

不同施氮水平下番茄叶片氮含量时空分布特征 及 SPAD 无损诊断模型构建

陈 辛, 李晓静, 刘杰才, 宋 阳

(内蒙古农业大学园艺与植物保护学院 呼和浩特 010018)

摘 要:为了解决当前温室番茄 SPAD 氮素诊断时叶位选择混乱、模型适用性差等问题,以温室番茄为研究对象,研究不同氮浓度梯度下不同生育时期、叶位的 SPAD 值、叶片氮含量及氮肥表观利用率(ANUE)的空间位置变化规律,通过相关性分析筛选最佳诊断叶位,并构建氮含量估测模型。结果表明,(1)番茄叶片氮含量随生育期呈先升后降趋势,上、中叶位大多数在V期(定植后 110 d)达峰值,下叶位在IV期(定植后 95 d)达峰值;同一时期同一叶位叶片氮含量随施氮水平升高呈先升后降趋势,N3(450 kg hm⁻²)水平下叶片氮含量最高(除下叶位 IV 期外);叶片氮含量垂直分布(除 IV 期外)整体表现为上叶位>中叶位>下叶位,低氮水平下不同叶位间差异更显著。(2)各叶位 SPAD 值随生育期推进呈先升后降变化趋势,空间分布在 II 期表现为上叶位>中叶位>下叶位。(3)Spearman 相关性分析显示,I~V期上叶位 SPAD 值与氮含量极显著相关(相关系数 0.948~0.993, $P<0.01$),VI期(定植后 125 d)下叶位二者相关性达极显著水平(相关系数 0.908, $P<0.01$),确定番茄 SPAD 氮素诊断最佳叶位为“I~V期(定植后 50~110 d)选上叶位,VI期(定植后 125 d)选下叶位”。(4)番茄叶片氮肥表观利用率(ANUE)以上叶位最高、下叶位最低,上、中叶位随施氮水平升高呈先升后降趋势,各叶位 ANUE 均在V期(定植后 110 d)达到峰值。(5)基于最佳叶位 SPAD 值构建的非线性氮含量估测模型拟合优度 R^2 为 0.879 3~0.965 3,其中II期(定植后 65 d)模型最高;模型验证结果显示,I期(定植后 50 d)模型可靠性最优(均方根方差 RMSE=0.90%,相对误差 RE=6.55%)。综上所述,番茄 SPAD 氮素无损诊断应采用“前上后下”的动态叶位选择策略,分生育期构建的氮含量估测模型可实现叶片氮素的精准诊断。

关键词:番茄;氮素无损诊断;SPAD 值;叶位;氮肥利用率

中图分类号:S641.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)08-063-09

Temporal and spatial distribution characteristics of nitrogen content in tomato leaves under different nitrogen application levels and construction of the SPAD non-destructive diagnostic model

Chen Xin, Li Xiaojing, Liu Jiecai, Song Yang

(College of Horticulture and Plant Protection, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, Inner Mongolia, China)

Abstract: To address the current issues of chaotic leaf position selection and poor model applicability in SPAD-based nitrogen diagnosis of greenhouse tomato, this study took greenhouse tomato as the research object and investigated the spatial variation patterns of SPAD value, leaf nitrogen content, and apparent nitrogen use efficiency (ANUE) at different growth stages and leaf positions under gradient nitrogen concentrations. Through correlation analysis, the optimal diagnostic leaf position was identified, and nitrogen content estimation models were established. The results showed that: (1) Tomato leaf nitrogen content increased first and then decreased over the growth stage. The upper and middle leaf positions almost peaked at stage V (110 days after transplanting), while the lower leaf position peaked at stage IV (95 days after transplanting). At the same stage and leaf position, leaf nitrogen content rose initially and then decreased with increasing nitrogen application rates, with the highest value observed under the N3 treatment (450 kg · hm⁻²) (except lower leaf position at stage IV). The vertical distribution of leaf nitrogen content generally followed the order (except stage IV): Upper leaf position > middle leaf position > lower leaf position, with more pronounced differences among leaf positions under low nitrogen conditions. (2) SPAD value at all leaf positions also increased first and then decreased over the growth

收稿日期:2025-12-17;修回日期:2026-04-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD2000600);内蒙古自治区重点研发和成果转化计划项目(2023YFHH0095)

作者简介:陈 辛,男,在读硕士研究生,研究方向为设施作物营养调控。E-mail:3045205648@qq.com

通信作者:宋 阳,男,副教授,研究方向为设施园艺。E-mail:496928735@qq.com

stage, with a spatial distribution order at stage II of upper leaf position > middle leaf position > lower leaf position. (3) Spearman correlation analysis revealed that SPAD value at the upper leaf position were significantly correlated with nitrogen content during stages I-V (50-110 days after transplanting), with correlation coefficients ranged from 0.948 to 0.993 ($P<0.01$). At stage VI (125 days after transplanting), the correlation at the lower leaf position also reached a highly significant level (correlation coefficient 0.908, $P<0.01$). Accordingly, the optimal leaf positions for SPAD-based nitrogen diagnosis were determined as upper leaf position for stages I-V and lower leaf for stage VI. (4) The apparent nitrogen use efficiency (ANUE) of tomato leaves was highest at the upper leaf position and lowest at lower leaf position. ANUE increased first and then decreased with rising nitrogen rate, and peaked at stage V for upper and mid leaf positions. (5) Non-linear nitrogen content estimation models constructed based on SPAD value at the optimal leaf positions achieved coefficient of determination (R^2) values ranging from 0.879 3 to 0.965 3, with the highest value at stage II (65 days after transplanting). Model validation results indicated that the stage I (50 days after transplanting) model exhibited the best reliability ($RMSE=0.90\%$, $RE=6.55\%$). In conclusion, non-destructive SPAD-based nitrogen diagnosis for tomato should adopt a dynamic leaf position selection strategy - "upper leaf position in early stages, lower leaf position in later stages" - and the nitrogen content estimation models constructed for different growth stages can enable accurate diagnosis of leaf nitrogen status.

