

# 时空亏缺调控灌溉和施氮处理对番茄水氮利用的影响\*

刘小刚<sup>1</sup> 张彦<sup>1</sup> 张富仓<sup>2</sup> 蔡焕杰<sup>2</sup> 李志军<sup>2</sup> 杨启良<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院 昆明 650500; 2. 西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室 杨凌 712100)

**摘要** 为探索节水灌溉条件下蔬菜的水肥高效利用模式,采用番茄盆栽试验,以常规充分灌水为对照,研究了时空亏缺调控灌溉和氮肥处理对番茄营养器官干物质累积、灌溉水分利用效率、氮素累积及土壤水氮分布的影响。在交替灌溉条件下,设置控水时期、灌水水平和施氮水平3因素,控水时期分别为开花座果期和结果期,2个灌水水平分别为高水和低水,3个施氮水平分别为高氮、低氮和无氮,并以常规灌溉作为对照。结果表明:与常规充分灌水处理相比,交替灌溉持续高水处理、交替灌溉开花座果期低水处理、交替灌溉结果期低水处理及交替灌溉持续低水处理分别降低干物质累积总量4.52%、11.93%、17.76%和23.94%,分别降低氮素累积总量1.74%、12.86%、15.50%和22.47%,分别降低氮素干物质生产效率2.24%、3.93%、2.55%和0.89%,而分别增加灌溉水分利用效率12.39%、8.99%、15.02%和12.96%。在交替灌溉条件下,中氮处理的干物质累积、灌溉水分利用效率和氮素累积总量最大。与低氮处理相比,中氮和高氮处理的氮素干物质生产效率分别降低6.87%~12.70%和17.81%~24.38%,土壤硝态氮分别提高31.64%~159.58%和57.37%~297.37%。综合考虑干物质累积、水分利用及氮素累积等因素,番茄适宜的水氮供给模式为交替灌溉持续高水中氮处理:灌水定额为80%W<sub>0</sub>(W<sub>0</sub>为常规充分灌溉的灌水定额,保持土壤含水量为田间持水量的70%~85%),施氮量为0.30 g(N)·kg<sup>-1</sup>(干土)。

**关键词** 时空亏缺调控灌溉 灌水量 施氮量 干物质积累 氮素累积 水氮利用 番茄

中图分类号: S275.3 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2013)11-1350-08

## Effect of spatio-temporal deficit irrigation and nitrogen supply on water and nitrogen use of tomato

LIU Xiao-Gang<sup>1</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>, ZHANG Fu-Cang<sup>2</sup>, CAI Huan-Jie<sup>2</sup>, LI Zhi-Jun<sup>2</sup>, YANG Qi-Liang<sup>1</sup>

(1. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract** For sustainable water use in protected agriculture, crop-specific and water-saving irrigation techniques that do not negatively affect crop productivity must be developed. Globally, successful attempts have been documented regarding the use of deficit irrigation methods. Regulated deficit irrigation (RDI) and controlled alternate partial root-zone irrigation (CRAI) have been used to improve irrigation water use efficiency (IWUE) of various crops. Because nitrogen (N) has been the most widely used fertilizer, N demand was likely to grow in the future. Thus the optimization of water and fertilizer use in vegetable production was a critical water/fertilizer-saving strategy. Four irrigation treatments under CRAI and three N levels were explored for optimum modes of water and fertilizer supply in vegetable production under water-saving irrigation in a pot tomato experiment. The irrigation treatments were W<sub>H</sub>W<sub>H</sub> (high water level through out growth period), W<sub>H</sub>W<sub>L</sub> (high water level at flowering and fruit-setting stages with low water level at full-fruit stage), W<sub>L</sub>W<sub>H</sub> (low water level at flowering and fruit-setting stages with high water level at full-fruit stage) and W<sub>L</sub>W<sub>L</sub> (low water level through out growth period). Then the N levels included N<sub>H</sub> [high N, 0.45 g(N)·kg<sup>-1</sup>], N<sub>M</sub> [medium N, 0.30 g(N)·kg<sup>-1</sup>] and N<sub>L</sub> [low N, 0.15 g(N)·kg<sup>-1</sup>]. Using conventional irrigation (CI) as control experiment, the effect of spatio-temporal of deficit controlled deficit irrigation (STCDI),

\* 国家自然科学基金项目(51109102, 51009073)、国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA100504)、云南省应用基础研究资助项目(2010ZC043, 2010ZC042)、云南省教育厅重点项目(2011Z035)和水利部公益项目(201101042)资助

刘小刚(1977—), 博士, 副教授, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: liuxiaogang888@tom.com

收稿日期: 2013-05-07 接受日期: 2013-07-05

which combined RDI and CRAI, and N rates on the vegetative parts of tomato dry matter accumulation (DMA), irrigation water use efficiency (IWUE), N accumulation (NA) and soil water and mineral N distribution were studied. Compared with CI, the results showed that  $W_H W_H$ ,  $W_L W_H$ ,  $W_H W_L$  and  $W_L W_L$  under CRAI decreased tomato DMA by 4.52%, 11.93%, 17.76% and 23.94%, respectively. They respectively decreased NA by 1.74%, 12.86%, 15.50% and 22.47%. The four irrigation treatments decreased N dry matter production efficiency (NDMPE) by 2.24%, 3.93%, 2.55% and 0.89% and increased IWUE by 12.39%, 8.99%, 15.02% and 12.96%, respectively. DMA, IWUE and NA of  $N_M$  were highest under CRAI. Compared with  $N_L$ ,  $N_M$  and  $N_H$  decreased tomato NDMPE by 6.87%–12.70% and 17.81%–24.38% while increasing soil  $NO_3^-$ -N content by 31.64%–159.58% and 57.37%–297.37%, respectively. High DMA, IWUE and NA were obtained under  $W_H W_H$ , CRAI and  $N_M$ . The optimum mode for water and N supply under CRAI was 80% of CI irrigation (which was 70%–85% of soil field capacity) and nitrogen rate of  $0.30 \text{ g(N)·kg}^{-1}$  (dry soil).

