

李莉,郭斌.基于辐热积的温室番茄干物质生产及分配模型[J].江苏农业科学,2019,47(5):129-132.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.05.032

基于辐热积的温室番茄干物质生产及分配模型

李莉¹,郭斌²

(1. 山东省临沂市气象局,山东临沂 276000; 2. 四川省阿坝州气象局,四川马尔康 624000)

摘要:番茄是我国温室栽培的最主要作物之一,干物质的生产及分配决定着果实的发育和产量,构建温室番茄的干物质生产及分配模型对温室番茄栽培管理具有重要的理论意义和实践价值。以番茄乐农 6 号为材料,于 2016—2017 年在山东省临沂市日光温室进行试验,构建以辐热积(TEP)为尺度的干物质生产及分配模型,并利用与建模数据相独立的数据进行验证。结果表明,模型对番茄地上部分干质量、根系干质量、茎干质量、叶片干质量和果干质量的预测结果与 1:1 直线之间的决定系数(R^2)在 0.88~0.95,统计回归标准误差(RMSE)在 0.006 9~0.010。该模型预测精度较高,且参数少、用户易于获取,不仅能较好地预测我国现有生产水平下温室番茄的干物质生产及分配,而且可以实现我国温室番茄生产环境优化调控和模式化栽培管理提供决策支持。

关键词:温室番茄;干物质生产及分配模型;辐热积

中图分类号: S625.5; S641.201

文献标志码: A

文章编号: 1002-1302(2019)05-0129-04

设施农业的兴起大大减少了农业生产受外界环境影响的制约,温室内部温度和辐射是影响作物生长的主要因素^[1-5],而太阳辐射作为主要热源,直接影响着温室内温度的变化,因此能否准确地掌握温度和辐射的调节尺度对温室作物的生产起着重要的作用。

作物模拟技术是优化作物栽培管理的重要手段之一,其中干物质分配一直是作物模拟模型研究的重要内容。前人提出很多理论来模拟作物干物质分配,如功能平衡模型^[6-7]、运输-阻力模型^[8]、源库调控模型^[9-11]等。目前应用最多的是源库调控^[4]模型和分配指数模型^[12-15]。源库调控模型具有较强的机理性,但模型需要很多参数,其中许多参数(如营养器官的库强)很难通过试验获取,其实用性受到很大限制^[16]。Wolswinkel 指出干物质分配的模拟是基于作物的库强,库强也可以定义为作物各个器官对同化物的潜在需要或积累同化物的潜在能力^[17];Heuvelink 构建了基于作物器官库强,即作物潜在生长速率的温室番茄干物质分配模型^[18];TOMGROW 和 TOMSIM 模型中关于温室番茄干物质分配模型都是基于作物的源库理论建立的,其中,TOMGROW 模型需要输入大量的模型参数,大大降低了模型的实用性和广适性;TOMSIM 模型利用固定的茎、叶干质量比率来预测茎、叶干质量,采用果枝出现速率和果实生长周期等来预测果实干质量,但是在不同品种或同一品种不同播期下预测值差异较大,因此限制了不同品种的产量预测精度^[19-20]。而分配指数和分配系数模型由于简单实用,是目前应用最广的干物质分配模型^[8]。分配系数是某一植株部分干质量的增加量占整株干质量增加量

的比例^[21];分配指数是指器官干质量占总干质量的比例^[22]。本研究利用累积辐热积来拟合温室番茄的分配指数,建立了基于我国栽培技术和种植制度的温室番茄干物质生产及分配模型,为我国温室番茄生长及栽培管理和环境优化调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2016 年 12 月至 2017 年 5 月在山东省临沂市设施农业气象试验站日光温室内进行。山东省临沂市设施农业气象试验站地处蒙阴、费县和沂南 3 县交界处附近的双墩镇,地理坐标为 118.26°E、35.32°N,年平均气温 13.3℃,年降水量 793.9 mm,年日照时数 2 314 h,属于暖温带季风区大陆性气候。该地区属丘陵地带,土壤贫瘠,经过首期治理后土壤有所改变,土质偏碱性,pH 值为 7.73~8.38,土壤通透性良好。

