

# 云南杨梅碳、氮、磷化学计量特征

苏凯文<sup>1</sup> 陈路红<sup>1</sup> 郑伟<sup>1</sup> 潘瑶<sup>2</sup> 尹华军<sup>3</sup> 巩合德<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>西南林业大学生态旅游学院, 昆明 650224; <sup>2</sup>西南林业大学亚太森林组织昆明培训中心, 昆明 650224; <sup>3</sup>中国科学院成都生物研究所, 成都 610041

**摘要** 碳(C)、氮(N)、磷(P)在植物生长和各种生理调节机能中发挥着重要作用。为研究云南灌丛生态系统C、N、P含量之间的关系以及植物生物量、土壤C、N、P含量与植物C、N、P含量的相互影响, 该研究采用样地调查的方法, 在云南省云南杨梅(*Myrica nana*)灌丛主要分布区设立了29个样地, 通过测量样地中云南杨梅灌丛C、N、P含量, 系统分析了云南杨梅C、N、P的计量规律。结果显示: 1)研究区域云南杨梅根、茎、叶的C、N、P含量的平均值分别是45.94%、0.54%、0.03%、46.32%、0.58%、0.03%和49.05%、1.70%、0.06% (干质量), 其中叶的C、N、P含量均显著高于茎和根。在根中C:N:P为1 531:18:1, 在茎中C:N:P为1 544:19:1, 而在叶中C:N:P为818:10:1, 反映了云南杨梅不同部位元素计量不同的分配关系; 2)云南杨梅叶片中C含量和N:P值随生物量的增加而降低, 但只有叶片C含量与生物量的相关关系极显著, 而N:P值与生物量的相关关系不显著。叶片中N含量和P含量随生物量的增加而升高, 其中P含量与生物量的相关关系显著, N含量与生物量的相关关系不显著。云南杨梅叶的N:P (34.2)明显大于8, 说明P是云南杨梅生长的限制因素。3)根的C、N、P含量与土壤中的P含量都有显著的相关性, 其中N、P为极显著正相关, C为显著负相关; 茎的C含量与土壤的C、N、P含量都显著负相关, 且N、P含量的相关性极显著, 而茎的P含量与土壤中的P含量极显著正相关; 叶的P含量与土壤的C、N、P含量都极显著正相关, 叶的C含量则与土壤的P含量极显著负相关。该研究结果可为西南高原灌丛生态系统的研究提供数据支持。

**关键词** 云南杨梅; 碳; 氮; 磷; 元素计量; 生物量; 土壤

**引用格式:** 苏凯文, 陈路红, 郑伟, 潘瑶, 尹华军, 巩合德 (2017). 云南杨梅碳、氮、磷化学计量特征. 植物生态学报, 41, 136–146. doi: 10.17521/cjpe.2016.0026

## Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Myrica nana* in Yunnan, China

SU Kai-Wen<sup>1</sup>, CHEN Lu-Hong<sup>1</sup>, ZHENG Wei<sup>1</sup>, PAN Yao<sup>2</sup>, YIN Hua-Jun<sup>3</sup>, and GONG He-De<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Ecotourism Faculty, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; <sup>2</sup>Asia-Pacific Network For Sustainable Forest Management And Rehabilitation Kunming Training Center, Kunming 650224, China; and <sup>3</sup>Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041, China

### Abstract

**Aims** Carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) play important roles in plant growth and physiological functions. We aimed at exploring the intrinsic relationships of C, N and P in *Myrica nana*—a common shrub in Yunnan Province—as well as their relationships with plant biomass and soil nutrients.

**Methods** We measured the concentration of C, N and P of *M. nana* from 29 sites for their magnitudes and correlations with soil nutrients.

**Important findings** 1) The arithmetic mean value of C, N and P concentration in the roots, stems and leaves of *M. nana* was 45.94%, 0.54%, 0.03%, and 46.32%, 0.58%, 0.03%, and 49.05%, 1.70%, 0.06%, respectively. C, N and P concentrations in the leaves were significantly higher than those in the roots and the stems. The C:N:P in roots, stems and leaves was 1 531:18:1, 1 544:19:1, and 818:10:1, respectively. 2) The C concentration and N:P in leaves of *M. nana* decreased with the increase of biomass of *M. nana*; the leaf C concentration was significantly correlated with biomass ( $p < 0.01$ ), while the correlation between N:P and biomass was not significant ( $p > 0.05$ ). The leaf N increased with the increase of plant biomass, the P was significantly correlated with biomass ( $p < 0.05$ ), but the correlation between N concentration and biomass was not significant ( $p > 0.05$ ). N:P in leaves was 34.2, suggesting that plant growth was limited by P. 3) C, N and P concentration in the roots were significantly correlated with soil P ( $p < 0.05$ ), with N, P concentrations correlated with soil P positively ( $p < 0.01$ ) and C negatively ( $p < 0.05$ ). C concentration in the stems was significantly and negatively correlated with soil C, N, with significant correlation with C, N, and P concentration ( $p < 0.01$ ). P concentration in the stems was significantly and

收稿日期Received: 2016-01-17 接受日期Accepted: 2016-12-25

\* 通信作者Author for correspondence (E-mail: gonghede3@163.com)

positively correlated with soil P concentration ( $p < 0.01$ ), while leaf P significantly and positively correlated with soil C, N and P ( $p < 0.01$ ); leaf C concentration was significantly and negatively correlated with soil P ( $p < 0.01$ ).

**Key words** *Myrica nana*; carbon; nitrogen; phosphorus; stoichiometry; biomass; soil

**Citation:** Su KW, Chen LH, Zheng W, Pan Y, Yin HJ, Gong HD (2017). Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Myrica nana* in Yunnan, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 136–146. doi: 10.17521/cjpe.2016.0026

生态化学计量学结合了热力学第一定律、生物进化的自然选择原理和分子生物学中心法则, 包括了生态学和化学计量学的基本方法(王绍强和于贵瑞, 2008), 使得生物学科不同层次(分子、细胞、有机体、种群、生态系统和全球尺度)的研究理论能够有机地统一起来(曾德慧和陈广生, 2005), 为研究生态系统能量和化学元素(以碳(C)、氮(N)、磷(P)为主)平衡以及生态结构与功能提供了一种新的手段(洪江涛等, 2013), 并与现今的热点——全球碳循环和全球气候变化紧密地结合起来(Elser *et al.*, 2000a, 2010)。植物生长过程中, C、N、P是构建植物体和驱动代谢过程最重要的元素, 碳水化合物、木质素、纤维素、酶、核苷酸等的代谢都与这3种元素有关(Elser *et al.*, 2010; van de Waal *et al.*, 2010)。研究发现, 不同地带植物叶N:P不同(张文彦等, 2010; 任书杰等, 2012), 生长季植物叶C:N、C:P和N:P变化趋势不同(牛得草等, 2013), 植物叶C:N和N:P与草原退化程度相关(银晓瑞等, 2010), 群落植物物种多样性和生物量与叶C:N和N:P回归关系显著(颌洪涛等, 2016), 事实上, 生态化学计量特征影响着植物生长率和生物量(Elser *et al.*, 2000b; Ågren, 2008; 严正兵等, 2013; 颌洪涛等, 2016)。研究这些元素的计量学特征对探索植物生长、生态系统功能发挥的机制具有极为重要的作用(闫帮国等, 2015)。近年来, 植物生态化学计量学取得了丰硕的研究成果, 诸多假说和研究见诸刊物, 如植物N:P的营养限制理论(Koerselman & Meuleman, 1996), 植物叶片N:P地理分布模式的物种组成假说(Vitousek & Farrington, 1997; Wright, 2001), 草本植物和环境因子的关系等。不同学者对不同生态系统的C、N、P化学计量特征做了大量研究, 韩文轩等(2009)研究了北京及周边地区植物叶的C、N、P计量特征, 系统分析了北京周边358种不同生长型植物叶的C、N、P计量规律; 邵学新等(2013)对杭州湾潮滩湿地3种优势植物的C、N、P含量做了动态分析。然而目前我国C、N、P计量研究主要集中于草原地区和黄土高原(Zheng

