

# 水氮供应对温室黄瓜氮素吸收及土壤硝态氮分布的影响

李静<sup>1,2</sup>, 张富仓<sup>2</sup>, 江明杰<sup>3</sup>, 方栋平<sup>4</sup>, 王海东<sup>2</sup>

(1. 陕西省土地工程建设集团, 西安 710075; 2. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100;  
3. 陕西东佳实业有限公司, 西安 710075; 4. 浙江省水利水电勘测设计院, 杭州 310002)

**摘要:** 采用温室小区试验, 研究了不同水氮供应条件对温室黄瓜氮素吸收及土壤硝态氮分布的影响。结果表明, 氮素在植株体各器官中的累积量随生育期的推进不断增大, 在盛果期累积量达到最大, 且总体增长趋势呈“S”型; 在不同生育期, 黄瓜各器官中氮累积量均表现为叶>茎>根, 而在盛果期, 果实中的氮累积量达到最大, 且随灌水量和施肥量的增加而增加; 灌水量、施氮量及水氮交互作用对黄瓜氮累积量、*UPE*及*FPF*均有显著性影响, 在同一灌水条件下, *NUE*、*UPE*及*FPF*均随着施氮量的增加而减少, 而对于同一施氮水平, *UPE*、*FPF*均随着灌水量的增加显著提高, *NUE*在不同灌水量条件下变化趋势则有所不同。灌水量及施氮量对土壤硝态氮分布有重要影响, 且施氮量是影响土壤硝态氮累积的关键因素, 随灌水量的增加表层土壤中硝态氮累积量呈逐渐降低的趋势, 而随施氮量的增加则逐渐增大, 且施氮量越高, 淋洗现象越明显。

**关键词:** 温室黄瓜; 水氮供应; 滴灌施肥; 氮素吸收; 硝态氮

中图分类号: S626.5; S642.2

文献标志码: A

doi:10.13522/j.cnki.gggs.2017.03.009

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.

## 0 引言

黄瓜在我国西北地区设施蔬菜生产中占重要地位, 其增产潜力大, 对水分及养分需求量大, 并且在所有矿物质养分中, 氮素对促进作物生长发育和增产的效果最为显著。为追求高产丰收, 传统灌水与施肥现象极为普遍, 不仅严重浪费水资源, 还会导致土壤渗漏、氮素挥发、硝态氮淋失等损失, 对农业环境形成潜在威胁<sup>[1-5]</sup>。而相比于传统的灌溉施肥方式, 滴灌施肥技术更能灵活准确控制水肥投入量及施入点, 达到水肥同步效果, 不仅满足作物对养分的正常需求, 而且能够有效提高氮肥利用率, 避免氮素淋失<sup>[6-7]</sup>。目前, 国内外关于合理的水肥投入提高蔬菜氮素吸收及利用已有了大量研究<sup>[8-11]</sup>。研究发现合理的水分供应可以促进肥料转化和吸收, 从而提高肥料利用率<sup>[12]</sup>。侯振安等<sup>[13]</sup>研究发现, 滴灌施肥可以定量供给作物水分和养分, 并使土壤保持适宜的水分和养分浓度, 有效提高水分和养分利用率。也有研究<sup>[10, 14]</sup>表明, 适量提高施肥量和灌水量能提高氮肥的利用率, 而过量灌水会使硝态氮向土壤下层运移, 引起土壤硝态氮的淋失, 进而增加对地下水的污染。杨莉琳等<sup>[15]</sup>通过研究发现, 过量施氮是造成土壤中硝态氮淋失的根本原因, 而且硝态氮在土壤剖面的分布与土壤质地、施肥量和灌水条件等密切相关。淮贺举等<sup>[16]</sup>研究也表明, 作物吸氮量与施氮量之间具有正相关效应, 但不合理的氮肥供应会造成土壤中硝态氮的大量累积, 过量灌水会使其向土层下方淋溶, 对地下水造成威胁。因此探究合理的水氮供应, 不仅能提高水肥利用效率, 而且对改善农田水肥环境和缓解该地区水资源紧缺有重要的意义。以往的研究多以灌水量和施肥量作为单一因子进行分析来寻求适合作物生长的最佳处理, 而有关水肥一体化条件下的研究报道比较少, 另外, 其作物品种、土壤特点、种植密度以及气候等各种因素, 导致得出的研究结论也大不相同。本试验通过研究黄瓜在各水氮供应条件下, 不同

收稿日期: 2016-01-11

基金项目: “十二五”国家 863 计划项目(2011AA100504); 教育部高等学校创新引智计划项目(B12007)

作者简介: 李静(1990-), 女。硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: muzizheng1990@163.com

通信作者: 张富仓(1962-), 男。教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

生育期氮素在植株中的分布情况、土壤中氮素空间分布的变化规律以及氮素的吸收利用等方面,探求有利于西北地区温室养分吸收利用的水氮供应模式,为确定合理的滴灌施肥制度提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区基本概况

