

黄土高原西部针叶林植物器官与土壤碳氮磷化学计量特征

孙美美¹, 关晋宏^{1,2}, 岳军伟², 李国庆^{1,2}, 杜盛^{1,2}

(1. 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, 陕西 杨凌 712100;

2. 中科院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了系统地比较分析黄土高原西部针叶林植物器官与土壤内碳(C)、氮(N)、磷(P)化学计量变化特征, 选取位于黄土高原西部的甘肃省天水市、甘南州、定西市、兰州市和武威市5个地区的针叶林为研究对象, 通过对乔木各器官及土壤不同深度的C、N、P元素含量及其化学计量比的分析, 探讨了5个调查区针叶林生态系统化学计量特征及其相互间的相关性。结果表明: 植物叶的C、N、P含量较其他器官稍高, 其中C含量达到511.97~538.66 g/kg; 5个调查区中武威地区的植物干、枝、根的C含量显著低于其他4个地区, 分别为425.04、400.58、400.55 g/kg。针叶林干中C:N在地区间差异达到显著水平($p < 0.05$), 其他各器官内差异不显著; 甘南和兰州地区的针叶林各器官间C:N差异显著; 针叶林干和根中N:P在地区之间存在显著性差异, 兰州和武威地区各器官间N:P的差异达到显著性水平。5个调查区土壤C、N、P含量及其计量特征的差异主要存在于上层土壤(0—30 cm), 而较深层次土壤在各地区之间的差异较小。针叶林干中C、N、P含量两两之间均存在显著相关关系, 而在针叶林叶中仅N与P含量之间存在显著相关关系; 土壤表层(0—20 cm)中C与N含量之间存在极显著的正相关关系。

关键词: 黄土高原西部; 针叶林; 碳氮磷; 化学计量学特征

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)03-0202-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.03.035

Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Stoichiometry in Plant Organs and Soil of Coniferous Forests on the Western Loess Plateau

SUN Meimei¹, GUAN Jinhong^{1,2}, YUE Junwei², LI Guoqing^{1,2}, DU Sheng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: To comparatively investigate the stoichiometric characteristics of carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) in plant organs and soil layers of coniferous forests, we conducted plot surveys in five prefectures/cities (Tianshui, Gannan, Dingxi, Lanzhou, and Wuwei) in Gansu Province on western Loess Plateau. Contents of C, N, P, and their stoichiometric ratios in each plant organ and different depth of soil layers were analyzed, and the relationships among components in the coniferous forest ecosystems were analyzed and compared across the five study areas. The results showed that C, N, and P contents in the foliage were higher than in other organs of the trees, and C content reached 511.97~538.66 g/kg. The C content in stems, branches, and roots in Wuwei was 425.04 g/kg, 400.58 g/kg, and 400.55 g/kg, respectively, being significantly lower than those in the other four areas. The differences in C:N among study areas were only significant for stems ($p < 0.05$). Significant differences in C:N among different organs of the conifers were found in Gannan and Lanzhou. The N:P in stems and roots of the conifers were significantly different among study areas, whereas the differences in N:P among organs were only significant in Lanzhou and Wuwei. Differences in the contents and stoichiometric characteristics of soil C, N, and P among the five survey areas were mainly detected in the 0—30 cm soil layers, while the deeper soil layers showed little difference among study areas. In addition, C, N, and P contents in stems of the conifers were significantly correlated with each other, while a significant correlation was only detected between N and P contents in leaves. Soil C

收稿日期: 2016-12-04

资助项目: 中国科学院战略性先导科技专项“中国森林生态系统固碳现状、速率、机制和潜力”(XDA05050202)

第一作者: 孙美美(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事植物生态恢复和森林固碳以及化学计量学等方面的研究。E-mail: sunmeimei2014@126.com

通信作者: 杜盛(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事半干旱地区植被恢复生态学、树木生理生态学、群落生态水文过程等方面的研究。E-mail: shengdu@ms.iswc.ac.cn

and N contents in the surface layer (0—20 cm) showed a significant positive correlation.

Keywords: western Loess Plateau; coniferous forests; C, N, and P; stoichiometric characteristic

生态化学计量学理论通过生物化学计量比解释了有机体间的能量(有机质 C)与氮(N)、磷(P)以及其他营养物质循环过程,提供了一种研究 C、N、P 等元素在生态系统过程中耦合关系的方法^[1-3]。C、N、P 是植物生长所需的大量元素,而且是限制植物生长的主要元素,C、N、P 循环与植物生长密切相关^[4]。植物各器官中的养分含量取决于土壤养分供应与植物养分需求之间的动态平衡状况^[5]。

