植物营养与肥料学报 2015,21(2): 449 -457 doi: 10.11674/zwyf.2015.0220
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

水肥减量对日光温室土壤水分状况及番茄产量和品质的影响

罗 勤[1], 陈竹君[1,2*], 闫 波[1], 雷金繁[3], 张晓敏[1], 白新禄[1], 周建斌[1,2]
(1 西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌 712100; 2 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室,陕西杨凌 712100; 3 杨凌区农业技术推广中心, 陕西杨凌 712100)

摘要:【目的】水肥一体化技术为改变我国长期以来设施栽培蔬菜"大水大肥"的传统管理方式,实现资源节约、环境友好发展提供了硬件物质基础和载体,但我国不同地区农业生产条件差异较大,适合当地土壤、气候、作物和栽培季节等特点的水肥一体化灌溉制度和施肥量相对缺乏。本文在陕西关中地区研究了水肥一体化条件下不同水肥处理对土壤水分状况及秋冬茬番茄养分吸收和产量等的影响,旨在制定适宜当地日光温室栽培番茄的科学合理的灌溉施肥制度。**【方法】**田间试验设常规水肥处理(CK)、植苗后水肥一体化灌水追肥期水肥分别减量 20%(S1)及 40% (S2)3 个处理,其中常规处理灌水量为当季作物冠层水面蒸发量 (100% ET),追肥量为当地农户的平均用量;水肥一体化为膜下滴灌 + 文丘里施肥系统。采用自动连续数采张力计(英国 Skye DataHog2)测定蔬菜生长期间各处理 0—20 cm 和 20—50 cm 土层土壤水势,并建立对应的土壤水分特征曲线,将土壤水势动态变化转换为土壤含水率动态变化;用直径 20 cm 蒸发皿测定当季番茄冠层的水面蒸发量,分析冠层水面蒸发量与土壤有效贮水量损失的关系;测定了不同水肥处理对番茄根、茎、叶、果实生物量及氮、磷、钾吸收量与产量和品质的影响。**【结果】**1)不同处理番茄生育期内 0—50 cm 土壤相对含水率均在 75% 以上,土壤水分供应充足。常规水肥处理灌水后 0—20 cm 土壤含水率达到或超过田间持水量,20—50 cm 土层均超过田间持水量,表明土壤水分可下渗到 50 cm 以下,进而发生土壤养分的淋溶问题。追施期水肥减量 40% 处理的土壤水分大部分处在 75% ～ 85% 的适宜值范围。2)随灌水量的减少,0—50 cm 土壤有效贮水量损失降低,平均为番茄冠层水面蒸发量的 65.4%,与追肥期水肥减量 40% 处理的灌水量相近。3)不同水肥处理番茄干物质累积、养分携出量、番茄产量、品质均无显著性差异,而灌水利用率从常规水肥处理的 55.1 kg/m^3 提高到 83.2 kg/m^3,差异达极显著水平。**【结论】**从 0—50 cm 土壤水分状况、土壤有效贮水量损失及番茄冠层水面蒸发关系看,温室全覆膜滴灌条件下,当地适宜灌溉定额为作物冠层水面蒸发量的 65% 左右。根据番茄生育期内不同水肥处理对土壤水分状况、番茄养分吸收、产量及品质和灌水利用效率的影响,制定出适宜当地秋冬茬番茄的合理灌溉制度为: 全生育期总灌溉定额为 1057 m^3/hm^2,8 ～ 12 月对应的灌水定额分别为 168、169、132、105 及 50 m^3/hm^2,8 ～ 11 月灌水周期分别为 20 ～ 30 d、8 ～ 13 d、8 ～ 13 d 和 20 ～ 30 d,12 月份依天气少量补水或不灌水,1 月份无需灌水。

关键词: 日光温室; 番茄; 水肥减量; 产量品质; 土壤水分状况
中图分类号: S152.7; S614.2.606 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)02-0449-09

Effects of reducing water and fertilizer rates on soil moisture and yield and quality of tomato in solar greenhouse

LUO Qin[1], CHEN Zhu-jun[1,2*], YAN Bo[1], LEI Jin-fan[3], ZHANG Xiao-min[1], BAI Xin-lu[1], ZHOU Jian-bin[1,2]
(*1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3 Yangling Agricultural Technology Extension Station, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

收稿日期: 2014-01-02 **接受日期:** 2014-08-26
基金项目: 陕西省农业攻关项目(2014K01-14-03);国家"十二五"科技支撑计划项目课题(2012BAD15B04);高等学校学科创新引智计划(B12007);中英农业生产中养分资源可持续利用合作项目资助。
作者简介: 罗勤(1989—),女,新疆塔城人,硕士研究生,主要从事设施栽培水肥调控技术研究。E-mail: luoqin153@163.com
* 通信作者 Tel: 029-87082793, E-mail: zjchen@nwsuaf.edu.cn

