

再生水滴灌对黄瓜叶绿素、光合、产量及品质的影响

王璐璐¹, 田军仓^{1,2,3*}, 徐桂红¹, 沈 晖^{1,2,3}, 闫新房^{1,2,3}

(1.宁夏大学 土木与水利工程学院, 银川 750021; 2.宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 银川 750021; 3.旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 银川 750021)

摘 要:【目的】探究再生水滴灌不同灌溉定额对黄瓜光合作用、产量与品质的影响规律。【方法】采用随机区组对比试验方法, 分析了再生水处理与自来水对照的不同灌溉定额(1 890、2 835 与 3 780 m³/hm²)对黄瓜光合作用、产量与品质的影响。【结果】①黄瓜 4 个光合指标(净光合速率、蒸腾速率、气孔导度与胞间 CO₂ 摩尔分数)及 SPAD 值与产量均随着灌溉定额的增加而增大, 而群体水分利用效率则随着灌溉定额的增加而降低。相同灌溉定额再生水处理比自来水对照的黄瓜 4 个光合作用指标及 SPAD 值平均值分别增加 7.32%、2.99%、4.19%、3.07%与 5.54%, 产量与群体水分利用效率平均值分别增加 8.9%与 8.86%; ②黄瓜可溶性糖与可溶性固形物质量分数随着灌溉定额的增加而减小, 而维生素 C 与总酸质量分数随着灌溉定额的增加而增加; 再生水处理比自来水对照的维生素 C 量、可溶性糖与可溶性固形物量平均值分别增加 1.14%、12.64%与 5.8%, 黄瓜总酸量平均值降低 8.72%。【结论】黄瓜 SPAD 值与光合作用指标最大, 产量最高, 品质适宜的处理为再生水高水处理 Z3, 即灌溉定额为 3 780 m³/hm², 相应的灌水定额为 180 m³/hm², 灌水次数为 21 次。

关键词: 再生水; 滴灌; 黄瓜; 光合作用; 品质; 水分生产效率

中图分类号: S273.5

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.20190263

王璐璐, 田军仓, 徐桂红, 等. 再生水滴灌对黄瓜叶绿素、光合、产量及品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(5): 18-25.

WANG Lulu, TIAN Juncang, XU Guihong, et al. The Effects of Drip Irrigation with Reclaimed Wastewater on Chlorophyll, Photosynthesis, Yield and Quality of Cucumber [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(5):18-25.

0 引言

在我国干旱地区, 农业灌溉使用再生水的原因: 一是再生水中含有氮、磷、钾等元素, 提高土壤肥力^[1]; 二是利用再生水能避免严重的污染问题^[2]; 三是能防止养分、化学物质和病原体等输入到生态系统中^[3]。因此, 再生水灌溉对控制农业污染及水资源短缺问题具有重要的科学意义和实用价值。代志远等^[4]认为再生水对农作物生长的影响尚有分歧。薛彦东等^[5]研究表明, 再生水灌溉对黄瓜、西红柿品质无显著影响。吴文勇等^[6]研究表明, 再生水处理与对照相比可显著增加果菜类蔬菜产量, 黄瓜平均增产 23.6%。裴亮等^[7]研究表明全部采用再生水滴灌处理对黄瓜的生长发育和产量形成均表现出一定的促进作用, 增产

21.5%。本文针对宁夏中卫市再生水滴灌对黄瓜的影响问题, 开展再生水滴灌对黄瓜叶绿素、光合、产量及主要品质的影响研究, 可为宁夏再生水滴灌推广提供理论与技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在宁夏中卫市应理城乡市政产业集团中水厂再生水灌溉示范基地进行。供试土质为壤土, 土壤干体积质量为 1.44 g/cm³。田间质量持水率为 28%, 种植期内试验地降水量 116.3 mm。土壤理化性质如表 1 所示。灌溉水源为中水厂的再生水与自来水, 再生水水质符合《农田灌溉水质标准》(GB5084—2005), 其水质指标如表 2 所示。

1.2 试验设计

采用随机区组试验, 进行再生水水质不同灌溉定额试验, 以自来水水质不同灌溉定额为对照, 共 6 个水平, 3 次重复, 重复作为区组。在各水平膜下滴灌方式、施肥、栽培等相同条件下, 研究再生水滴灌不同灌溉定额水平对黄瓜的光合、产量与品质的影响。

收稿日期: 2019-06-13

基金项目: 生活再生水回用技术研发与示范(2018YFC0408104); 宁夏高等学校一流学科建设项目(NXYLXK2017A03); 教育部“长江学者和创新团队发展计划”创新团队基金资助项目(IRT1067)

作者简介: 王璐璐(1994-), 女。硕士研究生, 主要从事精准节水灌溉与信息系统新技术研究。E-mail: 2427922032@qq.com

通信作者: 田军仓(1958-), 男。教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论技术、水资源高效利用和水资源工程等方面的研究。E-mail: slxtjc@163.com

再生水处理与对照低、中、高灌溉定额水平相应的 3 21 次，试验方案如表 3 所示。
个灌水定额分别为 90、135、180 m³/hm²，灌水次数

表 1 土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil

土壤类型 Soil type	pH 值	全盐量/ (g kg ⁻¹) Total salt	有机质量/ (g kg ⁻¹) Organic matter	碱解氮量/ (mg kg ⁻¹) Alkaline nitrogen	速效磷量/ (mg kg ⁻¹) Fast-acting phosphorus	速效钾量/ (mg kg ⁻¹) Fast-acting potassium
壤土 Loam	8.60	0.50	13.27	36.00	18.59	180.10

