

不同连栽代数杉木人工林土壤氮素季节变化特征

任丽红¹, 索沛衡¹, 唐楚珺¹, 刘雨晖², 陈辉², 王玉哲¹, 刘先¹

(1.福建农林大学 林学院, 福州 350002; 2.福建农林大学 莘口教学林场, 福建 三明 365002)

摘 要: 为了解连栽杉木人工林不同代际土壤氮的季节变化特征, 以中亚热带不同连栽代数杉木人工林(一代、二代、三代)及格氏栲天然林为研究对象, 测定不同形态氮(全氮、可溶性有机氮、铵态氮、硝态氮、微生物量氮)含量及其季节动态变化, 探究连栽和季节变化对土壤氮素有效性的影响。结果表明: (1) 杉木人工林土壤全氮和可溶性有机氮有明显的季节变化, 其中全氮含量由大到小表现为 6 月、12 月、3 月、9 月, 可溶性有机氮含量由大到小表现为 6 月、9 月、3 月、12 月。(2) 杉木人工林土壤铵态氮含量随着栽植代数的增加而增加, 而硝态氮则呈现出相反的趋势, 且土壤硝态氮和铵态氮含量具有明显的季节变化特征, 在 3 月时土壤铵态氮含量达到最大, 而土壤硝态氮含量在 6 月达到最大。(3) 不同连栽代数和采样季节及其交互作用均对土壤微生物量氮含量有显著影响。(4) 杉木人工林土壤全氮、铵态氮和硝态氮之间均存在极显著的相关关系, 土壤微生物量氮、可溶性有机氮和铵态氮之间也存在极显著相关关系($p < 0.01$); 且土壤含水量与土壤微生物量氮、可溶性有机氮和铵态氮含量呈显著相关关系, 表明土壤水分是影响该地区土壤氮含量变化的关键因子。尽管连栽对于土壤全氮和可溶性有机氮无显著影响, 但是随着连栽代数的增加, 杉木人工林土壤 NH_4^+-N 总体呈现出增加的趋势, 而 NO_3^--N 则呈现出下降的趋势, 这可能反映了土壤系统在氮匮乏条件下采取了一种保氮策略, 其微生物学机理还有待进一步探究。

关键词: 杉木人工林; 连栽; 土壤氮素; 季节变化

中图分类号: S714.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)05-0022-07

Seasonal Dynamics of Soil Nitrogen in the Continuously Cultivated Chinese Fir Plantations

REN Lihong¹, SUO Peiheng¹, TANG Chujun¹, LIU Yuhui², CHEN Hui², WANG Yuzhe¹, LIU Xian¹

(1.Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2.Xinkou Forest Station, Fujian Agriculture and Forestry University, Sanming, Fujian 365002, China)

Abstract: This study aims to investigate the seasonal dynamics of the contents of different fractions of soil nitrogen (total nitrogen, TN; dissolved organic nitrogen, DON; ammonium nitrogen, NH_4^+-N ; nitrate nitrogen, NO_3^--N ; microbial biomass nitrogen, MBN) in different successive rotations (first-rotation plantation, FRP; second-rotation plantation, SRP; third-rotation plantation, TRP) of subtropical Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation and *Castanopsis kawakamii* dominated natural forest (NF) from December 2017 to September 2018 in Sanming, Fujian, China. The results showed that: (1) the contents of soil TN and DON exhibited significant seasonal variations in Chinese fir plantation; TN content decreased in the order: June > December > March > September, DON content decreased in the order: June > September > March > December; (2) the contents of soil NH_4^+-N in soils increased with the increment of successive rotations of Chinese fir, while the contents of NO_3^--N presented the opposite trend; the contents of soil NH_4^+-N and NO_3^--N exhibited significant seasonal variations in Chinese fir plantations, and the soil NH_4^+-N content reached the maximum in March, while the soil NO_3^--N content reached the maximum in June; (3) the soil MBN content was significantly affected by different generations of Chinese fir plantation, sampling seasons and their interactions; (4) there was significant correlation among soil TN, NH_4^+-N and NO_3^--N contents in Chinese fir plantations, and there was also significant correlation among soil MBN, DON and NH_4^+-N ($p <$

收稿日期: 2020-09-21

修回日期: 2020-10-21

资助项目: 国家自然科学基金(41603081), 福建省科技厅自然科学基金青年创新项目(2018J05046)

第一作者: 任丽红(1995—), 女, 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 研究方向为森林理水与保土功能。E-mail: R_lihong@163.com

通信作者: 王玉哲(1986—), 男, 山西临汾人, 讲师, 主要从事森林土壤碳氮循环方面的研究工作。E-mail: wangyuzhe@fafu.edu.cn

0.01), and there was significant relationship among soil moisture, MBN, DON and $\text{NH}_4^+\text{-N}$, indicating that soil moisture was the key factor regulating the seasonal dynamics of soil N in Chinese fir plantations. Successive rotation had no significant impact on contents of soil TN and DON, but led to the reduction in the nitrate content and enhancement of ammonium content. These results indicate the N-conservation strategy of successive rotations in Chinese fir plantation, and the underlying microbial mechanism on the dynamics of soil nitrogen needs to be further studied.

