应用生态学报 2015年6月 第26卷 第6期
Chinese Journal of Applied Ecology, Jun. 2015, **26**(6): 1641-1648

施肥方式和施氮量对欧美108杨人工林土壤氮素垂向运移的影响*

戴腾飞 席本野 闫小莉 贾黎明**
(北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

摘 要 在大田试验条件下,研究了施肥方式(滴灌施肥和沟施)和施氮量(单次每株25、50、75 g)对欧美108杨人工林土壤氮素垂向运移动态的影响.结果表明:不同施肥方式和施氮量下,土壤中铵态氮和硝态氮含量均随土层深度的增加而降低;滴灌施肥下铵态氮和硝态氮主要集中在0~40 cm土层,随时间变化呈先升后降的变化趋势,分别于施肥后第5天和第10天达到最大值(211.1和128.8 mg·kg^{-1}).沟施下铵态氮和硝态氮主要集中在0~20 cm土层,硝态氮含量随时间呈逐渐增加的变化趋势,于施肥后第20天达到最大值(175.7 mg·kg^{-1}),但铵态氮随时间无显著变化;滴灌施肥下氮素在土壤中的有效时长约为20 d,而沟施下氮素在土壤中有效时长超过20 d.滴灌施肥下,土壤中铵态氮和硝态氮的含量和运移距离均随施氮量的增加而增加;沟施下,施氮量越高土壤中硝态氮含量越高,但对铵态氮含量无显著影响.滴灌施肥下林地土壤中尿素的水解、硝化速率和运移深度均高于沟施,且施氮量越大,氮素在深层土壤的积累量越高.结合欧美108杨根系和土壤氮素分布特征,滴灌施肥能够为更大的细根分布区提供氮素,更适用于人工林培育.当单次施氮量为每株50 g时,既可保证细根主要分布区内有较高含量的氮分布又不会造成淋溶,肥料利用效率可能更高.

关键词 滴灌施肥; 沟施; 土壤氮素运移; 铵态氮; 硝态氮
文章编号 1001-9332(2015)06-1641-08 **中图分类号** S714.8; S753.5 **文献标识码** A

Effects of fertilization method and nitrogen application rate on soil nitrogen vertical migration in a *Populus* ×*euramericana* cv. 'Guariento' plantation. DAI Teng-fei, XI Ben-ye, YAN Xiao-li, JIA Li-ming (*Province-Ministry Co-construct Key Laboratory of Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*). *-Chin. J. Appl. Ecol.*, 2015, **26**(6): 1641-1648.

Abstract: A field experiment was conducted to investigate the effects of fertilization methods, *i.e.*, drip (DF) and furrow fertilization (GF), and nitrogen (N) application rates (25, 50, 75 g N·plant^{-1}·time^{-1}) on the dynamics of soil N vertical migration in a *Populus* ×*euramericana* cv. 'Guariento' plantation. The results showed that soil NH_4^+-N and NO_3^--N contents decreased with the increasing soil depth under different fertilization methods and N application rates. In the DF treatment, soil NH_4^+-N and NO_3^--N were mainly concentrated in the 0-40 cm soil layer, and their contents ascended firstly and then descended, reaching their maximum values at the 5th day (211.1 mg·kg^{-1}) and 10th day (128.8 mg·kg^{-1}) after fertilization, respectively. In the GF treatment, soil NH_4^+-N and NO_3^--N were mainly concentrated in the 0-20 cm layer, and the content of soil NO_3^--N rose gradually and reached its maximum at the 20th day (175.7 mg·kg^{-1}) after fertilization, while the NH_4^+-N content did not change significantly after fertilization. Overall, N fertilizer had an effect within 20 days in the DF treatment, and more than 20 days in the GF treatment. In the DF treatment, the content and migration depth of soil NH_4^+-N and NO_3^--N increased with the N application rate. In the GF treatment, the NO_3^--N content increased with the N application rate, but the NH_4^+-N content was not influenced. Under the DF treatment, the hydrolysis rate, nitrification rate and migration depth of urea were higher or larger than that under the GF treatment, and more N accumulated in deep soil as the N application rate increased. Considering the distribution characte-

* 中央高校基本科研业务费专项资金项目(BLX2013018)资助.
** 通讯作者. E-mail: jlm@bjfu.edu.cn
2014-09-08 收稿,2015-03-17 接受.

ristics of fine roots and soil N, DF would be a better fertilization method in *P.* ×*euramericana* cv. 'Guariento' plantation, since it could supply N to larger distribution area of fine roots. When the N application rate was 50 g · tree^{-1}each time, nitrogen mainly distributed in the zone of fine roots and had no risk of deep leaching, consequently improving the fertilizer utilization efficiency.

Key words: drip fertigation; furrow fertilization; soil nitrogen migration; ammonium nitrogen; nitrate nitrogen.

随着我国木材需求量逐年增加,木材生产愈加不能满足国内市场需求,对外依存度越来越高,通过营造速生丰产林解决木材供需矛盾越来越重要.杨树是我国最主要的速生丰产树种之一,栽植面积居世界首位,达 757 万 hm^2,占全国人工乔木林总面积的 18.9%[1].欧美 108 杨(*Populus* ×*euramericana* cv. 'Guariento')以其生长速度快、抗性强、材质优等特性广泛种植于黄淮以北和辽河以南地区[2].目前,关于该树种在施肥方面的研究多集中在不同施肥制度对林木生长和生理特性的影响等方面[3-6],对施肥后土壤氮素运移的研究较少.而了解氮素在土壤中的运移和分布状况对于合理选择施肥措施,提高氮素利用率,防止地下水污染具有重要意义[7].

