

DOI: 10.5846/stxb201601080057

牛瑞龙, 高星, 徐福利, 王渭玲, 王玲玲, 孙鹏跃, 白小芳. 秦岭中幼林龄华北落叶松针叶与土壤的碳氮磷生态化学计量特征. 生态学报, 2016, 36(22): - .

Niu R L, Gao X, Xu F L, Wang W L, Wang L L, Sun P Y, Bai X F. Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometric characteristics of soil and leaves from young and middle aged *Larix principis-rupprechtii* growing in a Qinling Mountain plantation. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): - .

秦岭中幼林龄华北落叶松针叶与土壤的碳氮磷生态化学计量特征

牛瑞龙¹, 高星¹, 徐福利^{2,3}, 王渭玲^{1*}, 王玲玲¹, 孙鹏跃¹, 白小芳³

1 西北农林科技大学生命科学学院, 杨凌 712100

2 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100

3 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100

摘要:为探究华北落叶松人工林物质循环规律与养分元素的分配格局, 将华北落叶松针叶和土壤结合起来, 以秦岭地区 7 年(7a)、12 年(12a)、22 年(22a)生华北落叶松人工林为研究对象, 综合探究中幼林龄华北落叶松针叶和土壤的 C、N、P 含量及 C:N:P 化学计量特征。结果表明, 不同林龄间土壤 C 和 P 含量的差异显著, 7a 和 12a 的 C 和 P 含量显著高于 22a 的, N 含量差异不显著, 随土层深度的增加, 土壤 C、N、P 均呈下降趋势; 22a 土壤的 C:P 和 N:P 显著高于 7a 和 12a, 说明随着林龄增加, P 限制了人工林正常的生长发育, C:N 在林龄之间的差异不显著; 不同林龄针叶 C 差异不显著, N 和 P 差异显著, N 和 P 含量在中龄林中最高; 22a 针叶的 C:N 和 C:P 均表现为显著下降, 3 种林龄华北落叶松针叶的 N:P 在 6.8—9.3 之间, 说明幼、中林龄华北落叶松主要受 N 的限制; 华北落叶松针叶和土壤的 C、C:N 之间呈显著的正相关, P、C:P 之间呈显著的负相关, N、N:P 之间相关性不显著。中林龄华北落叶松人工林土壤 P 元素含量低, 主要是通过养分的再吸收来满足植株的生长需求, 而非通过吸收土壤养分。

关键词:生态化学计量; 秦岭; 华北落叶松; 针叶; 土壤

Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometric characteristics of soil and leaves from young and middle aged *Larix principis-rupprechtii* growing in a Qinling Mountain plantation

NIU Ruilong¹, GAO Xing¹, XU Fuli^{2,3}, WANG Weiling^{1,*}, WANG Lingling¹, SUN Pengyue¹, BAI Xiaofang³

1 College of Life Sciences, Northwest Agriculture and Forest University, Yangling 712100, China

2 College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forest University, Yangling 712100, China

3 Institute of Soil and Water Conservation of Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

Abstract: Ecological stoichiometry theory is an important tool that can be used to explore the law of substance cycling and the distribution patterns of nutrient elements. Carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) play an important role in regulating plant growth and various physiological functions. In recent years, some studies have reported that *Larix principis-rupprechtii*, which was introduced into Shaanxi Province in 1958, grew well during its initial stage, but as its age increased, the growth potential fell and soil fertility decreased. There has been a global trend towards forest ecosystem restoration and reconstruction. Therefore, we chose to study the *Larix principis-rupprechtii* plantation in the Qinling Mountains that contained

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973 计划”资助项目(2012CB416902)

收稿日期: 2016-01-08; 修订日期: 2016-06-14

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

trees with three different stand ages. These were 7 years old (7a), 12 years old (12a), and 22 years old (22a). The contents and mass ratios of the C, N, and P elements in the soil and leaves were investigated. The results showed that an increase in soil depth led to a decrease in soil C, N, and P contents for each growth stage. The soil C and P contents were different for the three stand ages. The soil C and P contents of 7a and 12a were significantly higher than those for 22a. In contrast, there was no significant difference in soil N between the stand ages. The soil C:P and N:P mass ratios for 22a were significantly higher than those for 7a and 12a, which indicated that P limited the development of *Larix principis-rupprechtii* as the stand age increased. There were no significant differences between soil C:N mass ratios for different stand ages. There were large significant differences in leaf N and P among the stand ages, but leaf C showed a different trend. The leaf N and P contents were highest during middle age. The leaf C:N and C:P mass ratios represent plant C assimilation ability to a certain extent. Therefore, these indexes could reflect nutrient utilization efficiency and the growth rate of plants. In this study, the leaf C:N and C:P mass ratios for 22a significantly decreased compared to the other stand ages, which showed that the N and P utilization efficiencies decreased as the stand age rose. The leaf N:P ratio varied from 6.8 to 9.3 for the three stand ages, which indicated that N was the main factor limiting the growth of young and middle aged *Larix principis-rupprechtii* stands. The C content and C:N mass ratio in the soil were positively correlated with the C content and the C:N mass ratio in leaves. However, the relationship between the soil and leaf P and C:P mass ratio was negatively correlated. The soil N and N:P mass ratio showed no significant correlation with leaf N and the N:P mass ratio. It is known that there is a close relationship between soil and leaf C, N, P and mass ratios. The negative relationship between soil P and leaf P showed that with low soil P, the middle aged plantation mainly supported growth through the reabsorption of plant nutrients rather than through the absorption of soil nutrients. Based on a comprehensive analysis of a number of factors, we conclude that N and P fertilizer should be applied to *Larix principis-rupprechtii* plantations. This is especially important during the middle growth phase. These fertilizer applications will help meet the nutritional needs of *Larix principis-rupprechtii* plantations and improve plantation productivity.

