重大问题.在全球尺度上由于温度升高,导致 20 世纪 80 年代以来小麦和玉米分别减产 5.5% 和 3.8%^[1].大量研究表明,作物产量的降低主要由于温度升高所引起.如 1978—

* 国家玉米产业体系项目(CARS-02-24)和公益性行业(农业)科技专项(201103003)资助.

** 通讯作者. E-mail: mengqfcau@gmail.com

2013-05-02 收稿,2013-10-25 接受.

2005 年,平均温度每上升 1 °C,美国玉米减产 7%^[2];1992—2003 年,水稻生长季最低温度每上升 1 °C,导致菲律宾的水稻产量减少 10%^[3];温度每上升 1 °C,导致我国小麦产量下降 3%~10%^[4].由此可见,过去温度升高等气候因子的变化已经给粮食生产带来了显著的不利影响.研究气候变化对粮食生产的影响及其机理,有利于制定合理的措施来适应气候变化、提高产量,从而保证国家的粮食安全.

华北平原是我国气候变化敏感区域,也是我国重要的粮食生产基地,近年来该区气候发生了明显变化^[5].20 世纪 70 年代以来,华北平原增温速率高达 0.25 °C·10 a⁻¹,高于全国 50 年以来的平均增幅(0.22 °C·10 a⁻¹).年降水量除华北东南部呈增加趋势外,我国其他大部分地区表现为减少趋势^[6-7].与全国其他传统粮食生产基地不同,该区经济发展迅速,环境污染加剧,造成大气中气溶胶颗粒物等成分显著增加,这可能在一定程度上会导致日照时数和太阳辐射的显著下降^[8].研究该区特定的气候因子变化对粮食生产的影响,有利于分辨出导致产量变化的主要原因,从而为进一步指导当地农业生产适应气候变化提供可能.

以往有些研究报道了华北地区气候变化及其对农业生产的影响^[9-13].然而,关于气象因素变化(辐射、温度和降雨等)对产量影响的贡献分析相对较少,且农民应对气候变化适应性措施的相关研究也较欠缺.了解气候因素变化对产量的影响,并且理解农民的主动适应性措施,有利于在未来制定有针对性的措施,使农业生产尽可能地适应气候变化.本文以地处华北平原腹地的河北省邢台市为例,研究了 1981—2010 年气候变化对夏玉米生产的影响,进一步分析温度、降水、太阳辐射变化对产量的相对贡献,并结合当地农民在近年来采用的新品种,分析了新品种对玉米产量提高的贡献.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域概况

邢台市(36° 50′—37° 47′ N, 113° 52′—115° 49′ E)地处河北省南部,位于太行山脉南段东麓冲积平原,是华北平原典型的一年两熟制度的农业主产区.此区属温带大陆性季风气候,年均气温 13.9 °C,最冷月平均气温 2.6 °C,最热月平均气温 27.6 °C;年均降水量 493.4 mm,其中,5—10 月降水量(435.3 mm)占全年降水量的 88%;年均相对湿

度 62%,年均无霜期 157.8 d,年日照时数 2438.2 h,年均风速 1.9 m·s⁻¹,年均蒸发量 1975.8 mm^[14].

1.2 数据来源

邢台站点 1981—2010 年逐日气象数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://www.cma.gov.cn>),主要包括平均温度、最高温度、最低温度、日照时数、降水量、平均风速和平均相对湿度.作物种植信息资料主要来自文献[15-17],包括 20 世纪 80 年代、21 世纪初夏玉米的品种、播种日期与播种密度等.

根据种植信息,本文利用 Hybrid-Maize 模型输入当地气象数据及玉米关键生育期(出苗、吐丝与成熟)或生育期天数,计算各玉米品种从出苗至成熟≥10 °C 有效生长积温(GDD)^[18-19].20 世纪 80 年代,河北省夏玉米主要品种包括鲁原单 4 号、冀单 17 号、鲁玉 3 号、冀单 10 号、京早 7 号、掖单 2 号等^[16-17],生育期天数分别为 85、89、90、91、93、98 d, GDD 分别为 1397、1446、1458、1470、1482、1551 °C,该时期的品种主要为早熟品种,平均生育期天数为 91 d, GDD 平均为 1470 °C,当地夏玉米播期在 6 月 15 日左右^[15],种植密度设置为每公顷 60000 株^[17].21 世纪初,河北省夏玉米品种典型代表为郑单 958, GDD 为 1750 °C,该时期品种的播期和种植密度与 20 世纪 80 年代相同.