林业生产实践中常采用撒施、集中施肥(沟施、穴施、环状及放射施等)、叶面施肥、分层施用等传统的施肥方式,但在提高氮肥利用效率上均不理想.滴灌施肥是从国外引进的一种将肥料溶解于水中,并通过滴灌设施输送到植物根区,供植物吸收利用的先进施肥技术[8].相比传统施肥方式,其能有效控制肥料施用的种类、数量、比例和时期,既保证了根区养分的高效供应,又能减少水分的损耗和养分的淋失,从而提高水肥的利用效率,达到节水节肥的目的[8-9].目前,滴灌施肥在国外已广泛用于杨树、火炬松等人工林的培育[10-13],但在国内林业中的应用相对较少[14].

施肥作为提高林地生产力的有效管理手段之一,合理施肥能促进林木生长和作物产量,但过量施肥不仅抑制林木生长,还会对环境造成负面影响[15].因此,如何合理施肥,在保证高产的前提下减少生产投入和环境污染是当前农林经营管理所关注的热点问题.尿素施入土壤后能转化为可被植物吸收利用的 NH_4^+ 和 NO_3^-,了解它们在土壤中的运移特征对施肥方式的选择和施肥量的调控具有十分重要的作用[16].近年来,通过室内土柱和大田模拟试验,对滴灌施肥条件下养分的运移和分布特征进行了一些研究[8-9,17-20].但是,由于大田条件下土壤氮素的运移受土壤质地、土壤湿度和根系分布等因素的影响[18],单纯的田间土壤模拟试验所得的结果并不能直接应用到实际的林地经营管理中.因此,本文在大田试验条件下,研究不同施肥方式和施氮量对欧美 108 杨人工林土壤铵态氮和硝态氮垂向运移动态变化的影响,为速生丰产林施肥方式和施氮量的合理选择提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验地位于北京市顺义区杨镇高各庄村(40°05′49″ N,116°49′36″ E),海拔 28 m.本地区属暖温带大陆性气候,春季干旱多风,夏季炎热多雨,年均气温 11.5 ℃,年均降水量 625 mm,降雨主要集中在 7、8 月,无霜期 195 d.试验区面积 4 hm^2,土壤理化性质见表 1[14].

1.2 试验设计

供试材料为欧美 108 杨,2011 年春季采用 3 年生实生苗木造林,平均胸径 5.0 cm,平均树高 7.0 m.林木采取宽窄行带状栽植模式,株距 4 m,窄行距 6 m,宽行距 12 m.2012 年初铺设滴灌管进行滴灌施肥试验,铺设方式采用 1 行 1 带沿树体基部铺设,滴灌管管径为 16 mm,滴头类型为迷宫式滴头,间距 100 cm,流量为2 L · h^{-1}.2012年滴灌低肥DF_{25}、滴灌中

表 1 试验地土壤理化性质[14]

Table 1 Soil physical and chemical properties at the experimental site[14]

深度 Depth (cm)	砂粒 Sand (%)	粉粒 Silt (%)	粘粒 Clay (%)	容重 Bulk density (g · cm^{-3})	田间持水量 Moisture-holding capacity (%)	全氮 Total N (g · kg^{-1})	速效磷 Available P (mg · kg^{-1})	速效钾 Available K (mg · kg^{-1})	土壤质地 Soil texture
0~20	79.96	29.52	0.52	1.68	12.7	0.58	4.91	178.89	砂质壤土
20~40	67.19	32.28	0.53	1.64	15.9	0.49	4.74	203.64	壤土
40~60	63.52	35.92	0.56	1.62	16.7	0.44	5.02	204.41	壤土

肥 DF_{50}和滴灌高肥 DF_{75}处理单次施氮量为每株 25、50 和 75 g N，共施 6 次，沟施和对照 CK 均无施肥和灌溉措施.

试验设施肥方式和施氮量 2 个因子：施肥方式包括滴灌施肥（DF）和沟施（GF）.其中，施肥沟位于树体南北侧，距离树体 1 m，沟深 15～20 cm，宽 30 cm，长 80 cm；根据文献[21-24]确认单次施氮量为每株 25、50 和 75 g N，共施 6 次.另设一个对照（CK），按照当地生产上的水肥管理技术，春季展叶前沟灌一次，每株约 640 L，不施肥.试验采用完全组合设计，共 7 个处理（DF_{25}、DF_{50}、DF_{75}、GF_{25}、GF_{50}、GF_{75}和 CK），重复 3 次，各小区随机分布.每次施肥均在同一天内完成，所施氮肥为尿素（含氮量 46.3%）.滴灌施肥时将尿素溶解为饱和溶液，采用以色列泰芬公司（TEEN）研发的美瑞（MixRite）比例混合泵（比例施肥器）由水力驱动将肥液输送到滴灌管中，从滴头匀速滴出.

1.3　土样采集及分析

2013 年，在欧美 108 杨生长季内（4 月初展叶），于 4 月 28 日进行首次施肥（滴灌施肥和沟施同时进行），取样时间为施肥前 1 天，施肥后第 2、5、10 和 20 天，采样周期内无降雨和灌溉.滴灌施肥处理随机选择 3 个距离树体最近的滴头，使用直径为 3 cm 的土钻采集滴头正下方 0～20、20～40 和 40～60 cm 土层土壤.沟施和 CK 处理随机选择 3 个距离树体 1 m 的样点，同样采集 3 层土壤样品，将土样分两份装入自封袋中，一份用于测定土壤含水量，一份保存于-4 ℃的冰箱，用于测定土壤硝态氮和铵态氮含量.土壤含水量采用烘干法测定，土壤新鲜样品采用 1 mol·L^{-1}的氯化钾溶液浸提（土水比 1∶5），土壤硝态氮含量采用紫外分光光度计法测定，土壤铵态氮含量采用靛酚蓝比色法测定[25].

