

智能灌溉施肥对设施番茄水氮利用效率的影响

孟繁超¹, 吕昊峰¹, 董静², 何世朋¹, 李飞^{1,3}, 刘庆花^{1*}, 梁斌¹

(1.青岛农业大学 资源与环境学院, 山东 青岛 266109; 2.寿光市农业局
国家大宗蔬菜体系寿光综合实验站, 山东 潍坊 262700; 3.潍坊职业学院, 山东 潍坊 262700)

摘要:【目的】明确测墒自动灌溉对水氮利用效率的影响, 探索确定设施番茄最佳墒情管理参数。【方法】通过连续3季的田间试验, 结合土壤墒情实时原位监测与“智能+”技术, 以传统漫灌施肥为对照(CK), 探究不同土壤含水率范围(田间持水率的60%~65%、75%~80%、60%~95%)对设施番茄产量、品质、水氮利用效率的影响。【结果】基于土壤墒情原位监测的智能灌溉施肥技术能够将土壤表层(0~30 cm)含水率控制在设定区间之内。60%~65%、75%~80%、60%~95%处理单季灌溉次数分别平均为55、87、10次, 单季灌水量为1 215~3 105 m³/hm²比传统漫灌施肥处理减少了35.9%~78.4%, 番茄果实产量增加了2.6%~24.3%, 灌溉水利用效率提高至42.8~58.7 kg/m³, 氮素利用效率提高至26.3%~34.7%, 其中75%~80%处理较其他处理产量显著增加12.8%~18.3%, 3季平均产量达111 t/hm², 单季灌溉量平均为2 655 m³/hm², 较漫灌处理节水51.4%, 灌溉水利用效率达到42.78 kg/m³。氮素表现损失量为漫灌处理的67.1%。【结论】基于土壤墒情原位监测的智能灌溉施肥技术可实现“少量多次”的灌溉制度, 从而大幅度减少灌溉量和劳动力成本, 降低氮素淋溶风险, 提高设施番茄产量和水氮利用效率。

关键词: 设施番茄; 土壤墒情原位监测; 智能灌溉施肥; 产量; 水氮利用效率

中图分类号: S274.3

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022081

孟繁超, 吕昊峰, 董静, 等. 智能灌溉施肥对设施番茄水氮利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(Supp.1): 7-12.

MENG Fanchao, LYU Haofeng, DONG Jing, et al. Effects of Intelligent Irrigation Fertilization on Water and Nitrogen Use Efficiency of Greenhouse Tomato[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(Supp.1): 7-12.

0 引言

【研究意义】我国设施蔬菜种植发展迅速, “十三五”期间种植面积维持在410万hm²[1]。传统设施蔬菜生产水肥投入量高。郭金花[2]在山东寿光的调查结果显示, 设施蔬菜平均单季灌水量高达8 300 m³/hm²。殷冠羿等[3]研究表明, 过量灌溉导致大量的氮素淋溶损失。Lyu等[4]研究表明, 设施蔬菜单季氮素损失量高达287 kg/hm², 占氮肥投入的31%, 灌溉量是氮素淋溶损失的最主要驱动因素。过量灌溉导致养分大量淋洗损失, 为了满足蔬菜作物对养分的高强度需求以期获得高产, 种植者不断增加肥料投入量。黄绍文等[5]调查发现, 设施蔬菜化肥养分(N+P₂O₅+K₂O)施用量为1 352.5 kg/hm², 是作物需求量的1.9~3.4倍。Zhang等[6]研究表明, 我国氮肥投入量是美国和加拿大等发达国家的2.43倍,

肥料利用率仅为发达国家的37%。因此, 要想减少施肥量, 提高肥料利用效率, 控水是关键。

【研究进展】近年来, 滴灌施肥技术的应用日趋广泛。白由路[7]研究表明, 滴灌施肥可节水40%以上, 节肥20%以上, 省工90%, 显著提高水肥利用效率, 降低养分淋溶损失[8-9]。然而, 目前应用到我国设施蔬菜生产中的滴灌施肥管理粗放, 节水减肥效果甚微, 有的灌溉量甚至超过漫灌模式, 无法真正实现省时省工、优质高产的目标。随着“智能+”的发展, 为智能灌溉施肥提供了保障。近年来, 通过滴灌施肥的智能施肥机迅速发展, 但国内智能施肥机产品仅是将施肥器、过滤器等设备简单集成, 或者是将工业自动化控制产品复制到农业生产当中, 缺乏精准的水肥管理的参数, 更缺乏集“测定-控制-配肥-施肥”于一体的智能化与精准化的创新产品。

