

# 浑水含沙率和泥沙粒度组成对膜孔灌入渗特性的影响

姜瑞瑞, 费良军, 金世杰, 傅渝亮, 钟 韵

(西安理工大学水资源研究所, 西安 710048)

**摘要:** 通过室内清水膜孔灌自由入渗试验和 4 种不同含沙率及 4 种不同泥沙粒度组成的浑水膜孔灌自由入渗试验, 研究了含沙率和泥沙粒度组成对浑水膜孔灌入渗特性的影响。结果表明: 综合考虑含沙率和泥沙粒度组成的联系, 定义了相对黏粒含量的概念; 基于相对黏粒含量建立了单位膜孔面积累积入渗量、水平湿润锋运移和垂直湿润锋运移的数学模型, 经检验该数学模型具有较好的相关性; 提出了浑水膜孔灌自由入渗情况下灌水均匀度分析的数学模型。研究结果为浑水膜孔灌的进一步研究奠定了基础。

**关键词:** 含沙率; 泥沙粒度组成; 浑水膜孔灌; 相对黏粒含量; 灌水均匀度

**中图分类号:** S275.8      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2018)01-0157-05

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.01.025

## Effects of Silt Content and Clay and Sand Grade on Freedom Infiltration Characteristics of Muddy Water Film Hole Irrigation

JIANG Ruirui, FEI Liangjun, JIN Shijie, FU Yuliang, ZHONG Yun

(Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

**Abstract:** Through indoor infiltration of clean water film hole irrigation and four different silt content and four clay and sand grade of infiltration of muddy water film hole irrigation tests under the same condition, the influence of infiltration characteristics of muddy water film hole irrigation under different silt content and clay and sand grades was studied. In the study eight different kind of muddy water were configured, four of them were different in clay and sand grades, but had the same silt content of 5%, and others were different in silt content that respectively by 2%, 5%, 7% and 9%. Soil dry density was 1.40 g/cm<sup>3</sup>. The effects of silt content and clay and sand grade on freedom infiltration characteristics of muddy water film hole irrigation were examined. Considering the combination of silt content and clay and sand grades, the concept of relative clay content was proved. Based on the concept above, the model involved film hole cumulative infiltration volume, horizontal wetting front movement and vertical wetting front movement was established, and we also found that the model had high precision. Further, the mathematical model of irrigation uniformity analysis under the free infiltration of muddy water film hole irrigation was put forward. The findings provide a theoretical foundation for further study of muddy water film hole irrigation, and technical support for the practical production and application of muddy water film hole irrigation.

**Keywords:** silt content; clay and sand grade; muddy water film hole irrigation; relative clay content; irrigation uniformity

膜孔灌溉技术既具有地面灌的特点, 又具有滴灌局部灌的效果, 是对覆膜、地面灌溉和滴灌节水灌溉技术的一个综合应用。膜孔灌在目前应用较为广泛, 在国内外都有报道<sup>[1-4]</sup>, 但是针对浑水膜孔灌的研究较少<sup>[5-7]</sup>。

浑水入渗过程可描述为表面落淤、颗粒运移和入渗滞留 3 个过程<sup>[8]</sup>。孙存喜等<sup>[9-10]</sup>率先对含沙浑水入渗特性开展了试验研究工作, 认为在泥沙颗粒组成

一定的情况下, 随着浑水含沙量的增大, 其入渗能力逐渐减小。卞艳丽等<sup>[11]</sup>通过在测坑中开展不同泥沙级配组合的浑水灌溉入渗试验, 得出同一含沙量浑水灌溉, 泥沙级配越细, 不同深度土壤含水量始变历时和增长拐点历时更长; 同一泥沙级配浑水灌溉, 含沙量越大, 不同深度土壤含水量始变历时和增长拐点历时更长。已有学者<sup>[1,12-14]</sup>从土壤空气压力方面对浑

