

黄土旱塬 Hybrid-Maize 模型适应性及春玉米生产潜力估算

刘毅^{1,3,4}, 李世清^{1*}, 陈新平^{1,2}, 白金顺²

- (1. 中国科学院水利部水土保持研究所/西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100;
2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094; 3. 中国科学院长武黄土高原农业生态试验站, 杨凌 712100;
4. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 通过对 Hybrid-Maize 玉米高产模型进行田间验证, 应用该模型对黄土旱塬春玉米生产潜力进行初步估算。结果表明, Hybrid-Maize 模型在黄土旱塬表现出较好模拟效果, 总生物量、秸秆生物量和籽粒产量模拟值与实测值间具有极显著线性相关性, 其决定系数分别为 0.9469、0.8164 和 0.9650, 回归系数分别为 1.0198、0.9787 和 1.1844, 接近于 1。黄土旱塬区多年光温生产潜力和气候生产潜力因品种不同有所差别, 对多年平均光温籽粒和总生物量生产潜力, 紧凑型玉米品种分别为 13.25 和 22.45 t/hm², 平展型玉米品种分别为 12.32 和 20.62 t/hm², 年际变化小; 对多年平均气候籽粒和总生物量生产潜力, 紧凑型玉米品种分别为 11.97 和 19.94 t/hm², 平展型玉米品种分别为 11.37 和 18.63 t/hm², 年际波动大。在黄土旱塬区, 玉米产量潜力挖掘的主要途径应集中在提高密度和水分限制条件下, Hybrid-Maize 玉米模型在指导玉米高产栽培上具有较好应用。

关键词: Hybrid-Maize 模型, 生产潜力, 产量模拟, 春玉米, 黄土旱塬

中图分类号: S126.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-12-0302-07

刘毅, 李世清, 陈新平, 等. 黄土旱塬 Hybrid-Maize 模型适应性及春玉米生产潜力估算[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 302-308.

Liu Yi, Li Shiqing, Chen Xinping, et al. Adaptability of Hybrid-Maize model and potential productivity estimation of spring maize on dry highland of loess plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 302-308.(in Chinese with English abstract)

0 引言

作物生产潜力是评价一个地区粮食生产能力、发展前景的重要指标, 对指导粮食生产及制定经济发展战略具有重要作用, 因此作物生产潜力评价是国内外广大学者普遍重视和研究的热点领域。国内已就旱地作物生产潜力^[1-4]、高产栽培及水肥优化管理^[5-9]等开展了大量相关研究, 取得了许多重要成果, 对推动中国旱地农业发展起到了重要指导作用。但是, 大多数研究工作采用“投入-产出”的黑箱研究方法, 主要探索试验条件下一些栽培措施或不同水肥用量对玉米产量的影响, 而对影响过程和原因关注不够, 从而导致某些单一研究结果难以形成规律性结论并在更大时空尺度应用。作物模拟模型是在品种、环境和作物管理相互作用条件下植物生长过程的数学表示, 现已成为科学研究、作物管理和政策分析的主要决策工具^[10-12]。已开发的一些模型如: CERES-Maize model^[13]和 Muchow-Sinclair-Bennett(MSB) model^[14]是仅适用于模拟玉米的专用型模型, 其主要缺陷

在于需要输入不易获取的某些作物特性数据(参数), 因此在一定程度上限制了这些模型的应用。美国 Nebraska 大学 Yang 等^[15] 开发研制的 Hybrid-Maize 模型是在高产玉米体系中经过校正的模型, 它的重要功能是可以帮助理解不同区域玉米品种环境产量潜力, 并能够开发最优作物和水氮管理策略, 同时可对过去年份进行数据模拟分析和进行当季作物管理。

黄土高原半干旱地区光照充足、热量适中、大气湿度低, 昼夜温差大等特点均有利于减少呼吸损失、增加光合产物积累, 提高作物产量和品质。作为 C4 作物的春玉米, 光合效率高, 关键生长期与降水季节分布基本吻合, 高产稳产性优于小麦和糜谷, 因此研究黄土高原旱地春玉米生产潜力, 优化旱地玉米管理策略, 对持续提高玉米产量具有一定科学和实践意义。本试验通过田间试验对 Hybrid-Maize 玉米高产模型在黄土高原旱地春玉米生产进行验证的基础上, 初步估算了黄土旱塬春玉米生产潜力, 为优化旱地春玉米栽培技术和挖掘其产量潜力提供一定理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验在中国科学院水利部水土保持研究所所长武农业生态试验站进行, 该试验站位于黄土高原中南部陕甘交界处的陕西省长武县洪家镇王东村, 北纬 35°12', 东经 107°40', 海拔 1200 m, 属暖温带半湿润大陆性季风气候, 年均降水 584 mm, 年均气温 9.1℃, 无霜期 171 d, 地下水埋深 50~80 m, 属典型旱作农业区。地貌属高原沟壑

收稿日期: 2008-01-19 修订日期: 2008-11-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2009CB118604); 公益性行业科研专项(2008326)

作者简介: 刘毅(1978-), 男, 湖南新化人, 博士生, 主要从事农业生态研究。杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100。

Email: lyle3521@126.com

*通讯作者: 李世清(1963-), 男, 教授, 主要从事土壤-植物氮素营养研究。杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100。

Email: sqli@ms.iswc.ac.cn

区，塬面和沟壑两大地貌单元各占 35% 和 65%，地带性土壤为黑垆土，质地均匀疏松，是高原沟壑区的典型代表。2007 年试验期间作物生育期降雨、太阳辐射及气温变化等见图 1。

