

炭基氮肥与灌水对温室番茄产量、品质及土壤硝态氮残留的影响

李艳梅^{1,2,3}, 杨俊刚^{1,2,3}, 孙焱鑫^{1,2,3*}, 廖上强^{1,2,3}, 张琳^{1,2,3}, 邹国元^{1,2,3}

(1.北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097; 2.农业部都市农业(北方)重点实验室, 北京 10097; 3.北京市缓控释肥料工程技术研究中心, 北京 100097)

摘要:炭基氮肥是近年来生物炭农用的重要方向。为明确其在不同灌水量条件下设施栽培体系的农学与环境效应,通过两种工艺将生物炭与尿素复合,采用田间试验研究浸泡型炭基尿素和高压型炭基尿素与两个不同灌溉水量(常规及低量)相耦合对番茄光合作用、生长、产量、品质、土壤盐度及硝态氮残留的影响。结果表明,与常规灌水相比,低量灌水使叶片光合作用及叶绿素合成受到抑制,番茄出现减产;浸泡型炭基尿素处理所受抑制相对较弱,番茄产量降低不明显;高压型炭基尿素处理所受抑制较强,番茄产量明显降低;减水措施增强了两种炭基尿素处理叶片的蒸腾作用,提升了番茄果实可溶糖与Vc含量;减水措施还表现为明显增加了两种炭基尿素处理0~80 cm土层中的硝态氮残留量。与普通尿素相比,浸泡型和高压型炭基尿素处理起到了增强叶片光合强度及调节叶片蒸腾强度的作用,增加了叶片叶绿素合成及果径和单果重,番茄产量分别增加34.5%~51.5%、9.1%~15.6%;两种炭基尿素在常规灌水时表现为降低果实硝酸盐及Vc含量,在低量灌水时表现为增加果实可溶糖与Vc含量;与普通尿素相比,浸泡型炭基尿素处理在常规灌水和低量灌水时0~80 cm土层硝态氮总量分别减少了45%和37%,高压型炭基尿素处理在常规灌水时0~80 cm土层的硝态氮总量无明显变化,减量灌水时0~80 cm土层的硝态氮总量增加了13.0%;浸泡型炭基尿素与低量灌水组合处理的土壤硝态氮残留量低于普通尿素与常规灌水组合处理。浸泡型炭基尿素在提升番茄产量与品质、降低土壤氮素环境风险及减少灌水投入等方面均具有较好的推广潜力。

关键词:番茄;高压型炭基氮肥;浸泡型炭基氮肥;常规灌水;低量灌水

中图分类号:S274 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)10-1965-08 doi:10.11654/jaes.2015.10.018

Coupling Effects of Biochar-Based Urea and Irrigation on Tomato Yield and Fruit Quality and Soil Nitrate Content in Greenhouse Facility

LI Yan-mei^{1,2,3}, YANG Jun-gang^{1,2,3}, SUN Yan-xin^{1,2,3*}, LIAO Shang-qiang^{1,2,3}, ZHANG Lin^{1,2,3}, ZOU Guo-yuan^{1,2,3}

(1. Institute of Plant Nutrition and Resource, Beijing Academy of Agricultural and Forest Science, Beijing 100097, China; 2. Key Laboratory of Urban Agriculture(North), Ministry of Agriculture, P.R.China, Beijing 100097, China; 3. Beijing Engineering Technology Research Center for Slow/Controlled-release Fertilizer, Beijing 100097, China)

Abstract: Biochar-based nitrogen fertilizer has been one of important applications of biochar in agriculture. Here a greenhouse experiment was conducted to examine the agronomic and environmental effects of two types of biochar-based urea (water-immersed and highly-pressurized) under two irrigation conditions (conventional level and low level). Leaf photosynthesis, growth, yield and quality of tomato, soil salinity, and soil nitrate content were observed. Results showed that reducing irrigation level by 46.0% inhibited leaf photosynthesis and decreased tomato yield, as compared to the conventional irrigation level. The leaf photosynthesis and tomato yield in the treatment with highly-pressurized biochar-based urea was significantly decreased, whereas such inhibition was not obvious in the treatment with water-immersed biochar-based urea. However, the reduced irrigation increased leaf transpiration rate, fruit soluble sugar and Vc content and soil nitrate content in both biochar-based urea treatments. Compared with conventional urea, water-immersed and highly-pressurized biochar-based urea enhanced leaf photosynthesis intensity, regulated leaf transpiration intensity, increased leaf chlorophyll content and fruit diameter and weight, resulting in increases in tomato yield by 34.5%~51.5% and 9.12%~15.6%, respectively. Both types of biochar-based urea re-

收稿日期:2015-04-23

基金项目:北京市农林科学院科技创新能力建设(KJCX20151407);北京市自然科学基金(6132017);北京市缓控释肥料工程中心建设(z111105055311092)

作者简介:李艳梅(1983—),女,博士,助理研究员,主要从事废弃物资源化利用、新型肥料及水肥一体化研究。E-mail: liyanmei0101@163.com

*通信作者:孙焱鑫 E-mail: Sunyanxin@sohu.com

duced fruit nitrate and Vc content at the conventional irrigation level, but increased fruit soluble sugar and Vc content at the reduced irrigation level. In comparison with conventional urea treatment, water immersed type of biochar-based urea decreased soil residual nitrate of 0~80 cm depth by 45.0% at the conventional irrigation level and by 37.0% at the reduced irrigation level. High-pressured type of biochar-based urea had little effect on soil residual nitrate at the conventional irrigation level, whereas it greatly increased soil residual nitrate of 0~80 cm depth by 13.0% at the reduced irrigation level. Soil nitrate content was significantly lower in water immersed biochar-based urea treatment at reduced irrigation level than in conventional urea treatment at conventional irrigation level. In sum, water immersed biochar-based urea has potential to increase tomato yield, improve fruit quality, lower soil nitrogen environmental risks, and reduce irrigation level.

