

## ◆ 生物科学 ◆

广西不同林龄和区域马尾松人工林的土壤 C、N、P 化学计量特征<sup>\*</sup>刘平<sup>1</sup>, 李鹏<sup>2</sup>, 杨章旗<sup>2\*\*</sup>, 颜培栋<sup>2</sup>, 唐生森<sup>2</sup>, 吴东山<sup>2</sup>

(1. 广西师范大学生命科学学院, 广西桂林 541006; 2. 广西壮族自治区林业科学研究院, 广西优良用材林资源培育重点实验室, 广西南宁 530002)

**摘要:**为探明广西马尾松 *Pinus massoniana* 人工林土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)化学计量特征, 揭示马尾松人工林土壤养分平衡机理及其时空动态变化, 为马尾松人工林可持续经营提供理论依据, 研究以广西4个典型区域马尾松人工林为对象, 采用空间代替时间的方法, 比较不同区域各林龄土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)含量及其化学计量比的变化规律。结果表明: SOC、TN和C/N的变异系数较小, 分别为21%、27%和22%, 属弱变异, 在不同林龄和区域中其值比较稳定。林龄、区域及其交互作用对SOC、TN、TP、C/P、N/P的变化均有显著影响( $P < 0.05$ )。SOC、TN含量呈波动性变化, 在成熟林阶段最低; SOC含量在幼龄林阶段最高, TN含量在近熟林阶段最高。土壤TP含量在中龄林阶段最低, 且随林龄增加呈先减少后增加的趋势。土壤C/N、C/P、N/P平均值均在成熟林中最高, 且显著高于近熟林和过熟林( $P < 0.05$ ); 土壤C/P、N/P平均值随林龄增加呈先减少后增加再减少的趋势。华山地区SOC、TN和TP含量最低, 而土壤C/N、C/P、N/P平均值最高。天洪岭地区土壤C/N平均值最低, 镇龙地区土壤C/P、N/P平均值最低。相关性分析表明, 土壤C/N与TN含量显著负相关; 土壤C/P与TN、TP含量均呈显著负相关关系; 土壤N/P与SOC、TP含量均呈显著负相关关系, 与C/P显著正相关。总体来说, 广西马尾松人工林主要受到P限制, 且在速生阶段比较明显。为保证马尾松人工林发育, 在马尾松速生阶段可适当施加P肥。

**关键词:** 马尾松人工林 土壤化学计量特征 不同林龄 区域 相关性

中图分类号: S714.5 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2022)01-0192-09

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20220314.002

土壤养分对植物生长有至关重要的作用, 并直接影响植物群落的组成、结构以及生产力水平<sup>[1]</sup>。土壤

养分中碳(C)、氮(N)、磷(P)含量的变化可能改变生态系统中各组分C、N、P的化学计量特征, 进而影响

收稿日期: 2021-08-09

\* 广西八桂学者专项(2019A026), 广西创新驱动专项(桂科AA17204087-4)和“十三五”国家重点研发计划项目(2017YFD060030202, 2017YFD0601201)资助。

【作者简介】

刘平(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事森林生态学研究。

【\*\*通信作者】

杨章旗(1964-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事林木遗传育种研究, E-mail: Yangzhangqi@163.com。

【引用本文】

刘平, 李鹏, 杨章旗, 等. 广西不同林龄和区域马尾松人工林的土壤C、N、P化学计量特征[J]. 广西科学, 2022, 29(1): 192-200.

LIU P, LI P, YANG Z Q, et al. Stoichiometric Characteristics of Soil C, N and P in *Pinus massoniana* Plantations of Different Ages and Regions in Guangxi [J]. Guangxi Sciences, 2022, 29(1): 192-200.

生态系统的结构和功能<sup>[2]</sup>。土壤C、N、P的比值既能反映土壤肥力大小,又能体现植物营养状况<sup>[3]</sup>,是探索土壤C、N、P元素循环及平衡特征的重要指标<sup>[4]</sup>。

在森林生态系统中,林龄和区域均对土壤C、N、P化学计量特征有显著影响<sup>[5,6]</sup>。崔宁洁等<sup>[7]</sup>对不同林龄(5 a、14 a、39 a)马尾松 *Pinus massoniana* 人工林C、N、P分配格局及化学计量特征的研究表明,土壤C、N、P含量在成熟林中最高,随林龄增加马尾松对N、P的利用效率降低,土壤C/N与C/P均表现为下降趋势。雷丽群等<sup>[8]</sup>对广西不同林龄(6 a、16 a、23 a和35 a)马尾松天然林进行研究发现,林龄的增加对土壤P含量影响不显著,而对土壤C/N、N/P均有极显著的影响。另外,Zhao等<sup>[9]</sup>发现土壤C、N、P化学计量比存在空间变异性,在陆地生态系统中土壤碳、氮、磷主要受区域气候的影响。在较温暖和湿润的条件下,C、N、P的输入和输出在生物化学过程中表现得更为活跃<sup>[10]</sup>。可见,土壤C、N、P化学计量特征受很多因素影响,且变化趋势多样<sup>[11]</sup>。因此,在不同区域和林龄条件下开展土壤C、N、P化学计量特征研究具有重要的意义。

