

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230299

# 晋西黄土区不同密度刺槐人工林叶片-枯落物-土壤化学计量特征

巩大鹏<sup>1</sup>, 毕华兴<sup>1,2,3,4,5,6\*</sup>, 王劲峰<sup>7</sup>, 赵丹阳<sup>1</sup>, 黄靖涵<sup>1</sup>, 宋艺琳<sup>1</sup>

(1. 北京林业大学, 北京 100083; 2. 林木资源高效生产全国重点实验室, 北京 100083; 3. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083; 4. 水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083; 5. 北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083; 6. 林业生态工程教育部工程研究中心, 北京 100083; 7. 北京市丰台区水文和水土保持工作站, 北京 100165)

**摘要:** [目的] 研究不同林分密度对刺槐人工林叶片、枯落物、土壤 C、N、P 化学计量特征的影响, 为晋西黄土区刺槐人工林的经营管理提供科学参考。[方法] 通过野外调查, 选择晋西黄土区 5 种不同密度 (500、1 000、1 500、2 000、2 500 株·hm<sup>-2</sup>) 刺槐人工林, 测定和分析叶片、枯落物、土壤的养分。用单因素分析法分析密度对三者养分的影响, 采用 Pearson 相关系数, 分析刺槐人工林叶片、枯落物、土壤 C、N、P 及其化学计量比之间的相关性。[结果] 随着密度增加, 刺槐人工林叶片 C、N、P 含量先增加后减小, 叶片 C:P、N:P 先降低后增加; 枯落物的 C、C:N、C:P、N:P 随着密度先减少后增大, N、P 则先增大后减少; 土壤 C、P、N 含量及 C:P、N:P 随密度的增大而降低; C:N 随密度呈先降低后增加的趋势。不同林分密度下, 叶片 N:P 均大于 14, 叶片-枯落物-土壤 C、N、P 及其化学计量比中除了叶片 N、C:N 以外, 均存在不同的显著差异性 ( $p < 0.05$ )。[结论] 不同林分密度下, 叶片 N:P 均大于 14, 说明研究区刺槐人工林主要受到 P 限制; 密度在一定程度上影响着刺槐人工林的养分循环及其分配和化学计量特征; 在密度为 1 000~1 500 株·hm<sup>-2</sup> 的刺槐人工林叶片、枯落物、土壤 C、N、P 含量最高, 养分限制最弱, 枯落物分解速率相对较快, 为适宜经营密度。

**关键词:** 林分密度; 刺槐; 养分循环; 化学计量特征

**中图分类号:** S718.55

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2024)02-0156-09

林分密度影响了林内光照、水分、养分等重要自然资源, 成为制约林木生产力及养分循环的重要因素之一<sup>[1-5]</sup>。合理的林分密度可以增强林木抵御病虫害的能力, 保证林木有一个良好的生长发育环境。

生态化学计量是基于化学计量学, 将应用生物学、化学和物理学等多学科相互结合, 探索生态系统中物质能量的平衡及其相互关系的方法<sup>[6]</sup>; 也是一种研究植物养分, 判断限制元素的方法<sup>[7]</sup>。叶片通过土壤提供的 C、N、P 等养分来维持生命活动, 最终以枯落物的形式分解将养分返还给土壤, 这三者间的相互作用与环境相互影响, 使得它们成

为了生态系统养分循环的重要过程<sup>[8]</sup>。目前国内外对植物、枯落物、土壤等的 C、N、P 化学计量特征围绕着不同林种、不同海拔、化学计量比与枯落物分解速率相关性等方面展开了大量的研究<sup>[9-13]</sup>。部分国内学者针对不同树种开展了对密度与植物叶片、枯落物、土壤生态化学计量特征关系的研究调查<sup>[14-15]</sup>。但由于树种、立地条件、林分结构等因素的不同, 密度对叶片、枯落物和土壤间 C、N、P 化学计量特征的影响仍有很大的不确定性, 尚需进行深入的探讨。

刺槐 (*Robinia pseudoacacia* L.) 具有易繁

收稿日期: 2023-08-01 修回日期: 2023-09-14

基金项目: 国家重点研发课题 (2022YFF1300401), 国家自然科学基金项目 (31971725、U2243202)

\* 通讯作者: 毕华兴, 教授, 博导, 主要从事水土保持与林业生态工程研究 E-mail: bhx@bjfu.edu.cn

殖、生长速度快、耐干旱以及适应性强等特点, 常用于黄土区的植被恢复, 是黄土高原的主要造林树种之一<sup>[16]</sup>。目前对于刺槐人工林在林分密度方面的研究, 主要集中于土壤理化性质<sup>[17]</sup>、土壤与枯落物的持水能力等方面<sup>[18-20]</sup>。关于刺槐人工林化学计量特征的研究多集中于林龄方面<sup>[21-23]</sup>, 而林分密度对刺槐人工林叶片—枯落物—土壤养分及其化学计量比影响的研究尚未开展。本研究以 500、1 000、1 500、2 000、2 500 株·hm<sup>-2</sup> 密度的刺槐人工林为对象, 探究叶片-枯落物-土壤养分含量及其化学计量特征随密度的变化趋势, 以及三者间的耦合关系, 研究结果可为晋西黄土区刺槐人工林的经营提供科学参考。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于山西省临汾市吉县蔡家川流域 (36°12'29"~36°17'27" N, 110°39'48"~110°47'49" E), 该流域属于典型的黄土残塬沟壑区。其总面积约为 40.10 km<sup>2</sup>。海拔 920~1 430 m。属于暖温