& Shangguan, 2007; He *et al.*, 2008), 对地处云贵高原、地形复杂、气候多变的云南灌丛生态系统尚缺乏有关的系统分析和报道。在全球变暖的趋势下, 灌丛分布范围有所扩大(Sturm *et al.*, 2001), 在由生物入侵导致植被演替引起的北半球局部区域碳储量变化中, 灌丛生态系统能发挥巨大作用。灌丛植物通过光合作用和蒸腾作用吸收大气中的CO<sub>2</sub>、获取土壤中的水分和矿物质元素, 参加整个生物圈的生物地球化学循环(Ehleringer & Field, 1993)。加强灌丛植物C、N、P元素计量特征及其空间格局的研究, 是准确评估区域生态系统初级生产力和地球化学循环及其全球变化响应机制的基础, 所以针对灌丛系统的研究势必成为新的热点(Jackson *et al.*, 2002)。我国是世界上灌丛分布面积最广的国家, 灌丛面积约 $2 \times 10^8 \text{ hm}^2$ , 占我国陆地总面积的1/5左右, 约为中国现存森林面积的2倍(刘国华等, 2003; 巩合德等, 2012), 在中国研究灌丛生态系统的生态化学计量特征有天然的优势。云南灌丛系统的代表植物云南杨梅(*Myrica nana*)是中国的特有种, 为杨梅科杨梅属常绿灌木, 其树高在0.5–2.0 m之间, 雌雄异株, 2–3月开花, 6–7月果实成熟(中国科学院中国植物志编辑委员会, 1979), 根部有放线菌共生, 起生物固氮作用, 对生态环境有积极作用。云南杨梅分布区域性强, 仅分布在我国云南、贵州、西藏和四川等省区的部分地区, 能在黄壤、黄棕壤、暗红壤和红壤中生存, 海拔1 900–2 500 m内生长最好, 是云南杨梅的最适生区。因其自身的代表性和广布性, 云南杨梅的研究对保护云南乃至西南地区的灌丛系统意义重大。

区域尺度上植物的N和P特征能反映植物特性及其对环境条件的长期响应与适应(侯学煜, 1982)。大多数陆生植物的生长经常受N、P限制或二者的共同限制(Koerselman & Meuleman, 1996; Venterink *et al.*, 2003; Harpole *et al.*, 2011)。叶片作为植物的主要光合器官, 其N:P的大小经常被用来表明植物生长受到哪种元素的限制作用, 但是这种限制关系会随

着外界环境的改变而变化(Koerselman & Meuleman, 1996; Aerts & Chapin, 2000; Güsewell, 2004; He *et al.*, 2008; von Oheimb *et al.*, 2010)。相同区域的植物也可能因为外界环境与内在属性的区别, 其受限制的营养元素也不同(王晶苑等, 2011)。由于植物的N限制和P限制对植物生长的控制, 生态化学计量特征影响着植物生物量变化(Aerts & Beltman, 2003; Güsewell Beltman., 2005), 土壤N含量和P含量的多少又在一定程度上调节着植物的生态元素计量, 同时, 植物生物量是生态系统获取能量的集中体现, 能够表征植物的生长状态。所以本研究通过实测云南14个县区29个样地的云南杨梅样品和对应土壤样品, 收集云南杨梅的生物量数据、C、N、P数据和土壤的C、N、P数据, 以阐明以下几个问题: 1)云南杨梅内在的C、N、P计量特征; 2)云南杨梅叶片C、

N、P含量与其生物量的关系及云南杨梅生长的限制元素; 3)云南杨梅C、N、P含量与土壤C、N、P含量之间的关系, 以期为我国西南地区的灌丛植物元素计量学研究和陆地生态系统的碳贮量、碳交换评估提供基础科学数据, 为保护当地的灌丛生态系统提供理论依据。

# 1 材料和方法

## 1.1 野外调查和元素测量

在云南杨梅分布比较广的14个县区, 选取29个典型分布区建立灌丛类型样地(表1)。每个样地按照分布特征设计3个典型的5 m × 5 m的样方, 并在每个样方内随机选取1个1 m × 1 m的样方, 测量该样方内所有云南杨梅的生物量。测量时按照根、茎、叶分别用电子天平称质量, 每个器官选取150 g以上

表1 云南29个云南杨梅标准样地的相关信息

Table 1 Characteristics of the 29 study sites of *Myrica nana* shrub in Yunnan Province

样地编号 Site number	样地地点 Site location	纬度 Latitude (N)	经度 Longitude (E)	海拔 Altitude (m)
YN002	云南省姚安县 Yao'an, Yunnan	25.52°	101.40°	2 220.6
YN003	云南省姚安县 Yao'an, Yunnan	25.49°	101.31°	2 623.1
YN004	云南省姚安县 Yao'an, Yunnan	25.50°	101.15°	2 093.3
YN006	云南省大姚县 Dayao, Yunnan	25.66°	101.15°	2 258.6
YN010	云南省大姚县 Dayao, Yunnan	25.71°	101.48°	2 120.4
YN011	云南省大姚县 Dayao, Yunnan	25.91°	101.23°	2 396.0
YN013	云南省牟定县 Mouding, Yunnan	25.45°	101.46°	2 037.9
YN016	云南省牟定县 Mouding, Yunnan	25.44°	101.53°	2 145.2
YN017	云南省牟定县 Mouding, Yunnan	25.45°	101.63°	2 245.0
YN018	云南省南华县 Nanhua, Yunnan	25.33°	101.03°	2 567.2
YN019	云南省南华县 Nanhua, Yunnan	25.17°	101.06°	2 392.4
YN020	云南省南华县 Nanhua, Yunnan	25.32°	101.26°	2 148.2
YN022	云南省禄丰县 Lufeng, Yunnan	25.31°	102.12°	2 113.1
YN024	云南省禄丰县 Lufeng, Yunnan	25.31°	101.90°	2 199.1
YN025	云南省禄丰县 Lufeng, Yunnan	25.32°	101.87°	2 272.3
YN026	云南省安宁县 Anning, Yunnan	24.86°	102.45°	2 043.8
YN027	云南省安宁县 Anning, Yunnan	24.82°	102.42°	2 123.4
YN028	云南省安宁县 Anning, Yunnan	24.85°	102.39°	1 950.0
YN029	云南省昆明市 Kunming, Yunnan	25.14°	102.61°	2 183.4
YN030	云南省嵩明县 Songming, Yunnan	25.41°	103.04°	2 084.8
YN038	云南省昆明市 Kunming, Yunnan	25.22°	102.66°	2 137.5
YN039	云南省富民县 Fumin, Yunnan	25.23°	102.42°	2 086.0
YN040	云南省富民县 Fumin, Yunnan	25.28°	102.63°	2 214.7
YN041	云南省寻甸县 Xundian, Yunnan	25.54°	103.39°	2 060.9
YN044	云南省寻甸县 Xundian, Yunnan	25.52°	103.38°	2 008.0
YN050	云南省会泽县 Huize, Yunnan	26.47°	103.46°	2 040.0
YN052	云南省会泽县 Huize, Yunnan	26.50°	103.45°	2 010.0
YN058	云南省师宗县 Shizong, Yunnan	24.91°	103.87°	2 156.0
YN068	云南省砚山县 Yanshan, Yunnan	23.77°	104.68°	1 656.0

