

窦超银,郭海瑞,孟维忠,等. 大棚黄瓜滴灌水肥一体化土壤硝态氮分布特征[J]. 江苏农业科学,2020,48(6):110-116.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.06.023

# 大棚黄瓜滴灌水肥一体化土壤硝态氮分布特征

窦超银<sup>1</sup>,郭海瑞<sup>1</sup>,孟维忠<sup>2</sup>,陈伟<sup>2</sup>,延玮辰<sup>2</sup>

(1.扬州大学水利科学与工程学院,江苏扬州 225009; 2.辽宁省水利水电科学研究院,辽宁沈阳 110003)

**摘要:**为探究滴灌水肥一体化条件下土壤硝态氮的空间分布特征,以大棚黄瓜为对象,采用正交试验设计方法,探究不同灌溉下限(田间持水率的 65%、75%、85%,分别记为  $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ )、施氮量(产量理论需氮量的 70%、100%、130%,分别记为  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ )和施钾量(产量理论需钾量的 70%、100%、130%,分别记为  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ )对硝态氮分布和含量的影响。结果表明,滴灌水肥一体化灌溉滴头正下方存在低土壤  $NO_3^- - N$  含量区域, $NO_3^- - N$  在垄坡和垄沟区域累积,并有明显的表聚特征。随着灌溉下限的增大,土壤剖面  $NO_3^- - N$  含量有先增大后减小的趋势;灌溉下限越低,滴头附近  $NO_3^- - N$  含量越小,灌溉下限越高, $NO_3^- - N$  越集中于中下层土壤。土壤剖面  $NO_3^- - N$  含量随施氮量增加而增大,水平和垂直方向各点  $NO_3^- - N$  含量均会增加,高施氮量提高硝态氮含量更为明显。土壤剖面  $NO_3^- - N$  含量随着施钾量的增加而增大,在水平方向上, $NO_3^- - N$  含量的增加主要在 15 cm 以外,而垂直方向主要在 0~20 cm 土层。试验 3 因素对土壤剖面  $NO_3^- - N$  含量的影响表现为施氮量 > 施钾量 > 灌溉下限, $N_3K_3W_2$  组合条件下土壤剖面  $NO_3^- - N$  含量最高。

**关键词:**灌溉下限;施氮量;施钾量;随水施肥;硝态氮分布

**中图分类号:** S275.6;S642.206;S642.207

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-1302(2020)06-0110-07

我国设施农业普遍存在施肥过量的问题,由于肥料过量投入导致的环境污染,土壤质量退化等一系列后果日益严重,其中氮肥的不合理应用尤为突出。研究表明,设施农业生产实践中平均每季氮肥投入量为  $1\ 000\text{ kg/hm}^2$ ,是作物吸收量的 5 倍左右,当季利用率低于 10%<sup>[1]</sup>。大量的氮素被残留在土壤中,0~90 cm 土层氮含量可达到  $500\sim1\ 230\text{ kg/hm}^2$ <sup>[2]</sup>,当季氮素化肥的 20%~25% 随降雨径流和渗漏排出农田<sup>[3]</sup>,构成地下水和地表水污染的主要污染源,每年流入河流中的氮有 29.1%~67.5% 来自农田径流<sup>[4]</sup>。随着设施农业的快速发展和农户持续盲目地增加肥料投入,若不改变传统粗放的水肥管理技术,对生态环境造成的负面影响势必会更加严重。

滴灌水肥一体化技术是根据作物需水需肥规律将水肥以溶液形式通过滴灌系统适时适量供给作物的灌溉施肥技术,具有精确控制、降低盐渍化和地下水污染风险、减小土壤养分浓度剧变和有利

于根系吸收养分等优点,近几年在设施农业中得到较快发展并取得明显的生态效果。滴灌水肥一体化对硝态氮( $NO_3^- - N$ )的调控,一方面是利用  $NO_3^- - N$  具有易迁移性和易被淋洗的特点;另一方面是利用滴灌局部灌溉,结合少量多次的灌溉制度将灌溉水控制在较小的湿润区域内,保持含水量在较高水平的特性<sup>[5]</sup>。Singandhupe 等研究表明,滴灌明显减少了深层渗漏和土壤蒸发,并能精确控制根层水分状况,随水所施肥料主要分布在根系层,提高肥料利用效率;与沟灌相比,水肥一体化增产 3.7%~12.5%,节水 31%~37%, $NO_3^- - N$  吸收量增加 8%~11%<sup>[6]</sup>。Sharmasarkar 等研究表明,滴灌水肥一体化能够有效调控土壤氮素的分布,通过减少深层渗漏减少氮素淋失<sup>[7]</sup>。Li 等研究表明,无论水肥如何组合, $NO_3^- - N$  总是在湿润体边界累积,但如果随水施肥管理不当,容易造成养分分布在根区外<sup>[8]</sup>。Ajday 等研究认为,土壤质地是影响滴灌水肥一体化  $NO_3^- - N$  分布的主要因素,尽管  $NO_3^- - N$  向湿润体外部迁移,在根系分布层仍保持着足够的  $NO_3^- - N$ <sup>[4]</sup>。由此可见,滴灌水肥一体化条件下, $NO_3^- - N$  和土壤水分在土空间分布形状上具有一致

