

施肥时机对土壤水氮运移转化规律的影响

马敬东¹, 聂卫波¹, 冯正江¹, 王慧¹, 马孝义²

(1.西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,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:为揭示不同施肥时机(全过程、前 1/2 和后 1/2 入渗水量施肥)下土壤水氮运移转化规律,以砂壤土和黏壤土地的一维垂直肥液(尿素)入渗试验为基础,重点分析不同施肥时机下土壤水氮分布与再分布过程中的运移转化规律,并量化比较其对土壤中氮素含量的影响。结果表明,施肥时机对土壤累积入渗量和湿润体中水分分布影响微小,但对不同形态氮素运移转化影响显著;砂壤土和黏壤土入渗结束时刻,全过程和后 1/2 入渗水量施肥时,其尿素态氮、铵态氮(NH_4^+-N)和硝态氮(NO_3^--N)含量均随土层深度增大而减小;前 1/2 入渗水量施肥时,尿素态氮和 NO_3^--N 含量在湿润体边缘累积, NH_4^+-N 呈先增大后减小趋势,且主要分布在 5—25 cm 土层;再分布阶段,全过程和后 1/2 入渗水量施肥时,砂壤土和黏壤土中尿素态氮分别在再分布 3 天和 5 天时基本水解完成,同时 NH_4^+-N 含量达到峰值, NO_3^--N 含量再分布 10 天内未出现下降趋势;前 1/2 入渗水量施肥时,尿素态氮再分布 10 天时基本水解完成, NH_4^+-N 含量再分布 5~10 天达到峰值, NO_3^--N 含量则呈先增加后减小趋势;后 1/2 入渗水量和全过程施肥条件下,砂壤土和黏壤土再分布 10 天时 0—40 cm 土层中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量均大于前 1/2 入渗水量施肥,说明其氮素潜在利用效率高,故推荐畦(沟)灌合理施肥时机为后 1/2 入渗水量或全过程施肥。研究结果可为农田畦(沟)灌施肥系统的设计和管理提供理论基础和技术支撑。

关键词: 灌溉施肥; 施肥时机; 土壤水分; 水氮运移

中图分类号:S275.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)04-0236-11

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.04.030

Effects of Fertilization Timing on Soil Water and Nitrogen Transport and Transformation

MA Jingdong¹, NIE Weibo¹, FENG Zhengjiang¹, WANG Hui¹, MA Xiaoyi²

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

Abstract: In order to reveal the law of soil water and nitrogen transport and transformation under different fertilization timing (the whole process, the first 1/2 and the last 1/2 infiltration water fertilization), we analyzed the migration and transformation law of soil water and nitrogen distribution and redistribution under different fertilization timing, and compared their effects on soil nitrogen content quantitatively based on the one-dimensional vertical fertilizer solution (urea) infiltration experiment of sandy loam and clay soil. The results showed that fertilization timing had little effect on the cumulative infiltration of soil and the distribution of water in moist body, but it had a significant effect on the transport and transformation of different forms of nitrogen in the process of distribution and redistribution. At the end of infiltration in sandy loam and clay loam, during the whole process and fertilization of the last 1/2 infiltration water, the content of urea nitrogen, ammonium nitrogen (NH_4^+-N) and nitrate nitrogen (NO_3^--N) decreased with the increasing of soil depth. When the first half of the infiltration water was fertilized, the content of urea nitrogen and NO_3^--N accumulated at the edge of the wet body, and NH_4^+-N increased first and then decreased, mainly distributed in 5—25 cm soil layer. In the redistribution stage, urea nitrogen in sandy loam and clay loam was basically hydrolyzed after 3 and 5 days of redistribution during the whole process and the last 1/2 infiltration water

收稿日期:2021-12-24

资助项目:国家自然科学基金项目(51579205,51909208);陕西省教育厅重点实验室基金项目(20JS099)

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

fertilization, respectively. At the same time, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ content reached the peak, and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content did not decline within 10 days of redistribution. When the first half of the infiltration water was fertilized, the hydrolysis of urea nitrogen was basically completed after 10 days of redistribution, the content of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ reached the peak after 5—10 days of redistribution, and the content of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ increased first and then decreased. Under the condition of the last 1/2 infiltration water and the whole process of fertilization, when sandy loam and clay loam were distributed for another 10 days, the content of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ in the 0—40 cm soil layer both were greater than those of the first 1/2 infiltration water, indicating that its potential nitrogen utilization efficiency was high. Therefore, it was recommended that the rational fertilization time of border (ditch) irrigation was the last half of the infiltration water or the whole process of fertilization. The results of this research could provide theoretical basis and technical support for the design and management of farmland border (ditch) irrigation and fertilization system.

Keywords: fertigation; fertilization time; soil water content; water and nitrogen transport

灌溉施肥是将肥料充分溶解后与灌溉水混合引入田间的施肥技术,与传统(化肥)撒施技术相比,其提高了肥料利用率,降低了养分流失引起的农田土壤生态环境污染风险^[1-2]。目前,该技术在压力灌溉(如微灌、喷灌等)系统中被广泛应用,并在生产实践中取得了较好的经济与环境效益。Li等^[3]分析了滴头流量和施肥时机等因素对湿润体中铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)分布规律的影响,结果表明,使用较大的滴头流量可增加水平向湿润锋运移距离,并建议采用灌水施肥总时间的前1/4时段灌水(1/4W),中间1/2时段施肥(1/2N),后1/4时段灌水(1/4W)的模式,可将 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 最大程度保留在作物根系层,提高氮素利用效率;Gardenas等^[4]模拟研究了不同微灌系统中施肥时机对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失的影响,结果表明,灌溉后期施肥可减少 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量;栗岩峰等^[5]以温室番茄滴灌试验为基础表明,灌溉过程后期施肥, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 主要分布在土层深度0—20 cm;陶塍等^[6]通过室内盐碱土的滴灌施肥试验表明,采用1/4 N—1/2 W—1/4 N灌水施肥模式,可获得更高的氮素分布均匀性;黄倩楠等^[7]研究表明,滴灌施肥时机对花椰菜产量、全氮和硝酸盐含量有显著影响,并推荐施肥时机尽量保持在灌水过程的中期。综上所述,微灌系统中施肥时机对土壤氮素分布规律及其潜在利用效率有着显著影响,且大多推荐灌水中期或后期施肥,可获得较高的氮素分布均匀性和利用效率;此外,由于微灌系统灌水器的特殊性,需在灌溉施肥后采用清水对管道进行冲洗,可有效避免灌水器的堵塞^[8]。

地面灌溉面积占我国总灌溉面积的95%以上,其中畦(沟)灌是最常见的地面灌水技术。随着地面灌溉理论体系的不断发展与完善,灌溉施肥技术逐步与畦(沟)灌相结合,并在生产实际中逐步推广应用。畦(沟)灌施肥与微灌施肥系统相比较,具有成本低、推广潜力大等优点,且无灌水器堵塞等问题;但畦

