

网络出版时间:2016-01-08 10:22

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.02.010

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160108.1022.020.html

马尾松不同林型土壤 C、N、P、K 的化学计量特征

秦娟^a,孔海燕^a,刘华^b

(安徽农业大学 a 资源与环境学院,b 林学与园林学院,安徽 合肥 230036)

【摘要】 【目的】探讨大别山东南缘 3 种马尾松林型 0~60 cm 土层土壤养分含量及其土壤化学计量特征的变化规律,为该区马尾松林的可持续发展和生产提供科学依据。【方法】在马尾松林龄为 22 年的马尾松纯林及马尾松×麻栎混交林、马尾松×枫香混交林内各设置样地 3 块,采用 5 点取样法分层(20 cm 为 1 层)取样,并测定土壤有机 C、全 N、全 P、全 K 含量,比较不同林型各土层土壤养分含量及生态化学计量特征。【结果】马尾松各林型 0~60 cm 土层土壤有机 C、全 N、全 P 和全 K 含量均表现为马尾松×枫香混交林>马尾松×麻栎混交林>马尾松纯林。2 种混交林各土层土壤有机 C 和全 N 含量显著高于其纯林,其中混交林表层(0~20 cm)土壤有机 C 含量较纯林增加了 1.9 倍,全 N 含量较纯林增加了 2.6 倍;土壤全 P、全 K 含量变异性较小,变异系数分别为 0.07 和 0.10,在不同林型及不同土层差异均未达到显著水平。3 种林型土壤 C/N、C/P、C/K、N/P 随土层的加深均有所降低,其中马尾松纯林表层土壤 C/N 显著高于混交林,马尾松×枫香混交林表层土壤 C/P、C/K 和 N/P 较马尾松纯林分别提高了 44.22%, 45.83% 和 57.59%;C/N、P/K 较稳定,变异幅度小,变异系数分别为 0.20 和 0.07,属弱变异;C/P、C/K、N/P、N/K 变异系数均在 0.2~0.5,变异幅度较大,属中等变异。由相关性分析可知,土壤有机 C 与全 N、全 P 含量呈极显著正相关,而与土壤 K 含量相关性较小;土壤全 N 与全 P 含量显著正相关,相关系数为 0.744;土壤全 K 与土壤全 N、全 P 含量相关性均不显著。【结论】大别山区马尾松针阔混交林较马尾松纯林有效提高了林地土壤有机 C、全 N 含量及 C/P、C/K、N/P 和 N/K 值,且表层土壤养分含量提高更显著,而森林类型的改变对土壤中 P、K 元素含量的影响较小。

【关键词】 马尾松;纯林;针阔混交林;土壤养分;化学计量特征

【中图分类号】 S791.248;S714

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2016)02-0068-09

Stoichiometric characteristics of soil C,N,P and K in different *Pinus massoniana* forests

QIN Juan^a,KONG Hai-yan^a,LIU Hua^b

(a School of Resources and Environment,b School of Forestry and Landscape Architecture,

Anhui Agricultural University,Hefei,Anhui 230036,China)

Abstract: 【Objective】 The changes of soil stoichiometric characteristics in three *Pinus massoniana* forests were explored in the southeastern margin of Dabie Mountains to provide scientific basis for the sustainable development and production of *P. massoniana* in this area. 【Method】 Three sample plots were set in 22 years old pure *P. massoniana* forest (PF), *P. massoniana* and *Quercus acutissima* mixed forest (PQM), and *P. massoniana* and *Liquidambar formosana* mixed forest (PLM). The 5 point sampling method was used for stratification and sampling (20 cm for each layer). The soil nutrient contents of soil organic carbon (C),total nitrogen (N),total phosphorus (P) and total potassium (K) in depth of 0—60 cm were measured and ecological stoichiometry characteristics in different forests and soil depths were compared.

【收稿日期】 2014-06-30

【基金项目】 安徽省自然科学基金项目(1408085QC57);安徽省高校省级优秀青年人才基金资助项目(2012SQRL058);安徽农业大学青年科学基金重点项目(2012zd015);安徽农业大学生态学一级学科博士点建设基金项目(XKTS2013004)

【作者简介】 秦娟(1979—),女,陕西华县人,讲师,博士,主要从事植物生理生态研究。E-mail:qjj814@126.com

【Result】 Soil organic C, total N, total P and total K contents of *P. massoniana* forest in soil depth of 0—60 cm were in the order of PLM>PQM>PF. The soil organic C and total N of PLM and PQM were significantly higher than that of PF at different soil depths. In the surface layer soil (0—20 cm) of mixed forests, soil organic C and total nitrogen were 1.9 and 2.6 times more than in pure forest, respectively. The total P and total K contents had smaller variability and the variable coefficients were 0.07 and 0.10, respectively without significant difference among different forest types and soil depths. Soil C/N, C/P, C/K, and N/P ratios in the three different forests decreased with the increase of soil depth. The surface layer soil C/N of PF was significantly higher than the mixed forests. The PLM surface layer soil C/P, C/K and N/P ratios were increased by 44.22%, 45.83% and 57.59% compared to PF. C/N and P/K ratios were stable with weak variable coefficients of 0.20 and 0.07. The variable coefficients of C/P, C/K, N/P, and N/K were 0.2—0.5, belonging to medium variation. Soil organic C had significantly positive correlation with total N and total P contents but not with total K. There was significant positive correlation between total N and total P with correlation coefficient of 0.744. Correlations among soil total K with total N and total P were insignificant. 【Conclusion】 Soil organic C, total N, C/P, C/K, N/P and N/K in *P. massoniana* mixed forests were significantly higher than in the pure forest in Dabie Mountains, especially for surface layer. The change of forest type had minor effect on soil P and K.

