

# 红壤区肥液浓度对涌泉根灌水氮运移特性的影响

代智光, 王萍根, 谢方杰, 周志鹏

(南昌工程学院水利与生态工程学院, 南昌 330099)

**摘要:** 为提高红壤区涌泉根灌水氮利用效率, 通过室内肥液入渗试验, 研究了不同肥液浓度(0, 10, 20, 35, 60 g/L)条件下涌泉根灌土壤的入渗能力、湿润锋迁移距离、土壤水分分布以及铵态氮和硝态氮的运移特性, 并建立了红壤涌泉根灌土壤累计入渗量及湿润锋在竖直向上、竖直向下和水平方向的迁移距离与肥液浓度的关系模型。结果表明: 土壤累计入渗量、湿润锋迁移距离以及湿润体内水分和氮素的分布均受到肥液浓度的影响。在同一入渗时刻, 土壤累计入渗量及湿润锋迁移距离随肥液浓度的增大而增大, 且与入渗历时均呈幂函数关系; 在灌水结束时, 相同土层深度内, 肥液浓度越大, 土壤含水率就越大, 土壤中铵态氮和硝态氮的浓度也越大, 且与铵态氮相比, 硝态氮的分布范围更广。随着肥液再分布的进行, 土层内最大含水率位置逐渐下移, 且土壤含水率的分布也更加均匀; 土壤中铵态氮和硝态氮浓度的变化趋势不同, 浅层中铵态氮的浓度逐渐降低, 而硝态氮的浓度先降低后增加; 深层中铵态氮的浓度先增加后降低, 而硝态氮的浓度逐渐增加。该研究成果可为进一步研究红壤区涌泉根灌肥液入渗氮素运移及转化提供理论参考。

**关键词:** 涌泉根灌; 红壤; 肥液浓度; 水氮运移

中图分类号: S275

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)01-0344-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.01.049

## Effects of Fertilizer Concentration on Water-Nitrogen Transport Characteristics Under Surge Root Irrigation for Red Soil

DAI Zhiguang, WANG Pinggen, XIE Fangjie, ZHOU Zhipeng

(School of Water Resources and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099)

**Abstract:** In order to improve the utilization efficiency of water and nitrogen in the red soil under surge root irrigation, through an indoor fertilizer infiltration test, the soil infiltration capacity, wetting front migration, soil moisture, and the migration characteristics of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen were studied under different fertilizer concentrations (0, 10, 20, 35, 60 g/L), and the relational model between cumulative infiltration volume, the wetting front migration distance and the fertilizer concentration were established. The results showed that: The cumulative infiltration volume, the wet front migration distance, and the migration and distribution of water and nitrogen in the wet body were all affected by the fertilizer concentration. At the same infiltration time, the cumulative infiltration volume and the wet front migration distance all increased with the increase of the fertilizer concentration, and they all had a power function relationship with the infiltration duration. At the end of irrigation, the greater the concentration of fertilizer was, the greater the soil moisture content was, and the greater the concentration of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen was for the same soil depth, and the distribution of nitrate nitrogen was wider than ammonium nitrogen. With the redistribution of fertilizer solution, the position of maximum moisture content went down gradually, and the distribution of moisture content was more uniform. The changes of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen concentration were different between the shallow and deep layer of soil. In the shallow layer, the concentration of ammonium nitrogen gradually decreased, while the concentration of nitrate nitrogen decreased first and then increased. In the deep layer, the concentration of ammonium nitrogen increased first and then decreased, while the concentration of nitrate nitrogen showed a gradually increasing trend. The research results could provide a theoretical reference for further study on the nitrogen transport and transfor-

收稿日期: 2019-07-01

资助项目: 江西省教育厅研究项目(GJJ180952); 江西省科技厅研究项目(20192BAB216037); 中国农科院水资源安全高效利用重点开发实验室开放基金项目(2019BB02)

第一作者: 代智光(1984—), 男, 博士, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail: 77494350@qq.com

mation of surge-root irrigation in the red soil region.