带大陆性季风气候, 年平均降水量 578.9 mm, 降水主要集中于 6—9 月, 约占全年降水量的 70%, 年均潜在蒸发量为 1 724 mm, 远超过年均降水量。褐土和黄土母质为主要土壤类型。主要树种由山杨 (*Populus davidiana* Dode.)、辽东栎 (*Quercus liaotungensis* Mayr.) 等天然次生林, 以及人工营造的刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、油松 (*Pinus tabulaeformis* Carr.)、侧柏 (*Platycladus orientalis* Linn.) 等水土保持林组成<sup>[24]</sup>。

### 1.2 样地布设

试验于 2022 年 8 月, 在研究区选择 5 种不同密度 (500 株·hm<sup>-2</sup>、1 000 株·hm<sup>-2</sup>、1 500 株·hm<sup>-2</sup>、2 000 株·hm<sup>-2</sup>、2 500 株·hm<sup>-2</sup>) 的刺槐林样地, 每种密度设置 3 个重复样地 (20 m × 20 m), 在每个样地内, 测定样地海拔、坡度、坡向等立地因子, 对样地内的乔木进行每木检尺, 测量树高、林分密度、树冠大小等数据, 同时记录林龄、林分密度和郁闭度等信息, 每个密度梯度下 3 块重复样地的海拔、坡度、坡向基本一致, 林龄相同, 样地基本信息见表 1。

表 1 不同密度刺槐人工林样地基本特征

Table 1 Basic characteristics of *Robinia pseudoacacia* plantation plots of different densities

林分密度 Density/(株·hm <sup>-2</sup> )	平均树高 Average height/m	平均胸径 Average DBH/cm	平均冠幅 Canopy density/m	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect/(°)	郁闭度 Canopy density/%	林龄 Stand age/a
500	9.73 ± 22.24 b	16.03 ± 5.56	1.81 ± 1.18	1 140	24	ES125	45	25
1 000	10.08 ± 2.35 a	16.10 ± 6.12	2.03 ± 1.14	1 170	20	ES143	40	25
1 500	9.31 ± 2.60 b	11.93 ± 4.47	1.29 ± 0.68	1 090	45	E90	59	21
2 000	8.01 ± 1.99 c	11.09 ± 4.09	1.66 ± 1.45	1 140	25	WS240	68	28
2 500	6.87 ± 1.42 d	10.33 ± 2.27	1.41 ± 1.25	1 030	25	E70	50	21

注: 均值 ± 标准差

Note: The data in the table are mean ± standard deviation

### 1.3 样品采集与测定

样品采集于 8 月 12 日开始进行, 在每个样地内, 选择 3 株标准木 (具有平均树高和胸径), 用高枝剪对树冠东西南北 4 个方向, 按照上中下 3 个部位采集叶片样品, 同时收集树干周围的枯落物。将叶片和枯落物分别混匀装入密封袋带回实验室, 在 80 °C 下烘干至质量恒定, 冷却后用粉碎机粉碎, 过筛后装袋保存用于 C、N、P 含量测定。在清除树冠投影下方的枯落物后, 采取五点取样法采集 0~30 cm 土层土样, 将土样风干、研磨、过 0.25 mm 筛后, 于实验室测定 C、N、P 含量。

植物和枯落物用 HCl 溶液去除无机碳后使用德国 elementar 生产的有机碳分析仪 (vario TOC SELECT) 测定有机碳含量, 土壤有机碳含量采用采取外加热—重铬酸钾氧化法测定碳含量, 土壤、叶片、枯落物样品氮含量用凯氏定氮法测定、磷含量用 HClO<sub>4</sub>—H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 消煮—钼锑抗比色分光光度计法测定。

### 1.4 数据处理

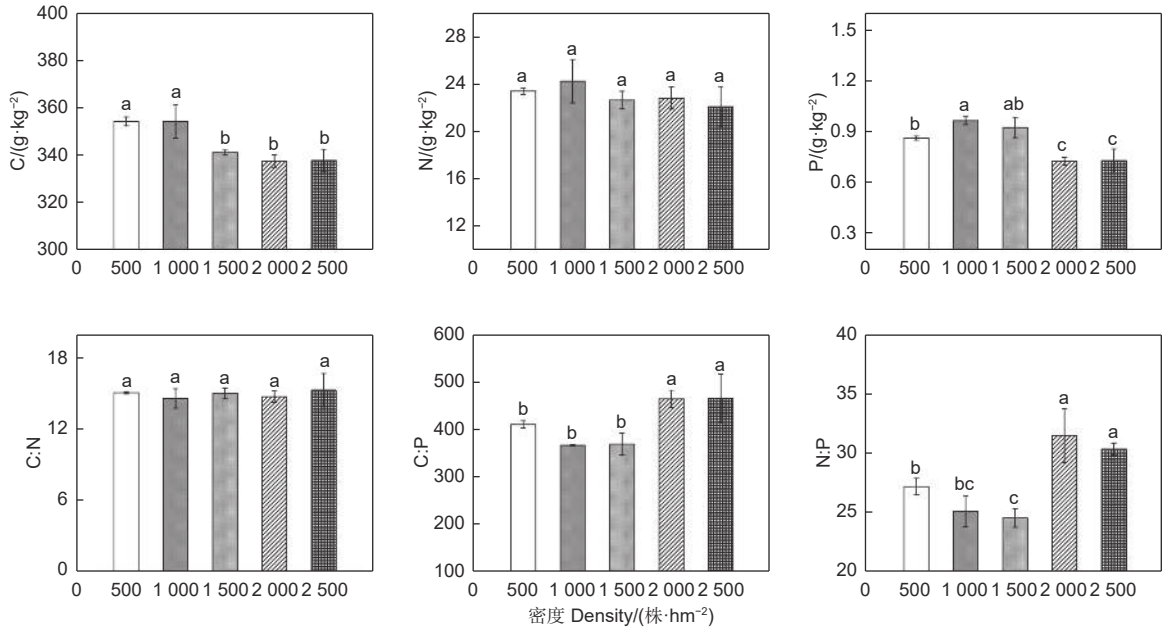
采用 EXCEL 2003 进行数据处理, 使用 origin 作图, 运用 SPSS 20 软件对数据进行统计分析。用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和多

