

交替滴灌施氮对日光温室黄瓜生长、光合特性、产量及水氮利用效率的影响

刘学娜¹, 刘彬彬², 崔青青¹, 张文东¹, 李曼¹, 艾希珍^{1,2}, 毕焕改^{1,2}, 李清明^{1,2,3,*}

¹山东农业大学园艺科学与工程学院, ²作物生物学国家重点实验室, ³农业部黄淮海设施农业工程科学观测实验站, 山东泰安271018

摘要:以‘津优35号’黄瓜为试材, 采用两因素裂区设计, 主区因素为灌溉方式, 设传统滴灌(C)和交替滴灌(A) 2个水平; 裂区因素为施氮量, 设 $900 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (经验施氮, N_2)、 $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (减施氮, N_1)和 $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (不施氮, N_0) 3个水平, 共6个处理, 对黄瓜的生长、光合特性、产量、品质及水氮利用效率等进行了研究。结果表明: 交替滴灌处理下黄瓜株高和茎粗显著降低, 但黄瓜的根系生长及根系活力显著提高。与传统滴灌相比, 交替滴灌施氮显著提高叶片色素含量, 降低了蒸腾速率, 而净光合速率差异不显著。对于果实品质而言, 在同一灌溉方式下, 果实中亚硝酸盐含量随着施氮量的增加而显著增加, 为 $N_2 > N_1 > N_0$, 可溶性糖和维生素C含量则是先升高后降低。在同一施氮水平下, 交替滴灌处理黄瓜的各项品质指标均比传统滴灌含量高。交替滴灌处理的灌水量较传统滴灌处理减少43.6%, 平均水分利用效率提高78.5%, AN_1 产量最高, CN_2 次之, 二者之间差异并不显著。氮肥农学利用效率(ANUE)则随着施氮量的增大而降低。交替滴灌处理下, 减施氮有利于获得更高的产量, 且ANUE高; 而在传统滴灌条件下, 经验施氮处理的产量较减施氮仅增加0.9%, 但ANUE降低36.9%。综上所述, 交替滴灌减施氮(AN_1)处理可在保证黄瓜生长、产量和品质的同时显著提高水氮利用效率, 可作为日光温室黄瓜提质增效的一种水氮管理模式。

关键词: 黄瓜; 交替滴灌施氮; 产量; 水氮利用效率

随着世界经济的发展与人类活动的频繁加剧, 水资源的短缺以及过度施肥导致的环境污染问题已严重制约着现代农业的可持续发展; 而合理灌溉施肥是实现蔬菜高产、优质和养分高效利用的重要技术措施。控制性交替灌溉(controlled alternative irrigation)是一种有效利用作物生理功能节水的灌溉方法, 其核心是强调利用作物水分胁迫时产生的根信号功能, 即通过人工控制, 使在垂直剖面或水平面上的干燥区域交替出现, 这样就可以使不同区域部位的根系交替经受一定程度的干旱锻炼, 既可减少棵间全部湿润时的无效蒸发损失和总的灌溉用水量, 亦可提高根系对水分和养分的利用率(康绍忠等1997)。烤烟在交替灌溉条件下可节省约15%的用水量而不引起产量的下降, 并提高了烤烟的营养物质含量(彭静等2013)。曹琦等(2010)对温室黄瓜的研究表明: 交替隔沟灌溉可节水37%~48%, 作物水分利用效率提高47%~82%, 且使果实商品性和营养品质提高, 产量与对照持平。氮素是植物生长所必需的营养元素, 是决定土壤生产力的重要限制性因素。植物对养分的吸收、运转以及土壤中养分的扩散都需要依靠土壤水分这种媒介, 土壤水分状况在很大程度上决定着肥料的合理用量与利用效率(金轲等1999)。

曹庆杰等(2010)研究结果表明, 氮素是决定黄瓜生长发育的决定性指标, 对黄瓜的株高、茎粗及产量都有显著影响。氮素营养可以改善土壤水分胁迫下植株体内水分状况, 增强作物的抗旱性(李生秀等1994; 樊小林等2002)。而我国设施蔬菜生产中普遍存在氮素施用过量的现象, 每生长季氮肥施用量一般超过植株需求量的几倍(Chen等2004)。氮肥追施过量, 会导致病害加重, 同时会使得蔬菜硝酸盐含量增加(王柳等2007)。日光温室蔬菜生产中大量投入氮肥和不均衡施肥使氮肥利用率较低, 浪费大量养分资源的同时(李东方等2011), 造成土壤盐分积累、酸化以及地下水硝酸盐污染, 影响温室土壤的可持续利用并最终导致产量降低, 产品品质恶化(张国红等2005)。

设施蔬菜生产中, 如何进行科学的水肥管理, 如何在进行高产、高效生产的同时, 提高水氮利用效率和蔬菜品质以及有效降低设施蔬菜生产对环境的破坏是突破设施农业经济效益瓶颈的关键

收稿 2016-04-14 修定 2016-05-26

资助 国家自然科学基金(31471918)、山东省自然科学基金(ZR2013CM008)、山东省高等学校科技计划项目(J14LF06)和山东省农业重大应用技术创新项目。

* 通讯作者(E-mail: gslqm@sdau.edu.cn)。

问题(张志斌2000)。合理控制水分和氮素的投入是提高水氮利用效率的有效途径(汤丽玲等2005;高兵等2008),寻求水分和肥料之间最佳的耦合点,使水肥产生协同作用,达到“以水促肥”和“以肥调水”的目的,从而提高植物的水氮利用效率、产量以及品质具有重要的意义。黄瓜(*Cucumis sativus*)是耗水耗肥的蔬菜作物,营养生长与生殖生长并进,干物质积累和养分吸收受到水肥供应和环境条件的影响很大(裴孝伯等2002; Guo等2008)。交替滴灌技术和氮肥相结合的应用研究在设施蔬菜尤其是在对水分非常敏感的黄瓜上较少报道,因此本文拟通过研究交替滴灌施氮对黄瓜生长发育状况、产量、品质及水氮利用效率等的综合影响,阐述水氮间的交互作用,对不同灌水、施氮方案进行综合评价,为建立日光温室黄瓜栽培合理的水氮管理模式提供理论依据。

材料与方 法

1 试验地点与材料

试验于2014年2月至8月在山东农业大学园艺实验站日光温室中进行。供试黄瓜(*Cucumis sativus* L.)品种为‘津优35号’(天津科润黄瓜研究所),采用10 cm×10 cm营养钵育苗,2月25日浸种催芽,3月15日定植,7月13日拉秧。土壤碱解氮含量: 217.7 mg·kg⁻¹,速效磷含量: 33.3 mg·kg⁻¹,速效钾含量: 96.3 mg·kg⁻¹,有机质含量: 34.8 g·kg⁻¹,田间持水量: 40%,土壤容重: 1.17 g·cm⁻³。水肥一体化系统主要由水源、水泵、PE主管道、滴灌管(内镶式滴灌

管,直径16 mm)、文丘里施肥器等组成。滴头间距30 cm,滴头流量2 L·h⁻¹,滴灌工作压力0.2 MPa。

2 试验设计

试验采用裂区设计,主区因素为灌溉方式,设传统滴灌(conventional drip irrigation, C)和交替滴灌(alternative drip irrigation, A) 2个水平;裂区因素为施氮量,设900 kg·hm⁻²(经验施氮, N₂)、450 kg·hm⁻²(减施氮, N₁)和0 kg·hm⁻²(不施氮, N₀) 3个水平,均重复3次,随机区组排列,共6个处理: CN₀为传统滴灌不施氮处理; CN₁为传统滴灌减施氮处理; CN₂为传统滴灌经验施氮处理; AN₀为交替滴灌不施氮处理; AN₁为交替滴灌减施氮处理; AN₂为交替滴灌经验施氮处理。滴灌管铺设采用2行3管式,即2行黄瓜3行滴灌管,小行距30 cm,大行距120 cm,中间滴灌管到左右2行黄瓜的距离为15 cm,两边滴灌管距离到邻近两行的距离为10 cm(如图1所示)。黄瓜苗长至3~4片真叶时定植,每小区定植50株黄瓜,小区面积9.6 m²(8 m×1.2 m),每小区之间用深50 cm的塑料薄膜隔开以防水肥侧渗。

