

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

任书杰^{1,2}, 于贵瑞^{1*}, 陶波¹, 王绍强¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所生态网络观测与模拟重点实验室, CERN 综合研究中心, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:大尺度的叶片的氮(N)和磷(P)的化学计量学特征是植物对环境条件的长期适应的结果, 并能为大尺度模型的发展提供数据基础. 通过对文献数据的搜集整理, 对中国东部南北样带 168 个采样点的 654 种植物的 N 和 P 的化学计量学特征、空间格局及其与气候因子(年均温度)的关系进行了研究. 结果表明, 中国东部南北样带 654 种植物叶片的 N 和 P 的化学计量学特征存在很大的变异性. 叶片 N 的变化范围为 2.17~52.61 mg·g⁻¹, 几何平均数为 17.55 mg·g⁻¹, 叶片 P 的变化范围为 0.10~10.27 mg·g⁻¹, 几何平均数为 1.28 mg·g⁻¹, 叶片 N/P 的变化范围为 1.7~74.6, 几何平均数为 13.5. 中国东部南北样带乃至中国区域叶片 P 的含量显著低于全球尺度的其它研究结果, 这说明与全球尺度相比, 中国区域植被生长更易受到 P 的限制. 在所研究的不同功能群间, 以叶片 N 含量的差异最大, P 次之, N/P 的差异最小, 这与在多数的功能群内, 其叶片 N 和 P 含量间存在显著相关性有关. 另外在系统发育上亲缘越远的功能群 N 和 P 含量差异越大(蕨类植物与种子植物), 亲缘越近的差异越小(双子叶植物与单子叶植物). 叶片的 N 和 P 含量与纬度和年均温度间存在极显著的相关关系, 随着纬度升高和年均温度的降低, 叶片 N 和 P 含量极显著地增加($p < 0.001$). 可是 N/P 与纬度和年均温度的相关性较弱($p = 0.386$ 和 $p = 0.342$), 这可能是由于 N 和 P 含量随纬度和年均温度的变化趋势相同且变异性较大, 并且相对于全球尺度而言本研究的区域范围相对较小等多种因素共同导致的.

关键词:中国东部南北样带; 叶片; 养分; 生态化学计量学; 功能群

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)12-2665-09

Leaf Nitrogen and Phosphorus Stoichiometry Across 654 Terrestrial Plant Species in NSTEC

REN Shu-jie^{1,2}, YU Gui-rui¹, TAO Bo¹, WANG Shao-qiang¹

(1. 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; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Stoichiometry of leaf N and P is a characteristic of plant to adapt to environment, and can provide data for process-based modeling at large scale. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry of NSTEC terrestrial plants were studied based on a NSTEC data set including leaf nitrogen and phosphorus observations for 654 plant species at 168 sites. The results showed that leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry in NSTEC exhibited large variations, primarily ranging 2.17~52.61 mg·g⁻¹ for N, 0.10~10.27 mg·g⁻¹ for P, 1.7~74.6 for N/P ratio. Geometric means for all plant species were 17.55 mg·g⁻¹, 1.28 mg·g⁻¹ and 13.5, respectively. Leaf P of NSTEC (ever across China) was lower than global level, therefore plant growth was more limited by P in China region comparing to global environment. For all functional groups, the difference of leaf N was largest, but that of N/P ratio was smallest, since leaf N and P closely related in most of functioning groups; for leaf N and P of the different phylogenetic functional groups, the difference was largest for farthest relative (seed vs fern), least for closest relative (monocotyledon vs dicotyledon). There were obvious correlation between leaf N (or P) and latitude (or mean annual temperature, MAT). Leaf N and P significantly increased with latitude increasing (or MAT decreasing), but the relationship between N/P ratio and latitude (or MAT) wasn't significant ($p = 0.386$ and $p = 0.342$), and the reason maybe include, leaf N and P had the same tendencies and large variations, and region in this research was smaller than global research.

Key words: NSTEC; leaf; nutrient; ecological stoichiometry; functional group

全球变化(CO₂ 浓度升高、氮沉降、温度升高、沙漠化等)将会明显地影响生态系统的结构、过程和功能以及陆地植被的分布格局和演替进程^[1~11]. 因此, 生态系统对全球变化的响应与适应性研究是当今全球变化与生态学研究的科学前沿. 样带研究是

收稿日期: 2007-01-15; 修订日期: 2007-03-14

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(30590381); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-432)

作者简介: 任书杰(1976~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为全球变化与陆地生态系统碳氮循环, E-mail: rensj.04b@igsnr.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: yugr@igsnr.ac.cn; yuguirui@cern.ac.cn

连接分散站点的观测研究与区域综合分析的一种研究方法,可用空间代替时间的方法缩短对科学问题认识所需要的时间.氮(N)和磷(P)是陆地生态系统植物生长的主要限制因子,关于植物的 N 和 P,尤其是叶片的 N 和 P 的化学计量学已经有了很多研究^[12~14].但是这些研究多以分散站点为研究对象,因此把分散的研究结果综合起来,扩展到区域或全球尺度,为发展大尺度生物地球化学循环模型和植被地理模型提供科学依据是当务之急.目前在国内和国际上已有少量关于区域尺度上叶片 N 和 P 化学计量学的研究工作^[15~18],但是关于样带尺度的叶片 N 和 P 的化学计量学特征的研究鲜见报道^[19],而关于中国东部南北样带叶片 N 和 P 化学计量学特征研究工作还未见报道.

