

长期施氮与灌溉对毛白杨人工林土壤硝态氮分布与积累的影响

张润哲¹, 朱嘉磊¹, 王江¹, 聂浩亮¹, 黄梦遥¹, 宋连君², 聂立水^{1*}

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 威县苗圃场, 河北 邢台 054700)

摘要: [目的] 研究灌溉和施氮对硝态氮在毛白杨林地土壤中积累与分布的影响, 为毛白杨速生丰产林科学精准施肥和减少硝态氮淋失提供依据。 [方法] 在华北平原毛白杨适生地河北威县, 利用“十二五”毛白杨大径材培育研究长期试验地, 研究了通过灌溉保持不同土壤水分状况 (田间持水量 45%、60%、75%) 和施氮量 (0.0、101.6、203.2、304.8 kg·hm⁻²) 对土壤硝态氮分布与积累的影响。 [结果] 土壤硝态氮分布具有明显的表聚性, 在 0~200 cm 土层呈先下降后上升再下降的“S”型变化趋势, 且施氮量越大, 硝态氮在 60~100 cm 土层累积的趋势越明显。随着土壤水分的增加, 土壤硝态氮的淋洗峰所在土层深度分别在 40~60、60~80、80~100 cm。土壤硝态氮累积量随施氮量的增加而增加, 随灌溉水量的增加则呈先增加后减少的趋势; 水氮交互作用对硝态氮的分布与积累影响显著。林地不同水氮组合土壤硝态氮累积量为 86.11~259.29 kg·hm⁻²。 [结论] 施氮量与土壤水分含量对毛白杨林地土壤硝态氮的分布与积累影响显著, 在 0~200 cm 土层内, 随着施氮量的增加, 硝态氮的累积量呈上升趋势; 随着土壤含水量的增加, 硝态氮积累峰所在的土层呈逐渐下移的趋势。与农田生态系统相比, 试验林地 0~200 cm 土层内硝态氮累积量较低, 林地生态系统庞大林木根系对硝态氮吸收作用值得重视。同时, 为了减少硝态氮的淋失, 建议减少氮肥的施用, 并将田间持水量控制在 60%~75%。

关键词: 硝态氮; 施氮量; 田间持水量; 毛白杨; 农田生态系统; 林地生态系统

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2019)06-0007-07

在通气良好土壤中, 硝态氮是植物吸收氮的主要形态^[1-3], 但硝酸根离子水溶性极强, 不易被土壤胶体吸附, 很容易随土壤下渗水淋失。据统计, 全球每年施入土壤中的氮肥量高达 8 500~9 000 万 t^[4], 我国每年氮肥的施用量超过 270 万 t^[5], 而氮肥利用率不足 50%^[6]。其中的原因之一是过量施氮造成硝态氮淋失, 从而导致地下水和地表水污染日益严重^[7]。因此, 研究长期施氮下林地土壤硝态氮淋失状况, 可为农林业提高氮肥利用率和减少硝态氮淋失提供科学依据。

目前, 农业土壤硝态氮淋失的报道很多, 且不同土地利用类型下硝态氮累积量存在较大差异^[8]。0~2 m 土层内农田硝态氮的累积量可超过 325 kg·hm⁻², 菜地、果园的土壤硝态氮累积量分别为 124~

3 459、93~6 791 kg·hm⁻²^[8-12]。大量单因素试验结果表明, 施氮量直接影响硝态氮在土壤中的动态变化, 而灌溉或降雨也是影响硝态氮运移的一个重要因素^[13-16], 特别是在通气良好的砂质土壤中, 水分的渗透作用增强, 可能会增加硝态氮淋失的风险^[17-19]。Bergström 等^[20]研究表明, 施用过量的氮肥会造成硝态氮在土壤剖面形成累积峰, 而植物根系同样也是影响土壤硝态氮淋失的一个重要因素。王朝晖等^[21]发现, 根系分布较深的植物比浅根植物更能有效地吸收氮素, 减少深层土壤硝态氮积累。

杨树人工林作为我国速生丰产林的重要组成部分, 种植面积多达 850 万 hm²^[22]。由于速生丰产林种植面积广, 而且相对于其他速生树种, 杨树所需要的水分及氮肥的供应也十分巨大。长期以来, 人们

收稿日期: 2019-05-06 修回日期: 2019-07-03

基金项目: 十二五"国家科技支撑计划资助(2015BAD09B02)

