

# 华北落叶松人工林土壤碳氮磷生态化学计量特征

白小芳<sup>1,2</sup>, 徐福利<sup>1,3†</sup>, 王渭玲<sup>3</sup>, 赵亚芳<sup>1,2</sup>, 王玲玲<sup>3</sup>, 孙鹏跃<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 712100 陕西杨凌; 2. 中国科学院大学, 100049 北京;  
3. 西北农林科技大学, 712100 陕西杨凌)

**摘要:** 为阐明华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*) 人工林地土壤有机碳、全氮和全磷质量分数的时间变化特征和垂直分布特征, 以秦岭20年华北落叶松人工林地为研究对象, 对其土壤有机碳、全氮和全磷质量分数及其化学计量比的季节变化和垂直分布特征进行研究分析。结果表明: 1) 有机碳、全氮和全磷质量分数随着土层深度增加而降低, 土壤有机碳和全氮质量分数具有相似的空间分布和时间变化特征。0~20 cm 土壤有机碳、全氮和全磷质量分数从5—10月均呈现明显的动态变化, 有机碳质量分数的季节波动性最大; 20~40 cm 和 40~60 cm 土层的季节变化规律没有0~20 cm 土层明显。2) 0~20 cm 土层的 C/N、C/P 和 N/P 显著高于 20~40 cm 和 40~60 cm 土层; 各个土层 C/N 季节变异性最小, 季节变化规律不明显, N/P 变异性最大, C/P 次之, 且 C/P 和 N/P 具有相似的季节变化趋势。3) 土壤 C、N 和 P 质量分数之间存在极显著的正相关关系( $P < 0.01$ )。土壤有机碳质量分数与 C/N 和 C/P 以及土壤全氮质量分数与 C/P 和 N/P 均呈极显著正相关; 土壤全磷质量分数与 C/P 存在极显著正相关关系, 而与 N/P 不相关。表明有机碳和全氮质量分数是导致 C/N、C/P 和 N/P 变化的主要因素。

**关键词:** 华北落叶松; 人工林; 土壤生态化学计量特征; 秦岭

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 1672-3007(2015)06-0068-08

## Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus in a *Larix principis-rupprechtii* plantation

Bai Xiaofang<sup>1,2</sup>, Xu Fuli<sup>1,3</sup>, Wang Weiling<sup>3</sup>, Zhao Yafang<sup>1,2</sup>, Wang Lingling<sup>3</sup>, Sun Pengyue<sup>3</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 712100, Yangling, Shaanxi, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, 100049, Beijing, China; 3. Northwest A&F University, 712100, Yangling, Shaanxi, China)

**Abstract:** Large areas of plantations have been cultivated in China since 1950s, which provide tremendous ecological and economic services such as soil and water control, wood production, carbon sequestration and environment protection. Many problems such as soil degradation, tree diseases and wood production decline, however, also appeared after several decades of cultivation due to lack of effective management practices, which seriously threatens the stability and sustainability of plantation development and imposes severe influence on ecological and economic achievements. As the main elements circulation and nutrients turnover pool for plant growth, soil is essential in forest management. The soil fertilization maintenance and promotion have been and still are of significant interest for plantation management. A number of studies concerning spatial pattern of soil nutrients have been conducted in woodland, while little is known about the temporal pattern of soil nutrient status and stoichiometric ratios in plantations which has the important implications for dynamic balance of soil

收稿日期: 2015-04-08 修回日期: 2015-10-21

项目名称: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“林林对土壤 NP 吸收、利用与归还机制”(2012CB416902)

第一作者简介: 白小芳(1990—),女,硕士研究生。主要研究方向: 生态环境。E-mail: baixiaofang999@163.com

† 通信作者简介: 徐福利(1958—),男,研究员。主要研究方向: 植物营养学,环境生态与农业可持续的水肥管理。E-mail: xfl@nwsuaf.edu.cn

