

# 通气与水分再分布 对地下滴灌湿润体导气率的影响

郭庆<sup>1</sup>, 牛文全<sup>2,3</sup>, 张振华<sup>4</sup>

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;  
3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 鲁东大学地理与规划学院, 山东 烟台 264025)

**摘要:** 利用瞬态土壤导气率测算模型, 研究了室内模拟地下滴灌土壤导气率的变化, 分析了通气与灌后水分再分布对地下滴灌湿润体土壤导气率的影响。结果表明: 地下滴灌湿润体内供气压力与时间呈良好的线性关系, 导气特征参数与土壤导气率呈极显著的线性关系; 容重为 1.3、1.4 和 1.5 g/cm<sup>3</sup> 的风干土样在灌水停止时, 棕壤土的导气率分别减小至灌水前的 8.9%、22.7% 和 49.9%, 壤土的导气率分别减小至灌水前的 2.7%、5.4% 和 9.8%, 灌后土壤水分再分布过程中, 土壤导气率呈缓慢增长趋势; 灌后人工通气可迅速提高地下滴灌湿润体土壤导气率, 通气 5 min 后, 棕壤土的导气率分别提高至灌水前干土的 64.1%、54.1% 和 79.9%, 是停止灌水时的 7.3 倍、2.5 倍和 1.6 倍, 壤土的导气率分别提高至灌水前的 79.9%、84.1% 和 80.8%, 是停止灌水时的 30.5 倍、15.3 倍和 8.4 倍。

**关键词:** 通气; 水分再分布; 地下滴灌; 导气率

**中图分类号:** S275.6 **文献标识码:** A

## Effect of Ventilation and Water Redistribution on Air Permeability of Wetted Soil under Subsurface Drip Irrigation

GUO Qing<sup>1</sup>, NIU Wen-quan<sup>2,3</sup>, ZHANG Zhen-hua<sup>4</sup>

(1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province;  
2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling 712100,  
Shaanxi Province; 3. Institute of Soil and Water Conservation Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province;  
4. College of Geography and Planning, Ludong University, Yantai 264025, Shandong Province)

**Abstract:** In this paper, the transient soil air permeability calculation model is used to investigate the change of soil air permeability under subsurface drip irrigation in lab, analyze the effect of ventilation and water redistribution on the air permeability of wetted soil under subsurface drip irrigation. The results showed that there existed good linear relationship between gas pressure and time, and significant linear relationship between the characteristic parameter of air permeability and soil air permeability in the wetted soil under subsurface drip irrigation; when the irrigation stopped, the air permeability of air-dried brown soil, in which the bulk density were 1.3, 1.4 and 1.5 g/cm<sup>3</sup>, were reduced to 8.9%, 22.7% and 49.9%, respectively; and loe soil, in which the bulk density were 1.3 g/cm<sup>3</sup>, 1.4 g/cm<sup>3</sup> and 1.5 g/cm<sup>3</sup>, were reduced to 2.7%, 5.4% and 9.8%, respectively; in the process of soil water redistribution, the soil air permeability showed slow growth; the artificial ventilation after irrigation could improve the air permeability of the wetted soil rapidly; after five minutes of continuous ventilation, the air permeability of brown soil increased to 64.1%, 54.1% and 79.9%, which is 7.3 times, 2.5 times and 1.6 times of that of the air-dried soil, and the air permeability of loe soil increased to 79.9%, 84.1% and 80.8%, which is 30.5 times, 15.3 times and 8.4 times that of the air-dried soil.

**Key words:** ventilation; water redistribution; subsurface drip irrigation; air permeability

收稿日期: 2011-09-02

基金项目: “十二五”“863”计划课题(2011AA100507)。

作者简介: 郭庆(1984-), 男, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉新技术的研究。E-mail: guoqing518@yahoo.cn。

通讯作者: 牛文全(1972-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事节水灌溉新技术的研究工作。E-mail: nwq@vip.sina.com。

土壤也和自然界许多生物活体类似,在不停地进行着“呼吸”<sup>[1]</sup>。土壤空气来源于大气,存在于土壤各种孔隙中,而土壤孔隙被水和空气共同占据。无论土壤处于脱湿还是吸湿过程,水总是优先占据较小孔隙,空气则优先占据较大孔隙。同时土壤空气的交换主要通过土壤中相互连接并且充气的孔隙来实现的。土壤通气性好坏主要取决于土壤的总孔隙度,孔隙连接性和通气孔隙度的大小<sup>[2]</sup>。土壤大孔隙是土壤通气主要通道,土壤大孔隙的数量和比例是决定土壤通气能力的内在因素。当灌溉或降雨时,土壤孔隙充水,水分增加,土壤空气被排挤出来;当水分减少时,大气中的空气便会进入土壤。因此,土壤含水率增加(或减少)将减少(或增加)土壤空气占据的孔隙体积,从而影响土壤气体的交换速度。由于测试手段相对困难,对土壤空气的研究还未广泛开展,但其应用的范围及潜力都很广<sup>[3]</sup>。