* 通讯作者: 聂立水, 博士, 教授. 研究方向: 植物营养学. E-mail: nielishui@sohu.com

把提高灌溉水利用率和增加化肥用量作为提高农林业产量的重要手段,因此,有不少学者对水肥因素之间的耦合机理进行了深入研究。因地制宜地调节水分和肥料,使其处于合理的范围,使水肥产生协同作用,达到“以水促肥”和“以肥促水”的目的,是实现林业生产节水节肥和高产高效的主要途径。贺勇等^[23]发现,滴灌施肥处理下 107 杨幼林对 N、P、K 的吸收能力增强,最佳施氮量为 $120 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。陈兰岭等^[24]在研究灌水与林木生长的关系时发现,增加灌水次数,将田间供水量控制在 $10 \text{ t} \cdot \text{株}^{-1}$,材积年增量最大;而毛白杨(*Populus tomentosa* var. *tomentosa*)作为我国北方优良乡土树种,生长迅速、材质优良,是华北地区主要的速生丰产用材林。基于培育大径材毛白杨速生丰产用材林,施氮与灌水显著影响林木的生长,也选育出了许多优良三倍体品种,如 S86、BT17 等;但杨树人工林地的硝态氮淋失状况研究较少^[25],而长期施氮和灌水下的毛白杨人工林硝态氮淋失状况更是鲜有报道。随着氮肥常年定期施用以及水分的定期补充,使得硝态氮在林地中淋失的风险不断增加,最终可能会导致地下水污染,所以,长期不同水氮条件下的毛白杨人工林硝态氮淋失状况值得关注。

本研究以毛白杨 S86 为研究对象,探讨灌水和施肥对毛白杨林地硝态氮分布及积累的影响,为毛白杨人工林地科学精准施肥,提高氮肥利用率和减少硝态氮淋失提供依据。

1 试验地概况

试验地位于河北省邢台市威县国家重点杨树良种基地—威县苗圃场($113^{\circ}52' \sim 115^{\circ}49' \text{ E}$, $36^{\circ}50' \sim 37^{\circ}47' \text{ N}$),属于华北平原南部,地势低平;属暖温带大陆性半干旱季风气候,年平均气温 13°C ,极端最高气温为 41.6°C ,极端最低气温为 -21.4°C ;年平均降水量为 497.7 mm ,降水多集中在夏末秋初;全年日照总时数为 2574.8 h ,无霜期历时 198 d 。

供试材料三倍体毛白杨无性系 S86 来自河北省威县苗圃场。选择生长状况基本一致的 2 年生苗木,平均苗高 5.8 m ,平均胸径 6.1 cm ,于 2007 年 4 月统一造林。造林总面积为 1.21 hm^2 ,株行距为 $4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ (造林密度平均为 $1270 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$),共计 36 个小区,小区面积为 252 m^2 ,小区间设有保护行,林间无间作作物,每年 3 月份进行耕地松土 1 次。林地内土壤为

砂壤质潮土,总孔隙度 46.7% ,田间持水量 26% ,土壤密度 $1.43 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。浅层地下水平均埋深 15.12 m ,深层地下水平均埋深 52.81 m ^[26-27]。2007 年试验地土壤的有机质为 $8.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮为 $0.58 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮为 $87.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷为 $8.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾为 $90.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2 研究方法

2.1 试验设计与实施

本试验采用主处理为水,副处理为氮的裂区设计(简称灌水量和施氮量)。土壤含水量划分 3 个梯度水平:W1、W2、W3,分别指田间持水量的 45% 、 60% 、 75% 。氮肥按纯氮量计算共设 4 个用量水平:N0、N1、N2、N3,分别为 0.0 、 101.6 、 203.2 、 $304.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,即: 0 、 80 、 160 、 $240 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。试验共设 12 个处理,3 次重复,共计 36 个小区^[26-27]。为避免土壤磷素和钾素缺乏而干扰不同处理效果,试验采用所有处理补施足量磷肥和钾肥作为肥底。

自 2007 年至 2018 年,每年分别在 5 月末、6 月末、7 月末分 3 次连续施肥。每次施入肥料的 $1/3$ 。施肥方法采用穴施,在供试样木两侧各挖 1 个 $20 \sim 30 \text{ cm}$ 深的穴,穴与树干的距离依据树冠的投影而定,施肥后立即覆土、灌水。氮、磷、钾肥同步,分别为尿素($\text{N}46\%$)、过磷酸钙(P_2O_5 16%)和硫酸钾(K_2O 50%)。磷肥按 P_2O_5 计算,用量为 $101.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ($80 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$),钾肥按 K_2O 计算,用量为 $50.80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ($40 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$),且各处理磷钾肥施用量一致。

用 ML2x 土壤水分测量仪(国产)监测土壤含水量,在距离供试样木 20 cm 深的土层处测定土壤水分,得到土壤体积含水率,根据公式“土壤密度 = 体积含水率/质量含水率”换算得到质量含水率。若每个区组的含水量低于试验设计的水分值,则进行灌溉补充水分,测定每隔 3 d 进行 1 次,每次测定均在 $10:00$ 进行。

