

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

高三平¹, 李俊祥^{1,2,*}, 徐明策¹, 陈 熙¹, 戴 洁¹

(1. 华东师范大学环境科学系; 2. 城市化生态过程与生态恢复上海市重点实验室, 200062 上海)

摘要:对天童常绿阔叶林 5 个演替阶段的 13 个种类 24 个植物个体叶片的 N、P 化学计量学的研究表明: (1) 各演替阶段植物叶片的 N、P 含量变异较大, N 含量的值在 6.49 ~ 14.69 mg g⁻¹ 之间, P 含量的值在 0.66 ~ 1.13 mg g⁻¹ 之间, 叶片的 N:P 值在 7.45 ~ 16.38 之间; 总体平均值 N 为 9.43 mg g⁻¹, P 为 0.86 mg g⁻¹, N:P 为 11.17; (2) 演替后期的叶片 N 含量和 N:P 比高于演替前期, 叶片 N 含量的变化趋势与 N:P 比的变化趋势协同性较好, N:P 的变化趋势能较好地反映不同演替阶段的群落变化特征; (3) 叶片 N:P 可以作为植物和演替阶段的限制性营养元素的指标, 不同演替阶段的群落生长基本上均是受 N 而不是受 P 的限制; 演替各阶段绝大多数物种新生叶的 N:P 都小于成熟的营养叶的 N:P, 两者均受 N 元素的限制, 且氮素对新叶的限制性更强, 表明新叶容易缺乏氮素而发育不良。

关键词:常绿阔叶林; 演替阶段; 叶片 N:P 化学计量学; 限制性营养元素

文章编号:1000-0933 (2007) 03-0947-06 **中图分类号:**Q948.1 **文献标识码:**A

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

GAO San-Ping¹, LI Jun-Xiang^{1,2,*}, XU Ming-Ce¹, CHEN Xi¹, DAI Jie¹

1 Department of Environmental Science, East China Normal University, 200062 Shanghai, China

2 Shanghai Key Laboratory of Urbanization and Restoration Ecology, 200062 Shanghai, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(3): 0947 ~ 0952.

Abstract: The leaf N and P stoichiometry of 24 individuals of 13 plant taxa in five various successional stages of the evergreen broad-leaved forest in Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province was studied. The results showed that (1) leaf N, P and N:P mass ratio exhibited large variations, ranging from 6.49 to 14.69 mg g⁻¹ for N, from 0.66 to 1.13 mg g⁻¹ for P, and from 7.45 to 16.38 for N:P ratio. The arithmetic means for all species were 9.43 for leaf N and 0.86 mg g⁻¹ for leaf P, and 11.17 for N:P, respectively; (2) Leaf N content and N:P ratio in earlier successional stages were higher than those in later successional stages, the temporal change in leaf N corresponded well with that of leaf N:P ratio, and the

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30400050); 国家自然科学基金重点资助项目(30130060); 华东师范大学“211”生态学重点学科资助项目

收稿日期:2006-10-13; **修订日期:**2007-01-30

作者简介:高三平(1984 ~), 女, 安徽安庆人, 硕士生, 主要从事景观生态、生物地球化学循环研究. E-mail: gaosanping@yahoo.com.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jxli@des.ecnu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30400050), the Key Project of National Natural Science Foundation of China (No. 30130060) and The State's tenth five-year "211 Project"-supported key academic discipline program of East China Normal University.

Received date: 2006-10-13; **Accepted date:** 2007-01-30

Biography: GAO San-Ping, Master candidate, mainly engaged in landscape ecology and biogeochemical cycling. E-mail: gaosanping@yahoo.com.cn

change in leaf N:P ratio could be explained in terms of the characteristics of the communities in different successional stages; (3) Leaf N:P stoichiometry can be used as an ecological indicator for nutrient limitation both at the plant individual and community levels. The N:P ratio in new leaves was lower than that in mature leaves for most plant species, indicative of N-limitation but not P-limitation. New leaves more frequently suffered from N-limitation than mature leaves, and thus were subject to leaf hypogenesis in the shortage of N nutrient supply.

