

地下滴灌影响要素及其敏感性分析

范王涛, 李刚

(西安理工大学水利水电学院, 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710000)

摘要: 地下滴灌是一项具有广阔应用前景的高效节水灌溉技术之一。为分析不同影响因素对地下滴灌滴头流量的影响机制, 以 PLASSIM 滴头、和平滴头 2 种滴头为研究对象, 利用有机玻璃桶(直径 40 cm, 高 40 cm)内埋设滴头(表层 20 cm 下)系统分析了滴头工作压力(60, 100, 150, 200, 250, 300, 370 kPa)、土壤初始含水量(12%, 18%)及土壤容重(1.25, 1.40 g/cm³)对地下滴灌滴头流量的影响及其敏感性。结果表明: 工作压力是地下滴灌滴头流量的主要影响因素, 且随工作压力增大, 滴头流量增大; 土壤初始含水率和容重对供试的滴头流量均起制约作用, 其中对轻砂土的制约作用更为明显; 土壤质地对各影响因素的敏感性存在差异, 其中轻砂土最敏感, 粉壤土居中, 轻粘土最弱。PLASSIM 滴头、和平滴头的敏感性指标均随工作压力、土壤初始含水率、容重的增加而降低。通过系统分析多种土壤物理特性对地下滴灌滴头流量的影响及其敏感性分析, 将为设计经济、高效而又节水的地下滴灌系统, 制定合理的地下滴灌制度提供理论依据。

关键词: 地下滴管; 滴头流量; 水力特性; 影响因素; 敏感性分析

中图分类号: S277.9⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)03-0330-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.03.054

An Experimental Study on Influencing Factors Under Subsurface Drip Irrigation

FAN Wangtao, LI Gang

(State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract: Subsurface drip irrigation (SDI), which has a wide application prospect, is one of the high-efficiency water-saving irrigation techniques. Because the emitters are buried in the soil, the hydraulic characteristics of SDI subunit pipe network are often affected by soil physical properties, and the research present on these problems are inadequate. In the paper, laboratory tests were carried out to investigate the influencing factors of hydraulic factors under subsurface drip irrigation, the treatments included work stress (60, 100, 150, 200, 250, 300, 370 kPa), soil initial moisture contents (12%, 18%), and soil bulk densities (1.25, 1.40 g/cm³). In addition, the sensitivity was also analyzed. In this study, PLASSIM emitters and Heping emitters were used. The main results were as follows: The work pressure was the main factor that affected the emitter discharge in all three soil samples, and the SDI emitter discharge was larger under higher work pressure. Soil bulk density and initial soil water content could limit the discharge, especially in sandy soil. Significant differences in the sensitivities of emitter discharges for different soil samples were obtained. The sensitivity was larger in the sandy soil, while it was smaller in the loamy soil and smallest in the clay soil. Three kinds of sensitive indicator of the PLASSIM emitter declined with the increase of work pressure, soil initial moisture content, and soil bulk density. The results obtained in this study could provide scientific instructions on irrigation program and efficient irrigation system.

Keywords: subsurface drip irrigation; emitter discharge; hydraulic characteristics; influencing factors; sensitivity analysis

地下滴灌(Subsurface Drip Irrigation, 简称 SDI)是在滴灌技术(Drip Irrigation, 简称 DI)的基础上发

展而成的一种新型的高效节水灌溉技术, 其主要通过地埋毛管上的滴头使水或水肥混合液缓慢出流渗入

到作物根区土壤中,再借助毛细管作用或重力作用将水分扩散到整个根系层以供作物吸收利用的一种灌水方法^[1]。与其他灌水方法相比,地下滴灌可有效减少输水过程、地表蒸发以及深层渗漏的水量损失,节水效果明显;同时,地下滴灌可将水肥适时适量地输送到作物根区,满足作物需求,提高农产品品质及其产量^[2]。同时由于地下滴灌管道埋于地下,无需占用大量耕地修建沟渠,因此可有效提高土地利用;而地下滴灌在灌水期间,地表相对干燥,在一定程度上可抑制杂草生长^[3-4]。因而,大力发展地下滴灌技术对于缓解我国水资源短缺与需水量日益增大的矛盾有着十分重要的意义。

但作为一种新型的节水灌溉技术,地下滴灌设备研制和技术研究尚处于初级阶段,且存在较多亟待解决的问题。国内众多外学者从多个角度研究了地下滴灌滴水的水力特性、分析了影响滴水流量的因素^[5-7]。作峰等^[8-9]、安巧霞等^[10]、宰松梅等^[11]研究了滴水类型、工作压力等因素对滴水流量的影响;Khaledian 等^[12]和 Mubarak 等^[13]从土壤导水率角度分析了土壤对滴水出流的影响;亦有众多学者分别从试验研究和数学模型建立等方面研究了地下点源入渗条件下土壤对滴水出流的影响^[14-17]。但以上众多研究多集中于分析工作压力、滴水类型等对滴水流量的影响,而对其他因素,尤其是土壤物理特性,对滴水流量影响的分析较少。由于地下滴灌的滴水埋于田间土壤中,从而导致地下滴灌的水力特性很容易受到土壤物理特性的影响,同时土壤自身的空间异质性使得这一问题更加复杂化。