土壤导气率是指单位时间内单位面积土壤上透过的气体数量。它反映了气体透过土体的能力,是土壤特性对土壤空气更新速率的综合影响指标。土壤导气率通常是在研究土体一端施加一定的气压,然后测量通过土体的稳定气体通量,依据土壤空气对流通量方程获得<sup>[4-6]</sup>。土壤导气率直接影响土壤气体交换能力,进而影响土壤水分和养分有效性。同时土壤导气能力可用于分析土壤孔隙几何分布、结构以及土壤稳定性等,因此土壤导气特征受到很大关注<sup>[7]</sup>。Kirkham<sup>[8]</sup>提出瞬态土壤导气率测量方法,并在假设空气不可压缩的情况下分析了原状土土壤导气率。Evans和Kirkham<sup>[9]</sup>将土壤导气率的瞬态测量应用于田间。Grover<sup>[10]</sup>提出了一种土壤导气率稳态法的测量装置。Jalbert和Dane<sup>[11]</sup>提出了侵入式和非侵入式测量田间土壤导气率的装置,并推导出了稳态土壤导气率测算模型。Hailong Li等<sup>[12]</sup>采用瞬态法测量了沥青的导气率,此种方法不需要给土壤样品提供稳定的气流,具有简便经济的优点。王卫华等<sup>[13]</sup>应用土壤导气率测量仪对不同含水率、土层、取样方向、根系密度下的导气率,以及室内原状土壤样本在田间持水率情况下的导气率进行了研究,认为含水率接近田间持水率时土壤导气率和饱和导水率之间存在对数线性关系。灌水或降雨后,作物根际土壤充满水,土壤中气体被迫排出,造成作物根系土壤通气不良, O<sub>2</sub> 不足<sup>[14]</sup>。如果土壤中 CO<sub>2</sub> 含量过高、O<sub>2</sub> 含量严重不足,就会抑制作物根系有氧呼吸,极大地影响作物健康生长<sup>[15]</sup>。对于地下滴灌,作物的根系主要分布在湿润体内,因此如何改善地下滴灌湿润体土壤导气率的问题亟待解决。目前国内外学者对一维和三维土壤导气率的测算模型和测量装置做了大量研究,而对地下滴灌湿润体土壤导气率的研究尚未涉及。本文在室内采用单灌水器模拟地下滴灌,研究了地下滴灌后湿润体土壤导气率的测定方法及水分再分布和人工通气对湿润体土壤导气率的影响,为如何改善地下滴灌湿润体土壤导气率提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土样

供试土样为棕壤土、壤土和黄绵土。土壤经风干、碾碎、过筛(2 mm)后备用。按照国际土壤质地分类标准进行划分,划

分结果如表 1。

表 1 供试土壤的颗粒组成

供试土样	取样地点	各级含量百分数/%			土壤质地(国际制)
		<0.02 mm	0.02~0.25 mm	>0.25 mm	
棕壤土	山东烟台	31.172	68.266	0.562	砂壤土
壤土	陕西杨凌	51.280	48.502	0.218	粉质黏土
黄绵土	陕西安塞	22.658	76.844	0.498	沙壤土

## 1.2 试验装置

### 1.2.1 瞬态法测定土壤导气率

瞬态法测定一维土壤导气率模型<sup>[12]</sup>如下:

$$K_a = -\frac{\mu V Z s}{A P_{atm}} \quad (1)$$

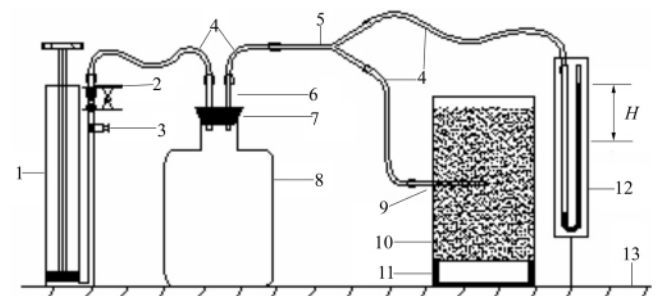
其中:  $f(t) = \ln[c(P - P_{atm}) / (P + P_{atm})]$

$$c = [P(0) + P_{atm}] / [P(0) - P_{atm}]$$

式中:  $K_a$  为土壤导气率,  $m^2$ ;  $V$  为气室体积,  $m^3$ ;  $Z$  为土柱高度,  $m$ ;  $A$  为土柱的底面积,  $m^2$ ;  $P_{atm}$  为标准大气压,  $Pa$ ;  $s$  为时间  $t$  的函数关系拟合的直线斜率,  $s^{-1}$ ;  $P(0)$  为初始时刻气室中封闭气体的压力,  $Pa$ ;  $P$  为  $t$  时刻气室中封闭气体的压力,  $Pa$ ;  $\mu$  为空气动力黏滞系数,  $\mu = (1.717 + 4.8T) \times 10^{-8} Pa \cdot s$ ;  $T$  为温度,  $^{\circ}C$ , 当温度为  $-10^{\circ}C < T < 40^{\circ}C$  时,  $\mu$  的误差小于 0.15%, 当温度为  $-10^{\circ}C < T < 40^{\circ}C$  且大气压强大于 77 kPa 时, 湿度对  $\mu$  的影响小于 1%, 误差可以忽略<sup>[16]</sup>。

