

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdcqk.2020.0044

胡建强, 赵经华, 杨磊, 等. 不同灌水处理对多砾石砂土膜下滴灌玉米水分分布特征的影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(2): 211-217. HU J Q, ZHAO J H, YANG L, et al. Effect of different irrigation water treatments on water distribution characteristics of maize under submulched drip irrigation on pebbly sandy soil[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(2): 211-217. (in Chinese)

# 不同灌水处理对多砾石砂土膜下滴灌玉米 水分分布特征的影响

胡建强<sup>1</sup>, 赵经华<sup>1</sup>, 杨磊<sup>2</sup>, 彭艳平<sup>2</sup>

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 中国能源建设集团新疆电力设计院有限公司, 乌鲁木齐 83000)

**摘要:**为探究不同灌水定额对多砾石砂土膜下滴灌玉米土壤水分分布的影响,采用大田小区对比的试验方法,分析30.0、37.5、45.0、52.5、60.0 mm五种灌水定额对土壤水分分布的影响。结果表明:同一灌水处理条件下,土壤剖面含水率等值线分布形式的变化过程是“长轴在垂向的椭圆形-长轴在横向的椭圆形-单峰曲线”。灌水24 h后土壤含水率达到了一个相对的稳定状态,且土壤表面25 cm内的含水率明显小于灌后0 h土壤含水率;40 cm深度处土壤含水率达到了最大。不同灌水定额土壤含水率变化趋势一致,随灌水定额的增加含水率等值线图越接近于椭圆形;在垂直方向与水平方向土壤含水率增加幅度分别表现为:中部>下部>上部、左部>中部>右部;52.5 mm灌水定额处理下不同深度的土壤含水率最接近田间持水率。试验分析认为在多砾石砂土地区52.5 mm灌水定额处理是水分分布最优的灌水处理。

**关键词:**多砾石砂土;膜下滴灌;土壤含水率;土壤水分分布

中图分类号:TV93;S275 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Effect of different irrigation water treatments on water distribution characteristics of maize under submulched drip irrigation on pebbly sandy soil

HU Jianqiang<sup>1</sup>, ZHAO Jinghua<sup>1</sup>, YANG Lei<sup>2</sup>, PENG Yanping<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. China Energy Engineering Group Xinjiang Electric Power Design Institute CO., LTD., Urumqi 83000, China)

**Abstract:** In order to explore the effect of different irrigation quotas on soil moisture distribution of maize under drip irrigation on mulch pebbly sandy soil, the effect of 30.0, 37.5, 45.0, 52.5, and 60.0 mm irrigation quotas on soil moisture distribution were analyzed by field plot comparison test method. The results showed that the change process of the contour distribution of soil water content in the soil profile was the ellipse with the long axis in the vertical direction and the ellipse with the long axis in the horizontal direction-unimodal curve. After 24 hours of irrigation, the soil moisture content reached a relatively stable state, and the soil moisture content within 25 cm of the soil surface was significantly lower than that in 0 hours after irrigation. The soil moisture content was the highest at a depth of 40 cm. The changing trend of soil water content in different irrigation quotas was the same, while the contour map of soil water content was closer to an el-

收稿日期:2019-06-17 修回日期:2019-09-20 网络出版时间:2019-09-27

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190927.1413.006.html>

基金项目:“水利工程”重点学科研究项目(SLXK-YJS-2018-02);新疆维吾尔自治区自然科学基金(2019D01A40)

作者简介:胡建强(1993—),男,新疆伊犁人,主要从事灌溉节水理论研究。E-mail:1526166088@qq.com

通信作者:赵经华(1979—),男,新疆奇台人,副教授,博士,主要从事节水灌溉技术研究及教学工作。E-mail:zhaojinghua\_xj@126.com

lipse with the increase of irrigation quota. The increased range of soil water content in the vertical direction and horizontal direction was as follows; middle > lower > upper and left > middle > right, respectively. The soil moisture content at different depths treated with a 52.5 mm irrigation quota was closer to the field moisture retention rate. The experimental analysis showed that 52.5 mm irrigation quota treatment was the best irrigation water treatment for water distribution in the pebbly sandy soil area.