试验于2013年在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室日光温室中进行,试验地位于北纬34°18',东经108°40'。试验站海拔为521 m,年平均气温为13℃,年降水量为550~600 mm,降水主要集中在7—9月。站内设有国家气象站,按照国家气象局的《地面气象观测规范》标准进行气温、湿度、降水、日照、水面蒸发、风速、气压和地温观测,并设有自动气象站,自动记录气温、相对湿度、太阳辐射和风速。供试土壤为重壤土,耕作层土壤理化性质为:有机质质量分数14.1 g/kg,土壤体积质量为1.43 g/cm<sup>3</sup>,田间持水率为23.67%(质量含水率),土壤pH值为7.8,全氮量为0.87 g/kg,碱解氮量、速效磷量、速效钾量分别为63、58.5、146.8 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验设灌水量与施氮量2个因素,其中灌水量设置3个水平,分别为低水(W<sub>1</sub> 60% ET<sub>0</sub>)、中水(W<sub>2</sub> 80% ET<sub>0</sub>)和高水(W<sub>3</sub> 100% ET<sub>0</sub>),其中ET<sub>0</sub>为参考作物蒸发蒸腾量;施氮量设置4个水平,分别为对照(N<sub>0</sub>无氮肥)、低氮(N<sub>1</sub> 180 kg/hm<sup>2</sup>)、中氮(N<sub>2</sub> 360 kg/hm<sup>2</sup>)和高氮(N<sub>3</sub> 540 kg/hm<sup>2</sup>)。试验采用完全随机设计,共12个处理,每个处理重复3次,分36个小区(长×宽=6 m×1.25 m)种植。为防止试验处理间相互渗漏影响,试验小区之间用塑料薄膜隔离。试验中氮肥用尿素(含N 46.4%),磷肥用重过磷酸钙(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 44%),钾肥用氯化钾(含K<sub>2</sub>O 60%)。其中磷肥和钾肥用量分别为P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 200 kg/hm<sup>2</sup>和K<sub>2</sub>O 450 kg/hm<sup>2</sup>。定植前,将全部的磷肥、22%的氮肥及33%的钾肥作为基肥施入;苗期施17%的氮肥,具体时间为9月5日,剩余氮肥及钾肥分7次等量追施,间隔时间为7 d,并采用液压比例施肥泵装置控制施肥,具体追肥时间为9月23日、10月1日、10月9日、10月17日、10月25日、11月2日、11月10日。

### 1.3 试验材料

滴灌试验在坐北朝南的日光温室内进行,温室通过屋顶通风口通风,长50 m,宽8 m,有效种植面积为300 m<sup>2</sup>。供试黄瓜品种为“博耐9-1”(Bonai 9-1),于2013年08月21日定植,11月22日拉秧。黄瓜种植方向为南北走向,定植时,以25 mm的缓苗水进行灌溉以保证幼苗的成活率。种植方式为当地典型的起垄覆膜栽培模式,垄高20 cm,宽75 cm,各试验小区种植2行黄瓜,共24株,在2行黄瓜中间布置1条直径8 cm的内镶式滴灌带,滴头间距33 cm,滴头流量为3.6 L/h。黄瓜的生育阶段划分为苗期(20130821—0920)、开花坐果期(0921—1001)、盛果期(1002—1108)、末果期(1109—1122)。全生育期低水(W<sub>1</sub>)、中水(W<sub>2</sub>)和高水(W<sub>3</sub>)灌溉的灌水量分别为126、152和177 mm。

### 1.4 观测项目及方法

植株氮素吸收量的测定:在苗期、开花坐果期、盛果期及末果期,每个试验区随机选取黄瓜3株,将根、茎、叶、果分开,根系用清水冲洗干净,分别放入烘箱,在105℃条件下杀青30 min后,置于75℃条件下烘至恒质量。并将烘干后的干物质粉碎、过0.5 mm筛,用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮,消煮液用凯氏定氮仪(FOSS 2300型)测定植株全氮量<sup>[17]</sup>。计算公式如下:

$$\text{各器官氮吸收量(kg/hm}^2\text{)}=\text{各器官全氮量}\times\text{干物质量}\times\text{种植密度}。 \quad (1)$$

土壤含硝态氮量测定:苗期、开花坐果期、盛果期及末果期分别在滴头正下方垂直观测区间60 cm内以15 cm为一个梯度测定土壤含硝态氮量,并在拉秧后在垂直观测区间100 cm内以10 cm为一个梯度,水平观测区间45 cm内以15 cm为一个梯度取土样测定含硝态氮量。将土样带回室内风干磨细,过5 mm筛,然后用2 mol/L KCL溶液浸提(干土5 g,土液比1:10),再用流动分析(AutoAnalyzer-III,德国Bran+Luebbe公司)测定土壤中含硝态氮量。

植株其他相关指标计算公式<sup>[18]</sup>如下:

$$\text{氮素利用效率(NUE)(kg/kg)}=\text{产量}/\text{植株氮累积吸收量}, \quad (2)$$

$$\text{氮素吸收效率(UPE)(kg/kg)}=\text{植株氮累积吸收量}/\text{氮养分投入量}, \quad (3)$$

$$\text{肥料偏生产力(PFP)(kg/kg)}=\text{产量}/\text{氮、磷、钾养分投入量总和}。 \quad (4)$$

## 1.5 数据处理

采用 DPS v14.10 及 SPSS 18 统计分析软件处理试验数据, 选取 LSD 多重比较进行方差分析, 其中置信度为 95%, 用 Sigma Plot 10.0 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水氮供应水平对黄瓜氮吸收和分配的影响

