

土壤初始含水率对浑水膜孔灌肥液自由入渗水氮运移特性影响

陈琳¹, 费良军¹, 刘利华¹, 王子路², 钟韵¹

(1. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048; 2. 黄河水利科学研究院, 郑州 450003)

摘要: 为了探究浑水膜孔灌肥液入渗在不同土壤初始含水率下水氮运移特性, 通过室内肥液入渗试验, 研究了不同土壤初始含水率(6.02%, 7.40%, 8.23%, 10.08%和13.20%)条件下入渗特性、湿润锋运移、土壤水分分布以及铵态氮和硝态氮的运移特性, 建立了浑水膜孔灌肥液入渗累积入渗量、各向湿润锋运移距离与土壤初始含水率之间的关系, 提出了不同土壤初始含水率的累积入渗量以及各向湿润锋运移距离的经验模型。结果表明: 累积入渗量、各向湿润锋运移距离以及湿润体内水分和氮素的分布规律均受到土壤初始含水率的影响; 同一入渗时刻, 累积入渗量随土壤初始含水率的增大而减小, 而湿润锋运移距离却呈现出随时间增大的趋势; 土壤初始含水率越大, 湿润体体积越大, 湿润体内水分、铵态氮以及硝态氮分布范围越广; 土壤初始含水率越大, 入渗系数 K 值越小, 入渗指数 α 越大。灌水结束时, 湿润体内铵态氮绝大部分分布在湿润体半径 $r \leq 5$ cm 范围内, 而湿润体半径 $10 \text{ cm} > r > 5$ cm 范围的土壤铵态氮含量随土层深度的增加而降低, 当湿润体半径 $r \geq 10$ cm 时, 铵态氮含量明显降低; 硝态氮主要集中在由膜孔中心至半径为 10 cm 范围内, 水平方向和垂直方向硝态氮含量均随着膜孔中心距离的增加而降低, 距离膜孔中心越近硝态氮含量越高; 在同一位置处, 铵态氮和硝态氮质量分数均随土壤初始含水率的增大而增大; 随土壤水分再分布, 湿润锋逐渐下移, 湿润体内铵态氮逐渐向下运移且其含量呈现降低趋势; 随时间继续运移, 上层土壤硝态氮含量逐渐减小, 下层新湿润体中硝态氮含量逐渐增加, 整个湿润体内硝态氮含量分布趋于均匀。研究成果为进一步研究浑水膜孔灌肥液入渗氮素运移及转化奠定了基础。

关键词: 浑水膜孔灌; 土壤初始含水率; 水分再分布; 模型; 氮素运移

中图分类号: S275 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)02-0058-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.02.009

Effects of Soil Initial Water Content on Transport Characteristics of Free Infiltration Water and Nitrogen Under Film Hole Irrigation with Muddy Water

CHEN Lin¹, FEI Liangjun¹, LIU Lihua¹, WANG Zilu², ZHONG Yun¹

(1. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003)

Abstract: In order to explore the water and nitrogen transport characteristics under water and fertilizer integration of film hole irrigation with muddy water irrigation, through the indoor fertilizer infiltration test, the migration characteristics of infiltration wetting front migration, soil moisture, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen were studied under different soil initial water content (6.02%, 7.40%, 8.23%, 10.08% and 13.20%). The relationship between cumulative infiltration volume, the wetting front migration distance and the soil initial water content of liquid fertilizer infiltration of film hole irrigation with muddy water were established. An empirical model was proposed to calculate the cumulative infiltration volume and the wetting front migration distance under different soil initial water content. Results showed that: The cumulative infiltration, the wetting front migration distance, the water transport in wetting body, the distribution and transformation of nitrogen were all affected by the soil initial water content. At the same infiltration time, the cumulative infiltration reduced, while the wetting front migration distance increased, with the increase of soil initial water content. The higher the soil initial water content was, the larger the wetting volume was, and the wider water, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in soil distributed. The higher the soil initial water content was, the smaller the value of infiltration parameter K was, and the larger the value of infiltration index α was. After irrigation, ammonium nitrogen was mostly distributed in the wetting body with humid

收稿日期: 2017-11-13

资助项目: 国家自然科学基金项目(51479161, 51779205); 国家重点研发计划项目(2016YFC0400204); 陕西省教育厅项目(16JK1539); 中国博士后基金项目(2015M582763XB); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(HKY-JBYW-2016-26)

第一作者: 陈琳(1990—), 女, 山东济南人, 博士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: 1036784415@qq.com

通信作者: 费良军(1963—), 男, 陕西蓝田人, 博士, 教授, 主要从事节水灌溉、农业水资源利用与水环境研究。E-mail: feiliangjun2008@163.com

radius which was less than or equal to the range of 5 cm. Meanwhile, ammonium nitrogen content decreased with the increase of soil depth in the wetting body when the wetted radius was larger than 5 cm and less than 10 cm. The ammonium nitrogen content obviously decreased when the humid radius was larger than 10 cm. Nitrate nitrogen was mainly distributed in the range from the center of the membrane pore to the wetting radius of 10 cm. The nitrate nitrogen content in the horizontal direction and the vertical direction decreased with increasing distance from the center of the film hole, the nearer was away from film hole center the higher nitrate nitrogen content was in both vertical and horizontal direction. The greater the initial soil water content was, the higher the mass fraction of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen was at the same position. With the redistribution of soil moisture, the wetting front gradually went down, the wetting of ammonium nitrogen gradually downwardly migrated and its content decreased. Nitrate nitrogen concentration front transported with time prolongation, the soil nitrate nitrogen content decreased in the upper layer and gradually increased in the lower layer new wetting body, the content of nitrate nitrogen in wetting body tend to uniformly distribute. The research results could lay the foundation for further study on the transport and transformation of nitrogen fertilizer under the film hole irrigation with muddy water.