Keywords: tomato; highly-pressurized type of biochar-based urea; water immersed type of biochar-based urea; conventional irrigation; reduced irrigation

番茄是全世界广为栽培的果菜之一,施用氮肥是提高其产量的重要措施。由于增施氮肥所带来的产量及效益驱动,生产中的氮肥实际投入量远远超出番茄的理论氮素需求。这不仅造成作物农学效率低下及品质难以提升,且易引起土壤次生盐渍化及硝态氮残留等问题。研究表明,应用聚合物包衣类缓释氮肥可提高番茄产量、提升番茄品质,减少土壤氮素残留^[1-2]。由于这类缓释氮肥目前也存在诸如包衣材料降解差及二次环境污染等尚未解决的问题,继续探索更多的氮肥缓释途径对于保障番茄安全高效生产具有重要意义。生物炭是农林废弃物高温热解所产生的一种富炭固体产物,其疏松多孔的结构有助于延缓氮素养分在土壤中的释放,减少氮素损失,具有成为氮肥增效载体的潜力^[3]。将生物炭与氮肥复合制备炭基氮肥成为近年生物炭农用的重要方向,并被证实可明显促进作物生长和增产^[4-8],更重要的是,炭基氮肥在氮素释放后仍可发挥土壤改良剂的作用。目前为止,相关研究主要集中在常规水量下的禾本科作物,对其在设施番茄应用及在节水水量下的对比研究还较少。

番茄生产在常规灌水模式下存在水资源浪费问题,在番茄产量需求及经济发展等多重压力下,如何在减少灌溉水量的同时不影响番茄生产,成为当前迫切需要解决的问题。氮肥与水分进入作物根际土壤会产生相互协同、叠加及拮抗三种不同方式的耦合效应^[9]。如何最大程度发挥水氮协同效应,有效推进番茄产业的可持续发展值得深入思考。李艳梅等^[2]针对聚合物包衣氮肥的研究表明,包衣尿素纯 N 用量 $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 情况下,灌水量减少 16% 对番茄产量的降低不明显且番茄品质得到提升,土壤硝态氮残留量明显增加但仍低于减水前的等氮量普通尿素处理。生物炭与聚合物缓释载体材料性质明显不同,炭基氮肥水氮耦合对番茄生产与环境效应的影响尚不可知。此外,目前有关蔬菜水氮耦合效应的研究多关注产量效应,忽视了作物生理特性的水氮效应。叶片光合作用是估测作物生产能

力的主要依据,其变化亦会明显受水氮因子的影响^[10],摸清其对水氮耦合效应的响应有助于明确产量及品质变化产生的原因,对此进行研究显得尤为重要。

本研究以京郊春茬设施番茄为研究对象,通过田间试验考察两种炭基缓释氮肥(浸泡型和高压型)与两个灌溉水量(常规和低水)相耦合对番茄生产及环境效应的影响,以期合理应用炭基氮肥及优化番茄水氮管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 3 月至 7 月在北京大兴区俊铭城基地日光温室进行。土壤类型为褐土,质地为壤土。播前 0~20 cm 土层土壤有机质含量 $15.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮含量 $1.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、硝态氮 $79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $14.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $175 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、pH8.28。供试番茄品种为鑫语,于 2 月 28 日开始育苗,4 月 9 日移栽定植前施入基肥,7 月 26 日拉秧。每株番茄留果 4 穗。

试验采用裂区设计。以灌溉量(滴灌模式)为主处理,设置:高水区($4300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, CI),低水区($2300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, LI);以施肥为副处理,设置:对照(不施氮肥,CK),普通氮肥(尿素 U),浸泡型炭基缓释氮肥(WI),高压型炭基缓释氮肥(HP)。共 8 个处理,每个处理 3 次重复。试验小区规格为 $5 \text{ m} \times 10 \text{ m}$,同一灌溉量区内随机排列。小区内采用高畦栽培技术,畦面宽 80 cm,双行种植,株距 40 cm,行距 60 cm。小区之间用塑料薄膜(埋深 40 cm)纵向隔开,防止处理之间相互影响。

施肥方法为:基施 40%(基施氮肥类型不同,用量相同,均为 $100 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$),追施 60%(在一穗果和二穗果膨大期分别追施 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 普通氮肥)。所有处理的有机肥均为腐熟牛粪,用量 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,N、 P_2O_5 和 K_2O 的含量分别为 0.33%、0.22% 和 0.15%。所有处理的磷肥用量为 $200 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$,肥料

为过磷酸钙;钾肥用量为 $218 \text{ kg K}_2\text{O} \cdot \text{hm}^{-2}$,肥料为硫酸钾。有机肥和磷肥全部基施(深度为 30 cm),钾肥基施 40% ,追施两次(设施追肥方式,时间同氮肥),每次 30% 。

制备炭基尿素的原材料生物炭来自修剪树枝及废旧木料,风干后破碎至粒径小于 2 mm ,放入不锈钢反应釜中进行热处理,在 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 保持 4 h ,冷却后粉碎制得木炭粉。生物炭比表面积为 $330 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,灰分含量为 3.05% , $\text{pH}7.46$,有机碳 $27.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{CEC}13.0 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,交换钙 $2360 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,交换镁 $741 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $238 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $1625 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

