

DOI: 10.5846/stxb201605170951

赵一婷, 曹扬, 陈云明, 彭守璋. 黄土丘陵沟壑区森林生态系统生态化学计量特征. 生态学报, 2017, 37(16): 5451-5460.

Zhao Y P, Cao Y, Chen Y M, Peng S Z. Ecological stoichiometry in a forest ecosystem in the hilly-gully area of the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(16): 5451-5460.

黄土丘陵沟壑区森林生态系统生态化学计量特征

赵一婷¹, 曹 扬^{2,3}, 陈云明^{2,3,*}, 彭守璋^{2,3}

1 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100

2 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

3 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100

摘要:为了阐明黄土丘陵沟壑区森林生态系统植物与土壤之间的养分循环关系,明确叶片与乔木层整体生态化学计量特征差异性,采用野外调查与室内分析相结合的方法对研究区内主要森林生态系统不同乔木器官和土壤 C、N、P 含量进行了测定,分析了叶片、乔木层和土壤化学计量特征及之间的关系。结果表明:研究区内森林生态系统乔木层平均 C、N、P 含量均显著低于叶片水平,表层土壤(0—10 cm)C、N 含量以及 C:P、N:P 值均显著高于土壤(0—100 cm)平均值;叶片与乔木层及二者与土壤间的生态化学计量特征关系不同;乔木层平均 C 含量与降水呈显著正相关,乔木层平均 P 含量仅与海拔呈显著正相关,影响本地区植物生长状态的主要因素是降水。土壤平均 C、N 含量仅受土壤容重的影响,土壤平均 P 含量主要受土壤容重、温度和降水的影响。研究结果可以为黄土丘陵沟壑区人工林的建设和管理提供理论依据。

关键词:人工林;自然林;乔木层;土壤;化学计量

Ecological stoichiometry in a forest ecosystem in the hilly-gully area of the Loess Plateau

ZHAO Yiping¹, CAO Yang^{2,3}, CHEN Yunming^{2,3,*}, PENG Shouzhang^{2,3}

1 College of Forestry, Northwest Agriculture of Forestry University, Yangling 712100, China

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest Agriculture of Forestry University, Yangling 712100, China

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

Abstract: To understand nutrient cycling and relationships between the soil and plants in forest ecosystems in the hilly-gully area of the Loess Plateau, combined field investigations and laboratory analyses were performed to study the ecological stoichiometry characteristics of trees and soil, and their relationships. The results showed that the carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) contents of leaves were significantly higher than that of trees, and the contents of the surface soil (0—10 cm) were higher than that in the soil layers (0—100 cm). The relationship between the trees and soil, and between leaf and soil were inconsistent. In the tree layer, C was positively correlated with precipitation, and P was positively correlated with elevation. Therefore, the main factor affecting plant growth was precipitation. In the soil, C, N only affected by soil bulk density, and P has correlations with soil bulk density, temperature and precipitation. These results provide a theoretical basis for the development and management of plantations in the hilly-gully area of the Loess Plateau.

Key Words: plantation; natural forest; tree; soil; stoichiometry

基金项目:国家自然科学基金项目(41371506, 41201088, 41601058);中国科学院西部之光项目(K301021304);高校基本科研业务费(2014YB0560);教育部博士点基金项目(20120204120014)

收稿日期:2016-05-17; **网络出版日期:**2017-03-27

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

碳(C)是构成植物体的最主要元素^[1],氮(N)和磷(P)是陆地生态系统的主要限制性元素,在植物生长的各生理代谢活动中发挥着十分重要的作用,相互独立而又相互影响^[2]。生态化学计量学是一门统一了不同生物学科层次^[3]、结合了生物学与化学、物理学等多种学科理论,用来研究生态系统间多重元素以及能量平衡的一门学科^[4],它能为生态系统的养分循环与限制提供新的研究思路 and 手段^[5]。森林是陆地上组成最复杂、结构最完整的生态系统,其中交织着相当复杂的生态学过程,而植物和土壤是森林生态系统的两个主要组成部分。土壤是植物赖以生存的基础,为植物提供了养分与水分,而植物又通过枯枝落叶将养分返还到土壤中,两者紧密相连。因此,基于生态化学计量学原理和方法,研究森林生态系统中植物与土壤 C、N、P 生态化学计量特征对揭示养分限制以及元素循环和平衡机制具有重要意义。

目前,国内外关于森林生态系统植物和土壤生态化学计量特征的研究已经覆盖了多个领域和层次。例如,Reich 和 Oleksyn 在全球尺度上分析了森林生态系统植物叶片与土壤的生态化学计量特征^[6];Han 等在国内首次以较大尺度分析了我国 127 个样点 753 种陆生植物叶片 N、P 含量以及 N:P 比值特征与气候因子关系^[2];王晶苑等通过对中国 4 种主要森林类型的叶片和凋落物进行研究,阐明了不同森林类型的生态化学计量特征的差异性^[7];任书杰等分析中国东部南北样带 654 种植物叶片 N 和 P 含量,结果表明叶片 N、P 含量随着纬度的降低和年均温增加而显著降低^[8];吴统贵等运用定量分析方法研究了珠江三角洲 3 种典型森林类型乔木叶片的生态化学计量特征^[9]。由此可见,目前森林生态系统生态化学计量学的研究内容基本是以植物叶片为研究对象,有关于乔木层整体的研究较少^[10],因为叶片只是乔木的一个营养器官,并不能全面代表乔木层整体养分含量情况,叶片与乔木层整体的生态化学计量特征规律的差异性有待进一步探究。关于森林生态系统土壤化学计量学的研究,庞圣江等研究了广西雅长林区 3 种森林类型及演替不同阶段 0—20 cm 表层土壤养分含量及其比例的影响状况^[11];俞月凤等在喀斯特地区从洼地研究了不同森林类型植物和 0—20 cm 土壤生态化学计量学特征及其之间的关系^[12],结果表明不同森林类型植物和土壤的 C、N、P 含量存在显著差异且土壤 C、N、P 的供应量对植物叶片 C、N、P 含量影响不大。这反映出国内外相关研究主要集中在 0—20 cm 的表层土壤,表层土壤受环境的影响更加直接和显著,研究表层土壤生态化学计量特征具有重要意义,但黄土丘陵沟壑区土层深厚,各树种的主要根系分布在 0—100 cm 范围内^[13],仅研究 0—20 cm 土壤生态化学计量特征不能反映这一地区森林生态系统土壤化学计量学特征,目前缺乏对深层土壤(0—100 cm)生态化学计量特征的研究。