**Key words** Spatio-temporal deficit controlled irrigation, Irrigation amount, Nitrogen rate, Dry matter accumulation, N accumulation, Water and nitrogen use, Tomato

(Received May 7, 2013; accepted Jul. 5, 2013)

时空亏缺调控灌溉 (spatio-temporal deficit controlled irrigation, 简称 STDCI) 利用作物遗传和生理生态特性以及干旱胁迫信号 ABA 的响应机制, 通过时间(生育期)或空间(水平或垂直方向的不同根系区域)上的主动水分调控, 达到节水高效和优质高产的目的。其内容包括调亏灌溉 (regulated deficit irrigation, 简称 RDI) 和部分根区交替灌溉 (partial rootzone drying, 简称 PRD)<sup>[1-4]</sup>。将 RDI 和 PRD 结合起来对比研究, 是国外学者进行时空亏缺调控灌溉研究的趋势<sup>[5-7]</sup>。STDCI 由传统丰水高产型灌溉转向节水优产型灌溉, 对改善作物生长的土壤生态环境, 提高灌溉水利用效率起到重要作用<sup>[8]</sup>。

水分和养分是影响蔬菜生长发育和品质的两大生态因素, 也是有效调控蔬菜产量和品质的主要手段。目前蔬菜生产主要依靠水肥的大量投入来提高产量, 不仅造成水肥资源的浪费, 还会导致蔬菜发病率高, 品质下降, 土壤硝酸盐淋失, 微量元素缺乏及环境污染等问题<sup>[8]</sup>。对辣椒进行 STDCI 的研究结果表明, 苗期适度水分亏缺、开花座果期及时复水、结果期和结果后期分别采用亏缺灌溉和分根交替灌溉可获得较高产量和水分利用效率<sup>[9]</sup>。当灌水量相同时, 交替灌溉获得的番茄产量比调亏灌溉高约 7%~10%。亏水灌溉和交替灌溉能提高辣椒可溶性固形物含量, 使单果重量和体积有所减小<sup>[10]</sup>。有研究报告, STDCI 可使番茄的氮素表现利用效率超过 70%, 木质部的汁液脱落酸含量提高 28%~38%<sup>[11]</sup>。交替灌溉(亏水 30%)在马铃薯收获期根区土壤的氮素残留量较小; 和充分供水相比, RDI 和 PRD 在生长后期能够提高土壤氮素有效性<sup>[12]</sup>。

有关蔬菜 RDI 或 PRD 的节水调质效应已有较为系统研究<sup>[13-14]</sup>, 但大多研究没有将 RDI 和 PRD 有机结合起来, 很少考虑灌水模式、亏水时期和养分对蔬菜的交互作用。有关 STDCI 的水肥耦合效应及优

化模式集中在大田作物上<sup>[15-16]</sup>, 而针对于蔬菜研究较少。因此, 本试验将灌水模式和水肥供给相结合, 研究分根区交替灌溉条件下不同水氮供给对番茄营养器官干物质累积、水分利用效率、氮素累积分配及土壤水氮分布的影响, 以期为时空亏缺调控灌溉条件下蔬菜的最佳水肥供给模式和高效利用提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地点和材料

试验于 2011 年 6—10 月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内进行, 供试土壤为瘠土, 其有机质含量  $6.2 \text{ g·kg}^{-1}$ , 全氮  $0.85 \text{ g·kg}^{-1}$ , 全磷  $0.68 \text{ g·kg}^{-1}$ , 碱解氮  $50.5 \text{ mg·kg}^{-1}$ , 速效磷  $14.73 \text{ mg·kg}^{-1}$ , 速效钾  $140.47 \text{ mg·kg}^{-1}$ , 田间持水量( $\theta_F$ )为 24%(质量)。

采用塑料桶(桶口直径 32.5 cm, 底部直径 26.5 cm, 高 33 cm)进行盆栽试验, 桶底部均匀钻有 9 孔以增加其透气性, 交替灌溉处理的桶中央用塑料膜均匀隔开, 防止水分侧渗, 塑料布中央做“V”形缺口, 用于定植番茄。桶底铺有纱网和细砂, 两边装入事先施入  $KH_2PO_4$ (分析纯) $0.513 \text{ g·kg}^{-1}$ (干土)的等质量土壤, 每桶装土 23 kg。装土时, 分别在两侧中央距桶底 2 cm 处各插 1 根直径 2.5 cm 的 PVC 灌水管, 管上交错打 4 行小孔用于渗水, 每行 6 个, 孔间距 2.5 cm, 管四周和底部用纱网包裹。供试番茄品种为“世纪粉冠王”, 2011 年 6 月 27 日定植, 每桶 1 株, 缓苗 10 d 后进行水分处理。

### 1.2 试验设计

灌水方式为控制性分根区交替灌溉(CRAI), 对根系两侧进行交替灌水。以常规充分灌溉[CI, 对根系 2 侧同时均匀灌水; 灌水量为  $W_0$ , 即保持土壤含水量为田间持水量的 70%~85%]作为对照。试验设 3