Abstract:【**Objectives**】Fertigation technology has a great potential to replace the traditional irrigation and fertilization methods in the protected cultivation in China. Soils, climate, and crops require different frequency of irrigation and fertilization. Therefore, effects of different water and nutrient treatments on soil moisture, nutrient uptake, yield and quality of autumn-winter tomato in Guanzhong Plain, Shaanxi was studied. Our aim was to setup the optimum rates of irrigation and fertilization in solar greenhouses.【**Methods**】The field trial included three treatments, the conventional treatment (CK) in which irrigation rate equaled to 100% evapotranspiration and average rates of fertilizers used by local farmers were applied (conventional fertilizer treatment), and reducing 20% and 40% of water and fertilizer rates in comparison with CK (S1 and S2). The fertilizers were added into the irrigation system with Venturi tube during the crop growth. Soil moisture in 0-20 cm and 20-50 cm layers was continuously monitored by an automatic tension meter system (Skye DataHog2, UK). Soil water content was calculated with soil water characteristic curve. water surface evaporation was determined with the evaporating dish method (diameter 20 cm), and its relationship with loss of soil available water was analyzed. The nutrient absorption, yield, quality, irrigation utilization of autumn-winter tomato in different treatments were also determined.【**Results**】1) The soil relative water contents are higher 75% in 0-50 cm soil layer in all the treatments throughout the whole growing period of tomato, indicating soil water supply is adequate for tomato growth. The soil water contents in 0-20 cm and 20-50 cm soil layers in the conventional treatment reach or exceed the field capacity after irrigation, which indicates that water infiltrated below 50 cm soil layer and would result in nutrient leaching. Compared with CK, the soil relative water contents in the treatment of reducing 40% of water and fertilizer rates are mainly in optimum range from 75% to 85%. 3) When reducing the irrigation rate, the water loss from 0-50 cm soil layer is decreased, and the loss of effective storage water equals 65.4% of the canopy water evaporation, and also equals to the irrigation amount in the S2 treatment. 3) There are not significant differences in nutrient absorption, yield and quality of tomato among the different treatments. However, the use efficiency of irrigation water is increased from 55.1 kg/m^3 in the conventional treatment to 83.2 kg/m^3 in the water and nutrient saving treatments.【**Conclusions**】The optimum irrigation rate for the solar greenhouse in the study region is 65% of water surface evaporation. The appropriate irrigation quota for the autumn-winter tomato in solar greenhouse is 1057 m^3/ha, the irrigation amounts in August, September, October, November and December are 168, 169, 132, 105, and 50 m^3/ha, respectively, and the time intervals of irrigation in August, September, October, and November are 20-30 days, 8-13 days, 8-13 days, and 20-30 days, respectively and the irrigation in December is dependent on climate, either less rate or no irrigation. No irrigation is needed in January.

Key words: solar greenhouse; tomato; water and fertilizer saving; yield and quality; soil moisture

随着我国社会经济发展和生活水平的提高,人们对蔬菜消费量和品质的要求也越来越高,日光温室已发展成为北方蔬菜栽培的主要形式[1]。“大水大肥”是我国蔬菜种植的传统管理方式,灌溉水和肥料的投入量达到作物实际需求量的2～3倍甚至更高,盲目过量水肥投入已经成为普遍现象,导致病害加剧、肥料深层淋失、产量品质下降及环境污染等问题[2-4]。水肥一体化技术(fertigation)可有效控制灌水及施肥的数量和频率,及时满足作物对水分及养分的需要,减少无效损耗,显著提高水分及养分利用效率,具有节水、节肥、高产和高效等优点[5],这一技术在国外设施栽培发达地区已广泛应用。

近年来,随着我国农业集约化水平的不断提高,水肥一体化技术在我国日光温室栽培中的应用也迅速发展。一些研究者对不同地区日光温室栽培蔬菜的需水量、灌溉量、适宜的土壤水分上下限等进行了研究。虞娜等[6]提出,番茄适宜的灌溉上限和下限土壤水吸力分别为10 kPa和30 kPa;张辉等[7]认为,番茄生育前期和后期灌溉控制下限土壤吸力值分别为20 kPa和60 kPa。曾向辉等[8]提出,番茄生长适宜的土壤相对含水率范围为苗期55%～70%,开花坐果期65%～85%,结果期70%～90%;王贺辉等[9]研究结果表明,土壤相对含水率苗期45%～55%,开花坐果期55%～75%,坐果期65%～85%为番茄适宜的土壤含水率范围。刘学军等[10]在宁夏日光温室滴灌灌溉制度试验研究得出,春茬番茄全

生育期适宜的灌水次数为 29 次,平均灌水周期 4 ～5 d,平均次灌水量 210 m^3/hm^2,适宜的灌溉定额 6150 m^3/hm^2;陈碧华等[11]在河南日光温室的研究结果表明,春茬番茄合适的灌溉定额在 2 723 m^3/hm^2 ～2 837 m^3/hm^2 之间。由于我国不同地区农业生产条件,土壤、气候、作物和栽培季节等不同,灌溉定额、灌溉频次等技术指标存在很大差异。因此,有必要研究适合不同地区日光温室栽培环境的水分管理技术。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验地位于陕西省杨凌农业高新技术产业示范区 2009 年建设的大寨镇设施栽培基地,当地海拔 520 m 左右,年平均气温 13℃,年均降水量 620 mm 左右,主要集中在 7 ～9 月,年均蒸发量 1400 mm,属半湿润易旱区,土壤类型为塿土。试验日光温室长 85 m,宽 7 m。种植作物为秋冬茬(秋延茬)番茄,品种为“金棚 10 号”。番茄定植时间为 2012 年 8 月 5 日,完全收获期为 2013 年 1 月 30 日。种植期间地面全覆盖聚乙烯薄膜,灌溉和追肥采用滴灌 + 文丘里施肥器的水肥一体化系统,每小区均安装控制开关以调节灌水及施肥量,每次灌水定额用水表控制。本季种植前温室土壤基本理化性质见表 1。

