

# 不同沟垄规格对土壤湿润峰运移规律的影响

段红腾<sup>1</sup> 吴发启<sup>1,2</sup> 向方昕<sup>3</sup> 郝爽敬<sup>2</sup> 汤晓迪<sup>2</sup>

(1.西北农林科技大学水土保持研究所 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学资源环境学院 陕西 杨凌 712100;  
3.西北农林科技大学园艺学院 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**针对内陆干旱区滴灌条件下沟垄栽培措施设计不完善等问题,通过研究不同沟垄规格对土壤湿润峰运移变化规律的影响,旨在为大田沟垄滴灌系统的合理设计提供理论参考价值。采用室内土箱模拟试验,以沟底宽度和沟底坡度为变量,以计划湿润层为约束条件,分析湿润峰的运移变化规律。在沟底坡度一定的条件下,沟底宽度越大灌水到达计划湿润层所用时间越长,形成的湿润体体积越大;在沟底宽度一定的条件下,沟底坡度越大灌水到达计划湿润层所用时间越短,形成的湿润体体积越小;水平、垂直湿润峰运移距离与灌水历时存在幂函数关系。幂函数指数  $b$  随沟底宽度及沟底坡度变化差异性较小。水平湿润峰幂函数系数  $a$  随沟底宽度增加而增加,随沟底坡度增加而减小。垂直湿润峰幂函数系数  $a$  随沟底宽度增加而减小,随沟底坡度增加而增加。

**关键词:** 沟垄措施; 沟底宽度; 沟底坡度; 湿润峰

中图分类号: S275.6 文献标识码: A

## Effects of Different Ridge and Ditch Specifications on Soil Wetting Peak Transport Law

DUAN Hong-teng<sup>1</sup>, WU Fa-qi<sup>1,2</sup>, XIANG Fang-xin<sup>3</sup>, HAO Shuang-jing<sup>2</sup>, TANG Xiao-di<sup>2</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China;  
2. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China;  
3. College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

**Abstract:** In view of the imperfect design of ridge and ditch cultivation measures under drip irrigation in inland arid area, the influence of different ridge and furrow specifications on the change of soil wetting peak transport is studied, which aims to provide theoretical reference value for rational design of ridge and ditch drip irrigation system. The indoor soil box simulation test was carried out, and the variation of the movement of the wetting peak was analyzed by taking the width of the bottom of the ditch and the slope of the ditch as variables and taking the planned wet layer as the constraint. With a certain slope of the ditch bottom, the greater the width of the ditch bottom, the longer the time it takes for the irrigation water to reach the planned wetting layer, and the larger the volume of the wetting body. With a certain width of the ditch bottom, the higher the slope of the ditch bottom, the shorter the time it takes for the irrigation water to reach the planned wetting layer, and the smaller the volume of the wetting body. The horizontal and vertical wetting peak migration distance has a power function relationship with the irrigation duration. The power function index  $b$  varies little with the width of the ditch bottom and the slope of the ditch bottom. The horizontal wet power function coefficient  $a$  increases with the increase of the width of the bottom of the ditch, and decreases with increase of the slope of the bottom of the ditch. The vertical wetting peak power function coefficient  $a$  decreases with the increase of the width of the bottom of the ditch, and increases with the increase of the slope of the bottom of the ditch.

**Key words:** ridge and ditch measures; ditch bottom width; ditch bottom slope; wetting peak

起垄微沟滴灌是一种结合滴灌优势和沟垄种植特点于一体的新型高效节水灌溉技术<sup>[1]</sup>,具有减少水分深层渗漏、避免

收稿日期: 2019-07-09

基金项目: “十三五”国家重点研发计划课题项目“河源区及干旱区降雨径流挖潜与高效利用技术”(2017YFC0403600)。

作者简介: 段红腾(1995-) 男, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: 1534321771@qq.com。

通讯作者: 吴发启(1957-) 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: wufaqi@263.net。