收稿日期:2019-02-28

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(编号:51609208);辽宁省科技攻关计划课题(编号:2015103030)。

作者简介:窦超银(1982—),男,江苏如皋人,博士,高级工程师,主要从事节水灌溉原理与技术研究。E-mail:chydou@163.com。

性,含量大小分布趋势则相反,这一分布特征也是滴灌水肥一体化技术应用的理论基础。而随着滴灌水肥一体化应用研究的进一步深入,滴灌水肥一体化已不再是单一的施肥技术,而逐渐成为高效的水肥综合管理技术,研究者们开始关注水肥一体化下灌溉和施肥制度的合理制定,并涛等研究认为滴灌水肥一体化施氮量为  $90 \text{ kg/hm}^2$  时氮肥利用效率最高<sup>[9]</sup>,栗岩峰等的研究表明高施氮量会增加氮素淋失风险<sup>[10]</sup>。灌溉施肥制度的调整必然引起土壤中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  分布的变化,反之,通过研究不同灌溉施肥条件下  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  分布的变化规律可为调整灌溉施肥制度提供依据,但目前相关研究报道还较少。本研究以水肥一体化应用的关键参数即灌溉下限、施氮量和施钾量为试验因素,拟通过田间试验得出不同水肥条件下硝态氮的空间分布特征及各因素对硝态氮分布的影响规律,以期为地区滴灌水肥一体化技术的合理应用提供参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验在辽宁省灌溉试验中心站 ( $120^\circ 30' 44'' \text{E}$ ,  $42^\circ 08' 59'' \text{N}$ ) 的高标准日光温室中进行,试验站位于辽宁省沈阳市黄家乡,为平原地带,属温带大陆性季

风气候。供试土壤为黏壤土,容重为  $1.33 \text{ g/cm}^3$ ,土壤饱和体积含水率为  $42.2\%$ ,田间持水率为  $24\%$ ,土壤中肥力偏下,速效钾含量为  $81.3 \text{ mg/kg}$ ,速效磷含量为  $18.4 \text{ mg/kg}$ ,碱解氮含量为  $75.4 \text{ mg/kg}$ ,全氮含量为  $1.1 \text{ g/kg}$ ,有机质含量为  $1.2\%$ ,土壤 pH 值为  $7.1$ 。

### 1.2 试验设计

试验种植作物为黄瓜,供试品种为玛丽亚。黄瓜采用大垄双行种植,垄宽  $1.5 \text{ m}$ ,垄长  $7 \text{ m}$ ,垄台高  $0.15 \text{ m}$ ,行距为  $0.5 \text{ m}$ ,株距为  $0.45 \text{ m}$ 。每垄种植黄瓜 16 株,两垄之间的距离为  $1.5 \text{ m}$ 。采用膜下滴灌灌溉,黄瓜定植前在垄中心铺设滴灌带,滴头间距为  $0.3 \text{ m}$ ,滴头流量为  $1.38 \text{ L/h}$ ,覆膜完成后,在滴灌带两侧水平距离  $0.25 \text{ m}$  处种植作物。黄瓜定植时,为保证黄瓜缓苗率,各处理统一灌水  $25 \text{ mm}$ 。此后,根据试验方案进行灌溉。滴灌布置示意图及取样点分布见图 1。

黄瓜各处理施肥时间统一,分别为种植前施底肥,撒施腐熟的有机肥  $225 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,施复合肥  $750 \text{ kg/hm}^2$ 。生长期追肥,每次肥料用量根据处理设置而异。追肥均采用随水施肥的方式,灌水  $15 \text{ mm}$ ,肥料在灌水  $3/4 \sim 4/5$  时施完,剩余水量用于冲洗管道内残留肥料。