表 1　供试土壤基本理化性质

Table 1　Basic physical and chemical properties of soil used

土层 Soil layer (cm)	有机质 Org. matter (g/kg)	矿质态氮 Mineral N (mg/kg)	有效磷 Olsen-P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)	田间持水量 Field capacity (%)	土壤容重 Bulk density (g/cm^3)	质地 Texture
0 — 20	10.73	90.65	102.97	254.63	23.60	1.22	粉砂质壤土
20 — 50	7.73	51.34	36.71	120.56	21.50	1.56	Silty loam

1.2　试验设计

温室基肥施用和植苗时灌水量各处理一致,为当地农户日光温室秋冬茬栽培番茄的平均用量(当地秋延茬施基肥,春夏茬在秋延茬收获后直接植苗或接近收获时套栽,一般不施基肥或施用量较少)。其中基肥有机肥施用干鸡粪 1.68×10^4 kg/hm^2(N、P_2O_5、K_2O 含量分别为 23、21、19 g/kg),折合 N、P_2O_5、K_2O 用量分别为 393、358、325 kg/hm^2;化肥施用史丹利复合肥、过磷酸钙和硫酸钾,折合 N、P_2O_5、K_2O 的用量见表 2。由于当地定植苗时农户灌水量普遍较大,植苗至第一穗果膨大期(8 月 5 日至 9 月 18 日)作物需水量较小,视天气农户一般不灌水或少量补水。此后每穗果膨大期(间隔 10 d 左右)灌水追肥一次,因此水肥减量处理从第一穗果膨大期后开始。

表 2　不同处理施肥量($N-P_2O_5-K_2O$)和灌水量

Table 2　Fertilization ($N-P_2O_5-K_2O$) and irrigation amount in different treatments

处理 Treatment	基肥 Base fertilizer (kg/hm^2)	追肥 Top dressing (kg/hm^2)	定植时灌水量 Irrigation at transplanting (m^3/hm^2)	生长期灌水量 Irrigation during growth (m^3/hm^2)
CK	54-294-204	471-81-396	219	1311
S1	54-294-204	377-65-317	219	1049
S2	54-294-204	283-49-238	219	787

试验设 3 个处理(表 2): 常规水肥处理(CK),植苗后水肥一体化灌水追肥期水肥分别减量 20%(S1)及 40% 处理(S2),即与常规处理比水分总量分别减少 17% 和 34%,化肥总施氮量减少 18% 和 36%,总 P_2O_5 减少 5% 和 9%、总 K_2O 分别减少 13% 和 26%。其中常规处理灌水量为事先测得的当季作物冠层水面蒸发量 (100% ET),追肥量为农户的平均用量(表 2)。每处理重复 3 次,完全随机

区组排列,小区面积33.6 m^2,每小区栽植8行,160株番茄。水肥一体化追肥施用尿素和圣诞树复合肥($N-P_2O_5-K_2O$为19-8-27)。

1.3 测定项目及方法

土壤水分监测 番茄定植后,各处理小区0—20 cm和20—50 cm土层均埋设一组英国Skye公司mini DataHog2自动连续数采张力计,监测土壤水势变化。然后根据事先测得日光温室0—20 cm和20—50 cm土层水分含量与此张力计监测的土壤水势建立土壤水分特征曲线,将监测的土壤水势转换为土壤含水率,进而计算一定厚度土层和面积的土壤贮水量等。

作物冠层水面蒸发量测定 用直径20 cm的蒸发皿测定日光温室内番茄冠层的水面蒸发量[1]。

产量及番茄养分吸收和品质测定 番茄开始成熟后分小区连续计产;此外,在番茄盛果期时每小区采集具有代表性植株5株,分别测定根、茎、叶、果实生物量及氮、磷、钾含量,番茄果实可溶性糖、有机酸、维生素C等品质指标。氮、磷、钾采用$H_2SO_4-H_2O_2$消煮,半微量凯氏法测定全氮,钒钼黄法测定全磷,火焰光度法测定全钾;可溶性糖含量采用蒽酮法测定;有机酸采用酸碱滴定法测定;维生素C采用2,6-二氯靛酚滴定法测定。

1.4 数据处理

试验数据采用Microsoft Excel软件处理,SAS 8.1进行方差分析。

2 结果与讨论

2.1 水肥减量对土壤水分动态和水分损失的影响

2.1.1 不同处理土壤水分动态 从土壤水分动态变化(图1)可看出,从第一穗果膨大期至最后收获,共灌溉5次,灌水间隔10～15 d,这与当地每茬果实膨大期灌溉施肥的管理习惯相符。0—20 cm和20—50 cm土层土壤含水率均表现为CK > S1 > S2,亦与灌水量处理一致。CK处理灌水后0—20 cm土层土壤含水率达到或超过田间持水量,20—50 cm土层均超过田间持水量,说明CK处理灌水量偏高,且CK处理灌水前后的土壤含水率变幅较S1和S2大,表明灌溉水可能下渗到50 cm以下,进而发生土壤养分的淋溶问题。S1和S2处理除了9月灌水定额高,20—50 cm土层水分达到或超过田间持水量外,其余4次灌水仅使0—20 cm土层活跃层水分恢复,20—50 cm土层水分变化较小。3个处理0—50 cm土壤相对含水率均在75%以上,说明水肥减量后土壤水分含量依然是非常充足的。

