

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0112

张芳园,刘玉春,郭彬,等.节水减氮对日光温室番茄产量和水氮利用效率的影响[J].南水北调与水利科技,2018,16(4):176-183. ZHANG F Y, LIU Y C, GUO B, et al. Effects of water saving and nitrogen reduction on tomato yield and water and nitrogen use efficiency in solar greenhouse[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 176-183. (in Chinese)

## 节水减氮对日光温室番茄产量和水氮利用效率的影响

张芳园<sup>1</sup>, 刘玉春<sup>1</sup>, 郭彬<sup>1</sup>, 杨小蛟<sup>1</sup>, 蔡伟<sup>1</sup>, 王一喆<sup>2</sup>

(1. 河北农业大学 城乡建设学院, 河北 保定 071001; 2. 新苑阳光农业有限公司, 河北 廊坊 065000)

**摘要:**为降低蔬菜园区经验水肥管理制度造成的资源浪费,提高作物水肥利用效率,探讨了滴灌和膜下沟灌两种灌水技术下,节水减氮对番茄根区深层渗漏量、番茄耗水量、产量和水氮利用效率的影响。结果表明:在采用60%~80%园区经验灌水量的条件下,番茄耗水量降低了17%~43%、水分利用效率提高了9%~59%,灌水量对产量影响不显著;而在50%园区经验施氮量的条件下,番茄增产9%~17%、氮肥利用效率提高12%~35%;滴灌与膜下沟灌相比,春夏茬各试验处理水分利用效率、氮肥利用效率和产量均值分别提高6.9%、8.4%和8.2%,秋冬茬分别提高4.1%、4.9%和5.3%。综合分析表明,与园区经验水氮用量相比,80%的经验灌水量、50%的经验施氮量不会显著降低产量,但可以显著提高水氮利用效率;滴灌与膜下沟灌相比能减少深层渗漏量,减少水肥资源的浪费。

**关键词:**节水减氮;深层渗漏;产量;水分利用效率;氮肥利用效率

中图分类号: S274.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2018)04-0176-08

### Effects of water saving and nitrogen reduction on tomato yield and water and nitrogen use efficiency in solar greenhouse

ZHANG Fangyuan<sup>1</sup>, LIU Yuchun<sup>1</sup>, GUO Bin<sup>1</sup>, YANG Xiaojiao<sup>1</sup>, CAI Wei<sup>1</sup>, WANG Yizhe<sup>2</sup>

(1. Institute of Urban and Rural Construction, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China;

2. Xinyuan Sunshine Agriculture Limited Company, Langfang 065000, China)

**Abstract:** In order to reduce the waste of resources caused by the experience management of water and fertilizer in the vegetable garden, and to improve water and fertilizer use efficiency of crops, we discussed the effects of water saving and nitrogen reduction on deep percolation of tomato root zone, tomato water consumption, yield, and water and nitrogen use efficiency under two irrigation conditions: drip irrigation and under film furrow irrigation. The results showed that when the irrigation amount was 60%-80% of the experience amount of the garden, the water consumption of tomatoes decreased by 17%-43%, and the water use efficiency increased by 9%-59%; the effect of irrigation amount on yield was not significant. When the nitrogen application amount was 50% of the experience amount of the garden, the tomato yield increased by 9%-17%, and the nitrogen use efficiency increased by 12%-35%. Compared with under film furrow irrigation, drip irrigation could increase the average values of water use efficiency, nitrogen use efficiency, and yield by 6.9%, 8.4% and 8.2% respectively for the spring and summer batch, and by 4.1%, 4.9% and 5.3% respectively for the autumn and winter batch. Comprehensive analysis showed that compared with the experience amount of water and nitrogen use in the garden, using 80% of the experience irrigation amount and 50% of the experience nitrogen amount will not significantly reduce the yield, but will significantly improve water and nitrogen use efficiency.

收稿日期: 2017-12-13 修回日期: 2018-04-01 网络出版时间: 2018-04-23  
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20180419.1111.002.html>  
基金项目: 河北省科技计划项目(15227003D)

**Fund:** Science and Technology Plan Project of Hebei Province (15227003D)

**作者简介:** 张芳园(1993-),女,河北辛集人,主要从事节水灌溉理论与技术的研究。E-mail: 2320475704@qq.com

**通讯作者:** 刘玉春(1971-),女(满族),河北平泉人,副教授,博士,主要从事农业水土工程理论与技术的研究。E-mail: liuyuchun5@163.com

Compared with under film furrow irrigation, drip irrigation can reduce deep percolation, and reduce the waste of water and fertilizer resources.