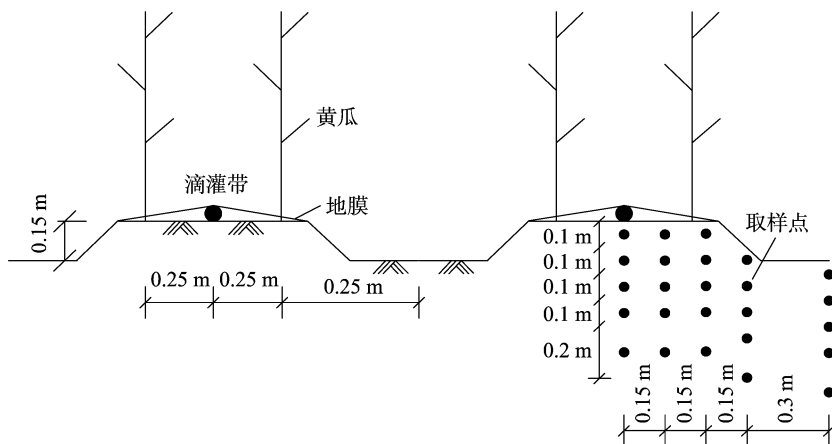


图1 滴灌布置示意图及取样点分布

试验设置不同处理灌溉下限 ( $W$ )、氮素施用量 ( $N$ ) 和钾施用量 ( $K$ )。灌溉下限分别为  $20 \text{ cm}$  处田间持水量的  $65\%$  ( $W_1$ )、 $75\%$  ( $W_2$ )、 $85\%$  ( $W_3$ ); 氮素施用量设低氮 ( $N_1$ )、中氮 ( $N_2$ )、高氮 ( $N_3$ ) 等 3 个水平; 钾施用量设低钾 ( $K_1$ )、中钾 ( $K_2$ )、高钾 ( $K_3$ ) 等 3 个水平。其中  $N_2$  处理和  $K_3$  处理根据目标产量和产量理论需肥量计算,  $N$  素施用量为  $252 \text{ kg/hm}^2$ ,  $K_2O$  施用量为  $351 \text{ kg/hm}^2$ 。高氮和高钾施用量增加

$30\%$ , 低氮和低钾施用量减小  $30\%$ 。施肥量  $60\%$  用量作为底肥施入, 剩余用量分别在坐果期、始收期、盛果期和盛采期追施, 每次追施肥量为总量的  $10\%$ 。所施用的肥料为尿素 (含  $N 46\%$ ) 和硫酸钾 (含  $K_2O 50\%$ ), 各处理设计如表 1 所示。试验在 3 个大棚中进行, 每个大棚内 55 条垄, 两侧选出 5 条垄不作处理, 即中间 50 条垄开展试验, 每 5 条垄为 1 个小区 ( $7.5 \text{ m} \times 7.0 \text{ m}$ ), 单个大棚划分为 10 个小

区,随机布置 9 个处理(空余 1 个小区无处理),每个大棚作为 1 个重复,每个处理设 3 次重复。田间

管理工作聘请当地农业生产技术人员负责,参考当地经验做法。

表 1 大棚黄瓜水肥一体化正交试验设计

试验处理	水平组合	试验因素		
		灌水下限	施氮量	施钾量
1	W <sub>1</sub> N <sub>1</sub> K <sub>1</sub>	65% θ <sub>田</sub>	70% N <sub>目标</sub>	70% K <sub>目标</sub>
2	W <sub>1</sub> N <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	65% θ <sub>田</sub>	100% N <sub>目标</sub>	100% K <sub>目标</sub>
3	W <sub>1</sub> N <sub>3</sub> K <sub>3</sub>	65% θ <sub>田</sub>	130% N <sub>目标</sub>	130% K <sub>目标</sub>
4	W <sub>2</sub> N <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	75% θ <sub>田</sub>	70% N <sub>目标</sub>	100% K <sub>目标</sub>
5	W <sub>2</sub> N <sub>2</sub> K <sub>3</sub>	75% θ <sub>田</sub>	100% N <sub>目标</sub>	130% K <sub>目标</sub>
6	W <sub>2</sub> N <sub>3</sub> K <sub>1</sub>	75% θ <sub>田</sub>	130% N <sub>目标</sub>	70% K <sub>目标</sub>
7	W <sub>3</sub> N <sub>1</sub> K <sub>3</sub>	85% θ <sub>田</sub>	70% N <sub>目标</sub>	130% K <sub>目标</sub>
8	W <sub>3</sub> N <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	85% θ <sub>田</sub>	100% N <sub>目标</sub>	70% K <sub>目标</sub>
9	W <sub>3</sub> N <sub>3</sub> K <sub>2</sub>	85% θ <sub>田</sub>	130% N <sub>目标</sub>	100% K <sub>目标</sub>

注:表中 θ<sub>田</sub> 为土壤田间持水量;N<sub>目标</sub> 为目标产量理论施氮量;K<sub>目标</sub> 为目标产量理论施钾量。

1.3 测定指标与方法

土壤含水量通过 TRIME 测定,每日 08:00 读数指导灌溉。在黄瓜盛采期追肥后 1 周,用土钻取土样,取样点位置为距离滴头水平距离 0、15、30、45、75 cm 处,取样深度为 0~10、10~20、20~30、30~40、40~60 cm,土样 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量由辽宁省农业科学院测试分析中心测定。常规数据整理由 Excel 2010 完成,分析单因素对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量影响时取单因素平均值,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 剖面分布采用 Surfer 8.0 绘制,正交极差和方差分析由 SPSS 20.0 完成。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉下限土壤剖面 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 分布特征

不同灌溉下限 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量与分布如图 2 所示,各处理 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 空间分布形状相近,在滴头正下方 20 cm 以下,水平距离 20 cm 以内,均出现 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 低含量区域,含量低于 30 mg/kg;在垄坡和垄沟交汇处是剖面 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量最高区域,在

W<sub>1</sub> 和 W<sub>2</sub> 处理中,含量高于 120 mg/kg,在 W<sub>3</sub> 处理中含量达到 90 mg/kg;在垄台、垄坡和垄沟 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 表聚明显,表层 0~10 cm 含量多高于 60 mg/kg;此外,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 空间分布具有显著的梯度分布特点,越接近表层,含量梯度越大。W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub> 和 W<sub>3</sub> 处理剖面 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 平均含量分别为 54.4、57.3、53.0 mg/kg,即随着灌溉下限的增大,剖面 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量有先增大后减小的趋势。