要想实现水肥的精准管理, 除明确作物水肥需求规律外, 准确调控栽培介质的水分状况也至关重要。利用频/时域反射仪(FDR/TDR)是实现设施蔬菜水分精准控制的重要手段。TDR技术相对成熟, 测定结果受土壤盐分影响小, 数据稳定, 但价格较

收稿日期: 2022-02-18

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2021CXGC010801)

作者简介: 孟繁超(1997-), 女。硕士研究生, 主要从事设施蔬菜水肥高效利用。E-mail: mengfanchao1997@163.com

通信作者: 刘庆花(1976-), 女。副教授, 博士, 主要从事设施蔬菜水肥高效利用。E-mail: qhliu_nj@163.com

高, 单个探头在万元以上。唐玉邦等^[10]研究表明多数 FDR 测定仪均存在精度和稳定度不够的问题。德国 Steps 公司通过多年的努力, 解决了 FDR 测定仪精度差的问题, 在土壤水分原位监测中应用较多。

【切入点】目前, 我国土壤水分原位监测 FDR 仪产品发展迅速, 产品样式多, 但质量参差不齐, 并且普遍缺乏智能化控制的相关技术参数。李鸿儒等^[11]为了解决以上问题, 研制出了能够自动标定的 FDR 水分传感器。张瑞卿等^[12]也基于 FDR 传感器研制出了灌溉系统, 但都并未实现完全自动, 不能在实际生产中实现全自动灌溉。水肥一体化和信息技术相结合, 实现真正的智慧农业是未来的发展方向^[13]。

【拟解决的关键问题】综上所述, 本研究利用土壤墒情原位监测系统, 设置不同的土壤含水率, 明确测墒自动灌溉对设施番茄产量、品质和水氮利用效率的影响, 探索设施番茄最佳墒情管理参数, 为设施农业绿色健康发展提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

供试温室位于山东省寿光市洛城街道欣禾沃土高效农业研发中心 (118°51'40"E, 36°51'40"N), 为土墙水泥立柱钢架结构。供试土壤 0~5、5~10、10~15 cm 处的土壤体积质量和田间持水率分别为 1.28、1.25、1.27 g/cm³ 和 36.5%、36.9%、37.2%。

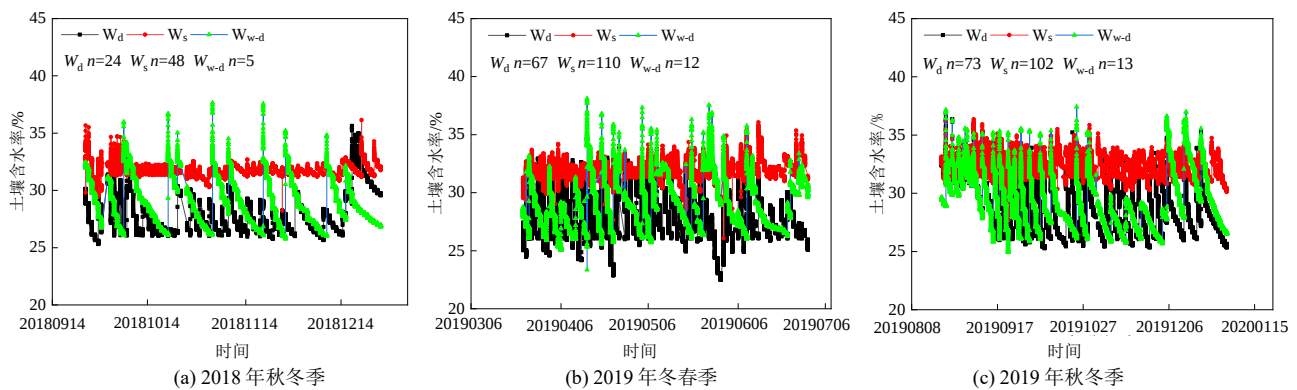


图 1 3 季番茄不同水分处理土壤体积含水率的变化规律

Fig.1 Changes of different irrigation treatments on soil volumetric water content in three seasons

1.3 测定项目及方法

每个小区选定 3 株有代表性番茄植株, 在每穗番茄成熟时, 采集成熟果实称质量, 第 3 穗果实成熟时采样测定品质指标。拉秧期采集植物样品, 测定地上部生物量。拉秧后, 各小区采用 5 点法分 3 层采集 0~90 cm 土壤样品, 测定矿质态氮量。

