

肥液浓度对不同形态氮素在土壤中运移转化特性的影响

马敬东¹, 聂卫波¹, 张文平¹, 李一博¹, 马孝义²

(1.西安理工大学水利水电学院, 西安 710048; 2.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌, 712100)

摘要: 为揭示肥液(尿素)浓度影响下土壤湿润体中不同形态氮素的运移转化规律,选取黏壤土和砂壤土作为肥液入渗试验供试土壤,量化分析肥液浓度对土壤累积入渗量和不同形态氮素在分布和再分布过程中运移转化特性的影响。结果表明:相同入渗时间内土壤累积入渗量随肥液浓度的增大而增加,Kostiakov公式的入渗系数与肥液浓度呈现线性关系,建立并验证了考虑肥液浓度影响的土壤累积入渗量估算公式,模拟值与实测值具有较高的一致性,两者间的相对误差绝对值均值均 $<8.0\%$;入渗结束时,土壤湿润体相同位置处的尿素态氮、铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)含量均随肥液浓度的增大而增加; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 主要分布在土壤湿润体深度 20 cm 以上,尿素态氮和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量随着湿润体深度的增大呈现下降趋势;再分布过程中,土壤湿润体中尿素态氮含量随再分布时间的增加整体呈现减小趋势,且黏壤土和砂壤土湿润体中的尿素态氮分别在再分布 5,3 天时基本水解完成; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量呈现先增加后减小的趋势,黏壤土湿润体中的峰值约出现在再分布 3~5 天,而砂壤土约在再分布 3 天;黏壤土湿润体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量呈现先增加后减小的趋势,其峰值约在 5~10 天,而砂壤土中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量在再分布 10 天时,始终保持在较高水平。研究结果为农田灌溉施肥系统的设计和管理提供理论基础和技术支撑。

关键词: 肥液浓度; 累积入渗量; 尿素态氮; 铵态氮; 硝态氮; 运移特性

中图分类号:S275.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)05-0255-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2021.05.035

Effects of Fertilizer Solution Concentration on the Migration and Transformation Characteristics of Different Forms of Nitrogen in Soil

MA Jingdong¹, NIE Weibo¹, ZHANG Wenping¹, LI Yibo¹, MA Xiaoyi²

(1.School of Water Resources and Hydropower, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2.Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to reveal the migration and transformation of different forms of nitrogen in the wetted soil under the influence of fertilizer solution (urea) concentration, clay loam and sandy loam were selected as the different soil textures for infiltration experiments, and we quantitatively analyzed the influences of fertilizer concentration on soil cumulative infiltration and transport and transformation characteristics of different forms of nitrogen in the process of distribution and redistribution. The results showed that during the same infiltration time, the cumulative infiltration increased with the increasing of fertilizer concentration, and a linear relationship between the infiltration coefficient of Kostiakov equation and fertilizer concentration were found. The estimation equation of cumulative infiltration considering the effect of fertilizer concentration was established and verified. The simulated value was in good agreement with the measured value, and the average absolute value of relative error between them was less than 8.0% . At the end of infiltration, the contents of urea nitrogen, ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) and nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) at the same position all increased with the increasing of fertilizer concentration. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ mainly distributed above 20 cm of soil wetted depth, and the contents of urea nitrogen and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ decreased with the increasing of soil wetted depth. During the redistribution process, the contents of urea nitrogen in clay loam and sandy loam decreased with the increasing of redistribution time, and the hydrolysis of urea nitrogen in the wetted clay loam and

收稿日期:2021-04-07

资助项目:国家自然科学基金项目(51579205);陕西省教育厅重点实验室基金项目(20JS099);大学生创新创业训练计划项目(G202010700039)

第一作者:马敬东(1997—),男,硕士研究生,主要从事农业水土工程研究。E-mail:mjd952@sina.com

通信作者:聂卫波(1981—),男,博士,教授,主要从事农业水土工程研究。E-mail:nwbo2000@163.com

sandy loam was basically completed at the 5th and the 3rd days of redistribution, respectively. The content of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ increased first and then decreased, the peak value of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ content clay loam appeared within the range of the 3~5 days in redistribution, while that of sandy loam appeared about around 3 days in redistribution. The content of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ in clay loam increased first and then decreased, and its peak value appeared within the range of the 5~10 days in redistribution, while the content of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ in sandy loam remained at a high level after 10 days. The research results could provide theoretical basis and technical support for the design and management of irrigation and fertilization system.

Keywords: fertilizer concentration; cumulative infiltration; urea nitrogen; ammonium nitrogen; nitrate nitrogen; migration characteristics

灌溉施肥是将肥料溶在水中,灌溉与施肥同时进行,以满足作物对水分和养分的需求;与传统撒施化肥相比,灌溉施肥具有节约劳动成本、提高水肥利用率和减少环境污染等优点^[1-3]。灌溉施肥条件下,不同肥料溶液进入土壤后,由于受土壤质地、初始含水率、容重、肥液浓度等因素影响,导致其运移转化特性十分复杂。近年来,国内外学者对灌溉施肥条件下的土壤水肥运移转化特性进行了研究,武海霞等^[4]、费良军等^[5]、张文平等^[6]分别采用肥液入渗试验,分析了肥液浓度对土壤入渗特性的影响,建立了累积入渗量、湿润体运移距离、土壤水力特性参数与肥液浓度间的函数关系,为量化研究肥液入渗特性提供了基础,但上述研究过程中均未分析肥液浓度对湿润体中不同形态氮素运移转化特性的影响。Zerihun 等^[7]和 Dai 等^[8]分别建立并验证了可用于模拟畦灌地表水流运动过程中溶质运移模型,有助于提升畦灌施肥系统的设计和管理水平。Li 等^[9]、王旭洋等^[10]、范庆锋等^[11]分别研究滴灌条件下湿润体中硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)和铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)的运移特性,结果均表明,入渗结束时, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 呈现“氮随水走”的运移特性,易在土壤湿润体边缘累积,其研究结果可用于滴灌施肥管理,但研究过程中未考虑肥液浓度对湿润体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 运移转化特性的影响。Ebrahimian 等^[12]通过常规沟灌与隔沟灌溉条件下的大田灌溉施肥试验,结果表明,隔沟灌溉相比于常规沟灌能减少土壤中水氮的深层渗漏损失,提高土壤水氮利用效率;Rochette 等^[13]分析了不同施肥量和施肥深度条件下的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 挥发特性,结果表明,深施尿素可减少 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 挥发,提高肥料利用效率,而不同施肥量对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 挥发损失率影响较小;冯晓波等^[14]分析了砂壤土不同容重和肥液(尿素)浓度对土壤水氮运移特性影响,揭示了湿润体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的分布规律,但未分析肥液浓度对湿润体再分布过程中不同形态氮素的运移转化特性影响;陈琳等^[15]、钟韵等^[16]分析了膜孔灌条件下湿润体中水氮运移特性,结果表明,土壤初始含水率对湿润体中水氮