**Key words:** pebbly sandy soil; drip irrigation under film; soil moisture content; soil moisture distribution

在降雨极少且蒸发极大的内陆干旱区,水资源短缺制约了本地区农业经济发展和生态环境改善<sup>[1-3]</sup>。灌溉农业技术要求在获得更高产量的同时减少水资源的消耗<sup>[4-6]</sup>。玉米作为世界第一大作物,在经济发展中占有重要地位<sup>[7-8]</sup>。因此揭示滴灌玉米的土壤水分分布特征在使作物产量得到保障的同时还能最大程度地节约水资源。赵文举等<sup>[9]</sup>研究表明表层土壤水分变异性最强,随着土层深度的增大,变异性减弱,土壤水分等值线由密变疏,逐渐趋于平滑。王平等<sup>[10]</sup>研究表明滴灌玉米设计湿润比的增加,将增加湿润锋的垂向与水平运移距离。焦炳忠等<sup>[11]</sup>研究表明在玉米全生育期,土壤含水率随土层深度增加呈先增后减的变化趋势;随生育期变化,作物越来越趋向于吸收更深层土壤水分。张昊等<sup>[12]</sup>研究表明膜下滴灌玉米土壤水分运移变化多在 60 cm 土层以上,尤其以 0~20 cm 土层变化最为明显;不同生育期各土层的土壤含水量具有差异性。

科学灌溉制度的确定,对北疆地区水资源的合理开发利用、农田灌溉管理以及自然植被生态恢复等工作有着重要的现实意义。新疆北部阿勒泰草原的农牧业生产主要是在荒漠瘠薄的戈壁地上开发和起来。该地区农业生产的主要土壤质地是多

砾石砂土(0~40 cm 是多砾质土,40~60 cm 是轻砾石土),土壤保水保肥能力低;年均蒸发量是年均降雨量的 15 倍以上<sup>[13]</sup>。近些年对膜下滴灌玉米的生理指标、产量、水分利用效率及耗水规律的研究较多<sup>[14-16]</sup>,但对多砾石砂土膜下滴灌玉米土壤水分分布的研究存在空白。本文针对该地区土壤质地与其他地区存在的差异,对多砾石砂土膜下滴灌玉米的水分分布特征进行相应试验研究,探讨滴灌玉米的适宜度。

## 1 试验区概况与方法

### 1.1 试验区概况

2017 年 4 月—10 月在阿勒泰福海县灌溉试验站(N47°00′56″~47°01′56″,E87°35′56″~87°36′01″)进行试验。试验区高程 550 m,年均太阳辐射总量 564.7 kJ/cm<sup>2</sup>,光合有效辐射量为太阳总辐射量的 48%,作物生长期日照时数在 1 900 h 左右;年均气温 4.0 ℃,极端最高气温 41 ℃,极端最低气温 -42.7 ℃,气温年差达 83.7 ℃;≥0 ℃的积温为 3 272.6 ℃;年均蒸发量为 1 844.4 mm 以上,是年均降雨量的 15 倍以上,作物生长期日均相对湿度低于 30%。该站区土壤质地为多砾石砂土,具体土壤物理性状见表 1,土壤酸碱度及微量元素含量见表 2。

表 1 土壤物理性状

Tab. 1 Soil physical properties

土层深度/cm	颗粒含量/%				土壤质地	土壤干容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	田间持水率/%
	黏粒	粉粒	砂粒	>2 mm 石粒			
0~20	10.12	31.13	45.40	13.35	多砾质土	1.75	22.13
20~40	9.59	23.24	38.98	28.19	多砾质土	1.76	20.86
40~60	6.38	18.94	25.85	48.83	轻砾石土	1.79	17.22

表 2 土壤酸碱度及微量元素含量

Tab. 2 Soil pH and trace element content

土层深度/cm	土壤 pH 值	土壤渗透系数/(mm·d <sup>-1</sup> )	速效氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	有机质含量/%	全氮含量/%
0~20	8.62	7.86	20.54	98.61	10.34		
20~40	8.46	8.73	19.23	93.57	8.91	0.213	0.027
40~60	8.45	9.75	18.73	85.02	7.75		

## 1.2 试验材料与方法

玉米供试品种为先玉 1331 号,适宜在 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温为 $2\ 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上地区种植。选用滴头流量 $3.6\text{ L/h}$ ,滴头间距 $0.3\text{ m}$ 的单翼迷宫式滴灌带。用文丘里施肥罐进行施肥。选用 QT-303 型号,长 $600\text{ mm}$ ,直径为 $44\text{ mm}$ 规格的 Trime 管进行田间布置,平面布置见图 1。土壤水分含水率由德国生产的土壤水分探测仪 TRIME-IPH 通过预先布置好的 Trime 管进行测量。

玉米种植模式见图 1。试验设 5 个灌水定额处理( $30.0$ 、 $37.5$ 、 $45.0$ 、 $52.5$ 、 $60.0\text{ mm}$ ),每个处理设 3 个重复,其灌溉制度见表 3。各试验小区随机布置,小区之间均设有 $1.5\text{ m}$ 隔离带,防止水分交互;玉米试验田面积 $0.55\text{ hm}^2$ ,各小区面积 $0.03\text{ hm}^2$ ,各小区定苗株数均为 $3\ 000$ 株。

