

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201502026

杨慧,李青芳,涂春艳,等. 桂林毛村岩溶区典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征[J]. 广西植物, 2015, 35(4):493-499

Yang H, Li QF, Tu CY, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of typical plants in karst area of Maocun, Guilin[J]. *Guihaia*, 2015, 35(4):493-499

桂林毛村岩溶区典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征

杨 慧^{1,2}, 李青芳^{1,2,3}, 涂春艳^{1,2,3}, 曹建华^{1,2*}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所国土资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西 桂林 541004; 3. 广西师范大学生命科学学院, 广西 桂林 541004)

摘 要: 植物的碳、氮、磷化学计量特征能反映植物对土壤营养元素的利用效率, 岩溶区植物经过长期的进化形成了自身独特的生理生态和生态化学计量特征, 通过岩溶区植物叶片碳、氮、磷化学计量可以揭示岩溶生态系统各组分之间的养分循环规律。该研究在桂林毛村岩溶区次生林中选择 3 个 20 m×20 m 的样方, 采用多元统计方法分析了岩溶区森林 12 种典型植物叶片共 186 个样品的碳、氮、磷的生态化学计量特征, 研究它们之间的相互关系, 探讨碳、氮、磷化学计量学在岩溶生态系统中的生态指示作用。结果表明: (1) 虽然岩溶区石灰土氮和磷的含量较高, 但由于其有效性低, 植物对养分的吸收和利用缓慢, 岩溶区石灰土植物的生长仍然受到 N 和 P 的共同限制; (2) 由于岩溶区植物叶片中 N 和 P 的含量显著偏低导致较高的 C:N 和 C:P 值(C:N 的平均值为 80.86; C:P 的平均值为 639.65); (3) 利用 $N:P < 14$ 表明氮受限制, $N:P > 16$ 表明磷受限制, $14 < N:P < 16$ 表明 N 和 P 共同限制的标准判断植物叶片受 N 或 P 的限制在岩溶区不完全适合; (4) 元素间相关性分析表明, 叶片的 C 和 N 呈极显著负相关关系($P < 0.01$), C 和 P 呈显著负相关关系($P < 0.05$), N 和 P 之间呈现极显著正相关关系($P < 0.01$)。这体现了植物体内两营养元素含量需求变化的相对一致性。研究结果有助于了解岩溶区森林植物的适生机制及其生态地球化学过程, 可为岩溶区生态治理提供理论依据。

关键词: 岩溶生态系统; 自然植被; 植物叶片养分; 生态化学计量; 养分限制**中图分类号:** Q948.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2015)04-0493-07

Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of typical plants in karst area of Maocun, Guilin

YANG Hui^{1,2}, LI Qing-Fang^{1,2,3}, TU Chun-Yan^{1,2,3}, CAO Jian-Hua^{1,2*}(1. *Karst Dynamics Laboratory, MLR & Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China*; 2. *International Research Center on Karst (IRCK) under the Auspices of UNESCO, Guilin 541004, China*; 3. *College of Life Sciences, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China*)

Abstract: The balance between various elements of the ecosystem has been the focus of research related to the ecology of global change and biogeochemical cycles. Ecological stoichiometry is the study of the balance of energy and elements in biological systems and based on the general laws of physics, chemistry and biology. Ecological stoichiometry provides an integrated approach to investigating the stoichiometric relationships and rules in biogeochemical cycling and ecological processes. The primary nutrient elements, carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P), play an important role in plant growth and regulating various botanic physiological functions. The cycling of N and P are

收稿日期: 2015-02-17 修回日期: 2015-04-20

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41402326); 广西自然科学基金青年基金(2013GXNSFBA019217); 中国地质调查项目(12120113005300); 国土资源部公益性行业科研专项(201211086-05); 广西科学研究与技术开发计划项目(桂科合 14125008-2-1)。

作者简介: 杨慧(1981-), 女, 山东单县人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为岩溶生态学, (E-mail) yanghui-kdl@karst.ac.cn。