个因素,分别为控水时期、灌水量和施氮量。控水时期分为:开花座果期(2011年7月7—28日)和结果期(2011年7月29日—10月30日);2个灌水水平为交替高水( $W_H$ )和交替低水( $W_L$ ),灌水定额分别为 $80\%W_0$ 和 $60\%W_0$ ,称重法控制灌水;3个施氮水平分别为高氮( $N_H$ ) $0.45\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、中氮( $N_M$ ) $0.30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和低氮( $N_L$ ) $0.15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。3因素完全组合共12个处理,3个施氮水平的常规充分灌溉处理作为对照,每处理重复6次。氮肥用尿素(分析纯),分3次等量随水施入,施入时间分别为(7月12日、8月20日和9月6日)。于7月7日开始控水处理,控水前均采用常规灌溉方式灌水,并保持土壤含水率为田间持水量的70%~85%。

### 1.3 测定项目及方法

试验结束时(2011年10月30日)用小土钻在番茄的左、右两侧5 cm处分别取土,每7 cm取1个土样,取土深度为28 cm。部分土样用烘干法测定含水率,剩余新鲜土样立即风干、磨碎、过筛待测硝态氮。土壤硝态氮采用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的KCl(土液比1:5)浸提,紫外可见分光光度计测定。将植株鲜样按不同器官分开,105 °C杀青30 min后60 °C烘至恒重,测定各器官干重;干物质磨碎后采用开氏法测定全氮含量<sup>[17]</sup>。灌溉水分利用效率(IWUE)用干物质总质量与总灌水量的比值表示,氮素积累总量为番茄植株生育期内氮积累量的总和;氮素干物质生产效率(N dry matter production efficiency, NDMPE)用干物质积累总量与氮素积累总量的比值表示。

### 1.4 数据处理

采用Excel 2003和SAS软件对试验数据进行分析,多重比较用Duncan法。

## 2 结果与分析

### 2.1 时空亏缺调控灌溉和施氮处理对番茄干物质累积和水分利用效率的影响

统计结果表明(表1),除开花座果期灌水对根系的干物质影响不显著( $P>0.05$ )外,不同时期水分处理对冠层及干物质累积总量的影响均显著( $P<0.05$ ),施氮量对根系、冠层及干物质累积总量影响显著( $P<0.05$ )。由图1可知,在交替灌溉条件下,除持续低水处理外,其余各处理的根系、冠层及干物质累积总量都表现为中氮处理最大,低氮处理次之,高氮处理最低。交替灌溉条件下,与开花座果期低水处理相比,开花座果期高水处理干物质累积总量提高8.28%;与结果期低水处理相比,结果期高水处理干物质累积总量提高5.03%。在灌水条件相同时,与低氮处理相比,中氮处理可提高干物质累积总量5.39%~22.78%,而高氮处理抑制干物质累积9.92%~22.78%。与常规充分灌溉相比,交替持续高水处理、开花座果期低水处理、结果期低水处理及持续低水处理的干物质累积总量分别降低4.52%、11.93%、17.76%和23.94%。其中交替持续高水中氮处理的干物质累积量最高,比常规充分灌溉中氮处理高 $3.33\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ ,表明交替灌溉持续高水中氮处理能为番茄提供良好的生长环境。

统计结果表明(表1),交替灌溉条件下施氮量对灌溉水分利用效率影响显著( $P<0.05$ ),灌水及灌水和施氮的交互作用对其影响不显著( $P>0.05$ )。交替灌溉条件下,与低氮处理相比,中氮处理灌溉水分利用效率提高了0.83%~16.24%;除开花座果期低水高氮处理可提高灌溉水分利用效率1.05%,其他高氮处理均降低灌溉水分利用效率8.95%~14.31%。表明

表1 时空亏缺调控灌溉和施氮处理及交互作用对番茄水氮利用的方差分析( $P$ 值)

Table 1 Variance analysis of spatio-temporal deficit controlled irrigation, nitrogen supply and their interaction on water and nitrogen use of tomato ( $P$  value)

水氮利用 Use of water and N		分根区交替灌溉 CRAI							常规灌溉 CI
		A	B	C	A×B	A×C	B×C	A×B×C	C
干物质累积 Dry mass accumulation	根系 Root	0.054	0.032	<0.001	0.107	0.815	0.475	0.512	0.064
	冠层 Canopy	0.049	<0.001	<0.001	0.862	0.444	0.411	0.747	0.068
	合计 Total	0.027	<0.001	<0.001	0.833	0.131	0.426	0.695	0.470
灌溉水分利用效率 IWUE		0.475	0.379	<0.001	0.849	0.138	0.614	0.629	0.062
氮素累积 N accumulation	根系 Root	0.111	0.109	0.006	0.098	0.481	0.064	0.214	0.006
	冠层 Canopy	0.018	0.004	<0.001	0.179	0.067	0.685	0.211	0.042
	合计 Total	0.008	0.001	<0.001	0.470	0.021	0.635	0.289	0.018
氮素干物质生产效率 NDMPE		0.994	0.432	<0.001	0.340	0.350	0.826	0.552	0.026

CRAI为分根区交替灌溉;CI为常规灌溉,保持土壤含水量为田间持水量的70%~85%;IWUE为灌溉水分利用效率;NDMPE为氮素干物质生产效率;下同。CRAI was controlled alternate partial rootzone irrigation. CI was conventional sufficient irrigation to keep soil water content at 70%~85% field capacity. IWUE was irrigation water use efficiency. NDMPE was N dry mass product efficiency. The same below. A: 开花座果期灌水 irrigation at flowering and fruit set stage; B: 结果期灌水 irrigation at full fruit stage; C: 施氮量 N rate.