加快植被恢复、改善生态环境是黄土丘陵沟壑区的重要目标。利用生态化学计量学原理和方法研究不同森林生态系统植物与土壤的化学计量特征,分析环境及生物因子对其影响,深刻了解森林生态系统植物与土壤间化学计量特征关系,有助于揭示 C、N、P 元素之间的交互影响作用以及植物与土壤间的养分循环关系。本文对黄土丘陵沟壑区不同森林生态系统的叶片、乔木层和土壤 C、N、P 生态化学计量特征进行研究,旨在了解本地区森林生态系统植物与土壤之间的养分循环关系以及明确叶片与乔木层整体的生态化学计量特征是否有一致性,以期对本地区人工林建设和管理提供理论依据。

1 研究地区及研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市境内(35°27'—38°2'N, 108°50'—110°27'E),属于典型的黄土丘陵沟壑区,海拔 500—1600 m,地势为西北高,东南低,土壤类型主要为黄绵土,植被类型主要包括刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、小叶杨(*Populus simonii*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、辽东栎(*Quercus wutaishanica*)、麻栎(*Q. acutissima*)、白桦(*Betula platyphylla*)、茶条槭(*Acer ginnala*)等。研究区属于温带半干旱大陆性气候,年均气温 8—9℃,年均降雨量 550—650 mm,且多集中在 7、8 月,温度和降雨量从东南至西北呈现递减的趋势,具有明显的地域性差异。春、冬两季受极地干冷气团的影响,寒冷干燥且多风沙;夏、秋两季受西太平洋副热带高压和印度洋低压的影响,炎热且多暴雨。

本研究根据 2009 年陕西省森林清查资料中研究区内森林类型、面积、蓄积构成及其地域分布权重等布设了 23 个代表主要森林类型的研究样点(图 1),包括刺槐、侧柏和油松 3 种人工林,白桦、辽东栎和麻栎 3 种自然林(表 1)。每个样点选取 3 个重复样地,每个样地设置一个 20 m×30 m 的样方,并对样点概况进行调查(胸径、树高、海拔、经纬度等),从陕西省气象局得到样点所在县(区)的温度、降雨等信息。

1.2 样品采集及处理

于 2012 年 8 月对所选定样方内乔木进行每木检尺,记录胸径和树高,并统计株数,按不同径级选标准木 3 株,采集其各器官样品(叶、枝、干、根,立木取样),同器官样品混合后取 300 g 左右用于 C、N、P 含量的测定,叶片在冠层分东、西、南、北四个方位采摘,枝在树冠南向分上、中、下 3 个冠层随机选取,干在胸径处利用生长锥取适量的茎干(包括木质部和韧皮部),根在 50 cm 深度处采集粗根。在每个样方内按对角线法取 3 个 100 cm 深的土芯,分 5 层(0—10、10—20、20—30、30—50、50—100 cm)混合取样,用于各层土壤 C、N、P 含量的测定;同时挖取 1 个 100 cm 深的土壤剖面,用环刀分 5 层(0—10、10—20、20—30、30—50、50—100 cm)采集土壤用于相应土层容重的测定(环刀法),每层两个重复。以上采集的样品带回实验室后,植物样品进行烘干、粉碎,土壤样品风干磨碎后分别采用外加热-重铬酸钾容量法、凯氏定氮法和硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法(GB 7852-87)测定其 C、N、P 含量。

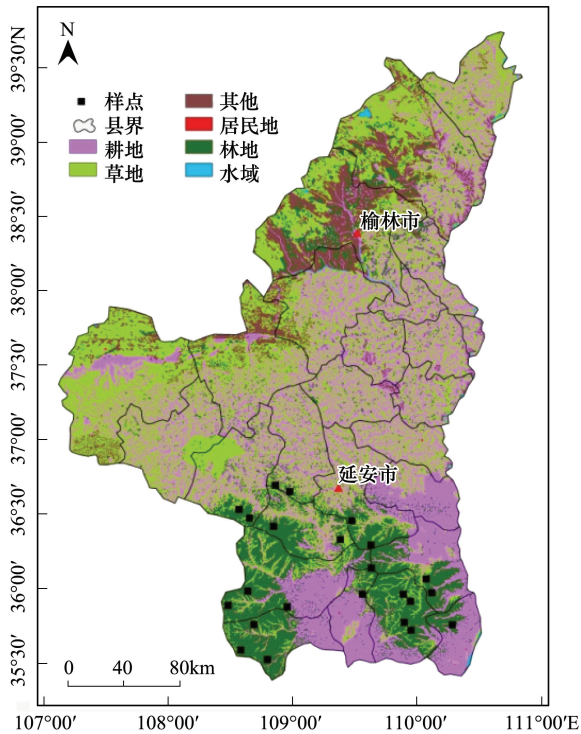


图 1 森林生态系统采样点分布图
Fig.1 Distribution of sampling sites

表 1 研究区森林生态系统树种概况
Table 1 Tree species of forest ecosystem in the study area

不同起源 Origins	树种概况 Tree species
人工林 Plantation	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> 、侧柏 <i>Platycladus orientalis</i> 、小叶杨 <i>Populus simonii</i> 、油松 <i>Pinus tabulaeformis</i> 等
自然林 Natural forest	辽东栎 <i>Quercus wutaishanica</i> 、白桦 <i>Betula platyphylla</i> 、麻栎 <i>Q. acutissima</i> 、茶条槭 <i>Acer ginnala</i> 等