马尾松是我国南方主要用材树种之一,具有速生、丰产、产脂量高等特点,已成为我国南方造林的先锋树种<sup>[12]</sup>。但是近年来,大面积的人工林都以纯林进行抚育管理,林分层次结构单一,对土壤元素需求相对单一,导致地力衰退<sup>[13,14]</sup>。目前,国内有很多学者对马尾松人工林土壤进行研究<sup>[15,16]</sup>,对人工林经营起到一定的指导作用。然而,这些研究多针对特定的林龄或者部分林龄,且采样点地域尺度跨度小,区域相对单一,所得结论有一定的片面性<sup>[14]</sup>。基于此,本研究以广西4个典型区域5 a、15 a、23 a、30 a、40 a和63 a生6种不同林龄的马尾松人工林为研究对象,分析马尾松人工林土壤C、N、P含量及其生态化学计量比在林龄和区域间的动态变化特征,以期为马尾松人工林土壤管理提供数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验区位于广西南部的宁明县派阳山林场、中部的横州市镇龙林场、东部的苍梧县天洪岭林场和北部的环江县华山林场(106°30′ - 111°16′ E, 21°15′ - 25°31′ N),以派阳山地区、镇龙地区、天洪岭地区、华

山地区表示。试验区属北热带和亚热带季风气候,阳光充足,雨热同期,年均降雨量1465.45 mm,年均气温21.05℃,最低气温-1℃,最高气温40.5℃,以低山丘陵地貌为主。试验林土壤以红壤、赤红壤为主,海拔250-550 m,坡度在22°左右,坡向以阳坡和半阳坡为主,林下灌木主要有越南悬钩子 *Rubus cochinchinensis*、山乌柏 *Sapium discolor*、酸藤子 *Embelia laeta*、玉叶金花 *Mussaenda pubescens*、鲫鱼胆 *Maesa perlaris* 等,草本主要有铁芒萁 *Dicranopteris linearis*、金毛狗 *Cibotium barometz*、半边旗 *Pteris semipinnata* 和五节芒 *Miscanthus floridulus* 等。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 样地设置

在每个区域,采用空间代替时间的方法选择坡度、坡向、海拔、土壤和地形等立地因子相同或相似的6种林龄的马尾松人工林,分别为5 a(幼龄林)、15 a(中龄林)、23 a(近熟林)、30 a(成熟林)、40 a(过熟林1)和63 a(过熟林2)人工林作为研究对象,每种林分在上、中、下坡位各设置1块20 m×20 m的标准地(即3个重复),其中天洪岭地区没有合适的成熟林、华山地区没有合适的近熟林和63 a的过熟林,因此共63块样地。对样地内的马尾松进行每木检尺,并调查样地的地形地貌、土壤类型、群落结构及林下植被。林分密度为样地设置时保存的植株数量与单位面积之比;在林分调查时,机械设置100个样点,在各样点位置上采用抬头垂直仰视的方法,判断该样点是否被树冠覆盖,统计被覆盖的样点数,计算出郁闭度;盖度为植被地上部分垂直投影面积占地面面积的比例。造林时,试验林经炼山整地后,均于次年3月定植,定植后前2 a每年进行2次砍草抚育,其后均采用近自然经营措施。样地基本概况见表1。

#### 1.2.2 样品采集与测定

在每块样地内按“S”型布设5个代表性样点采集土壤样品,用土钻法采集0-20 cm的土壤样品,并将土壤混合均匀,采用四分法将土壤分为4份,每份大约500 g。取其中1份,去除根和石子后自然风干并过2 mm筛,用于化学性质测定。土壤有机碳(SOC)采用KCr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>高温消煮法,使用分光光度计测定;全氮(TN)采用半微量凯氏定氮法测定;全磷(TP)采用钼锑钒比色法测定<sup>[16,17]</sup>。

表 1 不同区域及龄组马尾松人工林样地基本概况

Table 1 Basic overview of *Pinus massoniana* plantation plots in different stand ages and regions