不同水平距离 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量变化如图 3-A 所示,在水平方向上,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量总体变化趋势为随滴头距离的增大,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量先增大后减小。距滴头 0、15 cm 处 W<sub>1</sub> 处理 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量均值最小,约为 32 mg/kg,W<sub>2</sub> 处理和 W<sub>3</sub> 处理含量均约为 40 mg/kg,高出 W<sub>1</sub> 处理 25.0%;30 cm 处 W<sub>2</sub> 处理和 W<sub>1</sub> 处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量分别增至 59.6、63.6 mg/kg,W<sub>3</sub> 处理增量较小,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量为 51.0 mg/kg;45 cm 处各处理 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量均进一步增大,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在 75.7~77.2 mg/kg 之间,

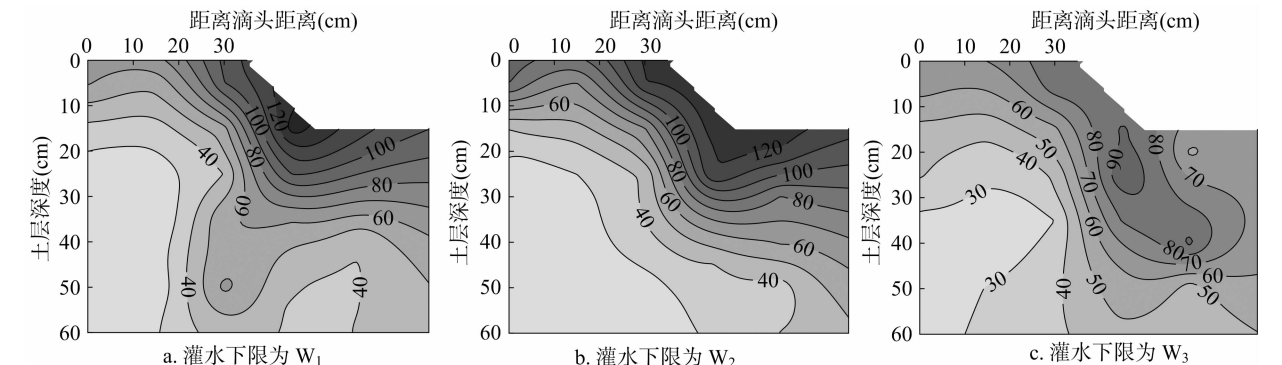
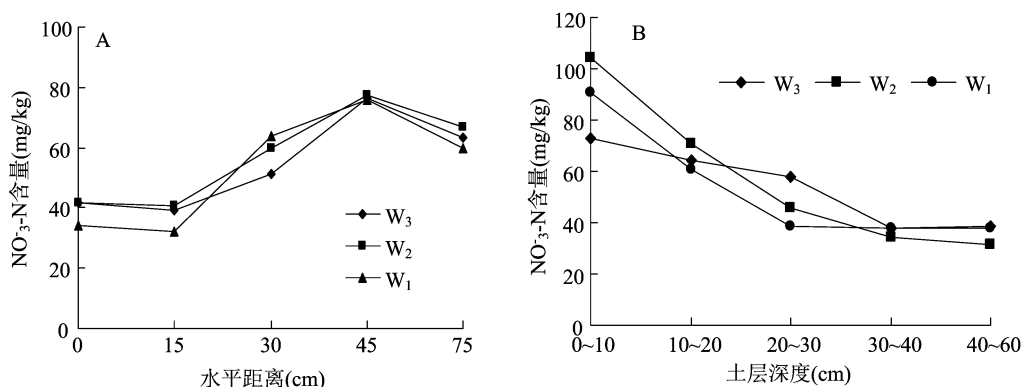


图2 不同灌溉下限土壤剖面 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 分布

图3 不同水平距离(A)和土层深度(B)下土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量变化

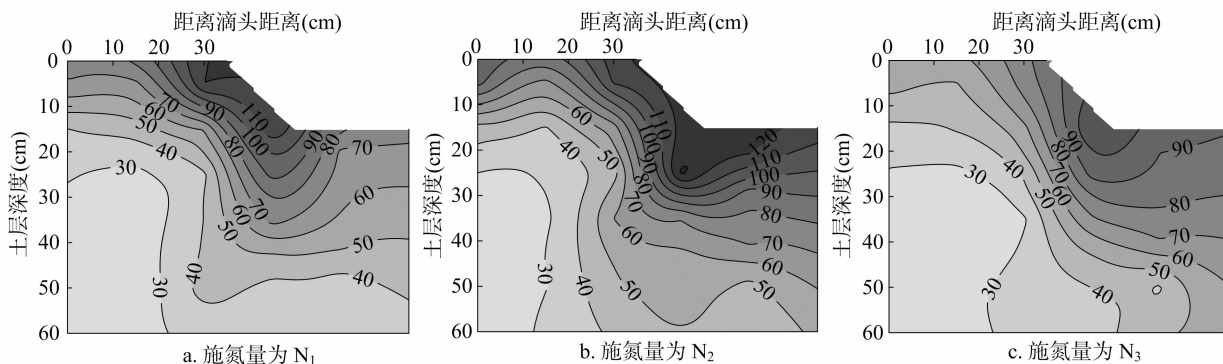
变幅仅为 2.0%, 处理之间差异较小; 垄中 (75 cm 处)  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量下降, 其中  $W_1$  处理减幅最大, 降低 20.9%,  $W_2$  处理减幅最小, 减少 13.2%; 表明灌溉下限对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  水平分布的影响主要在滴头附近区域, 且在低灌溉下限控制下  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量较小。