表 2 再生水和自来水水质指标

Table 2 Water quality indicators of recycled water and tap water

处理 Treatments	pH 值	总磷/ (mg L ⁻¹) Total phosphorus	总氮/ (mg L ⁻¹) Total nitrogen	钾/ (mg L ⁻¹) Potassium	氯化物/ (mg L ⁻¹) Chloride	全盐/ (mg L ⁻¹) Whole salt
再生水 Recycled water	7.51	0.41	16.4	19.3	120	393
自来水 Tap water	7.42	未检出 (<0.01)	0.21	8.4	30.3	219

处理 Treatments	悬浮物/ (mg L ⁻¹) Suspended matter	碳酸氢根/ (mg L ⁻¹) Bicarbonate	钙/ (mg L ⁻¹) Calcium	镁/ (mg L ⁻¹) Magnesium	粪大肠菌群/ (个 L ⁻¹) Fecal coliform
再生水 Recycled water	8.1	210.4	71.3	60.4	130
自来水 Tap water	0.5	116.7	42.2	11.8	未检出

表 3 试验方案

Table 3 Test plan

水质 Water quality	处理 Treatments	灌溉定额/ (m ³ hm ⁻²) Irrigation quota
再生水 Recycled water	Z1	1 890
	Z2	2 835
	Z3	3 780
自来水 Tap water	Q1	1 890
	Q2	2 835
	Q3	3 780

1.3 试验实施

试验于 2017 年 5 月 25 日—9 月 25 日进行，各处理面积为 5.5 m×1.4 m（其中垄宽为 80 cm，垄间距为 60 cm）。灌溉采用膜下滴灌的方式，每垄种植 2 行黄瓜，1 行黄瓜布置 1 行滴灌带，滴头间距为 30 cm，与株距相同，滴头流量为 3 L/h。在黄瓜种植前，种植垄施复合肥 750 kg/hm²（氮、磷、钾比例为 15：15：15），有机肥 1 500 kg/hm²（有机质≥45%，氮、磷、钾总量=5%）。施肥后，测试基础肥力。在试验实施期间，每个水平种植垄均施追肥水溶复合肥 540 kg/hm²（氮、磷、钾比例为 16：5：25），降雨时各处理均不灌水，幼苗期灌水 6 次，其中 1 次随水施肥；初花期灌水 4 次，其中 2 次随水施肥；结果期灌水 11 次，其中前 9 次随水施肥，均采用滴灌水肥一体化技术随水施肥。

1.4 观测项目及方法

黄瓜光合指标的测定：使用 LI-6400 便携式光合系统测定仪对叶片光合指标进行测定，使用便携式

SPAD-520 型叶绿素仪对叶片叶绿素进行测定^[8]。

黄瓜产量的测定：在每次结果后称量黄瓜产量，并计算黄瓜的总产量。

黄瓜品质的测定：从每个水平的 3 个重复小区采取代表性样品，测定不同处理样品的品质指标。可溶性固形物用折射仪法测定；可溶性总糖用盐酸水解—铜还原直接滴定法测定；维生素 C 用 2，6-二氯酚酚滴定法测定；总酸用酸解滴定法测定。

1.5 数据处理和统计方法

数据采用 Office 2016 和 DPS 7.05 版本统计分析软件进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 再生水滴灌对黄瓜 SPAD 值的影响

图 1 为不同处理黄瓜叶绿素变化，由图 1 可知，叶片 SPAD 值在整个生育期内呈凸抛物线趋势，各处理在 7 月 25 日黄瓜叶片 SPAD 值最大。表 4 为再生水不同灌溉定额下 SPAD 值影响的差异性分析结果，由表 4 可知，再生水处理与自来水对照不同灌溉定额对黄瓜 SPAD 值均有显著影响（ $p<0.01$ ），再生水处理与自来水对照的黄瓜 SPAD 值均随着灌溉定额的增加而增大。结果后期 9 月 3 日观测值顺序为：Z3 处理>Q3 处理>Z2 处理>Q2 处理>Z1 处理>Q1 处理。再生水灌溉处理中，Z3 处理 SPAD 值分别比 Z2 处理和 Z1 处理高 13.71%和 38.83%；自来水灌溉对照中，Q3 处理 SPAD 值分别比 Q2 处理和 Q1 处理高 16.22%和 40.46%；在灌溉定额相同条件下，Z1、Z2 和 Z3 处理 SPAD 值分别比 Q1、Q2 和 Q3 处理 SPAD 值高 5.66%、6.73%和 4.43%，SPAD 平均值高 5.54%。由

于再生水中总氮、总磷量分别比自来水增加 7.7 倍与 40 倍,在全生育期内,3 个处理总氮与总磷量分别高 137.7 kg/hm² 与 3.49 kg/hm²,从而提高了植株对氮、磷的利用效率^[5,9],并且镁为影响叶绿素合成的关键元素,再生水中镁含量比自来水增加 4.1 倍,在全生育期内,3 个处理镁量均高出 413.34 kg/hm²,所以再生水灌溉比自来水黄瓜 SPAD 值增加,并且随着灌溉定额的增大,水分促进了叶片新陈代谢能力,进而增加了 SPAD 值^[9-10]。Z3 处理再生水高水平黄瓜叶 SPAD 值最大为 85.84。

