

基于 CERES-Maize 模型的华北平原玉米生产潜力的估算与分析

戴明宏, 陶洪斌, 廖树华, 王利纳, 王璞*

(中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100094)

摘要: 在对 DSSAT4.0 中 CERES-Maize 模型进行参数校正和验证的基础上, 进一步利用华北地区具有代表性的 10 个气象站 30 年 (1976~2005 年) 的气象资料以及华北地区典型的土壤数据展开模拟。结果表明, 在一年一季的生产条件下, 华北平原各地区玉米多年平均光温生产潜力为 $13.53 \sim 22.56 \text{ t/hm}^2$; 各地区玉米产量在 4 月下旬至 6 月中旬的播期范围内均呈随播期的延迟而增加的趋势, 对这一趋势和各气象指标进行相关分析表明, 在华北北部主要驱动因子是灌浆期平均日辐射量, 而华北中南部主要驱动因子是灌浆期的温度。华北平原自北向南, 优化播期呈逐渐推迟的趋势: 北部怀来地区 5 月上旬播种较为适宜, 北京、乐亭和天津地区以 5 月下旬至 6 月初播种产量最高; 中南部以 6 月中上旬播种 (夏播) 较适宜。

关键词: CERES-Maize; 春玉米; 华北平原; 产量潜力; 播期

中图分类号: S513

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-4-0030-07

戴明宏, 陶洪斌, 廖树华, 等. 基于 CERES-Maize 模型的华北平原玉米生产潜力的估算与分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 30-36.

Dai Minghong, Tao Hongbin, Liao Shuhua, et al. Estimation and analysis of maize potential productivity based on CERES-Maize model in the North China Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 30-36. (in Chinese with English abstract)

0 引言

华北平原作为典型的冬小麦-夏玉米一年两熟轮作区, 春玉米仅有小面积种植 (主要分布于华北北部、旱地及山区)。然而, 随着水资源的日益短缺和农业用水量的不断增加, 华北平原的地下水被大量、过度开采, 直接造成了地下水位逐年下降, 形成大面积区域地下水漏斗^[1]。因此, 在华北平原缺水地区或年份以耗水量小的两年三熟制 (第一年冬小麦-夏玉米, 第二年春玉米), 甚至春玉米连作制等种植制度, 在缺水的或漏斗中心地区, 适当地替代耗水量较大的冬小麦-夏玉米一年两熟制, 成为减少华北地区农业用水总量的方法之一。然而, 冬小麦-夏玉米一年两熟制相对于两年三熟制和春玉米连作制, 在产量上仍有明显的优势。如何充分发挥春玉米的生产潜力, 缩小与一年两熟制的产量差距, 是目前华北平原农业可持续发展所面临的重要课题之一。传统上认为春玉米比夏玉米具有更高的产量潜力, 这在很大程度上归因于华北地区的温光生态条件, 对于一年一季玉米

而言是有多余的, 人们可以灵活的选择播期和生育长的品种, 而夏玉米的生育期受冬小麦生育期的限制, 只能选用生育期短的品种或提前收获未成熟的玉米。在华北平原各地区, 玉米的优化播期究竟处于什么范围, 不同播期下的光温生产潜力有多高, 仍未有定论。而播期不当是限制华北平原作物产量潜力发挥的主要因素之一^[2], 因此在华北平原针对不同地区的优化播期进行研究, 以提高光温生产潜力是十分必要的。

研究作物光温生产潜力的方法包括: 公式概算法、田区定位试验法、高产记录值调查法^[3]、联合国粮农组织 (FAO) 生态区划法^[4]以及作物生长模型法等, 其中作物生长模型法能定量地和动态地描述作物生长、发育和产量形成过程, 可以较为精确地描述光、温、水存在状况对作物生长发育的影响, 通用性强、覆盖面广、方法简单。以美国密歇根州立大学教授 Ritchie 为首的科学家团队研究开发的 CERES-Maize 模型^[5]是经过大量试验资料验证过的机理性模型。Hodges 曾用它来预报美国玉米带的产量^[6], 另外它还被广泛用于预测气候变化对作物的影响^[7-10], 李军等用它对黄土高原地区玉米生产潜力进行了模拟^[11]。本研究首先利用两年的田间试验结果校正 CERES-Maize 的参数, 并验证该模型在华北地区的有效性, 进而将获取到的关键参数, 与华北不同地区多年的气象数据耦合。通过模拟, 一方面获取华北平原不同地区的玉米一般产量和光温生产潜力, 另一方面帮助确定各地区的玉米优化播期, 这对于促进华北平原农业可持

收稿日期: 2007-09-20 修订日期: 2008-01-18

基金项目: 国家 863 课题 (2006AA10A303) 和国家 863 课题 (2006AA100202)
作者简介: 戴明宏 (1981-), 男, 安徽长丰人, 博士研究生, 主要从事玉米高产栽培及 DSSAT 模型的应用研究。北京 中国农业大学农学与生物技术学院, 100094。Email: minghongdai@yahoo.com.cn

