

注肥时间对花椰菜产量、品质和水氮利用效率的影响

吴玉恒¹, 吴文勇², 韩玉国¹, 廖人宽², 杨林林³

(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 100044; 3. 北京农业职业学院, 北京 102442)

摘要:针对我国设施蔬菜水肥管理粗放、肥料利用效率低等突出问题,通过温室花椰菜小区试验,设置4种注肥时间处理,即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)(1/5W-1/5N-3/5W表示整个灌水过程的前1/5时间灌水,接下来的1/5时间施肥,后3/5时间灌水冲洗管道,其他同),研究了不同注肥时间对温室花椰菜产量、品质、水氮利用效率和土壤剖面氮素迁移规律的影响,探索了滴灌施肥条件下最优注肥时间及其调控阈值。结果表明,花椰菜全生育期耗水量随着注肥时间向后推移而呈先增加后减少趋势,其中T3处理耗水量最高,为135.26 mm。在灌溉施肥过程中向后推移施肥可显著提高花椰菜产量和品质,其中后期施肥处理(T3、T4)的产量较前期施肥处理(T1、T2)增加了1.78%~6.39%。花椰菜的氮肥利用效率和氮肥回收率随着注肥时间的向后推移而呈逐渐增加趋势,且花球部位的氮素累积量明显增加,水分利用效率显著降低。另外,向后推移注肥时间有效地减少了硝态氮的淋失。在试验条件下,综合考虑花椰菜产量、品质和水氮利用效率,灌溉施肥过程中注肥时间应尽量向后推移。

关键词: 注肥时间; 产量; 品质; 水氮利用效率; 氮素分布

中图分类号: S276

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2017.08.002

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.

0 引言

花椰菜是一种低脂肪、高能量并富含多种维生素的十字花科蔬菜,具有抵御癌症和心脏病的作用^[1]。在花椰菜栽培过程中,合理的水氮供应能够促进花椰菜茎叶的形成和花球的膨大发育,提高花椰菜产量^[2]。不合理的水肥管理措施,不仅造成花球品质和水肥利用效率低下^[3-4],同时导致硝态氮的淋失,对地下水存在潜在污染^[5]。水肥一体化技术是将灌溉和施肥融为一体的农业新技术,具有改善温室大棚水肥气热条件、定时定量定点输送养分和水分、节约水肥资源等优点^[6-8]。通过水肥一体化技术能够合理地控制注肥时间、施肥量和施入点^[9],从而提高肥料利用率和作物产量。在实际生产过程中,实现花椰菜的高质高产还需要探明水肥一体化条件下的水肥管理制度。目前,国内外关于花椰菜水肥管理方面的研究较多。研究表明,适当减少化肥施入并配施生物肥(80%常规施肥+生物肥)显著提高了花椰菜的品质和肥料利用率^[10];当氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)施量分别为249.28、54.33、234.09 kg/hm²时花椰菜可获得最高产量,且同等底肥条件下花椰菜各项品质指标与施氮量负相关^[11];滴灌施肥条件下,施氮量对花椰菜产量的影响大于灌水量对其影响,且在相同施氮水平下过多的灌水量会引起花椰菜产量和品质的下降^[12];施肥频率对花椰菜生长和产量没有显著影响^[13]。已有关于花椰菜水肥调控的研究多集中于施肥量、灌水量或施肥配比等控制因素上,而不同注肥时间对花椰菜产量、品质及水氮利用效率方面的研究鲜见。已有学者通过室内土箱试验^[14-15]和计算机模拟^[16-17]发现注肥时间对土壤剖面硝态氮分布有明显影响,但是通过田间试验研究注肥时间与土壤水氮分布和利用的关系的研究较少。为此,以温室花椰菜为试验材料,研究不同注肥时间对设施蔬菜的产量、品质、

收稿日期: 2016-11-10

基金项目: 大型灌区节水技术集成与示范项目(2015BAD20B00);水肥一体化的高效节水灌溉系统研究与示范项目(D151100004115002);设施农田水肥优化管理标准化技术模式(2016YFC0403101)

