

安徽石台亚热带常绿阔叶林植物叶中 C、N、P 特征分析^{*1}

柯立 崔珺 杨佳 徐小牛*

(安徽农业大学林学与园林学院, 安徽合肥 230036)

【摘要】以安徽石台亚热带常绿阔叶林植物叶片为研究对象, 分析了植物叶中 C、N、P 含量以及它们之间的化学计量关系, 讨论了不同类型植物叶片的化学计量特征。结果显示: 所研究的 28 种植物物种间差异明显, 叶片中 C 含量为 400.08~519.36mg/g, N 为 5.15~15.39mg/g, P 为 0.30~0.97mg/g, $m(C):m(N)$ 范围为 29.99~92.25、 $m(C):m(P)$ 的范围为 467.01~1443.81、 $m(N):m(P)$ 的范围为 10.01~29.29, 且 N 与 P、 $m(C):m(N)$ 值与 $m(C):m(P)$ 值之间呈现显著的正相关关系, $m(N):m(P)$ 的变化主要由 P 含量决定。不同生活型植物 $m(C):m(N)$ 值从大到小表现为灌木(59.68) > 乔木(51.56) > 草本和藤本植物(44.50), 草本和藤本植物与灌木之间 $m(C):m(N)$ 差异显著; 不同植物 $m(C):m(P)$ 值从大到小表现为灌木(1043.4) > 草本和藤本植物(818.78) > 乔木(808.35), 灌木与乔木、草本和藤本植物都存在显著差异。该地区灌木 $m(C):m(N)$ 值和 $m(C):m(P)$ 值均最高, 说明灌木对 N、P 的利用效率最高。3 种植物 $m(N):m(P)$ 值均大于 16, 说明该地区常绿阔叶林主要受 P 限制。虽然植物受 P 限制, 但其 $m(C):m(P)$ 值含量较高, 说明植物对其生长受限的元素利用效率会更高, 这反映了植物对环境适应的一种对策。

【关键词】亚热带常绿阔叶林; C、N、P 含量; 化学计量; 养分利用效率

【中图分类号】: S718 **【文献标志码】**: A **【文章编号】**: 1000-2006(2014)06-0028-05

C、N、P 是植物生长发育过程中必不可少的营养元素, 其中 N、P 往往是陆生植物两个关键的限制性因子^[1-2]。植物叶片的碳氮比($m(C):m(N)$)和碳磷比($m(C):m(P)$)意味着生物量与养分的比值关系, 在一定程度上反映植物的营养利用效率^[3]。生物体中 C 与养分元素 N、P 的化学计量比值能够调控和影响生态系统的 C 循环过程^[4]。而植物叶片氮磷比($m(N):m(P)$)可以作为判断环境的因子, 特别是土壤对植物生长的养分供应状况的指标^[5]。因此, 开展植物叶片 C、N、P 化学计量比的研究有着重要的意义。

自 Redfield 发现海洋浮游生物个体中存在稳定的化学计量比以来, 许多学者将其拓展到了陆地生态系统中^[2-8]。近年来, 生态化学计量方法在研究 C、N、P 的区域分布规律^[6-8]和森林演替群落^[9-14]方面得到了广泛的应用。例如, Reich 等^[7]对全球 1280 种陆生植物的研究发现, 随着纬度的降低和年平均气温的增加, 叶片的 N 和 P 含量降低, 而 $m(N):m(P)$ 的值则升高。银晓瑞等^[9]研究发现内蒙古典型草原不同恢复演替阶段植物叶片的 $m(C):m(N)$ 、 $m(N):m(P)$ 的值与退化程度呈负相关。虽然也有学者从生态系统的角度进行了生态化学计量的研究, 但这些研究集中在高山草甸^[11]、滨海湿地生态系统等^[12], 而对常绿阔叶林

¹收稿日期: 2013-10-15 修回日期: 2014-02-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2010CB950602); 中国科学院战略先导性科技专项项目(2011XDA05050204)

第一作者: 柯立, 硕士。*通信作者: 徐小牛, 教授。E-mail: xnxu6162@163.com。

引文格式: 柯立, 崔珺, 杨佳, 等. 安徽石台亚热带常绿阔叶林植物叶中 C、N、P 特征分析 [J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2014, 38(6): 28-32.