Key Words: evergreen broad-leaved forest, successional stage, leaf N and P stoichiometry, limitative nutrient

生态化学计量学(Ecological Stoichiometry)是研究生态相互作用中的能量与多种化学元素(如 C、N、P)的平衡,以及热力学定律如何影响食物网动态和生态系统中养分循环的一门分支学科^[1,2]。化学计量学很早就被应用于生态学研究,但长期以来几乎被生态学家所忽视。近年来,由于认识到化学计量学研究可以把生态实体的各个层次在元素水平上统一起来,因此元素化学计量学成为近年来新兴的一个生态学研究分支^[3]。目前,化学计量学作为一种新的生态学研究工具已经被应用于从分子到种群、群落,以及生态系统各个层次^[1-3]。氮和磷元素对生物的生长、发育以及行为都起着很重要的作用,氮磷比在决定群落结构和功能上是个关键性的指标,氮磷比可以作为对生产力起限制性作用的营养元素的指示剂^[4,5]。目前国外有关 N:P 化学计量学的研究及应用较多,但研究主要集中在水生生态系统和湿地生态系统^[4-9],对陆地生态系统的氮磷化学计量学的研究相对较少^[10]。国内对氮磷化学计量学的研究相对较晚,最近 Han 等^[11]对中国陆地 753 个植物物种的叶片氮、磷计量化学进行了研究,但属于在大尺度水平上的研究。植物叶片的 N、P 化学计量学的指示作用,能否应用于陆地生态系统,尤其是针对不同演替阶段?是一个非常令人感兴趣的研究内容,至今尚未见报道。

鉴于此,本文选择浙江省天童国家森林公园内不同演替阶段的常绿阔叶林群落中的常见种(主要是优势种)为对象,目的在于探索常绿阔叶林不同演替阶段中物种叶片 N、P 的化学计量学特征,以及氮磷化学计量学在陆地生态系统中的生态指示作用。

1 实验样地概况及实验方法

1.1 实验样地选择及概况

实验在位于鄞州的浙江天童森林生态系统国家野外科学观测研究站内进行。该地森林植被保存良好,是浙江省东部丘陵地区地带性植被的代表类型。森林公园范围内发育着一个较完整的常绿阔叶林演替系列:次生灌丛、马尾松(*Pinus massoniana*) + 苦槠(*Castanopsis sclerophylla*)林、马尾松 + 木荷(*Schima superba*)林、木荷 + 马尾松林、木荷 + 栲树(*Castanopsis fargesii*)林、栲树 + 木荷林^[12]。为了保证演替系列各阶段植物群落生态因子的相似性,选择样地时使其他地形因子(海拔、坡向、高度)尽量保持一致,本实验选取了其中 5 个不同的演替阶段作为研究样地,按照演替序列依次是次生灌丛、马尾松 + 木荷林、木荷 + 马尾松林、栲树 + 米槠(*Castanopsis carlesii*)林、栲树 + 木荷林,具体样地主要物种组成见表 1。为了便于比较,选择同一生活型的常见种,马尾松不在研究对象之列。

1.2 实验方法

植物样品采集 不同演替阶段中的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,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,采用四分法取样;灌木则不需攀爬,按同样方法取样,然后装入牛皮纸信封并标记带回实验室处理。

营养元素限制性取样 判断植物是否受营养元素的限制,一般通过野外或室内对比试验来确定^[13]。在自然状况下,同株植物的成熟营养叶和正在萌芽生长的新叶,由于生长速度和发育对营养元素的需求不同,因此,叶片的 N、P 含量在短时间内可以作为判断营养元素供应的指示。本实验采用同一物种的成熟营养叶片和当年正在萌芽阶段的新生叶为受试样品,采样则是在植物萌芽期间,分别采集新叶和成熟的营养叶,取样方