Key Words: ecological stoichiometry; Qinling; *Larix principis-rupprechtii*; leaf; soil

生态化学计量学结合了生物学、化学和物理学等学科的基本理论,是研究生物系统能量平衡和多重化学元素(主要是 C、N 和 P)平衡的学科^[1-2]。植物组织中 C、N、P 化学计量比的变化可以揭示植物养分浓度和养分限制性关系以及不同植物对养分的需求和利用状况^[3]。近年来,国内关于生态化学计量学的研究发展迅速,主要集中于森林生态系统^[4]和草原生态系统^[5]。森林生态系统养分循环是生态学研究的一个重要领域,C、N、P 作为森林中植物生长发育所必需的营养元素,三者关系密切,共同参与生物地球化学循环^[6]。

华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)具有成活率高、生长快、材质优、抗寒性强及水土保持效果好等特点,是我国重要的用材林和防护林树种之一^[7],同时也是森林生态系统的重要组成部分。自 1958 年陕西省引种和造林以来,引种初期林木生长良好,但近年来随着林龄的增加,出现生长势衰退,林地肥力下降的情况^[8]。目前,关于华北落叶松人工林碳汇和碳储量^[9-10]、土壤理化性质^[11]、凋落物及持水特性^[12]等方面的研究较多,而对其营养元素循环规律及利用效率的研究报道较少。尽管谢会成等^[13]分析了华北落叶松茎叶中 N、P 和 K 等营养元素的含量,赵亚芳等^[14]对华北落叶松根茎叶 C、N、P 含量及其化学计量特征的季节变化进行了研究,白小芳等^[15]也对华北落叶松土壤 C、N、P 的生态化学计量特征进行了探究,但是将华北落叶松针叶和土壤联系起来综合分析的至今未见报道。为了探究随林龄增加华北落叶松人工林生态系统中物质循环规律与养分元素的分配格局,判断华北落叶松生长的限制性养分元素及对养分的需求和利用状况,本文综合分析秦岭北麓不同林龄华北落叶松人工林针叶和土壤中 C、N、P 含量及其化学计量比的变化特征,以期为提高林地的养分利用率及生产力并为实现华北落叶松人工林林地的科学管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样地概况

研究区位于秦岭北西主峰鳌山脚下的陕西省宝鸡市太白县华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii*) 人工林林场,地理坐标为 33°38'13"—34°09'55" N, 107°03'—107°46'40" E。海拔 1600—1700 m, 年最高气温 32.8℃, 最低气温-25℃, 年均气温 7.6—11.1℃, 年均降水量 600—1000 mm, 林木生长期 6 个月, 该研究区长冬无夏, 春秋相连, 气候中温湿润, 带有大陆性季风气候与高山气候交汇的特征。土壤主要以山地棕壤为主, 还有水稻土、高山草甸土、黄棕壤等, 其土层厚度 60—65 cm。2011 年进行了人工林抚育, 砍伐林下其他木本植物, 植物群落结构简单, 林下植被组成以草本和小灌木为主如铁杆蒿 (*Artemisia sacrorum*)、披针藁草 (*Carex lancifolia*)、黄精 (*Polygonatum*)、大油芒 (*Sponiopogon sibiricus*)、绣线菊 (*Spiraea salicifolia*)、六道木 (*Abelia biflora*)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor*) 等。

1.2 试验设计与采样

于 2014 年 7 月华北落叶松生长旺盛期进行实地调查, 分析林分基本状况, 结果见表 1。选取海拔、坡向、坡位、林下植被等立地条件基本一致的 7 年 (7a)、12 年 (12a)、22 年 (22a) 生的华北落叶松人工林为研究对象, 每个林龄设置 3 块标准样地 (面积为 20 m×20 m), 即 3 次重复 (由于人工纯林林地实际条件的限制, 不同林龄的 9 块样地不可能随机分布, 同一林龄的 3 块样地之间有大约 10 m 的隔离带)。用标准木法^[16-17], 对样地内人工林进行每木检尺, 计算出每个样地内所有树木的平均胸径和树高, 找出接近平均胸径和树高且生长良好的 9 棵树木作为标准木。用高枝剪法采集针叶样品, 在每 3 株标准木树冠中部的东、西、南、北方向各取 1 根枝条, 摘取枝条上的所有针叶混合成一个样品, 共计 27 个针叶样品。土壤样品用土钻法采集, 在采集针叶样品的同一区域内, 按梅花形选取 5 个小区, 移除区域内土层表面的枯枝落叶, 然后用土钻分别采集 0—20、20—40、40—60 cm 土样, 3 次重复, 用四分法取 5 个点的土样装袋, 共计 81 个土样。

表 1 样地概况

Table 1 General information of sample plots

林龄 Age/a	平均树高 Average height/m	平均胸径 Average diameter/cm	海拔 Altitude/m	坡向 Slope aspect	坡位 Slope position	坡度 Slope degree/(°)	密度 Density/ (stem/hm ²)	林下草本 Under growth vegetation
7	5.0	4.52	1680—1700	东北	坡中	20—25	2800	黄精属 (<i>Polygonatum</i>)、 菊科 (<i>Compositae</i>) 等
12	8.9	7.40	1650—1690	东北	坡中	20—25	2750	大油芒 (<i>Sponiopogon sibiricus</i>) 等
22	12.1	10.33	1665—1700	东北	坡下	10—15	2500	披针藁草 (<i>Carex lancifolia</i>)

