

DOI: 10.5846/stxb201211291703

李刚,孙骞,于善祥,安东升,董永义,邹聪聪,杜文丛,张宁一,罗卫红.氮素对长江中下游温室切花百合外观品质影响的模拟研究.生态学报, 2014, 34(14): 4057-4070.

Li G, Sun Q, Yu S X, An D S, Dong Y Y, Zou C C, Du W C, Zhang N Y, Luo W H. Quantifying the effects of nitrogen on external quality of cut lily in greenhouse in the Yangtze River Delta. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(14): 4057-4070.

氮素对长江中下游温室切花百合外观品质影响的模拟研究

李 刚, 孙 骞, 于善祥, 安东升, 董永义, 邹聪聪, 杜文丛, 张宁一, 罗卫红*

(南京农业大学农学院, 南京 210095)

摘要:氮素是影响花卉生长与外观品质的重要营养元素。定量研究氮素对温室切花百合外观品质的影响,可为切花百合氮素管理提供决策支持。以百合‘索邦’和‘西伯利亚’为材料,根据不同定植期、生长中后期不同速效氮素水平处理试验,以冠层累积吸收辐射热(P_{TI})为发育尺度,以现蕾期叶片累积氮含量为植株氮素特征指标,定量分析氮素对切花百合外观品质指标(叶面积指数、株高、出叶数、第1花蕾长度与第1花蕾直径)和出花率的动态影响。在此基础上,建立氮素对切花百合外观品质影响的模拟模型,并用独立的试验数据对模型进行检验。结果表明,模型对叶面积指数、株高、出叶数、第1花蕾长度、第1花蕾直径、一级花、二级花、三级花和四级花的预测效果较好,预测值与实测值之间基于1:1线的决定系数(r^2)分别为0.92、0.85、0.86、0.91、0.88、0.88、0.88、0.91和0.91,相对回归估计标准误(rRMSE)分别为0.09、0.10、0.14、0.13、0.12、0.18、0.15、0.18和0.21。研究建立的模型为长江中下游地区温室切花百合生产中氮素的优化管理提供了模型工具,也为露地栽培切花百合生产中氮素的优化管理提供了参考。

关键词:百合;温室;叶片氮含量;外观品质;模型

Quantifying the effects of nitrogen on external quality of cut lily in greenhouse in the Yangtze River Delta

LI Gang, SUN Qian, YU Shanxiang, AN Dongsheng, DONG Yongyi, ZOU Congcong, DU Wencong, ZHANG Ningyi, LUO Weihong*

College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

Abstract: Nitrogen is one of the most important nutrient elements that affect the growth and external quality of flower crops. The aim of this study was to quantitatively investigate the impacts of nitrogen on external quality of cut lily, so as to optimize the nitrogen management for cut lily production in greenhouses. For this purpose, six experiments with different planting dates and levels of nitrogen treatment were conducted in greenhouses in Lianyungang (34°42' N, 119°30' E) and Nanjing (32°N, 118°E) from August 2008 to May 2011. The cultivar used in the experiments was *Lilium* spp. ‘Sorbonne’ and ‘Siberia’. Four levels of available nitrogen treatment (25 mg (N)/kg (soil), 45 mg (N)/kg (soil), 65 mg (N)/kg (soil) and 85 mg (N)/kg (soil)) were used in the nitrogen treatment experiments. The plot of an area of 0.8 m² for each nitrogen treatment with three replicas was arranged in a randomized block design. In all experiments, 3 plants of each plot (9 plants per nitrogen treatment) were randomly selected for non-destructive measurements once every 4 days after planting. The non-destructive measurements include plant height, leaf number, length of first flower bud and diameter of first flower

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31171453)

收稿日期:2012-11-29; 网络出版日期:2014-02-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lwh@njau.edu.cn

bud. Statistical information on the relative yield of different rank was also collected at harvest stage. Photosynthetically active radiation (PAR) and air temperature above the canopy inside the greenhouse were monitored automatically every 10 s, and 30 min averaged data were recorded using a datalogger (CR1000; Campbell Scientific Inc.). The integrated photo-thermal index, PTI, was used to describe the changes of the external quality traits (leaf area index, plant height, leaf number, length of first flower bud, diameter of first flower bud) and relative yield. Effects of the accumulated leaf nitrogen content (dry weight based) at flower bud showing stage on the dynamics of the external quality traits and the relative yield of different rank were quantified based on the experimental data. Based on these quantitative relationships, a model for predicting the effects of nitrogen on external quality of cut lily in greenhouse was developed. Independent experimental data were used to validate the model. The results showed that our model gave satisfactory predictions of external quality traits and the relative yield of different rank for cut lily grown in greenhouse. The coefficient of determination (r^2) and the relative root mean squared error (rRMSE) between the predicted and measured value of the cut lily were, respectively, 0.92 and 0.09 for leaf area index, 0.85 and 0.10 for plant height, 0.86 and 0.14 for leaf number, 0.91 and 0.13 for length of first flower bud, 0.88 and 0.12 for diameter of first flower bud, 0.88 and 0.18 for relative yield of rank one, 0.88 and 0.15 for relative yield of rank two, 0.91 and 0.18 for relative yield of rank three, and 0.91 and 0.21 for relative yield of rank four. The model developed in this study can be used for the optimization of nitrogen management for cut lily production in greenhouses, and provides reference approaches for the optimization of nitrogen management for cut lily production in open field in the Yangtze River delta.

Key Words: cut lily; greenhouse; leaf nitrogen content; external quality; model

百合 (*Lilium* spp.) 是目前世界上最受欢迎的切花之一。近年来我国切花百合产业发展迅速,但由于缺乏标准化栽培管理技术,温室切花百合产品质量普遍不高,严重影响生产企业的经济效益^[1]。温室作物与大田作物相比,茬数多,种植时间长,过量施用氮肥现象在温室栽培生产中十分严重^[2-3]。温室内土壤生态系统的特殊环境及失衡的氮肥管理,极易造成土壤盐分积累和盐害发生,严重地制约设施农业的发展^[4]。在温室切花生产过程中,过量施用氮肥还会严重降低切花品质,缩短瓶插寿命^[5-6]。因此,合理施用氮肥,提高氮素利用率,对提高温室切花外观品质 and 保护环境具有重要意义。

定量研究氮素对花卉外观品质的影响是花卉生产中进行氮素优化管理的重要前提。国内外已有的花卉外观品质模拟模型主要是基于光温的预测模型,如基于不同生长温度的长寿花外观品质预测模型^[7],基于辐热积的日光温室独本菊、一品红、郁金香、百合、多头切花菊、蝴蝶兰、大花蕙兰外观品质模拟模型^[8-14],基于相对热效应的春石斛兰外观品质模拟模型^[15]。这些模型为花卉外观品质的光温优化调控提供了有效的模型工具。关于营养元素对花卉外观品质影响的报道则较少。丁琪峰等^[16]建立

了氮素对日光温室独本菊品种‘神马’外观品质影响的模拟模型。康红梅等^[17]利用二次函数建立了氮素与切花月季外观品质的关系,用于预测切花月季外观品质。百合为球根花卉,养分吸收规律不同于宿根类或木本花卉^[18]。对于宿根花卉来说,定植后不断从土壤中吸收养分,维持其生长发育,直至成熟^[19-20]。而球根花卉在定植时鳞茎已储存了大量营养物质,可作为初期生长主要的养分来源;中后期主要依靠茎生根吸收养分供地上部分生长和花器官发育,此时氮素对植株地上部分的生长作用最敏感,土壤中氮素不足或过量会降低切花外观品质,甚至出现盲花^[21-22]。目前,有关氮素对球根花卉外观品质影响的模拟研究鲜有报道。

本研究针对球根花卉中后期才依靠茎生根吸收养分供植株生长的特点,以切花百合‘索邦’和‘西伯利亚’为试验材料,通过温室内不同定植期、生长中后期不同速效氮素水平的栽培试验,定量分析氮素对切花百合外观品质指标的动态影响,建立氮素对切花百合外观品质影响的模拟模型,以期对长江中下游地区温室切花百合生产中的氮素优化和标准化管理提供理论依据和决策支持。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2008 年 8 月至 2011 年 5 月在连云港岗埠农场日光温室和南京市农业科学研究所连栋温室内进行。共 6 个试验,其中试验 1 和试验 2 为无氮素处理试验,试验 3、4、5 和试验 6 为氮素处理试验。各试验定植时土壤或基质的营养状况见表 1。

试验 1 于 2008 年 8 月 28 日在连云港岗埠农场日光温室内进行。温室东西走向,长 70 m,跨度 10.5 m,脊高 3 m,后墙高 2.8 m。前屋面为竹架结构,覆盖无滴聚氯乙烯薄膜,夏季外覆遮阳网降温,冬季每天 16:00 至次日 8:00 采用长 10 m、宽 1.2 m、厚 0.05 m 的草帘保温。供试品种为‘索邦’(*Lilium* spp. ‘Sorbonne’)和‘西伯利亚’(*Lilium* spp. ‘Siberia’),系从荷兰进口经过 5 °C 春化处理种球,周径为 0.14—0.16 m。采用土栽方式种植,密度为 36 株/m²。小区面积 8 m²,3 个重复。采收期:索邦为 2008 年 12 月 8 日,西伯利亚为 2008 年 12 月 30 日。