2.2 土壤样品采集及分析

于 2018 年 11 月待树木生长停止时,在每个小区内进行土壤样品采集。为保证样品具有足够代表性,在每个小区内按 S 形路线采样,共采集 5 个样点,每个点垂直方向按机械层次划分为 $0 \sim 20$ 、 $20 \sim 40$ 、 $40 \sim 60$ 、 $60 \sim 80$ 、 $80 \sim 100$ 、 $100 \sim 120$ 、 $120 \sim 200 \text{ cm}$ 7 个层次,再将 5 个样点同层次混合,用四分法取大约 1 kg 的样品装入塑封袋密封,在 $0 \sim 4^{\circ}\text{C}$

下保存带回实验室分析,共采集 252 个土壤样品。

新鲜土样过 2 mm 筛后,取 1/2 放入冰箱,在 $-6\sim-7^{\circ}\text{C}$ ^[28] 保存,用于测定土壤的硝态氮。土壤硝态氮用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KCl 浸取^[29],紫外分光光度计法测定^[30]。

2.3 数据统计与分析

硝态氮累积量 $I = h \times C \times B/10$

式中: I 为硝态氮累积量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); h 为土层厚度 (cm); C 为硝态氮含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); B 为该土层的平均密度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)^[31]。

采用 Excel2010 进行数据整理和图表绘制,利用 SPSS24.0 进行数学统计分析,采用一般线性模型 (GLM) 中 Univariate(单因变量)分析检验不同田间持水量、不同施氮量及水氮交互作用对毛白杨 S86 林地土壤硝态氮积累量的差异和硝态氮分布的差异,对其中显著的效应运用 Duncan 检验法进行多重比较。

表 1 不同水氮组合间土壤硝态氮含量方差分析

Table 1 Variance analysis of soil nitrate N content under different water nitrogen coupling levels

变异来源 Sources of variation	III 类平方和 Type III sums of squares	自由度 df	均方 Mean square	F	显著性 sig.
施氮量 × 灌水量 Nitrogen Application × Irrigation	109.033	6	18.172	6.179	<0.01
施氮量 Nitrogen Application	499.682	3	166.561	56.639	<0.01
灌水量 Irrigation	153.159	2	76.580	26.041	<0.01

氮肥对硝态氮分布的影响较明显,基本表现为 $\text{N3} > \text{N2} > \text{N1} > \text{N0}$ 。施用氮肥后,硝态氮在土层中的残留量明显增加,施氮量增大,硝态氮在土壤剖面各层次中的分布也呈现升高的趋势,施氮量越大,硝