的材料带回实验室, 于70 °C的烘箱中烘烤48 h至恒质量。根、茎、叶样品分别在粉碎机中粉碎后再次烘干至恒质量, 分别测量其C、N、P含量(%)。C和N含量用C/N元素分析仪(2400II CHNS/O, Perkin-Elmer, Boston, USA)测量; 将样品粉末采用H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>凯氏(Kjedahl)法消解, 然后用钼蓝比色法测量P的含量。

## 1.2 数据处理方法

植物不同部位C、N、P含量的内部分配关系用Pearson相关关系分析, 采用 $t$ 检验比较植物不同部位C、N、P含量差异, 根据Pearson相关性分析分析植物叶片N、P与生物量的相关性, 并对植物C、N、P含量与土壤C、N、P含量做回归分析。

## 2 结果

### 2.1 云南杨梅C、N、P含量及其相关性

云南杨梅根的C、N、P含量变化范围分别为40.96%–47.83%、0.38%–0.82%、0.01%–0.11% (表2), 平均值分别是45.94%、0.54%、0.03%; 茎的C、

N、P含量变化范围为43.89%–47.74%、0.40%–0.93%、0.01%–0.09%, 平均值分别为46.32%、0.58%、0.03%; 叶的C、N、P含量变化范围分别为43.97%–51.03%、0.29%–2.15%、0.03%–0.14%, 平均值分别为49.05%、1.70%、0.06% (表2)。在根中C:N:P约为1 531:18:1, 在茎中C:N:P约为1 544:19:1, 而在叶中C:N:P约为818:10:1, 在根中C:N、C:P和N:P的质量比值约为86.6、2 559.8和29.6, 在茎中C:N、C:P和N:P的质量比值约为82.2、2 656.2和31.9, 叶中C:N、C:P和N:P的质量比值约为30.4、1 012.9和34.2 (表3), 这表明营养元素在云南杨梅执行不同功能的部位之间具有明显不同的分配规律(元素计量特征)。

植物不同部位 $t$ 检验分析表明, 云南杨梅根和茎的C含量存在显著差异( $p < 0.05$ ), 叶和根、茎的C含量都存在极显著差异( $p < 0.01$ ); 根和茎的N含量差异不显著( $p > 0.05$ ), 叶和根、茎的N含量都存在极显著差异( $p < 0.01$ ); 根和茎的P含量差异不显著( $p > 0.05$ ), 叶和根、茎的P含量存在极显著差异( $p < 0.01$ ), 叶的C、N、P含量均高于其他部位。

表2 云南杨梅C、N、P含量统计特征

Table 2 Statistics of carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) in *Myrica nana*

变量 Variable	数量 Number	平均值 Mean (%)	中值 Median (%)	标偏差 Standard deviation	最大值 Maximum (%)	最小值 Minimum (%)
C	根 Root	45.94	46.03	1.05	47.83	40.96
	茎 Shoot	46.32	46.48	0.69	47.74	43.89
	叶 Leaf	49.05	49.25	1.03	51.03	43.97
N	根 Root	0.54	0.54	0.86	0.82	0.38
	茎 Shoot	0.58	0.56	0.12	0.93	0.40
	叶 Leaf	1.70	1.73	0.23	2.15	0.29
P	根 Root	0.03	0.02	0.03	0.11	0.01
	茎 Shoot	0.03	0.02	0.02	0.09	0.01
	叶 Leaf	0.06	0.05	0.02	0.14	0.03

表3 云南杨梅C、N、P化学计量统计特征

Table 3 Stoichiometric characteristic of carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) in *Myrica nana*

部位 Part	变量 Variable	数量 Number	平均值 Mean	最大值 Maximum	最小值 Minimum	标准偏差 Standard Deviation
根 Root	C:N	84	86.6	120.0	57.1	13.5
	C:P	84	2 559.8	5 189.6	419.7	1 494.8
	N:P	84	29.6	70.0	5.1	17.1
茎 Stem	C:N	83	82.2	116.3	49.9	14.5
	C:P	83	2 656.2	7 235.8	514.4	1 515.5
	N:P	83	31.9	83.76	4.95	16.7
叶 Leaf	C:N	84	30.4	153.9	23.1	14.1
	C:P	84	1 012.9	1 918.7	340.6	322.3
	N:P	84	34.2	64.6	9.1	9.8



通过植物C、N、P相关性分析(表4)可以看出: 1) 根中各元素相关性均不显著( $p > 0.05$ ); 茎的C含量和P含量显著负相关, 其他元素间相关性不显著( $p > 0.05$ ); 叶的C含量和P含量极显著负相关( $p < 0.01$ ), N含量和P含量极显著正相关( $p < 0.01$ ), 其他元素间相关性不显著( $p > 0.05$ )。2) 在根茎之间, C含量、P含量极显著正相关( $p < 0.01$ ), N含量没有显著的相关性( $p > 0.05$ ), 而根的N含量和茎的C含量、根的P含量和茎的C含量显著负相关( $p < 0.05$ ), 根的N含量和茎的P含量显著正相关( $p < 0.05$ ), 其余元素间相关性不显著; 在根和叶之间, C含量、P含量极显著正相关( $p < 0.01$ ), N含量相关性不显著( $p > 0.05$ ), 根的C含量和叶的P含量、根的N含量和叶的C含量、根的P含量和叶的C含量显著负相关( $p < 0.05$ ), 根的N含量和叶的P含量极显著正相关( $p < 0.01$ ), 其余元素间相关性不显著( $p > 0.05$ ); 在茎叶之间, C、P含量都极显著正相关( $p < 0.01$ ), N含量显著正相关( $p < 0.05$ ), 而茎的C含量和叶的P含量、茎的P含量和叶的C含量都极显著负相关( $p < 0.01$ ), 其余元素间相关性不显著( $p > 0.05$ )。叶的C含量与P含量的负相关性以及叶的N含量与P含量的正相关性是高等陆生植物C、N、P元素计量的普遍规律(Sterner & Elser, 2002), 体现了绿色植物在固C过程中养分(N、P等)利用效率的权衡策略(Vitousek, 1982; Aerts & Chapin, 2000; Diemer, 2004)。