### 1.2.2 地下滴灌条件下土壤导气特征参数和导气率的测定装置

土壤导气特征参数测定装置由气泵、气室、试验土箱和压力计 4 部分组成(图 1)。对于地下滴灌, 假设封闭气体压力随时间变化关系曲线特征与瞬态一维土壤导气率的计算模型一致, 也能得出  $f(t)$  作为时间  $t$  的函数关系拟合的直线斜率  $s$ , 在本文中将斜率  $s$  称为土壤导气特征参数。单滴头采用微孔滴头<sup>[17]</sup>。马孝义等<sup>[18]</sup>研究表明, 进行地下滴灌的微孔滴头适宜孔径为 0.9~1.2 mm。截取长 20 cm  $\Phi$ 6 mm 的塑料管, 在距离密封端 2 cm 处打孔, 孔径取 1 mm, 加套进行防堵处理。对截取的 35 个单滴头进行空气介质恒定水头下出流量测定, 选取 7

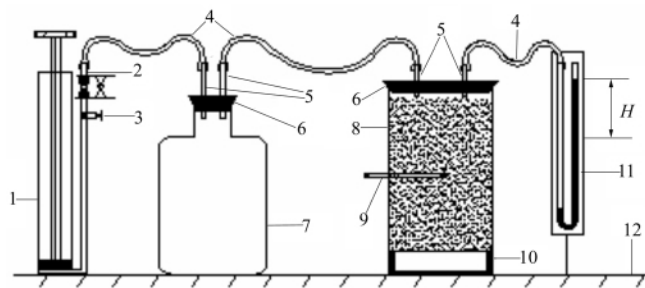


1-气泵; 2-气门口; 3-导气开关; 4-导气软管; 5-三通; 6-导气硬管; 7-橡皮塞; 8-气室; 9-滴灌管; 10-土箱; 11-支座; 12-U形管压力计; 13. 地面

图 1 地下滴灌土壤导气特征参数测定装置

个流量最为接近平均流量的滴头(1个用于导气特征参数测定试验,其余6个用于地下滴灌条件下湿润体土壤导气率测定试验)。试验土箱选用圆柱形有机玻璃桶,内径20 cm,高32 cm,距顶部17 cm处钻 $\Phi 6$  mm直孔,土箱下底面打满 $\Phi 1$  mm的直孔留作排气之用。装土之前用胶带封住土箱底部直孔,待装土完成后去掉胶带,土样为棕壤土、壤土和黄绵土,按密度为1.3、1.35、1.4、1.45、1.5、1.55 g/cm<sup>3</sup>分层(5 cm)装入有机玻璃土箱中,至钻孔处将单滴头穿过钻孔,滴头置于土箱中部,继续装土至箱顶以下2 cm处。

目前,暂无地下滴灌条件下埋点源土壤导气率的测算模型,只能借助现有土壤导气率模型做进一步的推导。待地下滴灌条件下土壤导气特征参数测定完成后,将滴灌管裸露在空气中的一端密封,然后利用瞬态法测定土箱中一维土柱的土壤导气率(图2)。



1-气泵;2-气门嘴;3-导气开关;4-导气软管;5-导气硬管;6-橡皮塞;7-气室;8-土箱;9-滴灌管;10-支座;11-U形管压力计;12.地面

图2 地下滴灌土壤导气率测定装置

### 1.2.3 地下滴灌试验装置

地下滴灌试验装置由点源供水系统和试验土箱组成(图3)。采用马氏瓶供水并保持每次试验的水头和灌水量一致。试验土箱选用圆柱形有机玻璃桶,内径20 cm,高32 cm,距顶部17 cm处钻 $\Phi 6$  mm直孔,土箱下底面打满 $\Phi 1$  mm的直孔留作排气之用。装土之前用胶带封住土箱底部直孔,待装土完成后去掉胶带,土样为棕壤土和壤土,按容重为1.3、1.4、1.5 g/cm<sup>3</sup>分层(5 cm)装入有机玻璃土箱中,至钻孔处将单滴头穿过钻孔,滴头置于土箱中部,继续装土至箱顶以下2 cm处。每个容重装两个土箱,编号为1号和2号。单滴头短管一端密封,另一端与马氏瓶相连进行地下滴灌。处理为同一水头,同一灌水量,容重采用1.3、1.4、1.5 g/cm<sup>3</sup>3种。

