

土壤基质入渗驱动下桉树人工林地表氮淋失模拟研究

黄 幼, 容清标, 廖煜亮, 赵明全, 潘天森, 吴沅桓, 杨钙仁, 黄钰涵

(广西大学林学院, 广西森林生态与保育重点实验室, 南宁 530004)

摘要: 为探究土壤基质驱动下桉树人工林施肥措施对地下水体的影响, 以短轮伐期内不同林龄桉树(1 年、2 年、3 年、5 年)表层土壤(0—20 cm)为研究对象, 采用室内填土土柱模拟基质入渗驱动下铵态氮、硝态氮、总溶解态氮和溶解态有机氮的淋失过程, 分析基质入渗特征参数与不同形态的溶解态氮淋失过程的变化关系及其影响因素。结果表明: (1) 桉树表层土壤基质稳定入渗率和累积入渗量随林龄的增大呈增加—降低—增加的趋势, 其中, 2 年生桉树表层土壤的稳定入渗率(143 mm/h)和累积入渗量(279 mm)最高。 (2) 不同形态溶解态氮淋失浓度在淋失开始时达到峰值, 并随基质入渗率的降低而逐渐减小, 且基质入渗率与不同形态溶解态氮淋失浓度的变化关系可用线性方程表示。 (3) 硝态氮和溶解态有机氮是桉树人工林表层土壤氮淋失的主要形态, 砂粒含量增加促进氮淋失, 而黏粒和有机质含量增加抑制氮淋失。同时, 淋失初期铵态氮淋失浓度高于地下水水质控制范围, 是污染桉树人工林地下水水质的潜在威胁。综上, 土壤基质入渗是桉树人工林表层土壤氮淋失的重要驱动因素, 两者变化趋势一致并存在线性关系, 同时, 土壤砂粒、黏粒与有机质含量也是影响桉树人工林地表层土壤氮淋失的重要影响因素。

关键词: 基质入渗; 氮淋失; 人工林; 表层土壤

中图分类号: S154.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)03-0304-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.03.039

Simulation Study on Nitrogen Leaching on the Surface of Eucalyptus Plantation Driven by Soil Matrix Infiltration

HUANG You, RONG Qingbiao, LIAO Yuliang, ZHAO Mingquan,

PAN Tiansen, WU Yuanhuan, YANG Gairen, HUANG Yuhan

(Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004)

Abstract: Under the hydrological processes of soil matrix infiltration, the effect of fertilization measures of eucalyptus plantations during the short rotation period on groundwater needs a new understanding. The surface soil (0—20 cm) of differently aged eucalyptus plantations (1 year, 2 years, 3 years, and 5 years) were used as the research object. Filled soil columns were used to simulate the leaching process of ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, total dissolved nitrogen, and dissolved organic nitrogen driven by matrix infiltration. The change between the infiltration characteristic parameters and the leaching process of different forms of dissolved nitrogen and their influence factors were studied. Results showed that: (1) The steady infiltration rate and cumulative infiltration showed an increase-decrease-increase trend with plantation age increment, therein the steady infiltration rate (143 mm/h) and cumulative infiltration (279 mm) of on the surface soil of 2-years old eucalyptus plantation were the largest. (2) The concentrations of different forms of dissolved nitrogen in the leachate reached to the peaks at the beginning of leaching process and gradually decreased with the matrix infiltration rate decrease. Also, the matrix infiltration rates and the concentration of four nitrogen forms in the leachates showed the well linear relationships. (3) The nitrate nitrogen and dissolved organic nitrogen were the main forms of nitrogen leaching on the surface soil of eucalyptus plantations. The sand content increment promoted the nitrogen leaching, while the clay content and soil

收稿日期: 2022-09-20

资助项目: 广西自然科学基金项目(2021GXNSFBA196020); 广西科技基地和人才专项(桂科 AD22035032)

第一作者: 黄幼(1997—)女, 广西南宁人, 硕士研究生, 主要从事土壤水文研究。E-mail: huangyou_2569@163.com

通信作者: 黄钰涵(1992—)女, 贵州毕节人, 讲师, 博士, 硕士生导师, 主要从事土壤侵蚀和土壤水文研究。E-mail: huangyuhan0710@foxmail.com

organic matters increment restrained the nitrogen leaching. Simultaneously, the concentrations of ammonium nitrogen at the initial leaching stage were higher than the threshold of groundwater quality, which was a potential threat causing the groundwater pollution in eucalyptus plantations. In summary, soil matrix infiltration was an important factor of nitrogen leaching of topsoil in eucalyptus plantations, and they had the coupling change trend and a linear relationship. The contents of sand, clay, and soil organic matters were the important factors affecting the nitrogen leaching on the surface soil of eucalyptus plantations.