法同上。

表 1 不同演替阶段的主要物种组成

Table 1 The major plant specie composition of various successional stages

演替阶段 Successional stage	描述 Description
次生灌丛 Secondary shrub	以槲木(<i>Loropetalum chinense</i>)为优势种,伴生窄基红褐桤(<i>Eurya rubiginosa</i> var. <i>attenuata</i>)、山矾(<i>Symplocos sumuntia</i>),并有木荷幼苗 The dominant species is <i>L. chinense</i> , which companioned <i>E. rubiginosa</i> var. <i>attenuata</i> , <i>S. sumuntia</i> , and <i>S. superba</i> seedling
马尾松 + 木荷林 <i>P. massoniana</i> + <i>S. superba</i> forest	马尾松为乔木层优势种,木荷为乔木亚层优势种;灌木层以马银花(<i>Rhododendron ovatum</i>)为优势种,并有较多山矾、窄基红褐桤 The dominant species in the first arbor layer is <i>P. massoniana</i> , but <i>S. superba</i> is the dominant in the second arbor layer; The dominant species in shrub layer is <i>R. ovatum</i> , which companioned <i>S. sumuntia</i> and <i>E. rubiginosa</i> var. <i>attenuata</i>
木荷 + 马尾松林 <i>S. superba</i> + <i>P. massoniana</i> forest	木荷为乔木层优势种,灌木层主要是山矾、马银花、桤木(<i>Eurya japonica</i>)和皱柄冬青(<i>Ilex kengii</i>) The dominant species in the arbor layer is <i>S. superba</i> , the species in the shrub layer are mainly composed of <i>S. sumuntia</i> , <i>R. ovatum</i> , <i>E. japonica</i> , and <i>I. kengii</i>
栲树 + 米槠林 <i>C. fargesii</i> + <i>C. carlesii</i> forest	栲树为乔木层优势种,米槠为乔木亚层优势种;灌木层以浙江新木姜子(<i>Neoliusea aurata</i> var. <i>chekiangensis</i>)为优势种,细齿桤(<i>Eurya nitida</i>)为亚优势种 The dominant species in the first arbor layer is <i>C. fargesii</i> , but <i>C. carlesii</i> is the dominant in the second arbor layer; The dominant species in shrub layer is <i>N. aurata</i> var. <i>chekiangensis</i> , while <i>E. nitida</i> is the subdominant
栲树 + 木荷林 <i>C. fargesii</i> + <i>S. superba</i> forest	栲树为乔木层优势种,木荷为亚优势种;灌木层优势种为连蕊茶(<i>Camellia fraterna</i>),生有褐叶青冈(<i>Cyclobalanopsis stewardiana</i>)、细齿桤(<i>E. nitida</i>) The dominant species in the first arbor layer is <i>C. fargesii</i> , while <i>S. superba</i> is the subdominant; The dominant species in shrub layer is <i>C. fraterna</i> , which companioned <i>C. stewardiana</i> and <i>E. nitida</i>

样品处理 采集回来的叶片样品放入烘箱,80℃恒温下干燥 48h,达恒重后称量干重,然后将其粉碎、过筛、装袋备用。

叶片 N、P 测定 硝解方法采用标准凯氏法^[14],营养元素测定使用流动注射分析仪(SKLAR,荷兰生产)。数据处理使用 Excel 和 SPSS 统计分析软件。

2 结果

2.1 不同演替阶段植物叶片 N、P 化学计量学总体特征

在各演替阶段采集到的 13 个种类 24 个个体中,叶片的 N、P 含量变异相当大(见表 2),叶片 N 含量的值在 6.49 ~ 14.69 mg g⁻¹之间,叶片 P 含量的值在 0.66 ~ 1.13 mg g⁻¹之间,而叶片的 N:P 的值在 7.45 ~ 16.38 之间,而总体平均值 N 为 9.43mg g⁻¹,P 为 0.86mg g⁻¹,N:P 为 11.17。

2.2 不同演替阶段叶片 N、P 及 N:P 格局

天童森林公园内的 5 个演替阶段植物叶片的 N、P,以及 N:P 的变化,灌木层和乔木层的植物叶片 N 含量的算术平均值,随着演替的进展,呈现先逐渐减小再增加的“倒抛物线”型趋势;植物叶片 P 含量的算术平均值,灌木层和乔木层均呈现不规则变化;叶片 N:P 的算术平均值,乔木层呈现不规则变化,而灌木层呈现与叶片 N 含量相似的趋势,各演替阶段叶片 N:P 的平均值呈现与灌木层叶片 N:P 相似的变化趋势(见图 1)。而且这种趋势灌木层比乔木层表现明显,叶片 N:P 的变化趋势与 N 含量的变化趋势协同性较好,与叶片 P 含量的变化趋势协同性较差。