1.3 样品处理与测定

采集的针叶样品, 于 105℃ 下杀青 15 min 后在 75℃ 条件下烘干至恒重, 粉碎过 100 目筛, 装袋封存备用。采集的土样带回实验室自然风干, 拣出断根和小石头, 研磨过 100 目筛, 装袋封存备用。针叶和土壤有机碳采用重铬酸钾氧化-外加热法测定; 针叶全氮和全磷的测定, 将针叶样品用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 凯氏定氮法测定全氮, 钼锑抗比色法测定全磷; 土壤全氮用硒粉-硫酸铜-硫酸消化法测定, 土壤全磷用 HClO₄-H₂SO₄ 法测定^[18]。

1.4 数据整理及分析

试验数据用 Microsoft Office Excel 2007 进行初步整理, 用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析 (One-way ANOVA), 双因素方差分析 (Two-way ANOVAs) 和多重比较 (LSD), 显著性水平设为 0.05, 用 SigmaPlot 12.5 绘图。

2 结果

2.1 不同林龄土壤 C、N、P 含量及 C:N:P 生态化学计量特征

土壤 C 在不同林龄之间存在显著性差异,7a 和 12a 的 C 含量显著高于 22a 的(图 1A)。土壤 N 在不同林龄之间差异不显著,不同土层的 N 含量变化趋势也不相同(图 1B)。22a 的土层为 20—40 cm 和 40—60 cm 的土壤 P 含量显著低于 7a 和 12a,7a 和 12a 的土壤 P 含量差异不显著(图 1C)。同一林龄华北落叶松林下土壤 C、N、P 含量均随土层深度增加而降低。土壤 C:N 在不同林龄之间差异不显著,除在土层 20—40 cm,22a 的 C:N 显著低于 7a 和 12a(图 1D)。C:P 随着林龄的增加均呈升高趋势,而且 22a 的 C:P 显著高于 7a 和 12a(图 1E)。N:P 的变化趋势和显著性与 C:P 大致相同(图 1F)。由双因素方差分析可知,土壤深度显著影响土壤 C 和 N 含量。除了 N 之外,林龄几乎显著影响所有的土壤变量。另外,土壤深度和林龄之间的交互作用只显著影响土壤 C 含量(表 2)。

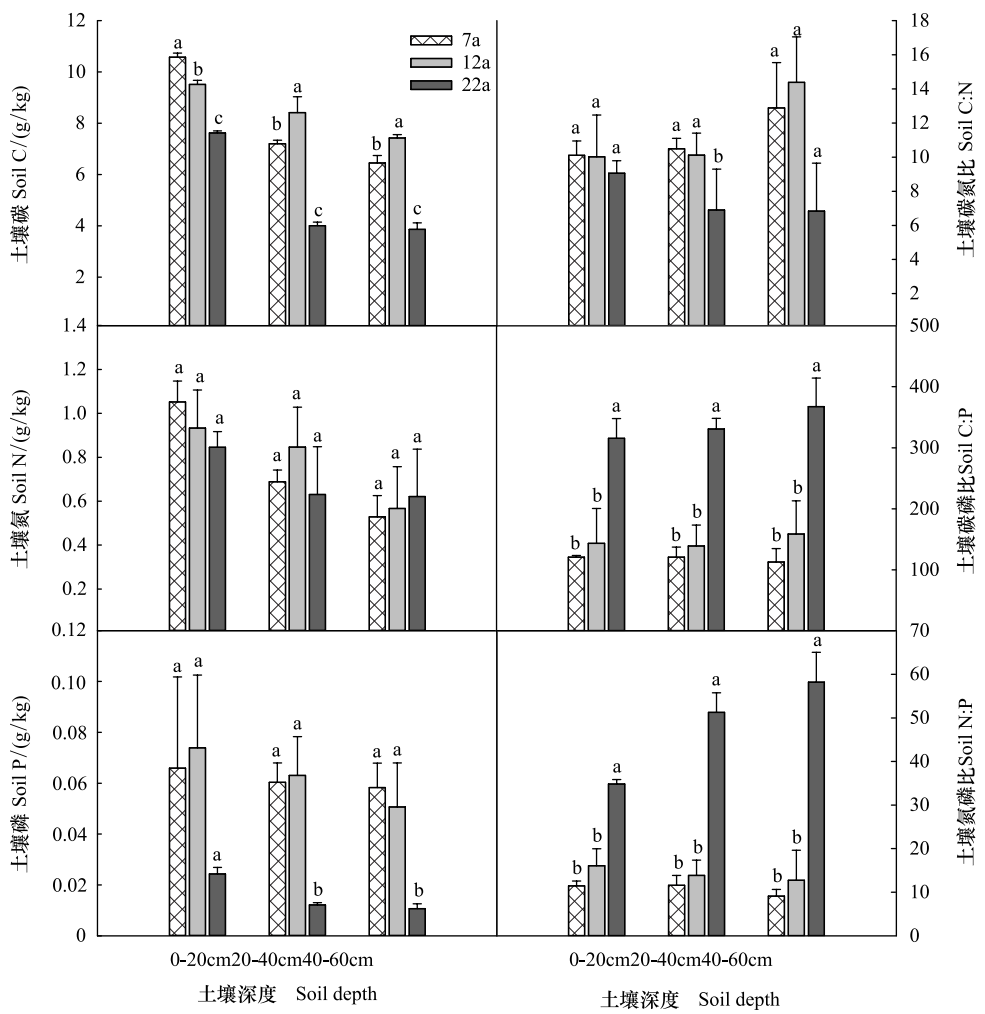


图 1 不同林龄华北落叶松土壤 C(A)、N(B)、P(C) 含量及 C:N(D)、C:P(E)、N:P(F) 质量比的动态变化

Fig.1 Soil C(A), N(B), P(C) contents and C:N(D), C:P(E), N:P(F) mass ratios in different ages of *Larix principis-rupprechtii*