1.3 数据处理

各样方内乔木层平均 C、N、P 含量根据各器官相应 C、N、P 含量进行质量加权平均。计算公式如下:

$$W = \frac{\sum_{j=1}^4 C_j \times B_j}{\sum_{j=1}^4 B_j}$$

式中,W 为乔木层平均 C、N、P 含量(mg/g);C、B 为 j 器官(j=1-4,分别代表叶、枝、干、根)对应的 C、N、P 含量(mg/g)及生物量密度(g/m²)。生物量密度为单位样方面积内某一器官的生物量总和,先用适合于本地区各树种的异速生长方程求得样方中单木该器官生物量(表 2)^[10],然后累加得到整个样方的该器官生物量,再除以样方面积即可得到乔木层该器官生物量密度。

土壤(0—100 cm)平均 C、N、P 含量则采用下式计算:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^5 C_i \times B_i \times D_i}{\sum_{i=1}^5 B_i \times D_i}$$

式中, T 为样方土壤(0—100 cm)平均 C、N、P 含量(mg/g), C 、 B 和 D 分别为第 i 层土壤 C、N、P 含量(mg/g)、容重(g/cm³)和深度(cm)。 $i=1—5$, 分别代表 0—10、10—20、20—30、30—50、50—100 cm 土层。

同一样点 3 个重复样地的均值作为该样点乔木层与土壤的平均 C、N、P 含量。

表 2 各树种的异速生长方程^[10]

Table 2 Allometric relationships of different species

树种 Species	异速生长方程 Allometric relationships
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	$W_S = 0.2738(D^2H)^{0.6912}$; $W_B = 0.0061(D^2H)^{0.9455}$; $W_L = 0.0042(D^2H)^{0.8986}$; $W_T = W_S + W_B + W_L$
小叶杨 <i>Populus simonii</i>	$W_S = 0.07363(D^2H)^{0.7745}$; $W_B = 0.1136 + 0.00603(D^2H)$; $W_L = -1.5367 + 0.4316\ln(D^2H)$; $W_T = W_S + W_B + W_L$
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	$W_S = 0.009741(D^2H)^{1.04086}$; $W_B = 0.01690D^{2.57733}$; $W_L = 0.00599D^{2.57495}$; $W_P = 0.010723(D^2H)^{0.80398}$; $W_T = W_S + W_B + W_L + W_P$
辽东栎 <i>Quercus wutaishanica</i>	$W_S = 0.04930(D^2H)^{0.8514}$; $W_B = 0.004917D^{3.09503}$; $W_L = 0.018504D^{2.1740}$; $W_P = 0.03355(D^2H)^{0.7263}$; $W_T = W_S + W_B + W_L + W_P$
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	$W_S = 0.02275(D^2H)^{0.91035}$; $W_B = 0.002645D^{3.35934}$; $W_L = 0.003813D^{2.3901}$; $W_P = 0.01388(D^2H)^{0.8102}$; $W_T = W_S + W_B + W_L + W_P$
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	$W_S = 0.02583(D^2H)^{0.6841}$; $W_B = 0.00464D^{3.2181}$; $W_L = 0.02340D^{1.9277}$; $W_P = 0.00763(D^2H)^{0.0447}$; $W_T = W_S + W_B + W_L + W_P$

D : 为胸径(cm); H : 树高(m); W_L 、 W_B 、 W_S 、 W_P 、 W_T (kg) 分别为叶、枝、干、根生物量以及各器官生物量之和

1.4 数据分析

对不同起源、同一起源不同树种间的森林生态系统生态化学计量特征的差异性检验采用单因素方差分析(one-way ANOVA), 对于土壤与叶片、乔木层之间生态化学计量特征的相关性、各层各元素之间的相关性以及各影响因素与土壤和乔木层生态化学计量特征间的相关性则进行 Pearson 相关性分析。土壤及乔木层 C:N、C:P 以及 N:P 值均以质量比表示^[14], 图、表中数据为平均值±标准误, 文中显著性水平设置为 $P=0.05$ 。以上数据均在 SPSS 17.0 中进行分析, Sigma Plot 10.0 中进行绘图。

2 结果与分析

2.1 乔木层 C、N、P 含量及化学计量比

陕北黄土丘陵沟壑区森林生态系统乔木层平均 C、N、P 含量分别为 441.22、4.41、0.40 mg/g, 平均 C:N、C:P、N:P 值分别为 115.64、1145.74、10.61, 而叶片中 C、N、P 含量分别为 463.20、14.97、1.14 mg/g, C:N、C:P、N:P 值分别为 36.69、438.78、13.30(表 3)。由此可知, 叶片与乔木层整体各元素含量均差异较大, 表现为乔木层平均含量显著低于叶片水平($P<0.01$)。人工林、自然林间乔木层平均 C:N 值(119.19、113.36)、C:P 值(1129.64、1156.10)差异均不显著, 平均 C、P 含量人工林(447.10、0.41 mg/g)>自然林(437.44、0.40 mg/g), 平均 N 含量自然林(4.68 mg/g)>人工林(3.99 mg/g)(差异均不显著), 只有平均 N:P 值(9.77、11.15)差异显著($P<0.05$)(图 2)。人工林中, 乔木层平均 C 含量大小依次为侧柏(466.83 mg/g)、刺槐(457.13 mg/g)、油松(427.05 mg/g), 前两者显著高于后者($P<0.05$), 平均 N 含量刺槐、油松(4.13、3.74 mg/g)显著高于侧柏(2.48 mg/g)($P<0.05$), 平均 P 含量刺槐、油松(0.41、0.41 mg/g)显著高于侧柏(0.29 mg/g)($P<0.01$), 平均 C:N、C:P 值侧柏(187.98、1632.37)显著高于油松(120.08、1033.13)、刺槐(113.91、1137.02)($P<0.01$); 自然林中, 平均 C 含量麻栎(480.75 mg/g)显著高于辽东栎(436.50 mg/g)($P<0.05$), 平均 N 含量白桦(12.44 mg/g)显著高于辽东栎(4.18 mg/g)、麻栎(3.70 mg/g)($P<0.01$), 平均 C:N 值辽东栎、麻栎(129.93、119.99)显著高于白桦(36.26)($P<0.05$), 平均 P 含量为白桦(0.61 mg/g)>辽东栎(0.40 mg/g)>麻栎(0.31 mg/g), 平均 C:P 值

