

不同施氮量对玉米器官形态指标的影响分析与定量模拟

段 萌<sup>1,2</sup> 张宝忠<sup>1,3</sup> 魏 征<sup>1,3</sup> 张帅杰<sup>4</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 北京 100048;

3. 水利部数字孪生流域重点实验室, 北京 100038; 4. 山西农业大学林学院, 太谷 030801)

**摘要:** 为揭示氮素对玉米生长发育中各器官形态指标的影响,构建能够模拟玉米器官形态的模型,本研究以玉米为试验材料开展田间试验,设置4个施氮处理(0 kg/hm<sup>2</sup> (N1)、225 kg/hm<sup>2</sup> (N2)、338 kg/hm<sup>2</sup> (N3)、450 kg/hm<sup>2</sup> (N4)),探究不同施氮量水平下玉米不同生育阶段器官形态指标(包括叶长、叶宽、节长、节间直径和叶鞘长)的变化规律,并建立作物器官形态结构模拟模型。结果表明,氮肥处理对叶长的生长影响差异显著( $P < 0.01$ ),而不同叶位对叶长的影响极显著( $P < 0.001$ ),氮肥处理对叶宽、玉米节间长度和茎秆直径的影响均不显著,其中,2020年各生育阶段对叶鞘长的影响差异显著( $P < 0.01$ );此外,生育阶段、氮肥处理和叶位对玉米叶鞘长的影响均不显著。构建了玉米器官尺度的模拟模型,并利用2年的试验数据分别对模型参数进行了率定与验证。各器官形态指标模型模拟结果中模型模拟效率(EF)均在0.72以上,模型对叶长和叶宽模拟的均方根误差(RMSE)均值分别为7.285 cm和1.200 cm,节长、节间直径和叶鞘长的RMSE分别为1.593、0.171、1.282 cm,模型对叶长和叶宽的平均绝对误差(MAE)均值分别为5.817、0.708 cm,节长、节间直径和叶鞘长的MAE分别为1.111、0.116、0.923 cm。本模型对玉米各器官发育过程的模拟具有较好的预测性和解释性。

**关键词:** 玉米; 施氮量; 器官形态特征; 模拟模型

中图分类号: S126; S513 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)10-0284-09

OSID:



Effects of Different Nitrogen Application Rates on Morphological Indices of Maize Organs and Quantitative Simulation

DUAN Meng<sup>1,2</sup> ZHANG Baozhong<sup>1,3</sup> WEI Zheng<sup>1,3</sup> ZHANG Shuaijie<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

2. National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research-Beijing, Beijing 100048, China

3. Key Laboratory of River Basin Digital Twinning, Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China

4. College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

**Abstract:** In order to investigate the response of nitrogen on the morphological indices of various organs in maize growth and development, and build a model that could simulate the morphological indicators of organs in maize, a field experiment was conducted with maize, and four nitrogen fertilization treatments were set with nitrogen content of 0 kg/hm<sup>2</sup> (N1), 225 kg/hm<sup>2</sup> (N2), 338 kg/hm<sup>2</sup> (N3) and 450 kg/hm<sup>2</sup> (N4), respectively. The changes of organ morphological indicators, including leaf length, leaf width, internode length, internode diameter and leaf sheath length at different growth stages of maize under different nitrogen application levels were investigated, and the simulation model of crop organ morphological structure was established. The results showed that nitrogen fertilizer treatments had significant effects on leaf length ( $P < 0.01$ ), while different leaf positions had extremely significant effects on leaf length ( $P < 0.001$ ). Nitrogen treatment had no significant effects on leaf width, internode

收稿日期: 2022-06-16 修回日期: 2022-07-14

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51979287)、中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金项目(SK2020TS08)和中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项(ID0145B022021)

**作者简介:** 段萌(1986—),女,博士后,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: dm2015cau@163.com

**通信作者:** 张宝忠(1981—),男,教授级高级工程师,主要从事蒸散发尺度效应研究,E-mail: zhangbaozhong333@163.com

length and stem diameter, among which, leaf sheath length had significant effects on each growth stage in 2020 ( $P < 0.01$ ). In addition, the effects of growth stage, nitrogen treatment and leaf position on leaf sheath length were not significant. A simulation model of maize organ scale was constructed, and the model parameters were calibrated and verified by using two years of experimental data. The model simulation efficiency (EF) was above 0.72. The root mean square error (RMSE) of leaf length and leaf width were 7.285 cm and 1.200 cm, respectively. The RMSE of node length, internode diameter and leaf sheath were 1.593 cm, 0.171 cm and 1.282 cm, respectively. The mean absolute error (MAE) of leaf length and leaf width were 5.817 cm and 0.708 cm, respectively. The MAE of node length, internode diameter and leaf sheath were 1.111 cm, 0.116 cm and 0.923 cm, respectively. The results showed that the model had good prediction and interpretation for the simulation of the developmental process of various organs in maize.

**Key words:** maize; nitrogen application rate; organ morphological characteristics; simulation model

## 0 引言

农田生态系统不仅受人类活动的深刻影响,同时也是气候变化的主要承受者,大气二氧化碳( $\text{CO}_2$ )浓度升高、降水格局改变、氮沉降以及由于臭氧层变薄所引起的紫外线辐射增强等全球气候变化和频发的极端天气已严重影响了植物生理生态过程和农田水碳耦合过程<sup>[1-2]</sup>。作物冠层结构不仅影响太阳辐射的截获量,同时通过影响冠层内的温度、湿度和二氧化碳浓度等微环境,最终影响群体内部的光合效率、水分利用效率和作物产量等。结构是功能的基础,作物冠层结构的变化必然影响到生理生态功能的改变<sup>[3-5]</sup>。因而,了解冠层结构及其内部各器官的形态特征对环境变化的响应是探索是农田生态系统水碳循环的基础。尽管目前关于不同时空尺度的水碳循环研究较多,但考虑冠层结构对水碳循环空间异质性的研究较少,生态系统内部的水热碳氮通量与作物生理生化过程关系密切,作物生理环境同时受到冠层结构的影响,二者既相互促进又相互制约。因此,考虑作物冠层结构与作物行为特征的水碳通量定量表征研究,揭示农田生态系统对气候变化和人类活动的响应机制,已成为寻求水碳调控的有效途径,更是缺水条件下农业得以持续稳定发展的关键科学问题。

作物模型通过描述农田生态系统中各组分的特点及其对系统的影响,来定量刻画作物生态系统中的气象因子、土壤水分、养分和温度等要素在作物生长和发育等诸多过程间复杂的相互作用关系,为优化栽培、合理的水分供应、资源合理利用以及种植效益优化等提供了重要手段<sup>[6-8]</sup>。目前应用较为广泛的综合模型包括 HIJMANs 等<sup>[9]</sup>开发的 WOFOST (World food studies) 模型、澳大利亚 CSIRO 开发的 APSIM (Agricultural production systems simulator) 模型<sup>[10-11]</sup>、美国夏威夷大学开发的 DSSAT (Decision support system for agrotechnology transfer) 模型、联合

