

# 涌泉根灌肥液入渗水氮运移特性研究\*

费良军 傅渝亮 何振嘉 聂卫波 王博 王龙飞

(西安理工大学水资源研究所, 西安 710048)

**摘要:** 为了提高涌泉根灌模式下水肥利用率,减少氮肥流失与深层渗漏,通过涌泉根灌肥液入渗田间试验,研究了不同肥液质量浓度涌泉根灌入渗湿润体及其水氮运移特性,揭示了涌泉根灌土壤入渗量和湿润锋运移距离随肥液质量浓度的变化关系;建立了不同肥液质量浓度涌泉根灌入渗量和湿润锋运移经验模型;分析了入渗湿润深度范围内肥液质量浓度分别对土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 含量分布特性的影响。结果表明:肥液质量浓度增大,单位面积累计入渗量随入渗时间增加而增大,并且入渗量和湿润锋运移距离均与入渗时间呈极显著幂函数关系,决定系数分别达到 0.98 和 0.96,均大于临界相关系数  $r_c(0.6055)$ ;入渗再分布阶段,肥液质量浓度 41.7 g/L 能更好地保证枣树根系水分的吸收,而不同肥液质量浓度对土壤氮素转化率影响有所不同,硝态氮转化率基本不明显,而肥液质量浓度为 33.3 g/L 时铵态氮转化率最高。

**关键词:** 涌泉根灌 肥液入渗 湿润体 氮素运移

**中图分类号:** S275.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)06-0121-09

## Transport Characteristics of Water and Nitrogen under Bubbled-root Irrigation with Fertilizer Solution

Fei Liangjun Fu Yuliang He Zhenjia Nie Weibo Wang Bo Wang Longfei

(Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to improve the utilization rates of water and fertilizer and reduce the loss of nitrogen fertilizer and deep seepage under bubbled-root irrigation, the change features of soil wetted body as well as the water and nitrogen movement characteristics with different fertilizer solution concentrations were studied. The relation between the cumulative infiltration volume and transportation distance of wetting front with the change of solution concentration was presented. Besides, the empirical models for cumulative infiltration volume and wetting front transportation distance were established under bubbled-root irrigation; the impact of fertilizer solution concentration on the distribution laws of  $\text{NO}_3^-$ -N and  $\text{NH}_4^+$ -N content within the scope of infiltration depth was analyzed. The results of the experiment showed that when the liquid concentration was increased, the cumulative infiltration in unit area was increased with time, and both infiltration amount and wetting front transportation distance showed remarkable power function relationship with infiltration time. The determination coefficients were up to 0.98 and 0.96, respectively, which were greater than the critical correlation index (0.6055); in the redistribution of infiltration, the liquid concentration of 41.7 g/L could guarantee better water absorption of jujube root, the influences of different concentrations of nitrogen on conversion rate of soil were different, the conversion rate of nitrate nitrogen was not significant, and the conversion rate of ammonium nitrogen of 33.3 g/L was the highest.

**Key words:** Bubbled-root irrigation Fertilizer solution infiltration Wetted body Nitrogen transport

收稿日期: 2014-11-04 修回日期: 2015-01-06

\* 国家自然科学基金资助项目(51279157,51479161)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B04)和陕西省科技计划资助项目(2011k01-22)

作者简介: 费良军,教授,博士生导师,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

## 引言

涌泉根灌是针对果树根系分布较深的特点在滴灌基础上发展的一种微灌新技术。涌泉根灌直接将水肥输送到果树根部进行灌溉,减少地面无效蒸发,提高灌溉水肥利用效率,具有广阔的推广应用前景<sup>[1]</sup>。涌泉根灌湿润体的大小与形状影响果树生长,对湿润体点源入渗的研究是涌泉根灌技术要素研究的基础<sup>[2]</sup>。国外对地表点源灌溉湿润体特性做了大量研究,Ben-Asher等<sup>[3]</sup>研究了滴灌条件下湿润半径与时间关系表达式并进行了模拟检验,但忽略了重力项的影响作用,其模拟结果与较大流量长时间滴灌的实测结果偏离较多;Patel Neelam等<sup>[4]</sup>对滴灌条件下农作物根区湿润体进行了研究,揭示了滴灌土壤水分运移机理;Cote等<sup>[5]</sup>、Bristow等<sup>[6]</sup>、Bhatngar等<sup>[7]</sup>、Beggs等<sup>[8]</sup>、Skaggs等<sup>[9]</sup>将Hydrus模型应用于地下滴灌,模拟了地下滴灌条件下水分及溶质在土壤中的运移和分布情况。国内学者大部分仅对水分方面做了相关研究,费良军等<sup>[10]</sup>得出了清水涌泉根灌湿润锋的运移距离与入渗时间呈明显的幂函数关系,并建立了相对应的计算公式;樊晓康等<sup>[11]</sup>研究了土壤含水率、土壤干容重和灌水器埋深对湿润体的影响,结果表明湿润体的形状受土壤初始含水率和容重的影响较小;李明思等<sup>[12]</sup>针对不同容重土壤,研究了不同流量下滴灌对湿润锋运移的影响,结果表明,流量越大,湿润锋运移速率越快;李耀刚等<sup>[13-14]</sup>对涌泉根灌条件下土壤水分运动的研究表明,湿润体特征值随着流量的变化而变动,并在非饱和土壤水动力学的基础上,建立了柱状出流入渗模型,结果表明开孔长度对湿润体内水分分布影响较大;汪有科等<sup>[15]</sup>对涌泉根灌不同孔径、孔深条件下的土壤水分运移规律进行了试验研究,表明孔径与孔深均对湿润体的特征值有较大影响。目前,关于涌泉根灌对农田养分的影响鲜有研究,且主要集中在喷、滴灌施肥的氮素运移和污水灌溉条件下农田土壤水氮运移方面<sup>[16-19]</sup>。