果实产量为每穗成熟番茄的鲜质量累加。采用 2,6-二氯酚酚滴定法测定 Vc 量, 蒽酮法测定可溶性糖量, NaOH 滴定法测定有机酸量。采集的果实及

1.2 试验设计

试验共设置 4 个处理, 分别为维持土壤田间持水量的 60%~65% (适度干旱处理, W_d)、75%~80% (适宜水分处理, W_s)、60%~95% (干湿交替处理, W_{w-d}) 及传统漫灌 (W_f) 处理。每个处理重复 3 次, 随机区组排列, 共 12 个小区, 每小区长 11.5 m, 宽 2.8 m。采用起垄种植, 垄宽 0.8 m, 过道 0.6 m, 每垄 2 行种植, 行距 0.4 m, 株距 0.4 m。试验时间为 2018 年 8 月—2019 年 12 月, 共种植 3 季, 番茄品种为当地种植较多的“齐达利”。利用 FDR 水分监测器监测土壤水分状况, 通过自动化灌溉施肥机控制灌溉开启与停止及灌水量。所有处理肥料用量相同, 基肥为发酵鸡粪, 用量为 15 t/hm², 追肥施用尿素、磷酸二氢钾、硫酸钾, 每季投入 N、P₂O₅、K₂O 分别为 480、90、450 kg/hm², 分 7 次追施, 间隔 15~20 d。W_f 处理在每次灌水时, 随水施入肥料, W_d、W_s、W_{w-d} 处理, 将追施的化肥溶解后, 用注肥泵注入灌溉设备随水施肥。各处理中氮素的来源包括灌溉水、基肥和追肥。由于各处理灌溉量不同, 来源于灌溉水的氮素数量也有差异, W_d、W_s、W_{w-d}、W_f 处理灌水量范围分别为 1 208~1 842、2 292~3 105、2 061~2 234、3 986~6 794 m³/hm²。

W_d、W_s、W_{w-d} 处理土壤体积含水率分别稳定在 22.5%~37.1%、29.7%~36.4%、23.4%~38.1% (图 1), 达到了预期的试验处理, 图 1 中其中 W_in 为该处理的灌溉次数, i 为不同处理代表的字母。

植物样品称完鲜质量后置于烘箱, 105 °C 杀青 30 min, 75 °C 烘干至恒质量。烘干样经粉碎后, 用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 凯氏定氮仪测定全氮量。土壤鲜样用 2 mol/L 的 KCl 溶液浸提 (水土比为 10:1), 滤液用 AA3 型连续流动分析仪 (SEAL Analytical) 测定矿质态氮量, 同时测定土壤质量含水率。灌溉水利用效率、氮素利用率和氮素表观损失量计算式为:

$$WUE=Y \times 1000/I, \quad (1)$$

$$N_p=(N_1 \times g_1 + N_2 \times g_2) / 1000 \times S, \quad (2)$$

$$NUE=N_p/N_{input}, \quad (3)$$

$$N_L=N_{input}+N_b-N_p-N_a, \quad (4)$$

式中： WUE 为灌溉水利用效率 (kg/m^3)； Y 为番茄产量 (t/hm^2)； I 为灌水量 (m^3/hm^2)， N_p 为作物氮素携出量 (kg/hm^2)， N_1 为茎叶全氮量 (%)， N_2 为作物果实全氮量 (%)， g_1 为单株茎叶生物量 (干质量, g)， g_2 为单株果实生物量 (干质量, g)， S 为种植密度 (株/ hm^2)； NUE 为氮素利用效率 (%)； N_{input} 为氮总投入量 (kg/hm^2)，其中氮总投入量为化学肥料氮素、鸡粪氮素与灌溉水携带氮素之和。 N_L 为氮素表观损失量； N_b 为种植前 0~90 cm 土壤剖面中矿质态氮累积量 (kg/hm^2)， N_a 为种植后 0~90 cm 土壤剖面中矿质态氮累积量 (kg/hm^2)。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理，SPSS 23 和 Origin 8.5 进行方差分析和图表制作，采用 Duncan 法进行多重比较 ($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 设施番茄产量与品质

