

不同龄组杉木林土壤碳、氮、磷的生态化学计量特征^①

曹小玉¹, 李际平¹, 杨静¹, 闫文德^{1,2}

(1 中南林业科技大学林学院, 长沙 410004; 2 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004)

摘要: 为了阐明不同发育阶段杉木人工林土壤的生态化学计量特征, 在湖南省金洞林场选择立地因子基本一致的杉木幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林、过熟林分别设置 3 块 20 m × 30 m 样地, 在每个样地利用 S 形 5 点取样法分层(0~15、15~30、30~45、45~60 cm)采取土壤样品, 用于测定土壤有机碳、全氮、全磷, 并计算化学计量比。结果显示: 5 个龄组杉木林 0~60 cm 土壤有机碳、全氮、全磷的含量分别为 11.02~14.74、1.65~1.84、0.26~0.35 g/kg。土壤有机碳和全氮的含量随着杉木年龄的增长表现出了先减少后增加再减少的趋势, 而土壤全磷的含量则表现为先减少后增加的趋势。土壤有机碳和全氮的含量都表现为随土层加深而下降的规律, 土壤有机碳下降幅度中龄林 > 近熟林 > 过熟林 > 成熟林 > 幼龄林, 土壤全氮下降幅度近熟林 > 过熟林 > 中龄林 > 幼龄林 > 成熟林。而土壤全磷含量随着土层下降没有明显的变化规律。5 个龄组杉木林 0~60 cm 土壤 C:N、C:P 和 N:P 变化范围分别为 6.94~8.53、49.03~53.07 和 5.79~7.74, 土壤 C:N 随着杉木年龄的增加表现出了先减少后增加的趋势, 土壤 C:P 和 N:P 则表现出了先增加后降低的趋势。土壤 C:P 和 N:P 随土层下降而减少, 而土壤 C:N 随着土层下降呈现出相对稳定的规律。

关键词: 杉木林; 龄组; 土壤养分; 化学计量特征

中图分类号: S714.2 **文献标识码:** A

生态化学计量学是研究生态系统各组分主要组成元素平衡关系和耦合关系的科学, 它最早应用于水生生态系统的植物个体生长、种群动态、群落演替等研究领域, 之后在森林、草原、湿地等陆地生态系统得到广泛应用^[1-2]。土壤碳、氮、磷等化学元素是土壤养分主要组成部分和植物生长的必备元素, 在循环过程中是相互作用和平衡制约关系, 仅考虑其本身的变异特征对了解土壤质量变异是不全面的, 还需了解它们之间的比例关系^[3-5]。因此, 用生态化学计量学的理论和方法研究土壤碳、氮、磷等元素的化学计量特征是十分必要的, 它为认识土壤碳、氮、磷等元素的循环和平衡机制提供了一种新思路^[6]。

杉木是我国南方栽植面积最广的造林树种, 其面积约占我国人工林总面积的 1/4 左右, 在我国木材供应和生态安全维护方面发挥着重要的作用。近年来, 不少学者围绕杉木林土壤有机碳和养分积累、微生物动态和土壤腐殖质的组成及性质等问题进行了系统的研究^[7-9], 但对杉木林土壤碳、氮、磷等元素生态

化学计量特征的研究却少见文献, 特别是对杉木林全周期生命过程中土壤碳、氮、磷元素生态化学计量特征的变化规律的研究尚未见报道, 本研究以金洞林场 5 个龄组杉木林为研究对象, 运用生态化学计量学的理论和方法, 分析不同龄组杉木林对土壤碳、氮、磷养分元素含量及其化学计量比的影响, 探讨土壤碳、氮、磷养分元素在杉木林土壤生态系统中的动态平衡过程, 进而为预测杉木林发育过程中土壤养分含量和判断土壤养分限制作用提供理论依据, 同时也为杉木林不同发育阶段制定科学的抚育经营措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

金洞林场位于湖南省永州市祁阳县南部金洞管理区, 地处 26°2'10" ~ 26°21'37"N, 110°53'43" ~ 112°13'37"E, 东靠常宁市, 南抵双牌、宁远、新田、桂阳县, 西临永州市零陵区, 北接祁阳县。东西宽约