大多数研究认为,温室栽培番茄适宜的土壤相对含水率不超过85%[12-14]。2013年农业部办公厅印发《水肥一体化技术指导意见》[15]中,水分管理指标为农作物灌溉上限控制在田间持水量的85%～95%,下限控制在55%～65%。由于蔬菜是对水分敏感的作物,水分适宜范围比粮食作物窄,因此,生产中的灌溉频率相对较高。本试验0—50 cm土壤水分连续监测未观测到土壤相对含水率小于75%的情况,为此,我们将土壤相对含水率划分为75%～85%、85%～100%及>100%,然后对番茄不同生育期不同处理土壤所处含水率范围的天数占相应生育阶段天数的百分数进行了统计,得到开花～果实膨大期和采摘收获期的土壤水分分布状况图(图2)。

由图2可以看出,在开花～果实膨大期,CK处理0—20 cm土层的土壤相对含水率>85%的天数占该生育阶段天数的比例为78%,20—50 cm土层

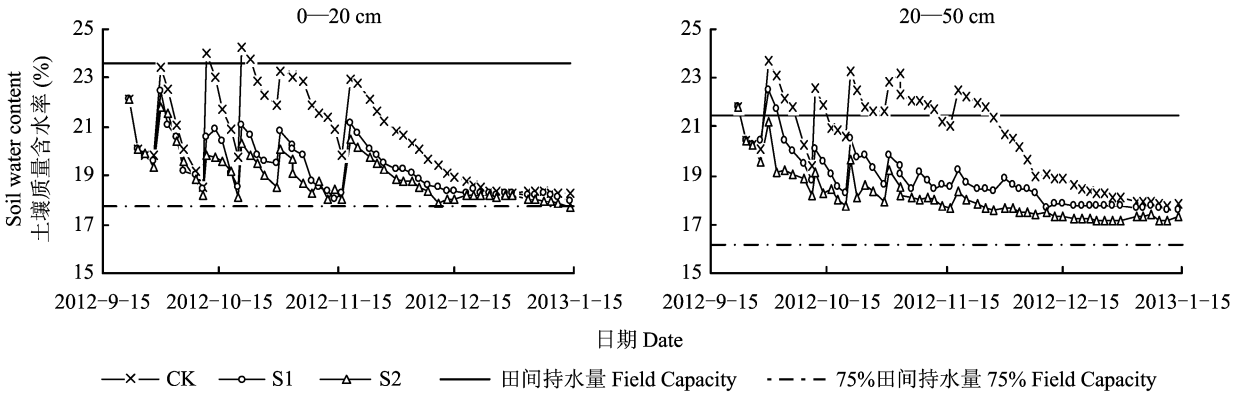

图1 不同水肥处理0—20 cm和20—50 cm土壤含水率变化

Fig.1 Changes of soil water contents in 0-20 cm and 20-50 cm soil layers in different treatments

则占 100%,且 20—50 cm 土层有近 80% 的时间土壤相对含水率超过田间持水量;采摘收获期 CK 处理 0—20 cm 和 20—50 cm 土层土壤相对含水率 > 85% 的天数比例亦分别为 43% 和 68%;说明 CK 处理土壤水分均偏高。S1 处理 0—20 cm 和 20—50 cm 土壤的相对含水率 > 85% 的比例在开花～果实膨大期为 50% 和 70%,采摘收获期为 32% 和 5%。而 S2 处理的 2 个土层土壤相对含水率在 75%～85%,适宜范围占生育期内的比例相对较高,开花～果实膨大期分别为 63% 和 60%,采摘收获期为 81% 和 100%,说明 S2 处理的灌水定额较为适宜。

2.1.2 不同处理土壤有效贮水量损失与作物冠层水面蒸发量　作物的耗水量与水面蒸发力有密切关系,许多研究者以作物冠层的水面蒸发量(ET)指导灌溉[16-18],作物耗水量一般小于冠层的水面蒸发量(ET)。而从土壤水量平衡看,主要根系范围内土壤水分蒸散损失量更接近灌水需要量,土壤水分蒸散量理论上等于土壤有效贮水量损失。2013 年农业部发布的《水肥一体化技术指导意见》中提出[15],根据农作物根系状况确定湿润深度,蔬菜宜为 20～30 cm;崔宁和王峰等[18-19]的研究认为,温室灌溉适宜的土壤湿润层分别为 30 cm 和 50 cm;范凤翠[20]研究表明,日光温室番茄表现出典型的浅根系分布特征,0—40 cm 土层番茄主要根系比例达到了 94.63%～98.29%。本试验中也观察发现番茄根系主要分布在 5～30 cm 土层。同时,监测到的土壤水分状况说明,不同处理 0—50 cm 土壤相对含水率均超过 75%,水分充足,上层水分减少时,作物最多利用到 20—50 cm 土层的水分,利用 50 cm 土层以下的水分较少。为此,根据土壤水分平衡原理,计算了每月 0—50 cm 土壤有效贮水量损失(图 3)。

