

滴灌条件下原状土与扰动土水分运动特性

董丽艳, 王卫华

(昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500)

摘要: 为了分析土壤结构对土壤入渗规律的影响, 通过研究云南红壤土滴灌条件下水分运动特征, 采用室内外对比试验, 试验共设计了3个滴头流量, 分别为2.68, 3.74, 4.68 L/h, 土壤容重为1.2 g/cm³, 分别进行了单、双点源滴灌入渗试验, 着重分析了原状土与扰动土在一定的滴头流量下的湿润锋、湿润体变化特征, 揭示区域土壤水分运移规律, 进而为区域性作物灌水提供参考依据。结果表明: (1) 原状土湿润锋运移速率比较快, 原状土地表湿润比随交汇时间增加的速率快于扰动土, 说明湿润锋的运移速率与土壤孔隙有关; (2) 相同观测时间下, 原状土湿润体变化比较快, 原状土湿润体扁率 α 大于扰动土, 原状土 $\alpha=16.53\%$, 扰动土 $\alpha=45\%$; (3) 原状土与扰动土含水率等值线变化有相同趋势, 但不重合, 疏密程度有差异; (4) 原状土分形维数比扰动土的小, 说明原状土孔隙分布差异大, 扰动土的质地较均匀。研究结果揭示了该地区原状土与扰动土水分运动特征, 为进一步的机理研究提供参考。

关键词: 湿润锋; 湿润体; 原状土; 扰动土; 土壤孔隙

中图分类号: S274.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0164-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.05.026

Water Movement Characteristics of Undisturbed and Disturbed Soil Under Drip Irrigation

DONG Liyan, WANG Weihua

(Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500)

Abstract: To explore the effect of soil structure on soil infiltration, the water movement characteristics of Yunnan red loam under the condition of freshwater drip irrigation was assessed by the comparison of the indoor and outdoor experiments, in which single and double point source drip irrigation with three drip discharges (2.68, 3.74, 4.68 L/h) was arranged. The soil bulk density was 1.2 g/cm³. The specifically analyzed characteristics of wetting front and wetting body under a certain drip discharge between undisturbed and disturbed soils would reveal the regional soil moisture migration rule, which provided reference basis for regional crop irrigation. The results showed that: (1) The wetting front transport rate of undisturbed soil was faster, and the earth's surface wetting proportion of undisturbed soil increased faster than that of disturbed soil with the change of intersection time, which indicated that migration velocity of wetting front was related to soil porosity; (2) Under the same observation time, the wet body of undisturbed soil changed more quickly, and the wet body flat rate of undisturbed soil (16.53%) was greater than that of disturbed soil (45%); (3) The moisture content contour of undisturbed and disturbed soil had the same change trend, but did not overlap, while the degree of density differed; (4) The fractal dimension of undisturbed soil was less than that of disturbed soil, which indicated that the soil pore distribution of undisturbed soil differed, while the texture of disturbed soil was relatively uniform. The results revealed the soil moisture migration characteristics of undisturbed and disturbed Yunnan red loam, and provided reference for further mechanism research.

Keywords: wetting front; wetted body; undisturbed soil; disturbed soil; the soil pore

土壤结构是指不同粒级的土壤颗粒通过不同机械组合而成的结构体,土壤中土粒或团聚体之间以及团聚体内部的空隙称为土壤孔隙^[1],而孔隙的大小、数量及空间分布差异直接影响水分运动特征,同时也影响土壤中溶质,有机质的运移^[2]。由于土壤大孔隙的存在,增加了土壤通气性,有利于降水入渗,减少地表径流,提高作物产量^[3]。因而通过对土壤孔隙的进一步研究和模拟能更加清楚地认识土壤空间结构分布,从而将预测的土壤水分运动基本规律应用于滴灌设计和运行管理中。