在垂直方向上,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量总体变化趋势为随土层深度增大而减小 (图 3-B)。在 0~10 cm 处  $W_2$  处理  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量最高, 约为 104.4 mg/kg, 分别高出  $W_3$  处理和  $W_1$  处理 43.5%、15.4%; 10~20、20~30 cm 处  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量较表层急剧下降,  $W_3$  处理在 20~30 cm 深度含量高于其他处理, 而  $W_1$  处理含量最低; 30 cm 以下土层,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量相对稳定, 减幅小,  $W_2$  处理  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量最低; 这

表明灌溉下限控制越高,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  越集中于中下层土壤。

## 2.2 不同施氮量土壤剖面 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 分布特征

不同施氮量土壤剖面  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量与分布如图 4 所示, 不同施氮处理滴头正下方均有“Λ”字形低  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量区域,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  主要在“Λ”字外累积, 其分布特征与不同灌溉下限条件下  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  分布特征相同;  $N_1$  处理和  $N_3$  处理  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  在垄坡的富集较  $N_2$  处理明显,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量高于 110 mg/kg; 在近地表含量梯度变化也高于  $N_2$  处理。  $N_1$ 、 $N_2$  和  $N_3$  剖面  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  平均含量分别为 52.0、50.4、62.3 mg/kg, 即低氮和中氮处理用量引起剖面中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量差异较小; 随着施氮的增加, 土壤剖面中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量有增大的趋势。

图4 不同施氮量土壤剖面  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  分布

由图 5 可知, 在水平方向上,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量总体变化趋势为 0~15 cm 时  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量变化小, 15~45 cm 时  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量迅速增大并在 45 cm 处达到峰值 (70.4~87.2 mg/kg), 45~75 cm 时  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量急剧减小; 在近滴头 45 cm 范围内  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量平均增加 105.5%, 从垄坡到垄沟含量平均下降 17.0%。  $N_3$  处理不同水平距离  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量均高于其他处理, 其中 0~15 cm 时差距较小, 仅高出

1.5~10.3 mg/kg, 随着距离的增加差异增大, 45 cm 处较  $N_2$  处理和  $N_1$  处理均高出 23.8%;  $N_1$  处理在 0~45 cm 内  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量高于  $N_2$  处理, 但垄沟中含量低于  $N_2$  处理, 差值因距离变化而异, 没有明显的规律; 表明当施氮量高于中氮处理施氮量时, 距离滴头不同水平位置  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量均会因施氮量的增加而增加, 反之施用量引起的水平方向含量差异不明显。在垂直方向上,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量总体变化

趋势为随土层深度增大而减小,且  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量的减小幅度也随着土层深度的增加而减小,表层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量从 75.5 ~ 103.7 mg/kg (0 ~ 10 cm 时) 减少到 44.6 ~ 50.3 mg/kg (10 ~ 20 cm 时),下降 48.5% ~ 62.4%; 而 30 ~ 60 cm 土层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量差异范围为 1.4 ~ 2.3 mg/kg,降幅低于 5.3%。各处理之间,  $\text{N}_3$  处理不同深度土层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量均高于  $\text{N}_2$  处理和  $\text{N}_1$  处理,但随着深度增加,差异逐

渐减小,如  $\text{N}_3$  处理与  $\text{N}_2$  处理差异由 0 ~ 10 cm 土层的 28.3 mg/kg 减少到 40 ~ 60 cm 土层的 2.3 mg/kg;  $\text{N}_1$  处理和  $\text{N}_2$  处理除表层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量存在差异外,10 cm 以下土层含量均接近(图 5); 表明高施氮量对不同深度土层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量有明显提升作用,当施氮量低于中氮处理施氮量时,施氮量对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量垂直方向上的分布影响不明显。