(沟)灌施肥影响因素众多(灌水流量、停水时间、施肥时机、田间微地形、田块规格等),将影响田间灌溉和施肥质量,这给畦(沟)灌合理的施肥时机选取和控制带来了较大困难。为此,国内外学者研究分析了不同因素对畦(沟)灌施肥质量的影响,Abbasi等^[9]研究表明,砂壤土沟灌全过程或后半程施肥可获得较高的溶质分布均匀性,且溶质浓度对其均匀性影响较小,但采用保守型溴化物,其与非保守型肥料的运移转化规律差异显著,导致研究结果与生产实际存在一定差异;Playán等^[10]研究了入畦流量和施肥时机对畦灌施肥质量的影响,结果表明,变入畦流量下水流推进至33%~50%畦长时施肥,可获得较高施肥均匀度;梁艳萍等^[11]研究表明,基于入畦单宽流量4 L/(s·m)和灌溉全过程均匀施肥,可在冬小麦返青和扬花期灌水后2天作物有效根系层内形成相对较高的土壤水氮分布均匀性;Moravejalahkami等^[12]分析计算了砂壤土质地不同入沟流量下的施肥质量,结果表明,采用变流量可较为显著地提高施肥均匀度,并降低 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量;陈新国等^[13]研究表明,基于入畦单宽流量4 L/(s·m)灌水至畦长33%处开始均匀施肥,玉米根系层中土壤水分与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 沿畦长分布均匀性最好;谷少委等^[14]研究表明,砂质壤土条件下,畦长60 m、畦宽3.2 m时全过程施肥,可获得较高的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 分布均匀性和冬小麦产量。综上所述,以往大田畦(沟)灌施肥试验研究,侧重于分析不同因素对灌水施肥质量的影响,并提出合理的施肥时机、灌水流量等技术要素组合,有助于提高畦(沟)灌施肥技术的实用性,但并未给出不同施肥时机条件下,土壤湿润体中不同形态氮素运移转化的具体信息,导致较难从机理上揭示施肥时机对畦(沟)灌条件下土壤水氮运移转化规律的影响。基于此,本文以砂壤土和黏壤土一维垂直肥液(尿素)入渗试验为基础,重点分析不同施肥时机下土壤水氮的运移转化规律,并量化比较其对土壤氮

素含量的影响,以期为农田畦(沟)灌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),年平均降水量约 635 mm,蒸发量约 1 100 mm,属于典型的半干旱半湿润气候区。区域地形由南部渭河河滩向北逐渐升高,大致分为三级阶地,其中一级阶地主要为砂壤土,二、三级阶地地形变化较大,以黏壤土为主。根据研究区域地形地貌特征,本试验分别采集了位于一级阶地法西村和三级阶地王上村典型农田土壤(深度约 0—40 cm)作为供试土壤。

1.2 测定项目与方法

对供试土壤特性参数进行测定,测定结果见表 1。土壤含水率采用烘干法测定;土壤饱和含水率:将自然状态下土样按设计容重装入环刀,底部垫滤纸放

入盛有蒸馏水的容器中,逐渐向容器中加水至与环刀上表面平齐,每隔一段时间取出环刀擦干表面水分称重,直到前后 2 次所称重量一致,此时测定其含水率即为饱和含水率;土壤颗粒组成采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪测定供试土壤颗粒组成,按照国际制土壤质地分类标准确定土壤质地; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量:采用精度为 0.01 g 的天平称取 5 g 土样,加入 50 mL 浓度为 1 mol/L 的 KCl 溶液,将浸提液在振荡机上振荡 1 h 后过滤,吸取 5 mL 过滤液,放入 SMARTCHEM 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:采用精度为 0.01 g 天平称取 5 g 土样,加入 50 mL 浓度为 2 mol/L 的 KCl—PMA 溶液,将浸提液在振荡机振荡 1 h 后过滤,吸取 10 mL 过滤液加入 30 mL 显色剂,85 ℃ 水浴 30 min,然后用流动水冷却 15 min 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	$\theta_r /$	$\theta_s /$	$\text{NO}_3^{--}\text{N} /$	$\text{NH}_4^{+}\text{--N} /$	尿素态氮 /	土壤颗粒组成 / %		
		($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	<0.002 mm	0.002~0.02 mm	0.02~2 mm
一级阶地	砂壤土	0.041	0.458	4.85	4.08	4.20	15.86	25.71	58.43
三级阶地	黏壤土	0.055	0.359	5.29	2.21	6.40	28.63	34.25	37.12

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

1.3 试验设计

为使本文研究成果具有代表性,选取我国使用量最大的氮肥—尿素(浙江鑫建环保科技有限公司,总氮含量 $\geq 46.0\%$)作为供试肥料,采用一维垂直肥液入渗试验分析施肥时机对土壤水氮运移转化规律的影响。试验于 2021 年 5—6 月在西北农林科技大学灌溉实验站进行。根据研究区域典型田块实际情况,并结合已有研究成果^[15-16],砂壤土和黏壤土的初始含水率(θ_0)分别设定为 0.116,0.162 cm^3/cm^3 ,土壤容重分别为 1.45,1.35 g/cm^3 。入渗试验开始前,将供试土样碾压并过 2 mm 筛,按照设定的 θ_0 和容重分层(5 cm)填入直径为 15 cm、高 70 cm 的土柱,层间打毛;为防止气阻对入渗过程的影响,在土柱底部布设排气孔,同时在柱身设置若干直径 2 cm 的取土孔。试验过程中,结合地面灌溉实际情况,入渗水头控制在 5 cm 左右,基于先密后疏原则记录不同时间入渗水量和湿润锋运移距离;入渗结束时停止供水,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 在第 0,1,3,5,10 天采集土样,用于测定土壤含水率、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和尿素态氮。

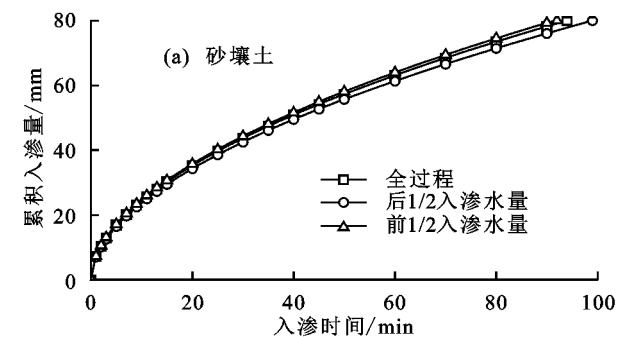
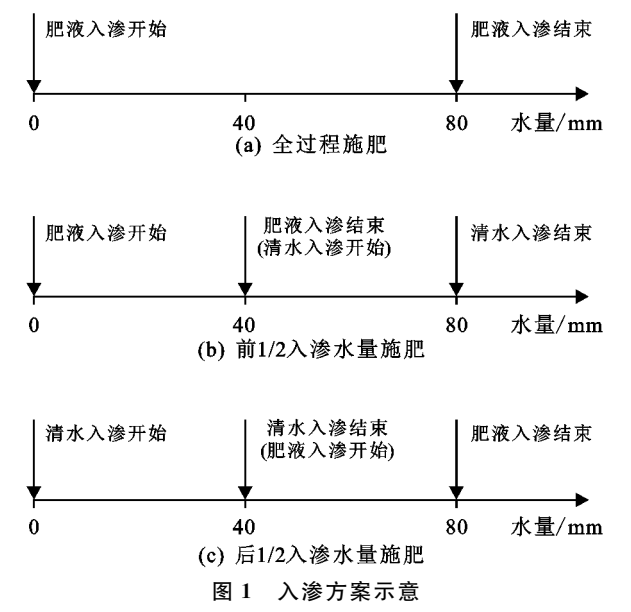
参照关中平原中部地区小麦、玉米等作物畦(沟)灌条件下常采用的灌水定额^[17-18],确定本试验入渗水量为 80 mm。根据当地农户种植习惯和已有文献资

料^[19]可知,研究区域小麦或玉米种植过程中,常采用的施氮量约 320 kg/hm^2 ,其中约 50% 的施氮量作为基肥在作物播种时施入,剩余施氮量在小麦或玉米生长过程中分 1~2 次进行追肥。因此,本次试验施氮量设置 3 个水平,分别为 80,160,320 kg/hm^2 ,其中施氮量 80,160 kg/hm^2 为小麦或玉米进行 2,1 次追肥情景,320 kg/hm^2 为不施基肥,且 1 次追肥情景。根据试验设置的施氮量和入渗水量,计算可得肥液浓度分别为 100,200,400 mg/L 。由于本文重点分析施肥时机对土壤水氮运移转化规律的影响,故入渗过程中施肥时机设置 3 种情景(图 1),分别为全过程、前 1/2 和后 1/2 入渗水量施肥,分别对应大田畦(沟)灌的全过程、前半程和后半程施肥情景。由于试验施氮量为定值,故前 1/2 和后 1/2 入渗水量施肥时对应的肥液浓度分别为 200,400,800 mg/L 。根据试验设计,砂壤土和黏壤土质地各 9 组处理,每组处理设置 3 次重复。

