

兴安落叶松 (*Larix gmelinii* Rupr.) 叶片 养分的空间分布格局

任书杰, 于贵瑞*, 陶 波, 官丽莉, 方华军, 姜春明

(中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, CERN 综合研究中心, 北京 100101)

摘要:对中国东北温带森林生态系统主要树种兴安落叶松 (*Larix gmelinii* Rupr.) 24 个采样点 72 个叶片样品有机碳 (C)、全氮 (N)、全磷 (P) 和全钾 (K) 的化学组成、地理分布格局及其与气候因子的关系进行了研究。结果表明, 叶片 C、N、P 和 K 含量的几何平均数分别为 543.970、16.902、2.373 mg/g 和 14.625 mg/g, 且叶片的 C 含量 > N 含量 > K 含量 > P 含量; 叶片的 C/N、C/P 和 N/P 分别为 32.183、229.226 和 7.123。随纬度的增加、年均温度和年均降雨量的降低, 兴安落叶松叶片 C、N 含量和 N/P 显著降低, 叶片 C/N 和 K 含量显著升高, 叶片 P 含量和 C/P 的变化没有达到显著水平。叶片 N 含量随纬度与年均温度的变化与全球及其它大尺度的研究结果相反, 而 N/P 与其一致, 这与在该区域的其它物种的研究结果基本一致。这可能是由于在本研究区域北部寒温带越往高纬度地区年均温度和年均降雨量越低、生长季越短, 因此成土作用弱导致植物可以吸收利用的养分越少, 但是由于植物显著降低的 N 含量和变化不明显的 P 含量导致了叶片 N/P 随纬度的增加和年均温度和年均降雨量的降低而降低, 这与全球尺度的研究结果一致。兴安落叶松叶片养分分布格局与全球尺度和中国区域研究结果的差异说明了加强区域叶片养分特征研究的重要性。叶片养分与气候因子的显著线性相关说明气候因子是影响叶片养分特征的一个主要因子。

关键词:生态化学计量学; 兴安落叶松; 年均温度; 年均降雨量; 纬度; 分布格局; 叶片养分

文章编号: 1000-0933 (2009) 04-1899-08 中图分类号: Q948 文献标识码: A

Spatial patterns for variations in leaf nutrient contents of Dahurian Larch (*Larix gmelinii* Rupr.)

REN Shu-Jie, YU Gui-Rui*, TAO Bo, GUAN Li-Li, FANG Hua-Jun, JIANG Chun-Ming

Synthesis Research Center of Chinese Ecosystem Research Network, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 1899 ~ 1906.

Abstract: Spatial patterns for leaf nutrient contents of Dahurian larch (*Larix gmelinii* Rupr.) based on the analysis of 72 samples in 24 sites in temperate forest ecosystems in Northeast China were studied. The studied region belongs to the cold temperate zone. The results show that the geometric means of leaf organic carbon (C), nitrogen (N), potassium (K) and phosphorus (P) contents were 543.970 mg/g, 16.902 mg/g, 14.625 mg/g and 2.373 mg/g, respectively. The geometric means of C/N, C/P and N/P were 32.183, 229.226 and 7.123, respectively. With the increase of latitude and decrease in mean annual temperature (MAT) and annual precipitation (AP), leaf C and N contents and N/P ratios of Dahurian larch decreased significantly, and leaf C/N ratios and K content increased significantly, but leaf P contents had no significant change. The changes in the leaf N content with latitude, MAT and AP are different from those reported in literature, but the changes in the leaf N/P ratio are similar to those in literature, which are similar to the changes of other species in our studied region. With the increase in latitude, MAT and AP decreased, and the growing season shortened,

基金项目:国家自然科学基金重大资助项目(30590381); 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX2-YW-432); 国家自然科学基金重大国际(地区)合作与交流资助项目(30721140307); 国家自然科学基金资助项目(40601097)

收稿日期: 2007-12-20; 修订日期: 2008-04-23

致谢: 感谢中国科学院地理科学与资源研究所生态网络中心李胜功研究员对本文写作给予的帮助。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuguirui@cern.ac.cn

pedogenesis was weakened and available soil nutrients for plant decreased, but N/P ratios decreased significantly because of the significant decrease in N content. This finding is similar to the results obtained in other global observations. The differences in the spatial patterns of foliar nutrient contents between Dahurian larch and global and other Chinese flora indicate the importance of an advanced understanding of leaf traits in terms of nutrient contents in a regional scale. The significant relationships between leaf nutrient contents and climatic factors suggest that climatic factors are the major forces affecting variation in the leaf nutrient traits of Dahurian larch.

