

# 覆膜与水分控制对宁夏设施滴灌番茄产量与品质的影响

郭彬<sup>1</sup>, 莫彦<sup>2</sup>, 吴忠东<sup>1\*</sup>, 张彦群<sup>2</sup>, 龚贻腾<sup>3</sup>, 龚时宏<sup>2</sup>, 王建东<sup>4</sup>, 李巧灵<sup>2</sup>

(1. 山东理工大学 农业工程与食品科学学院, 山东 淄博 255049;

2. 中国水利水电科学研究院 水利研究所, 北京 100048; 3. 中咨海外咨询有限公司, 北京 100048; 4. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

**摘要:** 【目的】探索宁夏设施滴灌番茄覆膜的效果和适宜的灌溉制度, 为宁夏地区设施滴灌番茄节水高产种植提供理论依据。【方法】通过 2a 试验, 在覆膜(M)与不覆膜(NM)条件下, 设定 4 种水分控制水平, 灌水频率为 7~10 d,  $W_1$ 、 $W_2$  和  $W_3$  处理的灌水上限分别为 100%FC(田间持水率)、80%FC 和 70%FC, 以当地灌水量为对照(CK, 灌水上限为 123%FC), 研究了覆膜和水分控制对设施滴灌番茄生长、产量、品质与水分生产效率的影响。【结果】番茄株高和茎粗在苗期一开花坐果期生长迅速, 受覆膜处理影响显著( $P<0.01$ ), 受水分控制影响不显著( $P>0.05$ )。随着灌水量的增加, 番茄产量先增加后降低,  $W_2M$  处理的产量和水分生产效率均为最大值, 分别为 89 844.88 kg/hm<sup>2</sup> 和 502.5 kg/(hm<sup>2</sup> mm), 相比覆膜 CK 分别增加 21.4% 和 63.7%。相比于不覆膜处理, 覆膜番茄产量平均增加 18.1%, 差异达到显著水平( $P<0.05$ ), 其还原性维生素 C 和可溶性固形物量分别提高 28.9% 和 22.8% ( $P<0.05$ )。覆膜和水分控制均对番茄还原性维生素 C 量、可溶性固形物和可溶性总糖量的影响达到显著水平( $P<0.01$ ), 覆膜处理还对可滴定酸量和糖酸比的影响达到显著水平( $P<0.05$ )。【结论】对于宁夏设施滴灌番茄, 采用覆膜栽培与 80%FC 的灌水上限可以获得较高产量和较好品质。

**关键词:** 覆膜; 滴灌; 灌水上限; 产量; 番茄品质

中图分类号: S641.2

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020525

OSID:



郭彬, 莫彦, 吴忠东, 等. 覆膜与水分控制对宁夏设施滴灌番茄产量与品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(3): 48-55.

GUO Bin, MO Yan, WU Zhongdong, et al. Combined Effects of Film Mulching and Water-controlled Drip Irrigation on Yield and Quality of Facility-cultivated Tomato in Ningxia[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(3): 48-55.

## 0 引言

【研究意义】2019 年我国农业灌溉用水量占全国总用水量的 61.4%<sup>[1]</sup>, 水资源的过度消耗严重制约着中国特色现代化农业的建设, 为此, 我国近年来积极推进节水灌溉技术。截至 2019 年, 我国发展节水灌溉面积 3 427 万 hm<sup>2</sup>, 占总灌溉面积的 46.3%, 其中微灌面积 628 万 hm<sup>2</sup>, 居世界第一<sup>[1]</sup>。到 2018 年, 我国设施蔬菜种植面积为 390 万 hm<sup>2</sup>, 其中设施番茄占比超过 19.7%<sup>[2]</sup>。【研究进展】滴灌可以促进番茄根系生长发育, 提高水肥利用效率<sup>[3]</sup>。相比于畦灌, 滴灌番茄可显著降低土壤 CO<sub>2</sub> 累积排放量, 有利于土

壤有机质的积累<sup>[4]</sup>。大量研究表明, 番茄产量和品质受灌溉制度的影响十分显著<sup>[5-6]</sup>。在温室基质滴灌栽培条件下, 樱桃番茄产量和水分生产效率随灌水量的增加而先增加后降低, 当灌水频率为 4 d/次, 总灌水量为 306 mm 时的产量最大<sup>[7]</sup>。张志云等<sup>[8]</sup>发现灌水频率对番茄产量和水氮淋失影响不显著, 但番茄灌水频率为 6 d/次时, 番茄获得最高产量, 硝态氮淋失量明显降低。

维生素 C 量、可溶性固形物量、可溶性糖量等是衡量番茄品质的重要指标。在壤土条件下, 番茄糖酸比随灌水下限的增大而增大, 而可溶性固形物量、可溶性糖量、维生素 C 量和可溶性蛋白量随灌水下限的增大而减小<sup>[9]</sup>。在番茄不同生育阶段适宜的灌水下限能改善果实品质。王文娟<sup>[10]</sup>通过膜下滴灌番茄试验发现, 将苗期和开花坐果期的土壤水分控制在 70%FC~80%FC 有利于番茄品质提高, 在结果后期, 适当的水分亏缺有利于可溶性蛋白量的积累。Du

收稿日期: 2020-09-20

基金项目: 水利部技术示范项目(SF-201802); 国家自然科学基金项目(51909276); 中国水科院基本科研业务费项目(ID0145B602017)

作者简介: 郭彬(1996-), 男, 山东潍坊人。硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail: wy393966534@163.com