Key words: Tomato; Non-destructive nitrogen diagnosis; SPAD value; Leaf position; Nitrogen use efficiency

叶绿素仪 (soil and plant analyzer development, SPAD) 可快速无损测定叶片叶绿素相对含量, 而多数作物的叶绿素含量与氮素含量存在显著正相关关系^[1], 因此该技术已成为作物氮素营养实时无损诊断的核心工具, 广泛应用于小麦^[2]、水稻^[3]、玉米^[4]及番茄^[5]等作物的氮素精准管理中。然而, 氮素在植物体内具有强移动性, 导致植株垂直空间氮分布异质性显著, 进而引发不同叶位叶片叶绿素含量差异^[6], 最终降低 SPAD 诊断模型的精度与稳定性^[7]。这一问题在水稻研究中已得到证实: 任红军等^[8]指出水稻倒三叶、倒四叶为 SPAD 氮诊断最优指示叶, 而李月帅等^[9]则发现杂交稻孕穗期、常规稻幼穗分化期的倒一叶 SPAD 值诊断效果更优, 表明作物生育期与叶位选择的交互作用会显著影响 SPAD 诊断准确性。

番茄作为全球产量最大的设施蔬菜^[9], 氮素是其生长发育与产量形成的关键限制因子, 但生产中普遍存在施氮过量现象。这不仅导致果实硝酸盐累积、品质下降, 还引发土壤板结、湖泊河流等水体富营养化的环境风险^[10]。氮肥表观利用率 (apparent nitrogen use efficiency, ANUE) 是衡量氮肥利用效率的核心指标, 能直观反映作物对氮肥的吸收利用程度^[11]。然而, 温室番茄生产中因施肥方式不当、氮素淋溶挥发及作物自身吸收分配特性等因素, ANUE 常低于 30%, 部分地区甚至不足 20%^[12]。精准施氮需依赖氮的实时无损监测, SPAD 技术虽具备便捷性优势, 但在番茄氮诊断应用中仍存在明显不足。叶位选择缺乏统一标准, Xiong 等^[13]认为, 番茄新叶与老叶的氮含量均与 SPAD 值显著相关, 均可作为诊断叶; 石小虎等^[9]通过分析 12 个节位叶

片, 提出第 8~第 10 节中叶位叶片的 SPAD 值与氮素营养状况线性关系最优: 二者在最佳诊断叶位的选取范围上存在明显分歧。关于 SPAD 氮素诊断营养的研究维度不完整, 现有研究未探究全生育期内不同叶位 SPAD 值、氮含量及 ANUE 的动态关联, 难以满足番茄全生育期氮诊断需求; 现有诊断模型未结合生育期与最佳叶位, 且未引入 ANUE 验证叶位选择与模型构建的合理性, 同时缺乏不同模型间的对比分析, 导致模型适用性有限^[14]。

因此, 本研究以温室番茄为材料, 设置氮浓度梯度试验, 系统测定全生育期不同叶位的 SPAD 值、叶片氮含量及 ANUE。通过相关性分析筛选最佳诊断叶位, 构建分生育期氮含量估测模型, 并结合叶片氮素分配理论、冠层光合效率优化理论及 SPAD 光学响应原理, 深入解析 SPAD 值与叶片氮含量时空分异的生理生态机制, 以期建立一套“分时期-选叶位-建模型-验效率”的系统诊断框架, 为温室番茄氮素精准管理提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验于 2024 年 3—10 月在内蒙古农业大学开展。温室坐北朝南, 跨度 7 m、高 4.4 m, 钢结构采光屋面覆盖 PVC 无滴膜, 配备保温被与砖混墙体。供试土壤 0~20 cm 耕层土壤的基本理化性质为碱解氮含量 (w , 下同) $78.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有机质含量 $18.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮含量 $0.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效磷含量 $80.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾含量 $124.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、pH 7.14, 电导率 $408.26 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。试验温室空气温度、相对湿度常年保持在 $13\sim 35^\circ\text{C}$ 、 $55\%\sim 80\%$ 。

1.2 试验设计

根据试验温室 0~20 cm 耕层土壤中碱解氮和有机质含量,折合土壤基础供氮量约 $95 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,结合番茄全生育期需氮量($300 \sim 450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),确定人工施氮梯度范围为 $0 \sim 600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,依次设置 5 个施氮水平: N0 ($0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 对照)、 N1 ($150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、 N2 ($300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、 N3 ($450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、 N4 ($600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。小区面积 20 m^2 ,小区间用埋深 50 cm 的农膜分隔,随机区组设计,3 次重复。

供试氮肥选用尿素(含氮量 46.4%),总施氮量的 10%作为基肥,于番茄定植时施用;剩余 90%作为追肥,自第一穗果膨大期(果实直径达 4 cm)起,每 15 d 追施 1 次,累计追施 6 次。试验以追肥次数为节点,将番茄全生育期划分为 I~VI 期。

供试番茄品种为金粉 88(陕西金鹏种苗有限公司选育),属高秧粉果、硬果类型。50 孔穴盘育苗,育苗基质为 $V_{\text{草炭}}:V_{\text{蛭石}}:V_{\text{珍珠岩}}=2:1:1$,待苗龄 50 d 时定植于日光温室内。定植方式采用高垄覆膜单行栽培,垄高 10 cm、宽 40 cm,两垄的中心间距为 80 cm,定植株距 30 cm。灌溉方式为膜下暗灌,定