国粮农组织开发的 AquaCrop 模型等。然而,目前这些作物模型大多是对作物器官静态的模拟或完全忽略作物冠层结构,主要采用叶面积指数、冠层覆盖度等参数来表征作物冠层状况,由于对作物冠层结构特征关注不足,从而导致系统内部水热碳氮过程模拟误差较大和模型普适性不足,特别是由于种植模式导致冠层结构显著变化后,现有作物模型将产生显著偏差<sup>[12]</sup>。

针对现有作物模型存在的局限,众多学者尝试表征冠层结构。GREYSON 等<sup>[13]</sup>研究了叶片宽度与叶位的关系,HESKETH 等<sup>[14]</sup>建立了叶片、叶鞘及节间之间的关系,TOLLENAAR 等<sup>[15]</sup>研究了玉米叶片方位角分布规律等,杨恒山等<sup>[16]</sup>建立玉米冠层结构模型,常丽英等<sup>[17]</sup>构建了水稻叶片模型,虽然众多学者建立了作物空间结构的模型,但这些模型多为单一器官或某一特定时期的模拟,由于建立作物模型需要大量准确有效的观测数据,而这些数据的获取具有周期长和误差较大的特点<sup>[18-24]</sup>,因此,作物模型的开发仍需继续开展深入而系统的研究。作物冠层结构一直是作物栽培学、植物生理学和作物遗传育种学等学科研究的热点,而作物模型、农田生态系统中的水碳氮循环等多是气象学、生态学和农业资源与环境等学科的研究热点。为此,本文主要探究作物冠层结构中器官的结构特征及作物发育过程间的变化规律,基于观测得到的玉米各器官形态指标(主要包括叶长、叶宽、节长、节间直径和叶鞘长等),构建玉米形态建成的模拟模型,为进一步建立玉米冠层三维空间结构模型奠定基础和技术框架。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验在中国水利水电科学研究院大兴节水试验基地(东经  $116^{\circ}25'51''$ , 北纬  $39^{\circ}37'25''$ ) 进行,该区属于暖温带半湿润大陆性季风气候,夏季炎热多雨,

春冬干旱少雨,四季分明。大兴区年际间降雨量变化较大,年降雨量最高值和最低值相差 3 倍以上,年内季节降雨量分布也不均匀,年均降雨量 540 mm,降水多集中在 6—9 月,其中 80% 以上降雨量为汛期降雨量。该区多年平均水面蒸发量 1 889.1 mm,多年平均大气温度 11.6℃,年均日照时数 2 772.3 h,年均无霜期为 209 d。该区盛行东北风和西南风。

该区光热自然条件丰富,适合多种作物生长,包括冬小麦、夏玉米、花生、黄豆等。冬小麦和夏玉米连作是当地农民采用的主要种植模式。正常年份,冬小麦生长季降雨不足,为保障作物正常生长需要,需进行补充灌溉,而夏玉米生长季降雨充分,不需灌溉。

1.2 试验材料与与设计

试验于 2020 年 6 月—2021 年 10 月进行,试验设置 4 个施氮水平:不施肥 (0 kg/hm<sup>2</sup>)、低肥 (225 kg/hm<sup>2</sup>)、中肥 (338 kg/hm<sup>2</sup>)、高肥 (450 kg/hm<sup>2</sup>),分别表示为 N1、N2、N3、N4,每个处理设置 3 次重复,试验采用随机区组排列设计,共计 12 个小区,每个小区面积 56 m<sup>2</sup>。夏玉米全生育期内共施肥 2 次,生育期内有效磷 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 和有效钾 (K<sub>2</sub>O) 施用量均为 135 kg/hm<sup>2</sup>,其中复合肥作为底肥施入 (总养分含量为 45%,N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O 为 15:15:15),在拔节期进行追肥施入尿素 (N 含量 46%)。供试玉米品种为“纪元 168”,在 2020 年的玉米大田试验中,于 6 月 27 日播种,9 月 25 日收获。2021 年试验于 6 月 18 日播种,9 月 29 日收获,其他设置与 2020 年试验设计一致,玉米株距 35 cm,行距 60 cm,其他管理措施与当地农民习惯保持一致。研究区内土壤属沙壤土,各年土壤氮营养背景值如表 1 所示,其中, *h* 为土壤深度, *W*<sub>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N</sub> 为硝态氮

含量, *W*<sub>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N</sub> 为铵态氮含量。

表 1 土壤氮营养背景值  
Tab.1 Soil nutrient background values

| 年份   | <i>h</i> /cm | <i>W</i> <sub>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N</sub> /(mg·kg <sup>-1</sup> ) | <i>W</i> <sub>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N</sub> /(mg·kg <sup>-1</sup> ) |
|------|--------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 2020 | 0~20         | 3.486                                                                    | 27.024                                                                   |
|      | 20~40        | 5.251                                                                    | 12.247                                                                   |
|      | 40~60        | 3.813                                                                    | 13.382                                                                   |
| 2021 | 0~20         | 2.925                                                                    | 11.617                                                                   |
|      | 20~40        | 2.808                                                                    | 7.843                                                                    |
|      | 40~60        | 2.370                                                                    | 6.072                                                                    |

1.3 测定项目与方法

为观测玉米叶片形态指标的变化过程,自玉米第 3 片叶出现开始,每个小区选取 5 株玉米,定株测量每片叶片的叶长和叶宽。一般每间隔 2 d 测定 1 次,在玉米生长较为旺盛以及器官生长变化较快的时期每天测定 1 次。叶长即从叶尖至叶片基部处的距离,叶宽测量时从叶尖至叶片基部每隔 2 cm 叶长处测一个数据。

叶鞘及茎秆形态指标的测定与叶片指标测定同步进行,每隔 2 d 定株测定叶鞘长度的变化,每个处理重复测定 5 株,在器官生长变化较快的时期每天测定 1 次。叶鞘长度为叶枕与植株基部距离。茎秆形态指标的测定包括节间长度和节间直径的测定,其中节间直径用游标卡尺测量,当节间不圆时,则两个面都测定。