通信作者: 吴忠东(1968-), 女, 山东淄博人。副教授, 博士, 主要从事劣质水灌溉及环境效应研究。E-mail: wuzhongdong@126.com

等<sup>[11]</sup>研究发现适当的水分亏缺能提高番茄产量和改善果实品质,当灌水量为75%标准蒸发皿蒸发量时,番茄的产量、番茄红素量与可滴定酸量最大。

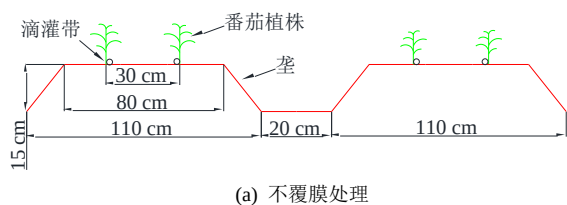
覆膜可以显著提高作物产量和水分利用效率<sup>[12-14]</sup>,在大田滴灌粮食作物中的应用十分广泛。对于设施蔬菜,王京伟等<sup>[15]</sup>在陕西杨凌的试验研究表明覆膜滴灌甜瓜的产量较不覆膜滴灌甜瓜能显著提高29.3%;王乐等<sup>[16]</sup>的研究表明,覆膜滴灌番茄的产量和水分生产效率比不覆膜滴灌番茄分别显著提高了2.9%和21.7%。

【切入点】在宁夏地区,滴灌技术在设施番茄中应用比例较大,但滴灌条件下的大水大肥管理模式仍十分普遍<sup>[17]</sup>,不仅增加了生产成本,造成番茄减产和品质下降,还会造成水资源浪费和地下水污染等生态问题,而且地膜覆盖栽培设施蔬菜增产效应的相关研究成果较少,种植大户对是否进行覆膜栽培蔬菜存在争议,因此,设施滴灌番茄是否需要覆盖地膜值得研究。【拟解决的关键问题】本试验通过比较覆膜与不覆膜条件下,不同水分控制对番茄的生长、产量、品质以及水分生产效率的影响来获得合理高效的设施滴灌番茄栽培管理模式。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于2018年和2019年7—11月在宁夏中卫市的九晟农牧发展公司农业基地(东经105°6'49",北纬37°28'13",海拔1233 m)进行,试验地属干旱、半干旱大陆性季风气候和沙漠气候,年平均气温5.3~9.9℃,日照时间2250~3100 h,无霜期105~163 d,年均降水量166.9~647.3 mm,蒸发量1312~2204 mm。试验所用温室为全钢架结构,东西走向,坐北朝南,长85 m,宽11.5 m,顶部覆盖聚乙烯薄膜和保温棉被,保温棉被由自动卷帘机控制,棚内设置有温湿度传感器。试验地土质为壤土,0~80 cm土壤平均体积质量为1.53 g/cm<sup>3</sup>,平均田间持水率为31.03%(体积含水率),土壤全氮为1560 mg/kg、铵态氮为10.62 mg/kg、硝态氮为59.08 mg/kg、有效磷为63.05 mg/kg、速效钾为227.80 mg/kg、有机质质量分数为22540 mg/kg和pH值为8.25。



(a) 不覆膜处理

### 1.2 试验设计

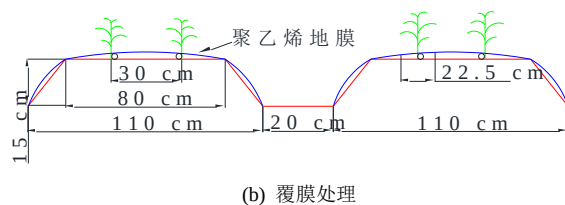
试验设置覆膜和水分控制2个处理。覆膜处理包含覆膜(M)和不覆膜(NM)处理。考虑覆膜对田间小气候影响显著<sup>[18-19]</sup>,一个大棚设置2种覆膜方式不利于区分覆膜对微环境与作物生长的影响,因此同一大棚只能设置1种覆膜处理。受客观条件限制,2018年开展不覆膜处理试验,2019年在相同大棚中开展覆膜处理试验。

水分控制包含高水(W<sub>1</sub>)、中水(W<sub>2</sub>)、低水(W<sub>3</sub>)处理和1个对照(CK),每个处理包括3个重复(R1、R2、R3)。W<sub>1</sub>处理的灌水上限为100%FC, W<sub>2</sub>处理的灌水上限为80%FC, W<sub>3</sub>处理的灌水上限为70%FC, CK为当地常用的滴灌灌溉制度(灌水上限为123%FC)。灌水频率根据试验地区常用灌水间隔设置,在番茄苗期,灌水频率为7 d/次,在开花坐果期—结果后期,灌水频率为10 d/次。2018年,只在番茄苗期和开花坐果期进行了4次灌水处理,从定植后36 d,各处理灌水量相同。试验将番茄全生育期划分为4个阶段:苗期(2018年7月13日—8月3日,2019年7月2—23日)、开花坐果期(2018年8月3日—9月12日,2019年7月23日—9月4日)、结果盛期(2018年9月12日—10月19日,2019年9月4日—10月12日)和结果后期(2018年10月19日—11月13日,2019年10月12日—11月10日),从番茄定植到采摘结束,各处理的灌水量见表1。

表1 各处理灌水量

| Table 1 | Irrigation amount of each treatment |                |                | mm    |
|---------|-------------------------------------|----------------|----------------|-------|
| 处理      | W <sub>3</sub>                      | W <sub>2</sub> | W <sub>1</sub> | CK    |
| 不覆膜     | 118.9                               | 137.6          | 160.5          | 197.4 |
| 覆膜      | 98.8                                | 122.5          | 152.3          | 187.9 |

试验番茄品种选用粉印3号,采用南北向垄上种植模式,垄宽110 cm,高15 cm,每垄种植2行番茄,番茄种植行距30 cm,株距50 cm,每行番茄布置1条滴灌带供水,滴灌带(雨润农业节水灌溉制造有限公司,宁夏)为内镶贴片式,滴头流量2.8 L/h,壁厚0.2 mm,滴头间距30 cm。在覆膜滴灌处理中,番茄采用黑白交替膜覆盖,膜宽120 cm,厚0.012 mm(图1)。试验小区长11.5 m,宽3.9 m,每个处理设3个重复,共12个小区,每个小区的入口均安装了阀门和水表。



(b) 覆膜处理

图1 番茄种植模式

Fig.1 Planting pattern of tomato

### 1.3 测定项目和方法

#### 1) 土壤水分

每隔 3 d 以及每次灌水前和灌水 24 h 后用 TRIME-PICO 剖面土壤水分仪 (IMKO, 德国) 监测土壤水分变化, 测试深度为 20、40 和 60 cm。每个处理均安装 3 根 TRIME 管, TRIME 管安装在番茄株间。由于 2018 年只在番茄苗期和开花坐果期进行了灌水处理, 从定植后 36 d 开始, 没有进行土壤水分监测, 但在最后 1 次收获结束后, 测定了各层土壤含水率。