1.3 Hybrid-Maize 模型

Hybrid-Maize 模型是由美国 Nebraska-Lincoln 大学开发的玉米生长模型.该模型集合了作物通用型(如 INTERCOM)和玉米专用型(如 CERES-Maize)两种作物模型的优点.同时,该模型开发了一些新的模块,形成了基于玉米生长过程模拟的机理模型,用于模拟优化和水分条件限制下的玉米生长发育过程^[20-22].该模型已经在我国很多地区得到较好验证并进行了大面积应用^[23-24].

Hybrid-Maize 模型需要输入的气象数据包括日最高气温、日最低气温、降水量、太阳辐射(或日照时数)、相对湿度和平均风速.运行过程可选择不同模式(多年或单一年份),结合种植信息,输入相应的播种日期、品种 GDD(或出苗日期、吐丝期和成熟日期)、种植密度、水分管理(优化或者雨养)等,即可进行模拟.

本文首先对 Hybrid-Maize 模型进行校验和适用性评价.试验地点在河北省曲周县中国农业大学实验站(紧邻邢台市),试验年份为 2008 年,土壤质地为壤土.种植玉米品种为登海 3719(GDD =

1843 ℃), 5月26日播种, 播种密度为每公顷 85000 株. 试验中采用优化管理以保证夏玉米整个生长季不受水分和养分供应的影响, 同时有效控制杂草、病虫害等. 田间试验设置 4 次重复, 随机区组排列. 关键生育期记录包括播种、出苗、吐丝期、成熟期. 取样日期包括二叶期(6月12日)、六叶期(6月28日)、十叶期(7月11日)、吐丝期(7月29日)、乳熟期(8月13日)、乳熟后 17 天(8月30日)、收获前 15 天(9月12日)、收获期(9月25日). 测试项目主要包括总生物量和籽粒产量.

模型应用邢台站点 2008 年气象数据, 输入玉米生长季关键生育期(出苗期: 6月1日; 吐丝期: 7月29日; 成熟期: 9月25日)、播种密度, 并选择优化处理进行玉米生长季的模拟. 由玉米生长过程中模拟与田间实测总生物量以及籽粒产量的动态变化可以看出, Hybrid-Maize 模型能够较好地模拟玉米的生长和产量形成过程(图 1).

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 软件进行数据处理和图表制作. 用 SPSS 18.0 软件进行线性回归分析.

2 结果与分析

2.1 1981—2010 年河北邢台的年际气候变化

1981—2010 年, 邢台地区平均温度和最低温度

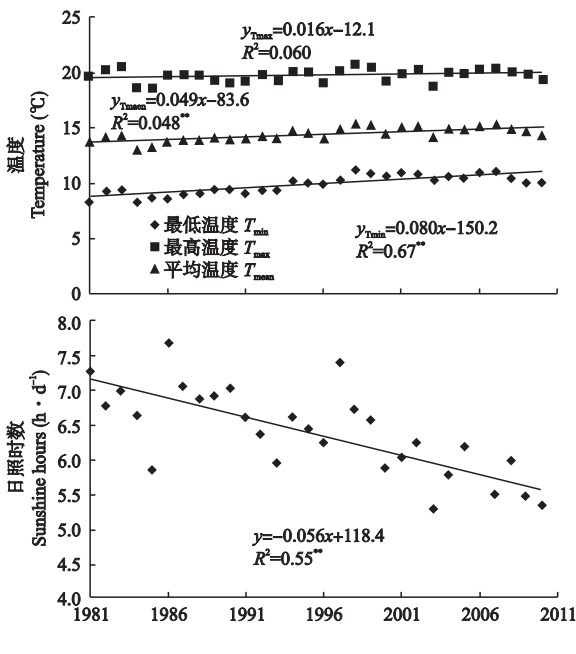


图 2 1981—2010 年邢台地区温度、降水量、日照时数和太阳辐射的年变化特征

Fig. 2 Trends in annual mean temperature, total precipitation, mean sunshine hour and total solar radiation from 1981 to 2010 in Xingtai Region.

