

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.025

# 土壤容重对涌泉根灌土壤水氮运移特性的影响

费良军 刘显 王佳 曾健 杨扬

(西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

**摘要:** 在室内通过人工配置不同水平土壤容重(1.35、1.40、1.45、1.50 g/cm<sup>3</sup>),用土箱进行水肥入渗模拟试验,研究土壤容重对累积入渗量、湿润锋运移、土壤水分以及铵态氮和硝态氮运移的影响,建立以土壤容重和入渗时间为自变量,累积入渗量和各向湿润锋运移距离为因变量的经验模型。结果表明:土壤容重对累积入渗量、各向湿润锋运移距离及湿润体内水分和氮素的分布、转化均具有较为显著的影响。随着土壤容重的减小,累积入渗量、湿润锋运移距离、湿润体内水分、铵态氮及硝态氮含量均呈增大趋势。入渗系数  $K$  随着土壤容重的增大而减小,入渗指数  $\alpha$  随着土壤容重的增大而增大;在同一时刻,湿润体内铵态氮和硝态氮含量的平均值、变化量及转化率均随着土壤容重的增大而增大。距离灌水器越近,铵态氮、硝态氮含量越高;湿润体内铵态氮分布主要集中在灌水器附近,随着再分布进行,湿润体内铵态氮含量、转化率逐渐减小,转化量逐渐增加。灌水结束、再分布 3、5、10、15、20 d 条件下,以灌水结束时刻为基准,铵态氮含量降幅依次为 2.34%、11.41%、34.22%、59.06% 和 73.75%。湿润体内硝态氮分布区域与水分分布相似,随着再分布进行,湿润体内硝态氮含量、转化量逐渐增大,再分布 15 d 达到最大值;而转化率呈现出先增大后减小的趋势,再分布 10 d 转化率达到最大值。灌水结束、再分布 3、5、10、15、20 d 条件下,以灌水结束时刻为基准,湿润体内硝态氮含量依次增加 0.76%、60.12%、156.95%、204.68% 和 180.51%。土壤容重对涌泉根灌土壤水分和氮素运移、分布及其转化的影响均较为显著。

**关键词:** 涌泉根灌; 土壤容重; 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: 1000-1298(2017)08-0219-10

## Effects of Soil Bulk Density on Transport Characteristics of Water and Nitrogen under Bubbled-root Irrigation

FEI Liangjun LIU Xian WANG Jia ZENG Jian YANG Yang

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

**Abstract:** The different soil bulk density levels (1.35 g/cm<sup>3</sup>, 1.40 g/cm<sup>3</sup>, 1.45 g/cm<sup>3</sup> and 1.50 g/cm<sup>3</sup>) were constructed by indoor manual configuration. The experiment of water and fertilizer infiltration was carried out in the soil bin. The effects of soil bulk density on cumulative infiltration, wetting front migration, soil moisture, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N transport were investigated. An empirical model was created, in which the cumulative infiltration amount and the wetting front migration distance were the dependent variables, and the bulk density and infiltration time were independent variables. Results showed that the soil bulk density had a significant effect on the cumulative infiltration, the migration distance of wetting front and the distribution and transformation of moisture and nitrogen in the soil. With the decrease of soil bulk density, the cumulative infiltration, wetting front migration, moisture in the body, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N contents showed an increasing trend. The greater the soil bulk density was, the smaller the infiltration coefficient  $K$  became. The greater the soil bulk density was, the greater the infiltration index  $\alpha$  became. At the same time, the average value, the change amount and the conversion rates of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N in wetted body were increased with the increase of soil bulk density. The closer the distance to the emitter was, the higher the contents of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N became. The distribution of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N in the moist body was mostly concentrated in the vicinity of the emitter. With the

收稿日期: 2016-12-10 修回日期: 2017-01-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400204)、国家自然科学基金项目(51279157、51479161)和公益性行业(农业)科研专项(201203003)

作者简介: 费良军(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论和农业水资源利用研究,E-mail: feiliangjun2008@163.com

redistribution, the content of  $\text{NH}_4^+$ -N in the wetted soil and the conversion rate were decreased gradually, and the transformation amount was increased gradually. After the redistribution for 3 d, 5 d, 10 d, 15 d and 20 d, with the end of irrigation time as the benchmark, the decline order was 2.34%, 11.41%, 34.22%, 59.06% and 73.75%, respectively. The distributions of  $\text{NO}_3^-$ -N in the soil were similar to water. After the redistribution for 3 d, 5 d, 10 d, 15 d and 20 d, with the end of irrigation time as the benchmark, the  $\text{NO}_3^-$ -N content increase order was 0.76%, 60.12%, 156.95%, 204.68% and 180.51%, respectively. The soil bulk density had a significant effect on the distribution and transformation of moisture and nitrogen in the soil.

**Key words:** bubbled-root irrigation; soil bulk density; redistribution; models; nitrogen migration

## 引言

涌泉根灌作为一种新型地下渗灌技术,其原理是通过微管把水肥溶液直接运送到果树根区,进行地下局部灌溉,减小蒸发损失、杂草生长及水肥在地表的积聚,又由于有水流过渡保护器的保护,灌水器不易堵塞,应用前景广阔<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、分布特性进行研究,可为合理确定山地果树灌溉技术参数提供科学依据。

关于涌泉根灌土壤水分方面的研究,国内诸多学者<sup>[2-6]</sup>通过开展室内外试验,探究了涌泉根灌水入渗特性、灌溉技术要素及影响因素等,并取得了重要的研究成果;水肥耦合不仅可以提高水氮的利用效率,同时提高作物产量、品质<sup>[7-12]</sup>。而对于涌泉根灌氮素分布特性方面,仅见到肥液浓度及灌水器埋深对涌泉根灌水分及氮素运移特性的报道<sup>[13-15]</sup>。迄今为止,在涌泉根灌条件下关于土壤容重对土壤氮素的运移分布特性的研究尚未见相关报道。水肥溶液的入渗主要受土壤容重、土壤机械组成、初始含水率及有机物质等影响<sup>[16-17]</sup>,而各影响因素主要通过改变土壤大孔隙率来影响入渗速率,其中土壤容重的变化直接影响土壤大孔隙率的改变。所以土壤容重对涌泉根灌水肥一体化灌溉溶液入渗势必会有较为显著的影响<sup>[18]</sup>。

本文在室内通过涌泉根灌水肥一体化入渗试验,研究土壤容重对涌泉根灌土壤水分及氮素分布的影响,以期为陕北山地涌泉根灌水肥高效利用技术提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验土壤制备

试验于2016年5月在陕西省米脂县西北农林科技大学米脂试验站进行,供试土壤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,土样经自然风干后,进行研磨,过2 mm细筛,用Mastersizer-2000型激光粒度分析仪对土壤进行

