

文章编号: 1672-3317(2021)01-0047-08

水氮耦合对膜下滴灌设施番茄水氮生产函数影响研究

李文玲¹, 孙西欢¹, 张建华², 马娟娟¹, 郭向红^{1*}, 雷涛¹, 孙瑞峰¹, 宋涛²

(1.太原理工大学 水利科学与工程学院, 太原 030024; 2.香港浸会大学 深圳研究院, 深圳 518000)

摘要:【目的】探究膜下滴灌水氮耦合对温室番茄水氮生产函数的影响, 寻求影响温室番茄的关键需水阶段, 为番茄节水高效生产提供理论依据。【方法】设置4因素3水平水氮耦合正交试验, 对温室水氮耦合下番茄的产量进行研究, 基于Jensen模型建立了番茄水氮生产函数, 并建立其水分敏感指数累积曲线, 利用塑料大棚番茄水氮耦合产量结果对水氮生产函数进行验证。【结果】通过模型计算的番茄产量与实测产量的变化趋势一致, 模型拟合残差平方和(SSE)为0.010, 决定系数 R^2 达到0.793, 验证计算值和实测值之间的均方根误差、平均相对误差、平均绝对误差分别为 2.98 t/hm^2 、2.53%、 2.39 t/hm^2 , 各生育期水分敏感指数表现为“开花期($\lambda_2=0.200$)>苗期($\lambda_1=0.096$)>成熟期($\lambda_3=0.059$)”, 通过水分敏感指数累积曲线计算得到的水分敏感指数与Jensen模型的水分敏感指数具有较好的拟合效果, 各因素对番茄产量的影响表现为“开花期灌水>苗期灌水>施氮量>成熟期灌水”, 开花期灌水量对产量的影响达到显著水平($P<0.05$)。T1处理产量最高, 达到 72.92 t/hm^2 。番茄的氮肥偏生产力随施氮量的增加而降低。施氮量为 250 kg/hm^2 , 继续增加氮肥对番茄增产效果不明显, 且降低了水分利用效率。试验建立的水氮生产函数具有较高的模拟精度, 水分敏感指数累积曲线对水分敏感指数的计算较为准确。在整个生育阶段开花期的水分敏感指数最大。【结论】综合考虑番茄产量及水氮利用效率, 设施番茄膜下滴灌水氮优化方案为: 苗期采用充分灌水、开花期采用75%充分灌水、成熟期采用75%充分灌水和施氮量 250 kg/hm^2 的组合。

关键词: 水氮耦合; 番茄; 产量; 水氮生产函数

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020214

OSID:



李文玲, 孙西欢, 张建华, 等. 水氮耦合对膜下滴灌设施番茄水氮生产函数影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(1): 47-54.

LI Wenling, SUN Xihuan, ZHANG Jianhua, et al. The Effect of Water-nitrogen Coupling on Water-nitrogen Production Functions of Greenhouse Tomato under Mulched Drip Irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(1): 47-54.

0 引言

【研究意义】番茄是我国重要的经济作物, 种植面积广泛。番茄果实具有较高营养价值, 富含丰富的VC、番茄红素等营养物质, 具有抗氧化、抗癌等功效^[1]。水分和养分是决定番茄生长的重要因素, 合理的灌溉和施肥对控水节肥、提高番茄产量以及改善番茄品质, 甚至保护生态环境均有十分重要的意义^[2-3]。但不合理的灌溉施肥导致作物减产, 尤其是过量灌水施肥会造成水资源浪费和地下水污染, 甚至破坏生态环境^[4]。因此, 将有限的水氮资源科学合理地配置, 使农作物获得最佳经济效益是目前农业生产的关键。

【研究进展】作物水分生产函数能够反映作物产量随作物耗水量变化规律, 通过不同生育期的水分敏感程度反映作物需水规律, 指导灌溉管理, 对作物优质高效生产具有重要的意义^[5-6]。国内外学者围绕作物耗水规律对作物产量的影响开展了大量研究, 研究对象包括酿酒葡萄^[7]、水稻^[8]、玉米^[9]、甜瓜^[10]等, 通过研究作物耗水规律及其影响因素, 建立相应的水分生产函数模型, 明确作物各阶段的需水规律。目前, 国内外常用的作物水分生产函数模型主要有两大类, 第一类为反映产量和全生育期耗水量之间的关系, 包括Hiler-Clark模型、Hanks模型; 第二类为反映产量和不同生育阶段耗水量的关系, 其中有包括Blank模型、Stewart模型在内的加法模型和包括Jensen模型、Minhas模型在内的乘法模型^[11-12]。有学者认为乘法模型中的Jensen模型克服了加法模型在实际应用中的缺陷, 分生育期进行计算, 得到的水分敏感系数均为正值^[13-14]。王则玉等^[15]基于Jensen模型建立的红枣的水分生产函数模型, 通过各生育期水分敏感指数的