为麻栎(1588.40)>辽东栎(1149.37)>白桦(734.06),平均 N:P 值为白桦(20.25)>麻栎(12.16)>辽东栎(10.30),各树种间均存在显著差异(P 含量 $P<0.01$, C:P、N:P 值 $P<0.05$)(表 4)。

表 3 乔木层 C、N、P 含量及化学计量比

Table 3 Tree C, N, P contents and their ratios

	C/(mg/g)	N/(mg/g)	P/(mg/g)	C:N	C:P	N:P
乔木层 Tree	441.22±5.49B	4.41±0.24B	0.40±0.01B	115.64±5.61A	1145.74±37.53A	10.61±0.32B
叶片 Leaf	463.20±5.60A	14.97±0.51A	1.14±0.34A	36.69±2.91B	438.78±16.75B	13.30±0.36A

不同字母代表叶片与乔木层的差异性

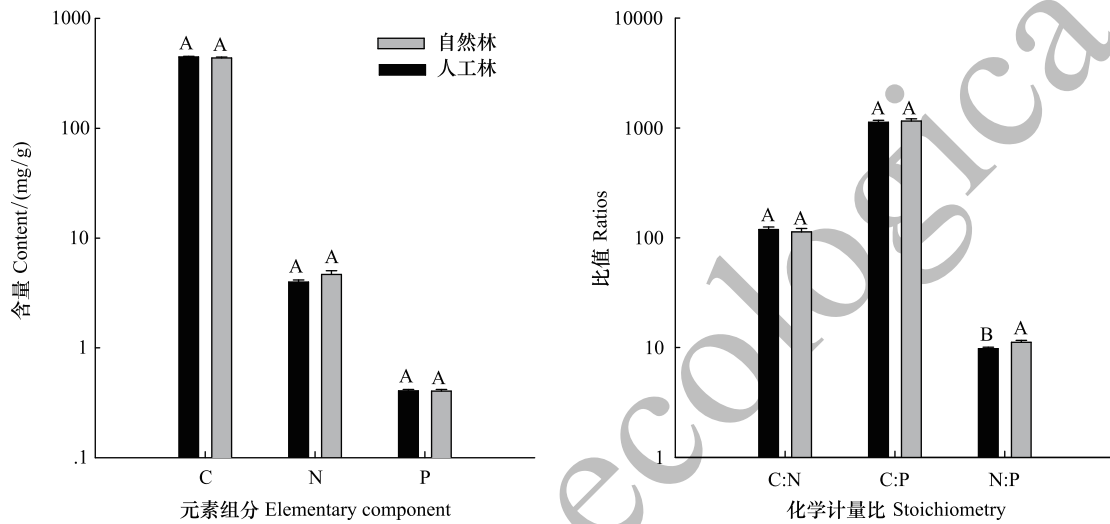


图 2 不同起源森林乔木层 C、N、P 含量及化学计量比

Fig.2 Tree C, N, P contents and their ratios in different forest origins

不同字母代表不同起源森林间的差异性

表 4 不同树种森林乔木层 C、N、P 含量及化学计量比

Table 4 Tree C, N, P contents and their ratios in different species

不同起源 Origins	树种 Species	C/ (mg/g)	N/ (mg/g)	P/ (mg/g)	C:N	C:P	N:P
人工林 Plantation	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	457.13±10.97A	4.13±0.21A	0.41±0.02A	113.91±8.43B	1137.02±66.52B	10.16±0.51A
	侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	466.83±0.14A	2.48±0.04B	0.29±0.00B	187.98±3.37A	1632.37±21.42A	8.69±0.04A
	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	427.05±1.61B	3.74±0.36A	0.41±0.01A	120.08±12.09B	1033.13±24.64B	8.95±0.70A
自然林 Natural forest	白桦 <i>Betula platyphylla</i>	450.97±0.16AB	12.44±0.05A	0.61±0.01A	36.26±0.17B	734.06±10.49B	20.25±0.20A
	辽东栎 <i>Quercus wutaishanica</i>	436.50±9.01B	4.18±0.24B	0.40±0.01B	119.99±10.37A	1149.37±56.28C	10.30±0.32C
	麻栎 <i>Q. acutissima</i>	480.75±20.58A	3.70±0.08B	0.31±0.01C	129.93±5.28A	1588.40±114.87A	12.16±0.46B