近年来,生态化学计量学领域的研究发展较快,主要集中于研究森林和草原生态系统方面^[6]。2005 年曾德慧等^[2]较系统地介绍了生态化学计量学的理论与发展,我国的化学计量学研究开始起步。随后 Han 等^[7]首次在较大尺度上研究报道了我国 127 个样点的 753 种陆生植物叶片中 N:P 不同的分布规律,填补了中国在国际植被相关研究中的空白。植物化学计量学研究的关注点主要在区域尺度的格局分布^[8-10],生态系统化学计量学特征^[11-13],不同演替阶段生态系统的比较^[14-15]以及植物器官间生态化学计量特征的相关性^[5,16]等方面。已有研究表明在较大区域尺度上,阔叶林的 C:P 和 N:P 高于针叶林,而 C:N 则低于针叶林,常绿林的 N:P 高于落叶林,草本的 N:P 低于木本^[17]。目前针对黄土高原森林生态系统的化学计量学这方面的研究较少且研究区域主要在陕北地区^[5,18-19],而针对黄土高原西部针叶林生态系统化学计量学变化特征则有待深入研究。本研究选取甘肃 5 个地区(天水、甘南、定西、兰州、武威)的针叶林为研究对象,在较大尺度上对比研究其植物与土壤的 C、N、P 含量差异及生态化学计量学特征,试图探讨该地区土壤—植物系统中营养元素在化学剂量特征上的反映,有利于揭示生物物质化学循环过程中的养分迁移规律以及生态系统内植物养分的限制状况,并提出植物对该地区环境的适应策略^[20]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取的针叶林林区分别位于甘肃省天水市、甘南州、定西市、兰州市和武威市等行政区。天水市调查区(106°12'—106°24' E, 34°15'—34°21' N),年均降水量 570 mm 左右,年均气温约 11 °C,年日照时间 2 100 h 左右,无霜期 165~230 d,采样树种为森林群落优势树种华山松(*Pinus armandii*)和落叶松(*Larix gmelinii*)。甘南调查区(103°18'—104°4' E, 33°42'—34°54' N),年均降水量 400~800 mm 左右,年均气温 1~13 °C,年日照时数 2 000 h 左右,无霜期短,森林土壤多为山地棕壤,采样树

种为森林植被优势树种云杉(*Picea asperata*)。定西市调查区(103°59'—105°6' E, 34°58'—35°44' N)年均降水量 500 mm 左右,年均气温 3.4 °C,年日照时数 2 500 h 左右,无霜期 80 d,森林土壤多为黄绵土,采样树种为森林植被优势树种落叶松和油松(*Pinus tabulaeformis*)。兰州市调查区(104°2' E, 35°46' N),年均降水量 400 mm 左右,集中分布于 6—9 月,年均气温 7 °C 左右,年日照时数 2 600 h,无霜期 180 d,森林土壤为山地灰褐土,采样树种为油松纯林。武威市调查区(102°32' E, 37°22' N),年均降水量 170 mm 左右,年均气温约 7.8 °C,年日照时数 3 000 h,无霜期 85~165 d,森林土壤为山地灰褐土,采样树种为调查样地森林植被优势树种圆柏。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择及样品采集 本研究样地设置与调查于 2012 年 9 月进行,样地设置遵循“代表性、均一性、连续性”的原则,原则上围取样地面积为 1 000 m² (50 m×20 m),但由于实际地形的限制实际样地中有部分设置为 600 m² (30 m×20 m)。在甘肃省内 5 个针叶林重要栽培区(天水、甘南、定西、兰州、武威)分别选取生长健康、林相较整齐、立地条件基本一致的 3 块样地进行针叶林植物与土壤 C、N、P 含量及其生态化学计量比特征的研究。样地基本信息情况见表 1。

依据样地内乔木平均胸径确定 5 株标准木,分干、枝、叶、根 4 个器官取样,均采集 300 g 左右。树干在 1.3 m 胸径处取样,枝叶在树冠顶端向阳面取样,根不分径级挖取。在样地内按照 0—10, 10—20, 20—30, 30—50, 50—100 cm 土壤层,使用内径 4 cm 的土钻,分 3 个取样点钻取土钻土,将等层样品混合均匀后取 200 g 左右带回实验室。

1.2.2 室内样品处理与分析测定 将野外采集的乔木器官样品置于 70 °C 烘箱烘至恒重,烘干样品磨碎过 0.25 mm 筛,用于测定植物的 N、P、C 含量。待测土壤样品在室内阴干,压碎大块土,拣出植物根系等杂物,粉碎并过 1 mm 筛,将大于 1 mm 石砾集中称重。再用四分法取部分样品研磨直至全部土样通过 0.25 mm 筛。植物和土壤样品的有机 C、全 N、全 P 含量分别采用重铬酸钾硫酸氧化法、半微量凯氏法、酸溶—钼锑抗比色法测定^[21]。

