

灌水量对温室自根与嫁接黄瓜根系分布及水分利用效率的影响

孔祥悦^{1,2}, 王永泉³, 眭晓蕾^{1,2}, 张振贤^{1,2}, 高丽红^{1,2,*}

(¹ 中国农业大学蔬菜系, 北京 100193; ² 设施蔬菜生长发育调控北京市重点实验室, 100193; ³ 北京市农业技术推广站, 北京 100101)

摘 要: 为探求黄瓜适宜的节水灌溉方式, 以温室栽培的黄瓜自根苗和嫁接苗为试验材料, 设定每次灌水 150、300 和 450 m³ · hm⁻² 的不同灌水量, 研究灌水量对黄瓜根系分布、商品瓜产量和水分利用效率的影响。结果表明, 与常规灌水量对照 (每次 450 m³ · hm⁻²) 相比, 适度减少灌水量, 在多数情况下不会显著影响黄瓜根系生长、垂直分布与水分利用, 每次 150 m³ · hm⁻² 的灌水量对自根与嫁接黄瓜的产量无显著影响, 水分利用效率显著提高。每次 150 m³ · hm⁻² 灌水量下, 嫁接黄瓜的根系旺盛且粗壮, 同时诱发了大量毛细根向土壤深层分布, 使其产量显著高于自根黄瓜, 因此在减量灌溉条件下, 嫁接具有良好的促根节水丰产的效果。

关键词: 黄瓜; 灌水量; 嫁接; 根系分布; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S 642.2

文献标志码: A

文章编号: 0513-353X (2012) 10-1928-09

Effects of Irrigation on Roots Distribution and Water Use Efficiency of Own-rooted and Grafted Cucumber in Solar Greenhouse

KONG Xiang-yue^{1,2}, WANG Yong-quan³, SUI Xiao-lei^{1,2}, ZHANG Zhen-xian^{1,2}, and GAO Li-hong^{1,2,*}

(¹ College of Agriculture and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; ² Beijing Key Laboratory of Growth and Development Regulation for Protected Vegetable Crops, Beijing 100193; ³ Station of Popularizing Agricultural Technique of Beijing, Beijing 100101, China)

Abstract: A solar greenhouse experiment was carried out to search the optimum mode of water-saving irrigation for cucumber (*Cucumis sativus* L. ‘Jinyu 5’). Different irrigation levels (150, 300 and 450 m³ · hm⁻² each time) were set. Cucumber plants were either own-rooted or grafted onto the rootstock (*Cucurbita ficifolia*). Then root distribution, commodity yield and water use efficiency (WUE) were investigated. The results showed that in most cases, a modest reduction in irrigation quantity didn’t significantly affect the growth, the vertical distribution and absorption of cucumber’s root. Compared with conventional irrigation (450 m³ · hm⁻² each time), irrigation of 150 m³ · hm⁻² each time didn’t significantly affect the yield of own-rooted and grafted cucumber, thus significantly increased WUE. In irrigation of 150 m³ · hm⁻² each time, the roots of grafted cucumber were strong and stout, a large number of capillary

收稿日期: 2012-05-15; **修回日期:** 2012-08-09

基金项目: 水利部公益性行业科技项目 (201001061); 国家‘十二五’科技支撑计划项目 (2011BAD12B01); 现代农业产业技术体系建设专项项目 (Nycytx-35-gw22)

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: gaolh@cau.edu.cn; Tel: 010-62732825)

roots were induced and distributed to the deep soil, so that the yield of grafted cucumber was higher significantly than that of own-rooted cucumber. On the whole, in the reduction of irrigation, grafting may obtain favorable effects of root-promoting, water-saving and high yield.

Key words: cucumber; irrigation; graft; root distribution; yield; water use efficiency

黄瓜 (*Cucumis sativus* L.) 对水分敏感, 且需水量较大, 在设施黄瓜生产中普遍存在盲目过量灌溉的现象。水分的过量投入, 不仅带来水资源浪费, 水分利用效率降低, 还会带来氮肥的随水流失, 存在污染地下水的风险。在黄瓜设施栽培水肥管理中制定合理的灌溉制度, 对于改善根层土壤环境、降低空气湿度、营造有利于增产和品质改善的地下与地上条件、提高水分利用效率尤为重要。

已有研究表明, 适宜的土壤水分有利于温室黄瓜植株生长和产量提高, 水分过高则植株徒长, 产量无显著增加, 水分利用效率降低; 水分过低则植株生长受抑, 产量降低 (张宪法 等, 2002)。张爱良等 (1997) 发现, 当植株受到土壤水分胁迫时, 根系形态结构、化学成分等均会发生相应变化, 进而影响地上部“叶光合系统”的建成和产量。嫁接可以利用砧木发达的根系, 显著提高对土壤养分和水分的吸收 (Nieves et al., 2002; 孙艳和黄炜, 2002), 有效提高水肥利用效率 (张圣平 等, 2006; Dietmar et al., 2010)。

然而, 前人的研究多集中在节水灌溉对黄瓜植株地上部生长的影响, 对地下根系的影响研究相对较少。本试验中以日光温室自根与嫁接黄瓜为研究对象, 研究灌水量与嫁接栽培对黄瓜根系分布、商品瓜产量、水分利用效率的影响, 以评价灌水量与嫁接的综合促根节水效果, 为温室黄瓜合理农艺节水栽培措施的制定提供一定的数据支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况与试验材料