Keywords: matrix infiltration; nitrogen leaching; plantation; surface soil

氮是植物生长过程中重要的营养元素之一^[1]。降水与入渗、径流一系列水文过程是土壤氮输入、转移和输出的载体和主要动力,而土壤参与地表水、土壤水和地下水相互流通、转化、运行,是影响土壤氮素淋失的关键过程^[2-3],因此,研究土壤入渗驱动下氮素淋失可为探究人工林经营管理措施对地下水的影响提供科学基础。

人工林作为森林重要组成部分,在营林过程中施用氮肥已成为提高其木材产量的普遍手段,但是,人工林地对肥料利用率较低^[4],导致大量盈余的氮肥通过降雨径流及渗漏等途径进入水体中,造成水体污染^[5]。近年来,相关学者针对入渗驱动下人工林地氮淋失开展大量研究,部分学者^[6]采用原位淋溶试验研究土壤总入渗(包括基质入渗和优先流)驱动下土壤氮淋失发现,林地氮素的高淋失程度与施氮量、降雨量、植被^[7]和季节^[8]等条件密切相关。也有部分学者结合染色示踪和图像处理法,区分人工林地优先流和基质入渗驱动下氮淋失,解璐萌等^[9]研究表明,林地土壤优先流区氮含量高于基质区。但通过基质入渗进入土壤的水分和养分才能被根系吸收利用,而植物吸收利用效率有限,当浅层土壤基质吸附养分饱和时,富余养分随基质入渗向下层运移,存在较高的养分淋失风险^[10]。目前,较多学者通过室内填土土箱或土柱试验研究农田中土壤基质入渗驱动下的养分淋失问题发现,土壤质地^[11]和肥液浓度^[12]显著影响不同类型农用地氮淋失。少部分学者逐渐关注人工林地基质入渗驱动下养分淋失,Mi等^[13]通过室内填土土柱试验确定基质入渗驱动下3种人工林地有机层溶解态氮的持续释放速率。孙本华等^[14]采用填土土柱模拟试验表明,氮输入量增加导致针叶林地无机氮淋失增加,土壤酸化加重。综上,国内外大多数学者集中于总入渗和优先流驱动下氮淋失研究,而关于基质入渗驱动下氮淋失的研究主要集中于农田系统,仅有少部分学者关注人工林,所以,土壤基质入渗驱动下不同人工林地氮淋失规律亟待开展系统研究。

长期施肥条件下,表层土壤(0—20 cm)中氮素普遍高于深层土壤,同时,氮素易受降水影响而向深层土壤迁移,进而对地下水构成威胁^[15]。桉树作为世界三大

人工林树种之一,我国桉树人工林种植面积超过450万 hm^2 ^[16],其施肥措施对地下水影响尚不清晰。为此,选取短轮伐期内不同林龄桉树林地表层土壤,通过室内模拟研究土壤基质入渗驱动下土壤氮淋失变化规律,探究不同林龄桉树表层土壤基质入渗规律及其影响因素;明确基质入渗驱动下,不同林龄桉树表层土壤氮淋失规律及其影响因素;研究不同林龄桉树表层土壤基质入渗过程与氮淋失的耦合关系,以便于了解土壤基质入渗和土壤氮淋失的关系,同时,可为桉树人工林生态营林措施及现有土壤水分动态和氮素迁移转化过程模型的完善提供科学基础。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

试验研究区域位于中国广西壮族自治区国有东门林场(107°15′—108°00′E, 22°17′—22°30′N)。该地区为亚热带季风气候,年降水量1 100~1 300 mm,主要集中在6—8月,年蒸发量1 192~1 724 mm,年均气温22.3℃,最高气温41℃。试验区域土壤为赤红壤,pH为4.0~6.0,土层深厚,肥力较低,桉树是该区域主要的人工林树种之一。种植桉树前进行1次机械全垦,种植当年进行1次带状铲草,之后每年进行1次全砍杂灌。施肥管理为穴施,施放有机肥(有机质 $\geq 40\%$)和混合肥(有机质 $\geq 15\%$; N:P:K=15:6:9),2种肥料均由广西力源宝科技有限公司生产。

1.2 试验设计

根据桉树轮伐期,选取4个林龄尾巨桉树(*Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*)第1代植苗林,分别种植于2020年5月、2019年5月、2018年5月、2016年5月。种植当月施放有机肥0.5 kg 1次,之后每年5月追肥混合肥0.5 kg 1次。土壤样品采集于2021年12月,根据采样时间计算桉树林龄,即1, 2, 3, 5年。4片林地分别建立1个20 m×20 m样方,由于施肥穴位于桉树树干周围1 m²内,因此,从每个样方对角线上随机选取3棵桉树,清除土层表面的枯枝落叶,在距离树干0.5 m处采集样品(图1)。运用环刀、铝盒和自封袋采集0—20 cm土层土壤用于测定容重、土壤原始含水率、风干土水分换算系数、有机质和机械组成;将3个采样点土壤混合后运用自

封袋采集并运回室内,去除土壤中植物根系、砾石等杂质,自然风干过 2 mm 筛孔,均匀混合后测定全氮、硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)含量,并用于填充土柱。土壤原始含水率和风干土水分换算系数通过烘干法测定;土壤容重通过环刀法^[13]测定;土壤有机质含量通过浓硫酸—重铬酸钾氧化法测定;土壤机械组成通过激光粒度分析仪(马尔文 MAZ3000,英国)测定,并根据美国制分类标准^[17]进行分类。土壤全氮通过凯氏定氮仪(KJELTEC8420,丹麦)测定,土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 通过氯化钾浸提—紫外分光光度计(PE Lambda 35,美国)测定。土壤基本理化性质见表 1。