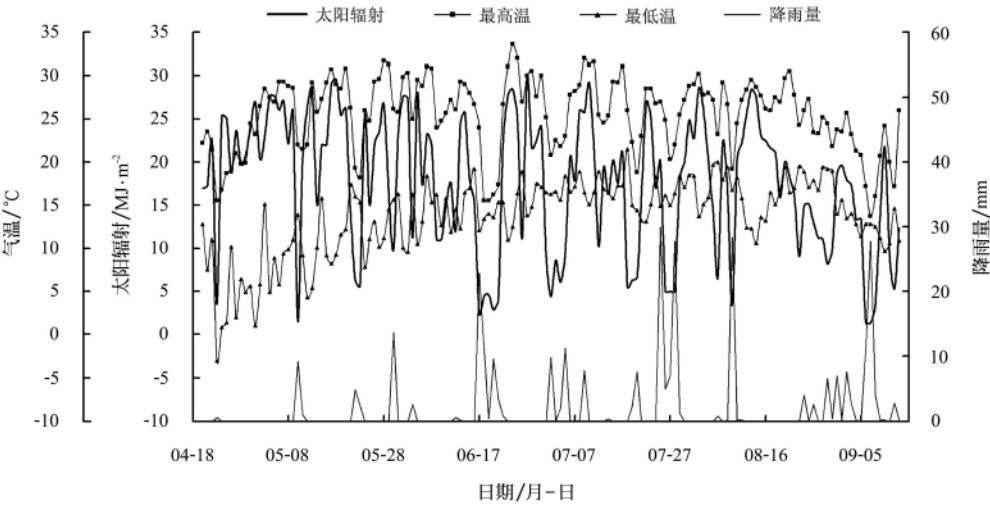


图 1 2007 年玉米生育期主要气象数据
Fig.1 Main meteorological data during corn growing period in 2007

1.2 试验设计

试验处理包括品种和栽培模式 2 个因子，采用完全试验方案（表 1）。以品种为主处理，栽培模式为副处理。选用两种不同株型高产玉米品种：先玉 335（紧凑型）和沈单 10（平展型）；栽培模式采用灌溉、雨养和覆膜 3 种水分管理方式，灌溉处理保证土壤含水率为田间持水量的 70%~85%，TDR 监测（动态监测水分）与烘干法（测定土壤含水率计算灌溉量）相结合测定土壤含水率，确定灌溉量；雨养和覆膜处理为天然降雨。所有处理均垄作，垄高 7~10 cm，垄面宽 40~47 cm；在垄上播种玉米；对于覆膜处理垄上覆膜，沟内不覆膜，将宽 70 cm 厚 0.005 mm 的地膜平铺压实于垄上。灌溉处理根据小区土壤含水率分别于 2007 年 5 月 8 日、5 月 20 日、6 月 14 日、7 月 14 日和 8 月 15 日每小区灌溉 1 m³（相当于灌溉量 33.67 mm），于沟内灌溉，玉米全生育期总灌溉量为 168.4 mm。试验共 6 个处理，4 次重复，共 24 个小区，裂区试验设计，小区面积为 6.6×4.5=29.7 m²，行距 60 cm，株距因品种而定：先玉 335 为 20 cm，沈单 10 为 25 cm。在本试验中主要以开发和模拟灌溉、雨养和覆膜产量潜力为主要目标，因此养分管理根据目标产量 14 t/hm² 确定，保证养分充分供应：每公顷施纯氮 280 kg，分 3 次施入：基肥与种肥 110 kg/hm²，拔节期追肥 80 kg/hm²，抽雄期追肥 90 kg/hm²；每公顷施纯磷 50 kg，基肥与种肥一次施入；每公顷施纯钾 100 kg，基肥与种肥一次施入；分别以含氮量为 46% 的尿素、含 P₂O₅ 12% 的过磷酸钙和含 K₂O 45% 的硫酸钾为氮源、磷源和钾源。试验于 2007 年 4 月 20 日播种，于 8 月 27 日至 9 月 13 日根据成熟情况收获。

播种密度、播种时间及施肥量等均根据试验站多年气象资料通过 Hybrid-Maize 模型模拟确定。

1.3 玉米生长期样品采集及生物量测定

试验按玉米生育期测定植株生长状况，分别于 6 叶

期（V6）、12 叶期（V12）、吐丝期（R1）、灌浆期（R3）和生理成熟期（R6）在各小区所划定取样区（单元）中进行取样，每次连续随机采取 3 株玉米，利用器具将植株从近地面剪下后，将植物样品杀青后于 65~75℃ 下烘至恒质量，在灌浆期（R3）和生理成熟期（R6），将籽粒和秸秆分开处理，每次称量记录生物量干质量，并换算为每公顷生物量。

表 1 田间试验方案
Table 1 Scheme of field experiment

| 处理号 | 品种 | 栽培模式 | 水分管理 | 种植密度 /hm ² |
|-----|--------|------|------------------------|-----------------------|
| 1 | 先玉 335 | 灌溉 | 土壤含水率保持在田间持水量的 70%~85% | 85000 |
| 2 | 先玉 335 | 雨养 | 天然降雨 | 85000 |
| 3 | 先玉 335 | 覆膜 | 天然降雨 | 85000 |
| 4 | 沈单 10 | 灌溉 | 土壤含水率保持在田间持水量的 70%~85% | 68000 |
| 5 | 沈单 10 | 雨养 | 天然降雨 | 68000 |
| 6 | 沈单 10 | 覆膜 | 天然降雨 | 68000 |