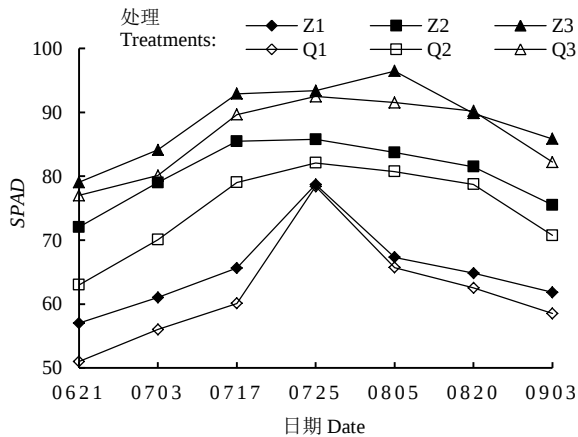


图 1 不同处理黄瓜叶绿素变化

Fig.1 Changes in chlorophyll of cucumber under different treatments

表 4 再生水不同灌溉定额下 SPAD 值影响的差异性分析结果

Table 4 Analysis of differences in the effects of different irrigation quotas on chlorophyll content in recycled water

水质 Water quality	处理 Treatments	SPAD
再生水 Recycled water	Z1	61.83Cc
	Z2	75.49Bb
	Z3	85.84Aa
自来水 Tap water	Q1	58.52Cc
	Q2	70.73Bb
	Q3	82.2Aa

2.2 再生水滴灌对黄瓜光合指标的影响

选结果期的光合指标分析不同处理日变化光合作用。

2.2.1 再生水滴灌对黄瓜净光合速率的影响

图 2 为不同处理黄瓜净光合速率变化,由图 2 可知,黄瓜叶片净光合速率日变化曲线为双峰型,于 10:00 与 14:00 处达到峰值,于 12:00 处达到峰谷。由表 5 可知,再生水处理与自来水对照不同灌溉定额对黄瓜净光合速率均有极显著影响 ($p < 0.01$),再生水处理与自来水对照的黄瓜净光合速率均随着灌溉定

额的增加而增大,各水平 10:00 峰值处均值顺序为: Z3 处理 > Z2 处理 > Q3 处理 > Q2 处理 > Z1 处理 > Q1 处理。再生水灌溉处理, Z3 处理净光合速率分别比 Z2 处理和 Z1 处理高 5.65% 与 28.26%; 自来水灌溉中, Q3 处理净光合速率分别比 Q2 处理和 Q1 处理高 5.61% 与 16.49%; 相同灌溉定额下, Z1、Z2 和 Z3 处理分别比 Q1、Q2 和 Q3 处理净光合速率高 0.3%、10.4% 和 10.44%, 平均净光合速率高 7.32%。由于再生水灌溉、高灌溉定额均使黄瓜 SPAD 值增大,从而促进光合作用,增加了黄瓜净光合速率。在 10:00 时, Z3 黄瓜净光合速率量最大为 33.86 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{s})$ 。

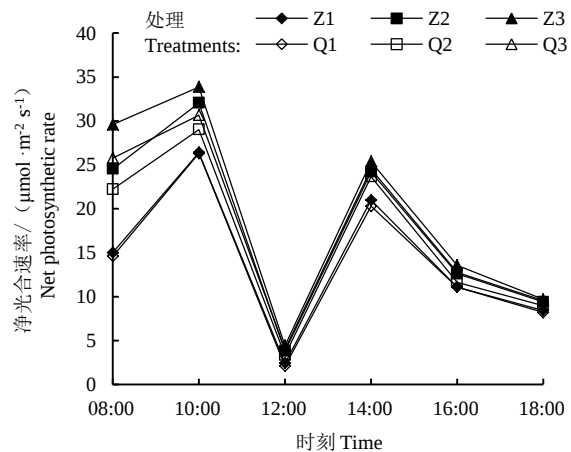


图 2 不同处理黄瓜净光合速率变化

Fig.2 Changes in net photosynthetic rate of cucumber under different treatments

2.2.2 再生水滴灌对黄瓜蒸腾速率的影响

图 3 为不同处理黄瓜蒸腾速率变化,由图 3 可知,黄瓜叶片蒸腾速率日变化曲线为双峰型,在 10:00 与 14:00 处达到峰值,于 12:00 处达到峰谷。表 5 为再生水不同灌溉定额对光合作用指标影响的差异性,由表 5 可知,再生水与自来水不同灌溉定额对黄瓜蒸腾速率均有极显著影响 ($p < 0.01$),再生水与自来水的黄瓜蒸腾速率均随着灌溉定额的增加而增大,各处理中, 10:00 峰值处均值顺序为: Z3 处理 > Q3 处理 > Z2 处理 > Q2 处理 > Z1 处理 > Q1 处理。再生水灌溉下, Z3 处理蒸腾速率分别比 Z2 和 Z1 处理高 6.78% 与 29.52%; 自来水灌溉, Q3 处理蒸腾速率分别比 Q2 和 Q1 处理高 6.28% 与 28.72%; 相同灌溉定额下, Z1、Z2 和 Z3 处理分别比 Q1、Q2 和 Q3 处理蒸腾速率高 2.7%、2.86% 和 3.35%, 平均蒸腾速率高 2.99%。其机理与净光合速率一致。在 10:00 时, Z3 处理黄瓜蒸腾速率最大为 15.75 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \text{s})$ 。

2.2.3 再生水滴灌对黄瓜气孔导度的影响

图 4 为不同处理黄瓜气孔导度变化,由图 4 可知,黄瓜叶片气孔导度日变化曲线为双峰型,于 10:00 与 14:00 达到峰值,于 12:00 达到峰谷。表 5 为再生水

不同灌溉定额对光合作用指标影响的差异性, 由表 5 可知, 再生水处理与自来水对照不同灌溉定额对黄瓜气孔导度均有极显著影响 ($p < 0.01$), 再生水处理与自来水对照的黄瓜气孔导度均随着灌溉定额的增加而增大, 10:00 峰值处均值顺序为: Z3 处理 > Q3 处理 > Z2 处理 > Q2 处理 > Z1 处理 > Q1 处理。再生水灌溉处理中, Z3 处理气孔导度分别比 Z2 和 Z1 处理

