

青藏高原东部窄叶鲜卑花碳、氮、磷化学计量特征

贺合亮^{1,2} 阳小成² 李丹丹¹ 尹春英¹ 黎云祥³ 周国英⁴ 张林⁵ 刘庆^{1*}

¹中国科学院成都生物研究所, 中国科学院山地生态恢复与生物资源利用重点实验室, 生态恢复与生物多样性保育四川省重点实验室, 成都 610041; ²成都理工大学材料与化学化工学院, 成都 610059; ³西华师范大学生命科学学院, 四川南充 637009; ⁴中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008; ⁵中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101

摘要 为了探究青藏高原东部窄叶鲜卑花(*Sibiraea angustata*)灌木不同器官碳(C)、氮(N)、磷(P)含量的分配格局及其生态化学计量特征, 该文采用分层随机抽样方法布设样地, 选择16个窄叶鲜卑花灌丛样地, 分别采集窄叶鲜卑花灌木根、茎、叶、当年枝和果等植物器官样品, 并分析样品C、N、P含量及其计量比。结果表明: C、N、P在不同器官中的含量分别表现为茎>当年枝>果>根>叶, 叶>果>当年枝>茎>根, 果>叶>当年枝>根>茎。窄叶鲜卑花各器官中C含量相对稳定, N、P含量变异系数较大, 在根部的变异系数最大。在不同器官中N:P的范围为7.12–12.41, 其值变化不大, N:P变异系数的最小值在当年枝中, 说明N:P在当年枝中的内稳性较高。在该灌木植物体中C与N之间、C与P之间呈极显著的负相关关系, C对N、P具有稀释作用; N与P呈极显著正相关关系, N与P间具有较好的耦合协同性。分析发现: 窄叶鲜卑花不同器官C、N、P化学计量特征在一定程度上符合内稳态理论和生长速率理论, 其元素分配与器官所执行的功能密切相关; 同时指出在物种水平上应当谨慎使用生态化学计量比来判断养分的限制情况。

关键词 窄叶鲜卑花; 生态化学计量学; 植物器官; 青藏高原

引用格式: 贺合亮, 阳小成, 李丹丹, 尹春英, 黎云祥, 周国英, 张林, 刘庆 (2017). 青藏高原东部窄叶鲜卑花碳、氮、磷化学计量特征. 植物生态学报, 41, 126–135. doi: 10.17521/cjpe.2016.0031

Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus of *Sibiraea angustata* shrub on the eastern Qinghai-Xizang Plateau

HE He-Liang^{1,2}, YANG Xiao-Cheng², LI Dan-Dan¹, YIN Chun-Ying¹, LI Yun-Xiang³, ZHOU Guo-Ying⁴, ZHANG Lin⁵, and LIU Qing^{1*}

¹Key Laboratory of Mountain Ecological Restoration and Bioresource Utilization & Ecological Restoration Biodiversity Conservation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; ²College of Material and Chemistry & Chemical Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; ³The School of Life Science, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637009, China; ⁴Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; and ⁵Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract

Aims Little is known about the stoichiometric characteristics of carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) in plateau shrubs across China. *Sibiraea angustata* is a typical and representative shrub species on the eastern Qinghai-Xizang Plateau, and exploring its C, N and P distribution patterns and stoichiometric properties in different organs (including root, shoot, leaf, twig and fruit) would help us better understand the mechanisms of C, N and P cycling and balance in the *S. angustata* dominated shrub ecosystem.

Methods Sixteen sampling sites were selected on the eastern Qinghai-Xizang Plateau by the stratified sampling method. The height and coverage of the dominant shrubs, latitude, longitude and altitude of the sites were recorded. Three 5 m × 5 m plots were selected at each site. At least 128 biological samples of plant organs of *S. angustata* were collected and measured, respectively. The C and N concentrations of plant samples were analyzed using an elemental analyzer (2400 II CHNS). The P concentration was analyzed using the molybdate/ascorbic acid method after H₂SO₄-H₂O₂ digestion.

Important findings The C, N and P concentrations of different organs followed the order of: shoot (495.07 g·kg⁻¹) > twig (483.37 g·kg⁻¹) > fruit (480.35 g·kg⁻¹) > root (468.47 g·kg⁻¹) > leaf (466.33 g·kg⁻¹); leaf (22.27 g·kg⁻¹) > fruit (19.74 g·kg⁻¹) > twig (7.98 g·kg⁻¹) > shoot (4.54 g·kg⁻¹) > root (4.00 g·kg⁻¹) and fruit (2.85 g·kg⁻¹)

收稿日期Received: 2016-01-17 接受日期Accepted: 2016-09-21

* 通信作者Author for correspondence (E-mail: liuqing@cib.ac.cn)

> leaf ($1.92 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > twig ($0.96 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > root ($0.52 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > shoot ($0.45 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), respectively. The ranges of the coefficient of variation (CV) for C, N and P concentrations were 1.71%–4.44%, 14.49%–25.50% and 11.46%–46.15%, respectively. Specifically, the C concentration was relatively high and stable, and the maximum CV values for N and P were found in roots. The N:P value of different organs varied from 7.12–12.41 and the minimum CV for N:P was found in twig, which indicated that N:P in twig had higher internal stability. In addition, correlation analysis indicated that the C concentration was significantly negatively correlated with N and P concentrations and correlation coefficients were -0.407 and -0.342 , respectively. However, N concentration had dramatically positive correlation with P concentration and the correlation coefficient was 0.814 . These results also could indicate that the C, N and P stoichiometric characteristics in the *S. angustata* shrub accorded with the homeostatic mechanism and growth rate hypothesis to some extent, the distributions of C, N and P concentrations were closely related to the function of the organs and it should be prudent to use ecological stoichiometric ratios to judge the condition of nutrient limitation at the species level.