Keywords: film hole irrigation with muddy water; soil initial water content; water redistribution; models; nitrogen migration

膜孔灌是将地膜平铺在畦中,通过作物的出苗孔和专用灌水孔入渗进行灌溉的方法,其节水增产效果明显。膜孔灌较传统地面灌具有保温保墒、节水、保肥、灌水质量和灌溉水利用率高等特点。氮素是人类提高粮食产量的主要土壤肥力要素,但是近几年作物氮素利用效率低、氮素损失严重等问题日益凸显。关于膜孔灌肥液入渗方面的研究,国内诸多学者^[1-10]通过开展室内外试验,研究得到膜孔灌肥液自由入渗水、氮运移的影响因素主要包括膜孔直径、土壤初始含水率、土壤含水率、土壤容重、灌水量、肥液浓度、土壤质地及施肥方式等。对于膜孔灌肥液自由入渗水、氮运移模型的研究,早期多采用以 CDE 为控制方程的确定性模型来模拟土壤中的溶质运移^[11]。冯绍元等^[12]在室内试验的基础上,根据土壤水动力学原理,运用多孔介质中溶质运移理论,对一维非饱和土壤中氮素运移与转化过程进行了数值模拟,并初步分析和探讨了非饱和土壤中 NH_4^+-N 运移与转化过程的主要影响因素;董玉云^[13]分别采用 Kostikov 入渗模型、Philip 入渗模型及简化的 Philip 入渗模型,利用实测数据拟合得到 Kostikov 入渗模型具有较高的精度,且入渗系数简单易得。

浑水灌溉是我国黄河流域引黄区灌溉的主要特点,目前采用膜孔灌的灌水技术利用浑水灌溉已在膜孔直径、泥沙粒度组成、黏粒组成、浑水含沙率、土壤容重以及土壤初始含水率对浑水膜孔灌单孔自由入渗及单向多向交汇入渗的影响方面有所研究^[14-21]。本文在室内通过浑水膜孔灌水肥入渗试验,研究土壤初始含水率对浑水膜孔灌肥液入渗水分和氮素运移的影响,为进一步研究浑水膜孔灌肥液入渗氮素运移及转化提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置

浑水膜孔灌肥液自由入渗室内试验装置见图 1。

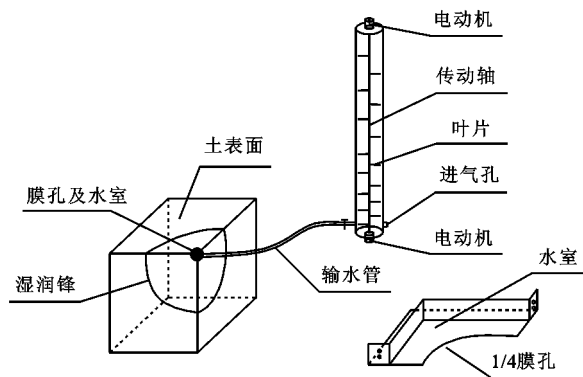


图1 浑水膜孔灌自由入渗试验装置示意

试验土箱采用 10 mm 厚透明有机玻璃制成(长 24 cm×宽 20 cm×高 40 cm),供水装置为改进的马氏瓶(内径为 9 cm,传动轴直径为 1.4 cm,高 90 cm),即在普通供水装置马氏瓶中加入搅拌系统,使得用于土壤水分入渗的浑水具有恒定的含沙率,保证泥沙始终处于悬浮状态,并且试验前后保证浑水含沙率差异在 5% 以内。为方便观测土壤水分入渗湿润锋运移,采用 1/4 膜孔进行模拟,入渗源水室采用 5 mm 厚有机玻璃制成,膜孔直径为 6 cm,将其置于土层上表面土箱一角为试验供水,保持 4 cm 水头。浑水含沙率为 4%(根据陕西省西安市泾阳县泾渭渠黄河含水率为 4.18%而配置),配置浑水时,先测出风干后的黄河泥沙(于 2016 年 9 月从泾渭渠取回)的含水率,计算出配制一定量一定比例的浑水所需要的泥沙量^[22],即:

$$M_s = \frac{\rho}{\theta - \rho} \times M_w \quad (1)$$

式中: M_s 为配制一定量一定比例的浑水所需泥沙量

(kg); ρ 为浑水泥沙含量(质量分数)(%); θ 为风干后泥沙的质量含水率(%); M_w 为配制一定比例的浑水所需要蒸馏水量(肥液入渗考虑用蒸馏水)(kg)。

将计算出的泥沙量溶于配制一定量一定比例的浑水所需蒸馏水中, 配制所需比例即为试验所用含沙率的浑水。

1.2 试验方法

试验于 2017 年 4—7 月在西安理工大学农水实验室进行。供试土壤于试验前取自西安浐灞, 其土壤质地参数为风干含水率 5.3%, 饱和含水率 34.36%, 饱和导水率 0.017 7 cm/min, 初始硝态氮含量 6.25 mg/kg, 初始铵态氮含量 15 mg/kg, pH 7.5。将采回土样置阴凉处, 自然风干, 去除土壤中大石子颗粒及树枝, 过 2 mm 筛以备用。土壤粒径组成采用 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪进行测定, 黏粒(<0.002 mm)土粒占 13.58%, 粉粒(0.002~0.02 mm)土粒占 71.55%, 砂粒(0.02~2 mm)土粒占 14.87%。

试验设定 5 个不同土壤初始含水率处理, 分别为 6.02%, 7.40%, 8.23%, 10.08% 和 13.20%。土壤经自然风干, 过 2.0 mm 筛后按照预定的初始含水率配土, 土箱装土分层厚度 2.5 cm, 层间刮毛避免产生分层, 每个处理 3 次重复, 取其平均值进行分析; 试验全程采用秒表计时, 单位以分钟计算; 使用钢卷尺测量水平和垂直湿润锋运移距离; 肥液采用浓度为 600 mg/L 的硝酸铵钙溶液进行试验, 硝酸铵钙是一种含氮和速效钙的新型高效复合肥料, 其肥效快, 可快速补氮; 连续灌水入渗 12 h 后, 分别在灌水结束时、再分布 1 天和再分布 2 天时, 在水平方向上距膜孔中心 2.5, 5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20 cm 和其对应垂直方向 2.5, 5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20 cm 处用土钻取土, 每份土样分 4 份, 2 份土样进行烘箱 8 h, 烘干测定土壤质量含水率; 另 2 份土样自然风干后 1 份称取 5 g, 加入 25 mL KCl 溶液振荡过滤后, 取溶液 10 mL 稀释至 40 mL 后, 加入 1 mL 酒石酸钾钠和 2 mL 钠氏试剂(10 g 碘化汞+7 g 碘化钾+16 g 氯化钠), 定容 50 mL, 取样用美国 HACH 公司 DR/4000 型紫外分光光度计测定土壤铵态氮的浓度; 另 1 份称取 3 g 自然风干土样, 加入 15 mL CaCl₂ 溶液振荡后, 取滤液 0.2 mL, 加入 0.5 mL 浓硫酸水杨酸后, 再加入 0.3 mL 氢氧化钠, 取样测定土样硝态氮的浓度。