综上所述,目前国内外对涌泉根灌的研究重点主要集中在入渗土壤水分运动、湿润体形态特征及湿润锋运移规律等方面,对施肥农田涌泉根灌入渗湿润体的研究较少。为了能够推广涌泉根灌节水保肥型微灌技术,并适宜山地果树灌溉模式和施肥标准,提高水肥利用率和灌水均匀度,减小氮肥深层渗漏损失,本文通过不同质量浓度的肥液进行涌泉根灌入渗对比试验,研究涌泉根灌肥液入渗对湿润体特征值的影响规律,以期对涌泉根灌水肥耦合和技术要素研究奠定基础。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

试验在陕西榆林市米脂县孟岔山地微灌枣树示范基地进行,本区为典型的黄土高原丘陵沟壑区,属北温带半干旱性气候,年均降水量451.6 mm,降水主要集中在7—9月份。试验地土质为黄绵土,试验土壤颗粒级配组成如表1所示。土壤平均干容重为1.30 g/cm<sup>3</sup>,土壤田间持水率为23.4%,试验期土壤平均初始含水率为0.104 g/g。

表1 试验土壤颗粒级配组成

Tab.1 Gradation composition of test soil

粒径/mm	0~0.002	0.002~0.02	0.02~0.20	0.2~2.0
质量分数/%	17.55	42.59	38.86	1.00

### 1.2 试验装置及试验设计

试验装置由马氏瓶、涌泉根灌灌水器及配套套筒组成,由马氏瓶供水,通过调节马氏瓶底部旋钮开度控制流量。涌泉根灌灌水器长20 cm,外径4 cm,灌水器与配套套筒通过螺口直接安装或拆卸,配套套筒(PVC材料)壁厚2 mm,内径4 cm,外径4.2 cm;在套筒外壁下方6 cm范围内打孔,孔径为2 mm,透水部开孔度20%,为防止土壤颗粒进入灌水器产生堵塞,开孔处用纱布包裹。试验流量为7 L/h,灌水量30 L,肥液为尿素溶液,根据肥液质量浓度C设置3个水平,分别为33.3、41.7、50.0 g/L,试验装置如图1所示。

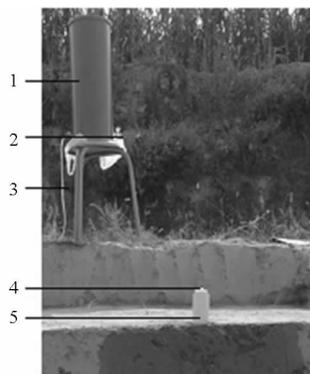


图1 试验系统示意图

Fig.1 Experimental system structure

1. 马氏瓶 2. 气阀 3. 输水管 4. 灌水器进水口 5. 套筒

## 2 结果与分析

### 2.1 涌泉根灌入渗能力

图2为灌水量30 L、灌水器流量7 L/h的清水与肥液质量浓度分别为33.3、41.7、50.0 g/L的涌泉根灌点源入渗单位面积累积入渗量随时间变化曲线。可以看出,在试验条件下,涌泉根灌肥液和清水在单

位面积上的累积入渗量均随着时间的延长而增大,入渗肥液质量浓度越大,单位面积累积入渗量越大,表明水肥耦合能够显著增加水分入渗,其原因为肥液入渗在水平和竖直方向上均具有溶质势,使得肥液入渗的入渗量和入渗速率均大于清水入渗,增加了土壤水势梯度从而增大了土壤水力传导度。这一现象与董玉云等<sup>[20]</sup>和武海霞等<sup>[21]</sup>的研究结果一致。

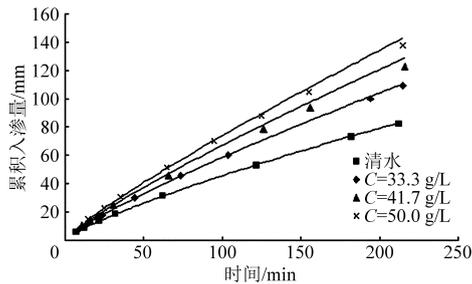


图 2 涌泉根灌肥液入渗单位面积累积入渗量

Fig.2 Cumulative infiltration curves under bubbled-root irrigation with fertilizer solution in unit area

经分析,涌泉根灌条件下单位面积上累积入渗量符合 Kostiakov 幂函数模型,即

$$Z = Kt^\alpha \quad (1)$$

式中  $Z$ ——涌泉根灌随灌水时间变化的单位面积上累积入渗量,mm

$K$ ——入渗系数,mm/min

$\alpha$ ——入渗指数  $t$ ——入渗时间,min

对图 2 中肥液和清水在单位面积的累积入渗量的实测数据分别用 Kostiakov 模型进行拟合,可得:

$$C = 0 \text{ g/L (清水) 时}$$

$$Z = 1.171t^{0.804} \quad (R^2 = 0.999) \quad (2)$$

$$C = 33.3 \text{ g/L 时} \\ Z = 1.243t^{0.826} \quad (R^2 = 0.986) \quad (3)$$

$$C = 41.7 \text{ g/L 时} \\ Z = 1.301t^{0.841} \quad (R^2 = 0.997) \quad (4)$$

$$C = 50.0 \text{ g/L 时} \\ Z = 1.433t^{0.863} \quad (R^2 = 0.998) \quad (5)$$

取显著性水平为 0.01,  $R^2$  均大于临界相关系数  $r_\alpha$  (0.6055), 表明 Kostiakov 入渗模型能够很好地描述涌泉根灌累积入渗量随时间变化的关系。通过分析,发现入渗系数  $K$ 、入渗指数  $\alpha$  与肥液质量浓度  $C$  呈线性关系,即