本文通过对中国东部南北样带(NSTEC, north-south transect of eastern China)上 168 个采样点的 654 种植物叶片 N、P 含量以及 N/P 的统计特征、空间分布(随纬度变化)及其与气候因子(年均温度)关系的研究,揭示了中国东部南北样带叶片 N 和 P 生态化学计量学特征、分布规律和不同功能群间的差异,以期为中国区域乃至全球尺度的生物地球化学模型和植被地理模型研究提供基础数据和科学依据.

1 材料与方法

1.1 数据库的建立

中国东部南北样带植被叶片 N 和 P 养分数据库的数据主要来自以下 4 个方面:①1982~2006 年已公开发表的学术论文;②已公开出版的学术著作;③中国生态系统研究网络(Chinese ecosystem research network, CERN)森林站的定位观测数据,包括长白山站、会同站、鹤山站和鼎湖山站;④郑淑霞等^[15]所提供的陕西省宁陕县数据.数据库中包括了 168 个采样点(对于原出处没有经纬度信息的采样点只要在同一县境内的统一用该县县城所在点的经纬度代替)的 654 种植物.采样点分布如图 1 所示.

这里所收集的数据不包括农作物,并限制叶片的采集时间以生长季(7~9 月份)为主,对各种来源的叶片 N 和 P 含量数据的单位进行了标准化,统一转化为国际标准单位($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$).

1.2 气象资料的收集

对于所需要的气象数据(年均温度),如果文献中已有记载则直接获取,否则通过全国 730 个站点的 1954~2002 年进行 $0.1^\circ\times 0.1^\circ$ 样条函数插值的气象数据库^[20]中获得.为了检验通过插值计算获得



图 1 采样点的分布

Fig.1 Sample locations

的气象数据与从文献中直接获得的气象数据的相关性,把从文献中获得的 51 个点年均温度与通过插值获得的结果进行了比较,结果如图 2 所示.从图 2 中可以看出通过插值计算的数据与文献中直接获得的数据间具有很好的一致性,其回归方程为 $y = 1.0004x$, 相关系数 $R^2 = 0.859$,达到了极显著水平,可以认为通过插值计算的年均温度与从文献中直接获得的年均温度有很好的一致性.

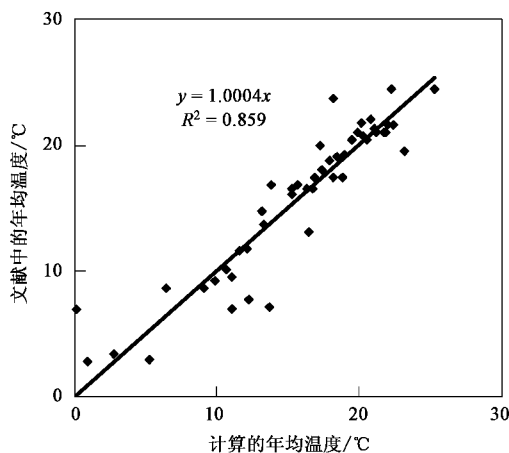


图 2 文献与计算获得到的年均温度的比较

Fig.2 Relationship between computed and referenced mean annual temperature

1.3 数据分析

采用 SPSS 统计分析软件包(SPSS 13.0 for Windows, Chicago, USA)进行数据的统计分析.正态分布性检验采用 K-S 检验(one sample kolmogorov-smirnov test)方法.

对同一物种的所有测定值取平均数,然后对共计 654 种植物的叶片 N、P 含量和 N/P 进行正态分布检验,如符合正态分布用算术平均数表示总体的大小,符合对数正态分布用几何平均数表示总体的大小.同时还计算了不同生活型(草本和木本、常绿木

本和落叶木本、针叶木本和阔叶木本),不同系统发育(种子和蕨类)植物叶片 N、P 含量和N/P的几何平均数和算术平均数,其中种子植物又进一步分为裸子植物和被子植物,被子植物进一步分为双子叶植物和单子叶植物,分别进行统计分析。