如今水资源匮乏与粮食需求日益增多的矛盾亟待解决,而解决水资源短缺的两大途径在于高效节水技术的推广和农业用水效率的提高。土壤水分运动特性是节水灌溉的重要基础,且土壤内部孔隙分布差异与土壤水分运动特征有着密切关系。关于土壤水分运动特征的研究有很多^[4-13],如吴漩等^[4]对四川双流县设施栽培下原状土与扰动土水分运动规律进行研究,得出二者的水分特征曲线总体变化趋势较为一致,但该成果主要针对设施栽培土适用;汪志荣等^[5]对不同质地土壤进行点源入渗下的水分运动特征研究以及刘雪芹等^[6]对砂壤土水分运动特征的研究等;这些研究成果对滴灌设计和作物灌溉提供了一定的理论依据,然而并没有涉及野外试验与室内试验的对比研究,从而导致研究结果在野外环境的应用缺乏普遍适用性。因此,本文将对云南红土地地区淡水滴灌条件下原状土、扰动土的湿润锋、湿润体特征参数进行对比,揭示该地区水分运移规律,对比分析土壤结构对水分运动特征的影响,室内外试验研究应该充分考虑原状土与扰动土的差异,为进一步开展地区性滴灌入渗的机理研究提供了理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土样

在昆明理工大学现代农业工程学院土壤物理实验室旁的撂荒地上开挖不同土层深度,用环刀采集土样,每个深度 5 个重复,用于原状土基本物理参数的测定(表 1)。扰动土是在该撂荒地上取土,将该土样经过风干、碾磨过 2 mm 的筛,室内按预设容重装填制备而成。利用国际制土壤质地分类标准对供试土样进行分类;采用马尔文激光颗粒分析仪测定土壤颗粒机械组成,取其平均值。供试土样粉粒、砂粒、黏粒的质量分数分别为 28.63%,16.80%,54.57%;用离心机法测得土壤水分特征曲线,如图 1 所示。

表 1 土壤物理基本参数

土层深度/cm	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	土壤饱和 含水率/%	初始 含水率/%	土壤 类型	质地 类型
0—10	1.20	32.86	3.07	燥红土	黏壤土
10—20	1.21	32.33	2.95		
20—30	1.23	31.99	2.79		

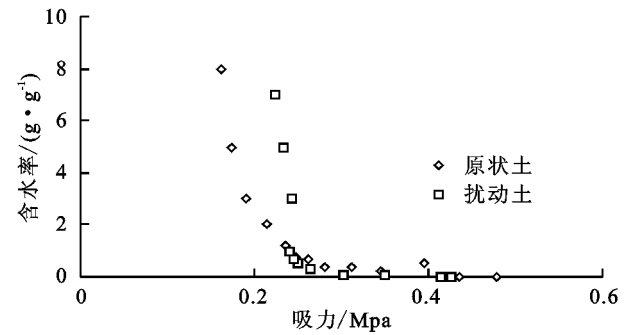


图 1 原状土和扰动土土壤水分特征曲线

1.2 试验设计

于 2016 年 3 月 4 日—4 月 28 日分别在室内、室外进行了容重为 1.2 g/cm^3 ,滴头流量分别为 2.68, 3.74, 4.68 L/h 的单、双点源滴灌入渗试验,每组试验重复 3 次,试验结果采用各处理数据的平均值进行分析。室内试验在昆明理工大学现代农业工程学院土壤物理实验室进行,室外试验在校园撂荒地进行。

1.3 研究方法

由土箱和供水系统构成试验装置(图 2),利用蠕动泵控制滴头流量,设置好蠕动泵的转速后,用量筒定时测定供式滴头流量。为观察三维入渗下土壤水分运动的情况,本试验采用 $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ 玻璃土箱,每 5 cm 装填 1 次土,夯实,层间打毛,装土 35 cm,装土完毕后,把滴头放置在土箱一角落 O 点处,从表层 O 点处分别标记与土箱边壁成 30° (c 线)和 60° (d 线)位置线,不同时刻用彩色钉在所画的线上标记,方便记录水平运移距离,试验中采用先密后疏的时间间隔记录数据,当湿润锋边界到达土箱底层时,试验结束。不同时刻下在土箱侧壁标记湿润锋运移痕迹,试验结束即刻取土,水平方向间隔 5 cm,垂直方向间隔 10 cm 取土,一直取到湿润锋干湿交界处,烘干法测含水率。野外试验之前,先将土地平整为长 45 cm,宽 45 cm 的试验区域,试验范围边界处竖直向下挖一条用于观测的渠,渠的一侧作为观测面,观测面用透明塑料膜遮盖,避免蒸发对湿润体含水率的影响。每组试验尽量在一天完成,减少试验条件差异的影响,用蠕动泵供水,在供试土样滴头下方土表面分别画出 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 线(b、c、d),见图 2。水平运移距离观测方法与室内试验相同,取土位置与室内布设相同。