2 结果与分析

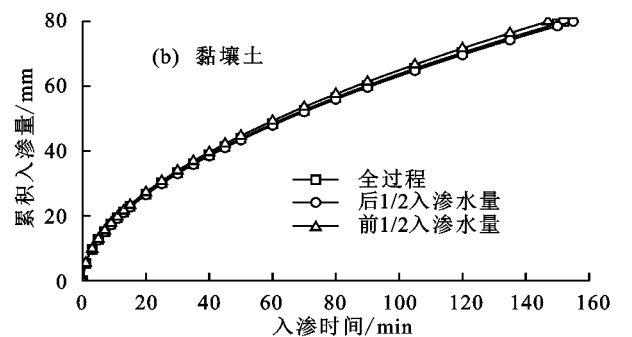
本文重点分析施肥时机对土壤水氮运移转化规律的影响,且所设置的肥液浓度远大于土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量(本底值),虽然已有研究^[20-21]表明,不同肥液浓度会影响土壤水氮运移转化规律,但其对于不同肥液浓度条件下的水氮运移和再

分布规律基本一致;同时本文试验结果也进一步验证了该观点。因此,本文重点以肥液浓度为 100 mg/L 为例(全过程施肥时肥液浓度,对应前 1/2 和后 1/2 入渗水量施肥时的肥液浓度为 200 mg/L;下文所述肥液浓度均为全过程施肥时浓度),分析施肥时机对土壤水氮运移规律的影响。



2.1 施肥时机对累积入渗量的影响

从图 2 可以看出,不同施肥时机条件下砂壤土达到设定的入渗水量所需时间(约 92 min)明显小于黏壤土(约 147 min),这是由于砂壤土中黏粒含量较低,砂粒含量较高(表 1),使得砂壤土中大孔隙较多,导致其入渗速率较大;黏壤土与之相反^[22-24]。同时发现,施肥时机对砂壤土和黏壤土分别达到设定入渗水量所需时间影响微小,虽然前 1/2 入渗水量施肥时达到设定入渗水量所需时间稍小于全过程和后 1/2 入渗水量施肥,但无显著性差异($p>0.05$),原因可能为前 1/2 入渗水量施肥时肥液浓度为 200 mg/L,大于全过程和后 1/2 入渗水量施肥入渗前半段的肥液浓度,较大的肥液浓度中含有更多的 NH_4^+-N ,其与土壤胶体相结合可能改变土壤孔隙结构,在土壤上层(入渗水量 40 mm 时,砂壤土和黏壤土湿润锋运移深度分别约为 17, 11 cm)形成更多的大孔隙^[25],且较大的肥液浓度增大湿润锋处的基质势,使得土壤入渗速率较快。但由于入渗时间较短且肥液浓度整体较小,使其影响不显著,也可能是由于试验误差所引起,对于产生该现象具体原因还需进一步深入研究。



2.2 施肥时机对土壤水分分布的影响

从图 3 可以看出,不同施肥时机条件下入渗结束时刻砂壤土湿润锋运移距离(42.5 cm)大于黏壤土(33.2 cm),原因为本试验入渗水量采用定值(80 mm),但黏壤土孔隙率通常大于砂壤土,使得黏壤土湿润锋运移距离较小。同时发现,施肥时机对土壤水分分布影响微小,且土壤含水率均随土层深度增加而

逐渐减小,最终趋于初始含水率。原因为肥液入渗结束时刻含水率分布与土壤水分运移密切相关,其主要受初始含水率、入渗水头、容重、质地等因素影响^[26-28];同时,肥液浓度差异在一定程度上也影响土壤水分分布;虽然本试验中不同施肥时机条件下的肥液浓度不同,但施氮量和入渗水量一致且入渗时间较短,使得不同施肥时机对土壤水分分布影响微小。

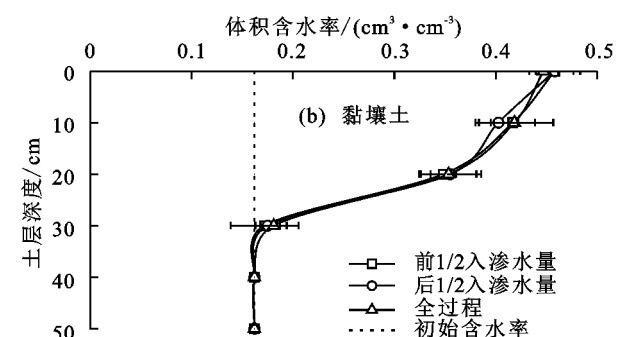
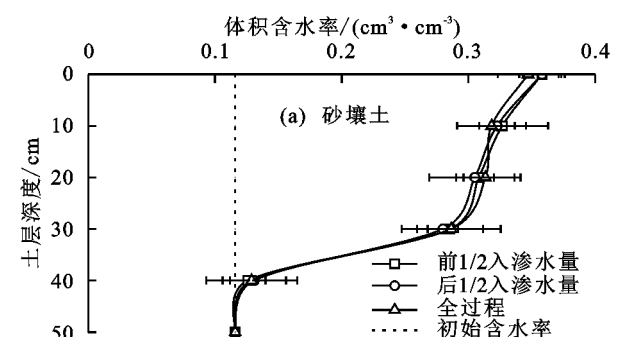


图 3 入渗结束时刻土壤水分分布规律

由于砂壤土与黏壤土不同施肥时机条件下土壤水分再分布规律一致,故以砂壤土为例进行分析。从图 4 可以看出,施肥时机对土壤水分再分布影响微小。再分布 10 天内土壤湿润体上层(约 30 cm 以上)中含水率持续下降;以入渗结束时刻湿润体 0—30 cm 含水率均值 $0.320\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 为参照,再分布第 1, 3, 5, 10 天土壤湿润体 0—30 cm 含水率均值分别减小 18.51%, 30.35%, 32.64%, 36.83%, 原因为土壤水

势梯度的差异,使得湿润体中水分继续下移,同时由于土面蒸发损失,使得土壤湿润体中 0—30 cm 含水率持续下降。土壤湿润体 30 cm 以下含水率则呈现先增大后减小趋势,原因为再分布前 3 天湿润体上层(约 30 cm 以上)水分在重力作用下向下移动;但再分布 5 天后,由于土面蒸发损失,土层上部含水率急剧减小,下部水分在毛管力作用下向上运动,导致土层 30 cm 以下含水率出现下降趋势。