Keywords: Chinese fir plantation; consecutive rotation; soil nitrogen; seasonal variation

杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.] 是我国南方重要的速生用材树种, 具有出材率高、材质优良、适应性广和经济效益高等优点, 在我国种植面积广大 ($1.1 \times 10^7 \text{ hm}^2$), 约占全国人工林总面积的 26.5%^[1-2]。然而, 随着杉木纯林面积的不断扩大, 多代连栽以及集约化经营, 导致土壤中养分含量减少, 引起地力衰退和林地生产力降低, 已经严重影响到了杉木人工林的可持续发展^[3-5]。由于杉木是速生树种, 速生期需要从土壤中吸收大量养分, 并且杉木枯死的枝叶保留在树体上时间较长, 不易脱落, 造成凋落物量较少, 加之凋落叶为针叶, 短时间内难以分解, 容易造成土壤养分供需不平衡^[6-7]。有研究发现, 杉木人工林土壤微生物总数、土壤养分含量(如全氮、全磷、全钾等)随着连栽代数递减^[8-9], 其中, 土壤氮是植物生长发育需求量最大的元素之一^[10-11], 并且极易通过淋溶或挥发等过程从土壤系统中损失, 其在连栽后近熟林一成熟林的动态变化研究较少, 以往研究多存在于幼龄林和中龄林^[12-13]。

土壤氮含量与森林生态系统初级生产力密切相关^[14], 同时也是评价土壤质量的重要指标^[10]。土壤氮的存在形态多样, 主要可以分为有机氮和无机氮, 其中超过 90% 以有机态形式存在^[15]。可溶性有机氮是可以被水或稀盐溶液浸提出来的有机氮, 可以在土壤物理、化学及生物学作用过程中被矿化分解^[16], 转化为铵态氮和硝态氮等无机氮供植物吸收利用。微生物量氮是土壤氮素的一个重要储备库, 不能被植物直接利用, 但可以通过微生物的矿化作用转化为硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)等无机氮被植物吸收利用^[16-17]。无机氮是可供植物吸收利用的主要形态, 包括铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)和固定态铵(fixed- NH_4)^[18], 是森林土壤生态系统中的活性氮库。以上各形态氮具有不同的化学组成和化学性质, 从而决定了各形态氮的转化特征, 生物有效性及在土壤中的移动性等各方面差异^[18]。有研究表明, 林分土壤中的各种形态氮含量之间存在显著相关关系^[19-20]。可见, 研究森林土壤各种形态氮的动态, 对于了解森林生态系统生产力和氮素循环具有重要意义。

已有研究表明, 有关连栽杉木林土壤氮含量特征的结论往往因研究地点和林龄而异。例如, 马祥庆等^[4]研究发现, 随着栽植代数的增加, 幼龄—中龄杉木人工林土壤全量养分呈逐代下降趋势, 与一代杉木林地相比, 二、三代杉木林地全氮分别下降 13.40% 和 20.86%; 何友军等^[13]研究发现, 第二代杉木纯林土壤微生物量氮含量、土壤全氮含量低于一代杉木纯林; 索沛衡等^[21]研究发现, 成熟林中土壤中全氮、微生物量氮、可溶性有机氮不随连栽代数增加而发生改变, 而硝态氮含量随着连栽代数的增加显著增加。土壤氮养分状况是表征杉木人工林土壤肥力水平的基本因素, 关于连栽杉木林不同形态氮含量随连栽代数的变化还没有一致的结论, 并且有关近熟—成熟的连栽杉木人工林土壤中不同形态氮含量的长期变化研究相对较少。因此, 研究多代连栽后杉木人工林土壤不同形态氮(全氮、可溶性有机氮、微生物量氮、铵态氮和硝态氮)含量的季节变化特征, 不仅为探究杉木人工林土壤氮素与土壤肥力状况及其演变特征提供基础数据, 同时为探索提高森林生态系统生产力及土壤氮素循环与转化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于福建省三明市福建农林大学莘口教学林场($117^\circ 28' \text{E}$, $26^\circ 10' \text{N}$), 属武夷山支脉低山丘陵区, 为中亚热带湿润季风气候, 年均降水量 1 749 mm, 年均蒸发量 1 585 mm, 年平均相对湿度 81%, 年均气温 19.1°C 。海拔高度为 175~264 m, 土壤类型主要为粉砂岩发育的山地红壤, 土层厚度 $> 80 \text{ cm}$ 。主要林下植被有狗脊蕨(*Woodwardia japonica* (L. f.) Sm.)、江南卷柏(*Selaginella moellendorffii* Hieron.)和三叶崖爬藤(*Tetrastigma hemsleyanum* Diels et Gilg)等。天然林研究区乔木层主要由格氏栲、马尾松和木荷等构成; 草本层主要包括芒萁(*Dicranopteris pedata* (Houtt.) Nakaike)、黑莎草(*Gahnia tristis* Nees)和华山姜(*Alpinia oblongifolia* Hayata)等种类。