粒径分析,粒径为 $0 \text{ mm} < d \leq 0.002 \text{ mm}$ , $0.002 \text{ mm} < d \leq 0.02 \text{ mm}$ , $0.02 \text{ mm} < d \leq 2.0 \text{ mm}$ 的颗粒分别占1.985%、13.386%、84.629%(体积分数),按国际制分类标准判定为砂壤土。

### 1.2 试验装置与试验设计

试验装置主要由马氏瓶和有机玻璃制成尺寸为 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$ (长×宽×高)的试验土箱组成。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用玻璃胶粘贴于土箱一角,开孔率为20%;试验全程采用秒表计时,单位以分钟计算;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:CleverChem2000。试验示意图见图1。

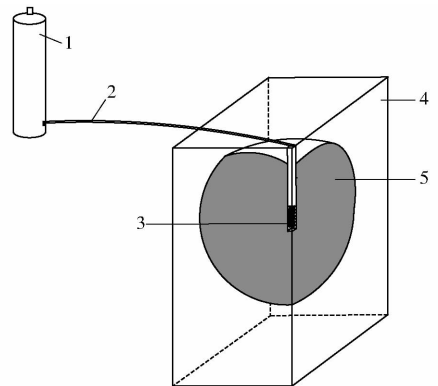


图1 试验示意图

Fig.1 Schematic diagram of experiment

1. 马氏瓶 2. 输水管 3. 模拟灌水器 4. 土箱 5. 湿润体

### 1.3 试验方法与观测内容

试验设定初始流量为1.2 L/h,为了更好地模拟涌泉根灌灌水器,在试验过程中,使套筒内的积水深度最大维持在20 cm(涌泉根灌灌水器高度)。灌水时间420 min,肥液质量浓度为60 g/L,设定4种土壤容重梯度,分别为1.35、1.40、1.45、1.50  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,每组试验重复进行3次,取其平均值进行分析。

模拟灌水器出水孔外侧包裹两层纱布以避免装填土箱过程中土壤通过灌水器孔洞进入套筒。灌水器埋深设置为35 cm。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

距离灌水器水平 0、10、20、30 cm, 垂直深度 0 ~ 100 cm 范围内每隔 10 cm 用土钻取土。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤容重对涌泉根灌肥液入渗能力的影响

通过涌泉根灌 4 种土壤容重( $\gamma$ ) 条件下水肥入渗试验数据分析发现, 土壤容重对累积入渗量具有较为显著的影响。图 2 为不同土壤容重条件下, 累积入渗量随入渗时间的变化曲线。可以看出, 随着入渗时间的持续增大, 累积入渗量逐渐增大; 同一入渗时刻, 土壤容重越小, 累积入渗量越大。分析其原因, 主要是随着土壤容重的增加, 土壤大孔隙变少, 土壤团粒结构被破坏, 土壤结构变得更加密实, 影响了土壤间气相比比例, 从而造成累积入渗量随着土壤容重增大而减小的现象。

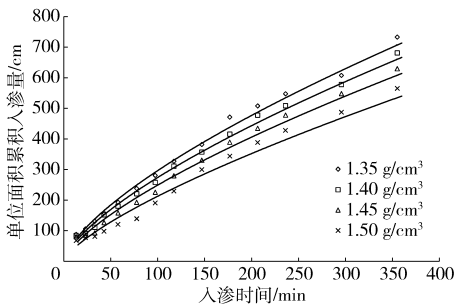


图 2 累积入渗量曲线

Fig. 2 Cumulative infiltration curves

经分析, 涌泉根灌水肥一体化条件下累积入渗量与入渗时间之间符合 Kostiakov 模型, 即

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

式中  $I(t)$ ——随时间变化的累积入渗量, cm

$K$ ——入渗系数, cm/min

$\alpha$ ——入渗指数  $t$ ——入渗时间, min

对图 2 中的实测数据用 Kostiakov 模型进行拟合, 得到:

$$\gamma = 1.35 \text{ g/cm}^3 \text{ 时}$$

$$I(t) = 12.669 4t^{0.684 8} \quad (R^2 = 0.992 6) \quad (2)$$

$$\gamma = 1.40 \text{ g/cm}^3 \text{ 时}$$

$$I(t) = 11.276 6t^{0.693 1} \quad (R^2 = 0.987 6) \quad (3)$$

$$\gamma = 1.45 \text{ g/cm}^3 \text{ 时}$$

$$I(t) = 9.752 9t^{0.703 8} \quad (R^2 = 0.977 4) \quad (4)$$

$$\gamma = 1.50 \text{ g/cm}^3 \text{ 时}$$

$$I(t) = 7.473 3t^{0.727 3} \quad (R^2 = 0.963 9) \quad (5)$$

各土壤容重条件下, 涌泉根灌自由入渗累积入渗量与入渗时间拟合结果中, 决定系数  $R^2$  均大于 0.96, 大于临界相关系数  $r_a$  (0.641), 表明按照 Kostiakov 建立的入渗模型可以很好地描述涌泉根灌自由入渗累积入渗量与入渗时间的关系。通过进一步分析入渗系数  $K$ 、入渗指数  $\alpha$  与土壤容重的关系, 得到

$$K = -34.158 0\gamma + 58.963 9 \quad (R^2 = 0.985 3) \quad (6)$$

$$\alpha = 0.278 0\gamma + 0.305 6 \quad (R^2 = 0.937 2) \quad (7)$$

将式(6)、(7)代入式(1)得到涌泉根灌水肥一体化灌溉条件下, 累积入渗量与土壤容重和入渗时间的关系模型

$$I(t, \gamma) = (-34.158 0\gamma + 58.963 9)t^{0.278 0\gamma + 0.305 6} \quad (8)$$

为检验模型(8)的可靠性, 配置土壤容重为  $1.37 \text{ g/cm}^3$  的土样, 按照同样的标准进行试验, 选取 9 个时间点进行分析, 将其实测值和模型拟合值进行对比分析, 结果见表 1。

表 1 累积入渗量实测值与模型拟合值

Tab. 1 Measured and model fitted values of cumulative infiltration

参数	入渗时间/min								
	25	45	80	120	180	210	240	300	360
实测值/cm	102.00	156.50	236.74	346.50	454.56	501.36	537.40	601.28	721.30
拟合值/cm	110.87	165.98	246.37	325.44	429.89	477.87	523.74	610.44	691.83
相对误差/%	8.70	6.06	4.07	-6.08	-5.43	-4.69	-2.54	1.52	-4.09

由表 1 可知, 累积入渗量实测值和模型拟合值相对误差均在  $\pm 9\%$  范围以内, 说明式(8)对涌泉根灌水肥一体化条件下累积入渗量的预测精度符合要求。