*通讯作者: 王璞 (1957-), 男, 山西朔州人, 教授, 博士生导师, 主要从事作物高产栽培与资源高效利用研究。北京 中国农业大学农学与生物技术学院, 100094。Email: wangpu@cau.edu.cn

续化种植业调整具有重要的参考价值。

1 材料与方法

为给 CERES-Maize 模型的参数校正和有效性验证提供数据, 本研究在中国农业大学东北旺试验站进行了三个相关的田间试验, 每个实验均重复 4 次, 三个试验中选用的品种均为 CF1505。试验 1 用于获取该品种的品种参数, 试验 2 和 3 用于验证模拟结果的准确性。试验 1 于 2005 年和 2006 年连续进行, 其中设置了三个氮肥管理模式, 即, 1) 不施氮; 2) 推荐施氮模式, 其施氮量是根据春玉米的目标产量 (13.5 t/hm^2) 以及于各施肥时期 (播种前、拔节期和大喇叭口期) 测定的土壤无机氮含量的差值计算获得^[12]; 根据测定及计算结果, 2005 年施氮量为 140 kg/hm^2 (拔节期 30 kg/hm^2 , 大喇叭口期 110 kg/hm^2), 2006 年施氮量为 70 kg/hm^2 (于大喇叭口期施用); 3) 经验施氮模式, 总施氮量为 240 kg/hm^2 , 按 1:2:3 的比例分别于播种前、拔节期和大喇叭口期施用。2005 年, 于 5 月 11 日播种, 种植密度为 6.67 株/m^2 , 行距为 60 cm , 并在播种前和大喇叭口期追肥后进行灌水, 灌水量均为 100 mm 。磷 (普钙)、钾 (硫酸钾)、锌肥均作底肥施用, 用量分别为 150 、 120 、 30 kg/hm^2 。2006 年, 除播种期调至 4 月 26 日外, 种植密度、灌水量以及磷钾锌肥用量均与 2005 年保持一致。试验 2 于 2006 年进行, 设置 3 个水分处理, 即 100 mm (仅灌底墒水)、 160 mm (底墒水 100 mm , 大喇叭口期 60 mm) 和 220 mm (底墒水 100 mm , 大喇叭口期 120 mm), 其它管理措施与试验 1 的经验施氮模式相同。试验 3 于 2006 年进行, 设置 4 个播种日期, 分别为 4 月 24 日、5 月 11 日、5 月 28 日和 6 月 14 日, 其它栽培管理措施与试验 1 的经验施氮模式相同。

试验地土壤类型为石灰性潮土, 表 1 列出了各试验地以及华北地区典型的^[13] (用于华北地区玉米一般产量模拟及光温生产潜力模拟) 土壤全氮、速效磷、速效钾、有机质及 pH 值等基础地力指标。试验地土壤质地为华北地区典型的粉砂质粘壤土^[14], 所有模拟过程均采用同一组土壤质地数据 (表 2)。试验站内的小型气象站可准确测定逐日的气象数据, 研究中利用该气象站测定的 2005~2006 年的逐日最高气温、最低气温、平均温度、降雨量及太阳辐射量等数据用以修正模型参数并验证模拟结果的准确性。

另外, 由国家气象局资料室提供了覆盖华北地区 10 个气象站 (北京、怀来、天津、乐亭、石家庄、沧州、济南、惠民、兖州、安阳) 30 年 (1976~2005 年) 的逐日气象数据, 包括最高气温、最低气温、平均温度、降雨量及日照时数等, 这部分数据主要用于模拟华北地区不同播期下玉米的一般生产情况及光温生产潜力。需要

指出的是, 由于 CERES 模型要求的是太阳辐射量, 非日照时数 (虽然模型具有自动将日照时数转换为太阳辐射量的功能, 但经过调试发现其转换的数据比实际值偏低, 模拟的结果偏差很大), 因此, 我们采用了国际上认可的埃斯屈朗 (Angstrom) 经验公式^[15]将日照时数转换为太阳辐射量。并利用东北旺试验站中小型气象站测定的 2000~2001 年玉米生育期内实际日辐射量, 与利用该公式由当地日照时数转化的日辐射量进行相关性和误差分析, 二者的相关系数达 0.9643 , 均方根误差 (RMSE) 也很低 (图 1)。通过此验证, 证明了埃斯屈朗公式可用于 CERES-Maize 模型的模拟。

表 1 试验地及华北地区典型的土壤基础肥力指标

Table 1 Soil fertility of experimental field and typical soil fertility in the North China Plain

	全氮 /%	速效磷 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹	有机质 /mg·kg ⁻¹	pH 值
试验 1	0.114	43.3	191.7	2.35	7.5
试验 2	0.107	41.8	168.3	2.28	7.5
试验 3	0.116	29.1	141.7	2.29	7.5
华北典型地区 ^[13]	0.100	21.9	90.9	1.23	8.2