2 结果与分析

2.1 土壤初始含水率对肥液入渗能力的影响

通过浑水膜孔灌 4 种初始土壤质量含水率(θ_0)条件下肥液入渗试验数据分析发现, 土壤初始含水率对累积入渗量具有较显著的影响。从图 2 可以看出, 膜孔单位面积累积入渗量随入渗时间的增加而增大, 在相同入渗时间时, 随着土壤初始含水率增大, 单位

膜孔累积入渗量减少。这是因为入渗量是由土水梯度和水力传导度决定的, 土壤含水率主要影响入渗水流湿润区的平均梯度从而影响浑水入渗能力^[14]。在其他条件不变的情况下, 水分入渗主要由重力势和基质势作用下运移, 随着初始含水率越高, 水分入渗湿润锋面的土水势越高, 则入渗湿润锋面与未湿润土层之间的平均梯度势越小; 又因为高初始含水率会使入渗到土壤中的肥液浓度降低, 进而降低了肥液中钙离子置换土壤胶体钠离子的能力。综上所述, 土壤初始含水率越高, 浑水肥液入渗能力越低。

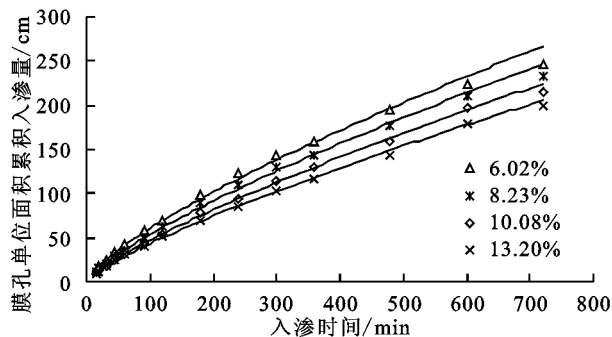


图 2 累积入渗量曲线

经分析, 浑水膜孔灌肥液入渗单位膜孔累积入渗量符合 Kostikov 模型即:

$$I = Kt^\alpha \quad (2)$$

式中: I 为累积入渗量(cm); t 为入渗时间(min); α 为经验入渗指数, 反映土壤入渗能力的衰减速度; K 为经验入渗系数, 其物理意义是入渗开始后第一个单位时段末的累积入渗量, 在数值上与第一个单位时段末入渗速度相等。在土壤水分入渗的初始阶段, 系数 K 对土壤入渗能力起主导作用, 随着入渗时间的推移, 指数 α 变为影响土壤入渗能力的主要因素^[15]。利用公式(2)对图 2 累积入渗量实测值拟合见表 1。

表 1 Kostikov 入渗模型参数拟合结果

初始含水率 $\theta_0/\%$	经验 系数 K	经验 指数 α	决定 系数 R^2
6.02	1.8936	0.7520	0.9986
8.23	1.5270	0.7727	0.9991
10.08	1.2416	0.7899	0.9995
13.20	1.1315	0.7906	0.9984

入渗系数 K 随土壤初始含水率增加而减小, 而入渗指数 α 随土壤初始含水率增大而增大。 K 值从 1.893 6 减小到 1.131 5, α 值从 0.752 0 增大到 0.790 6, 拟合结果的决定系数 R^2 均大于 0.99, 说明采用 Kostikov 入渗模型建立的浑水膜孔灌肥液入渗模型相关关系显著。

经分析 K 和 α 与土壤初始含水率之间具有线性关系:

$$K(\theta) = -0.106\theta + 2.445 \quad R^2 = 0.8989 \quad (3)$$

$$\alpha(\theta)=-0.0054\theta+0.7255 \quad R^2=0.8175 \quad (4)$$

将公式(3)和公式(4)代入公式(2),得到累积入渗量与初始含水率及入渗时间的数学模型:

$$I(\theta,t)=(-0.106\theta+2.445)t^{0.0054\theta+0.7255} \quad (5)$$

$6.02\leq\theta\leq13.2,0<t\leq720$

表 2 累积入渗量实测值与模型拟合值

入渗时间/min	20	30	45	60	90	120	180	240	300	360	480	600	720
实测值/cm	16.36	22.52	31.36	38.96	53.08	66.28	94.76	114.08	139.16	155.88	190.12	223.20	244.00
拟合值/cm	16.44	22.42	30.58	38.11	51.97	64.78	88.35	110.12	130.63	150.19	187.19	222.06	255.31
相对偏差/%	0.46	-0.46	-2.50	-2.19	-2.08	-2.27	-6.76	-3.47	-6.13	-3.65	-1.54	-0.51	4.64

2.2 土壤初始含水率对湿润锋运移特性的影响

从图 3 可以看出,各向湿润锋均随时间的推移而增加,在入渗前 60 min 内,不同土壤初始含水率处理的各方向湿润锋运移距离差异不明显,之后随着入渗时间的增加,各方向湿润锋运移曲线逐渐变缓,最后趋于平缓,由于浑水入渗影响土壤饱和导水率,因此当入渗达到稳渗状态时,可将土壤水分入渗视为层状土入渗^[16]。在同一入渗时间下,各向湿润锋运移距离随土壤初始含水率增大而增加,即土壤初始含水率为 6.02%,8.23%,10.08%和 13.2%的矩膜孔中心

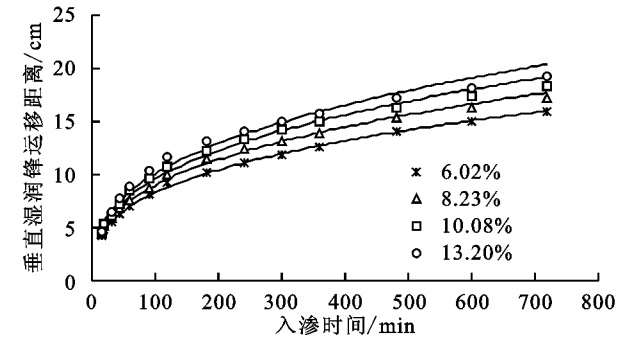


图 3 湿润锋运移特性曲线

不同土壤初始含水率处理的垂直湿润锋运移特性曲线与入渗时间具有显著的幂函数关系,即:

$$S_{zi}=Et^F \quad (6)$$

式中: S_{zi} 为浑水膜孔灌垂直湿润锋运移距离(cm); E 为拟合系数; F 为拟合指数。用公式(6)对图 3 中浑水膜孔灌水肥一体化灌溉不同土壤初始含水率处理垂直湿润锋运移距离与入渗时间进行拟合,结果见表 3。

