

文章编号: 1008 - 2786 - (2018)6 - 878 - 11

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000383

横断山区高山栎组灌木型植物 C、N、P 生态化学计量特征

李丽¹, 胡君¹, 于倩楠^{1,2,3}, 阳小成⁴, 李婷¹, 刘庆^{1*}

(1. 中国科学院成都生物研究所, 成都 610041; 2. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 成都 611756;

3. 四川省环境工程评估中心, 成都 610041; 4. 成都理工大学材料与化学化工学院, 成都 610059)

摘 要: 为了解横断山区高山栎组 [*Quercus sect. Heterobalanus* (Oerst.) Menits.] 灌木型植物不同器官碳(C)、氮(N)、磷(P)生态化学计量特征及分布格局, 该文采用随机抽样方法布设 18 个高山栎组植物灌丛样地, 采集高山栎组植物的根、茎、叶、枝器官样品, 分析样品 C、N、P 含量。结果表明: (1) 高山栎组植物 C、N、P 在各器官中分别表现为叶($477.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 枝($469.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 茎($445.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 根($431.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 叶($13.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 茎($6.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 枝($5.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 根($4.70 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 叶($1.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 枝($1.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 根($1.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 茎($0.71 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 分配到叶中的营养元素相对较多; (2) 各器官中 C 含量较 N、P 含量相对稳定, 其中变异系数最大值发生在根部; (3) 各器官 C:N 范围为 36.50 ~ 105.33, 最大值在根中, 最小值在叶中, C:P 范围为 418.15 ~ 768.36, 最大值在茎中, 最小值在枝中, N:P 范围为 4.89 ~ 11.69, 最大值在叶中, 最小值在枝中; (4) 各器官 C 与 N、P 间均呈负相关关系, N 与 P 间均呈正相关关系, 但相关关系是否显著在不同器官中不同; (5) 各器官 C、N、P 含量受海拔的影响较小, 仅叶片 C 含量、枝 P 含量与海拔间存在弱负相关关系。由此可见, 高山栎组灌木型植物各器官营养元素的含量与其生长期及相应器官的功能结构密切相关。

关键词: 生态化学计量特征; 高山栎组; 灌木型; 植物器官; 横断山区

中图分类号: Q948.1

文献标志码: A

生态化学计量学是运用于研究生态系统能量及元素平衡与循环的科学^[1], 而研究植物 C、N、P 化学计量特征对于认识生态系统碳汇潜力和区域养分限制状况具有重要意义^[2]。近年来我国开展了大量的有关陆地(草地、湿地、灌丛、森林)生态系统生态化学计量特征的研究^[3-18], 普遍发现植物叶片中 C、N、P 含量存在一个内稳态机制, 其养分含量变化并不直接受土壤控制, 更多与其自身遗传特征相关。这些研究多针对植物叶片, 少有针对不同器官营养

元素含量特征的研究, 但营养元素在植物体不同器官中的分配存在差异, 这使得植物能调控自身生长速率以适应环境^[19], 因此, 将生态化学计量信息的研究拓展至不同器官中十分必要^[21]。

高山栎组 [*Quercus sect. Heterobalanus* (Oerst.) Menits.] 是壳斗科栎属植物, 大约 9 ~ 11 种, 垂直分布可从 1700 m 到 4800 m, 主要集中分布在我国横断山区, 为该地区群落中的优势种和建群种^[22-23], 尤其是灌木型的高山栎组植物在该地亚高山、高山

收稿日期(Received date): 2018 - 03 - 12; 改回日期(Accepted date): 2018 - 11 - 01

基金项目(Foundation item): 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050303); 科技部科技基础性工作专项(2015FY210200, 2015FY110300)。

[Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA05050303); Science and Technology Basic Work Project of the Ministry of Science and Technology of China (2015FY210200, 2015FY110300)]

作者简介(Biography): 李丽(1994 -), 女, 贵州贵阳人, 博士研究生, 从事植被生态学研究。[LI Li (1994 -), female, born in Guiyang, Guizhou province, Ph. D. candidate, research on vegetation ecology] E-mail: lili@cib.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 刘庆, 男, 博士, 研究员, 从事森林生态与全球变化、灌丛生态和恢复生态学研究 [LIU Qing, male, Ph. D., professor, research on forest ecology and global change, shrub ecology and restoration ecology] E-mail: liuqing@cib.ac.cn

地区形成了相对稳定的原生灌丛,是该区域代表性植被,在横断山区占有重要地位,对其进行研究具有重要意义。目前,国内对高山栎组植物的研究主要集中在生长特点、光合特性和生物量方面^[24-26],对高山栎组植物不同器官生态化学计量特征的研究鲜见报道,基于此,本文以分布于横断山地区,且生活型为灌木的高山栎组植物为研究对象,对高山栎组

植物不同器官的 C、N、P 含量进行了测定,比较了各器官营养元素含量及比值之间的差异,探讨营养元素与海拔因子之间的关系,以期能揭示横断山地区灌木型的高山栎组植物不同器官生态化学计量特征及养分平衡机理,丰富西南地区碳氮磷化学计量特征数据库,为预测该区域对未来气候变化的响应提供重要信息,也为更合理地经营和维护横断山地区