待黄瓜第6片真叶展平时开始水分处理,设土壤灌溉水分下限为田间最大持水量的65%,上限为田间最大持水量的90%,当含水量降至或接近该处理水分下限即进行灌水,灌水至水分控制上限。传统滴灌时3行滴灌管同时打开进行灌水处理,而交替滴灌则是中间和两边的滴灌管交替打开,即该次灌水时只打开中间滴灌管,下次灌水则是打开两边滴灌管而关闭中间滴灌管,依次交替滴

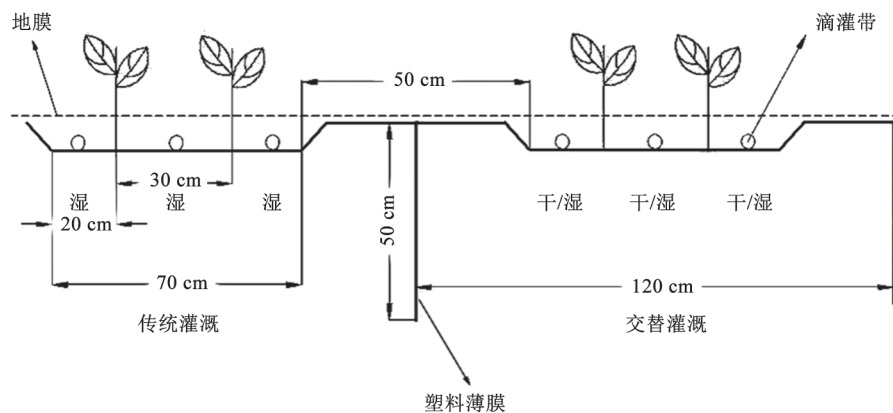


图1 日光温室黄瓜不同膜下滴灌方式示意图

Fig. 1 Layout of different drip irrigation methods of cucumber under plastic film in solar greenhouse

灌。灌水量依公式: $M_{\text{滴灌}}=r \times p \times h \times \theta_f \times (q_1 - q_2) / \eta$ 计算(李清明等2005)。式中 r 为土壤容重, 为 $1.17 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; p 为土壤湿润比, 取100%; h 为灌水计划湿润层, 取0.4 m; θ_f 为田间持水量, 为40%; q_1 、 q_2 分别为土壤水分上限和土壤水分下限; η 为水分利用系数, 滴灌取0.9。试验所用肥料是尿素(N为46%), 分别用各个处理所施氮量的1/3做为基肥, 剩下的2/3分别在初花期、结果初期和结果盛期做追肥随水施入。

3 测定项目与方法

测定黄瓜植株的株高和茎粗, 每处理选取9株。株高为茎基部到生长点的距离, 用卷尺进行测量; 茎粗为子叶基部下胚轴的直径, 用游标卡尺进行测量。根系取样采用土壤剖面法, 以植株为中心取30 cm (垂直于行向) \times 25 cm (沿行向) 的面积取土, 取土深40 cm, 土壤挖出后, 低压水冲洗根系, 剔除杂质, 用扫描仪及WinRHIZO软件进行根系分析(总根长、根总表面积、根总体积、根平均直径和根尖数), 重复3次。根系活力采用TTC法测定(李合生2002)。

叶绿素含量的测定, 采用80%丙酮黑暗浸泡72 h, 提取液按照李合生(2002)方法, 用UV-紫外分光光度计测定叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素含量。净光合速率(P_n)、细胞间隙 CO_2 浓度(C_i)、气孔导度(G_s)以及蒸腾速率(T_r)采用便携式光合仪(CIRAS-3; PP-Systems, 美国)于晴天上午10:00选取第3~4片功能叶进行测定。光源LED, PAR=1 000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, CO_2 浓度=380 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。在测定光合参数的同时采用FMS-2型调制式叶绿素荧光仪(英国汉莎公司)测定荧光参数, 包括PSII实际光化学效率(Φ_{PSII})、暗适应下PSII的最大量子产额(F_v/F_m)、光适应下PSII最大光化学效率(F_v'/F_m')、非光

化学淬灭系数[NPQ=($F_m - F_m'$)/ F_m']、光合电子传递效率(ETR= $\Phi_{\text{PSII}} \times \text{PAR} \times 0.84 \times 0.5$)。叶片暗适应30 min后, 利用叶绿素荧光成像系统(FlourCam荧光成像系统, 捷克PSI公司), 采用Shulter=2, Super=30, Act2=50, Sensitivity=80测定。叶绿素荧光发射瞬间变化由顶部CCD相机捕获。

在结果盛期, 分别在每个小区的前、中、后3个等距离点取样, 然后选取大小和色泽基本一致的果实5条进行品质测定, 蒸馏水冲洗干净后, 研磨均匀, 测定其品质指标。可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定; 可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝G-250法测定; 亚硝酸盐含量采用盐酸萘乙二胺法测定; 维生素C含量采用2,6-二氯酚比色法测定(李合生2002)。

小区产量和瓜果数在每次采摘时均进行计数, 最后累积计算产量。水分利用效率(WUE)为产量(kg)与生育期内总灌水量(m^3)的比值(Cabello等2009)。氮肥农学利用效率(ANUE)为单位施肥量所增加的作物产量, 按照ANUE=(施氮区产量-对照区产量)/施氮量计算(Fageria和Baligar 2003)。

4 数据分析及处理

数据均取3次的平均值, 采用DPS数据处理软件进行方差分析, 不同处理间的多重比较采用Duncan新复极差法, 用Excel和Systat SigmaPlot进行数据统计和作图。

实验结果

1 交替滴灌施氮对黄瓜株高、茎粗及根系生长特性的影响

由表1中可知, 株高在 CN_2 处理最高, AN_2 处理

表1 交替滴灌施氮对黄瓜株高、茎粗及根系生长特性的影响

Table 1 Effects of alternative drip irrigation and nitrogen fertilization on plant height, stem diameter and characteristics of cucumber root growth

| 处理 | 株高/cm | 茎粗/mm | 根长/cm | 根直径/mm | 根表面积/ cm^2 | 根尖数/条 | 根活力/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ |
|---------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|--|
| CN_0 | 452±19 ^b | 0.979±0.01 ^{ab} | 1 414±5 ^c | 1.33±0.10 ^e | 787±33 ^d | 4 058±379 ^c | 33.62±2.68 ^d |
| CN_1 | 495±21 ^a | 0.989±0.01 ^a | 1 523±4 ^c | 1.52±0.17 ^d | 803±29 ^d | 5 050±226 ^b | 47.58±2.45 ^e |
| CN_2 | 501±20 ^a | 0.995±0.01 ^a | 1 857±81 ^b | 1.96±0.11 ^c | 966±63 ^c | 6 094±149 ^a | 46.73±1.76 ^e |
| AN_0 | 350±16 ^{cd} | 0.971±0.02 ^b | 1 890±155 ^{ab} | 1.57±0.10 ^d | 1 157±80 ^b | 5 918±116 ^a | 46.14±4.06 ^e |
| AN_1 | 370±14 ^c | 0.981±0.02 ^{ab} | 2 067±189 ^a | 2.72±0.17 ^a | 1 208±72 ^a | 6 230±99 ^a | 78.41±4.65 ^a |
| AN_2 | 330±9 ^d | 0.973±0.01 ^b | 1 581±28 ^c | 2.47±0.08 ^b | 942±62 ^c | 4 597±4 ^c | 67.39±5.89 ^b |

