

基于 DSSAT 模型的春玉米水肥效应

——以黄土高原丘陵沟壑区为例

邹龙^{1,2}, 冯浩^{1,3†}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100 陕西杨凌; 2. 中国科学院大学, 100049 北京;
3. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 712100 陕西杨凌)

摘要: 在完成模型调试的基础上, 设定一系列的施肥和灌溉情景 (N1、N2、N3、N4、N5, 分别表示纯氮施用量 100、200、300、400、500 kg/hm²; M0、M1、M2、M3, 分别表示有机肥料施用量为 0、7 500、15 000、22 500 kg/hm²; I0、Ib、Ik、Ig, 分别表示不灌溉, 在春玉米拔节期、开花期、灌浆期分别灌水 50 mm)。利用 DSSAT 模型在平水年 2005 年的光照、气温、降雨等条件下模拟不同情景下春玉米的生长情况。结果表明: 1) 在雨养条件(不进行灌水处理, 生育期水分全部由降雨补充)下, 可以在控制氮用量的同时通过增施有机肥料来弥补由于少使用氮肥而带来的产量损失; 2) M1N4 处理(7 500 kg/hm²的有机肥、400 kg/hm²的纯氮处理)和 M2N3 处理(15 000 kg/hm²的有机肥、300 kg/hm²的纯氮处理)下, 春玉米产量前者为 14 313 kg/hm², 后者为 14 711 kg/hm², 生物量前者为 24 803 kg/hm², 后者为 24 349 kg/hm², N 的产量生产率前者为 40.8 kg/kg, 后者为 41.1 kg/kg, N 的干物质生产率前者为 70.7 kg/kg, 后者为 70.4 kg/kg, 均相差不大, 且处于较高水平; 3) 在模拟灌溉条件下, 肥料用量较小时, 灌水对春玉米产量影响不大, 此时产量的限制因素可能是肥料, 肥料用量较大时, 灌水的增产效果很明显, 尤其在灌浆期, 保证玉米水分供应对产量有着重要的意义。

关键词: DSSAT 模型; 春玉米; 黄土高原

中图分类号: S147.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-3007(2014)06-0097-08

Water-fertilizer effect on *Zea mays* based on the DSSAT model:

A case study in the Loess Plateau

Zou Long^{1,2}, Feng Hao^{1,3}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, 712100, Yangling, Shaanxi, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, 100049, Beijing, China; 3. Institute of Water Saving Agriculture in Arid regions of China, 712100, Yangling, Shaanxi, China)

Abstract: After model debugging, we designed a series of fertilizer and irrigation conditions as follows: N1, N2, N3, N4 and N5 mean the dose of pure nitrogen of 100, 200, 300, 400 and 500 kg/hm², respectively; M0, M1, M2 and M3 represent the amount of organic fertilizer of 0, 7 500, 15 000 and 22 500 kg/hm², respectively; I0 represents no irrigation, Ib, Ik and Ig mean 50 mm water irrigated at the jointing stage, flowering period and grain-filling stage of *Zea mays*, respectively. Then the DSSAT model was used to simulate the growth situation of *Z. mays* with different water-fertilizer regimes under the conditions of light, temperature and rainfall in 2005. The results show that: 1) In the rain-fed conditions (no irrigation during the growth of *Z. mays* with the water depending on rainfall) with limited amount of N, the yield loss caused by the lack of N can be compensated by increasing the use of organic fertilizer;

收稿日期: 2013-11-20 修回日期: 2014-11-20

项目名称: 国家 863 计划课题“作物生境过程模拟与动态优化决策技术”(2013AA102904)

第一作者简介: 邹龙(1987—), 男, 硕士研究生。主要研究方向: 水土资源高效利用及作物模型。E-mail: zoulong19871230@163.com

† 通信作者简介: 冯浩(1970—), 男, 博士, 研究员。主要研究方向: 农田水土资源高效利用。E-mail: nercwsi@vip.sina.com

2) Under the conditions of M1N4 treatment (the amounts of organic fertilizer and pure nitrogen were 7 500 and 400 kg/hm² , respectively) and M2N3 treatment (the amounts of organic fertilizer and pure nitrogen were 15 000 and 300 kg/hm² , respectively) , no significant variations were observed in the yield of *Z. mays*: that of the former treatment was 14 313 kg/hm² and that of the latter 14 711 kg/hm² , biomass of the former was 24 803 kg/hm² and the latter 24 349 kg/hm² , yield productivities of N of the former was 40. 8 kg/kg and the latter 41. 1 kg/kg , and dry matter productivity of N of the former was 70. 7 kg/kg and the latter 70. 4 kg/kg. And all of them were at a high level. 3) Under the situation of simulated irrigation with a small amount of fertilizer , irrigation had little effect on *Z. mays* yield , indicating that the yield-limiting factor in this case may be fertilizer; when treated with a large amount of fertilizer , irrigation increased yield obviously , which is of important significance for productivity by ensuring water supply at the grain-filling stage.