如表 1 所示, 随着黄瓜生育期的推进, 氮素在植株体各器官中的累积量不断增大, 总体增长趋势呈现“S”型, 表现为在盛果期总氮素累积量急剧增大, 其余生育期增长趋势较缓慢。在不同生育期, 黄瓜各器官中氮累积量均表现为叶 > 茎 > 根, 到达盛果期后, 氮素在果实中的吸收量达到最大。

表 1 水氮供应对黄瓜各器官氮累积量变化的影响

处理	苗期/(kg·hm <sup>-2</sup> )			坐果期/(kg·hm <sup>-2</sup> )			盛果期/(kg·hm <sup>-2</sup> )				末果期/(kg·hm <sup>-2</sup> )				
	叶	茎	根	叶	茎	根	果	叶	茎	根	果	叶	茎	根	
W <sub>1</sub>	N <sub>0</sub>	1.63c	0.54h	0.07e	9.60f	1.64j	0.37d	54.18h	25.72h	9.24f	0.62i	83.51h	27.34h	10.03h	0.69h
	N <sub>1</sub>	1.67c	0.57gh	0.08e	12.56e	1.93i	0.42cd	69.71g	33.63fgh	11.96d	0.73h	96.03g	35.23fgh	12.39g	0.82g
	N <sub>2</sub>	1.72c	0.58g	0.08e	12.85e	1.94i	0.44cd	109.72c	41.16f	13.35c	1.04d	158.75e	42.94f	16.01e	1.08e
	N <sub>3</sub>	1.74c	0.58g	0.08e	12.88e	1.98h	0.45bcd	102.15d	63.85d	14.02c	1.09c	175.08d	64.27d	16.73e	1.16d
W <sub>2</sub>	N <sub>0</sub>	2.56b	0.65f	0.08e	13.22e	4.05g	0.40cd	79.58f	31.43gh	10.60e	0.79g	96.00g	31.48gh	13.26f	0.84g
	N <sub>1</sub>	2.64b	0.7de	0.09d	16.74c	5.22f	0.45bcd	92.95e	40.84f	13.42c	0.90e	107.69f	41.67f	17.63d	0.96f
	N <sub>2</sub>	3.08ab	0.77bc	0.10b	18.58b	5.40e	0.47bc	192.00b	69.73cd	15.66b	1.12c	221.23c	70.67cd	20.98b	1.26c
	N <sub>3</sub>	3.16ab	0.79b	0.10b	18.81b	5.81d	0.53b	194.48b	75.04bc	17.78a	1.19ab	221.47c	77.8bc	22.78a	1.41b
W <sub>3</sub>	N <sub>0</sub>	2.66b	0.67ef	0.09cd	14.85d	5.38e	0.44cd	79.07f	35.65fg	11.34de	0.86f	95.66g	36.43fg	13.07fg	0.97f
	N <sub>1</sub>	3.13ab	0.74cd	0.10bc	18.35b	6.02c	0.48bc	97.72de	52.25e	16.10b	1.06d	113.61f	53.34e	18.88c	1.08e
	N <sub>2</sub>	3.56a	0.77bc	0.12a	19.48ab	6.49b	0.53b	191.05b	79.96ab	17.09a	1.16b	237.42b	83.26ab	20.43b	1.29c
	N <sub>3</sub>	3.60a	0.84a	0.12a	20.58a	8.21a	0.66a	235.97a	84.74a	17.70a	1.22a	273.51a	88.00a	21.24b	1.50a

注 表中数值为平均值(n=12), 同列不同字母表示显著性差异(P<0.05), 下同

苗期植株体总氮吸收量较少, 仅占全生育期氮累积量的 0.9%~2.3%, 并且在总氮吸收量中, 叶的吸氮量占总吸收量的 72%~80%。各器官氮吸收量均随灌水量和施氮量的增加而增加, 植株体最小总吸氮量在 W<sub>1</sub>N<sub>0</sub> 处理条件下获得, 为 2.24 kg/hm<sup>2</sup>, 最大总吸氮量在 W<sub>3</sub>N<sub>3</sub> 处理条件下获得, 为 4.57 kg/hm<sup>2</sup>, 是 W<sub>1</sub>N<sub>0</sub> 处理条件下的 2.04 倍。其中, 在 W<sub>1</sub> 灌水条件下, 不同施氮量对黄瓜总吸氮量无显著差异, 而在 W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub> 灌水条件下, 各施氮量之间出现显著性差异。

开花坐果期植株体氮总累积量占全生育期总氮累积量的 5.0%~12%, 且是苗期总吸氮量的 4~6 倍。与苗期类似, 叶的吸氮量占据绝大比例。在同一施氮量水平下, 各器官氮吸收量均随灌水量的增加而增加, 且相互之间差异显著。在 W<sub>1</sub> 灌水条件下, 植株平均总吸氮量为 14.27 kg/hm<sup>2</sup>, 与之比较, W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub> 条件下的总氮吸收量分别增加了 57%、78%。器官吸氮量与施氮量之间正相关, 其中, 在 W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub> 及 W<sub>3</sub> 灌水条件下, N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub> 施肥处理下的总氮累积量均与 N<sub>0</sub> 处理之间存在显著性差异。