Key Words: ecological stoichiometry; *Larix gmelinii* Rupr. ; mean annual temperature; annual precipitation; latitude; spatial pattern; leaf nutrient

全球变化是目前人们最为关注的环境问题之一,其中包括氮沉降增加、大气二氧化碳浓度升高、臭氧层破坏等,这些变化将会导致全球温度和降水格局的变化^[1-5]。在未来气候变化条件下,植被的组成、结构和分布格局将会发生怎么样的变化是目前全球变化研究的一个重点领域。氮(N)和磷(P)作为植物生长的两个主要限制因子,从20世纪30年代Redfield把N和P计量学思想引入到海洋生态系统研究后^[6,7],N和P计量学在海洋生态系统已经得到了相当广泛的应用^[8,9],目前已经成为人们理解海洋生物地球化学循环的核心思想^[6,7,10,11]。基于N和P计量学在海洋生态系统的广范应用,目前N和P计量学的思想已经应用到陆地生态系统,并很快得到越来越多的研究者广泛关注^[12-16]。许多研究表明在全球尺度上或较大的区域尺度上,植物叶片N和P含量及N/P随气候因子的变化存在显著的规律性变化^[13,17,18]。最近有研究表明,叶片N和P含量和N/P在区域尺度上的这种变化规律主要由物种或生活型决定,相对而言气候因子的影响很小甚至未达到显著水平^[14,19]。这些研究都是针对大量的物种对气候因子的一种综合反应。某一特定物种叶片计量学特征随气候因子的分布格局更能反应气候因子对叶片计量学特征的影响。但是通常对于某一物种而言往往只分布在一定的区域或生境内,其分布的区域范围很小。因此研究气候因子对某一特定物种的影响存在一定的难度。

落叶松是一个寒温带及温带的树种,天然分布非常广,在针叶树种中是最耐寒的,垂直分布达到森林分布的最上限。兴安落叶松(*Larix gmelinii* Rupr.)为松科落叶松属的落叶乔木,在我国东北地区具有广泛的分布。因此本研究利用兴安落叶松研究单一物种叶片的计量学特征、分布格局及其与气候因子的关系,为综合研究陆地生态系统重要的生命元素的生物地球化学循环与全球变化的关系,提供数据基础和理论依据。

1 材料和方法

1.1 样品的采集

植物样品来自于2006年植物旺盛生长季的野外调查。在本次调查中,依据兴安落叶松在中国东北越往高纬度分布越广特点,共采集了25个点的样品,去除了一个离县城较近的点,共有24个具有代表性样点的叶片样品,24个采样点的分布如图1所示。采样点一般位于山体中部长势均匀的地段,在每一个采样点设置10m×10m的小样方4个,样品的采集原则参照《陆地生物群落调查观测与分析》^[20]。在一个10m×10m的小样方内,选择长势均匀的兴安落叶松植株,采样时同时考虑不同层次和不同方位,在3个小样方内采集3次重复,每个重复采集叶鲜重约为300g。