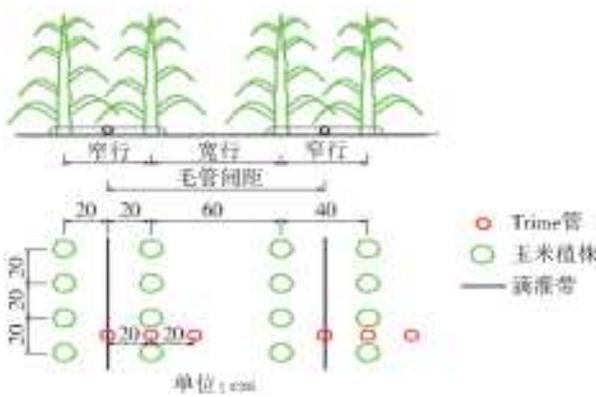


图 1 玉米种植模式及 Trime 管平面布置

Fig. 1 Maize cropping pattern and Trime tube layout plan

表 3 玉米灌水设计方案

Tab. 3 Design scheme of maize irrigation

灌水日期	灌水定额/mm					备注
	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$W_5$	
5月15日	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	出苗水
6月20日	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5	补水
7月5日	30.0	37.5	45	52.5	60.0	施加尿素
7月12日	30.0	37.5	45.0	52.5	60.0	施加尿素
7月19日	30.0	37.5	45.0	52.5	60.0	施加尿素
7月25日	30.0	37.5	45.0	52.5	60.0	
8月1日	30.0	37.5	45.0	52.5	60.0	
8月9日	30.0	37.5	45.0	52.5	60.0	施加尿素
8月16日	30.0	37.5	45.0	52.5	60.0	
8月23日	30.0	37.5	45.0	52.5	60.0	
9月4日	30.0	37.5	45.0	52.5	60.0	
总计	337.5	405.0	472.5	540.0	607.5	

5月13日播种,随播种施加底肥(磷酸二铵 $150\text{ kg/hm}^2$ ,硫酸钾镁肥 $90\text{ kg/hm}^2$ )。苗期为了保

证各试验小区出苗率及拔节期充分蹲苗,各处理灌水定额一致,分别为 $30.0$ 、 $37.5\text{ mm}$ 。在玉米全生育期用文丘里施肥罐施加尿素 4 次(每次 $225\text{ kg/hm}^2$ ),10月3日测产并收获。

## 1.3 测定项目

### 1.3.1 耗水量

TRIME-IPH 在播种前、收获后、灌前、灌后测定土壤剖面含水率(体积),生育阶段转变与降雨需进行加测;开始灌水后每隔 $1\text{ h}$ 测定一次土壤含水率(至灌水结束),灌水结束后每隔 $4\text{ h}$ 测定一次( $72\text{ h}$ 后结束测定)。每 $10\text{ cm}$ 分层测定 $0\sim 60\text{ cm}$ 土壤含水率。旱作物的生育期任一时段内,作物耗水量根据农田水量平衡方程计算

$$ET=W_0-W_t+W_T+P_0+K+M \quad (1)$$

式中: $ET$ 为时段 $t$ 内的作物耗水量, $\text{mm}$ ;  $W_0$ 、 $W_t$ 分别为时段初与时段末的土壤计划湿润层内的储水量, $\text{mm}$ ;  $W_T$ 为由于计划湿润层增加而增加的水量, $\text{mm}$ ,本试验不涉及计划湿润层的增加,故 $W_T=0$ ;  $P_0$ 为土壤计划湿润层内保存的有效降水量, $\text{mm}$ ;  $K$ 为 $t$ 时段内的地下水补给量, $\text{mm}$ ;由于试验区地下水埋深大于 $6\text{ m}$ ,因此不考虑地下水补给(即 $K=0$ )<sup>[17]</sup>;  $M$ 为时段 $t$ 内灌溉水量, $\text{mm}$ 。

### 1.3.2 气象数据

试验站的气温、辐射、降雨等常用气象数据由站内安装的 Watchdog 小型自动气象站全天候自动观测,每 $30\text{ min}$ 测定一次。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同灌水定额对土壤含水率的影响

图 2 为灌水结束 $24\text{ h}$ 时不同灌水定额下湿润体含水率分布情况。可见,灌水定额的增加与湿润体内的平均含水率的上升成正比,且含水率等值线逐渐接近椭圆形;灌水定额为 $30.0$ 、 $37.5$ 、 $45.0$ 、 $52.5$ 、 $60.0\text{ mm}$ 时,湿润体内的平均体积含水率分别为 $14.10\%$ 、 $15.08\%$ 、 $16.45\%$ 、 $17.44\%$ 、 $19.42\%$ 。在深度方向,随灌水定额的增加含水率均呈现先增后减的趋势,土壤含水率增加幅度表现为:中部 $>$ 下部 $>$ 上部; $30\sim 37.5\text{ mm}$ 灌水定额处理的含水率峰值在 $30\text{ cm}$ 深处, $45\sim 60\text{ mm}$ 灌水定额处理的含水率峰值出现在 $40\text{ cm}$ 处,且随灌水定额的增加含水率的峰值将不会下移,这主要是因为多砾石砂土土壤 $40\text{ cm}$ 以下是砂土,由沙子、卵石等组成,土壤渗漏量大。各处理 $10\text{ cm}$ 处的土壤含水率最低,一方面是因为土壤持水能力差,另一方面是因为气候条件导致蒸发量大。