植后浇第一次水,在第一穗果直径达 4 cm 时浇第二次水,浇水量为 $56.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (滴头流速 $1.7 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$,灌水 1 h),之后每采收 1 次果实浇水 1 次,浇水量为 $112.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (滴头流速 $1.7 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$,灌水 2 h)。追肥管理方面,于番茄膨果期坐果时,随滴灌追施磷酸二氢钾(有效成分含量: $\text{P}_2\text{O}_5 > 22.75\%$, $\text{K}_2\text{O} > 28.72\%$),施用量为 $10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,整枝方式采用单干整枝,及时抹除叶腋萌发的侧枝,待植株第 6 穗花完成坐果后,及时对主茎顶端进行打顶处理;其余田间管理措施均参照当地设施番茄标准化栽培技术规程的常规方案执行。

1.3 SPAD 数据与叶片氮含量测定

追肥后第 3 天晴天上午 09:00—11:00,选取 5 株长势一致的植株,用 SPAD-502(日本柯尼卡美能达公司)测定不同叶位 SPAD 值,随后收集对应叶片。叶片经 105°C 杀青 30 min 后于 80°C 烘干至恒质量,用 Vario EL cube 元素分析仪测定氮含量。

番茄 I~VI 期,把叶片按照在主干上着生位置(从上至下数)分为上叶位、中叶位和下叶位,各时期不同叶位对应的叶序如表 1 所示。

表 1 温室番茄不同生育时期叶位划分

Table 1 Leaf position classification of tomato plants at different growth stages in greenhouse

时期 Period	定植后时间 Time after transplanting/d	总叶数 Total leaf number	叶序 Phyllotaxis		
			上叶位 Upper leaf position	中叶位 Mid leaf position	下叶位 Lower leaf position
I	45	7~8	1	4	7
II	60	9~12	1	6	10
III	75	13~15	1	9	13
IV	90	16~18	1	12	17
V	115	19~21	1	15	19
VI	130	22~24	1	15	22

1.4 氮肥表观利用率计算

氮肥表观利用率(ANUE)^[11]计算如公式(1)。

$$\text{ANUE} = \frac{U_n - \text{N0}}{\text{N}_{\text{applied}}} \quad (1)$$

式中: U_n 为不同施氮处理叶位总吸氮量(如 N1 处理为 U_1), $U_n = \text{生物量} \times \text{含氮量} \times 100\%$, 生物量为叶片烘干后质量; N0 为 N0 处理地上部总吸氮量, $\text{N}_{\text{applied}}$ 为各处理实际施氮量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.5 数据分析

用 Excel 2016 整理数据, SPSS 24.0、GraphPad 8.0.2 进行统计分析, Origin 2024 作图与建模。将 SPAD 数据按 7:3 随机分为建模集(构建模型)与验证集(验证精度)。采用回归分析构建 SPAD 值与

氮含量的估测模型,选取拟合优度(R^2)最高的方程。模型精度用偏差率(D)、平均偏差率(AD)、决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)、相对误差(RE)评价,公式如下:

$$D = (P_{\text{实测值}} - P_{\text{预测值}}) / P_{\text{实测值}} \times 100\%; \quad (2)$$

$$AD = \sum \frac{|D|}{n} \quad (3)$$

式中: D 表示偏差率, P 表示番茄叶片氮含量, AD 表示平均偏差率, $|D|$ 表示偏差率绝对值, n 表示指标个数。

验证模型通过将验证集 SPAD 值代入估测模型中得到叶片氮素预测值,将叶片氮素预测值与验证集进行拟合,验证模型的精度采用实测值(验证

集)和预测值之间的决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)来分析。其中, R^2 表示模型拟合度,其数值越接近 1,模型越稳定。模型在 $R^2<0.5$ 时不可用, $0.5<R^2<0.8$ 时可用, $R^2>0.8$ 时模型评价性能较高。

均方根误差(RMSE)公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{\text{实测值}} - P_{\text{预测值}})^2} \quad (4)$$

相对误差(RE)公式为:

$$RE = \frac{y_i - \bar{y}_i}{\bar{y}_i} \quad (5)$$

式中: y_i 表示真实值, $\bar{y}_i$ 表示预测值。

2 结果与分析

2.1 不同施氮处理对番茄不同叶位氮含量的影响

由表 2 可知,从生育期看,不同叶位氮含量随生育期推进呈先升后降的趋势,上叶位氮含量从I期均值 $3.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 升至V期均值 $4.8 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,变化幅度达到 37.14%,中叶位从I期 $2.7 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 升至

$4.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,变化幅度达 59.26%,下叶位从I期 $3.4 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 升至 $3.9 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,变化幅度达 14.71%,大多数叶位在VI期叶片氮含量都呈现出下降趋势。

从施氮处理对不同叶位叶片氮含量影响来看,上、中叶位大多数在V期达峰值,VI期下降;下叶位全部在IV期达峰值,V~VI期下降。施氮显著提升叶片氮含量,除IV期 N0、N1、N3、N4 中叶位氮含量外,其余时期叶位氮含量均表现为上叶位>中叶位>下叶位,上叶位比中叶位高 21.01%(V期)~49.10%(III期),比下叶位高 19.67%(IV期)~67.89%(I期);中叶位比下叶位高 7.01%(VI期)~38.01%(V期);仅IV期下叶位比中叶位高 13.56%。

从不同叶位同一时期同一氮处理氮含量来看,仅上、中、下叶位IV期 N0,上、中、下叶位IV期 N4 未存在显著差异,其余时期均呈现上叶位显著高于中、下叶位。

2.2 番茄氮肥表观利用率变化

由表 3 可知,上叶位转化能力最强,氮水平以

表 2 不同时期不同施氮处理对番茄叶位氮含量的影响
Table 2 Effects of different nitrogen application treatments at different stages on nitrogen content in tomato leaves (mg·g⁻¹)