nutrients. The objective of this study was to clarify the seasonal pattern of soil stoichiometric characteristics of a 20-year-old *Larix principis-rupprechtii* plantation in Qinling. The soil organic carbon (C), total nitrogen (N), total phosphorous (P) contents and stoichiometric ratios were measured to explore their seasonal variation and vertical distribution. The results show that: 1) The contents of C, N and P decreased with soil depth throughout the entire growing season (May to October). The contents of C, N and P have obvious seasonally dynamic changes from May to October. Soil C and N varied greatly in the 0–20 cm soil layer (coefficient of variance ( $C_v$ ) of C and N was 0.28 and 0.22, respectively) compared to 20–40 cm and 40–60 cm soil layers ( $C_v$  for C 0.11–0.18; for N 0.13–0.14), while soil P fluctuated significantly in the 40–60 cm layer (0.18) in comparison with the other two layers. The contents of C and P in the 0–20 cm soil layer reached the top value in October. Also, seasonal variations of C (0.11–0.28) and N (0.15–0.22) were greater than P (0.06–0.18). 2) C/N, C/P and N/P ratios in the 0–20 cm soil layer was significantly higher than those in 20–40 cm and 40–60 cm layers ( $P < 0.05$ ). In these three soil layers, the seasonal variation of C/N was the smallest and not obvious. The seasonal variation of N/P was the biggest. In May, C/P and N/P in both 0–20 cm and 20–40 cm soil layers were significantly higher than in other months ( $P < 0.05$ ). In May and June, C/P and N/P in 40–60 cm soil layer were significantly higher than in July and August. 3) The relative analysis implies that the contents of C, N and P have obvious positive correlation ( $P < 0.01$ ). Moreover, C content and C/N, C content and C/P, N content and C/N, N content and N/P, P content and C/P all have obvious positive correlations, but P content has no relation with N/P.

**Keywords:** *Larix principis-rupprechtii*; plantation; soil ecological stoichiometry; Qinling

生态化学计量学主要用来分析多重化学元素(主要是C、N、P)的质量平衡对生态交互作用的影响<sup>[1-2]</sup>。目前,生态化学计量学作为一种新型的生态学研究工具已经被很多学者应用于森林生态系统的研究。20世纪50年代以来,我国营建了大面积的落叶松人工林;但是由于造林密度大、林分结构单一等原因,造成很多落叶松人工林地力衰退<sup>[3]</sup>。研究土壤C、N、P的生态化学计量特征及其季节变化,对揭示土壤养分的有效性和限制性以及C、N、P循环与平衡具有重要意义<sup>[4-6]</sup>;但是,与国外的研究情况相比较,国内的研究相对不足,且主要<sup>[7-9]</sup>集中在植物组织元素生态化学计量方面。对土壤C、N、P生态化学计量特征的研究主要集中于草地生态系统<sup>[10-11]</sup>和湿地生态系统<sup>[12-13]</sup>,而对人工林地不同深度土壤养分含量及化学计量特征的季节变化研究较少。

目前,对华北落叶松(*Larix gmelinii*)人工林的研究主要集中于林下土壤养分、土壤水分、生长特性、组织器官元素分析和碳汇功能等<sup>[14-17]</sup>。从生态化学计量学的角度对华北落叶松林地土壤元素含量的季节变化及其生态化学计量特征的研究至今未见报道。为了探索华北落叶松人工林地土壤

元素动态变化规律,揭示土壤营养元素的循环机制。笔者主要对华北落叶松林地不同季节、不同深度土壤有机碳、全氮和全磷质量分数变化及生态化学计量学特征进行探讨,以期为华北落叶松人工林的经营和管理提供科学依据,并为人工林生态系统化学计量学研究提供参考。

## 1 研究区概况

本试验地位于陕西省宝鸡市太白县林业局南滩林场,地处太白县城东南4 km的秦岭西主峰鳌山脚下(E 107°03′00″~107°46′40″,N 33°38′13″~34°09′55″)。海拔1 600~1 700 m,年降雨量600~1 000 mm,年均无霜期158 d,年平均气温7.6~11.1℃,最高气温32.8℃,最低气温-25℃,属秦岭谷地小气候带,林木生长期约166 d。试验样地为20年华北落叶松人工林林地,林分基本情况为:密度2 500株/hm<sup>2</sup>,平均树高9.3 m,平均胸径为37.88 cm。土壤为山地棕壤,土壤含水率15.68%,pH值6.71。林下植物有大油芒(*Spodiopogon sibiricus*)、披针薹草(*Carex lancifolia*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、黄精(*Polygonatum sibiricum*)等多种植物。

## 2 研究方法

### 2.1 样品采集与分析测定

2012年2—3月选择试验样地,4月12日在20年华北落叶松林林地布设3块样地(样地面积 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ ),从5月15日开始采集样地的林下土壤,以后每月中旬采样1次,直到10月落叶为止,共计采样6次。

在每个样地内随机选取5个点,5个点的土样用四分法取土装袋,用1 m的土钻分层取样,取样深度分别为0~20、20~40、40~60 cm,共计54个土样,采集土样时需先除去枯枝落叶层。土壤样品自然风干,进一步拣去可见的动植物残体和根系,研磨,过0.25 mm筛,保存好用于土样分析。土壤有机碳质量分数用重铬酸钾外加热法测定,全氮质量分数用凯氏定氮法测定,全磷质量分数用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消煮后用钼锑抗分光光度法测定。