* 不同小写字母代表不同林龄间的差异显著,显著性水平为 0.05

2.2 不同林龄针叶 C、N、P 含量及 C:N:P 生态化学计量特征

如图 2A 所示,华北落叶松人工林针叶的 C 含量在不同林龄之间差异不显著。与之相反,不同林龄针叶的 N、P 含量之间存在显著差异(图 2B 和图 2C),22a 针叶 N、P 含量显著高于 7a 和 12a 针叶的 N、P 含量。华

北落叶松人工林针叶的 C:N 在不同林龄之间差异显著,呈升高再降低的趋势(图 2D)。7a 的针叶 C:P 值显著高于 12a 和 22a,呈降低趋势(图 2E)。12a 的针叶 N:P 值显著低于 7a 和 22a 的,呈降低再升高趋势(图 2F)。由双因素方差分析可知,林龄显著影响针叶 N 含量,C:N 和 N:P(表 2)。

表 2 不同林龄和土壤深度对华北落叶松针叶和土壤 C、N、P 含量及其质量比的影响

Table 2 *F* and *P* values for the effects of stand age and soil depth on leaf and soil C, N, P content and mass ratios

因素 Factor	<i>F</i> (<i>P</i>) value					
	C	N	P	C:N	C:P	N:P
林龄 Stand age	1.956(0.222)	57.518(<0.001)	4.076(0.076)	25.233(0.001)	4.841(0.056)	6.778(0.029)
土壤深度 Soil depth	10.186(0.001)	12.747(<0.001)	0.653(0.530)	1.144(0.335)	0.086(0.918)	0.217(0.806)
林龄 Stand age	10.927(<0.001)	0.328(0.724)	22.565(<0.001)	5.467(0.011)	108.295(<0.001)	40.763(<0.001)
土壤深度×林龄 Soil depth×Stand age	22.842(<0.001)	1.225(0.335)	0.179(0.946)	1.332(0.296)	0.583(0.679)	2.362(0.092)

* 第 1 个因子林龄是对针叶 C、N、P 及其质量比的影响,下面 3 个因子是表示对土壤 C、N、P 及其质量比的影响

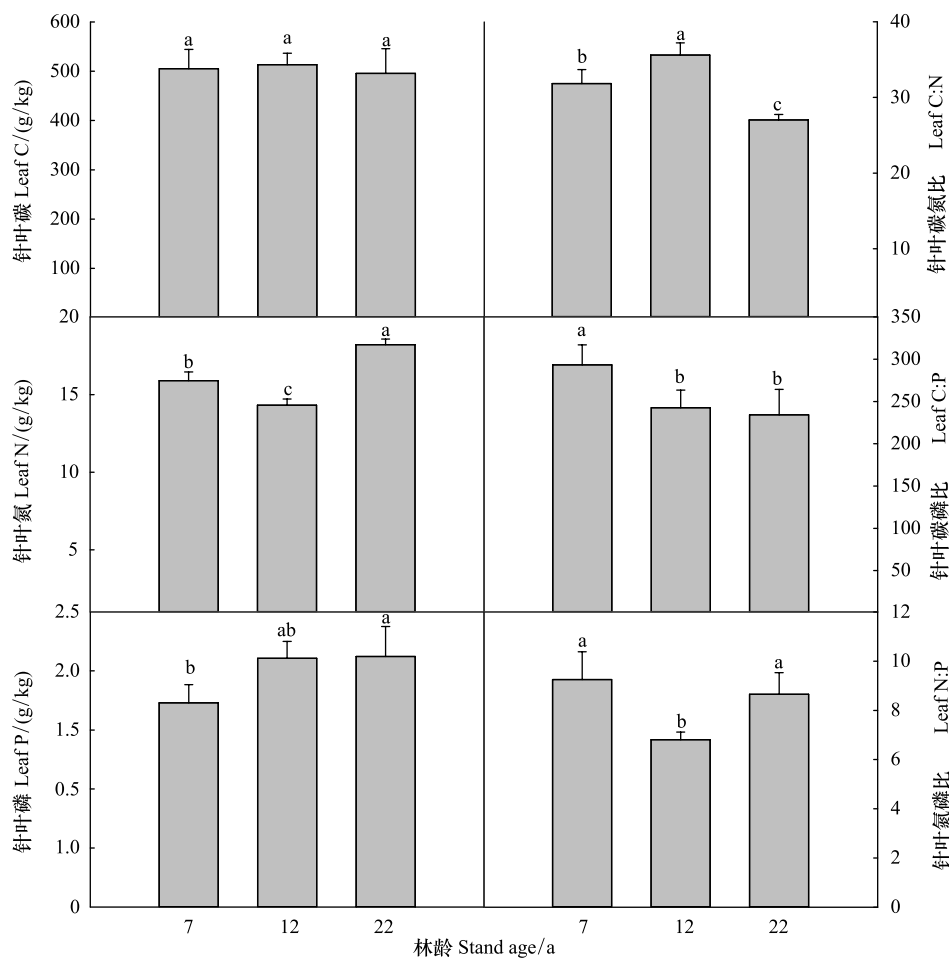


图 2 不同林龄华北落叶松针叶 C(A)、N(B)、P(C) 含量及 C:N(D)、C:P(E)、N:P(F) 质量比的动态变化

Fig.2 Leaf C(A), N(B), P(C) contents and C:N(D), C:P(E), N:P(F) mass ratios in different ages of *Larix principis-rupprechtii*