Key words *Sibiraea angustata*; ecological stoichiometry; plant organs; Qinghai-Xizang Plateau

Citation: He HL, Yang XC, Li DD, Yin CY, Li YX, Zhou GY, Zhang L, Liu Q (2017). Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus of *Sibiraea angustata* shrub on the eastern Qinghai-Xizang Plateau. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 126–135. doi: 10.17521/cjpe.2016.0031

碳(C)、氮(N)、磷(P)是植物的基本营养元素,参与细胞的结构与功能,与植物体内的代谢过程存在密切的联系(郭宝华等,2014)。植物体不同功能器官具有不同的结构物质,而不同结构物质中C、N、P的含量也不相同,因此,同一植物不同器官的C、N、P含量存在差异(刘超等,2012)。生态化学计量学是一门新兴的交叉学科,其结合了生物学、化学和物理学等基本原理,是研究生态系统能量平衡和多重元素(主要是C、N、P)平衡的科学(曾德慧和陈广生,2005)。关于陆地生态系统植被生态化学计量学的研究,近年来在国内外发展速度较快(贺金生和韩兴国,2010),这些研究主要是对草地(安卓等,2011;宾振钧等,2014; Song *et al.*, 2014)、湿地(李征等,2012; Zhang *et al.*, 2013; Qu *et al.*, 2014)和森林(阎恩荣等,2010; Moore *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2012)生态系统的研究,且大量的研究是针对植物叶片开展的(吴统贵等,2010; 阎凯等,2011; 王凯等,2013; 马露莎等,2014; Xia *et al.*, 2014)。目前,国内有关灌丛植物生态化学计量学的研究成果相对匮乏,马红红等(2014)对秦岭松栎混交林优势灌木叶片N、P的研究指出,优势灌木叶片N、P的质量分数与土壤的N、P质量分数呈正相关关系且不同优势灌木之间存在显著差异;牛得草等(2013)通过研究阿拉善荒漠6种主要灌木植物叶片发现同一生活型的6种植物叶片的C、N、P含量及其比值在整个生长季内的变化规律不同;李单凤等(2015)从环境分异和机制角度

对黄土高原优势灌丛营养器官进行研究,指出甘肃和宁夏灌丛群落的P资源相对匮乏。然而,针对我国青藏高原优势灌木物种不同器官之间C、N、P含量的分配格局及其生态化学计量学特征的研究鲜见报道。研究同一植物不同器官C、N、P的分配格局及化学计量特征,对揭示该物种的生态策略和环境适应性具有重要的生态学和植物生理学意义。

窄叶鲜卑花(*Sibiraea angustata*)是青藏高原东部高山灌丛中特有的、具有代表性的物种,分布于我国青海南部、四川西部、西藏东南部和甘肃东南部,其分布范围与青藏高原东部的高寒灌丛、草甸区相当(吴宁,1998)。窄叶鲜卑花为落叶灌木,高2.0–2.5 m,小枝圆柱形,微有棱角,叶片倒披针形,稀长椭圆形,顶生穗状圆锥花序,蓇葖果直立,果梗长3–5 mm,具柔毛,花期一般在6月,果期8–9月(中国科学院中国植物志编辑委员会,1974)。目前,对窄叶鲜卑花的研究主要集中在其化学成分及药理活性等方面(姚莉和鞠洋,2009;王章伟等,2014),生态环境功能方面的研究也有报道,李娇等(2014)分析了窄叶鲜卑花灌丛土壤呼吸对不同施N水平的短期响应,吴宁(1998)对川西北窄叶鲜卑花灌丛的类型和生物量及其与环境因子的关系进行了研究。但是从生态化学计量学的角度对窄叶鲜卑花的研究未见专门报道,基于此,本文以分布于青藏高原东部的窄叶鲜卑花为研究对象,研究该灌木不同器官C、N、P含量及其两两比值的统计特征,揭示青藏

高原东部窄叶鲜卑花不同器官C、N、P的化学计量学特征及其养分平衡和循环机制,为我国青藏高原灌丛的高效经营及其生态功能与健康安全的维护提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域与样地概况

研究区域位于青藏高原东部(96.08°–102.95° E, 29.88°–33.27° N, 海拔3 332–4 212 m),地处青海南部、四川西部、西藏东南部,受青藏高原特殊的地理环境和独特的地形地貌影响,该区域呈现特有的立体气候(张新时, 1978)。窄叶鲜卑花的分布地区属寒温带气候类型,表现为冬长夏短、气温低、年较差小、日较差大,雨量充沛、分布不均,日照充足等气候特点。年平均气温在5.0 以下,年降水量在650.0 mm以上,降水时段主要集中在5–10月;在11月初土壤即开始进入冻土状态,春秋季节短促且不明显,冷暖季分明。植物的生长季一般为5–9月,年日照时间为1 850–2 700 h。

该地区冬长夏短,植物生长期较短,该地区的植被具有较强的耐寒性,能够忍耐冬季长达数月的积雪覆盖和冻土环境(张发会等, 2008)。该地区灌丛群落灌木层除了优势物种窄叶鲜卑花外,还存在其他伴生灌木物种,包括山生柳(*Salix oritrepha*)、高山

绣线菊(*Spiraea alpina*)、金露梅(*Potentilla fruticosa*)、岩生忍冬(*Lonicera rupicola*)、紫丁杜鹃(*Rhododendron violaceum*)、川滇绣线菊(*Spiraea schneideriana*)、奇花柳(*Salix atopantha*)等植物。该区域草本层物种较多,主要有羊茅(*Festuca ovina*)、条纹龙胆(*Gentiana striata*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、紫花针茅(*Stipa purpurea*)等。

1.2 样品采集

根据窄叶鲜卑花灌丛在青藏高原东部的分布情况(表1),采用分层随机抽样的方法布设样地,共选择了16个具有代表性的地段作为样地进行调查,在每个样点采用GPS仪和地质罗盘测定经纬度、海拔、坡度等环境指标。

样品的采集工作选择在8–9月进行,当地灌丛植被处于生长季中后期,在每个样地随机设置3个5 m × 5 m的样方,重复样方两两边缘之间的最小距离为5 m,最大距离不超过50 m。在每个样方中,选取1 m × 1 m的小样方进行收割,并按不同部分进行取样(根、茎、叶、繁殖器官,如能区分还应划分当年枝),所取样品要多于100 g,采集后进行杀青处理,装入信封,带回实验室做进一步处理。

