

肥液浓度对浑水膜孔灌多点源入渗水氮运移的影响

康守旋, 费良军, 姜瑞瑞, 钟 韵

(西安理工大学省部共建西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 西安 710048)

摘要: 为了探究浑水膜孔灌多点源入渗多向交汇下水氮运移特性, 利用浑水膜孔灌入渗装置进行了室内试验, 研究了不同肥液浓度(0, 1, 2, 3, 4 g/L)的硝酸铵钙溶液对浑水膜孔灌多向交汇入渗规律、单向交汇和多向交汇发生时间、膜孔中心和各交汇点(植株交汇中心、行间交汇中心和 4 点源交汇中心)垂直方向的含水率和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的分布规律等的影响。结果表明: 各肥液浓度下膜孔单位面积累积入渗量与入渗时间呈幂函数关系, 入渗参数 a 随肥液浓度的增大而减小, 入渗参数 b 随肥液浓度的增大而增大; 随着肥液浓度的增加, 单向交汇和多向交汇发生时间均提前; 10 cm 土层深度处, 肥液入渗各中心含水率较 0 g/L 处理分别增加 10.42%, 13.94%, 16.38%, 24.74%; 各中心垂直方向含水率随土壤深度呈现不同的变化规律; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在土壤上层分布均匀, 而在湿润锋处出现峰值; 4 点源交汇中心处 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量高于其他 3 个中心。研究结果可为浑水膜孔灌的技术研究奠定科学基础。

关键词: 浑水入渗; 膜孔灌; 多点源入渗; 水氮运移

中图分类号: S274.3 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2019)06-0156-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.06.022

Effect of Fertilizer Concentration on Water and Nitrogen Migration in Multi-point Source Infiltration of Muddy Water Film Hole Irrigation

KANG Shouxuan, FEI Liangjun, JIANG Ruirui, ZHONG Yun

(State Key Laboratory Base of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an 710048)

Abstract: In order to investigate the characteristics of water and nitrogen migration under multi-point source infiltration in the muddy water-filled membrane hole irrigation, the indoor hydrophobic membrane hole infiltration device was used to test the influence of the infiltration solution (0 g/L, 1 g/L, 2 g/L, 3 g/L, and 4 g/L ammonium nitrate solution) on the infiltration laws, the occurrence time of one-way intersections and multi-directional intersections, the water content in the vertical direction of film hole centers and junctions (the plant intersection center, the inter-row intersection, and the 4-point source intersection), and the distribution law of $\text{NO}_3^- - \text{N}$. The results showed that the cumulative infiltration and permeation time per unit area of membrane pores showed a power function relationship, the infiltration index a decreased with the increase of fertilizer concentration while the infiltration index b increased with the increase of fertilizer concentration. With the increase of fertilizer concentration, the occurrence time of one-way intersection and multi-directional intersection was advanced. At the depth of 10 cm soil, the water content of each center increased by 10.42%, 13.94%, 16.38%, and 24.74%, respectively, compared with 0 g/L treatment. The water content in each center varied with the increment of soil depth. $\text{NO}_3^- - \text{N}$ was evenly distributed in the upper layer of the soil, and showed peak at the wet front. The $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content at the 4-point source intersection center was higher than the other 3 centers. The results provide a basis for improving the theory of water-filled membrane hole irrigation.

Keywords: muddy water infiltration; film hole irrigation; multi-point source infiltration; water and nitrogen migration

我国北方地区面临严峻的缺水问题^[1], 为了将有限的水资源更加合理利用, 一些灌区使用浑水进行灌溉。膜孔灌是指灌溉水流在所覆地膜上流动, 通过作物放苗孔或专门的灌水孔渗入到作物计划湿润层的灌水技术^[2]。膜孔灌既是地面灌溉, 又属于局部灌溉, 因此其既具有节能的优点, 又兼具局部灌溉的节