水入渗的影响进行了研究,结果表明灌溉浑水含沙量越大,泥沙粒径组成越细,累积入渗量越小,减渗量和减渗率越大。刘利华等<sup>[15]</sup>通过室内浑水膜孔灌单孔入渗试验,研究得出随着浑水含沙率的变化,入渗系数  $K$  和减渗率  $\eta$  呈现一定的规律变化。钟韵等<sup>[16]</sup>通过浑水膜孔灌室内入渗试验发现,浑水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积累积入渗量和稳定入渗率随着物理性黏粒含量  $d_{0.01}$  (粒径 $<0.01$  mm 的颗粒含量)的增大而减小。可见,目前针对浑水膜孔灌入渗的研究只是一些单一因素的分析,两个及两个以上多因素的分析较少。

浑水含沙率和泥沙粒度组成是影响浑水入渗的两个主要影响,而且二者又具有紧密的联系。本文综合考虑浑水含沙率和泥沙粒度组成对浑水入渗的影响,并基于物理性黏粒含量  $d_{0.01}$  这一衡量指标进行研究。这些研究成果以期为进一步浑水膜孔灌技术的研究奠定科学基础。

1 材料与方法

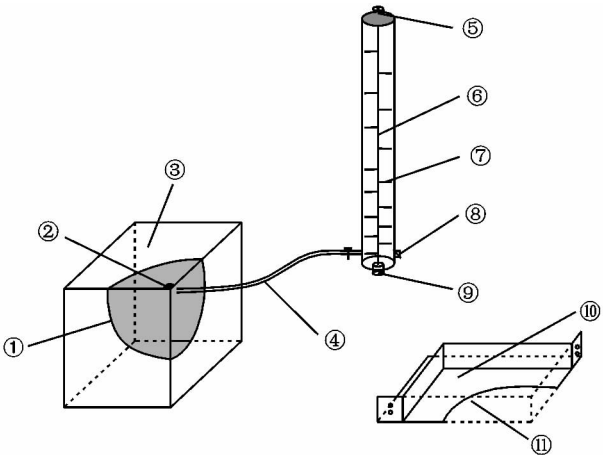
1.1 试验装置

为了研究不同初始含沙率的浑水膜孔灌单点源入渗特性,对清水膜孔灌单点源入渗试验装置系统<sup>[17]</sup>加以改进,改进的试验装置如图 1 所示,将供水装置中的马氏瓶增加搅拌系统,从而使浑水保持在恒定的含沙率和相同的颗粒级配组成,不至于出现浑水分层现象。浑水膜孔灌自由入渗土箱由 10 mm 厚的有机玻璃制成,土箱长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 24 cm $\times$ 20 cm $\times$ 30 cm,为便于观测入渗过程中湿润锋的运移,采用 1/4 的膜孔(图 1)进行模拟,将膜孔置于土箱的一角;为模拟膜孔灌时的充分供水,要使水室保持一定的水头,入渗点源水室采用 5 mm 厚有机玻璃制成,水室高为 2 cm,结合马氏瓶调整水室的水头。改造的马氏瓶增加了自动搅拌系统,使泥沙始终处于悬浮状态,马氏瓶内径为 9 cm,传动轴直径为 1.4 cm,高 90 cm,经计算叶片体积仅为马氏瓶体积的 2%,可忽略不计。

1.2 试验方法

试验于 2016 年 9 月于西安理工大学农水实验大厅进行。供试土样为粉砂土,风干碾压过 2 mm 筛,初始含水率为 2.15%,孔隙率为 36.12%,饱和导水率  $K_s$  为 0.022 cm/min,pH 为 7.8,供试土样土壤颗粒级配组成使用 Mastersizer-2000 激光粒度分析仪测定,粒径在 0~0.001,0.001~0.01,0.01~0.10,0.10~2.00 mm 的体积含量分别为 0.70%,24.36%,72.08%,2.86%。供试土样干容重为 1.40 g/cm<sup>3</sup>,分层称重装入土箱压实。试验浑水均采取人工配置,由风干碾碎后过 1 mm 土筛的泥土配置而成,

每次试验都需提前 2 d 配置浑水,并每隔一定时间搅拌一次,选取膜孔直径为 5 cm 的膜孔进行浑水膜孔灌自由入渗试验。将膜孔置于土箱装置的一角,入渗开始后按照先密后疏的时间间隔读取马氏瓶中的水位变化,并观察记录相应时刻湿润锋的坐标位置和湿润体的形状。该试验设 4 个处理:A、B、C、D 4 种不同颗粒级配的浑水,清水对照。每组处理 3 次重复。表 1 是人工配置的 4 种不同浑水的泥沙粒度组成,各粒径含量均为体积分数。