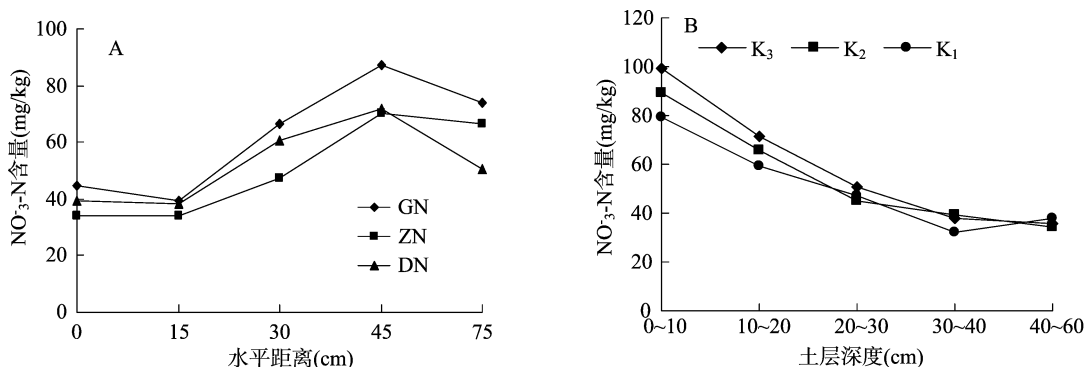


图5 不同水平距离(A)和土层深度(B)土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量变化

### 2.3 不同施钾量土壤剖面 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 分布特征

不同施钾量  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量与分布如图 6 所示,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  分布形式与不同灌溉下限及施氮量条件下分布一致,剖面中心存在  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  低含量区,垄坡和垄沟具有明显的表聚性;垄坡和垄沟  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含

量和变化梯度随着施钾量的增加而增大。  $\text{K}_1$ 、 $\text{K}_2$  和  $\text{K}_3$  剖面  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  平均含量分别为 59.0、54.6、51.1 mg/kg,即随着施钾量的增加,土壤剖面  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量有减小的趋势。

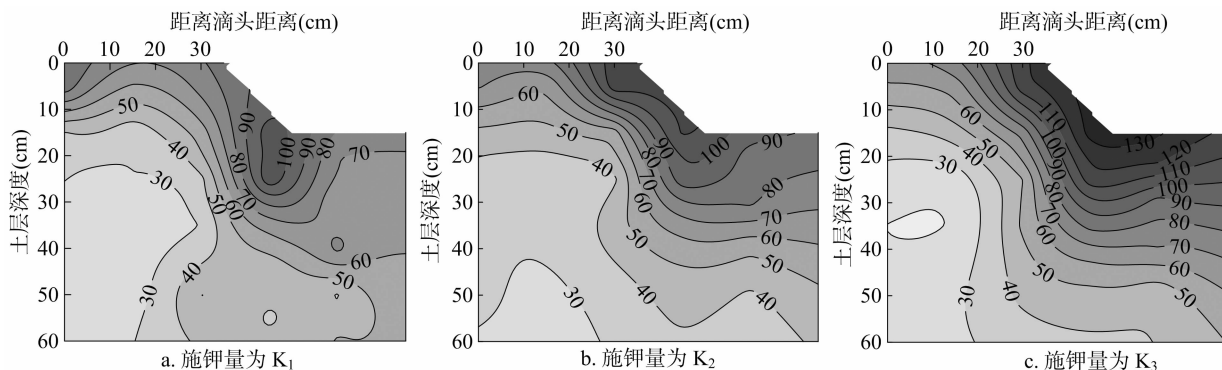


图6 不同施钾量土壤剖面  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  分布

由图 7 可知,在水平方向上,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量随着到滴头距离的增大先增大后减小,各处理  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量峰值均出现在水平距离 45 cm 处。距滴头 0 ~ 15 cm 内  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量相对稳定,不同处理  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量在 33.4 ~ 43.5 mg/kg 范围内,差异较小;在水平距离为 30 ~ 75 cm 时,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量随着施钾量的增加而增大,  $\text{K}_3$  处理高出  $\text{K}_1$  处理 13.3 ~ 17.3 mg/kg,增幅达 19.5% ~ 35.0%,但在 45 ~ 75 cm 时,  $\text{K}_2$  处理和  $\text{K}_1$  处理  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量接近(图 7); 这表明施钾量对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  水平分布的影响主要

在 15 cm 以外,在施钾量高于中钾处理施用量时,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  有明显的提高。在垂直方向上,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量总体变化趋势为随土层深度增大而减小。在 0 ~ 20 cm 内,各处理  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量迅速减小,减幅为 24.7% ~ 28.3%,处理之间  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量表现为  $\text{K}_3 > \text{K}_2 > \text{K}_1$ ,表层差异最大,  $\text{K}_3$  高出  $\text{K}_1$  处理 26.1%,随着土层深度增加,处理之间差异减小; 20 cm 土层以下  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量变化趋缓,含量变化在 9.2 ~ 14.7 mg/kg 范围内,处理之间  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量相近(图 7); 这表明在垂直方向上施钾量对

