

# 土壤初始含水率对涌泉根灌土壤水分及氮素运移特性的影响

刘显, 费良军, 王佳, 代智光, 曾健, 杨扬

(西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

**摘要:** 为了探究涌泉根灌水肥一体化灌溉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(4.13%, 7.21%, 8.77%, 11.06%, 14.01%)条件下入渗特性、湿润锋运移、土壤水分以及铵态氮和硝态氮的运移特性, 建立了涌泉根灌累积入渗量、各向湿润锋运移距离与不同土壤初始含水率之间的关系, 提出了不同初始含水率下涌泉根灌累积入渗量、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、转化等均不同程度地受到土壤初始含水率的影响。同一时刻条件下, 累积入渗量随着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、铵态氮和硝态氮的分布范围越广泛; 距离灌水器出水孔越近, 土壤中的铵态氮和硝态氮含量越高。入渗系数  $K$  随着土壤初始含水率的增大而减小, 入渗指数  $\alpha$  随着土壤初始含水率的增大而增大; 水平湿润锋拟合参数  $a$ 、 $b$  均随土壤初始含水率的增大而增大, 坚直向下湿润锋运移指数  $c$  随着土壤初始含水率的增大而增大, 入渗指数  $d$  随着土壤初始含水率的增大而减小。随着土壤水分再分布的持续进行, 湿润体内水分分布越加均匀, 采用克里斯琴森均匀系数  $Cu$  评价灌水结束、再分布1,3天条件下湿润体内水分分布均匀度依次为61.99%, 74.27%和83.60%; 湿润体内铵态氮含量逐渐减小, 但铵态氮的分布区域基本无变化; 湿润体内硝态氮分布区域变大, 平均值呈增大, 最值区域有下移趋势。研究成果为进一步研究涌泉根灌水氮高效利用技术奠定了基础。

**关键词:** 涌泉根灌; 土壤初始含水率; 再分布; 模型; 氮素运移

中图分类号:S274.3 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2017)04-0118-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.04.020

## Transport Characteristics of Water and Nitrogen Under Bubbled-root Irrigation with Soil Initial Water Content

LIU Xian, FEI Liangjun, WANG Jia, DAI Zhiguang, ZENG Jian, YANG Yang

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

**Abstract:** To explore the water and nitrogen transport characteristics under water and fertilizer integration of bubbled-root irrigation, through the indoor fertilizer infiltration test, the migration characteristics of wetting front migration, soil moisture, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen were studied under different soil initial water content (4.13%, 7.21%, 8.77%, 11.06%, 14.01%). The relationships between the cumulative infiltration amount, the wetting front migration distance and the soil initial water content of bubbled-root irrigation were established. An empirical model was proposed to calculate the cumulative infiltration volume and the wetting front migration distance under different initial water content. Results showed that: The cumulative infiltration, the wetting front migration distance, the moisture in the body, the distribution and transformation of nitrogen were all affected by the initial water content of soil. At the same time, the cumulative infiltration reduced with the increase of initial soil water content, while the wetting front migration distance increased with the increase of initial soil water content. The higher the initial water content of soil was, the larger volume of wetting body was, and the wilder water, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen distributed. The closer to the emitter outlet, the contents of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in the soil were higher. The infiltration coefficient  $K$  decreased with the increase of initial soil water content, while the infiltration index  $\alpha$  showed an opposite trend. The fitting parameters  $a$  and  $b$  of horizontal wetting front

both increased with the increase of initial soil water content. The vertical downward wetting front migration index  $c$  increased with the increase of initial soil water content, while the infiltration index  $d$  decreased with the increase of initial soil water content. With the continuous redistribution of soil moisture distribution, the moisture distribution in the moist body was more uniform, and the uniformity of water distribution evaluated by Christiansen uniformity coefficient  $Cu$ , in moist body was 61.99%, 74.27% and 83.60%, respectively, at the end of irrigation, redistribution of 1 day and 3 days. With the redistribution, the content of ammonium in the wetted body gradually decreased, but the distribution region of ammonium nitrogen was almost unchanged. With the redistribution, the distribution of nitrate nitrogen in the wetted area became larger, the average value of it increased, and the maximum value of it had a downward trend. The above research results can lay the foundation for further researches on water and nitrogen use efficient of bubbled-root irrigation technology.

**Keywords:** bubbled-root irrigation; soil initial water content; redistribution; models; nitrogen migration

涌泉根灌是近几年在滴灌技术上发展起来的一种新型地下渗灌技术,水肥溶液通过微管进入到作物根部区域土壤,对作物进行局部灌溉。相对于地表灌溉而言,减小了水分的蒸发损失、地表杂草的生长,避免了肥液在地表的积聚,加之其独特的套筒设计,有效的避免了灌水器的堵塞<sup>[1]</sup>。对涌泉根灌水肥一体化灌溉条件下水分及氮素运移特性进行研究,可为合理确定山地果树灌溉技术参数提供科学依据。目前针对涌泉根灌水氮运移特性方面的研究已取得一定研究成果。汪有科等<sup>[2]</sup>、费良军等<sup>[3]</sup>、黎朋红等<sup>[4]</sup>和吴恒卿等<sup>[5]</sup>通过大田涌泉根灌水分入渗试验,表明灌水器孔径、埋深、流量均会对湿润锋运移距离产生较为显著的影响;牛文全等<sup>[6]</sup>、张智韬等<sup>[7]</sup>通过室内涌泉根灌水分入渗试验,表明土壤初始含水率对湿润锋运移距离、湿润体内水分分布影响显著;费良军等<sup>[8]</sup>、刘显等<sup>[9-10]</sup>在涌泉根灌肥液入渗条件下,探究了肥液浓度和灌水器埋深对土壤水分和氮素运移特性的影响。土壤水分入渗特性受土壤初始含水率的影响较为显著<sup>[11-15]</sup>,而目前关于土壤初始含水率对涌泉根灌土壤氮素运移特性方面的研究未见报道,探究不同含水率条件下涌泉根灌土壤水分和氮素的运移、分布规律对涌泉根灌节水技术的应用具有一定程度的指导意义。本文通过涌泉根灌室内水肥一体化入渗试验,研究了土壤初始含水率对涌泉根灌土壤水分及氮素运移特性的影响,以期为陕北山地涌泉根灌水肥高效利用提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

