doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.028

微润管出流特性和流量预报方法研究

牛文全[1,2]　张明智[3]　许　健[2]　邹小阳[4]　张若婵[1]　李　元[2]

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌 712100;2.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西杨凌 712100;
3.河南省水利科学研究院,郑州 450000;4.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌 712100)

摘要: 为探明影响微润管流量的主要因素,确定微润管压力与流量关系,通过田间试验,研究不同土壤初始质量含水率(13.83%、15.49%、16.27%、17.72%)和不同土壤容重(1.18、1.21、1.24、1.26 g/cm^3)条件下不同压力水头(0、0.1、0.3、0.7、1.1、2.1 m)对微润管流量的影响。结果表明:微润管流量随土壤质量含水率变化有一定的自我调节作用,但微润管流量受土壤质量含水率变化影响较小,自我调节时间约为44 h。随着灌水时间增加,微润管流量呈先快速增加再减小后趋于稳定平缓的趋势,灌水后约48 h趋于稳定状态。工作压力、土壤容重和初始质量含水率均对微润管流量有显著影响,在一定工作压力范围内(0~2.1 m水头),压力与流量呈显著性线性关系($P<0.05$),模型决定系数R^2大于0.85,随土壤初始质量含水率与容重增加,微润管流量呈减小趋势,微润管流量变化对工作压力的敏感度逐渐下降;在压力与流量线性回归模型中微润管的流量系数和压力为零的流量b均非单纯由产品自身特性决定,土壤初始质量含水率和容重与流量系数呈显著负相关关系($P<0.05$),容重与压力为零的流量均存在显著负相关关系($P<0.05$),可用土壤初始质量含水率和容重确定流量系数和压力为零时的流量值,最终实现微润灌出流预报。通过灰色关联分析发现,压力是影响微润管流量的最主要因素,土壤容重次之,土壤初始质量含水率对微润管流量影响最小。

关键词: 微润管;流量;土壤;压力;初始质量含水率;容重

中图分类号: S275.9　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1000-1298(2017)06-0217-08

Prediction Methods and Characteristics of Flow for Moistube

NIU Wenquan[1,2]　ZHANG Mingzhi[3]　XU Jian[2]　ZOU Xiaoyang[4]　ZHANG Ruochan[1]　LI Yuan[2]

(1. *College of Water Resource and Architectural Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *Institute of Soil and Water Conservation*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
3. *Henan Provincial Water Conservancy Research Institute*, *Zhengzhou* 450000, *China*　4. *Institute of Soil and Water Conservation*, *Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: In order to understand the main factors influencing the flow of moistube and determine the relationship between flow and pressure, in the case of different soil initial mass moisture contents (13.83%, 15.49%, 16.27% and 17.72%) and soil bulk densities (1.18 g/cm^3, 1.21 g/cm^3, 1.24 g/cm^3 and 1.26 g/cm^3), the completely random experiment design in field of arable land was used to test the influence of different pressures (0 m, 0.1 m, 0.3 m, 0.7 m, 1.1 m and 2.1 m) on moistube flow. The results showed that the moistube had a weak and short duration of self-regulation function of flow with the change of soil moisture content, which was about 44 h. The moistube flow was increased quickly and then decreased to steady state, the soil moisture content was increased and then tended to stable state at the beginning of irrigation, it would be in steady state when after 48 h of irrigation. Moistube flow was significantly influenced by pressure, soil bulk density and soil initial mass moisture content. Moistube flow was mainly controlled by pressure, there was a significantly liner relationship between pressure and flow within a certain range (the water head was varied from 0 m to 2.1 m), the determination coefficient $R^2>0.85$, when soil initial mass moisture content and bulk density was increased, moistube flow kept a downtrend, meanwhile the moistube flow change on the sensitivity of the working pressure was gradually decreased. Moistube flow coefficient k and flow b with zero pressure were not simply determined by the

收稿日期:2016-09-12　修回日期:2016-11-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400202)和国家自然科学基金项目(51679205)

作者简介: 牛文全(1971—),男,研究员,博士生导师,主要从事灌溉理论与节水技术研究,E-mail:nwq@nwsuaf.edu.cn

moistube's characteristics in the model of liner relationship between pressure and flow. The soil initial mass moisture content and bulk density with moistube flow coefficient k showed a significant negative correlation respectively ($P<0.05$), bulk density with flow b with zero pressure had a significant negative correlation ($P<0.05$), Moistube flow coefficient k and flow b with zero pressure can be determined by soil initial mass moisture content and bulk density, thus the moistube flow can be predicted. According to correlation analysis and variance analysis, pressure was the most important factor affecting the moistube flow, then the soil bulk density and soil initial mass moisture content was the least.

Key words: moistube; flow; soil; pressure; initial mass moisture content; bulk density

引言

微润管由填料(不与聚乙烯材料发生化学反应的材料,如轻质碳酸钙、重质碳酸钙与超细二氧化硅;材料表面处理剂为脂肪醇聚氧乙烯醚 AEO－7 或脂肪醇聚氧乙烯醚 AEO－9)与高压聚乙树脂按预设质量比形成混合材料进行搅拌,搅拌均匀后置入造粒机制成填充颗粒料,将该颗粒料置入预设制管设备以制成预成型管,再将预成型管导入高温萃取机中,以水和十二烷基苯磺酸钠的混合液为萃取剂对预成型管进行连续萃取而制成。管壁较厚((0.9±0.1) mm),微润管属于线源持续性灌溉,是渗灌的一种。微润灌技术结构简单,动力消耗少,运行费用低,是一种具有广阔应用前景的节水灌溉技术,关于微润灌技术的应用及研究越来越多[1-6]。