1.2 试验设计及过程

本试验选择番茄品种乐农 6 号,将苗期的番茄种植于山东省临沂市日光温室试验区内。试验温室顶高 4.6 m,宽 10.0 m,长 68.0 m,试验小区垄宽 95 cm,走道 80 cm,行距 30 cm,株距 20 cm。温室覆盖棚膜为聚乙烯无滴膜,膜厚 0.6 mm,透光系数为 75%。选取长势良好且一致的 4~5 张真叶状态的番茄幼苗 200 株定植,将土壤水分控制在田间持水量的 70%~80%(体积含水量 20%~30%),光照度保持在晴天的正常范围内(阴天时补光)。待 80% 以上的番茄苗进入花果期后,选取长势良好且一致的苗期番茄进行试验处理。试验分为 2 个部分:试验 1 的数据用于模型的建立,试验 2 的数据用于模型的检验。

1.3 观测项目与方法

1.3.1 气象数据的测定 用数据采集器(WatchDog2000, USA)自动采集设施内气象要素,采集内容包括冠层(1.5 m)处空气温度和相对湿度。采集频率为 10 s/次,存储每 30 min 的平均值。

收稿日期:2018-09-17

基金项目:四川省科技厅科技项目(编号:2017ZR0281)。

作者简介:李莉(1990—),女,江苏连云港人,助理工程师,研究方向为农业气象。E-mail:625175826@qq.com。

通信作者:郭斌,高级工程师,高级信息系统项目管理师,研究方向为应用气象及气象信息化。Tel:(0837)2821230;E-mail:abgb_001@163.com。

1.3.2 作物各器官干物质量的获取 苗期每 5 d,其余生育期每 7 d 进行破坏性取样,取有代表性的植株样本,苗期每次 6 株,其余生育期每次 3 株。将各植株分为根、茎、叶和果 4 个部分,测定鲜质量,再 105 ℃ 杀青,然后在 85 ℃ 烘干至恒质量,采用精度为 0.01 g 的电子天平测定各器官干质量。

果实成熟时,每隔 2 d 左右采摘 1 次,各试验小区随机选取 10 株番茄,将成熟果实采用 105 ℃ 杀青,然后在 85 ℃ 烘干至恒质量,采用精度为 0.01 g 的电子天平称取其干质量。

1.4 模型描述

在源库比例一定的条件下,干物质的分配主要受生育期和同化产物量的影响,其中生育期主要受相对热效应的影响。而同化产物量主要受辐射的影响。在此采用辐热积^[23-25]来模拟温室番茄的生长。辐热积是指温度热效应与光合有效辐射的乘积,计算过程如下:首先计算出每小时的相对热效应(relative thermal effectiveness, RTE),然后将每小时相对热效应乘以相应小时内的总光合有效辐射(photosynthetically active radiation, PAR)即可得到每小时的辐热积(hourly production of thermal effectiveness and PAR, HTEP)。将 1 d 内各个小时的辐热积累加即为日总辐热积(daily total production of thermal effectiveness and PAR, DTEP)。某生育阶段的累计辐热积(accumulated total production of thermal effectiveness and PAR, TE_P)为该阶段日总辐热积之和。具体计算公式如下:

$$RTE(T) = \begin{cases} 0 & T < T_b \\ \frac{T - T_b}{T_{ob} - T_b} & T_b < T < T_{ob} \\ 1 & T_{ob} < T < T_{ou} \\ \frac{T_m - T}{T_m - T_{ou}} & T_{ou} < T < T_m \\ 0 & T > T_m \end{cases} \quad (1)$$

$$PAR = Q \times 0.5; \quad (2)$$

$$HTEP = \begin{cases} RTE \times PAR \times 10^{-6} & PAR > 0 \\ RTE & PAR = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: T_b 为温室番茄生长下限温度,℃; T_m 为生长上限温度,℃; T_{ob} 为生长最适下限温度,℃; T_{ou} 为生长最适上限温度,℃; T 为每小时平均温度,℃; $RTE(T)$ 为每小时的相对热效应; Q 为 1 h 内太阳总辐射, $J/(m^2 \cdot h)$; 0.5 为光合有效辐射在太阳总辐射中的比例; PAR 为 1 h 内总光合有效辐射, $J/(m^2 \cdot h)$; $HTEP$ 为 1 h 内的辐热积, $MJ/(m^2 \cdot h)$ 。