$$K_c = uC + k_0 \quad (6)$$

$$\alpha_c = vC + \alpha_0 \quad (7)$$

式中  $K_c$ 、 $\alpha_c$ ——肥液的入渗系数、入渗指数

$u$ 、 $v$ ——拟合系数

$k_0$ 、 $\alpha_0$ ——清水的入渗系数、入渗指数

进行线性回归分析得

$$K_c = 0.005C + 1.171 \quad (R^2 = 0.944) \quad (8)$$

$$\alpha_c = 0.001C + 0.804 \quad (R^2 = 0.982) \quad (9)$$

将式(8)、(9)入渗参数  $K_c$ 、 $\alpha_c$  回归方程式代入式(1)得到涌泉根灌不同肥液质量浓度条件下随灌水时间变化的单位面积上累积入渗量的模型为

$$Z = (0.005C + 1.171)t^{0.001C + 0.804} \quad (10)$$

为验证式(10)的可靠性,采用该模型计算肥液质量浓度为 50.0 g/L 的涌泉根灌肥液入渗单位面积上累积入渗量,拟合结果见表 2。

表 2 累积入渗量实测值与模型拟合值对比

Tab.2 Comparison of simulated and measured values of cumulative infiltration

项目	入渗时间/min							
	15	25	35	65	95	125	155	215
实测值/mm	15.15	23.14	30.60	51.15	70.09	88.01	105.22	138.05
计算值/mm	14.37	22.33	29.85	50.91	70.63	89.50	107.74	142.88
相对偏差/%	-5.11	-3.51	-2.45	-0.46	0.78	1.68	2.40	3.50

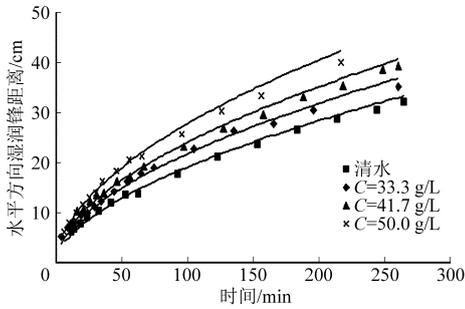
由表 2 可知,模型的拟合值与实测值的相对偏差在 -5.11% ~ 3.50% 以内,相对偏差均在 ±10% 范围内,说明采用式(10)计算涌泉根灌单位面积上累积入渗量是可靠的。

## 2.2 肥液质量浓度对湿润锋运移的影响

图 3 为清水和肥液处理在水平方向和竖直方向上湿润锋的运移曲线。相同入渗时间内,在水平方向与竖直方向上的湿润锋运移距离均随入渗肥液质量浓度的增大而增大。另一方面,随着观测时间的延长,水平方向与竖直方向的湿润锋距离的变化程度有所不同。以清水入渗作对照处理,水平方向运移距离随着肥液质量浓度的增大而增大,增大程度

依次为 9.0% (33.3 g/L)、22.4% (41.7 g/L)、24.5% (50.0 g/L),而竖直方向随肥液质量浓度运移变化程度逐渐减小,变化幅度依次为 11.3% (33.3 g/L)、13.9% (50.0 g/L)、17.9% (41.7 g/L)。随着肥液质量浓度的变化,竖直方向湿润锋距离变化程度呈先增大后减小的趋势,竖直方向湿润锋距离并不能一直保持随肥液质量浓度增大而增大,当肥液质量浓度达到 41.7 g/L 时,湿润锋运移距离的增大趋势反而减小,不利于竖直方向湿润锋运移距离增大的持续性;水平方向运移距离均随肥液质量浓度增大,但肥液质量浓度 50.0 g/L 与 41.7 g/L 相比,总体运移距离的增大程度仅提高了 2.1%,增加程度不明

显。总之,湿润锋运移距离的变化量无论水平方向还是垂直方向,均随肥液质量浓度的增大而增大,但从湿润锋运移距离的变化程度发现,肥液质量浓度过高(50.0 g/L)并没有比肥液质量浓度41.7 g/L条



件下垂直方向的湿润体运移变化趋势效果显著,因此肥液质量浓度41.7 g/L条件下的湿润体运移增加趋势最为明显。

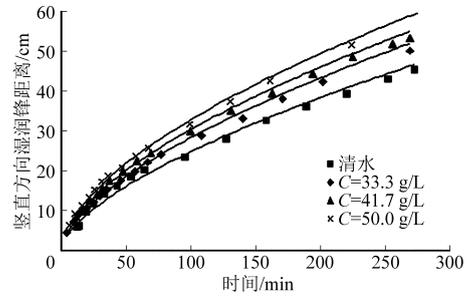


图3 剖面湿润锋运移距离

Fig. 3 Variation of wetting front transport in soil profile

如图3所示,涌泉根灌条件下肥液入渗在水平方向与垂直方向上的湿润锋运移距离均与时间 $t$ 呈幂函数关系,即

$$R = At^b \quad (11)$$

式中  $R$ ——涌泉根灌随灌水时间变化的水平(垂直)方向湿润锋运移距离,cm

$A$ 、 $b$ ——拟合参数

用式(11)分别对图3中水平方向和垂直方向湿润锋数据进行拟合,可得土壤入渗湿润锋运移距离与入渗时间的关系如表3所示。

表3 竖直剖面湿润锋运移拟合结果

Tab. 3 Fitting result of wetting front transport in vertical profile

质量浓度 $C$ ( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	水平方向		垂直方向	
	$R_x$	$R^2$	$R_z$	$R^2$
0(清水)	$R_x = 1.362t^{0.575}$	0.962	$R_z = 1.410t^{0.629}$	0.994
33.3	$R_x = 1.731t^{0.551}$	0.992	$R_z = 1.743t^{0.612}$	0.999
41.7	$R_x = 1.910t^{0.550}$	0.970	$R_z = 1.981t^{0.599}$	0.977
50.0	$R_x = 2.225t^{0.549}$	0.988	$R_z = 2.242t^{0.589}$	0.993