Key words: *Pinus massoniana*; pure forest; coniferous and broadleaved mixed forests; soil nutrient; stoichiometric characteristics

马尾松(*Pinus massoniana*)是我国南方主要的造林适生针叶树种,也是松类树种中分布最广、面积最大的一类用材树种^[1],它不仅具有经济意义、防护效能及美学价值,而且在维护生态系统平衡方面也具有重要作用。然而由于遭到人们不合理的采伐利用,致使许多天然林的面积迅速缩小,取而代之的是营造生产力及经济价值高的大面积人工纯林。在南方地区纯林主要以松类及杉木组成的针叶树纯林居多,这种纯林不仅树种单一,结构层次简单,而且在森林的抗逆性方面具有明显弱势,长期种植将导致林地土壤养分含量下降、地力衰退,从而直接影响森林生产力的发挥^[2]。因此,发展针叶树纯林的前景并不乐观,这就要求人们从森林树木的生物学特性及生态学角度去改变林分的物种组成结构,以建立比人工针叶纯林更复杂、更稳定的森林生态系统,从而为更好地发挥森林的生态效益和经济效益服务^[3]。

大量研究证明,混交林在提高土壤肥力、改善林地养分状况、增加林地物种多样性、提高林分结构的稳定性和生产力等方面均发挥了重要作用,且明显改善了森林植物的生态环境^[4-5]。混交林是防护林体系林种、树种配置的重要组成形式,也是形成树种合理结构的良好途径,通过选择合适的阔叶树种与马尾松混交,就能充分利用地上、地下的能量和空间,从而增加混交林分的生物量,改善林地土壤养分状况,为林地植被的生长和营造马尾松混交林提供

重要理论参考。

土壤 C、N、P、K 化学计量特征不仅可以反映土壤的肥力状况,而且其比值是土壤有机质构成和土壤质量状况以及养分供给能力的重要体现指标,也是反映土壤 C、N、P 矿化、固持作用的指标^[6]。该类比值容易测定,能够反映生态系统的功能变异性,且通过土壤 C、N、P、K 的比值变化规律不仅能有效地为土壤养分管理提供理论指导,还有利于确定生态系统中元素变化对全球环境变化及 C、N 循环过程的响应。目前,国内学者对生态化学计量特征的研究主要集中在不同区域尺度的土壤调查^[7-8]、人类活动影响^[9]及陆地生态系统植物组织元素的化学计量特征^[10-13]等方面,而对全球尺度土壤 C、N、P 计量特征及其养分限制^[14-15]等方面的研究仍不够完善,尚需进一步进行分析与探讨。在森林生态系统中, N 和 P 成为许多地区树木生长的最主要限制因子,因此,土壤中各养分元素含量的平衡将直接影响森林植物的生长及植被类型组成,通过对不同区域生态系统土壤 C、N、P 等化学计量特征的分析,探讨森林生态系统养分元素平衡的 C、N、P 比值,对于预测土壤、植物间的养分循环速率及土壤-植物相互作用的养分调控因素具有重要意义。本研究以马尾松 3 种不同林型为对象,对其土壤化学计量特征进行分析,以期揭示马尾松不同林型土壤 C、N、P、K 及其比值的变异规律,为大别山区马尾松林的持续生产

和发展及最优混交林型的筛选提供理论参考。

1 研究地区与方法

1.1 研究地概况

研究地点位于安徽省枞阳县大山村,枞阳县地处大别山东南边缘,位于安徽省中西部的长江北岸,北纬 31°01′~31°38′,东经 117°05′~117°43′,属于亚热带季风湿润气候区,四季气候变化明显。年均气温 16.5℃,年均日照时数 2 064.9 h,年均降水量 1 326.5 mm,山地成土母岩以花岗片麻岩为主,山地土壤主要为麻石黄棕壤,质地较轻,pH 值为 5.5~6.5,具有典型代表性的亚热带北缘地区丘陵岗地气候特点。

研究区地貌特征为低山丘陵,海拔多在 160 m 左右。山坡较平缓,坡度多在 20°以下,局部达 30°。枞阳县大山村针阔混交林多分布于天然林的林缘,是原人工种植未抚育的马尾松林,经 40 多年的封山育林由阔叶树种侵入发展而成针、阔叶混交林,是人工马尾松林过渡到半天然阔叶林的类型。马尾松常

绿落叶阔叶混交林是该地区的主要植被类型,林中的阔叶树种主要有化香(*Platycarya strobilacea*)、麻栎(*Quercusacu tissima*)、枫香(*Liquidambar formosana*)等。森林群落结构明显,林分郁闭度在 0.4~0.8。

1.2 样地土壤样品采集

在马尾松林样地的坡向、坡度、坡位和海拔等立地因子基本一致且林分年龄(22 年生)较一致的前提下,选取具有代表性的马尾松(*P. massoniana*)纯林、马尾松×麻栎(*P. massoniana*×*Q. tissima*)混交林及马尾松×枫香(*P. massoniana*×*L. formosana*)混交林 3 种林型,每种林型设 20 m×20 m 样地 3 块进行土壤样品的采集。在每块样地内,以“S”形选取 5 个点取样,使用直径为 4 cm 的土钻分土层采样,采样时去除土层表面枯落物,采样深度为 60 cm(分 0~20,20~40 和 40~60 cm 3 个土层),将同一样地采集的土壤样品分层混合,密封后装入土袋带回实验室待测。样地概况见表 1。

表 1 马尾松 3 种林型样地的概况
Table 1 General situation in three *Pinus massoniana* forests

林型 Forest type	混交比例 Proportion of mixture	密度/ (株· hm ⁻²) Density	平均树高/m Average height	平均 胸径/cm Average DBH	海拔/m Altitude	坡向 Slope aspect	坡度/(°) Slope gradient	坡位 Slope position	乔木层 盖度/% Arbor Cover	主要乔木层 树种组成 Dominant species in tree layer
马尾松 纯林 PF	—	1 510	9.2	11.9	105	西北 Northwest	23	中 Medium	60	马尾松 <i>P. massoniana</i>
					99	北 North	18	中 Medium	60	
					85	北 North	20	下 Down	70	
马尾松× 麻栎 混交林 PQM	2:1	1 120 (450)	10.3 (8.9)	14.1 (9.8)	90	北 North	15	下 Down	70	马尾松、麻栎、化香 <i>P. massoniana</i> , <i>Q. tissima</i> , <i>P. strobilacea</i>
					115	西北 Northwest	18	中 Medium	80	
					138	北 North	20	上 Up	70	
马尾松× 枫香 混交林 PLM	2:1	1 050 (515)	10.5 (12.9)	13.6 (11.7)	142	西北 Northwest	22	上 Up	65	马尾松、化香、枫香 <i>P. massoniana</i> , <i>P. strobilacea</i> , <i>L. formosana</i>
					153	西北 Northwest	20	上 Up	70	
					118	北 North	18	中 Medium	75	

注:PF, Pure *Pinus massoniana* forest;PQM, *Pinus massoniana* and *Quercusacu tissima* mixed forest;PLM, *Pinus massoniana* and *Liquidambar formosana* mixed forest;括号内数据为麻栎或枫香的值。下同。

Note:PF, Pure *Pinus massoniana* forest;PQM, *Pinus massoniana* and *Quercusacu tissima* mixed forest;PLM, *Pinus massoniana* and *Liquidambar formosana* mixed forest. The data in bracket is *Q. tissima* or *L. formosana*. The same below.