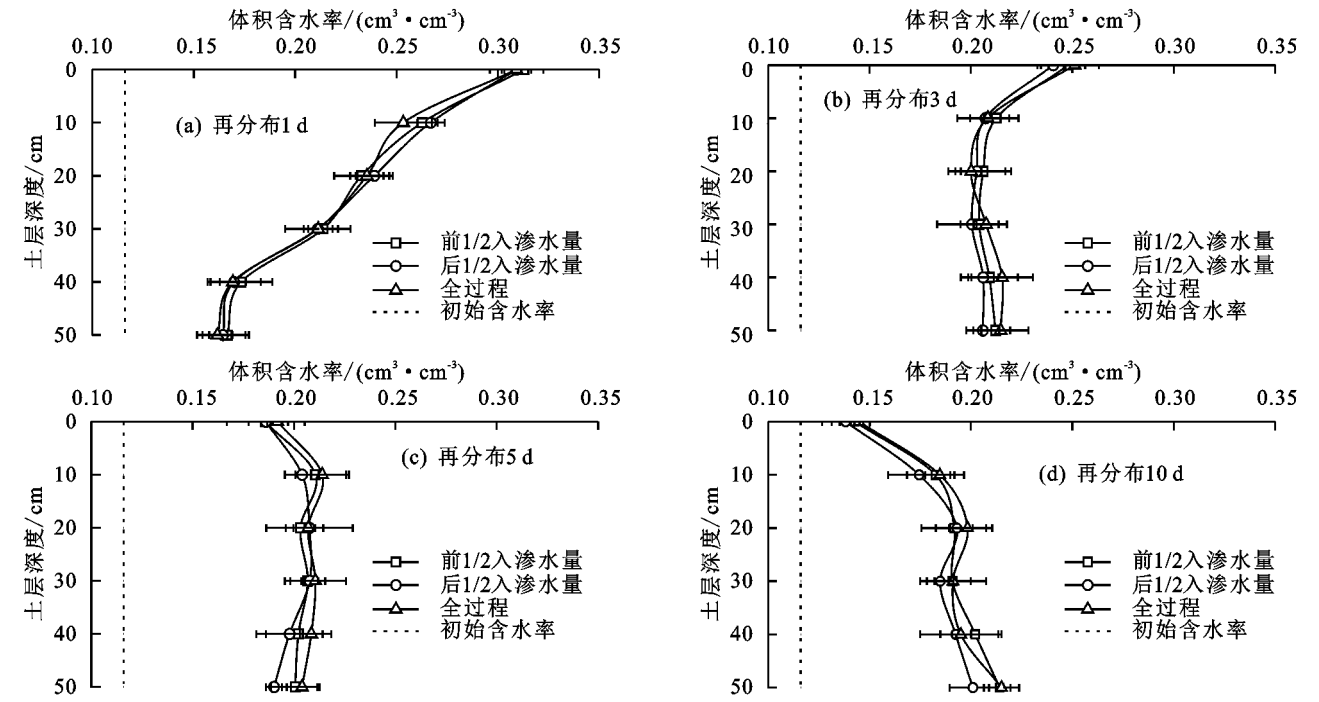


图 4 砂壤土质地土壤水分再分布规律

2.3 施肥时机对土壤氮素运移规律的影响

从图 5 可以看出,施肥时机对土壤湿润体内尿素态氮含量分布有明显影响。全过程和后 1/2 入渗水量施肥条件下,尿素态氮含量总体呈现随土层深度增加而减小的趋势,原因为尿素态氮不易被土壤胶体吸附,容易随水分运移,故表现出与土壤水分相似的分布规律;同时发现,后 1/2 入渗水量施肥条件下尿素态氮含量在土层上部(砂壤土和黏壤土分别约为 15, 12 cm)大于全过程施肥,而下部分布规律相反。原因为后 1/2 入渗水量施肥时,肥液浓度为全过程施肥

时的 2 倍,导致大量的尿素态氮聚集在土层上部,而下部为尿素态氮随水分子在对流、弥散等作用下的运移结果。前 1/2 入渗水量施肥条件下,尿素态氮含量随着土层深度增加逐渐增大,并在土壤湿润体边缘累积,其与全过程和后 1/2 入渗水量施肥时表现出明显的差异。原因为前 1/2 入渗水量施肥条件下,开始阶段湿润体中尿素态氮分布与全过程施肥相似,但在后 1/2 水量入渗时改为清水,使得湿润体上部尿素态氮随着土壤水分向下运移,并在湿润体边缘累积,即该情景下对尿素态氮产生淋洗作用。

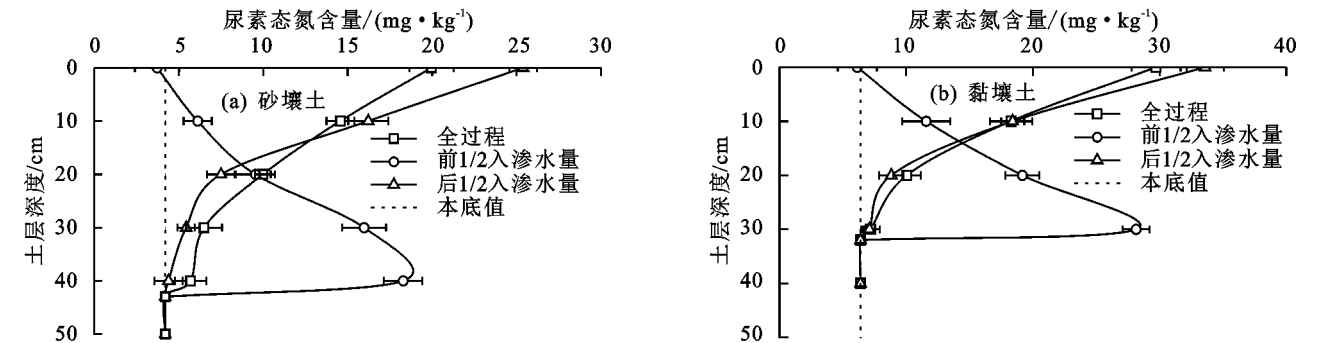


图 5 不同施肥时机入渗结束时刻土壤尿素态氮分布

由图 6 可知,施肥时机对土壤湿润体内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量分布影响较大。全过程和后 1/2 入渗水量施肥条件下, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量总体呈现随土层深度增加而减小的趋势,且主要分布在深度 20 cm 以上土层中,原因为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 带正电容易被带负电的土壤胶体所吸附,当吸附达到一定程度后才随着入渗水分向下运移;后 1/2 入渗水量施肥条件下 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量在土层上部(砂壤土和黏壤土分别约为 13, 7 cm)大于全过程施肥。原因为后 1/2 入渗水量施肥时,肥液浓度为全过程施肥 2 倍,

且土壤胶体对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 具有强的吸附作用^[29-31],使得 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在土层上部聚集。前 1/2 入渗水量施肥条件下, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量随着土层深度增加呈现先增加后减小的趋势,主要分布在 5—25 cm 土层中,其分布规律与全过程和后 1/2 入渗水量施肥时明显不同。原因为前 1/2 入渗水量施肥条件下,上层土壤所吸附的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在后半段入渗过程中被清水淋洗,导致其向下运移,但土壤胶体对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 吸附作用较强,使其向下运移程度没有尿素态氮明显。

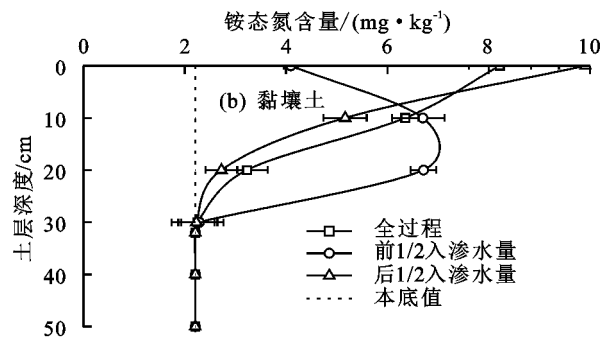
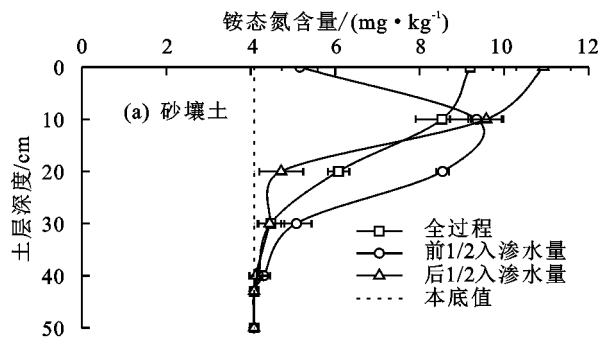