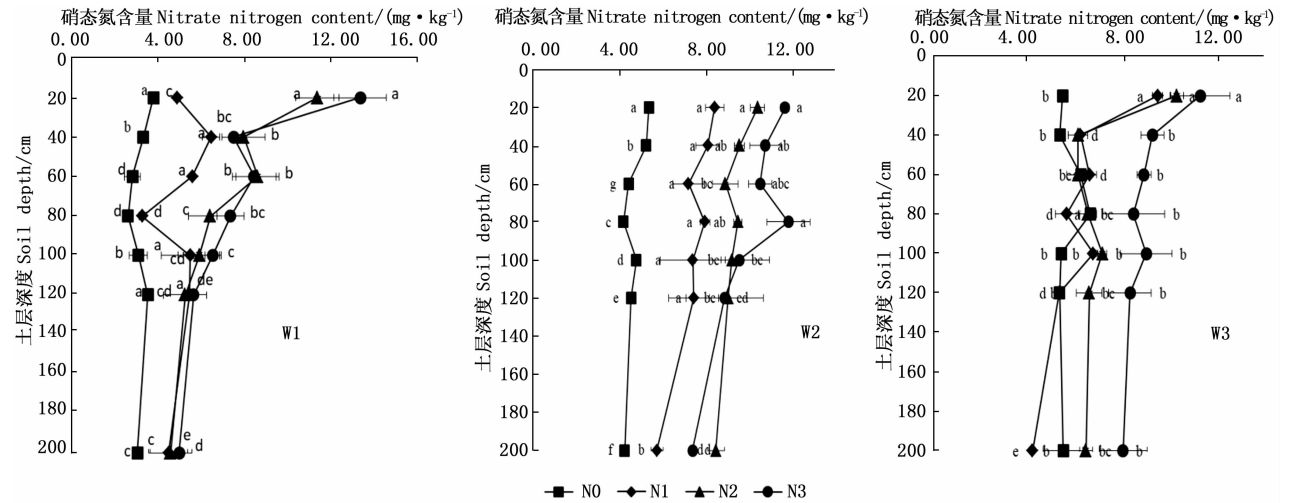
3 结果与分析

3.1 土壤硝态氮的分布

连续 11 年不同水、氮处理后 S86 无性系林地 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80、80 ~ 100、100 ~ 120、120 ~ 200 cm 土层的土壤硝态氮含量分别为: $3.78\sim13.36$ 、 $3.32\sim10.74$ 、 $2.82\sim10.49$ 、 $2.61\sim10.49$ 、 $3.09\sim9.53$ 、 $3.54\sim9.01$ 、 $3.04\sim8.45\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。0 ~ 200 cm 各土层内硝态氮平均含量变化范围为 $5.59\sim8.82\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,且呈逐层递减的趋势。硝态氮含量在林地土壤中有明显的表聚现象,且随着土层深度的增加,硝态氮含量总体有下降的趋势。

表 1 表明:施氮量、灌水量和水氮交互作用均对土壤硝态氮含量影响极显著 ($p < 0.01$)。由 F 值大小可知:三者影响程度表现为施氮量 $>$ 灌水量 $>$ 水氮交互作用。

态氮在剖面内的起伏变化越大,而 N0 处理在整个剖面未出现明显的淋洗峰;土壤中硝态氮含量与施氮量的高低成正比,施氮量越高,硝态氮在土壤剖面中出现的峰值也越高(图 1)。



注:小写字母表示差异达显著水平, $p < 0.05$,下同
Notes: Lowercase letters indicate significant difference, $p < 0.05$, the same below

图 1 不同田间持水量和施氮水平下毛白杨林地土壤剖面硝态氮含量分布

Fig. 1 Nitrate nitrogen content distribution in soil profile of *Populus tomentosa* var. *tomentosa* under different field water capacity and nitrogen application levels

灌水量的不同,也造成了硝态氮分布的差异性, W1 处理中, N0 硝态氮平均含量为 $2.61 \sim 3.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 而 W2 处理中, N3 硝态氮平均含量为 $7.37 \sim 11.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。根据硝态氮累积量公式 $I = h \times C \times B/10$ 可计算出两组合 $0 \sim 200 \text{ cm}$ 的积累量为 $86.11 \sim 252.29 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。随着灌水量的增加, 土壤硝态氮的淋洗峰所在土层深度在逐渐下降(图 1)。在 W1 水平下, 硝态氮主要集中在 $0 \sim 60 \text{ cm}$ 处, 在 60 cm 以下, 硝态氮含量有起伏, 但总体呈现下降的趋势。在 W2 水平下, 硝态氮含量大多呈现先下降后上升再下降的趋势, 峰值出现在 $80 \sim 100 \text{ cm}$ 处, 在 $100 \sim 200 \text{ cm}$ 处硝态氮含量有明显的下降趋势。在 W3 水平下, 硝态氮含量大多呈现先下降后上升再下降的趋势, 峰值大多出现在 100 cm 处, 在 100 cm 以下, 硝态氮含量呈现下降趋势。

3.2 土壤硝态氮的积累

施氮量对土壤中硝态氮的积累有显著影响(图 2)。在同一灌水量条件下, 土壤硝态氮积累量随施氮量的增加而增大。具体表现为 $N3(240 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}) > N2(160 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}) > N1(80 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}) > N0(0 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1})$, 其中, 施氮量在 N3 水平下土壤硝态氮积累量最大, 达到 $696.90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 是 N0 的 1.87 倍。

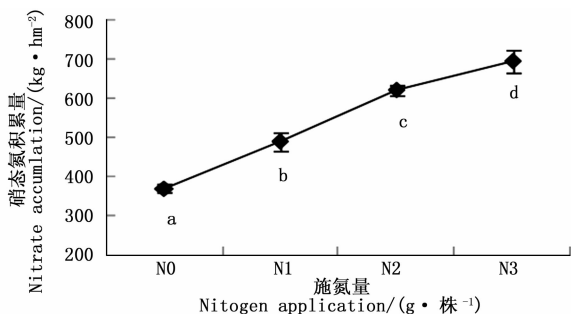


图 2 施氮量对毛白杨林地土壤硝态氮积累的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen application on soil nitrate accumulation in *Populus tomentosa* var. *tomentosa* forestland

灌水量对土壤中硝态氮的积累也有显著影响(图 3)。在同一施氮条件下, 土壤硝态氮的积累量随灌水量的增加呈先上升后下降的趋势, 表现为 $W2(60\%) > W3(75\%) > W1(45\%)$, 当田间持水量达到 60% 时, 林地土壤中硝态氮积累量最大为 $832.88 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 是 W1 的 1.40 倍。

