

# 滴灌施肥时机对设施蔬菜产量品质与氮肥利用效率的影响

黄倩楠<sup>1</sup>, 吴文勇<sup>2</sup>, 韩玉国<sup>1</sup>, 吴玉恒<sup>1</sup>, 毕亚然<sup>2</sup>

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 中国水利水电科学研究院水利研究所, 北京 100038)

**摘要:** 为了提高设施蔬菜滴灌水肥利用效率, 在日光温室内开展了为期 15 个月不同滴灌施肥时机对设施蔬菜产量品质、土壤-蔬菜系统中氮素分布、氮素平衡和氮素利用效率的研究。结果表明: 滴灌施肥时机对果实产量、全氮和硝酸盐含量有显著影响, 灌水中前期施肥处理产量、全氮和硝酸盐含量均较高, 随着施肥时段向后推移, 蔬菜吸收氮素先增大后减小; 灌水后期施肥处理在收获后各层土壤硝态氮含量最低且消耗量最高, 灌水中期施肥处理土壤-蔬菜系统表观损失和氮盈余小, 较其他处理低 15.35%~59.13%; 灌水中期施肥处理氮肥偏生产力 and 氮肥表观利用率高于前后期施肥处理, 3 茬平均氮肥表观利用率 T2 处理高于其他处理 7.09%, 7.41%, 11.48%。施肥时机对土壤-蔬菜系统产量品质和氮素分布等综合影响明显, 推荐滴灌施肥过程中尽量使施肥时机保持在灌水过程的中期。

**关键词:** 滴灌施肥; 施肥时机; 氮素分布; 氮素平衡; 氮素利用效率

中图分类号: S63 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2019)03-0292-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.03.043

## Effects of Drip Fertigation Strategies on Yield and Quality of Protected Vegetables and Nitrogen Use Efficiency

HUANG Qiannan<sup>1</sup>, WU Wenyong<sup>2</sup>, HAN Yuguo<sup>1</sup>, WU Yuheng<sup>1</sup>, BI Yaran<sup>2</sup>

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2. Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038)

**Abstract:** In order to improve the water and fertilizer use efficiency of drip fertigation for protected vegetables, the effects of drip fertigation strategies on yield and quality of greenhouse vegetables, and soil nitrogen distribution, nitrogen balance and nitrogen use efficiency in soil-vegetable system were investigated for 15 months in a solar heated greenhouse. The results showed that the fruit yield and the contents of total nitrogen and nitrate were affected significantly by fertigation strategies. The yield, total nitrogen and nitrate content were all higher in the treatment of fertilizing at the early stage of irrigation, and the nitrogen uptake by vegetable increased first and then decreased with the time of fertilization progressing backwards. After harvest, the soil nitrogen contents of the treatment of fertilizing at the end stage of irrigation were the lowest in all soil layers, while the nitrogen consumptions were the highest. In the treatment of fertilizing at the medium stage of irrigation, the apparent loss and surplus of nitrogen in soil-vegetable system were 15.35% ~ 59.13% less than those in other treatments. Nitrogen fertilizer partial productivity and nitrogen apparent efficiency of the treatment of fertilizing at the medium irrigation stage were higher than those in other treatments. The average nitrogen fertilizer apparent utilization rate of the three stubbles in the T2 treatment was 7.09%, 7.41% and 11.48% higher than that in other treatments, respectively. In conclusion, fertigation strategies had a significant comprehensive impact on the yield, quality and nitrogen distribution of soil-vegetable system, and the strategy of applying fertilizer at the medium stage of irrigation schedule was recommend.

**Keywords:** drip fertigation; fertigation strategies; nitrogen distribution; nitrogen balance; nitrogen use efficiency

日光温室蔬菜滴灌施肥技术是提高水肥利用效率、减少农业面源污染的有效途径, 既可以供给植物

足够水分和养分, 又可以避免养分淋失。滴灌施肥技术相对于传统施肥的优势在于将水分和养分直接输

送到根区土壤,使水分和养分尽可能地在土壤中保持均匀。因此,滴灌施肥条件下土壤水分和养分的运移和分布得到了广泛关注。滴灌施肥条件下, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在土壤中运移受对流作用控制,溶质随灌水径向流动到湿润锋后,在溶质势作用下向湿润体以外的区域扩散<sup>[1-2]</sup>;滴灌量及土壤表层水分含量对土壤溶液 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量有直接影响,表层土壤溶液中硝态氮向下淋洗且施氮量愈高淋洗愈明显<sup>[3-5]</sup>。可以确定,施肥前土壤水分状况会对溶质运移产生重要影响。因此,合理安排灌水过程中灌水和施肥的次序,即滴灌施肥时机,将通过改变溶质随水流的运动状况而直接影响溶质在土壤中分布情况,若管理不当则会导致硝态氮累积和淋失。HYDRUS-2D 地下滴灌不同土壤质地不同施肥时机对水和氮素运移模拟结果表明,在渗透性较大的土壤中,前期施肥处理由于溶质受毛细作用较大,溶质向深层渗漏量比后期施肥处理少<sup>[6]</sup>。室内模拟砂壤土滴灌施肥时机对水氮分布的影响,从减少硝态氮淋失的角度出发,灌溉中期施肥为最佳方式<sup>[7]</sup>,在温室条件下应用<sup>15</sup>N 标记尿素进行不同滴灌施肥时机棉花盆栽试验,前期施肥处理<sup>15</sup>N 在 0—20 cm 土层分布最均匀,收获后土壤硝态氮的残留量也最小,且棉花根系的生长和分布也优于其他处理<sup>[8]</sup>。在沟灌中,灌溉中期施肥时植物根系比前期或后期施肥能够吸收更多氮素,但灌溉后期施肥能够减小氮素的淋失量<sup>[9]</sup>。对滴灌施肥时机的研究,多集中在计算机模拟和室内模拟,进行大田试验较少,且多集中在氮素分布<sup>[10-11]</sup>,缺少较宏观和能够具体直接反映滴灌施肥时机对作物和土壤影响的定量指标研究。因此开展了

