

DOI: 10.5846/stxb201705090856

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.

Wang Z F, Zheng F L. C, N, and P stoichiometric characteristics of *Pinus tabulaeformis* plantation in the Ziwuling Region of the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(19): 6870–6880.

# 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

汪宗飞<sup>1,2</sup>, 郑粉莉<sup>1,3,\*</sup>

1 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100

**摘要:** 分析人工植被重建背景下, 森林植物、枯落物与土壤的碳(C)、氮(N)、磷(P)化学计量特征有助于深入理解森林生态系统养分循环规律和系统稳定机制。以黄土高原子午岭地区的 3 个林龄(10、25 a 和 40 a)的人工油松林为对象, 通过测定油松林叶片、枯落物和土壤的碳(C)、氮(N)、磷(P)含量, 研究人工油松林不同林龄叶片、枯落物和土壤的化学计量学特征。结果表明, 不同林龄油松叶片 C、N、P 含量分别为 538.85–560.54 g/kg、9.00–10.47 g/kg 和 1.04–1.13 g/kg。在 3 个林龄油松林中, 除叶片 C 含量外, 叶片 N、P 含量存在显著差异 ( $P < 0.05$ ); 枯落物层以及土壤层的 C、N、P 含量均存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 且枯落物层含量大于土壤层。随着林龄的增加, 叶片 C:N 比呈现先减小后增大的变化, N:P 和 C:P 比呈显著增加趋势, 而枯落物层 C:N、C:P 和 N:P 比无显著差异。同时, 随着林龄的增加, 除 10–20 cm 土层的 C:N 比外, 土壤的 C:N 比在 0–10 cm 土层和 C:P 和 N:P 比在 0–10 和 10–20 cm 皆呈显著增加趋势。研究区油松林叶片 N:P 比平均值为 9.13, 低于 14, 表明油松林生长主要受氮的限制。土壤的 N 含量与叶片和枯落物层的 N 含量, 以及三者间 N:P 比呈显著线性相关 ( $P < 0.05$ ), 充分体现了油松林植物、枯落物与土壤之间的互动关系。研究结果可为我国黄土高原脆弱生态区的生态功能恢复与植被重建提供科学依据。

**关键词:** 生态化学计量; 油松; 不同林龄; 叶片; 枯落物; 土壤

## C, N, and P stoichiometric characteristics of *Pinus tabulaeformis* plantation in the Ziwuling Region of the Loess Plateau

WANG Zongfei<sup>1,2</sup>, ZHENG Fenli<sup>1,3,\*</sup>

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

**Abstract:** In this study, characterization of the C, N, and P stoichiometry of the “plant-litter-soil” continuum was to guide the *Pinus tabulaeformis* forest productivity, and to understand the nutrient cycling and stability mechanisms of the forest ecosystem on the Loess Plateau. The *P. tabulaeformis* plantation grown for 10-, 25-, and 40-years in the Ziwuling area on the Loess Plateau was selected to determine the carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P), as well as the stoichiometric characteristics in the leaves, litter, and soil during stand development. The results showed that the content of C, N, and P in leaves from the *P. tabulaeformis* plantations ranged from 538.85 to 560.54, 9.00 to 10.47, and 1.04 to 1.13

基金项目: 中国科学院国际合作局对外合作重点项目资助(161461KYSB20170013)

收稿日期: 2017-05-09; 网络出版日期: 2018-06-20

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

g/kg, respectively. Except for the C content in leaf, the N and P contents in the leaves were significantly different for the three stand ages ( $P < 0.05$ ). The C, N and P contents in litter and soil were also significantly different for the three stand ages ( $P < 0.05$ ), with litter having higher contents than soil. As the forest age increased, the leaf C:N ratios first decreased, and then increased; whereas the N:P and C:P ratios of the leaves were significantly increased. Meanwhile the C:N, C:P and N:P ratios of the litter did not significantly differ with the age of the *P. tabulaeformis* plantations. The contents of C and N in soil increased with increasing forest age, and were significantly higher ( $P < 0.05$ ) at 0—10 cm depth than at the 10—20 cm depth in all plantation ages. However, the content of P changed litter in the soil profile. As the forest age increased, the soil C:P and N:P ratios at 0—10 and 10—20 cm depth and the soil C:N ratios at 0—10 cm depth increased, the soil C:N ratios at 10—20 cm depth decreased. For all plantation ages, the value of the N:P ratio in leaves was less than 14 under *P. tabulaeformis* plantations, which indicated that the growth of the plant in this study was limited by N. Correlations analysis showed that significantly positive correlations ( $P < 0.05$ ) between the N content and N:P ratios existed for the leaves, litter, and soil, which indicated that content of N in the plant was affected by the supply of N in the soil. Overall, vegetation restoration improved soil quality in the Loess Plateau. The results can provide a scientific basis for the restoration of ecological function and vegetation in the fragile ecological region of the Loess Plateau in China.

**Key Words:** C, N and P stoichiometry; *Pinus tabulaeformis*; plantation age; leaf; litter; soil

碳(C)、氮(N)、磷(P)作为生态系统中的结构性元素和养分元素,在生物地球化学循环中,促进生态系统物质循环和能量流动,对维持整个生态系统稳定性具有十分的重要意义。生态化学计量学(Ecological stoichiometry)是目前研究元素在生物地球化学循环和生态过程中计量关系和规律的综合有效的方法<sup>[1-6]</sup>,对分析植物、凋落物、土壤相互作用的养分调控因素提供重要手段。N和P是自然生态系统的主要限制性元素,在植物生长进程中发挥出非常重要的作用。植物N:P比营养限制理论目前已被广泛的认同并应用在对不同生态系统的研究<sup>[7-10]</sup>。生态系统内部的C、N、P循环在植物、凋落物和土壤之间相互转换,森林生态系统植物-凋落物-土壤生态化学计量特征及其关系研究,有助于我们深入认识森林生态系统物质养分循环及其作用机制,具有十分重要的理论和现实意义。