4 讨论

4.1 施氮量和灌水量对土壤硝态氮分布的影响

在干旱或半干旱地区, 通过人工施肥输入的氮

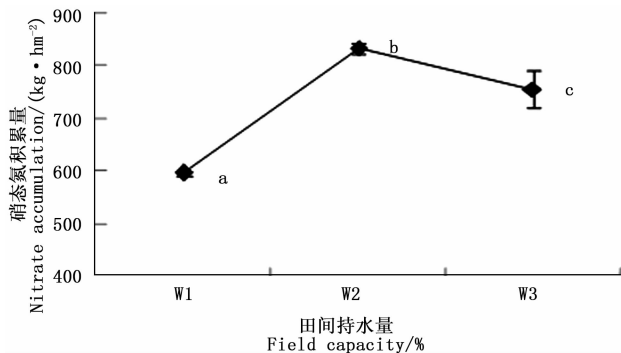


图 3 不同田间持水量对毛白杨林地土壤硝态氮积累的影响

Fig. 3 Effects of different field water holdup on soil nitrate accumulation in *Populus tomentosa* var. *tomentosa* forestland

素在土壤中转化为硝态氮后成为植物吸收利用的主要形态。一般情况下, 将尿素施入土壤后, 尿素先水解为碳酸铵, 进一步水解后分解为碳酸氢铵和氢氧化铵。由于本研究区内土质是潮质沙壤土, 通气状况良好, 故易发生硝化作用, 将 NH_4^+ 氧化为 NO_3^- 。研究发现, 硝态氮含量大多随土层深度增加呈先下降后上升加再下降的趋势, 这与刘微等^[32]的结果一致。本研究结果显示: $0 \sim 200 \text{ cm}$ 平均硝态氮含量为 $5.59 \sim 8.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 且大多集中于土层 $0 \sim 100 \text{ cm}$ 处, 但在 $120 \sim 200 \text{ cm}$ 处, 硝态氮含量相对较少, 这与左海军等^[33]的研究结果不一致。分析可能有以下原因: 由于施肥时期选择在 5、6、7 三个月份, 此时正处于毛白杨生长旺盛期, 树高和胸径生长最快^[26-27], 毛白杨对硝态氮的吸收利用也是一年中最大的; 其次, 由于试验地采用氮、磷、钾肥配施的方法, 能够增加氮肥利用率, 从而减少土壤硝态氮的淋失^[34]。

研究发现, 灌水量同样显著影响硝态氮在土壤剖面上的分布。在不同田间持水量下, 土壤硝态氮的分布主要集中在 $0 \sim 100 \text{ cm}$ 土层处, 在 120 cm 以下未出现硝态氮大量积累的情况, 这与戴腾飞等^[35]的研究结果一致。分析可能的原因是灌水和施肥时处于毛白杨生长旺盛期, 需要大量的水分和养分。植物对土壤水分吸收越多, 对 NO_3^- 的吸收也就越多。每年的 5—8 月是毛白杨生长旺盛期, 试验区域内土质为砂壤土, 土壤孔隙较大, 随着温度逐渐升高, 地面蒸散量增加, 使水分上移。

研究还发现, 随着灌水施氮的进行, 硝态氮在土壤剖面上形成了不同层次的积累峰, 且随着灌水

量的增加积累峰所在土层也在逐渐下移,但大多集中在40~100 cm处。谷晓博等^[36]在研究油菜地土壤硝态氮分布时也发现,硝态氮含量峰值所在土层深度随灌水量的增加而下移。导致这种状况出现可能与植物根系有不可分割的关系。按质量分析,毛白杨根系主要集中在树木周围2.0 m,深度0~100 cm区域内,大约占总根重的86%^[37-38],其中,细根具有吸收水分和养分的功能^[38]。秘洪雷等^[39]发现,滴灌条件下杨树人工林细根主要分布在0~40 cm;邱楠等^[40]发现,0~110 cm土层内有较多的细根分布,约占细根总量的53%。当施入氮肥时,由于上层根系对 NO_3^- 有较强的吸收和拦截能力,将大部分氮素截留在密集根区附近,从而使深层土壤硝态氮含量减少,进一步降低了硝态氮淋失的风险。