不同字母代表人工林、自然林中各树种间的差异性

2.2 土壤 C、N、P 含量及化学计量比

陕北黄土丘陵沟壑区森林生态系统土壤(0—100 cm)平均 C、N、P 含量分别为 6.78、0.63、0.53 mg/g,平均 C:N、C:P、N:P 值分别为 10.65、13.24、1.22。其中,表层土壤(0—10 cm)C、N、P 含量分别为 23.21、1.91、0.57

mg/g, C:N、C:P、N:P 值分别为 12.04、41.08、3.38(表 5), 表层土壤 C、N、P 含量及其比值均高于土壤平均值(C、N 含量、C:P、N:P 值差异显著, $P<0.01$), 表现出养分表层富集的特征。人工林、自然林间土壤平均 C:P 值(11.19、14.55)差异显著($P<0.05$), 而平均 C:N 值(9.83、11.18)、N:P 值(1.11、1.30)均差异不显著, 与乔木层不同, 土壤平均 C、N 含量为自然林(7.28、0.65 mg/g)>人工林(6.00、0.60 mg/g), 平均 P 含量为人工林(0.54 mg/g)>自然林(0.52 mg/g), 其中 C 含量差异显著($P<0.05$), N、P 含量差异不显著(图 3)。人工林中, 土壤平均 C 含量表现为油松(6.94 mg/g)>刺槐(5.36 mg/g)>侧柏(2.53 mg/g), 油松与后两者间存在显著差异($P<0.05$), 平均 P 含量刺槐、侧柏(0.55 mg/g、0.55 mg/g)显著高于油松(0.50 mg/g) ($P<0.01$), 而平均 N 含量、C:N、C:P 值均为油松(0.64 mg/g、11.00、14.00)、刺槐(0.56 mg/g、9.48、9.64)显著高于侧柏(0.39 mg/g、6.46、4.55) ($P<0.05$); 自然林中, 平均 C:N 值辽东栎(12.07)显著高于白桦(5.89) ($P<0.05$), 平均 N:P 值辽东栎、麻栎(1.31、1.59)显著高于白桦(0.74) ($P<0.05$), 平均 C、N 含量、C:P 值均是辽东栎(7.87、0.67 mg/g、15.62)、麻栎(7.77、0.74 mg/g、16.76)显著高于白桦(2.36、0.40 mg/g、4.36) ($P<0.01$) (表 6)。

表 5 土壤 C、N、P 含量及化学计量比
Table 5 Soil C, N, P contents and their ratios

土壤 Soil/cm	C/ (mg/g)	N/ (mg/g)	P/ (mg/g)	C:N	C:P	N:P
0—10	23.21±1.05A	1.91±0.08A	0.57±0.01A	12.04±0.25A	41.08±1.78A	3.38±0.13A
10—20	12.03±0.54	1.10±0.04	0.55±0.01	10.79±0.21	22.07±0.99	2.01±0.07
20—30	8.12±0.49	0.77±0.04	0.54±0.01	10.19±0.26	15.30±0.89	1.45±0.07
30—50	5.01±0.28	0.51±0.02	0.52±0.01	9.79±0.53	9.86±0.65	1.00±0.05
50—100	3.75±0.27	0.37±0.01	0.52±0.01	10.01±0.76	7.81±0.76	0.75±0.04
总体 Total	6.78±0.30B	0.63±0.02B	0.53±0.01A	10.65±0.42A	13.24±0.71B	1.22±0.05B

不同字母代表表层土壤与总体的差异性

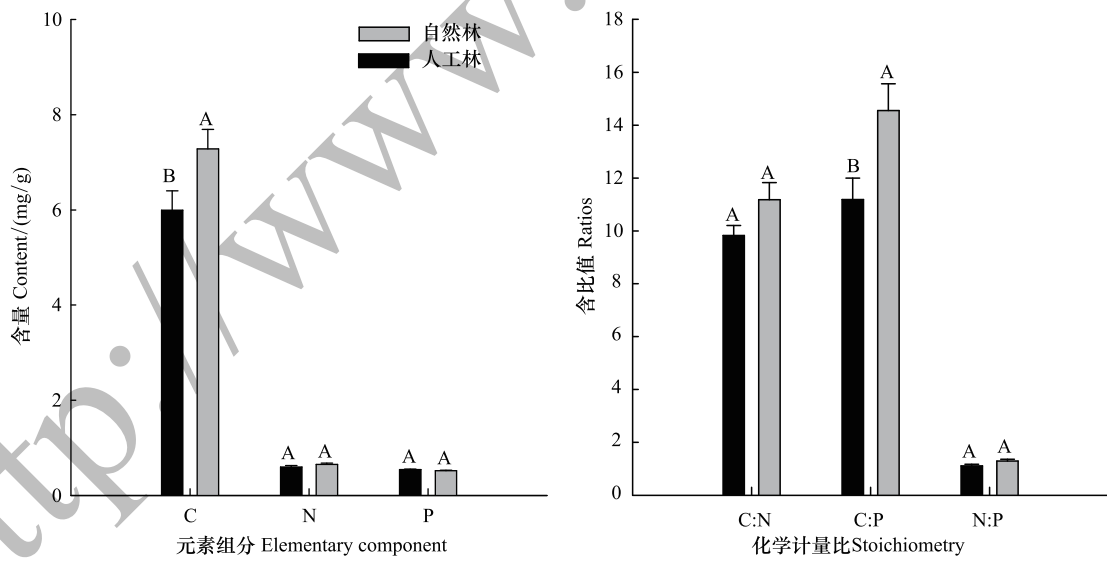


图 3 不同起源森林土壤 C、N、P 含量及化学计量比
Fig.3 Soil C, N, P contents and their ratios in different forest origins

2.3 乔木层和土壤 C、N、P 生态化学计量学特征及其之间关系

对乔木层及土壤各元素平均含量及其化学计量比进行相关性分析表明, 乔木层中 P 含量与 N:P 值、C 含量与 C:N 及 C:P 值、N 含量与 P 含量及 N:P 值、C:N 值与 C:P 值均呈显著正相关, C 含量与 P 含量、C:P 值与 N:P 值、N 含量与 C:N 及 C:P 值、P 含量与 C:N 及 C:P 值、C:N 值与 N:P 值均呈显著负相关(表 7); 土壤中 C 含量与 N 含量、C 含量与 C:N 和 C:P 及 N:P 值、N 含量与 C:P 及 N:P 值、C:P 值与 C:N 及 N:P 值均