表 2 试验地土壤质地情况

Table 2 Soil texture of experimental field

土层/cm	黏粒/%	粉砂粒/%	砂粒/%
0~15	16.6	52.6	30.8
15~30	17.7	47.8	34.5
30~60	26.8	56.8	16.4
60~90	21.7	47.6	30.7
90~120	18.6	46.4	35.0
120~150	19.6	57.8	22.6

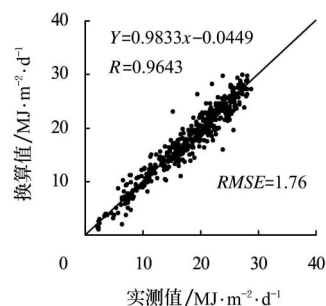


图 1 埃斯屈朗公式验证:

实测日辐射量 ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) 和利用公式换算的日辐射量 ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) 相关性分析 (图中斜线表示 1:1 基准线)

Fig.1 Angstrom formula validation: Comparison of solar radiation amounts ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) measured in weather station and calculated with Angstrom formula (The line represents 1:1 relationship)

埃斯屈朗公式: $R1 = RA (aA + bA \cdot nN^{-1})$; 式中, $R1$ 为实际接收的辐射 ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)。 RA 为天文辐射值 (Angot 值), 或假定没有大气时到达地面的辐射理论值。 RA 值

与一年中不同日期和纬度具有一定的函数关系。 NV^{-1} 为实际日照时数 (n, h) 与晴天时每日的最长日照时数 (N, h) 之比。 aA 和 bA 为经验常数, 取决于地理位置和气候。本研究中华北地区属温带地区, 取值 $aA=0.18$, $bA=0.55$ 。

2 结果与分析

2.1 模型参数的校正及验证

CERES-Maize 模型要求的玉米品种参数包括: P1, 指完成非感光幼苗期大于 8°C 热量时间; P2, 光周期敏感系数, 指光敏感期大于临界日长 1 h 的光周期导致发育延迟的程度; P5, 灌浆期特征参数, 指吐丝至生理成熟大于 8°C 的热量时间; G2, 单株最大穗粒数; G3, 潜在灌浆速率参数; PHINT, 指出叶间隔特性参数^[16,17]。除了品种参数之外, 另一个重要的参数 SLPF (Soil fertility factor), 指土壤肥力功能, 反应了玉米对土壤肥力有效利用的能力。SLPF 一般取值范围在 $0\sim 1$ 之间, 并且取值越大玉米光合效率越高、干物质积累速率越快。针对不同地区, 不同土壤类型、质地或肥力状况, 不同玉米品种等不同环境条件下的模拟过程中, SLPF 的取值都需要进行相应的调整, 从而使模拟值和实测值得到有效的吻合。

为确保获取准确的品种参数, 本研究针对两年来三个处理同时进行了参数调整。在保证每个处理的模拟值与实测值之间的误差均小于 5% 的前提下, 以各个指标诸如开花日期、成熟日期、籽粒产量、粒重、穗粒数等的均方根误差 (RMSE) 达到最小为最佳参数标准。经过调试获取到的 CF1505 品种参数: P1、P2、P5、G2、G3、PHINT 分别为 209、0.59、1005、1250、6.8、43, SLPF 取值 0.68。利用此品种参数模拟的各处理开花和成熟日期和实测值均完全吻合。由于试验地土壤肥力过高, 2005 年经验施氮模式和推荐施氮模式与不施氮相比, 在玉米籽粒产量、生物量、千粒重及单位面积粒数等指标上均无显著差异, 这一点与 CERES 的模拟结果是一致的。如图 2 所示, 不同处理 2005 年产量和生物量对应的点几乎完全处在 1:1 基准线上, 千粒重和单位面积粒数虽略有偏差, 但偏差最大的误差率也仅有 4.1%。2006 年高温寡照的天气造成的玉米产量普遍下降, 也同样在模拟结果中体现出来。总体上看, 各个指标的 RMSE 都被控制在较低水平, CERES 模拟值和实测值已经达到较高的吻合度。

在对 CERES-Maize 进行校正之后, 继续利用试验 2、3 的数据验证 CERES-Maize 模型。如图 3 所示, 在田间试验中, 灌水量 100 mm 与 160 mm 或 220 mm 相比, 产量、千粒重、单位面积粒数和地上部总生物量等指标均得到明显的增加, 但是灌水量由 160 mm 增加到 220 mm 时, 各项指标增加均不显著。CERES-Maize 模拟也呈现相同的结果, 灌水量 160 mm 和 220 mm 在春玉米的生长