Keywords: DSSAT model; *Zea mays*; Loess Plateau

黄土高原是我国北方重要的旱作农业区,在我国粮食生产中占据重要地位^[1]。春玉米(*Zea mays*)是黄土高原区主要的粮食作物之一,具有光合效率高、稳产高产性高等特点,因此,探讨黄土高原春玉米的生产潜力,优化田间管理措施,对于提高春玉米产量具有重要意义^[2]。20世纪初,DSSAT模型开始在我国得到应用,研究人员在不同的地区对玉米作物进行了大量模拟研究工作,并取得了不错的效果。杨靖民等^[3]在吉林省黑土区,利用DSSAT模型进行玉米生长模拟(叶面积指数、地上干物质、籽粒质量),应用当地平均产量和生长期对玉米品种参数进行校验,根据产量和氮肥施用量呈典型的效应递减关系,确定了当地的最佳施氮量以及春玉米生长期间最佳追肥时间。戴明宏等^[4]利用CERES-Maize模型模拟北京地区的春玉米生长,表明无论是在充分灌溉的条件下还是在只灌底墒水或者雨养的条件下,推迟春玉米播期能够提高产量,并且推迟春玉米播期后能显著提高土壤的水分利用效率。刘玮^[5]根据吉林省梨树县的试验数据,利用DSSAT模型对玉米生长过程进行模拟,最终确定了当地玉米的最佳播种时期。姜志伟等^[6]利用DSSAT模型对夏玉米的光温生产潜力和水温生产潜力进行模拟分析,明确了夏玉米增产的重要途径。李树岩等^[7]借助DSSAT模型对黄淮夏玉米进行模拟研究,明确了夏玉米不同生育期水分对作物生长的影响程度。张艳红等^[8]运用CERES-Maize模型对曲周地区的夏玉米生产在不同气象、土壤条件下的生长进行模拟,确立了不同年型以及不同肥力特性的土壤条件下夏玉米的灌溉制度。虽然,目前基于DSSAT模型的玉米模拟研究取得了一些成果,但在黄土高原地区,该类研究尚属少数;然而,一个地

区的优化管理模式在不同区域可能没有通用性,因此,在该区进行相关的研究显得必不可少。笔者以一系列的假设情景,结合DSSAT作物模型对假设情景下的作物生长进行模拟,通过比较各种假设情景下作物的生长、产量等情况,探讨水肥用量对春玉米生长以及产量的影响,以期为黄土高原丘陵沟壑区今后的春玉米生产提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 模型及相关数据

1) DSSAT模型。农业技术转化决策系统(DSSAT, Decision Support System for Agrotechnology Transfer)是由美国佛罗里达大学、夏威夷大学、依阿华州立大学、美国农业部国际土壤和肥力研究中心和加拿大高尔大学于1989年共同开发的一个以模拟作物生长为基础的机制模型系统,其中包括多于20种作物生长模型、2个土壤CN和水分模拟模型^[9-10]。现在DSSAT模型已被广泛应用于各个研究领域,该模型是当前世界上应用最广泛的作物模型之一,可逐日模拟作物生长和发育过程,可响应许多因素,包括作物遗传特性、管理措施、环境、氮素和水分胁迫、病虫害等,主要用于农业试验分析、农业产量预报、农业生产风险评估、气候对农业的影响评价等^[11]。

模型运行主要需要4方面的输入数据,包括逐日气象数据(最高/最低气温、降雨量、有效太阳辐射等)、农田土壤参数、作物田间管理参数以及作物遗传参数。DSSAT模型中各个作物模型均以天为时间步长,详细描述作物生长发育和产量形成过程以及土壤中水分和氮素的动态变化过程。该模型可以用于作物光温、降水生产潜力的模拟、作物栽培方案

的优化等,可以为农业技术选择提供合理有效的决策和预测^[12]。

气象数据通过 DSSAT 模型内嵌的 WeatherMan 软件输入,农田土壤参数和作物田间管理参数分别通过 Sbuild 和 Xbuild 参数管理平台录入,在模型参数库中直接录入已经调试完成的春玉米品种“沈单 10 号”的品种参数,建立好的数据库均保存在模型文件中,供模型运行时调用。

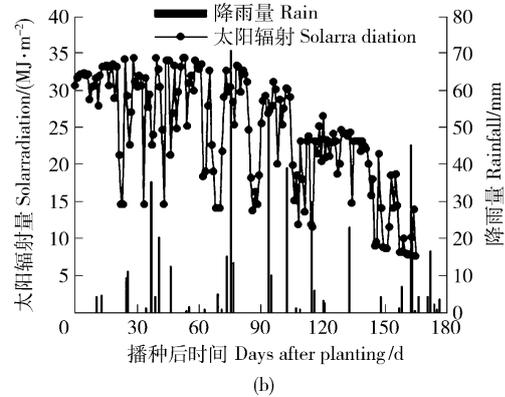
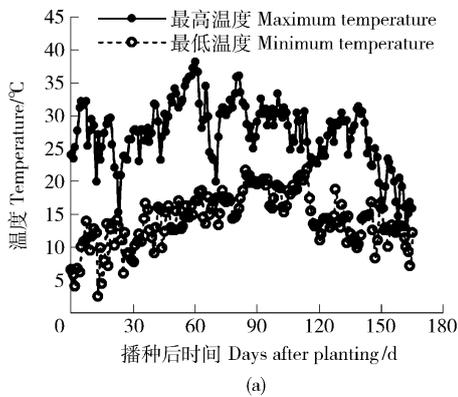