浸泡型炭基尿素:称取等质量的木炭粉和尿素,将尿素溶于蒸馏水中制备成尿素饱和溶液,再加入木炭粉于该尿素溶液中,边加边搅拌,搅拌 30 min 使其充分混匀,平衡 24 h 后风干或于 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 下加热干燥,粉碎备用,测得含氮量为 22.1% 。高压型炭基尿素:称取等质量的木炭粉和尿素,搅拌 30 min 使其充分混匀,分别装入几个 1 L 大烧杯,经密封处理后置于 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 高压锅内压制 30 min ,取出冷却后粉碎备用,测得含氮量 21.5% 。

试验采用自压式滴灌系统,每个定植垄上安装两条滴灌管,滴水头间距 40 cm ,共灌溉 6 次,灌溉时间为移栽时和移栽后第 15 、 32 、 52 、 75 、 97 d 。各小区均以约 20 cm 宽的田埂隔开,能独立进水和排水。

1.2 样品采集和测定

于番茄座果期晴天上午 $9:00-11:00$,各处理随机选取 20 片植株叶片,采用便携式叶绿素仪(SPAD-502)测定叶绿素含量,全自动便携式光合仪(LC Pro-SD)测定番茄叶片光合与蒸腾速率,测试部位为番茄自上而下第 3 或第 4 复叶上的成熟叶片;采用土壤盐度计(PNT3000)测定距番茄茎基部 5 cm 处的土壤盐度。

盛果期随机选取 15 个果实样品,用于番茄果径、单果重和品质测定。每次采收时,每个试验小区的番茄果实集中采收分类,用电子台秤称重并记录每个小区的实测产量。于番茄定植前采集基础土壤样品,带回实验室风干,剔除植物碎片和小石砾,磨碎过 0.15 mm 孔径筛,用于土壤理化性质测定。于番茄成熟收获时采集 $0-80 \text{ cm}$ 深度土壤样品(20 cm 为一层取样),带回实验室剔除杂物后过 2 mm 筛,用于土壤硝态氮含量测定。

土壤分析参照文献^[11]:采用电位法测定土壤 pH 值,重铬酸钾容量法-外加热法测定有机质含量,半微

量凯氏法测定全氮含量,酚二磺酸比色法测定硝态氮含量, $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法测定速效磷含量, $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 中性 NH_4OAc 浸提-火焰分光光度法测定速效钾含量。果实品质分析参照文献^[12]:采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量,比色法测定 Vc 含量,紫外分光光度法测定硝酸盐含量。

1.3 数据处理与计算

数据整理及作图采用Excel 2007软件完成,统计分析采用SPSS17.0中的单因素方差分析法(One Way Anova),用新复极差法进行多重比较,处理间差异性显著水平定为 $P<0.05$ 。

参照张银锁等^[13]的计算方法:氮肥农学效率(NAE)= $(\text{施氮区番茄产量}-\text{同一灌水区无氮处理番茄产量})/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})/\text{施氮量}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 。参照安顺伟等^[14]的计算方法:水分生产效率(WPE)= $\text{作物产量}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})/\text{灌水量}(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$ 。

2 结果与分析

2.1 产量效应

表1显示,减少灌水量后,番茄果径及果重均值分别减小 4.58% 、 8.69% ,产量均值降低 8.27% ;减水引起的U(普通)和HP(高压型)处理产量降幅分别为 13% 和 7.9% ,均达统计学显著水平;减水引起的WI处理(浸泡型)产量降幅为 2.1% ,降幅尚未达统计学显著水平。从表1可知,相同灌水量处理条件下,三个施氮处理的番茄果径与单果重较不施氮对照增加,在CI和LI水量下(常规灌水和低量灌水)均表现出 $\text{WI}>$

表1 不同水氮组合对番茄果径、单果重及产量的影响

Table 1 Coupling effects of water and nitrogen on fruit diameter, weight and yield of tomato

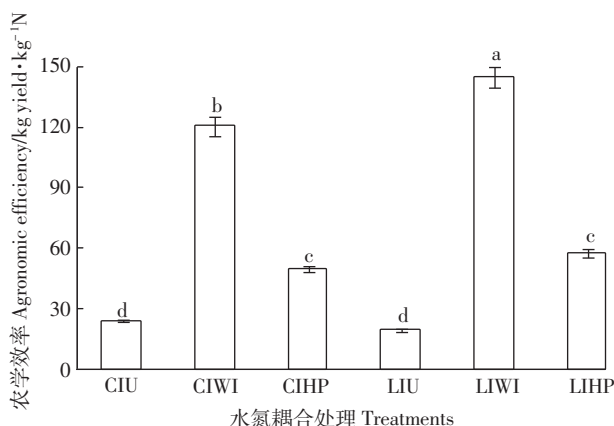
处理编号及说明 Treatment	果径 Fruit diameter/mm	单果重 Fruit weight/g	产量 Yield/kg·hm ⁻²
CICK 常规灌水+不施氮	78.0d	236d	64 832d
CIU 常规灌水+普通尿素	84.0bc	279c	70 735c
CIWI 常规灌水+浸泡型炭基尿素	91.5a	338a	95 131a
CIHP 常规灌水+高压型炭基尿素	87.0ab	300bc	77 189b
LICK 低量灌水+不施氮	71.8e	195e	56 728f
LIU 低量灌水+普通尿素	79.3cd	236d	61 481e
LIWI 低量灌水+浸泡型炭基尿素	88.0ab	325ab	93 130a
LIHP 低量灌水+高压型炭基尿素	85.5b	297bc	71 086c

注:其他图表中的编号同此表;同一列数据后英文小写字母不同表示处理间某指标差异显著($P<0.05$)。

Note: Treatment codes were same below. Values followed by different letters within a column are significantly different between treatments at the 5% level.