1.4 Hybrid-Maize 模型简介

作物生长模拟模型是以系统分析原理为基础，通过计算机模拟技术以定量描述作物生长、发育、产量形成过程及其对环境的反应。Hybrid-Maize 模型^[15,16]是通过数学公式利用气候、土壤特性和管理因素而定量描述玉米生长过程的作物模拟模型。它是通过将 CERES-Maize^[13] 玉米专用模型中的玉米发育及器官生长模块与 INTERCOM^[17]和 WOFOST^[18]作物通用模型中的光合和呼吸模块进行组合后，另外加入一些新模块而形成的新模型。Hybrid-Maize 模拟模型允许玉米生产商、作物咨询者和研究人员通过探索气候和管理因素对作物生长发育的影响，使之更好理解某一地区玉米产量潜力、产量潜力的年际变化以及影响高产和稳产的可能管理措施。同

时也是通过高产玉米体系校正的模型,通过该模型可以帮助理解不同区域玉米品种环境产量潜力,并能够开发最优管理策略,同时可以对过去年份进行数据模拟分析和进行当季作物管理。

1.5 Hybrid-Maize 模型数据库组建

Hybrid-Maize 模型运行首先需要建立试验区气象、土壤和作物参数数据库。气象资料数据库包括太阳辐射 (MJ/m^2) 或日照时数 (h)、日最高气温 ($^{\circ}\text{C}$)、日最低气温 ($^{\circ}\text{C}$)、大气相对湿度 (%)、降雨量 (mm)、蒸发量 (mm) 和风速 (m/s)。资料来源于中国科学院水利部水土保持研究所武农业生态试验站,资料年限 1990~2007 年。

土壤数据库 (表 2) 包括土壤含水率、土壤质地、土壤容重 (0~30 cm 和 30~60 cm)、有机质、全氮、有效磷、速效钾、无机氮和 pH 值,其中土壤含水率、土壤质地和土壤容重为 Hybrid-Maize 模型运行所必需土壤数据;其余为土壤基本特性数据。

Hybrid-Maize 模型所需作物参数 (表 3) 主要用来描述玉米生长发育进程。试验中采用美国玉米带广泛采用的田间玉米生育期观测记录标准,观测生育期主要包括播种期、出苗期 (VE)、抽雄期 (VT)、吐丝期 (R1) 和生理成熟期 (R6)。

表 2 土壤参数测定方法及其结果

Table 2 Determination method of soil parameters and its results

| 监测指标 | 测定值 | 测定方法 |
|---|-------|----------------|
| 土壤质地 (黏粒含量)/% | 37.0 | 激光粒度分析法 |
| 土壤含水率 (0~30 cm)/% | 13.64 | 烘干法 |
| 土壤含水率 (30~60 cm)/% | 14.06 | 烘干法 |
| 容重 (0~30 cm)/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | 1.30 | 环刀法 |
| 容重 (30~60 cm)/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | 1.33 | 环刀法 |
| pH 值 (0~30 cm) | 8.4 | 电位法 |
| 有机质 (0~30 cm)/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 11.8 | 铬酸氧还滴定的外热源法 |
| 有效磷 (0~30 cm)/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 14.4 | Olsen 法 |
| 速效钾 (0~30 cm)/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 144.6 | 乙酸钠—火焰光度法 |
| 全氮 (0~30 cm)/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 0.87 | 开氏定氮法 |
| 无机氮 (0~30 cm)/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 3.15 | KCl 浸提—流动分析仪测定 |

表 3 2007 年大田试验玉米生育期观测记录

Table 3 Maize growing period observation record of field experiment in 2007

| 处理 | 播种 | | 出苗 (VE) | | 抽雄 (VT) | | 吐丝 (R1) | | 成熟 (R6) | |
|-----------|------|----|---------|----|---------|----|---------|----|---------|-----|
| | 日期 | 天数 | 日期 | 天数 | 日期 | 天数 | 日期 | 天数 | 日期 | 天数 |
| 先玉 335 灌溉 | 4.20 | 0 | 5.4 | 15 | 7.10 | 82 | 7.10 | 82 | 9.12 | 146 |
| 先玉 335 雨养 | 4.20 | 0 | 5.3 | 14 | 7.15 | 87 | 7.16 | 88 | 9.10 | 144 |
| 先玉 335 覆膜 | 4.20 | 0 | 4.30 | 11 | 7.5 | 77 | 7.5 | 77 | 8.27 | 130 |
| 沈单 10 灌溉 | 4.20 | 0 | 5.3 | 14 | 7.9 | 81 | 7.10 | 82 | 9.13 | 147 |
| 沈单 10 雨养 | 4.20 | 0 | 5.2 | 13 | 7.16 | 88 | 7.16 | 88 | 9.11 | 145 |
| 沈单 10 覆膜 | 4.20 | 0 | 4.30 | 11 | 7.6 | 79 | 7.6 | 80 | 8.28 | 131 |