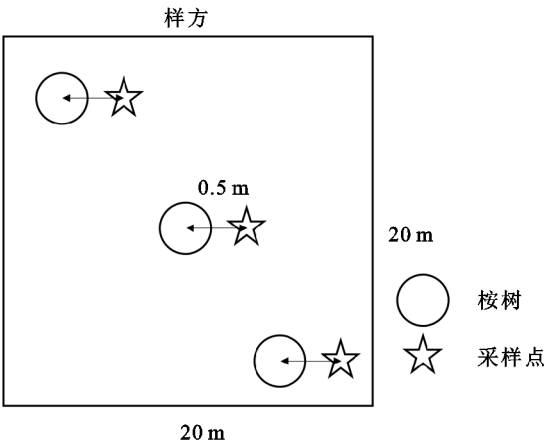


图 1 采样点位置

表 1 不同林龄桉树表层(0—20 cm)土壤基本理化性质

土壤理化性质		1 年	2 年	3 年	5 年
原始含水率/%		24.65±0.01a	20.79±0.04ab	24.04±0.02a	19.02±0.02c
水分换算系数/%		96.71±0.01a	97.20±0.01a	97.45±0.01a	96.51±0.01a
容重/(g·cm ⁻³)		1.05±0.04b	1.25±0.02a	1.03±0.05b	1.07±0.04b
有机质/(g·kg ⁻¹)		29.06±3.31a	28.65±4.39a	21.64±2.44b	27.47±2.57a
机械组成	砂粒/%	16.20±9.43b	12.07±0.22b	35.29±8.07a	10.18±1.41b
	粉粒/%	66.42±2.32a	54.33±3.69b	54.28±8.28b	61.28±1.61ab
	黏粒/%	17.38±11.61bc	33.60±3.76a	10.43±0.74c	28.54±0.20ab
全氮/(g·kg ⁻¹)		1.01±0.01a	1.02±0.03a	1.05±0.03a	0.95±0.03b
硝态氮/(mg·kg ⁻¹)		23.99±4.17b	11.01±1.89c	37.38±0.38a	4.99±0.01d
铵态氮/(mg·kg ⁻¹)		5.01±0.86a	3.58±0.23c	4.46±0.17ab	4.11±0.21bc

注:表中数据均为平均值±标准差;不同小写字母表示不同林龄桉树表层土壤间差异显著($p<0.05$)。下同。

试验装置主要由有机玻璃管(高 25 cm,半径 5 cm,厚 0.5 cm)、漏斗和锥形瓶三部分组成(图 2)。填土前在管底部铺设 1 层 100 目布纱网,管内壁均匀涂抹 1 层凡士林,以防贴壁优先流发生。设置填土高度为 20 cm,为保证填土均匀性,分 8 层(每层 2.5 cm)填土。设计填土容重为 1.1 g/cm³,土壤质量含水率为 10%。根据设计容重、土壤质量含水率和水分换算系数计算每层风干土质量和每层需加纯水质量。将风干土和纯水混合均匀后填入管中,为防止分层现象,每压实 2.5 cm 厚度,用玻璃棒打毛,填充完毕后自然沉降 24 h。将土柱固定于漏斗上,填土上端放置 1 块洁净的海绵,以防止水流直接冲刷土壤。在注水层外壁贴上 5 cm 的标尺,用于记录水位下降,并从土柱底部收集淋溶液。采用变水头法测定基质入渗率,水头为 4 cm,用秒表记录水位每下降 1 cm 所需要的时间,当水位下降至 2 cm 时,补水至 4 cm。从第 1 滴淋溶液淋失开始记录接样时间,接样总时长为 90 min,前 20 min 间隔 5 min 接样,将 0~10 min 计为淋失初期;20~90 min 间隔 10 min 接样,将 80~90 min 计为淋失末期。从入渗开始至接样结束期间连续记录基质入渗数据,并通过公式(1)计算入渗率^[18]:

$$i = \frac{\Delta I}{\Delta t} \times 600$$

(1)

式中: i 为入渗率(mm/h); ΔI 为水在 Δt 时段(min)的入渗量(cm);600 为转换系数。第 1 个入渗率计为初始入渗率,将最后 3 个相对恒定入渗率的平均值计为稳定入渗率(SIR),整个入渗过程入渗总量为累积入渗量(CI)。

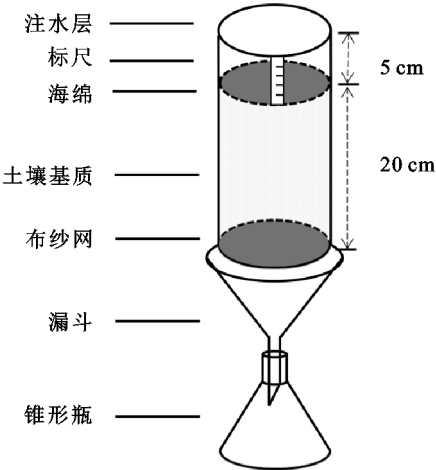


图 2 试验装置

称量每个接样时间段的淋溶液体积,计算淋溶液渗漏率,公式为:

$$y = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

(2)