**Key words:** water saving and nitrogen reduction; deep percolation; yield; water use efficiency; nitrogen use efficiency

中国作为农业大国,在粮食作物、经济作物、园艺作物生产上均存在着水资源匮乏和肥料利用率不高的问题。在此形势下,加快发展节水高效农业,不仅是解决我国水资源短缺、实现水资源高效利用的有力保障,同时也是保障粮食安全、生态安全和水资源安全的重大基础战略。2017年中央一号文件明确“把农业节水作为方向性、战略性大事来抓”<sup>[1]</sup>,因此节水、减肥已经成为“国家行动”。

近年来我国设施蔬菜生产迅速发展,我国已成为世界上设施蔬菜栽培面积最大的国家,至2014年已超过380万 $\text{hm}^2$ <sup>[2]</sup>。在设施蔬菜生产中,水、肥是最重要的物质投入,其利用情况直接影响着农作物的产量、品质和效益,并且直接或间接的影响着生态环境<sup>[3-6]</sup>。蔬菜是一种高耗水耗肥作物,蔬菜需求的刚性增长和我国水资源的严重短缺、土壤环境的恶化,迫使蔬菜生产要采用节水减肥措施。由于缺乏水肥定量化标准规范,园区普遍存在不合理灌溉,导致肥料流失,致使作物产量低、品质劣<sup>[7-8]</sup>,因此蔬菜生产中亟需减少水肥用量,尤其是氮肥用量,降低蔬

菜的硝酸盐含量,减少土壤、地下水和地表水的硝酸盐污染,实现环境友好、资源节约的蔬菜生产。有研究表明:相比沟灌,滴灌处理番茄的营养生长期无明显优势,但是在后期增产效果和保水性能均优于沟灌<sup>[9]</sup>;随着灌水量和施氮量增加,番茄产量呈先增加后减少的趋势<sup>[10]</sup>;在同一灌溉水平下,随施肥量增加肥料偏生产力显著降低<sup>[11]</sup>。本文研究滴灌和膜下沟灌两种灌水技术条件下,节水减氮对日光温室番茄深层渗漏量、耗水量和水氮利用效率的影响,以期设施蔬菜水肥管理提供参考依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于河北省廊坊市永清县新苑阳光农业园区(30°19'N, 116°29'E),基地属北温带亚湿润气候区,年平均日照2740h,年平均气温11.5℃,年平均降雨540mm。试验用日光温室为东西走向,长79m,宽65m。供试土壤为粉壤土,其物理特性见表1。

表1 试验土壤物理和水力特性  
Tab.1 Physical properties of experimental soil

埋深/cm	容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	田间持水率/ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	饱和含水率/ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	不同颗粒粒径所占百分数(美国制)			质地
				砂粒 (2~0.05 mm)	粉粒 (0.05~0.002 mm)	黏粒 (<0.002 mm)	
0~20	1.39	0.24	0.38	2.15	90.80	7.05	粉壤土
20~40	1.41	0.28	0.41	1.68	91.08	7.24	
40~60	1.44	0.30	0.45	3.73	90.49	5.78	

### 1.2 试验设计

试验考虑灌水量、施氮量和灌水技术3个因素,灌水量分为试验园区番茄栽培经验灌水量(W3)、经验灌水量的80%(W2)、经验灌水量的60%(W1)3个水平;施氮量分为试验园区番茄栽培经验施氮量(N3)、经验施氮量的50%(N2)、不施氮(N1)3个水平;灌水技术包括滴灌(D)和膜下沟灌(F)。试验温室分为滴灌区和膜下沟灌区两部分,滴灌和膜下沟灌均为9个处理,每个处理3个重复,两部分的各处理均为随机排列的方式布置,试验小区尺寸6.5m×1.35m。

试验供试作物为番茄,春夏茬于2015年4月7日定植,7月20日拔秧;秋冬茬于2016年9月17日定植,2017年2月14日拔秧。春夏茬试验在开

花坐果期遇天气干旱,浇了一次催花水,W3、W2、W1灌水量分别为20mm、16mm、12mm;秋冬茬试验幼苗期灌水量较大,且低温季节要尽量减少浇水次数,以免降低地温,所以在开花坐果期没有进行灌水。春夏茬番茄全生育期W3、W2、W1灌水总量分别为262mm、218.6mm、175.2mm,N3、N2、N1施氮总量分别为100.24 $\text{kg}/\text{hm}^2$ 、87.05 $\text{kg}/\text{hm}^2$ 、73.86 $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;秋冬茬番茄全生育期W3、W2、W1灌水总量分别为179mm、151.6mm、124.2mm,N3、N2、N1分别为133.05 $\text{kg}/\text{hm}^2$ 、115.77 $\text{kg}/\text{hm}^2$ 、98.48 $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。试验期间,依据试验园区经验确定灌水时间,春夏茬和秋冬茬番茄各生育期灌水总量见表2。

表 2 各生育期灌水总量统计

Tab. 2 Statistics of the total irrigation amount in each growth period

灌水 处理	mm					
	春夏茬			秋冬茬		
	幼苗期	开花坐果期	结果期	幼苗期	开花坐果期	结果期
W3	45	20	197	84.0	0	95
W2	45	16	157.6	75.6	0	76
W1	45	12	118.2	67.2	0	57

### 1.3 试验观测

(1) 土壤基质势。番茄定植后, 每个试验处理在番茄小区一侧的中间位置, 安装 3 支负压计, 埋深分别为 20、40 和 60 cm, 在番茄整个生育期内, 每天上午 7:00- 7:30 读数, 监测番茄根区土壤基质势的变化。

