

# 河西走廊辣椒滴灌水盐调控施肥灌溉制度研究

韩晓宇<sup>1,2</sup>, 万书勤<sup>1\*</sup>, 李晓彬<sup>1</sup>, 康跃虎<sup>1,2</sup>, 冯志文<sup>3</sup>

(1. 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;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 内蒙古大学 马铃薯工程技术研究中心, 呼和浩特 010021)

**摘 要:**【目的】研究河西走廊地区辣椒滴灌农业生产水盐调控与施肥灌溉制度。【方法】在甘肃省金昌市八一农场, 通过控制滴头正下方20 cm深度处的土壤水基质势下限不低于-20 kPa进行滴灌水盐调控灌溉, 设计了5个施肥比例的施肥灌溉处理, 分别为农场滴灌条件下基于测土配方施肥的辣椒施肥量的20%、40%、60%、80%与100%, 研究了滴灌水盐调控施肥灌溉对辣椒生长、产量和土壤盐分养分垂直剖面分布特征的影响。【结果】经过2 a试验研究得到:①0~100 cm整个土体的盐分基本维持平衡, 土壤盐分不增加。②在辣椒生育期内硝态氮主要分布在0~40 cm深的根系分布层, 70 cm深度以下硝态氮浓度低且稳定, 基本不存在硝态氮的深层渗漏淋失。③辣椒的株高、地上部分鲜质量均随着施肥比例的增加而增加, 当施肥比例为100%时辣椒的产量达到最大值, 2 a辣椒的平均产量达到26 595.8 kg/hm<sup>2</sup>。④滴灌高频施肥灌溉有利于提高辣椒的灌溉水利用效率和肥料偏生产力, 2 a平均灌溉水利用效率为5.1 kg/m<sup>3</sup>, 肥料偏生产力为30.1 kg/kg, 均高于农场管理方法下滴灌辣椒的值。【结论】在河西走廊辣椒滴灌生产中, 推荐滴头正下方20 cm深度土壤水基质势阈值控制在-20 kPa以上指导水盐调控灌溉, 总施肥量设定为100%测土配方施肥(全生育期N 360 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 195 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O 375 kg/hm<sup>2</sup>)进行施肥灌溉水肥一体化管理。

**关键词:**滴灌施肥灌溉; 硝态氮; 灌溉水利用效率; 肥料偏生产力; 辣椒; 土壤盐分

中图分类号:S275

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.gggs.20180106

韩晓宇, 万书勤, 李晓彬, 等. 河西走廊辣椒滴灌水盐调控施肥灌溉制度研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(12): 35-45.

## 0 引 言

河西走廊属于大陆性干旱气候, 日照时间长但降水稀少, 自古以来就要依靠灌溉发展农业。由于滴灌具有明显的节水、省肥、增产、优质、省工等优点<sup>[1-2]</sup>, 在河西走廊尤其是统一管理的国营农场得到大面积应用推广<sup>[3]</sup>。近年来河西走廊地区干制辣椒种植面积不断增加, 正在成为该地区的农业支柱产业<sup>[4]</sup>。但辣椒根系不发达, 根量少, 入土浅, 土壤干旱或者水分过多都易造成根系生长不良, 肥多也易烧根<sup>[5]</sup>, 恰当的水肥管理是辣椒高产的关键。目前, 滴灌在当地国营农场辣椒生产中被普遍应用, 但由于缺乏配套的辣椒滴灌施肥灌溉制度, 管理人员仍按照传统地面灌溉周期、灌水量、施肥量和施肥方法进行灌溉、施肥<sup>[6-7]</sup>。例如: 磷钾肥和大部分氮肥底施, 辣椒整个生育期地面撒施肥料追肥1~2次或者1次性加入大量肥料进行2~3次滴灌施肥灌溉追肥<sup>[8-9]</sup>, 易造成水分、养分深层渗漏损失, 也不利于辣椒增产和品质提高。

另外, 河西走廊属于典型的干旱区, 土壤中积累着一定的盐分, 灌溉水中或多或少含有可溶性盐, 灌溉时若没有足够的淋洗水量, 盐分易在土壤中积累, 发生盐碱化; 若淋洗盐分的水量过大, 不但浪费水资源, 在一些地区甚至会造成地下水位上升, 发生土壤次生盐渍化。因此, 河西走廊地区辣椒滴灌施肥灌溉制度制定时, 还必须考虑水盐调控, 以保证土壤盐分平衡, 不产生盐分积累。

收稿日期: 2018-02-08

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0400105; 2016YFC0501304)

作者简介: 韩晓宇(1992-), 女。硕士研究生, 主要从事农田水循环与节水灌溉研究。E-mail: hanxy.15s@igsnrr.ac.cn

通信作者: 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

控制作物根区土壤水基质势阈值是灌溉制度制定常用的一种方法<sup>[10]</sup>。康跃虎<sup>[11]</sup>经过长期系统地试验研究,发现华北地区控制滴头正下方 20 cm 处的土壤水基质势在-35~-25 kPa,能够使作物根系分布层保持良好的水分状况,达到作物高产和高水分利用效率。前人研究<sup>[12-14]</sup>发现,当土壤水基质势下限控制在-20 kPa 以上时,整个土壤剖面盐分可以维持平衡,并且作物获得高产。以地面灌溉作物高产或者测土配方施肥量为基础,布置不同施肥比例田间试验滴灌施肥灌溉制度,在青海、内蒙古等地的研究发现,滴灌高频施肥灌溉条件下,枸杞和马铃薯的施肥量为当地推荐施肥量的 70%~80%左右时,产量与肥料偏生产力均达到较高水平<sup>[15-17]</sup>。

针对河西走廊地区辣椒生产中对滴灌水盐调控施肥灌溉制度的迫切需求,通过负压计指导灌溉,在当地农场滴灌辣椒推荐施肥量的基础上,设置不同的施肥比例处理,研究辣椒生长、产量、水肥利用以及土壤盐分平衡的响应,以期提出河西走廊地区辣椒滴灌水盐调控施肥灌溉制度,指导当地农户科学地进行辣椒滴灌施肥灌溉管理。

# 1 研究区与研究方法

## 1.1 试验区概况

试验于 2015—2016 年在甘肃省金昌市双湾镇八一农场天生炕分场进行(北纬 38°36′,东经 102°23′,海拔 1 390 m)。金昌市位于河西走廊东段,气候类型属于大陆性温带干旱气候,光照充足,年平均日照总时间 2 981.6 h;年平均降水量仅为 139.8 mm,且集中在夏季,6—8 月降水占全年降水量 66%;平均蒸发量 2 094.2 mm,是降水量的 15 倍。试验区位于金昌市东北部,靠近荒漠化严重的民勤县与内蒙古自治区的阿拉善右旗,是具有悠久历史的灌区。灌溉水为地下水,含沙量大,电导率为 0.7 dS/m,pH 值为 7.9。土壤主要理化性质如表 1 所示,试验区内土壤为粉砂壤土,以粉粒(0.002~0.05 mm)为主,整个剖面土壤体积质量较大,在 1.37~1.66 g/cm<sup>3</sup>之间,且 0~40 cm 深度的土壤体积质量较低。土壤表层 0~40 cm 土壤饱和泥浆提取液电导率(*EC<sub>e</sub>*)较低,平均为 1.67 dS/m,40 cm 深度以下平均土壤 *EC<sub>e</sub>* 达到 4.94 dS/m。土壤中有效氮与有效磷量表现为 0~30 cm 土层较高,有效氮量平均为 20.30 mg/L,平均有效磷量为 31.67 mg/L,30 cm 深度以下有效氮与有效磷量低,平均为 7.62 mg/L 与 23.83 mg/L。有效钾在土壤剖面中呈现波动分布,0~20 cm 土层有效钾量较高,为 12.71 mg/L,20~80 cm 有效钾量降低,平均为 3.92 mg/L,80 cm 以下土层有效钾量上升,平均达到 10.83 mg/L。