在水平方向,随灌水定额的增加含水率逐渐增加,土壤含水率增加幅度表现为:左部>中部>右部。

多砾石砂土土壤的渗透系数较大,故而灌水定额的增大对湿润体横向直径影响较小,但在一定程

度上增加了深度。由图可知,52.5 mm 灌水定额处理湿润体各处的含水率最接近田间持水率。由于多砾石砂土的土壤物理性状,过大的灌水定额将引起深层渗漏,灌溉水浪费。

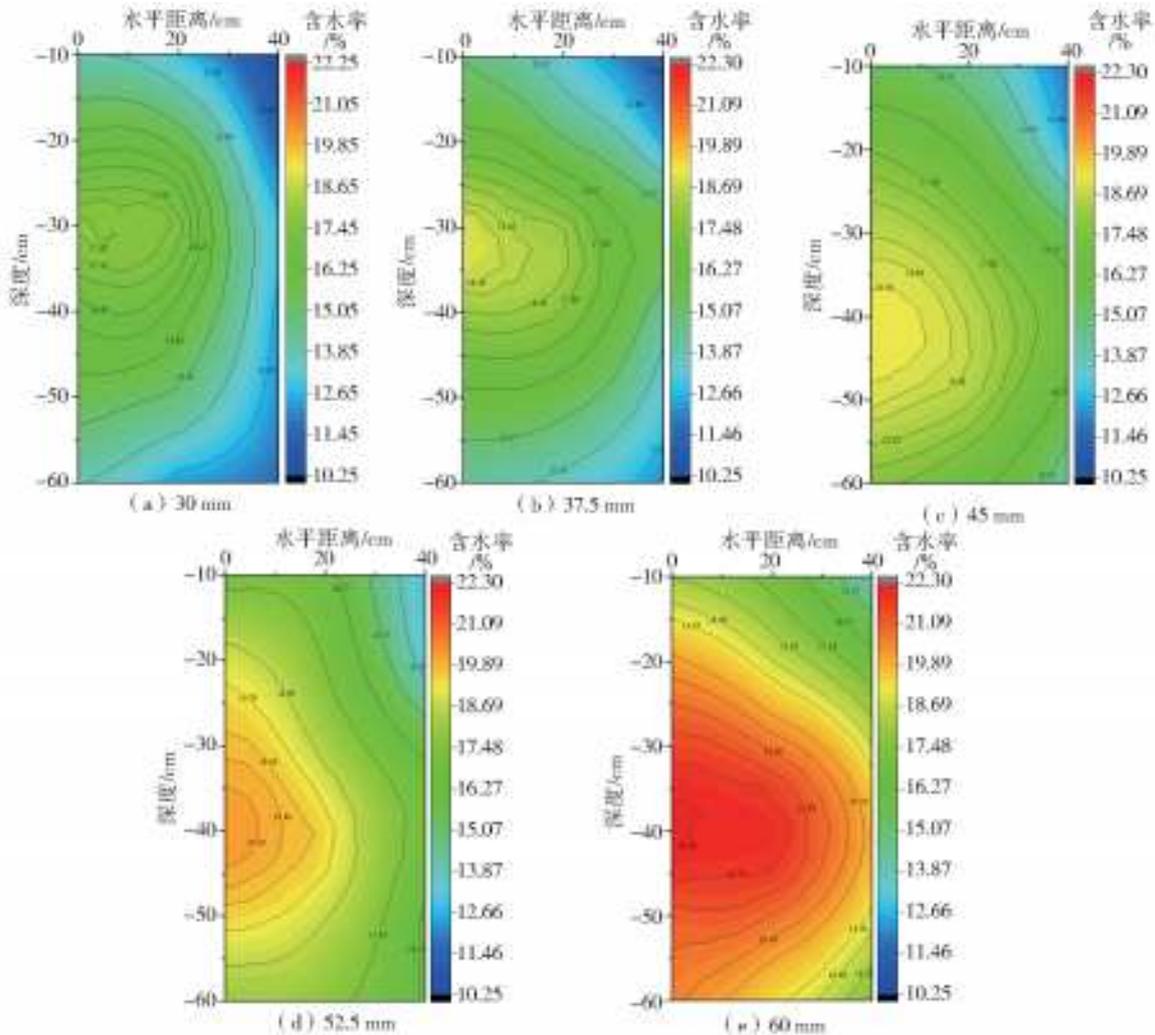


图 2 不同灌水定额处理含水率分布

Fig. 2 Water content distribution in different irrigation quotas

### 2.2 不同时刻土壤含水率分布特征

图 3 为灌水结束 0、24、72 h 时 60 mm 灌水定额处理土壤含水率分布情况。由图 3(a)灌水结束时土壤含水率分布可知,在灌水过程中,土壤含水率是以滴头为中心呈长轴在纵向的椭圆形向外扩散。图 3(b)灌水结束 24 h 时土壤含水率分布可知,水分再分布过程基本结束,土壤水分达到一个相对稳定状态,土壤内最大含水率与最小含水率差值变小。由图 3(a)、图 3(b)灌水结束至灌水结束 24 h 可以看出,土壤含水率以长轴在纵向的椭圆形逐渐扩散为长轴在水平方向的椭圆形;湿润体内平均质量含水率分别为 17.72%、19.42%,与灌水结束时相比,湿润体内平均含水率明显上升,这主要是因为试验设计时没有设计测定 0~10 cm 的含水率,导致出现