(2) 土壤含水率。番茄定植前, 在温室大棚内随机取三点用土钻取土, 检测土壤初始含水率。番茄生育期内, 平均每 20 天在番茄根区附近取土, 每个处理设置 1 个取样点, 取土深度为 60 cm, 每 20 cm 取 1 个土样, 用烘干法测定土壤质量含水率。

(3) 番茄产量。在番茄采收期, 用电子秤称重各小区实际产量。

### 1.4 试验计算

(1) 深层渗漏量( $D$ ) 根据达西定律<sup>[12]</sup> 确定。土壤水分特征曲线参数和非饱和导水率采用 Van Genuchten 模型<sup>[13]</sup>。土壤颗粒组成及土壤密度, 利用 RETC 软件<sup>[14]</sup> 中的 ROSETTA 人工神经网络模型<sup>[15]</sup> 分析土壤水力特性参数。试验用土壤的 Van Genuchten 模型参数列于表 3。据此利用负压计测得的番茄根区土壤深度 40 cm 和 60 cm 的土壤基质势, 计算番茄根区 50 cm 深度土壤的深层渗漏量。

表 3 试验土壤水力特性参数

Tab. 3 The hydraulic properties of experimental soil

试验 土壤	$\theta_r$ /( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$\theta_s$ /( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$\alpha$ / $\text{cm}^{-1}$	$n$	$l$	$K_s$ /( $\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ )
粉壤土	0.067	0.45	0.02	1.41	0.5	10.8

表 4 番茄产量统计

Tab. 4 Statistics of tomato yield

试验处理	春夏茬番茄产量/( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )						秋冬茬番茄产量/( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )					
	D			F			D			F		
	W3	W2	W1	W3	W2	W1	W3	W2	W1	W3	W2	W1
N3	75.33	73.02	64.34	73.29	65.9	67.18	52.92	47.54	43.68	45.07	45.07	41.92
N2	78.16	75.41	78.31	70.32	65.98	64.63	56.45	55.61	51.77	51.98	53.32	49.01
N1	82.2	72.48	63.29	74.57	64	66.24	49.06	46.47	42.4	47.94	46.16	42.88

(2) 番茄耗水量( $ET$ ) 根据农田水量平衡方程式<sup>[12]</sup> 计算; 番茄水分利用效率( $WUE$ ) 和氮肥利用效率( $PPF$ )<sup>[16]</sup> 分别按式(1)和式(2)进行计算:

$$WUE = Y/ET \quad (1)$$

$$PPF = Y/N \quad (2)$$

式中:  $WUE$  为番茄水分利用效率 [ $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ ];  $PPF$  为氮肥偏生产力 ( $\text{kg}/\text{kgN}$ );  $Y$  为番茄产量 ( $\text{t}/\text{hm}^2$ );  $ET$  为番茄耗水量 ( $\text{mm}$ );  $N$  为施氮量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 番茄产量

两茬试验番茄产量统计见表 4, 方差分析结果见表 5。可知, 春夏季滴灌条件下, W1 和 W2 处理分别比 W3 低 12.6% 和 6.3%, 膜下沟灌条件下, W1 和 W2 处理分别比 W3 低 9.2% 和 10.2%; 秋冬季滴灌条件下, W1 和 W2 处理分别比 W3 低 13.0% 和 5.6%, 膜下沟灌条件下, W1 和 W2 处理分别比 W3 低 0.8% 和 0.3%, 减少灌水量会降低番茄产量, 但灌水量仅在春秋茬膜下沟灌条件下表现出显著性。春夏季滴灌条件下, N2 处理产量分别比 N1 和 N3 高 6.4% 和 9.0%; 秋冬季滴灌条件下, N2 处理产量分别比 N1 和 N3 高 18.8% 和 13.6%, 膜下沟灌条件下, N2 处理分别比 N1 和 N3 高 12.7% 和 16.9%, 灌水量相同条件下, 产量随施肥量的增加先增加后减小, 符合报酬递减效应, 施氮量仅在秋冬茬膜下沟灌条件下表现出显著性。春夏茬试验滴灌和膜下沟灌产量均值分别为  $73.61 \text{ t}/\text{hm}^2$  和  $68.01 \text{ t}/\text{hm}^2$ , 秋冬茬分别为  $49.54 \text{ t}/\text{hm}^2$  和  $47.04 \text{ t}/\text{hm}^2$ , 滴灌条件下比膜下沟灌条件下分别高 8.2% 和 5.3%, 与膜下沟灌相比, 滴灌灌水技术能增加番茄产量, 春夏茬试验灌水技术对番茄产量的影响达到显著水平, 但秋冬茬试验未达到显著水平。

### 2.2 番茄根区深层渗漏量

两茬试验番茄根区各生育期深层渗漏量见表 6, 方差分析结果见表 7。春夏茬两种灌水技术条件

表5 番茄产量的方差分析结果

Tab.5 The result of the tomato yield by variance analysis

方差分析	春夏茬		秋冬茬	
	D	F	D	F
灌水量	0.153	0.002*	0.268	0.472
施氮量	0.499	0.871	0.060	0.015*
滴灌+膜下沟灌	0.036*		0.252	