### 2.2 土壤容重对各向湿润锋运移特性的影响

图 3 为在不同土壤容重条件下, 水平湿润锋、竖直向下湿润锋和竖直向上湿润锋运移距离随入渗时间的变化曲线。由图 3 中可以看出, 各向湿润锋均

随着入渗时间的增加而增大, 且同一时刻, 容重越小, 湿润锋运移距离越大。在入渗前 60 min 内, 各容重条件下湿润锋运移距离差异不显著, 随着入渗继续进行, 各容重条件下的湿润锋运移距离差异逐渐显著, 湿润锋运移曲线最后趋于平缓。这主要是因为随着土壤容重的增大, 土壤越密实, 孔隙度减小, 水分入渗通道受到阻塞增大所致。

对不同容重条件下各向湿润锋运移距离随入渗

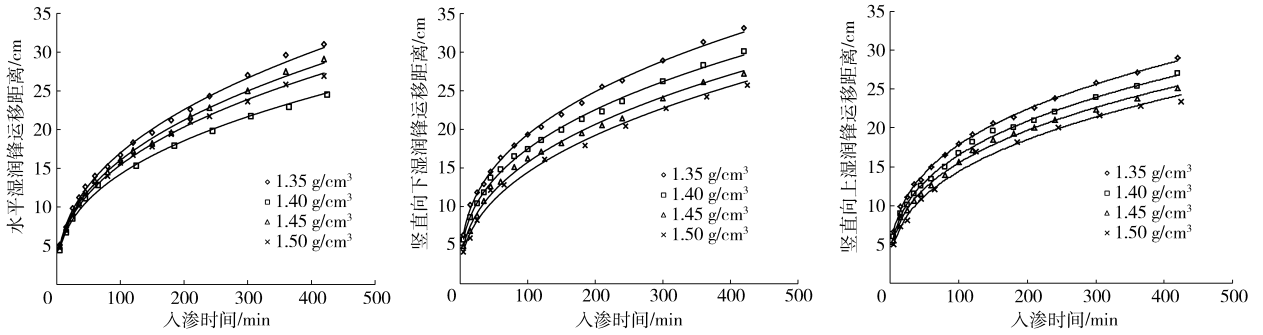


图3 不同土壤容重条件下各向湿润锋运移特性曲线

Fig. 3 Characteristic curves of anisotropic wetting front migration under different soil bulk densities

时间的变化曲线进行分析,发现各向湿润锋运移距离与入渗时间具有较好的幂函数关系,设

$$R(t) = at^b \quad (9)$$

$$H(t) = ct^d \quad (10)$$

$$L(t) = et^f \quad (11)$$

式中  $R(t)$ ——水平湿润锋运移距离,cm

$H(t)$ ——竖直向下湿润锋运移距离,cm

$L(t)$ ——竖直向上湿润锋运移距离,cm

$a, b, c, d, e, f$ ——拟合参数

通过式(5)对图3中各向湿润锋运移距离的实测值进行拟合,结果如表2所示。

表2 不同土壤容重条件下各向湿润锋运移距离与入渗时间关系拟合结果

Tab. 2 Fitting results of wetting front migration distance and infiltration time under different soil bulk densities

参数	土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )				
	1.35	1.40	1.45	1.50	
水平湿润锋	$a$	2.573 9	2.508 9	2.471 5	2.455 3
	$b$	0.409 8	0.402 9	0.397 7	0.381 7
	$R^2$	0.997 9	0.997 7	0.998 5	0.997 0
竖直向下湿润锋	$c$	3.611 5	3.199 4	2.587 7	2.147 6
	$d$	0.364 2	0.368 5	0.391 9	0.413 6
	$R^2$	0.997 9	0.997 9	0.992 7	0.988 8
竖直向上湿润锋	$e$	3.897 8	3.475 5	3.170 2	2.728 4
	$f$	0.330 2	0.338 2	0.344 6	0.361 2
	$R^2$	0.998 6	0.997 4	0.996 4	0.994 8

取显著性水平0.01,通过表2可以看出决定系数 $R^2$ 均远大于临界相关系数 $r_a$ (0.623),说明不同土壤容重条件下各向湿润锋运移距离与入渗时间之间具有很好的幂函数关系。参数 $a, b, c, d, e, f$ 随着土壤容重变化呈单一的变化趋势,经分析其与土壤容重具有较好的线性关系,拟合结果为:

(1)水平湿润锋

$$a = 3.623\ 0 - 0.786\ 4\gamma \quad (R^2 = 0.928\ 3) \quad (12)$$

$$b = 0.653\ 1 - 0.179\ 0\gamma \quad (R^2 = 0.933\ 5) \quad (13)$$

将相关系数拟合结果代入式(9),得到以入渗

时间和土壤容重为自变量,水平湿润锋运移距离为因变量的数学模型,即

$$R(t, \gamma) = (3.623\ 0 - 0.786\ 4\gamma)t^{0.653\ 1 - 0.179\ 0\gamma} \quad (0\ \text{min} < t \leq 420\ \text{min}, 1.35\ \text{g/cm}^3 \leq \gamma \leq 1.50\ \text{g/cm}^3) \quad (14)$$

(2)竖直向下湿润锋

$$c = 17.146\ 0 - 10.007\ 0\gamma \quad (R^2 = 0.994\ 4) \quad (15)$$

$$d = -0.104\ 5 + 0.343\ 2\gamma \quad (R^2 = 0.938\ 0) \quad (16)$$

将相关系数拟合结果代入式(10),得到以入渗时间和土壤容重为自变量,竖直向下湿润锋运移距离为因变量的数学模型,即

$$H(t, \gamma) = (17.146\ 0 - 10.007\ 0\gamma)t^{-0.104\ 5 + 0.343\ 2\gamma} \quad (0\ \text{min} < t \leq 420\ \text{min}, 1.35\ \text{g/cm}^3 \leq \gamma \leq 1.50\ \text{g/cm}^3) \quad (17)$$

(3)竖直向上湿润锋

$$e = 14.186 - 7.627\gamma \quad (R^2 = 0.995\ 5) \quad (18)$$

$$f = 0.058\ 5 + 0.2\gamma \quad (R^2 = 0.952\ 7) \quad (19)$$

将相关系数拟合结果代入式(11),得到以入渗时间和土壤容重为自变量,竖直向上湿润锋运移距离为因变量的数学模型,即

$$L(t, \gamma) = (14.186 - 7.627\gamma)t^{0.058\ 5 + 0.2\gamma} \quad (0\ \text{min} < t \leq 420\ \text{min}, 1.35\ \text{g/cm}^3 \leq \gamma \leq 1.50\ \text{g/cm}^3) \quad (20)$$

为检验模型(14)、(17)、(20)的可靠性,在土壤容重为1.37 g/cm<sup>3</sup>条件下,选取9个时间点进行分析,将其实测值和模型拟合值进行对比分析,结果见表3。