1.2.3 数据统计分析 野外调查所得数据经 Excel 2010 简单整理后,利用 SPSS 20.0 进行分析,选择单因素方差分析(One-Way ANOVA)比较参数之间的差异,采用 Sigmaplot 12.5 软件绘图并检验相关性($p < 0.05$)。

表 1 针叶林样地基本信息

地区	树种	林龄/	坡度/	林分密度/	平均胸径/	平均树高/	郁闭度/	土壤类型
		a	(°)	(株·hm ⁻²)	cm	m	%	
天水	华山松	40	20	2740	16.3	13.8	85	灰质森林土
	落叶松	25	9	920	17.5	13.3	68	棕壤
	华山松	45	42	2350	15.4	13.3	65	森林褐土
甘南	云杉	37	28	3583	10.8	8.6	82	山地棕壤
	云杉	25	15	2183	12.5	6.8	92	山地棕壤
	云杉	35	14	1983	15.1	8.2	90	森林褐土
定西	落叶松	24	13	1040	13.2	8.0	90	森林褐土
	油松	28	8	783	14.1	4.8	40	黄绵土
	油松	30	18	3167	6.9	4.6	70	黄绵土
兰州	油松	40	0	3250	11.5	7.1	50	山地灰褐土
	油松	40	0	2433	13.1	7.1	50	山地灰褐土
	油松	40	0	1050	19.9	9.1	40	山地灰褐土
武威	圆柏	50	60	280	25.6	9.6	30	山地灰褐土
	圆柏	50	62	320	23.2	8.3	30	山地灰褐土
	圆柏	50	58	390	25.3	10.2	40	山地灰褐土

2 结果与分析

2.1 各调查区乔木各器官 C、N、P 含量差异性

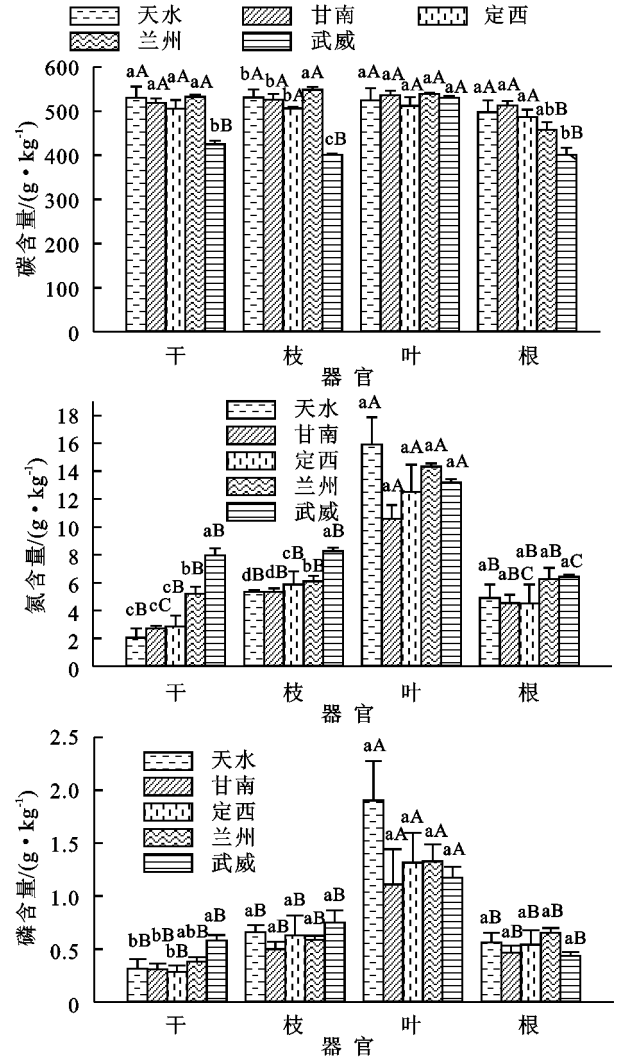
由图 1 可知,乔木 C、N、P 含量因地理位置、植物器官类别的不同而存在一定差异。研究区域内针叶林干、枝、叶和根的 C 含量分别在 425.04~532.73, 400.59~548.26,511.97~538.66,400.55~512.89 g/kg 之间,N 含量分别在 2.06~7.97,5.35~8.26, 10.57~15.90,4.53~6.43 g/kg 之间,P 含量分别在 0.29~0.58,0.50~0.75,1.11~1.90,0.44~0.65 g/kg 之间。武威地区干、枝、根部 C 含量均低于其他地区,且干、枝的 C 含量与其他地区之间差异达到显著水平,根部 C 含量虽与兰州地区无显著差异,但与其他地区差异达到显著水平;兰州地区针叶林枝的 C 含量显著高于其他 4 个地区。通过对同一地区不同植物器官之间 C 含量差异进行分析,结果表明,武威地区针叶林叶 C 含量最高,且与其他器官之间 C 含量差异达到显著水平,兰州地区针叶林根部 C 含量显著低于其他器官,而其他地区内针叶林不同器官之间 C 含量均没有显著差异。