表 1 试验区土壤主要理化性质

| 土层<br>深度/cm | 土壤物理性质    |               |           |               |                                | 土壤化学性质                                           |      |                                |                                |                                |
|-------------|-----------|---------------|-----------|---------------|--------------------------------|--------------------------------------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|             | 不同粒径比例/%  |               |           | 土壤质地<br>(美国制) | 体积质量/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | <i>EC<sub>e</sub></i> /<br>(dS·m <sup>-1</sup> ) | pH 值 | 有效氮量/<br>(mg·L <sup>-1</sup> ) | 有效磷量/<br>(mg·L <sup>-1</sup> ) | 有效钾量/<br>(mg·L <sup>-1</sup> ) |
|             | <0.002 mm | 0.002~0.05 mm | 0.05~2 mm |               |                                |                                                  |      |                                |                                |                                |
| 0~10        | 11.5      | 60.7          | 27.8      | 粉砂壤土          | 1.51                           | 1.54                                             | 8.48 | 16.24                          | 0.37                           | 14.83                          |
| 10~20       | 11.5      | 59.6          | 28.8      | 粉砂壤土          | 1.46                           | 1.75                                             | 8.49 | 20.23                          | 0.31                           | 10.59                          |
| 20~30       | 11.5      | 59.9          | 28.6      | 粉砂壤土          | 1.45                           | 1.56                                             | 8.56 | 24.42                          | 0.27                           | 3.95                           |
| 30~40       | 11.3      | 61.5          | 27.1      | 粉砂壤土          | 1.37                           | 1.84                                             | 8.07 | 10.01                          | 0.24                           | 2.71                           |
| 40~50       | 24.1      | 73.5          | 2.4       | 粉砂壤土          | 1.61                           | 3.56                                             | 7.97 | 8.23                           | 0.25                           | 1.63/                          |
| 50~60       | 25.2      | 73.9          | 0.8       | 粉砂壤土          | 1.63                           | 4.30                                             | 7.80 | 5.65                           | 0.23                           | 3.12                           |
| 60~80       | 15.6      | 77.6          | 4.5       | 粉砂壤土          | 1.65                           | 5.82                                             | 7.86 | 4.66                           | 0.24                           | 8.18                           |
| 80~100      | 16.2      | 81.9          | 6.1       | 粉砂壤土          | 1.63                           | 6.63                                             | 8.02 | 6.84                           | 0.24                           | 10.85                          |
| 100~120     | 18.0      | 82.8          | 0.3       | 粉砂壤土          | 1.66                           | 4.39                                             | 8.04 | 10.35                          | 0.23                           | 10.81                          |
| 平均          | 16.2      | 71.1          | 12.7      |               | 1.55                           | 3.49                                             | 8.14 | 9.57                           | 0.26                           | 7.41                           |

试验区辣椒生长期 2015—2016 年的降雨量与蒸发量如图 1 所示。由图 1 可知,2015 年降水相对充沛,累计降雨量达 116.5 mm,64% 的降雨集中在 8—9 月,其中在辣椒生育后期 9 月 6 日的次降雨量达 32 mm;2016 年辣椒生长期 2016 年累计降雨量为 105 mm,同样集中在 8—9 月,占比 46%,在辣椒生育中期 7 月 13 日的次降雨量超过了 40 mm。2015—2016 年的累计蒸发量分别为 2 938 mm 和 3 323 mm,分别是降水量的 25 倍与 32 倍。

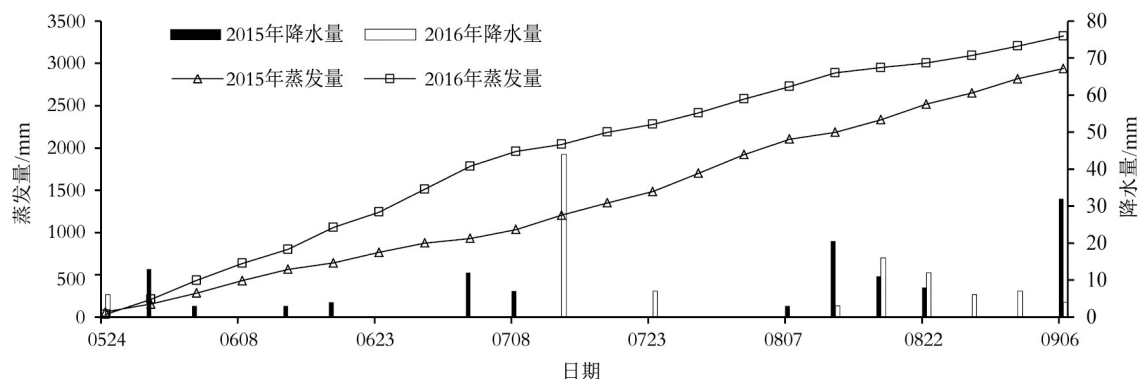


图1 辣椒生长期降雨量及蒸发量

## 1.2 试验设计

试验选用辣椒品种为美国红,是主产于新疆北部以及甘肃中西部的中早熟品种。当地辣椒生长期为5月中旬到9月中旬,生育期115 d左右。

试验以控制滴头正下方20 cm处土壤水基质势不低于-20 kPa指导水盐调控灌溉,以农场滴灌条件辣椒推荐施肥量(基于农场测土配方施肥,全

表2 磷酸二氢钾、尿素、硫酸钾的日追肥量

| 处理   | 磷酸二氢钾/g | 尿素/g | 硫酸钾/g |
|------|---------|------|-------|
| 100% | 86      | 178  | 107   |
| 80%  | 69      | 142  | 86    |
| 60%  | 52      | 107  | 64    |
| 40%  | 34      | 71   | 43    |
| 20%  | 17      | 36   | 21    |

生育期N施量360 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>施量195 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O施量375 kg/hm<sup>2</sup>)为基础,设计了5个滴灌施肥灌溉比例,分别为20%、40%、60%、80%和100%。不施底肥(种肥),养分全部采用滴灌进行追施。辣椒定苗后进行滴灌施肥灌溉,辣椒拉秧前20 d结束施肥灌溉,施肥灌溉时间按照90 d计算。将总施肥量除以90 d,计算出每日施肥灌溉需要加入的肥料量(表2),每次施肥前将日施肥量乘以灌溉间隔时间,计算出这次所需的施肥量加入施肥罐(每个肥料罐控制同一处理的3个重复小区,面积为204.75 m<sup>2</sup>)中随灌溉进行追肥。

## 1.3 灌溉与农艺措施

辣椒采用覆膜滴灌的栽培模式,采用宽膜1.4 m,铺设后膜面宽1.2 m,辣椒交错种植在距离滴灌带0.15 m的两侧,水平株距0.3 m,行距0.3 m,1膜种植4行(小行距0.3 m,大行距0.4 m)(图2)。每个小区宽6.5 m,铺9条滴灌带,4个宽膜(8条滴灌带)+1窄膜(最后0.9 m布置1条滴灌带,窄膜,铺设后膜面宽0.7 m,种2行辣椒),每个小区面积为10.5 m×6.5 m,每个处理重复3次,共15个试验小区,试验区总面积为33 m×34.5 m。

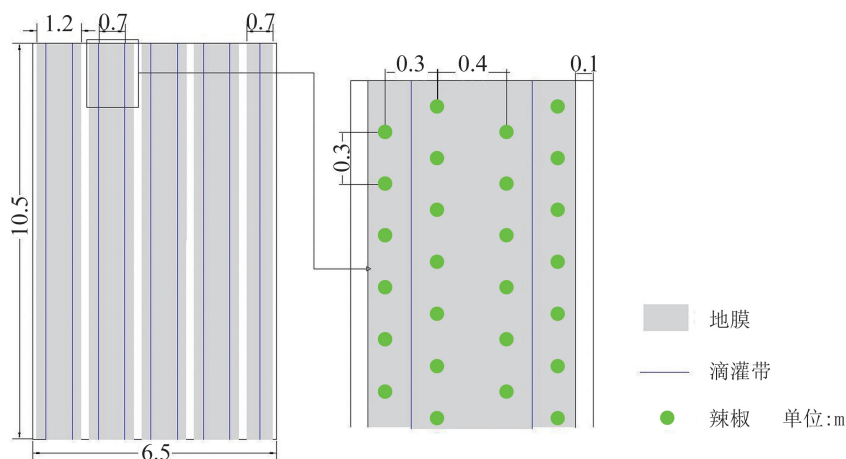


图2 试验小区布置与辣椒栽培模式

辣椒定植和缓苗期统一灌溉,每次灌溉保证水平湿润锋到达距植株水平距离0.1 m以上。当滴头正下方20 cm深度处土壤水基质势下限降低到-20 kPa开始灌溉,每次灌水量8 mm,随水进行施肥。灌水后观察负压计读数,如果土壤水基质势升高到-10 kPa,则停止灌溉,如果仍低于-10 kPa,再灌水4 mm,一直到土壤水基质势升高到-10 kPa,结束灌溉。补充灌溉不进行施肥。

1.4 测定项目与方法

1)降雨与蒸发。在试验区中心位置,按照气象站观测规范,安装雨量筒和直径为20 cm的蒸发皿,测定降雨量和每天水面蒸发量。

2)土壤水基质势。在每个处理的第2个重复试验小区中间位置,某一滴头正下方20 cm处理设1支负压计,每天08:30和15:00定时观测负压计读数,用以指导灌溉。

3)辣椒生长指标及产量调查。辣椒定植后,每个小区选中间4行辣椒取样,测定株高、茎粗、地上部分鲜质量等指标。从辣椒定苗至收获,每30 d测定1次,每个小区取3株。当全田辣椒红果率达到90%以上时1次性收获,每个试验小区保留最中间4行辣椒称质量测产。

4)土壤盐分和养分。在辣椒定苗后,辣椒生育期内每隔30 d左右、停止灌溉10 d,所有处理统一取土,用于分析土壤剖面盐分和养分分布状况。取样点位置垂直于滴灌带,向膜间距离滴头水平距离7、14、21、28、35 cm,向膜中距离滴头水平距离0、7、14、21、28 cm取土,共10个位点。取样深度为0~10、10~20、20~30、30~40、40~60、60~80、80~100 cm,共7个深度。土样经过风干、碾细、过筛(1 mm孔径)后,装入密闭自封袋备用。采用国际通用的方法将土样制作成饱和泥浆(USDA, 1954),用DT5-1离心机(北京时代北利离心机有限公司)离心获得饱和泥浆提取液。用DDS-11A电导率仪测定饱和泥浆提取液的电导率( $EC_e$ ),文中土壤盐分均用 $EC_e$ 表示。采用紫外分光光度计测定饱和泥浆提取液中的硝态氮量。

5)灌溉水利用效率(IWUE)计算式为:

$$IWUE=Y/I,$$
 (1)

式中: $Y$ 为辣椒产量(kg/hm<sup>2</sup>); $I$ 为灌水量(m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)。

6)肥料偏生产力(PFP)计算式为:

$$PFP=Y/F,$$
 (2)

式中: $F$ 为所施肥料的养分量,即N+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+K<sub>2</sub>O的养分量(kg/hm<sup>2</sup>)。

1.5 数据处理及分析

采用Excel 2010对数据进行处理与绘图,用IBM SPSS 19.0软件对数据进行差异显著性检验。土壤盐分和养分在分析数据时采用水平加权平均值法,加权平均值=Σ(样品含量×水平距离/整个水平范围)。文中平均值均指加权平均值。

2 结果与分析

2.1 灌水量与土壤水分状况

由表3可知,不同时期辣椒灌水量的差别较大,其中5—6月辣椒缓苗阶段,各处理灌水量较少,平均为其总灌水量的12%(2015年)和15%(2016年);7月辣椒进入营养生长与生殖生长并进阶段,各处理灌水量明显增加,其中2015年7月和8月各处理灌水量平均占其总灌水量的44%和44%,2016年7月和8月各处理灌水量平均占其总灌水量的48%和34%。

表3 2015年与2016年辣椒的灌水情况

| 年份   | 处理   | 灌水量/mm |      |       |       | 总灌水量/mm | 灌溉次数/次 | 灌溉周期/d |
|------|------|--------|------|-------|-------|---------|--------|--------|
|      |      | 5月     | 6月   | 7月    | 8月    |         |        |        |
| 2015 | 20%  | -      | 48.6 | 175.7 | 159.9 | 384.2   | 35     | 2.4    |
|      | 40%  | -      | 34.0 | 110.7 | 113.8 | 258.5   | 23     | 4.5    |
|      | 60%  | -      | 39.4 | 127.5 | 143.9 | 310.8   | 32     | 3.3    |
|      | 80%  | -      | 45.4 | 130.7 | 136.9 | 313.0   | 28     | 3.7    |
|      | 100% | -      | 26.6 | 160.0 | 154.8 | 341.4   | 33     | 3.2    |
| 2016 | 20%  | 12.4   | 44.4 | 114.9 | 47.6  | 219.3   | 19     | 5.8    |
|      | 40%  | 10.6   | 50.6 | 172.9 | 150.0 | 384.1   | 35     | 3.1    |
|      | 60%  | 10.7   | 42.8 | 115.5 | 87.5  | 256.5   | 21     | 5.2    |
|      | 80%  | 8.5    | 48.5 | 202.6 | 159.7 | 419.3   | 37     | 3.0    |
|      | 100% | 10.4   | 67.8 | 257.6 | 195.8 | 531.6   | 41     | 2.7    |

辣椒灌水量随着施肥比例的增加有增加的趋势,尤其是在相对干旱的2016年(表3)。这主要是因为研究区辣椒生育期降雨量主要集中在8月之后,5—7月辣椒缓苗、开花坐果期和结果初期主要依靠灌溉满足其生长发育。本研究辣椒定苗后就开始进行施肥灌溉,施肥比例高的处理,有利于辣椒生长发育,辣椒长势越好其生长耗水越大,相应地又提高了灌溉频率和灌水量。

需要说明的是,2015年20%处理的灌水量达到384.2 mm,与100%处理的灌水量相当,这主要是因为土壤空间变异性的影响。考虑到该处理的数据不具有普遍性,在数据分析时剔除了2015年20%处理的数据。

图3表示2 a辣椒生育期内不同施肥比例处理08:30土壤水基质势的变化(图中直线为灌溉阈值)。从图3可以发现,所有处理在辣椒施肥灌溉阶段的大部分时间内,土壤水基质势都保持在-20 kPa之上。其中在2015年8月初与2016年7月土壤水基质势出现低于-20 kPa的情况,这主要是由于负压计读数采用人工定时观测,有时15:00的土壤水基质势未达到灌溉阈值而没有灌溉,但经过一个下午和一个晚上的水分消耗,致使第二天08:30出现土壤水基质势低于灌溉阈值的情况。另外,试验区7、8月气温高,包括辣椒在内的多种作物处于生长旺盛阶段,需水量大,灌溉用户增多导致农场供水紧张,有时难以保证辣椒的及时灌溉。

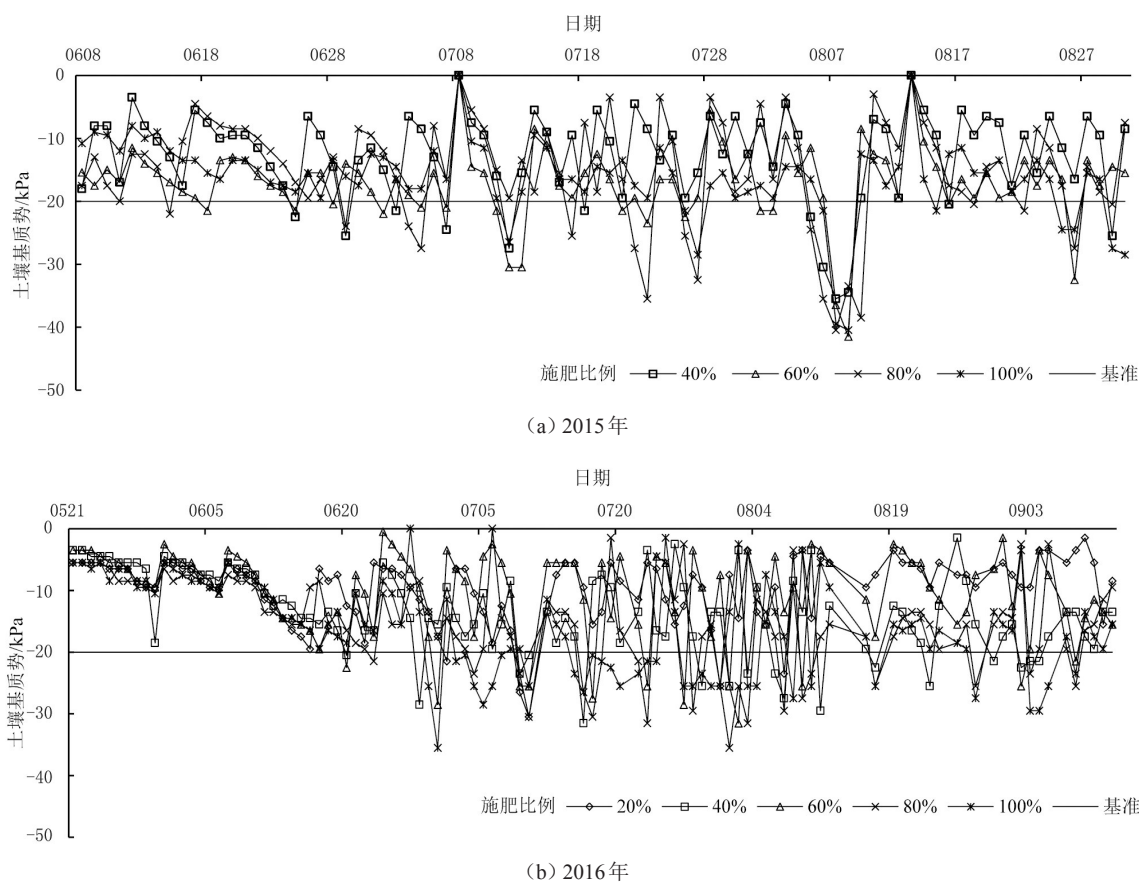


图3 辣椒生育期内不同施肥比例处理08:30土壤水基质势的变化

## 2.2 土壤盐分状况

图4是2015年辣椒不同生育阶段各施肥比例处理的土壤盐分垂直剖面分布状况。由图4可知,①在试验开始之前,0~100 cm土层土壤 $EC_e$ 平均为3.2 dS/m,其中0~40 cm土层土壤 $EC_e$ 较低,平均为1.8 dS/m,而40~100 cm土层土壤 $EC_e$ 较高,平均为4.1 dS/m。②7月各处理0~100 cm整个土体土壤 $EC_e$ 均大幅度下降,平均降低了70%,说明盐分在土体中重新分布,基本被淋洗到了100 cm以下的土层中。到8月,各处理 $EC_e$ 较7月均有不同程度的降低,即土壤盐分仍不断被淋洗。③9月14日(停止灌溉10 d后),土壤 $EC_e$ 与辣椒生长旺盛时期相比没有明显的差异,其中40%、60%、80%和100%处理0~100 cm土层土壤 $EC_e$ 分别平均为0.8、0.9、0.9和0.7 dS/m,较试验开始之前的土壤盐分均明显降低。