1.3 土壤养分测定

将从野外采集的土壤样品带回实验室后自然风干,去除植物残体、根系、石块等,将风干后的土壤样品研磨、压碎、过孔径 0.25 mm 筛以测定土壤各项养分含量。土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定,土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定,土壤全磷含量采用钼锑抗比色法测定,土壤全钾含量采用火焰光度法测定,以上各项指标每样品重复测定 3 次。

1.4 数据分析

采用 SPSS 17.0 统计分析软件包对数据进行相

关分析与 One-Way ANOVA 方差分析,并用 LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 马尾松不同林型林地土壤有机 C、全 N、全 P 和全 K 含量的变化

由表 2 可知,各林型 0~60 cm 土层土壤有机 C、全 N、全 P 和全 K 含量均表现为马尾松×枫香混交林>马尾松×麻栎混交林>马尾松纯林。马尾松纯林土壤有机 C 和全 N 含量显著低于 2 种混交林,

而全 P 和全 K 含量在 3 种林型间差异不显著。马尾松×枫香混交林土壤有机 C、全 N、全 P、全 K 含量较马尾松纯林分别提高了 56.43%,60.85%,11.49%和 10.34%。

表 2 马尾松 3 种林型 0~60 cm 土层土壤有机 C、全 N、全 P 和全 K 含量

Table 2 Contents of soil organic C, total N, total P and total K at 0~60 cm soil depth in three *Pinus massoniana* forests

林型 Forest type	土壤有机 C Soil organic C	土壤全 N Soil total N	土壤全 P Soil total P	土壤全 K Soil total K
马尾松纯林 PF	25.17±1.54 b	1.48±0.03 b	0.77±0.02 a	52.02±1.58 a
马尾松×麻栎混交林 PQM	54.25±2.97 a	3.42±0.03 a	0.81±0.03 a	55.55±0.97 a
马尾松×枫香混交林 PLM	57.77±2.03 a	3.78±0.04 a	0.87±0.03 a	58.02±2.04 a

注:表中数值为“平均值±标准差”,同列数据后标不同字母者表示差异显著($P<0.05$)。
Note: The value is “mean±SD”. Different letters indicate significantly difference at $P<0.05$ level.

图 1 显示,3 种林型中,土壤有机 C、全 N、全 P 和全 K 含量均随不同土层深度的增加而呈现逐渐降低的趋势,其中混交林土壤有机 C 含量显著高于纯林($P<0.05$),马尾松纯林表层(0~20 cm)土壤有机 C 含量为 12.32 g/kg,在 40~60 cm 土层则迅速下降为 4.96 g/kg,其下降率高达 59.74%;而 2 种混交林表层土壤有机 C 含量分别为 23.68 g/kg

(马尾松×麻栎混交林)和 25.36 g/kg(马尾松×枫香混交林),显著高于纯林,表层土壤有机 C 含量较纯林分别提高 47.98%和 51.42%,混交林下层(40~60 cm)土壤有机 C 含量也较其表层土壤有显著降低,但均显著高于纯林下层土壤,2 种不同混交林型间有机 C 含量无显著差异。

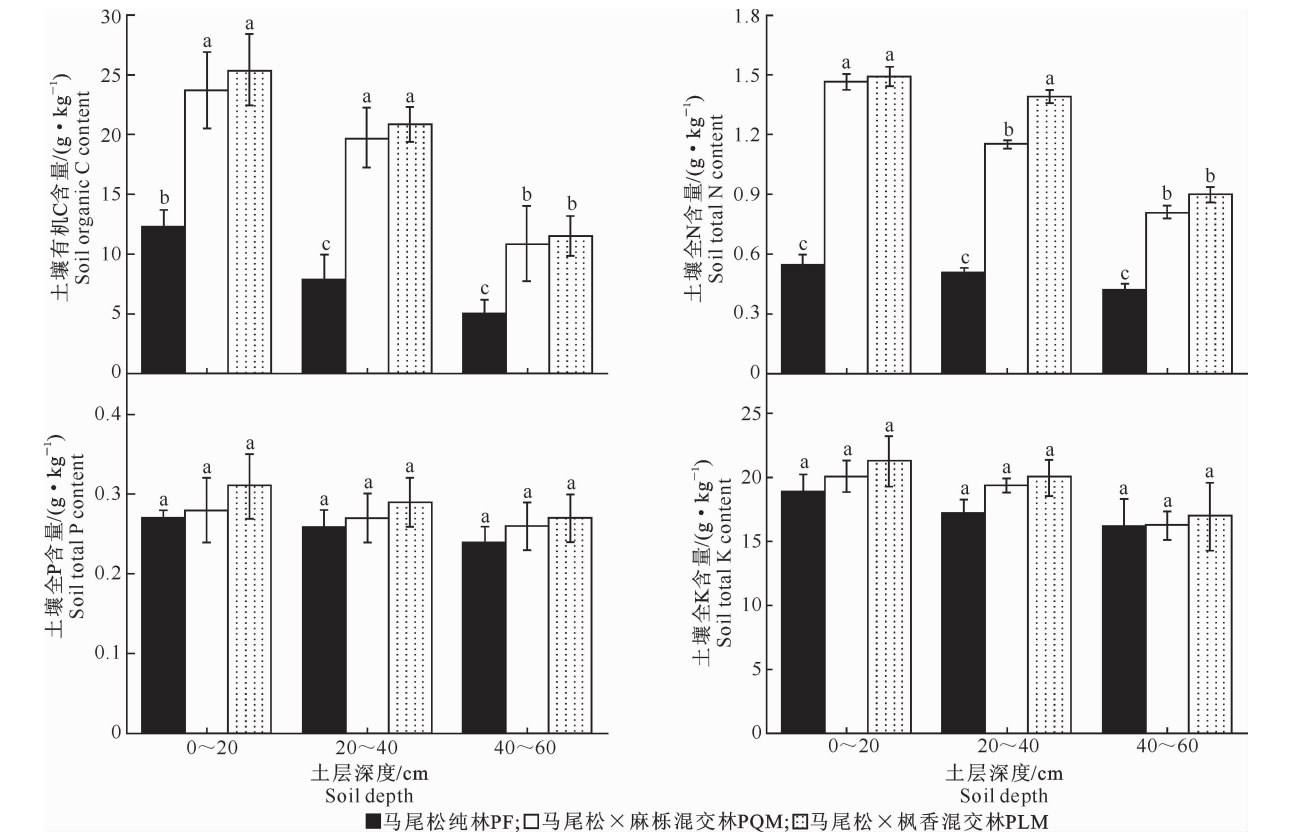


图 1 马尾松 3 种林型不同土层土壤养分含量的变化

图柱上标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同

Fig. 1 Variations of soil nutrition content in three *Pinus massoniana* forests
Different letters indicate significant difference at $P < 0.05$, the same below