注: \* 表示各处理在  $\alpha=0.05$  水平下差异性显著, \*\* 表示各处理在  $\alpha=0.01$  水平下差异性显著。下同。

下苗期、开花坐果期和结果期深层渗漏量均值分别为 1.55 mm、1.30 mm 和 1.75 mm, 秋冬茬分别为 3.48 mm、-0.71 mm 和 7.78 mm, 开花坐果期番茄渗漏量为负值, 说明在这一时期没有产生深层渗漏, 可能是因为这一时期没有灌水, 番茄根区储水量不能满足番茄生长和腾发量的需求, 造成一定程度

的水分亏缺; 结果期渗漏量较大, 说明结果期较大的灌水量不仅满足番茄的腾发需求, 也提高了番茄土壤的储水量, 导致深层渗漏量增加, 实际生产中可以适当减少该生育阶段的灌水量。

春夏茬滴灌条件下, W1、W2、W3 处理全生育期深层渗漏量均值分别为 3.03 mm、4.40 mm、5.15 mm; 膜下沟灌条件下, 分别为 4.14 mm、5.36 mm、5.44 mm, 渗漏量随灌水量增加逐渐升高。膜下沟灌各生育期的渗漏量均高于滴灌, 可能是由于滴灌条件下出流量小、灌水均匀, 而膜下沟灌处理流量大, 土壤水分的垂向运动更大、入渗快, 番茄深层渗漏主要受灌水影响, 从而增加了渗漏量。方差分析表明, 灌水量和施氮量对番茄深层渗漏量在  $\alpha=0.05$  水平上均不存在显著差异。春夏季滴灌和膜

表6 番茄根区 50 cm 深层渗漏量

Tab.6 Deep seepage at depth of 50 cm in tomato root zone

灌水技术	灌水处理	施肥处理	春夏茬番茄根区深层渗漏量/mm				秋冬茬番茄根区深层渗漏量/mm			
			苗期	开花坐果期	结果期	全生育期	苗期	开花坐果期	结果期	全生育期
滴灌	W3	N3	3.32	1.75	-2.06	3.01	0.51	2.76	-3.08	0.19
		N2	4.16	2.49	3.08	9.73	1.82	-1.46	5.16	5.52
		N1	0.58	1.57	0.55	2.70	4.54	-0.83	7.26	10.97
	W2	N3	1.60	3.00	-1.21	3.39	9.85	0.75	9.37	19.97
		N2	-0.74	2.95	7.12	9.34	2.57	-2.35	1.79	2.01
		N1	2.94	0.44	-2.90	0.48	2.7	-1.52	3.48	4.66
	W1	N3	-0.99	1.19	1.65	1.85	1.7	-1.96	14.87	14.61
		N2	1.70	-0.52	2.16	3.34	4.36	-1.66	10.16	12.86
		N1	0.61	1.73	1.58	3.92	-0.31	-2.94	7.93	4.68
膜下沟灌	W3	N3	2.80	1.11	1.83	5.75	3.7	-1.87	5.71	7.54
		N2	1.57	1.05	2.32	4.86	4.16	-0.36	29.19	32.99
		N1	0.48	2.47	2.76	5.71	1.05	-1.51	5.47	5.01
	W2	N3	1.86	0.83	3.59	6.28	4.15	-1.75	11.79	14.19
		N2	2.06	2.39	0.96	5.42	5.82	-1.27	9.14	13.69
		N1	0.24	1.16	2.99	4.39	4.14	-0.6	5.95	9.49
	W1	N3	1.85	0.04	2.35	4.24	7.62	-0.84	5.29	12.07
		N2	2.13	-1.11	4.51	5.54	1.33	6.28	3.35	10.96
		N1	1.67	0.78	0.19	2.64	3.01	-1.58	7.23	8.66

表7 番茄根区深层渗漏量的方差分析结果

Tab.7 The result of the deep leakage of tomato root region by variance analysis

灌水技术		春夏茬				秋冬茬			
		苗期	开花坐果期	结果期	全生育期	苗期	开花坐果期	结果期	全生育期
滴灌	W	0.335	0.355	0.902	0.7683	0.432	0.295	0.151	0.683
	N	0.968	0.789	0.087	0.067	0.823	0.182	0.962	0.648
膜下沟灌	W	0.800	0.101	0.984	0.302	0.643	0.436	0.508	0.828
	N	0.054	0.681	0.843	0.417	0.394	0.306	0.507	0.225
滴灌+膜下沟灌		0.804	0.235	0.261	0.496	0.515	0.548	0.370	0.230

下沟灌两种灌水技术下,番茄全生育期深层渗漏量均值分别为 4.19 mm 和 4.98 mm,分别占全生育期总灌水量的 1.9% 和 2.3%;秋冬季滴灌和膜下沟灌两种灌水技术下番茄全生育期深层渗漏量均值分别为 8.39 mm 和 12.73 mm,分别占全生育期总灌水量的 5.86% 和 8.40%,说明灌水技术对深层渗漏有一定影响,但灌水技术对番茄深层渗漏量不存在显著差异。