#### 2) 生长指标

每个小区选取 3 株具有代表性的番茄植株, 在番茄苗期 (2018 年, 定植后 4 d; 2019 年, 定植后 2 d) 和开花坐果期 (2018 年, 定植后 24 d; 2019 年, 定植后 21 d) 测定番茄株高和茎粗。株高 (地面至植株最高处) 采用卷尺测定, 茎粗 (地面以上 3 cm 处) 采用游标卡尺测定。

#### 3) 产量与品质

依据番茄实际成熟时间进行采摘, 每次采摘果实时, 将每个小区中间一垄成熟的果实全部摘取, 采用电子秤 (精度为 5 g) 称质量, 计算番茄总产量。

在 2018 年 10 月 19 日和 11 月 11 日, 2019 年 9 月 28 日和 10 月 18 日果实采摘时, 选取每个处理小区中大小、硬度一致的果实 3 个, 测定番茄还原性维生素 C (2, 6-二氯酚靛酚滴定法)、可溶性固形物 (ATAGO 手持糖度计 PR-32, Co. Ltd., Tokyo, Japan)、可溶性总糖 (硫酸蒽酮法) 和可滴定酸度 (NaOH 滴定法) [20]。

#### 4) 水分生产效率与灌溉水水分利用效率

水分生产效率与灌溉水水分利用效率计算式为:

$$WUE_{ET}=Y/ET, \quad (1)$$

$$WUE_I=Y/I, \quad (2)$$

式中:  $WUE_{ET}$  为作物水分生产效率 ( $\text{kg}/(\text{hm}^2 \text{ mm})$ );  $ET$  为作物生育期耗水量 ( $\text{mm}$ );  $Y$  为番茄总产量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $WUE_I$  为灌溉水水分利用效率 ( $\text{kg}/(\text{hm}^2 \text{ mm})$ );  $I$  为作物生育期灌溉水量 ( $\text{mm}$ )。

作物耗水 ( $ET$ ) 采用水量平衡方程计算:

$$ET=P+I+\Delta W-R-D, \quad (3)$$

式中:  $P$  为降雨量 ( $\text{mm}$ ), 温室大棚无自然降雨,  $P=0$ ;  $I$  为灌溉水量 ( $\text{mm}$ );  $\Delta W$  为生育期前和生育期结束后 0~60 cm 土层蓄水量变化值 ( $\text{mm}$ );  $R$  为地表径流量 ( $\text{mm}$ ), 本试验区域无地表径流,  $R=0$ ;  $D$  为全生育期内该时间段的地下水补给量 ( $\text{mm}$ ), 本试验区域内平均地下水埋深 2.55 m, 可忽略地下水补给,  $D=0$ 。

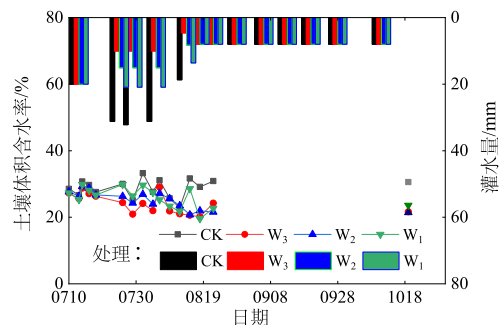
### 1.4 数据处理

显著性分析采用 SPSS 18.0 统计软件进行分析。变化趋势图采用 Microsoft Excel 2016 与 Origin 2017 进行制作。

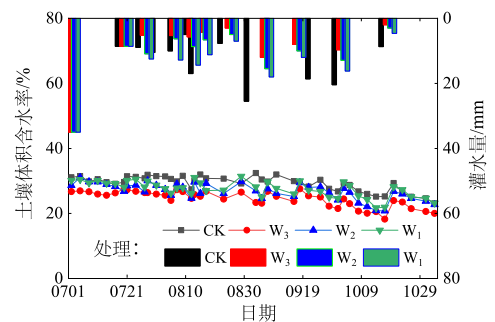
## 2 结果与分析

### 2.1 土壤含水率

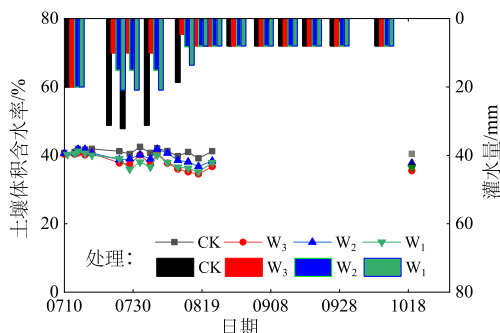
覆膜和不覆膜滴灌番茄在 0~20、20~40 cm 和 40~60 cm 土层的土壤体积含水率变化曲线如图 2 所示, 由图 2 可以看出, 各层土壤含水率随着灌水量增大而增大。随着生育期的进行, 土壤含水率均呈逐渐减小的趋势。