盛果期植株氮素迅速累积, 其总氮累积量占全生育期总氮累积量的 64%~81%, 是开花坐果期总吸氮量的 6~13 倍, 且果实中的吸氮量占总吸收量的 62%~76%。各器官氮累积量均随灌水量的增加而增加, 相比于 W<sub>1</sub> 处理, W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub> 条件下的总氮吸收量分别增加了 52%、67%。与苗期及开花坐果期相比, 盛果期氮素累积量迅速增加, 这是由于生殖器官的成熟, 对养分及水分的需求也急剧增大。与开花坐果期类似, 各器官氮累积量随施氮量的增加也呈现出显著增加趋势, 而且在 W<sub>3</sub> 条件下, 各施肥处理间均存在显著性差异, 这是因为 W<sub>3</sub> 处理下土壤含水率高, 土水势较大, 植株更容易从土壤中吸收水分、养分以满足生长需求, 从而显著提高了自身的氮素累积量。

在末果期, 虽然作物体内养分呈下降趋势, 但由于干物质的不断累积, 其氮总累积量仍呈增长趋势, 但累积量仅占全生育期总氮累积量的 11%~30%。与以上生育期不同, 在末果期叶片的吸氮量少于茎秆吸氮量, 主要归结于末果期植株逐渐衰老, 下部叶片黄化和脱落致使叶片干物质累积增长量少于茎秆增长量的原因。各器官氮累积量均随灌水量、施氮量的增加而增加, 在各灌水条件下, 不同施氮处理间存在显著性差异, 且在 N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub> 及 N<sub>3</sub> 施肥条件下, 各灌水处理间也存在显著性差异。

## 2.2 不同水氮供应水平下的氮效率评价

从表2可看出,灌水量、施氮量对黄瓜氮累积量、*UPE*及*PPF*均有显著性影响,且除灌水量对氮累积量影响外,其余因素均达到极显著水平;施氮量对*NUE*的影响也达到极显著水平,但灌水量对其影响不显著。水氮交互作用对*NUE*、*UPE*及*PPF*有显著影响,对氮累积量的影响达到极显著水平。

表2 水氮供应对黄瓜养分吸收利用效率的影响

处理	氮累积量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	<i>NUE</i> /(kg·kg <sup>-1</sup> )	<i>UPE</i> /(kg·kg <sup>-1</sup> )	<i>PPF</i> /(kg·kg <sup>-1</sup> )	
W <sub>1</sub>	N <sub>0</sub>	121.57g	-	-	54.11d
	N <sub>1</sub>	144.47fg	257.83a	0.80d	44.88g
	N <sub>2</sub>	218.79d	188.44b	0.61f	40.82h
	N <sub>3</sub>	257.24c	162.51c	0.48g	35.13i
W <sub>2</sub>	N <sub>0</sub>	141.58fg	-	-	66.19b
	N <sub>1</sub>	167.95ef	263.42a	0.93b	53.30d
	N <sub>2</sub>	314.14b	157.80c	0.87c	49.08ef
	N <sub>3</sub>	323.46b	154.59c	0.60f	42.02h
W <sub>3</sub>	N <sub>0</sub>	146.14fg	-	-	68.44a
	N <sub>1</sub>	186.91de	256.06a	1.04a	57.66c
	N <sub>2</sub>	342.40b	150.62c	0.95b	51.06e
	N <sub>3</sub>	384.25a	145.43c	0.71e	46.96fg

其中,在各灌水条件下,*NUE*、*UPE*均随着施氮量的增加而减少,在W<sub>1</sub>灌水条件下,相较于N<sub>1</sub>处理,N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>处理下的*NUE*和*UPE*分别减少了27%、37%及24%、41%,且各处理之间差异明显。在W<sub>2</sub>灌水条件下,相较于N<sub>1</sub>处理,N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>处理下的*NUE*和*UPE*分别减少了40%、41%及6.5%、36%,其中N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>处理均与N<sub>1</sub>处理之间有显著性差异,但N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>处理下的*NUE*之间无显著性差异。在W<sub>3</sub>灌水条件下,相较于N<sub>1</sub>处理,N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>处理下的*NUE*和*UPE*分别减少了41%、43%及8.4%、31%,类似的,N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>处理下的*NUE*之间也无显著性差异。数据表明,在W<sub>1</sub>水分条件下,增加施氮量对*NUE*和*UPE*均有明显抑制作用,而在W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>水分条件下,当施氮量达到N<sub>2</sub>条件时,继续增加施氮量,*NUE*没有明显变化,这是因为产量增加速率远大于养分吸收速率所致。对于同一施氮水平,*UPE*均随着灌水量的增加显著提高,而*NUE*在不同灌水量条件下变化趋势则有所不同。其中,对于N<sub>1</sub>、N<sub>3</sub>处理,*NUE*在不同水分处理之间无显著性差异,而在N<sub>2</sub>处理下,W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>处理之间无显著性差异,但均与W<sub>1</sub>之间有显著性差异。

