

基于临界氮浓度模型的日光温室甜椒氮营养诊断

向友珍, 张富仓^{*}, 范军亮, 强生才, 邹海洋, 闫世程, 吴 悠, 田建柯

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 中国旱区节水农业研究院, 杨凌 712100)

摘 要: 临界氮浓度稀释曲线是诊断作物氮营养状况的有效手段。该研究基于 2 a 温室小区试验, 以参考作物蒸发蒸腾量 (reference crop evapotranspiration, ET_0) 为基准, 设置 4 个灌溉水平 (105% ET_0 、90% ET_0 、75% ET_0 、60% ET_0) 和 4 个氮素水平 (300、225、150、75 kg/hm²), 构建和验证基于地上部生物量的甜椒在不同水分条件下的临界氮浓度稀释曲线经验模型。结果表明, 植株氮素吸收量、地上部生物量、经济产量和水分利用效率 (water use efficiency, WUE) 随灌水量增加呈先增加后减小的趋势; 灌溉水平 75% ET_0 和 90% ET_0 下, 最优施氮量差异较小, 且可获得较高经济产量和 WUE, 但经济产量和 WUE 不能同时达到最佳。75% ET_0 灌溉水平可获得高于 90% ET_0 灌溉水平约 11% 的水分利用效率, 且经济产量仅降低约 3%, 鉴于研究区水资源较短缺, 灌水量 75% ET_0 施氮量 190 kg/hm² 左右为最佳策略。该研究可为西北地区温室甜椒实时精准灌水施氮提供理论依据和技术支持。研究可为西北地区温室甜椒实时精准灌水施氮提供理论依据和技术支持。

关键词: 氮肥; 灌溉; 温室; 甜椒; 临界氮浓度; 氮营养指数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.013

中图分类号: S275.6; S365

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-17-0089-09

向友珍, 张富仓, 范军亮, 强生才, 邹海洋, 闫世程, 吴 悠, 田建柯. 基于临界氮浓度模型的日光温室甜椒氮营养诊断[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 89—97. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.013 <http://www.tcsae.org>
Xiang Youzhen, Zhang Fucang, Fan Junliang, Qiang Shengcai, Zou Haiyang, Yan Shicheng, Wu You, Tian Jianke. Nutrition diagnosis for N in bell pepper based on critical nitrogen model in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(17): 89—97. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.013 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

氮素是植株生长发育的“生命元素”, 在设施蔬菜生产中发挥着重要作用。为使蔬菜生长迅速、产量最大化, 投入过量氮肥的现象非常普遍, 使得菜地土壤环境不断恶化, 同时对设施蔬菜产业的可持续发展构成严重威胁^[1]。诊断作物氮素营养基本方法之一是确定作物的临界氮浓度值^[2], 其对改善蔬菜品质, 提高产量和氮肥利用效率, 解决环境污染问题具有重要意义。国内外学者通过构建临界氮浓度稀释曲线作物模型的方法, 已对农作物^[3-11]及马铃薯^[12]、番茄^[13-15]等蔬菜的氮素营养做出了科学诊断。有关甜椒氮素营养的研究结果主要集中于其吸收与利用方面, Bar-Tal 等^[16]研究表明增加氮浓度会提高甜椒对氮素的吸收, 营养液含氮量为 8.0~9.2 mmol/L 时利于甜椒茎和叶的干物质累积, 9.2 mmol/L 的含氮量则利于果实干物质累积。Yasuor 等^[17]发现滴灌条件下供应氮浓度为 56.2 mg/L 最优, 氮素营养大部分被甜椒吸收利

用, 既没产生过剩氮素污染环境也没因营养不良降低甜椒的产量和品质。研究表明^[13]植株氮浓度受水分供应影响, 高灌水量会促进干物质累积, 当施氮供应不充足时, 会稀释植株体内氮浓度, 然而考虑不同水分供应下的氮稀释曲线还未见报道, 本文通过研究甜椒不同生育期植株氮浓度的变化, 力求建立能够反映水分供应状况的氮稀释曲线。

作为高价值蔬菜的甜椒对水分和氮素营养成分的要求较为严格, 但农民仍然凭经验灌水施氮, 因此优化水氮管理, 提高产量和水肥利用效率, 是甜椒规模化生产中亟待解决的问题。本研究通过 2 a 不同水氮条件下的温室小区试验, 分别建立和验证滴灌施肥条件下日光温室甜椒临界氮浓度稀释曲线经验模型, 以期西北地区温室甜椒精准灌水施氮提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 田间试验

1.1.1 试验地概况

2a 试验 (2014 和 2015 年 4—7 月) 均在地处暖温带半湿润气候区的西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室日光温室内进行 (34°20'N, 108°04'E)。该地海拔 521 m, 年均气温 13℃, 年均降水量和蒸发量分别为 645、1 500 mm。土壤为重壤土, 容重 1.49 g/cm³, 田间持水量质量分数 24.5%, pH 值 8.12, 有机质、全氮、全磷、全钾分别为 14.63、0.76、0.53、14.25 g/kg, 碱解

收稿日期: 2016-02-17 修订日期: 2016-06-10

基金项目: 国家“十二五”863 计划项目课题 (2011AA100504); 教育部高等学校创新引智计划项目 (B12007)。

作者简介: 向友珍, 女, 湖南怀化人, 博士生, 讲师, 主要从事农业水土环境方面研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。

Email: youzhenxiang@nwsuaf.edu.cn

*通信作者: 张富仓, 男, 陕西武功人, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。Email: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

氮为 71.33 mg/kg, 有效磷为 58.93 g/kg。日光温室长度 76 m、跨度和高度分别为 7.5 和 2.8 m, 采用手动天窗和侧通风口通风; 温室内设有小型气象站 (HOBO event logger, onset computer corporation, USA), 可自动记录气象因子值 (大气压力、温度、相对湿度、光合有效辐射和太阳辐射等)。

1.1.2 供试材料

供试甜椒品种为美国马可力 (*Capsicum annuum* L. var. *grossum Marcomi* F1)。试验用肥料分别为尿素 (N 46%)、过磷酸钙 (P₂O₅ 60%) 和氯化钾 (K₂O 60%)。

滴灌施肥设备为以色列耐特菲姆 (Netafim) 公司的在线式智能灌溉施肥机 (NETAJET 3G INLINE)。NETAJET 3G INLINE 系统运行压力为 3~5 bar, 适用流量为 0.5~20 m³/h, 共安装 3 个文丘里施肥器, 肥料和水通过 HYDROMIX 水力混肥腔均匀混合后再打入主管道。每个施肥器的通道上都装配有 1 个可视的肥料表, 其过流流量为 30~300 L/h。滴灌管采用内镶式圆柱滴头, 管内径 8 mm, 滴头间距 30 cm, 流量 2 L/h, 工作压力 0.3 MPa。

1.1.3 试验设计及过程

试验设滴灌灌水量和施氮量 2 个因素, 每个因素 4 个水平。根据参考作物蒸发蒸腾量 (reference crop evapotranspiration, ET₀), 设置 4 个灌水量水平: 105% ET₀ (W1)、90% ET₀ (W2)、75% ET₀ (W3)、60% ET₀ (W4)。参照当地推荐施氮水平 300 kg/hm², 设置 4 个施氮量水平: 300 (N1)、225 (N2)、150 (N3)、75 kg/hm² (N4)。试验按照完全组合设计, 共 16 个处理, 每个处理 3 个重复, 共 48 个小区。