由表3可知,水平湿润锋、竖直向下湿润锋和竖直向上湿润锋运移距离的实测值和模型拟合值相对偏差均在±6%范围以内,说明用模型(14)、(17)、(20)对涌泉根灌各向湿润锋运移距离进行预测满足精度要求。

### 2.3 土壤容重对湿润体内含水率分布的影响

图4为灌溉施肥结束时刻,不同土壤容重条件下湿润体内垂直剖面含水率等值线分布图。可以看

表 3 各向湿润锋运移的实测值与模型拟合值对比

Tab. 3 Comparison between measured and model fitted values for migration of wetting front

湿润锋参数	入渗时间/min									
	15	25	45	80	120	180	240	360	420	
R	实测值/cm	7.30	10.00	12.10	16.10	18.60	21.60	24.30	28.80	30.30
	拟合值/cm	7.68	9.46	12.03	15.21	17.94	21.17	23.80	28.08	29.90
	相对误差/%	5.24	-5.38	-0.62	-5.55	-3.55	-2.01	-2.05	-2.49	-1.30
H	实测值/cm	9.10	10.70	14.40	16.70	20.00	22.40	25.80	29.20	31.20
	拟合值/cm	9.25	11.15	13.82	17.06	19.79	22.95	25.50	29.57	31.29
	相对误差/%	1.66	4.21	-3.99	2.17	-1.05	2.46	-1.17	1.28	0.28
L	实测值/cm	8.90	10.40	12.80	15.70	18.60	21.60	23.80	27.10	28.60
	拟合值/cm	9.20	10.90	13.25	16.04	18.36	21.01	23.12	26.45	27.85
	相对误差/%	3.32	4.79	3.52	2.19	-1.30	-2.74	-2.87	-2.38	-2.64

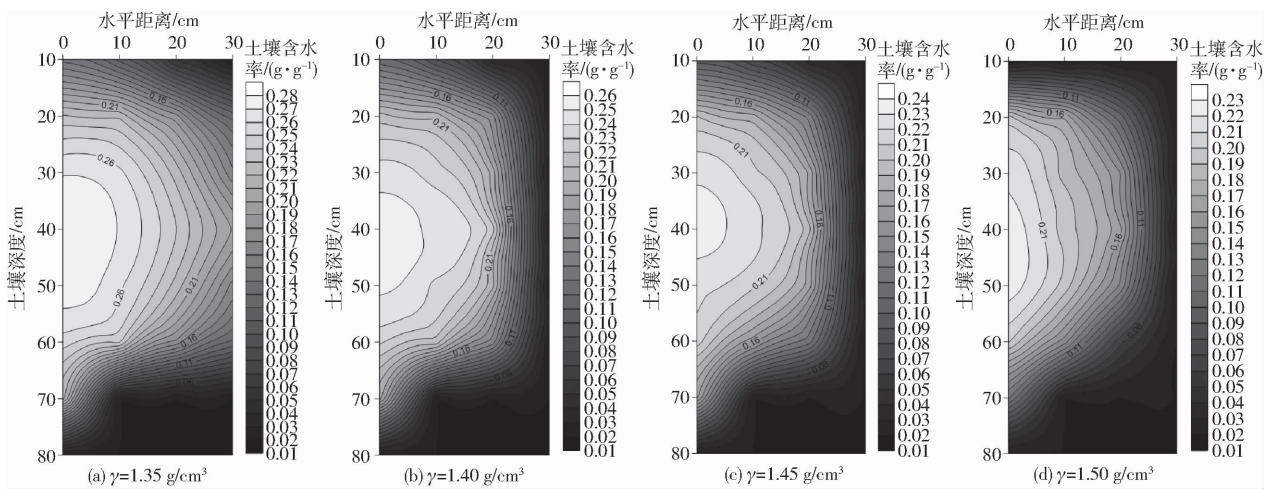


图 4 不同土壤容重条件下湿润体内垂直剖面含水率等值线分布图

Fig. 4 Contour maps of soil water content distribution in vertical profile under different soil bulk densities

出,不同容重条件下的湿润体等值线均呈半椭圆形,距离灌水器位置越远,含水率越小,等值线分布越密集,水势梯度也越大;容重越小,高含水率区域越大,湿润体内同一节点处的含水率也越大。

为更加具体地分析土壤容重对湿润体内土壤含水率分布的影响,取距灌水器水平 10 cm 处垂向土壤含水率分布情况进行分析,如图 5a 所示。可以看出,不同容重条件下土壤含水率分布差异较大,垂向土壤含水率的变化均呈现出先增大后减小的趋势,容重 1.35、1.40、1.45 g/cm<sup>3</sup> 条件下土壤水分主要集中在土壤深度 20~60 cm 范围内,而 1.50 g/cm<sup>3</sup> 条件下土壤水分主要集中在 20~50 cm 范围内。随着土壤容重的减小,同一深度处土壤含水率增大,以土壤深度 30 cm 为例,容重 1.35、1.40、1.45、1.50 g/cm<sup>3</sup> 的含水率依次为 0.26、0.23、0.21、0.18 g/g,以容重 1.35 g/cm<sup>3</sup> 为基准,减幅依次为 11.54%、19.23%、30.77%。这主要是因为随着土壤容重的增大,土壤密实度增大,土壤孔隙度变小,同一时间入渗到土壤中的水分就越少。该结果也体现出土壤容重对涌泉根灌水肥入渗湿润体内水分分布影响的显著性,因

此在对作物进行灌溉时,对容重较大的土壤进行适时疏松有助于土壤水分的入渗并提高土壤中的含水率。

图 5b 为土壤容重 1.35 g/cm<sup>3</sup>,不同时间条件下,距灌水器水平 20 cm 处土壤含水率变化曲线。从图中可以看到,随着再分布的进行,土壤含水率分布发生变化,湿润体内最大含水率位置有下移趋势。灌溉施肥结束、再分布 1 d 和 3 d,最大含水率位置依次为 40、50、60 cm;土壤深度 10、60、70 cm 处土壤含水率随着再分布的进行,逐渐增大;而 20~50 cm 土壤深度范围内,随着再分布进行,湿润体内含水率呈减小趋势。土壤深度 10 cm 处,随着再分布进行,其含水率依次为 0.06、0.10、0.13 g/g,以灌水结束时刻为基准,再分布 1 d 和 3 d 含水率增幅分别为 66.66% 和 116.67%;土壤深度 70 cm 处,随着再分布进行,土壤中含水率依次为 0.02、0.08、0.15 g/g,同样以灌水结束时刻土壤含水率为基准,再分布阶段土壤含水率增幅分别为 300% 和 650%。造成上述现象的原因主要是:灌水结束后,湿润体内水分在重力势、基质势和溶质势等作用下继续向四