图 1 2005 年春玉米生长期间气象数据

Fig. 1 Weather data during the growing phase of *Zea mays* in 2005

3) 农田土壤参数。农田土壤参数通过田间实测获得,当年春玉米播种前采用分层(每层 20 cm)取样法测定 0~100 cm 土壤剖面的土壤 pH 值、阳离子交换量(CEC)、机械组成、密度、有机质、全氮、硝态氮、凋萎含水量、田间持水量以及饱和含水量。具体测定方法参照鲍士旦主编的《土壤农化分析》^[14]。研究区域的土壤机械组成见表 1。

4) 作物田间管理参数。作物田间管理参数主要包括作物的播种时间、播种量、施肥时间、施肥用量及方式、肥料种类、灌溉、收获时间等。参数值主要参照作物实际田间管理记录。

5) 作物遗传参数。试验种植作物为玉米,品种

2) 逐日气象数据。模型运行所需要的逐日气象数据由中国科学院安塞农田生态系统国家野外科学观测研究站川地气象观测场提供,主要包括每日日照时间(h)、每日最高/低温度(°C)、每日降雨量(mm)。利用每日日照时间估算太阳辐射能(MJ/m^2)^[13]。

2005 年春玉米整个生长期间的气象资料见图 1。

为“沈单 10 号”。经调试后参数及其意义见表 2。

表 1 供试土壤机械组成

Tab. 1 Component of the experiment soil

| 土层深度 Depth of soil/cm | 砂粒 Sand (2 ~ 0.05 mm) /% | 粉粒 Silt (0.05 ~ 0.002 mm) /% | 黏粒 Clay (< 0.002 mm) / % |
|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| 0 ~ 20 | 25.939 | 67.558 | 6.504 |
| 20 ~ 40 | 24.222 | 67.807 | 7.971 |
| 40 ~ 60 | 23.438 | 68.873 | 7.690 |
| 60 ~ 80 | 24.354 | 67.194 | 8.452 |
| 80 ~ 100 | 21.495 | 68.111 | 10.403 |

表 2 春玉米“沈单 10 号”作物品种遗传参数

Tab. 2 Genetic parameters of *Zea mays* “Shen Dan 10”

| 参数 Parameter | 意义 Meaning | 取值 Value | 范围 Range |
|-----------------|--|-------------|-------------|
| P1 | 幼苗期生长特性参数 Thermal time from seedling emergence to the end of the juvenile phase/(°C·d) | 327.900 | 5 ~ 450 |
| P2 | 光周期敏感系数 Photoperiod sensitivity coefficient | 0.443 | 0 ~ 2 |
| P5 | 灌浆期特性参数 Thermal time from silking to physiological maturity/(°C·d) | 822.300 | 580 ~ 999 |
| G2 | 单株潜在最大穗粒数 Maximum possible number of kernels per plant | 963.600 | 248 ~ 990 |
| G3 | 潜在最大灌浆速率参数 Kernel filling rate during the linear grain filling stage and under optimum conditions/ (mg·grain ⁻¹ ·d ⁻¹) | 16.400 | 5 ~ 16.5 |
| PHINT | 出叶间隔特性参数 The interval in thermal time between successive leaf tip appearances/(°C·d) | 38.900 | 35 ~ 65 |

1.2 试验方案设计

1) 田间试验。试验在陕西安塞农田生态系统国家野外科学观测研究站 (E109°19'23", N36°51'30") 进行。试验玉米播种时间为 2005 年 4 月 23 日, 留苗 5 万 2 500 株/hm², 每小区 73 株, 每区 4 行, 每行 18 株。收获日期为 2005 年 10 月 5 日。

田间试验共有如下 2 个处理: MON1 处理, 即有机肥施用量为 0 kg/hm² (M0), 纯氮施用量 100 kg/hm² (N1); M1N1 处理, 有机肥料施用 7 500 kg/hm² (M1), 纯氮施用量 100 kg/hm² (N1)。此外 2 个处理均使用等量的重过磷酸钙。有机肥和磷肥在播种时全部使用, 氮肥按照基肥和追肥质量比 4:6 进行施用, 在春玉米拔节到大喇叭口期间进行追肥。试验期间玉米所需水分均来自降雨, 不进行灌溉。

2) 模拟处理。在田间处理的基础上设置如下模拟处理: N2 为 200 kg/hm², 即纯氮施用量 200 kg/hm²; N3 为 300 kg/hm², 即纯氮施用量 300 kg/hm²; N4 为 400 kg/hm², 即纯氮施用量 400 kg/hm²; N5 为 500 kg/hm², 即纯氮施用量 500 kg/hm²; M2 为 1 万 5 000 kg/hm², 即有机肥用量为 1 万 5 000 kg/hm²; M3 为 2 万 2 500 kg/hm², 即有机肥用量为 2 万 2 500 kg/hm²。施用方案以及磷肥施用量与大田试验相同。