各小区长 6.70 m、宽 1.25 m, 面积 8.40 m²。采用当地典型的垄沟覆膜栽培模式, 垄高 25 cm, 宽 75 cm, 垄顶做成平顶, 垄间距 50 cm, 小区间用塑料薄膜埋入 1 m 深土层, 进行隔离处理, 采用 1 管控制 2 行, 在 2 行甜椒中间布置滴灌管, 甜椒株距 45 cm, 行距 30 cm, 单株定植, 定植密度为 31 000 株/hm²。

分别于 2014 年 4 月 3 日和 2015 年 4 月 1 日 (甜椒苗 8~12 叶 1 心) 定植, 2014 年 7 月 25 日和 2015 年 7 月 23 日拉秧。为保证幼苗成活率, 浇定植水 40 mm, 定植后 15 d 开始灌溉处理, 平均每 5 d 灌 1 次水。2014 和 2015 年全生育期 W1、W2、W3 和 W4 的灌水量分别为 263.1、231.2、199.4、167.8 和 247.0、217.4、187.8、158.3 mm。定植后 20、40、55、65、75、85、95 d 施氮, 共施氮 7 次, 各次施氮量占整个生育期总施氮量的比例为 13.33%、13.33%、13.33%、20%、20%、13.33%、6.67%; 定植后 40 d 开始等量追施磷肥和钾肥, 平均 15 d 1 次, 共追施 5 次, 其中磷肥每次追施 8.5 kg/hm², 钾肥每次追施 25 kg/hm²。整个生育期吊线、整枝、疏果等管理措施按照当地农民习惯。2 a 试验期间, 温室日平均气温最小值为 14.1 °C, 最大值为 33.1 °C。

1.1.4 指标测定或计算

地上部生物量和植株氮含量: 在甜椒定植后 33、54、

62、72、81、91、101 和 112 d 共计破坏性取样 8 次, 植物样在 105 °C 杀青 30 min, 然后于 75 °C 烘干至恒质量, 测定植株地上部生物量, t/hm²。干植株样粉碎后过 1 mm 筛, 经浓 H₂SO₄-H₂O₂ 法消煮后通过流动分析仪 (AutoAnalyzer-III, 德国 Bran+Luebbe 公司) 测定其全氮含量。各器官氮累积量为器官氮浓度与器官干物质量的乘积, kg/hm²; 植株地上部氮累积量为茎、叶、果氮累积量之和; 植株地上部氮浓度为地上部氮累积量与地上部生物量的比值, %。

经济产量: 在果实采收期, 每次采收后将成熟果实收获, 称质量并计算经济产量, t/hm²。整个采收期共采收 6 次。

水分利用效率 (water use efficiency, WUE) 为甜椒经济产量 Y 与甜椒耗水量 (evapotranspiration, ET) 的比值。ET 采用水量平衡法^[18]计算, 由于试验在日光温室内进行, 有效降雨量为 0。试验采用精确灌溉, 无地表径流及深层渗漏, 径流量和深层渗漏量也为 0。研究区地下水位在 50 m 以下, 地下水补给量为 0。故

$$ET = I - \Delta W. \quad (1)$$

式中 I 为灌水量, mm; ΔW 为试验初期和末期 0~100 cm 土壤水分变化量, mm。分别于试验前和收获后 2 d 内测定土壤水分, 采用时域反射仪每隔 20 cm 测土壤体积含水量, 测至 100 cm 深。灌水量 I 为

$$I = K_c \cdot ET_0. \quad (2)$$

式中 K_c 为作物系数, 依据 FAO56^[18], 甜椒在生长前期、中期和后期的作物系数 K_{cin} 、 K_{cmid} 、 K_{cend} 取值分别为 0.7、1.05、0.9。

日光温室内风速为 0, 但蒸发和热量输送仍然存在, 故采用陈新明等^[19]的日光温室 Penman-Monteith 修正公式计算 ET₀。

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{1713(e_a - e_d)}{T + 273}}{\Delta + 1.64\gamma}. \quad (3)$$

式中 ET₀ 为参考作物蒸发蒸腾量, mm/d; T 为 2 m 高度处平均气温, °C; R_n 为地表净辐射, MJ/(m²·d); Δ 为饱和水汽压曲线斜率, kPa/°C; G 为土壤热通量, MJ/(m²·d); e_a 为饱和水汽压, kPa; e_d 为实际水汽压, kPa; γ 为干湿表常数, kPa/°C。这些气象资料来自温室内气象站。

1.2 模型描述

1.2.1 临界氮浓度稀释曲线模型

构建基于作物生物量的临界氮浓度稀释曲线必须先确定临界氮浓度值, 即既不受氮素营养制约又不存在氮素奢侈吸收的植株临界氮浓度值。受氮素营养制约被定义为作物生长受氮素营养限制, 增加氮肥会显著增加作物干物质累积量; 不存在氮素奢侈吸收被定义为作物生长不受氮素限制, 增施氮肥不会增加干物质累积量, 但会显著增加植株体内含氮量。各处理之间的显著性差异通过方差分析确定, 显著性水平设定为 0.05。

依据 Justes 等^[20]1994 年提出的临界氮浓度计算方法, 综合诸多学者^[4-15]的临界氮浓度稀释曲线模型的建模思

想, 构建基于地上部生物量的临界氮浓度稀释曲线的步骤如下: 1) 测定每次取样的地上部生物量及其对应的氮浓度值; 2) 对作物地上部生物量进行方差分析, 根据作物生长受氮素营养制约与否将数据分为氮素营养制约组和非制约组; 3) 氮素营养制约组的地上部生物量及其氮浓度值之间的关系以线性曲线拟合, 非制约组取其地上部生物量的平均值代表生物量最大值, 每次取样的理论临界氮浓度由上述曲线和以最大生物量为横坐标的垂线的交点的纵坐标决定。基于地上部生物量的临界氮浓度稀释曲线公式为

$$N_c = a \cdot DM^{-b} \quad (4)$$

式中 N_c 为临界氮浓度值, $g/100g$; a 为当地地上部生物量为 $1.00 t/hm^2$ 时植株的临界氮浓度; DM 为地上部干物质生物量, t/hm^2 ; b 为临界氮浓度稀释曲线斜率的统计学参数^[21]。

本研究采用均方根误差 (root mean squared error, RMSE) 和标准化均方根误差 (normalized root mean squared error, n-RMSE) 来校验模型精度, 并用模拟值与观测值的 1:1 直方图来直观显示模型的拟合度和可靠性, 斜率 >1 , 表示高估, <1 表示低估。RMSE 度量模拟值和实测值的平均差异, RMSE 值越小, 表明模拟值与实测值偏差越小。一般认为, $n-RMSE \leq 10\%$, 模型模拟性能极好; $20\% \leq n-RMSE < 10\%$, 模型模拟性能较好; $30\% \leq n-RMSE < 20\%$, 模型模拟性能一般; $n-RMSE > 30\%$, 模拟性能较差^[22]。