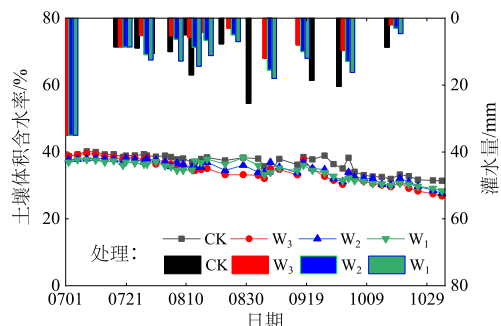
(a) 不覆膜处理 0~20 cm



(b) 覆膜处理 0~20 cm



(c) 不覆膜处理 20~40 cm



(d) 覆膜处理 20~40 cm

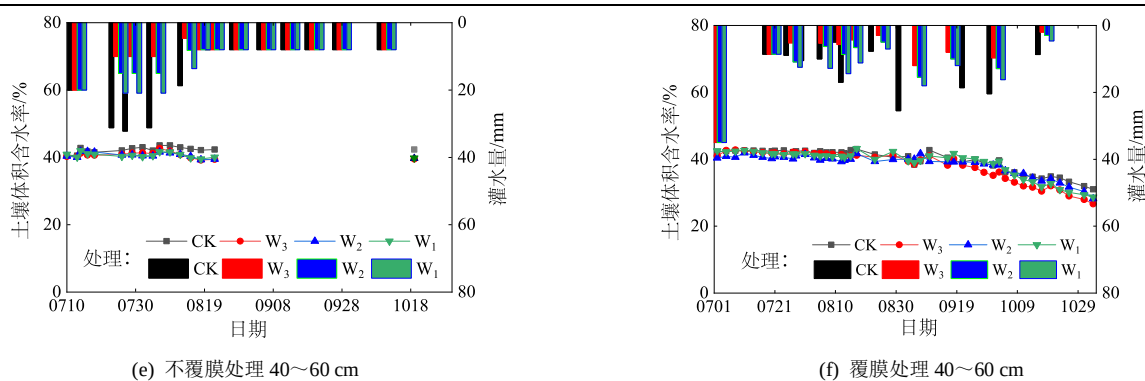


图 2 土壤含水率

Fig.2 Soil moisture content

0~20 cm 土层,覆膜处理的土壤含水率变化幅度较小,与不覆膜处理相比,番茄全生育期平均土壤含水率提高了 1.4%~12.0%; 20~40 cm 土层,各处理在番茄苗期土壤含水率无明显差异,当番茄进入开花坐果期,土壤含水率呈下降趋势,各处理间土壤含水率差异逐渐增大; 40~60 cm 土层,各处理土壤含水率在番茄苗期和开花坐果期基本趋于稳定状态,当番茄进入结果盛期后,土壤含水率逐渐下降。

表 2 设施滴灌番茄株高与茎粗

Table 2 Plant height and stem diameter of tomato under drip irrigation in greenhouse

| 试验处理     |                     | 株高/cm       |            | 茎粗/mm    |            |
|----------|---------------------|-------------|------------|----------|------------|
|          |                     | 苗期          | 开花<br>坐果期  | 苗期       | 开花<br>坐果期  |
| 不覆膜      | CKNM                | 19.0±1.1abc | 81.4±5.6a  | 3.4±0.2a | 9.8±0.4a   |
|          | W <sub>1</sub> NM   | 19.7±0.5abc | 71.2±2.2ab | 3.7±0.2a | 7.8±0.6c   |
|          | W <sub>2</sub> NM   | 20.4±1.8a   | 77.8±7.4a  | 3.6±0.2a | 8.3±0.46bc |
|          | W <sub>3</sub> NM   | 20.1±2.2ab  | 75.9±10.0a | 3.6±0.2a | 8.5±1.0bc  |
| 覆膜       | CKM                 | 18.0±1.2abc | 60.4±2.7c  | 3.8±0.6a | 9.0±0.9abc |
|          | W <sub>1</sub> M    | 19.1±1.9abc | 62.4±2.2bc | 3.8±0.2a | 9.3±0.6ab  |
|          | W <sub>2</sub> M    | 17.6±0.4bc  | 61.6b±3.6c | 3.6±0.1a | 8.9±0.5abc |
|          | W <sub>3</sub> M    | 17.1±0.6c   | 59.5±5.0c  | 3.6±0.2a | 8.8±0.4abc |
| <i>F</i> | 水分控制                | 0.51 NS     | 0.81 NS    | 0.50 NS  | 2.44 NS    |
| <i>F</i> | 覆膜处理                | 10.51**     | 51.19**    | 1.47 NS  | 2.38 NS    |
| <i>F</i> | 水分控制× <i>F</i> 覆膜处理 | 1.13 NS     | 1.29 NS    | 0.86 NS  | 3.19 NS    |

注 同一列中不同字母分别表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ ); \*表示  $\alpha=0.05$  上水平差异显著; \*\*表示  $\alpha=0.01$  上水平差异显著; NS 表示差异不显著 (LSD 法)。下同。

## 2.2 番茄株高与茎粗

番茄苗期和开花坐果期生理指标如表 2 所示。由表 2 可知,苗期 W<sub>2</sub>NM 处理株高较 CKNM 处理增加了 7.4%,W<sub>1</sub>NM 处理茎粗较 CKNM 处理增加了 8.8%,但与其他处理差异均不显著 ( $P>0.05$ ),CKNM 处理在开花坐果期的株高和茎粗最大,茎粗显著高于其他处理 ( $P<0.05$ );覆膜滴灌番茄在苗期株高,开花坐果期株高和茎粗均随着灌水上限的增加而增大,与

CK 相比,W<sub>1</sub> 处理苗期株高增加了 6.1%,开花坐果期株高和茎粗均增加了 3.3%。

覆膜对番茄苗期和开花坐果期的株高影响显著 ( $P<0.01$ ),其余指标受覆膜与水分控制的影响不显著 ( $P>0.05$ )。W<sub>2</sub>NM 和 W<sub>3</sub>NM 处理株高在苗期较 W<sub>2</sub>M 和 W<sub>3</sub>M 处理分别提高了 15.9%和 17.5%,在开花坐果期株高提高了 26.3%和 27.6% ( $P<0.05$ )。W<sub>1</sub>M 处理在开花坐果期的茎粗比 W<sub>1</sub>NM 处理提高了 19.2%,且差异达到显著水平 ( $P<0.05$ )。

## 2.3 番茄产量、耗水量与水分生产效率

番茄产量和水分利用效率如表 3 所示。由表 3 可以看出,相比于不覆膜处理,覆膜滴灌番茄产量平均提高了 18.1%。番茄产量随灌水量的增加呈先增加后降低的趋势,不覆膜滴灌番茄 W<sub>2</sub>NM 处理的产量最高,较 W<sub>3</sub>NM、W<sub>1</sub>NM 和 CKNM 处理分别增加 5.1%、7.7%和 15.9%,但差异不显著 ( $P>0.05$ );覆膜滴灌番茄 W<sub>2</sub>M 处理的产量最高,较 W<sub>3</sub>M 和 W<sub>1</sub>M 处理分别增加 8.5%和 11.7%,均无显著性差异,但与 CKM 处理相比,W<sub>2</sub>M 处理的产量显著提高了 21.4% ( $P<0.05$ )。