3) 灌溉处理。目前, 黄土高原地区属于旱作农业区, 在作物生长过程中所需要水分全部由期间的降雨供给, 不进行灌溉补水; 然而水分又是影响春玉米生长的重要因素, 因此, 试验希望能够借助模型, 探讨该区在有一次灌水条件下春玉米的生长情况。在春玉米拔节期 (5 月 29 日) 灌水 50 mm, 记为 Ib, 春玉米开花期 (7 月 15 日) 灌水 50 mm, 记为 Ik, 春玉米灌浆期 (7 月 26 日) 灌水 50 mm, 记为 Ig, 不灌水, 记为 I0。

4) 处理方案。将大田试验和模拟情景的所有试验处理完全组合, 得到 5 × 4 × 4 = 80 个处理方案。

2 结果与分析

2.1 雨养条件下模型模拟结果分析

2.1.1 春玉米产量 模拟运行模型 模拟雨养条件下 (春玉米生育期间不进行灌溉, 水分全部来自降雨) 的 20 个处理方案, 得到 2005 年春玉米产量模拟情况, 见表 3。

其中, MON1、M1N1 为田间处理, 实测产量分别为 9 375 和 1 万 1 331 kg/hm², 与模拟产量 9 998 和 1 万 1 371 kg/hm² 相比, 相对误差为 6.6% 和 0.4%, 表明模型校正比较准确, 可以进行下一步相关模拟预测。

表 3 不同处理春玉米的产量模拟值

Tab. 3 Calculated yield of *Zea mays* in different treatments

| 处理 Treatment | 产量 Yield/ (kg·hm ⁻²) | 处理 Treatment | 产量 Yield/ (kg·hm ⁻²) |
|-----------------|-------------------------------------|-----------------|-------------------------------------|
| MON1 | 9 998 | M2N1 | 12 775 |
| MON2 | 11 416 | M2N2 | 13 849 |
| MON3 | 12 447 | M2N3 | 14 711 |
| MON4 | 13 589 | M2N4 | 14 961 |
| MON5 | 14 493 | M2N5 | 15 051 |
| M1N1 | 11 371 | M3N1 | 13 990 |
| M1N2 | 12 620 | M3N2 | 14 502 |
| M1N3 | 13 728 | M3N3 | 14 665 |
| M1N4 | 14 313 | M3N4 | 14 749 |
| M1N5 | 14 580 | M3N5 | 14 769 |

由表 3 可知, 随着氮肥用量的增加, 春玉米产量都呈现增高趋势, 这可能是由于施肥量增加, 作物根系发达, 觅水空间和吸水能力增强, 充分利用了土壤中储存的水分, 表现出明显的以肥调水的作用; 然而, 由图 2 (a) 可知, 当 N 使用量达到一定程度 (约 300 kg/hm²) 时, 产量的增长率明显变缓, 当 N 使用量达到 400 kg/hm² 左右时, 再继续增加 N 用量, 春玉米产量几乎没有明显增长。由 N1 到 N2 水平, 4 个有机质处理 (M0、M1、M2、M3) 下产量的增长率分别为 14.2%、11.0%、8.4% 和 3.7%; 由 N2 到 N3 水平, 4 个有机质处理产量的增长率分别为 9.0%、8.8%、6.2% 以及 1.1%; 由 N3 到 N4 水平, 4 个有机质处理产量的增长率分别为 9.2%、4.3%、1.7% 和 0.6%; 由 N4 到 N5 水平, 4 个有机质处理产量的增长率分别为 6.6%、1.9%、0.6% 和 0.1%。由图 2 (a) 产量的变化趋势可知: 当氮肥用量为 N3 水平时, 春玉米产量以及产量的增长速率保持在较高水平, 增产效果较好; 从产量曲线的几何关系上来看, N3 左右为曲线的拐点, 该点之后曲线的增长明显减缓, 最终可能达到稳定, 甚至可能开始下降。模型对 N 平衡模拟的结果表明, 随着 N 用量的增加, N 的产量生产率呈下降趋势。如表 4 所示, 各有机质用量水平下, N 的产量生产率均是 N1 处理下最高, N5 处理下最低。由表 3 可知: N1 用量下的所有处理春玉米产量均较低, N5 用量下的所有处理春玉米产量虽然都较高; 但是 N 的产量生产率均最低, 氮素的浪费较严重。通过比较分析发现, M1N4 处理和 M2N3 处理下春玉米产量分别为 1 万 4 313 和 1 万 4 711 kg/hm², N 的产量生产率分别为 40.8 和 41.1 kg/

kg 均相差不大,且都处于较高水平。从作物生长的水肥供求关系来看,水肥之间存在着强烈的耦合关系,在水分供应不是很充足的情况下,肥料的施用量不宜过大,否则,可能会不利于作物生长^[15-17]。在

