

网络出版时间:2016-04-07 09:00

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2016.05.022

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160407.0900.044.html

日光温室内负水头灌溉条件下茄子生长及生理特性的研究

李霞¹,解迎革¹,王国栋¹,薛绪掌²,张敏¹,陈菲²

(1 西北农林科技大学 理学院,陕西 杨凌 712100;2 国家农业信息化工程技术研究中心,北京 100097)

[摘要] 【目的】研究日光温室内负水头灌溉对茄子生长及生理特性的影响,为温室水分管理提供理论和实践依据。【方法】设定灌溉系统的负压值为 70 hPa,每周常规灌溉的灌水量为负压自动灌溉系统下植株耗水量的 1.5 倍,在日光温室内进行负水头灌溉与常规灌溉下的茄子栽培试验,分析 2 种灌溉条件下植株的生长动态、一周内 2 种灌溉下土壤含水量的变化以及生育期内茄子生理特性的差异。【结果】70 hPa 负压灌溉下温室土壤含水量基本控制在 14.48% 左右。负水头灌溉下茄子的株高、茎粗、叶片数和展开度的增长速度均高于常规灌溉,其中株高和叶片数与常规灌溉相比差异显著。2 种灌溉方式下茄子叶片的光合、蒸腾作用及气孔导度的日变化趋势相同,均呈双峰曲线;负水头灌溉下茄子的光合速率、蒸腾速率及气孔导度均显著高于常规灌溉。负水头灌溉下茄子产量为常规灌溉的 1.44 倍,负水头灌溉和常规灌溉下的作物水分生产率分别为 17.86、8.27 kg/m³,两者差异极显著,负水头灌溉的水分生产率为常规灌溉的 2.16 倍。【结论】负水头灌溉在持续供水的同时又能精确控制土壤含水量,有效减少土壤渗漏和地表蒸发,具有良好的节水效果且更有利于作物的生长,茄子的产量和水分生产率都得到了显著提高。

[关键词] 负水头灌溉;常规灌溉;茄子;生长发育;光合作用;作物水分生产率

[中图分类号] S275;S641.101

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2016)05-0163-07

Growth and physiological characteristics of eggplant under negative hydraulic head irrigation in greenhouse

LI Xia¹, XIE Ying-ge¹, WANG Guo-dong¹, XUE Xu-zhang²,
ZHANG Min¹, CHEN Fei²

(1 College of Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: 【Objective】Effects of negative hydraulic head irrigation on growth and physiological characteristics of eggplant in greenhouse were studied to provide theoretical and practical basis for greenhouse irrigation management. 【Method】The negative pressure value of 70 hPa was set for irrigation system and weekly irrigation amount under normal irrigation was 1.5 times of water consumption under negative pressure irrigation. Through the cultivation experiment of eggplant under negative pressure irrigation and normal irrigation in greenhouse, the plant growth dynamics, the change in soil water content within a week and the physiological differences of eggplant under the two irrigation systems were analyzed. 【Result】The soil water content under negative pressure irrigation was controlled at about 14.48%. Plant height, stem diameter, leaf number and plant spread angle under negative pressure irrigation were higher than those under

[收稿日期] 2014-10-24

[基金项目] 西北农林科技大学基本科研业务费专项资金项目(Z109021202)

[作者简介] 李霞(1978—),女,河南漯河人,副教授,博士,主要从事环境生物物理学研究。E-mail:lixia1028@sohu.com

[通信作者] 解迎革(1976—),男,山西平陆人,副教授,博士,主要从事土壤物理学研究。E-mail:xiyingge1976@nwsuaf.edu.cn

normal irrigation. Compared with normal irrigation, the differences of plant height and leaf number were significant. There were all bimodal curves for the daily changes of eggplant leaf photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance under the two irrigation modes. Three parameters under negative pressure irrigation were higher than those under normal irrigation with significant difference. Eggplant yield under negative pressure irrigation was 1.44 times of that under normal irrigation. Crop water productivity of negative pressure irrigation and normal irrigation were 17.86 and 8.27 kg/m³ with very significant differences. Crop water productivity under negative pressure irrigation was 2.16 times of that under normal irrigation. 【Conclusion】 Negative pressure irrigation system can supply water steadily, control soil water content precisely, and reduce soil leakage and soil surface evaporation effectively. It had good water saving effect and improved eggplant yield and water use efficiency.