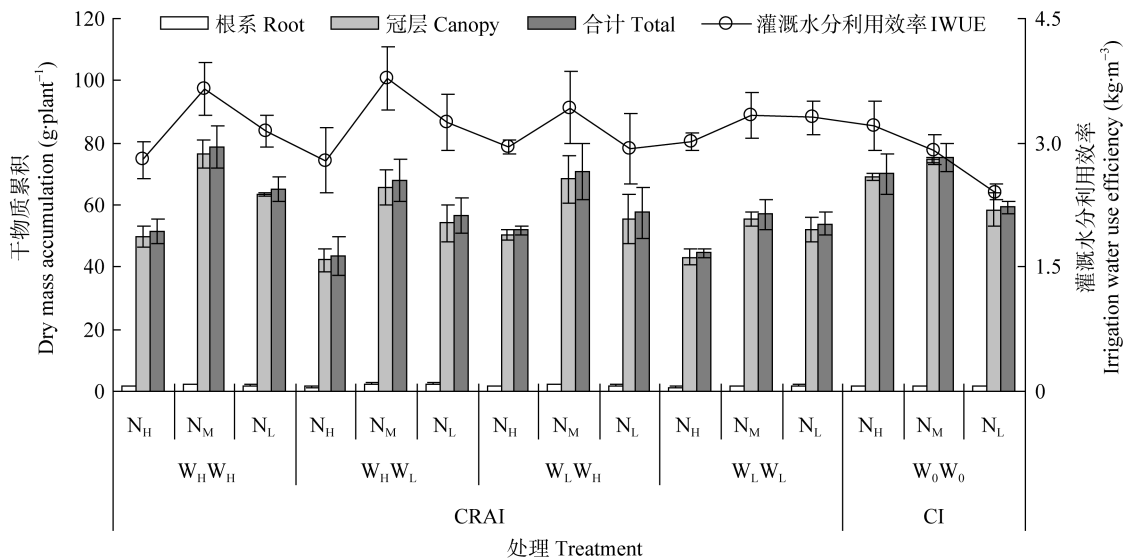


图 1 时空亏缺调控灌溉和施氮处理对番茄干物质累积和灌溉水分利用效率的影响

Fig. 1 Effect of spatio-temporal deficit controlled irrigation and nitrogen supply on dry mass accumulation and irrigation water use efficiency of tomato

$W_0$ 为常规充分灌水的灌水定额,  $W_H W_H$ 为交替灌溉持续高水处理,  $W_H W_L$ 为交替灌溉开花座果期高水、结果期低水处理,  $W_L W_H$ 为交替灌溉开花座果期低水、结果期高水处理,  $W_L W_L$ 为交替灌溉持续低水处理; 高水处理灌水定额为80% $W_0$ , 低水处理灌水定额为60% $W_0$ 。下同。 $W_0$  was irrigation quota of CI.  $W_H W_H$  was high water level at whole growth period under CRAI;  $W_H W_L$  was high water level at flowering and fruit set stage, while low water level at full fruit stage under CRAI;  $W_L W_H$  was low water level at flowering and fruit set stage, while high water level at full fruit stage under CRAI;  $W_L W_L$  was low water level at whole growth period under CRAI.  $W_H$  is 80%  $W_0$ , and  $W_L$  is 60% $W_0$ . The same below.

在交替灌溉条件下, 适量增施氮肥可以提高灌溉水分利用效率, 高氮同时抑制了干物质累积和灌溉水分利用效率的提高。其中交替灌溉持续高水中氮处理的灌溉水分利用效率最高, 可达 3.65  $kg \cdot m^{-3}$ , 表明该处理干物质累积和灌溉水分利用效率得到了同步提高。与常规灌溉相比, 时空亏缺调控灌溉高氮处理降低灌溉水分利用效率 6.18%~13.08%, 中氮和低氮处理提高灌溉水分利用效率 14.08%~37.07%, 中氮处理的灌溉水分利用效率分别为高氮和低氮处理的 1.23 倍和 1.12 倍。而常规灌溉处理的灌溉水分利用效率随着施氮的增加呈增加趋势。与常规充分灌溉相比, 交替持续高水处理、开花座果期低水处理、结果期低水处理和持续低水处理的灌溉水分利用效率分别提高 12.39%、8.99%、15.02%和 12.96%, 表明时空亏缺调控灌溉能明显提高灌溉水分利用效率。

### 2.2 时空亏缺调控灌溉和施氮处理对番茄氮素累积和利用的影响

干物质及其氮素含量的大小决定氮素累积量。统计结果表明(表 1), 施氮量对根系、冠层的氮素累积及累积总量影响显著( $P < 0.05$ ), 不同时期水分处理对冠层氮素累积及氮素累积总量影响显著( $P < 0.05$ )。由图 2 可知, 时空亏缺调控灌溉条件下, 与低氮处理相比, 高氮和中氮处理分别提高番茄氮素累积总量 5.55%和 36.25%。而常规充分灌溉的氮素累积量随着施氮量的增加而增加, 主要由于交替