重比较的方法 (LSD,  $p < 0.05$ ) 检验不同密度下刺槐人工林叶片、枯落物、土壤 C、N、P 及其化学计量比的差异, 采用 Pearson 相关系数分析它们之间的相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同密度刺槐人工林叶片的 C、N、P 含量及其化学计量比

不同密度间叶片含 C、N、P 量随着密度增加



注: 不同小写字母表示不同密度间差异显著 ( $p < 0.05$ ), 下同

Notes: Different lowercase letters in the same row indicate significant differences between different treatments ( $p < 0.05$ ). The same below

图 1 不同密度刺槐人工林叶片 C、N、P 含量和 C : N、C : P、N : P 值

Fig. 1 C, N, P content and C : N, C : P and N : P values of leaves of Robinia plantations of different densities

### 2.2 不同密度刺槐人工林枯落物的 C、N、P 含量及其化学计量比

随着刺槐林密度的增大, 枯落物的 C : N、C : P、N : P 先减少后增大; 枯落物的 C、N 变化规律呈“M”字形, 枯落物 P 呈先增大后减少的规律 (图 2)。不同密度刺槐林枯落物 C 含量存在显著差异 ( $p < 0.05$ ), 2000 株·hm<sup>-2</sup> 和 2500 株·hm<sup>-2</sup> 的 C 含量显著高于其他密度 ( $p < 0.05$ )。1000 株·hm<sup>-2</sup> 含 N 量显著高于其他密度 ( $p < 0.05$ )。1500 株·hm<sup>-2</sup> 含 P 量显著高于其他密度 ( $p < 0.05$ )。1000 株·hm<sup>-2</sup> 枯落物的 C : N 显著低于其他密度 ( $p < 0.05$ )。C : P 在五个密度间均存在显著差异 ( $p < 0.05$ )。1500 株·hm<sup>-2</sup> 和 2000 株·hm<sup>-2</sup> 枯落物的 N : P 分别与其他 3 种密

表现为, 先增加在减小趋势, C : N 没有显著变化, 叶片 C : P、N : P 随密度增加先降低后增加 (图 1)。500 株·hm<sup>-2</sup> 和 1000 株·hm<sup>-2</sup> 刺槐林叶片 C 含量显著高于其他 3 种密度叶片 ( $p < 0.05$ ); 2000 株·hm<sup>-2</sup> 和 2500 株·hm<sup>-2</sup> 叶片 P 含量显著低于其他密度 ( $p < 0.05$ ); 2000 株·hm<sup>-2</sup> 和 2500 株·hm<sup>-2</sup> 林分叶片 C : P 显著高于其他密度 ( $p < 0.05$ )。

度枯落物的 N : P 存在显著差异 ( $p < 0.05$ )。

### 2.3 不同密度刺槐人工林土壤的 C、N、P 含量及其化学计量比

随着刺槐林密度增大, 土壤 C 含量及 C : P 降低; P、N 含量及 N : P 先升高后降低, C : N 先降低后增加 (图 3)。500 株·hm<sup>-2</sup> 和 1000 株·hm<sup>-2</sup> 土壤含 C 量分别与其他 3 种密度呈显著差异 ( $p < 0.05$ )。1500 株·hm<sup>-2</sup> 土壤含 N 量显著高于其他 4 个密度 ( $p < 0.05$ ); 1500 株·hm<sup>-2</sup> 土壤含 P 与其他 4 个密度间存在显著差异 ( $p < 0.05$ ), 显著高于其他密度土壤含 P 量 ( $p < 0.05$ )。C : N、C : P、N : P 区间分别为 3.57~14.32、6.51~22.95、0.48~2.08, 且均在 5 个密度间存在显著差异 ( $p < 0.05$ ), 其中 500 株·hm<sup>-2</sup> 土壤

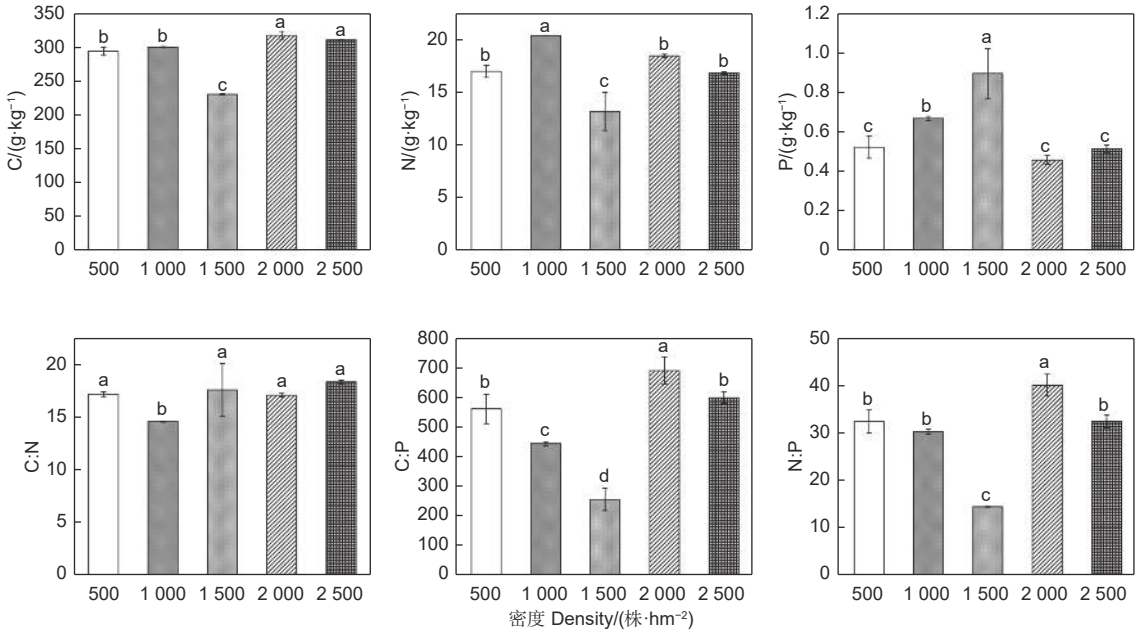


图 2 不同密度刺槐人工林枯落物 C、N、P 含量和 C : N、C : P、N : P 值

Fig. 2 C, N, P contents and C : N, C : P, N : P values of litter of Robinia plantations of different densities