分布有明显影响;聂坤堃等^[17]以肥液(硝酸钾)入渗试验为基础,结合数值模拟方法,量化分析了土壤初始含水量、沟中水深、肥液浓度对湿润体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 分布特性的影响,研究结果为农田沟灌施肥系统的设计与管理提供了依据。综上所述,以往研究从不同方面分析了肥液入渗过程中湿润体中土壤水氮运移特性,并取得了较多研究成果,但对于考虑肥液浓度对不同形态氮素分布和再分布过程中的运移转化特性影响研究较少,尤其是我国农业生产中使用量最大的尿素,其肥液入渗和湿润体再分布过程中,不同形态氮素存在一系列的生化反应,导致了问题研究的复杂性。基于此,本文以黏壤土和砂壤土不同肥液(尿素)浓度下的垂直入渗试验为基础,量化分析肥液浓度对土壤累积入渗量和湿润体中不同形态氮素分布和再分布过程中运移转化特性的影响,以期对农田灌溉施肥系统的设计和管理提供理论基础和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

杨凌区位于陕西省关中平原中部(107°59′—108°08′E, 34°14′—34°20′N),属于典型的半干旱半湿润气候区。区域地形由南向北逐渐升高,大致分布有 3 级阶地,其中 1 级阶地以砂壤土为主,2,3 级阶地高差较大,以黏壤土为主。根据研究区域的地形地貌特征,本试验分别采集了位于 3 级阶地王上村和 1 级阶地法西村的典型农田土壤(土层深度约 0—40 cm)。

1.2 测定项目与方法

对供试土壤特性参数进行测定,结果见表 1。

土壤含水率:烘干法测定。

土壤颗粒含量:Mastersizer 2000 激光粒度仪测定,并以国际制土壤质地分类标准确定供试土样质地。

$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量:用精度为 0.001 g 电子天平称取 5 g 土样,加入 50 mL 浓度为 1 mol/L 的 KCl 溶液进行浸提,将浸提液在振荡机振荡 30 min 后过滤,吸取 5 mL 过滤液,放入 SMART-CHEM 450 全自动间断化学分析仪测定 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量。

尿素态氮含量:用精度为 0.001 g 电子天平称取 5 g 土样,加入 50 mL 浓度为 2 mol/L 的 KCL-PMA 溶液进行浸提,将浸提液在振荡机振荡 30 min 后过滤,

吸取 10 mL 过滤液加入 30 mL 显色剂,加热冷却后加水定容至 50 mL,摇动使其充分混合,取出 10 mL 溶液用 DR450 型紫外分光光度计测定尿素态氮含量。

表 1 试验土壤特性参数

取样地点	土壤质地	$\theta_r / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\text{NO}_3^- - \text{N} / (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$\text{NH}_4^+ - \text{N} / (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	尿素态氮 / $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	土壤颗粒组成 / %		
						<0.002 mm	0.002~0.02 mm	0.02~2 mm
1 级阶地	砂壤土	0.055	4.08	5.63	23.75	15.86	25.71	58.43
3 级阶地	黏壤土	0.041	7.49	4.01	19.87	28.63	34.25	37.12

注: θ_r 为滞留含水率; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为硝态氮; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为铵态氮。

1.3 试验设计

目前,我国使用量最大的氮肥是尿素,因此本文选用浙江鑫建环保科技有限公司生产的尿素(总氮含量 $\geq 46.0\%$)作为供试肥料。土壤肥液入渗试验于 2019 年 4—5 月在西北农林科技大学灌溉实验站进行。试验开始前,将供试土样碾压并过 2 mm 筛,将土样按照设定的初始含水率 θ_0 和容重分层(5 cm)填入直径为 14 cm,高 70 cm 的土柱,土柱底部布设排气孔,防止气阻影响。根据研究区域典型田块的实际情况,并结合已有研究成果^[18],砂壤土和黏壤土的 θ_0 分别设定为 0.073,0.108 cm^3/cm^3 ,土壤容重分别为 1.45,1.35 g/cm^3 。李京玲等^[19]分析了蓄水坑灌肥液(尿素)入渗下土壤水氮运移情况,其中肥液浓度设为 700 mg/L;刘利华等^[20]利用浓度为 600 mg/L 的硝酸铵钙溶液,研究了浑水膜孔灌下水氮运移情况;冀雅珍等^[21]、武海霞等^[4]分析了膜下滴灌条件下 KNO_3 浓度对土壤水盐运移的影响,其中 KNO_3 浓度分别为 500,1 000,1 500 mg/L;陈琳等^[15]研究过程中所设置的肥液浓度均为 600 mg/L;综合考虑上述研究过程中所设置的肥液浓度范围,结合本文试验研究目的,尿素质量浓度设置 6 个水平,即 0,0.2,0.4,0.6,0.8,1.0 g/L;砂壤土和黏壤土质地各有 6 个试验处理,每个处理设置 2 次重复。试验过程中,结合农田地面灌溉的实际情况,入渗水头采用马氏瓶控制在 5 cm 左右,按照先密后疏的原则记录不同时间湿润锋运移距离和入渗水量;当土壤湿润锋运移至距离土柱底部 20 cm 处时停止供水,并立即吸出土柱上层积水。试验结束后,沿土柱垂直方向每隔 10 cm 在入渗

结束后第 1,3,5,10 天采集土样,用于土壤含水率、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、尿素态氮的测定。