HP>U 的趋势。在 CI 和 LI 水量下,施氮处理分别使番茄增产 9.1%~46.7%、8.3%~64.1%。WI 处理与 U 相比在 CI 和 LI 时分别增产 34.5%、51.5%,HP 处理与 U 相比在 CI 和 LI 时分别增产 9.1%、15.6%,证实等水量下两种炭基氮肥处理的番茄产量高于等氮量 U 处理,WI 型炭基氮肥处理的番茄产量高于等氮量 HP 型炭基氮肥处理,施用两种炭基氮肥在低量灌水时的增产幅度大于其在常规灌水时的增产幅度。总之,CIWI 和 LIWI 两个组合处理番茄的果径及单果重更大,产量较高。

图 1 和图 2 显示,减少灌水量后,农学效率与灌溉水生产效率均值提升,WI 型炭基氮肥处理的农学效率与灌溉水生产效率提升幅度均达统计学显著水平;HP 型炭基氮肥处理的农学效率提升幅度不显著,



处理间英文小写字母不同表示处理间差异显著 ($P<0.05$),下同
Values followed by different letters mean significant difference between treatments at the 5% level

图 1 不同水氮组合对氮肥农学效率的影响

Figure 1 Coupling effects of water and nitrogen treatments on agronomic efficiency of tomato

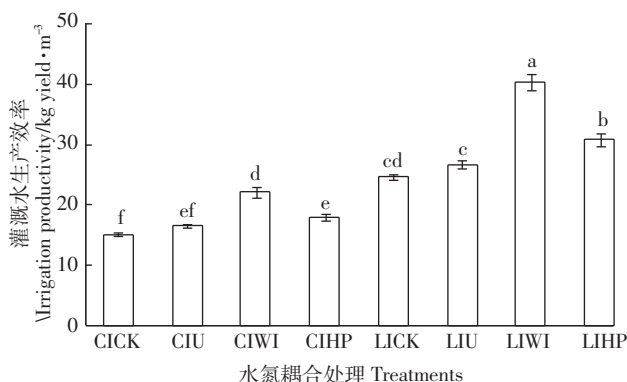


图 2 不同水氮组合对灌溉水生产效率的影响

Figure 2 Coupling effects of water and nitrogen treatments on irrigation productivity of tomato

灌溉水生产效率提升幅度均达统计学显著水平。CI 和 LI 水量下,与普通尿素处理相比,两种炭基尿素处理明显提升了番茄的农学效率与灌溉水生产效率,且表现出 WI>HP 的趋势,两项指标在 WI 和 HP 间的差异均达统计学显著水平。总之,农学效率以 LIWI 组合最高,CIWI 组合次之;灌溉水生产效率以 LIWI 组合最高,LIHP 组合次之。

2.2 品质效应

由表 2 看出,硝酸盐含量介于 77.3~91.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,整体处于较低水平,均低于茄果类蔬菜硝酸盐限值^[15]。减少灌水量后,番茄可溶糖与 Vc 含量增加,其中,WI 和 HP 处理的可溶糖含量分别提升 0.2%、0.5%,Vc 含量分别提升 0.6、3.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。说明减少灌水量措施提升了两种炭基尿素处理番茄的可溶糖与 Vc 含量,且高压型炭基尿素处理的增幅更大。与 U 相比,WI 型和 HP 型炭基尿素处理在 CI 水量时的 Vc 含量分别降低了 4.0、4.9 $\text{mg}\cdot 100\text{g}^{-1}$,硝酸盐含量分别显著降低 14.2、10.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。说明应用两种炭基尿素在常规灌水时有降低果实 Vc 含量及硝酸盐累积的趋势。与 U 相比,WI 型和 HP 型炭基尿素处理在 LI 水量时的 Vc 含量分别提升 0.9、2.4 $\text{mg}\cdot 100\text{g}^{-1}$,可溶糖含量分别提升 0.3%、0.7%。说明应用两种炭基尿素在低量灌水时有增加果实 Vc 及可溶糖含量的趋势。总之,CIWI 和 LIWI 处理果实的硝酸盐含量偏低,LIHP 处理果实的可溶糖与 Vc 含量偏高。

2.3 光合作用

从表 3 看出,灌水量减少后,番茄植株叶片光合速率和蒸腾速率均值分别降低 22%和 15%,叶绿素

表 2 不同水氮组合对番茄品质的影响

Table 2 Effects of water and nitrogen combinations on fruit quality of tomato

处理编号 Treatment	可溶性糖 Soluble sugar/%	Vc/ $\text{mg}\cdot 100\text{g}^{-1}$	硝酸盐 Nitrate/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
CICK	4.7c	15.8c	82.6abc
CIU	4.6cd	19.3a	91.5a
CIWI	4.7c	15.3cd	77.3c
CIHP	4.8bc	14.4d	81.5bc
LICK	4.9b	19.7a	80.8bc
LIU	4.5d	15.0cd	85.8abc
LIWI	4.9b	15.9c	82.0abc
LIHP	5.2a	17.4b	88.8ab

注:处理间英文小写字母不同表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Values followed by different letters within a column mean significant difference between treatments at the 5% level.