2.3 不同林龄针叶与土壤的 C、N、P 及其比值的相关关系

由图 3 可知,随着针叶 C 的增加,土壤 C 整体也呈上升趋势($R^2=0.1680, P=0.0337$)。土壤和针叶的 N 之间存在不显著的线性回归关系($R^2=0.0182, P=0.5024$);随着针叶 P 的增加,土壤 P 呈显著的下降趋势($R^2=0.1794, P=0.0277$);随着针叶 C:N 的增加,土壤 C:N 整体也呈上升趋势($R^2=0.2624, P=0.0063$);土壤 C:P

随着针叶 C:P 的增加呈显著下降趋势($R^2=0.2643, P=0.0061$); N:P 在土壤和针叶之间存在不显著的线性回归关系($R^2=0.0071, P=0.6756$)。

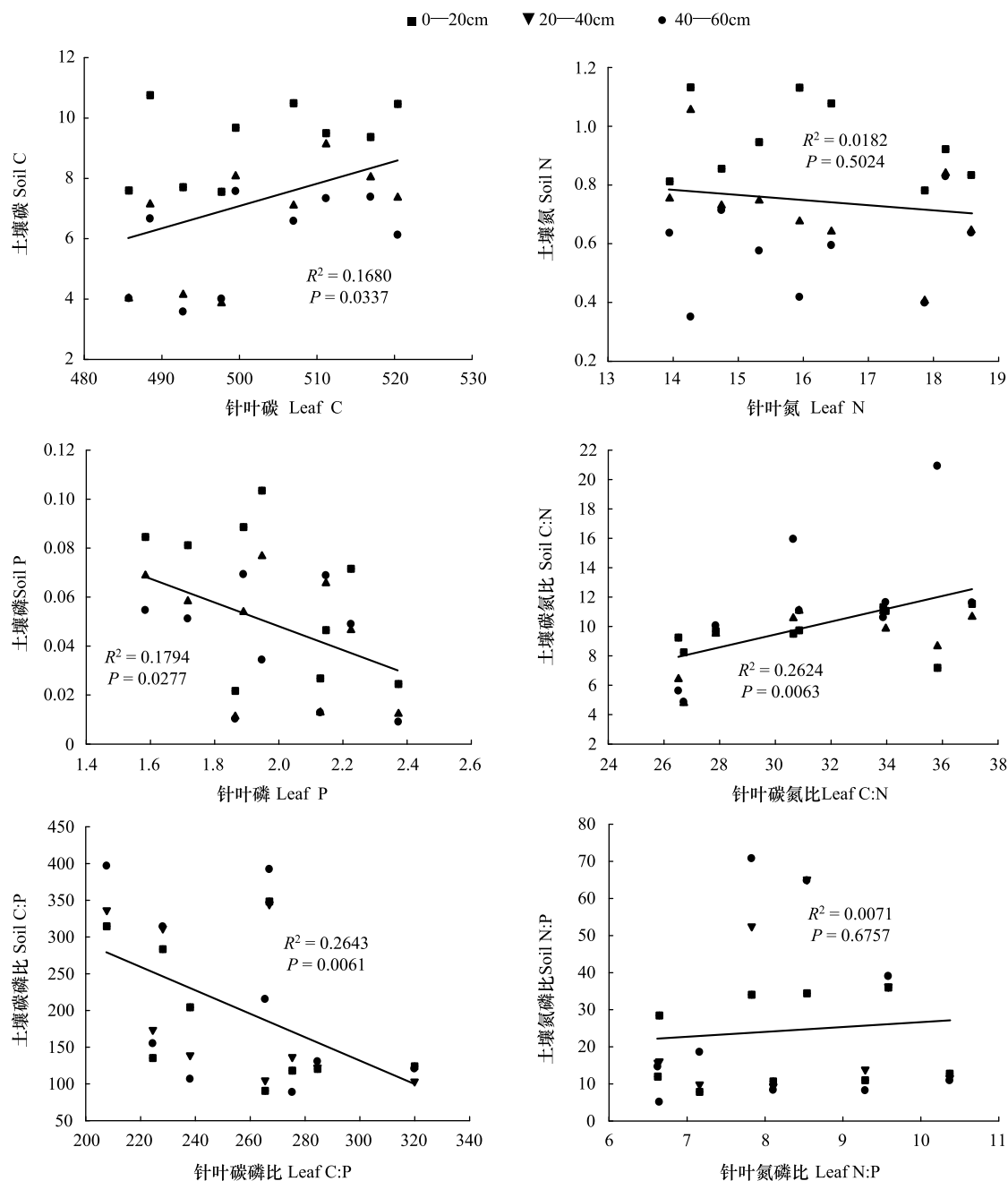


图3 针叶和土壤 C、N、P 及其比值的相关关系

Fig.3 Relationships between soil and leaf C, N, P and mass ratios

* 同一林龄的针叶 C、N、P 及比值分别对应土壤 3 个不同土层的对应的指标

3 讨论

3.1 不同林龄土壤 C、N、P 含量及其化学计量比特征

结果表明,不同林龄华北落叶松土壤的有机碳、全氮和全磷含量均随土层深度的增加而减小,同样的变化趋势在纪文婧等^[19]对山西太岳山 4 种植被类型(草甸、灌丛、华北落叶松人工林、华北落叶松-白桦混交林)

