

陈培云, 范弢, 何停, 户红红. 滇东岩溶高原不同恢复阶段云南松林叶片-枯落物-土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28 (6): 1549-1556

Chen PY, Fan T, He T, Hu HH. Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus in leaf litter soil of *Pinus yunnanensis* forest during different restoration stages in the karst plateau of eastern Yunnan [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, 28 (6): 1549-1556

滇东岩溶高原不同恢复阶段云南松林叶片-枯落物-土壤碳氮磷化学计量特征

陈培云^{1,2} 范弢^{1,2} 何停^{1,2} 户红红^{1,2}

¹云南师范大学地理学部 昆明 650500

²云南省高原地理过程与环境变化重点实验室 昆明 650500

摘要 以滇东岩溶坡地不同恢复阶段云南松林(纯林、人工混交林、天然次生林)为研究对象,以元江栲原生林和小铁仔灌丛作为参照样地,对5种植被类型中的叶片-枯落物-土壤中的C、N、P含量和化学计量比特征进行研究。结果表明:

(1) 3种云南松林都呈现为高C(432.27 g/kg)、低N(10.28 g/kg)、P(0.96 g/kg)的格局,5种植被类型的叶片-枯落物-土壤C、N、P含量基本都表现为叶片>枯落物>土壤,C/N、C/P、N/P值则都表现为枯落物>叶片>土壤,叶片和枯落物的养分含量和化学计量比值与土壤间差异显著。(2) 3种云南松林对于养分的吸收同化能力差异不大,但天然次生林的枯落物质量最好,人工混交林的土壤N、P有效性最高,云南松林内受N的胁迫作用强于原生林和灌丛。(3) 植物叶片-枯落物-土壤中C、N、P及其化学计量比间相关性显著,互馈机制明显。研究区内土壤C、N、P化学计量特征受土壤pH、团聚体颗粒、含水率、容重和硝态氮影响显著。因此,滇东岩溶高原云南松植被恢复过程中主要受N胁迫作用,提高枯落物养分回流是云南松植被恢复与经营的关键要素。(图4 表3 参41)

关键词 叶片-枯落物-土壤; 化学计量特征; 影响因子; 云南松; 滇东高原

Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus in leaf litter soil of *Pinus yunnanensis* forest during different restoration stages in the karst plateau of eastern Yunnan

CHEN Peiyun^{1,2}, FAN Tao^{1,2}, HE Ting^{1,2} & HU Honghong^{1,2}

¹Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China

²Yunnan Key Laboratory of Plateau Geographical Process and Environmental Change, Kunming 650500, China

Abstract We evaluated *Pinus yunnanensis* forests (pure forests, artificial mixed forests, and natural secondary forests) at different stages of restoration on karst slopes in eastern Yunnan, China; *Castanopsis orthacantha* primary forest and *Myrsine africana* shrub were used as reference plots. The C, N, and P contents and their stoichiometric ratios in the leaf litter soil of the five types of forest were investigated. The results showed that: (1) all the three *P. yunnanensis* forests had a pattern of high C (432.27 g/kg) with low N (10.28 g/kg) and P (0.96 g/kg). The contents of C, N, and P in the leaf litter soil of the five forest types from high to low were as follows: leaf > litter > soil, while the values of C/N, C/P, and N/P from high to low were as follows: litter > leaf > soil. The nutrient content and stoichiometric ratios of leaves and litter were significantly different from those of the soil. (2) The nutrient absorption and assimilation capacity of the three *P. yunnanensis* forests showed little difference, but the natural secondary forests had the best litter quality, and the artificial mixed forests had the highest soil N and P availability. *P. yunnanensis* forests were more stressed by N than primary forests and shrubs. (3) Plant leaf-litter-soil C, N, and P were significantly correlated with their stoichiometric ratios, and the mutual feedback mechanism was obvious. The stoichiometric characteristics of soil C, N, and P in the study area were significantly affected by soil pH, aggregate particles, water content, volume, weight, and nitrate nitrogen. The vegetation restoration of *P. yunnanensis* in the karst plateau of eastern Yunnan was mainly affected by N stress, which is the key factor for vegetation restoration and management of *P. yunnanensis* to improve the nutrient backflow of litter.

Keywords leaf-litter-soil; stoichiometric characteristics; influence factor; *Pinus yunnanensis*; eastern Yunnan plateau

收稿日期 Received: 2021-06-07 接受日期 Accepted: 2021-08-20

国家自然科学基金项目(41661004)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (41661004)

✉通信作者 Corresponding author (E-mail: fantaojx@163.com)

植物与土壤之间存在互馈关系^[1], 土壤为植物生长提供养分, 植物通过光合作用产生营养元素, 并通过枯落物分解这个纽带使得营养元素在植物-土壤之间发生循环作用。C是植物体的主要组成元素, N和P是植物生长的限制性因素^[2], 可通过利用生态化学计量学探究叶片-枯落物-土壤间的化学元素计量特征, 推测C、N、P在生态系统中的分配情况, 循环过程和对植物生长发育的限制性^[3]。对于云南松林内的C、N、P元素分布特点及它们之间耦合关系的变化研究, 有利于进一步了解滇东喀斯特高原云南松林生态系统的养分供求现状。

不同地区^[4]、不同类型^[5]以及不同林龄^[6]、不同演替阶段^[7]的植被都会对植物叶片-枯落物-土壤的养分含量有所影响, 进而影响其化学计量比值。在植被正向演替过程中, 随着植被林龄不断增加, 植被内的林分结构、枯落物质量和土壤性质等都会发生改变, 进而影响养分分配格局。随植被正向演替, 不同组分中的养分含量及化学计量比值的变化趋势也不相同, 马尾松 (*Pinus massoniana*) 叶片C、N含量表现为随植被恢复而增加, 而叶片P含量则先增多后减少^[8], 刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 林的叶片C/N值随植被恢复变化不大, C/P和N/P值则随植被恢复而变大^[7]; 不同林龄的油松 (*Pinus tabulaeformis*) 枯落物C、N随植被恢复先增多后减少, P含量则先减少后增多^[9], 樟子松 (*Pinus sylvestris*) 的枯落物C/N、C/P和N/P值则都随植被恢复出现先增大后减小的趋势^[10]。关于土壤在不同植被恢复阶段的化学计量比研究较多, 杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 林下土壤C、N、P含量随植被恢复出现减少—增加—减少的趋势^[11], 在不同植被恢复阶段的湿地松 (*Pinus elliotii*) 林下土壤C/N、C/P和N/P值差异均不显著^[12], 除此之外, 关于土壤化学计量比与环境因子间的相关性研究也比较多, 有地形^[13]、生境^[14]、土壤团聚体结构^[15]等方面。