3 个生长季设施番茄产量分别为 102~121、91~111、75~104 t/hm^2 。 W_s 处理 3 个生长季设施番茄

产量分别为 121、111、104 t/hm^2 ，较其他处理显著增加 18.3%~24.4%、12.8%~29.0%和 13.3%~39.0%，其他处理之间无显著差异 (表 1)。表 1 中不同小写字母表示处理间在 5%水平差异显著 (下同)。

表 1 不同灌溉处理下设施番茄产量

Table 1 Different irrigation treatments on

处理	the yield of greenhouse tomato t/hm^2			
	W_d	W_s	W_{w-d}	W_f
2018 年秋冬季	101.8±3.5b	120.5±3.1a	106.8±3.5b	106.3±3.9b
2019 年冬春季	91.1±6.5b	110.6±6.3a	97.1±4.9ab	88.4±5.7b
2019 年秋冬季	83.8±8.2b	104.2±4.3a	80.8±4.3b	74.9±1.3b
平均	92.2±9b	111.8±8.2a	94.9±13.1b	89.9±15.7b

各处理番茄果实 Vc 量平均为 136.8~209.8 mg/kg (表 2)。从 3 季均值来看，不同灌溉处理对果实 Vc 量无显著影响。 W_s 、 W_{w-d} 处理的糖酸比较传统漫灌处理分别显著增加 57.1%和 37.1%。其中 W_s 处理可溶性糖量显著高于其他处理，增幅为 17.8%~31.0%，有机酸量较漫灌处理显著降低 17.0%。

2.2 灌溉水利用效率与氮肥利用率

漫灌处理单季灌水量平均为 5 459 m^3/hm^2 ， W_d 、 W_s 、 W_{w-d} 处理单季灌水量分别平均为 1 608、2 652、2 177 m^3/hm^2 。较漫灌处理节水 53.8%~78.4%、35.9%~59.0%、48.3%~67.1% (表 3)。

表 2 不同处理对设施番茄 Vc、可溶性糖、有机酸和糖酸比

Table 2 Effects of different treatments on the vitamin C content、soluble sugar、soluble acid and sugar acid ratio of greenhouse tomato

指标	Vc/(mg kg^{-1})				可溶性糖/(g kg^{-1})				有机酸/(g kg^{-1})				糖酸比			
	W_d	W_s	W_{w-d}	W_f	W_d	W_s	W_{w-d}	W_f	W_d	W_s	W_{w-d}	W_f	W_d	W_s	W_{w-d}	W_f
2018 年秋冬季	185.6 a	169.4 a	170.7 a	174.4 a	21.9 b	26.8 a	28.9 a	27.4 a	4.7 b	4.7 b	4.8 b	5.6 a	4.7 a	5.8 a	6.0 a	4.8 a
2019 年冬春季	193.0 b	209.8 a	199.8 b	180.2 c	15.4 b	23.0 a	14.9 b	12.4 c	4.4 b	4.4 b	4.3 b	5.4 a	3.4 b	5.1 a	3.4 b	2.3 c
2019 年秋冬季	136.8 c	159.5 a	152.4 ab	141.5 bc	18.7 b	23.7 a	18.5 b	17.3 b	4.0 a	4.1 a	3.9 a	5.0 a	4.7 b	5.5 a	5.1 ab	3.4 c
平均	171.8 a	179.6 a	174.3 a	165.4 a	18.7 b	24.5 a	20.8 b	19.0 b	4.4 b	4.4 b	4.4 b	5.3 a	4.3 bc	5.5 a	4.8 ab	3.5 c

表 3 不同生长季各处理灌水量

Table 3 Irrigation amount of different

treatments in different growing seasons m^3/hm^2			
处理	2018 年秋冬季	2019 年冬春季	2019 年秋冬季
W_d	1 842	1 775	1 208
W_s	2 556	3 105	2 292
W_{w-d}	2 061	2 234	2 234
W_f	3 986	6 794	5 595

W_d 处理灌溉水利用效率最高，3 季平均为 58.7 kg/m^3 ，是传统漫灌处理的 1.07~4.22 倍 (表 4)。 W_s 处理灌溉水利用效率平均达到 42.8 kg/m^3 ，较传统漫灌处理增加 76.67%~242.0%，3 季平均增幅为 141.1%。2018 年秋冬季和 2019 年冬春季 W_{w-d} 处理灌溉水利用效率显著高于 W_s 处理，但在 2019 年秋冬季二者差异并不显著。