武威地区针叶林干、枝的 N 含量均显著高于其他地区,且各地区内针叶林叶 N 含量均显著高于同地区其他各器官;武威地区针叶林根部 N 含量显著低于其他器官,而在甘南地区,针叶林干的 N 含量显著低于枝、叶。针叶林干的 P 含量在地区尺度上存在显著差异,武威地区乔木干部 P 含量最高,且与天水、甘南、定西 3 个地区乔木干部 P 含量间差异显著;而在同一地区,针叶林叶的 P 含量显著高于其他器官,而干、枝、根部之间 P 含量差异均未达到显著水平。

2.2 各地区间 C : N 和 N : P 的变化特征

元素化学计量比可以在一定程度上反映出植物的生态策略,从中可以得到植物的生长状况等信息。研究区针叶林乔木各器官 C : N 和 N : P 的测量结果显示它

们分别在 34.17~319.69 和 7.04~14.81 之间变化。

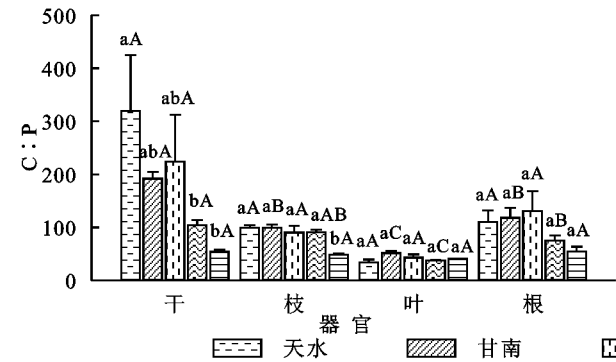


注:不同小写字母表示同一器官不同地区之间差异显著($p < 0.05$);不同大写字母表示同一地区不同器官之间的差异显著($p < 0.05$)。

图 1 不同地区针叶林不同器官 C、N、P 含量

由图 2 可知,5 个调查区针叶林各乔木干的 C : N 均高于同地区其他器官,地区之间针叶林干部 C : N 差

异较大,武威、兰州地区与天水地区之间针叶林干 C : N 差异达到显著水平($p<0.05$),其他各器官的 C : N 在地区间差异未达到显著水平。武威地区根 N : P 最大,显著高于其他地区(图 2),其他各器官 N : P 在地区



注:不同小写字母表示同一器官不同地区之间差异显著($p<0.05$);不同大写字母表示同一地区不同器官之间的差异显著($p<0.05$)。

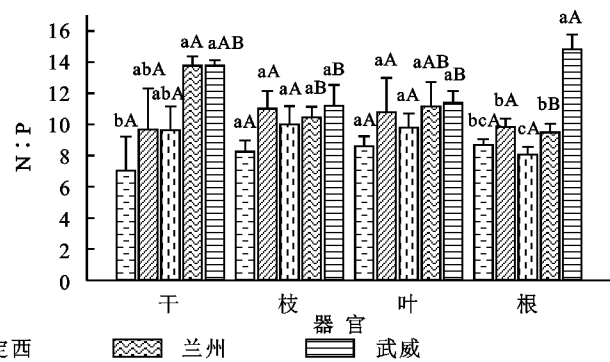
图 2 不同地区器官之间 C : N 与 N : P

2.3 土壤各层次 C、N、P 含量特征

由表 2 可知,各地区表层土壤(0—30 cm) C、N 含量均高于深层土壤。甘南地区 0—10 cm 土层土壤 C 含量显著高于天水、定西和兰州 3 个地区,而武威地区 0—10 cm 土层土壤 C 含量与其他 4 个地区差异未达到显著水平。甘南和武威地区 0—10 cm 土层土壤 N 含量均高于天水、定西和兰州 3 个地区,且与此 3 个地区间差异均达到显著水平($p<0.05$)。各地区深层土壤(50—100 cm)的 C 含量略有差异,但差异未达到显著水平(表 2)。土壤 P 含量受外界的影响较小,在各地区和各土层之间差异均不显著。

甘南地区土壤各层 C : N 较高,兰州地区较低

间差异未达到显著水平。甘南和兰州地区针叶林各器官间 C : N 存在显著性差异,兰州和武威地区各器官间 N : P 差异达到显著性水平,其他地区各器官 N : P 之间差异不显著(图 2)。