## 2.2 云南杨梅叶片C、N、P含量及N:P与生物量的关系

根据图1可看出云南杨梅叶片中C含量和N:P随生物量的增加而降低, 但只有叶片C含量与生物量的相关关系极显著( $p < 0.01$ ), 而N:P与生物量的相

关关系不显著。叶片中N含量和P含量随生物量的增加而升高, 其中P含量与生物量的相关关系显著( $p < 0.05$ ), N含量与生物量的相关关系不显著( $p > 0.05$ )。

## 2.3 云南杨梅C、N、P含量与土壤的关系

如图2所示, C含量在土壤表层(0–10 cm)最大, 随土层的加深而逐渐降低, 0–10 cm和10–20 cm土壤中C含量降低幅度最大, 最小显著差异法(LSD)进一步分析显示, 0–10 cm、10–20 cm、20–30 cm土壤C含量显著高于其他土层( $p < 0.05$ ), 且3个土层之间也存在显著差异, 其他各层土壤C含量变化较为平缓, 差异不显著( $p > 0.05$ )。土壤N含量整体上随土层深度加深而下降, 其中土层前4层各自与其他各层差异显著( $p < 0.05$ ), 50–70 cm、70–100 cm土层差异不显著( $p > 0.05$ )。P含量随土层变化的差异不显著( $p > 0.05$ ), 整体上波动不大, 无明显规律, 只有在50–70 cm出现波动, 但与其他土层差异也不显著( $p > 0.05$ )。这与潘鹏等(2014)对马尾松(*Pinus massoniana*)天然林土壤C、N、P含量的研究结果一致。

由于表层土(0–10 cm)的C、N、P含量与植物活动关系最为密切(潘军等, 2015), 故本文着重对表层土的C、N、P含量与云南杨梅C、N、P含量进行分析。通过分析云南杨梅根、茎、叶化学计量学特征与土壤因子的关系, 可知根的C、N、P含量与土壤的P含量有显著的相关性, 其中N含量、P含量极显著正相关( $p < 0.01$ ), 回归系数分别为0.547、0.157, C含量则显著负相关( $p < 0.05$ ), 回归系数为–5.278; 茎的C含量与土壤的C、N、P含量都显著或极显著负相关(C:  $p < 0.05$ ; N、P:  $p < 0.01$ ), 回归系数分别为–0.182、–3.368、–5.086; 而茎的P含量与土壤的P含量极显著正相关( $p < 0.01$ ), 回归系数为0.182; 叶

表4 植物不同部位C、N、P含量的相关关系

Table 4 Relationship among carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) concentration in different parts of *Myrica nana*

部位 Part	项目 Element	根 Root			茎 Stem			叶 Leaf		
		C	N	P	C	N	P	C	N	P
根 Root	C	1	–0.025	–0.020	0.43**	–0.03	–0.10	0.43**	–0.09	–0.27*
	N		1	0.080	–0.27*	0.20	0.25*	–0.23*	0.20	0.42**
	P			1	–0.28*	–0.13	0.58**	–0.27*	0.05	0.42**
茎 Stem	C				1	0.14	–0.53**	0.65**	0.01	–0.57**
	N					1	0.18	–0.11	0.25*	0.06
	P						1	–0.45**	0.05	0.49**
叶 Leaf	C							1	0.18	–0.47**
	N								1	0.43**
	P									1

\*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ 。

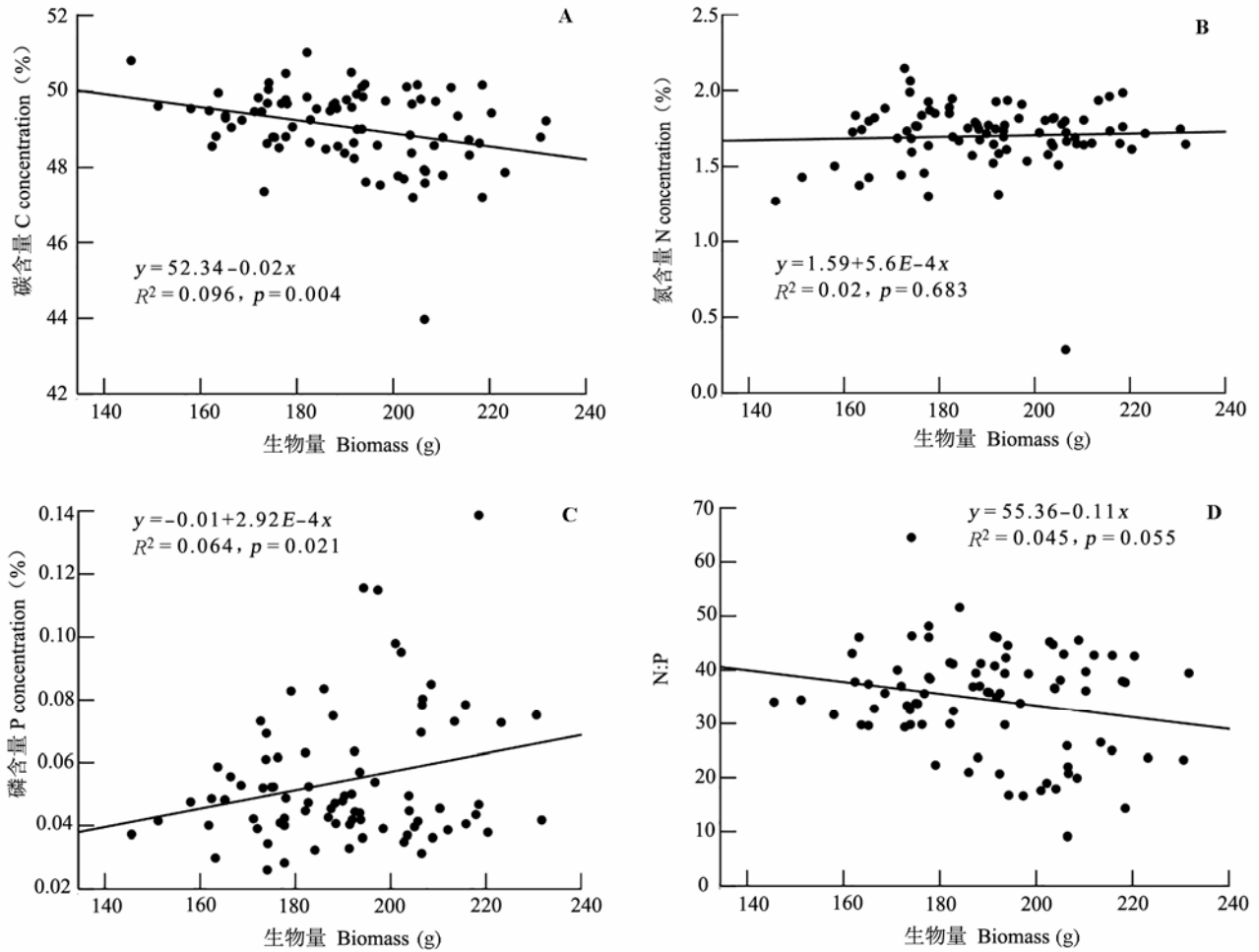


图1 云南杨梅生物量与叶片碳(A)、氮(B)、磷含量(C)及N:P(D)的关系。  
Fig. 1 Relationship between biomass and C (A), N (B), and P (C) concentrations, N:P (D) of leaf of *Myrica nana*.