1.3 样品的处理和测定

带回实验室的灌木植物样品用恒温烘箱在65 条件下烘至恒质量,取烘干的灌木样品(>1 g)用

表1 窄叶鲜卑花灌丛样地基本信息

Table 1 Basic information of *Sibiraea angustata* dominated shrub sites

样地编号 Plot ID	调查地区 Location	纬度 Latitude (N)	经度 Longitude (E)	海拔 Altitude (m)	灌木层高度 Height of shrub layer (m)	灌木层盖度 Coverage of shrub layer (%)	坡度 Slope aspect (°)	坡位 Slope position
1	四川理塘 Litang, Sichuan	29.88°	100.33°	3 980	1.10	80	10	中部 Middle part
2	四川理塘 Litang, Sichuan	30.08°	100.35°	4 064	0.80	60	10	下部 Lower part
3	四川色达 Sêrtar, Sichuan	31.85°	100.73°	3 535	0.40	70	21	中下部 Mid-lower part
4	四川炉霍 Luhuo, Sichuan	31.62°	100.23°	3 847	0.70	70	20	中部 Middle part
5	四川甘孜 Garzê, Sichuan	31.45°	99.97°	4 212	0.85	75	19	中下部 Mid-lower part
6	四川道孚 Dawu, Sichuan	30.88°	101.23°	3 332	1.20	40	14	中下部 Mid-lower part
7	四川小金 Xiaojin, Sichuan	31.70°	102.32°	4 034	2.20	70	15	中上部 Mid-upper part
8	四川马尔康 Barkam, Sichuan	31.90°	102.65°	3 709	3.10	70	20	中部 Middle part
9	四川阿坝 Aba, Sichuan	32.72°	102.01°	3 813	1.20	60	15	中部 Middle part
10	四川壤塘 Xiangtang, Sichuan	32.30°	101.07°	3 909	1.10	70	15	中部 Middle part
11	四川金川 Jinchuan, Sichuan	31.53°	101.68°	3 748	2.20	50	5	下部 Lower part
12	四川松潘 Songpan, Sichuan	33.02°	102.95°	3 344	1.05	80	0	中上部 Mid-upper part
13	青海久治 Jiuzhi, Qinghai	33.27°	100.62°	3 738	0.90	70	28	下部 Lower part
14	青海玉树 Yushu, Qinghai	33.03°	96.87°	4 053	1.20	65	39	中下部 Mid-lower part
15	青海囊谦 Nangqên, Qinghai	31.88°	96.88°	4 034	1.05	45	35	中下部 Mid-lower part
16	西藏洛隆 Lhorong, Xizang	30.73°	96.08°	4 198	0.70	32	10	下部 Lower part

杯式粉碎机进行粗粉碎, 过10目筛混匀, 颗粒过大而未过筛的粗样品继续进行粗粉碎, 如此循环直到完全过筛(对于木质坚硬的样品可先用木锤敲碎, 然后再进行粗粉碎), 然后用冷冻混合球磨仪将粗粉碎样品(>1 g)进行细粉碎, 过100目筛, 装袋标号, 用于实验分析。采用C/N元素分析仪(2400II CHNS/O, PerkinElmer, Boston, USA)测定灌木样品C、N含量, 使用酸溶-钼锑抗比色法测定灌木样品P的含量。

1.4 计算和统计方法

数据的计算和统计分析主要采用Excel 2007、SPSS 20.0等软件, 在Origin 8.5软件中制作插图。首先, 采用Excel 2007软件对C、N、P含量及其比值等原始数据的平均值、标准偏差和变异系数(变异系数=标准偏差/平均值×100%)等统计指标进行计算; 再使用SPSS 20.0统计软件对相关数据进行单因素方差分析; 最后在SPSS 20.0中对C、N、P含量及其比值进行Pearson相关性分析。

2 结果和分析

2.1 不同器官C、N、P化学计量特征

青藏高原东部窄叶鲜卑花不同器官C、N、P含量的描述性统计值可见表2。从表2可知, C含量在不

同器官中的分配情况表现为: 茎>当年枝>果>根>叶; N含量的分配情况为: 叶>果>当年枝>茎>根; P的分配情况为: 果>叶>当年枝>根>茎。茎中C含量显著高于叶和根($p < 0.05$); 叶片中N和P含量显著高于茎、根和当年枝($p < 0.05$); 果中P的含量也显著高于其他器官($p < 0.05$)。C的平均含量在各器官中的变化范围为466.33–495.07 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 各器官中C含量的最大值与最小值之间的差值不到30 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 不同器官C含量的变异系数均小于5% (1.71%–4.44%); N含量在各器官中的变化范围为4.00–22.27 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 不同器官N含量的变异系数变化范围为14.49%–25.50%。P含量在各器官中的变化范围为0.45–2.86 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; P含量在不同器官的变异系数变化范围为11.46%–46.15%。在根部N、P的变异系数最大, 其值分别为25.50%和46.15%。由此可知, 窄叶鲜卑花不同器官C含量相对稳定, 而N、P含量变异较大, 三者的变异性表现为: $C < N < P$ 。

青藏高原东部窄叶鲜卑花不同器官C:N、C:P和N:P的比值大小和描述性统计值见表3。从表3可知, C:N在叶和果两器官中的数值较小且不存在显著差异($p > 0.05$), 分别为 21.89 ± 4.90 、 24.82 ± 4.26 ; C:N在茎和根中的数值比较相近($p > 0.05$), 分别为 113.72 ± 23.02 、 123.92 ± 28.78 ; 根和茎中C:N数值显

表2 窄叶鲜卑花不同器官碳(C)、氮(N)、磷(P)含量特征

Table 2 Content of carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) of *Sibiraea angustata* shrub in different organs

元素指标 Element	不同器官 Different organ	n	MIN ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	MAX ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	M ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	SD ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	CV (%)
C	叶 Leaf	31	451.16	487.92	466.33 ^a	9.58	2.05
	果 Fruit	16	443.82	494.54	480.35 ^{ab}	21.33	4.44
	当年枝 Twig	22	471.58	496.38	483.37 ^b	8.28	1.71
	茎 Shoot	30	475.34	520.68	495.07 ^b	10.29	2.08
	根 Root	29	407.51	500.62	468.47 ^a	19.46	4.15
N	叶 Leaf	31	14.14	32.84	22.27 ^c	4.65	20.88
	果 Fruit	16	17.08	23.25	19.74 ^c	2.86	14.49
	当年枝 Twig	22	5.16	11.02	7.98 ^b	2.03	25.44
	茎 Shoot	30	2.95	6.77	4.54 ^a	0.97	21.37
	根 Root	29	2.69	6.91	4.00 ^a	1.02	25.50
P	叶 Leaf	31	1.07	4.10	1.92 ^c	0.65	33.85
	果 Fruit	16	2.37	3.33	2.85 ^d	0.40	15.09
	当年枝 Twig	22	0.83	1.16	0.96 ^b	0.11	11.46
	茎 Shoot	30	0.22	0.78	0.45 ^a	0.16	35.56
	根 Root	29	0.23	1.14	0.52 ^a	0.24	46.15