3 茬土壤—蔬菜系统滴灌施肥时机试验,以期探究长期不同滴灌施肥时机对日光温室蔬菜产量品质、氮素分布、氮素平衡和氮素利用效率的影响,为提高滴灌施肥效率、滴灌施肥制度制定提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于 2015 年 9 月至 2016 年 11 月在国家节水灌溉北京工程技术研究中心庞各庄试验站日光温室内进行,温室种植面积为 600 m<sup>2</sup>。连续种植秋茬花椰菜、春茬花椰菜和秋茬黄瓜,供试花椰菜品种为“京研 60”,黄瓜品种为“京研优胜”。第 1 茬花椰菜生育期为 2015 年 9 月 8 日至 12 月 30 日,第 2 茬花椰菜生育期为 2016 年 2 月 22 日至 6 月 7 日,第 3 茬黄瓜生育期为 2016 年 8 月 1 日至 11 月 15 日。供试土壤为粉壤土,容重 1.44 g/cm<sup>3</sup>,田间持水量 24.48%,pH 8.48。试验前 0—40 cm 土层基础土壤有机质含量 11.90 g/kg,全氮 0.79 g/kg,碱解氮 268 mg/kg,有效磷 124 mg/kg,速效钾 138 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验以滴灌施肥时机为影响因素,设置 5 个处理,分别为对照组 CK(无追肥)、T1(1/5N—4/5W)、T2(1/5W—1/5N—3/5W)、T3(2/5W—1/5N—2/5W)、T4(3/5W—1/5N—1/5W),其中 T2(1/5W—1/5N—3/5W)表示在每次灌水过程中,前 1/5 时间灌水,接下来 1/5 时间施肥,最后 3/5 时间灌水冲洗管道。其他处理含义相同。每个处理 3 个重复,各重复随机排列。每个小区间隔 1 m,并起高 20 cm 垄避免小区间水肥干扰,详见图 1。基肥施肥量见表 1。

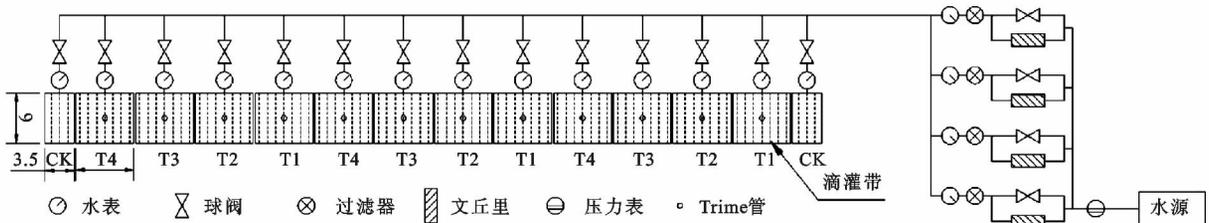


图 1 试验小区布置示意

表 1 基肥施用量

时间 (年-月-日)	有机肥/ (t·hm <sup>-2</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / (kg·hm <sup>-2</sup> )	K <sub>2</sub> O/ (kg·hm <sup>-2</sup> )
2015-09-08	31.5	100	30
2016-02-22	0	100	30
2016-08-01	42.0	350	130

根据测墒补灌法计算灌水量,土壤湿润比取 0.8,计划湿润层在作物生育初期取 200 mm,盛果期和尾果期取 400 mm,灌水上下限分别取田间持水量的 100% 和 70%,灌水利用系数取 0.9。3 茬蔬菜全生育期累计灌水量分别为 185.71,196.10,70.37 mm,见图 2。

在蔬菜定植前施用有机肥、磷肥和部分钾肥作为基肥,有机肥只在秋茬施用。有机肥为鸡粪,干基 N 2.9%,鸡粪矿化率按照 38.4% 计算<sup>[12]</sup>。化肥种类为尿素(N≥46.4%)、过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>≥12%)、硫酸钾(K<sub>2</sub>O≥50%),氮肥和部分钾肥作为追肥,分次随灌水施入,氮肥总追肥量秋茬花椰菜为 248.4 kg/hm<sup>2</sup>,春茬花椰菜为 250.0 kg/hm<sup>2</sup>,秋茬黄瓜为 350.0 kg/hm<sup>2</sup>,详见图 2。对照组不追肥。蔬菜生长周期约 110 天,追肥间隔为 2 周。根据灌溉定额和水压情况确定单次灌水时长,确定灌溉施肥时间,将尿素溶于灌溉水后用文丘里施肥器进行施肥。