基金项目: 湖南省自然科学基金面上项目(2018JJ2673)、林学重点学科开放基金项目(2016ZD06)、多功能森林经营湖南金洞林场样板基地作业法研究及示范项目(1692017-6)、湖南省教育厅项目(16C1668)、湖南省大学生研究性和创新性实验计划项目(湘教通〔2016〕283号)和中南林业科技大学人才引进项目(2016YJ075)资助。

作者简介: 曹小玉(1977—), 男, 甘肃灵台人, 博士, 副教授, 主要从事森林经理和森林生态方面的研究。E-mail: cxy7723@aliyun.com

33 km, 南北长约 36 km, 总面积 54 840.4 hm²。属中亚热带东南季风气候区, 年平均气温 18 ℃, 极端最高气温 40 ℃, 极端最低气温 -8 ℃, 年降水量 1 600 ~ 1 890 mm, 年蒸发量大约 1 225 mm。每年有效日照时间为 1 617 h, 全年无霜期 260 ~ 344 d, 相对湿度 75% ~ 82%。林区土壤以黄红壤和山地黄壤为主, 海拔 1 000 m 以上为山地黄棕壤, 丘陵地区以红壤为主, 土层厚度一般在 60 cm 以上。全场乔木林蓄积达 2.68 × 10⁶ m³, 其中杉木组的蓄积为 2.66 × 10⁶ m³, 占乔木林蓄积量的 99.2%。研究样地的杉木林都是人工纯林。

1.2 样地设置与土壤样品的采集

于 2016 年 8 月份, 在金洞林场内, 选择立地因子基本一致的杉木幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林、过熟林设置调查样地, 5 个龄组的杉木林分别设置 3 块 20 m × 30 m 的样地, 一共设置 15 块样地, 样地的基本情况见表 1。在每个样地利用 S 形 5 点取样分层(0 ~ 15、15 ~ 30、30 ~ 45、45 ~ 60 cm)采取土壤样品, 将同一土层的土壤样品除去杂质混合, 然后分层按四分法各取 1 kg 土样, 用于测定土壤有机碳、全氮、全磷。

表 1 样地基本情况
Table 1 Basic information of sampling plots

龄组	样地号	林龄(a)	株数密度(株/hm ²)	平均胸径(cm)	平均树高(m)	郁闭度	坡向	坡度(°)
幼龄林	1	7	2 398	6.9	5.8	0.7	北	19
	2	7	2 367	7.1	6.0	0.7	北	18
	3	7	2 412	6.8	5.9	0.7	北	20
中龄林	1	18	1 848	12.3	13.9	0.9	北	17
	2	18	1 792	13.5	14.5	0.9	北	18
	3	18	1 886	12.9	14.1	0.9	北	21
近熟林	1	23	1 412	16.8	15.7	0.8	北	18
	2	23	1 485	16.3	15.9	0.8	北	18
	3	23	1 516	17.1	16.2	0.8	北	20
成熟林	1	28	1 295	18.9	19.1	0.9	北	19
	2	28	1 236	19.2	20.1	0.9	北	18
	3	28	1 328	18.3	18.9	0.9	北	18
过熟林	1	40	1 068	28.5	22.6	0.9	北	20
	2	40	1 126	27.9	23.2	0.9	北	19
	3	40	1 053	28.3	24.1	0.9	北	19

1.3 土壤样品的测定

采集的土壤样品拿回实验室后, 放到通风、阴凉、干燥处自然风干, 过 0.149 mm 筛, 用于测定土壤有机碳、全氮、全磷含量。有机碳含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定; 全氮采用半微量凯氏法测定, 全磷采用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法测定。

1.4 数据处理分析

采用软件 Excel 2010 和 SPSS 19.0 进行数据分析和图表处理。

2 结果与分析

2.1 不同龄组杉木林土壤有机碳、全氮、全磷含量

从表 2 的统计结果看, 5 个龄组杉木林 0 ~ 60 cm 土壤有机碳、全氮、全磷的含量分别为 11.02 ~ 14.74、1.65 ~ 1.84、0.26 ~ 0.35 g/kg, 均值分别为 13.28、1.77、0.30 g/kg, 变异系数都为 0.4 左右。在杉木林从幼龄