Key words: negative pressure irrigation; normal irrigation; eggplant; growth; photosynthesis; crop water productivity

土壤水分是影响植物生长的重要环境因子,植物对水分条件的要求和适应是植物水分的重要特征^[1]。植物只有生长于适宜的土壤水分条件下,才有利于发挥其生长潜力,达到增产增收的目的^[2]。然而现阶段我国农业生产中,作物遭受水分胁迫和土壤水分浸渍的现象较普遍,相关的研究已有很多报道^[3-5]。设施蔬菜大多遭受土壤水分浸渍危害,很多地方采用的常规灌溉策略不仅浪费水资源,而且由于地面蒸发量大使室内湿度过高,从而抑制叶面蒸腾,阻碍根系吸水,带来的后果是容易滋生病虫害和深层渗漏引起的地下水污染^[6]。减少水分散失和提高水分利用效率是温室生产中不可忽视的重要问题,这要求把温室内土壤-植物-环境看作一个连续体,在土壤含水量被精确控制的条件下,就土壤水分对作物生长及相关生理指标的影响进行系统研究。

负水头灌溉系统可在气温、地温、光强、空气湿度等多种外界因素的影响下,做到适时适量的自动灌水,减少土壤渗漏和蒸发损失,实现土壤含水量的精确和持续控制^[7]。万克江等^[8]、耿伟等^[9-10]、李邵等^[11]利用负水头盆栽装置研究了不同吸力对黄瓜、豆角、菠菜等作物生理指标的影响,分析了不同吸力下的供水、控水效果。李邵等^[12]、张伟娟等^[13]在设定负水头灌溉吸力值的条件下,测定了温室内番茄的蒸腾规律。李邵等^[14]、毛思帅等^[15-16]研究了负水头灌溉营养液对黄瓜、番茄的生长特性及产量的影响。目前,有关负水头灌溉对茄子生长及生理特性影响的研究尚未见报道。本试验利用负水头灌溉系统进行温室栽培茄子试验,在前人的研究基础^[17]上,设定灌溉系统的最佳吸力值为 70 hPa,每周常规灌溉的灌水量为负压自动灌溉系统下植株耗水量的 1.5 倍,同时设常规灌溉对照,分析 2 种灌溉方式

下植株的生长动态及一周内 2 种灌溉方式下土壤含水率的变化和生育期内茄子生理特性的差异,以期对温室水分管理提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 负水头灌溉系统工作原理

负水头灌溉系统结构原理见图 1。该灌溉系统由负水头供水首部、供水管道、供水盘 3 部分构成,供水首部与温室内水龙头相连,中间连有水表;供水盘盘径为 0.20 m,竖直埋入土表 0.2 m 以下,盘间距为 0.5 m;支管长度 4.5 m,其间距为 0.9 m。当打开自来水龙头后,水由进水管进入浮球控水装置,在水面达到一定的高度后,浮球封住进水口,阻止自来水的进入,这样就可以保持一个稳定的水源;关闭集气筒下的 2 个阀门,打开上阀门,向集气筒中注满水,同时向控压管中灌入一定量的水;关闭上阀门,打开与主管相连的下阀门,集气筒中的水开始流入主管道,再进入支管下的供水盘(陶瓷盘,透水不透气),盘中与支管中的空气会慢慢统一排向集气筒,直至所有的供水盘中充满水后,打开集气筒与控压管相连的阀门,土壤由于基质势的存在,开始从供水盘吸水,控压管经过集气筒、主支管道向供水盘输水,容器中水位下降、压强减小,大气压就会将浮球控水装置中的水压入,浮球装置中水位下降,开关重新打开,自来水又开始进入,如此循环就形成了负压自动灌溉系统。此时的负压即相当于控压管进水口与浮球装置水面的高度差 h 厘米水柱的压力,1 cm 水柱产生的压力为 1 hPa,为了满足不同的灌溉需要,可以将控压管提升或者降低一个高度 Δh ,负压值就变为 $h + \Delta h$,因为每个盘的规格和埋深完全相同,所以在达到供水持续性的同时也能达到供水均匀性。

