

肥液浓度对涌泉根灌土壤水氮运移特性的影响

刘 显, 费良军, 刘 扬, 王 昌

(西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

摘要: 为了提高涌泉根灌水肥的利用效率, 采用室内土箱入渗试验, 探究了不同肥液浓度(0, 15, 30, 60 g/L)条件下湿润锋运移、土壤水分及氮素分布的规律。结果表明: 入渗相同时间时, 随着肥液浓度的增大, 湿润锋运移距离、湿润体内相同节点处的土壤含水率、铵态氮及硝态氮质量分数均增大; 湿润锋运移距离与入渗时间具有显著的幂函数关系, 其决定系数均达到 0.99; 随着肥液入渗再分布的进行, 湿润体内含水率分布更加均匀, 最大含水率位置下移, 铵态氮量逐渐减小, 再分布 5 d 湿润体内硝态氮量达到最大值; 硝态氮运移规律和水分相似, 易随水分流失。该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; 肥液浓度; 土壤入渗; 氮素运移

中图分类号: S275.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)05-0166-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2016.05.028

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

LIU Xian, FEI Liangjun, LIU Yang, WANG Chang

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

Abstract: To improve the water and fertilizer utilization efficiency of bubbled-root irrigation, the indoor infiltration experiment was conducted to explore the bubbled-root irrigation wetting front movement and soil moisture and nitrogen distribution rules at different fertilizer solution concentration criteria. Results showed that same infiltration time, with the increase of the fertilizer concentration, the wetting front migration distance and the soil water content at the same location in the wet body and the mass fraction of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen increased. The relationship between wetting front migration distance and infiltration time was a power function and the coefficient of determination reached 0.99. With the distribution of fertilizer solution infiltration, wet body achieved a sense of stability, uniform moisture content distribution, moisture content of peak position went down gradually. The amount of ammonium nitrogen decreased gradually and the maximum value of nitrate nitrogen was reached in 5 days moist body. Nitrate nitrogen migration regularity and moisture was consistent, along with the moisture loss. The above research results could lay the foundation for further research on efficient bubbled-root irrigation technology of using water and nitrogen.

Keywords: bubbled-root irrigation; fertilizer solution concentration; soil infiltration; nitrogen migration

涌泉根灌作为一种新型地下渗灌技术, 在山地经济林果中较滴灌和管灌有着不可比拟的优势, 其原理是通过微管把水肥直接输送到果树根区, 进行地下局部灌溉, 减小蒸发损失, 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^[1]。近年来, 众多学者在涌泉根灌土壤入渗方面开展了大量研究工作, 并取得了诸多成果。Hanson 等^[2]将沟灌、地表滴灌、管灌和地下渗灌进行对比分析, 表明采用地下灌溉模式对灌溉水利用率更高; 汪有科等^[3]在黄土地

对涌泉根灌进行水分入渗试验, 表明灌水器孔径和埋深与湿润体各向湿润锋运移距离具有显著幂函数关系, 再分布 1 d 湿润体基本达到稳定状态, 指出较为适宜的灌水器埋深和孔径分别为 30~40 cm 和 6 cm; 费良军等^[4]、黎朋红等^[5]通过大田试验表明, 随着灌水器流量的增大, 湿润体各向湿润锋运移距离变大且均与灌水时间呈幂函数关系; 李耀刚等^[6]用 Hydrus-3D 软件模拟流量对湿润体特性的影响, 得到了相同的结论; 牛文全等^[7]通过室内水分入渗试验表

收稿日期: 2016-04-21

资助项目: 国家自然科学基金资助项目(51279157, 51479161); 国家“十二五”科技支撑计划资助项目(2011BAD29B04); 陕西省科技计划资助项目(2011K01-22)

第一作者: 刘显(1989—), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉研究。E-mail: 651583261@qq.com

通信作者: 费良军(1963—), 男, 陕西人, 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

明,随着土壤初始含水率的变大,各向湿润锋运移速率及距离均变大,并且入渗结束后湿润体内水分分布也越加均匀;吴恒卿等^[8]在双点源条件下研究了灌水器间距及流量对土壤水分运移的影响;张智韬等^[9]研究表明,土壤初始含水率和套筒长度对湿润锋运移有促进作用,而土壤容重对其起抑制作用,建立了土壤初始含水率、容重及套筒长度与湿润锋运移距离的综合预测模型;而在涌泉根灌氮素运移方面,仅费良军等^[10]通过大田肥液入渗试验,研究了涌泉根灌条件下尿素溶液对累积入渗量、湿润锋运移及湿润体内铵态氮和硝态氮量分布的影响,表明随着肥液浓度的增大,累积入渗量、湿润锋运移速率及湿润体内同一节点处土壤铵态氮、硝态氮量均呈增大趋势。