林生长发育到过熟林的过程中, 土壤有机碳和全氮的含量随着杉木年龄的增长表现出了先减少后增加再减少的趋势。从幼龄林生长到中龄林阶段, 土壤有机碳和全氮分别减少了 22.34%、10.32%; 从中龄林生长到成熟林阶段, 土壤有机碳和全氮分别增加了 33.76%、10.91%; 从成熟林生长到过熟林阶段, 土壤有机碳和全氮分别减少了 7.39%、2.2%。而全磷表现出先减少后增加的趋势, 从幼龄林生长到中龄林阶段, 土壤全磷减少了 25.71%; 从中龄林生长到过熟林阶段, 土壤全磷增加了 23.07%。方差分析表明, 5 个龄组杉木林的土壤有机碳、全氮和全磷的含量差异不显著($P > 0.05$)。

2.2 不同龄组杉木林土壤有机碳、全氮、全磷剖面分布

从图 1 可以看出, 在杉木林生长发育的过程中, 杉木幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林土壤

表 2 0~60 cm 土壤有机碳、全氮、全磷含量(g/kg)

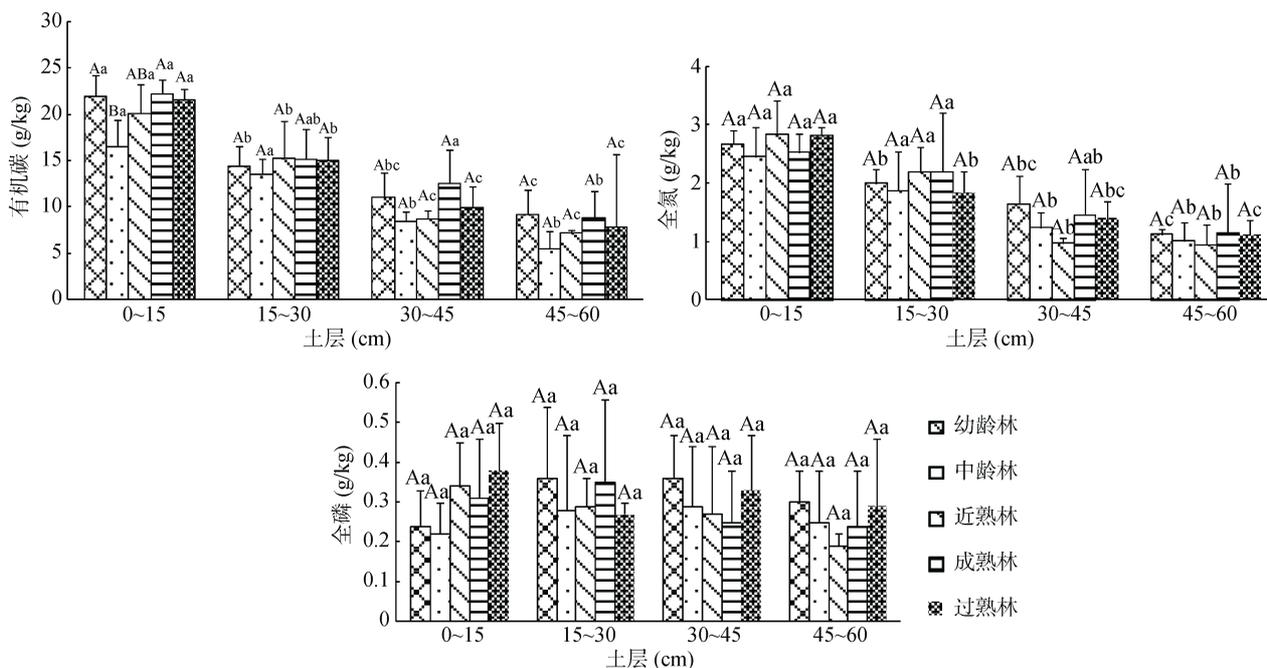
Table 2 Contents of soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorous in soils within 0~60 cm