### 2.3 番茄耗水量

两茬试验番茄根区各生育期耗水量见表 8,方差分析结果见表 9。春夏茬试验两种灌水技术条件下苗期、开花坐果期和结果期番茄耗水量均值分别为 28.55 mm、20.58 mm 和 118.65 mm,秋冬茬分别为 31.3 mm、28.57 mm 和 50.57 mm,春夏茬折合日平均耗水量分别为 2.04 mm、1.03 mm 和 1.67

mm/d,秋冬茬分别为 1.1 mm、0.9 mm 和 0.6 mm/d,苗期日耗水量最大。春夏茬滴灌条件下,灌水量 W2 和 W1 处理番茄全生育期耗水量均值分别比 W3 处理低 20.1% 和 33.7%,膜下沟灌条件下 W2 和 W1 处理分别比 W3 处理低 17.9% 和 38.9%;秋冬茬滴灌条件下, W2 和 W1 处理分别比 W3 处理低 29.1% 和 37.8%,膜下沟灌条件下 W2 和 W1 处理分别比 W3 处理低 21.3% 和 42.4%,番茄耗水量随灌水量的降低而降低,灌水量对番茄全生育期耗水总量的影响达到 0.05 水平的显著。在灌水量相同条件下,番茄全生育期耗水总量随施氮量的增加大多呈现先降低后增高的趋势,但施氮量对番茄耗水量的影响并不显著。春夏茬滴灌和膜下沟灌条件下,各试验处理全生育期番茄耗水总量分别为 168.30 mm

表 8 番茄耗水量 ET  
Tab. 8 Tomato evapotranspiration

灌水技术	灌水量	施肥量	春夏茬番茄耗水量/mm				秋冬茬番茄耗水量/mm			
			苗期	开花坐果期	结果期	全生育期	苗期	开花坐果期	结果期	全生育期
滴灌	W3	N3	26.78	19.49	165.00	211.27	39.58	32.76	74.82	147.15
		N2	25.94	0.46	171.96	198.35	41.92	8.47	104.59	154.98
		N1	29.52	0.39	175.67	205.58	37.29	14.42	72.09	123.80
	W2	N3	28.50	17.62	118.50	164.63	19.95	42.89	40.10	102.93
		N2	30.84	22.36	94.17	147.38	29.75	38.98	30.16	98.89
		N1	27.16	27.52	124.69	179.38	27.93	28.45	43.92	100.30
	W1	N3	31.09	40.32	86.86	158.27	17.29	43.49	24.59	85.37
		N2	28.41	39.26	63.83	131.50	19.91	33.23	26.17	79.31
		N1	29.49	23.59	65.23	118.32	22.08	29.99	48.02	100.08
膜下沟灌	W3	N3	27.30	40.45	147.08	214.83	50.92	39.03	58.06	148.01
		N2	28.53	12.35	160.67	201.54	54.14	23.09	42.96	120.19
		N1	29.62	12.52	160.52	202.66	42.20	31.06	79.76	153.01
	W2	N3	28.24	3.04	139.95	171.24	30.18	28.41	55.48	114.07
		N2	28.04	23.30	122.33	173.68	38.68	28.13	38.24	105.05
		N1	29.86	3.24	130.31	163.41	36.18	30.32	45.70	112.20
	W1	N3	28.25	44.61	51.57	124.43	20.14	20.41	45.50	86.06
		N2	27.97	12.05	88.19	128.21	29.54	6.26	40.32	76.12
		N1	28.43	27.88	69.25	125.56	15.91	24.73	39.72	80.36

表 9 番茄耗水量的方差分析结果  
Tab. 9 The result of variance analysis of water consumption in tomato

灌水技术		春夏茬				秋冬茬			
		苗期	开花坐果期	结果期	全生育期	苗期	开花坐果期	结果期	全生育期
滴灌	W	0.334	0.024*	0**	0.004**	0.001**	0.098	0.007**	0.003**
	N	0.969	0.804	0.939	0.824	0.843	0.269	0.94	0.987
膜下沟灌	W	0.800	0.371	0**	0**	0.004**	0.113	0.225	0.002**
	N	0.054	0.477	0.958	0.982	0.711	0.349	0.397	0.788
滴灌+膜下沟灌		0.803	0.855	0.983	0.950	0.210	0.374	0.838	0.984

和167.28 mm, 秋冬茬分别为110.31 mm和110.56 mm, 灌水技术对番茄耗水量的影响不显著。

## 2.4 水氮利用效率

两茬试验番茄水氮利用效率见表10, 方差分析结果见表11。春夏茬滴灌条件下, W1和W2处理WUE均值分别比W3高33.6%和18.2%, 膜下沟灌条件下分别高48.5%和9.3%; 秋冬茬滴灌条件下, 分别高41.8%和32.8%, 膜下沟灌条件下分别高58.5%和25.1%。水分利用效率随灌水量的增加急剧降低, 可见限水灌溉有利于提高番茄WUE; 两茬试验膜下沟灌条件下, 灌水量对番茄水分利用效率的影响均达到显著水平, 施氮量对番茄水分利用效率无显著影响。春夏茬滴灌条件下, 施氮量N1、N2和N3处理PFP均值分别为983.67 kg/(kgN)、887.94 kg/(kgN)和707.26 kg/(kgN), 膜下沟灌条件下分别924.30 kg/(kgN)、769.39 kg/(kgN)和686.26 kg/(kgN); 秋冬茬滴灌条件下, 施氮量N1、N2