综上所述,目前关于涌泉根灌的研究主要集中于土壤水分入渗特性方面,对肥液入渗条件下氮素运移、转化特性的研究涉及较少。因此,本文通过涌泉根灌室内肥液入渗试验,研究了肥液浓度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提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验土壤

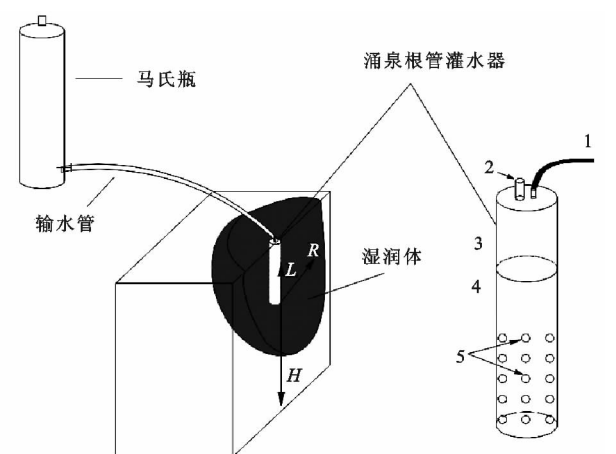
试验在陕西省榆林市米脂县西北农林科技大学米脂试验站进行,供试土壤于 2015 年 8 月取自银州镇孟岔村山地微灌枣树试验田间表层 0—50 cm 熟土,待土壤自然风干后,碾碎过 2 mm 细筛。利用马尔文 2000 激光粒度仪对试验土壤进行颗粒分析,不同粒径级 $d<0.002\text{ mm}$, $0.002\text{ mm}<d\leq0.02\text{ mm}$, $0.02\text{ mm}<d\leq2.0\text{ mm}$ 分别占 1.997%,13.384%,84.619%,按国际制分类标准判定为砂壤土,初始含水率为 1.6%(质量含水率,下同)。

1.2 试验装置及试验设计

试验装置主要由马氏瓶和有机玻璃制成的 $100\text{ cm}\times50\text{ cm}\times100\text{ cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)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;涌泉根灌灌水器上部为特有的迷宫流道,下部为分布均匀的出水孔套管;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,氮素测定使用全自动间断化学分析仪,分析仪型号: Clever Chem2000。试验装置及涌泉根灌根灌器细节如图 1 所示。

1.3 试验方法及观测内容

试验设定流量为 5 L/h,灌水时间 300 min,装土容重 1.35 g/cm^3 ,设定 3 种肥液浓度梯度,分别为 15,30,60 g/L,同时设立清水对照试验,每组试验重复进行 3 次,取其平均值进行分析。



注:1、输水管;2、通气孔;3、灌水器内部迷宫流道;4、灌水器套管;5、出水孔。

图 1 试验装置示意图

灌水器布置在试验土箱长边的边缘,埋深为 30 cm;在土箱侧面以灌水器出水口位置为圆心,建立坐标系,水平向右为 R 轴,竖直向下为 H 轴,竖直向上为 L 轴。试验开始后,在最初入渗 1 h 内,每隔 10 min 在土箱上画出湿润锋轨迹,并用卷尺测量出土壤各向湿润锋运移距离,在接下来的 2 h 内,每隔 20 min 在土箱上画出湿润锋轨迹并测量,之后每隔 30 min 观测 1 次,直至试验完毕。入渗结束后,分别在水平距离滴头 0,12.5,25 cm 的垂直深度 0—100 cm 范围内每隔 10 cm 用土钻取土。

2 结果与分析

2.1 肥液浓度对涌泉根灌土壤水分运移特性的影响

2.1.1 肥液浓度对各向湿润锋运移特性的影响 图 2 为不同肥液浓度条件下,水平湿润锋、竖直向下湿润锋和竖直向上湿润锋随时间变化的运移特性曲线。可以看出,水平湿润锋 R、竖直向下湿润锋 H 和竖直向上湿润锋 L 均随着入渗时间及肥液浓度的增加而增大,在灌溉相同时间时,肥液浓度越大湿润锋运移的距离越大。这是因为伴随着肥液浓度的增大,溶质势相应增大,肥液中的阳离子也越多,进而与土壤胶体中和,产生土壤团聚体越多,增大了土壤孔隙度,从而促进了湿润锋的运移。