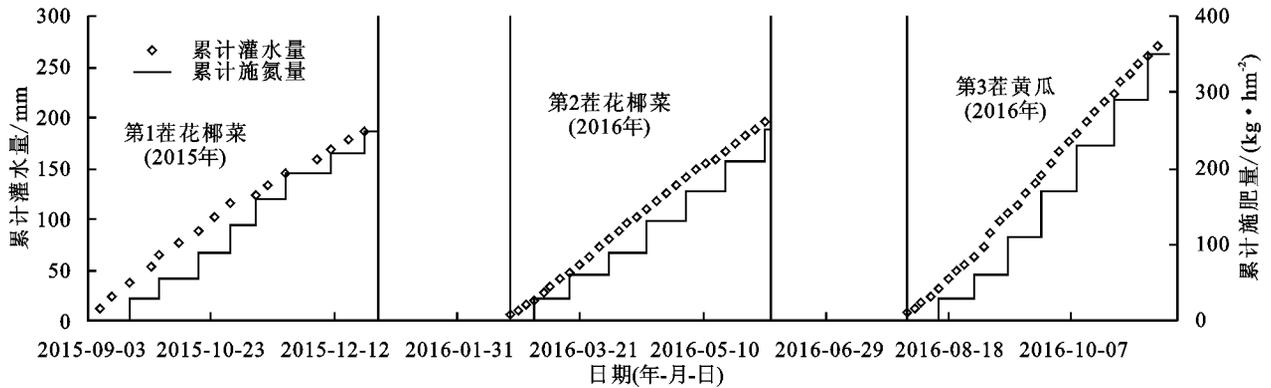


图 2 生育期内累计灌水量和施肥量

### 1.3 测定指标与方法

分别在作物种植前和收获后,用土钻在 0—120 cm 每 10 cm 采集 1 次土样,取样点在每个小区中心 2 棵蔬菜中间。将取回的土样风干后用 0.01 mol/L  $\text{CaCl}_2$  浸提,使用流动分析仪(AutoAnalyser—III,德国 Bran+Luebbe 公司)测定土壤硝态氮和铵态氮含量。在每个小区中间布置埋深 120 cm 的 Trime 管测量土壤含水率,在生育周期内每隔 4 天测量 1 次,灌水前后加测<sup>[13-14]</sup>。

在作物收获期分批收获,记录各次采摘果实的鲜重,并取每个小区果实样品测定品质,测定指标包括可溶性糖、维生素 C、硝酸盐含量。在果实收获期后,每个小区随机取 3 棵植株地上部分,分成花球、茎、叶 3 部分,经杀青烘干后磨碎,过 0.5 mm 筛,用  $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$  消煮,利用流动分析仪测定全氮含量<sup>[15]</sup>。

### 1.4 计算公式及方法

氮素表观损失计算公式为:

$$N_l = N_{in} - N_{out} = (N_i + N_a + N_m + N_w) - (N_u + N_r) \quad (1)$$

式中: $N_l$  为氮素表观损失( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ); $N_{in}$  为氮素输入( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ); $N_{out}$  为氮素输出( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ); $N_i$  为土壤初始无机氮( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ); $N_a$  为施无机氮量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ); $N_m$  为矿化量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ); $N_w$  为灌溉水含氮量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ); $N_u$  为作物吸收量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ); $N_r$  为收获后土壤残留( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )。

氮盈余计算公式为:

$$N_s = N_l + N_r \quad (2)$$

式中: $N_s$  为氮盈余( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )。

氮肥偏生产力计算公式为:

$$\text{NFP} = (Y - Y_c) / N_a \quad (3)$$

式中:NFP 为氮肥偏生产力( $\text{kg}/\text{kg}$ ); $Y$  为处理产量( $\text{kg}$ ); $Y_c$  为不施肥处理产量( $\text{kg}$ )。

氮肥表观利用率计算公式为:

$$\text{NUE} = (N_u - N_c) / N_a * 100\% \quad (4)$$

式中:NUE 为氮素表观利用率(%); $N_c$  为不施氮处

理吸氮量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )。

文中数据采用 Excel 和 SPSS 软件进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 滴灌施肥时机对蔬菜产量品质的影响