旱区农业中水分是限制肥料增产效果的重要影响因素,就模拟结果而言,无灌溉条件下过高的肥料投入对产量的增加并不一定有很大的作用。

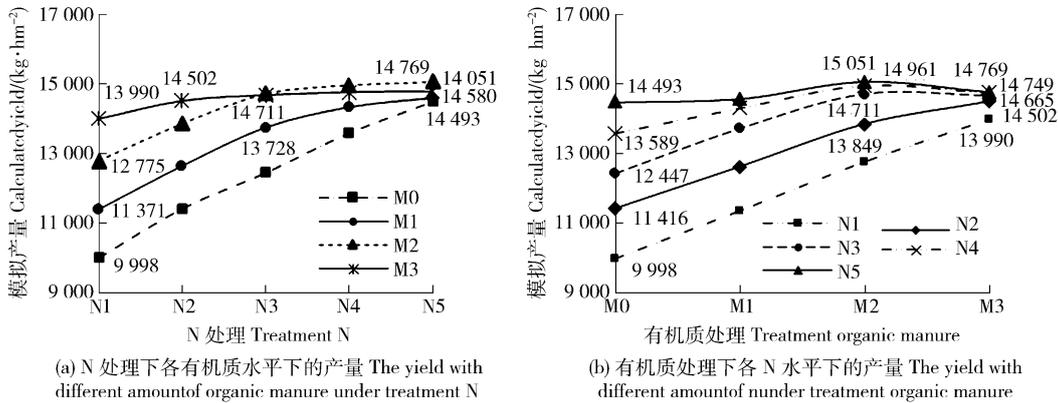


图 2 春玉米产量变化趋势

Fig. 2 Trend of yield of *Zea mays*

表 4 不同处理下 N 的产量生产率

Tab. 4 Yield productivity of N under different treatments

| 处理 Treatment | N 的产量生产率 Yield productivity of N/(kg·kg ⁻¹) | 处理 Treatment | N 的产量生产率 Yield productivity of N/(kg·kg ⁻¹) |
|-----------------|---|-----------------|---|
| M0N1 | 50.2 | M2N1 | 42.9 |
| M0N2 | 45.7 | M2N2 | 41.7 |
| M0N3 | 43.2 | M2N3 | 41.1 |
| M0N4 | 42.5 | M2N4 | 39.9 |
| M0N5 | 41.6 | M2N5 | 39.3 |
| M1N1 | 45.7 | M3N1 | 41.5 |
| M1N2 | 42.9 | M3N2 | 40.3 |
| M1N3 | 42.0 | M3N3 | 39.2 |
| M1N4 | 40.8 | M3N4 | 38.5 |
| M1N5 | 39.8 | M3N5 | 38.0 |

图 2(b) 描述了同一 N 用量不同有机肥使用量对产量的影响。可以看出,随着有机肥料使用量的增加,产量随之升高,尤其在低 N 用量的情况下,有机肥料的增产效果明显,N1 用量下产量随着有机质用量的增加几乎呈比例增加,随着 N 用量的增加有机肥料的增产效果减弱,N5 用量下有机肥料的施用对春玉米产量的增加没有明显作用。图中产量曲线的变化趋势表明,在控制 N 用量的同时,可以通过增施有机肥料来弥补由于少使用 N 肥而带来的产量损失。例如 M1N4、M2N3、M3N2 处理下玉米产量和 M0N5 处理下玉米产量相差不大,前者却较大程度上减少了 N 肥的用量。此外,使用有机肥料可以改善土壤结构,增加土壤中团聚体的含量,提高土壤

保水保墒的能力,再者,普通有机肥料与普通 N 肥相比价格更低廉,在农业生产中使用具有更高的经济收益;但是,由于有机肥的生产过程中需要投入的劳动量较大,生产周期较长,因此,不建议过多地施用有机肥料。

2.1.2 春玉米地上生物量模拟 生物量的模拟结果与产量模拟结果类似,田间实测地上生物量与模拟地上生物量的相对误差都在 10% 左右,模型校正准确。各处理的地上生物量模拟结果见图 3。由图 3(a) 可知,春玉米地上生物量随着 N 肥以及有机肥料用量的不同变化趋势与产量的变化趋势类似,在同一有机肥料水平下,随着 N 的增加,地上生物量逐渐增加,同样也在 N3 用量左右,曲线的增长速率明显减小。这与产量变化趋势一致,尤其 N5 用量下的 4 个有机肥料处理的地上生物量基本相等,表明在此 N 用量下施用有机肥对地上生物量的增长意义不大。由图 3(b) 可知:低 N 用量情况下增加有机肥料用量对地上生物量的增长有很好的促进效应,N1、N2 用量下 M0 到 M3 处理增长效果明显;此外,在高 N 用量情况下,随着有机肥料用量的增加,N3、N4、N5 用量下春玉米地上生物量趋于相等。