经分析,各向湿润锋运移距离均与入渗时间具有良好的幂函数关系,设

$$R(t)=at^b, \quad H(t)=ct^d, \quad L(t)=et^f \quad (1)$$

式中: $R(t)$ 、 $H(t)$ 和 $L(t)$ 分别为水平湿润锋、竖直向下湿润锋和竖直向上湿润锋的运移距离(cm); a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 均为拟合参数。

通过上式对图 2 中各方向湿润锋运移距离的实测值进行拟合,结果如表 1 所示。

取显著性水平为 0.01,临界相关系数 r_a 为 0.606,拟合结果良好。由表 1 可知,拟合参数 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 与肥液浓度呈良好线性关系,拟合结果见图 2。

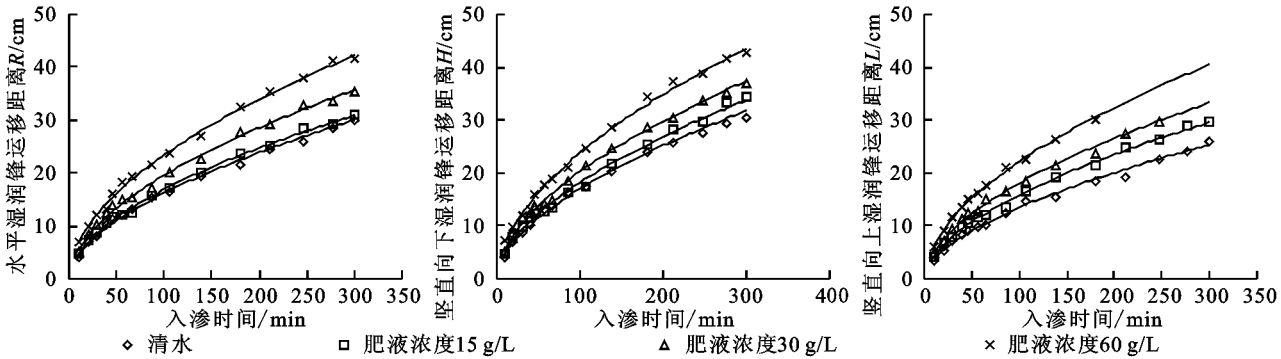


图 2 不同肥液浓度下各向湿润锋运移特性曲线

表 1 不同肥液浓度条件下各方向湿润锋运移
距离与入渗时间关系拟合结果

肥液浓度/(g·L ⁻¹)		0	15	30	60
水平湿润锋(R)	<i>a</i>	1.2281	1.3473	1.5857	1.9991
	<i>b</i>	0.5602	0.5494	0.5459	0.5348
	<i>R</i> ²	0.9943	0.9971	0.9953	0.9962
竖直向下湿润锋(<i>H</i>)	<i>c</i>	1.2334	1.3575	1.5529	0.9030
	<i>d</i>	0.5694	0.5636	0.5578	0.5486
	<i>R</i> ²	0.9944	0.993	0.9931	0.9958
竖直向上湿润锋(<i>L</i>)	<i>e</i>	0.9421	1.1638	1.3889	1.7660
	<i>f</i>	0.5771	0.5673	0.5569	0.5493
	<i>R</i> ²	0.9936	0.9958	0.9954	0.9985