收稿日期: 2020-04-16

基金项目: 山西省重点研发计划重点项目(201703D211002, 201903D211011); 国家重点研发计划项目(2017YFE0118100); 有机旱作山西省重点实验室开放基金课题(201805D111015-1); 山西省高等学校科技创新项目(2019L0136)

作者简介: 李文玲(1992-), 女, 山西汾阳人。硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: 472615976@qq.com

通信作者: 郭向红(1979-), 男, 山西平顺人。教授, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: xianghong7920@126.com

对比, 得到影响产量的需水关键期; Jensen 模型中的阶段水分敏感指数累加可与相应时间 t 建立一定的关系, 王仰仁等^[16]针对 Jensen 模型应用中存在的问题, 利用生长函数的曲线对水分敏感指数进行拟合, 把水分敏感指数的离散化处理方式改进为连续变化的过程, 进一步消除了相邻 2 个阶段耗水量的界限。在水氮耦合研究中, 周智伟等^[17]在水分生产函数 Jensen 模型的基础上引入肥料因子, 构造了关于水肥生产函数的 Jensen 模型; 孙爱华等^[8]综合考虑不同水分和氮肥用量对水稻产量的影响, 建立了水稻水氮生产函数的 Jensen 模型, 得到较高的拟合度。【切入点】前人对膜下滴灌条件下水分和氮素对番茄生长的影响研究较为系统深入, 但关于施氮量与生育阶段灌水量的耦合及其水氮生产函数构建鲜有报道。【拟解决的关键问题】本文研究膜下滴灌下不同水氮耦合对温室番

茄产量的影响, 并依据 Jensen 模型建立基于生育期灌水调控的番茄水氮生产函数, 确定水分敏感指数累积曲线, 并对模型进行验证, 探求温室番茄高产高效的水氮耦合模式, 以期当地番茄产业的可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区基本情况

试验于 2019 年 5—9 月在山西省农业科学院旱地农业研究中心阳曲县河村试验基地温室和塑料大棚内进行。该地属温带大陆性季风气候, 年平均温度为 5~7 °C, 年平均降水量 459 mm, 地下水埋深大于 5 m, 降雨多集中在 6—9 月, 无霜期约 144 d。试验区土壤类型为褐土, 番茄定植前大棚 0~60 cm 土壤理化性质见表 1。

表 1 土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil

土层深度/cm	有效磷量/(mg kg ⁻¹)	全氮量/(g kg ⁻¹)	有机质量/(g kg ⁻¹)	速效钾量/(mg kg ⁻¹)	土壤体积质量/(g cm ⁻³)	田间持水率/(cm ³ cm ⁻³)
0~15	46.6	0.91	13.7	173	1.39	0.31
15~30	16.0	0.31	8.0	95	1.50	0.31
30~45	5.25	0.40	4.9	61	1.60	0.35
45~60	3.22	0.21	5.2	55	1.65	0.42

1.2 作物管理

试验番茄品种为亿家粉王和奥冠 8 号, 于 2019 年 5 月 1 日分别定植于试验地温室和塑料大棚内, 2019 年 9 月 8 日拉秧。幼苗以单穴单株的形式定植在垄二侧, 株行距 0.5 m×0.5 m, 种植密度为 2.5 株/m², 滴灌带控制方式为“1 膜 2 管 2 行”, 试验小区面积为 25.2 m² (3.6 m×7 m)。定植前将有机肥 (20 000 kg/hm²)、磷肥 (P₂O₅, 200 kg/hm²) 均匀基施, 钾肥 (K₂O, 400 kg/hm²) 与方案设计的氮肥 (尿素) 各基施 1/2, 并于第 1 穗果实膨大期、第 3 穗果实膨大期分别追施 1/4。番茄生育期划分为苗期 (20190501—0612)、开花坐果期 (20190613—0726)、成熟期 (20190727—0908)。

1.3 试验设计

温室水氮耦合试验设置灌水量和施氮量 2 个因素, 在番茄的苗期、开花期、成熟期各设置 3 个灌水水平, 分别为 I 、 $0.75I$ 、 $0.5I$, 其中 I 为充分灌水, 灌水前测定含水率, 以灌水上限为田间持水率的 90% 为充分灌水 I 。试验期间灌水周期为每 10 d 灌水 1 次; 施氮量设置 3 个水平, 分别为 150、250、350 kg/hm², 建立 4 因素 3 水平水氮耦合正交试验, 共 9 个处理 (T1—T9), 每个处理设置 3 次重复。