滇东岩溶高原地区的地形以岩溶断陷盆地为主, 剧烈的高差使坡面土壤受到的侵蚀作用强烈, 垂直裂隙发育, 多种生境类型交叉相间分布, 水土流失和漏失问题严重。云南松 (*Pinus yunnanensis*) 作为西南地区植树造林的先锋树种, 由于其生态适应性广、耐干旱贫瘠、更新能力强、经济效益高等特点^[16], 在云南省得到广泛种植, 是该区的石漠化治理的重要手段之一。目前关于云南松化学计量的研究主要是与其他植被类型一起作为比较对象^[16], 或是集中于单个组分^[17], 对于云南松叶片-枯落物-土壤化学计量比值随植被恢复变化的研究还比较少, 本研究以云南松植被演替不同阶段: 纯林、人工混交林、天然次生林为研究对象, 以演替顶级阶段的元江栲原

生林和演替初级阶段的小铁仔灌丛作为对比样地, 通过对其叶片-枯落物-土壤连续体的化学计量分布特征及相关性的研究, 以及对土壤养分及其计量比与环境因子的冗余分析, 探讨喀斯特地区云南松林养分循环、养分限制状况, 为喀斯特高原云南松林更新与合理经营提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

云南省沾益海峰自然保护区 (103°29'-103°39'E, 25°35'-25°57'N) 地处乌蒙山系南延的滇东高原喀斯特山地核心部位, 海拔1 783-2 424 m, 属于亚热带高原季风气候, 雨热同期, 年降雨量1 073.5-1 089.7 mm, 年平均气温13-15 °C, 土壤以红壤为主, 土层浅薄, 区内土壤主要呈酸性, pH值低于7。由于环境因素与人为活动的共同影响, 导致该区石漠化现象加剧, 亚热带常绿阔叶林逐渐演变为云南松林与常绿阔叶林嵌套发育的景观类型, 云南松在该区人工林类型中占有重要地位其中, 云南松天然次生林中的植物组成主要有云南松 (*P. yunnanensis*)、滇油杉 (*Keteleeria evelyniana*)、滇石栎 (*Lithocarpus dealbatus*)、卵叶南烛 (*Lyonia variabilis*)、马醉木 (*Pieris formosa*)、毛蕨菜 (*Pteridium revolutum*)、黄背草 (*Themeda japonica*) 等, 人工混交林中的植物组成主要有云南松 (*P. yunnanensis*)、华山松 (*Pinus armandii*)、栓皮栎 (*Quercus variabilis*)、炮仗花杜鹃 (*Rhododendron spinuliferum*)、白牛筋 (*Dichotomanthes tristanicarpa*)、白茅 (*Imperata cylindrica*) 等。

1.2 样品采集与处理

2019年5月在研究区域内选取立地条件基本相同的典型区域, 在其中建立5个20 m × 20 m的标准样地。样地植被类型分别为3个云南松林演替不同阶段: 纯林、人工混交林和天然次生林; 以及两个对照样地, 元江栲原生林和小铁仔灌丛。

在每个样地内选择植株高度相对一致, 生长良好且成熟的各物种植株各3株 (表1), 用高枝剪在树冠的东南西北4个方位上无病害的成熟健康叶片, 混合均匀后采用四分法取样。在每个样地中设置3个0.5 m × 0.5 m的小样方, 收取样方内所有枯落物, 混合为一个样品。同时, 在小样方内对表层土壤 (0-20 cm) 进行取样。植物叶片与枯落物样品放入105 °C烘箱内杀青2 h, 后转65 °C烘干至恒重, 将土壤样品中的植物根系、凋落物和石砾等杂质去除, 置于室内阴凉处自然风干, 将

表1 样地基本概况

Table 1 The basic conditions of the sampling plots

植被类型 Forest	OF	NSF	AMF	PF	BF
优势种 Dominant species	元江栲 <i>Castanopsis orthacantha</i>	云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	云南松 <i>P. yunnanensis</i>	云南松 <i>P. yunnanensis</i>	小铁仔 <i>Myrsine africana</i>
重要值 Importance value	0.65	0.82	0.74	1	0.69
平均树高 Average height (h/m)	15.4 ± 0.28	13.4 ± 0.42	12.5 ± 0.31	10.3 ± 0.65	7.86 ± 0.58
平均胸径 Average diameter (D/m)	18.6 ± 1.13	14.7 ± 1.49	13.3 ± 1.40	11.7 ± 1.55	8.43 ± 1.21
平均林龄 Average forest stand age (t/a)	> 100	> 50	30	15	10
生境类型 Habitat type	土坡 Soil slope	土面、石沟 Soil surface, stony gully	土坡、石沟 Soil slope, stony gully	土坡、石沟 Soil slope, stony gully	石沟 Stony gully

OF: 元江栲原生林; NSF: 云南松天然次生林; AMF: 云南松人工混交林; PF: 云南松纯林; BF: 小铁仔灌丛。

OF: Primary forest of *C. orthacantha*; NSF: Natural secondary *P. yunnanensis* forest; AMF: Artificial mixed *P. yunnanensis* forest; PF: Pure *P. yunnanensis* forest; BF: Shrub of *M. africana*.

所有样品研细，过60目筛，以备养分分析。

全氮使用自动凯氏定氮仪/SKD-200测定，有机碳使用重铬酸钾氧化-容量法测定，全磷使用紫外-可见分光光度计/752自动测定。土壤团聚体使用土壤团聚体分析仪（型号XY-100）进行湿筛上下震荡，得到> 0.25 mm和< 0.25 mm的大团聚体和微团聚体。

1.3 数据处理

采用Excel 2010和SPSS 21.0软件进行数据处理与分析，利用单因素方差分析（One-way ANOVA）和多重比较法（LSD）比较不同植被的同一组分，同一植被不同组分间的化学计量差异。用Person相关系数法对化学计量和化学计量比进行相关性分析，采用Canoco 5软件进行冗余分析，研究土壤化学计量特征的影响因子，使用Origin 2019制图。

2 结果与分析

2.1 叶片-枯落物-土壤C、N、P含量特征

元江栲栳原生林、云南松林及小铁仔灌丛的C、N、P含量基本为叶片>枯落物>土壤（图1）。其中，5种植被的叶片C、N、P平均含量为438 g/kg、10.5 g/kg、0.98 g/kg，枯落物C、N、P平均含量为412 g/kg、8.83 g/kg、0.65 g/kg，土壤C、N、P平均含量为5.88 g/kg、0.54 g/kg、0.42 g/kg。叶片和枯落物中的C、N、P含量显著高于土壤（ $P < 0.05$ ）。

在5种植被类型中，叶片C含量以人工林最高（453 g/kg），枯落物C含量以天然次生林最高（433 g/kg），原生林中的叶片（415 g/kg）和枯落物C（385 g/kg）含量最低，云南松混交林叶片C含量显著高于其他3种植被类型，除原生林外，其他几种植被类型间枯落物C含量（413-417 g/kg）较为接近。原生林和灌丛土壤C含量显著高于云南松林（ $P < 0.05$ ），天然次生林和人工混交林的土壤C含量高于纯林，说明云南松林叶片C含量多，但养分归还量少，云南松混交林的养分归还状况优于纯林。