CV, 变异系数; M, 平均值; MAX, 最大值; MIN, 最小值; n, 子样本容量; SD, 标准偏差。在同一元素平均值列中的不同小写字母表示不同器官元素含量差异显著($p < 0.05$)。

CV, coefficient of variation; M, mean; MAX, maximum; MIN, minimum; n, subsample number; SD, standard deviation. Different small letters in the same element and mean column indicate the significant difference in the different organs ($p < 0.05$).

表3 窄叶鲜卑花不同器官碳(C)、氮(N)、磷(P)比值特征

Table 3 The ratio of carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) of *Sibiraea angustata* shrub in different organs

元素比值 Element ratio	不同器官 Different organ	n	MIN	MAX	M	SD	CV (%)
C:N	叶 Leaf	31	13.74	32.99	21.89 ^a	4.90	22.38
	果 Fruit	16	19.84	28.75	24.82 ^a	4.26	17.16
	当年枝 Twig	22	44.14	96.18	64.16 ^b	16.83	26.23
	茎 Shoot	30	71.70	167.96	113.72 ^c	23.02	20.24
	根 Root	29	63.72	174.63	123.92 ^c	28.78	23.22
N:P	叶 Leaf	31	4.15	16.91	12.41 ^c	3.11	25.06
	果 Fruit	16	5.28	9.42	7.12 ^a	1.93	27.11
	当年枝 Twig	22	5.87	9.88	8.21 ^a	1.42	17.30
	茎 Shoot	30	5.96	17.32	10.80 ^b	2.80	25.93
	根 Root	29	2.86	14.97	8.74 ^a	3.11	35.58
C:P	叶 Leaf	31	112.11	454.22	266.18 ^b	82.09	30.84
	果 Fruit	16	147.97	186.92	170.30 ^a	17.54	10.30
	当年枝 Twig	22	418.12	570.63	507.29 ^c	51.77	10.21
	茎 Shoot	30	629.05	2 219.58	1 235.46 ^d	437.02	35.37
	根 Root	29	421.11	2 089.60	1 070.28 ^d	439.16	41.03

CV, 变异系数; M, 平均值; MAX, 最大值; MIN, 最小值; n, 子样本容量; SD, 标准偏差。在平均值列中的不同小写字母表示不同器官间差异显著($p < 0.05$)。

CV, coefficient of variation; M, mean; MAX, maximum; MIN, minimum; n, subsample number; SD, standard deviation. Different small letters in the mean column indicate the significant difference in the different organs ($p < 0.05$).

著高于当年枝、叶和果($p < 0.05$)。N:P的数值在各器官中相对比较稳定, 其平均值的变化范围为7.12–12.41; 最大值在叶中, 为 12.41 ± 3.11 , 最小值在果中, 为 7.12 ± 1.93 ; 叶和茎中N:P数值显著高于当年枝、根和果($p < 0.05$)。C:P的数值在各器官中的变化巨大, 其平均值的变化范围为170.30–1 235.46; 最小值是在果中, 为 170.30 ± 17.54 , 最大值是在茎中, 为 $1 235.46 \pm 437.02$; 根和茎中C:P的数值显著高于当年枝、叶和果($p < 0.05$)。

2.2 C、N、P含量及其比值间的相关性

通过SPSS 20.0统计分析软件对窄叶鲜卑花植株C、N、P含量及其比值进行Pearson相关分析, 结果(表4)表明, C含量与N、P含量总体上均呈极显著的负相关关系($p < 0.01$), 其相关系数分别为-0.407、-0.342。而N含量与P含量之间呈极显著的正相关关系($p < 0.01$), 其相关系数为0.814, 相关性较强, 这在一定程度上反映了N、P在植物体内的耦合程度较高。C:N数值与C呈极显著的正相关关系($p < 0.01$), 与N呈极显著的负相关关系($p < 0.01$), 相关系数分别为0.374、-0.901。C:P数值与C、C:N值呈极显著的正相关关系($p < 0.01$), 其相关系数分别为0.432、0.833; 与N、P呈极显著的负相关关系($p < 0.01$), 相关系数分别为-0.746、-0.796, 负相关性较强, 产生

表4 碳(C)、氮(N)、磷(P)含量及其比值之间的相关系数(Pearson检验)
Table 4 The correlation coefficient among carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P) content and their ratios (Pearson test)

项目 Item	C	N	P	C:N	C:P	N:P
C	1					
N	-0.407**	1				
P	-0.342**	0.814**	1			
C:N	0.374**	-0.901**	-0.802**	1		
C:P	0.432**	-0.746**	-0.796**	0.833**	1	
N:P	-0.001	0.366**	-0.118	-0.276**	0.213*	1

*, 相关系数显著水平为5% ($0.01 < p < 0.05$), **, 相关系数显著水平为1% ($p < 0.01$)。

*, correlation is significant at the 0.05 level ($0.01 < p < 0.05$), **, correlation is significant at the 0.01 level ($p < 0.01$).