2 结果与分析

2.1 Hybrid-Maize 模型在田块尺度上的验证及覆膜条件下的模拟探索

为验证 Hybrid-Maize 模型在黄土旱塬的模拟效果,本文以 2007 年田间小区玉米试验数据为基础,通过输入试验区 2007 年记录气象数据、玉米各生育期日期以及土壤数据,利用 Hybrid-Maize 模型对玉米生物量和产量进行模拟,获得不同栽培模式玉米全生育期籽粒、秸秆和地上部总生物量的模拟结果,并对模拟结果与实测值进行比较 (图 2)。从图 2 看出,Hybrid-Maize 模型在优化本区玉米栽培上具有很好的应用前景,拟合效果理想。对灌溉处理,先玉 335 和沈单 10 总生物量在生殖生长期拟合较好,模拟值基本分布在实测值误差范围内,而在营养生长期,总生物量模拟值明显高于实测值;灌浆期实测秸秆生物量较模拟值偏高,而籽粒产量偏低;在生理成熟期,实测籽粒产量和秸秆生物量与模拟值基本相当。雨养条件下,苗期因春旱严重受水分胁迫影响,从而导致全生育期实测总生物量和秸秆生物量明显低于模拟值,而籽粒产量模拟值与实测值吻合很好。总体看,灌溉处理模拟值基本分布在实测误差范围内;而雨养处理总生物量和秸秆生物量实测值明显低于模拟值,说明补充灌溉对于旱区玉米生产潜力的挖掘效果明显。

本试验通过设计覆膜处理,以探索 Hybrid-Maize 模型对地膜覆盖栽培的模拟效果。结果表明,由于地膜覆盖显著增加玉米生育前期地温而明显加快玉米生育期进程 (表 3),覆膜处理比灌溉处理生育期减少 16 d,比雨养处理减少 14 d。因此,在不改变 Hybrid-Maize 模型中其他参数情况下,输入田间玉米实际生长发育日期参数进行模拟,模拟结果见图 2。图 2 表明,地膜覆盖处理拟合效果较好,无论是总生物量、秸秆生物量,还是籽粒产量,实测值与模拟值基本吻合。作者认为,Hybrid-Maize 模型对黄土区旱地覆膜处理模拟效果较好的主要原因在于 2007 年本区自然降水比较充沛 (2007 年生育期降雨量为 299 mm,多年平均降雨量为 216 mm),光热资源分配比较合理,弱化了因地膜覆盖影响土壤水分而对玉米生长发育的影响。因此 Hybrid-Maize 模型对地膜覆盖栽培的模拟研究,还需在不同降雨年型进一步研究,特别是在相对干旱年份玉米生长发育产生受到严重水分胁迫时对覆膜处理的模拟研究。

2.2 黄土旱塬玉米生产潜力模拟值与实测值的相关性分析

为进一步验证 Hybrid-Maize 模型在黄土旱塬的模拟效果,对模拟值与大田实测值进行相关性分析 (图 3)。图 3 表明,模拟值与实测值具有较好的线性相关性,总生物量、秸秆生物量和籽粒产量模拟值与实测值间的决定系数 R^2 分别为 0.9469、0.8164 和 0.9650,均达极显著水平,回归系数分别为 1.0198、0.9787 和 1.1844,比较接近于 1;对总生物量和秸秆生物量,其回归线略偏离理论线 (模拟与实测值 1:1 直线),这主要受雨养及灌溉处理玉米生育前期实测值低于模拟值的影响;而对籽粒产量,因灌浆期籽粒实测产量值明显低于模拟值,其回归线下端明显偏离 (低于) 理论线,表明当灌浆期籽粒累积量较少时,Hybrid-Maize 模型对该时期拟合偏高,在生理成熟期,拟合与实际比较吻合。总体看,