1.2 样地设置与样品采集

在试验地内选择土壤类型相同、海拔、坡向、坡度及经营措施基本一致的不同栽植代数杉木林(一代 FRP、二代 SRP、三代 TRP 和格氏栲天然林 NF)建立固定样方,每个处理 4 个重复,样地面积均为 20 m×20 m(表 1)。一代杉木人工林造林时间为 1973 年,造林密度为 2 700 株/hm²,现密度为 1 380 株/hm²;二代林于 1990 年种植,造林密度为 3 600 株/hm²,现密度为 1 050 株/hm²;三代林种植于 1979 年,造林密度为 3 000 株/hm²,现密度为 1 845 株/hm²。取样时间分别为 2017 年 12 月、2018 年 3 月、6 月、9 月,利用“S”型取样法分别采集每个样方内 0—10 cm 土层的混合土壤样品,每块样方 8 个采样点混合为 1 个土样。将每个土样分为 2 份,其中 1 份新鲜土样除去石块、根系,然后过 2 mm 筛,放置在冰箱中(4℃)保存,用于测定土壤含水量、硝态氮(NO₃⁻-N)、铵态氮(NH₄⁺-N)、土壤微生物量氮(MBN)含量;另一份土样进行自然风干,测定土壤 pH 和全氮(TN)的含量。

表 1 试验地概况				
栽植代数	海拔/m	坡度/(°)	坡向	林龄/a
一代林 FRP	175~264	21	西南	47
二代林 SRP	204~244	19	西	30
三代林 TRP	175~250	35	西北	41
天然林 NF	220~245	20	西	—

1.3 样品分析

土壤含水量测定采用重力法(105℃烘干 24 h);土壤 pH 值采用雷磁 PHS-3 C 型 pH 计进行测定(水:土=2.5:1)。土壤全碳全氮用元素分析仪(vario ISOTOPE cube, Elementar, German)测定。土壤 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 用 2 mol/L 的 KCl 溶液浸提后,用全自动间断分析仪(SmartChem 200, AMS/Alliance, Italy)测定。土壤微生物量氮(MBN)含量采用氯仿熏蒸法测定,用 0.5 mol/L 的 K₂SO₄ 溶液浸提(土水比为 1:5)后过滤,用总有机碳分析仪(TOC-L CPH, Shimadzu, Japan)测定浸提液中的氮含量,根据熏蒸和未熏蒸样品的可溶性有机 N 差值计算出土壤 MBN 的含量,转换系数为 2.22^[19]。土壤可溶性

有机氮(DON)为可溶性全氮与矿质氮(NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N)的差值。

1.4 数据处理

用 SPSS 25.0 进行数据的统计分析,用软件 Origin 2018 作图。用重复测量方差分析(Repeated Measures ANOVA)检验季节和连栽代数及其交互作用对杉木人工林土壤含水量, pH, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, TN, DON 和 MBN 的影响,用最小显著性差异法(LSD)进行多重比较(α=0.05)。土壤含水率、pH 和不同形态氮含量的相关性采用 Pearson 相关分析。

2 结果与分析

2.1 土壤可溶性有机氮和全氮含量

不同采样季节土壤 TN 含量存在显著差异,且连栽与采样季节的交互作用对土壤 TN 含量有显著影响(表 2, $p<0.05$)。连栽杉木人工林从冬季到次年夏季(2 017.12~2 018.6),土壤 TN 含量呈现先下降后略微上升的趋势(表 3)。杉木人工林土壤 TN 含量从冬季到春季(2 017.12~2 018.3)下降了 2.59%~19.69%,从春季到夏季(2 018.3~2 018.6)上升了 2.16%~33.39%,再从夏季到秋季(2 018.6~2 018.9)下降了 14.66%~24.77%。格氏栲天然林从冬季到次年春季(2 017.12~2 018.3),土壤 TN 含量上升了 14.38%,从春季到夏季(2 018.3~2 018.6)上升了 40.23%,再从夏季到秋季(2 018.6~2 018.9)下降了 26.35%。但是,连栽对于土壤 TN 含量并无显著影响(表 2, $p<0.05$, 表 3)。

不同采样季节土壤 DON 含量存在显著差异(表 2, $p<0.05$)。从冬季到次年秋季(2 017.12~2 018.9),连栽杉木人工林土壤 DON 含量呈先上升后下降的趋势,而天然林 DON 含量呈逐渐上升趋势(表 3)。连栽杉木人工林土壤 DON 含量从冬季到春季(2 017.12~2 018.3)上升了 49.5%~177.9%,从春季到夏季(2 018.3~2 018.6)上升了 41.9%~135.9%,再从夏季到秋季(2 018.6~2 018.9)下降了 7.1%~44.4%。但是,连栽对于土壤 DON 含量并无显著影响(表 2, $p<0.05$, 表 3),且连栽与采样季节的交互作用对土壤 DON 含量也无显著影响(表 2, $p<0.05$)。