式中: y 为淋溶液渗漏率(mL/min); ΔV 为水在 Δt

时段(min)的淋溶液体积(mL)。

采用 0.45 μm 微孔滤膜抽滤淋溶液后,通过连续流动分析仪(德国希尔公司 Auto Analyzer 3-AA3)测定淋溶液中的总溶解态氮(TDN)、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 的浓度,并通过 TDN 和 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 的差值计算获得 DON 的浓度。每个林龄的入渗模拟试验重复 5 次,共计 20 次。

2 结果与分析

2.1 不同林龄桉树表层土壤基质入渗过程

由公式(1)计算土壤基质入渗率,确定不同林龄

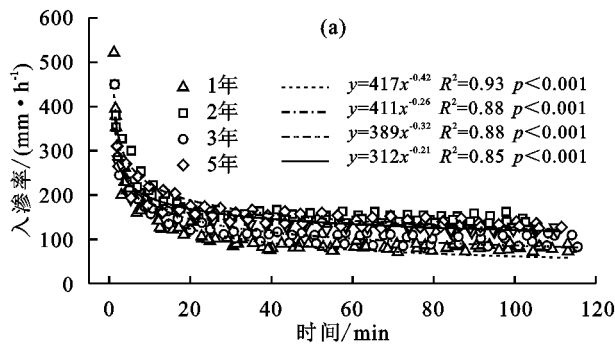
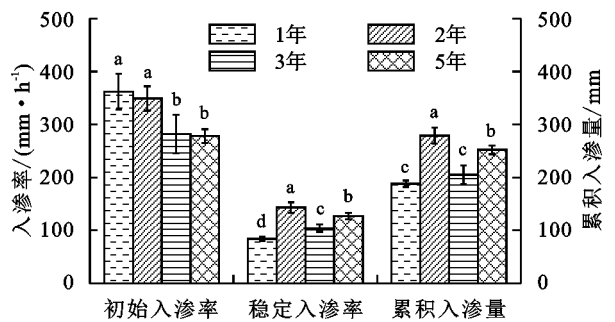


图 3 不同林龄桉树表层土壤基质入渗过程及淋溶液渗漏过程

随林龄的增大桉树表层土壤的初始入渗率分别为 362,349,282,278 mm/h; SIR 分别为 84,143,104,127 mm/h; CI 分别为 188,279,205,252 mm(图 4)。初始入渗率随林龄的增加呈降低趋势, SIR 和 CI 随林龄增加呈增加—降低—增加的趋势。1 年生桉树表层土壤初始入渗率最高,5 年生最低,1 年和 2 年生桉树表层土壤初始入渗率显著高于 3 年和 5 年生桉树($p<0.05$)。1 年生桉树 SIR 和 CI 最低,2 年生最高,2 年和 5 年生桉树表层土壤 SIR 和 CI 显著高于 1 年和 3 年生桉树表层土壤 SIR 和 CI($p<0.05$)。



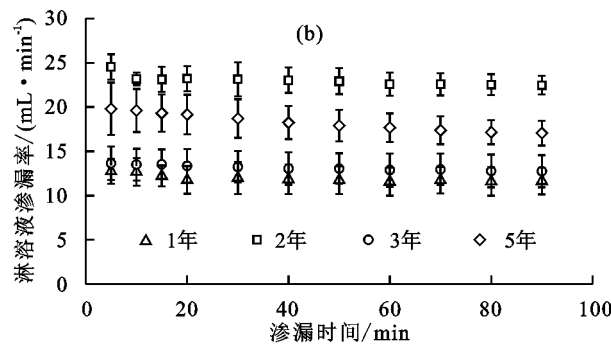
注:不同小写字母表示不同林龄桉树表层土壤初始入渗率、稳定入渗率和累积入渗量差异显著($p<0.05$)。

图 4 不同林龄桉树表层土壤基质入渗过程特征参数

2.2 不同林龄桉树表层土壤淋失溶解态氮的变化特征

2.2.1 不同林龄桉树表层土壤淋失溶解态氮的浓度变化 由图 5 可知,不同林龄桉树表层土壤淋溶液溶解态氮浓度在淋失开始时达到峰值,并随时间增长而降低。TDN 浓度最高,其次为 DON 和 NO₃⁻-N,

桉树表层土壤基质入渗过程(图 3),Kostiakov 模型的确定性系数(R^2)为 0.85~0.93,表明填土土柱模拟的 4 个林龄桉树表层土壤基质入渗过程符合土壤入渗的一般规律,初始入渗率高,入渗率随着时间增长逐渐降低至稳定入渗率。由公式(2)计算淋溶液渗漏率,且不同林龄桉树表层土壤淋溶液渗漏率与入渗率趋势相似(图 3),即渗漏率在淋失初期稍高,20~70 min 渗漏率缓慢下降,淋失末期渗漏率趋于稳定。其中,2 年生桉树表层土壤淋溶液渗漏率最高,其次为 5 年生和 3 年生,而 1 年生淋溶液渗漏率最低。