表中数值为平均值±标准差, 同列数字后不同字母表示有显著差异($P < 0.05$)。下表同。

最低。传统滴灌处理株高的总平均值比交替滴灌处理高37.9%；两种灌溉减施氮处理的株高平均值最大，分别比不施氮处理平均值和经验施氮处理平均值高7.9%和4.1%。茎粗则是以AN₀处理低于各处理，其中传统滴灌处理的茎粗总平均值比交替滴灌高1.3%，差异显著。水氮处理对根系各项特征参数有显著影响，其中AN₁处理的黄瓜根系的各项指标均高于其他处理。传统滴灌下，黄瓜根系的各项生长指标随着施氮量的增加而增加；而交替滴灌下，则呈先增高后降低的趋势，以N₁处理最高。在同一施氮水平下，N₀和N₁处理的黄瓜根系的各项生长指标均是交替滴灌处理高于传统滴灌，且差异显著；N₂处理恰好与此相反。对于根活力而言，同一施氮水平下，交替滴灌处理的根活力显著高于传统滴灌；在同一灌溉方式下，均是随施氮量的增加，呈先增高后降低的趋势，其中以N₁处理最高。

2 交替滴灌施氮对黄瓜叶片光合特性的影响

2.1 交替滴灌施氮对黄瓜叶片色素含量的影响

由表2可知，叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量在传统滴灌下均随着施氮量的增加而增加；而在交替滴灌下，则是呈先增高后降低的趋势；其中交替滴灌下，3种施氮量的叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素含量平均值分别比传统滴灌下的含量平均值高11.2%、3.8%及9.1%。同一施氮水平下，两种灌溉方式的N₂处理的叶绿素a含量平均值比N₀处理平均值和N₁处理平均值分别高7.8%和1.4%；而叶绿素b含量平均值和类胡萝卜素含量平均值则是在N₁下最高，分别比N₀和N₂高13%、4.8%和7.8%、0.2%。各处理间的叶绿素a/b差异大多不显著，但CN₁处理显著低于AN₂处理，低16%。分析原因可能是由于CN₁处理的叶绿素a含量显著降低，但叶绿素b与各处理差异并不显著，从而导致了其比值显著降低。

表2 交替滴灌施氮对黄瓜叶片色素含量的影响

Table 2 Effects of alternative drip irrigation and nitrogen fertilization on content of cucumber leaf pigment

| 处理 | 叶绿素a含量/mg·g ⁻¹ (FW) | 叶绿素b含量/mg·g ⁻¹ (FW) | 类胡萝卜素含量/mg·g ⁻¹ (FW) | 叶绿素a/b |
|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| CN ₀ | 0.798±0.01 ^c | 0.189±0.01 ^b | 0.270±0.01 ^d | 4.197±0.23 ^{ab} |
| CN ₁ | 0.815±0.01 ^d | 0.227±0.03 ^a | 0.283±0.02 ^c | 3.651±0.54 ^b |
| CN ₂ | 0.887±0.02 ^c | 0.230±0.01 ^a | 0.306±0.02 ^b | 3.872±0.11 ^{ab} |
| AN ₀ | 0.885±0.01 ^c | 0.221±0.01 ^{ab} | 0.299±0.01 ^b | 4.021±0.21 ^{ab} |
| AN ₁ | 0.968±0.01 ^a | 0.236±0.02 ^a | 0.331±0.02 ^a | 4.111±0.34 ^{ab} |
| AN ₂ | 0.923±0.02 ^b | 0.212±0.01 ^{ab} | 0.306±0.01 ^b | 4.345±0.17 ^a |

2.2 交替滴灌施氮对黄瓜叶片气体交换参数的影响

在同一灌溉方式下，P_n、G_s、T_r均表现出传统滴灌下随着施氮量的增加而增大，而交替滴灌则呈先增高后降低的趋势。传统滴灌下，N₂处理净光合速率分别比N₀、N₁高38%和4.1%；而交替滴灌下，N₁处理最高，分别比N₀和N₂高2.9%和13.9%。在同一施氮量下，CN₂处理的净光合速率比AN₂处理高38%，差异显著；而两种灌溉方式的净光合速率在N₀和N₁处理下差异均不显著。AN₂的气孔导度显著低于CN₂处理，而胞间CO₂浓度显著低于其他各处理。传统滴灌下蒸腾速率的总平均值比交替滴灌的平均值高15.8%，且差异显著。这表明在交替滴灌条件下，蒸腾速率变小，蒸腾量减少，更有利于保持植株水分，提高植株抗旱性。

2.3 交替滴灌施氮对黄瓜叶片荧光参数及荧光成像的影响

从表4中可知，暗适应下PSII的最大量子产额(F_v/F_m)在传统滴灌下随着施氮量的增加而升高；而在交替滴灌下则是呈先增高后降低的趋势；在同一氮水平下，交替滴灌处理在N₀、N₁处理下均高于传统滴灌。CN₀的F_v/F_m显著低于各处理，这表明传统滴灌不施氮处理对黄瓜叶片造成了光抑制。光适应下PSII的实际光化学效率(F_v'/F_m')及PSII的实际光化学量子效率(Φ_{PSII})与F_v/F_m的变化趋势一致。非光化学淬灭系数(NPQ)在传统滴灌下随着施氮量的增加而降低，而在交替滴灌处理下随着施氮量的增加呈先降低后升高的趋势。传统滴灌处理下NPQ的总平均值较交替滴灌处理的平均值

表3 交替滴灌施氮对黄瓜叶片气体交换参数的影响

Table 3 Effects of alternative drip irrigation and nitrogen fertilization on the parameters of cucumber leaf gas exchange

| 处理 | 净光合速率/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ | 气孔导度/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ | 胞间 CO_2 浓度/ $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ | 蒸腾速率/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ |
|-----------------|--|---|--|---|
| CN ₀ | 10.53±0.47 ^c | 499.67±10.97 ^{ab} | 309.00±3.61 ^a | 9.94±0.24 ^{ab} |
| CN ₁ | 13.97±1.01 ^{ab} | 482.67±10.97 ^{ab} | 303.00±3.00 ^a | 9.48±0.83 ^b |
| CN ₂ | 14.53±2.83 ^a | 505.67±36.25 ^a | 312.00±5.29 ^a | 10.73±0.43 ^a |
| AN ₀ | 11.67±0.21 ^{bc} | 467.33±41.95 ^{ab} | 309.67±9.01 ^a | 7.58±0.47 ^d |
| AN ₁ | 12.00±1.21 ^{ab} | 488.33±24.58 ^{ab} | 303.67±9.71 ^a | 9.92±0.28 ^{ab} |
| AN ₂ | 10.53±0.25 ^c | 442.33±31.01 ^b | 285.67±8.50 ^b | 8.54±0.17 ^c |

表4 交替滴灌施氮对黄瓜叶片荧光参数的影响

Table 4 Effects of alternative drip irrigation and nitrogen fertilization on fluorescence parameters of cucumber leaves

| 处理 | F_v/F_m | F_v'/F_m' | Φ_{PSII} | NPQ | ETR |
|-----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|
| CN ₀ | 0.805±0.003 ^c | 0.702±0.014 ^c | 0.603±0.009 ^b | 0.50±0.01 ^a | 205.08±3.01 ^b |
| CN ₁ | 0.813±0.002 ^b | 0.711±0.003 ^{bc} | 0.614±0.006 ^{ab} | 0.44±0.02 ^{bc} | 208.60±2.02 ^{ab} |
| CN ₂ | 0.814±0.002 ^{ab} | 0.718±0.007 ^{ab} | 0.622±0.002 ^a | 0.42±0.01 ^c | 211.61±0.63 ^a |
| AN ₀ | 0.811±0.001 ^b | 0.709±0.005 ^{bc} | 0.613±0.003 ^{ab} | 0.45±0.01 ^{bc} | 208.47±1.13 ^{ab} |
| AN ₁ | 0.818±0.002 ^a | 0.724±0.003 ^a | 0.623±0.009 ^a | 0.40±0.04 ^c | 212.03±3.13 ^a |
| AN ₂ | 0.814±0.001 ^{ab} | 0.707±0.011 ^{bc} | 0.609±0.009 ^b | 0.47±0.03 ^{ab} | 206.92±3.15 ^{ab} |