图 3 显示,随灌水量减少 0—20 和 20—50 cm 土层有效贮水量损失均呈降低趋势,而 20—50 cm 土层有效贮水量损失降低趋势还说明灌水量高的处理可能存在有效贮水向 50 cm 以下再分布损失,与前述分析是一致的。CK、S1 和 S2 处理 0—50 cm 土壤有效贮水量损失分别为冠层水面蒸发量的 77.36%、67.20% 和 53.46%,平均为 65.41%。各

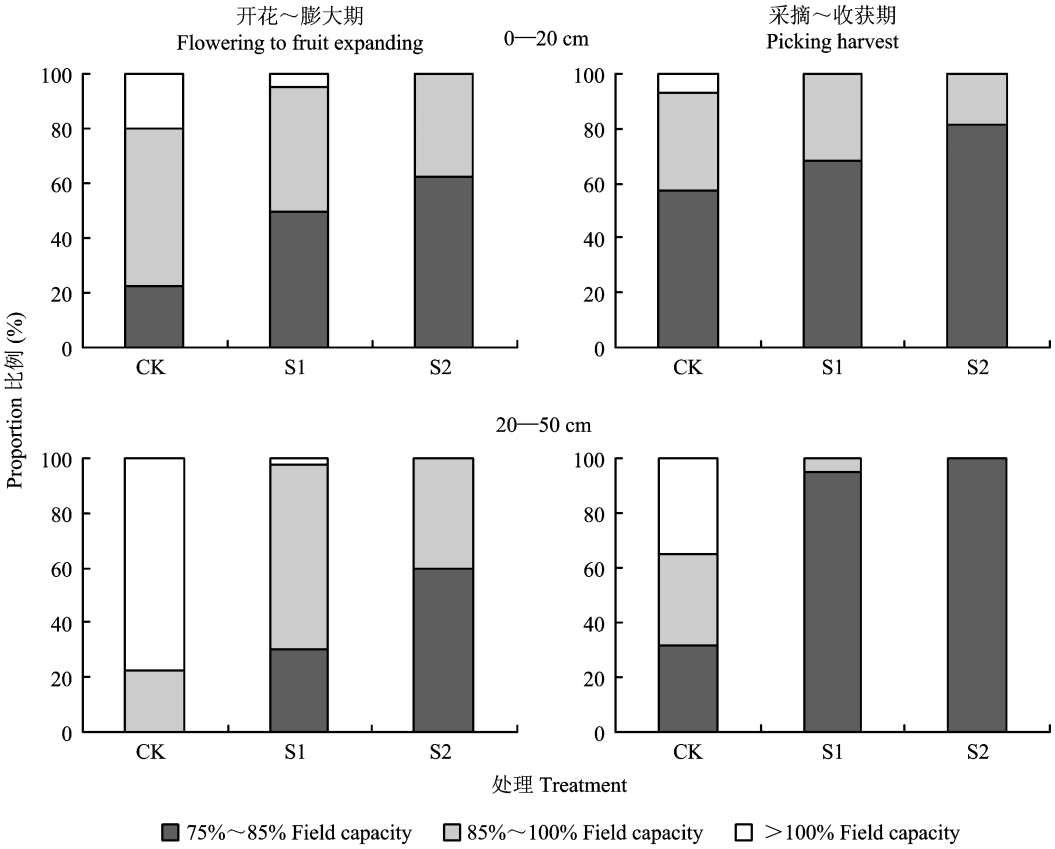

图 2　不同处理 0—20 cm 和 20—50 cm 土层土壤在不同水分范围的天数占该生育阶段总天数的比例

Fig. 2　The proportion of days of different soil moisture ranges in the total growth days of the growth stages of tomato in 0–20 cm and 20–50 cm soil layers under different treatments

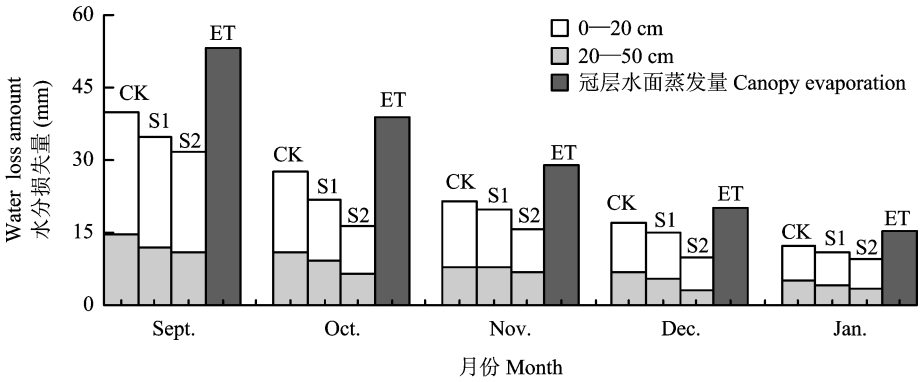

图3 不同处理0—50 cm土壤有效贮水量损失与冠层水面蒸发量

Fig. 3 The loss of available water storage in 0–50 cm soil depth and canopy evaporation of tomato in different treatments

处理灌溉量均高于土壤有效贮水量损失,而以S2处理的灌溉量(为冠层水面蒸发量的65.56%)与土壤有效贮水量损失平均最为接近,从水量平衡看S2处理的灌溉量较为合理。