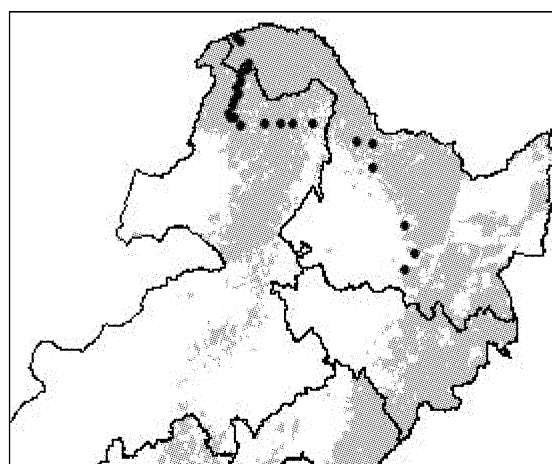


图1 采样点的分布图

Fig. 1 The distribution of sampling locations

1.2 植物养分的测定

样品经烘干、粉碎,测定叶片的有机碳(C)、全氮(N)、全磷(P)和全钾(K)含量。叶片 C 采用 $K_2Cr_2O_7$ 容量法;在其它指标的测定中,样品首先采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮,N 采用靛酚蓝比色法测定,P 采用钼锑抗比色法测定,K 采用原子吸收法测定^[21]。

1.3 气象资料的获取

采样点的年均温度和年均降雨量,通过全国 730 个站点 1954 ~ 2002 年 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 样条函数插值的气象数据库^[22] 获得。

1.4 数据分析

在本研究中,数据的处理采用 Microsoft office excel 和 SPSS (SPSS for Windows version 13.0, SPSS Inc., Chicago, USA) 两种软件对所获得的数据进行分析处理。正态分布性检验采用 K-S 检验,即 One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test。

2 结果与分析

2.1 兴安落叶松叶片养分组成的统计学特征

兴安落叶松叶片计量学特征的研究结果如表 1 所示,从表中可以看出叶片 K 含量和 C/P 仅符合对数正态分布(K-S 检验 $p < 0.05$ 和对数 K-S 检验 $p > 0.05$),可用几何平均数表示其大小;其它指标即符合正态分布又符合对数正态分布(K-S 检验 $p > 0.05$ 和对数 K-S 检验 $p > 0.05$),算术平均和几何平均数均可以表示其大小。叶片 C 含量的变化范围从 403.657mg/g 到 653.733mg/g,算术平均数为 545.169mg/g;叶片 N 含量的变化范围从 10.947mg/g 到 31.638mg/g,算术平均数为 17.468mg/g;叶片 P 含量的变化范围从 0.895mg/g 到 3.553mg/g,算术平均数为 2.447mg/g;叶片 K 含量的变化范围从 9.488mg/g 到 27.356mg/g,几何平均数为 14.625mg/g;叶片 C/N 的变化范围从 19.783 到 50.734,算术平均数为 33.127;叶片 C/P 的变化范围从 129.158 到 601.030,几何平均数为 229.226;N/P 的变化范围从 3.866 到 14.246,算术平均数为 7.504。

表 1 兴安落叶松叶片养分的统计特征

Table 1 The descriptive statistics of leaf nutrients of *Larix gmelinii* Rupr.

项目 Item	C 含量 Leaf C (mg/g)	N 含量 Leaf N (mg/g)	P 含量 Leaf P (mg/g)	K 含量 Leaf K (mg/g)	C/N	C/P	N/P
算术平均数 Arithmetic mean	545.169	17.468	2.447	15.176	33.127	239.339	7.504
SD	36.202	4.629	0.544	4.447	8.043	85.336	2.478
CV (%)	6.641	26.498	22.230	29.303	24.279	35.655	33.027
几何平均数 Geometric mean	543.970	16.902	2.373	14.625	32.183	229.226	7.123
最大值 Maximum	653.733	31.638	3.553	27.356	50.734	601.030	14.246
最小值 Minimum	403.657	10.974	0.895	9.488	19.783	129.158	3.866
中位数 Median	541.668	16.887	2.439	13.266	31.471	224.560	6.934
K-S 检验 p 值 p of K-S test	0.256	0.484	0.735	0.013	0.448	0.003	0.410
对数 K-S 检验 p 值 p of K-S test (lg-transformed)	0.373	0.886	0.130	0.052	0.538	0.187	0.991
样本数 Number of samples	72	72	72	72	72	72	72

* SD:标准差 Standard Deviation; CV:变异系数 Coefficient of Variation

2.2 兴安落叶松叶片养分的地理分布格局

兴安落叶松叶片的养分含量及其比例随纬度的分布格局如图 2 所示。从图中可以看出,兴安落叶松叶片的 C、N 含量和 N/P 均随着纬度的升高而极显著的降低($p < 0.001$, $n = 72$);叶片 K 含量和 C/N 则随纬度的升高而极显著的升高;而叶片 P 含量随纬度的升高而降低,但没有达到显著水平($p = 0.168$, $n = 72$);叶片的 C/P 随纬度的升高也没有达到显著水平($p = 0.341$, $n = 72$)。

