

水肥耦合对设施番茄土壤水分、养分运移及 产量和水分利用效率影响

尹志荣, 柯英, 蔡进军

(宁夏农林科学院 农业资源与环境研究所, 银川 750002)

摘要:【目的】探寻滴灌水肥耦合条件下温室水果番茄优质高效的最优水肥组合。【方法】设置灌水量和施肥量 2 因素 3 水平共 9 个处理, 灌水量分别为 W1 (当地常规滴灌水量, $4\ 800\ \text{m}^3/\text{hm}^2$)、W2 ($75\%W1$, $3\ 600\ \text{m}^3/\text{hm}^2$)、W3 ($50\%W1$, $2\ 400\ \text{m}^3/\text{hm}^2$), 施肥量分别为 F1 (高肥, $7\ 200\ \text{kg}/\text{hm}^2$)、F2 (中肥 $70\%F1$, $5\ 040\ \text{kg}/\text{hm}^2$)、F3 (低肥 $40\%F1$, $2\ 880\ \text{kg}/\text{hm}^2$), 分析水肥耦合对番茄产量、水分利用效率、土壤水分及养分影响。【结果】施肥水平与灌水量交互效应对番茄水肥耦合的产量、土壤水分及养分产生显著影响。与 W1F1 处理相比, W2F2、W3F2 处理产量降低 16.26% 和 6.54%, 但水分利用效率增加 11.62% 和 66.56%。各处理 0~20 cm 土壤质量含水率随生育进程的推进呈波动递减趋势, 变化范围在 13.33%~24.53% 之间; 土壤剖面水分空间分布随灌水量和施肥量的减少在距离地面 60 cm 处出现水分聚集区, W2F2、W3F2 处理平均土壤质量含水率为 16.53% 和 16.84%。各处理土壤有机质量及速效养分生育后期较生长中期累积明显, 相同灌水量下, 根层土壤有机质及速效磷、速效钾量变化基本一致, 均呈随施肥量的减少而减少变化趋势; 相同施肥量下, 适度减少灌水量有利于降低碱解氮、速效磷、速效钾向深层迁移, 显著提高根区土壤养分。【结论】灌水量在 $2\ 400\sim3\ 600\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 之间, 施肥量为 $5\ 040\ \text{kg}/\text{hm}^2$ (液体有机肥 $3\ 600\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、大量元素水溶肥 $1\ 440\ \text{kg}/\text{hm}^2$) 时, 能够获得较高产量以及水分利用效率, 同时有效提高根层养分量, 降低养分淋失风险。

关键词: 水肥耦合; 设施水果番茄; 产量; 土壤含水率; 养分

中图分类号: S157

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022421

OSID: 

尹志荣, 柯英, 蔡进军. 水肥耦合对设施番茄土壤水分、养分运移及产量和水分利用效率影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(6): 33-44.

YIN Zhirong, KE Ying, CAI Jinjun. The Combined Effect of Irrigation and Fertilization on Soil Water, Nutrient Transport, Yield and Water Use Efficiency of Greenhouse Tomato[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(6): 33-44.

0 引言

【研究意义】番茄是一种耗水量较大的作物, 当番茄产量为 $160\ 814.81\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时, 全生育期平均灌水量 $1\ 475.00\ \text{m}^3/\text{hm}^2$, 追肥量 $2\ 156.48\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ^[1]。水资源短缺是当今世界性问题, 发达国家有效用水率可达 80% 以上, 同时水分利用效率为 $2.00\ \text{kg}/\text{m}^3$, 而我国渠灌水和井灌水的有效利用率为 40% 和 60%, 水分利用效率不足发达国家的 $1/2$ ^[2]。若能将灌溉水利用效率提高到 70% 以上, 则水分利用效率可达到 $1.50\ \text{kg}/\text{m}^3$, 节水 1 000 亿 m^3 。宁夏地处中国西北部黄河上游, 年平均降水量 $166.90\sim647.30\ \text{mm}$, 水资源北少南多, 且差异明显, 年平均蒸发量 $1\ 312\sim2\ 204\ \text{mm}$, 是黄河流域水资源最为匮乏的区域之一。近年来, 推广高效节水灌溉技术力度逐年增大, 滴灌节水效益显著, 但部分地区仍存在大水漫灌现象, 滴灌有效使用

率低^[3]。同时, 在实际农业生产中人们崇尚“经验主义”, 施肥具有主观性, 对肥料种类和施肥量不明确^[4]。因此, 研究土壤水分、养分供应与作物关系对于番茄水分高效利用、减肥增效至关重要。【研究进展】目前, 关于番茄水肥耦合的研究较多, 并获得了重要结论, 但仍存在较大差异。如曲兆鸣^[5]研究认为, 优化施肥与灌水量的耦合作用使肥料养分释放特征与番茄对养分的需求特征相匹配, 在提高番茄产量和品质的同时, 提高了水肥利用效率并节约了水肥资源。王鹏勃等^[6]研究发现, 施肥量和灌水量作为单一因子对灌溉水分利用效率的影响极显著, 且水分作用大于肥料作用, 而水肥交互作用对水分利用效率的影响不显著。吴雪等^[7]研究指出, 灌水量与施氮量、磷肥与钾肥用量之间存在显著交互作用, 灌水量、氮肥用量过高不利于番茄综合营养品质的提高, 合理增施磷肥和钾肥可有效提高番茄营养品质。赵伟等^[8]在基础磷素量较高的土壤上, 连续 2 a 减少 70% 的磷肥用量没有影响番茄产量, 降低番茄对钾素的奢侈吸收。Singandhupe 等^[9]研究发现, 当施氮量小于 $120\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时, 滴灌施肥较沟灌显著增加了番茄产量和氮吸收量,

收稿日期: 2022-07-29 修回日期: 2023-02-07 网络出版日期: 2023-05-05
基金项目: 宁夏农业高质量发展和生态保护科技创新示范项目 (NGSB-2021-11-02)

作者简介: 尹志荣 (1982-), 女。助理研究员, 硕士研究生, 主要从事节水与水资源高效利用研究。E-mail: yinzhirong1982129@126.com
©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

提高水分和氮素利用效率,并且减少硝酸盐淋失。【切入点】前人研究中水肥用量的确定大多仅基于番茄产量品质效应、植株氮磷钾素吸收利用等单一指标,缺少土壤水分和养分运移变化对设施栽培条件下水肥耦合响应的系统探究,尤其在传统氮磷钾施肥基础上,关于水溶肥及液体有机肥供应特征与作物养分吸收和产量效应更是研究不足,特别是针对温室番茄追施液体有机肥适宜用量的研究更鲜见报道。【拟解决的关键问题】为此,以设施水果番茄为试验材料,研究不同水肥用量下设施土壤水分和养分的差异及变化,分析番茄产量、水分利用效率与水肥协同的响应关系。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2021年2—7月在宁夏银川西夏区平吉堡奶牛场农五队平吉堡现代农业示范园区(东经106°01′,北纬38°24′,平均海拔1 170 m)进行。试验地年平均气温9.6℃,年均日照时间2 911 h,年总辐射量为5 106 MJ/m²,年均无霜期188 d左右,年平均降水量196 mm。供试土壤0~20 cm土层理化性质为:有机质量7.67 g/kg,全盐量2.34 g/kg,pH值8.63,全氮量0.65 g/kg,全磷量0.67 g/kg,全钾量20.30 g/kg,速效钾量290 mg/kg,速效磷量46.33 mg/kg,平均田间持水率为24.11%。

1.2 试验设计

试验在设施大棚中进行,大棚跨度10 m,长90 m,试验区面积共75 m²。种植行宽0.60 m,长9 m,种植行两侧用40 cm深的黑色塑料防渗膜隔开,每行栽植番茄38株。2条种植行间距1 m,地表铺设白色地布,方便采摘。选择品种为水果番茄“亚蔬12号”为试验材料,于2021年2月25日移栽。常规打药、除草等田间管理依照当地习惯进行。试验设置3个灌水水平(W1:当地常规滴灌水量4 800 m³/hm²;W2:75%W1,3 600 m³/hm²;W3:50%W1,2 400 m³/hm²),3个施肥水平(F1:高肥7 200 kg/hm²;F2:70%F1,5 040 kg/hm²;F3:40%F1,2 880 kg/hm²),详见表1。采用裂区设计,主区为施肥水平、副区为灌水处理,共9个处理,每个处理3次重复。基肥一致,有机肥9 000 kg/hm²,复合肥1 200 kg/hm²,苗期不施肥,开花期至生育期结束进行水肥调控。灌水施肥频率根据当地灌溉施肥间隔设置,以土壤含水率低于田间持水率的70%作为灌水下限,开花坐果期至结果后期灌溉施肥频率为7~10 d/次,可根据天气及降水情况随时调节,试验过程中共灌水施肥11次,具体灌水施肥时间如表2所示。灌水量通过水表计量控制,不同处理肥液通过液压比例施肥泵随灌溉水施入。

表1 试验设计

Table 1 Experiment design

施肥水平	施肥量		灌水水平	灌水量/ (m ³ hm ⁻²)
	液体有机肥/ (kg hm ⁻²)	大量元素水溶肥/ (kg hm ⁻²)		
F1	5 040	2 160	W1	4 800
			W2	3 600
			W3	2 400
F2	3 600	1 440	W1	4 800
			W2	3 600
			W3	2 400
F3	2 160	720	W1	4 800
			W2	3 600
			W3	2 400