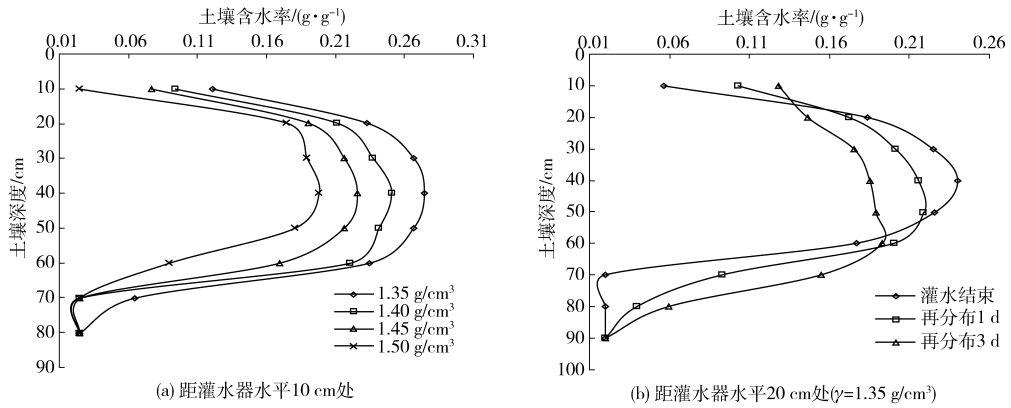


图5 不同土壤容重和再分布时间对湿润体内水分分布的影响

Fig. 5 Effects of different soil bulk densities and redistribution times on distribution of moisture in wet body

周运移;高含水率区域经历着脱水过程,而土壤深度10~20 cm及60~80 cm范围进行着吸水过程。

#### 2.4 土壤容重对湿润体内铵态氮分布的影响

不同土壤容重条件下,灌水器出水孔附近土壤中铵态氮含量最高,主要集中在30~40 cm范围内,如图6a所示。同一深度处,随着土壤容重的增大,铵态氮含量变小。容重1.35、1.40、1.45、1.50 g/cm<sup>3</sup>条件下,铵态氮量峰值依次为359.47、301.56、239.16、210.89 mg/kg,以容重1.35 g/cm<sup>3</sup>为基准,降幅依次为16.11%、33.47%、41.33%。水肥一体化条件下,铵态氮在土壤中运移较为复杂,土壤胶体对其具有吸附、离子交换及解析等作用<sup>[19]</sup>。带负电荷的土壤胶体将带正电荷的铵根离子吸附,致使入渗到土壤中的水肥溶液中的铵态氮含量快速减少,即以扩散机理为主要迁移途径的铵态氮减少<sup>[19]</sup>,铵态氮在土壤中的运移受到阻碍。只有当土壤胶体对带正电荷的铵根离子吸附量足够大时(即饱和状态),铵根离子才会依附于水流进行运移,所以形成湿润体内铵态氮分布集中的现象。土壤容重越大,土壤相对越密实,大孔隙越少,导致相同时间条件下入渗到土壤中肥液量减小,进而使在同一节点处,出现铵态氮含量随着土壤容重增大而减小的现象。

图6b为土壤容重1.40 g/cm<sup>3</sup>条件下,灌水器垂直深度土壤中铵态氮含量随再分布时间的变化曲线。由图6b可以看出,随着再分布的进行,土壤中铵态氮含量呈逐渐减小趋势,灌水结束到再分布3 d期间,土壤中铵态氮分布基本无变化;再分布5 d开始,土壤中铵态氮质量分数下降趋势较为显著;再分布20 d,湿润体内铵态氮含量接近土壤本底值。水肥溶液入渗结束时刻,铵态氮运移到的土壤范围内,其值随着再分布进行,变化差异较为明显。不同分布时间条件下,土壤中较高铵态氮含量的分布范围基本无变化,都维持在土壤深度30~40 cm范围内;而土壤中铵态氮含量随着再分布时间的变化基本都在土壤深度20~50 cm范围内进行。灌水结束和再分布3、5、10、15、20 d条件下,灌水器位置垂直深度20~60 cm范围内土壤铵态氮平均含量依次为176.22、172.09、156.11、115.91、72.15、46.26 mg/kg,以灌施水肥溶液结束为基准,降幅依次为2.34%、11.41%、34.22%、59.06%和73.75%。这主要是因为再分布阶段,土壤中铵态氮迁移缓慢,尤其是在灌水器出水孔附近的土壤中,此区域内铵态氮浓度梯度极小,基本不产生运移;初步估计湿润体内铵态氮质量分数的变化主要是硝化作用造成的。随着再分布的继续,湿润体内水分分布更加均匀,氧气量增

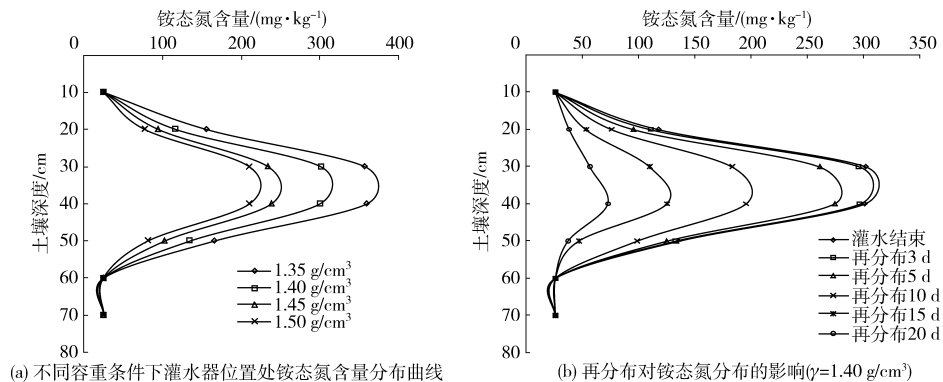


图6 不同土壤容重及再分布时间条件下铵态氮含量变化曲线

Fig. 6 Variation curves of ammonium nitrogen content under different soil bulk densities and redistribution times