微灌流量及其影响因素是决定灌水质量的重要因素,选用适宜的技术参数对于有效调控土壤含水率十分重要。一般情况下,影响地埋式灌水器流量的因素有土壤、水力与灌水器的特征参数等,其中土壤质地、容重、含水率和温度以及灌水器的尺寸、堵塞程度、工作压力、毛管埋深和布置间距等均对灌水器流量的影响较大[2,7-11]。对于地下滴灌,压力是控制其流量的关键因素[2],压力与流量一般是幂函数关系,可由滴头的流量系数和流态指数计算特定压力下的流量,滴灌系统的滴头流量系数和流态指数一般和滴头的结构参数有关[12-14]。微润灌与滴灌不同,前者压力与流量呈显著线性正相关关系[1,15],管道布置间距、铺设长度和埋深等均对流量有显著影响[16-24]。随微润管埋深的增加,流量呈减小趋势[2]。土壤类型、土壤初始质量含水率等因素也是影响垂直线源入渗的重要因素[25-26],流量与土壤入渗速率存在显著正相关关系[27]。

研究发现微润管压力与流量呈线性关系,容重与平均入渗速率(流量)呈负线性关系[2],且随土壤容重的增加,湿润峰运移距离呈减小趋势,随土壤初始质量含水率的增加,湿润峰运移距离呈增加趋势,土壤容重、初始质量含水率与流量的关系通过线性回归分析发现,土壤容重与流量呈负线性相关关系,其中 $R^2=0.807$;土壤初始质量含水率与流量呈正线性相关关系,其中 $R^2=0.866$;二者的线性模型决定系数 R^2 均较大,说明在该模型中土壤容重、初始质量含水率均可解释流量变化至少 80% 以上,二者是影响微润管流量的主要因素[28]。

但总体而言,针对上述因素对微润管流量影响的研究较少,不同影响因素对微润管流量的影响也缺乏定量分析。目前,有研究认为痕量灌溉技术可根据土壤含水率自我调节流量[4,28],为初步探明微润灌是否也具有同样的功能,有必要建立不同土壤性质的微润管压力与流量关系。本文通过大田试验,研究不同压力、土壤初始质量含水率与容重对微润管流量的影响,以期为微润灌溉科学设计和推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验于 2015 年 6 月份在陕西省杨凌西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室灌溉试验站(108°24′E、34°20′N,海拔高度 521 m)进行,该地区属暖温带半湿润气候,全年无霜期 221 d,年均日照时数 2 163.80 h,年均降水量为 600 mm,且多集中在 7—9 月份。试验地土壤为杨凌塿土,土壤颗粒分析组成见表 1,经测定 0～80 cm 土层内平均田间持水率(质量分数)为 24.0%,饱和含水率(体积分数)为 60.1%,凋萎含水率(体积分数)为 8.5%,土壤容重为 1.32 g/cm^3,该试验小区地下水埋深大于 5 m[29],因此,忽略地下水补给。

表 1 供试土壤颗粒分析

Tab.1 Particle size analysis of soil samples

粒径 R/mm	≥2.00	1.00～2.00	0.50～1.00	0.25～0.50	0.10～0.25	0.05～0.10	0～0.05
质量分数/%	0.96	3.76	6.35	15.86	19.85	14.88	38.34

1.2　试验设计及过程

采用深圳市微润灌溉有限公司生产的微润管，管径 16 mm，如图 1a 所示。试验设计小区尺寸为 6 m×2 m，各小区间距 1 m，每小区内铺设微润管 6 条，铺设长度 2 m，铺设间距 1 m，微润管埋深 0.20 m（图 1b）。试验时，用马氏瓶控制水位高度，当压力较低时，微润管流量受土壤含水率的影响较大，故按照由密到疏压力布置原则，每个小区铺设 6 条微灌管的工作压力分别为 0、0.1、0.3、0.7、1.1、2.1 m 水头。试验考虑土壤初始质量含水率和容重 2 个因素，各因素设置 4 个水平。预先设定目标初始土壤含水率为田间持水率的 60%、65%、70%、75%，通过实际测量各小区土壤初始质量含水率，由于田间土壤含水率分布不均匀，故试验前取出各小区 0～60 cm 土层土壤，搅拌均匀，测量土壤含水率，并计算灌水量

$$M = 100(\theta_F - \theta_i)\gamma H p \tag{1}$$

式中　M——灌水量，m^3/hm^2

θ_F——预先设定目标初始土壤质量含水率

θ_i——0～60 cm 土层内的平均质量含水率

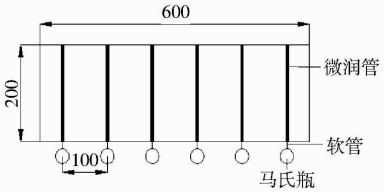
γ——土壤容重，g/cm^3

p——土壤湿润比，取 0.9

H——计划湿润层深度，m

通过换算获得各水平小区实际灌水量 m。

(a) 微润管



(b) 试验小区(单位:cm)

图 1　微润管及试验小区示意图

Fig. 1　Schematics of moistube and experiment plots

各小区实际灌水量 m 计算结果分别为 0、0.12、0.18、0.28 m^3，将该水分浇洒在相对应的小区取出土层的土壤中，搅拌均匀后整体均匀性回填，形成不同的土壤初始质量含水率及容重，同时考虑回填过程中产生的误差，采用 6 m×2 m 大型有机玻璃板整体均匀性压实，各小区随机选取 6 个采样点进行采集，计算平均值，测定试验小区实际土壤初始质量含水率（w）分别为 13.83%、15.49%、16.27%、17.72%（质量含水率）；容重（ρ_b）分别为 1.18、1.21、1.24、1.26 g/cm^3，共计 16 个试验小区，小区位置随机排列，共 96 个处理（表 2），由于微润管流量小，连续灌水时间短，故忽略各处理之间的土壤水分横向渗透运移。