的研究中也有发现。表层土壤(0—20 cm)有机碳和全氮含量随林龄的变化均表现为随林龄增加而减低,这与牛小云^[20]等和王丹^[21]等的研究报道一致。中林龄华北落叶松人工林林地表层土壤有机碳和全氮含量,相比幼林龄年均下降率分别为 2.22%—2.48%和 1.03%—2.54%。出现这种从幼林龄到中林龄表层土壤有机碳和全氮下降的现象,可能是由于不同发育阶段,林分郁闭度不同^[20],林下植被发育不同所致^[22],也可能是因为上一代林木枯落物和采伐剩余物归还土壤以及幼龄林生长消耗较少等原因导致的^[21]。

不同林龄土壤 N 的变化趋势与土壤 C 是基本一致的,但不同林龄的土壤全氮差异不显著,C:N 随林龄的变化趋势与土壤有机碳基本一致,但是随着土层深度的增加呈上升趋势。

C:N 是土壤氮素矿化能力的标志,与土壤有机质分解速率成反比关系^[23]。不同林龄华北落叶松土壤 C:N 虽然在相同土层之间略有下降,但差异不显著,在一定程度上反映出不同林龄华北落叶松土壤氮素矿化能力和有机质的分解速率相近。本研究中,22a 的华北落叶松土壤全 P 平均值为 0.014 g/kg,与 7a 和 12a 的相比显著下降,并且直接导致 22a 土壤 C:P 和 N:P 显著增大,一般认为土壤全磷小于 0.08—0.1 g/kg 时,土壤出现 P 元素供应不足的现象^[24]。3 个林龄华北落叶松人工林土壤 C:P 和 N:P 均表现为 7a<12a<22a,22a 华北落叶松土壤 C:P 和 N:P 显著增大。22a 华北落叶松土壤 C:P 的平均值 338.05,高于我国土壤 C:P 的平均水平 136^[25]和全球不同生态系统土壤的平均水平 186^[26]。较高的 C:P 比是磷有效性低的一个指标^[27],22a 的 N:P 比也显著增大,说明了随着林龄的增加土壤可利用性 P 元素下降。出现这种现象的可能原因是,22a 生华北落叶松人工林林木进入速生期,对养分的需求量增大,对磷的吸收量增多。同时先前的相关研究发现,从幼林龄到中林龄土壤磷酸酶总活性和酸性磷酸酶活性增高^[28],也可以证实这一现象。

3.2 不同林龄针叶 C、N、P 含量及其化学计量比特征

本研究中,华北落叶松人工林针叶 C 随林龄的增加无显著变化,这与 Fan 等^[29]的研究结果一致。由图 2B 和图 2C 可知,22a 华北落叶松针叶 N 和 P 含量显著高于 7a 和 12a 的针叶 N 和 P 含量。这是由于中林龄华北落叶松处于生长旺盛期,为了满足蛋白质的合成需要较多的 rRNA,从而导致叶片 N 含量升高,而 rRNA 又是植物的一个主要的 P 库^[30],故中林龄华北落叶松针叶的 N、P 含量表现为最高。华北落叶松针叶的 N、P 含量在林龄间的变化直接影响了针叶 C:N 和 C:P 在林龄间的差异。

叶片的 C:N 和 C:P 表示植物吸收营养所能同化 C 的能力,在一定程度上可反映植物的营养利用效率以及植物的生长速度,具有重要的生态学意义^[30]。由图 2D 和图 2E 可知,不论是针叶 C:N 还是 C:P,22a 华北落叶松都是最低的,说明 22a 华北落叶松的养分利用效率最小,崔宁浩等^[3]对不同林龄马尾松人工林的研究中也得到类似的结果。植物叶片 N:P 可以指示土壤营养限制情况^[31]。有研究认为,叶的 N:P<14 反映植物受 N 限制,N:P>16 反映植物受 P 限制,14<N:P<16 表示受 N、P 的共同限制^[32]。本研究中,3 种林龄华北落叶松针叶的 N:P 在 6.8—9.3 之间,说明幼、中林龄华北落叶松主要受 N 的限制,这与李靖^[33]的研究结果一致。但是由于温度、水分、光照、土壤养分、CO₂ 浓度等构成的非生物因素,以及由不同物种和功能群,不同器官和不同生长阶段等构成的生物因素对植物 N:P 化学计量存在着不同程度的影响^[34]。因此,对于秦岭地区华北落叶松以及中国华北落叶松 N:P 的阈值的确定还有待进行进一步的研究。在以往研究中,有人认为由于造林密度单一,林下植被稀疏,生物多样性匮乏等原因,随着林龄的增加,土壤肥力出现了不同程度的下降^[8,35],还有人认为秦岭山脉中林龄华北落叶松土壤全氮中度亏缺、全磷极度亏缺,氮磷配施能明显提高华北落叶松根、茎、叶中的氮磷含量^[36]。因此,在人工林的抚育管理中,特别是华北落叶松中林龄时期,可以合理施加 N、P 肥以改善土壤肥力。