番茄各生育时期的生长三基点温度如表 1 所示^[26]。

表 1 温室番茄生长三基点温度

生育期	下限温度 T_b (℃)	最适温度 T_o (℃)	上限温度 T_m (℃)
缓苗期及苗期	10	25	30
开花期	15	25	30
成熟期	15	25	35

1.5 分配指数计算

在运用分配指数模拟干物质分配时,一般认为同化产物首先在 地上部分和地下部分之间分配,然后在 地上部分之间进行分配。地上部分分配指数指的是地上部分干质量占总干质量的 比例。各个器官的分配指数指的是植株体器官干质量

占地上部分干质量的 比例。

$$PIS = WSH/W_{TOT}; \quad (4)$$

$$PIR = 1 - PIS。 \quad (5)$$

式中: PIS 为地上部分分配指数; PIR 为根分配指数; WSH 为地上部分干质量, $g/株$; $WTOT$ 为总干物量, $g/株$ 。

$$PIST = W_s/WSH; \quad (6)$$

$$PIL = W_l/WSH; \quad (7)$$

$$PIF = W_f/WSH。 \quad (8)$$

式中: $PIST$ 、 PIL 和 PIF 分别为茎、叶和果实分配指数; W_s 、 W_l 和 W_f 分别为茎、叶和果实干质量, $g/株$; WSH 为地上部分干质量, $g/株$ 。

1.6 模型检验

采用检验模型时常用的统计方法——回归估计标准误差(rootmean squared error, $RMSE$) 对模拟值和实测值之间的符合度进行统计分析。 $RMSE$ 值越小,表明模拟值与实测值的一致性越好,模拟值和实测值之间的偏差越小,即模型的模拟结果越准确、可靠。因此, $RMSE$ 能够很好地反映模型模拟值的预测性,其计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SM_i)^2}{n}}。 \quad (9)$$

式中: OBS_i 为实测值; SM_i 为模型模拟值; n 为样本容量。

2 结果与分析

2.1 番茄干物质生产

将番茄干物质总量与累积辐热积进行拟合,得到番茄干物质总量与 TEP 的变化关系(图 1)。番茄在缓苗期生长较为缓慢,干物质总量与累积辐热积呈线性关系,其形式为:

$$W_{TOT} = 0.23TEP + 2.5, TE P < 80 MJ/m^2。 \quad (10)$$

进入苗期后,干物质总量与累积辐热积的对数呈线性关系,其拟合形式为:

$$W_{TOT} = 66.2 \times \ln(TEP) - 263.5。 \quad (11)$$

式中: W_{TOT} 为干物质总量, $g/株$; TEP 为累积辐热积, MJ/m^2 。干物质总量在苗期和开花期变化量较大,在成熟期时变化减缓。

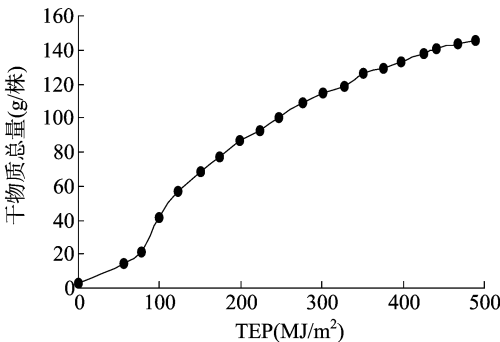


图 1 番茄干物质总量与累积辐热积的关系

采用与建模数据相独立的试验数据进行验证,根据公式(1)~公式(3)、公式(10)、公式(11)计算任意一天的干物质总量,本模型对温室番茄干物质生产的预测结果与 1:1 直线之间的 r^2 和 $RMSE$ 分别为 0.996 1 和 3.05(图 2)。番茄干物质总量的模拟值与实测值符合度较好。

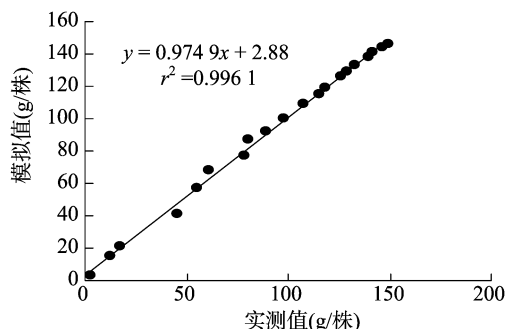


图2 干物质总量与实测值比较(1:1 直线)