NH₄⁺-N 浓度最低。NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度随林龄增长呈先增加后降低的趋势。分析 NH₄⁺-N 的淋失浓度变化可知,淋失初期 3 年生桉树表层土壤的 NH₄⁺-N 淋失浓度最高(2.08 mg/L),其次为 2 年生、1 年生和 5 年生,且 3 年生是 5 年生的 1.85 倍;淋失末期不同林龄桉树表层土壤的 NH₄⁺-N 淋失浓度相差不大。分析 NO₃⁻-N 的淋失浓度变化可知,淋失初期 3 年生桉树表层土壤的 NO₃⁻-N 淋失浓度最高(9.45 mg/L),其次为 1 年生和 5 年生和 2 年生,且 3 年生是 2 年生的 1.93 倍;淋失末期 3 年生 NO₃⁻-N 淋失浓度最高(1.59 mg/L),5 年生最低(0.11 mg/L)。TDN 和 DON 浓度随林龄增长呈降低—增加—降低的趋势,淋失初期 3 年生桉树表层土壤 TDN 淋失浓度最高(37.48 mg/L),其次为 1 年生、2 年生和 5 年生,且 3 年生是 5 年生的 8.04 倍;淋失末期 3 年生 TDN 淋失浓度最高(2.62 mg/L),2 年生最低(1.62 mg/L)。淋失初期 3 年生桉树表层土壤的 DON 浓度最高(27.91 mg/L),其次为 1 年生、2 年生和 5 年生,且 3 年生是 5 年生的 19.03 倍;淋失末期 5 年生 DON 淋失浓度最高(0.99 mg/L),3 年生最低(0.34 mg/L)。总体上,3 年生桉树表层土壤淋溶液中溶解态氮的浓度最高。

2.2.2 不同林龄桉树表层土壤溶解态氮淋失累积量变化 由表 2 可知,基质入渗驱动下不同林龄桉树表层土壤 NO₃⁻-N 和 DON 的淋失累积量最高,分别占 TON 淋失量的 35.46%~53.05%和 35.82%~50.60%。

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋失累积量随林龄增长而增加, 2 年生、3 年生和 5 年生桉树表层土壤的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋失累积量显著高于 1 年生 ($p < 0.05$)。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TDN 和 DON 淋失累积量随林龄的增长呈降低—增加—降低的趋势, 其中, 3 年生桉树土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TDN 和 DON 的淋失累积量最高, 且显著高于 1 年生、2 年生和 5 年生 ($p < 0.05$), 表明 3 年生桉树表层土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TDN 和 DON 浓度和淋失累积量最高。分析淋失初期溶解态氮淋失累积量变化

可知, 淋溶初期 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失累积量占 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失总量为 19.05%~54.69%, 2 年生和 5 年生 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失累积量占 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失总量分别为 54.69% 和 45.00%; 淋溶初期 DON 淋失累积量占 DON 淋失总量 20.00%~40.76%, 其中, 1 年生和 3 年生 DON 淋失累积量占 DON 淋失总量分别为 39.75% 和 40.76%。综上所述, 不同林龄桉树土壤溶解态氮在基质入渗过程中主要以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 DON 的形态淋失, 并以淋失初期为主要淋失阶段。