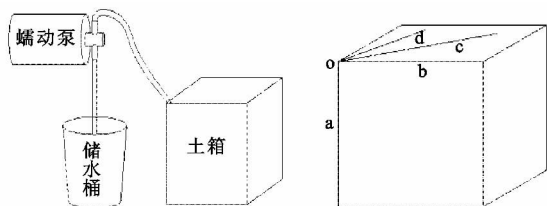
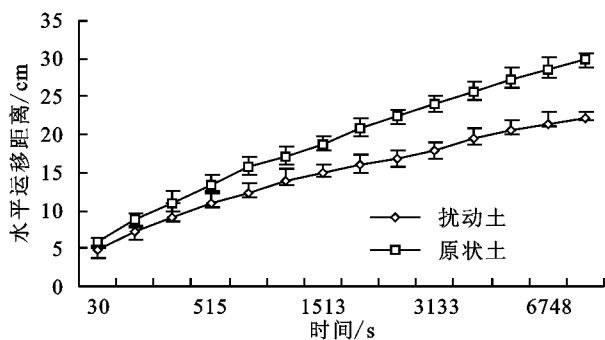


图 2 试验装置示意

2 结果与分析

2.1 湿润锋对比分析

2.1.1 运移距离对比分析 分析单点源滴灌入渗下原状土与扰动土对水平运移距离的影响,选取容重为 1.2 g/cm^3 滴头流量为 2.81 L/h 的试验数据进行分析。由图 3 中曲线斜率分析可知,原状土和扰动土的



性;从交汇时间来看,原状土交汇的较早。由 CAD 绘图软件计算出原状土与扰动土入渗到土箱底层,即试验结束时刻的交汇区面积,分别为 1 013.57, 904.16 cm²。图 6 是由 CAD 绘出的交汇湿润锋图,直接在 CAD 里可以用面积指令测出曲面图形面积,

同时也可以定积分求得面积。由图中面积对比,分析得知入渗相同深度的土层时,原状土入渗较快,从湿润面积来看,原状土湿润面积比扰动土大 10.79%,因此在今后的土壤入渗研究中,应当考虑原状土与扰动土入渗的差异。