(表 2)。在 0—50 cm 的各土层甘南均显著高于其他地区,在 50—100 cm 土层中 5 个地区之间没有显著差异。而 5 个调查区中,只有甘南和武威的表层土壤(0—10 cm)与深层土壤(50—100 cm)之间存在显著差异,其他 3 个地区各土层之间不存在显著差异(表 2)。土壤各层 N : P 在不同地区之间的差异较大,而同一地区不同土层之间差异不大,仅在武威地区各土层之间存在显著差异(表 2)。武威地区的 N : P 最高,在 0—10, 10—20, 30—50 cm 土层显著高于除甘南之外的其他地区,20—30 cm 土层显著高于其他地区,50—100 cm 土层与兰州地区差异不显著,显著高于其他地区。

表 2 不同地区土壤各层次间碳氮磷含量及其计量比特征

项目	地区	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—50 cm	50—100 cm
C/ (g · kg ⁻¹)	天水	33.87±16.77bA	17.02±4.24bA	12.30±2.03bA	9.28±1.50bA	4.64±0.76aA
	甘南	110.73±29.71aA	62.04±19.02aAB	35.29±12.11abB	22.76±7.47abB	9.20±1.69aB
	定西	28.79±12.27bA	23.67±7.63bA	17.41±4.63bA	13.94±2.99abA	8.69±2.02aA
	兰州	20.61±1.32bA	20.11±4.19bA	19.53±8.29bA	14.11±4.42abA	13.93±5.07aA
	武威	66.16±9.63abA	48.86±11.49abABC	54.13±17.09aAB	26.27±5.65aBC	15.40±5.65aC
N/ (g · kg ⁻¹)	天水	2.53±0.99bA	1.46±0.32bAB	1.18±0.17bAB	0.89±0.10bBC	0.47±0.06aC
	甘南	6.95±1.34aA	4.30±1.25abAB	2.76±0.96abBC	1.89±0.67abBC	0.81±0.19aC
	定西	2.63±0.99bA	2.27±0.76abA	1.65±0.45bA	1.28±0.35abA	0.78±0.23aA
	兰州	2.16±0.15bA	2.07±0.39abA	2.01±0.82abA	1.49±0.46abA	1.46±0.55aA
	武威	5.77±0.92aA	4.59±1.10aAB	5.08±1.67aA	2.61±0.45aAB	1.51±0.47aB
C : N	天水	12.36±1.30abA	11.52±0.32bA	10.37±0.40bA	10.30±0.59bcA	10.16±1.99aA
	甘南	15.38±1.61aA	14.53±1.28aAB	13.01±0.52aAB	12.37±0.49aAB	11.64±0.74aB
	定西	10.61±0.55bA	10.74±0.80bA	10.90±1.05bA	11.41±0.99abA	11.38±0.53aA
	兰州	9.54±0.31bA	9.61±0.25bA	9.26±0.54bA	9.41±0.16cA	9.98±0.43aA
	武威	11.52±0.20bA	10.66±0.15bAB	10.90±0.50bAB	9.92±0.40bcB	9.82±0.76aB
N : P	天水	2.46±0.62bA	1.15±0.27cA	1.24±0.40bA	1.24±0.53cA	0.97±0.57bA
	甘南	6.92±1.39aA	4.99±0.63aA	3.52±0.16bA	2.74±0.21abA	1.45±0.11bA
	定西	3.10±0.68bA	2.91±0.58bA	2.34±0.53bA	1.92±0.53bcA	1.27±0.38bA
	兰州	2.56±0.23bA	2.36±0.33bcA	2.22±0.71bA	1.96±0.44bcA	1.89±0.62abA
	武威	7.51±0.58aA	6.29±0.77aAB	6.40±1.55aAB	3.83±0.58aBC	3.23±0.82aC

注:不同小写字母表示不同地区同一土壤层之间的差异显著;大写字母表示同一地区不同土壤层之间的差异显著($p<0.05$)。

2.4 针叶林生态系统干、叶及土壤表层(0—20 cm)中 C、N、P 含量之间的相关性

针叶林生态系统的干、叶及土壤表层中 C、N、P 含量之间存在着一定的相关性。本研究表明,乔木干 C 与 N 含量之间存在显著线性负相关($p < 0.05$)、N 与 P 含量之间存在极显著正相关关系($p < 0.01$)。叶的 C 与 N 含量之间存在一定的负相关关系,但是没有达到显著水平,而 N 与 P 含量之间存在极显著

正相关关系。土壤 C、N 含量之间存在极显著线性正相关(图 3),而 N 与 P 之间的相关性未达到显著水平。土壤表层 C、N、P 含量两两间均为正相关关系,而干和叶 C 与 N 含量间则呈负相关关系。干、叶中 C 与 N 含量之间均表现为负相关关系,且趋势相似;干、叶及土壤的 N 与 P 含量之间均表现为正相关关系,且干 N 与 P 含量的正相关关系与土壤的 N 与 P 含量之间的趋势相似。