试验装置主要由马氏瓶和有机玻璃制成尺寸为50 cm×50 cm×100 cm(长×宽×高)的试验土箱组成(图1)。马氏瓶提供恒定水头,通过调节旋钮开度控制灌水器流量;取灌水器套筒1/4,并用玻璃胶粘贴于土箱一角,开孔率为20%,在套筒出水孔外侧包

裹两层纱布以免装填土箱过程中土壤颗粒通过出水孔进入套筒内部;试验全程采用秒表计时,单位以分钟量算;使用钢卷尺测量湿润锋运移距离;氮肥采用硝酸铵钙,以一定比例溶入水中,氮素的测定使用全自动间断化学分析仪,分析仪型号 CleverChem 2000。

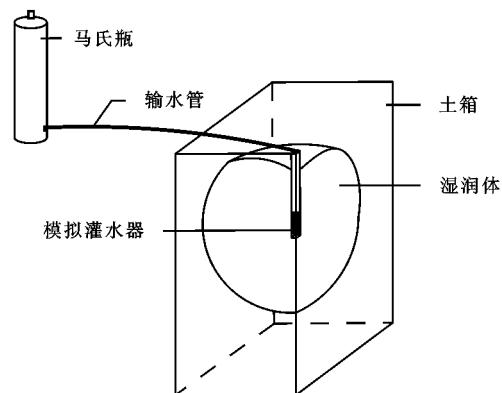


图1 试验模拟示意

### 1.2 试验方法

供试土壤于2016年8月取自陕西省米脂县远志山枣树微灌示范基地田间表层0—50 cm熟土,待所采集的土壤经自然风干后,进行研磨,过2 mm细筛,用 Mastersizer-2000 激光粒度分析仪对土壤进行颗粒分析,不同粒级  $d < 0.002$  mm,  $0.002$  mm  $< d \leq 0.02$  mm,  $0.02$  mm  $< d \leq 2.0$  mm 分别占 1.881%, 13.466%, 84.653%, 按国际制分类标准判定为砂壤土。试验设定流量为1.8 L/h,灌水时间540 min,肥液浓度为60 g/L,土壤容重设定为1.35 g/cm<sup>3</sup>,埋深为40 cm。设定5种土壤初始含水率梯度,分别为4.13%, 7.21%, 8.77%, 11.06%和14.01%(质量含水率,下同),每组试验重复进行3次,取其平均值进行分析。试验开始后,按照先密后疏的原则对试验数据进行读取;入渗结束后,分别在距离滴头水平0, 10, 20, 30 cm的垂直深度0—100 cm范围内每隔10 cm用土钻进行取土。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤初始含水率对涌泉根灌肥液入渗能力的影响

图 2 为不同土壤初始含水率条件下涌泉根灌水肥一体化灌溉累积入渗量随时间变化曲线图。随着入渗时间的持续进行,累积入渗量逐渐增大,且在相同累积入渗时间下,土壤初始含水率越大,累积入渗量反而越小。这主要是因为水分入渗到土壤中后,主要受重力势和基质势的作用进行迁移,而土壤初始含水率越大,水势梯度越小,土壤吸力也越小,液相率变大,土壤的蓄水能力变小;加之肥液入渗到具有初始含水率的土壤中使肥液浓度降低,进而使肥液中的钙离子对土壤胶体中钠离子的置换能力下降,土壤初始含水率越大,置换能力越低。基于以上原因,故而造成累积入渗量随着土壤初始含水率的增大而减小的现象。

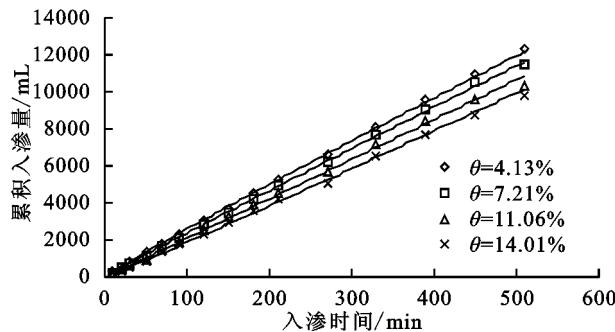


图 2 累积入渗量曲线

经分析,涌泉根灌肥液入渗累积入渗量符合 Kostiakov 模型即:

$$I(t) = Kt^\alpha \quad (1)$$

式中:  $I(t)$  为累积入渗量 (mL);  $K$  为入渗系数 (mL/min);  $\alpha$  为入渗指数;  $t$  为入渗时间 (min)。

对图 2 中涌泉根灌自由入渗在不同土壤初始含水率条件下累积入渗量的实测数据用式(1)进行拟合,得到:

$$\theta = 4.13\% \quad I(t) = 32.983t^{0.9482} \quad R^2 = 0.9898$$

$$\theta = 7.21\% \quad I(t) = 26.870t^{0.9736} \quad R^2 = 0.9988$$

$$\theta = 11.06\% \quad I(t) = 20.019t^{1.0099} \quad R^2 = 0.9984$$

$$\theta = 14.01\% \quad I(t) = 15.742t^{1.0376} \quad R^2 = 0.9981$$

由以上拟合结果可知,其决定系数  $R^2$  均大于 0.98,表明采用 Kostiakov 模型建立的涌泉根灌肥液入渗模型,相关关系显著。土壤初始含水率越大,  $K$  值越小,  $\alpha$  值越大。分析研究表明,其与土壤初始含水率之间具有线性关系:

$$K(\theta) = -1.7505\theta + 39.838 \quad R^2 = 0.9962 \quad (2)$$

$$\alpha(\theta) = 0.0091\theta + 0.9095 \quad R^2 = 0.9971 \quad (3)$$

将公式(2)、(3)带入到(1)式,得到以累积入渗量为因变量,土壤初始含水率和入渗时间为自变量的数学模型:

$$I(\theta, t) = (-1.7505\theta + 39.838)t^{(0.0091\theta + 0.9095)} \quad (4)$$

$$4.13 \leq \theta \leq 14.01, 0 < t \leq 510$$

为验证得到的经验模型(4)是否可靠,将土壤初始含水率为 8.77% 条件下,涌泉根灌肥液累积入渗量的实测值与模型(4)的模拟值进行对比,见表 1。

表 1 累积入渗量实测值与模型模拟值

入渗时间/min	20	50	90	150	210	270	330	390	450
实测值/mL	463.76	1109.49	2053.72	3381.20	4743.72	6009.76	7469.71	8782.55	10381.37
拟合值/mL	486.60	1198.63	2137.15	3532.65	4918.90	6298.68	7673.48	9044.22	10411.54
相对偏差/%	4.93	8.04	4.06	4.48	3.69	4.81	2.73	2.98	0.29