区域 Region	林分类型 Stand types	林分密度 (Tree/hm <sup>2</sup> ) Stand density (Tree/hm <sup>2</sup> )	平均树高(m) Average tree height (m)	平均胸径(cm) Average DBH (cm)	郁闭度(%) Crown density (%)	盖度(%) Coverage (%)
派阳山 Paiyangshan	幼龄林 Young forest	1 978	6.53	9.65	80	83
	中龄林 Middle-aged forest	1 534	10.75	12.53	60	73
	近熟林 Near mature forest	1 367	21.09	23.27	60	71
	成熟林 Mature forest	974	26.67	30.81	50	78
	过熟林 1 Overmature forest 1	867	29.75	35.42	70	81
	过熟林 2 Overmature forest 2	765	33.81	56.78	80	85
镇龙 Zhenlong	幼龄林 Young forest	1 965	6.75	9.95	70	81
	中龄林 Middle-aged forest	1 550	11.81	13.80	70	72
	近熟林 Near mature forest	1 352	22.27	23.40	70	78
	成熟林 Mature forest	925	28.49	31.19	70	75
	过熟林 1 Overmature forest 1	856	31.82	36.27	70	77
	过熟林 2 Overmature forest 2	722	34.65	43.64	80	81
天洪岭 Tianhongling	幼龄林 Young forest	1 955	6.21	9.02	70	75
	中龄林 Middle-aged forest	1 523	11.21	12.27	70	78
	近熟林 Near mature forest	1 328	17.16	23.26	50	56
	过熟林 1 Overmature forest 1	832	26.35	33.34	60	65
	过熟林 2 Overmature forest 2	731	32.75	41.35	70	72
华山 Huashan	幼龄林 Young forest	1 962	5.85	8.87	70	75
	中龄林 Middle-aged forest	1 516	9.78	12.13	70	78
	成熟林 Mature forest	926	25.47	27.26	60	65
	过熟林 1 Overmature forest 1	815	28.28	34.65	50	62

### 1.3 数据处理

用 Microsoft Office Excel 对数据进行初步整理, 用 SPSS 17.0 进行数据统计分析, 利用双因素方差分析(Two-way ANOVA)、单因素方差分析(One-

way ANOVA)及最小显著性差异法(LSD), 比较不同林龄、区域马尾松人工林土壤 C、N、P 含量和化学计量比的差异。元素含量及化学计量比之间相关性采用 Pearson 相关分析, 用 Origin 2019 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤 C、N、P 含量

由表 2 可知,4 个区域内 SOC 含量为 12.90 - 30.28 g/kg, TN 含量为 0.68 - 2.60 g/kg, TP 含量为 0.03 - 1.18 g/kg; 4 个区域马尾松人工林 SOC、

表 2 广西 4 个区域马尾松人工林 SOC、TN 和 TP 的统计分析

Table 2 Statistical analysis of soil organic C, total N and total P in *P. massoniana* plantations in four regions of Guangxi

指标 Indicators	平均值 ± 标准差 Mean ± SD	变异系数(%) CV(%)	最低值 Min	最高值 Max	变幅 Range
土壤有机碳 Soil organic C	(22.40 ± 4.60) g/kg	21	12.9 g/kg	30.28 g/kg	17.38
全氮 Total N	(1.73 ± 0.46) g/kg	27	0.68 g/kg	2.60 g/kg	1.92
全磷 Total P	(0.28 ± 0.26) g/kg	93	0.03 g/kg	1.18 g/kg	1.15
C/N	13.46 ± 2.93	22	7.35	20.02	12.67
C/P	128.32 ± 105.97	83	25.66	630	604.34
N/P	9.72 ± 7.46	77	1.84	49.67	47.83

注: CV ≤ 30% 为弱变异性, 30% < CV < 60% 为中等变异性, CV ≥ 60% 为强变异性

Note: CV ≤ 30% is weak variability, 30% < CV < 60% is moderate variability and CV ≥ 60% is strong variability

### 2.2 不同林龄和区域马尾松人工林土壤 C、N、P 含量变化

对不同林龄、区域的 SOC、TN 和 TP 含量及其化学计量比进行双因素方差分析, 结果显示林龄、区域及其交互作用均对 SOC、TN 和 TP 含量及其变化有显著影响 ( $P < 0.05$ , 表 3)。

表 3 SOC、TN 和 TP 含量及其化学计量比的双因素方差分析

Table 3 Two-way ANOVA of variance of soil organic C, total N and total P content and their stoichiometric ratio

自变量 Variable	因变量 Dependent variable	自由度 df	均方 Mean square	统计量 F-test	显著性 P-value
区域 Region	C	3	171.637	44.405	0.000**
	N	3	1.026	16.373	0.000**
	P	3	0.612	206.797	0.000**
	C/N	3	12.198	2.808	0.051
	C/P	3	65 879.181	22.796	0.000**
	N/P	3	399.917	25.367	0.000**
	林龄 Stand age	C	5	48.543	12.559
N		5	0.298	4.757	0.002**
P		5	0.128	43.288	0.000**
C/N		5	8.845	2.036	0.093