和N3处理PFP均值分别为466.86 kg/(kgN)、471.75 kg/(kgN)和361.12 kg/(kgN), 膜下沟灌条件下分别463.65 kg/(kgN)、444.34 kg/(kgN)和330.85 kg/(kgN)。氮肥偏生产力随施氮量的增加而降低, 施氮量对番茄PFP的影响达到0.05显著水平, 灌水量对番茄PFP的影响未达到显著水平。

春夏茬滴灌和膜下沟灌条件下, WUE均值分别为449.63 kg/(hm<sup>2</sup>·mm)和420.66 kg/(hm<sup>2</sup>·mm), PFP均值分别为859.62 kg/(kgN)和793.32 kg/(kgN); 秋冬茬滴灌和膜下沟灌条件下, WUE均值分别为466.19 kg/(hm<sup>2</sup>·mm)和447.65 kg/(hm<sup>2</sup>·mm), PFP均值分别为433.24 kg/(kgN)和412.95 kg/(kgN), 灌水技术对WUE和PFP的影响虽未达到0.05显著水平, 但滴灌处理的WUE和PFP值均大于膜下沟灌处理, 可能是由于沟灌条件下较大的深层渗漏量降低了番茄的水氮利用效率。

表10 番茄水分利用效率WUE和氮肥利用效率PFP  
Tab. 10 water use efficiency (WUE) and partial productivity of applied N (PFP) of tomato

试验处理	春夏季				秋冬季				
	WUE/(kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )		PFP/(kg·(kgN) <sup>-1</sup> )		WUE/(kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )		PFP/(kg·(kgN) <sup>-1</sup> )		
	D	F	D	F	D	F	D	F	
W3	N3	356.53	341.16	751.46	731.14	359.63	304.50	397.75	338.74
	N2	394.05	348.91	897.89	807.83	364.25	432.49	487.65	449.03
	N1	399.82	367.95	1112.86	1009.59	396.30	313.31	498.17	486.80
W2	N3	443.55	384.83	728.47	657.40	461.85	395.11	357.31	338.74
	N2	511.70	379.90	866.31	757.96	562.32	507.56	480.39	460.61
	N1	404.06	391.67	981.29	866.53	463.31	411.42	471.87	468.72
W1	N3	406.52	539.92	641.85	670.23	511.67	487.10	328.30	315.07
	N2	595.54	504.08	899.61	742.39	652.75	643.81	447.22	423.38
	N1	534.90	527.54	856.86	896.79	423.66	533.57	430.54	435.42
平均	449.63	420.66	859.62	793.32	466.19	447.65	433.24	412.95	

表11 番茄水分利用效率和氮肥利用效率的方差分析结果

Tab. 11 The result of variance analysis of water use efficiency and nitrogen use efficiency in tomato

项目	春夏茬				秋冬茬			
	WUE		PFP		WUE		PFP	
	D	F	D	F	D	F	D	F
灌水量	0.130	0**	0.637	0.642	0.096	0.035*	0.547	0.822
施氮量	0.363	0.971	0.016*	0.004**	0.467	0.317	0.007**	0**
滴灌+膜下沟灌	0.451		0.289		0.707		0.501	

## 3 讨论

作物生育期需要通过灌水和施肥来满足其生长发育, 适当的水分和肥料可以促进作物增产, 提高作物对水分和肥料的利用率, 而不适当的水分和肥料

会导致作物减产, 而且会造成环境污染<sup>[17-19]</sup>。此外, 过量灌溉会使氮肥流失, 氮肥流失不仅降低了土壤肥力及化肥利用效率, 且造成了不同程度的农业面源污染, 氮肥的淋溶、渗透又会引发地下水硝酸盐的富集, 且富集程度随氮肥施用量的增加而增大<sup>[20-22]</sup>。

因此,要选择适当的灌水量和施氮量。研究结果表明,春夏茬滴灌条件下,W3、W2和W1产量均值分别为 $68.65\text{ t/hm}^2$ 、 $73.64\text{ t/hm}^2$ 和 $78.56\text{ t/hm}^2$ ,膜下沟灌条件下分别为 $66.02\text{ t/hm}^2$ 、 $65.29\text{ t/hm}^2$ 和 $72.73\text{ t/hm}^2$ ;秋冬季滴灌条件下,W3、W2和W1产量均值分别为 $45.95\text{ t/hm}^2$ 、 $49.87\text{ t/hm}^2$ 和 $52.81\text{ t/hm}^2$ ,膜下沟灌条件下分别为 $44.61\text{ t/hm}^2$ 、 $48.18\text{ t/hm}^2$ 和 $48.33\text{ t/hm}^2$ ,过高灌水量会使作物减产,这与文献[23]对番茄产量研究所得结论基本一致。李玉斌<sup>[23]</sup>等研究认为,随着灌水量的增加,玉米耗水量呈上升趋势,本试验也得到相同结论。与W3相比,W1处理WUE提高41%~59%,W2处理WUE提高9%~33%;与N3相比,N1处理PFP提高29%~40%,N2处理PFP提高12%~35%,灌水量增加,番茄水分利用效率降低,随施氮量增加,番茄氮肥利用效率降低,这与前人研究结果一致<sup>[24+26]</sup>。