2 结果与分析

2.1 不同施氮量对玉米叶长的影响

图 1 为 2020 年和 2021 年氮肥处理下各生育期玉米叶长随叶位的变化规律。可以看出,2020 年和 2021 年不同施氮量处理下玉米各时期最大叶长分

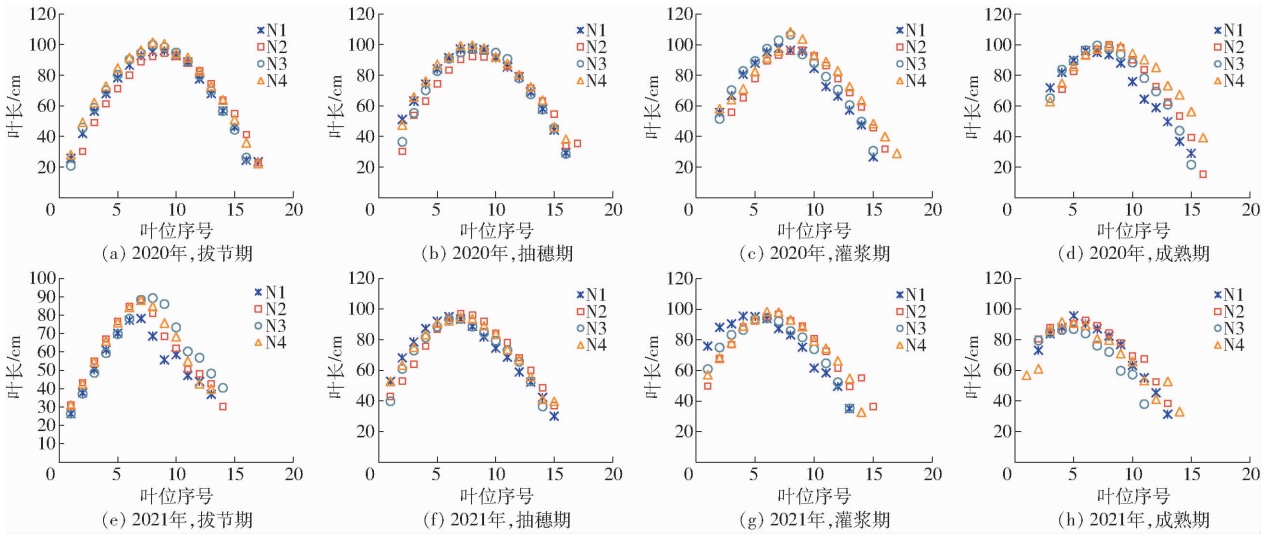


图 1 2020—2021 年氮肥处理下各生育期玉米叶长随叶位的变化规律

Fig.1 Changes of leaf length with leaf position in different growth periods and different nitrogenous fertilizer (2020—2021)

别出现在第 8 叶位和第 7 叶位,最大叶片数分别为 17 片和 15 片。由图 1 可知,氮素对玉米叶长的影响随着叶位的变化而不同,其中,在最大叶长叶位以上的玉米叶片长度随着氮含量的增加而增加,而在最大叶长叶位以下的玉米叶片长度随着氮含量的增加而下降。在玉米灌浆期,与 N1 处理相比较,N3 和 N4 处理显著降低了第 7 叶位以下玉米叶片的叶长,而增加了第 7 叶位以上玉米叶片叶长,这一规律在成熟期也较为明显。

本研究还表明,随着叶片的抽出,玉米叶长的变化差异不显著。但叶片定形后的最大叶长随叶位的不同而变化,且呈现二次曲线的变化规律。

对生育阶段、氮肥处理和叶位进行三因素方差分析,结果表明氮肥处理对叶长的影响差异显著 ( $P<0.01$ ),而不同叶位对叶长的影响差异极显著 ( $P<0.001$ )(表 2)。

表 2 2020—2021 年氮肥处理下玉米不同生育阶段  
各器官形态指标显著性检验

Tab.2 Significance test of morphological characteristics  
of various organs of maize at different growth stages  
under nitrogen fertilizer treatment from 2020 to 2021

| 年份   | 处理      | 叶长  | 叶宽 | 节长 | 节间直径 | 叶鞘长 |
|------|---------|-----|----|----|------|-----|
| 2020 | 生育阶段(S) | ns  | ns | ns | ns   | **  |
|      | 氮肥处理(N) | **  | ns | ns | ns   | ns  |
|      | 叶/节位(L) | *** | ns | ns | ns   | ns  |
|      | S×N     | ns  | ns | ns | ns   | ns  |
|      | S×L     | ns  | ns | ns | ns   | ns  |
|      | N×L     | ns  | ns | ns | ns   | ns  |
|      | S×N×L   | ns  | ns | ns | ns   | ns  |
| 2021 | 生育阶段(S) | *   | ns | ns | ns   | ns  |
|      | 氮肥处理(N) | **  | ns | ns | ns   | ns  |
|      | 叶/节位(L) | *** | ns | ns | ns   | ns  |
|      | S×N     | ns  | ns | ns | ns   | ns  |
|      | S×L     | ns  | ns | ns | ns   | ns  |
|      | N×L     | ns  | ns | ns | ns   | ns  |
|      | S×N×L   | ns  | ns | ns | ns   | ns  |

注:ns 表示  $F$  检验无显著性差异,\* 表示  $P<0.05$  水平下有显著性差异,\*\* 表示  $P<0.01$  水平下有显著性差异,\*\*\* 表示  $P<0.001$  水平下有显著性差异。

玉米叶位叶片定形后的长度随叶位的变化呈二次曲线的趋势,定量描述为

$$L_{e_n} = [(a_1 n^2 + b_1 n + c_1) F_{LCV} + L_{CV}] F(N) \quad (1)$$

式中  $L_{e_n}$ ——第  $n$  片叶定形后长度,cm  
 $F_{LCV}$ ——最终叶片变化系数,与品种有关  
 $L_{CV}$ ——叶长变化系数,为品种参数  
 $n$ ——伸长节间数  
 $a_1、b_1、c_1$ ——模型参数,分别取 - 1.108、17.718、21.753  
 $F(N)$ ——氮素影响因子

叶片氮含量通常可作为植株氮素水平的一个生理指标。研究表明,随着叶片氮含量的增加,玉米叶片呈现增长趋势,这一关系符合二次曲线方程,因此氮素影响因子  $F(N)$  计算公式为

$$F(N) = \begin{cases} 1 - f(N)(N_a - N_o)^2 & (0 < N_a < N_o) \\ 1 & (N_a \geq N_o) \end{cases} \quad (2)$$

式中  $f(N)$ ——方程系数,取 0.001 8  
 $N_a$ ——玉米叶片实际氮含量  
 $N_o$ ——玉米叶片最适氮含量

研究表明,玉米叶片从抽出到成熟期其最适氮含量不断变化,且呈下降趋势,可描述为

$$N_o = f_1(N_o) e^{f_2(N_o)} \quad (3)$$

式中  $f_1(N_o)、f_2(N_o)$ ——方程系数,通过试验数据分析结果分别取 1.22 和 -0.16

2.2 不同施氮量对玉米叶宽的影响

前人研究表明,随着叶片的伸长,玉米叶片宽度的潜力已基本确定<sup>[25]</sup>。由图 2 可知,2020 年和 2021 年不同施氮量处理的玉米各时期最大叶宽分别出现在第 10 叶位和第 8 叶位。本研究表明,随着叶片的抽出,叶宽变化差异不显著。但叶片定形后的最大叶宽随着不同叶位而变化,且呈现二次曲线的变化规律。通过对生育阶段、氮肥处理和叶位进行三因素方差分析,结果表明生育阶段、氮肥处理和叶位对叶宽的影响差异均不显著(表 2)。本研究还表明,不同施氮量处理玉米叶宽的变化规律与叶长的变化规律基本一致。在灌浆期和成熟期,氮素对叶宽的影响更加明显,与 N1 处理相比较,N4 处理显著降低了最大叶宽叶位以下玉米叶片的叶宽,而最大叶宽叶位以上的玉米叶片叶宽明显增加。因此,玉米不同叶位最大叶宽可描述为

$$W_{e_n} = (a_2 n^2 + b_2 n + c_2) F(N) \quad (4)$$

式中  $W_{e_n}$ ——第  $n$  片叶定形后宽度,cm  
 $a_2、b_2、c_2$ ——模型参数,分别取 - 0.141、2.602、-0.892