**Keywords:** surge root irrigation; red soil; fertilizer concentration; water-nitrogen transport

在我国,红壤主要分布于长江以南的低山丘陵区,是我国重要的土壤资源之一。该地区水热资源丰富,土地生产潜力巨大,特别适宜柑橘、蜜柚等果林树的生长<sup>[1-2]</sup>。长期以来,由于灌溉施肥方式不合理,导致该地区水肥利用效率低下,水土流失风险加剧,严重制约了农业的可持续发展<sup>[1]</sup>。

涌泉根灌是在滴灌基础上发展的一种地下微灌技术,可将水肥直接输送到作物根区,其流量大、抗堵能力强,特别适用于果树的灌溉<sup>[3-6]</sup>。氮肥是作物生长所需的主要肥力要素之一,但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<sup>[7-9]</sup>。土壤中水氮的运移特性对提高作物的水肥利用效率意义重大,近年来国内外相关学者<sup>[10-13]</sup>通过室内外试验研究表明,影响土壤水氮运移的因素主要包括肥液浓度、土壤质地、初始含水率、容重以及施肥方式等,其中肥液浓度的影响尤为显著。迄今为止,关于红壤区涌泉根灌技术的研究还仅限于土壤水分运动方面<sup>[14]</sup>,而关于肥液浓度对涌泉根灌水氮运移特性影响的研究还未见报道,这在一定程度上也限制了涌泉根灌技术在红壤区的推广应用。

基于此,本文通过室内土箱试验,研究了红壤区肥液浓度对涌泉根灌肥液入渗土壤水分和氮素运移特性的影响规律,以期为进一步研究红壤区涌泉根灌肥液入渗氮素运移及转化提供理论参考。

## 1 材料与方 法

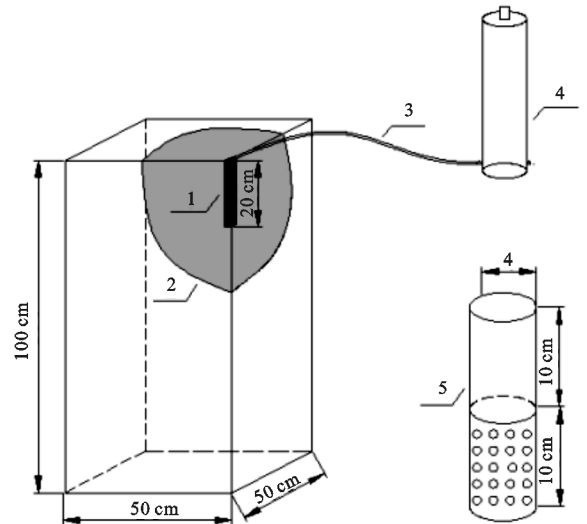
### 1.1 试验装置

试验于 2018 年 10 月在南昌工程学院灌溉排水实验室进行,试验土箱采用 10 mm 厚透明有机玻璃制成,供水装置为马氏瓶,其内径为 14 cm,高为 100 cm。灌水部分由涌泉根灌灌水器 and 套管组成,套管长度为 20 cm,内径为 4 cm,下部 10 cm 范围内均匀开孔,开孔率为 20%。为便于观察土壤湿润锋的运移,采用 1/4 灌水器进行模拟,用玻璃胶黏于土箱一角,并用纱布对套管外部进行包裹,以防止土壤渗入灌水器内。涌泉根灌室内试验装置及灌水器细部见图 1。

### 1.2 试验方法

供试土壤取自江西省进贤县田间 0—50 cm 内,其土壤风干含水率为 7.60%,饱和含水率为 41.21%,铵态氮含量为 18.71 mg/kg,硝态氮含量为 0.97 mg/kg,pH 为 8.1,偏酸性。将土壤自然风干后,过 2 mm 筛备用。土壤粒径组成采用 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪进行测定,黏粒( $0 < d \leq 0.002$  mm)、粉粒( $0.002 < d \leq 0.02$  mm)和砂粒( $0.02 < d \leq 2$  mm)占