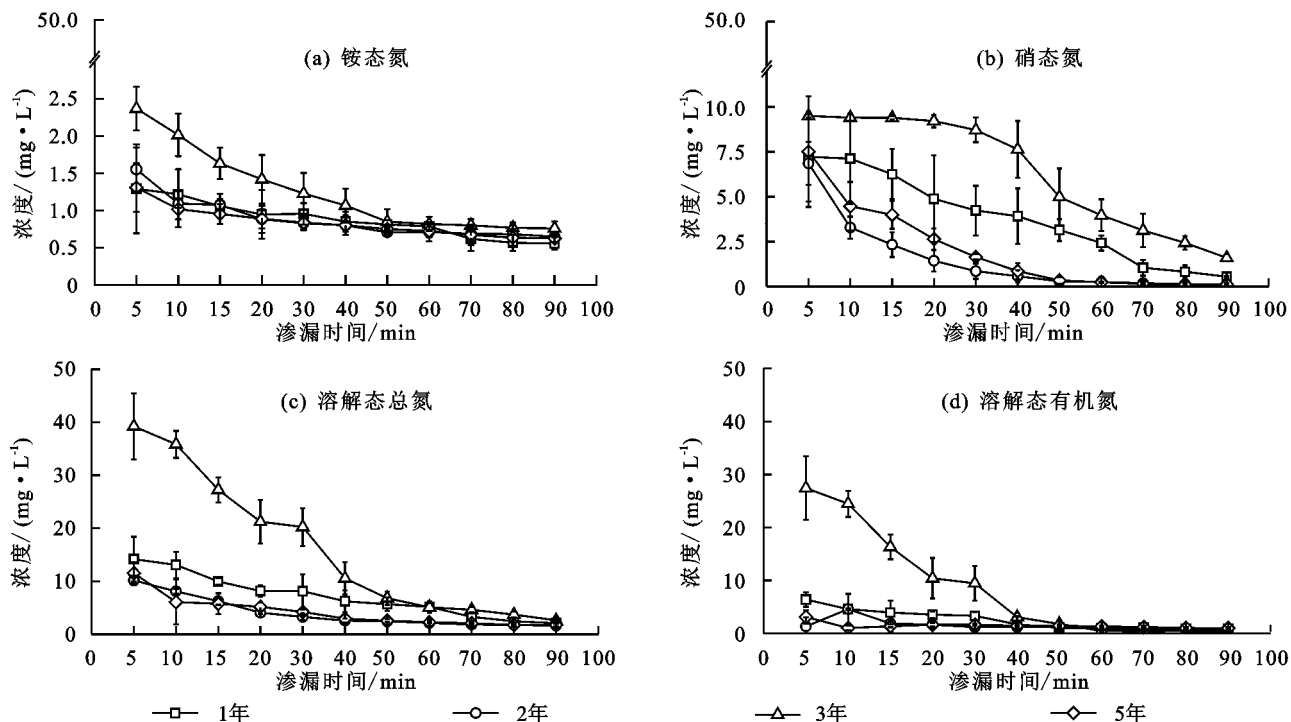


图 5 不同林龄桉树表层土壤溶解态氮浓度随渗漏时间的变化

2.3 不同林龄桉树表层土壤溶解态氮淋失浓度与入渗率的耦合关系

为探究土壤基质入渗与溶解态氮淋失的联系, 根据公式(1)计算每个淋失接样间隔内的平均入渗率, 与对应接样间隔的水样中氮淋失浓度结合分析发现, 溶解态氮淋失浓度随入渗率的减小呈降低趋势, 通过线性公式对其进行拟合, 公式为:

$$C = ai + b \quad (3)$$

式中: C 为溶解态氮淋失浓度 (mg/L); i 为入渗率 (mm/h); a 、 b 为拟合参数 (无量纲)。

表 2 不同林龄桉树表层土壤溶解态氮淋失累积量

林龄/a	铵态氮/ mg	硝态氮/ mg	总溶 解态氮/mg	溶解态 有机氮/mg
1	0.80±0.10b	3.48±0.97b	6.56±2.18b	2.35±1.07b
2	1.52±0.32a	1.89±0.27c	5.33±0.79b	1.92±0.41b
3	1.22±0.23a	6.44±1.46a	15.95±6.92a	8.07±5.46a
5	1.26±0.10a	2.17±0.30c	4.87±0.63b	1.94±0.16b

由表 3 可知, 不同林龄的基质入渗率与不同溶

解态氮淋失浓度的线性拟合决定系数 (R^2) 为 0.57~0.93, 表明土壤基质入渗率与不同溶解态氮指标淋失浓度的变化趋势可以用线性函数很好地表达。从开始淋失到稳定入渗过程, 不同溶解态氮淋失浓度与入渗率均呈正相关变化, 即氮淋失浓度随入渗率增加而增加。因此, 基质入渗驱动下, 淋失开始时具有最高的氮淋失浓度, 随着入渗的进行, 氮淋失浓度随入渗率的降低而逐渐减小。

3 讨论

在降雨径流的初期阶段, 大部分的污染物与初期径流量不成比例地冲刷进入地表水体, 称为初期冲刷效应^[19]。本研究发现, 基质入渗驱动下不同林龄桉树表层土壤氮淋溶也存在明显的初期效应, 并以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 DON 为主要淋失形态。淋溶初期 2 年生和 5 年生 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失累积量占 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失总量分别为 54.69% 和 45.00%, 1 年生和 3 年生 DON 淋失累积量占 DON 淋失总量分别为 39.75% 和 40.76%。

前人^[20]研究得到类似结果,原因是 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 带负电荷不易被土壤吸附,容易随水分下渗^[21]。而有机肥降解过程中产生大量的 DON,易溶于水并随水分运动发生淋失^[22],因此,氮素从林地地表向土壤迁移的过程中以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 DON 形态占主要部分。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 带正电荷,易被土壤胶体吸附而不易随水分下渗,但当土壤对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸附量饱和时,土壤中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 存在淋失风险^[11,21]。本文研究表明, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋失累积量最低,但通过分析淋溶初

期与淋失末期不同林龄桉树表层土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋失浓度,结合《地下水质量标准(GB/T 14848—2017)》^[23]发现,1 年生、2 年生和 5 年生桉树表层土壤在淋失初期的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度属于Ⅳ类水标准,3 年生桉树在淋失初期 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度属于Ⅴ类水标准,到淋失末期 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度有所下降,均属于Ⅲ类水标准。因此,在降雨丰沛的亚热带地区,人工林营林施肥措施引起的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋失浓度对地下水质量的影响亟须关注。

表 3 不同林龄桉树表层土壤基质入渗率与溶解态氮指标淋失浓度线性拟合分析结果

溶解态氮指标	拟合参数	1 a	2 a	3 a	5 a
硝态氮	<i>a</i>	0.39	0.22	0.50	0.12
	<i>b</i>	−29.22	−32.91	−40.66	−29.86
	R^2	0.70	0.61	0.57	0.88
	<i>i</i>	$81 \leq i \leq 99$	$142 \leq i \leq 164$	$90 \leq i \leq 106$	$234 \leq i \leq 287$
铵态氮	<i>a</i>	0.04	0.03	0.11	0.01
	<i>b</i>	−2.59	−4.04	−9.19	−1.81
	R^2	0.76	0.69	0.93	0.88
	<i>i</i>	$81 \leq i \leq 99$	$142 \leq i \leq 164$	$90 \leq i \leq 106$	$234 \leq i \leq 287$
溶解态总氮	<i>a</i>	0.68	0.35	2.58	0.14
	<i>b</i>	−51.14	−49.14	−227.04	−32.31
	R^2	0.79	0.75	0.86	0.78
	<i>i</i>	$81 \leq i \leq 99$	$142 \leq i \leq 164$	$90 \leq i \leq 106$	$234 \leq i \leq 287$
溶解态有机氮	<i>a</i>	0.34	0.06	1.97	0.04
	<i>b</i>	−26.10	−8.24	−176.55	−7.98
	R^2	0.88	0.86	0.88	0.91
	<i>i</i>	$81 \leq i \leq 99$	$142 \leq i \leq 164$	$90 \leq i \leq 106$	$234 \leq i \leq 287$