呈显著的正相关, P 含量与 C:P 及 N:P 值呈显著的负相关(表 8)。乔木层 C 含量与土壤 C:N 值、乔木层 C:P 值与土壤 P 含量及 N:P 值呈显著负相关, 乔木层与土壤间 N、P 含量相关性均不显著(表 9), 说明土壤 N、P 的供应量对乔木层 N、P 含量影响不显著^[12]。叶片 N 与土壤 N 含量、叶片 P 与土壤 C 及 N 含量呈显著正相关, 其余两层间相关性均不显著(表 10)。结果表明, 叶片、乔木层与土壤间的关系不同。

表 6 不同树种森林土壤 C、N、P 含量及化学计量比

Table 6 Soil C, N, P contents and their ratios in different species

不同起源 Origions	树种 Species	C/ (mg/g)	N/ (mg/g)	P/ (mg/g)	C:N	C:P	N:P
人工林 Plantation	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	5.36±0.69B	0.56±0.06A	0.55±0.01A	9.48±0.62A	9.64±1.15A	1.00±0.10A
	侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	2.53±0.38B	0.39±0.04B	0.55±0.01A	6.46±0.41B	4.55±0.57B	0.70±0.05A
	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	6.94±0.45A	0.64±0.05A	0.50±0.02B	11.00±0.26A	14.00±1.11A	1.28±0.11A
自然林 Natrul forest	白桦 <i>Betula platyphylla</i>	2.36±0.37B	0.40±0.03B	0.54±0.01A	5.89±0.64B	4.36±0.58B	0.74±0.05A
	辽东栎 <i>Quercus wutaishanica</i>	7.87±0.44A	0.67±0.03A	0.52±0.02A	12.07±0.82A	15.62±1.17A	1.31±0.08B
	麻栎 <i>Q. acutissima</i>	7.77±0.71A	0.74±0.07A	0.47±0.01A	10.61±0.27AB	16.76±1.81A	1.59±0.19B

不同字母代表人工林、自然林中各树种间的差异性

表 7 乔木层 C、N、P 含量及化学计量比之间的相关性

Table 7 Relationships of tree C, N, P contents and their ratios

	C	N	P	C:N	C:P
N	-0.09	1			
P	-0.28 *	0.81 **	1		
C:N	0.42 **	-0.75 **	-0.80 **	1	
C:P	0.66 **	-0.59 **	-0.88 **	0.83 **	1
N:P	0.05	0.90 **	0.51 **	-0.67 **	-0.30 *

* $P<0.05$; ** $P<0.01$

表 8 土壤 C、N、P 含量及化学计量比之间的相关性

Table 8 Relationships of soil C, N, P contents and their ratios

	C	N	P	C:N	C:P
N	0.78 *	1			
P	-0.04	0.02	1		
C:N	0.68 **	0.11	-0.05	1	
C:P	0.86 **	0.67 **	-0.50 **	0.57 **	1
N:P	0.69 **	0.81 **	-0.55 **	0.14	0.88 **

2.4 乔木层与土壤的 C、N、P 含量及化学计量比与各影响因子的关系

对乔木层与土壤各元素平均含量与各影响因子进行相关性分析表明, 乔木层 C 含量与降水、P 含量与海拔呈显著正相关, C 含量与平均胸径呈显著负相关, C:N 值与海拔、C:P 值与海拔呈显著负相关, C:N 值与树高呈显著正相关(表 11)。土壤 C、N 含量以及 C:P、N:P 值与土壤容重, P 含量与土壤容重、温度、降水, C:N 值与降水等均呈显著负相关(表 12), 说明土壤 C、N 含量仅受土壤容重的影响, P 含量主要受土壤容重、温度和降水的影响。

表 9 乔木层和土壤 C、N、P 含量及化学计量比之间的相关性

Table 9 Relationships between tree and soil C, N, P contents and their ratios

土壤 Soil	乔木 Tree					
	C	N	P	C:N	C:P	N:P
C	-0.22	-0.10	0.03	-0.23	-0.17	-0.05
N	-0.06	-0.05	0.12	-0.22	-0.16	-0.03
P	-0.23	-0.03	0.18	0.02	-0.25 *	-0.22
C:N	-0.32 **	-0.16	-0.12	-0.09	-0.08	-0.09
C:P	-0.08	-0.06	-0.03	-0.21	-0.05	0.07
N:P	0.07	-0.01	0.01	-0.20	-0.01	0.11

表 10 叶片和土壤 C、N、P 含量及化学计量比之间的相关性

Table 10 Relationships between leaf and soil C, N, P contents and their ratios

土壤 Soil	叶片 Leaf					
	C	N	P	C:N	C:P	N:P
C	-0.08	0.19	0.26 *	-0.15	-0.16	0.02
N	0.05	0.24 *	0.28 *	-0.20	-0.13	0.08
P	-0.13	-0.01	0.09	0.03	-0.17	-0.11
C:N	-0.20	0.00	0.03	0.00	-0.07	-0.01
C:P	-0.01	0.18	0.20	-0.14	-0.09	0.06
N:P	0.10	0.21	0.21	-0.18	-0.04	0.11

表 11 乔木层 C、N、P 含量及化学计量比与各因子之间的相关性

Table 11 Relationships between factors and tree C, N, P contents and their ratios

乔木 Tree	温度 Temperature	降水 Precipitation	海拔 Elevation	平均胸径 DBH	平均树高 Tree height
C	0.23	0.44 **	-0.04	-0.40 **	-0.11
N	-0.01	-0.02	0.22	0.12	0.00
P	-0.05	0.08	0.26 *	0.03	-0.17
C:N	0.23	0.15	-0.38 **	-0.10	0.30 *
C:P	0.12	0.14	-0.27 *	-0.14	0.21
N:P	-0.06	-0.09	0.21	0.13	0.03