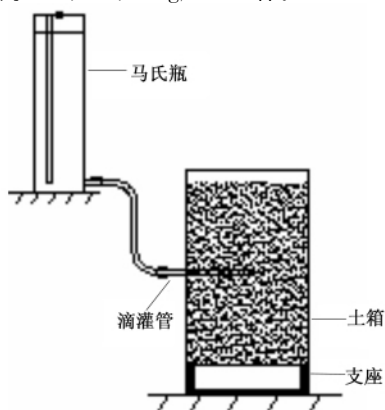


图3 地下滴灌装置

### 1.2.4 地下滴灌土壤湿润体通气方法

地下滴灌灌水结束后,利用气泵通过滴头给土壤湿润体输入空气,空气通过土壤样品从土箱底部排出,每次通气体积为湿润土体体积的1.5倍。

### 1.3 试验方法与观测内容

#### 1.3.1 瞬态一维土壤导气率的测定方法

一维边界条件下土壤导气率的瞬态测定方法由两部分构成:一是利用气泵给装置中输入空气,空气通过土壤样品从土箱底部排出,当U形管压力计右侧液面上升到H高度时立即关闭导气开关,用秒表记录液面下降不同高度时所用的时间。二是计算出不同液面高度所对应的压力值,得出 $f(t)$ 作为时间 $t$ 的函数关系拟合的直线斜率 $s$ ,代入公式(1)中计算土壤导气率。

#### 1.3.2 地下滴灌灌水前后土壤导气特征参数的变化

灌水前,用图1装置测定1号和2号土箱风干土的导气特征参数。停止灌水时测定1号和2号土箱中湿润体的土壤导气特征参数,然后在不同容重的1号土箱中人工缓慢均匀通气5 min,之后依据先密后疏的原则不定时测定湿润体土壤导气特征参数的变化,同时2号土箱中,在水分再分布过程中依据先密后疏的原则不定时测定湿润体土壤导气特征参数的变化。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 地下滴灌条件下气体压力函数曲线特征

3种供试土样按容重为1.3、1.35、1.4、1.45、1.5、1.55 g/cm<sup>3</sup>分层(5 cm)装入有机玻璃土箱中,这18次试验表明,对于不同容重的土样来说,地下滴灌条件下封闭气体压力随时间变化关系曲线特征与瞬态一维土壤导气率的计算模型一致,封闭容器中气体压力函数 $f(t)$ 的减小与时间 $t$ 呈良好的线性关系,气体压力函数值随时间的延长逐渐减小,气体压力函数随时间的变化关系拟合的直线过原点, $R^2$ 均在0.9以上且均位于坐标平面的第四象限,直线斜率均为负值。对于同一种土样来说,容重越小,直线斜率的绝对值越大,土壤导气特征参数的绝对值越大。因篇幅有限,随机抽取了其中部分土样的5条直线(图4)。

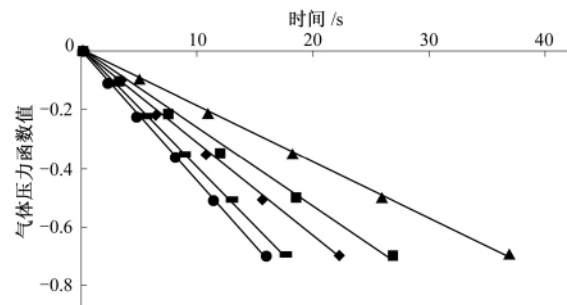


图4 气体压力函数随时间的变化

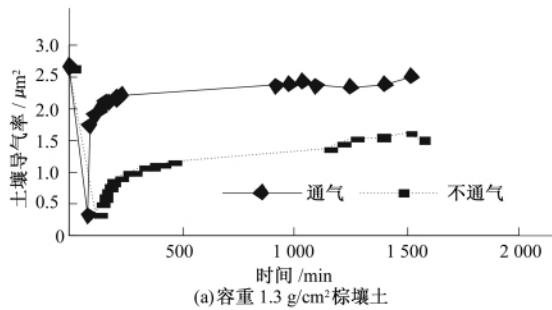
### 2.2 地下滴灌条件下土壤导气特征参数与土壤导气率的关系

为了研究地下滴灌条件下土壤导气特征参数与导气率的关系,3种供试土样按容重为1.3、1.35、1.4、1.45、1.5、1.55 g/cm<sup>3</sup>分层(5 cm)装入土箱中试验18次,每次装土高度一致。用瞬态法分别测定土箱中一维土柱的土壤导气率和地下滴灌

土壤导气特征参数。试验结果表明地下滴灌条件下土壤导气特征参数的绝对值与土壤导气率存在正相关关系,  $R^2 = 0.9821$  (图5)。检验水平  $\alpha = 0.005$ , 用  $F$  检验法,  $F = 192.64 > F_{0.005}(1, 16) = 10.58$ , 土壤导气率对土壤导气特征参数绝对值的线性回归是极显著的。因此, 对于地下滴灌后的湿润体, 只要测定出湿润体土壤的导气特征参数, 由此正相关的关系式即可换算出湿润体土壤导气率的大小。