### 2.2 数据分析

用Excel 2010进行数据的前期整理,使用SPSS16.0进行数据分析,各月份C、N、P元素质量分数及计量比差异采用单因素方差分析(One-way-Anova),相关性采用Pearson分析,图形采用Sigma Plot 10.0软件制作。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤有机碳、全氮、全磷生态化学计量参数的时空变化

华北落叶松人工林林地不同深度土壤有机

碳、全氮、全磷质量分数呈现不同程度的季节变异性,如表1所示。土壤有机碳、全氮、全磷质量分数均随着土层深度的增加而减少,0~20 cm土层有机碳、全氮、全磷质量分数分别占整个土层有机碳、全氮、全磷质量分数的63.40%、56.13%和36.74%。方差分析表明:各土层有机碳和全氮质量分数差异显著( $P < 0.05$ ),全磷质量分数差异不显著( $P > 0.05$ )。0~20 cm和20~40 cm土层中均为有机碳变异系数最大,全磷最小。40~60 cm土层中全磷变异系数最大,有机碳最小。

从季节变化角度分析,土壤有机碳质量分数(图1(a)):5—10月份0~20 cm土壤呈“降低—升高—降低—升高”的趋势,10月份显著高于其他月份( $P < 0.05$ );20~40 cm和40~60 cm土壤有机碳质量分数变化规律一致,均表现为“升高—降低—升高—降低”的趋势,且7月土壤有机碳质量分数显著低于其他月份( $P < 0.05$ )。从图1(b)可知:0~20 cm土层全氮质量分数与0~20 cm土壤有机碳质量分数变化趋势相似;20~40 cm土层全氮质量分数5、6月含量较高,显著高于其他月份( $P < 0.05$ ),7—10月呈波动式变化;40~60 cm土层全氮质量分数随着季节变化呈“升高—降低—升高—降低”的趋势。从图1(c)可知:0~20 cm土层全磷质量分数呈“降低—升高—降低—升高”的趋势,20~40 cm土层全磷质量分数为先降低后升高再降低后趋于稳定,且20~40 cm土层仅6月与8月差异显著( $P < 0.05$ ),40~60 cm土层全磷质量分数表现为先升高后降低的趋势,且7—10月差异不显著( $P > 0.05$ )。

表1 华北落叶松人工林土层有机碳、全氮、全磷质量分数

Tab. 1 Variations of organic carbon, total nitrogen, phosphorous in soil from the plantation of *Larix principis-rupprechtii*

土层 Soil layer/cm	有机碳 Organic carbon			全氮 Total nitrogen			全磷 Total phosphorous		
	平均值 Mean/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	标准差 Std/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	变异系数 $C_v/\%$	平均值 Mean/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	标准差 Std/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	变异系数 $C_v/\%$	平均值 Mean/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	标准差 Std/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	变异系数 $C_v/\%$
0~20	13.01	3.58	27.53	1.51	0.33	21.57	0.61	0.04	6.56
20~40	4.35	0.78	17.97	0.67	0.09	13.43	0.56	0.05	8.92
40~60	3.16	0.35	11.15	0.51	0.07	14.57	0.49	0.09	18.36

注:平均值为5—10月54个测量值的平均值,下同。Note: The average is the mean measured values of May to October, and the same below.

### 3.2 土壤生态化学计量比的时空变化

华北落叶松人工林不同深度土壤C/N、C/P和N/P均呈现出不同的季节变化规律,由表2可知:0~20 cm和20~40 cm土层的变异系数从大到小顺序为N/P > C/P > C/N,40~60 cm土层的变异系数

从大到小顺序为C/P > N/P > C/N,3个土层的C/N变异系数均最小;随着土层深度的增加,土壤C/N、C/P和N/P均呈现不断减少的趋势,方差分析表明0~20 cm土层的C/N、C/P和N/P显著高于20~40 cm和40~60 cm土层。因此,可以看出土壤C/N

的季节变异性最小, N/P 最大。

土壤 C/N 的季节变化规律没有 C、N 质量分数的变化明显: 0~20 cm 土层的 C/N 呈先逐渐升高后降低的趋势, 9 月 C/N 显著高于 5~8 月 ( $P < 0.05$ ), 9 和 10 月差异不显著 ( $P > 0.05$ ); 20~40 cm 土层的 C/N 表现为“升高—降低—升高—降低”的趋势; 40~60 cm 土层的 C/N 呈“降低—升高—降低”的趋势; 20~40 cm 和 40~60 cm 土层的 C/N 均在 8 月达到最大值(图 2(a))。土壤 C/P 变化(图 2(b)): 0~20 cm