1.4　数据处理

滴灌施肥 $DF=(DF_{25}+DF_{50}+DF_{75})/3$

沟施 $GF=(GF_{25}+GF_{50}+GF_{75})/3$

数据经 Shapiro-Wilk 和 Levene 检验均满足正态分布和方差齐性.采用 Excel 2007 和 SPSS 18.0 软件对数据进行统计分析.采用单因素方差分析（one-way ANOVA）和 Duncan 法进行方差分析和多重比较（$\alpha=0.05$）.利用 Origin 9.0 软件作图.图表中数据为平均值±标准差.

2　结果与分析

2.1　施肥方式对土壤铵态氮含量的影响

由图 1 可以看出，施肥前，滴灌施肥、沟施处理和 CK 土壤铵态氮含量均较低，为 2.9～7.3 mg·kg^{-1}，随土层深度的增加而降低.在 0～40 cm 土层，各处理间土壤铵态氮含量无显著差异.在40～60 cm土层，滴

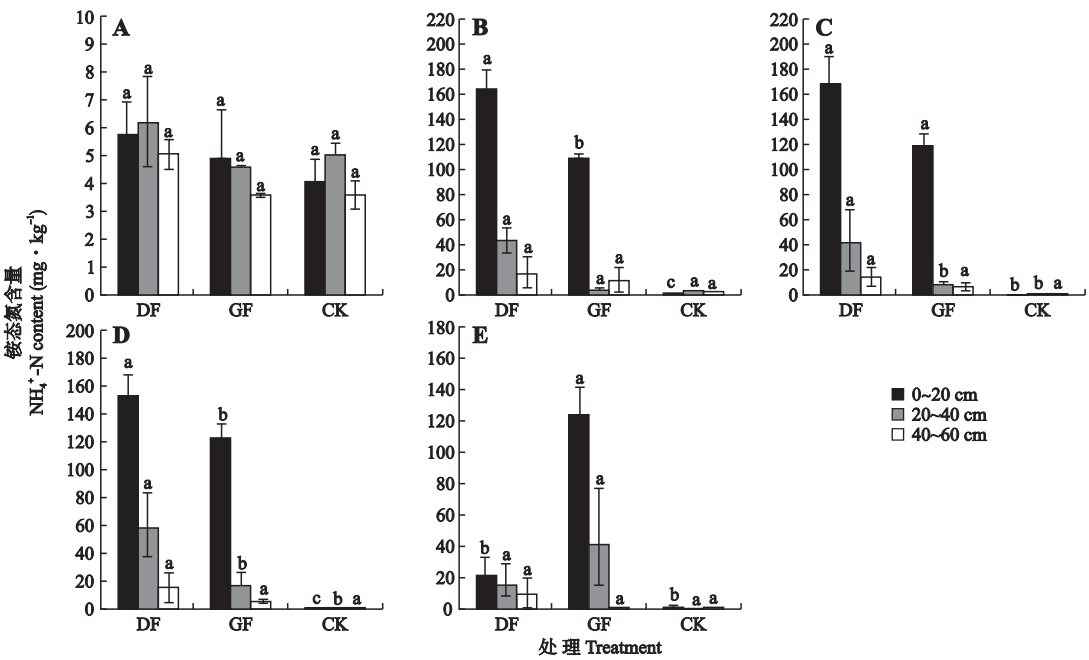


图 1　不同施肥方式下土壤铵态氮含量的动态变化

Fig.1　Dynamic changes of soil NH_4^+-N content under different fertilization methods.

DF：滴灌施肥 Drip fertigation；GF：沟施 Furrow fertilization；CK：对照 Control. A：施肥前 1 天 One day before fertilization；B：施肥后第 2 天 Two days after fertilization；C：施肥后第 5 天 The 5th day after fertilization；D：施肥后第 10 天 The 10th day after fertilization；E：施肥后第 20 天 The 20th day after fertilization. 不同小写字母表示在同一土层不同处理间差异显著（$P<0.05$）Different small letters indicated significant difference among different treatments in the same soil layer at 0.05 level. 下同 The same below.

灌施肥和沟施处理土壤铵态氮含量显著高于 CK,而滴灌施肥和沟施处理间无显著差异.

2 种施肥方式下铵态氮含量均随土层深度的增加而降低.滴灌施肥处理铵态氮主要集中在 0~40 cm 土层,其含量随时间呈先升后降的变化趋势,施肥后第 5 天达到最大值(211.1 mg·kg^{-1}).沟施处理铵态氮主要集中在 0~20 cm 土层,其含量随时间无显著变化.CK 铵态氮含量在各土层间均匀分布,稳定在 1.1~9.7 mg·kg^{-1}.