图 6 不同施肥时机入渗结束时刻土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分布

从图 7 可以看出,施肥时机对土壤湿润体内 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量分布影响显著。全过程和后 1/2 入渗水量施肥条件下, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量总体呈现随土层深度增加而减小的趋势,与入渗结束时刻湿润体中尿素态氮含量分布规律类似。同时发现,后 1/2 入渗水量施肥条件下 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量在土层上部(砂壤土和黏壤土分别约为 9, 7 cm)略大于全过程施肥,但其差异性小于尿素态

氮含量分布在该土层深度内的差异,进一步表明 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 易随水动的特性。前 1/2 入渗水量施肥条件下, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量随着土层深度增加逐渐增大,并在土壤湿润体边缘累积,其与全过程和后 1/2 入渗水量施肥时 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 分布规律相反。原因为前 1/2 入渗水量施肥条件下,后 1/2 水量入渗时改为清水,使得湿润体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 被水淋洗到土层下部。

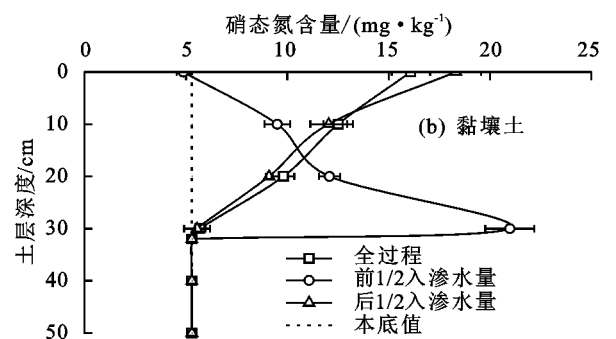
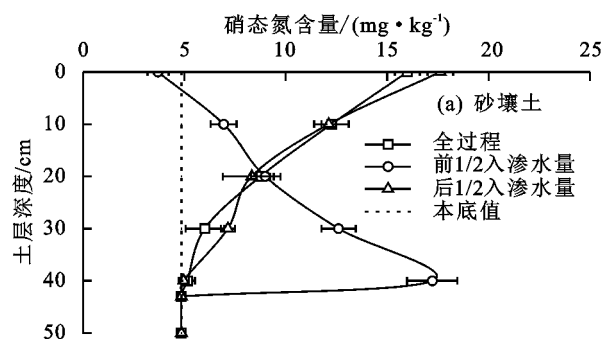


图 7 不同施肥时机入渗结束时刻土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 分布

2.4 施肥时机对土壤氮素运移再分布规律的影响

由于砂壤土与黏壤土不同施肥时机条件下,土壤中不同形态氮素再分布过程中的运移转化规律相似,因此以砂壤土为例进行分析。从图 8 可以看出,施肥时机对土壤湿润体再分布过程中的尿素态氮运移转化有明显影响。全过程和后 1/2 入渗水量施肥条件下,尿素态氮含量随着再分布时间的增加整体呈现下降趋势,砂壤土质地再分布 3 天时已经基本水解完成(黏壤土质地再分布 5 天时基本水解完成),这与马敬东等^[32]的研究结论一致。原因为入渗结束时刻,上述 2 种情景下的尿素态氮主要分布在土层上部(图

5),而土壤湿润体中水分、温度等条件基本相同,土层上部透气性更好,有利于尿素态氮水解,使其含量随再分布时间的增加明显降低。以全过程和后 1/2 入渗水量施肥入渗结束时刻土层 0—50 cm 中尿素态氮含量均值为参照,再分布 1, 3, 5, 10 天的尿素态氮含量分别减少 52.53%, 89.33%, 90.7%, 97.45% 和 58.38%, 90.88%, 91.99%, 97.23% (图 8),表明湿润体中尿素态氮已基本水解完成。但前 1/2 入渗水量施肥条件下,再分布过程中的尿素态氮含量运移转化规律与全过程和后 1/2 入渗水量施肥时有明显差异,其中深度约 40 cm 以上土层中尿素态氮含量持续减

小,但 40 cm 以下土层中尿素态氮含量再分布前 3 天呈增加趋势,原因为在前 1/2 入渗水量施肥时尿素态氮主要聚集在湿润锋处(图 5),再分布过程中其随水分向下运移;同时发现前 1/2 入渗水量施肥条件下,土壤中尿素态氮再分布 10 天时才基本水解完成(黏壤土质地再分布 10 天时也基本水解完成)。以前

1/2 入渗量施肥入渗结束时刻土层 0—50 cm 中尿素态氮含量均值为参照,再分布 1,3,5,10 天尿素态氮含量分别减少 30.16%,58.63%,78.39%,86.39%,原因为前 1/2 入渗水量施肥时大量的尿素态氮聚集在土层下部,而土层下部的通气性较差导致脲酶的活性较低,使其水解速率较慢。