表 12 土壤 C、N、P 含量及化学计量比与各因子之间的相关性

Table 12 Relationships between factors and soil C, N, P contents and their ratios

土壤 Soil	容重 Bulk density	海拔 Elevation	温度 Temperature	降水 Precipitation
C	-0.62 **	0.01	-0.03	-0.04
N	-0.63 **	-0.00	-0.08	0.02
P	-0.22 **	-0.07	-0.14 **	-0.30 **
C:N	-0.04	0.00	0.00	-0.18 **
C:P	-0.60 **	0.03	0.00	0.02
N:P	-0.60 **	0.01	-0.04	0.08

3 分析与讨论

3.1 森林生态系统 C、N、P 化学计量特征

本研究中,黄土丘陵沟壑区森林生态系统叶片 C 含量为 463.20 mg/g(表 3),与全球 492 种陆生植物叶片的平均值(464.00 mg/g)相近^[15];N 含量为 14.97 mg/g(表 3),低于全球和全国平均值(20.60 mg/g 和 20.24

mg/g)^[15,2];P 含量为 1.14 mg/g(表 3),低于全球平均水平(1.99 mg/g)^[15],且在全国(0.05—10.27 mg/g)^[2]也处于较低水平,表明黄土丘陵沟壑区森林生态系统叶片 N、P 含量较缺乏。0—10 cm 土壤 C、N、P 含量分别为 23.21、1.91、0.57 mg/g(表 5),低于桂西北喀斯特地区土壤(0—10 cm)C、N、P 平均含量(92.00、6.35、1.50 mg/g)^[16],说明黄土丘陵沟壑区土壤养分含量较匮乏;高于内蒙古温带草原区 0—10 cm 土层 N、P 含量(1.70、0.10 mg/g),C 含量则较低(25.30 mg/g)^[17],这可能和两个研究区植被覆盖类型不同有关;低于广西森林土壤的 N 含量(2.47 mg/g),但是与其 P 含量(0.51 mg/g)接近^[18],这可能与北方地区森林土壤相对缺 N,南方则相对缺 P 有关^[19];接近于福建闽江河口湿地 0—15 cm 土壤 C、N、P 含量(18.80、2.10、0.80 mg/g)^[20];高于甘肃省沙漠地区 0—20 cm 土壤 C、N、P 含量(3.00、0.30、0.30 mg/g)^[21],这可能是本研究区位于陕北黄土丘陵沟壑区,土壤养分含量较沙漠地区高的缘故。

C 是结构性元素,在植物中普遍含量高且变异小,影响 C:N、C:P 值的主要因素是 N、P 含量的变化^[6],本研究中叶片 C:N、C:P 值为 36.69、438.78(表 3),高于全球平均水平(22.50、232)^[15],进一步说明黄土丘陵沟壑区叶片 N、P 含量较低。同时,较高的 C:N、C:P 值代表植物的 N、P 利用率较高^[22],有研究证明植物在缺乏营养元素供应的情况下具有较高的养分利用率,这是植物适应养分贫瘠状态的一种生存策略^[23],这符合研究区土壤养分含量较匮乏的结论。土壤平均 C:N 值为 10.65(表 5),处于我国温带土壤 C:N 值的平均值(10.00—12.00)范围内,但低于森林生态系统(13.00)的均值^[24],说明黄土丘陵沟壑区土壤养分处于低水平平衡状态。

本研究中,黄土丘陵沟壑区森林生态系统乔木层平均 C、P 含量均为人工林>自然林,N 含量为自然林>人工林(图 2),其原因可能是人工林主要以乔木层为主,其养分集中在乔木层,而自然林的林下灌草层较复杂,养分分布格局不同^[12]。土壤 C:N 值与其有机质分解速度呈反比关系^[24],人工林中土壤平均 C:N 值为油松和刺槐显著高于侧柏,自然林中则是辽东栎显著高于白桦(表 6),说明研究区人工林中侧柏、自然林中白桦有着更高的有机质分解速率。土壤 N:P 值是养分限制类型的一个有效预测指标^[24],人工林土壤平均 N:P 值在不同树种间差异不显著,而自然林中白桦平均 N:P 值与辽东栎和麻栎差异显著(表 6),说明研究区内人工林的养分限制类型是一致的,而白桦与辽东栎、麻栎的养分限制类型不同。

3.2 乔木层和土壤 C、N、P 化学计量特征关系及其与各影响因子的关系

本研究中,土壤平均 N 含量与叶片 N 呈显著正相关(表 10),Garnier 研究表明,如果在植物体内元素浓度与土壤提供此养分的能力呈正相关,就可以认为植物生长受这种元素限制^[25],因此,黄土丘陵沟壑区植物主要是受 N 限制,这与北方地区森林土壤相对缺 N 的结论是一致的。

本研究中,乔木层平均 C 含量与温度相关性不显著,与降雨量呈显著的正相关(表 11),这与郑淑霞等对黄土高原地区的研究一致^[26]。C 是构成植物体中干物质的主要元素,植物 C 含量是 C 贮量的一种度量,反映了植物在光合作用中固定 C 的能力,是物质组分的一个综合指标,因此,C 含量可以在一定程度上反映植物的生长状态^[27],可以说明在黄土丘陵沟壑区降雨是影响植物生长状态的一个主要因素;而本研究中 N:P 值与降雨、温度等因子的相关性不显著(表 11),这与 Kerkhoff 等在全球尺度上研究得到的 N:P 值随着纬度升高、温度和降雨量的减少而明显增加这一结论不一致^[28],这可能是因为本研究的研究区与全球尺度相比,所处地理纬度较窄,气候因子的变化范围不是很大。土壤平均 C、N、P 含量与土壤容重均呈显著负相关(表 12),这一研究结果与李红林等对塔里木盆地以及王维奇等对闽江河口芦苇湿地的 C、N、P 含量及其化学计量比与环境因子的关系的研究结果一致^[29-30],这是因为土壤容重是表示土壤紧实度的一项敏感指标,植物根系的生长和凋落物的分解都和它有密切的关系,同时,土壤容重也会影响元素在土壤生态过程中的运输和积累,土壤容重小,土壤较疏松,则有利于拦渗蓄水^[31]以及元素累积,土壤 C、N、P 含量较高;土壤容重大,土壤紧实,则不利于植物根系的生长,同时会减少凋落物的分解,进一步会影响植物与土壤间的元素交流,土壤 C、N、P 含量较低。