2.2 不同处理对番茄养分吸收的影响

由表3可以看出,番茄吸收的氮、磷和钾养分主要分布在果实和叶片中,其中果实吸收的氮、磷和钾分别占植株总携出量的52.14%、58.13%和64.10%,叶片分别占37.02%、25.18%和30.07%,果实和叶片占氮、磷、钾总携出量的89.14%、83.28%和94.11%。不同处理番茄根、茎、叶、果实干物质和养分携出量有所差异,但差异均不显著。主要是由于不同处理虽然灌水和施肥量不同,但土壤水分的供应均为充足,同时,施用化肥提供的养分量已超过番茄的养分携出量,种植前温室土壤养分含量亦较高(表1),此外还有有机肥提供的养分量;因此,虽然追肥期水肥比常规处理分别减少20%和40%,但对养分的吸收并无显著影响。

2.3 不同处理对番茄产量、品质和灌水利用率的影响

不同处理番茄产量、单果重、维生素C、可溶性糖和有机酸等虽有所差异,但均未达显著水平(表4),而灌水利用率极显著提高,从CK处理的55.07 kg/m^{3}提高到S2处理的83.17 kg/m^3,提高了51.03%。王峰等[19]在甘肃研究番茄全生育期灌水量由2521 m^3/hm^{2}减少到2241 m^3/hm^{2}后,灌水利用率由68.38 kg/m^{3}提高至77.87 kg/m^3,产量无显著差异;Eugenio Nardella等[21]在意大利,以当地最大蒸发量70%为灌溉量的灌水利用率为15.35 kg/m^3,较日最大蒸发量灌水利用率11.97 kg/m^{3}提高22%,产量亦无显著差异;本研究结果与其他国内外一些研究者结论一致。此外,与CK处理相比,S2处理可节水523 m^3/hm^2,节约N、P_2O_5、K_2O肥料分别为188 kg/hm^2、32 kg/hm^{2}和158 kg/hm^2;水肥减量在节约资源的同时,还减少了养分在土壤中的累积及其他不良环境效应。

2.4 合理的灌溉制度

灌溉制度是指导作物水分管理的重要依据。灌溉制度包括作物全生育期的灌水量(灌溉定额)、灌水周期和每次灌水量(灌水定额)等。灌溉制度根据作物需水规律、当地气候、土壤墒情、土壤性状、设施条件和技术措施等制定。因不同地区气候、土壤持水特性以及温室栽培管理的不同,灌溉制度差异较大。孙磊[13]对春茬番茄各生育阶段需水量各处理进行最优分析提出,苗期需水量为838 m^3/hm^2,开花结果期为2020 m^3/hm^2,结果期为2639 m^3/hm^{2}为最优,灌溉定额约为5500 m^3/hm^2。许金香[22]计算了秋冬茬番茄的需水量为2099 m^3/hm^2。韩建会[23]认为春茬番茄的滴灌灌溉定额为3000 m^3/hm^2～3300 m^3/hm^2。

根据本试验番茄全生育期不同水肥处理对土壤水分状况、番茄养分吸收量、产量、品质的影响,以及灌溉后土壤有效贮水量损失动态等的结果分析,结合当地温室环境内不同月份的番茄冠层水分蒸发以及当地农户管理习惯,适当降低定植和苗期灌水量,制定出适宜当地秋冬茬番茄不同生育期和对应月份合理灌溉制度(表5),为指导当地秋冬茬温室番茄水分管理提供依据。

表 3　不同处理番茄生物量与养分携出量

Table 3　Tomato biomass and nutrient uptakes of different treatments

植株部位 Plant organ	处理 Treatment	干物质 Dry matter (kg/hm²)	养分含量(g/kg) Nutrient concentration			养分携出量(kg/hm²) Nutrient uptake		
			N	P	K	N	P	K
根 Root	CK	211.86 a	17.94	2.78	17.28	3.80 a	0.59 a	3.66 a
	S1	212.91 a	17.49	2.80	16.55	3.72 a	0.60 a	3.52 a
	S2	211.82 a	16.00	2.68	15.25	3.39 b	0.57 a	3.23 a
茎 Stem	CK	1247.75 a	15.99	2.40	19.45	19.95 a	3.00 a	24.27 a
	S1	1216.62 a	15.07	2.27	19.51	18.33 a	2.76 a	23.74 a
	S2	1193.87 a	15.31	2.35	19.87	18.28 a	2.80a	23.72 a
叶 Leaf	CK	2485.66 a	28.84	3.58	26.65	71.68 a	8.89 a	66.25 a
	S1	2471.24 a	28.80	3.58	25.96	71.16 a	8.84 a	64.15 a
	S2	2465.44 a	27.26	3.36	25.08	67.21 a	8.29 a	61.83 a
果实 Fruit	CK	4104.59 a	25.32	4.12	41.33	103.94 a	16.92 a	169.64 a
	S1	3963.12 a	24.95	4.27	40.32	98.87 a	16.91 a	159.78 a
	S2	4098.51 a	24.28	4.02	38.81	99.53 a	16.47 a	159.08 a
总量 Total	CK	8049.86				199.36	29.40	263.82
	S1	7863.89				192.09	29.10	251.19
	S2	7969.64				188.41	28.13	247.86