叶位 Leaf position	时期 Period	施氮处理 Nitrogen application treatment				
		N0(CK)	N1	N2	N3	N4
上叶位 Upper leaf position	I	3.17±0.32 Ac	3.49±0.32 Abc	3.83±0.33 Aab	4.13±0.38 Aa	3.79±0.20 Aab
	II	3.65±0.45 Ab	3.72±0.36 Ab	4.13±0.22 Aab	4.32±0.30 Aa	3.86±0.27 Aab
	III	3.77±0.37 Ab	4.02±0.35 Ab	4.13±0.14 Ab	4.98±0.42 Aa	4.11±0.34 Ab
	IV	3.91±0.43 Ab	4.18±0.24 Ab	4.33±0.37 Ab	5.11±0.26 Aa	4.15±0.19 ABb
	V	4.29±0.18 Ab	4.63±0.36 Aab	4.97±0.41 Aa	5.05±0.47 Aa	4.47±0.35 Aab
	VI	4.74±0.29 Aa	4.84±0.26 Aa	4.78±0.33 Aa	4.69±0.39 Aa	4.13±0.20 Ab
中叶位 Mid leaf position	I	2.47±0.08 Bb	2.66±0.21 Bab	2.75±0.48 Bab	2.99±0.18 Ba	2.77±0.23 Bab
	II	2.69±0.25 Ba	2.76±0.37 Ba	3.00±0.36 Ba	3.07±0.39 Ba	3.05±0.45 Ba
	III	2.65±0.25 Bc	2.90±0.03 Bbc	3.06±0.06 Bb	3.51±0.20 Ba	2.91±0.24 Bac
	IV	3.28±0.34 Ab	3.40±0.32 Bb	3.72±0.34 Bab	3.96±0.34 Ba	3.66±0.34 Bab
	V	3.49±0.35 Bb	3.91±0.3 Bab	4.31±0.39 Ba	4.31±0.34 Ba	3.70±0.24 Bb
	VI	3.03±0.23 Ba	3.09±0.41 Ba	3.38±0.47 Ba	3.46±0.22 Ba	3.39±0.38 Ba
下叶位 Lower leaf position	I	2.72±0.22 Ba	2.43±0.32 Bab	2.43±0.32 Bab	2.46±0.26 Cab	2.21±0.37 Cb
	II	2.91±0.27 Ba	2.82±0.18 Ba	2.82±0.18 Ba	2.67±0.34 Ba	2.21±0.23 Cb
	III	2.63±0.22 Ba	2.84±0.30 Ba	2.84±0.30 Ba	3.03±0.27 Ba	2.79±0.26 Ba
	IV	3.28±0.39 Ab	3.40±0.33 Bb	3.40±0.33 Bb	4.13±0.38 Ba	4.31±0.42 Aa
	V	3.09±0.41 Ba	3.26±0.42 Ca	3.26±0.42 Ca	3.31±0.23 Ca	3.24±0.34 Ba
	VI	2.78±0.37 Ba	3.04±0.34 Ba	3.04±0.34 Ba	3.14±0.12 Ba	3.07±0.42 Ba

注:不同大写字母表示同一时期、同一氮处理的不同叶位间在 0.05 水平差异显著;不同小写字母表示同一时期、同一叶位的不同氮处理间在 0.05 水平差异显著。表 4 同。

Note: Different capital letters in the table indicate significant differences at 0.05 level between different leaf positions under the same period and nitrogen treatment; different lowercase letters represent the same period and the same leaf position, and the difference between different nitrogen treatments is significant at 0.05 level. The same as table 4.

表 3 番茄不同叶位氮肥表观利用率
Table 3 Tomato nitrogen apparent use efficiency by different leaf positions %

叶位 Leaf position	氮处理 Nitrogen treatment	时期 Period					
		I	II	III	IV	V	VI
上叶位 Upper leaf position	N1	33.30±0.36 a	33.40±0.36 a	33.90±0.20 a	34.60±0.17 a	35.40±0.30 a	33.50±0.36 a
	N2	36.50±0.26 a	37.60±0.17 a	38.80±0.26 a	40.20±0.09 a	41.60±0.45 a	37.80±0.09 a
	N3	38.50±0.17 a	40.20±0.30 a	41.00±0.36 a	43.80±0.26 a	44.60±0.10 a	40.60±0.26 a
	N4	34.20±0.19 a	34.80±0.26 a	35.40±0.30 a	36.40±0.26 a	37.40±0.34 a	35.00±0.26 a
中叶位 Mid-leaf position	N1	32.00±0.43 b	31.80±0.36 b	32.40±0.17 b	32.50±0.34 b	33.10±0.36 b	32.30±0.19 b
	N2	33.60±0.36 b	33.70±0.43 b	34.80±0.26 b	36.00±0.36 b	36.30±0.19 b	34.50±0.26 b
	N3	34.70±0.19 b	34.90±0.34 b	35.30±0.36 b	37.70±0.36 b	38.40±0.26 b	35.00±0.29 b
	N4	32.20±0.19 b	32.30±0.36 b	33.20±0.36 b	33.90±0.20 b	34.10±0.19 b	32.90±0.30 b
下叶位 Lower leaf position	N1	30.10±0.20 c	30.10±0.40 c	31.10±0.26 c	31.20±0.36 c	31.30±0.26 c	30.60±0.29 c
	N2	30.00±0.43 c	30.30±0.26 c	31.80±0.26 c	32.50±0.36 c	32.70±0.34 c	30.90±0.29 c
	N3	30.00±0.26 c	30.20±0.26 c	30.70±0.39 c	32.60±0.19 c	33.30±0.19 c	30.50±0.26 c
	N4	30.10±0.45 c	30.50±0.36 c	31.50±0.26 c	31.60±0.20 c	31.70±0.09 c	30.90±0.17 c

注:不同小写字母表示同一时期同一氮处理不同叶位在 0.05 水平差异显著。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 level among different leaf positions under the same nitrogen treatment during the same period.