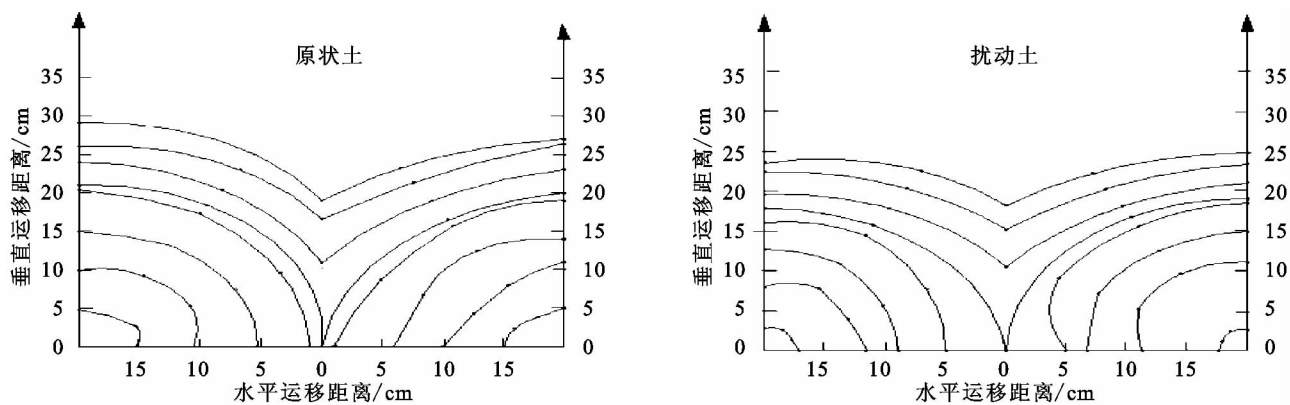


图 6 湿润锋迁移

2.2 湿润体特征参数分析

2.2.1 湿润体形状对比分析 选取单点源滴灌条件下容重为 1.2 g/m³,滴头流量为 3.74 L/h 的原状土与扰动土的湿润锋数据,将实测的原状土与扰动土的湿润锋迁移曲线在二维坐标系中完整地绘制出来。由图 7 可知,原状土湿润体较扰动土湿润体扁;原状土在水平、垂直方向

上的水分运移速率都比扰动土的快;在入渗初期,垂向上的重力可以忽略不计,由于土壤基质势的作用,水平运移速率快于垂直运移速率,土壤湿润体形状为半椭球体($a > b$);随着入渗时间增加,由于重力的影响,水分在垂向的运移速率逐渐加快,故垂向湿润距离运移速率逐渐大于水平运移速率,从而形成一个半椭球体($b > a$)。

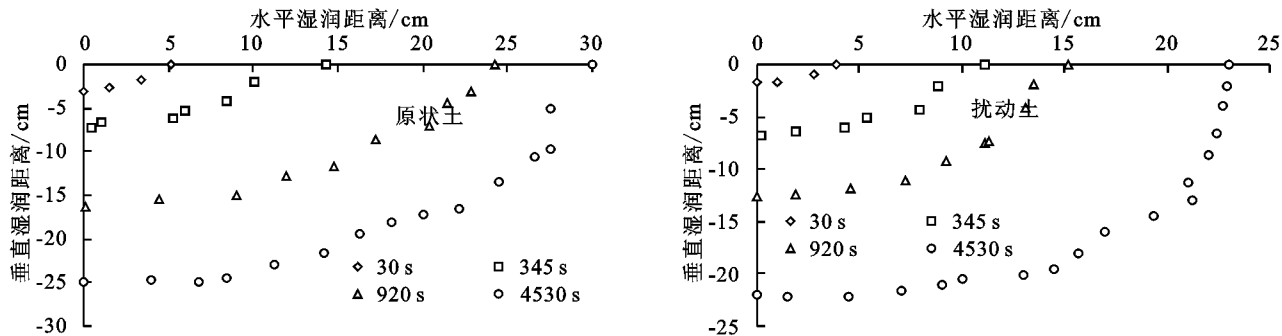


图 7 湿润锋随时间的变化

以滴头为坐标原点,过椭球体对称轴的任一剖面是半个椭圆,椭圆方程为:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (3)$$

式中: a 为水平方向上运移距离(cm); b 为垂直方向上的运移距离(cm);由 4 530 s 时刻湿润锋试验数据可得拟合方程为:

$$\text{原状土: } \frac{x^2}{29.95^2} + \frac{z^2}{25^2} = 1 \quad (4)$$

$$\text{扰动土: } \frac{x^2}{23^2} + \frac{z^2}{22^2} = 1 \quad (5)$$

将实测值与计算值对比分析,代入 4 个点 z 坐标,将求出的 x_1 与实测 x_2 用 $y=kx$ 对实测值与计算值进行拟合(表 2)。

由表 2 可知,斜率 k 等于 1 说明实测值与模拟值相

等; k 在 1 附近波动,说明实测值与计算值之间存在一定的差异,但其相对误差都保持在 5% 以内,因此,可认为在地表以下形成 1/2 椭球体。为了便于研究湿润体的形状,将椭球体的扁率用方程 $\alpha = ((a-b)/a)$ 表示,原状土 $\alpha = 16.53\%$,扰动土 $\alpha = 45\%$,扁率越小,说明湿润锋越接近圆,扁率越大,说明湿润锋越接近椭圆。由图 7 可知,原状土和扰动土水平向湿润距离的运移速率比垂直向运移的快,但最终水分会不断地在土壤中积累,由于重力作用,垂向湿润距离运移速率逐渐加快,最终导致湿润体向半球体逐渐转化;由于扰动土的结构在制备过程中发生了变化,趋于均质化,因此扁率小。