目前,国内外学者已经对于植物叶片、枯落物或土壤C、N、P生态化学计量特征开展了大量的研究<sup>[7, 11-15]</sup>,这些研究对丰富生态系统化学计量特征起到了重要的作用。然而现有研究主要是针对生态系统地单一组分(叶、土壤或者枯落物)或者两个组分组合(植物叶片和枯落物或者植物叶片和土壤)进行C、N、P生态化学计量研究,较少涉及将生态系统3个组分耦合为“植物-枯落物-土壤”作为连续体综合研究各组分之间的C、N、P化学计量特征的差异及其内在关系。土壤是植被生长的基质,它提供了植物体生长所需的大部分养分。植物通过叶片进行光合作用固定C,并且以枯落物的形式将养分归还给土壤。植物-土壤复合系统中枯落物作为养分的基本载体,是连接植物和土壤的纽带。运用生态化学计量学的理论认识植物-枯落物-土壤相互作用的养分调控因素,对于揭示元素相互作用与制约变化规律,实现自然资源的可持续利用具有重要的意义。此外,受植物养分吸收、微生物代谢和枯落物分解等因素影响,随林龄变化,对某一树种不同组分(叶、枯落物、土壤)生长过程中C、N、P生态化学计量特征也值得的进一步研究。因此,将植物叶片-枯落物-土壤作为连续体,探究随林龄增长主要养分元素和化学计量特征将有助于全面、系统地揭示森林生态系统的养分循环及化学计量特征,能够丰富和完善生态化学计量学。

黄土高原生态环境极其脆弱,是全国水土流失最严重的地区之一<sup>[16]</sup>。植被恢复被认为是解决土壤侵蚀,土地退化,重建和恢复生态系统的最主要方法<sup>[17-18]</sup>。油松(*Pinus tabulaeformis*)是我国暖温带森林主要建群种,具有良好的水土保持等生态功能,是黄土高原半湿润区退耕还林工程的主要树种之一<sup>[19]</sup>。目前,黄土高原子午岭林区通过不同时期造林工程,尤其是实施“退耕还林还草”工程以来,林区分布着由不同林龄组成的大面积的人工油松纯林,在区域水土保持和水源涵养中发挥着巨大的生态作用。因此本文选取子午岭林区

10、25 a 和 40 a 生的人工林油松为对象,通过研究油松林生态系统内植物-枯落物-土壤层 C、N、P 含量及其化学计量特征,分析林内植物不同生长阶段的限制性元素,并将林内植物-枯落物-土壤作为连续体,综合分析油松林林龄变化对叶片、枯落物和土壤 C、N、P 含量及其化学计量特征的影响,阐明不同林龄和土层深度下叶片、枯落物和土壤 3 个组分间化学计量的相互关系,从而从生态化学计量学角度为该区人工油松林健康评价、经营管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于陕西子午岭国家级自然保护区境内子午岭土壤侵蚀与生态观测试验站附近,地理坐标为 108°29'30"—109°42'54"E, 35°44'06"—36°23'23"N,属于暖温带半湿润地区,年均温度 7.4 °C,年日照时数 2159.4 h,无霜期 140—160 d,年降水量 587.6 mm,且多集中在 7—9 月份,相对湿度 65%—70%。地面组成物质主要以新黄土和老黄土为主,厚度一般为 50—100 m。主要分布的树种有辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等<sup>[18]</sup>。

### 1.2 试验设计

调查于 2015 年 8 月下旬进行。在研究区内选取坡位、坡向等立地条件相近的 10、25 a 和 40 a 生油松人工林作为研究样地(图 1),在每个样地随机设置 3 个 10 m×10 m 的标准样方(表 1)。



图 1 不同林龄人工油松林基本情况

Fig.1 The landscape of different-aged *Pinus tabulaeformis* plantation

表 1 不同林龄人工油松林分基本特征

Table 1 Basic status of different-aged artificial *Pinus tabulaeformis* plantation

林龄 Age/a	海拔 Altitude/m	坡向 Slope aspect	坡度 Slope degree/ (°)	坡位 Slope position	平均胸径 DBH Diameter at breast height/cm	平均树高 Average tree height/m	郁闭度 Canopy density
10	1130	西南 226°	5	坡中	2.3	3.1	0.45
25	1180	西南 172°	7	坡中	8.6	7.5	0.75
40	1140	西南 205°	8	坡中	13.6	12.1	0.65

调查时,测定样方内油松的胸径和树高,并基于测定结果筛选具有代表性的油松 5 株作为重复。参考已有研究结果<sup>[20-22]</sup>,用高枝剪法采集针叶样品,在每株标准木树冠中部的东、南、西、北 4 个方向各取样枝 1 条,获取乔木的针叶样品。因林下基本无灌木,并未采集林下植物样品。在标准样方内沿对角线选取 3 个 1 m×1 m 的枯落物样方,采集并混合样方内枯落物,获取枯落物样品。每个标准样方内沿“S”型选择 3 个采样点,每个样点按 0—10 cm 和 10—20 cm 分层采集土样,并将同一土层样品混合,获得约 500 g 混合样品供实验室分析。将植物样品在 105 °C 烘箱内杀青 15 min 后,并在 65 °C 下烘干至恒量后粉碎;土壤样品经自然风干后磨碎,过 100 目筛,用塑封袋保存备用。植物和土壤样品的有机碳采用重铬酸钾氧化-外加热法测定;植物样品全氮和全磷的测定,先用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮样品,凯氏定氮法测定全氮,钼锑抗比色法测定全磷;土壤全氮的

测定,用硒粉-硫酸铜-硫酸消化法;土壤全磷采用高氯酸-硫酸酸溶-钼锑抗比色法<sup>[23]</sup>。

### 1.3 数据分析

所得的数据经 Excel 2010 初步整理后,利用 SPSS 19.0 软件采用单因素方差分析(One-way ANOVA)、双因素方差分析(Two-way ANOVAS)和多重比较(LSD)进行显著性水平检验( $P < 0.05$ );采用 Pearson 法进行相关性分析;采用 SigmaPlot 12.5 软件绘图。