### 2.3 滴灌前后湿润体土壤导气率变化趋势

通过试验观察发现停止灌水 24 h 后土壤水分扩散已极为缓慢, 土壤湿润锋几乎不再扩展<sup>[19-21]</sup>, 因此将灌水后试验观测时间定为 24 h。导气率随时间变化趋势如图 6 所示。



(a) 容重 1.3 g/cm<sup>3</sup> 棕壤土

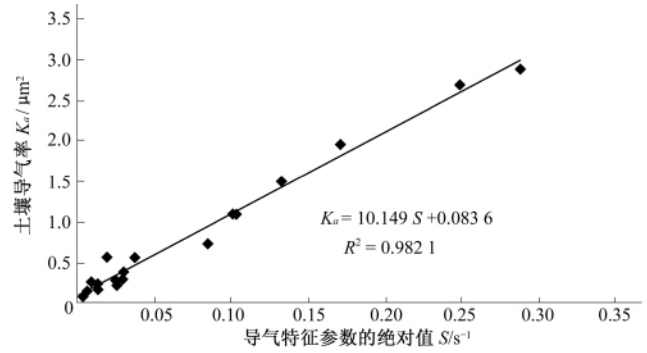
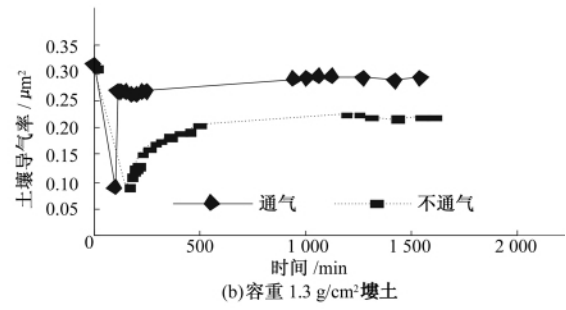
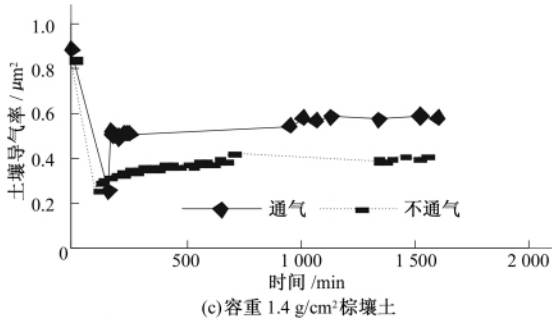


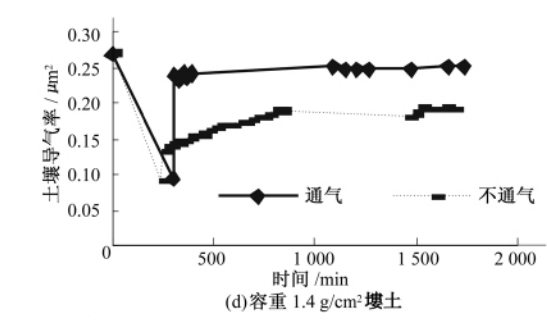
图5 土壤导气特征参数的绝对值与导气率的关系



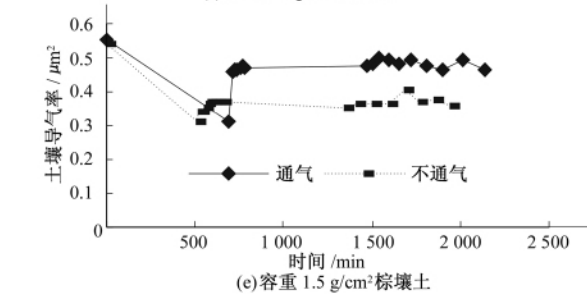
(b) 容重 1.3 g/cm<sup>3</sup> 壤土



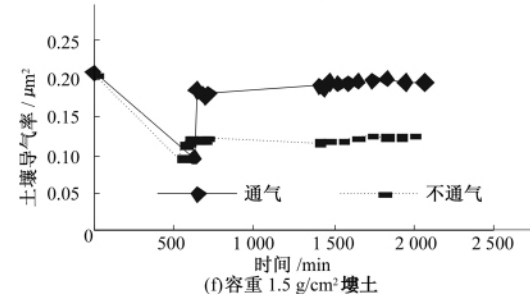
(c) 容重 1.4 g/cm<sup>3</sup> 棕壤土



(d) 容重 1.4 g/cm<sup>3</sup> 壤土



(e) 容重 1.5 g/cm<sup>3</sup> 棕壤土



(f) 容重 1.5 g/cm<sup>3</sup> 壤土

图6 土壤导气率随时间的变化

灌水前, 风干土样的含水率较小, 孔隙数量较多, 土壤导气率较大, 如图 6 的 0 时刻所示。风干程度相同的棕壤土和壤土导气率均随容重的增加呈降低趋势, 容重对棕壤土导气率影响较壤土显著, 在相同容重条件下, 棕壤土的导气率大于壤土的导气率, 这是因为棕壤土含矿物质多而结构差, 壤土含有机质多而结构好, 棕壤土的孔隙度较大。