TN 和 TP 平均含量分别为 (22.40 ± 4.60) g/kg、(1.73 ± 0.46) g/kg、(0.28 ± 0.26) g/kg。SOC、TN 和 TP 的变异系数分别为 21%、27% 和 93%, 表明 SOC 和 TN 变异属于弱变异, TP 变异属于强变异, 即 4 个区域的 SOC 和 TN 含量变化较小, 相对稳定, 而土壤 TP 含量差异大。

续表

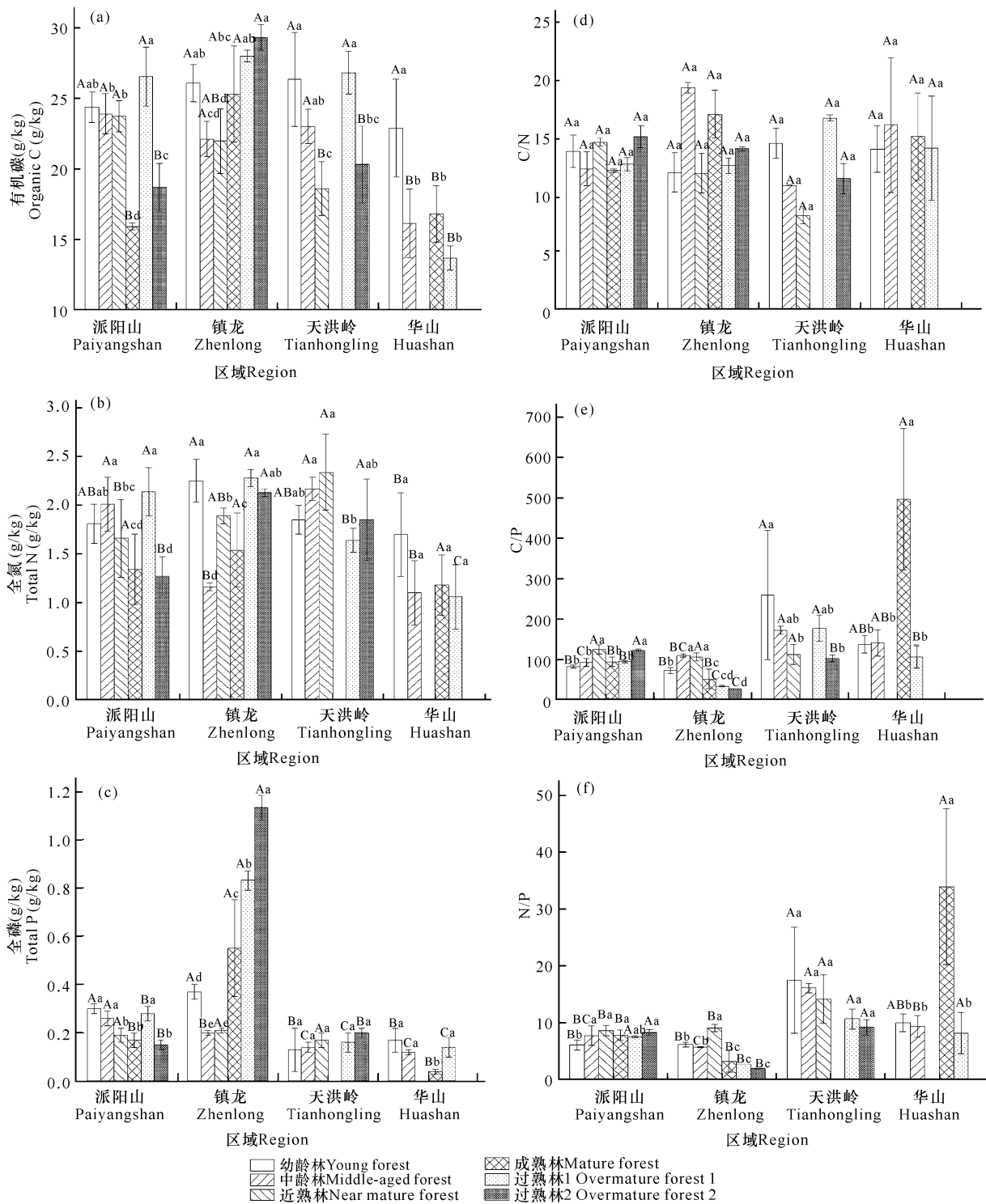
Continued table

自变量 Variable	因变量 Dependent variable	自由度 df	均方 Mean square	统计量 F-test	显著性 P-value
	C/P	5	18 180.714	6.291	0.000**
	N/P	5	102.519	6.503	0.000**
区域 × 林龄 Region × Stand age	C	12	35.558	9.199	0.000**
	N	12	0.421	6.715	0.000**
	P	12	0.127	42.911	0.000**
	C/N	12	20.998	4.835	0.000**
	C/P	12	23 655.074	8.185	0.000**
	N/P	12	96.635	6.130	0.000**