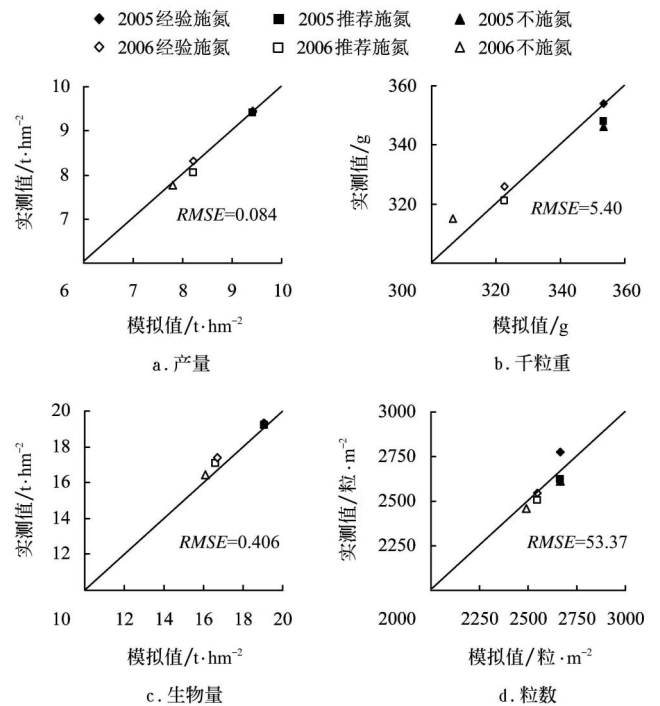


图 2 CERES-Maize 模型校正: 试验 1 实测和 CERES-Maize 模拟产量、千粒重、单位面积粒数、生物量的结果比较 (图中斜线表示 1:1 基准线)

Fig.2 CERES-Maize calibration: Comparison of maize yield, TKW, kernel number per unit area and aboveground biomass measured and simulated with CERES-Maize

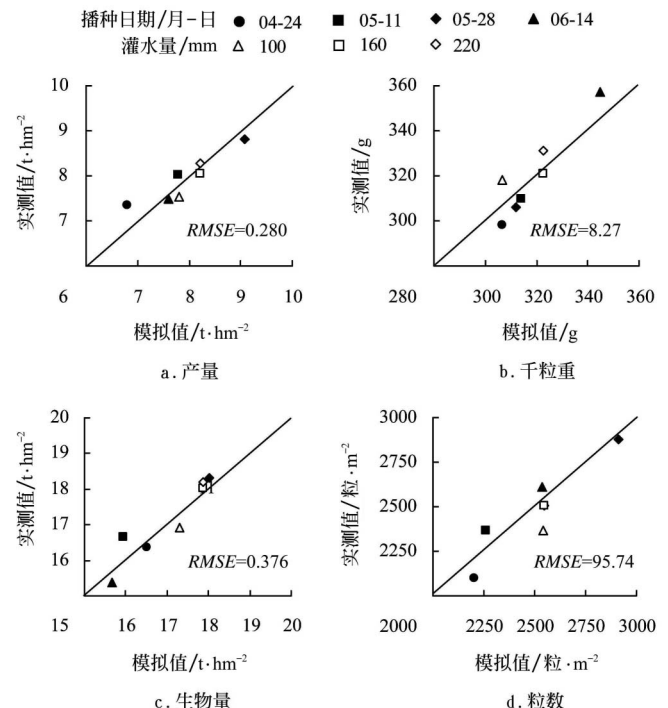


图 3 CERES-Maize 模型验证: 试验 2、3 实测和 CERES-Maize 模拟产量、千粒重、单位面积粒数、生物量的结果比较 (图中斜线表示 1:1 基准线)

Fig.3 CERES-Maize validation: Comparison of maize yield, TKW, kernel number and aboveground biomass measured and simulated with CERES-Maize

发育和籽粒产量方面没有明显差异。即在正常降雨年景, 春玉米大喇叭口期有必要进行灌溉, 灌溉量以 60 mm 较为适宜, 过量的灌水不会促进玉米增产。不同播期条件下, CERES-Maize 模型的模拟结果和田间试验的结果也基本吻合。以籽粒产量的表现为例, 其高低顺序均表现出 5 月 28 日 > 5 月 11 日 > 6 月 14 日 > 4 月 26 日, 千粒重和单位面积粒数也表现出同样的规律。在对生物量的模拟时出现了一定的偏差, 即 5 月 11 日播期条件下生物量的实测值高于 4 月 24 日的实测值, 而模拟的结果则相反。这一点并不妨碍 CERES-Maize 总体上模拟的精确度, 尽管模型验证结果中各项指标的 RMSE 略高于模型校正的 RMSE, 但各处理的误差率也都被控制在 5% 以内。验证的结果表明 CERES-Maize 模型模拟具有较高的准确性, 基本可以反应玉米的生长过程、产量以及不同处理间的差异, 适宜于针对华北地区的玉米生产展开更深入的研究。