SPAD 值降低 5.6%,说明减少灌水量降低了叶片的光合与蒸腾作用,并减少了叶绿素合成。从不同尿素处理叶片光合速率随灌水量的变化趋势的比较来看,U、WI 和 HP 处理叶片光合速率分别明显降低了 30%、14%和 23%。可见,减水措施对普通尿素和两种炭基尿素处理番茄植株叶片光合作用的影响相似,均表现为明显的抑制作用;但又表现出差异,表现为对普通尿素处理的抑制最强,对高压型炭基尿素处理的抑制次之,对浸泡型炭基尿素处理的抑制最弱。从不同尿素处理叶片蒸腾速率随灌水量的变化趋势的比较来看,U 处理叶片蒸腾速率明显降低 45%,WI 和 HP 处理叶片蒸腾速率分别明显增加 42%和 14%。可见,减水措施对普通尿素和炭基尿素处理叶片蒸腾作用的影响明显不同,表现为抑制普通尿素处理叶片的蒸腾作用和增强炭基尿素处理叶片的蒸腾作用;同时发现,两种炭基尿素处理叶片蒸腾强度增幅表现出浸泡型明显大于高压型的趋势。

表 3 显示,CK 光合速率小于三个施氮处理,说明施用氮肥增强了叶片光合作用。与 U 相比,WI 和 HP 处理叶片光合速率在 CI 灌水量下分别明显增加 37%和 26%,在 LI 灌水量下分别明显增加 68%和 37%。说明常规及低量灌水时,两种炭基尿素与普通尿素处理相比均明显增强了叶片光合作用,浸泡型炭基尿素的增强幅度大于高压型炭基尿素处理。与 U 相比,WI 和 HP 处理叶片蒸腾速率在 CI 灌水量下分别明显降低

表 3 不同水氮组合对番茄植株叶片光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)和叶绿素含量(SPAD)的影响

Table 3 Effects of water and nitrogen combinations on photosynthetic rate(Pn), transpiration rate(Tr) and chlorophyll content(SPAD) of tomato plant leaves

处理编号 Treatment	光合速率 Photosynthetic rate/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	蒸腾速率 Transpiration rate/ $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	叶绿素含量 Chlorophyll content (SPAD)
CICK	2.1d	2.9a	46.2ef
CIU	2.7c	2.9a	48.2de
CIWI	3.7a	1.9de	55.8a
CIHP	3.4b	2.2cd	54.6ab
LICK	1.6e	1.6e	43.8f
LIU	1.9d	1.6e	46.1ef
LIWI	3.2b	2.7ab	52.6bc
LIHP	2.6c	2.5bc	50.8cd

注:处理间英文小写字母不同表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Values followed by different letters within a column mean significant difference between treatments at the 5% level.

34%、24%,在 LI 灌水量下分别明显增加 69%和 56%。说明两种炭基尿素处理对叶片蒸腾强度的影响因灌水量不同而存在明显差异,表现为常规灌水时的明显抑制作用和低量灌水时的明显增强作用,就两种炭基尿素之间的比较来看,浸泡型炭基尿素的调节作用大于高压型炭基尿素。与 U 相比,WI 和 HP 处理叶片叶绿素 SPAD 值在 CI 灌水量下分别明显增加 16%和 13%,在 LI 灌水量下分别明显增加 14%和 10%。说明两个灌水量下,两种炭基尿素明显增加了叶片叶绿素合成,且浸泡型炭基尿素的作用大于高压型炭基尿素。

以上分析表明,应用两种炭基尿素有助于番茄叶片在不同灌水量条件下均维持相对较强的光合作用及适中的蒸腾作用,增强叶片叶绿素合成,浸泡型炭基尿素处理的这种调节作用表现得更为明显,取得了相对较高的叶片叶绿素含量。总之,光合速率以 CIWI 最高、CIHP 和 LIWI 次之,蒸腾速率则与此相反,叶绿素 SPAD 值与光合速率呈相似趋势。

2.4 土壤盐度与硝态氮残留

由图 3 看出:与 CI 水量相比,LI 水量处理的土壤盐度均值增加了 6.8%;就不同尿素处理的比较来看,减水措施后,U 和 HP 处理土壤盐度分别明显增加 33%和 35%,WI 处理土壤盐度的增加不明显。说明减少灌水量措施总体上增加了番茄根层土壤盐度,但又因尿素处理不同而异,表现为明显增加了普通尿素和高压型炭基尿素处理土壤盐度,对浸泡型炭基尿素处理土壤盐度的增加不明显。CI 水量下,与 U 相比,WI 和 HP 处理土壤盐度变化不显著;LI 水量下,与 U 相比,WI 处理土壤盐度明显降低 27%,HP 处理土壤盐度增加不明显。说明与普通尿素相比,两种炭基尿素在常规灌水时对土壤盐度的影响不显著,高压型炭基尿素在低量灌水时对土壤盐度的影响不显著,浸泡型

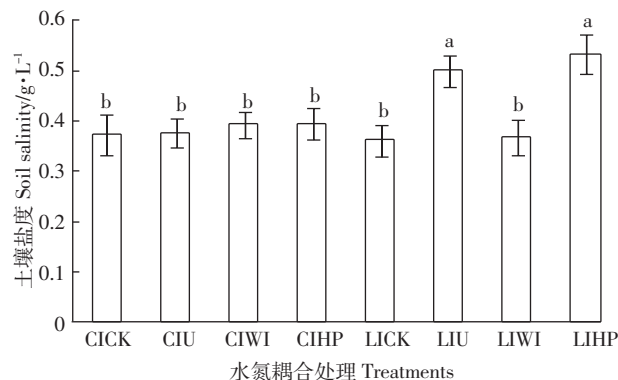


图 3 不同水氮组合对土壤盐度的影响

Figure 3 Effects of water and nitrogen combinations on soil salinity

炭基尿素在低量灌水时明显降低土壤盐度。

表层 0~40 cm 土壤硝态氮占 0~80 cm 剖面总量的 60%~79%,表明土壤硝态氮主要残留在表层 0~40 cm 土层。灌水量减少后,0~80 cm 剖面由上至下(每 20 cm 为一层)土壤硝态氮含量均值分别增加了 27%、14%、41%和 49%,说明减少灌水措施增加了剖面各层土壤硝态氮残留。灌水量减少后,U、WI 和 HP 处理 0~80 cm 剖面硝态氮总量分别增加了 19%、37%和 30%,说明减少灌水措施增加两种炭基尿素处理土壤硝态氮残留的幅度大于其增加普通尿素处理土壤硝态氮残留的幅度。就不同施肥处理剖面硝态氮总量比较来看,与 U 相比,WI 处理在 CI 和 LI 水量时分别减少了 45%和 37%,说明浸泡型炭基尿素与普通尿素相比在两个灌水量下均减少了剖面硝态氮总量;与 U 相比,HP 处理在 CI 水量时的影响不明显,在 LI 水量时增加了 13%,说明高压型炭基尿素与普通尿素相比在常规灌水时的影响不明显,在低量灌水时增加了剖面硝态氮总量(图 4)。总之,浸泡型炭基尿素处理硝态氮残留总量明显低于其他氮肥处理,LIWI 组合与 CIU 组合相比仍有降低,降幅达 25%。