试验 2 于 2009 年 3 月 26 日在南京市农业科学研究所连栋温室内进行。温室东西走向,长 28 m,沿南北方向分为 2 跨,每跨跨度 8 m,檐高 3 m,拱高 5 m。栽植床长 25 m,宽 1.7 m,高 1 m。冬季温室内加一层塑料薄膜保温,并通过鼓风机加温;夏季外覆遮阳网,湿帘、风机降温。供试品种为‘索邦’(*Lilium* spp. ‘Sorbonne’)。采用基质盆栽,每盆种植 1 个种

球,摆放密度为 36 株/m²。小区面积为 0.8 m²,3 个重复。基质体积配比为园土:草炭:河沙 = 1:1:2。花盆盆口直径 0.18 m,盆底直径 0.12 m,盆高 0.14 m。采收期为 2009 年 6 月 25 日。

氮素处理试验(试验 3、4、5 和试验 6)在连栋温室内进行。供试品种为‘索邦’(*Lilium* spp. ‘Sorbonne’),采用基质盆栽,基质体积配比为园土:草炭:河沙 = 1:1:3。设 4 个氮素水平,即通过施入尿素,使基质中速效氮含量分别为 25、45、65、85 mg (N)/kg (土壤)。每处理 3 个重复,共 12 个小区,小区面积为 0.8 m²,随机区组设计。氮肥分 3 次施入,施肥量分别为总量的 40%、30% 和 30%。

试验 3 于 2009 年 9 月 27 日定植,2010 年 1 月 22 日采收。施肥日期分别为:2009 年 10 月 18 日、2009 年 11 月 5 日、2009 年 12 月 20 日。

试验 4 于 2009 年 11 月 29 日定植,2010 年 4 月 25 日采收。施肥日期分别为 2010 年 1 月 12 日、2010 年 2 月 5 日、2010 年 3 月 17 日。

试验 5 于 2010 年 9 月 9 日定植,2011 年 1 月 2 日采收。施肥日期分别为 2010 年 10 月 21 日、2010 年 11 月 16 日、2010 年 12 月 14 日。

试验 6 于 2010 年 12 月 5 日定植,2011 年 5 月 2 日采收。施肥日期分别为 2011 年 2 月 9 日、2011 年 3 月 4 日、2011 年 4 月 1 日。

试验 3 的数据用于建立模型,试验 1、2、4、5 和试验 6 的数据用于检验模型。

表 1 供试基质的营养状况

Table 1 Nutrient content of the experimental substrate

试验 Exp No.	全氮 Total N /%	有机质 Organic C /%	速效氮 Available N /(mg/kg)	速效磷 Available P /(mg/kg)	速效钾 Available K /(mg/kg)	容重 Bulk density /(mg/m ³)	土壤盐分 EC /(mS/m)	pH
试验 1	0.05	2.98	100.43	21.94	69.54	1.06×10 ⁶	134	7.21
试验 2	0.04	2.32	80.21	17.63	43.42	1.06×10 ⁶	25	7.08
试验 3, 4	0.03	2.08	10.10	15.75	36.97	1.08×10 ⁶	18	6.22
试验 5, 6	0.02	2.24	9.67	11.42	40.38	1.12×10 ⁶	20	6.01

1.2 作物数据的获取

1.2.1 外观品质观测

试验期间每天观测切花百合生长发育动态,并记录到达各生育期的起始日期。从展叶开时,每处理各重复分别选取 3 株长势一致的植株(各处理 9 株)挂牌进行定株观测,每隔 4 d 测量 1 次。项目包

括株高、叶片长度、出叶数。现蕾后测定第 1 花蕾长度和第 1 花蕾直径(花蕾中部最大直径)。

1.2.2 化学分析及当季供氮量的计算

土壤与植株的取样及化学分析和当季土壤供氮量(速效氮)的计算参见文献^[23]。本研究以当季土壤供氮量(kg/hm²)作为供氮水平指标来探讨氮素对

切花百合外观品质指标的影响。

1.2.3 温室环境数据的采集

温室环境数据由数据采集器(CR1000, Campbell Scientific Inc., USA)自动采集。采集项目包括温室内切花百合冠层上方距离地面 1.5 m 高处的光合有效辐射(PAR)、空气温度及土壤温度。采集频率为

每 60 秒一次,存储 30 min 的平均值。

试验期间温室内空气温度、光照及土壤温度如图 1 所示(以试验 2、3 和试验 4 为例)。从图 1 可以看出,定植后,切花百合所遇到的温室内光温条件及土壤温度不同试验期间存在差异。

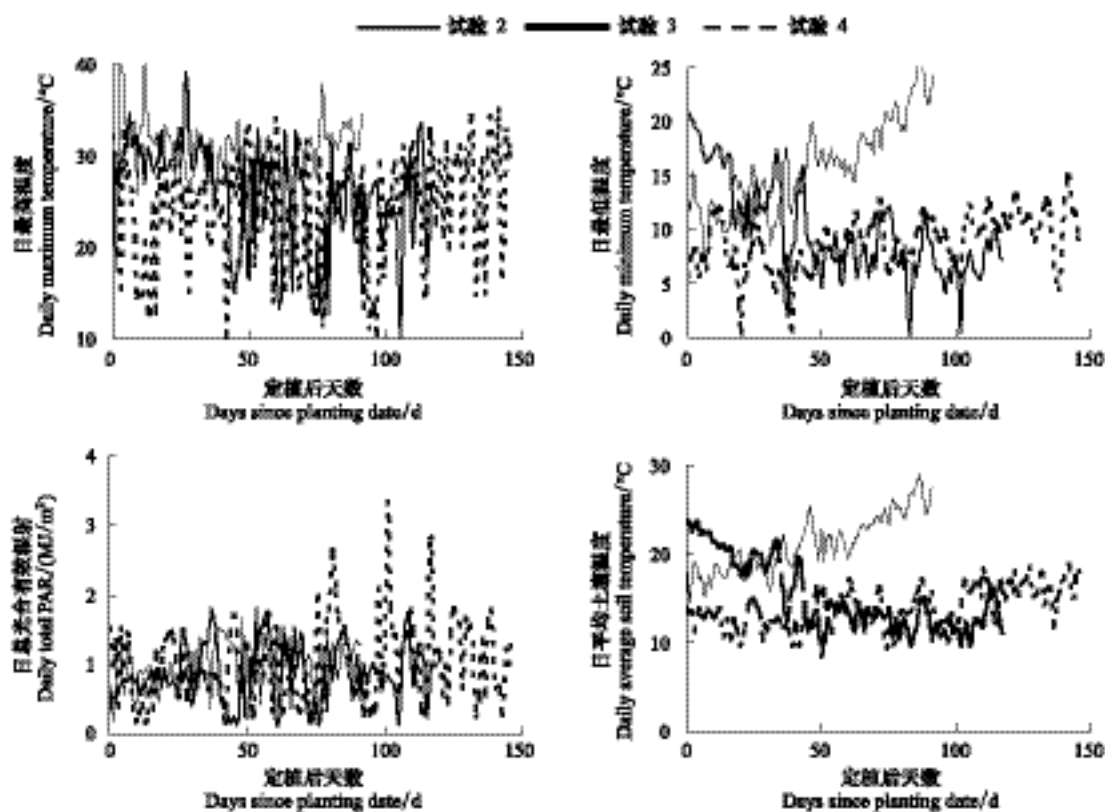


图 1 定植后温室内日最高温度、日最低温度和、总光合有效辐射和日平均土壤温度

Fig.1 Daily maximum temperature, minimum temperature, daily total photosynthetically active radiation and daily average soil temperature since planting date

1.2.4 叶面积指数计算

根据百合叶片叶面积与叶长的关系计算各氮素处理的单株叶面积,进一步计算叶面积指数。具体计算公式如下:

$$LA = k \times LL^2 \quad (1)$$

$$LAI = \sum LA \times d \quad (2)$$

式中, LL (leaf length) 为叶片长度(m), k 为经验系数,其值为 0.189^[24], LA (leaf area) 为单叶叶面积(m^2), d 为定植密度(株/ m^2), LAI (leaf area index) 为叶面积指数(m^2/m^2)。

1.2.5 出花率的统计

出花率是指采收时切花百合外观品质达到某等级标准的植株数占总植株数的比例。具体做法是:

采收时(第 1 花蕾开始露色但还未展开),参照百合质量分级标准(GB/T18247.1—2000)^[25]和《百合商品切花生产技术规程》^[26],明确了切花百合的分级标准(表 2),统计各处理中达到各等级切花标准的植株数,从而计算出各级切花的出花率,以此研究氮素水平对温室切花百合外观品质的影响。

2 模型的建立

2.1 外观品质指标的动态模拟

根据试验 3 的数据,采用冠层累积吸收辐射热积(PTI)^[27]作为预测指标,各氮素处理叶面积指数、出叶数、株高、第 1 花蕾长度和第 1 花蕾直径(图 2)随生育期的变化分别用公式(3)—(7)描述。