4.2 施氮量和灌水量对土壤硝态氮积累的影响

研究表明,灌水和施氮均显著影响土壤硝态氮的积累。当施氮量达到 $240 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 时,土壤硝态氮含量最大,土壤硝态氮的积累量随着施氮量的增加显著增加,与前人的研究结论基本一致^[41-42]。本研究中,不同水氮组合毛白杨S86林地土壤硝态氮在土层0~2 m的积累量达 $86.11 \sim 259.29 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。杨荣等^[43]的研究结果表明,不同利用方式下农田土壤硝态氮积累存在较大差异,蔬菜大棚0~300 cm土层硝态氮平均积累量可达 $2171.45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,小麦-玉米轮作农田土壤硝态氮平均积累量达 $207.07 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;但枣树园土壤硝态氮的平均积累量却只有 $123.15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,与本研究结果相近。王朝晖等^[44]研究同样发现,黄土高原地区1 m深土层累积的矿质氮可达 $150 \sim 225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中,硝态氮占60%~65%。有灌溉条件的地区,2 m以下仍有大量累积,黄土高原南部关中灌区,8年以上果园2~4 m的土层内残留硝态氮达 $1812 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,15年以上菜园 $681 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,高产农田 $214 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,一般农田也在 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上。相比而言,本研究中,毛白杨S86林地硝态氮积累量偏小,分析可能有以下几个方面的原因:运用科学的水肥管理措施,做到精准施肥以及灌水;毛白杨作为华北主要的速生树种,其对水分和养分的汲取能力是巨大的。

随着硝态氮不断被根系吸收利用,并不断引起土壤下层水分携带 NO_3^- 向上运动,使得深层土壤的硝态氮积累量减少;但是如果硝态氮的含量超过植

物需要时,施氮和灌水将导致硝态氮在土壤中大量积累。因此,水肥管理是影响人工林生态系统氮素利用的重要因素,应在保持林木稳产、高产,土壤 NO_3^- 残留最低的基础上,保证氮肥的限量指标和灌溉定额。

5 结论

研究表明,施氮与灌水对毛白杨林地土壤硝态氮的分布与积累影响显著,在0~200 cm土层内,不同水氮组合硝态氮的积累量为 $86.11 \sim 259.29 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。随着施氮量的增加,硝态氮的积累量呈上升趋势;随着灌水量的增加,硝态氮积累峰所在的土层呈逐渐下移的趋势。与农田生态系统相比,试验林地0~200 cm土层内硝态氮积累量较低,而二者的差异可能与多种因素有关,包括气候、土壤质地、植被类型、肥料种类以及施肥方式等。由于林地生态系统与农田生态系统主要区别于植被类型,所以建议在后续研究中考虑林木根系对硝态氮吸收(集流和扩散)作用,而且大量灌水情况下硝态氮是否淋溶至土层2 m以下的问题也需要后续探索。同时,为了减少硝态氮的淋失,建议减少氮肥的施用,并将田间持水量控制在60%~75%。

参考文献:

- [1] Canfield D E, Glazer A N, Falkowski P G. The evolution and future of Earth's nitrogen cycle [J]. Science, 2010, 330 (6001): 192-196.
- [2] Rashid G H, Schaefer R. Seasonal rate of nitrate reduction in two temperate forest soils [J]. Plant & Soil, 1987, 97(2): 291-294.
- [3] Lérans S, Edel K H, Pervent M, et al. Nitrate sensing and uptake in Arabidopsis are enhanced by ABI2, a phosphatase inactivated by the stress hormone abscisic acid [J]. Science Signaling, 2015, 8(375): ra43.
- [4] 席本野, 王 焱, 贾黎明. 滴灌施肥下施氮量和施氮频率对毛白杨生物量及氮吸收的影响 [J]. 林业科学, 2017, 53(5): 63-73.
- [5] Xu G W, Lu D K, Wang H Z, et al. Morphological and physiological traits of rice roots and their relationships to yield and nitrogen utilization as influenced by irrigation regime and nitrogen rate [J]. Agricultural Water Management, 2018, 203: 385-394.
- [6] Dobermann A, Krauss A, Isherwood K, et al. Nutrient use efficiency-measurement and management [C]// International Workshop on Fertilizer Best Management Practices: General Principles, 2007.
- [7] Li S X, Wang Z H, Hu T T, et al. Nitrogen in dryland soils of China and its management [J]. Advances in Agronomy, 2009, 101(8): 123-181.
- [8] 吕丽红. 半干旱半湿润地区土壤剖面中硝态氮累积的研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2004.