*通讯作者: 曹建华, 博士, 研究员, 主要研究方向为岩溶生物地球循环, (E-mail) jhcaogl@karst.ac.cn。

tightly coupled to C cycling in ecosystems, primarily through aspects related to ecosystem carbon primary production. Leaf C, N and P stoichiometry varies throughout many aspects of plant biology. The ratios of C : N, C : P and N : P may reflect the balance between the plant demand in relation to N and P availability and may constrain various processes. Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry of plants reflect the utilization efficiency of plants with regard to soil nutrient elements. After a long period of evolution, plants had form and their own unique ecophysiology and ecological stoichiometry in karst landscapes. Carbon, nitrogen, phosphorus stoichiometry of plant leaves can reveal the regularity of nutrient cycling within karst ecosystems. Three quadrats, sized 20 m × 20 m, in a secondary forest in the karst area of Maocun, Guilin were selected. A total of 186 samples of 12 plant types were collected. The ecological stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus were analyzed using multivariate statistical analysis to study the relationship between them and explored ecological indicating functions of carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry in karst ecosystems. The results were as follows: Firstly, C, N, and P values in the samples' plant leaves were $(456.19 \pm 2.16) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, $(7.71 \pm 0.26) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, and $(0.89 \pm 0.02) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. Carbon, nitrogen, and phosphorus values were all lower than China's and global averages. Although the higher contents of N and P in the karst limestone soil because of their low availability and their slow uptake and utilization efficiencies, nitrogen and phosphorus still presented as common limitations to plant growth within the karst area. Secondly, in this study, C : N, C : P, and N : P in the plant leaves of the samples were 80.86 ± 6.74 , 639.65 ± 53.79 , and 10.42 ± 0.89 , respectively. Because the contents of N and P in plant leaves in the karst area were significantly lower, it resulted in higher C : N and C : P values. Thirdly, the rules of N : P was less than 14, indicating nitrogen limits; N : P was more than 16, indicating nitrogen limits; and N : P between 14 and 16 showed that nitrogen and phosphorus limits were not entirely suitable for determining the limiting nutrient elements within the karst area. Lastly, correlation analysis between elements showed that there was a significant negative correlation between leaf C and N ($P < 0.01$), and a significantly negative correlation between C and P ($P < 0.05$), while there was a significant positive correlation between N and P ($P < 0.01$). This correlation reflected the change of the relative consistency of nutrient elements of plants. The results contributed to the understanding of plant adaptive mechanisms and ecological geochemical process, providing the theory basis for ecological control of the karst area.

Key words: karst ecosystem; natural vegetation; plant leaf nutrient; ecological stoichiometry; nutritional constraint

生态系统的元素平衡是当前全球变化生态学和生物地球化学循环研究的焦点和热点(David *et al.*, 2014)。碳是构成植物体内干物质的主要元素(项文化等, 2006), 而氮和磷是各种蛋白质和遗传物质的重要组成元素(刘万德等, 2010)。碳、氮和磷在土壤—植被的生态系统中都非常重要(郭子武等, 2013)。氮和磷的循环通过对生态系统碳的初级生产的影响与碳循环紧密耦合(Gao *et al.*, 2014)。碳氮比和碳磷比反映植物对土壤营养元素的利用效率(赵美霞等, 2012), 氮磷比则用于判断对群落生产力起限制作用的营养元素(曾德慧等, 2005)。

岩溶区森林因其生境的特殊性, 结构的复杂性和系统的脆弱性, 在一系列特征上与相同气候条件下常态地貌上的常绿阔叶林有明显的不同(罗绪强等, 2014)。经过长期的进化适应形成了自身独特的生理生态和生态化学计量特征。杜有新等(2010)对贵州中部岩溶山区三种优势灌木养分分布特征研究

后发现, 灌草丛灌木树种叶片的 N : P 比值和灌木林均显著高于磷素限制阈值(朴河春等, 2005), 说明这些灌木生长普遍受到磷素限制; 罗绪强等(2014)对茂兰岩溶区森林常见钙生植物叶片元素含量及其化学计量学特征研究后发现岩溶区钙生植物具有低 P、K 和高 Ca、Mg 的特点, 绝大部分植物属于 P 制约性植物。尽管学者们对岩溶区植物的生态化学计量特征进行了关注, 但关于岩溶区森林系统植物叶片生态化学计量特征研究仍显不足(Liu *et al.*, 2014)。因此, 开展岩溶区典型植物叶片的元素含量特征及其化学计量学研究, 有助于了解岩溶区森林植物的适生机制及其生态地球化学过程, 为岩溶区生态治理提供理论依据(杜有新等, 2010)。

本文在桂林市东南毛村岩溶生态研究基地选取一个次生林为主的典型岩溶样地, 对岩溶区自然林地不同地貌部位植物叶片中的 C、N、P 生态化学计量进行研究, 分析它们之间的相互关系, 探讨碳、氮、

磷化学计量学在岩溶生态系统中的生态指示作用, 对于揭示岩溶生态系统各组分之间的养分循环规律, 阐明系统的稳定性具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于桂林市东南约 30 km 的潮田乡毛村背地坪, 研究区属中亚热带湿润季风气候, 气候四季分明, 降雨量的年内分配主要受季风活动影响, 分布不均。夏季湿热多雨, 秋季干旱少雨。年均降雨量为 1 915 mm, 年均气温为 18.8 °C。研究区地层岩性为泥盆系融县组(D_{3r})灰岩。