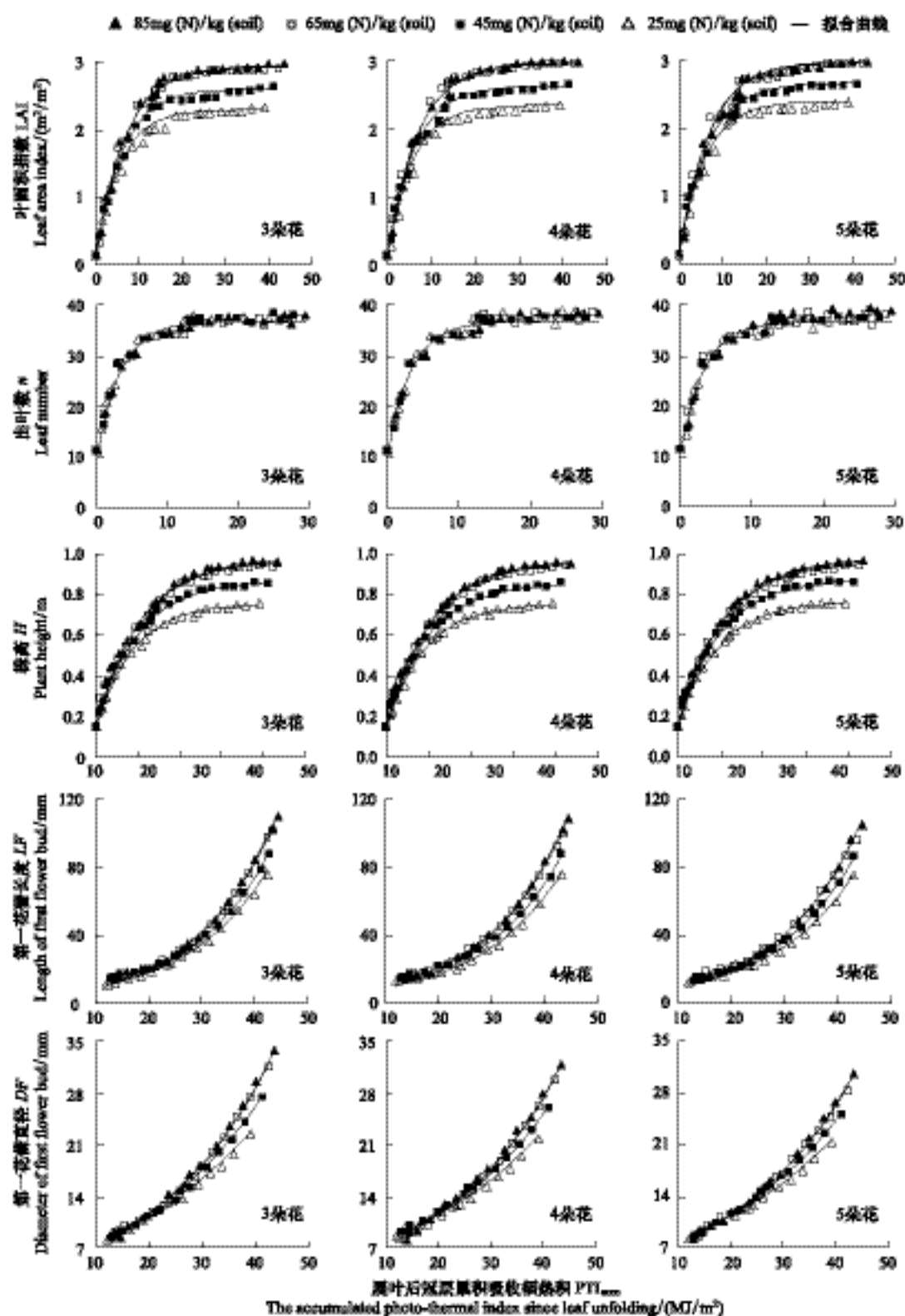


图2 不同氮水平下切花百合叶面积指数(LAI)、出叶数(n)、株高(H)、第1花蕾长度(LF)和第1花蕾直径(DF)与展叶后冠层累积吸收辐射热的关系

Fig.2 Relationship between leaf area index (LAI), leaf number (n), plant height (H), length of first flower bud (LF) and diameter of first flower bud (DF) of cut lily and the accumulated photo-thermal index since leaf unfolding (PTI_{sum}) under different nitrogen supply conditions

表 2 切花百合分级标准

Table 2 Ranking standards of cut lily

分级 Rank	切花枝长/m Stem height	第 1 花蕾长度/mm Length of first flower bud	第 1 花蕾直径/mm Diameter of first flower bud	花朵数 Flower number	叶片 Leaves
一级 Rank one	≥ 0.8	≥ 95	≥ 30.2	≥ 4	允许 2 片叶有轻微不足
二级 Rank two	≥ 0.7	≥ 85	≥ 28.6	≥ 3	允许 2 片叶有明显缺陷
三级 Rank three	≥ 0.6	≥ 75	≥ 25.4	≥ 2	允许 4 片有明显缺陷
四级 Rank four	< 0.6	< 75	≥ 22.2	≥ 1	超过 4 片以上有明显缺陷

$$LAI = LAI_0 + LAI_1 \times (1 - \exp(\frac{-r_{LAI} \times PTI_{sum}}{LAI_1}))$$
 (3)

$$n = n_0 + n_1 \times (1 - \exp(\frac{-r_n \times PTI_{sum}}{n_1}))$$
 (4)

$$H = H_0 + H_1 \times (1 - \exp(\frac{-r_H \times PTI_{sum}}{H_1}))$$
 (5)

$$LF = LF_0 \times \exp(r_{LF} \times (PTI_{sum} - PTI_b))$$
 (6)

$$DF = DF_0 \times \exp(r_{DF} \times (PTI_{sum} - PTI_b))$$
 (7)

式中, LAI、n、H、LF 和 DF 分别为叶面积指数(m²/m²)、出叶数、株高(m)、第 1 花蕾长度(mm)和第 1 花蕾直径(mm)。LAI₀、n₀、H₀、LF₀和 DF₀分别为展叶后开始定株测定时的叶面积指数、出叶数、株高、第 1 花蕾长度和第 1 花蕾直径(由试验 3 的数据分别定为 0.1 m²/m²、10、0.15 m、10 mm 和 8 mm), LAI₁、n₁和 H₁为展叶后叶面积指数、出叶数和株高的

增长量。r_{LAI}、r_n、r_H、r_{LF}和 r_{DF}分别为叶面积指数增加速率((m²/m²)(MJ/m²))、出叶数增加速率、株高增加速率(m MJ⁻¹ m⁻²)、第 1 花蕾长度增加速率(mm MJ⁻¹ m⁻²)和第 1 花蕾直径增加速率(mm MJ⁻¹ m⁻²)。PTI_{sum}和 PTI_b分别为展叶后冠层累积吸收辐热积(MJ/m²)和从展叶到现蕾冠层累积吸收辐热积(MJ/m²)。3、4、5 朵花的外观品质指标均采用上面的公式进行量化。

2.2 氮素对外观品质指标参数的模拟

各氮素处理在展叶期、现蕾期、采收期的叶片累积氮含量与土壤供氮量(速效氮)的关系如图 3 所示。叶片累积氮含量随生育期的进行先增大后减小,最大值出现在现蕾期。因此,本研究采用切花百合现蕾期的叶片累积氮含量作为营养指标来量化氮素对切花百合外观品质的影响。现蕾期叶片累积氮含量与当季土壤供氮量及当季土壤平均温度有关(图 3),可用公式(8)–(9)表示。

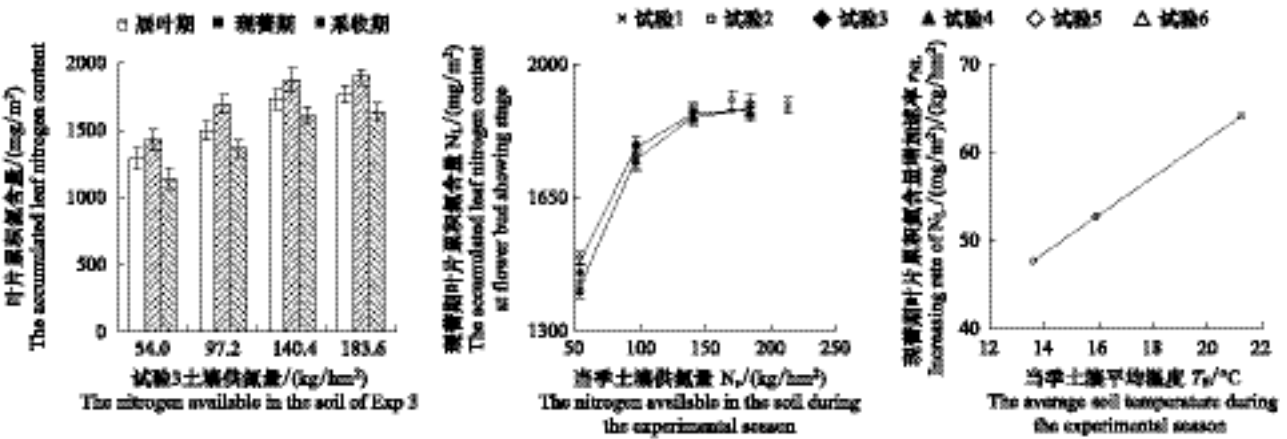


图 3 试验 3 不同生长阶段的叶片累积氮含量与当季土壤供氮量及现蕾期叶片累积氮含量(N_L)与当季土壤供氮量(N_s)及土壤平均温度(T_s)的关系

Fig.3 Relationship between accumulated leaf nitrogen content of different development stages and nitrogen available in the soil of Experiment 3 and between the accumulated leaf nitrogen content at flower bud showing stage and the nitrogen available in the soil and the average soil temperature during the experimental season

$$N_L = N_{LC} \times (1 - \exp(-r_{NL} \times N_S / N_{LC})) \quad (8)$$

$$r_{NL} = 2.2 \times T_s + 18.1 \quad (9)$$

式中, N_L 为现蕾期叶片累积氮含量 (mg/m^2), N_{LC} 为现蕾期叶片累积氮含量临界值 (mg/m^2), 根据试验 3 的观测数据定为 $1.87 \times 10^3 \text{ mg}/\text{m}^2$, N_S 为当季土壤供氮量 (kg/hm^2), r_{NL} 为现蕾期叶片累积氮含量增加速率 ($(\text{mg}/\text{m}^2)/(\text{kg}/\text{hm}^2)$), T_s 为当季土壤平均温度 ($^{\circ}\text{C}$)