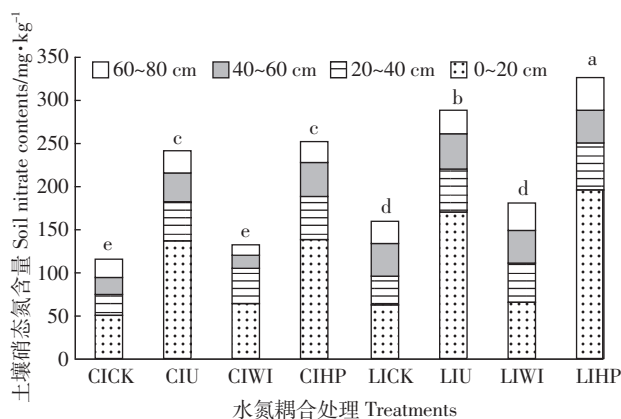


图4 不同水氮组合对土壤硝态氮含量的影响

Figure 4 Effects of water and nitrogen combinations on soil nitrate content

3 讨论

研究表明,两种炭基尿素与普通尿素处理相比增加了番茄果径、单果重与产量(表 1),提高了番茄农学效率与灌溉水生产效率(图 1 和图 2)。这与高海英等^[5-6]、陈琳等^[7]和张雯等^[8]报道的炭基氮肥促进粮食作物增产的结论基本一致。炭基氮肥增产原因主要与其增强叶片光合作用、调控叶片蒸腾强度有关(表 3),也可能与其增加土壤铵根离子持留、减少氮素损失有关^[16-18]。Zeng 等^[19]和 Li 等^[20]报道控制土壤含水量

至适宜水平有助于提升果蔬可溶糖与 Vc 含量,本研究两种炭基尿素在低量灌水条件下提高番茄可溶糖与 Vc 含量(表 2),可能与其生物炭载体影响土壤持水性能、增强叶片蒸腾强度(表 3)进而增加有机物合成有关。灌水量充足条件下普通氮肥的氮素溶出量较大,易导致作物根系氮素过量吸收及硝酸盐过量累积^[21],两种炭基尿素与普通尿素相比在常规水量下减少番茄硝酸盐累积可能与炭基尿素延缓氮素释放进而避免根系氮素过快吸收有关,也可能与炭基尿素调控土壤含水量进而抑制叶片蒸腾、避免根系氮素过量吸收有关。在甜茶上的最新研究表明,生物炭促进植物生长与其提高植物叶片光合作用密切相关^[22]。本研究浸泡型炭基尿素处理与高压型炭基尿素处理相比,使番茄叶片维持了相对较高的光合速率和适宜的蒸腾强度,番茄生长状况、产量及品质更优。由此推测,两种炭基尿素在土壤中释放出的生物炭载体数量的差异及由此对番茄叶片光合及蒸腾作用产生的不同影响,可能是两种炭基尿素处理产生差异的重要原因。

灌水量减少后,普通尿素与高压型炭基尿素处理番茄产量显著降低(表 1),与冯胜利等^[23]和 Marouelli 等^[24]及韩国君等^[25]报道的减少灌水措施引起番茄减产的结论一致。综合本研究试验结果(表 1 与表 3)与相关文献认为,减少灌水量措施引起番茄减产的重要原因之一可能是:水分胁迫下番茄叶片发生光抑制,引起叶片光能效率下降及干物质积累降低,进而引起番茄减产。减少灌水量引起的浸泡型炭基尿素处理番茄产量降幅较小,尚未达统计学显著水平,主要在于减少灌水措施对浸泡型炭基尿素处理番茄叶片的光合抑制作用相对较弱,且同时调节番茄叶片蒸腾强度至适中水平,因而该处理番茄叶片在低量灌水时仍然维持了叶绿体结构组分的完整性和功能性,从而维持较高的光合生产能力,有助于为番茄果实形成提供较多的新同化产物(表 1 与表 3)。灌水量减少后,两种炭基尿素处理番茄可溶糖含量及高压型炭基尿素处理番茄 Vc 含量得到明显提升,与番茄叶片蒸腾强度明显增加的趋势一致,由此推测番茄糖分及 Vc 提升可能与蒸腾运输途径的有机同化产物增加有关。一般情况下,减量灌溉会降低叶片蒸腾作用。但根据郑国琦等^[26]在枸杞上的研究,月灌水定额在 0~900 m³·hm⁻² 范围内变化时,以 450 m³·hm⁻² 处理的叶片蒸腾速率最高;据段爱国等^[27]在树种上的研究,随着干热胁迫程度加深,供试树种蒸腾速率变化表现出增强、减弱和稳定等三种类型。结合已有文献及本研究灌溉水量

与叶片蒸腾强度的关系,认为灌水量变化对植物蒸腾作用的影响与灌溉水量上下限值、氮肥类型、植物类型、土壤外源物质等均有关,因此在后期需进一步研究。浸泡型炭基尿素处理番茄农学效率及灌溉水生产效率表现出低量灌水>常规灌水的趋势,结合其生长、品质与产量特征,说明番茄生产中应用浸泡型炭基尿素有助于实现节水、高产与高效的统一。