注: $R_x$ 、 $R_z$ 为涌泉根灌随灌水时间变化的水平、垂直方向湿润锋运移距离。

由表3可以看到采用幂函数进行水平方向与垂直方向湿润锋运移距离拟合,决定系数均大于0.96,大于临界相关系数 $r_{\alpha}$ (0.6055)说明涌泉根灌肥液入渗过程中水平湿润锋与垂直湿润锋的运移距离与时间之间存在良好的幂函数关系,参数 $A$ 和 $b$ 随着肥液质量浓度的增大呈单一的变化规律,因此采用线性相关分析法对参数 $A$ 和 $b$ 与肥液质量浓度之间进行相关分析,得

$$\begin{cases} A(C)_x = 1.316 + 0.016C & (R^2 = 0.934) \\ A(C)_z = 1.361 + 0.015C & (R^2 = 0.937) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} b(C)_x = 0.573 - 0.001C & (R^2 = 0.913) \\ b(C)_z = 0.632 - 0.001C & (R^2 = 0.933) \end{cases} \quad (13)$$

结合式(12)、(13)得知参数和肥液质量浓度有较好的线性关系,式(13)中质量浓度变化范围内的参数 $b$ 变化影响不大,系数项可忽略,只保留常数项代入式(11)即可,得到涌泉根灌肥液入渗水平和垂直湿润锋运移距离随时间和肥液质量浓度变化的简化数学模型为

$$\begin{cases} R(t, C)_x = (1.316 + 0.016C)t^{0.573} \\ R(t, C)_z = (1.361 + 0.015C)t^{0.632} \end{cases} \quad (14)$$

式中  $R(t, C)_x$ 、 $R(t, C)_z$ ——涌泉根灌不同肥液质量浓度下水平、垂直方向湿润锋随时间变化的运移距离,cm

为验证模型精度,采用该模型拟合质量浓度为50.0 g/L的涌泉根灌肥液入渗水平方向和垂直方向的运移距离,拟合结果见表4。

由表4可知,水平方向和垂直方向上的湿润锋运移距离的拟合值与实测值的相对偏差均在 $\pm 10\%$ 以内,可以采用改进式(14)进行涌泉根灌垂直剖面上湿润锋运移距离的预测,并且满足精度要求。

### 2.3 肥液质量浓度对涌泉根灌湿润体含水率的影响

图4为不同测定时间(灌水结束、再分布1 d、再分布3 d)灌水器中心垂直方向上土壤剖面含水率的分布情况,其中CK为土壤初始含水率。按计划湿润层不同土层土壤含水率的变化规律,将其划分为:表层易变层(0~30 cm)、中层过渡层(30~60 cm)以及底层相对稳定层(60~100 cm)<sup>[22]</sup>。由图4可以看出,其他条件相同时,不同肥液质量浓度的涌泉根灌入渗土壤含水率分布规律大体相同;在灌水结束时,表层和中层土壤含水率明显高于底层,且表层略高于中层;这是由于涌泉根灌灌水器埋设于距地表15 cm处,在灌水过程中,流量超过土壤的入渗能力,在灌水器中会形成一定程度的积水,随着积水深

表 4 湿润锋运移距离实测值与模型拟合值对比

Tab. 4 Comparison of simulated and measured values of wetting front transport

运移距离	入渗时间/min								
	15	25	35	65	95	125	155	215	
$R_x$	实测值/cm	10.03	13.00	16.10	21.30	25.60	30.40	33.30	40.10
	计算值/cm	9.54	12.67	15.28	21.55	26.62	31.00	34.94	41.91
	相对偏差/%	-1.89	0.20	-2.68	3.33	5.89	3.67	6.51	5.85
$R_z$	实测值/cm	11.30	15.40	18.90	25.60	31.90	37.60	42.70	51.60
	计算值/cm	10.92	14.89	18.27	26.60	33.49	39.57	45.08	54.99
	相对偏差/%	-2.30	-3.15	-3.79	2.29	2.64	2.36	2.31	2.66

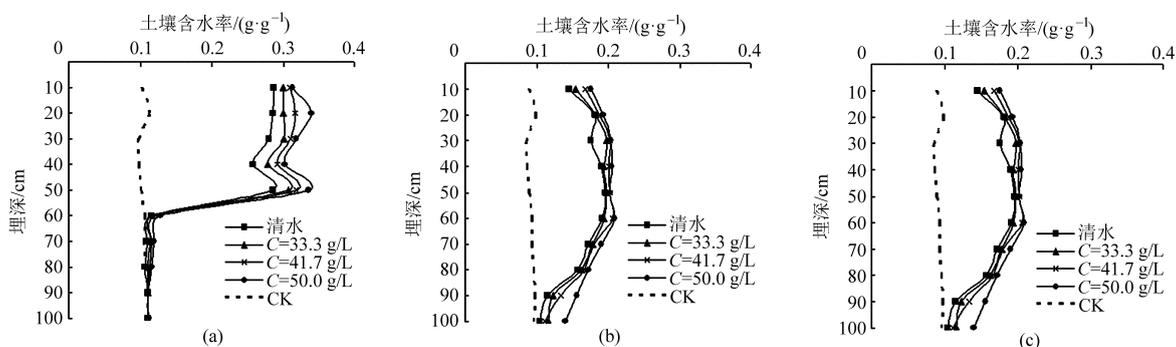


图 4 不同肥液浓度灌水器处湿润体土壤含水率分布图

Fig. 4 Variation of vertical soil moisture at emitter under different fertilizer solution concentrations