植物叶片的化学计量研究相对较少。为此，笔者以安徽亚热带常绿阔叶原始林为研究对象，从植物叶片 C、N、P 含量入手，揭示该地区林分中的生态化学计量特点，以期为该区域生态环境的保护和森林抚育管理提供科学参考。

1 材料与方法

1. 1 研究区概况

试验地位于安徽省石台县大山村(117° 21' 23.33" E, 30° 01' 47.44" N)，海拔 375m，属亚热带湿润季风气候，年平均气温为 16.2℃，最高月均温 29.3℃，最低月均温－5℃，≥10℃年积温为 4897℃。山麓观测站多年平均降水量 1600～1700mm，其中 76%的降雨量集中在 3—8 月的雨季。地带性土壤类型为棕壤。该地区植被类型为亚热带常绿阔叶原始林，林龄约为 200a。主要树种为甜槠(*Castanopsis eyrei*)、青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)、树参(*Dendropanax dentiger*)、老鼠矢(*Symplocos stellaris*)、草珊瑚(*Sarcandra glabra*)、矩型叶鼠刺(*Itea chinensis*)、全缘冬青(*Ilex integra*)等。

1. 2 样品采集、处理

2012 年 10 月进行野外调查和采样。选择具有代表性的林分设立面积为 20m×20m，间隔为 20m 的重复样地 3 块(表 1)。每个样地选择生长中等样木 2～3 株，确保每个树种有 6 株样木。采集不同种植物树冠外围中部的东、南、西、北 4 个方向的成熟叶片，草本和藤本植物则全株带回，3 块样地共采集 28 个种 84 份样品。

表 1 调查样地立地及表层土壤(0~10 cm)特性
Table 1 Characteristics of topsoil (0-10 cm) at the sampling site

样地 plot	坡向 aspect	全氮含量/ (mg·g ⁻¹) TN	全磷含量/ (mg·g ⁻¹) TP	相对含水 率/% relative moisture content	平均胸径/ cm DBH	pH
S1	SE	2.37	0.129	33.9	11.10	4.5
S2	SW	2.06	0.155	32.4	12.45	4.6
S3	SE	3.09	0.104	40.3	8.61	4.7
均值		2.51	0.129	35.5	10.60	

所采集的植物样品去尘后，置于 60℃烘至质量恒定，粉碎备用。C 和 N 含量用元素分析仪(EA3000 CNHSO Analyser)测定。P 含量采用硝酸—高氯酸消煮后、流动注射分析仪(FIA Star 5000, FOSS)测定。

1. 3 数据处理

数据采用 SPSS16.0 和 Excel2003 进行分析。

2 结果与分析

2. 1 不同植物叶片中 C、N、P 含量分析

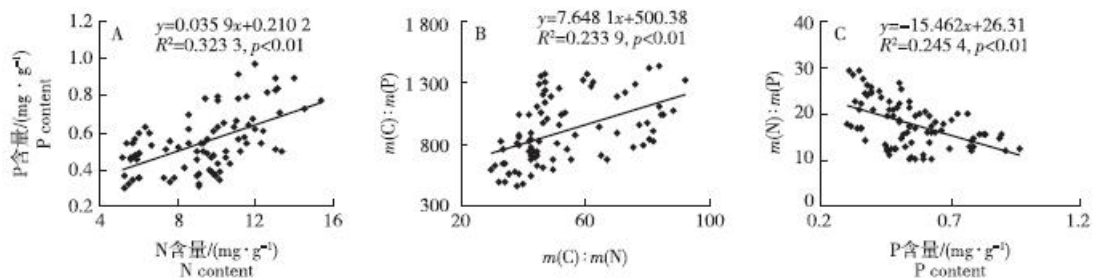
所采集到的 28 种植物中,C 含量范围为 404.67~505.27mg/g,N 含量范围为 5.59~14.39mg/g,P 含量范围为 0.32~0.89mg/g。不同物种之间元素含量差异较大(表 2)，且 N、P 元素的含量均小于全国平均水平((18.6±8.41)、(1.21±0.99)mg/g)^[15]，以及全球平均水平((18.3±8.71)、(1.42±1.12)mg/g)^[16]。