表2 番茄生育期灌水施肥时间表

Table 2 Irrigation and fertilization schedule of

tomato growth period

生育期	灌水 施肥 日期	施肥 水平	施肥量		灌水 水平	灌水量/ (m ³ hm ⁻²)
			液体 有机肥/ (kg hm ⁻²)	大量 元素 水溶肥/ (kg hm ⁻²)		
开花 坐果期	0410 0420 0428 0508	F1	420	180	W1	400.50
					W2	300.00
					W3	199.50
		F2	300	120	W1	400.50
					W2	300.00
					W3	199.50
		F3	180	60	W1	400.50
					W2	300.00
					W3	199.50
结果 盛期	0519 0529 0607 0617 0626	F1	420	180	W1	441.00
					W2	340.50
					W3	240.00
		F2	300	120	W1	441.00
					W2	340.50
					W3	240.00
		F3	180	60	W1	441.00
					W2	340.50
					W3	240.00
结果 后期	0707 0716	F1	420	180	W1	360.00
					W2	259.50
					W3	159.00
		F2	300	180	W1	360.00
					W2	259.50
					W3	159.00
		F3	180	180	W1	360.00
					W2	259.50
					W3	159.00

供试肥料:开花坐果期施用总氮量17%、P₂O₅量17%、K₂O量17%且含有微量元素的大量元素水溶肥,果实膨大期至生育期结束施用总氮量8%、P₂O₅量7%、K₂O量36%的大量元素水溶肥,同时配施含腐殖酸≥30 g/L的液体有机肥。供试肥料为翠康碧施大量元素水溶肥和德孚尔滴灌肥。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水率

每次灌水施肥前采用烘干称质量法测定各处理土

壤含水率，测定深度为 0~100 cm，每 20 cm 为 1 层。

1.3.2 土壤养分

于番茄营养生长期和收获期在每个试验小区内随机选取 3 个位置采集 0~100 cm 土层土壤样品，测定剖面土壤速效养分。用重铬酸钾氧化法测定土壤有机质；用扩散吸收法测定土壤碱解氮；用 0.5 mol/L 的 NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法测定土壤中速效磷；用 1 mol/L 的 NH_4OAc (pH 值为 7) 溶液浸提-原子吸收法测定土壤中速效钾。

1.3.3 番茄产量及水分利用效率

用电子天平（精度为 0.01 g）称量各小区每次的采摘量，并在试验结束后汇总为各小区产量。水分利用效率采用单位面积番茄总产量与番茄生育期灌水量的比值进行计算。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2010 和 Surfer 8.0 进行数据处理和制图，采用 DPS 9.50 进行方差分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 水肥耦合对番茄产量和水分利用效率的影响

由表 3 可知，果实成熟初期（5 月），相同灌水量下，番茄产量随施肥量的减少而减少；相同施肥水平下，如 F2、F3 施肥水平下番茄产量随灌水量的减少先增加后减少，F1 施肥水平下番茄产量随灌水量

的减少而逐渐降低。水肥耦合处理中 W1F3 处理产量最低，与 W1F1 处理相比，W1F3 处理产量减少 64.41%。果实成熟期（6 月），W1 处理下番茄产量随施肥量的减少逐渐减少，W2、W3 处理下番茄产量随施肥量的减少先增加后减少。水肥耦合处理中，W1F3 处理产量最低，W2F2 处理产量最高，为 10 969.05 kg/hm²。盛果期（7 月），番茄产量随施肥量的减少均呈先增加后减少的趋势；F1 施肥水平下番茄产量随灌水量的减少而减少，F2、F3 施肥水平下番茄产量随灌水量的减少先减少后增加，与果实成熟初期产量随灌水量的变化规律相反。该生育期 W2F3 处理产量最低，W1F2 处理产量最高。从全生育期累计产量来看，W1F1 水肥耦合处理产量最高，其次是 W3F2 处理。从灌水和施肥角度分别看，W3 处理下番茄的平均产量最高，为 38 703.90 kg/hm²，与 W1、W2 处理相比，产量分别增加 0.22% 和 10.37%；F2 施肥水平下的番茄平均产量最高，为 41 594.25 kg/hm²，与 F1、F3 施肥水平相比，产量分别增加 4.50% 和 34.21%；F3 施肥水平下番茄产量随灌水量的减少呈逐渐增加趋势。灌水量对不同水肥耦合处理水分利用效率的影响大于施肥量，如 F2、F3 施肥水平下的水分利用效率随灌水量的减少而增加。因此，水肥对产量的影响具有相互协同、相互促进的关系，合理有效的水肥调控是实现节水、节肥、高效生产的前提和基础。

表 3 番茄产量及水分利用效率

Table 3 Yield and water use efficiency of tomato

处理	产量/(kg hm ⁻²)				水分利用效率/(kg m ⁻³)
	5 月	6 月	7 月	累计产量	
W1F1	5 472.90±35.36aA	10 192.50±41.38abA	31 429.80±161.14abAB	47 095.20±558.75aA	9.81±1.65bcdAB
W1F2	2 789.25±18.82bcdABC	8 968.05±40.44cdBC	35 573.40±191.08aA	41 330.70±555.46aAB	8.61±2.07bcdAB
W1F3	1 948.05±10.24eC	5 467.95±13.33dC	20 010.00±127.74dC	27 426.00±378.73bB	5.71±1.14dB
W2F1	4 390.95±28.39abA	9 094.20±50.6bcAB	24 254.55±204.48cdABC	37 739.70±401.77abAB	10.48±1.46abcdAB
W2F2	4 011.45±39.51abcAB	10 969.05±56.11aA	24 456.60±123.59bcdABC	39 437.10±421.47abAB	10.95±1.49abcdAB
W2F3	2 315.85±20.35deBC	6 356.55±43.94dC	19 353.15±90.93dC	28 025.55±360.13bB	7.78±1.36cdAB
W3F1	2 766.30±26.40cdABC	7 854.45±51.52dBC	23 951.40±108.53cdBC	34 572.15±431.62abAB	14.41±2.73abcAB
W3F2	2 890.20±40.44abcAB	8 194.80±79.43dBC	31 429.80±281.90abcAB	44 014.80±652.49aAB	16.43±3.53aA
W3F3	2 199.00±13.33deBC	6 624.45±42.53dC	28 701.15±81.31abcAB	37 524.60±536.49abAB	15.64±3.62abAB

注 同列数据中小写字母表示在 0.05 水平上差异；大写字母表示在 0.01 水平上差异，下同。

2.2 生育期内设施番茄土壤水分运移特征

生育期内不同水肥处理下 0~20 cm 土层土壤质量含水率变化如表 4 所示。不同施肥水平下各灌水处理的土壤质量含水率第 1 次峰值出现在 6 月 6 日，之后随着生育期的推进逐渐降低，至下次灌水后又出现新的峰值，整个生育期土壤质量含水率呈波动递减趋势。F1 施肥水平下，各灌水处理不同时期的土壤质量含水率变化规律基本一致，W1、W2、W3 处理间差异不显著；F2 施肥水平下，6 月 6 日，W3 处理与 W2 处理土壤质量含水率差异极显著，W2 处理与 W1

处理差异显著；7 月 6 日，W2 处理与 W1 处理差异极显著，6 月 16 日前（即果实中期），W1 处理土壤质量含水率呈先减少后增加再减少的趋势，W2 处理呈先减少后增加的趋势，W3 处理呈先增加后减少的趋势，表现为 W3 处理>W1 处理>W2 处理；6 月 16 日至结果末期，随着灌水量的减少土壤质量含水率先减少后增加，表现为 W1 处理>W3 处理>W2 处理；F3 施肥水平下，各处理的土壤质量含水率波动规律又趋于一致，变化甚微无显著性差异，W2 处理土壤质量含水率比 W1、W3 处理高 4.97%、6.69%。灌水

量一致时,不同施肥水平的土壤质量含水率分布不同。W1 处理下, F2 施肥水平的土壤质量含水率于 5 月 18 日、5 月 27 日、6 月 6 日、6 月 25 日、7 月 6 日时与 F1 施肥水平土壤质量含水率差异显著, 5 月 27 日、6 月 25 日时与 F3 施肥水平土壤质量含水率差异显著, 不同时期 F2 施肥水平下的土壤质量含水率平均值为 18.28%, 明显高于 F3、F1 施肥水平; W2 处理下, 各施肥水平间土壤质量含水率差异不显著, F1、F2 施肥水平的土壤质量含水率变化规律相同, 5 月 18 日—6 月 16 日土壤质量含水率非常接近, 6 月 16 日—7 月 15 日平稳下降, F2 施肥水平下降幅度较 F1

施肥水平明显, F3 施肥水平下的土壤质量含水率在 6 月 6 日达到 23.40%, 为最高峰值, 此后缓慢下降逐渐与 F1 施肥水平持平; W3 处理下, 不同施肥水平的土壤质量含水率在 6 月 16 日之前变化较为剧烈, 随着时间的推移变幅减缓, 其中 F2 施肥水平下的土壤质量含水率在 5 月 27 日与 F1、F3 施肥水平土壤质量含水率差异极显著, 且其全生育期土壤质量含水率平均值最高, 为 17.33%。由此可见, 番茄生育期内设施土壤质量含水率的变化规律受灌溉量、施肥量的协同影响显著, 本研究中 W2 处理的土壤质量含水率整体偏高。