(a) 灌水结束时 (b) 再分布 1 d 后 (c) 再分布 3 d 后

度的不断增大,向上运移的湿润锋与上边界的水势梯度减小,在土壤基质势的作用下引起湿润锋向上运移的速率加快,导致表层土壤的含水率略高于中层土壤;而灌水量不足以再下渗到底层土壤,所以底层土壤含水率最低。再分布 1 d 后,土壤含水率由表层向下运移,表现出表层低、中层高、底层低的变化趋势。再分布 3 d 后,0 ~ 100 cm 内土壤平均含水率较灌水结束时降低 6.34%;清

水与不同肥液浓度的涌泉根灌土壤平均含水率仍具有类似的分布规律,肥液浓度越大,相同土层深度处的土壤含水率越高。入渗肥液影响土壤含水率的分布,在一定浓度范围内,肥液质量浓度越大,土壤的保水性越强。

结合图 4 施肥灌溉观测时间变化条件下肥液质量浓度对各土层含水率分布结果进行方差分析,分析结果见表 5。

表 5 不同肥液质量浓度条件下各土层含水率分布情况

Tab. 5 Distribution of soil moisture for each layer under different fertilizer solution concentrations

测定 时间/d	肥液质量浓度 /(g·L <sup>-1</sup> )	土壤质量含水率/(g·g <sup>-1</sup> )				
		0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm	60 ~ 80 cm	80 ~ 100 cm
0 (灌水结束)	33.3	0.264	0.255	0.187	0.100	0.098
	41.7	0.275	0.265	0.194	0.101	0.098
	50.0	0.287	0.273	0.204	0.103	0.098
1	33.3	0.169	0.197	0.196	0.171	0.120
	41.7	0.178	0.202	0.205	0.174	0.123
	50.0	0.185	0.205	0.206	0.182	0.149
3	33.3	0.138	0.161	0.168	0.145	0.126
	41.7	0.154	0.168	0.179	0.148	0.140
	50.0	0.164	0.172	0.174	0.157	0.146
方差分析	肥液质量浓度	* (P=0.002)	* (P=0.012)	* (P=0.044)	* (P=0.023)	NS (P=0.173)
	再分布时间	* (P=0.001)	* (P=0.001)	* (P=0.001)	* (P=0.003)	* (P=0.009)

注: NS 表示差异不显著; \* 表示在  $\alpha=0.05$  水平上差异显著。下同。

方差分析表明,埋深 0 ~ 100 cm 内含水率变化规律随着观测时间变化而变化,且 3 d 内差异性显著 ( $P < 0.05$ )。而肥液质量浓度只对 80 ~ 100 cm

处含水率变化规律的影响不明显 ( $P > 0.05$ ),且埋深越大,对含水率变化规律的影响越明显。说明在肥液质量浓度小于 50.0 g/L 条件下,不同肥液质量

浓度对水分变化的影响主要作用在埋深0~80 cm处,80 cm以下土壤含水率影响较小,卢俊寰等<sup>[23]</sup>研究表明,陕北丘陵区主要作物枣树,根系生物量累积的高密度区多在0~60 cm处,是枣树根系水分与养分吸收的重要位置。为了进一步分析对水分影响的变化过程,分别通过含水率变化量和相对变化率进行对比,即0~60 cm处水分变化取平均值,以灌水结束时不同肥液质量浓度处理下水分平均值作对比,对再分布3 d时水分变化进行分析,发现各肥液质量浓度处理下含水率变化量为-0.084 g/g (33.3 g/L)、-0.079 g/g (50.0 g/L)、-0.077 g/g (33.3 g/L),

对含水率相对变化率进行比较依次为:-33.9% (33.3 g/L)、-33.2% (50.0 g/L)、-31.7% (41.7 g/L),综合上述对比结果,以肥液质量浓度41.7 g/L处理条件下水分随再分布时间减小程度最好,可相对更好地保证枣树根系水分的吸收。

## 2.4 肥液质量浓度对涌泉根灌氮素运移的影响

### 2.4.1 $\text{NO}_3^-$ -N 运移特性

图5为流量及灌水量相同条件下不同质量浓度涌泉根灌肥液入渗在灌水结束时以及再分布3 d后, $\text{NO}_3^-$ -N含量整体在土层垂直深度方向的分布情况,CK为 $\text{NO}_3^-$ -N本底值。

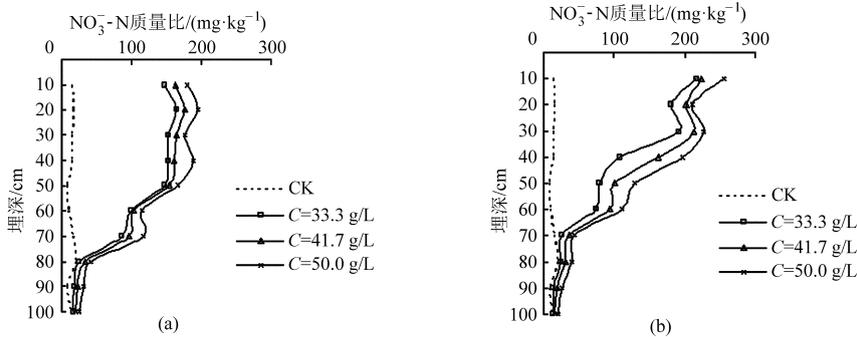


图5 不同肥液质量浓度涌泉根灌入渗 $\text{NO}_3^-$ -N分布状况

Fig. 5  $\text{NO}_3^-$ -N distribution status under bubbled-root irrigation with different fertilizer solution concentrations