比分别为 9.14%,40.24%和 50.62%(体积分数),按国际制分级标准判定为壤土。



注:1 为灌水器;2 为湿润体;3 为橡胶管;4 为马氏瓶;5 为灌水器细部。

图 1 试验装置示意

氮肥采用硝酸铵钙。根据肥液质量浓度设置 5 个梯度,分别为 0,10,20,35,60 g/L,并以肥液浓度为 15 g/L 的实测数据进行模型精度验证。设定灌水器初始流量为 5 L/h,灌水时间为 120 min。土箱按容重为 1.35 g/cm<sup>3</sup>进行装土,分层厚度为 5 cm,层间打毛,自然沉降 24 h 后开始试验。试验过程中,按照先密后疏的原则设置时间间隔,记录马氏瓶读数,并以灌水器底部为起点,用直尺测量湿润锋在竖直向上、竖直向下和水平方向的运移距离,灌水结束后用塑料薄膜覆盖以防止蒸发。灌水结束、再分布 1 天和再分布 3 天时,在距离灌水器水平 5 cm 处用土钻取土,每隔 10 cm 取 1 次样,分别测定土壤含水率、铵态氮和硝态氮的含量。土壤含水率采用烘干法进行测定,土壤中铵态氮和硝态氮的浓度采用紫外/可见光光度计法(PerkinElmer, LAMBDA 265)进行测定<sup>[15-16]</sup>。每组试验重复 3 次,取其平均值进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 肥液浓度对涌泉根灌土壤入渗能力的影响

由图 2 可知,随入渗历时的增长,不同浓度对应的土壤累计入渗量均逐渐增加,在灌水结束时,肥液浓度为 0,10,20,35,60 g/L 对应的土壤累计入渗量分别为 6.25,6.48,6.62,6.75,6.87 L,单位浓度增幅依次为 0.32%,0.26%,0.15%,0.08%。可以看出,肥液浓度对土壤的入渗能力有明显的促进作用,但随着肥液浓度的继续增加,促进作用逐渐减弱。这是因为随着

肥液的入渗,土壤中带负电荷的胶体逐渐被肥液中的铵根离子中和,使胶体之间排斥作用减弱甚至消失,促使微小胶体形成团聚体,增加了土壤颗粒的粒径,改善了土壤结构,从而使土壤的入渗能力得以增强<sup>[17-18]</sup>。

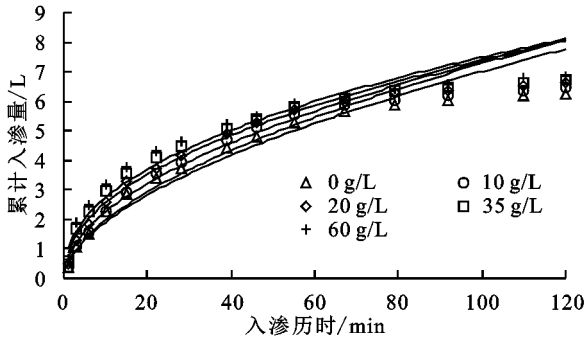


图 2 不同肥液浓度下土壤累计入渗量随入渗历时变化

土壤累计入渗量与入渗历时符合 Kostiakov 模型,即:

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

式中: $I(t)$ 为土壤累计入渗量(L); $K$ 为入渗系数(L/min); $\alpha$ 为入渗指数; $t$ 为入渗历时(min)。

运用公式(1)对图 2 中土壤累计入渗量与入渗历时的关系进行拟合。由表 1 可知,取显著性水平为 0.01,  $R^2$ 均大于其对应的临界相关系数  $R_{0.01}$  (0.606),这说明当肥液浓度不同时,土壤累计入渗量与入渗历时均符合 Kostiakov 模型。

表 2 土壤累计入渗量模拟值和实测值对比

指标	入渗历时/min							
	1	5	10	20	30	60	90	120
实测值/cm	0.93	1.77	2.49	3.68	4.07	5.79	6.29	6.56
模拟值/cm	1.02	1.96	2.60	3.44	4.05	5.37	6.33	7.11
相对误差/%	8.98	9.76	4.14	-6.98	-0.39	-7.84	0.60	7.74

注: $C=15$  g/L。

## 2.2 肥液浓度对土壤剖面湿润锋运移的影响

由图 3 可知,竖直向上、竖直向下和水平方向湿

表 1 不同肥液浓度条件下土壤累计入渗量与入渗历时关系

肥液浓度/ (g · L <sup>-1</sup> )	拟合公式	$R^2$
0	$I(t) = 0.871t^{0.429}$	0.973
10	$I(t) = 0.920t^{0.420}$	0.967
20	$I(t) = 1.079t^{0.395}$	0.970
35	$I(t) = 1.304t^{0.358}$	0.974
60	$I(t) = 1.449t^{0.337}$	0.972