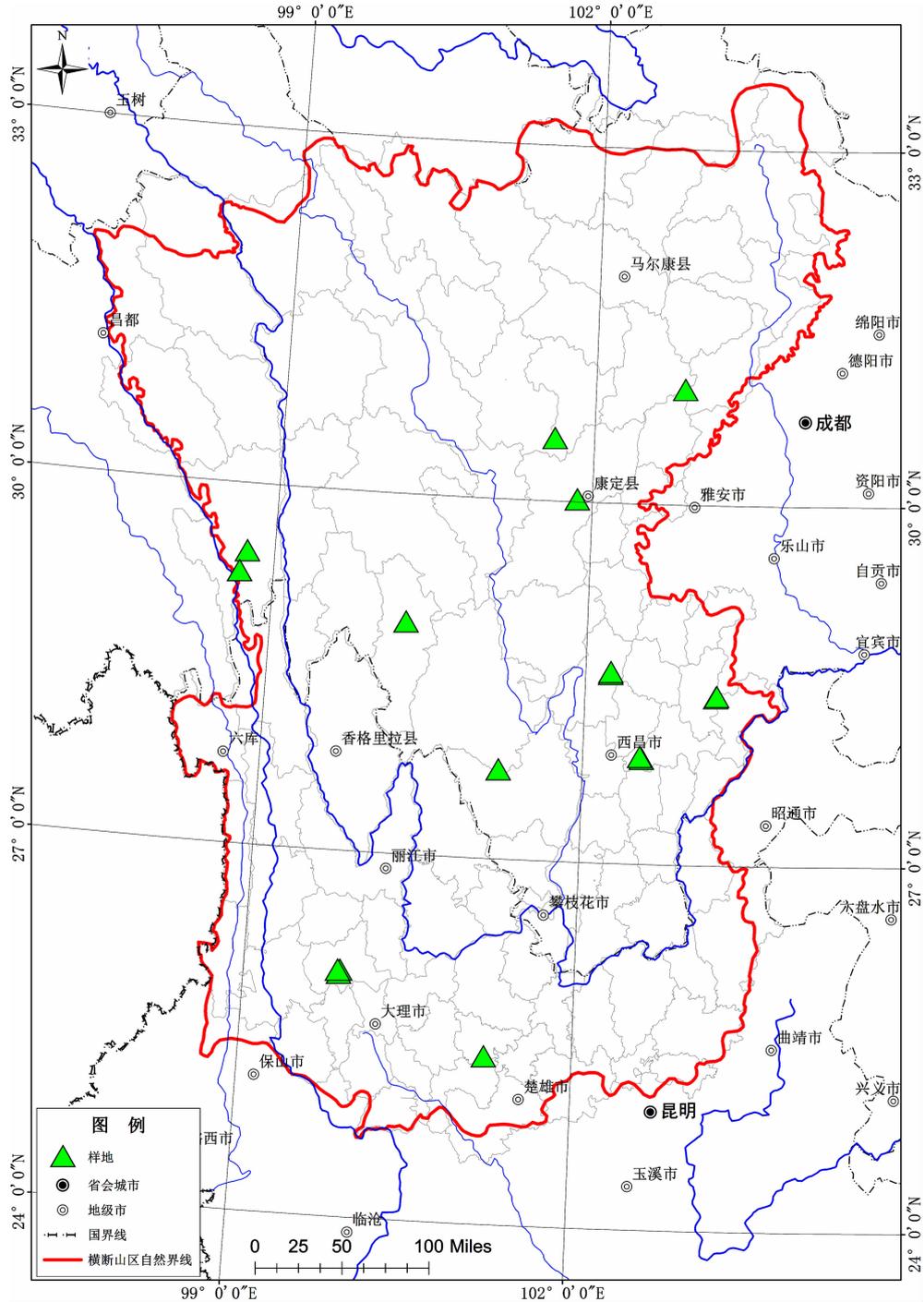


图 1 样地分布图

Fig. 1 Distribution of sampling sites.

灌丛资源提供科学依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

横断山区地处我国西南的藏东、川西和滇西北一带,位于青藏高原的东南部,其山岭海拔 2000 ~ 6000 m^[27]。该地区气候受多种季风环流影响,冬天干燥夏季多雨,干季与湿季差别明显,通常 5 月至 10 月为湿季,10 月至翌年 5 月为干季。气候有明显的垂直变化,横断东西间交通之形高原面年均温 14 ~ 16℃,最冷月 6 ~ 9℃,谷地年均温可达 20℃ 以上。该地区地质情况复杂特殊^[28],是全球生物多样性最丰富地区之一。本文所涉及的范围包括四川省的甘孜州、凉山州、阿坝州,西藏区林芝、昌都市东南部,云南省楚雄州、大理市,即 25°22' ~ 30°58'N, 99°52' ~ 100°17'E(图 1),这些地区植物为适应冬季长夏季短的环境特征,普遍生长期较短,且耐寒性较强。

灌木型高山栎组植物多分布在横断山区海拔 3000 ~ 4000 m 的阳坡或半阳坡上^[27],并在该地区形成相对稳定的原生灌丛植被,其叶多具有复表皮、被毛厚的角质层及较低的气孔密度等形态特征,这

些特征使其能适应寒冷环境,成为横断山区群落中的优势种。该海拔范围内植被分布以高山灌丛为主,除高山栎外,还存在其他灌木优势种形成的灌丛群落,主要包括多种杜鹃[隐蕊杜鹃(*Rhododendron intricatum*)、大白杜鹃(*Rhododendron decorum*)、腋花杜鹃(*Rhododendron racemosum*)等],多种锦鸡儿[鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubat*)、云南锦鸡儿(*Caragana franchetiana*)等],华西银露梅(*Potentilla glabra*)等。

1.2 植物样品采集

查阅《中国植被》并结合卫星地图,了解横断山区高山栎组植物灌丛群落的分布,利用卫星地图经纬度随机选取并现场确认了 18 个代表性样地,每个样地高山栎灌丛群落均为原生灌丛群落,且灌丛群落高度一般在 5 m 以下,盖度 > 30%。于 2011—2013 年 8 月和 9 月进行样地布设和样品采集,调查样地的基本环境信息(经纬度、海拔、坡度等),并在每个样地随机设置 3 个样点,样点面积 1 m × 1 m,在每个样点收获高山栎组植物根、茎、叶、枝器官样品不少于 100 g,装入档案袋,带回实验室。本次样地取样海拔范围 2050 ~ 4246 m,依据中国植物志对不同灌木型的高山栎组植物进行分类,本研究中主要涉及了 5 种^[30],详细情况见表 1。

表 1 样地概况

Table 1 General information of sample plot

样地编号 Plot ID	调查地点 Location	群系类型 Formation type	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔/m Altitude
1	四川稻城 Daocheng, Sichuan	川滇高山栎灌丛	28.93°	100.29°	4078
2	四川冕宁 Mianning, Sichuan	矮高山栎灌丛	28.59°	102.24°	2050
3	四川冕宁 Mianning, Sichuan	矮高山栎灌丛	28.58°	102.24°	2000
4	四川昭觉 Zhaojue, Sichuan	矮高山栎灌丛	27.88°	102.55°	3127
5	四川昭觉 Zhaojue, Sichuan	矮高山栎灌丛	27.89°	102.53°	3325
6	四川道孚 Dawu, Sichuan	川滇高山栎灌丛	30.53°	101.62°	3506
7	四川康定 Kangding, Sichuan	川滇高山栎灌丛	30.02°	101.86°	3673
8	四川美姑 Meigu, Sichuan	矮高山栎灌丛	28.40°	103.23°	2869
9	四川雷波 Leibo, Sichuan	矮高山栎灌丛	28.41°	103.24°	2952
10	四川木里 Muli, Sichuan	长穗高山栎灌丛	27.74°	101.22°	2790
11	四川小金 Xiaojin, Sichuan	川滇高山栎灌丛	30.97°	102.87°	3675
12	西藏林芝 Nyingchi, Xizang	川滇高山栎灌丛	29.63°	94.39°	3210
13	西藏芒康 Mangkang, Xizang	帽斗栎灌丛	29.43°	98.74°	4213
14	西藏芒康 Mangkang, Xizang	川滇高山栎灌丛	29.26°	98.68°	4246
15	云南姚安 Yaoan, Yunnan	毛脉高山栎灌丛	25.37°	101.21°	2209
16	云南洱源 Eryuan, Yunnan	矮高山栎灌丛	26.02°	99.88°	3260
17	云南洱源 Eryuan, Yunnan	矮高山栎灌丛	25.99°	99.87°	3060
18	云南洱源 Eryuan Yunnan	矮高山栎灌丛	26.02°	99.86°	3310