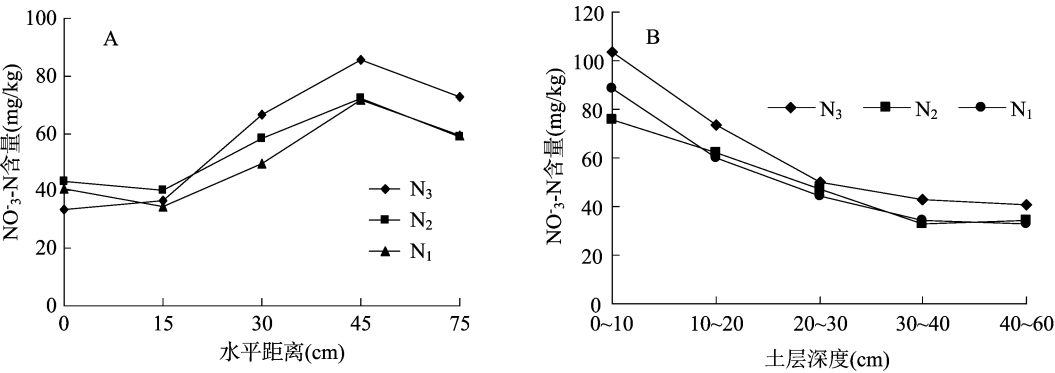


图7 不同水平距离(A)和土层深度(B)土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量变化

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量的影响主要在 0~20 cm 土层,钾素施用量的增加可以促进 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量增加。

2.4 土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量影响因素分析

滴灌水肥一体化 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量极差分析如表 2 所示,不同灌溉下限 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量表现为 W<sub>2</sub> > W<sub>3</sub> > W<sub>1</sub>,不同氮量施用条件下 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量表现为 N<sub>3</sub> > N<sub>1</sub> > N<sub>2</sub>,施钾量对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量的影响为 K<sub>3</sub> > K<sub>2</sub> > K<sub>1</sub>,即 75% 田间持水量、高施氮量和高施钾量条件下土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量较高,但方差分析结果表明,灌溉下限、施氮量和施钾量对土壤剖面 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量影响均未达到显著水平(表 3)。试验因素对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量的影响表现为施氮量 > 施钾量 > 灌溉下限(表 2),说明滴灌水肥一体化对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量具有一定的调控能力,施氮量从根本上改变了输入土壤中的氮量,是剖面 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量的主要影响因素,而灌溉对剖面 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量影响较小。根据极差分析结果可知,N<sub>3</sub>K<sub>3</sub>W<sub>2</sub> 组合是提高剖面 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量的最优组合。

3 讨论与结论

水分是 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 运移的载体,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 在土壤中的分布取决于土壤水分的运动。滴灌条件下,土壤水分从点源径向扩散,尽管滴头水力性能、土壤质地和作物吸水等会影响土壤水分运动,总体上水分分布呈半球或椭球状;球体半径在灌溉作用下持续增大,但湿润峰的推进逐渐趋缓;湿润体内,点源处土壤水分饱和,向外径向递减<sup>[11]</sup>。由于 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 不存在专性吸附,易在土壤水分中扩散和迁移,水肥一体化随水进入土体的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 在水势梯度作用下径向运动,因此,在本试验中,滴灌的水分运动特征是 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 分布的主要影响因素,滴头正下方

表 2 正交试验 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量极差分析

试验处理	试验因素			NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N 含量 (mg/kg)
	W	N	K	
W <sub>1</sub> N <sub>1</sub> K <sub>1</sub>	1	1	1	38.3
W <sub>1</sub> N <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	1	2	2	49.9
W <sub>1</sub> N <sub>3</sub> K <sub>3</sub>	1	3	3	70.8
W <sub>2</sub> N <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	2	1	2	60.5
W <sub>2</sub> N <sub>2</sub> K <sub>3</sub>	2	2	3	48.8
W <sub>2</sub> N <sub>3</sub> K <sub>1</sub>	2	3	1	62.5
W <sub>3</sub> N <sub>1</sub> K <sub>3</sub>	3	1	3	57.2
W <sub>3</sub> N <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	3	2	1	52.4
W <sub>3</sub> N <sub>3</sub> K <sub>2</sub>	3	3	2	53.5
K <sub>1</sub> (mg/kg)	159.0	156.0	153.2	
K <sub>2</sub> (mg/kg)	171.8	151.2	163.9	
K <sub>3</sub> (mg/kg)	163.2	186.8	176.9	
k <sub>1</sub> (mg/kg)	53.0	52.0	51.1	
k <sub>2</sub> (mg/kg)	57.3	50.4	54.6	
k <sub>3</sub> (mg/kg)	54.4	62.3	59.0	
优平均	W <sub>2</sub>	N <sub>3</sub>	K <sub>3</sub>	
R <sub>j</sub>	4.3	11.9	7.9	
主次顺序	N > K > W			

注:K<sub>1</sub>、K<sub>2</sub>、K<sub>3</sub> 分别为试验因素 1、2、3 水平 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量之和;  
k<sub>1</sub>、k<sub>2</sub>、k<sub>3</sub> 分别为试验因素 1、2、3 水平 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量的平均值;优平均为某因素下均值最大的水平;极差(R<sub>j</sub>)为最大均值与最小均值之差。

表 3 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量正交方差分析

试验因素	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
W	28.5	2	14.2	0.088	0.919
N	249.7	2	124.8	0.776	0.563
K	93.1	2	46.5	0.289	0.776
误差	321.9	2	161.0		

土壤在长期淋洗作用下,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失,成为土壤剖面 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量最低区域;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 随水运动到垄坡和垄沟后,随着土壤水分的消耗而累积,尤其是表土在蒸发作用下,有明显的表聚特征。