* * $P < 0.01$. 下同 The same below.

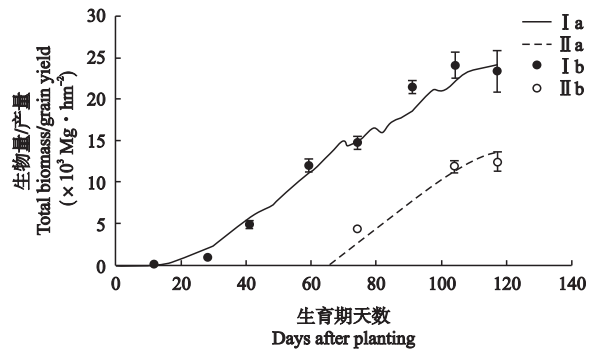


图 1 基于 Hybrid-Maize 模型的总生物量 (I) 和籽粒产量 (II) 模拟值 (a) 与实测值 (b)

Fig. 1 Simulated (a) total biomass (I) and grain yield (II) based on Hybrid-Maize model and observed value (b).

都呈显著上升趋势, 最高温度变化不显著. 其中, 最低温度每 10 年升高 0.80 ℃, 平均温度每 10 年升高 0.49 ℃. 期间, 年均降水量 496.5 mm, 年际波动较大, 变异系数高达 28%. 日照时数和太阳辐射均显著减少. 其中, 日照时数减幅为 0.56 h · d⁻¹ · 10 a⁻¹, 太阳辐射降幅为 265.1 MJ · m⁻² · 10 a⁻¹(图 2).

2.2 气候变化对夏玉米产量潜力的影响

2.2.1 玉米产量潜力变化 应用 Hybrid-Maize 模型模拟发现, 受气候变化的综合影响, 20 世纪 80 年代夏玉米的产量潜力呈显著下降趋势(图 3). 在灌溉(优化)和雨养条件下, 夏玉米的产量潜力下降均

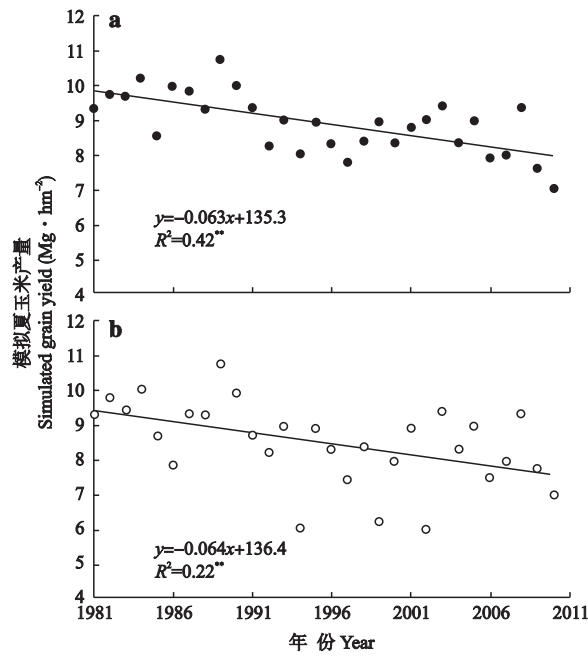


图3 1981—2010年优化(a)和雨养(b)条件下夏玉米产量潜力的模拟结果

Fig. 3 Trend of simulated grain yield for summer maize for optimum (a) and rainfed (b) maize from 1981 to 2010.

在 $0.63 \sim 0.64 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 。其中,雨养夏玉米的产量潜力波动较大,年际间变异高达 14%,高于灌溉条件下(10%)。

2.2.2 玉米产量潜力的变化原因 与全年温度变化一致,玉米生育期内最高温度变化不明显,平均温度和最低温度显著上升。其中,平均温度和最低温度的增幅分别为 0.49 和 $0.70 \text{ }^\circ\text{C} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 。生育期内降水量比较稳定,平均为 317 mm ,约占年降水量的 64%。夏玉米生育期内太阳辐射显著降低,降幅为 $124.0 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ (图4)。