湿润体内平均含水率明显上升现象。由图 3(c)灌水结束 72 h 时土壤含水率分布可知,随蒸散作用时间的增加,湿润体各层土壤含水量均逐步减少。土壤含水率呈单峰曲线变化,当深度不变时,水平距离 20 cm 时土壤含水率最大。但由图 3(b)和图 3(c)可知,随深度的增加含水率减小幅度越来越小;深度不变时,随水平距离的增加含水率减小幅度越来越小,这主要是因为土壤蒸发与根系喜水性造成的结果。

### 2.3 土壤水分再分布特性研究

由图 4 可知,滴灌历时 2 h 后,0~15 cm 土层土壤含水率的增加幅度最大;历时 3~5 h 后土壤含水率的最大值一般在 20 cm 左右深度处;历时 6~7 h 后土壤含水率的最大值一般在 30 cm 左右深度处;灌后 24 h 后土壤含水率的最大值一般在地面以下

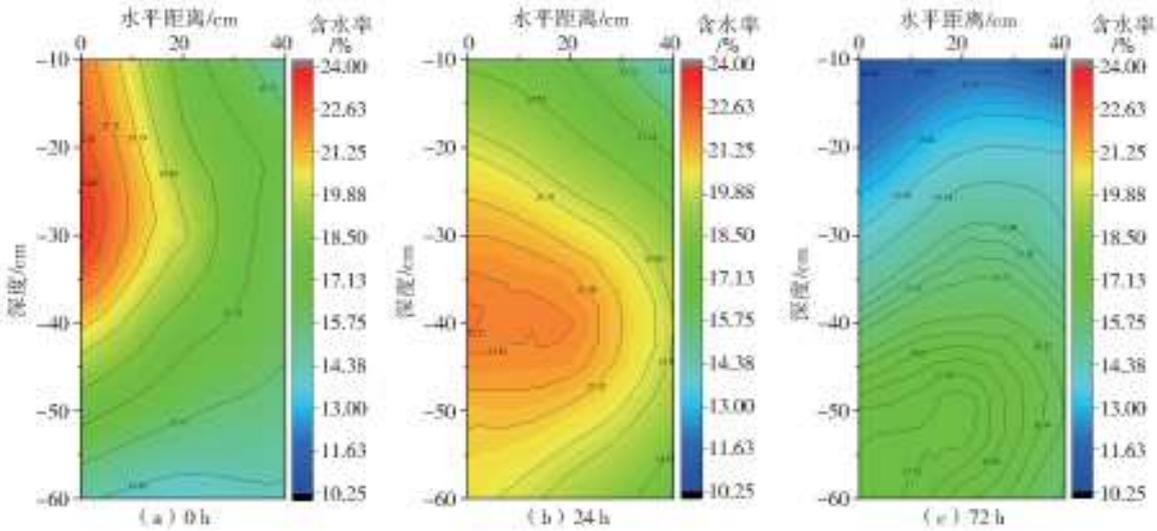


图3 60 mm 灌水定额下不同时刻的土壤含水率分布

Fig. 3 Distribution of soil moisture content at different times under 60 mm irrigation quota

40 cm 左右深度处;且 60 cm 处的土壤含水率明显小于其上部土壤含水率,这主要是由当地的土壤现状所导致。在一定时间范围内,随灌水时间的增加土壤含水率逐渐增加;灌水结束后,土壤含水率分布不均将引起水分继续向周围土壤运动的趋势。随着土壤水分再分布的进行,灌后 24 h 土壤表面 25 cm 以内的含水率明显小于灌后 0 h 土壤含水率。这是因为灌溉结束后,在重力作用下,土壤上部水分向下部及周围扩散,下部及周围土壤水分含量增加,上部土壤水分含量减少。土壤水分再分布达到一个相对稳定状态后,随蒸腾和蒸发作用时间的增加,湿润体各层土壤含水量均逐步减少,随时间的推移无限接近或小于灌溉前土壤含水率状态。