注: \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$

Note: \* means  $P < 0.05$ , \*\* means  $P < 0.01$

如图 1 所示, SOC、TN 含量随林龄增加呈波动性变化: 成熟林阶段 SOC、TN 含量最低; SOC 含量在幼龄林阶段最高, TN 含量在近熟林阶段最高。土壤 TP 含量随林龄增加表现为先减少后增加的趋势, 在中龄林阶段最低。土壤 TP 含量平均值表现为镇龙地区显著高于其他地区 ( $P < 0.05$ )。



同一图组不同大写字母表示该林龄阶段元素含量及化学计量比在不同区域间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 同一图组不同小写字母表示该区域元素含量及化学计量比在不同林龄间差异显著 ( $P < 0.05$ )

Different capital letters in the same panel indicate significant differences in elemental content and stoichiometric ratios between regions at that age ( $P < 0.05$ ) and different lower case letters in the same panel indicate significant differences in elemental content and stoichiometric ratios between regions at that age ( $P < 0.05$ )

图1 不同林龄和区域的马尾松人工林土壤 C、N、P 含量及其化学计量比

Fig. 1 Soil C, N and P contents and their stoichiometric ratios in plantation forests of *P. massoniana* at different stand ages and regions

### 2.3 不同林龄和区域马尾松人工林土壤 C、N、P 化学计量比

由表 2 可知,土壤 C/N、C/P、N/P 平均值分别为  $13.46 \pm 2.93$ ,  $128.32 \pm 105.97$ ,  $9.72 \pm 7.46$ , 变异系数分别为 22%、83%、77%,表明在 4 个区域中不同林龄马尾松人工林土壤 C/N 相对较稳定,土壤 C/P、N/P 差异较大。双因素方差分析(表 3)显示,土壤 C/N 在不同区域和不同林龄的交互作用下有显著性差异( $P < 0.05$ ),而在单一因素作用下均无显著性差异( $P > 0.05$ );不同林龄和区域及其交互作用均对土壤 C/P、N/P 有显著性影响( $P < 0.05$ )。如图 1 所示,成熟林土壤 C/N、C/P、N/P 平均值均最高,显著高于近熟林和过熟林;土壤 C/P、N/P 平均值随林龄增加呈先减少后增加再减少的趋势。华山地区土壤 C/N、C/P、N/P 平均值均最高。天洪岭地区土壤 C/N 平均值最低,镇龙地区土壤 C/P、N/P 平均值最低。在幼龄林、中龄林、过熟林 1 阶段,天洪岭地区的土壤 C/P 平均值均为最高,且显著高于派阳山和镇龙地区( $P < 0.05$ )。4 个区域马尾松人工林土壤 C/N 较 C/P 和 N/P 稳定,反映出土壤 C/N 较稳定的特点。

### 2.4 不同林龄和区域马尾松人工林土壤 C、N、P 与化学计量比的相关性

根据 Pearson 双变量相关性分析(表 4),土壤 C/N 与 SOC 含量无显著相关性,与 TN 含量显著负相关;土壤 C/P 与 TN、TP 含量均呈显著负相关关系

表 4 不同林龄和区域马尾松人工林土壤 C、N、P 与化学计量比的相关性  
Table 4 Correlation of C, N and P with stoichiometric ratios in soils of plantation *P. massoniana* at different forest ages and regions

组分 Component	土壤有机碳 Soil organic C	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	C/N	C/P	N/P
土壤有机碳 Soil organic C	1					
全氮 Total nitrogen	0.643**	1				
全磷 Total phosphorus	0.581**	0.397**	1			
C/N	0.054	-0.690**	-0.005	1		
C/P	-0.224	-0.283*	-0.508**	0.174	1	
N/P	-0.269*	-0.093	-0.529**	-0.119	0.940*	1

注: \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$

Notes: \* means  $P < 0.05$ , \*\* means  $P < 0.01$

系,与 SOC 含量相关性不显著。土壤 N/P 与 SOC 含量呈显著负相关关系,与 TP 含量呈极显著负相关关系,与 C/P 显著正相关,与 TN 含量、C/N 相关性不显著。