表 4 0~20 cm 土层土壤质量含水率

处理	日期							%
	0518	0527	0606	0616	0625	0706	0715	
W1F1	19.39±1.77aA	13.55±0.27cdBC	17.26±0.65dC	17.02±1.38abABC	14.91±1.05bcB	15.06±0.40bAB	14.77±1.75bAB	
W1F2	16.20±0.51bcAB	14.62±0.47abAB	24.19±3.13abAB	16.65±0.43abABC	21.60±1.41aA	19.31±2.18aA	15.38±0.55bAB	
W1F3	14.08±0.49bcB	12.78±0.61dC	22.46±0.36abcABC	12.75±0.64bC	15.62±2.59bcAB	17.25±0.74abAB	13.56±1.26bB	
W2F1	17.12±0.84abAB	14.58±0.62bcABC	18.93±1.29cdBC	19.66±2.12aA	16.01±1.37bcAB	16.50±1.04abAB	15.25±1.06abAB	
W2F2	15.92±1.89bcAB	14.43±0.52bcABC	18.21±0.33cdBC	20.17±1.32aA	13.21±0.36bcAB	14.13±1.25bB	15.03±0.15abAB	
W2F3	13.77±0.60cB	13.80±0.41bcdBC	23.40±2.09abAB	17.39±3.18abABC	15.77±1.36cB	16.45±1.50abAB	13.33±1.45bB	
W3F1	17.38±0.72abcAB	13.36±0.47cdBC	18.41±1.72cdBC	19.32±1.37aAB	16.08±0.92bcAB	16.02±1.08abAB	18.37±1.48aA	
W3F2	14.50±1.36bcB	16.46±0.89aA	24.53±1.95aA	17.29±1.44abABC	16.56±1.64bcAB	16.90±0.31abAB	15.07±0.73bAB	
W3F3	14.180.79±bcB	13.33±0.73dBC	20.02±0.31bcdABC	13.14±0.35bBC	16.27±2.44abAB	14.94±0.40bAB	14.87±0.20bAB	

图 1 为每次灌溉施肥前 0~100 cm 土体内土壤质量含水率的时空分布图, 图中横坐标为灌水时间间隔, 具体灌水时间 5 月 18 日、5 月 27 日、6 月 6 日、6 月 16 日、6 月 25 日、7 月 6 日、7 月 15 日, 其中以 5 月 18 日为第 1 天, 其他类推。由图 1 可知, F1、F2 施肥水平下不同处理 0~100 cm 土层平均土壤质量含水率表现为 W1 处理>W3 处理>W2 处理, W2 处理下各时期 20、40、60、80 cm 土层均出现明显的低含水区, 而 W3 处理在 20、40、60、80 cm 土层出现高含水区, F2 施肥水平下 0~100 cm 土层的平均土壤质量含水率较 F1 施肥水平增加; F3 施肥水平下, 土壤质量含水率随灌水量的减少先减少后增加, 表现为 W3 处理>W1 处理>W2 处理, W1 处理下土壤质量含水率等值线密度随着土层深度的增加逐渐缩小, 60~100 cm 土层土壤质量含水率稳定在 16.29%~16.66%之间, 灌水量由 W2 减少到 W3 处理时, 土壤质量含水率等值线密度逐渐增多, 表明随着时间推移不同土层土壤质量含水率变化加剧, 尤其在 7 月 6 日 W3 处理下 60 cm 土层土壤质量含水率出现了水分高聚集区, 为 21.50%。

2.3 水肥耦合对土壤有机质量的影响

由图 2 可知, 0~20 cm 土层土壤有机质量高于 20~40 cm 土层, 拉秧后 (8 月 6 日) 的土壤有机质量高于生长期 (6 月 9 日)。F1 施肥水平下, 0~20 cm 土层有机质量随灌水量减少先增加后减少, 其中 W2 处理土壤有机质量最高, 生长期土壤有机质量为

24.30 g/kg, 与 W1、W3 处理差异极显著, 拉秧后为 29.80 g/kg, W3 处理拉秧后的土壤有机质量增加也较明显, 达 29.00 g/kg, 而 W1 处理 2 个生育期的有机质量变化极小; 20~40 cm 土层有机质量无显著差异, 生长期在 14.60~15.60 g/kg 之间变化, 拉秧后 W1 处理土壤有机质量仅 0.20 g/kg 的浮动, W2、W3 处理拉秧后土壤有机质量与生长期相比分别增加 28.48%、15.07%。F2 施肥水平下, 生长期 0~20 cm 土层有机质量随灌水量的减少而减少, 拉秧后随灌水量的减少先减少后增加, 此时 W3 处理土壤有机质量与 W1、W2 处理差异显著。F3 施肥水平下, 0~20 cm 土层有机质量差异显著, 20~40 cm 土层有机质量在生长期及拉秧后均随灌水量的减少先减少后增加, 呈“V”形, W3 处理土壤有机质量平均值最高, 为 19.88 g/kg。

灌水量相同时, 如 W1 处理下, 生长期及拉秧后 0~20 cm 土层有机质量均随施肥量的减少先增加后减少, 拉秧后 F2 施肥水平下的土壤有机质量与 F1、F3 施肥水平差异显著, 而 20~40 cm 土层有机质量逐渐递增。W2 处理下, 不同施肥水平对生长期 0~20、20~40 cm 土层有机质量产生了显著影响, 随着施肥量的减少, 0~20 cm 土层有机质量生长期及拉秧后均呈递减趋势, 生长期 20~40 cm 土层有机质量先增加后减少, 拉秧后逐渐递减; F1 施肥水平下的土壤有机质量最高, 尤其在拉秧后 F1 施肥水平土壤有

机质量比 F2、F3 施肥水平增加 55.21%、94.77%。W3 处理下，生长期 0~20 cm 土层有机质量随施肥量的减少而增加，此时与 F1、F2 施肥水平相比，F3 施肥水平下的土壤有机质量分别增加 67.42%、60.14%，且 F3、F1 施肥水平差异显著，而拉秧后 F1 施肥水平下

的土壤有机质量增加明显，与 F2、F3 施肥水平相比，分别增加 26.09%、23.40%；2 个时期 20~40 cm 土层有机质量均为先减少后增加，但拉秧后 F2 施肥水平下的土壤有机质量与 F3 施肥水平差异极显著，均值表现为 F3 施肥水平>F1 施肥水平>F2 施肥水平。

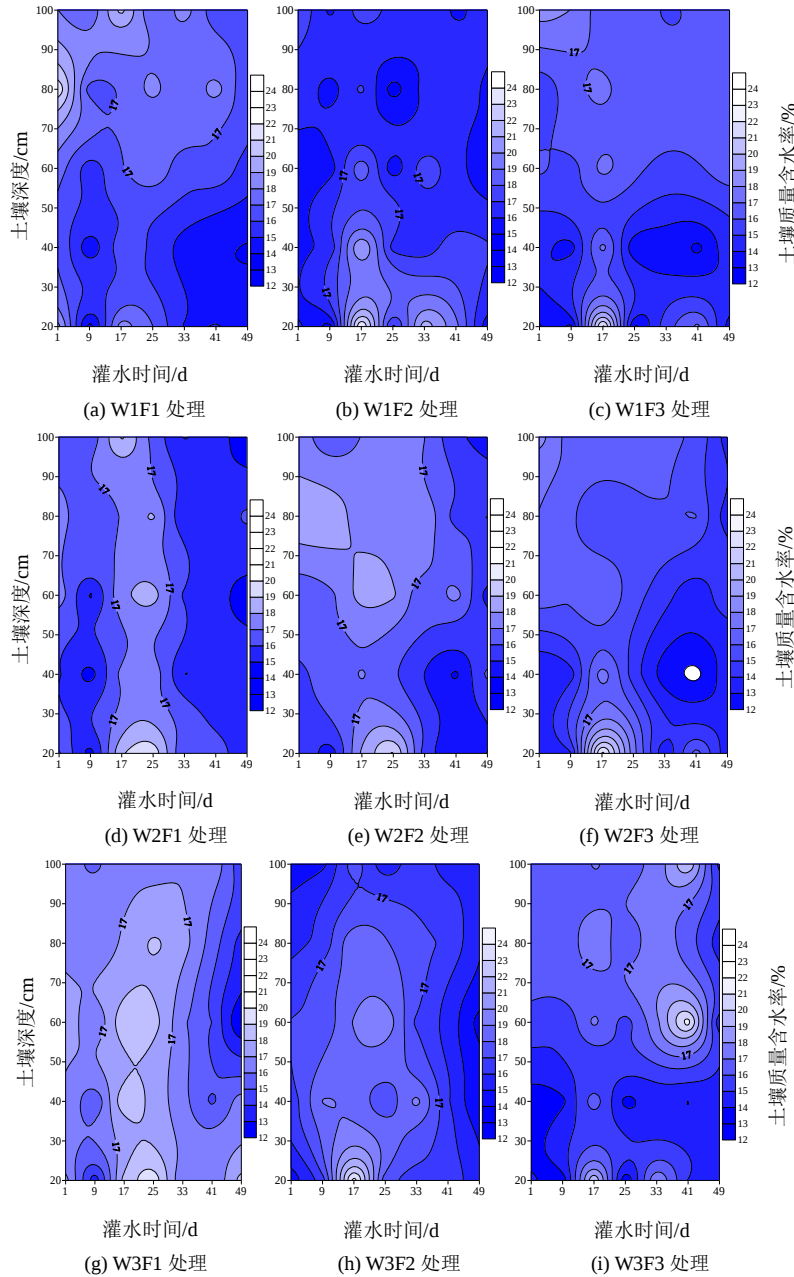
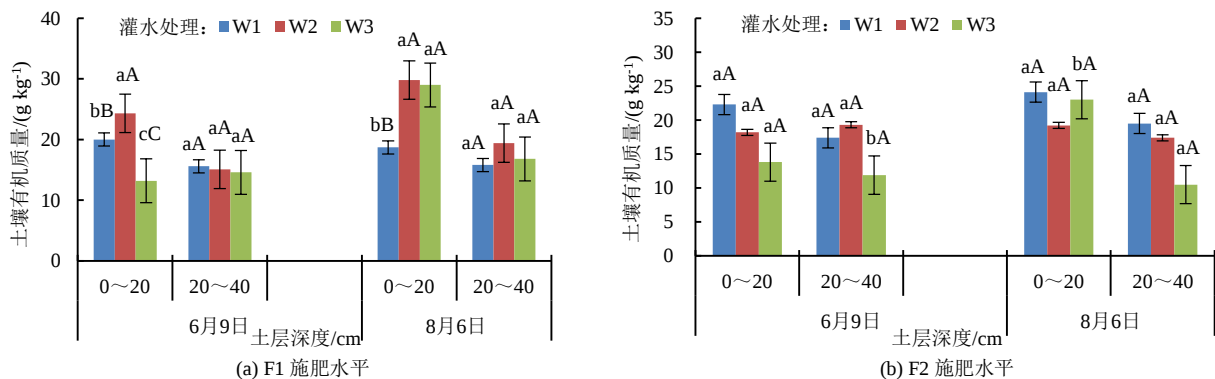