## 2 结果

### 2.1 油松林叶片 C、N、P 含量及化学计量学特征

不同林龄人工油松林叶片 C 含量在 538.85—560.54 g/kg 之间,N 含量在 9.00—10.47 g/kg 之间,P 含量在 1.04—1.13 g/kg 之间。油松林叶片的 C 含量不受林龄的影响;而林龄对叶片的 N、P 含量影响明显(图 2)。叶片 N 含量的变化与 C 含量变化表现出相反的趋势,25 a 油松林叶片 N 含量显著高于 10 a 和 40 a 油松林( $P < 0.05$ )的含量。叶片 P 含量的变化随着林龄增加,呈现减少趋势,10 a 油松林叶片 P 含量显著高于 25 a 和 40 a 的含量( $P < 0.05$ ),但 25 a 和 40 a 油松林叶片 P 含量差异不显著。

不同林龄人工油松林叶片 C:N、C:P 和 N:P 比值变化范围在 51.81—59.91,475.17—542.80 和 7.95—9.84 之间(图 2)。不同林龄叶片 C:N、C:P 和 N:P 比具有明显的差异( $P < 0.05$ )。由双因素方差分析可知,林龄显著影响叶片 N、P 含量和 C:N、C:P 和 N:P 比(表 2)。

表 2 林龄和土层深度及其二者互作对人工油松林叶片、枯落物层和土壤 C、N、P 含量及其比值影响的方差分析

Table 2 Variance analysis on effects of stand ages, soil layer depths and both coupling on leaf, litter layer and soil C, N, P contents and their ratios

因素 Factor	F (P)					
	C	N	P	C:N	C:P	N:P
林龄 Stand age*	1.45 (0.27)	23.264 ( $< 0.001$ )	5.827 (0.013)	11.178 (0.001)	5.628 (0.015)	26.65 ( $< 0.001$ )
林龄 Stand age**	14.832 ( $< 0.001$ )	3.289 (0.065)	5.372 (0.017)	0.415 (0.668)	0.231 (0.797)	0.551 (0.588)
土层深度 Soil layer depths***	1044.250 ( $< 0.001$ )	576.739 ( $< 0.001$ )	1.419 (0.257)	1.139 (0.307)	589.220 ( $< 0.001$ )	397.445 ( $< 0.001$ )
林龄 Stand age*	110.840 ( $< 0.001$ )	40.892 ( $< 0.001$ )	18.835 ( $< 0.001$ )	24.022 ( $< 0.001$ )	36.676 ( $< 0.001$ )	71.105 ( $< 0.001$ )
林龄与土层深度交互 Coupling of soil layer depth and stand age*	31.687 ( $< 0.001$ )	0.069 (0.934)	0.237 (0.793)	67.224 ( $< 0.001$ )	1.127 ( $< 0.356$ )	18.817 ( $< 0.001$ )

\* 林龄对叶片 C、N、P 含量及其比值影响; \*\* 林龄对枯落物 C、N、P 含量及其比值的影响; \*\*\* 土层深度对土壤 C、N、P 含量及其比值的影响; ★ 林龄对土壤 C、N、P 含量及其比值的影响; ☆ 林龄与土层深度互作对土壤 C、N、P 含量及其比值的影响

### 2.2 油松林枯落物层 C、N、P 含量及其化学计量学特征

不同林龄油松林枯落物层的 C、N、P 含量显著低于叶片 C、N、P 含量,而枯落物层的化学计量比高于叶片的化学计量比。林龄对人工油松林枯落物层 C、N、P 含量有明显影响。40 a 油松林枯落物层 C 含量显著高于 10 a 和 25 a ( $P < 0.05$ )的 C 含量。油松林枯落物层 N、P 含量变化与 C 含量变化表现出相同的变化趋势,40 a 油松林枯落物层 N、P 含量显著高于 10 a 和 25 a 的 N 含量。

油松林枯落物层 C:N、C:P 和 N:P 比平均值分别为 60.38、966.77 和 16.56(图 2)。其 C:N、N:P 和 C:P 比在不同林龄间差异不显著。由双因素方差分析可知,林龄显著影响枯落物层 C 和 P 含量(表 2)。

### 2.3 油松林土壤 C、N、P 含量及化学计量学特征

土层深度和林龄的变化对土壤中的 C、N、P 含量均有较大影响,不同林龄油松林各土层 C、N、P 含量分别在 10.18—25.51 g/kg,0.73—1.88 g/kg,0.55—0.61 g/kg 之间(图 3),各林龄 0—10 cm 土壤 C 和 N 含量均显著高于 10—20 cm 土壤的 C 和 N 含量( $P < 0.05$ ),而土壤 P 含量在 0—10 cm 与 10—20 cm 土层内差异不显