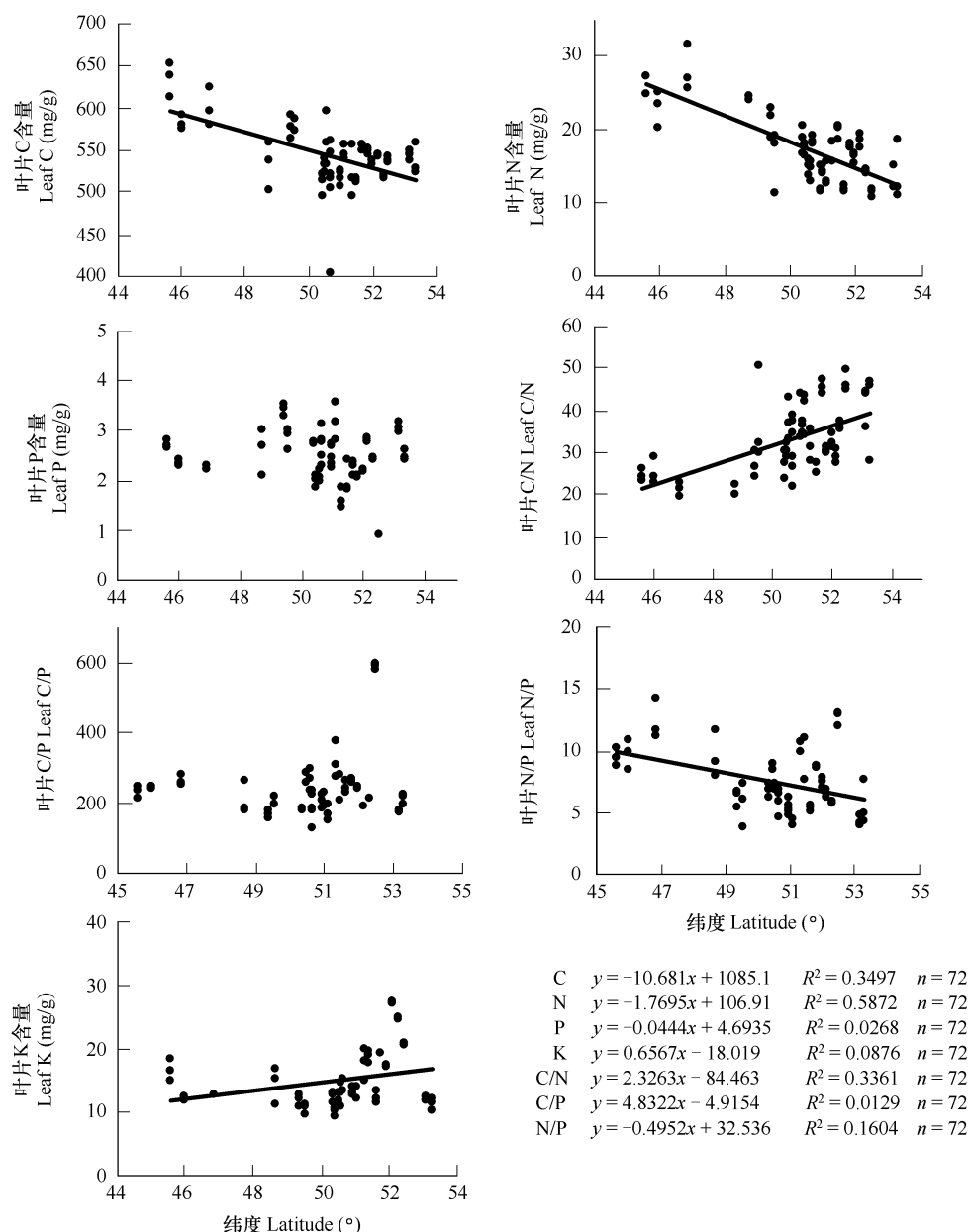


图2 兴安落叶松叶片养分的地理分布格局

Fig. 2 Geographic spatial patterns of leaf nutrients of *Larix gmelinii* Rupr.