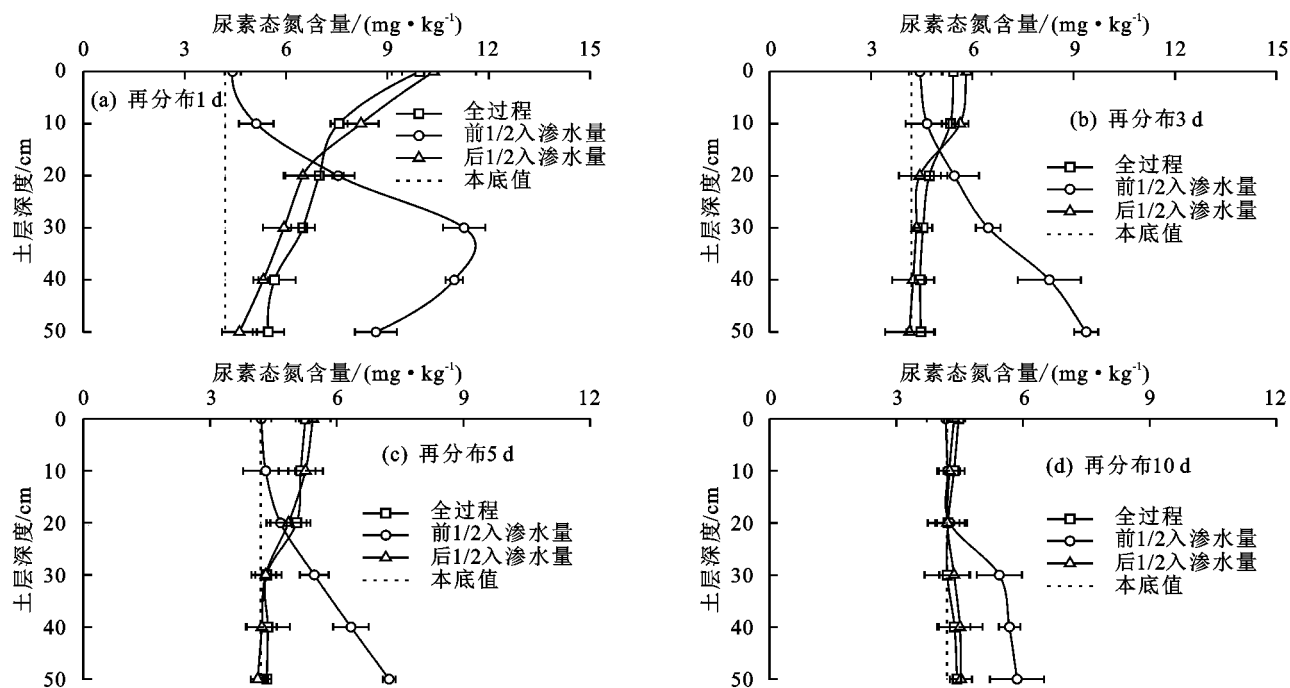


图 8 砂壤土质地土壤湿润体中尿素态氮再分布规律

由图 9 可知,施肥时机对土壤湿润体再分布过程中的 NH_4^+-N 运移转化影响较大。全过程和后 1/2 入渗水量施肥条件下,砂壤土质地 30 cm 以上土层中 NH_4^+-N 含量随着再分布时间的增加呈现先增加后减少的趋势,其中再分布 3 天内 NH_4^+-N 含量增加较为明显,再分布 5 天后 NH_4^+-N 含量逐渐减少,而 30 cm 以下土层 NH_4^+-N 含量变化较小;原因为再分布前 3 天,土层上部尿素态氮含量较大(图 8a、图 8b),其水解速率大于 NH_4^+-N 硝化速率,使得 NH_4^+-N 含量增加(图 9a、图 9b);再分布 3 天后,30 cm 以上土层尿素态氮含量逐渐趋于本底值,此阶段尿素态氮水解量小于 NH_4^+-N 硝化量,使得再分布 3 天后 30 cm 以上土层 NH_4^+-N 含量小于再分布 3 天时(图 8b、图 8c),而 30 cm 以下土层由于尿素态氮和 NH_4^+-N 含量相对较低,且土壤透气性较差,尿素态氮的水解和 NH_4^+-N 的硝化作用相对较弱,因此 NH_4^+-N 含量变化不明显。前 1/2 入渗水量施肥条件下,30 cm 以上土层中 NH_4^+-N 含量随再分布时间的增加而逐渐降低,但在 30 cm 以下土层呈现先增加后减小的趋势,原因为再分布过程中尿素态氮主要分布在 30 cm 以下土层(图 8)。以全过

程、前 1/2 和后 1/2 入渗水量施肥条件下,入渗结束时刻土层 0—50 cm 中 NH_4^+-N 含量均值为参照,再分布 1,3,5,10 天 NH_4^+-N 含量分别增加 59.89%,135.99%,97.91%,—32.80%,50.87%,109.03%,109.88%,—0.71% 和 82.18%,141.41%,97.31%,—35.10%。由此可知,砂壤土质地全过程和后 1/2 入渗水量施肥条件下, NH_4^+-N 含量峰值出现在再分布 3 天左右(黏壤土质地的峰值约出现在再分布 5 天),而前 1/2 入渗水量施肥条件下, NH_4^+-N 含量峰值出现在再分布 5~10 天(黏壤土质地的峰值也在再分布 5~10 天),这与再分布过程中尿素态氮水解完成时间基本一致。

由图 10 可知,施肥时机对土壤湿润体再分布过程中的 NO_3^--N 运移转化影响显著。全过程和后 1/2 入渗水量施肥条件下,再分布 10 天内 NO_3^--N 含量呈增加趋势,其中约 30 cm 以上土层中 NO_3^--N 含量增幅明显,但 30 cm 以下增幅不明显,原因为上部土层再分布过程中,土壤含水率降低(图 4),形成较为理想的好氧环境,有利于 NH_4^+-N 硝化形成 NO_3^--N ;且上述情景下 NH_4^+-N 主要集中在土层上部(图 9),故 NO_3^--N 含量增幅明显。以全过程和前 1/2 入渗水量施肥入渗

结束时刻土层 0—50 cm 中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量均值为参照,再分布 1,3,5,10 天, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量分别增加 14.19%,48.98%,73.70%,170.95%和 17.83%,59.36%,89.90%,214.46%。前 1/2 入渗水量施肥条件下, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量呈先增大后减小的趋势,原因为入渗结束时尿素态氮和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 聚集在湿润锋处,再分布过程中尿素态氮水解转化为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 再通过硝化作用转化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,导致再分布前 3 天 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量呈

现增加趋势;但由于试验土样采集深度距土柱底部 10 cm(即土层深度 50 cm 处),再分布过程中部分 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 随土壤水分再分布运移到土层深度 50 cm 以下,导致再分布 5 天后土壤湿润体内相同深度处 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量出现减小,以前 1/2 入渗量施肥入渗结束时刻土层 0—50 cm 中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量均值为参照,再分布 1,3,5,10 天 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量分别增加 7.64%,39.34%,51.27%,41.49%。