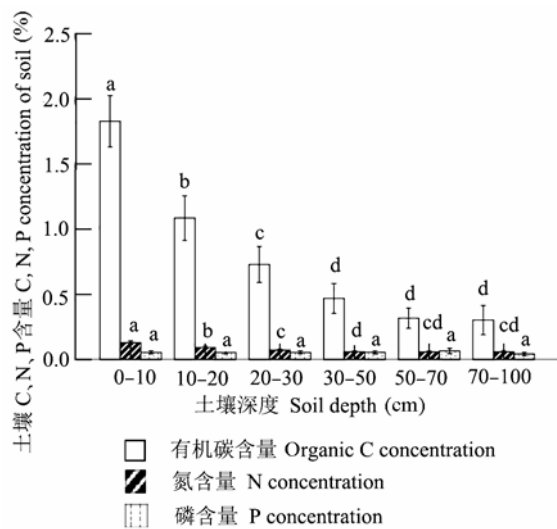


图2 土壤C、N、P含量(平均值±标准偏差)。不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。  
Fig. 2 Soil C, N and P concentration (mean  $\pm$  SD). Different lowercase letters indicate significant differences ( $p < 0.05$ ).

的P含量与土壤的C、N、P含量极显著正相关( $p < 0.01$ ), 回归系数分别为0.007、0.114、0.191; 叶的C含量则与土壤的P含量极显著负相关( $p < 0.01$ ), 回归系数为-7.651 (表5)。

### 3 讨论

(1)云南杨梅的C、N、P含量均在植物正常范围(Marschner, 1995)内。云南杨梅的C:N:P在根中为1 531:18:1, 在茎中为1 544:19:1, 在叶中为818:10:1, 并且, 叶的C、N、P含量显著高于其他部位, 证明了营养元素在云南杨梅负责不同功能的部位之间具有明显不同的分配规律(元素计量特征)。叶是绿色植物光合作用和呼吸作用的主要部位, 叶中N、P元素含量较高与其活跃的同化功能有关, 而叶中高浓度C同样与其生理功能相关。与韩文轩等(2009)的研究对比发现, 云南杨梅叶的C含量的平均值(49.05%)

doi: 10.17521/cjpe.2016.0026

表5 土壤C、N、P含量与云南杨梅C、N、P含量的相关性  
Table 5 Correlation between soil and *Myrica nana* carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) concentrations

表层土元素 Element in top soil	根 Root			茎 Stem			叶 Leaf		
	C	N	P	C	N	P	C	N	P
C	-0.09	0.10	0.14	-0.25*	-0.11	0.10	-0.07	0.16	0.29**
N	-0.16	0.15	0.16	-0.29**	-0.02	0.16	-0.17	0.18	0.31**
P	-0.27*	0.33**	0.32**	-0.39**	0.07	0.57**	-0.39**	0.21	0.46**

\*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ 。

高于北京及周边地区灌木叶的C含量平均值(47.20%), 而叶的N含量的平均值(1.70%)和P含量的平均值(0.06%)小于北京及周边地区灌木叶的N含量的平均值(2.48%)和P含量的平均值(0.16%)。本研究的取样地地处滇中地区, 年平均气温高于16.4℃, 日照时间长, 且受季风气候影响, 夏秋季降水量大, 平均值达1 105 mm (程建刚和解明恩, 2008), 气温、降水量都高于韩文轩等(2009)的研究区域(气温: -1.2–12℃, 降水量: 558 mm), 在光照、降水充足的条件下云南杨梅得以进行充分的光合作用和快速的新陈代谢, 促进了植物营养器官的构建, 而快速构建的茎叶中含有大量木质素和叶绿体, 木质素的碳含量较高, 叶绿体含有大量的有机质, 这就导致了云南杨梅C的大量积累(郑帷婕等, 2007)。

与中国灌木植物N、P含量的平均值(Han *et al.*, 2005; He *et al.*, 2008)比较, 云南杨梅的N、P含量也都小于平均值。由于土壤中N常以有机质的形态出现, 形态多样, 长期的生物进化和环境适应导致植物在以不同形态N为主的土壤上会形成不同的N吸收机制和策略(吴鹏飞和马祥庆, 2009), 这种环境原因带来的物种性状差异造成了云南杨梅的N含量与其他地区的灌木存在差异。根据形态特征、化石、花粉记录及基于*rbcL*基因的分子研究, 杨梅科被认为是最原始的放线菌结瘤植物(Huguet *et al.*, 2001), 我国有4种杨梅, 其中毛杨梅(*Myrica esculenta*)、云南杨梅、杨梅(*M. rubra*) 3个种能与*Frankia*放线菌共生结瘤固N。但环境条件对云南杨梅的固N结瘤有巨大的影响。王慧英和黄维南(1992)的实验显示, 25–30℃是杨梅根瘤固N的适宜温度, 30℃时固N活性最高, 低温会抑制杨梅根瘤的固N能力, 温度过高(>30℃)根瘤的固N活力降低。本实验地区地处较高海拔, 气温较低, 对云南杨梅的固N能力造成了影响。同时杨梅属植物虽然分布较广, 耐瘠薄, 在不同土壤中都能生存, 也能结瘤固N, 但不同的土壤质地对其结瘤固N影响较大。吴晓丽和顾小平

(1994)的实验显示, 花坛土有利于杨梅的生长和结瘤固N, 其生长量、结瘤量及根瘤固N活性最高, 而红壤最差, 本实验的实验地点位于24°–26°N之间的云南省红壤广泛分布区, 这也造成了云南杨梅的固N能力较低。

通过实验发现云南杨梅的P含量的平均值仅为中国灌木植物P含量平均值(0.11%)(Han *et al.*, 2005)的一半左右。首先, 植物P含量主要与土壤类型有关, 土壤中的P含量特别是有效P含量直接决定了植物的P含量(耿燕等, 2011)。本实验取样的土壤均为红壤, 红壤中P含量很低, 由于其特殊的理化性质使其中的P更易被固定, 导致对植物P含量有直接影响的有效P含量更低(李杰等, 2011; 赵其国等, 2013)。通过实测实验地的土壤全P含量发现, 其平均值仅为0.05%, 这是云南杨梅的P含量较低的最主要原因。其次, 植物中N、P的相互限制也对植物中的N、P含量有影响。植物叶片干生物量中的N:P是一个具有重要生态意义的指标, 一方面可以反映植被的结构和功能特征, 同时也反映了群落水平的营养限制状况(Koerselman & Meuleman, 1996; Güsewell, 2004; McGroddy *et al.*, 2004; Niklas *et al.*, 2005)。木本植物作为一个整体, 当N:P达到15时, 植物对N、P的吸收达到一个平衡。当植物N:P下降到低于临界比率时, 生境中P过量供给, 植物完全吸收甚至过量吸收P, 而不完全吸收N, 植物生长表现为N限制。相反, 当N:P增加到大于临界值时, 植物往往是P限制的(Han *et al.*, 2013)。不同植物类型的临界值还有区别, 例如, 陆生植物为10–20 (Güsewell, 2005), 湿地植物为14–16 (Koerselman & Meuleman, 1996)。Han等(2013)的研究显示, 常绿阔叶植物的养分限制N:P临界值为14.3, 而固N植物应该更低, 仅为8。此次调查的云南杨梅既是常绿阔叶植物也是固N植物, 其叶N:P为34.2, 明显大于14.3和8, 说明P元素是云南杨梅生长的限制因素, 在云南杨梅的生境中, N过量供给, 而P相对不足, 云南杨梅