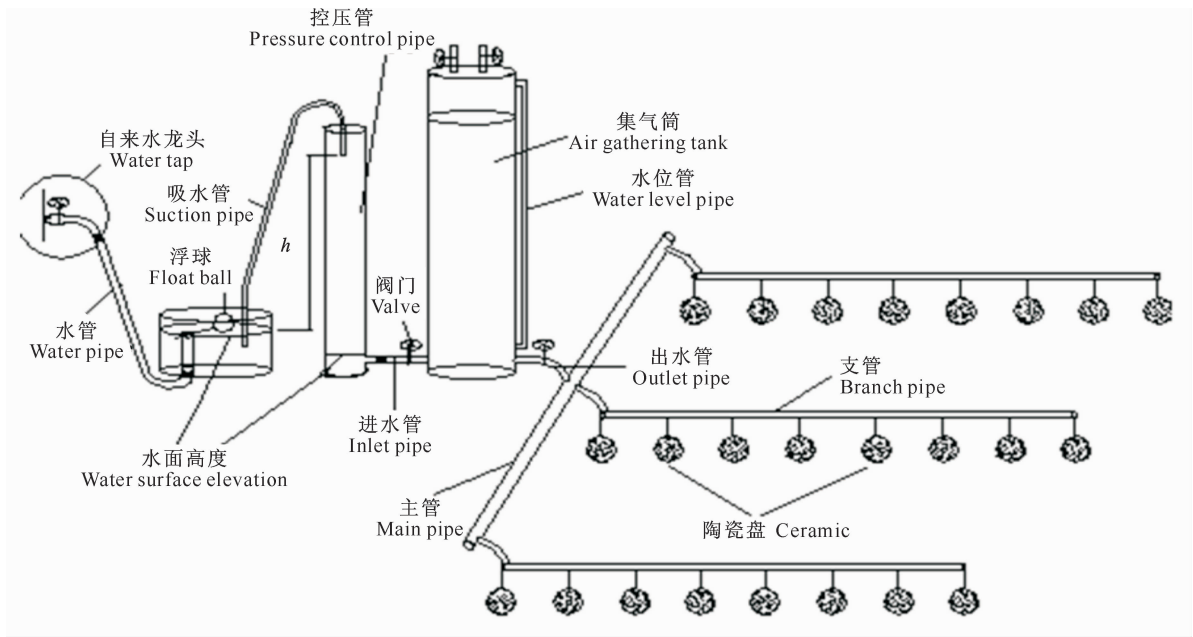


图 1 负水头灌溉系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of negative pressure irrigation system

1.2 材料与试验设计

试验于 2012 年 2—9 月在北京农林科学院日光温室内进行,设负水头灌溉和常规灌溉对照 2 个处理。温室总灌溉面积为 $5\text{ m}\times 4\text{ m}$,其中一半为负水头灌溉,另一半为常规漫灌对照,中间设有 1 m 深隔水板。供试茄子品种为京茄 2 号,2 月 28 日育苗,4 月 1 日选长势一致的植株定植,行距 80 cm ,株距 40 cm ,植株与灌溉系统支管的距离为 20 cm ,定植密度约为 $33\,000\text{ 株}/\text{hm}^2$,定植前施足基肥并运行负水头灌溉系统。常规灌溉下茄子植株的定植密度及施肥与负水头灌溉处理一致。负水头灌溉吸力值设定为 70 hPa 。

1.3 测定指标及方法

(1)土壤含水量。常规灌溉每周漫灌 1 次,灌水量为上一周负水头灌溉耗水量的 1.5 倍。为了对比 2 种灌溉方式下土壤含水量的差异,将供水器盘面土壤作为研究对象,常规漫灌于 2012-06-06 17:00 进行后,随后一周时间内每天下午 18:00 用土钻取 20 cm 深土样,每根支管等距离取 3 个土样,采用烘干法测定土壤含水量。

(2)耗水量。每日 17:00 从试验装置储水管的标尺上直接读取水位高度,当日的水位高度值减去前一日水位高度值即为今日茄子植株总耗水高度,再根据储水管内径换算出负水头灌溉的日蒸散量,总耗水量为日蒸散量的累积相加值。

(3)生长指标。从茄子定植后 20 d 开始每隔 7

d 记录 1 次茄子的形态指标,用直尺测定茄子株高及展开度,用游标卡尺测定茄子茎粗,记录茄子叶片数。

(4)光合生理指标。于茄子生育盛期选典型晴天(5 月 27 日)于 08:30—18:30 在自然光照条件下每隔 2 h 用美国 LI-COR 产 LI-6400 便携式光合仪测定光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)等指标。

(5)叶绿素相对含量。在茄子生育盛期(7 月 6 日),用日本产 SPAD-502 型叶绿素测定仪测定 2 个处理茄子叶片的叶绿素相对含量,重复 9 次,求平均值。