施肥前 1 天,滴灌施肥、沟施处理和 CK 0~60 cm 土层铵态氮平均含量无显著差异.施肥后第 2、5 和 10 天,滴灌施肥处理铵态氮平均含量为 226.2 mg·kg^{-1},较沟施处理(134.6 mg·kg^{-1})和 CK(3.07 mg·kg^{-1})显著提高 68% 和 728%.而施肥后第 20 天,沟施处理铵态氮平均含量为 166.8 mg·kg^{-1},较滴灌施肥处理(41.1 mg·kg^{-1})和 CK(2.4 mg·kg^{-1})显著提高 3.1 和 6.9 倍.可见,滴灌施肥处理尿素的水解时间和速率均高于沟施处理,并能在短期内(10 d)释放大量的铵态氮供植物吸收利用,而沟施处理铵态氮的释放相对缓慢.

2.2 施氮量对土壤铵态氮含量的影响

由图 2 可以看出,不同施氮量处理下,土壤铵态氮含量均随土层深度的增加而降低.滴灌施肥处理下,施氮量越大,铵态氮运移的距离越大,如铵态氮在 DF_{25}处理下运移至 40 cm,而在 DF_{50}处理下则运移至 60 cm.施氮量对沟施处理铵态氮的运移深度无显著影响,高施氮量处理 20~40 cm 土层铵态氮含量升高的原因可能是取样误差导致.

施肥后,滴灌施肥处理铵态氮含量随着施氮量的增加而增加,如施肥后第 10 天,DF_{25}、DF_{50}和 DF_{75}处理在 0~60 cm 土层的铵态氮总量分别为 177.7、228.0 和 278.4 mg·kg^{-1},各处理间差异显著.沟施处理铵态氮含量随施氮量增加不明显,如施肥后第 5 天,各处理间无显著差异.

2.3 施肥方式对土壤硝态氮含量的影响

由图 3 可以看出,施肥前土壤中硝态氮含量为 1.2~16.1 mg·kg^{-1}.滴灌施肥处理硝态氮在 40~60 cm 土层中富集,显著高于 0~20 和 20~40 cm 土层,亦显著高于沟施处理和 CK 的所有土层,这可能是由于 2012 年滴灌施肥试验后硝态氮在 40~60 cm 土层累积.而沟施处理和 CK 硝态氮含量则随深度的增加而降低.

2 种施肥方式下硝态氮含量均随土壤深度的增加而降低.滴灌施肥处理硝态氮主要集中在0~40 cm

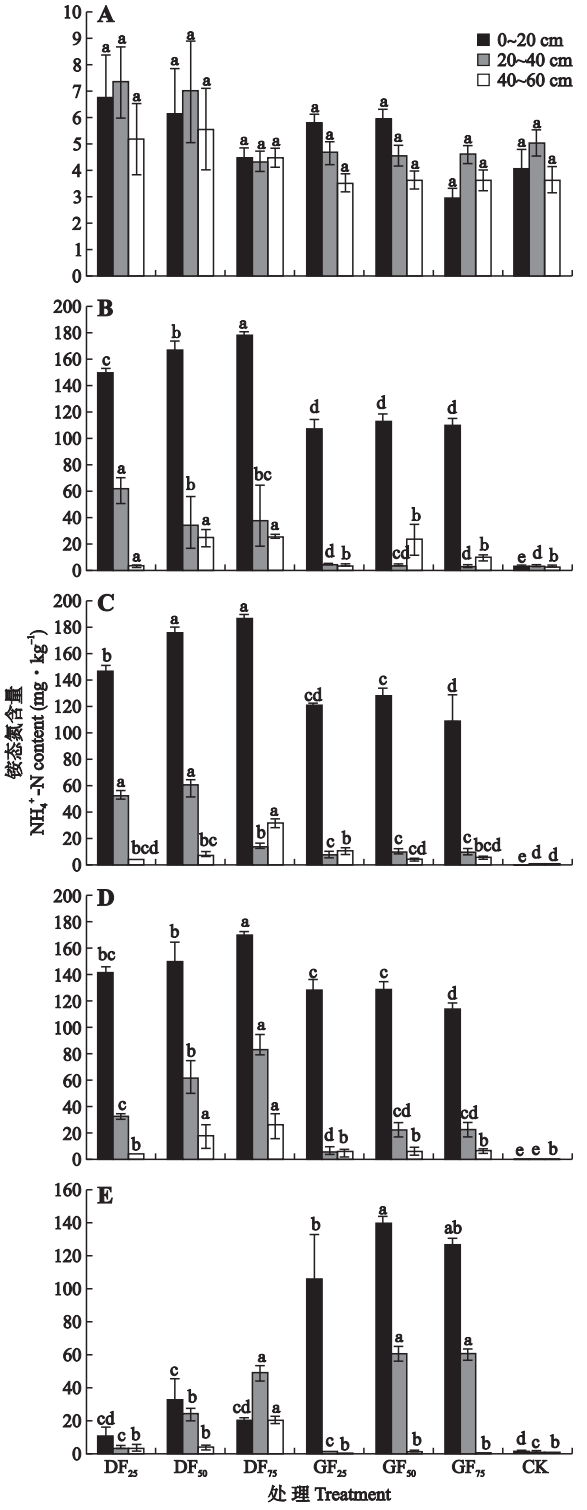


图 2 不同施氮量下土壤铵态氮含量的动态变化

Fig.2 Dynamic changes of soil NH_4^+-N content under different N application rates.

DF_{25}: 滴灌低肥 Drip fertigation with 25 g N·plant^{-1}·time^{-1}; DF_{50}: 滴灌中肥 Drip fertigation with 50 g N·plant^{-1}·time^{-1}; DF_{75}: 滴灌高肥 Drip fertigation with 75 g N·plant^{-1}·time^{-1}; GF_{25}: 沟施低肥 Furrow fertilization with 25 g N·plant^{-1}·time^{-1}; GF_{50}: 沟施中肥 Furrow fertilization with 50 g N·plant^{-1}·time^{-1}; GF_{75}: 沟施低肥 Furrow fertilization with 75 g N·plant^{-1}·time^{-1}. 下同 The same below.