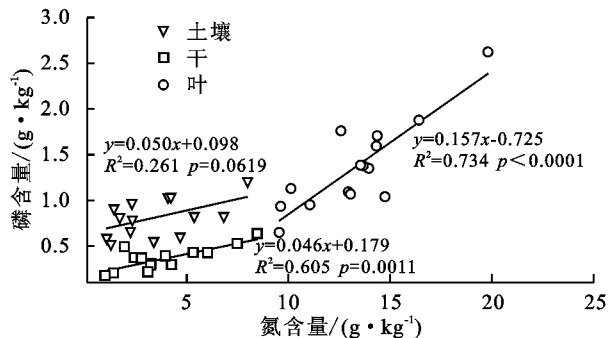
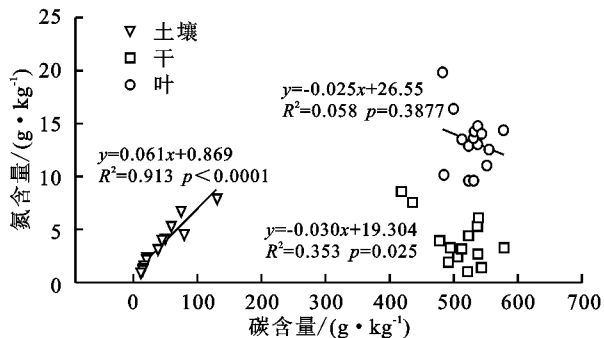


图 3 针叶林干、叶及土壤表层(0—20 cm)C、N、P 含量之间相关性

3 讨论

N 和 P 是限制森林固 C 的主要营养元素^[10],植物结构性营养元素 C 和功能限制性营养元素 N、P 之间相互作用,进而调节植物生长^[22]。通常 C 在大多数植物中含量稳定,引起 C 与 N、P 比值变化的主要因素是 N、P 含量的变化^[23]。本研究中 5 个调查区针叶林各器官 C 含量的平均值为 501.1 g/kg 高于 Elser 等^[24]研究报道的全球 492 种陆生植物叶片的平均含量 464 g/kg。这可能与不同地区间不同植物元素含量以及不同区域元素的可利用性有关。其中叶的 C 含量最高,干和枝的 C 含量相近仅次于叶,而根的 C 含量最低。这可能与各器官的养分储存及其功能的差异性有关^[5]。本研究中 5 个调查区针叶林各器官中 N 含量的平均值为 7.25 g/kg,明显低于基于全国 753 种陆地植物研究得出的平均值 18.6 g/kg^[8],且本研究中 P 含量的平均值 0.724 g/kg 也略低于该研究结果(1.21 g/kg)。这可能与植物自身的营养元素含量、自身结构特点和生长节律有很大关系,同时采样时间、植物所处的生长阶段也是使试验结果产生较大变异的重要因素^[25]。

本研究中 5 个调查区的针叶林平均 C、N、P 含量分别为 528.4、13.3、1.4 g/kg,略低于北京及其周边地区^[26]的针叶林叶片含量,略高于珠江三角洲地区^[11](表 3),整体上处于较高水平。本研究中针叶林的 C、N、P 含量明显高于王宁等^[27]报道的山西地区的油松林,可能是由于山西地区的油松林多为中幼龄林且森林质量低所造成的。生态化学计量学应用的

一个重要方面是根据植物叶片的 N : P 来判断当地环境对植物生长的养分供应状况^[2],即 N、P 元素的养分限制状况。Koerselman 等^[28]通过设计 40 个施肥对比试验发现植物叶片 N : P < 14 表示生长主要受 N 元素供给限制,叶片 N : P > 16 表示植物生长主要受 P 元素供给状况的限制,而 N : P 位于 14~16 之间时,则植物生长受到二者的共同限制。而 Güsewell^[22]的研究结果则认为 N : P < 10 时,植物受 N 素限制;N : P > 20 时,植物受 P 素限制;N : P 介于 10~20 之间时,施肥效应和 N : P 之间还没有明确的相关关系。另外,研究区域、采样时所处的生长阶段以及植物种类之间存在的差异,均会影响 N : P 临界值的变化^[2,22]。本研究中 5 个调查区针叶林叶片的 N : P 均小于全国森林的平均值 16^[7],且小于全球木本植物的 N : P 平均值 12^[29],说明该地区植物的生长或许受 N 元素养分亏缺的限制,在该地区以后的森林经营管理过程中可以考虑适当增施氮肥来提高森林质量。