高 44.23% 与 59.57%; 自来水灌溉, Q3 处理气孔导度分别比 Q2 和 Q1 处理高 37.25% 与 52.17%; 相同灌溉定额下, Z1、Z2 和 Z3 处理分别比 Q1、Q2 和 Q3 处理气孔导度高 2.17%、1.96% 和 7.14%, 平均气孔导度高 4.19%。其机理与净光合速率一致。在 10:00 时, Z3 处理黄瓜气孔导度最大为 $0.75 \text{ mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 。

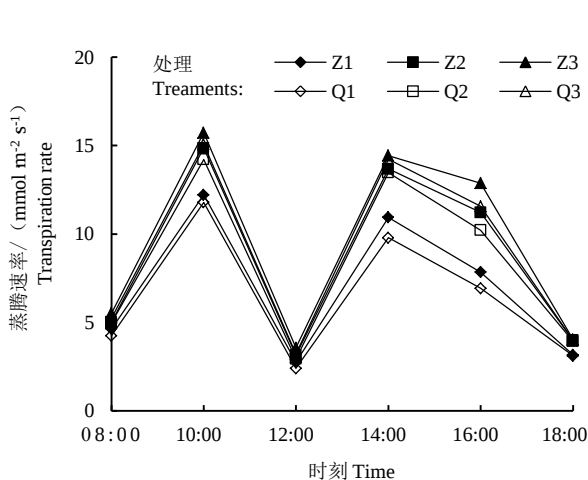


图 3 不同处理黄瓜蒸腾速率变化

Fig. 3 Changes in transpiration rate of cucumber under different treatments

2.2.4 再生水滴灌对黄瓜胞间 CO_2 摩尔分数 (C_i) 的影响

由图 5 可知, 黄瓜叶片 C_i 日变化曲线为“W”型, 与净光合速率变化曲线相反。

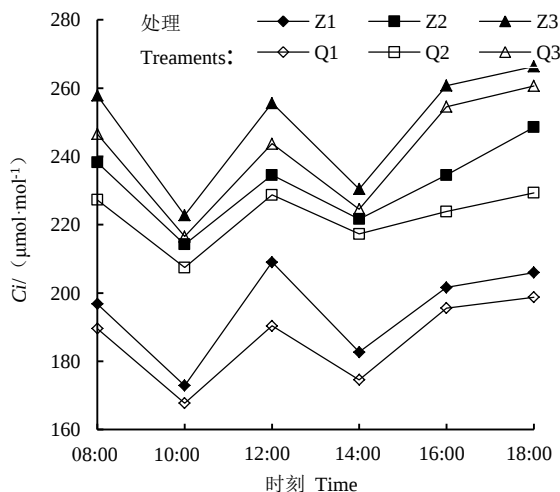


图 5 不同处理黄瓜 C_i 变化

Fig. 5 Changes in intercellular carbon dioxide concentration of cucumbers under different treatments

由表 5 可知, 再生水与自来水不同灌溉定额对黄瓜 C_i 均有极显著影响 ($p < 0.01$), 再生水处理与自来水对照的黄瓜 C_i 均随着灌溉定额的增加而增大, 10:00 谷值处均值顺序为: Z3 处理 > Q3 处理 > Z2 处理 > Q2 处理 > Z1 处理 > Q1 处理。再生水灌溉, Z3

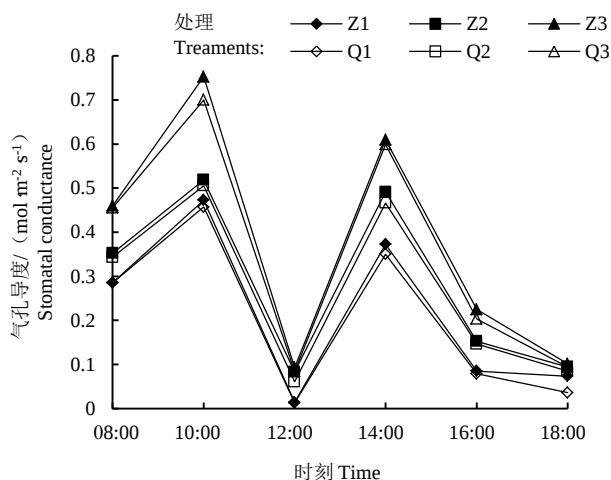


图 4 不同处理黄瓜气孔导度变化

Fig. 4 Stomatal conductance of cucumber under different treatments

处理 C_i 分别比 Z2 和 Z1 处理高 3.97% 与 28.82%; 自来水灌溉, Q3 处理 C_i 分别比 Q2 和 Q1 处理高 4.4% 和 29.08%; 相同灌溉定额下, Z1、Z2 和 Z3 处理分别比 Q1、Q2 和 Q3 处理 C_i 高 3.08%、3.29% 和 2.87%, 平均 C_i 高 3.07%。由于再生水灌溉、高灌溉定额均使黄瓜 SPAD 值增大, 从而增加气孔导度, 使 C_i 增加。在 10:00 时, Z3 处理黄瓜 C_i 最大, 为 $222.75 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 。