2.2 地上部分和根系分配指数

由图3可知,地上部分分配指数随累积辐热积的增加而增大,在番茄定植时地上部分分配指数最小,为0.80,在番茄成熟时最大,为0.97;而番茄根系分配指数表现出相反的规律,根系分配指数随累积辐热积的增加而减小,在番茄定植时根系分配指数最大,为0.20,在番茄成熟期时最小,为0.03。

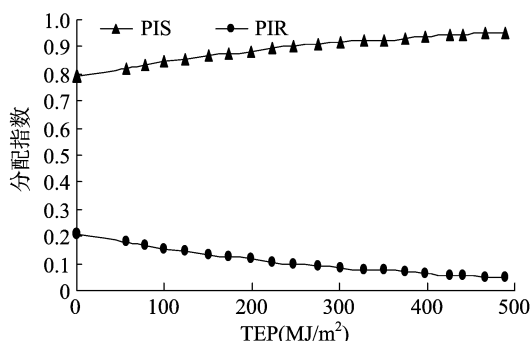


图3 番茄地上部、根系分配指数与累积辐热积的关系

采用与建模数据相独立的试验数据验证图3中拟合公式的可行性,结果表明番茄地上部分和根系的分配指数模拟值与实测值有较好的一致性,预测结果与1:1直线之间的 R^2 为0.90~0.95, $RMSE$ 为0.007~0.010,说明利用图3中的拟合公式可以准确模拟番茄全生育期地上部和根系分配指数。

2.3 地上部各器官分配指数

通过拟合得到地上部各器官分配指数与累积辐热积的相关关系(图4),拟合公式如下:

$$PIL = \begin{cases} 0.67 - 0.011 \exp(-TEP/39.9) & 0 < TEP < 1.68 \\ 0.27 + 3.1 \exp(-TEP/83) & TEP \geq 1.68 \end{cases}; \quad (12)$$

$$PIST = \begin{cases} 0.26 + 0.011 \exp(-TEP/39.9) & 0 < TEP < 1.68 \\ 0.23 + 31.1 \exp(-TEP/30.1) & TEP \geq 1.68 \end{cases}; \quad (13)$$

$$PIF = \begin{cases} -31.1 \exp(-TEP/30.1) & 0 < TEP < 1.68 \\ 0.4 - 3.1 \exp(-TEP/83) & TEP \geq 1.68 \end{cases}. \quad (14)$$

由图4可以看出,PIST随累积辐热积的增加而先增加后减小,在番茄苗期结束时最大,为0.45~0.49,在番茄成熟期结束时最小,为0.20~0.25;PIL随累积辐热积的增加而降低,在番茄定植时最大,为0.73~0.77,在成熟期结束时最小,为0.19~0.23;开花期后番茄PIF随着累积辐热积的增加而增加,在开花期之前最小,为0,在成熟期结束时最大,为

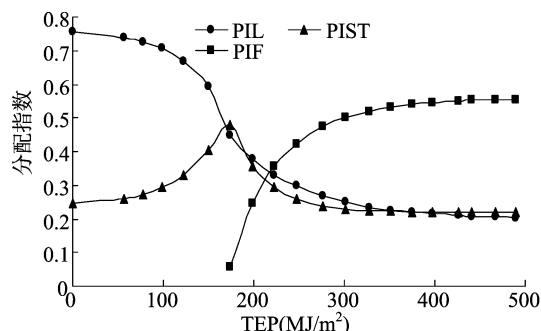


图4 番茄地上部各器官分配指数和辐热积的关系

0.53~0.58。番茄开花期之前,番茄植株只进行营养生长,包括茎和叶的生长,茎和叶的分配指数在定植时分别为0.26~0.28和0.72~0.74,随着营养生长的进行,茎和叶的分配指数逐步接近,在苗期结束时最为接近,为0.45~0.50和0.45~0.50,随后茎和叶分配系数随着累积辐热积的增加而降低;开花期初期时果实开始膨大,果实干物质增加速率较快,因此果实分配指数增加速率较大,在成熟期时,果实开始成熟,大部分果实已经膨大,干物质增加速率减缓,其果实分配指数增加较缓。