水氮耦合试验重复布置于温室和塑料大棚 2 个不同环境中。另在温室设置施氮量水平为 0、150、

250、350 kg/hm², 各生育期灌水量均为充分灌水 I , 共 4 个处理 (T10、T11、T12、T1) 进行氮肥控制。试验设计见表 2。

表 2 试验设计方案

Table 2 Experiments design

处理	灌水量/mm			施氮量/(kg hm ⁻²)
	苗期	开花期	成熟期	
T1	I	I	I	350
T2	I	$0.75I$	$0.75I$	250
T3	I	$0.5I$	$0.5I$	150
T4	$0.75I$	I	$0.75I$	150
T5	$0.75I$	$0.75I$	$0.5I$	350
T6	$0.75I$	$0.5I$	I	250
T7	$0.5I$	I	$0.5I$	250
T8	$0.5I$	$0.75I$	I	150
T9	$0.5I$	$0.5I$	$0.75I$	350
T10	I	I	I	0
T11	I	I	I	150
T12	I	I	I	250

1.4 测定项目与方法

1) 土壤含水率。各处理土壤含水率采用烘干法进行测定, 测试深度为 60 cm, 每 15 cm 取 1 层。于每次灌水前进行含水率测定。

2) 充分灌水的灌水量计算。充分灌水处理的灌水上限为田间持水率的 90%, 计算式为:

施氮量 ($F=4.248$) > 成熟期灌水量, 其中开花期灌水量对产量的影响达到显著水平 ($P<0.05$), 苗期灌水、施氮量和成熟期灌水对番茄产量有一定影响, 但未达到显著水平。

表4为各处理耗水量和水氮利用率。由表4可知, 各水氮耦合处理的番茄水分利用效率表现为 T2 处理>T3 处理>T6 处理>T9 处理>T7 处理>T5 处理>T4 处理>T1 处理>T8 处理, 氮肥偏生产力表现为 T4 处理>T8 处理>T3 处理>T7 处理>T2 处理>T6 处理>T1 处理>T5 处理>T9 处理。可知水分利用率随作物耗水量的增加而减少, 氮肥偏生产力随施氮量的增加而减少。施氮量为 350、250、150 kg/hm² 的各处理水分利用率平均值分别为 27.72、30.41、27.20 kg/m³, 氮肥偏生产力平均值分别为 190.76、266.21、427.31 kg/kg。可见, 氮肥偏生产力随施氮量的增加而减小, 且当施氮量为 250 kg/hm², 继续增加氮肥对番茄的产量的增加效果不明显, 且水分利用效率有所降低。综合考虑产量、水分利用率和氮肥偏生产力, T2 处理 (灌水量: 1、0.75I、0.75I、施氮量: 250 kg/hm²) 的综合效益最高。

表4 各处理番茄作物耗水量和水氮利用率

Table 4 Crop water consumption and water and nitrogen utilization of tomato in different growth period

处理	苗期/mm	开花期/mm	成熟期/mm	总耗水量/mm	WUE/(kg m ⁻³)	NPFP/(kg kg ⁻¹)
T1	56.50±0.29a	153.24±4.58a	77.67±0.25c	287.41±2.28a	25.37±0.13b	208.33±2.91d
T2	55.72±1.14a	92.47±0.56d	62.94±1.06d	211.13±3.93d	31.52±0.58a	266.21±3.25c
T3	57.95±0.89a	71.88±1.13e	52.16±0.40e	181.99±3.10f	33.42±0.23a	405.51±5.08b
T4	43.97±0.07c	144.21±3.57a	72.53±0.72c	260.71±1.13b	26.89±0.60b	467.37±2.39a
T5	49.01±0.33b	127.06±0.97c	61.65±0.13d	237.72±7.65c	27.62±0.38a	187.58±1.29d
T6	42.46±0.48c	78.43±2.38e	93.08±0.86b	213.97±2.68d	30.21±0.24a	258.58±5.77c
T7	29.62±0.60d	135.88±0.21b	66.66±1.37d	232.16±5.71c	29.49±0.55a	273.85±7.69c
T8	28.60±0.40d	116.03±2.24c	107.90±1.60a	252.53±0.180b	24.30±0.59b	409.04±2.51b
T9	29.73±0.99d	81.73±1.21e	93.30±0.13b	204.76±5.67e	30.15±0.92a	176.36±4.33e
σ	11.37	29.02	17.17	30.46	2.79	100.36

2.2 Jensen 模型及其敏感系数累计曲线

Jensen 模型是目前通用性最强的水分生产函数静态模型, 以作物各生育阶段腾发量为变量, 寻找不同生育阶段水分亏缺对作物最终产量的影响关系。在水分生产函数中引入氮素效应函数, 研究不同水氮交互的影响, 能寻求最优水氮耦合模式, 提高水氮利用率^[5]。王仰仁等^[19]提出水分敏感指数的累积曲线在不同施氮量下趋于稳定, 并认为在不同养分状态下水分敏感指数是稳定的, 可用于水氮模拟。