土层的 C/P 呈先降低后升高的趋势; 20~40 cm 和 40~60 cm 土层的 C/P 与 20~40 cm 和 40~60 cm 土层有机碳的质量分数变化规律基本一致。土壤 N/P 变化(图 2(c)): 0~20 cm 土层的 N/P 季节变化较明显, 呈先降低后升高的趋势, 且各月差异显著 ( $P < 0.05$ ); 20~40 cm 和 40~60 cm 土壤 N/P 与 40~60 cm 土壤全 N 含量变化规律基本一致。在整个生长季节 0~20 cm 土壤的 C/N、C/P 和 N/P 显著高于 20~40 cm 和 40~60 cm 土层 ( $P < 0.05$ )。

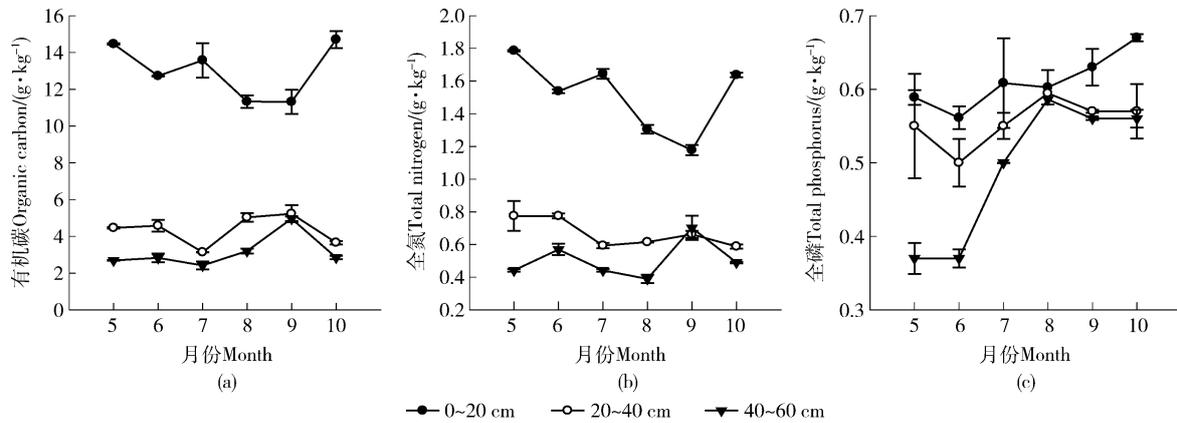


图 1 华北落叶松人工林土层有机碳、全氮、全磷质量分数的季节变化

Fig. 1 Seasonal dynamics of organic carbon, total nitrogen, phosphorous in soil from the *Larix principis-rupprechtii* plantation

表 2 华北落叶松人工林不同土层 C/N、C/P 和 N/P 的变化

Tab. 2 Variations of C/N, C/P and N/P in soil from the *Larix principis-rupprechtii* plantation

土层 Soil layer/cm	C/N			C/P			N/P		
	平均值 Mean	标准差 Std	变异系数 $C_v/1\%$	平均值 Mean	标准差 Std	变异系数 $C_v/1\%$	平均值 Mean	标准差 Std	变异系数 $C_v/1\%$
0~20	10.09	0.72	7.14	55.17	6.34	11.49	5.51	0.91	16.15
20~40	7.64	1.35	17.80	20.34	3.91	19.22	2.69	0.51	19.33
40~60	7.31	1.37	18.74	16.97	4.21	25.22	2.38	0.51	21.42

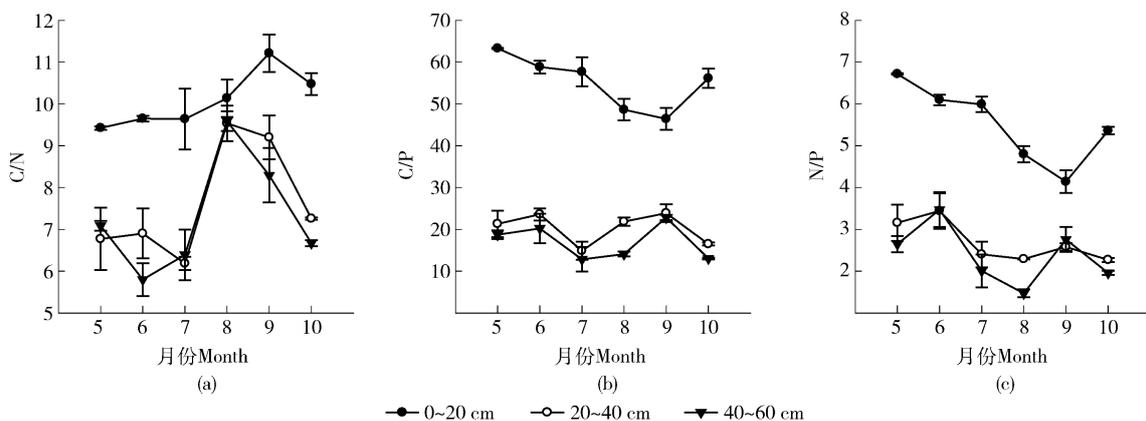


图 2 华北落叶松人工林不同土层 C/N、C/P 和 N/P 的季节变化

Fig. 2 Seasonal dynamics of C/N, C/P and N/P in soil from the *Larix principis-rupprechtii* plantation