采用与建模数据相独立的试验数据对地上部分各器官的干物质分配模型进行验证。利用公式(12)~公式(14)计算出地上部各器官分配指数模拟值,并与实测值进行对比。番茄茎、叶、果实模型的预测结果与1:1直线之间的 r^2 分别为0.88、0.91、0.89, $RMSE$ 分别为0.0071、0.0069、0.0073。模型的模拟值与实测值符合度较高。

4 结论与讨论

在潜在生长条件下,温室番茄的生长主要受同化产物的影响,而同化产物量主要取决于温度和光合辐射。仅采用有效积温来模拟误差较大,本研究综合了光合有效辐射和温度的光温指标——辐热积来模拟,提高了预测精度。同时,克服了“源库”调节理论输入参数多、实用性不强的局限性。模型精度高,且参数少、易获取,能较好地预测番茄干物质质量的生产以及在各器官的分配情况,为温室番茄生产的光温管理调控提供依据。

张红菊等利用辐热积对一品红、甜椒的干物质分配进行模拟,PIS、PIL、PIST与累积辐热积之间的表达形式^[25-26]与本研究一致,但由于供试品种、试验地点、栽培方式的不同,导致经验参数不同。说明本研究通过拟合得到的番茄干物质在天上部、根部及地上部各器官的分配模型具有较好的应用前景。

本研究没有考虑水分、养分的影响,试验的品种单一,模型在其他类型番茄品种、栽培条件、地点、种植方式的适用性还有待于进一步验证和校验。但是,本模型的研究思路和建模方法,为建立更具机理性的温室番茄干物质质量的生产及分配模型提供了参考。

参考文献:

- [1] Li G J, Benoit F, Ceustermans N. Influence of day and night temperature on the growth, development and yield of greenhouse sweet pepper [J]. Journal of Zhejiang University, 2004, 30 (5):

- 487–491.
- [2] Turc O, Lecoœur J. Leaf primordium initiation and expanded leaf production are co-ordinated through similar response to air temperature in pea (*Pisum sativum* L.) [J]. *Annals of Botany*, 1997, 80(3): 265–273.
- [3] 袁洪波, 李莉, 王俊衡, 等. 基于温度积分算法的温室环境控制方法[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 221–227.
- [4] Marcelis L M, Heuvelink E, Goudriaan J. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review [J]. *Scientia Horticulturae*, 1998, 74(1/2): 83–111.
- [6] Hunt H W, Morgan J A, Read J J. Simulating growth and root-shoot partitioning in prairie grasses under elevated atmospheric CO₂ and water stress [J]. *Annals of Botany*, 1998, 81(4): 489–501.
- [7] Levin S A, Mooney H A, Field C B. The dependence of plant root: shoot ratios on internal nitrogen concentration [J]. *Annals of Botany*, 1989, 64(1): 71–75.
- [8] Marcelis L F M. Simulation of biomass allocation in greenhouse: a review [J]. *Acta Horticulturae*, 1993, 328(8): 49–65.
- [9] Heuvelink E. Effect of fruit load on dry matter partitioning in tomato [J]. *Scientia Horticulturae*, 1997, 69(1/2): 51–59.
- [10] Heuvelink E. Dry matter partitioning in tomato: validation of a dynamic simulation model [J]. *Annals of Botany*, 1996, 77(1): 71–80.
- [11] Heuvelink E. Effect of plant density on biomass allocation to the fruits in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) [J]. *Scientia Horticulturae*, 1995, 64(3): 193–201.
- [12] 倪纪恒, 罗卫红, 李永秀, 等. 温室番茄干物质分配与产量的模拟分析[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(5): 811–816.
- [13] 李永秀, 罗卫红, 倪纪恒, 等. 温室黄瓜干物质分配与产量预测模拟模型初步研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(2): 116–121.
- [14] 杨再强, 罗卫红, 陈发棣, 等. 温室标准切花菊干物质生产和分配模型[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 2028–2035.
- [15] 孟亚利, 曹卫星, 柳新伟, 等. 水稻光合生产与干物质累积的动态模拟[J]. *生物数学学报*, 2004, 19(2): 205–212.
- [16] Marcelis L F M. A simulation model for dry matter partitioning in cucumber [J]. *Annals of Botany*, 1994, 74(1): 43–52.
- [17] Wolswinkel P. Phloem unloading and turgor-sensitive transport: factors involved in sink control of assimilate partitioning [J]. *Physiologia Plantarum*, 1985, 65: 331–339.
- [18] Heuvelink E. Dry matter partitioning in a tomato plant: one common assimilate pool? [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1995, 46(289): 1025–1033.
- [19] Jones J W, Dayan E, Allen L H, et al. A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO) [J]. *Transactions of the ASAE*, 1991, 34(2): 663–672.
- [20] 曹卫星, 罗卫红. 作物系统模拟及智能管理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [21] 刘铁梅. 小麦光合生产与物质分配的模拟模型[D]. 南京: 南京农业大学, 2000.
- [22] 李永秀, 罗卫红, 倪纪恒, 等. 用辐射积法模拟温室黄瓜叶面积、光合速率与干物质产量 [J]. *农业工程学报*, 2005, 21(12): 131–136.
- [23] Marcelis L F M. Fruit shape in cucumber as influenced by position within the plant, fruit load and temperature [J]. *Scientia Horticulturae*, 1994, 56(4): 299–308.
- [24] 倪纪恒, 陈学好, 陈春宏, 等. 用辐射积法模拟温室黄瓜果实生长 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(5): 192–196.
- [25] 张红菊, 戴剑锋, 罗卫红, 等. 温室盆栽一品红生长发育模拟模型 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(11): 241–247.
- [26] 刁明, 戴剑锋, 罗卫红, 等. 温室甜椒生长与产量预测模型 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(10): 241–246.