(6)茄子产量。于 6 月 20 日开始收获茄子,在长达 2 个月的生育期内,采用累积称重法测定茄子产量。

(7)作物水分生产率。即作物消耗单位水量的产出,其值等于作物产量(一般指经济产量)与耗水量之比,单位为“ kg/m^3 ”。

1.4 数据统计分析

采用 Excel 2010 和 DPS 7.05 软件进行试验数据统计分析与作图。

2 结果与分析

2.1 负水头灌溉与常规灌溉下土壤含水量的比较
常规灌溉下的土壤一般都要经历干湿交替变化,而负水头灌溉可持续精确控制土壤含水量,使土

壤含水量有一个相对稳定的值。在测定土壤含水量的一周时间内,除 6 月 8 日为晴天外,其他时间多为多云天气。图 2 给出 2 种灌溉方式下土壤含水量随时间的变化关系。

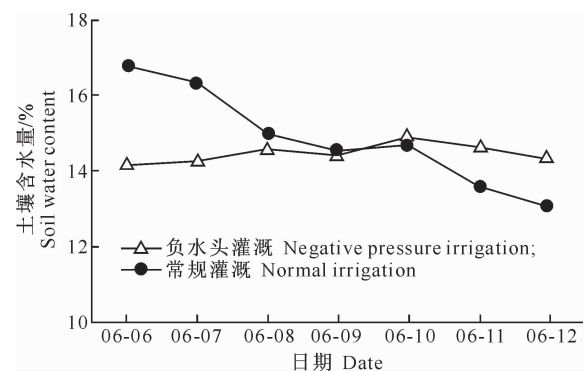


图 2 2 种灌溉方式下土壤含水量的周变化

Fig. 2 Weekly variation of soil water content under two irrigation modes

从图 2 可以看出,常规灌溉后土壤含水量在第 2 次灌溉之前一直呈降低趋势,晴天的降幅远大于多云天气下,从灌溉当天土壤含水量 16.78% 下降到一周后的 13.05%,一周内土壤的平均含水量为 14.84%;负水头灌溉下土壤含水量随着灌溉时间稍有波动,但幅度很小,一周内土壤的平均含水量为 14.48%。这说明了负水头灌溉系统能很好地控制

土壤含水量,可实现对作物的持续灌溉及对含水量的精确控制。

2.2 负水头灌溉对茄子植株生长的影响

图 3 为 2 种灌溉方式下茄子植株株高、茎粗、叶片数和展开度的对比结果。从图 3 可以看出,负水头灌溉与常规灌溉方式下茄子植株的生长规律一致,各生长指标均随着生育进程的推移持续增大,但在 2 种灌溉方式下茄子植株大小却存在明显差异。从定植到开始收获茄子的 2 个多月里,负水头灌溉下茄子的株高、叶片数及展开度均较常规灌溉高,且差异非常明显。分析茄子株高的增长量,苗期(04-21—05-19)时,负水头灌溉下茄子株高为常规灌溉的 1.1 倍左右,开花期(05-20—06-16)为 1.3 倍,结果期(06-17—06-30)为 1.2 倍,茄子株高的增长率呈逐渐增大最后趋于稳定的变化趋势。分析叶片数的变化量,负水头灌溉下苗期(04-21—05-19)茄子的叶片数比常规灌溉多 1 片,而到了开花结果初期(06-02—06-23),叶片数的增加速率加大,到 6 月 23 日,负水头灌溉叶片数比常规灌溉多 6 片。负水头灌溉下茄子植株的茎粗略高于常规灌溉,两者无显著差异。上述结果表明,在负水头灌溉条件下,土壤水分更适合茄子的生长。