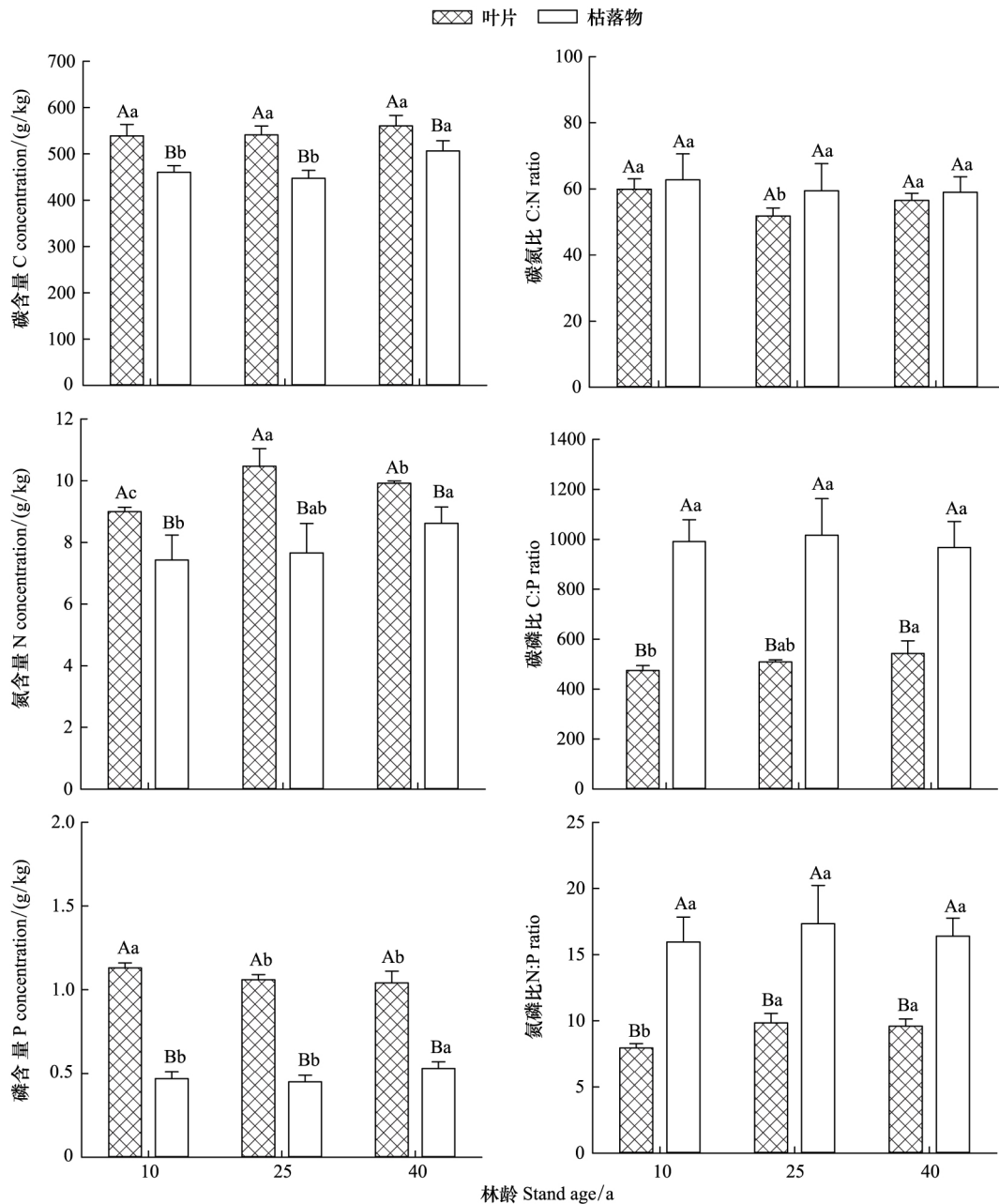


图2 不同林龄人工油松林叶片和枯落物层 C、N、P 含量及其生态化学计量比

Fig.2 The contents of Leaf and litter layer C, N, P and their stoichiometry in different stand ages of *P. tabulaeformis* plantations

同一组分不同小写字母表示不同林龄间差异显著;同一林龄不同大写字母表示不同组分间差异显著 ( $P < 0.05$ )

著。在 0—10 cm 土层内, 40 a 油松林的土壤 C 含量最大, 10 a 油松林内土壤 C 含量显著低于 25 a 和 40 a 油松林的土壤 C 含量。不同林龄油松林土壤 N 含量的表现与土壤 C 含量相似的结果。随着林龄的增加, 在 0—10 cm 土层中油松林土壤 P 含量呈减小趋势, 40 a 油松林土壤 P 含量均显著低于 10 a 和 25 a 的 P 含量。

不同林龄人工油松林土层 C:N、C:P 和 N:P 比值变化范围在 10.82—13.93, 17.25—47.98, 1.24—3.54 之间(图 3)。0—10 cm 土层 40 a 油松林土壤 C:N 比显著高于 10 a 和 25 a 油松林土壤 C:N ( $P < 0.05$ ), C:P 和 N:P 比表现出与 C:N 比相似的结果。10—20 cm 土层 10 a 油松林土壤 C:N 比显著高于 25 a 和 40 a 油松林的土壤 C:N 比, 而土壤 C:P 和 N:P 比显著低于 25 a 和 40 a 油松林土壤 C:P 和 N:P 比 ( $P < 0.05$ )。不同林龄油松林 C:N、C:P 和 N:P 比变化随土层变化比较明显, 10 a 油松林内 0—10 cm 土层 C:N 比显著低于 10—

20 cm 土层的 C:N, 而 10 a 油松林 0—10 cm 土层 C:P 和 N:P 比显著高于 10—20 cm 土层 C:P 和 N:P 比。25 a 和 40 a 油松林内 0—10 cm 土层 C:N、C:P 和 N:P 比均显著高于 10—20 cm 土层 C:N、C:P 和 N:P 比 ( $P < 0.05$ )。由双因素方差分析可知, 林龄显著影响土壤 C、N、P 含量和 C:N、C:P、N:P 比。除 P 含量和 C:N 外, 土壤深度显著影响 C、N 含量和 C:P、N:P 比。另外, 土层深度和林龄之间的交互作用明显影响土壤 C 含量以及 C:N 和 N:P 比(表 2)。