表 2 不同植物叶片中 C、N、P 含量及其生态化学计量指标

Table 2 Concentrations of C, N, P and their stoichiometrical ratios in foliage of the different plants

生活型 life form	物种 species	C 含量/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) C content	N 含量/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) N content	P 含量/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) P content	$m(\text{C}):$ $m(\text{N})$	$m(\text{C}):$ $m(\text{P})$	$m(\text{N}):$ $m(\text{P})$
乔木	树参(<i>Dendropanax dentiger</i>)	444.36	11.99	0.89	37.60	504.35	13.54
	甜槠(<i>Castanopsis eyrei</i>)	475.60	9.45	0.56	50.98	858.44	16.88
	青冈栎(<i>Cyclobalanopsis glauca</i>)	447.06	11.87	0.87	37.83	518.76	13.77
	木莲(<i>Manglietia fordiana</i>)	467.38	12.94	0.82	36.13	566.97	15.69
	红楠(<i>Machilus thunbergii</i>)	490.17	7.65	0.53	65.59	981.43	15.13
	栲树(<i>Castanopsis fargesii</i>)	466.01	9.54	0.47	48.95	1001.80	20.49
	长叶石栎(<i>Lithocarpus megalophyllus</i>)	473.82	10.25	0.38	46.28	1262.50	27.24
	台楠(<i>Phoebe formosana</i>)	452.40	5.75	0.57	78.80	798.34	10.13
	老鼠矢(<i>Symplocos stellaris</i>)	419.37	7.10	0.54	61.87	782.51	12.94
灌木	红淡比(<i>Cleyera japonica</i>)	468.66	6.58	0.53	71.85	892.02	12.56
	天竺桂(<i>Cinnamomum japonicum</i>)	495.60	8.61	0.54	63.46	1002.50	16.08
	乌药(<i>Lindera aggregata</i>)	505.27	12.29	0.61	41.22	851.39	20.82
	尖连蕊茶(<i>Camellia cuspidata</i>)	404.67	9.27	0.53	43.67	758.84	17.36
	马银花(<i>Rhododendron ovatum</i>)	465.69	9.64	0.38	48.40	1229.20	25.43
	全缘冬青(<i>Ilex integra</i>)	414.54	9.34	0.34	44.46	1228.30	27.55
	矩型叶鼠刺(<i>Itea chinensis</i>)	477.39	11.65	0.58	41.07	819.21	19.96
	小果铁冬青(<i>Ilex rotunda</i>)	487.97	5.78	0.46	84.37	1064.19	12.61
	细叶短柱茶(<i>Camellia microphylla</i>)	447.21	5.59	0.32	80.00	1382.56	17.28
	格药铃(<i>Eurya muricata</i>)	460.15	6.03	0.51	76.97	913.41	11.81
	乌饭树(<i>Vaccinium bracteatum</i>)	458.34	7.53	0.34	60.90	1331.80	21.88
草本和藤本植物	假红盖鳞毛蕨(<i>Dryopteris pseudo-erythrosora</i>)	412.13	12.42	0.55	33.20	748.98	22.58
	草珊瑚(<i>Sarcandra glabra</i>)	468.80	10.12	0.73	46.46	651.61	14.14
	菝葜(<i>Smilax china</i>)	453.83	14.39	0.73	31.64	621.03	19.66
	土麦冬(<i>Liriope spicata</i>)	419.53	6.01	0.44	69.90	1025.50	14.57
	南方紫萁(<i>Osmunda cinnamomea</i>)	415.15	9.47	0.51	44.27	811.50	18.63
	血党(<i>Ardisia brexiaulis</i>)	451.07	9.57	0.40	47.21	1132.00	23.97
	红凉伞(<i>Ardisia crenata</i>)	439.60	10.09	0.63	43.57	701.37	16.10
	络石(<i>Trachelospermum jasminoides</i>)	438.71	11.06	0.51	39.74	858.24	21.61