天然次生林和人工混交林的叶片N含量分别是纯林的1.07和1.09倍，略低于原生林和灌丛。枯落物N含量随云南松恢复逐渐增多，天然次生林枯落物N含量是人工混交林和纯林的1.22和1.56倍。云南松林土壤N含量（0.23-0.55 g/kg）显著低于原生林（1.00 g/kg）和灌丛（0.68 g/kg），人工混交林土壤N含量是天然次生林和纯林的2.16和2.38倍。

原生林叶片P含量（1.23 g/kg）最高，云南松林间的叶片P含量差异不显著（0.94-0.96 g/kg）。天然次生林和人工混交林枯落物P及土壤P含量显著高于其他3种植被类型（ $P < 0.05$ ），其含量分别是纯林的1.76、1.66倍和1.29、1.40倍。

2.2 叶片-枯落物-土壤C/N、C/P、N/P含量特征

5种植被类型的C/N、C/P、N/P值表现为枯落物>叶片>土壤（图1）。枯落物C/N、C/P、N/P的平均值为48.4、661、13.8，叶片C/N、C/P、N/P的平均值为42.8、458、10.8，土壤

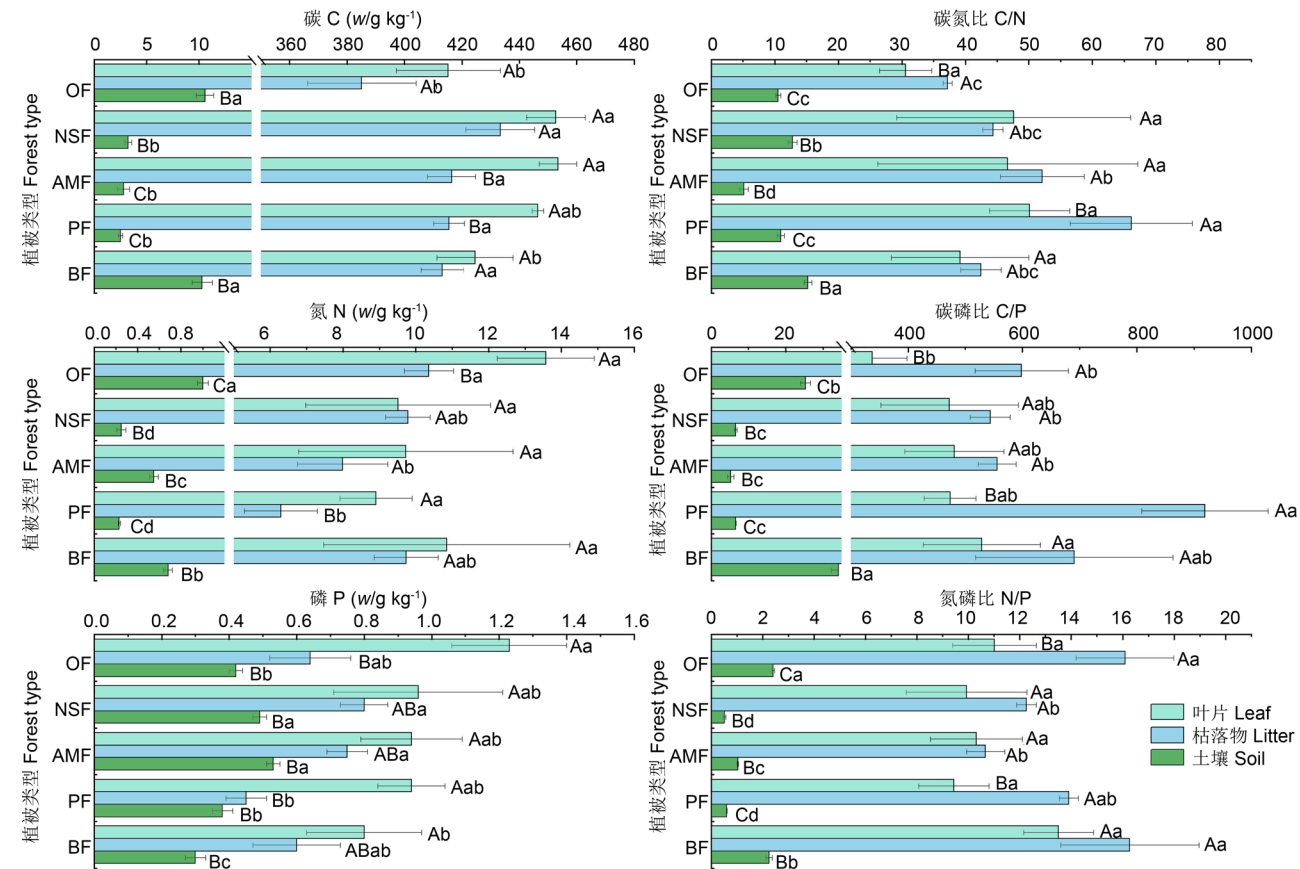


图1 5种植被叶片-枯落物-土壤C、N、P含量以及C、N、P化学计量比。OF：元江栲栳原生林；NSF：云南松天然次生林；AMF：云南松人工混交林；PF：云南松纯林；BF：小铁仔灌丛。不同小写字母表示同一组分不同植被间差异性显著（ $P < 0.05$ ），不同大写字母表示同一植被不同组分间差异性显著（ $P < 0.05$ ）。

Fig. 1 The C, N, P contents and C, N, P stoichiometric ratios of the leaf-litter-soil in five forests. OF: Primary forest of *Castanopsis orthacantha*; NSF: Natural secondary *Pinus yunnanensis* forest; AMF: Artificial mixed *P. yunnanensis* forest; PF: Pure *P. yunnanensis* forest; BF: Shrub of *Myrsine africana*. Different lowercase letters indicated significant differences among different forest types of the same component ($P < 0.05$), and different capital letters indicated significant differences among different components of the same forest ($P < 0.05$).

C/N、C/P、N/P的平均值为10.9、15.5、1.36。叶片和枯落物的化学计量比值显著高于土壤 ($P < 0.05$)。

5种植被间的叶片C/N值差异不显著, 纯林的枯落物C/N值显著高于其他植被类型, 分别是天然次生林和人工混交林的1.49和1.27倍。天然次生林土壤C/N值显著高于人工混交林、纯林和原生林, 显著低于灌丛 ($P < 0.05$)。

灌丛的叶片C/P (529) 值最高, 原生林 (337) 最低, 云南松林间的C/P (472-481) 值差异不大。纯林的枯落物C/P值显著高于其他几种植被类型, 是天然次生林和人工混交林的1.69和1.65倍。人工混交林土壤C/P值略低于天然次生林和纯林, 云南松林土壤C/P值 (5.24-6.59) 显著低于原生林 (25.4) 和灌丛 (34.2) ($P < 0.05$)。

原生林 (11.0) 和灌丛 (13.5) 的叶片N/P值高于云南松林 (9.44-10.3), 云南松林中人工林的N/P值最高, 纯林最低。纯林枯落物N/P值最高, 是天然次生林的1.13倍和人工混交林的1.30倍, 人工混交林的土壤N/P值最高, 是天然次生林的1.99倍和纯林的1.71倍, 云南松林叶片-枯落物-土壤N/P值显著低于原生林和灌丛。