2.3 不同施氮量对玉米茎秆形态指标的影响

研究表明,玉米节间的伸长与叶片的发生与展开存在密切的同伸关系<sup>[26]</sup>。玉米的茎主要由节和节间构成,茎的生长包括顶端生长和居间伸长两种方式,其中顶端生长缓慢,主要形成叶片和节间。在苗期玉米的茎节已经形成,而茎的伸长生长主要在拔节后的居间伸长,通常玉米的居间生长只发生在生殖生长阶段。从苗期开始,玉米茎秆缓慢生长,到雄穗开始分化,茎秆的伸长速度缓慢增加;而从雌穗

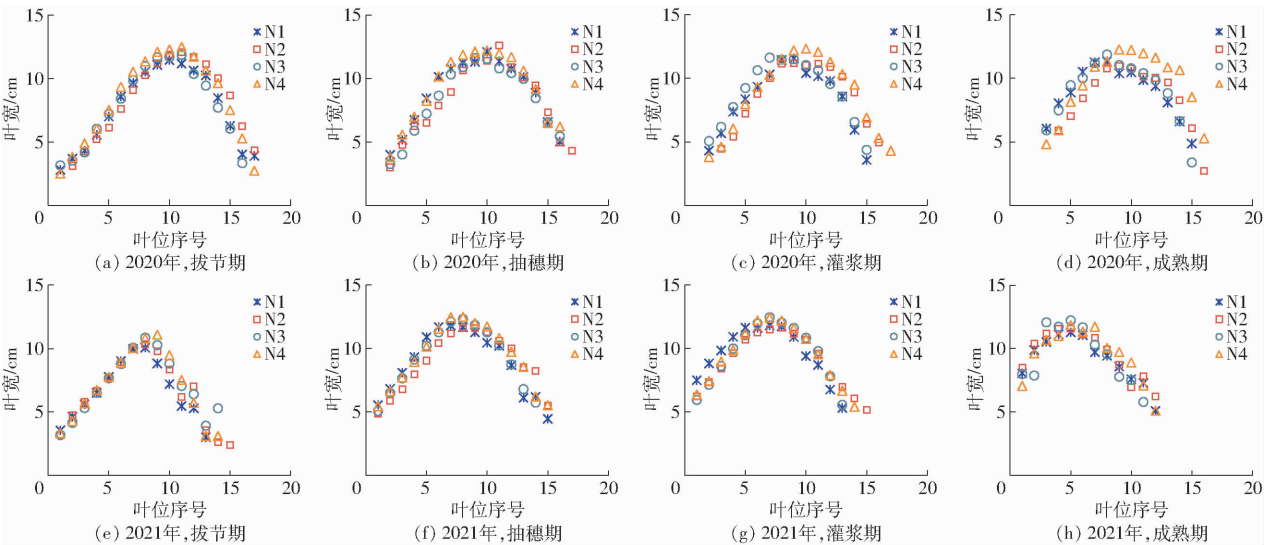


图2 2020—2021年氮肥处理下玉米各生育期叶宽随叶位的变化规律

Fig.2 Changes of leaf width with leaf position in different growth periods and different nitrogenous fertilizer (2020—2021)

开始分化到吐丝期茎秆的生长速度上升。由图3可知,玉米节间伸长呈现由慢到快再到慢的规律,各节间从形态学下端开始向上伸长生长,且生长有一定的顺序性和重叠性;而玉米各节间的粗度随着玉米的生长而逐渐增大(图4)。对生育阶段、氮肥处理和节位进行三因素方差分析,结果表明生育阶段、氮肥处理和节位对玉米节间长度(节长)和节间直径的影响差异均不显著(表2)。

玉米节间最终长度定量描述为

$$I_{Nn} = [(a_3n^2 + b_3n + c_3)F_{ICV} + I_{CV}]F(N) \tag{5}$$

式中  $I_{Nn}$ ——第  $n$  节节间定形后长度,cm  
 $F_{ICV}$ ——最终节长变化系数,与品种有关  
 $I_{CV}$ ——节长变化系数,为品种参数  
 $a_3、b_3、c_3$ ——模型参数,分别取 - 0.251、4.028、2.059

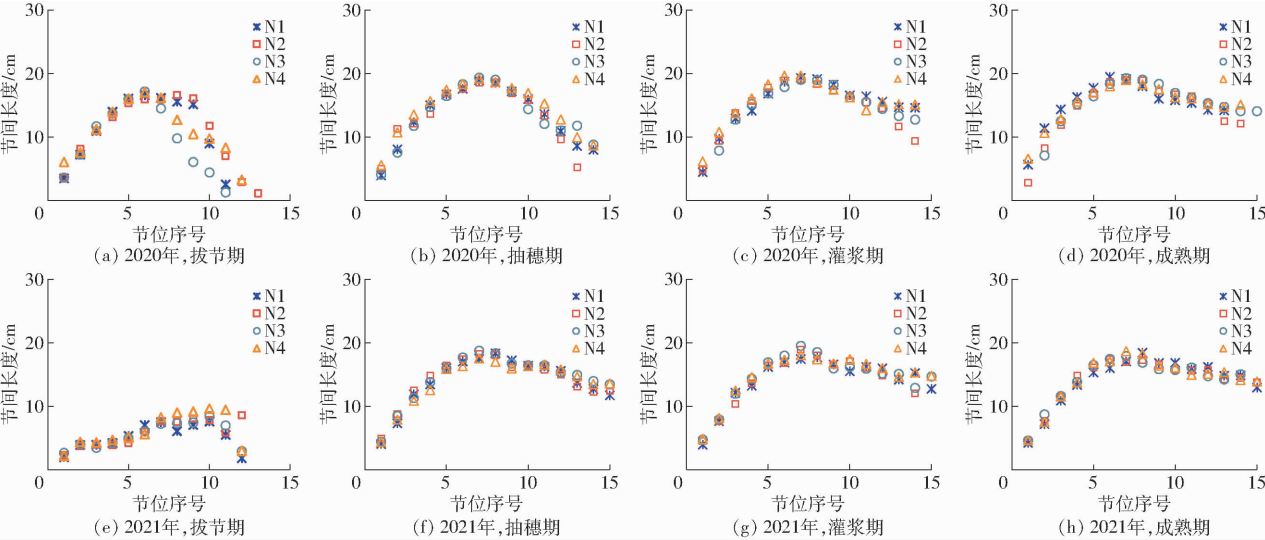


图3 2020—2021年氮肥处理下玉米各生育期茎秆节间长度随节位的变化规律

Fig.3 Changes rule of internode length with internode position in different growth periods and different nitrogenous fertilizer (2020—2021)