N3 处理 ANUE 最高,在 V 期 ANUE 整体上达到峰值,N4 处理以及生育后期(VI期)会抑制 ANUE 的维持,这一差异与叶片氮素分布一致。上、中叶位 ANUE 随施氮量增加呈“先升后降”的单峰变化趋势,均在 N3 处理下达到峰值。各处理下 ANUE 随生育期呈现“上升-峰值-下降”的变化,均在第 V 期达到峰值。同一氮水平、同一时期,不同叶位的 ANUE 均表现为上叶位>中叶位>下叶位,且差异显著,其中上叶位与下叶位的差异最大。N3 处理的 V 期,上叶位比下叶位高 33.93%;高氮(N4)条件下,VI 期上叶位 ANUE 相较下叶位显著提高 13.27%。综上所述,番茄氮素表观利用率最高的是上叶位。

2.3 不同施氮处理对番茄不同叶位 SPAD 值的影响

由表 4 可知,除上、中叶位 I 期外,各叶位 SPAD 值随施氮水平升高呈先升后降趋势。SPAD 值随生育期推进呈先升后降趋势:上叶位和中叶位大多数在 II 期达到峰值,下叶位除 N2、N3 外也在 II 期 SPAD 值最大。不同叶位 SPAD 值在 II 期大多呈“上叶位>中叶位>下叶位”。不同叶位叶片对氮水平变化的敏感性不同。上叶位对氮水平变化的敏感度最高,氮水平偏离 N1 后指标快速下降,N4 处理较 N1 处理的指标整体降幅达 10%以上;中、下叶位敏感度相对较低,氮水平在 N1~N3 时,SPAD 变化幅度小于 5%,仅在 N0 或 N4 水平 I、II、IV 期 SPAD 值出现显著下降。

2.4 氮素诊断最佳叶位筛选

由表 5 可知,上叶位叶片氮含量(各生育期均为顶 1 叶)在 I~V 期与 SPAD 值相关性强于同一时期的其他叶位,相关系数依次为 0.993、0.948、0.977、0.977、0.969,均达极显著相关水平;进入 VI 期后上叶位相关系数降至 0.880,相关性减弱。中叶位叶片氮含量与 SPAD 值的相关性在 I~IV 期分别为 0.906、0.928、0.928、0.930,均达极显著相关水平;V~VI 期的相关系数分别是 0.833、0.462,且未达显著水平。而下叶位叶片在 I~II 期 SPAD 值与叶片氮含量相关系数极低,仅为 0.210、0.200,未达显著水平;III、VI 期相关性增强,III、VI 期分别为 0.935、0.908,均通过极显著水平检验。

根据番茄叶片 SPAD 值与氮含量相关性强弱,选择不同时期测定诊断氮素的最佳叶位,在 I~V 期上叶位为最佳诊断叶位,VI 期则下叶位是最佳叶位。

2.5 氮素诊断模型构建与验证

基于最佳诊断叶位的 SPAD 值构建诊断模型,拟合优度均>0.70。I~V 期基于上叶位建立的诊断模型中,第 I 模型的 R²最高,为 0.981 8,III 期上叶位次之为 0.966 8;第 VI 期基于下叶位的 SPAD 值构建诊断模型,R²为 0.877 1(图 1)。偏差率检验显示,模型平均偏差率=0.068%~0.120%,相对误差=8.774%~10.220%,RMSE=0.058~0.846 g·kg⁻¹(表 6)。

对诊断模型进行验证,结果表明,II 期验证 R² 最

表 4 不同时期不同施氮处理对番茄叶片 SPAD 值的影响

Table 4 Effect of different nitrogen treatments at different stages on SPAD value of tomato leaves

叶位 Leaf position	氮处理 Nitrogen treatment	时期 Period					
		I	II	III	IV	V	VI
上叶位 Upper leaf position	N0	62.92±1.18 Aa	64.92±1.23 Ab	60.95±0.85 Ab	58.48±1.30 Ab	56.29±0.77 ABb	54.73±0.18 ABb
	N1	61.09±1.09 ABab	69.58±1.09 Aa	63.53±1.37 Aa	62.48±1.30 Aa	61.43±0.14 Aa	60.04±0.28 Aa
	N2	60.48±1.19 Ab	63.51±1.28 Bbc	59.09±0.78 Bc	57.30±1.33 Bbc	56.98±1.86 Bb	55.29±0.99 Bb
	N3	61.43±1.07 Aab	62.19±0.64 Ac	59.34±1.07 Bbc	58.72±0.62 Ab	57.49±1.27 Bb	55.48±1.19 Bb
	N4	57.51±0.77 Ac	58.16±1.09 Ad	56.93±2.41 Ad	56.25±1.13 Acd	56.25±1.87 Ab	54.38±1.11 ABb
中叶位 Mid-leaf position	N0	59.95±1.07 Bb	63.00±0.51 Ab	60.59±0.87 Ab	58.34±1.07 Ab	56.68±1.12 Ab	54.34±0.87 Bb
	N1	62.43±0.57 Aa	63.70±1.40 Bab	61.29±0.70 Bb	59.58±0.59 Bab	58.49±1.26 Bab	57.23±0.68 Ba
	N2	59.37±0.76 ABb	65.26±0.47 Aa	63.87±0.99 Aa	61.28±0.70 Aa	59.86±1.13 Aa	58.67±0.61 Aa
	N3	62.73±0.97 Aa	62.11±0.40 Ab	61.28±1.15 Ab	60.58±1.10 Aa	59.99±0.83 Aa	57.48±1.31 ABa
	N4	56.18±1.18 ABc	58.70±1.26 Ac	57.00±0.74 Ac	55.00±1.29 Ac	54.00±1.15 Ac	54.00±0.67 Bb
下叶位 Lower leaf position	N0	57.99±0.83 Bc	59.24±1.29 Bb	56.87±0.57 Bb	58.34±0.17 Bb	54.50±0.81 Bb	56.00±0.72 Ab
	N1	59.84±0.44 Ba	61.29±0.28 Cab	59.32±0.91 Ba	59.58±0.59 Cab	58.17±0.28 Ba	59.38±0.83 Aa
	N2	58.13±0.54 Bab	60.59±0.39 Ca	58.49±0.83 Ba	61.28±0.70 Ca	57.01±0.51 Ba	58.78±0.72 Aa
	N3	58.29±1.20 Bbc	59.29±0.77 Ba	57.85±0.88 Ba	60.58±1.10 Ba	57.97±0.82 Ba	58.33±0.89 Aa
	N4	54.75±0.91 Bd	57.55±1.28 Ac	52.49±0.59 Bb	55.00±1.29 Bc	54.78±1.16 Ab	56.18±1.13 Ab