水效果^[3],目前,国内外对膜孔灌均有报道^[4-9]。浑水膜孔灌结合了膜孔灌和浑水灌溉的特点,因此其成为学者们研究的热点^[10]。浑水膜孔灌入渗模式可分为3类:自由入渗、单向交汇入渗和多向交汇入渗。费良军等^[11]将膜孔灌湿润体看作半椭球体,研究了水平湿润半径和垂直湿润半径随时间的变化规律;一些学者对通过浑水膜孔灌室内试验,分析研究了含沙率^[12]、泥沙粒度^[12-13]、膜孔直径^[14]等对入渗参数和湿润锋运移参数的影响;周文等^[15]研究了不同含沙率下浑水膜孔灌单向交汇入渗特性,并分析了膜孔灌单向交汇入渗参数、湿润锋运移参数与含沙率的关系;也有学者^[16-17]对不同因素下浑水膜孔灌水氮运移特性进行研究。有关浑水膜孔灌的研究主要针对入渗特性和自由入渗下水氮运移方面,已取得了一定的成果,但关于浑水膜孔灌多向交汇入渗特性和水氮运移方面的研究较少。因此,本文在浑水膜孔灌多点多源多向交汇入渗的基础上,研究了不同肥液浓度入渗时交汇界面处的水氮运移特性,以期为浑水膜孔灌的技术研究奠定科学基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2018年6月27日至7月19日在西安理工大学农水大厅试验室进行。供试土样为西安粉壤土,采样后风干碾碎,过2 mm筛以备用。采用激光粒度分析仪(Masters-zer-2000型,英国)对土样粒径进行分析,粒径在 $0 < d < 0.002$ mm, 0.002 mm $< d < 0.02$ mm, 0.02 mm $< d < 0.2$ mm 分别为9.78%, 56.59%和33.63%。土壤初始质量含水率为2.5%,饱和含水率为38%,饱和导水率为0.021 cm/min。将泾惠渠渠底泥沙取回风干后,过1 mm筛以配置入渗用浑水,试验用肥料为硝酸铵钙。供试土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 本底值为6.5 mg/kg, NH_4^+ 为15 mg/kg。配置质量含沙率为3%,肥液浓度分别为1, 2, 3, 4 g/L, 分别记为T0、T1、T2、T3和T4处理。

1.2 试验装置与方法

试验装置分为3部分:土箱、浑水马氏瓶和膜孔装置(图1)。

土箱采用20 mm厚有机玻璃制成,其规格为10 cm $\times$ 12 cm $\times$ 35 cm(长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。试验土壤干容重为1.35 g/cm³,按此容重计算分层(5 cm高度为1层)土壤的质量后,分层装填土箱,层间刮毛,装土高度为40 cm。为使浑水尽量保持恒定的含沙率,浑水马氏瓶在普通马氏瓶两端加入电动机,再通过传动轴带动叶片的转动来搅动浑水。膜孔装置为10 mm厚的有机玻璃制成,膜孔直径为10 cm,膜孔水室高为5 cm。为便于观察湿

润锋,采用1/4膜孔置于土箱一角进行试验。根据膜孔灌灌水方式的水分入渗特点,入渗将在图1所示a、b、c、d界面处交汇后产生零通量面,为了便于研究仅取a、b、c、d界面右侧作为研究对象。

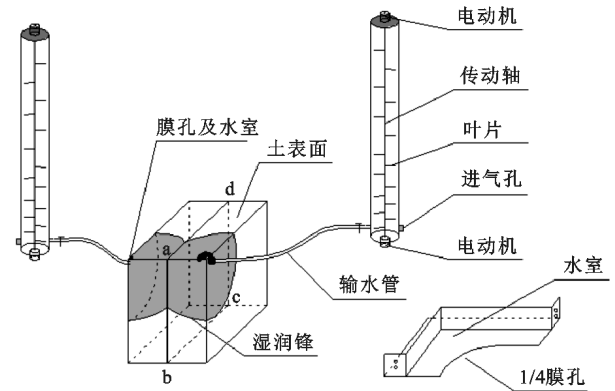


图1 浑水膜孔灌交汇入渗试验装置

1.3 试验观测方法

试验观测内容包括:(1)试验过程中按照先密后疏的时间间隔实时读取并记录马氏瓶读数,用来计算累积入渗量;(2)使用土钻法在入渗结束后取土样,采用烘干法测定土壤含水率;(3)试验参考《GB/T 32737—2016 土壤硝态氮的测定》^[16]中的操作步骤对样品进行处理,并采用紫外分光光度计(美国HACH公司生产DR/4000型)对土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量进行测定。