灌溉条件下土壤水分相对亏缺, 高氮处理的土壤矿物氮浓度过高不利于植株生长。交替灌溉条件下, 与开花座果期低水处理相比, 开花座果期高水处理提高氮素累积总量 10.99%; 与结果期低水相比, 结果期高水处理提高氮素累积总量 14.42%。交替灌溉条件下, 与常规充分灌溉处理相比, 持续高水处理、开花座果期低水处理、结果期低水处理和持续低水处理分别降低氮素累积总量 1.74%、12.86%、15.50%和 22.47%。表明时空亏缺调控灌溉不但抑制了干物质累积, 也抑制了植株氮素累积。

氮素干物质生产效率是评价氮素生理利用效率的重要指标, 由干物质生产和氮素积累特性共同决定。统计结果表明(表 1), 施氮量对氮素干物质生产效率影响显著( $P < 0.05$ ), 其余因素及交互作用对其影响不显著( $P > 0.05$ )。试验结果表明(图 2), 交替灌溉条件下, 与低氮处理相比, 中氮和高氮处理的氮素干物质生产效率分别降低 6.87%~12.70%和 17.81%~24.38%。表明在交替灌溉条件下, 随着施氮量的增加氮素的生理利用效率降低。与常规充分灌溉相比, 交替持续高水处理、开花座果期低水处理、结果期低水处理及持续低水处理的氮素干物质生产效率分别降低 2.24%、3.93%、2.55%和 0.89%。

### 2.3 时空亏缺调控灌溉和施氮处理对番茄根区土壤水氮的影响

统计表明(表 2), 结果期灌水处理对根区左、右

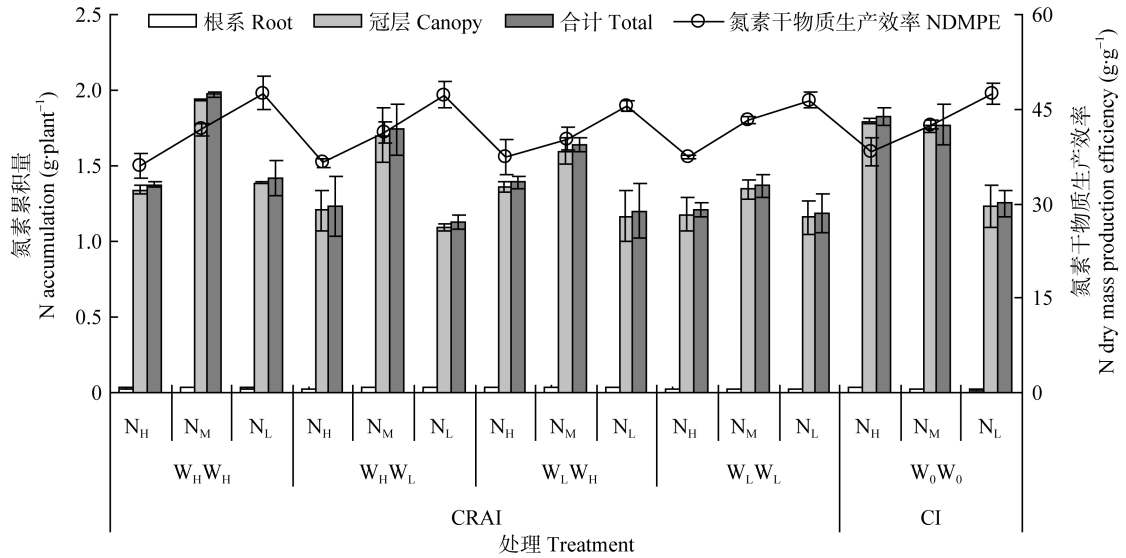


图 2 时空亏缺调控灌溉和施氮处理对番茄氮素分配和累积及氮素干物质生产效率的影响

Fig. 2 Effect of spatio-temporal deficit controlled irrigation and nitrogen supply on nitrogen distribution and accumulation and nitrogen dry matter production efficiency of tomato

表 2 时空亏缺调控灌溉和施氮处理对番茄两侧根区土壤水分分布的影响

Table 2 Effect of spatio-temporal deficit controlled irrigation and nitrogen supply on soil water distribution in two root zones of tomato %

灌水方式 Irrigation mode	灌水水平 Irrigation level	施氮水平 N level	土层 Soil layer (cm)							
			0~7		7~14		14~21		21~28	
			左侧 Left	右侧 Right	左侧 Left	右侧 Right	左侧 Left	右侧 Right	左侧 Left	右侧 Right
CRAI	W <sub>H</sub> W <sub>H</sub>	高 High	31.71a	26.52c	30.07ac	26.74ac	30.11ac	26.60ac	29.10ac	26.56ac
		中 Middle	31.74a	25.58ad	30.03ad	25.93ad	29.03ad	26.18ad	28.49ad	26.55ad
		低 Low	28.91a	22.23ae	27.05ae	22.45ae	25.21ae	21.10ae	22.63ae	20.33ae
	W <sub>H</sub> W <sub>L</sub>	高 High	30.26b	25.11bc	29.63bc	26.27bc	28.94bc	25.50bc	27.72bc	25.23bc
		中 Middle	30.09b	20.71bd	26.20bd	20.65bd	24.25bd	20.13bd	24.71bd	19.60bd
		低 Low	27.11b	17.99be	24.46be	19.02be	23.31be	18.53be	21.09be	17.67be
	W <sub>L</sub> W <sub>H</sub>	高 High	31.32a	29.45ac	30.16ac	27.27ac	29.48ac	27.44ac	28.97ac	27.52ac
		中 Middle	31.49a	26.73ad	28.74ad	25.96ad	28.50ad	25.59ad	28.14ad	25.75ad
		低 Low	31.12a	23.04ae	28.34ae	24.09ae	27.45ae	23.59ae	27.32ae	22.81ae
	W <sub>L</sub> W <sub>L</sub>	高 High	27.42b	21.58bc	26.82bc	22.34bc	26.33bc	22.03bc	24.95bc	21.20bc
		中 Middle	27.46b	19.31bd	26.42bd	21.22bd	25.35bd	20.85bd	23.85bd	20.77bd
		低 Low	24.89b	16.48be	23.20be	19.04be	21.81be	18.74be	19.48be	17.92be
CI	W <sub>0</sub> W <sub>0</sub>	高 High	27.31a		26.58a		26.84a		25.55a	
		中 Middle	27.11a		27.11a		25.60a		24.43a	
		低 Low	25.07a		24.75a		23.57a		22.70a	

不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著, 下同。Different small letters indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The same below.