水分蒸散损失、提高作物水分利用效率等特点<sup>[2-6]</sup>,该项灌溉技术的推广应用备受国内外学者关注<sup>[7]</sup>。滴灌属于局部湿润灌溉,而土壤湿润体的形状大小又决定作物的生长状况<sup>[8]</sup>。因此,研究沟垄滴灌条件下土壤湿润体的形状大小、土壤水分转移规律,对制定合理规范的沟垄滴灌制度具有重要意义。目前众多学者针对滴灌条件下土壤水分运移进行了系统研究,并取得一系列显著成果<sup>[9-13]</sup>。Goldberg、王全九等<sup>[9,10]</sup>分别研究了滴灌条件下土壤水分入渗规律,结果表明湿润体的基本形态受滴头流量、灌溉量等灌溉参数的影响。岳海英等<sup>[11]</sup>模拟分析不同滴头流量对湿润体形态的影响特征,结果表明不同流量的湿润体形态和灌水量之间均符合幂函数关系。郑园萍等<sup>[12]</sup>通过室内土箱试验模拟研究了多点源条件下砂壤土的水分运移特征,提出了在砂壤土滴灌系统中应选取大流量滴头的结论。然而,土壤湿润体的形状不仅受灌水技术参数影响,也与沟垄规格密不可分。上述研究为沟垄滴灌的合理设计提供了参考价值,但大多集中于分析灌水技术参数对土壤水分运移的影响规律,沟垄规格等农艺耕作措施方面很少涉及。此外,沟垄滴灌技术的研究多应用于果树、油菜花、玉米、马铃薯等<sup>[7,14]</sup>,枸杞作为青海等内陆干旱地区重要经济作物,其研究却较为薄弱<sup>[15]</sup>。因此,本文以灰棕漠土为基础,通过室内土箱模拟试验,研究滴灌条件下不同沟垄形态对土壤湿润峰转移规律的影响,以期对沟垄滴灌技术的合理设计提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤与试验装置

试验于西北农林科技大学资源环境学院水工实验室开展进行。供试土壤选自田间枸杞种植地(青海省海西州德令哈市怀头他拉镇)0~40 cm耕层土壤。土壤类型为灰棕漠土,质地砂壤,其基本物理参数见表1。土样经风干、磨细、均匀混合后过2 mm孔径筛后以备试验所需。将处理过筛后的土样加水配置成设计初始含水量(2.15%)。按1.6 g/cm<sup>3</sup>干密度每5 cm装入土箱,夯实且层间打毛。土体表层设计成梯形断面垄沟规格,用薄膜覆盖放置24 h,使土壤含水量均匀分配。

表1 土壤基本物理性质

土壤类型	粒径百分数/%			土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙度/%
	砂粒 ( $d \geq 0.02$ mm)	粉类 ( $0.02 > d \geq 0.002$ mm)	黏粒 ( $d < 0.002$ mm)		
灰棕漠土	61.44	35.55	3.06	1.60	39.64

试验装置主要由有机玻璃土箱及供水装置构成(图1)。土箱规格40 cm×20 cm×80 cm,其底部设置若干排气孔,以防气堵。采用马氏瓶供水,通过调节马氏瓶进气口开度来控制滴头流量的大小。将滴头置于土箱1/4棱角处,以实际湿润体的1/4作为研究对象。

### 1.2 试验方法

试验共设2个影响因素:沟底宽度、沟底坡度。其中沟底宽度3个水平,分别为7、11、15 cm(将田间沟垄形态的1/2作为研究对象,因此3种沟底宽度相当于14、22、30 cm的实际宽度)。沟底坡度设置为3个梯度,分别为30°、45°、60°。由于枸