统计并对蔬菜的产量和品质进行显著性分析,通过方差分析结果可以看出,滴灌施肥时机对蔬菜产量的影响最显著,对果实全氮和硝酸盐含量有一定影响,对可溶性糖和还原性  $V_c$  含量影响不显著。在 2 茬花椰菜中均为 T2 处理产量最高,黄瓜中 T3 处理产量最高,比产量最低的处理分别高 25.62%, 18.56%, 7.81%。结果表明,在施肥量相同的条件下,灌水中期施肥能够提高蔬菜的产量。前期施肥的 T1 处理果实全氮含量和硝酸盐含量较高, T4 处理含量较低,总体上前期施肥能提高果实全氮含量和硝酸盐含量。表明滴灌施肥时机确实影响蔬菜生长发育和产量品质,合理滴灌施肥管理措施是必要的。3 茬蔬菜不同滴灌施肥时机对产量和品质的影响见表 2。

### 2.2 滴灌施肥时机对蔬菜土壤氮素分布的影响

由图 3 可知,整体上,每茬种植前 0—40 cm 土壤硝态氮含量较高,种植后 0—20 cm 较高,根系范围内硝氮被大量吸收,种植后 T4 处理硝态氮含量最低, T1 处理含量相对较高。

从种植前后来看,表层土壤中硝态氮含量下降明显,其中 T4 处理 0—60 cm 土壤硝态氮含量均有较大变化, T3 处理 0—40 cm 土壤硝态氮下降较多, 40 cm 以下较少, T1 和 T2 处理仅 0—20 cm 下降较多,且可以看出表层硝态氮含量下降最多的处理为 T4。在下降量变化趋势上, T4 处理随土层深度增加减小量逐渐变小, T3 处理 0—60 cm 减小量随土层深度减少, 60—80 cm 持平后缓慢减小, T2 和 T1 处理减小量随着土层深度先减小后增大再趋于平缓下降, T2 处理在 0—40 cm 呈下降趋势, 40—60 cm 增加, 在 60—80 cm 持平后开始减小, T1 处理在 60—80 cm 处其土壤硝态氮的减小量仍增加后才减小。可能是

由于后期施肥时,由于淋洗时间较短,氮素主要分布在表层土壤,使表层土壤中的根长密度逐渐增

大<sup>[17-19]</sup>,蔬菜从土壤中吸收更多氮素,导致表层硝态氮含量后期施肥处理下降最多。

表 2 不同滴灌施肥时机对蔬菜产量和品质

作物	处理	果实产量/ (t · hm <sup>-2</sup> )	果实全氮/ (mg · g <sup>-1</sup> )	可溶性糖/ %	还原性 V <sub>C</sub> / (mg · 100 g <sup>-1</sup> )	硝酸盐/ (mg · kg <sup>-1</sup> )
第 1 茬 花椰菜	CK	29.96c	33.60c	3.80b	104.00a	52.10b
	T1	47.69b	44.40a	4.67a	100.60a	146.00a
	T2	59.90a	40.30b	4.58a	100.30a	123.43a
	T3	56.74a	38.60bc	4.27ab	99.67a	134.67a
	T4	49.87ab	35.40c	3.91b	92.46a	143.30a
第 2 茬 花椰菜	CK	18.10c	37.42a	4.62a	68.40a	68.53b
	T1	25.29ab	38.36a	5.89a	76.13a	108.63a
	T2	27.38a	39.80a	5.75a	77.83a	106.84a
	T3	23.10b	39.91a	4.24a	69.07a	107.78a
	T4	26.14ab	39.44a	5.58a	68.87a	108.10a
第 3 茬 黄瓜	CK	29.10b	26.94b	2.89a	2.00a	78.50b
	T1	49.52a	30.28ab	1.81a	2.92a	85.47ab
	T2	52.48a	32.91a	2.15a	3.19a	119.00a
	T3	53.15a	30.83ab	2.75a	2.93a	77.70b
	T4	49.03a	31.40ab	2.49a	3.41a	89.33ab