1.2 样地选择及样品采集

各点均采取林相整齐、林木分布较均匀, 坡位一致的次生林(平均树龄 20 a)。每个样方大小为 20 m×20 m, 在大样方内分割成 16 个 5 m×5 m 的小样方。在每个样方内确定优势植物、选取长势良好的灌木和乔木, 受试植物叶片均采集成熟的营养叶片。采集乔木叶片时, 攀爬至树冠部位或直接用高枝剪, 剪切冠层东西南北四个方位和上中下不同部位的枝条, 采摘叶片混合后, 用四分法取样; 灌木不需要攀爬, 按同样方法取样后, 装入自封袋带回实验室处理(高三平等, 2007)。本研究中, 共采集到 12 种典型植物, 其中灌木 10 种、乔木 6 种(某些物种同时有灌木和乔木)。

1.3 样品室内处理及 C、N、P 含量测定

将采集回来的样品先用自来水冲洗干净, 去掉灰尘等, 然后用去离子水冲洗。于 105 °C 下杀青 10 min, 80 °C 烘干至恒重, 粉碎后过 100 目筛制成供试样品; 碳的测定采用外加加热重铬酸钾容量法, N、P 的测定采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 凯氏定氮法测定 N, 钒钼黄比色法测定 P。

1.4 数据分析

采用 Excel2010 软件进行数据处理及作图, SPSS16.0 进行数据统计分析。植物叶片中的 C、N 和 P 含量均采用质量含量, 以 mg·g⁻¹ 为单位, 相应的 C:N、C:P 和 N:P 均采用质量比。正态分布性检验采用 One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test, 简称 K-S 检验; 不同植物叶片化学计量之间的差异性检验采用单因素方差分析(One-Way ANOVA), 用 LSD 法进行多重比较; 数据相关分析

采用 Pearson 相关系数, 采用双尾检验(2-tailed)。

2 结果与分析

2.1 岩溶区植物组成及叶片的 C、N、P 含量

共采集到 186 个植物样品, 包括 12 种不同的植物(表 1), 分别属于 9 科 11 属, 按照生活型划分为灌木和乔木, 其中壳斗科的青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)和金缕梅科的檫木(*Loropetalum chinense*)为优势物种。岩溶区植物叶片 C 含量在 371.14~528.00 mg·g⁻¹ 之间, 平均为 (456.19±2.16) mg·g⁻¹, 变异系数为 0.06, 碳的变幅相对较小, 分布较为集中(图 1)。N 含量在 (0.48~18.90) mg·g⁻¹ 之间, 平均为 (7.71±0.26) mg·g⁻¹; P 含量在 0.06~2.01 mg·g⁻¹ 之间, 平均为 (0.89±0.02) mg·g⁻¹, 与全球水平叶片 P 含量 1.99 mg·g⁻¹ (Elser *et al.*, 2000) 或 1.80 mg·g⁻¹ (Reich *et al.*, 2004) 相比, 研究区植物叶片中 P 含量明显偏低。N 和 P 的变异系数分别为 0.45 和 0.33, 相比 C, N 和 P 的变异性均较大。植物叶片 C、N 和 P 的偏度值均小于 1, 经 K-S 检验, 服从正态分布($P>0.05$)。

2.2 岩溶区植物叶片 C、N、P 化学计量特征

植物叶片的 C:N 和 C:P 反映植物吸收营养所能同化 C 的能力, 在一定程度上反映了植物的营养利用效率。本研究中, 岩溶区植物叶片 C:N 在 20.33~961.81 之间, 平均为 80.86±6.74; C:P 在 199.56~7 639.68 之间, 平均为 639.65±53.79; N:P 在 0.42~123.39 之间, 平均为 10.42±0.89。C:N、C:P 和 N:P 变异系数分别为 1.14、1.15 和 1.16。从变异系数看出, 桂林毛村岩溶区次生林地中 C:N、C:P 和 N:P 变异程度均较高, 而 C:N、C:P 和 N:P 的偏度值均大于 1, 经 K-S 检验, 均不符合正态分布($P<0.05$) (图 1)。这说明在小的区域尺度上 C:N、C:P 和 N:P 变异性较大, 与黄建军等(2003)和张珂等(2014)的研究结果一致。

2.3 岩溶区乔木与灌木叶片 C、N、P 含量比较

所采岩溶区植物样品中, 乔木占 40.86%, 灌木占 59.14% (表 2), 乔木和灌木之间 C、P 含量与总体之间均无显著性差异; 而乔木的 N 含量平均为 (8.47±0.39) mg·g⁻¹ 显著高于灌木 N 含量平均为 (7.20±0.33) mg·g⁻¹ ($P<0.05$); C:N 表现为乔木的 (63.14±2.90) 低于灌木, 并且差异显著($P<$