## 4 结论

本文研究滴灌和膜下沟灌两种灌水技术条件下,节水减氮对日光温室番茄产量、水氮利用效率、耗水量和深层渗漏量的影响,结论如下。

(1)两茬试验番茄产量均为W3处理略高于W1和W2处理,番茄产量随灌水量的增加而增加,但灌水量对产量影响未达到显著水平。秋冬茬膜下沟灌技术下,施氮量对番茄产量的影响达到显著水平,过高或过低的施氮量均不利于番茄产量增加。就灌水技术而言,滴灌技术番茄产量高于膜下沟灌技术。

(2)两茬试验不同灌水技术条件下,番茄WUE随灌水量的增加而降低,PFP随施氮量的增加而降低。就灌水技术而言,滴灌技术番茄WUE和PFP值均高于膜下沟灌技术。

(3)番茄耗水量随灌水量减少而降低,灌水量对番茄全生育期耗水总量的影响达到显著水平,但施氮量对番茄耗水量的影响不显著。渗漏量随灌水量减少而降低,适当降低灌水量有利于减少水分渗漏,两茬试验均为结果期渗漏量较大,结果期较大的灌水量不仅满足番茄的腾发需求,也提高了番茄土壤的储水量,导致深层渗漏量增加,但灌水技术和水、氮用量对番茄深层渗漏量不存在显著差异。

本试验仅研究了化肥中氮肥用量对作物产量和氮肥利用效率的影响,没有考虑底肥中有机肥提供氮素的因素,在以后相关研究中还需进一步考虑。

## 参考文献(References):

- [1] 2017年中央一号文件[Z]. 2017-02-05. (2017 central No. 1 document[Z]. 2017-02-05. (in Chinese))
- [2] 王文桥. 我国设施蔬菜农药减施增效展望[J]. 中国蔬菜, 2016, 1(5): 1-3. (WANG W Q. Prospect of pesticide reduction and synergism in facility vegetables in China[J]. Chinese vegetables, 2016, 1(5): 1-3. (in Chinese))
- [3] 杨小振, 张显, 马建祥, 等. 滴灌施肥对大棚西瓜生长、产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 109-118. (YANG X Z, ZHANG X, MA J X, et al. Effects of fertigation on growth, yield and quality of watermelon in Greenhouse[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2014, 30(7): 109-118. (in Chinese))
- [4] 王丽学, 汪可欣, 吴琼, 等. 水肥耦合技术与辽宁旱地农业可持续发展[J]. 节水灌溉, 2007(8): 10-11. (WANG L X, WANG K X, WU Q, et al. Water and fertilizer coupling technology and the sustainable development of dryland agriculture in Liaoning [J]. water saving irrigation, 2007(8): 10-11. (in Chinese))
- [5] 张依章, 张秋英, 孙菲菲, 等. 水肥空间耦合对冬小麦光合特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(2): 57-60. (ZHANG Y Z, ZHANG Q Y, SUN F F, et al. Effect of spatial coupling of water and fertilizer on photosynthetic characteristics of winter wheat[J]. Agricultural research in Arid Areas, 2006, 24(2): 57-60. (in Chinese))
- [6] 张广涛, 汪可欣, 王丽学, 等. 水肥耦合技术在辽宁地区农业可持续发展中的应用分析[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(24): 7531-7531. (ZHANG G T, WANG K X, WANG L X, et al. Application analysis of water and fertilizer coupling technology in the sustainable development of agriculture in Liaoning area [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007, 35(24): 7531-7531. (in Chinese))
- [7] 王勉. 高效设施农业发展现状与趋势分析[J]. 经济论坛, 2012(2): 108-111. (WANG M. Current situation and trend analysis of agricultural development of high efficiency facilities [J]. Economic Forum, 2012(2): 108-111. (in Chinese))
- [8] 程智慧, 刘旭新, 董志刚, 等. 西安蔬菜主产区土壤硝态氮累积现状与蔬菜产品、浅层地下水氮素污染调查研究[J]. 西北农业学报, 2008, 17(1): 188-192, 198. (CHENG Z H, LIU X X, DONG Z G, et al. Study on the accumulation of nitrate nitrogen in soil in the main vegetable producing areas of Xi'an and the investigation of nitrogen pollution in vegetable products and shallow groundwater [J]. Northwest Agricultural Journal, 2008, 17(1): 188-192, 198. (in Chinese))
- [9] 黄红荣, 李建明, 张军, 等. 滴灌条件下水肥耦合对番茄光合、产量和干物质分配的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(7): 6-12. (HUANG H R, LI J M, ZHANG J, et al. Effect of water and fertilizer coupling on photosynthesis, production and dry matter distribution of tomato under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(7): 6-12. (in Chinese))
- [10] 牛晓丽, 胡田田, 周振江, 等. 水肥供应对番茄产量和水分利用效率的影响[J]. 节水灌溉, 2014(2): 17-21. (NIU X L, HU T T, ZHOU Z J, et al. Effects of water and fertilizer supply on yield and water use efficiency of tomato [J]. Water Saving Ir-