1.3　测定指标及方法

1.3.1　流量 q

微润灌为管道壁面的微孔出流，其流量为单位时段内单位长度的出水量。灌水 3 d 内分别于灌水 0、2、4、7、11、15、24、31、39、48、60、72 h 时观测记录马氏瓶水位线，计算各单位时段出流量

$$q_i = s(H_{i+1} - H_i)/(T_i d) \tag{2}$$

式中　q_i——第 i 时段内的流量，$cm^3/(m\cdot h)$

s——马氏瓶底面积，cm^2

H_{i+1}、H_i——i 时段开始和结束时马氏瓶水位刻度值，cm

T_i——第 i 时段间隔，h

d——微润管长度，m

微润管平均流量 q 为各单位时段流量 q_i 的算术平均值。

1.3.2　土壤含水率

根据有关研究[30-31]，微润管周围大部分土壤含水率介于田间持水率的 80%～90% 之间，毛管正上部 5 cm 左右的土壤质量含水率基本保持在田间持水率的 80%～90% 之间，为防止采样对微润管的破坏，本研究采样点集中在毛管正上部 5～10 cm 处。采样时间均在记录马氏瓶水位线后立刻用土钻采集土样，采用干燥法测定土壤质量含水率。

1.3.3　土壤容重

灌水前在微润管正上部 5～10 cm 土层取样，采用环刀法测定。

1.4　数据分析

利用 SPSS 22.0 进行逐步线性回归分析，Excel 进行灰色关联度及方差分析，用 OriginPro 9.0 作图。

2　结果与分析

2.1　微润管流量随时间的变化

微润管流量受土壤含水率的影响微润管流量随灌水时间的变化而发生相应的改变[24]。图 2a 为随机选择一组微润管流量随灌水时间的变化趋势。

由图 2a 可知，微润管流量随灌水时间的增加，基本均呈先增大再减小后趋于稳定的变化趋势，压力越大变化趋势越明显。灌水 48 h 后微润管流量基本趋于稳定。压力越大，微润管流量达到稳定状态所需时间越短。压力相同时，土壤初始质量含水率与容重越小，土壤水分达到稳定状态所需的时间

表 2 试验处理

Tab. 2 Experiment treatments

处理	土壤初始含水率/%	容重/(g·cm^{-3})	压力水头/m	处理	土壤初始含水率/%	容重/(g·cm^{-3})	压力水头/m
T01	13.83	1.18	0	T49	16.27	1.18	0
T02	13.83	1.18	0.1	T50	16.27	1.18	0.1
T03	13.83	1.18	0.3	T51	16.27	1.18	0.3
T04	13.83	1.18	0.7	T52	16.27	1.18	0.7
T05	13.83	1.18	1.1	T53	16.27	1.18	1.1
T06	13.83	1.18	2.1	T54	16.27	1.18	2.1
T07	13.83	1.21	0	T55	16.27	1.21	0
T08	13.83	1.21	0.1	T56	16.27	1.21	0.1
T09	13.83	1.21	0.3	T57	16.27	1.21	0.3
T10	13.83	1.21	0.7	T58	16.27	1.21	0.7
T11	13.83	1.21	1.1	T59	16.27	1.21	1.1
T12	13.83	1.21	2.1	T60	16.27	1.21	2.1
T13	13.83	1.24	0	T61	16.27	1.24	0
T14	13.83	1.24	0.1	T62	16.27	1.24	0.1
T15	13.83	1.24	0.3	T63	16.27	1.24	0.3
T16	13.83	1.24	0.7	T64	16.27	1.24	0.7
T17	13.83	1.24	1.1	T65	16.27	1.24	1.1
T18	13.83	1.24	2.1	T66	16.27	1.24	2.1
T19	13.83	1.26	0	T67	16.27	1.26	0
T20	13.83	1.26	0.1	T68	16.27	1.26	0.1
T21	13.83	1.26	0.3	T69	16.27	1.26	0.3
T22	13.83	1.26	0.7	T70	16.27	1.26	0.7
T23	13.83	1.26	1.1	T71	16.27	1.26	1.1
T24	13.83	1.26	2.1	T72	16.27	1.26	2.1
T25	15.49	1.18	0	T73	17.72	1.18	0
T26	15.49	1.18	0.1	T74	17.72	1.18	0.1
T27	15.49	1.18	0.3	T75	17.72	1.18	0.3
T28	15.49	1.18	0.7	T76	17.72	1.18	0.7
T29	15.49	1.18	1.1	T77	17.72	1.18	1.1
T30	15.49	1.18	2.1	T78	17.72	1.18	2.1
T31	15.49	1.21	0	T79	17.72	1.21	0
T32	15.49	1.21	0.1	T80	17.72	1.21	0.1
T33	15.49	1.21	0.3	T81	17.72	1.21	0.3
T34	15.49	1.21	0.7	T82	17.72	1.21	0.7
T35	15.49	1.21	1.1	T83	17.72	1.21	1.1
T36	15.49	1.21	2.1	T84	17.72	1.21	2.1
T37	15.49	1.24	0	T85	17.72	1.24	0
T38	15.49	1.24	0.1	T86	17.72	1.24	0.1
T39	15.49	1.24	0.3	T87	17.72	1.24	0.3
T40	15.49	1.24	0.7	T88	17.72	1.24	0.7
T41	15.49	1.24	1.1	T89	17.72	1.24	1.1
T42	15.49	1.24	2.1	T90	17.72	1.24	2.1
T43	15.49	1.26	0	T91	17.72	1.26	0
T44	15.49	1.26	0.1	T92	17.72	1.26	0.1
T45	15.49	1.26	0.3	T93	17.72	1.26	0.3
T46	15.49	1.26	0.7	T94	17.72	1.26	0.7
T47	15.49	1.26	1.1	T95	17.72	1.26	1.1
T48	15.49	1.26	2.1	T96	17.72	1.26	2.1

就越长。随土壤含水率的增加,微润管流量呈先增加后减小再趋于稳定的趋势,说明微润管流量随土壤含水率变化有一定的自我调节作用,综合分析发现,自我调节时间约为 44 h。微润管流量与土壤含水率约在灌水 48 h 后均趋于稳定。

2.2 土壤含水率随时间的变化

图 2b 为微润管上部 5 ~ 10 cm 平均土壤含水率随灌水时间变化的趋势。分析发现,随灌水时间的增加,土壤含水率呈先快速增加后趋于平缓稳定的趋势,灌水 60 h 后土壤含水率基本趋于稳定,土壤含水率随工作压力增大而增大,工作压力为 2.1 m 水头时土壤质量含水率最大,约为 24%;工作压力水头为零时最小,土壤质量含水率约为 20%。工作压力越大,土壤含水率达到稳定状态所需的时间越短。土壤初始质量含水率越小,土壤水分达到稳定状态所需的时间越长,初始土壤质量含水率分别为 13.83% 和 17.72% 时,土壤含水率达到稳定状态所需的时间相差约为 20 h。土壤容重对土壤含水率达到稳定状态所需时间的影响与初始质量含水率类似。

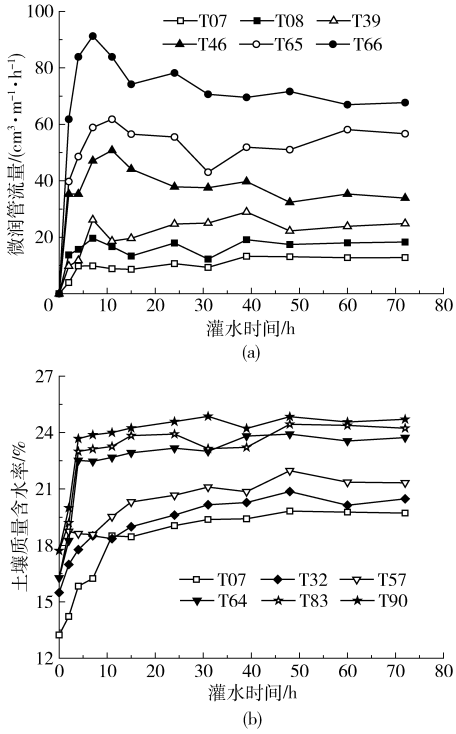


图 2 微润管流量与土壤质量含水率随时间的变化曲线

Fig. 2 Changing curves of moistube flow and soil mass moisture content with time

2.3 压力对微润管流量的影响

通过对试验中 16 个小区 96 组试验数据分析发现,压力与流量在一定范围内呈线性增加趋势,即

$$q = kh + b \tag{3}$$

式中 k——流量系数,cm^3/(m^2·h)

h——水头，m

b——压力为零时的平均流量，$cm^3/(m \cdot h)$

参数见表 3。

由表 3 可知，压力-流量 Pearson 相关系数介于 0.94 ~ 1.00 之间，相关关系具有极显著性（$P < 0.01$）。压力-流量线性拟合公式的决定系数 R^2 介于 0.89 ~ 1.00 之间，最小值 0.89 > 0.85，表明该模型中压力可解释流量的程度在 85% 以上，因此，压力是控制微润管流量的主要因素。通过对模型自变量的显著性检验（$P < 0.05$），工作压力在 0 ~ 2.1 m 水头范围内，微润管压力与流量呈显著线性关系。通过 $e = \sqrt{1 - R^2} = 0.19$，获得剩余因子，该因子较大，且流量系数 k 值介于 23.99 ~ 37.54 $cm^3/(m^2 \cdot h)$ 之间，压力为零时的流量 b 值介于 9.34 ~ 14.44 $cm^3/(m \cdot h)$ 之间，最大值是最小值的 1.50 倍以上，相差较大。说明影响流量的主要因素除压力外，其他因素的影响也不能忽视，如土壤初始质量含水率和容重等。

表 3　不同处理下微润管流量与流量系数

Tab. 3　Moistube flow and flow coefficient of different treatments

土壤初始质量含水率 w/%	流量系数 k/($cm^3 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)				压力为零时流量/($cm^3 \cdot m^{-1} \cdot h^{-1}$)			
	ρ_{b1}	ρ_{b2}	ρ_{b3}	ρ_{b4}	ρ_{b1}	ρ_{b2}	ρ_{b3}	ρ_{b4}
13.83	36.71**	37.54**	32.68**	29.74**	14.44*	12.27*	12.64*	10.28*
15.49	35.82**	33.28**	31.61**	27.25**	13.24*	12.31*	12.21*	10.66**
16.27	33.67**	29.76**	30.73**	24.39**	12.87*	12.49ns	12.44*	10.07**
17.72	31.92**	29.83**	30.29**	23.99**	13.61*	11.56**	11.80**	9.34**

注：*、** 分别表示自变量在回归模型中 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平上显著相关，下同。ρ_{b1}、ρ_{b2}、ρ_{b3} 和 ρ_{b4} 分别表示土壤容重为 1.18、1.21、1.24、1.26 g/cm^3。

2.4　土壤容重对流量的影响

通过单因素方差分析发现，土壤容重对微润管流量有显著影响（$P < 0.05$）。随土壤容重的增加，微润管流量呈减小趋势（表 3）。Pearson 相关分析发现，土壤容重对 k 和 b 值影响的 Pearson 相关系数分别为 −0.776、−0.893，均达显著水平（$P < 0.05$）。随土壤容重的增大，流量系数 k 基本呈减小趋势，说明随土壤容重的增加，微润管流量变化对工作压力的敏感度逐渐下降，在压力与流量线性关系式（3）中，增加 1.0 m 压力时，流量 q 增加量等于流量系数 k，当土壤容重增加 1.00 g/cm^3 时，流量系数 k 减小 100.01 $cm^3/(m^2 \cdot h)$，k 的减小导致微润管流量的增加量也相应减小。随土壤容重的增大，压力为零时流量 b 也基本呈减小趋势。

2.5　土壤初始质量含水率对流量的影响

通过单因素方差分析发现，土壤初始质量含水率对微润管流量有显著影响（$P < 0.05$），随土壤初始质量含水率的增加，微润管流量基本呈减小趋势。由表 3 可知，随初始质量含水率的增加，流量系数 k 和压力为零时的流量 b 基本均呈减小趋势，说明随土壤初始质量含水率的增加，微润管流量变化对工作压力的敏感度呈逐渐下降趋势，在压力与流量线性关系中，压力增加 1.0 m 流量增加量等于流量系数 k，当土壤初始质量含水率增加 1 个百分点时，流量系数 k 减小 1.10 $cm^3/(m^2 \cdot h)$，k 的减小导致微润管流量的增加量也相应减小。流量系数 k、压力为零的流量 b 与土壤初始质量含水率 w 的 Pearson 相关系数分别为 −0.523、−0.225，说明 k、b 均与 w 呈负相关关系，其中流量系数 k 与土壤初始质量含水率（w）呈显著相关关系（$P < 0.05$）。