2 结果与分析

2.1 肥液浓度对累积入渗量的影响

由图 1 可知,由于不同肥液浓度条件下,黏壤土和砂壤土的入渗规律相似,故以黏壤土为例进行分析说明。不同肥液浓度条件下土壤累积入渗量随入渗时间的增长呈增加趋势;且随着入渗时间增长,肥液浓度对累积入渗量的影响愈明显。入渗时间为 20 min 时,以肥液浓度 $C=0$ g/L 为对照(土壤累积入渗量为 2.1 cm), C 分别为 0.2,0.4,0.6,0.8,1.0 g/L 条件下的累积入渗量分别增加 0.2,0.4,0.5,0.6,0.8 cm;当入渗时间为 400 min 时(土壤累积入渗量为 9.4 cm), C 分别为 0.2,0.4,0.6,0.8,1.0 g/L 条件下的累积入渗量分别增加 1.2,1.9,2.6,3.5,4.4 cm。因为肥液入渗开始阶段,主要为土壤中非毛管孔隙充水,该阶段土壤肥液入渗主要受基质势控制,不同肥液浓度所产生的溶质势对土壤水势影响较小,使得肥液浓度对累积入渗量的影响相对较小;随着入渗时间的增加,土壤入渗逐渐由毛管孔隙主导,该阶段土壤肥液入渗主要受重力势与溶质势控制,使得肥液浓度对累积入渗量的影响相对较大;且肥液入渗过程中, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与土壤胶体结合可能改变了土壤中团聚体的结构,特别是水稳性团聚体数量的增加,使得土壤结构和孔隙数量发生变化,而肥液浓度越大,土柱上层土壤中所含 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量越高(图 3a),可能导致土壤结构和孔隙数量的变化更大,使得土壤累积入渗量随着肥液浓度的增大而增大。

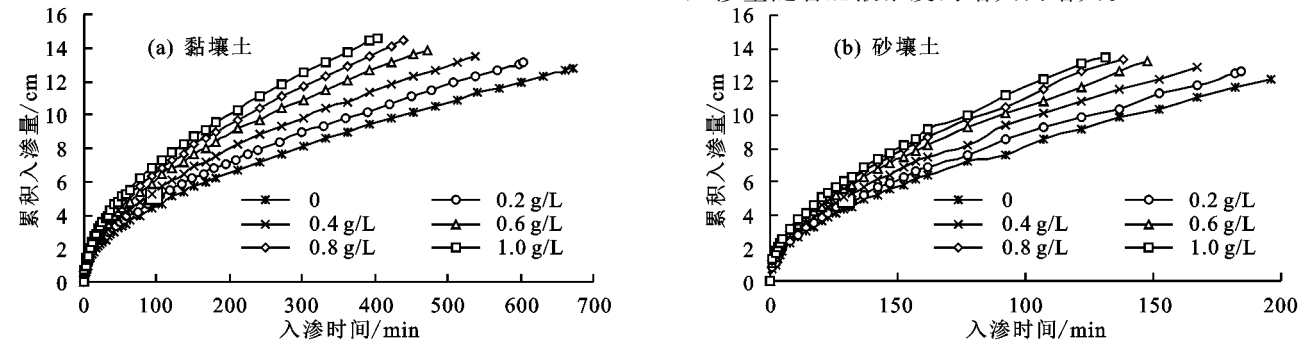


图 1 不同肥液浓度条件下的土壤累积入渗量

经分析,不同肥液浓度条件下,土壤累积入渗量 Z 与入渗时间 t 符合 Kostiaikov 入渗公式,即:

$$Z=k \cdot t^a \tag{1}$$

式中: Z 为累积入渗量(cm); t 为入渗时间(min); k 为入渗系数(cm/min^a); a 为入渗指数,无量纲。利用公式(1)对图 1 中黏壤土和砂壤土不同肥液浓度条件下的入渗过程进行拟合(表 2)。

表 2 黏壤土和砂壤土不同肥液浓度条件下入渗参数拟合结果

土壤 质地	肥液浓度 C / ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	入渗系数 k / ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-a}$)	入渗 指数 a	决定 系数 R^2
黏壤土	0	0.45	0.511	0.998
	0.20	0.51	0.509	0.998
	0.40	0.53	0.507	0.984
	0.60	0.60	0.503	0.999
	0.80	0.64	0.502	0.999
	1.00	0.71	0.500	0.998
	0	0.73	0.528	0.998
砂壤土	0.20	0.79	0.526	0.998
	0.40	0.95	0.501	0.998
	0.60	1.04	0.498	0.998
	0.80	1.10	0.498	0.998
	1.00	1.17	0.494	0.997

对表 2 中数据进行分析发现,入渗系数 k 随肥液浓度 C 的增加呈现增大趋势,且两者具有较好的线性关系,即通过线性公式对其进行估算,其中线性公式为:

$$k=pC+k_0 \tag{2}$$

式中: k_0 为肥液浓度 C 为 0 时的入渗系数; p 为拟合系数。将表 3 中 C 分别为 0.2,0.4,0.6,1.0 g/L 条件下的入渗系数带入公式(2),可得:

$$k_1=0.26C+0.45 \quad (R^2=0.977) \tag{3a}$$

($0 \leq C \leq 1.00$ g/L,黏壤土)

$$k_2=0.46C+0.73 \quad (R^2=0.971) \tag{3b}$$

($0 \leq C \leq 1.00$ g/L,砂壤土)

同时发现,入渗指数 a 随肥液浓度 C 的增加呈现减小趋势,但差异很小。因此,本文对不同肥液浓度条件下的入渗指数 a 取定值,即黏壤土和砂壤土均采用 C 为 0 时的入渗系数,分别为 0.511 和 0.528。将其与公式(3)代入公式(1)中,可得黏壤土和砂壤土不同肥液浓度条件下累积入渗量估算公式,即:

$$Z_1=(0.26C+0.45)t^{0.511} \tag{4a}$$

($0 \leq C \leq 1.00$ g/L,黏壤土)

$$Z_1=(0.46C+0.73)t^{0.528} \tag{4b}$$

($0 \leq C \leq 1.00$ g/L,砂壤土)

为验证公式(4)的可靠性,用其分别对黏壤土和砂壤土 $C=0.8$ g/L 条件下的入渗过程进行估算,并

与实测值进行比较(图 2)。

由图 2 可知,采用公式(4)估算所得黏壤土和砂壤土的入渗过程与实测值基本吻合,两者间的相对误差绝对值均值分别为 3.1% 和 7.6%,说明试验条件下所建肥液入渗过程估算公式是可靠的。对其产生误差的原因进行分析,主要有:虽然肥液浓度对 a 影响较小,但公式(4)中的入渗指数 a 采用定值,由此引入了入渗过程的估算误差;试验过程中不可避免的存在测量误差。