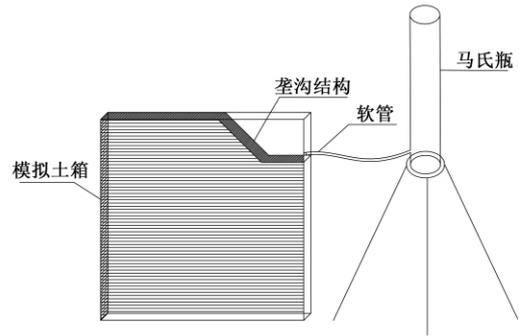


图1 试验装置示意图

杞根系的主要分布范围及水分活跃层大致位于距地表0~40 cm范围内<sup>[15]</sup>,因此选取40 cm土层深度作为试验的计划湿润层。采用完全随机试验设计,共9组试验,3次重复。

湿润峰的绘画采用先密后疏原则,灌水开始后每隔10 min用马克笔在土箱外侧描绘湿润峰基本形态特征,待湿润峰间距明显变小,隔20 min描绘一次,之后间隔30 min进行记录。以滴头位置为原点,通过刻度尺测量不同时刻湿润峰的位置坐标。由于选取40 cm土层深度作为计划湿润层,当垂直湿润峰运移至35 cm处停止灌水,进行湿润峰形状大小的描绘,当湿润峰垂直距离到达40 cm时试验结束。为了防止水分蒸发损失,用塑料薄膜进行覆盖处理。

采用Excel 2016、Origin 8.0、SPASS等软件进行图表处理及结果分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 湿润峰形态分析

图2为不同沟底宽度、坡度条件下土壤湿润峰的运移过程。 $h$ 为入渗深度, $L$ 为水平运移距离,原点坐标为滴头所在位置。由图2可知:对于不同沟底宽度、沟底坡度的沟垄滴灌而言,在整个灌水过程中,入渗湿润峰形态均大致表现为1/4椭圆状,且于表层土壤5 cm附近处发生变形回缩。滴灌开始阶段,相同时间间隔内湿润峰的水平运移距离明显大于垂直入渗深度。这主要是由于灌水初期土壤含水量相对较低,基质势在水分入渗过程中发挥主要作用。水平方向土壤孔隙较大,土壤水分在运移过程中所受阻力小,扩散速度快。垂直方向土壤孔隙相对较小,水分在运移过程中所受阻力相对较大,扩散速度缓慢。随着灌水的继续进行,土壤含水量上升,基质势减小,水分的入渗过程则由重力势和基质势共同支配作用,并且在水平方向,土壤水分运移受到土垄的阻碍作用。土壤水分垂直运移速度逐渐大于水平运移速度,最终出现湿润峰垂直距离大于水平距离的现象。

根据累计入渗量及水量平衡原理计算可得表2。结合图2及表2可知:沟底宽度、沟底坡度对土壤水分的分布规律、湿润体的形状大小均产生不同程度的影响,且沟底坡度的影响程度相对较大。同一沟底坡度条件下,随着沟底宽度的增加,水平湿润峰的运移距离变大,垂直湿润峰到达计划湿润层所需时间较长,灌水量增大,灌溉所形成的湿润面积越大。以上试验现象说明沟底宽度的增大有利于增大表层土壤的湿润面积,该种沟