注:①为湿润锋;②为膜孔水室;③为土面;④为输水管;⑤为电机;⑥为传动轴;⑦为叶片;⑧为进气阀;⑨为电动机;⑩为水室;⑪为模拟膜孔。

图 1 浑水膜孔灌自由入渗试验装置示意

表 1 4 种不同浑水的颗粒级配组成

泥沙 粒径/mm	浑水泥沙种类			
	A	B	C	D
$<0.001$	0.90	0.70	0.62	1.11
$\geq 0.001\sim 0.002$	3.06	3.97	4.77	4.66
$\geq 0.002\sim 0.005$	7.43	9.49	11.90	11.57
$\geq 0.005\sim 0.01$	8.87	10.90	14.46	19.89
$\geq 0.01\sim 0.025$	38.96	33.75	34.59	34.72
$\geq 0.025\sim 0.05$	15.44	29.45	23.71	17.26
$\geq 0.05\sim 0.1$	12.77	8.88	6.47	7.06
$\geq 0.1\sim 0.25$	10.33	2.01	2.13	1.46
$\geq 0.25\sim 0.5$	1.40	0.40	0.73	1.17
$\geq 0.5\sim 1$	0.83	0.45	0.63	1.10
$d_{0.01}$	20.26	25.06	31.75	37.23

本研究综合考虑浑水含沙率和黏粒含量的相互关系,以浑水中粒径小于 0.01 mm 的物理性黏粒含量  $d_{0.01}$  作为研究浑水入渗的自变量,以此来分析入渗量的变化规律。各粒径含量的体积百分数  $d_{0.01}$  等效为质量百分数,为便于研究将单位质量含沙率下 A、B、C、D 4 种浑水的黏粒含量分别概化为 0.202 6,0.250 6,0.317 5,0.372 3,则 B 类颗粒级配组的含沙率分别为 2%,5%,7%,9%的不同含沙率的浑水概化黏粒含量分别是 0.501 2,1.253 0,1.754 2,2.255 4。

2 结果与分析

2.1 浑水膜孔入渗特性分析

浑水的含沙率和泥沙粒度组成是研究浑水入渗的主要因素,含沙率和泥沙粒度的不同组合会使浑水入渗能力不同,从而对浑水灌溉产生较大影响。

泥沙粒度组成反映了不同粒径大小颗粒的相对含量,不同粒径的泥沙在灌溉土壤表面先后沉积,对土壤水分的入渗界面产生影响,固液界面的理化性质发生变化,在土壤表面形成致密层,水分入渗的通道也随之发生变化。研究表明浑水中小于 0.01 mm 粒径的物理性黏粒含量对浑水理化性质、泥沙沉降规律、浑水黏滞性和沉积层土壤性质等起着主要的决定作用,因此可以根据浑水中小于 0.01 mm 粒径的物理性黏粒含量  $d_{0.01}$  来表征不同泥沙粒度浑水的特性。表 1 中 A、B、C、D 4 种不同浑水的物理性黏粒含量依次增加,且有较大差别。

图 2 表示不同含沙率的 B 类浑水单位膜孔面积累积入渗量随时间变化关系,可以看出随浑水含沙率的增大,单位膜孔面积累积入渗量减小,且符合幂函数变化规律,根据 Kostiakov 公式建立浑水膜孔灌单点源累积入渗模型,拟合结果见表 2,表中  $k_1$ 、 $\alpha_1$  分别为入渗系数和入渗指数。