2.3 兴安落叶松叶片养分与气候因子的关系

为了明确兴安落叶松叶片养分与气候因子(年均温度和年均降雨量)的关系,给出了其与气候因子间的直线回归方程及相关系数,如表2所示。从表2中可以看出,总体而言,叶片计量学指标随年均温度和年均降雨量的分布格局与它们随纬度的变化相反,即随着年均温度和年均降雨量的升高,落叶松叶片的C、N含量和N/P极显著的升高,K含量和C/N极显著的降低,而P含量虽然也随年均温度和年均降雨量升高但没有达到极显著水平(p 分别为0.261和0.128),C/P没有达到显著水平(p 分别为0.863和0.280)。

3 讨论

3.1 兴安落叶松叶片养分含量特征

植物叶片养分含量受多种因素的影响,如物种、生长发育阶段、气候以及土壤的营养状况等^[13,14,17,23~25]。但是不同物种叶片的不同养分含量高低存在普遍性的规律,本研究中兴安落叶松叶片C含量>N含量>K含

量 > P 含量这与以往的研究结果一致^[23,26,27]。与其它松科植物叶片的计量学特征相比(表 3),兴安落叶松叶片 N、P 和 K 含量远高于其它松科植物,其中 P 和 K 含量约是其它种的 2 倍甚至还多,N/P 小于其它松科植物。

表 2 兴安落叶松叶片养分与气候因子的关系
Table 2 Relationships between leaf nutrients of *Larix gmelinii* Rupr. and climatic factors

项目 Item	年均温度 MAT			年均降雨量 AP		
	方程 Equation	R ²	p	方程 Equation	R ²	p
C 含量 Leaf C	$y = 7.2475x + 571.42$	0.3427 **	0.000	$y = 0.4626x + 310$	0.391 **	0.000
N 含量 Leaf N	$y = 1.061x + 21.31$	0.4494 **	0.000	$y = 0.0736x - 19.93$	0.6048 **	0.000
P 含量 Leaf P	$y = 0.0249x + 2.5373$	0.018	0.261	$y = 0.0018x + 1.5487$	0.0253	0.182
K 含量 Leaf K	$y = -0.5489x + 13.188$	0.1303 **	0.002	$y = -0.0253x + 28.061$	0.0778 **	0.018
C/N	$y = -1.2895x + 28.457$	0.2198 **	0.000	$y = -0.0973x + 2.584$	0.3503 **	0.000
C/P	$y = -0.6031x + 237.15$	0.0004	0.863	$y = -0.2252x + 53.81$	0.0167	0.280
N/P	$y = 0.3241x + 8.6775$	0.1462 **	0.001	$y = 0.0202x - 2.7454$	0.1585 **	0.001

MAT: mean annual temperature; AP: annual precipitation; 下同 the same below

表 3 兴安落叶松叶片的养分含量与其它松科植物的比较
Table 3 Compare leaf nutrients of *Larix gmelinii* Rupr. with other plants of Pinaceae

植物名称 Species	N 含量 Leaf N (mg/g)	P 含量 Leaf P (mg/g)	叶片 N/P Leaf N/P	K 含量 Leaf K (mg/g)	资料来源 Data source
兴安落叶松 <i>Larix gmelinii</i> Rupr.	17.468 ± 4.629 (n = 72)	2.447 ± 0.544 (n = 72)	7.504 ± 2.478 (n = 72)	15.176 ± 4.447 (n = 72)	本研究 This study
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	13.174 ± 2.856 (n = 16)	1.111 ± 0.660 (n = 29)	11.858 (n = 1)	6.331 ± 1.856 (n = 26)	[25]
华山松 <i>Pinus armandii</i>	13.398 ± 5.715 (n = 4)	0.860 ± 0.448 (n = 4)	15.579 (n = 1)	5.113 ± 1.305 (n = 4)	[25]
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	11.442 ± 1.739 (n = 10)	1.142 ± 0.337 (n = 9)	10.019 (n = 1)	5.474 ± 1.120 (n = 10)	[25]
红松 <i>Pinus koraiensis</i>	11.734 ± 3.036 (n = 5)	1.228 ± 0.258 (n = 5)	9.555 (n = 1)	3.698 ± 1.565 (n = 5)	[25]
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	10.473 ± 1.114 (n = 2)	0.966 ± 0.02 (n = 2)	10.842 (n = 1)	3.878 ± 1.470 (n = 2)	[25]