注: $t$ 为入渗历时(min); $I(t)$ 为土壤累计入渗量(L)。

经分析,入渗系数  $K$  与肥液浓度  $C$  之间呈线性关系,而入渗指数  $\alpha$  与肥液浓度  $C$  之间则呈指数函数关系( $R_{0.01} = 0.9587$ ),即:

$$K = 0.0104C + 0.8657 \quad R^2 = 0.9605 \quad (2)$$

$$\alpha = 0.4303e^{-0.004C} \quad R^2 = 0.9613 \quad (3)$$

将公式(2)和公式(3)代入公式(1),得到以肥液浓度和入渗历时为自变量的涌泉根灌土壤累计入渗量模型:

$$I(t) = (0.0104C + 0.8657)t^{0.4303\exp(-0.004C)} \quad (4)$$

式中: $C$ 为肥液浓度(g/L),其取值范围为  $0 \leq C \leq 60$ ;  $t$ 为入渗历时(min); $I(t)$ 为土壤累计入渗量(L)。

为验证模型的可靠性,以肥液浓度为 15 g/L 为例,运用公式(4)可得到不同入渗历时对应的土壤累计入渗量。由表 2 可知,土壤累计入渗量模拟值和实测值的相对误差均在  $\pm 10.00\%$  以内,精度满足要求。

润锋均随入渗历时的增长而增加,且肥液浓度越大,各向湿润锋的运移距离也越大。

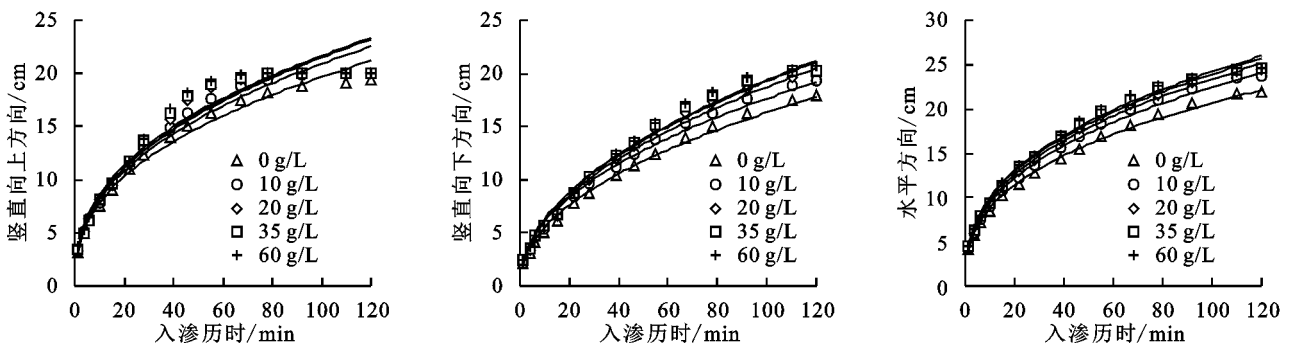


图 3 不同肥液浓度条件下土壤湿润锋运移距离随入渗历时变化

不同肥液浓度条件下,涌泉根灌肥液入渗湿润锋在竖直向上、竖直向下以及水平方向的运移距离与入渗历时均呈幂函数关系(表 3,  $R^2 > 0.930$ ),其函数形式为:

$$Z(t) = At^b \quad (5)$$

式中: $t$ 为入渗历时(min); $A$ 、 $b$ 为拟合参数; $Z(t)_u$ 、 $Z(t)_d$ 和 $Z(t)_l$ 分别为湿润锋在竖直向上、竖直向下和水平方向的运移距离(cm)。

由表 3 可知,土壤湿润锋拟合公式的 2 个参数  $A$  和  $b$  均随肥液浓度呈单一的变化关系,经分析,拟合

参数  $A$ 、 $b$  与肥液浓度均呈线性关系 ( $R^2 > 0.900$ ), 见 公式(6)~公式(11)。

表 3 土壤湿润锋运移距离拟合

肥液浓度/ (g · L <sup>-1</sup> )	竖直向上		竖直向下		水平	
	公式	R <sup>2</sup>	公式	R <sup>2</sup>	公式	R <sup>2</sup>
0	$Z(t)_u = 3.358t^{0.380}$	0.985	$Z(t)_d = 1.796t^{0.491}$	0.998	$Z(t)_l = 3.579t^{0.402}$	0.997
10	$Z(t)_u = 3.598t^{0.377}$	0.972	$Z(t)_d = 1.855t^{0.495}$	0.997	$Z(t)_l = 3.705t^{0.394}$	0.996
20	$Z(t)_u = 3.771t^{0.371}$	0.953	$Z(t)_d = 1.879t^{0.503}$	0.994	$Z(t)_l = 3.899t^{0.390}$	0.996
35	$Z(t)_u = 3.868t^{0.367}$	0.942	$Z(t)_d = 1.923t^{0.505}$	0.991	$Z(t)_l = 4.097t^{0.384}$	0.994
60	$Z(t)_u = 4.047t^{0.358}$	0.935	$Z(t)_d = 1.949t^{0.512}$	0.990	$Z(t)_l = 4.196t^{0.380}$	0.992