图 1 土壤质量含水率空间分布

Fig.1 Spatial distribution of soil quality water content



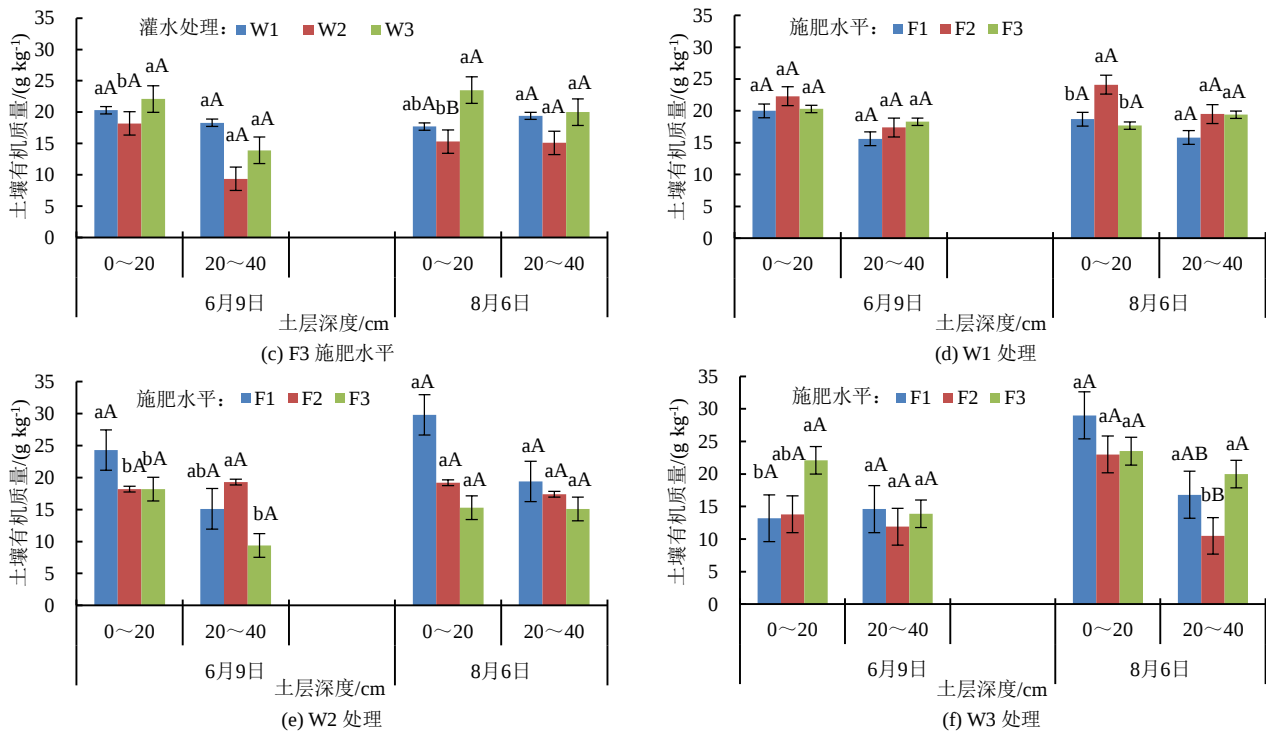


图 2 土壤有机质量变化情况

Fig.2 Changes of soil organic matter

2.4 水肥耦合对土壤碱解氮的影响

图 3 为不同水肥耦合处理土壤剖面碱解氮量。以 0~20 cm 土层碱解氮为例 (表 5), 生长期 (6 月 9 日) W1F3、W2F3、W2F1、W3F2 处理土壤碱解氮量与 W1F1 处理差异极显著; 拉秧后 (8 月 6 日) W1F2、W1F3、W3F1、W3F2、W3F3 处理与 W1F1 处理差异也极显著, W2F1、W2F2 处理与 W1F1 处理差异显著, 且土壤剖面碱解氮量较生长期明显增加, 有积累现象。F1 施肥水平下, W1、W3 处理在生长期间的土壤剖面碱解氮量随土层深度变化一致, 二者 0~20 cm 土层碱解氮量与 W2 处理差异极显著, W2 处理 0~60 cm 土层的碱解氮量较 W1、W3 处理增加; 拉秧后 3 个灌水处理下的土壤碱解氮量变化规律也基本一致, 且 3 个灌水处理 0~20 cm 土层碱解氮量差异均极显著, 表现为 W3 处理>W2 处理>W1 处理。F2 施肥水平下, 生长期随土层深度增加, W1 处理下碱解氮量呈缓慢递减趋势, W2 处理呈“M”形变化趋势, W3 处理呈先增加后减少趋势, 0~100 cm 土层碱解氮量均值表现为 W3 处理>W2 处理>W1 处理; 拉秧后 3 个灌水处理下的土壤碱解氮量均下降, 且 3 个处理 0~20 cm 土层碱解氮量差异均极显著, 均值表现为 W3 处理>W2 处理>W1 处理。F3 施肥水平下, 3 个灌水处理生长期间的碱解氮量变化相似且差异较小, 仅 W2 处理与 W3 处理 0~20 cm 土层碱解氮量差异显著; 拉秧后 W3 处理与 W1 处理差异极显著, 与 W2 处理差异显著, 均值表现为 W3 处理>W2 处理>W1 处理, 但 40 cm 以下土层碱解氮量变化不大。

灌水量相同时, 不同施肥水平下土壤碱解氮量差异不同。W1 处理下, 生长期 F3 施肥水平 0~20 cm 土层碱解氮量与 F1、F2 施肥水平差异显著, 均值表现为 F3 施肥水平>F2 施肥水平>F1 施肥水平, 20 cm 以下土层表现为 F1 施肥水平>F2 施肥水平>F3 施肥水平; 拉秧后 F1、F2 施肥水平下土壤碱解氮量逐渐降低, 0~20 cm 土层碱解氮量与 F3 施肥水平差异显著。W2 处理下, 生长期 F1 施肥水平土壤碱解氮量与 F2 施肥水平差异显著, F1 施肥水平以 20~40 cm 土层为“拐点”先增加后减少, F2 施肥水平呈“M”形变化, F3 施肥水平 0~20 cm 土层积累量最高, 20 cm 土层向下急剧下降后逐渐平稳; 拉秧后 F1、F2 施肥水平下 0~20 cm 土层碱解氮量与 F3 施肥水平差异极显著, 拉秧后 3 个施肥水平下 0~100 cm 土层碱解氮量均值与生长期均表现为 F1 施肥水平>F2 施肥水平>F3 施肥水平。W3 处理下, 生长期 F2 施肥水平土壤碱解氮量较 F1、F3 施肥水平增加, F3 施肥水平土壤碱解氮量最低, 拉秧后 0~40 cm 土层碱解氮量 F2、F1 施肥水平基本持平, 40 cm 以下土层 F1 施肥水平土壤碱解氮积累量高于 F2、F3 施肥水平。综上可知, 灌水量、施肥量的不同导致土壤剖面碱解氮量存在差异, 过量施肥会导致 0~100 cm 土层碱解氮量增加, 但过量灌水容易带动土壤碱解氮向深层迁移导致 0~20 cm 土层碱解氮量减小, 本研究中, 相同施肥量下 W2、W3 处理土壤剖面碱解氮的积累量较高, 相同灌水量下施肥量不同时, 0~20 cm 土层碱解氮量差异显著, 0~100 cm 土层碱解氮均值表现为 F1 施肥水平>F2 施肥水平>F3 施肥水平。