由表 1 可知,在土壤初始含水率为 8.77% 条件下,用式(4)得到的模拟值和实测值之间的相对偏差全部保持在  $\pm 10\%$  之内,则说明用模型(4)可以很好的模拟涌泉根灌肥液入渗特性。

### 2.2 初始含水率对各向湿润锋运移特性的影响

图 3 为不同初始含水率条件下,水平湿润锋和垂直向下湿润锋随时间的运移曲线。从图 3 可以看出,不同初始含水率条件下的水平湿润距离和垂直向下湿润锋运移距离均随着入渗时间的增加而增大,且随着入渗时间的持续,运移曲线逐渐变缓。在同一入渗时间条件下,土壤初始含水率越小各向湿润锋运移距离越小。就水平湿润锋运移距离而言,在入渗时间为 300 min 时,初始含水率 4.13%, 7.21%, 11.06% 和 14.01% 条件下,湿润锋运移距离为 25.6, 27.6, 30.2, 32.1 cm; 以初始含水率 4.13% 为基准,增幅依

次为 7.81%, 17.97% 和 25.39%; 而对于竖直向下湿润锋运移距离而言,同样在累积入渗时间为 300 min 时,初始含水率 4.13%, 7.21%, 11.06% 和 14.01% 条件下,湿润锋运移距离为 29.5, 33.0, 37.5, 40.9 cm, 同样以初始含水率 4.13% 为基准, 增幅依次为 11.86%, 27.12% 和 38.64%。可知土壤初始含水率对竖直向下湿润锋运移特性的影响较水平湿润锋显著,主要是因为随着土壤初始含水率的增大,相应的土壤缺水率越小,导水率则越大; 相对于土壤蓄水能力而言,土壤初始含水率越大,蓄水能力反而越弱; 故而初始含水率越大越有利于湿润锋的运移。但是伴随着土壤初始含水率的增大,土壤吸力变小,又会使土壤湿润锋运移减慢。在这一矛盾的进程中,土壤吸力以变率为主<sup>[16]</sup>。因此,出现了土壤初始含水率越大,湿润锋运移距离越大的现象。

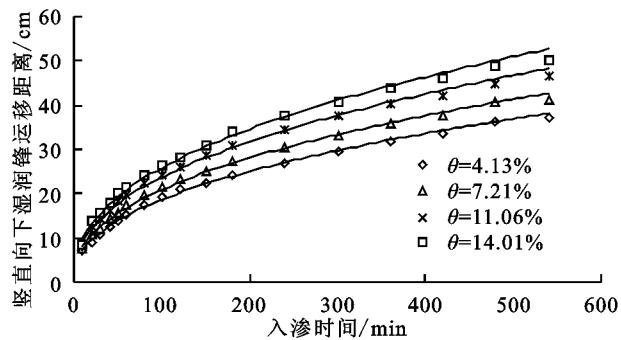
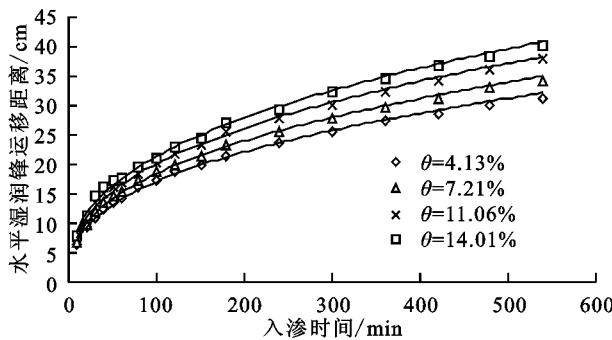


图3 不同土壤初始含水率条件下各向湿润锋运移特性曲线

不同土壤初始含水率条件下水平湿润锋、垂直向下湿润锋运移特性曲线与入渗时间具有显著的幂函数关系,设:

$$R(t) = at^b \quad H(t) = ct^d \quad (5)$$

式中:  $R(t)$ 、 $H(t)$  分别表示水平湿润锋、垂直向下湿润锋运移距离( $\text{cm}$ );  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  为拟合参数。

用(5)式对图3中涌泉根灌水肥一体化灌溉不同土壤初始含水率条件下的水平湿润锋和垂直向下湿润锋运移距离与入渗时间进行拟合,结果见表2。

表2 不同土壤初始含水率条件下各方向湿润锋

运移距离与入渗时间拟合结果

湿润锋	参数	土壤初始含水率/%			
		4.13	7.21	11.06	14.01
水平湿润锋	$a$	2.9955	3.1738	3.4248	3.6185
	$b$	0.3773	0.3815	0.3839	0.3852
	$R^2$	0.9951	0.9945	0.9923	0.9902
	$c$	2.6332	2.9681	3.3970	3.7071
竖直向下湿润锋	$d$	0.4252	0.4240	0.4219	0.4217
	$R^2$	0.9975	0.9979	0.9951	0.9918

由表2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条件下,涌泉根灌水肥液入渗水平、垂直向下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,对于水平湿润锋而言,随着土壤初始含水率的增加,运移系数  $a$  和运移指数  $b$  均呈增大趋势;竖直向下湿润锋来说,运移系数  $c$  随着土壤初始含水率的增大而增大,运移指数  $d$  随着土壤初始含水率的增大而减小。

通过将参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  与土壤初始含水率进行分

析得到:

(1) 水平湿润锋

$$a = 0.0633\theta + 2.7267 \quad R^2 = 0.9993$$

$$b = 0.0008\theta + 0.3749 \quad R^2 = 0.9404$$

拟合参数  $b$  中,土壤初始含水率在研究变化范围内对参数  $b$  的影响不大,为了简化,将带土壤初始含水率项忽略。并将相关系数带入式(5),得到不同土壤初始含水率条件下的涌泉根灌水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:

$$R(\theta, t) = (0.0633\theta + 2.7267)t^{0.3749} \quad (6)$$

$$4.13 \leq \theta \leq 14.01, 0 < t \leq 540$$

式中:  $\theta$  为土壤初始含水率(%)。

(2) 竖直向下湿润锋

$$c = 0.1091\theta + 2.1737 \quad R^2 = 0.9899$$

$$d = -0.0004\theta + 0.4267 \quad R^2 = 0.9463$$

拟合参数  $d$  中,土壤初始含水率在研究变化范围内对参数  $d$  的影响不大,为了简化,将带土壤初始含水率项忽略。并将相关系数带入式(5),得到不同土壤初始含水率的涌泉根灌水肥一体化入渗竖直向下湿润锋运移距离和入渗时间的经验模型。即:

$$H(\theta, t) = (0.1091\theta + 2.1737)t^{0.4267} \quad (7)$$

$$4.13 \leq \theta \leq 14.01, 0 < t \leq 540$$

为检验模型(6)、(7)的可靠性,将土壤初始含水率为 8.77% 条件下,涌泉根灌水肥液入渗水平湿润锋、竖直向下湿润锋运移距离的实测值与模型(6)、(7)的模拟值进行对比分析,见表3。