玉米节间最终直径定量描述为

$$D_{en} = \begin{cases} AF(N) & (n_0 \leq n < n_0 + n_1) \\ (D_{ea}n + D_{eb})F(N) & (n \geq n_0 + n_1) \end{cases} \tag{6}$$

式中  $D_{en}$ ——茎基部第  $n$  节间直径,mm  
 $A、D_{ea}、D_{eb}$ ——模型参数,分别取 19.238、- 1.794、30.294  
 $n_0$ ——初生节间数  
 $n_1$ ——地上部第1节节间数

2.4 不同施氮量对玉米叶鞘形态指标的影响

玉米的叶由叶片、叶鞘和叶舌3部分组成。玉米叶鞘数量通常与叶片数量相对应。研究表明,通常玉米叶鞘生长达最大值时其植株叶片也达到最大。由图5可知,2020年不同施氮量处理的玉米各

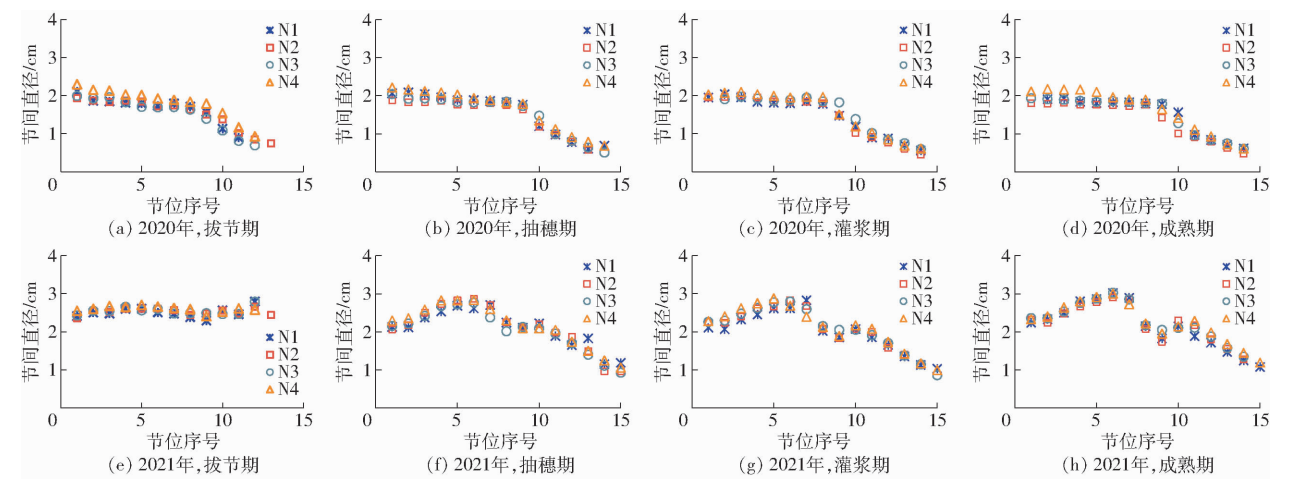


图 4 2020—2021 年氮肥处理下玉米各生育期节间直径随节位的变化规律

Fig. 4 Changes of internode diameter with internode position in different growth periods and different nitrogenous fertilizer (2020—2021)

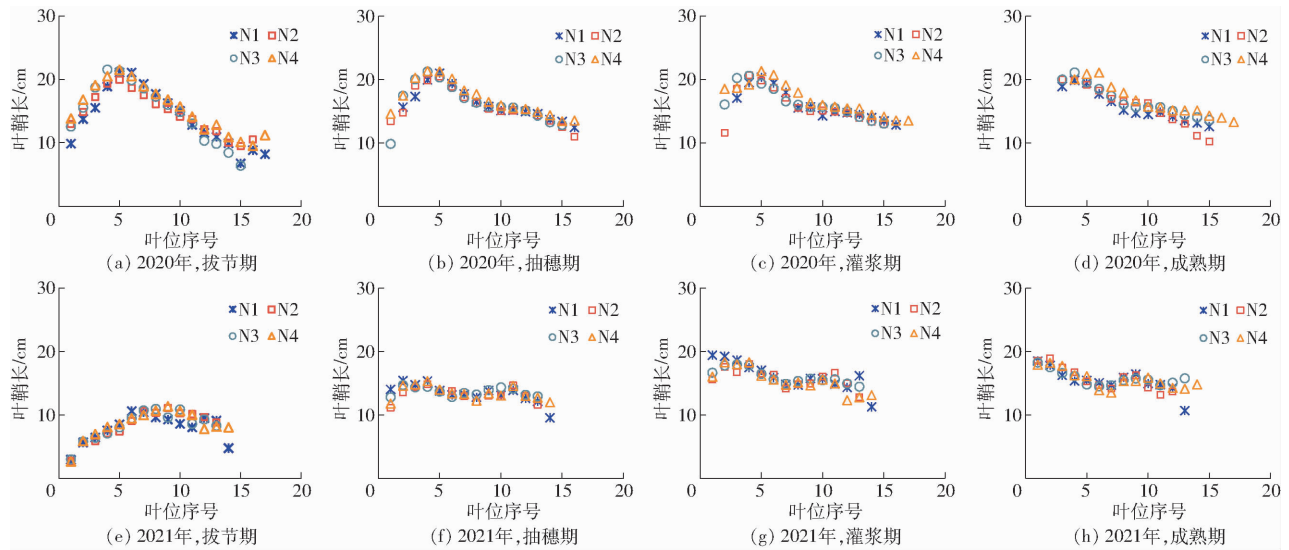


图 5 2020—2021 年氮肥处理下玉米不同生育期叶鞘长随叶位的变化规律

Fig. 5 Changes rule of leaf sheath length with leaf position in different growth periods and different nitrogenous fertilizer (2020—2021)

时期最大叶鞘长度均出现在第 5 叶位；而 2021 年各处理的玉米各时期最大叶鞘长度不同生育期出现时间不同。本研究还表明，玉米叶鞘定形后的最大叶鞘长度随叶位的不同而变化，且呈现三次曲线的变化规律。对生育阶段、氮肥处理和节位进行三因素方差分析，结果表明 2020 年生育阶段对叶鞘长的影响差异显著 ( $P < 0.01$ )；除此以外，生育阶段、氮肥处理和叶位对玉米叶鞘长度的影响差异均不显著 (表 2)。