试验于 2009 年 1 月—2010 年 1 月在北京市顺义区大孙各庄镇绿奥蔬菜合作社日光温室内进行。供试温室长 70 m, 跨度 7 m, 脊高 3.5 m。耕层土壤的基本理化性状为有机质 0.21%, 全氮 $5.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 $151.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $246.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 6.29, 容重 $1.51 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 田间持水量 26.01%。供试黄瓜自根苗和嫁接苗接穗品种为‘津育 5 号’, 嫁接苗砧木品种为‘黑籽南瓜’。

1.2 试验设计

试验分冬春茬和秋冬茬两茬进行。冬春茬于 2009 年 1 月 6 日在玻璃温室内播种黄瓜, 1 月 9 日播种黑籽南瓜, 1 月 16 日嫁接, 2 月 20 日定植到日光温室, 7 月初拉秧。秋冬茬试验于同年 8 月 9 日播种黄瓜, 8 月 12 日播种黑籽南瓜, 8 月 16 日进行嫁接, 8 月 30 日定植, 2010 年 1 月初拉秧。

设计 3 种不同灌水量[W3: 每次灌水 $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ (农户常用灌溉量), W2: 每次 $300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, W1: 每次 $150 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$], 并在此基础上分别对试验材料进行嫁接 (G1) 与自根 (G0) 两种处理, 共 6 个处理。每个处理 3 次重复。采用完全随机区组排列, 每个小区为 1 次重复, 设 3 个栽培畦, 每个栽培畦面积 6.76 m^2 。以自根、常用灌溉量 (G0W3) 作对照 (以农户实际生产经验作对照, 目的是使研究结果更贴近生产, 更易于在生产实际中应用)。

前期定植水与缓苗水的灌水时间与灌水量各处理相同, 其中冬春茬前期水为 $829.5 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 秋冬茬为 $1105.1 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。缓苗后开始不同灌水量试验, 灌水间隔以对照需要灌水作为依据 (农户实

际生产经验) 来确定, 3 种灌水量处理同时灌水, 每次灌水处理前 1 d 的土壤墒情见表 1。

表 1 每次灌水处理前 1 d 0~40 cm 土壤含水量占田间持水量的百分比
Table 1 The percentage of the 0~40 cm soil water content at the day before irrigation and the field capacity /%

季节 Period	日期/(M-D)	处理 Treatment					
	Date	G0W1	G0W2	G0W3	G1W1	G1W2	G1W3
冬春茬 Winter-spring period	03-24	68.2	67.8	68.4	70.2	69.0	73.9
	04-11	58.6	53.9	60.9	59.1	59.4	63.9
	04-19	63.9	63.2	72.6	60.8	67.5	75.1
	04-27	68.8	64.7	71.5	65.3	69.4	83.1
	05-09	65.5	56.0	62.8	63.7	68.2	71.3
	05-24	55.9	55.9	53.4	60.3	60.3	61.2
	06-06	61.7	56.1	65.8	60.8	61.7	68.4
	06-23	66.2	59.9	64.0	62.0	62.6	65.4
秋冬茬 Autumn-winter period	09-26	69.4	68.6	74.9	71.3	71.2	73.0
	10-13	65.3	63.2	69.5	67.2	68.2	68.4
	10-26	63.2	64.1	69.9	65.3	67.1	72.8
	11-17	67.4	64.7	72.5	68.3	68.9	75.0
	12-12	70.8	70.8	76.7	72.4	75.0	78.6

注: G0. 自根; G1. 嫁接; W1. 每次灌水量 $150 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; W2. 每次灌水量 $300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; W3. 每次灌水量 $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

Note: G0. Own-root; G1. Graft; W1. Irrigation $150 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; W2. Irrigation $300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; W3. Irrigation $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

冬春茬初花期为 2 月 20 日—3 月 27 日, 共 36 d; 初瓜期为 3 月 28 日—4 月 12 日, 共 16 d; 盛瓜期为 4 月 13 日—6 月 8 日, 共 57 d; 末瓜期为 6 月 9 日—7 月 2 日, 共 24 d; 全生育期 133 d。秋冬茬初花期为 8 月 30 日—9 月 30 日, 共 32 d; 初瓜期为 10 月 1—20 日, 共 20 d; 盛瓜期为 10 月 21 日—12 月 1 日, 共 42 d; 末瓜期为 12 月 2—30 日, 共 29 d; 全生育期 123 d。

冬春茬于 3 月 25 日开始进行灌水量处理, 至生育期结束共进行 8 次, 全生育期内, W1 灌水总量为 $2\,029.5 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, W2 为 $3\,229.5 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, W3 为 $4\,429.5 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。秋冬茬于 9 月 27 日开始进行灌水量处理, 至生育期结束共进行 5 次, 全生育期内, W1 灌水总量为 $1\,855.1 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, W2 为 $2\,605.1 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, W3 为 $3\,355.1 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。各处理均采用地膜覆盖, 膜下沟灌, 同时为减少因水分侧渗而造成的试验误差, 不同处理小区之间用垂直埋深 50 cm 的薄膜隔开, 灌水量用精确度为 0.001 m^3 的水表计量。按常规生产追肥和日常管理, 各处理一致。