不同演替阶段乔木层优势种和灌木层优势种成熟营养叶和新生叶片的 N:P 见图 2。从图 2 可以看出,不同演替阶段,乔木层植物成熟营养叶的 N:P 基本上 >12,新生叶的 N:P 均 <12;灌木层植物成熟营养叶的 N:P 基本上 <12,新生叶的 N:P 均 <10;不同优势种的 N:P 在不同演替阶段也各不相同,乔木层成熟营养叶的 N:P 随着演替进展逐渐降低,而新生叶则呈缓慢增高趋势;灌木层成熟营养叶的 N:P 随着演替进展则呈逐渐增加趋势,新生叶也基本呈现缓慢增高趋势。但无论处于哪个演替阶段,也不论是灌木层还是乔木层,成熟营养叶

片的 N:P 基本上均大于新生叶片。

表 2 不同演替阶段植物叶片 N、P 含量与 N:P 比

Table 2 Leaf N and P contents and N:P ratio in various successional stages

Table 2 Leaf N and P contents and N:P ratio in various successional stages								
演替阶段 Successional stage	群落层次 Community stratum	物种 Species	N		P		N:P	
			含量 Content (mg/g)	均值 Average	含量 Content (mg/g)	均值 Average	基于质量的 比值 Mass-based ratio	均值 Average
次生灌丛 Secondary shrub	灌木层 Shrub layer	山矾 <i>S. sumuntia</i>	12.21		0.99		12.16	
		檵木 <i>L. chinense</i>	9.65		1.04		9.03	
		窄基红褐桉 <i>E. rubiginosa</i> var. <i>attenuata</i>	7.29	9.52	0.89	0.92	8.24	10.42
		木荷 <i>S. superba</i>	8.93		0.76		12.25	
		窄基红褐桉 <i>E. rubiginosa</i> var. <i>attenuata</i>	9.27		1.02		9.22	
马尾松 + 木荷林 <i>P. massoniana</i> + <i>S. superba</i> forest	灌木层 Shrub layer	山矾 <i>S. sumuntia</i>	10.63	9.47	0.92	1.00	11.88	9.61
		米槠 <i>C. carlesii</i>	11.07		1.13		9.90	
		马银花 <i>R. ovatum</i>			0.92		7.45	
	乔木层 Arbor layer	木荷 <i>S. superba</i>	7.29	7.29	0.69	0.69	10.93	10.93
木荷 + 马尾松林 <i>S. superba</i> + <i>P. massoniana</i> forest	灌木层 Shrub layer	马银花 <i>R. ovatum</i>	8.36		0.88		9.66	
		山矾 <i>S. sumuntia</i>	8.60	8.06	0.86	0.87	10.06	9.32
		皱柄冬青 <i>I. kengii</i>	7.45		0.85		8.66	
		栓木 <i>E. japonica</i>	7.83		0.88		8.89	
	乔木层 Arbor layer	木荷 <i>S. superba</i>	6.49	6.49	0.67	0.67	10.07	10.07
米槠 + 栲树林 <i>C. carlesii</i> + <i>C. fargesii</i> forest	灌木层 Shrub layer	浙江新木姜子 <i>N. aurata</i> var. <i>chekiangensis</i>	10.38		0.94		11.79	
		连蕊茶 <i>C. fraterna</i>	7.80	10.63	0.87	0.87	9.36	12.46
		褐叶青冈 <i>C. stewardiana</i>	13.70		0.79		16.23	
	乔木层 Arbor layer	米槠 <i>C. carlesii</i>	8.94		0.73		12.25	
		栲树 <i>C. fargesii</i>	8.52	8.73	0.69	0.71	12.24	12.24
栲树 + 木荷林 <i>C. fargesii</i> + <i>S. superba</i> forest	灌木层 Shrub layer	褐叶青冈 <i>C. stewardiana</i>	14.69		1.03		16.38	
		连蕊茶 <i>C. fraterna</i>	13.65	12.74	0.94	0.94	15.34	14.53
		细齿桉 <i>E. nitida</i>	9.89		0.84		11.88	
	乔木层 Arbor layer	木荷 <i>S. superba</i>	7.72		0.66		11.55	
		栲树 <i>C. fargesii</i>	9.06	8.39	0.71	0.69	12.74	12.14
平均值 Average			9.43		0.86		11.17	