表3 各向湿润锋运移的实测值与模型模拟值

湿润锋	项目	入渗时间/min								
		20	40	60	100	180	300	360	420	480
$R$	实测值/cm	10.2	14	15.9	19.2	24	28.5	30.6	32.3	33.8
	拟合值/cm	10.09	13.08	15.23	18.45	22.99	27.85	29.82	31.59	33.21
	相对偏差/%	-1.08	-6.57	-4.21	-3.91	-4.21	-2.28	-2.55	-2.2	-1.75
$H$	实测值/cm	11.5	15	18.2	22.7	28.6	34.9	37.6	39.3	41.6
	拟合值/cm	11.24	15.11	17.96	22.34	27.71	35.69	38.58	41.21	43.62
	相对偏差/%	-2.26	0.73	-1.32	-1.59	-3.11	2.26	2.61	4.86	4.86

由表3可知,在涌泉根灌水肥一体化灌溉条件下,利用得到的经验模型(6)、(7)对水平湿润锋和竖直向下湿润锋在不同入渗时间下的运移距离进行模

拟,并将模拟值和实测值进行对比分析,可见两者的相对偏差全部维持在  $\pm 10\%$  之内。表明利用经验模型(6)、(7)可以对不同土壤初始含水率条件下涌泉根

灌肥液入渗的水平湿润锋、竖直向下湿润锋在不同入渗时间下的运移距离进行预测。

### 2.3 初始含水率对湿润体内水分分布特性的影响

为了探究灌水结束时刻,湿润体内水分分布情况。在灌水结束后,用土钻进行取土并用烘箱进行烘干,测得质量含水率。图 4 为灌水结束时刻在不同土壤初始含水率条件下,湿润体剖面水分分布等值线图。从图 4 可以看出,土壤初始含水率对湿润体内水分的分布影响较为显著。在中心位置,含水率等值线相对疏松,含

水率差异较小,含水率比较大,接近土壤饱和含水率,水势梯度小;距离灌水器水平位置越远,含水率越小,等值线越密集,水势梯度越大。土壤初始含水率越大,湿润体内高含水率区域和湿润体体积越大,且最大含水率位置随着初始含水率的增大有下移趋势。相对于非饱和土壤而言,土壤初始含水率决定了不同的导水率,土壤初始含水率越大,相应入渗到土壤中水分的渗透扩散越大。在湿润体内同一节点处的水分含量,随着土壤初始含水率的增大而增大。

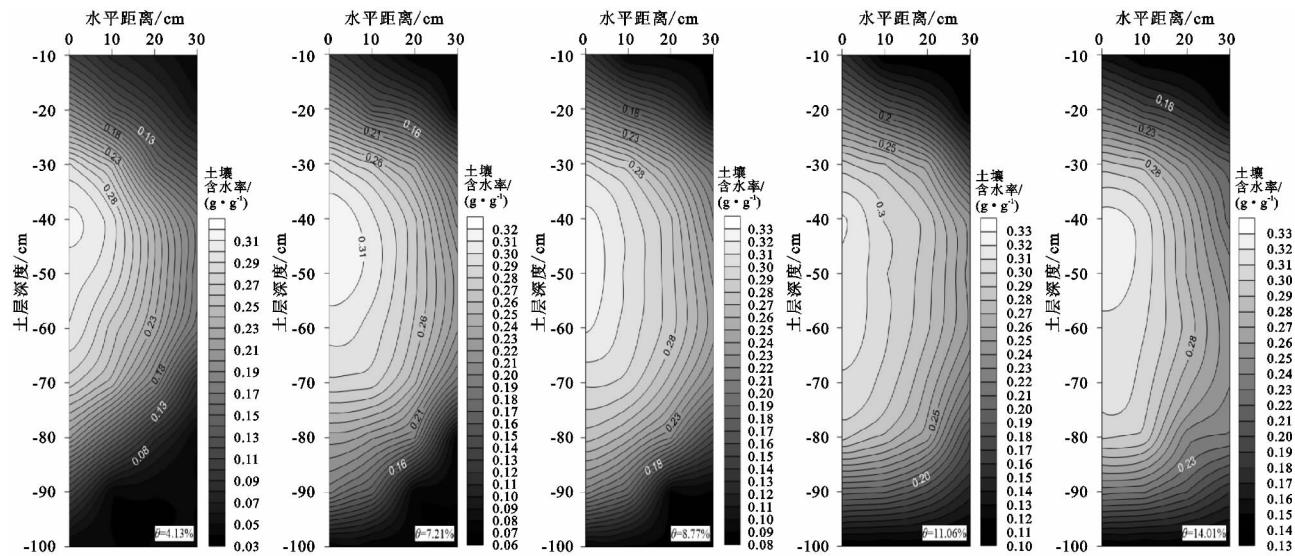


图 4 不同土壤初始含水率条件下湿润体内垂直剖面水分分布等值线

取距灌水器水平 20 cm 处,不同土壤初始含水率条件下土壤水分随深度的变化进行分析,见图 5(a)。从图 5(a)可以看出,不同土壤初始含水率条件下,垂直方向上土壤含水率随土壤深度的变化均表现出先增大而后减小的趋势;随着土壤初始含水率的增大,湿润体的最大含水率的位置有下移趋势;水分入渗到土壤中后,主要受到基质势和重力势的双重作用进行运移,但就对土壤初始含水率而言,初始含水率越大,基质势的作用越微小,重力势的作用越显著,故而形成随着土壤初始含水率的增大,最大湿润区域下移的现象。在生产实践中,对初始含水率较大的土壤进行灌溉时,为了避免深层渗漏,要适时的减小灌水器的埋深。同一土壤深度,土壤初始含水率越大,相应的水分含量则越大,以土壤深度 50 cm 而言,土壤初始含水率 4.13%, 7.21%, 8.77%, 11.06% 和 14.01% 条件下,土壤含水率依次为: 23.85%, 27.19%, 28.30%, 29.13% 和 30.85%, 以初始含水率 4.13% 为基准,增幅依次为 14.00%, 18.66%, 22.14% 和 29.35%, 主要是因为随着土壤初始含水率的增大,相应的土壤缺水率越小,导水率越大的缘故。