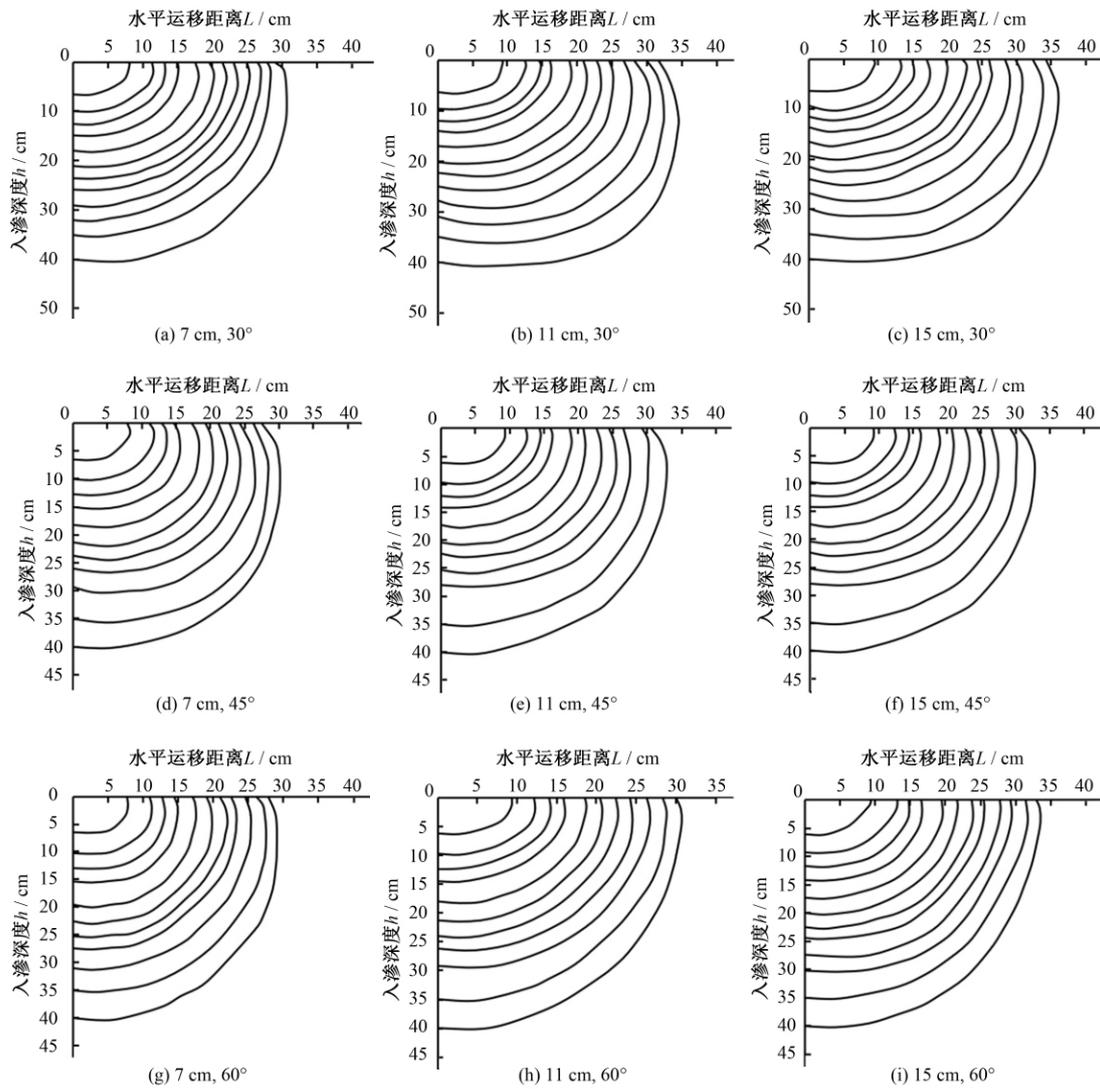


图2 不同沟底宽度、沟底坡度条件下湿润峰运移过程

表2 不同处理下灌水量与灌水历时

处理		30°	45°	60°
7 cm	灌水量/L	3.6	3.21	2.98
	历时/min	230	205	190
11 cm	灌水量/L	3.84	3.53	3.24
	历时/min	245	225	207
15 cm	灌水量/L	3.92	3.60	3.37
	历时/min	250	230	215

垄措施更适合于蔬菜类等浅根系作物的沟垄灌溉。同一沟底宽度条件下,随着沟底坡度的增加,水平湿润峰的运移距离变小,垂直湿润峰到达计划湿润层所需时间变短,灌水量减小,灌溉所形成的湿润面积越小。因此,针对耐旱等深根系植物可以适当增加沟底坡度以达到缩小表层土壤的湿润面积,促进水分向根系运移的目的。