3 讨论与结论

天童不同演替阶段群落植物的叶片 N 含量、N:P 要明显低于全国的平均水平 14.1 mg/g、15.2^[11], 以及全球的水平 20.1 mg/g、13.8^[15] 或者 20.6 mg/g、12.7^[16]; 叶片 P 含量低于全球水平的 1.77^[15] 或者 1.99^[16], 与 Han 等的结果 0.88 接近^[11]。造成叶片 P 含量偏低与中国土壤 P 含量普遍低于全球水平有关^[11], N 含量偏低的原因尚待进一步分析, 但与该地区的另一研究结果接近^①。

此外, 植物叶片或生物量中的 N、P 含量, 尤其是 N:P 是判断植物营养元素限制^[4,5]、植物的生长速率^[17-20]、群落结构组成^[21,22] 等的重要指标。从天童 5 个不同演替阶段灌木层和乔木层叶片的 N、P 含量和 N:P 的特征来看, 仅叶片的 N 含量或 P 含量并不能作为很好的指标反映演替阶段, 但是叶片 N 含量和 N:P 两者共同的趋势却和演替阶段有很好的拟合趋势, 这种变化趋势对演替阶段的响应是一个非常有趣的现象, 值得进一步研究。

① 闫恩荣, 常绿阔叶林退化过程中土壤的养分库动态及植物的养分利用策略, 华东师范大学博士学位论文, 2006

叶片 N:P (或生物量的 N:P) 化学计量学的一个最引人注目的作用就是作为生态系统营养元素限制的一个指标^[4],并在水生和湿地生态系统中得到广泛应用^[10,23]。在水生生态系统和湿地生态系统,判断营养元素限制的 N:P 阈值为: $N:P < 14$ 则 N 是限制性营养元素, $N:P > 16$ 则 P 是限制性营养元素, $16 > N:P > 14$ 则 N 或 P,或者 N、P 同时起限制作用。这一判别阈值很少被应用于陆生生态系统。有关 N:P 作为陆生生态系统的营养元素的限制性阈值,实验和野外观测到的值变化很大,很难以某个个体、群落、或生态系统的类型的 N:P 观测值作为阈值来衡量或评判所有的情况。Güsewell 在综述了大量的研究结果后得出: $N:P < 10$ 时,增加 N 肥可以增加植被的生物量, $N:P > 20$,增加 P 肥可以增加植被的生物量,在两者之间时,施肥对生物量的效果与 N:P 关系不明显。按照这两种阈值标准,用前者作参照,本文实验物种基本上均是 N 元素供应不足,群落的生长受 N 限制,用后者做参考,受试物种也有 14 个个体处于 N 限制状态,而且基本上都是群落演替前期或中期的物种,而无论用哪种 N:P 阈值,天童常绿阔叶林不同演替阶段的群落生长均不受 P 限制(见表 2)。

对不同演替阶段的乔木层和灌木层优势种的成熟营养叶和新生叶的营养元素限制性,成熟营养叶的 N:P 均小于 14,而新生叶的 N:P 绝大多数小于 10,成熟营养叶的 N:P 几乎都大于新生叶的 N:P (图 2),表明新生叶较成熟营养叶更容易受 N 元素的限制,新叶容易因 N 元素的缺乏而发育不良。氮素是叶绿素的主要成分,氮素对作物叶绿素、光合速率、暗反应的主要酶以及光呼吸等都有明显的影响,直接或间接影响着光合作用。植物缺 N 时,酶、氨基酸及非酶蛋白的合成受到影响,从而影响到植物代谢的各个方面,叶绿素合成等生理过程亦受抑制^[24]。