## 3 讨论

### 3.1 不同林龄和区域马尾松人工林土壤 C、N、P 含量变化

SOC、TN、TP 是植物生长必需的养分,而土壤 C、N 主要来源于枯落物的归还,P 来源于岩石风化<sup>[15-18]</sup>,林龄和区域对土壤 C、N、P 含量具有显著影响<sup>[19]</sup>。本研究结果表明,4 个区域 SOC、TN 含量平均值随林龄增加呈波动性变化,这与一些学者的研究结果不一致。向云西<sup>[20]</sup>对不同林龄马尾松天然林的研究表明,随林龄增加 SOC、TN 含量逐渐增加,而杨霞等<sup>[15]</sup>在研究油松人工林发现 SOC、TN 含量随林龄增加呈先增加后减少的变化规律。出现本研究结果的原因可能是研究区内原始积累的枯落物丰富、林分密度大、净生产力较低,土壤养分高归还、消耗少,以致于在幼龄林阶段保持着比较高的土壤养分<sup>[21]</sup>。一般情况下,在马尾松速生阶段,林木生长旺盛,生物量不断积累,净生产力增加,林地养分不断消耗,导致土壤养分逐渐降低。覃其云等<sup>[22]</sup>在研究广西马尾松人工林肥力质量时也发现,马尾松生长量越高,其土壤肥力质量越低。在过熟林阶段,林分生长变慢,林木对土壤养分吸收减少,枯落物增加,土壤养分回升。本研究中,派阳山、镇龙和天洪岭地区 SOC 含量在中龄林至近熟林阶段随林龄增加呈现减少的趋势,与上述研究结果一致。过熟林 2 阶段 SOC 含量比过熟林 1 阶段低的原因可能是研究区过熟林 1 阶段的植物多样性较丰富,而较好的植物多样性能增加土壤有机碳的合成<sup>[23]</sup>。本研究中土壤 TP 含量在幼龄林至过熟林 1 阶段变化不显著,这与雷丽群等<sup>[8]</sup>研究结果一致,主要是由于 P 是一种沉积性矿物,不易迁移,不能够及时在土壤中聚集。

不同区域 SOC、TN、TP 的变化不一致,可能是不同区域中的植被类型、温度、湿度等因素引起的。华山地区 SOC、TN 和 TP 含量平均值为 4 个区域中最低,究其原因可能是该区域位于喀斯特地貌区,水土流失较大,导致土壤养分的流失。本研究中, SOC 平均含量为  $(22.40 \pm 4.60)$  g/kg,与全国马尾松人工林 0-20 cm 土层 SOC 含量平均值 22.0 g/kg 基本一致<sup>[24]</sup>, TN 平均含量  $(1.73 \pm 0.46)$  g/kg、TP 平均

含量( $0.28 \pm 0.26$ ) g/kg 均与一些学者有关广西马尾松人工林土壤研究结果一致<sup>[22,25]</sup>。总体来看,广西马尾松人工林土壤处于低 P 状态,植物生长发育过程中可能会受到 P 限制。

### 3.2 不同林龄和区域马尾松人工林土壤 C、N、P 计量比变化

土壤 C、N、P 化学计量比是反映土壤有机质含量和质量的重要指标,还能反映有机质分解中养分矿化情况<sup>[26]</sup>。土壤 C/N 是衡量土壤中 C、N 营养平衡情况的重要指标,不仅可用来反映土壤有机质的分解状况,还可作为土壤氮矿化能力的标志,较低的 C/N 表明土壤有机质具有更快的矿化速率<sup>[27,28]</sup>。当土壤 C/N 较低时,N 超过微生物生长所需的部分就会释放到土壤中;C/N 较高时,微生物需要一定的氮来维持自身的生长<sup>[29,30]</sup>,会从土壤中吸收 N,土壤中 N 含量减少。研究区 C/N 平均值为  $13.46 \pm 2.93$ ,略高于全国平均水平 11.9。这在一定程度上表明土壤中的有机质难以转化,土壤中 N 元素矿化能力较弱,土壤 N 元素不足<sup>[15]</sup>。本研究中土壤 C/N 随着林龄增加变化不显著,究其原因可能是 SOC 和 TN 含量随林龄增加趋于动态平衡。

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 潜力的一个指标<sup>[31]</sup>。C/P 偏大,会抑制土壤有机物质分解释放 P<sup>[15]</sup>。本研究区土壤 C/P 平均值为  $128.32 \pm 105.97$ ,总体远高于全国平均水平 61,说明本研究 4 个区域土壤有机物质释放 P 的能力较弱,土壤 P 比较匮乏。

土壤 N/P 可用于诊断 N 养分是否被限制,能够指示植物生长过程中土壤养分供应情况,较低的 N/P 一般反映植物受到 N 限制,较高的 N/P 反映植物受到 P 限制<sup>[32,33]</sup>。本研究马尾松人工林土壤 N/P 平均值为  $9.72 \pm 7.46$ ,高于全国土壤 N/P 平均值 5.20,表明本研究区马尾松处于 P 缺乏状态。相关性分析表明,土壤 N/P 与 TP 呈显著相关,且 N/P 与 C/P 变化趋势一致。在本研究中,土壤 C/P 和 N/P 在林龄层面表现为成熟林阶段为最高值,且显著高于过熟林,表明马尾松在成熟林阶段需要大量的 P 来满足自身生长,这与 Ma 等<sup>[34]</sup>的研究结果一致。在过熟林阶段,P 含量升高,导致 C/P、N/P 降低。在地区层面,土壤 C/P、N/P 均表现为华山地区显著高于派阳山和镇龙地区,表明华山地区的 P 较其他地区匮乏。