1.3 样品处理与测定

带回的所有样品在 65℃ 条件下烘干至恒量,取烘干的灌木样品称量并磨碎,过 0.25 mm 分样筛,装入塑封袋,用于分析样品 C、N、P 含量。其中灌木样品 C、N 含量采用 C/N 元素分析仪(2400II CHNS/O, Perkin Elmer, Boston, USA)测定,P 含量使用钼锑抗比色法测定。

1.4 计算与统计方法

使用 Excel 2010、SPSS 20.0 对数据进行整理和分析,使用 Origin 8.5 软件制作图表。通过 SPSS 描述统计分析得到高山栎组植物不同器官的碳、氮、磷含量及其比值的平均值和变异系数。用 One-Way ANOVA 分析高山栎组植物各器官碳、氮、磷含量及其比值之间的差异;各器官中碳、氮、磷含量与比值两两之间的关系及与环境因子间的关系,采用 Pearson 相关分析;不同器官和不同物种对各器官碳、氮、磷含量及比值产生差异的影响,采用多元方差分析;海拔对碳、氮、磷含量及比值的影响,采用简单线性回归分析。

2 结果

2.1 各器官碳、氮、磷化学计量特征

横断山区高山栎组植物不同器官碳、氮、磷含量的描述统计结果显示(表 2):碳含量在各器官中根 < 茎 < 枝 < 叶,变化范围为 431.42 ~ 477.88 g · kg⁻¹,极差值不到 50 g · kg⁻¹,变异系数均小于 0.07 (0.02 ~ 0.07),根部变异系数最大;氮含量根 < 枝 < 茎 < 叶,变化范围为 4.70 ~ 13.83 g · kg⁻¹,变异系数在 0.23 ~ 0.39,根部变异系数最大;磷含量茎 < 根 < 枝 < 叶,变化范围为 0.71 ~ 1.26 g · kg⁻¹,变异系数在 0.27 ~ 0.53,根部变异系数最大。由此看出,高山栎组植物不同器官中碳含量相对氮、磷含量变异系数较小,其值较稳定;根部碳、氮、磷含量变异系数均大于茎、叶、枝。同时,不同器官碳、氮、磷含量差异性分析结果显示(表 2):碳含量在叶中最高(477.88 g · kg⁻¹),其值显著高于茎、根($p < 0.05$),与枝间没有显著差异($p > 0.05$);叶中氮含量为最高(13.83 g · kg⁻¹),其值显著高于茎、枝、根($p < 0.05$);叶中磷含量也为最高(1.26 g · kg⁻¹),显著高于茎($p < 0.05$),与根、枝间没有显著差异($p > 0.05$),由此看出,与根、茎、枝相比,叶片分配

到了更多的营养元素。

表 2 高山栎组植物不同器官碳、氮、磷含量特征

Table 2 Content of carbon, nitrogen and phosphorus in different organs of *Heterobalanus*

元素指标 Element	器官 Organ	样本量 n	平均值 Mean /(g · kg ⁻¹)	标准偏差 SD /(g · kg ⁻¹)	变异系数 CV
C	根 Root	25	431.42a	28.84	0.07
	茎 Shoot	26	445.26b	24.98	0.06
	叶 Leaf	38	477.88c	14.11	0.03
	枝 Twig	12	469.29c	7.58	0.02
N	根 Root	25	4.70a	1.78	0.38
	茎 Shoot	26	6.08a	2.19	0.36
	叶 Leaf	38	13.83b	3.24	0.23
	枝 Twig	12	5.82a	1.40	0.24
P	根 Root	25	1.16b	0.75	0.65
	茎 Shoot	26	0.71a	0.29	0.41
	叶 Leaf	38	1.26b	0.43	0.34
	枝 Twig	12	1.21b	0.33	0.27

同列不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。

Significant difference at 0.05 levels in the same element are indicated by different letters.

表 3 高山栎组植物不同器官碳、氮、磷比值特征

Table 3 The ration of carbon, nitrogen and phosphorus of *Heterobalanus* in different organs

比值 Ration	器官 Organ	样本量 N	平均值 Mean	标准偏差 SD	变异系数 CV
C:N	根 Root	25	105.33 b	41.82	0.40
	茎 Shoot	26	86.23 b	42.57	0.49
	叶 Leaf	38	36.50 a	8.91	0.24
	枝 Twig	12	86.86 b	28.86	0.33
C:P	根 Root	25	577.39 ab	452.37	0.78
	茎 Shoot	26	768.36 b	424.31	0.55
	叶 Leaf	38	438.50 a	204.91	0.47
	枝 Twig	12	418.15 a	127.64	0.31
N:P	根 Root	25	5.99 a	3.99	0.67
	茎 Shoot	26	9.04 b	2.55	0.28
	叶 Leaf	38	11.69 c	2.91	0.25
	枝 Twig	12	4.89 a	0.82	0.17

同列不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。

Significant difference at 0.05 levels in the same element are indicated by different letters.

横断山区高山栎组植物不同器官 C:N、C:P 和 N:P 的描述性统计分析和差异性分析结果显示(表 3):C:N 值在根、枝、茎中差异不显著($p > 0.05$),且均显著高于叶中 C:N 值(36.50, $p < 0.05$);C:P 值在各器官中变异系数较大,其平均值变化范围为

418.15 ~ 768.36, 最大值在茎中, 最小值在枝中, C: P 值在茎和根间差异不显著 ($p > 0.05$), 均显著高于叶、枝 ($p < 0.05$); N: P 值在各器官中相对比较稳定, 其平均值变化范围 4.89 ~ 11.69, 最大值在叶中, 最小值在枝中, 叶中 N: P 显著高于茎、根、枝 ($p < 0.05$)。此外, 可看出与茎、叶、枝相比, 根部 C: N、C: P、N: P 变异系数相对较大。