通常而言由于气候的影响,温带土壤一般表现在 N 缺乏,而热带土壤则表现为 P 缺乏^[28,29],同时叶片的 N 和 P 含量反应了土壤 N 和 P 的可给性^[30,31],因此随纬度的升高叶片的 N 和 P 含量升高而 N/P 降低^[13,17,18,31],即叶片 N 含量的升高幅度小于叶片 P 含量。本研究中的兴安落叶松分布区域相对于其它松科植物纬度更高,因此叶片 N/P 低于其它松科植物,叶片 N 和 P 含量高于其它物种,同时 P 含量的增幅比 N 含量更高。以往大量的研究表明落叶植物的养分含量要远高于常绿植物^[18,27,31],因此产生兴安落叶松叶片养分高于其它松科植物的另一原因可能与兴安落叶松是落叶树种,而其它松科植物为常绿树种有关。

3.2 兴安落叶松叶片养分的空间分布格局

最近的研究表明,叶片 N 和 P 的计量学特征存在大尺度上的分布格局^[13, 17, 18, 31]。在全球尺度的研究结果表明,叶片 N 和 P 含量随纬度的升高和年均温度的降低而升高,而叶片的 N/P 则降低^[13]。在中国区域和中国东部南北样带(NSTEC)的研究结果表明^[18, 31],叶片 N 和 P 含量与全球尺度的研究结果相似,两者均随着纬度的升高、年均温度和年均降雨量的降低而升高,而叶片 N/P 有降低的趋势,但是没有达到显著水平。

对兴安落叶松的研究结果表明(图 2,表 2 和表 4),随纬度升高、年均温度和年均降雨量的降低,叶片 N 含量表现为极显著的降低,这与全球尺度的研究结果相反;叶片 P 含量的变化没有达到显著水平,这与全球尺

度的研究结果不同;而叶片的 N/P 降低与全球尺度的结果相一致。为了探讨兴安落叶松叶片养分的这种与全球尺度不同的分布格局的原因,作者进一步分析了与兴安落叶松位于同一区域范围的不包括兴安落叶松的其它物种的 N 和 P 含量以及 N/P 的分布格局(本研究组未发表数据),结果如表 4 所示。从表中可以看出,兴安落叶松的 N 和 P 含量与同兴安落叶松处于同一区域的其它物种随纬度和年均温度的分布趋势相似,随着纬度的升高和年均温度的降低,叶片 N 和 P 含量降低,但是兴安落叶松 P 含量随纬度和年均温度的变化没有达到显著水平。本研究中兴安落叶松叶片 N 和 P 含量与全球和其它较大尺度上的研究结果存在不同的结论,这主要可能是由于在本文中所研究的物种兴安落叶松分布于中温带和寒温带,年均温度低以及生长季短致使成土作用较弱,使植物可以吸收利用的营养较少所致。随着纬度的升高和年均温度的降低,兴安落叶松叶片的 N/P 降低,而该区域其它物种则没有明显的规律性变化,其原因可能是由于在本研究区域相对于全球尺度较小(表 5),其它物种的物种间的变异大于年均温度产生的影响,从而掩盖了其 N/P 随年均温度的变异,而兴安落叶松作为单一物种由于不存在物种间的变异,因此其随年均温度和纬度的变化达到显著水平。与热带雨林和草地生态系统的研究结果不同^[14, 19],气候因子是影响兴安落叶松叶片养分分布格局的一个重要因子。与其它大尺度的研究区域相比(表 5),本研究中的纬度范围仅为 45.60 ~ 53.30°N,相对于其它研究区域要小得多,这可能会掩盖叶片计量学特征在大尺度上的分布格局,因此研究区域范围较小可能也是影响研究结果的一个主要原因。