## 4 结论

本研究中,在林龄层面,SOC、TN 含量均在成熟林阶段最低,SOC 含量在幼龄林阶段最高,TN 含量在近熟林阶段最高。土壤 TP 含量在中龄林阶段最低,随林龄增加呈先减少后增加的趋势。成熟林土壤 C/N、C/P、N/P 平均值均最高,显著高于近熟林和过熟林。土壤 C/P、N/P 平均值随林龄增加呈先减少后增加再减少的趋势。在区域层面,华山地区 SOC、TN 和 TP 含量平均值为 4 个区域中最低,而土壤 C/N、C/P、N/P 平均值却为最高值。天洪岭地区土壤 C/N 平均值最低,镇龙地区土壤 C/P、N/P 平均值最低。镇龙地区土壤养分较其他地区丰富,华山地区则最匮乏。总体来说,广西地区马尾松人工林土壤 P 含量偏低,在速生阶段尤其明显。为保证马尾松人工林较好的生长发育,可在速生阶段施加适量 P 肥。本研究对森林生态系统其他结构层次的 C、N、P 含量尚未涉足,今后应该结合起来开展相关研究。

### 参考文献

- [1] 刘蓉,张卫国,江小雷,等.垂穗披碱草群落退化演替的植被特性及其与土壤性状的相关性研究[J].草业科学,2010,27(10):96-103.
- [2] ELSER J J,ANDERSEN T,BARON J S,et al. Shifts in lake N : P stoichiometry and nutrient limitation driven by atmospheric nitrogen deposition[J]. Science,2009,326:835-837.
- [3] 张珊.不同林龄序列云杉人工林土壤化学计量特征及其与土壤因子的相关性研究[D].兰州:甘肃农业大学,2017.
- [4] GUNDERSEN P,CALLESEN I,DE VRIES W. Nitrate leaching in forest ecosystems is related to forest floor C/N ratios [J]. Environmental Pollution,1988,102(S1):403-407.
- [5] 乔阳.亚热带常绿阔叶林土壤碳、氮、磷化学计量特征及其影响因素[D].上海:华东师范大学,2020.
- [6] SHAO P S,LIANG C,RUBERT-NASON K,et al. Secondary successional forests undergo tightly - coupled changes in soil microbial community structure and soil organic matter [J]. Soil Biology and Biochemistry,2019,128:56-65.
- [7] 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.
- [8] 雷丽群,卢立华,农友,等.不同林龄马尾松人工林土壤