2.2 区域玉米一般产量及光温生产潜力预测

在华北地区由北向南选取了怀来、北京、乐亭、天津、沧州、石家庄、惠民、济南、安阳、兖州等 10 个站点以模拟玉米生产。为了明确各地在一年一季生产条件下玉米的优化播期, 在模拟方案中从春播到夏播共设置了四个播期, 即 4 月 24 日、5 月 11 日、5 月 28 日和 6 月 14 日。一般产量模拟指的是在特定的天气及土壤条件下, 利用现有的品种和栽培方法模拟所能达到的产量。在进行一般产量模拟时, 采用的栽培方案与试验 1 中经验施氮模式相同, 并且选用的品种参数以及 SLPF 的取值和通过校正获取的参数取值一致。相比之下光温生产潜力模拟中关闭了除天气因素之外的其它所有限制因素。表 3、表 4 分别列出了 CERES-Maize 模拟的, 1976~2005 年各地区不同播期玉米的一般产量以及光温生产潜力的平均值。由于在对一般产量进行模拟时, 玉米会受到一

定的水、氮胁迫以及磷、钾、病虫害等因素的影响, 因此所模拟的一般产量总低于光温生产潜力。华北地区不同播期下, 平均一般产量为 9.60~15.30 t/hm², 平均光温生产潜力为 13.53~22.56 t/hm²。总体上看, 华北地区玉米的一般产量比其光温生产潜力低 38.9%, 表明该地区的玉米生产仍有较大潜力可以挖掘。华北北部的怀来、北京、乐亭及天津(北纬 39.05°~40.24°)属于高产量区, 一般产量和光温生产潜力分别在 10.86~15.30 t/hm² 和 14.99~22.56 t/hm² 范围内。尤以怀来的玉米产量最高, 其一般产量和光温生产潜力最高分别可达 15.30 和 22.56 t/hm²; 华北中部的沧州、石家庄、惠民(北纬 37.30°~38.20°)以及南部的济南、兖州和安阳(北纬 35.34°~36.36°)产量略低, 一般产量水平在 9.60~12.80 t/hm² 范围内, 而光温生产潜力为 13.53~18.98 t/hm²。华北平原玉米光温生产潜力由北向南呈递减趋势和玉米灌浆期日平均温度、平均日最高温度、平均昼夜温差(日温差)以及平均日辐射量等气象因素都有很大关系。华北平原由北向南, 玉米灌浆期日平均温度和平均日最高气温逐渐上升, 而平均昼夜温差和平均日辐射量逐渐下降, 是该地区由北向南光温生产潜力逐渐下降的根本原因。不同播期之间, 玉米一般产量和光温生产潜力各地均表现出在一定范围内随播期延迟(4 月 24 日至 6 月 14 日)而增加的趋势(表 3, 表 4)。在华北北部, 怀来地区当播期由 4 月 24 日推迟到 5 月 11 日, 一般产量与光温生产潜力分别增加了 10.9% 和 10.1%, 但 5 月 28 日播期下由于生育后期温度过低, 33% 的年份玉米无法充分成熟, 6 月 14 日播期下则 100% 达不到成熟, 表明该地区于 5 月上旬进行玉米播种较为合适。北京、乐亭和天津地区当播期 4 月 24 日推迟到 5 月 28 日, 一般产量分别提升了 9.7%、13.8% 和 3.5%, 若在 6 月 14 日播种, 则分别有 43%、80% 和 13% 的年份达不到生理成熟, 表明这些

表 3 基于 CERES-Maize 模型的华北平原玉米一般产量模拟结果

Table 3 Maize typical yield simulated by CERES-Maize model in the North China Plain

/t·hm⁻²

地区	纬度 (°)	播期/月-日							
		04-24		05-11		05-28		06-14	
		平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
怀来	40.24	13.80	2.19	15.30	2.33	(33%)	—	(100%)	-
北京	39.48	11.24	1.29	11.30	1.39	12.33	1.75	(43%)	-
乐亭	39.26	11.97	1.34	12.26	1.43	13.62	1.98	(80%)	-
天津	39.05	10.86	1.27	10.93	1.42	11.24	1.41	(13%)	-
沧州	38.20	10.73	1.72	11.13	1.54	11.36	1.53	12.80	1.7
石家庄	38.02	9.60	1.52	9.86	1.36	10.07	1.77	11.78	1.84
惠民	37.30	10.95	0.98	10.99	1.27	10.93	0.93	11.97	1.48
济南	36.36	9.91	1.92	10.73	1.17	10.43	1.14	11.81	1.62
安阳	36.03	9.69	1.2	9.63	1.15	10.49	1.19	11.63	1.13
兖州	35.34	10.56	1.08	10.26	1.28	11.15	1.44	12.77	1.8

注: 括号内数字表示在该播期下模拟的玉米达不到生理成熟年份所占比例。

表 4 基于 CERES-Maize 模型的华北平原玉米光温生产潜力模拟结果

Table 4 Maize photothermal potential yield simulated by CERES-Maize model in the North China Plain /t·hm⁻²