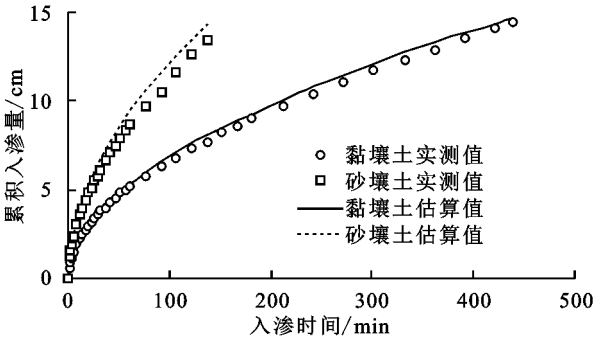


图 2 不同土壤质地累积入渗量估算值与实测值对比

2.2 肥液浓度对土壤氮素运移特性的影响

图 3 为黏壤土和砂壤土不同肥液浓度条件下,入渗结束时土壤湿润体内尿素态氮含量分布曲线,其中黏壤土和砂壤土中尿素态氮本底值分别为 19.87, 23.75 mg/kg(表 1)。结果表明,相同肥液浓度条件下尿素态氮含量随土层深度增加逐渐降低,原因为尿素态氮不易被土壤胶体吸附,其在湿润体内随土壤水分运移,故表现出与含水率相似的分布规律;且肥液入渗结束时,土壤湿润体上层含水率大于下层土壤,并在湿润体边缘处趋近于初始含水率,即此处尿素态氮含量趋于本底值。同一深度处,不同肥液浓度条件下土壤中尿素态氮含量随着肥液浓度的增加而增加,以 $C=0.2$ g/L 为参照,土壤湿润体深度为 20 cm 处, C 分别为 0.4,0.6,0.8,1.0 g/L 条件下,砂壤土和黏壤土中尿素态氮含量分别增加了 34.4%,114.16%,146.09%,192.15% 和 75.49%,186.93%,249.18%,298.66%,因为随着肥液浓度增大,湿润体相同深度处,单位体积土壤溶液中所含的尿素态氮越多,即尿素态氮含量越高,这与程东娟等^[22]的研究结论一致。

图 4 为黏壤土和砂壤土不同肥液浓度条件下,入渗结束时刻土壤湿润体内 NH_4^+-N 含量分布曲线,其中黏壤土和砂壤土中 NH_4^+-N 本底值分别为 4.01,5.63 mg/kg(表 1)。结果表明,相同肥液浓度条件下 NH_4^+-N 含量随土层深度增加逐渐降低,且主要分布在深度 20 cm 以上的土层中,原因是 NH_4^+-N 带正电容易被土壤中胶体所吸附^[23],当吸附到一定程度后 NH_4^+-N 才会随着土壤水分的对

流作用继续向下运移。同一深度处,不同肥液浓度条件下土壤中 NH_4^+-N 含量随着肥液浓度的增加而增加,以 $C=0.2\text{ g/L}$ 为参照,土壤湿润体深度为 20 cm 处, C 分别为 $0.4,0.6,0.8,1.0\text{ g/L}$ 条件下,砂壤土和黏壤土中 NH_4^+-N 含量分别增加了 $17.27\%,30.77\%,45.61\%,63.99\%$ 和 $29.96\%,29.44\%,62.09\%,104.86\%$,因为随着肥液浓度增大,湿润体相同深度处,单位体

积土壤溶液中所含的尿素态氮越多,即 NH_4^+-N 含量越高。同时发现,相同肥液浓度和土层深度条件下,黏壤土质地湿润体中的 NH_4^+-N 含量高于砂壤土质地,这是因为黏壤土中具有更高的黏粒含量(表1),其更易吸附 NH_4^+-N 离子,并且砂壤土通气透水性更好有利于硝化作用地进行,这与康守旋等^[23]的研究结论一致。

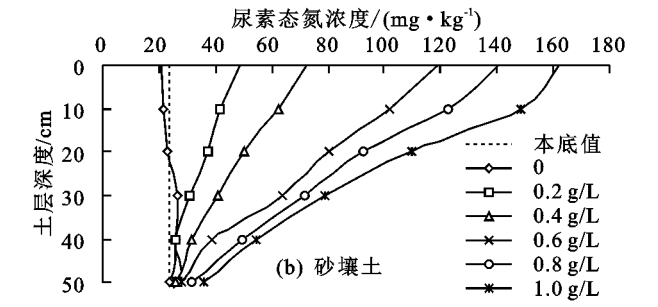
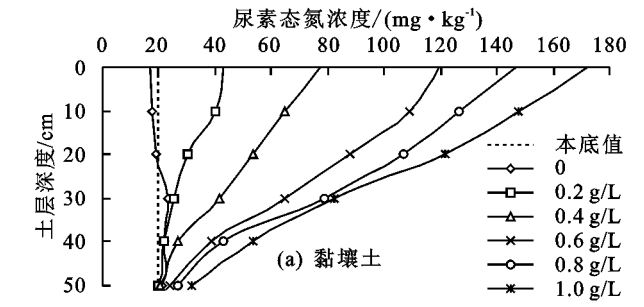


图3 不同肥液浓度对土壤尿素态氮运移的影响

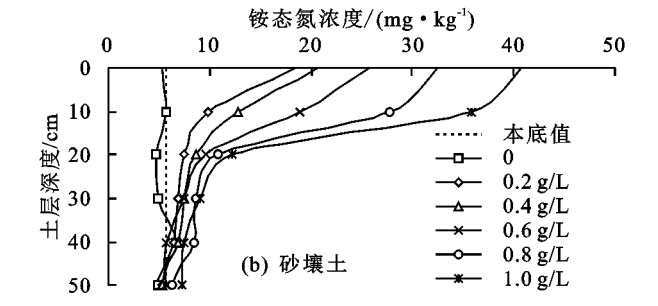
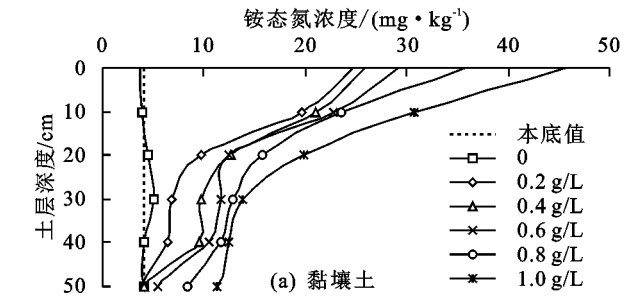