生长中对N完全吸收, 对P不完全吸收。云南杨梅的这种营养限制状况也在很大程度上造成了云南杨梅的P含量较低。

(2) N、P是植物生长的关键营养元素, 对构建植物体有巨大的影响, 控制着植物的生产力大小, 在本研究中, 云南杨梅叶片的N、P含量都随生物量的增加而升高, 这证明了N、P在植物生长过程中提供营养供给的关键作用, N、P含量的增加促进植物构建植物体增加植物生物量。同时, N、P作为大量元素不仅对生物体中的生物化学功能极为重要, 还具有相对较高的内稳性(Sterner & Elser, 2002), 因此, 在生物量变化中必须被不断补充, 从而保持稳定, 这也导致了随着生物量的增加, N、P含量随之升高。叶片C含量与生物量的相关关系极显著( $p < 0.01$ ), 且随着生物量的增加而降低, 这表明云南杨梅的C含量对植物茎叶的生长有抑制作用, 这和C的生理作用有关, C主要参与的是叶的光合作用和蒸腾作用, 而植物的光合作用和C积累对植物的新陈代谢和生长有抑制作用。在本研究中, 叶片N:P与生物量的相关关系并不显著, 具体原因还不清楚, 但N在土壤中的形态相当一部分是有机物, 因此其吸收受植物与微生物关系的影响, 干扰因素较多(van der Heijden *et al.*, 2008), 而P的吸收如前文所说与土壤P含量和植物根构型有很大的关系, 这种差异也可能导致了叶片N:P与生物量的相关关系不显著。

(3) 由于植被、凋落物和腐殖质对土壤C、N含量贡献最大(潘鹏等, 2014), 而这些物质主要影响土壤表层, 并随着土壤深度的加深而减弱, 所以土壤表层(0–10 cm)的C含量最大, 随着土层的加深C含量逐渐降低, N在表层土壤中的含量也显著高于其他土层。而土壤P含量与土层深度没有明显的规律性变化则是因为土壤的P含量主要是与土壤类型、成土母质等因素有关(赵琼和曾德慧, 2005; 和继军等, 2010)。植物与土壤作为地球化学循环中的不同环节, 两者必然存在联系, 植物通过土壤吸收养分, 同时又以凋落物的形式将C、N、P归还土壤, 二者的元素特征具有一定的相关性。云南杨梅根、茎、叶的P含量与土壤的P含量极显著正相关( $p < 0.01$ )是因为植物体内的P绝大部分由根系从土壤中吸收(耿燕等, 2011), 云南杨梅通过根系吸收土壤中的P, 通过养分传输, 使云南杨梅的地上部分和地下部分的P含量都与土壤的P含量显著正相关, 说明了云南

杨梅能敏感地反映土壤P库的动态, 对土壤P含量的丰缺有着较好的指示作用(陈嘉茜等, 2014)。而根、茎、叶的C含量都与土壤的P含量呈负相关关系, 因为植物根系对土壤养分的吸收利用是土壤速效养分输出的主要途径, 土壤作为植物生长的主要基质, 其中有机质经过分解源源不断地为植物正常生理活动提供必要的养分, 使得土壤与植物在养分供应与需求间通过动态交换达到并维持一个平衡的元素比(王绍强和于贵瑞, 2008)。同时根、茎、叶的N含量与土壤的N含量相关性都不明显, 这是因为植物的N含量可能更倾向于是一种物种性状, 与土壤养分无关(丁凡等, 2011)。总之, 以上这些特征都是云南杨梅为了提高自身对营养成分的吸收利用率和对环境适应性的表现。

**基金项目** 中国科学院战略性先导科技专项(XDA-050503030201)和国家自然科学基金(31560189)。

**致谢** 感谢西南林业大学科技创新基金(15110)资助。

## 参考文献

- Aerts R, Beltman B (2003). Is the relation between nutrient supply and biodiversity co-determined by the type of nutrient limitation? *Oikos*, 101, 489–498.
- Aerts R, Chapin FS III (2000). The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns. *Advances in Ecological Research*, 30, 1–67.
- Ågren GI (2008). Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities. *Ecology, Evolution, and Systematics*, 39, 153–170.
- Chen JQ, Zhang LL, Li J, Wen DZ, Peng ST (2014). Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of two fern species and their relationships to nutrient availability. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 22, 567–575. (in Chinese with English abstract) [陈嘉茜, 张玲玲, 李炯, 温达志, 彭诗涛 (2014). 蕨类植物碳氮磷化学计量特征及其与土壤养分的关系. 热带亚热带植物学报, 22, 567–575.]
- Cheng JG, Xie ME (2008). The analysis of regional climate change features over Yunnan in recent 50 years. *Progress in Geography*, 27, 19–26. (in Chinese with English abstract) [程建刚, 解明恩 (2008). 近50年云南区域气候变化特征分析. 地理科学进展, 27, 19–26.]
- Diemer M (2004). The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 428, 821–827.
- Ding F, Lian PY, Zeng DH (2011). Characteristics of plant leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry in relation to soil nitrogen and phosphorus concentrations in Songnen Plain meadow. *Chinese Journal of Ecology*, 30, 77–81. (in Chinese with English abstract) [丁凡, 廉培勇, 曾德慧