- [9] 杨生茂. 长期施肥对绿洲农田土壤生产力及土壤硝态氮积累的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(10): 2043–2052.
- [10] 王 琦, 李锋瑞. 灌溉与施肥对黑河中游新垦农田土壤硝态氮积累及氮素利用率的影响[J]. 生态学报, 2005, 28(5): 2148–2159.
- [11] 韦高玲, 卓慕宁, 廖义善, 等. 不同施肥水平下菜地耕层土壤中氮磷淋溶损失特征[J]. 生态环境学报, 2016, 25(6): 1023–1031.
- [12] 薛晓辉, 赵常万, 张 嵩. 黔西北不同土地利用类型下土壤全氮及硝态氮的分布与残留[J]. 草地学报, 2016, 24(4): 819–824.
- [13] Ping H, Zhang J, Zhu A, *et al.* Coupled water and nitrogen (N) management as a key strategy for the mitigation of gaseous N losses in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2015, 51(3): 333–342.
- [14] 张国梁, 章 申. 农田氮素淋失研究进展[J]. 土壤, 1998, 30(6): 291–297.
- [15] Plett D C, Holtham L R, Okamoto M, *et al.* Nitrate uptake and its regulation in relation to improving nitrogen use efficiency in cereals[J]. *Seminars in Cell & Developmental Biology*, 2017, 74: 97–104.
- [16] Jeong H, Bhattarai R Exploring the effects of nitrogen fertilization management alternatives on nitrate loss and crop yields in tile-drained fields in Illinois[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 213: 341–352.
- [17] Di H J, Cameron K C Nitrate leaching in temperate agroecosystems: sources, factors and mitigating strategies[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 64(3): 237–256.
- [18] Huang P, Zhang J B, Xin X L, *et al.* Proton accumulation accelerated by heavy chemical nitrogen fertilization and its long-term impact on acidifying rate in a typical arable soil in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(1): 148–157.
- [19] Huang P, Zhang J, Zhu A, *et al.* Nitrate accumulation and leaching potential reduced by coupled water and nitrogen management in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 610–611(1): 1020–1028.
- [20] Bergström L, Brink N Effects of differentiated applications of fertilizer n on leaching losses and distribution of inorganic n in the soil[J]. *Plant & Soil*, 1986, 93(3): 333–345
- [21] 王朝辉, 李生秀, 王西娜, 等. 旱地土壤硝态氮残留淋溶及影响因素研究[J]. 土壤, 2006, 38(6): 676–681.
- [22] Xi B, Bloomberg M, Watt M S, *et al.* Modeling growth response to soil water availability simulated by HYDRUS for a mature triploid *Populus tomentosa* plantation located on the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 176: 243–254
- [23] 贺 勇, 兰再平, 孙尚伟, 等. 滴灌施肥条件下 107 杨幼林 N、P、K 养分吸收量与施肥量研究[J]. 林业科学研究, 2015, 28(3): 426–430.
- [24] 陈兰岭, 辛忠智, 李宝琪, 等. 干旱地区杨树速生丰产林灌水与林木生长的关系[J]. 林业科学研究, 1991, 4(4): 447–452.
- [25] Petros G, Anders T, Inge S, *et al.* Fertilization effects on biomass production, nutrient leaching and budgets in four stand development stages of short rotation forest poplar[J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, 397: 18–26.
- [26] Zhu J L, Bo H J, Li X, *et al.* Effects of Soil Water and Nitrogen on the Stand Volume of Four Hybrid *Populus tomentosa* Clones[J]. *Forests*, 2017, 8(7), 250; <https://doi.org/10.3390/f8070250>.
- [27] 赵 燕, 董雯怡, 张志毅, 等. 施肥对毛白杨杂种无性系幼苗生长和光合的影响[J]. 林业科学, 2010, 46(4): 70–76.
- [28] Dai J, Wang Z, Li M, *et al.* Winter wheat grain yield and summer nitrate leaching: Long-term effects of nitrogen and phosphorus rates on the Loess Plateau of China[J]. *Field Crops Research*, 2016, 196: 180–190.
- [29] Norman R J, Stucki J W. The Determination of Nitrate and Nitrite in Soil Extracts by Ultraviolet Spectrophotometry 1[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45(2): 347–353.
- [30] Dong, Q, Dang, T, Guo, *et al.* Effect of different mulching measures on nitrate nitrogen leaching in spring maize planting system in south of Loess Plateau[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213(1): 654–658.
- [31] 杨乐苏, 周光益, 邱治军, 等. 森林土壤硝态氮测定中样品采集与保存方法的研究[J]. 林业科学研究, 2005, 18(2): 209–213.
- [32] 刘 微, 赵同科, 王丽英. 不同水分、施氮量对土壤中硝态氮含量分布的影响[J]. 华北农学报, 2006, 21(3): 27–30.
- [33] 左海军, 马履一, 王彦辉, 等. 不同施肥处理条件下苗圃潮土硝态氮垂向运移特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 89–94.
- [34] Andong Cai, Mingang Xu, Boren Wang, *et al.* Manure acts as a better fertilizer for increasing crop yields than synthetic fertilizer does by improving soil fertility[J]. *Soil & Tillage Research*, 2019, 189: 168–175.
- [35] 戴腾飞, 席本野, 闫小莉, 等. 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[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1641–1648.
- [36] 谷晓博, 李援农, 黄 鹏, 等. 水氮互作对冬油菜氮素吸收和土壤硝态氮分布的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(7): 1283–1293.
- [37] 王文全, 贾渝彬, 胥丽敏, 等. 毛白杨根系分布的研究[J]. 河北农业大学学报, 1997, 20(1): 24–29.
- [38] 席本野, 王 烨, 贾黎明, 等. 宽窄行栽植模式下三倍体毛白杨根系分布特征及其与根系吸水的关系[J]. 生态学报, 2011, 31(1): 47–57.
- [39] 秘洪雷, 兰再平, 孙尚伟, 等. 滴灌栽培杨树人工林细根空间分布特征[J]. 林业科学研究, 2017, 30(6): 946–953.
- [40] 邸 楠, 席本野, Pinto J R, 等. 宽窄行栽植下三倍体毛白杨根系生物量分布及其对土壤养分因子的响应[J]. 植物生态学报, 2013, 37(10): 961–971.
- [41] 王 甜, 黄志霖, 曾立雄, 等. 不同施肥处理对三峡库区柑橘园土壤氮磷淋失影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 53–57.
- [42] Zhang L, Gao L, Zhang L, *et al.* Alternate furrow irrigation and nitrogen level effects on migration of water and nitrate-nitrogen in soil and root growth of cucumber in solar-greenhouse[J]. *Scientia Hor-*