表 5 番茄不同时期、叶位的叶片氮含量与 SPAD 值的相关性(Spearman)分析

Table 5 Spearman correlation analysis of leaf nitrogen content and SPAD values at different growth stages and leaf positions in tomatoes

叶位 Leaf position	时期 Period					
	I	II	III	IV	V	VI
上叶位 Upper leaf position	0.993**	0.948**	0.977**	0.977**	0.969**	0.880*
中叶位 Mid-leaf position	0.906**	0.928**	0.928**	0.930**	0.833 ns	0.462 ns
下叶位 Lower leaf position	0.210 ns	0.200 ns	0.935**	0.873*	0.894*	0.908**

注:*表示在 0.05 水平显著相关,**表示在 0.01 水平极显著相关,ns 表示无显著相关性。

Note: * indicates a significant correlation at the 0.05 level, ** indicates an extremely significant correlation at 0.01 level, ns indicates no significant correlation.

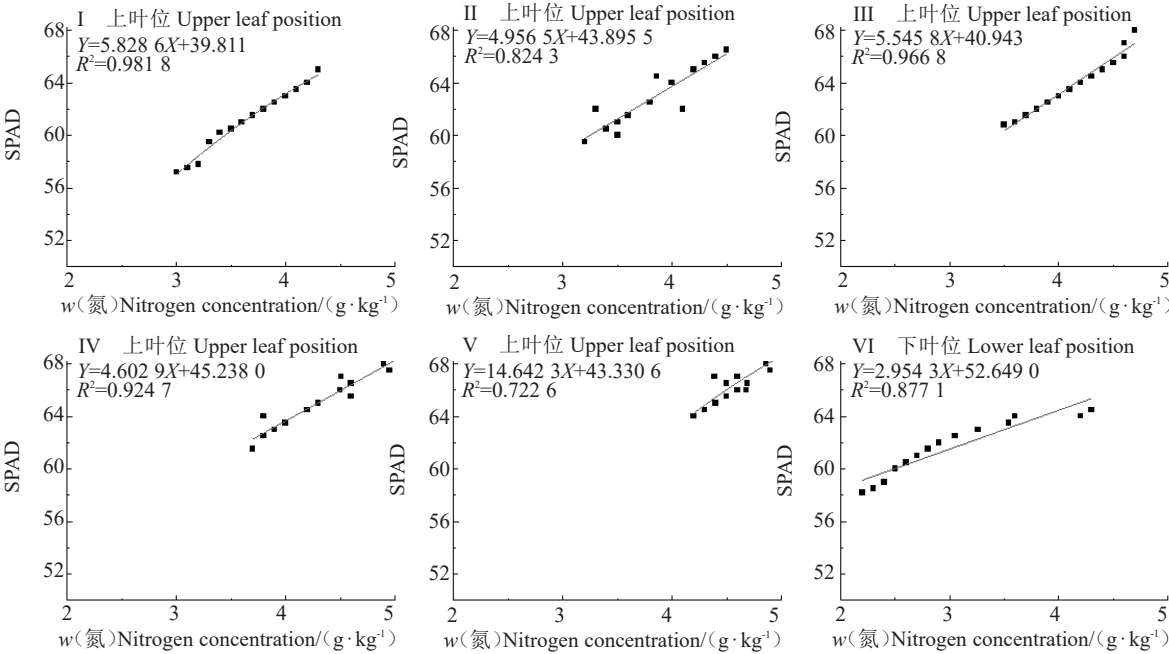


图 1 番茄不同时期不同叶位氮含量的最优估测模型

Fig. 1 Optimal estimation model for nitrogen content in different leaf positions of tomatoes at different stages

表 6 番茄不同时期不同叶位氮含量估测值的偏差率					
Table 6 Deviation rate of estimated nitrogen content in tomato leaves at different stages and positions					
时期:叶位 Period: leaf position	最大偏差率 Max deviation rate/%	最小偏差率 Minimum deviation rate/%	平均偏差率 Mean deviation rate/%	相对误差 Relative error/%	均方根误差 Root mean square error/(g·kg ⁻¹)
I期:上叶位 Period I: Upper leaf position	0.130	-0.260	0.068	9.245	0.846
II期:上叶位 Period II: Upper leaf position	0.009	-0.944	0.111	9.615	0.812
III期:上叶位 Period III: Upper leaf position	0.154	-0.333	0.075	8.774	0.599
IV期:上叶位 Period IV: Upper leaf position	0.152	-0.553	0.082	8.941	0.260
V期:上叶位 Period V: Upper leaf position	0.124	-0.253	0.120	10.220	0.099
VI期:下叶位 Period VI: Lower leaf position	0.072	-0.541	0.105	10.047	0.058

高(0.965 3),I、III、IV期次之(0.936 7、0.925 0、0.916 8),V、VI期 $R^2<0.9$;I期模型 $RMSE$ 最低(0.90%)、 $RE=$ 6.55%,可靠性最高,其余时期均 $RMSE>1\%$ 、 RE 在 7.88%~10.04%,误差相对较大(图 2)。