1.3 测试项目与方法

根系生长指标的测定: 分别于冬春茬、秋冬茬拉秧前, 各小区 (每个小区为 1 次重复) 选取 1 株代表性植株, 每个处理 3 次重复, 用直径 8 cm、高 15 cm 的根钻, 以其主根处为中心, 围绕一周取样, 每个土层 (15 cm 为一个土层) 取 9 个点, 共取 3 层。取出后立即冲洗去除杂物, 获得根系样品。用 EPSON EXPRESSION 4990 型根系扫描仪对根样进行扫描, 扫描图像经 Adobe Photoshop CS4 软件和 Win RHIZO 根系分析软件分析根样的根长、根表面积、根平均直径、根体积以及直径分别在 $0 \sim 0.5 \text{ mm}$ 、 $0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$ 、 $1.0 \sim 1.5 \text{ mm}$ 、 1.5 mm 以上范围内的根长。最后将根样在 65°C 下烘干, 称取根样干质量。

土壤储水量的测定: 黄瓜定植开始与拉秧结束时于窄行中间位置用土钻采集 $0 \sim 80 \text{ cm}$ 的土样, 将土层分为 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 、 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 、 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 、 $60 \sim 80 \text{ cm}$, 共 4 层, 每小区取 5 个点, 同层土壤混合混匀, 用烘干法测定土壤含水量。

灌溉水渗漏量的测定: 利用排水式蒸渗仪测量, 按照黄瓜栽培要求对蒸渗仪的规格进行改进 (蒸渗仪长宽高规格分别为 $150 \text{ cm} \times 130 \text{ cm} \times 90 \text{ cm}$, 为方便表层耕作, 其顶部安装于距地表 30 cm 处),

所测渗漏量至少为距地表 120 cm 以下的水分。每次灌溉后用水泵将蒸渗仪中的水分抽出并计量。每个试验小区下设置 1 个蒸渗仪，所获得的渗漏量为 3 次重复的平均值。

耗水量 (ET) 的测定：由水量平衡法计算得到耗水量 $ET = I - D \pm W_o$ 。I：灌水量； W_o ：土壤储水变化量 ($W_o =$ 拉秧时土壤含水量 - 定植时土壤含水量)；D：渗漏量。

商品瓜产量及水分利用效率的测定：在收获期内以每个小区的中间畦记录商品瓜产量，最后折合成不同处理的产量。水分利用效率 (WUE) 为商品瓜产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 与耗水量 (mm) 的比值。

利用 SPSS 数据分析软件对数据进行处理分析。

2 结果与分析

2.1 灌水量对自根与嫁接黄瓜根系特征参数的影响

由表 2 可以看出，在冬春茬，相同灌水量下嫁接苗 (G1W1、G1W2、G1W3) 的根长、根表面积、根直径、根体积、根干质量分别与自根苗 (G0W1、G0W2、G0W3) 均无显著差异。在秋冬茬，W1 灌水量下，嫁接苗 (G1W1) 的根长和根干质量显著高于自根苗 (G0W1)，其他指标灌水量和是否嫁接都没有显著差异。说明秋冬茬低灌水量 (W1) 下，嫁接显著促进了根系的生长，增加了根系的吸收能力，从而提高了植株对水分的吸收能力。

在冬春茬，W2 灌水量下自根苗 (G0W2) 的根长和根表面积显著高于 W1 灌水量下自根苗 (G0W1) 的根长和根表面积，而 W3 灌水量下自根苗 (G0W3) 仅根表面积一项指标显著高于 W1 灌水量下自根苗 (G0W1) 的根表面积。在其余情况下，灌水量对自根苗或嫁接苗的根长、表面积、直径、根体积和根干质量均无显著影响。这些结果说明适度减少灌水量，在多数情况下并不会显著影响黄瓜根系生长与吸收，从而达到节水与维持根系正常生长的双重效果。此外，在冬春茬，虽然灌水量由 W2 降至 W1 时，自根苗 (G0W2 与 G0W1) 根长和根面积显著减小，但是嫁接苗 (G1W2 与 G1W1) 根长和根面积并未显著减小。这说明在冬春茬嫁接苗可通过提高根系生长和增大根系吸收面积来增强植株对水分的吸收能力，从而缓解水分亏缺带来的不利影响。

表 2 灌水量对自根与嫁接黄瓜根系特征参数的影响

Table 2 Effect of irrigation on root characteristic parameters of own-rooted and grafted cucumber

季节 Period	处理 Treatment	根长/cm Length	表面积/ cm^2 Surf area	直径/mm Diameter	体积/ cm^3 Volume	干质量/g Dry weight
冬春茬 Winter - spring period	G0W1	3 809.7 b	522.1 b	0.64 ab	13.82 a	1.76 a
	G0W2	4 723.8 a	730.5 a	0.57 b	14.51 a	2.00 a
	G0W3	4 533.1 ab	726.6 a	0.59 b	16.27 a	1.97 a
	G1W1	4 515.3 ab	672.9 ab	0.74 a	18.61 a	2.49 a
	G1W2	5 222.4 a	854.2 a	0.65 ab	21.51 a	3.04 a
	G1W3	5 106.9 a	820.5 a	0.69 ab	17.92 a	2.74 a
秋冬茬 Autumn - winter period	G0W1	2 049.5 b	410.2 a	0.45 a	7.09 b	0.99 b
	G0W2	2 549.7 ab	435.0 a	0.42 a	7.84 ab	1.13 ab
	G0W3	2 634.1 ab	435.1 a	0.48 a	8.31 ab	1.31 ab
	G1W1	2 878.4 a	460.3 a	0.45 a	8.95 ab	1.34 a
	G1W2	3 098.9 a	500.5 a	0.50 a	10.07 a	1.41 a
	G1W3	3 082.7 a	499.0 a	0.52 a	9.35 a	1.35 a