图 5(b)为土壤初始含水率 4.13%,不同时间条件下,距灌水器水平 20 cm 处垂向土壤水分分布变化曲线图。从图 5(b)可以看出,随着再分布的进行,湿

润体内水分进行着再分配,湿润体内最大含水率位置逐渐下移,湿润体体积变大。灌水结束、再分布 1 天和再分布 3 天条件下,湿润体内最大含水率位置依次为 40, 60, 70 cm; 随着再分布的进行,土壤深度 10—20 cm 和 70—90 cm 范围内的土壤水分均有不同程度的增加,而 30—60 cm 土壤范围内的水分含量均呈现出减小的现象。土壤深度 10 cm 处,灌水结束、再分布 1 天和再分布 3 天,土壤中含水率为 5.93%, 8.46% 和 9.27%, 以灌水结束为基准,则增幅依次为 42.66% 和 56.32%; 土壤深度 80 cm 处,灌水结束、再分布 1 天和再分布 3 天条件下,含水率为 8.34%, 16.17% 和 17.23%, 以灌水结束为基准,则增幅依次为 93.88% 和 106.59%; 土壤深度 40 cm, 灌施结束、再分布 1, 3 天, 土壤含水率依次为 23.54%, 17.48% 和 15.38%, 减幅依次为 25.74% 和 12.01%。灌水结束直至再分布 1 天期间,湿润体内水分分布的变化较为剧烈。采用克里斯琴森均匀系数  $C_u$  分别对灌水结束、再分布 1 天及 3 天条件下,湿润体内水分分布均匀度进行评价,均匀度依次为 61.99%, 74.27% 和 83.60%。可见随着土壤水分再分布的持续进行,湿润体内水分分布越加均匀,土壤深度 30—60 cm 范围的高含水率区域向四周低含水率范围迁移,进行着脱

水过程,反之,土壤深度10—20 cm和70—90 cm区

域经历着吸水过程。

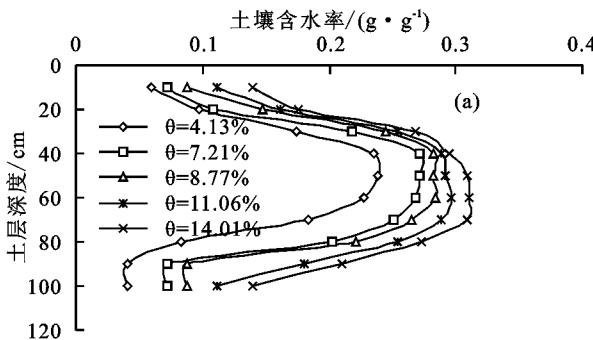


图5 不同土壤初始含水率和再分布时间对湿润体内水分分布的影响

#### 2.4 初始含水率对湿润体内铵态氮分布的影响

图6为不同初始含水率条件下,湿润体垂直剖面铵态氮含量等值线图。从图6可以看出,距离灌水器出水孔越远,等值线越密集,梯度越大。各个初始含水率条件下,铵态氮含量分布区域基本一致,没有明显差别,均集中在土壤深度20—40 cm范围内,高铵态氮含量区域均位于土壤深度30—40 cm区域,且分布范围相差无几。在土壤深度40—50 cm范围内,随着土壤初始含水率的增大,同一节点处的铵态氮含量相应的较大。就垂直方向而言,各个初始含水率条件下的铵态氮主要分布在灌水器出水孔附近土壤区域,基本为土层深度30—40,40 cm以下等值线骤然变得密集,相应的铵态氮含量骤然

减小。对比图4湿润体内垂直剖面含水率等值线分布图,可以看出铵态氮的分布区域与水分分布相差较大,这也表明了铵态氮不易随水分迁移,与“盐随水去”一般的溶质迁移规律不相符。对于水平方向而言,铵态氮在垂直剖面的水平方向的分布与深度方向相类似,铵态氮主要分布在距离灌水器0—10 cm范围内,随着土壤初始含水率的增大,水平分布区域有相应的增大,不过亦不明显。这主要是因为入渗到土壤中的铵根离子带正电荷,被带负电荷的土壤胶体大量的吸附,大大减少了土壤溶液中铵态氮的含量,故而使以对流—弥散机理进行迁移的铵态氮的含量大大减少,基于此种前提,大大限制了土壤中铵态氮的迁移范围。