表 4 兴安落叶松和其它物种养分特征与纬度和年均温度的 spearman 相关系数
Table 4 The spearman correlation coefficient between leaf nutrients and latitude, MAT

项目 Item	兴安落叶松 <i>Larix gmelinii</i> Rupr.			其它物种 Other species in the region		
	N	P	N/P	N	P	N/P
纬度 Latitude	-0.766 **	-0.164	-0.401 **	-0.449 **	-0.307 **	-0.035
年均温度 MAT	0.670 **	0.134	0.382 **	0.444 **	0.358 **	-0.016
样品数 Number of samples	72	72	72	303	303	303

表 5 不同研究区域的纬度范围
Table 5 The latitude ranges of different study regions

研究区域 Study region	纬度范围 Latitude range	参考文献 Reference
中国东北地区北部 North of Northeast China	45.60 ~ 53.30°N	本研究 This study
中国东部南北样带 North-South transect of Eastern China	18.3 ~ 52.32°N	[31]
中国 China	18 ~ 49°N	[18]
全球尺度 Global scale	43°S ~ 70°N	[13]

兴安落叶松叶片 N 和 P 含量的地理分布格局以及与气候因子的关系与处于同一区域的其它物种的分布趋势基本一致,但与大尺度乃至全球尺度的研究结果不同,因此叶片养分在区域范围内的研究结果可能与大尺度乃至全球尺度的研究结果存在较大差异甚至相反的结论。在大尺度甚至全球尺度上的研究结果不一定适合于区域范围,同理在小的研究尺度的研究结果也不一定适合于大尺度或全球,同时在不同区域间可能会存在较大的差异。这说明加强区域尺度的生物地球化学循环研究的重要性。

References:

- [1] Jiang G M, Han X G, Lin G H. Response of plant growth to elevated [CO₂]: a review on the chief methods and basic conclusions based on experiments in the external countries in past decade. *Acta Phytocologica Sinica*, 1997, 21(6): 489 – 502.
- [2] Peng S L, Zhao P, Ren H, *et al.* The possible heat-driven pattern variation of zonal vegetation and agricultural ecosystems along the north-south transect of China under the global change. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(1): 217 – 226.