多,促进了铵态氮向硝态氮的转化。

图 7 为湿润体内铵态氮平均含量随再分布时间的变化曲线。从图中可以看出,同一时刻条件下,湿润体内铵态氮平均含量随着土壤容重的减小而增大,这主要是因为土壤容重越小,入渗到土壤中的肥液越多的缘故。不同土壤容重条件下湿润体内铵态氮含量均随着再分布的进行而逐渐减小。这主要是由于试验采用的肥料是硝酸铵钙,肥液入渗到土壤中铵态氮即接近最大值,入渗结束并伴随着再分布持续进行,湿润体内水分分布更加均匀,湿润体内氧气含量增加,促进了硝化作用的进行,促使铵态氮含量减小,加之湿润体内铵态氮的挥发损失等共同作用,造成湿润体内铵态氮含量随着再分布进行而逐渐减小。图 8 为湿润体内铵态氮转化量与再分布时间的曲线。从图中可以看出,随着再分布的进行,湿润体内各土壤容重条件下铵态氮的转化量均呈增加趋势,且同一时刻下,土壤容重越小,湿润体内铵态氮的转化量越大。在再分布 10 d,土壤容重 1.35、1.40、1.45、1.50 g/cm<sup>3</sup> 条件下,铵态氮平均转化量为 119.58、109.40、93.67、79.77 mg/kg,减幅依次为 8.51%、14.38% 和 14.84%。图 9 为湿润体内铵态氮变化率与再分布时间的关系曲线。从图中可以看出,在同一时刻条件下,铵态氮的转化率随着土壤容重的增大而减小。各土壤容重条件下,铵态氮的转化率均随着再分布时间的延长而逐渐减小,其中前 10 d 湿润体内铵态氮的转化率相对较大。在再分布 5 d,土壤容重 1.35、1.40、1.45、1.50 g/cm<sup>3</sup> 条件下,铵态氮转化率分别为 12.94、12.23、9.79、8.56 mg/(kg·d),减幅依次为 5.49%、19.95% 和 12.56%。

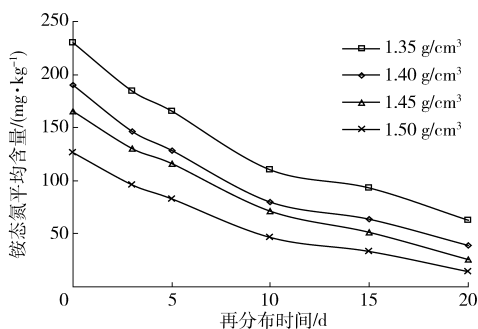


图 7 湿润体内铵态氮含量平均值与再分布时间的关系  
Fig. 7 Relationship curves between mean value of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N content in wetted body and redistribution time

### 2.5 土壤容重对湿润体内硝态氮分布的影响

图 10a 为不同土壤容重条件下,距灌水器水平 10 cm 处垂向硝态氮含量随土壤深度变化曲线。从图中可以看出,湿润体内同一位置处,硝态氮含量随着土壤容重的增大而变小;以土壤深度 20~60 cm

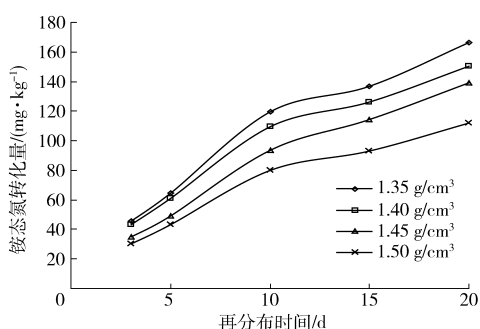


图 8 湿润体内铵态氮转化量与再分布时间的关系  
Fig. 8 Relationship curves between conversion quantity of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and redistribution time

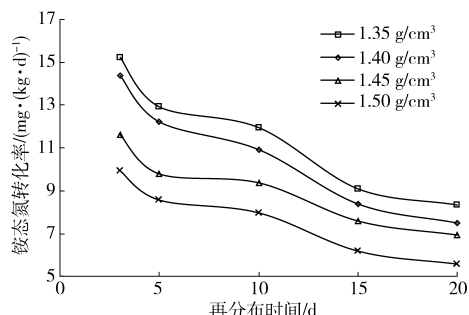


图 9 湿润体内铵态氮转化率与再分布时间的关系  
Fig. 9 Relationship between conversion rate of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and redistribution time

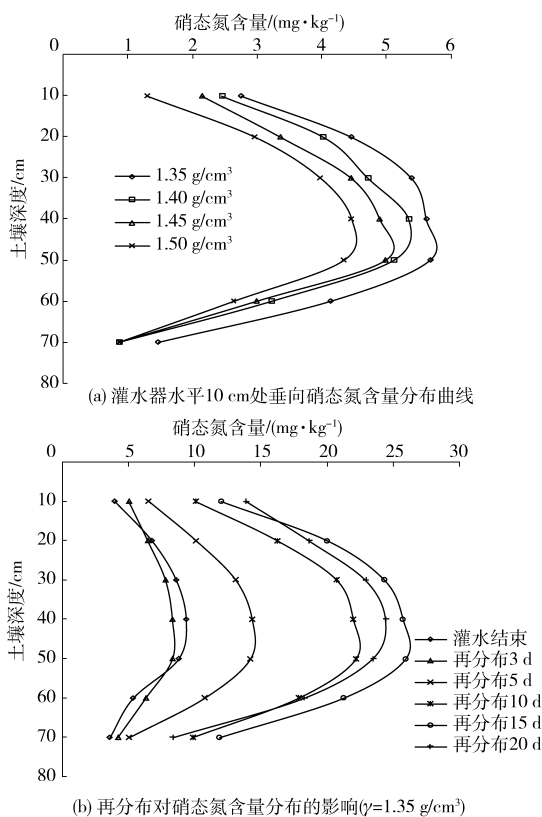


图 10 不同土壤容重及再分布时间条件下硝态氮含量变化曲线

Fig. 10 Variation curves of nitrate nitrogen content under different soil bulk densities and redistribution times

范围内硝态氮平均含量为例,容重 1.35、1.40、

1.45、1.50 g/cm<sup>3</sup> 硝态氮含量依次为 5.06、4.49、4.13、3.68 mg/kg,以容重 1.35 g/cm<sup>3</sup>为基准,减幅依次为 11.26%、18.38%和 27.27%。结合图 5 湿润体内含水率分布规律,可以看出硝态氮在湿润体内分布规律与水分相似,体现了硝态氮易随水分运移的特性。主要是因为土壤胶体表面带有大量的负电荷,对同样带负电荷的硝酸根离子形成排斥,硝酸根离子不易被土壤胶体吸附,易随水分移动;而土壤容重越小,土壤越疏松,孔隙度越大,相同时间内入渗到土壤中的肥液越多,硝态氮含量越大,进而造成湿润体内同一节点处,硝态氮含量随着土壤容重的减小而增大。在各土壤容重条件下,湿润体内硝态氮在距离灌水器附近保持较高含量,距离灌水器越远,含量越小,此特点与湿润体内铵态氮含量分布相似。涌泉根灌水肥溶液自由入渗,湿润体内含水率沿着远离灌水器的方向呈减小趋势,而在湿润锋处含水率骤减,基于硝态氮易被淋洗特性,使其在湿润体内浓度随着远离灌水器而递增,在湿润体边缘处达到最值。但硝态氮含量是以浓度乘以含水率得到,在灌水器附近,虽然硝态氮浓度较小,但是含水率较大,远大于湿润锋边缘处硝态氮浓度。故而形成灌水器附近硝态氮含量最大,距离灌水器越远含量越小。