由图 1 还可知,土壤全 N 含量在纯林不同土层间无显著差异,而在 2 种混交林型不同土层间差异显著,均为表层土壤(马尾松×麻栎混交林 1.46 g/kg、马尾松×枫香混交林 1.49 g/kg)显著高于下

层土壤(马尾松×麻栎混交林 0.81 g/kg、马尾松×枫香混交林 0.90 g/kg),且混交林各土层全 N 含量均显著高于纯林,其中表层土壤全 N 含量是纯林的 2.6 倍。3 种林型中,土壤全 P、全 K 含量均随土层深度的增加变化很小,差异未达到显著水平($P>0.05$),但在 3 种林型中,仍以 2 种混交林高于纯林。

表 3 显示,3 种林型土壤有机 C 含量介于 4.96~25.36 g/kg,平均值为 15.24 g/kg,变异系数

为 0.48,属于中等变异,这说明在 3 种马尾松林型间有机 C 含量变化差异较大。土壤全 N 含量最大值为 1.49 g/kg,均值为 0.96 g/kg,属中等变异,说明在 3 种林型间全 N 含量变化幅度较大。土壤全 P、全 K 含量变异系数分别为 0.07 和 0.10,属弱变异,即在不同林型间全 P、全 K 含量变化较小,其值较稳定。分析可知,不同土层土壤有机 C 及全 N 含量对不同林型的响应要强于土壤全 P 及全 K 含量。

表 3 马尾松 3 种林型土壤全量养分的统计分析

Table 3 Statistical analysis of soil total nutrient in three *Pinus massoniana* forests

土壤全量养分 Soil total nutrient	样本数 Sample number	最大值/ (g · kg ⁻¹) Maximum value	最小值/ (g · kg ⁻¹) Minimum value	均值/ (g · kg ⁻¹) Mean value	标准差/ (g · kg ⁻¹) Standard deviation	变异系数(CV) Variable coefficient
土壤有机 C Soil organic C	27	25.36	4.96	15.24	7.30	0.48
土壤全 N Soil total N	27	1.49	0.42	0.96	0.42	0.44
土壤全 P Soil total P	27	0.31	0.24	0.27	0.02	0.07
土壤全 K Soil total K	27	21.21	16.10	18.40	1.86	0.10

注:CV≤0.2 为弱变异性,0.2<CV<0.5 为中等变异性,CV≥0.5 为强变异性。下表同。
Note:CV≤0.2, weak variability; 0.2<CV<0.5, Medium variability; CV≥0.5, Strong variability. The same below.

