文章编号:1672 - 3317(2019)07 - 0001 - 09

温室滴灌土壤基质势调控对番茄生长、品质和耗水的影响

万书勤[2],闫振坤[4],康跃虎[2,3],原保忠[4*],焦艳平[1],郭 军[5]

(1.河北省农业节水工程技术研究中心/河北省水利科学研究院,石家庄 050051;
2.中国科学院 地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室,北京 100101;
3.中国科学院大学 资源与环境学院,北京100049;4.华中农业大学 植物科学技术学院,
武汉 430070;5.天津市静海区团泊镇农业办公室,天津 301636)

摘 要:【目的】获得华北地区日光温室冬春茬番茄优质高产滴灌灌溉制度。【方法】采用田间试验的方法,布置了7个不同土壤基质势阈值的试验,在番茄开花坐果期和结果期分别控制滴头正下方20 cm深度土壤基质势阈值在-15 kPa和-15 kPa(S1)、-15 kPa和-30 kPa(S2)、-15 kPa和-45 kPa(S3)、-25 kPa和-25 kPa(S4)、-30 kPa和-15 kPa(S5)、-30 kPa和-30 kPa(S6)以及-30 kPa和-45 kPa(S7),研究了番茄生育期内土壤基质势动态调控对番茄生长、果实品质、耗水量和水分利用效率等的影响。【结果】在试验控制的土壤基质势范围内,①在番茄开花坐果期,番茄株高和茎粗均随土壤基质势阈值的升高而增加,进入结果期后不同土壤基质势处理下的番茄株高差异不明显,但茎粗仍随着土壤基质势阈值的升高而增加;②开花坐果期不同土壤基质势处理下的叶片*SPAD*值(相对叶绿素量)无显著差异,但结果期不同处理叶片*SPAD*值差异明显,表现为开花坐果期土壤基质势阈值高于低处理(S5、S6和S7)的叶片*SPAD*值;③对于开花坐果期土壤基质势阈值较低的处理,其畸形果率低、果实可溶性固形物量高,并且随着结果期土壤基质势的降低,畸形果率呈降低趋势,果实可溶性固形物量呈升高趋势;④番茄产量随着结果期土壤基质势阈值的降低而升高,-45 kPa处理番茄的产量最高;⑤随着整个生育期土壤基质势阈值的升高,番茄灌水量和耗水量显著增加,灌溉水利用效率和水分利用效率显著降低。【结论】综合考虑番茄产量、果实品质、灌溉水利用效率和水分利用效率等,华北地区日光温室秋冬茬番茄高产优质高水分利用效率的土壤基质势阈值为开花坐果期-30 kPa、结果期-45 kPa。

关 键 词:日光温室;冬春茬番茄;滴灌;高产优质;水分利用效率

中图分类号:S275.6;S274.1 **文献标志码:**A doi:10.13522/j.cnki.ggps.20180468

万书勤,闫振坤,康跃虎,等. 温室滴灌土壤基质势调控对番茄生长、品质和耗水的影响[J]. **灌溉排水学报**,2019,38(7):1-9.

0 引 言

番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.)是我国设施栽培的大宗蔬菜之一,在南北方都有广泛栽培。据中投顾问产业研究中心统计,2016年番茄设施栽培面积77.8万hm^2,占设施蔬菜栽培面积的首位[1]。滴灌可以根据作物的需水需肥规律适时适量地进行灌溉和施肥,具有增产、优质、省工等优点,越来越广泛地被运用到设施番茄生产中。如何科学合理地制定设施番茄滴灌灌溉计划是实现高产优质、发挥滴灌效益的关键。

目前通过监控土壤基质势阈值指导番茄灌溉,已被广泛应用在科学研究和生产实践中[2-7]。诸葛玉平等[2]指出保护地渗灌秋冬茬番茄灌水下限为:控制30 cm深度土壤基质势苗期在-25 kPa、开花坐果期在

收稿日期:2018-09-03

基金项目:河北省农业节水工程技术研究中心开放课题与河北省水利科技成果推广项目(2015012);国家科技支撑计划课题(2014BAD12B05,2016YFC0400105)

作者简介:万书勤(1978-),女。副研究员,主要从事农田水循环与节水灌溉研究。E-mail: wansq@igsnrr.ac.cn

通信作者:原保忠(1968-),男。副教授,主要从事作物水分高效利用与农业生态。E-mail: yuanbz@mail.hzau.edu.cn

-40~-25 kPa之间，该灌溉制度下番茄水分生产效率和产量均较高。Hartz等[3]推荐美国加利福尼亚州大田优质高产番茄滴灌灌溉制度为：番茄结果期之前控制30 cm深度土壤基质势阈值在-35~-20 kPa之间，结果期在-50~-40 kPa之间。Marouelli等[4]提出在巴西中部5—9月干燥凉爽季节里，大田滴灌条件下番茄苗期、开花坐果期和结果期相应土层深度的土壤基质势阈值分别在-35 kPa（10 cm深度）、-12 kPa（15 cm深度）和-15 kPa（20 cm深度）时，番茄产量最高。张辉等[5]指出东北温室覆膜滴灌条件下，早春茬番茄在开花至第一穗果快速膨大期、第一穗果快速膨大至收获结束，30 cm深度处土壤基质势阈值以分别控制在-20 kPa和-60 kPa左右为宜。张艳红等[6]提出在河北日光温室覆膜滴灌条件下，综合考虑高产、高灌溉水利用效率，早春茬口番茄滴头正下方20 cm深度土壤基质势下限控制在-30~-20 kPa最为适宜。综上，以往不同研究得出的番茄适宜土壤基质势阈值并不完全一致，特别是在番茄结果期，适宜的土壤基质势阈值范围较大，介于-60~-15 kPa，这很可能与研究地区气候条件、土壤质地、番茄茬口、品种、计划湿润层深度等的不同有关。

为了获得华北地区日光温室冬春茬番茄高产优质滴灌灌溉制度，在番茄不同生育阶段设计不同的土壤基质势阈值，研究日光温室滴灌土壤基质势动态调控对番茄生长、产量、品质、耗水量以及水分利用效率等的影响，以期确定冬春茬番茄适宜的土壤基质势阈值范围，为设施番茄水分高效管理提供一定数据支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2015—2016年番茄冬春茬生长季在河北省廊坊市永清县海泽田农业示范园区（北纬39°19′，东经116°27′）的日光温室中开展。该地属于暖温带大陆性季风气候，年平均降雨540 mm，年平均气温11.5 ℃。日光温室为钢架结构，长56 m、宽10 m、顶高4.5 m，后墙为厚度0.5 m的土墙，最外层为砖墙，覆盖材料为聚乙烯膜。

供试土壤为砂壤土，0~20 cm表层土壤疏松，土壤平均体积质量为1.29 g/cm^3；随着土层深度的增加，土壤体积质量逐渐增大，20~50 cm土壤体积质量平均为1.42 g/cm^3，50~100 cm土壤体积质量增加到1.52 g/cm^3。0~100 cm深度田间持水率对应的土壤基质势为-9.0~-7.0 kPa。耕作层0~30 cm土壤速效磷和速效钾的量丰富，分别平均为46.2 mg/kg和280.0 mg/kg；30 cm以下土壤养分迅速降低为缺乏水平，其中40~100 cm土层土壤速效磷和速效钾的量分别平均为4.5 mg/kg和56.1 mg/kg。

采用深层地下水灌溉，灌溉水矿化度0.5 g/L左右。浅层地下水埋深大于5 m。

1.2 试验材料与农艺管理

供试番茄品种为凯特一号。2015年9月9日移栽，9月25日定植，2016年3月1日进行打顶，3月15日第1次采收，5月11日采收结束。参考园区番茄管理方法，留5层穗果。

1.3 试验设计

试验设7个土壤基质势阈值。在番茄开花坐果期（2015年9月26日—2016年1月26日），控制滴头正下方20 cm深度土壤基质势阈值（灌溉下限值）分别为-15 kPa（S1）、-15 kPa（S2）、-15 kPa（S3）、-25 kPa（S4）、-30 kPa（S5）、-30 kPa（S6）和-30 kPa（S7）；在番茄结果期（2016年1月27日—5月11日），滴头正下方20 cm深度土壤基质势阈值（灌溉下限值）调整为-15 kPa（S1）、-30 kPa（S2）、-45 kPa（S3）、-25 kPa（S4）、-15 kPa（S5）、-30 kPa（S6）和-45 kPa（S7）。试验设计见表1所示。

表1 试验处理设计 kPa

处理	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
缓苗期（20150909—20150925）	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15
开花坐果期（20150926—20160126）	-15	-15	-15	-25	-30	-30	-30
结果期（20160127—20160511）	-15	-30	-45	-25	-15	-30	-45

在番茄缓苗期（2015年9月9—25日）统一灌溉，番茄苗移栽后立刻进行第1次灌溉，灌水量45 mm左右，以使得计划根系分布范围内的土壤水库达到或接近最大贮水能力；之后当滴头正下方20 cm深度土壤基质势降低到-15 kPa进行灌溉，以保证番茄幼苗安全度过缓苗期，每次灌溉6 mm左右。番茄定苗后（2015年9月26日之后），各处理当土壤基质势降低到设定的阈值时，进行施肥灌溉，每次灌水量6 mm左右；灌溉结束后及时读数，如果该监测点土壤基质势升高到设定的阈值以上，则结束这次灌溉，如果土壤基质势仍低于

设定的阈值，再灌溉1次（灌水量6 mm），直到土壤基质势升高到设定的阈值以上，结束这次灌溉。

小区面积7.2 m×8 m。番茄采用覆膜起垄种植模式，垄高15 cm，垄面宽80 cm，垄沟宽60 cm，2垄中心距离为120 cm。垄上覆膜，膜宽120 cm。垄上番茄行距40 cm，株距33 cm，1条垄上布置2条滴灌带种植2行番茄，每个小区共12条滴灌带、12行番茄。

定植前施有机肥2 680 kg/hm^2，尿素（46.4% N）1 430 kg/hm^{2}作为底肥；番茄定苗后每次灌溉进行追肥，选择速溶性复合肥。将番茄施肥量按生育阶段时间分配到每天，每次施肥量为每天施肥量与灌溉间隔时间的乘积，其中开花坐果期设计为120 d，每天灌溉追入复合肥（N、P、K质量比为18∶18∶18）2.5 kg/hm^2，共追肥300 kg/hm^2；结果期设计为100 d，每天灌溉追入复合肥（N、P、K质量比为12∶8∶40）4.2 kg/hm^2，共追肥415 kg/hm^2。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 生长指标

株高：从番茄定植20 d后开始，每隔30 d左右，直到番茄打顶，每处理选取25株长势相近的植株标记，用卷尺量株高。测量时，选择自然生长状态番茄冠顶最高点到地面的垂直距离。

茎粗：从番茄定植20 d后开始，每隔30 d左右，直到试验结束前，用游标卡尺测量标记植株（同株高）的茎粗。测定部位统一为第3~4节处。

株高（茎粗）平均相对生长速率（*RGR*）计算式为：

$$RGR=\frac{1}{W}\times\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}t}\ , \tag{1}$$

式中：W为番茄某一个时间的株高（cm）或者茎粗（mm），$\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}t}$ 为番茄当时株高或者茎粗增长速度（cm/d或者mm/d）；株高*RGR*和茎粗*RGR*的单位分别为cm/（cm·d）、mm/（mm·d）。

实际计算相对生产率的计算式为：

$$RGR=\frac{\ln W_2-\ln W_1}{t_2-t_1}\ , \tag{2}$$

式中：W_1为t_1取样时番茄株高（cm）或者茎粗（mm），W_2为t_2取样时番茄株高（cm）或者茎粗（mm）；t_2-t_1为间隔的生长时间（d）。

叶片相对叶绿素量（*SPAD*值）：从番茄定植20 d后开始，每隔30 d左右，直到试验结束前，用叶绿素仪（SPAD502plus）测定标记植株（同株高）的相对叶绿素量，测定叶片统一为从顶芽数第4片叶。

1.4.2 产量指标

产量：从始收期开始到末收期，每个试验小区番茄按行收获。按照（GB 8852—1988）国家标准中定义的商品果标准采收，统计每行番茄商品果数量和质量。在采摘末期统计处理小区采摘总株数，计算产量。

畸形果率：从始收期开始到末收期，与测产同步，用目测及触摸法观察每个果实的外观，按照（GB 8852—1988）国家标准中定义的畸形果，统计畸形果数量和质量。按照畸形果质量占总果质量（商品果质量与畸形果质量之和）的百分数计算畸形果率，以%表示。

1.4.3 品质指标

可溶性固形物量：在盛果期，与测产同步，从每个小区采摘的商品果中，随机选出25个果实。使用水果榨汁机榨汁，取上清液过滤，放置于烧杯中，用阿贝折射仪（BM-2型）法，测定番茄可溶性固形物量。

果实硬度：在盛果期，与测产同步，从每个小区采摘的商品果中，随机选出25个果实，使用水果硬度计（GY-2）法，测定番茄果实硬度。

1.4.4 灌水量与灌溉水利用效率

灌水量：每次灌水后记录水表读数，除以每个水表控制的灌溉面积，计算出每个处理单位面积的灌水量。

灌溉水利用效率（*IWUE*）：番茄产量与生育期总灌水量的比值，计算式为：

$$IWUE=\frac{Y}{I}\ , \tag{3}$$

式中：Y为番茄产量（t/hm^2）；I为番茄生育期总灌水量（mm）；*IWUE*的单位为t/（hm^2·mm）。

1.4.5 耗水量与水分利用效率

利用水量平衡法计算番茄耗水量，计算式为：

$$ET=I+P+\triangle S-D\ , \tag{4}$$

式中：ET为番茄生育期耗水量；I为番茄生育期总灌水量；P为降雨量，日光温室无降雨，所以P=0；ΔS为0~100 cm土体土壤储水量的变化值；R为地表径流，日光温室滴灌条件下无地表径流，所以R=0；D为番茄生育期深层渗漏，设定为通过80 cm深度断面上的水量，采用定位通量法计算[8-9]。以上单位均为(mm)。

水分利用效率(WUE)：番茄产量与生育期总耗水量的比值，计算式为：

$$WUE=\frac{Y}{ET}, \tag{5}$$

式中：Y为番茄产量(t/hm^2)；ET为番茄生育期耗水量(mm)；WUE的单位为t/(hm^2·mm)。

2 结果与分析

2.1 不同处理对番茄株高和茎粗的影响

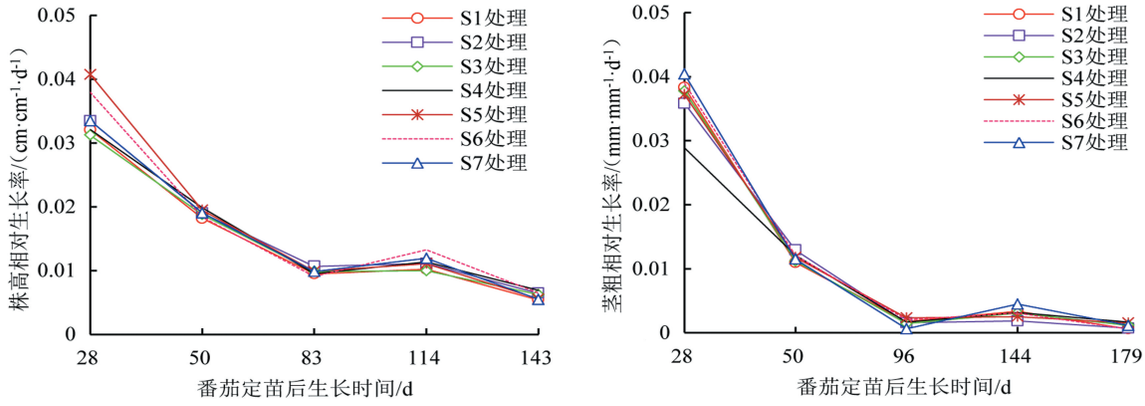
由表2可知，随着番茄的生长发育，所有处理下的番茄平均株高增长迅速。番茄开花坐果期不同处理下的平均株高差异明显，尤其是在开花坐果前期，如10月17日，土壤基质势控制较高(-15 kPa和-25 kPa)的S1、S2、S3和S4处理4个处理番茄株高平均为16.4 cm，土壤基质势控制较低(-30 kPa)的S5、S6和S7处理3个处理番茄平均株高为14.7 cm，较前4个处理的平均株高降低了10.4%。随着番茄的生长发育，不同处理间株高的差异逐渐减小。当番茄进入结果期，7个处理下番茄株高无明显差异，例如3月1日番茄打顶前，不同处理株高无差异，平均为98.1 cm。

表2 不同时期不同处理番茄的平均株高

处 理	开花坐果期/cm				结果期/cm	
	10月17日	10月29日	11月29日	1月3日	1月30日	3月1日
S1	17.2a	25.3a	44.5a	62.0a	81.7a	96.6a
S2	16.0abc	23.9ab	43.1ab	62.6a	84.5a	103.2a
S3	16.5ab	24.0ab	43.0ab	60.6a	79.4a	96.3a
S4	15.9abc	23.4b	43.3ab	60.5a	82.1a	101.7a
S5	13.9d	22.6b	41.4bc	58.5ab	78.9a	93.7a
S6	14.7cd	23.1b	40.9c	56.3b	80.5a	98.4a
S7	15.6bc	23.3b	42.0bc	59.2ab	81.8a	96.9a

注 同一列数据后不同小写字母表示在P<5%水平上差异显著，相同小写字母表示在P<5%水平上无显著差异，下同。

由图1(a)不同处理番茄株高相对生长率可知，番茄定苗后28 d不同处理株高相对生长率不同，其中土壤基质势控制较低的S5和S6处理，株高相对生长率高，2个处理平均为0.039 cm/(cm·d)，其他处理株高平均相对生长率为0.032 cm/(cm·d)；从番茄定苗后50 d开始，不同处理番茄株高相对生长率没有明显差异。总体上番茄株高相对生长率随着番茄的生长发育逐渐降低。



(a)株高相对生长率　　(b)茎粗相对生长率

图1 不同处理番茄株高和茎粗相对生长率

随着番茄的生长发育，所有处理的茎粗迅速增大。开花坐果期不同处理茎粗差异明显，土壤基质势阈值高(-15 kPa)的S1、S2和S3处理的茎粗最大，其次是S4处理(-25 kPa)，土壤基质势阈值低的S5、S6和S7处理(-30 kPa)的茎粗最小。同株高的变化规律不同，随着番茄进入结果期，不同处理的茎粗仍然有差异，并且

随着土壤基质势阈值的升高有增粗的趋势。

番茄定苗后28 d不同处理番茄茎粗相对生长率略有不同，除S4处理茎粗相对生长率低，为0.029 mm/(mm·d)外，其他处理的茎粗相对生长率较为接近，在0.036～0.040 mm/(mm·d)之间，从番茄定苗后50 d开始，不同处理番茄茎粗相对生长率没有明显差异。总体上番茄茎粗相对生长率随着番茄的生长发育迅速降低(图1(b))。

表3 不同时期不同处理番茄的平均茎粗

处理	开花坐果期/mm			结果期/mm		
	10月17日	10月29日	11月29日	1月30日	3月3日	4月10日
S1	4.8a	7.6a	10.7a	12.0ab	13.4a	13.7a
S2	4.9a	7.6a	11.3a	12.5a	13.3ab	13.6a
S3	4.8a	7.6a	10.7a	11.7ab	13.0abc	13.6a
S4	4.9a	7.0b	10.1b	11.2bc	12.5abc	13.3ab
S5	4.3b	6.7b	9.7b	11.2bc	12.2bc	12.9ab
S6	4.2b	6.7b	9.8b	11.1bc	12.3abc	12.6b
S7	4.3b	6.9b	9.9b	10.3c	12.0c	12.5b

2.2 不同处理对叶片相对叶绿素量(*SPAD*值)的影响

各处理下番茄叶片相对叶绿素量*SPAD*值随番茄生长发育的变化趋势一致(表4)。在开花坐果前期(10月17—29日)叶片*SPAD*值基本稳定，之后逐渐降低，到来年1月3日降低至最低值，之后又逐渐增大。

不同处理叶片*SPAD*值在开花坐果期无显著差异，进入结果期后开始逐渐出现差异，到结果后期(3月1日)表现为开花坐果期土壤基质势阈值较低处理(S5、S6和S7处理)的*SPAD*值较高，土壤基质势阈值较高处理(S1、S2、S3和S4处理)的*SPAD*值较低，即番茄生育前期(开花坐果期)相对较低的土壤基质势阈值(-30 kPa)有利于提高结果后期番茄叶片叶绿素量。

表4 不同时期不同处理番茄平均叶片*SPAD*值

处理	开花坐果期				结果期	
	10月17日	10月29日	11月29日	1月3日	1月30日	3月1日
S1	54.9a	53.9a	43.5a	32.4a	33.6b	47.3cd
S2	54.0a	53.4a	43.4a	31.3a	35.0ab	45.9d
S3	52.2a	54.3a	44.5a	32.0a	37.4a	48.8bc
S4	52.7a	53.1a	44.7a	32.9a	35.0ab	45.3d
S5	53.3a	53.6a	44.6a	33.7a	38.3a	50.5ab
S6	52.6a	55.5a	45.0a	32.9a	36.8ab	49.9ab
S7	51.9a	53.6a	45.4a	31.8a	38.0a	51.5a

2.3 不同处理对番茄产量及品质的影响

不同处理番茄的产量有明显差异。其中结果期土壤基质势控制最低(-45 kPa)的S3和S7处理番茄的产量最高，平均达到132.0 t/hm^2，其次是S1、S2、S4和S6处理，平均产量为116.9 t/hm^2，为S3和S7处理平均产量的88.6%，S5处理番茄产量最低，为103.8 t/hm^2，为S3和S7处理平均产量的78.6%(表5)。S5处理在开花坐果期土壤基质势阈值控制在-30 kPa、结果期提高到-15 kPa，说明番茄生育期内土壤干湿变化剧烈不利于番茄的高产。

表5 不同处理番茄产量与相关品质指标

处理	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
产量/(t·hm^{-2})	115.9b	115.1b	134.5a	118.5ab	103.8b	118.2b	129.5ab
畸形果率/%	25.7a	16.3ab	26.6a	26.5a	9.6bc	7.7c	7.4c
可溶性固形物量/%	4.7cd	4.0de	4.1de	3.3e	5.2bc	5.8ab	6.4a
硬度/(kg·cm^{-2})	1.85c	2.05bc	2.30ab	2.41a	2.18abc	2.28ab	1.91c

注 同一行数据后不同小写字母表示在P<5%水平上差异显著，相同小写字母表示在P<5%水平上无显著差异，下同。

不同处理番茄畸形果率有明显差异(表5)。其中开花坐果期土壤基质势阈值较高(-15 kPa和-25 kPa)的S1、S3、S4的畸形果率最大，平均高达26.3%；而开花坐果期土壤基质势阈值较低(-30 kPa)的S5、S6和S7处理畸形果率低，平均为8.2%，并且随着结果期土壤基质势阈值的降低(从-15 kPa降低到-45 kPa)畸形果率

有降低的趋势。

不同处理对番茄果实可溶性固形物量有显著影响(表5)。其中开花坐果期土壤基质势阈值高(-15 kPa)的S1、S2和S3处理果实可溶性固形物量较低,平均为4.2%;开花坐果期土壤基质势阈值低(-30 kPa)的S5、S6和S7处理果实可溶性固形物量高,并且随着结果期土壤基质势阈值的降低,可溶性固形物量有升高的趋势;番茄整个生育期土壤基质势阈值最低的S7处理,果实可溶性固形物量最高,说明较低的土壤基质势阈值可以提高果实可溶性固形物量。

不同处理对番茄果实硬度也有明显的影响(表5),但是同土壤基质势阈值的关系不明显。总体上,番茄果实可溶性固形物量最低的S4处理果实硬度最大,为2.41 kg/cm^2。

2.4 不同处理对番茄耗水量、水分利用效率和灌溉水利用效率的影响

不同处理下的灌水量、耗水量、灌溉水分利用效率和水分利用效率见表6。从表6可以看出,番茄生育期土壤基质势阈值越高,番茄灌水量越多,灌溉水利用效率越低。番茄整个生育期土壤基质势阈值最高的S1处理,累计灌水量最多,达到526.0 mm,灌溉水利用效率最低,仅为0.22 t/(hm^2·mm);土壤基质势阈值最低的S7处理,累计灌水量最少,为140.6 mm,为S1处理的26.7%,灌溉水利用效率最高,达到0.92 t/(hm^2·mm),为S1处理的4.2倍;S4和S5处理相比,S4处理番茄定苗后土壤基质势都控制在-25 kPa,而S5处理尽管开花坐果期土壤基质势阈值为-30 kPa,但结果期土壤基质势阈值升高到-15 kPa,使得其累计灌水量(251.7 mm)超过了S4处理的值(192.7 mm),其灌溉水利用效率为0.41 t/(hm^2·mm),低于S4处理的值(0.62 t/(hm^2·mm))。

表6 不同处理灌水量、耗水量及水分利用效率

处理	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
灌溉水量/mm	526.0	484.4	340.3	192.7	251.7	170.1	140.6
耗水量/mm	442.9	409.8	400.5	260.8	265.1	250.3	221.9
灌溉水分利用效率/(t·hm^{-2}·mm^{-1})	0.22d	0.24d	0.40c	0.62b	0.41c	0.69b	0.92a
水分利用效率/(t·hm^{-2}·mm^{-1})	0.26e	0.28e	0.34d	0.45bc	0.39cd	0.47b	0.58a

同灌水量和灌溉水利用效率的规律基本一致,随着番茄生育期土壤基质势阈值的升高,耗水量增多,而水分利用效率降低。S1处理整个生育期土壤基质势阈值最高,其耗水量也最高(442.9 mm),水分利用效率最低(0.26 t/(hm^2·mm));土壤基质势阈值最低的S7处理,耗水量最少(221.9 mm),水分利用效率最高(0.58 t/(hm^2·mm))。总体上,与灌水量和灌溉水利用效率相比,不同处理间耗水量和水分利用效率的差距较小。

3 讨 论

番茄枝繁叶茂,蒸腾作用强烈,果实含水率大,生长期间水分消耗量大且对水分反应较敏感,土壤水分状况是影响番茄生长、产量及果实品质等的重要因素。康跃虎等[10]在华北地区大田试验中发现,控制滴头正下方20 cm深度的土壤基质势阈值,可以明显影响到作物根系分布层的土壤水分状况,土壤基质势阈值越高,50 cm深度范围内的土壤水分状况越高,土壤基质势阈值越低,以滴头为中心形成的干燥范围越大。日光温室滴灌条件下,灌溉是土壤水分的唯一来源,调控土壤基质势阈值对土壤水分状况的影响更加显著[11]。万书勤等[11]在海泽田农业示范园区同一试验点日光温室的研究发现,番茄开花坐果期,当滴头正下方20 cm深度土壤基质势阈值分别控制在-15 kPa和-30 kPa时,0～60 cm深度以上范围土壤含水率分别保持在田间持水率的90%以上和80%左右;番茄结果期,当土壤基质势阈值控制在-25～-15 kPa时,0～100 cm整个土体土壤含水率基本保持在田间持水率的77%～91%,当土壤基质势阈值在-45 kPa时,0～100 cm整个土体土壤含水率保持在田间持水率的60%以上。

适宜的土壤水分状况有利于番茄的生长,番茄的株高、茎粗、叶面积等地上部分以及根系长度、根表面积等地下部分的各项生长指标均随着土壤含水率的升高而增大[12-14];本研究发现,番茄的株高和茎粗均随着土壤基质势阈值的升高而增大,进入结果期后,由于植株经历了打顶,故各处理株高基本一致,但茎粗仍随着土壤基质势阈值的升高而增大。番茄生育前期较高的土壤含水率容易导致番茄枝叶徒长,大量的养分集中在茎叶生长部位,而较少的养分供应给花、果,导致落花落果,降低坐果数,产生畸形果[15]。另外,番茄不耐高的土壤及空气湿度[15],土壤含水率过高时,会造成土壤通气不良,导致落花落果、畸形果率增加[16]。本研究

中，番茄整个生育期土壤基质势阈值较高（-25～-15 kPa）处理（S1和S4）的产量低、畸形果率高，而土壤基质势阈值较低（-45～-30 kPa）处理（S7）的产量高、畸形果率低。刘浩等[17]、王聪聪[18]也发现结果期水分过高（田间持水率的80%以上）会降低番茄产量、增加畸形果和小果的形成量。

番茄叶片叶绿素量不同生育阶段的值不同，但也明显受气温、光照、土壤水分状况等因素的影响。张晶晶等[19]指出番茄叶片叶绿素量在幼苗营养生长阶段随时间呈增长趋势，在移植60 d前后达到最大值，从结果期开始番茄营养物质主要向果实运输，叶片叶绿素量开始逐渐下降。但本研究发现番茄叶片*SPAD*值（叶片相对叶绿素量）在开花坐果前期基本稳定，之后逐渐降低，到来年1月3日左右降低到最低值，之后又逐渐增大，这很可能是因为秋冬茬番茄越冬期间的低温弱光逆境引起叶片叶绿素量的降低[20]，春季温度升高、光照增强，使得叶片*SPAD*值又逐渐增大。本研究中不同土壤基质势阈值番茄叶片*SPAD*值在开花坐果期没有显著差异，但到结果后期差异明显，在开花坐果期土壤基质势阈值较低处理的*SPAD*值高，土壤基质势阈值较高处理的*SPAD*值低。这主要是因为土壤水分状况好时，植株生长快，长势强，造成单位叶面积中叶绿素量降低，土壤含水率较低时，植株生长相对缓慢，使得单位叶面积内叶绿素量积累，从而表现出一定土壤含水率范围内，番茄叶片叶绿素量随着土壤含水率的降低而升高的现象[21-22]。但当土壤含水率低到使植物遭受干旱胁迫时，叶绿素降解，叶绿素的合成减少，表现为叶绿素量随水分胁迫程度的增强大幅度降低[23]。史莹等[24]、侯梦媛等[25]的研究也发现不同土壤水分处理下，番茄叶片叶绿素量随着水分胁迫程度先升高后降低，适度水分胁迫下（60%～70%田间持水率），番茄叶片的叶绿素量较高。从本研究不同处理番茄叶片*SPAD*值的差异也可以知道，滴灌条件下20 cm深度番茄开花坐果期和结果期土壤基质势阈值分别控制在-30 kPa和-45 kPa时，相当于土壤含水率分别保持在田间持水率的80%左右和60%以上时，对番茄生长发育并不会造成明显的水分胁迫，并且有利于番茄叶片叶绿素量积累。

番茄可溶性固形物主要由可溶性糖和有机酸等成分组成，其量的高低与果实生长过程中水分和碳水化合物的代谢密切相关[26]，直接影响到番茄果实的品质。许多研究表明，水分对番茄果实中可溶性固形物等有稀释作用，水分胁迫使果实含水率下降，也就相应地增加了果实中干物质的量，提高了可溶性固形物量[27-29]，但水分胁迫往往会伴随产量的降低[30-32]。但也有研究表明，水分胁迫对番茄产量和果实品质的影响与水分胁迫发生的时间和程度密切相关，例如Mitchell等[33]发现在番茄采摘前50 d开始进行水分亏缺灌溉可以提高番茄果实可溶性固形物量，而不会导致减产；刘明池等[34]提出番茄生产中应选择膨大期开始亏缺灌溉，既可以提高番茄品质，又可以减少产量降低带来的负面影响；本研究也发现日光温室滴灌条件下，秋冬茬番茄土壤基质势阈值开花坐果期控制在-30 kPa、结果期控制在-45 kPa时，番茄果实可溶性固形物量高，产量也高，并且耗水量少，水分利用效率高。这与祁金虎等[35]的研究结果略有不同，发现灌水控制下限土壤基质势-40 kPa处理，夏秋茬番茄果实Vc量、可溶性糖量、糖酸比等要显著高于-20、-30和-35 kPa处理，但可溶性固形物量、有机酸量与土壤基质势没有明显关系，并推荐在温室土壤肥力较低时，滴灌条件下夏秋茬番茄灌水控制上限土壤基质势为-6 kPa、灌水控制下限土壤基质势为-30 kPa。而王聪聪[18]提出在充分考虑番茄产量、水分利用效率及果实品质的基础上，温室番茄优质、高产、高效三者的土壤水分控制下限指标：开花坐果期和结果期分别控制40 cm计划湿润层深度土壤含水率为田间持水率的70%～75%和60%～65%，这与本研究的结果基本一致。这可能与番茄品种、茬口、计划湿润层深度等的不同有关。

4 结 论

在试验控制的土壤基质势范围内，开花坐果期番茄的株高和茎粗均随着土壤基质势阈值的升高而增加，进入结果期之后不同处理株高没有显著差异，但茎粗仍随着阈值的升高有增粗的趋势。不同处理番茄叶片*SPAD*值在结果后期出现差异，其中开花坐果期土壤基质势阈值较低处理的*SPAD*值较高，反之则较低。

开花坐果期土壤基质势阈值低处理（-30 kPa）的畸形果率低、果实可溶性固形物量高，并且结果期阈值从-15 kPa降低到-45 kPa，畸形果率有降低的趋势、果实可溶性固形物量有升高的趋势。番茄的产量随着结果期土壤基质势阈值的降低而升高，其中S3和S7处理（-45 kPa）产量最高，而番茄生育期内土壤水分变化剧烈（S5处理）产量最低。随着土壤基质势阈值的升高，番茄灌水量和耗水量显著增加，而灌溉水利用效率和水分利用效率显著降低。

综合考虑番茄产量、果实品质、灌水量和水分利用效率，华北地区日光温室秋冬茬番茄生产中，滴灌条

件下滴头正下方20 cm深度土壤基质势下限在开花坐果期控制在-30 kPa、结果期控制在-45 kPa，有利于番茄的高产优质，并且节水效益显著。

参考文献：

[1] 作物版团队．图文直击：我国设施蔬菜主产区分布情况[J]. 营销界（农资与市场）作物版，2018(1)：46-53.

[2] 诸葛玉平，张玉龙，李爱峰，等．保护地番茄栽培渗灌灌水指标的研究[J]. 农业工程学报，2002，18(2)：53-57.

[3] HARTZ T, HANSON B. Drip irrigation and fertigation management of processing tomato[R]. Davis: Vegetable research and information center, University of California, 2009, 1-11.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 张艳红，焦艳平，赵勇，等．日光温室滴灌条件下土壤基质势对番茄生长的影响[J]. 中国农村水利水电，2011(7)：5-7，11.

[7] 万书勤，康跃虎，刘士平．滴灌条件下土壤基质势与打顶措施对番茄生长和水分利用的影响[J]. 灌溉排水学报，2009，28(2)：1-4，33.

[8] 雷志栋，杨诗秀，谢森传．土壤水动力学[M]. 北京：清华大学出版社，1988.

[9] 白珊珊，万书勤，康跃虎．华北平原滴灌施肥灌溉对冬小麦生长和耗水的影响[J]. 农业机械学报，2018，49(2)：269-276.

[10] 康跃虎，王凤新，刘士平，等．滴灌调控土壤水分对马铃薯生长的影响[J]. 农业工程学报，2004，20(2)：66-72.

[11] 万书勤，闫振坤，康跃虎，等．土壤基质势调控对温室滴灌番茄土壤水分分布和产量的影响[J]. 灌溉排水学报，2019, 38(5):1-11.

[12] 高方胜，徐坤，徐立功，等．土壤水分对番茄生长发育及产量品质的影响[J]. 西北农业学报，2005，14(4)：69-72.

[13] 杨再强，邱译萱，刘朝霞，等．土壤水分胁迫对设施番茄根系及地上部生长的影响[J]. 生态学报，2016，36(3)：45-50.

[14] 王晓森，常晓，孟兆江，等．不同灌水下限与底肥施用对温室番茄光合特性、产量和品质的影响[J]. 灌溉排水学报，2016，35(3)：45-50.

[15] 程智慧．蔬菜栽培学各论[M]. 北京：科学出版社，2017.

[16] 贺献林．温室番茄异常诊治及高效栽培新技术[M]. 北京：中国农业出版社, 2005.

[17] 刘浩，段爱旺，孙景生，等．温室滴灌条件下土壤水分亏缺对番茄产量及其形成过程的影响[J]. 应用生态学报，2009，20(11)：2 699-2 704.

[18] 王聪聪．日光温室番茄优质高效灌溉控制指标研究[D]. 邯郸：河北工程大学，2011.