膜孔灌多向交汇入渗过程可以分为3个阶段:自由入渗阶段、单向交汇阶段和多向交汇阶段,其过程结合图2来进行说明。第1阶段,入渗时间较短时,入渗湿润锋彼此间没有相接,相当于膜孔间距无限大的单点源自由入渗;第2阶段,行间膜孔入渗的水平湿润锋相接,逐渐形成1个交汇面即水分零通量面,两侧水分将不会经过此面进行运移,此时即进入膜孔灌的单向交汇入渗阶段;第3阶段,行间膜孔入渗的水平湿润锋相接,逐渐形成交汇面即水分零通量面,两侧水分将不会经过此面进行运移,此时进入膜孔灌的多向交汇入渗阶段。

图3为入渗装置观测位置示意图。图3中a、b、c和d分别表示膜孔中心,株间交汇中心、行间交汇中心和4点源交汇中心(中心a、中心b、中心c和中心d)。面 AA_1BB_1 为自由入渗湿润体1/4剖面,行与行发生交汇后在面 CC_1DD_1 处形成零通量面,植株之间发生交汇后在面 BB_1CC_1 处形成零通量面。

2 结果与分析

2.1 肥液浓度对浑水肥液多点多源交汇入渗水分运移特性的影响

各处理累积入渗量随时间变化过程曲线见图4。从图4可以看出,随着入渗的进行,各处理单位膜孔面积累积入渗量不断增大;相同入渗时间内,单位膜

孔面积累积入渗量从大到小依次为 $T_4>T_3>T_2>T_1>T_0$,即累积入渗量随肥液浓度逐渐增大,说明肥液浓度对土壤水分的入渗能力产生了影响^[17-18]。这是因为土壤中含有带负电荷的胶体,而入渗的硝酸铵钙肥液中含有大量的阳离子。在肥液入渗过程中,土壤

胶体因正负电荷相互吸引而逐渐凝聚生成土壤团聚体,促使土壤表面结构发生改变,增大土壤孔隙,土壤导水能力发生变化,因此促进浑水肥液的入渗。从 T_0 到 T_1 处理肥液浓度逐渐增大,土壤中胶体的吸附现象则越明显,相应的单位膜孔面积累积入渗量也越大。