(1)水平湿润锋

$a=0.0132C+1.1931 \quad R^2=0.9904$
 $b=-0.0004C+0.5581 \quad R^2=0.9628$

将相关性系数拟合结果代入幂函数公式(1),则水平湿润锋运移距离随时间和肥液浓度变化的数学模型可表示为

$R(t,C)=(0.0132C+1.1931)t^{-0.0004C+0.5581}$
 $0<t\leq 300, 0\leq C\leq 60$

式中: $R(t,C)$ 为水平湿润锋运移距离与入渗时间及肥液浓度关系式; C 为肥液浓度(g/L); t 为入渗时间(min)。

(2)竖直向下湿润锋

$c=0.0114C+1.2130 \quad R^2=0.9955$
 $d=-0.0003C+0.5689 \quad R^2=0.9958$

将相关性系数拟合结果代入幂函数公式(1),则竖直向下湿润锋运移距离随时间和肥液浓度变化的数学模型可表示为

$H(t,C)=(0.0114C+0.2130)t^{-0.0003C+0.5689}$
 $0<t\leq 300, 0\leq C\leq 60$

式中: $H(t,C)$ 为竖直向下湿润锋运移距离与入渗时间及肥液浓度关系式; C 为肥液浓度(g/L); t 为入渗时间(min)。

(3)竖直向上湿润锋

$e=0.0137C+0.9554 \quad R^2=0.9978$
 $f=-0.0005C+0.5757 \quad R^2=0.9837$

将相关性系数拟合结果代入幂函数公式(1),则

竖直向上湿润锋运移距离随时间和肥液浓度变化的数学模型可表示为

$L(t,C)=(0.0137C+0.9554)t^{-0.0005C+0.5757}$
 $0<t\leq t_c, 0\leq C\leq 60$

式中: $L(t,C)$ 为竖直向上湿润锋运移距离与入渗时间及肥液浓度关系式; C 为肥液浓度(g/L); t 为入渗时间(min)。 t_c 为竖直向上湿润锋运移到土壤表面的时间(min)。

2.1.2 肥液浓度对土壤含水率的影响 在灌水结束时刻及再分布 1,3,5 d 时分别在灌水器位置处及距灌水器水平 12.5,25 cm 位置进行垂向取土,分析肥液浓度对土壤含水率分布的影响。

图 3 为涌泉根灌供水结束时刻不同肥液浓度条件下湿润体内垂直剖面土壤含水率等值线分布图。图 3 中的 0 点即为灌水器及其孔洞所处位置。可以看出,不同肥液浓度条件下产生的含水率等值线分布图均呈不规则的半椭球形,距离灌水器位置越远,等值线分布越密集,水势梯度越大;随着肥液浓度的增大,高含水区域湿润体范围增大,同一节点处含水率越大。

图 4 为灌水结束时刻不同肥液浓度条件下灌水器位置及肥液浓度 60 g/L 条件下,再分布 1,3,5 d 时距灌水器水平 12.5 cm 处垂向土壤含水率分布曲线图。可以看出,湿润深度 60 cm 以上范围,同一节点处的土壤含水率随着肥液浓度的增大而变大,且随着再分布的进行而减小;深度 60 cm 以下范围的土壤随着再分布的继续,含水率有增加趋势。这是由于肥液浓度增大导致了土壤溶质势相应增大,团聚体增多,孔隙度变大,土壤的入渗能力增大,导致累积入渗量增大;另溶液中含有的钙离子对土壤具有一定的保水作用,肥液浓度越大,钙离子浓度越高,保水效果越显著。灌施结束后,随着再分布的进行,湿润体内高含水区域土壤水分在基质势、重力势、溶质势及水势差的共同作用下,继续向四周扩散,下层土壤受到高含水区域土壤水分的补充,以及在水势梯度的作用下继续向远离湿润体区域运移,从而湿润体内水分的分布更加均匀。在灌水器位置垂向深度 80 cm 范围内,灌水结束和再分布 1 d,3 d,湿润体内最大含水率

及最小含水率分别为 0.267,0.100 g/g;0.238,0.130 g/g 和0.141,0.118 g/g;则其相对差值分别为 62.55%,45.38%和 16.31%,可见再分布 3 d 湿润体内含水率分布更加均匀。