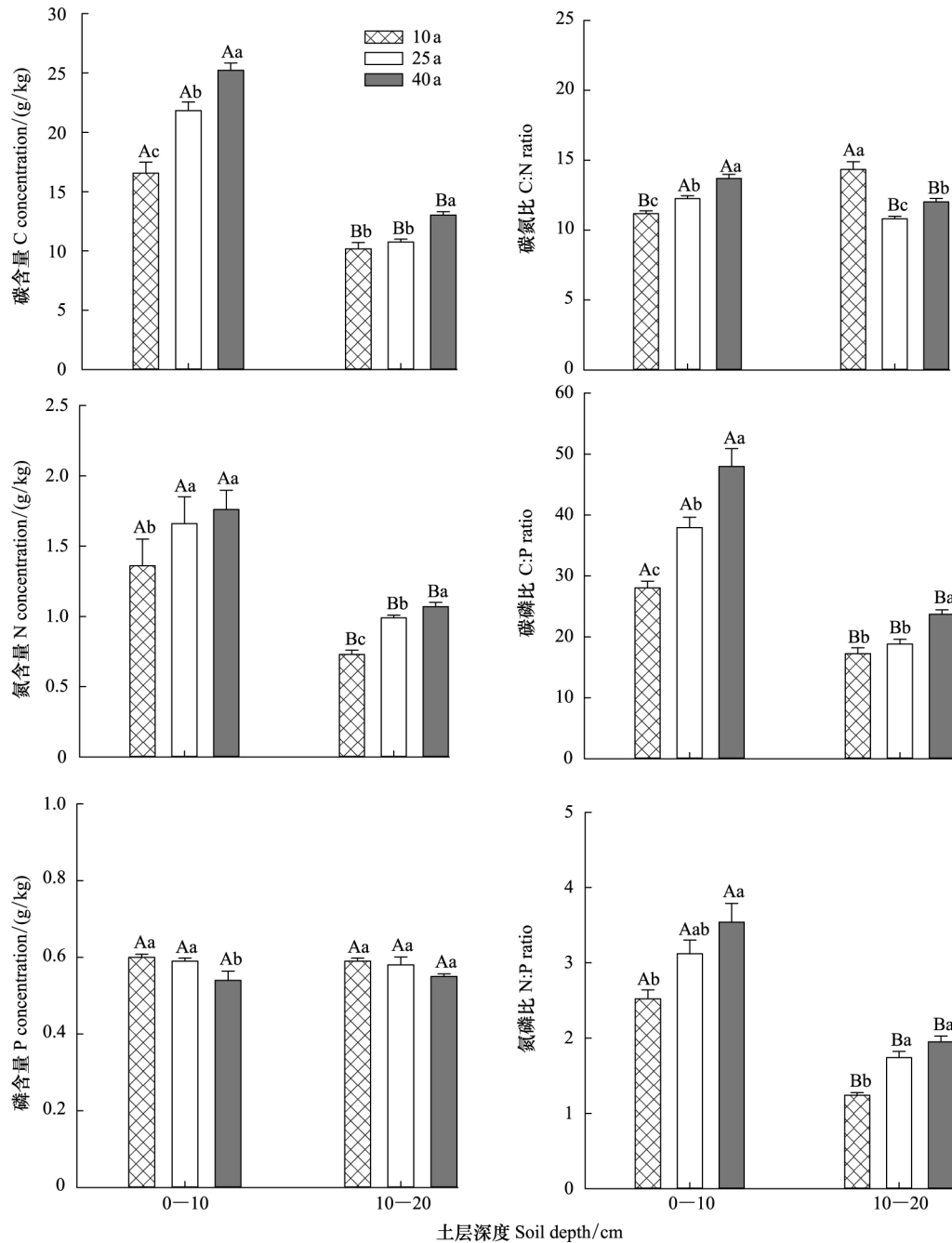


图 3 不同林龄人工油松林下不同土层 C、N、P 含量及其生态化学计量比

Fig.3 Soil C, N, P contents and ratios of their stoichiometry at different soil layer depths under *P. tabulaeformis* plantations with different stand ages

同一土层不同小写字母(a, b)表示不同林龄间差异显著, 同一林龄不同大写字母(A, B)表示不同土层间差异显著 ( $P < 0.05$ )

## 2.4 油松林叶片、枯落物层和土壤 C、N、P 的关系

Pearson 相关分析表明(表 3) 油松林叶片 N 含量与 0—10 cm 土壤 N 含量呈显著负相关,而油松林叶片 P 含量、C:P 和 N:P 比与土壤 P 含量、C:P、N:P 比分别呈显著正相关( $P < 0.05$ ) 油松叶片 C 含量和 C:N 比与土壤 C 含量和 C:N 比呈不显著相关。枯落物层和土壤层的 N 含量呈显著正相关,而枯落物层 P 含量和 N:P 比与土壤层 P 含量和 N:P 比呈显著负相关。油松叶片与枯落物层 N 含量、P 含量、C:N 比和 N:P 比呈显著负相关,而油松叶片与枯落物层 C:P 比呈显著正相关( $P < 0.05$ )。

表 3 叶片、枯落物层与土壤 C、N、P 含量及其比值的 Pearson 相关分析

Table 3 Pearson correlation of C, N and P contents and ratios of their stoichiometry between leaf, litter layer and soil

化学计量指标 Stoichiometric index		回归公式 Regression formula	$R^2$	$P$	样本数 Sample
枯落物层与叶片 Litter layer and leaf	N	$y = -9.631x + 112.415$	0.781	0.002	27
	P	$y = -0.302x + 0.771$	0.550	0.022	27
	C:N	$y = -3.069x + 214.568$	0.566	0.019	27
	C:P	$y = 0.619x + 9.942$	0.784	0.001	27
	N:P	$y = -1.051x + 1586.769$	0.696	0.005	27
土壤与叶片 Soil and leaf	N	$y = -2.755x + 31.523$	0.852	0.000	27
	P	$y = 0.284x + 0.306$	0.504	0.032	27
	C:P	$y = 0.557x - 3.314$	0.775	0.002	27
	N:P	$y = 0.150x - 50.370$	0.699	0.005	27
土壤与枯落物层 Soil and litter layer	N	$y = 0.233x - 0.191$	0.722	0.004	27
	P	$y = -0.899x + 1.011$	0.838	0.001	27
	N:P	$y = -0.1x + 134.959$	0.492	0.035	27

## 3 结果与讨论

### 3.1 油松叶片的 C、N、P 含量及化学计量特征

植物的 C、N、P 含量以及 C:N:P 生态化学计量学随林龄变化呈现变异性。刘冰燕等<sup>[24]</sup>和王宁等<sup>[25]</sup>研究发现,随林龄增加,油松人工林植物 C、N、P 含量明显增加,而 C:N:P 比变化不明显。但也有研究表明,随林龄的增加,植物叶片 C、P 含量呈现先减小后增大趋势,C:P 比呈先增大后减小趋势<sup>[26]</sup>。而在本研究中,油松人工林随林龄增加,叶片 C、N、P 含量和 C:N:P 比变化规律与前人结果<sup>[24-26]</sup>不一致,可能是由于采样时间、林龄、立地条件、生长地气候环境等不同因素综合所影响的。本文研究还发现,25 a 油松林叶片 N 含量显著高于 10 a 和 40 a 的叶片 N 含量。这是由于中林龄油松处于生长旺盛期,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,故中林龄油松针叶的 N 含量表现为最高。油松针叶的 N 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。另外,在本研究中,3 种林龄针叶 C、N、P 含量的变化规律并不一致,这可能是由于随着林龄的增加,其对土壤养分的吸收和需求量有所不同,而且随着时间的变化,受枯落物分解、微生物活动、植物周边环境因素的变化等的综合影响,其林下土壤养分供应量也会发生一定的变化<sup>[14]</sup>。