注:  $t$  为入渗历时 (min);  $Z(t)_u$ 、 $Z(t)_d$ 、 $Z(t)_l$  分别为土壤湿润锋在竖直向上、竖直向下和水平方向的运移距离。

$$A(C)_u = 0.0107C + 3.4608 \quad R^2 = 0.910 \quad (6)$$

$$Z(C, t)_l = (0.0106C + 3.6306)t^{-0.0003C + 0.3988} \quad (14)$$

$$b(C)_u = -0.0004C + 0.3798 \quad R^2 = 0.990 \quad (7)$$

式中:  $C$  为肥液浓度 (g/L), 其取值范围为  $0 \leq C \leq 60$ ;  $t$  为入渗历时 (min);  $Z(C, t)_u$ 、 $Z(C, t)_d$  和  $Z(C, t)_l$  分别为湿润锋在竖直向上、竖直向下和水平方向的运移距离 (cm)。

$$A(C)_d = 0.0024C + 1.8199 \quad R^2 = 0.901 \quad (8)$$

$$b(C)_d = 0.0003C + 0.4926 \quad R^2 = 0.936 \quad (9)$$

$$A(C)_l = 0.0106C + 3.6306 \quad R^2 = 0.922 \quad (10)$$

$$b(C)_l = -0.0003C + 0.3988 \quad R^2 = 0.911 \quad (11)$$

将公式(6)~公式(11)代入公式(5), 可得到红壤区涌泉根灌土壤湿润锋在竖直向上、竖直向下和水平方向的运移距离与肥液浓度和入渗历时的关系模型:

$$Z(C, t)_u = (0.0107C + 3.4608)t^{-0.0004C + 0.3798} \quad (12)$$

$$Z(C, t)_d = (0.0024C + 1.8199)t^{0.0003C + 0.4926} \quad (13)$$

同样, 以肥液浓度为 15 g/L 为例, 对公式(12)~公式(14)进行验证。由表 4 可知, 湿润锋在竖直向上、竖直向下和水平方向运移距离的模拟值和实测值的相对偏差均在  $\pm 10\%$  以内, 这说明不同肥液浓度时, 用公式(12)~公式(14)来预测红壤区涌泉根灌湿润锋的运移距离是合理的。

表 4 湿润锋运移距离实测值和模拟值对比

入渗 历时/min	竖直向上			竖直向下			水平		
	实测值/ cm	拟合值/ cm	相对 偏差/%	实测值/ cm	拟合值/ cm	相对 偏差/%	实测值/ cm	拟合值/ cm	相对 偏差/%
1	3.3	3.6	8.87	1.7	1.9	8.40	4.1	3.8	-8.19
5	6.1	6.6	7.70	4.3	4.1	-4.10	7.2	7.1	-0.72
10	7.8	8.6	8.92	5.9	5.8	-1.20	8.8	9.4	6.33
30	12.7	12.9	1.65	9.7	10.1	3.63	13.9	14.5	4.06
60	17.9	16.7	-6.98	13.9	14.2	2.15	19.4	19.0	-1.88
90	19.7	19.5	-1.18	17.8	17.4	-2.43	21.9	22.3	1.98
120	20.0	21.7	/	19.3	20.1	3.74	23.5	25.0	6.10