玉米叶鞘定形后长度随叶位的变化可定量描述为

$$L_{S_n} = [(a_4 n^3 + b_4 n^2 + c_4 n + d_4) F_{SCV} + S_{CV}] F(N) \tag{7}$$

式中  $L_{S_n}$ ——第  $n$  片叶鞘定形后长度，cm  
 $F_{SCV}$ ——最终叶鞘变化系数，与品种有关

$S_{CV}$ ——叶鞘长变化系数，为品种参数  
 $a_4、b_4、c_4、d_4$ ——模型参数，分别取 0.011、  
-0.328、2.245、14.237

2.5 模型验证

2020 年和 2021 年玉米叶长、叶宽、节长、节间直径和叶鞘长各模型模拟值与实测值的对比如图 6 所示，模型评价指标如表 3 所示。本文选用 2020 年的玉米叶长、叶宽、节长、节间直径和叶鞘长实测数据对模型参数进行率定，并用 2021 年的试验数据进行模型的验证。结果表明，玉米各器官实测值与模拟值之间具有较好的一致性和符合度。统计分析结果可知，各器官形态指标模型模拟结果 EF (模型模拟效率) 均在 0.72 以上，模型对叶长和叶宽模拟的均方根误差 (RMSE) 均值分别为 7.285 cm 和 1.200 cm，EF 均值分别为 0.84 和 0.85，拟合效果较为理想。

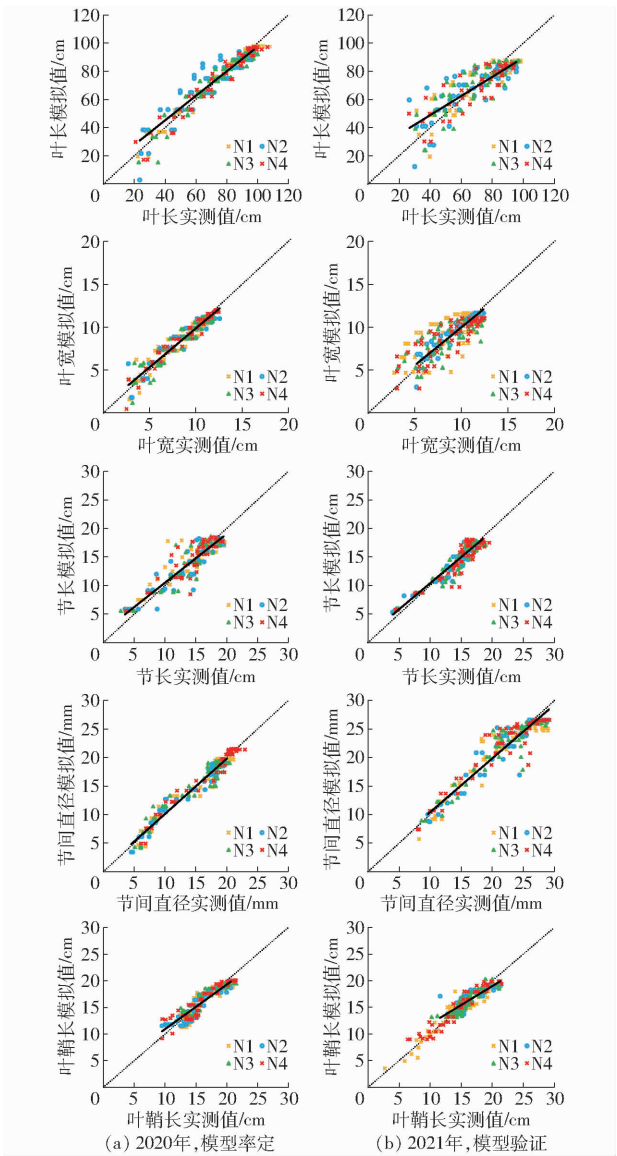


图6 2020年和2021年各器官形态指标模拟值与实测值对比

Fig.6 Comparison of simulated and measured values of organ morphological indicators in 2020 and 2021

节长、节间直径和叶鞘长的 RMSE 分别为 1.593、0.171、1.282 cm，EF 均值分别为 0.82、0.88 和 0.80，拟合效果较好。模型对叶长和叶宽的平均绝对误差 (MAE) 均值分别为 5.817 cm 和 0.708 cm，节长、节间直径和叶鞘长的 MAE 分别为 1.111、0.116、0.923 cm，拟合效果较理想。综上所述，文中所建立的模型能够较好地模拟和预测玉米各器官的形态指标，但由于作物生长受外界自然因素影响较多，且数据获取具有较大的难度，导致在 2020 年和 2021 年间的试验数据尚存在一定误差。

3 讨论

作物冠层结构的复杂性导致其冠层内部的微环境 (光照、相对湿度、温度和风速等) 差异会使叶片

表3 2020—2021 年玉米各器官形态指标模型模拟效果评价指标  
Tab.3 Evaluation index of model simulation effect of organs morphological indicators of maize in 2020—2021

| 参数   | 处理 | 模型率定        |            |      | 模型验证        |            |      |
|------|----|-------------|------------|------|-------------|------------|------|
|      |    | RMSE/<br>cm | MAE/<br>cm | EF   | RMSE/<br>cm | MAE/<br>cm | EF   |
| 叶长   | N1 | 7.63        | 6.97       | 0.88 | 8.02        | 7.45       | 0.73 |
|      | N2 | 5.75        | 3.78       | 0.93 | 9.93        | 7.41       | 0.79 |
|      | N3 | 5.90        | 4.40       | 0.94 | 8.11        | 7.10       | 0.76 |
|      | N4 | 3.35        | 2.51       | 0.97 | 9.59        | 6.92       | 0.77 |
|      | 均值 | 5.65        | 4.41       | 0.93 | 8.91        | 7.22       | 0.76 |
| 叶宽   | N1 | 0.85        | 0.65       | 0.89 | 1.60        | 0.50       | 0.76 |
|      | N2 | 0.82        | 0.58       | 0.90 | 1.64        | 0.51       | 0.83 |
|      | N3 | 0.88        | 0.63       | 0.89 | 1.59        | 1.12       | 0.80 |
|      | N4 | 0.66        | 0.50       | 0.95 | 1.56        | 1.18       | 0.84 |
|      | 均值 | 0.80        | 0.59       | 0.90 | 1.59        | 0.82       | 0.80 |
| 节长   | N1 | 1.75        | 1.22       | 0.82 | 1.02        | 0.90       | 0.92 |
|      | N2 | 1.48        | 1.11       | 0.87 | 1.22        | 1.10       | 0.89 |
|      | N3 | 1.82        | 1.24       | 0.79 | 2.06        | 1.11       | 0.76 |
|      | N4 | 2.01        | 1.25       | 0.72 | 1.38        | 0.95       | 0.86 |
|      | 均值 | 1.76        | 1.20       | 0.80 | 1.42        | 1.01       | 0.85 |
| 节间直径 | N1 | 0.13        | 0.10       | 0.92 | 0.21        | 0.17       | 0.84 |
|      | N2 | 0.10        | 0.07       | 0.95 | 0.27        | 0.12       | 0.80 |
|      | N3 | 0.13        | 0.09       | 0.92 | 0.20        | 0.14       | 0.85 |
|      | N4 | 0.09        | 0.06       | 0.96 | 0.20        | 0.14       | 0.87 |
|      | 均值 | 0.11        | 0.08       | 0.93 | 0.22        | 0.14       | 0.84 |
| 叶鞘长  | N1 | 1.01        | 1.04       | 0.82 | 1.35        | 0.85       | 0.80 |
|      | N2 | 1.17        | 0.99       | 0.84 | 1.68        | 0.89       | 0.76 |
|      | N3 | 1.12        | 0.83       | 0.81 | 1.29        | 0.88       | 0.82 |
|      | N4 | 1.19        | 1.01       | 0.84 | 1.45        | 0.90       | 0.78 |
|      | 均值 | 1.12        | 0.96       | 0.82 | 1.44        | 0.88       | 0.79 |