灌水初期, 滴头附近土壤含水率急速接近饱和, 和周围土层形成较大的水土势梯度, 驱使土壤水快速扩散, 形成一个由内到外含水率逐渐减小的湿润体<sup>[20]</sup>。在滴灌过程中, 由于稳定的水源供给, 湿润体内土壤含水率普遍较高。在滴灌入渗过程中, 随着湿润体的不断扩展, 土壤孔隙中充满水, 含水率增大, 气体被迫排出, 水分阻碍了气体的流动, 土壤透气性迅速减

弱, 导气率迅速减小。灌水停止时, 容重为 1.3、1.4、1.5 g/cm<sup>3</sup> 的 1 号桶中棕壤土的土壤导气率分别减小到灌水前的 8.9%、22.7% 和 49.9%。灌水停止后, 土壤水分在自身重力、吸力梯度的作用下会继续向外扩散运动, 也就是土壤水分的再分布过程。湿润体内部土壤含水率随时间延长而减少, 前期较快, 后期变缓。土壤水分的再分布过程使得湿润体内的土壤含水率均有不同程度的下降, 土壤水分由高含水区向低含水区运移<sup>[21]</sup>。这就使得土壤导气率前期增大速度较快, 后期变慢。在水分再分布过程中, 土壤容重越大, 湿润体土壤导气率变化幅度越小。

灌水停止时, 对每个容重下的 1 号土箱不采取人工通气处理, 使其进行自然条件下的土壤水分再分布过程, 地下滴灌湿

润体土壤导气率随时间的变化呈缓慢增长趋势;以棕壤土为例,在 330 min 后容重为  $1.3 \text{ g/cm}^3$  的土壤导气率提高至灌水前 57.7%,在 590 min 后容重为  $1.4 \text{ g/cm}^3$  的土壤导气率提高至灌水前的 73.5%,在 155 min 后容重为  $1.5 \text{ g/cm}^3$  的土壤导气率提高至灌水前 63.6%,但这与人工通气改善湿润体土壤导气率的速度相比,具有明显的滞后性。

密度为  $1.3$ 、 $1.4$ 、 $1.5 \text{ g/cm}^3$  的风干土样在灌水停止时,棕壤土的导气率分别减小至灌水前的 8.9%、22.7%和 49.9%,壤土的导气率分别减小至灌水前的 2.7%、5.4%和 9.8%,通气 5 min 后,棕壤土的导气率分别提高至灌水前干土的 64.1%、54.1%和 79.9%,是停止灌水时的 7.3 倍、2.5 倍和 1.6 倍,壤土的导气率分别提高至灌水前的 79.9%、84.1%和 80.8%,是停止灌水时的 30.5 倍、15.3 倍和 8.4 倍。由此可见,灌水和通气作用均对土壤导气率产生影响,但对壤土导气率的影响较棕壤土显著。这是因为壤土孔隙度较小,黏粒含量较多,对水分的吸引力较强,在灌水停止时滴头附近土壤水分接近饱和,导气率下降明显。而棕壤土孔隙度较壤土大,灌水停止时土壤水分含量较壤土低。采用人工通气后,空气进入湿润体土壤中,土壤孔隙中的水分向周围迅速扩散,土壤透气通道被迫打开。此后由于在水分的再分布过程中,更多的水分向周围扩散,滴头周围的湿润体土壤含水率逐渐降低,导气率不断提高。在通气情况相同的条件下,壤土中水分的扩散较棕壤土的明显,导气率变化较棕壤土显著。

为了维持植物正常的生长,外界须提供足够的  $\text{CO}_2$  和氧气供其进行光合和呼吸作用。植物根系的呼吸要消耗大量的氧气,如果土壤氧气不足对植物会产生一系列的不利影响,如对植物根系和枝条的生长及经济产量的影响<sup>[22]</sup>。研究表明,低氧胁迫后网纹甜瓜植株株高和根长显著降低。地上部和地下部的鲜重和干重减少。表明低氧胁迫能显著抑制网纹甜瓜幼苗地上部和地下部的生长<sup>[23]</sup>。在降雨或灌溉后,植物的根系常处于低氧环境中,为了促进作物根区与大气的交换,如何改善土壤导气率已成为亟待解决的问题。因此,不同土壤的地区应因地制宜,采取合理的灌水和通气条件,以改善土壤导气率,达到节水、增产、高效的目的。

### 3 结 语

本文借助瞬态一维边界条件下土壤导气率测算模型,对地下滴灌条件下的土壤导气率进行了研究,分析了通气与水分再分布过程对地下滴灌湿润体土壤导气率的影响,得出以下结论:

(1) 地下滴灌条件下供气压力函数与时间呈良好的线性关系,这与瞬态一维土壤导气率的测算模型中的规律一致。

(2) 地下滴灌条件下土壤导气特征参数与土壤导气率呈极显著的线性关系,据此关系可以对地下滴灌土壤湿润体导气率进行测算。

(3) 通气作用与水分再分布过程都能提高湿润体土壤的导气率,但通气作用提高湿润体土壤导气率的及时性明显优于水分再分布过程。

在本次试验中,由于暂无地下滴灌埋点源土壤导气率计

算模型,无法单纯地研究湿润体导气率的变化。通过三维土体导气特征参数  $s$  与一维土柱土壤导气率之间的定量关系只是为了能间接表征湿润体导气率的变化,同时湿润体导气率受到灌水量及湿润体在三维土体中相对大小等因素的影响。因此有关地下滴灌埋点源土壤导气率计算模型还有待进一步的研究。

### 参考文献:

- [1] 秦耀东. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [2] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [3] Jury W A, Horton R. Soil Physics[M]. John Wiley and Sons, Inc, 2004.
- [4] Shan C, Javandel I, Ronald W F. Analytical solutions for steady state gas flow to a soil vapor extraction well[J]. Water Resources, 1992, 28(4): 1105-1120.
- [5] Springer D S, Loaiciga H A, Cullen S J, et al. Air permeability of porous materials under controlled laboratory conditions [J]. Ground Water, 1998, 36(4): 558-565.
- [6] Poulsen T G, Moldrup P. Air permeability of compost as related to bulk density and volumetric air content[J]. Waste Management Research, 2007, 25: 343-351.
- [7] 同延安, 王全九. 土壤-植物-大气连续体系中水运移理论与方法[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002.
- [8] Kirkham D. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state[J]. Soil Science Society of America Journal, 1947, 11(C): 93-99.
- [9] Evans D D, Kirkham D. Measurement of the air permeability of soil in situ[J]. Soil Science Society of America Journal, 1950, 14(C): 65-73.
- [10] Grover B L. Simplified air permeameters for soil in place[J]. Soil Science Society of America Journal, 1955, 19(4): 414-418.
- [11] Jalbert M, Dane J H. A handheld device for intrusive and non-intrusive field measurements of air permeability[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, (2): 611-617.
- [12] Hailong L, Jiao J J, Luk M. A falling-pressure method for measuring air permeability of asphalt in laboratory[J]. Journal of Hydrology, 2004, 286: 69-77.
- [13] 王卫华, 王全九, 李淑芹. 长武地区土壤导气率及其与导水率的关系[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 120-127.
- [14] 陈红波, 李天来, 孙周平. 根际通气对日光温室黄瓜栽培基质酶活性和养分含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6): 1470-1474.
- [15] 郭超, 牛文全. 根际通气对盆栽玉米生长与根系活力的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(6): 1194-1198.
- [16] Mason E A, Monchick L. Survey of the equation of state and transport properties of moist gases. In A. Wexler(ed.) Humidity and moisture: Measurement and control in science and industry. Reinhold Publishing Corp., New York, 1965, (3): 257-272.
- [17] 胡笑涛, 康绍忠, 马孝义, 等. 地下滴灌条件下沙质土壤入渗特性试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(5): 75-77.

(下转第 9 页)

表2 冬小麦籽粒粗蛋白和淀粉含量

Tab. 2 The protein and starch content in winter wheat

处理	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>
籽粒粗蛋白/%	12.820	13.001	13.485	13.768	14.088	14.618
淀粉含量/%	78.142	77.327	76.934	78.220	77.952	77.735

从表2中可以看出,垄上覆膜沟播小麦与平作对冬小麦籽粒粗蛋白含量和淀粉含量的影响不大,各处理之间差异不大,覆膜一组各处理略大于平作一组。籽粒粗蛋白含量与灌水量呈负相关关系,即灌水量增加,籽粒粗蛋白含量减小,这是由于高水对籽粒蛋白有稀释作用所致。覆膜低水处理 W<sub>3</sub> 中籽粒粗蛋白含量最大为 14.618%,比高水处理 W<sub>1</sub> 增加 0.85%,比平作高水处理 W<sub>1</sub> 高 1.798%。与此相反,小麦中的淀粉含量随着灌水量的增加呈现微弱的上升趋势,灌水量越大,淀粉含量越高。覆膜高水处理 W<sub>1</sub> 中淀粉含量最高为 78.22%,相比低水处理 W<sub>3</sub> 增加 0.485%。基于综合因素考虑,可以得出适量的水分才能使得小麦的品质达到最优,水分过高或过低必然会抑制某种指标的生长,在此试验中选择覆膜中水蛋白含量仅比低水处理低 0.53%,淀粉含量比高水处理低 0.268%,但却可以节约水量,达到节水和优质的平衡。