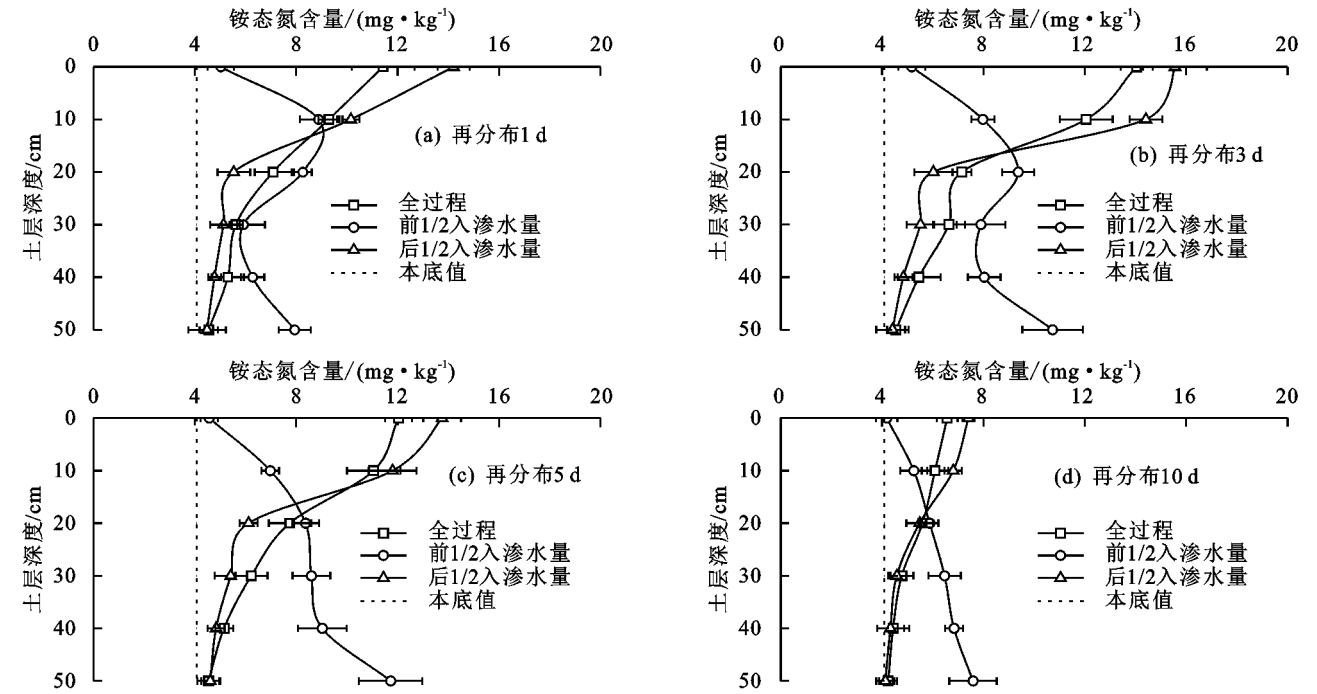


图 9 砂壤土质地土壤湿润体中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 再分布规律

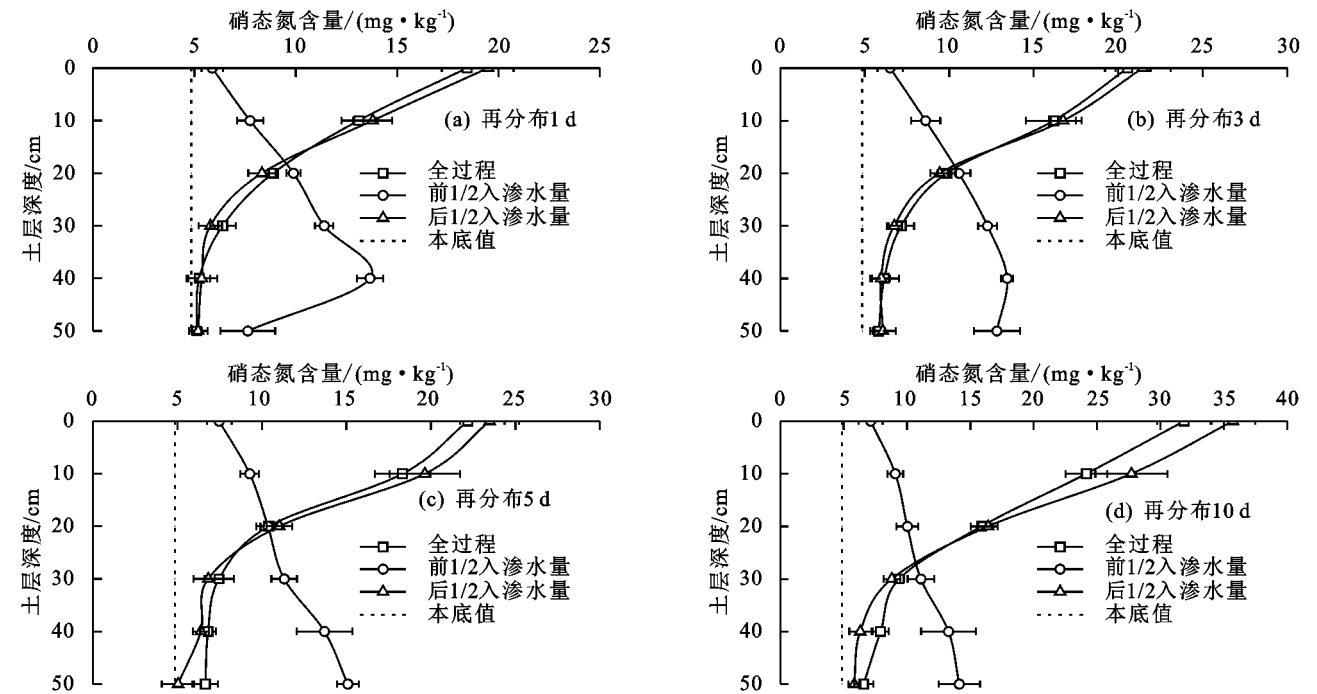


图 10 砂壤土质地土壤湿润体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 再分布规律

2.5 施肥时机对土壤中氮素含量的影响

入渗结束后,土壤湿润体中不同形态氮素再分布

过程中经过一系列复杂的生化反应,其中尿素态氮再分布 10 天时基本全部水解(图 7),并转化成易被作物吸

收利用的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。大量研究^[33-35]表明,小麦、玉米等作物根系一般分布在 100 cm 以内的土层中,但其约 90% 的根量集中于 0—40 cm 土层,因此本试验量化分析施肥时机对再分布 10 天时 0—40 cm 土层中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的影响,计算结果见表 2。结果表明,施肥时机对 0—40 cm 土层中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量有明显影响。以砂壤土和黏壤土肥液浓度 100 mg/L 为例,后 1/2 入渗水量和全过程施肥条件下,再分布 10 天时 0—40 cm 土层中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量分别为 189.30, 231.60 mg/kg 和 177.50, 192.60 mg/kg,均大于前 1/2 入渗水量施肥条件下的含量(103.50, 126.70 mg/kg)。分别以砂壤土和黏壤

土前 1/2 入渗水量施肥条件下 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量为基础,各肥液浓度 100, 200, 400 mg/L 后 1/2 入渗水量和全过程施肥条件下,再分布 10 天时 0—40 cm 土层中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量高出其比例的均值分别为 93.50%, 74.80% 和 78.10%, 44.50%。由于本试验各施肥时机下的施氮量和灌水定额相同,故 0—40 cm 土层中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量越高,则意味着可被作物吸收利用的氮素越多,即氮素的潜在利用效率越高。因此,从作物根系层中氮素潜在利用效率的角度而言,本研究推荐砂壤土和黏壤土质地,畦(沟)灌的合理施肥时机为后 1/2 入渗水量或全过程施肥。

表 2 再分布 10 天土层深度 0—40 cm 中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量 单位:mg/kg

肥液浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	砂壤土			黏壤土		
	全过程	前 1/2 入渗水量	后 1/2 入渗水量	全过程	前 1/2 入渗水量	后 1/2 入渗水量
100	177.50	103.50	189.30	192.60	126.70	231.60
200	363.70	197.60	394.80	396.30	278.40	483.20
400	689.80	385.80	763.10	784.50	564.30	948.40

注:表中肥液浓度为全过程施肥时,前 1/2 入渗水量和后 1/2 入渗水量施肥时肥液浓度为其 2 倍。

3 讨论

本研究表明,肥液浓度 100, 200, 400 mg/L 条件下施肥时机对土壤湿润体中水分分布影响微小,这与 Li 等^[3]的研究结论一致。由于本研究中施肥时机的不同,仅体现在入渗不同阶段的肥液浓度与开始和结束的时间上,而其入渗试验中施氮量和灌水量一致,使得施肥时机对入渗过程影响微小。何振嘉等^[22]和马敬东等^[32]研究表明,土壤累积入渗量随肥液浓度增加而增加,但本研究表明,施肥时机对砂壤土和黏壤土达到设定入渗水量所需时间影响微小。原因可能为,本研究前 1/2 和后 1/2 入渗水量施肥条件下,肥液浓度为全过程施肥的 2 倍,但由于入渗时间较短且肥液浓度整体较小,导致其对土壤累积入渗量的影响不显著。

本研究表明,肥液浓度 100, 200, 400 mg/L 的全过程和后 1/2 入渗水量施肥条件下,入渗结束时刻砂壤土和黏壤土湿润体中尿素态氮、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的分布规律一致,即均随湿润体深度的增加而逐渐减小,且 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 主要分布在深度约 20 cm 以上土层中,这与膜孔灌^[36]和涌泉根灌^[22]条件下湿润体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分布规律一致。前 1/2 入渗水量施肥条件下,砂壤土和黏壤土质地湿润体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和尿素态氮在湿润体边缘聚集,这与 Li 等^[3]研究滴灌施肥条件下的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 分布规律一致,但黄倩楠等^[7]和吴玉恒等^[37]在日光温室滴灌试验过程中并未出现

$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在湿润体边缘累积的现象,其原因主要为该试验田块存在犁底层,阻碍 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 随水分的运移; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在后半段清水入渗淋洗下主要分布范围下移约 5 cm,这与莫晓钰等^[30]的研究结论基本一致,即土壤胶体对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 吸附作用较强,清水入渗淋洗其向土层深处运移程度较小。

本研究表明,肥液浓度 100, 200, 400 mg/L 的全过程和后 1/2 入渗水量施肥条件下,砂壤土和黏壤土质地湿润体再分布过程中尿素态氮的运移转化规律基本一致,其分别在再分布 3 天和 5 天时基本水解完成,这与马敬东等^[32]的研究结论一致,但与程东娟等^[38]的粉土质地膜孔灌和郭大应等^[39]的粉砂壤土喷灌条件下所得尿素态氮水解完成时间(分别为 15 天和 2 天)有所差异;前 1/2 入渗量施肥条件下,砂壤土和黏壤土中尿素态氮再分布 10 天时才基本水解完成,说明施肥时机对湿润体再分布过程中的尿素态氮运移转化有明显影响。全过程和后 1/2 入渗水量施肥条件下,砂壤土和黏壤土湿润体中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量峰值约出现在再分布 3 天和 5 天, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量再分布 10 天内呈增加趋势,这与费良军等^[16]和侯红雨^[40]的研究结论有所差异;但前 1/2 入渗量施肥条件下, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量峰值均出现在再分布 5~10 天, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量则呈先增大后减小的趋势,说明施肥时机对湿润体再分布过程中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 运移转化影响显著。由于不同形态氮素的运移转化受土壤质地、含水率、温度、通气性等众多