Hybrid-Maize 玉米模型模拟结果与实际观测值比较接近, 说明该模型在指导春玉米高产栽培上具有较好应用。

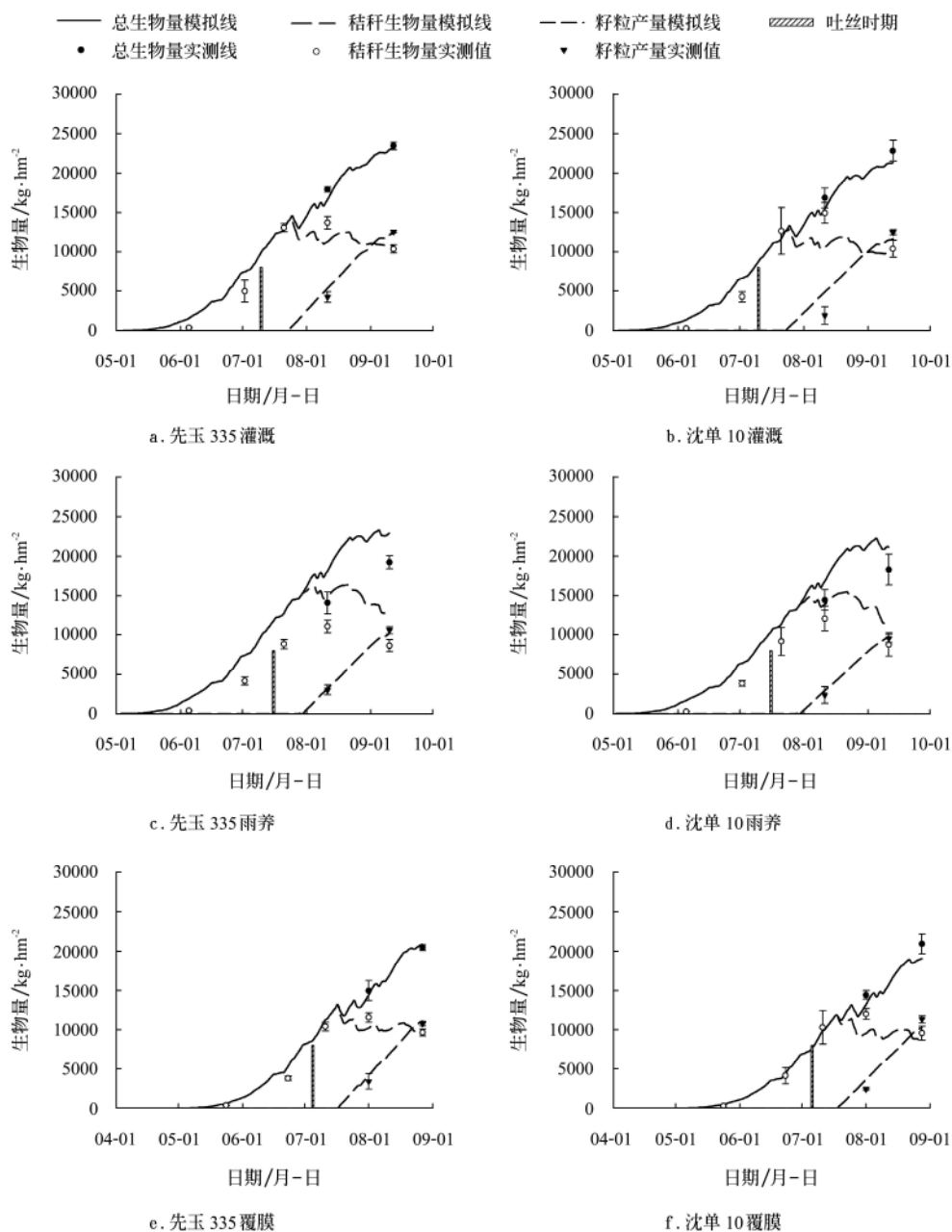


图 2 Hybrid-Maize 模型对玉米生物量和产量的模拟验证

Fig.2 Biomass and yield simulation verification of maize based on Hybrid-Maize model

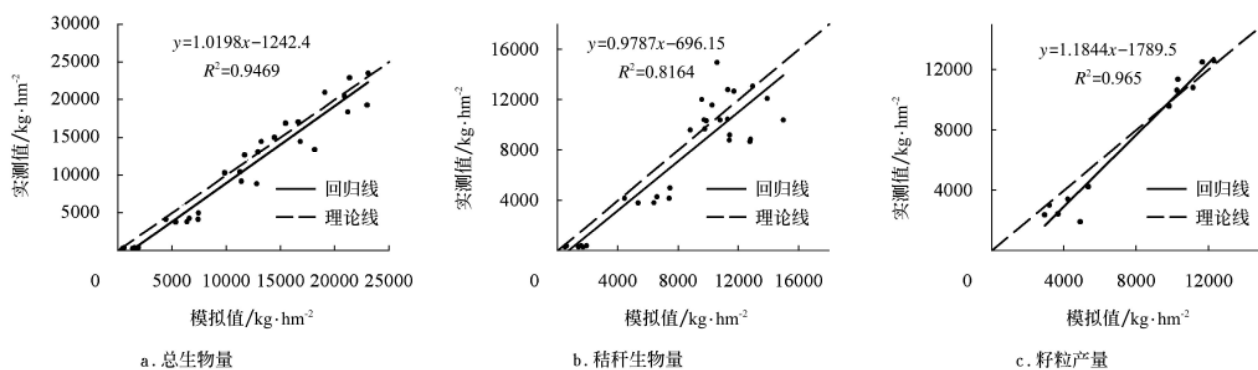


图 3 生物量和产量模拟值与实测值的相关性分析

Fig.3 Correlation analysis between simulated and observed values of biomass and yield

2.3 黄土旱塬春玉米生产潜力估算

利用 2007 年田间玉米试验对 Hybrid-Maize 模型的验证比较及模拟值与实测值相关性分析表明,应用 Hybrid-Maize 模型对黄土旱塬区春玉米生长过程的模拟值与实测值基本吻合,说明 Hybrid-Maize 模型在本区具有很好的应用前景。为此,本研究利用 Hybrid-Maize 模型,以长武试区为例,对黄土旱塬春玉米光温生产潜力和气候生产潜力进行模拟估算,由于受气象资料限制,我们仅对 1990—2007 年黄土旱塬春玉米生产潜力进行模拟估算,结果见表 4。

玉米光温生产潜力是指现有玉米优良品种在生长期內保持最适水肥供应时,在该地区光照和热量资源范围内所能实现的最高产量,是该地区灌溉农田玉米可能达到的产量上限。在模拟玉米光温生产潜力时,Hybrid-Maize 模型假设玉米生长不受养分、水分和病虫害胁迫,只考虑光照和热量资源对玉米生长和产量形成的影响。模拟结果表明(表 4),紧凑型品种先玉 335 和平展型品种沈单 10 光温生产潜力籽粒产量分别平均为 $(13.25 \pm 0.86) \text{ t/hm}^2$ 和 $(12.32 \pm 0.85) \text{ t/hm}^2$; 地上部总生物量光温生产潜力分别平均为 $(22.45 \pm 0.96) \text{ t/hm}^2$ 和 $(20.62 \pm 0.92) \text{ t/hm}^2$ 。玉米气候生产潜力是指现有玉米优良品种在生长期內,在该地区光照、热量和自然降水资源存在状况范围内,旱作农田可能达到的最高产量。在模拟估计玉米气候生产潜力时,Hybrid-Maize 模型假设玉米生长