表 3 垂直湿润锋运移距离与入渗时间拟合参数

初始含水率 $\theta/\%$	拟合 系数 E	拟合 指数 F	决定 系数 R^2
6.02	1.7969	0.3325	0.9986
8.23	1.8508	0.3433	0.9976
10.08	1.8952	0.3521	0.9922
13.20	1.9422	0.3576	0.9884

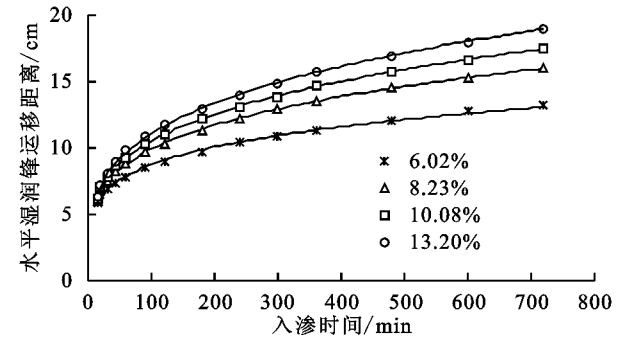
不同土壤初始含水率处理的水平湿润锋运移距离与入渗时间为幂函数关系,即:

$$S_{xi}=\frac{D}{2}Gt^H \quad (7)$$

式中: S_{xi} 为浑水膜孔灌水平湿润锋运移距离(cm); D

利用初始含水率为 7.4% 的处理验证数学模型(5),累积入渗量的实测值与模型模拟值进行对比(表 2),可以看出模拟值与实测值之间的相对偏差全部保持在 $\pm 7\%$ 之内,说明用模型(5)可以很好地模拟浑水膜孔灌肥液入渗特性。

垂直湿润锋运移距离分别为 15.90,17.21,18.25,19.20 cm,其平均运移速率分别为 0.022 1,0.023 9,0.025 3,0.026 7 cm/min;距膜孔中心水平湿润锋运移距离分别为 13.3,14.7,16.2,18.7 cm,其平均运移速率分别为 0.018 5,0.020 4,0.022 5,0.026 0 cm/min。这主要是因为土壤初始含水率越大,土壤缺水率越小,导水率则越大,土壤蓄水能力反而越弱,因此初始含水率越大越有助于湿润锋运移。但是土壤含水率越大,土壤吸水力则越小,会导致湿润锋运移速度减慢。整个土壤水分入渗过程,土壤吸水力为主要影响因素^[13]。



为膜孔直径(cm); G 为拟合系数; H 为拟合指数。

用公式(7)对图 3 中浑水膜孔灌水肥一体化灌溉不同土壤初始含水率处理水平湿润锋运移距离与入渗时间进行拟合,结果见表 4。

表 4 水平湿润锋运移距离与入渗时间拟合参数

初始含水率 $\theta/\%$	拟合 系数 G	拟合 指数 H	决定 系数 R^2
6.02	1.3200	0.3137	0.9974
8.23	1.3271	0.3522	0.9935
10.08	1.3402	0.3673	0.9913
13.20	1.3574	0.3805	0.9892

由表 3 和表 4 可以看出,各决定系数 R^2 均大于 0.98,说明不同初始含水率处理的浑水膜孔灌肥液入渗水平和垂直湿润锋运移距离和入渗时间具有较好的幂函数关系。在同一条件下,对垂直和水平湿润锋而言,拟合系数 E 、 F 、 G 和 H 均随着土壤初始含水率增加而增加。

通过对拟合系数 E 、 F 、 G 和 H 与土壤初始含水

率进行分析得到:

(1)垂直湿润锋:

$$E=0.02\theta+1.1389 \quad R^2=0.9925$$

$$F=0.0034\theta+0.3156 \quad R^2=0.8781$$

将相关系数代入公式(6),得到不同土壤初始含水率下的浑水膜孔灌肥液入渗垂直湿润锋运移距离与入渗时间之间的经验模型,即:

$$S_{zi}=(0.02\theta+1.1.89)t^{(0.0034\theta+0.3156)}$$

$$6.06\leq\theta\leq13.2, 0<t\leq720 \quad (8)$$

式中: θ 为土壤初始含水率(%).

(2)水平湿润锋:

$$G=0.0053\theta+1.2858 \quad R^2=0.9842$$

$$H=0.009\theta+0.2689 \quad R^2=0.8781$$

将相关系数代入公式(7),得到不同土壤初始含水率条件下的浑水膜孔灌肥液入渗水平湿润锋运移距离与入渗时间之间的经验模型,即:

$$S_{xi}=\frac{D}{2}(0.0053\theta+1.2858)t^{(0.009\theta+0.2489)}$$

$$6.02\leq\theta\leq13.2, 0<t\leq720 \quad (9)$$

为验证模型(8)和(9)的可靠性,将土壤初始含水率为7.4%处理的浑水膜孔灌肥液入渗垂直和水平湿润锋运移距离的实测值与模型模拟值进行对比分析,见表5。

表 5 各方向湿润锋的实测值与模型模拟值

湿润锋	项目	入渗时间/min												
		20	30	45	60	90	120	180	240	300	360	480	600	720
S_{zi}	实测值/cm	6.70	7.20	8.10	8.60	9.50	10.10	11.00	11.60	12.30	12.60	13.50	14.20	14.60
	拟合值/cm	6.62	7.15	7.75	8.23	9.00	9.60	10.57	11.33	11.98	12.55	13.51	14.33	15.05
	相对偏差/%	-1.19	-0.73	-4.30	-4.26	-5.30	-4.91	-3.95	-2.30	-2.60	-0.42	0.11	0.93	3.06
S_{zi}	实测值/cm	5.10	5.90	6.70	6.90	8.90	9.90	11.00	12.00	12.90	13.80	14.80	15.80	16.80
	拟合值/cm	5.06	5.80	6.66	7.35	8.44	9.31	10.69	11.79	12.72	13.54	14.93	16.11	17.14
	相对偏差/%	-0.88	-1.62	-0.54	6.53	-5.17	-5.97	-2.84	-1.76	-1.39	-1.92	0.88	1.96	2.04

由表5可知,在浑水膜孔灌肥液入渗条件下,利用得到的经验模型(8)和(9)对垂直和水平湿润锋在不同入渗时间下的运移距离进行模拟,并将模拟值与实测值进行对比分析,可见其相对误差在 $\pm 7\%$ 之内。说明该模型对浑水膜孔灌肥液入渗各方向湿润锋运移距离进行预测满足精度要求。