因素影响,且包含复杂的生化反应,其不同施肥时机条件下的运移转化特性还需进一步研究,以便得出具有较强普适性的规律。

本研究表明,施肥时机对 0—40 cm 土层中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量有较大影响,肥液浓度 100,200,400 mg/L 的后 1/2 入渗水量和全过程施肥条件下,其含量均大于前 1/2 入渗水量施肥(表 2),说明灌溉后期或整个灌溉过程施肥可提高作物根系主要分布范围内的氮素含量,尤其是能有效降低 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的淋失(图 10),这与 Gardenas 等^[4]对微灌施肥的研究结果类似,即灌溉过程后期施肥可减少 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的淋失。陈新国等^[13]的研究认为,灌水至畦长的 1/3 处开始施肥,玉米根系层中氮素含量较高,且 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 分布均匀性较好;谷少委等^[14]以大田畦灌施肥试验为基础进行研究表明,全过程施肥条件下土壤中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的分布更加均匀。虽然大田畦(沟)灌过程中影响土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 运移转化和分布规律的因素较多,但其推荐的施肥时机与本研究结果基本一致。由于本试验为均质土壤肥液入渗,且在湿润体不同形态氮素运移转化过程中未考虑作物的影响,其与大田畦(沟)灌施肥试验存在一定差异,故本研究所推荐的施肥时机还需在大田试验中进一步验证,以增强结论的可靠性。

4 结论

(1)施肥时机对土壤累积入渗量和湿润体中水分分布规律影响微小,但对土壤中不同形态氮素的运移规律影响显著。砂壤土和黏壤土质地入渗结束时刻,肥液浓度 100,200,400 mg/L 的全过程和后 1/2 入渗水量施肥条件下,尿素态氮、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量均随土层深度的增大而逐渐减小,且 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 主要分布在深度约 20 cm 以上土层;前 1/2 入渗水量施肥条件下,尿素态氮和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 均随入渗深度的增大而逐渐增大,在湿润体边缘累积, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 呈现先增大后减小趋势,主要分布在 5—25 cm 土层中。

(2)施肥时机对土壤湿润体再分布过程中不同形态氮素的运移转化规律影响明显。肥液浓度 100,200,400 mg/L 的全过程和后 1/2 入渗水量施肥条件下,砂壤土和黏壤土质地分别在再分布 3 天和 5 天时,尿素态氮水解基本完成,同时 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量达到峰值,但 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量再分布 10 天内未出现明显下降趋势;前 1/2 入渗水量施肥条件下,再分布 10 天时,尿素态氮基本水解完成, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量再分布 5~10 天达到峰值,但 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量呈现先增加后减小趋势,其峰值约在 5~10 天。

(3)施肥时机对土壤中氮素含量有较大影响。砂壤土和黏壤土后 1/2 入渗水量和全过程施肥条件下,肥液浓度 100,200,400 mg/L 再分布 10 天时 0—40 cm 土层中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量均大于前 1/2 入渗水量施肥,其高出比例的均值分别为 93.50%,74.80% 和 78.10%,44.50%,说明氮素的潜在利用效率高。因此,本研究推荐砂壤土和黏壤土质地,畦(沟)灌的合理施肥时机为后 1/2 入渗水量或全过程施肥。

参考文献:

- [1] Brunetti G, Šimůnek J, Bautista E, et al. 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.
- [2] Dillon J, Edinger-Marshall S, Letey J. Farmers adopt new irrigation and fertilizer techniques Changes could help growers maintain yields protect water quality[J]. California Agriculture, 1999, 53(1): 24-31.
- [3] Li J S, Zhang J J, Rao M J. Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source[J]. Agricultural Water Management, 2004, 67(2): 89-104.
- [4] Gardenas A I, Hopmans J W, Hanson B R, et al. Two dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under microirrigation[J]. Agricultural Water Management, 2005, 74(3): 219-242.
- [5] 栗岩峰,李久生,李蓓.滴灌系统运行方式和施肥频率对番茄根区土壤氮素动态的影响[J].水利学报, 2007, 38(7): 857-865.
- [6] 陶埏,吕新,陈剑,等.不同滴灌施肥方式对棉田土壤含水率、硝态氮分布及对产量的影响[J].棉花学报, 2015, 27(4): 329-336.
- [7] 黄倩楠,吴文勇,韩玉国,等.滴灌施肥时机对设施蔬菜产量品质与氮肥利用效率的影响[J].水土保持学报, 2019, 33(3): 292-297, 304.
- [8] Zhang J J, Li J S, Zhao B Q, et al. Simulation of water and nitrogen dynamics as affected by drip fertigation strategies[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(12): 2434-2445.
- [9] Abbasi F, Simunek J, Th M, 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.
- [10] Playán E, Faci J M. Border fertigation: Field experiments and a simple model[J]. Irrigation Science, 1997, 17(4): 163-171.
- [11] 梁艳萍,许迪,李益农,等.冬小麦不同畦灌施肥模式水氮分布田间试验[J].农业工程学报, 2009, 25(3): 22-27.

- [12] Moravejalahkami B, Mostafazadeh-Fard B, Heidarpour M, et al. The effects of different inflow hydrograph shapes on furrow irrigation fertigation[J]. *Biosystems Engineering*, 2012, 111(2): 186-194.
- [13] 陈新国, 张寄阳, 申孝军, 等. 畦灌不同施肥模式对夏玉米田间水氮分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 140-148.
- [14] 谷少委, 高剑民, 邓忠, 等. 畦灌与施肥时机对土壤硝态氮分布和冬小麦产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(9): 134-142.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 王文佳, 冯浩. 基于 CROPWAT-DSSAT 关中地区冬小麦需水规律及灌溉制度研究[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(6): 795-802.
- [18] 徐家屯. 基于 RZWQM2 模型的关中灌区冬小麦/夏玉米灌溉施肥优化及深层土壤水氮运移特征分析[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [19] 尹晓芳, 同延安, 张树兰, 等. 关中地区小麦/玉米轮作农田硝态氮淋溶特点[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(3): 640-646.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 何振嘉, 傅淦亮, 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.
- [23] 余小弟, 刘小刚, 朱益飞, 等. 土壤质地和供水压力对竖插式微润管入渗的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2017, 35(1): 71-79.
- [24] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(6): 40-45.
- [25] 范严伟, 赵彤, 白贵林, 等. 水平微润灌湿润体 HYDRUS-2D 模拟及其影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(4): 115-124.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 白丹, 何靖, 郭霖, 等. 多因素影响下竖管地下灌溉入渗特性分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(23): 101-105.
- [29] Wang C Y, Wu D F, Mao X M, et al. Estimating soil ammonium adsorption using pedotransfer functions in an irrigation district of the North China Plain[J]. *Pedosphere*, 2020, 31(1): 157-171.
- [30] 莫晓钰, 彭辉. 非饱和带全剖面尿素态氮迁移转化规律分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2022, 52(1): 97-110.
- [31] 张勇勇, 吴普特, 赵西宁, 等. 垄沟灌溉施氮土壤水氮分布特征试验研究[J]. *排灌机械工程学报*, 2013, 31(5): 440-448.
- [32] 马敬东, 聂卫波, 张文平, 等. 肥液浓度对不同形态氮素在土壤中运移转化特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(5): 255-263.
- [33] 吉艳芝, 徐明杰, 巨晓棠, 等. 华北平原不同种植制度对粮食作物氮素利用和土壤氮库的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(19): 86-96.
- [34] 姜丽娜, 徐光武, 黄培新, 等. 不同栽培模式下冬小麦根系直径的频率分布[J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(6): 828-833.
- [35] 漆栋良, 胡田田, 吴雪, 等. 适宜灌水施氮方式利于玉米根系生长提高产量[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 144-149.
- [36] 脱云飞. 膜孔灌土壤氮素运移转化特性试验与数值模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- [37] 吴玉恒, 吴文勇, 韩玉国, 等. 注肥时间对花椰菜产量、品质和水氮利用效率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(8): 7-12.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.