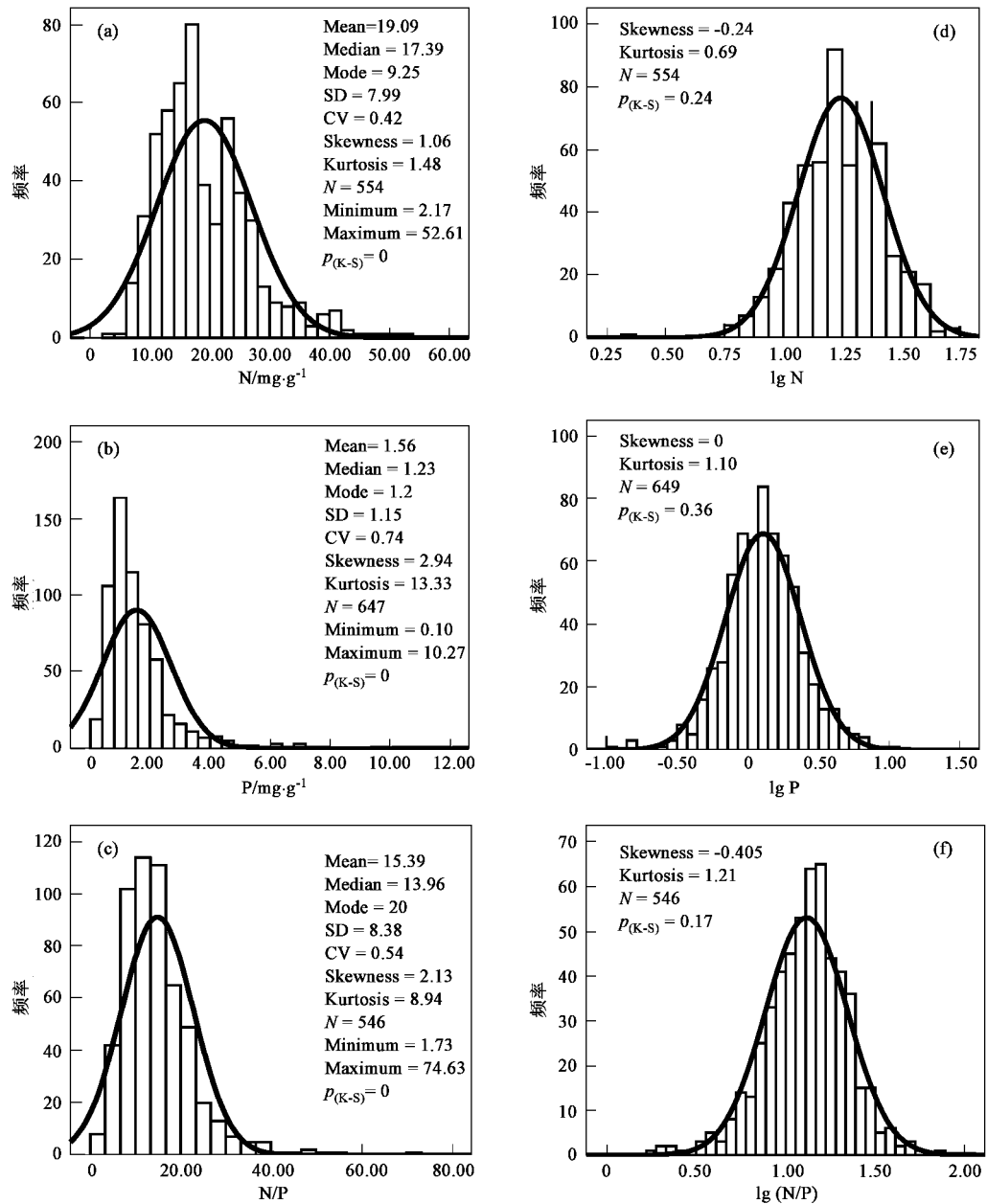
不同功能型间 N、P 含量的化学计量学比较是参照 Han 等^[18]的方法。首先是对同一物种的不同测量值取平均值,其次是对每一功能型的 N、P 和N/P取常用对数,第三是对取常用对数的不同功能型的 N、P 和N/P进行一维方差分析。另外,还给出了不同功能

群的叶片 N 和 P 含量间的 Spearman 相关系数。为了研究 N 和 P 计量学与纬度和年均温度的关系,还对同一采样点同一物种的 N 和 P 含量取平均值。

2 结果与分析

2.1 中国东部南北样带 654 种植物叶片 N 和 P 化学计量学的统计特征

为了表述叶片 N、P 含量以及N/P的统计特征,笔者给出了中国东部南北样带叶片 N、P 含量和N/P 的频率分布图(图 3)。由图 3 可知,叶片 N、P 含量



Mean 代表平均值, Median 代表中位数, Mode 代表众数, SD 代表标准差, CV 代表变异系数, Skewness 代表偏度, Kurtosis 代表峰度, N 代表样本容量, Minimum 代表最小值, Maximum 代表最大值, $p_{(K-S)}$ 代表 K-S 检验的 p 值

图 3 中国东部南北样带叶片 N、P 含量和N/P及其对数的频率分布

Fig.3 Histograms of leaf N, P and N/P in NSTEC

和N/P均呈偏态分布[图 3(a)~3(c)],对其取常用对数后,基本上呈正态分布[图 3(d)~3(f)],这说明叶片的 N、P 含量以及 N/P 符合对数正态分布,所以用几何平均数比算术平均数能更真实地反映样本的统计特征.

中国东部南北样带叶片的 N、P 含量和N/P的频

率分布如图 3 所示.从图 3 中可知叶片的 N、P 含量和N/P存在很大的变异性,它们的变化范围[图 3(a)~3(c)]分别为 2.17~52.61 mg•g⁻¹、0.10~10.27 mg•g⁻¹和 1.73~74.63,算术平均值分别为 19.09 mg•g⁻¹、1.56 mg•g⁻¹和 15.39,而几何平均数分别为 17.55 mg•g⁻¹、1.28 mg•g⁻¹和 13.49(表 1).

表 1 不同生活型植物叶片 N 和 P 的化学计量学特征比较¹⁾

Table 1 Stoichiometry of leaf N, P and N/P of different plant life form

功能群 (生活型)	N 含量/mg•g ⁻¹			P 含量/mg•g ⁻¹			N/P			<i>r</i> _s
	<i>n</i>	GM	AM	<i>n</i>	GM	AM	<i>n</i>	GM	AM	
草本	197	19.70	21.76	201	1.52	1.89	218	12.98	15.64	0.421**
木本	353	16.43	17.57	429	1.17	1.39	349	13.78	15.24	0.524**
常绿木本	197	14.00	14.71	247	0.96	1.10	245	14.66	16.17	0.281**
落叶木本	156	21.12	21.20	182	1.55	1.77	154	12.76	14.07	0.356**
针叶木本	44	12.72	13.13	46	1.12	1.20	44	11.97	13.16	0.100
阔叶木本	309	17.04	18.21	383	1.18	1.41	305	14.07	15.54	0.517**
所有物种	554	17.55	19.09	647	1.28	1.56	546	13.49	15.39	0.52**

1) GM(geometric mean)代表几何平均数,AM(arithmetic mean)代表数学平均数,*n* 代表物种数,*r*_s 代表 Spearman 相关系数,* 代表 0.05 水平上的显著性,** 代表 0.01 水平上的显著性,下同