*PPF*在同一灌溉水平下,均随施氮量的增加显著降低;而在同一施肥水平下,则随灌水量增加*PPF*显著提高(W<sub>2</sub>N<sub>2</sub>与W<sub>3</sub>N<sub>2</sub>除外)。其中W<sub>3</sub>N<sub>0</sub>获得最大*PPF*(68.44 kg/kg),W<sub>1</sub>N<sub>3</sub>获得最小*PPF*(35.13 kg/kg),较W<sub>3</sub>N<sub>0</sub>处理减少了49%。在W<sub>1</sub>灌水条件下,N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>条件下的*PPF*较N<sub>1</sub>分别减少了9.0%、22%;在W<sub>2</sub>灌水条件下,N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>条件下的*PPF*较N<sub>1</sub>分别减少了8.0%、21%;而在W<sub>3</sub>灌水条件下,N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>条件下的*PPF*较N<sub>1</sub>分别减少了11%、19%,表明适当减少施氮量可显著提高*PPF*。

## 2.3 水氮供应对各生育期根区土壤剖面垂直硝态氮累积分布的影响

### 2.3.1 苗期作物根区土壤剖面垂直硝态氮累积分布

如图1所示,在相同灌水条件下,土壤硝态氮动态变化主要受施氮量影响而呈现出规律性的变化,在0~30 cm土层范围内均随着施氮量的增加而显著增加,而在40~60 cm土层间变动很小,且各处理在0~60 cm土层间累积量均随着深度的增加呈下降趋势。在W<sub>1</sub>条件下,N<sub>0</sub>处理时,各土层硝态氮累积量之间无显著性差异,而在N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>及N<sub>3</sub>处理条件下,硝态氮累积量最大值均出现在15 cm土层处,且硝态氮累积量均随着土层深度的增加而减少,其中在30 cm处硝态氮累积量显著降低。在W<sub>2</sub>条件下,各处理均在15 cm土层处硝态氮累积量取得最大值(N<sub>0</sub>除外),且较W<sub>1</sub>灌水处理均有不同程度的减少,但在30、45及60 cm处其硝态氮累积量均高于W<sub>1</sub>处理。在W<sub>3</sub>条件下,N<sub>0</sub>处理时,硝态氮累积量在0~60 cm土层间随着深度的增加而增加,而在N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>及N<sub>3</sub>处理条件下,硝态氮累积量最大值均出现在30 cm土层处,且45 cm及60 cm处其累积量均高于W<sub>2</sub>处理。这表明,施氮量是影响土壤硝态氮累积的主要因素。苗期由于氮肥还未随水完全下渗,致使硝态氮在表层土壤分布较多,但随着灌水量的增加,下层土壤中的硝态氮累积量则有所增加,可能是由于表层土壤中部分硝态氮随水迁移到30~60 cm土层导致的。