(a) 灌水结束时 (b) 再分布3 d后

由图5可以看出,硝态氮含量随入渗肥液质量浓度的增大而增大,且在土层深度40 cm位置处达到最大值,这是由于涌泉根灌灌水方式影响所致,其运移规律与土壤水分运移规律较为相似。由于硝态氮主要带负电荷,土壤胶粒难以对其吸附,并且对流作用随水分运动在土壤中运移,入渗时间越长,硝态氮随水垂直向下运移的 $\text{NO}_3^-$ -N量越大。再分布

3 d后,各土层深度处含量均有增大,且相同埋深处,肥液质量浓度越大,含量增大越明显;垂直方向距土表40~60 cm处,含量骤减,并在距土表60 cm处以下递减至与本底值相当。

结合图5肥液灌溉测定时间变化条件下肥液质量浓度对各土层硝态氮含量分布结果进行方差分析,分析结果见表6。

表6 不同肥液质量浓度条件下各土层硝态氮含量分布情况

Tab. 6 Distribution of  $\text{NO}_3^-$ -N content for each layer under different fertilizer solution concentrations

测定 时间/d	肥液质量浓度 /( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	土壤硝态氮质量比/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )				
		0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm
0(灌水结束)	33.3	311.7	306.7	246.7	111.7	35.0
	41.7	340.0	326.7	258.3	130.0	43.3
	50.0	375.0	365.0	281.7	158.3	56.7
3	33.3	398.3	300.0	155.0	51.7	33.3
	41.7	425.0	376.7	195.0	68.3	36.7
	50.0	466.7	423.3	241.7	85.0	43.3
方差分析	肥液质量浓度	* ( $P=0.003$ )	NS ( $P=0.132$ )	NS ( $P=0.152$ )	NS ( $P=0.140$ )	NS ( $P=0.118$ )
	再分布时间	* ( $P=0.001$ )	NS ( $P=0.239$ )	NS ( $P=0.050$ )	NS ( $P=0.059$ )	NS ( $P=0.165$ )

以上方差分析表明,不论是肥液质量浓度还是再分布时间,对各层土壤硝态氮分布的影响程度均随埋深增大而趋于减小,而0~20 cm处差异性随浓度和时间变化均较显著,这是由于地表0~20 cm

处于浅层埋深,土壤孔隙分布保持较完整,导致土壤通气性良好,含氧量高,为硝化作用提供了良好的通气环境,有利于硝化作用进行。并且肥液浓度越大,硝化作用越明显,导致肥液质量浓度对硝态氮含量

差异性影响越大;20~100 cm处由于土壤通气状况较差,从而造成厌氧环境,有利于反硝化作用的进行,并且随埋深的增大反硝化作用逐渐增强。

#### 2.4.2 $\text{NH}_4^+$ -N 运移特性

图6为流量及灌水量相同条件下不同质量浓度

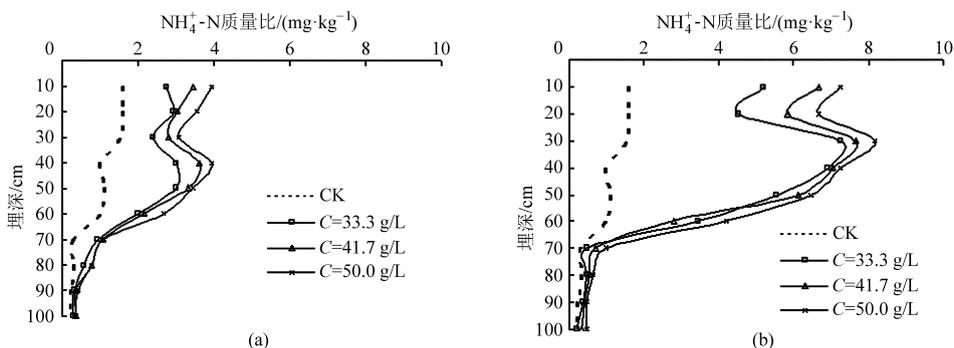


图6 不同肥液质量浓度涌泉根灌入渗  $\text{NH}_4^+$ -N 分布状况

Fig. 6  $\text{NH}_4^+$ -N distribution status under bubbled-root irrigation with different fertilizer solution concentrations

(a) 灌水结束时 (b) 再分布3 d后

出浅层高、底层低的分布规律,且质量浓度越大,浅层与底层  $\text{NH}_4^+$ -N 含量差距越明显。这主要是由于土壤胶粒所携带的负电荷能够吸收大量带正电荷  $\text{NH}_4^+$  离子,减缓了  $\text{NH}_4^+$ -N 向下运移,肥液质量浓度增大,土壤表层对  $\text{NH}_4^+$ -N 吸附性增强,导致表层土壤中  $\text{NH}_4^+$ -N 含量较底层大。灌水结束时,土层深度20~40 cm范围内土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量较高,这是由于涌泉根灌入渗方式所致。再分布3 d后,表层  $\text{NH}_4^+$ -N 含量有不同程度的增大,地下埋深垂直距离0~40 cm处增幅显著。随着埋深距离增大,  $\text{NH}_4^+$ -N 含量有减小趋势,埋深为70 cm时,趋于本底值。由