微润管流量受诸多因素影响，各因素对其影响程度不同。在诸多因素影响程度尚不清楚的情况下，宜采用灰色关联法分析压力、土壤初始质量含水率与容重对微润管流量的影响（表 4）。

表 4　压力、土壤初始质量含水率、容重与微润管流量的灰色关联度和方差分析

Tab. 4　Grey correlation and variance analysis of pressure, soil initial mass moisture content, bulk density and moistube flow

参数	压力水头	土壤初始质量含水率	容重
灰色关联度	0.774 ± 0.140	0.630 ± 0.150	0.633 ± 0.160
F	213.83**	91.39**	211.83**

由表 4 可知，根据灰色关联度排序，对微润管流量的关联程度由大到小依次为：压力水头、容重、土壤初始质量含水率，该结果表明影响微润管流量较大的因素是压力。通过方差分析发现，压力、初始质量含水率和容重均对微润管流量有显著影响，压力 F 值最大，容重次之，初始质量含水率最小。

综上，对流量系数 k 与初始质量含水率 w、容重 ρ_b，压力为零时的流量 b 与初始质量含水率 w、容重 ρ_b 进行逐次线性回归分析，结果见表 5。

由表 5 可知，流量系数 k 与初始质量含水率 w、容重 ρ_b 存在二元线性回归关系，压力为零时的流量

表 5 回归模型与参数

Tab. 5 Regression model and parameters

因变量	自变量	非标准化系数	标准化系数	显著性 P	R^2	调整后 R^2
k	常数项	175.42		<0.001	0.88	0.86
	ρ_b	−100.04	−0.78	<0.001		
	w	−1.40	−0.52	<0.001		
b	常数项	61.17		<0.001	0.80	0.78
	ρ_b	−40.29	−0.89	<0.001		

b 与容重 ρ_b 存在一元线性回归关系，其回归方程分别为

$$k = -1.40w - 100.04\rho_b + 175.42 \quad (R^2 = 0.88, P < 0.05) \tag{4}$$

$$b = -40.29\rho_b + 61.17 \quad (R^2 = 0.80, P < 0.05) \tag{5}$$

k 与 w、ρ_b 回归的决定系数 $R^2 = 0.88$，表明该模型中 w 与 ρ_b 可解释 k 的程度达 88%，可以用 w 与 ρ_b 共同实现对系数 k 的估计。b 与 ρ_b 回归的决定系数 $R^2 = 0.80$，表明该模型中 ρ_b 可解释 b 的程度达 80%，可以用 ρ_b 来实现对常数 b 的估计。上述 2 个回归方程的显著性 $P < 0.05$，说明自变量与因变量之间具有显著的线性关系，w、ρ_b 对 k 的贡献率分别为 52% 和 78%，回归方程(4)能够解释 k 变化的 86%。ρ_b 对 b 的贡献率为 89%，回归方程(5)能够解释 b 变化的 78%。但 k 与 w、ρ_b，b 与 ρ_b 的剩余因子 e 均较大，分别为 0.35 和 0.45，说明对 k 和 b 的影响因子除 w 与 ρ_b 外，还有其他影响因素，有待进一步研究。

将式(4)、(5)代入式(3)可确定微润管流量

$$q = (-1.40w - 100.04\rho_b + 175.42)h - 40.29\rho_b + 61.17 \tag{6}$$

3 讨论

由于微润管壁厚且微孔尺寸小、数目多、相互连通的特殊结构，在管壁内外压力差的作用下，水分完全穿过管壁上所有微小且路径曲折复杂的微通道或实现全部孔口出流需要一定时间，工作压力越大，管壁内外压力差越大，水流速较快，易打通所有微孔，微润管流量达到稳定流量状态所需时间越短。图 2 中当微润管管壁微孔全部打开前，约在灌水前 4 h，微润管的流量增加主要受打通微孔数量即过水断面面积决定，而受管壁外侧土水势变化的影响较小，因此，微润管流量呈增加趋势。在特定的工作压力下，当微润管流量达到最大时，随灌水时间的增加，管壁周围土壤含水率逐渐增加，抑制微润管微孔出流，因此，本试验灌水 4 h 后微润管流量存在一个较短的下降趋势，但随灌水时间进一步增加，约灌水 48 h 后，管壁周围土壤质量含水率趋于稳定，管壁内外的压力差也趋于稳定，微润管流量也随之呈稳定状态[7,13]。说明在灌水过程中，随土壤含水率的增加微润管流量呈减小趋势。灌水过程中，微润管流量也随土壤含水率的逐渐提高而发生一定的变化，但变化幅度较小。通过分析发现，在灌水过程中，微润管流量根据土壤含水率的变化自我调节时间约为 44 h。当灌水 48 h 后，微润管流量与土壤含水率均不再变化，此时影响微润管流量的主要因素为工作压力，如当工作压力为 2.1 m 水头时，土壤质量含水率约为 24%，此时，微润管的稳定流量约为 65.00 $cm^3/(m\cdot h)$，当工作压力为 0.1 m 水头时，土壤质量含水率约为 20%（稳定流量约为 18.00 $cm^3/(m\cdot h)$，远小于压力为 2.1 m 水头时的流量。图 2 中微润管流量随时间增加个别出现上下波动现象，这可能与试验微润管（微孔直径、微孔密度等）、气候（温度、空气湿度、风速等）、土壤质地（孔隙度、土壤含水率等）以及水源（泥沙含量、矿物质含量、酸碱度等）有关，这些还有待进一步进行试验探究，定性、定量分析研究。