根据试验 3 的数据, 公式 (3) — (7) 中参数 n_1 (图 4)、 r_n 受现蕾期叶片累积氮含量影响较小, 而参数 LAI_1 、 r_{LAI} 、 H_1 、 r_H 、 r_{LF} 、 r_{DF} 和 PTI_b 与现蕾期叶片累积氮含量有关, 分别用公式 (10) — (16) 对相关数据进行曲线拟合建立各参数与现蕾期叶片累积氮含量的关系。

$$\text{LAI}_1 = \begin{cases} \text{LAI}_1(0) & N_L \geq N_{LC} \\ \text{LAI}_1(0) \times (1 - r_1 \times (N_{LC} - N_L)) & N_L < N_{LC} \end{cases} \quad (10)$$

$$r_{\text{LAI}} = \begin{cases} r_{\text{LAI}}(0) & N_L \geq N_{LC} \\ r_{\text{LAI}}(0) \times (1 - r_2 \times (N_{LC} - N_L)) & N_L < N_{LC} \end{cases} \quad (11)$$

$$H_1 = \begin{cases} H_1(0) & N_L \geq N_{LC} \\ H_1(0) \times (1 - r_3 \times (N_{LC} - N_L)) & N_L < N_{LC} \end{cases} \quad (12)$$

$$r_H = \begin{cases} r_H(0) & N_L \geq N_{LC} \\ r_H(0) \times (1 - r_4 \times (N_{LC} - N_L)) & N_L < N_{LC} \end{cases} \quad (13)$$

$$r_{LF} = \begin{cases} r_{LF}(0) & N_L \geq N_{LC} \\ r_{LF}(0) \times (1 - r_5 \times (N_{LC} - N_L)) & N_L < N_{LC} \end{cases} \quad (14)$$

$$r_{DF} = \begin{cases} r_{DF}(0) & N_L \geq N_{LC} \\ r_{DF}(0) \times (1 - r_6 \times (N_{LC} - N_L)) & N_L < N_{LC} \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{PTI}_b = \begin{cases} \text{PTI}_b(0) & N_L \geq N_{LC} \\ \text{PTI}_b(0) \times (1 - r_7 \times (N_{LC} - N_L)) & N_L < N_{LC} \end{cases} \quad (16)$$

式中, 参数 $\text{LAI}_1(0)$ 、 $r_{\text{LAI}}(0)$ 、 $H_1(0)$ 、 $r_H(0)$ 、 $r_{LF}(0)$ 、 $r_{DF}(0)$ 和 $\text{PTI}_b(0)$ (the value of LAI_1 , r_{LAI} , H_1 , r_H , r_{LF} , r_{DF} , PTI_b under ample nitrogen supply condition) 分别为无氮胁迫条件下展叶后叶面积指数增长量 (m^2/m^2)、叶面积指数增加速率 ($(\text{m}^2/\text{m}^2) \text{ MJ}^{-1} \text{ m}^{-2}$)、株高增长量 (m)、株高增加速率 ($\text{m MJ}^{-1} \text{ m}^{-2}$)、第 1 花蕾长度增加速率 ($\text{mm MJ}^{-1} \text{ m}^{-2}$)、第 1 花蕾直径增加速率 ($\text{mm MJ}^{-1} \text{ m}^{-2}$) 和从展叶到现蕾的冠层累积吸收辐射热 (MJ/m^2)。 $r_1 - r_7$ 分别为 LAI_1 、 r_{LAI} 、 H_1 、 r_H 、 r_{LF} 、 r_{DF} 和 PTI_b 随叶片累积氮含量的增加速率。具体值见表 3。其中第 1 花蕾长度相关参数 ($r_{LF}(0)$ 、 r_5) 和第 1 花蕾直径相关参数 ($r_{DF}(0)$ 、 r_6) 随花朵数的改变而改变 (图 5), 其拟合公式 (17) — (20) 如下:

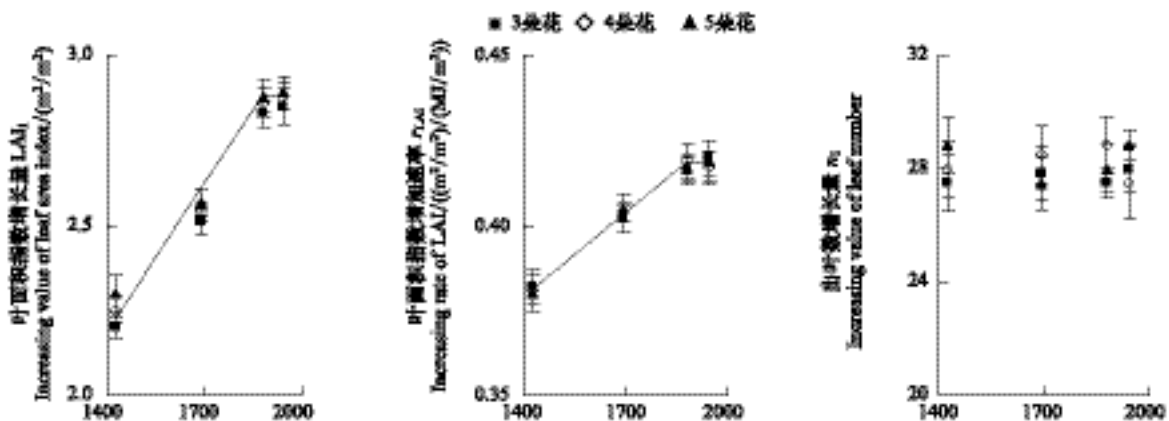
$$r_{LF}(0) = 0.0712 - 0.0007F_n \quad (17)$$