表 2 不同连栽代数和季节变化对土壤理化性质的重复方差测量分析结果

项目	含水量	pH	铵态氮	硝态氮	可溶性有机氮	土壤微生物量氮	全氮
季节	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***
代数	0.009**	0.021*	0.000***	0.000***	0.254	0.007**	0.065
季节×代数	0.000***	0.019*	0.001**	0.000***	0.137	0.000***	0.001**

注:表中数值是重复测量方差的 p 值, * $p<0.05$, ** $p<0.01$, *** $p<0.001$ 。

表 3 不同连栽代数土壤可溶性有机氮和全氮的季节动态变化

指标	林分	2017-12	2018-03	2018-06	2018-09
土壤可溶性有机氮(DON)	FRP	11.77±0.11aC	15.79±0.66abC	23.07±0.65aA	19.35±1.29aB
	SRP	14.44±1.38aB	15.90±1.73abAB	20.90±1.58aA	20.91±2.41aA
	TRP	14.97±0.96aC	18.56±1.71aB	24.35±1.99aA	17.97±1.01aB
	NF	12.03±1.52aB	13.59±1.90bB	21.68±0.79aA	23.42±2.73aA
土壤全氮(TN)	FRP	1.54±0.09abA	1.50±0.14aA	1.54±0.04bA	1.31±0.07aA
	SRP	1.77±0.05aA	1.59±0.11aAB	1.79±0.09abA	1.44±0.07aB
	TRP	1.75±0.12abAB	1.41±0.08aB	1.88±0.15aA	1.41±0.07aB
	NF	1.13±0.15bB	1.29±0.04aB	1.81±0.07abA	1.34±0.05aB

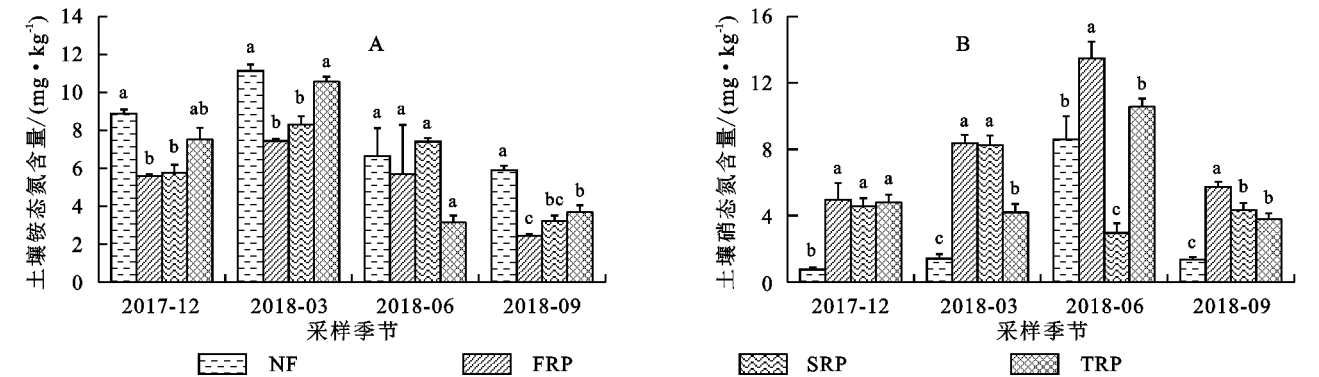
注:不同小写字母表示不同连栽代数间的差异性($p<0.05$),大写字母表示不同季节间的差异性($p<0.05$)。

2.2 土壤矿质氮(NH₄⁺-N和NO₃⁻-N)含量

不同连栽代数和采样季节及其交互作用均对土壤NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量有显著影响(表2, $p<0.01$)。整体来看,土壤NH₄⁺-N含量在春季(3月)达到峰值,在秋季(9月)达到谷值。除6月外,土壤NH₄⁺-N含量在不同连栽代数杉木林土壤中的变化趋势基本一致,天然林土壤NH₄⁺-N含量(5.14~40.99 mg/kg)显著高于连栽杉木人工林(2.18~11.28 mg/kg),而一代林和二代林土壤中NH₄⁺-N含量无显著差异,均低于三代林(图1A, $p<0.05$)。在6月,

天然林和杉木人工林土壤NH₄⁺-N含量无显著性差异(图1A, $p>0.05$)。

不同采样时期土壤NO₃⁻-N含量存在显著差异(表2,图1B, $p<0.05$)。整体来看,一代林土壤NO₃⁻-N(2.88~16.18 mg/kg)含量在4个采样季节中均高于其他林分(0.54~11.34 mg/kg),除6月外,天然林土壤NO₃⁻-N含量均显著低于杉木人工林。从冬季到次年夏季(2 017.12~2 018.6),不同林分的NO₃⁻-N含量整体呈上升趋势,但在不同连栽代数杉木林之间未表现出明显规律。



注:FRP表示一代杉木林;SRP表示二代杉木林;TRP表示三代杉木林;NF表示格氏栲天然阔叶林。不同小写字母表示同一季节不同连栽代数间存在显著差异($p<0.05$),下同。

图 1 不同林分土壤NH₄⁺-N、NO₃⁻-N季节动态变化

2.3 土壤微生物量氮(MBN)含量

不同连栽代数和采样季节及其交互作用均对土壤MBN含量有显著影响(表2, $p<0.01$,图2)。不同林分内(一代林除外),从冬季到次年秋季(2 017.12~2 018.9),土壤MBN含量呈现先上升后略微下降的趋势(图2)。土壤MBN含量从冬季到春季(2 017.12~2 018.3)上升了98.86%~213%,从春季到夏季(2 018.3~2 018.6)下降了6.14%~57.71%,再从夏季到秋季(2 018.6~2 018.9)下降了6.58%~33.36%,但是一代林从夏季到秋季上升了46.76%。其中春、夏两季天然林土壤MBN含量显著高于杉木人工林,秋季一代林(77.49~100.73 mg/kg)显著高于二、三代林和天然林(36.39~73.73 mg/kg)。

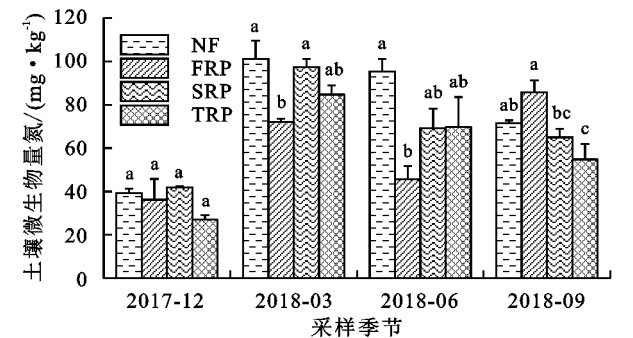


图 2 不同林分土壤微生物量N季节动态变化

2.4 土壤pH和含水率及其与土壤氮含量的相关性

不同连栽代数和采样季节及其交互作用对土壤pH、含水率均有显著影响(表2, $p<0.05$)。不同林分土壤含水率变化趋势基本一致,二代杉木林土壤含水率(24.01%~41.60%)显著高于一代、三代杉木人工林和天

然林(16.22%~37.20%),从 12 月到次年 9 月土壤含水率呈递增趋势,在 9 月 4 种林分土壤含水率值均达到最大(31.96%~41.60%),12 月的最小(16.22%~29.84%)(表 4)。4 种林分的土壤均为酸性(3.94~5.99),受季节变化的影响显著,且 3 月份的 pH 值高于其他 3 个季节(表 4)。天然林的土壤 pH 值(4.24~5.99)高于连栽杉木人工林(3.94~5.94),在 12 月和 6 月,天然林 pH 值与其他 3 种林分的 pH 值存在显著性差异($p<0.05$);3 月各林分土壤 pH 值差异不显著。

由表 5 可知,土壤 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 相互之间均存在极显著的相关关系($p<0.01$);土壤氮素(MBN,DON 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$)与土壤含水率也存在极显著的的相关关系,其中含水率与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈现显著负相关,且 MBN,DON 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 之间也存在极显著

的相关关系($p<0.01$);土壤 pH 值和 MBN 呈现极显著的正相关关系。

表 4 不同连栽代数杉木林土壤 pH 和含水量比较

指标	林分	2017-12	2018-03	2018-06	2018-09
含水率	FRP	21.43±0.45b	28.90±1.16b	29.05±0.28ab	33.42±0.23b
	SRP	27.46±1.23a	33.61±1.43a	32.78±2.04a	38.14±2.04a
	TRP	20.51±1.13b	27.03±0.73b	31.06±0.64ab	35.03±1.29ab
	NF	17.06±0.65c	26.71±1.79b	28.41±1.62b	34.63±0.87ab
pH	FRP	4.00±0.03c	5.68±0.12a	4.23±0.02bc	4.21±0.07ab
	SRP	4.19±0.03b	5.54±0.09a	4.26±0.03b	4.17±0.06b
	TRP	4.07±0.03c	5.51±0.06a	4.14±0.04c	4.18±0.7ab
	NF	4.30±0.02a	5.75±0.08a	4.42±0.05a	4.26±0.01a

注:FRP 表示一代杉木林;SRP 表示二代杉木林;TRP 表示三代杉木林;NF 表示格氏栲天然阔叶林。表中数值为平均值±标准差($n=4$),不同小写字母表示同一季节不同连栽代数间存在显著差异($p<0.05$)。

表 5 不同形态土壤氮含量及其与土壤理化性质的相关性

土壤因子	土壤微生物量氮 MBN	可溶性有机氮 DON	铵态氮 $\text{NH}_4^+\text{-N}$	硝态氮 $\text{NO}_3^-\text{-N}$	全氮 TN
可溶性有机氮 DON	0.306 *				
铵态氮 $\text{NH}_4^+\text{-N}$	-0.181	-0.441 **			
硝态氮 $\text{NO}_3^-\text{-N}$	0.095	0.370 **	-0.376 **		
全氮 TN	-0.071	0.148	-0.315 **	0.428 **	
含水率	0.513 **	0.539 **	-0.592 **	0.165	0.160
pH	0.565 **	-0.239	0.160	-0.015	-0.229

注:表中数值是皮尔逊相关系数 p 值,* $p<0.5$,* * $p<0.01$, $n=64$ 。

3 讨论

本研究中,不同连栽代数杉木林土壤 TN 和 DON 含量均没有显著差异(表 2),说明土壤 TN 没有随着连栽代数的增加而显著减少,这与在广西南亚热带桉树林的研究结果不一致^[22],该研究发现 1—3 代桉树林土壤 TN 随着栽植代数的增加而减少,且均显著低于前茬马尾松人工林。这可能是由于桉树的轮伐期较短(5~7 a),对养分需求量大,且在采伐时整个树木会被利用而从林地取走,造成林地养分的损失程度大于杉木林。4 种林分土壤 TN 含量最高值均出现在夏季,最低值则主要出现在 9 月,这与林下植被类型和林内小气候等有关。3 月时气温较低,土壤微生物活性和有机氮矿化作用较弱,此时植物开始生长,对有效氮的吸收量逐渐增加,土壤 TN 的含量的积累逐渐减少;6 月时林木生长旺盛,虽然需要从土壤中吸收较多的氮素来满足其生长需要,但充足的水热条件有利于有机物质的分解,以及凋落物的分解促进了土壤 TN 的累积;9 月林木生长速度减缓,对氮素的吸收能力仍然较强,水热条件相对夏季较差,导致土壤 TN 的生物累积能力最低;进入 12 月后,虽然土壤微生物活性和有机氮矿化作用最弱,但林木对

氮素的吸收能力最低,会促使土壤 TN 的生物积累较秋季略有增加。森林土壤 DON 主要来源于凋落物、有机质的淋溶和腐殖质的分解及大气氮沉降^[23]。本研究结果显示,格氏栲天然林及连栽杉木人工林 4 种不同林分土壤 DON 含量呈明显的季节变化,呈先上升后下降的趋势,其中 12 月 DON 含量最低(表 3),出现这种趋势可能是因为 12 月降雨减少且温度低,土壤中微生物的活性低,凋落物的分解速率低,随着降雨量和温度的升高,土壤微生物活动增强,促使土壤动植物体分解,从而使土壤 DON 含量逐渐增高。

随着连栽代数的增加,杉木人工林土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 总体呈现出增加的趋势(图 1A),而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 则呈现出下降的趋势(图 1B),这与 Chen 等^[24]在湖南会同连栽杉木林中发现的结果一致。土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 带正电,更容易被土壤胶体吸附存留于土壤中,而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 带负电,移动性强,特别是在酸性土壤中更容易流失^[25]。在连栽杉木林中土壤氮多以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的形式损失^[26]。土壤氮有效性很大程度上通过氮矿化过程调控,该过程在微生物参与下将土壤有机氮转化为无机氮。相较于杉木一代林,二代林和三代林土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 升高, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 下降,可能反映了在土壤氮匮乏条件下系统为了适应环境而采取的保氮机制。随着连栽代

数增加,尽管土壤 TN 含量未见明显下降(表 3),但土壤矿化率升高,硝化率降低,从而减少了土壤氮流失的风险,这也与 Chen 等^[27]对连栽杉木林中土壤净矿化率和硝化率的测定结果一致。同样,在江苏北部杨树人工林的研究也发现,二代四年生杨树林土壤 NO_3^- -N 含量(7.67 mg/kg)显著低于一代四年生林地(30.93 mg/kg),这是由于二代杨树林土壤硝化作用显著减弱导致土壤供 NO_3^- -N 的能力减弱,需要注意的是,该研究中测定的净硝化作用,要想深入了解连栽对土壤硝化能力的影响,还需借助氮同位素示踪技术测定土壤总硝化速率、微生物对 NO_3^- -N 的同化吸收速率、以及反硝化过程中气态氮的损失速率^[28]。有报道表明,随着连栽代数增加,杉木林土壤中氨氧化细菌的数量和种类均有所下降^[29],这可能是造成土壤硝化作用减弱和 NO_3^- -N 含量降低的原因。未来研究可结合参与硝化与反硝化功能微生物的数量与不同形态氮的关系深入探讨连栽杉木林土壤氮的转化和去向。值得注意的是,无论在哪个季节,杉木人工林的土壤 NH_4^+ -N 含量普遍低于天然林,而 NO_3^- -N 含量则高于杉木人工林,说明天然林转化为杉木人工林会使土壤氮淋失的风险增高。尤其本样地位于亚热带季风气候区,夏季降雨充沛,更不利于土壤速效氮的截留与保持。