两侧土壤含水量影响显著( $P < 0.05$ ), 施氮量对 7~28 cm 土壤含水量影响显著( $P < 0.05$ ), 其余因素及各因素交互作用对土壤含水量影响不显著( $P > 0.05$ )。在交替灌水条件下, 与结果期低水处理相比, 结果期高水处理提高土壤含水量均值 17.11%。灌水条件相同时, 与低氮处理相比, 高氮和中氮处理的 7~28 cm 土壤含水量分别提高 11.23%~31.60%和 5.92%~19.77%。交替灌溉左侧土壤含水量明显高于右侧, 其均值相差 2.06%~5.69%。这是由于交替灌溉使根区土壤左、

右两侧产生了明显水势差, 有利于刺激根系系统并提高水分利用效率。除交替灌溉持续低水处理左侧 21~28 cm 的含水量低于常规灌溉外, 其余处理左侧的土壤含水量均呈不同程度提高; 而右侧土壤含水量均值明显低于常规充分灌溉处理, 表明造成了一定的水分胁迫。

硝态氮是可以被作物吸收利用的矿物氮。统计分析表明(表 3), 施氮量对土壤硝态氮含量影响显著( $P < 0.05$ ), 结果期灌水及不同时期灌水的交互作用

表 3 时空亏缺调控灌溉和施氮处理对番茄根区土壤硝态氮分布的影响

Table 3 Effect of spatio-temporal deficit controlled irrigation and nitrogen supply on soil nitrate nitrogen distribution in two root

zones of tomato

mg·kg<sup>-1</sup>

灌溉方式 Irrigation mode	灌溉水平 Irrigation level	施氮水平 N level	土层 Soil layer (cm)											
			0~7		7~14		14~21		21~28					
			左侧 Left	右侧 Right	左侧 Left	右侧 Right	左侧 Left	右侧 Right	左侧 Left	右侧 Right				
CRAI	W <sub>H</sub> W <sub>H</sub>	高 High	39.83a	39.14a	76.03acf	66.99acf	101.48acf	94.45acf	97.48a	104.90ad				
		中 Middle	36.82b	29.25b	55.18adf	48.29adf	73.39adf	79.15adf	97.99b	86.32bd				
		低 Low	26.41c	24.97c	26.31aef	30.25aef	33.55aef	35.25aef	55.57c	53.94cd				
	W <sub>H</sub> W <sub>L</sub>	高 High	45.53a	47.06ae	90.64beg	88.70beg	111.69beg	103.51beg	107.45a	107.15ae				
		中 Middle	30.09b	29.49bf	59.21bdg	43.80bdg	88.29bdg	80.25bdg	96.10b	79.96be				
		低 Low	21.33c	25.82cg	22.81beg	22.51beg	51.93beg	53.62beg	58.35c	53.80ce				
	W <sub>L</sub> W <sub>H</sub>	高 High	41.88a	45.42a	76.13ach	59.89ach	112.15ach	94.9ach	111.32a	107.08af				
		中 Middle	35.09b	33.49bf	62.21bdg	47.80bdg	88.29bdg	80.25bdg	96.10b	79.96be				
		低 Low	29.15c	27.10c	28.81aeh	27.30aeh	45.25aeh	39.00aeh	58.49c	57.62cf				
	W <sub>L</sub> W <sub>L</sub>	高 High	45.16a	47.98ae	102.37bci	107.55bci	104.22bci	106.46bci	102.65a	122.31ag				
		中 Middle	34.82b	27.3bf	62.97bdi	59.49bdi	105.78bdi	93.35bdi	99.72b	85.42bg				
		低 Low	29.90c	31.06cg	37.76bei	28.61bei	41.10bei	51.73bei	65.23c	64.89cg				
CI	W <sub>0</sub> W <sub>0</sub>	高 High	36.53a		77.08a		107.22a		102.71a					
		中 Middle	25.60b		62.67b		86.64b		82.15b					
		低 Low	21.83c		40.76c		41.56c		42.94c					

对交替灌溉 7~21 cm 硝态氮也影响显著( $P<0.05$ )。在交替灌溉条件下,与低氮处理相比,中氮和高氮分别提高土壤硝态氮 31.64%~159.58%和 57.37%~297.37%。与结果期低水处理相比,结果期高水处理减少土壤硝态氮含量 16.62%。与常规充分灌溉相比,交替持续高水灌溉、开花座果期低水、结果期低水可使 7~21 cm 土壤硝态氮减少 13.41%、14.36%和 1.79%,而持续低水可使 7~21 cm 土壤硝态氮增加 8.36%。表明土壤硝态氮均值随着灌水量的增加呈减小趋势,开花座果期低水处理的硝态氮均值低于结果期低水处理。交替持续高水处理的土壤硝态氮均值比常规灌溉处理低 5.25%,估计是由于交替灌溉单侧灌水量较大且交替持续高水处理的植株生长旺盛所致。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 时空亏缺调控灌溉和施氮处理对番茄干物质累积和水分利用效率的影响