叶片 N、P 含量间具有良好的线性关系($R^2=0.3233$, $p<0.01$) (图 1A), 叶片 P 含量随着 N 含量的增加而增加。

图 1 植物叶片 N 与 P、 $m(\text{C}):m(\text{N})$ 与 $m(\text{C}):m(\text{P})$ 、 $m(\text{N}):m(\text{P})$ 与 P 含量的关系Fig. 1 Relationships between foliar N and P, $m(\text{C}):m(\text{N})$ and $m(\text{C}):m(\text{P})$, $m(\text{N}):m(\text{P})$ and P

28 种植物叶片 3 种元素间比值变化较大, $m(\text{C}):m(\text{N})$ 范围为 31.64~84.37; $m(\text{C}):m(\text{P})$ 的范围为 504.35~1382.56; $m(\text{N}):m(\text{P})$ 的范围为 10.13~27.55。 $m(\text{C}):m(\text{N})$ 与 $m(\text{C}):m(\text{P})$ 之间呈现显著的正相关关系($R^2=0.2339$, $p<0.01$) (图 1B)。

植物叶片的 $m(N) : m(P)$ 的值与 P 含量的呈较显著的负相关关系(图 1C)，而与 N 含量相关性较弱，说明 $m(N) : m(P)$ 的值的化主要由 P 含量变化决定。

2. 2 不同类型植物叶片中 C、N、P 化学计量学特征

不同类型植物叶片 C 含量的平均值范围在 437.35~462.32mg/g，草本和藤本植物与灌木、乔木之间差异显著，而乔木与灌木之间无明显差异;P 含量的平均值范围在 0.47~0.62mg/g，不同植物叶片中含量从大到小表现为:乔木>草本和藤本>灌木，且灌木与乔木、草本和藤本之间存在显著差异，说明乔木与草本和藤本对 P 的吸收能力比灌木高;N 含量平均值范围在 8.39~10.39mg/g，草本和藤本植物与灌木之间差异显著(表 3)。

表 3 不同类型植物叶片中 C、N、P 含量及化学计量比
Table 3 C, N, P concentrations and stoichiometry of plant at different life forms

植物类型 plant type	C 含量/(mg·g ⁻¹) C content	N 含量/(mg·g ⁻¹) N content	P 含量/(mg·g ⁻¹) P content	$m(C) : m(N)$	$m(C) : m(P)$	$m(N) : m(P)$
草本和藤本	437.35 ± 20.65a	10.39 ± 2.39a	0.56 ± 0.13a	44.50 ± 11.54a	818.78 ± 200.22a	18.91 ± 4.07a
灌木	462.32 ± 32.28b	8.39 ± 2.40b	0.47 ± 0.12b	59.68 ± 17.81b	1 043.4 ± 242.30b	18.49 ± 5.34a
乔木	459.48 ± 22.37b	9.62 ± 2.53ab	0.62 ± 0.19a	51.56 ± 15.47ab	808.35 ± 263.97a	16.20 ± 5.14a

注:同列中字母不同表示存在显著性差异($p < 0.05$)。表中数值为平均值 ± 标准差。

灌木类植物叶片 $m(C) : m(P)$ 的值最高，且与乔木、草本和藤本植物都存在显著差异，而乔木与草本和藤本植物之间无显著差异;植物叶片 $m(C) : m(N)$ 值的范围为 44.50~59.68，且草本和藤本植物与灌木之间差异显著;不同类型植物叶片 $m(N) : m(P)$ 含量从大到小表现为:草本和藤本植物>灌木>乔木，且三者之间无显著差异(表 3)。

3 讨论

1)在植物叶片 C、N、P 含量方面，28 种植物叶片中，草本和藤本植物叶片的 C 含量均值最低((437.35±20.65)mg/g)，明显低于 Elser 等^[13-14]研究全球 492 种陆生植物叶片 C 含量所得均值((464±32.1)mg/g)，而乔木与灌木植物叶片 C 含量则与全球平均水平基本持平。乔木与灌木植物叶片 C 含量高于草本和藤本植物主要是由于它们木质化程度较高，有机化合物含量较大，这也说明它们比草本和藤本植物具有较高的 C 储备能力。

N、P 元素是植物生命活动必须的营养元素。植物对 N 元素的吸收主要来源于土壤，而自然森林生态系统土壤中 N 的最主要来源是凋落物的归还^[15]。一般来说，常绿阔叶林凋落物输入到土壤中的 N 少于其他森林类型。这就使得在此次研究中植物 N 元素的含量小于全国平均水平((18.6±8.41)mg/g)^[15]和全球平均水平((18.3±8.71)mg/g)^[6]。