C : P、N : P 显著高于其他密度 C : P、N : P 其他密度的土壤 C : N ( $p < 0.05$ )。  
( $p < 0.05$ ); 1 500 株·hm<sup>-2</sup> 土壤 C : N 显著低于

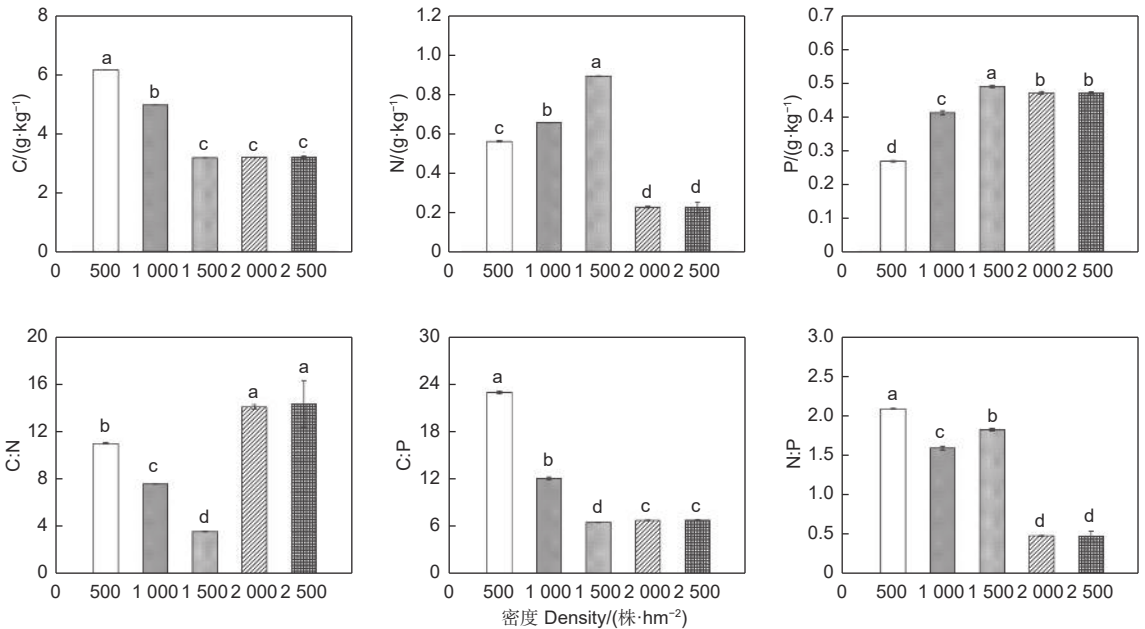


图 3 不同密度刺槐人工林土壤 C、N、P 含量和 C : N、C : P、N : P 值

Fig. 3 C, N, P content and C : N, C : P and N : P values of soil of Robinia plantations of different densities

#### 2.4 刺槐人工林叶片-枯落物-土壤 C、N、P 含量及其化学计量比之间的相关性

由表 2 可以看出, 叶片 N 与叶片 C 呈正相关关系; 叶片 P 与叶片 C、N 呈显著正相关关系 ( $p < 0.05$ )。枯落物 C 与叶片 P 呈显著负相关关

系 ( $p < 0.05$ ); 枯落物 N 与枯落物 C 呈极显著正相关关系 ( $p < 0.01$ ); 枯落物 P 与叶片 P 呈极显著正相关关系 ( $p < 0.01$ ), 与枯落物 C 呈极显著负相关关系 ( $p < 0.01$ )。土壤 C 与叶片 C 呈极显著正相关关系 ( $p < 0.01$ ); 土壤 N 与叶片 P、枯



表 2 刺槐人工林叶片-枯落物-土壤 C、N、P 含量的相关性

Table 2 Correlation of leaves-litter-soil C, N and P contents in Robinia plantations

指标 Index	叶片 Leaf			枯落物 Litter			土壤 Soil			
	C	N	P	C	N	P	C	N	P	
叶片 Leaf	C	1								
	N	0.577*	1							
	P	0.584*	0.571*	1						
枯落物 Litter	C	-0.010	0.032	-0.554*	1					
	N	0.349	0.404	0.029	0.773**	1				
	P	0.091	0.104	0.712**	-0.880**	-0.452	1			
土壤 Soil	C	0.860**	0.413	0.432	0.145	0.347	-0.165	1		
	N	0.410	0.251	0.865**	-0.865**	-0.418	0.855**	0.249	1	
	P	-0.729**	-0.303	-0.234	-0.184	-0.225	0.296	-0.957**	-0.108	1

注: \*表示显著相关 ( $p < 0.05$ ), \*\*表示极显著相关 ( $p < 0.01$ )。下同  
Notes: \*, the correlation is significant at the 0.05 level. \*\*, the correlation is significant at the 0.01 level. The same below