土壤养分	幼龄林	中龄林	近熟林	成熟林	过熟林	均值	变异系数
有机碳	14.20 ± 5.50 a	11.02 ± 4.77 a	12.82 ± 5.86 a	14.74 ± 7.27 a	13.65 ± 5.80 a	13.28 ± 5.84	0.44
全氮	1.84 ± 0.62 a	1.65 ± 0.64 a	1.74 ± 0.91 a	1.83 ± 0.88 a	1.79 ± 0.71 a	1.77 ± 0.73	0.41
全磷	0.35 ± 0.14 a	0.26 ± 0.13 a	0.27 ± 0.11 a	0.29 ± 0.14 a	0.32 ± 0.12 a	0.30 ± 0.13	0.43

注：表中数据为平均值 ± 标准差，同一行数据小写字母相同表示不同龄组杉木林间差异不显著($P>0.05$)。

有机碳和全氮的含量都随着土层的加深而降低,在 0~60 cm 土层范围内,土壤有机碳下降幅度中龄林 > 近熟林 > 过熟林 > 成熟林 > 幼龄林,全氮下降幅度近熟林 > 过熟林 > 中龄林 > 幼龄林 > 成熟林。方差分析表明,对于有机碳含量,表现为幼龄林、近熟林和过熟林表层(0~15 cm)均显著高于其他土层($P<0.05$),中龄林表层显著高于 30~45 cm 和 45~60 cm 土层

($P<0.05$),成熟林表层显著高于 45~60 cm 土层($P<0.05$);对于全氮含量,表现为幼龄林和过熟林表层(0~15 cm)均显著高于其他 3 个土层($P<0.05$),中龄林、近熟林和成熟林表层均显著高于 30~45 cm 和 45~60 cm 土层($P<0.05$)。随着土层的加深,5 个龄组杉木林土壤全磷含量无明显的变化规律,且各层土壤全磷含量之间无显著性差异($P>0.05$)。



(图中大写字母不同表示同一土层不同龄组杉木林间差异显著($P<0.05$),小写字母不同表示相同龄组杉木林不同土层间差异显著($P<0.05$),下图同)

图 1 不同土层深度土壤的有机碳、全氮和全磷含量

Fig. 1 Contents of soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorous in soils in different depths

2.3 不同龄组杉木林土壤化学计量比特征

从表 3 的数据分析可知,5 个龄组杉木林 0~60 cm 土壤 C:N、C:P 和 N:P 变化范围分别为 6.94~8.53、49.03~53.07 和 5.79~7.74,均值分别为 7.85、51.17 和 6.44,变异系数分别为 0.25、0.55 和 0.52。从杉木林的发育过程看,杉木林土壤 C:N 随着杉木年龄的增加表现出了先减少后增加的规律,从幼龄林发育到中龄林减少了 10%,从中龄林发育到过熟林增加了 9.7%;土壤 C:P 和 N:P 则表现出了先增加后降

低的规律,土壤 C:P 和 N:P 从幼龄林发育到中龄林分别增加了 1.6% 和 33.7%,从中龄林发育到过熟林则分别降低了 4.5% 和 19.35%。方差分析表明 5 个龄组杉木林的土壤 C:P 和 N:P 不存在显著差异性($P>0.05$),而杉木中龄林与近熟林、中龄林与成熟林的土壤 C:N 存在显著差异性($P<0.05$)。

2.4 不同龄组杉木林土壤化学计量比剖面分布

由图 2 的数据分析可知,杉木幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林的土壤 C:P 和 N:P 都随着

表 3 0~60 cm 土壤 C:N、C:P 和 N:P
Table 3 Ratios of C:N, C:P and N:P in soils within 0~60 cm

化学计量比	幼龄林	中龄林	近熟林	成熟林	过熟林	均值	变异系数
C:N	7.71 ± 1.26 ab	6.94 ± 1.19 b	8.53 ± 3.35 a	8.48 ± 1.47 a	7.61 ± 1.23 ab	7.85 ± 1.95	0.25
C:P	51.50 ± 39.42 a	52.31 ± 36.76 a	49.03 ± 15.86 a	53.07 ± 25.50 a	49.93 ± 16.44 a	51.17 ± 27.99	0.55
N:P	5.79 ± 3.13 a	7.74 ± 4.99 a	6.25 ± 2.56 a	6.43 ± 3.31 a	6.00 ± 2.30 a	6.44 ± 3.35	0.52

注：表中数据为平均值 ± 标准差，同一行数据小写字母不同表示不同龄组杉木林间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平。