1.2.2 氮素营养指数模型

采用 Lemaire 等^[23]提出的氮素营养指数 (nitrogen nutrition index, NNI) 评价甜椒植株体内氮素营养状况。

$$NNI = N_t / N_c \quad (5)$$

式中 N_t 为地上部生物量氮浓度实测值, $g/(100 g)$ 。NNI 表征作物植株体内氮素营养状况: $NNI > 1$, 表现为氮素营养过剩; $NNI = 1$, 氮素营养状况适宜; $NNI < 1$, 表现为氮素营养亏缺。

1.2.3 氮素吸收模型

温室甜椒植株氮吸收量 (N_{upt} , kg/hm^2) 与地上部生物量最大累积量 (maximum dry matter, DM_{max} , kg/hm^2) 之间的关系为

$$N_{upt} = 10 N_c \cdot DM_{max} \quad (6)$$

将式 (4) 代入式 (6) 得到温室甜椒临界氮浓度吸收模型

$$N_{uptc} = 10a \cdot DM_{max}^{1-b} \quad (7)$$

式中 N_{uptc} 为临界氮吸收量, kg/hm^2 ; $1-b$ 为生长参数, 表征氮相对吸收速率与地上部生物量累积速率之比。

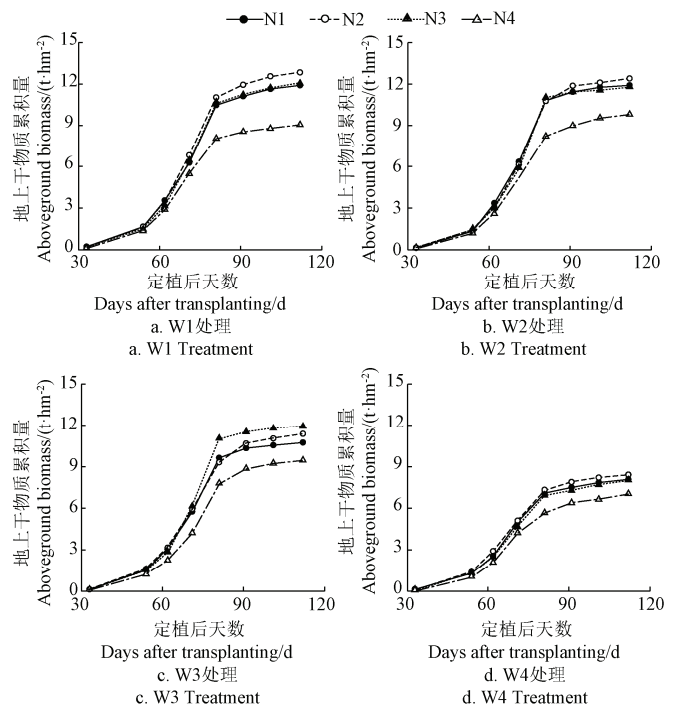
1.3 数据处理与分析

利用回归拟合方法建立临界氮浓度稀释曲线经验模型 (2014 年), 采用 2015 年的独立测定数据对模型进行验证。采用 Excel 2013 进行数据整理和误差分析, SPSS 18.0 软件中的多重比较法最小显著 (least-significant difference, LSD) 进行方差分析, 显著性水平设定为 0.05, 使用 Origin 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉水平下温室甜椒地上部生物量及含氮量变化

图 1 为不同灌溉和施 N 水平下温室甜椒地上部生物量的动态累积过程。由图可以看出, 定植后随生育期发展, 甜椒地上部生物量逐渐增大, 定植后 54 d 左右开始表现出差异, 随后差异逐渐变大。由曲线斜率的变化可知, 相同灌溉水平下, 定植后 62 d 左右开始, N2 氮素处理下地上部生物量增长率最大, N1 和 N3 氮素处理之间无明显差异 (W3 灌溉水平除外, 其 N3 氮素处理的地上部生物量增长率最大), N4 氮素处理的地上部生物量极显著低于其他处理 ($P < 0.01$)。说明不同水分条件下一定范围内提高施氮水平可促进植株生长发育, 施氮过量则造成氮素营养供过于求, 改变根区土壤微环境, 不利于植株吸收利用, 适量的水分和氮素营养成分供应有利于植株生物量的积累。本试验条件下, 4 个灌溉水平下甜椒地上部生物量的变化范围分别为 $0.15 \sim 12.84$ (W1), $0.15 \sim 12.4$ (W2), $0.11 \sim 11.90$ (W3), $0.07 \sim 8.40 t/hm^2$ (W4), 各灌溉水平下 N4 处理甜椒地上部生物量均显著低于其他处理 ($P < 0.05$)。



注: N1~N4 分别表示 4 个氮素水平 300、225、150、75 $kg \cdot km^{-2}$; W1~W4 分别表示 4 个灌水量水平 $105\%ET_0$ 、 $90\%ET_0$ 、 $75\%ET_0$ 、 $60\%ET_0$, ET_0 为参考作物蒸散量; 下同。

Note: N1~N4 are 4 nitrogen levels of 300, 225, 150, and 75 $kg \cdot km^{-2}$, respectively; W1~W4 are 4 irrigation levels with $105\%ET_0$, $90\%ET_0$, $75\%ET_0$, $60\%ET_0$, respectively, and ET_0 is reference crop evapotranspiration; same below.

图 1 2014 年不同灌溉水平下氮肥对温室甜椒地上部生物量的影响

Fig.1 Effects of nitrogen application rates on aboveground biomass of greenhouse bell pepper under difference irrigation levels in 2014

图 2 为不同灌溉和施 N 水平下甜椒植株含氮量动态

变化过程。由图可知, 增加灌水量和施氮量, 甜椒植株含氮量呈增加趋势。从曲线斜率可知, 植株含氮量随生育期的发展呈减小趋势。相同生育期 W1 灌溉水平下含氮量整体水平较高, 且结果期 W2 和 W3 灌溉水平下减小趋势变缓, W4 灌溉水平下植株含氮量整体水平显著低于其他灌溉水平。4 个灌溉水平下 (W1~W4) 甜椒植株含氮质量分数的范围分别为 1.43%~4.65%、1.45%~4.43%、1.36%~4.33%、1.04%~3.42%。说明适量的水分供应有利于植株对氮素营养的吸收利用, 尤其是结果期氮素营养迅速在果实中积累^[24-25], 促进了果实的生长发育, 灌溉水平过高增强了植株的营养生长, 易产生“徒长”现象, 灌溉水平过低则因水分不足无法满足植株正常生长需求, 对氮素营养的吸收利用受到制约。