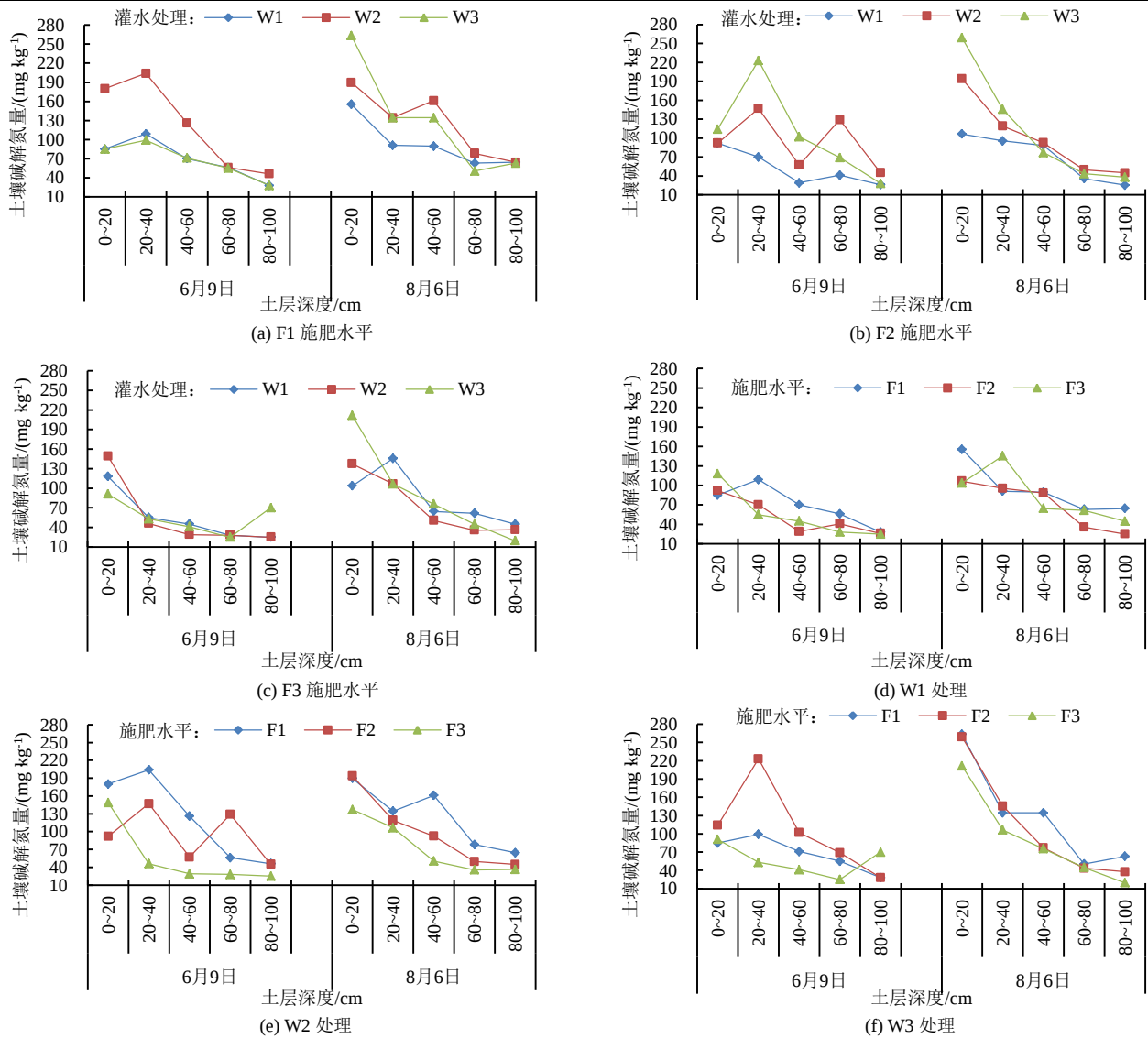


图3 0~100 cm 土层土壤碱解氮量变化情况

Fig.3 Changes of soil alkali-hydrolyzed nitrogen of 0~100 cm soil layer

2.5 水肥耦合对土壤速效磷的影响

图4为不同水肥耦合处理土壤剖面速效磷量变化。以0~20 cm 土层土壤速效磷变化为例(表5), 生长期(6月9日)除W1F3、W2F1处理外, 其他处理土壤速效磷与W1F1处理均差异极显著; 拉秧后(8月6日)除W1F1、W1F2、W1F3处理外, W2F1、W2F2、W3F1、W3F2、W3F3处理与W1F1、W1F2、W1F3处理差异也极显著, W2F3处理仅与W1F1处理差异极显著、与W1F3处理差异显著, 0~40 cm 土层速效磷量积累明显, 40~100 cm 土层变化较小。F1施肥水平下, 土壤速效磷量以W2处理0~20 cm 土层最高, 生长期与W1处理差异显著, 与W3处理差异极显著; 拉秧后W2处理与W1、W3处理差异均极显著; 20~100 cm 土层速效磷量差异减小, 生长期表现为W1处理>W2处理>W3处理, 拉秧后表现为W3处理>W2处理>W1处理。F2施肥水平下, 生长期以W2处理土壤剖面速效磷量最高; 拉秧后

W2、W3处理0~20 cm 土层速效磷量与W1处理差异显著, W3处理最高, W2处理次之; 20~100 cm 土层速效磷量表现为W2处理>W1处理>W3处理。F3施肥水平下, 生长期及拉秧后, W2、W3处理与W1处理0~20 cm 土层速效磷量差异均极显著, 20~100 cm 土层差异较小; 随着灌水量的减少, 生长期土壤剖面速效磷量先减少后增加, 表现为W1处理>W3处理>W2处理, 拉秧后逐渐递减。

灌水量相同时, 不同施肥水平对土壤剖面速效磷量的影响不同。W1处理下, 生长期F2施肥水平0~20 cm 土层速效磷量与F1、F3施肥水平差异极显著, 拉秧后差异显著, 0~100 cm 土层速效磷量表现为F3施肥水平>F1施肥水平>F2施肥水平; W2处理下, 不同施肥水平0~100 cm 土层速效磷量随施肥量的减少而减少, 生长期及拉秧后F2、F3施肥水平与F1施肥水平差异极显著; W3处理下, 生长期F3施肥水平土壤速效磷量最高, 与F1、F2施肥水平

差异极显著；拉秧后 F2 施肥水平 0~20 cm 土层速效磷量高达 299.30 mg/kg，与 F1、F3 施肥水平差异极显著，F1、F3 施肥水平速效磷量仅为 111.00、125.50 mg/kg，20~60 cm 土层速效磷量差异显著，表现为 F1 施肥水平>F2 施肥水平>F3 施肥水平，60 cm 以下土

层差异逐渐缩小。整体而言，W2 处理下各施肥水平 0~100 cm 土层速效磷量最高，尤其在 F1、F2 施肥水平下，0~100 cm 土层土壤剖面速效磷量均值分别为 96.68、75.40 mg/kg。