叶片 C:N:P 比值的的变化反映了植物生活史过程中生长和防御策略之间的权衡。植物叶片 N、P 含量高,意味着其光合速率较高,生长速率快,对生长所需资源的竞争能力强,而叶片 C 含量高则意味着其比叶重大,光合速率较低,生长速率慢,对外界不利环境的防御能力强<sup>[20]</sup>。本研究中,不同林龄人工油松林叶片 C 含量在 538.85—560.54 g/kg 之间,N 含量在 9.00—10.47 g/kg 之间,P 含量在 1.04—1.13 g/kg 之间,叶片 C、N、P 含量都在植物生长的正常范围<sup>[27]</sup>。油松叶片 C 含量明显高于 Elser 等<sup>[28]</sup>研究的全球 492 中陆生植物的叶片 C 含量(464 g/kg),表明油松叶片有机化合物含量较高,叶片 N 含量显著低于我国植物叶片平均 N 含量(20.2 g/kg)和全球植物叶片平均 N 含量(20.6 g/kg),叶片 P 含量显著低于我国植物叶片平均 N 含量(1.46 g/kg)



和全球植物叶片平均 P 含量(1.99 g/kg),说明油松植物体内 N、P 都缺乏。N 和 P 是陆地生态系统中植物生长的主要限制元素,其含量的高低影响植物的生长与群落的动态,而且 N:P 临界比值被认为可以作为判断环境对植物生长的养分供应状况的指标<sup>[29]</sup>。有关研究表明,当针叶片 N:P>16 时,认为生长受 P 限制,当针叶片 N:P<14 时,认为植物生长受 N 限制,当针叶片 N:P 比值位于 14 和 16 之间时,认为植物生长受两者 N 和 P 的共同限制<sup>[8]</sup>。本研究中,油松林针叶 N:P 比值在不同林龄内平均值分别为 7.95、9.84 和 9.59,表明油松林生长主要受 N 的限制,研究结果与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 限制的结论一致<sup>[30]</sup>。随着林龄的增加,植物 N:P 比有所上升,说明植物受 N 的限制情况有所缓解,在人工林的抚育管理中,特别是在油松林幼林时期,建议要合理施用 N 肥以改善土壤养分供给状况。虽说不同生长阶段的油松林针叶 N、P 含量均随林龄增加有显著变化,但 N:P 却保持相对稳定,这说明植物自身具有调节元素需求与养分吸收平衡的能力,验证了植物的内稳态维持机制。运用 N:P 化学计量学原理,研究不同林龄群落 N:P 比值变化,发现不同林龄间限制植物生长的主要营养元素,对于营林管理提高生产力具有重要意义。

### 3.2 油松林枯落物层 C、N、P 含量及化学计量特征

枯落物是联系植物体和土壤的载体,对其营养元素的研究有重要意义。枯落物是养分回归土壤的主要途径,是森林生态系统养分元素循环的一个重要组成部分。已有研究表明,森林生长所需 70%—90% 的养分来自枯落物的降解<sup>[31]</sup>。本研究中,林地枯落物 C、N、P 平均含量分别为 467.66、8.28 g/kg 和 0.49 g/kg,与王晶苑等<sup>[15]</sup>对长白山温带针阔混交林与鼎湖山亚热带常绿阔叶林所做的研究比较,本研究其 C、N、P 含量均低于长白山温带针阔混交林与鼎湖山亚热带常绿阔叶林。与其他地区研究比较,发现子午岭地区油松林枯落物层与叶片均表现出相对较高 C:N 比,这说明枯落物完全秉承了植物的特性,这也与王维奇等<sup>[32]</sup>对湿地植物凋落物计量特征研究结果吻合。N:P 比值是影响枯落物分解和养分归还速率的重要因素之一<sup>[31]</sup>。本研究中,随着林龄的增加,枯落物层 N、P 含量都有所增加,其 N:P 稳定在 17 左右,可见该地区油松人工林下枯落物的分解与养分归还速率在不同生长阶段处在一个相对平衡的状态。通过比较发现,黄土高原子午岭地区油松林枯落物层 C:N、C:P 比高于低纬度高温地区喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物养分的 C:N 比(23.72)和 C:P 比(484),而 N:P 比低于喀斯特峰丛洼地 N:P 比(18.00)<sup>[33]</sup>。南方森林由于受低纬度和高温的影响,植物养分含量较高纬度地区低,再吸收作用强度相对较强。可以看出不同地区的植物再吸收功能对枯落物的 C、N、P 含量及 C:N:P 比值的影响是较大,但是影响程度存在差异。

### 3.3 油松林土壤 C、N、P 含量及化学计量特征

随着植被恢复年限的增加,土壤 C、N 含量也相应的增加。其原因可能是随着恢复年限的延长,林地枯落物逐渐增加,而林地土壤 C、N 的补充和积累主要来自枯落物分解,根系残体及其分泌物等。本研究中,40 a 油松林土壤 C、N 含量高于 10 a 和 25 a 的 C、N 含量,这与赵发珠等<sup>[34]</sup>的研究结果一致。本研究结果还表明,不同林龄油松林土壤的 C、N 含量随土层深度的增加而减少,表层(0—10 cm)土壤含量最高,呈现出“表聚”现象,这与前人研究结果<sup>[35]</sup>一致,这可能与土壤表层土壤微生物活性较高有关,土壤微生物参与土壤碳、氮循环,促进了土壤碳、氮的积累。在本研究中土壤 P 含量低于全球平均水平(2.8 g/kg)<sup>[9]</sup>,这与中国土壤 P 含量普遍低于全球水平的规律一致<sup>[21]</sup>,这可能与黄土高原地球化学背景、强烈的风化作用和严重的水土流失有关。研究区土壤养分随着土层的加深而降低,其中以有机 C 和全 N 含量降低最多,而全 P 降低较少,这与魏孝荣和邵明安<sup>[37]</sup>的研究结果一致。其原因主要是由于由碳、氮、磷的来源不同所决定的,碳、氮主要受枯落物养分归还和分解的影响,使这些元素在土壤表层积累,然后经淋溶作用向下迁移,同时还受植物吸收利用的影响;而磷主要受土壤母质风化的影响<sup>[36]</sup>。