此现象的原因是P作为C:P值的除数, P值越大, C:P值越小, 故两者极显著负相关, 而N与P极显著正相关, 从而C:P与N极显著负相关。在植物体内N:P与N含量呈极显著的正相关关系($p < 0.01$), 而其与P含量的相关性不显著($p > 0.05$), 在一定程度上说明在窄叶鲜卑花中N:P值的变化主要由N含量变化决定。

3 讨论

3.1 窄叶鲜卑花灌木生态化学计量特征

目前, 国内外对陆地生态系统化学计量学的研究主要集中在对植物群落叶片C、N、P含量及其计量学特征的研究, 而对植物物种不同器官C、N、P

含量及其比值特征的研究相对较少。本文对窄叶鲜卑花不同器官中C、N、P含量的分配格局进行研究, 结果表明, C在各器官中的含量高且相对稳定, N、P含量较低且变异系数都较大, N的变异系数小于P(表2), 原因可能是C是构成植物骨架的基本结构物质, 且为植物新陈代谢、生长发育和繁殖等生理活动提供能源的物质, 需求量大, 所以在植物体内含量高且变异小; Vitousek (1998)通过N、P的施肥试验, 发现N含量被植物控制在较窄的范围内, 故N含量在各器官中的变异性小于P, 本研究的结果与Vitousek的试验结论一致。N、P含量的变异系数的最大值都位于根部(表2), 这可能是由植物体中N和P的来源引起的, 即植物通过根系从土壤中吸收和利用有效的N、P, 因不同土壤环境中有效N、P含量存在较大差异, 故造成根系对N、P的吸存量具有较大差异。

不同植物器官C、N、P含量的差异不仅受植物的基本生理过程需求的影响, 而且受相应组织的组织结构和功能分化的影响(Minden & Kleyer, 2014)。灌木等木质植物的茎是植物的支撑、输导器官, 该器官组织主要是由木质素、纤维素等富含C的多糖物质组成(Freudenberg & Neish, 1968), 植物茎的这一结构性决定其C浓度较高, 因此C在窄叶鲜卑花茎中的浓度最高。叶片既是植物的同化器官, 也是植物重要的养分储存器官, 而茎、枝和根作为养分的吸收和输送通道, 较少储存养分(李合生, 2002), 因而导致窄叶鲜卑花叶片的N和P含量显著地高于茎、根和当年枝($p < 0.05$)。采集果实对其C、N、P含量进行分析, 结果显示, 果中P的含量显著高于其他器官($p < 0.05$); N的含量与叶中的含量相近($p > 0.05$), 但是显著高于当年枝、茎和根中的含量($p < 0.05$)。由于此次采样集中在8月中下旬, 此时为窄叶鲜卑花灌木的果期, 窄叶鲜卑花灌木为了促进果实的成熟、储备营养等需要大量的蛋白质物质, 故使N含量较高; 植物果实是遗传器官, 其中含有大量的核酸, 而P是核酸的主要构成元素, 故P在果中的含量最高, 这也进一步表明了元素在不同器官中的含量分配与该器官所执行的功能及植物的生长期密切相关(Niklas & Cobb, 2005)。

C、N、P是生物体基本的组成元素, 生物体的生长过程实质上是对元素的积聚与相对比例的调节过程(曾冬萍等, 2013)。Sterner和Elser (2002)认为, 生物体C、N、P比值与生长率有很强的关系, 在此

基础上, 产生了生长速率理论, 即生物体的快速生长需要大量的蛋白质酶, 也需要大量核糖体RNA合成蛋白质, 由于核糖体RNA中含有大量的P, 蛋白质酶中含有大量的N, 从而使得生长率高的生物和新陈代谢速率快的器官具有较低的C:N、C:P和N:P。在窄叶鲜卑花不同器官中, 叶和果C:N和C:P的数值显著低于其他器官($p < 0.05$), N:P在果中最小, 这是因为采样是在该灌木生长季的后期, 此时也是叶和果新陈代谢速率较快的时期, 表明了不同器官C、N、P比值特征在一定程度上符合生态化学计量学的生长速率理论。生态化学计量学内稳态理论认为有机体的元素组成比值是动态平衡的, 有机体存在一个相对稳定的C、N、P比值关系(曾德慧和陈广生, 2005), 窄叶鲜卑花不同器官N:P值在一个相对较小的范围内分布, 在一定程度上反映了N:P在该灌木中具有内在的稳定性。

通过对窄叶鲜卑花C、N、P含量相关分析发现: C与N、P呈极显著的负相关关系($p < 0.01$)(表4), 在植物体中C与N、P一般呈负相关性是高等陆生植物C、N、P计量的普遍规律(Sterner & Elser, 2002), 在窄叶鲜卑花中这一规律得到进一步体现, 此规律可以把植物体中的基本元素C比作溶液的溶剂, 把N、P比作溶液的溶质, 即C对N、P有一定的稀释作用, 可以把此规律称之为C对N、P的“稀释效应”。植物中的N和P是协同元素, 一般呈正相关关系(Wright *et al.*, 2005), 本研究表明, 窄叶鲜卑花植株体内N与P呈极其显著的正相关关系($p < 0.01$)(表4), 这一结果与烤烟(杨梅等, 2015)、长白山森林不同演替阶段植物(胡耀升等, 2014)、中国东部南北样带不同功能群植物(任书杰等, 2007)等C、N、P化学计量特征的研究结果相一致。

3.2 窄叶鲜卑花叶片化学计量特征及其养分分析

叶片是植物通过光合作用获取能源和光合产物的主要器官, 研究其C、N、P化学计量特征具有重大意义。研究表明, 青藏高原东部窄叶鲜卑花叶片中的C含量($466.33 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)与Elser等(2000)对全球492种陆地植物叶片研究所得C含量($464 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $p > 0.05$)极为接近; 与我国其他植物相关研究相比, 窄叶鲜卑花叶片C含量也处于较高水平, 高于亚热带的浙江天童山植物($450 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $p > 0.05$)(阎恩荣等, 2010)和中国草地生态系统($438 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $p > 0.05$)(He *et al.*, 2008), 显著高于阿拉善荒漠典型植物(379.01

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $p < 0.05$) (张珂等, 2014) 和黄土高原优势灌丛植物 ($421.40 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $p < 0.05$) (李单凤等, 2015), 说明青藏高原东部窄叶鲜卑花叶片的有机化合物含量较高, 具有较高的C储存能力。