将水分生产函数的 Jensen 模型与氮素效应函数结合起来, 构造番茄的水氮生产函数。先利用温室氮肥控制试验 (T10、T11、T12、T1 处理) 的试验数据, 通过二次曲线拟合潜在产量 $Y_m(F)$ 与施肥量 F 之间的关系, 由式 (9) 计算得到氮素效应函数 ($R^2=0.984$)。

表3 极差分析及 ANOVA 检验

Table 3 Range analysis and ANOVA test table

处理	苗期灌水	开花期灌水	成熟期灌水	施氮量/(kg hm ⁻²)	产量/(t hm ⁻²)
T1	1	1	1	1	72.92
T2	1	2	2	2	66.55
T3	1	3	3	3	60.83
T4	2	1	2	3	70.11
T5	2	2	3	1	65.65
T6	2	3	1	2	64.64
T7	3	1	3	2	68.46
T8	3	2	1	1	61.36
T9	3	3	2	3	61.73
均值 1	66.77	70.49	66.31	66.77	
均值 2	66.80	64.52	66.13	66.55	
均值 3	63.85	62.40	64.98	64.10	
极差 R	2.95	8.10	1.33	2.67	
因素主次	2	1	4	3	
最优方案	B1A2D1C1				
ANOVA 检验 F 值					
F	5.539	34.011*	-	4.248	

注 同列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$), *表示差异达到显著水平 ($P<0.05$), **表示差异达到极显著水平 ($P<0.01$), 下同。

$$Y_m(F) = -0.244F^2 + 151.1F + 50379 \quad (11)$$

分别通过式 (8) 一式 (10) 将温室番茄水氮耦合处理 (T1—T9) 的试验数据采用 1stOpt1.5Pro 软件进行参数拟合, 得到 Jensen 模型及其敏感指数累积曲线的具体形式为式 (12)、式 (13)。

$$\frac{Y_a}{-0.244F^2 + 151.1F + 50379} = \left[\frac{ET_1}{ET_{m1}} \right]^{0.096} \cdot \left[\frac{ET_2}{ET_{m2}} \right]^{0.200} \cdot \left[\frac{ET_3}{ET_{m3}} \right]^{0.059}, \quad (12)$$

$$Z(t_i) = \frac{0.361}{1 + e^{3.430 - 0.057t_i}} \quad (13)$$

可知水分敏感指数累积曲线的参数 A、B、C 分别为 3.430、0.057、0.361; 各生育期番茄水分敏感指数为“开花期 ($\lambda_2=0.200$) > 苗期 ($\lambda_1=0.096$) > 成熟期 ($\lambda_3=0.059$)”, 说明在开花期番茄产量对水分最为敏

感，该生育阶段若进行水分胁迫，将会造成番茄减产。

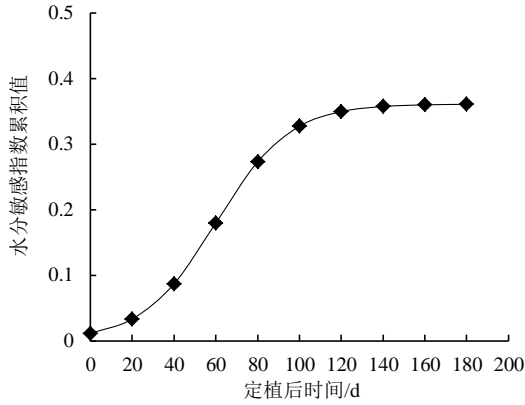


图 1 水分敏感指数累积值

Fig.1 Water sensitive index accumulation curve

图 1 为水分敏感指数累积函数的曲线。由图 1 可以看出番茄水分敏感指数累积值随时间的变化表现为先缓慢增大，后迅速增大，随后曲线趋于平缓，在果实成熟后期，番茄水分敏感指数的累积值接近于 0.4。水分敏感指数累积值增长较快的时间段内（定植后 60~80 d），水分敏感指数达到 0.093。番茄在生育中期为生长旺盛期，该阶段番茄植株营养生长和生殖生长同时进行，叶片蒸腾作用较强，对水分需求量较大，此外水分亏缺影响该阶段番茄的花蕾授粉及坐果率，对最终产量也将造成一定的影响。因此，生育中期应保证充足的灌水量。

2.3 水氮生产函数模型验证

表 5 为大棚水氮耦合试验番茄产量的实测值与计算值。由表 5 可知，各处理的模型计算产量和实测产量趋势一致。模型拟合残差平方和 SSE 为 0.010，决定系数 R^2 为 0.793，计算值与实测值的均方根误差 $RMSE$ 为 2.34 t/hm²，平均相对误差 MRE 为 2.71%，平均绝对误差 MAE 为 1.38 t/hm²。

