

不同林龄马尾松人工林土壤碳氮磷 生态化学计量特征

雷丽群^{1,2}, 卢立华^{1,2}, 农友^{1,2}, 明安刚^{1,2*}, 刘士玲^{1,2}, 何远^{1,2}

(1. 中国林业科学研究院热带林业实验研究中心, 广西 凭祥 532600;
2. 广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站, 广西 凭祥 532600)

摘要: [目的] 研究了马尾松从幼龄林至成熟林生长序列中的土壤有机 C、全 N、全 P 含量及其生态化学计量特征, 以丰富该区域马尾松生态系统生态化学计量学领域的基础研究。[方法] 以广西凭祥 4 个林龄(6、16、23、35 a) 马尾松人工林为研究对象, 每个林龄选取 3 块林分, 每个林分内设置一个 400 m² 的调查样地, 按照 0~20、20~40、40~60 cm 三层土层取样, 采用不同林分土壤化学计量的对比实验测定土壤 CNP, 采用单因素方差分析的 LSD 法进行显著性检验。[结果] 表明: 4 个林龄马尾松人工林 0~20 cm 土壤有机 C、全 N、全 P 含量分别为 5.73~15.56、0.69~1.23、0.17~0.23 g·kg⁻¹, 是 20~40 cm 土层的 1.51、1.31、1.06 倍, 40~60 cm 土层的 1.97、1.58、1.06 倍。土壤有机 C 含量、全 N 含量均随林龄的递增先降低后增加, 随土层加深持续降低; 土壤全 P 含量在林龄和土层间均无显著性变化; 林龄对土壤 C:N、N:P 有极显著的影响($P=0.001$, $P=0.000$), 土层对土壤 C:P、N:P 有显著性影响($P=0.000$, $P=0.014$)。[结论] 土壤有机 C、全 N 含量从成熟林阶段开始回升; N 在不同林龄间和不同土层间的变化是土壤 N:P 变化的主要原因; 土壤 C:N、C:P 主要受有机 C 的影响。

关键词: 马尾松人工林; 林龄; 碳氮磷; 生态化学计量

中图分类号: S791.248

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2017)06-0954-07

Stoichiometry Characterization of Soil C, N and P of *Pinus massoniana* Plantations at Different Age Stages

LEI Li-qun^{1,2}, LU Li-hua^{1,2}, NONG You^{1,2}, MING An-gang^{1,2}, LIU Shi-ling^{1,2}, HE Yuan^{1,2}

(1. Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang 532600, Guangxi, China;

2. Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem Research Station, Pingxiang 532600, Guangxi, China)

Abstract: [Objective] To investigate the concentrations and stoichiometric ratio of soil organic C, total N and P in *Pinus massoniana* plantations from young to mature stages in order to enrich the basic research of *P. massoniana* ecosystem in stoichiometric field. [Method] Four *P. massoniana* plantations at different ages (6-, 16-, 23- and 35-year-old) in Pingxiang of Guangxi were selected as the research object, three plots in size of 400 m² were set up for each of the plantations. The soil samples were collected from 0-20, 20-40, 40-60 cm depths respectively for measuring organic C, total N and total P, the ratio among them was estimated. The LSD method was used to test the significance of single factor. [Result] The contents of soil organic C, total N and total P in 0-20 cm soil layer of *P. massoniana* plantation were 5.73-15.56 g·kg⁻¹, 0.69-1.23 g·kg⁻¹ and 0.17-0.33 g·kg⁻¹, which

收稿日期: 2017-02-22

基金项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费专项资金项目(CAFYBB2014QA033)、广西林业科技项目(桂林科学[2016]第37号)、中国林业科学研究院热带林业实验中心主任基金项目(RL2015-04)

作者简介: 雷丽群, 硕士, 助理工程师。主要研究方向: 森林生态学。电话: 13481104142, E-mail: 757467053@qq.com。地址: 532600, 广西凭祥市科园路8号

* 通讯作者: 明安刚, 在读博士, 高级工程师。主要研究方向: 森林生态学。E-mail: mingganggang0111@163.com

are 1.51, 1.31, and 1.06 times of that in 20 ~ 40 cm soil layer, and 1.97, 1.58, 1.06 times of that in 40 ~ 60 cm soil layer, respectively. The concentrations of soil organic C and total N increased at initial and then decreased as the stand age increased, while decreased with the increasing soil depth. No significant difference was found in the soil total P among different stand age and soil depth. Stand age have statistically significant effect on soil C:N and N:P ($P=0.001$, $P=0.000$), the soil layer has significant effect on soil C:P and N:P ($P=0.000$, $P=0.014$). [**Conclusion**] The contents of soil organic C and total N begin to pick up from the mature stage. The change of N among different stand age and soil depth is the key factor changing soil N:P ratio. The ratio of soil C:N and C:P is mainly affected by organic C.

Keywords: *Pinus massoniana* plantation; stand age; CNP; stoichiometry.

近10年,生态化学计量学为研究分子、细胞、有机体、种群、生态系统等不同尺度的生物能力平衡和多重化学元素平衡,以及元素平衡对生态交互作用的影响等提供了崭新视角^[1]。它着重于强调有机体的主要组成元素(特别是C、N、P)的比值关系,认为元素的比值对有机体的关键特征及其对资源种类和数量的需求均有决定性作用^[2]。土壤作为植物养分的主要来源,对植物的生长发育以及生态系统服务功能有着重要的调控作用^[3]。探讨森林生态系统土壤的生态化学计量特征,了解森林生态系统养分元素循环过程、养分限制性关系及其对全球气候变化的响应与反馈,对提升森林生态系统服务功能和森林可持续经营均有着重要的意义^[4-7]。

土壤CNP比是有机质或其他成分中的C素与N素、P素总质量的比值,是土壤有机质组成和质量程度的一个重要指标,反映了土壤内部CNP的循环特征^[8]。曹娟等^[9]研究了湖南会同3个林龄(7 a、17 a、25 a)杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)人工林的土壤C、N、P特征,发现随着造林时间增加,土壤有机C、全N、全P含量逐渐增加,土壤的C:N和C:P主要受土壤有机C影响。崔宁浩等^[10]对5 a、14 a、39 a三个林龄的马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)人工林的研究亦表明,土壤C、N、P含量随林龄增加而增加,马尾松人工林受N和P的共同限制,但林龄对N、P养分限制的影响并不显著。不同学者的研究结论各异,曾凡鹏等^[11]对辽东山区的落叶松(*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.)群落的研究则表明,土壤C、N、P含量随着林龄的增加而降低,地力呈逐渐衰退的趋势,C:N和C:P随林龄变化显著。可见,土壤C、N、P含量及生态化学计量比随林龄变化的趋势,以及养分元素间的限制性关系仍有相当大的不确定性,需要进一步的研究探讨。

马尾松是我国南方主要的造林用材树种,在林

业生产及森林生态系统中占有及其重要的地位,具有耐干旱、适应性强、速生、优质等特点^[12]。本文以位于凭祥市的中国林科院热带林业实验中心林区的4个林龄(6、16、23、35 a)马尾松人工林为研究对象,分析了马尾松从幼龄林至成熟林生长序列中的土壤有机C、全N、全P含量及其生态化学计量比格局,探讨养分元素随林龄的变化趋势及它们之间的制约关系,以丰富该区域马尾松生态系统生态化学计量学领域的基础研究。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西凭祥市中国林业科学研究院热带林业实验中心林区(106°50' E, 22°10' N),属南亚热带季风型气候区。据广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站气象观测数据,研究区年平均温度20.8~22.9℃,年降水量1400 mm左右,全年降雨量呈正态分布,7—8月份达至峰值,高达500~600 mm,雨热同季。土壤为花岗岩发育而成的山地红壤,土层厚度达100 cm以上,土壤pH均值为4.5左右,属酸性土。

选取成土母岩、地形地貌、土壤类型、海拔、坡度等立地条件较为一致的马尾松人工林(6、16、23、35 a)为研究对象,每个林龄选取3块林分,每个林分内设置面积400 m²的调查样地。4个林龄初植密度均为2940株·hm⁻²左右,造林后前3年均进行砍草抚育,不施肥,造林3年后不再进行抚育。造林第10 a左右进行第一次间伐,第20 a左右进行第二次间伐,第25 a左右进行第三次间伐。根据广西用材林林组划分标准^[13],将所选的4个林龄马尾松人工林划分为:幼龄林(6 a)、中龄林(16 a)、近熟林(23 a)、成熟林(35 a)。4个林龄马尾松样地的基本情况如下(见表1)。林下灌木主要有玉叶金花(*Mus-*

saenda pubescens Ait. f.)、酸藤子 (*Embelia laeta* (L.) Mez)、越南悬钩子 (*Rubus cochinchinensis* Tratt.)、红皮水锦树 (*Wendlandia tinctoria* (Roxb.) DC. *Subsp. intermedia* (How) W. C. Chen)、大沙叶

(*Pavetta arenosa* Lour.)等,草本主要有铁芒萁 (*Dicranopteris linearis* (Burm.) Underw.)、半边旗 (*Pteris semipinnata* L.)、金毛狗 (*Cibotium barometz* (L.) J. Sm.)、扇叶铁线蕨 (*Adiantum flabellulatum* L.)等。

表1 样地基本情况

Table 1 Basic situation of sample plots

样地号 Plot No.	林龄 Age/a	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Elevation/m	坡度 Slope gradient /°	平均胸径 Mean DBH/cm	平均树高 Mean height/m	密度 Density/ (株·hm ⁻²)	郁闭度 Canopy density
1	6	106°54'40.32"	22°02'16.19"	291	15	8.03	5.17	2 797	0.8
2	6	106°54'46.54"	22°03'33.53"	304	15	9.15	5.23	2 940	0.9
3	6	106°52'33.77"	22°03'45.64"	497	26	7.32	5.93	2 955	0.9
4	16	106°54'36.63"	22°01'27.51"	262	30	14.09	11.46	1 186	0.6
5	16	106°54'26.24"	22°01'34.78"	282	25	14.57	10.76	1 356	0.7
6	16	106°54'47.60"	22°01'35.10"	250	20	15.86	11.31	1 186	0.6
7	23	106°55'07.48"	22°03'39.45"	275	23	20.69	15.61	545	0.5
8	23	106°54'59.46"	22°03'44.53"	241	30	22.14	16.26	600	0.5
9	23	106°54'46.54"	22°03'33.53"	252	30	22.14	14.87	576	0.5
10	35	106°53'55.82"	22°02'50.14"	297	30	25.05	19.78	455	0.3
11	35	106°53'49.66"	22°02'41.16"	306	25	26.01	19.96	450	0.4
12	35	106°54'04.73"	22°02'48.28"	270	25	24.02	20.05	448	0.4

1.2 研究方法

1.2.1 土壤采集 2013年7—9月在每个调查样地内选择代表性地段,挖取一个1 m左右深的土壤剖面,按0~20、20~40、40~60 cm土层混合取样,取土500 g,带回实验室。自然风干后,磨细过0.15 mm孔径筛,用于测定土壤有机碳、全氮、全磷含量。

1.2.2 样品测定 土壤有机碳采用重铬酸钾-水合加热法测定^[7];土壤全氮采用凯氏定氮法测定^[9];土壤全磷采用钼锑抗比色法测定^[9]。为保证数据的有效性和准确性,每个样品重复测定3次,取其平均值做为最终数值。

1.3 数据处理

在Excel 2013中进行数据统计及绘图,在SPSS 16.0中进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和多重比较分析(LSD),采用Pearson进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同林龄马尾松人工林土壤C、N、P含量变化

由表2可知,4个林龄0~60 cm土壤有机C含量均值分别为10.60、5.76、4.39、4.91 g·kg⁻¹,表现为随林龄先降低后增加,6 a林分显著高于16 a林分,16 a林分显著高于23 a和35 a林分,23、35 a林分间无显著差异。4个林龄土壤有机C含量在0~20 cm土层为8.88 g·kg⁻¹,分别为20~40、40~60 cm土层的1.51、1.97倍,表现为随土层增加显著

降低。同一土层不同林龄,0~20 cm土层土壤有机C表现为23 a林分显著低于其它3个林分,分别为6、16、35 a的41.3%、75.3%、86.7%;20~40、40~60 cm土层土壤有机C均表现为23、35 a林分显著低于6 a和16 a林分,6 a林分显著高于16 a林分。同一林龄不同土层,6、16、23 a林分土壤有机C含量均表现为0~20 cm土层显著高于20~40 cm土层,20~40 cm土层显著高于40~60 cm土层;35 a林分0~20 cm土层有机C含量显著高于20~40、40~60 cm土层。

由表2可知,4个林龄0~60 cm土壤N含量均值分别为0.91、0.69、0.58、0.79 g·kg⁻¹,表现为随林龄先降低后增加,6、35 a林分显著高于16 a林分和23 a林分,16 a林分显著高于23 a林分。4个林龄土壤N含量在0~20 cm土层是0.93 g·kg⁻¹,分别为20~40、40~60 cm土层的1.31、1.58倍,表现为随土层增加显著降低。同一土层不同林龄,0~20 cm土层土壤N含量表现为16、35 a林分显著高于23 a林分,显著低于6 a林分;20~40 cm土层土壤N含量表现为16、23 a林分显著低于6 a林分和35 a林分,6 a林分显著高于35 a林分;40~60 cm土层土壤N含量表现为16、23 a林分显著低于6 a林分和35 a林分,其余无显著差异。同一林龄不同土层,6、16、35 a林分土壤N含量均表现为0~20 cm土层显著高于20~40 cm土层,20~40 cm土层显著高于40~60 cm土层;23 a林分土壤N含量表

现为0~20、20~40 cm 土层显著高于40~60 cm 土层。

由表2可知,4个林龄0~60 cm 土壤P含量均值分别为0.21、0.17、0.17、0.17 g·kg⁻¹,表现为6 a略高于其它3个林龄林分,但无显著差异。4个林

龄土壤P含量在0~20 cm 土层是0.19 g·kg⁻¹,分别为20~40、40~60 cm 土层的1.01、1.01倍,土壤P含量随土层变化不显著。同一土层不同林龄或同一林龄不同土层间土壤全P含量均无显著性差异。

表2 不同林龄马尾松人工林土壤C、N、P含量变化特征

Table 2 Concentrations of soil organic C, total N and total P of the various soil layers at different aged stages *Pinus massoniana* plantations

元素 Element	林龄 Age/a	土层 Soil layer				Mean
		0~20cm	20~40cm	40~60cm		
TOC	6	15.56 ± 1.20Aa	9.56 ± 0.50Ab	6.69 ± 0.53Ac	10.60 ± 1.01A	
	16	7.61 ± 0.42Ba	5.54 ± 0.38Bb	4.14 ± 0.29Bc	5.76 ± 0.60B	
	23	5.73 ± 0.24Ca	4.10 ± 0.35Cb	3.33 ± 0.18Cc	4.39 ± 0.50C	
	35	6.61 ± 0.28Da	4.29 ± 0.21Cb	3.84 ± 0.57Cb	4.91 ± 0.56C	
	Mean	8.88 ± 0.59a	5.87 ± 0.57b	4.50 ± 0.61c		
TN	6	1.23 ± 0.07Aa	0.83 ± 0.04Ab	0.68 ± 0.14Ac	0.91 ± 0.15A	
	16	0.89 ± 0.10Ba	0.65 ± 0.10Cb	0.53 ± 0.07Bc	0.69 ± 0.07B	
	23	0.69 ± 0.14Ca	0.59 ± 0.03Ca	0.47 ± 0.03Bb	0.58 ± 0.05C	
	35	0.91 ± 0.05Ba	0.78 ± 0.01Bb	0.68 ± 0.03Ac	0.79 ± 0.04A	
	Mean	0.93 ± 0.09a	0.71 ± 0.06b	0.59 ± 0.06c		
TP	6	0.23 ± 0.05Aa	0.21 ± 0.04Aa	0.18 ± 0.02Aa	0.21 ± 0.04A	
	16	0.17 ± 0.01Aa	0.17 ± 0.02Aa	0.18 ± 0.01Aa	0.17 ± 0.01A	
	23	0.17 ± 0.03Aa	0.17 ± 0.03Aa	0.17 ± 0.03Aa	0.17 ± 0.01A	
	35	0.17 ± 0.02Aa	0.18 ± 0.02Aa	0.17 ± 0.02Aa	0.17 ± 0.01A	
	Mean	0.19 ± 0.02a	0.18 ± 0.02a	0.18 ± 0.01a		

同元素同行不同小写字母表示该元素在不同土层中差异显著($P < 0.05$),同元素同列不同大写字母表示该元素在不同林龄间差异显著($P < 0.05$)。

Different lowercase alphabets in the same line indicate the element has significant difference in different soil layers($P < 0.05$), different capital alphabets in the same column indicate the element has significant difference among different ages($P < 0.05$).

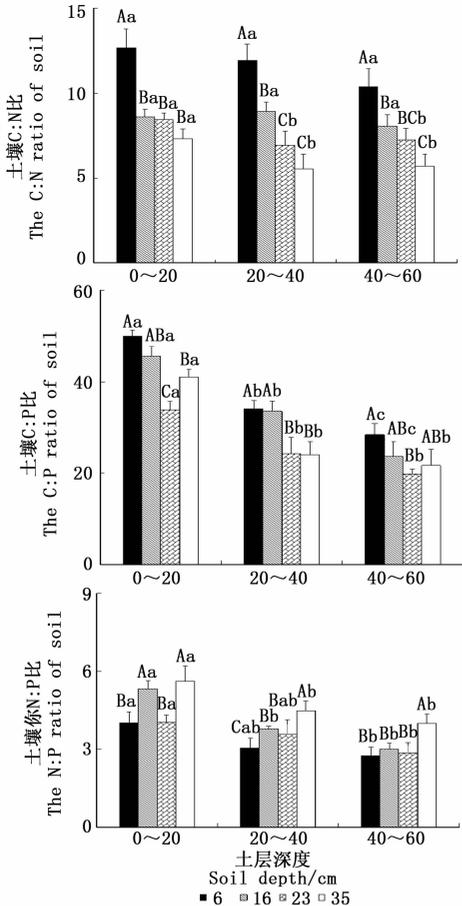
2.2 不同林龄马尾松人工林土壤C、N、P的化学计量特征

由图1可知,4个林龄马尾松人工林0~60 cm 土层土壤C:N为5.54~12.67,随林龄增加逐渐降低。单因素方差分析表明,林龄对土壤C:N有极显著的影响($P = 0.001$),土层对土壤C:N无显著性影响($P = 0.562$)。多重比较表明,0~20 cm 土层土壤C:N表现为6 a林分显著高于其它3个林分,20~40 cm 土层土壤C:N表现为23、35 a林分显著低于6 a和16 a林分,6 a林分显著高于16 a林分,40~60 cm 土层土壤C:N表现为6 a林最大,16 a林分次之,35 a林分最小,23 a林分与16、35 a均无显著差异。就同一林龄不同土层而言,6、16 a各土层间土壤C:N无显著差异,23、35 a林分均表现为0~20 cm 土层显著高于20~40、40~60 cm 土层。

由图1可知,4个林龄马尾松人工林0~60 cm 土层土壤C:P为19.75~49.91,随林龄增加逐渐降低,至成熟林略有提高。单因素方差分析表明,林龄对土壤C:P无显著性影响($P = 0.132$),土层对土壤

C:P有极显著性影响($P = 0.000$)。多重比较表明,0~20 cm 土层土壤C:P表现为6 a林分显著高于23、35 a林分,与16 a林分无显著差异,20~40 cm 土层土壤C:P表现为6、16 a林显著高于23 a和35 a林分,40~60 cm 土层土壤C:P表现为6、16 a林显著高于23 a,与35 a林分无显著差异。就同一林龄不同土层而言,6、16 a林分土壤C:P均表现为0~20 cm 土层显著高于20~40 cm 土层,20~40 cm 显著高于40~60 cm 土层,23、35 a林分土壤C:P均表现为0~20 cm 土层显著高于20~40、40~60 cm 土层。

由图1可知,4个林龄马尾松人工林0~60 cm 土层土壤N:P为2.85~5.61,随林龄增加呈“N”字形变化。单因素方差分析表明,林龄、土层对土壤N:P均有显著性影响($P = 0.014$, $P = 0.000$)。多重比较表明,0~20 cm 土层土壤N:P表现为16、35 a林分显著高于6、23 a林分,20~40 cm 土层土壤N:P表现为16、23 a林分显著高于6 a林分,显著低于35 a林分,40~60 cm 土层土壤N:P表现为35 a显著高于其它3个林分。



同一图组不同大写字母表示该土层元素计量比在不同林龄间差异显著 ($P < 0.05$), 同一图例不同小写字母表示该林龄不同土层间元素计量比差异显著 ($P < 0.05$)。

图1 4个林龄马尾松人工林各土层土壤C:N、C:P、N:P的变化特征
Fig. 1 Changes of soil C:N, C:P, N:P of the various soil layers in the four aged *Pinus massoniana* plantations

2.3 不同林龄马尾松人工林土壤C、N、P含量及化学计量比的相关性

由表3相关性分析结果表明,土壤C:N与有机C含量有极显著的相关性,与全N含量相关性不显著,土壤C:P与有机C含量有极显著相关性,与全P含量相关性不显著,说明研究区马尾松人工林土壤C:N、土壤C:P主要受有机C的影响。土壤N:P与全N含量呈现极显著的相关性,与有全P含量相关性不显著。

表3 马尾松人工林土壤C、N、P含量及化学计量比的相关性
Table 3 Correlation of soil C, N, P content and their stoichiometry in *Pinus massoniana* plantations

项目 Item	C	N	P	C:N	C:P	N:P
C	1	0.799**	0.826**	0.686**	0.734**	0.071
N		1	0.740**	0.142	0.520**	0.453**
P			1	0.454**	0.266	-0.246
C:N				1	0.661**	-0.343*
C:P					1	0.440**
N:P						1

3 讨论

本研究结果表明,马尾松人工林土壤有机C、全N含量随林龄增加逐渐降低,至成熟林有所回升,但仍低于幼龄林或中龄林,这与一些学者的研究结论不同。崔宁浩等^[10]对马尾松人工林(5、14、39 a)的研究以及吴明等^[14]对杉木人工林(10、20、30 a)的研究均表明,土壤有机C和全N含量随林龄的增大而增加。杨会侠等^[15]对7、17、31、51 a 4个林龄的马尾松人工林发育过程中的养分动态格局进行了研究,认为幼龄林阶段林分主要在于构建树冠,净生产力较低,加之林分密度大,凋落物丰富,土壤养分高归还、高吸收、周转时间最短,养分消耗相对较小,土壤中仍然保留着较高的养分含量;中林龄至近成熟林阶段,林分净生产力大幅度提高,生物量大量积累,而进一步的间伐使得林分密度减小,凋落物量归还量下降,土壤养分处于高吸收或低归还,林地养分极度被消耗,17 a 生林分是耗费地力最大的年龄阶段;成熟林阶段,由于林木生长速度下降,树木稀疏,凋落物归还有限,对土壤养分处于低吸收、低归还状态,土壤养分消耗相对较小,有利于林地土壤养分的积累。本研究支持此论点,虽然马尾松人工林土壤养分在成熟林阶段有所回升,但由于中龄林-近熟林的茂盛生长期对土壤养分的大量消耗,马尾松人工林地力仍有不断衰退的趋势,其中16 a 生中龄林土壤肥力消耗最大。不同林龄马尾松林下环境存差异,直接影响地被植物的生存与定居,进而对土壤养分能力及土壤基质的稳定性产生影响^[16]。从幼龄林至中龄林,林分保持较高的郁闭度和林分密度,为林下耐阴性物种的入侵和定居创造了条件,物种间长期处于竞争状态,土壤养分被激烈的争夺以满足众多物种的生存与发展,不利于土壤养分的积累。自近熟林后,林分郁闭度大幅度下滑,许多耐阴性林下植被由于适应不了强光环境而自行退出,只有少许找到适合自己生态位的耐阴性物种和喜光植被被保留下来,从而形成了稳定的植被群落,有利于成熟林阶段土壤养分的回归。从土层变化上来看,马尾松人工林土壤有机C、全N含量随土层增加逐渐降低,这符合以往的研究结论^[17-20]。土壤C、N主要来源于凋落物的归还,首先在表层富集,之后经淋溶向下迁移扩散,因此,在土层上表现为“倒金字塔”的变化特征。4个林龄土壤全P含量在年龄和土层间均无显著性差异,数值在 $0.17 \sim 0.28 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之

间,普遍低于其他研究区,且非常稳定。主要原因有两点:首先土壤P素的主要获得方式是岩石风化,而岩石风化需要漫长的时间才能完成,且在0~60 cm土层中的变化非常有限^[21-22],其次研究区处于低纬度的南亚热带,土壤全P含量本身偏低^[23-24]。从研究区土壤P素特征来看,该地区植被生长过程可能受到P的限制。

土壤C:N:P是土壤有机质组成和质量程度的一个重要指标,可用于判定土壤C、N、P的矿化作用和固持作用^[8]。研究区4个林龄马尾松人工林土壤C:N:P分别为37:3:1、34:4:1、26:3:1、29:5:1,低于我国土壤C:N:P均值60:5:1。C:N是衡量土壤C、N营养平衡状况的指标,较低的C:N比表明土壤有机质具有更快的矿化速率^[25]。Bengtsson等^[26]指出,当土壤C:N比值较高时,微生物需要输入N素来满足自身的生长需要,当土壤C:N比值较低时,超过微生物生长所需要的N素就会被释放到土壤中。研究区4个林龄马尾松人工林土壤C:N平均值为8.48,低于我国土壤C:N平均值11.9,表现为6a幼龄林(11.66) > 16a中龄林(8.53) > 23a近熟林(7.54) > 35a成熟林(6.18),不同林龄土壤C:N时间差异显著,可能原因是由于随着树木年龄的累积,原来土壤中丰富的C、N等结构性养分被大量消耗,造成土壤C:N持续性降低。

土壤C:P是衡量微生物矿化土壤有机物质释放P或从环境中吸收固持P素潜力的一个指标,较低的C:P比是土壤P有效性高的一个指标^[8-9,27]。贾宇等^[28]指出,当土壤C:P > 200时,微生物C素大幅度增加,竞争土壤中的速效磷,P素发生净固持作用,当土壤C:P < 200时,会出现土壤微生物的C素短暂性增加,P素发生净矿化作用。研究区4个林龄马尾松人工林土壤C:P均值为31.66,小于200更低于我国土壤C:P平均值105,表现为6a幼龄林(37.47) > 16a中龄林(34.31) > 35a成熟林(28.93) > 23a近熟林(25.97),林龄对土壤C:P无显著性影响,说明随着林龄的增加,土壤中可利用性P素仍然非常有限。

土壤N:P可用作N养分限制、饱和的诊断指标,指示植物生长过程中土壤营养成分的供应情况^[8-9]。研究区4个林龄马尾松人工林土壤N:P均值为3.87,低于全国土壤N:P平均值5.20,表现为35a成熟林(4.69) > 16a中龄林(4.04) > 23a近熟林(3.49) > 6a幼龄林(3.27)。林龄、土层对土

壤N:P均有显著性影响,但4个林龄马尾松人工林土壤P素含量偏低且非常稳定,相关性结果亦表明土壤N:P与全N含量呈现极显著的相关性,与全P含量相关性不显著,说明N在不同林龄间和不同土层间的变化是土壤N:P变化的主要原因。N的变化跟N的来源密切相关,主要有以下三个途径:(1)凋落物归还。植物有机组织中的氮通过凋落物归还到土壤中,受凋落量和分解速率的共同影响。卢立华等^[29]在同纬度地带对人工林凋落物的研究表明,马尾松人工林(18 a, 900株·hm⁻²)年凋落物量高达5 580.07 kg·hm⁻²,而杨会侠等^[30]发现马尾松人工林幼龄林至成熟林凋落物N素年归还量分别为40.03、34.60、29.43、34.17 kg·hm⁻²,表现为从7年生林分降低至31年生林分,到51年生时又有所增加,与本文全N含量在林龄间的变化规律一致。(2)生物固氮。即依靠自生和共生的固氮菌将气态氮固定为含氮有机化合物,再通过微生物及共生植物,直接或间接进入土壤。(3)大气降水。大气中的气态氮经降水淋溶,部分被森林的林冠层截留,最后随径流进入土壤中,成为土壤氮的经常性来源之一。不同地域、不同林型导致土壤最后实际接收到的氮含量有所差异。周光益等^[31]对酸雨区的21、40a马尾松冠层淋溶规律的研究发现,两者穿透雨硝态氮年沉积量分别为33.90、32.37 kg·hm⁻²,周国逸等^[32]在鼎湖山的研究甚至表明,降水氮沉降量已远超出植物生长所需要的氮含量(5~8 kg·hm⁻²)。据广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站数据,研究区6个月(2016年7月—2016年12月)铵态氮、硝态氮的沉降量分别为2.22、13.61 kg·hm⁻²,支持同在亚热带地区鼎湖山的研究结论。此外,研究区雨热同期,高温高湿的气候环境,再加上酸性土壤,沉降至土壤中的氮会发生硝化和反硝化过程,致使土壤中的氮以氧化二氮的形式被释放到空气中^[34]。这也是研究区土壤C:N、N:P比随林龄变化异于其他研究区的原因之一。大量研究表明,植物体内的C:N:P能明确植物群落生长过程中受到哪种元素的限制作用^[21],本研究对植物的C、N、P含量尚未涉足,只能对现象做描述性分析,是本研究的不足,今后应该开展土壤与植物C、N、P化学计量特征及林下植被多样性的相关研究。

4 结论

(1)土壤有机C、全N含量从成熟林阶段开始回

升。

(2) N 在不同林龄间和不同土层间的变化是土壤 N:P 变化的主要原因。

(3) 有机 C 是影响土壤 C:N、C:P 的重要因素。

参考文献:

- [1] 程滨, 赵永军, 张文广, 等. 生态化学计量学研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(6):1628-1637.
- [2] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索[J]. 植物生态学报, 2005, 29(6):1007-1019.
- [3] 喻林华, 方晰, 项文化, 等. 亚热带 4 种林分类型枯落物层和土壤层的碳氮磷化学计量特征[J]. 林业科学, 2016, 52(10): 10-21.
- [4] 赵亚芳, 徐福利, 王渭玲, 等. 华北落叶松根茎叶碳氮磷含量及其化学计量学特征的季节变化[J]. 植物学报, 2014, 49(5): 560-568.
- [5] Cao Y, Chen Y. Ecosystem C:N:P stoichiometry and carbon storage in plantations and a secondary forest on the Loess Plateau, China [J]. Ecological Engineering, 2017, 105:125-132.
- [6] Jing A N. Effect of Forest and Farm on Vertical Patterns of Soil Carbon, Nitrogen and Other Parameters in Northeast China[J]. Bulletin of Botanical Research, 2012, 32(3):331-338.
- [7] 牛瑞龙, 高星, 徐福利, 等. 秦岭中幼林龄华北落叶松针叶与土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7384-7392.
- [8] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8):3937-3947.
- [9] 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.
- [10] 崔宁洁, 刘小兵, 张丹桔, 等. 不同林龄马尾松 (*Pinus massoniana*) 人工林碳氮磷分配格局及化学计量特征[J]. 生态环境学报, 2014, 23(2):188-195.
- [11] 曾凡鹏, 迟光宇, 陈欣, 等. 辽东山区不同林龄落叶松人工林土壤-根系 C:N:P 生态化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2016, 35(8):1819-1825.
- [12] 周政贤. 中国马尾松[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001:53-60.
- [13] 韩畅, 宋敏, 杜虎, 等. 广西不同林龄杉木、马尾松人工林根系生物量及碳储量特征[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2282-2289.
- [14] 吴明, 邵学新, 周纯亮, 等. 中亚热带典型人工林土壤质量演变及其环境意义[J]. 生态学杂志, 2009, 28(9):1813-1817.
- [15] 杨会侠, 汪思龙, 范冰, 等. 马尾松人工林发育过程中的养分动态[J]. 应用生态学报, 2010, 21(8):1907-1914.
- [16] 崔宁洁, 张丹桔, 刘洋, 等. 不同林龄马尾松人工林林下植物多样性与土壤理化性质[J]. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2610-2617.
- [17] 王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 等. 河口湿地植物活体-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7119-7124.
- [18] Maisto G, De Marco A, Meola A, et al. Nutrient dynamics in litter mixtures of four Mediterranean maquis species decomposing in situ [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(3): 520-530.
- [19] 苗娟, 周传艳, 李世杰, 等. 不同林龄云南松林土壤有机碳和全氮积累特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3):625-631.
- [20] 秦娟, 唐心红, 杨雪梅. 马尾松不同林型对土壤理化性质的影响[J]. 生态环境学报, 2013, (4):598-604.
- [21] 胡耀升, 么旭阳, 刘艳红. 长白山森林不同演替阶段植物与土壤氮磷的化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3):632-638.
- [22] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 等. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1):64-71.
- [23] Zhang C, Tian H Q, Liu J Y, et al. Pools and distributions of soil phosphorus in China[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19(1): 347-354.
- [24] Kellogg L E, Bridgman S D. Phosphorus retention and movement across an ombrotrophic-minerotrophic peatland gradient[J]. Biogeochemistry, 2003, 63(3): 299-315.
- [25] Majda H, Ohrvik J. Interactive effects of soil warming and fertilization on root production, mortality in Norway spruce stand in Northern Sweden [J]. Global Change Biology, 2004, 10(2): 182-188.
- [26] Bengtsson G, Bengtson P, Mansson K F. Gross nitrogen mineralization-, immobilization-, and nitrification rates as a function of soil C/N ratio and microbial activity[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(1): 143-154.
- [27] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 等. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6581-6590.
- [28] 贾宇, 徐炳成, 李凤民, 等. 半干旱黄土丘陵区苜蓿人工草地土壤磷素有效性及对生产力的响应[J]. 生态学报, 2007, 27(1):42-47.
- [29] 卢立华, 贾宏炎, 何日明, 等. 南亚热带 6 种人工林凋落物的初步研究[J]. 林业科学研究, 2008, 21(3):346-352.
- [30] 杨会侠, 汪思龙, 范冰, 等. 不同林龄马尾松人工林年凋落量与养分归还动态[J]. 生态学杂志, 2010, 29(12):2334-2340.
- [31] 周光益, 徐义刚, 吴仲民, 等. 广州市酸雨对不同森林冠层淋溶规律的研究[J]. 林业科学研究, 2000, 13(6):598-607.
- [32] 周国逸, 闫俊华. 鼎湖山区域大气降水特征和物质元素输入对森林生态系统存在和发育的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(12):2002-2012.
- [33] 张捷, 刘洋, 张健, 等. 马尾松人工林林冠层对氮、磷、硫的截留效应[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4):37-43.
- [34] 方运霆, 莫江明, Per Gundersen, 等. 森林土壤氮素转换及其对氮沉降的响应[J]. 生态学报, 2004, 24(07):1523-1531.

(责任编辑: 崔 贝)