注:  $C = 15$  g/L。

### 2.3 肥液浓度对土壤湿润体内含水率分布的影响

土壤水分的分布直接影响作物对水分的有效吸收<sup>[19]</sup>。本试验于灌水结束及再分布 1 天和 3 天时, 在距

离灌水器水平 5 cm 处进行垂向取土, 分析肥液浓度对土壤湿润体内含水率分布及再分布的影响(图 4)。

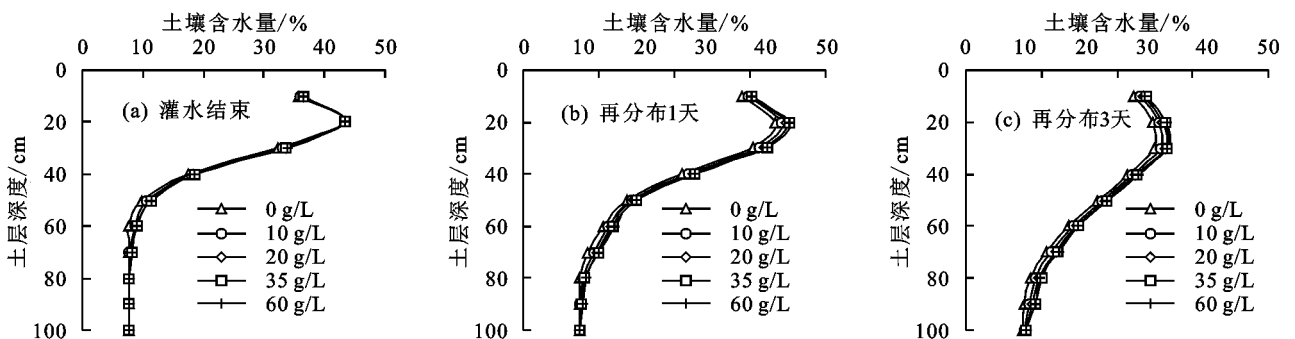


图 4 肥液浓度对土壤含水率的分布及再分布影响

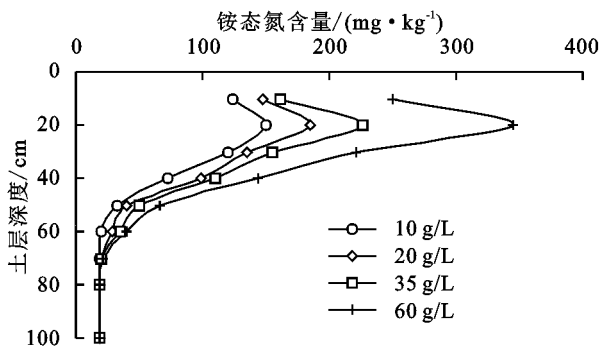
由图 4 可知, 在灌水结束时, 土壤水分主要集中在 0—50 cm 土层内, 且肥液浓度越大, 相同土层内土壤含水率就越大。在灌水结束时, 各层土壤剖面含水

率的极差值分别为 35.8%, 35.9%, 35.8%, 35.8%, 35.9%, 且最大值均处于 10—20 cm, 而再分布 3 天时, 各层土壤剖面含水率的极差值减小至 17.3%, 17.9%,

18.4%, 18.7%, 18.7%, 且土层内最大含水率的位置下移至 20—30 cm, 可以看出, 随着再分布的进行, 土壤水分逐渐向深层迁移, 土壤含水率的剖面分布更加均匀, 且土层内最大含水率位置逐渐下移。这是因为随着肥液浓度的增加, 越来越多的铵态氮进入土壤, 铵态氮带正电荷, 易与带负电荷的土壤胶体发生中和反应, 促使土壤形成更大的团聚体, 从而改善了土壤的入渗特性。此外, 肥液中所含的钙离子对土壤的保水性能也有一定的促进作用, 因此肥液浓度越高, 保水效果也就越好<sup>[10]</sup>。随着再分布时间的延长, 土壤肥液在重力势、基质势和溶质势的共同作用下, 逐渐从土壤浅层向深层运移, 从而使土壤水分的分布更加均匀。

#### 2.4 肥液浓度对土壤氮素运移分布的影响

在灌水结束、再分布 1 天和再分布 3 天时, 测定不同深度土层内铵态氮和硝态氮的质量浓度, 并对不同肥液浓度、不同时间条件下土壤中铵态氮和硝态氮的浓度分布进行分析。