2.2.2 湿润体含水率对比分析 选取单点源滴灌条件下容重为 1.2 g/cm³、滴头流量为 3.74 L/h 的原状土与扰动土湿润体含水率数据分析,由 surfer 绘制等值线图(图 8)。分析可得原状土与扰动土含水率

等值线变化有相同的趋势,都是以滴头为中心的椭球体,水平方向上,滴头下方含水率最大,垂直方向上湿润体含水率随着入渗深度增加逐渐减小;原状土的等值线较密,扰动土的等值线较疏。这说明扰动土破坏了土壤的孔隙结构,也说明了原状土与扰动土湿润体含水率的分布很大程度上取决于土壤的孔隙结构。有效水主要存在于毛管孔隙中,毛管孔隙是土壤中水分储存和运动最强烈的地方,它的大小决定了毛管孔隙力大小和吸水力强度。土壤的质地、结构决定了毛管孔隙的数量。由于原状土受到环境或生物因素的

影响,比如蚯蚓、蚂蚁等生物孔穴所形成的大孔隙等对土壤中水分运动有很大的影响;扰动土土壤结构遭到破坏,导致孔隙的几何形状、数量、大小及通透性都发生了变化,从而影响了土壤中水分运移的速率和形式,在过筛过程中,已经筛除了土壤中粒径超过 2 mm 的颗粒,大大减小了土壤中大孔隙的数量,在夯实的过程中,也严重改变了土壤天然结构,使土壤中毛细孔隙数量显著增加。因此在入渗开始时,扰动土滴头下方含水率大于原状土,整体上扰动土中水分运移速率慢,持水效果优于原状土。

表 2 实测值与计算值拟合结果

点坐标		斜率		相对误差/%	
原状土	扰动土	原状土	扰动土	原状土	扰动土
(11.2, -23.0)	(21.0, -11.2)	1.066	0.952	4.7	4.7
(14.2, -21.7)	(22.0, -8.6)	1.047	1.028	4.7	2.8
(22.2, -16.5)	(22.7, -4.0)	1.014	0.965	1.4	3.5
(27.5, -9.8)	(22.95, -2.0)	1.000	0.998	0.0	0.2