压力是控制微灌流量的关键因素[2]，随压力增大，入渗速率增加，土壤入渗界面承受压力增大，导致入渗界面土壤结构发生变化，该区域饱和导水率发生改变，反过来动态影响流量[12-13]。本研究发现工作压力是决定微润管流量的关键因素。微润管由于特殊的制作工艺，使微润管壁面上形成纵横交错、相互连接的微孔，据测量微孔孔径为 10 ~ 900 nm，每平方厘米至少有 10 万个微孔，这些微孔是水流从管内向外渗出的通道[1]。因此，微润管内工作压力决定了管壁内外的压力差，进而决定微润管流量，这与地下滴灌滴头流量受压力控制的原理基本相似[2,32]。然而，地下滴灌滴头孔口尺寸与微润管微孔相差几个数量级，且相邻滴头相对独立工作，因此，压力对地下滴灌滴头和微润管流量的影响规律并不完全一致。滴灌滴头工作压力主要消耗于克服迷宫流道内的局部水头损失，滴头流量几乎不受土壤容重和初始质量含水率的影响，压力与流量是幂函数关系[12]，非压力补偿式滴头流态指数一般在 0.50 ~ 1.00 之间。而微润管微孔不具备迷宫特性，且微孔相互连接，微润管压力与流量基本是线性关系，即其流态指数约为 1.00，大于滴头的流态指数，说明微润管流量对压力变化的敏感度大于滴灌。由于微润管壁出流孔多且小，与土壤密切接触，增大了土壤因素（容重、初始质量含水率等）对微润管内外压力差的影响，从而显著影响微润管流量。

土壤容重是土壤的一个重要物理特征参数，土壤容重越大，土壤密实度越大，长时间灌水会使土壤中细小颗粒或离子吸附在管壁，影响微孔出流，同时土壤容重增加，大孔隙会减少，土壤孔隙中的气体也较难排到大气中，增加了入渗过程中的气相阻力[33-35]，土壤水分不易快速扩散到远处，在灌水过程中，微润管外壁附近土壤越易形成高含水率区域，微润管管壁内外压差减小，微润管出流阻力增大[7]，因此，本研究中随土壤容重的增加，微润管流量呈减小趋势，与牛文全等[2]和薛万来等[28]在室内土箱试验的结果基本一致。

土壤水分运动的主要动力来自土壤水势梯度[4]。土壤水势受基质势、溶质势、温度势和重力势影响，本试验各处理土壤水势的差异主要来自基质势，基质势越大，土壤含水率越小，土壤水吸力增大，流量增加[36]。另外，土壤团聚体快速湿润会产生致使团聚体破碎的崩解力，土壤初始质量含水率越小崩解力越大，团聚体崩解会减小土壤孔隙度，增加固体颗粒数量与毛细管数量[37-38]。初始质量含水率越小，土壤孔隙填充所需的水分越多[39]，因此，本试验中微润管流量随土壤初始质量含水率减小略有增加。

4　结论

（1）微润管流量随土壤质量含水率变化有一定的自我调节作用，随土壤初始质量含水率的增大，微润管流量略有减小。但微润管流量受土壤质量含水率变化的影响较小，自我调节时间较短，约为 44 h。随灌水时间的增加，微润管流量呈先快速增加再减小后趋于平缓稳定的状态。

（2）工作压力、土壤容重和初始质量含水率均对微润管流量有显著影响。在一定工作压力范围内（0～2.1 m 水头），微润管压力与流量呈显著性线性关系。随土壤初始质量含水率与容重的增加，微润管流量呈减小趋势，同时微润管流量对工作压力变化的敏感度逐渐下降。初始质量含水率、容重与流量系数 k，容重与压力为零时的流量 b 均存在显著负相关关系，可用土壤初始质量含水率和容重确定流量系数和压力为零时的流量值，实现微润灌出流预报。

（3）灰色关联度分析发现，工作压力对微润管流量影响最大，容重次之，初始质量含水率的影响最小。

参　考　文　献

1　杨庆理. 微水量连续灌溉管、制造方法、使用方法及其应用：CN，201410251132.1[P]. 2014－09－10.

2　牛文全，张俊，张琳琳，等. 埋深与压力对微润灌湿润体水分运移的影响[J/OL]. 农业机械学报，2013，44(12)：128－134. http：//www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20131221&journal_id = jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.021.
NIU Wenquan，ZHANG Jun，ZHANG Linlin，et al. Effects of buried depth and pressure head on water movement of wetted soil during moistube-irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2013，44(12)：128－134.（in Chinese）

3　何玉琴，成自勇，张芮，等. 不同微润灌溉处理对玉米生长和产量的影响[J]. 华南农业大学学报，2012，33(4)：566－569.
HE Yuqin，CHENG Ziyong，ZHANG Rui，et al. Effects of different ways of micro-moist irrigation on growth and yield of maize[J]. Journal of South China Agricultural University，2012，33(4)：566－569.（in Chinese）

4　张国祥，赵爱琴. “痕量灌溉”理论支撑与技术特点的质疑[J]. 农业工程学报，2015，31(6)：1－7.
ZHANG Guoxiang，ZHAO Aiqin. Query about theory and technical properties of trace quantity irrigation[J]. Transactions of the CSAE，2015，31(6)：1－7.（in Chinese）

5　李跻嵘. 微润灌溉：国际高效节水的创新先行者[J]. 国际融资，2013(7)：14－15.
LI Jirong. Moistube sub-surface irrigation：leads international high-efficiency water-saving[J]. International Margin，2013(7)：14－15.（in Chinese）

6　张明智，牛文全，许健，等. 微灌与播前深松对根际土壤酶活性和夏玉米产量的影响[J]. 应用生态学报，2016，27(6)：1925－1934.
ZHANG Mingzhi，NIU Wenquan，XU Jian，et al. Influences of micro-irrigation and subsoiling before planting on enzyme activity in soil rhizo-sphere and summer maize yield[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2016，27(6)：1925－1934.（in Chinese）

7　李刚，白丹，王晓愚，等. 土壤质地对地下滴灌灌水器水力要素的影响[J]. 农业机械学报，2009，40(2)：58－62.
LI Gang，BAI Dan，WANG Xiaoyu，et al. Effect of different textural soils on hydraulic characteristics of emitters under subsurface drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2009，40(2)：58－62.（in Chinese）

8　FRANZLUEBBERS A J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth[J]. Soil and Tillage Research，2002，66(2)：197－205.

9　BACHMANN J，HORTON R，GRANT S A，et al. Temperature dependence of water retention curves for wet table and water repellent soil[J]. Soil Science Society of America，2002，66(1)：44－52.

10　ZHOU B，LI Y，SONG P，et al. A kinetic model for biofilm growth inside non-PC emitters under reclaimed water drip irrigation[J]. Agricultural Water Management，2016，168：23－34.

11　BOVÉ J，PUIG-BARGUÉS J，ARBAT G，et al. Development of a new underdrain for improving the efficiency of microirrigation sand media filters[J]. Agricultural Water Management，2017，179：296－305.

12 王锐，孙西欢，郭向红，等. 不同入渗水头条件下土壤水分运动数值模拟[J]. 农业机械学报，2011,42(9):45－49.
WANG Rui, SUN Xihuan, GUO Xianghong, et al. Numerical simulation for soil water movement at different infiltration heads [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(9):45－49. (in Chinese)
13 杜少卿，曾文杰，施泽，等. 工作压力对滴灌管迷宫流道灌水器水力性能的影响[J]. 农业工程学报，2011,27(增刊2):55－60.
DU Shaoqing, ZENG Wenjie, SHI Ze, et al. Effects of working pressure on hydraulic performances of labyrinth path emitters[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(Supp.2): 55－60. (in Chinese)
14 郭向红，孙西欢，马娟娟，等. 不同入渗水头条件下的 Green－Ampt 模型[J]. 农业工程学报，2010,26(3):64－68.
GUO Xianghong, SUN Xihuan, MA Juanjuan, et al. Green－Ampt model of different infiltration heads[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3):64－68. (in Chinese)
15 薛万来，牛文全，张俊，等. 压力水头对微润灌土壤水分运动特性影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报，2013,32(6):7－11.
XUE Wanlai, NIU Wenquan, ZHANG Jun, et al. Effects of hydraulic head on soil water movement under moistube-irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013,32(6):7－11. (in Chinese)
16 张书函，雷廷武，丁跃元，等. 微孔管渗灌时土壤水分运动的有限元模拟及其应用[J]. 农业工程学报，2002,18(4):1－5.
ZHANG Shuhan, LEI Tingwu, DING Yueyuan, et al. Finite element modeling of soil water movement under subsurface irrigation with porous pipe and its application[J]. Transactions of the CSAE, 2002,18(4):1－5. (in Chinese)
17 牛文全，樊晓康，陈俊英. 初始含水率对涌泉根灌土壤渗透特征的影响[J]. 排灌机械工程学报，2012,30(4):491－496.
NIU Wenquan, FAN Xiaokang, CHEN Junying. Effect of initial moisture content on soil infiltration characteristics during bubblie irrigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012,30(4):491－496. (in Chinese)
18 刘焕芳，孙海燕，苏萍，等. 微灌自压软管合理铺设长度的确定[J]. 农业工程学报，2005,21(2):46－50.
LIU Huanfang, SUN Haiyan, SU Ping, et al. Determination of optimal laying length of gravitational flexible hose form icro-irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(2): 46－50. (in Chinese)
19 BAUTISTA E, WARRICK A W, STRELKOFF S. New results for an approximate method for calculating two-dimensional furrow infiltration[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2014,140(10):1－10.
20 袁巧霞，蔡月秋. 温室集雨及低压自渗灌溉可行性研究[J]. 农业机械学报，2006,37(4):155－157.
YUAN Qiaoxia, CAI Yueqiu. Greenhouse rainwater harvesting and low pressure since the seepage irrigation feasibility study[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(4):155－157. (in Chinese)
21 梁海军，刘作新，舒乔生，等. 水头压力对橡塑渗灌管渗水性能的影响[J]. 农业工程学报，2009,25(2):1－5.
LIANG Haijun, LIU Zuoxin, SHU Qiaosheng, et al. Effects of operating pressure on the discharge characteristics of porous pipes as micro-irrigation laterals[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(2):1－5. (in English)
22 吴卫熊,何令祖,张廷强,等. 滴灌和微润灌条件下桂西北山区典型土壤水分运移规律分析[J]. 节水灌溉,2016(9): 18－25.
WU Weixiong,HE Lingzu,ZHANG Tingqiang, et al. Research on soil-water movement characteristics of Guangxi main soil under the condition of moisture irrigation and drip irrigation [J]. Water Saving Irrigation,2016 (9): 18－25. (in Chinese)
23 HANSON B, MAY D. The effect of drip line placement on yield and quality of drip-irrigated processing tomatoes[J]. Irrigation and Drainage Systems, 2007,21(2):109－118.
24 诸葛玉平，张玉龙，张旭东，等. 渗灌土壤水分调控技术参数的研究进展[J]. 农业工程学报，2003,19(6):41－45.
ZHUGE Yuping, ZHANG Yulong, ZHANG Xudong, et al. Review on technical parameters of subsurface drip irrigation for soil water control[J]. Transactions of the CSAE, 2003,19(6):41－45. (in Chinese)
25 曾辰，王全九，樊军. 初始含水率对土壤垂直线源入渗特征的影响[J]. 农业工程学报，2010,26(1):24－30.
ZENG Chen, WANG Quanjiu, FAN Jun. Effect of initial moisture content on vertical line-source infiltration characteristics of soil [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 24－30. (in Chinese)
26 SHAVIV A, SINAI G. Application of conditioner solution by subsurface emitters for stabilizing the surrounding soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004,130(6):485－490.
27 LAZAROVITCH N, ŠIMŮNEK J, SHANI U. System-dependent boundary condition for water flow from subsurface source[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005,69(1):46－50.
28 薛万来，牛文全，罗春艳，等. 微润灌溉土壤湿润体运移模型研究[J]. 水土保持学报，2014,28(4):49－54.
XUE Wanlai, NIU Wenquan, LUO Chunyan, et al. Prediction model of wetted front migration distance under moistube-irrigation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,28(4):49－54. (in Chinese)
29 余坤，冯浩，王增丽，等. 氨化秸秆还田改善土壤结构增加冬小麦产量[J]. 农业工程学报，2014,30(15):165－173.
YU Kun, FENG Hao, WANG Zengli, et al. Ammoniated straw improving soil structure and winter wheat yield[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(15):165－173. (in Chinese)
30 张俊，牛文全，张琳琳，等. 初始含水率对微润灌溉线源入渗特征的影响[J]. 排灌机械工程学报，2014,32 (1):72－79.
ZHANG Jun, NIU Wenquan, ZHANG Linlin, et al. Effects of soil initial quality moisture content on line-source infiltration characteristic in moistube irrigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014,32(1): 72－79. (in Chinese)
31 张俊，牛文全，张琳琳，等. 微润灌溉线源入渗湿润体特性试验研究[J]. 中国水土保持科学，2012,10 (6):32－38.
ZHANG Jun, NIU Wenquan, ZHANG Linlin, et al. Experimental study on characters of wetted soil in moistube irrigation[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012,10(6):32－38. (in Chinese)

(下转第 241 页)

81:14 – 23.

75 LI Q F, WANG L L, JAVANTY R K M, et al. Organic and elemental carbon in atmospheric fine particulate in animal agriculture intensive area in North Carolina: estimation of secondary organic carbon concentration[J]. Open Journal of Air Pollution, 2013, 2(1): 7 – 18.

76 WANG L J, LI Q F, KEITH E, et al. Biological characteristics of aerosols emitted from a layer operation in southestern US[C]. ASABE Annual Meeting Paper 096358, 2009.

77 TAKAI H, JAEOBSONB L D, PEDEMENA S. Reduction of dust concentration and exposure in pig buildings by adding animal fat in feed [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 63(2):113 – 120.

78 DLR. Application of all filtration systems in swine operations[M]. AGRIS, 2009.

79 CHAI M, LU M M, TIM K, et al. Using an improved electrostatic precipitator for poultry dust removal[J]. Journal of Electrostatics, 2009, 67(6):870 – 875.

80 TAN Z C, ZHANG Y H. A review of effects and control methods of particulate matter in animal indoor environments[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2004, 54(7):845 – 854.

81 LI H, XIN R, BUMS T, et al. Effects of bird activity, ventilation rate and humidity on PM_{10} concentration and emission rate of a turkey barn[C]//Livestock Environment VIII, 2008:111 – 116.

82 TAKAI H, MOILER F, IVERSEN M. Dust control in pig houses by spraying mpesoed oil[J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(5):1513 – 1518.

83 MELSE R W, VAN DER WERF A W. Biofiltration for mitigation of methane emission from animal husbandry[J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(14):5460 – 5468.

(上接第 224 页)

32 马娟娟，孙西欢，李占斌. 单坑变水头入渗条件下均质土壤水分运动的数值模拟[J]. 农业工程学报,2006,22(6):205 – 207.
MA Juanjuan, SUN Xihuan, LI Zhanbin. Numerical simulation of homogenous soil moisture movement under varying-head infiltration of single water storage pit[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(6): 205 – 207. (in Chinese)

33 李雪转，樊贵盛，王雪. 影响土壤入渗积水时间因素的试验[J]. 农业工程学报，2009,25(9):27 – 31.
LI Xuezhuan, FAN Guisheng, WANG Xue. Experiments on factors affecting ponding time under soil infiltration conditions [J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(9):27 – 31. (in Chinese)

34 脱云飞，费良军，董艳慧，等. 土壤容重对膜孔灌水氮分布和运移转化的影响[J]. 农业工程学报，2009,25(2):6 – 11.
TUO Yunfei, FEI Liangjun, DONG Yanhui, et al. Effects of soil bulk density on distribution and transportation and transformation of soil moisture and nitrogen under film hole irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(2):6 – 11. (in Chinese)

35 佘冬立，郑加兴，刘营营，等. 围垦年限和土壤容重对海涂土壤水分运动参数的影响[J/OL]. 农业机械学报，2015, 46(2):120 – 125. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150218&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.018.
SHE Dongli, ZHENG Jiaxing, LIU Yingying, et al. Effects of land reclamation time and soil bulk density on soil hydraulic parameters in coastal reclamation region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 120 – 125. (in Chinese)

36 张光辉，费宇红，王惠军，等. 基于土壤水势变化的灌溉节水机理与调控阈值[J]. 地学前缘，2010,17(6):174 – 180.
ZHANG Guanghui, FEI Yuhong, WANG Huijun, et al. Mechanism and forecasting threshold of saving water from irrigation in farmland on the basis of soil moisture potential variation[J]. Earth Science Frontiers, 2010,17(6):174 – 180. (in Chinese)

37 LADO M, BEN-HUR M, SHAINBERG I. Soil wetting and texture effects on aggregate stability, seal formation, and erosion[J]. Soil Science Society of America, 2004,68(6):1992 – 1997.

38 张珂萌，牛文全，汪有科，等. 微咸水微润灌溉下土壤水盐运移特性研究[J/OL]. 农业机械学报，2017,48(1): 175 – 182. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170123&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.023.
ZHANG Kemeng, NIU Wenquan, WANG Youke, et al. Characteristics of water and salt movement in soil under moistube-irrigation with brackish water[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 175 – 182. (in Chinese)

39 王晓愚，白丹，李占斌，等. 地下滴灌灌水器水力要素试验研究[J]. 农业工程学报，2008,24(10):6 – 10.
WANG Xiaoyu, BAI Dan, LI Zhanbin, et al. Experimental study on hydraulic characteristics of emitter under subsurface drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(10):6 – 10. (in Chinese)