### 3.3 土壤有机碳、全氮、全磷质量分数及生态化学计量比的相关性

如图 3 所示,对土壤有机碳、全氮、全磷质量分数以及有机碳、全氮、全磷化学计量比的相关性分析得出:土壤有机碳、全氮和全磷的质量分数之间存在极显著的正相关关系( $P < 0.01$ ),全氮和全磷的质量分数之间也存在极显著的正相关关系,其中,有机碳和全磷的质量分数之间呈现良好的线性拟合关系,有机碳和全氮质量分数及全氮和全磷质量分数的拟合程度较弱。有机碳质量分数与 C/N 和 C/P

也存在极显著的正相关关系( $P < 0.01$ ),且有机碳质量分数和 C/N 之间的线性拟合度极高;全氮质量分数与 C/N 和 N/P 之间存在极显著的正相关关系( $P < 0.01$ ),全氮质量分数与 C/N 的线性拟合度远大于与 N/P 的线性拟合度。全磷质量分数与 C/P 存在极显著的正相关关系——呈曲线相关但相关系数较小;而与 N/P 的相关性不显著。由此可见,不同季节土壤全氮质量分数的变异是导致 N/P 的动态变化的主要原因。

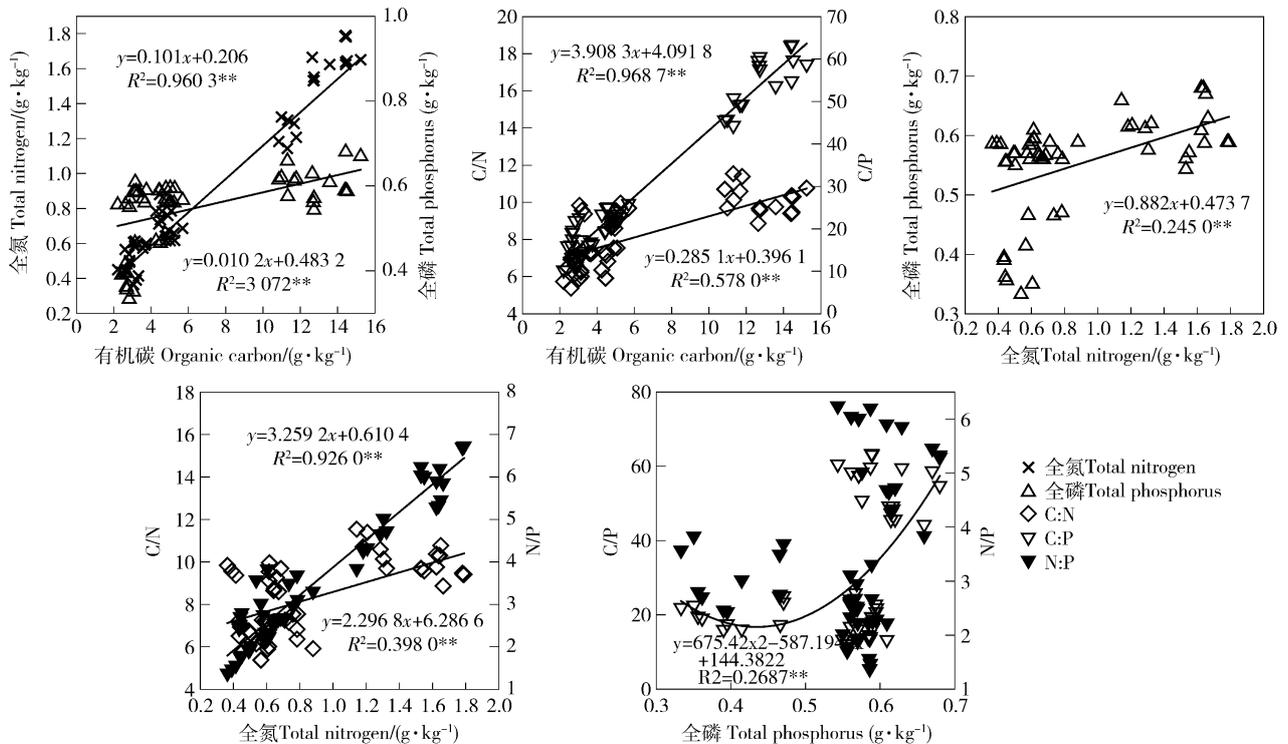


图 3 土壤有机碳、全氮、全磷质量分数及其化学计量比的相关性

Fig. 3 Correlation of soil carbon, nitrogen and phosphorus and stoichiometric ratio