2.2 各器官碳、氮、磷含量及化学计量比相关性

高山栎组植物各器官 C 含量与 N、P 含量相关性在根、茎、枝中均未通过显著性检验 ($p > 0.05$), 仅在叶片中达到显著性检验, 呈极显著负相关 ($p < 0.01$)。N 含量与 P 含量在茎、叶、枝中均呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 在根中呈正相关, 但相关关系不显著 ($p > 0.05$)。可以看出, 各器官中 C 含量与 N、P 含量相关关系均表现为负相关, N 含量与 P

含量相关关系均为正相关, 但不同器官相关关系是否显著存在差异 (表 4)。

不同器官 C、N、P 含量与其比值的相关关系表现为: C: N 数值与 C 含量在叶片中呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 在根、茎、枝中相关关系不显著 ($p > 0.05$); C: N 数值与 N 含量在根、茎、叶、枝中均呈极显著负相关 ($p < 0.01$)。C: P 数值与 C 含量在叶片中呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 在根、茎、枝中相关关系不显著 ($p > 0.05$); C: P 数值与 P 含量在根、茎、叶、枝中均呈显著或极显著负相关 ($p < 0.05$ 或 $p < 0.01$)。N: P 数值与 N 含量在叶中呈显著正相关 ($p < 0.05$), 在根、茎、枝中相关关系不显著 ($p > 0.05$); N: P 数值与 P 含量在根、茎、叶中负相关关系极显著 ($p < 0.01$), 在枝中相关关系不显著 ($p > 0.05$) (表 4)。

表 4 不同器官碳、氮、磷含量及化学计量比的相关系数

Table 4 Correlation coefficient of carbon, nitrogen, phosphorus content and their stoichiometry in different organs (Pearson test).

元素指标 Element	不同器官 different organ	C	N	P	C: N	C: P	N: P
C	根 Root	1					
	茎 Shoot	1					
	叶 Leaf	1					
	枝 Twig	1					
N	根 Root	-0.144	1				
	茎 Shoot	-0.003	1				
	叶 Leaf	-0.556 **	1				
	枝 Twig	-0.438	1				
P	根 Root	-0.178	0.264	1			
	茎 Shoot	-0.241	0.657 **	1			
	叶 Leaf	-0.489 **	0.857 **	1			
	枝 Twig	-0.299	0.760 **	1			
C: N	根 Root	0.339	-0.894 **	-0.379	1		
	茎 Shoot	0.187	-0.885 **	-0.703 **	1		
	叶 Leaf	0.536 **	-0.959 **	-0.844 **	1		
	枝 Twig	0.405	-0.990 **	-0.752 **	1		
C: P	根 Root	0.342	-0.420 *	-0.688 **	0.645 **	1	
	茎 Shoot	0.315	-0.704 **	-0.860 **	0.898 **	1	
	叶 Leaf	0.336 *	-0.728 **	-0.876 **	0.820 **	1	
	枝 Twig	0.353	-0.860 **	-0.951 **	0.870 **	1	
N: P	根 Root	0.292	0.052	-0.780 **	0.175	0.811 **	1
	茎 Shoot	0.352	0.284	-0.501 **	-0.105	0.332	1
	叶 Leaf	0.166	-0.383 *	-0.743 **	0.465 **	0.876 **	1
	枝 Twig	-0.129	0.305	-0.370	-0.310	0.191	1

* $0.01 < p < 0.05$, ** $p < 0.01$ 。

对 C、N、P 含量及其比值是否受高山栎组不同器官及不同物种的影响进行分析(表 5),不同器官、不同物种与高山栎组植物 C、N、P 含量及比值间 P 值均小于 0.001,表明不同器官及不同物种对高山栎组植物 C、N、P 含量及比值的影响是显著的。

表 5 碳、氮、磷含量及其比值与不同器官、不同种的多元方差分析

Table 5 Multivariate analysis of variance between C, N, P content, their ratios and different organ, different species

元素指标 Element	项目 Item	F value	P value
C	不同器官 Different organ	27.195	0.000
	不同种 Different species	6.606	0.000
N	不同器官 Different organ	109.341	0.000
	不同种 Different species	16.701	0.000
p	不同器官 Different organ	3.915	0.011
	不同种 Different species	6.737	0.000
C: N	不同器官 Different organ	7.214	0.000
	不同种 Different species	47.033	0.000
C: P	不同器官 Different organ	7.214	0.000
	不同种 Different species	29.501	0.000
N: P	不同器官 Different organ	39.350	0.000
	不同种 Different species	12.191	0.000

2.3 对碳、氮、磷化学计量特征的影响因素分析

对高山栎组植物 C、N、P 及其比值与海拔之间相关关系研究表明(表 6):坡度及坡向与高山栎植物 C、N、P 及其比值相关关系均不显著;而海拔与高山栎组植物 C 含量、P 含量之间相关关系均表现为极显著正相关关系,与 N 含量相关关系不显著,与 C: N 值呈显著正相关关系,与 C: P 值呈极显著负相关关系,与 N: P 值呈显著负相关关系。

表 6 碳、氮、磷含量及其比值与地形因子的相关性(Pearson 检验)

Table 6 Correlations between C, N, P content, their ratios and topographical factors (Pearson test)

	C	N	P	C: N	C: P	N: P
海拔 Altitude	0.311 **	0.128	0.326 **	0.224 *	-0.382 **	-0.225 *
坡向 Aspect	0.061	0.024	-0.031	-0.157	-0.191	-0.034
坡度 Slope	-0.046	-0.026	0.038	0.020	-0.172	-0.125

* 0.01 < p < 0.05, ** p < 0.01。

尽管海拔与高山栎组植物 C、N、P 含量及其比值间有一定的相关关系,但其相关关系较弱。在高山栎组植物不同器官 C、N、P 含量及比值与海拔的一元线性回归分析中(表 7),仅叶片中 C 含量,枝中 P 含量,茎中 C: N 值,枝中 N: P 值,茎、叶、枝中 C: P 值与海拔间存在较弱的线性关系(p < 0.05),其余化学计量特征与海拔间的线性回归均未经过显著性检验(p > 0.05)。

表 7 不同器官 C、N、P 含量及比值与海拔线性回归分析

Table 7 The linear regression analysis of C, N, P content, their ratios and altitude by different organs