2.3 湿润体内水分分布规律

土壤肥液入渗结束时刻,用烘干法测量得到土壤质量含水率。图4为灌水结束后不同土壤初始含水率处理,以膜孔为原点的湿润体垂直剖面(取1/2面进行研究)水分分布等值线图。从图4中比较发现,土壤初始含水率对湿润体内水分分布影响较为显著。土壤含水率分布与水分在土壤中运移规律密切相关,在靠近膜孔位置,含水率等值线相对较疏松,含水率差异较小,含水率较大,接近土壤饱和含水率,土壤水势梯度较小;越靠近湿润锋位置土壤含水率变化越大,含水率梯度则越大,相应的土壤水势梯度较大。位于膜孔中心附近的土壤在入渗期间其含水率基本接近饱和含水率,这一部分土壤水分主要依靠膜孔中水头作用而下渗,因此该部分视为饱和土壤水分运动;而位于湿润锋附近的土壤,由于湿润锋前后的含水率差别较大,水分主要靠土壤基质势梯度运移;在湿润体内,水分运移不受水头作用影响,同时基质势作用较弱,因此仅受重力作用运移。土壤初始含水率越大,湿润体体积越大,最大含水率的位置越下移;在湿润体内,同一位置的含水率随着土壤初始含水率的增大而增大。

从图5(a)可知,不同土壤初始含水率处理水分随土层深度变化规律,即浑水膜孔灌肥液入渗过程中,膜孔中心垂向土壤含水率均表现为随土层深度的增加而减小;由于土壤水分运移主要受基质势和重力势的影响,随着土壤初始含水率的增大,基质势作用较弱,重力势作用越显著,因此土壤最大湿润区随初始含水率的增大而下移。在同一土层深度,土壤初始含水率越大则土壤含水量越大,在土壤深度5 cm,土壤初始含水率6.02%,7.4%,8.23%,10.08%和13.2%处理的土壤含水率分别为28.43%,29.21%,29.83%,30.04%和31.00%,以土壤初始含水率6.02%为基准,增幅依次为2.67%,4.69%,5.36%和8.29%。

图5(b)为土壤初始含水率6.02%处理在不同时间条件下垂向土壤水分分布变化规律图。从图5可以看出,浑水膜孔灌肥液入渗过程中,膜孔中心垂向土壤含水率在同一土层深度随入渗时间的增长而增大,随入渗时间的延长,湿润锋不断下移,湿润体体积持续扩大,土壤处于吸湿状态。入渗结束后进入水分再分布过程,湿润锋继续下移,上层土壤含水率不断降低,下层土壤一方面受到上层土壤水分补给,一方面在水势梯度作用下继续下移,但是由于运移的速度十分缓慢,因此整个湿润体内土壤含水率分布比较均匀。入渗结束后在分布1天后基本稳定,再分布2天后湿润体内土壤含水率分布基本趋于均匀。经分析,浑水膜孔灌肥液入渗膜孔中心垂向土壤含水率在不同时刻的值与湿润锋垂向运移距离有关,湿润体膜孔中心垂向某点土壤含水率是湿润

锋垂向运移距离的函数($\theta=f(h)$)。

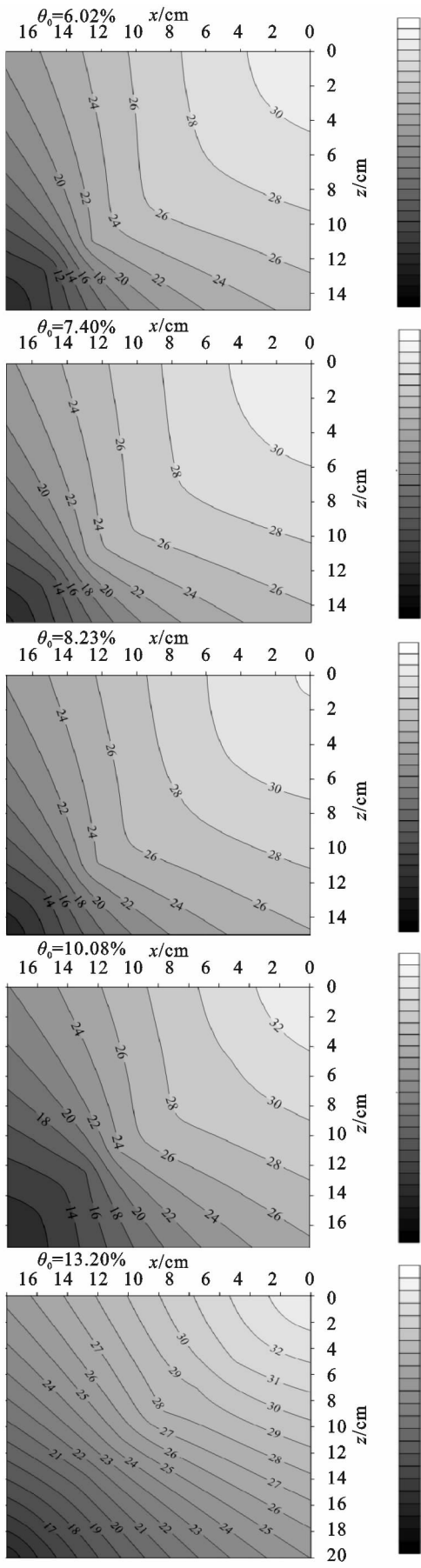


图 4 不同土壤初始含水率下湿润体内垂直剖面水分分布等值线

根据土壤含水率随湿润锋垂向运移距离的分布规律,可以得出其符合抛物线函数,对其建立数学模型为:

$$\theta = ah^2 + bh + c \tag{10}$$

用公式(10)对图 6(b)中不同时刻的浑水膜孔灌肥液入渗土壤含水率分布实测数据进行拟合得到:

入渗结束时, $\theta = -0.1074h^2 + 0.4597h + 30.42$
 $R^2 = 0.9533$

入渗结束再分布 1 天, $\theta = -0.04175h^2 + 0.1147h + 23.31$ $R^2 = 0.9694$

入渗结束再分布 2 天, $\theta = -0.02232h^2 + 0.1748h + 17.90$ $R^2 = 0.9938$

以上拟合相关系数均大于 0.95,说明采用公式(10)能较好地描述不同时刻湿润锋垂向运移距离与土壤含水率之间的关系。

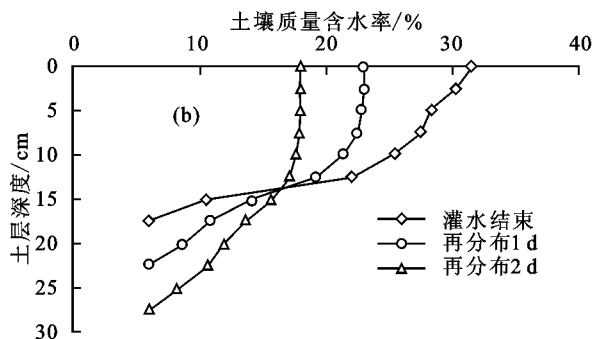
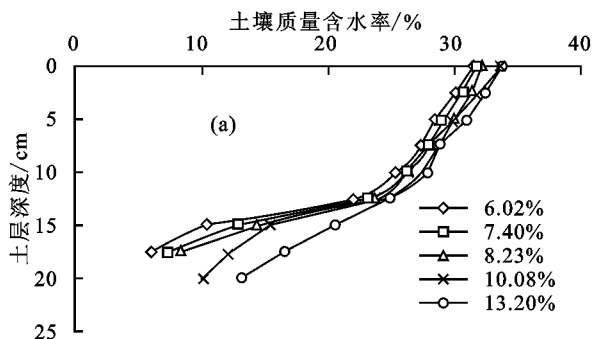
2.4 土壤初始含水率对湿润体内铵态氮分布的影响

图 6(a)为不同土壤初始含水率处理的膜孔中心垂向湿润体内铵态氮含量随垂直土层深度的变化曲线。从图 6(a)可以看出,各处理湿润体内铵态氮的峰值出现在膜孔中心,且各处理铵态氮含量无显著差异,在未湿润土体中,所测得的铵态氮含量较本底值无差别。图 6(c)为不同土壤初始含水率处理的膜孔中心水平湿润体内铵态氮含量随土壤水平方向的变化规律。从图 6(c)可以看出,铵态氮含量在水平方向变化规律与垂向方向基本相同,膜孔附近铵态氮含量大于湿润锋边缘的含量,在湿润体水平方向的同一位置,随时间的延长,铵态氮含量逐渐减小。在湿润体中,灌入的铵态氮绝大部分分布在湿润体半径 $r \leq 5$ cm 范围内,而湿润体半径 $r > 5$ cm 范围的土壤铵态氮含量随土层深度的增加而降低;当湿润体半径 ≥ 10 cm 时,铵态氮含量明显降低。这是因为土壤胶体主要带负电荷,土壤溶液中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 带正电荷,与土壤胶体颗粒接触后被大量吸附,阻碍了 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在土壤向下运移。湿润半径为 5 cm 处,土壤初始含水率 6.02%, 7.40%, 8.23%, 10.08% 和 13.20% 处理的垂向铵态氮含量分别为 221.1, 245.4, 256.5, 261.9, 359.1 mg/kg, 其他处理相对于初始含水率 6.02% 处理增幅分别是 13.98%, 17.70%, 19.40% 和 41.21%;湿润半径为 5 cm 处,土壤初始含水率 6.02%, 7.4%, 8.23%, 10.08% 和 13.20% 处理的水平位置铵态氮含量分别为 226.9, 240.4, 258.5, 286.9, 329.1 mg/kg, 其他处理相对于初始含水率 6.02% 处理增幅分别是 5.62%, 12.22%, 20.91% 和 31.05%, 同一湿润半径位置处,随着土壤初始含水率的增大,土壤中铵态氮含量也相应增大。

图 6(b)和图 6((d)分别为土壤初始含水率为

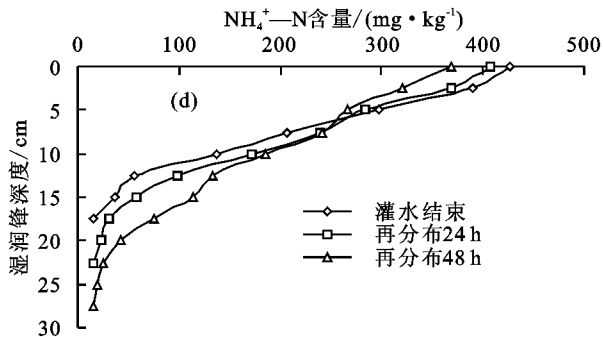
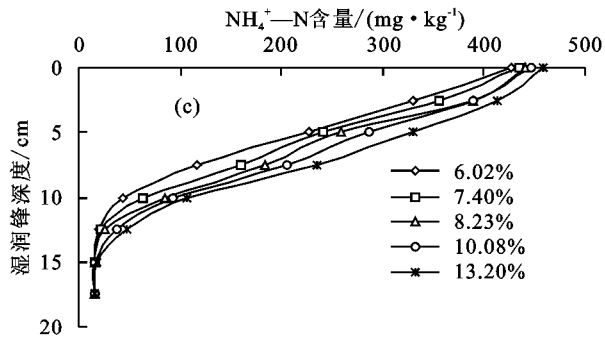
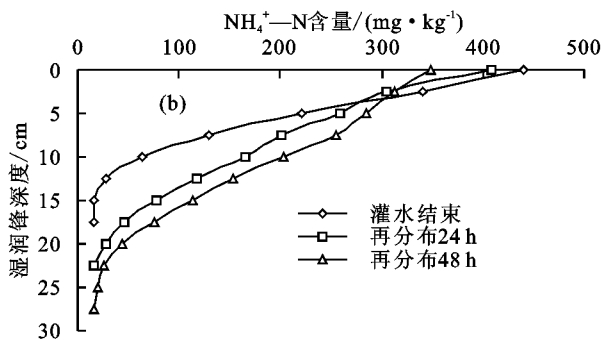
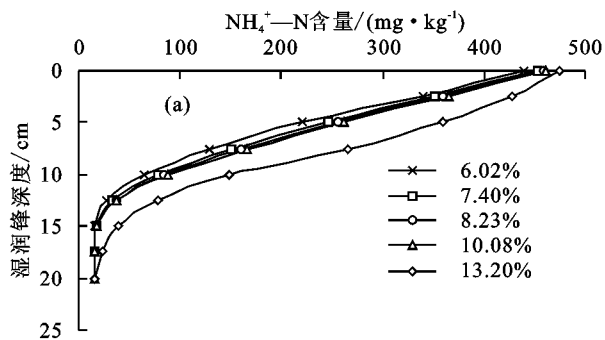
6.02%处理随土壤水分再分布,膜孔中心垂向和水平湿润体内铵态氮含量的变化规律。从图 6(b)和图 6(d)可以看出,随土壤水分再分布,湿润锋逐渐下移,湿润体内铵态氮逐渐向下运移且其含量有降低趋势,这是因为一部分铵态氮随水分运移,一部分铵态氮在微生物作用下发生硝化转化反应;以湿润半径 10 cm