传统漫灌处理氮素利用率仅为 15.2%~23.2%，3 季平均为 18.7% (表 5)。 W_d 、 W_s 、 W_{w-d} 处理氮素利用率为 26.3%~34.7%，平均为 29.1%，处理之间

无显著差异，较传统处理显著增加 45.5%~69.0%，平均增幅为 55.4%。

表 4 不同水分处理下灌溉水利用效率

Table 4 Different irrigation treatments

on the water use efficiency kg/m^3			
处理	W_d	W_s	W_{w-d}
2018 年秋冬季	55.3±1.9a	47.1±1.2c	51.8±1.7b
2019 年冬春季	51.3±3.6a	35.6±2.2c	43.5±2.2b
2019 年秋冬季	69.4±6.8a	45.5±1.9b	36.1±1.9b
平均	58.7±9.4a	42.7±6.2a	43.8±7.8a

表 5 不同水分处理下氮素利用率的效率

Table 5 Different irrigation treatments

on the nitrogen use efficiency %			
处理	W_d	W_s	W_{w-d}
2018 年秋冬季	27.3±2.8ab	31.4±1.9 a	30.9±2.5a
2019 年冬春季	27±0.8a	34.6±2.2 a	28.1±0.6a
2019 年秋冬季	27.4±1.5 a	28.8±7 a	26.2±3.4 a
平均	27.2±0.2a	31.6±2.9a	28.4±2.3a

2.3 氮素表观损失

传统漫灌处理剖面矿质态氮累积量显著小于其他 3 个处理, 仅为 $1\ 080.9\ \text{kg}/\text{hm}^2$ (表 6)。传统漫灌处理的氮素表观损失为 $3\ 071.3\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 显著高于

其他 3 个滴灌处理。与传统漫灌处理相比, W_d 、 W_s 和 W_{w-d} 处理的氮素表观损失量分别减少了 43.0%、33.0%和 48.3%。

表 6 不同处理在 0~90 cm 的氮素表观损失量

处理	灌溉水氮投入量	有机肥及化肥氮投入量	种植前剖面矿质态氮累积量	种植后剖面矿质态氮累积量	作物携出量	氮素表观损失量
W_d	380.9	2 079	1 254.2	$1\ 509.75 \pm 63.8\ b$	$454.6 \pm 30.6\ b$	$1\ 749.6 \pm 34.0\ c$
W_s	628.0	2 079	1 254.2	$1\ 294.6 \pm 75.1\ c$	$607.0 \pm 5.0\ a$	$2\ 059.5 \pm 80.1\ b$
W_{w-d}	515.5	2 079	1 254.2	$1\ 753.9 \pm 55.6\ a$	$507.9 \pm 35.0\ ab$	$1\ 586.7 \pm 90.3\ c$
W_f	1 293.0	2 079	1 254.2	$1\ 080.9 \pm 75.2\ d$	$473.8 \pm 46.9\ b$	$3\ 071.3 \pm 72.4\ a$

3 讨论

3.1 设施番茄产量

本研究表明, 基于土壤墒情原位监测的智能滴灌施肥处理番茄产量为 $81 \sim 124\ \text{t}/\text{hm}^2$, 在各生长季均高于传统漫灌施肥处理。江丽华等^[14]对山东省设施番茄产量的调研结果表明, 传统农户设施番茄产量为 $108 \sim 127\ \text{t}/\text{hm}^2$ 。本研究中基于土壤墒情原位监测的智能滴灌施肥处理产量能够与传统农户的产量持平。Wal 等^[15]和 Gelder 等^[16]研究表明, 荷兰设施番茄产量为 $600\ \text{t}/\text{hm}^2$ 。这是因为荷兰种植模式为 1 年 1 茬, 且为无土栽培, 种植密度大, 而山东省设施番茄多为 1 年 2 茬且为土壤栽培, 种植密度小, 与荷兰的种植模式相比, 采摘期减少了 60 d 左右, 因此导致产量显著低于荷兰模式。张旭等^[17]研究表明, 与漫灌施肥相比, 滴灌施肥能够增加作物产量, 这可能是由于高频灌溉能够增加作物光合速率^[18]、叶面积指数、干物质积累量^[9]和作物根系的生长^[19]。