不受养分和病虫害胁迫,只考虑光、温、水等气候因素对玉米生长和产量形成的影响。模拟结果表明(如表 4 所示),紧凑型品种先玉 335 和平展型品种沈单 10 籽粒气候生产潜力分别平均为 $(11.97 \pm 1.88) \text{ t/hm}^2$ 和 $(11.37 \pm 1.60) \text{ t/hm}^2$; 地上部总生物量气候生产潜力分别平均为 $(19.94 \pm 2.27) \text{ t/hm}^2$ 和 $(18.63 \pm 1.80) \text{ t/hm}^2$ 。从两个玉米品种多年光温生产潜力及气候生产潜力的变异性看,就籽粒和总生物量光温生产潜力变异系数而言,先玉 335 分别为 6.49% 和 4.29%,沈单 10 分别为 6.86% 和 4.46%;就籽粒和总生物量气候生产潜力变异系数而言,先玉 335 分别为 15.69% 和 11.41%;沈单 10 分别为 14.06% 和 9.69%,显然光温生产潜力变异系数小于气候生产潜力变异系数,说明相对气候生产潜力而言,黄土旱塬玉米光温生产潜力比较稳定,变异较小。

水分满足率是籽粒气候生产潜力值与光温生产潜力值的比值:水分满足率=籽粒气候生产潜力/籽粒光温生产潜力,表示自然降水条件下降水对作物需水的满足程度。结果表明,在黄土旱塬,春玉米降水满足程度普遍较高,先玉 335 平均为 0.90 ± 0.13 ,变异系数为 14.16%;沈单 10 平均为 0.92 ± 0.10 ,变异系数为 11.30%。这一结果揭示了黄土旱塬紧凑型玉米品种在高密种植下,因对水分需求较大,作物对降水满足程度的变异性更大,因此获得高产风险也较大。

表 4 黄土旱塬春玉米产量潜力模拟结果

Table 4 Simulation results of spring maize field potential on the dry highland of loess plateau

| 年份 | 先玉 335 | | | | | 沈单 10 | | | | | t·hm ⁻² |
|-----------|--------|-------|--------|-------|-----------|--------|-------|--------|-------|-----------|--------------------|
| | 光温生产潜力 | | 气候生产潜力 | | 水分 满足率 | 光温生产潜力 | | 气候生产潜力 | | 水分 满足率 | |
| | 籽粒产量 | 总生物量 | 籽粒产量 | 总生物量 | | 籽粒产量 | 总生物量 | 籽粒产量 | 总生物量 | | |
| 1990 | 13.36 | 22.38 | 13.36 | 22.38 | 1.00 | 12.58 | 20.38 | 12.58 | 20.38 | 1.00 | |
| 1991 | 13.49 | 21.70 | 10.67 | 16.30 | 0.79 | 12.60 | 20.00 | 10.39 | 15.67 | 0.82 | |
| 1992 | 12.15 | 21.27 | 11.64 | 19.52 | 0.96 | 11.52 | 19.31 | 11.04 | 18.34 | 0.96 | |
| 1993 | 13.10 | 20.39 | 13.10 | 20.39 | 1.00 | 12.43 | 18.89 | 12.43 | 18.89 | 1.00 | |
| 1994 | 11.99 | 22.80 | 8.32 | 17.53 | 0.69 | 10.79 | 21.69 | 8.44 | 16.65 | 0.78 | |
| 1995 | 12.27 | 21.85 | 11.91 | 16.15 | 0.97 | 11.22 | 20.19 | 10.93 | 15.91 | 0.97 | |
| 1996 | 14.22 | 23.07 | 14.58 | 21.85 | 1.03 | 13.22 | 21.32 | 13.35 | 20.80 | 1.01 | |
| 1997 | 12.33 | 22.51 | 7.97 | 16.71 | 0.65 | 11.03 | 21.48 | 7.72 | 16.21 | 0.70 | |
| 1998 | 13.05 | 22.17 | 13.21 | 21.38 | 1.01 | 12.16 | 20.59 | 12.26 | 20.07 | 1.01 | |
| 1999 | 14.23 | 23.47 | 11.58 | 20.82 | 0.81 | 12.87 | 22.07 | 11.20 | 19.15 | 0.87 | |
| 2000 | 14.16 | 24.12 | 12.14 | 21.98 | 0.86 | 13.11 | 21.62 | 11.72 | 20.09 | 0.89 | |
| 2001 | 13.23 | 23.17 | 9.80 | 17.18 | 0.74 | 12.34 | 20.70 | 9.45 | 16.13 | 0.77 | |
| 2002 | 14.59 | 23.93 | 11.02 | 20.49 | 0.76 | 13.56 | 21.76 | 10.79 | 19.00 | 0.80 | |
| 2003 | 13.36 | 21.82 | 13.37 | 21.84 | 1.00 | 12.61 | 19.95 | 12.61 | 19.95 | 1.00 | |
| 2004 | 12.33 | 21.59 | 12.48 | 18.70 | 1.01 | 11.67 | 19.60 | 11.74 | 17.73 | 1.01 | |
| 2005 | 13.20 | 22.75 | 13.15 | 21.10 | 1.00 | 12.35 | 20.62 | 12.44 | 19.67 | 1.01 | |
| 2006 | 12.76 | 21.93 | 12.38 | 21.35 | 0.97 | 11.87 | 19.87 | 11.73 | 19.69 | 0.99 | |
| 2007 | 14.74 | 23.21 | 14.74 | 23.21 | 1.00 | 13.78 | 21.06 | 13.78 | 21.06 | 1.00 | |
| 平均值 | 13.25 | 22.45 | 11.97 | 19.94 | 0.90 | 12.32 | 20.62 | 11.37 | 18.63 | 0.92 | |
| 标准差 | 0.86 | 0.96 | 1.88 | 2.27 | 0.13 | 0.85 | 0.92 | 1.60 | 1.80 | 0.10 | |
| 变异系数 CV/% | 6.49 | 4.29 | 15.69 | 11.41 | 14.16 | 6.86 | 4.46 | 14.06 | 9.69 | 11.30 | |