注：G0. 自根；G1. 嫁接；W1. 每次灌水量 $150 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ；W2. 每次灌水量 $300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ；W3. 每次灌水量 $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。表中数据采用 LSD 方差分析方法，同一列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: G0. Own-root; G1. Graft; W1. Irrigation $150 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; W2. Irrigation $300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; W3. Irrigation $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$. The data were analyzed with LSD analysis. The different lowercase letters in the same column denoted significant difference at 0.05 level.

2.2 灌水量与嫁接处理下黄瓜根系垂直分布特征及根系分级直径比较

研究比较了灌水量和嫁接栽培对根系土壤垂直分布的影响,并对不同直径的根系长度所占比例进行了比较,结果分别见表3和表4。

由表3可以看出,在冬春茬,随着土壤深度的增加,黄瓜根量逐渐减少。相同灌水量下,嫁接黄瓜(G1)在0~15 cm、15~30 cm不同深度的根系长度与自根黄瓜(G0)无显著差异,但在W1、W3灌水量下,G1在30~45 cm深度的根系长度分别显著大于G0,说明嫁接黄瓜在土壤深层分布的根长较自根黄瓜大,利于深层水分的吸收。当灌水量由W2降至W1时,G1在30~45 cm深度的根系长度无显著变化,但G0显著减小,G1W1植株根系表现出向30~45 cm深层土壤生长的趋势。在秋冬茬,灌水量与嫁接处理对黄瓜根系垂直分布没有显著影响。

这说明适度减少灌水量,多数情况不会显著影响黄瓜根系的垂直分布。在冬春茬,虽然灌水量由W2降至W1时,自根苗(G0W2与G0W1)在30~45 cm深度的根系长度显著减小,但是嫁接苗(G1W2与G1W1)的根系长度并未显著减小,说明了在冬春茬嫁接苗可通过维持根系在深层土壤的正常分布来增强植株对水分的吸收能力,缓解水分亏缺的不利影响。

表3 灌水量对自根与嫁接黄瓜在不同土层中的根系长度及所占比例的影响

Table 3 Effect of irrigation on the roots length and ratio of own-rooted and grafted cucumber in different soil layer

季节 Period	处理 Treatment	0 ~ 15 cm		15 ~ 30 cm		30 ~ 45 cm	
		根系长度/ cm	比例/ %	根系长度/ cm	比例/ %	根系长度/ cm	比例/ %
		Roots length	Ratio	Roots length	Ratio	Roots length	Ratio
冬春茬 Winter - spring period	G0W1	2246.2 a	58.96 a	1077.5 a	28.28 a	486.0 c	12.76 b
	G0W2	2612.5 a	55.31 a	1422.6 a	30.12 a	688.6 b	14.58 ab
	G0W3	2709.6 a	59.77 a	1200.6 a	26.49 a	622.8 bc	13.74 ab
	G1W1	2611.8 a	57.84 a	1202.2 a	26.63 a	701.3 ab	15.53 ab
	G1W2	2937.3 a	56.24 a	1521.3 a	29.13 a	763.8 ab	14.62 ab
秋冬茬 Autumn - winter period	G1W3	2865.3 a	56.11 a	1344.7 a	26.33 a	896.9 a	17.56 a
	G0W1	1245.0 b	60.75 a	534.2 a	26.07 a	270.2 a	13.19 a
	G0W2	1578.0 ab	61.89 a	619.3 a	24.29 a	352.4 a	13.82 a
	G0W3	1728.2 ab	65.61 a	599.4 a	22.76 a	306.5 a	11.64 a
	G1W1	1703.0 ab	59.17 a	791.4 a	27.49 a	384.0 a	13.34 a
	G1W2	2203.2 a	71.09 a	727.7 a	23.48 a	168.1 a	5.42 a
	G1W3	2065.1 a	66.99 a	707.8 a	22.96 a	309.8 a	10.05 a

注: G0. 自根; G1. 嫁接; W1. 每次灌水量 $150 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; W2. 每次灌水量 $300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; W3. 每次灌水量 $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。表中数据采用 LSD 方差分析方法, 同一列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: G0. Own-root; G1. Graft; W1. Irrigation $150 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; W2. Irrigation $300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; W3. Irrigation $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$. The data were analyzed with LSD analysis. The different lowercase letters in the same column denoted significant difference at 0.05 level.