为例,灌水结束、再分布 24 h 以及 48 h 条件下,该节点处垂向铵态氮含量依次为 64.48,165.60,195.30 mg/kg,以灌水结束该点铵态氮含量为基准,增幅为 61.06%和 15.21%;该节点处水平铵态氮含量依次为 136.2,171.5,185.3 mg/kg,以灌水结束该点铵态氮含量为基准,增幅为 20.58%和 26.50%。



注:(a)为不同土壤初始含水率下水分随土层深度的变化规律;(b)为不同时间条件下垂向土壤水分分布的变化规律。

图 5 不同土壤初始含水率和再分布时间对水分运移规律的影响



注:(a)为供水结束时湿润体垂向 NH_4^+-N 分布;(b)为再分布湿润体垂向 NH_4^+-N 分布;(c)为供水结束时湿润体水平方向 NH_4^+-N 分布;(d)为再分布湿润体水平方向 NH_4^+-N 分布。

图 6 不同土壤初始含水率和再分布时间对铵态氮运移规律的影响

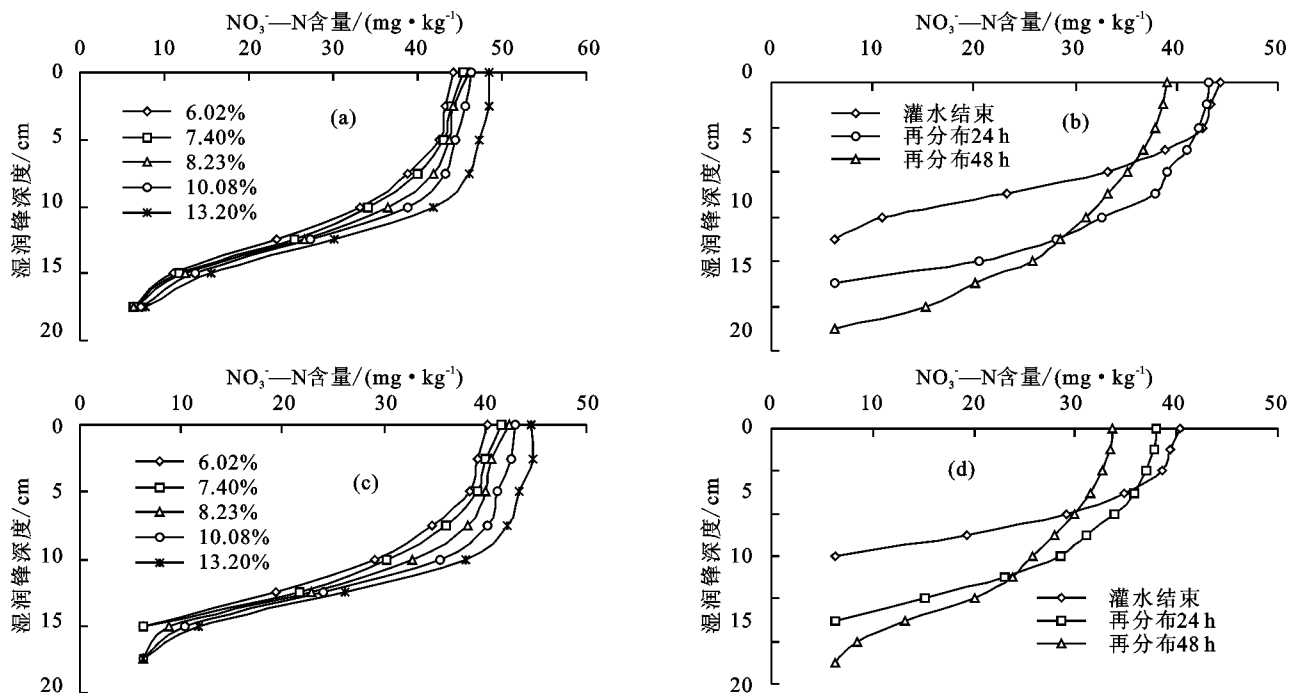
2.5 土壤初始含水率对湿润体内硝态氮分布的影响

图 7(a)和图 7(c)分别为不同土壤初始含水率处理的膜孔中心垂向和水平方向湿润体内硝态氮含量的变化规律。从图 7(a)和图 7(c)可以看出,供水结束时,肥液入渗土壤 NO_3^--N 主要集中分布在由膜孔中心至半径为 10 cm 范围内,这是因为膜孔灌肥液入渗可将养分保存在浅层土壤中利于作物根系吸收,使得肥料利用率提高,减少肥液深层渗漏造成的肥料污染;水平方向和垂直方向的 NO_3^--N 含量均随着距膜孔中心距离的增加而降低,而且无论是垂直

还是水平方向,距膜孔中心越近 NO_3^--N 含量越高;在同一位置处,硝态氮质量分数随土壤初始含水率的增大而增大;由于硝态氮运移主要受水势梯度的作用,水平方向只受基质势作用,而垂直方向既受基质势又受重力势作用,因此垂直湿润锋运移距离较水平湿润锋大,垂直方向的硝态氮运移距离也大于水平方向。湿润半径为 5 cm 处,土壤初始含水率 6.02%,7.40%,8.23%,10.08%和 13.20%处理的垂向硝态氮含量分别为 42.50,43.00,43.70,44.39,47.23 mg/kg,其他处理相对于初始含水率 6.02%处

理增幅分别是1.16%、2.75%、4.26%和10.01%;湿润半径为5 cm处,土壤初始含水率6.02%、7.40%、8.23%、10.08%和13.20%处理的水平位置硝态氮含量分别为:

38.50、39.20、40.00、41.16、43.34 mg/kg,其他处理相对于初始含水率6.02%处理增幅分别是1.79%、3.75%、6.47%和11.17%。



注:(a)为供水结束时湿润体垂向 NO_3^- -N 分布;(b)为再分布湿润体垂向 NO_3^- -N 分布;(c)为供水结束时湿润体水平方向 NO_3^- -N 分布;(d)为再分布湿润体水平方向 NO_3^- -N 分布。

图7 不同土壤初始含水率和再分布时间对硝态氮运移规律的影响

图7(b)和图7(d)分别为土壤初始含水率为6.02%处理随土壤水分再分布,膜孔中心垂向和水平湿润体内硝态氮含量变化规律。从图7(b)和图7(d)可以看出,进入再分布阶段后,土壤中硝态氮运移速度随水分运移速度的降低而降低,且此时扩散作用所占比例增加;再分布过程中,浑水膜孔入渗土壤硝态氮浓度锋随时间继续运移,上层土壤硝态氮含量逐渐减小,下层新湿润体中硝态氮含量逐渐增加,整个湿润体内硝态氮含量分布趋于均匀;由于硝化反应,土壤中硝态氮含量略有增加;以湿润半径5 cm为例,灌水结束、再分布24 h以及48 h条件下,该节点处垂向硝态氮含量依次为42.50、42.20、37.88 mg/kg,以灌水结束该点硝态氮含量为基准,降幅为0.71%和12.20%;该节点处水平硝态氮含量依次为38.50、36.94、32.66 mg/kg,以灌水结束该点硝态氮含量为基准,降幅为4.22%和17.89%。