地区	纬度 /(°)	播期/月-日							
		04-24		05-11		05-28		06-14	
		平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
怀来	40.24	20.74	2.07	22.56	2.14	—	—	—	—
北京	39.48	15.87	1.55	15.50	1.90	16.85	2.39	—	—
乐亭	39.26	16.33	1.82	16.69	1.94	18.70	2.73	—	—
天津	39.05	15.09	1.66	14.99	1.96	15.47	2.03	—	—
沧州	38.20	15.15	1.95	15.26	2.08	15.79	1.97	18.42	2.13
石家庄	38.02	13.79	2.03	13.80	1.88	13.91	2.47	16.53	2.50
惠民	37.30	15.17	1.38	15.60	2.04	15.57	1.81	18.98	2.85
济南	36.36	14.70	1.91	14.71	1.60	14.26	1.56	16.43	2.25
安阳	36.03	14.14	1.33	13.53	1.83	14.76	1.88	16.70	1.88
兖州	35.34	14.69	1.52	14.13	1.80	15.40	2.01	18.12	2.59

地区以 5 月下旬至 6 月初播种产量最高。华北平原中南部的 6 个地区（石家庄、沧州、惠民、济南、兖州和安阳）由于气候差异不大，模拟的结果非常相似。总的来说在华北中南部，6 月是玉米播期的分水岭。6 月之前播种的玉米一般产量不会超过 11 t/hm²，光温生产潜力不超过 16 t/hm²，而 6 月 14 日播种的一般产量和光温生产潜力都在 11 t/hm² 和 16 t/hm² 以上，而且基本可以保证玉米充分成熟（惠民和石家庄个别年份未成熟），表明华北中南部在一年一熟条件下，以 6 月中上旬（夏播）种植玉米较适宜。

北京地区于 4 月底或 5 月初播种，玉米进入吐丝期的时间大约在 7 月上旬至中旬，正值北京地区高温多雨寡照的阶段，光辐射量少、昼夜温差小都不利于玉米籽粒的灌浆；而 5 月底至 6 月初播种，玉米进入吐丝期大约在 7 月底至 8 月初，该阶段湿热天气相对减少，而光照和昼夜温差都处于相对适宜于灌浆的阈值里。在对各播期玉米光温生产潜力和灌浆期内气象因素分别进行相关性分析（表 5）表明，北京地区玉米产量随播期延迟而增加与玉米灌浆期日平均温度、平均日最高温度、平均昼夜温差（日温差）以及平均日辐射量的相关系数分别为 -0.7733、-0.7620、0.8526 和 0.9920，也就是说该地区玉米产量随播期延迟而增加，其最大驱动因子是灌浆期平均日辐射量，其次是昼夜温差。对惠民和安阳的研究结果表明，在灌浆期各项气象因子中，平均日辐射量与玉米产量随播期延迟而增加趋势的相关性最低，尤其在安阳其相关系数仅为 0.0772。而灌浆期平均日均温、平均日最高温和平均昼夜温差的相关系数都在 0.92 以上。华北平原中南部，7~8 月间光照相对于北部地区更稳定，因此该地区不同播期下玉米灌浆期的光辐射量相差不大，玉米产量随播期延迟而增加的主要驱动因子是灌浆期的温度指标。

表 5 玉米光温生产潜力与灌浆期各气象因子的相关性分析

Table 5 Analysis of the correlation between the increasing trend of photothermal potential yield with delaying sowing date and weather factors in the North China Plain

地区	日平均温度 /°C	日最高温度 /°C	日温差 /°C	日辐射量 / J·(m ² ·d) ⁻¹
北京	-0.7733	-0.7620	0.8526	0.9920
惠民	-0.9253	-0.9268	0.9215	0.7902
安阳	-0.9311	-0.9263	0.9569	0.0772

3 结论与讨论

CERES-Maize 模型模拟结果的有效性，是以获取准确的品种参数以及与影响作物生长发育的其它参数为前提的。而模型参数的确定，一方面以详细的天气、土壤、田间管理以及试验数据为基础；另外一方面要在模型灵敏度分析中反复地调整各参数，以使各项指标的实测值和模拟值达到最佳的吻合。目前，国内有许多利用作物模型及其它方法计算玉米产量潜力的报道，例如：王宗明^[18]和吴绍洪^[19]分别利用 Cropsyst 模型和改进的 PS123 作物生长模型，模拟了黑龙江海倫市玉米光温生产潜力；蔡承智等利用 AEZ 模型对中国所有农作制区域的玉米产量潜力做了分析，其中华北地区玉米的灌溉生产潜力为 12~13 t/hm²^[20]；王崇姚等通过经验公式计算指出华北地区（黄淮海地区）玉米的光温生产潜力为 37.4 t/hm²^[21]，而赵春生则利用了联合国 FAO 的生态区划法计算出北京地区春、夏玉米的光温生产潜力分别为 16.1 和 12.3 t/hm²^[4]。CERES-Maize 模型以日为单位计算作物的发育速度，根、茎、叶的伸长和扩展速率，群体截获光量和干物质在植株各器官中的分配量，植株所吸收的水分和氮素等^[5]。通过调整播期可改变玉米生育期内的温、光、水等气候条件，从而影响玉米的生长发育和产量形成。利用 CERES-Maize 模型研究玉米的光温生产潜力，指的