由表4可知,灌水量与嫁接处理对黄瓜根系直径为1.0~1.5 mm、大于1.5 mm的根系长度所占比例无显著影响。在冬春茬,灌水量由W2降至W1时,自根苗(G0W2与G0W1)与嫁接苗(G1W2与G1W1)根系直径为0~0.5 mm的毛细根根长比例均显著减小,自根苗(G0W2与G0W1)根系直径为0.5~1.0 mm的细根比例显著增加。在秋冬茬,灌水量的减少对自根苗不同直径的根系分布无显著影响,但嫁接苗(G1W1)根系直径为0~0.5 mm的毛细根比例显著增加,0.5~1.0 mm的细根比例显著减少。这说明,在较低灌水量W1下,冬春茬诱发直径为0.5~1.0 mm的细根发生,而秋冬茬诱发嫁接黄瓜直径为0~0.5 mm的毛细根发生。

由根系直径为0.5~1.0 mm的根长所占比例可以看出,在冬春茬W3灌水量下,嫁接苗(G1W3)的根长所占比例显著高于自根苗(G0W3),在秋冬茬W2灌水量下,嫁接苗(G1W2)显著高于自

根苗 (G0W2), 这说明嫁接黄瓜根系较自根黄瓜粗壮。此外, 在秋冬茬 W1 灌水量下, 嫁接苗 (G1W1) 显著低于自根苗 (G0W1), 原因可能是该条件下诱发嫁接黄瓜直径为 0 ~ 0.5 mm 的毛细根大量发生, 比例显著增加, 使得直径为 0.5 ~ 1.0 mm 的细根比例显著减少。

表 4 灌水量对自根与嫁接黄瓜不同直径范围的根系长度所占比例的影响

Table 4 Effect of irrigation on the ratio of root length with different root diameter of own-rooted and grafted cucumber

季节 Period	处理 Treatment	直径范围/mm Diameter				/%
		0 ~ 0.5	0.5 ~ 1.0	1.0 ~ 1.5	> 1.5	
冬春茬 Winter - spring period	G0W1	60.91 bc	20.76 ab	7.73 a	10.61 a	
	G0W2	67.02 a	17.87 c	6.34 a	8.78 a	
	G0W3	65.78 a	19.46 bc	7.81 a	6.94 a	
	G1W1	58.28 c	21.26 ab	8.03 a	12.42 a	
	G1W2	63.30 ab	19.58 bc	7.90 a	9.22 a	
	G1W3	60.08 bc	22.18 a	7.96 a	9.78 a	
秋冬茬 Autumn - winter period	G0W1	72.51 ab	17.39 ab	5.67 a	4.43 ab	
	G0W2	75.56 a	16.29 bc	4.73 a	3.42 b	
	G0W3	71.76 ab	17.88 ab	6.04 a	4.32 ab	
	G1W1	75.89 a	14.12 c	5.61 a	4.37 ab	
	G1W2	70.58 b	19.91 a	5.38 a	4.13 ab	
	G1W3	68.86 b	19.27 ab	6.05 a	5.83 a	

注: G0. 自根; G1. 嫁接; W1. 每次灌水量 $150 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; W2. 每次灌水量 $300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; W3. 每次灌水量 $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。表中数据采用 LSD 方差分析方法, 同一列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: G0. Own-root; G1. Graft; W1. Irrigation $150 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; W2. Irrigation $300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; W3. Irrigation $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$. The data were analyzed with LSD analysis. The different lowercase letters in the same column denoted significant difference at 0.05 level.

综上所述可以看出, 在冬春茬, 虽然灌水量由 W2 降至 W1 时, 自根苗 (G0W2 与 G0W1) 在 30 ~ 45 cm 深度的根系长度显著减小, 但是嫁接苗 (G1W2 与 G1W1) 的根系长度并未显著减小, 维持了根系在深层土壤的正常分布, 同时在较低灌水量 W1 下, 诱发了自根与嫁接黄瓜直径为 0.5 ~ 1.0 mm 的细根发生。在秋冬茬, 灌水量与嫁接处理对黄瓜根系垂直分布没有显著影响, 但在较低灌水量 W1 下, 可以诱发嫁接黄瓜直径为 0 ~ 0.5 mm 的毛细根大量发生。

2.3 灌水量对自根与嫁接黄瓜产量和水分利用效率的影响

如表 5 所示, 相同 W2 和 W3 灌水量水平下, 嫁接与自根黄瓜产量和水分利用效率无显著差异。这说明当灌水量处于 W2 和 W3 时, 与灌水量相比, 嫁接并不是影响黄瓜产量和水分利用效率的主要因素。但是, 在低灌水量 W1 下, 嫁接苗 (G1W1) 的黄瓜产量在冬春茬和秋冬茬均显著高于自根苗 (G0W1), 增幅分别为 19.37% 和 36.55%。在秋冬茬, 嫁接苗 (G1W1) 的水分利用效率显著高于自根苗 (G0W1)。这说明, 在秋冬茬降低灌水量 (W1), 嫁接苗可以通过提高水分利用效率增加黄瓜产量。但在低灌水量 W1 下, 冬春茬自根苗 (G0W1) 的水分利用效率却显著大于嫁接苗 (G1W1), 这可能是由于冬春茬黄瓜需水量大, 自根黄瓜对较低灌水量的敏感性更强, 根长显著减小, 影响水分吸收, 使其耗水量大幅下降所致。