2.3 叶片-枯落物-土壤C、N、P计量比相关性

通过对5种植被类型间叶片、枯落物、土壤C、N、P的Person相关性分析 (表2) 表明, 叶片C、N、P显著影响枯落物C、N、P含量, 说明植物对枯落物养分的影响作用显著。叶片N、P之间显著正相关, 叶片C与土壤N相关性显著。枯落物C、N含量显著影响枯落物P含量, 枯落物C、N、P分别对土壤N、土壤C、N和土壤P影响显著。土壤C与土壤N、P之间相关性显著。

对5种植被类型叶片、枯落物、土壤C/N、C/P、N/P的相关性分析 (表3) 表明, 叶片C/N与叶片C/P和N/P间的相关性显

著, 叶片N/P与土壤C/N显著负相关。枯落物C/N与枯落物C/P和土壤C/P、N/P显著正相关, 枯落物N/P与土壤C/N、C/P、N/P显著正相关。土壤C/N与土壤C/P、土壤C/P与土壤N/P显著正相关。

2.4 土壤C、N、P及其计量比与环境因子相关性

5种植被类型土壤中大团聚体数量显著高于微团聚体 (图2), 人工混交林和天然次生林的大团聚体数量显著高于原生林、纯林和灌丛; 反之, 微团聚体数量显著低于原生林、纯林

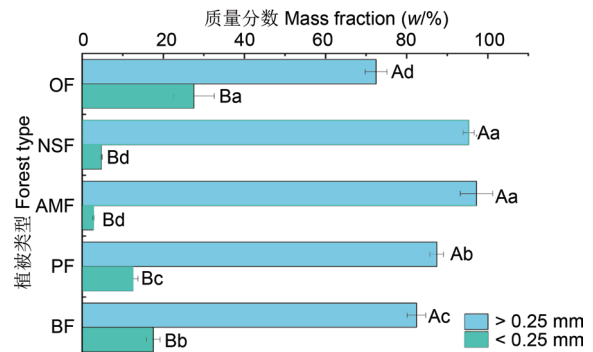


图2 5种植被类型表层土壤团聚体质量分数。OF: 元江栲原生林; NSF: 云南松天然次生林; AMF: 云南松人工混交林; PF: 云南松纯林; BF: 小铁仔灌丛。不同小写字母表示不同植被同一粒径间差异性显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示同一植被不同粒径间差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 2 The mass fraction of surface soil aggregates of five forests. OF: Primary forest of *Castanopsis orthacantha*; NSF: Natural secondary *Pinus yunnanensis* forest; AMF: Artificial mixed *P. yunnanensis* forest; PF: Pure *P. yunnanensis* forest; BF: Shrub of *Myrsine africana*. Different lowercase letters indicate significant differences among different forest types of the same aggregate size ($P < 0.05$), and different capital letters indicate significant differences among different aggregate size of the same forest ($P < 0.05$).

表2 5种植被叶片-枯落物-土壤C、N、P相关性

Table 2 The correlation of C, N, and P between leaf, litter, and soil in five forests

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	-	1						
	P	-	0.709**	1					
枯落物 Litter	C	0.657**	-0.592*	-0.571*	1				
	N	-	-	-	1				
	P	-	-	-	0.515*	0.661**	1		
土壤 Soil	C	-	-	-	0.676**	-	1		
	N	-0.636*	-	-	-0.620*	0.593*	-	0.854**	1
	P	-	-	-	-	-	0.682**	-0.550*	1

*和**分别表示在0.05和0.01水平上显著相关。

* and ** indicate significant correlation at the levels of 0.05 and 0.01, respectively.

表3 5种植被叶片-枯落物-土壤C/N、C/P、N/P相关性

Table 3 The correlation of C/N, C/P and N/P between leaf, litter, and soil in five forests

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	0.752**	1						
	N/P	-0.649**	-	1					
枯落物 Litter	C/N	-	-	1					
	C/P	-	-	0.697**	1				
	N/P	-	-	-	-	1			
土壤 Soil	C/N	-	-	-	-	0.574*	1		
	C/P	-	-	-	-	0.767**	0.587*	1	
	N/P	-	-	-	-	0.691**	-	0.923**	1

*和**分别表示在0.05和0.01水平上显著相关。

* and ** indicate significant correlation at the levels of 0.05 and 0.01, respectively.

和灌丛。说明天然次生林及人工混交林对土壤结构稳定性的改善作用优于其他3种植被类型。

由土壤C、N、P及其计量比与环境因子之间的RDA结果(图3)可知,环境因子能够解释土壤C、N、P及其计量比变异的86.55%,其中第一冗余因子解释了变异的74.25%,主要与土壤团聚体颗粒、pH、含水率与无机态氮有关;第二冗余因子解释了变异的12.3%,主要与土壤细根与容重有关。结合冗余分析与Person相关性分析,土壤C、N、N/P与pH、大团聚体、含水率显著负相关,与土壤微团聚体极显著正相关。土壤C与容重极显著正相关,土壤N与硝态氮显著正相关,土壤P与容重显著负相关,与细根和硝态氮显著正相关。土壤C/N与容重极显著正相关,与细根和硝态氮显著负相关,土壤C/P和pH显著负相关,和容重极显著正相关。

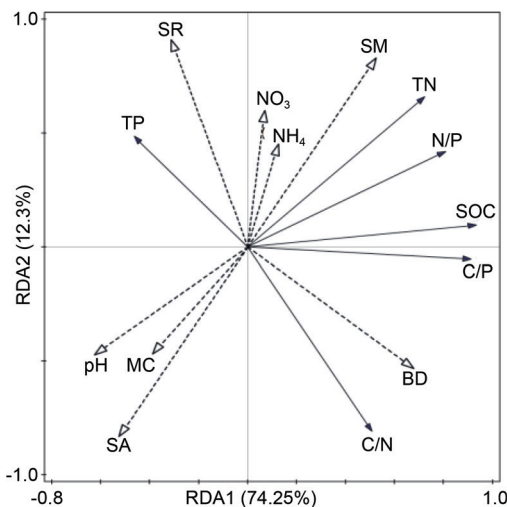


图3 表层土壤C、N、P及其计量比与环境因子之间的冗余分析二维排序图。SR: 土壤细根; NO₃⁻: 硝态氮; NH₄⁺: 铵态氮; SM: 微团聚体; BD: 容重; SA: 大团聚体; MC: 含水率。

Fig. 3 The redundancy analysis between C, N, P, and their stoichiometric ratios with environmental factors of surface soil. SR: Soil fine root; NO₃⁻: Nitrate nitrogen; NH₄⁺: Ammonium nitrogen; SM: Micro-aggregate; BD: Volume-weight; SA: Macro-aggregates; MC: Moisture content.