以上结果表明,可以通过增加有机肥料的用量来代替增加 N 施用量以促进地上生物量形成。这与 N 肥和有机肥的施用对产量变化趋势的影响效果相同。

同样,对各个处理下模拟的 N 的干物质生产率

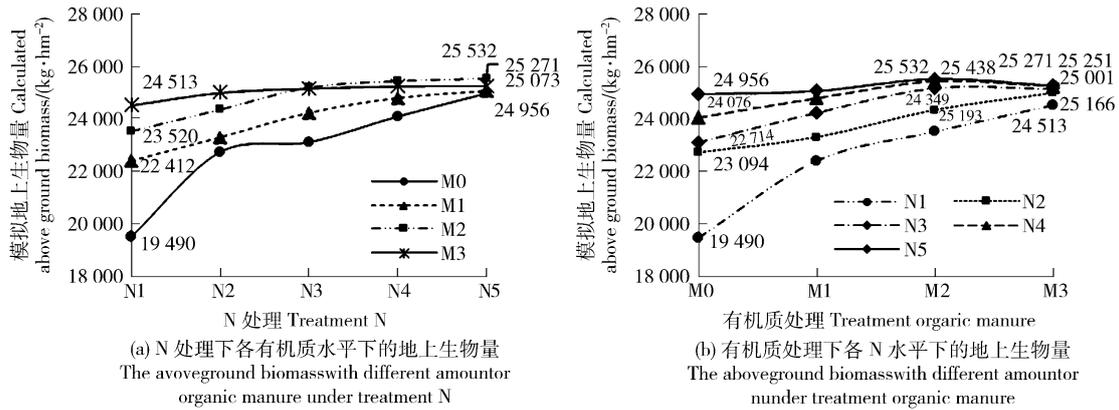


图 3 地上生物量变化趋势

Fig. 3 Trend of aboveground biomass

进行对比分析发现, M1N4 和 M2N3 处理方式下, 春玉米地上生物量分别为 24 803 和 24 349 kg/hm², N 的干物质生产率分别为 70.7 和 70.4 kg/kg, 2 个处理的效果基本相同并且都优于其他处理方式。

2.2 不同灌溉处理下模型模拟结果与分析

各灌溉处理下不同施肥水平的春玉米产量模拟结果见图 4。从图 4(a) ~ (f) 均可以看出: 灌溉对春玉米产量有一定的增加作用, 但是在不同的施肥水

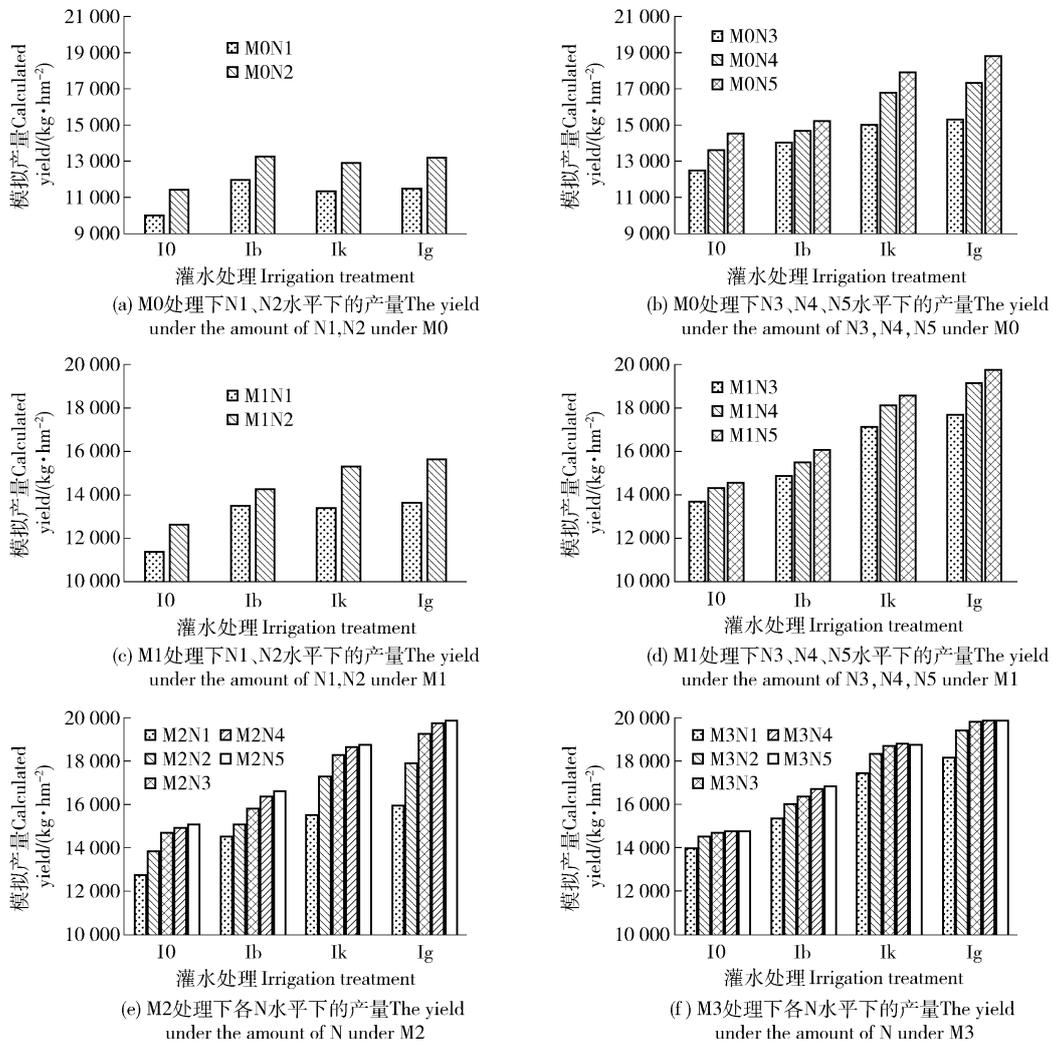


图 4 不同灌水处理下各处理春玉米模拟产量

Fig. 4 Calculated yield of *Zea mays* with different treatments under varied irrigation regimes