3.2 灌溉水利用效率

荷兰设施番茄种植模式的灌溉水利用效率为 $62.5 \sim 71.4\ \text{kg}/\text{m}^3$ ^[20], 本研究较荷兰模式相比, 仍有较大差距。这可能是由于荷兰模式的渗漏液是循环施用, 并且在热交换器等位置增加了冷却系统, 增加了温室中蒸发水的循环利用^[21]。姜言娇等^[22]研究表明, 我国传统漫灌的灌溉水利用效率仅为 $14.5\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。本研究中, 基于墒情监测的滴灌处理平均灌溉水利用效率为 $48.5\ \text{kg}/\text{m}^3$, 比传统漫灌提高了 2.3 倍。牛文全等^[23]研究表明, 降低水分投入量是提高灌溉水利用效率的根本途径。徐晓宇^[24]也证明了适量的亏缺灌溉较充分灌溉能够增加灌溉水利用效率 9%~25%。与漫灌处理相比, 高频滴灌能够使水分集中在根系的有效范围内, 直接被植物利用, 减少了渗漏损失, 从而提高灌溉水利用效^[25]。

3.3 氮素利用与损失

氮素淋溶损失是设施菜地氮素损失的主要途径。硝态氮淋溶是设施菜地氮素淋溶的主体, 占总氮淋

溶的 69.1%~73.1%^[26]。土壤硝态氮的运移依赖于土壤水分运移。张泽锦等^[27]的试验结果均证明设施蔬菜生产中, 灌水量超过灌水定额会使土壤剖面中的硝态氮随水向下移动, 增加氮素的淋溶损失。丁武汉等^[28]研究表明, 我国设施菜地的氮肥利用率仅为 18.6%。而本研究中基于墒情监测的滴灌处理氮肥利用率平均为 29.1%, 显著高于我国平均水平。主要原因是采用基于土壤墒情原位监测的智能灌溉次数可达 87 次/季, 实现了少量多次的高频灌溉, 使养分集中在根系附近, 减少其淋洗损失, 从而提高其利用效率, 而如此频繁的灌溉操作如果依靠人工完成则会显著增加劳动成本。Sun 等^[29]研究表明, 滴灌比畦灌减少了 75%~80%的氮素淋失量, 殷冠羿等^[3]也有类似的结论。聂斌等^[30]研究结果证明降低灌水量, 增加灌溉频率, 可以减少硝态氮的迁移淋失风险。也有研究表明土壤硝态氮量随径向距离和土层深度的增加而减小^[31]。樊兆博等^[8]的研究表明, 设施番茄漫灌处理一季的表现损失量就高达 $1\ 302\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 与本研究结果类似。本试验中基于墒情监测的滴灌处理的表现损失量显著小于漫灌处理, 2 季的累积表现损失量为 $1\ 586 \sim 2\ 059\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 。

4 结论

1) 在显著降低 51.4%灌溉量的前提下仍能使番茄产量增加 24.3%, 灌溉水利用效率平均达 $48.5\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。

2) 显著减少氮素表观损失, 氮素利用率提高至 29.1%。

3) 控制田间持水率在 75%~80%范围内, 可显著增加番茄产量和品质。因此, 田间持水率 75%~80%是比较适宜的土壤含水量范围。

参考文献:

- [1] 周杰, 夏晓剑, 胡璋健, 等. “十三五”我国设施蔬菜生产和科技进展及其展望[J]. 中国蔬菜, 2021(10): 20-34.
- [2] 郭金花. 典型设施蔬菜生产系统水肥、农药投入及环境影响的生命