2.3 再生水滴灌对黄瓜产量的影响

由表 6 可知, 再生水与自来水不同灌溉定额对黄瓜产量均有极显著影响 ($p < 0.01$), 再生水与自来水不同灌溉定额的黄瓜产量均随着灌溉定额的增加而增大, 其均值顺序为: Z3 处理 > Q3 处理 > Z2 处理 > Q2 处理 > Z1 处理 > Q1 处理。再生水灌溉处理中, Z3 处理产量分别比 Z2 和 Z1 处理高 12.12% 和 26.2%; 自来水灌溉对照中, Q3 处理产量分别比 Q2 和 Q1 处理高 14.9% 和 32.29%; 相同灌溉定额下, Z1、Z2 和 Z3 处理分别比 Q1、Q2 和 Q3 处理产量高 11.68%、9.18% 和 6.54%, 平均产量高 8.9%。由于再生水灌溉、高灌溉定额均促进黄瓜光合作用, 并且再生水中总氮、总磷与钾元素量分别比自来水增加 7.7 倍、40 倍与 1.3 倍, 在全生育期内, 3 个处理总氮、总磷与含钾量分别高 137.7 、 3.49 和 $92.7 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 从而提高了植株对氮、磷、钾的利用效率^[5,9-15], 增加了黄瓜产量。

所以 Z3 处理黄瓜产量最大为 71 799 kg/hm²。由表 6 可知, 再生水灌溉, Z1 处理群体水分利用效率分别比 Z2 和 Z3 处理高 20.19%和 34.91%; 自来水灌溉, Q1 处理群体水分利用效率分别比 Q2 和 Q3 处理高 17.86%和 28.97%, 相同灌溉定额下, Z1、Z2 和 Z3 处理分别比 Q1、Q2 和 Q3 处理群体水分利用效率高 11%、8.85%和 6.12%, 平均群体水分利用效率高 8.86%。

表 5 再生水不同灌溉定额对光合作用指标影响的差异性

Table 5 The effects of different irrigation quotas on the photosynthesis index of recycled water

水质 Water quality	处理 Treatments	净光合速率/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) Net photosynthetic rate	蒸腾速率/($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) Transpiration rate	气孔导度/($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) Stomatal conductance	$C_i/(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$
再生水 Recycled water	Z1	26.4 Cc	12.16Cc	0.47Cc	172.91Cc
	Z2	32.05Bb	14.75Bb	0.52Bb	214.24Bb
	Z3	33.86Aa	15.75Aa	0.75Aa	222.75Aa
自来水 Tap water	Q1	26.32 Cc	11.84Cc	0.46Cc	167.75Cc
	Q2	29.03 Bb	14.34Bb	0.51Bb	207.42Bb
	Q3	30.66Aa	15.24Aa	0.7Aa	216.54Aa

注 表中小写字母代表差异显著 ($p<0.05$), 大写字母代表差异极显著 ($p<0.01$), 下同。

Note The lowercase letters in the table represent significant differences ($p<0.05$), and the uppercase letters represent extremely significant differences ($p<0.01$), the same as below.

表 6 不同处理黄瓜产量、灌溉水分生产效率与水分利用效率

Table 6 Water production efficiency and water use efficiency of cucumber under different treatments

水质 Water quality	处理 Treatments	灌水量/ ($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$) Irrigation volume	实际需水量 ($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$) Actual water demand	产量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) Yield	灌溉水分生产效率/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) Irrigation water production efficiency	群体水分利用效率/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) Population water use efficiency	叶片水分利用 效率/($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) Leaf water use efficiency
再生水 Recycled water	Z1	1 890	3 377.3	56 893Cc $\pm$ 2 061	30.10	16.85	2.17
	Z2	2 835	4 566.2	64 039Bb $\pm$ 2 429	22.59	14.02	2.17
	Z3	3 780	5 747.9	71 799Aa $\pm$ 1 355	18.99	12.49	2.15
自来水 Tap water	Q1	1 890	3 355.7	50 943Cc $\pm$ 2 643	26.95	15.18	2.22
	Q2	2 835	4 553.3	58 653Bb $\pm$ 1 271	20.69	12.88	2.02
	Q3	3 780	5 723.3	67 391Aa $\pm$ 1 128	17.83	11.77	2.01

2.4 再生水滴灌对黄瓜品质的影响

表 7 为再生水不同灌溉定额对黄瓜品质影响的差异性, 由表 7 可知, 再生水与自来水的黄瓜可溶性固形物质量分数与可溶性糖质量分数随着灌溉定额的增加而减小, 而维生素 C 质量分数与总酸质量分数随着灌溉定额的增加而增加。

再生水与自来水不同灌溉定额对黄瓜维生素 C 质量分数均有显著性影响 ($p<0.01$)。其均值顺序为 Z3 处理>Q3 处理>Z2 处理>Q2 处理>Z1 处理>Q1 处理, 再生水灌溉处理中, Z3 处理维生素 C 质量分数分别比 Z2 处理与 Z1 处理高 29.45%与 35.29%; 自来水灌溉, Q3 处理维生素 C 质量分数分别比 Q2 处理与 Q1 处理高 29.18%与 33.79%; 相同灌溉定额下, Z1、Z2 和 Z3 处理分别比 Q1、Q2 和 Q3 处理维生素 C 质量分数高 0.41%、1.33%和 1.54%, 平均维生素 C 质量分数高 1.14%。由于再生水中总氮、总磷与钾量分别比自来水增加 7.7 倍、40 倍与 1.3 倍, 在全生育期内, 3 个处理总氮、总磷与钾量分别提高

137.7、3.49、92.7 kg/hm², 总氮、总磷与钾元素可以提高黄瓜维生素 C 量^[15-16], 从而再生水灌溉增加了维生素 C 量。所以 Z3 处理维生素 C 质量分数最高, 为 9.89 mg/kg。