是现有玉米优良品种在其生长期保持最适水肥状态时, 在一个地区的光照和热量资源范围内所能实现的单位面积最高产量^[11]。估算时, CERES-Maize 模型还考虑了品种固有的遗传特性, 因此更贴近实际的生产情况。

前人对中国的气候生产潜力进行了区划, 认为华北平原全年的光温生产潜力在 26.3 t/hm^2 以上^[22]。本研究指出, 在一年一季的前提下, 以北纬 39° 为界华北平原光温生产潜力可分为两部分: 华北北部(北纬 $39.05^\circ \sim 40.24^\circ$) 由于玉米灌浆期温度相对较低、昼夜温差较大、光照也较充足, 有利于延长并加快玉米籽粒的灌浆, 该地区属于高产量区, 光温生产潜力为 $14.99 \sim 22.56 \text{ t/hm}^2$; 华北中南部(北纬 $35.34^\circ \sim 38.20^\circ$) 产量潜力略低, 光温生产潜力为 $13.53 \sim 18.98 \text{ t/hm}^2$ 。模拟的结果表明, 华北平原自北向南, 优化播期呈逐渐推迟的趋势。在华北北部, 怀来地区 5 月上旬播种较为适宜; 北京、乐亭和天津地区以 5 月下旬至 6 月初播种产量最高, 这一结论和邓根云^[23]的研究结果不谋而合, 其利用公式概算法同样指出北京郊区中熟玉米的最佳播期是在 5 月中下旬。华北平原中南部由于气候差异不大, 以 6 月中上旬(夏播) 种植玉米较适宜。近年来, 山东夏玉米(6 月上旬播种) 在高产竞赛中屡破高产纪录^[24, 25], 也证明了该地区的气候条件有利于夏玉米的生产。长期以来, 人们认为华北地区春玉米具有比夏玉米更高的产量潜力, 但实际上该地区的气候条件, 特别是灌浆期的高温寡照天气, 并不利于春玉米籽粒的灌浆, 春玉米的高产主要得益于其较长的生育期。夏玉米生产中所面临的主要问题之一, 是其收获期被限制在冬小麦播种之前。因此人们通常未等完全成熟便将其收获了, 产量潜力未得到充分发挥的同时, 籽粒品质也下降了(含水量高)。本研究中, 华北中南部夏玉米之所以比春播玉米具有较高的光温生产潜力, 首先在于夏玉米灌浆期较春玉米灌浆期具有相对凉爽的气温和优越的光照条件, 更有利于籽粒的充分灌浆; 另一方面是由于模拟中并未限制其生育期。该地区夏玉米的生育期若能延长至十月中下旬, 仍有较大的产量潜力可以挖掘。

北京位于华北平原的西北边缘, 尽管其气候特点与华北其它地区有一定的差别, 但作为典型的暖温带半湿润大陆性气候, 能够代表华北平原总体的气候特征。DSSAT 模型的宗旨, 是决策能否将一个地区的农业技术推广于其它地区。本研究利用在北京连续两年获取到的田间试验数据, 对 DSSAT 中的 CERES-Maize 模型进行了较完整的参数校正及验证, 并将该参数应用于华北其它地区的玉米生产模拟, 有助于今后华北平原农作物种植制度调整的总体决策。一般的研究仅利用一个试验处理进行参数调正, 而本研究根据两年来三个施氮模式的试验数据同时进行参数调正, 并利用另外两个不同因素

(灌溉量和播期) 的试验结果对所获取的参数进行验证, 增强了 CERES-Maize 模拟结果的准确度和可信度。所以只要具备土壤、气候及品种参数等数据资料, 利用 CERES-Maize 模型就可以得出任何地区、年份的一般生产状况和生产潜力, 通用性强、覆盖面广、简单实用, 并且理论上较常规作物潜力研究方法好, 应成为今后玉米生产潜力的研究方向。但目前模型对种植密度, 磷、钾等营养元素平衡, 病、虫、草害及自然灾害等的模拟精度还有待加强, 研究人员还在对 CERES-Maize 进行不断的更新和升级, 以促进模型得到更好的推广和应用。

[参 考 文 献]