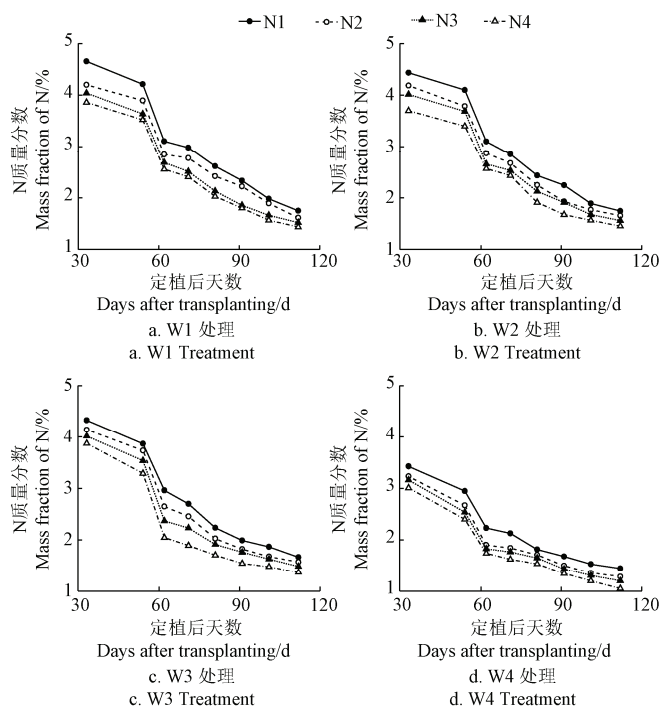


图2 2014 年不同灌溉水平下温室甜椒地上部氮含量的动态变化
Fig.2 Dynamic of nitrogen content in aboveground of greenhouse bell pepper under difference irrigation levels in 2014

2.2 温室甜椒临界氮稀释曲线模型的构建与验证

2.2.1 温室甜椒临界氮浓度稀释曲线模型构建

定植后 54 d 之前, 植株氮浓度值随生物量的增加无显著降低, 且生物量较小, 低于 1.00 t/hm², 因此不采用氮素临界稀释曲线来拟合该阶段的氮浓度值, 以临界氮浓度常数代之, 该常数为不受氮素制约处理植株体内最小氮浓度与受氮素制约处理的最大氮浓度的平均值^[6], 经计算 W1、W2、W3 和 W4 灌溉水平下临界氮浓度常数分别为 4.54、4.72、4.64 和 4.38 g/100g, 其对应最小生物量分别为 1.22、1.36、1.29、1.19 t/hm²。根据式 (4) 对定植后 54 d 临界氮浓度及其对应的地上部生物量数据进行线性拟合, 得到各灌溉水平下甜椒的临界氮浓度稀释曲线经验模型。从而, 4 个灌溉水平下甜椒临界氮浓度稀释曲线经验模型表达式为

$$\begin{aligned} W1: N_c &= \begin{cases} 4.53DW^{-0.322} & DW > 1.22, R^2 = 0.936, P < 0.01 \\ 4.54 & DW \leq 1.22 \end{cases} \\ W2: N_c &= \begin{cases} 5.19DW^{-0.318} & DW > 1.36, R^2 = 0.901, P < 0.01 \\ 4.72 & DW \leq 1.36 \end{cases} \\ W3: N_c &= \begin{cases} 4.71DW^{-0.320} & DW > 1.29, R^2 = 0.908, P < 0.01 \\ 4.64 & DW \leq 1.29 \end{cases} \\ W4: N_c &= \begin{cases} 3.64DW^{-0.308} & DW > 1.19, R^2 = 0.955, P < 0.01 \\ 4.38 & DW \leq 1.19 \end{cases} \quad (8) \end{aligned}$$

参数 a 随灌溉水平的提高呈先增大后减小的趋势, 说明适宜的灌水可增大植株临界氮浓度值, 提高植株对氮素营养的容纳能力, 促进作物生长、生物量累积, 导致植株氮浓度值降低速率加快。由参数 a 和灌水量 I 拟合线性曲线可以得出不同水分条件下参数 a 的计算式

$$a = -0.0004 \cdot I^2 + 0.197 \cdot I - 17.830 \quad (9)$$

4 个灌水水平下参数 b 无显著差异, 以其均值作为不同水分条件下临界氮浓度稀释曲线参数 b , 临界氮浓度常数及其对应最小生物量以潜在最大值 4.72 g/(100 g) 和 1.36 t/hm² 计。

综上, 不同水分条件下甜椒临界氮浓度稀释曲线模型表达式为

$$N_c = \begin{cases} (-0.0004 \cdot I^2 + 0.197 \cdot I - 17.830) \cdot DW^{0.317} & DW > 1.36 \\ 4.72 & DW \leq 1.36 \end{cases} \quad (10)$$

2.2.2 温室甜椒临界氮浓度稀释曲线模型验证

采用独立的数据点对临界氮稀释曲线经验模型进行校验, 即利用 2015 年不同灌溉条件下 (W1、W2、W3、W4) 试验结果对甜椒临界氮浓度系数曲线经验模型进行验证, 其步骤如下: 将各灌溉水平下的灌水量与地上部生物量 (定植后 62、72、81、91、101 和 112 d) 分别带入式 (10) 中计算临界氮浓度模拟值 (样本数 $n=24$), 做出观测值和模拟值的 1:1 直方图, 通过 RMSE 和 n -RMSE 来评价模型的精度, 结果图 3 所示。从图 3 可以看出 W1、W2 和 W3 水平下观测值和模拟值关系良好, W4 水平下稍差, 但考虑到 W4 为重度亏缺灌溉处理, 在生产实践中难于得到应用, 故观测值和模拟值之间整体关系较好。模型精度评判的 n -RMSE 为 16.63%, 介于 10%~20% 之间, 达到了较好水平, 说明经验模型具有较好的精度, 可以进一步用于植株体内的氮营养诊断。

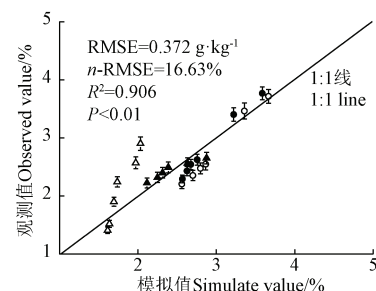


图3 2015 年日光温室甜椒临界氮浓度模拟与观测值
Fig.3 Simulated and observed critical nitrogen content of solar greenhouse bell pepper in 2015

2.3 基于氮营养指数模型的营养诊断

根据式 (5) 计算不同灌溉条件下甜椒在各施氮处理下生育期内营养指数 (NNI) 的动态变化如图 4 所示。从图 4 可以看出, 甜椒 NNI 随生育期发展呈减小趋势。W1、W2、W3 和 W4 水平下 NNI 均值变化区间分别为 0.88~1.21、0.92~1.33、0.91~1.13 和 0.89~1.08, 说明 NNI 随灌水量的增加呈先增加后减小的趋势。各水分条件下, N1 和 N2 氮素处理 NNI>1, 表明氮营养过剩, N3 和 N4 处理 NNI<1, 表明氮营养不足, 一定程度抑制了甜椒生物量的累积。N1、N2、N3 和 N4 水平下 NNI 均值变化区间分别为 1.04~1.35、0.99~1.14、0.84~1.03 和 0.75~0.93, 随施氮量的增加呈增加的趋势。综合考虑各水分条件下整个生育期氮素营养状况, 甜椒的最佳施氮量应介于 N2~N3 (即 150~225 kg/hm²) 之间, 且更接近 N2。