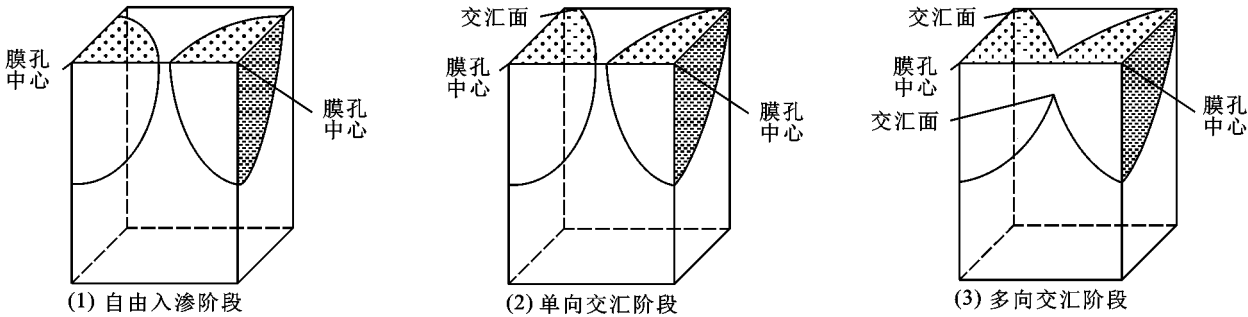


图 2 入渗各阶段示意
渗参数。

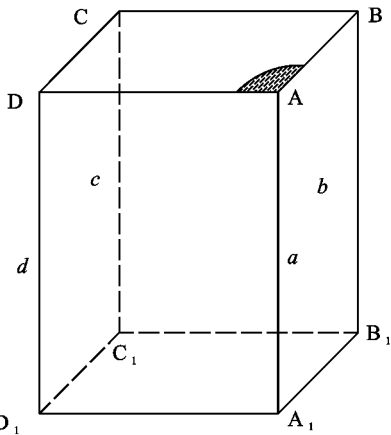


图 3 浑水肥液多点多源交汇入渗方式下观测点位置示意

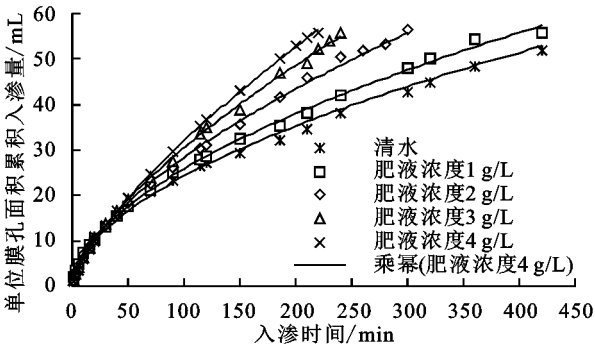


图 4 不同肥液浓度浑水多点多源交汇入渗单位
膜孔面积累积入渗量变化

因肥液浓度对土壤的入渗能力产生影响,改变肥液的入渗速率,从而改变单向交汇和多向交汇所发生的时间。不同浓度下的多点多源交汇入渗各阶段发生时间见表 1。单向交汇、多向交汇和入渗结束时间(灌水量为定值)均随着肥液浓度的增高而减小。

采用 Kostiakov 入渗模型分析自由入渗、单向交汇和多向交汇阶段单位膜孔面积累积入渗量随时间的变化规律,即:

$$I=at^b \tag{1}$$

式中: I 为单位膜孔面积累积入渗量(cm); a 、 b 为入

表 1 不同处理各阶段时间 单位: min

处理	单向交汇	多向交汇	入渗结束
T1	150	320	420
T2	120	240	300
T3	100	210	240
T4	90	180	220

通过对不同肥液浓度下累积入渗量与入渗时间的拟合,得到各处理不同入渗阶段的入渗参数。从表 2 可以看出,入渗参数 a 、 b 随肥液浓度的增大变化不同:入渗参数 a 随之增大,而入渗参数 b 减小。各处理拟合结果的确定系数 R^2 均大于 0.9,表明不同肥液浓度下多点多源交汇各入渗阶段累积入渗量与时间之间均符合 Kostiakov 入渗模型,存在较好的幂函数关系。

表 2 不同处理入渗参数

处理	a_1	b_1	a_2	b_2	a_3	b_3
T1	1.9919	0.5582	2.9912	0.4851	3.2897	0.4691
T2	1.7006	0.6077	2.0060	0.5812	2.7420	0.5299
T3	1.3790	0.6717	1.5755	0.6497	1.8501	0.6193
T4	1.1482	0.7228	1.2323	0.7080	1.7037	0.6478

注: a_1 、 b_1 为自由入渗阶段; a_2 、 b_2 为单向入渗阶段; a_3 、 b_3 为多向入渗阶段。

2.2 肥液浓度对浑水肥液多点多源交汇入渗土壤含水率的影响

各处理交汇入渗结束后,测得中心 a 、中心 b 和中心 c 垂向含水率分布曲线(图 5)。由图 5 可知,肥液浓度对各中心土壤水分的影响具有相同规律:中心 a 、中心 b 和中心 c 垂向含水率随着湿润深度的增加逐渐减小,即湿润体内的土壤含水率分布随土层深度的增加逐渐减小;在同一土层深度处,3 个中心土壤含水率大小依次为 $T_4>T_3>T_2>T_1>T_0$,即土壤

含水率均随着肥液浓度的增大而增大。在中心 *a* 垂向深度 10 cm 处,T1、T2、T3 和 T4 处理土壤含水率分别为 22.45%,26.58%,29.33%和 31.56%,均大于 T0 处理,且比 T0 处理分别增加 10.42%,13.94%,16.38%,

24.74%。土壤含水率的结果进一步说明,在一定范围内,肥液浓度对入渗过程有促进作用,使更多的水分入渗到土壤,即肥液具有一定的增渗作用,肥液浓度越大,增渗作用越明显,从而土壤含水率较大。