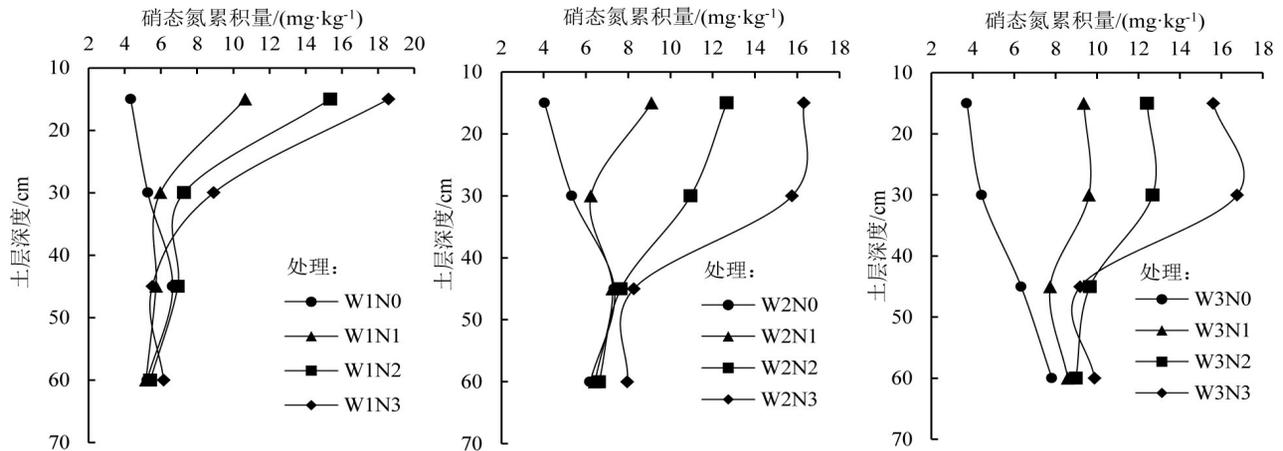


图1 苗期不同水氮供应条件下根区土壤剖面垂直硝态氮累积分布

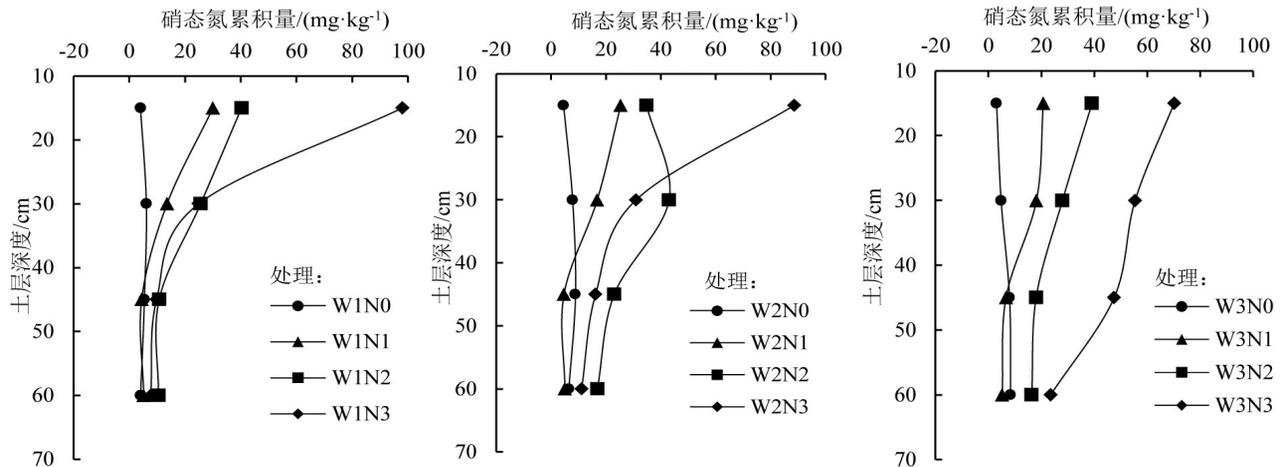


图2 坐果期不同水氮供应条件下根区土壤剖面垂直硝态氮累积分布

### 2.3.2 坐果期作物根区土壤剖面垂直硝态氮累积分布

如图2所示,与苗期相比,在不同灌水条件下, $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ 处理的土壤硝态氮累积量均有明显提高。与苗期类似,0~30 cm土层间的硝态氮累积量明显高于45~60 cm土层间。在 $W_2$ 条件下, $N_1$ 、 $N_3$ 处理时,硝态氮累积量最大值均出现在15 cm土层处,而在 $N_2$ 处理下,最大值则出现在30 cm土层处,比15 cm处高24%,这是由于 $W_2N_2$ 处理条件下形成的根区环境较适宜作物根系吸收并生长,导致植株根系生长快于其余处理,水肥向根系迁移造成的。

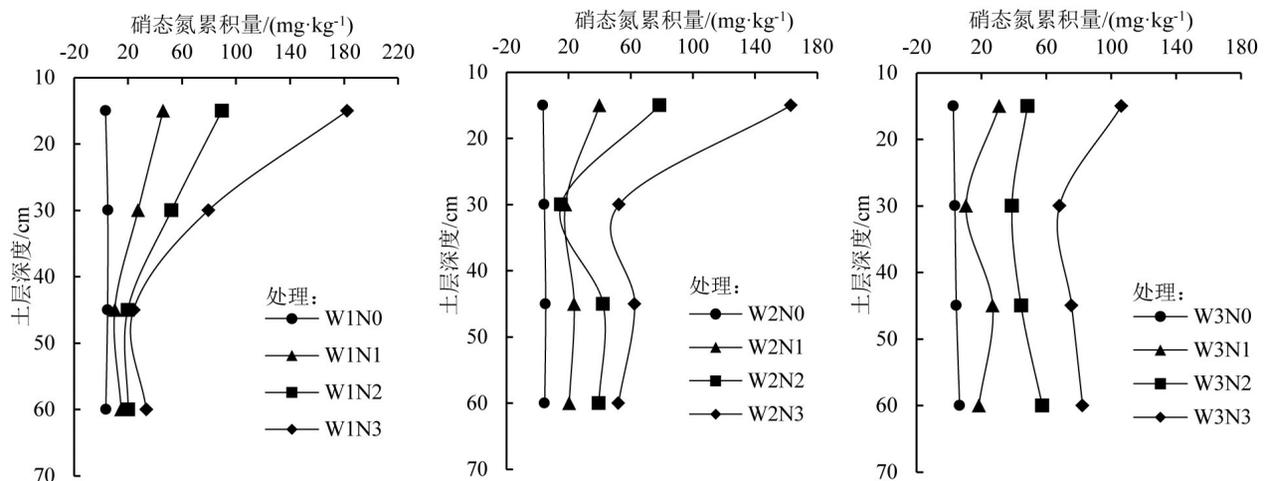


图3 盛果期不同水氮供应条件下根区土壤剖面垂直硝态氮累积分布

### 2.3.3 盛果期作物根区土壤剖面垂直硝态氮累积分布

图3为黄瓜盛果期各处理不同土壤深度硝态氮累积量的变化图。如图3所示,由于外部氮源的不断供应,盛果期土壤中的硝态氮不断累积,且在0~60 cm土层间硝态氮累积量与施氮量正相关。与苗期、开花坐

果期不同,在W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>灌水条件下,各施氮处理在30~60 cm土层间硝态氮分布较均匀,这是因为随生育期推进,土壤中的硝态氮随水分逐渐往下迁移造成的,而表层土壤硝态氮较高可能是由于取土前的一次施肥,其硝态氮未完全入渗导致的。