因此,本文以 PLASSIM 滴水、和平滴水为研究对象,系统分析滴水工作压力、土壤初始含水率及容重对地下滴灌滴水流量的影响及其敏感性分析,为设计经济、高效而又节水的地下滴灌系统,制定合理的地下滴灌设计参数和科学的灌水技术(灌水定额、灌水时间等)提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土样

本研究于 2014 年 10 月,在陕西关中闲置农田选取 3 种典型土壤为供试土样。分别在农田内随机抽取 60 个约 2 m² 的正方形区域,除去耕层 10 cm 左右土壤,取土深度为 30 cm,土壤初始含水率为 1%。土样充分风干后粉碎,过 2 mm 土筛。利用英国马尔文公司生产的 MS2000 激光粒度分析仪进行颗粒分析,土壤粒级分析结果见表 1,按中国土壤颗粒质地分类标准^[2]进行分析,3 种供试土样分别为轻粘土、粉壤

土和轻砂土。

1.2 研究方法

本文试验在直径 40 cm、高 40 cm 的有机玻璃桶中进行,滴水埋深 20 cm。供试滴水选用以色列公司生产的 PLASSIM 滴水与陕西和平科技股份有限公司生产的和平滴水。根据工程应用的实际情况与试验条件,设计 5 种滴水工作压力,分别为:60,100,150,200,250,300,370 kPa;根据农业生产实际,设计 2 种土壤容重:1.25,1.40 g/cm³ 和 2 种土壤初始含水率(质量比):12%,18%。为保证土桶内初始含水率及容重的均匀性,供试土壤需经风干、研碎和过筛(2 mm)处理,而后通过计算添加相应水分,使得初始土壤质量含水率分别为 12%,18%。依据试验设计,将各不同含水量的 3 种质地土壤分别按容重 1.25,1.40 g/cm³ 分层均匀装入土桶,共 12 个处理,每个处理重复 3 次。

表 1 供试土壤颗粒分析结果

供试 土样	土壤质地	不同粒径的颗粒组成/%		
		0.05~1 mm	0.01~0.05 mm	<0.001 mm
1	轻粘土	38.21	28.70	32.02
2	粉壤土	10.45	61.13	0.90
3	轻砂土	55.75	35.09	0.11

试验前须先校核滴水,本文采用传统容积法测定滴水流量,利用秒表计时,利用量筒量取出流量,最终获取供试滴水工作压力与出流量之间的关系。

地表滴灌滴水流量和压力之间的关系式为:

$$q_{DI}=kh^x \tag{1}$$

式中: q_{DI} 为地表滴灌滴水流量(L/h); h 为工作压力(kPa); k 、 x 分别为经验系数和经验指数。

2 结果与分析

2.1 水力因素对地下滴灌滴水流量的影响

2.1.1 压力对滴水流量的影响 由图 1 可以看出,随压力增大,滴水流量随之增大。当容重与初始含水率一定时,工作压力对 3 种质地土壤的地下滴水流量影响并不显著,尤其是当容重及含水量均较大时(分别为 1.4 g/cm³ 和 18%),3 种土壤的流量—压力曲线几乎重合;反之,当容重及含水量均较小时(分别为 1.25 g/cm³ 和 12%),相同压力下滴水流量有较明显的差异,且滴水流量在轻砂土中略大,轻粘土最小。在容重、压力及初始含水量均相同的条件下,3 种土壤中的滴水流量十分接近,差异不显著。