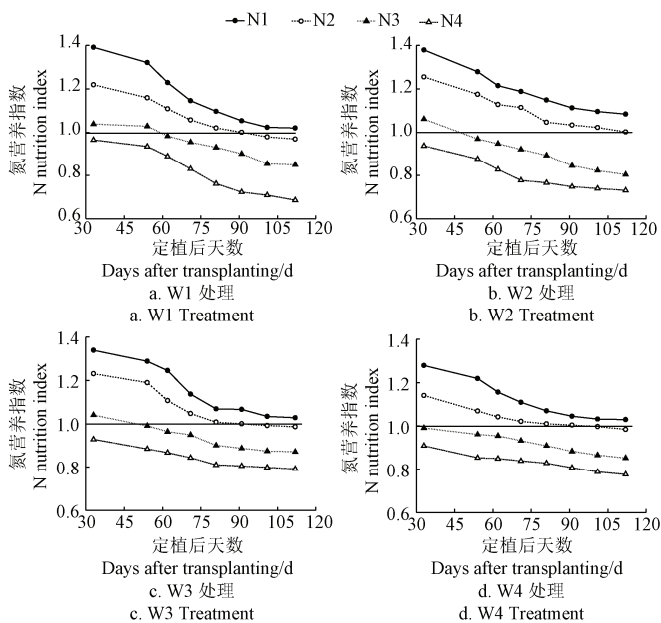


图 4 2015 年不同灌溉水平下温室甜椒营养指数的动态变化
Fig.4 Dynamic of nitrogen nutrient index of greenhouse bell pepper under difference irrigation levels in 2015

2.4 基于氮素吸收模型的氮营养诊断

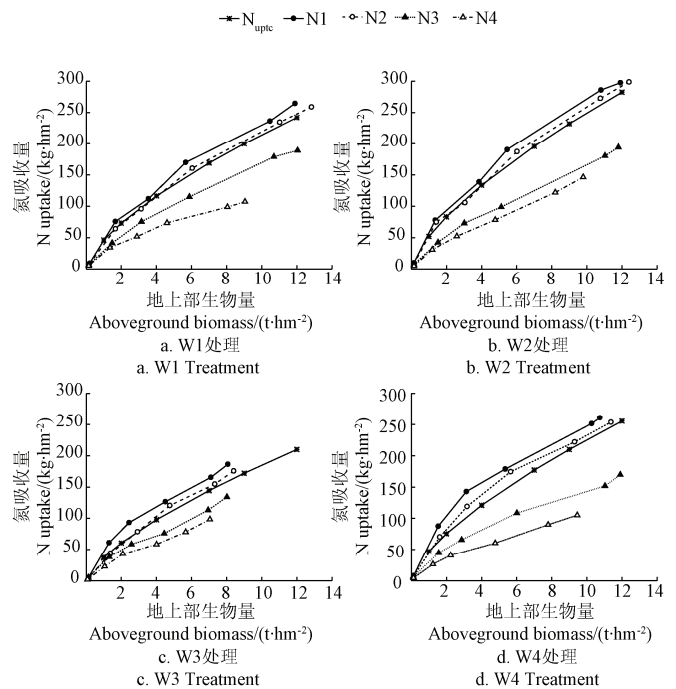
利用 (7) 式计算出的在不同灌溉条件下甜椒临界氮吸收模型

$$N_{\text{uptc}} = 10 \times (-0.0004 \cdot I^2 + 0.197 \cdot I - 17.830) \cdot DW_{\text{max}}^{0.683} \quad (11)$$

由式 (11) 可以看出, 灌水量直接影响甜椒整个生育期的氮营养吸收状况, 随灌水量的增加甜椒对氮素营养的吸收能力呈先增加后减小的趋势, 说明适宜的灌水量有利于促进植株对氮素营养的吸收。

甜椒氮吸收量随施氮量和地上部生物量的增加呈增加趋势 (图 5), W2 灌溉水平下植株氮吸收量较高, W1 和 W3 水平之间无显著差异, W4 水平下氮吸收量显著低于其他水平, 且各灌溉水平下临界氮吸收量曲线均处于 N3~N2 (即 150~225 kg/hm²) 之间, 且接近 N2, 这与基于 NNI 的营养诊断结论一致。说明适宜的水分条件有利于促进植株对氮素的吸收, 水分过量则可能是因为

氮淋失量的增加, 导致氮吸收量减少, 水分过低无法满足植株正常需求, 氮吸收能力降低。以 W2 水平为例分析相同灌溉条件下甜椒地上生物量的累积和氮吸收量之间的关系, 可以看出 N2 施氮处理的氮吸收量低于 N1 处理 (图 5b), 而地上部生物量显著高于 N1 处理 (图 1b), N3 处理的氮吸收量显著低于 N1 处理 (图 5b), 而地上部生物量与 N1 处理之间无显著差异 (图 1b), 说明适宜的氮吸收量有利于提高甜椒地上部生物量的累积速率, 氮素吸收过多反而不利于地上部生物量的累积, 氮素吸收不足无法满足植株生长基本营养需求, 抑制植株生长, 地上部生物量累积速率较低。



注: N_{uptc} 为临界氮吸收量。
Note: N_{uptc} is critical N uptake.

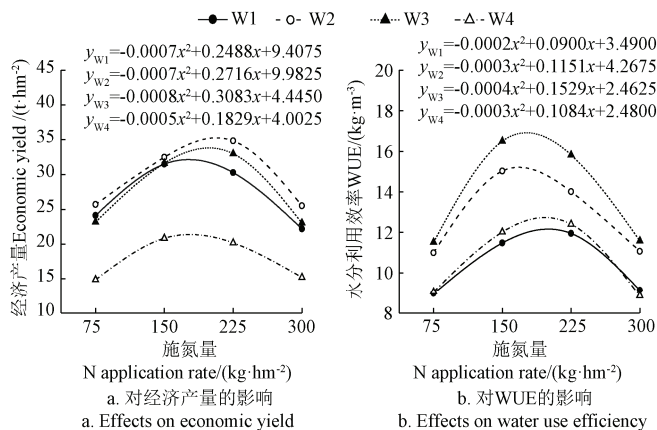
图 5 2015 年不同灌溉条件下温室甜椒地上部生物量与氮吸收量的关系

Fig.5 Relationships between crop total-N uptake and aboveground biomass of greenhouse bell pepper under difference irrigation conditions in 2015

2.5 氮素营养对经济产量和水分利用效率的影响

图 6 为不同灌溉和施氮水平对甜椒经济产量和 WUE 的影响。图 6 表明, 相同灌溉条件下, 甜椒的经济产量和 WUE 随施氮量增加而增加, 但施氮量增至某一定数值后经济产量和 WUE 又随施氮量增加而降低。由甜椒经济产量与施氮量拟合曲线可以看出 (图 6a), 4 个灌溉水平下施氮量均在 150~225 kg/hm² 之间甜椒可获得最大经济产量, 这与前述及施氮量为 150~225 kg/hm² 之间地上部生物量最大的结论相符。说明较高的生物量累积是作物高产的基础, 养分吸收则影响生物量的累积^[26]。同时, 由甜椒 WUE 与施氮量拟合曲线可以看出 (图 6b), 4 个灌溉水平下施氮量均在 150~225 kg/hm² 之间可获得最大 WUE。经计算, W1、W2、W3 和 W4 水平下基于经济产

量最优时适宜的施氮量分别为 177.71、194.00、192.69、182.90 kg/hm²，对应获得经济产量分别为 31.52、35.33、34.14 和 20.73 t/hm²，基于 WUE 最优时适宜的施氮量为 225.00、191.83、191.13、80.67 kg/hm²，对应 WUE 分别为 13.62、15.30、17.07、12.27 kg/m³。说明在一定灌溉条件下甜椒的生长发育过程中临界氮吸收量的存在^[15,27]，过量施氮和氮肥亏缺均会降低经济产量和 WUE，但经济产量和 WUE 不能同时达到最大。4 个灌溉水平下甜椒地上部生物量在施氮量超过 150 kg/hm² 时基本维持统计学意义的相等范围内（图 1），但经济产量和 WUE 显著降低，说明超过植株临界氮吸收量后施氮量的增加不但不能同步大幅度提高生物量，反而会抑制果实对营养成分的吸收利用，降低经济产量和 WUE。



注：所有公式 $R^2 > 0.96$, $P < 0.01$ 。
Note: $R^2 > 0.96$, $P < 0.01$ for all equations.