图 10b 为土壤容重为 1.35 g/cm<sup>3</sup> 条件下,灌水器位置处垂直方向上土壤硝态氮含量随再分布时间的变化曲线。由图 10 可以看出,随着再分布进行,湿润体内硝态氮分布范围越来越大,且土壤最大硝态氮含量位置有下移趋势;灌溉施肥结束至再分布 3 d 内,土壤深度 30~50 cm 范围内土壤硝态氮含量均有不同程度的减少,而土壤深度 10 cm 和 60~70 cm 范围内土壤中硝态氮含量均有不同程度的增加。基于硝态氮易随水分运移的特性,再分布期间,硝态氮在水势梯度及重力势的作用下随水分进行重新分配,加之浓度锋处的硝态氮浓度梯度较大,形成的分子扩散对硝态氮共同作用下的结果。再分布 5~15 d 期间,湿润体内硝态氮含量呈现出不同程度的增加,再分布 20 d,土壤中硝态氮含量表现出小于再分布 15 d 的现象。灌水结束、再分布 3、5、10、15、20 d 条件下,土壤中硝态氮平均含量为 6.62、6.67、10.60、17.01、20.17、18.57 mg/kg,以灌水结束时刻土壤中硝态氮平均含量作为基准,增幅依次为 0.76%、60.12%、156.95%、204.68%和 180.51%;由土壤中硝态氮含量的平均值可以看出,在再分布 3 d 内,硝态氮含量基本相等,而再分布 5 d 开始,硝态氮含量增加速率变快。在非饱和土壤条件下,铵态氮的硝化作用要大于硝态氮的反硝化作用<sup>[20]</sup>,随着湿润体再分布的进行,湿润体内水分分布更加均匀,通气状

况变好,氧气量增加,促进了硝化作用的进行。铵态氮经过硝化作用生成的硝态氮在浓度梯度、重力势等的共同作用下进行再分配。再分布 20 d 相对于再分布 15 d,湿润体内土壤平均硝态氮含量降幅为 7.93%。土壤深度 70 cm 左右硝态氮峰值区域减小速率远大于土壤深度 10 cm 区域,表明深度 10 cm 区域土壤硝态氮的反硝化作用要小于深度 70 cm 区域,主要是土壤深度越大通气状况越差,为反硝化微生物创造了嫌气条件,增强了反硝化作用,将硝态氮部分还原成了气态性质的氮,产生挥发损失,使土壤深处硝态氮峰值区域硝态氮含量减小量大于表层。

图 11 为湿润体内硝态氮平均含量与再分布时间的关系曲线。由图 11 可以看出,同一时刻条件下,湿润体内硝态氮的平均含量随着土壤容重的增大而减小,主要是因为土壤容重越大,累积入渗量越小。再分布 15 d 期间,随着再分布进行,湿润体内硝态氮平均含量逐渐增大,而再分布 3 d 期间,湿润体内硝态氮平均含量变化较小;再分布 20 d,湿润体内硝态氮平均含量呈现不同程度的减小。这主要是因为再分布 3 d 期间,湿润体内水分相对充足,创造了嫌气条件,促进了反硝化作用的进行,使硝态氮含量减少,而期间又有铵态氮进行硝化作用,转化形成的硝态氮在非饱和土壤条件下,铵态氮的硝化作用要强于硝态氮的反硝化作用<sup>[19]</sup>;随着再分布进行,湿润体内水分分布更加均匀,通气性变好,嫌气微生物受到抑制,反硝化作用减弱,硝化作用加强,促进了湿润体内铵态氮向硝态氮的转化,故而造成随着再分布时间的进行,湿润体内硝态氮含量逐渐增加的现象。图 12 为湿润体内硝态氮转化量与再分布时间的关系曲线。从图中可以看出,在同一时间条件下,土壤中硝态氮含量的增加量随着土壤容重的增大而减小。在再分布 15 d,土壤容重 1.35、1.40、1.45、1.50 g/cm<sup>3</sup> 条件下,铵态氮平均转化量为 13.02、12.00、11.21、10.47 mg/kg,减幅依次为 7.83%、6.58%和 6.60%。不同土壤容重条件下,湿润体内

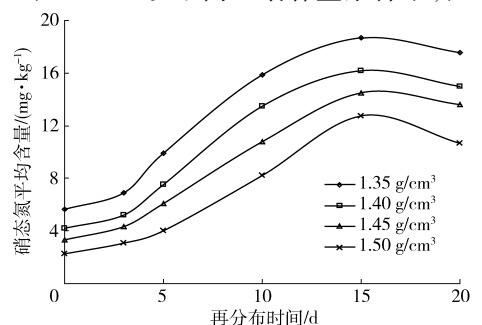


图 11 湿润体内硝态氮含量平均值与再分布时间的关系

Fig. 11 Relationship between mean value of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> content in wetted body and redistribution time



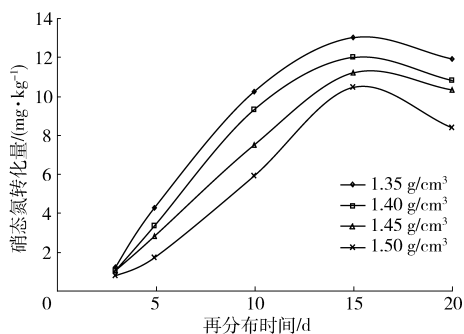


图 12 湿润体内硝态氮转化量与再分布时间的关系

Fig. 12 Relationship between conversion quantity of  $\text{NO}_3^-$ -N and redistribution time

硝态氮转化量均随着再分布时间的延长而增大。图 13 为湿润体内硝态氮变化率与再分布时间的关系曲线。由图 13 可以看出,在同一时刻条件下,硝态氮的转化率随着土壤容重的增大而减小。在再分布 10 d,土壤容重 1.35、1.40、1.45、1.50  $\text{g}/\text{cm}^3$  条件下,铵态氮转化率为 1.02、0.93、0.75、0.69  $\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ ,减幅依次为 8.82%、19.35% 和 21.33%。再分布 10 d 内硝态氮转化率伴随着再分布时间的持续而增加,再分布 10 d 硝态氮转化率达到最大;再分布 10~20 d 期间,土壤硝态氮转化率随着再分布的继

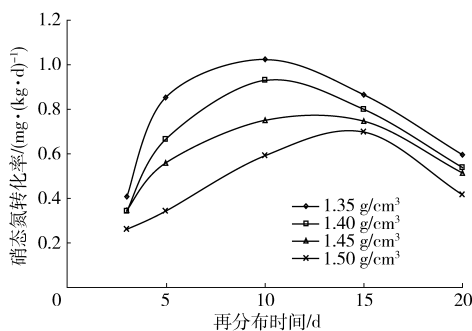


图 13 湿润体内硝态氮转化率与再分布时间的关系

Fig. 13 Relationship between conversion rate of  $\text{NO}_3^-$ -N and redistribution time