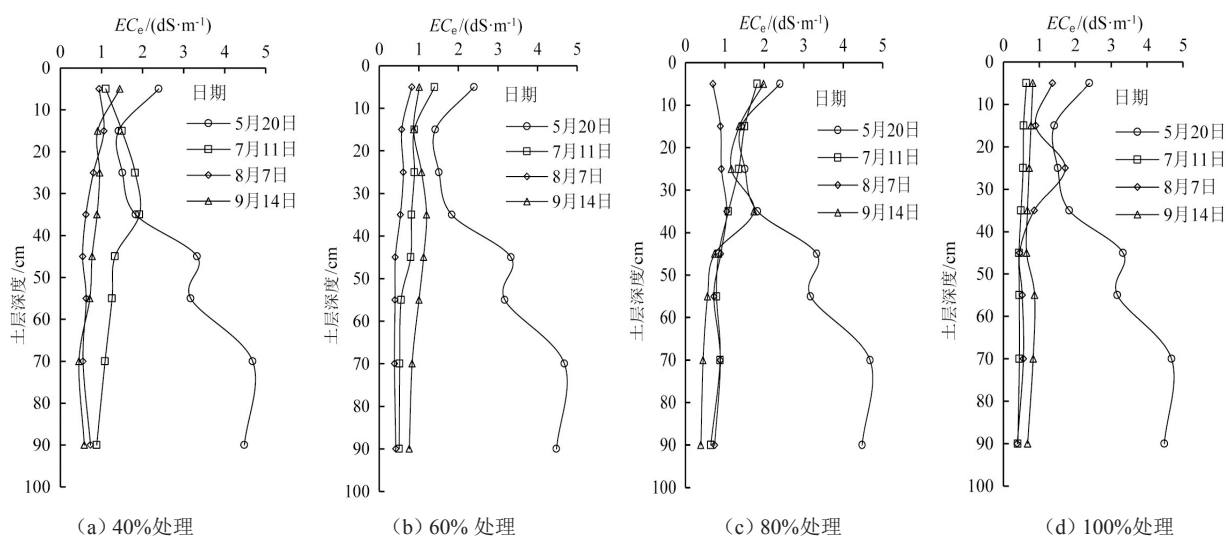


图4 2015年不同施肥比例处理辣椒不同生育阶段土壤盐分垂直剖面分布特征

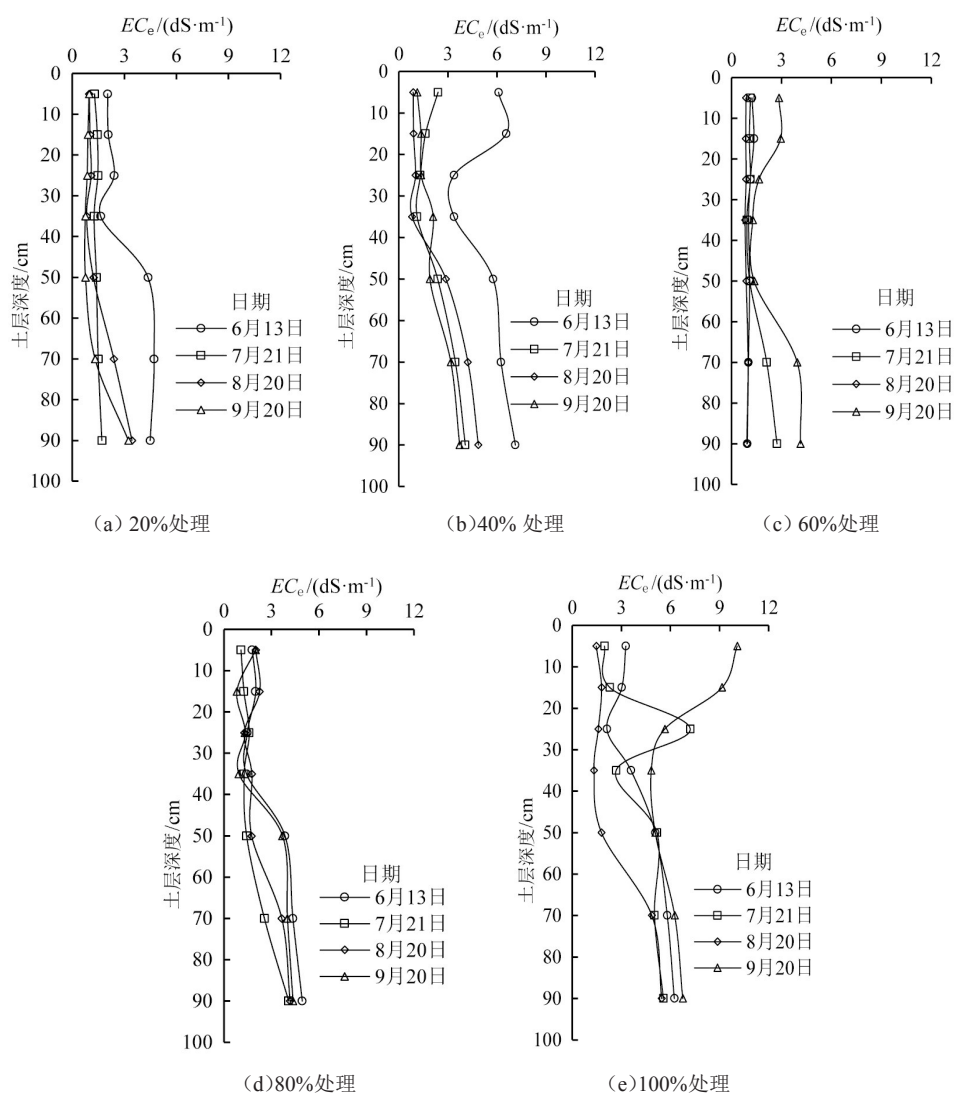


图5 2016年不同施肥比例处理辣椒不同生育阶段土壤盐分垂直剖面分布

为了防止辣椒连作障碍,2016年更换了辣椒种植地块。由图5可知,①辣椒移栽统一灌溉30 mm后的缓苗阶段,不同处理整个土壤的 $EC_e$ 仍然比较高,20%~100%处理0~100 cm深度土壤 $EC_e$ 分别平均为3.5、5.8、1.1、3.3和4.6 dS/m,0~40 cm土层土壤 $EC_e$ 相对较低,平均值分别为2.0、4.9、1.2、1.7和3.0 dS/m,说明该地块较2015年的地块整体土壤盐分偏高,并且土壤盐分存在较大的空间变异。②经过7、8月持续的滴灌施

肥灌溉,各处理的土壤 $EC_e$ 均显著降低,20%~100%处理8月0~100 cm土层土壤 $EC_e$ 平均值分别为1.8、2.8、0.9、2.6和3.0 dS/m,较6月的土壤 $EC_e$ 分别降低了49%、52%、17%、20%和34%。③9月20日停止灌溉10 d后,20%~100%处理0~100 cm土层土壤 $EC_e$ 分别平均为1.4、2.4、2.8、2.9、6.5 dS/m,与辣椒生长旺盛时期的8月相比,除100%处理外,其他处理土壤 $EC_e$ 没有明显变化。100%处理0~20 cm表层土壤 $EC_e$ 显著增加到9.6 dS/m,出现盐分表聚现象,这很可能是因为100%处理选择的取样点其覆盖的膜有破损,土壤盐分在破膜位置聚积。

总体上,在干旱区滴灌农田,覆膜滴灌条件下控制滴头正下方20 cm处土壤水基质势阈值在-20 kPa指导辣椒进行施肥灌溉,频繁施肥灌溉阶段土壤盐分淋洗效果明显,停止灌溉后整个0~100 cm土体土壤盐分也可以维持平衡。

### 2.3 土壤养分状况

由于土壤硝态氮具有易随水运移的特性,若耕作措施或施肥灌溉管理不当,易发生淋失,进而污染地下水<sup>[19]</sup>。该试验利用饱和泥浆提取液测定了土壤硝态氮量<sup>[20]</sup>,2015年和2016年辣椒生长旺盛时期(7月或8月)与试验结束后(9月,停止灌溉10 d后)土壤饱和泥浆提取液硝态氮质量浓度分布如图6所示。由图6可知,①滴灌高频施肥灌溉条件下,硝态氮基本都分布在0~40 cm土层,尤其是在0~20 cm土壤表层。例如2015年8月40%~100%处理0~20 cm土层硝态氮质量浓度平均为32.2 mg/L,20~40 cm土层硝态氮质量浓度平均为17.6 mg/L,而40 cm深度以下硝态氮质量浓度平均为8.1 mg/L。②辣椒不同生育阶段0~40 cm土层土壤硝态氮质量浓度变化剧烈,而40 cm深度以下,尤其是70 cm深度以下,土壤硝态氮质量浓度基本保持不变。2015年9月40%~100%处理0~40 cm土层硝态氮质量浓度平均为17.9 mg/L,较8月的平均值(24.9 mg/L)降低了28%,而40 cm以下土层硝态氮质量浓度(8.8 mg/L)较8月的平均值降低了9%。③另外,某一时期土壤饱和泥浆提取液硝态氮质量浓度同施肥比例处理关系不大,2016年7月,20%~100%处理0~20 cm土层硝态氮质量浓度平均值分别为34.7、64.6、27.3、30.4和37.6 mg/L。这主要是因为滴灌高频施肥灌溉条件下,取土样时有些处理如40%处理刚进行了施肥灌溉,所以硝态氮质量浓度较高,而80%处理上次施肥灌溉结束一段时期而下一次施肥灌溉尚未开始,故硝态氮质量浓度反而较低。

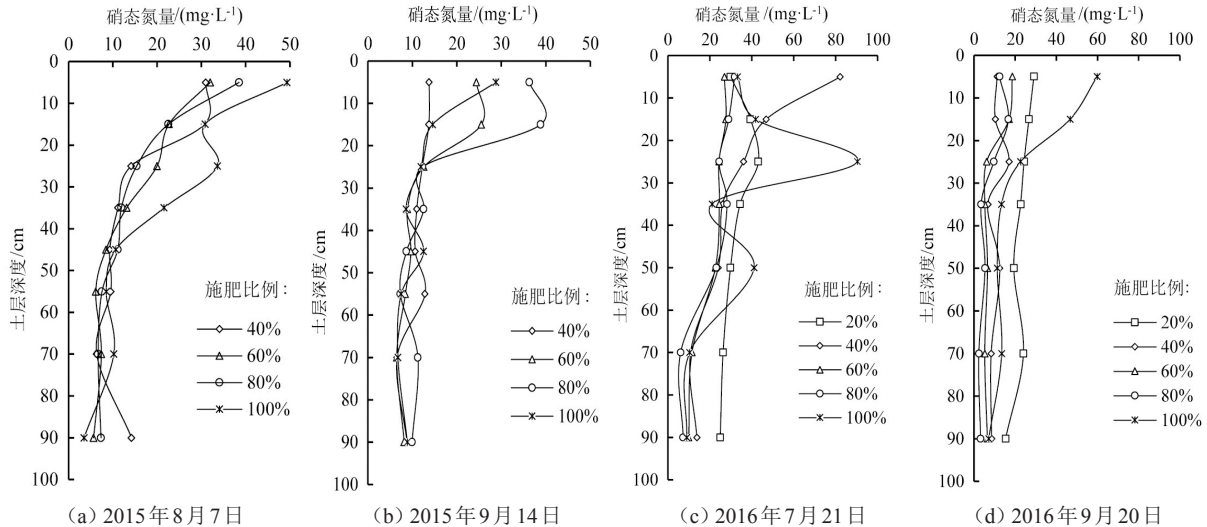


图6 不同施肥比例处理辣椒不同生育期土壤饱和泥浆提取液硝态氮质量浓度垂直剖面分布

总体上,滴灌高频施肥灌溉条件下,硝态氮基本都分布在0~40 cm土层,尤其是在0~20 cm土壤表层,而辣椒的根系也主要分布在30 cm土层以上范围,即硝态氮主要分布在辣椒根系分布层,这有利于养分的吸收利用;所有施肥比例处理0~40 cm土层土壤硝态氮质量浓度变化剧烈,而70 cm深度以下土壤硝态氮质量浓度基本保持不变,这说明即使是100%施肥比例处理也基本不存在硝态氮的深层渗漏淋失,同时也说明农场提供的基于当地测土配方施肥量的滴灌辣椒施肥是基本合理的。