### 2.2 水平湿润峰随时间的变化规律

同一沟底坡度不同沟底宽度条件下水平湿润峰随时间的变化规律见图3。不同沟底宽度、不同沟底坡度条件下水平湿

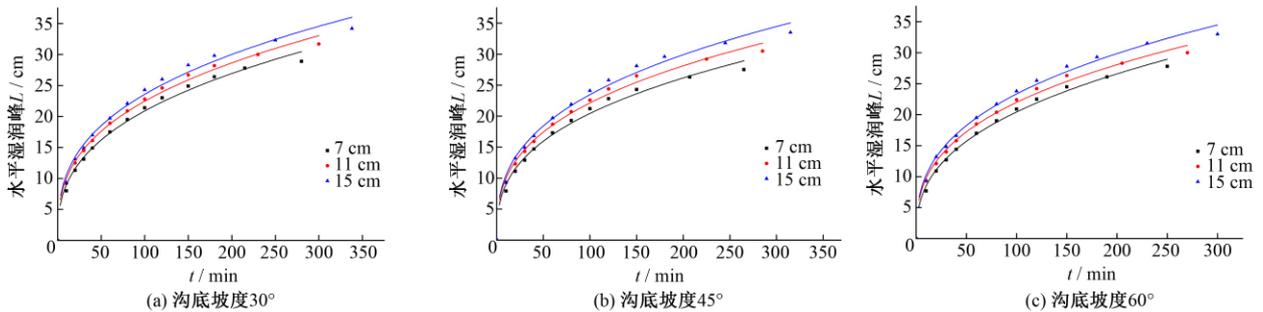


图3 水平湿润峰随时间的变化规律

润距离和时间的拟合关系见表 3。水平湿润峰随时间的变化规律满足幂函数关系  $L = a t^b$ 。

表 3 水平湿润峰拟合式及相关系数

项目	30°	45°	60°
7 cm	$L = 3.870t^{0.366}$	$L = 3.756t^{0.357}$	$L = 3.555t^{0.380}$
	$R^2 = 0.989$	$R^2 = 0.984$	$R^2 = 0.992$
11 cm	$L = 4.467t^{0.351}$	$L = 4.411t^{0.345}$	$L = 4.339t^{0.352}$
	$R^2 = 0.992$	$R^2 = 0.99$	$R^2 = 0.991$
15 cm	$L = 4.753t^{0.348}$	$L = 4.686t^{0.349}$	$L = 4.550t^{0.355}$
	$R^2 = 0.986$	$R^2 = 0.988$	$R^2 = 0.992$

从表 3 知: 随着沟底宽度和沟底坡度的变化幂函数指数  $b$  差异性较小, 其平均值均为 0.35。而幂函数系数  $a$  随沟底宽度的增加而增加, 随沟底坡度的增加而减小。这表明水平湿润峰转移距离受沟底宽度和坡度的影响。从图 3 可以看出在灌水历时相同时, 沟底坡度越大, 拟合曲线的斜率越小。同一沟底坡度条件下, 沟底宽度越大, 拟合曲线斜率越大, 即水分水平扩散距离越大, 相同时间间隔内水平转移距离越大。以上现象说明同一沟底坡度条件下, 增大沟底宽度会增大土壤的湿润面积。这是因为随着沟底宽度的增加, 灌水时间延长, 水分在基质势的作用下, 持续向水平方向运移, 而不受土垄的阻挡。当水分运移至沟底边缘处, 受沟底坡度的影响, 坡度越大, 水分侧渗说受的阻力越强, 抑制了水分在水平方向的运移。