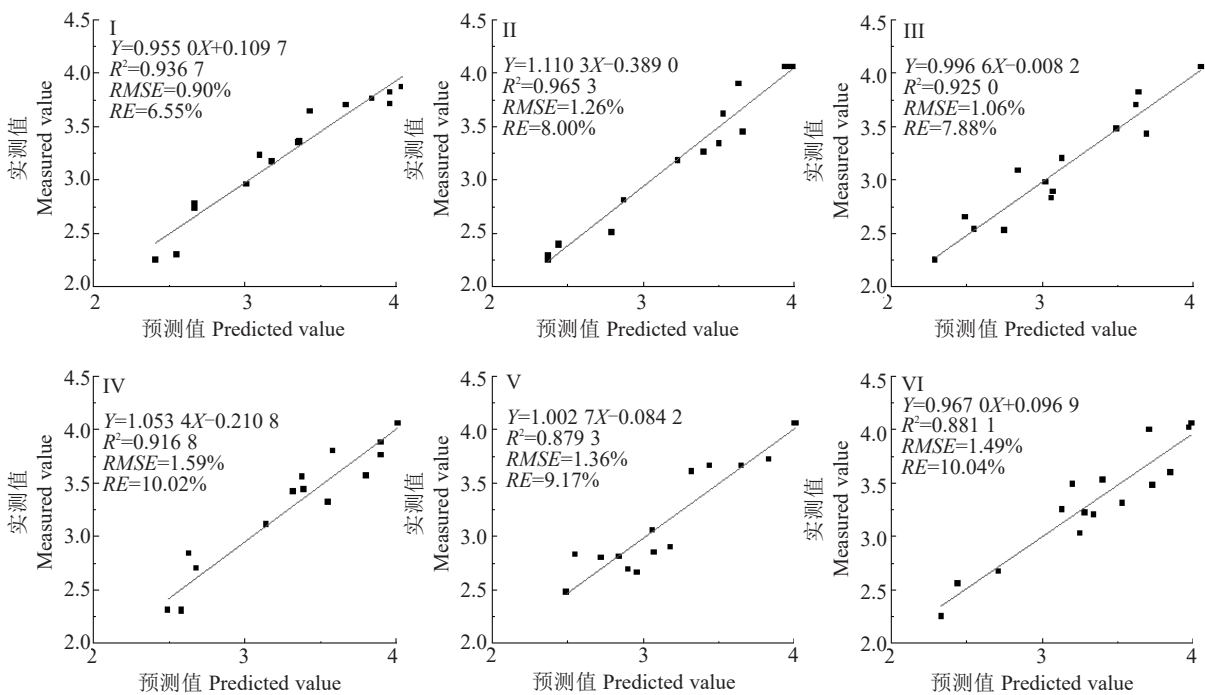


图 2 番茄不同时期叶片氮含量估测的验证模型

Fig. 2 Validation model for estimating leaf nitrogen content in tomato at different stages

3 讨论与结论

氮素是设施番茄生长发育的核心营养元素,其精准管理高度依赖植株氮营养状况的快速无损诊断,而叶位选择与生育期耦合是决定 SPAD 诊断精度与适用性的关键环节^[15]。本研究结果表明,适宜施氮范围内番茄叶片氮含量与 SPAD 值随施氮水

平升高呈先升后降趋势,该结果与石小虎等^[9]在温室番茄中的研究结论一致,符合茄果类蔬菜氮素吸收与光合生理响应规律。叶片氮含量垂直分布整体表现为上叶位>中叶位>下叶位,与王艳群等^[16]、李建明等^[17]的研究结果相同,反映植株在氮素受限条件下,优先将氮素分配至光合活性更强的上部功能叶片,是典型的“源-库”调控与氮素高效利

用策略^[16];仅在IV期出现下叶位氮含量高于中叶位的特殊现象,与Yang等^[18]观察到的生育期叶位逆转规律一致,主要因为该阶段果实库快速提升,中叶位氮素大量向生殖器官转运,而下叶位氮素再分配速率相对较低,导致叶位间氮分布格局短暂逆转^[9]。SPAD值空间分布在II期也呈现上叶位>中叶位>下叶位。

相关性分析结果表明,不同叶位SPAD值与氮含量的关联程度随生育期呈现互补特征。I~V期上叶位相关系数高达0.948~0.993($P<0.01$),诊断稳定性强;进入VI期后,上叶位相关系数降至0.880,主要因为生育后期氮素持续向果实转运,而叶绿素降解存在明显滞后性,导致SPAD对叶片氮含量变化的敏感性下降^[17],该机制与Luzia等^[19]在番茄叶片衰老与叶绿素降解中的研究结果一致。下叶位则表现为I~II期相关性不显著,III期后相关系数提升至0.935以上,与上叶位形成阶段性互补优势,这一规律与Gauder等^[20]、李建明等^[17]的研究结果相同。结合ANUE验证进一步显示,上叶位ANUE在各生育期均显著高于中、下叶位,V期N3处理达44.60%,且叶位ANUE变化趋势与氮含量、SPAD值峰值高度一致,可准确反映植株对施氮水平的响应强度,该结果与前人仅关注相关性、未用效率指标验证的研究形成明显区别^[13];VI期下叶位ANUE与氮含量协同下降,且与SPAD值极显著相关($R^2=0.908$, $P<0.01$),从氮素利用效率角度证实I~V期选用上叶位、VI期选用下叶位的动态诊断策略具备生理合理性,可有效解决现有研究中番茄SPAD诊断叶位选择混乱、适用性不足的问题^[14]。