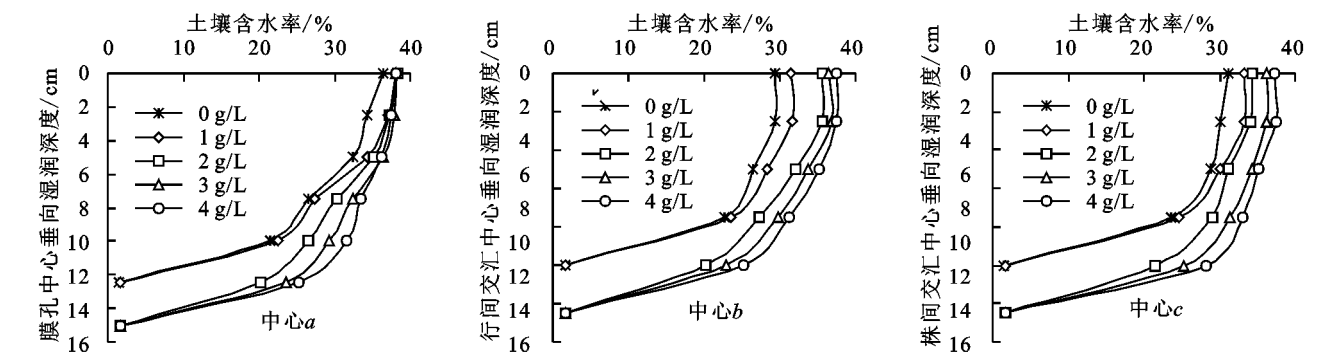


图 5 不同肥液浓度各中心垂向土壤含水率分布

浑水肥液多点源交汇入渗过程通过具有一定水头的膜孔向土壤中输送水分,在膜孔处土壤与膜孔水室直接接触,故膜孔中心处的含水率最大,在灌水结束时,膜孔处的土壤含水率接近土壤饱和含水率。另外,从图 5 还可以看出,越接近湿润体上层,曲线斜率就越小,说明土壤含水率变化梯度变小,主要是因为膜孔入渗过程中,越靠近膜孔水室处的土壤,膜孔水室水头的压力势对其影响越大,故含水率越大。而在水分在土壤中运移过程中主要动力来源为基质势和重力势,随着入渗时间的延长,与水分直接接触的土壤先达到饱和含水率,在下层土壤中,湿润锋处含水率变化梯度较大,主要是因为水分刚到达湿润锋附近的土壤,其导水率为非饱和导水率和非饱和土壤水分运动,水分传递速率较慢,土壤含水率和上层含水率相差较大。

中心的时间不同,各中心含水率不同。

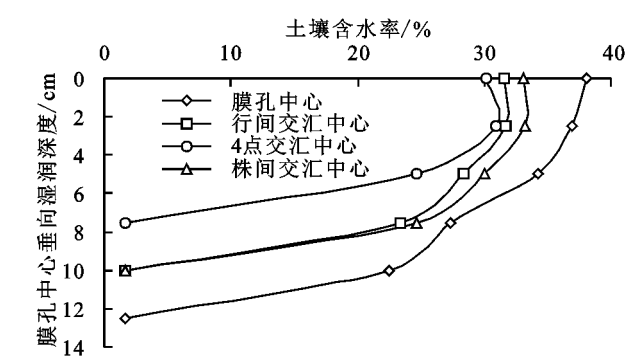


图 6 湿润体含水率分布

施用肥料在一定范围内,对土壤水分的入渗及作物的生长均有一定促进作用,但当肥料施用量过大时,也会造成土壤的板结和土壤肥液浓度过高,作物根系失水导致作物枯萎现象。还可能造成土壤结构破坏,入渗通道增大,土壤储水能力减弱,水分下渗严重。所以在实际灌溉过程中,要控制肥液用量,以求更好的水分利用效率。