图4 不同肥液浓度对土壤 NH_4^+-N 运移的影响

图5为黏壤土和砂壤土不同肥液浓度条件下,入渗结束时刻土壤湿润体内 NO_3^--N 含量分布曲线,其中黏壤土和砂壤土中 NO_3^--N 本底值分别为 $7.49,4.08\text{ mg/kg}$ (表1)。结果表明,相同肥液浓度条件下,随着湿润体深度的增加 NO_3^--N 含量逐渐降低;原因为 NO_3^--N 和土壤胶体均带负电,两者相互排斥,使得 NO_3^--N 随着土壤水分的对流作用向下运移,其分布规律与土壤水分分布特征基本一致;同时,注意到 $C=0\text{ g/L}$ 时,湿润体上层 NO_3^--N 含量小于本底值,且在湿润体下部累积,原因为肥液浓度为0时,即为清水入渗,此时土壤溶液背景值中的 NO_3^--N 含量高于0,使得

该处理下的入渗过程对 NO_3^--N 产生了淋洗作用,也间接反映了土壤中 NO_3^--N 易随水动的特点。同一深度处,不同肥液浓度条件下土壤中 NO_3^--N 含量随着肥液浓度的增加而增加,以 $C=0.2\text{ g/L}$ 为参照,土壤湿润体深度为 20 cm 处, C 分别为 $0.4,0.6,0.8,1.0\text{ g/L}$ 条件下,砂壤土和黏壤土中 NO_3^--N 含量分别增加了 $23.96\%,74.65\%,167.59\%,260.09\%$ 和 $23.93\%,93.10\%,169.17\%,284.25\%$ 。因为随着肥液浓度增大,湿润体相同深度处,单位体积土壤溶液中所含的 NO_3^--N 越多,即 NO_3^--N 含量越高,这与董玉云等^[24]的研究结论一致。

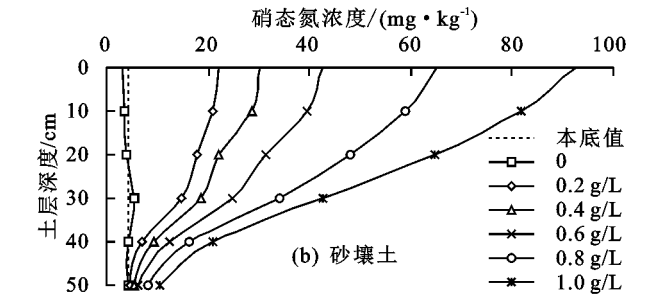
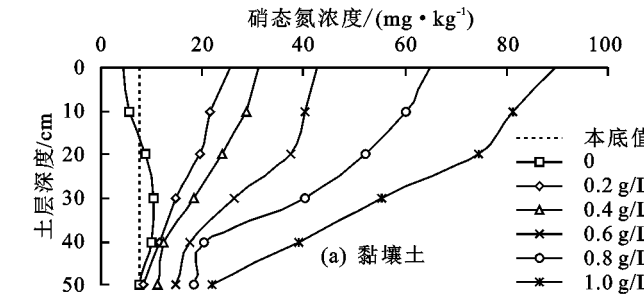


图5 不同肥液浓度对土壤 NO_3^--N 运移的影响

2.3 肥液浓度对土壤氮素运移再分布特性的影响

由于黏壤土和砂壤土在不同肥液浓度条件下,土

壤氮素运移再分布特性基本相似,故以黏壤土为例进行分析说明。图6为黏壤土肥液入渗结束后第1,3,

5,10 天,不同肥液浓度条件下尿素态氮含量的再分布特性曲线。结果表明,不同肥液浓度条件下,虽然尿素态氮含量均随着再分布时间的增加整体呈现下降趋势,但初始肥液浓度越高,其相同深度处土壤中所含尿素态氮含量越高;因为入渗结束时,湿润体中温度、水分等条件基本相同,使得尿素态氮的水解速率一致,而初始肥液浓度越高使得相同位置处的尿素态氮含量越高(图 3),导致再分布过程中湿润体相同位置处尿素态氮含量越高(图 6d)。相同肥液浓度条件下,随着再分布时间的增加湿润体中尿素态氮含量

明显降低;以 $C=0.6\text{ g/L}$ 为参照,湿润体深度为 20 cm 处,再分布 3,5,10 天与再分布 1 天时相比较,尿素态氮含量分别减少了 37.66%,68.22%,70.75% (图 6)。原因为尿素态氮在土壤湿润体内经过一系列的生化反应,水解生成了 NH_4^+-N ,导致尿素态氮含量逐渐降低。进一步分析发现,本文试验条件下,黏壤土质地湿润体内的尿素态氮再分布 5 天时已经基本水解完成(图 6c 和图 6d),即尿素态氮含量趋于本底值,而砂壤土质地湿润体内的尿素态氮再分布 3 天时已经基本水解完成。