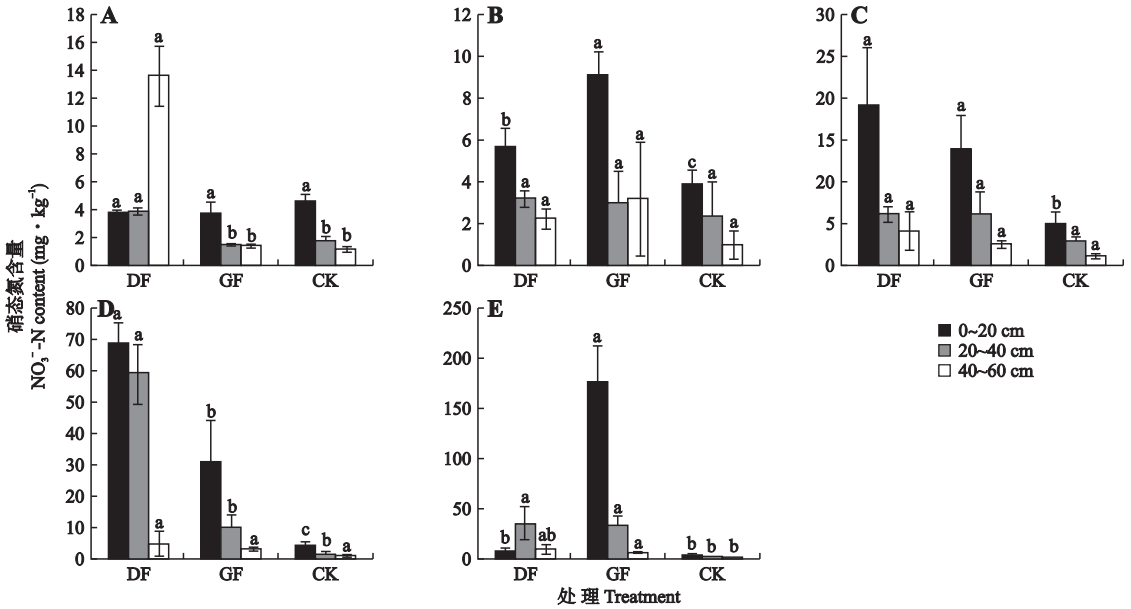


图 3　不同施肥方式下土壤硝态氮含量随时间的变化

Fig.3　Dynamic changes of soil NO_3^--N content under different fertilization methods.

土层,其含量随时间呈先升后降的趋势,施肥后第 10 天显著增加并达到最大值(128.8 mg · kg^{-1}).沟施处理硝态氮主要集中在 0~20 cm 土层,其含量随时间变化呈逐渐增加的趋势,于施肥后第 20 天显著增加并达到最大值(175.7 mg · kg^{-1}).CK 各土层硝态氮含量在试验期间无显著变化,稳定在 6.3~7.9 mg · kg^{-1}.

施肥前 1 天,滴灌施肥处理 0~60 cm 土层硝态氮平均含量显著高于沟施和 CK.施肥后第 2 和 5 天,滴灌施肥和沟施处理硝态氮平均含量为 20.2 和 19.1 mg · kg^{-1},较 CK(8.2 mg · kg^{-1})显著提高 1.5 和 1.3 倍.施肥后第 10 天,滴灌施肥处理硝态氮平均含量为 133.6 mg · kg^{-1},较沟施(44.5 mg · kg^{-1})和 CK(7.9 mg · kg^{-1})显著提高 2.0 和 15.9 倍.而施肥后第 20 天,沟施处理硝态氮平均含量为 216.4 mg · kg^{-1},较滴灌施肥(51.2 mg · kg^{-1})和 CK(7.5 mg · kg^{-1})显著提高 3.2 和 27.9 倍.可见,滴灌施肥处理硝化速率快于沟施处理,滴灌施肥处理在施肥后第 10~20 天释放大量的硝态氮供植物吸收利用,而沟施处理硝态氮的释放主要在施肥 20 d 后.

2.4　施氮量对土壤硝态氮含量的影响

由图 4 可以看出,不同施氮量处理下,土壤硝态氮含量均随土层深度的增加而降低.滴灌施肥处理下,施氮量越大,硝态氮运移的距离越大,如硝态氮在 DF_{25}处理施肥后第 20 天最终运移至 40 cm,而在 DF_{75}处理下则最终运移至 60 cm.沟施处理下,施氮量对硝态氮分布的深度无显著影响.

施肥后,2 种施肥处理下硝态氮含量均随施氮量的增加而增加.施肥后第 10 天(滴灌施肥处理硝态氮含量达到最大值),0~60 cm 土层 DF_{75}和 DF_{50}处理显著大于 DF_{25}处理($DF_{75} \geqslant DF_{50} > DF_{25}$).施肥后第 20 天(沟施处理硝态氮含量达到最大值),0~60 cm 土层 GF_{75}处理硝态氮含量为 245.1 mg · kg^{-1},高于 GF_{50}处理(222.0 mg · kg^{-1})和 GF_{25}处理(182.2 mg · kg^{-1}).