平下灌溉的增产作用却有很大差别,在有机肥和 N 肥用量均比较低的情况下,灌溉处理的春玉米产量略微高于不灌溉的春玉米产量(图 4(a)和(c));相反,有机肥和 N 肥用量较大的情况下,灌溉后的春玉米产量大幅增加(图 4(e)和(f)),如 M2N4I_g 的产量高出 M2N4I₀ 的产量近 5 000 kg/hm²(图 5(a))。此外,同一有机肥料水平、不同 N 肥用量下,低 N 用量条件下灌一水后的春玉米产量均能够达到甚至高于不灌溉的较高 N 用量下春玉米的产量,如 M0N1I_b、M0N1I_k、M0N1I_g 处理下的春玉米产量分别为 1 万 1 945、1 万 1 308 和 1 万 1 479 kg/hm²,均与 M0N2I₀ 处理下的春玉米产量 1 万 1 416 kg/hm²相差不大(图 5(b))。同时,灌溉的增产作用也表现为高肥用量下的效果优于低肥用量下的效果,如 M2N1I_g 处理下的春玉米产量与 M2N5I₀ 处理下春玉米产量相差不大,前者为 1 万 5 945 kg/hm²,后者为 1 万 5 051 kg/hm²(图 5(c));然而,M0N1I_b 处理下产量 1 万 1 945 kg/hm²明显低于 M0N5I₀ 处理下的产量 1 万 4 493 kg/hm²(图 5(d))。

上述结果表明:在 2005 年这种降雨年型下,在有机肥和 N 肥用量相对较低的春玉米种植中,生育期内灌一水(无论是哪个生育期)对春玉米产量增加效果可能不大,该条件下春玉米产量的主要限制因素可能是肥料用量;然而在有机肥和 N 肥使用量

均较大的情况下,灌溉的增产效果显著提高(图 4(e)、(f))。这可能与水肥之间的互作效应有密切关系,在低 N 水平下应该配以低水分处理,高 N 水平下配以高水分处理,同理,水分需要有适宜的氮素供应才能有较好的利用效率^[15-17]。

图 4(a)、(c)表明,在肥料使用量相对较低的条件下,虽然春玉米生育期内灌水都有增产效应,但在春玉米生长的拔节期进行灌水带来的产量增加略高于在春玉米开花期间或者是灌浆期间进行灌水而增加的产量。这可能是由于春玉米拔节期间生长迅速,水分消耗量较大,若此时补充水分有利于植株生长,相反,如果此时植株受旱则影响其生长发育,影响最终产量形成,这与高肥料用的灌水增产效果不同。由图 4(b)、(d)、(e)、(f)可以看出,肥料用量较高的情况下,同一施肥水平不同时期的灌水处理产量均表现为春玉米灌浆期间进行灌水处理(I_g)的产量最高,拔节期进行灌水处理(I_b)的春玉米产量最低。高肥料用量的条件下,肥料能促进植物根系发育,从而扩大根系的吸水范围,扩大土壤中水分的利用范围,在一定程度上缓解了植物的水分胁迫,这也可能是高肥料用量情景下灌水的效果不同于低肥料用量下的效果的原因之一。此外,灌浆期灌水对春玉米产量形成有很重要的意义,如果春玉米在灌浆时由于土壤供水不足而出现水分胁迫,再加上此