两种炭基尿素对番茄收获期土壤盐度和硝态氮残留的影响有所不同。与普通尿素相比,浸泡型炭基尿素处理在低量灌水时表现出减轻土壤盐渍化程度的作用(图3),在常规灌水及低量灌水时表现出减少0~80 cm土层氮素残留的作用(图4),可以认为浸泡型炭基尿素的氮素供应在时间和空间上与番茄的氮素吸收趋于同步,因而在维持高产出的同时减少了0~80 cm土层氮素残留。高压型炭基尿素处理对盐度无明显影响,但在低量灌水条件下明显增加了0~80 cm土层硝态氮残留,其原因可能是高压工艺制备的炭基尿素对氮素的吸持作用较强,以至出现了在低量灌水时未完全释放及释放滞后的现象,因而在制作工艺及供应数量上仍需进一步调整,选择与番茄养分吸收特征更吻合的高压型炭基氮肥将会进一步降低损失而提高效率。本研究还发现炭基尿素对土壤氮素残留的影响与灌水量有关。高海英等^[5]针对浸泡型木炭基硝酸铵氮肥的研究表明,炭基氮肥处理显著降低了盆栽糜子土壤矿质氮残留,但同时发现炭基氮肥处理显著提高了盆栽小麦土壤矿质氮残留。已有研究得出的不同结论可能与作物类型、氮肥类型、土壤肥力、供水情况或炭基氮肥的制作工艺不同等有关,后期还需增加对比试验做进一步深入研究。低量灌水与常规灌水相比增加了两种炭基尿素处理的土壤硝态氮残留,其原因可能是减少灌水量限制了氮肥氮素释放及土壤剖面的硝态氮迁移^[28]。总体来看,本试验浸泡型木炭基尿素处理土壤硝态氮残留在两个水量下均处于较低水平,说明浸泡型木炭基尿素在减少灌水投入和土壤氮素残留方面具有积极作用。

4 结论

(1)与常规灌水相比,低量灌水处理抑制了叶片光合作用及叶绿素合成,引起番茄减产。灌水量减少后,普通尿素和高压型炭基尿素处理叶片光合速率降幅较大,减产达显著水平,浸泡型炭基尿素处理叶片光合速率降幅较小,减产幅度未达显著水平;灌水量减少后,两种炭基尿素处理的灌溉水生产效率及浸泡

型炭基尿素处理的农学效率提升。减少灌水量措施增强了两种炭基尿素处理叶片的蒸腾作用,提升了番茄果实可溶糖与Vc含量,还明显增加了两种炭基尿素处理0~80 cm土层硝态氮总残留量。

(2)与普通尿素相比,两种炭基尿素起到了增强叶片光合强度、调节叶片蒸腾强度、增加叶片叶绿素SPAD值、果实果径与单果重的作用,浸泡型与高压型炭基尿素产量增幅分别为34.5%~51.5%、9.1%~15.6%,明显提升了番茄农学效率与灌溉水生产效率,浸泡型炭基尿素的作用更明显。两种炭基尿素在常规灌水时降低了果实硝酸盐及Vc含量,在低量灌水时增加了果实可溶糖与Vc含量。应用浸泡型炭基尿素在两个水量下均减少了土壤硝态氮残留,低量灌水时应用高压型炭基尿素有增加土壤硝态氮残留的风险。

(3)综合考虑番茄产量、品质及土壤硝态氮累积,浸泡型炭基尿素与低量灌水组合处理、浸泡型炭基尿素与常规灌水组合处理具有较高的应用价值。

参考文献:

- [1] 杨俊刚, 张鹏飞, 倪小会, 等. 施用控释肥对设施番茄 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋洗、 N_2O 排放及产量与品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(9): 1849-1857.
YANG Jun-gang, ZHANG Peng-fei, NI Xiao-hui, et al. Effects of controlled release fertilizer on soil nitrate leaching, N_2O emission and fruit yield and quality in greenhouse tomato production system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(9): 1849-1857.
- [2] 李艳梅, 廖上强, 薛高峰, 等. 减量灌溉下番茄施控释肥的水氮耦合效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(1): 134-140.
LI Yan-mei, LIAO Shang-qiang, XUE Gao-feng, et al. Coupling effects of controlled-release urea and water on tomato yield and soil nitrate under reduced irrigation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(1): 134-140.
- [3] 何绪生, 张树清, 余 雕, 等. 生物炭对土壤肥料的作用及未来研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(15): 16-25.
HE Xu-sheng, ZHANG Shu-qing, SHE Diao, et al. Effects of biochar on soil and fertilizer and future research[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(15): 16-25.
- [4] Matthew D. The effects of nitrogen-enriched biochar on maize (*Zea mays*) productivity and soil organic carbon[D]. University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2011.
- [5] 高海英, 何绪生, 陈心想, 等. 生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤化学性质及作物产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(10): 1948-1955.
GAO Hai-ying, HE Xu-sheng, CHEN Xin-xiang, et al. Effect of biochar and biochar-based ammonium nitrate fertilizers on soil chemical properties and crop yield[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(10): 1948-1955.
- [6] 高海英, 陈心想, 张 雯, 等. 生物炭和生物炭基氮肥的理化特征及其作物肥效评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 66-71.