再生水比自来水不同灌溉定额水平对黄瓜可溶性糖质量分数均有极显著影响 ($p<0.01$)。其均值顺序为: Z1 处理>Z2 处理>Q1 处理>Z3 处理>Q2 处理>Q3 处理。再生水灌溉处理中, Z1 处理可溶性糖质量分数分别比 Z2 处理与 Z3 处理高 5.09%与 14.4%; 自来水灌溉对照中, Q1 处理可溶性糖质量分数分别比 Q2 处理与 Q3 处理高 9.47%与 12.8%; 相同灌溉定额下, Z1、Z2 和 Z3 处理分别比 Q1、Q2 和 Q3 处理高 11.62%、16.27%和 10.1%, 平均可溶性糖质量分数高 12.64%。由于再生水中总氮、总磷与钾量分别比自来水增加 7.7 倍、40 倍与 1.3 倍, 在全生育期内, 3 个处理总氮、总磷与钾量分别提高 137.7、3.49、92.7 kg/hm², 总氮、总磷与钾元素可以提高黄瓜可溶性糖量^[15-16], 因此再生水灌溉增加了可溶性糖量。所以

Z1 处理可溶性糖质量分数最高为 4.13%。

再生水比自来水不同灌溉定额对黄瓜可溶性固形物质量分数均有极显著影响 ($p<0.01$)。其均值顺序为：Z1 处理>Z2 处理=Q1 处理>Q2 处理>Z3 处理>Q3 处理，再生水灌溉，Z1 处理可溶性固形物质量分数分别比 Z2 处理与 Z3 处理高 12.9%与 18.8%；自来水灌溉中，Q1 处理可溶性固形物质量分数分别比 Q2 处理与 Q3 处理高 1.77%与 7.75%；在灌溉定额相同条件下，Z1、Z2 和 Z3 处理分别比 Q1、Q2 和 Q3 处理高 12.9%、1.77%和 2.41%，平均可溶性固形物质量分数高 5.8%。由于再生水中总氮、总磷与钾量分别比自来水增加 7.7 倍、40 倍与 1.3 倍，在全生育期内，3 个处理总氮、总磷与钾量分别高出 137.7、3.49、92.7 kg/hm²，总氮、总磷与钾量可以提高黄瓜可溶性固形物量^[15-16]，从而再生水灌溉增加了可溶

性固形物量。所以 Z1 处理可溶性固形物质量分数最高，为 4.55%。

再生水比自来水不同灌溉定额对黄瓜总酸质量分数均有极显著性影响 ($p<0.01$)，其均值顺序为：Q3 处理>Z3 处理=Q2 处理>Z2 处理>Q1 处理>Z1 处理。再生水灌溉中，Z3 处理总酸质量分数分别比 Z2 处理与 Z1 处理高 1.49%与 13.33%；自来水灌溉，Q3 处理总酸质量分数分别比 Q2 处理与 Q1 处理高 14.71%与 18.18%；在灌溉定额相同条件下，Z1、Z2 和 Z3 处理分别比 Q1、Q2 和 Q3 处理低 10%、1.49%和 14.71%，平均总酸质量分数低 8.72%。由于再生水 pH 值高于自来水，在碱性条件下不利于总酸合成，使总酸量降低。所以 Q3 处理总酸质量分数最高，为 0.78 g/kg。

表 7 再生水不同灌溉定额对黄瓜品质影响的差异性

Table 7 Differential analysis results of different irrigation quotas on cucumber quality

水质	处理	维生素 C/ (mg 100g ⁻¹) Vitamin C	标准差 Standard deviation	可溶性糖/% Soluble sugar	标准差 Standard deviation	可溶性固形物/% Soluble solids	标准差 Standard deviation	总酸/ (g kg ⁻¹) Acid value	标准差 Standard deviation
再生水 Recycled water	Z1	7.31Cc	0.391	4.13Aa	0.234	4.55Aa	0.263	0.6Bb	0.036
	Z2	7.64Bb	0.392	3.93 Bb	0.234	4.03Bb	0.263	0.67Aa	0.036
	Z3	9.89Aa	0.392	3.61 Cc	0.234	3.83Cc	0.263	0.68Aa	0.036
自来水 Tap water	Q1	7.28Cc	0.392	3.7Aa	0.234	4.03Aa	0.263	0.66Bb	0.036
	Q2	7.54Bb	0.392	3.38 Bb	0.234	3.96 Bb	0.263	0.68Bb	0.036
	Q3	9.74Aa	0.392	3.28 Cc	0.234	3.74 Cc	0.263	0.78Aa	0.036

3 讨论

黄瓜叶片 SPAD 值在生育期内呈凸抛物线趋势，净光合速率、蒸腾速率与气孔导度日变化曲线为“M”型，与 Ci 日变化曲线相反。2 种水质灌溉下，黄瓜的 SPAD 值、光合指标与产量均随灌溉定额的增加而增大，这是因为基于本试验条件下，增大灌溉定额，促进作物新陈代谢，叶片光合系统发育较好，叶绿素量增加。同时，水与叶绿素增加可促使光合作用增强，利于黄瓜生长所需物质合成，产量增加^[17-18]。而群体水分利用效率随灌溉定额水平的增加而降低，这是因为随着灌溉定额水平的增加，使生产黄瓜单位产量消耗的水分增加，从而降低群体水分利用效率。在灌溉定额相同条件下，再生水灌溉下黄瓜 SPAD 值、光合作用指标、产量与群体水分利用效率平均值均比自来水灌溉的高。这可能是因为再生水中总氮、总磷量分别比自来水增加 7.7 倍与 40 倍有关。在全生育期内，再生水灌溉 3 个处理总氮与总磷量分别比自来水灌溉高 137.7 kg/hm²与 3.49 kg/hm²，提高了植株对氮、磷的利用效率^[5,9]，镁为影响叶绿素合成的关键元素，