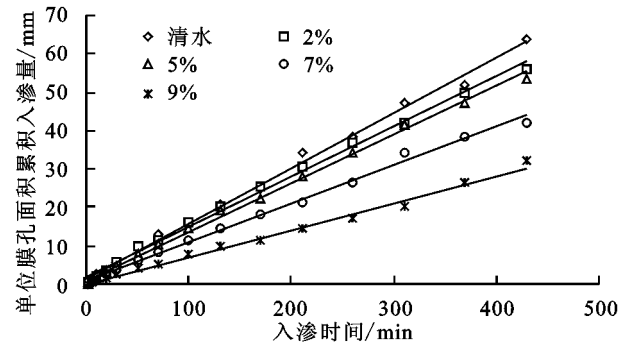


图 2 不同含沙率的浑水单膜孔累积入渗量曲线

表 2 不同含沙率浑水膜孔的入渗量拟合参数

含沙率/%	$k_1$	$\alpha_1$	$R^2$
0	0.3012	0.8671	0.977
2	0.2817	0.8755	0.988
5	0.2233	0.9052	0.974
7	0.1689	0.9180	0.983
9	0.1044	0.9291	0.947

含沙率为 5% 的 A、B、C、D 4 种不同泥沙粒度组成的浑水单位膜孔面积累积入渗量随时间变化见图 3,相同含沙率的浑水泥沙黏粒含量越大,单位膜孔面积累积入渗量越小,分析表明,不同泥沙粒度组成的浑水单位膜孔面积累积入渗量随时间变化具有较好的幂函数关系,根据 Kostiakov 公式建立入渗量模型,拟合结果见表 3,表中  $k_2$ 、 $\alpha_2$  分别为入渗系数和入渗指数。

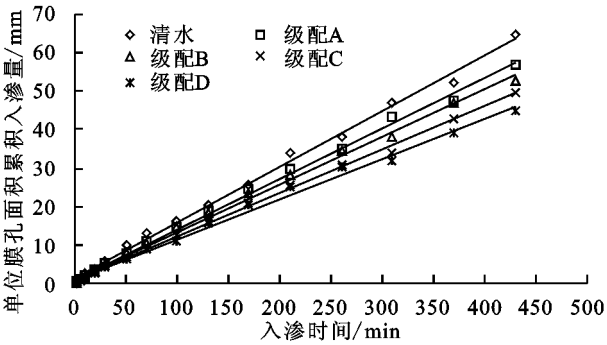


图 3 不同泥沙粒度组成的浑水单膜孔累积入渗量曲线

表 3 不同泥沙粒度组成的浑水累积入渗量拟合参数

入渗浑水	$k_2$	$\alpha_2$	$R^2$
清水	0.3010	0.8671	0.876
A	0.2467	0.8901	0.979
B	0.2233	0.9052	0.974
C	0.1738	0.9318	0.999
D	0.1682	0.9344	0.998

5%含沙率下 4 种颗粒级配组成的浑水的相对黏粒含量分别可概化为 1.013,1.253,1.588,1.862。粒径小于 0.01 mm 的黏粒含量是影响浑水入渗的主要因素,表 4 是不同含沙率、不同泥沙粒度组成下概化相对黏粒含量  $d_{0.01}$  与入渗系数和入渗指数的相互关系,研究表明入渗系数  $K$  与概化相对黏粒含量  $d_{0.01}$  具有较高的线性相关性,拟合结果见公式(1),入渗指数  $\alpha$  与黏粒含量  $d_{0.01}$  有较好的指数函数关系,拟合结果见公式(2):

$$K(d_{0.01})=-0.0871d_{0.01}+0.32 \quad R^2=0.959$$

(1)

$$\alpha(d_{0.01})=0.8641e^{0.0371d_{0.01}} \quad R^2=0.899$$

(2)

式中: $K(d_{0.01})$ 为浑水不同相对黏粒含量的入渗系数; $\alpha(d_{0.01})$ 为浑水不同相对黏粒含量的入渗指数; $d_{0.01}$ 为浑水泥沙粒径小于 0.01 mm 的相对黏粒含量。

表 4 不同相对黏粒含量下浑水膜孔累积入渗量拟合参数

$d_{0.01}$	$K$	$\alpha$
0.000	0.3012	0.8671
0.501	0.2817	0.8755
1.013	0.2467	0.8901
1.253	0.2233	0.9052
1.587	0.1738	0.9318
1.754	0.1689	0.9180
1.862	0.1682	0.9344
2.255	0.1044	0.9291