元素指标 Element	不同器官 Different organ	斜率 Slope	常数 Constant	P value	R ²
C	根 Root	0.006	412.41	0.550	0.025
	茎 Shoot	0.006	426.01	0.484	0.020
	叶 Leaf	0.011	441.96	0.001 **	0.251
	枝 Twig	-0.007	495.68	0.097	0.177
N	根 Root	0.001	6.698	0.306	0.003
	茎 Shoot	0.000	3.85	0.351	0.004
	叶 Leaf	0.000	13.72	0.965	0.028
	枝 Twig	0.001	1.75	0.174	0.094
P	根 Root	0.000	-0.17	0.099	0.069
	茎 Shoot	0.000	0.20	0.100	0.071
	叶 Leaf	0.000	0.78	0.160	0.028
	枝 Twig	0.000	-0.31	0.017 **	0.392
C: N	根 Root	-0.003	114.29	0.846	0.038
	茎 Shoot	-0.030	175.91	0.047 *	0.119
	叶 Leaf	-0.000	38.45	0.789	0.026
	枝 Twig	-0.025	177.76	0.138	0.126
C: P	根 Root	-4.180	1926.87	0.078	0.084
	茎 Shoot	-0.330	1769.40	0.025 *	0.160
	叶 Leaf	-0.109	798.28	0.027 *	0.105
	枝 Twig	-0.151	965.41	0.032 *	0.320
N: P	根 Root	-0.002	12.95	0.105	0.066
	茎 Shoot	-0.000	10.60	0.679	0.028
	叶 Leaf	-0.002	18.57	0.002 **	0.213
	枝 Twig	-0.000	6.94	0.252	0.042

* 0.01 < p < 0.05, ** p < 0.01。

3 讨论

3.1 不同器官碳、氮、磷化学计量特征

本研究对 C、N、P 含量在高山栎组植物不同器官中的分配情况进行分析(表 2)。研究中,各器官 C、N、P 含量稳定性表现为 C < N < P,可能是由于植

物的生理活动(如生长繁殖)需要大量 C 合成的能源物质和结构性物质支持,所以植物体内 C 较功能性物质和贮藏性物质富 N、P 变化较大^[31];而 Vitousek 实验发现,通常在植物中 N 含量较稳定,其变化幅度在各器官中较小,变异系数小于 P 含量^[32],这与本研究结果一致。各器官中根部的 N 含量和 P 含量变异最大,这与贺合亮窄叶鲜卑花碳、氮、磷研究结果相同^[33],可能是由于根部是植物的主要吸收器官,其对有效 N、P 的吸收和利用受土壤养分含量的影响较大,所以不同土壤养分供给状况下,植物根中 N、P 含量不同,其变异系数较其它器官大。植物不同器官含有营养元素的差异,主要是由于土壤养分环境与植物不同器官的生理需求、功能结构不同造成的^[34-35]。在本研究中,高山栎组植物 C 含量表现为叶 > 枝 > 茎 > 根,叶、枝之间碳含量最高彼此差异不显著,两者显著高于茎、根(表 2)。原因可能是,高山栎组植物叶片作为重要同化器官,具有独特的抗寒、抗旱形态结构,需较多的养分用于构建这些保卫结构,同时它也是重要的 C 养分储存部位,这导致了叶片 C 含量较高;而枝作为植物的支撑、疏导器官,富含多糖物质,所以 C 含量较高;根部主要进行水分和无机盐交换,养分储存较少,因而 C 含量较低。叶片光合作用过程中需要大量氮素用于叶绿素、RuBP 羧化酶和电子传递链组分等的合成,同时,叶片光合作用的同化过程和光合磷酸化过程也需要大量 P 支持,因而为进一步提高叶片的光合速率,分配到叶片中 N、P 含量显著高于根、茎、枝。而茎是植物的支撑器官,主要承担水分和养分的运输作用,因此其 N、P 养分含量相对较低。

有关生长速率理论的研究指出,生物的生长离不开蛋白质,而蛋白质于核糖体合成与产生,这一过程需要大量的 P 和大量的 N 形成核糖体 RNA 与蛋白质酶,所以生长快速的有机体通常具有较低的 C:N、C:P 和 N:P 比值^[36-37]。在高山栎组植物不同器官中,叶片 C:N 数值最低,显著低于根、茎、枝($p < 0.05$);C:P 比值在根、叶、枝中较低,且两两间差异不显著($p > 0.05$);但叶片 N:P 比值却显著高于根、茎、枝($p < 0.05$)(表 3)。原因可能是,虽然高山栎组植物叶片新陈代谢速率较快,具有较低的 C:N、C:P 值,但是叶片具有较高的 N 含量,与根、茎、叶之间差异较大($p < 0.05$),导致叶片 N:P 值

高。这表明应谨慎使用生长速率理论判断同一植物不同器官的新陈代谢快慢。

高山栎组植物碳、氮、磷含量间的相关分析结果表明:高山栎组植物根、茎、叶、枝的 C 与 N、P 均呈负相关关系,这符合 Sterner 提出的高等陆生植物 C 与 N、P 通常为负相关关系的规律^[38],说明了植物在养分配分时选择用于建成结构或用于生长是矛盾的^[39];本研究中根、茎、叶、枝的 N 与 P 均呈正相关关系,与窄叶鲜卑花^[33]、烤烟^[40]、森林叶片^[14]等研究结果相同,这进一步说明了植物体中 N 与 P 为协同元素的关系,两者通常表现出正相关性^[41]。此外,本研究发现高山栎组植物的 C、N、P 相关关系是否显著在不同器官中不同,这可能是由于植物不同器官生理需求及功能结构不同,叶片新陈代谢快,其结构建成与生长的矛盾也较显著,所以叶片中 C 与 N、P 呈极显著负相关关系;而根中 N、P 主要来源于土壤,其 N、P 含量主要受土壤中有效 N、P 含量的影响,所以根部 N、P 元素的相关程度比其余器官低^[42-43]。

叶片为植物体的基本功能结构单位,其生物化学成分相对稳定^[42],对其 C、N、P 化学计量特征进行研究具有重要意义。在本研究中,高山栎组植物叶片 C 含量为 $477.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,处于较高水平,接近于全球陆地植物($464 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[45];高于中国草地生态系统($438 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[46],说明了高山栎组植物叶片具有较高的 C 储存能力。本研究中高山栎组植物叶片 N 含量为 $13.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,低于 Han 等在中国区域得到 N 含量($20.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[47]以及 Elser 等全球尺度下的 N 含量($20.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[45],表明了高山栎组植物分布区 N 元素较匮乏;高山栎组植物叶片 P 含量为 $1.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,相近乎于 Han 等在中国区域得到 P 含量($1.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[47],低于 Elser 等全球尺度下的 P 含量($1.58 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[45]。这说明了横断山地区高山栎组植物的生长可能主要受 N 元素的限制性元素。本研究中,叶片 C:N、C:P、N:P 值分别为 36.50、438.50、11.69,其 C:N、C:P 低于姜沛沛等在陕西省森林群落中得到的灌木叶片 C:N (44.42)、C:P (532.25)^[14]。叶片 N:P 是判断植物营养元素限制、生长速率的重要指标,一般认为生长速率较快的植物具有低的 N:P 值^[48],本研究中高山栎组植物叶片 N:P 值较低^[14],可看出高山栎组植物具有较高的生长速率。