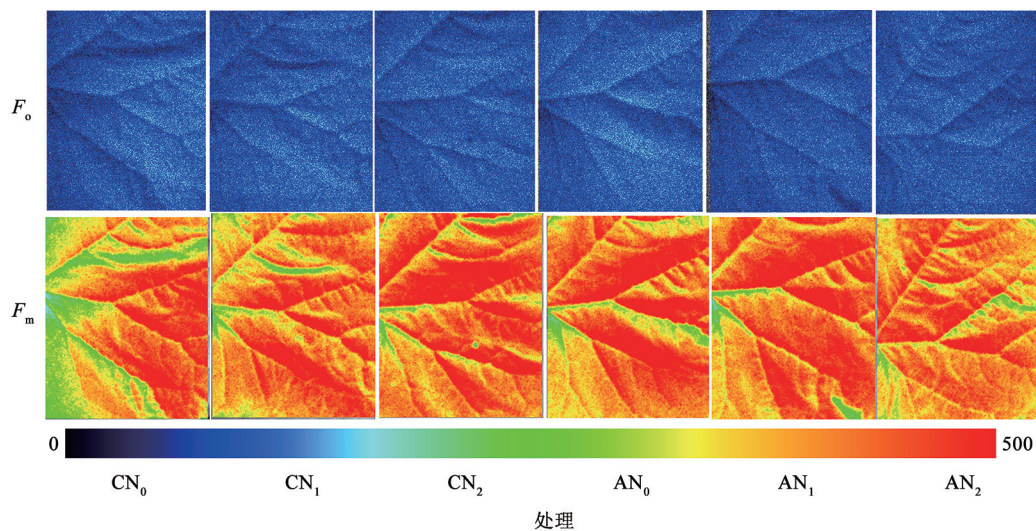
高3.3%。电子传递速率(ETR)以CN₀处理最低; AN₁处理最高,较CN₀高3.4%。

从图2中我们可以看出,以AN₁处理的 F_0 最低。对于 F_m 而言, CN₀显著低于各处理, AN₂次之。综合 F_0 和 F_m 我们可以得知光系统II最大限度接收光量子的能力, F_0 值低, F_m 值高, 则其接受光量子的范围宽, 即进入光化学反应途径的光量子越多。

Rfd可作为衡量植物健康程度的经验参数。从图3中可以看出, 交替滴灌施氮对黄瓜Rfd有影响, 其中以CN₀和AN₂的显著低于其他处理, 而AN₁及CN₁处理的Rfd较高。

3 交替滴灌施氮对日光温室黄瓜品质的影响

由图4可以看出, 在两种灌溉方式下, 黄瓜果实中的亚硝酸盐含量均随着施氮量的增加而增加;

图2 交替滴灌施氮对黄瓜叶片叶绿素荧光参数 F_0 和 F_m 的影响Fig.2 Effects of alternative drip irrigation and nitrogen fertilization on chlorophyll fluorescence parameters (F_0 , F_m) of cucumber leaves

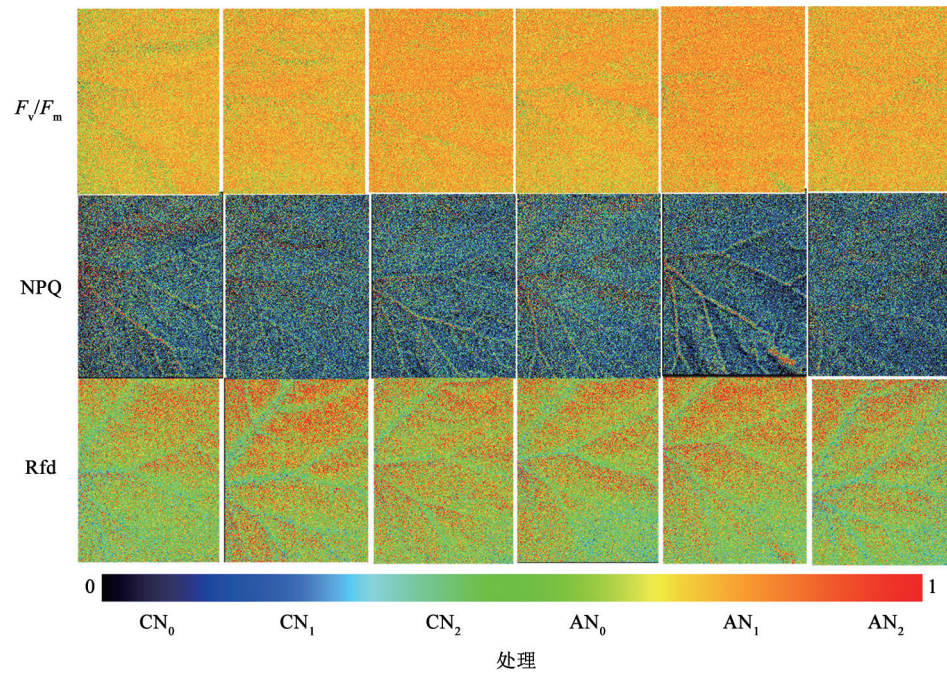


图3 交替滴灌施氮对黄瓜叶片叶绿素荧光参数 F_v/F_m 、NPQ和Rfd的影响

Fig.3 Effects of alternative drip irrigation and nitrogen fertilization on chlorophyll fluorescence parameters (F_v/F_m , NPQ, Rfd) of cucumber leaves

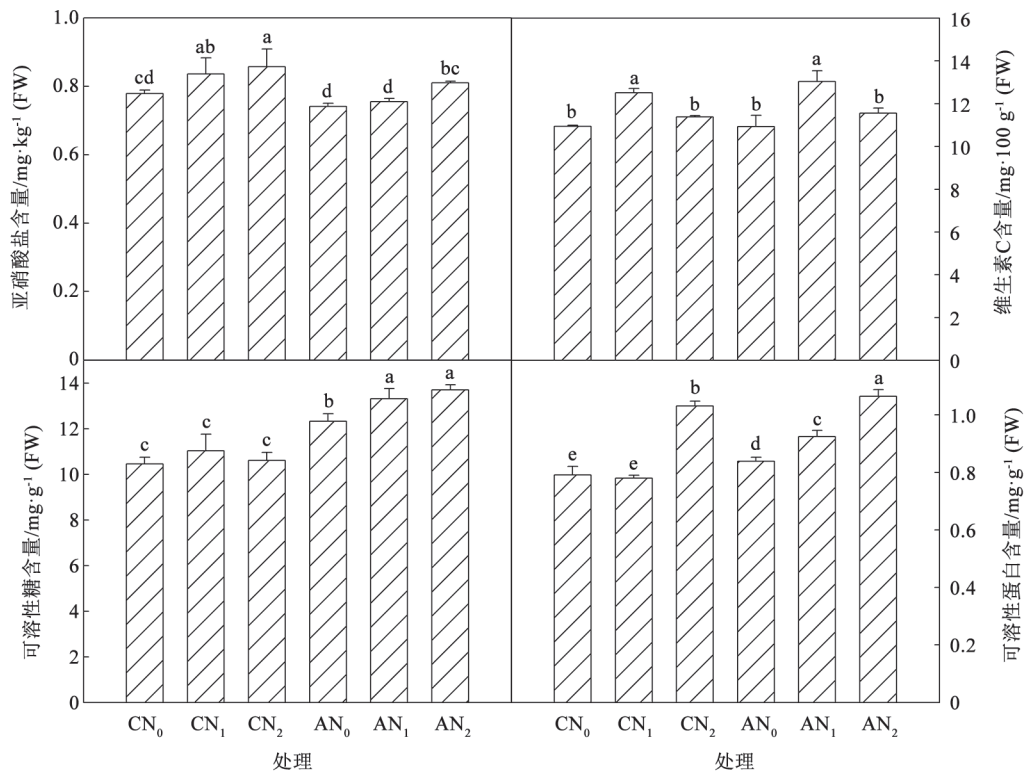


图4 交替滴灌施氮对黄瓜品质的影响

Fig.4 Effects of alternative drip irrigation and nitrogen fertilization on the quality of cucumber fruit
各柱形上不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