施肥后第 20 天,DF_{75}处理在 0~60 cm 土层硝态氮残余量为 76.7 mg · kg^{-1},高于 DF_{50}处理(48.3 mg · kg^{-1}),并显著高于 DF_{25}处理(28.6 mg · kg^{-1}).从土壤中残留的硝态氮含量来看,DF_{25}处理土壤硝态氮含量几乎降低至施肥前,表明低肥量不能满足植物对氮素的需求.DF_{50}和 DF_{75}处理土壤硝态氮含量均有富余,能够满足植物对氮素的需求.考虑到 DF_{75}处理 40~60 cm 土层的硝态氮残留量较大,发生淋溶的风险较大,因此推荐单次施肥量为每株 50 g.

3　讨　　论

一般情况下,尿素施入土壤后先水解为碳酸铵,进一步水解后分解为碳酸氢铵和氢氧化铵,在通气良好的情况下还会发生硝化作用,将 NH_4^+氧化为 NO_3^-,其中 NH_4^+和 NO_3^-均可被植物吸收利用;另外,也存在挥发、淋失和径流等多种损失途径[16,25].本研究表明,不同施肥方式和施氮量处理下,土壤铵

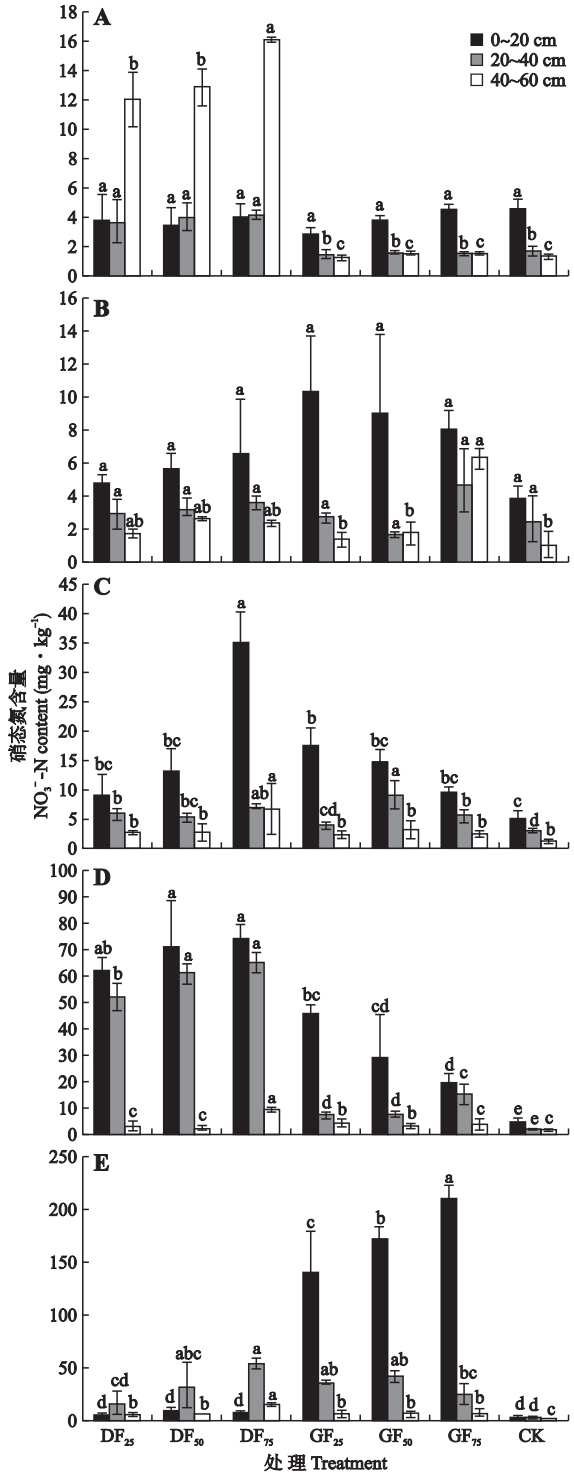


图 4 不同施氮量下土壤硝态氮含量的动态变化

Fig.4 Dynamic changes of soil NO_3^--N content under different N application rates.

态氮和硝态氮分布随土层深度的增加而降低.滴灌施肥处理的铵态氮和硝态氮主要分布在 0~40 cm 土层,但在沟施处理下则主要分布在 0~20 cm 土层.本研究中,铵态氮的分布规律与通过室内土槽模拟滴灌试验[26]和温室田间滴灌试验[19]得到的研究结果相似,表明不同的试验环境对铵态氮在土壤中的分布规律影响不大;而硝态氮的分布规律与王虎等[27]通过大田试验施用硝酸铵得到的研究结论相反,未出现硝态氮在深层土壤的积累现象.分析其原因可能是:NH_4^+-N 带正电荷,在土壤中容易被土壤胶体吸附,容易被土壤"包存",因而其移动性较小,而 NO_3^--N 带负电荷,不易被土壤中胶体吸附,故在土壤中移动性较大[8,28].由于本研究与王虎等[27]试验时施用的肥料种类不同,肥液中 NO_3^--N 含量较少,土壤中 NO_3^--N 大部分来源于 NH_4^+-N 的硝化作用,并未随水分的移动而再分布.