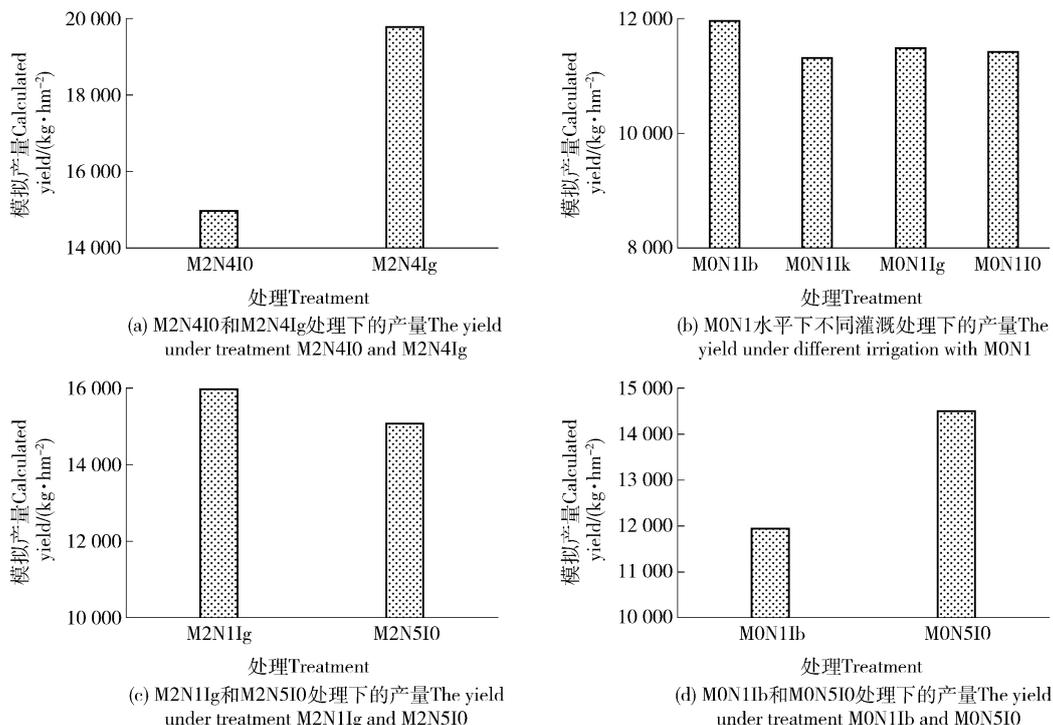


图 5 不同处理间春玉米模拟产量的比较

Fig. 5 Comparison of calculated yield of *Zea mays* among different treatments

时叶片蒸腾作用强烈,则必然导致植物体内水分减少,有机物质运输受到影响,造成灌浆受阻,籽粒瘦小,最终产量减少;因此,避免春玉米在灌浆期间受到严重水分胁迫对保证春玉米产量有重要意义。

3 结论

1) 在雨养条件下,不同有机肥用量和氮肥用量处理下春玉米产量和地上生物量的结果均表明,在控制氮肥用量的同时可以通过增施有机肥料来弥补由于少使用氮肥而带来的产量损失。

2) 雨养条件下,就肥料的施用量对春玉米产量的增加效果而言,7 500 kg/hm²的有机肥料和 400 kg/hm²纯氮用量处理(M1N4)与 1 万 5 000 kg/hm²有机肥料和 300 kg/hm²纯氮用量处理(M2N3)下春玉米的产量、生物量以及氮的偏生产率均相差不大,且都维持在较高水平,2 个处理的效果基本相同并且都优于其他处理方式。

3) 在有机肥和 N 肥用量较低的情况下,生育期内灌一水(无论是哪个生育期)对春玉米产量影响不大;在有机肥和 N 肥使用量均较大的条件下,灌水对产量的增加有明显的促进效果。此外,同一施肥处理下,不同时期的灌水处理产量均表现为 I_g(在灌浆期间灌水 50 mm)处理的产量均高于其他处理,说明避免春玉米在灌浆期间受到严重水分胁迫对保证春玉米产量有重要意义。

4 参考文献

- [1] 黄占斌,山仑. 论我国旱地农业建设的技术路线与途径[J]. 干旱地区农业研究,2000,18(2):1-6
- [2] 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
- [3] 杨靖民,刘金华,窦森,等. 应用 DSSAT 模型对吉林省黑土玉米最佳栽培技术的模拟和校验研究 I. 模型品种参数校验和产量的敏感性分析[J]. 土壤学报,2011,48(2):366-374
- [4] 戴明宏,赵久然,Claupein W,等. 基于 CERES-Maize 模型春玉米水分优化管理决策[J]. 水土保持学报,2009,23(1):187-192
- [5] 刘玮. 基于模型的播期对东北春玉米产量影响的研究[R]. 沈阳:第 29 届中国气象学会年会,2012
- [6] 姜志伟,武雪萍,华珞,等. 洛阳旱地夏玉米生产潜力长周期定量模拟与评价[J]. 生态学报,2009,29(1):315-324
- [7] 李树岩,刘荣花,成林,等. CERES-Maize 模型支持下的夏玉米水分条件模拟分析[C]. 黑龙江齐齐哈尔:第一次细胞分子生物学、生物物理学和生物工程学会会议,2010
- [8] 张艳红,廖树华,马永良. 基于 CERES-Maize 模型的夏玉米生产水肥优化管理技术方法与应用研究[J]. 玉米科学,2006,14(增刊1):88-91
- [9] 刘海龙,诸叶平,李世娟,等. DSSAT 作物系统模型的发展与应用[J]. 农业网络信息,2011(11):5-12
- [10] 鲁向晖,穆兴民,Nangia V,等. DSSAT 模型对豫西冬小麦保护性耕作效应模拟效果验证[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(3):64-70
- [11] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, et al. DSSAT cropping system model[J]. European Journal of Agronomy,2003,18:235-265
- [12] Hoogenboom G, Jones J W, Wilkens P W, et al. DSSAT V4.5 version [CD]. Honolulu: University of Hawaii, 2008
- [13] Pickering N B, Hansen J W, Jones J W, et al. WeatherMan: A utility for managing and generating daily weather data[J]. Agronomy Journal,1994,86(2):332-337
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000
- [15] 王翠玲,郭世昌. 旱棚控制条件下的水肥耦合效应[J]. 南京农专学报,2000,16(2):39-42
- [16] 胡顺军,田长彦,王方,等. 膜下滴灌棉花水肥耦合效应研究初报[J]. 干旱区资源与环境,2005,19(2):192-195
- [17] 王艳玲,王鸿斌,赵兰坡. 吉林省西部盐化黑钙土区芝麻水肥耦合效应研究[J]. 土壤通报,2004,35(4):430-435

(责任编辑:宋如华)