生育期内温度的升高,导致玉米生育期的缩短。玉米生育期内,营养生长阶段(出苗至吐丝期)温度显著增高,增幅为 $0.56 \text{ }^\circ\text{C} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$,而生殖生长阶段

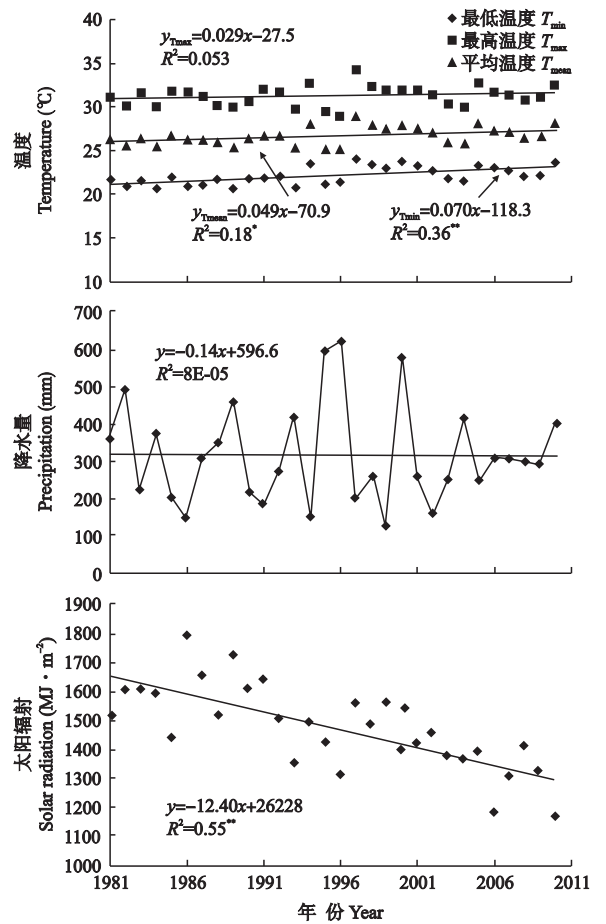


图4 1981—2010年邢台地区夏玉米生育期温度、降雨量、太阳辐射的变化

Fig. 4 Trends in mean temperature, precipitation, and solar radiation during maize growth season from 1981 to 2010 in Xingtai Region.

(吐丝至成熟期)温度变化趋势不显著。营养生长阶段温度的升高导致相应阶段内的生育期天数显著减少,营养生长阶段的生育期平均 10 年缩短 1.3 d。1981—2010 年,夏玉米总生育期平均每 10 年缩短 2.3 d(图5)。

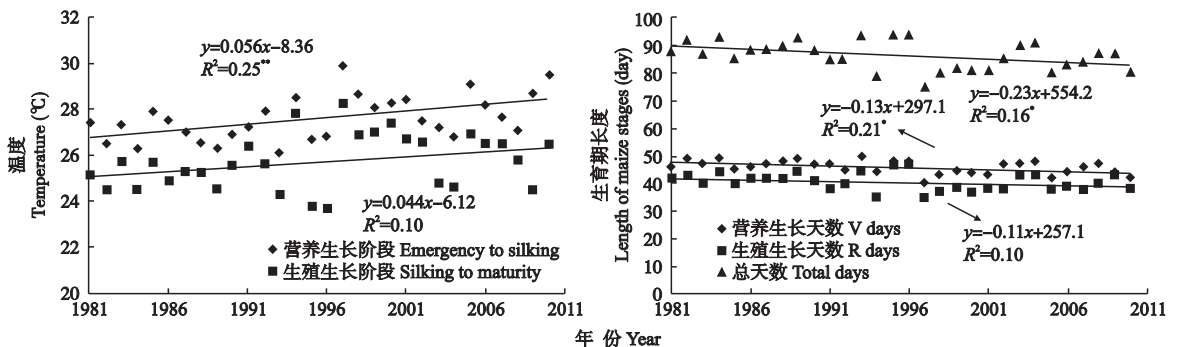


图5 1981—2010年夏玉米营养生长阶段、生殖生长阶段平均温度和生育期长度的模拟结果

Fig. 5 Simulation results of mean temperatures and growth days during vegetative and reproductive growth stage from 1981 to 2010.