4 结论

(1) 黄土丘陵沟壑区乔木层、土壤养分含量较低,土壤较贫瘠,且本区域植物受 N 元素限制。

(2) 叶片与乔木层整体各元素含量均表现为乔木层整体显著低于叶片水平($P < 0.01$),叶片与乔木层的生态化学计量特征及二者与土壤间的关系不同。

(3) 对乔木层整体来说,C 含量与降水呈显著正相关、与平均胸径呈显著负相关,P 含量与海拔关系呈显著正相关,N 含量与各影响因子均不存在显著性关系;降雨是黄土丘陵沟壑区影响植物生长状态的一个主要因素。

(4) 对土壤(0—100 cm)来说,土壤容重对其 C、N、P 含量均影响较大,温度和降水对其 P 含量影响也较大。

参考文献(References):

- [1] 项文化, 黄志宏, 闫文德, 田大伦, 雷丕锋. 森林生态系统碳氮循环功能耦合研究综述. 生态学报, 2006, 26(7): 2365-2372.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Sterner RW, Elser JJ, Vitousek P. Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere. Princeton, USA: Princeton University Press, 2002.
- [6] Reich PB, 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 吴统贵, 陈步峰, 肖以华, 潘勇军, 陈勇, 萧江华. 珠江三角洲 3 种典型森林类型乔木叶片生态化学计量学. 植物生态学报, 2010, 34(1): 58-63.
- [10] 崔高阳, 曹扬, 陈云明. 陕西省森林各生态系统组分氮磷化学计量特征. 植物生态学报, 2015, 39(12): 1146-1155.
- [11] 庞圣江, 张培, 贾宏炎, 杨保国, 邓硕坤, 冯昌林, 王庆灵. 桂西北不同森林类型土壤生态化学计量特征. 中国农学通报, 2015, 31(1): 17-23.
- [12] 俞月凤, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 文丽, 范夫静. 喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤 C、N、P 化学计量特征. 应用生态学报, 2014, 25(4): 947-954.
- [13] 赵忠, 李鹏, 王乃江. 渭北黄土高原主要造林树种根系分布特征的研究. 应用生态学报, 2000, 11(1): 37-39.
- [14] 阎恩荣, 王希华, 郭明, 仲强, 周武. 浙江天童常绿阔叶林、常绿针叶林与落叶阔叶林的 C:N:P 化学计量特征. 植物生态学报, 2010, 34(1): 48-57.
- [15] Elser JJ, Fagan WF, Denno RF, Dobberfuhl DR, Folarin A, Huberty A, Interlandi S, Kilham SS, McCauley E, Schulz KL, Siemann EH, Sterner RW. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. Nature, 2000, 408(6812): 578-580.
- [16] 曾昭霞, 王克林, 刘孝利等. 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.
- [17] 银晓瑞, 梁存柱, 王立新, 王炜, 刘钟龄, 刘小平. 内蒙古典型草原不同恢复演替阶段植物养分化学计量学. 植物生态学报, 2010, 34(1): 39-47.
- [18] 王淑彬, 徐慧芳, 宋同清, 黄国勤, 彭晚霞, 杜虎. 广西森林土壤主要养分的空间异质性. 生态学报, 2014, 34(18): 5292-5299.
- [19] 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.
- [20] 玉维奇, 全川, 曾从盛. 不同质地湿地土壤碳、氮、磷计量学及厌氧碳分解特征. 中国环境科学, 2010, 30(10): 1369-1374.
- [21] 杨雪, 李奇, 王绍美, 侯宝林, 张杰琦, 王刚. 两种白刺叶片及沙堆土壤化学计量学特征的比较. 中国沙漠, 2011, 31(5): 1156-1161.
- [22] Vitousek P. Nutrient cycling and nutrient use efficiency. The American Naturalist, 1982, 119(4): 553-572.
- [23] Bowman W D. Accumulation and use of nitrogen and phosphorus following fertilization in two alpine tundra communities. Oikos, 1994, 70(2): 261-270.
- [24] 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.
- [25] Garnier E. Interspecific variation in plasticity of grasses in response to nitrogen supply. Population biology of grasses // Cheplick G P, ed. Population Biology of Grasses. Cambridge: Cambridge University Press, 1998, 155-181.
- [26] 郑淑霞, 上官周平. 黄土高原地区植物叶片养分组成的空间分布格局. 自然科学进展, 2006, 16(8): 965-973.
- [27] 龙世友, 鲍雅静, 李政海, 高伟, 洪光宇, 黄硕, 邹德喜. 内蒙古草原 67 种植物碳含量分析及与热值的关系研究. 草业学报, 2013, 22(1): 112-119.
- [28] Kerkhoff AJ, Enquist BJ, Elser JJ, Fagan W F. Plant allometry, stoichiometry and the temperature-dependence of primary productivity. Global Ecology and Biogeography, 2005, 14(6): 585-598.
- [29] 李红林, 贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 解丽娜, 洪毅. 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征. 土壤学报, 2015, 52(6): 1345-1355.
- [30] 玉维奇, 王纯, 曾从盛, 全川. 闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征. 生态学报, 2012, 32(13): 4087-4093.
- [31] 贡璐, 张海峰, 吕光辉, 杜东伟. 塔里木河上游典型绿洲不同连作年限棉田土壤质量评价. 生态学报, 2011, 31(14): 4136-4143.