则基于 Kostiakov 入渗模型可建立单位膜孔面积累积入渗量与时间和相对黏粒含量的函数关系,见公式(3),该模型较以往建立的模型相比在前人研究的基础上考虑浑水入渗的主要影响因素,综合考虑含沙率和泥沙粒度组成两个因素之间的联系,将两个因素的共同作用概化为相对黏粒含量  $d_{0.01}$ ,这样在实际应用时通过测定浑水的含沙率和黏粒含量计算出概化相对黏粒含量  $d_{0.01}$  就可预测出该浑水在任意时刻的累积入渗量,将双因素简化为单因素,使计算更为简单方便。

$$I(t) = (-0.0871d_{0.01} + 0.32)t^{0.8641e^{0.0371d_{0.01}}} \quad (3)$$

## 2.2 湿润锋运移规律分析

通过对试验数据分析表明不同含沙率和泥沙粒度组成的浑水,水平湿润锋和垂直湿润锋运移随时间变化均有较好的幂函数规律,拟合结果见公式(4)、公式(5):

$$X - \frac{D}{2} = a \cdot t^b \quad (4)$$

$$Y = f \cdot t^g \quad (5)$$

式中:  $X$  为水平湿润锋运移距离(cm);  $Y$  为垂直湿润锋运移距离(cm);  $D$  为膜孔直径,在这里取 5.0 cm;  $a$ 、 $b$ 、 $f$ 、 $g$  均为拟合参数。表 5 是颗粒级配组成为 B 含沙率分别为 0, 2%, 5%, 7%, 9% 的 5 浑水和含沙率为 5% 颗粒级配组成为 A、C、D 的 3 种浑水的水平和垂直湿润锋运移随时间变化的拟合参数及不同浑水的概化相对黏粒含量,研究发现随相对黏粒含量的变化各拟合参数呈现出一定的变化规律,参数  $a$ 、 $f$  均随  $d_{0.01}$  的增大而增大,  $b$ 、 $g$  则随着  $d_{0.01}$  的增大而减小。

表 5 湿润锋运移模型拟合参数

$d_{0.01}$	水平湿润锋		垂直湿润锋	
	$a$	$b$	$f$	$g$
0.001	1.1535	0.3336	1.6763	0.3301
0.501	1.1317	0.3344	1.3971	0.3585
1.013	0.9923	0.3549	1.4224	0.3561
1.253	0.9293	0.3631	1.2597	0.3686
1.587	0.8759	0.3661	1.0843	0.3878
1.754	0.7910	0.3817	1.0292	0.4008
1.862	0.7112	0.3914	0.9546	0.3962
2.255	0.6131	0.4213	0.8612	0.4181

分析表明  $d_{0.01}$  与参数  $a$ 、 $b$ 、 $f$ 、 $g$  具有较紧密的函数关系,现建立参数  $a$ 、 $b$ 、 $f$ 、 $g$  与  $d_{0.01}$  的函数关系,拟合结果见下式,各模型相关性较高:

$$a = -0.0735d_{0.01}^2 - 0.0861d_{0.01} + 1.16585 \quad R^2 = 0.9743 \quad (6)$$

$$b = 0.3231e^{0.1001d_{0.01}} \quad R^2 = 0.9031 \quad (7)$$

$$f = -0.3601d_{0.01} + 1.6709 \quad R^2 = 0.9509 \quad (8)$$

$$g = 0.3309e^{0.1d_{0.01}} \quad R^2 = 0.9434 \quad (9)$$

分别将公式(6)~公式(9)代入公式(4)、公式(5)中可得不同相对黏粒含量的浑水水平和垂直湿润锋运移的时间变化规律,如公式(10)、公式(11)所示,该模型将浑水含沙率和黏粒含量两个因素对水平和垂直湿润锋的影响,通过浑水中的相对黏粒含量  $d_{0.01}$  反映出来,使研究对象得到简化:

$$X(t) = (-0.0735d_{0.01}^2 - 0.0861d_{0.01} + 1.1658) \cdot t^{(0.3231e^{0.1001d_{0.01}})} + \frac{D}{2} \quad (10)$$