doi: 10.17521/cjpe.2016.0026



- (2011). 松嫩平原草甸三种植物叶片N、P化学计量特征及其与土壤N、P浓度的关系. *生态学杂志*, 30, 77–81.]
- Editorial Board of Flora of China, Chinese Academy of Sciences (1979). *Flora of China*. Vol. 21. Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国科学院中国植物志编辑委员会 (1979). 中国植物志. 第21卷. 科学出版社, 北京.]
- Ehleringer JR, Field CB (1993). *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe*. Academic Press, San Diego.
- Elser JJ, Fagan WF, Denno RF, Dobberfuhl DR, Folarin A, Huberty A, Interlandi S, Kilham SS, McCauley E, Schulz KL (2000a). Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. *Nature*, 408, 578–580.
- Elser JJ, Fagan WF, Kerkhoff AJ, Swenson NG, Enquist BJ (2010). Biological stoichiometry of plant production: Metabolism, scaling and ecological response to global change. *New Phytologist*, 186, 593–608.
- Elser JJ, Sterner RW, Gorokhova E, Fagan WF, Markow TA, Cotner JB, Harrison JF, Hobbie SE, Odell GM, Weider LW (2000b). Biological stoichiometry from genes to ecosystems. *Ecology Letters*, 3, 540–550.
- Geng Y, Wu Y, He JS (2011). Relationship between leaf phosphorus concentration and soil phosphorus availability across Inner Mongolia grassland. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 1–8. (in Chinese with English abstract) [耿燕, 吴漪, 贺金生 (2011). 内蒙古草地叶片磷含量与土壤有效磷的关系. *植物生态学报*, 35, 1–8.]
- Gong HD, Cheng XP, Ma YW (2012). Characteristics of biomass distribution in *Myrica nana*. *Nonwood Forest Research*, 30(4), 106–108. (in Chinese with English abstract) [巩合德, 程希平, 马月伟 (2012). 云南杨梅灌丛生物量的分配特征. *经济林研究*, 30(4), 106–108.]
- Güsewell S (2004). N:P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance. *New Phytologist*, 164, 243–266.
- Güsewell S (2005). Nutrient resorption of wetland graminoids is related to the type of nutrient limitation. *Functional Ecology*, 19, 344–354.
- Güsewell S, Bailey KM, Roem WJ, Bedford BL (2005). Nutrient limitation and botanical diversity in wetlands: Can fertilization raise species richness? *Oikos*, 109, 71–80.
- Han WX, Fang JY, Guo DL, Zhang Y (2005). Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 168, 377–385.
- Han WX, Tang LY, Chen YH, Fang JY (2013). Relationship between the relative limitation and resorption efficiency of nitrogen vs phosphorus in woody plants. *PLOS ONE*, 8, e83366. doi: 10.1371/journal.pone.0083366.
- Han WX, Wu Q, Tang LY, Chen YH, Li LP, He JS, Fang JY (2009). Leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry across plant species in Beijing and its periphery. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 45, 855–860. (in Chinese with English abstract) [韩文轩, 吴漪, 汤璐瑛, 陈雅涵, 李利平, 贺金生, 方精云 (2009). 北京及周边地区植物叶的碳氮磷元素计量特征. *北京大学学报(自然科学版)*, 45, 855–860.]
- Harpole WS, Ngai JT, Cleland EE, Seabloom EW, Borer ET, Bracken MES, Elser JJ, Gruner DS, Hillebrand H, Shurin JB, Smith JE (2011). Nutrient co-limitation of primary producer communities. *Ecology Letters*, 14, 852–862.
- He JJ, Cai GQ, Tian L, Fang HY (2010). Effect of vegetation measures on the soil conservation and factors analysis. *Chinese Journal of Soil Science*, 41, 706–710. (in Chinese with English abstract) [和继军, 蔡国强, 田磊, 方海燕 (2010). 植被措施对土壤保育的作用及其影响因素分析. *土壤通报*, 41, 706–710.]
- He JS, Wang L, Flynn DF, Wang XP, Ma WH, Fang JY (2008). Leaf nitrogen:phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes. *Oecologia*, 155, 301–310.
- Hong JT, Wu JB, Wang XD (2013). Effects of global climate change on the C, N, and P stoichiometry of terrestrial plants. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24, 2658–2665. (in Chinese with English abstract) [洪江涛, 吴建波, 王小丹 (2013). 全球气候变化对陆地植物碳氮磷生态化学计量学特征的影响. *应用生态学报*, 24, 2658–2665.]
- Hou XY (1982). *Chinese Vegetation Geology and Chemical Content of Dominant Plants*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [侯学煜 (1982). 中国植被地理及优势植物化学成分. 科学出版社, 北京.]
- Huguet V, Batzli JM, Zimpfer JF, Normand P, Dawson JO, Fernandez MP (2001). Diversity and specificity of *Frankia* strains in nodules of sympatric *Myrica gale*, *Alnus incana*, and *Shepherdia canadensis* determined by *rrs* gene polymorphism. *Applied and Environmental Microbiology*, 67, 2116–2122.
- Jackson RB, Banner JL, Jobbágy EG, Pockman WT, Wall DH (2002). Ecosystem carbon loss with woody plant invasion of grasslands. *Nature*, 418, 623–626.
- Koerselman W, Meuleman AFM (1996). The vegetation N:P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Journal of Applied Ecology*, 33, 1441–1450.
- Li J, Shi YL, Chen ZW (2011). Research on phosphorus in southern red soils of in China. *Chinese Journal of Soil Science*, 42, 763–768. (in Chinese with English abstract) [李杰, 石元亮, 陈智文 (2011). 我国南方红壤磷素研究概况. *土壤通报*, 42, 763–768.]
- Liu GH, Ma KM, Fu BJ, Guan WB, Kang YX, Zhou JY, Liu SL (2003). Above ground biomass of main shrubs in dry valley of Minjing river. *Acta Ecologica Sinica*, 23, 1757–1764. (in Chinese with English abstract) [刘国华, 马克明, 傅伯杰, 关文彬, 康永祥, 周建云, 刘世梁 (2003). 岷江干旱河谷主要灌丛类型地上生物量研究. *生态学报*, 23, 1757–1764.]
- Marschner H (1995). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press, New York.