5种植被类型土壤大团聚体及微团聚体中C、N、P含量相似(图4),原生林及灌丛土壤大团聚体和微团聚体的C、N含量显著高于云南松林,云南松林中以人工混交林土壤C、N含量为最多。各植被类型土壤大团聚体及微团聚体中的P含量接近,云南松林中的P含量以人工混交林为最多,纯林最少;云南松林土壤团聚体P含量高于原生林和灌丛。

3 讨论

3.1 不同恢复阶段云南松林叶片-枯落物-土壤C、N、P含量特征及耦合关系

研究区内云南松林叶片的C、N、P含量分别为446-454、8.91-9.72、0.94-0.96 g/kg,低于全球(C 464 g/kg)^[18]和全国(N 18.6 g/kg, P 1.21 g/kg)^[19]其他陆生植物的平均养分含量,低于喀斯特岩溶山地马尾松林^[20]叶片C、N、P(492、12.2、1.04 g/kg)含量。针叶树种平均C含量高于阔叶树种^[21],因此原生林与灌丛的叶片C含量低于云南松林。枯落物C、N、P与叶片C、N、P之间呈显著相关性,说明植物是枯落物养分的主要来源,叶片N、P含量间极显著正相关,这是由于生长期

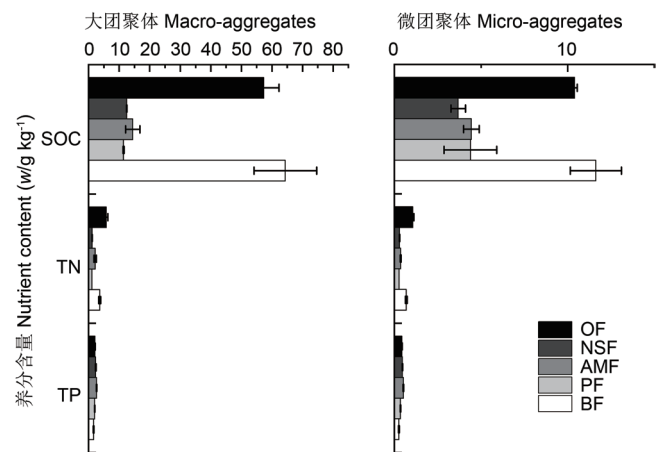


图4 5种植被土壤团聚体C、N、P含量。OF: 元江栲原生林; NSF: 云南松天然次生林; AMF: 云南松人工混交林; PF: 云南松纯林; BF: 小铁仔灌丛。

Fig. 4 Contents of C, N, and P of soil aggregates in five forests. OF: Primary forest of *Castanopsis orthacantha*; NSF: Natural secondary *Pinus yunnanensis* forest; AMF: Artificial mixed *P. yunnanensis* forest; PF: Pure *P. yunnanensis* forest; BF: Shrub of *Myrsine africana*.

中的植物需要大量的rRNA(核糖体)来合成蛋白质等物质,使得叶片N含量增加,而rRNA也是植物P的主要贡献者^[22],叶片中的P含量相继增加。

枯落物C、N、P含量相比叶片有所降低,这是因为植物对养分再吸收作用的影响。云南松林枯落物C、N、P含量随植被恢复而逐渐增多,说明云南松植被恢复利于枯落物质量的提高。枯落物C、N增加会提升枯落物中的生物量,进而促进枯落物P含量增加^[23],因此枯落物P与枯落物C、N存在正相关性。

土壤养分是植物生长的直接养分来源,其含量受枯落物分解养分归还量的影响,在0-20 cm的表层土壤中C、N、P含量为2.51-10.6、0.23-1.0、0.30-0.53 g/kg,远低于全国土壤养分平均含量水平(11.1、1.06、0.65 g/kg)^[24],低于滇南云南松林地土壤养分含量(50.2、4.54、0.51 g/kg)^[16],表明该区土壤较为贫瘠。天然次生林和人工混交林土壤养分含量状况优于纯林,这是由于针阔混交林的养分分解状况和枯落物质量都比纯林好。云南松林土壤P含量高于原生林和灌丛,而土壤C、N含量远低于这两个参考样地,说明云南松林对于P素的固持作用较好,以及需要注意纯林生长发育中土壤施肥和提升枯落物质量的问题。枯落物N与土壤C、N、P间的相关性强于枯落物C和P,说明土壤N的获取方式相对较为单一^[25]。

随云南松林植被恢复,其叶片、枯落物、土壤中的养分格局随之发生改变,叶片C、N、P含量先增多后减少,枯落物C、N、P含量则逐渐增多,土壤C逐渐增多,而土壤N、P含量也是先增多后减少。这表明云南松植被发展到后期阶段,尽管枯落物养分输入由单一变得的多样,含量有所增多,作为土壤养分的主要来源之一的枯落物养分归还量并没有因此增加^[26],造成土壤养分含量供应不足,使云南松生态系统内养分含量到后期出现减少的情况。

3.2 不同恢复阶段云南松林叶片-枯落物-土壤C、N、P计量比特征及耦合关系

通过对植物及环境中C、N、P的化学计量比研究能够判定植物的养分利用情况、土壤的养分供应情况及生态环境受养分限制格局等^[27]。成熟叶片的C/N、C/P值可表征植物对N和P的利用效率^[28],本研究区内叶片C/N、C/P值为30.6-50.1、

337-529, 高于全球 (22.5、232)^[18] 及贵州喀斯特高原 (25.7、278)^[29] 植物的C/N和C/P值, 说明研究区内的植物具有较高的C同化能力及N、P利用率, 其中云南松林对养分的同化利用效率要优于原生林和灌丛, 对于该区的适应性更强, 原生林的C/N、C/P值较低, 说明植物生长速率较快^[30]。云南松叶片C/N值随植被恢复先减小后增大, 而叶片C/P值则随植被恢复先增大后减小, 这与人对于不同林龄常绿针叶林的研究结果^[8]不同, 可能是因为不同地区的环境状况差异所致。根据Guseswell对于N/P值的界定标准 (10-20)^[31], 人工混交林 (9.92) 和纯林 (9.44) 受N的限制作用, 演替到天然次生林 (10.3) 阶段, 受N、P的共同限制作用, 因此在云南松生长发育初期, 应与乡土阔叶树种共植, 如元江栲、滇石栎及清香木等叶片N素含量相对较高, 能够提高枯落物质量, 促进土壤养分提高, 后期应注意N、P的共同添加。叶片C、N、P间相关性不显著, 而叶片C/N、C/P、N/P间有显著相关性, 说明植物C-N、C-P间的耦合关系由N、P主导^[32]。

研究区内枯落物C/N、C/P、N/P值分别为37.2-66.1、543-919和10.7-16.3, 低于全球枯落物 (66.2、3144、45.5)^[33]的化学计量比值, 与喀斯特峡谷地区原生林^[34]枯落物相比, 研究区内C/P和N/P值较低, C/N值相近。C/N、C/P值低利于枯落物的分解、增加土壤养分含量^[35], 云南松枯落物C/N、C/P值随植被恢复逐渐降低, 说明枯落物质量从纯林到天然次生林不断提高。枯落物C/P值是否低于600, 是判定枯落物P处于释放或固持状态的依据^[36], 天然次生林和人工混交林的枯落物C/P值较小, 枯落物P处于净释放状态, 因此它们的土壤P含量也相对较多。本研究区内的枯落物N/P值均<25, 枯落物分解主要受N元素的制约作用^[29], 云南松林受到的制约作用强于原生林和灌丛, 其中纯林的限制作用强于天然次生林和人工混交林。枯落物C/N和C/P之间极显著正相关, 说明枯落物C显著影响N、P的分解。