3.2 C、N、P 化学计量特征的影响因素分析

海拔、坡度、坡向是重要的地形因子,其中海拔尤为重要,随着海拔的升高,气温、CO₂分压降低,光照强度增加,进而影响到植物的生长^[49],植物各器官 C、N、P 化学计量特征在不同海拔生态环境因子的影响下也会发生相应的适应性变化。同时,海拔梯度与温度变化密切相关,对海拔的研究可用于推测全球气温变化下植物生长的变化。

本研究中,坡度、坡向与高山栎组植物 C、N、P 化学计量值间相关性均不显著,对其影响较小,海拔对其影响相对较强,但呈较弱的相关关系,而器官的来源不同及物种间差异是造成 C、N、P 含量及其比值变异的主要影响因素。同时,具体的高山栎组植物不同器官化学计量值对海拔的响应为,叶片中 C 含量与海拔间呈显著正相关($p < 0.01$),原因可能是随着海拔的升高,温度降低,为满足对环境的要求,高山栎组植物叶片的毛、鳞片厚度也会随海拔升高而增加^[50],更多的 C 用于构建这些保卫结构,所以叶片中的 C 含量随着海拔的升高而显著增加。而根部受海拔的影响较小,可能是由于土壤对于根部受海拔升高的影响具有一定的缓冲作用,从而使得海拔对根部的响应不显著,但具体原因有待进一步研究。高山栎组植物各器官 C:N、C:P、N:P 与海拔之间表现为显著负相关关系($p < 0.05$),或具有负相关趋势($p > 0.05$),即随着海拔的升高各器官 C:N、C:P、N:P 值有降低的趋势,参照 Elser 指出生长快速的有机体通常具有较低的 C:N、C:P 和 N:P 比值可知^[36],随着海拔的升高,温度降低,高山栎组植物 C:N、C:P、N:P 有降低的趋势,生长速率则可能有增加的趋势。通过对高山栎组植物 C、N、P 化学计量特征对海拔响应的研究,可预测到在全球气温升高的环境下,横断山区灌丛群落叶片 C 含量可能会降低,而各器官 C、N、P 化学计量比值会有升高的趋势。

4 结语

对横断山地区高山栎组灌木型植物不同营养器官 C、N、P 化学计量的研究发现:高山栎组植物营养元素在不同器官之间的分配存在差异,其中叶片 C、N、P 含量均高于其余器官,分别为 $477.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $13.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;各器官 C、N、P 含量

变异系数均表现为 $C < N < P$,变异系数最大值发生在根部;高山栎组植物不同器官 C、N、P 相关关系一表现为 C 与 N、P 为负相关,N 与 P 为正相关,但相关关系是否显著在不同器官中不同;器官来源不同及物种不同是造成高山栎组植物 C、N、P 含量及比值差异的主要因素;海拔对高山栎组植物根部 C、N、P 含量影响不显著;海拔升高时,叶 C 含量及枝 P 含量增加,C:N、C:P、N:P 值有降低的趋势。此外,本文仅针对生长季后期的高山栎组灌木型植物进行了调查研究,缺乏季节间动态变化的分析。同时,由于高山栎组植物的分类尚存在分歧^[22],很难依据形态特征进行准确鉴定,所以本研究并未探究不同种灌木型高山栎之间的差异。

参考文献 (References)

- [1] VANNI M J, FLECKER A S, HOOD J M, et al. Stoichiometry of nutrient recycling by vertebrates in a tropical stream: linking biodiversity and ecosystem function [J]. *Ecology Letters*, 2002, 5 (2): 285 - 293
- [2] NIKLAS K J, OWENS T, REICH P B, et al. Nitrogen/phosphorus leaf stoichiometry and the scaling of plant growth [J]. *Ecology Letters*, 2010, 8(6): 636 - 642
- [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. 植物生态学报 [J], 2010, 34(1): 2 - 6 [HE Jinsheng, HAN Xingguo. Ecological stoichiometry: Searching for unifying principles from individuals to ecosystems [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1): 2 - 6]
- [4] YU Q, CHEN Q S, ELSER J J, et al. Linking stoichiometric homeostasis with ecosystem structure, functioning and stability [J]. *Ecology Letters*, 2010, 13(1): 1390 - 1399
- [5] 刘旻霞, 朱柯嘉. 青藏高原东缘高寒草甸不同功能群植物氮磷化学计量特征研究 [J]. 中国草地学报, 2013, 35(2): 52 - 58 [LIU Minxia, ZHU Kejia. Characteristics of nitrogen and phosphorus stoichiometry of plants in different functional groups on alpine meadow in the eastern edge of Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2013, 35(2): 52 - 58]
- [6] 刘旻霞, 王刚. 高山草甸坡向梯度上植物群落与土壤中的 N、P 化学计量学特征 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 2012, 48(3): 70 - 75 [LIU Minxia, WANG Gang. N and P stoichiometry of plant and soil on slope direction gradient subalpine meadows [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2012, 48(3): 70 - 75]
- [7] 李征, 韩琳, 刘玉虹, 等. 滨海盐地碱蓬不同生长阶段叶片 C、N、P 化学计量特征 [J]. 植物生态学报, 2012, 36(10): 1054 - 1061 [LI Zheng, HAN Lin, LIU Yuhong, et al. C, N and P stoichiometric characteristics in leaves of *Suaeda salsa* during different growth phase in coastal wetlands of China [J]. *Chinese*