2.3 肥液浓度对浑水肥液多点源交汇入渗 NO₃⁻-N 运移的影响

图 7 为肥液浓度分别为 1,2,3,4 g/L 下多点源交汇入渗湿润体各中心垂向 NO₃⁻-N 含量分布情况。多点源交汇入渗经历 3 个人渗阶段,故可将入渗湿润体中分为 3 个中心,即膜孔中心 *a*、株间交汇中心 *b*(单向交汇中心)和行间交汇中心 *c*(多向交汇中心)。由图 7 可知,膜孔中心 5 cm 深度处,肥液浓度为 1,2,3,4 g/L 的入渗分别对应的 NO₃⁻-N 含量分别为 34.72,64,95.27,134.49 mg/kg,说明在同一土壤入渗深度,肥液浓度越大,对应处 NO₃⁻-N 含量越多。这是因为入渗肥液浓度越大,所携带溶质就越多,进入土壤中的 NO₃⁻-N 越多。

图 6 为肥液浓度为 1 g/L 入渗结束后的湿润体土壤含水率分布情况。从图 6 可以看出,在肥液浓度一定情况下,湿润体内的含水率分布为膜孔中心>株间交汇中心>行间交汇中心>4 点源交汇中心。这是因为膜孔水室为膜孔灌土壤水分入渗的进水口,膜孔灌水分下渗在膜孔附近受到水头的作用下渗,膜孔中心在膜孔正下方,受水头、重力势和基质势的影响较大,同时水分由膜孔中心向周围土壤侧渗,所以膜孔中心处含水率较大。而在多点源交汇入渗过程中,先发生单向交汇,即单向交汇面先出现,再发生行间交汇,最后发生多点源的交汇,所以由于水分到达各

由图 7a、图 7b 和图 7c 中 NO₃⁻-N 含量的分布曲线可知,湿润体内除了湿润锋附近,上层土壤中 NO₃⁻-N 含量分布比较均匀,随着土层深度的增加,NO₃⁻-N 含量递减,且递减梯度较为稳定。NO₃⁻-N 含量随着土层深度的变大逐渐减小,一是因为入渗水分中的肥液随着入渗的进行部分吸附在上层土壤中,另一部分随着水分继续下渗运移并在湿润锋处累积;同时试验所用肥料为硝酸铵钙,硝酸铵钙中铵氮含量较小,且本次试验采用浑水覆膜入渗,

浑水入渗会在膜孔土壤表面形成致密层,覆膜会使土壤通气状况变差,从而使反硝化作用增强,土壤深度越深,通气状况越差,反硝化作用越强,造成一定量的 NO_3^- -N损失。