- GAO Hai-ying, CHEN Xin-xiang, ZHANG Wen, et al. Physicochemical properties and efficiencies of biochar and biochar-based nitrogenous fertilizer[J]. *Journal of Northwest A&F University*, 2013, 41(4):66-71.
- [7] 陈琳, 乔志刚, 李恋卿, 等. 施用生物质炭基肥对水稻产量及氮素利用的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2013, 29(5):671-675.
- CHEN Lin, QIAO Zhi-gang, LI Lian-qing, et al. Effects of biochar-based fertilizers on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(5):671-675.
- [8] 张雯, 何绪生, 耿增超, 等. 新型生物炭基氮肥对土壤-冬小麦系统氮素累积及相关生物活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(7):1394-1401.
- ZHANG Wen, HE Xu-sheng, GENG Zeng-chao, et al. Effects of different biochar-based nitrogen fertilizers on nitrogen accumulation and biological activities in soil-winter wheat system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(7):1394-1401.
- [9] 穆兴民. 水肥耦合效应与协同管理[M]. 北京: 中国林业出版社, 1999.
- MU Xing-min. Water-fertilizer coupling effect and collaborative management[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1999.
- [10] 周振江, 牛晓丽, 李瑞, 等. 番茄叶片光合作用对水肥耦合的响应[J]. *节水灌溉*, 2012(2):28-32, 37.
- ZHOU Zhen-jang, NIU Xiao-li, LI Rui, et al. Coupling effects of irrigation and fertilizers on photosynthetic rate of tomato leaves[J]. *Water saving Irrigation*, 2012(2):28-32, 37.
- [11] 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.
- LU Ru-kun. Analysis method of soil agrichemistry[M]. Beijing: China Agricultural Technology Publishing House, 2000.
- [12] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- LI He-sheng. Principal and technique of physiological-biochemical experiments of plant[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- [13] 张银锁, 宇振荣, Driessen P M. 环境条件和栽培管理对夏玉米干物质积累、分配及转移的试验研究[J]. *作物学报*, 2002, 28(1):104-109.
- ZHANG Yin-suo, YU Zhen-rong, Driessen P M. Experimental study of assimilate production, partitioning and translocation among plant organs in summer maize (*Zea mays*) under various environmental and management conditions[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(1):104-109.
- [14] 安顺伟, 周继华, 王克武, 等. 不同灌溉方式对大棚黄瓜生长和产量的影响[J]. *蔬菜*, 2012, 12:51-54.
- AN Shun-wei, ZHOU Ji-hua, WANG Ke-wu. Effects of different irrigation modes on the growth and yield of greenhouse cucumber[J]. *Vegetables*, 2012, 12:51-54.
- [15] 王晶, 周泽义, 曹文祺. GB/T 19338—2003 蔬菜中硝酸盐限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- WANG Jing, ZHOU Ze-yi, CAO Wen-qi. GB/T 19338—2003 Tolerance limit for nitrate in vegetables[S]. Beijing: China Standard Press, 2003.
- [16] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil[J]. *Plant and Soil*, 2007, 291(1/2):275-290.
- [17] Steiner C, Glaser B, Teixeira W G. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(6):893-899.
- [18] Chen Y, Shinogi Y, Taira M. Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48:526-530.
- [19] Zeng C Z, Bie Z L, Yuan B Z. Determination of optimum irrigation water amount for drip-irrigated muskmelon (*Cucumis melo* L.) in plastic greenhouse[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(4):595-602.
- [20] Li Y J, Yuan B Z, Bie Z L. Effect of drip irrigation criteria on yield and quality of muskmelon grown in greenhouse conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 109:30-35.
- [21] Miranda T, Prendergast M, Michael D. Localisation of nitrate in the rhizosphere of biochar-amended soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(11):2243-2246.
- [22] 王艳芳, 沈向, 陈学森, 等. 生物炭对缓解对羟基苯甲酸伤害平邑甜茶幼苗的作用[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(5):968-976.
- WANG Yan-fang, SHEN Xiang, CHEN Xue-sen, et al. Effects of biochar on alleviation of the influence of p-hydroxybenzoic acid on physiological characteristics in *Malus Hupehensis* Rehd[J]. *Seedlings Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(5):968-976.
- [23] 冯胜利. 水分与源库比对加工番茄光合生理及产量形成的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2008.
- FENG Sheng-li. Effects of water and source/sink ratio on the photosynthesis physiology and yield of processing tomato[D]. Shihezi: Shihezi University, 2008.
- [24] Marouelli W A, Silva W L C. Water tension thresholds for processing tomatoes under drip irrigation in Central Brazil[J]. *Irrigation Science*, 2007, 25(4):411-418.
- [25] 韩国君, 陈年来, 黄海霞, 等. 番茄叶片光合作用对快速水分胁迫的响应[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(4):1017-1022.
- HAN Guo-jun, CHEN Nian-lai, HUANG Hai-xia, et al. Responses of tomato leaf photosynthesis to rapid water stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(4):1017-1022.
- [26] 郑国琦, 张磊, 郑国保. 不同灌水量对干旱区枸杞叶片结构、光合生理参数和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(11):2806-2813.
- ZHENG Guo-qi, ZHANG Lei, ZHENG Guo-bao. Effects of irrigation amount on leaf structure, photosynthetic physiology, and fruit yield of *Lycium barbarum* in arid area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11):2806-2813.
- [27] 段爱国, 张建国, 张守攻. 干热河谷主要植被恢复树种蒸腾作用[J]. *生态学报*, 2009, 29(12):6691-6701.
- DUAN Ai-guo, ZHANG Jian-guo, ZHANG Shou-gong. Transpiration of tree species for vegetation restoration in dry-hot river valleys[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(12):6691-6701.
- [28] 杜建军, 王新爱, 廖宗文, 等. 不同浸提条件对包膜控/缓释肥水中溶出率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(1):71-78.
- DU Jian-jun, WANG Xin-ai, LIAO Zong-wen, et al. Effects of different extract conditions on water distribution rate of coated controlled/slowed-release fertilizer[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(1):71-78.