$$r_5 = 151.7 \times 10^{-6} - 4.5 \times 10^{-6}F_n \quad (18)$$

$$r_{DF}(0) = 0.0493 - 0.0015F_n \quad (19)$$

$$r_6 = 576.7 \times 10^{-6} - 20 \times 10^{-6}F_n \quad (20)$$

式中, F_n 为花朵数。



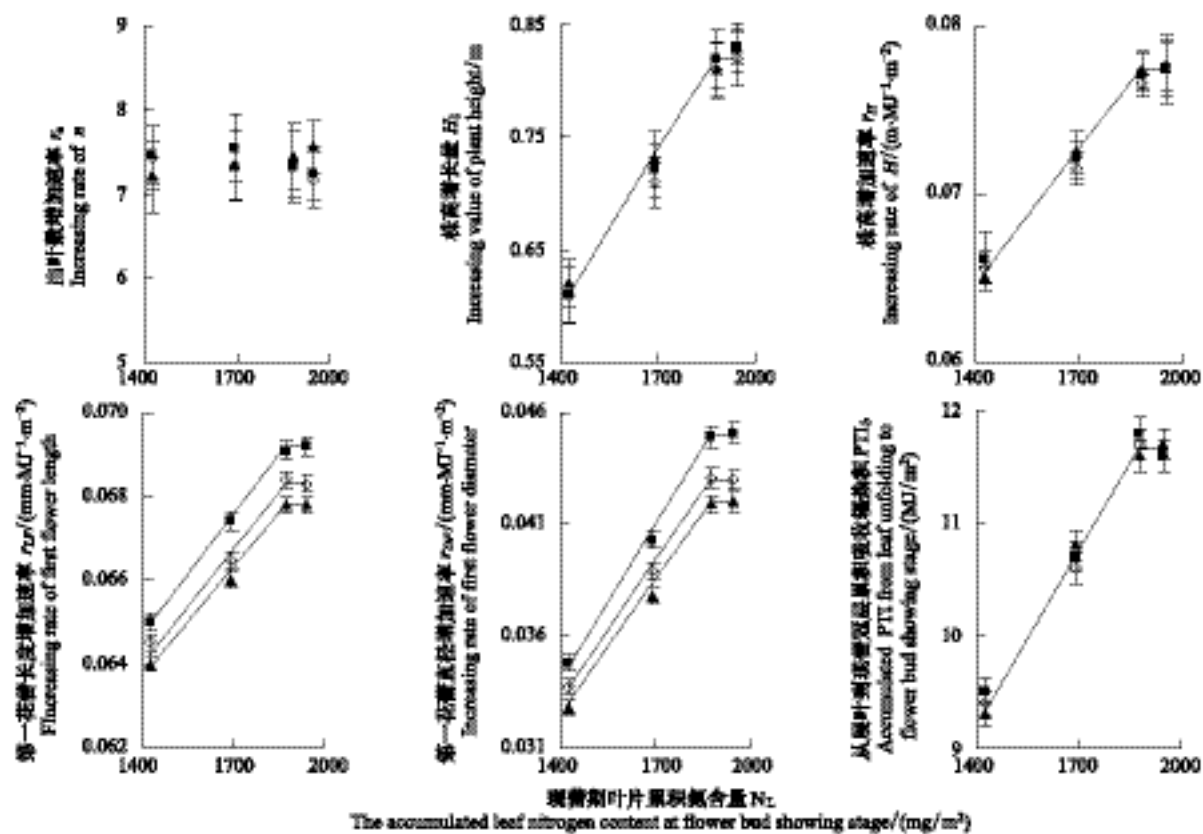


图 4 切花百合叶面积指数增长量(LAI₁)、叶面积指数增加速率(r_{LAI})、出叶数增长量(n_1)、出叶速率(r_n)、株高增长量(H_1)、株高增加速率(r_H)、第 1 花蕾长度增加速率(r_{LF})、第 1 花蕾直径增加速率(r_{DF})和从展叶到现蕾冠层累积吸收辐射热积(PTI_b)与现蕾期叶片累积氮含量(N_L)的关系

Fig.4 Relationship between increasing value of leaf area index LAI₁, increasing rate of leaf area index (r_{LAI}), increasing value of leaf number (n_1), increasing rate of leaf number (r_n), increasing value of plant height (H_1), increasing rate of plant height (r_H), increasing rate of first flower bud length (r_{LF}), increasing rate of first flower bud diameter (r_{DF}), accumulated PTI from leaf unfolding to flower bud showing stage (PTI_b) and the accumulated leaf nitrogen content at flower bud showing stage

表 3 根据试验 3 的观测数据确定的模型参数值

Table 3 List of parameters values determined by measured data of Experiment 3

花朵数 F_n Flower number	$LAI_1(0)$	$r_{LAI}(0)$	n_1 Increasing value of leaf number	r_n Increasing rate of leaf number	$H_1(0)$
	Value of LAI_1	Value of r_{LAI}			Value of H_1
	under ample nitrogen supply condition $\diagup(m^2/m^2)$	under ample nitrogen supply condition $\diagup((m^2/m^2)/(MJ/m^2))$			under ample nitrogen supply condition $\diagup m$
3	2.84 (0.05)	0.418 (0.005)	28 (0.8)	7.89 (0.32)	0.83 (0.02)
4	2.87 (0.04)	0.417 (0.005)	27 (1.2)	7.93 (0.34)	0.82 (0.02)
5	2.88 (0.05)	0.418 (0.005)	27 (0.5)	7.90 (0.32)	0.82 (0.02)
花朵数 F_n Flower number	$r_H(0)$	$r_{LF}(0)$	$r_{DF}(0)$	$PTI_b(0)$	r_1
	Value of r_H	Value of r_{LF}	Value of r_{DF}	Value of PTI_b	Increasing rate of r_{LAI}
	under ample nitrogen supply condition $\diagup(m MJ^{-1} m^{-2})$	under ample nitrogen supply condition $\diagup(mm MJ^{-1} m^{-2})$	under ample nitrogen supply condition $\diagup(mm MJ^{-1} m^{-2})$	under ample nitrogen supply condition $\diagup(MJ/m^2)$	$\diagup((m^2/m^2)/(mg/m^2))$
3	0.0774 (0.002)	0.0692 (0.0002)	0.045 (0.0005)	11.6 (0.15)	5.06×10^{-3}
4	0.0776 (0.002)	0.0683 (0.0002)	0.043 (0.0004)	11.6 (0.15)	5.06×10^{-3}
5	0.0773 (0.003)	0.0678 (0.0002)	0.042 (0.0004)	11.7 (0.15)	5.06×10^{-3}

续表

花朵数 F_n Flower number	r_2 Increasing rate of r_{LAI} /((m^2/m^2) /(MJ/m^2) /(mg/m^2))	r_3 Increasing rate of H_1 $mg^{-1} m^{-2}$)	r_4 Increasing rate of r_H /($(m MJ^{-1} m^{-2})$ /(mg/m^2))	r_5 Increasing rate of r_{LF} /($(mm MJ^{-1} m^{-2})$ /(mg/m^2))	r_6 Increasing rate of r_{DF} /($(mm MJ^{-1} m^{-2})$ /(mg/m^2))	r_7 Increasing rate of PTI_b /(MJ/m^2) /(mg/m^2))
3	1.98×10^{-3}	0.58×10^{-3}	0.35×10^{-3}	0.138×10^{-3}	0.40×10^{-3}	0.45×10^{-3}
4	1.98×10^{-3}	0.58×10^{-3}	0.35×10^{-3}	0.134×10^{-3}	0.38×10^{-3}	0.45×10^{-3}
5	1.98×10^{-3}	0.58×10^{-3}	0.35×10^{-3}	0.129×10^{-3}	0.37×10^{-3}	0.45×10^{-3}

$LAI_1(0)$ 、 $r_{LAI}(0)$ 、 $H_1(0)$ 、 $r_H(0)$ 、 $r_{LF}(0)$ 和 $r_{DF}(0)$:无氮胁迫条件下展叶后叶面积指数增长量(m^2/m^2)、叶面积指数增加速率($(m^2/m^2)/(MJ m^{-2})$)、株高增长量(m)、株高增加速率($m MJ^{-1} m^{-2}$)、第1花蕾长度增加速率($mm MJ^{-1} m^{-2}$)、第1花蕾直径增加速率($mm MJ^{-1} m^{-2}$)和从展叶到现蕾的冠层累积吸收辐射热(MJ/m^2); n_1 、 r_n :出叶数增长量和出叶数增加速率; r_1 — r_7 : LAI_1 、 r_{LAI} 、 H_1 、 r_H 、 r_{LF} 、 r_{DF} 和 PTI_b 随叶片累积氮含量的增加速率; r_1 — r_7 : LAI_1 、 r_{LAI} 、 H_1 、 r_H 、 r_{LF} 、 r_{DF} 和 PTI_b 随叶片累积氮含量的增加速率

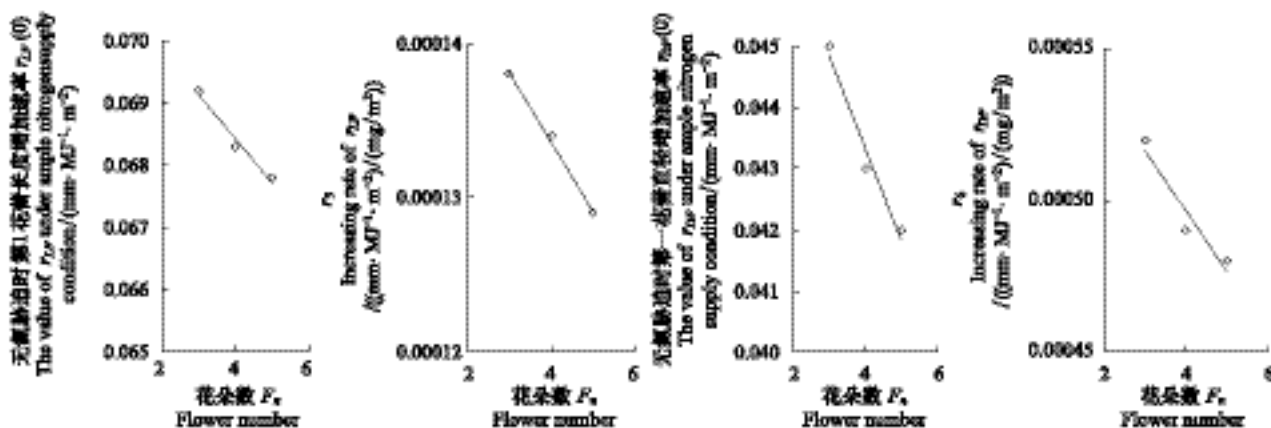


图5 无氮胁迫时第1花蕾长度增加速率($r_{LF}(0)$)、 r_{LF} 增加速率(r_5)、第1花蕾直径增加速率($r_{DF}(0)$)和 r_{DF} 增加速率(r_6)与花朵数(F_n)的关系

Fig.5 Relationship between the value of r_{LF} under ample nitrogen supply condition, increasing rate of r_{LF} , the value of r_{DF} under ample nitrogen supply condition, increasing rate of r_{DF} and flower number