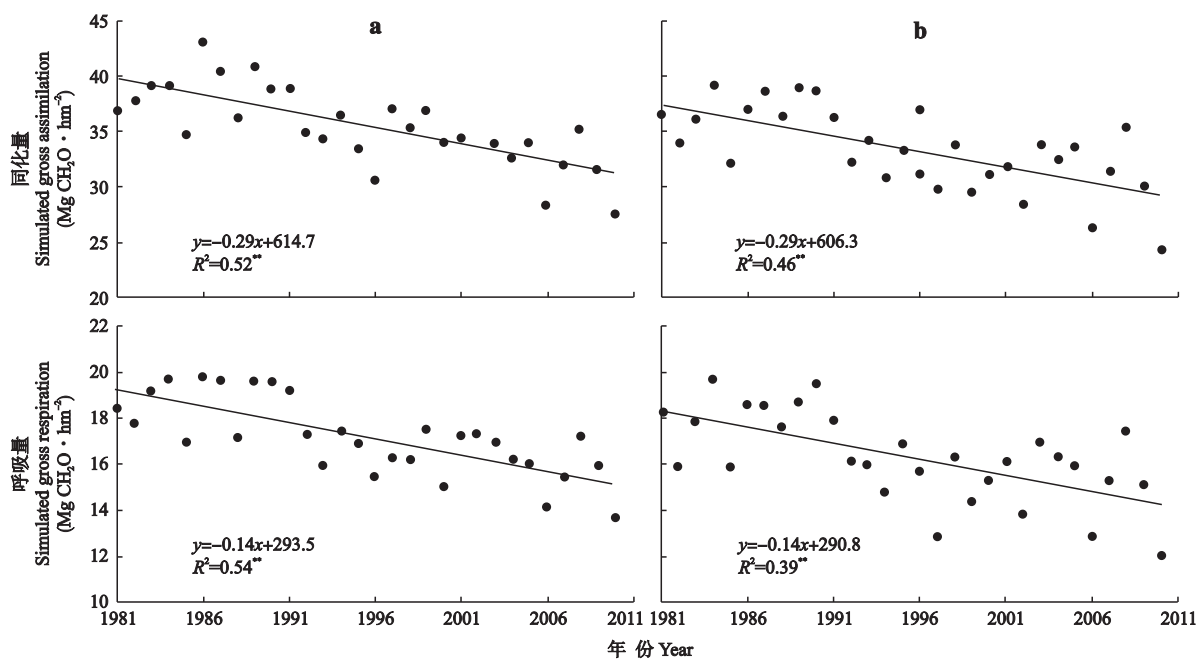


图6 1981—2010年模型模拟优化(a)和雨养(b)条件下夏玉米生长总同化量与呼吸量

Fig. 6 Simulated gross assimilation and total respiration for optimum (a) and rainfed (b) maize from 1981 to 2010.

受上述气候因素的综合影响,研究期间雨养和灌溉条件下夏玉米的同化量均显著减少,且降幅相同,为 $2.9 \text{ Mg CH}_2\text{O} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$;夏玉米生育期内的呼吸量也显著下降,降幅均为 $1.4 \text{ Mg CH}_2\text{O} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ (图6).同化量与呼吸量的差值均为 $-1.5 \text{ Mg CH}_2\text{O} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$,从而最终表现为产量下降,且灌溉与雨养条件下夏玉米产量潜力的下降趋势相同.

2.2.3 情景分析 由于灌溉与雨养条件下产量潜力下降趋势一致,说明降水变化对夏玉米产量潜力的影响较小.同时,灌溉与雨养条件下同化量与呼吸量数值和降幅一致进一步说明降水量不是本区导致产量潜力下降的主要因素.降雨主要影响产量年际间的变异.

应用情景分析进一步研究温度和太阳辐射的变化对于夏玉米产量潜力的影响,发现当温度不变时,夏玉米产量潜力以 $0.38 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 的速度下降;当辐射不变时,夏玉米产量的降幅为 $0.19 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ (图7).这表明太阳辐射对产量潜力下降的贡献高达60%,高于温度上升对产量潜力下降的影响(30%).