2.2 不同功能群植物叶片 N 和 P 化学计量学特征
的比较

中国东部南北样带不同功能型植物叶片 N 和 P 含量存在很大的变异性(表 1 和表 2),其中 N 含量从蕨类的 11.25 mg•g⁻¹到落叶木本的 21.12 mg•g⁻¹,P 含量从蕨类的 0.88 mg•g⁻¹到落叶木本的 1.55 mg•g⁻¹,而N/P从裸子植物的 11.95 到蕨类植物的 17.66(表 1 和表 2).在不同的生活型植物中(表 1),以落叶木本和常绿木本的差异最大,N、P 含量和 N/P 间的差异均达到显著水平.在不同系统发育的比较中(表 2),蕨类植物与种子植物的差异最大,N、P 和 N/P 的差异均达到显著水平(表 2).被子植物中的双子叶和单子叶的差异最小,只有 N 的差异达

到显著水平(*p* < 0.05),而 P 和N/P的差异不显著.因此可以得出在系统发育上亲缘关系越远的功能群 N 和 P 含量差异越大,亲缘越近的差异越小.同时比较各个功能群 N 和 P 的相关性发现,除针叶、蕨类和裸子植物外,其它 9 种不同功能型的叶片 N 和 P 均达到极显著相关(表 1 和表 2).6 组功能型的 N、P 含量和N/P的差异如表 3 所示,在所比较的 6 组功能型中,相对于叶片 N 和 P 含量的变异,N/P 的变异性要小得多(表 3).在 6 组不同功能型植物间的叶片 N 和 P 含量的比较中,各组间的 N 含量全部达到显著或极显著差异,P 有 3 组达到极显著差异(*p* < 0.01),而N/P只有 3 组达到显著差异(*p* < 0.05).

表 2 不同系统发育植物叶片 N 和 P 的化学计量学特征比较

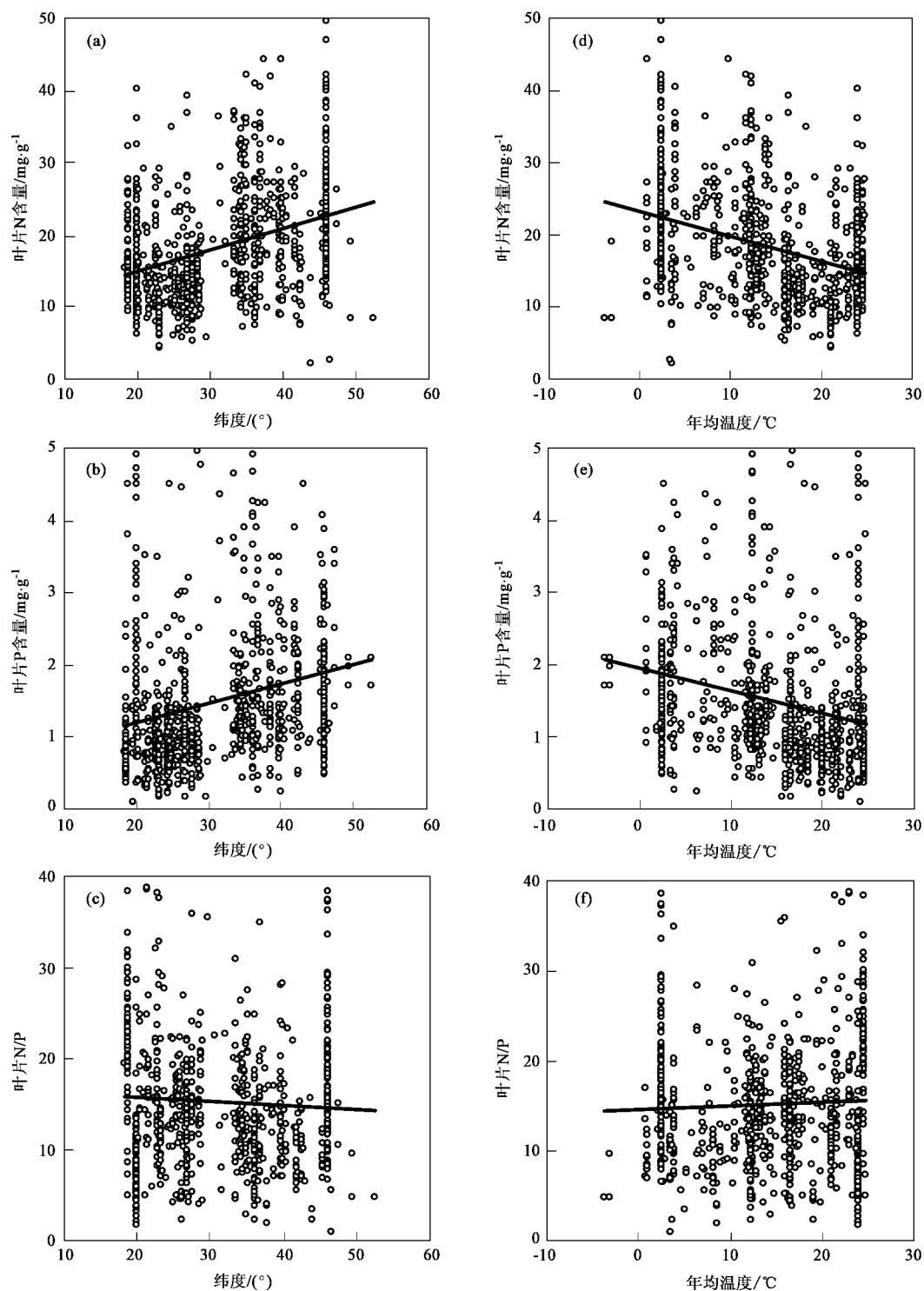
Table 2 Stoichiometry of leaf N, P and N/P of different plant phylogeny

