

DOI: 10.5846/stxb202201100093

王轶浩, 周建岗, 符裕红. 林龄对重庆武陵山区马尾松天然次生林 C、N、P 生态化学计量特征的影响. 生态学报, 2022, 42(23): 9537-9547.

Wang Y H, Zhou J G, Fu Y H. Effects of stand ages on C, N and P stoichiometry of *Pinus massoniana* secondary forests in Wuling Mountain Area of Chongqing. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9537-9547.

林龄对重庆武陵山区马尾松天然次生林 C、N、P 生态化学计量特征的影响

王轶浩^{1,*}, 周建岗², 符裕红³

1 重庆师范大学地理与旅游学院, 三峡库区地表生态过程重庆市野外科学观测研究站, 重庆 401331

2 山西省沁县漳源林场, 长治 046400

3 贵州师范学院生物科学学院, 贵阳 550018

摘要:在国家碳达峰和碳中和背景下, 为准确评估区域植被固碳增汇功能和科学指导其经营管理, 以重庆武陵山区 14、25、38、45、62 年生马尾松天然次生林为研究对象, 对马尾松各器官(叶、枝、干、根和皮)、凋落物以及土壤 C、N、P 含量及其生态化学计量特征进行研究。结果表明: (1) 马尾松针叶 C、N、P 含量分别变化在 444.48—518.03 g/kg、12.31—16.15 g/kg、1.75—2.21 g/kg 之间, 总体呈“C 适中、N 缺乏及 P 充足”的养分格局, 且马尾松生长主要受 N 限制。(2) 马尾松各器官 C、N、P 生态化学计量受林龄影响及其变化规律各有不同, 但不同器官差异显著($P < 0.05$), 其中 C 含量以皮最大, N、P 含量则以针叶最大。(3) 林龄对马尾松凋落物 C、N、P 生态化学计量影响不显著($P > 0.05$); 马尾松林土壤 P 含量低(变化在 0.09—0.41 g/kg 之间), 但各土层生态化学计量比却普遍较高, 且受林龄影响各不相同。(4) C、N、P 生态化学计量在马尾松各器官—凋落物—土壤之间总体呈显著相关性($P < 0.05$), 其中, 针叶 C、N 含量均与土壤 N 含量呈显著正相关, 但针叶 P 含量与土壤 N 含量呈显著负相关。因此, 对于该区域马尾松天然次生林, 应采取适当增施氮肥或林下补植固氮树种的营林措施, 以提升马尾松天然次生林的固碳增汇能力。

关键词:生态化学计量; 器官; 凋落物; 土壤; 林龄; 马尾松天然次生林

Effects of stand ages on C, N and P stoichiometry of *Pinus massoniana* secondary forests in Wuling Mountain Area of Chongqing

WANG Yihao^{1,*}, ZHOU Jiangang², FU Yuhong³

1 College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University; Three Gorges Reservoir Area Earth Surface Ecological Processes of Chongqing Observation and Research Station, Chongqing 401331, China

2 Zhangyuan Forest Farm of Qinxian County of Shanxi Province, Changzhi 046400, China

3 Biological Sciences College of Guizhou Education University, Guiyang 550018, China

Abstract: As the essential nutrient elements of plants and the most basic constituent elements of ecosystem, carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) play an important role in biogeochemical cycle and maintaining stability of ecosystem structure and function. Under the background of carbon peak and carbon neutralization, in order to accurately evaluate the carbon sequestration and sink increasing function of regional vegetation and scientifically guide vegetation management, we investigated *Pinus massoniana* secondary forests of 14, 25, 38, 45 and 62 years old in Wuling Mountains Area of Chongqing. Contents and stoichiometry of C, N and P in various organs (leaf, branch, stem, root and bark), litter and soil

基金项目:重庆师范大学基金项目(20XLB005); 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN202000502); 贵州省自然科学基金项目(黔科合基础[2019]1251号)

收稿日期:2022-01-10; **采用日期:**2022-09-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wyih515@163.com

of *P. massoniana* forests at five different stand ages were studied. The results showed that C, N and P contents of *P. massoniana* leaf ranged from 444.48 to 518.03 g/kg, 12.31 to 16.15 g/kg, and 1.75 to 2.21 g/kg, respectively, and overall presented a nutrient pattern of “moderate C, deficient N and sufficient P”, and the growth of *P. massoniana* in this study was mainly limited by N. C, N and P contents in various organs of *P. massoniana*, as well as their stoichiometry, were differently affected by stand ages and their variations were different, but were significantly affected by organs ($P < 0.05$). C content in bark was the largest, and N and P contents in leaf were the largest in various organs. Litter C, N and P contents of *P. massoniana* forests, as well as their stoichiometry, were not significantly affected by stand ages ($P > 0.05$). The soil P contents of *P. massoniana* forests were lower (ranging from 0.09 to 0.41 g/kg), but their stoichiometric ratios of various soil layers were generally higher and differently affected by stand ages. C, N and P contents, as well as their stoichiometry presented the significant correlation between various organs and litter and soil of *P. massoniana* forests ($P < 0.05$). C and N contents in leaves were significantly positively correlated with soil N content, but P content in leaves was significantly negatively correlated with soil N content. Therefore, for the *P. massoniana* secondary forests in this region, our findings suggest that appropriate forest management measures such as increasing soil nitrogen fertilizer or replanting nitrogen fixation trees under forest should be taken to enhance the capacity of forest carbon sequestration and sink increasing.