落物 P 呈极显著正相关关系, 与枯落物 C 呈极显著负相关关系, 土壤 P 与叶片 C、土壤 C 呈极显著负相关关系 ( $p < 0.01$ )。

由表 3 可以看出, 叶片 N:P 与 C:P 呈极显著正相关关系 ( $p < 0.01$ )。枯落物 C:N 与叶片 C:P 呈显著正相关关系 ( $p < 0.05$ ); 枯落物 C:P 与叶片 C:P、N:P 呈极显著正相关关系 ( $p < 0.01$ ); 枯落物 N:P 与叶片 N:P、枯落

物 C:P 呈极显著正相关关系 ( $p < 0.01$ ), 与叶片 C:P 呈显著正相关关系 ( $p < 0.05$ )。土壤 C:N 与叶片 C:P、N:P 和枯落物 C:P、N:P 呈极显著正相关关系 ( $p < 0.01$ ); 土壤 N:P 与叶片 C:P、N:P 和土壤 C:N 呈极显著负相关关系 ( $p < 0.01$ ), 与枯落物 C:P、N:P 呈显著负相关关系 ( $p < 0.05$ ), 与土壤 C:P 呈极显著正相关关系 ( $p < 0.01$ )。

表 3 刺槐人工林叶片-枯落物-土壤 C、N、P 化学计量比的相关性

Table 3 Correlation of leaf-litter-soil C, N and P stoichiometry ratios of Robinia acacia plantations

指标 Index	叶片 Leaf			枯落物 Litter			土壤 Soil			
	C:N	C:P	N:P	C:N	C:P	N:P	C:N	C:P	N:P	
叶片 Leaf	C:N	1								
	C:P	0.417	1							
	N:P	0.002	0.909**	1						
枯落物 Litter	C:N	0.424	0.538*	0.407	1					
	C:P	0.028	0.746**	0.810**	0.192	1				
	N:P	-0.084	0.603*	0.703**	-0.068	0.963**	1			
土壤 Soil	C:N	0.216	0.887**	0.874**	0.265	0.928**	0.856**	1		
	C:P	0.015	-0.208	-0.234	-0.182	0.113	0.170	0.022	1	
	N:P	-0.060	-0.758**	-0.804**	-0.265	-0.638*	-0.563*	-0.724**	0.663**	1

### 3 讨论

#### 3.1 不同密度刺槐人工林叶片的 C、N、P 含量及其化学计量比

研究区 5 种密度的刺槐人工林叶片 C、N、P 含量的均值分别为  $345.11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $23.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 其中叶片 C、P 含量明显低于全球 492 种陆地植物叶片 C、P 平均含量  $464 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、

$1.99 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[25]</sup>; N 含量高于全球植物叶片 N 含量  $20.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 也高于我国 753 种陆地植物叶片 N 平均含量  $18.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[26]</sup>。说明晋西黄土区的刺槐叶片 N 含量较为丰富, 这主要是由于刺槐是豆科树种, 其根的具有根瘤菌, 拥有固氮的能力, 能吸附空气中的氮氧化物<sup>[21]</sup>。刺槐林叶片 C 含量随林分密度的增大逐渐降低, 这可能是由于林分密度较

低时, 种间竞争不激烈, 叶片可以维持较好的光合同化产物量, 但随着林分密度增大, 种间竞争加剧, 林内透光率下降, 导致植物叶片光合作用能力减弱<sup>[3]</sup>。

本研究发现密度对叶片的 C、N、P 含量有一定影响, C:N 保持相对稳定, C:P、N:P 会随密度变化而发生改变, 说明密度对叶片生长和 N、P 养分限制有一定影响, 这与王凯等<sup>[27]</sup> 研究结果相同。C、N、P 对植物的生长发育都起到了相当重要的作用, 其生态化学计量比体现了植物对养分的吸收效率、固 C 效率以及 N、P 养分的限制格局<sup>[28]</sup>。快速生长的植物具有相对较低的 C:N 和 C:P<sup>[29]</sup>, 且生长速率与 N:P 呈负相关关系<sup>[30]</sup>, 说明适宜密度更有利于叶片生长。在 1 000 株·hm<sup>-2</sup> 和 1 500 株·hm<sup>-2</sup> 的刺槐林中, 叶片 C、N、P 含量较高, C:P、N:P 较低, 说明养分更多分配到叶片上, 促进叶片寿命增长, 以便获得更多光合产物, 提高固 C 效果, 为适宜经营密度。叶片 N、P 含量呈先增加在减小趋势, 这可能是由于林分密度过小, 林分郁闭度低, 过强的光照使得土壤含水量下降, 这导致土壤养分的有效性下降, 不利于植物吸收, 所以低密度植物叶片养分含量较低; 当林分密度增大, 种间竞争加剧, 植物会通过提高 N、P 利用效率以此缓解养分胁迫的影响, 从而使叶片养分升高, 但随着密度增大, 植物对养分的需求量增大, 导致土壤养分下降, 使得单株植物养分的积累量降低, 从而使叶片 N、P 含量随着密度增大开始下降<sup>[4,27]</sup>。植物体中 N 和 P 作为主要的限制性营养元素, 对植物结构、功能以及生长有着一定的影响<sup>[31]</sup>。因此, 可以通过 N:P 大小判断土壤养分的限制情况, 当叶片 N:P < 14 时, 植物生长主要受 N 限制; 当 N:P > 16 时, 植物生长主要受 P 限制; 当 14 < N:P < 16 时, 植物生长受 N 和 P 共同限制<sup>[32]</sup>。以此作为判断依据, 晋西黄土区不同密度的刺槐人工林 N:P (24.52~31.50) 均大于 14, 说明该地刺槐林生长主要受到 P 限制。