表 1 桂林毛村岩溶区次生林地典型植物名录

Table 1 Typical species list of secondary forest in karst area in Maocun, Guilin

植物名称 Plant name	生活型 Life form	科 Family	属 Genus
檫木 <i>Loropetalum chinense</i>	乔木、灌木 Tree, Shrub	金缕梅科 <i>Hamamelidaceae</i>	檫木属 <i>Loropetalum</i>
青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>	乔木、灌木 Tree, Shrub	壳斗科 <i>Fagaceae</i>	青冈属 <i>Cyclobalanopsis</i>
巴豆 <i>Croton tiglium</i>	乔木、灌木 Tree, Shrub	大戟科 <i>Euphorbiaceae</i>	巴豆属 <i>Croton</i>
红背山麻杆 <i>Alchornea trewioides</i>	灌木 Shrub	大戟科 <i>Euphorbiaceae</i>	山麻杆属 <i>Alchornea</i>
山麻杆 <i>A. davidii</i>	灌木 Shrub	大戟科 <i>Euphorbiaceae</i>	山麻杆属 <i>Alchornea</i>
海桐 <i>Pittosporum tobira</i>	乔木、灌木 Tree, Shrub	海桐科 <i>Pittosporaceae</i>	海桐花属 <i>Pittosporum</i>
榆树 <i>Ulmus pumila</i>	乔木 Tree	榆科 <i>Ulmaceae</i>	榆属 <i>Ulmus</i>
南酸枣 <i>Choerospondias axillaris</i>	乔木 Tree	漆树科 <i>Anacardiaceae</i>	南酸枣属 <i>Choerospondias</i>
黄荆 <i>Vitex negundo</i>	灌木 Shrub	马鞭草科 <i>Verbenaceae</i>	牡荆属\黄荆属 <i>Vitex</i>
千里香 <i>Murraya paniculata</i>	灌木 Shrub	芸香科 <i>Rutaceae</i>	九里香属 <i>Murraya</i>
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	灌木 Shrub	木犀科 <i>Oleaceae</i>	女贞属 <i>Ligustrum</i>
桂树 <i>Osmanthus fragrans</i>	灌木 Shrub	木犀科 <i>Oleaceae</i>	木犀属 <i>Osmanthus</i>