总之,陆地生态系统植物叶片的 N、P 化学计量学是一个非常令人感兴趣,而又值得进一步深入研究的问

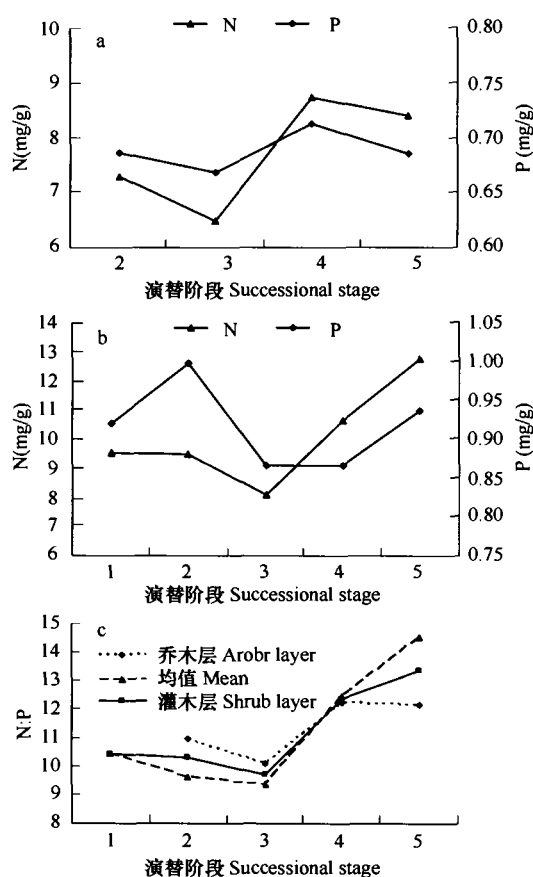


图 1 不同演替阶段叶片平均 N、P 含量和 N:P

Fig. 1 The mean leaf N and P contents and N:P in various successional stages

(a)不同演替阶段乔木层叶片的 N、P 含量, (b)不同演替阶段灌木层叶片的 N、P 含量, (c)不同演替阶段叶片的 N:P

(a) leaf N and P contents in the arbor layer, (b) leaf N and P contents in the shrub layer, and (c) the average leaf N:P in various successional stages

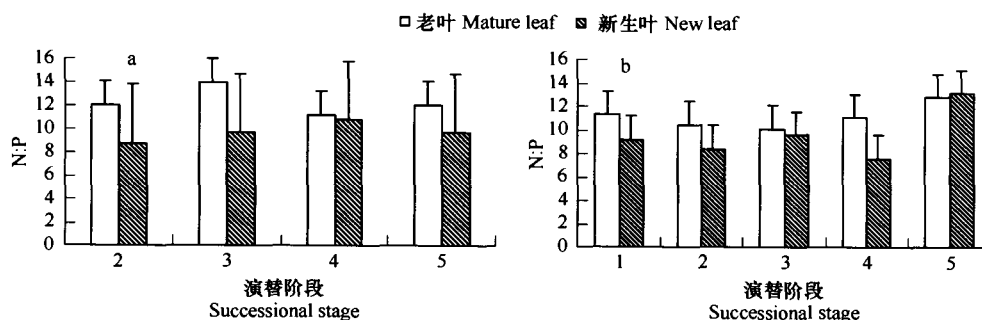


图 2 不同演替阶段乔木层(a)和灌木层(b)常见种新生叶与老叶的氮磷比

Fig. 2 The leaf N: P in mature and new leaf of common species in arbor (a) and shrub layer (b) respectively

题。有关常绿阔叶林不同演替阶段的植物叶片的 N、P 化学计量学特征及其生态指示作用,也尚需更多的数据来阐明。通过对天童常绿阔叶林不同演替阶段物种叶片的 N、P 化学计量学研究,得出以下结论:

(1)各演替阶段植物叶片的 N、P 含量变异较大,叶片 N 含量的值在 $6.49 \sim 14.69 \text{ mg g}^{-1}$ 之间,叶片 P 含量的值在 $0.66 \sim 1.13 \text{ mg g}^{-1}$ 之间,而叶片的 N:P 的值在 $7.45 \sim 16.38$ 之间,而总体平均值 N 为 9.43 mg g^{-1} , P 为 0.86 mg g^{-1} , N:P 为 11.17。

(2)在 5 个演替系列的 N、P,以及 N:P 的变化中,灌木层和乔木层的 N 含量和 N:P 随着演替的进行均呈现先高后低,再逐渐增高趋势,演替后期的叶片 N 含量和 N:P 要比演替前期高,叶片 N 含量的变化趋势与 N:P 的变化趋势协同性较好;而叶片 P 含量的变化则随演替的进行呈无规律波动,叶片 P 含量的变化趋势与 N:P 的变化趋势协同性较差。