表 5 番茄产量实测值与计算值

Table 5 The measured and calculated values of tomato yield

处理	计算值/(t hm ⁻²)	实测值/(t hm ⁻²)
T1	57.07	56.04
T2	53.05	50.77
T3	47.81	52.04
T4	53.10	51.39
T5	50.32	51.33
T6	48.12	49.70
T7	54.77	50.44
T8	53.99	51.06
T9	49.03	48.04
SSE		0.010
R^2		0.793
$RMSE/(t\ hm^{-2})$		2.34
$MRE/\%$		2.71
MAE		1.38

进一步通过水分敏感指数的累积曲线计算相应

的水分敏感指数，并与 Jensen 模型中的水分敏感指数进行比较，结果见表 6。由表 6 可知，通过累积函数曲线计算的水分敏感指数与 Jensen 模型中的水分敏感指数的绝对误差小于 0.01，相对误差小于 10%。因此水分敏感指数累积曲线对水分敏感指数具有较好的拟合效果，可以对番茄水分敏感指数进行预测。

表 6 水分敏感指数误差

Table 6 Error calculation of water sensitive index

项目	苗期	开花期	成熟期
Jensen 模型	0.096	0.200	0.059
累积函数	0.087	0.195	0.064
绝对误差	0.009	0.005	0.005
相对误差/%	9.103	2.481	8.151

3 讨论

水分和氮素是影响番茄产量的 2 个重要因素，合理的灌水和施氮是实现番茄高效生产的关键，也是水肥资源高效利用的重要途径。水分亏缺在一定程度上减少了番茄的产量^[20]，Cui 等^[21]通过对不同生育期的水分胁迫的番茄产量进行研究，认为果实发育期的干旱胁迫使产量下降。李波等^[22]通过对不同生育期供水条件下番茄产量的研究，认为番茄开花坐果期控制灌水下限为 60%田间持水率，结果盛期控制灌水下限为 75%田间持水率，控制灌水上限为 90%田间持水率时，产量最高，本研究的结果与之类似，在 T1 处理各生育期灌水上限均为田间持水率的 90%，产量最高。Nunez-Ramirez 等^[23]通过研究 4 种施氮量对番茄产量的影响，结果表明施氮量与作物产量正相关。毕晓庆等^[24]认为氮肥施用量为 0~360 kg/hm² 时，产量随氮肥施用量的增加而增加。而王进斌等^[25]研究表明，施氮量为 0~200 kg/hm² 时，玉米的产量随施氮量增加而增加，超过该范围玉米产量有所下降。本试验番茄平均产量随施氮量的增加而增加，施氮量为 350 kg/hm² 的番茄产量最高，分别较施氮量为 250 kg/hm² 和 150 kg/hm² 的平均产量高 0.33%、4.17%，这与朱荣松等^[26]的研究结果相似。本试验在施氮量为 250 kg/hm² 的基础上，继续增加氮肥对番茄的产量的增加效果不明显，且水分利用效率有所降低，这与王进斌等^[25]的研究结果相似。王激清等^[27]研究发现春玉米的氮肥偏生产力随施氮量增加而减小，而本文得到番茄氮肥偏生产力与施氮量负相关，结果与之相似。本文利用极差法分析并综合考虑产量、水分利用率和氮肥偏生产力，T2 处理在未造成大量减产的条件下，具有较高的水分利用率和氮肥偏生产力。

作物水氮生产函数是在水分生产函数的基础上引入氮素效应函数，可定量评估田间水分和施氮及其交

互作用对作物产量的影响。金建华等^[29]通过不同干旱程度研究对棉花水分敏感指数的影响,结果表明棉花的水分最敏感指数表现为“花铃期>蕾期>吐絮期”。Zhang^[28]等通过对不同水分亏缺程度下番茄的水分敏感指数和水分生产函数进行研究,得到在开花期,番茄的水分敏感指数最大,其次为盛果期,苗期的水分敏感指数最小;本研究各生育期番茄水分敏感指数表现为开花期($\lambda_2=0.200$)>苗期($\lambda_1=0.096$)>成熟期($\lambda_3=0.059$), Zhang^[28]等的研究与本研究的水分敏感指数均在开花期最大,而本研究苗期的水分敏感指数大于成熟期的水分敏感指数,这与 Zhang^[28]等的研究结果不一致,这可能是由于生育期划分少及土壤等因素不同引起了水分敏感指数在各生育阶段表现不一致。王克全^[30]利用 Jensen 模型建立水稻敏感指数累积曲线,并对 Jensen 模型中的水分敏感指数进行了验证,得到较好的拟合效果。金建华等^[29]建立的水分敏感指数累积曲线是“S”型曲线,水分敏感指数累积值从播种后 50 d 才开始增长;本文水分敏感指数累积曲线表现为前期增长较缓慢,中期快速增长,后期保持平稳的状态,在定植 40 d 后已进入快速增长阶段,这可能是由于番茄植株生长进入营养生长与生殖生长并进的阶段,对水分的需求量增大,造成该阶段对水分亏缺较为敏感,水分敏感指数较大。本文经过水分敏感指数累积曲线计算得到的各阶段水分敏感指数与 Jensen 模型中的水分敏感指数进行比较,二者的相对误差和绝对误差分别为 0.005~0.009, 2.481~9.103,可以利用水分敏感指数累积曲线对水分敏感指数进行计算,且具有较高的精确度。