2.2 马尾松不同林型林地土壤有机 C、全 N、全 P 和全 K 的化学计量特征

由图 2 可知,马尾松 3 种林型土壤 C/N、C/P、

C/K、N/P 均随土层的加深而有所降低,2 种混交林型与纯林在 0~40 cm 土层基本上表现出显著差异($P<0.05$)。

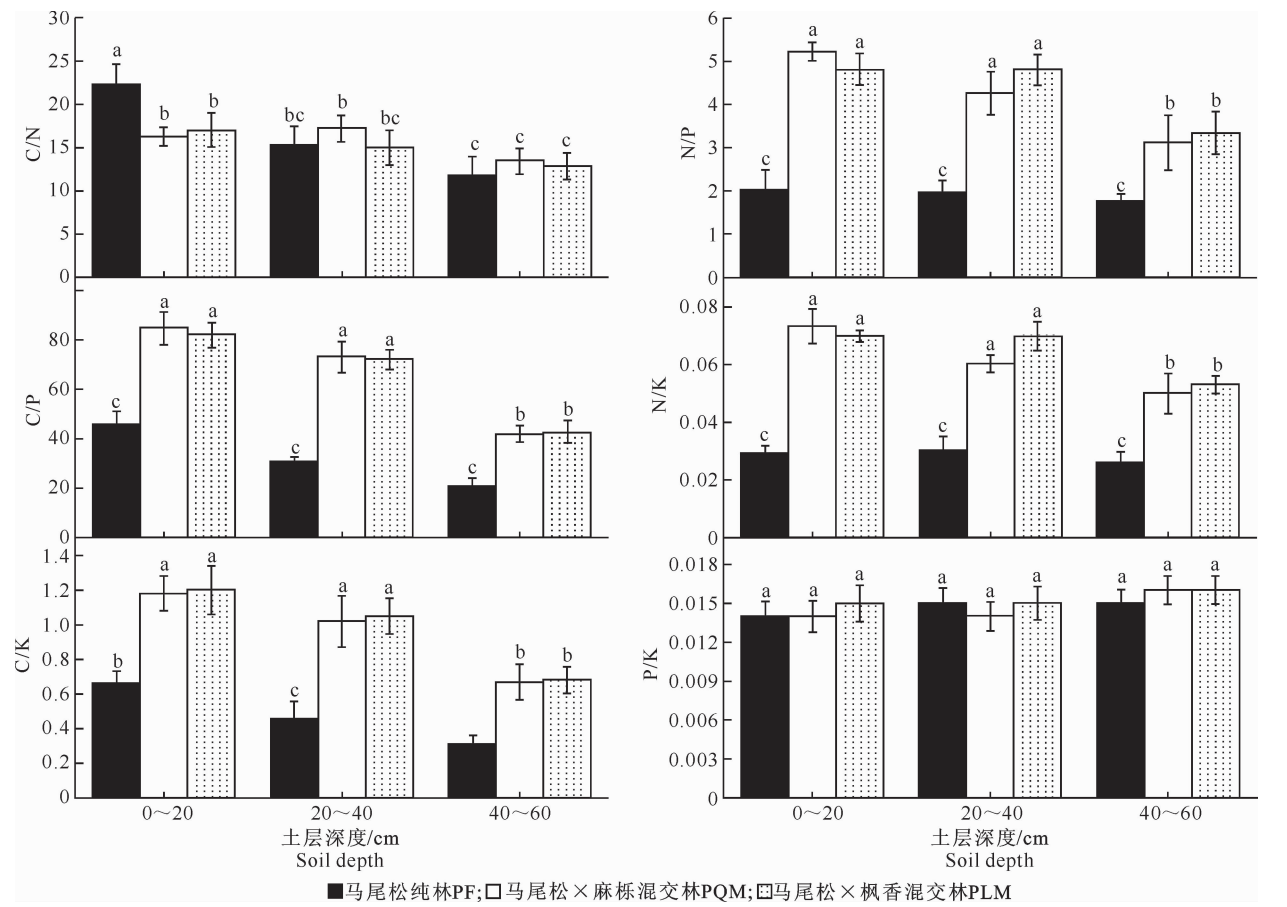


图 2 马尾松 3 种林型不同土层的土壤化学计量特征

Fig. 2 Soil stoichiometric characteristics in three *Pinus massoniana* forests

由图 2 还可知,马尾松纯林表层土壤 C/N 显著高于混交林,约为 2 种混交林的 1.3 倍,而 2 种混交林间差异不显著。3 种林型中,马尾松×枫香混交林表层土壤 C/P、C/K 和 N/P 较马尾松纯林分别提高了 44.22%, 45.83% 和 57.59%。马尾松纯林 N/K 在不同土层未显示出显著差异,而 2 种混交林型 0~40 cm 土层土壤 N/K 显著高于下层土壤。在 0~60 cm 土层,2 种混交林型 N/K 显著高于马尾松纯林,其中马尾松×枫香混交林表层土壤 N/K 较纯林提高了 58.57%,这说明 2 种混交林较马尾松纯林有效提高了土壤的 C/P、C/K、N/P 和 N/K。3 种林型 0~60 cm 土层 P/K 均未表现出显著差异,这与土壤全 P、全 K 含量变异较小有关,因而其值较稳定,在 0.01 左右波动。

由表 4 可知,C/N、P/K 值较稳定,变异系数分别为 0.20 和 0.07,变异幅度较小,属弱变异。不同

林型土壤 C/N 变化于 11.81~22.40,其中最大值为马尾松纯林表层土壤的 C/N,其显著高于 2 种混交林。C/P、C/K、N/P、N/K 变异系数均在 0.2~0.5,属于中等变异。有研究表明,在某些情况下,C/P 比 C/N 的变异性大,即 C/P 具有更大的取值范围,原因在于磷不是腐殖酸和棕黄酸的结构组分^[16]。C/P、C/K、N/P、N/K 在混交林与纯林间均表现出显著差异,即混交林显著高于纯林,而 2 种混交林间差异不显著。C/P 变化于 20.67~84.57,均值为 54.72,其变异幅度较大,这与土壤有机 C 含量在混交林与纯林间变化较大有关。C/K 在不同林型间的变化规律与 C/P、N/P、N/K 较一致,这与土壤中 P、K 元素含量稳定有关,所以 C/K、C/P、N/P 与 N/K 就只受到土壤中 C、N 元素含量的影响,故 C/K、C/P 与有机 C 的变化规律一致,而 N/P、N/K 与全 N 含量变化规律基本一致。

表 4 马尾松 3 种林型土壤 C、N、P、K 的化学计量比

Table 4 Stoichiometric ratios of soil C,soil N,soil P and soil K in three *Pinus massoniana* forests

化学计量比 Stoichiometric ratio	样本数 Sample number	最大值 Maximum value	最小值 Minimum value	均值 Mean value	标准差 Standard deviation	变异系数(CV) Variable coefficient
C/N	27	22.40	11.81	15.70	3.13	0.20
C/P	27	84.57	20.67	54.72	23.47	0.43
C/K	27	1.20	0.31	0.80	0.32	0.40
N/P	27	5.21	1.75	3.47	1.35	0.39
N/K	27	0.073	0.026	0.051	0.019	0.37
P/K	27	0.016	0.014	0.015	0.001	0.07

2.3 马尾松不同林型林地土壤养分与化学计量比之间的相关性

对马尾松 3 种林型 0~60 cm 土层土壤有机 C、

全 N、全 P、全 K 含量及其化学计量比值相关性的分析结果见表 5。

表 5 马尾松 3 种林型土壤养分含量与化学计量比之间的相关性分析

Table 5 Correlation analysis between soil nutrient content and the stoichiometric ratio in three kinds of *Pinus massoniana* forest types

指标 Index	土壤有机 C Organic C	土壤全 N Total N	土壤全 P Total P	土壤全 K Total K	C/N	C/P	C/K	N/P	N/K	P/K
土壤有机 C Organic C	1.000	0.960**	0.886**	0.323	—	—	—	0.940**	0.853**	0.408
土壤全 N Total N		1.000	0.744*	0.234	—	0.954**	0.952**	—	—	0.559
土壤全 P Total P			1.000	0.155	0.375	—	0.844**	—	0.733*	—
土壤全 K Total K				1.000	0.561	0.413	—	0.374	—	—

注: ** 表示在 $\alpha=0.01$ 水平相关性显著(双尾检验), * 表示在 $\alpha=0.05$ 水平相关性显著(双尾检验); “—”表示存在自相关关系,不宜进行相关分析。
Note: ** indicates correlation is significant at $\alpha=0.01$ level (2-tailed), * indicates correlation is significant at $\alpha=0.05$ level (2-tailed); “—” indicates that autocorrelation exists and no analysis is conducted.