不同灌水量处理对相同嫁接处理黄瓜产量无显著影响, 但对水分利用效率存在显著影响。说明适度降低灌水量仍可满足黄瓜产量形成对水分的需求。无论是嫁接苗还是自根苗, 其水分利用效率均在灌水量 W1 下显著高于灌水量 W2 下。这说明当灌水量处于 W1 和 W2 时, 灌水量是影响水分利用效率的主要因素。但是, 无论是嫁接苗还是自根苗, 其水分利用效率均在灌水量 W2 和 W3 下无显著差异。这说明当灌水量超过一定限度的时候, 灌水量的改变对黄瓜水分利用效率的影响减弱或消失。

表 5 灌水量对自根与嫁接黄瓜产量和水分利用效率的影响
Table 5 Effect of irrigation on yield and water use efficiency of own-rooted and grafted cucumber

季节 Period	处理 Treatment	商品瓜产量/ (kg · hm ⁻²) Commodity yield	灌水量/ mm Irrigation	渗漏量/ mm Leakage	土壤储水变化 量/ mm Variation of soil water storage	耗水量/ mm Water consumption	水分利用效率/ (kg · mm ⁻¹ · hm ⁻²) WUE
冬春茬 Winter – spring period	G0W1	113 481 b	202.85	72.31	14.38	116.16 b	976.9 a
	G0W2	119 142 ab	322.79	72.31	2.17	248.31 a	479.8 c
	G0W3	120 746 ab	442.73	192.59	10.75	260.89 a	462.8 c
	G1W1	135 461 a	202.85	58.24	13.53	158.14 b	856.6 b
	G1W2	135 090 a	322.79	58.24	15.10	249.45 a	541.6 c
	G1W3	136 163 a	442.73	169.29	3.74	277.18 a	491.2 c
秋冬茬 Autumn – winter period	G0W1	23 330 b	185.41	77.41	23.92	84.08 c	277.5 b
	G0W2	27 282 ab	260.37	77.41	51.70	131.26 ab	207.8 d
	G0W3	27 627 ab	335.34	182.11	37.45	115.78 b	238.6 bcd
	G1W1	31 857 a	185.41	77.52	20.17	87.72 c	363.2 a
	G1W2	32 561 a	260.37	77.52	42.28	140.57 a	231.6 cd
	G1W3	32 783 a	335.34	168.11	43.61	123.62 ab	265.2 bc

注: G0. 自根; G1. 嫁接; W1. 每次灌水量 150 m³ · hm⁻²; W2. 每次灌水量 300 m³ · hm⁻²; W3. 每次灌水量 450 m³ · hm⁻²。表中数据采用 LSD 方差分析方法, 同一列不同小写字母表示差异显著 (P < 0.05)。

Note: G0. Own-root; G1. Graft; W1. Irrigation 150 m³ · hm⁻²; W2. Irrigation 300 m³ · hm⁻²; W3. Irrigation 450 m³ · hm⁻². The data were analyzed with LSD Analysis. The different lowercase letters in the same column denoted significant difference at 0.05 level.

综合考虑上述结果, 在本试验灌水量范围内, 灌水量并不是影响黄瓜产量的主要因素。在低灌水量 W1 下, 虽然冬春茬嫁接苗 (G1W1) 水分利用效率较自根苗 (G0W1) 显著降低, 但其黄瓜产量仍然显著提高; 而秋冬茬嫁接苗 (G1W1) 水分利用效率和产量均显著高于自根苗 (G0W1)。这说明, 嫁接是维持低灌水量 (W1) 下黄瓜产量的主要因素。

3 讨论

在每次 300 m³ · hm⁻² 的灌水量下, 自根黄瓜产量与常规灌水量 (每次 450 m³ · hm⁻²) 下产量无显著降低。这是因为传统的设施蔬菜水肥管理会造成大量水分深层渗漏和土壤 NO₃⁻-N 淋失 (Kitchen et al., 1997; 汤丽玲 等, 2002), 适当降低灌水量减少了渗漏量, 较多的养分储存在土壤表层 (于红梅 等, 2005; 巨龙 等, 2007) 供作物生长发育所需, 从而保证了商品瓜产量。

自根黄瓜在每次 150 m³ · hm⁻² 的灌水量下, 虽然灌水量锐减, 冬春茬和秋冬茬的黄瓜产量与常规灌水量下产量并无显著差异。这可能是因为虽然灌水量减少, 但 NO₃⁻-N 淋洗量减少, 使得土壤表层 NO₃⁻-N 含量增加, 保证了植物可吸收有效氮素养分供给, 从而维持了产量。在每次 150 m³ · hm⁻² 的灌水量下, 嫁接黄瓜产量较自根黄瓜显著提高, 这是因为嫁接与自根黄瓜相比, 嫁接黄瓜的根系旺盛且粗壮 (郭世荣, 2006), 增强了对土壤表层氮素的利用能力, 同时诱发了大量毛细根的发生, 或者向 30 ~ 45 cm 土壤深层的根系分布量显著高于自根黄瓜, 可以吸收更多水分 (刘锦春和钟章成, 2009; 牛勇 等, 2009), 最终保证了黄瓜产量。因此减量灌溉同时采取嫁接栽培方式可以进一步提高黄瓜产量。

本试验中的灌溉量是基于农民的常规灌溉经验和前人的研究基础而确定的, 灌溉时间是根据常规灌溉处理下植株的需水情况而定。为了提高研究结果的实用性, 特将依据农户生产经验制定的灌溉制度与黄瓜生育期的土壤墒情结合 (表 1)。有研究发现, 灌水下限为饱和含水率的 55% 时, 黄瓜穴盘苗的干物质积累量、主根长、根系活力均显著优于其他灌水下限处理 (赵青松 等, 2011)。黄