功能群 (系统发育)	N 含量/mg•g ⁻¹			P 含量/mg•g ⁻¹			N/P			<i>r</i> _s
	<i>n</i>	GM	AM	<i>n</i>	GM	AM	<i>n</i>	GM	AM	
蕨类	17	11.25	11.80	21	0.88	1.54	17	17.66	21.94	0.219
种子	537	17.80	19.32	626	1.30	1.56	529	13.38	15.14	0.506**
裸子	46	13.27	13.88	48	1.18	1.28	46	11.95	13.10	0.258
被子	491	18.29	19.83	578	1.31	1.58	483	13.52	15.37	0.51**
单子叶	62	16.34	17.33	68	1.23	1.61	61	13.39	16.78	0.364**
双子叶	429	18.59	20.19	510	1.32	1.57	422	13.54	15.17	0.523**
所有物种	554	17.55	19.09	647	1.28	1.56	546	13.49	15.39	0.52**

2.3 叶片的 N、P 含量和N/P与纬度和年均温度的
关系

在中国东部南北样带,植物叶片 N 和 P 含量随着纬度的升高和年均温度的降低而升高[图 4(a)、(b)、

(d)、(e)], 而N/P与纬度和年均温度间的相关关系较弱 ($p = 0.386$ 和 $p = 0.342$ [图 4(c)、(f)].



(a): 纬度与叶片 N 含量($R = 0.349$, $p < 0.001$, $n = 859$); (b): 纬度与叶片 P 含量($R = 0.313$, $p < 0.001$, $n = 1013$); (c): 纬度与叶片 N/P ($R = 0.030$; $p = 0.386$; $n = 844$); (d): 年均温度与叶片 N 含量($R = 0.352$, $p < 0.001$, $n = 859$); (e): 年均温度与叶片 P 含量($R = 0.312$ $p < 0.001$, $n = 1013$); (f): 年均温度与叶片 N/P ($R = 0.033$, $p = 0.342$, $n = 844$)

图 4 中国东部南北样带叶片 N、P 和N/P与年均温度和纬度的关系

Fig.4 Relationships between leaf N, P and N/P of plants, latitude and mean annual temperature in NSTEC

表 3 不同功能群植物间叶片 N 和 P 化学计量学特征的方差分析¹⁾

Table 3 Results of ANOVA for comparisons between different functional groups

功能群成对比较		N 含量		P 含量		N/P	
		<i>F</i> (<i>m</i> , <i>n</i>)	Sig.	<i>F</i> (<i>m</i> , <i>n</i>)	Sig.	<i>F</i> (<i>m</i> , <i>n</i>)	Sig.
生活型	草本 vs. 木本	25.29 (1, 552)	<i>p</i> < 0.001	25.74 (1, 645)	<i>p</i> < 0.001	1.67 (1, 544)	<i>p</i> = 0.200
	常绿木本 vs. 落叶木本	111.92 (1, 351)	<i>p</i> < 0.001	91.63 (1, 427)	<i>p</i> < 0.001	8.31 (1, 347)	<i>p</i> < 0.05 <i>p</i> = 0.004
	针叶木本 vs. 阔叶木本	26.31 (1, 351)	<i>p</i> < 0.001	0.339 (1, 427)	<i>p</i> = 0.561	5.026 (1, 347)	<i>p</i> < 0.05 <i>p</i> = 0.026
系统发育	蕨类 vs. 种子	20.72 (1, 552)	<i>p</i> < 0.001	8.02 (1, 645)	<i>p</i> < 0.01 (<i>p</i> = 0.005)	4.64 (1, 544)	<i>p</i> < 0.05 <i>p</i> = 0.032
	裸子 vs. 被子	26.82 (1, 535)	<i>p</i> < 0.001	1.18 (1, 624)	<i>p</i> = 0.277	2.39 (1, 527)	<i>p</i> = 0.123
	单子叶 vs. 双子叶	5.39 (1, 489)	<i>p</i> < 0.05 <i>p</i> = 0.021	0.708 (1, 576)	<i>p</i> = 0.400	0.022 (1, 481)	<i>p</i> = 0.882

1) *F*(*m*, *n*)代表方差分析中的 *F* 值, *F*(*m*, *n*)中 *m* 和 *n* 分别代表组间和组内的自由度, Sig. 表示同一测定指标在不同功能群植物之间的差异显著性检验

3 讨论

3.1 中国东部南北样带植物叶片 N 和 P 的化学计量学特征

为了方便中国东部南北样带叶片 N 和 P 的计量学特征与其它相关研究的比较,笔者把相关的研究结果列于表 4, 并且对中国东部南北样带的研究结果与其它结果进行了方差分析, 结果如表 4 所示.

中国东部南北样带叶片 N 含量与 Elser 等^[16, 17]在全球尺度上的研究结果存在显著差异(表 4). 这

说明中国东部南北样带植被叶片 N 含量显著低于全球尺度的研究结果. 同时中国东部南北样的研究结果显著低于 Han 等^[18]在全国尺度上的研究结果(表 4), 也低于郑淑霞等^[15]在黄土高原的研究结果(算术平均数为 24.1 mg•g⁻¹). 中国东部南北样带植物叶片较低的 N 含量, 可能与中国东部较高的降雨量有关^[21, 22]. 因为植物吸收的是移动性很强的有效态氮(如硝态氮和氨态氮), 而东部南北样带相对较高的降雨量, 很可能使这些移动性很强的氮发生淋溶^[23], 故植物可吸收利用的有效氮减少, 导致中国东部南北样带叶片 N 含量较低.