- Mcgroddy ME, Daufresne T, Hedin LO (2004). Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide: Implications of terrestrial Redfield-type ratios. *Ecology*, 85, 2390–2401.
- Niklas KJ, Owens T, Reich P, Cobb ED (2005). Nitrogen/phosphorus leaf stoichiometry and the scaling of plant growth. *Ecology Letters*, 8, 636–642.
- Niu DC, Li Q, Jiang SG, Chang PJ, Fu H (2013). Seasonal variations of leaf C:N:P stoichiometry of six shrubs in desert of China's Alxa Plateau. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 37, 317–325. (in Chinese with English abstract) [牛得草, 李茜, 江世高, 常佩静, 傅华 (2013). 阿拉善荒漠区6种主要灌木植物叶片C:N:P化学计量比的季节变化. 植物生态学报, 37, 317–325.]
- Pan J, Song NP, Wu XD, Yang XG, Chen L, Qu WJ (2015). Effects of different planting-years of artificial *Caragana intermedia* shrubs on soil organic carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry characteristics in desert steppe. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 41, 160–168. (in Chinese with English abstract) [潘军, 宋乃平, 吴旭东, 杨新国, 陈林, 曲文杰 (2015). 荒漠草原不同种植年限人工柠条林土壤碳氮磷化学计量特征. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 41, 160–168.]
- Pan P, Gan WF, Ouyang XZ, Xiao X (2014). Relationship between the contents of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and soil organic carbon density of *Pinus massoniana* nature forest. *Journal of Northwest Forest University*, 29(6), 1–5. (in Chinese with English abstract) [潘鹏, 甘文峰, 欧阳勋志, 肖欣 (2014). 马尾松天然林土壤碳氮磷含量与碳密度的关系. 西北林学院学报, 29(6), 1–5.]
- Ren SJ, Yu GR, Jiang CM, Fang HJ, Sun XM (2012). Stoichiometric characteristics of leaf carbon, nitrogen, and phosphorus of 102 dominant species in forest ecosystems along the North-South Transect of East China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 23, 119–124. (in Chinese with English abstract) [任书杰, 于贵瑞, 姜春明, 方华军, 孙晓敏 (2012). 中国东部南北样带森林生态系统102个优势种叶片碳氮磷化学计量学统计特征. 应用生态学报, 23, 119–124.]
- Shao XX, Li WH, Wu M, Yang WY, Jiang KY, Ye XQ (2013). Dynamics of carbon, nitrogen and phosphorus storage of three dominant marsh plants in Hangzhou Bay coastal wetland. *Environmental Science*, 4, 3451–3457. (in Chinese with English abstract) [邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (2013). 杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究. 环境科学, 4, 3451–3457.]
- Sterner RW, Elser JJ (2002). *Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere*. Princeton University Press, Princeton.
- Sturm M, Racine CH, Tape KD (2001). Increasing shrub abundance in the arctic. *Nature*, 411, 546–547.
- van de Waal DB, Verschoor AM, Verspagen JMH, van Donk E, Huisman J (2010). Climate-driven changes in the ecological stoichiometry of aquatic ecosystems. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 8, 145–152.
- van der Heijden MGA, Bardgett RD, van Straalen NM (2008). The unseen majority: Soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 11, 296–310.
- Venterink HO, Wassen MJ, Verkroost AWM, de Ruiter PC (2003). Species richness-productivity patterns differ between N-, P-, and K-limited wetlands. *Ecology*, 84, 2191–2199.
- Vitousek PM (1982). Nutrient cycling and nutrient use efficiency. *American Naturalist*, 119, 553–573.
- Vitousek PM, Farrington H (1997). Nutrient limitation and soil development: Experimental test of a biogeochemical theory. *Biogeochemistry*, 37, 63–75.
- von Oheimb G, Power SA, Falk K, Friedrich U, Mohamed A, Krug A, Boschatzke N, Härdtle W (2010). N:P ratio and the nature of nutrient limitation in *Calluna*-dominated heathlands. *Ecosystems*, 13, 317–327.
- Wang HY, Huang WN (1992). Characteristics of symbiotic nitrogen fixation by *Myrica rubra*. *Fujian Journal of Agricultural Science*, 7(2), 48–52. (in Chinese with English abstract) [王慧英, 黄维南 (1992). 杨梅根瘤的共生固氮特性. 福建农业学报, 7(2), 48–52.]
- Wang JY, Wang SQ, Li RL, Yan JH, Sha LQ, Han SJ (2011). C:N:P stoichiometric characteristics of four forest types' dominant tree species in China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 587–595. (in Chinese with English abstract) [王晶苑, 王绍强, 李纫兰, 闫俊华, 沙丽清, 韩士杰 (2011). 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, 35, 587–595.]
- Wang SQ, Yu GR (2008). Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements. *Acta Ecologica Sinica*, 8, 3937–3947. (in Chinese with English abstract) [王绍强, 于贵瑞 (2008). 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征. 生态学报, 8, 3937–3947.]
- Wright IJ, Reich PB, Westoby M (2001). Strategy shifts in leaf physiology, structure and nutrient content between species of high- and low-rainfall and high- and low-nutrient habitats. *Functional Ecology*, 15, 423–434.
- Wu PF, Ma QX (2009). Research advances in the mechanisms of high nutrient use efficiency in plants. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 427–437. (in Chinese with English abstract) [吴鹏飞, 马祥庆 (2009). 植物养分高效利用机制研究进展. 生态学报, 29, 427–437.]
- Wu XL, Gu XP (1994). A study on the characteristics of *Myrica rubra* in nodulation and nitrogen fixation. *Forest Research*, 3, 306–310. (in Chinese with English abstract)

- [吴晓丽, 顾小平 (1994). 杨梅结瘤固氮特性研究. 林业科学研究, 3, 306–310.]
- Xie HT, He XD, You WX, Yu D, Liu HF, Wang JL, Gu S, Nie QH, Liang YT, Zhang JL (2016). Effects of ecological stoichiometry on biomass and species diversity of the *Artemisia ordosica* community in Habahu National Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 3621–3627. (in Chinese with English abstract) [顾洪涛, 何兴东, 尤万学, 余殿, 刘惠芬, 王金龙, 古松, 聂庆华, 梁玉婷, 张京磊 (2016). 哈巴湖国家级自然保护区油蒿群落生态化学计量特征对群落生物量和物种多样性的影响. 生态学报, 36, 3621–3627.]
- Yan BG, Liu GC, Fan B, He GX, Shi LT, Li JC, Ji ZH (2015). Relationships between plant stoichiometry and biomass in an arid-hot valley, Southwest China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 807–815. (in Chinese with English abstract) [闫帮国, 刘刚才, 樊博, 何光熊, 史亮涛, 李纪潮, 纪中华 (2015). 干热河谷植物化学计量特征与生物量之间的关系. 植物生态学报, 39, 807–815.]
- Yan ZB, Kim NY, Han TS, Fang JY, Han WY (2013). Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Arabidopsis thaliana*. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 37, 551–557. (in Chinese with English abstract) [严正兵, 金南瑛, 韩廷申, 方精云, 韩文轩 (2013). 氮磷施肥对拟南芥叶片碳氮磷化学计量特征的影响. 植物生态学报, 37, 551–557.]
- Yin XR, Liang CZ, Wang LX, Wang W, Liu ZL, Liu XP (2010). Ecological stoichiometry of plant nutrients at different restoration succession stages in typical steppe of Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 39–47. (in Chinese with English abstract) [银晓瑞, 梁存柱, 王立新, 王炜, 刘钟龄, 刘小平 (2010). 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, 34, 39–47.]
- Zeng DH, Chen GS (2005). Ecological stoichiometry: A science to explore the complexity of living systems. *Acta Phytocologica Sinica*, 29, 1007–1019. (in Chinese with English abstract) [曾德慧, 陈广生 (2005). 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索. 植物生态学报, 29, 1007–1019.]
- Zhang WY, Fan JW, Zhong HP, Hu ZM, Song LL, Wang N (2010). The nitrogen:phosphorus stoichiometry of different plant functional groups for dominant species of typical steppes in China. *Acta Agrestia Sinica*, 18, 503–509. (in Chinese with English abstract) [张文彦, 樊江文, 钟华平, 胡中民, 宋璐璐, 王宁 (2010). 中国典型草原优势植物功能群氮磷化学计量学特征研究. 草地学报, 18, 503–509.]
- Zhao Q, Zeng DH (2005). Phosphorus cycling in terrestrial ecosystems and its controlling factors. *Acta Phytocologica Sinica*, 29, 153–163. (in Chinese with English abstract) [赵琼, 曾德慧 (2005). 陆地生态系统磷素循环及其影响因素. 植物生态学报, 29, 153–163.]
- Zhao QG, Huang GQ, Ma YQ (2013). The problems in red soil ecosystem in southern of China and its countermeasures. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 7615–7622. (in Chinese with English abstract) [赵其国, 黄国勤, 马艳芹 (2013). 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策. 生态学报, 33, 7615–7622.]
- Zheng S, Shangguan Z (2007). Spatial patterns of leaf nutrient traits of the plants in the Loess Plateau of China. *Trees*, 21, 357–370.
- Zheng WJ, Bao WK, Gu B, He X, Leng L (2007). Carbon concentration and its characteristics in terrestrial higher plant. *Chinese Journal of Ecology*, 26, 307–313. (in Chinese with English abstract) [郑帷婕, 包维楷, 辜彬, 何晓, 冷俐 (2007). 陆生高等植物碳含量及其特点. 生态学杂志, 26, 307–313.]

责任编辑: 唐志尧 责任编辑: 李 敏



植物生态学报官网



微信订阅号  
期刊及学科  
相关信息发布



微信服务号  
稿件状态查询  
全文检索浏览