注:各茬同列数据之后的不同小写字母表示处理间在 P<0.05 水平差异显著。

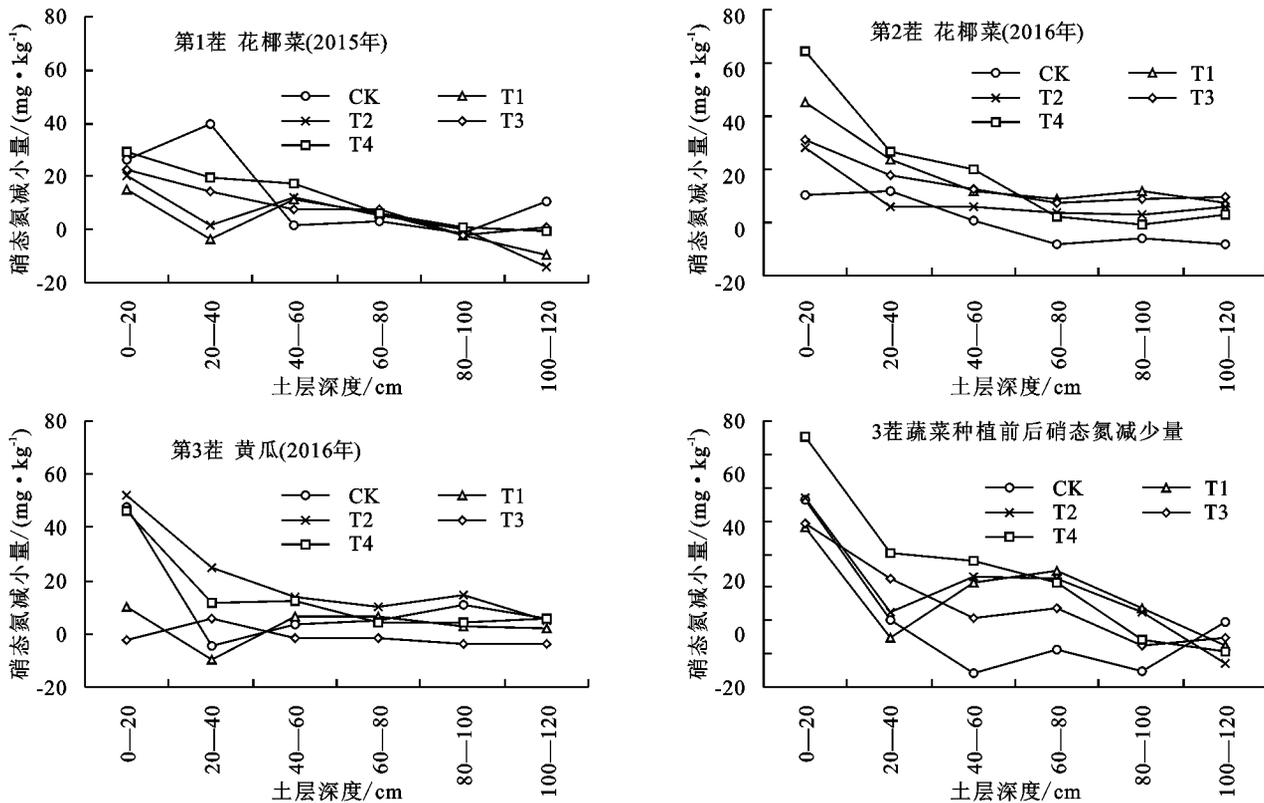


图 3 不同处理种植前后硝态氮减小量

### 2.3 不同滴灌施肥时机下蔬菜氮素平衡

在计算氮素表观平衡时,将作物根系吸收利用主要土层定义为 0—60 cm 范围内,超出 60 cm 视为损失。可以看出,氮素输入主要是种植前残留和施肥,氮素输出中,作物吸收、土壤残留和表观损失均占较大比重(表 3)。

从作物吸收来看,T2 处理蔬菜吸收的氮素最多,

T4 处理蔬菜吸收最少,4 个处理呈现出先增大后减小的趋势,即随着灌水过程中施肥时段向后推移,蔬菜吸收氮素量先增大后减小,灌水中期施肥提高蔬菜吸收氮素量。这是因为灌水中期施肥处理根系分布层土壤中硝态氮和铵态氮能够均匀地分布在土壤根系范围内,大部分被作物吸收,淋失量较少。前期施肥由于后期灌水时间较长,氮素随着灌溉水分向深层

淋洗,而后期施肥主要在表层土壤累积,不如中期和前期施肥分布均匀。

收获后土壤中残留氮素从 T1 到 T4 随着施肥时段的后移残留量减少,3 茬蔬菜最低土壤氮素残留量比最高残留量分别低 101.38,73.69,136.23 kg/hm<sup>2</sup>。根据氮素平衡计算结果,土壤—蔬菜系统的表观损失随着施肥时段后移先减小后增大。2 茬花椰菜中表观损失呈现趋势较一致,损失量接近,均为 T2 处理表观损失量最小,T4 处理最大,2015 年秋茬花椰菜中 T2 处理比其他 3 个处理分别低 15.35%,27.15%,47.99%,2016 年春茬花椰菜中 T2 处理低 44.12%,38.11%,59.13%。2016 年秋茬黄瓜较花椰菜表观损失高,T3 处理表观损失量最小,T4 最大。造成黄瓜表观损失大的原因主要是施有机肥和氮肥量较大。

导致 T2、T3 处理表观损失较小的原因主要是蔬菜氮素吸收量相对于其他处理大,且残留氮素保持在土壤 0—60 cm 内。

氮盈余受土壤—蔬菜系统表观损失的影响较大,随处理变化趋势相似,表现为随着施肥时段后移先减小后增大,灌水中期施肥处理表观损失和氮盈余均较小。图 4 为 3 茬蔬菜种植体系汇总的氮素平衡。从图 4 可以看出,氮盈余中表观损失具有重要地位,占 74%~89%,总表观损失和氮盈余随着施肥时段后移先减小后增大,T2 处理最小,T1 其次,T4 处理最大,T2 处理较 T4 处理减小表观损失和氮盈余达 25.68%和 20.00%。根据 2015—2016 年花椰菜—花椰菜—黄瓜 3 茬蔬菜种植体系氮素输入和输出计算不同处理的氮素平衡(表 3)。