3.3 不同林龄针叶与土壤的 C、N、P 及其化学计量比的相关关系

相关分析结果表明,华北落叶松针叶和土壤的主要营养元素 C、N、P 及化学计量比之间存在着紧密的相关关系,先前许多人的研究也证实了这一点^[3,37]。在土壤与植物相互作用的关系中,土壤是植物生长所需养分的主要来源,对调节植物生长具有重要作用;同时植物通过光合作用固定 C,将部分 C 转移到土壤,并以枯落物的形式将 C 和养分逐步补偿给土壤^[38]。如图 3 所示,土壤 C 与针叶 C 呈显著的正相关,土壤 P 与针叶 P

呈显著的负相关,这与崔宁浩等^[3]的研究结果不同甚至相反。值得注意的是,22a 华北落叶松土壤 P 显著下降,针叶 P 含量却显著升高。出现这种现象可能的原因是,随着华北落叶松林龄的增加,土壤 P 元素显著下降,在土壤 P 元素供应相对缺乏的情况下,林木增强了对 P 元素的再吸收^[37],22a 华北落叶松的养分再吸收率显著升高。于钦民^[39]对秦岭地区 5 个不同林龄华北落叶松的研究中发现,中林龄华北落叶松的养分再吸收率显著高于其他林龄,这证实了我们的解释。另外,土壤中的 P 除了来自于凋落物的输入外,还与土壤成土母质中的矿物成分密切相关^[40],因此,也可能与林地的成土母质有关,具体的原因还有待进行进一步的分析。7a 和 12a 生华北落叶松针叶的 C:N 和 C:P 均大于土壤的 C:N 和 C:P,22a 针叶的 C:N 大于土壤的 C:N,但是 22a 针叶的 C:P 小于土壤 C:P。曾昭霞等^[37]认为在土壤 N、P 含量绝对值相对偏高,而植物的 N、P 养分再吸收率偏低的情况下,凋落物 C:N 和 C:P 大于植物的,植物的高于土壤的。因此,造成 22a 针叶 C:P 小于土壤 C:P 的这种差异的原因是,中林龄华北落叶松人工林土壤 P 元素含量较低,主要是通过养分的再吸收来满足植株的生长需求,而非是吸收土壤养分,这进一步证实了上一分析的结果。另外,尽管针叶的 N 和 N:P 与土壤的 N 和 N:P 之间没有显著性关系(图 3),但据郭全恩等^[41]的报道,不同深度土层,植物叶片养分与土壤养分含量的相关性有所不同,说明不同深度土层土壤的养分含量对植物叶片营养元素含量的影响程度不同。双因素方差分析结果显示土层深度对土壤 N 含量具有极显著性影响($P<0.001$),恰恰也证明了这一点。植物和土壤之间 C:N:P 的差异大小,代表了生产者及土壤微生物为维持生态平衡面临的养分竞争格局^[42]。尽管这方面的研究以前也有报道,但是维持 C、N、P 平衡及养分转化的内在机制还不太清楚,需要进一步的探索。

4 结论

随着林龄的增加,华北落叶松人工林地出现不同程度的 N、P 元素的限制作用;华北落叶松针叶和土壤的主要营养元素及化学计量比之间存在着紧密的相关关系;中林龄华北落叶松人工林土壤 P 元素含量低,主要是通过养分的再吸收来满足植株的生长需求,而非是通过吸收土壤养分。因此,在人工林的抚育管理中,特别是华北落叶松中林龄时期,可以合理施加 N、P 肥以改善土壤肥力,提高林木生产力。

参考文献(References):

- [1] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, Fagan W F, Markow T A, Cotner J B, Harrison J F, Hobbie S E, Odell G M, Weider L J. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. *Ecology Letters*, 2000, 3(6): 540-550.
- [2] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索. *植物生态学报*, 2005, 29(6): 1007-1019.
- [3] 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.
- [4] 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:N:P 化学计量学特征. *植物生态学报*, 2011, 35(6): 587-595.
- [5] 宋彦涛, 周道玮, 李强, 王平, 黄迎新. 松嫩草地 80 种草本植物叶片氮磷化学计量特征. *植物生态学报*, 2012, 36(3): 222-230.
- [6] 马永跃, 王维奇. 闽江河口区稻田土壤和植物的 C、N、P 含量及其生态化学计量比. *亚热带农业研究*, 2011, 7(3): 182-187.
- [7] 李国雷, 刘勇, 吕瑞恒, 于海群, 李瑞生. 华北落叶松人工林密度调控对林下植被发育的作用过程. *北京林业大学学报*, 2009, 31(1): 19-24.
- [8] 刘勇, 李国雷, 林平, 姜辉, 于海群, 吕瑞恒. 华北落叶松人工幼、中龄林土壤肥力变化. *北京林业大学学报*, 2009, 31(3): 17-23.
- [9] 杜红梅, 王超, 高红真. 华北落叶松人工林碳汇功能的研究. *中国生态农业学报*, 2009, 17(4): 756-759.
- [10] 耿丽君, 许中旗, 张兴锐, 席常新, 卢金平, 孙晓梅, 黄选瑞. 燕山北部山地华北落叶松人工林生物碳储量. *东北林业大学学报*, 2010, 38(6): 43-45, 52-52.
- [11] 刘杰, 马履一, 贾忠奎, 王西洋, 汪加魏, 宋春华. 不同林龄华北落叶松林下土壤理化性质及微生物学指标评价. *水土保持通报*, 2013, 33(6): 88-93.
- [12] 张愿, 马长明. 华北落叶松人工林凋落物储量及其持水特性. *林业资源管理*, 2014, (6): 63-68.
- [13] 谢会成, 葛云, 孙居文, 李际红, 杨茂生. 华北落叶松人工林叶内营养元素含量的变异. *福建林学院学报*, 2005, 25(2): 163-166.