土壤养分组成是植物生长过程中非常重要的影响因素,其养分供应状况与植物的光合作用、矿物质代谢等生理生态过程密切相关^[32]。土壤中 C、N、P 的养分变化将会直接影响植物体内的 C、N、P 含量及其化学计量比。本研究中 5 个调查区的 C、N 含量随着土壤层的加深,地区之间的差异减小。各土壤层中 P 含量在 5 个调查区中的空间变异小,主要是因为土壤中的 P 主要来源于岩石风化,而岩石风化是一个漫长的过程,且在 0—60 cm 土层中风化程度差异不大,因此土壤 P 含量在各土层的空间分布较稳定^[15,20]。本研究中 5 个调查区的

C : N, C : P, N : P 都明显小于全球不同生态系统土壤的平均水平(C : N : P=186 : 13 : 1)^[33], 而本研究中土壤 C : N 则与中国土壤 C : N 平均值(10 : 1~12 : 1)^[34]的结果较为一致。

表 3 与其他地区针叶林叶片 C、N、P 含量的比较

研究区域	C/ (g · kg ⁻¹)	N/ (g · kg ⁻¹)	P/ (g · kg ⁻¹)	C : N	N : P	文献
天水	524.43	15.90	1.90	34.17	8.59	本研究
甘南	536.41	10.58	1.11	51.39	10.77	本研究
定西	511.97	12.52	1.32	42.78	9.79	本研究
兰州	538.66	14.33	1.33	37.61	11.17	本研究
武威	530.35	13.21	1.17	40.15	11.39	本研究
北京及其周边	535.0	16.3	1.4	32.9	12.6	韩文轩等, 2009 ^[26]
珠江三角洲	517.85	12.20	0.77	47.45	15.84	吴统贵等, 2010 ^[11]
山西	472.18	13.73	1.67	34.39	8.22	王宁等, 2015 ^[27]
浙江天童	514	5.8	0.5	88.62	11.6	阎恩荣等, 2010 ^[30]
长白山	522.90	15.20	1.30	34.40	11.69	王晶苑等, 2011 ^[10]
宝鸡	503.91	17.06	1.63	36.23	10.51	赵亚芳等, 2014 ^[31]

植物在长期的进化过程中逐渐形成了较强的生理生化调节能力以适应外界环境的变化而不影响自身生长^[2], 其体内的光合作用和矿质代谢过程之间的内在联系使得植物体内的 C、N、P 含量在随环境而变化的同时相互之间也具有明显的相关性^[1,12]。而森林土壤 C、N、P 含量之间也存在着紧密的联系, 其比值反映了土壤内部养分循环和平衡的特征^[35]。本研究表明, 表层土壤(0—20 cm)的 C 含量与 N 含量之间呈现极显著的线性相关关系($p<0.01$), 这与以往生态系统物质循环研究中得出土壤中的 C、N 之间存在一种耦合关系的结果相一致。干中 C、N 之间也存在显著的正相关关系, 而叶中 C、N 含量之间相关关系不显著, 这可能与各器官的功能不同有关。本研究中针叶林干和叶器官中 N 含量与 P 含量间均存在极显著的正相关关系, 这与以往的研究结果一致^[36-37]。而土壤表层 N 含量与 P 含量之间虽也存在正相关关系, 但是没有达到显著水平。植物和土壤作为陆地生态系统的 2 个重要组成部分, 对其各自的 C、N、P 含量及其化学计量特征的研究有助于人们深入了解生态系统内部养分、物质循环过程, 探讨研究整个生态系统 C、N、P 元素化学计量特征的变化格局从而真正揭示 C、N、P 元素的内在平衡机制。

4 结论

(1)研究区域内针叶林的叶 C 含量均高于乔木其他各器官,但在各地区之间没有显著差异。各器官 C : N 在地区间的差异仅在干中达到显著性水平,其他各器官差异不显著;甘南和兰州地区的针叶林各器官间 C : N 差异显著;N : P 在干和根之间存在显著差异,兰州和武威地区各器官间 N : P 的差异达到显

著水平。

(2)研究区域内土壤 C、N、P 含量及其计量特征的差异主要存在于上层土壤(0—30 cm)中,而较深层次土壤在各调查区之间的差异较小。土壤各层次的 P 含量在各地区之间没有显著差异。

(3)针叶林干的 C 与 N 含量、N 与 P 含量均存在显著相关关系,而在针叶林的叶器官中仅 N 与 P 含量间存在显著相关关系;土壤表层(0—20 cm)中仅 C 与 N 含量之间存在极显著的正相关关系。

参考文献:

[1] Sterner R W, Elser J J. Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere [M]. Princeton University Press, Princeton, 2002.

[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[J].植物生态学报,2005,29(6),1007-1019.

[3] 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[J].植物生态学报,2010,34(1):2-6.