研究建立土壤基质入渗率与不同溶解态氮指标淋失浓度的线性函数关系,前人^[24]研究也有类似发现,随着入渗的持续, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 运移速度随水分运动速度降低迅速减缓, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量随土壤入渗时间延长而降低^[12],但没有明确入渗率与氮淋失浓度之间的关系。同时,在针对土壤水分动态和氮的迁移转化过程的模型中,LEACHM 模型主要模拟氮肥在土体中的转化^[25],HYDRUS-1D 主要集中于溶质 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 吸附过程、硝化与反硝化过程^[26],这些模型忽略 DON 的矿化和迁移,以及水分入渗驱动下氮的迁移和转化过程,因此,开展基质入渗驱动下氮淋失过程的研究有助于改进现有预测模型。

土壤氮淋失程度与土壤入渗性能、土壤理化性质和土壤氮累积量等密不可分。由表 4 可知, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋失累积量与黏粒、SIR 和 *CI* 呈正相关($p < 0.01$),与前人^[27]研究结果一致。雷豪杰等^[28]研究表明,在一定范围内黏粒增加可提高土壤结构的稳定性促进水分入

渗,同时,SIR 和 *CI* 增加提高 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋失风险。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与 *CI* 呈负相关($p < 0.05$),而前人^[12,24]研究采用不同浓度肥液淋溶土箱发现,随肥液浓度增大,*CI* 增加, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失风险提高。但本研究中,采用纯水淋溶,入渗过程基本不受溶质势影响,因此,*CI* 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的淋失变化有差异。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TDN 和 DON 淋失累积量与砂粒呈正相关,与黏粒呈负相关($p < 0.01$),1 年生和 3 年生桉树表层土壤中黏粒较低,而土壤全氮、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 背景值较高(表 1),导致 1 年生和 3 年生桉树表层土壤的 TDN、DON 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失累积量较高。与前人^[11]研究结果类似,即砂质土壤增加氮淋失的风险,而黏质土壤易导致氮累积。TDN、DON 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的淋失累积量与有机质呈负相关($p < 0.01$),因为有机质可提高阳离子交换量,促进土壤氮素富集,以降低氮淋失^[29]。因此,土壤理化性质是影响不同林龄桉树表层土壤基质入渗驱动下氮淋失的重要因素。

表 4 土壤基质入渗特征参数与土壤理化性质和溶解态氮淋失累积量的相关性分析

项目	稳定入渗率	累积入渗量	砂粒	粉粒	黏粒	有机质	铵态氮	硝态氮	总溶解态氮	溶解态有机氮
稳定入渗率	1.000									
累积入渗量	0.992 **									
砂粒	-0.404	-0.494								
粉粒	-0.610 *	-0.481	-0.451 *							
黏粒	0.799 **	0.839 **	-0.859 **	-0.070						
有机质	0.091	0.245	-0.924 **	0.600 **	0.688 **					
铵态氮	0.707 **	0.796 **	-0.091	-0.625 **	0.460 *	-0.094				
硝态氮	-0.481	-0.537 *	0.893 **	-0.269	-0.843 **	-0.805 **	0.019			
总溶解态氮	-0.332	-0.324	0.796 **	-0.398	-0.662 **	-0.760 **	0.053	0.773 **		
溶解态有机氮	-0.277	-0.276	0.700 **	-0.376	-0.567 **	-0.689 **	0.001	0.619 **	0.972 **	1.000

注：* 表示 $p<0.05$ ；** 表示 $p<0.01$ 。

4 结 论

(1)桉树表层土壤基质入渗 SIR 和 CI 随林龄增大呈增加—降低—增加的趋势,2 年生桉树表层土壤 SIR(143 mm/h)和 CI(279 mm)最高。

(2)土壤基质入渗驱动下桉树表层土壤不同溶解态氮淋失浓度在淋溶开始时达到峰值,且淋失初期 NH_4^+-N 浓度属于地下水标准Ⅳ和Ⅴ类水,是污染地下水的潜在威胁。随着入渗过程的持续,不同形态的溶解态氮淋失浓度均随基质入渗率降低而降低。并据此建立不同林龄桉树表层土壤基质入渗驱动下,开始淋失后入渗率与不同形态氮的淋失浓度的线性方程。

(3)4 个林龄桉树表层土壤 NO_3^--N 和 DON 淋失累积量分别占 TDN 淋失累积量的 35.46%~53.05%, 35.82%~50.60%,因此,DON 和 NO_3^--N 是桉树表层土壤氮淋失的主要形态。SIR 和 CI 提高促进 NH_4^+-N 淋失,土壤中砂粒含量增加促进 NO_3^--N 、TDN 和 DON 淋失,而黏粒含量增加抑制 NO_3^--N 、TDN 和 DON 淋失;有机质含量增大有利于土壤氮素富集,从而降低不同形态氮淋失。

参考文献:

[1] Yang J, Guo W Q, Wang F, et al. Dynamics and influencing factors of soluble organic nitrogen in paddy soil under different long-term fertilization treatments[J].Soil and Tillage Research,2021,212:e105077.