尿素施入土壤中需要经过一定时间的分解与转化,其在土壤中的迁移转化与土壤脲酶含量、含水量、酸度、温度和湿度有关,也受土壤类型、施肥深度、植被类型和根系等因素的影响[29].Nkrumah 等[30]发现,尿素施入土壤后 3~7 h 有 28.9%的尿素转化为铵态氮,24 h 转化率达到 64%~77%,48 h 时达到 80%~85%.因此,一般情况下,土壤中尿素的水解时间在 3 d 左右.本研究中滴灌施肥方式下,土壤中氮素随时间呈先增后减的变化趋势,铵态氮和硝态氮含量分别于施肥后第 5 和 10 天达到最大值,这与习金根等[8]通过室内土柱模拟滴灌施肥的研究结果相似.沟施下土壤铵态氮含量随时间变化不明显,而硝态氮含量随时间呈逐渐增加的变化趋势.董玉云等[31]研究不同施肥方式对膜孔点源入渗尿素转化特性的影响时发现,不同施肥方式下(灌施、表施和深施)尿素的转化规律基本一致,施肥 5 d 后土壤铵态氮达到最高峰,随后的 10 d 内迅速下降至土壤的本底值,而土壤硝态氮一直平稳升高,于施肥后 15 d 左右达到最大值.本研究中沟施处理结果不同于董玉云等[31]的研究,可能是因为施肥量较大,土壤含水量相对于滴灌施肥处理较低,尿素在土壤中的分解速率较慢.从 2 种施肥方式下氮素在土壤中随时间变化的趋势来看,滴灌施肥方式下氮素的释放迅速,施肥后 10 d 内以铵态氮的供应为主,施肥 10 d 后以硝态氮的供应为主,因此其氮素有效时长为施肥后 20 d 内;沟施方式下氮素的释放缓慢,其氮素有效时长超过 20 d.这表明不同的施肥方式下硝化作用进行的时间和速度也不同.另外,由于本试验对沟施方式的试验时间较短,只追踪至施肥后第 20 天,不能确定土壤中铵态氮和硝态氮含量的后续变化,需要进一步的研究.

胡明芳等[32]通过滴灌施肥研究发现,硝态氮主要分布在 0~40 cm 土层,其含量随着施氮量的增加

而增加.本研究中也发现,2 种施肥方式下土壤硝态氮含量均随施氮量的增加而增加,较高的施氮量会加大土壤硝态氮含量的积累.氮肥的施用量决定着硝态氮淋失量的大小,也决定了土壤剖面中硝态氮深层的积累[25].本研究表明,施用尿素提高了土壤中铵态氮含量,其主要在 0~40 cm 土层变化.这是因为铵态氮容易被土壤胶体吸附,可移动性较小,因而存在的淋溶风险较小.在相同施氮量下,滴灌施肥更能增加土壤中铵态氮含量,而沟施增加的是硝态氮含量,这可能与 2 种施肥方式下土壤通气状况有关[24].因此,从氮素淋溶和氮素有效利用空间方面考虑,当单次施氮量为每株 50 g 时,既能保证根系分布范围内有较高的氮素供应又不会造成淋溶.

参考文献

[1] Jia L-M (贾黎明), Liu S-Q (刘诗琦), Zhu L-H (祝令辉), *et al*. Carbon storage and density of poplars in China. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Science) (南京林业大学学报:自然科学版), 2013, **37**(2): 1-2 (in Chinese)

[2] Zhang B-J (张百俊), Dong S-L (董胜林), Jia W-X (贾卫禧), *et al*. On the introducing characteristics of new *Populus* ×*euramericana* cv. 'Neva' and *Populus* × *euramericana* cv. 'Guariento'. *Journal of Henan Institute of Science and Technology* (Natural Science) (河南科技学院学报:自然科学版), 2008, **36**(4): 24-26 (in Chinese)

[3] Jing D-W (井大炜), Xing S-J (邢尚军). Effects of chicken manure mixed with inorganic fertilizer on soil enzyme activities, microbial biomass C and N at rhizosphere of poplar seedlings. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2013, **19**(2): 455-461 (in Chinese)

[4] Rennenberg H, Wildhagen H, Ehlting B. Nitrogen nutrition of poplar trees. *Plant Biology*, 2010, **12**: 275-291

[5] Lin X-M (林晓明), Xu C-Y (徐程扬), Wang Q-F (王奇峰), *et al*. Effects of nitrogen and phosphorus on biomass accumulation of *Populus* ×*euramericana* cv.'74/76' cuttings. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2011, **39**(2): 13-16 (in Chinese)

[6] Xing S-J (邢尚军), Jing D-W (井大炜), Ma H-L (马海林), *et al*. Effects of different assorted measures on growth and rhizosphere soil characteristics of *Populus* × *euramericana* cv. 'Neva'. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2014, **42**(10): 7-10 (in Chinese)

[7] Zhao Y-G (赵允格), Shao M-A (邵明安), Zhang X-C (张兴昌). Impact of localized compaction and ridge fertilization on field nitrate transport and nitrate use efficiency. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(1): 68-72 (in Chinese)

[8] Xi J-G (习金根), Zhou J-B (周建斌), Zhao M-X (赵满兴), *et al*. Leaching and transforming characteristics of different nitrogen fertilizers added by fertigation. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2004, **10**(4): 337-342 (in Chinese)

[9] Ajdary K, Singh DK, Singh AK, *et al*. Modelling of nitrogen leaching from experimental onion field under drip fertigation. *Agricultural Water Management*, 2007, **89**: 15-28

[10] Lee KH, Jose S. Nitrogen mineralization in short-rotation tree plantations along a soil nitrogen gradient. *Canadian Journal of Forest Research*, 2006, **36**: 1236-1242

[11] Coleman M. Spatial and temporal patterns of root distribution in developing stands of four woody crop species grown with drip irrigation and fertilization. *Plant and Soil*, 2007, **299**: 195-213