### 2.4 滴灌施肥对辣椒生长的影响

2016年辣椒不同生育期不同施肥比例处理株高、茎粗和地上部分鲜质量如表4所示。由表4可知,不同处理辣椒的株高在6月没有显著差异,随着辣椒的生长发育,株高不断增加,不同施肥比例处理之间株高的

差异也逐渐增大,到8月100%与80%处理辣椒的株高已经明显高于20%处理的。随着辣椒的生长发育,茎粗呈现出先增加后减小的趋势,且不同施肥比例处理辣椒的茎粗没有显著差异。随着辣椒的生长发育,不同施肥比例地上部分鲜质量不断增加,到8月100%处理辣椒地上部分鲜质量显著高于20%处理的。

总体上辣椒的株高和地上部分鲜质量,随着施肥比例的增加而增大。灌水越频繁、灌水量越高,辣椒的株高越高和鲜质量也越大。这与冯志文等<sup>[17]</sup>内蒙古马铃薯、汪然等<sup>[18]</sup>青海油菜的试验结果不一致,研究提出不同施肥比例作物的灌水量无明显差异,这同作物总灌水量、生育期降雨量及分布等有密切的关系。例如内蒙古马铃薯生育期总降雨量达到350 mm左右,而不同施肥处理马铃薯生育期内总灌水量平均仅150 mm左右;青海油菜生育期内80%的降雨量分布在7月之前,进入油菜生长旺盛期之前,各施肥比例处理灌溉频率基本一致,进入生长旺盛期之后,各施肥比例的灌水量同步快速增加。

表4 2016年辣椒不同生育期不同施肥比例处理的株高、茎粗与鲜质量

| 施肥比例/% | 株高/cm              |                     |                     | 茎粗/mm             |                    |                    | 鲜质量/kg              |                    |                    |
|--------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
|        | 6月                 | 7月                  | 8月                  | 6月                | 7月                 | 8月                 | 6月                  | 7月                 | 8月                 |
| 20     | 36.28 <sup>a</sup> | 55.28 <sup>c</sup>  | 57.12 <sup>c</sup>  | 6.29 <sup>a</sup> | 11.52 <sup>a</sup> | 11.21 <sup>a</sup> | 0.036 <sup>ac</sup> | 0.17 <sup>ac</sup> | 0.29 <sup>bc</sup> |
| 40     | 38.48 <sup>a</sup> | 65.33 <sup>a</sup>  | 62.50 <sup>ac</sup> | 7.38 <sup>a</sup> | 12.26 <sup>a</sup> | 10.96 <sup>a</sup> | 0.046 <sup>a</sup>  | 0.20 <sup>ab</sup> | 0.34 <sup>ac</sup> |
| 60     | 36.46 <sup>a</sup> | 58.11 <sup>bc</sup> | 61.12 <sup>bc</sup> | 5.76 <sup>a</sup> | 10.06 <sup>a</sup> | 10.26 <sup>a</sup> | 0.030 <sup>bc</sup> | 0.15 <sup>bc</sup> | 0.25 <sup>bc</sup> |
| 80     | 37.46 <sup>a</sup> | 59.33 <sup>b</sup>  | 63.72 <sup>ab</sup> | 6.39 <sup>a</sup> | 12.36 <sup>a</sup> | 11.28 <sup>a</sup> | 0.037 <sup>ab</sup> | 0.25 <sup>a</sup>  | 0.36 <sup>ab</sup> |
| 100    | 38.44 <sup>a</sup> | 61.61 <sup>ab</sup> | 67.68 <sup>a</sup>  | 6.99 <sup>a</sup> | 11.39 <sup>a</sup> | 11.03 <sup>a</sup> | 0.042 <sup>a</sup>  | 0.21 <sup>a</sup>  | 0.47 <sup>a</sup>  |

注 同列不同小写字母表示各处理差异显著( $P<0.05$ )。

### 2.5 滴灌施肥灌溉对辣椒产量及水肥利用的影响

由图7可知,2015年和2016年辣椒的产量随着施肥比例的增加有增大的趋势。当施肥比例最小时产量最低,2015年40%处理的辣椒产量为19 415.5 kg/hm<sup>2</sup>,2016年20%处理的产量为13 910.0 kg/hm<sup>2</sup>;当施肥比例为100%时,辣椒产量达到最高,2 a平均产量为26 595.8 kg/hm<sup>2</sup>,2015年为27 930.1 kg/hm<sup>2</sup>,2016年为25 261.5 kg/hm<sup>2</sup>,分别较最低产量提高了44%和82%。方差分析结果显示2015年不同处理辣椒的产量没有显著差异,2016年100%处理的产量同其他处理的产量有显著的差异。

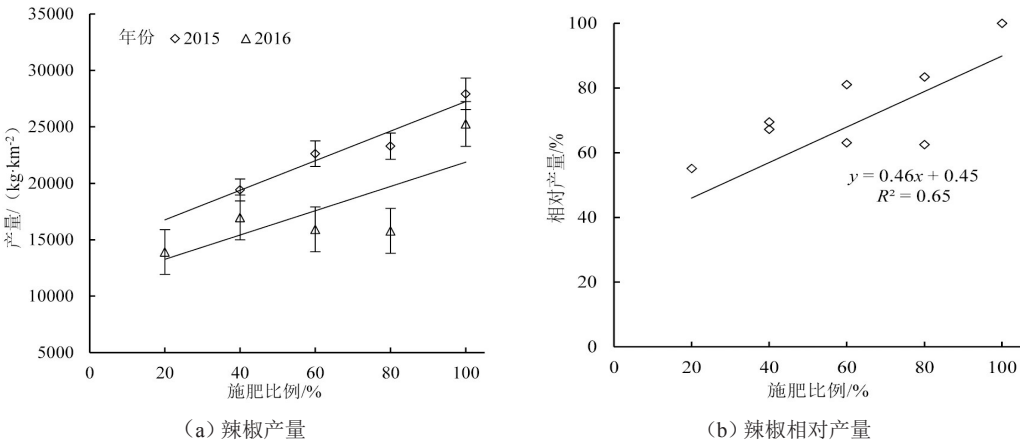


图7 2015—2016年不同施肥比例处理的辣椒的产量和相对产量

与2015年相比,因农场劳动力紧缺的原因,2016年辣椒苗晚种植了近20 d,且当时移栽的辣椒苗也较弱,到9月生育后期各处理辣椒出现早衰的现象,故2016年辣椒产量低于2015年的(图7)。

将2015年、2016年20%~80%处理的产量除以100%处理的产量折算成相对产量(图7(b)),相对产量随着施肥比例的增加而直线增加,回归分析获得辣椒的产量( $y$ )与施肥比例( $x$ )的关系可以表达为 $y=0.46x+0.45(R^2=0.65)$ 。

2015年和2016年肥料偏生产力都随着施肥比例的增加而迅速降低,当施肥比例大于80%时,肥料偏生产力降低幅度变缓,基本维持在一个相对稳定的值,2015年和2016年平均分别为33.3和24.5 kg/kg(图8)。2015年不同施肥比例处理的灌溉水利用效率为5.6~6.8 kg/m<sup>3</sup>,2016年为3.2~5.2 kg/m<sup>3</sup>,总体上,灌溉水利用效率同施肥比例的关系不大。2015年辣椒的产量高且灌水量较少,灌溉水利用效率与肥料偏生产力均高于2016年的值。施肥比例为100%时,2 a平均灌溉水利用效率为5.1 kg/hm<sup>2</sup>。