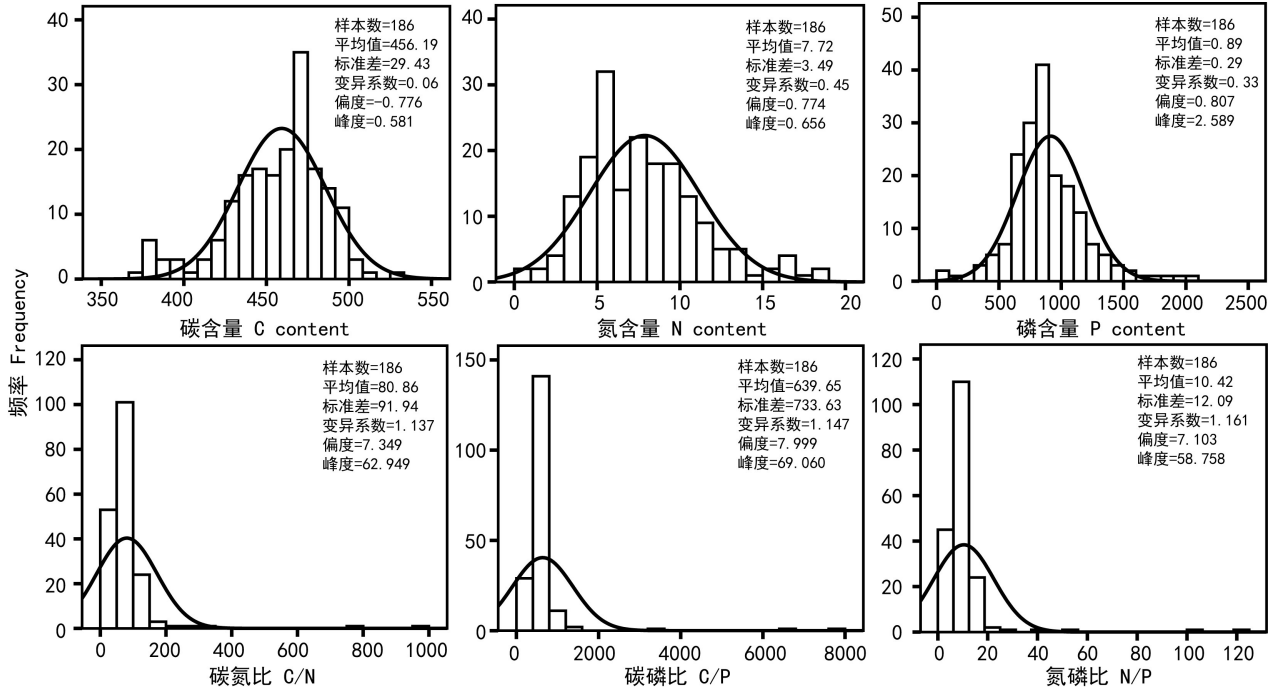


图 1 毛村岩溶区植物叶片养分组成的频率分布

Fig. 1 Frequency distribution of plant leaf nutrient composition in karst area

0.05); C:P 和 N:P 均表现为乔木高于灌木,但差异不显著($P > 0.05$)。不同生活型的相同植物,其植物叶片中 C、N、P 含量差异性均不显著($P > 0.05$);不同植物之间,除 C 差异性较为显著外,N 和 P 的差异均不显著;不同植物的 C:N、C:P 和 N:P 差异性均不显著,这一研究结果与张珂等(2015)研究结果不同,这可能是因为在岩溶区富钙偏碱的地球化学背景下,植物对养分的适应策略趋同,即为了适应环境的变化,植物具有可伸缩性地调整营养

元素含量的能力,也就是营养元素化学计量比值变化的能力(朴河春等,2005)。

2.4 植物叶片 C、N、P 之间的关系

图 2 为 6 种乔木和 10 种灌木植物叶片平均值中 C 和 N、C 和 P 以及 N 和 P 之间的关系。从图 2 中可以看出,桂林毛村岩溶区次生林地植物样品的 C 含量与 N 含量之间呈显著负相关关系($P < 0.05$),C 含量与 P 含量之间呈极显著负相关关系($P < 0.01$),N 含量与 P 含量之间呈显著的正相关

表 2 不同生活型植物的叶片养分组成比较
Table 2 Plant leaf nutrient composition comparison of different life forms

功能型 Functional type	植物名称 Plant name	重复数 Number	C (mg · g ⁻¹)	N (mg · g ⁻¹)	P (mg · g ⁻¹)	C : N	C : P	N : P	
乔木 Tree	欏木 <i>Loropetalum chinense</i>	15	449.34±2.42ab	5.91±0.37a	0.78±0.03ab	80.00±4.64ab	587.66±24.87a	7.63±0.46a	
	青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>	11	470.55±3.28bde	6.12±0.42a	0.71±0.07a	78.76±4.79ab	710.67±85.90a	9.10±0.95a	
	巴豆 <i>Croton tiglium</i>	14	378.62±5.33c	12.66±1.18b	1.25±0.10c	31.49±4.31a	308.51±18.63a	10.57±1.43a	
	海桐 <i>Pittosporum tobira</i>	13	460.31±14.91abd	7.52±0.89a	0.87±0.08ab	63.47±9.52ab	537.12±48.48a	8.67±0.90a	
	榆树 <i>Ulmus pumila</i>	9	473.47±3.25de	7.46±0.89a	0.69±0.03a	68.66±7.48ab	692.72±25.84a	10.93±1.36a	
	南酸枣 <i>Choerospondias axillaris</i>	14	475.42±8.18de	11.28±0.20b	1.00±0.03bcd	42.20±1.01a	476.77±15.42a	11.31±0.44a	
	合计 Total	76	456.36±3.59a	8.47±0.39a	0.91±0.04a	63.14±2.90a	643.55±95.67a	11.22±1.58a	
	灌木 Shrub	欏木 <i>Loropetalum chinense</i>	25	443.86±3.00a	5.39±0.42a	0.76±0.05ab	118.18±28.50ab	730.66±119.34a	9.36±2.02a
		青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>	5	465.08±0.44abde	6.23±0.51a	0.84±0.05ab	75.20±6.03ab	558.91±35.26a	7.44±0.13a
巴豆 <i>Croton tiglium</i>		9	412.94±29.15f	12.33±4.59b	1.17±0.01cd	60.43±37.20ab	352.87±24.27a	10.52±3.88a	
海桐 <i>Pittosporum tobira</i>		11	476.26±5.38de	7.00±0.62a	0.77±0.04ab	76.42±10.34ab	641.68±42.70a	9.19±0.70a	
黄荆 <i>Vitex negundo</i>		15	476.74±5.17de	6.82±2.07a	1.18±0.10cd	244.20±179.66b	418.45±40.52a	6.37±2.51a	
千里香 <i>Murraya paniculata</i>		13	443.23±4.89a	7.45±1.09a	0.97±0.06abd	61.82±8.04ab	460.92±27.78a	7.82±1.41a	
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>		8	485.76±7.04e	7.35±1.65a	0.85±0.02ab	74.48±18.94ab	572.25±19.47a	8.64±3.26a	
山麻杆 <i>Alchornea davidii</i>		6	411.62±20.58f	10.5±0.93b	1.30±0.02c	39.20±0.97a	316.63±15.66a	8.08±0.86a	
红背山麻杆 <i>Alchornea treviioides</i>		10	437.58±12.88a	15.00±1.34c	0.86±0.04ab	29.17±3.07a	507.05±45.06a	17.38±1.42a	
桂树 <i>Osmanthus fragrans</i>		8	495.53±4.86e	7.08±0.57a	0.61±0.03a	69.99±8.11ab	812.34±52.79a	11.61±0.65a	
合计 Total		110	456.07±2.69a	7.20±0.33b	0.88±0.03a	93.10±11.09b	636.95±62.87a	9.86±1.03a	
总计 Total		186	456.19±2.16a	7.72±0.26ab	0.89±0.02a	80.86±6.74ab	639.65±53.79a	10.42±0.89a	

注：同一列不同字母表示差异性显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$).