基于最佳叶位构建的分生育期非线性诊断模型, R^2 为0.879 3~0.965 3,整体拟合度高、诊断可靠,其中II期模型拟合最优,与Gáborčík^[21]、Wahono等^[22]提出的茄果类蔬菜SPAD氮素诊断模型构建规律一致。模型验证显示精度呈阶段波动:I期模型综合表现最好($RMSE=0.90\%$, $RE=6.55\%$),主要因苗期叶片生理状态稳定、温室环境干扰小,SPAD值与氮含量关系稳固^[12];IV期模型虽 R^2 较高(0.916 8),但 $RMSE$ 与 RE 相对增大,主要受盛果期氮素剧烈转运、冠层微环境波动增大的双重影响,导致预测误差增大,该现象与石小虎等^[9]的研究结论一致;VI期下叶位模型误差有所缩小,符合作物生育后期氮素再分配趋于稳定、下叶位诊断可靠性提升的变化特征^[20]。后续试验可扩大品种与环境梯度,融合环境传感与机器学习算法,构建多因子耦合的动态氮素

诊断模型,进一步提升设施番茄SPAD无损诊断的普适性与精准度。

本研究结果表明,番茄叶片氮含量与SPAD值均存在时空分异特征,氮含量垂直分布整体表现为上叶位>中叶位>下叶位,SPAD值在II期也呈上叶位>中叶位>下叶位,二者随生育期推进均呈先升后降趋势;结合相关性分析与ANUE验证,确定番茄SPAD氮素无损诊断宜采用“I~V期选用上叶位、VI期选用下叶位”的动态叶位策略,具有生理合理性;基于最佳叶位构建的分生育期非线性氮含量估测模型拟合度良好($R^2=0.879\ 3\sim0.965\ 3$),其中I期模型可靠性最高,整体可实现设施番茄叶片氮含量的精准无损诊断。

参考文献

- [1] 王磊,卢艳丽,白由路.主要粮食作物基于SPAD的氮素营养诊断方法研究进展[J].植物营养与肥料学报,2022,28(3):546-554.
- [2] 姜瑛,刘晔,张林利,等.不同质地潮土冬小麦SPAD值在氮素营养诊断上的应用研究[J].河南农业大学学报,2018,52(4):485-491.
- [3] 李月帅,郝祝霞,周圆,等.基于叶片SPAD值对崇明区水稻产量预测和氮素营养诊断模型的构建[J].中国农业大学学报,2024,29(12):45-56.
- [4] 赵士诚,何萍,仇少君,等.相对SPAD值用于不同品种夏玉米氮肥管理的研究[J].植物营养与肥料学报,2011,17(5):1091-1098.
- [5] 石小虎,蔡焕杰.基于叶片SPAD估算不同水氮处理下温室番茄氮营养指数[J].农业工程学报,2018,34(17):116-126.
- [6] Zhao J G, Gao A Q, Wang B Y, et al. Modeling and visualization of nitrogen and chlorophyll in greenhouse *Solanum lycopersicum* L. leaves with hyperspectral imaging for nitrogen stress diagnosis[J]. Plants, 2025, 14(21):3276.
- [7] Clara R C, Tardaguila J, Andres S G, et al. Quantifying spatio-temporal variation of leaf chlorophyll and nitrogen contents in vineyards[J]. Biosystems Engineering, 2016, 150:201-213.
- [8] 任红军,许桂玲,冯跃华,等.基于杂交水稻叶片SPAD值的氮素营养诊断模型的初步构建[J].中国稻米,2024,30(2):5-12.
- [9] Zhao F Y, Zhang Y Y, Li Z J, et al. Vermicompost improves microbial functions of soil with continuous tomato cropping in a greenhouse[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(1/2):380-391.
- [10] Padilla M F, Farneselli M, Gianquinto G, et al. Monitoring nitrogen status of vegetable crops and soils for optimal nitrogen management[J]. Agricultural Water Management, 2020, 241:106356.
- [11] 巨晓荣,田雪,冀宏杰,等.基于长期氮肥试验评估氮肥利用率算法的合理性[J].植物营养与肥料学报,2024,30(7):1284-1294.
- [12] 薄录吉,李彦,王艳芹,等.设施番茄土壤氮素淋失控制技术措施比较[J].中国生态农业学报(中英文),2025,33(2):278-285.

- [13] Xiong D L, Chen J, Yu T T, et al. SPAD-based leaf nitrogen estimation is impacted by environmental factors and crop leaf characteristics[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1):13389.
- [14] 李岚涛, 盛开, 尹焕丽, 等. 考虑植株氮垂直分布的夏玉米营养诊断敏感位点筛选[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(6):56-65.
- [15] Xu G H, Fan X R, Miller A J. Plant nitrogen assimilation and use efficiency[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2012, 63(1):153-182.
- [16] 王艳群, 李建明, 胡晓辉, 等. 设施番茄不同叶位 SPAD 值与氮素营养的关系及最佳叶位筛选[J]. *中国蔬菜*, 2019(5):45-50.
- [17] 李建明, 胡晓辉, 邹志荣. 温室番茄不同叶位 SPAD 值与氮素营养的关系 [J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2017, 45(8):103-110.
- [18] Yang H, Yang P J, Li H F, et al. Replacing the nitrogen nutrition index by SPAD values and analysis of effect factors for estimating rice nitrogen status[J]. *Agronomy Journal*, 2018, 110(2):545-554.
- [19] Luzia G Y, Schelbert S H, Bastien C, et al. Different mechanisms are responsible for chlorophyll dephytylation during fruit ripening and leaf senescence in tomato[J]. *Plant Physiology*, 2014, 166(1):44-56.
- [20] Gauder M, Pfenning J, Liebig H P, et al. Relations between optical properties and N status of tomato leaves[J]. *Acta Horticulturae*, 2010(852):247-252.
- [21] Gáborčík N. Relationship between contents of chlorophyll (a+b) (SPAD values) and nitrogen of some temperate grasses[J]. *Photosynthetica: International Journal for Photosynthesis Research*, 2003, 41(2):285-287.
- [22] Wahono, Indradewa D, Sunarminto B H, et al. Evaluation of the Use of SPAD-502 Chlorophyll meter for non-destructive estimation of nitrogen status of tea leaf (*Camellia sinensis* L. Kuntze)[J]. *Indian Journal of Agricultural Research*, 2019, 53(3):333-337.