瓜田间生产中土壤含水量以达到田间最大持水量的 70% ~ 80% 为宜。而根际土壤含水量低的条件下会刺激根系在垂直和水平两个方向上发育, 以便获得足够水分(牛勇 等, 2009)。杨志刚等(2011)得到相似结果, 无论是自根还是嫁接黄瓜, 与灌水下限 85% 相比, 灌水下限 65% 的产量与水分利用效率均无显著差异, 但是分布于 0 ~ 30 cm 土层的根长明显增加。在本试验条件下, 冬春茬 G0W2、G1W1 的灌水下限分别维持在 55% ~ 70%、60% ~ 70%, 以促进根系伸长, 既可减少灌水定额同时亦能满足作物对水分的需求。处理 G0W1 的灌水下限为 55% ~ 70%, 虽然其灌水量(每次 $150 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)较低, 但是仅抑制了冬春茬自根黄瓜(G0W1 较 G0W2)根长和根表面积(表 2), 并没有显著影响冬春茬自根黄瓜产量(表 5)。这说明本试验中低灌水量(每次 $150 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)及其灌水下限 55% ~ 70% 均可满足黄瓜生长。

本试验中, 进行灌水处理前的土壤相对含水量各处理相近。当开始第一次灌水处理后, 每次灌水处理前的土壤相对含水量 G0W1 普遍高于 G0W2, 这是由于低灌水量(每次 $150 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)抑制了自根黄瓜根系向深层土壤的伸长生长, 降低了根表面积(表 2), 水分吸收受到影响, 使土壤留存的相对含水量偏高。

不同栽培茬口较低灌水量(每次 $150 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)对黄瓜根系的形成产生不同的影响, 冬春茬主要诱发直径为 0.5 ~ 1.0 mm 的细根生长, 而秋冬茬诱发的是直径 0 ~ 0.5 mm 的毛细根。这是因为冬春茬环境温度逐渐升高, 黄瓜对水分的需求量增大, 灌水量过少, 直径 0 ~ 0.5 mm 毛细根受到水分限制, 相对增长放缓, 而直径为 0.5 ~ 1.0 mm 的细根仍然保持增长(高小锋 等, 2010); 秋冬茬黄瓜需水量减少, 每次 $150 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 的灌水量对毛细根的发生没有产生明显影响。

不同栽培茬口较低灌水量(每次 $150 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)对黄瓜根系特征参数的影响不尽相同。每次 $150 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 灌水量下, 冬春茬自根黄瓜的根长、根表面积均显著小于每次 $300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 灌水量下。这是因为冬春茬黄瓜需水量大, 在常规灌溉频率的前提下, 对较低灌水量的敏感性更强。因此, 为了保证自根黄瓜根系的良好生长, 选择较低灌水量的同时, 要对灌溉时间、灌溉频率做相应的调整, 冬春茬应适当缩短灌水间隔期, 以满足作物基本需求。

本试验中, 灌水量处理是在缓苗后进行的, 生产上植株定植后一般是进行两次水分灌溉(定植水和缓苗水), 因采用农民经验灌水量, 前期总体水量偏大。此外, 由于秋冬茬后期温光环境不利于黄瓜产量形成, 最终导致秋冬茬与冬春茬相同处理下黄瓜水分生产效率差异较大, 因此, 在采取合适的灌溉量和栽培方式的同时, 尽量改善温室的环境条件, 也是提高水分生产效率的有效途径。

在本试验条件下, 日光温室嫁接黄瓜对每次 $150 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 灌水量的适应性优于自根黄瓜, 根系生长旺盛, 能够达到良好的促根节水丰产的效果。减量灌溉条件下采用嫁接技术是设施黄瓜的一项合理且有效的节水措施。

References

- Dietmar Schwarz, Youssef Rouphael, Giuseppe Colla, Jan Henk Venema. 2010. Grafting as a tool to improve tolerance of vegetables to abiotic stresses: Thermal stress, water stress and organic pollutants. *Scientia Horticulturae*, 127 (2): 162 - 171.
- Gao Xiao-feng, Wang Jin-xin, Zhang Bo, Ma Hui-fang, Zhong Nan. 2010. Effects of drought stress on dry matter partitioning of young *Robinia pseudoacacia* at its different growth stages. *Chinese Journal of Ecology*, 29 (6): 1103 - 1108. (in Chinese)
- 高小锋, 王进鑫, 张 波, 马惠芳, 钟 楠. 2010. 不同生长期干旱胁迫对刺槐幼树干物质分配的影响. *生态学杂志*, 29 (6): 1103 - 1108.
- Guo Shi-rong. 2006. *Soilless cultivation*. Beijing: China Agriculture Press: 28. (in Chinese)
- 郭世荣. 2006. 无土栽培学. 北京: 中国农业出版社: 28.
- Ju Long, Wang Quan-jiu, Wang Lin-fang, Shi Xiao-nan. 2007. Effects of irrigation amounts on yield of winter wheat and distribution characteristics