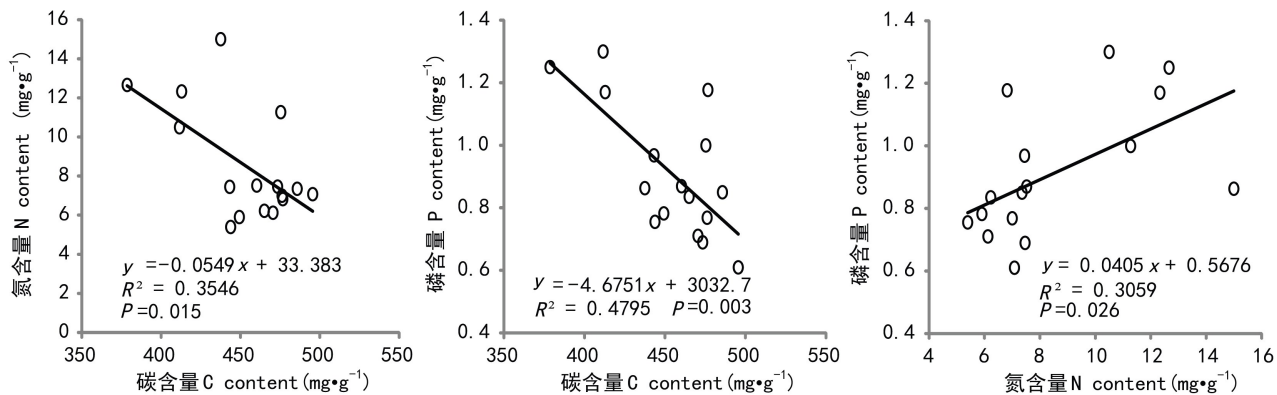


图 2 岩溶区植物叶片 C、N、P 之间的相关性分析 ($n = 186$)

Fig. 2 Relationship between leaf C, N and P of plant in karst area

关系($P < 0.01$),体现了植物体内两营养元素含量需求变化的相对一致性(李征等,2012)。

3 讨论

3.1 植物叶片 C、N、P 含量特征

岩溶区植物叶片 C 的含量略低于全球植物叶片 C 平均含量($464 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)(Elser *et al.*,2000;刘万德等,2010)比珠江三角洲典型植物叶片 C 含量($502.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)(吴统贵等,2010)低,但比阿拉善沙漠植物叶片中的 C 含量值($379.01 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)(张珂等,2014)和滇池流域植被叶片 C 含量($441.42 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)(阎凯等,2011)要高;N 的含量显著低于全球水平 $20.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (Reich *et al.*,2004)、中国 753 种陆地植被叶片 N 平均含量为 $20.20 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (Han *et al.*,2005)以及浙江天童 32 种常绿阔叶树叶片中 N 含量($16.06 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)(黄建军等,2003);与全球水平叶片 P 含量 $1.99 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (Elser *et al.*,2000)或 $1.80 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (Reich *et al.*,2004)相比,研究区植物叶片中 P 含量明显偏低。从植物叶片 C、N、P 含量与世界上主要植被类型叶片含量的比较可以看出,在富钙偏碱的岩溶区石灰土上,植物的生长比较明显地受到 N 和 P 的共同限制,这与多数陆地生态系统中的研究结果一致(张珂等,2014)。虽然已有的研究(杨慧等,2010)和本研究结果均显示,岩溶区石灰土有较高的全氮和全磷含量,但岩溶区石灰土是石灰岩母质发育的土壤,土壤中营养元素的生物有效性在很大程度上受到富钙、镁的岩溶地球化学背景制约,营养元素供给速率较慢,有效性偏低(曹建华等,2003),导致植物对养分的吸收和利用减少,造成植物体内养分含量较少。

3.2 植物叶片 C : N、C : P 和 N : P 化学计量特征

本研究中 C : N 分别是中国森林生态系统植物 C : N 值(28.5)(王晶苑等,2011)的 2.8 倍和全球森林生态系统植物 C : N(37.1)(McGroddy *et al.*,2004)值的 2.2 倍;与中国其它地区的研究结果相比,岩溶区 12 种典型植物叶片中 C : N 比阿拉善荒漠 54 种植物(张珂等,2014)、浙江天童 32 种植物(黄建军等,2003)和滨海盐地碱蓬(李征等,2012)等都要高;C : P 比全球森林生态系统植物(McGroddy *et al.*,2004)和中国森林生态系统植物(王晶苑等,2011)的 C : P 的值均要高。正如前文所述,本研究所采集的植物叶片 N 和 P 的含量显著