再生水中含镁量比自来水增加 4.1 倍，在全生育期内，3 个处理含镁量均高出 413.34 kg/hm²，所以相对于自来水灌溉，再生水灌溉黄瓜 SPAD 值增加。进而光合作用增强，产量增加。这与吴文勇等^[6]、裴亮等^[7]研究结果一致。在实际需水量相同情况下，黄瓜产量增加，群体水分利用效率增大。

再生水与自来水的不同灌溉定额对黄瓜维生素 C、可溶性糖、可溶性固形物与总酸质量分数均有极显著性影响 ($p<0.01$)。黄瓜可溶性糖与可溶性固形物质量分数随着灌溉定额的增加而减小，而维生素 C 与总酸质量分数随着灌溉定额的增加而增加。这是因为增加灌溉定额促进了黄瓜新陈代谢，从而有利于维生素 C 与总酸的积累，但不利于可溶性糖与可溶性固形物的合成。再生水灌溉的维生素 C 量、可溶性糖与可溶性固形物量平均值比自来水高，这可能是因为再生水中总氮、总磷与钾量分别比自来水增加 7.7 倍、40 倍与 1.3 倍，在全生育期内，3 个处理总氮、总磷与钾量分别高出 137.7、3.49、92.7 kg/hm²，总氮、总磷与钾元素可以提高黄瓜维生素 C 量^[15-16]，而再生水 pH 值高于自来水，在碱性条件下不利于总酸合成，

使总酸量降低。

4 结 论

1) 在晴天 10:00 时, 黄瓜净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO_2 摩尔分数最大值分别为 $33.86 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 、 $15.75 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 、 $0.75 \text{ mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 、 $222.75 \mu\text{mol}/\text{mol}$, 黄瓜最大 SPAD 值与最高产量指标分别为 85.84 与 $71\,799 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。以上指标均随着灌溉定额的增加而增大, 再生水灌溉黄瓜光合作用与产量指标均大于自来水灌溉, Z3 处理黄瓜的光合作用与产量指标均最高。

2) 灌溉水分利用效率、群体水分利用效率与叶片水分利用效率均随着灌溉定额的增加而降低。Z1 处理黄瓜的灌溉水分利用效率与群体水分利用效率均最高, 分别为 $30.1 \text{ kg}/\text{m}^3$ 与 $16.85 \text{ kg}/\text{m}^3$, Z1 处理与 Q1 处理叶片水分利用效率值接近。

3) 黄瓜可溶性糖与可溶性固形物质量分数随着灌溉定额的增加而减小, 而维生素 C 与总酸质量分数随着灌溉定额的增加而增加。Z3 处理维生素 C 质量分数最大为 $9.89 \text{ mg}/100 \text{ g}$, Z1 处理可溶性糖与可溶性固形物质量分数最大分别为 4.13% 与 4.55%, Q3 处理总酸质量分数最大为 $0.78 \text{ g}/\text{kg}$ 。

Z3 处理再生水高水平为当地较适宜的黄瓜滴灌灌溉制度。

致 谢: 对本文研究中做出贡献的欧阳赞与赵策表示感谢!

参考文献:

- [1] 乔宝花. 水资源短缺地区实施再生水农田灌溉可行性解析[J]. 农业科技与信息, 2018(21): 93-94.
QIAO Baohua. Feasibility analysis of implementing reclaimed water farm irrigation in areas with water shortage[J]. Agricultural Science and Technology and Information, 2018(21): 93-94.
- [2] RUSAN M J M, HINNAWI S, ROUSAN L M. Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters[J]. Desalination, 2007, 215(1/3): 143-152.
- [3] ORON G, CAMPOS C, GILLERMAN L, et al. Wastewater treatment, renovation and reuse for agricultural irrigation in small communities[J]. Agricultural Water Management, 1999, 38(3): 223-234.
- [4] 代志远, 高宝珠. 再生水灌溉研究进展[J]. 水资源保护, 2014, 30(1): 8-13.
DAI Zhiyuan, GAO Baozhu. Research advances in reclaimed water irrigation[J]. Water Resources Protection, 2014, 30(1): 8-13.
- [5] 薛彦东, 杨培岭, 任树梅, 等. 再生水灌溉对黄瓜和西红柿养分元素分布特征及果实品质的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(2): 395-401.
XUE Yandong, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Effects of irrigation with treated wastewater on nutrient distribution in cucumber and tomato plants and their fruit quality[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,

2011, 22(2): 395-401.