从植物养分需求角度来看, 植物需要的多种营养元素里N、P尤为重要, 是限制植物生长和繁殖等生理活动的重要因素 (阿布里孜·阿不都热合曼等, 2015), 它们既是植物体内许多重要有机化合物的组分, 同时又以多种方式参与植物体内各种代谢过程。中国陆生植物叶片N含量与全球范围内的植物叶片N含量较为接近 (Han *et al.*, 2005), 但叶片中P含量显著低于全球陆生植物的测定值 (Elser *et al.*, 2000)。此外, 李单凤等 (2015) 对黄土高原优势灌丛研究发现C:P、N:P值分别为411.46和20.81, 指出黄土高原优势灌丛的限制性元素是P。本研究中窄叶鲜卑花叶片N:P值为12.41, 显著低于黄土高原优势灌丛植物, 与全球植物极为接近 (12.60 , $p > 0.05$) (Elser *et al.*, 2000)。而本研究中叶片N、P含量 (N, $22.27 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; P, $1.92 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 均显著高于中国陆生植物 (N, $18.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; P, $1.21 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; $p < 0.05$) (Han *et al.*, 2005) 和全球植物 (N, $17.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; P, $1.58 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; $p < 0.05$) (Elser *et al.*, 2000), 且窄叶鲜卑花叶片P浓度也显著高于黄土高原优势灌丛 (P, $1.20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $p < 0.05$)。尽管窄叶鲜卑花叶片N:P值较低, 但我们认为窄叶鲜卑花叶片具有较高的N、P含量, 其生长很可能不受N、P限制。较高的窄叶鲜卑花叶片N、P含量来源于肥沃的土壤, 前期对窄叶鲜卑花灌丛土壤N、P含量的研究结果 (贺合亮等, 2015) 表明, 窄叶鲜卑花灌丛0–10 cm层土壤营养元素 (N, $6.27 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; P, $1.13 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 远远高于黄土高原优势灌丛0–10 cm层土壤 (N, $0.108 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; P, $0.54 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) (李单凤等, 2015), 但土壤N:P分析显示P具有成为限制元素的趋势 (贺合亮等, 2015), 这与植物叶片养分限制的分析存在一定差异。因此, 在肥沃的土壤和某些具有较高养分含量的物种中使用生态化学计量学N:P值进行养分限制性判断应当谨慎, 因为相关养分限制诊断指标的敏感性和适用性因研究对象不同而存在差异 (曾冬萍等, 2013)。故要准确评价土壤N、P是否为限制性养分, 不仅要比较N:P值, 还要对N和P含量及其有效性进行比较; 想要真实而准确地反映不同物种在环境中养分的限制情况, 除了要分析叶片N:P值外, 还应当分析该物质叶片N、P含量并结合

相应的施肥试验做进一步的营养诊断。

本研究对青藏高原东部窄叶鲜卑花不同营养器官的C、N、P化学计量特征进行了研究, 研究发现: 窄叶鲜卑花不同器官中C、N、P含量及其分配与该器官所执行的功能和所处的生长期密切相关; 该灌木不同器官C、N、P计量特征在一定程度上符合生态化学计量学的内稳态理论和生长速率理论; 在该植物体中, C与N或P极显著负相关, C对N、P具有稀释效应, N和P极显著正相关性, 两者耦合程度较高; 青藏高原东部窄叶鲜卑花灌丛土壤肥沃, 窄叶鲜卑花灌木叶片C、N、P含量较高, 使用土壤和灌木叶片N:P指标分析该物种养分限制情况存在一定差异, 故用化学计量比在肥沃的土壤和物种水平判断养分限制性情况应谨慎。此外, 本文对窄叶鲜卑花这一物种生长季后期C、N、P的分配和计量特征进行了研究, 缺少物种间、群落水平和季节动态变化分析, 随着全球变化, 尤其是气候变暖、N沉降的进行等, 灌丛等陆地生态系统将受到巨大影响, 陆地植被生态化学的元素平衡状况和相关计量指标对全球变暖、N沉降等全球变化是如何响应的, 有待进一步深入研究, 为此我们下一步的重点工作是研究该灌丛生态系统化学计量特征的季节动态变化及对温度升高、N沉降等全球变化的响应机理。

基金项目 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 (2015FY110300)、国家自然科学基金 (31570476、31400424) 和中国科学院西部之光 (Y4C2021)。

参考文献

- Abliz A, Lü GH, Zhang XN, Gong YM (2015). Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of photosynthetic organs across Ebinur Lake Wetland Natural Reserve of Xinjiang, Northwest China. *Chinese Journal of Ecology*, 34, 2123–2130. (in Chinese with English abstract) [阿布里孜·阿不都热合曼, 吕光辉, 张雪妮, 公延明 (2015). 新疆艾比湖流域植物光合器官碳、氮、磷生态化学计量特征. *生态学杂志*, 34, 2123–2130.]
- An Z, Niu DC, Wen HY, Yang Y, Zhang HR, Fu H (2011). Effects of N addition on nutrient resorption efficiency and C:N:P stoichiometric characteristics in *Stipa bungeana* of steppe grasslands in the Loess Plateau, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 801–807. (in Chinese with English abstract) [安卓, 牛得草, 文海燕, 杨益, 张洪荣, 傅华 (2011). 氮素添加对黄土高原典型草原长芒草氮磷重吸收率及C:N:P化学计量特征的影响. *植物生态学*