- 周期评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [3] 殷冠羿, 胡克林, 李品芳, 等. 不同水肥管理对京郊设施菜地氮素损失及氮素利用效率的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2 403-2 412.
- [4] LYU Haofeng, ZHOU Weiwei, DONG Jing, et al. Irrigation amount dominates soil mineral nitrogen leaching in plastic shed vegetable production systems[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2021, 317: 107 474.
- [5] 黄绍文, 唐继伟, 李春花, 等. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1 480-1 493.
- [6] ZHANG Xin, DAVIDSON Eric A, MAUZERALL Denise L, et al. Managing nitrogen for sustainable development[J]. Nature, 2015, 528(7 580): 51-59
- [7] 自由路. 高效施肥技术研究的现状与展望[J]. 中国农业科学, 2018, 51(11): 2 116-2 125.
- [8] 樊兆博, 刘美菊, 张晓曼, 等. 滴灌施肥对设施番茄产量和氮素表观平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 970-976.
- [9] 张坤, 刁明, 景博, 等. 不同灌水量与灌水频率对加工番茄根系生长和产量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(1): 83-89.
- [10] 唐玉邦, 何志刚, 虞利俊, 等. 土壤水分传感器(FDR)在作物精准灌溉中的标定与应用[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(4): 343-344.
- [11] 李鸿儒, 于唯楚, 王振营. 基于迁移学习的 FDR 土壤水分传感器自动标定模型研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 213-220.
- [12] 张瑞卿, 戈振扬, 单伟, 等. 基于 FDR 原理的自动灌溉系统设计[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(2): 80-82, 86.
- [13] 赵春江. 智慧农业的发展现状与未来展望[J]. 中国农业文摘-农业工程, 2021, 33(6): 4-8.
- [14] 江丽华, 李妮, 徐钰, 等. 山东省设施蔬菜施肥现状调查研究[J]. 山东农业科学, 2020, 52(2): 90-96.
- [15] WAL B , MEULEBROEK L V , STEPPE K . Application of drought and salt stress can improve tomato fruit quality without jeopardising production[J]. Acta Horticulturae, 2016(1 170): 729-736.
- [16] GELDER A De, DIELEMAN J A, BOT G P A, et al. An overview of climate and crop yield in closed greenhouses[J]. Journal of Horticultural Science & Biotechnology, 2012, 87(3): 193-202.
- [17] 张旭, 熊又升, 谢媛圆, 等. 灌溉方式与施氮量对鲜食玉米生育前期生长发育的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(12): 54-60.
- [18] 李耀霞, 郁继华, 张国斌, 等. 灌水上限和施肥量对温室番茄生长发育的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 42-51.
- [19] LIANG Xinshu, GAO Yinan, ZHANG Xiaoying, et al. Effect of Optimal Daily Fertigation on Migration of Water and Salt in Soil, Root Growth and Fruit Yield of Cucumber (*Cucumis sativus* L.) in Solar-Greenhouse[J]. Plos One, 2014, 9(1):e86 975.
- [20] ZHOU Dianfan, MEINKE Holger, WILSON Matthew, et al. Towards delivering on the sustainable development goals in greenhouse production systems[J]. Resources Conservation and Recycling, 2021, 169: 105 379
- [21] KATSOULAS N, SAPOUNAS A, ZWART F DE, et al. Reducing ventilation requirements in semi-closed greenhouses increases water use efficiency[J]. Agricultural Water Management, 2015, 156: 90-99.
- [22] 姜言娇, 袁园园, 薛丽, 等. 基于 Meta 分析的灌溉模式对温室番茄产量和水分生产力的影响[J]. 节水灌溉, 2020(3): 40-45.
- [23] 牛文全, 古君, 梁博惠, 等. 水分亏缺条件下毛管埋深对番茄生长、产量及品质的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 279-287.
- [24] 徐晓宇. 基于 Meta 分析的不同灌溉量对作物产量、水分利用效率及品质的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [25] 谷丽丽, 魏珉, 侯加林, 等. 精准灌溉施肥对日光温室土壤性状及黄瓜产量品质的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(22): 4 507-4 516.
- [26] 骆晓声, 吕宏伟, 寇长林. 有机肥替代氮肥及节水对设施番茄和辣椒菜田氮淋溶的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2021(2): 96-101.
- [27] 张泽锦, 王力明, 唐丽, 等. 滴灌水量对设施土壤养分分布和黄瓜养分吸收的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(9): 72-78.
- [28] 丁武汉, 雷豪杰, 徐驰, 等. 我国设施菜地地表观氮平衡分析及其空间分布特征[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(3): 353-360.
- [29] SUN Yuan, HU Kelin, ZHANG Kefeng, et al. Simulation of nitrogen fate for greenhouse cucumber grown under different water and fertilizer management using the EU-Rotate_N model[J]. Agricultural Water Management, 2012, 112: 21-32.
- [30] 聂斌, 李文刚, 江丽华, 等. 不同灌溉方式对设施番茄土壤剖面硝态氮分布及灌溉水分效率的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 102-107.
- [31] 黄吴进, 邓利梅, 夏建国, 等. 温室滴灌施肥条件下土壤硝态氮的运移及分布特征[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(12): 42-48.