表 4 中国东部南北样带叶片 N、P 含量和 N/P 与其它研究结果的比较

Table 4 Results of ANOVA for comparisons between leaf N, P and N/P of NSTEC and other studies

研究区域	N 含量/mg•g ⁻¹			P 含量/mg•g ⁻¹			N/P			文献来源
	GM	AM	<i>n</i>	GM	AM	<i>n</i>	GM	AM	<i>n</i>	
中国东部南北样带	17.55	19.09	554	1.28	1.56	647	13.5	15.4	546	本研究
中国	18.63 *	20.24 *	554	1.21	1.46	745	14.4	16.3 *	894	[18]
全球尺度	18.34 *	20.09 *	1 251	1.42 * *	1.77 * *	923	11.8 * *	13.8 * *	894	[17]
全球尺度	17.66 *	20.62	398	1.58 * *	1.99 * *	406	11 * *	12.7 * *	325	[16]

中国东部南北样带叶片 P 含量显著地低于 Elser 等^[16, 17]在全球尺度的研究结果, 而与 Han 等^[18]在中国区域的结果差异并不显著. 这说明与全球尺度上的研究相比, 中国植物的叶片磷极显著偏低. 以往研究表明叶片的 P 含量与土壤 P 含量密切相关^[24, 25], 因此笔者分析了距采样点最近的纬度点的第二次全国土壤普查的土壤 P 含量^[26~31]与叶片 P 含量的关系(图 5), 发现叶片 P 含量有随土壤 P 含量增加的趋势. 地壳 P 素的平均含量大约为 2.8 mg•g⁻¹^[32], 而我国除了南海诸岛外, 大部分地区的

磷素均低于这一数值^[32], 而且变幅很大^[33], 也就是说中国土壤 P 含量低于全球的平均水平^[32, 34]. 因此中国区域植物叶片 P 含量较低主要是由于土壤 P 含量较低所导致的.

中国东部南北样带叶片的 N/P 与 Han 等^[18]在中国的研究结果算术平均数差异显著, 几何平均数差异不显著, 而与 Elser 等^[16, 17]在全球尺度的研究结果存在极显著差异(表 4). 中国区域叶片 N/P 偏高的主要原因可能是由于土壤 P 偏低而导致的叶片 P 含量低所致. N/P 通常被用来作为描述 N 和 P 相对限制和

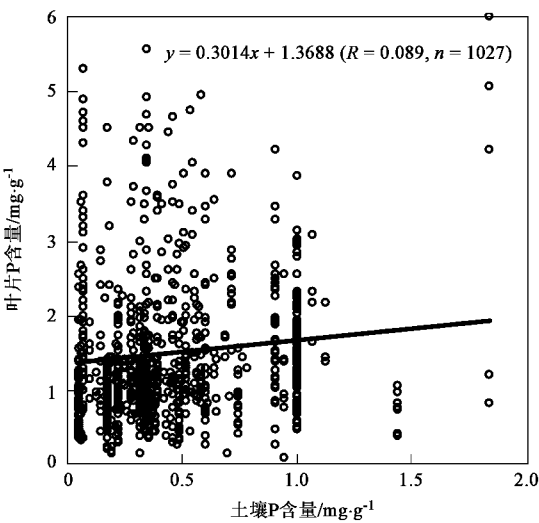


图 5 土壤 P 含量与叶片 P 含量的关系
Fig.5 Relationships between leaf P and soil P

物种丰富度的一个指标^[13, 35~37]. 当N/P小于14时, 植物生长主要受N限制, 当N/P大于16时, 植物生长主要受P限制^[29]. 与全球尺度的研究结果相比, 中国区域相对较高的N/P和较低的叶片P含量进一步说明了中国区域的植被生产力受P的限制较大.

3.2 不同功能群间叶片 N 和 P 化学计量学特征的比较

在中国东部南北样带, 叶片的 N 和 P 含量在功能群间存在很大的差异(表 1 和表 2), 研究发现, 对于不同功能型植物叶片的 N 含量而言, 草本显著高于木本, 落叶木本显著高于常绿木本, 阔叶木本显著高于针叶木本. 这与以前的研究结果一致^[12, 13, 38, 39], 即寿命短的快速生长的物种的叶片 N 含量高于寿命长的生长相对较慢的物种. 对于不同的系统发育的功能群而言, 种子植物的 N 和 P 含量显著高于蕨类植物, 被子植物显著高于裸子植物, 双子叶植物的 N 含量显著高于单子叶植物, 这表明了植物叶片 N 和 P 含量在系统发育学方面的差异.

表 5 中国东部南北样带与其它研究区域纬度范围的比较

Table 5 Latitude ranges of NSTEC and other studies					
研究区域	纬度范围	N 的变化范围	P 的变化范围	N/P 的变化范围	参考文献
中国东部南北样带	18.39°N ~ 52.32°N	2.17 ~ 52.61	0.10 ~ 10.27	1.73 ~ 74.63	本研究
中国	18°N ~ 49°N	6.25 ~ 52.61	0.05 ~ 10.27	3.29 ~ 78.89	[18]
全球尺度	43°S ~ 70°N	17.2 ~ 59.9	1.7 ~ 6.9	12.6 ~ 111.8	[17]

在中国研究区域N/P与纬度和年均温度相关性不显著的原因之一可能是由于相对于全球尺度而言, 中国研究区域的纬度范围较小而引起的(表 5).

由于叶片 N 和 P 含量间存在很好的相关关系(表 1 和表 2), 所以在不同功能群间N/P的变异性要小于叶片 N 和 P 含量自身的变异性(表 3), 在 6 组功能型间的比较分析中(表 3), N 含量全部达到显著或极显著差异, P 有 3 组达到了极显著差异, 而 N/P也有 3 组达到显著差异. 虽然 P 和N/P同在 6 组中的 3 组中存在显著差异, 但是 P 为极显著差异($p < 0.01$), 而N/P为显著差异($p < 0.05$). N/P的相对稳定性(表 3)以及 N 和 P 之间的高度相关(表 1 和表 2), 反映了不同功能群植物间叶片 N 和 P 含量的相对一致性, 这是植物最基本的特性之一^[40].