$$Y(t) = (-0.3601d_{0.01} + 1.6709) \cdot t^{0.3309e^{0.1d_{0.01}}} \quad (11)$$

## 2.3 灌水均匀度分析

覆膜灌溉可有效地提高水流的推进速度,忽略灌溉区域空间变异性影响,地面灌溉中水流的推进速度往往是灌溉均匀度的决定因素,研究表明在利用浑水进行灌溉时由于浑水中黏粒在土壤表面的落淤可有效减少水土界面的粗糙度系数,提高水流推进速度,从而提高灌溉均匀度,为分析不同含沙率和泥沙粒度组成的浑水对膜孔灌溉均匀度的影响,将灌水均匀度定义为公式(12):

$$\eta = \frac{d}{d^*} \quad (12)$$

式中:  $\eta$  为灌水均匀度;  $d$  为畦尾最大湿润直径(cm);  $d^*$  为放水口最大湿润体直径(cm)。湿润体直径主要由膜孔入渗量决定,而入渗量又受入渗时间、含沙率、浑水粒度组成、膜孔大小、土壤结构、土壤质地等因素的影响,忽略土壤空间变异性、膜孔大小等因素对浑水膜孔灌的影响。单位膜孔面积累积入渗量又是时间和黏粒相对含量  $d_{0.01}$  的函数,因此可建立灌水均匀度与时间和相对黏粒含量  $d_{0.01}$  的函数,如公式(13)所示:

$$\eta = \frac{f^*(t-T, d_{0.01})}{f(t, d_{0.01})} \quad (13)$$

式中:  $T$  为水流从放水口到达畦尾的时间(min);  $f(t, d_{0.01})$  和  $f^*(t-T, d_{0.01})$  分别表示放水口和畦尾最大湿润体直径  $d$  与时间  $t$  和相对黏粒含量  $d_{0.01}$  函数关系。根据此模型可知浑水膜孔灌以其特有的性质,可有效提高灌水效率,提高灌水均匀度,膜上水流推进速度越快,相对黏粒含量越大,灌水时间越长,灌水均匀度越好。

## 2.4 模型检验

为检验模型的可靠性,随机选取两种土壤经测得两种土壤的黏粒含量分别为 23.74% 和 33.19%,分别配置浓度为 10.0% 和 4.0% 的浑水,则两种浑水的概化相对黏粒含量分别为 2.374 0、1.327 6,按照同样的方法进行试验,共选取 10 个实测点进行对照,显著性水平  $\alpha$  取为 0.05,则临界相关系数为 0.631 9,通过对得出的试验数据进行分析表明当浑水浓度较低时,累积入渗量在模拟值与实测值散点图中个点能较好的分布在  $Y=X$  两侧,  $r=0.952 > 0.6319$ ,相关性较高;但对于高浓度的浑水各点分布稍为离散,  $r=0.856 > 0.6319$ ,相关性也较高;水平和垂直湿润锋的验证结果也出现同样的效果。这说明该模型能较好的适应低浓度的浑水,随浑水浓度的增加其相关性有所下降,但该模型对高浓度的浑水也有一定的借鉴意义,可通过对其加以修正再应用。

## 3 讨论

通过试验验证表明,本文所建立的数学模型对于低

浓度的浑水来说具有较高的相关性,而对于高含沙率的浑水来说会有一定范围的误差。此外此模型是基于室内试验所得到的,与田间土壤相比土壤结构的差异和空间变异性以及不可控因素等的影响,对于实际应用中可能会存在一定的偏差,因此应加以校正后应用。

本文是以西安粉土为研究对象,对于其他类型的土壤可能会因为土壤性质的不同而发生变化,因此应加以修正。

## 4 结论

(1)浑水膜孔灌条件下土壤水分的入渗量与浑水中的黏粒含量有较紧密的联系,不同泥沙含量和不同泥沙粒度组成的浑水的单位膜孔面积累积入渗量随时间变化具有较好的幂函数关系,符合 Kostiakov 入渗模型,而入渗系数和入渗指数又和相对黏粒含量有紧密的函数关系。综合考虑含沙率和泥沙粒度组成,建立了基于相对黏粒含量的不同含沙率或不同泥沙粒度组成的浑水膜孔灌自由入渗的入渗模型,经检验显著性较高。