番茄耗水量随灌水量的增加呈递增趋势,且 CK 显著高于 W<sub>2</sub> 和 W<sub>3</sub> 处理 ( $P<0.05$ )。在相同水分控制下,覆膜处理的耗水高于不覆膜处理,但差异不显著 ( $P>0.05$ )。

番茄水分生产效率 ( $WUE_{ET}$ ) 和灌溉水水分利用效率 ( $WUE_I$ ) 受水分控制影响显著 ( $P<0.05$ ), $WUE_{ET}$  和  $WUE_I$  随灌水量的增加呈递减趋势。相比于 CKNM 处理,W<sub>3</sub>NM 处理的  $WUE_{ET}$  和  $WUE_I$  分别显著提高了 79.6%和 83.1% ( $P<0.05$ );W<sub>2</sub>M 处理的  $WUE_{ET}$  为 502.5 kg/(hm<sup>2</sup> mm),相比于 CKM 处理,W<sub>2</sub>M 处理的  $WUE_{ET}$  显著提高了 63.7%,W<sub>3</sub>M 处理的  $WUE_I$  显著提高了 112.6% ( $P<0.05$ )。与不覆膜处理相比,覆膜滴灌番茄的  $WUE_{ET}$  较高,但差异不显著 ( $P>0.05$ )。对于  $WUE_I$ ,覆膜处理高于不覆膜处理,W<sub>2</sub>M 和 W<sub>3</sub>M 处理较 W<sub>2</sub>NM 和 W<sub>3</sub>NM 处理的  $WUE_I$  分别显著提高了 36.5%和 41.6% ( $P<0.05$ )。

表 3 番茄产量、耗水量、水分生产效率和灌溉水分利用效率

Table 3 Tomato yield, water consumption, water production efficiency and irrigation water use efficiency

| 处理                           |                   | 产量/(kg hm <sup>-2</sup> ) | ET/mm         | WUE <sub>ET</sub> /(kg hm <sup>-2</sup> mm <sup>-1</sup> ) | WUE <sub>V</sub> /(kg hm <sup>-2</sup> mm <sup>-1</sup> ) |
|------------------------------|-------------------|---------------------------|---------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 不覆膜                          | CKNM              | 63 774.5±2 757.64d        | 230.8±8.9ab   | 276.3±11.5d                                                | 323.1±14.0d                                               |
|                              | W <sub>1</sub> NM | 68 611.3±3 173.8cd        | 188.8±8.6bcd  | 363.4±16.8cd                                               | 427.5±19.8cd                                              |
|                              | W <sub>2</sub> NM | 73 918.6±986.9bcd         | 160.4±2.6d    | 460.8±5.8ab                                                | 537.2±7.2bc                                               |
|                              | W <sub>3</sub> NM | 70 345.5±4 465.9bcd       | 141.8±2.9d    | 496.1±29.8a                                                | 591.6±37.6b                                               |
| 覆膜                           | CKM               | 74 034.0±11 628.2bcd      | 241.2±0.4a    | 306.9±45.2cd                                               | 394.0±61.9d                                               |
|                              | W <sub>1</sub> M  | 80 430.5±6 094.8abc       | 211.1±10.8abc | 381.0±30.5bc                                               | 528.1±40.0bc                                              |
|                              | W <sub>2</sub> M  | 89 844.8±2 629.1a         | 178.8±5.9cd   | 502.5±14.7a                                                | 733.4±21.5a                                               |
|                              | W <sub>3</sub> M  | 82 778.4±12 605.9ab       | 164.9±0.8cd   | 502.0±72.4a                                                | 837.8±127.6a                                              |
| <i>F</i> 水分控制                |                   | 3.7*                      | 6.3*          | 23.6**                                                     | 27.1**                                                    |
| <i>F</i> 覆膜处理                |                   | 20.4**                    | 24.3**        | 1.5 NS                                                     | 28.6**                                                    |
| <i>F</i> 水分控制× <i>F</i> 覆膜处理 |                   | 0.2 NS                    | 0.2 NS        | 0.1 NS                                                     | 1.9 NS                                                    |

2.4 番茄品质

番茄品质指标如表 4 所示。由表 4 可知,不覆膜滴灌番茄还原性维生素 C 量、可溶性总糖量和糖酸比随灌水量增加逐渐降低,W<sub>3</sub>NM 处理的还原性维生素 C 比其他处理显著提高了 6.3%~29.7% ( $P<0.05$ ); W<sub>3</sub>NM 处理的可溶性总糖量比 W<sub>1</sub>NM 和 CKNM 处理分别显著提高了 12.3%和 21.0% ( $P<0.05$ ); 不同水

分控制间的糖酸比差异没有达到显著性水平 ( $P<0.05$ )。番茄可溶性固形物量随灌水量增加而先增加后降低, W<sub>2</sub>NM 处理的可溶性固定物量比 W<sub>1</sub>NM 和 CKNM 处理显著提高了 8.9%和 16.8% ( $P<0.05$ ), 与 W<sub>3</sub>NM 处理差异不显著 ( $P>0.05$ )。番茄可滴定酸量 CKNM 处理为 0.47%, 比其他处理显著增加了 23.7%~27.0% ( $P<0.05$ )。