- [3] Reich P B, Knops J, Tilman D, *et al.* Plant diversity enhances ecosystem responses to elevated CO₂ and nitrogen deposition. *Nature*, 2001, 410: 809—810.
- [4] Wang S P, Zhou G S, Gao S H, *et al.* Gradient distribution of soil nitrogen and its response to climate change along the Northeast China Transect. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(2): 279—283.
- [5] Hungate B A, Johnson D W, Dijkstra P, *et al.* Nitrogen cycling during seven years of atmospheric CO₂ enrichment in a scrub oak woodland. *Ecology*, 2006, 87(1): 26—40.
- [6] Redfield A C. On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton. James Johnstone Memorial Volume. Liverpool: Liverpool University Press, 1934. 176—192.
- [7] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, 1958, 46: 205—221.
- [8] Lindeman R L. The trophic-dynamic aspect of ecology. *Ecology*, 1942, 23: 399—418
- [9] Reiners W A. Complementary models for ecosystems. *American Naturalist*, 1986, 127: 59—73
- [10] Fleming R H. The composition of plankton and units for reporting populations and production. *Proceedings of the Sixth Pacific Scientific Congress*, 1940, 3: 535—540
- [11] Sterner R W, Elser J J. *Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere*. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- [12] McGraddy M E, Daufresne T, Hedin L O. Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial Redfield-type ratios. *Ecology*, 2004, 85(9): 2390—2401.
- [13] 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.
- [14] Townsend A R, Cleveland C C, Asner G P, *et al.* Controls over foliar N:P ratios in tropical rain forests. *Ecology*, 2007, 88(1): 107—118.
- [15] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass? *Biogeochemistry*, 2007, 85: 235—252.
- [16] Gao S P, Li J X, Xu M C, *et al.* 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. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 947—952.
- [17] Hedin L O. Global organization of terrestrial plant-nutrient interactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)*, 2004, 101(30): 10849—10850.
- [18] Han W X, Fang J Y, Guo D L, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 2005, 168: 377—385.
- [19] He J S, Fang J Y, Wang Z H, *et al.* Stoichiometry and large-scale patterns of leaf carbon and nitrogen in the grassland biomes of China. *Oecologia*, 2006, 149: 115—122.
- [20] Dong M. *Survey, observation and analysis of terrestrial biological communities*. Beijing: Standards Press of China, 1997.
- [21] Lu R K. *The analytical methods for soil agricultural Chemistry*. Beijing: Chinese Agricultural Science Technology Press, 2000.
- [22] Tao B, Cao M K, Li K R, *et al.* Spatial patterns of terrestrial net ecosystem productivity in China during 1981—2000. *Science in China, Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(5): 745—753.
- [23] Hou X Y, Lin H X, Zhang H L. *Analyses of the chemical elements in 150 species of plants in China*. Beijing: Higher Education Press, 1959.
- [24] Hou X Y. *Chinese vegetable geography and chemical elements: analyses of the dominant plant species*. Beijing: Science Press, 1982.
- [25] Hobbie S E, Gough L. Foliar and soil nutrients in tundra on glacial landscapes of contrasting ages in northern Alaska. *Oecologia*, 2002, 131: 453—462.
- [26] Yan C R, Chen L Z, Huang J H, *et al.* A study on nutrient cycling of pine stands in eastern part of China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, 23(4): 351—360.
- [27] Zheng S X, Shangguan Z P. Spatial patterns of leaf nutrient traits of the plants in the Loess Plateau of China. *Progress in Natural Science*, 2006, 16(8): 965—973.
- [28] Hedin L O, Vitousek P M, Matson P A. Nutrient losses over four millions years of tropical forest development. *Ecology*, 2003, 84(9): 2231—2255.
- [29] Jenny H. Causes of the high nitrogen and organic matter content of certain tropical forest soils. *Soil Science*, 1950, 69: 63—69.
- [30] Aerts R, Chapin F S III. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processed and patterns. *Advances in Ecological*

Research, 2000, 30: 1–67.

- [31] Ren S J, Yu G R, Tao B, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 654 terrestrial plant species in NSTEC. *Environmental Science*, 2007, 28(12): 2665–2673.

参考文献:

- [1] 蒋高明, 韩兴国, 林光辉. 大气 CO₂ 浓度升高对植物的直接影响——国外十余年来模拟实验研究之主要手段及基本结论. *植物生态学报*, 1997, 21(6): 489–502.
- [2] 彭少麟, 赵平, 任海, 等. 全球变化压力下中国东部样带植被与农业生态系统格局的可能性变化. *地学前缘*, 2002, 9(1): 217–226.
- [4] 王淑平, 周广胜, 高素华, 等. 中国东北样带土壤氮的分布特征及其对气候变化的响应. *应用生态学报*, 2005, 16(2): 279–283.
- [16] 高三平, 李俊祥, 徐明策, 等. 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. *生态学报*, 2007, 27(3): 947–952.
- [20] 董明编. 陆地生物群落调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [21] 鲁如坤编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [22] 陶波, 曹明奎, 李克让, 等. 1981–2000 年中国陆地净生态系统生产力空间格局及其变化. *中国科学, D 辑*, 2006, 36(12): 1–9.
- [23] 侯学煜, 林厚萱, 章慧龄合著. 中国 150 种植物的化学成分及其分析方法. 北京: 高等教育出版社, 1959.
- [24] 侯学煜. 中国植被地理及优势植物化学成分. 北京: 科学出版社, 1982.
- [25] 严昌荣, 陈灵芝, 黄建辉, 等. 中国东部主要松林营养元素循环的比较研究. *植物生态学报*, 1999, 23(4): 351–360.
- [26] 郑淑霞, 上官周平. 黄土高原地区植物叶片养分组成的空间分布格局. *自然科学进展*, 2006, 16(8): 965–973.
- [31] 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. *环境科学*, 2007, 28(12): 2665–2673.