4 结论

1) 基于 Jensen 模型建立的膜下滴灌番茄水氮生产函数,模型拟合残差平方和 SSE 为 0.010, 决定系数 R^2 为 0.793, 验证计算值与实测值的均方根误差 $RMSE$ 为 2.34 t/hm², 平均相对误差为 2.71%, 平均绝对误差为 1.38 t/hm², 模型具有较高的精确度, 可对膜下滴灌水氮耦合番茄产量进行预测。

2) 本试验番茄各生育阶段水分敏感指数大小表现为开花期($\lambda_2=0.200$)>苗期($\lambda_1=0.096$)>成熟期($\lambda_3=0.059$), 开花期番茄对水分亏缺最为敏感。水分敏感指数累积曲线对水分敏感指数的计算具有较高的精度, 可用其对水分敏感指数进行更精细的预测。

3) 番茄开花期灌水量对产量的影响达到显著水平 ($P<0.05$), 苗期灌水、施氮量和成熟期灌水对番茄产量有一定影响, 但未达到显著水平。施氮能够提高番茄产量和水分利用率, 降低氮肥偏生产力。当施氮量为 250 kg/hm² 继续增加氮肥对番茄增产效果不

明显, 且水分利用效率降低。由极差法和综合考虑产量、水分利用率和氮肥偏生产力, 本试验条件下膜下滴灌水氮耦合番茄的最优方案为: 苗期采用充分灌水、开花期采用 75% 充分灌水、成熟期采用 75% 充分灌水和施氮量 250 kg/hm² 的组合。

参考文献:

- [1] GAO Y M, TIAN P, LI J, et al. Transcriptional changes during tomato ripening and influence of brackish water irrigation on fruit transcriptome and sugar content.[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2019, 145: 21-33.
- [2] 王启龙, 卢楠, 庞喆, 等. 不同灌水方式对温室番茄土壤理化性状与产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(S2): 36-39.
WANG Qilong, LU Nan, PANG Zhe, et al. Effects of different irrigation methods on soil physicochemical property and growth of tomato in newly increased cultivated lands [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(S2): 36-39.
- [3] DJIDONOU D, ZHAO X, KOCH K E, et al. Nitrogen accumulation and root distribution of grafted tomato plants as affected by nitrogen fertilization [J]. *Hortscience*, 2019, 54(11):1 907-1 914.
- [4] 晏军, 吴启侠, 朱建强, 等. 适雨灌溉下不同施肥模式对机插稻田水环境及产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(2): 56-63.
YAN Jun, WU Qixia, ZHU Jianqing, et al. Effects of different fertilization models on paddy water environment and yield in machine-transplant rice under irrigation adjusted by rainfall[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(2): 56-63.
- [5] 陈伟. 水稻水分生产函数及水氮耦合模型试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2013.
CHEN Wei. Experimental study on rice water production function and water-nitrogen coupling model[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2013.
- [6] 王康, 沈荣开, 沈言俐, 等. 作物水分与氮素生产函数的实验研究[J]. *水科学进展*, 2002(3): 308-312.
WANG Kang, SHEN Rongkai, SHEN Yanli, et al. Experiment study on the crop's water-nitrogen production function[J]. *Advances in Water Science*, 2002(3): 308-312.
- [7] 孔维萍, 鱼生智, 王海峰, 等. 调亏灌溉下酿酒葡萄耗水特性及水分生产函数研究[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(2): 93-100.
KONG Weiping, YU Shengzhi, WANG Haifeng, et al. Effects of regulated deficit irrigation on wine grape water consumption characteristics and water production function[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(2): 93-100.
- [8] 孙爱华, 华信, 朱士江, 等. 节水灌溉水稻水氮生产函数模型试验研究[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(33): 11 704-11 706.
SUN Aihua, HUA Xin, ZHU Shijiang, et al. Experiments of water-nitrogen production function for rice water-saving irrigation[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(33): 11 704-11 706.
- [9] 李楠楠. 黑龙江省半干旱区玉米膜下滴灌水肥耦合模式试验研究