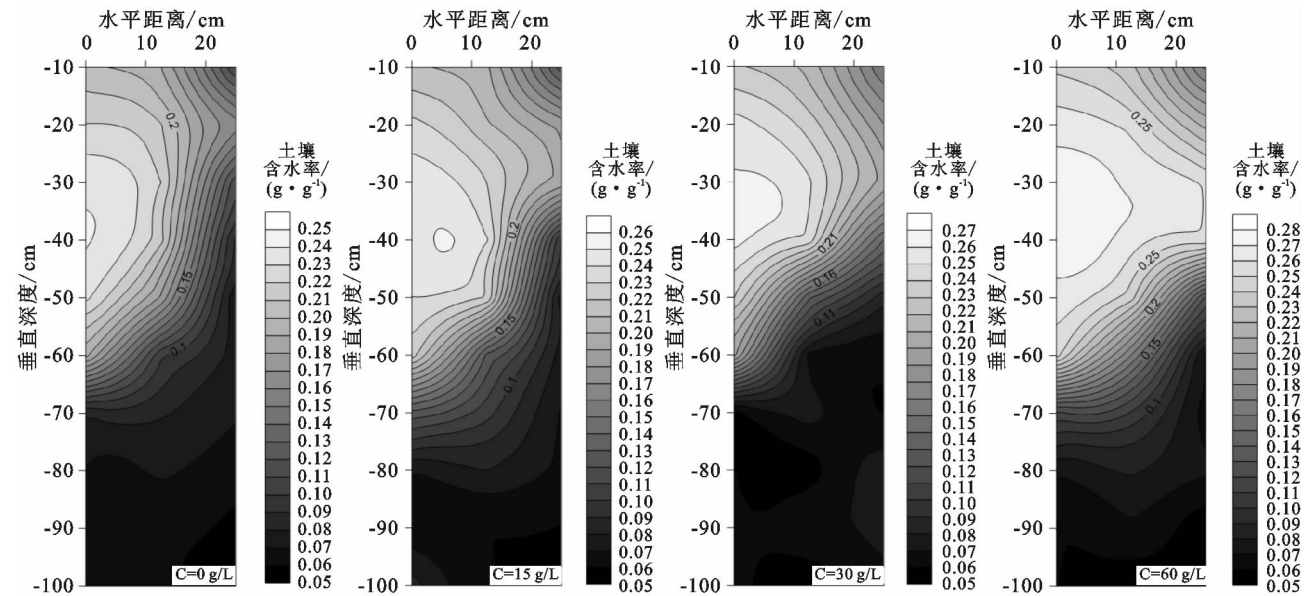


图 3 不同肥液浓度条件下湿润体内垂直剖面土壤水分分布

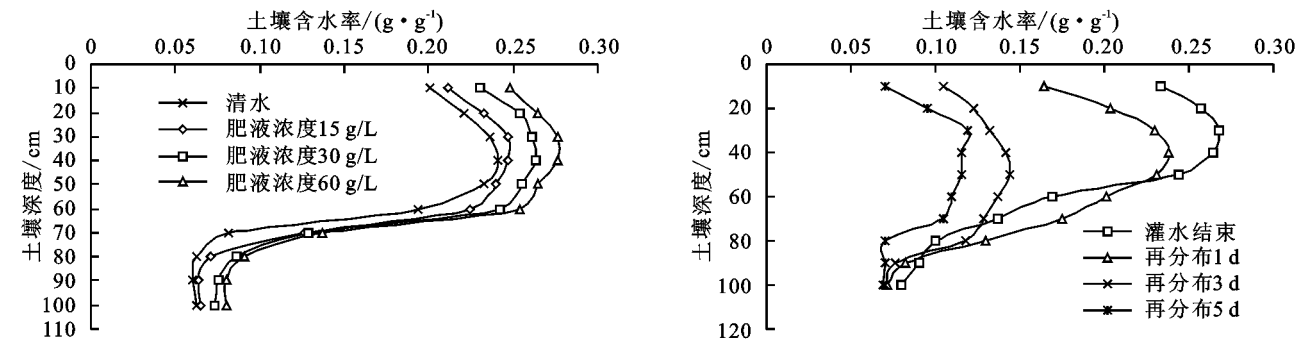


图 4 不同肥液浓和再分布时间条件下湿润体内土壤含水率分布规律

2.2 肥液浓度对涌泉根灌土壤氮素运移特性的影响

2.2.1 肥液浓度对湿润体内铵态氮分布的影响

由图 5(a)和图 5(b)可知,在肥液浓度 30 g/L 条件下,灌水结束及再分布 1,3,5,10 d 时灌水器位置处垂向铵态氮量变化曲线和肥液浓度为 15,30,60 g/L 时,灌水结束时刻在距灌水器水平 12.5 cm 处铵态氮量随土壤深度变化曲线。可以看出,土壤深度 30 cm 范围内,铵态氮量随着土壤深度的增加而逐渐增大,在 30 cm 左右达到峰值(灌水器下端口位置);深度 30 cm 以下,土壤

中铵态氮量迅速下降,50 cm 以下位置铵态氮量变化不大。灌施结束时刻土壤中铵态氮量达到最大值,随着再分布进行,铵态氮量逐渐减小;肥液浓度越大,湿润体内同一节点处铵态氮量越高。这是因为带负电荷的土壤胶体对铵根离子具有吸附性,将大量的铵根离子吸附在灌水器出水口周围的土壤中;肥液浓度越大,溶液中的铵根离子越多,同一节点处土壤中的铵态氮量就越大;随着再分布的持续,土壤中铵态氮伴随着挥发及硝化作用,铵态氮的量逐渐减小。