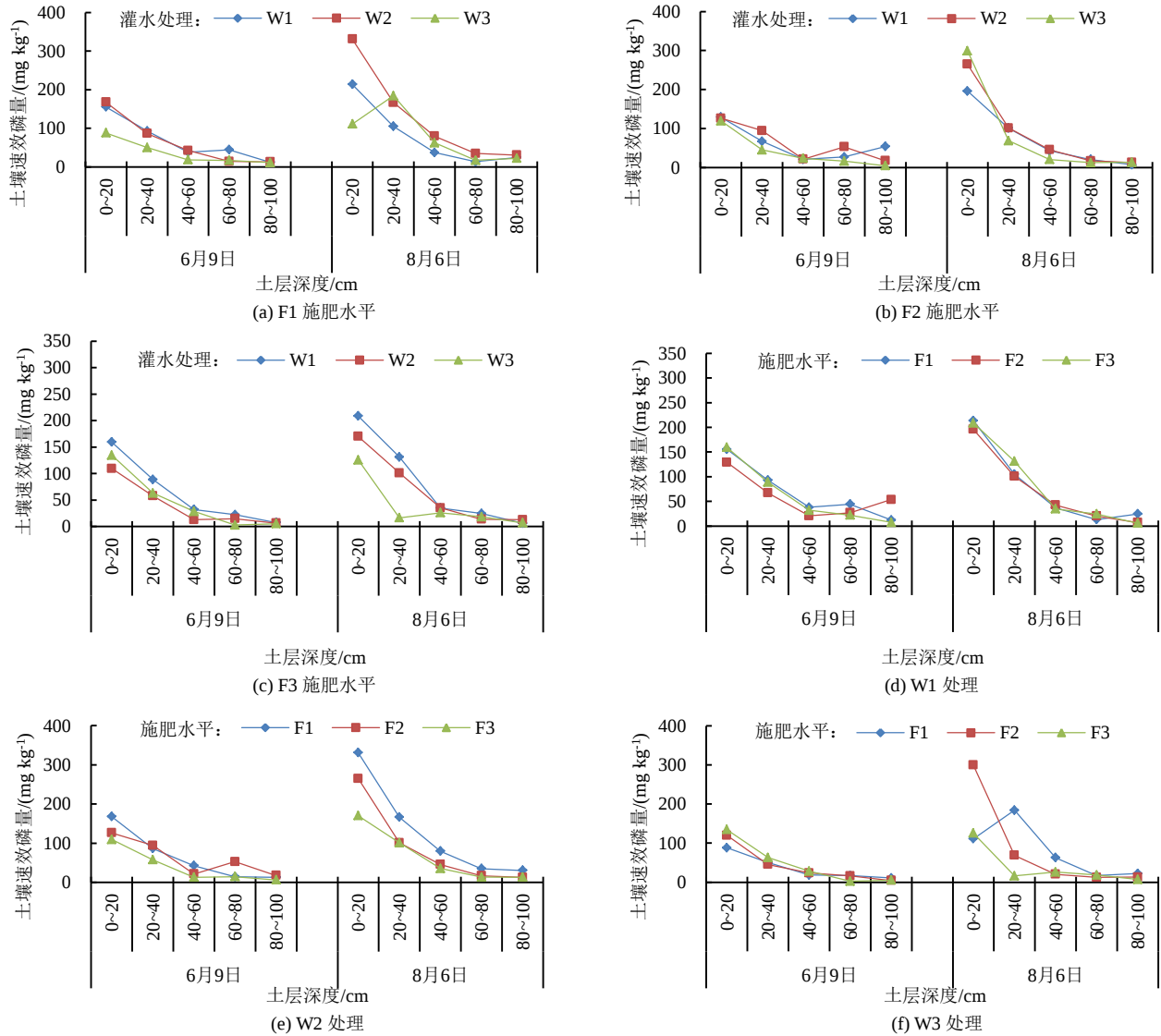


图4 0~100 cm 土层土壤速效磷量变化情况

Fig.4 Changes of available phosphorus of 0~100 cm soil layer

表5 0~20 cm 土层土壤速效养分方差分析

Table 5 Analysis of variance of available nutrient content in 0~20 cm soil layer

处理	6月9日			8月6日		
	碱解氮量/(mg kg ⁻¹)	速效磷量/(mg kg ⁻¹)	速效钾量/(mg kg ⁻¹)	碱解氮量/(mg kg ⁻¹)	速效磷量/(mg kg ⁻¹)	速效钾量/(mg kg ⁻¹)
W1F1	85.00±5.52dD	155.60±8.18aA	408.00±6.41dD	155.40±1.64cCD	213.70±10.44cC	435.00±17.2eE
W1F2	92.00±4.94dCD	129.00±6.18bBC	320.00±14.9eE	106.40±8.79dE	196.00±3.4cdCD	450.00±18.77eE
W1F3	118.00±6.67cC	159.30±5.82aA	318.00±8.69eE	103.60±10.97dE	208.70±6.76cCD	310.20±2.61gF
W2F1	180.00±8.03aA	167.90±9.63aA	823.00±11.37aA	189.70±2.47bBC	331.10±17.14aA	670.00±16.86bB
W2F2	92.00±5.03dCD	126.40±5.48bBC	548.00±14.42bB	193.90±6.7bBC	265.00±9.65bB	485.00±7.77dD
W2F3	149.00±8.75bB	109.50±6.23cC	335.00±23.18eE	137.20±10.63cDE	170.00±1.46dD	305.20±10.91gF
W3F1	85.00±2.96dD	87.90±1.58dD	515.00±10.39bBC	263.20±11.82aA	111.00±6.74eE	770.00±17.27aA
W3F2	114.00±14.57cC	119.60±7.19bcBC	475.00±20.21cC	259.00±22.31aA	299.30±23.32aAB	540.00±10.73cC
W3F3	91.00±1.62dCD	134.50±5.37bB	258.00±10.96fF	211.40±21.12bB	125.50±13.33eE	415.00±7.51fE

2.6 水肥耦合对土壤速效钾的影响

由图5可知，番茄拉秧后不同水肥耦合处理土壤

剖面速效钾量没有表现出全部累积增加的趋势，0~20 cm 土层速效钾量在生长期及拉秧后差异极显著

(表 5)。F1 施肥水平下, 生长期间 W2 处理 0~100 cm 土层速效钾量最高, 其次是 W3 处理; 3 个灌水处理 0~20 cm 土层速效钾量差异均极显著; 拉秧后 W2、W3 处理 0~20 cm 土层速效钾量与 W1 处理差异极显著, 与 W1 处理相比, W2、W3 处理分别增加 54.02%、77.01%。F2 施肥水平下, W2 处理土壤速效钾量累积最多, 生长期间 0~20 cm 土层速效钾量与 W1 处理差异极显著, 与 W3 处理差异显著; 拉秧后 W2 处理与 W1、W3 处理差异显著。F3 施肥水平下, 生长期间 W2 处理 0~20 cm 土层速效钾量与 W3 处理差异显著, 20~80 cm 土层差异不明显, 80~100 cm 土层 W2 处理土壤速效钾量最高, 为 254 mg/kg; 拉秧后 W2 处理

0~20 cm 土层速效钾量与 W1、W3 处理差异极显著, 以 W3 处理累积增加最多。灌水量相同时, 不同施肥水平对土壤剖面速效钾量的影响不同。W1、W2 处理下, 生长期间 F2、F3 施肥水平 0~20 cm 土层速效钾量与 F1 施肥水平差异均极显著; W1 处理下, 拉秧后 F3 施肥水平与 F2、F1 施肥水平 0~20 cm 土层速效钾量差异极显著, W2、W3 处理下 3 个施肥水平 0~20 cm 土层速效钾量均差异极显著。综合比较, 3 种施肥水平下, 生长期间 W2 处理 0~100 cm 土层土壤剖面速效钾量变化较大, 拉秧后 W3 处理 0~20 cm 土层速效钾量变化最大; 灌水量相同时, 随着施肥量的减少, 0~100 cm 土层速效钾量逐渐减少。

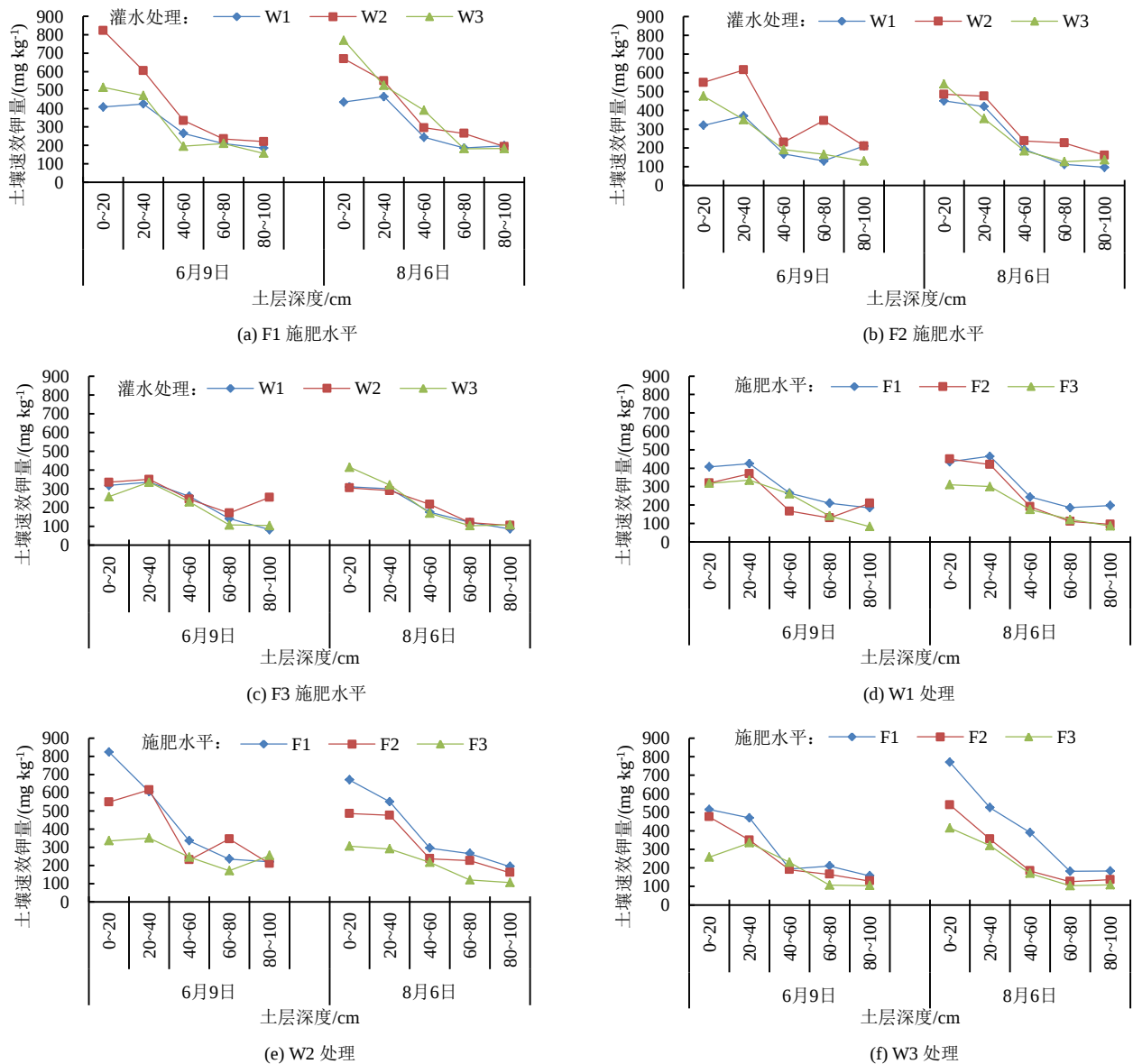


图 5 0~100 cm 土层土壤速效钾量变化情况

Fig.5 Changes of available potassium of 0~100 cm soil layer

3 讨论

3.1 水肥耦合对番茄产量和水分利用效率的影响

水肥是影响番茄产量及水分利用效率的重要因

素^[10]。本研究表明, 在充分灌溉条件下水肥交互作用对番茄产量的影响达到了极显著水平, 其产量及水分利用效率随施肥量的减少而降低, 而在灌水量减少的情况下番茄产量及水分利用效率随施肥量的减少先

增加后减少,说明在一定范围内施肥量的增加有利于产量的提高,过低或过高的施肥量均不利于植株对水分的吸收和利用,从而造成减产,本研究中 W2、W3 处理下, F2 施肥水平 (70%F1) 下的水分利用效率最高。这与郭彬等^[11]和窦允清等^[12]得出的滴灌水肥优化组合比常规水肥提高水分利用效率高的结论一致,原因可能在于合理的水肥能够减少田间植株的无效蒸发进而提高水分利用效率,同时与李建明等^[13]、赵志华等^[14]研究结果相似。另外,从番茄第 1 茬果实成熟至拉秧减少 1/3 灌水量对番茄产量无显著影响^[15],本研究同样得出,在施肥量一定的情况下,减少灌水量对番茄产量的影响不显著,而且适度减少灌溉量有利于提高水分利用效率,这可能是因为水肥因子间的协同作用弥补了水分或肥料单一因子的不足进而降低作物损害与减产^[16],这与吴悠^[17]、李旭峰等^[18]的研究结果一致。本研究表明,当施肥量为 5 040.00 kg/hm²、灌水量为 2 400 m³/hm²时,番茄产量和水分利用率最高,分别达到 4 4014.80 kg/hm²、16.34 kg/m³,表明在节水节肥的同时,达到了稳产高效的目的,与虞娜等^[19]结果相近。

3.2 水肥耦合对设施土壤水分运移的影响

不同水肥耦合对土壤剖面含水率动态分布有不同程度的影响,增加灌水量容易造成灌溉水向土壤深层移动,使得灌溉水不能得到充分利用^[20-23]。本研究表明,在不考虑施肥因素的情况下 W2 处理 (中量灌水量) 比 W1 处理 (高量灌水量) 土壤含水率高。在滴灌施肥协同作用下,由于施肥量不同导致其在参与水分动态迁移与土壤空间结构重建上出现时间和空间上分布的差异^[24],本研究中 F2 施肥水平 (70%F1) 下的土壤含水率均高于 F1、F3 施肥水平,这说明合理的施肥不仅能够提高作物产量,还能增加土壤含水率,使一部分原来对作物生长的“无效水”变成“有效水”,促进作物根系生长发育进而提高作物根系从土壤中的吸水能力。减少生育后期的灌溉量,优先保证花期水分的供应量,可以优化土壤水分分布^[25]。本研究仅从总量上进行控制,缺少根据番茄各生育期需水量进行水分调控的详细研究,因此,生育期内灌溉分配方案还需进一步探究。

3.3 水肥耦合对设施土壤养分运移的影响

水分作为养分的载体,对养分的迁移和吸收起着至关重要的作用^[26]。本研究表明,在番茄生长过程中,水肥耦合对 0~20 cm 土层土壤有机质量及速效养分影响差异显著。灌水量相同时,0~20 cm 土层土壤有机质量随施肥量的减少而减少,一方面液体有机肥所含大量微生物进入土壤后,有助于分解和释放速效养分,供作物吸收利用^[27],另一方面较低土

壤含水率很可能会阻碍有机肥中的有机质向深层迁移,进而增加土壤有机质累积量。总体来看,中水高肥 (W2F1) 及低水高肥 (W3F1) 处理均提高了 0~20 cm 土壤有机质量,与彭令发等^[28]研究一致。养分投入水平是关系到土壤环境的重要因素,合理施用能优化土壤质量,降低肥料向下淋移的风险。作物对养分的吸收量不随灌水量的变化而改变,但会随肥料施入量的减少而减小。本研究表明,土壤速效养分量的变化趋势相同,其中速效磷在土壤剖面呈抛物线型分布,这可能是因为增加施肥量,满足作物吸收利用后剩余部分肥料转化为土壤氮磷钾有效元素储存在土壤中,使得土壤速效养分量增加。此外,本研究表明,施肥量相同时,适度减少灌水量有利于提高 0~100 cm 土体速效养分,0~40 cm 土层速效养分增加尤为明显,说明适量降低灌水量可有效降低土壤养分向深层土壤的迁移量。综上,灌水量为 2 400~3 600 m³/hm²、施肥量为 5 040 kg/hm²时,既能有效保证产量,又可以有效节约水资源,增加肥料吸收利用,降低环境污染风险。目前大多数研究基本上是以水分和施肥量为影响因素,忽视了土壤基础肥力因子以及土壤酸碱性对土壤养分影响,因而得出结论缺乏共性,通用性不强,难以在不同肥力水平的田块上推广应用^[29]。就宁夏北部引黄灌区而言,土壤分布差异较大,含盐碱土、灌淤土、风沙土、灰钙土等土壤类型,针对不同土壤类型和不同基础肥力的设施土壤开展相关方面的试验研究还未形成体系,试验存在随机性误差可能导致部分研究结果不太一致,下一步应当增加不同设施土壤类型水肥协同方面的试验研究,基于不同土壤类型为不同基础肥力的设施土壤提供不同的水肥管理理论与方法。

4 结 论

1) 番茄产量受灌溉施肥量影响显著,充分灌溉下番茄产量随施肥量的减少而减少,减量灌溉下番茄产量先增加后减少,与生育期内产量最高的 W1F1 处理相比, W2F2 处理产量虽然降低了 16.26%,但可节水 25%,水分利用效率提高 11.62%。

2) 不同灌溉施肥水平 0~20 cm 土层土壤质量含水率随生育进程的推进呈波动递减趋势,0~100 cm 土体土壤质量含水率的空间分布差异明显。F2 施肥水平对 0~20 cm 土层土壤质量含水率影响较大,土壤质量含水率较高;从灌溉量看, W2 灌溉量提高了土壤质量含水率。

3) 土壤有机质及剖面速效养分变化主要集中在 0~40 cm 土层,其 0~20 cm 土层养分随施肥量的减

少而减少, 适度减少灌溉量有利于降低碱解氮、速效磷、速效钾向深层土壤迁移量。综合考虑, 灌水量在 $2\ 400\sim 3\ 600\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 之间, 施肥量为 $5\ 040\ \text{kg}/\text{hm}^2$ (液体有机肥 $3\ 600\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、大量元素水溶肥 $1\ 440\ \text{kg}/\text{hm}^2$) 时, 既能保证产量, 又可以实现节水, 降低养分淋失风险。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