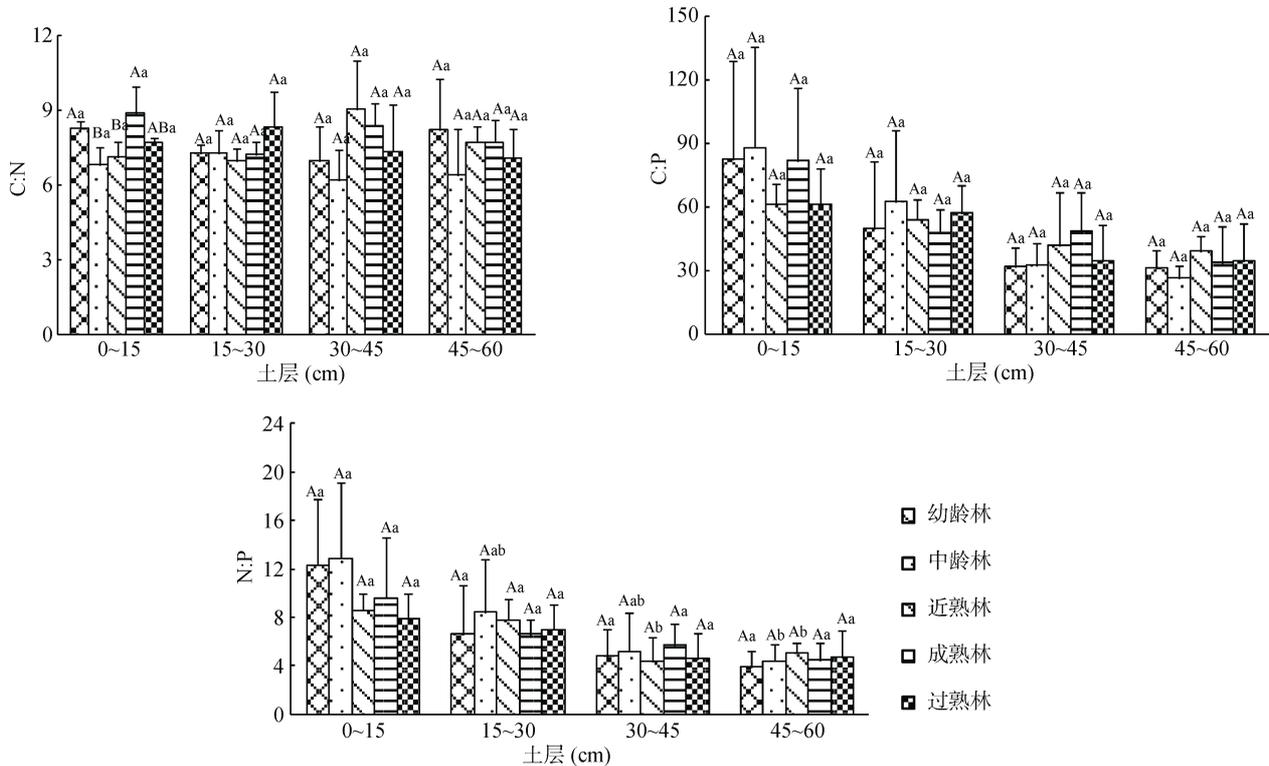


图 2 不同土层深度土壤 C:N、C:P 和 N:P
Fig. 2 Ratios of C:N, C:P and N:P in soils in different depths

土层加深而逐渐减小，C:P 下降幅度中龄林 > 幼龄林 > 成熟林 > 过熟林 > 近熟林，N:P 下降幅度幼龄林 > 中龄林 > 成熟林 > 过熟林 > 近熟林；而 5 个龄组杉木林土壤 C:N 随着土层加深保持相对稳定。方差分析表明同一龄组杉木林不同土层之间的 C:N 和 C:P 不存在显著差异性 ($P > 0.05$)；而 N:P 表现为中龄林 0~15 cm 土层和 45~60 cm 土层间，以及近熟林 0~15 cm 土层和 45~60 cm 土层与 30~45 cm 土层和 45~60 cm 土层间差异显著。同一土层不同龄组杉木林之间的 C:P 和 N:P 也不存在显著性差异 ($P > 0.05$)；但在 0~15 cm 土壤表层，杉木幼龄林与中龄林、中龄林与成熟林、成熟林与近熟林土壤 C:N 存在显著差异性 ($P < 0.05$)。