Key Words: C:P:N stoichiometry; organs; litter; soil; stand ages; *Pinus massoniana* secondary forests

碳(C)、氮(N)、磷(P)作为植物必须的营养元素和生态系统最基本的组成元素,在生物地球化学循环和维持生态系统结构及功能稳定性方面发挥着重要作用^[1-2]。生态化学计量是研究生态系统多重元素(主要是C、N、P)耦合关系及其化学平衡的一种综合有效方法^[3-4],C、N、P生态化学计量不仅可以决定植物功能^[5],还能反映植物对环境变化的适应能力^[6],也为全球气候变化和国家碳达峰碳中和背景下揭示植物固碳增汇机制提供了新的研究思路^[7]。以往研究表明,生态系统中植物、凋落物、土壤的C、N、P含量都具有明显的时空变异性^[7],并且植物和土壤的N、P含量均是限制植物生长及固碳潜力的重要因素^[8-9]。因此,开展不同区域、不同生长阶段的植物C、N、P含量及其生态化学计量特征研究,对从生态化学计量角度揭示植物体固碳增汇机制以及科学评估区域植被固碳增汇功能都具有非常重要的理论和现实意义。

目前国外对植物生态化学计量特征已有大量研究^[10-12],国内相关研究虽然起步较晚但发展迅速,对不同区域、不同森林类型及其各演替阶段的叶片、土壤的生态化学计量特征进行了大量研究^[13-15],但对植物枝、干、根、皮等各器官的生态化学计量特征研究较少,尤其将植物各器官与凋落物、土壤联系起来进行生态化学计量特征系统研究则更少。马尾松(*Pinus massoniana*)是我国南方山地丘陵区主要造林树种和先锋树种,在维护我国森林资源安全和发挥森林固碳增汇、保持水土等生态服务功能方面具有举足轻重的作用。对于马尾松来说,以往有关其C、N、P生态化学计量研究主要集中在人工林,如郭其强等^[16]研究了贵州高原山地马尾松人工林土壤生态化学计量特征;崔宁洁等^[17]研究了四川宜宾马尾松人工林针叶、凋落物、土壤的生态化学计量特征,而对林分结构更复杂和分布面积更广的马尾松天然(次生)林研究则非常不足。这大大限制着对马尾松天然林生态化学计量特征的科学认知以及全面准确评估马尾松林固碳增汇功能。

武陵山区位于我国重庆、湖北、湖南和贵州四省毗邻区域,是我国重要的生物多样性与水土保持生态功能区,生态区位十分特殊,而重庆黔江区处于武陵山区腹地。黔江区现有森林资源以天然林为主,其中又以马尾松天然(次生)林占绝对优势(其面积和蓄积均占全区天然林80%以上)。本文在武陵山区的重庆黔江区国有林场,以马尾松天然次生林为研究对象,对5个林龄的马尾松各器官(叶、枝、干、根和皮)、凋落物以及土壤C、N、P含量及其生态化学计量特征进行研究,以期掌握武陵山区不同林龄的马尾松天然次生林C、N、P生态化学计量特征变化及影响,为分布式评估武陵山区马尾松林固碳增汇功能提供科学基础数据,并为该区域森林可持续经营管理提供决策参考依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市黔江区国有林场(N29°4′—29°52′,E108°28′—108°56′),为亚热带湿润性季风气候,并具有典型的山地气候特征,年均气温 15.4 ℃,年均降雨量 1300 mm。属四川盆周山地区,以低中山为主,平均海拔变化在 800—1500 m。土壤以砂岩、页岩上发育的黄壤、黄棕壤为主,厚度 50—80 cm。黔江区国有林场管辖森林面积 32.45 km²,森林覆盖率达 93.8%,地带性森林植被为亚热带常绿阔叶林,但现有森林植被以马尾松、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、柏木(*Cupressus funebris*)、杨树(*Pterocarya stenoptera*)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、华山松(*Pinus armandii*)等为主,其中马尾松林主要为天然次生林,伴生树种有杉木、青冈、石栎(*Lithocarpus glaber*)、漆树(*Toxicodendron vernicifluum*)等,林分分层现象明显,灌木层覆盖度变化在 50%—80%,主要有木姜子(*Litsea pungens*)、野桐(*Mallotus japonicus*)等;草本层覆盖度变化在 30%—70%,主要有芒(*Miscanthus sinensis*)、狗脊蕨(*Woodwardia prolifera*)、铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

按照国家林业局 2003 年对我国南方地区马尾松天然林林龄的划分标准:幼龄林(≤20 a)、中龄林(21—30 a)、近熟林(31—40 a)、成熟林(41—60 a)、过熟林(≥61 a),在黔江区国有林场选取立地条件相近的马尾松天然次生林幼龄林(14 a)、中龄林(25 a)、近熟林(38 a)、成熟林(45 a)和过熟林(62 a),每个林龄分别设置 3 个规格为 30 m×30 m 的典型样地,共 15 个典型样地(表 1)。

表 1 马尾松天然次生林典型样地基本情况
Table 1 Characteristics of sample plots for *Pinus massoniana* secondary forests

林龄 Stand age	样地编号 Plot number	海拔 Altitude/m	坡度 Slope gradient/(°)	坡向 Slope aspect	坡位 Slope position	密度 Density/ (株/hm ²)	郁闭度 Canopy density	平均树高 Mean height/m	平均胸径 Mean DBH/cm	土壤类型 Soil types	土层厚度 Soil depth/cm
14	1	1040	18	NW20	下坡	2650	0.75	10.3	8.8	黄棕壤	85
	2	1070	10	NW40	中坡	2025	0.75	9.6	10.5	黄棕壤	80
	3	1112	15	SW75	下坡	1650	0.60	11.1	11.5	黄棕壤	90
25	4	1100	20	NW45	中坡	1800	0.90	14.3	11.5	黄棕壤	70
	5	1010	28	NW20	下坡	1900	0.90	14.0	13.1	黄棕壤	80
	6	1038	15	NE40	下坡	1225	0.80	15.0	15.5	黄棕壤	80
38	7	1125	22	NE20	中坡	1650	0.90	15.1	15.3	黄棕壤	80
	8	1130	18	NW65	中坡	1575	0.80	15.1	15.2	黄棕壤	70
	9	1115	17	NW65	中坡	1100	0.75	15.7	16.3	黄棕壤	60
45	10	1045	18	SW35	中坡	1575	0.85	15.8	14.2	黄棕壤	80
	11	1059	20	NW25	下坡	1025	0.85	16.9	17.2	黄棕壤	60
	12	1056	17	NW65	下坡	1100	0.75	17.2	17.0	黄棕壤	90
62	13	660	20	NE20	下坡	1150	0.80	18.7	20.2	黄棕壤	85
	14	691	18	NE20	中坡	650	0.80	18.2	19.5	黄棕壤	75
	15	661	20	NE40	中坡	1050	0.85	17.8	18.1	黄棕壤	90