作者简介: 吴玉恒(1994-),男,安徽宁国人。硕士研究生,主要从事水土保持方面的研究。E-mail: 18811701566@163.com

通信作者: 吴文勇(1977-),男,江苏射阳人。教授级高级工程师,博士,主要从事农业节水、水文水资源研究。E-mail: wenyongwu@126.com

耗水规律和水氮利用效率的影响,通过分析土壤剖面硝态氮分布情况来揭示滴灌系统不同注肥时间对土壤硝态氮迁移的影响效应,探寻滴灌施肥条件下最优注肥时间,为制定合理的灌溉施肥制度提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2015年9—12月在国家节水灌溉北京工程技术研究中心庞各庄试验站的日光温室内进行。该站地处东经116°20′,北纬39°35′,海拔33 m,属北温带半湿润半干旱大陆性季风气候,年平均降水量568.9 mm,多年平均水面蒸发量1 021 mm。供试土壤为粉质壤土,0~40 cm土层平均田间持水率为24.48% (质量含水率),基础理化性质见表1(北京市水科学技术研究院检测)。

表1 土壤基础理化性质

土层 深度/cm	粒级分数/%			土壤体积质量/ (g·cm ⁻³)	pH值	全氮量/ (g·kg ⁻¹)	有机质量/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮量/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷量/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾量/ (mg·kg ⁻¹)
	砂粒	粉粒	黏粒							
0~10	26.0	67.5	6.5	1.42	8.38	1.28	20.0	128	185	219
10~20	31.5	62.5	6.0	1.46	8.38	0.75	11.4	398	103	114
20~30	31.5	62.5	6.0	1.62	8.58	0.66	7.73	260	140	88
30~40	16.5	60.5	23	1.53	8.57	0.45	8.48	286	69	129

供试花椰菜品种为“青松65”,种植方向为东西向,定植株行距均为50 cm。试验采用自压重力式滴灌系统,滴灌带间距为30 cm,滴头间距为30 cm,滴头实测流量是1.38 L/h。按照花椰菜生长发育特点将全生育期划分为苗期(9月8—28日)、莲座期(9月29日—10月27日)、结球前期(10月28日—11月28日)和结球后期(11月29日—12月30日)。供试肥料为尿素(含N量46%)、复合肥(含N量15%、含P₂O₅量15%、含K₂O量15%)。

1.2 试验设计

试验设4种注肥时间处理,即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)处理,此T2(1/5W-1/5N-3/5W)处理中1/5W-1/5N-3/5W表示整个灌水过程的前1/5时间灌水,接下来的1/5时间施肥,后3/5时间灌水冲洗管道,其他同。每个施肥处理3次重复,小区规格为7 m×6 m,共计12个小区。试验小区间设置有20 cm高的垄避免小区间水肥干扰。在试验小区的东、西二侧设置3.5 m×6 m的保护区。按照花椰菜的需水需肥规律及日光温室中土壤水肥情况,基肥中有机肥、复合肥(N、P₂O₅、K₂O质量比15:15:15)施量共计5 250、182 kg/hm²,施肥方式为撒施;后期追肥随滴灌施入。每次灌溉施肥持续时间为100 min,其中注肥时间20 min,将1.512 kg尿素溶于20 L灌溉水后用文丘里施肥器进行施肥。根据花椰菜的需水规律,采用测墒补灌法进行滴灌,分别以0~40 cm土层田间持水率的75%和100%为灌水下限和上限,累计灌水量185.71 mm;整个生育期内共追肥8次,10月2日、10日、18日、24日、31日、11月10日、15日、22日随水施肥,累计施氮量为248.4 kg/hm²。

1.3 测定项目与方法

在蔬菜种植前后,采用土钻法采集土样,用1 mol/L的KCl溶液浸提,使用流动分析仪(AutoAnalyser-III,德国Bran+Luebbe公司)测定浸提液中硝态氮和铵态氮的量^[18]。在每周二和每次灌水前后用Trime-T3土壤水分监测系统每隔10 cm测定土壤体积含水率,测至120 cm垂直剖面处。

2015年12月12—24日为收获期,分4次收获,每次收获详细记录花球的鲜质量。蔬菜样品分叶片、茎、花球、根4部分,经净化、杀青、烘干后磨碎,各小区混合均匀后过0.5 mm筛,采用半微量凯氏定氮法^[19]测定植物全氮量。在收获期间选取各处理生长发育状况一致的花球进行品质测定,其中可溶性糖采用硫酸-蒽酮比色法^[20]测定,维生素C采用钼蓝比色法^[20]测定,硝酸盐采用紫外分光光度法^[20]测定。