## 4 讨论

### 4.1 土壤有机碳、全氮、全磷质量分数动态变化分析

土壤有机碳质量分数主要受进入土壤的动植物、微生物残体和根系分泌物等有机质的影响。本研究结果显示,不同深度土壤有机碳质量分数随着季节改变而不断变化,这与白军红等<sup>[18]</sup>对内陆湿地土壤的研究结果相似。主要原因是冬季植物生长停滞,枝叶脱落,养分归还;而且冬季温度低,冻融作用促进了有机碎屑和碳矿化过程<sup>[19]</sup>。随着温度升高,土壤微生物活性增强,土壤有机质分解加速,有机碳质量分数减少。20~40 cm 和 40~60 cm 土层由于土壤活性较低对温度变化的

响应不如 0~20 cm 土层,且深层土壤的有机碳消耗大于积累;因此,季节变化规律也没有 0~20 cm 土层明显。各月份有机碳质量分数的垂直分布都呈现随着土层深度增加而减少的规律,这与前人的研究结果<sup>[20-21]</sup>一致。与国内其他森林群落相比,本研究中 0~20 cm 土层平均有机碳质量分数为 13.01 g/kg,明显低于桂西北<sup>[22]</sup>、喀斯特峰从洼地<sup>[23]</sup>、东北东部森林<sup>[24]</sup>、小兴安岭白桦林<sup>[25]</sup>、岷江柏人工林<sup>[26]</sup>等森林群落。造成这种差异的主要原因是:土壤有机碳质量分数受植被类型、温度、降水、成土母质、土壤性质等的综合影响,这些因子必然会影响到土壤有机碳的形成和分解。

土壤全氮的主要来源是大气降水带来的氮

的化合物、动植物残体以及生物固氮(包括共生和非共生)。各月份土壤全氮质量分数的垂直分布和有机碳质量分数相似,这与辛颖等<sup>[27]</sup>的研究结果类似。全氮质量分数的垂直分布与土壤有机质质量分数密切相关,而且相关文献<sup>[22]</sup>表明土壤中的全氮95%以上以有机氮的形式存在于土壤表层。0~20 cm 土层全氮质量分数的季节变化与有机碳质量分数相类似,主要原因是华北落叶松为多年生落叶乔木,冬季生长停滞,土壤中会有上一年氮素的累积且植物刚开始生长对氮素的吸收较少;所以5、6月氮质量分数相对较高,随着植物生长进入旺盛期,氮素需求增加,土壤全氮质量分数减少,后期植物需求减少,氮素开始累积。

土壤全磷的来源相对固定,其质量分数主要受成土母质的影响,其他方式(干湿沉降,动植物残体,微生物活动等)对全磷质量分数的影响相对较小<sup>[28]</sup>。尽管如此,全磷质量分数的季节变化也能在一定程度上反应植物对磷的吸收。本研究中,落叶松生长的不同季节0~20 cm 土层的全磷质量分数始终大于中下层,且季节变化也较明显。主要是因为0~20 cm 土层受到多种因素的影响,如大气降水的稀释、枯落物分解的补充以及植物根系的吸收。本研究中土壤全磷的平均质量分数明显低于全球平均水平(2.8 g/kg)<sup>[29]</sup>。这与植被和气候对土壤的影响有关,也与中国土壤全磷的质量分数普遍低于全球平均水平的结果相符。

#### 4.2 土壤有机碳、全氮、全磷生态化学计量特征的变化及相关性分析

土壤 C/N、C/P、N/P 是有机质或其他成分中碳素与氮素、磷素总质量的比值,可以在一定程度上反映有机质的分解与积累,N、P 的富瘠和有效性在一定范围内可以作为土壤肥力的指标,从而影响植物的养分吸收,进而影响其生长发育<sup>[30]</sup>。

不同深度土壤 C/N 季节差异显著,造成 C/N 季节变化趋势的原因可能是由于土壤有机 C 的积累和随着温度升高,微生物活性增强,土壤的矿化作用增强以及植物对碳氮的吸收不同,也有可能是随着季节变化有机碳的累积速率相对较快,导致 C/N 的变异。本研究 C/N 随着土层深度的增加而减少的变化规律,与 Tian Hanqin 等<sup>[31]</sup>和 C. C. Cleveland 等<sup>[32]</sup>研究结果一致。不同生长季节 0~20 cm 土层的 C/P 变化远大于 20~40 cm 和