- of soil water-salt in semi-arid region. Transactions of the CSAE, 23 (1): 86 - 90. (in Chinese)
- 巨 龙, 王全九, 王琳芳, 史晓楠. 2007. 灌水量对半干旱区土壤水盐分布特征及冬小麦产量的影响. 农业工程学报, 23 (1): 86 - 90.
- Kitchen N R, Blanchard P E, Hughes D F, Lerch R N. 1997. Impact of historical and current farming systems on groundwater nitrate in Northern Missouri. Journal of Soil and Water Conservation, 52 (4): 272 - 277.
- Liu Jin-chun, Zhong Zhang-cheng. 2009. Influence of water stress and re-watering on the root growth of *Cupressus funebris* Endl. seedlings in the limestone area. Acta Ecologica Sinica, 29 (12): 6439 - 6445. (in Chinese)
- 刘锦春, 钟章成. 2009. 水分胁迫和复水对石灰岩地区柏木幼苗根系生长的影响. 生态学报, 29 (12): 6439 - 6445.
- Nieves Fernández-García, Vicente Martínez, Antonio Cerdá, Micaela Carvajal. 2002. Water and nutrient uptake of grafted tomato plants grown under saline conditions. Plant Physiology, 159: 899 - 905.
- Niu Yong, Liu Hong-lu, Wu Wen-yong, Chen Li-hua. 2009. Effects of different irrigation lower limit on growth index of cucumber in solar greenhouse. Journal of Irrigation and Drainage, 28 (3): 81 - 84. (in Chinese)
- 牛 勇, 刘洪禄, 吴文勇, 陈丽华. 2009. 不同灌水下限对日光温室黄瓜生长指标的影响. 灌溉排水学报, 28 (3): 81 - 84.
- Sun Yan, Huang Wei. 2002. Photosynthetic characteristic and nutrient absorption characteristic of two grafted cucumber seedlings. Acta Horticulturae Sinica, 29 (2): 179 - 180. (in Chinese)
- 孙 艳, 黄 炜. 2002. 两个黄瓜品种嫁接苗光合特性及养分吸收特性的研究. 园艺学报, 29 (2): 179 - 180.
- Tang Li-ling, Chen Qing, Zhang Hong-yan, Zhang Xiao-sheng, Li Xiao-lin, Liebig H P. 2002. Effects of different irrigation and fertilization strategies on soil inorganic N residues in open field of vegetable rotation system. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 8 (3): 282 - 287. (in Chinese)
- 汤丽玲, 陈 清, 张宏彦, 张晓晟, 李晓林, Liebig H P. 2002. 不同灌溉与施氮措施对露地菜田土壤无机氮残留的影响. 植物营养与肥料学报, 8 (3): 282 - 287.
- Yang Zhi-gang, Cui Shi-mao, Chen Zhi-qun, Kong Xiang-yue, Gao Li-hong. 2011. Effects of irrigation lower limit and grafting methods on root growth and water use efficiency of cucumber in greenhouse. Journal of Irrigation and Drainage, 30 (4): 61 - 64. (in Chinese)
- 杨志刚, 崔世茂, 陈之群, 孔祥悦, 高丽红. 2011. 灌溉下限与嫁接方式对温室黄瓜根系生长及水分利用效率的影响. 灌溉排水学报, 30 (4): 61 - 64.
- Yu Hong-mei, Li Zi-zhong, Gong Yuan-shi. 2005. Leached nitrate in vegetable field under different water and nitrogen fertilizer management practices. Scientia Agricultura Sinica, 38 (9): 1849 - 1855. (in Chinese)
- 于红梅, 李子忠, 龚元石. 2005. 不同水氮管理对蔬菜地硝态氮淋洗的影响. 中国农业科学, 38 (9): 1849 - 1855.
- Zhang Ai-liang, Miao Guo-yuan, Wang Jian-ping. 1997. The relationship between plant roots and water. Crop Research, (2): 4 - 6. (in Chinese)
- 张爱良, 苗果园, 王建平. 1997. 作物根系与水分的关系. 作物研究, (2): 4 - 6.
- Zhang Sheng-ping, Gu Xing-fang, Wang Ye. 2006. Effect of bur cucumber (*Sicyos angulatus* L.) as rootstock on growth physiology and stress resistance of cucumber plants. Acta Horticulturae Sinica, 33 (6): 1231 - 1236. (in Chinese)
- 张圣平, 顾兴芳, 王 烨. 2006. 野生棘瓜砧木对黄瓜生长及抗逆性的影响. 园艺学报, 33 (6): 1231 - 1236.
- Zhang Xian-fa, Yu Xian-chang, Zhang Zhen-xian. 2002. Effect of soil water on the growth and physiological characteristics of cucumber during fruit stage in greenhouse. Acta Horticulturae Sinica, 29 (4): 343 - 347. (in Chinese)
- 张宪法, 于贤昌, 张振贤. 2002. 土壤水分对温室黄瓜结果期生长与生理特性的影响. 园艺学报, 29 (4): 343 - 347.
- Zhao Qing-song, Li Ping-ping, Wang Ji-zhang, Gao Bei. 2011. Effects of irrigation threshold on growth and physiological characteristics of cucumber plug seedlings. Transactions of the CSAE, 27 (6): 31 - 35. (in Chinese)
- 赵青松, 李萍萍, 王纪章, 高 蓓. 2011. 不同灌水下限对黄瓜穴盘苗生长及生理指标的影响. 农业工程学报, 27 (6): 31 - 35.