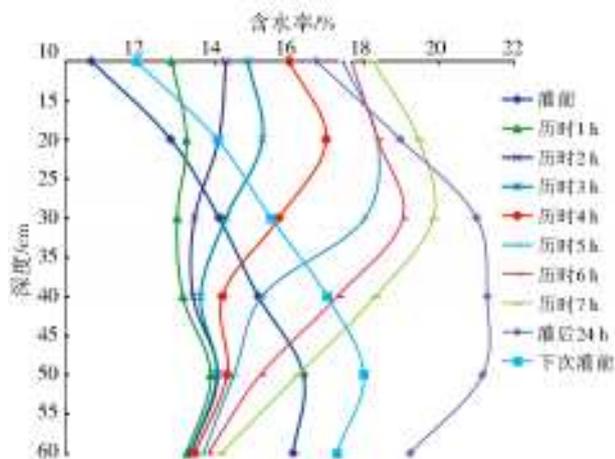


图4 土壤水分再分布过程

Fig. 4 Soil water redistribution process

### 3 讨论

土壤水分分布的研究有助于在保障产量的同时减少不必要的水分消耗<sup>[18-19]</sup>。目前多集中于对砂质

土、黏质土及壤土的水分分布研究,土壤水分分布又存在一定的空间变异性<sup>[20-21]</sup>。因此对多砾石砂土的水分分布特征进行研究总结,从而弥补研究空白。黄耀华<sup>[22]</sup>等人研究表明壤质黏土水分含量在二维空间随离滴头距离的增加而逐渐减少,砂质壤土与黏壤土水分含量随深度增加表现为先减小后增加,且继续向下移动趋势明显。本文研究表明多砾石砂土水分含水率随径向距离增大而减少,随土层深度增加表现为先增加后减小,峰值没有继续向下移动的趋势。这主要与土壤质地有关,40 cm 以下是砂土,由沙子、卵石等组成,土壤渗漏量大,因此随灌水定额的增加含水率的峰值不会下移。赵引等<sup>[23]</sup>研究表明灌水结束后,贮水量先增加随后缓慢减少,这与本文研究一致。

本研究发现,随着灌水定额的增大湿润体的体积不断增大,湿润体含水率也随之增大,距离滴头越近含水量等值线越密,外围含水量等值线较稀疏,滴头正下方约 40 cm 处土壤含水率达到最大值,再分布后含水量等值线变为稀疏。这与张志刚<sup>[24]</sup>研究一致。含水率垂直扩散速率比水平方向上大,再分布过程湿润体的轮廓线形状可用半椭圆型方程表示,土壤水分再分布达到一个相对稳定状态后,土壤表面含水率明显小于灌溉时土壤含水率。这与赵颖娜<sup>[25]</sup>研究结果一致。但本研究发现是在 24 h 后土壤水分再分布达到一个相对稳定状态,这主要是因为多砾石砂土的透水性强,湿润体各处含水率较早的达到一个相对稳定的状态。

### 4 结论

灌水定额的增加与湿润体内的平均含水率的增

加呈线性关系,且含水率等值线逐渐接近椭圆形。在垂直方向,随灌水定额的增加含水率均呈现先增后减的趋势,在水平方向,随灌水定额的增加含水率逐渐增加。

同一灌水定额处理灌后 0 h 的土壤含水率以滴头为中心呈长轴在纵向的椭圆形向外扩散。灌后 24 h 的土壤含水率再分布过程基本结束,土壤水分达到一个相对稳定状态,土壤内最大含水率与最小含水率差值变小。灌后 72 h 随土壤深度与水平距离的增加含水率减小幅度越小。

在多砾石砂土土壤质地条件下,0~40 cm 的多砾质土渗透系数较大,同一灌水处理的含水率均在灌水 24 h 后达到一个相对的稳定状态,此时 25 cm 深度内的含水率明显小于灌后 0 h 的土壤含水率。40~60 cm 的轻砾石土渗透系数最大、保水能力极差,随灌水定额的增加含水率峰值逐渐下移至 40 cm;当灌水定额大于 45 mm 时,灌水定额的增加并不会使含水率的峰值下移。52.5 mm 灌水定额处理的土壤含水率最接近田间持水率,且没有造成水分渗漏损失。52.5 mm 灌水定额处理的土壤水分分布最优且有利于水资源的合理应用。

#### 参考文献(References):

[1] 李彪,孟兆江,申孝军,等. 隔沟调亏灌溉对冬小麦-夏玉米光合特性和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(11): 8-14. (LI B, MENG Z J, SHEN X J, et al. Effects of furrow regulated deficit irrigation on Photosynthetic Characteristics and yield of winter wheat-summer maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(11): 8-14. (in Chinese)) DOI: 10. 13522/ j. cnki. ggps. 20180096.