2.5 不同龄组杉木林土壤有机碳、全氮、全磷含量及其化学计量比之间的相关性

从表 4 可以得知，研究区杉木林土壤有机碳与土

壤全氮、全磷、C:N、C:P、N:P 均呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，土壤全氮与土壤全磷、C:N、C:P、N:P 均呈显著或极显著正相关，土壤 C:N 和 C:P，C:P 和 N:P 也呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。研究结果同时显

表 4 土壤有机碳、全氮、全磷含量及其化学计量比的相关性

	C	N	P	C:N	C:P	N:P
C	1					
N	0.844**	1				
P	0.455**	0.517**	1			
C:N	0.725**	0.264*	0.226	1		
C:P	0.854**	0.654**	-0.02	0.701**	1	
N:P	0.551**	0.675**	-0.25	0.113	0.777**	1

注：**表示相关性达到 $P < 0.01$ 显著水平，*表示相关性达到 $P < 0.05$ 显著水平。

示有机碳与 C:N、C:P 的相关性均大于土壤全氮与 C:N 和土壤全磷与 C:P 的相关性,说明 C:N 和 C:P 主要受控于土壤有机碳含量。N:P 与全氮的相关性显著大于其与全磷的相关性,说明 N:P 主要受控于土壤全氮含量。

3 讨论与结论

土壤碳、氮、磷等养分因子是影响土壤质量水平的重要因子,其含量和分布对植物的生长发育起着非常重要的作用^[10-11],本文通过对金洞林场 5 个龄组杉木林土壤有机碳、全磷和全氮含量研究发现,5 个龄组杉木林 0~60 cm 土壤有机碳、全氮、全磷的含量分别为 11.02~14.74、1.65~1.84、0.26~0.35 g/kg。从杉木林的发育过程看,土壤有机碳和全氮的含量随着杉木年龄的增长表现出了先减少后增加再减少的趋势,而全磷表现出先减少后增加的趋势。主要原因是随着杉木的生长,林分的郁闭度越来越大,导致林分凋落物量大于分解量,而进入速生阶段的杉木中龄林需要大量的养分,养分需求量大于归还量,促使林分土壤养分减少^[12],这与王丹等^[13]和盛炜彤等^[14]对杉木林土壤肥力随年龄变化规律的研究结果基本一致。这说明杉木发育到中龄林阶段是土壤养分相对较少的阶段,为了维持杉木林土壤养分水平,最迟要在林分发育到近熟林阶段,对林分进行适当的间伐,降低林分郁闭度,促进林分林地凋落物分解速度和土壤微生物活性以增加土壤养分归还量。

5 个龄组杉木林土壤有机碳和全氮的含量都表现为随土层变深而下降的规律,土壤有机碳下降幅度中龄林>近熟林>过熟林>成熟林>幼龄林,全氮下降幅度近熟林>过熟林>中龄林>幼龄林>成熟林;而土壤全磷含量随着土层下降没有明显的变化规律。这是因为土壤有机碳、全氮和全磷含量在土壤纵断面的分布规律是由其来源不同决定的。土壤中的动植物、微生物残体及植物根系分泌物等有机质是形成土壤有机碳的主要来源,累积于杉木林土壤表层的腐烂凋落物和死根分解物为土壤表层提供了大量有机质,因此,在杉木林更新抚育过程中尽量避免炼山行为和保护林下灌木和草本植被,以维持土壤表层肥力。而随着土层下降,变差的土壤环境质量限制了土壤微生物、动物生存,不利于杉木林分中植物根系生长发育,导致杉木林土壤有机质的来源减少和土壤生物固氮水平下降,从而使土壤有机碳和氮素含量逐渐减少。而土壤中磷含量受母质、气候、生物和土壤中的地球化学过程等一系列因素的影响,因此,随土层下降全