- [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2010.
- LI Nannan. Coupling effects between water and nitrogen of corn on drip irrigation under plastic film in semiarid region of Heilongjiang province [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2010.
- [10] 王加蓬, 蔡焕杰, 王健, 等. 温室膜下滴灌甜瓜需水量与水分生产函数研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(2): 45-47.
- WANG Jiapeng, CAI Huanjie, WANG Jian, et al. Water demand and water production function for muskmelon under mulched drip irrigation in greenhouse [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(2): 45-47.
- [11] 李亚龙, 崔远来, 李远华, 等. 作物水氮生产函数研究进展[J]. 水利学报, 2006, 37(6): 704-710.
- LI Yalong, CUI Yuanlai, LI Yuanhua, et al. Advancement of research on crop water-nitrogen production function[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(6): 704-710.
- [12] 韩松俊, 刘群昌, 王少丽, 等. 作物水分敏感指数累积函数的改进及其验证[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 83-88.
- HAN Songjun, LIU Qunchang, WANG Shaoli, et al. Improvement and verification of cumulative function of crop water sensitive index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(6): 83-88.
- [13] 李中楷, 刘鹤, 赵文智, 等. 作物水分生产函数研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(12): 23-36.
- LI Zhongkai, LIU Hu, ZHAO Wenzhi, et al. Revisiting crop water production functions in terms of cross-regional applications [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(12): 23-36.
- [14] 杜太生, 康绍忠. 基于水分-品质响应关系的特色经济作物节水调质高效灌溉[J]. 水利学报, 2011(2): 123-130.
- DU Taisheng, KANG Shaozhong. Efficient water-saving irrigation theory based on the response of water and fruit quality for improving quality of economic crops [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011(2): 123-130.
- [15] 王则玉, 马晓鹏, 刘国宏, 等. 基于Jensen模型的红枣水分生产函数及敏感指数研究[J]. 新疆农业科学, 2017(4): 52-56.
- WANG Zeyu, MA Xiaopeng, LIU Guohong, et al. Research on water production function and sensitive indexes based on Jensen Model[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2017(4): 52-56.
- [16] 王仰仁, 荣丰涛, 李从民, 等. 水分敏感指数累积曲线参数研究[J]. 山西水利科技, 1997(4): 20-24.
- WANG Yangren, RONG Fengtao, LI Congmin, et al. Study on parameters of cumulative curve of water sensitive index[J]. Shanxi Hydraulics, 1997(4): 20-24.
- [17] 周智伟, 尚松浩, 雷志栋. 冬小麦水肥生产函数的Jensen模型和人工神经网络模型及其应用[J]. 水科学进展, 2003, 14(3): 280-284.
- ZHOU Zhiwei, SHANG Songhao, LEI Zhidong. Jensen model and ANN model for water-fertilizer production function of winter wheat[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(3): 280-284.
- [18] 茆智, 崔远来, 李远华. 水稻水分生产函数及其时空变异理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- MAO Zhi, CUI Yuanlai, LI Yuanhua. Theory and application of rice water production function and its temporal and spatial variation[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [19] 王仰仁, 雷志栋, 杨诗秀. 冬小麦水分敏感指数累积函数研究[J]. 水利学报, 1997(5): 29-36.
- WANG Yangren, LEI Zhidong, YANG Shixiu. Cumulative function of sensitive index for winter wheat[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(5): 29-36.
- [20] MATTAR M A, EL-ABEDIN TKZ. Soil water status and growth of tomato with partial root-zone drying and deficit drip irrigation techniques[J]. Irrigation Science, 2020(38): 163-176.
- [21] CUI JT, SHAO GC, LU J, et al. Yield, quality and drought sensitivity of tomato to water deficit during different growth stages[J]. Scientia Agricola, 2020(2): 77-88.
- [22] 李波, 任树梅, 杨培岭, 等. 供水条件对温室番茄根系分布及产量影响[J]. 农业工程学报, 2007(9): 39-44.
- LI Bo, REN Shumei, YANG Peiling, et al. Impacts of different water supply on tomato root distribution and yield in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007(9): 39-44.
- [23] NUNEZ-RAMIREZ F. Nitrogen fertigation influence on nitrate concentration of nitrates on extract cellular of petiole, yield and quality of greenhouse tomato [J]. Rev. Fac. Cienc. Agrar. 2017(49): 93-103.
- [24] 毕晓庆, 山楠, 杜连凤, 等. 氮肥用量对设施滴灌栽培番茄产量品质及土壤硝态氮累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(11): 2 246-2 250.
- BI Xiaoqing, SHAN Nan, DU Lianfeng, et al. Effects of nitrogen rates on tomato yield and quality and soil nitrate accumulation under drip irrigation in solar greenhouse [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(11): 2 246-2 250.
- [25] 王进斌, 李玲玲, 谢军红, 等. 耕作措施和氮肥用量对陇中旱农区粮饲兼用玉米光合特性与水分利用效率的影响[J]. 西北农业学报, 2018, 27(6): 802-811.
- WANG Jinbin, LI Lingling, XIE Junhong, et al. Effects of tillage practices and nitrogen rates on photosynthetic characteristics and water use efficiency of grain and forage maize in dry farming areas of central Gansu in China[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2018, 27(6): 802-811.
- [26] 朱荣松, 张瑜, 谢国庆, 等. 不同施氮量对番茄产量和肥料利用率的影响[J]. 南方园艺, 2018, 29(4): 1-4.
- ZHU Rongsong, ZHANG Yu, XIE Guoqing, et al. Effects of different nitrogen application rates on tomato yield and fertilizer utilization[J]. Southern Horticulture, 2018, 29(4): 1-4.
- [27] 王激清, 刘社平. 施氮量对番茄生长发育和氮肥利用率的影响[J]. 河南农业科学, 2015, 44(2): 94-97.
- WANG Jiqing, LIU Sheping. Effects of Nitrogen application rate on growth and development and nitrogen use efficiency of tomato[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2015, 44(2): 94-97.
- [28] ZHANG H G, ZHANG J D. Periodical water production function of processing tomato (*Solanum Lycopersicum*)[J]. Subjected to Water Deficit in an Arid Environment, 2014, 34: 196-200.