### 3 结 语

本试验在起垄覆膜沟播小麦和平作两种种植模式下,研究了不同灌水量对冬小麦株高、叶面积、叶绿素含量、产量、水分利用效率以及籽粒蛋白质和淀粉含量的影响。试验结果表明,垄上覆膜沟播冬小麦的生长情况明显优于平作一组。株高随着灌水量的增加而增加,而叶面积则随着灌水量的增加而相应的减小,二者在拔节期的变化最为明显。叶绿素含量则呈现先增后减的趋势。对于平作一组,中水处理叶绿素含量最高,而起垄覆膜一组低水处理的叶绿素含量最高,这是由于起垄覆膜的集雨作用,可以使得降雨更加有效地利用,将无效水变为有效水,因此,高水和中水处理并没有表现出优越性,反而造成了水资源的浪费。虽然起垄覆膜在一定程度上减少了小麦的种植面积,使得穗数在一定程度上减小,但由于覆膜的集雨作用使水分利用效率增加,使得穗粒数和千粒重增加,正负效应后产量不仅没有降低反而有所提高。覆膜中水处理比平作中水处理产量增加 421 kg/hm<sup>2</sup>,水分利用效率提高 4.95 kg/(hm<sup>2</sup>·mm)。冬小麦籽粒粗蛋白含量随着灌水量的增加而降低,高水会对籽粒蛋白含量起到稀释作用,而淀粉含量反之,随着灌水量的增加而增加。

垄上覆膜沟播不仅使得产量和水分利用率增加,而且也可

改善品质,在相同灌水量下可以取得更好的经济效益。在生产实践中,选择垄上覆膜沟播小麦中水处理(总灌水量 260 mm),在取得产量最大化的同时以节约水量,且蛋白含量和淀粉含量都较高,达到二者的平衡,实现节水、高产、优质的统一。

### 参考文献:

- [1] 申孝军,孙景生,刘祖贵,等. 灌水控制下限对冬小麦产量和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 58-65.
- [2] 李文晓,张岁歧,山 仑. 苜蓿叶片及根系对水分亏缺的生理生化响应[J]. 草地学报, 2007, 15(4): 299-305.
- [3] 张卫星,朱德峰. 水分亏缺对水稻生长发育、产量和稻米品质影响的相关研究[J]. 中国稻米, 2007, 33(5): 1-4.
- [4] 山 仑. 农业与作物高效用水[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2003, 33(1): 1-5.
- [5] MohaPatra B K, Lenka D, Nark D. Effects of plastic mulching on yeild and water use efficiency in maize[J]. Annals of Agric. Res., 1998, 19: 210-211.
- [6] 崔欢虎,张松令. 半干旱地区冬小麦地膜覆盖穴播技术研究[J]. 山西农业科学, 1998, 26(2): 3-6.
- [7] 王 勇. 旱地地膜冬小麦籽粒灌浆特性研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 124-126.
- [8] 王同花,李援农. 起垄覆膜沟播冬小麦土壤水分利用效率及土壤温度的影响[J]. 中国农村水利水电, 2011, (1): 46-49.
- [9] 李守谦. 地膜小麦栽培技术及品种[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1998: 1-118.
- [10] 张淑芳,柴守玺. 冬小麦地膜覆盖的水分效应[J]. 甘肃农业大学学报, 2011, 4(2): 45-52.
- [11] 田海燕,张岁歧,王小林. 水分条件对冬小麦生长发育及产量的影响[J]. 水土保持研究, 2011, 3(18): 217-225.
- [12] 王同花,李援农. 起垄覆膜沟播冬小麦的水分效应研究[J]. 中国农村水利水电, 2010, (11): 79-81.
- [13] 日本食品工业学会《食品分析法》编委会编. 食品分析法[M]. 郑州粮食学院翻译组译. 成都: 四川科学技术出版社, 1985, 344-355.
- [14] 黄彩霞,柴守玺. 不同水分处理对冬小麦产量和水分利用效率的影响[J]. 草业学报, 2010, 19(5): 196-203.
- [15] 王晓英,何明荣. 水氮耦合对强筋冬小麦籽粒蛋白质和淀粉品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 3(13): 361-367.
- [16] 翟炳年,李生秀. 水氮配合对冬小麦产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 26-32.
- [17] 孔 东,晏 云. 不同水氮处理对冬小麦生长及产量影响的田间试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 36-40.
- [18] 张忠学,于贵瑞. 不同灌水处理对冬小麦生长及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2003, 23(2): 1-4.

(上接第5页)

- [18] 马孝义,康绍忠,王凤翔,等. 果树地下滴灌灌水技术田间试验研究[J]. 西北农业大学学报, 2000, 28(1): 57-61.
- [19] 王永东,张宏武,徐新文,等. 风沙土水分入渗与再分布过程中湿润锋运移试验研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 8(23): 190-194.
- [20] 张和喜,袁友波,舒贤坤,等. 地下滴灌条件下土壤水分运动研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(8): 3 277-3 279.

- [21] 刘雪芹,范兴科. 滴灌条件下土壤水分再分布过程研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(4): 42-45.
- [22] 杨润亚,张振华,王洪梅,等. 根际通气和盐分胁迫对玉米生长特性的影响[J]. 鲁东大学学报, 2010, 26(1): 35-38.
- [23] 孙艳军,郭世荣,胡晓辉,等. 根际低氧逆境对网纹甜瓜幼苗生长及根系呼吸代谢途径的影响[J]. 植物生态学报, 2006, 30(1): 112-117.