时空亏缺调控灌溉使作物部分根系在不同时期交替经受一定程度的干旱锻炼,既可减少作物蒸腾,促进根系的吸收和合成能力,增大水分传导速率,加速地上部分生长,又不会使作物生物学和经济学产量显著降低而达到节水高产的目的<sup>[18]</sup>。本试验表明,虽然时空亏缺调控灌溉处理的番茄干物质累积略有减少,但能使水分利用效率提高 17.29%~37.07%。交替灌水条件下,施氮量对干物质累积总

量和水分利用影响显著,除持续低水处理外,其余都是中氮处理的干物质累积最大,低氮处理次之,高氮处理最低;中氮处理的水分利用效率也最高,低氮次之,高氮最低。这表明时空亏缺调控灌溉条件下,中等供氮水平有利于提高干物质累积和水分利用效率,供氮水平过高反而抑制了植株生长。这与唐控虎等<sup>[19]</sup>的研究结果(适量供氮能显著增强根系活力,改善根系生理功能,提高水分利用;中等供氮水平有利于提高幼苗根系活力,供氮水平过高则导致根系活力下降)相一致。

#### 3.2 时空亏缺调控灌溉和施氮处理对番茄氮素累积和利的影响

作物在水分或养分局部供应条件下,由于根系在局部供应区的补偿效应,养分和水分吸收功能明显增强<sup>[18,20]</sup>。本试验研究表明,与常规充分灌溉相比,交替灌溉处理使氮素累积总量略有下降。这主要是由于亏缺灌溉不同程度地抑制了干物质累积;并且高氮持续低水处理的水分亏缺严重,土壤中的有效养分不能变成根际有效养分所致。研究还发现,交替灌溉持续高水处理的氮素累积总量分别是开花座果期低水处理、结果期低水处理和持续低水处理的 1.13 倍、1.16 倍和 1.27 倍,其原因是番茄在开花座果期需水量较少,而在结果期耗水量大且产量对水分供应较为敏感,表现出在结果期低水和持续低水对干物质和全氮累积抑制较大。此结果与秦永林等<sup>[21]</sup>的研究结果(适宜的水分供应可以促进肥料转化及

吸收,提高肥料利用率;而适宜的施肥也可以调节水分利用过程,提高水分利用率)相一致。

### 3.3 时空亏缺调控灌溉和施氮处理对番茄根区土壤水氮的影响

灌水和施氮及番茄对水、氮的吸收利用决定土壤水、氮分布。本研究表明,交替灌溉高氮处理和持续低水处理的土壤硝态氮出现明显累积,不利于氮肥利用效率提高。与常规灌溉相比,除持续低水处理外,时空亏缺调控灌溉处理的根区土壤硝态氮含量略低于常规灌溉处理,这主要由于交替灌溉的单侧灌水量较大,并且交替灌溉能刺激作物对养分的吸收利用<sup>[20]</sup>。也有研究表明,交替隔沟灌溉在灌水沟和非灌水沟之间没有形成零通量面,其水分的侧向入渗明显增强,导致土壤硝态氮残留量略高于传统灌溉<sup>[15]</sup>。

本试验结果说明,交替灌溉条件下不同时期亏水和施氮处理对番茄生长、水氮利用及根区土壤水氮环境的影响明显,只有选择适当的亏水时期和亏水程度才能达到提高水肥利用的目的。与常规灌溉相比,时空亏缺调控灌溉改变了根区水氮环境,中氮处理更利于番茄生长和节水节肥。

### 3.4 结论

(1)时空亏缺调控灌溉虽然抑制番茄干物质累积,但能提高灌溉水分利用效率。与 CI 相比,  $W_H W_H$ 、 $W_L W_H$ 、 $W_H W_L$  及  $W_L W_L$  处理分别降低干物质累积总量 4.52%、11.93%、17.76%和 23.94%,分别增加灌溉水分利用效率 12.39%、8.99%、15.02%和 12.96%。

(2)时空亏缺调控灌溉减少了番茄的氮素累积总量。与 CI 相比,  $W_H W_H$ 、 $W_L W_H$ 、 $W_H W_L$  及  $W_L W_L$  处理分别降低氮素累积总量 1.74%、12.86%、15.50%和 22.47%,降低氮素干物质生产效率 2.24%、3.93%、2.55%和 0.89%。

(3)综合考虑干物质累积、水分利用及氮素累积的因素,番茄适宜的水氮供给模式为交替灌溉持续高水中氮处理:灌水定额为  $80\%W_0$  ( $W_0$  为常规充分灌溉的灌水定额,保持土壤含水量为田间持水量的 70%~85%),施氮量为  $0.30 \text{ g(N)} \cdot \text{kg}^{-1}$  (干土)。