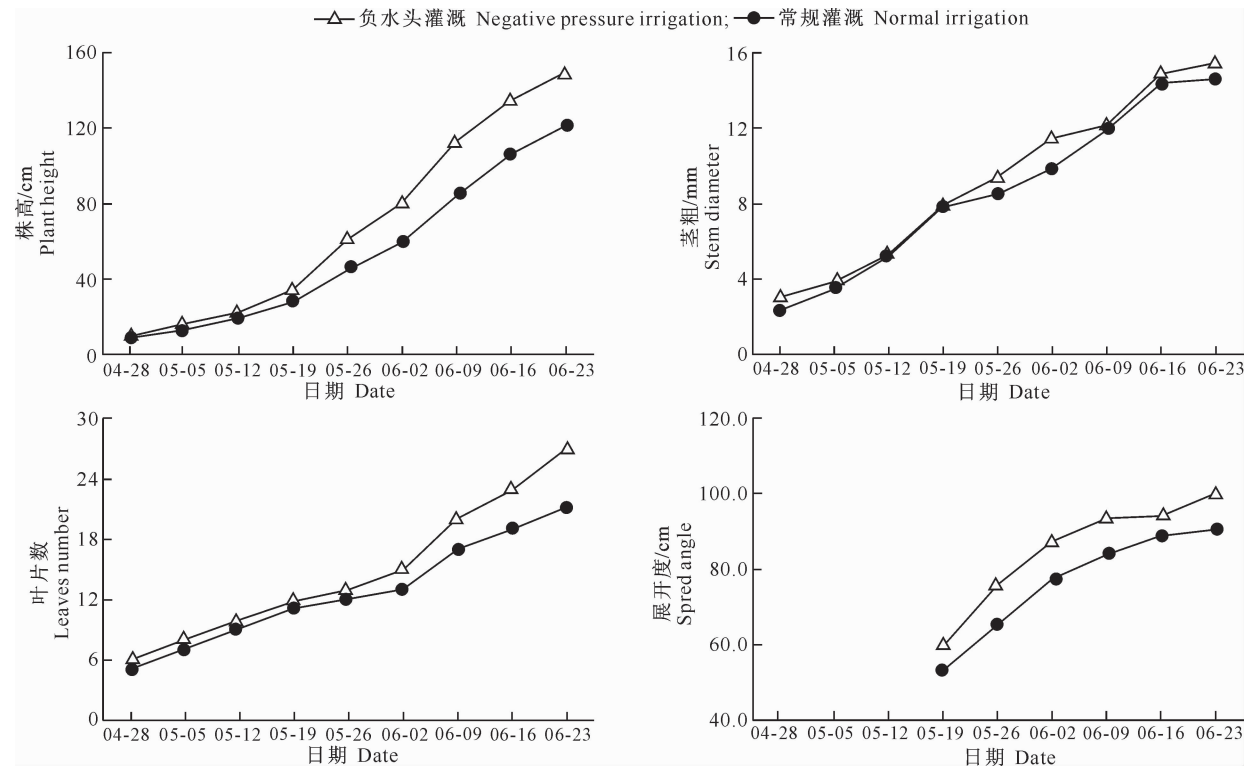


图 3 2 种灌溉方式下茄子生长指标的比较

Fig. 3 Comparison of growth indexes of eggplant growth under two irrigation modes

2.3 负水头灌溉对茄子叶片光合参数及叶绿素相对含量的影响

图4给出了负水头灌溉与常规灌溉2种方式下茄子叶片光合参数的日变化曲线。由图4可知,2种灌溉方式下茄子叶片的光合速率和蒸腾速率的日变化趋势相同,在光合速率较大时,蒸腾速率也较大;两者均呈双峰曲线,在12:30时有明显的“午休”现象,此时2种灌溉方式下叶片的光合和蒸腾都有明显下降,但负水头灌溉下叶片的光合及蒸腾速率明显高于常规灌溉;10:30左右,负水头灌溉下茄子叶片的光合速率和蒸腾速率分别为15.88

$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $16.42 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,而常规灌溉下的光合及蒸腾速率仅为 $12.50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $13.45 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。气孔导度与光合速率有着相似的变化规律。从08:30到14:30,同一灌溉方式下气孔导度的变化很小,但2种灌溉方式间的气孔导度差异显著,两者的差值一直保持在 $0.7 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 左右。2种灌溉方式下叶片胞间 CO_2 浓度差异不明显,整个日变化曲线中,负水头灌溉下叶片胞间 CO_2 浓度只是略高于常规灌溉下。正午时分,常规灌溉下水分供应相对不足,导致叶片气孔部分关闭以减小植株蒸腾,光合速率也下降^[18]。