2.4.1 肥液浓度对土壤湿润体内铵态氮运移分布的影响 图 5 为不同肥液浓度时, 灌水结束时距离灌水器水平 5 cm 处土壤中铵态氮浓度的分布曲线和肥液浓度为 20 g/L 时, 距离灌水器水平 5 cm 处在灌水结束, 再分布 1 天和 3 天时土壤中铵态氮的再分布曲线。由图 5 可知, 在灌水结束时, 土壤中铵态氮主要分布在 0—40 cm 土层内, 且肥液浓度越高, 规律越明显, 这是因为铵态氮带正电荷, 易受带负电荷的土壤胶体所吸附, 导致土壤中铵态氮主要分布在灌水器附近, 只有当灌水器附近土壤所吸附的铵态氮达到饱和后, 部分铵态氮才开始随着水流向土壤深层迁移, 其运移受土壤吸附能力的影响明显。铵态氮的再分布过程中, 在开始阶段, 表层中的铵态氮随着土壤肥液逐渐向下层迁移, 因此, 铵态氮浓度表现出表层下降, 深层增加的变化趋势。随着再分布时间的延长, 土壤中肥液的运动基本稳定, 铵态氮浓度的变化主要是由于铵态氮的硝化反应造成, 因此不同深度土层中, 铵态氮浓度均表现为逐渐降低的变化趋势。

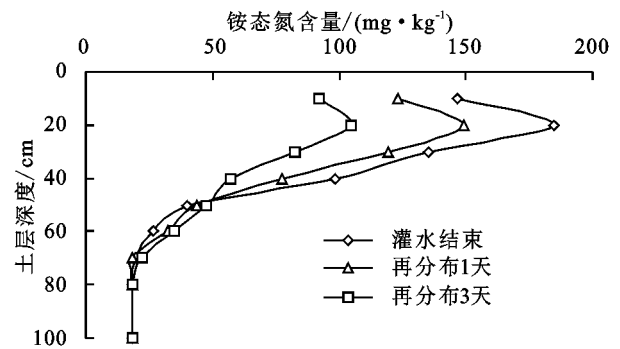


图 5 肥液浓度对土壤中铵态氮的分布及再分布影响

2.4.2 肥液浓度对土壤湿润体内硝态氮运移分布的影响 图 6 为不同肥液浓度时, 在灌水结束时距离灌水器水平 5 cm 处土壤中硝态氮浓度的分布曲线, 和肥液浓度为 20 g/L 时, 距离灌水器水平 5 cm 处土壤中硝态氮的再分布曲线。由图 6 可知, 在灌水结束时, 与土壤中铵态氮相比, 硝态氮的分布范围更广, 且肥液浓度越大, 相同土层内硝态氮的浓度就越高, 这是因为带有大量负电荷的土壤胶体对硝态氮的吸附能力较弱, 因此, 硝态氮易随土壤肥液一起运动, 且肥液浓度越高,

其所携带的硝态氮就越多, 因此, 硝态氮浓度也就越高。从灌水结束至再分布 1 天时, 土层中硝态氮的浓度变化表现为浅层降低, 深层增加的变化趋势, 这是因为在此期间, 土壤中硝态氮的浓度变化主要是由于肥液的运动造成的; 而再分布 1 天至再分布 3 天, 硝化反应逐渐成为硝态氮浓度变化的主要因素, 因此各层硝态氮的浓度均逐渐增大, 而在表层土壤中, 土壤的通气性更好, 硝化反应也更剧烈, 因此与土壤深层相比, 浅层土壤中硝态氮的浓度增大幅度更大。

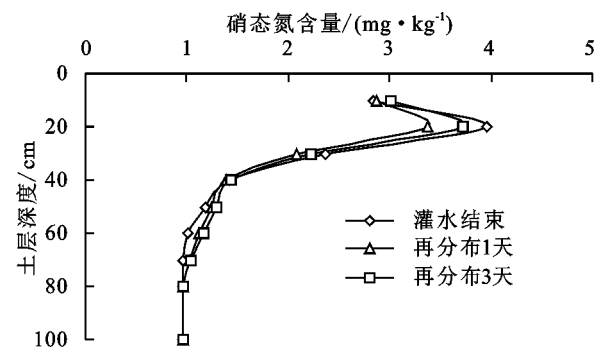
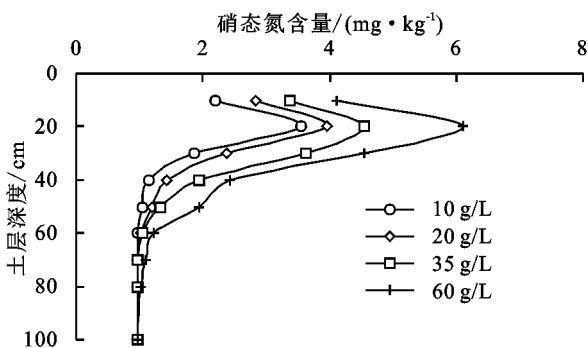