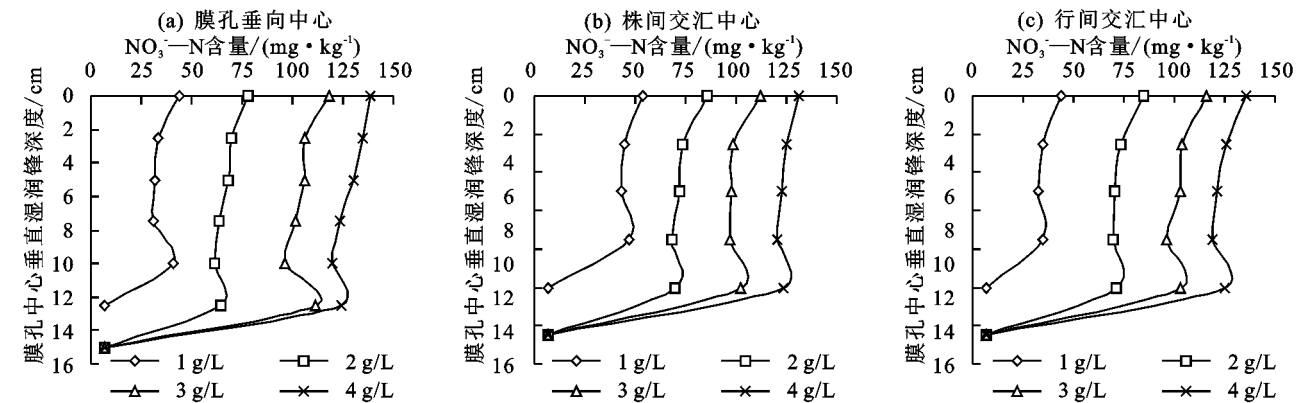


图 7 不同肥液浓度湿润体各中心垂向 NO_3^- -N 含量

各中心 NO_3^- -N 含量分布曲线在湿润锋处出现一峰值,说明湿润锋处的 NO_3^- -N 含量增大,这是因为土壤胶体带有大量的负电荷,土壤对 NO_3^- -N 的吸附作用较弱,在干湿土之间的水势梯度以及基质势的作用,使得水分下渗携带较多的硝态氮运移到湿润峰,从而在湿润锋边缘累积导致湿润锋处 NO_3^- -N 含量增大。因此,在适宜的肥液浓度下,膜孔灌肥液入渗可将养分保存在浅层土壤中,从而利于作物根系吸收,使得肥料利用率提高,减少肥液深层渗漏造成的肥料污染。

图 8 为入渗结束后肥液浓度为 2 g/L 的多点源交汇入渗湿润体各中心垂向 NO_3^- -N 含量分布情况。从图 8 可知,浑水肥液多点源交汇入渗湿润体内 NO_3^- -N 的含量在 4 点源交汇中心含量最大。这是因为土壤对 NO_3^- -N 的吸附作用较弱,水分携带溶质不断向水平方向和垂直方向发生运移,湿润锋随着入渗的进行在植株间先发生单向交汇,之后在行间方向又发生多向交汇入渗。交汇界面形成零通量面,水分不再在水平方向运移,但是随着入渗的进行,零通量面处含水量会持续增加。而在垂直方向入渗速率变小时,水分会停留在交汇界面处,使得肥液也停留在交汇界面处,从而使得交汇界面的 NO_3^- -N 含量大于膜孔中心处的 NO_3^- -N 含量。

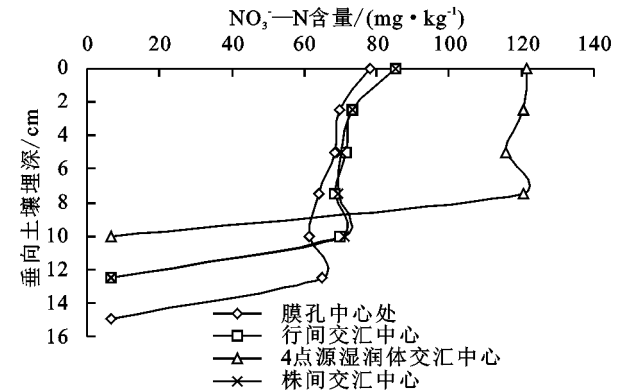


图 8 湿润体各中心垂向 NO_3^- -N 含量

3 结论

(1)肥液对浑水入渗有一定的增渗作用,且在一定范围内,增渗作用随肥液浓度的增大而增大。随着肥液浓度的增大,单位膜孔面积累积入渗量逐渐增加,其与入渗时间呈幂函数关系,随着肥液浓度的增大,入渗参数 a 减小,入渗参数 b 增大。

(2)肥液改善土壤入渗能力,增加水分入渗速率,减小单向和多向交汇时间以及灌水时间,使湿润体的湿润深度增大,因此需根据作物的要求控制合理的肥液浓度。

(3)湿润体内的含水率分布规律为:膜孔中心>株间交汇中心>行间交汇中心>4 点源交汇中心。在各中心处,垂向土壤含水率随着湿润深度的增加逐渐减小,肥液浓度对垂向土壤含水率的影响相同,其含水率均随着肥液浓度的增大而增大。

(4)相同土层深度,肥液浓度越大, NO_3^- -N 的含量越多。在膜孔中心、株间交汇中心和行间交汇中心处, NO_3^- -N 含量在土壤上层分布较为均匀,其随着土层深度的增大逐渐减小至本底值; NO_3^- -N 的含量在 4 点源交汇中心含量最大,其他中心处 NO_3^- -N 的含量差异较小。

参考文献:

[1] 王浩,汪林,杨贵羽,等.我国农业水资源形势与高效利用战略举措[J].中国工程科学,2018,20(5):9-15.

[2] Hu H Y, Jin J, Cheng D J, et al. Influence of plant space on dynamic changes of soil nitric nitrogen under film hole irrigation[J].Procedia Engineering, 2012, 28: 246-251.