- [29] 金建华, 孙书洪, 王仰仁, 等. 棉花水分生产函数及灌溉制度研究[J]. 节水灌溉, 2011(2): 46-48, 61.
JIN Jianhua, SUN Shuhong, WANG Yangren, et al. Study on water production function and irrigation system of cotton[J]. Water Saving Irrigation, 2011(2): 46-48, 61.
- [30] 王克全. 查哈阳灌区水稻水分生产函数及其优化灌溉制度试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2008.
WANG Kequan. Study on rice water production function and optimal irrigation schedules of ChaHaYang irrigation area[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2008.

The Effect of Water-nitrogen Coupling on Water-nitrogen Production Functions of Greenhouse Tomato under Mulched Drip Irrigation

LI Wenling¹, SUN Xihuan¹, ZHANG Jianhua², MA Juanjuan¹,
GUO Xianghong^{1*}, LEI Tao¹, SUN Ruifeng¹, SONG Tao²

(1. College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
2. HKBU Institute for Research and Continuing Education, Shenzhen 518000, China)

Abstract: **【Background】** Tomato is an important economic crop planted widely in both north and south of China. In addition to its effect in antioxidant and anti-cancer, tomato is also nutritious and rich in VC, lycopene and other nutrients. Water and nutrients are two abiotic factors determining tomato growth. Irrational irrigation and fertilization, especially when they are used excessively, not only waste resources and contaminate groundwater, but could also compromise crop yield and quality. Understanding how water and nutrients combine to modulate tomato growth is hence critical to its sustainable production. **【Objective】** The overall objective of this paper is to determine the production functions of water and nitrogen of greenhouse tomato in response to water-nitrogen coupling under mulched drip irrigation. We can therefore find its key water-demand stages and provide guidelines for efficient use of water and nitrogen fertilizer in tomato production. **【Method】** The experiment considered four factors and three levels, with all designed using the orthogonal test to study how yield of the tomato responds to change in water and nitrogen coupling. The Jensen model was used to describe the change in tomato yield with water and nitrogen applications. **【Result】** The tomato yield calculated by the model was consistent with the measurements, with the squared sum of the model fitting residuals being 0.01 and the determination coefficient being 0.793. The root mean square error, average relative error and average absolute error between the calculated and the measured yield were 2.98 t/hm², 2.53% and 2.39 t/hm², respectively. The water sensitive index at each growth stage was ranked in the descending order as flowering stage ($\lambda_2=0.200$) > seedling stage ($\lambda_1=0.096$) > ripening stage ($\lambda_3=0.059$). The water sensitive index calculated from the cumulative curve of the water sensitive index agreed well with the estimate from the Jensen model. The factors that impacted tomato yield was ranked in the following descending order based on their significance: irrigation at flowering stage > irrigation at seedling stage > nitrogen application > irrigation at maturity stage, with the effect of irrigation at flowering stage being significant ($P < 0.05$). The highest yield was 72.92 t/hm², achieved by triple irrigations coupled with 350 kg/hm² of nitrogen application. The partial nitrogen production decreased as nitrogen application increased, and when the nitrogen application exceeded 250 kg/hm², a further increase in its application did not result in a noticeable yield increase but reduced the water use efficiency. The water-nitrogen production function was accurate and can be used to predict yield of the tomato fertigated by film-mulched drip irrigation. The cumulative curve of the water sensitive index was adequate for calculating water sensitive index, with the water sensitive index at flowering stage being the highest. **【Conclusion】** Considering the yield and water and nitrogen use efficiency, the optimal fertigation under film-mulched drip irrigation was: sufficient irrigation at seedling stage, 75% of the sufficient irrigation at flowering stage and ripening stage respectively, coupled with 250 kg/hm² of nitrogen application.

Key words: water-nitrogen coupling; tomato; yield; water-nitrogen production function

责任编辑: 韩洋