土壤C/N、C/P、N/P值分别为5.11-15.2、5.24-34.2和0.51-2.40, 其中C/P和N/P值低于全国 (61、5.2)^[24]和喀斯特峰林峰丛区 (79.2、6.64)^[37]土壤水平, 土壤C/N值 (11.9、12.0) 较为接近。土壤C/P值是P素矿化能力的标志^[6], 云南松林的P素有效性优于原生林和灌丛, 其中以人工混交林最佳。研究区内土壤N/P值低, 说明植物生长受N素的限制, 其中天然次生林和纯林受到的限制作用较人工混交林更强。总体看来, 不同恢复阶段云南松林土壤状况表现为人工混交林>天然次生林>纯林, 这可能是因为天然次生林恢复年限较长, 难分解的物质在土壤中不断累积, 导致土壤孔隙状况不佳, 养分分解速率慢, 也可能是由于天然次生林内优势种叶片N普遍低于人工混交林优势种叶片N含量, 以及人为收取枯枝落物等人类活动干扰所致。枯落物C/N与土壤C/P、N/P间显著负相关, 较低的枯落物C/N值能够促进养分分解及归还, 枯落物N/P与土壤C/N、C/P、N/P间显著正相关, 说明土壤养分含量主要受制于枯落物养分归还, 土壤C/N与土壤C/P, 土壤C/P与土壤N/P间有显著正相关性, 表明土壤中C、N、P间的耦合关系。

3.3 土壤C、N、P计量特征与环境因子相关性

在N素较为缺乏的地区, 土壤水分、有效氮素供给状态和土壤颗粒结构等都是影响生态系统生产力变化的主要环境因素^[38]。土壤C、N、N/P与土壤大团聚显著负相关, 与微团聚体显著正相关, 云南松林土壤团聚体养分含量与土壤大团聚体数量的变化一致, 说明云南松植被恢复对土壤结构的改善作用能够促进土壤团聚体养分累积。降雨和径流的冲刷是造成土壤养分流失的直接原因^[39], 特别是在人工混交林及纯林所在的坡地地形上, 土壤侵蚀作用加剧, 因此可通过提高地被植物和枯落物数量等方法, 减少云南松林坡地土壤表面产流产沙。石沟生境利于土壤养分的积聚^[14], 因此应该对云南松林中的石沟生境加以保护。

土壤团聚体大小组成的差异还会造成土壤孔隙度的差异, 进而导致地表水下渗速率不同, 影响土壤含水率, 土壤C、N、N/P与含水率显著负相关, 天然次生林和人工混交林的土壤结构优于其他3种植被类型^[40], 因此可通过针阔混交的方式改善纯林、灌丛等群落的土壤结构。土壤硝态氮与土壤N、P显著正相关, 与C/N显著负相关, 研究区酸性的土壤环境中硝化作用较弱, 并且硝态氮本身也极易淋溶流失, 因此硝态氮的留存可视为是改善该区N胁迫作用的关键因子。

土壤pH值对土壤C、N、C/P、N/P有显著影响, 土壤酸碱度影响微生物活性, 进而对枯落物分解与转化作用产生影响, 针叶枯落物分解会形成酸性土壤环境^[10], 通过利用针阔混植数量的差异或人为干预等调节土壤pH值, 进而提高养分归还量。细根是地下枯落物的主要输入源^[41]。细根与土壤C/N极显著负相关, 与土壤P显著正相关, 地下枯落物分解使得C输入增多, 土壤P含量随之增加。土壤容重影响土壤通气度及营养元素的运移^[17], 土壤容重与土壤C及土壤C/P、N/P极显著正相关, 说明通气度较好的土壤环境更利于养分的累积。

4 结论

相较于原生林和灌丛, 云南松林的C同化能力及N、P利用效率更高, 生态适应性更强, 但受制于土壤贫瘠的影响, 其养分含量低于全国平均水平, 云南松植被恢复初期受N胁迫, 发育到天然次生林阶段受N、P共同限制, 云南松枯落物及土壤中的N素也相对缺乏, 纯林中受到的N胁迫作用更强, 可通过提高林下植被生物量、种植含N高的乡土优势种、利用和保护小生境等措施提高林内枯落物养分分解速率, 增加土壤养分归还量, 促进土壤养分累积。

云南松天然次生林和人工混交林对土壤结构改善作用优于其他植被类型, 土壤团聚体、含水率、pH、硝态氮、细根、容重对土壤养分含量有显著影响, 其中硝态氮是影响土壤N、P含量的关键因子, 可通过人为干预土壤理化性质等提高土壤养分含量。本文主要研究滇东高原断陷盆地地区云南松林叶片-枯落物-土壤中的生态化学计量特征及差异性, 但其循环过程的机理并不明确, 还需进一步加强其对环境变化响应方面的研究。

参考文献 [References]

1 宁志英, 李玉霖, 杨红玲, 张子谦, 张建鹏. 沙化草地土壤碳氮磷化学计量特征及其对植被生产力和多样性的影响[J]. 生态学报, 2019, 39 (10): 3537-3546 [Ning ZY, Li YL, Yang HL, Zhang ZQ, Zhang

JP. Stoichiometric characteristics of soil C, N and P in desertified grassland and their effects on vegetation productivity and diversity [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, 39 (10): 3537-3546]