3 讨 论

作为一个由 CERES-Maize 模型与 INTERCOM 模型组合产生的玉米专用生长模拟模型, 模型作者在开发 Hybrid-Maize 模型的同时, 利用 Lincoln (1999-2001 年) 和 Manchester (2002 年) 大田试验结果, 对模型进行验证的基础上, 与 CERES-Maize 模型和 INTERCOM 模型进行了比较分析, 结果表明, Hybrid-Maize 模型在 Lincoln 和 Manchester 两地均得到很好验证, 相对 CERES-Maize 模型, Hybrid-Maize 模型对环境变化相对更为敏感, 而且在不降低模型预测精度的前提下, 容许用户输入更少的作物特性参数^[15,16]。本研究结果表明, Hybrid-Maize 模型在黄土旱塬表现出较好的模拟效果, 说明在优化本区玉米栽培上具有较好的应用前景。

水分是影响黄土旱塬春玉米产量提高的主要限制因子, 已有研究表明, 黄土旱塬在节水栽培和补充灌溉条件下可实现 15 t/hm^2 以上超高产量。王宗明等^[19]选用中国学者提出的旱地作物生产潜力模型计算了黄土旱塬区春玉米光温生产潜力和气候生产潜力分别为 10.72 t/hm^2 、 8.77 t/hm^2 。李军等^[3]应用 DSSAT3 中 CERES-Maize 模型模拟研究黄土高原 22 个地点玉米光温生产潜力和气候生产潜力, 得出黄土高原春玉米光温生产潜力和气候生产潜力分别为 $8.27 \sim 15.97 \text{ t/hm}^2$ 和 $0 \sim 13.54 \text{ t/hm}^2$ 。本研究利用 Hybrid-Maize 模型模拟计算的黄土旱塬 1990-2007 年间春播两种株型玉米光温生产潜力和气候生产潜力表明, 对紧凑型玉米品种在种植密度为每公顷 85000 株条件下, 其光温生产潜力和气候生产潜力分别为 $11.99 \sim 14.74 \text{ t/hm}^2$ 及 $7.97 \sim 14.74 \text{ t/hm}^2$; 对平展型玉米品种在种植密度为 6800 株/ hm^2 条件下, 光温生产潜力和气候生产潜力分别为 $10.79 \sim 13.78 \text{ t/hm}^2$ 及 $7.72 \sim 13.78 \text{ t/hm}^2$, 其生产潜力估算结果明显高于王宗明等^[19]利用旱地作物生产潜力模型获得的结果, 而与李军等^[3]采用 CERES-Maize 模型估算的上限结果基本一致, 而下限有较大差异, 原因在于李军等^[3]是对整个黄土高原玉米的模拟, 某些地方 (如黄土高于北部和西部) 的生产潜力, 特别是气候生产潜力很低, 因而其下限偏低; 在本研究模拟年份, 以严重干旱的 1997 年模拟籽粒气候生产潜力最低, 为 8 t/hm^2 左右。戴明宏等^[20]在对 DSSAT4.0 中 CERES-Maize 模型进行参数校正和验证的基础上, 对华北平原玉米生产潜力的估算与分析结果表明, 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 $13.53 \sim 22.56 \text{ t/hm}^2$, 表明中国玉米主产区华北平原玉米光温生产潜力明显高于黄土高原地区。从总体看, 旱地作物生产潜力模型属经验模型, Hybrid-Maize 模型和 CERES-Maize 模型同属机理模型, 旱地作物生产潜力模型获得的生产潜力值差异通常较大, 不易取舍, 作物生产潜力受人为主观因素影响较大, 而且近年来某些地区作物实际产量已达到或超过过去研究获得的潜力值, 理论上难以解释, 而 Hybrid-Maize 模型和 CERES-Maize 模型, 特别是充分考虑玉米种植密度的 Hybrid-Maize 模型所获得的结果更加具有实际参考和应

用价值。

4 结 论

1) Hybrid-Maize 模型在黄土旱塬表现出较好模拟效果, 在优化本区玉米栽培上具有很好应用前景。验证结果表明, Hybrid-Maize 玉米模型模拟结果总体上与实际观测值比较接近, 说明该模型在指导春玉米高产栽培上具有较好应用。尽管尚无 Hybrid-Maize 模型模拟地膜覆盖栽培条件下玉米生产潜力的报道, 但本研究发现, 在不改变 Hybrid-Maize 模型中其他参数情况下, 输入玉米生长发育实际日期参数后, 仍然可获得较好拟合效果; 同时说明在应用 Hybrid-Maize 模型模拟地膜覆盖栽培玉米生产潜力时, 应考虑覆膜玉米与露地玉米生长发育实际日期的差异。