注(Note)：同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

表 4　不同处理番茄果实产量、品质及灌水利用率

Table 4　Tomato yield, fruit quality and irrigation water utilization of different treatments

处理 Treatment	产量 Yield (kg/hm²)	总灌水量 Total irrigation (m³/hm²)	灌水利用率 Irrigation utilization (kg/m³)	单果重 Single fruit weight (g)	维生素 C Vitamin C (mg/kg)	可溶性糖 Soluble sugar (%)	有机酸 Organic acid (%)	糖酸比 Sugar-acid ratio
CK	84250.01 a	1530.00	55.07 C	198.67 a	170.92 a	4.70 a	0.46 a	10.27 a
S1	82111.55 a	1267.60	64.78 B	203.87 a	180.96 a	4.86 a	0.48 a	10.14 a
S2	83715.39 a	1006.60	83.17 A	196.91 a	215.29 a	4.97 a	0.50 a	10.01 a

注(Note)：同列数据后不同小、大写字母分别表示处理间差异达 5% 和 1% 显著水平 Values followed by different small and capital letters in same column mean significant at the 5% and 1% levels, respectively.

表 5　日光温室栽培秋冬茬番茄灌溉制度

Table 5　Irrigation schedule of autumn-winter tomato in solar greenhouse

生育期 Growth period	月份 Month	灌水定额 (m³/hm²) Irrigation quota	灌水周期(d) Irrigation frequency	灌溉定额(m³/hm²) Irrigation quota
苗期 Seedling	8	168	20～30	1057
开花～果实膨大期	9	169	8～13	
Flowering to fruit expanding	10	132	8～13	
采摘收获期	11	105	20～30	
Harvest	12	50		
	1			

3 结论

1)不同处理番茄生育期内0—50 cm土壤相对含水率均在75%以上,土壤水分供应充足。常规水肥处理灌水后0—20 cm土层土壤含水率达到或超过田间持水量,20—50 cm土层均超过田间持水量,灌水量偏高,水分可能下渗到50 cm以下,进而发生土壤养分的淋溶问题;S2处理土壤水分大部分均处在75%～85%适宜值范围。随灌水量的减少,0—50 cm土壤有效贮水量损失降低,平均为番茄冠层水面蒸发量的65.41%,与S2处理灌水量接近,S2处理是适宜的灌水定额。

2)不同水肥处理番茄干物质累积、养分携出量、番茄产量、品质均无显著性差异,灌水利用率极显著提高,从常规水肥处理的55.1 kg/m^{3}提高到83.2 kg/m^3,节水523 m^3/hm^2,节约肥料分别为N 188 kg/hm^2、P_2O_5 32 kg/hm^{2}和K_2O 158 kg/hm^2。

3)制定出适宜当地秋冬茬番茄的合理灌溉制度。全生育期总灌溉定额为1057 m^3/hm^2,8～12月对应的灌水定额分别为168 m^3/hm^2、169 m^3/hm^2、132 m^3/hm^2、105 m^3/hm^{2}及50 m^3/hm^2,8～11月灌水周期分别为20～30 d、8～13 d、8～13 d和20～30 d,12月份依天气少量补水或不灌水,1月份无需灌水。

参 考 文 献:

[1] Wang Z Y, Liu Z X, Zhang Z K, Liu X B. Subsurface drip irrigation scheduling for cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown in solar greenhouse based on 20 cm standard pan evaporation in Northeast China[J]. Scientia Horticulturae, 2009, 123(1): 51-57.

[2] 李若楠, 张彦才, 黄绍文, 等. 节水控肥下有机无机肥配施对日光温室黄瓜-番茄轮作体系土壤氮素供应及迁移的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 677-688.
Li R N, Zhang Y C, Huang S W *et al*. Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on soil nitrogen availability and movement under water and fertilizer saving management in cucumber-tomato double cropping system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(3): 677-688.

[3] 袁亭亭, 杨建平, 徐坤. 秋延迟番茄氮、磷、钾优化施肥方案研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1246-1251.
Yuan T T, Yang J P, Xu K. Study on optimization of NPK fertilization scheme of tomato in late autumn[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(5): 1246-1251.

[4] 黄绍文, 王玉军, 金继运, 唐继伟. 我国主要菜区土壤盐分、酸碱性和肥力状况[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 906-918.
Huang S W, Wang Y J, Jin J Y, Tang J W. Status of salinity, pH and nutrients in soils in main vegetable production regions in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 906-918.

[5] 黄绍文. 设施番茄水肥一体化技术[J]. 中国蔬菜, 2013, (13): 40-41.
Huang S W. Fertigation on tomato in the solar greenhouse[J]. China Vegetable, 2013, (13): 40-41.

[6] 虞娜, 张玉龙, 张玉玲, 等. 灌溉和施肥对温室番茄产量和品质影响效应的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2009, (4): 31-35.
Yu N, Zhang Y L, Zhang Y L *et al*. Study on effect of irrigation and fertilization on yield and fruit quality of greenhouse tomato[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2009, (4): 31-35.

[7] 张辉, 张玉龙, 虞娜, 等. 温室膜下滴灌灌水控制下限与番茄产量、水分利用效率的关系[J]. 中国农业科学, 2006, 39(2): 425-432.
Zhang H, Zhang Y L, Yu N *et al*. Relationship between low irrigation limit and yield, water use efficiency of tomato in under-mulching-drip irrigation in greenhouse[J]. Scientia Agricultura Sincia, 2006, 39(2): 425-432.