采用水量平衡法计算作物耗水量(ET_c),由于试验在温室大棚内进行,降雨量为0,单次灌水量较少,地表径流量可忽略不计,地下水埋深低于4 m,故可忽略地下水补给。因此,作物耗水量=灌水量+计划湿润层内土壤贮水量的变化量,进而计算水分利用效率(产量/作物耗水量)和氮肥利用效率(产量/施氮量),同时参照文献[21-23]计算氮肥回收率((施肥处理植物吸氮量-未施肥处理植物吸氮量)/施氮量)。

采用Microsoft Excel 2007处理数据,SPSS Statistics 19软件进行方差分析,运用Duncan法进行差异显著性检验(P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 注肥时间对花椰菜耗水规律的影响

根据水量平衡方程计算花椰菜各生育期的耗水量,其变化如图1所示(同一时期不处理不同字母表示差异显著 $P<0.05$,下同)。从图1可以看出,全生育期花椰菜耗水量表现为T3处理>T4处理>T2处理>T1处理,分别为135.26、132.11、129.49、120.16 mm,日耗水强度表现为T3处理>T4处理>T2处理>T1处理,分别为1.19、1.16、1.14、1.05 mm/d。各处理最大日耗水量均出现在结球前期,且随着生育期的推进,耗水量呈先增加后减小的趋势。苗期,花椰菜耗水量较小,各处理间的差异性较小;莲座期和结球前期,花椰菜的耗水量持续上升,莲座期T2、T3处理耗水量较T1、T4处理增加4.55%~7.53%且差异显著($P<0.05$),而结球前期T3处理耗水量最高,分别比T1、T2、T4处理增加了13.43%、3.44%、6.33%,且差异显著($P<0.05$);结球后期,花椰菜耗水量有所下降,T3、T4处理耗水量显著高于T1、T2处理,增加了10.47%~28.04%,且差异显著($P<0.05$)。在整个生育周期内后期施肥处理的总耗水量高于前期施肥处理,T3、T4处理的耗水量较T1、T2处理增加了2.02%~12.57%,表明灌水施肥过程中向后推移施肥可以明显提高花椰菜对水分的消耗,在结球后期尤为明显。这可能是因为:注肥时间向后推迟减少了硝态氮被淋洗的时间,根系层保留了大部分养分,增加了根系可吸收氮肥的量,促进了花椰菜的营养生长,加速了土壤水分的消耗。

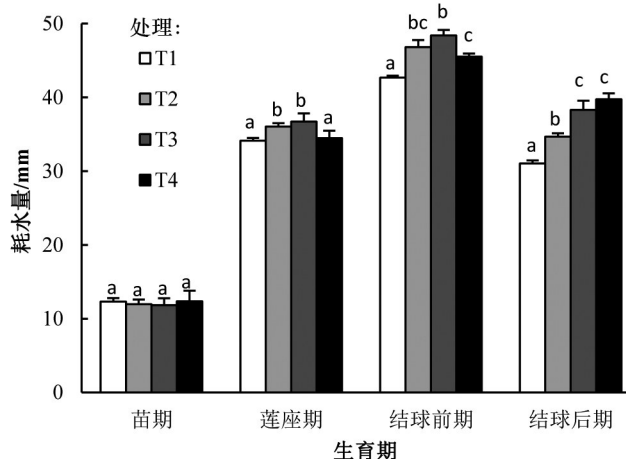


图1 各生育周期花椰菜耗水规律

2.2 注肥时间对花椰菜产量和品质的影响

不同注肥时间花椰菜的产量和品质如表2所示。从表2可以看出,后期施肥处理(T3、T4)产量显著高于前期施肥处理(T2),均值表现为T4处理>T3处理>T1处理>T2处理,后期施肥处理较前期施肥处理产量提高1.78%~6.39%;灌溉施肥过程中随着注肥时间的向后推移,花椰菜可溶性糖量呈增加趋势,表现为T4处理>T3处理>T2处理>T1处理,其中,T1处理与T4处理可溶性糖量差异显著($P<0.05$);硝酸盐量随注肥时间的向后推移呈减少趋势,T4处理硝酸盐量最低,为122.52 mg/kg,与T1、T2、T3处理均存在显著性差异($P<0.05$);注肥时间对花椰菜Vc量无显著性影响。