2.3 农民的适应性措施

近10年来,农民逐渐采用长生育期品种(表1),以适应气候变化.21世纪初期,邢台的代表性夏玉米品种主要为郑单958,GDD为 $1750 \text{ }^\circ\text{C}$,较20世

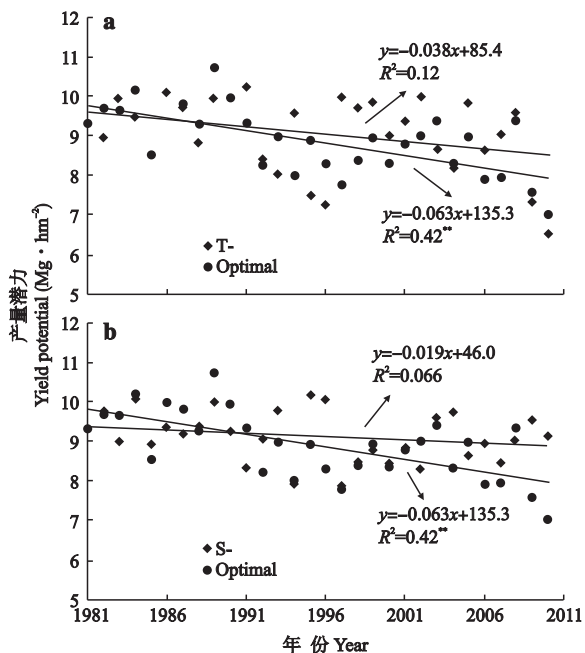


图7 模拟1981—2010年温度不变(a)、辐射不变(b)与实际气候变化条件下优化玉米的产量潜力

Fig. 7 Simulated yield potential with the stable temperature (a) and solar radiation (b), and the actual weather data for optimum maize from 1981 to 2010.

T-: 温度不变,每年温度均设定为1981年的温度值 The stable temperature meant the temperature from 1981 to 2010 was the same with 1981; S-: 太阳辐射不变,每年太阳辐射与1981年相同 The stable solar radiation meant the solar radiation from 1981 to 2010 was the same with 1981; Optimal: 优化,1981—2010年实际气象条件 The optimal meant the actual weather data from 1981 to 2010.

表 1 20 世纪 80 年代 (I) 与 21 世纪初 (II) 夏玉米品种产量潜力和生育期平均值的比较

Table 1 Yield potentials and length of maize stages of varieties in 1980s (I) and 2000s (II) (mean±SD)

时期 Periods	条件 Condition	产量潜力 Simulated grain yield (Mg · hm ⁻²)	生育期天数 Growth days	营养生殖 阶段天数 Vegetative growth stage days	生殖生长 阶段天数 Reproductive growth stage days
I	优化 Optimal	8.42±0.80	85±4	45±2	40±2
	雨养 Rainfed	8.10±1.11			
II	优化 Optimal	11.83±1.21	111±8	54±2	57±6
	雨养 Rainfed	10.83±1.67			
变化 Variation	优化 Optimal	3.40±0.92	26±5	9±1	17±5
	雨养 Rainfed	2.73±1.21			

纪 80 年代品种 GDD 增加 280 °C (增幅达 19%)。与 20 世纪 80 年代品种相比,21 世纪初夏玉米品种的产量潜力明显上升,在灌溉和雨养条件下分别增加 40% (3.40 Mg · hm⁻²) 和 34% (2.73 Mg · hm⁻²);其总生育期长度延长约 26 d,其中,营养生长阶段与生殖生长阶段分别延长 9 和 17 d。由此可见,品种的改变,主要是延长了玉米的生育期长度,尤其是花后生育期的长度,增加了灌浆时间,从而导致了产量潜力的提高。

3 讨 论

3.1 气候变化对产量的影响

邢台地区年际气候变化趋势与华北平原整体基本一致。但 1981—2010 年,邢台平均温度的平均增幅 (0.49 °C · 10 a⁻¹) 远高于华北平原 (0.25 °C · 10 a⁻¹)^[7]。邢台地区玉米生育期内降雨量变化不明显,没有对产量造成显著影响,但由于其年际变异较大,导致雨养玉米产量潜力年际间波动较大。华北平原有些地区年降水量下降,也有一些地区增加,但都未达到显著水平^[11,25]。邢台地区日照时数和太阳辐射的降幅分别为 0.56 h · d⁻¹ · 10 a⁻¹ 和 265.1 MJ · m⁻² · 10 a⁻¹,高于整个华北平原的平均值 (0.40 h · d⁻¹ · 10 a⁻¹、196 MJ · m⁻² · 10 a⁻¹)^[11-12]。这主要是因为以邢台为代表的地区,近年来工业发展迅速,环境污染比较严重,大气中气溶胶等成分大量增加。大量研究表明,气溶胶的增加能够导致太阳辐射的大幅降低^[8]。