有学者认为植物叶片 P 含量与土壤 P 含量呈显著正相关^[16-17]，此次试验区土壤 P 含量为 0.129mg/g(表 1)，低于全国 P 平均含量(0.56mg/g)^[15]和全球平均水平(2.8mg/g)^[18]。可能由于该地区为亚热带常绿阔叶原始林，在土壤发育过程中，原生矿物逐渐消失，土壤中磷酸盐从非闭蓄态的有机矿物形式转变成为闭蓄态和有机结合的形式，难以利用，可被植物吸收利用的 P 越来越少。这就导致了植物叶片中的 P 含量小于全国平均水平^[15]((1.21±0.99)mg/g)和全球平均水平((1.42±1.12)mg/g)^[18]。

叶片 N、P 含量间具有良好的线性关系($R^2=0.3233$, $p<0.01$)，所以其 $m(N) : m(P)$ 的变异性要小于 N、P 本身的变异，即植物叶片的 $m(N) : m(P)$ 具有相对的稳定性。试验得出，叶片的 $m(N) : m(P)$ 与 P 含量呈较显著的负相关关系，而其与 N 含量相关性较弱，说明 $m(N) : m(P)$ 值的变化主要由 P 含量变化决定。这可能是由于 P 的变异系数(29.45%)高于 N(27.28%)所造成的。根据生长速率假说，植物要想加快生物量的积累速率，必须提高其对 P 元素的同化，降低 $m(N) : m(P)$ 的值，以加速蛋白质合成，加强同化作用^[19]。此次试在一定程度上支持了这种观点。

2) 在植物 $m(C) : m(P)$ 与 $m(C) : m(N)$ 及营养利用效率方面, 植物叶 $m(C) : m(P)$ 与 $m(C) : m(N)$ 反映植物吸收营养元素所能同化 C 的能力, 在一定程度上可以反映植物的营养利用效率, 同时也代表了不同植物的固 C 效率^[20]。此次试验区域 $m(C) : m(N)$ 从大到小为灌木 (59.68) > 乔木 (51.56) > 草本和藤本植物 (44.50), 草本和藤本植物与灌木之间 $m(C) : m(N)$ 差异显著, 且它们含量都高于全球平均水平 (22.5)^[14] 和浙江天童山常绿阔叶林 (42.11)^[21]。说明石台地区常绿阔叶林对 N 元素的利用效率较高, 且灌木对 N 的利用效率高于其他类型植物。

植物叶片 $m(C) : m(P)$ 从大到小为灌木 (1043.4) > 草本和藤本植物 (818.78) > 乔木 (808.35), 灌木与乔木、草本和藤本植物都存在显著差异, 且均高于全球水平 (232) 和浙江天童山常绿阔叶林 (758)^[21]。表明安徽大山地区常绿阔叶林植物对 P 利用效率较高, 且灌木植物对 P 的利用效率要高于乔木和草本和藤本植物。

3) 在植物生长限制元素判断方面, N、P 是各种蛋白质和遗传物质不可缺少的组成成分, 对植物的生长发育起着重要作用, 但在自然界中, 两种元素的供应往往受到限制, 成为生态系统中的主要受限因子^[1-2]。Koerselman 等^[22]通过总结一些生态系统的施肥试验的结果得出, 当植物叶片 $m(N) : m(P)$ 的值 > 16 时, 表示受 P 限制; 当 $m(N) : m(P)$ 的值 < 14 时, 表示受 N 限制; 处于两者之间时, 表示两者均不受限制或都受限制。此次试验中植物叶片 $m(N) : m(P)$ 的值均大于 16, 且叶片中 P 含量明显小于全国平均水平^[15], 说明石台常绿阔叶原始林主要受 P 限制。虽然植物受 P 限制, 但可以看出, 其 $m(C) : m(P)$ 的值较高, 说明植物对其生长受限的元素利用效率会更高, 这反映了植物对环境适应的一种对策。

参考文献(References) :

[1] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in fresh water, marine and terrestrial ecosystems [J]. Ecology Letters, 2007(10) : 1 — 8.