ticulturae, 2004, 99(2):43-49.

[43] 杨 荣,苏永中. 农田利用方式和冬灌对沙地农田土壤硝态氮积累的影响[J]. 应用生态学报,2009,20(3):615-623.

[44] 王朝辉,李生秀,王西娜,等. 旱地土壤硝态氮残留淋溶及影响因素研究[J]. 土壤,2006,38(6):676-681.

Effects of Long-term Irrigation and Nitrogen Application on Distribution and Accumulation of Soil Nitrate in *Populus tomentosa* var. *tomentosa* Plantations

ZHANG Run-zhe¹, ZHU Jia-lei¹, WANG Jiang¹, NIE Hao-liang¹, HUANG Meng-yao¹,
SONG Lian-jun², NIE Li-shui¹

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Weixian Nursery, Xingtai 054700, Hebei, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of irrigation and nitrogen application on soil nitrate accumulation and distribution, so as to provide visions for specific irrigation and fertilization management principles and guidelines as well as reducing nitrate leaching in intensively managed *Populus tomentosa* var. *tomentosa* industrial plantation. [Method] The study site locates in Weixian County of Hebei Province where a long-term irrigation and fertilization supported by “12th Five-Year Plan” research project has been initiated with aims to improve timber production. By maintaining the soil water content above different field water holding capacity (45%, 60%, 75%) and different nitrogen application rate (0.0, 101.6, 203.2, and 304.8 kg · hm⁻²), the distribution pattern and accumulation of soil nitrate were studied. [Result] Soil nitrate content had an obvious surface accumulation tendency. From 0-200 cm, the soil nitrate content followed a S-shaped pattern (decrease-increase-decrease). The higher rate the nitrogen, the more the accumulation of nitrate in the soil layer between 60-100 cm. With the increase of soil moisture level, the leaching peak of soil nitrate was going down to 40-60, 60-80, and 80-100 cm, respectively. The nitrate accumulation in soil increased with the increase of nitrogen application rate. With the increase of soil moisture level, the soil nitrate showed an up then down pattern. Meanwhile, the water and nitrogen had a significant positive interaction on the distribution and accumulation of nitrate. In this study, different combinations of water and nitrogen of the soil nitrate accumulation ranged from 86.11-259.29 kg · hm⁻². [Conclusion] Nitrogen application and soil moisture levels have significant effects on the distribution and accumulation of soil nitrate in the *P. tomentosa* var. *tomentosa* stand. With the increase of nitrogen application rate, the soil nitrate shows a tendency to build up in the soil layer between 0-200 cm. With the increase of irrigation level, the soil nitrate accumulation peak tends to move downward gradually. Compared with the farmland ecosystem, the accumulation of nitrate between 0-200 cm in the forest ecosystem is lower. This indicates that in evaluation of soil nitrate distribution and accumulation, consideration should be given to the deep root system of the forest ecosystem. While, in order to reduce the leaching of nitrate nitrogen, it is recommended to reduce the application of nitrogen fertilizer and control the field water holding capacity between 60% and 75%.

Keywords: nitrate; nitrogen application rate; field water capacity; *Populus tomentosa* var. *tomentosa*; farmland ecosystem; forest ecosystem

(责任编辑:徐玉秀)