受气候变化影响,邢台地区夏玉米产量潜力呈显著降低趋势,降幅达 0.63 ~ 0.64 Mg hm⁻² · 10 a⁻¹,与

华北平原其他地区的气候变化造成夏玉米减产的结果 (0.17 ~ 0.65 Mg · hm⁻² · 10 a⁻¹) 一致^[13,25]。该区域气候变化下玉米产量潜力的下降主要由于夏玉米生育期内太阳辐射的降低与温度升高造成生育期缩短共同作用的结果,其中,太阳辐射降低对产量潜力下降的贡献更大,这与全球和区域的部分研究结果存在一定差异。在全球尺度上,与辐射变化相比,温度变化对作物产量的影响更重要^[26-27]。在以邢台为代表的地区,如何应对太阳辐射快速下降导致的产量降低,并制定相应适应性措施,尚需进一步研究。

3.2 农民适应性措施

本研究主要从农民采用长生育期品种适应气候变暖这一角度进行适应性评价。在该地区,主要通过延长玉米的生育期长度,尤其是花后生育期的长度,增加灌浆时间,从而增加玉米产量。这一适应性措施与其他类似地区通过更换品种适应气候变化的研究结果基本一致^[13,25]。

当前在气候变化的适应性方面,农民还通过改变播期和调整管理等其他措施来提高产量。如在气候变暖的大背景下,玉米产量的形成期应尽量避免高温,同时灌浆期的相对适宜低温也是玉米高产的关键所在,这就要求根据不同气候和生态条件对播期进行适当调节,以充分利用当地气候资源,提高玉米产量潜力。在华北平原适当早播高温敏感型品种,可以减少 6% 的产量损失;适当晚播耐高温品种,则可有效减少 5.7% 的产量损失^[28]。此外,优化灌溉和施肥等管理措施也可以有效减缓气候变化对作物的不利影响,在作物增产和稳产方面起着重要作用。

参考文献

- [1] Lobell DB, Schlenker W, Roberts JC. Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 2011, **333**: 616-620
- [2] Schlenker W, Roberts MJ. Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U. S. crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, **106**: 15594-15598
- [3] Peng SB, Huang JL, Sheehy JE, et al. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, **101**: 9971-9975
- [4] You LZ, Rosegrant MW, Wood S, et al. Impact of growing season temperature on wheat productivity in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, **149**: 1009-1014
- [5] Ma J-H (马洁华), Liu Y (刘园), Yang X-G (杨晓光), et al. Characteristics of climate resources under