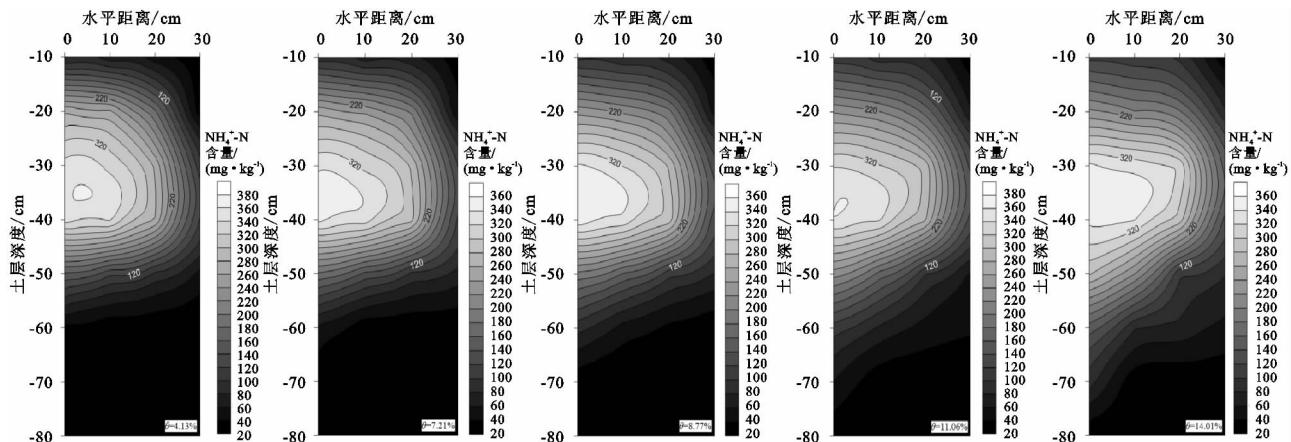


图6 湿润体垂直剖面铵态氮分布等值线

图7(a)为在不同初始含水率下,灌水器位置处湿润体内铵态氮质量分数随土层深度的变化曲线。从图7(a)可以看出,各初始含水率条件下,湿润体内铵态氮的最值范围多位于30—40 cm土层,且各条件下铵态氮的最值基本相同。在40 cm土层以下,湿润体内铵态氮质量分数明显减少。10—40 cm土层范围内,各土壤初始含水率条件下铵态氮含量分布曲线较为接近,而50—70 cm土层内,土壤初始含水率对湿润体内铵态氮的分布影响较为显著。50 cm土层处,土壤初始含水率为4.13%, 7.21%, 8.77%, 11.06%和14.01%条件下,铵态氮含量依次为156.56, 176.11, 193.49, 229.12, 283.01 mg/kg,增幅依次为12.48%,

9.87%, 18.41%和23.52%。同一土层深度位置,土壤初始含水率越大,相应的铵态氮含量越大。土壤深度80 cm虽然有水分到达,但试验观测到该位置的铵态氮含量与土壤初始值基本相同。

图7(b)为土壤初始含水率8.77%条件下,随土壤水分再分布的进行,距灌水器水平10 cm处土层中铵态氮含量随土层深度变化曲线。从图7(b)可以看出,随土壤水分再分布的进行,湿润体内铵态氮含量逐渐减小,10—40 cm土层范围内的变化尤为显著;以30 cm土层为例,灌水结束、再分布3,5,10天和再分布15天条件下,该节点处铵态氮含量依次为319.26, 284.67, 224.18, 144.26, 68.28 mg/kg,以灌水结束为基

准,则减幅依次为 10.83%, 29.78%, 54.81% 和 78.61%。在图 7(b)还可看出,即使是在不同的观测时间下,湿润体内铵态氮的分布区域基本没有变化。随着土壤水分再分布的进行,湿润体内水分分布更加均匀,一

定程度上增加了土壤中氧气含量,越接近土壤表层,土壤通气性越好,促进了铵态氮的硝化反应,加之铵态氮的挥发损失,从而造成随着再分布的进行,湿润体内铵态氮逐渐减小的现象。

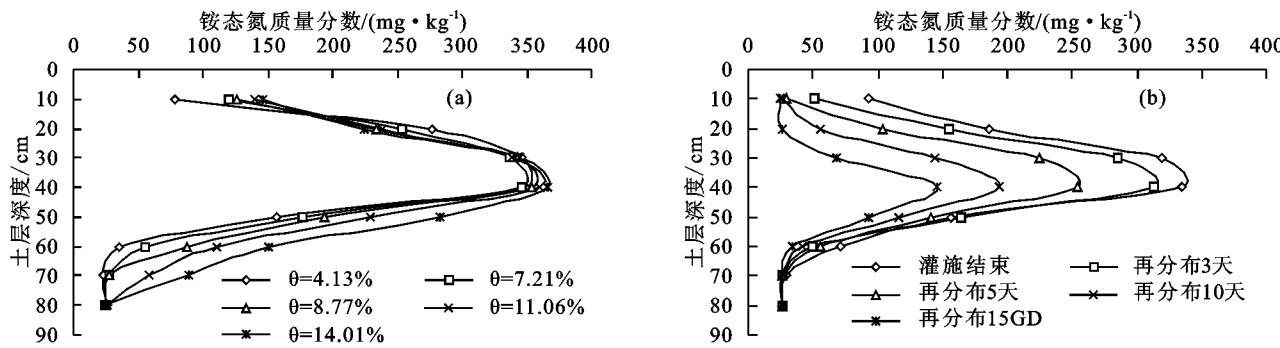


图 7 不同土壤初始含水率及再分布时间条件下铵态氮变化曲线

通过以上分析可以看出,在涌泉根灌水肥一体化灌溉模式下,入渗到土壤中的铵态氮溶质基本不会随水分运移,更不会均匀的分布于湿润体内的各个节点,而是大量的聚集于灌水器出水孔附近土壤区域内。故而造成此区域的铵态氮浓度过高,进而容易氨化而造成挥发损失,又由于此区域的铵态氮浓度太高,还可能会对果树根系产生损伤。故在实际应用中,要引起重视并对其采取一定的措施。

## 2.5 初始含水率对湿润体内硝态氮分布的影响

图 8 为灌水结束时刻,在不同初始含水率条件下湿润体垂直剖面硝态氮含量等值线图。从图 8 可以看出,各土壤初始含水率下的等值线分布图均表现出距离灌水器出水孔越远,等值线越密集的现象。在同一水平位置处,土壤中硝态氮质量分数随土层深度呈现出先增大后减小的趋势;在同一土层深度,硝态氮含量随水平距离的增大而逐渐减小。高硝态氮量分布区域均位于灌水器出水孔附近,这一特性与铵态氮

在湿润体内分布特点一致。土壤初始含水率越大,相应的湿润体内硝态氮的分布范围越广泛。相对于非饱和土壤而言,土壤初始含水率决定了不同的导水率,土壤初始含水率越大,导水率越大,入渗到土壤中的水分运移距离越远,加之硝态氮易随水分运移的特性,形成了土壤初始含水率越大,湿润体内硝态氮分布范围越宽泛的现象。

通过对比水分在垂直剖面的分布特性(图 4)可以发现,硝态氮溶质在土壤中的迁移受到水分的运移影响较为显著,只要是湿润体范围内,硝态氮的含量均呈现出不同程度的增加,而且硝态氮在湿润体内的分布区域与水分亦相似,在一定程度上说明了硝态氮在土壤中的运移特性与水分相似。这主要是因为带负电荷的硝酸根离子对同样带负电荷的土壤胶体之间产生排斥作用,不易被土壤胶体所吸附,故而在对流作用下形成了和湿润体内水分分布相似的特性。