内部和叶片表面水碳运移不同,同时,由于作物栽培模式的差异加剧了冠层空间结构的多维变化,从而导致叶片水碳氮过程的时空异质性,进而影响作物的生长发育。构建作物器官尺度模型,对于认识农田水碳运移规律,提高作物水分利用效率,破解农业水危机等具有重要的现实指导意义。本研究通过深入观测和系统分析了不同施氮条件下玉米各器官中的形态特征变化,主要分析不同生育期的玉米叶长、叶宽、节长、节间直径和叶鞘长随叶位的变化关系,并根据玉米各器官形态建成过程,进一步构建了能够定量表征玉米不同叶位叶片、节间和叶鞘的生长动态与几何参数形成过程的模拟模型。

氮素对玉米植株的碳氮代谢、生物量累积以及光合生产和物质分配具有重要影响。本研究发现氮素对玉米叶长的影响随着叶位的变化而不同,在最大叶长叶位以上的玉米叶片长度随着氮含量的增加而增加,而在最大叶长叶位以下的玉米叶片长度随着氮含量的增加而下降。玉米最大叶长、叶宽和叶

鞘长在不同处理之间差异不显著,即氮素对叶长、叶宽和叶鞘长的影响不显著。在拔节期和抽穗期氮素对节长的影响差异不显著,而灌浆期和成熟期氮素对节长的影响存在显著性差异。常丽英等<sup>[17]</sup>研究发现,氮素对水稻的最大叶宽影响差异不显著;高志英等<sup>[27]</sup>研究发现,在自然光条件下,不同施氮量对玉米叶长、叶宽和叶鞘长的影响差异不显著;这些研究结果与本试验结果基本相同。高飞等<sup>[28]</sup>研究发现,氮肥形态调控对玉米茎粗、茎长的影响有明显差异,这与本研究结果类似。由于本文只考虑了 4 个氮肥水平,且田间试验受到地理位置、气候因子等多种因素影响,尚不具有普适性,同时,由于玉米植株形态建成过程的复杂性和可塑性,在今后研究中,需要进行更加精准量化的研究,来进一步细致地表述该模型中氮素对玉米形态指标的影响,以增强模型的可靠性和适用性。

玉米的株型生长受品种类型和环境条件显著影响,这是一个十分复杂的研究方向,本文仅对某一特定品种在特定生长条件下进行了试验分析,虽然本研究采用 2 年的大田试验数据对模型进行参数的率定和验证,但由于缺少品种参数的相关试验,仅用各器官的形变系数来表征品种的差异,未能更好地体现品种参数量化的器官生长特征差异。本文中所建立的各器官形态模型缺少生态环境、种植模式等模块,缺少农田生态系统中物质运移和能量交换模拟,因此,在对作物不同时期冠层空间结构中的叶片、茎秆和叶鞘等形态特征模拟时,模拟值与实测值存在

一定的误差,模型改进尚具有较大的空间。这说明,该模型并不具有很好的普适性,与作物生长实际状况存在一定偏差,但该模型对于探究作物发育过程中的变化规律,进一步建立动态的作物冠层三维结构模型,并融合作物水碳运移的动态生长模拟,进一步形成土壤-作物-大气系统水热碳氮过程的动态模拟,为最终实现作物动态生长发育过程的可视化奠定基础。

#### 4 结论

(1) 氮肥对玉米叶长的生长影响差异显著 ( $P < 0.01$ ) 而对叶宽、节长、节间直径和叶鞘长的影响差异均不显著;不同叶位对叶长的影响极显著 ( $P < 0.001$ ),对玉米其他器官的影响差异均不显著;各生育阶段对玉米叶长、叶宽、节长、节间直径的影响差异均不显著。叶片定形后最大叶长、叶宽、节长和节间直径随叶位的不同而变化,且呈现二次曲线的变化规律,玉米叶鞘定形后的最大叶鞘长度随叶位的不同而变化,且呈现三次函数的变化规律。

(2) 通过 2 年的田间试验对所构建的冠层结构模型进行了参数的率定和验证,结果表明,本模型对玉米各器官形态指标模拟的实测值与模拟值之间具有较好的一致性和符合度。本模型对于模拟玉米地上部形态特征具有较好的预测性和较强的解释性,能够为玉米器官形态结构特征的研究及其量化模拟提供理论基础与技术支撑。

#### 参 考 文 献

[1] 陈敏玲,张兵伟,任婷婷,等. 内蒙古半干旱草原土壤水分对降水格局变化的响应[J]. 植物生态学报,2016,40(7):658-668.  
CHEN Minling, ZHANG Bingwei, REN Tingting, et al. Responses of soil moisture to precipitation pattern change in semiarid grasslands in Nei Mongol, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(7): 658-668. (in Chinese)

[2] 李伟,白娥,李善龙,等. 施氮和降水格局改变对土壤 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 通量的影响[J]. 生态学杂志,2013,32(8):1947-1958.  
LI Wei, BAI Edith, LI Shanlong, et al. Effects of nitrogen addition and precipitation change on soil methane and carbon dioxide fluxes[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(8):1947-1958. (in Chinese)

[3] 张旺锋,王振林,余松烈,等. 种植密度对新疆高产棉花群体光合作用、冠层结构及产量形成的影响[J]. 植物生态学报,2004,28(2):164-171.  
ZHANG Wangfeng, WANG Zhenlin, YU Songlie, et al. Effects of plant density on canopy photosynthesis, canopy structure and yield formation of high-yield cotton[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2004, 28(2):164-171. (in Chinese)