2) Hybrid-Maize 模型对黄土旱塬多年模拟结果表明, 紧凑型品种先玉 335 和平展型品种沈单 10 籽粒气候生产潜力分别平均为 $(11.97 \pm 1.88) \text{ t/hm}^2$ 和 $(11.37 \pm 1.60) \text{ t/hm}^2$; 地上部总生物量气候生产潜力分别平均为 $(19.94 \pm 2.27) \text{ t/hm}^2$ 和 $(18.63 \pm 1.80) \text{ t/hm}^2$; 且光温生产潜力变异系数小于气候生产潜力变异系数, 说明相对气候生产潜力而言, 黄土旱塬玉米光温生产潜力比较稳定, 变异较小。黄土旱塬区春玉米降水满足程度普遍较高, 紧凑型品种水分满足率略低于平展型品种, 且在玉米高密度种植条件下, 自然降水满足作物需水的程度年际变化更大。以上结果初步说明在黄土旱塬区, 玉米产量潜力挖掘的主要途径应该主要集中在提高密度和水分限制条件下。

[参 考 文 献]

- [1] 王宗明, 梁银丽. 应用 EPIC 模型计算黄土塬区作物生产潜力的初步尝试[J]. 自然资源学报, 2000, 17(4): 481—487.
- [2] 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, 3(2): 161—165.
- [3] 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(2): 555—560.
- [4] 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.
- [5] 赵 致, 张荣达, 吴盛黎, 等. 紧凑型玉米高产栽培理论与技术研究[J]. 中国农业科学, 2001, 34(5): 465—468.
- [6] 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.
- [7] 卜玉山, 苗果园, 邵海林, 等. 对地膜和秸秆覆盖玉米生长发育与产量的分析[J]. 作物学报, 2006, 32(7): 1090—1093.
- [8] 马 强, 宇万太, 沈善敏, 等. 下辽河平原水肥交互作用及对玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 29—33.
- [9] 杨 涛, 梁宗锁, 薛吉全, 等. 不同玉米品种水分利用效率的差异性研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 21—25.

- [10] Fischer G, Shah M, van Velthuizen H, et al. Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century[A]. Proceedings of the IIASA[C]. Vienna: Remaprint, 2000.
- [11] Hammer G L, Kropff M J, Sinclair T R, et al. Future contributions of crop modeling—from heuristics and supporting decision making to understanding genetic regulation and aiding crop improvement[J]. *Eur J Agron*, 2002, 18: 15–31.
- [12] Hansen J W. Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture: issues, approaches, challenges[J]. *Agric Syst*, 2002, 74: 309–330.
- [13] Jones C A, Kiniry J R, Dyke P T, et al. CERES-Maize: Simulation Model of Maize Growth and Development[M]. College Station: Texas A&M University Press, 1986.
- [14] Muchow R C, Sinclair T R, Bennett J M. Temperature and solar radiation effects on potential maize yields across locations[J]. *Agronomy Journal*, 1990, 82: 338–342.
- [15] Yang H S, Dobermann A, Lindquist J L, et al. Hybrid-Maize — a maize simulation model that combines two crop modeling approaches[J]. *Field Crops Res*, 2004, 87: 131–154.
- [16] Yang Haishun, Dobermann A, Kenneth G, et al. Features, applications, and limitations of the Hybrid-Maize simulation model[J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(3): 737–748.
- [17] Kropff M J, van Laar H H. Modelling Crop-Weed Interactions[M]. UK: CABI, 1993.
- [18] Van Diepen C A, Wolf J, van Keulen H, et al. WOFOST: a simulation model of crop production[J]. *Soil Use Manage*, 1989, 5, 16–24.
- [19] 王宗明, 梁银丽. 黄土塬区主要粮食作物增产潜力分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2002, 16(3): 33–37
- [20] 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.

Adaptability of Hybrid-Maize model and potential productivity estimation of spring maize on dry highland of loess plateau

Liu Yi^{1,3,4}, Li Shiqing^{1*}, Chen Xinping^{1,2}, Bai Jinshun²

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource / Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China;

2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China;

3. Changwu Agro-ecological Experiment Station in the Loess Plateau, Yangling 712100, China;

4. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: On the basis of verification of the Hybrid-Maize model in the maize production system on the dry highland of loess plateau with field experiment in 2007, the Hybrid-Maize model was used to simulate the potential productivity of spring maize on the dry highland of loess plateau. The maize yield potential data were obtained between 1990 and 2007. The results indicated that the Hybrid-Maize model had a good simulation effect on the dry highland of loess plateau. Correlation analysis indicated that there was a highly significant linear correlation between simulated data and observed data of total biomass, stalk biomass and grain yield, and the coefficients of determination were 0.9469, 0.8164 and 0.9650, respectively, the regression coefficients were 1.019, 0.9787 and 1.1844, respectively, close to 1. Annual photosynthetic-temperature potential productivity and climate potential productivity on the dry highland of loess plateau were different with different varieties. As for impact-typed maize, annual photosynthetic-temperature grain yield and total biomass were 13.25 t/hm² and 22.45 t/hm², respectively, and for flat-typed maize they were 12.32 t/hm² and 20.62 t/hm², respectively. The annual variation of photosynthetic-temperature potential productivity was low. The climate grain yield and total biomass were 11.94 t/hm² and 19.94 t/hm² for impact-typed maize, respectively, and those were 11.37 t/hm² and 18.36 t/hm² for flat-typed maize, respectively. The annual variation of climate potential productivity was high. The yield potential exploration of maize on the dry highland of loess plateau is dependent mainly on improving planting-density and soil water condition, therefore, the Hybrid-Maize model has good application value on guiding high yield cultivation of maize.

Key words: Hybrid-Maize model, potential productivity, maize yield simulation, spring maize, dry highland of loess plateau