表 5 表明,土壤有机 C 与土壤全 N、全 P 含量极显著正相关($P<0.01$),与土壤全 K 含量相关性较小($P>0.05$);土壤全 N 与全 P 含量显著正相关

($P<0.05$),相关系数为 0.744;土壤全 K 与土壤全 N、全 P 含量相关性均不显著。
由表 5 还可知,土壤有机 C 与 N/P、N/K 呈极

显著正相关,这是因为土壤中 P、K 含量变化较稳定,N/P、N/K 主要受到土壤全 N 含量的影响,而马尾松不同林型及不同土层土壤全 N 与有机 C 含量的变化又具有一致性;土壤全 N 与 C/P、C/K 呈极显著正相关,其相关系数均达到 0.95 以上;土壤全 P 与 C/K 相关性极显著,与 N/K 相关性显著;土壤全 K 与 C/N、C/P 和 N/P 之间无显著相关性。

3 讨 论

由于森林植被类型不同,导致其地表凋落物的储量及构成、树木根系生长发育和凋落物的分解速率等均存在一定差异,从而造成不同植被类型林地土壤养分含量的差异^[17]。本研究在对大别山东南缘马尾松 3 种林型进行分析时发现,土壤有机 C 和全 N 含量均随土层深度的增加而下降。在森林生态系统中,林地表面植物的凋落物及其根系是土壤有机 C 的主要来源,而凋落物是森林生态系统内维持土壤养分的重要物质来源,其所含的营养元素经分解释放后归还给土壤,显著提高了土壤肥力,是土壤养分的重要归还库^[18],植物的这些凋落物及根系主要集中在土壤表层(0~20 cm),因此其分解所形成的大量有机物及养分元素也首先进入土壤表层,从而使土壤表层有机质的积累量较多,随着土层深度的增加,植物根系分布减少,其凋落物所分解的有机质来源减少,土壤养分含量也减少^[19]。然而由于森林类型不同,其树种组成及生物学特性也不相同,因而使得不同树种凋落物的质、量及其分解速率均有较大差异,从而影响不同林地土壤养分含量和分布状况。3 种马尾松林型中,0~60 cm 土层马尾松纯林土壤有机 C、全 N 含量显著低于 2 种混交林,而 2 种混交林间差异基本不显著,但仍以马尾松×枫香混交林较高。分析认为这与不同林地地被物有机质的积累与分解有关。由于马尾松针叶质地粗硬,纤维素含量高,表皮富含蜡质,透水性差,因而较难分解转化,从而影响有机质在土壤中的积累^[20]。在马尾松纯林地发现其林下凋落物的积累量最少,而且林地凋落物的周转时间长^[21]。在马尾松×枫香混交林中,由于落叶阔叶树种枫香生长快、树冠大、落叶丰富,能为混交林地土壤提供更多的凋落物,凋落物数量的增加一方面可有效增强土壤表层的蓄水保水能力,使土壤水分条件得到明显改善;另一方面由于凋落物的分解改善了林地土壤的物理特性,加速了养分循环,从而也提高了混交林地土壤的肥力。此外,马尾松与枫香都属于深根性树种,其主根明

显,侧根发达,两树种在混交后,其根系交错分布,可以有效利用地下营养空间。有研究表明,混交林中两树种须根在土壤中呈层状分布,马尾松须根在 10~20 cm 的土层中分布较多,占全部须根量的 40.0%,枫香须根集中分布于 20~40 cm 土层中,占全部须根量的 50.1%^[22],正是由于两树种根系的分层分布有效扩大了林地地下的营养空间,从而缓和了两树种的种间矛盾,促进了马尾松与枫香的生长,改善了混交林地的土壤养分状况。在马尾松×麻栎混交林中,麻栎是一种强阳性喜光树种,不能在树冠下生长,但在混交林中生长迅速,形成良好的干形,且能促进马尾松的高生长,麻栎与枫香都属于深根性树种,其根系在土壤中呈哑铃型分布,主要分布于表层(0~20 cm)和深层(>60 cm)土壤,这正好与马尾松根系镶嵌分布从而能合理利用地下空间,促进马尾松的生长。本研究发现,在马尾松×麻栎混交林地麻栎叶凋落物现存量较高,这可能与其中 C 素含量较高有关,C/N 值越高,凋落物分解速度越慢;而在马尾松×枫香混交林中,其凋落物中枫香花、果的含量较高,叶含量较低,说明其叶的 C/N 比值较低,分解速度快,从而导致马尾松×枫香混交林地养分循环加快。

土壤全 P、全 K 含量在马尾松不同林型及不同土层深度差异较小,但均随土层的加深而有所下降。3 种林型土壤全 P 含量变化于 0.24~0.31 g/kg,全 K 含量为 16.10~21.21 g/kg,其变异幅度较小,变异系数分别为 0.07 和 0.10,说明土壤全 P、全 K 含量在不同林型及土层间变化很小。这是因为土壤全 P 主要来源于岩石的风化及凋落物的分解^[23]。土壤中的 K 元素主要来自于矿物风化、森林凋落物和降水淋溶,其含量大小随土层深度的变化不显著,因而相对较稳定,变异性也较小^[24]。由本研究土壤养分含量分析可知,3 种林型土壤有机 C、全 N、全 P、全 K 含量大小表现为:马尾松×枫香混交林>马尾松×麻栎混交林>马尾松纯林,说明混交林地的土壤有机 C、全 N、全 P 及全 K 含量均较马尾松纯林有所提高,这就表明马尾松针阔混交林在保持土壤养分、增加土壤肥力方面的作用高于马尾松纯林。

土壤 C/N、C/P 和 N/P 是有机质或其他成分中 C 素与 N 素、P 素总质量的比值,是反映土壤有机质组成及土壤资源有效性的重要指标^[25]。C/N 是土壤质量的敏感指标,其会影响土壤中有机 C 和 N 的循环^[26]。一般来讲,土壤 C/N 与土壤有机质分解速率成反比关系^[27],当然不同生态系统土壤 C/N

也会存在显著差异。当 C/N 较高时,土壤有机质分解速率较低,这时微生物需要输入更多的 N 素来满足它们的生长;而 C/N 较低时,超过微生物生长所需的 N 素就会释放到土壤中,从而增加土壤的 N 素含量^[28]。在 3 种马尾松林型中,2 种混交林地凋落物数量丰富,其林地的养分归还量增加,有效提高了土壤肥力及全 N 含量;而马尾松纯林地凋落物数量少,且其针叶分解速度慢、分解速率低,因而其土壤全 N 含量少,C/N 高。Batjes^[29]认为,全球土壤 C/N 在 9.9~29.8,均值为 13.33^[30]。我国土壤 C/N 平均值在 10:1~12:1^[31]。本研究区土壤 C/N 平均值为 15.70,说明研究区 C/N 略高于我国土壤 C/N 平均水平,这可能与南方的酸性土壤类型有关,其土壤中氮素含量较低。3 种马尾松林型土壤 C/P 均值为 54.72,低于我国土壤 C/P 的平均值 105^[32],这与研究区土壤 P 含量较高有关。贾宇等^[33]研究发现,当土壤 C/P>200 时,微生物体的 C 素大幅度增加,微生物之间竞争土壤中的速效 P,导致土壤中的 P 含量减少;而当土壤 C/P<200 时,会出现土壤微生物体 C 素的短暂增加和有机 P 的净矿化,从而使土壤中的 P 含量增加。本研究区土壤 C/P<200,说明研究区土壤中的 P 含量较充足。土壤 N/P 可以作为养分限制类型的有效预测指标^[34]。研究区 3 种马尾松林型土壤 N/P 存在显著差异,其均值为 3.47,且均为 2 种混交林显著高于纯林,这说明混交林地植物地上部分生长旺盛,林地土壤 N 素营养充足,参与植物光合作用的 N 素利用效率也较高,因而混交林土壤 N/P 主要受 P 素制约,土壤 N/P 之间的差异也说明了不同森林类型之间存在不同的养分限制类型。

土壤 P/K 在马尾松不同林型及不同土层深度变异很小,其值在 0.01~0.02 波动,可见森林类型的改变对土壤中 P、K 含量的变化影响较小。罗亚勇等^[11]的研究表明,土壤 P、K 含量较高,但 P/K 稳定在 0.03~0.04,可见土壤 P/K 较稳定,这与二者均显著受土壤母质的影响有关。本研究中,马尾松混交林与纯林的 C/K、N/K 差异显著,这是因为土壤中全 K 含量相对稳定,C/K、N/K 主要受土壤有机 C 或全 N 含量的影响,而有机 C 和全 N 含量在混交林与纯林间差异显著,因而 C/K 和 N/K 也具有相似的变化规律。土壤 C、N、P、K 之间的比值主要受不同区域水热条件和成土作用特征的控制,由于气候、地貌、植被类型、物种组成、母岩、土壤质地以及土层深度等因子和人为活动的影响,土壤 C、

N、P、K 总量变化很大,因而使得不同生态系统土壤 C、N、P、K 之间比值的空间变异性较大,这也说明在不同的环境背景下,由于研究区域的不同,土壤养分化学计量特征也会存在明显差异。

[参考文献]

- [1] 莫江明, Brown S, 孔国辉, 等. 鼎湖山马尾松林营养元素的分布和生物循环特征 [J]. 生态学报, 1999, 19(5): 635-639.
Mo J M, Brown S, Kong G H, et al. Nutrient distribution and cycling of a Masson's pine planted forest in Dinghushan [J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(5): 635-639. (in Chinese)
- [2] 韩艺师, 魏彦昌, 欧阳志云, 等. 连栽措施对桉树人工林结构及持水性能的影响 [J]. 生态学报, 2008, 28(9): 4609-4617.
Han Y S, Wei Y C, Ouyang Z Y, et al. Effects of continuous planting rotation on forest structural characteristics and water holding capacity of *Eucalyptus* plantations [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4609-4617. (in Chinese)
- [3] 邓仕坚, 张家武, 陈楚莹, 等. 不同树种混交林及其纯林对土壤理化性质影响的研究 [J]. 应用生态学报, 1994, 5(2): 126-132.
Deng S J, Zhang J W, Chen C Y, et al. Effect of pure and mixed stands on soil physical and chemical properties [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1994, 5(2): 126-132. (in Chinese)
- [4] 田大伦, 项文化, 闫文德. 马尾松与湿地松人工林生物量动态及养分循环特征 [J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2207-2210.
Tian D L, Xiang W H, Yan W D. Comparison of biomass dynamic and nutrient cycling between *Pinus massoniana* plantation and *Pinus elliottii* plantation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(10): 2207-2210. (in Chinese)
- [5] 樊后保, 李燕燕, 黄玉梓, 等. 马尾松纯林改造成针阔混交林后土壤化学性质的变化 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(4): 77-81.
Fan H B, Li Y Y, Huang Y Z, et al. Changes of soil chemical properties after pure massonps pine plantations transferred into mixed conifer-hardwood stands [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(4): 77-81. (in Chinese)
- [6] Dise N B, Matzner E, Forsius M. Evaluation of organic horizon C:N ratio as an indicator of nitrate leaching in conifer forests across Europe [J]. Environmental Pollution, 1998, 102(S1): 453-456.
- [7] Han W, Fang J, Reich P, et al. Biogeography and variability of eleven mineral elements in plant leaves across gradients of climate, soil and plant functional type in China [J]. Ecology Letters, 2011, 14: 788-796.
- [8] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 等. 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.
Liu X Z, Zhou G Y, Zhang D Q, et al. N and P stoichiometry of plant and soil in lower subtropical forest successional series in southern China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 64-71. (in Chinese)
- [9] 韩琳, 李征, 曾艳, 等. 太湖流域河岸带不同土地利用下草本植物叶片和土壤 C、N、P 化学计量特征 [J]. 生态杂志,

- 2013,32(12):3281-3288.
- Han L, Li Z, Zeng Y, et al. Carbon, nitrogen, and phosphorous stoichiometry of herbaceous plant leaf and soil in riparian zone of Taihu lake basin, east China under effects of different land use types [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(12): 3281-3288. (in Chinese)
- [10] 李 征, 韩 琳, 刘玉虹, 等. 滨海盐地碱蓬不同生长阶段叶片 C、N、P 化学计量特征 [J]. 植物生态学报, 2012, 36(10): 1054-1061.
- Li Z, Han L, Liu Y H, et al. C, N and P stoichiometric characteristics in leaves of *Suaeda salsa* during different growth phase in coastal wetlands of China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(10): 1054-1061. (in Chinese)
- [11] 罗亚勇, 张 宇, 张静辉, 等. 不同退化阶段高寒草甸土壤化学计量特征 [J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 254-260.
- Luo Y Y, Zhang Y, Zhang J H, et al. Soil stoichiometry characteristics of alpine meadow at its different degradation stages [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(2): 254-260. (in Chinese)
- [12] 牛得草, 董晓玉, 傅 华. 长芒草不同季节碳氮磷生态化学计量特征 [J]. 草业科学, 2011, 28(6): 915-920.
- Niu D C, Dong X Y, Fu H. Seasonal dynamics of carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in *Stipa bungeana* [J]. Pratacultural Science, 2011, 28(6): 915-920. (in Chinese)
- [13] 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, 28(12): 2665-2673.
- Ren S J, Yu G R, Tao B, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 654 terrestrial plant species in NSTEC [J]. Environmental Science, 2007, 28(12): 2665-2673. (in Chinese)
- [14] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. 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.
- [15] Yang Y, Fang J, Guo D, et al. Vertical patterns of soil carbon, nitrogen and carbon: Nitrogen stoichiometry in Tibetan grasslands [J]. Biogeo Sciences Discussions, 2010, 7: 1-24.
- [16] Stevenson F J, Cole M A. Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients [M]. USA: John Wiley & Sons Inc, 1999.
- [17] 王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 等. 河口湿地植物活体枯落物土壤的碳氮磷生态化学计量特征 [J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7119-7124.
- Wang W Q, Xu L L, Zeng C S, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometric ratios among live plant-litter-soil systems in estuarine wetland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(23): 7119-7124. (in Chinese)
- [18] Maisto G, De Marco A, Meola A, et al. Nutrient dynamics in litter mixtures of four Mediterranean maquis species decomposing in situ [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(3): 520-530.
- [19] 谷思玉, 汪 睿, 谷邵臣, 等. 不同类型红松林土壤基础肥力特征分析 [J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 73-76.
- Gu S Y, Wang R, Gu S C, et al. An analysis of characteristics of soil basic fertility in different types of *Pinus Koraiensis* forest [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(3): 73-76. (in Chinese)
- [20] 杨会侠, 汪思龙, 范 冰, 等. 马尾松人工林发育过程中的养分动态 [J]. 应用生态学报, 2010, 21(8): 1907-1914.
- Yang H X, Wang S L, Fan B, et al. Dynamics of nutrients in an age sequence of *Pinus massoniana* plantation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(8): 1907-1914. (in Chinese)
- [21] 樊后保, 苏素霞, 李丽红, 等. 林下套种阔叶树的马尾松林凋落物生态学研究: III. 凋落物现存量及其养分含量 [J]. 福建林学院学报, 2003, 23(3): 193-197.
- Fan H B, Su S X, Li L H, et al. Forest litter ecology in *Masson's* pine stand and its mixed forests formed by inter-planting with hardwood tree species: III. Biomass and nutrient content of forest litter [J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2003, 23(3): 193-197. (in Chinese)
- [22] 徐世红. 马尾松阔叶树混交林生物量和矿质养分特征 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2010.
- Xu S H. Characteristics of biomass and nutrient storage in stands of *Pinus Massoniana* mixed with broad-leaved species [D]. Hefei: Anhui Agriculture University, 2010. (in Chinese)
- [23] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 等. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C、N、P 化学计量特征 [J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6581-6590.
- Liu W D, Su J R, Li S F, et al. Stoichiometry study of C, N and P in plant and soil at different successional stages of monsoon evergreen broad-leaved forest in Pu'er, Yunnan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(23): 6581-6590. (in Chinese)
- [24] 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.
- Liu X Z, Zhou G Y, Zhang D Q, et al. N and P stoichiometry of plant and soil in lower subtropical forest successional series in southern China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 64-71. (in Chinese)
- [25] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征 [J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.
- Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3937-3947. (in Chinese)
- [26] 任书杰, 曹明奎, 陶 波, 等. 陆地生态系统氮状态对碳循环的限制作用进展 [J]. 地理科学进展, 2006, 25(4): 58-67.
- Ren S J, Cao M K, Tao B, et al. The effects of nitrogen limitation on terrestrial ecosystem carbon cycle: A review [J]. Progress in Geography, 2006, 25(4): 58-67. (in Chinese)
- [27] Majda H, Ohrvik J. Interactive effects of soil warming and fertilization on root production, mortality, and longevity in a Norway spruce stand in Northern Sweden [J]. Global Change Biology, 2004, 10(2): 182-188.

organic carbon with other soil physical and chemical indexes of different land use types [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2013, 41(8): 103-109. (in Chinese)

[17] 黄从德, 张 健, 杨万勤, 等. 四川森林土壤有机碳储量的空间分布特征 [J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1217-1225.
Huang C D, Zhang J, Yang W Q, et al. Spatial distribution characteristics of forest soil organic carbon stock in Sichuan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1217-1225. (in Chinese)

[18] 周 莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99-105.
Zhou L, Li B G, Zhou G S. Advances in controlling factors of soil organic carbon [J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(1): 99-105. (in Chinese)

[19] 曹吉鑫, 孙向阳, 高程达, 等. 宁夏贺兰山三种植被下土壤有机碳密度的比较 [J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1641-1644.
Cao J X, Sun X Y, Gao C D, et al. Comparison of soil organic carbon density under three vegetations in Helan Mountain of Ningxia [J]. Ecology and Environment, 2008, 17(4): 1641-1644. (in Chinese)

[20] 杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量 [J]. 生态学报, 2005, 25(11): 2875-2882.
Yang J Y, Wang C K. Soil carbon storage and flux of temperate forest ecosystems in northeastern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11): 2875-2882. (in Chinese)

[21] 王文静, 王百田, 吕 钊, 等. 山西太岳山不同林分土壤有机碳储量研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(1): 81-85.
Wang W J, Wang B T, Lü Z, et al. Soil organic carbon reserve of different forests in Taiyue mountain [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(1): 81-85. (in Chinese)

[22] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47: 151-163.

(上接第 76 页)

[28] Chapin S F III, Matson P, Mooney H A. Principles of terrestrial ecosystem ecology [M]. New York: Springer-Verlag, 2002.

[29] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. Europe Journal of Soils Science, 1996, 47: 151-163.

[30] Post W M, Pastor J, Zinke P J, et al. Global patterns of soil nitrogen storage [J]. Nature, 1985, 317: 613-616.

[31] 黄昌勇. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Huang C Y. Soil science [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese)

[32] 孙 超. 基于生态化学计量学的草地退化研究: 以大安市姜家店草场为例 [D]. 长春: 吉林大学, 2012.
Sun C. Study on grassland degeneration based on ecological stoichiometry: A study of Jiangjiadian meadow in Da'an city [D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)

[33] 贾 宇, 徐炳成, 李凤民, 等. 半干旱黄土丘陵区苜蓿人工草地土壤磷素有效性及对生产力的响应 [J]. 生态学报, 2011, 18(5): 166-170.
Jia Y, Xu B C, Li F M, et al. Availability and contributions of soil phosphorus to forage production of seeded alfalfa in semi-arid Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 18(5): 166-170. (in Chinese)

[34] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation [J]. Journal of Applied Ecology, 2003, 40: 523-534.