灌溉下限土壤水分含量设置越高,湿润体含水量长期保持在较高水平,灌溉频繁,且每次灌溉初

始含水量高,水分运移速度较大,土壤中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  容易淋洗<sup>[12]</sup>;灌溉下限越低,单次灌溉水量越多,土壤中充水孔隙较多,水分连续性较好,水流在土壤中流动所受的阻力减小<sup>[13]</sup>,也会导致  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  淋洗到深层土壤中,因此,本试验中,高水分下限控制为少量多次灌溉,低水分下限控制为大水量小频率灌溉,部分  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  淋出剖面或分布在距离滴头较远位置,剖面  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量均低于 75% 田间持水量作为土壤水分控制下限处理。施氮是土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量增加的主要途径之一,Kiggundu 等研究表明, $\text{NO}_3^- - \text{N}$  随着养分使用量增加而增加,同时增大淋失风险<sup>[14]</sup>,本试验结果也表明随着施氮量增加,剖面  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量提高,这与前人的研究结果<sup>[14]</sup> 一致。尽管钾素用量对土壤氮素影响研究报道较少,但研究表明,施钾可提高追施氮肥在土壤中的残留量<sup>[15]</sup>;可降低氮肥的挥发损失,如当尿素和氯化钾以 1 : 1 同步追施可使尿素中的氨挥发损失量从 42% 降低到 4.6%<sup>[16]</sup>,氮素损失量减少 50%<sup>[17]</sup>。本试验结果表明增加施钾量可提高土壤剖面  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量。此外,在滴灌灌溉条件下,因施氮量和施钾量增加的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量主要在距离滴头水平距离 15 cm 以外区域,这一区域与作物根系分布相一致,为作物氮素吸收提供了有利条件。

由此可见,滴灌的水分运动和分布特性决定了滴灌水肥一体化氮素的分布;灌溉下限,施氮量和施钾量通过改变  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的运移速度、浓度和阻力等动力学参数,改变剖面  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量,但未从根本上改变  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的分布形式;施氮量对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量影响最大,其次为施钾量,灌溉下限对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量影响最小。

#### 参考文献:

- [1] Zhu J H, Li X L, Christie P, et al. Environmental implications of low nitrogen use efficiency in excessively fertilized hot pepper (*Capsicum frutescens* L.) cropping systems [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2005, 111 (1): 70 - 80.
- [2] Hu Y C, Song Z W, Lu W L, et al. Current soil nutrient status of intensively managed greenhouses [J]. Pedosphere, 2012, 22 (6): 825 - 833.
- [3] 黄国勤, 王兴祥, 钱海燕, 等. 施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策 [J]. 生态环境, 2004, 13 (4): 656 - 660.
- [4] Ajdary K, Singh D K, Singh A K, et al. Modelling of nitrogen leaching from experimental onion field under drip fertigation [J]. Agricultural Water Management, 2007, 89 (1/2): 15 - 28.
- [5] Freeman B M, Blackwell J, Garzoli K V. Irrigation frequency and total water application with trickle and furrow systems [J]. Agricultural Water Management, 1976, 1 (1): 21 - 31.
- [6] Singandhupe R B, Rao G, 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.
- [7] Sharmasarkar F C, Sharmasarkar S, Miller S D, et al. Assessment of drip and flood irrigation on water and fertilizer use efficiencies for sugarbeets [J]. Agricultural Water Management, 2001, 46 (3): 241 - 251.
- [8] Li J S, Zhang J J, Ren L. Water and nitrogen distribution as affected by fertigation of ammonium nitrate from a point source [J]. Irrigation Science, 2003, 22 (1): 19 - 30.
- [9] 井涛, 樊明寿, 周登博, 等. 滴灌施氮对高垄覆膜马铃薯产量、氮素吸收及土壤硝态氮累积的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18 (3): 654 - 661.
- [10] 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.
- [11] Bhatnagar P R, Chauhan H S. Soil water movement under a single surface trickle source [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95 (7): 799 - 808.
- [12] 王振华, 郑旭荣, 任杰, 等. 土壤初始含水率对地下滴灌线源入渗土壤水分运动影响的试验研究 [J]. 灌溉排水学报, 2008, 27 (5): 77 - 79.
- [13] 任杰. 地下滴灌灌水设计参数对土壤水分运动规律的影响研究 [D]. 石河子: 石河子大学, 2008.
- [14] Kiggundu N, Migliaccio K W, Schaffer B, et al. Water savings, nutrient leaching, and fruit yield in a young avocado orchard as affected by irrigation and nutrient management [J]. Irrigation Science, 2012, 30 (4): 275 - 286.
- [15] 于振文, 梁晓芳, 李延奇, 等. 施钾量和施钾时期对小麦氮素和钾素吸收利用的影响 [J]. 应用生态学报, 2007, 18 (1): 69 - 74.
- [16] Rappaport B D, Axley J H. Potassium chloride for improved urea fertilizer efficiency [J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48 (2): 399 - 401.
- [17] Gameh M A, Angle J S, Axley J H. Effects of urea potassium chloride and nitrogen transformations on ammonia volatilization from urea [J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54 (6): 1768 - 1772.