在同一氮水平上, 传统滴灌处理下的果实亚硝酸盐含量均高于交替滴灌处理。果实中的维生素C含量的变化不是随氮含量的增加呈正相关增加, 而是施入经验施氮量时, 其含量有下降的趋势。交替滴灌处理下, 果实中的可溶性糖和可溶性蛋白质的含量均显著高于传统滴灌处理。AN₂处理的可溶性蛋白质和可溶性糖含量均高于其他处理, 而AN₁处理的维生素C含量最高。总的来说, 交替滴灌处理黄瓜的各项品质指标均比传统滴灌含量高。

4 交替滴灌施氮对日光温室黄瓜产量和水氮利用效率的影响

传统滴灌下, 随着施氮量的增加, 黄瓜产量在增加, 并且水分利用效率也在提高, 而在交替滴灌下并没有这样的趋势。AN₁处理的黄瓜产量最高, CN₂处理次之, 但差异不显著, 仅高0.7%。CN₀的瓜条数显著低于各处理, 而单果重与各处理差异不显著, 这表明, 造成CN₀产量低的主要原因是因为瓜条数的减少。交替滴灌处理下水分利用效率的总平均值比传统滴灌处理的总平均值高78.5%, 分析原因可能是有两个方面造成: 一是因为交替滴灌处理的灌水量的减少, 灌水量比传统滴灌低43.6%; 二是因为交替滴灌提高了黄瓜的产量。在N₁下, 交替滴灌处理的氮肥农学利用效率较传统滴灌处理高16.1%; 而在N₂水平下, 传统滴灌处理的ANUE比交替滴灌处理高77%。在传统滴灌条件下, N₁的ANUE较N₂高58.5%; 而在交替滴灌下, N₁的ANUE比N₂高225.5%。

讨 论

水分和养分是影响作物生长发育和生产力提高的重要物质基础, 水是肥效发挥的有利帮手, 肥是开启水土体系生产产能的阀门, 故水肥耦合是

取得作物高产、高效、优质的有效途径。本研究结果发现, 在同一施氮水平下, 增大灌水量可以提高黄瓜的株高和茎粗。从表6中我们可以得知, 在N₂处理下, 增加灌水量有利于黄瓜植株的生长, 但CN₂处理黄瓜的各项根系指标较交替滴灌小, 这说明水分过多并不利于根系的生长。在滴灌模式下, 科学合理的灌溉方式与施氮量相结合能促进黄瓜植株的生长, 进而提高产量和水分利用效率。根长、根直径、根体积、根表面积及根尖数等参数可以作为评价植株根系生长状况的指标。徐国伟等(2015)研究表明, 水稻根系形态及生理活性在不同水氮处理间存在明显差异。同一氮肥条件下, 轻度水分胁迫增加了根长, 而同一水分条件下, 重施氮肥并不能显著提高根长, 中氮轻度水分胁迫处理协同地上地下生长, 降低了根冠比。这与本研究试验结果一致。交替滴灌的灌水量比传统滴灌减少了43.6%, 且各处理以AN₁处理黄瓜的各项根系指标最高, 这表明较少的灌水量以及减氮处理可以显著提高黄瓜的各项根系指标。

光合作用系统的所有色素, 是与光能吸收转换和电子传递有关。有报道认为, 水分胁迫明显降低了叶绿素含量, 但是常莉飞和邹志荣(2007)研究表明, 亏缺灌溉有利于提高温室黄瓜的叶绿素含量。而氮素对光合作用的影响直接与叶绿素含量有关, 施氮后叶绿素含量增加(冯福生等1986), 导致叶肉细胞光合活性和叶片吸光强度增加, 最终使得净光合速率增加。本试验结果表明, 交替滴灌下的色素含量显著高于传统滴灌, 这可能是由于传统滴灌下灌水量的增加对叶片色素含量造成了一种“稀释效应”。虽然增施氮肥和减少灌水量使黄瓜叶绿素含量提高, 但是叶绿素水平的高低与净光合速率的高低并没必然的联系。有报道

表6 交替滴灌施氮对黄瓜产量及水氮利用效率的影响

Table 6 Effects of alternative drip irrigation and nitrogen fertilization on cucumber fruit yield, WUE and ANUE

| 处理 | 产量/kg·667 m ⁻² | 瓜条数/条·667 m ⁻² | 单果重/g | 灌水量/m ³ | 水分利用效率/kg·m ⁻³ | 氮肥农学利用效率/% |
|-----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------|--------------------------|
| CN ₀ | 6 724±145 ^c | 36 060±481 ^c | 186±4 ^{ab} | 4.6522 | 20.80±0.4 ^c | — |
| CN ₁ | 6 951±117 ^{ab} | 36 778±263 ^b | 189±2 ^a | 4.6522 | 21.51±0.4 ^c | 50.51±8.7 ^a |
| CN ₂ | 7 011±105 ^{ab} | 37 449±278 ^{ab} | 187±4 ^{ab} | 4.6522 | 21.69±0.3 ^c | 31.87±14.8 ^{ab} |
| AN ₀ | 6 799±50 ^{bc} | 37 241±120 ^{ab} | 182±2 ^b | 2.6231 | 37.31±0.3 ^b | — |
| AN ₁ | 7 063±106 ^a | 37 472±447 ^{ab} | 188±3 ^a | 2.6231 | 38.76±0.6 ^a | 58.62±12.5 ^a |
| AN ₂ | 6 962±92 ^{ab} | 37 681±223 ^a | 184±2 ^{ab} | 2.6231 | 38.19±0.5 ^{ab} | 18.01±8.5 ^b |

认为,水分亏缺导致光合速率降低,其主要原因在于气孔导度降低,影响 CO_2 进入叶内(李世清等2000);而轻度的水分亏缺虽能影响叶片的生长,但并不影响叶绿体光合酶活性,因而对光合速率不造成明显影响(山仑和徐萌1991)。本研究结果表明,当黄瓜在交替滴灌时,叶片气孔导度下降,胞间 CO_2 浓度变小,从而使净光合速率降低,且施氮量越大其净光合速率下降幅度越大。

施氮肥能增加小麦开花后旗叶叶绿素含量和净光合速率,提高暗适应下PSII的最大量子产额(F_v/F_m),提高PSII活性等叶绿素荧光参数,进而改善光合功能(邹铁祥等2007)。轻度水分胁迫对 Φ_{PSII} 没有影响,在轻度水分胁迫下光合作用的碳氧化还原循环是PSII活性的主要电子汇(electron sinks),因此其活性不会降低(Cornic和Fresneau 2002)。植株在干旱胁迫下PSII反应中心的电子激发速率和电子传递速率之间的平衡被打破,使PSII反应中心处于不稳定的状态(Efeoglu等2009),但植株可通过关闭部分PSII反应中心来耗散过剩的激发能,实现自我保护。从表4中我们可以得知, CN_0 的PSII最大光量子产量显著低于各处理,但NPQ显著高于各处理,这表明传统滴灌不施氮对黄瓜造成了光抑制,造成了反应中心的非光化学过程的热耗散比例显著增加,从而使PSII活性降低。结合灌水量进行适量追施氮肥可改善黄瓜叶片的光合功能,提高了PSII的活性和PSII光化学最大效率,使表观光合作用电子传递速率和PSII总的光化学量子产量提高,降低了非辐射能量耗散,使黄瓜叶片所吸收的光能较充分地用于光合作用。

可溶性糖含量是评价黄瓜品质优劣的一个重要指标。有研究表明,随着施氮水平的升高,可溶性糖含量逐渐降低,说明施用氮素化肥不利于可溶性糖的形成和积累(徐坤范等2005)。传统滴灌下,可溶性糖含量低于交替滴灌,故果实风味较交替滴灌淡。在交替滴灌下,黄瓜通过降低果实水分含量,增加可溶性糖和可溶性蛋白含量,提高渗透调节能力,从而降低水势,通过增加这些来共同保护果实免受干旱胁迫。维生素C也是蔬菜的一个重要品质指标,在适度亏缺灌溉条件下维生素C含量最高,高水灌溉含量最低,且增施氮肥会降低蔬菜的维生素C含量(徐坤范等2005;杨治平等