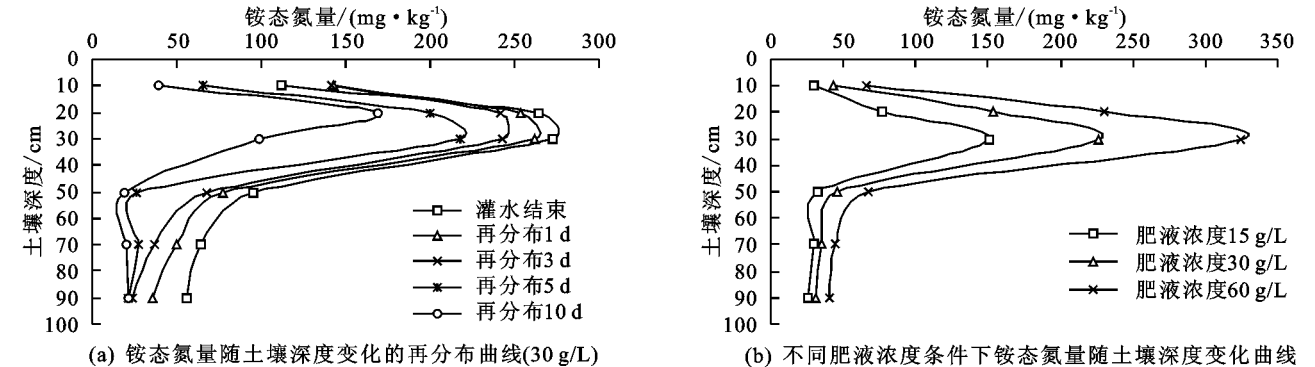


图 5 不同时间、不同肥液浓度条件下土壤中铵态氮量的分布规律

2.2.2 肥液浓度对湿润体内硝态氮分布的影响 由图 6(a)可知,在肥液浓度为 15 g/L 的试验处理条件下,灌水器位置垂向深度不同时间下硝态氮量的变化。可以看出,不同时间下,硝态氮量随着土壤深度的增加而逐渐减小,硝态氮峰值基本位于土壤深度 10 cm 处,这是由于浅层土壤通气状况良好,促进硝化作用进行,硝态氮量增大。随着肥液入渗再分布,湿润体内硝态氮量持续增大,再分布 5 d 土壤中硝态氮量达到最大值。灌水结束、再分布 1,3,5,10 d 条件下,土壤中硝态氮峰值分别为 3.60,4.58,5.10,5.46,4.66 mg/kg,变化速率依次为 27.22%,11.35%,7.06%,−14.65%;硝态氮含量峰值在灌水结束后到再分布 1 d 的时间段内增大较快,1~5 d 时间段内增大较为缓慢,5 d 达到最大,5~10 d 的时间段内逐渐

减小;说明铵态氮转化为硝态氮主要在再分布 5 d 内进行,这期间应注意防止氨气的挥发损失。图 6(b)为灌水结束时刻,在浓度为 15,30,60 g/L 肥液入渗条件下,距灌水器水平 12.5 cm 位置处垂向深度土壤硝态氮量分布曲线图。可以看出,肥液浓度越大,湿润体内相同节点处硝态氮量越高,且随着土壤深度的增加,硝态氮量逐渐减小,湿润体内硝态氮分布规律与土壤含水率相似;肥液浓度增大,导致土壤孔隙度变大,随着肥液进入土壤的硝态氮增多;越接近土壤表层,通气状况越好,进而促进表层铵态氮向硝态氮转化。硝态氮与土壤胶体的相斥性及在水分推移作用下,促使其向湿润锋处运移,运移特性方面与水分相似。这在一定程度上反映出了硝化作用受到通气条件的影响和硝态氮易随水分流失的特性。