表2 不同注肥时间条件下花椰菜的产量和品质及其水氮利用率

处理	经济产量/(kg·hm ⁻²)	可溶性糖量/%	Vc量/(mg·10 ⁻¹ ·g ⁻¹)	硝酸盐量/(mg·kg ⁻¹)	水分利用效率/(kg·m ⁻³)	氮肥利用效率/(kg·kg ⁻³)	氮肥回收率/%
T1	24 530.60±720.51ab	3.91±0.16b	9.25±1.05a	143.30±25.59a	20.94±1.42a	88.98±8.03a	25.27±9.34ab
T2	23 554.81±632.48a	4.27±0.26ab	10.10±1.20a	134.67±23.12a	19.69±0.76ab	85.44±6.82a	17.62±7.65a
T3	25 016.14±503.48b	4.58±0.27ab	10.03±1.20a	123.43±23.44a	17.53±1.22bc	90.74±13.39a	33.92±16.56ab
T4	25 060.14±482.36b	4.67±0.29a	10.06±1.25a	122.52±20.63b	18.82±0.54c	90.90±8.59a	42.98±11.46b

注 同列不同小写字母表示0.05水平下差异显著;下同。

2.3 注肥时间对花椰菜水氮利用效率的影响

氮肥利用效率是指单位土壤养分资源消耗量所获得的经济产量,反映了产量和土壤养分资源消耗的关系^[24-25];水分利用效率是指单位蒸散量所获得的经济产量,二者都是评价农业生产是否高产高效的重要指标^[24]。氮肥回收率是指植物吸收来自施氮肥的养分占施用氮肥养分总量的比例,可根据施氮处理与不施氮处理的植株氮素累积量之差占施氮量的比例表征^[21-23]。不同注肥时间条件下花椰菜水氮利用效率如表2所示。

由表2可知,①从氮肥利用效率来看,灌溉施肥过程中注肥时间向后推移处理高于注肥时间向前推移处理,其中T4处理氮素利用效率最高,达90.90 kg/kg,T3、T4处理氮素利用效率较T1、T2处理增加1.98%~6.39%,各处理间差异不显著($P>0.05$)。②水分利用效率的变化趋势与其相反,均值表现为T1处理>T2处理>T4处理>T3处理,T1和T2处理较T3、T4处理增加了4.62%~19.45%,其中T1处理显著高于T3、T4处理

($P<0.05$),表明灌溉施肥过程中向前推移注肥时间可以明显提高花椰菜的水分利用效率。③各处理的氮肥回收率均值表现为T4处理>T3处理>T1处理>T2处理,其中T4处理的氮肥回收率最高,达到42.98%,显著高于T2处理($P<0.05$)。

2.4 注肥时间对花椰菜氮素分配的影响

各处理花椰菜氮素分配情况如表3所示。从表3可以看出,茎和花球部位的氮素累积量随着注肥时间的向后推移呈逐渐增大的趋势,其中T4处理花球氮素累积量为111.27 kg/hm²,显著高于T1、T2处理($P<0.05$)。T1、T2处理根氮素累积量分别为21.15、20.68 kg/hm²,显著高于T3、T4处理($P<0.05$)。叶片和植株的氮素累积量的增加趋势不明显,总体表现为注肥时间向后推移处理的氮素累积量高于注肥时间向前推移处理。T2处理叶片氮素累积量显著低于T3、T4处理($P<0.05$);,T4处理总氮素累积量最高,为301.28 kg/hm²,显著高于T2处理($P<0.05$)。

表3 不同注肥时间条件下氮素的分配

处理	氮素累积量/(kg·hm ⁻²)				合计
	根	茎	叶	花球	
T1	21.15±1.91a	25.02±2.26a	124.29±11.21ab	86.84±7.83a	257.29±23.21ab
T2	20.68±1.65a	27.76±2.21a	98.93±7.89a	90.92±7.25a	238.30±19.01a
T3	12.31±1.82b	28.92±4.27a	136.75±20.18b	100.82±14.88ab	278.80±41.14ab
T4	15.11±1.43b	28.92±2.87a	144.51±13.66b	111.27±10.52b	301.28±28.48b