2007)。本试验结果表明,黄瓜在交替滴灌下,果实中维生素C的含量增加。亚硝酸盐含量是蔬菜安全品质的重要指标。从图4中我们可以的得知,在同一灌溉方式, N_2 处理的亚硝酸盐含量均高于减施氮和不施氮处理。而在同一施氮水平下,传统滴灌亚硝酸盐含量高于交替滴灌,尽管传统滴灌处理的果实中亚硝酸盐的含量较高,但各处理的亚硝酸盐含量均远低于国家对无公害蔬菜安全要求的瓜果类蔬菜亚硝酸盐 $\text{NO}_2^- \leq 4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的标准。

作物产量是各种处理效应的最终反映。不同处理造成了根系发育、生理活性等方面的不同,也造成了养分吸收量的差异,这些差异最终都表现在作物产量上。施氮对提高蔬菜产品的产量有较大影响。已有研究表明,适量增施氮肥可以提高蔬菜产量(Yaghi等2013; Rahil和Qanadillo 2015)。在土壤干旱状况下施用氮肥可以促进作物对深层土壤水分的利用而增加作物产量(Sadras等2012; Oppong Danso等2015),而有学者则持相反观点,认为施氮可提高作物对干旱胁迫的敏感性,使作物受胁迫程度加剧,对产量造成不利的影响(上官周平 1997)。本试验结果表明,交替滴灌处理的黄瓜平均产量高于传统滴灌处理,且灌水量降低43.6%,从而提高了水分利用效率。但在交替滴灌条件下,经验施氮量对黄瓜增产不利。本试验的结果产量较大田生产上的黄瓜产量要低很多,可能主要原因是我们温室常年种植黄瓜,造成了黄瓜的产量降低。

WUE反映了农业生产中作物的能量转化效率。施肥可显著提高作物产量和水分利用效率(张艳等2009)。合理施肥,能促进植物生长发育和良好冠层盖度的形成,减少田间植物株间的无效蒸发,从而提高水分的利用效率。赵义涛等(2007)的辣椒水肥耦合试验研究表明,增加灌水量降低了水分利用效率,而施肥能提高水分利用效率,低水高肥耦合能显著提高辣椒的水分利用效率。在传统滴灌模式下,经验施氮处理与减施氮处理比较,产量高,WUE高。因为土壤肥料越高,土壤的矿质养分供应越充足,黄瓜的蒸腾系数就越小,而且“以肥补水”提高了水分利用效率。但在交替滴灌下,经验施氮处理的WUE却低于减施氮处理。从表1、6中我们可以得知,在交替滴灌处理下,灌水量

较少, 而经验施氮处理, 可能会造成土壤根系盐浓度较高, 不利于黄瓜更好的生长。

设施农业生产上普遍存在氮肥施用量过大的问题, 这样既造成了氮肥的浪费, 降低了利用效率和经济效益, 又给环境带来巨大的压力。而提高氮肥利用效率, 不能简单采取降低氮肥用量、消耗土壤氮素的途径, 应追求在氮肥用量适宜的基础上, 通过水肥合理的耦合搭配来真正提高氮肥的利用率, 获得较高的作物产量(郑永美等2007)。氮肥农学利用效率是单位施肥量对作物籽粒产量增加的反映, 是农业生产中最关心的经济指标之一。大量的研究(葛均筑等2014; 郭丙玉等2015)表明, 过量的施入氮肥, 可造成氮肥利用效率降低; 而适当减少施氮量, 虽会造成产量降低, 但氮肥利用效率得到一定提高。本研究结果表明: 在传统滴灌条件下, 灌水量较多, 施入较高的氮肥, 能获得较高的产量, 但会造成氮肥利用效率的降低; 而在交替滴灌条件下, 由于灌水量的减少, 若施入高氮, 反而不利于黄瓜的生长, 且会造成氮肥利用效率降低。

综上所述, 交替滴灌较传统滴灌灌水量降低43.6%, 水分利用效率提高78.5%, 且产量未下降。交替滴灌减施氮处理使黄瓜根系的生长及根系活力显著高于传统灌溉, 在保证黄瓜生长、产量和品质的同时, 提高水分和氮素利用效率, 可作为日光温室黄瓜提质增效的一种水氮管理模式。

参考文献

- Cabello MJ, Castellanos MT, Romojaro F, Martinez-Madrid C, Ribas F (2009). Yield and quality of melon grown under different irrigation and nitrogen rates. *Agr Water Manage*, 96 (5): 866–874
- Cao Q, Wang SZ, Gao LH, Ren HZ, Chen QY, Zhao JW, Wang Q, Sui XL, Zhang ZX (2010). Effects of alternative furrow irrigation on growth and water use efficiency of cucumber in solar greenhouse. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 26 (1): 47–53 (in Chinese with English abstract) [曹琦, 王树忠, 高丽红, 任华中, 陈青云, 赵景文, 王倩, 睦晓蕾, 张振贤(2010). 交替隔沟灌溉对温室黄瓜生长及水分利用效率的影响. *农业工程学报*, 26 (1): 47–53]
- Cao QJ, Sun Q, Li JS, Guo XN, Chen R (2010). Effect of N fertilizer on growth and yield of cucumber and optimum application rate of N in greenhouse. *Northern Hortic*, (8): 1–4 (in Chinese with English abstract) [曹庆杰, 孙权, 李建设, 郭鑫年, 陈茹(2010). 不同施氮量对设施黄瓜生长及产量的影响. *北方园艺*, (8): 1–4]
- Chang LF, Zhou ZR (2007). Effects of regulated deficit irrigation (RDI) on the growth, yield and quality of greenhouse cucumber. *J Anhui Agric Sci*, 35 (23): 7142–7144 (in Chinese with English abstract) [常莉飞, 邹志荣(2007). 调亏灌溉对温室黄瓜生长发育、产量及品质的影响. *安徽农业科学*, 35 (23): 7142–7144]
- Chen Q, Zhang X, Zhang H, Christie P, Li X, Horlacher D, Liebig HP (2004). Evaluation of current fertilizer practice and soil fertility in vegetable production in the Beijing region. *Nutr Cycl Agroecosys*, 69 (1): 51–58
- Cornic G, Fresneau C (2002). Photosynthetic carbon reduction and carbon oxidation cycles are the main electron sinks for photosystem II activity during a mild drought. *Ann Bot*, 89 (7): 887–894
- Efeoglu B, Ekmekci Y, Cicek N (2009). Physiological responses of three maize cultivars to drought stress and recovery. *S Afr J Bot*, 75 (1): 34–42
- Fageria NK, Baligar VC (2003). Methodology for evaluation of lowland rice genotypes for nitrogen use efficiency. *J Plant Nutr*, 26: 1315–1333
- Fan XL, Shi ZJ, Wu P (2002). Effects of nitrogen fertilizer on parameters of rice (*Oryza sativa* L.) root architecture and their genotypic difference. *J Northwest Sci-Tech Univ Agric For (Nat Sci Ed)*, 30 (2): 1–5 (in Chinese with English abstract) [樊小林, 史正军, 吴平(2002). 水肥(氮)对水稻根构型参数的影响及其基因型差异. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 30 (2): 1–5]
- Feng FS, Chen WL, Li J, Wang YK, Wang QF (1986). Variation of the activities of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase and nitrate reductase in leaves from wheat plant grown different nitrogen levels. *Plant Physiol Commun*, 34 (6): 20–22 (in Chinese with English abstract) [冯福生, 陈文龙, 李洁, 王玉崑, 王秋芬(1986). 不同供氮水平下冬小麦叶片中RuBP羧化酶和硝酸还原酶的活性变化. *植物生理学通讯*, 34 (6): 20–22]
- Gao B, Li JL, Chen Q, Liu QH, He H (2008). Effects of different irrigation and fertilization strategies on the yield and inorganic N in greenhouse tomato system. *J Soil Water Conserv*, 22 (6): 136–140 (in Chinese with English abstract) [高兵, 李俊良, 陈清, 刘庆花, 何华(2008). 不同水氮管理对日光温室番茄产量及土壤无机氮的影响. *水土保持学报*, 22 (6): 136–140]
- Ge JZ, Li SY, Zhong XY, Yuan GY, Xu Y, Tian SY, Cao CG, Zhai ZB, Liu SQ, Zhan M, et al (2014). Effects of nitrogen application and film mulching on yield performance parameters and nitrogen use efficiency of spring maize in the middle reaches of Yangtze River. *Acta Agron Sin*, 40 (6): 1081–1092 (in Chinese with English abstract) [葛均筑, 李淑娅, 钟新月, 袁国印, 徐莹, 田少阳, 曹湊贵, 翟中兵, 刘诗晴, 展茗等(2014). 施氮量与地膜覆盖对长江中游春玉米产量性能及氮肥利用效率的影响. *作物学报*, 40 (6): 1081–1092]
- Guo BY, Gao H, Tang C, Liu T, Chu GX (2015). Response of water coupling with N supply on maize nitrogen uptake, water and N use efficiency, and yield in drip irrigation condition. *Chin J Appl Ecol*, 26 (12): 3679–3686 (in Chinese with English abstract) [郭丙玉, 高慧, 唐诚, 刘涛, 褚贵新(2015). 水肥互作对滴灌玉米氮素吸收、水氮利用效率及产量的影响. *应用生态学报*, 26 (12): 3679–3686]
- Guo R, Li X, Christie P, Chen Q, Jiang R, Zhang F (2008). Influence of root zone nitrogen management and a summer catch crop on cucumber yield and soil mineral nitrogen dynamics in intensive production systems. *Plant Soil*, 313 (1): 55–70