- [14] 赵亚芳, 徐福利, 王渭玲, 王玲玲, 王国兴, 孙鹏跃, 白小芳. 华北落叶松根茎叶碳氮磷含量及其化学计量学特征的季节变化. 植物学报, 2014, 49(5): 560-568.
- [15] 白小芳, 徐福利, 王渭玲, 赵亚芳, 王玲玲, 孙鹏跃. 华北落叶松人工林土壤碳氮磷生态化学计量特征. 中国水土保持科学, 2015, 13(6): 68-75.
- [16] 俞月凤, 何铁光, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 杜虎, 韩畅, 李莎莎. 喀斯特峰丛洼地不同类型森林养分循环特征. 生态学报, 2015, 35(22): 7531-7542.
- [17] 张希彪, 上官周平. 黄土丘陵区主要林分生物量及营养元素生物循环特征. 生态学报, 2005, 25(3): 527-537.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 14-271.
- [19] 纪文婧, 程小琴, 韩海荣, 康峰峰, 桂志宏, 朱江, 王甜, 周文嵩, 赵敬. 山西太岳山好地方典型植被类型土壤理化特征. 生态学报, 2016, 35(1): 141-148.
- [20] 牛小云, 孙晓梅, 陈东升, 张守攻. 辽东山区不同林龄日本落叶松人工林土壤微生物、养分及酶活性. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2663-2672.
- [21] 王丹, 王兵, 戴伟, 李萍, 胡文, 郭浩. 不同发育阶段杉木林土壤有机碳变化特征及影响因素. 林业科学研究, 2009, 22(5): 667-671.
- [22] 焦如珍, 杨承栋, 屠星南, 盛伟彤. 杉木人工林不同发育阶段林下植被、土壤微生物、酶活性及养分的变化. 林业科学研究, 1997, 10(4): 373-379.
- [23] Don A, Schumacher J, Scherer-Lorenzen M, Scholten T, Schulze E D. Spatial and vertical variation of soil carbon at two grassland sites-implications for measuring soil carbon stocks. *Geoderma*, 2007, 141(3/4): 272-282.
- [24] 贾平, 郝伟, 李广凡. 落叶松人工林土壤中磷的研究. 东北林业大学学报, 1998, 26(1): 67-69.
- [25] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [26] Cleveland C C, Liptzin D. C: N: P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass?. *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235-252.
- [27] 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.
- [28] 陈立新, 杨承栋. 落叶松人工林土壤磷形态、磷酸酶活性演变与林木生成关系的研究. 林业科学, 2004, 40(3): 12-18.
- [29] Fan H B, Wu J P, Liu W F, Yuan Y H, Hu L, Cai Q K. Linkages of plant and soil C: N: P stoichiometry and their relationships to forest growth in subtropical plantations. *Plant and Soil*, 2015, 392(1/2): 127-138.
- [30] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 张志钧, 李忠文. 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. 生态学报, 2010, 30(23): 6581-6590.
- [31] Güsewell S, Koerselman W, Verhoeven J T A. Biomass N: P ratios as indicators of nutrient limitation for plant populations in wetlands. *Ecological Applications*, 2003, 13(2): 372-384.
- [32] 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.
- [33] 李靖. 不同林龄杉木和华北落叶松人工林氮磷养分特征与根构型研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [34] 刘超, 王洋, 王楠, 王根轩. 陆地生态系统植被氮磷化学计量研究进展. 植物生态学报, 2012, 36(11): 1205-1216.
- [35] 马亚娟, 徐福利, 王渭玲, 陈钦程, 赵海燕, 赵亚芳. 氮磷提高华北落叶松人工林地土壤养分和酶活性的作用. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 664-674.
- [36] 徐福利, 赵亚芳, 张潘, 王渭玲, 于钦民, 王伟东, 王国兴. 施肥对华北落叶松人工林根茎叶中氮磷含量的影响. 林业科学, 2014, 50(3): 139-143.
- [37] 曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 曾馥平, 宋同清, 彭晚霞, 张浩, 杜虎. 桂西北喀斯特森林植物-凋落物-土壤生态化学计量特征. 植物生态学报, 2015, 39(7): 682-693.
- [38] 王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 全川, 张林海. 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. 生态学报, 2011, 31(23): 7119-7124.
- [39] 于钦民. 秦岭华北落叶松人工林叶茎根氮磷含量动态变化与 N: P 化学计量学特征研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [40] 聂兰琴, 吴琴, 尧波, 付姗, 胡启武. 鄱阳湖湿地优势植物叶片-凋落物-土壤碳氮磷化学计量特征. 生态学报, 2016, 36(7): 1898-1906.
- [41] 郭全恩, 郭天文, 王益权, 马忠明, 刘军, 南丽丽. 甘肃省干旱地区苹果叶片营养和土壤养分相关性研究. 土壤通报, 2009, 40(1): 114-117.
- [42] Hobbie S E, Gough L. Foliar and soil nutrients in tundra on glacial landscapes of contrasting ages in northern Alaska. *Oecologia*, 2002, 131(3): 453-462.