注:斜率为实测值与计算值拟合曲线的斜率。

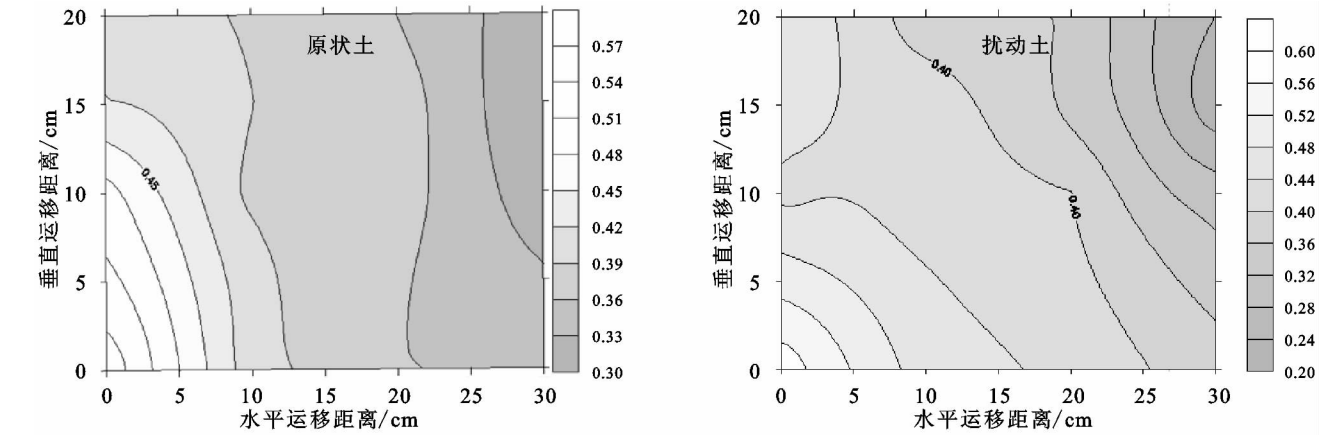


图 8 湿润体含水率

通过对湿润体形状和湿润体含水率对比分析,发现在用扰动土进行试验研究时,扰动土研究结果并不能完全准确地反映原状土的入渗情况,原状土的湿润体形状较扰动土扁平,含水率等值线较扰动土的密。希望在今后扰动土的研究中,能通过孔隙结构与孔隙分布的角度对比分析,得出一个修正系数,尽可能地来反映原状土水分入渗的真实情况。

2.3 原状土与扰动土孔隙分形维数的差异

土壤孔隙分形维数体现的是土壤孔隙与固体颗粒接触界限的不规则性。由图 1 可知,在低吸力阶段,含水率急剧下降,之后趋于平缓。说明孔隙尺度分布差异是水分运动特征的一大影响因素;将图 1 的土壤水分特征曲线用幂函数形式进行拟合,绘制对数关系土壤水分特征曲线(图 9),根据图 9 计算出原状土、扰动土的孔隙分形维数(表 3)。

由表 3 可知,原状土分形维数小于扰动土,这是由于原状土的孔隙尺度分布差异比扰动土的大。扰动土过筛后,颗粒间重新排列组合,颗粒填充能力不

如原状土,不易形成良好的结构;原状土中是大孔隙主导输水作用,而扰动土中由于土壤经过筛分,装填,使得毛管孔隙均匀分布在土壤结构中。原状土分形维数比扰动土的少 0.1,说明原状土没有扰动土紧实,通透性较扰动土好,其为天然土壤结构,内部孔隙差异大,有机质含量高,团聚能力高^[15-17];扰动土碾磨、过筛后质地较均匀,颗粒间接触较原状土容易,因而二者之间分形维数存在差异,但相差不大。

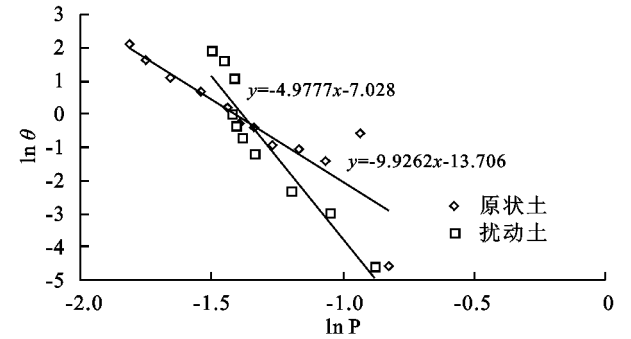


图 9 原状土和扰动土对数关系土壤水分特征曲线

表 3 土壤孔隙分形维数

公式名称	表达形式	推导	结果	分形维数
Campbell 公式	$\frac{\theta}{\theta_s} = \left[\frac{\psi}{\psi_a} \right]^{D-3}$	$\ln \frac{\theta}{\theta_s} = (D-3) \ln \frac{\psi}{\psi_a}$	$k = \frac{1}{D-3}$	$D_d = 2.899$ $D_u = 2.799$

备注: θ 为质量含水率(g/g); ψ 为介质的基质吸力(bar); ψ_a 为进气吸力(bar); k 为对数土壤水分特征曲线斜率; D_d 为扰动土的分形维数; D_u 为原状土的分形维数。