2.5 注肥时间对土壤剖面硝态氮分布的影响

土壤剖面硝态氮的累积情况如图2所示。从图2可以看出,硝态氮量在垂直方向上的分布基本表现为随土层深度的增加而逐渐降低的趋势。与种植前相比,收获后0~40 cm土层硝态氮累积量明显降低,这可能是因为:植物根系主要分布在0~40 cm土层内,在生长发育过程中吸收了土层内大量氮素,T1、T2、T3、T4处理收获后硝态氮累积量较种植前分别增加了44.46、62.75、59.43、85.19 mg/kg,收获后T1处理的氮素累积量显著高于其他处理($P<0.05$);40~80 cm土层硝态氮累积量变化幅度较小;80~120 cm土层硝态氮累积量明显增加,可能是由于硝态氮易随水移动,灌溉过程导致了硝态氮向深层土壤移动,T1、T2、T3、T4处理种植前硝态氮累积量较收获后分别增加了45.14、42.94、29.81、20.89 mg/kg,该土层收获后的硝态氮累积量随注肥时间的向后推移呈减少趋势,说明灌溉施肥过程中向后推移注肥时间可明显减少农田土壤硝态氮的淋失量。

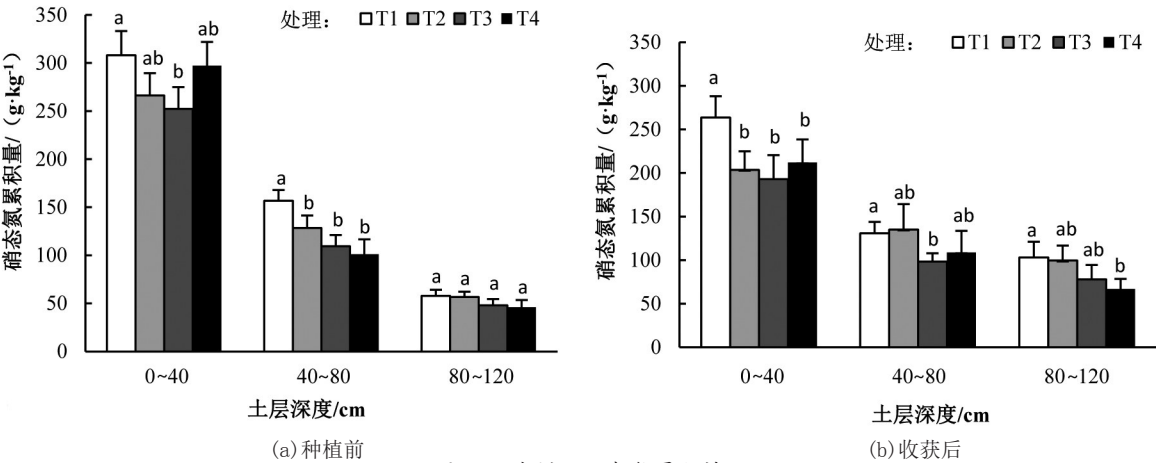


图2 土壤剖面硝态氮累积情况

3 讨论

氮素在土壤中的运移以水为载体,在水肥一体化条件下改变注肥时间直接造成氮素在土壤剖面分布的差异,也影响着作物对养分的吸收利用。本试验结果表明,注肥时间对花椰菜耗水量、产量、品质(可溶性糖量和硝酸盐量)和水分利用效率均有显著影响。其中,花椰菜的产量随着注肥时间的向后推移呈增加趋势,且注肥时间对花椰菜的可溶性糖量和硝酸盐量影响显著,栗岩峰等^[26]的研究结果则认为注肥时间对作物产量和品质均无显著影响,这可能与试验材料和施氮量不同有关。由于本试验的单次施氮量较高,增加了灌溉施肥后土壤剖面氮素分布的差异性,注肥时间对作物产量和品质的影响也随之改变。已有研究表明,滴

灌施肥条件下,硝态氮易在土壤湿润体边缘产生累积^[9,14],也有部分研究结果表明未在湿润体边缘发现硝态氮累积现象^[15],本试验也未发现累积现象,这可能与该试验区土壤质地和施用肥液质量浓度有关。硝态氮累积现象的试验大多是在土壤质地均匀的土柱条件下进行的,而本试验是在大棚内进行,并且在30~40 cm土层内黏粒成分占23%,该土层的黏粒颗粒对水分和养分的向下运移存在阻碍作用,这可能是导致硝态氮未在湿润土体边缘累积的重要原因。另外,田间试验的高施氮量和高肥液质量浓度也是导致湿润体边缘硝态氮累积现象不明显的重要原因。试验结果表明土壤硝态氮的淋失量随着注肥时间的向后推移逐渐减少,这与以往室内试验和模拟所得结论^[14,16]相一致。