续而降低。

### 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,土壤容重越小,累积入渗量越大。随着土壤容重的增大,入渗系数  $K$  越小,入渗指数  $\alpha$  越大;建立了以入渗时间和土壤容重为自变量,累积入渗量为因变量的经验模型,经验证该模型可靠性较高。

(2) 随着入渗时间的增加,湿润锋运移距离逐渐增大;土壤容重越小,各向湿润锋运移距离越大,湿润锋运移距离与入渗时间具有较为显著的幂函数关系。建立了以入渗时间和土壤容重为自变量,各向湿润锋运移距离为因变量的湿润锋运移模型。经过验证,该模型可靠性较高。土壤容重越大,湿润体范围越小,湿润体内同一节点处含水率越小。随着再分布进行,湿润体范围变大,水分分布更加均匀。

(3) 基于铵态氮特性,灌水结束及再分布阶段,铵态氮分布范围主要集中在灌水器附近土壤区域;对于硝态氮而言,基于其不易被土壤吸附易随水分运移的特性,其在湿润体内分布特性与水分相似。土壤容重越大,湿润体内同一节点处铵态氮、硝态氮含量越小;同一再分布时刻,湿润体内铵态氮和硝态氮平均值、变化量及变化率均随着土壤容重的减小而增大。再分布 5 d 直至再分布 20 d,湿润体内铵态氮含量减小幅度较大,再分布 20 d,湿润体内铵态氮含量接近土壤本底值;湿润体内硝态氮含量在再分布 3 d 之内,平均值基本无变化,分布范围变大,变得较为均匀;再分布 5 d 开始,硝态氮含量增幅较为显著,直至再分布 15 d,湿润体内硝态氮含量基本达到最大值;再分布 20 d 开始,硝态氮含量低于再分布 15 d,越接近土壤表层,硝态氮含量减少越缓慢。

### 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.  
WU Pute, ZHU Delan, WANG Youke. Research and application of bubbled-root irrigation [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(4): 354-357. (in Chinese)
- 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.  
WANG Youke, LI Penghong, MA Lihui, et al. Experiment on water migration of surger root irrigation in loess sloping fields [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(5): 449-454. (in Chinese)
- 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.  
FEI Liangjun, CAO Jun, NIE Weibo. Characteristics test of wetting body of surge and spring root irrigation [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(3): 260-265. (in Chinese)
- 4 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 water content on soil infiltration characteristics during bubble irrigation [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(4): 491-496. (in Chinese)
- 5 黎朋红,汪有科,马理辉,等. 涌泉根灌湿润体特征值变化规律研究[J]. 水土保持学报,2009,23(6):190-194.  
LI Penghong, WANG Youke, MA Lihui, et al. Study on eigenvalues of wetted soil under surge root irrigation [J]. Journal of Soil

- and Water Conservation, 2009, 23(6):190-194. (in Chinese)
- 6 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.  
WU Hengqing, HUANG Qiang, WEI Qun. Moist body of two-point source interference infiltration of surge root irrigation[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2015, 43(5):201-207. (in Chinese)
- 7 王秀康, 邢英英, 张富仓. 膜下滴灌施肥番茄水肥供应量的优化研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1):142-150. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160119&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160119&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.019.  
WANG Xiukang, XING Yingying, ZHANG Fucang. Optimal amount of irrigation and fertilization under drip fertigation for tomato [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):142-150. (in Chinese)
- 8 吴立峰, 张富仓, 周罕觅, 等. 不同滴灌施肥水平对北疆棉花水分利用率和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 137-146.  
WU Lifeng, ZHANG Fucang, ZHOU Hanmi, et al. Effect of drip irrigation and fertilizer application on water use efficiency and cotton yield in North of Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(20):137-146. (in Chinese)
- 9 杨小振, 张显, 马建祥, 等. 滴灌施肥对大棚西瓜生长、产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7):109-118.  
YANG Xiaozhen, ZHANG Xian, MA Jianxiang, et al. Effects of drip fertigation on growth, yield and quality of watermelon in plastic greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(7):109-118. (in Chinese)
- 10 谷晓博, 李援安, 杜娅丹, 等. 水氮耦合对冬油菜氮营养指数和光能利用效率的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 123-132. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160217&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160217&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.017.  
GU Xiaobo, LI Yuannong, DU Yadan, et al. Effects of water and nitrogen coupling on nitrogen nutrition index and radiation use efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2):123-132. (in Chinese)
- 11 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21):70-80.  
XING Yingying, ZHANG Fucang, ZHANG Yan, et al. Irrigation and fertilization coupling of drip irrigation under plastic film promotes tomato's nutrient uptake and growth[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(21):70-80. (in Chinese)
- 12 王连君, 王程翰, 乔建磊, 等. 膜下滴灌水肥耦合对葡萄生长发育、产量和品质的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6):113-119. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160615&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160615&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.015.  
WANG Lianjun, WANG Chenghan, QIAO Jianlei, et al. Effects of water and fertilizer coupling on growth, yield and quality of grape under drip irrigation with film mulching[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6):113-119. (in Chinese)
- 13 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/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(6):121-129. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150618&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150618&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.018.  
FEI Liangjun, FU Yuliang, HE Zhenjia, et al. Transport characteristics of water and nitrogen under bubbled-root irrigation with fertilizer solution[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6):121-129. (in Chinese)
- 14 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.  
LIU Xian, FEI Liangjun, LIU Yang, et al. Transport characteristics of water and nitrogen under bubbled-root irrigation with fertilizer solution[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5):166-170. (in Chinese)
- 15 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.  
LIU Xian, FEI Liangjun, WANG Bo, et al. Transport characteristics of water and nitrogen under bubbled-root irrigation with buried depth of emitter[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(9):20-25. (in Chinese)
- 16 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 & Tillage Research, 2007, 92(1):122-128.
- 17 FRANZLUEBBERS A J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth[J]. Soil & Tillage Research, 2002, 66(2):197-205.
- 18 李伟. 鄂托克旗土地规模化经营下的农田生态保护措施研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.  
LI Wei. The study on farmland ecological protection measures under land formalization management in Etoke[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- 19 侯红雨. 温室滴灌条件下氮素转化运移规律研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2002.  
HOU Hongyu. Study on the rules of nitrogen translation and movement under drip-irrigation in the greenhouse[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2002. (in Chinese)
- 20 穆红文. 膜孔灌自由入渗氮素运移转化特性试验及数值模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.  
MU Hongwen. Water and nitrogen transport and translation characteristics research and numerical simulation under film hole free infiltration[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese)