

DOI: 10.5846/stxb202203220701

杨支齐, 杜虎, 曾馥平, 彭晚霞, 郭诗宇, 宋同清, 何霄嘉. 广西主要人工林生态系统氮储量格局. 生态学报, 2022, 42(13): 5446-5457.

Yang Z Q, Du H, Zeng F P, Peng W X, Guo S Y, Song T Q, He X J. Nitrogen storage patterns of main plantation ecosystems in Guangxi. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5446-5457.

广西主要人工林生态系统氮储量格局

杨支齐^{1,3,4}, 杜 虎^{1,3}, 曾馥平^{1,3}, 彭晚霞^{1,3}, 郭诗宇⁵, 宋同清^{1,3}, 何霄嘉^{2,*}

1 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125

2 中国 21 世纪议程管理中心, 北京 100038

3 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站/广西喀斯特生态过程与服务重点实验室, 环江 547100

4 广西大学林学院, 南宁 530004

5 湖北生态工程职业技术学院, 武汉 430200

摘要: 森林生态系统作为陆地最大氮素储存库, 在维系氮素生物地球化学循环方面发挥了重要作用。以我国人工林主产地广西马尾松 (*Pinus massoniana*)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、桉树 (*Eucalyptus robusta*) 3 种主要人工林为研究对象, 探讨了 3 种林型不同龄组、不同层次的氮储量组成与分配格局, 结果表明: (1) 随着林龄的变化, 不同林龄马尾松、杉木、桉树林氮储量大小范围在 6.64—15.15、8.44—14.90、3.22—11.29 Mg/hm² 之间, 其中马尾松、杉木、桉树分别在幼龄林、过熟林、成熟林达到最大, 除幼龄阶段马尾松氮储量最高外, 其他各林龄阶段均为杉木林最大。(2) 各个林龄总体来看, 3 种人工林生态系统氮储量生态格局基本一致, 绝大部分氮储存于土壤中 (0—100 cm), 乔木层氮储量仅次于土壤层, 灌木层氮储量最小。0—100 cm 土层范围内, 按 10 cm 每层进行划分, 三种人工林各个林龄均是 0—10 cm 表层土壤氮储量最高。马尾松、杉木除幼龄林外土壤层氮储量均随着林龄增大而逐渐升高, 在过熟林分别达到了 10.71 和 16.63 Mg/hm², 桉树则幼龄林到成熟林逐渐升高, 成熟林氮储量为 11.26 Mg/hm², 过熟林则下降。同一林分各层次不同器官氮储量存在着差异, 3 种人工林乔木层中树干氮储量均占比最高, 树干是乔木层的主要氮库; 灌木层中叶片中含有更多的氮储量; 草本层地上部分 > 地下部分, 地上部分是氮储存的主要场所; 细根氮储量 0—20 cm > 20—40 cm。不同造林树种生态系统氮固持能力有所差异, 总体上, 人工造林后期生态系统固氮能力逐渐增强, 而速生桉树人工林收获期生态系统固氮有所下降。

关键词: 氮储量; 分配格局; 人工林; 林龄; 广西

Nitrogen storage patterns of main plantation ecosystems in Guangxi

YANG Zhiqi^{1,3,4}, DU Hu^{1,3}, ZENG Fuping^{1,3}, PENG Wanxia^{1,3}, GUO Shiyu⁵, SONG Tongqing^{1,3}, HE Xiaojia^{2,*}

1 Key Laboratory of Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

2 The Administrative Center for China's Agenda 21, Beijing 100038, China

3 Guangxi Key Laboratory of Karst Ecological Processes and Services, Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100

4 College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China

5 Hubei Ecology Polytechnic College, Wuhan 430200, China

Abstract: Forest ecosystem, as the largest nitrogen storage pool on land, plays an important role in maintaining nitrogen biogeochemical cycle. In this study, three main plantation forests in China, namely *Pinus Massoniana*, *Cunninghamia Lanceolata* and *Eucalyptus robusta*, were selected as the research objects. The composition and distribution patterns of

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31971487); 中国科学院青年创新促进会项目 (2021366); 国家高层次青年人才计划项目

收稿日期: 2022-03-22; **采用日期:** 2022-07-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hexj@acca21.org.cn

nitrogen reserves in different age groups and levels of three forest types were discussed. The results showed that: (1) With the change of stand age, the nitrogen storage of masson's pine, *Cunninghamia lanceolata* and *Eucalyptus* varied in 6.64—15.15 Mg/hm², 8.44—14.90 Mg/hm² and 3.22—11.29 Mg/hm², in which the nitrogen storage of Masson's pine, *Cunninghamia lanceolata* and *eucalyptus* reached the maximum in young forest, overripe forest and mature forest, respectively. Except for the young stage, the nitrogen reserves of Masson pine were the highest in the other stages of Chinese fir forest. (2) The ecological pattern of nitrogen storage in the three plantations was basically the same at each stand age. Most of the nitrogen was stored in the soil (0—100 cm). The nitrogen storage in the tree layer was next to that in the soil layer, and the nitrogen storage in the shrub layer was the smallest. In the range of 0—100 cm soil layer, each layer was divided by 10 cm, and the soil nitrogen storage in the surface layer of the three artificial forests was the highest at 0—10 cm of each age. The soil nitrogen storage in the soil layer of Masson's pine and Chinese fir increased gradually with the increase of stand age except for the young forest, and reached 10.71 Mg/hm² and 16.63 Mg/hm² in the overripe forest, respectively. In *eucalyptus*, nitrogen storage increased gradually from young forest to mature forest. Nitrogen storage in mature forest was 11.26 Mg/hm², but decreased in overmature forest. (3) There were differences in nitrogen storage of different organs at different levels in the same stand. The proportion of nitrogen storage in tree layer was the highest in the trunk of the three plantations, and the trunk was the main nitrogen pool in the tree layer. The middle layer of shrub layer had more nitrogen storage. Above ground part of herbaceous layer & GT; The underground part, the aboveground part is the main place of nitrogen storage; Fine root nitrogen storage 0—20 cm>20—40 cm. The nitrogen fixation capacity of different afforestation species was different. In general, the nitrogen fixation capacity of the ecosystem was gradually increased in the later stage of artificial afforestation, but decreased in the harvest stage of fast-growing *eucalyptus* plantation.

Key Words: nitrogen reserves; distribution pattern; plantation; forest age; Guangxi

森林生态系统作为全球生态系统重要的组成部分,在陆地生态系统氮循环中发挥着极其重要的作用,其植被与土壤的氮储量超过陆地生态系统总氮储量的 50%^[1]。根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告,目前,大气中二氧化碳、甲烷和氧化亚氮等温室气体的浓度已上升到过去 80 万年来的最高水平^[2-3]。氮是森林生态系统重要的组成部分,氮循环过程对生态系统的稳定性、生产力以及固氮潜力等都有关键的影响作用^[4],它是多数陆地自然生态系统植物生长的主要限制元素,也是决定生态恢复成效的关键元素^[5]。随着人类对地球的影响越来越大,氮循环和气候将成为地球系统越来越重要的决定因素^[6]。

碳、氮循环之间有着密切的耦合关系,陆地生态系统固碳在很大程度上受制于土壤的供氮能力^[7]。幼叶的氮浓度在一定程度上影响着地上部分的碳储量^[8]。通过氮添加可以有效增强森林的碳汇作用^[7-9]。以往研究发现,土壤是森林生态系统的重要氮储存场所,土壤质地是影响森林氮分配空间格局的主要因素,土壤氮储量占绝对优势,其所占比例为 94.05%^[10]。氮储量在各个土层的分布也存在较大差异,其中表层土壤氮储量较多,随着土层深度增加而逐渐降低^[11]。除土壤层外,乔木层氮储量在森林各个层次中占比最高^[12]。同地区的森林氮储量差异很大,为了深入了解和定量描述这种差异的原因,准确进行动态预测和区域评价,需要对不同区域的不同森林类型进行大量的研究^[13-14]。除此之外,同一个森林随着林龄的变化,氮储量也存在显著差异^[15]。研究表明,林龄对森林生态系统氮储量有显著的影响^[16],艾则民^[17]等对于刺槐人工林生态系统研究发现,氮储量随林龄增加而逐渐增大。之前对于氮储量方面的研究,多集中于乔木层与土壤层分布,而对于林下层氮储量分布规律研究较少。

广西壮族自治区位于全国地势第二台阶中的云贵高原东南边缘,处于两广丘陵西部,森林覆盖率从 1950 年的 16.04% 提高到 2018 年的 62.37%,增加近三倍^[18]。马尾松、杉树、桉树是我国南方主要的人工树种,因其具有生长快、产量高、用途广、材质好等特点,在广西广泛种植,分布面积极广^[19]。研究了广西马尾松、杉木和桉树 3 种主要人工林不同林龄和不同层次的氮储量组成和分布格局。对不同林龄森林乔木层、灌木层、草本层、凋落物层、细根和土层的氮储量分布规律进行综合研究,利用实测植物氮含量计算氮储量,在很大程度上提高了森林生态系统氮储量的估算精度,为区域尺度上森林氮库估算及氮平衡提供科学参考。通过揭示生态系统尺度上的氮素分布,可以帮助经营者更准确地把握森林氮储量的动态变化,制定科学有效的氮素管理措

施^[20-22]。正确评价广西森林生态系统的氮储量,揭示氮储量的时空变化以及影响因素,对更大尺度氮循环研究都有着极其重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

广西壮族自治区位于东经 104°26′—112°04′,北纬 20°54′—26°24′之间,北回归线横贯广西中部。全区总面积达 2376.00 万 hm^2 ,地形复杂,素有“八山一水一分田一片海”之说,其地势西北高,东南低,丘陵、山地约占 75%。广西属亚热带季风气候区,气候温暖,雨水丰沛,光照充足。夏季日照时间长、降水多、气温高,冬季日照时间短、天气干暖。全区各地极端最高气温为 33.7—42.5℃,极端最低气温为 -8.4—2.9℃,年平均气温 21℃,各地年降水量均 1070 mm 以上,大部分地区为 1500—2000 mm^[23]。在良好的气候条件下,一年四季植物均可以生长,林木生长量是全国平均水平的 2 至 3 倍,全区森林覆盖率达 60.17%,优越的气候资源促进了广西林业的蓬勃发展。本研究所选马尾松(PM)、杉木(CF)、桉树(EP)3 种人工林占全区乔木林总面积的 48.86%,蓄积量占乔木林总蓄积量的 49.16%。

1.2 研究方法

1.2.1 样方建立与调查

参照《IPCC 优良做法指南》对系统随机抽样的建议和广西 3 类人工林的分布特征,基于《广西森林资源规划设计调查技术方法》等林龄的划分标准,分林龄(幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林、过熟林),具体林龄划分标准可参照课题组之前研究结果^[24],计算松、杉、桉在广西各县(市)的面积、蓄积综合权重,选择权重最大的县(市),设置不同林龄松、杉、桉人工林样点,其中马尾松样点 22 个、杉木样点 15 个、桉树样点 15 个。各样点设置 3 块重复样地,每个样地大小为 1000 m^2 (50 m×20 m),将每块样地进一步划分为 10 个 10 m×10 m 的样方,在样方内测量胸径($D \geq 2$ cm)树种得胸径、冠幅、树高,对树种的位置坐标进行记录,之后挂牌标号为后期的复查做好准备。用 GPS 进行定位,记录其经纬度、坡度、坡向、坡位、海拔、方位^[25-26]。样地分布概况以及种植密度如图 1 及表 1 所示。

表 1 松、杉、桉不同林龄林分密度(平均值±标准差)

Table 1 Stand densities of pine, Chinese fir and Eucalyptus at different ages (Mean±SD)

	林龄 Stand age / a				
	幼龄林 Young forest	中龄林 Middleaged forest	近成熟林 Near mature forest	成熟林 Mature forest	过成熟林 Over mature forest
	密度(株/ hm^2)	密度(株/ hm^2)	密度(株/ hm^2)	密度(株/ hm^2)	密度(株/ hm^2)
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	2360±850	1990±1120	1620±610	1040±260	1950±540
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	890±510	1060±530	750±200	700±400	790±420
桉树 <i>Eucalyptus robusta</i>	1120±110	1350±230	1360±150	1200±120	1100±380

1.2.2 植被生物量测定

在每木调查的基础上,以 2 cm 为径阶,根据中央径阶多、两端逐次少的原则,在样地外选择不同林龄和径阶的树种作为样木,进行生物量的测定;记录树种名称、胸径、树高、冠幅、坐标及存活状况等。利用各树种(组)标准木各器官(干、枝、叶、根)的干重和总干重建立各器官及总生物量与样木胸径(D)的幂回归方程($W=aD^b$)、多项式方程($W=a+bD+cD^2$)或者指数方程($W=ae^{bD}$)。根据样地每木调查的结果及相应的回归方程计算乔木层各个体的生物量,并由此获得乔木层的总生物量^[26]。

按“品”字型在样地内设置 3 个 2 m×2 m 的小样方,调查所有灌木种类、株丛数、高度、基径、覆盖度;采用全收获法收获样框内所有灌木的枝、叶、根,称重、取样,烘干测定各器官生物量,用 3 个样框的平均值来推算样地中灌木层的总生物量。在每个 2 m×2 m 的小样方内各取 1 个 1 m×1 m 的小样框,调查草本种类、株丛数、平均高度、覆盖度,按同样方法获取草本层地上地下生物量、凋落物生物量。

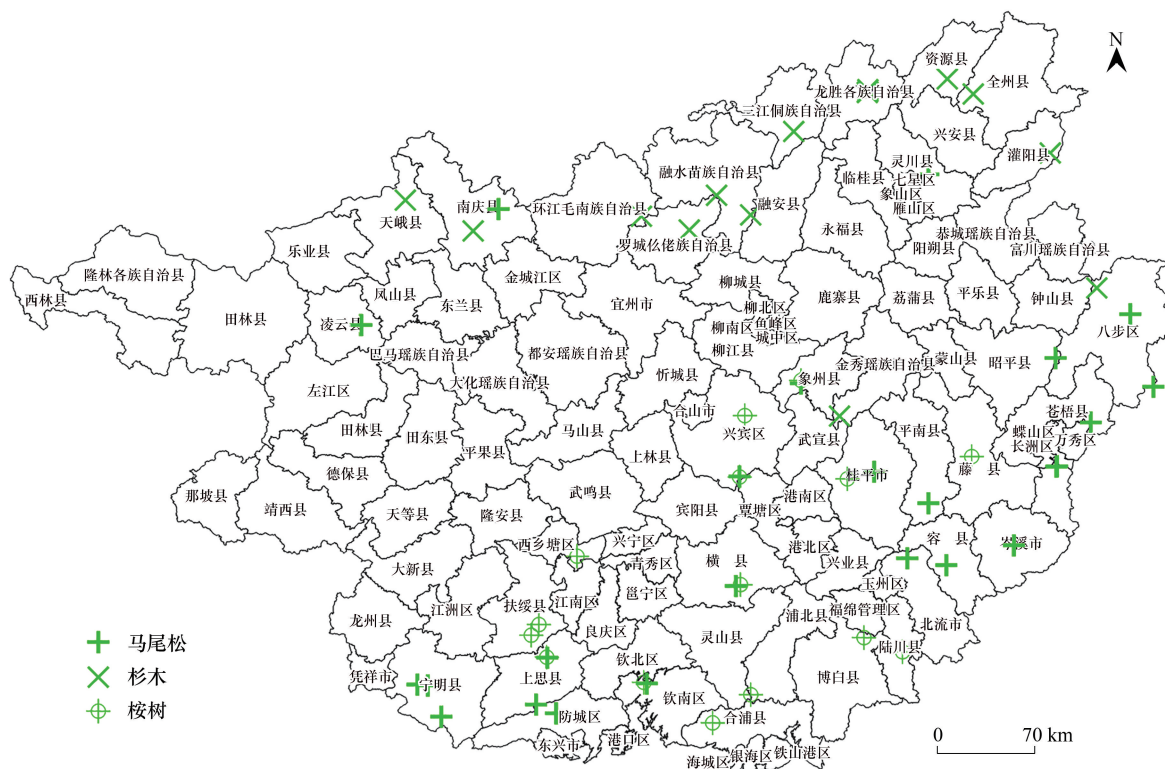


图1 研究区样地分布

Fig.1 Plot distribution in the study area

1.2.3 土壤样品采集

在样地四个角和中间按土壤机械分层,用土钻钻取 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm、30—50 cm、50—100 cm 五个层次样品,各层样品合成一个混合样(约 1000 g)。带回实验室风干研磨待测全氮。

1.2.4 氮含量测定

野外所采集植物叶、枝、干、根样品,经粉碎过筛后,采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮-流动注射仪法测定植物氮含量。土壤氮含量的测定采用半微量开氏法-流动注射仪。

1.2.5 数据处理

根据前期研究所得生物量回归方程,计算样地内每木各组份的生物量及整株树木生物量。根据各组份的氮含量,将生物量换算为氮储量。植被部分(乔木层、灌木层、草本层和凋落物层)的氮储量采用每一部分的生物量与它们的氮含量之积进行计算^[8]。将样地内所有树种的单株氮储量相加,得到样地树木总氮储量。按照林龄进行划分,将同一林龄不同样地氮储量进行平均得到某一林龄氮储量。根据样地总碳氮储量和总面积换算出氮密度,即单位面积的氮储量,以 Mg/hm^2 表示。

土壤氮储量通过容重、有机氮含量、土壤层厚度计算而得;土层氮储量 $S (Mg/hm^2)$ 采用以容重 $BD (g/cm^3)$ 、氮含量 $C (g/kg)$ 及土层厚度 $T (cm)$ 的乘积进行计算,0.1 为单位转换系数^[27],其计算公式为^[9]:

$$S = BD \times C \times T \times 0.1$$

松、杉、桉氮储量则是乔木层、灌木层、草本层、凋落物层和土壤层氮储量计算之和。

采用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验松、杉、桉三种人工林各组分氮含量和氮储量间的差异性,并用最小显著差异法(LSD)进行多重比较。数据在 Excel 2016 和 SPSS 26.0 中进行处理,在 Origin 9.0 中完成做图。图表中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 植被层、凋落物层及细根氮储量

2.1.1 乔木层氮储量及分配

随着林龄的变化,3种林分乔木层氮储量分配格局不同(表2),马尾松、杉木、桉树乔木层氮储量分别为159.1、229.86、84.52 kg/hm²。马尾松乔木层氮储量分配为过熟林>成熟林>近熟林>幼龄林>中龄林,除幼龄林大于中龄林外,其他随着林龄的增大而呈现逐渐增加的趋势,过熟林氮储量最大,为66.8 kg/hm²。杉木乔木层在成熟林氮储量最多,为70.6 kg/hm²,从幼龄林到成熟林一直保持着增大的趋势,氮储量大小顺序为成熟林>过熟林>近熟林>中龄林>幼龄林。桉树氮储量随林龄变化顺序为中龄林>成熟林>近熟林>过熟林>幼龄林,中龄林氮储量较多,为26.3 kg/hm²。在不同林龄3种林分乔木层氮储量中,从幼龄林到成熟林杉木乔木层氮储量显著大于马尾松和桉树乔木层,过熟林中,马尾松乔木层氮储量显著大于杉木与桉树乔木层氮储量($P<0.05$)。枝、干、根中,氮储量大小顺序为杉木>马尾松>桉树。不同器官进行比较,马尾松乔木层氮储量分配为干>枝>根>叶,杉木、桉树乔木层氮储量大小顺序为干>叶>枝>根,不同林龄中,马尾松、杉木、桉树树干氮储量占整个氮储量的50.01%—67.68%、39.68%—63.48%、19.93%—67.78%。树干氮储量均占比最高,说明树干是乔木层的主要氮库。

2.1.2 灌木层氮储量及分配

3种林分林下灌木层随着林龄的变化,氮储量分配格局不同(表3)。马尾松林下灌木层氮储量分配为近熟林>成熟林>过熟林>幼龄林>中龄林,杉木为成熟林>过熟林>近熟林>幼龄林>中龄林,桉树为成熟林>近熟林>中龄林>幼龄林>过熟林。3种林分林下灌木层不同器官氮储量分配均是叶>枝>根,其中马尾松叶片氮储量占整个氮储量的32.53%—53.56%,杉木占比32.03%—49.18%,桉树占比39.3%—48.32%,叶片氮储量占比均最高,说明在灌木层叶片是氮储存的主要器官。

2.1.3 草本层、凋落物层、细根氮储量及分配

3种林分林下草本层地上部分氮储量均大于地下部分氮储量(表4),马尾松林下草本层地上部分氮储量占比为59.07%—79.09%,杉木占比为38.72%—54.52%,桉树占比为56.97%—77.29%,草本层地上部分是氮储存的主要场所。随着林龄的变化,马尾松林下草本层氮储量在成熟林达到最高,为4.5 kg/hm²,杉木氮储量呈现先升高后逐渐降低的趋势,在近熟林达到最高,为6.34 kg/hm²,桉树氮储量呈现逐渐升高的趋势,在过熟林达到最高,为4.61 kg/hm²。

3种林分凋落物氮储量进行比较,马尾松>桉树>杉木,随着林龄的变化,马尾松凋落物氮储量变化趋势与桉树凋落物随林龄变化趋势一致,中龄林氮储量最多,分别为5.24和5.6 kg/hm²,随着林龄的变化,从中龄林到过熟林,氮储量逐渐降低。杉木凋落物氮储量在过熟林达到最高,为3.95 kg/hm²,整体呈现波动变化。

3种林分细根氮储量均是0—20 cm>20—40 cm(表5),马尾松细根0—20 cm氮储存占比47.13%—92.34%,杉木占比23.43%—83.10%,桉树占比54.41%—82.17%,说明细根0—20 cm是氮储存的主要场所。随着林龄的变化,马尾松0—40 cm细根氮储量呈现逐渐降低的趋势,在幼龄林氮储量最高,为6.57 kg/hm²,细根在成熟林达到最高,为9.86 kg/hm²,桉树在中龄林达到最高,为9.21 kg/hm²。

2.2 土壤层氮储量

同一林龄林型间总氮储量比较,随着土层深度的增加,3种林分土层氮储量呈现逐渐降低的趋势,表层土壤氮储量均最高,其中马尾松、杉木、桉树氮储量分别为1.56—1.97 Mg/hm²、3.16—2.07 Mg/hm²和0.56—2.27 Mg/hm²,氮储量分别占土层总氮储量的13.02%—24.87%、11.87%—27.02%和17.47%—19.82%(表6)。不同土层范围内,同一林龄间,杉木氮储量均显著大于马尾松和桉树。随着林龄的变化,杉木土壤氮储量变化趋势和马尾松一致,氮储量变化为幼龄林>过熟林>成熟林>近熟林>中龄林,除幼龄林外,随着林龄的增大,土壤层

表 2 三种人工林不同林龄乔木层氮储量器官分配/(kg/hm²)

林龄/a Stand ages	枝 Branch				干 Stem				根 Root			
	PM	CF	EP	PM	EP	CF	PM	EP	PM	CF	EP	小计 Total
幼龄林 Young and semi-matured forest	2.42±0.34Ac	3.75±1.46Ac	2.18±0.24Ab	3.11±0.82Ad	5.05±3.71Ab	0.27±0.06Ab	10.99±0.78Ac	18.6±14.18Aa	0.7±0.15Ab	1.93±0.74Ac	0.37±0.05Bd	29.31 3.53
中龄林 Middle-aged forest	2.57±0.21Cc	7.15±1.05Ab	4.62±0.4Ba	1.66±1.06Bd	6.42±1.78Ab	1.38±0.48Bb	9.17±3.16Ac	12.21±1.42Aa	17.85±10.61Aa	2.15±2.77Bc	4.98±1.99Abe	30.78 26.34
近熟林 Near-aged forest	3.62±0.5Bb	12.05±1.14Aa	2.36±1.4Bb	4.55±2.32ABc	7.01±1.39Ab	2.7±1.89Ba	11.07±2.17Bc	21.24±3.4Aa	9.99±0.75Bab	3.05±1.35Bbc	1.66±0.44Bb	49.43 16.74
成熟林 Mature forest	4.32±0.44Ba	13.16±0.37Aa	4.34±0.91Ba	5.8±1.69Bb	12.83±2.43Aa	2.6±0.28Ca	21.97±6.88ABb	32.96±8.96Aa	12.76±1.58Ba	4.65±1.52Bb	1.83±0.7Bb	70.64 21.56
过熟林 Overgrown forest	4.42±0.29Ba	12.24±0.39Aa	4.29±0.39Ba	9.79±1.04Aa	8.88±3.61Ab	1.6±0.04Bb	45.19±0.64Aa	23.98±10.09Ba	9.41±2.3Bab	7.35±3.21Aa	1.03±0.44Cc	49.72 16.35

不同大写字母表示同一林龄不同林分间差异显著,不同小写字母表示同一器官不同林龄间差异显著(林龄和林分间多重比较)($P<0.05$); PM:马尾松 Masson pine; CF:杉木 Fir wood; EP:桉树 Eucalyptus表 3 三种人工林不同林龄灌木层氮储量器官分配/(kg/hm²)

林龄/a Stand ages	叶 Leaf				枝 Branch				根 Root			
	PM	CF	EP	PM	EP	CF	PM	EP	PM	CF	EP	小计 Total
幼龄林 Young and semi-matured forest	0.39±0.03Ac	0.08±0.04Bcd	0.34±0.01Ab	0.3±0.1Ab	0.09±0.04Bb	0.24±0.02ABc	0.51±0.16Aab	0.08±0.01Bc	0.17±0.03Bb	1.21	0.26	0.76
中龄林 Middle-aged forest	0.2±0.04Bc	0.06±0.01Cd	0.37±0.04Ab	0.13±0.07Bb	0.07±0.01Bb	0.35±0.01Ab	0.07±0.03Bc	0.04±0.01Bc	0.18±0.02Ab	0.41	0.18	0.91
近熟林 Near-aged forest	1.07±0.49Aa	0.14±0.01Bc	0.7±0.07ABa	0.94±0.38Ba	0.07±0.01Bb	0.64±0.01Aa	0.57±0.15Aa	0.07±0.01Bc	0.43±0.07Aa	2.59	0.30	1.78
成熟林 Mature forest	0.96±0.17Aab	0.43±0.05Ba	0.87±0.19Aa	0.44±0.11Ab	0.5±0.09Aa	0.61±0.05Aa	0.38±0.11Aab	0.31±0.04Aa	0.43±0.02Aa	1.79	1.24	1.92
过熟林 Overgrown forest	0.54±0.08Abc	0.31±0.03Bb	0.27±0.04Bb	0.39±0.01Ab	0.15±0.02Bb	0.18±0.02Bc	0.3±0.09Abc	0.21±0.02ABb	0.1±0.02Bb	1.24	0.68	0.56

表 4 三种人工林不同林龄草本层以及凋落物层氮储量分配/(kg/hm²)

Table 4 Nitrogen storage allocation in herb layer and litter layer at different ages of the three plantations

林龄/a Stand ages	草地上 Aboveground herb			草地下 Underground herb			小计 Total			凋落物 Litter		
	PM	CF	EP	PM	CF	EP	PM	CF	EP	PM	CF	EP
幼龄林 Young and semi-matured forest	1.63±0.32Abc	0.22±0.09Bc	1.38±0.64Ac	0.68±0.1Bc	0.35±0.05Cc	1.04±0.1Aa	2.31±0.26Ac	0.57±0.15Bc	2.43±0.61bAc	3.53±0.63Acd	1.29±0.01Bc	1.42±0.43Bc
中龄林 Middle-aged forest	1.23±0.35Ac	0.45±0.09Bc	1.4±0.13Ac	0.85±0.24Abc	0.47±0.05Bc	0.41±0.01Bb	2.08±0.58Ac	0.92±0.11Bc	1.81±0.13Ac	5.24±0.79Aa	3.04±0.16Bb	5.6±0.29Aa
近熟林 Near-aged forest	2.65±0.74ABab	3.46±0.56Aa	2.09±0.29Bbc	1.23±0.33Bab	2.88±0.49Aa	0.69±0.08Bb	3.89±0.99Bab	6.34±1.06Aa	2.79±0.3Bb	4.8±0.61Aab	2.66±0.06Bb	5.27±0.1Aab
成熟林 Mature forest	2.96±0.72Aa	1.42±0.14Bb	2.79±0.45Aab	1.54±0.26ABa	1.67±0.18Ab	1.13±0.15Ba	4.5±0.92Aa	3.1±0.19Bb	3.93±0.32ABa	3.86±0.63ABbc	2.88±0.3Bb	4.19±0.51Ab
过熟林 Overgrown forest	2.07±0.45Babc	0.69±0.04Cc	3.56±0.72Aa	0.55±0.12Bc	0.85±0.1ABc	1.04±0.22Aa	2.62±0.58Bbc	1.55±0.13Bc	4.61±0.49Aa	2.49±0.1Bd	3.95±0.23Aa	2.5±0.93Bc

表 5 三种人工林不同林龄细根氮储量分配/(kg/hm²)

Table 5 Distribution of fine root nitrogen storage at different ages in three plantations

林龄/a Stand ages	细根 0—20cm			细根 20—40cm			细根 0—40cm		
	PM	CF	EP	PM	CF	EP	PM	CF	EP
幼龄林 Young and semi-matured forest	3.09±0.31Aa	1.34±0.34Bc	1.29±0.02Bbc	3.47±1.91Aa	0.27±0.01Bc	0.36±0.03Bc	6.57±1.76Aa	1.62±0.34Bd	1.66±0.05Bbc
中龄林 Middle-aged forest	2.9±0.5ABa	0.17±0.01Bd	6.44±3.11Aa	1.95±0.47Bb	0.55±0.01Cc	2.77±0.01Aa	4.85±0.97ABab	0.72±0.01Bd	9.21±3.11Aa
近熟林 Near-aged forest	2.28±0.41Ba	5.03±0.27Aa	1.69±0.15Bbc	1.53±0.36Bbc	3.14±0.05Ab	0.34±0.06Cc	3.82±0.74Bbc	8.18±0.24Ab	2.04±0.2Cbc
成熟林 Mature forest	1.81±0.47Ba	5.39±0.12Aa	4.25±1.33Aab	0.37±0.1Bc	4.46±0.75Aa	0.9±0.29Bb	2.19±0.53Cc	9.86±0.79Aa	5.16±1.63Bb
过熟林 Overgrown forest	2.76±2.04ABa	4.37±0.45Ab	0.09±0.04Bc	0.23±0.02Bc	2.73±0.16Ab	0.05±0.01Bc	2.99±2.02Bbc	7.11±0.54Ac	0.15±0.06Bc

氮储量逐渐增大,在过熟林土壤氮储量达到最多,分别为 4.55、8.60 Mg/hm^2 ,对于桉树来说,土壤层氮储量从幼龄林到成熟林呈逐渐增大的趋势,在成熟林达到最多,为 11.95 Mg/hm^2 。

2.3 生态系统氮储量及分配格局

由表 7 可知,马尾松、杉木、桉树人工林生态系统总氮储量分别为 6.64—15.15 Mg/hm^2 、8.44—16.7 Mg/hm^2 、3.22—11.29 Mg/hm^2 ,同一林龄不同林型间比较,除幼龄林马尾松氮储量大于杉木与桉树外,其余林龄均是杉木大于马尾松与桉树,这与土壤层大小规律相一致。随着林龄的变化,马尾松土壤层氮储量占比逐渐降低,占比大小范围为 99.29%—99.79%。乔木层氮储量占比逐渐升高,占比范围为 0.12%—0.62%,在过熟林乔木层氮储量达到最高。杉木土壤层氮储量随着林龄的变化有着逐渐升高的趋势,但所占比例呈现逐渐降低的趋势,所占比例大小范围为 99.37%—99.73%(表 7)。随着林龄的增加,植被层氮储量占生态系统氮储量的比重逐渐增加,说明随着林龄的变化,植物各层次逐渐有氮的积累。桉树土壤层氮储量随着林龄的变化而逐渐升高,变化规律与马尾松以及杉木变化规律基本相似,乔木层氮储量仅次于土壤层氮储量,氮储量占比范围为 0.11%—0.33%,在中龄林达到最高。3 种林分从总体来看,土壤层氮储量最高,乔木层次之,灌木层氮储量最小(图 2)。

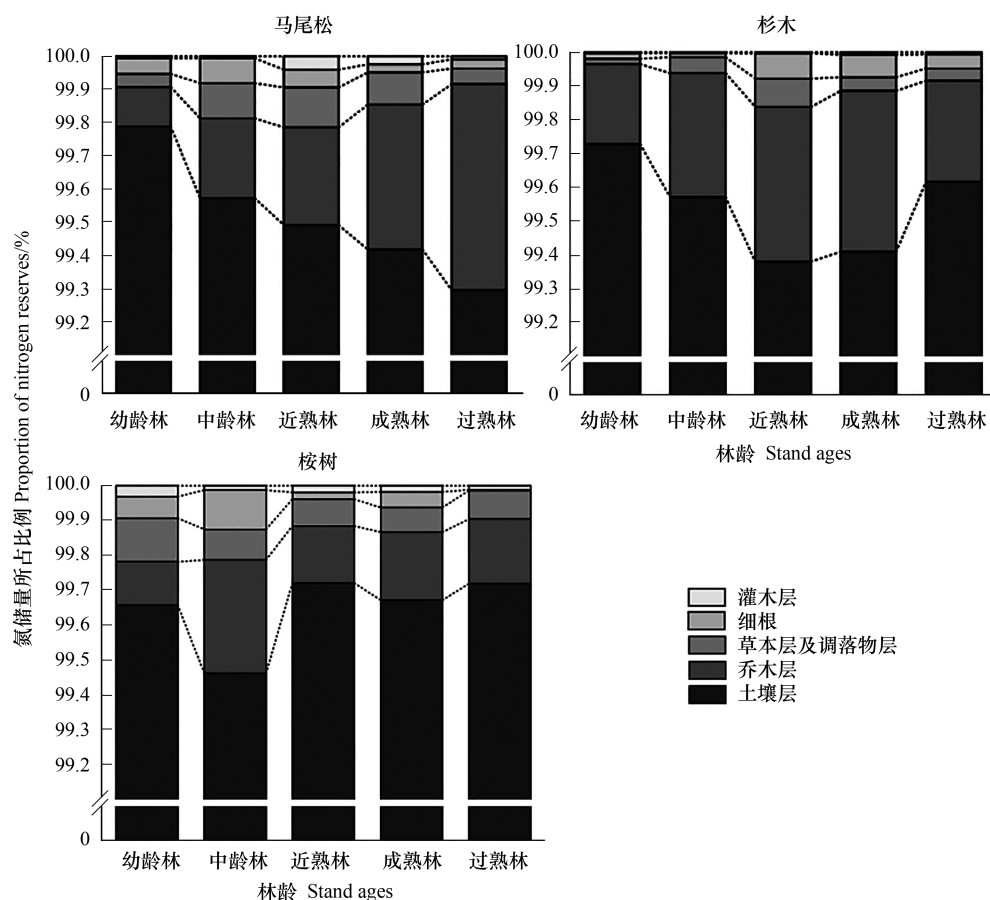


图 2 三种人工林不同层次氮储量占比

Fig.2 Proportions of nitrogen storage at different levels in three plantations

根据不同层次氮储量可以分别计算出 3 种林分总的氮储量(表 7)。3 种林分中,氮储量大小为杉木>马尾松>桉树,3 种林分氮储量均以土壤层达到绝对优势。3 种人工林生态系统总全氮储量的空间分布格局基本相似,对于马尾松以及桉树来说,各层次氮储量大小顺序均为土壤层>乔木层>草本及凋落物层>细根>灌木层,杉木各层次氮储量大小顺序为土壤层>乔木层>细根>草本及凋落物层>灌木层,3 种林分中土壤层氮储量均最高,乔木层氮储量仅次于土壤层,占比分别为 0.33%、0.37%以及 0.2%,灌木层氮储量占比最小,与之前刘凯等研究结果相一致^[28]。

表 6 三种人工林不同林龄不同土壤层氮储量分配/(Mg/hm²)

Table 6 Distribution of nitrogen reserves in different soil layers at different ages of the three plantations

土层/cm Depth	幼龄林			中龄林			近熟林			成熟林			过熟林		
	Young and semi-matured forest			Middle-aged forest			Near-aged forest			Mature forest			Overgrown forest		
	PM	CF	EP	PM	CF	EP	PM	CF	EP	PM	CF	EP	PM	CF	EP
0—10	1.97±0.89Ab	2.07±0.63Ab	0.56±0.18Bb	1.74±0.73ABab	2.26±0.57Aa	1.42±0.52Bb	1.85±0.68Ab	2.25±0.9Ab	2.27±1.07Ab	1.56±1.16Bb	2.88±0.76ABb	2.09±0.66Ab	1.60±0.68Ba	3.16±0.64Ab	1.57±0.79Bb
10—20	1.29±1.19Ab	1.37±0.35Ab	0.40±0.25Ab	0.83±0.41Ac	1.03±0.35Ab	1.11±0.36Ab	0.99±0.51Bcd	1.84±0.49Abc	0.90±0.37Bb	1.06±0.41Bb	1.89±0.35Abc	1.37±0.67Bb	0.51±0.19Ba	2.51±0.37Abc	1.03±0.84Bb
20—30	1.37±1.21Ab	1.26±0.43Ab	0.36±0.24Ab	0.62±0.38Ac	0.79±0.37Ab	0.80±0.26Ab	0.84±0.28Bd	1.28±0.31Ac	0.87±0.37Bb	0.87±0.30Bb	1.63±0.43ABc	1.10±0.79Ab	0.66±0.27Ba	1.94±0.26Ac	0.65±0.27Bb
30—50	2.73±2.69Ab	2.28±0.83Ab	0.23±0.09Ab	1.25±0.74Abc	1.39±0.43Ab	1.37±0.52Ab	1.29±0.57Ac	1.73±0.25Abc	1.78±0.92Ab	1.19±0.31Bb	2.83±0.96ABb	1.83±1.84Ab	1.10±0.60Ba	3.01±0.46Ab	1.31±0.61Bb
50—100	7.75±6.97Aa	5.21±1.98Aa	1.67±0.35Aa	2.17±1.47Aa	2.91±1.29Aa	3.27±1.14Aa	2.47±0.92Ba	3.5±0.75ABa	4.57±2.63Aa	3.51±2.40Aa	5.56±2.05Aa	4.87±3.63Aa	6.83±10.11Aa	6.0±1.09Aa	4.05±2.84Aa

表 7 三种人工林生态系统氮储量及分配格局/(Mg/hm²)

Table 7 Nitrogen storage and distribution patterns in three plantations ecosystems

林龄/a Stand ages	乔木层			灌木层			草本层及凋落物层			细根			土壤层			总和		
	Arbor layer			Shrub-grass layer			Herb layer and litter layer			Fines roots			Soil layer			Sum		
	PM	CF	EP	PM	CF	EP	PM	CF	EP	PM	CF	EP	PM	CF	EP	PM	CF	EP
幼龄林 Young and semi-matured forest	0.018	0.029	0.004	0.001	0.0003	0.001	0.006	0.002	0.004	0.007	0.002	0.002	15.119	12.221	3.208	15.151	12.255	3.217
中龄林 Middle-aged forest	0.016	0.031	0.026	0.0004	0.0002	0.001	0.007	0.004	0.007	0.005	0.001	0.009	6.608	8.408	7.962	6.636	8.444	8.006
近熟林 Near-aged forest	0.022	0.049	0.017	0.003	0.000	0.002	0.009	0.009	0.008	0.004	0.008	0.002	7.431	10.628	10.384	7.468	10.695	10.412
成熟林 Mature forest	0.036	0.071	0.022	0.002	0.001	0.002	0.008	0.006	0.008	0.002	0.010	0.005	8.197	14.817	11.258	8.246	14.904	11.294
过熟林 Overgrown forest	0.067	0.050	0.016	0.001	0.001	0.001	0.005	0.006	0.007	0.003	0.007	0.0002	10.705	16.633	8.614	10.782	16.696	8.638

3 讨论

本研究从林龄以及不同器官的角度出发,探究氮储量与林龄与器官之间的关系,从结果可知,在乔木层中 3 种林分树干氮储量均占比最高,说明树干是乔木层的主要氮库。通过比较 3 种林分不同林龄氮储量大小关系可以发现,氮储量均有着随着林龄的增大而呈现不断增大的趋势,马尾松在过熟林氮储量达到最高,杉木和桉树在成熟林氮储量达到最高,这可能由于在树木生长过程中,在成熟时遭到人为的砍伐,导致树木在成熟林氮储量达到最高,而在过熟林氮储量有一定的下降^[29],另一方面,林分成熟后,由于养分不足、树木衰老、器官和植物死亡增加等各种因素,种群生物量开始下降,最终影响植被氮储量^[30],从 3 种林分总体来看,乔木层氮储量与林龄有着显著的正相关关系。

在灌木层,通过分析各器官氮储量所占比例发现,3 种林分灌木层叶片相比于别的器官均占有最高的氮储量,可能是由于植物各器官在生长发育过程中执行生理功能时,对氮的需求和利用存在差异^[31],灌木层位于乔木层下方,为了更好的进行光合作用,叶片中含有更多的叶绿素,N 作为叶绿素组成元素,缺 N 叶绿素无法合成,没有 N 植物就不能进行光合作用,同时树叶是代谢作用最旺盛的器官,因此灌木层叶片中有着较多的氮储存。这与刘文飞等^[32]研究结果相一致。3 种林分林下草本层地上部分氮储量均大于地下部分氮储量,说明草本层地上部分是草本储存氮的主要场所^[33]。灌木层与草本层作为林下层,3 种林分在一起比较发现,马尾松林下层氮储量均高于杉木与桉树,由于针叶树种马尾松林冠开阔,阳光可以直射林下层,林下灌木和草本植被丰富,生物量较高,因而杉木与桉树林下植被氮储量显著低于马尾松林下植被。3 种林分细根均是 0—20 cm>20—40 cm,土壤表层细根生物量比较大,因此相比较于细根 20—40 cm,细根 0—20 cm 具有较多的氮储存,根系的垂直分布直接影响输送到土壤各层次的养分含量,表层细根的生长、死亡及周转对土壤氮循环及其动态变化具有重要的生态意义^[34]。

植被层从总体来看,不同层次氮储量分配差异较大,3 种林型乔木层氮储量所占比例均最大,表明乔木层是植被层氮储存的主要部位,其它层次对氮储量的贡献远小于乔木层对氮储量的贡献。随着林龄的增大,树木生长的后期,乔木层氮储量有着更为明显的聚集效应。广西拥有比较充裕的降雨,以往研究发现,降雨给林分提供充足水分的同时,也是林分重要的氮素来源,每年从降水输入到生态系统的氮素含量惊人,影响到生态系统的氮循环,研究氮沉降对于生态系统氮循环的意义重大。

森林生态系统氮储量主要由森林植被、凋落物和土壤组成,其中土壤氮储量占据绝大多数^[35]。土壤氮循环是全球生物化学循环的重要组成部分,土壤氮储量能在一定程度上反映土壤肥力,也可作为衡量森林土壤质量和植被恢复的重要指标^[36]。本研究土壤层氮储量远远高于植被层氮储量,这种研究结果与黄宇^[37]、莫德祥^[38]、艾泽民^[39]、He^[40]等的研究结果基本一致。土壤层氮储量呈现逐渐降低的趋势,土壤深度对于土壤氮储量有着较为明显的影响^[41]。土壤表层氮储量主要来源于凋落物的分解,且表层土壤的凋落物较多,同时表层土壤良好的通气状况与水热条件也为微生物活动提供了更好的环境^[42],这都促进了土壤表层中氮储量的积累^[43],氮储量取决于有机质的输入输出决定的,具有明显的表层富集现象^[44—45]。除幼龄林土壤层氮储量马尾松大于杉木与桉树外,其余林龄均是杉木>马尾松>桉树,不同人工林树种生物学特性和土壤养分状况的差异是造成杉木氮储量(0—100 cm)显著高于马尾松以及桉树的重要原因^[46—47]。3 种林分各林龄阶段土壤氮密度绝大部分小于我国森林土壤平均氮密度($(13.59 \pm 8.40) \text{ t/hm}^2$)^[14],可能原因是相较于天然林生态系统,人工林木材收获会带走一定数量的氮,导致土壤层氮储量的下降;另外,人工种植扰动土壤,破坏土壤团聚性,加速土壤氮分解、释放与淋失^[48]。

4 结论

在本研究中,马尾松、杉木、桉树人工林生态系统总氮储量分别为 6.64—15.15 Mg/hm^2 、8.44—16.7 Mg/hm^2 和 3.22—11.29 Mg/hm^2 ,除幼龄林外,其余林龄均是杉木氮储量最高,植被氮储量大小差异主要

是由于氮含量以及生物量差异所引起,杉木林相比较于马尾松林和桉树林,有着更好的固氮效应,三种林分氮储量均有着随着林龄的增大而呈现不断增大的趋势。从总体来看,整体均表现为土壤层>乔木层>灌木层,草本及凋落物层和细根氮储量的大小关系因不同林分本身特性的原因而存在一定的差异。同一林龄林型间总氮储量比较,随着土层深度的增加,3种林分土层氮储量呈现逐渐降低的趋势。通过分析三种林分氮储量随林龄的变化以及各层次氮储量分布,合理控制林分的林龄、种植类型、种植密度以及林分结构从而得到更多的养分储存。森林氮库的研究是一项复杂的研究任务,未来可将森林氮储量与气候、微生物和土壤的理化性质等相结合,深入探究各因素之间的相互作用。

参考文献(References):

- [1] Schlesinger W H, Bernhardt E S. The global cycles of nitrogen and Phosphorus. Biogeochemistry. Amsterdam: Elsevier, 2013: 445-467.
- [2] Kurbatova A I, Tarko A M, Kozhevnikova P V. Modeling the global biogeochemical cycle of carbon and nitrogen in the system atmosphere-plant-soil. E3S Web of Conferences, 2019, 116: 00041.
- [3] 曹龙. IPCC AR6 报告解读:气候系统对二氧化碳移除响应. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 664-670.
- [4] Reich P B, Hobbie S E, Lee T L, Ellsworth D S, West J B, Tilman D, Knops J M H, Naeem S, Trost J. Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to CO₂. Nature, 2006, 440(7086): 922-925.
- [5] 李德军, 陈浩, 肖孔操, 张伟, 王克林. 西南喀斯特生态系统氮素循环特征及其固碳效应. 农业现代化研究, 2018, 39(6): 916-921.
- [6] Gruber N, Galloway J N. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. Nature, 2008, 451(7176): 293-296.
- [7] Li D J, Niu S L, Luo Y Q. Global patterns of the dynamics of soil carbon and nitrogen stocks following afforestation: a meta-analysis. The New Phytologist, 2012, 195(1): 172-181.
- [8] Wang G Z, Liu Y G, Wu X Q, Pang D B, Yang X, Hussain A, Zhou J X. Stand structural diversity and species with leaf nitrogen conservation drive aboveground carbon storage in tropical old-growth forests. Forests, 2020, 11(9): 994.
- [9] Eastman B A, Adams M B, Brzostek E R, Burnham M B, Carrara J E, Kelly C, McNeil B E, Walter C A, Peterjohn W T. Altered plant carbon partitioning enhanced forest ecosystem carbon storage after 25 years of nitrogen additions. The New Phytologist, 2021, 230(4): 1435-1448.
- [10] Xu L, He N P. Nitrogen storage and allocation in China's forest ecosystems. Science China Earth Sciences, 2020, 63(10): 1475-1484.
- [11] 施钦, 殷云龙, 华建峰, 丁次平, 张凌云, 杨红明. 云南滇池‘中山杉 118’人工林及土壤的碳、氮积累特征. 植物资源与环境学报, 2021, 30(1): 75-77.
- [12] 任亮晶, 商宏莉, 罗辑, 刘亭, 孙守琴, 何咏梅. 海螺沟冰川退缩区原生演替序列植被碳氮储量动态. 水土保持研究, 2020, 27(5): 32-37, 44.
- [13] 于兵. 大庆地区土地利用/覆被变化对植被和土壤碳氮储量的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010.
- [14] 徐丽, 何念鹏. 中国森林生态系统氮储量分配特征及其影响因素. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(10): 1374-1385.
- [15] 罗达, 冯秋红, 史作民, 李东胜, 杨昌旭, 刘千里, 何建社. 岷江干河谷区岷江柏人工林碳氮储量随林龄的动态. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1099-1105.
- [16] 刘冰燕, 陈云明, 曹扬, 吴旭. 秦岭南坡东段油松人工林生态系统碳、氮储量及其分配格局. 应用生态学报, 2015, 26(3): 643-652.
- [17] 艾泽民, 陈云明, 曹扬. 黄土丘陵区不同林龄刺槐人工林碳、氮储量及分配格局. 应用生态学报, 2014, 25(2): 333-341.
- [18] 李巧玉, 黄周玲, 尹承颖. 从 16.04% 到 62.37%——广西森林覆盖率 70 年大增近 3 倍回望. 广西林业, 2019(10): 4-7.
- [19] 陶玉华, 隆卫革, 马麟英, 曹书阁, 向达永, 郭蓓. 柳州市马尾松、杉木、桉树人工林碳储量及其分配. 广东农业科学, 2011, 38(22): 42-45.
- [20] 王卫霞, 史作民, 罗达, 刘世荣, 卢立华, 明安刚, 于浩龙. 我国亚热带几种人工林生态系统碳氮储量. 生态学报, 2013, 33(3): 925-933.
- [21] Peichl M, Leava N A, Kiely G. Above- and belowground ecosystem biomass, carbon and nitrogen allocation in recently afforested grassland and adjacent intensively managed grassland. Plant and Soil, 2012, 350(1): 281-296.
- [22] Petrenko C L, Bradley-Cook J, Lacroix E M, Friedland A J, Virginia R A. Comparison of carbon and nitrogen storage in mineral soils of graminoid and shrub tundra sites, western Greenland. Arctic Science, 2016, 2(4): 165-182.
- [23] 兰秀, 刘永贤, 宋同清, 范稚莲, 杜虎, 曾馥平, 彭晚霞, 张家涌. 广西桉树林表层土壤水分时间稳定性分析. 水土保持学报, 2019, 33(4): 263-269.
- [24] 杜虎, 曾馥平, 王克林, 宋同清, 温远光, 李春干, 彭晚霞, 梁宏温, 朱宏光, 曾昭霞. 中国南方 3 种主要人工林生物量和生产力的动态变化. 生态学报, 2014, 34(10): 2712-2724.

- [25] 兰斯安, 杜虎, 曾馥平, 宋同清, 彭晚霞, 韩畅, 陈莉, 苏樑. 不同林龄杉木人工林碳储量及其分配格局. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1125-1134.
- [26] 兰秀, 杜虎, 宋同清, 曾馥平, 彭晚霞, 刘永贤, 范稚莲, 张家涌. 广西主要森林植被碳储量及其影响因素. 生态学报, 2019, 39(6): 2043-2053.
- [27] 莫德祥, 吴庆标, 林宁, 卓宇. 桂东南柳杉人工林碳氮储量及其分配格局. 生态学杂志, 2012, 31(4): 794-799.
- [28] 刘凯. 桂西南马尾松、红锥人工幼林及其混交林生物量和碳氮特征研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
- [29] 刘迎春, 王秋凤, 于贵瑞, 朱先进, 展小云, 郭群, 杨浩, 李胜功, 胡中民. 黄土丘陵区两种主要退耕还林树种生态系统碳储量和固碳潜力. 生态学报, 2011, 31(15): 4277-4286.
- [30] Bunker D E, Declerck F, Bradford J C, Colwell R K, Perfecto I, Phillips O L, Sankaran M, Naeem S. Species loss and aboveground carbon storage in a tropical forest. *Science*, 2005, 310(5750): 1029-1031.
- [31] 施家月, 王希华, 闫恩荣, 程铭华. 浙江天童常见植物幼树器官的氮磷养分特征. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2006(2): 121-129.
- [32] 刘文飞, 樊后保. 马尾松阔叶树混交林生态系统的氮素循环特征. 北京林业大学学报, 2008, 30(6): 52-58.
- [33] 侯芳, 王克勤, 宋娅丽, 李加文, 杨云陆, 李有邦. 滇中亚高山典型森林林下植被碳氮储量及其分配格局. 水土保持研究, 2019, 26(1): 61-68.
- [34] 常宗强, 冯起, 司建华, 李建林, 苏永红. 祁连山不同植被类型土壤碳贮量和碳通量. 生态学杂志, 2008, 27(5): 681-688.
- [35] Potter C S. Terrestrial Biomass and the Effects of Deforestation on the Global Carbon Cycle: results from a model of primary production using satellite observations. *BioScience*, 1999, 49(10): 769-778.
- [36] 黄从德, 张健, 杨万勤, 张国庆, 王永军. 四川森林土壤有机碳储量的空间分布特征. 生态学报, 2009, 29(3): 1217-1225.
- [37] 黄宇, 冯宗炜, 汪思龙, 冯兆忠, 张红星, 徐永荣. 杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统 C、N 贮量. 生态学报, 2005, 25(12): 3146-3154.
- [38] Mo D, Wu Q, Lin N, Zhuo Y. Carbon and nitrogen storage and their allocation pattern in *Cryptomeria fortunei* plantations in southeastern Guangxi of South China. *Chin J Ecol*, 2012, 1: 794-799.
- [39] 艾泽民, 陈云明, 曹扬. 黄土丘陵区不同林龄刺槐人工林碳、氮储量及分配格局. 应用生态学报, 2014, 25(02): 333-341.
- [40] He Y J, Qin L, Li Z Y, Liang X Y, Shao M X, Tan L. Carbon storage capacity of monoculture and mixed-species plantations in subtropical China. *Forest Ecology and Management*, 2013, 295: 193-198.
- [41] 王艳丽, 字洪标, 程瑞希, 唐立涛, 所尔阿芝, 罗雪萍, 李洁, 王长庭. 青海省森林土壤有机碳氮储量及其垂直分布特征. 生态学报, 2019, 39(11): 4096-4105.
- [42] Kolton M, Weston D J, Mayali X, Weber P K, McFarlane K J, Pett-Ridge J, Somoza M M, Lietard J, Glass J B, Lilleskov E A, Shaw A J, Tringe S, Hanson P J, Kostka J E. Defining the Sphagnum core microbiome across the North American continent reveals a central role for diazotrophic methanotrophs in the nitrogen and carbon cycles of boreal peatland ecosystems. *mBio*, 2022, 13(1).
- [43] 王淑平, 周广胜, 吕育财, 邹建军. 中国东北样带(NECT)土壤碳、氮、磷的梯度分布及其与气候因子的关系. 植物生态学报, 2002, 26(5): 513-517.
- [44] Zhixiang W, Guishui X, Zhongliang T. Characteristics of soil organic carbon and total nitrogen in rubber plantations soil at different age stages in the western region of Hainan Island. *Agricultural Science and Technology*, 2010.
- [45] 崔鸿侠, 肖文发, 潘磊, 黄志霖, 王晓荣, 庞宏东. 神农架巴山冷杉林土壤碳储量特征. 林业科学, 2012, 48(11): 107-111.
- [46] Burton J, Chen C R, Xu Z H, Ghadiri H. Soluble organic nitrogen pools in adjacent native and plantation forests of subtropical Australia. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(11): 2723-2734.
- [47] Chen C R, Xu Z H. Analysis and behavior of soluble organic nitrogen in forest soils. *Journal of Soils and Sediments*, 2008, 8(6): 363-378.
- [48] 刘玉林, 朱广宇, 邓蕾, 陈磊, 上官周平. 黄土高原植被自然恢复和人工造林对土壤碳氮储量的影响. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2163-2172.