磷含量的变化规律不明显。

土壤有机碳、全氮、全磷等养分元素的循环过程是相互耦合、相互影响的,已有研究发现土壤 C:N、C:P 等存在一定的比例关系^[15-16]。土壤 C:N 是反映土壤氮素矿化能力和土壤碳、氮养分平衡状况的重要指标,比值较小时,有利于增强土壤微生物的分解能力,从而促进土壤有效氮增多;比值较高时,则由于存在氮受限,影响土壤微生物分解能力,从而促进有机碳的累积^[17-18]。5 个龄组杉木林土壤 C:N 变化范围为 6.94~8.53,均低于我国土壤 C:N 均值 11.9 和世界土壤 C:N 均值 13.33^[19]。说明研究区杉木林土壤微生物分解能力强,土壤有机质具有较快的矿化作用。土壤有机质的分解速度受到土壤磷的有效性影响,因此,土壤 C:P 可以作为土壤养分限制、碳磷饱和的诊断和有效预测指标。5 个龄组杉木林的 C:P 变化范围为 49.03~53.07,低于我国土壤 C:P 均值 61。较低的 C:P 是磷有效性高的一个指标,这有利于研究区杉木林土壤微生物有机磷净矿化,为杉木的生长发育供给了充足的磷酸盐。5 个龄组杉木林的 N:P 变化范围为 5.79~7.74,均值为 6.44,大于我国土壤 N:P 均值 5.2。这表明研究区杉木林土壤氮元素偏多,磷元素偏少,导致杉木林土壤磷素有效性不足以平衡氮素有效性,可以考虑在杉木林经营过程中,适当给林地施加氮肥以维持氮磷元素平衡。

5 个龄组杉木林土壤 C:P 和 N:P 都随土层下降而减少。而土壤 C:N 随着土层下降呈现出相对稳定的规律。究其原因是土壤有机碳与全氮之间存在极强的相关性^[20]。从杉木林的发育过程看,杉木林土壤 C:N 随着杉木年龄的增加表现出了先减少后增加的规律,但较 C:P 和 N:P 变异系数为最小,而土壤 C:P 和 N:P 表现出了先增加后降低的规律,说明栽植年限在一定程度上影响着杉木林土壤化学计量比。任璐璐等^[21]在研究黄土高原不同年龄刺槐林土壤化学计量特征时,也发现土壤 C:N 随着刺槐栽植年限的增加先降低后增加;白荣等^[22]在研究滇中高原植被演替过程中也发现土壤 C:P 和 N:P 先增加后降低。

对 5 个龄组杉木林土壤有机碳、全氮、全磷含量及其化学计量比之间的相关性研究得知,研究区杉木林土壤有机碳与 C:N、C:P 的相关性均大于土壤全氮与 C:N 和土壤全磷与 C:P 的相关性,说明 C:N 和 C:P 主要受控于土壤有机碳含量,这与曹娟等^[23]对湖南会同 3 个林龄杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征研究结果一致。