- rigation, 2014(2): 17-21. (in Chinese))
- [11] 邢英英,张富仓,张燕,等.膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长[J].农业工程学报,2014,30(21): 70-80. (XING Y Y, ZHANG F C, ZHANG Y, et al. Irrigation and fertilization coupling of drip irrigation under plastic film promotes tomato's nutrient uptake and growth[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2014, 30(21): 70-80. (in Chinese))
- [12] 雷志栋.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988. (LEI Z D. Soil hydrodynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988. (in Chinese))
- [13] GENUCHTEN M T V. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(44): 892-898.
- [14] GENUCHTEN M T V, LEIJ F J, YATES S R, et al. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils[J]. 1991.
- [15] SCHAAP M G, LEIJ F J, van GENUCHTEN M T V. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions[J]. Journal of Hydrology, 2001, 251(3-4): 163-176.
- [16] 黄冠华,查贵锋,冯绍元,等.冬小麦再生水灌溉时水分与氮素利用效率的研究[J].农业工程学报,2004,20(1): 65-68. (HUANG G H, CHA G F, FENG S Y, et al. Study on water and nitrogen use efficiency of irrigated winter wheat with reclaimed water[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2004, 20(1): 65-68. (in Chinese))
- [17] 韩丙芳,田军仓,杨金忠,等.膜侧灌甜菜水肥耦合产量效应研究[J].中国农村水利水电,2008(3): 39-43. (HAN B F, TIAN J C, YANG J Z, et al. Study on the effect of coupling of water with fertilizer on beet yield irrigated from the side of plastic mulch[J]. Rural water conservancy and hydropower in China, 2008(3): 39-43. (in Chinese))
- [18] 田军仓,韩丙芳,李应海,等.膜上灌玉米水肥耦合模型及其最佳组合方案研究[J].沈阳农业大学学报,2004,35(5): 396-398. (TIAN J C, HAN B F, LI Y H, et al. Model of coupling water with fertilizer upon maize irrigated on plastic film and its optimum combination scheme[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2004, 35(5): 396-398. (in Chinese))
- [19] 虞娜,张玉龙,黄毅,等.温室滴灌施肥条件下水肥耦合对番茄产量影响的研究[J].土壤通报,2003,34(3): 179-183. (YU N, ZHANG Y L, HUANG Y, et al. Interactive effect between water and fertilizer coupling on tomato cultivation under drip fertilization in greenhouse[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2003, 34(3): 179-183. (in Chinese))
- [20] 张锋.中国化肥投入的面源污染问题研究——基于农户施用行为的视角[D].南京:南京农业大学,2011. (ZHANG F. Study on the non point pollution of the agricultural fertilizer input in China based on the aspect of farmers' fertilizer input[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. (in Chinese))
- [21] 黄云凤,张路平,洪华生,等.小流域氮流失特征及其影响因素[J].水利学报,2006,37(7): 801-806. (HUANG Y F, ZHANG L P, HONG H S, et al. Linear regression method for identifying aquifer parameters and position of straight line recharge boundary [J]. Journal of water conservancy, 2006, 37(7): 801-806. (in Chinese))
- [22] 邓伟.农田降雨径流污染控制技术的研究[D].长沙:湖南农业大学,2011. (DENG W. Study on control agriculture runoff pollution [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2011. (in Chinese))
- [23] 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 J M, PAN T H, WANG L H, 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. (in Chinese))
- [24] 李玉斌,马忠明.水氮互作对膜下滴灌玉米产量及水氮利用的影响[J/OL].玉米科学,11(2017-05-09). (LI Y B, MA Z M. Effect of irrigation and nitrogen amount on yield, water and nitrogen use efficiency of maize under plastic mulched drip irrigation [J/OL]. Corn Science, 11(2017-05-09). (in Chinese))
- [25] 邢英英,张富仓,张燕,等.膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长[J].农业工程学报,2014,30(21): 70-80. (XING Y Y, ZHANG F C, ZHANG Y, et al. Irrigation and fertilization coupling of drip irrigation under plastic film promotes tomato's nutrient uptake and growth[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(21): 70-80. (in Chinese))
- [26] 李静,张富仓,江明杰,等.水氮供应对温室黄瓜氮素吸收及土壤硝态氮分布的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(3): 52-58. (LI J, ZHANG F C, JIANG M J, et al. Effects of water and nitrogen supply on nitrogen uptake of greenhouse cucumber and nitrate nitrogen distribution in soil [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(3): 52-58. (in Chinese))