3 结论

(1)原状土和扰动土的水平、垂直运移距离随着入渗时间推移显著性增加,入渗初始阶段,增长速率较快,之后减缓逐渐趋于不变。从交汇时间来看,原状土交汇的较早,入渗到相同土层深度时,原状土湿润面积大于扰动土,且原状土与扰动土的运移距离变化趋势一致,但没有重合,说明二者存在的差异。

(2)交汇宽度随着入渗时间推移也显著增加,原状土交汇宽度运移速度快于扰动土,随着交汇时间的推移,原状土的地表湿润比增加的速率快于扰动土。

(3)分析湿润体特征参数得出,原状土湿润锋较扰动土湿润锋扁,说明土壤孔隙影响湿润锋的迁移。原状土与扰动土含水率等值线变化有相同的趋势,但不重合,疏密程度存在差异,原状土的分形维数小于扰动土的。

综上,通过室内外试验对比分析,得出原状土与扰动土水分运动规律的差异,关注土壤孔隙结构对水分运动的影响,为进一步开展地区性滴灌入渗的机理研究提供理论依据,希望在今后的研究中,能通过室内外对比试验与数值模拟相结合的方式,考虑原状土与扰动土土壤结构上的差异,不断修正经验公式,为将来农业发展提供更加真实可靠的预测信息。

参考文献:

[1] 聂良佐. 原状土结构损伤重塑后强度、变形和渗透性变化机理研究[J]. 岩土工程界, 2008, 11(7): 23-25.

[2] 程亚南, 刘建立, 张佳宝. 土壤孔隙结构定量化研究进展[J]. 土壤通报, 2012, 43(4): 988-994.

[3] 孙梅, 黄运湘, 孙楠, 等. 农田土壤孔隙及其影响因素研究进展[J]. 土壤通报, 2015, 46(1): 233-238.

[4] 吴漩, 郑子成, 李廷轩, 等. 设施栽培下原状土与扰动土水分特性的试验研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(6):

99-102.

[5] 汪志荣, 王文焰, 王全九, 等. 点源入渗土壤水分运动规律实验研究[J]. 水利学报, 2000, 31(6): 39-44.

[6] 刘雪芹, 范兴科, 马甜. 滴灌条件下砂壤土水分运动规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(3): 56-59.

[7] 梁锦陶, 孙西欢, 肖娟. 土壤质地和供水水头对负压灌溉土壤水分运移的影响研究[J]. 节水灌溉, 2011(6): 30-33.

[8] 王永东, 郑子成, 李廷轩, 等. 设施栽培对土壤结构及水分特性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2011, 29(1): 75-79.

[9] 吴卫熊, 张廷强, 何令祖, 等. 滴灌条件下山区典型土壤水分运移规律分析[J]. 节水灌溉, 2017(2): 5-8.

[10] Starr G C, Cooley E T, Lowery B, et al. Soil water fluctuations in a loamy sand under irrigated potato[J]. Soil Science, 2005, 170(2): 77-89.

[11] Atac T, Hopmans J W, Dennis E, et al. Comparison of air and water permeability between disturbed and undisturbed soils [J]. Soil Science, 2005, 69 (5): 1362-1371.

[12] 赵伟霞, 张振华, 蔡焕杰, 等. 间接地下滴灌土壤湿润体特征参数[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 87-92.

[13] 王博. 滴灌水分运动研究进展[J]. 黑龙江水利科技, 2014, 42(1): 171-172.

[14] 管孝艳, 杨培岭, 吕焱, 等. 基于多重分形理论的农田土壤特性空间变异性分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(5): 712-720.

[15] 蔡新民, 丁新新, 潘健, 等. 分形理论在土壤科学研究中的应用[J]. 防护林科技, 2011(6): 8-13.

[16] Unsal E, Dane J H. Quivalent soil pore geometry to determine effective water permeability [J]. Vadose Zone Journal, 2006, 5(4): 1278-1280.

[17] Vervoort R W, Cattle S R. Linking hydraulic conductivity and tortuosity parameters to porespace geometry and pore size distribution[J]. Journal of Hydrology, 2016, 272(1/4): 36-49.