(3)叶片 N:P 可以作为植物和演替阶段的限制性营养元素的指标,天童常绿阔叶林不同演替阶段的群落生长基本上均是 N 元素供应不足,群落的生长受 N 限制,不受 P 限制;演替各阶段绝大多数常绿阔叶林的物种新生叶的 N:P 都小于成熟营养叶的 N:P,两者均受 N 元素的限制,且氮素对新叶的限制性更强,新叶容易缺乏氮素而发育不良。

References:

- [1] Elser J J. Ecological stoichiometry: from sea to lake to land. *Trends in Ecology and Evolution*, 2000, 15(10): 393–394.
- [2] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, *et al.* Biological stoichiometry from genes to ecosystems. *Ecology Letters*, 2000, 3(6): 540–550.
- [3] Zhang L, Bai Y, Han X. Application of N: P Stoichiometry to Ecology Studies. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(9): 1009–1018.
- [4] Koerselman W, Meuleman AFM. The vegetation N: P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Journal of Ecology*, 1996, 33(6): 1441–1450.
- [5] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40: 523–534.
- [6] Atkinson M J, Smith S V. C:N:P ratios of benthic marine plants. *Limnology and Oceanography*, 1983, 28: 568–574.
- [7] Dowing J A, MacCauley E. The nitrogen: Phosphorus relationship in lakes. *Limnology and Oceanography*, 1992, 37(5): 936–945.
- [8] Dowing J A. Marine Nitrogen: Phosphorus stoichiometry and the global N:P cycle. *Biogeochemistry*, 1997, 37: 237–252.
- [9] Elser J J, Hassett T P. A stoichiometric analysis of the zooplankton phytoplankton interaction in marine and freshwater ecosystems. *Nature*, 1994, 370: 211–213.
- [10] Güsewell S, Koerselman W, Verhoeven JTA. Biomass N: P ratios as indicators of nutrient limitation for plant populations in wetland. *Ecological Applications*, 2002, 13(2): 372–384.
- [11] Han W, Fang J, Guo D, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 2005, 168: 377–385.
- [12] Song Y C, Wang X R. *Vegetation and flora of Tiantong National Forest Park Zhejiang Province*. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Document Publishing House, 1995.
- [13] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: how can it occur? *Biogeochemistry*, 1991, 13(2): 87–115.
- [14] Amin M, Flowers T H. Evaluation of Kjeldahl digestion method. *Journal of Research (Science)*, 2004, 15(2): 159–177.
- [15] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 2004, 101(30): 11001–11006.
- [16] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, *et al.* Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. *Nature*, 2000, 408(6812): 578–580.
- [17] Ingstedt T. Mineral nutrient requirements of *Pinus Sylvestris* and *Picea abies* seedlings. *Physiologia Plantarum*, 1979, 45: 373–380.
- [18] Nielsen S L, Enriquez S, Duarte C M, *et al.* Scaling maximum growth rates across photosynthetic organisms. *Functional Ecology*, 1996, 10: 167–175.
- [19] Niklas K J, Cobb E D. N, P, and C stoichiometry of *eranthis hyemalis* (renunculaceae) and the allometry of plant growth. *American Journal of Botany*, 2005, 92(8): 1256–1263.
- [20] Niklas K J. Plant allometry, leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry, and interspecific trends in annual growth rates. *Annals of botany*, 2006, 97: 155–163.
- [21] Theodose T A, Bowman W D. Nutrient availability, plant abundance, and species diversity in two alpine communities. *Ecology*, 1997, 78: 1861–1872.
- [22] Bobbink R, Hornung M, Roelofs J G M. The effects of air-borne nitrogen pollutants on species diversity in natural and semi-natural European vegetation—a review. *Journal of Ecology*, 1998, 86: 717–738.
- [23] Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. *New Phytologist*, 2004, 164(2): 1469–1487.
- [24] Cao C L, Li S X, Miao F. The Research Situation about Effects of Nitrogen on Certain Physiological and Biochemical Process in Plants. *The Journal of Northwest Agricultural University*, 1999, 27(4): 96–101.

参考文献:

- [12] 宋永昌,王祥荣主编. 浙江天童国家森林公园的植被和区系. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1995.
- [24] 曹翠玲, 李生秀, 苗芳. 氮素对植物某些生理生化过程影响的研究进展. *西北农业大学学报*, 1999, 27(4): 96–101.