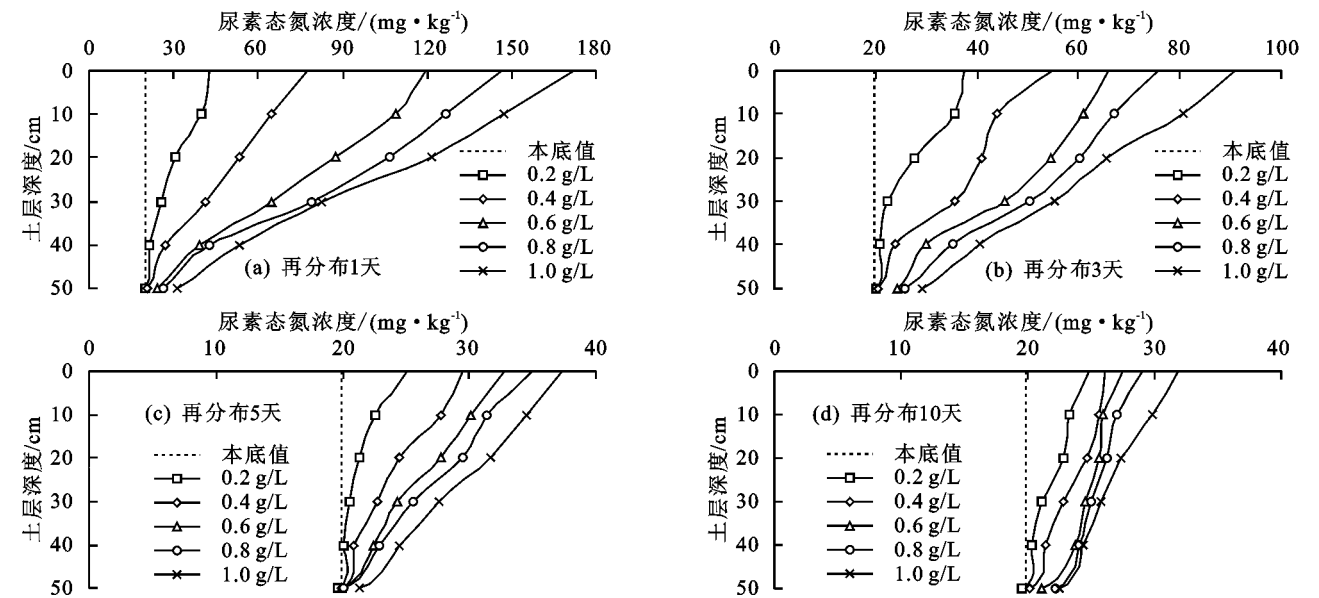


图 6 不同肥液浓度对土壤尿素态氮再分布的影响

图 7 为黏壤土肥液入渗结束后第 1,3,5,10 天,不同肥液浓度条件下 NH_4^+-N 含量的再分布特性曲线。结果表明,湿润体中 NH_4^+-N 含量表现为初始肥液浓度越高,相同深度处含量越大;因为入渗结束时,初始肥液浓度越高使得相同位置处的 NH_4^+-N 含量越高(图 4),而湿润体中温度、水分等条件基本相同,使得不同初始肥液浓度条件下的尿素态氮水解速率和 NH_4^+-N 硝化速率基本一致,导致再分布过程中湿润体相同位置处 NH_4^+-N 含量越高(图 7d)。相同肥液浓度条件下,随着再分布时间的增加,土壤湿润体内 NH_4^+-N 含量呈现先增加后减少的趋势,其中再分布 1,3 天相同土层深度处的 NH_4^+-N 含量有明显增加,而再分布 5 天后 NH_4^+-N 含量逐渐减少(图 7)。以 $C=0.6\text{ g/L}$ 为参照,土壤湿润体深度为 20 cm 处,再分布 3,5,10 天与再分布 1 天时相比较, NH_4^+-N 含量分别增加了 51.56%,38.71%, -45.89%;因为再分布前 3 天,土壤湿润体中尿素态氮含量较高(图 6a 和图 6b),其水解速率大于 NH_4^+-N 硝化速率,使得 NH_4^+-N 含量明显增加(图 7a 和图

7b);再分布 3~5 天时,湿润体中尿素态氮含量逐渐降低,此阶段其水解速率小于 NH_4^+-N 硝化速率,导致再分布 5 天时湿润体内相同深度处 NH_4^+-N 含量小于再分布 3 天时的含量(图 7b 和图 7c);再分布 5 天后,湿润体中尿素态氮水解基本完成,同时土壤水分经过再分布和蒸发作用,湿润体内土壤含水率下降,使得更多的空气进入湿润体内形成了好氧环境,在一定程度上促进了 NH_4^+-N 的硝化反应,导致 NH_4^+-N 含量较再分布 5 天时进一步降低(图 7d)。砂壤土质地湿润体中 NH_4^+-N 含量在再分布 1~3 天呈增大趋势,而再分布 3 天后出现下降趋势。

图 8 为黏壤土肥液入渗结束后第 1,3,5,10 天,不同肥液浓度条件下 NO_3^--N 含量的再分布特性曲线。结果表明,相同深度处的 NO_3^--N 含量在不同再分布时间内均呈现出初始肥液浓度越高,其含量越大的分布特征;因为入渗结束时,初始肥液浓度越高使得相同位置处的 NO_3^--N 含量越高(图 4),其他条件相同情况下,尿素态氮水解速率、 NH_4^+-N 硝化速率和 NO_3^--N 反硝化速率等基本一致,导致

再分布过程中相同深度处湿润体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量越高(图 8d)。相同肥液浓度条件下,随着再分布时间增加,湿润体内 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量呈现先增加后减少的趋势,其中再分布 1, 3, 5 天相同土层深度处的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量有明显增加,而再分布 10 天时 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量较再分布 5 天有所减小(图 8)。以 $C=0.6 \text{ g/L}$ 为参照,土壤湿润体深度为 20 cm 处,再分布 3, 5, 10 天与再分布 1 天时相比较, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量分别增加了 22.25%, 52.32%, 8.1%;因为随着再分布时间的增加,土壤湿润体内形成了好氧环境,导致 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的硝化速率大于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的反硝化速率,使得再分布前 5 天,土壤湿润体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量不断增大

(图 8a、图 8b 和图 8c);再分布 5~10 天时,湿润体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量出现了下降趋势(图 8d),原因为此阶段湿润体内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量由于硝化和挥发呈现下降趋势,使得用于转化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的生化反应源($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)有所减少,以及 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 也存在一定反硝化作用;同时,由于本试验土样采集深度距土柱底部 20 cm,再分布过程中部分 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 随土壤水分迁移到接近土柱底部位置,上述原因共同导致了土样采集深度处 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量再分布 10 天时较再分布 5 天有所降低。砂壤土质地湿润体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量在再分布 10 天始终保持在较高水平,尚未出现较为明显的下降趋势。