表 3 3 茬蔬菜体系氮素平衡

单位:kg/hm<sup>2</sup>

作物	处理	氮素输入				作物吸收	残留	表观损失	氮盈余
		种植前残留	施氮量	矿化量	灌溉水				
第 1 茬 花椰菜	CK	493.58	0	350.78	1.06	198.62	244.42	402.38	646.80
	T1	574.24	248.40	350.78	1.06	386.01	498.12	290.35	788.47
	T2	539.50	248.40	350.78	1.06	461.43	432.55	245.77	678.32
	T3	516.60	248.40	350.78	1.06	392.76	386.74	337.35	724.09
	T4	627.95	248.40	350.78	1.06	339.42	416.25	472.53	888.77
第 2 茬 花椰菜	CK	384.16	0	0	1.12	129.41	311.69	-55.82	255.87
	T1	485.94	250.00	0	1.12	221.08	166.93	349.04	515.97
	T2	388.42	250.00	0	1.12	241.07	203.42	195.06	398.48
	T3	417.41	250.00	0	1.12	200.57	152.81	315.15	467.96
第 3 茬 黄瓜	CK	372.04	0	467.71	1.54	181.15	207.55	452.60	660.14
	T1	325.75	350.00	467.71	1.54	365.41	283.92	785.96	1069.88
	T2	382.58	350.00	467.71	1.54	388.22	189.24	926.07	1115.31
	T3	228.10	350.00	467.71	1.54	373.92	203.33	761.93	965.26
	T4	388.79	350.00	467.71	1.54	361.40	147.69	982.80	1130.49

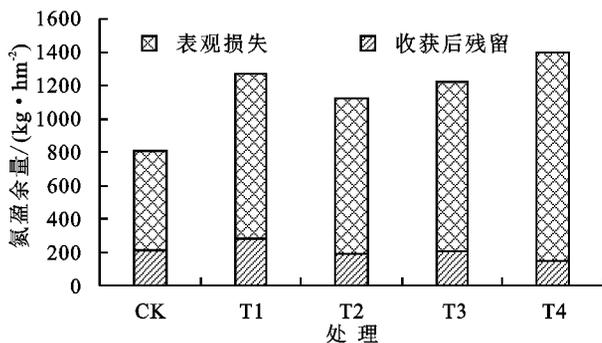


图 4 不同处理 3 茬蔬菜总氮盈余

#### 2.4 滴灌施肥时机对蔬菜氮素利用效率的影响

计算不同处理的氮肥偏生产力和氮肥表观利用率,从图 5、图 6 可以看出,2015 年秋茬和 2016 年春茬花椰菜 T2 处理氮肥偏生产力最高,2016 年秋茬黄瓜 T3 处理氮肥偏生产力最高,分别为 120.53,37.14,68.71 kg/kg,分别比氮肥偏生产力最低处理高 40.18,17.14,11.77 kg/kg,整体上,灌水中期施肥处理氮肥偏生产

力较高。3 茬蔬菜氮肥表观利用率 T2 处理显著高于前期施肥和后期施肥处理,且处理间差异较大,T2 处理 3 茬平均氮肥表观利用率为 34.89%,比其他 3 个处理分别高 7.09%,7.41%,11.48%,最大表观利用率达到 44.66%(2016 年春茬花椰菜 T2 处理)。结合氮素平衡分析,说明灌水中前期施肥能够促进氮素保留在蔬菜根系范围内,使氮素在土壤中分布更加均匀,提高氮肥偏生产力和表观利用率,减少土壤中氮素残留和表观损失。

### 3 讨论

氮素在土壤中运移主要受对流作用和弥散作用影响,因此滴灌施肥过程中施肥时土壤含水率将会对氮素分布产生显著影响,进而影响到蔬菜生长发育、产量品质、氮素平衡以及氮素利用效率。本试验研究表明,滴灌施肥时机对蔬菜产量、果实全氮含量影响较大,对土壤中硝态氮分布和氮素平衡有明显影响,灌水中期施肥