### 2.3 垂直湿润峰随时间的变化规律

由表 4 知: 垂直湿润峰转移距离与灌水历时之间存在幂函

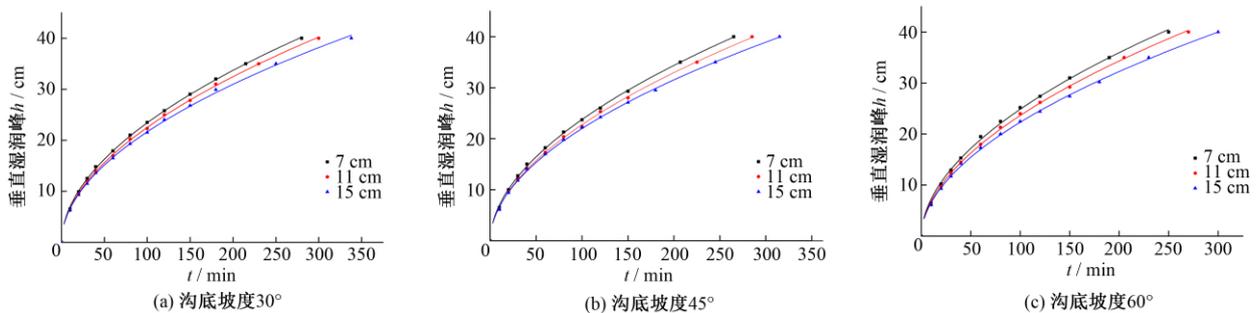


图 4 垂直湿润峰随时间的变化规律

## 3 讨论

在沟垄栽培种植模式下, 确定合理规范的沟垄规格尤为重要。因此, 根据目标作物根系分布的主要范围, 推断出土壤湿润体的最佳湿润面积及深度, 进而确定最适的沟垄规格。在灌水过程中作物不仅可以得到充分灌溉, 而且可减少水分深层渗漏, 有效提高作物产量, 达到水资源高效利用的目的。

本文研究表明, 沟底宽度和沟底坡度在一定程度上都会影响灌溉水在土壤中的运移分布。沟底宽度的增大有利于增大表层土壤的湿润面积, 该种沟垄措施更适用于蔬菜类等浅根系作物的沟垄灌溉。同一沟底宽度条件下, 随着沟底坡度的增加, 水平湿润峰的运移距离变小, 垂直湿润峰到达计划湿润层所需时间变短, 促进水分向深根系运移。灌水形成的水平、垂

数关系。其中幂函数指数  $b$  随沟底坡度和沟底宽度变化差异性不大。而幂函数系数  $a$  随沟底宽度的增加而减小, 随沟底坡度的增加而增加。这表明垂直湿润距离不仅受沟底宽度的影响, 也与沟底坡度密切相关。

表 4 垂直湿润峰拟合式及相关系数

沟底宽度	沟底坡度		
	30°	45°	60°
7 cm	$h = 2.096t^{0.524}$	$h = 2.103t^{0.532}$	$h = 2.243t^{0.532}$
	$R^2 = 0.999$	$R^2 = 0.999$	$R^2 = 0.998$
11 cm	$h = 1.974t^{0.528}$	$h = 2.035t^{0.535}$	$h = 2.184t^{0.538}$
	$R^2 = 0.999$	$R^2 = 0.999$	$R^2 = 0.999$
15 cm	$h = 1.895t^{0.516}$	$h = 1.914t^{0.519}$	$h = 2.035t^{0.531}$
	$R^2 = 0.999$	$R^2 = 0.999$	$R^2 = 0.999$

图 4 给出不同沟底宽度、沟底坡度条件下垂直湿润距离随灌水时间的变化规律。由图 4 知: 同一沟底宽度条件下随着沟底坡度的增加, 曲线斜率增大, 土壤水分垂直运移速度增大。说明增大沟底坡度有利于土壤水分在垂直方向上的运移; 同一沟底坡度条件下, 随着沟底宽度的增加曲线斜率下降, 水分垂直运移速度减小。说明增大沟底宽度抑制土壤水分的垂直运移。上述试验现象的出现是由于增大沟底坡度, 灌溉水分在水平方向的扩散阻力变大, 而垂直方向上灌溉水在重力势和基质势的共同作用下运移速率得以提升。在同一沟底坡度条件下, 沟底宽度增加, 水分侧渗距离增加, 垂直运移相对受到抑制。