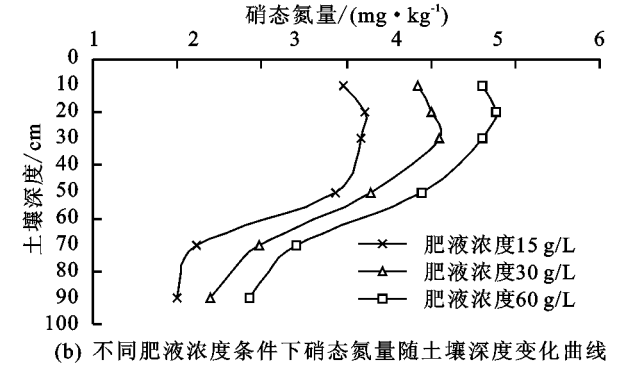
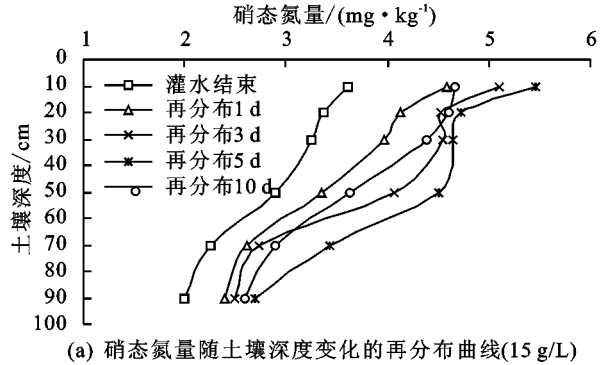


图 6 不同时间、不同肥液浓度条件下土壤中硝态氮量的分布规律

3 结论

(1)在肥液入渗过程中,湿润体内各方向湿润锋运移距离随入渗时间和肥液浓度呈幂函数规律增大;灌施结束时刻,湿润体内同一节点处的土壤含水率亦随着肥液浓度的增大而增大,此研究成果与费良军等^[10]通过大田肥液入渗试验和董玉云等^[11-12]采取室内膜孔肥液入渗试验得到的结论一致,肥液入渗,促使土壤团聚体的增加,孔隙度增大,加快了湿润锋的运移,湿润锋运移速率及距离伴随着肥液浓度的增大而增大,因而在选择水肥溶液浓度时,在依据作物对氮肥的需求及根系分布范围前提下,合理的布设灌水器孔洞位置及埋深,避免造成水肥溶液蒸发损失或深层渗漏,以使其得到充分利用。再分布 3 d,湿润体内土壤含水率分布更加均匀。

(2)肥液浓度越大,湿润体内同一节点处的铵态氮和硝态氮质量分数越大;铵态氮峰值位于灌水器出水口附近,体现了土壤胶体对铵态氮的固定吸附作用,硝态氮在湿润体内的分布规律与水分相似,表现出易随水分流失的特性,故涌泉根灌在大田的实际应用中,应依据湿润体内氮素的分布特性结合作物根系的分布特点,选择适宜的肥液浓度和灌水器位置,以提高水肥的利用效率;随着再分布期间硝化及反硝化作用的进行,湿润体内铵态氮量逐渐减小而硝态氮量

逐渐增加且峰值有下移趋势;再分布 5 d,硝态氮质量分数达到最大,这一结果与董玉云等^[11]通过室内灌施尿素肥液膜孔入渗试验,再分布 15 d 左右湿润体内硝态氮量达到峰值的结论不同,分析其中原因,主要是肥液种类造成的,尿素溶液中的铵态氮及硝态氮来自于尿素的水解,周期较长,本试验采用的硝酸铵钙肥液,水肥溶液本身既具有较多铵根离子及硝根离子,这在一定程度上缩短了转化周期,在灌施结束时刻,湿润体内铵态氮及硝态氮量均高于尿素肥液,尤其是铵态氮,灌水结束时湿润体内铵态氮量即达到最大值,硝态氮也在再分布 5 d 处于最大值;此结论体现了硝酸铵钙肥液具有快速补氮、肥效更快的特点。

以上研究成果,在一定程度上为果树涌泉根灌水肥一体化灌溉条件下水肥的高效利用提供理论参考。但本文所涉及的土壤为质地均一的砂壤土,土壤容重也较为单一,以上研究成果对于其他土壤类型及容重是否成立,有待进一步研究。由于涌泉根灌主要应用于根系分布较为广泛的果树作物,而根据特定果树根系分布的特点,可能会布置不同数量的灌水器,则会出现相邻灌水器产生的湿润体发生交汇,影响湿润体特性,故后期应侧重对双点源或多点源同时灌施水肥溶液时,肥液浓度对湿润体特征值及水分和氮素运移特性进行研究。