3 结论

(1)累积入渗量与入渗时间符合Kostiakov入渗模型;同一入渗时刻条件下,累积入渗量随初始含水率增加而减低;土壤初始含水率越大,入渗系数 K 值越小,入渗指数 α 则越大;建立了以入渗时间和初始含水率为自变量,累积入渗量为因变量的经验模型,

其具有较高可靠性。

(2)各向湿润锋运移距离与入渗时间均有较好的幂函数关系;入渗时间相同,各向湿润锋运移距离均随初始含水率增大而增大;初始含水率越大,湿润体内同一位置处质量含水率越大;建立了以各向湿润锋运移距离、入渗时间与初始含水率的经验模型,且模型具有较高的可靠性。

(3)灌水结束时,湿润体内铵态氮绝大部分分布在湿润体半径 $r \leq 5$ cm范围内,而湿润体半径 $10 \text{ cm} > r > 5$ cm范围的土壤铵态氮含量随土层深度的增加而降低,当湿润体半径 ≥ 10 cm时,铵态氮含量明显降低;初始含水率越大,铵态氮分布范围越大;随土壤水分再分布,湿润锋逐渐下移,湿润体内铵态氮逐渐向下运移且其含量有降低趋势。

(4)供水结束时,肥液入渗土壤硝态氮主要集中在由膜孔中心至半径10 cm范围内,水平和垂直方向硝态氮含量均随着距膜孔中心距离的增加而降低,而且无论是垂直还是水平方向,距膜孔中心越近,硝态氮含量越高;在同一位置处,硝态氮质量分数随土壤初始含水率的增大而增大;再分布过程中,浑水膜孔入渗土壤硝态氮浓度锋随时间继续运移,上层土壤硝态氮含量逐渐减小,下层新湿润体中硝态氮含量逐渐增加,整个湿润体内硝态氮含量分布趋于均匀。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 穆红文,费良军,雷雁斌.膜孔灌肥液自由入渗硝态氮运移特性试验研究[J].干旱地区农业研究,2007,25(2):63-66.
- [3] 费良军,脱云飞,穆红文.膜孔肥液自由入渗土壤铵态氮运移和分布特性试验研究[J].干旱地区农业研究,2008,26(3):193-197.
- [4] 董玉云,费良军,任建民.土壤质地对单膜孔肥液入渗水分及氮素运移的影响[J].农业工程学报,2009,25(4):30-34.
- [5] 脱云飞,王克勤,张振伟,等.膜孔肥液自由入渗中土壤容重对水氮分布和均匀性的影响[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2010,36(6):650-656.
- [6] 程东娟,高然,王海峰,等.施肥方式和肥量对膜孔自由入渗量的影响[J].人民黄河,2010(9):73-75.
- [7] 高然,程东娟,费良军,等.膜孔灌自由入渗铵态氮运移特性试验研究[J].人民黄河,2011(5):80-81.
- [8] 董玉云,穆红文,费良军.单膜孔肥液入渗影响因素试验研究[J].中国农村水利水电,2015(10):5-9.
- [9] 刘颖.设施条件下不同因素对膜孔灌水热运移的影响研究[D].邯郸:河北工程大学,2012.
- [10] 胡浩云.设施条件下膜孔灌水氮运移特性试验和数值模拟[D].武汉:武汉大学,2012.
- [11] 侯春霞,胡海英,魏朝富,等.土壤溶质运移研究动态及展望[J].土壤通报,2003,34(1):70-73.
- [12] 冯绍元,张瑜芳,沈荣开.非饱和土壤中氮素运移与转化试验及其数值模拟[J].水利学报,1996(8):8-15.
- [13] 董玉云.膜孔入渗土壤水氮运移特性试验与数值模拟[D].西安:西安理工大学,2007.
- [14] 金世杰,费良军,傅渝亮,等.土壤初始含水率对浑水膜孔灌自由入渗特性影响[J].水土保持学报,2016,30(5):235-239,254.
- [15] 钟韵,费良军,傅渝亮,等.土壤容重对浑水膜孔灌单点源自由入渗特性的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):88-91,96.
- [16] 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(01):184-188+195.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 金世杰.浑水膜孔灌多源交汇入渗规律及影响因素的试验研究[D].西安:西安理工大学,2017.
- [20] 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,2017,35(2):178-184.
- [21] 钟韵.浑水膜孔灌单点源入渗特性试验与数值模拟研究[D].西安:西安理工大学,2017.
- [22] 杨素宜.土壤含水量对浑水入渗能力的影响[J].太原大学学报,2010,11(2):127-130.
- [17] Shen H O, Zheng F L, Wen L L, et al. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope[J]. Soil and Tillage Research,2016,155(1):429-436.
- [18] 赵春红,高建恩,王飞,等.含沙量对坡面流水动力学特性的影响研究[J].农业机械学报,2013,44(9):79-85.
- [19] 马波,吴发启,马璠.种植大豆地表土壤溅蚀效应及其空间分布特征[J].土壤学报,2013,50(1):50-58.
- [20] Lin Y M, Cui P, Ge Y G, et al. The succession characteristics of soil erosion during different vegetation successionstages in dry-hot river valley of Jinsha River, upper reaches of Yangtze River[J]. Ecological Engineering,2014,62(1):13-26.
- [21] He J J, Sun L Y, Gong H L, et al. Laboratory studies on the influence of rainfall pattern on rill erosion and its runoff and sediment characteristics[J]. Land Degradation and Development,2017,28(5):1615-1625.
- [22] 尚佰晓,王莉,王瑄,等.坡面土壤剥蚀率及其与水流含沙量的关系研究[J].水土保持学报,2009,23(2):28-31.
- [23] 肖海,刘刚,刘普灵.集中流作用下黄土坡面剥蚀率对侵蚀动力学参数的响应[J].农业工程学报,2016,32(17):106-111.
- [24] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等.雨滴打击对黄土坡面细沟侵蚀特征的影响[J].农业机械学报,2015,46(8):104-112.

(上接第 44 页)