偏低,导致了 C : N 和 C : P 的结果普遍偏高。另外,本研究中 N : P 比全球森林生态系统植物(McGroddy *et al.*,2004)和中国森林生态系统植物 N : P 值要低(王晶苑等,2011)。按照植物的 N : P < 14 表明氮受限制,N : P > 16 表明磷受限制, $14 < N : P < 16$ 表明 N 和 P 共同限制(Güsewell *et al.*,2002;Koerselman *et al.*,1996)的标准来看,大部分植物属于 P 制约性植物;本研究的 N : P < 14,如果按此标准来判断,表明研究区植物在受 N、P 共同作用的同时更易受 N 限制。但事实上,与 N 含量相比,在研究区植物叶片中 P 的含量相对偏低,而且土壤中有效态磷的含量也较低。从这一分析出发,研究区植物首先应该受到 P 的限制而非 N 的限制。这说明利用上述标准判断植物叶片是否受 N 或 P 的限制在岩溶区并不完全适合。

3.3 植物叶片 C、N、P 相关性

叶片 C 与 N 以及 C 与 P 之间的负相关关系以及 N 与 P 之间的正相关关系,是高等陆生植物 C、N、P 元素计量的普遍特征之一,其大小与物种的生态策略和适应性有关,具有重要的生态学 and 进化学意义,也体现了叶片属性间的经济策略(张珂等,2014)。本研究验证了这一规律,并且与阎凯等(2011)对滇池流域植物叶片养分的研究结果和李征等(2012)对滨海盐地碱蓬叶片 C、N、P 化学计量学特征的研究结果一致。

4 结论

岩溶区植物叶片 C 平均含量为(456.19 ± 2.16) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,N 平均含量为(7.71 ± 0.26) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$;P 平均含量为(0.89 ± 0.02) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。受岩溶区特殊的富钙偏碱的土壤地球化学背景及相关环境因素的影响,岩溶区植物叶片 N、P 含量特别是磷和有效态磷含量明显低于其它母质发育的土壤上的植物及全球平均水平。说明岩溶区植物生长主要受到 N、P 的限制特别是 P 的限制。利用 N : P < 14 表明氮受限制,N : P > 16 表明磷受限制, $14 < N : P < 16$ 表明 N 和 P 共同限制的标准来判断植物叶片是否受 N 或 P 的限制在岩溶区并不完全适合。通过对 C : N 和 C : P 比值分析及 C、N、P 相关性分析,发现由于岩溶区植物叶片中 N 和 P 的含量偏低导致了该地区植物叶片中较高的 C : N 和 C : P。叶片的 C 和 N 呈极显著负相关关系,C 和 P 呈显著负相关关系,

N 和 P 呈极显著正相关关系。研究结果对于深入理解岩溶区土壤—植物间养分转化关系, 认识岩溶区植物适应机制及进行石漠化治理具有重要意义。

致谢 广西植物研究所盘波老师在野外植物考察中给予了指导! 卜巧珍、马俊飞、唐红萍、刘芝灵、黄中经等同学在野外采样和室内实验中给予了帮助! 审稿专家与本刊编辑老师提出了宝贵意见!

参考文献:

Cao JH(曹建华), Yuan DX(袁道先), Pan GX(潘根兴). 2003. Some soil features in karst ecosystem(岩溶生态系统中的土壤)[J]. *Adv Earth Sci*(地球科学进展), **18**(1): 37—44

David O, Christoph D, Björn CR, *et al.* 2014. Unifying elemental stoichiometry and metabolic theory in predicting species abundances[J]. *Ecol Lett*, **17**: 1 247—1 256

Du YX(杜有新), Li LQ(李恋卿), Pan GX(潘根兴), *et al.* 2010. Distribution patterns of main nutrients in three dominant shrubs in karst mountainous areas in central Guizhou, China(贵州中部喀斯特山地三种优势灌木养分分布)[J]. *Ecol Environ Sci*(生态环境学报), **19**(3): 626—630

Elsler JJ, Fagan WF, Denno RF, *et al.* 2000. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs[J]. *Nature*, **408**(6 812): 578—580

Gao SP(高三平), Li JX(李俊祥), Xu MC(徐明策), *et al.* 2007. Leaf N and P Stoichiometry of common species in successional stages of the evergreen broad-leaved forest in Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province, China(天童常绿阔叶林不同演替阶段常见种叶片 N, P 化学计量学特征)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **27**(3): 947—952