[4] 邵梅香,覃林,谭玲.我国生态化学计量学研究综述[J].安徽农业科学,2012,40(11):6918-6920.

[5] 陆媛,陈云明,曹扬,等.黄土高原子午岭辽东栎林植物和土壤碳氮磷化学计量学特征[J].水土保持学报,2015,29(3):196-201.

[6] 刘万德,苏建荣,李帅锋,等.云南普洱季风常绿阔叶林优势物种不同生长阶段叶片碳、氮、磷化学计量特征[J].植物生态学报,2015,39(1):52-62.

[7] Han W X, Fang J Y, Guo D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in china[J]. New Phytologist, 2005, 168(2): 377-385.

[8] 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[J].自然科学进展,2006,16(8):965-973.

- [9] 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.
- [10] 王晶苑,王绍强,李幼兰,等. 中国四种森林类型主要优势植物的 C : N : P 化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2011,35(6):587-595.
- [11] 吴统贵,陈步峰,肖以华,等. 珠江三角洲 3 种典型森林类型乔木叶片生态化学计量学[J]. 植物生态学报, 2010,34(1):58-63.
- [12] 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[J]. 植物生态学报, 2015,39(7):682-693.
- [13] 李娜,李建,刘海丰,等. 东灵山 3 种落叶阔叶林的碳氮元素含量及比率[J]. 林业科学,2009,45(8):82-87.
- [14] 阎恩荣,王希华,周武. 天童常绿阔叶林演替系列植物群落的 N : P 化学计量特征[J]. 植物生态学报,2008,32(1):13-22.
- [15] 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.
- [16] 徐冰,程雨曦,甘慧洁,等. 内蒙古锡林河流域典型草原植物叶片与细根性状在种间及种内水平上的关联[J]. 植物生态学报,2010,34(1):29-38.
- [17] 曾冬萍,蒋利玲,曾从盛,等. 生态化学计量学特征及其应用研究进展[J]. 生态学报,2013,33(18):5484-5492.
- [18] 李鑫,曾全超,安韶山,等. 黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究[J]. 环境科学,2015,36(3):1084-1091.
- [19] 杨佳佳,张向茹,马露莎,等. 黄土高原刺槐林不同组分生态化学计量关系研究[J]. 土壤学报,2014,51(1):133-142.
- [20] 李婷,邓强,袁志友,等. 黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. 环境科学,2015,36(8):2988-2996.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京:中国农业出版社,2000:30-177.
- [22] Güsewell S. N : P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance[J]. New Phytologist, 2004, 164(2): 243-266.
- [23] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [24] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs[J]. Nature, 2000, 408(6812): 578-580.
- [25] Baldwin D S, Rees G N, Mitchell A M, et al. The short-term effects of salinization on anaerobic nutrient cycling and microbial community structure in sediment from a fresh wetland[J]. Wetlands, 2006, 26(2): 455-464.
- [26] 韩文轩,吴漪,汤璐瑛,等. 北京及周边地区植物叶的碳氮磷元素计量特征[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2009,45(5):855-860.
- [27] 王宁,张有利,王百田,等. 山西省油松林生态系统碳氮磷化学计量特征[J]. 水土保持研究,2015,22(1):72-79.
- [28] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N : P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [29] Kang H Z, Xin Z J, Breg B, et al. Global pattern of leaf litter nitrogen and phosphorus in woody plants[J]. Annals of Forest Science, 2010, 67(8): 811-811.
- [30] 阎恩荣,王希华,郭明,等. 浙江天童山常绿阔叶林、常绿针叶林与落叶阔叶林的 C : N : P 化学计量特征[J]. 植物生态学报,2010,34(1):48-57.
- [31] 赵亚芳,徐福利,王渭玲,等. 华北落叶松针叶碳、氮、磷含量及化学计量比的季节变化[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(5):1328-1335.
- [32] 宾振钧,王静静,张文鹏,等. 氮肥添加对青藏高原高寒草甸 6 个群落优势种生态化学计量学特征的影响[J]. 植物生态学报,2014,38(3):231-237.
- [33] 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.
- [34] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2000:37.
- [35] Achat D L, Bakker M R, Augusto L, et al. Phosphorus of soils from contrasting forested ecosystems in southwestern Siberia: effects of microbiological and physicochemical properties[J]. Biogeoscience, 2013, 10(2): 733-752.
- [36] 周鹏,耿燕,马文红,等. 温带草地主要优势植物不同器官间功能性状的关联[J]. 植物生态学报,2010,34(1):7-16.
- [37] Kerkhoff A J, Fagan W F, Elser J J, et al. Phylogenetic and growth form variation in the scaling of nitrogen and phosphorus in the seed plants[J]. American Naturalist, 2006, 168(4): 103-122.