在施用氮肥时,尿素态氮会随水运动,在土壤中会被脲酶转化为铵态氮,硝化细菌又会将铵态氮转化为硝态氮;各类形态的氮素在土壤溶液中运移特性又存在差异,尿素态氮和硝态氮在土壤中随水迁移能力强^[27],铵态氮容易被土壤颗粒吸附;同时这3类氮素都能被植物所吸收利用,这些因素给试验研究带来了更大的复杂性。已有不少学者通过田间试验^[9,29]、室内试验^[14,27]和数值模拟^[17,28]来研究各类氮素在土壤中迁移和转化规律。本试验在探讨注肥时间与氮素淋溶间的关系并未综合考虑各类氮素迁移转化规律,所以在今后的研究中还需进一步深入展开。另外,本研究发现注肥时间对作物耗水量存在显著影响,而在目前关于注肥时间对作物耗水量影响的相关参考文献还很少,所以在今后的研究中还需进一步探明注肥时间与水分利用间的关系,为制定合理的灌溉施肥制度提供重要理论依据。

4 结 论

1)花椰菜全生育期耗水量随着注肥时间的向后推移呈先增加后减少的趋势,其中T3处理耗水量最高,为135.26 mm;灌水施肥过程中向后推移施肥明显增加花椰菜对水分的消耗,在结球后期尤为明显。

2)不同注肥时间处理对花椰菜产量和品质影响显著。随着注肥时间的向后推移,花椰菜产量呈逐渐增加趋势,其中注肥时间向后推移处理(T3、T4处理)的产量较注肥时间向前推移处理(T1、T2处理)增加1.78%~6.39%;花椰菜得可溶性糖量随着注肥时间的向后推移而显著增加,硝酸盐量显著降低。

3)注肥时间的向后推移增加了花椰菜中氮素累积量和氮肥利用效率。后期施肥处理的氮肥回收率高于前期施肥处理,其中T4处理的氮肥回收率最高,达到42.98%。灌溉施肥过程中的前期施肥处理的水分利用效率高于后期施肥处理,其中T1和T2处理较T3、T4处理增加4.62%~19.45%。

4)收获后试验区表层土壤硝态氮累积量较施肥前明显减少,80~120 cm土层硝态氮累积量明显增加;灌溉施肥过程向后推迟施肥有效地减少了硝态氮的淋失;灌溉施肥过程中的前期施肥处理在各层土壤的硝态氮累积量均高于后期施肥处理。

在试验条件下,综合考虑花椰菜产量、品质和水氮利用效率,灌溉施肥过程中注肥时间应向后推移,推荐T4处理的施肥方案。

参考文献:

- [1] SELIM E M, MOSA A A. Fertigation of humic substances improves yield and quality of broccoli and nutrient retention in a sandy soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2012, 175(2):273-281.
- [2] 卢必威. 花椰菜的营养特性及施肥技术[J]. 中国蔬菜, 1984(4):49-52.
- [3] 张志斌. 我国设施蔬菜存在的问题及发展重点[J]. 中国蔬菜, 2008(5):1-3.
- [4] 王丽英, 赵小翠, 曲明山, 等. 京郊设施果菜类蔬菜土壤水肥管理现状及技术需求[J]. 华北农学报, 2012, 27(S1):298-303.
- [5] DI H J, CAMERON K C. Nitrate leaching in temperate agroecosystems:sources,factors and mitigating strategies[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 64(3):237-256.
- [6] VIJAYAHUMAR G, TAMILMANI D, SELVARAJ P K. Irrigation and Fertigation Scheduling under Drip Irrigation in Brinjal (*Solanum melongena* L. Crop[J]. International Journal of Bio-resource and Stress Management, 2010, 1(2):72-76.
- [7] EL-HONDAWY S E, HOKAM E M, SCHMIDHALTER U. Drip Irrigation Frequency: The Effects and Their Interaction with Nitrogen Fertilization on Sandy Soil Water Distribution, Maize Yield and Water Use Efficiency under Egyptian Conditions[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2008, 194(3):180-192.
- [8] 李久生, 栗岩峰, 王军, 等. 微灌在中国:历史、现状和未来[J]. 水利学报, 2016, 47(3):372-381.
- [9] 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.
- [10] 李杰, 贾豪语, 颜建明, 等. 生物肥部分替代化肥对花椰菜产量、品质、光合特性及肥料利用率的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(1):47-55.
- [11] 黄梅卿. 氮磷钾平衡施用对花椰菜经济产量及品质的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(5):261-266.
- [12] THOMPSON T L, DOERGE T A, GODIN R E. Nitrogen and water interactions in subsurface drip-irrigated cauliflower: I Plant response[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(1):406.