图 6 2015 年不同灌溉条件下氮肥对温室甜椒经济产量和水分利用效率的影响

Fig.6 Effects of N application rates on economic yield and water use efficiency WUE of greenhouse bell pepper in 2015

3 讨论

3.1 甜椒与其他作物临界氮浓度稀释曲线模型比较

本研究采用自动滴灌施肥的栽培模式，构建了日光温室不同水分条件下甜椒临界氮浓度稀释曲线经验模型，并基于临界氮营养指数和氮吸收模型对甜椒的需氮量和营养状况进行了诊断。Lemaire 等^[28]于 1997 年建立了 C3 类作物的临界氮浓度稀释曲线模型 $N_c = 5.21DW^{-0.56}$ ，较之于该模型本研究构建经验模型的参数小，主要原因是临界氮浓度稀释曲线模型的参数受农艺措施，作物生长的生态气候，以及作物类型和品种等影响^[29]，任何模型应用到某一特定生态气候环境和作物时，模型参数都需要重新率定。甜椒和番茄同属 C3 类作物中的茄科类蔬菜，生长特性和习性具有较大的相似性，因此在不受水分制约条件下 Tei 等^[14]建立的模型 ($N_c = 4.53DW^{-0.327}$)、王新等^[15]建立的模型 ($N_c = 4.352DW^{-0.274}$) 与本研究在 105%ET₀ 灌溉水平 (W1) 下所构建经验模型的参数 a 、 b 较为接近。本研究构建的经验模型参数随灌溉水平提高呈先增大后减小的趋势，说明适宜的灌水量有利于提高植株对氮素

营养的容纳能力，增加植株临界氮浓度值，促进地上部生物量的累积，提高作物经济产量。杨慧等^[13]构建的不同水分条件下番茄的临界氮稀释曲线模型时也得到相似的结论，但其研究对象为盆栽番茄，土壤微生态环境致使植株对氮素营养吸收收到抑制作用，因此构建的模型参数 a 远小于大田栽培模式下所构建的模型参数，仅为 1.140~1.512。同属茄科的马铃薯因生长习性与甜椒差异较大，根系直接供给果实水分和养肥，其临界氮浓度稀释曲线模型 ($N_c = 5.30DW^{-0.42}$)^[12]参数 a 较大。本研究 90%ET₀ 灌溉水平 (W2) 下经验模型的参数 a 较大，甜椒地上部生物量累积值（图 1）和经济产量（图 6）较高，75%ET₀ 灌溉水平 (W3) 下经验模型参数 a 则与 105%ET₀ 灌溉水平 (W1) 下的无显著差异，地上部生物量累积值（图 1）和经济产量（图 6）亦无显著差异，说明适当的水分胁迫下，干旱锻炼的考验可促进作物的对水分和养分吸收利用^[24-25,29-30]，提高生物量^[29,31-32]。60%ET₀ 灌溉水平 (W4) 下的经验模型参数 a 较小是因为水分过度亏缺条件下，植株对氮素营养的吸收受到限制，导致植株生长受到一定的抑制作用。

本研究所构建的临界氮浓度稀释曲线经验模型可较好地描述各水分条件下甜椒地上部生物量和植株氮浓度之间的关系。较之于前人基于氮素单一因素构建的临界氮浓度稀释曲线模型，本研究构建的不同水分条件下的经验模型具有更为广泛的适用性，但该经验模型仅由单一品种单一生态气候环境的试验资料构建，其普适性有待进一步提高。此外，由于研究区没有温室甜椒的作物系数，本研究计算灌水量所采用的作物系数参照于 FAO-56，可能存在一定的局限性，作物系数还需要进一步优化。

3.2 基于甜椒氮素营养诊断和增产节水效应的最佳施氮量确定

基于 NNI 实时诊断植株氮素营养状况，量化作物受氮素营养制约程度^[33]，是合理施氮，促进作物生长，提高经济产量的基础。前人研究表明，NNI 能较好的反应小麦^[4-6]、玉米^[7-9]、番茄^[15]等作物的氮素营养状况，利用 NNI 可量化作物生长过程中的氮素营养供应量，及时采用应对措施，调整灌水施肥策略，促进作物生长。

本研究分析计算了不同水氮供应下甜椒各生育期内 NNI 的动态变化（图 4）和甜椒地上部生物量与氮吸收量关系（图 5），得出了甜椒 NNI 随灌水量增加呈先增加后减小的趋势，随施氮量增加呈增加的趋势，氮吸收量随施氮量和地上部生物量的增多呈增加趋势的结论，综合考虑甜椒全生育期营养状况、地上部生物量和氮吸收量，本研究分析认为甜椒的最佳施氮量介于 150~225 kg/hm² 之间，该施氮量有利于促进植株对氮素营养的吸收利用，提高地上部生物量的累积速率。由本研究拟合的甜椒经济产量与施氮量线性曲线也说明促使甜椒得到最高经济产量和 WUE 的施氮量为 150~225 kg/hm²。可见作物获得较高经济产量和 WUE 的前提是较高生物量的累积，适宜的养分吸收则是生物量累积的前提。经

进一步分析计算, 本试验条件下提高灌溉水平, 植株的氮素吸收量、地上部生物量、经济产量和 WUE 呈先增加后减小的趋势, 其中 75%ET₀ 和 90%ET₀ 灌溉水平下有利于植株对氮素营养的吸收利用, 地上部生物量、经济产量和 WUE 较高。基于经济产量考虑, 75%ET₀ 和 90%ET₀ 灌溉水平下适宜施氮量分别为 192.69 和 194.00 kg/hm², 对应经济产量分别为 34.14 和 35.33 t/hm²; 基于 WUE 考虑, 75%ET₀ 和 90%ET₀ 灌溉水平下适宜施氮量分别为 191.13 和 191.83 kg/hm², 对应 WUE 分别为 17.07 和 15.30 kg/m³。较之于 90%ET₀ 灌溉水平, 75%ET₀ 灌溉水平下甜椒理论最优经济产量降低了 3.34%, 理论 WUE 则提高了 11.54%。本研究分析认为一定灌溉条件下过量施氮和氮肥亏缺均会降低甜椒的经济产量和 WUE, 但经济产量和 WUE 不能同时达到最大, 邢英英等^[34]以番茄为研究对象进行的水肥试验也得出了类似结论。甜椒经济产量和 WUE 随施氮量的增加呈先增高后降低的趋势, 且施氮量超过 150 kg/hm² 时, 地上部生物量基本维持统计学意义的相等范围内 (图 1), 说明超过植株临界氮吸收量后施氮量的增加不但不能同步大幅度提高生物量, 反而会抑制果实对营养成分的吸收利用, 降低经济产量, 这与前人施氮过高会增加甜椒坐果率, 但小果率增多, 经济产量降低^[35-37]的研究结论相似。本研究分析计算的最佳施氮范围较美国公认^[38]的甜椒最佳施氮量 224 kg/hm² 小, 除土壤本底差异这一因素外, 另一主要原因是本试验在设施农业环境下进行, 在线式智能灌溉施肥机 (NETAJET 3G INLINE) 应用, 提高了灌水施肥的精准性, 提高了农田水肥利用效率。