直湿润峰均与时间满足幂函数关系, 因此可以通过函数关系来预测一定灌水时间内土壤水分的运移距离。

本试验假设土壤均质且各向同性, 仅选取沟底宽度和坡度作为试验要素, 没有考虑土壤其他物理性质对灌溉水在土壤中运移分布的影响。之后的研究应从 Hydrus 软件出发, 结合数学方法对土壤水分运移进行模拟研究。

## 4 结论

利用室内土箱模拟试验, 对湿润峰形态进行观测, 分析了沟底宽度、沟底坡度对土壤水分分布的影响, 得出以下结论。

(1) 沟底宽度是影响土壤湿润体形状大小的重要因素。同一沟底坡度条件下, 沟底宽度越大, 灌水到达计划湿润层时间越长, 灌水量越大, 形成的湿润体体积会越大。

(2) 沟底坡度影响着湿润体形状大小。同一沟底宽度条件下,沟底坡度越大,灌水到达计划湿润层时间越短,灌水量越小,形成的湿润体体积越小。

(3) 水平、垂直湿润峰运移距离与时间均满足幂函数关系。幂函数指数  $b$  与沟底宽度、沟底坡度无明显函数关系。水平湿润峰幂函数系数  $a$  随沟底宽度增加而增加,随沟底坡度增加而减小;垂直湿润峰幂函数系数  $a$  随沟底宽度增加而减小,随沟底坡度增加而增加。

#### 参考文献:

- [1] 刘婧然,程东娟,王丽玄,等.起垄微沟滴灌土壤水分入渗规律试验研究[J].节水灌溉,2018(9):6-11.
- [2] M CARMEN A, MAROUEN A, MANUEL S D. Effects of partial root-zone drying on yield, ripening and berry ABA in potted Tempranillo grapevines with split roots[J]. Australian Journal of Grape and Wine Research, 2006, 12(1): 13-20.
- [3] 吴卫熊,潘伟,张廷强,等.毛细节水灌溉条件下蔗区土壤水分运移规律研究[J].节水灌溉,2016(11):5-10.
- [4] 谢孟林,查丽,郭萍,等.垄作覆膜对川中丘区土壤物理性状和春玉米产量的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(2):31-38.
- [5] 郭建忠,刘淑慧,李森,等.不同种植方式对草木樨滴灌土壤水盐运移的研究[J].节水灌溉,2017(5):59-62.

- [6] 孙梦媛,刘景辉,赵宝平,等.全膜垄作对旱作马铃薯土壤含水率、酶活性及产量的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(4):1672-3317.
- [7] 侯慧芝,王娟,张绪成,等.半干旱区全膜覆盖垄上微沟种植对土壤水热及马铃薯产量的影响[J].作物学报,2015,41(10):1582-1590.
- [8] 李明思,康绍忠,孙海燕,等.点源滴灌滴头流量与湿润体关系研究[J].农业工程学报,2006,22(4):32-35.
- [9] REVOL P, CLOTHIER B E, KOSUTH P, et al. The free-water pond-under trickle source: a field test of existing theories[J]. Irrigation Science, 1996, 16(4): 169-173.
- [10] 王全九,王文焰,吕殿青,等.膜下滴灌盐碱地水盐运移特征研究[J].农业工程学报,2000,16(4):54-57.
- [11] 岳海英,李援农.滴灌土壤湿润体含水率分布规律的试验研究[J].灌溉排水学报,2010(2):137-139.
- [12] 郑园萍.滴灌条件下土壤水分入渗过程模拟试验研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [13] 张林,吴普特,朱德兰,等.多源滴灌条件下土壤水分运移模拟试验研究[J].排灌机械工程学报,2012(2):237-243.
- [14] 孙梦媛,刘景辉,赵宝平,等.全膜垄作对旱作马铃薯土壤含水率、酶活性及产量的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(4):1672-3317.
- [15] 郑国保,张源沛,孔德杰,等.不同灌溉定额对枸杞土壤水分动态变化规律的影响[J].西北农业学报,2012,21(2):117-120.