[2] RAES D, STEDUTO P, HSIAO TC, et al. Aquacrop-the fao crop model to simulate yield response to water: ii. main algorithms and software description[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3): 438-447. DOI: 10. 2134/ agronj 2008. 0140s.

[3] 胡建强,赵经华,马英杰,等. 不同灌水定额对膜下滴灌玉米的生长、产量及水分利用效率的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(5): 249-254. (HU J Q, ZHAO J H, MA Y J, et al. Effects of different irrigation quotas on growth, yield and water use efficiency of drip irrigation maize under mulch[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(5): 249-254. (in Chinese)) DOI: 10. 11705/ j. issn. 1672-643X. 2018. 05. 41.

[4] SKAGGS T H, TROUT T J, ŠIMUNEK J, et al. Comparison of hydrus-2d simulations of drip irrigation with experimental observations [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004, 130(4): 304-310. DOI: 10.

1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:4(304).

[5] 梁烜赫,徐晨,赵鑫,等. 干旱对不同种植密度玉米生长发育及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(11): 15-19. (LIANG T H, XU C, ZHAO X, et al. Effects of drought on growth and yield of maize with different planting densities[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(11): 15-19. (in Chinese)) DOI: 10. 13522/ j. cnki. ggps. 2017. 0621.

[6] 张俊鹏,孙景生,刘祖贵,等. 不同水分条件和覆盖处理对夏玉米籽粒灌浆特性和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 501-506. (ZHANG J P, SUN J S, LIU Z G, et al. Effects of different water conditions and mulching treatments on grain filling characteristics and yield of summer maize [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(3): 501-506. (in Chinese)) DOI: 10. 3724/ SP. J. 1011. 2010. 00501.

[7] 李少昆,赵久然,董树亭,等. 中国玉米栽培研究进展与展望[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 1941-1959. (LI S k, ZHAO J L, DONG S T, et al. Progress and prospect of maize cultivation in China[J]. Agricultural Science of China, 2017, 50(11): 1941-1959. (in Chinese)) DOI: 10. 3964/ j. issn. 0578-1752. 2017. 11. 001.

[8] 中国农业年鉴编委会. 中国农业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011. (China Agricultural Yearbook Editorial Committee. China Agricultural Yearbook[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2011. (in Chinese))

[9] 赵文举,李晓萍,范严伟,等. 西北旱区压砂地土壤水分的时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 144-151. (ZHAO W J, LI X P, FAN Y W, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of soil moisture in sandy soil in arid northwest China [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2015, 31(17): 144-151. (in Chinese)) DOI: 10. 11975/ j. issn. 1002-6819. 2015. 17. 019.

[10] 王平. 滴灌湿润比对土壤水分分布及玉米生长生理指标影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016. (WANG P. Effect of drip irrigation wetting ratio on soil moisture distribution and physiological indexes of maize growth[D]. Yangling: Northwest University of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2016. (in Chinese))

[11] 焦炳忠. 宁夏扬黄灌区不同灌溉模式对玉米生长及土壤水分时空分布的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2017. (JIAO B Z. Effects of different irrigation modes on maize growth and spatial and temporal distribution of soil moisture in Yang Huang Irrigation Area of Ning Xia[D]. Yin Chuan: Ningxia University, 2017. (in Chinese))

[12] 张昊,郝春雷,孟繁盛,等. 膜下滴灌条件下不同灌水量对玉米产量及土壤水分的影响[J]. 作物杂志, 2016(1): 105-109. (ZHANG H, HAO C L, MENG F S, et al. Effects of different irrigation amounts on Maize