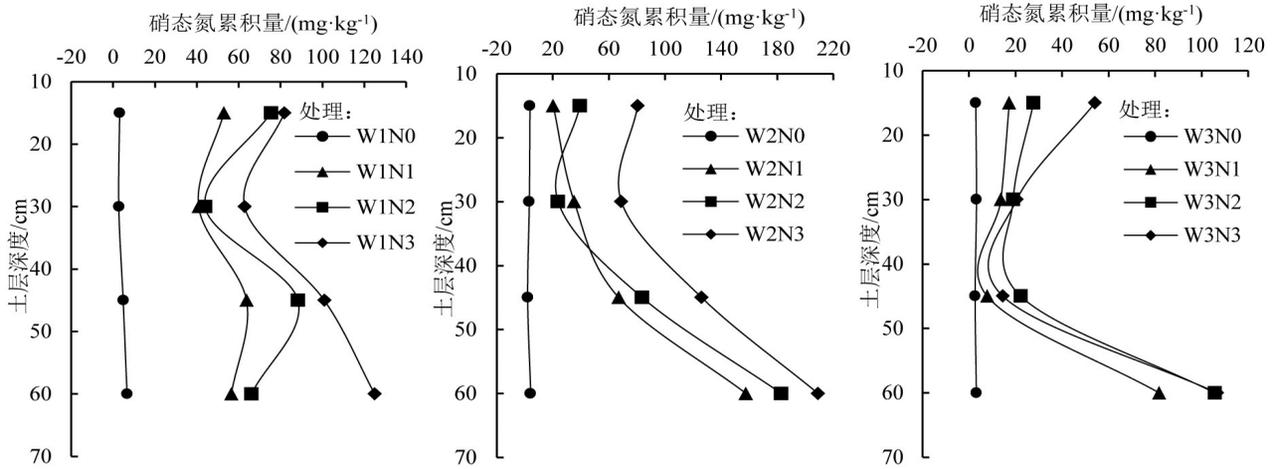


图4 末果期不同水氮供应条件下根区土壤剖面垂直硝态氮累积分布

如图4所示,末果期土壤中的硝态氮不断累积,在不同灌水条件下,其变化趋势也有所不同,且与苗期、坐果期及盛果期土壤硝态氮变化趋势明显不同。在N<sub>0</sub>处理条件下,不同灌水条件对土壤硝态氮累积量无显著差异,且0~60 cm土层间差异也不显著。而在W<sub>1</sub>条件下,在0~60 cm土层间硝态氮累积量均与施氮量正相关,且在N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>处理下均在30 cm土层处累积量最小,45~60 cm土层累积量明显大于0~30 cm,表明在作物生殖生长阶段,植株对养分的需求量较大,导致根区土壤硝态氮减小,也可能是表层土壤养分淋失所致。与W<sub>1</sub>处理不同,在W<sub>2</sub>条件下,N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>处理下的土壤硝态氮累积量均在60 cm土层处达到最高,且与施氮量正相关。在N<sub>1</sub>处理下,土壤硝态氮累积量随土层深度的增大而提高,而在N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>处理下,则随土层深度的增大呈先降低后增大的趋势,在30 cm处硝态氮累积量最小,且45~60 cm处硝态氮累积量明显高于0~30 cm,这是因为土壤含水率较高,土水势较大,一方面使得作物能够更容易从根区土壤中吸收水分、养分以满足生长需求,另一方面也会致使表层土壤中硝态氮向下淋溶。在W<sub>3</sub>条件下,0~45 cm处N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>处理下的土壤硝态氮累积量均低于W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub>处理,而60 cm处N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>处理则明显大于W<sub>1</sub>处理,且N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>处理下的土壤硝态氮累积量均随土层深度的增大呈先降低后增大的趋势,均在45 cm土层处达最低值,且60 cm处的硝态氮累积量大于0~45 cm处硝态氮累积量总和,这表明在高水条件下,土壤水分较高,土壤中硝态氮较为活跃,更易导致硝态氮向下淋溶。

结果表明,随生育期的推进,土壤中的硝态氮不断累积,并随着生育期推进硝态氮不断往下迁移。在末果期,由于外部氮源的减少,作物生长吸收及硝态氮的淋溶导致土壤表层硝态氮累积量减少,而在60 cm处硝态氮累积最大。土壤中硝态氮累积量受灌水及施氮影响显著,随灌水量的增加表层土壤中硝态氮累积量呈逐渐降低的趋势,而随施肥量的增加则呈现逐渐增大的趋势。

### 3 结论

1) 随生育期的推进,氮素在黄瓜各器官中的累积量不断增大,总体增长趋势呈现“S”型,并在盛果期总氮素累积量最大。在不同生育期,黄瓜各器官中氮累积量均表现为叶>茎>根,到达盛果期后,氮素在果实中的吸收量达到最大,且植株氮吸收量随灌水量和施肥量的增加而增大。

2) 在各灌水条件下,NUE、UPE及PPF均随着施氮量的增加而减少,且在低水条件下,增加施氮量对NUE和UPE均有明显抑制作用,而在中水、高水条件下,当施氮量达到中氮条件时,继续增加施氮量,NUE没有明显变化,适当减少施氮量可显著提高PPF。对于同一施氮水平,UPE均随着灌水量的增加显著提高。