(上接第4页) 马铃薯生长发育的需要,管道埋深20cm处理地面蒸发量最小,为马铃薯提供的水分最多;高灌溉水平下,管道埋深20cm处理下马铃薯根系附近土壤含水率较高,抑制了马铃薯根系的呼吸作用,从而导致马铃薯产量的降低。刘丽秋<sup>[12]</sup>的研究发现,产量最高的处理水分利用效率不一定最高,这与本试验结果相符。刘晓菲<sup>[13]</sup>等研究发现,地下滴灌马铃薯最佳滴灌带埋设深度为20cm,与本试验结果不符。原因可能是滴灌为点源灌溉,而渗灌为线源灌溉,相同工作压力下流量较大,并且试验地气候条件不同。

研究表明,T5处理的水分利用效率最高,为10.97 kg/m<sup>3</sup>,T7处理次之;T9处理的水分利用效率最低,为8.81 kg/m<sup>3</sup>。考虑当地农业用水资源现状,选择合适的地下渗灌埋深,适当降低马铃薯的灌水量,有利于提高马铃薯的水分利用效率。

## 4 结论

综合考虑马铃薯产量和水分利用效率,在本试验条件下,地下渗灌埋深为10cm,灌溉定额为1500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>时,马铃薯产量较高为39.78 t/hm<sup>2</sup>,水分利用效率最高为10.97 kg/m<sup>3</sup>,是宁夏干旱半干旱地区地下渗灌马铃薯生产中适宜的地下渗灌埋深和灌溉定额组合。

#### 参考文献:

- [1] 李典.渗灌技术的现状以及发展趋势[J].湖南水利水电,2015(2):32-33,50.

- [2] Yuping Z, ZHANG X, ZHANG Y, et al. Tomato root response to subsurface drip irrigation[J]. 土壤圈:英文版,2004,14(2):205-212.
- [3] 庄千燕.地下滴灌不同埋深对土壤水分运移及高羊茅生长的影响[D].北京:北京林业大学,2010.
- [4] 冯棣,刘晓菲,康跃虎,等.地下滴灌不同土壤水分调控对马铃薯产量和灌溉水利用效率的影响[J].节水灌溉,2015(8):42-44.
- [5] 郑文生,孟岩,李芳花,等.地下滴灌条件下氮肥调控对氮运移规律的影响[J].灌溉排水学报,2018,37(8):15-21.
- [6] 潘小保,缴锡云,郭维华,等.浅埋式滴灌毛管埋深对苜蓿生长的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(4):152-157.
- [7] 张营,缴锡云,卢佳,等.浅埋式滴灌土壤水分分布规律试验研究[J].水资源与水工程学报,2018,29(2):240-245.
- [8] 吴永成.华北地区冬小麦-夏玉米节水种植体系氮肥高效利用机理研究[D].北京:中国农业大学,2005.
- [9] 焦炳忠,任秋实,郭媛姣,等.不同灌溉定额对膜侧玉米生长及水分利用效率的影响[J].中国农村水利水电,2018(5):18-22.
- [10] 李道西,彭世彰.地下滴灌灌水设计参数对土壤水分分布影响的计算机模拟[J].沈阳农业大学学报,2004(Z1):507-509.
- [11] 蒋树芳,万书勤,冯棣,等.地下滴灌不同埋深对番茄产量和灌溉水利用效率的影响[J].节水灌溉,2015(8):26-28.
- [12] 刘秋丽.痕量灌溉不同灌水量对大棚茄子生长及水分利用效率的影响[J].中国农村水利水电,2018(8):27-30.
- [13] 刘晓菲,万书勤,冯棣,等.地下滴灌带不同埋深对马铃薯产量和灌溉水利用效率的影响[J].灌溉排水学报,2015,34(5):63-66.