涌泉根灌肥液入渗在灌水结束时及再分布3 d后  $\text{NH}_4^+$ -N 含量整体在土层深度方向的分布情况,其中CK为  $\text{NH}_4^+$ -N 本底值。

由图6可以看出,  $\text{NH}_4^+$ -N 含量整体随入渗肥液浓度的增大而增大,  $\text{NH}_4^+$ -N 含量在灌水结束时表现

于前期地表浅层灌水过后,聚集大量带正电的吸附性为主的  $\text{NH}_4^+$ ,当地表达到  $\text{NH}_4^+$  吸附能力时,其余  $\text{NH}_4^+$  随水向深层运动,并且有不同程度的吸附作用,另一方面,随着埋深的增大,  $\text{NH}_4^+$ -N 随水流运动能力减弱,肥液入渗形成大量且密闭孔隙,阻隔与地表的能量交换,造成厌氧环境,土壤内部通气性较差,促进了硝化反应,故  $\text{NH}_4^+$ -N 含量随深度增大逐渐降低。

结合图6施肥灌溉再分布时间变化条件下肥液质量浓度对各土层铵态氮含量分布结果进行分析,如表7所示。

表7 不同肥液质量浓度条件下各土层铵态氮含量分布情况

Tab. 7 Distribution of  $\text{NH}_4^+$ -N content for each layer under different fertilizer solution concentrations

观测 时间/d	肥液质量浓度 /( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	土壤铵态氮质量比/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )				
		0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm
0(灌水结束)	33.3	5.67	5.40	5.00	1.50	0.64
	41.7	6.50	6.40	5.50	1.83	0.72
	50.0	7.47	7.00	6.13	1.89	0.77
3	33.3	9.73	14.20	9.00	0.93	0.57
	41.7	12.53	14.73	8.93	1.27	0.73
	50.0	13.93	15.47	10.67	1.67	0.93
方差分析	肥液质量浓度	NS( $P=0.1519$ )	*( $P=0.0273$ )	NS( $P=0.1176$ )	NS( $P=0.1396$ )	NS( $P=0.1894$ )
	再分布时间	*( $P=0.0174$ )	*( $P=0.0003$ )	*( $P=0.0063$ )	NS( $P=0.0585$ )	NS( $P=0.6496$ )

以上方差分析表明,再分布时间对0~100 cm处土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 分布影响显著性较水分分布影响显著明显,且影响差异性主要集中在0~60 cm处,且3 d内差异性显著( $P<0.05$ )。而肥液质量浓度对铵态氮变化影响仅集中在20~40 cm处具有显著性( $P<0.05$ )外,其他埋深铵态氮变化影响均未达到显

著性( $P>0.05$ ),这主要是由于灌水器出水口距地表埋深为15 cm处,由于水解作用,肥液在灌水器出水口处渗入土壤后,此处(20 cm)附近铵态氮质量比随肥液质量浓度增加而增加,随着时间的变化,增加程度更明显(再分布3 d后)。提高了  $\text{NH}_4^+$ -N 对土壤颗粒的吸附能力,大部分被土壤固定,不再向下运动,造

成了滴头附近测定的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  质量比偏高。

通过铵态氮与硝态氮剖面含量随时间变化的对比发现,无论肥液质量浓度多少,铵态氮和硝态氮含量在 60 cm 处以下均基本接近本底值。以枣树根系吸水及生物量累积效果为目的,和埋深 0 ~ 60 cm 处灌水结束时相比,灌后 3 d 时,各肥液浓度处理下的平均氮素转化率  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ : - 1.4% (33.3 g/L) < - 7.8% (50.0 g/L) < 10.8% (41.7 g/L);  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ : 94.5% (50.0 g/L) < 96.7% (41.7 g/L) < 104.9% (33.3 g/L); 随着肥液质量浓度的增大,硝态氮平均氮素转化率在 0 ~ 60 cm 处由于灌水量总量一定,一定程度抑制了硝态氮转化率,但没有显著变化关系,而铵态氮随着肥液质量浓度增大,导致 0 ~ 60 cm 埋深以内铵态氮质量比减小,以 50.0 g/L 处理条件下铵态氮转化率最低,33.3 g/L 处理条件下氮氮转化率最高。

### 3 结 论

(1) 累积入渗量与入渗时间之间符合 Kostiakov

幂函数模型关系;水平湿润锋与竖直湿润锋运移距离均随肥液质量浓度的增大而增大,且均与入渗时间呈显著的幂函数关系。

(2) 不同肥液质量浓度湿润锋运移距离随质量浓度增大而增大,但运移距离增大程度并不是质量浓度越大就越明显。

(3) 以根系水分的吸收以及生物量累积的形成最大为目标,通过涌泉根灌水分与肥液动态分布进行方差分析,以肥液质量浓度 41.7 g/L 处理下保水效果更好,此情况下埋深 0 ~ 60 cm 处能更有利于保证枣树根系水分的吸收以及生物量累积的形成;肥液质量浓度过高对硝态氮质量比的影响并不明显,当肥液质量浓度达到 50.0 g/L 时反而抑制铵态氮转化,且转化率达到最低,故应适当减小肥液质量浓度,本次研究以肥液质量浓度 33.3 g/L 铵态氮转化率最高。对当地施肥管理具有一定的参考价值。