### 3.2 不同密度刺槐人工林枯落物的 C、N、P 含量及其化学计量比

枯落物是植物与土壤间的纽带, 在生态系统中的养分循环发挥着重要作用。其 C、N、P 含量及其化学计量比可以反映土壤养分的供给与植物对养分的利用状况<sup>[33]</sup>。研究区 5 种密度的刺槐人工林枯落物的 C、N、P 含量均值分别为 290.31 g·kg<sup>-1</sup>、17.16 g·kg<sup>-1</sup>、0.61 g·kg<sup>-1</sup>, 其中 N 含量高于全球

401 种木本植物 N 含量 10.90 g·kg<sup>-1</sup><sup>[34]</sup>, 充分说明刺槐对 N 的利用效率较高。5 种不同密度的枯落物的 C:N、C:P、N:P 大致呈先降低后升高的趋势, 密度对它们有着明显扰动作用, 这与王凯等研究结果相同<sup>[27]</sup>, 这可能是因为密度影响植物对衰老叶片 C、N、P 含量的利用效率, 从而改变枯落物的 C、N、P 含量, 使得其化学计量比随密度变化而变化<sup>[27]</sup>。枯落物的 C:N、N:P 可以反应枯落物的分解速率, 其分解速率与 C:N、N:P 成负相关关系<sup>[11]</sup>。有研究表明, 当 C:N < 40 时, 会出现枯落物净 N 矿化现象, 且矿化作用会随着枯落物 C:N 减小而变得越发明显<sup>[35]</sup>; C:P 低于 600 时, 枯落物 P 开始释放<sup>[36]</sup>; 当枯落物 N:P > 25 时, 枯落物的分解速率受到 P 的限制, 因为 P 含量较低时, 枯落物具有较高的 N 和木质素, 由此造成分解速率降低, N:P 越大受到 P 限制越强烈<sup>[37]</sup> 这反映出刺槐林的枯落物分解速率以及养分返还受密度影响。1 500 株·hm<sup>-2</sup> 枯落物的 N 含量最低, 可能是由于该密度下枯落物的分解速率较快, 部分 N 已经返还给土壤, 而 1 500 株·hm<sup>-2</sup> 刺槐人工林土壤 N 含量显著高于其他密度, 可以说明这点<sup>[4]</sup>。1 500 株·hm<sup>-2</sup> 枯落物的 P 含量较高, 可能是由于该密度下土壤 P 含量丰富, 使叶片对衰老、凋落叶片 P 的重吸收率降低, 让其保有了更多 P 用于返还给土壤中<sup>[27]</sup>。在研究区中, 除 1 500 株·hm<sup>-2</sup> 刺槐人工林枯落物 N:P 低于 25, 其分解速度受 N 限制, 其余密度均高于 25, 分解受 P 限制。

### 3.3 不同密度刺槐林土壤的 C、N、P 含量及其化学计量比

土壤中 C、N、P 含量在一定程度限制林木的生长发育, 其化学计量比反映土壤对林木养分的供应情况<sup>[33]</sup>。本研究区中, 刺槐人工林土壤 C 随着密度的增大而减少, N、P 含量随密度的变化呈先增大后减少的趋势, C:N、C:P 随密度增加呈先减少后增大的趋势, 这与王岩松等<sup>[17]</sup> 研究结果相同。这可能是因为枯落物量随着密度的增大而增加, 从而增大了对土壤养分的补充, 但林分密度的持续增长, 加剧了种间竞争, 林木为了生长发育消耗了大量的 N 和 P, 并且过密的林分结构降低了林内透光度, 减少了土壤水分的含量, 影响了水热气肥条件, 从而对土壤中酶的活性产生影响, 使得枯落物分解速率降低, 影响养分回归土壤以及土壤

固化 C、N、P 的能力<sup>[38]</sup>。有研究表明在 P 缺乏地区，土壤 C:P 越低，植物生长越快<sup>[39]</sup>。研究区中，1 500 株·hm<sup>-2</sup> 刺槐林的 C:P 最低，证实 1 500 株·hm<sup>-2</sup> 为适宜生长的密度。而随着林分密度继续增大，林木间的生存空间变小，对养分竞争变得越来越激烈，从而消耗了大量的 P，使得 P 对人工刺槐林的限制更强<sup>[40]</sup>。

### 3.4 刺槐林叶片-枯落物-土壤 C、N、P 含量及其化学计量比的相关性分析

枯落物 C 与叶片 P 呈显著负相关关系 ( $p < 0.05$ )，枯落物 P 与叶片 P 呈极显著正相关关系 ( $p < 0.01$ )，枯落物 C:N 与叶片 C:P 呈显著正相关关系 ( $p < 0.05$ )；枯落物 C:P 与叶片 C:P、N:P 呈极显著正相关关系 ( $p < 0.01$ )；枯落物 N:P 与叶片 N:P，与叶片 C:P 呈显著正相关关系 ( $p < 0.05$ )，这表明枯落物的养分部分承载自叶片，二者关系紧密。土壤 C 与叶片 C 呈极显著正相关关系 ( $p < 0.01$ )，土壤 N 与叶片 P、枯落物 P 呈极显著正相关关系，土壤 P 与叶片 C 呈极显著负相关关系 ( $p < 0.01$ )。土壤 C:N 与叶片 C:P、N:P 和枯落物 C:P、N:P 呈极显著正相关关系 ( $p < 0.01$ )；土壤 N:P 与叶片 C:P、N:P 和土壤 C:N 呈极显著负相关关系 ( $p < 0.01$ )，与枯落物 C:P 呈显著负相关关系 ( $p < 0.05$ )。这说明土壤是叶片养分的主要来源，枯落物分解是土壤养分重要的补充途径。这与任悦等<sup>[41]</sup>对樟子松人工林 N、P 的化学计量特征以及赵成娇<sup>[42]</sup>对樟子松人工林的化学计量特征研究结果相似；与王亚娟等<sup>[43]</sup>对油松人工林的生态化学计量特征研究结果不一致，说明植物与土壤间的化学计量关系存在的差异，受不同林分结构，气候环境差异等因素影响<sup>[44]</sup>。不同密度的刺槐人工林 C、N、P 含量均表现为叶片 > 枯落物 > 土壤，这与白雪娟等<sup>[29]</sup>研究结果一致。植物光合作用主要是在叶片中进行，新陈代谢旺盛，其 C、N、P 含量相对较高<sup>[33]</sup>。枯落物养分低于叶片，是因为 N、P 在叶片衰老时，逐步转移到新鲜年轻的叶片，这种行为表现出植物对养分利用效率，降低对土壤养分的依赖<sup>[45]</sup>。