(上接第58页)

8 346.24 万 m³, 控灌Ⅱ耗水节水潜力为 1 0672 万 m³, 可见滇中地区节水潜力巨大。

3 结语

气象因素与水稻逐日需水量有着一定关系, 受滇中高原气候影响, 水稻生育前期气候干燥, 而后期湿度大, 风速低, 导致需水高峰出现在分蘖期, 生育后期蒸发蒸腾量较低且生长发育时间长。

与淹水灌溉相比, 控制灌溉通过降低水稻蒸腾蒸发, 减少渗漏量与排水量, 充分利用了降雨对灌溉水的补给, 且控制灌溉水分利用效率高干淹水灌溉, 起到高效节水的效果。

与传统灌水方式比较, 控灌Ⅰ耗水节水潜力为 8 346.24 万 m³, 控灌Ⅱ耗水节水潜力为 10 672 万 m³, 表明滇中地区若采用适宜的灌溉模式节水潜力巨大。

参考文献:

- [1] 云南省统计局. 云南统计年鉴: 2016 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.

- [2] 邵东国, 孙春敏, 王洪强, 等. 稻田水肥资源高效利用与调控模拟 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(12): 72–78.
- [3] 郑世宗, 王士武, 卢成. 不同水肥模式对南方地区单季水稻需水特性影响研究 [J]. *灌溉排水学报*, 2007, 26(6): 86–88.
- [4] 和王璞, 张建业, 徐俊增, 等. 灌溉排水耦合调控稻田水分转化关系 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(11): 144–149.
- [5] 刘路广, 吴瑕, 王丽红, 等. 鄂北地区不同灌溉模式水稻需水及生长特性研究 [J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(3): 32–36, 50.
- [6] 朱士江, 孙爱华, 张忠学. 三江平原不同灌溉模式水稻需水规律及水分利用效率试验研究 [J]. *节水灌溉*, 2009(11): 12–14.
- [7] 庄德续, 司振江, 李芳花. 不同灌溉模式水稻需水规律研究 [J]. *节水灌溉*, 2014(8): 1–3, 11.
- [8] 刘广明, 杨劲松, 姜艳, 等. 节水灌溉条件下水稻需水规律及水分利用效率研究 [J]. *灌溉排水学报*, 2005, 24(6): 49–52, 55.
- [9] Pang G B, Xu Z H, Yang S H, et al. Influence factors analysis of rice leaf water use efficiency under controlled irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(4): 233–241.
- [10] 刘路广, 谭君位, 吴瑕, 等. 鄂北地区水稻适宜节水模式与节水潜力 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(4): 169–177.