4 结 论

1) 依据 2a 温室小区试验 4 个灌溉水平 (105%ET₀、90%ET₀、75%ET₀、60%ET₀) 4 个氮素水平 (75、150、225、300 kg/hm²) 的试验资料, 构建和验证了西北地区不同水分条件下日光温室甜椒的临界氮浓度稀释曲线模型, 从模型参数看, 提高灌溉水平, 植株的氮素吸收量、地上部生物量、经济产量和水分利用效率呈先增加后减小的趋势。

2) 基于氮营养指数模型与氮素吸收模型的氮素营养诊断结果一致: 各灌溉水平下最佳施 N 量均介于 150~225 kg/hm² 之间。

3) 氮素营养对经济产量和水分利用效率的效应分析结果表明, 灌溉水平为 75%ET₀ 和 90%ET₀ 时较有利于甜椒的植株对氮素营养的吸收利用, 地上部生物量、经济产量和 WUE 较高。在适宜施氮量无显著差异的情况下, 灌溉水平为 75%ET₀ 时可获得仅低 90%ET₀ 灌溉水平约 3%的经济产量, 但可提高约 11%的水分利用效率。考虑到研究区水资源比较短缺, 灌水量 75%ET₀ 施氮量为 190 kg/hm² 左右为最佳滴灌策略。

【参 考 文 献】

- [1] 李俊, 李建明, 曹凯, 等. 西北地区设施农业研究现状及存在的问题[J]. 中国蔬菜, 2013(6): 24—29.
- [2] Greenwood D J, Gastal F, Lemaire G, et al. Growth rate and %N of field grown crops: theory and experiments[J]. Annals of Botany, 1991, 67(2): 181—190.
- [3] Olesen J E, Berntsen J, Hansen E M, et al. Crop nitrogen demand and canopy area expansion in winter wheat during vegetative growth[J]. European Journal of Agronomy, 2002, 16(4): 279—294.
- [4] Justes E, Mary B, Meynard J M, et al. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops[J]. Annals of botany, 1994, 74(4): 397—407.
- [5] Yue Shanchao, Meng Qingfeng, Zhao Rongfang, et al. Critical nitrogen dilution curve for optimizing nitrogen management of winter wheat production in the North China Plain[J]. Agronomy Journal, 2012, 104(2): 523—529.
- [6] Yao X, Zhao B, Tian Y C, et al. Using leaf dry matter to quantify the critical nitrogen dilution curve for winter wheat cultivated in eastern China[J]. Field Crops Research, 2014, 159: 33—42.
- [7] Plénet D, Lemaire G. Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration[J]. Plant and Soil, 1999, 216(1/2): 65—82.
- [8] 梁效贵, 张经廷, 周丽丽, 等. 华北地区夏玉米临界氮稀释曲线和氮营养指数研究[J]. 作物学报, 2013, 39(2): 292—299.
- [9] 强生才, 张富仓, 向友珍, 等. 关中平原不同降雨年型夏玉米临界氮稀释曲线模拟及验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 168—175.
- [10] Qiang Shengcai, Zhang Fucang, Xiang Youzhen, et al. Simulation and validation of critical nitrogen dilution curve for summer maize in Guanzhong Plain during different rainfall years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(17): 168—175. (in Chinese with English abstract)
- [11] Xue Xiaoping, Sha Yizhuo, Guo Wenqi, et al. Accumulation characteristics of biomass and nitrogen and critical nitrogen concentration dilution model of cotton reproductive organ[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6204—6211.
- [12] Ata-Ul-Karim S T, Yao X, Liu X, et al. Development of critical nitrogen dilution curve of Japonica rice in Yangtze River Reaches[J]. Field Crops Research, 2013, 149: 149—158.
- [13] Giletto C M, Echeverría H E. Critical nitrogen dilution curve for processing potato in Argentinean humid pampas[J]. American Journal of Potato Research, 2012, 89(2): 102—110.
- [14] 杨慧, 曹红霞, 柳美玉, 等. 水氮耦合条件下番茄临界氮浓度模型的建立及氮素营养诊断[J]. 植物营养与肥料学