40~60 cm 土层,且 0~20 cm 土层 C/P 约是 20~40 cm 和 40~60 cm 土壤的 3 倍左右,差异显著。主要由于有机碳、全磷质量分数的变异程度不同,土壤有机碳质量分数随着土层的变化明显减少,且季节变化也非常显著,而全磷质量分数变化差异较小,使得土壤 C/P 在不同土层季节变异性较大。土壤 N/P 反映的是土壤全氮与全磷质量分数的计量比,而能被植物吸收的氮、磷分别是有效氮和有效磷;因此,N/P 在土壤养分限制诊断方面有一定的局限性。但是土壤 N/P 在一定程度上可间接预测对植物养分的供给水平和限制水平。本研究中 N/P 较低,表明该林地一定程度上受到氮的制约。N/P 随着土层深度的增加而减少,且季节差异显著,主要可能是由于氮在不同季节和不同土壤深度的变异大,而全磷质量分数则由于自身的生物地球化学循环特征,受到季节变化和土层的影响较小。

不同深度土壤碳氮分布具有一致性,且二者呈极显著的线性相关关系(图3),这与李玮等<sup>[33]</sup>的研究结果一致。这是由于土壤有机碳和全氮的主要来源是动植物残体分解,受到植被和气候等影响较大;而土壤全磷质量分数的空间变异虽然小于有机碳和全氮质量分数,但亦与二者之间存在极显著的相关关系( $P < 0.01$ )。说明土壤的全氮、全磷质量分数会在一定程度上影响土壤有机碳质量分数,反之亦然。C 和 N 质量分数与 C/N 呈极显著的正相关关系,进一步说明了有机碳和全氮质量分数的分布和变化的相对一致性。通过比较有机碳、全氮、全磷质量分数与 C/N、C/P 和 N/P 的相关性,表明 C/N、C/P 和 N/P 变化主要受到有机碳和全氮质量分数变化的影响,全 P 质量分数的影响相对较小。这与王维奇<sup>[34]</sup>的研究结果一致。

总体来看,整个土层 C/N、C/P 和 N/P 的平均值分别为 8.35、31.94 和 3.63,其变异系数分别为 20.48%、64.44% 和 50.41%,表明 C/N 相对稳定。这符合化学计量学的基本原则,即有机物质的形成需要一定数量的 N 和其他营养成分,及其相应的相对固定比率的碳<sup>[35]</sup>。同时,将本研究结果与全国不同气候区域土壤 C/N、C/P 和 N/P 对比研究发现华北落叶松林林地土壤 C/N、C/P 和 N/P 均低于全国平均值<sup>[31]</sup>。土壤 C/N、C/P 和 N/P 不同月份间的差异,主要受到植物对养分的吸收、微生物、凋落物和各月温度与降水等的影

响;但是由于受土壤碳氮磷本底值的影响,关于土壤碳氮磷化学计量的时间和空间变异,以及对土壤养分的指示作用目前不是很明确,还需要开展更多更全面的研究进一步明确其变异来源。

## 5 结论

1) 华北落叶松林地土壤有机碳、全氮、全磷的质量分数均随着土层深度的增加而呈减少的趋势,全氮质量分数的空间分布规律和有机碳质量分数具有一致性。0~20 cm 土层有机碳、全氮、全磷质量分数在5—10月均呈现明显的动态变化,有机碳质量分数的季节波动性最大,且有机碳、全氮质量分数的季节变异性大于全磷质量分数。

2) 在整个生长季节,0~20 cm 土层的 C/N、C/P 和 N/P 显著高于 20~40 cm 和 40~60 cm 土层,各个土层 C/N 季节变异性最小,季节变化规律不明显;C/P 和 N/P 变异性较大,且各个土层的 C/P 和 N/P 具有相似的季节变化趋势。

3) 不同季节和不同深度土壤有机碳、全氮、全磷质量分数之间呈极显著的正相关,有机碳质量分数与 C/N、C/P 以及全氮质量分数与 C/P、N/P 也呈极显著的正相关。表明有机碳、全氮质量分数是影响 C/N、C/P 和 N/P 的关键因子。