## 4 结论

(1) 不同林分密度下，刺槐林叶片 N:P 均

大于 14，表明晋西黄土区刺槐林生长主要受到 P 限制，2 000 株·hm<sup>-2</sup> 和 2 500 株·hm<sup>-2</sup> 的林分受 P 限制最严重。

(2) 不同林分密度之间，叶片-枯落物-土壤 C、N、P 及其化学计量比中除了叶片 N、C:N 以外，均存在不同的显著差异性，表明密度在一定程度上影响着刺槐林的养分分配和化学计量特征。

(3) 1 000~1 500 株·hm<sup>-2</sup> 的刺槐林叶片 C、N、P 含量最高；枯落物和土壤 N、P 含量最高；受养分限制影响最小，枯落物养分分解释放速率较快，为适宜经营密度范围。

### 参考文献:

- [1] 张勇强, 李智超, 厚凌宇, 等. 林分密度对杉木人工林下物种多样性和土壤养分的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(1): 239-250.
- [2] 兰道云, 毕华兴, 赵丹阳, 等. 晋西黄土区不同密度油松人工林保育土壤功能评价[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 189-196.
- [3] 郭子武, 陈双林, 杨清平, 等. 密度对四季竹叶片 C、N、P 化学计量和养分重吸收特征的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 893-899.
- [4] 肖兴翠, 李志辉, 唐作钧, 等. 林分密度对湿地松人工林养分循环速率和利用效率的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(11): 2871-2880.
- [5] 乌吉斯古楞, 陆玉宝, 田有亮, 等. 大青山油松人工林生长与林分密度关系的研究[J]. 内蒙古科技与经济, 2006(12): 19-21.
- [6] 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.
- [7] 张丽霞, 白永飞, 韩兴国. N:P 化学计量学在生态学中的应用(英文)[J]. Acta Botanica Sinica, 2003(9): 1009-1018.
- [8] ZHANG G, ZHANG P, PENG S, et al. The coupling of leaf, litter, and soil nutrients in warm temperate forests in northwestern China[J]. Sci Rep, 2017(7): 11754.
- [9] 吴统贵, 陈步峰, 肖以华, 等. 珠江三角洲3种典型森林类型乔木叶片生态化学计量学[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 58-63.
- [10] 杨阔, 黄建辉, 董丹, 等. 青藏高原草地植物群落冠层叶片氮磷化学计量学分析[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 17-22.
- [11] 李雪峰, 韩士杰, 胡艳玲, 等. 长白山次生针阔混交林凋落物中有机物分解与碳、氮和磷释放的关系[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 245-251.
- [12] 马任甜, 方瑛, 安韶山. 云雾山草地植物地上部分和枯落物的碳、氮、磷生态化学计量特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1170-1180.
- [13] FRANKLIN O, AGREN G I. Leaf senescence and resorption as mechanisms of maximizing photosynthetic production during canopy development at limitation[J]. Functional Ecology, 2002, 16(6): 727-733.
- [14] 王凯, 赵成娇, 张日升, 等. 不同密度樟子松人工林土壤碳氮磷