[2] Vitousek P, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? [J]. Biogeochemistry, 1991, 13: 87 — 115.

[3] Vitousek P. Nutrient cycling and nutrient use efficiency [J]. The American Naturalist, 1982, 119(4) : 553 — 572.

[4] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索

[J]. 植物生态学报, 2005, 29(6) : 1007 — 1019. Zeng D H, Chen G S. Ecological stoichiometry: a science to explore the complexity of living systems [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29(6) : 1007 — 1019.

[5] Martin J W, Harry G M O V, Evalyne O A M. Nutrient concentrations in mire vegetation as a measure of nutrient limitation in mire ecosystems [J]. Journal of Vegetation Science, 1995, 6: 5 — 16.

[6] Zhang L X, Bai Y F, Han X G. Application of N: P stoichiometry to ecology studies [J]. Acta Botanica Sinica, 2003, 45 (9) : 1009 — 1018.

[7] 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.

[8] McGroddy ME, Daufresne T, Hedin LO. Scaling of C : N : P stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial redfieldtype ratios [J]. Ecology, 2004, 85(9) : 2390 — 2401.

[9] 银晓瑞, 梁存柱, 王立新, 等. 内蒙古典型草原不同恢复演替阶段植物养分化学计量学 [J]. 植物生态学报, 2010, 34 (1) : 39 — 47. Yin X R, Liang C Z, Wang L X, et al. Ecological stoichiometry of plant nutrients at different restoration succession stages in typical steppe of Inner Mongolia, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1) : 39 — 47.

[10] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 等. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤 N、P 的化学计量特征 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(1) : 64 — 71. Liu X Z, Zhou G Y, Zhang D Q, et al. N and P stoichiometry of plant and soil in lower subtropical forest successional series in southern China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1) : 64 — 71.

[11] 张文彦, 樊江文, 钟华平, 等. 中国典型草原优势植物功能群氮磷化学计量学特征研究 [J]. 草地学报, 2010, 18 (4) : 503 — 509. Zhang W Y, Fan J W, Zhong H P, et al. The nitrogen: phosphorus stoichiometry of different plant functional groups for dominant species of typical steppes in China [J]. Acta Agrestia Sinica, 2010, 18(4) : 503 — 509.

[12] 吴统贵, 吴明, 刘丽, 等. 杭州湾滨海湿地 3 种草本植物叶片 N、P 化学计量学的季节变化 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(1) : 23 — 28. Wu T G, Wu M, Liu L, et al. Seasonal variations of leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry of three herbaceous species in Hangzhou Bay coastal wetlands, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1) : 23 — 28.

[13] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems [J]. Ecology Letters, 2000(3) : 540 — 550.

[14] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs [J]. Nature, 2000, 408: 578 — 580.

[15] 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: 377 — 385.

[16] Hedin L O. Global organization of terrestrial plant-nutrient interactions [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(30) : 10849 — 10850.

[17] Aerts R, Chapin F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns [J]. Advances in Ecological Research, 2000, 30: 1 — 68.

[18] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 等. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究 [J]. 环境科学, 2007, 28(12) : 2665 — 2673. Ren S J, Yu G R, Tao B, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 654 terrestrial plant species in NSTEC [J]. Environmental Science, 2007, 28(12) : 2665 — 2673.

[19] Niklas K J, Owens T, Reich P B, et al. Nitrogen /phosphorus leaf stoichiometry and the scaling of plant

growth [J] . EcologyLetters, 2005(8) : 636 — 642.

[20] Herbert D A, Williams M, Rastetter E B. A model analysis of N and P limitation on carbon accumulation in Amazonian secondary forest after alternate land-use abandonment [J] . Biogeochemistry, 2003, 65(1) : 121 — 150.

[21] 阎恩荣, 王希华, 郭明, 等. 浙江天童山常绿阔叶林常绿针叶林与落叶阔叶林的 C : N : P 化学计量特征 [J] . 植物生态学报, 2010, 34(1) : 48 — 57. Yan E R, Wang X H, Guo M, et al. 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 [J] . Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34 (1) : 48 — 57.

[22] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N : P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation [J] . Journal of Applied Ecology, 1996, 33: 1441 — 1450.