- Jin K, Wang DS, Cai DX, Zhou Y, Guo SC, Huang F, Wang CL (1999). Response and interaction for water and fertilizer. II. The effect of different compositions of N, P and water on the yield of winter wheat. *J Plant Nutr Fert*, 5 (1): 9–13 (in Chinese with English abstract) [金轲, 汪德水, 蔡典雄, 周涌, 郭世昌, 黄峰, 王翠玲 (1999). 水肥耦合效应研究. II. 不同N、P、水配合对旱地冬小麦产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 5 (1): 9–13]
- Kang SZ, Zhang JH, Liang ZS, Hu XT, Cai HJ (1997). The controlled alternative irrigation—a new approach for water saving regulation in farmland. *Agric Res Arid Areas*, 15 (1): 4–9 (in Chinese with English abstract) [康绍忠, 张建华, 梁宗锁, 胡笑涛, 蔡焕杰 (1997). 控制性交替灌溉——一种新的农田节水调控思路. *干旱地区农业研究*, 15 (1): 4–9]
- Li DF, Zhang SL, Shan CJ, Wang BL, Ren XJ, Zhang XH (2011). Research progress on wheat nitrogen nutrition efficiency. *Resour Deve Market*, 27 (2): 164–166 (in Chinese with English abstract) [李东方, 张胜利, 单长卷, 王丙丽, 任秀娟, 张喜焕 (2011). 小麦氮素营养效率的研究进展. *资源开发与市场*, 27 (2): 164–166]
- Li HS (2002). Principle and Technology of Plant Physiological and Biochemical Experiments. Beijing: Higher Education Press [李合生 (2002). *植物生理生化实验原理与技术*. 北京: 高等教育出版社]
- Li QM, Zou ZR, Guo XD, Cai HJ, Zhang XP (2005). Effect of different irrigation maximums on growth dynamics, yield and quality of greenhouse cucumber during initial bloom stage. *J Northwest Sci-Tech Univ Agric For (Nat Sci Ed)*, 33 (4): 47–51 (in Chinese with English abstract) [李清明, 邹志荣, 郭晓冬, 蔡焕杰, 张西平 (2005). 不同灌溉上限对温室黄瓜初花期生长动态、产量及品质的影响. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 33 (4): 47–51]
- LI SQ, Tian XH, Li SX (2000). Physiological compensation effects of nutrient on winter wheat in dryland. *Acta Bot Boreale-Occident Sin*, 20 (1): 22–28 (in Chinese with English abstract) [李世清, 田霄鸿, 李生秀 (2000). 养分对旱地小麦水分胁迫的生理补偿效应. *西北植物学报*, 20 (1): 22–28]
- Li SX, LI SQ, Gao YJ, Wang XQ, He HX, Du JJ (1994). The mechanism and effects of N fertilization in increasing water use efficiency. *Agric Res Arid Areas*, 12 (1): 38–46 (in Chinese with English abstract) [李生秀, 李世清, 高亚军, 王喜庆, 贺海香, 杜建军 (1994). 施用氮肥对提高旱地作物利用土壤水分的作用机理和效果. *干旱地区农业研究*, 12 (1): 38–46]
- Oppong Danso E, Abenney-Mickson S, Sabi EB, Plauborg F, Abekoe M, Kugblenu YO, Jensen CR, Andersen MN (2015). Effect of different fertilization and irrigation methods on nitrogen uptake, intercepted radiation and yield of okra (*Abelmoschus esculentum* L.) grown in the Keta Sand Spit of Southeast Ghana. *Agric Water Manage*, 147: 34–42
- Pei XB, Zhang FM, Wang L (2002). Effect of light and temperature on uptake and distribution of nitrogen, phosphorus and potassium of solar greenhouse cucumber. *Sci Agric Sin*, 35 (12): 1510–1513 (in Chinese with English abstract) [裴孝伯, 张福垚, 王柳 (2002). 不同光温环境对日光温室黄瓜氮磷钾吸收分配的影响. *中国农业科学*, 35 (12): 1510–1513]
- Peng J, Guo L, Peng Q, Wu DL, Wang HQ (2013). Effects of different irrigation methods on growth and quality of flue-cured tobacco. *Plant Physiol J*, 49 (1): 53–56 (in Chinese with English abstract) [彭静, 郭磊, 彭琼, 武德里, 王惠群 (2013). 不同灌溉方式对烤烟的生长及品质的影响. *植物生理学报*, 49 (1): 53–56]
- Rahil MH, Qanadillo A (2015). Effects of different irrigation regimes on yield and water use efficiency of cucumber crop. *Agric Water Manage*, 148: 10–15
- Sadras VO, Lawson C, Hooper P, McDonald GK (2012). Contribution of summer rainfall and nitrogen to the yield and water use efficiency of wheat in Mediterranean-type environments of South Australia. *Eur J Agron*, 36 (1): 41–54
- Shan L, Xu M (1991). Water-saving agriculture and its physio-ecological bases. *Chin J Appl Ecol*, 2 (1): 70–76 (in Chinese with English abstract) [山仑, 徐萌 (1991). 节水农业及其生理生态基础. *应用生态学报*, 2 (1): 70–76]
- Shangguan ZP (1997). Regulation of nitrogen nutrition on photosynthetic characteristics of winter wheat on dryland. *Plant Nutr Fert Sci*, 3 (2): 105–110 (in Chinese with English abstract) [上官周平 (1997). 氮素营养对韩作小麦光合特性的调控. *植物营养与肥料学报*, 3 (2): 105–110]
- Tang LL, Chen Q, Li XL, Chen YZ, Ding GG (2005). Studies on the target value of nitrogen supply for greenhouse tomato growth during autumn-winter season. *J Plant Nutr Fert*, 11 (2): 230–235 (in Chinese with English abstract) [汤丽玲, 陈清, 李晓林, 陈永智, 丁光国 (2005). 日光温室秋冬茬番茄氮素供应目标值的研究. *植物营养与肥料学报*, 11 (2): 230–235]
- Wang L, Zhang FM, Wei XJ (2007). Effects of different nitrogen fertilization levels on quality and yield of cucumber cultivated in solar greenhouse. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 23 (12): 225–229 (in Chinese with English abstract) [王柳, 张福垚, 魏秀菊 (2007). 不同氮肥水平对日光温室黄瓜品质和产量的影响. *农业工程学报*, 23 (12): 225–229]
- Xu GW, Wang HZ, Zhai ZH, Sun M, Li YJ (2015). Effect of water and nitrogen coupling on root morphology and physiology, yield and nutrition utilization for rice. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 31 (10): 132–141 (in Chinese with English abstract) [徐国伟, 王贺正, 翟志华, 孙梦, 李友军 (2015). 不同水氮耦合对水稻根系形态生理、产量与氮素利用的影响. *农业工程学报*, 31 (10): 132–141]
- Xu KF, Ai XZ, Zhang XH, Xu KL (2005). Effect of nitrogen levels on quality of cucumber in solar greenhouse. *Acta Agric Boreale-Occident Sin*, 14 (1): 162–166 (in Chinese with English abstract) [徐坤范, 艾希珍, 张晓慧, 徐康乐 (2005). 氮素水平对日光温室黄瓜品质的影响. *西北农业学报*, 14 (1): 162–166]
- Yaghi T, Arslan A, Naoum F (2013). Cucumber (*Cucumis sativus* L.) water use efficiency (WUE) under plastic mulch and drip irrigation. *Agric Water Manage*, 128: 149–157
- Yang ZP, Chen MC, Zhang Q, Zhang JJ (2007). Effects of different fertilizer measurement on nutrient utilization in cucumber and nitrate leaching loss from soil in greenhouse. *J Soil Water Conserv*, 21 (2): 57–60 (in Chinese with English abstract) [杨治平, 陈明昌, 张强, 张建杰 (2007). 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. *水土保持学报*, 21 (2): 57–60]