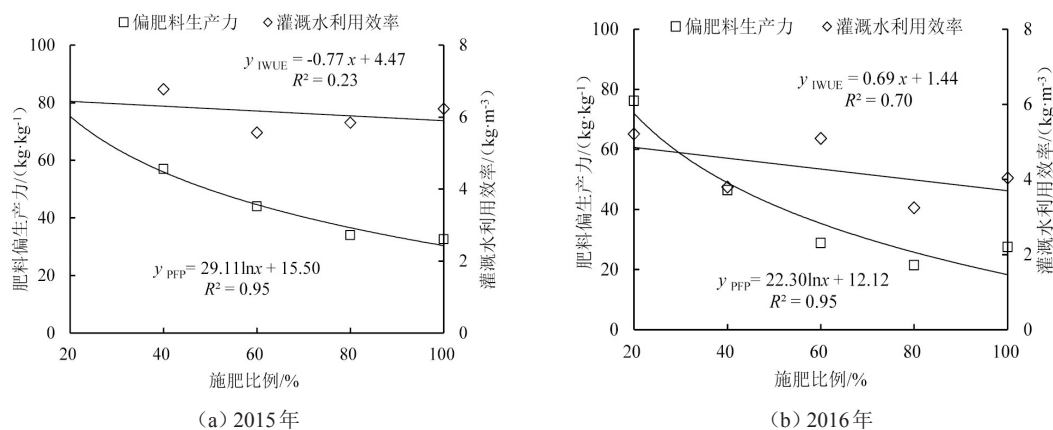


图8 不同施肥比例处理辣椒灌溉水利用效率及肥料偏生产力

2016年对农场管理的辣椒进行产量跟踪。农场管理的辣椒也为滴灌灌溉,但是基本上是参考当地地面灌溉下辣椒的灌溉和施肥方案进行管理,15 d左右灌1次水,1次灌水约7 h,灌水定额为801 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>左右,整个生育期施肥3次,单次随灌溉施肥544.5 kg/hm<sup>2</sup>左右。农场管理的辣椒产量约为22 000 kg/hm<sup>2</sup>,灌水量6 819 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,灌溉水利用效率为3.2 kg/m<sup>3</sup>,低于试验5个高频施肥灌溉处理的灌溉水利用效率,农场辣椒肥料偏生产力为23.7 kg/kg,基本与80%和100%施肥比例处理的值持平。施肥比例为100%时,2 a平均肥料偏生产力为30.1 kg/hm<sup>2</sup>。在此需要说明的是,2016年农场辣椒正常栽植,较试验的辣椒提早20 d左右移栽,且辣椒苗更壮。

### 3 讨论

制定与滴灌技术特点相适应的施肥灌溉制度,根据作物的需水需肥规律适时适量地进行灌溉和施肥是充分发挥滴灌节水、省肥、高产、优质等综合效益的关键。控制作物根区土壤水基质势阈值是制定滴灌灌溉制度常用的方法。杨会颖等<sup>[21]</sup>在甘肃省武威市石羊河农业与生态节水试验站的研究发现,膜下滴灌条件下土壤水基质势下限控制在-40~-30 kPa时辣椒产量和水分利用效率均较高。但是在干旱地区由于土壤中本身积累着一定的盐分,灌溉水中或多或少含有可溶性盐,在制定滴灌灌溉制度或者施肥灌溉制度时,必须考虑水盐调控,以保证土壤盐分平衡,不产生盐分积累。Wang等<sup>[14]</sup>在新疆克拉玛依棉花膜下滴灌的研究指出,土壤次生盐渍化发生的风险随着土壤水基质势阈值控制的降低而增加,当滴头正下方20 cm深度土壤水基质势分别控制在-10、-20、-30和-50 kPa时,土壤盐分的积累深度分别表现为:无盐分积累、80 cm以下积累、40 cm以下积累以及0~40 cm范围内积累。因此,在干旱地区滴灌水盐调控灌溉制度非常重要,正是基于此本研究通过控制滴头正下方20 cm处土壤水基质势阈值为-20 kPa指导辣椒滴灌水盐调控灌溉。

滴灌施肥灌溉条件下如果采用植物营养学的方法开展作物需肥规律研究,需要进行大量的植物营养试验和田间不同养分肥料施肥量的交叉试验,例如“3414”试验,工作量大、周期长、效率低。从“土壤-植物-大气”系统界面溶质运移机理和过程考虑,滴灌与传统地面灌溉相比,由于水分运动和水分时空变异特点以及施肥方式不同等的原因,其养分在土壤中分布特点、运移状况、深层淋失等均不相同;例如滴灌条件下硝态氮主要分布在0~40 cm主要根系分布层,硝态氮深层淋失量小;而地面灌溉条件下0~150 cm土层剖面硝态氮都有所增加,且在100~150 cm土层的积累量最大,故硝态氮深层淋失风险大<sup>[22-24]</sup>。作物的需肥规律主要由其生物学特点决定,基于植物营养学和农业栽培试验获得的地面灌溉条件下作物施肥量,同样可以反映滴灌条件下作物的需肥规律。因此,以地面灌溉作物高产施肥制度或者测土配方推荐施肥制度为基准,获得滴灌条件下的施肥比例,可构建起滴灌水肥一体化施肥制度。本研究发现100%施肥比例处理辣椒的生长最好、产量最高,这与青海、内蒙古、河北等地枸杞、油菜、马铃薯和冬小麦等作物上发现的50%~85%当地高产或测土配方推荐施肥量的结果<sup>[17-18,22]</sup>不一致,主要是因为上述推荐施肥量是针对地面灌溉的,而本研究参考的八一农场提供的辣椒施肥方案,是基于当地测土配方施肥、滴灌条件下的施肥方案,该方案已经考虑到滴灌条件下速效养分的深层淋失风险较小,故肥料的施用量已经调减。所以本研究得到辣椒最高产量的施肥比例为100%,这也说明八一农场推荐的滴灌条件下辣椒的施肥方案(全生育期N施量360 kg/hm<sup>2</sup>,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>施

量 195 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O 施量 375 kg/hm<sup>2</sup>) 是基本合理的。该施肥方案推荐的 N、P 养分施入量与刘喜堂等<sup>[8]</sup>推荐的甘肃河西走廊地区加工型辣椒膜下滴灌施肥方案(有机肥 7.5~15.0 t/hm<sup>2</sup>, N 施量 276 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 施量 180 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O 施量 108 kg/hm<sup>2</sup>)、雒兴刚<sup>[25]</sup>推荐的甘肃金塔县干制辣椒膜下滴灌施肥方案(农家肥 45 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, N 施量 247~337 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 施量 185~266 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O 施量 69~123 kg/hm<sup>2</sup>) 和杨光彬<sup>[26]</sup>推荐的新疆阜康县制干辣椒膜下滴灌施肥方案(N 施量 434 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 施量 216 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O 施量 285 kg/hm<sup>2</sup>) 中推荐的养分施入量相比较少或者基本相当。考虑到滴灌高频施肥灌溉条件下辣椒的增产潜力, 下一步的研究有必要提高施肥比例到 120% 或者更高。另外, 与八一农场管理的辣椒相比, 本研究 100% 施肥比例处理辣椒增产 14.8%, 灌溉水利用效率提高 25.2%, 偏肥料生产力提高 16.4%, 并且是在辣椒苗晚种近 20 d 且移栽的辣椒苗较弱的基础上获得的结果, 这说明高频滴灌施肥灌溉有利于辣椒的生长和增产以及灌溉水利用效率与肥料利用效率的提高。如果 2016 年辣椒苗同农场辣椒一同种植且是同一批壮苗, 根据 2015 年不同施肥比例与辣椒产量的关系推测, 正常情况下 80% 左右的施肥比例可获得同农场管理方法下基本相当的辣椒产量。

## 4 结 论

1) 河西走廊辣椒覆膜滴灌施肥灌溉条件下, 当滴头正下方 20 cm 深度土壤水基质势控制在 -20 kPa 以上时, 0~100 cm 整个土体的盐分基本维持平衡, 土壤盐分不积累。硝态氮在辣椒生育期内主要分布在 0~40 cm 的根系分布层, 有利于养分的吸收利用, 70 cm 深度的硝态氮质量浓度低且稳定, 基本不存在硝态氮的深层渗漏淋失。