[2] Ma W M, Zhang X C. Effect of Pisha sandstone on water infiltration of different soils on the Chinese Loess Plateau[J].Journal of Arid Land,2016,8(3):331-340.

[3] Ann K B, Mats J. Atmospheric nitrogen deposition has

caused nitrogen enrichment and eutrophication of lakes in the northern hemisphere[J].Global Change Biology, 2006,12(4):635-643.

[4] 王永忠,周建辉,竹万宽,等.桉树人工林培育需肥量研究[J].桉树科技,2020,37(1):24-27.

[5] Lovett G M, Mitchell M J. Sugar maple and nitrogen cycling in the forests of eastern North America[J].Frontiers in Ecology and the Environment,2004,2(2):81-88.

[6] Stumpp C, Maloszewski P. Quantification of preferential flow and flow heterogeneities in an unsaturated soil planted with different crops using the environmental isotope δO^{18} [J].Journal of Hydrology,2010,394(3/4):407-415.

[7] 惠昊.杨树人工林树种组成对土壤氮淋失特征的影响[D].南京:南京林业大学,2020.

[8] Fetzer J, Frossard E, Kaiser K, et al. Leaching of inorganic and organic phosphorus and nitrogen in contrasting beech forest soils-seasonal patterns and effects of fertilization[J].Biogeosciences,2022,19(5):1527-1546.

[9] 解璐萌,张英虎,张明祥,等.黄河三角洲刺槐群落土壤优先流及养分分布特征[J].生态学报,2021,41(19):7713-7724.

[10] 傅渝亮,波涌畦灌层状土间歇入渗模型及地下水影响的肥液间歇入渗氮素运移特性[D].西安:西安理工大学,2018.

[11] Zarabi M, Jalali M. Leaching of nitrogen from calcareous soils in western Iran: A soil leaching column study [J].Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 184(12):7607-7622.

[12] 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.

[13] Mi H L, Ji H P, Egbert M. Sustained production of

- dissolved organic carbon and nitrogen in forest floors during continuous leaching[J]. *Geoderma*, 2018, 310: 163-169.
- [14] 孙本华, 胡正义, 吕家珑, 等. 模拟氮沉降下南方针叶林红壤的养分淋溶和酸化[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(10): 1820-1826.
- [15] 王丰, 任灵玲, 安婷婷, 等. 长期施肥对土壤中氨氧化细菌丰度和种群多样性的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2020, 39(1): 86-94.
- [16] Xie Y J, Arnold R J, Wu Z H, et al. Advances in eucalypt research in China[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2017, 4(4): 380-390.
- [17] 吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. *土壤学报*, 2019, 56(1): 227-241.
- [18] Zhang J, Lei T W, Qu L Q, et al. Method to measure soil matrix infiltration in forest soil[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 552: 241-248.
- [19] Wang L Z, Huang Y F, Wang L, et al. Pollutant flushing characterizations of stormwater runoff and their correlation with land use in a rapidly urbanizing watershed[J]. *Journal of Environmental Informatics*, 2014, 23(1): 44-54.
- [20] 欧阳祥, 莫明浩, 计勇, 等. 基于室内土柱模拟的坡耕地红壤氮磷淋溶特征[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(11): 40-46.
- [21] Nie S A, Zhao L X, Lei X M, et al. Dissolved organic nitrogen distribution in differently fertilized paddy soil profiles: Implications for its potential loss[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 262: 58-64.
- [22] Liang H, Lv H F, Batchelor W D, et al. Simulating nitrate and DON leaching to optimize water and N management practices for greenhouse vegetable production systems[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 241: e106377.
- [23] 中国地质调查局, 水利部水文局, 中国地质科学院水文地质环境地质研究所等. 地下水质量标准[S]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局: 中国国家标准化管理委员会, 2017.
- [24] 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.
- [25] 张俊, 徐绍辉, 刘建立, 等. 农田生态系统中氮循环模型研究进展[J]. *灌溉排水学报*, 2006, 25(3): 85-88.
- [26] 高震国, 钟瑞林, 杨帅, 等. Hydrus 模型在中国的最新研究与应用进展[J]. *土壤*, 2022, 54(2): 219-231.
- [27] Fan X, Xue Q, Liu S W, et al. The influence of soil particle size distribution and clay minerals on ammonium nitrogen in weathered crust elution-deposited rare earth tailing[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 208: e111663.
- [28] 雷豪杰, 李贵春, 丁武汉, 等. 设施菜地土壤氮素运移及淋溶损失模拟评价[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(1): 38-52.
- [29] Wang Q, Wen J, Wen Y J, et al. Alteration of soil-surface electrochemical properties by organic fertilization to reduce dissolved inorganic nitrogen leaching in paddy fields[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 209: e104956.