参考文献：

- [1] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2000, 3(6): 540–550
- [2] Griffiths B S, Spillies A, Bonkowski M. C:N:P stoichiometry and nutrient limitation of the soil microbial biomass in a grazed grassland site under experimental P limitation or excess[J]. *Ecological Processes*, 2012, 1: 1–11
- [3] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40: 523–534
- [4] 项文化, 黄志宏, 闫文德, 等. 森林生态系统碳氮循环功能耦合研究综述[J]. *生态学报*, 2006, 26(7): 2365–2372
- [5] Yang Y H, Fang J Y, Guo D L, et al. Vertical patterns of soil carbon, nitrogen and carbon:nitrogen stoichiometry in Tibetan grasslands[J]. *Biogeosciences Discussions*, 2010, 7(1): 1–24
- [6] McGroddy M E, Daufresne T, Hedin L O. Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide: Implications of terrestrial Redfield-type ratios[J]. *Ecology*, 2004, 85(9): 2390–2401
- [7] 宁晓波, 项文化, 王光军, 等. 湖南会同连作杉木林凋落物量 20 年动态特征[J]. *生态学报*, 2009, 29(9): 5122–5129
- [8] 杨玉盛, 邱仁辉, 俞新妥. 不同栽植代数 29 年生杉木林土壤腐殖质及结合形态的研究[J]. *林业科学*, 1999, 35(3): 116–119
- [9] 焦如珍, 杨承栋, 孙启武, 等. 杉木人工林不同发育阶段土壤微生物数量及其生物量的变化[J]. *林业科学*, 2005, 41(6): 163–165
- [10] 罗亚勇, 张宇, 张静辉, 等. 不同退化阶段高寒草甸土壤化学计量特征[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(2): 254–260
- [11] 张婷, 翁月, 姚凤娇, 等. 放牧强度对草甸植物小叶章及土壤化学计量比的影响[J]. *草业学报*, 2014, 23(2): 20–28
- [12] 张珂, 苏永中, 王婷, 等. 荒漠绿洲区不同种植年限人工梭梭林土壤化学计量特征[J]. *生态学报*, 2016, 36(11): 3235–3243
- [13] 王丹, 王兵, 戴伟, 等. 不同发育阶段杉木林土壤有机碳变化特征及影响因素[J]. *林业科学研究*, 2009, 22(5): 667–671
- [14] 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
- [15] Bowman W D. Accumulation and use of nitrogen and phosphorus following fertilization in two alpine tundra communities[J]. *Oikos*, 1994, 70(2): 261–270
- [16] 卢同平, 史正涛, 牛洁, 等. 我国陆生生态化学计量学应用研究进展与展望[J]. *土壤*, 2016, 48(1): 29–35
- [17] Ncufeldt H, Da Silva J, Ayarza M A, et al. Land-use effects on phosphorus fractions in Cerrado Oxisols[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 31(1): 30–37
- [18] 唐光木, 徐万里, 盛建东, 等. 新疆绿洲农田不同开垦年限土壤有机碳及不同粒径土壤颗粒有机碳变化[J]. *土壤学报*, 2010, 47(2): 279–285
- [19] 郭东艳. 退化草原的生态化学计量学研究——以吉林西部退化草地为例[D]. 长春: 吉林大学, 2013
- [20] Raven J A, Handley L L, Andrews M. Global aspects of C/N interactions determining plant–environment interactions[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2003, 55(394): 11–25
- [21] 任璐璐, 张炳学, 韩凤朋, 等. 黄土高原不同年限刺槐土壤化学计量特征分析[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 339–344
- [22] 白荣. 滇中高原典型植被演替进程中的生态化学计量比特征研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012
- [23] 曹娟, 闫文德, 项文化, 等. 湖南会同 3 个林龄杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. *林业科学*, 2015, 51(7): 1–8

Stoichiometric Characterization of Soil C, N, and P of Different Age-group Chinese Fir Plantations

CAO Xiaoyu¹, LI Jiping¹, YANG Jing¹, YAN Wende^{1,2}

(1 *College of Forestry, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, China*; 2 *National Engineering Laboratory for Applied Technology of Forestry & Ecology in South China, Changsha 410004, China*)

Abstract: To clarify soil stoichiometric characteristics of different age-group Chinese fir plantations, young, half mature, near mature, mature and over mature Chinese fir plantations with similar site condition were selected in Jindong forest farm of Hunan Province. Three sample plots of 20 m × 30 m were set up in each of these different age-group plantations and soil samples were collected from 0–15, 15–30, 30–45 and 45–60 cm depths, respectively, with S-shaped sampling method (5 sampling points) in each plot. The contents of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (N), total phosphorus (P) in depth of 0–60 cm were measured, then ratios of C:N, C:P and N:P were analyzed. Results showed that the contents of SOC, N and P ranged in 11.02–14.74, 1.65–1.84, 0.26–0.35 g/kg, respectively, in different age-group Chinese fir plantations. With the increasing age, the contents of SOC and N decreased first then increased and finally decreased, the content of P decreased first and then increased. The contents of SOC and N decreased with the increase of soil depth, and the decreasing degree of SOC varied in the order of half mature > near mature > over mature > mature > young, and that of N in the order of near mature > over mature > half mature > young > mature, but the content of P varied irregularly with the increase of soil depth. Ratios of C:N, C:P and N:P ranged in 6.94–8.53, 49.03–53.07 and 5.79–7.74, respectively, in different age-group Chinese fir plantations. C:N decreased first and then increased with the increasing age, but C:P and N:P changed oppositely. C:P and N:P decreased with the increase of soil depth, while soil C:N remained stable.

Key words: Chinese fir plantation; Age-group; Soil nutrient; Stoichiometric characteristics