Gao Y, He N, Yu G, *et al.* 2014. Long-term effects of different land use types on C, N, and P stoichiometry and storage in subtropical ecosystems: a case study in China[J]. *Ecol Eng*, **67**: 171—181

Guo ZW(郭子武), Wang WY(王为宇), Yang QP(杨清平), *et al.* 2013. Effects of mulching management on stoichiometry of soil C, N, P in *Phyllostachys praecox* plantations(林地覆盖对雷竹林土壤碳氮磷化学计量特征的影响)[J]. *Guihaia*(广西植物), **33**(5): 627—632

Güsewell S, Koerselman W. 2002. Variation in nitrogen and phosphorus concentrations of wetland plants[J]. *Per Plant Ecol Evol Syst*, **5**(1): 37—61

Han W, Fang J, Guo D, *et al.* 2005. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. *New Phytol*, **168**(2): 377—385

Huang JJ(黄建军), Wang XH(王希华). 2003. Leaf nutrient and structural characteristics of 32 evergreen broad-leaved species(浙江天童 32 种常绿阔叶树叶片的营养及结构特征)[J]. *J East Chin Norm Univ: Nat Sci Ed*(华东师范大学学报·自然科学版), (1): 92—97

Koerselman W, Meuleman AF. 1996. The vegetation N : P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. *J Appl Ecol*, **33**: 1 441—1 450

Li Z(李征), Han L(韩琳), Liu YH(刘玉虹), *et al.* 2012. C, N and P stoichiometric characteristics of *Suaeda salsa* during different growth phase in coastal wetlands of China(滨海盐

地碱蓬不同生长阶段叶片 C、N、P 化学计量特征)[J]. *Chin J Plant Ecol*(植物生态学报), **36**(10): 1 054—1 061

Liu CC, Liu YG, Guo K, *et al.* 2014. Concentrations and resorption patterns of 13 nutrients in different plant functional types in the karst region of south-western China[J]. *Ann Bot*, **113**: 873—885

Liu WD(刘万德), Su JR(苏建荣), Li SF(李帅锋), *et al.* 2010. 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(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]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **30**(23): 6 581—6 590

Luo XQ(罗绪强), Zhang GL(张桂玲), Du XL(杜雪莲), *et al.* 2014. Characteristics of element contents and ecological stoichiometry in leaves of common calcicole species in Maolan karst forest(茂兰喀斯特森林常见钙生植物叶片元素含量及其化学计量学特征)[J]. *Ecol Environ Sci*(生态环境学报), **23**(7): 1 121—1 129

McGroddy ME, Daufresne T, Hedin LO. 2004. Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial Redfield-type ratios[J]. *Ecology*, **85**(9): 2 390—2 401

Piao HC(朴河春), Liu CQ(刘丛强), Zhu SF(朱书法), *et al.* 2005. Variations of C4 and C3 plant N : P ratios influenced by nutrient stoichiometry in limestone and sandstone areas of Guizhou(贵州石灰岩和砂岩地区 C4 和 C3 植物营养元素的化学计量对 N/P 比值波动的影响)[J]. *Quat Sci*(第四纪研究), **25**(5): 552—560

Reich PB, Oleksyn J. 2004. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. *Proc Nat Acad Sci USA J Sci*, **101**: 11 001—11 006

Wang JY(王晶苑), Wang SQ(王绍强), Li RL(李纫兰), *et al.* 2011. C : N : P stoichiometric characteristics of four forest types' dominant tree species in China(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)[J]. *Chin J Plant Ecol*(植物生态学报), **35**(6): 587—595

Wang SQ(王绍强), Yu GR(于贵瑞). 2008. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements(生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **28**(8): 3 937—3 947

Wu TG(吴统贵), Chen BF(陈步峰), Xiao YH(肖以华), *et al.* 2010. Leaf stoichiometry of trees in three forest types in Pearl River Delta, South China(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]. *Chin J Plant Ecol*(植物生态学报), **34**(1): 58—63

Xiang WH(项文化), Huang ZH(黄志宏), Yan WD(闫文德), *et al.* 2006. Review on coupling of interactive functions between carbon and nitrogen cycles in forest ecosystems(森林生态系统碳氮循环功能耦合研究综述)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **26**(7): 2 365—2 372

Yan K(阎凯), Fu DG(付登高), He F(何峰), *et al.* 2011. Leaf nutrient stoichiometry of plants in the phosphorus-enriched soils of the Lake Dianchi watershed, southwestern China(滇池流域富磷区不同土壤磷水平下植物叶片的养分化学计量特征)[J]. *Chin J Plant Ecol*(植物生态学报), **35**(4): 353—361

Yang H(杨慧), Cao JH(曹建华), Sun L(孙蕾), *et al.* 2010. Fractions and distribution of inorganic phosphorus in dif-