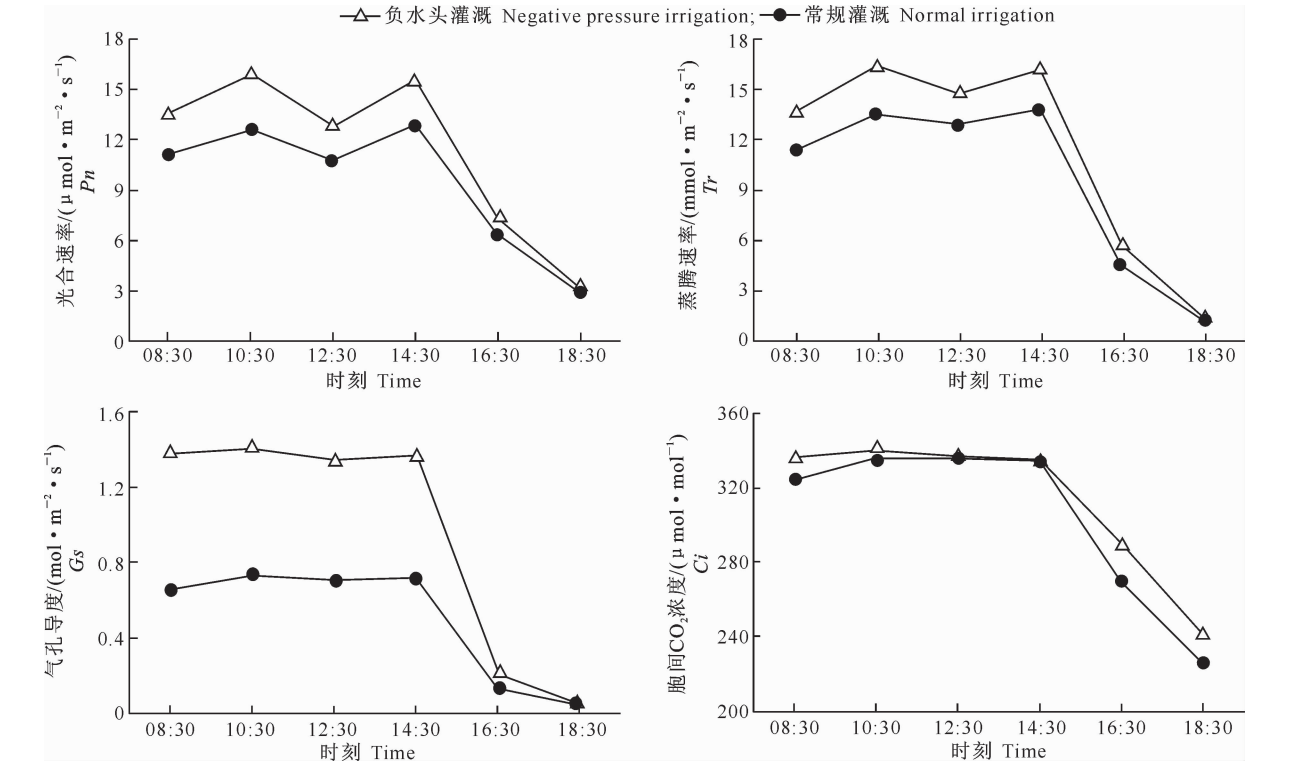


图4 2种灌溉方式下茄子叶片光合参数的日变化

Fig.4 Diurnal variation of photosynthetic parameters of eggplant leaves under two irrigation modes

在茄子植株的生育盛期,选择典型晴天(7月6日)正午11:00对茄子叶片的叶绿素相对含量进行测定,负水头灌溉与常规灌溉方式下茄子叶片叶绿素相对含量分别为 51.38 ± 0.32 和 50.58 ± 0.25 ,两者差异不显著。

2.4 负水头灌溉对茄子产量及作物水分生产率的影响

2种灌溉方式下茄子植株产量及作物水分生产率的差异见表1。

表1 2种灌溉方式下茄子的产量及作物水分生产率

Table 1 Yield and crop water productivity of eggplant under two irrigation modes

灌溉方式 Irrigation mode	果实产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Fruit yield	单果质量/kg Average fruit weight	总耗水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$) Water use	水分生产率/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) Water productivity
负水头灌溉 Negative pressure irrigation	20 966	0.178	1 174.155	17.86
常规灌溉 Normal irrigation	14 559	0.157	1 761.232	8.27

由表1结果可以得出,负水头灌溉总耗水量为 $1\,174.155 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,常规漫灌的灌水量为 $1\,761.232$

m^3/hm^2 ;负水头灌溉和常规灌溉下茄子果实产量分别为 $20\,966$ 和 $14\,559 \text{ kg}/\text{hm}^2$,负水头灌溉下茄子

产量为常规灌溉的 1.44 倍;负水头灌溉下茄子单果质量要高于常规灌溉,但二者差异不显著;负水头灌溉下水分生产率为常规灌溉的 2.16 倍,其明显提高了作物的水分利用效率。