土壤(C:N:P 比)是土壤有机质或其他成分中的 C、N、P 总质量的比值,是土壤有机质组成和质量好坏的一个重要参数,是衡量土壤有机质组成和营养平衡的一个重要指标<sup>[37]</sup>,是确定土壤 C、N 和 P 平衡特征的重要参数<sup>[38]</sup>。本文研究的 3 个林龄油松林 C:N:P 分别为 33:3:1、36:3:1、54:4:1,低于我国土壤 C:N:P 的平均值(60:5:1)和全球不同生态系统土壤 C:N:P 平均水平值(186:13:1)<sup>[39]</sup>,主要原因是本地区严重的水土流失,



土壤 C、N 损失导致较低的 C:N:P 比。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。随着林龄的增加,C:N 也呈现增加趋势,表明油松林的土壤的 C:N 受生长年限的影响。土壤 N:P 可以作为判断生境中 N 或 P 不足的指标,指示植物生长过程中土壤营养成分的供应情况。本研究中,3 个林龄油松林土壤 N:P 均小于全国平均值(5.2),另外从本研究中土壤磷含量接近全国平均值可知,该区域氮含量低于全国平均值,这与植物 N:P 判断一致。土壤 C:P 比可作为衡量微生物矿化土壤有机物质释放磷或从环境中吸收固持磷素潜力的一种指标。3 个林龄油松林人工林土壤 C:P 均低于我国平均值 61,这将有利于林地土壤微生物在矿化土壤有机质中释放较多的磷元素,补充土壤的有效磷库,为油松林生长可吸收利用的磷酸盐。3 个林龄油松人工林土壤 C:P 和 N:P 比均随着林龄的增加而升高,土壤中碳、氮含量的变化是土壤 C:P 和 N:P 变化的重要影响因素,而枯落物分解归还、林木生长吸收利用是碳、氮含量变化的主要原因。刘兴诏等<sup>[11]</sup>研究南亚热带森林演替过程中土壤氮、磷的相互关系发现,土壤 N:P 随着森林演替的进行呈现出明显增加的变化趋势。本文研究结果与之结果相一致,即随着油松林龄的增加,土壤中 N 含量显著增加,而土壤 P 含量显著减小,土壤 N:P 呈增加趋势。出现这种现象的原因一方面是由于土壤 N 的获取的途径是多样化<sup>[40-41]</sup>,另一方面是枯落物的归还土壤 C、N、P 差异。

### 3.4 油松林叶片-枯落物层-土壤 C、N、P 的相关关系

进行相关性分析可以揭示森林生态系统中不同组分碳氮磷化学计量比指标变量之间的协调关系,有助于对养分在三者之间的转换做出合理的解释。相关分析结果显示,油松林针叶、枯落物层、土壤的主要化学计量指标之间存在着紧密的相关关系,先前许多研究也证实了这一点<sup>[42]</sup>。叶片与枯落物中 N、P 含量有很好的相关关系,表明凋落物中养分来自于叶片。枯落物层与土壤中的 N 和 P 具有很好的相关关系,这是由于相当一部分枯落物中的有机质及 N 和 P 等元素会被释放到土壤中,是土壤养分库的主要来源之一。植物以光合作用固定有机质,并在完成自身生活史后以枯落物的形式将营养元素返回到土壤中,形成了森林生态系统植物针叶>枯落物层>土壤的养分格局。植物从土壤中吸收 N 和 P,在叶片凋落之前又通过养分再吸收过程对 N 和 P 进行了重吸收,因此枯落物层 C:N、C:P 和 N:P 比均高于植物的,植物又大于土壤的。植物、枯落物层和土壤之间 C:N:P 的差异意味着总生长效率在元素中的变化,有必要将植物-枯落物-土壤作为一个完整的系统加以研究,探讨 C、N、P 元素化学计量比在整个系统中的变化格局才能真正揭示 C、N、P 平衡的内在机制。

## 4 结论

(1) 子午岭地区不同林龄人工油松林叶片-枯落物层-土壤不同组分中,叶片、枯落物层和土壤的 C、N 和 P 含量随生长年限的变化规律和差异各不相同。随着油松林龄的增加,油松林叶片的 C 含量无明显变化,而针叶 N 含量呈现出先增大后减小趋势,针叶 P 含量表现出呈减小趋势的变化规律。另一方面,随着油松林龄的增加,枯落物层 C 含量呈现增加的趋势,N 和 P 含量表现出与 C 含量同样的变化规律;而土壤的 C、N 含量随着油松林龄增加而增加,而 P 含量变化呈减小的变化规律;在人工油松林叶片-枯落物-土壤不同组分中,叶片的 C、N 和 P 含量均显著大于枯落物层和土壤的 C、N 和 P 含量,叶片、枯落物层和土壤 3 个组分之间 C、N 含量表现为叶片>枯落物层>土壤,而 P 含量表现为叶片>土壤>枯落物层。

(2) 研究通常将 N:P 比为 16 作为评价植物生长受氮或者磷限制的临界值,本文中油松林针叶 N:P 比平均值为 9.13,表明油松林生长主要受氮的限制。

(3) 由于人工油松林叶片-枯落物-土壤的 C、N 和 P 含量的差异性,使得 C:N、C:P 和 N:P 比随油松林龄变化特征也各不相同。随着林龄的增加,油松林叶片 C:N 比呈现先减小后增大增加的趋势,而 C:P 和 N:P 比呈现增加的趋势;枯落物层的 C:N、N:P 和 C:P 比没有明显的变化;土壤的 C:N、C:P 和 N:P 比也呈现出增加的变化规律。