## 6 参考文献

- [1] Else J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems [J]. *Ecology Letters*, 2000, 3(6): 540-550
- [2] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems [J]. *Ecology letters*, 2007, 10(12): 1135-1142
- [3] 阎德仁,王晶莹,杨茂仁. 落叶松人工林土壤衰退趋势 [J]. *生态学杂志*, 1997, 16(2): 62-66
- [4] 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
- [5] 王建林,钟志明,王忠红,等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳磷比的分布特征 [J]. *草业学报*, 2014, 23(2): 9-19
- [6] Yang Yuanhe, Fang Jingyun, Guo Daili, et al. Vertical patterns of soil carbon, nitrogen and carbon: Nitrogen stoichiometry in tibetan grasslands [J]. *Biogeosciences Discussions*, 2010, 7(1): 1-24
- [7] 吴统贵,吴明,刘丽,等. 杭州湾滨海湿地 3 种草本植物叶片 N、P 化学计量学的季节变化 [J]. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 23-28
- [8] 王冬梅,杨惠敏. 4 种牧草不同生长期 C、N 生态化学计量特征 [J]. *草业科学*, 2011, 28(6): 921-925
- [9] 陈军强,张蕊,侯尧宸,等. 亚高山草甸植物群落物种多样性与群落 C、N、P 生态化学计量的关系 [J]. *植物生态学报*, 2013, 37(11): 979-987
- [10] 丁小慧,宫立,王东波,等. 放牧对呼伦贝尔草地植物和土壤生态化学计量学特征的影响 [J]. *生态学报*, 2012, 32(15): 4722-4730
- [11] 丁小慧,罗淑政,刘金巍,等. 呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化 [J]. *生态学报*, 2012, 32(11): 3467-3476
- [12] 刘文龙,谢文霞,赵全升,等. 胶州湾芦苇潮滩土壤碳、氮和磷分布及生态化学计量学特征 [J]. *湿地科学*, 2014, 12(3): 362-368
- [13] 聂兰琴,吴琴,尧波,等. 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 [J]. *生态学报*, 2015, 36(7): 1-9
- [14] 陈钦程,徐福利,王渭玲,等. 秦岭北麓不同林龄华北落叶松土壤速效钾变化规律 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5): 1243-1249
- [15] 韩芬,王辉,边银霞,等. 华北落叶松枝叶挥发性物质的化学成分及其化感作用 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(11): 2327-2332
- [16] 杜红梅,王超,高红真. 华北落叶松人工林碳汇功能的研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(4): 756-759
- [17] 李振华,王彦辉,于澎涛,等. 六盘山半干旱区华北落叶松林的生长季蒸散量和组分特征 [J]. *生态环境学报*, 2013, 22(2): 222-228
- [18] 白军红,邓伟,王庆改,等. 内陆盐沼湿地土壤碳氮磷剖面分布的季节动态特征 [J]. *湖泊科学*, 2007, 19(5): 599-603
- [19] Groffman P M, Driscoll C T, Fahey T J, et al. Effects of mild winter freezing on soil nitrogen and carbon dynamics in a northern hardwood forest [J]. *Biogeochemistry*, 2001, 56(2): 191-213
- [20] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423-436
- [21] 刘景双,杨继松,于君宝,等. 三江平原沼泽湿地土壤有机碳的垂直分布特征研究 [J]. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 5-8
- [22] 庞圣江,张培,贾宏炎,等. 桂西北不同森林类型土壤生态化学计量特征 [J]. *中国农学通报*, 2015, 31(1): 17-23
- [23] 杜虎,彭晚霞,宋同清,等. 桂北喀斯特峰丛洼地植物群落特征及其与土壤的耦合关系 [J]. *植物生态学报*, 2013, 37(3): 197-208
- [24] 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): 83-90
- [25] 韩营营, 黄唯, 孙涛, 等. 不同林龄白桦天然次生林土壤碳通量和有机碳储量[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1460-1469
- [26] 王冰冰, 曲来叶, 马克明, 等. 岷江上游干旱河谷灌丛群落土壤生态酶化学计量特征[J]. 生态学报, 2015, 35(18): 1-14
- [27] 辛颖, 聂立水, 张志毅, 等. 鲁西平原毛白杨造林地土壤全氮空间变异性研究[J]. 土壤通报, 2011, 42(1): 98-102
- [28] Chen Xiongwen, Li Bailian. Change in soil carbon and nutrient storage after human disturbance of a primary Korean pine forest in northeast China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 186(1/2/3): 197-206
- [29] Zhang Chi, Tian Hanqin, Liu Jiyuan, et al. Pools and distributions of soil phosphorus in China [J]. *Global biogeochemical cycles*, 2005, 19(1): 1-8
- [30] Méndez M, Karlsson P S. Nutrient stoichiometry in *Pinus vulgaris*: Nutrient availability, plant size, and reproductive status [J]. *Ecology*, 2005, 86(4): 982-991
- [31] Tian Hanqin, Chen Guangsheng, Zhang Chi, 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
- [32] Cleveland C C, Liptzin D. C: N: P stoichiometry in soil: Is there a "redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235-252
- [33] 李玮, 郑子成, 李廷轩. 不同植茶年限土壤团聚体碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 9-16
- [34] 王维奇, 曾从盛, 钟春棋, 等. 人类干扰对闽江河口湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(10): 2411-2416
- [35] Sterner RW, Elser J J. *Ecological stoichiometry: The biology of elements from molecules to the biosphere* [M]. Princeton: Princeton University Press, 2002: 46-55

(责任编辑: 程云 郭雪芳)