- [6] 吴文勇, 许翠平, 刘洪禄, 等. 再生水灌溉对果菜类蔬菜产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 36-40.
WU Wenyong, XU Cuiping, LIU Honglu, et al. Effect of reclaimed water irrigation on yield and quality of fruity vegetables[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 36-40.
- [7] 裴亮, 张体彬, 梁晶, 等. 再生水滴灌对黄瓜生长及产量的影响研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(5): 105-108.
PEI Liang, ZHANG Tabin, LIANG Jing, et al. Growth and yield of cucumber as influenced by reclaimed water drip irrigation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(5): 105-108.
- [8] 张瑞弯. 膜下滴灌黄瓜水肥气热耦合模型研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2017.
ZHANG Ruiwan. Research of water, fertilizer, air and heat coupling model of cucumber under mulched drip irrigation[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2017.
- [9] 张利东, 高丽红, 张柳霞, 等. 交替隔沟灌溉与施氮量对日光温室黄瓜光合作用、生长及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(9): 2 348-2 354.
ZHANG Lidong, GAO Lihong, ZHANG Liuxia, et al. Effects of alternative furrow irrigation and nitrogen application rate on photosynthesis, growth, and yield of cucumber in solar greenhouse[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(9): 2 348-2 354.
- [10] 欧阳赞. 温室水肥气热耦合对西瓜生长、光合、产量和品质的影响研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2018.
OUYANG Zan. Research on the effect of water-fertilizer-air-heat coupling on growth, photosynthetic, yield and quality of watermelon in greenhouse[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2018.
- [11] 张文东, 李清明, 李时雨, 等. 分区滴灌施氮对日光温室黄瓜产量及水氮利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(S1): 1-4, 21.
ZHANG Wendong, LI Qingming, LI Shiyu, et al. Effects of partitive-area drip irrigation and nitrogen fertilization on yield and water-nitrogen use efficiency of cucumber in solar greenhouse[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(S1): 1-4, 21.
- [12] 杨志远, 宋健, 黄重文, 等. 痕量灌溉下不同水肥处理对温室黄瓜生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(1): 74-78.
YANG Zhiyuan, SONG Jian, HUANG Chongwen, et al. Effects of different trace irrigation systems of integral control of water and fertilization on growth of cucumber in greenhouse[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(1): 74-78.
- [13] 窦超银, 孟维忠, 陈伟, 等. 辽宁地区秋冬茬大棚黄瓜滴灌水肥一体化试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(8): 22-26.
DOU Chaoyin, MENG Weizhong, CHEN Wei, et al. Fertigation of autumn-winter greenhouse cucumber in east Liaoning Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(8): 22-26.
- [14] 李若楠, 武雪萍, 黄绍文, 等. 不同施磷水平下温室冬春茬黄瓜日产量变化及其与光温环境的关系[J]. 园艺学报, 2018, 45(2): 289-298.
LI Ruonan, WU Xueping, HUANG Shaowen, et al. Variation of greenhouse cucumber daily yield and its responses to sunlight duration

- and air temperature with different phosphorus rates[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2018, 45(2): 289-298.
- [15] 杨阳, 宋炳彦, 刘云, 等. 不同追氮量对设施黄瓜产量及品质的影响[J]. *华北农学报*, 2017, 32(S1): 256-259.
- YANG Yang, SONG Bingyan, LIU Yun, et al. Effects of different nitrogen application on yield and quality of cucumber[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, 32(S1): 256-259.
- [16] 潘云平, 张英. 不同磷、钾肥对保护地黄瓜品质及产量的影响[J]. *内蒙古农业科技*, 2014, 42(6): 27-28.
- PAN Yunping, ZHANG Ying. Effects of different phosphorus and potassium fertilizers on quality and yield of cucumber in protected field[J]. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2014, 42(6): 27-28.
- [17] 郑生宏, 柴红玲, 李阳, 等. 叶面肥叶绿素对茶树生长和产量的影响[J]. *浙江农业科学*, 2012, 53(10): 1 382-1 383.
- ZHENG hongsheng, CHAI hongling, LI yang, et al. Effect of foliar fertilizer chlorophyll on growth and yield of tea plant[J]. *Zhejiang Agricultural Sciences*, 2012, 53(10): 1 382-1 383.
- [18] 张西平, 赵胜利, 张旭东, 等. 不同灌水处理对温室黄瓜形态及光合作用指标的影响[J]. *中国农学通报*, 2007, 23(6): 622-625.
- ZHANG Xiping, ZHAO Shengli, ZHANG Xudong, et al. Effect on morphology and photosynthesis index of cucumber under plastic mulch in solar greenhouse with different irrigation amount[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(6): 622-625.

The Effects of Drip Irrigation with Reclaimed Wastewater on Chlorophyll, Photosynthesis, Yield and Quality of Cucumber

WANG Lulu^{1, 2, 3*}, XU Guihong¹, SHENG Hui^{1, 2, 3}, YAN Xinfang^{1, 2, 3}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Engineering Technology Research Center of Water-Saving and Water Resource Regulation in Ningxia, Yinchuan, China; 3. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Regions, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China)

Abstract: 【Objective】Irrigating with treated domestic and urban wastewaters has been in increase over the past decade and the purpose of this paper is to investigate the effects of irrigation amount and scheduling on photosynthetic traits, yield and quality of cucumber. 【Method】We compared three irrigation amounts: 1 890 m³/hm², 2 835 m³/hm² and 3 780 m³/hm², with each having a control that was irrigation with the same amount of clean water. In each treatment, we measured photosynthetic traits, chlorophyll content and yield. 【Result】In all treatments and controls, the four photosynthetic traits - net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and intercellular carbon dioxide concentration - as well as the chlorophyll content and yield all increased with the irrigation amount, while the “grouped” water use efficiency decreased inversely with the irrigation amount. When the irrigation amount was the same, irrigating with reclaimed wastewater increased average of the four photosynthetic indexes and chlorophyll content by 7.32%, 2.99%, 4.19%, 3.07% and 5.54%, and the average of “grouped” yield and water use efficiency by 8.9%. 8.86% respectively, compared with the controls. As irrigation amount increased, the soluble sugar and solids content of the fruits decreased while the vitamin C and total acid mass fraction increased. When the irrigation amount was the same, irrigating with reclaimed wastewater increased the average vitamin C content, soluble sugar content and soluble solids content by 1.14%, 12.64% and 5.8% respectively, while reduced the average total acid content of the fruit by 8.72%, compared to the controls. 【Conclusion】In terms of photosynthetic indexes and yield, the optimal irrigation scheduling for the reclaimed wastewater was: Irrigating 3 780 m³/hm² of water in 21 times with each irrigation being 180 m³/hm².

Key words: reclaimed wastewater; drip irrigation; cucumber; photosynthesis; fruit quality; water use efficiency

责任编辑:白芳芳