### 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 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)
- 3 Ben-Asher J, Charach G, Zemel A. Infiltration and water extraction from trickle irrigation source: the effective hemisphere model [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986,50(4):882 - 887.
- 4 Patel Neelam, Rajput T B S. Dynamic and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(12):1335 - 1349.
- 5 Cote C M, Bristow K L, Charlesworth P B, et al. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation [J]. Irrigation Science, 2003, 22(3 - 4):143 - 156.
- 6 Bristow K L, Cote C M, Thorburn P J, et al. Soil wetting and solute transport in trickle irrigation systems [C] // 6th International Micro-irrigation Conference (Micro2000), 2000:1 - 9.
- 7 Bhatnagar P R, Chauhan H S. Soil water movement under a single surface trickle source [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(7):799 - 808.
- 8 Beggs R A, Tchobanoglous G, Hills D, et al. Modeling subsurface drip application of onsite wastewater treatment system effluent [C] // On-Site Wastewater Treatment X, Proceedings of the Tenth National Symposium on Individual and Small Community Sewage Systems, 2004:92 - 103.
- 9 Skaggs T H, Trout T J, Rothfuss Y. Drip irrigation water distribution pattern: effects of emitter rate, pulsing and antecedent water [J]. Soil Science Society of America Journal, 2010,74(6):1886 - 1896.
- 10 费良军,曹俊,聂卫波. 涌泉根灌土壤湿润体特性试验[J]. 灌排机械学报,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)
- 11 樊晓康,陈俊英,牛文全,等. 涌泉根灌土壤湿润体影响因素的试验研究[J]. 节水灌溉,2011(10):1 - 4.  
Fan Xiaokang, Chen Junying, Niu Wenquan, et al. Experimental study on influencing factors of soil wetted body of clay loam under bubbled root irrigation [J]. Water Saving Irrigation, 2011(10):1 - 4. (in Chinese)
- 12 李明思,康绍忠,孙海燕. 点源滴灌滴头流量与湿润体关系研究[J]. 农业工程学报,2006,22(4):32 - 35.  
Li Mingsi, Kang Shaozhong, Sun Haiyan. Relationships between dripper discharge and soil wetting pattern for drip irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2006,22(4):32 - 35. (in Chinese)
- 13 李耀刚,王文娥,胡笑涛,等. 涌泉根灌条件下土壤水分运动数值模拟研究[J]. 灌溉排水学报,2012,31(3):42 - 47.

- Li Yaogang, Wang Wen'e, Hu Xiaotao, et al. Numerical simulation of soil water movement under bubbled root irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(3):42-47. (in Chinese)
- 14 李耀刚,王文娥,胡笑涛,等.基于HYDRUS-3D的涌泉根灌土壤入渗数值模拟[J].排灌机械工程学报,2013,31(6):536-552.  
Li Yaogang, Wang Wen'e, Hu Xiaotao, et al. Numerical simulation of soil water infiltration under bubbled root irrigation based on HYDRUS-3D[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(6):536-552. (in Chinese)
- 15 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].灌排机械工程学报,2010,28(5):449-454.  
Wang Youke, Li Penghong, Ma Lihui, et al. Experiment on water migration of surge root irrigation in loess sloping fields [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(5):449-454. (in Chinese)
- 16 郭大应,谢成春,熊清瑞,等.喷灌条件下土壤中的氮素分布研究[J].灌溉排水,2000,19(12):76-77.  
Guo Daying, Xie Chengchun, Xiong Qingrui, et al. The nitrogen distribution in soil after surface application of nitrogenous fertilizer under sprinkling irrigation condition[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2000,19(12):76-77. (in Chinese)
- 17 李久生,饶敏杰.喷灌施肥均匀性对冬小麦产量影响的田间试验评估[J].农业工程学报,2000,16(6):38-42.  
Li Jiusheng, Rao Minjie. Field evaluation of yield response of winter wheat to uniformity of sprinkler applied fertilizer[J]. Transactions of the CASE, 2000, 16(6):38-42. (in Chinese)
- 18 魏新平.灌溉对作物根区硝酸钾运移影响的研究[D].西安:西安理工大学,2000.  
Wei Xinping.  $KNO_3$  transport in soil root zone as affected by irrigation [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology,2000. (in Chinese)
- 19 何华.地下滴灌条件下作物水氮吸收利用与最佳灌水技术参数的研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2001.  
He Hua. Crop water and nitrogen use and optimum technical parameters under subsurface drip irrigation [D]. Yangling: Northwest A&F University,2001. (in Chinese)
- 20 董玉云,费良军,穆红文.肥液浓度对单膜孔入渗 $NO_3^-$ -N运移特性影响的室内试验研究[J].农业工程学报,2006,22(5):204-206.  
Dong Yuyun, Fei Liangjun, Mu Hongwen. Laboratory experimental study on effects of fertilizer solution concentration on transport characteristics of  $NO_3^-$ -N under single film hole infiltration [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(5):204-206. (in Chinese)
- 21 武海霞,刘建军,赵启明.尿素溶液浓度对一维垂直入渗特性影响的试验研究[J].中国农村水利水电,2011(6):67-69.  
Wu Haixia, Liu Jianjun, Zhao Qiming. An experimental study of the influence of urea solution concentration on characteristic of one-dimensional vertical infiltration [J]. China Rural Water and Hydropower,2011(6):67-69. (in Chinese)
- 22 刘天成.涌泉根灌入渗特性与枣树滴灌灌溉制度研究[D].西安:西安理工大学,2012.  
Liu Tiancheng. Study on the infiltration characteristics of surge spring root irrigation and drip irrigation regime of jujube [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012. (in Chinese)
- 23 卢俊寰,汪有科,梁宇,等.陕北黄土丘陵成年枣树根系空间分布规律研究[J].中国农村水利水电,2012(10):4-12.  
Lu Junhuan, Wang Youke, Liang Yu, et al. Research on spatial distribution law of adult jujube root system in loess hilly regions in northern Shaanxi [J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(10):4-12. (in Chinese)