表 4 番茄品质指标

Table 4 The quality index of tomato

| 处理                           |                   | 还原性维生素 C 量/(mg 10 <sup>-2</sup> g <sup>-1</sup> ) | 可溶性固形物量/%   | 可溶性总糖量/%    | 可滴定酸量/%     | 糖酸比         |
|------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 不覆膜                          | CKNM              | 17.93±0.48f                                       | 3.45±0.07e  | 2.19±0.01e  | 0.47±0.02a  | 4.62±0.18c  |
|                              | W <sub>1</sub> NM | 18.95±0.95e                                       | 3.70±0.03d  | 2.36±0.09d  | 0.38±0.04b  | 6.14±0.28cd |
|                              | W <sub>2</sub> NM | 21.88±0.07d                                       | 4.03±0.14c  | 2.53±0.07bc | 0.37±0.02b  | 6.84±0.61bc |
|                              | W <sub>3</sub> NM | 23.25±0.15c                                       | 3.91±0.10cd | 2.65±0.08b  | 0.38±0.02b  | 6.94±0.56bc |
| 覆膜                           | CKM               | 23.73±0.48c                                       | 4.30±0.15b  | 2.37±0.01d  | 0.27±0.02d  | 8.92±0.64a  |
|                              | W <sub>1</sub> M  | 25.63±0.03b                                       | 4.64±0.17a  | 2.46±0.17cd | 0.30±0.02cd | 8.29±1.14ab |
|                              | W <sub>2</sub> M  | 27.73±0.23a                                       | 4.83±0.14a  | 2.70±0.05ab | 0.28±0.05cd | 9.68±1.64a  |
|                              | W <sub>3</sub> M  | 28.23±0.88a                                       | 4.74±0.17a  | 2.83±0.12a  | 0.33±0.04bc | 8.75±1.28ab |
| <i>F</i> 水分控制                |                   | 111.3**                                           | 21.2**      | 31.1**      | 2.2NS       | 2.5NS       |
| <i>F</i> 覆膜处理                |                   | 741.1**                                           | 264.6**     | 17.6**      | 73.5**      | 44.1**      |
| <i>F</i> 水分控制× <i>F</i> 覆膜处理 |                   | 2.6NS                                             | 0.3NS       | 0.3NS       | 7.6**       | 1.7NS       |

覆膜滴灌番茄还原性维生素 C 量和可溶性总糖量随灌水量增加逐渐降低, W<sub>3</sub>M 处理的还原性维生素 C 量和可溶性总糖量分别比 CKM 处理显著提高 19.0%和 19.4% ( $P<0.05$ )。W<sub>2</sub>M 处理番茄可溶性固形物量和糖酸比分别比 CKM 处理提高了 12.3%和 8.5%, 其中,可溶性固形物量的差异达到显著水平 ( $P<0.05$ )。

覆膜滴灌番茄的还原性维生素 C 量和可溶性固形物量分别比不覆膜处理平均提高了 28.9%和 22.8%, 且差异达到显著性水平 ( $P<0.05$ ); 覆膜滴灌番茄的可溶性总糖量比不覆膜处理增加了 4.2%~8.2%, 在 CK 和 W<sub>3</sub>处理的差异达到显著性水平 ( $P<0.05$ ); 相比于不覆膜处理,覆膜滴灌番茄

的可滴定酸量平均降低了 37.0%, 二者在 CK 和 W<sub>2</sub>处理的可滴定酸量差异达到了显著水平 ( $P<0.05$ ); 与不覆膜处理相比,覆膜滴灌番茄的糖酸比平均提高了 48.9%, 相比于 CKNM 处理, CKM 处理的糖酸比显著提高了 93.1% ( $P<0.05$ )。

3 讨论

水分控制对番茄在苗期和开花坐果期的株高和茎粗影响不显著,与张新燕等<sup>[21]</sup>试验结果相似。覆膜对番茄生育前期株高影响显著,刘伟等<sup>[22]</sup>认为膜下滴灌可以改善土壤温度和水分条件,提供了有利于作物苗期生长的土壤水、热环境。王丽娟等<sup>[23]</sup>发现以当地



水肥施用量为 CK 进行水肥减量会造成减产, 当水肥减少 20% 时番茄减产最少且品质最好, 而李耀霞等<sup>[24]</sup>认为, 80%FC 的灌水上限可促进番茄增产 15.4%, 节水 54.9%。本试验发现, 在相同覆膜条件下, 3 种灌溉处理 ( $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ ) 对应的番茄产量差异不显著, 但  $W_2$  灌水处理的产量与  $WUE_{ET}$  均为最高值, 这可能是由于地区水肥施用量不同、番茄品种等原因导致<sup>[23]</sup>。

灌水量大带来的稀释作用<sup>[25]</sup>使番茄果实中的还原性维生素 C 量降低, 这也是本研究中还原性维生素 C 与灌水量呈反比的原因, 与洪霞<sup>[26]</sup>关于温室番茄产量-品质-环境效应组合评价模型构建及其水肥效应的研究中得出的维生素 C 与灌水量呈负相关关系的结论一致。适宜的亏水能提高番茄果实中蔗糖合成酶和蔗糖磷酸合成酶的活性, 降低酸性转化酶和中性转化酶的活性, 促进蔗糖的合成并抑制其分解<sup>[27]</sup>, 因此, 本研究中  $W_2M$  处理的番茄可溶性总糖量和糖酸比最大。在一定范围内, 水分亏缺有利于番茄可溶性固形物的积累, 但同时也会增加可滴定酸量<sup>[9]</sup>, 类似的, 本研究中番茄可滴定酸量为  $W_3$  处理最大, 控制灌水上限后的番茄可溶性固形物量比当地常用的滴灌制度得到显著提高。

对于大田玉米滴灌, 覆膜能显著减少土壤蒸发量, 同时由于产量提高会增大作物蒸腾量, 故覆膜与不覆膜滴灌的作物耗水量相差不大, 覆膜滴灌作物耗水量甚至略高于不覆膜处理<sup>[18]</sup>。对于设施番茄, 相比于不覆膜处理, 覆膜滴灌番茄的土壤蒸发减小幅度低于大田条件, 而 16.1%~21.5% 的增产表明番茄蒸腾量提高了, 故本试验中, 覆膜滴灌番茄的耗水量高于不覆膜处理, 但覆膜条件下的  $WUE_{ET}$  与  $WUE_1$  仍然高于不覆膜处理。由于覆膜可以提高土壤温度, 形成良好的水肥条件, 促进土壤养分的释放, 提高土壤酶活性和植物根系活力<sup>[28]</sup>, 故番茄还原性维生素 C 量、可溶性固形物量、可溶性总糖量和糖酸比也均得到显著提高 ( $P<0.05$ )。

## 4 结 论

1) 覆膜处理可有效提高土壤表层含水率, 各灌水处理含水率表现为  $CK>W_1$  处理  $>W_2$  处理  $>W_3$  处理。覆膜后番茄产量、 $WUE_{ET}$  和  $WUE_1$  显著提高, 产量和  $WUE_{ET}$  在  $W_2$  灌水处理达到最大。

2) 减少灌水量并覆膜可有效改善番茄品质。覆膜条件下番茄还原性维生素 C、可溶性固形物、可溶性糖量和糖酸比均显著高于不覆膜处理,  $W_2M$  处理的可溶性固形物量和糖酸比最大。

3) 对于宁夏地区设施番茄种植, 综合考虑

$WUE_{ET}$ 、产量和品质指标, 番茄在覆膜条件下, 设置 80%FC 灌水上限可获得较高产量和较好的品质。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 全国水利发展统计公报[R]. 2019. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Statistic Bulletin on China Water Activities[R]. 2019.
- [2] 刘世伟. 宁夏永宁县设施番茄病害发生情况调查及防治策略探讨[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018. LIU Shiwei. Investigation and control strategy of tomato plant disease in Yongning county, Ningxia[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.
- [3] 杨丽娟, 张玉龙, 杨青海, 等. 灌溉方法对番茄生长发育及吸收能力的影响[J]. 灌溉排水, 2000, 19(3): 58-61. YANG Lijuan, ZHANG Yulong, YANG Qinghai, et al. Effects of irrigation method on growth, development and activity of tomato roots[J]. Irrigation and Drainage, 2000, 19(3): 58-61.
- [4] 王亚芳, 吕昊峰, 杜九月, 等. 灌溉方式和秸秆还田对设施番茄田  $CO_2$  排放的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 76-81. WANG Yafang, LYU Haofeng, DU Jiuyue, et al. Effect of irrigation and straw returning on soil  $CO_2$  emissions in greenhouse tomato[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(17): 76-81.
- [5] MARINO S, ARIA M, BASSO B, et al. Use of soil and vegetation spectroradiometry to investigate crop water use efficiency of a drip irrigated tomato [J]. European Journal of Agronomy, 2014, 59: 67-77.
- [6] COOLONG T, SURENDRAN S, WARNER R. Evaluation of irrigation threshold and duration for tomato grown in a silt loam soil[J]. Hort Technology, 2011, 21(4): 466-473.
- [7] 费良军, 汪爱科, 王龙飞, 等. 日光温室基质栽培樱桃西红柿滴灌试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(12): 1 070-1 076. FEI Liangjun, WANG Aike, WANG Longfei, et al. Experiment on substrate cultivation of cherry tomatoes in sunlight greenhouse with drip irrigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(12): 1 070-1 076.
- [8] 张志云, 赵伟霞, 李久生. 灌水频率和施氮量对番茄生长及水氮淋失的影响[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13(2): 81-90. ZHANG Zhiyun, ZHAO Weixia, LI Jiusheng. Effects of drip irrigation frequency and nitrogen fertilizer on nitrate leaching and tomato growth[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015, 13(2): 81-90.
- [9] 李欢欢, 刘浩, 孙景生, 等. 水肥耦合对温室番茄产量、水分利用效率和品质的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(9): 886-891. LI Huanhuan, LIU Hao, SUN Jingsheng, et al. Effects of water and fertilizer coupling on yield, water use efficiency and quality of tomato

- in greenhouse[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2018, 36(9): 886-891.
- [10] 王文娟. 日光温室番茄灌溉制度及水肥耦合效应研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- WANG Wenjuan. Study on the irrigation regime and water-fertilizer coupling of tomato in solar greenhouse[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016.
- [11] DU Yadan, CAO Hongxia, LIU Shiquan, et al. Response of yield, quality, water and nitrogen use efficiency of tomato to different levels of water and nitrogen under drip irrigation in Northwestern China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(5): 1 153-1 161.
- [12] JAYAKUMAR M, JANAPRIYA S, SURENDRAN U. Effect of drip fertigation and polythene mulching on growth and productivity of coconut (*Cocos nucifera* L.), water, nutrient use efficiency and economic benefits[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 182: 87-93.
- [13] YU Yueyuan, TURNER Neil C, GONG Yanhong, et al. Benefits and limitations to straw- and plastic-film mulch on maize yield and water use efficiency: A meta-analysis across hydrothermal gradients[J]. *European Journal of Agronomy*, 2018, 99: 138-147.
- [14] JIA Hongchang, ZHANG Yong, TIAN Shiyan, et al. Reserving winter snow for the relief of spring drought by film mulching in northeast China[J]. *Field Crops Research*, 2017, 209: 58-64.
- [15] 王京伟, 牛文全, 许健, 等. 覆膜滴灌对日光温室甜瓜土壤环境及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(6): 232-241.
- WANG Jingwei, NIU Wenquan, XU Jian, et al. Effects of drip irrigation under plastic film on muskmelon soil environment and yield in greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(6): 232-241.
- [16] 王乐, 何平如, 张红玲, 等. 秸秆深埋和覆膜对土壤水盐及番茄产量的影响[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(3): 372-378.
- WANG Le, HE Pingru, ZHANG Hongling, et al. Effects of straw burying and film mulching on soil water-salt and yield of tomato[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(3): 372-378.
- [17] 孔德杰, 郑国宝, 张源沛, 等. 宁夏设施番茄膜下滴灌条件下耗水规律和水分利用效率[J]. *西北农业学报*, 2011, 20(1): 119-123.
- KONG Dejie, ZHENG Guobao, ZHANG Yuanpei, et al. Research of water consumption regularity with drip irrigation under mulch of greenhouse tomato in Ningxia[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2011, 20(1): 119-123.
- [18] 刘洋, 栗岩峰, 李久生, 等. 东北半湿润区膜下滴灌对农田水热和玉米产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(10): 93-104, 135.
- LIU Yang, LI Yanfeng, LI Jiusheng, et al. Effects of mulched drip irrigation on water and heat conditions in field and maize yield in sub-humid region of Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(10): 93-104, 135.
- [19] 郭金强, 王肖娟, 彭擎宇, 等. 膜下滴灌加工番茄田间小气候的特征[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2009, 27(3): 295-297.
- GUO Jinqiang, WANG Xiaojuan, PENG Jingyu, et al. A study on field microclimate characteristics of processing tomato with drip irrigation under membranes[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2009, 27(3): 295-297.
- [20] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- LI Hesheng. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [21] 张新燕, 王浩翔, 牛文全. 不同水氮供应模式对设施番茄生长及产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(11): 55-60.
- ZHANG Xinyan, WANG Haoxiang, NIU Wenquan. The effects of different water-nitrogen couplings on growth and yield of greenhouse tomato[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(11): 55-60.
- [22] 刘伟, 田德龙, 侯晨丽, 等. 膜下滴灌对春小麦水热条件及产量品质的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(11): 29-37.
- LIU Wei, TIAN Delong, HOU Chenli, et al. The dynamics of soil moisture and temperature under film-mulched drip irrigation and its impact on yield and quality of spring wheat[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(11): 29-37.
- [23] 王丽娟, 孙嘉星, 韩卫华, 等. 水肥减量对土壤硝态氮和番茄产量品质的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(3): 1-7.
- WANG Lijuan, SUN Jiaying, HAN Weihua, et al. The effects of reducing irrigation and fertilization on soil nitrate, yield and quality of greenhouse tomato[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(3): 1-7.
- [24] 李耀霞, 郁继华, 张国斌, 等. 灌水上限和施肥量对温室番茄生长发育的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(2): 42-51.
- LI Yaoshia, YU Jihua, ZHANG Guobin, et al. Effects of irrigation upper limit and fertilizer application on growth and development of tomato in greenhouse[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2020, 48(2): 42-51.
- [25] 王秀康, 杜常亮, 邢金金, 等. 基于水肥供应条件下温室番茄品质性状的主成分分析[J]. *分子植物育种*, 2017, 15(2): 698-704.
- WANG Xiukang, DU Changliang, XING Jinjin, et al. Effects of irrigation and fertilization on fruit quality of greenhouse tomatoes: Principal component analysis[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2017, 15(2): 698-704.
- [26] 洪霞. 温室番茄产量-品质-环境效应综合评价模型构建及其水肥响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- HONG Xia. Combination evaluation model of tomato yield quality environment effect and its response to water and fertilizer in greenhouse[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.
- [27] 周继莹, 成自勇, 王峰, 等. 覆膜沟灌条件下不同水氮处理对番茄产量与品质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(4): 43-49.
- ZHOU Jiying, CHENG Ziyong, WANG Feng, et al. Effects of water

- and nitrogen on yield and fruit quality of tomato under furrow irrigation and plastic film mulching cultivation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(4): 43-49.
- [28] 孙梦媛, 刘景辉, 赵宝平, 等. 全覆膜垄作种植对旱作马铃薯生长和土壤特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 262-269, 276.
- SUN Mengyuan, LIU Jinghui, ZHAO Baoping, et al. Effects of full-film mulching and ridging planting on the rainfed potato growth and soil characteristics[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5): 262-269, 276.

## Combined Effects of Film Mulching and Water-controlled Drip Irrigation on Yield and Quality of Facility-cultivated Tomato in Ningxia

GUO Bin<sup>1</sup>, MO Yan<sup>2</sup>, WU Zhongdong<sup>1\*</sup>, ZHANG Yanqun<sup>2</sup>, GONG Yiteng<sup>3</sup>,  
GONG Shihong<sup>2</sup>, WANG Jiandong<sup>4</sup>, LI Qiaoling<sup>2</sup>

(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. Department of irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

3. CIECC Overseas Consulting Co., Ltd, Beijing 100048, China; 4. Institute of Environment and Sustainable

Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 10004, China)

**Abstract:** 【Background】Tomato is a vegetable grown widely across Ningxia in greenhouses with the soil mulched. Drip irrigation is the main irrigation for greenhouse crops, but excessive irrigation is common resulting in not only water waste but also environmental contamination due to agrochemicals leaching. Increasing water use efficiency and reducing detrimental impact of the mulching film is hence critical to sustaining tomato production in Ningxia. 【Objective】The purpose of this study was to find an optimal drip-irrigation scheduling and film mulching in attempts to provide guidance for improving water use efficiency while in the meantime increasing yield of the greenhouse tomato in Ningxia. 【Method】A two-year experiment was conducted in a solar greenhouse with the soil either not mulched (M) or mulched (NM) with plastic film. Added to these were three irrigation levels by keeping the soil moisture at 100% ( $W_1$ ), 80% ( $W_2$ ) and 70% of the field capacity respectively, with the irrigation used by local farmers (123% of the field capacity) taken as the control (CK). 【Result】It was the film much rather than the irrigation amount that affected the growth of plant height and stem diameter from seedling stage to flowering and fruit setting stage at significant level ( $P<0.01$ ). With an increase in irrigation amount, the tomato yield increased first followed a decline. The yield and water use efficiency of  $W_2M$  were 89 844.8 kg/hm<sup>2</sup> and 502.5 kg/(hm<sup>2</sup> mm) respectively, up 21.4% and 63.7% respectively from CKM. Compared with not mulching, mulching increased the average yield by 18.1%, reductive vitamin C and soluble solid content by 28.9% and 22.8% respectively, all at significant level ( $P<0.05$ ). The combined effect of water control and film mulch on reductive vitamin C, soluble solids and total soluble sugar was significant at  $P<0.01$ , and the effect of film mulching on titratable acid and sugar acid ratio was significant at  $P<0.05$ . Compared with CK,  $W_3$  increased the total soluble sugar content and the sugar acid ratio by 4.2%~8.2% and 48.9% respectively, both at significant level ( $P<0.05$ ), while reducing the titratable acid content by 37%.  $W_2M$  increased the soluble solid content and the sugar acid ratio most, by 12.3% and 8.5% respectively, compared to CK. Film mulching also affected soluble sugar and soluble acid content at significant level ( $P<0.05$ ). 【Conclusion】Our two-year experiment showed that keeping the soil moisture not exceeding 80% of the field capacity using drip irrigation with the soil mulched was most effective to increase yield and quality of the greenhouse tomato in Ningxia.

**Key words:** film mulching; drip irrigation; tomato; yield and fruit quality; greenhouse

责任编辑: 陆红飞