[19] 张晶晶，海波，刘慧鹏．番茄叶片叶绿素含量变化规律研究[J]. 现代农业科技，2015(1)：99-100.

[20] 赵玉萍．不同温度光照对温室番茄生长、光合作用及产量品质的影响[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2010.

[21] 张宪法．水分对日光温室结果期黄瓜生长与生理特性的影响[D]. 泰安：山东农业大学，2001.

[22] 王磊，任树梅，毕勇刚，等．土壤水分及有机肥料对番茄叶片光合特性及叶绿素含量影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报，2004，23(2)：66-68, 80.

[23] 王宝山．逆境植物生物学[M]. 北京：高等教育出版社，2010.

[24] 史莹，周清，司哺春，等．持续高土壤水分对番茄植株叶绿素含量及光合特性的影响研究[J]. 北方园艺，2010，34(21)：42-44.

[25] 侯梦媛，杨再强，张曼义．水分胁迫对设施番茄结果期叶片衰老特性和根系活力的影响[J]. 北方园艺，2017，41(1)：52-57.

[26] 关军锋．果实品质生理[M]. 北京：科学出版社，2008.

[27] 唐晓伟，刘明池，郝静，等．调亏灌溉对番茄品质与风味组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2010，16(4)：970-977.

[28] MOHMED A M A，程吉林，冯绍元，等．滴灌条件下不同供水水平对温室番茄生长、产量及其品质的影响[J]. 灌溉排水学报，2016，35(1)：36-41.

[29] 吴泳辰，韩国君，陈年来．调亏灌溉对加工番茄产量、品质及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报，2016，35(7)：104-107.

[30] 郭海涛，邹志荣，杨兴娟，等．调亏灌溉对番茄生理指标、产量品质及水分生产效率的影响[J]. 干旱地区农业研究，2007，25(3)：133-137.

[31] 郭艳波．温室膜下滴灌条件下番茄控水灌溉指标试验研究[D]. 北京：中国科学院研究生院，2008.

[32] 梁玉芹，刘云，杨军芳，等．不同灌水量对日光温室番茄产量与品质的影响[J]. 河北农业科学，2012，16(2)：34-36.

[33] MITHELL J P, SHENNAN C, GRATTAN S R, et al. Tomato fruit yields and quality under water deficit and salinity[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1991, 116(2): 215-221.

[34] 刘明池，张慎好，刘向莉．亏缺灌溉时期对番茄果实品质和产量的影响[J]. 农业工程学报，2005, 21(z2)：92-95.

[35] 祁金虎，张玉龙．滴灌灌水控制下限对温室番茄产量、品质、水分利用效率的影响[J]. 江苏农业科学，2014，42(12)：198-201.

Response in Growth, Quality and Water Consumption of Greenhouse Tomato to Change in Matric Potential at 20 cm below the Emitter of Drip Irrigation

WAN Shuqin[2], YAN Zhenkun[4], KANG Yuehu[2,3], YUAN Baozhong[4*], JIAO Yanping[1], Guo Jun[5]

(1. Hebei Engineering Research Center for Agricultural Water Saving\Hebei Provincial Academy of Water Resources, Shijiazhuang 050051, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 5. Agricultural Office of Tuanbo Town, Jinghai County, Tianjin 301636, China)

Abstract:【Objective】Irrigation schedule needs to know the spatiotemporal dynamics of soil moisture in root zone. The objective of this paper is to investigate the feasibility of using matric potential measured at 20 cm below the drip emitter as a proxy for soil moisture in the root zone to schedule irrigation.【Method】The experiment was conducted in a greenhouse and the model plant was tomato. We compared seven matric potential (SMP) thresholds in that whenever the measured soil matric potential dropped below them, drip irrigation was resumed. The values of the SMP thresholds varied from flowering and fruit-setting stage to fruiting stage, and the seven combinations (flowering and fruit-setting stage /fruiting stage) were -15 kPa/-15 kPa (S1), -15 kPa/-30 kPa (S2), -15 kPa/-45 kPa (S3), -25 kPa/-25 kPa (S4), -30 kPa/-15 kPa (S5), -30 kPa/-30 kPa (S6), and -30 kPa/-45 kPa (S7). In each treatment, we measured growth, fruit quality, water consumption and water use efficiency of the tomato.【Result】Stem diameter increased with SMP threshold at both flowering and fruit-setting stage and fruiting stage, whereas the plant height was only responsive to SMP at flowing and fruit-setting stage. The relative chlorophyll content in leaf (*SPAD*) did not show significant difference between treatments at flowering and fruit-setting stage but inversely increased with the SMP threshold at fruit setting stage. Decreasing the SMP threshold at flowering and fruit-setting stage could reduce the percentage of defective fruits and increase soluble solids content. Yield increased inversely with SMP threshold at fruit setting stage, peaking when SMP was -45 kPa. Lowering the SMP threshold increased irrigation amount and hence water consumption, thereby decreasing water use efficiency.【Conclusion】Our experimental results suggest that setting the SMP at -30 kPa at the flowering and fruit-setting stage and -45 kPa at the fruiting period appears to be optimal to best balance yield, fruit quality, irrigation water use efficiency and water use efficiency for winter-spring tomato grown in solar greenhouse in North China.

Key words: solar greenhouse; winter and spring growing tomato; drip irrigation; high yield and good quality; water use efficiency

责任编辑:赵宇龙