[12] Henderson DE, Jose S. Biomass production potential of three short rotation woody crop species under varying nitrogen and water availability. *Agroforestry Systems*, 2010, **80**: 259-273

[13] Silber A, Xu G, Levkovitch I, *et al*. High fertigation frequency: The effects on uptake of nutrients, water and plant growth. *Plant and Soil*, 2003, **253**: 467-477

[14] Yan X-L (闫小莉), Dai T-F (戴腾飞), Xing C-S (邢长山), *et al*. Coupling effect of water and nitrogen on the morphology and distribution of fine root in surface soil layer of young *Populus* ×*euramericana* plantation. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2015, **35**(11): doi. 10.5846/stxb201308032013 (in Chinese)

[15] Wang S-H (王树会), Geng S-X (耿素祥). Effect of excessive fertilization on growth, development yield and quality of flue-cured tobacco. *Journal of Agricultural Science and Technology* (中国农业科技导报), 2010, **12**(5): 116-122 (in Chinese)

[16] Yu Y-W (于亚伟), Zhang L-X (张丽霞), Han X-Y (韩晓阳). Urea transformation and nitrification under different urea combined fertilization in the brown soils of tea garden. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2011, **17**(5): 1278-1282 (in Chinese)

[17] Clothier BE, Sauer TJ. Nitrogen transport during drip fertigation with urea. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, **52**: 345-349

[18] Li J-S (李久生), Yang F-Y (杨风艳), Li Y-F (栗岩峰). Water and nitrogen distribution under subsurface drip fertigation as affected by layered-textural soils. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2009, **25**(7): 25-31 (in Chinese)

[19] Hou H-Y (侯红雨), Pang H-B (庞鸿宾), Qi X-B (齐学斌), *et al*. Study on the NH_4^+-N transformation and transport under drip irrigation in greenhouse. *Journal of Irrigation and Drainage* (灌溉排水学报), 2003, **22**(1): 48-52 (in Chinese)

[20] Wang H (王　虎), Wang X-D (王旭东), Yang Y (杨　莹). Distribution pattern of NH_4^+-N in soil under

dripping irrigation and fertigation. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2006, **24** (1): 51-55 (in Chinese)

[21] Deng T (邓 坦), Jia L-M (贾黎明). Nutritional characteristics and fertilization of poplar. *World Forestry Research* (世界林业研究), 2009, **22**(5): 51-56 (in Chinese)

[22] Zhao H (赵 好), Chen J-L (陈金林), Yu B (于彬), *et al*. Formulated fertilization for fast-growing and high-yield poplar plantation. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2009, **37**(11): 26-28 (in Chinese)

[23] Ma H (马 晖), Yu W-P (于卫平), Huang L-J (黄利江), *et al*. Study on fertilization technology of fast-growing and high-yielding poplar plantation. Ⅱ. Top-dressing experiment. *Forest Research* (林业科学研究), 2004, **17**(suppl. 1): 23-30 (in Chinese)

[24] Kong L-G (孔令刚), Liu F-D (刘福德), Wang H-T (王华田), *et al*. Effect of fertilization on soil microflora and enzyme rhizosphere effect in poplar forestland. *Science of Soil and Water Conservation* (中国水土保持科学), 2006, **4**(5): 60-65 (in Chinese)

[25] Ma X-H (马兴华), Yu Z-W (于振文), Liang X-F (梁晓芳), *et al*. Effects of nitrogen application rate and its basal-top-dressing ratio on spatio-temporal variations of soil NO_3^--N and NH_4^+-N contents. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(4): 630-634 (in Chinese)

[26] Lv M-C (吕谋超), Cai H-J (蔡焕杰), Huang X-Q (黄修桥). The redistribution of water and nitrate in rhizosphere under drip fertigation. *Journal of Irrigation and Drainage* (灌溉排水学报), 2008, **27**(3): 24-27 (in Chinese)

[27] Wang H (王 虎), Wang X-D (王旭东), Zhao S-W (赵世伟). Distribution of soil water and nitrate in Lou soil under drip fertigation. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica* (西北农业学报), 2008, **17**(6): 309-314 (in Chinese)

[28] Xiong S-P (熊淑萍), Ji X-J (姬兴杰), Li C-M (李春明), *et al*. Effect of different fertilizer treatments on spatial-temporal variations of soil ammonium nitrogen. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2008, **27**(3): 978-983 (in Chinese)

[29] Dong Y (董 燕), Wang Z-Y (王正银). Conversion of urea in soil and its plant use efficiency. *Phosphate and Compound Fertilizer* (磷肥与复肥), 2005, **20**(2): 76-78 (in Chinese)

[30] Nkrumah M, Griffith SM, Ahmad N, *et al*. Lysimeter and field studies on ^{15}N in a tropical soil. *Plant and Soil*, 1989, **114**: 3-12

[31] Dong Y-Y (董玉云), Fei L-J (费良军), Mu H-W (穆红文). Influence of fertilizer application on transform characteristics of soil urea under single film hole infiltration. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2012, **30**(1): 8-11 (in Chinese)

[32] Hu M-F (胡明芳), Tian C-Y (田长彦), Lv Z-Z (吕昭智), *et al*. Effects of N rate on cotton yield and nitrate-N concentration in plant tissue and soil. *Journal of Northwest A&F University* (Natural Science) (西北农林科技大学学报:自然科学版), 2006, **34**(4): 63-68 (in Chinese)

作者简介 戴腾飞,男,1989 年生,硕士研究生.主要从事杨树施肥管理研究. E-mail: f.jctdtf@163.com

责任编辑 孙 菊