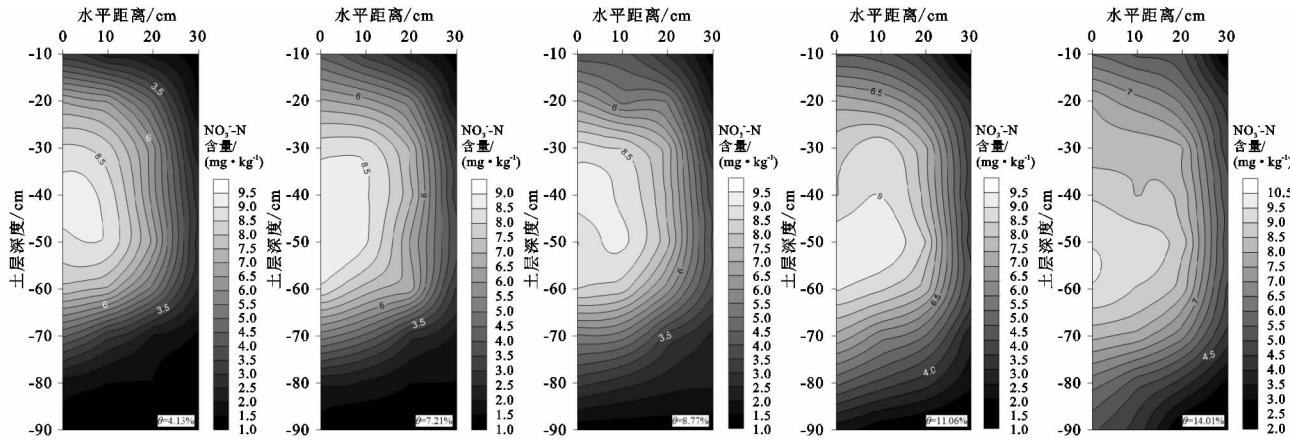


图 8 不同土壤初始含水率下湿润体内垂直剖面硝态氮含量分布等值线

为了更加直观的对比土壤初始含水率对湿润体内硝态氮分布的影响,选取灌水器位置处和距灌水器水平 30 cm 垂向硝态氮含量随土壤深度的变化曲线

进行说明,见图 9。在灌水器位置处(图 9(a)),不同初始含水率条件下,硝态氮含量均随着土壤深度的加深而呈现出先增大后减小的变化趋势。在灌水器位

置处硝态氮质量分数的最大值差异不大,随着土壤初始含水率的增加,土壤中的硝态氮的最大值区域略有下移。在土层深度60 cm以下,可以看出土壤初始含水率越大,硝态氮运移距离越远,在同一土层下,硝态氮的质量分数随着土壤初始含水率的增大而增大,在土层深度20 cm以上亦表现出此规律,只是较土层深度60 cm以下范围不明显。土层深度10 cm处,初始含水率4.13%,7.21%,8.77%,11.06%和14.01%条件下土壤中硝态氮含量依次为3.16,4.34,4.21,4.91,5.96 mg/kg,以土壤初始含水率4.13%为基准,增幅依次为37.34%,33.23%,55.38%和88.61%;而土层深度70 cm处,硝态氮含量依次为6.58,7.24,7.89,8.67,9.16 mg/kg,同样以土壤初始含水率4.13%为基准,增幅依次为10.03%,19.91%,31.76%和39.21%。图9(b)可以更加清楚的体现出在距离灌水器水平较远位置处,土壤初始含水率对湿润体内硝态氮分布的影响。

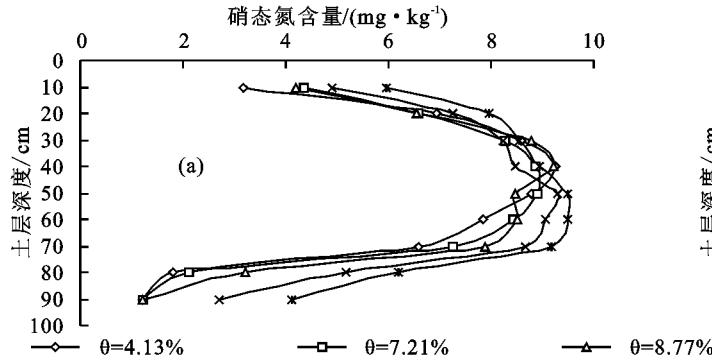
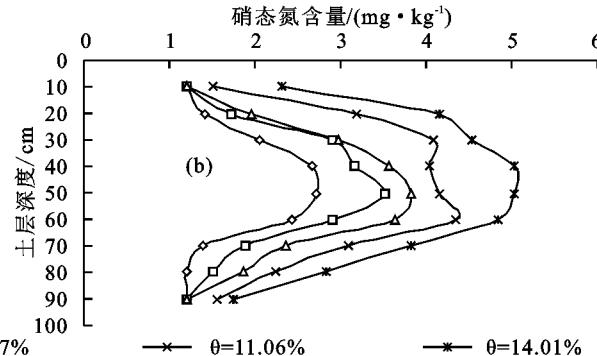


图9 土壤初始含水率对不同土层硝态氮量的影响曲线

图10为土壤初始含水率11.06%条件下,随着土壤水分再分布的进行距灌水器水平20 cm处土壤中硝态氮含量随土层深度变化曲线。从图10可以看出,在灌施结束至再分布1天期间,土层深度20—60 cm范围内,湿润体内硝态氮均有不同程度的减少;而土层深度60 cm以下及20 cm以上土壤区域硝态氮均表现出不同程度的增加。这主要是因为带负电荷的硝酸根离子与同样带负电荷的土壤胶体之间存在排斥,造成硝酸根离子极易随土壤水分进行运移,且在灌施结束时刻,灌水器出水孔附近土壤中硝态氮溶液的浓度较高,在较高的浓度梯度下,硝态氮以分子扩散的方式进行迁移;加之以对流作用在重力势等作用下随水分进行重新分配,造成再分布1天湿润体内硝态氮的分布较灌施结束时刻更加的均匀。再分布1天到再分布15天期间,湿润体内硝态氮含量均呈现出不同程度的增加现象。再分布15天较再分布10天而言,土层深度60—90 cm呈现出不同程度的减小,而土层深度10—60 cm范围表现出不同程度的增大,越靠近土壤表层,硝态氮增加幅度越大。这主