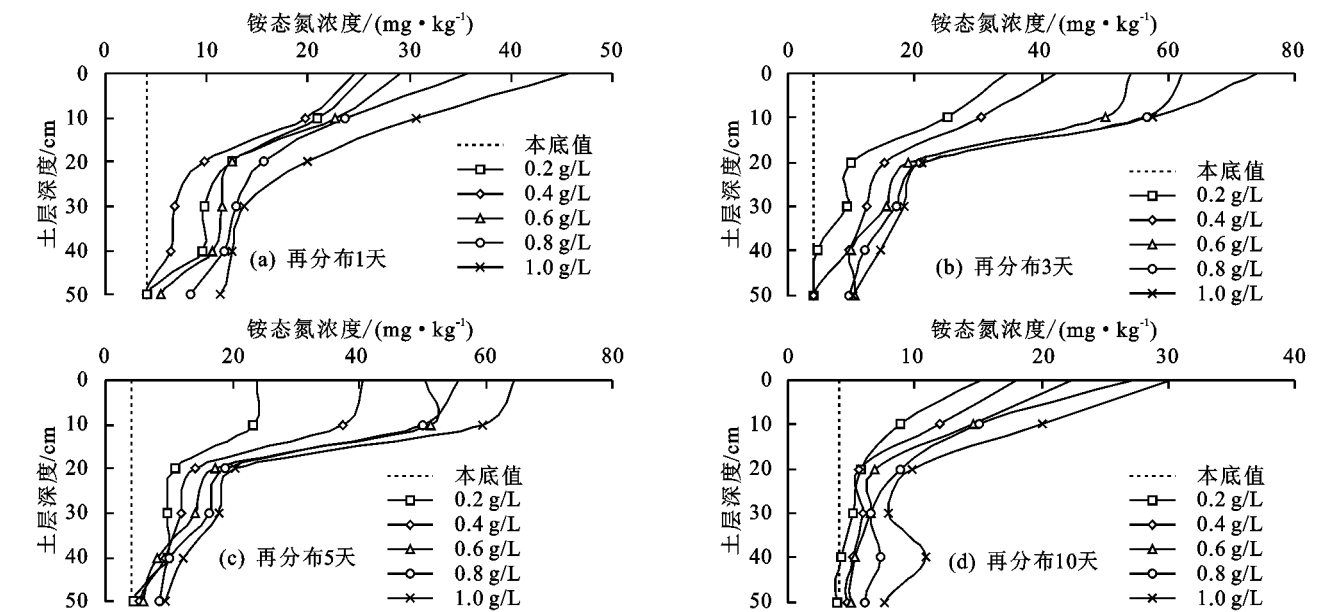


图 7 不同肥液浓度对土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 再分布的影响

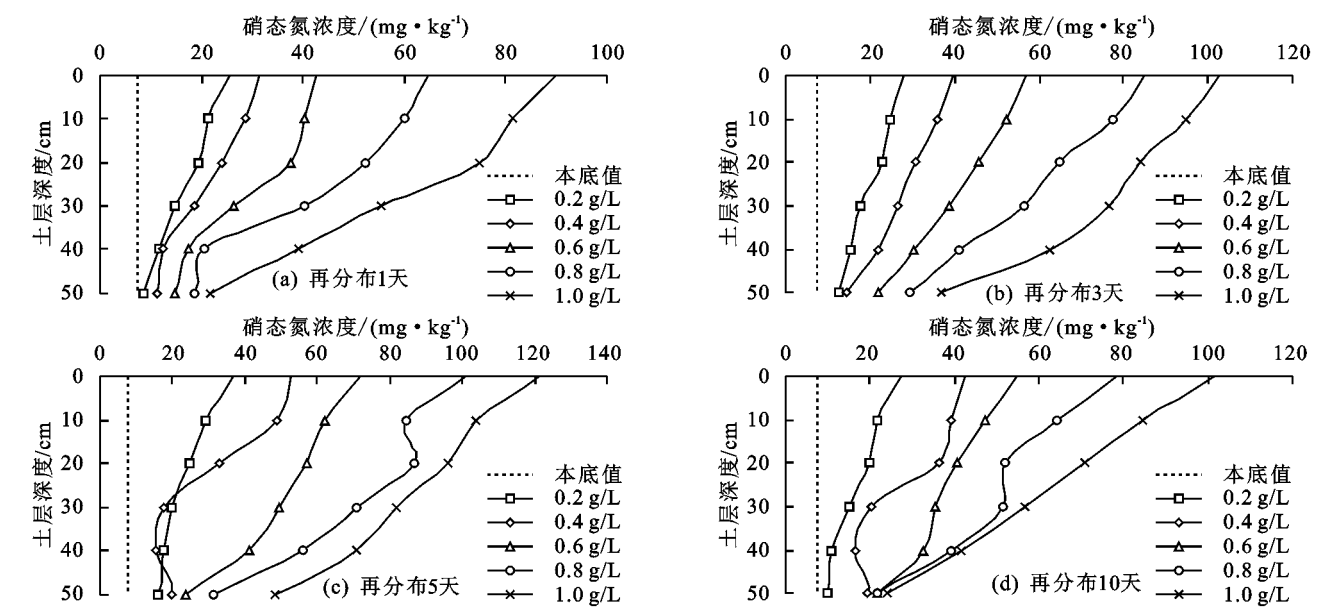


图 8 不同肥液浓度对土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 再分布的影响

3 讨论

本研究表明,土壤肥液(尿素)入渗过程可采用

Kostiakov 公式表征,且入渗系数 k 与肥液浓度呈现线性关系,这与费良军等^[5]、张文平等^[6]、聂坤堃

等^[17]的研究结论一致。从水溶质动力学理论角度分析,入渗系数 k 与肥液浓度 C 间应符合抛物线型函数,因为肥液中所含的正电荷($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)与土壤带负电荷的胶体相结合,可能在一定程度上改变了土壤结构,同时肥液溶质势增大了湿润锋界面处总水势的差值,增强了土壤入渗能力;但随着肥液浓度进一步增加,导致水的黏滞性增大,将降低肥液入渗能力。由于文中试验设置的肥液浓度范围较小($0 \sim 1.0 \text{ g/L}$),无法体现该过程,对于该峰值还需进一步研究。

本研究表明,黏壤土和砂壤土湿润体中的尿素态氮分别在第 5 天和第 3 天时基本完全水解。程东娟等^[22]研究表明,粉土质地的玉米膜孔灌条件下,湿润体中尿素态氮在第 15 天基本完全水解;郭大应等^[25]研究表明,粉砂壤土在夏季喷灌条件下,湿润体中尿素态氮第 2 天后基本完全水解。上述研究结果与本文结果有所差异,因为试验过程中土壤质地、含水率、温度等不同,导致尿素态氮水解速率有较为明显差异。由此可知,土壤中尿素态氮的水解过程中包含复杂的生化反应,对不同初始条件下其水解机制还需进一步研究。

本研究表明,黏壤土质地湿润体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量再分布 5~10 天时出现下降趋势,这与刘显等^[26]研究结论一致。费良军等^[27]研究表明,砂壤土膜孔灌条件下,湿润体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量在再分布 15 天后才出现下降趋势,本试验由于再分布时间最长为 10 天,尚未观测到砂壤土湿润体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量下降的再分布时间;侯红雨^[28]研究表明,粉砂壤土滴灌条件下,湿润体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量再分布 7 天时达到峰值,与本文砂壤土质地的研究结果有所差异。可能是因为土壤湿润体厌氧环境有助于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的反硝化作用,不同土壤质地、含水率、孔隙率等均影响土壤透气性,使反硝化速率存在差异,导致 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量下降时间有所不同,但更为具体的原因还有待进一步分析。因此,需深入研究不同初始条件下土壤中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的反硝化机理,以便得出具有较强普适性的规律。