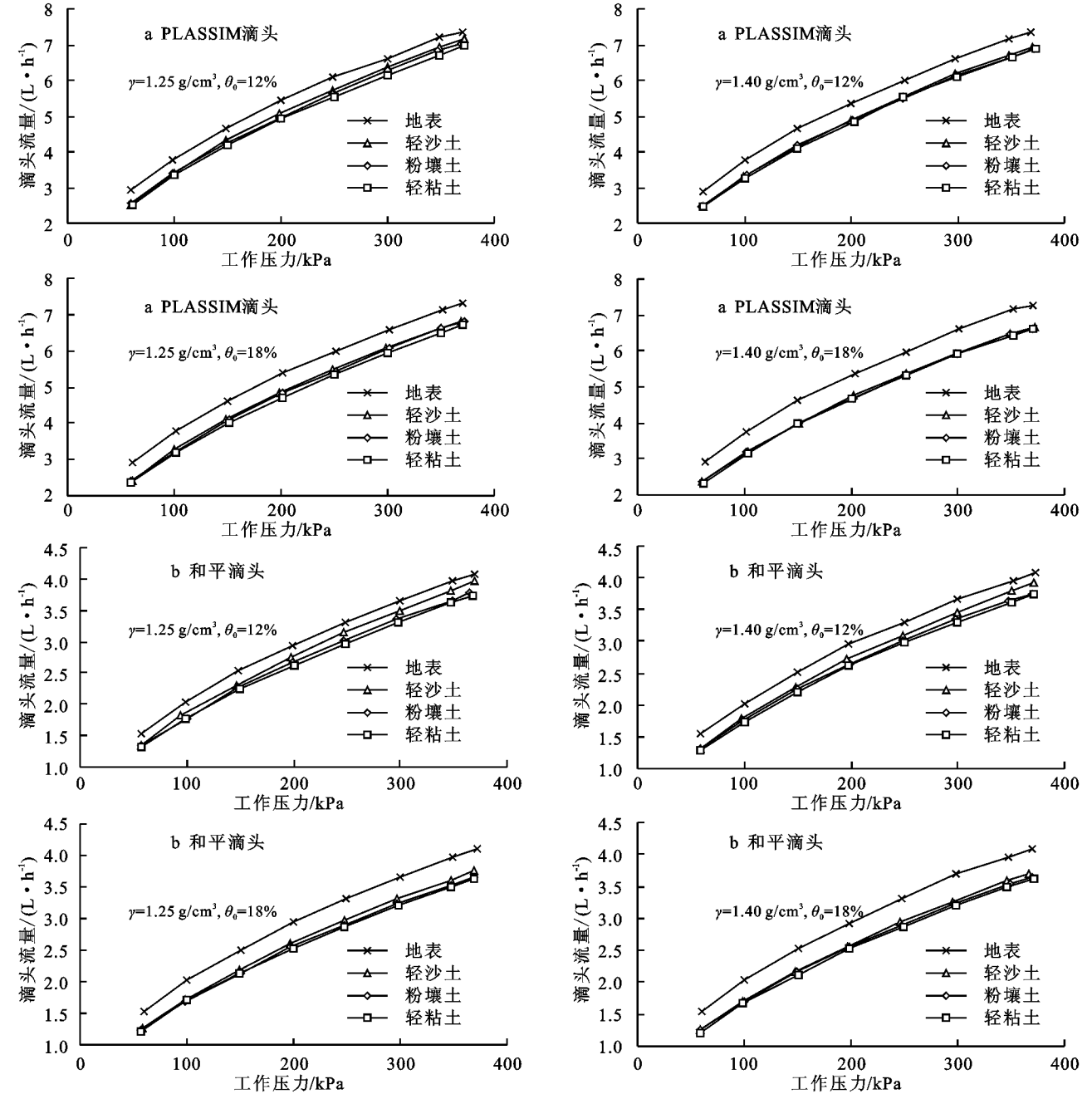
为进一步分析 2 种滴水条件下,滴水流量随压力的变化,且由于土壤质地对滴水流量随压力变化影响较小,因此本部分内容不考虑土壤类型,依据实测数据,分别拟合求得 PLASSIM 与和平滴水在地表滴灌

时的流量—压力关系式:

$$q_{DIP}=0.3610h^{0.5088} \quad R^2=0.997 \quad (2)$$

$$q_{DI和}=0.1687h^{0.5390} \quad R^2=0.989 \quad (3)$$

由公式(2)、公式(3)可以看出, R^2 均大于 0.98,滴头流量与工作压力相关性较强,可用幂函数对两者关系进行表述。



注: r 为土壤容重(g/cm^3); θ_0 为土壤初始含水率(值量比%)。下同。

图 1 2 种滴头在地表及 3 种质地土壤中滴头流量与压力的关系

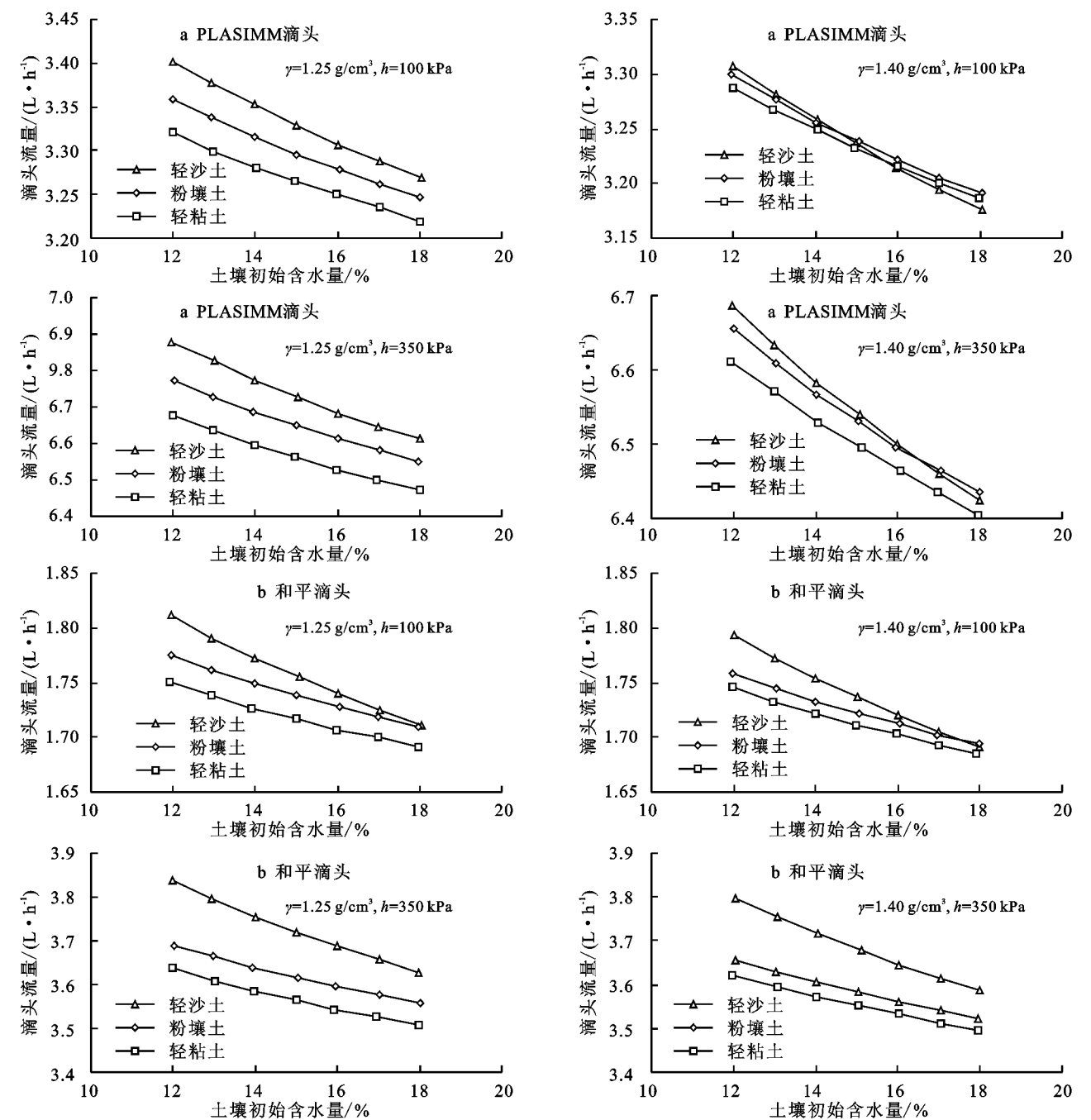
2.1.2 初始含水率对滴头流量的影响 由图 2 可以看出,土壤初始含水率对滴头流量影响显著,随初始含水率增大,滴头流量显著减小。这主要由于土壤中已有的水分占据了土壤部分孔隙,土壤基质势较大,滴头出口处的水流不易及时扩散,阻滞在滴头周围,形成有压水流,从而阻碍滴头进一步出流,致使其流量有所减小^[18]。进一步分析图 2 可以看出,相同 θ_0 情况下,不同土壤中滴头流量按土壤质地的不同呈现如下规律:轻砂土>粉壤土>轻粘土。当容重较大

($1.4 \text{ g}/\text{cm}^3$)时,轻砂土中的滴头流量随初始含水率的增大而减小的速度更快,甚至在初始含水率为 18%时出现了滴头流量小于其他 2 种土壤的情况,这主要由于轻砂土的孔隙分布随容重的变化较大,继而对埋于土中的滴头流量产生较大的影响(图 2)。

2.1.3 土壤容重对滴头流量的影响 由图 3 可以看出,当工作压力和初始含水率不变时,2 种滴头的滴头流量均是近似呈线性递减趋势。不同土壤中的滴头流量按土壤质地的不同呈现如下规律:轻砂土>

粉壤土>轻粘土。其结果表明土壤质地越轻,容重对滴头流量的制约作用越明显。这主要因为土壤容重的变化改变了土壤孔隙度和孔隙分布。一般而言,

砂土中大孔隙发育,其通气性和透水性强,砂土的物理特性对容重的敏感性较强,受土壤容重变化的影响较大^[19]。



注: h 为工作压力(kPa)。下同。

图 2 流量与土壤初始含水率的关系

在容重和初始含水率较大时(18%),轻砂土中的滴头流量随容重的增大而减小的较快,甚至在容重为 1.4 g/cm^3 时出现了滴头流量小于其他 2 种土的情况。当工作压力和初始含水率不变时,随着容重增大,滴头流量几乎呈线性递减趋势。土壤容重越大,表明土壤越密实,土壤中孔隙介质透水性能就越弱,此时,滴头出口处的水流不易及时扩散,阻滞在滴头周围,形成有压水流,从而阻碍滴头进一步出流,致使

其流量有所减小。反之,容重较小时,土壤透水性越强,滴头出流受到的阻碍略小,其流量就相对较大。

2.2 滴头流量对水力特性敏感性分析

滴头流量对水力特性的敏感性可用敏感性指标来表示,敏感性指标越大,表明滴头流量对该水力特性的变化越敏感。依据压力、含水量及容重与滴头流量的变化曲线形状,建立地下滴灌滴头流量计算公式为:

$$q_{SDI} = k\gamma^a\theta_0^c h^x$$

(4)

式中: q_{SDI} 为地下滴灌滴头流量 (L/h); γ 为土壤容重 (g/cm^3); θ_0 为土壤初始含水率 (质量, %); k 为经验系数; a, c, x 为经验指数。

公式(4)中已经给出了地下滴灌滴头流量值的计算公式, 分别用 $\partial q_{SDI}/\partial h$, $\partial q_{SDI}/\partial \theta_0$, $\partial q_{SDI}/\partial \gamma$ 反映地下滴灌的敏感性, 将公式(4)分别对 h, θ, γ 求偏导数, 以分析滴头流量对压力、含水量和容重敏感性,

结果为:

$$\frac{\partial q_{SDI}}{\partial h} = k\gamma^a \theta^c x h^{x-1} \quad (5)$$

$$\frac{\partial q_{SDI}}{\partial \theta_0} = k\gamma^a c \theta^{c-1} h^x \quad (6)$$

$$\frac{\partial q_{SDI}}{\partial \gamma} = ka\gamma^{a-1} \theta^c h^x \quad (7)$$

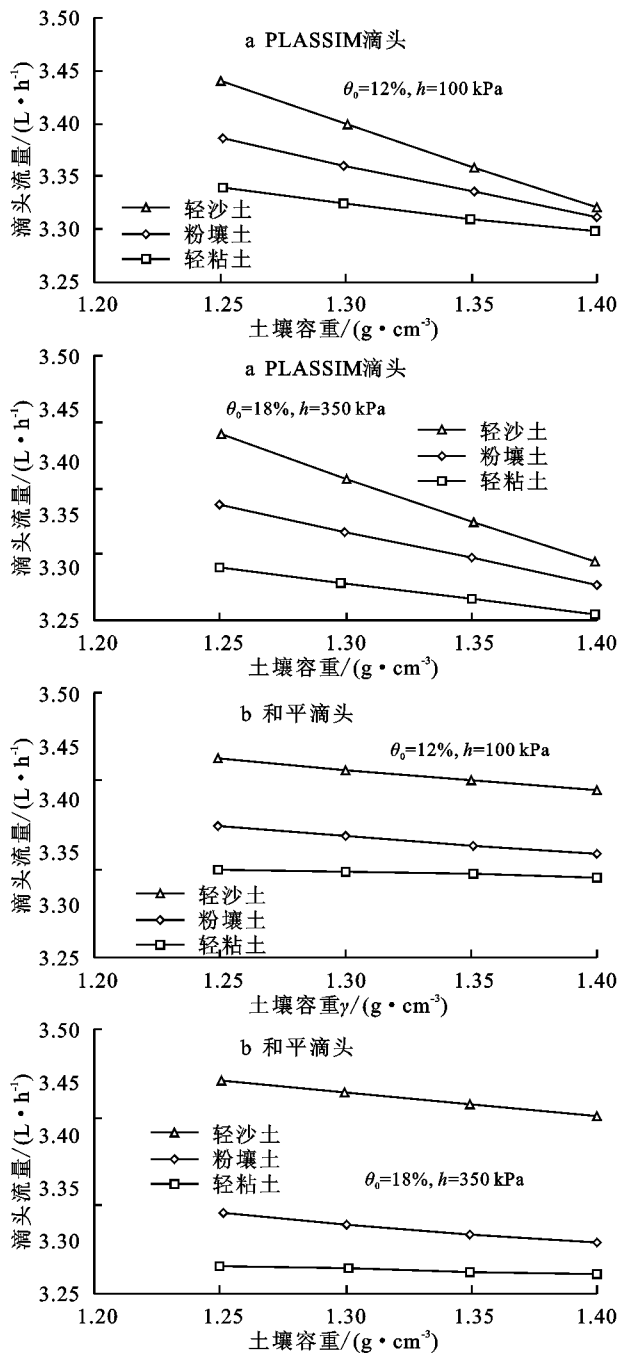
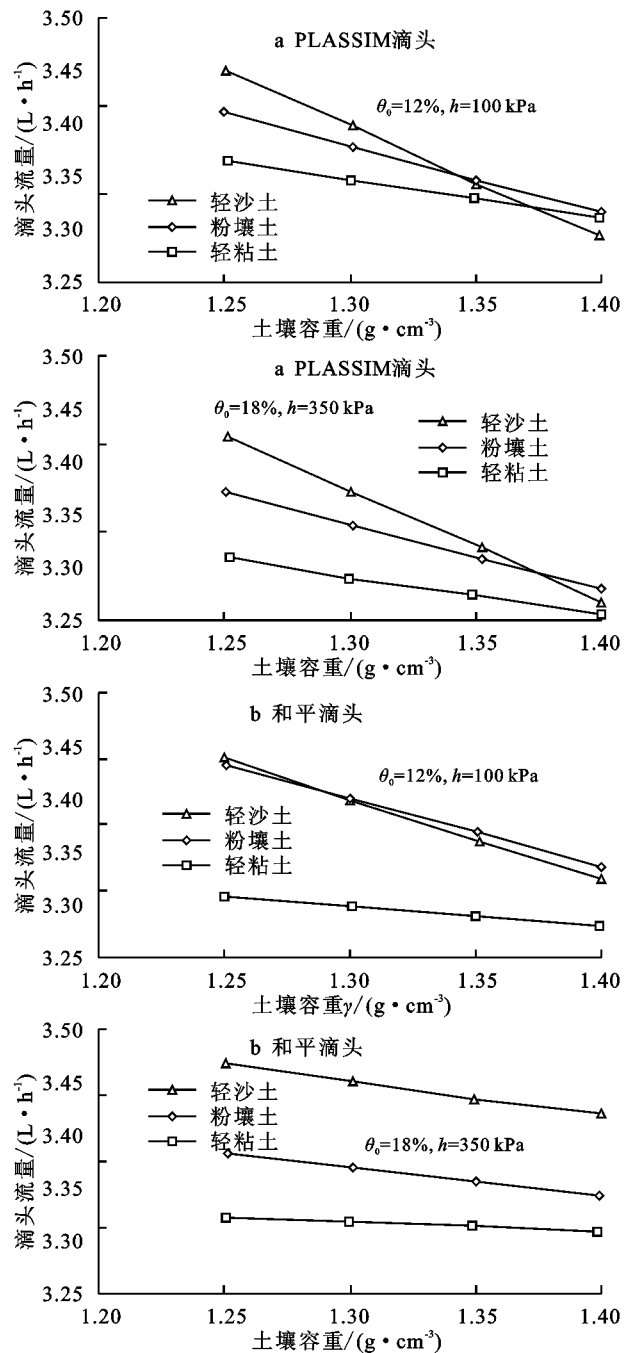


图 3 滴头流量与土壤容重的关系

2.2.1 滴头流量对压力的敏感性分析 将 2 种滴头在 3 种土壤中的滴头压力敏感性指标 $\partial q_{SDI}/\partial h$ 随压力变化曲线绘于图 4。 $\partial q_{SDI}/\partial h$ 越大, 滴头流量对压力的变化越敏感。从图 4 可以看出, 系统工作压力较低时两种滴头敏感性指标均相对较高, 压力的变化对



滴头流量影响较大; 随压力的增加, 2 种滴头敏感性指标降低, 压力的变化对滴头流量大小的影响程度逐渐减弱。在相同压力时, 这 2 种滴头在不同土壤下的敏感性指标大小为轻砂土 > 粉壤土 > 轻粘土。

2.2.2 滴头流量对含水率的敏感性分析 将 2 种滴

头在 3 种土壤中 $\partial q_{SDI}/\partial \theta_0$ 随初始含水率变化的情况绘于图 5。若 $|\partial q_{SDI}/\partial \theta_0|$ 越大,则表明滴头流量对初始含水率的变化越敏感。由图 5 可以看出,初始含水率较低时两种滴头敏感性指标均相对较高,初始含水率的变化对滴头流量影响较大,随含水率的增加,2 种滴头敏感性指

标降低,表明当初始含水率较大时对滴头流量影响减弱。在相同初始含水率时,这两种滴头在不同土壤中的敏感性指标大小为轻砂土>粉壤土>轻粘土。因此在待测的 3 种土壤中,轻砂土中的滴头流量对初始含水率的变化较敏感,轻粘土的敏感性最小。

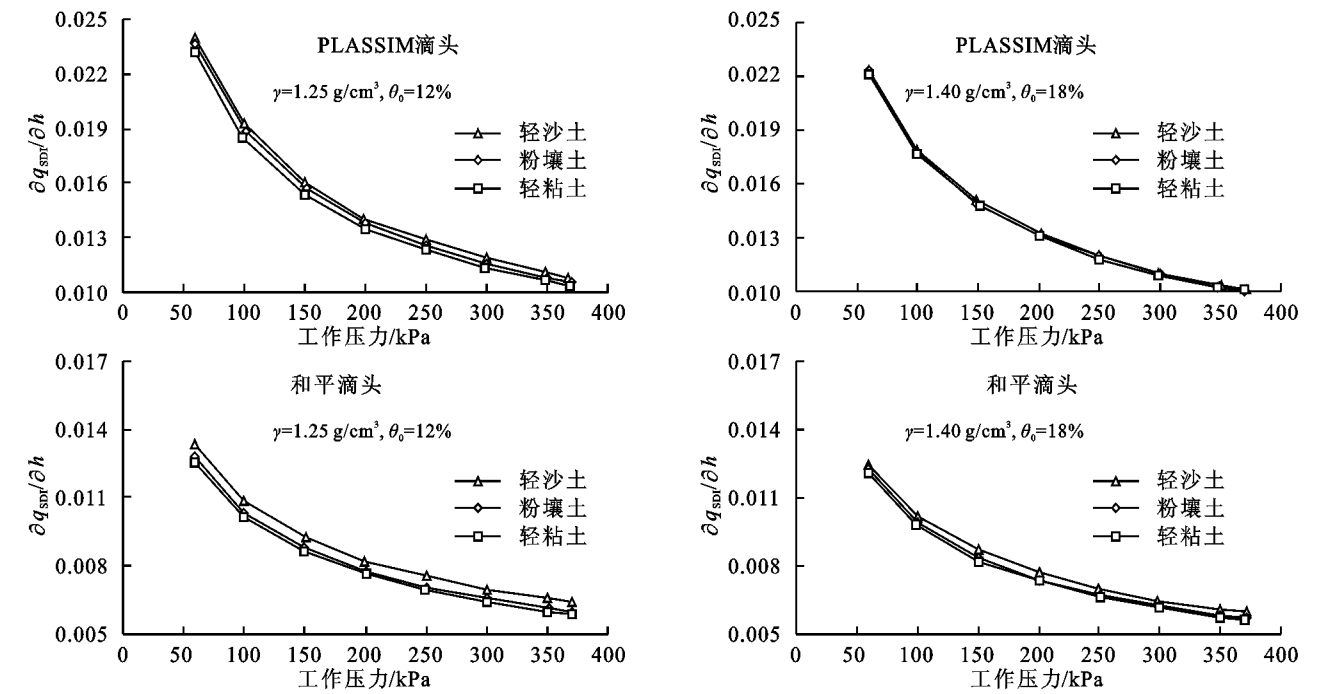


图 4 $\partial q_{SDI}/\partial h$ 随压力变化曲线

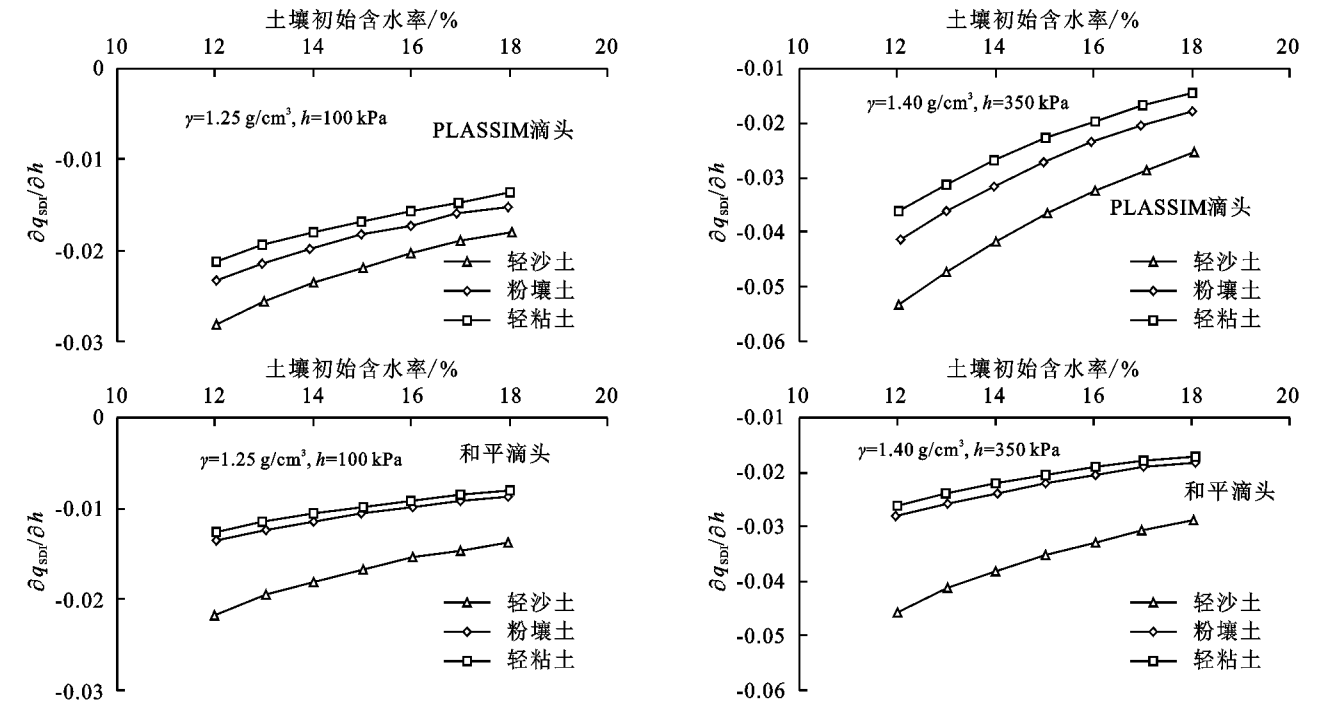
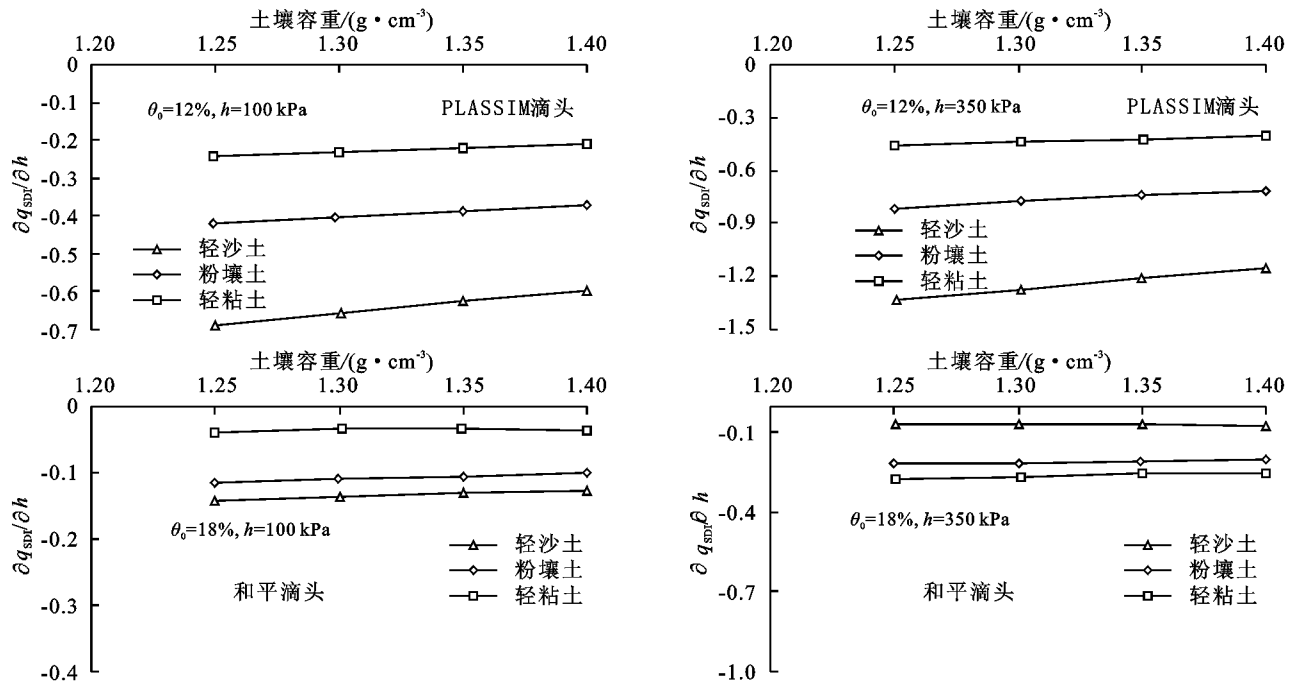


图 5 $\partial q_{SDI}/\partial \theta_0$ 随压力变化曲线

2.2.3 滴头流量对土壤容重的敏感性分析 将 3 种土壤中 $\partial q_{SDI}/\partial \gamma$ 随容重的变化关系绘于图 6。 $|\partial q_{SDI}/\partial \gamma|$ 越大,则表明滴头流量对容重变化越敏感。从图 6 可以看出,随着容重的变化其敏感性指标变化不显著,说明滴头流量对容重变化敏感性不高;随着

土壤容重的增加,2 种滴头敏感性指标均有所降低。当容重相同时,这 2 种滴头在不同土壤下的敏感性指标大小为轻砂土>粉壤土>轻粘土。这表明在 3 种土壤中轻砂土中的滴头流量受容重变化的敏感性相对较大,轻粘土最小。

图 6 $\partial q_{sdi}/\partial \gamma$ 随容重变化曲线

3 结 论

在 3 种供试土壤中,工作压力是决定滴头流量大小的决定性因素。在压力相同时,与地表滴头流量相比,3 种土壤中的地下滴头流量有不同程度的减小;土壤容重与初始含水率越小,滴头流量随工作压力变化趋势的差别相对明显;2 种滴头在不同土壤下的压力敏感性指标大小均为轻砂土>粉壤土>轻粘土。3 种土壤中,滴头流量随压力的增加而增加,2 种滴头的压力敏感性指标随系统工作压力的增加而降低。

(1)在相同压力时,土壤初始含水率和容重对供试的滴头流量均起制约作用。土壤质地越轻,初始含水率和容重对滴头流量的制约作用越明显。相同初始含水率或容重条件下,不同土壤中滴头流量对各影响因素变化的敏感性均表现为:轻砂土>粉壤土>轻粘土。PLASSIM 滴头、和平滴头的敏感性指标均随工作压力、土壤初始含水率、容重的增加而降低。

(2)轻砂土的物理特性对容重和初始含水率的敏感性较强;当初始含水率较大时,轻砂土中的滴头流量随容重增大而减小的速率较快;初始含水率较小时,相同条件下,轻粘土滴头流量最小,轻砂土最大。

参考文献:

- [1] 王晓愚. 地下滴灌田间管网系统水力要素室内试验与数值模拟研究[D]. 西安:西安理工大学,2009.
- [2] 孙三民,安巧霞,杨培岭,等. 间接地下滴灌灌溉深度对枣树根系和水分的影响[J]. 农业机械学报,2016,47(8):81-90.
- [3] Sagi Gidi. Adi dripper resistance to clogging with use of effluent water; A case study [J]. International Water

and Irrigation, 2006, 26(2): 42-43.

- [4] Sampathkumar T, Pandian B J, Rangaswamy M V, et al. Influence of deficit irrigation on growth, yield and yield parameters of cotton-maize cropping sequence[J]. Agricultural Water Management, 2013, 130(130): 90-102.
- [5] Payero J O, Tarkalson D D, Irmak S, et al. Effect of irrigation amounts applied with subsurface drip irrigation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry matter production in a semiarid climate [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(8): 895-908.
- [6] 孙三民,安巧霞,蔡焕杰,等. 枣树间接地下滴灌根区土壤盐分运移规律研究[J]. 农业机械学报,2015,46(1):160-169.
- [7] 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.
- [8] 仵峰,宰松梅,徐建新,等. 地下滴灌的应用模式与启示[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2016,37(3):19-22.
- [9] 仵峰,吴普特,范永申,等. 地下滴灌条件下土壤水能态研究[J]. 农业工程学报,2008,24(12):31-35.
- [10] 安巧霞,孙三民,徐镭,等. 不同流量对间接地下滴灌湿润体特征的影响[J]. 人民黄河,2016,38(6):154-156.
- [11] 宰松梅,仵峰,范永申,等. 不同滴灌形式对棉田土壤理化性状的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(12):84-89.
- [12] Khaledian M, Shabanpour M, Alinia H. Saturated hydraulic conductivity variation in a small garden under drip irrigation [J]. Geosystem Engineering, 2016, 19(6):1-9.

(下转第 343 页)