能够显著提高氮肥偏生产力和氮素利用效率。

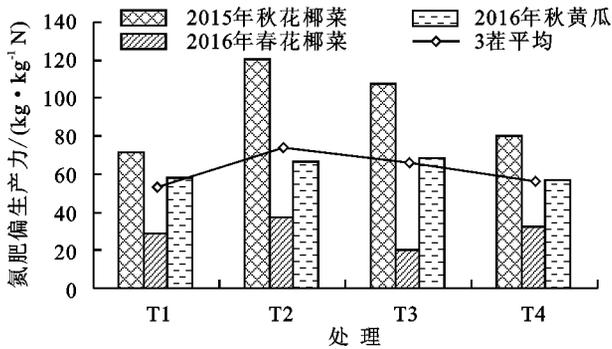


图5 不同处理蔬菜氮肥偏生产力

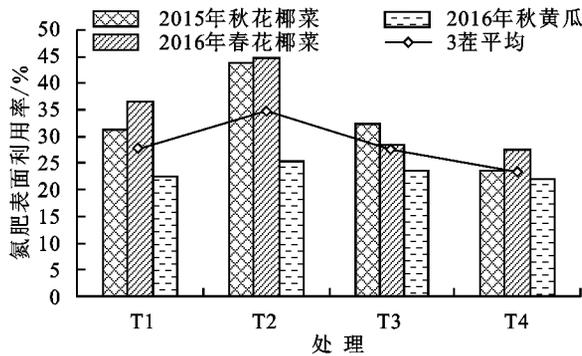


图6 不同处理氮肥表观利用率

李久生等<sup>[7]</sup>室内模拟结果表明,中期施肥处理(1/4W-1/2N-1/4W)后土壤中氮素分布均匀性更好。栗岩峰等<sup>[20]</sup>在日光温室内进行了滴灌频率和滴灌施肥时机对番茄根系分布和根区氮素动态的研究,认为滴灌频率较低、每次施肥量较大时,滴灌施肥时机对番茄根系分布和根区氮素动态影响较大,施肥时段向前推移能使硝态氮在各土层中分布更均匀,氮肥利用效率更高。在本试验过程中得到类似结论,施肥时段为中前期的T2处理(1/5W-1/5N-3/5W)综合表现较好。

本试验结果中并未出现在湿润锋周边累积现象,这可能是由于田间施肥液浓度较高,陈静等<sup>[21]</sup>研究发现,随着施氮量的增加,硝态氮在湿润锋边缘累积现象越不明显,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N随水运移深度主要在60 cm以上,李久生等<sup>[22]</sup>在利用高浓度肥液试验时也发现在湿润土体边缘没有明显累积。另外,也与土壤质地有关,李久生等<sup>[22]</sup>是在土柱中利用砂土(砂粒94.8%)进行试验发现湿润锋累积现象,在粗粒中氮素更容易随水分向下运移到达湿润锋,而本试验在砂壤土中进行,且存在犁底层,阻碍了氮素随水分的运移。

土壤-作物系统的氮素平衡能够评价氮肥管理是否合理,在施氮量一致的情况下,由于施肥时段改变了氮素在土壤中的运移分布特征和均匀程度,将影响土壤-蔬菜系统的氮素平衡和氮素利用效率<sup>[23]</sup>。本研究首次探究了滴灌施肥时机对土壤-蔬菜系统氮素平衡的影响,总表观损失和氮盈余随着施肥时段后移先减小后增大,T2处理最小,T1其次,T4处理最大。主要原因可

能是后期施肥时,土壤含水率整体较高,溶质运移主要受重力作用,淋洗时间也较短,主要残留在表面,可能水解等损失较多;前期施肥时溶质受基质势作用主要通过对流运移,后期淋洗能够使氮素分布较后期施肥更加均匀,但淋洗时间过长可能导致氮素随水分运移至根系分布层以下而导致损失。本试验结果表明,中期施肥的T2、T3处理氮素平衡更为合理。

综合考虑产量品质、土壤氮素平衡和氮素利用效率,在滴灌施肥时应该使施肥时段尽量保持在灌水过程的中期,使肥料尽可能保持在根系范围内,减少土壤-蔬菜系统的表观损失和氮盈余,提高氮肥利用效率。

## 4 结论

(1)滴灌施肥时机对蔬菜产量品质有显著影响,灌水中期施肥处理(T2、T3处理)能够提高蔬菜产量4.74%~25.62%,前期施肥处理(T1处理)能够提高果实中全氮和硝酸盐含量,滴灌施肥时机对可溶性糖及还原性V<sub>c</sub>的影响不显著。

(2)由于灌水后期施肥时硝态氮保留在表层,根系生长旺盛,灌水后期施肥T4处理土壤硝态氮含量下降较多,土壤中残留氮素随施肥时段向后推移残留量减少,土壤-蔬菜系统中表观损失和氮盈余均随着施肥时段向后推移先减小后增大,T2处理表观损失和氮盈余比T4处理减小25.68%和20.00%。

(3)中期施肥处理氮肥偏生产力和氮肥表观利用率显著高于前期施肥或后期施肥处理,3茬蔬菜体系中灌水中期施肥T2处理能够提高氮肥表观利用率7.09%,7.41%,11.48%。

### 参考文献:

- [1] Tarek S, Ronny B, Magnus P. Simulation of soil water and salinity distribution under surface drip irrigation [J]. *Irrigation and Drainage*, 2013, 62(3): 352-362.
- [2] 王虎,王旭东,赵世伟. 滴灌施肥条件下土壤水分和硝态氮的分布规律[J]. *西北农业学报*, 2008, 17(6): 309-314.
- [3] Mohammad N E, Alazba A A, Simunek J. HYDRUS simulations of the effects of dual-drip subsurface irrigation and a physical barrier on water movement and solute transport in soils [J]. *Irrigation Science*, 2014, 32(2): 111-125.
- [4] Ramos T B, Simunek J, Goncalves M C, et al. Two-dimensional modeling of water and nitrogen fate from sweet sorghum irrigated with fresh and blended saline waters [J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 111: 87-104.
- [5] 张学军,赵营,陈晓群,等. 滴灌施肥中施氮量对两年蔬菜产量、氮素平衡及土壤硝态氮累积的影响[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(11): 2535-2545.