- global climate change in the North China Plain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **20**: 3818–3827 (in Chinese)
- [6] Ding Y-H (丁一汇), Ren G-Y (任国玉), Shi G-Y (石广玉), *et al.* China's national assessment report on climate change. I: Climate change in China and the future trend. *Advances in Climate Change* (气候变化研究进展), 2006, **2**(1): 3–8 (in Chinese)
- [7] Tan F-Y (谭方颖), Wang J-L (王建林), Song Y-B (宋迎波), *et al.* Analysis of changing characteristics of agricultural climate resources over last 45 years in North China Plain. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 2009, **30**(1): 19–24 (in Chinese)
- [8] Che HZ, Shi GY, Zhang XY, *et al.* Analysis of 40 years of solar radiation data from China, 1961–2000. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**: 1–5
- [9] Xiong W (熊伟), Xu Y-L (许吟隆), Lin E-D (林而达), *et al.* Regional simulation of maize yield under IPCC SRES A2 and B2 scenarios. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 2005, **26**(1): 11–15 (in Chinese)
- [10] Zhang J-P (张建平), Zhao Y-X (赵艳霞), Wang C-Y (王春乙), *et al.* Effects of climate change on winter wheat growth and yield in North China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(7): 1179–1184 (in Chinese)
- [11] Liu Y (刘园). Contributions of Climate Factors and Agronomical Managements on Crop Production of Winter Wheat and Summer Maize in the North China Plain. PhD Thesis. Beijing: China Agricultural University, 2010 (in Chinese)
- [12] Chen C, Wang EL, Yu Q, *et al.* Quantifying the effects of climate trends in the past 43 years (1961–2003) on crop growth and water demand in the North China Plain. *Climatic Change*, 2010, **100**: 559–578
- [13] Wang J, Wang EL, Yang XG, *et al.* Increased yield potential of wheat-maize cropping system in the North China Plain by climate change adaptation. *Climatic Change*, 2012, **113**: 825–840
- [14] Liu J (刘军), Cheng X-H (程晓辉), Huang R (黄荣). Analysis on climate characteristics in Xingtai City during 1954–2010. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科学), 2012, **40**(4): 2255–2256 (in Chinese)
- [15] Li B-H (李伯航), Sang Y-C (桑育春). A study of chief measures in high yield and aestival seed corn by means of bolting. *Journal of Agricultural University of Hebei* (河北农业大学学报), 1985, **8**(2): 1–8 (in Chinese)
- [16] Zhou Y-Z (周玉芝), Duan H-J (段会军), Cui Y-H (崔彦宏). The current status of development and demonstration for summer maize varieties in Hebei Province. *Crops* (作物杂志), 2005(1): 59–61 (in Chinese)
- [17] Zhou Y-Z (周玉芝), Duan H-J (段会军), Ji X-Z (姬惜珠), *et al.* Study on the development rule of summer planting maize varieties in Hebei Province. *Journal of Agricultural University of Hebei* (河北农业大学学报), 2005, **28**(2): 1–4 (in Chinese)
- [18] Bai J-S (白金顺). Evaluation and Exploitation of Maize (*Zea mays* L.) Yield Potential by Using Hybrid-Maize Simulation Model. PhD Thesis. Beijing: China Agricultural University, 2010(in Chinese)
- [19] Hou P (侯鹏). The Approaches for High Yield and High Efficiency of Maize (*Zea mays* L.) in Heilongjiang Province. PhD Thesis. Beijing: China Agricultural University, 2012 (in Chinese)
- [20] Yang HS, Dobermann A, Lindquist JL, *et al.* Hybrid-Maize: A maize simulation model that combines two crop modeling approaches. *Field Crops Research*, 2004, **87**: 131–154
- [21] Yang HS, Dobermann A, Cassman KG, *et al.* Features, applications, and limitations of the Hybrid-Maize simulation model. *Agronomy Journal*, 2006, **98**: 737–748
- [22] Grassini P, Yang HS, Cassman KG. Limits to maize productivity in the Western Corn-Belt: A simulation analysis for fully irrigated and rained conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, **149**: 1254–1265
- [23] Bai JS, Chen XP, Dobermann A, *et al.* Evaluation of NASA Satellite-and model-derived weather data for simulation of maize yield potential in China. *Agronomy Journal*, 2010, **102**: 9–16
- [24] Chen XP, Cui ZL, Vitousek PM, *et al.* Integrated soil-crop system management for food security. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, **108**: 6399–6404
- [25] Liu Y, Wang EL, Yang XG, *et al.* Contributions of climatic and crop varietal changes to crop production in the North China Plain, since 1980s. *Global Change Biology*, 2010, **16**: 2287–2299
- [26] Lobell DB, Burke MB. Why are agricultural impacts of climate change so uncertain? The importance of temperature relative to precipitation. *Environmental Research Letters*, 2008, **3**: 034007
- [27] Schlenker W, Lobell DB. Robust negative impacts of climate change on African agriculture. *Environmental Research Letters*, 2010, **5**: 014010
- [28] Tao FL, Zhang Z. Adaptation of maize production to climate change in North China Plain: Quantify the relative contributions of adaptation options. *European Journal of Agronomy*, 2010, **33**: 103–116

作者简介 王泓霏,女,1989年生,硕士研究生.主要从事气候变化对农业生产影响及农民适应性研究. E-mail: wang-hf07@163.com

责任编辑 杨弘