3.3 叶片 N 和 P 的计量学与纬度和年均温度的关系

虽然叶片的 N、P 含量和N/P更多地反映了植物对当地土壤营养条件的适应^[13], 但是最近的研究表明叶片的 N、P 和N/P仍然存在大尺度尤其是全球尺度的变化规律^[17]. Reich 等^[17]对全球 452 个点的 1 280种植物的5 087个观测值的研究发现, 越靠近赤道, 随年均温度的升高, 叶片 N 和 P 含量降低, 而 N/P升高; 从热带到寒冷干旱的中纬度地区, N 和 P 含量升高, 这主要是由于与温度有关的植物生理计量学和土壤年龄的生物地理梯度引起的; 越靠近赤道区域随年均温度的升高, N/P升高, 这是由于 P 是古老的热带土壤的主要限制因素, 而 N 是年轻的温带土壤和高纬度土壤的主要限制因素. 而郑淑霞等^[15]等对黄土高原地区 7 个采样点的研究表明叶片 N 和 P 含量与纬度与年均温度间未达到显著相关, 这可能是相对于较大的空间尺度而言, 黄土高原的研究区域较小有关(表 5). 中国东部南北样带叶片的 N 和 P 含量随纬度的升高而升高, 随年均温度的升高而降低, 这与 Reich 等^[17]在全球尺度的研究结果一致. 但在中国东部南北样带纬度和年均温度与N/P间的相关性并没有达到显著水平. 这与 Han 等^[18]在中国全国尺度的研究结果是一致的.

Reich 等^[17] 在全球尺度研究的纬度范围为43°N ~ 70°N, 而中国东部南北样带的纬度范围为18.39°N ~ 52.32°N和中国区域^[18]为18°N ~ 49°N(表 5). 图 6 对

本研究 和 Reich 等^[17] 在全球尺度上的研究结果随纬度和年均温的变化进行了比较. 从图 6 中可以看出, 中国东部南北样带的研究范围相对全球较小, N/P 随纬度的变化相对平缓, 而全球尺度的变化幅度相对较大, 当把中国东部样带的数据加入到全球

数据库中, 则变化减缓, 但是 N/P 与纬度之间仍然具有极显著的相关性[图 6(a)]. 叶片 N/P 随年均温度的变化趋势与随纬度的变化相反, 即随着年均温的增加 N/P 增大, 但变化情况与随纬度的变化相似[图 6(b)].

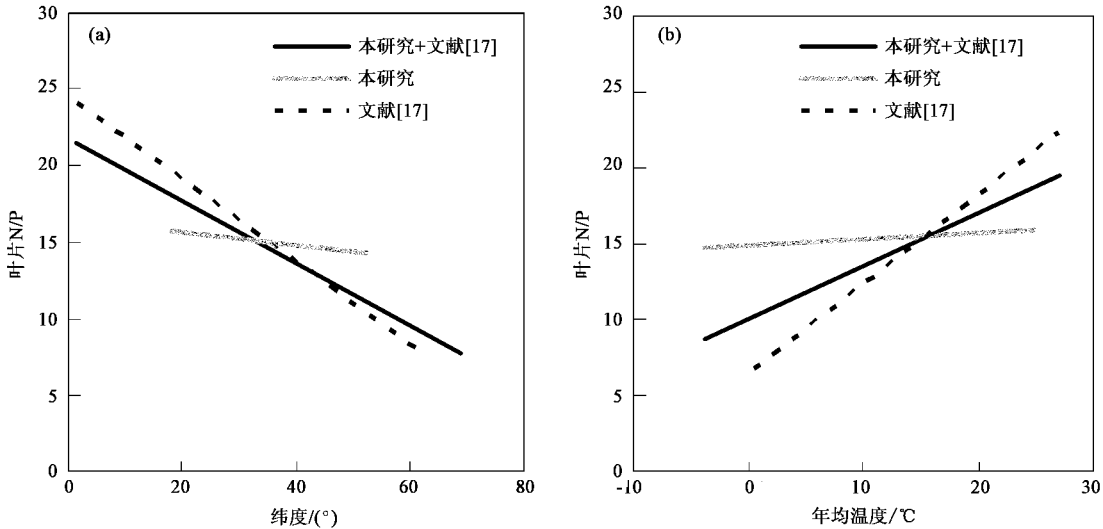


图 6 中国东部南北样带叶片 N/P 随纬度和年均温度变化与全球尺度研究结果的比较

Fig.6 Comparison of relationship between N/P, latitude and mean annual temperature of NSTEC and global studies

另外, 因为叶片 N 和 P 含量同时随着纬度的升高而升高, 年均温度的升高而降低, 也就是说叶片的 N 和 P 含量随纬度和年均温度的变化具有相同的变化趋势(图 5), 而两者的比值 N/P 随纬度和年均温度的变化趋势会被减缓, 而且叶片的 N、P 含量具有较大的变异性(表 5), 进而增大了 N/P 的变异性. 这可能也掩盖了 N/P 随纬度和年均温度的变化规律.

致谢: 本研究得到了中国生态系统研究网络 (Chinese ecosystem research network, CERN) 提供的长白山站、会同站、鹤山站和鼎湖山站观测数据, 上官周平研究员和郑淑霞博士提供的陕西省宁陕县观测数据, 研究中还用到了 Reich 在全球尺度上^[17] 的数据, 在此一并深表感谢.