(2)垂直和水平湿润锋运移距离与入渗时间都具有较好的幂函数关系,且相关系数  $a$ 、 $b$ 、 $f$ 、 $g$  随相对黏粒含量规律性变化,建立了基于相对黏粒含量的垂直和水平湿润锋运移模型,其相关性较显著。基于相对黏粒含量,建立了浑水膜孔灌的浑水膜孔灌的灌水均匀度分析模型。

### 参考文献:

- [1] Saeed M, Mahmood S. Application of film hole irrigation on borders for water saving and sunflower production [J]. *Arabian Journal for Science & Engineering*, 2013, 38(6): 1347-1358.
- [2] 贾丽华,费良军.膜孔灌技术田间试验研究进展[J]. *中国农业信息*, 2015(24):45-46,131.

(上接第 156 页)

- [31] Hulugalle N R. Effect of tied ridges and undersown *Stylosanthes hamata* (L) on soil properties and growth of maize in the Sudan Savannah of Burkina Faso [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 1989, 25(1): 39-51.
- [32] Hulugalle N R. Effect of tied ridges on soil water content, evapotranspiration, root growth and yield of cowpeas in the Sudan Savannah of Burkina Faso [J]. *Field Crops Research*, 1987, 17(3): 219-228.
- [33] 夏立忠,马力,杨林章,等.植物篱和浅垄作对三峡库区

- [3] 林晓康.不同因素对微咸水膜孔灌水氮盐运移影响[D].河北 邯郸:河北工程大学,2015.
- [4] Hudan T, Murat. Numerical simulation of soil water movement under condition of film hole irrigation [J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(1): 69-73.
- [5] 费良军,王锦辉.泥沙粒度组成对浑水膜孔灌单向交汇入渗特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(4):105-112.
- [6] 王锦辉,费良军.不同膜孔直径的浑水膜孔灌单向交汇入渗特性[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1):184-188,195.
- [7] 费良军,王锦辉,金世杰.不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗特性研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(2):172-178.
- [8] 曹惠提,卞艳丽,黄福贵.浑水灌溉下土壤水分入渗规律研究综述[J]. *人民黄河*, 2010, 32(3):69-70,73.
- [9] 孙存喜,吴发启,颜秉龙.两种初始土壤含水量对浑水入渗影响的试验研究[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(3):32-35.
- [10] 孙存喜,吴发启,王健,等.不同浓度浑水入渗试验研究[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(4):57-60,83.
- [11] 卞艳丽,曹惠提,张会敏,等.泥沙级配对浑水灌溉下土壤水分增长过程的影响分析[J]. *节水灌溉*, 2016(7):23-30,35.
- [12] 李援农.浑水灌溉禁铜土壤空气压力影响的研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2003, 23(1):91-93.
- [13] 曹惠提,卞艳丽,张会敏,等.浑水灌溉下土壤水分变化研究[J]. *节水灌溉*, 2013(8):1-6,9.
- [14] 卞艳丽,曹惠提,张会敏,等.不同泥沙级配浑水灌溉入渗量及减渗作用分析[J]. *人民黄河*, 2015, 37(3):145-148.
- [15] 刘利华,费良军,朱红艳,等.含沙率对浑水膜孔灌单孔自由入渗特性的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(12):62-67.
- [16] 钟韵,费良军,傅渝亮,等.浑水膜孔灌入渗影响因素[J]. *排灌机械工程学报*, 2017, 35(2):178-184.
- [17] 费良军,程东娟,雷雁斌,等.膜孔灌单点源入渗特性与数学模型研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(5):212-216.
- 坡耕地氮磷流失的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(14):104-111.
- [34] 陈诚,郝治邦.模拟降雨下不同坡度土壤坡面产流产沙特征及磷和钾素流失研究[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(2):70-76.
- [35] 和继军,蔡强国,刘松波.次降雨条件下坡度对坡面产流产沙的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(5):1263-1268.
- [36] 黄志霖,傅伯杰,陈利顶.黄土丘陵区不同坡度、土地利用类型与降水变化的水土流失分异[J]. *中国水土保持科学*, 2005, 3(4):11-18.