- 2 姜俊, 陆元昌, 秦永胜, 孟丙南, 魏琦, 肖佳伟. 北京平原地区不同人工林叶片-凋落物-土壤生态化学计量特征[J]. 生态环境学报, 2020, **29** (4): 702-708 [Jiang J, Lu YC, Qin YS, Meng BN, Wei Q, Xiao JW. Ecological stoichiometry of leaf-litter-soil in different plantations in Beijing plain [J]. *Ecol Environ Sci*, 2020, **29** (4): 702-708]
- 3 Elser JJ, Sterner RW, Gorokhova E, Fagan WF, Markow TA, Cotner JB, Weider LW. Biological stoichiometry from genes to ecosystems [J]. *Ecol Lett*, 2000, **3** (5): 540-550
- 4 Yang Y, Liu BR, An SS. Ecological stoichiometry in leaves, roots, litters and soil among different plant communities in a desertified region of northern China [J]. *Catena*, 2018, **166** (9): 328-338
- 5 Xiao L, Bi YL, Du SZ, Wang Y, Guo C, Peter C. Response of ecological stoichiometry and stoichiometric homeostasis in the plant-litter-soil system to re-vegetation type in arid mining subsidence areas [J]. *J Arid Environ*, 2021, **184** (11): 551-560
- 6 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 (中英文), 2021, **19** (2): 108-116 [Yang X, Chen LH, Zheng XL. Ecological stoichiometry characterization of soil carbon, nitrogen, and phosphorus of *Pinus tabulaeformis* plantations at different stand ages [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2021, **19** (2): 108-116]
- 7 Liu Y, Fang Y, An SS. How C: N: P stoichiometry in soils and plants responds to succession in *Robinia pseudoacacia* forests on the loess plateau, China [J]. *For Ecol Manag*, 2020, **475** (9): 308-316
- 8 盘金文, 郭其强, 孙学广, 高超. 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 [Pan JW, Guo QQ, Sun XG, Gao C. Contents and stoichiometric characteristics of C, N, P and K under different stand ages of *Pinus massoniana* plantations [J]. *J Plant Nutr Fertil*, 2020, **26** (4): 746-756]
- 9 姜沛沛, 曹扬, 陈云明, 王芳. 不同林龄油松 (*Pinus tabulaeformis*) 人工林植物、凋落物与土壤C、N、P化学计量特征[J]. 生态学报, 2016, **36** (19): 6188-6197 [Jiang PP, Cao Y, Chen YM, Wang F. Variation of C, N, and P stoichiometry in plant tissue, litter, and soil during stand development in *Pinus tabulaeformis* plantation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36** (19): 6188-6197]
- 10 淑敏, 王东丽, 王凯, 连昭, 汤家喜, 韩小美, 斯日本极. 不同林龄樟子松人工林针叶-凋落叶-土壤生态化学计量特征[J]. 水土保持学报, 2018, **32** (3): 174-179 [Shu M, Wang DL, Wang K, Lian Z, Tang JX, Han XM, Siri MJ. Ecological stoichiometry characteristics of needle leaves-litter-soil in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations with different forest ages [J]. *J Soil Water Conserv*, 2018, **32** (3): 174-179]
- 11 张芸, 李惠通, 张辉, 黄彬彬, 刘春华, 蒋宗培, 马祥庆. 不同林龄杉木人工林土壤C:N:P化学计量特征及其与土壤理化性质的关系[J]. 生态学报, 2019, **39** (7): 2520-2531 [Zhang Y, Li HT, Zhang H, Huang BB, Liu CH, Jiang ZK, Ma XQ. Soil C:N:P stoichiometry and its relationship with the soil physicochemical properties of different aged Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, **39** (7): 2520-2531]
- 12 胡启武, 聂兰琴, 郑艳明, 吴琴, 尧波, 郑林. 沙化程度和林龄对湿地松叶片及林下土壤C、N、P化学计量特征影响[J]. 生态学报, 2014, **34** (9): 2246-2255 [Hu QW, Lie LQ, Zheng YM, Wu Q, Yao B, Zheng L. Effects of desertification intensity and stand age on leaf and soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in *Pinus elliottii* plantation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34** (9): 2246-2255]
- 13 郑鸾, 龙翠玲. 茂兰喀斯特森林不同地形土壤生态化学计量特征[J]. 南方农业学报, 2020, **51** (3): 545-551 [Deng L, Long CL. Eco-stoichiometric characteristics of soil in different topographical sites of Maolan karst forest [J]. *J S Agric Sin*, 2020, **51** (3): 545-551]
- 14 何洁, 严友进, 易兴松, 王勇, 戴全厚. 喀斯特地区土壤异质性及其与植物互作[J/OL]. 应用生态学报, 2021, 1-11 [He J, Yan YJ, Yi XS, Wang Y, Dai QH. Soil heterogeneity and the interaction with plants in karst areas [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2021, 1-11]
- 15 Fan RQ, Du JJ, Liang AZ, Lou J, Li JY. Carbon sequestration in aggregates from native and cultivated soils as affected by soil stoichiometry [J]. *Biol Fertil Soil*, 2020, **56** (9), 1109-1120
- 16 陶慧敏, 孙宁晓, 温家豪, Umair Muhammad, 袁俊, 杜红梅, 刘春江. 滇南喀斯特地区灌木群落和人工林土壤元素化学计量特征[J]. 生态学报, 2019, **39** (24): 9119-9130 [Tao HM, Sun NY, Wen JH, Muhammad U, Yuan J, Du HM, Liu CJ. Characteristics of soil stoichiometry in native shrub and plantation communities in karst regions of Yunnan province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, **39** (24): 9119-9130]
- 17 董廷发. 不同海拔云南松林土壤养分及其生态化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2021, **40** (3): 672-679 [Dong TF. Soil nutrients and their ecological stoichiometry of *Pinus yunnanensis* forest along an elevation gradient [J]. *Acta Ecol Sin*, 2021, **40** (3): 672-679]
- 18 Elser JJ, Fagan WF, Denno RF, Dobberfuhl DR, Folarin A, Huberty A, Interlandi S, Kilham SS, McCauley E, Schulz KL, Siemann EH, Sterner RW. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs [J]. *Nature*, 2000, **408** (6812): 578-582
- 19 Han WX, Fang JY, Guo DL, Zhang Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. *N Phytol*, 2005, **168** (2): 377-385
- 20 何斌, 李青, 冯图, 薛晓辉, 李望军, 刘勇. 黔西北不同林龄马尾松人工林针叶-凋落物-土壤C、N、P化学计量特征[J]. 生态环境学报, 2019, **28** (11): 2149-2157 [He B, Li Q, Feng T, Xue XH, Li WJ, Liu Y. Stoichiometry characteristics of C, N, and P in needle leaves, litter, and soil during stand development in *Pinus massoniana* plantation in northwest Guizhou province [J]. *Ecol Environ Sin*, 2019, **28** (11): 2149-2157]
- 21 马钦彦, 陈迎林, 王娟, 蔺琛, 康峰峰, 曹文强, 马志波, 李文宇. 华北主要森林类型建群种的含碳率分析[J]. 北京林业大学学报, 2002, **11** (Z1): 100-104 [Ma QY, Chen XL, Wang J, Lin C, Kang FF, Cao WQ, Ma ZB, Li WY. Carbon content rate in constructive species of main forest types in northern China [J]. *J Beijing For Univ*, 2002, **11** (Z1): 100-104]
- 22 Huysen TL, Perakis SS, Harmon ME. Decomposition drives convergence of forest litter nutrient stoichiometry following phosphorus addition [J]. *Plant Soil*, 2016, **406** (1/2): 1-14
- 23 秦仕忆, 喻阳华, 邢容容, 王璐. 喀斯特高原山区水源涵养林土壤及凋落物的生态化学计量特征[J]. 林业资源管理, 2017, **6** (5): 66-73 [Qin SY, Yu YH, Xing RR, Wang L. Stoichiometric characteristics of litter and soils in water conservation forests of karst plateau mountainous region [J]. *For Res Manag*, 2017, **6** (5): 66-73]
- 24 Tian HQ, Chen GS, Zhang C, Melillo JM, Hall CAS. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: a synthesis of observational data [J]. *Biogeochemistry*, 2010, **98** (1-3): 139-151
- 25 田静, 盛茂银, 汪攀, 温培才. 西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤C、N、P化学计量特征和土壤酶活性的影响[J]. 环境科学, 2019, **40** (9): 4278-4286 [Tian J, Sheng MY, Wang P, Wen PC. Influence of land use change on litter and soil C, N, P stoichiometric characteristics and soil enzyme activity in karst ecosystem, southwest China [J]. *Environ Sci*, 2019, **40** (9): 4278-4286]
- 26 廖周瑜, 惠阳, 王邵军, 陈鹏. 不同林龄云南松凋落叶分解及养分归