影响。从图9(b)可以看出,在距灌水器水平30 cm处,土壤初始含水率对湿润体内硝态氮的分布影响较为显著。各土壤初始含水率条件下,硝态氮含量均随着土层深度的加深呈现出先增大后减小的趋势。同一土层深度,湿润体内硝态氮质量分数随着土壤初始含水率的增大而增大。土层深度40 cm处,土壤初始含水率4.13%,7.21%,8.77%,11.06%和14.01%条件下土壤中硝态氮含量依次为2.67,3.16,3.57,4.03,5.04 mg/kg,以土壤初始含水率4.13%为基准,增幅依次为18.35%,33.71%,50.94%和88.76%。随着土壤初始含水率的增大,则相应的土壤缺水率就越小,导水率越大;加之带负电荷的土壤胶体对同样带负电荷的硝酸根离子相互排斥,易于随水分进行对流迁移,故而形成土壤初始含水率越大,湿润体体积越大,且在远离灌水器的一定湿润体区域内硝态氮含量随着土壤初始含水率的增大而增大。



要是因为土壤初始含水率较高,天然地创造了嫌气条件,土层深度越深,通气性越差,则硝态氮的反硝化作用越强烈,铵态氮硝化作用越微弱,故而造成越土层深度越深,硝态氮含量减小幅度越大的现象。

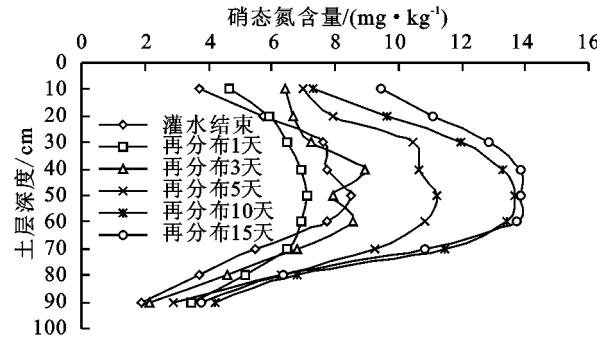


图10 距灌水器水平20 cm垂向土壤硝态氮再分布曲线( $\theta=11.06\%$ )

### 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,累积入渗量随着土壤初始含水率的增大而减小。土壤初始含水率越大,入渗系数K越小,入渗指数 $\alpha$ 越大;建立了入渗时间、入渗参数与土

壤初始含水率的关系和累积入渗量经验模型。

(2)各向湿润锋的运移距离均与入渗时间具有较好的幂函数关系;在同一入渗时间条件下,各向湿润锋的运移距离均随着土壤初始含水率的增大而增大;土壤初始含水率越大,湿润体内同一节点处水分含量也越大,水分分布均匀性越高;建立了以各向湿润锋运移距离为因变量,入渗时间和土壤初始含水率为自变量的湿润锋运移距离经验模型,经验证该模型具有较高的可靠性。

(3)灌施结束时刻,湿润体内铵态氮分布区域主要集中在灌水器出水孔附近土壤中;土壤初始含水率越大,铵态氮的分布范围相对越大。随着土壤水分再分布的进行,湿润体内铵态氮含量逐渐减小,铵态氮分布区域基本不受再分布时间的影响。

(4)湿润体内硝态氮分布特性与水分相似;在距离涌泉根灌灌水器出水孔较远位置,土壤初始含水率越大,湿润体内同一节点处硝态氮质量分数越大。湿润体内硝态氮质量分数在再分布 1 天之内,最大值减小,分布范围变大;再分布 1 天直至再分布 15 天,湿润体内硝态氮质量分数均呈现出不同程度的增加;越接近土壤表层,硝态氮变化趋势越明显。

#### 参考文献:

- [1] 吴普特,朱德兰,汪有科.涌泉根灌技术研究与应用[J].排灌机械工程学报,2010,28(4):354-357,368.
- [2] 汪有科,黎朋红,马理辉,等.涌泉根灌在黄土坡地的水分运移规律试验[J].排灌机械工程学报,2010,28(5):449-454.
- [3] 费良军,曹俊,聂卫波.涌泉根灌土壤湿润体特性试验[J].排灌机械工程学报,2011,29(3):260-265.
- [4] 黎朋红,汪有科,马理辉,等.涌泉根灌湿润体特征值变

(上接第 98 页)

- [16] 秦倩,王金满,王洪丹,等.采煤塌陷地不同充填介质水力特性对比研究[J].中国煤炭,2015,41(2):114-119.
- [17] 王曦,严家平,喻怀君,等.矿区充填复垦地煤矸石层水分竖直上移特征试验研究[J].煤炭工程,2013,45(11):99-101.
- [18] 陈胜华,胡振琪,陈星彤,等.煤矸石山酸化的内外因分析及防治措施[J].煤炭科学技术,2007,35(2):94-96.
- [19] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity

化规律研究[J].水土保持学报,2009,23(6):190-194.

- [5] 吴恒卿,黄强,魏群.涌泉根灌双点源交汇入渗湿润体试验研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(5):201-207.
- [6] 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.
- [7] 张智韬,吴普特,陈俊英,等.涌泉根灌土壤湿润体运移模型[J].排灌机械工程学报,2013,31(2):173-179.
- [8] 费良军,傅渝亮,何振嘉,等.涌泉根灌肥液入渗水氮运移特性研究[J].农业机械学报,2015,46(6):121-129.
- [9] 刘显,费良军,刘扬,等.肥液浓度对涌泉根灌土壤水氮运移特性的影响[J].水土保持学报,2016,30(5):166-170.
- [10] 刘显,费良军,王博,等.灌水器埋深对涌泉根灌土壤水氮运移特性的影响[J].灌溉排水学报,2016,35(9):20-25.
- [11] 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):76-79.
- [12] 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.
- [13] Liu H, Lei T W, Zhao J, et al. Effects of rainfall intensity and antecedent soil water content on soil infiltration under rainfall conditions using the run off-on-out method[J]. Journal of Hydrology, 2011, 396(1): 24-32.
- [14] 吴忠东,王全九.不同初始含水率条件下的微咸水入渗实验[J].农业机械学报,2010(增刊 1):53-58.
- [15] Zhang G S, Chan K Y, Oates A, et al. Relationship between soil structure and runoff/soil loss after 24 years of conservation tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 92(1):122-128.
- [16] 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.

of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. Nature, 2006, 440(7081):165-173.

- [20] 张英俊,王云琦,张会兰,等.缙云山针阔混交林土壤呼吸速率对降水输入量变化的响应[J].水土保持学报,2017,31(1):134-139.
- [21] 王伟,张洪江,张成梁,等.煤矸石山植被恢复影响因子初探:以山西省阳泉市 280 煤矸石山为例[J].水土保持通报,2008,28(2):147-152.