(4) 通过对人工油松林叶片-枯落物层-土壤 C、N、P 含量和 C:N、C:P、N:P 比进行相关性分析,发现叶片、枯落物层和土壤的 N:P 比两两均具有显著相关( $P < 0.05$ ),其中叶片与土壤 N:P 比呈显著正相关,叶片与

枯落物层、枯落物层与土壤 N:P 比呈显著负相关;叶片与枯落物层、土壤中的 C:P 比之间具有显著正相关 ( $P < 0.05$ );叶与枯落物层的 C:N 比之间具有显著负相关 ( $P < 0.05$ );叶与土壤的 C:N 比和枯落物层与土壤的 C:N、C:P 比之间相关性均不显著 ( $P > 0.05$ )。

#### 参考文献(References):

- [1] Sardans J, Rivas-Ubach A, Peñuelas J. The C:N:P 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.
- [2] 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.
- [3] 程滨,赵永军,张文广,安树青. 生态化学计量学研究进展. *生态学报*, 2010, 30(6): 1628–1637.
- [4] Elser J J, Dobberfuhl D R, Mackay N A, Schampel J H. Organism size, life history, and N:P Stoichiometry. *Bioscience*, 1996, 46(9): 674–684.
- [5] 曾冬萍,蒋利玲,曾从盛,王维奇,王纯. 生态化学计量学特征及其应用研究进展. *生态学报*, 2013, 33(18): 5484–5492.
- [6] 贺金生,韩兴国. 生态化学计量学:探索从个体到生态系统的统一化理论. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 2–6.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 任书杰,于贵瑞,陶波,王绍强. 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. *环境科学*, 2007, 28(12): 2665–2673.
- [10] 李玉霖,毛伟,赵学勇,张铜会. 北方典型荒漠及荒漠化地区植物叶片氮磷化学计量特征研究. *环境科学*, 2010, 31(8): 1726–1725.
- [11] 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.
- [12] Han W X, Fang J Y, Guo D L, Zhang Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377–385.
- [13] 刘兴诏,周国逸,张德强,刘世忠,褚国伟,闫俊华. 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. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 64–71.
- [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:N:P 化学计量学特征. *植物生态学报*, 2011, 35(6): 587–595.
- [15] 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.
- [16] Fu B J, Liu Y, Lü Y H, He C S, Zeng Y, Wu B F. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. *Ecological Complexity*, 2011, 8(4): 284–293.
- [17] Zheng F L. Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau. *Pedosphere*, 2006, 16(4): 420–427.
- [18] Jiao J Y, Zhang Z G, Bai W J, Jia Y F, Wang N. Assessing the ecological success of restoration by afforestation on the Chinese Loess Plateau. *Restoration Ecology*, 2012, 20(2): 240–249.
- [19] 吴刚,冯宗炜. 中国油松林群落特征及生物量的研究. *生态学报*, 1994, 14(4): 415–422.
- [20] 王凯博,上官周平. 黄土丘陵区燕沟流域典型植物叶片 C、N、P 化学计量特征季节变化. *生态学报*, 2011, 31(17): 4985–4991.
- [21] 杨佳佳,张向茹,马露莎,陈亚南,党廷辉,安韶山. 黄土高原刺槐林不同组分生态化学计量关系研究. *土壤学报*, 2014, 51(1): 133–142.
- [22] 刘冰燕,陈云明,曹扬. 渭北黄土区刺槐人工林氮、磷生态化学计量特征. *西北林学院学报*, 2016, 31(1): 1–6, 14–14.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京:中国农业出版社, 2000: 30–177.
- [24] 刘冰燕,陈云明,曹扬,吴旭. 秦岭南坡东段油松人工林生态系统碳、氮储量及其分配格局. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 643–652.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Marschner H. Mineral nutrition of higher plants. New York: Academic Press, 1995.
- [28] 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.
- [29] Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional Significance. *New Phytologist*, 2004, 164(2): 243–266.

- [30] Von Oheimb G, Power S A, Falk K, Friedrich U, Mohamed A, Krug A, Boschatzke, Hardtleb W. N:P ratio and the nature of nutrient limitation in *Calluna*-dominated heathlands. *Ecosystems*, 2010, 13(2): 317-327.
- [31] 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.
- [32] 王维奇,徐玲琳,曾从盛,仝川,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.
- [33] 潘复静,张伟,王克林,何寻阳,梁士楚,韦国富. 典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C:N:P 生态化学计量特征. *生态学报*, 2011, 31(2): 335-343.
- [34] 赵发珠,韩新辉,杨改河,佟小刚,康乐,杜约翰. 黄土丘陵区不同退耕还林地土壤有机碳、氮密度变化特征. *水土保持研究*, 2012, 19(4): 43-47, 51-52.
- [35] 李珊珊,耿增超,林姜,余雕,罗志伟. 秦岭火地塘林区土壤剖面碳氮垂直分布规律的研究. *西北林学院学报*, 2011, 26(4): 1-6.
- [36] 魏孝荣,邵明安. 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征. *生态学报*, 2007, 27(2): 603-612.
- [37] 曹娟,闫文德,项文化,谌小勇,雷丕锋. 湖南会同 3 个林龄杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征. *林业科学*, 2015, 51(7): 1-8.
- [38] Schlesinger W H, Reynolds J F, Cunningham G L, Huenneke L F, Jarrell W M, Virginia R A, Whitford W G. Biological feedbacks in global desertification. *Science*, 1990, 247(4946): 1043-1048.
- [39] 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.
- [40] Vitousek P. Nutrient cycling and nutrient use efficiency. *The American naturalist*, 1982, 119(4): 553-572.
- [41] Bielecki R L. Phosphate pools, Phosphate transport, and Phosphate availability. *Annual Review of Plant physiology*, 1973, 24: 225-252.
- [42] 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.