- 报, 2015, 21(5): 1234—1242.
- Yang Hui, Cao Hongxia, Liu Meiyu, et al. Simulation of critical nitrogen concentration and nitrification index of tomato under different water and nitrogen conditions[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2015, 21(5): 1234—1242. (in Chinese with English abstract)
- [14] Tei F, Benincasa P, Guiducci M. Critical nitrogen concentration in processing tomato[J]. European Journal of Agronomy, 2002, 18(1): 45—55.
- [15] 王新, 马富裕, 刁明, 等. 滴灌番茄临界氮浓度、氮素吸收和氮营养指数模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 99—108.
- Wang Xin, Ma Fuyu, Diao Ming, et al. Simulation of critical nitrogen concentration, nitrogen uptake and nitrogen nutrition index of processing tomato with drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(18): 99—108. (in Chinese with English abstract)
- [16] Bar-Tal A, Aloni B, Karni L, et al. Nitrogen nutrition of greenhouse pepper. II. Effects of nitrogen concentration and $\text{NO}_3\text{:NH}_4$ ratio on growth, transpiration, and nutrient uptake[J]. Hort Science, 2001, 36(7): 1252—1259.
- [17] Yasur H, Ben Gal A, Yermiyahu U, et al. Nitrogen management of greenhouse pepper production: Agronomic nutritional, and environmental implications[J]. Hort Science, 2013, 48(10): 1241—1249.
- [18] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evaporation guidelines for computing crop water requirements[M]//FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [19] 陈新明, 蔡焕杰, 李红星, 等. 温室大棚内作物蒸发蒸腾量计算[J]. 应用生态学报, 2007, 18(2): 317—321.
- Chen Xinming, Cai Huanjie, Li Hongxing, et al. Calculation of crop evapotranspiration in greenhouse[J]. The Journal of Applied Ecology, 2007, 18(2): 317—321. (in Chinese with English abstract)
- [20] Justes E, Mary B, Meynard J M, et al. Determination of acritical nitrogen dilution curve for winter wheat crops[J]. Annals of Botany, 1994, 74(4): 397—407.
- [21] Gastal F, Lemaire G. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective[J]. Journal of Experimental Botany, 2002, 53: 789—799.
- [22] Chen Xinping, Zhang Fusuo, Cui Zhenling, et al. Critical grain and stover nitrogen concentration sat harvest for summer maize production in China[J]. Agronomy Journal, 2010, 102: 289—295.
- [23] Lemaire G, Gastal F, Cruz P, et al. Relationships between plant-N, plant mass and relative growth rate for C3 and C4 crops[C]//Proceedings of the 1st ESA Congress. Paris, 1990: 5—7.
- [24] 岳文俊, 张富仓, 李志军, 等. 水氮耦合对甜瓜氮素吸收与土壤硝态氮累积的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 88—96.
- Yue Wenjun, Zhang Fucang, Li Zhijun, et al. Effects of water and nitrogen coupling on nitrogen uptake of muskmelon and nitrate accumulation in soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery. 2015, 46(2): 88—96. (in Chinese with English abstract)
- [25] 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 70—80.
- Xing Yingying, Zhang Fucang, Zhang Yan, et al. Promoting tomato growth and nutrient uptake using appropriate combination of water and fertilizer under mulched drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(21): 70—80. (in Chinese with English abstract)
- [26] Watt M S, Clinton P W, Whitehead D, et al. Aboveground biomass accumulation and nitrogen fixation of broom (*Cytisus scoparius* L.) growing with juvenile *Pinus radiata* on a dryland site[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 184: 93—104.
- [27] 薛晓萍, 陈兵林, 郭文琦, 等. 棉花临界需氮量动态定量模型[J]. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2363—2370.
- Xue Xiaoping, Chen Binglin, Guo Wenqi, et al. Dynamic quantitative model of critical nitrogen demand of cotton[J]. The Journal of Applied Ecology, 2006, 17(12): 2363—2370. (in Chinese with English abstract)
- [28] Lemaire G, Gastal F. N uptake and distribution in plant canopies[M]. Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops. Heidelberg, Berlin: Springer, 1997: 3—43.
- [29] Lodhi A S, Kaushal A, Singh K G. Impact of irrigation regimes on growth, yield and water use efficiency of sweet pepper[J]. Indian Journal of Science and Technology, 2014, 7(6): 790—794.
- [30] Khan M S I, Roy S S, Pall K K. Nitrogen and phosphorus efficiency on the growth and yield attributes of Capsicum[J]. Academic Journal of Plant Sciences, 2010, 3(2): 71—78.
- [31] 吴立峰, 张富仓, 周罕冕, 等. 不同滴灌施肥水平对北疆棉花水分利用率和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 137—146.
- Wu Lifeng, Zhang Fucang, Zhou Hanmi, et al. Effect of drip irrigation and fertilizer application on water use efficiency and cotton yield in North of Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(20): 137—146. (in Chinese with English abstract)
- [32] Gupta A J, Ahmad M F, Bhat F N. Studies on yield, quality, water and fertilizer use efficiency of capsicum under drip irrigation and fertigation[J]. Indian Journal of Horticulture, 2010, 67(2): 213—218.
- [33] Ågren G I. Theory for growth of plants derived from the nitrogen productivity concept[J]. Physiologia Plantarum, 1985, 64(1): 17—28.
- [34] 邢英英, 张富仓, 吴立峰, 等. 基于番茄产量品质水肥利用效率确定适宜滴灌灌水施肥量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 1): 110—121.
- Xing Yingying, Zhang Fucang, Wu Lifeng, et al. Determination of optimal amount of irrigation and fertilizer under, drip fertigated system based on tomato yield, quality, water and, fertilizer use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(Suppl.1): 110—121. (in Chinese with

English abstract)

- [35] 鲜开梅, 王彦波, 苑育文. 氮素在甜椒等蔬菜作物方面的研究进展[J]. 现代农业科技, 2006, 7: 6—9.
Xian Kaimei, Wang Yanbo, Yuan Yuwen. Research progress of nitrogen in vegetable crops (bell pepper)[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2006, 7: 6—9. (in Chinese with English abstract)
- [36] Abu-Zahra T R. Influence of agricultural practices on fruit quality of bell pepper[J]. Pakistan Journal of Biological Sciences, 2011, 14(18): 876—881.
- [37] 许爱文. 甜椒高产施肥技术[J]. 河北农业科技, 2002, 6: 10.
Xu Aiwen. High yield fertilizer technology of pepper[J]. Hebei Agricultural Science and Technology, 2002, 6: 10. (in Chinese with English abstract)
- [38] Scholberg J M, Zotarelli L, Tubbs R S, et al. Nitrogen uptake efficiency and growth of bell pepper in relation to time of exposure to fertilizer solution[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2009, 40(13/14): 2111—2131.

Nutrition diagnosis for N in bell pepper based on critical nitrogen model in solar greenhouse

Xiang Youzhen, Zhang Fucang^{*}, Fan Junliang, Qiang Shengcai,
Zou Haiyang, Yan Shicheng, Wu You, Tian Jianke

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The unreasonable application of water and nitrogen significantly affects the growth and the yield of greenhouse vegetables in northwest China, which has raised the need to adjust the crop irrigation and nitrogen (N) fertilizer requirements. Based on the aboveground biomass, the assessment of crop N status is an effective approach to optimize N management in greenhouse vegetable production. The research was conducted in a sunlit, ventilated greenhouse at the Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas, Ministry of Education, in Yangling District, Shanxi Province, during the spring-summer (April-July) seasons of 2014 and 2015. The site is located at 34°20'N, 108°04'E. There were 4 irrigation levels (W1: 105%ET₀, W2: 90%ET₀, W3: 75%ET₀, and W4: 60%ET₀, ET₀ is reference crop evapotranspiration) and four nitrogen levels (N1: 300, N2: 225, N3: 150, and N4: 75 kg/hm²), resulting in a total of 16 treatments. The plant samples at different treatments were taken 8 times during the study periods, i.e., 33, 54, 62, 72, 81, 91, 101, and 112 days separately after being transplanted, which were used to measure the aboveground biomass and total nitrogen of bell peppers. The yields of bell pepper were measured during the harvesting time. Soil moisture was measured before transplanting and after harvest using the time domain reflectometry. Water use efficiency was calculated by water balance method. Results showed that the total N uptake, aboveground biomass, yield and water use efficiency (WUE) were affected by the irrigation levels. The diagnosis results of the greenhouse pepper's nitrogen nutrition based on critical N model were the same between the model of nitrogen nutrition (NNI) and the model of N uptake. The optimal N fertilizer were between 150 and 225 kg/hm², but more closer to 225 kg/hm². The irrigation levels of 75%ET₀ and 90%ET₀ were more favorable to the increase in nitrogen nutrition uptake. The 2 irrigation levels economic yields were 34.14 and 35.33 t/hm², and WUE were 17.07 and 15.30 kg/m³, respectively. However, the economic yield and WUE could not achieve optimal results at the same time. The aboveground biomasses of bell pepper at the 2 irrigation had no significant difference when the N application rate was more than 150 kg/hm². The optimal N application rates were 194.00 and 192.69 kg/hm² based on the economic yield, while the optimal N application rates were 191.13 and 191.83 kg/hm² based on WUE. Considering the water shortage condition in the northwest China, the irrigation level of 75%ET₀ (N fertilizer application rate of about 190 kg/hm²) was suggested to be optimal for greenhouse bell pepper production since it could save water by about 11%, while the economic yield only declined by about 3% compared with the irrigation level of 90%ET₀. The study can provide theoretical basis and technical support for improving water and nitrogen management of greenhouse bell peppers in northwest China.

Keywords: nitrogen fertilizers, irrigation, greenhouse, bell pepper, critical nitrogen concentration, nitrogen nutrition index