3 讨论与结论

本研究通过给定一个确定的负水头值(即供水吸力值)来控制土壤水分,在持续供水的同时又能精确控制土壤含水量,使温室内茄子的土壤含水量几乎稳定在 14.4%。负水头灌溉避免了常规灌溉下土壤的干湿交替,土壤过湿会导致土壤内氧气缺乏而不利作物的生长,土壤干燥则会导致根系缺水也不利于作物的生长^[19],而负水头灌溉能够根据作物需水量精确给水,满足作物生长对水分的需求,更有利于作物的生长。负水头灌溉方式下茄子植株的生长规律与常规灌溉一致,但株高、茎粗、叶片数、展开度等形态指标值均大于常规灌溉,其中负水头灌溉下的株高和叶片数与常规灌溉相比差异显著,株高增长率逐渐增大后趋于稳定,叶片数的增长速度则是持续增加。

负水头灌溉下茄子植株的光合速率与蒸腾速率均强于常规灌溉,且二者差异显著,均呈双峰曲线,在 12:30 有明显的“午休”现象;二者气孔导度和胞间 CO₂ 浓度也有着相似的变化规律。

试验过程中,为保证常规漫灌作物的正常生长,本试验以负水头灌溉的作物耗水量为标准,常规灌溉处理作物灌水量为负水头的 1.5 倍。在此基础上比较了 2 种灌溉方式下作物的产量及水分生产率。结果表明,负水头灌溉下单果质量略大于常规灌溉,差异不明显,但果实产量远高于常规灌溉处理,为常规灌溉的 1.44 倍,这可能是由于负水头适宜的水分供应加快了茄子植株体内同化物质的运转与积累,使得茄子果实总产量大于常规灌溉。负水头以其特殊的灌溉方式避免了土壤的深层渗漏和无效地表蒸发,在温度、光照等多种外界因素影响下适时适量地供水,达到了节水高效的作用。与常规灌溉相比,负水头灌溉的水分生产率为常规灌溉的 2.16 倍,明显提高了作物的水分利用效率,同时节省了人力物力,该灌溉方式能获得更大的经济效益,所以说负水头灌溉系统作为一种新型的智能灌水装备在温室栽培中具有有良好的推广价值。在整个试验过程中,笔者人为规定每周常规灌溉的补水量为负水头耗水量的 1.5 倍,这个补水量是否完全满足作物的生长需求以及其他灌水量下作物的水分生产率又将如何变

化,这些问题有待下一步研究解决。

[参考文献]

[1] 王沙生,高荣孚,吴贯明. 植物生理学 [M]. 北京:中国林业出版社,1981.
Wang S S, Gao R F, Wu G M. Plant physiology [M]. Beijing: Chinese Forestry Press, 1981. (in Chinese)

[2] 陈金平,刘祖贵,段爱旺,等. 土壤水分对温室盆栽番茄叶片生理特性的影响及光合下降因子的动态 [J]. 西北植物学报, 2004, 24(9): 1589-1593.
Chen J P, Liu Z G, Duan A W, et al. Effects of soil moisture on physiological characteristics and the dynamic state of factors causing photosynthesis decline in potted tomato leaves in green house [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2004, 24 (9): 1589-1593. (in Chinese)

[3] Tang Z C. Response and adaptability of plants to water stress: I. General concepts of stress resistance and the resistance to water-logging in plant [J]. Plant Physiology Communications, 1983(3): 24-29.

[4] 董建国,余叔文. 细胞分裂素对渍水小麦衰老的影响 [J]. 植物生理学报, 1984, 10(1): 55-61.
Dong J G, Yu S W. Effects of cytokinin on senescence and ethylene production in waterlogged wheat plants [J]. Acta Phytophysiologica Sinica, 1984, 10(1): 55-61. (in Chinese)

[5] 吕 军. 渍水对冬小麦生长的危害及其生理效应 [J]. 植物生理学报, 1994, 20(3): 221-226.
Lü J. The injury to winter wheat growth by soil water logging and its mechanism [J]. Acta Phytophysiologia Sinica, 1994, 20 (3): 221-226. (in Chinese)

[6] 吴文勇,杨培岭,刘洪禄. 温室土壤植物环境连续体水热运移研究进展 [J]. 灌溉排水, 2002, 21(1): 76-79.
Wu W Y, Yang P L, Liu H L. Retrospect and prospect on researches of water and heat transfer in soil-plant-environment continuum (SPEC) in greenhouse [J]. Irrigation and Drainage, 2002, 21(1): 76-79. (in Chinese)