- 化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2020, 39(3): 741-748.
- [15] 陈义堂. 不同密度杉木林各组分C、N和P含量及其化学计量特征[J]. 广西林业科学, 2021, 50(6): 657-664.
- [16] 茹豪. 晋西黄土区典型林地水文特征及功能分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [17] 王岩松, 马保明, 高海平, 等. 晋西黄土区油松和刺槐人工林土壤养分及其化学计量比对林分密度的响应[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(8): 81-93.
- [18] 侯贵荣, 毕华兴, 魏曦, 等. 黄土残塬沟壑区刺槐林枯落物水源涵养功能综合评价[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 251-257.
- [19] 王宁, 毕华兴, 孔凌霄, 等. 晋西黄土区不同密度刺槐林地土壤水分补偿特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 255-262.
- [20] 周巧稚, 毕华兴, 孔凌霄, 等. 晋西黄土区不同密度刺槐林枯落物层水文生态功能研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 115-121.
- [21] 赵敏, 马宝有, 赵江平, 等. 黄土丘陵沟壑区不同林龄刺槐叶片氮、磷重吸收特征[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(2): 401-407.
- [22] 马任甜, 安韶山, 黄懿梅. 黄土高原不同林龄刺槐林碳、氮、磷化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(9): 2787-2793.
- [23] 李慧, 许亚东, 王涛, 等. 不同林龄刺槐人工林植物与土壤C、N、P化学计量特征演变[J]. 西北农业学报, 2018, 27(11): 1651-1659.
- [24] 赵丹阳, 毕华兴, 侯贵荣, 等. 不同林龄刺槐林植被与土壤养分变化特征[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2021, 19(3): 56-63.
- [25] ELSEY J J, FAGAN W F, DENNO R F, *et al.* Nutritional constraints interrestrial and freshwater food webs[J]. *Nature*, 2000, 40(8): 578-580.
- [26] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 等. 中国东部南北样带654种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究[J]. 环境科学, 2007(12): 2665-2673.
- [27] 王凯, 那恩航, 张日升, 等. 不同密度下沙地樟子松碳、氮、磷化学计量及养分重吸收特征[J]. 生态学杂志, 2021, 40(2): 313-322.
- [28] FIFE D N, NAMBIAR E K S, SAUR E. Retranslocation of foliar nutrients in evergreen tree species planted in a Mediterranean environment[J]. *Tree Physiology*, 2008, 28(2): 187-96.
- [29] 白雪娟, 曾全超, 安韶山, 等. 黄土高原不同人工林叶片-凋落叶-土壤生态化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3823-3830.
- [30] ELSEY J J, ACHARYA K, KYLE M, *et al.* Growth rate stoichiometry couplings in diverse biota[J]. *Ecology Letters*, 2010, 6: 936-943.
- [31] SABINE G. N: P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. *New Phytologist*, 2004, 164(2): 243-266.
- [32] KOERSELMAN W, MEULEMAN AFM. The vegetation N: P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [33] 任悦. 沙地樟子松人工林叶片-枯落物-土壤C、N、P化学计量特征[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [34] KANG H, XIN Z, BERG B, *et al.* Global pattern of leaf litter nitrogen and phosphorus in woody plants[J]. *Annals of Forest Science*, 2010, 67(8): 811.
- [35] WILLIAM P, WHENDEE L S, INGRID C B, *et al.* Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition[J]. *Science*, 2007, 315(26): 361-364.
- [36] 赵谷风, 蔡延(马奔), 罗媛媛等. 青冈常绿阔叶林凋落物分解过程中营养元素动态[J]. 生态学报, 2006(10): 3286-3295.
- [37] 潘复静, 张伟, 王克林, 等. 典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物C:N:P生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2011, 31(2): 335-343.
- [38] U M, ZHONG Z, SUN Z, *et al.* Soil available phosphorus and moisture drive nutrient resorption patterns in plantations on the Loess Plateau[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 461: 117910.
- [39] ELSEY J J, ACHARYA K, KYLE M, *et al.* Growth rate-stoichiometry couplings in diverse biota[J]. *Ecology Letters*, 2003, 10(6): 936-943.
- [40] 赵琼, 曾德慧, 陈伏生, 等. 沙地樟子松人工林土壤磷库及其有效性初步研究[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 224-227.
- [41] 任悦, 高广磊, 丁国栋, 等. 沙地樟子松人工林叶片-枯落物-土壤氮磷化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30(3): 743-750.
- [42] 赵成姣. 不同密度沙地樟子松人工林生态化学计量特征[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2019.
- [43] 王亚娟, 陈云明, 孙亚荣, 等. 黄土丘陵区油松人工林植物器官-凋落物-土壤化学计量特征的季节变化[J]. 水土保持学报, 2022, 36(4): 350-356.
- [44] 王珂, 尹向洲, 张明辉, 等. 林龄对红松人工林叶片-凋落物-土壤C、N、P生态化学计量特征的影响[J]. 西部林业科学, 2023, 52(2): 55-61 + 74.
- [45] RAERTS, F CHAPIN. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns[J]. *Advances in Ecological Research*, 1999, 30: 1-67.



# Stoichiometric Characteristics of Leaves-litter-soil of *Robinia pseudoacacia* of Different Densities in the Loess Region of Western Shanxi Province

GONG Da-peng<sup>1</sup>, BI Hua-xing<sup>1,2,3,4,5,6</sup>, WANG Jin-feng<sup>7</sup>, ZHAO Dan-yang<sup>1</sup>,  
HUANG Jing-han<sup>1</sup>, SONG Yi-lin<sup>1</sup>

(1. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing 100083, China; 3. Ji County Station, Chinese National Ecosystem Research Network (CNERN), Beijing 100083, China; 4. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China; 5. Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China; 6. Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering of Ministry of Education, Beijing 100083, China; 7. Wang Jinfeng, Fengtai district hydrology and soil and water conservation workstation, Beijing 100165, China)

**Abstract:** [Objective] To study the effects of different stand densities on the stoichiometric characteristics of C, N and P in leaves, litter and soil of *Robinia pseudoacacia* plantation forests, and to provide scientific references for the management of plantation forests in the loess region of western Shanxi Province. [Methods] Based on five different densities (500, 1000, 1500, 2000, 2500 plants/hm<sup>2</sup>) of plantation forests in the loess region of western Shanxi Province, the nutrients of leaves, litter and soil were measured and analysed. The effects of density on the three nutrients were analysed by one-way analysis of variance (ANOVA), and the correlations between leaf, litter, soil C, N, P and their stoichiometric ratios in plantations were analyzed by Pearson's correlation coefficient. [Result] The C, N and P contents of leaves of plantation forest increased and then decreased with the increase of density, and the C : P and N : P of leaves decreased and then increased; the C, C : N, C : P and N : P of litter decreased and then increased with the increase of density, and the N and P increased and then decreased; the C, P and N contents and C : P and N : P of soil decreased with the increase of density; and the C : N showed a tendency of decreasing and then increasing with the increase of density. Leaf N : P was greater than 14 in different stand densities, and there were different significant differences ( $p < 0.05$ ) in leaf-detritus-soil C, N, P and their stoichiometric ratios, except for leaf N, C : N. [Conclusion] Leaf N : P is greater than 14 in different stand densities, indicating that plantation forests in the study area are mainly P-limited; density affects nutrient cycling and its distribution and stoichiometric characteristics of plantation forests to a certain extent; *Robinia pseudoacacia* plantation forests with densities ranging from 1,000 to 1,500 plants/hm<sup>2</sup> have the highest contents of leaf blade, litter, and soil C, N, and P, and the weakest nutrient limitation, and the decomposition rate of litter is relatively fast, which is suitable for the operation of the forests.

**Keywords:** Stand density; plantation forest; nutrient cycling; stoichiometric characteristics

(责任编辑: 崔 贝)