- and their effects on a loamy sand [J]. *Annals of Environmental Science*, 2009, 3: 195-206.
- [14] Leifeld J, Fenner S, Müller M. Mobility of black carbon in drained peatland soils [J]. *Bio-geosciences*, 2007, 4(2): 425-432.
- [15] 张伟明. 生物炭的理化性质及其在作物生产上的应用 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.
- [16] Farrell M, Kuhn T K, Macdonald L M, et al. Microbial utilization of biochar-derived carbon [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 465(6): 288-297.
- [17] 肖婧, 徐虎, 蔡岸冬, 等. 生物炭特性及施用管理措施对作物产量影响的整合分析 [J]. *中国农业科学*, 2017, 50(10): 1830-1840.
- [18] 朱美玲, 贡璐, 张龙. 塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析 [J]. *环境科学*, 2015, 36(7): 2678-2685.
- [19] Czimczik C I, Masiello C A. Controls on black carbon storage in soils [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(3): 1-8.
- [20] 贺玉晓, 赵同谦, 刘刚才, 等. 采煤沉陷区土壤重金属含量对土壤酶活性的影响 [J]. *水土保持学报*, 2012, 26(1): 214-218.
- [21] 吴萍萍, 李录久, 李敏. 生物炭负载铁前后对复合污染土壤中 Cd、Cu、As 淋失和形态转化的影响研究 [J]. *环境科学学报*, 2017, 37(10): 3959-3967.
- [22] Luke B, Eduardo M J, Jose L, et al. A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(12): 3269-3282.
- [23] 苏耀明, 陈志良, 雷国建, 等. 多金属矿区土壤重金属垂向污染特征及风险评估 [J]. *生态环境学报*, 2016, 25(1): 130-134.
- [24] Topoliantz S, Ponge J F, Ball of S. Manioc peel and charcoal: A potential organic amendment for sustainable soil fertility in the tropics [J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2005, 41(1): 15-21.
- [25] Yang Y, Yan J L, Ding C. Effects of biochar amendment on the dynamics of enzyme activities from a paddy soil polluted by heavy metals [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 610/613: 2129-2133.
- (上接第 297 页)
- [6] Khalil A, Singh D K, Manoj K. Modelling of nitrogen leaching from experimental onion field under drip fertigation [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 89(1/2): 15-28.
- [7] 李久生, 张建君, 饶敏杰. 滴灌系统运行方式对砂壤土水氮分布影响的试验研究 [J]. *水利学报*, 2004, 35(9): 31-37.
- [8] 侯振安, 李品芳, 吕新, 等. 不同滴灌施肥方式下棉花根区的水、盐和氮素分布 [J]. *中国农业科学*, 2007, 40(3): 549-557.
- [9] Jirka S, Keith L B, Sarah A H, et al. The effect of different fertigation strategies and furrow surface treatments on plant water and nitrogen use [J]. *Irrigation Science*, 2016, 34(1): 53-69.
- [10] Alberto P, Luca I, Daniele M, et al. The influence of fertigation strategies on water and nutrient efficiency of tomato grown in closed soilless culture with saline water [J]. *Acta Horticulturae*, 2009, 807: 445-450.
- [11] Phogat V, Skewes M A, Cox J W, et al. Evaluation of water movement and nitrate dynamics in a lysimeter planted with an orange tree [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 127(3): 74-84.
- [12] 叶静, 安藤丰, 符建荣, 等. 不同有机肥对土壤中的氮素矿化及对化肥氮固持的影响 [J]. *浙江农业学报*, 2008, 20(3): 176-180.
- [13] 温云杰, 李桂花, 黄金莉, 等. 连续流动分析仪与自动凯氏定氮仪测定小麦秸秆全氮含量之比较 [J]. *中国土壤与肥料*, 2015(6): 146-151.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [15] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 224.
- [16] 巨晓棠. 氮肥有效率的概念及意义: 兼论对传统氮肥利用率的理解误区 [J]. *土壤学报*, 2014, 51(5): 921-933.
- [17] 栗岩峰, 李久生, 李蓓. 滴灌系统运行方式施肥频率对番茄产量与根系分布的影响 [J]. *中国农业科学*, 2006, 39(7): 1419-1427.
- [18] 陶埭, 吕新, 陈剑, 等. 不同滴灌施肥方式对棉田土壤含水率、硝态氮分布及对产量的影响 [J]. *棉花学报*, 2015, 27(4): 329-336.
- [19] 吴玉恒, 吴文勇, 韩玉国, 等. 注肥时间对花椰菜产量、品质和水氮利用效率的影响 [J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(8): 7-12.
- [20] 栗岩峰, 李久生, 李蓓. 滴灌系统运行方式和施肥频率对番茄根区土壤氮素动态的影响 [J]. *水利学报*, 2007, 38(7): 857-865.
- [21] 陈静, 王迎春, 李虎, 等. 滴灌施肥对冬小麦农田土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  分布、累积及氮素平衡的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(4): 927-935.
- [22] 李久生, 杨凤艳, 栗岩峰. 层状土壤质地对地下滴灌水氮分布的影响 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 25-31.
- [23] 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.