- Yield and soil moisture under drip irrigation under mulch[J]. *Crop Journal*, 2016(1):105-109. (in Chinese)) DOI:10.16035/j.issn.1001-7283.2016.01.019.
- [13] 刘虎,苏佩凤,郭克贞,等.北疆干旱荒漠地区春小麦与苜蓿灌溉制度研究[J].*中国农学通报*,2012,28(3):187-190. (LIU H, SU P F, GUO K Z, et al. Study on irrigation system of spring wheat and alfalfa in arid desert areas of northern Xinjiang[J]. *China Agricultural Bulletin*, 2012, 28(3):187-190. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-6850.2012.03.034.
- [14] 张泽锦,唐丽,李跃建,等.滴灌带布置方式对宽间栽培莴笋土壤水盐分布及产量的影响[J].*灌溉排水学报*,2018,37(10):23-27,47. (ZHANG Z J, TANG L, LI Y J, et al. Effects of drip irrigation belt arrangement on soil water and salt distribution and yield of lettuce grown in wide compartment[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(10):23-27, 47. (in Chinese)) DOI:10.13522/j.cnki.gggs.2017.0414.
- [15] 齐智娟,冯浩,张体彬,等.覆膜耕作方式对河套灌区土壤水热效应及玉米产量的影响[J].*农业工程学报*,2016,32(20):108-113. (QI Z J, FENG H, ZHANG T B, et al. Effects of mulched cultivation on soil water and heat effects and maize yield in Hetao irrigation area[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2016, 32(20):108-113. (in Chinese)) DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.20.014.
- [16] 张智郡,刘海军,张立伟,等.玉米生理生态指标及产量对不同生育期水分亏缺的响应[J].*灌溉排水学报*,2018,37(4):9-17. (ZHANG Z J, LIU N J, ZHANG L W, et al. Response of physiological and ecological indexes and yield of Maize to water deficit at different growth stages[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(4):9-17. (in Chinese)) DOI:10.13522/j.cnki.gggs.2017.0534.
- [17] 洪明,朱航威,穆哈西,等.不同滴头流量及灌水定额下红枣树耗水规律[J].*干旱地区农业研究*,2014,32(1):72-77,109. (HONG M, ZHU H W, MU H X, et al. Water consumption of jujube trees under different dripper discharge and irrigation quotas[J]. *Agricultural Research in Arid Areas*, 2014, 32(1):72-77, 109. (in Chinese)) DOI:10.7606/j.issn.1000-7601.2014.01.012.
- [18] 陈东峰,罗朋,张富仓,等.膜下滴灌水肥调控对玉米生长和水肥利用的影响[J].*干旱地区农业研究*,2018,36(5):161-168. (CHEN D F, LUO P, ZHANG F C, et al. Effects of water and fertilizer regulation under mulch drip irrigation on maize growth and water and fertilizer utilization[J]. *Agricultural Research in Arid Areas*, 2018, 36(5):161-168. (in Chinese)) DOI:10.7606/j.issn.1000-7601.2017.05.24.
- [19] 何子建,史文娟,杨军强.膜下滴灌间作盐生植物棉田水盐运移特征及脱盐效果[J].*农业工程学报*,2017,33(23):129-138. (HE Z J, SHI W J, YANG J Q. Characteristics of water and salt transport and desalination effect in cotton field of halophyte intercropped with drip irrigation under mulch[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2017, 33(23):129-138. (in Chinese)) DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2017.23.017.
- [20] 符超峰,赵景波.毛乌素沙地东南缘不同类型沙丘土壤水分分布特征[J].*干旱区研究*,2011,28(3):377-383. (FU C F, ZHAO J B. Soil moisture distribution characteristics of different types of dunes in the southeastern margin of Maowusu Sandy Land[J]. *Arid Region Studies*, 2011, 28(3):377-383. (in Chinese)) DOI:10.13866/j.azr.2011.03.001.
- [21] 何福红,黄明斌,党廷辉.黄土高原沟壑区小流域土壤水分空间分布特征[J].*水土保持通报*,2002,22(4):6-9. (HE F H, HUANG M B, DANG T H. Spatial distribution characteristics of soil moisture in small watershed in gully region of Loess Plateau[J]. *Soil and Water Conservation Bulletin*, 2002, 22(4):6-9. (in Chinese)) DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2002.04.002.
- [22] 黄耀华,王侃,杨剑虹.滴灌施肥条件下土壤水分和速效氮迁移分布规律[J].*水土保持学报*,2014,28(5):87-94,301. (HUANG Y H, WANG K, YANG J H. Distribution of soil moisture and available nitrogen under drip irrigation and fertilization[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(5):87-94, 301. (in Chinese)) DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2014.05.016.
- [23] 赵引,毛晓敏,薄丽媛.覆膜和灌水处理下土壤水分动态与玉米生长模拟研究[J].*农业机械学报*,2018,49(9):195-204. (ZHAO Y, MAO X M, BO L Y. Study on soil moisture dynamics and maize growth simulation under plastic film mulching and irrigation[J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2018, 49(9):195-204. (in Chinese)) DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.19.024.
- [24] 张志刚,李宏,李疆,等.地表滴灌条件下滴头流量对土壤水分入渗一再分布过程的影响[J].*干旱地区农业研究*,2016,34(2):224-231. (ZHANG Z G, LI H, LI J, et al. Effects of dripper discharge on soil water infiltration-redistribution under surface drip irrigation[J]. *Agricultural Research in Arid Areas*, 2016, 34(2):224-231. (in Chinese)) DOI:10.7606/j.issn.1000-7601.2016.02.36.
- [25] 赵颖娜,汪有科,马理辉,等.原状土滴灌条件下水分再分布过程研究[J].*灌溉排水学报*,2010,29(2):44-49. (ZHAO Y N, WANG Y K, MA L H, et al. Study on water redistribution under undisturbed soil drip irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(2):44-49. (in Chinese)) DOI:10.13522/j.cnki.gggs.2010.02.009.