- [13] THOMPSON T L, WHITE S A, WALWORTH J, et al. Fertigation Frequency for Subsurface Drip-Irrigated Broccoli[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(3):910.
- [14] 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.
- [15] 侯振安,李品芳,龚江,等. 不同滴灌施肥策略对棉花氮素吸收和氮肥利用率的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(4):702-708.
- [16] GARDENAS A I, HOPMANS J W, HANSON B R, et al. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2005, 74(3):219-242.
- [17] HANSON B R, SIMUNEK J, HOPMANS J W. Evaluation of urea-ammonium-nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling[J]. Agricultural Water Management, 2006, 86(1-2):102-113.
- [18] 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.
- [19] 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, 2000:302-316.
- [20] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社, 2006:74-77.
- [21] 王姗姗,黄庆海,徐明岗,等. 长期不同施肥条件下红壤性水稻土双季稻氮肥回收率的变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2):297-303.
- [22] 段英华,徐明岗,王伯仁,等. 红壤长期不同施肥对玉米氮肥回收率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5):1 108-1 113.
- [23] 李虹儒,许景钢,徐明岗,等. 我国典型农田长期施肥小麦氮肥回收率的变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2):336-343.
- [24] 李韵珠,王凤仙,黄元仿. 土壤水分和养分利用效率几种定义的比较[J]. 土壤通报, 2000, 31(4):150-155.
- [25] 巨晓棠,张福锁. 关于氮肥利用率的思考[J]. 生态环境学报, 2003, 12(2):192-197.
- [26] 栗岩峰,李久生,饶敏杰. 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):1 419-1 427.
- [27] 习金根,周建斌. 不同灌溉施肥方式下尿素态氮在土壤中迁移转化特性的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3):271-275.
- [28] HUTSON J L, WAGENET R J. Simulating nitrogen dynamics in soils using a deterministic model[J]. Soil Use and Management, 2010, 7(7):74-78.
- [29] WANG Z, LI J, LI Y. Effects of drip irrigation system uniformity and nitrogen applied on deep percolation and nitrate leaching during growing seasons of spring maize in semi-humid region[J]. Irrigation Science, 2014, 32(3):221-236.

The Timing of Application of Nitrogen in Drip Fertigation Affects Yield, Quality, as Well as Water and Nitrogen Use Efficiency of Cauliflower

WU Yuheng¹, WU Wenyong², HAN Yuguo¹, LIAO Renkuan², YANG Linlin³

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

2. Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China; 3. Beijing Vocational College of Agriculture, Beijing 102442, China)

Abstract: Increasing nitrogen use efficiency in producing vegetables from greenhouses is essential in China, and in this paper, we investigated the impact of the timing of fertigation on yield, quality, water and nitrogen use efficiency of cauliflower using plot experiments. Four fertigation timings were examined: 1/5N-4/5W (T1), 1/5W-1/5N-3/5W (T2), 2/5W-1/5N-2/5W (T3), 3/5W-1/5N-1/5W (T4), in which 1/5W, 1/5N and 3/5W represented irrigating water at the first fifth of a irrigation/fertigation event, applying the nitrogen at the second fifth of the event, flashing the irrigation pipe in the last three fifths of the event, respectively. The results showed that the total water consumption increased first and then decreased as the fertigation was delayed, peaking in T3 with a water consumption of 135.26 mm. The timing of the fertigation had a significant effect on yield and quality, with the yield increasing by slightly delaying the nitrogen application. Applying the nitrogen in the late stage (T3 and T4) increased the yield by 1.78%~6.39%, compared with application at the beginning stage (T1 and T2). Water use efficiency, nitrogen use efficiency and recovery efficiency, as well as the percentage of nitrogen in the ball-flower all increased by delaying the nitrogen application to later stage. Delaying the nitrogen application also reduced nitrate leaching. In summary, our experimental results showed that delaying nitrogen application in fertigation increased yield, quality, water and nitrogen use efficiencies.

Key words: fertilization time; yield; quality; water and nitrogen use efficiency; nitrogen distribution

责任编辑:刘春成