- 汪洋, 张生仁, 张翔, 等. 宁夏地区设施番茄水肥一体化灌溉制度试验研究[J]. 园艺与种苗, 2017, 37(8): 15-17, 24.
- WANG Yang, ZHANG Shengren, ZHANG Xiang, et al. Experimental study on irrigation schedule of integrative water and fertilizer for tomato in greenhouse of Ningxia[J]. Horticulture & Seed, 2017, 37(8): 15-17, 24.
- 杨贵羽, 王浩. 基于农业水循环结构和水资源转化效率的农业用水调控策略分析[J]. 中国水利, 2011(13): 14-17.
- YANG Guiyu, WANG Hao. Analysis of the agriculture water use regulation based on the agricultural water cycle structure and water resources use efficiency[J]. China Water Resources, 2011(13): 14-17.
- 马常生, 张探武. 宁夏农业节水管理机制探讨[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(5): 186-188.
- MA Changsheng, ZHANG Tanwu. Discussion on the management mechanism of agricultural water-saving in Ningxia[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2009, 20(5): 186-188.
- 陈龙, 马淑萍. 宁夏冷凉区设施园艺发展存在的问题及对策[J]. 现代农业科技, 2013(17): 216-217.
- 曲兆鸣. 优化施肥和灌水对设施番茄生长及土壤环境的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- QU Zhaoming. Effects of optimal fertilization and irrigation on tomato growth and soil environment in greenhouse[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.
- 王鹏勃, 李建明, 丁娟娟, 等. 水肥耦合对温室袋培番茄品质、产量及水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(2): 314-323.
- WANG Pengbo, LI Jianming, DING Juanjuan, et al. Effect of water and fertilizer coupling on quality, yield and water use efficiency of tomato cultivated by organic substrate in bag[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(2): 314-323.
- 吴雪, 王坤元, 牛晓丽, 等. 番茄综合营养品质指标构建及其对水肥供应的响应[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 119-127.
- WU Xue, WANG Kunyuan, NIU Xiaoli, et al. Construction of comprehensive nutritional quality index for tomato and its response to water and fertilizer supply[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(7): 119-127.
- 赵伟, 杨圆圆, 蒋丽媛, 等. 减施磷肥提高设施番茄氮磷钾生理效率并减少土壤速效磷累积[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10): 1 710-1 718.
- ZHAO Wei, YANG Yuanyuan, JIANG Liyuan, et al. Reducing conventional phosphorus input increase physiological efficiencies of absorbed nitrogen, phosphorus and potassium in greenhouse tomato and decrease soil available phosphorus accumulation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(10): 1 710-1 718.
- SINGANDHUPE R B, RAO G G S N, PATIL N G, et al. Fertigation studies and irrigation scheduling in drip irrigation system in tomato crop (*Lycopersicon esculentum* L.)[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 19(2): 327-340.
- 于亚军, 李军, 贾志宽, 等. 不同水肥条件对宁南旱地谷子产量、WUE 及光合特性的影响[J]. 水土保持研究, 2006, 13(2): 87-90.
- YU Yajun, LI Jun, JIA Zhikuan, et al. Effect of different water and fertilizer on yield, WUE and photosynthetic characteristics of millet in southern Ningxia semi-arid area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(2): 87-90.
- 郭彬, 莫彦, 吴忠东, 等. 覆膜与水分控制对宁夏设施滴灌番茄产量与品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(3): 48-55.
- GUO Bin, MO Yan, WU Zhongdong, et al. Combined effects of film mulching and water-controlled drip irrigation on yield and quality of facility-cultivated tomato in Ningxia[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(3): 48-55.
- 窦允清, 王振华, 张金珠, 等. 水肥耦合对滴灌加工番茄生理生长及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(7): 124-129.
- DOU Yunqing, WANG Zhenhua, ZHANG Jinzhu, et al. Effects of water and fertilizer coupling on physiological growth and yield of tomato under drip irrigation[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(7): 124-129.
- 李建明, 潘铜华, 王玲慧, 等. 水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 82-90.
- LI Jianming, PAN Tonghua, WANG Linghui, et al. Effects of water-fertilizer coupling on tomato photosynthesis, yield and water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(10): 82-90.
- 赵志华, 李建明, 张大龙, 等. 水钾耦合对大棚厚皮甜瓜产量和可溶性固形物含量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(8): 161-167.
- ZHAO Zhihua, LI Jianming, ZHANG Dalong, et al. Interactive effects of water and potassium on yield and soluble solid content of plastic greenhouse muskmelon[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2013, 41(8): 161-167.
- 陈金亮. 番茄果实生长和糖分模拟及节水调质优化灌溉决策研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- CHEN Jinliang. Modeling fruit growth and sugar accumulation and optimizing irrigation scheduling for improving water use efficiency and fruit quality of tomato[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016.
- 王振华, 陈潇洁, 吕德生, 等. 水肥耦合对加气滴灌加工番茄产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 66-75.
- WANG Zhenhua, CHEN Xiaojie, LYU Desheng, et al. Effects of water and fertilizer coupling on the yield and quality of processing tomato under aerated drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(19): 66-75.
- 吴悠. 灌溉量和施肥模式对温室番茄水肥利用及根区土壤环境的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- WU You. Effects of irrigation amount and fertilizer types on water and fertilizer utilization and root-zone environment of greenhouse tomato[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2020.
- 李旭峰, 孙西欢, 马娟娟, 等. 膜下滴灌不同水分处理对温室番茄根系活力和水分利用率的影响[J]. 节水灌溉, 2019(12): 53-57.
- LI Xufeng, SUN Xihuan, MA Juanjuan, et al. Effects of different water treatments under film drip irrigation on root activity and water use efficiency of greenhouse tomato[J]. Water Saving Irrigation, 2019(12): 53-57.
- 虞娜, 张玉龙, 张玉玲, 等. 灌溉和施肥对温室番茄产量和品质影响效应的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2009(4): 31-35.
- YU Na, ZHANG Yulong, ZHANG Yuling, et al. Study on effect of irrigation and fertilization on yield and fruit quality of greenhouse tomato[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2009(4): 31-35.
- 郭全忠. 不同灌水量对设施番茄土壤养分和水分在土壤剖面中迁移的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(4): 153-158.
- GUO Quanzhong. Effect of different irrigation amount on the moving of soil water and nutrient in soil profiles of tomato greenhouses[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2013, 22(4): 153-158.
- 王利书, 杨宝斌, 王丽玄, 等. 基肥施用方式和灌水量对土壤水分

- 态和玉米产量影响[J]. 节水灌溉, 2021(8): 1-7.
- WANG Lishu, YANG Baobin, WANG Lixuan, et al. Effects of application methods and irrigation amount on dynamics of soil moisture and maize yield[J]. Water Saving Irrigation, 2021(8): 1-7.
- [22] 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(4): 713-726.
- XING Yingying, ZHANG Fucang, ZHANG Yan, et al. Effect of irrigation and fertilizer coupling on greenhouse tomato yield, quality, water and nitrogen utilization under fertigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(4): 713-726.
- [23] 周博, 周建斌. 不同水肥调控措施对日光温室土壤水分和番茄水分利用效率的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(1): 211-216.
- ZHOU Bo, ZHOU Jianbin. Effects of different fertilizers and water managements on water distribution in soil and water use efficiency of tomato[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2009, 37(1): 211-216.
- [24] 王虎兵, 曹红霞, 郝舒雪, 等. 水肥耦合下温室番茄养分动态变化及与生物量和产量的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(5): 149-156.
- WANG Hubing, CAO Hongxia, HAO Shuxue, et al. The relationship between dynamic change in nutrient contents and biomass and yield of tomato under coupled irrigation and fertilization in greenhouse[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(5): 149-156.
- [25] 尔晨, 林涛, 夏文, 等. 灌溉定额和施氮量对机采棉田水分运移及硝态氮残留的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(2): 497-510.
- ER Chen, LIN Tao, XIA Wen, et al. Coupling effects of irrigation and nitrogen levels on yield, water distribution and nitrate nitrogen residue of machine-harvested cotton[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(2): 497-510.
- [26] 马建琴, 何沁雪, 刘蕾. 双目标条件下玉米水肥耦合效应分析及配施方案优化研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(10): 58-63.
- MA Jianqin, HE Qinxue, LIU Lei. Optimizing irrigation and fertilization coupling to balance the improvement of yield and water use efficiency of summer maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(10): 58-63.
- [27] 李俊华, 沈其荣, 褚贵新, 等. 氨基酸有机肥对棉花根际和非根际土壤酶活性和养分有效性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(2): 277-284.
- LI Junhua, SHEN Qirong, CHU Guixin, et al. Effects of application amino acid fertilizer on soil enzyme activity and available nutrients in cotton rhizosphere and bulk soils[J]. Soils, 2011, 43(2): 277-284.
- [28] 彭令发, 郝明德, 来璐, 等. 黄土旱塬区长期施肥对土壤剖面养分分布的影响[J]. 水土保持通报, 2003, 23(1): 36-38.
- PENG Lingfa, HAO Mingde, LAI Lu, et al. Effect of long-term fertilization on nutrients distribution of soil profiles in arid highland of loess plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2003, 23(1): 36-38.
- [29] 彭龙, 郭克贞, 吕志远, 等. 不同水肥处理对毛乌素沙地玉米根系土壤养分含量的影响[J]. 北方农业学报, 2018, 46(1): 90-98.
- PENG Long, GUO Kezhen, LYU Zhiyuan, et al. Effects of different water and fertilizer treatments on soil nutrient content in the Maowusu sandy land[J]. Journal of Northern Agriculture, 2018, 46(1): 90-98.

The Combined Effect of Irrigation and Fertilization on Soil Water, Nutrient Transport, Yield and Water Use Efficiency of Greenhouse Tomato

YIN Zhirong, KE Ying, CAI Jinjun

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China)

Abstract: 【Objective】 Greenhouse vegetable production relies on irrigation and fertilization. Improving their use efficiency can reduce the operational costs and environmental impact. The objective of this paper is to find their optimal combination for greenhouse tomato production. 【Method】 The experiment consisted of three irrigation treatments: conventional drip irrigation at $4\ 800\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ (W1), reducing W1 by 25% (W2), and 50% (W2); and three fertilizations: high fertilization at $7\ 200\ \text{kg}/\text{hm}^2$ (F1), and reducing F1 by 30% (F2), and 60% (F3). In each treatment, we measured soil water distribution, and yield and water use efficiency of the tomato. 【Result】 Fertilization and irrigation were strongly interacted in their impact on tomato yield, soil water and nutrients. Compared to W1+F1, W2+F2 and W3+F2 reduced the fruit yield by 16.26% and 6.54%, and increased water use efficiency by 11.62% and 66.56%, respectively. Soil water content in the 0~20 cm soil layer exhibited oscillation in the range of 13.33%~24.53%, but overall showed a declined trend as the crop grew. With the decrease in irrigation and fertilization, the gradient of soil water content at the depth of 60 cm became steeper. The average soil water content under W2+F2 and W3+F2 was 16.53% and 16.84%, respectively. Soil organic matter and bioavailable nutrients were more abundant in the later growth stage than in the middle growth stage. Soil organic matter and bioavailable phosphorus, potassium in root zone were comparable in all treatments, both decreasing with the decrease in fertilization when the irrigation amount was the same. When the fertilization was the same, a moderate reduction in irrigation amount could reduce the downward movement of alkali-hydrolyzed nitrogen, bioavailable phosphorus and potassium, thereby increasing nutrients in the root zone. 【Conclusion】 Among all the treatments we compared, the optimal irrigation and fertilization to give the best yield and water use efficiency was drip-irrigation with $2\ 400\sim 3\ 600\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ of water, and fertilization with $3\ 600\ \text{kg}/\text{hm}^2$ of liquid organic fertilizer and $1\ 440\ \text{kg}/\text{hm}^2$ of water-soluble fertilizer.

Key words: irrigation and fertilization coupling; facility fruit tomato; yield; soil water content; soil nutrients

责任编辑: 白芳芳