图 6 肥液浓度对土壤中硝态氮的分布及再分布影响

### 3 结论

(1)肥液浓度对涌泉根灌土壤入渗能力的影响显著,肥液浓度越高,土壤累计入渗量就越大,且不同肥液浓度条件下,土壤累计入渗量随入渗历时的变化均符合 Kostiaikov 模型;湿润锋在竖直向上、竖直向下以及水平方向的运移距离均随肥液浓度的增大而增大,且与入渗历时均呈幂函数关系。

(2)在灌水结束时,土壤水分主要集中在 0—50 cm,且肥液浓度越大,相同位置处土壤含水率就越高,随着再分布的进行,土壤含水率的剖面分布均趋于均匀,且土壤剖面含水率的最大值逐渐下移。

(3)在灌水结束时,土壤中铵态氮主要分布在 0—40 cm,而硝态氮的分布范围更广,且肥液浓度越高,规律越明显,再分布期间,在开始阶段,土壤中铵态氮随水分逐渐向下层迁移,而后不同深度土层中铵态氮浓度均逐渐降低;而硝态氮的分布规律与铵态氮存在差别,在开始阶段,土壤中硝态氮浓度表现为浅层降低,深层增加的变化趋势,而后各层中硝态氮的浓度均逐渐增大,且与土壤深层相比,浅层土壤中硝态氮的浓度增幅更大。

#### 参考文献:

[1] 涂安国,谢颂华,李英,等.红壤坡地柑桔园长期试验下水沙动态变化特征分析[J].水土保持学报,2018,32(2):160-165.

[2] 刘伟佳,李占斌,邹大胜,等.非吸附性离子质量浓度对红壤入渗特性的影响[J].排灌机械工程学报,2018,36(8):645-650.

[3] 曾健.陕北黄土丘陵沟壑区涌泉根灌苹果树耗水特征与灌溉制度研究[D].西安:西安理工大学,2018.

[4] Dai Z G, Fei L J, Huang D L, et al. Coupling effects of irrigation and nitrogen levels on yield, water and nitrogen use efficiency of surge-root irrigated jujube in a semiarid region [J]. *Agricultural Water Management*, 2019,213:146-154.

[5] 王佳.陕北山地枣树涌泉根灌调亏灌溉制度与水肥耦合效应研究[D].西安:西安理工大学,2016.

[6] Dai Z G, Fei L J, Zhong Y, et al. Water and nitrogen input optimization for jujube trees under surge root irri-

gation based on weighted grey correlation model [J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2019,12(3):45-51.

[7] Simunek J, Bristow K L, Helalia S A, et al. The effect of different fertigation strategies and furrow surface treatments on plant water and nitrogen use [J]. *Irrigation Science*, 2016,34:53-69.

[8] Wu Y, Wang L C, Bian S F, et al. Evolution of roots to improve water and nitrogen use efficiency in maize elite inbred lines released during different decades in China [J]. *Agricultural Water Management*, 2019,216:44-59.

[9] Huang P, Zhang J B, Zhu A N, et al. Nitrate accumulation and leaching potential reduced coupled water and nitrogen management in the Huang-Huai-Hai Plain [J]. *Science of the Total Environment*, 2018,610:1020-1028.

[10] 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.

[11] 何振嘉,傅渝亮,王博,等.涌泉根灌不同浓度肥液入渗特性及土壤湿润体模型研究[J].农业工程学报,2018,34(24):90-99.

[12] 陈琳,费良军,刘利华,等.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[J].水土保持学报,2018,32(2):58-66.

[13] 钟韵,费良军,刘乐,等.膜孔灌溉下土壤入渗特征的多因素分析[J].水科学进展,2018,29(4):53-61.

[14] 刘风华,代智光,费良军.容重对红壤条件下涌泉根灌水分入渗能力影响[J].水土保持学报,2019,33(1):88-92.

[15] 鲁如坤.土壤农业化学常规分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1999.

[16] 中华人民共和国农业部.GB/T 32737—2016 土壤硝态氮的测定—紫外分光光度计法[S].北京:中国标准出版社,2016.

[17] 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.

[18] 刘乐.浑水膜孔灌自由入渗氮素运移转化与水肥耦合特性及影响因素研究 [D].西安:西安理工大学,2019.

[19] Liang W L, Kosugi K, Mizuyama T. Soil water redistribution processes around a tree on a hillslope: The effect of stemflow on the dry in process [J]. *Ecohydrology*, 2016,8:1381-1395.