2.3 出花率的模拟

不同氮素处理切花百合采收时统计的各级出花率(一级、二级、三级和四级)与现蕾后冠层累积吸收

辐射热的关系如图6,分别利用公式(21)–(25)拟合各出花率与氮素之间的关系。

$$R_1 = \begin{cases} R_1(0) & PTI_a \geq PTI_a(0) \\ R_1(0) \times (1 - r_8 \times (PTI_a(0) - PTI_a)) & PTI_a < PTI_a(0) \end{cases} \quad (21)$$

$$R_2 = \begin{cases} R_2(0) & PTI_a \geq PTI_a(0) \\ R_2(0) \times (1 - r_9 \times (PTI_a(0) - PTI_a)) & PTI_a < PTI_a(0) \end{cases} \quad (22)$$

$$R_3 = \begin{cases} R_3(0) & PTI_a \geq PTI_a(0) \\ R_3(0) \times (1 + r_{10} \times (PTI_a(0) - PTI_a)) & PTI_a < PTI_a(0) \end{cases} \quad (23)$$

$$R_4 = 1 - R_1 - R_2 - R_3 \quad (24)$$

$$PTI_a = \begin{cases} PTI_a(0) & N_L \geq N_{LC} \\ PTI_a(0) \times (1 - r_{11} \times (N_{LC} - N_L)) & N_L < N_{LC} \end{cases} \quad (25)$$

式中, R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 分别为一级、二级、三级和四级切花百合的出花率(%), $R_1(0)$ 、 $R_2(0)$ 、 $R_3(0)$ 和

$R_4(0)$ 分别为无氮素胁迫时切花百合一级、二级、三级和四级的出花率,由试验3的数据确定为53%、

26%、12%和9%, r_8 、 r_9 和 r_{10} 分别为一级、二级和三级切花的出花率随现蕾后冠层累积吸收辐射热的增加速率,由试验3的数据确定为0.44、0.31和1.16, PTI_a 为无氮素胁迫时现蕾后冠层累积吸收辐射热

(MJ/m^2), PTI_a 为不同氮素处理现蕾后冠层累积吸收辐射热(MJ/m^2)。 r_{11} 为现蕾后冠层累积吸收辐射热随叶片累积氮含量的增加速率,由试验3的数据确定为 $0.166 \times 10^{-3} (\text{MJ}/\text{m}^2)/(\text{mg}/\text{m}^2)$ 。

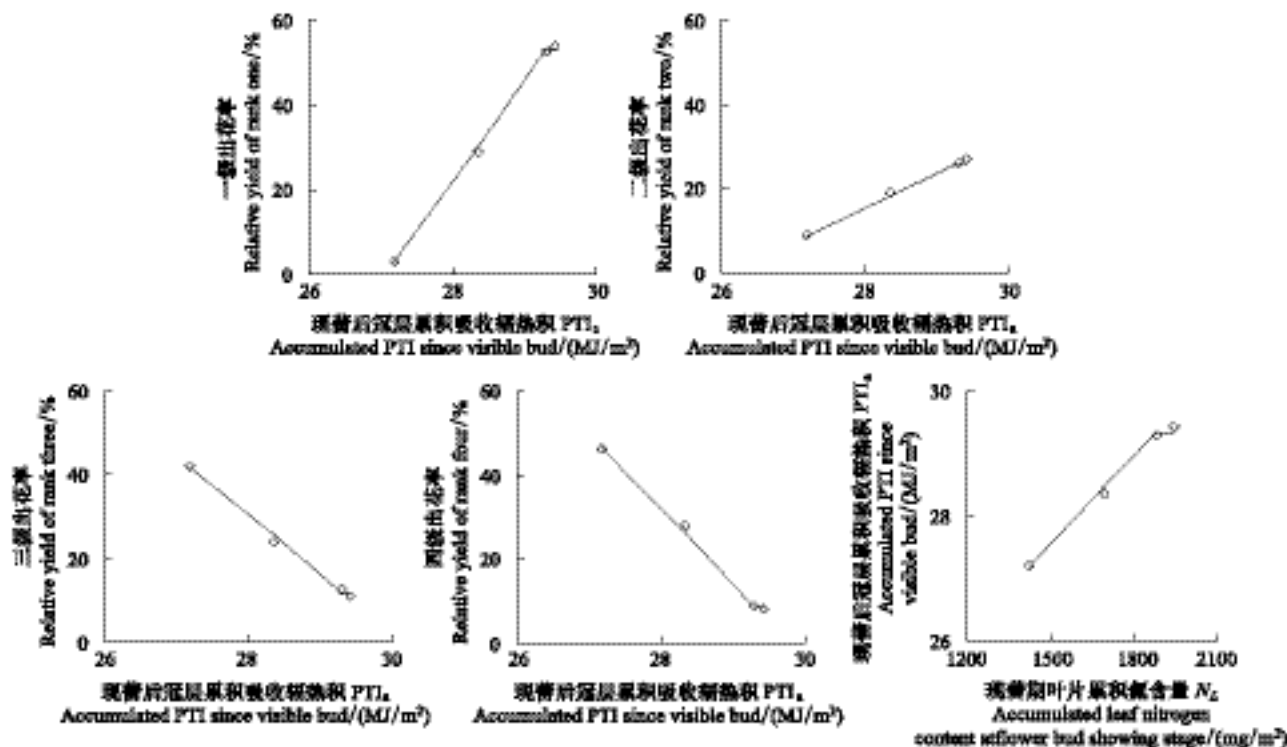


图6 切花百合采收时出花率和现蕾后冠层累积吸收辐射热的关系及现蕾后冠层累积吸收辐射热(PTI_a)和叶片累积氮含量(N_L)的关系

Fig.6 Effects of different nitrogen supply on relative yield of different rank and accumulated PTI since visible bud

2.4 模型检验方法

采用预测值与观测值之间的决定系数(r^2)和相对回归估计标准误(rRMSE)对模型进行检验。其中, r^2 用于分析符合度,rRMSE用于评价精确度。其计算公式(26)–(27)如下:

$$r^2 = \frac{(\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y}))^2}{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2} \quad (26)$$

$$\text{rRMSE} = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - y)^2}{a}} \quad (27)$$

式中, x 为实测值, y 为预测值, $\bar{x}$ 为实测平均值, $\bar{y}$ 为预测平均值, a 为样本容量。

3 结果与分析

采用与建模数据相独立的试验数据(试验1、2、4、5和试验6)按照公式(1)–(20)计算出各氮素水平处理的叶面积指数、株高、出叶数、第1花蕾长度

和第1花蕾直径的预测值(图7)。预测值与实测值之间基于1:1线的决定系数(r^2)分别为0.92、0.85、0.86、0.91和0.88,相对回归估计标准误(rRMSE)分别为0.09、0.10、0.14、0.13和0.12。模型对一级、二级、三级和四级切花的预测值与实测值之间的 r^2 分别为0.88、0.88、0.91和0.91,rRMSE分别为0.18、0.15、0.18和0.21。本研究建立的模型对温室切花百合外观品质指标的预测较为准确。

从图2、图4和图6可以看出,随着现蕾期叶片累积氮含量的增加,叶面积指数增加速率、株高增加速率、第1花蕾长度增加速率、第1花蕾直径增加速率均增大。当现蕾期叶片累积氮含量超过 $1.87 \times 10^3 \text{ mg}/\text{m}^2$ (即叶片氮浓度占叶干重的百分比为5.4%时),株高增加速率、第1花蕾长度增加速率和第1花蕾直径增加速率趋于稳定。因此, $1.87 \times 10^3 \text{ mg}/\text{m}^2$ 可以作为长江中下游地区温室切花百合生产中的氮素管理指标。在现蕾期,当叶片累积氮含量达到

$1.87 \times 10^3 \text{ mg/m}^2$ 时,秋季定植(试验 1、3 和 5,9 月份定植)的土壤当季供氮量约为 140.4 kg/hm^2 (土壤氮浓度为 65 mg/kg),冬季定植(试验 4 和 6,12 月定植)的当季土壤供氮量约为 146.6 kg/hm^2 (土壤氮浓度为 67.9 mg/kg),春季定植(试验 2,3 月份定植)的

土壤当季供氮量要低于 140.4 kg/hm^2 (图 3B)。这可能是由于不同定植期的光温条件不同(图 1),造成土壤温度不同(图 1),土壤温度通过影响氮素的吸收和利用,进而影响叶片的累积氮含量。