[8] 曾向辉, 王慧峰, 戴建平, 彭庆彬. 温室西红柿滴灌灌水制度试验研究[J]. 灌溉排水学报, 1999, 18(4): 23-26.
Zeng X H, Wang H F, Dai J P, Peng Q B. Study on irrigation regime for tomato under trickle irrigation in greenhouse[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 1999, 18(4): 23-26.

[9] 王贺辉, 赵恒, 高强, 韩淑敏. 温室番茄滴灌灌水指标试验研究[J]. 节水灌溉, 2005, (4): 22-25.
Wang H H, Zhao H, Gao Q, Han S M. Study on irrigation index for tomato under trickle irrigation in greenhouse[J]. Water Saving Irrigation, 2005, (4): 22—25.

[10] 刘学军, 张上宁, 何宝银. 日光温室番茄滴灌灌溉制度试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(3): 21-24.
Liu X J, Zhang S N, He B Y. Experiment on tomato irrigation schedule by drip irrigation in sunlight greenhouse system[J]. Journal of Water Resources &Water Engineering, 2010, 21(3): 21-24.

[11] 陈碧华, 郜庆炉, 杨和连, 张玉河. 华北地区日光温室番茄膜下滴灌水肥耦合技术研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(5): 80-83.
Chen B H, Gao Q L, Yang H L, Zhang Y H. Studies on water and fertilizer coupling under mulch drip fertilization on tomato in solar-greenhouse in North China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(5): 80-83.

[12] 郭艳波, 冯浩, 吴普特. 西北地区不同土壤水分处理对温室大棚番茄产量和耗水的影响[J]. 自然资源学报, 2009, 24(1): 50-57.
Guo Y B, Feng H, Wu P T. Effects of different soil moisture treatments on yield and water consumption of tomato in greenhouse in northwest China[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(1): 50-57.

[13] 孙磊, 孙景生, 刘浩, 等. 日光温室滴灌条件下番茄需水规

律研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(2): 51-54.
Sun L, Sun J S, Liu H *et al*. Water requirement rules of tomato in sunlight greenhouse[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(2): 51-54.

[14] 孙健, 成自勇, 王铁良, 等. 日光温室春夏茬番茄灌溉模式试验研究[J]. 节水灌溉, 2011, (6): 1-3.
Sun J, Cheng Z Y, Wang T L *et al*. Experimental study on suitable irrigation mode of summer tomato in greenhouse[J]. Water Saving Irrigation, 2011, (6): 1-3.

[15] 农业部. 水肥一体化技术指导意见[J]. 中国农技推广, 2013.
Ministry of Agriculture. Issued guidance on the integration of water and fertilizer technology [J]. China Agricultural Technology Extension, 2013.

[16] Li Y J, Yuan B Z, Bie Z L *et al*. Effect of drip irrigation criteria on yield and quality of muskmelon grown in greenhouse conditions [J]. Agriculture Water Management, 2012, 109: 30-35.

[17] 刘浩, 段爱旺, 孙景生, 刘祖贵. 基于 Penman-Monteith 方程的日光温室番茄蒸腾量估算模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 208-213.
Liu H, Duan A W, Sun J S, Liu Z G. Estimating model of transpiration for greenhouse tomato based on Penman-Monteith equation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(9): 208-213.

[18] 崔宁, 张玉龙, 刘洋, 等. 节点渗灌灌水控制上限对番茄生长及产量和品质的影响[J]. 北方园艺, 2010, (7): 53-56.
Cui N, Zhang Y L, Liu Y *et al*. Effect of different upper irrigation limit on growth, yield and quality of tomato under node permeation irrigation[J]. Northern Horticulture, 2010, (7): 53-56.

[19] 王峰, 杜太生, 邱让建, 董平国. 亏缺灌溉对温室番茄产量与水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 46-52.
Wang F, Du T S, Qiu R J, Dong P G. Effects of deficit irrigation on yield and water use efficiency of tomato in solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(9): 46-52.

[20] 范凤翠, 张立峰, 李志宏, 等. 日光温室番茄控制土壤深层渗漏的灌水量指标[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 83-89.
Fan F C, Zhang L F, Li Z H *et al*. Tomato irrigation index for soil water leakage control in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(10): 83-89.

[21] Nardella E, Giuliani M M, Gatta G, Caro A D. Yield response to deficit irrigation and partial Root-Zone drying in processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2012, 2: 209-219.

[22] 许金香, 高丽红. 日光温室不同栽培茬口番茄需水量初探[J]. 中国农学通报, 2005, 5(5): 308-312.
Xu J X, Gao L H. Primary study on water requirement of tomato in different season in solar greenhouse[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 5(5): 308-312.

[23] 韩建会, 徐淑贞. 日光温室番茄滴灌节水效果及灌溉制度的评价[J]. 西南农业大学学报, 2003, 25(1): 77-79.
Han J H, Xu S Z. Water-saving effect of drip irrigation and evaluation of irrigation regimes for tomato production in solar energy greenhouse [J]. Journal of Southwest Agricultural University, 2003, 25(1): 77-79.