1.2.2 样品采集与测定

2016 年 8 月,首先对各典型样地胸径≥5 cm 的马尾松进行每木检尺,记录其胸径、树高、冠幅和数量。根据各典型样地调查结果分别选择 3 株马尾松标准木,在每株标准木的上冠层南向采集枝叶样品(因 62 a 马尾松林冠层太高,未能采集其枝、叶样品),之后采集适量树皮、干和根样品,将各典型样地内采集的马尾松叶、枝、皮、干、根样品,按器官混合,即每个典型样地获得 5 个不同器官的混合样品,共获得 73 个马尾松不同器官

的混合样品。然后在各典型样地沿对角线设置 3 个规格为 1 m×1 m 凋落物样方,收集马尾松凋落物并混合,即每个典型样地获得 1 个凋落物混合样品。

在各典型样地内沿对角线选择 3 个采样点,之后在各采样点挖一个土壤剖面,并按土壤形成层(O 层、A 层、B 层)取样,其中 O 层为腐殖质层,即有机残留物层,有明显的枯枝落叶等有机物残体;A 层为淋溶层,富含有机质,颜色较暗;B 层为淀积层,中度分化,颜色较浅。最后将各典型样地的同一土层样品按样地分别混合,即每个典型样地获得 3 个不同土层的混合土样,共获得 45 个土壤混合样品。

将植物、土壤样品带回实验室后,首先进行预处理,其中,植物样品置于 105℃ 烘箱杀青 30 min 后,在 85℃ 烘箱烘干至恒重,并用粉碎机磨碎;土壤样品自然风干后,剔除石头、草根等杂物,研磨之后过筛。然后采用重铬酸钾容量-外加热法测定各样品的 C 含量;采用硫酸-双氧水消煮,半微量凯氏定氮法测定各样品的 N、P 含量。

1.2.3 数据处理

采用 Excel 2019 对数据进行处理与图表制作,利用 SPSS23.0 软件进行不同林龄马尾松天然次生林的不同器官之间、不同土层之间、凋落物的 C、N、P 含量及其生态化学计量的单因素方差分析(One-way ANOVA)及 LSD 检验法的多重均值比较分析和 Pearson 法的相关性分析。

2 结果

2.1 各器官 C、N、P 含量及其生态化学计量比

不同林龄马尾松针叶 C 含量变化在 444.48—518.03 g/kg 之间,N 含量变化在 12.31—16.15 g/kg 之间,P 含量变化在 1.75—2.21 g/kg 之间,其中,针叶 C、N 含量均随林龄先增加后降低,以 25 a 最大,而针叶 P 含量则以 38 a 最大,45 a 最小,总体看,林龄对针叶 C、N、P 含量的影响并不显著($P>0.05$)(图 1)。同样地,林龄对马尾松根、皮 C 含量和枝、干、皮 P 含量的影响也均不显著,但对其他器官 C、N 含量和根 P 含量均有显著影响($P<0.05$),其中,25 a 马尾松枝、干 C 含量均显著低于 45 a 的含量,分别为 492.72、511.33 g/kg;38 a 枝、皮 N 含量也均显著低于 45 a 的含量,但 38 a 根 N 含量均高于其他林龄的含量,不同林龄马尾松根的 P 含量大小排序为 45 a(1.85 g/kg)>14 a(1.76 g/kg)>25 a(1.57 g/kg)>38 a 与 62 a(1.32 g/kg)。方差分析表明,器官对各林龄马尾松 C、N、P 含量均有显著影响($P<0.05$)(图 1)。除 45 a 马尾松外,其他林龄马尾松皮的 C 含量均显著高于其他器官,而各林龄马尾松针叶的 N、P 含量均明显高于其他器官($P<0.05$)。

由图 1 可知,不同林龄马尾松各器官 C:N、C:P、N:P 变化范围分别在 33.42—380.88、204.31—482.51、0.98—8.69 之间,林龄对马尾松叶、枝的 C:N、C:P、N:P 均无显著影响($P>0.05$)。除干的 C:P 外,林龄对马尾松干、根和皮的 C:N、C:P、N:P 均影响明显($P<0.05$),其中,38 a 马尾松根的 C:P、N:P 均显著高于其他林龄,但其 C/N 显著低于其他林龄。同时,38 a 马尾松皮的 C:N、C:P 均显著高于其他林龄,以 45 a 马尾松皮的 C:N、C:P 最低,分别为 144.08、392.99。器官对各林龄马尾松 C:N、C:P、N:P 均有显著影响($P<0.05$),表现为各林龄马尾松干的 C:N 均显著高于其他器官,其次是皮,以叶的 C:N 最小,反之,各林龄马尾松针叶的 N:P 均显著高于其他器官,以干的 N:P 最小。

2.2 凋落物 C、N、P 含量及其生态化学计量比

不同林龄马尾松凋落物 C、N、P 含量分别变化在 477.95—494.67 g/kg、7.95—9.68 g/kg、1.32—1.73 g/kg 之间,C:N、C:P、N:P 则分别变化在 50.47—65.96、292.86—390.82、4.81—5.98 之间(图 2)。总体看,凋落物 N、P 含量均随林龄先增大后降低,以 25 a 的含量最大,凋落物 C 含量则以 45 a 的含量最大。同样地,马尾松凋落物 C:N、C:P、N:P 均以 45 a 的最大。但方差分析表明,林龄对马尾松凋落物 C、N、P 含量及其生态化学计量比的影响并不显著($P>0.05$)。

2.3 土壤 C、N、P 含量及其生态化学计量比

由图 2 可知,不同林龄马尾松林 O 层土壤 C、N 含量均以 45 a 的含量最大,但其差异并不明显($P>0.05$)。

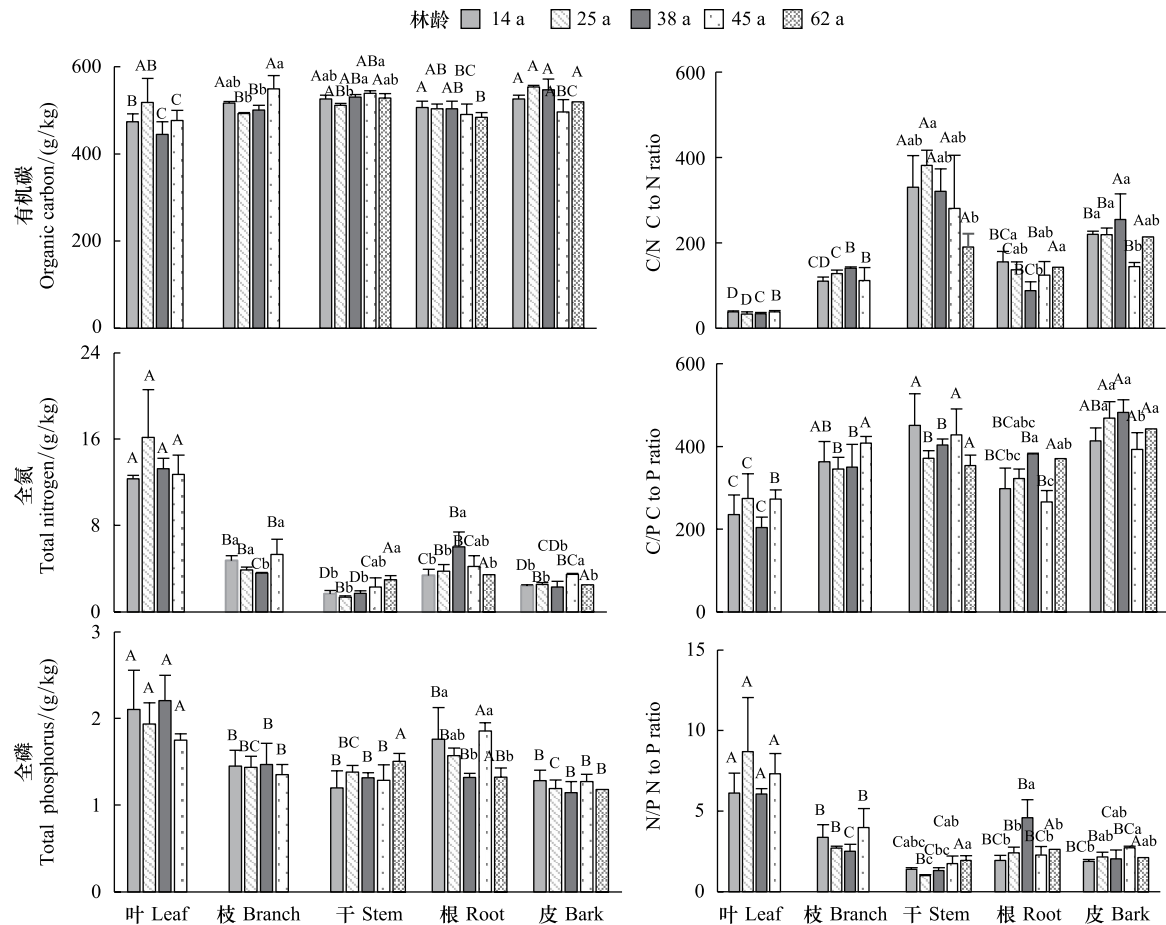


图1 5个林龄马尾松各器官 C、N、P 含量及其生态化学计量比

Fig.1 C, N, P contents and stoichiometry of different organs of *Pinus massoniana* in the five stand aged forests

不同小写字母表示马尾松同一器官不同林龄之间差异显著,不同大写字母表示同一林龄不同器官之间差异显著($P < 0.05$)

同样地,林龄对 B 层土壤 C、P 含量的影响也不显著,除此之外,林龄对马尾松林 A 层土壤 C、N、P 含量及 B 层 N 含量和 O 层 P 含量均有显著影响($P < 0.05$)。马尾松林 A 土层 C、N 含量和 B 土层 N 含量均随林龄先增大再降低,其中,38 a 马尾松林的 A 土层 C 含量显著高于其他林龄的含量,为 19.58 g/kg;25 a 马尾松林的 A、B 土层 N 含量均显著高于其他林龄的含量,分别为 1.19、0.90 g/kg。马尾松林 O、A 土层 P 含量则总体随林龄而增加,以 62 a 的含量最大,分别为 0.41、0.31 g/kg。方差分析表明,除 14、25、62 a 马尾松林土壤 P 含量外,土层对各林龄土壤 C、N、P 含量均有显著影响($P < 0.05$),且均表现为 O 层>A 层>B 层(图 2)。

不同林龄马尾松林土壤 C:N、C:P、N:P 分别变化在 11.14—20.55、33.51—272.94、2.48—15.64 之间(图 2),林龄对马尾松林 A、B 土层 C:P 和 N:P 均影响显著($P < 0.05$),但对各土层 C:N 以及 O 土层 C:P、N:P 影响不明显($P > 0.05$)。总体看,马尾松林 A、B 土层 C:P 和 N:P 均随林龄先增大再降低,其中,以 62 a 马尾松林最小。土层对各林龄马尾松林土壤 C:N、C:P、N:P 影响则不尽相同,其中,对 14 a 马尾松林 C:P、25 a 马尾松林 C:N 和 45、62 a 马尾松林 C:P 及 N:P 影响显著($P < 0.05$),对其他林龄则影响不明显($P > 0.05$)(图 2)。

2.4 各器官、凋落物和土壤 C、N、P 含量及其生态化学计量比的相关性分析

由表 2 可知,马尾松针叶 C 含量与针叶 N 含量、枝 P 含量、A 土层 N 含量均显著相关,相关系数分别为 0.817、-0.600 和 0.797。马尾松针叶 N 含量与 A 土层 C、N 含量及 B 土层 N 含量均呈显著正相关,针叶 P 含

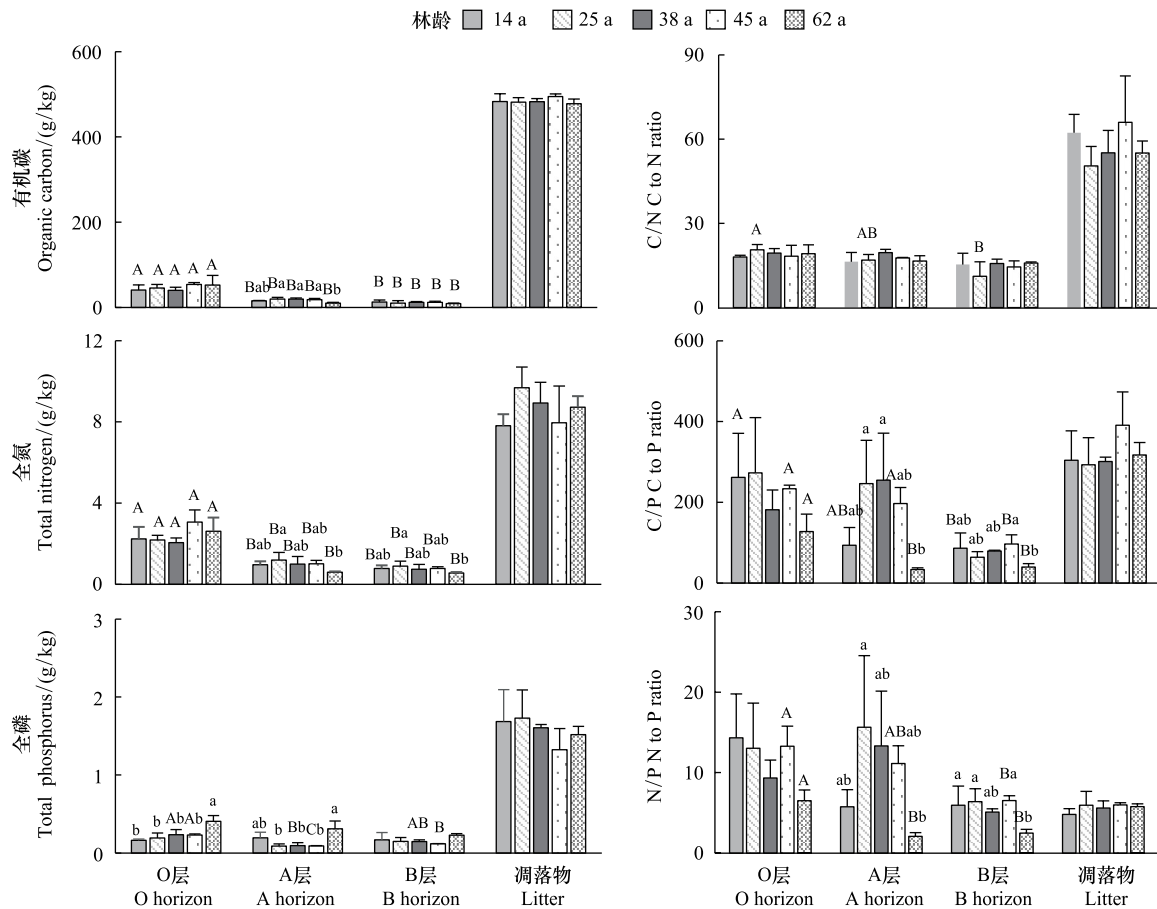


图2 5个林龄马尾松天然次生林凋落物、土壤C、N、P含量及其生态化学计量比

Fig.2 Litter and soil C, N, P contents and stoichiometry in the five stand aged *Pinus massoniana* secondary forests

不同小写字母表示马尾松凋落物、同一土层不同林龄之间差异显著,不同大写字母表示同一林龄不同土层之间差异显著($P < 0.05$)

量则与凋落物及B土层的P含量呈显著正相关,与O土层C、N含量呈显著负相关。马尾松枝C、N含量分别与干N含量、根P含量呈显著正相关,而均与皮C含量呈显著负相关,相关系数分别为 -0.688 、 -0.715 。马尾松根P含量与皮P含量、凋落物C含量呈显著正相关,与B土层P含量呈显著负相关(-0.525)。马尾松林各土层之间C、N、P含量也呈一定的相关性(表2),表现为O土层C含量与其N含量呈显著正相关(0.814);O土层P含量则与A土层N含量呈显著负相关,与A、B土层P含量均呈显著正相关;A土层C、N含量均随其P含量增加而显著减少,但均随B土层N含量增加而极显著增加($P < 0.01$);A土层P含量、B土层C含量分别与B土层P、N含量呈显著正相关,相关系数分别为 0.717 、 0.593 。

马尾松各器官、凋落物和土壤C、N、P生态化学计量比的相关性分析表明(表3),针叶的C:N与其N:P、凋落物N:P、A土层C:P及N:P均呈显著负相关,相关系数分别为 -0.651 、 -0.668 、 -0.852 及 -0.844 。针叶的C:P则与针叶、凋落物及B土层的N:P呈显著正相关,与根C:P及A、B土层C:N呈显著负相关。针叶的N:P与凋落物N:P、O土层C:P及各土层N:P均呈显著正相关。枝的C:N、C:P、N:P均与根的C:P及O土层C:N显著相关,且枝的C:N、C:P与其N:P显著相关。同时,除凋落物N:P外,凋落物其他生态化学计量比以及干、根、皮的C:N仅与其各自的生态化学计量比相关。由表3可知,马尾松林O土层C:P、N:P均与A土层C:P、N:P及B土层N:P呈显著正相关,除此之外,A土层C:P、N:P及B土层C:N、C:P均与B土层N:P显著相关,相关系数分别为 0.637 、 0.678 、 -0.516 、 0.639 。

表 2 马尾松各器官、凋落物和土壤 C、N、P 含量的相关性
Table 2 Correlations of different organs, litter and soil C, N, P contents in *Pinus massoniana* secondary forests

元素 Element	叶 C Leaf C	叶 N Leaf N	叶 P Leaf P	枝 C Branch C	枝 N Branch N	干 N Stem N	根 P Root P	O 土层 C O horizon C	O 土层 P O horizon P	A 土层 C A horizon C	A 土层 N A horizon N	A 土层 P A horizon P	B 土层 C B horizon C
叶 N Leaf N	0.817**	1											
枝 P Branch P	-0.600*	-0.331	0.103										
干 N Stem N	-0.079	-0.104	0.013	0.611*									
根 P Root P	0.392	0.015	-0.478	0.427	0.705*								
干 P Stem P	0.060	0.340	0.051	-0.165	0.048	0.694**							
皮 C Bark C	-0.039	0.172	0.127	-0.688*	-0.715**	-0.719**	-0.372						
皮 P Bark P	0.196	0.030	-0.376	0.439	0.271	-0.104	0.534*	0.149					
凋落物 C Litter C	-0.115	-0.146	-0.556	0.387	0.381	0.188	0.563*	0.083	0.039				
凋落物 P Litter P	-0.159	-0.244	0.631*	-0.408	0.031	-0.165	-0.279	-0.457	-0.008	-0.126			
O 土层 C O horizon C	0.121	0.294	-0.581*	0.339	0.008	-0.039	-0.175	1	0.310	0.180	0.075		
O 土层 N O horizon N	0.138	0.186	-0.599*	0.241	0.468	0.063	0.035	0.814**	0.241	0.203	0.092	0.145	
A 土层 C A horizon C	0.387	0.651*	-0.265	-0.392	-0.277	-0.635*	0.096	0.180	-0.416	1	0.839**	-0.563*	0.398
A 土层 N A horizon N	0.797**	0.839**	-0.464	-0.313	-0.054	-0.586*	0.434	0.075	-0.537*	0.839**	1	-0.528*	0.044
A 土层 P A horizon P	-0.093	-0.405	0.403	0.068	0.110	0.235	-0.340	0.288	0.698**	-0.563*	-0.528*	1	-0.106
B 土层 N B horizon N	0.548	0.697*	-0.174	-0.261	-0.127	-0.302	0.165	0.195	-0.503	0.783**	0.718**	-0.494	0.593*
B 土层 P B horizon P	-0.077	-0.086	0.695*	-0.190	-0.265	0.247	-0.525*	0.029	0.543*	-0.296	-0.439	0.717**	0.320

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; O: 腐殖质 Humus; A: 淋溶 Eluvial; B: 淀积 Illuvial

3 结论与讨论

3.1 马尾松针叶及其他器官 C、N、P 生态化学计量特征

森林是陆地生态系统最大的碳库,约占陆地总碳储量的 30%—50%^[18],而森林碳储量多少由其 C 含量和生物量共同决定。本研究中,不同林龄马尾松针叶 C 含量变化在 444.48—518.03 g/kg 之间,平均值为 478.12 g/kg(图 1),处于我国植物叶片 C 含量范围(423.8—530.2 g/kg),略高于全球陆生植物叶片平均 C 含量(464 g/kg)^[19],明显高于黔中地区马尾松人工林针叶 C 含量(443.3 g/kg)^[20],但略低于赣南马尾松天然林针叶 C 含量(485.3—502.6 g/kg)^[2],说明该研究区马尾松针叶 C 含量总体适中。但与本研究马尾松其他器官 C 含量相比,针叶 C 含量偏低,5 个林龄马尾松 C 含量平均值依器官排序为皮>干>枝>根>叶,说明马尾松 C 总体上更容易在皮富集,其次是干、枝、根。

N、P 是陆地生态系统中植物生长的主要限制元素,本研究马尾松针叶 N 含量平均值为 13.61 g/kg(图 1),明显低于我国陆地植物叶片平均值(20.5 g/kg)^[21]和全球植物叶片平均值(20.6 g/kg)^[22]。针叶 P 含量平均值为 2.00 g/kg(图 1),与全球植物叶片平均值接近(1.99 g/kg)^[22],但明显高于我国陆地植物叶片平均值(1.39 g/kg)^[21]。这说明该研究区马尾松针叶 N、P 含量总体呈现“N 缺乏、P 充足”的养分格局。N:P 临界比值常作为判断环境对植物生长的养分供应情况的指标^[23],当植物 N:P>16 时,植物生长主要受 P 限制;当 N:P<14 时,植物生长主要受 N 限制;当 N:P 比值介于 14 和 16 之间时,植物生长受 N 和 P 共同限制^[24]。本研究 14、25、38、45 a 马尾松针叶 N:P 分别为 6.12、8.69、6.05、7.31(图 1),均低于 14,也低于我国陆地植物叶片平均值(14.7)^[21]和全球植物叶片平均值(12.7)^[22],且不同林龄马尾松各器官的 N:P 均也低于 14,表明本研究区马尾松生长主要受 N 限制,这与黄土高原子午岭油松人工林^[1]以及同处于亚热带的黔中地区马尾松人工林^[20]、赣南地区马尾松天然林^[2]的研究结果一致,但不同于 Von Oheimb 等^[25]研究结论“低纬度地区的植物更易受 P 限制,高纬度地区的植物更易受 N 限制”。

以往大多数研究表明植物的 C、N、P 含量及其生态化学计量比随林龄变化呈变异性^[1,7],但其受林龄的影响及其变化规律却各有不同,如黔中地区^[20]马尾松针叶的 C、N 含量随林龄增加而上升,茎、根 N 含量则随林龄增加先下降后上升,针叶、根 P 含量则随林龄增加先上升后下降。梁月明等^[26]研究表明,广西镇龙林场马尾松针叶 C 含量随林龄增加先增大后下降,其他则变化不明显。何斌等^[27]研究发现,黔西北地区马尾松针叶 C、N、P 含量及其化学计量特征随林龄的变化规律不尽相同,但均受到林龄显著影响。本研究马尾松针叶 C、N 含量随林龄增加先增加后降低,针叶 P 含量则以 38 a 马尾松最大,这反映了不同林龄阶段的马尾松对土壤养分的吸收和需求有所差异。但总体看,林龄对马尾松各器官的 C、N、P 含量及其化学计量特征的影响不尽相同,说明林龄对其影响具有不确定性,这可能是因为马尾松 C、N、P 含量及其生态化学计量特征除受林龄影响外,还受到采样时间、立地条件、气候环境等各种因素的综合影响^[1]。本研究表明,器官对马尾松 C、N、P 含量及其化学计量特征均有显著影响,表现为针叶 N、P 含量明显高于其他器官,这与贵州喀斯特 10 个优势树种的研究结果一致^[19],说明该研究区马尾松 N、P 容易在针叶富集。

3.2 马尾松凋落物及土壤 C、N、P 生态化学计量特征

凋落物是森林回归土壤养分的主要途径,也是森林生长所需养分的主要来源^[28],本研究马尾松凋落物 C、N、P 含量比同处于亚热带的马尾松凋落物^[2,17,27] C、P 含量偏高、N 含量接近或偏低,但明显比黄土高原的刺槐凋落物 N、P 含量低^[29]。与针叶相比,本研究马尾松凋落物 N、P 含量明显减小,而 C:N、C:P 则明显增大,这反映了马尾松对营养元素的再吸收特征,即植物从衰老叶片或其他器官再吸收或再分配营养元素的能力,使得营养元素在植物体内留存时间增加^[30]。研究表明,凋落物 N:P 是影响凋落物分解和养分回归的重要因素,且与凋落物分解速率呈负相关^[31]。本研究马尾松凋落物 N:P 变化在 4.81—5.98 之间,其中以成熟林 N:P 最大(图 2),均低于同处于亚热带的马尾松林凋落物 N:P^[2,17,27],说明本研究区马尾松凋落物分解速率相对较快,有助于马尾松林土壤有机碳的输入和补充,这可能与本研究马尾松林为天然次生林,林下植物种

类较丰富有关^[32],而其中以成熟林凋落物分解较慢,这与姜沛沛等^[7]研究结果一致(认为凋落物分解速率随林龄增加大致呈降低趋势),但本研究林龄对马尾松凋落物 C、N、P 含量及其生态化学计量比的影响并不显著。

本研究马尾松林 O 层土壤 C、N 含量随林龄呈增加趋势,其中以成熟林最大(图 2),这可能与林地凋落物随林龄增加而增加,且林地土壤 C、N 补充与积累主要来自凋落物分解及养分归还^[1]。本研究马尾松林各层土壤 P 含量远低于全球水平(2.8 g/kg),这与中国土壤 P 含量普遍低于全球平均水平的规律一致^[7],但本研究马尾松针叶 P 含量却普遍较高,这充分说明了马尾松对土壤 P 的高利用效率。以往研究表明,土壤 C:N 反映了其有机质的矿化快慢,C:P 反映了土壤有机质被微生物矿化释放 P 潜力大小,N:P 反映了土壤 P 有效性高低^[2],本研究马尾松林各土层的 C:N、C:P、N:P 均高于我国土壤的平均水平(C:N 为 11.9,C:P 为 61,N:P 为 5.2)^[33],也均高于向云西等^[2]、何斌等^[27]、雷丽群等^[34]研究马尾松林土壤生态化学计量比,这说明该区域马尾松林土壤有机质的矿化作用偏慢,利于马尾松林土壤有机碳积累和土壤碳库功能增强;同时也说明马尾松林土壤矿化释放的 P 元素较少,但 P 有效性高,这也是本研究马尾松林之所以“虽然土壤 P 含量低,但针叶 P 含量高”的原因之一。

3.3 马尾松各器官-凋落物-土壤 C、N、P 生态化学计量相关关系

相关性分析可以揭示森林生态系统中不同组分 C、N、P 生态化学计量指标变量之间的协调关系,便于对 C、N、P 在植物各器官-凋落物-土壤之间的转换及耦合过程做出合理解释^[1]。本研究表明,C、N、P 含量及其生态化学计量比在马尾松各器官—凋落物—土壤之间均存在一定的显著相关性,其中尤以马尾松针叶的 C、N、P 生态化学计量与凋落物、土壤各指标变量之间的关系更为紧密,这与前人研究结果一致^[1-2],这说明马尾松针叶、凋落物、土壤之间存在更为紧密的 C、N、P 元素转换及耦合关系。除此之外,各器官、凋落物、土层的 C、N、P 生态化学计量之间均存在一定的自相关关系。本研究马尾松林 A 土层 N 含量与马尾松针叶 C 含量显著正相关,且各土层 N 含量与其土层 C 含量均呈显著正相关(表 2),这说明增加土壤 N 含量有助于提高马尾松针叶和土壤 C 含量,并进一步增强马尾松林的固碳增汇功能。杜红霞^[35]在我国岷江上游对森林土壤施加氮肥研究也表明,施加氮肥可增加连香树、云南松、云杉叶片和土壤 C 含量,且受施加量的影响。然而,本研究不同林龄马尾松林 A 土层 N 含量的平均值为 0.95 g/kg,低于我国土壤的平均水平(1.06 g/kg)^[33],说明马尾松林 A 土层的 N 含量较为缺乏,并且本研究表明 N 限制着马尾松生长,进而影响着马尾松固碳能力。

因此,在全球气候变化和国家碳达峰碳中和背景下,今后在该区域马尾松林经营管理过程中,应采取适当增施氮肥或林下补植固氮树种的营林措施,以增加马尾松林土壤 N 含量,从而提升马尾松林的固碳增汇能力。同时,本研究对结构复杂的马尾松天然次生林,仅考虑了其优势树种——马尾松的 C、N、P 生态化学计量,尚不能完全反映马尾松天然次生林的固碳能力,今后还需加强对马尾松天然次生林内伴生树种、灌木及草本植物 C、N、P 生态化学计量特征研究,以更加全面认识马尾松天然次生林的固碳增汇功能和进一步掌握不同林龄马尾松天然次生林 C、N、P 生态化学计量特征变化机理,从而为马尾松天然次生林经营管理提供新的科学依据。

参考文献(References):

- [1] 汪宗飞,郑粉莉.黄土高原子午岭地区人工油松林碳氮磷生态化学计量特征.生态学报,2018,38(19):6870-6880.
- [2] 向云西,陈胜魁,潘萍,欧阳勋志,宁金魁,李琦.马尾松叶片-凋落物-土壤的碳氮磷化学计量特征.森林与环境学报,2019,39(2):120-126.
- [3] 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.生态学报,2008,28(8):3937-3947.
- [4] Sardans J, Rivas-Ubach A, Peñuelas J. The C:P:N stoichiometry of organisms and ecosystems in a changing world: a review and perspectives. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2012, 14(1): 33-47.
- [5] Ai Z M, He L R, Xin Q, Yang T, Liu G B, Xue S. Slope aspect affects the non-structural carbohydrates and C:P:N stoichiometry of *Artemisia sacrorum* on the Loess Plateau in China. CATENA, 2017, 152: 9-17.
- [6] Niklas K J, Owens T, Reich P B, Cobb E D. Nitrogen/phosphorus leaf stoichiometry and the scaling of plant growth. Ecology Letters, 2005, 8(6): 636-642.

- [7] 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. 生态学报, 2016, 36 (19): 6188-6197.
- [8] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [9] Reich P B, Hobbie S E, Lee T, Ellsworth D S, West J B, Tilman D, Knops J M H, Naeem S, Trost J. Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to CO₂. Nature, 2006, 440(7086): 922-925.
- [10] McGroddy M E, Daufresne T, Hedin L O. Scaling of C:P:N stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial Redfield-type ratios. Ecology, 2004, 85(9): 2390-2401.
- [11] Ågren G I, Weih M. Plant stoichiometry at different scales: element concentration patterns reflect environment more than genotype. New Phytologist, 2012, 194(4): 944-952.
- [12] Yu Q, Chen Q S, Elser J J, He N P, Wu H H, Zhang G M, Wu J G, Bai Y F, Han X G. Linking stoichiometric homeostasis with ecosystem structure, functioning and stability. Ecology Letters, 2010, 13(11): 1390-1399.
- [13] 阎恩荣, 王希华, 周武. 天童常绿阔叶林演替系列植物群落的 N:P 化学计量特征. 植物生态学报, 2008, 32(1): 13-22.
- [14] 王晶苑, 王绍强, 李纫兰, 闫俊华, 沙丽清, 韩士杰. 中国四种森林类型主要优势植物的 C:P:N 化学计量学特征. 植物生态学报, 2011, 35(6): 587-595.
- [15] 李瑞, 马文超, 吴科君, 陈红纯, 王婷, 周翠, 魏虹. 三峡库区消落带水位变化对落羽杉 C、N、P 生态化学计量特征的影响. 生态学报, 2020, 40(3): 976-984.
- [16] 郭其强, 盘金文, 李慧娥, 高超, 孙学广, 杨菊. 贵州高原山地马尾松人工林土壤碳、氮、磷生态化学计量特性. 水土保持学报, 2019, 33 (4): 293-298.
- [17] 崔宁洁, 刘小兵, 张丹桔, 张健, 刘洋, 邓长春, 纪托未, 陈亚梅. 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. 生态环境学报, 2014, 23(2): 188-195.
- [18] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. Science, 2011, 333(6045): 988-993.
- [19] 刘立斌, 钟巧连, 倪健. 贵州高原型喀斯特次生林 C、N、P 生态化学计量特征与储量. 生态学报, 2019, 39(22): 8606-8614.
- [20] 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. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (4): 746-756.
- [21] Han W X, Fang J Y, Reich P B, Woodward F I, Zhang Z H. Biogeography and variability of eleven mineral elements in plant leaves across gradients of climate, soil and plant functional type in China. Ecology Letters, 2011, 14(8): 788-796.
- [22] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, Dobberfuhl D R, Folarin A, Huberty A, Interlandi S, Kilham S S, McCauley E, Schulz K L, Siemann E H, Sterner R W. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. Nature, 2000, 408(6812): 578-580.
- [23] Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. New Phytologist, 2004, 164(2): 243-266.
- [24] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [25] Von Oheimb G, Power S A, Falk K, Friedrich U, Mohamed A, Krug A, Boschatzke N, Härdtle W. N:P ratio and the nature of nutrient limitation in *Calluna*-dominated heathlands. Ecosystems, 2010, 13(2): 317-327.
- [26] 梁月明, 潘复静, 马姜明, 杨章旗, 零天旺, 李明金, 陆绍浩, 钟凤跃. 不同林龄和密度马尾松人工林针叶和根系的生态化学计量特征. 广西植物, 2021, 41(9): 1497-1508.
- [27] 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. 生态环境学报, 2019, 28(11): 2149-2157.
- [28] 赵其国, 王明珠, 何园球. 我国热带亚热带森林凋落物及其对土壤的影响. 土壤, 1991, 23(1): 8-15.
- [29] 陈亚南, 马露莎, 张向茹, 杨佳佳, 安韶山. 陕西黄土高原刺槐枯落叶生态化学计量学特征. 生态学报, 2014, 34(15): 4412-4422.
- [30] Wardle D A, Walker L R, Bardgett R D. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences. Science, 2004, 305 (5683): 509-513.
- [31] 王宁, 张有利, 王百田, 王瑞君. 山西省油松林生态系统碳氮磷化学计量特征. 水土保持研究, 2015, 22(1): 72-79.
- [32] 简尊吉, 倪妍妍, 徐瑾, 雷蕾, 曾立雄, 肖文发. 中国马尾松林土壤肥力特征. 生态学报, 2021, 41(13): 5279-5288.
- [33] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C:P:N ratios in China's soils: a synthesis of observational data. Biogeochemistry, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [34] 雷丽群, 卢立华, 农友, 明安刚, 刘士玲, 何远. 不同林龄马尾松人工林土壤碳氮磷生态化学计量特征. 林业科学研究, 2017, 30(6): 954-960.
- [35] 杜红霞. 四川岷江上游典型森林生态系统 C、N 格局与动态[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006: 38-42.