- 还特征[J]. 生态环境学报, 2018, **27** (11): 1981-1986 [Liao ZY, Hui Y, Wang SJ, Chen P. Leaf litter decomposition and nutrient return characteristics of *Pinus yunnanensis* at different forest ages [J]. *Ecol Environ Sci*, 2018, **27** (11): 1981-1986]
- 27 张耀艺, 倪祥银, 杨静, 谭思懿, 廖妹, 吴福忠. 中亚热带同质园不同树种氮磷重吸收及化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2021, **32** (4): 1154-1162 [Zhang YY, Ni XY, Yang J, Tan SY, Niao S, Wu FZ. Nitrogen and phosphorus resorption and stoichiometric characteristics of different tree species in a mid-subtropical common-garden [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2021, **32** (4): 1154-1162]
- 28 魏大平, 张健, 张丹桔, 李川北, 赵燕波, 张捷, 周泓杨. 不同林冠郁闭度马尾松(*Pinus massoniana*)叶片养分再吸收率及其化学计量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2017, **23** (3): 560-569 [Wei DP, Zhang J, Zhang DJ, Li CB, Zhao YB, Zhang J, Zhou HY. Leaf carbon, nitrogen, and phosphorus resorption and the stoichiometry in *Pinus massoniana* plantations with various canopy densities [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2017, **23** (3): 560-569]
- 29 刘娜, 喻理飞, 赵庆, 武亚楠, 严令斌. 喀斯特高原石漠化区次生林叶片-枯落物-土壤连续体碳氮磷生态化学计量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2020, **26** (3): 681-688 [Liu N, Yu LF, Zhao Q, Wu YN, Yan B. C: N: P stoichiometry of leaf-litter-soil continuum in secondary forests of the rocky desertification regions of the karst plateau [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2020, **26** (3): 681-688]
- 30 Liu WC, FuSY, Yan SJ, Ren CJ, WuSJ, Deng J, Li BY, Han XH, Yang GH. Responses of plant community to the linkages in plant-soil C: N: P stoichiometry during secondary succession of abandoned farmlands, China [J]. *J Arid Land*, 2020, **12** (5): 251-226
- 31 Güsewell S. N: P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance [J]. *N Phytol*, 2004, **164** (2): 243-266
- 32 熊星烁, 蔡宏宇, 李耀琪, 马文红, 牛克昌, 陈迪马, 刘娜娜, 苏香燕, 景鹤影, 冯晓娟, 曾辉, 王志恒. 内蒙古典型草原植物叶片碳氮磷化学计量特征的季节动态[J]. 植物生态学报, 2020, **44** (11): 1138-1153 [Xiong XS, Cai HY, Li XQ, Ma WH, Niu KC, Chen DM, Liu NN, Su XY, Jing HY, Feng XJ, Zeng H, Wang ZH. Seasonal dynamics of leaf C, N and P stoichiometry in plants of typical steppe in Nei Mongol, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2020, **44** (11): 1138-1153]
- 33 Elser J J, Fagan WF, Kerkhoff AJ, Swenson NG, Enquist BJ. Biological stoichiometry of plant production: metabolism, scaling and ecological response to global change [J]. *N Phytol*, 2010, **186** (3): 593-608
- 34 赵伊博, 方皓月, 江光林, 咎燕, 刘思艺, 刘思凝, 王丽霞, 谭波, 李略, 游成铭, 徐振锋, 张丽. 川西高山峡谷区不同类型彩叶林枯落物和土壤生态化学计量特征[J]. 四川农业大学学报, 2020, **38** (6): 685-692 [Zhao YB, Fang HY, Jiang GL, Zan Y, Liu SY, Liu SN, Wang LX, Tan B, Li H, You CM, Xu ZF, Zhang L. Stoichiometry Characteristics of litter and soil in different types of color-leaf forests in the alpine valley region of western Sichuan [J]. *J Sichuan Agri Univ*, 2020, **38** (6): 685-692]
- 35 WangZF, Zheng FL. Impact of vegetation succession on leaf-litter-soil C: N: P stoichiometry and their intrinsic relationship in the Ziwuling area of China's loess plateau [J]. *J For Res*, 2021, **32** (2): 697-711
- 36 黄雍容, 高伟, 黄石德, 林捷, 谭芳林, 游惠明, 杨丽. 福建三种常绿阔叶林碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2021, **41** (5): 1991-2000 [Huang YR, Gao W, Huang SD, Lin J, Tan FL, You HM, Yang L. Ec stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in Fujian evergreen broad-leaved forest [J]. *Acta Ecol Sin*, 2021, **41** (5): 1991-2000]
- 37 吴鹏, 崔迎春, 赵文君, 舒德远, 侯贻菊, 丁访军, 杨文斌. 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤化学计量特征[J]. 北京林业大学学报, 2019, **41** (3): 80-92 [Wu P, Cui YC, Zhao WJ, Shu DY, Hou YJ, Ding FJ, Yang WB. Characteristics of soil stoichiometric in natural restoration process of Maolan karst forest vegetation, southwestern China [J]. *J Beijing For Univ*, 2019, **41** (3): 80-92]
- 38 LeBauer DS, Treseder KK. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed [J]. *Ecology*, 2008, **89** (2): 371-379
- 39 石璞, Chiahue Doua Yang, 赵鹏志. 间歇性降雨对土壤团聚体粒级及磷、铜、锌富集的影响[J]. 土壤学报, 2021, **58** (4): 948-956 [Shi P, Yang CD, Zhao PZ. Effect of intermittent rainfall on size distribution and phosphorus, copper and zinc enrichment of soil aggregates [J]. *Acta Pedol Sin*, 2021, **58** (4): 948-956]
- 40 方薇, 范弢. 滇东岩溶山地不同类型云南松林地土壤团聚体稳定性差异[J]. 水土保持通报, 2020, **40** (3): 95-102+132 [Fang W, Fan T. Differences in soil aggregate stability of different species of *Pinus yunnanensis* in karst mountain area of eastern Yunnan province [J]. *J Soil Water Conserv*, 2020, **40** (3): 95-102+132]
- 41 胡文杰, 庞宏东, 胡兴宜, 刘清平, 徐丽君, 李玲, 张涛. 覆盖对毛竹林土壤物理性质及养分含量的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, **40** (5): 20-27 [Hu WJ, Pang HD, Hu XY, Liu QP, Xu LJ, Li L, Zhang T. Influence of mulching on soil physical properties and nutrients contents of *Phyllostachys edulis* forest [J]. *J C S For Technol Univ*, 2020, **40** (5): 20-27]