[4] 王富贵,于晓芳,高聚林,等. 不同类型玉米品种冠层结构及其光合特性对深松增密的响应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47(2):33-44.  
WANG Fugui, YU Xiaofang, GAO Julin, et al. Response of canopy structure and photosynthetic characteristics of different maize varieties to subsoiling tillage and increasing density[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2019, 47(2):33-44. (in Chinese)

[5] 李少昆,王崇桃. 作物株型和冠层结构信息获取与表述的方法[J]. 石河子大学学报(自然科学版),1997,1(3):250-256.  
LI Shaokun, WANG Chongtao. The methods of obtaining and expressing information of crop plant shape and population structure[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 1997,1(3):250-256. (in Chinese)

[6] 陈根云,俞冠路,陈悦,等. 光合作用对光和二氧化碳响应的观测方法探讨[J]. 植物生理与分子生物学报,2006,32(6):691-696.  
CHEN Genyun, YU Guanlu, CHEN Yue, et al. Exploring the observation methods of photosynthetic responses to light and carbon dioxide[J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2006, 32(6):691-696. (in Chinese)

- [7] DUNCAN W G. A model for simulation photosynthesis in plant communities[J]. *Hilgardia*, 1967, 38(4): 1–32.
- [8] FEDDES R A. Simulation of field water use and crop yield[J]. *Soil Science*, 1978, 129(3): 193.
- [9] HIJMANS R J, GUIKING-IENS I M, Van DIEPEN C A. WOFOST 6.0: user's guide for the WOFOST 6.0 crop growth simulation model[J]. *Scan Dlo Winand Staring Centre*, 1994, 43(1): 145–152.
- [10] DIEPEN C A, WOLF J, KEULEN H. WOFOST: a simulation model of crop production[J]. *Soil Use and Management*, 2010, 5(1): 16–24.
- [11] PEAKE A S, ROBERTSON M J, BIDSTRUP R J. Optimising maize plant population and irrigation strategies on the Darling Downs using the APSIM crop simulation model[J]. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 2008, 48(1): 313–325.
- [12] BAILEY W G, DAVIES J A. The effect of uncertainty on aerodynamic resistance on evaporation model[J]. *Boundary Layer Meterol*, 1981, 20(2): 187–199.
- [13] GREYSON R I, WALDEN D B, SMITH W J. Leaf and stem heteroblasty in *Zea*[J]. *Botanical Gazette*, 1982, 143(1): 73–78.
- [14] HESKETH J D, WARRINGTON I J, REID J F, et al. The dynamics of corn canopy development: pytomer ontogeny[J]. *Biotronics*, 1988, 17: 69–77.
- [15] TOLLENAAR M, HUNTER R B. A photoperiod and temperature sensitive period for leaf number of maize[J]. *Crop Science*, 1983, 23: 457–460.
- [16] 杨恒山, 李莹莹, 徐寿军, 等. 玉米地上主要器官形态建成的动态模拟[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(2): 183–190.  
YANG Hengshan, LI Yingying, XU Shoujun, et al. Dynamic simulation of maize main organ morphogenesis[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(2): 183–190. (in Chinese)
- [17] 常丽英, 顾东祥, 张文宇, 等. 水稻叶片伸长过程的模拟模型[J]. *作物学报*, 2008, 34(2): 311–317.  
CHANG Liying, GU Dongxiang, ZHANG Wenyu, et al. A simulation model of leaf elongation process in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(2): 311–317. (in Chinese)
- [18] WATANABE T, HANANJ S, ROOM P M, et al. Rice morphogenesis and plant architecture: measurement, specification and the reconstruction of structural development by 3D architectural modelling[J]. *Annals of Botany*, 2005, 95(7): 1131–1143.
- [19] JONATHAN H, DAVID M, BRUNO A. Maximum likelihood inference and bootstrap methods for plant organ growth via multi-phase kinetic models and their application to maize[J]. *Annals of Botany*, 2005, 96(1): 137–148
- [20] POMMEL B, SOHBI Y, ANDRIEU B. Use of virtual 3D maize canopies to assess the effect of plot heterogeneity on radiation interception[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2001, 110(1): 55–67.
- [21] 郑文刚, 郭新宇, 赵春江, 等. 玉米叶片几何造型研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 152–154.  
ZHENG Wen'gang, GUO Xinyu, ZHAO Chunjiang, et al. Geometry modeling of the maize leaf canopy[J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(1): 152–154. (in Chinese)
- [22] 吕丽华, 赵明, 赵久然, 等. 不同施氮量下夏玉米冠层结构及光合特性的变化[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(9): 2624–2632.  
LÜ Lihua, ZHAO Ming, ZHAO Jiuran, et al. Canopy structure and photosynthesis of summer maize under different nitrogen fertilizer application rates[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(9): 2624–2632. (in Chinese)
- [23] 郭彩玲, 刘刚. 基于三维点云的苹果树冠层点-叶模型重建方法[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(4): 173–180.  
GUO Cailing, LIU Gang. Reconstruction method of apple tree canopy point-leaf model based on 3D point clouds[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(4): 173–180. (in Chinese)
- [24] 梁秀英, 周风燃, 陈欢, 等. 基于运动恢复结构的玉米植株三维重建与性状提取[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(6): 209–219.  
LIANG Xiying, ZHOU Fengran, CHEN Huan, et al. Three-dimensional maize plants reconstruction and traits extraction based on structure from motion[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(6): 209–219. (in Chinese)
- [25] 何萍, 金继运, 林葆. 氮肥用量对春玉米叶片衰老的影响及其机理研究[J]. *中国农业科学*, 1998, 31(3): 66–71.  
HE Ping, JIN Jiyun, LIN Bao. Effect of N application rates on leaf senescence and its mechanism in spring maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1998, 31(3): 66–71. (in Chinese)
- [26] 郭新宇, 赵春江, 刘洋, 等. 基于生长模型的玉米三维可视化研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(3): 121–125.  
GUO Xinyu, ZHAO Chunjiang, LIU Yang, et al. Three-dimensional visualization of maize based on growth models[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(3): 121–125. (in Chinese)
- [27] 高志英, 张兆沛, 樊蕾, 等. 光照强度和氮素水平对玉米生长发育, 光合生理及干物质积累的影响[J]. *云南农业大学学报(自然科学版)*, 2020, 35(2): 187–195.  
GAO Zhiying, ZHANG Zhaopei, FAN Lei, et al. Effects of light intensity and nitrogen level on the growth, photosynthetic physiology and dry matter accumulation of maize[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2020, 35(2): 187–195. (in Chinese)
- [28] 高飞, 王若水, 许华森, 等. 晋西黄土区水肥调控对苹果-玉米间作系统玉米灌浆期穗位叶光合生理特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(8): 2477–2490.  
GAO Fei, WANG Ruoshui, XU Huasen, et al. Effects of water and fertilizer coupling on photosynthetic characteristics of maize leaves in ear position at filling stage in an apple-maize intercropping system in Losses Plateau of west Shanxi Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(8): 2477–2490. (in Chinese)