- [1] 朱希刚. 华北平原农业水资源利用[J]. 世界农业调研, 1998, (4): 9—12.
- [2] 夏爱萍, 梁卫理, 吕红毡, 等. 冀南平原冬小麦—夏玉米生产主要限制因素分析[J]. 中国农学通报, 2006, 22 (9): 123—126.
- [3] 李 军, 王立祥, 邵明安, 等. 黄土高原地区小麦生产潜力模拟研究[J]. 自然资源学报, 2001, 16 (2): 161—165.
- [4] 赵春生. 对京郊玉米高产潜力分析[J]. 北京农业, 1998, (4): 7.
- [5] 曹永华. 美国 CERES 作物模拟模型及其应用[J]. 世界农业, 1991, (9): 52—55.
- [6] Hodges T, Botner D, Sakamoto C, et al. Using the CERES-Maize model to estimate production for the U.S. cornbelt [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1987, 40: 293—303.
- [7] Phillips J G, Cane M A, Rosenzweig C. ENSO, Seasonal rainfall patterns and simulated maize yield variability in Zimbabwe [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 90: 39—50.
- [8] Southworth J, Randolph J C, Habeck M, et al. Consequences of future climate change and changing climate variability on maize yields in the Midwestern United States[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2000, 82: 139—158.
- [9] Mati B M. The influence of climate change on maize production in the semi-humid-semi-arid areas of Kenya [J]. Journal of Arid Environments, 2000, 46: 333—344.
- [10] O'Neal M R, Frankenbeger J R, Ess D R. Use of CERES-Maize to study effect of spatial precipitation variability on yield [J]. Agricultural Systems, 2002, 73, 205—225.
- [11] 李 军, 王立祥, 邵明安, 等. 黄土高原地区玉米生产潜力模拟研究[J]. 作物学报, 2002, 28 (4): 555—560.
- [12] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35 (11): 1361—1368.
- [13] 俞 海, 黄季焜, Rozelle S, 等. 中国东部地区耕地土壤肥力变化趋势研究[J]. 地理研究, 2003, 22 (3): 380—388.
- [14] 中国农科院土肥所. 土壤肥料分析[M]. 北京: 农业出版社, 1978: 175.
- [15] 范柯伦 H, 沃尔夫 J, 著(杨守春, 王涌清, 陈同斌, 等译). 农业生产模型——气候、土壤和作物[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1990: 65.

- [16] 张艳红, 马永良, 廖树华. CERES-Maize 模型模拟中品种参数优化方法研究[J]. 中国农业大学学报, 2004, 9 (4): 24—29.
- [17] Jones C A, Kiniry J R. CERES-Maize : A simulation model of maize growth and development [M]. Texas A&M University Press, 1986: 45—46.
- [18] 王宗明, 张 柏, 宋开山, 等. CropSyst 作物模型在松嫩平原典型黑土区的校正和验证[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 47—50.
- [19] 吴绍洪, 靳 京, 戴尔阜. 基于 PS123 作物生长模型的黑龙江海伦市玉米生产潜力计算[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 93—97.
- [20] 蔡承智, Van Velthuisen H, Fischer G, 等. 基于 AEZ 模型我国农作物区划的玉米产量潜力分析[J]. 玉米科学, 2006, 14 (4): 158—161.
- [21] 王崇桃, 李少昆, 韩伯棠. 玉米高产之路与产量潜力挖掘[J]. 科技导报, 2006, 24 (4): 8—11.
- [22] 陈明荣, 龙斯玉. 中国气候生产潜力区划的探讨[J]. 资源科学, 1984, (3): 72—79.
- [23] 邓根云. 气候生产潜力的季节分配与玉米的最佳播期[J]. 气象学报, 1986, 44 (2): 192—198.
- [24] 韩守良, 慕美财, 翟延举, 等. 2004 年夏玉米超高产栽培研究简报[J]. 玉米科学, 2006, (14) (增刊): 110—111.
- [25] 杨今胜, 王永军, 李登海, 登. 超高产夏玉米栽培研究初报[J]. 青岛农业大学学报 (自然科学版), 2007, 24 (2): 97—100.

Estimation and analysis of maize potential productivity based on CERES-Maize model in the North China Plain

Dai Minghong, Tao Hongbin, Liao Shuhua, Wang Lina, Wang Pu

(College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract: A field experiment with three nitrogen managements was conducted from 2005 to 2006 in Beijing Dongbeiwang experimental station to calibrate CERES-Maize model in DSSAT 4.0. Another two field experiments regarding irrigation amounts and sowing dates were conducted in 2006 to validate CERES-Maize model. After model validation, normal maize production and photothermal potential productivity were simulated by using 30 years weather data from 10 weather stations in the North China Plain (NCP). The results show that average photothermal potential productivity is in the range of 13.53 to 22.56 t/hm² in the NCP under the condition of one crop one year. Maize photothermal potential yield increased by delaying sowing date in range of the end of April to middle of June, and the main driving factor of this trend was average daily radiation during grain filling stage in the north NCP, while that in the south and middle NCP was on daily temperature condition. There was a delaying trend about optimized sowing dates from north to south in the NCP. In the north NCP, optimized sowing date was around early May in Huailai region (40.23 °N Latitude), while it was late May in region of Beijing, Tianjin and Laoting (39.05°N~39.48°N Latitude). And in the south and middle NCP (35.34 °N~38.20 °N Latitude), maize sowed in early June could reach the maximum yield.

Key words: CERES-Maize; spring maize; North China Plain; potential productivity; sowing date