Effects of Intelligent Irrigation Fertilization on Water and Nitrogen Use Efficiency of Greenhouse Tomato

MENG Fanchao¹, LYU Haofeng¹, DONG Jing², HE Shipeng¹, LI Fei^{1,3}, LIU Qinghua^{1*}, LIANG Bin¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China;

2. Agricultural Bureau of Shouguang, National Shouguang Comprehensive Test Station for Bulk Vegetable System,

Weifang 262700, China; 3. Weifang Vocational College, Weifang 262700, China)

Abstract: 【Objective】 In order to clarify the influence of automatic irrigation of soil moisture measurement on water use efficiency, explore and determine the optimal soil moisture management parameters of greenhouse tomato,

and provide technical support for the green and healthy development of greenhouse agriculture. **【Method】** The effects of management parameters (60%~65%, 75%~80%, 60%~95% of field water capacity and flood irrigation treatment) on yield, quality and water and nitrogen use efficiency of greenhouse tomato were investigated through field experiment for three consecutive seasons, combined with real-time monitoring of soil moisture in situ and “smart+” technology. **【Result】** The intelligent irrigation based on soil moisture monitoring in situ controlled the soil surface water content within the set range. The irrigation times of 60%~65%, 75%~80% and 60%~90% treatments were 55, 87 and 10 times in a single season on average, realizing the precise management of a small number of times. Compared with flood irrigation treatment, the yield was increased by 2.6%~24.3%, the irrigation amount was 1 215~3 105 m³/hm², decreased by 35.9%~78.4%, the water use efficiency was increased to 42.8~58.7 kg/m³, and the nitrogen use efficiency was increased to 26.3%~34.7%. The yield of 75%~80% treatment was significantly increased by 12.8%~18.3% compared with other treatments, the average yield of three seasons was 111 t/hm², the irrigation amount of one season was 2 655 m³/hm², the water saving was 51.4%, the water use efficiency was 42.78 kg/m³, and the apparent nitrogen loss was 67.1% compared with that of flood treatment. **【Conclusion】** Intelligent irrigation based on soil moisture monitoring in situ can not only improve the yield and quality of tomato, but also improve the efficiency of water and nitrogen use, reduce the risk of nitrogen leaching, reduce the apparent loss, and provide a basis for the optimization of irrigation parameters.

Key words: greenhouse tomato; soil moisture in situ monitoring; intelligent irrigation and fertilization; yield; water and nitrogen use efficiency

责任编辑: 白芳芳

(上接第6页)

Short-term Response of Rice Growth, Water and Fertilizer Utilization to Different Fertilizer Applications in Land Consolidation Paddy Fields

HUANG Xingcheng^{1,2,3}, LI Yu^{1,2,3}, LIU Yanling^{1,2,3}, ZHANG Yarong^{1,2,3},
YANG Yehua^{1,2,3}, ZHU Huaqing^{1,2,3}, JIANG Taiming^{2,3,4*}

(1. Institute of Soil and Fertilizer, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China; 2. National Agricultural Experimental Station for Soil Quality in Guiyang, Guiyang 550006, China; 3. Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation and Agricultural Environment (Guizhou), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guiyang 550006, China; 4. Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China)

Abstract: 【Objective】 In order to provide scientific basis for scientific water and fertilizer management of rice, the effects of different fertilization models on rice growth and water and fertilizer utilization were explored.

【Method】 Four fertilization treatments were used in pot experiments: balanced chemical fertilizer(CF), low amount organic fertilizer instead of chemical fertilizer (CF-LM), high amount organic fertilizer instead of chemical fertilizer (CF-HM), and no fertilization control (CK). Rice growth, yield and composition factors, water and fertilizer utilization were investigated in four soils from land consolidation paddy fields. **【Result】** Compared with the no fertilizer control treatment(CK), the number of tillers, the length, width and area of flag leaf in rice were increased significantly with fertilization treatments(CF, CF-LM and CF-HM). Under the condition of equal nutrient input, the grain yield of rice under CF was significantly higher than that of CF-LM and CF-HM, with an average increase of 39.1% and 175.4%, respectively. The water and fertilizer utilization of each treatment were highest in CF, followed by CF-LM and CF-HM. Pathway analysis showed that the number of panicles, spikelets per panicle, percentage of filled grain, and 1000-grain weight directly and significantly promoted the establishment of rice grain yield, with direct path coefficients were 0.83, 0.23, 0.14 and 0.05, respectively. **【Conclusion】** It was concluded that, the short-term application of balanced chemical fertilizer after paddy field consolidation achieved higher grain yield, water and fertilizer utilization efficiency. Chemical fertilizer improving rice grain yield by increasing numbers of tillers and numbers of panicles.

Key words: land consolidation paddy fields; fertilization; yield; *PFP*; *WUE*

责任编辑: 白芳芳