- Zhang GH, Ren HZ, Gao LH, Zhang FM, Cao ZF, Zhang ZX (2005). The soil microbe populations and enzyme activities in helio-greenhouse of Beijing suburbs. *Sci Agric Sin*, 38 (7): 1447–1452 (in Chinese with English abstract) [张国红, 任华中, 高丽红, 张福垠, 曹之富, 张振贤(2005). 京郊日光温室土壤微生物状况和酶活性. *中国农业科学*, 38 (7): 1447–1452]
- Zhang Y, Zhang Y, Chen C, Li D, Zhai BN (2009). Effect of water stress and nitrogen application on growth and development of winter wheat genotypes with different water and nitrogen use efficiency at seedling stage. *J Trit Crops*, 29 (5): 844–848 (in Chinese with English abstract) [张艳, 张洋, 陈冲, 李东, 翟丙年(2009). 水分胁迫条件下施氮对不同水氮效率基因型冬小麦苗期生长发育的影响. *麦类作物学报*, 29 (5): 844–848]
- Zhang ZB (2000). Discussion on the sustainable development of vegetable protection in China. *J Shenyang Agric Univ*, 31 (1): 15–17 (in Chinese with English abstract) [张志斌(2000). 关于我国设施蔬菜生产可持续发展的探讨. *沈阳农业大学学报*, 31 (1): 15–17]
- Zhao YT, Liang YJ, Xu GB (2007). Water use efficiency under the condition of capsicum cultivation in protective field. *J Jilin Agric Univ*, 29 (5): 523–527 (in Chinese with English abstract) [赵义涛, 梁运江, 许广波(2007). 水肥耦合对保护地辣椒水分利用效率的影响. *吉林农业大学学报*, 29 (5): 523–527]
- Zheng YM, Ding YF, Wang QS, Li GH, Wu H, Yuan Q, Wang HZ, Wang SH (2007). Favorable effects of nitrogen before transplanting on nitrogen distribution and utilization efficiency in rice rhizosphere soil. *Sci Agric Sin*, 40 (2): 314–321 (in Chinese with English abstract) [郑永美, 丁艳锋, 王强盛, 李刚华, 吴昊, 袁奇, 王惠芝, 王绍华(2007). 起身肥改善水稻根际土壤氮素分布与利用的研究. *中国农业科学*, 40 (2): 314–321]
- Zou TX, Dai YB, Jiang D, Jing Q, Cao WX (2007). Effects of nitrogen and potassium application levels on flag leaf photosynthetic characteristics after anthesis in winter wheat. *Acta Agron Sin*, 33 (10): 1667–1673 (in Chinese with English abstract) [邹铁祥, 戴廷波, 姜东, 荆奇, 曹卫星(2007). 氮、钾水平对小麦花后旗叶光合特性的影响. *作物学报*, 33 (10): 1667–1673]

Effects of alternative drip irrigation and nitrogen fertilization on growth, photosynthesis, yield, and water-nitrogen use efficiency of cucumbers in solar greenhouse

LIU Xue-Na¹, LIU Bin-Bin², CUI Qing-Qing¹, ZHANG Wen-Dong¹, LI Man¹, AI Xi-Zhen^{1,2}, BI Huan-Gai^{1,2}, LI Qing-Ming^{1,2,3,*}

¹College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, ²State Key Laboratory of Crop Biology,

³Scientific Observing and Experimental Station of Environment Controlled Agricultural Engineering in Huang-Huai-Hai Region, Ministry of Agriculture, Tai'an, Shandong 271018, China

Abstract: The purpose of this study was to reach a high-yield, good quality and high-efficiency water-nitrogen system for cucumber in the solar greenhouse. 'Jinyou No. 35' cucumber was chosen as the test cultivar. The experiment utilized the split-plot design with drip irrigation as main plots and nitrogen as subplots. The main plots was drip irrigation (conventional drip irrigation and alternative drip irrigation), the subplots was nitrogen (experiential nitrogen 900 kg·hm⁻²; saving 50% nitrogen compared to experiential nitrogen 450 kg·hm⁻²; no nitrogen 0 kg·hm⁻²). So there were six treatments in total. The results showed that the alternative drip irrigation and nitrogen fertilization decreased significantly the plant height and stem diameter of cucumbers, but the root growth characteristics and root activity were increased significantly. Compared to conventional drip irrigation, the alternative drip irrigation improved the content of leaf pigment, and the transpiration rate (T_r) was significantly declined, but net photosynthetic rate (P_n) was not difference. For the quality of cucumbers, the content of nitrate under the same irrigation levels significantly added with the increasing of nitrogen, $N_2 > N_1 > N_0$. However, the content of VC and soluble sugar showed a trend of first increase and then decline. Under the same nitrogen levels, the quality of cucumber fruit in the alternative drip irrigation treatment was better than that of the conventional drip irrigation. Compared to conventional drip irrigation, the amount of irrigation water in the alternative drip irrigation decreased by 43.6%, but the average of water use efficiency increased by 78.5%. About the yield, the AN_1 was the first place, CN_2 was second, and there is no difference. The agronomy use efficiency of nitrogen (ANUE) declined with the increasing of nitrogen. Under the alternative drip irrigation, the low nitrogen was better yield and ANUE. Under the conventional drip irrigation, we put the experiential nitrogen (N_2), the yield increased by 0.9% than CN_1 , but the ANUE decreased by 36.9%. Therefore, the alternative drip irrigation with 450 kg·hm⁻² can optimize coupling effect of water-nitrogen; improve water-nitrogen use efficiency significantly, which can be used as a water-nitrogen management mode of solar greenhouse cucumber.

Key words: cucumber; alternative drip irrigation and nitrogen fertilization; yield; water-nitrogen use efficiency

Received 2016-04-14 Accepted 2016-05-26

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31471918), Natural Science Foundation of Shandong Province (Grant No. ZR2013CM008), Science and Technology Project of Colleges and Universities in Shandong Province (Grant No. J14LF06), and Programs of Shandong Province Agricultural Major Application Technology Innovation.

*Corresponding author (E-mail: gslqm@sdau.edu.cn).