3) 土壤中硝态氮随生育期的推进不断累积、不断往下迁移,且表层土壤中硝态氮累积量随灌水量的增加逐渐降低,随施氮量的增加则逐渐增大。在苗期、开花坐果期及盛果期时,0~30 cm土层间硝态氮累积量较高,而在末果期,表层土壤硝态氮累积量逐渐减少,在45~60 cm处含硝态氮量累积最大,且其量与施氮量呈正比,增加灌水量也更容易导致硝态氮向下层土壤淋溶。

## 参考文献:

- [1] 张艳玲,宋述尧,王艳,等. 氮素营养对黄瓜生长发育及产量的影响[J]. 吉林农业科学, 2008, 33(1):43-46.
- [2] 吕殿青,同延安,孙本华. 氮肥施用对环境污染影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1):8-15.
- [3] 李俊良,朱建华,张晓晟,等. 保护地番茄养分利用及土壤氮素淋失[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(2): 126-129.
- [4] 于红梅. 不同水氮管理下蔬菜地水分渗漏和硝态氮淋洗特征的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [5] ZHU J H, LI X L, CHRISTIE P, et al. Environmental implications of low nitrogen use efficiency in excessively fertilizer hot pepper (*Capsicum frutescens* L.) cropping systems[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2005, 111(1): 70-80.
- [6] THOMPSON T L, DOERGE T A, GODEIN R E. Nitrogen and water interactions in subsurface drip-irrigated cauliflower: Agronomic, economic, and environmental outcomes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(1): 412-418.
- [7] KUMAR S, DEY P. Effects of different mulches and irrigation methods on root growth, nutrient uptake, water-use efficiency and yield of strawberry[J]. *Scientia Horticulturae*, 2011, 127(3): 318-324.
- [8] 高兵,李俊良,陈清,等. 不同水氮管理对日光温室番茄产量及土壤无机氮的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(6): 136-140.
- [9] 杨治平,陈明昌,张强,等. 不同施肥措施对保护地黄瓜养分利用效率及土壤氮素淋失影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 57-60.
- [10] VAZQUEZ N, PARDO A, SUSO M L. A methodology for measuring drainage and nitrate leaching in unevenly irrigated vegetable crops[J]. *Plant and Soil*, 2005, 269(1): 297-308.
- [11] 习金根,周建斌,赵满兴,等. 滴灌施肥条件下不同种类氮肥在土壤中迁移转化特性的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(4):337-342.
- [12] CLOTHIER B E, SAUER T J. Nitrogen transport during drip fertigation with urea[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52: 345-349.
- [13] 侯振安,乔贵宾,王志勇,等. 多元整合液态微肥在棉花滴灌上的应用效果研究初报[J]. 新疆农垦科技, 2003(1): 31-33.
- [14] 梁运江,依艳丽,许广波,等. 水肥耦合效应对保护地辣椒肥料氮、磷经济利用效率的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(6): 141-144.
- [15] 杨莉琳,胡春胜. 施肥对华北高产区土壤 $\text{NO}_3^-$ -N淋失与作物 $\text{NO}_3^-$ -N含量及产量的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(5):501-505.
- [16] 淮贺举,张海林,蔡万涛,等. 不同施氮水平对春玉米氮素利用及土壤硝态氮残留的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12):2 651-2 656.
- [17] 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.
- [18] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5):915-924.

## Effects of Water and Nitrogen Supply on Nitrogen Uptake of Greenhouse Cucumber and Nitrate Nitrogen Distribution in Soil

LI Jing<sup>1,2</sup>, ZHANG Fucang<sup>2</sup>, JIANG Mingjie<sup>3</sup>, FANG Dongping<sup>4</sup>, WANG Haidong<sup>2</sup>

(1. Shaanxi Land Construction Group, Xi'an 710075, China; 2. Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

3. Shaanxi Dong Jia M&E Installation Co., LTD, Xi'an 710075, China;

4. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hangzhou 310002, China)

**Abstract:** The greenhouse experiment was conducted to study the effects of different water and nitrogen supply on nitrogen uptake of greenhouse cucumber and nitrate nitrogen distribution in soil. The results showed that nitrogen accumulation in various organs of cucumber increased with the growth stage advancing, and gained the maximum amount of accumulation in full fruit period. In addition, the overall growth trend presented "S" type; In different growth periods, nitrogen accumulation in various organs of cucumber showed that: leaf > stem > root, while nitrogen accumulation in fruit reached the max value during the fruiting period, and increased with the increase of the irrigation and fertilizer amount; Irrigation, nitrogen rate and water and nitrogen interaction had significant influence on nitrogen accumulation, *UPE* and *PPF* of cucumber. Under the same irrigation conditions, *NUE*, *UPE* and *PPF* presented a decreasing trend with the increasing amount of nitrogen. For the same nitrogen levels, *UPE* and *PPF* significantly increased with the increase of irrigation, but the trend of *NUE* varies under the different irrigation conditions. Irrigation and nitrogen rate had a major impact on soil nitrate distribution, and nitrogen rate was the key factor of affecting soil nitrate accumulation. With the increase of irrigation amount, nitrate content in surface soil was gradually decreased, while increased with the increase of nitrogen rate, and the higher nitrogen amount caused the leaching phenomenon more evidently.

**Key words:** greenhouse cucumber; water and nitrogen supply; fertigation; nitrogen uptake; nitrate nitrogen.

责任编辑:赵宇龙