4 结论

(1)相同入渗时间,黏壤土和砂壤土中累积入渗量随着肥液浓度的增大而增加,且入渗过程可采用 Kostikov 公式表征。建立并验证了考虑肥液浓度影响的土壤累积入渗量估算公式,黏壤土和砂壤土累积入渗量模拟值和实测值具有较高的一致性,两者间的相对误差绝对值均值分别为 3.1% 和 7.6%。

(2)入渗结束时,黏壤土和砂壤土湿润体相同位

置处的尿素态氮、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量均随肥液浓度的增大而增加。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 主要分布在土层深度 20 cm 以上,尿素态氮和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量随着湿润体深度的增大呈现下降趋势。

(3)再分布过程中,黏壤土和砂壤土湿润体中尿素态氮分别在再分布 5, 3 天时基本水解完成。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量呈先增加后减小的趋势,黏壤土峰值约在再分布 3~5 天,而砂壤土约在再分布 3 天时出现峰值。黏壤土湿润体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量呈先增加后减小的趋势峰,其峰值约在 5~10 天,而砂壤土中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量再分布 10 天始终保持较高水平,尚未出现较为明显的下降趋势。

参考文献:

- [1] 高祥照,杜森,钟永红,等.水肥一体化发展现状与展望[J].中国农业信息,2015,27(2):14-19.
- [2] Abbasi F, Simunek J, van Genuchten M T, et al. Overland water flow and solute transport: Model development and field-data analysis[J].Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2003,129(2):71-81.
- [3] Brunetti G, Šimunek J, Bautista E. A hybrid finite volume-finite element model for the numerical analysis of furrow irrigation and fertigation[J].Computers and Electronics in Agriculture,2018,150:312-327.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 张文平,聂卫波,马敬东,等.肥液浓度对土壤水力特性参数的影响[J].水土保持学报,2020,34(4):63-71.
- [7] Zerihun D, Fuman A, Warrick A W, et al. Coupled surface-subsurface solute transport model for irrigation borders and basins. I: Model development[J].Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2015,131(5):396-406.
- [8] Dai W, Zhang S H, Xu D, et al. Efficient simulation of surface solute transport in basin fertigation[J].Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2017,143(11):401-412.
- [9] Li J S, Zhang J J, Ren L. Water and nitrogen distribution as affected by fertigation of ammonium nitrate from a point source[J].Irrigation Science,2013,22(1):19-30.
- [10] 王旭洋,范兴科.滴灌条件下施氮时段对土壤氮素分布的影响研究[J].干旱地区农业研究,2017,35(3):182-189.
- [11] 范庆锋,张玉龙,张玉玲,等.不同灌溉方式下设施土壤硝态氮的积累特征及其环境影响[J].农业环境科学学报,2017,36(11):2281-2286.

[12] Ebrahimian H, Liaghat A, Parsinejad M, et al. Optimum design of alternate and conventional furrow fertigation to minimize nitrate loss[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2013, 139(11): 911-921.

[13] Rochette P, Angers D A, Chantigny M H, et al. Ammonia volatilization and nitrogen retention: How deep to incorporate urea? [J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42(6): 1635-42.

[14] 冯晓波, 马娟娟, 孙西欢, 等. 地面灌施条件下土壤水氮运移规律研究[J]. 节水灌溉, 2014(9): 13-17.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 聂坤堃, 聂卫波, 白清俊. 沟灌肥液入渗硝态氮运移特性数值模拟及影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 128-139.

[18] 介飞龙, 费良军, 钟韵, 等. 土壤初始含水率对膜孔灌湿润体特征的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 174-181.

[19] 李京玲, 陈攀, 孙西欢, 等. 蓄水坑灌肥液入渗下土壤水氮运移特性试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(10): 56-61.

[20] 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.

[21] 冀雅珍, 武海霞. 膜下滴灌条件下 KNO₃ 肥液浓度对土壤水盐运移的影响[J]. 水利水电快报, 2017, 38(4): 26-29.

[22] 程东娟, 赵新宇, 费良军. 膜孔灌施尿素条件下氮素转化和分布室内模拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 58-62.

[23] 康守旋, 费良军, 姜瑞瑞, 等. 肥液浓度对浑水膜孔灌多点源入渗水氮运移的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 156-161.

[24] 董玉云, 费良军, 穆红文. 肥液浓度对单膜孔入渗 NO₃⁻ - 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.

[25] 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, 2010, 19(2): 76-77.

[26] 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, 176.

[27] 费良军, 刘显, 王佳, 等. 土壤容重对涌泉根灌土壤水氮运移特性的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 219-228.

[28] 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.

(上接第 254 页)

[14] 魏亚娟, 党晓宏, 汪季, 等. 不同演化阶段白刺灌丛沙堆土壤生态化学计量特征[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 377-384.

[15] 杨秀云, 韩有志, 武小钢. 华北落叶松林细根生物量对土壤水分、氮营养空间异质性改变的响应[J]. 植物生态学报, 2012, 36(9): 965-972.

[16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[17] Yuan Z Y, Chen Y H. Negative effects of fertilization on plant nutrient resorption[J]. Ecology, 2015, 96(2): 373-380.

[18] Chapin F S, Bloom A J, Field C B, et al. Plant responses to multiple environmental factors[J]. Bioscience, 1987, 37(1): 49-57.

[19] Schreeg L A, Santiago L S, Wright S J, et al. Stem, root, and older leaf N : P ratios are more responsive indicators of soil nutrient availability than new foliage [J]. Ecology, 2014, 95(8): 2062-2068.

[20] Li Y, Niu S L, Yu G R. Aggravated phosphorus limitation on biomass production under increasing nitrogen loading: A meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2016, 22(2): 934-943.

[21] 赵琼, 刘兴宇, 胡亚林, 等. 氮添加对兴安落叶松养分分配和再吸收效率的影响[J]. 林业科学, 2010, 46(5): 14-19.

[22] Koerselman W, Meuleman A F. The vegetation N : P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441-1450.

[23] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 2-6.

[24] Du E, Terrer C, Adam F A, et al. Global patterns of terrestrial nitrogen and phosphorus limitation[J]. Nature Geoscience, 2020, 13(3): 221-226.

[25] 刘宏伟. 2 种不同生态系统中植物叶片功能性状及养分再吸收比较研究[D]. 重庆: 西南大学, 2014.