[7] 邹朝望,薛绪掌,张仁铎,等. 负水头灌溉原理与装置 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 17-22.
Zou C W, Xue X Z, Zhang R D, et al. Principle and equipment of negative pressure irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23 (11): 17-22. (in Chinese)

[8] 万克江,薛绪掌,王志敏,等. 供水吸力对黄瓜若干生理指标的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(6): 98-102.
Wan K J, Xue X Z, Wang Z M, et al. Influence of water supply tension to some physiological parameters of cucumber [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(6): 98-102. (in Chinese)

[9] 耿 伟,薛绪掌,王志敏. 不同供水吸力下豆角若干生理指标的变化 [J]. 中国农学通报, 2006, 22(5): 206-210.
Geng W, Xue X Z, Wang Z M. Changes of some physiological indices in common bean under water supply tension [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22 (5): 206-210. (in

Chinese)

[10] 耿 伟,万克江,薛绪掌,等. 负压供水下菠菜某些生理指标的变化 [J]. 农业系统科学与综合研究,2006,22(4):248-251.
Geng W,Wan K J,Xue X Z,et al. Variation of some physiological parameters under negative pressure water supply in Spinach [J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture,2006,22(4):248-251. (in Chinese)

[11] 李 邵,薛绪掌,郭文善,等. 供水吸力对温室盆栽黄瓜产量与品质的影响 [J]. 园艺学报,2010,37(8):1339-1344.
Li S,Xue X Z,Guo W S,et al. Influence of water supply tension on yield and quality of potted cucumber in greenhouse [J]. Acta Horticulturae Sinica,2010,37(8):1339-1344. (in Chinese)

[12] 李 邵,耿 伟,薛绪掌,等. 日光温室负压自动灌溉下番茄蒸腾规律研究 [J]. 节水灌溉,2008(1):25-29.
Li S,Geng W,Xue X Z,et al. Research on transpiration of tomato under negative pressure automatic irrigation in greenhouse [J]. Water Saving Irrigation,2008(1):25-29. (in Chinese)

[13] 张伟娟,李 邵,胡跃高,等. 负水头灌溉对温室番茄植株蒸腾规律的影响 [J]. 中国农学通报,2010,26(15):103-108.
Zhang W J,Li S,Hu Y G,et al. Effects of negative hydraulic head irrigation method on transpiration of tomato in greenhouse [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2010,26(15):103-108. (in Chinese)

[14] 李 邵,薛绪掌,齐 飞,等. 不同营养液质量浓度对温室盆栽黄瓜生长与基质环境的影响 [J]. 灌溉排水学报,2011,30(6):115-119.
Li S,Xue X Z,Qi F,et al. Effects of different nutrition solution concentrations on growth of cucumber and substrate environments [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2011,30(6):115-119. (in Chinese)

[15] 毛思帅,胡跃高,薛绪掌,等. 负水头供给营养液对不同番茄品种生长特性的影响 [J]. 北方园艺,2012(10):28-32.
Mao S S,Hu Y G,Xue X Z,et al. Study on growth,physiology and yield of different tomato varieties with supplying nutrient solution by negative pressure irrigation [J]. Northern Horticulture,2012(10):28-32. (in Chinese)

[16] 毛思帅,胡跃高,薛绪掌,等. 负水头供不同营养液对温室樱桃番茄生长和产量的影响 [J]. 中国蔬菜,2012(24):73-79.
Mao S S,Hu Y G,Xue X Z,et al. Effects of different nutrient solutions on growth and yield of cherry tomato under negative pressure water irrigation device in green house [J]. China Vegetables,2012(24):73-79. (in Chinese)

[17] 李 邵,薛绪掌,郭文善,等. 负水头灌溉系统供水规律研究 [J]. 灌溉排水学报,2008,27(5):55-58.
Li S,Xue X Z,Guo W S,et al. R Water supply law of negative hydraulic head irrigation system [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2008,27(5):55-58. (in Chinese)

[18] Davies W J,Wilkinson S,Loveys B. Stomatal control by chemical signaling and the exploitation of this mechanism to increase water use efficiency in agriculture [J]. New Phytologist,2002,153:449-460.

[19] Gabriel C. Drought stress inhibits photosynthesis by decreasing stomatal aperture-not by affecting ATP synthesis [J]. Trends in Plant Science,2000(5):187-188.