- Journal of Plant Ecology, 2012, **36**(10): 1054 – 1061]
- [8] QU F Z, YU J B, DU S Y, et al. Influences of anthropogenic cultivation on C, N and P stoichiometry of reed-dominated coastal wetlands in the Yellow River Delta[J]. Geoderma, 2014, **236**(4): 227 – 232
- [9] WANG W Q, WANG C, SARDANS J, et al. Plant invasive success associated with higher N-use efficiency and stoichiometric shifts in the soil-plant system in the Minjiang River tidal estuarine wetlands of China[J]. Wetlands Ecology and Management, 2015, **23**(5): 865 – 880
- [10] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 等. 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[J]. 生态学报, 2010, **30**(23): 6581 – 6590 [LIU Wangde, SU Jianrong, LI Shuaifeng, et al. Stoichiometry study of C, N and P in plant and soil at different successional stages of monsoon evergreen broad-leaved forest in Pu'er, Yunnan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, **30**(23): 6581 – 6590]
- [11] MOORE T R, TROFYMOW J A, PRESCOTT C E, et al. Nature and nurture in the dynamics of C, N and P during litter decomposition in Canadian forests[J]. Plant and Soil, 2011, **339**(1–2): 163 – 175
- [12] 项文化, 黄志宏, 闫文德, 等. 森林生态系统碳氮循环功能耦合研究综述[J]. 生态学报, 2006, **26**(7): 2365 – 2372 [XIANG Wenhua, HUANG Zhihong, YAN Wende, et al. Review on coupling of interactive functions between carbon and nitrogen cycles in forest ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, **26**(7): 2365 – 2372]
- [13] 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[J]. 植物生态学报, 2015, **39**(12): 1146 – 1155 [CUI Gaoyang, CAO Yang, CHEN Yunming. Characteristics of nitrogen and phosphorus stoichiometry across components of forest ecosystem in Shaanxi Province [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2015, **39**(12): 1146 – 1155]
- [14] 姜沛沛, 曹扬, 陈云明. 陕西省森林群落乔灌木叶片和凋落物 C、N、P 生态化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(2): 365 – 372 [JANG Peipei, CAO Yang, CHEN Yunming. C, N, P stoichiometric characteristics of tree, shrub, herb leaves and litter in forest community of Shaanxi Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(2): 365 – 372]
- [15] 罗艳, 贡璐, 朱美玲, 等. 塔里木河上游荒漠区 4 灌木植物叶片与土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2017, **37**(24): 1 – 10 [LUO Yan, GONG Lu, ZHU Meiling, et al. Stoichiometry characteristics of leaves and soil of four shrubs in the upper reaches of the Tarim River Desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(24): 1 – 10]
- [16] 崔鸿侠, 肖文发, 黄志霖, 等. 神农架 3 种针叶林土壤碳储量比较[J]. 东北林业大学学报, 2014, **42**(3): 69 – 72 [CUI Hongxia, XIAO Wenfa, HUANG Zhilin, et al. Soil organic carbon storage of three coniferous forests in Shennongjia Nature Reserve [J]. J. Nor For Univ, 2014, **42**(3): 69 – 72]
- [17] 鲁志云, 宋亮, 王训, 等. 哀牢山森林凋落物与腐殖质及土壤的生态化学计量特征[J]. 山地学报, 2017, **35**(3): 274 – 282 [LU Zhiyun, SONG Liang, WANG Xun, et al. Ecological Stoichiometry Characteristics of the Litterfall-Humus-Soil Continuum Systems under Different Successional Stages of the Subtropical Forest in SW China [J]. Mountain Research, 2017, **35**(3): 274 – 282]
- [18] 赵培, 王群盈, 刘志鹏. 秦岭山区沟渠植物和土壤 CNP 生态化学计量特征[J]. 山地学报, 2017, **35**(5): 753 – 760 [ZHAO Pei, WANG Qunying, LIU Zhipeng. The Stoichiometric Characteristics of C, N, P for Plants and Soil in the Ditches at Shangluo City of Qinling Mountain [J]. Mountain Research, 2017, **35**(5): 753 – 760]
- [19] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2013, **33**(15): 4674 – 4682 [ZHU Qiulian, XING Xiaoyi, ZHANG Hong, et al. Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hilly-gully region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(15): 4674 – 4682]
- [20] MARSCHNER H. Mineral Nutrition of Higher Plants [J]. Journal of Ecology, 1995, **76**(4): 1250
- [21] ELSER J J, FAGAN W F, KERKHOFF A J, et al. Biological stoichiometry of plant production: Metabolism, scaling and ecological response to global change [J]. New Phytologist, 2010, **186**(3): 593 – 608.
- [22] 杨钦周. 中国 - 喜马拉雅地区硬叶栎林的特点与分类[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1990, **14**(3): 197 – 211 [YAN Qinzhou. The characteristic and classification of Oak durisilvae in the Himalayan region of China [J]. Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica, 1990, **14**(3): 197 – 211]
- [23] 周浙昆. 中国栎属的地理分布[J]. 中国科学院研究生院学报, 1993, **10**(1): 95 – 102 [ZHOU Zhekun. Geographical distribution of Quercus from China [J]. Journal of Graduate School Academia Sinica, 1993, **10**(1): 95 – 102]
- [24] 刘兴良, 刘世荣, 何飞. 中国硬叶常绿高山栎类植物的分类与现代地理分布[J]. 四川林业科技, 2008, **29**(3): 1 – 7 [LIU Xinliang, LIU Shirong, HE Fei. Taxonomy and modern geographical distribution of Species of Sclerophyllous Alpine Oak plants in China [J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2008, **29**(3): 1 – 7]
- [25] 王国严, 徐阿生. 川滇高山栎研究综述[J]. 四川林业科技, 2008, **29**(2): 23 – 29 [WANG Guoyan, XU Asheng. A review of researches on *Quercus aquifolioides* [J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2008, **29**(2): 23 – 29]
- [26] 刘千里, 徐雪梅, 刘兴良, 等. 卧龙巴郎山川滇高山栎叶片营养元素的海拔梯度变化特征[J]. 四川林业科技, 2012, **33**(3): 1 – 6 [LIU Qianli, XU Xuemei, LIU Xinliang, et al. Characteristics of macronutrient variation in leaves of *Quercus*