[3] 徐首先,魏玉强,聂新山,等.膜孔灌理论及实用技术初步研究[J].水土保持研究,1996,3(3):23-29.

[4] 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):505-513.

[5] 刘文光.夹砂层土壤膜孔灌水分入渗规律数值模拟研究[D].兰州:甘肃农业大学,2018.

[6] 刘思琦.微咸水膜孔灌田间试验土壤水盐运移规律研究[D].河北 邯郸:河北工程大学,2017.

[7] 李文.变浓度条件下点源入渗水氮运移规律研究[D].北京:中国农业科学院,2017.

[8] 范严伟,赵彤,赵文举,等.膜孔灌灌溉入渗量的简化计算方法及验证[J].农业工程学报,2016,32(13):67-74.

[9] Li Y B, Fan Y W, Liu Y, et al. In fluencing factors and simplified model of film hole irrigation[J].Water,2017,9(7):5-23.

[10] Bouwer H, Ludke J, Rrice R C. Sealing pond bottoms with muddy water[J].Ecological Engineering,2001,18(2):5-8.

[11] 费良军,吴军虎,王文焰,等.充分供水条件下单点膜孔入渗湿润特性研究[J].水土保持学报,2001,15(5):137-140.

[12] 姜瑞瑞,费良军,金世杰,等.浑水含沙率和泥沙粒度组成对膜孔灌入渗特性的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):157-161.

[13] 费良军,王锦辉.泥沙粒度组成对浑水膜孔灌单向交汇入渗特性的影响[J].农业机械学报,2016,47(4):105-112.

[14] 费良军,王锦辉,金世杰.不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗特性研究[J].农业机械学报,2016,47(2):172-178.

[15] 周文,曹琳,王锦辉.浑水膜孔灌单向交汇入渗特性试验研究[J].排灌机械工程学报,2017,35(7):627-633.

[16] 中华人民共和国国家标准.GB/T 32737-2016 土壤硝态氮的测定紫外分光光度法[S].北京:中国标准出版社,2016.

[17] 刘利华,费良军,陈琳,等.膜孔直径对浑水膜孔灌土壤水氮运移特性的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):126-131.

[18] 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.

(上接第 155 页)

[16] Bunte K, Poesen J. Effects of rock fragment size and cover on overland flow hydraulics, local turbulence and sediment yield on an erodible soil surface[J].Earth Surface Processes and Landforms,2010,19(2):115-135.

[17] 张光辉.坡面薄层流水动力学特性的实验研究[J].水科学进展,2002,13(2):159-165.

[18] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等.黄土坡面细沟与细沟间水流水动力学特性研究[J].泥沙研究,2013(6):45-52.

[19] 敬向锋,吕宏兴,张宽地,等.不同糙率坡面水力学特征的试验研究[J].水土保持通报,2007,27(2):33-38.

[20] Bunte K, Poesen J. Effects of rock fragment covers on erosion and transport of noncohesive sediment by shallow overland flow[J].Water Resources Research,1993,29(5):1415-1424.

[21] Smets T, López-Vicente M, Poesen J. Impact of sub-surface rock fragments on runoff and interrill soil loss from cultivated soils[J].Earth Surface Processes and Landforms,2011,36(14):1929-1937.

[22] 王葆,马俊明,程金花,等.华北土石山区砾石覆盖对土壤溅蚀的影响[J].中国水土保持科学,2015,13(5):93-98.

[23] Fang N F, Shi Z H, Chen F X, et al. Discharge and suspended sediment patterns in a small mountainous watershed with widely distributed rock fragments[J].Journal of Hydrology,2015,528:238-248.

[24] 王小燕.紫色土碎石分布及其对坡面土壤侵蚀的影响[D].武汉:华中农业大学,2012.

[25] 梁洪儒,余新晓,樊登星,等.砾石覆盖对坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2014,28(3):57-61.

[26] Cerdà A. Effects of rock fragment cover on soil infiltration, interrill runoff and erosion[J].European Journal of Soil Science,2001,52(1):59-68.

[27] Box J E. The effects of surface slaty fragments on soil erosion by water[J].Soil Science Society of America Journal,1981,45(1):111-116.