- 报, 35, 801–807.]
- Bin ZJ, Wang JJ, Zhang WP, Xu DH, Cheng XH, Li KJ, Cao DH (2014). Effects of N addition on ecological stoichiometric characteristics in six dominant plant species of alpine meadow on the Qinghai-Xizang Plateau, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 231–237. (in Chinese with English abstract) [宾振钧, 王静静, 张文鹏, 徐当会, 程雪寒, 李柯杰, 曹德昊 (2014). 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. *植物生态学报*, 38, 231–237.]
- Elser JJ, Fagan WF, Denno RF, Dobberfuhl DR, Folarin A, Huberty A, Ierland S, Kilham SS, Mcauley E, Schulz KL, Siemann EH, Sterner RW (2000). Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. *Nature*, 408, 578–580.
- Editorial Committee of Flora of China, Chinese Academy of Sciences (1974). *Flora of China* (Volume 36). Science Press, Beijing. 70–71. (in Chinese) [中国科学院中国植物志编辑委员会 (1974). 中国植物志(第三十六卷). 科学出版社, 北京. 70–71.]
- Freudenberg K, Neish AC (1968). *Constitution and Biosynthesis of Lignin*. Springer-Verlag, Berlin. 199.
- Guo BH, Liu GL, Fan SH, Du MY, Su WH (2014). Distribution patterns and stoichiometry characteristics of C, N, P in *Phyllostachys edulis* forests of different productivity levels. *Scientia Silvae Sinicae*, 50(6), 1–9. (in Chinese with English abstract) [郭宝华, 刘广路, 范少辉, 杜满义, 苏文会 (2014). 不同生产力水平毛竹林碳氮磷的分布格局和计量特征. *林业科学*, 50(6), 1–9.]
- Han WX, Fang JY, Guo D, Zhang Y (2005). Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 168, 377–385.
- He JS, Wang L, Dan FBF, Wang XP, Ma WH, Fang JY (2008). Leaf nitrogen:phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes. *Oecologia*, 155, 301–310.
- Huang WJ, Zhou GY, Liu JX, Zhang DQ, Xu ZH, Liu SZ (2012). Effects of elevated carbon dioxide and nitrogen addition on foliar stoichiometry of nitrogen and phosphorus of five tree species in subtropical model forest ecosystems. *Environmental Pollution*, 168, 113–120.
- He HL, Yang XC, Wang D, Sun YY, Yin CY, Li T, Li YX, Zhou GY, Zhang L, Liu Q (2015). Ecological stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus of *Sibiraea angustata* shrub in eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 21, 1128–1135. (in Chinese with English abstract) [贺合亮, 阳小成, 王东, 孙誉育, 尹春英, 李婷, 黎云祥, 周国英, 张林, 刘庆 (2015). 青藏高原东部窄叶鲜卑花灌丛土壤C、N、P生态化学计量学特征. *应用与环境生物学报*, 21, 1128–1135.]
- He JS, Han XG (2010). Ecological stoichiometry: Searching for unifying principles from individuals to ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 2–6. (in Chinese) [贺合亮, 韩兴国(2010). 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*, 34, 2–6.]
- Hu YS, Yao XY, Liu YH (2014). N and P stoichiometric traits of plant and soil in different forest succession stages in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 632–638. (in Chinese with English abstract) [胡耀升, 么旭阳, 刘艳红 (2014). 长白山森林不同演替阶段植物与土壤氮磷的化学计量特征. *应用生态学报*, 25, 632–638.]
- Li DF, Yu SL, Wang GX, Fang WW (2015). Environmental heterogeneity and mechanism of stoichiometry properties of vegetative organs in dominant shrub communities across the Loess Plateau. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 453–465. (in Chinese with English abstract) [李单凤, 于顺利, 王国勋, 方伟伟 (2015). 黄土高原优势灌丛营养器官化学计量特征的环境分异和机制. *植物生态学报*, 39, 453–465.]
- Li HS (2002). *Modern Plant Physiology*. Higher Education Press, Beijing, 96–100. (in Chinese) [李合生 (2002). 现代植物生理学. 高等教育出版社, 北京. 96–100.]
- Li J, Yin CY, Zhou XB, Wei YH, Qiao G, Liu Q (2014). Effects of nitrogen addition on soil respiration of *Sibiraea angustata* shrub in the eastern margin of Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 5558–5569. (in Chinese with English abstract) [李娇, 尹春英, 周晓波, 魏宇航, 高巧, 刘庆 (2014). 施氮对青藏高原东缘窄叶鲜卑花灌丛土壤呼吸的影响. *生态学报*, 34, 5558–5569.]
- Li Z, Han L, Liu YH, An SQ, Leng X (2012). C, N and P stoichiometric characteristics in leaves of *Suaeda salsa* during different growth phase in coastal wetlands of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 36, 1054–1061. (in Chinese with English abstract) [李征, 韩琳, 刘玉虹, 安树青, 冷欣 (2012). 滨海盐地碱蓬不同生长阶段叶片C、N、P化学计量特征. *植物生态学报*, 36, 1054–1061.]
- Liu C, Wang Y, Wang N, Wang GX (2012). Advances research in plant nitrogen, phosphorus and their stoichiometry in terrestrial ecosystems: A review. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 36, 1205–1216. (in Chinese with English abstract) [刘超, 王洋, 王楠, 王根轩 (2012). 陆地生态系统植被氮磷化学计量研究进展. *植物生态学报*, 36, 1205–1216.]
- Ma HH, Hou L, Dou YX, Zhang SX, Yang AD, Tian RX (2014). Stoichiometric characteristics of nitrogen and phosphorus in leaves of dominant shrub species in pine-oak mixed forest in the Qinling Mountains. *Journal of Northeast Forestry University*, 42(11), 35–38. (in Chinese with English abstract) [马红红, 侯琳, 窦艳星, 张硕新, 杨安定, 田瑞选 (2014). 秦岭松栎混交林优势灌木