- aquifolioides* along with the altitudinal gradient on the Balangshan mountain in Wolong Nature Reserve, China [J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2012, **33**(3): 1–6
- [27] 施雅风. 第四纪中期青藏高原冰冻圈的演化及其与全球变化的联系[J]. 冰川冻土, 1998, **20**(3): 5–16 [SHI Yafeng. Evolution of the Cryosphere in the Tibetan Plateau, China, and its Relationship with the Global Change in the Mid Quaternary[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, **20**(3): 5–16]
- [28] 潘裕生. 横断山区地质构造分区[J]. 山地研究, 1989, **7**(1): 3–12 [PAN Yusheng. Geological tectonic division of the Hengduan mountainous region [J]. Mountain Research, 1989, **7**(1): 3–12]
- [29] 余有德, 刘伦辉, 张建华. 横断山区植被分区[J]. 山地研究, 1989, **7**(1): 47–55 [YU Youde, LIU Lunhui, ZHANG Jianhua. Vegetation regionalization of the Hengduan mountainous region [J]. Mountain Research, 1989, **7**(1): 47–55]
- [30] 黄成就, 张永田, 徐永椿, 等. 壳斗科 [A]. 中国植物志 (第 22 卷) [C]. 北京: 科学出版社, 1998: 213–332 [HUANG Chengchui, CHANG Yongtian, XU Yongchun, et al. Fagaceae [A]. Flora of China (Vol. 22) [C]. Beijing: Science Press, 1998: 213–332]
- [31] KERKHOFF A J, FANGAN W F, ELSER J J, et al. Phylogenetic and growth form variation in the scaling of nitrogen and phosphorus in the seed plants [J]. The American Naturalist, 2006, **168**(4): 103–122
- [32] VITOUSEK P M. Foliar and litter nutrients, nutrient resorption, and decomposition in Hawaiian *Metrosideros polymorpha* [J]. Ecosystems, 1998, **1**(4): 401–407
- [33] 贺合亮, 阳小成, 李丹丹, 等. 青藏高原东部窄叶鲜卑花碳、氮、磷化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2017, **41**(1): 126–135 [HE Heliang, YANG Xiaocheng, LI Dandan, et al. Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus of *Sibiraea angustata* shrub on the eastern Qinghai-Xizang Plateau [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, **41**(1): 126–135]
- [34] NIKLAS K J, COBB E D. N, P, and C stoichiometry of *Eranthis hyemalis* (Ranunculaceae) and the allometry of plant growth [J]. American Journal of Botany, 2005, **92**(8): 1256–1263
- [35] MINDEN V, KLEYER M. Internal and external regulation of plant organ stoichiometry [J]. Plant Biology, 2014, **16**(5): 897–907
- [36] ELSER J J, ACHARYA K, KYLE M, et al. Growth rate-stoichiometry couplings in diverse biota [J]. Ecology Letters, 2003, **6**(10): 936–943
- [37] MAKINO W, COTNER J B, STERNER R W, et al. Are bacteriamore like animals than plants? Growth rate and resource dependence of bacterial C: N: P stoichiometry [J]. Functional Ecology, 2003, **17**(1): 121–130
- [38] STERNER R W, ELSER J J. Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere [J]. Princeton: Princeton University Press, 2003: 1–20
- [39] ZHENG S X, SHANGGUAN Z P. Spatial patterns of leaf nutrient traits of the plants in the Loess Plateau of China [J]. Trees, 2007, **21**(3): 357–370
- [40] 杨梅, 王昌全, 袁大刚, 等. 不同生长期烤烟各器官 C、N、P 生态化学计量学特征 [J]. 中国生态农业学报, 2015, **23**(6): 686–693 [YANG Mei, WANG Changquan, YUAN Dagang, et al. C, N, P stoichiometry traits of different fluecured tobacco organs at different growth stages [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, **23**(6): 686–693]
- [41] WRIGHT I J, REICH P B, CORNELISSEN J H C, et al. Assessing the generality of global leaf trait relationships [J]. New Phytologist, 2005, **166**(2): 485–496
- [42] 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
- [43] 樊江文, 张良侠, 张文彦, 等. 中国草地样带植物根系 N、P 元素特征及其与地理气候因子的关系 [J]. 草业学报, 2014, **23**(5): 69–76 [FAN Jiangwen, ZHANG Liangxia, ZHANG Wenyan, et al. Plant root N and P levels and their relationship to geographical and climate factors in a Chinese grassland transect [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, **23**(5): 69–76.]
- [44] REINERS W A. Complementary models for ecosystems [J]. The American Naturalist, 1986, **127**(1): 59–73
- [45] ELSER J J, FAGAN W F, DENNO R F, et al (2000). Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs [J]. Nature, 2000, **408**(6812): 578–580
- [46] HE J S, FANG J Y, WANG Z H, et al. Stoichiometry and large-scale patterns of leaf carbon and nitrogen in the grassland biomes of China [J]. Oecologia, 2006, **149**(1): 115–122
- [47] 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
- [48] TESSIER J T, RAYNAI D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation [J]. Journal of Applied Ecology, 2003, **40**(3): 523–534
- [49] 胡启武, 宋明华, 欧阳华, 等. 祁连山青海云杉叶片氮、磷含量随海拔变化特征 [J]. 西北植物学报, 2007, **27**(10): 2072–2079 [HU Qiwu, SONG Minghua, OUYANG Hua, et al. Variations in Leaf N, P of *Picea crassifolia* along the Altitude Gradient in Qilian Mountains [J]. Acta Botanica Boreali – Occidentalia Sinica, 2007, **27**(10): 2072–2079]
- [50] 姜永雷, 邓莉兰, 黄晓霞. 不同海拔川滇高山栎叶片的解剖结构特征 [J]. 江苏农业科学, 2015, **43**(1): 195–198 [JIANG Yonglei, DENG Lilan, HUANG Xiaoxia. Anatomical structural characteristics of *Quercus aquifolioides* leaves in different altitudes [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, **43**(1): 195–198]

Stoichiometric Characteristics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in *Quercus Sect. Heterobalanus* Shrubs in the Hengduan Mountain, China

LI Li¹, HU Jun¹, YU Qiannan^{1,2,3}, YANG Xiaochen⁴, LI Tin¹, LIU Qing^{1*}

(1. Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Faculty of Geosciences & Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

3. Sichuan Environment & Engineering Appraisal Center, Chengdu 610041, China;

4. College of Material and Chemistry & Chemical Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Few studies have been performed on the stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus (C, N and P) in plateau shrublands across China. *Heterobalanus* is a typical shrub species representative of the Hengduan Mountain Region. Thus, exploring the carbon, nitrogen and phosphorus distribution patterns in its various organs could help us understand both the mechanisms of C, N and P cycling and nutrient balance in the *Heterobalanus*-dominated shrub ecosystem. A stratified random sample of seventeen sampling sites was selected in the Hengduan Mountain Region, and then 101 biological samples of *Heterobalanus* plant organs were collected and measured. The results showed that: (1) The C, N and P concentrations varied in different organs, in the following decreasing orders: leaf ($477.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > twig ($469.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > shoot ($445.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > root ($431.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$); leaf ($13.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > shoot ($6.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > twig ($5.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > root ($4.70 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$); leaf ($1.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > twig ($1.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > root ($1.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > shoot ($0.71 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), respectively. (2) The C concentration was relatively higher and more stable than the N and P concentrations, and the maximum coefficient of variation for C, N and P were all observed at the root. (3) The N:P ratio varied in different organs from 4.89 – 11.69, with the minimum found in the twig organ and the maximum found in the leaf. (4) The correlation analysis results indicated that the C concentration was negatively correlated with N and P concentrations, while the N concentration correlated positively with the P concentration. However, the magnitude of correlation differed significantly in the different organs. (5) In all organs, the C, N and P concentrations were hardly affected by altitude, but only the C concentration of the leaf and the P concentration of the twig increased with latitude. These results indicate that the C, N and P stoichiometric characteristics in *Heterobalanus* shrubs are somewhat related to homeostasis, and the distributions of C, N and P are closely related to both the growth period and the function of the organ.

Key words: ecological stoichiometry; *Heterobalanus*; shrub; plant organs; Hengduan Mountain