2) 辣椒的株高和地上部分鲜质量均随着施肥比例的增加而增加。当施肥比例为 100% 时辣椒的产量达到最大值, 2 a 平均为 26 595.8 kg/hm<sup>2</sup>, 灌溉水利用效率 5.1 kg/m<sup>3</sup>, 肥料偏生产力为 30.1 kg/kg, 均较农场管理方法下滴灌辣椒的值高。

3) 在河西走廊辣椒生产中, 推荐控制滴头正下方 20 cm 深度土壤水基质势阈值在 -20 kPa 来指导水盐调控灌溉, 100% 测土配方施肥量(全生育期 N 施量 360 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 施量 195 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O 施量 375 kg/hm<sup>2</sup>), 同时进行施肥灌溉。采用该辣椒水盐调控施肥灌溉制度, 能够明显提高辣椒的产量、灌溉水利用效率和肥料利用效率, 并且没有发生土壤次生盐渍化和肥料淋失的风险。

## 参考文献:

- [1] HODNETT M G, BELL J P, AH KOON P D, et al. The control of drip irrigation of sugarcane using "index" tensiometers: some comparisons with control by the water budget method[J]. *Agricultural Water Management*, 1990, 17(1/3):189-207.
- [2] SINGH A K, SINGH S K, PANDEY A K, et al. Effects of drip irrigation and polythene mulch on productivity and quality of strawberry (*Fragaria ananassa*) [J]. *HortFlora Research Spectrum*, 2012, 1(2):131-134.
- [3] 石岩, 成自勇, 王开录. 滴灌工程技术在河西地区大田推广应用中的问题探讨: 以勤锋农场滴灌工程为例[J]. *中国水利*, 2013(11):27-29.
- [4] 陈灵芝. 甘肃省干制辣椒生产现状和发展对策[J]. *中国蔬菜*, 2010, 1(13):9-10.
- [5] 张振贤. 蔬菜栽培学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
- [6] 吴普特, 冯浩, 牛文全, 等. 我国北方地区节水农业技术水平及评价[J]. *灌溉排水学报*, 2003, 22(1):26-30, 34.
- [7] 刘佳, 张玲丽, 颜建明, 等. 干旱气候条件下灌溉方式与灌水定额对辣椒生长的影响[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(2):373-381.
- [8] 张廷彦, 李国飞, 冯国强. 河西地区辣椒膜下滴灌高产栽培技术[J]. *蔬菜*, 2011(6):20-21.
- [9] 刘喜堂, 薛元. 甘肃河西走廊地区加工型辣椒膜下滴灌节水栽培技术[J]. *现代农业科技*, 2013(2):103-107.
- [10] PHENE C J, ALLEE C P, PIERRO J D. Soil matric potential sensor measurements in real-time irrigation scheduling[J]. *Agricultural Water Management*, 1989, 16(3):173-185.
- [11] 康跃虎. 实用型滴灌灌溉计划制定方法[J]. *节水灌溉*, 2004(3):11-12, 15.
- [12] 贾俊妹, 康跃虎, 万书勤, 等. 不同土壤基质势对滴灌枸杞生长的影响研究[J]. *灌溉排水学报*, 2011, 30(6):81-84.
- [13] KANG Y H, WANG R S, WAN S Q, et al. Effects of different water levels on cotton growth and water use through drip irrigation in an arid region with saline ground water of Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 109:117-126.
- [14] WANG R S, WAN S Q, KANG Y H, et al. Assessment of secondary soil salinity prevention and economic benefit under different drip line placement and irrigation regime in northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 131:41-49.
- [15] 万书勤, 康跃虎, 刘士平, 等. 柴达木地区滴灌水-盐-肥综合调控对枸杞生长和水肥利用的影响[J]. *节水灌溉*, 2016(5):37-41, 47.
- [16] 万书勤, 汪然, 康跃虎, 等. 微咸水滴灌施肥灌溉对马铃薯生长和水肥利用的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(7):1-7, 15.
- [17] 冯志文, 康跃虎, 万书勤, 等. 滴灌施肥对内蒙古沙地马铃薯生长和水肥利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(5):242-249.
- [18] 汪然, 万书勤, 康跃虎, 等. 滴灌水盐调控施肥灌溉对青海油菜产量及水肥利用的影响[J]. *节水灌溉*, 2016(4):18-23.

- [19] 曹红霞, 康绍忠, 何华. 田间管理措施对土壤硝态氮迁移影响研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2005, 24(1):72-76.
- [20] 中国科学院地理科学与资源研究所. 一种测定土壤速效养分的方法:CN104344984A[P]. 2015-02-11.
- [21] 杨会颖, 刘海军, 李艳, 等. 膜下滴灌条件下土壤基质势对辣椒产量和水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30 (1):54-60.
- [22] 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.
- [23] 李兰. 喷灌对土壤环境的影响及作物生长和耗水的响应研究:以冬小麦为例[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2009.
- [24] 吕国华. 不同灌溉方法对作物生境的影响及作物生长响应:以冬小麦为例[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2010.
- [25] 雒兴刚. 金塔县干制辣椒膜下滴灌栽培技术[J]. 甘肃农业科技, 2013(3):45-46.
- [26] 杨光彬. 浅谈制干辣椒膜下滴灌高产栽培技术[J]. 新疆农业科技, 2016(2):24-26.

## A Drip Fertigation Schedule to Manage Soil Water and Salt in Hot Pepper Field in Hexi Corridor

HAN Xiaoyu<sup>1,2</sup>, WAN Shuqin<sup>1\*</sup>, LI Xiaobin<sup>1</sup>, KANG Yuehu<sup>1,2</sup>, FENG Zhiwen<sup>3</sup>

(1.Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.Inner Mongolia Potato E&T Research Center, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

**Abstract:**【Objective】Keeping salt in root zone below a threshold is critical to sustaining crop growing and the purpose of this paper is to experimentally investigate the efficacy of using drip fertigation schedule to manage soil water and salt in hot pepper field in Hexi Corridor.【Method】The field experiment was conducted in Bayi Farm at Jinchang city of Gansu province. In the experiment, the soil matric potential at the depth of 20 cm, just below the drip emitter, was controlled higher than -20 kPa. Five fertilizations were examined, which were 20%, 40%, 60%, 80% and 100% of the recommended fertilizer application to the hot peppers in the farm, calculated based on the measured soil nutrients. For each treatment, we measured the growth, yield of the pepper, as well as the distributions of salt and nutrient in soil profile.【Result】The two-year experiments found that: ①Salt content in 0~120 cm soil remained almost unchanged and no soil salinity occurred. ② Inorganic nitrogen mainly stayed in the root zone, 0~40 cm, and was low and stable in subsoil below 70 cm; we did not find nitrogen leaching. ③ Both plant height and above-ground fresh weight of the pepper increased with nitrogen application; the yield peaked when 100% of the recommended fertilizer was applied with the associated two-year average being 26 595.8 kg/hm<sup>2</sup>. ④Increasing fertigation frequency improved both irrigation water use efficiency and fertilizer productivity, with the two-year average irrigation water use efficiency being 5.1 kg/m<sup>3</sup> and partial productivity of fertilizer being 30.1 kg/kg.【Conclusion】Keeping soil matric potential at depth of 20 cm, just below the emitter, above -20 kPa can be used as a guidance to manage soil water and salt to safeguard hot pepper production in Hexi Corridor. The fertilizers application should be 100% of the recommended-consisting of N 360 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 195 kg/hm<sup>2</sup> and K<sub>2</sub>O 375 kg/hm<sup>2</sup>.

**Key words:** drip fertigation; inorganic nitrogen concentration; irrigation water use efficiency; fertilizer productivity; hot pepper; soil salt

责任编辑:赵宇龙