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[J]. 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[J]. 地学前缘, 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 [J]. Nature, 2001, **410**: 809 ~ 810.

[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[J]. 应用生态学报, 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 [J]. Ecology, 2006, **87**(1): 26 ~ 40.

[6] 苏永中, 赵哈林. 持续放牧和围封对科尔沁退化沙地草地碳截存的影响[J]. 环境科学, 2003, **24**(4): 23 ~ 28.

[7] 李玉强, 赵哈林, 移小勇, 等. 沙漠化过程中科尔沁沙地植物-土壤系统碳氮储量动态[J]. 环境科学, 2006, **27**(4): 635 ~ 640.

[8] 徐治国, 何岩, 闫百兴, 等. 湿地植物对外源氮、磷输入响应研究[J]. 环境科学研究, 2007, **20**(1): 64 ~ 68.

[9] 周青, 黄晓华, 刘小林. 酸雨对 3 种木本植物的胁迫效应[J]. 环境科学, 2002, **23**(5): 42 ~ 46.

[10] 周运超, 潘根兴, 李恋卿, 等. 太湖地区 3 种水稻土不同温度培养中有机碳库变化及其对升温的响应[J]. 环境科学, 2003, **24**(1): 46 ~ 51.

[11] 张丽华, 宋长春, 王德宣, 等. 沼泽湿地生态系统呼吸与温度、氮素及植物生长的相互关系[J]. 环境科学, 2007, **28** (1): 1 ~ 8.

[12] Foulds W. Nutrient concentrations of foliage and soil in south-western Australia [J]. New Phytol, 1993, **125**(3): 529 ~ 546.

[13] Thompson K, Parkinson J A, Band S R, *et al.* A comparative study of leaf nutrient concentrations in a regional herbaceous flora [J]. New Phytol, 1997, **136**: 679 ~ 689.

[14] Cunningham S A, Summerhayes B, Westoby M. Evolutionary divergences in leaf structure and chemistry, comparing rainfall and soil nutrient gradients [J]. *Ecol Monogr*, 1999, **69**: 569 ~ 588.

[15] 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[J]. *自然科学进展*, 2006, **16**(8): 965 ~ 973.

[16] 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.

[17] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude [J]. *PNAS*, 2004, **101**: 11001 ~ 11006.

[18] 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 Phytol*, 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 grasslands biomes of China [J]. *Oecologia*, 2006, **149**: 115 ~ 122.

[20] 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[J]. *中国科学 D 辑*, 2006, **36** (12): 1 ~ 9.

[21] 尚宗波, 高琼, 杨莫安. 利用中国气候信息系统研究年降水量空间分布规律[J]. *生态学报*, 2001, **21**(5): 689 ~ 694.

[22] 支蓉, 龚志强, 王德英, 等. 基于幂律尾指数研究中国降水的时空演变特征[J]. *物理学报*, 2006, **55**(11): 8185 ~ 8197.

[23] 王辉, 王全九, 邵明安. 降水条件下黄土坡地氮素淋溶特征的研究[J]. *水土保持学报*, 2005, **19**(5): 61 ~ 64, 93.

[24] Aerts R, Chapin F S III. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processed and patterns [J]. *Adv Eco Res*, 2000, **30**: 1 ~ 67.

[25] Hedin L O. Global organization of terrestrial plant-nutrient interactions [J]. *PNAS*, 2004, **101**: 10849 ~ 10850.

[26] 全国土壤普查办公室编. 中国土种志[M]. (第二卷). 北京: 中国农业出版社, 1994a. 1 ~ 739.

[27] 全国土壤普查办公室编. 中国土种志[M]. (第六卷). 北京: 中国农业出版社, 1996. 1 ~ 880.

[28] 全国土壤普查办公室编. 中国土种志[M]. (第三卷). 北京: 中国农业出版社, 1994b. 1 ~ 744.

[29] 全国土壤普查办公室编. 中国土种志[M]. (第四卷). 北京: 中国农业出版社, 1995a. 1 ~ 806.

[30] 全国土壤普查办公室编. 中国土种志[M]. (第五卷). 北京: 中国农业出版社, 1995b. 1 ~ 886.

[31] 徐治国, 何岩, 闫百兴, 等. 植物 N/P 与土壤 pH 值对湿地植物物种丰富度的影响[J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(3): 346 ~ 349.

[32] 全国土壤普查办公室编. 中国土种志[M]. (第一卷). 北京: 中国农业出版社, 1993. 1 ~ 924.

[33] 熊毅, 李庆逵主编. 中国土壤[M]. (第二版). 北京: 科学出版社, 1987. 1 ~ 746.

[34] Zhang C, Tian H Q, Liu J Y, *et al.* Pools and distributions of soil phosphorus in China [J]. *Global Biogeochem Cycle*, 2005, **19**: GB1020, doi: 10.1029/2004GB002296.

[35] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998. 1 ~ 1253.

[36] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N: P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation [J]. *J Appl Ecol*, 1996, **33**(6): 1441 ~ 1450.

[37] Niklas K J, Owens T, Reich P B, *et al.* Nitrogen/phosphorus leaf stoichiometry and the scaling of plant growth [J]. *Ecol Lett*, 2005, **8**: 636 ~ 642.

[38] Aerts R. Nutrient resorption from senescing leaves of perennials: are there general patterns? [J]. *J Ecol*, 1996, **84**: 597 ~ 608.

[39] Wright I J, Reich P B, Cornelissen J H C. Assessing the generality of global leaf trait relationships [J]. *New Phytol*, 2005, **166**: 485 ~ 496.

[40] Duarte C M. Nutrient concentration of aquatic Plants-patterns across species [J]. *Limnol Oceanogr*, 1992, **37**: 882 ~ 889.