土壤矿质氮的动态变化在很大程度上依赖于土壤微生物对土壤有机质的分解速率和微生物固持、气态损失和淋溶等多种过程的相互竞争^[11,17]。本研究中,不同林分土壤中 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量呈明显的季节变化,主要受局地小气候影响。土壤 N 素转化过程主要靠微生物参与,而微生物对土壤含水量和温度反应非常敏感^[30]。其他地区不同林分的研究结果则与本研究样地有所不同,如四川都江堰地区桢楠林、杉木林以及常绿阔叶研究显示土壤 NH_4^+ -N 在冬季(12 月份)达到最大值^[31],重庆缙云山地区 4 种典型林分表层土壤(0—10 cm) NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的最大值均出现在秋季^[32]。可见由于研究地区以及林分类型不同,土壤的理化性质、生物特性以及气候都存在差异,从而造成研究结果不同。报道也显示, NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量有明显的季节变化性和空间变异性^[33]。

土壤 MBN 是土壤有机氮中最活跃的组分,也是土壤氮循环和转化过程中的重要参数^[34]。土壤微生物量的季节性动态变化是一个复杂的过程,在同一生态系统,即使气候条件相同,不同植被下土壤微生物量的季节变化也不相同^[35-36]。土壤微生物量的变化

与温度、湿度、土壤理化性质等环境因素有关,且土壤微生物因季节变化也会有差异,微生物的群落结构和功能也随之变化,从而使微生物量因季节变化而变化^[37]。本研究结果表明,土壤 MBN 与土壤水分呈显著正相关关系(表 5),表明该区域土壤含水量是影响土壤 MBN 的重要因子之一,这与 Chen 等^[27]研究发现一致。此外,在连栽杉木人工林内,相关分析表明,土壤 MBN 与土壤 pH 呈显著正相关(表 5),这表明土壤酸碱性也是影响土壤微生物量的一个重要因素。本研究中 4 种林分的土壤 MBN 含量具有明显的季节变化(表 2),二代林、三代林和天然林均呈现出先增加后减少的趋势(图 2),其中 6 月、9 月为植物的生长期,MBN 含量较低,这与大多数研究发现的土壤 MBN 有季节变化的结果一致^[38-39]。植物在生长期对土壤养分的需求量大,限制了土壤微生物对养分的可利用性,因此生长期土壤微生物生物量氮较低。本研究中土壤 MBN 都是在春季(3 月)最高(图 2),说明春季在土壤温度、湿度还比较适宜的时候,植物生长缓慢,植物对 N 的竞争减少,因此导致土壤 MBN 增加。4 种林分中一代林土壤 MBN 含量的季节动态与其他 3 种林分不同,从 12 月到 3 月土壤微生物量 N 含量增加,这可能是因为冬季与春季交替的过程中,水分增多、温度升高,微生物活动频繁,土壤 MBN 快速增加;到 6 月温度持续升高,微生物活动强,资源消耗快,由于竞争导致 MBN 含量下降;9 月以后植物生长速度变慢,温度降低、降雨减少,且凋落物由上而下的转移,营养物质的输入导致土壤 MBN 含量开始增加。土壤微生物组成结构不同,且不同的微生物种类会对季节变化产生一定影响,从而使土壤 MBN 含量有明显的季节变化。

4 结论

(1) 不同连栽代数杉木林土壤 TN 和 DON 含量均没有显著差异,但杉木人工林土壤 TN 和 DON 有明显的季节变化,其中 TN 含量由大到小表现为 6 月、12 月、3 月、9 月, DON 含量由大到小表现为 6 月、9 月、3 月、12 月。

(2) 土壤 NH_4^+ -N 含量随着杉木栽植代数的增加而增加,而 NO_3^- -N 含量则呈现下降的趋势;土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量在不同季节间差异显著,总体呈现出先增加后减少的趋势,但土壤 NH_4^+ -N 含量在 3 月达到最大,而 NO_3^- -N 含量在 6 月达到最大。

(3) 栽植代数和采样季节及其交互作用均对土壤 MBN 含量有显著影响,从 12 月到次年 9 月,总体上呈现出先增加后减少的趋势,在 3 月时达到最大值。

(4) 杉木人工林土壤 TN , NH_4^+-N 和 NO_3^--N 相互之间均存在极显著的相关关系,且土壤 MBN , DON 和 NH_4^+-N 之间也存在极显著的相关关系 ($p < 0.01$); 土壤含水量与土壤 MBN , DON 和 NH_4^+-N 含量呈显著相关关系,表明土壤水分是影响该地区土壤氮含量的变化的关键因子。

参考文献:

- [1] 耿丹,夏朝宗,张国斌,等.杉木人工林灌木层生物量模型构建[J].北京林业大学学报,2018,40(3):34-41.
- [2] 第八次全国森林资源清查结果[J].林业资源管理,2014(1):1-2.
- [3] 陈楚莹,张家武,周崇莲,等.改善杉木人工林的林地质量和提高生产力的研究[J].应用生态学报,1990,1(2):97-106.
- [4] 马祥庆,范少辉,刘爱琴,等.不同栽植代数杉木人工林土壤肥力的比较研究[J].林业科学研究,2013,13(6):577-582.
- [5] 盛炜彤,杨承栋,范少辉.杉木人工林的土壤性质变化[J].林业科学研究,2003,16(4):377-385.
- [6] 林开敏,俞新妥.杉木人工林地力衰退与可持续经营[J].中国生态农业学报,2001,9(4):43-46.
- [7] 盛炜彤,范少辉.杉木及其人工林自身特性对长期立地生产力的影响[J].林业科学研究,2002,15(6):629-636.
- [8] 杜国坚,张庆荣,洪利兴,等.杉木连栽林地土壤微生物区系及其生化特性和理化性质的研究[J].浙江林业科技,1995,15(5):14-20.
- [9] 杨玉盛,何宗明,陈光水,等.杉木多代连栽后土壤肥力变化[J].土壤与环境,2001,10(1):33-38.
- [10] Bruun S, Luxhoi J, Magid J, et al. A nitrogen mineralization model based on relationships for gross mineralization and immobilization [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006,38(9):2712-2721.
- [11] 毛超,漆良华.森林土壤氮转化与循环研究进展[J].世界林业研究,2015,28(2):8-13.
- [12] 孙启武,杨承栋,焦如珍.江西大岗山连栽杉木人工林土壤性质的变化[J].林业科学,2003,39(3):1-5.
- [13] 何友军,王清奎,汪思龙,等.杉木人工林土壤微生物生物量碳氮特征及其与土壤养分的关系[J].应用生态学报,2006,17(12):2292-2296.
- [14] 周才平,欧阳华.温度和湿度对暖温带落叶阔叶林土壤氮矿化的影响[J].植物生态学报,2001,25(2):204-209.
- [15] 章宪,范跃新,罗茜,等.凋落物和根系处理对杉木人工林土壤氮素的影响[J].亚热带资源与环境学报,2014,9(2):39-44.
- [16] 吴汉卿,张玉龙,张玉玲,等.土壤有机氮组分研究进展[J].土壤通报,2018,49(5):1240-1246.
- [17] Näsholm T, Kielland K, Ganeteg U. Uptake of organic nitrogen by plants [J]. New Phytologist, 2009,182(1):31-48.
- [18] 王百群,戴鸣钧.土壤不同形态氮素在剖面中移动特征的模拟研究[J].水土保持研究,2000,7(4):115-120.
- [19] 王清奎,汪思龙,冯宗炜.杉木人工林土壤可溶性有机质及其与土壤养分的关系[J].生态学报,2005,25(6):1299-1305.
- [20] Chen C R, Xu Z H, Zhang S L, et al. Soluble organic nitrogen pools in forest soils of subtropical Australia [J]. Plant and Soil, 2005,177:285-297.
- [21] 索沛衡,杜大俊,王玉哲,等.杉木连栽对土壤氮含量和氮转化酶活性的影响[J].森林与环境学报,2019,39(2):113-119.
- [22] 黄振格,何斌,谢敏洋,等.连栽桉树人工林土壤氮素季节动态特征[J].东北林业大学学报,2020,48(9):88-94.
- [23] 高艳.森林土壤可溶性有机氮研究现状[J].安徽农学通报,2012,18(24):89-97.
- [24] Chen L C, Guan X, Wang Q K, et al. Effects of phenolic acids on soil nitrogen mineralization over successive rotations in Chinese fir plantations [J]. Journal of Forestry Research, 2020,31(1):303-311.
- [25] Hattenschwiler S, Vitousek P M. The role of polyphenols in terrestrial ecosystem nutrient cycling [J]. Trends Ecology & Evolution, 2000,15(6):238-243.
- [26] Tian D L, Xiang W H, Yang W H. Nutrient characteristics of hydrological process in young second rotation Chinese fir plantations[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002,22(6):859-865.
- [27] Chen T H, Chiu C Y, Tian G L. Seasonal dynamics of soil microbial biomass in coastal sand dune forest [J]. Pedobiologia, 2005,49(6):645-653.
- [28] 蒋永丰.苏北杨树人工林林地土壤氮矿质化特性研究[D].南京:南京林业大学,2006.
- [29] Liu L. Effect of different soil quality of *Cunninghamia lanceolata* plantations on microbial community and two functional groups [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [30] Guntiñas M E, Leirós M C, Trasar-Cepeda C, et al. Effects of moisture and temperature on net soil nitrogen mineralization: A laboratory study [J]. European Journal of Soil Biology, 2011,48:73-80.
- [31] 蔡春铁,黄建辉.四川都江堰地区桉楠林、杉木林和常绿阔叶林土壤 N 库的季节变化[J].生态学报,2006,26(8):2540-2548.
- [32] 孙素琪,王玉杰,王云琦,等.重庆缙云山 4 种典型林分土壤氮素动态变化[J].环境科学研究,2015,28(1):66-73.
- [33] 莫江明,郁梦德,孔国辉.鼎湖山马尾松人工林土壤硝态氮和铵态氮动态研究[J].植物生态学报,1997,21(4):335-341.