- 碳氮磷生态化学计量特征[J]. 林业科学研究, 2017, 30(6):954-960.
- [9] ZHAO F Z, SUN J, REN C J, et al. Land use change influences soil C, N, and P stoichiometry under 'Grain-to-Green Program' in China [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 10195.
- [10] SELVARAJ S, DURAISAMY V, HUANG Z J, et al. Influence of long-term successive rotations and stand age of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations on soil properties [J]. Geoderma, 2017, 306:127-134.
- [11] 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.
- [12] 丁贵杰, 吴协保, 齐新民, 等. 马尾松纸浆材林经营模型系统及优化栽培模式研究[J]. 林业科学, 2002, 38(5): 7-13.
- [13] 郝中明, 吴水荣, 覃林, 等. 广西南部地区不同林龄马尾松及其混交林理化性质研究[J]. 广东农业科学, 2018, 45(1):39-43.
- [14] 盘金文, 郭其强, 孙学广, 等. 不同林龄马尾松人工林碳、氮、磷、钾养分含量及其生态化学计量特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(4):746-756.
- [15] 杨霞, 陈丽华, 郑学良. 不同林龄油松人工林土壤碳、氮和磷生态化学计量特征[J]. 中国水土保持科学, 2021, 19(2):108-116.
- [16] 向云西, 陈胜魁, 潘萍, 等. 马尾松叶片-凋落物-土壤的碳氮磷化学计量特征[J]. 森林与环境学报, 2019, 39(2):120-126.
- [17] 赵林林, 吴志祥, 孙瑞, 等. 土壤有机碳分类与测定方法的研究概述[J]. 热带农业工程, 2021, 45(3):154-161.
- [18] CHAPIN F S III, MASTON P A, VITOUSEK P M. Principles of terrestrial ecosystem ecology [M]. New York: Springer, 2011.
- [19] YU Z P, WANG M H, HUANG Z Q, et al. Temporal changes in soil C-N-P stoichiometry over the past 60 years across subtropical China [J]. Global Change Biology, 2018, 24(3):1308-1320.
- [20] 向云西. 马尾松天然林生态系统化学计量特征研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2019.
- [21] 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.
- [22] 覃其云, 唐健, 邓小军, 等. 广西马尾松人工林土壤肥力评价研究[J]. 林业调查规划, 2017, 42(6):16-21, 32.
- [23] 王园博. 黑河中游湿地不同植被类型植物、土壤特征及其与土壤有机碳的关系[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020.
- [24] 王大鹏, 王文斌, 郑亮, 等. 中国主要人工林土壤有机碳的比较[J]. 生态环境学报, 2014, 23(4):698-704.
- [25] 李臻, 梁月明, 潘复静, 等. 不同林龄马尾松人工林土壤酶活性及其生态化学计量特征[J]. 桂林理工大学学报, 2021, 41(1):210-217.
- [26] JANSSEN B H. Nitrogen mineralization in relation to C : N ratio and decomposability of organic materials [J]. Plant and Soil, 1996, 181(1):39-45.
- [27] BUI E N, HENDERSON B L. C : N : P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors [J]. Plant and Soil, 2013, 373(1/2): 553-568.
- [28] 李猛, 聂洪光, 张淑红, 等. 有机肥配施氮肥设施菜田 FDA 水解酶活性与肥力相关性研究[J]. 园艺学报, 2016, 43(5):907-917.
- [29] 原树生. 大兴安岭林区土壤养分及化学计量特征影响因素研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
- [30] BENGTTSSON G, BENGTTSON 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.
- [31] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4674-4682.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] MA X Q, HEAL K V, LIU A Q, et al. Nutrient cycling and distribution in different-aged plantations of Chinese fir in southern China [J]. Forest Ecology and Management, 2007, 243(1):61-74.



## Stoichiometric Characteristics of Soil C, N and P in *Pinus massoniana* Plantations of Different Ages and Regions in Guangxi

LIU Ping<sup>1</sup>, LI Peng<sup>2</sup>, YANG Zhangqi<sup>2</sup>, YAN Peidong<sup>2</sup>, TANG Shengsen<sup>2</sup>, WU Dongshan<sup>2</sup>

(1. College of Life Science, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi, 541006, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Superior Timber Trees Resource Cultivation, Guangxi Forestry Research Institute, Nanning, Guangxi, 530002, China)

**Abstract:** To investigate the stoichiometric characteristics of soil carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) in *Pinus massoniana* plantations in Guangxi, to reveal the mechanism of soil nutrient balance in *P. massoniana* plantations and its spatial and temporal dynamics of *P. massoniana* plantations, and to provide a theoretical basis for sustainable management of *P. massoniana* plantations, and the change rule of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) contents and stoichiometric ratios at different forest ages in different regions were compared by using the method of space instead of time. The results showed that the coefficients of variation for SOC, TN and C/N were small, which was 21%, 27% and 22%, respectively, belonging to weak variation, and their values were relatively stable in different forest ages and regions. Forest age, region and their interaction all had significant effects on the variation of SOC, TN, TP, C/P and N/P ( $P < 0.05$ ). The contents of SOC and TN in soil fluctuated, which were the lowest in mature forest stage. SOC contents were highest in the young forest stage and TN contents were the highest in the near mature forest stage. TP contents in soil were the lowest in the middle-aged forest stage, and with the increase of forest age, it showed a trend of first decreasing and then increasing. The average values of soil C/N, C/P and N/P were all the highest in mature forests, and were significantly higher than those in near-mature and over-mature forests ( $P < 0.05$ ). With the increase of forest age, the average values of soil C/P and N/P showed a trend of first decreasing, then increasing and then decreasing. SOC, TN and TP contents in soil were the lowest in Huashan area, while the average values of soil C/N, C/P and N/P were the highest. The average values of C/N in soil in Tianhongling area was the lowest, and the average values of C/P and N/P in soil in Zhenlong area were the lowest. Correlation analysis showed that C/N in soil was significantly negatively correlated with TN content, and C/P in soil was significantly negatively correlated with TN and TP content. N/P in soil was significantly negatively correlated with SOC and TP content, and significantly positively correlated with C/P. In general, Guangxi *P. massoniana* plantations are mainly restricted by P, and it is more obvious in the fast-growing stage. In order to ensure the development of *P. massoniana* plantations, P fertilizer can be appropriately applied in the fast-growing stage of *P. massoniana*.

**Key words:** *Pinus massoniana* plantation; soil stoichiometric characteristics; different stand age; region; relevance