- 叶片N、P化学计量特征. *东北林业大学学报*, 42(11), 35–38.]
- Ma LS, Chen YN, Zhang XR, Yang JJ, An SS (2014). Characteristics of leaf ecological stoichiometry of *Robinia pseudoacacia* in Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 21(3), 57–61. (in Chinese with English abstract) [马露莎, 陈亚南, 张向茹, 杨佳佳, 安韶山 (2014). 黄土高原刺槐叶片生态化学计量学特征. *水土保持研究*, 21(3), 57–61.]
- Minden V, Kleyer M (2014). Internal and external regulation of plant organ stoichiometry. *Plant Biology*, 16, 897–907.
- Moore TR, Trofymow JA, Prescott CE, Titus BD (2011). Nature and nurture in the dynamics of C, N and P during litter decomposition in Canadian forests. *Plant and Soil*, 339, 163–175.
- Niklas KJ, Cobb ED (2005). N, P, and C stoichiometry of *Eraanthis hyemalis* (Ranunculaceae) and the allometry of plant growth. *American Journal of Botany*, 92, 1256–1263.
- 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.]
- Qu FZ, Yu JB, Du SY, Li YZ, Lü XF, Ning K, Wu HF, Meng L (2014). Influences of anthropogenic cultivation on C, N and P stoichiometry of reed-dominated coastal wetlands in the Yellow River Delta. *Geoderma*, 236, 227–232.
- Ren SJ, Yu GR, Tao B, Wang SQ (2007). Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 643 terrestrial plant species in NSTEC. *Environmental Science*, 28, 2665–2673. (in Chinese with English abstract) [任书杰, 于贵瑞, 陶波, 王绍强 (2007). 中国东部南北样带654种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究. *环境科学*, 28, 2665–2673.]
- Song ZL, Liu HY, Zhao FJ, Xu CY (2014). Ecological stoichiometry of N:P:Si in Chinese grasslands. *Plant and Soil*, 380, 165–179.
- Sterner RW, Elser JJ (2002). *Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere*. Princeton University Press, Princeton. 1–20.
- Vitousek PM (1998). Foliar and litter nutrients, nutrient resorption, and decomposition in Hawaiian *Metrosideros* polymorpha. *Ecosystems*, 1, 401–407.
- Wright IJ, Reich PB, Cornelissen JHC, Falster DS, Garnier E, Hikosaka K, Lamont BB, Lee W, Oleksyn J, Osada N, Poorter H, Villar R, Warton DI, Westoby M (2005). Assessing the generality of global leaf trait relationships. *New Phytologist*, 166, 485–496.
- Wang K, Wu HY, Lu H, Xu DY, Li N (2013). Leaf stoichiometric properties of garden tree species in Fuxin city. *Arid Zone Research*, 30, 236–241. (in Chinese with English abstract) [王凯, 吴祥云, 卢慧, 徐东洋, 李娜 (2013). 阜新市主要园林树种叶片生态化学计量特征. *干旱区研究*, 30, 236–241.]
- Wang ZW, Xu XH, Chen XT, Yu SS, Liu HD, Lin LG, Li B (2014). Chemical constituents from the aerial part of *Sibiraea angustata*. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 37, 57–60. (in Chinese with English abstract) [王章伟, 徐向红, 陈笑天, 庾石山, 刘宏栋, 林利光, 李斌 (2014). 窄叶鲜卑花地上部分化学成分研究. *中药材*, 37, 57–60.]
- Wu N (1998). The community types and biomass of *Sibiraea angustata* scrub and their relationship with environmental factors in northwestern Sichuan. *Acta Botanica Sinica*, 40, 860–870. (in Chinese with English abstract) [吴宁 (1998). 川西北窄叶鲜卑花灌丛的类型和生物量及其与环境因子的关系. *植物学报*, 40, 860–870.]
- Wu TG, Wu M, Liu L, Xiao JH (2010). Seasonal variations of leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry of three herbaceous species in Hangzhou Bay coastal wetlands, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 23–28. (in Chinese with English abstract) [吴统贵, 吴明, 刘丽, 萧江华 (2010). 杭州湾滨海湿地3种草本植物叶片N、P化学计量的季节变化. *植物生态学报*, 34, 23–28.]
- Xia CX, Yu D, Wang Z, Xie D (2014). Stoichiometry patterns of leaf carbon, nitrogen and phosphorus in aquatic macrophytes in eastern China. *Ecological Engineering*, 70, 406–413.
- Yan ER, Wang XH, Guo M, Zhong Q, Zhou W (2010). C:N:P stoichiometry across evergreen broad-leaved forests, evergreen coniferous forests and deciduous broad-leaved forests in the Tiantong region, Zhejiang Province, eastern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 48–57. (in Chinese with English abstract) [阎恩荣, 王希华, 郭明, 仲强, 周武 (2010). 浙江天童常绿阔叶林、常绿针叶林与落叶阔叶林的C:N:P化学计量特征. *植物生态学报*, 34, 48–57.]
- Yan K, Fu DG, He F, Duan CQ (2011). Leaf nutrient stoichiometry of plants in the phosphorus-enriched soils of the Lake Dianchi watershed China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 353–361. (in Chinese with English abstract) [阎凯, 付登高, 何峰, 段昌群 (2011). 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. *植物生态学报*, 35, 353–361.]
- Yang M, Wang QQ, Yuan DG, Li QQ, Zeng J, Luo Q, Lan XM, Tang J (2015). C, N, P stoichiometry traits of different flue-cured tobacco organs at different growth stages. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 23, 686–693. (in Chinese with English abstract) [杨梅, 王昌全, 袁大刚,

- 李启权, 曾建, 罗茜, 兰兴梅, 唐杰 (2015). 不同生长期烤烟各器官C、N、P生态化学计量学特征. *中国生态农业学报*, 23, 686–693.]
- Yao L, Ju Y (2009). Effects of *Sibiraea augustata* on digestive system. *Chinese Journal Integrated Traditional Western Medicine Digestion*, 17, 376–378. (in Chinese with English abstract) [姚莉, 鞠洋 (2009). 窄叶鲜卑花促消化作用的实验研究. *中国中西医结合消化杂志*, 17, 376–378.]
- Zeng DH, Chen GS (2005). Ecological stoichiometry: A science to explore the complexity of living systems. *Acta Phytocologica Sinica*, 29, 141–153. (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, 141–153.]
- Zeng DP, Jiang LL, Zeng CS, Wang WQ, Wang C (2013). Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 5484–5492. (in Chinese with English abstract) [曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 王维奇, 王纯 (2013). 生态化学计量学特征及其应用研究进展. *生态学报*, 33, 5484–5492.]
- Zhang FH, He F, He YP, Fan H, Jiang TL (2008). The influencing factors and protection of biodiversity in western Sichuan. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 29(6), 46–51. (in Chinese with English abstract) [张发会, 何飞, 何亚平, 樊华, 降廷伦 (2008). 川西生物多样性的影响因素及其保护对策. *四川林业科技*, 29(6), 46–51.]
- Zhang K, He MZ, Li XR, Tan HJ, Gao YH, Li G, Han GJ, Wu YY (2014). Foliar carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of typical desert plants across the Alashan Desert. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 6538–6547. (in Chinese with English abstract) [张珂, 何明珠, 李新荣, 谭会娟, 高艳红, 李刚, 韩国君, 吴杨杨 (2014). 阿拉善荒漠典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征. *生态学报*, 34, 6538–6547.]
- Zhang ZS, Song XL, Lu XG, Xue ZS (2013). Ecological stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in estuarine wetland soils: Influences of vegetation coverage, plant communities, geomorphology, and seawalls. *Journal of Soils Sediments*, 13, 1043–1051.
- Zhang XS (1978). The plateau zonality of vegetation in Xizang. *Acta Botanica Sinica*, 20, 140–149. (in Chinese with English abstract) [张新时 (1978). 西藏植被的高原地带性. *植物学报*, 20, 140–149.]

责任编辑: 谢宗强 责任编辑: 李 敏