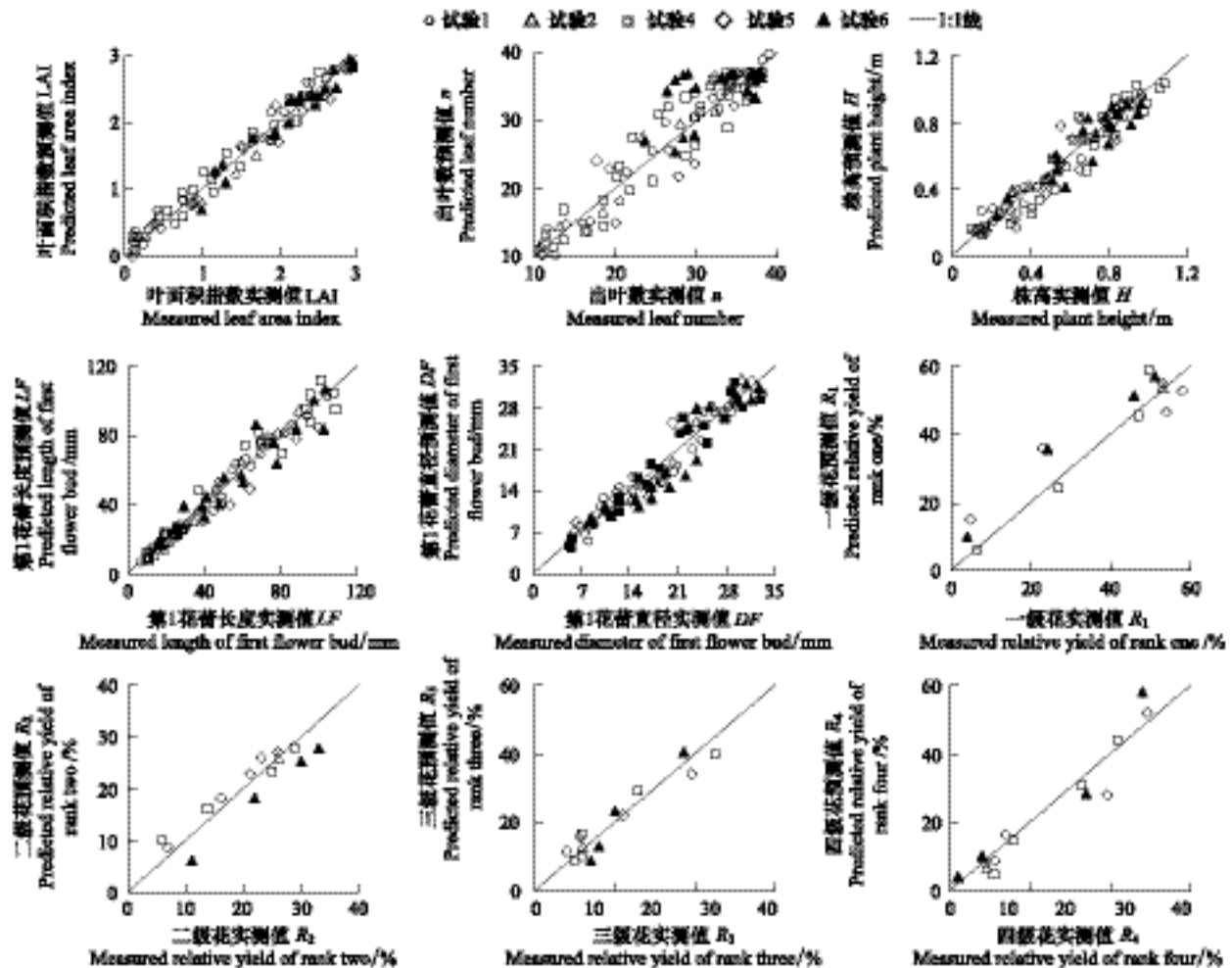


图 7 不同氮素水平下切花百合叶面积指数(LAI)、出叶数(n)、株高(H)、第 1 花蕾长度(LF)、第 1 花蕾直径(DF)和出花率的预测值与实测值的比较

Fig.7 Comparison between predicted and measured leaf area index, leaf number, plant height, length of first flower bud, diameter of first flower bud and relative yield of different rank of cut lily under different nitrogen supply conditions

4 讨论

在本试验研究的土壤氮浓度范围内,各氮素处理间叶片数差异不显著,这主要是因为叶片数的多少由种球的鳞片数(种球大小)决定,经过 5°C 低温春化处理的百合种球花芽发育后,在植株长至 10—15 cm 时叶片数已趋于稳定,但初期大量叶片未展开^[28]。因此叶片出叶速率主要受鳞茎内贮存营养的影响而受现蕾期叶片累积氮含量的影响极小。许

多研究发现无论是单子叶植物如高粱^[29]、黑麦草^[30]、韭葱^[31]、玉米^[32]还是双子叶植物如马铃薯^[33]、向日葵^[34],其叶片累积氮含量对出叶速率的影响都很小,但也有少数研究发现叶片累积氮含量对玉米出叶速率有影响^[35]。不同土壤氮浓度处理通过影响叶片的叶面积而影响外观品质^[36]。随着土壤供氮量的增加,株高、第 1 花蕾长度,第 1 花蕾直径增大。这进一步证明切花百合中后期随着茎生根的不断生长,仍然需要从土壤中吸取足够的氮素

以满足生长发育的需要^[21]。与菊花现蕾期叶片累积氮含量临界值($1.62 \times 10^3 \text{ mg/m}^2$)相比^[16],百合叶片累积氮含量临界值($1.87 \times 10^3 \text{ mg/m}^2$)稍高。这可能与切花百合的花朵数多,且开花后地上部茎、叶中的营养需要回流到地下部,供给新鳞茎的生长有关。

本研究建立的模型采用综合的光温指标(冠层累积吸收辐射热积)而不是定植后天数来量化外观品质随生育时期的动态变化,模拟效果较好,进一步验证了冠层累积吸收辐射热积这一指标的可靠性。土壤供氮量是通过影响作物,特别是叶片累积氮含量而间接作用于作物光合作用、干物质生产与分配以及产量与品质形成^[16]。本研究基于外观品质与现蕾期叶片累积氮含量的定量关系,确定了切花百合现蕾期叶片累积氮含量的适宜值,并根据现蕾期叶片累积氮含量与土壤当季供氮量(速效氮)和土壤温度的关系,进一步确定了保证现蕾期叶片累积氮含量适宜值的土壤供氮量,从而克服了以土壤氮含量作为预测指标只能应用于同一土壤或基质类型的局限。根系对不同类型土壤中氮素的吸收以及叶片中氮素的代谢和运转不同^[37],进一步建立不同类型土壤切花百合现蕾期叶片累积氮含量与土壤当季供氮量的定量关系,则模型可以应用于不同土壤类型的切花百合的氮素优化管理。

本研究采用的产品外观品质指标是直接影响产品价格和生产经济效益的切花百合商品分级指标。要进一步提高模型的机理性,还需要定量研究反映氮代谢可能影响的花卉品质特征(如花枝硬度和韧度、色泽等指标及采后瓶插寿命)对氮素的响应。

此外,花卉外观品质对氮素的响应因土壤中营养元素的配比不同会有很大差异。要优化花卉作物的养分管理,还需要进一步研究多营养元素及其互作对花卉外观品质的定量影响。

5 结论

本研究通过不同定植期、生长中后期不同速效氮素水平处理的试验,以冠层累积吸收辐射热积为发育尺度,以现蕾期叶片累积氮含量为氮素指标,量化了不同光温条件下氮素施用水平对温室切花百合外观品质指标的动态影响,建立了氮素对切花百合外观品质影响的模拟模型。根据定植日期、土壤中速效氮含量和生长季的施氮量,温室内每小时的光合

有效辐射和空气温度信息,以及土壤温度状况,模型可以动态预测温室切花百合叶面积指数、株高、第1花蕾长度、第1花蕾直径等外观品质指标和出花率,可为长江中下游地区温室切花百合氮素优化和标准化管理提供决策支持。本研究建立的模型参数通过露地栽培试验订正后,模型也可应用于指导露地栽培切花百合生产的氮素管理。要优化花卉作物的养分管理,还需进一步研究多营养元素及其互作对花卉外观品质的定量影响。

References:

- [1] Zhang F F, Sun J, Xie Z K. The influence of fertilization on photosynthesis and yield of oriental lily 'Sorbonne' under the alkaline soil in northwest China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(4): 79-87.
- [2] Wang Y Q, Peng Z P, Xue S C, Yang Y M, Zhou Y P, Zhao L B. Effect of excessive fertilization on soil ecological environment in the facility farmland. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(S1): 81-84.
- [3] Tagliavini M, Scudellazi D, Marangoni B, Toselli M. Nitrogen fertilization management in orchards to reconcile productivity and environmental aspects. *Fertilizer Research*, 1996, 43(1/3): 93-102.
- [4] Sanchez C A, Doerge T A. Using nutrient uptake patterns to develop efficient nitrogen management strategies for vegetables. *HortTechnology*, 1999, 9(4): 601-606.
- [5] Khalaj M A, Edrisi B. Effect of plant spacing and nitrogen levels on quantity and quality characteristics of tuberose (*polianthes tuberosa* L.) under field experiment. *International Journal of AgriScience*, 2012, 2(3): 244-255.
- [6] Ménard C, Dansereau B, Garelo G, Le Page-Degivry M T. Influence of nitrogen supply on ABA levels and flower senescence in *Rosa hybrida* cv Royalty. *Acta Horticulturae*, 1996, 424: 151-155.
- [7] Eveleens-Clark B, Carvalho S M P, Heuvelink E. A conceptual dynamic model for external quality in *Kalanchoe*. *Acta Horticulturae*, 2004, 654: 263-270.
- [8] Yang Z Q, Luo W H, Chen F D, Gu J J, Li X M, Ding Q F, Zhao C B, Lu Y F. Quality prediction model of greenhouse standard cut chrysanthemum based on light-temperature effect. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(4): 877-882.
- [9] Zhang H J, Dai J F, Luo W H, Zhuang K M, Wei Y G, Zhang O. Model for simulating development and growth of pot planted poinsettia (*Euphorbia pulcherrima*) grown in greenhouse. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(11): 241-247.
- [10] Li G, Chen Y R, Dai J F, Luo W H, Zhao T L, Zhu P B. A

- model for predicting flowering date and external quality of cut tulip in solar greenhouse. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (14): 4062-4071.
- [11] Zou C C. A Model for Predicting the Flowering Date and External Quality of Lily Grown in Traditional Chinese Solar Greenhouse [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.
- [12] Li Y F, Fang W M, Chen F D, Shi C L. A quality prediction model for spray cut chrysanthemums in a solar greenhouse. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2010, 27(3): 404-409.
- [13] Zhang X Y, Liu F, Wang F Y, Liu S Y, Feng W J, Shang M H, Zhu J H. Simulation of dry matter partitioning and marketing date of greenhouse *Phalaenopsis aphrodite* Rchb. F. flower. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(6): 1453-1457.
- [14] Tan M. Simulation of *Cymbidium hybridum* Growth and Development Based on Production of Thermal Effectiveness and Photosynthetically Active Radiation [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.
- [15] Chen L L, Zhong S L, Dai J F, Li G, Luo W H, Shao H P, Zhang N N. A temperature management model for controlling flowering date and external quality of Dendrobium in greenhouse. *Science China: Information Sciences*, 2010, 40(S1): 232-243.
- [16] Ding Q F, Dai J F, Luo W H, Mi X J, Chen Y S, Zhao C J, Qiao X J, Liu K X. Simulating the effects of nitrogen on external quality indices of standard cutting chrysanthemum 'Shenma' in solar greenhouse. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42 (1): 363-369.
- [17] Kang H M, Zhang Q X, Pan H T. Effects of nitrogen nutrient on the cut rose flower quality. *Journal of Henan Agricultural University*, 2012, 46(3): 284-286, 297-297.
- [18] Guo Y H, Ma W Q. Nutrient uptake and distribution in oriental hybrids of lily. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(6): 753-757.
- [19] Qasim M, Ahmad I, Nadeem A. Influence of various nitrogen levels on growth and biomass of *Jasminum sambac*. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 2003, 40(3/4): 144-150.
- [20] Acharya M M, Dashora L K. Response of graded levels of nitrogen and phosphorus on vegetative growth and flowering in African marigold (*Tagetes erecta* Linn.). *Journal of Ornamental Horticulture*, 2004, 7(2): 179-183.
- [21] Sajid G M, Kaukab M, Ahmad Z. Foliar application of plant growth regulators (PGRs) and nutrients for improvement of lily flowers. *Pakistan Journal of Botany*, 2009, 41(1): 233-237.
- [22] Holcomb E J, Gamez S, Beattie D, Elliott G C. Efficiency of fertigation programs for baltic ivy and asiatic lily. *HortTechnology*, 1992, 2(1): 43-46.
- [23] Mi X J, Dai J F, Luo W H, Ding Q F, Chen Y S, Zhao C J, Qiao X J, Liu K X. Quantifying the effects of nitrogen on dry matter partitioning of standard cut chrysanthemum 'Shenma' in solar greenhouse. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33 (1): 108-117.
- [24] Dong Y Y, Li G, An D S, Luo W H. Simulation model for predicting effects of substrate water potential on leaf area of cut lily. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(3): 191-197.
- [25] Afforestation Secretary of the State Forestry Administration. GB/T 18247.1—2000 product grade for major ornamental plants-part 1: cut flowers. Beijing: Standards Press of China, 2001.
- [26] Dong W, Yin X D, Li J L, Pei Z B, Wu J X, Yang X Q, Zhang C L, Yu C X. Technical rules for the production of lily cut flowers. *Journal of Central South Forestry University*, 2003, 23 (5): 107-111.
- [27] Xu R, Dai J, Luo W, Yin X, Li Y, Tai X, Han L, Chen Y, Lin L, Li G, Zou C, Du W, Diao M. A photothermal model of leaf area index for greenhouse crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(4): 541-552.
- [28] Cai X M, Fang S Z, Zheng D J, Lin Z, Lin J. Development process and physiological changes of Lilium oriental "Sorbonne". *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2006, 15 (1): 176-179.
- [29] Muchow R C. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment. I. Leaf growth and leaf nitrogen. *Field Crops Research*, 1988, 18(1): 1-16.
- [30] Van Loo E N. On the Relation between Tillering, Leaf Area Dynamics and Growth of Perennial Ryegrass (*Lolium perenne* L.) [D]. The Netherlands: Wageningen Agricultural University, 1993.
- [31] Biemond H. Effects of nitrogen on development and growth of the leaves of vegetables. 2. Appearance, expansion growth and life span of leaves of leek plants. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 1995, 43(2): 233-246.
- [32] Vos J, van der Putten P E L, Birch C J. Effect of nitrogen supply on leaf appearance, leaf growth, leaf nitrogen economy and photosynthetic capacity in maize (*Zea mays* L.). *Field Crops Research*, 2005, 93(1): 64-73.
- [33] Vos J, Biemond H. Effects of nitrogen on the development and growth of the potato plant. I. Leaf appearance, expansion growth, life spans of leaves and stem branching. *Annals of Botany*, 1992, 70(1): 27-35.
- [34] Trápani N, Hall A J. Effects of leaf position and nitrogen supply on the expansion of leaves of field grown sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Plant and Soil*, 1996, 184(2): 331-340.
- [35] McCullough D E, Girardin P, Mihajlovic M, Aguilera A, Tollenaar M. Influence of N supply on development and dry matter accumulation of an old and a new maize hybrid. *Canadian Journal of Plant Science*, 1994, 74(3): 471-477.
- [36] Roberts A N, Stang J R, Wang Y T, McCorkle W R, Riddle L, Moeller F W. Easter Lily Growth and Development. Corvallis:

Technical Bulletin, 1985: 5-74.

- [37] Kim T H, Chun Y T, Kim K Y, Chung S J. Root zone temperature effects on nitrate assimilation and xylem transport in hydroponically grown cucumber plants. *Acta Horticulturae*, 2002, 588: 59-62.

参考文献:

- [1] 张芬芬, 孙娟, 谢忠奎. 西北碱性土壤施肥对东方百合‘索邦’光合及种球产量的影响. *草业学报*, 2012, 21(4): 79-87.
- [2] 王艳群, 彭正萍, 薛世川, 杨云马, 周亚鹏, 赵立宾. 过量施肥对设施农田土壤生态环境的影响. *农业环境科学学报*, 2005, 24(S1): 81-84.
- [8] 杨再强, 罗卫红, 陈发棣, 顾俊杰, 李向茂, 丁琪峰, 赵才标, 陆亚凡. 基于光温的温室标准切花菊品质预测模型. *应用生态学报*, 2007, 18(4): 877-882.
- [9] 张红菊, 戴剑锋, 罗卫红, 庄克明, 魏猷刚, 章鸥. 温室盆栽一品红生长发育模拟模型. *农业工程学报*, 2009, 25(11): 241-247.
- [10] 李刚, 陈亚茹, 戴剑锋, 罗卫红, 赵统利, 朱朋波. 日光温室切花郁金香花期与外观品质预测模型. *生态学报*, 2011, 31(14): 4062-4071.
- [11] 邹聪聪. 日光温室切花百合花期和外观品质的预测模型 [D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [12] 李玉发, 房伟民, 陈发棣, 石常磊. 日光温室多头切花菊品质模拟. *浙江林学院学报*, 2010, 27(3): 404-409.
- [13] 张晓艳, 刘锋, 王风云, 刘淑云, 封文杰, 尚明华, 朱建华. 温室蝴蝶兰干物质分配及产品上市期模拟研究. *中国生态农学报*, 2008, 16(6): 1453-1457.
- [14] 谭美. 基于辐射热的大花蕙兰生长发育模拟研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [15] 陈莉莉, 钟双林, 戴剑锋, 李刚, 罗卫红, 邵和平, 张宁宁. 温室春石斛花期与外观品质温度调控模型. *中国科学: 信息科学*, 2010, 40(S1): 232-243.
- [16] 丁琪峰, 戴剑锋, 罗卫红, 米晓洁, 陈永山, 赵春江, 乔晓军, 刘克信. 氮素对日光温室独本菊‘神马’外观品质影响的模拟. *中国农业科学*, 2009, 42(1): 363-369.
- [17] 康红梅, 张启翔, 潘会堂. 氮素营养对切花月季品质的影响. *河南农业大学学报*, 2012, 46(3): 284-286, 297-297.
- [18] 郭友红, 马文奇. 东方百合养分吸收规律和分配特点的研究. *土壤通报*, 2004, 35(6): 753-757.
- [23] 米晓洁, 戴剑锋, 罗卫红, 丁琪峰, 陈永山, 赵春江, 乔晓军, 刘克信. 氮素对日光温室独本菊品种‘神马’干物质分配影响的模拟. *植物生态学报*, 2009, 33(1): 108-117.
- [24] 董永义, 李刚, 安东升, 罗卫红. 水分对切花百合叶面积影响的预测模型研究. *农业工程学报*, 2012, 28(3): 191-197.
- [25] 国家林业局植树造林司. GB/T 18247.1—2000 主要花卉产品等级, 第1部分: 鲜切花. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [26] 董伟, 殷小冬, 李技林, 裴作斌, 吴建祥, 杨晓琴, 张翠兰, 余朝秀. 百合商品切花生产技术规程. *中南林学院学报*, 2003, 23(5): 107-111.
- [28] 蔡宣梅, 方少忠, 郑大江, 林真, 林婕. 东方百合‘索蚌 Sorbonne’生长发育进程及一些生理生化变化. *西北农业学报*, 2006, 15(1): 176-179.