### 参考文献

- [1] Li F S, Liang J H, Kang S Z, et al. Benefits of alternate partial root-zone irrigation on growth, water and nitrogen use efficiencies modified by fertilization and soil water status in maize[J]. *Plant and Soil*, 2007, 295(1/2): 279–291
- [2] 杜太生, 康绍忠, 胡笑涛, 等. 根系分区交替滴灌对棉花产量和水分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(10): 2061–2068  
Du T S, Kang S Z, Hu X T, et al. Effect of alternate partial root-zone drip irrigation on yield and water use efficiency of cotton[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(10): 2061–2068
- [3] 杜太生, 康绍忠, 胡笑涛, 等. 时空亏缺调控灌溉——果园节水理论的新突破[J]. *沈阳农业大学学报*, 2004, 35(5): 449–454  
Du T S, Kang S Z, Hu X T, et al. Spatio-temporal deficit controlled irrigation in orchard and its research advances[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2004, 35(5): 449–454
- [4] 王振昌, 杜太生, 杨秀英, 等. 隔沟交替灌溉对棉花耗水、产量和品质的调控效应[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(1): 13–17  
Wang Z C, Du T S, Yang X Y, et al. Effects of alternate furrow-irrigation on crop water consumption, yield and quality of cotton[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(1): 13–17
- [5] Patanè C, Cosentino S L. Effects of soil water deficit on yield and quality of processing tomato under a Mediterranean climate[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(1): 131–138
- [6] Savic S, Stikic R, Vucelic B, et al. Comparative effects of regulated deficit irrigation (RDI) and partial root-zone drying (PRD) on growth and cell wall peroxidase activity in tomato fruits[J]. *Scientia Horticulturae*, 2008, 117(1): 15–20
- [7] 康绍忠, 杜太生, 孙景生, 等. 基于生命需水信息的作物高效节水调控理论与技术[J]. *水利学报*, 2007, 38(6): 661–667  
Kang S Z, Du T S, Sun J S, et al. Theory and technology of improving irrigation water use efficiency based on crop growing water demand information[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(6): 661–667
- [8] 郑志松, 王晨阳, 牛俊义, 等. 水肥耦合对冬小麦籽粒蛋白质及氨基酸含量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(4): 788–793  
Zheng Z S, Wang C Y, Niu J Y, et al. Effects of irrigation and fertilization coupling on protein and amino acids contents in grains of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4): 788–793
- [9] 邵光成, 刘娜, 陈磊. 温室辣椒时空亏缺灌溉需水特性与产量的试验[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(4): 117–121  
Shao G C, Liu N, Chen L. Character of water demand and yield of space-time deficit irrigation for hot pepper in greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(4): 117–121
- [10] Shao G C, Zhang Z Y, Liu N, et al. Comparative effects of deficit irrigation (DI) and partial rootzone drying (PRD) on soil water distribution, water use, growth and yield in greenhouse grown hot pepper[J]. *Scientia Horticulturae*, 2008, 119(1): 11–16
- [11] Topcu S, Kirda C, Dasgan Y, et al. Yield response and N-fertilizer recovery of tomato grown under deficit irrigation[J]. *Eur J Agron*, 2007, 26(1): 64–70
- [12] Shahnazari A, Ahmadi S H, Laerke P E, et al. Nitrogen dynamics in the soil-plant system under deficit and partial root-zone drying irrigation strategies in potatoes[J]. *Eur J Agron*, 2008, 28(2): 65–73
- [13] 牛晓丽, 周振江, 李瑞, 等. 根系分区交替灌溉条件下水肥供应对番茄可溶性固形物含量的影响[J]. *中国农业科学*,

- 2012, 45(5): 893–901  
Niu X L, Zhou Z J, Li R, et al. Effects of water and fertilizers applied on the soluble solid content in tomato under alternate partial root-zone irrigation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(5): 893–901
- [14] 唐晓伟, 刘明池, 郝静, 等. 调亏灌溉对番茄品质与风味组分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(4): 970–977  
Tang X W, Liu M C, Hao J, et al. Influences of regulated deficit irrigation on sensory quality and flavor components of tomato[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(4): 970–977
- [15] 刘小刚, 张富仓, 杨启良, 等. 不同沟灌方式下玉米根区矿物氮迁移动态研究[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(3): 540–547  
Liu X G, Zhang F C, Yang Q L, et al. Transfer of mineral nitrogen in maize root zone soil under different furrow irrigation modes[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(3): 540–547
- [16] 马守臣, 张绪成, 段爱旺, 等. 施肥对冬小麦的水分调亏灌溉效应的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(6): 139–143  
Ma S C, Zhang X C, Duan A W, et al. Regulated deficit irrigation effect of winter wheat under different fertilization treatments[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(6): 139–143
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000  
Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis*[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000
- [18] 胡田田, 康绍忠, 高明霞, 等. 玉米根系分区交替供水、氮的效应与高效利用机理[J]. *作物学报*, 2004, 30(9): 866–871  
Hu T T, Kang S Z, Gao M X, et al. Effects and mechanisms of alternate water and nitrogen supply to partial root zone of maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(9): 866–871
- [19] 唐拴虎, 徐培智, 陈建生, 等. 一次性施用控释肥对水稻根系活力及养分吸收特性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(4): 591–596  
Tang S H, Xu P Z, Chen J S, et al. Effects of single basal application of controlled-release fertilizer on root activity and nutrient absorption of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(4): 591–596
- [20] 胡田田, 康绍忠. 植物抗旱性中的补偿效应及其在农业节水中的应用[J]. *生态学报*, 2005, 25(4): 885–891  
Hu T T, Kang S Z. The compensatory effect in drought resistance of plants and its application in water-saving agriculture[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4): 885–891
- [21] 秦永林, 井涛, 康文钦, 等. 阴山北麓马铃薯在不同灌溉模式下的水肥效率[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(4): 426–431  
Qin Y L, Jing T, Kang W Q, et al. Water and fertilizer use efficiency of potato under different irrigation patterns in North Yin Mountain Region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(4): 426–431