

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.02.001

马尾松人工林土壤碳氮磷生态化学 计量学特征的纬度变化

简尊吉¹, 倪妍妍¹, 徐瑾¹, 曾立雄^{1,2},
雷蕾^{1,2}, 朱建华^{1,2}, 肖文发^{1,2*}

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091;

2. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037)

摘要: [目的] 探讨马尾松人工林土壤碳、氮、磷养分及其生态化学计量学特征的纬度变化, 为马尾松人工林的可持续经营和生产力提高提供科学依据。[方法] 通过对亚热带地区东南至西北 8 个研究点马尾松人工林 0~20 cm 矿质土层土壤有机碳、全氮、全磷含量的测定, 利用回归分析法探索土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征的纬度变化趋势, 利用 Pearson 相关法和冗余分析法分析气候因子(年均气温和年均降水量)、林分特征(年龄、密度和胸径)和土壤性质(pH 值与黏粒含量)对其纬度变化的影响, 采用方差分解法分析气候、林分和土壤因子对其纬度变化的相对贡献率。[结果] (1) 土壤有机碳、全氮、全磷的平均含量分别为 16.02、1.22、0.35 g·kg⁻¹, 土壤碳氮比、碳磷比、氮磷比的平均值分别为 14.18、47.01、3.59; (2) 土壤有机碳和全氮含量均随纬度的升高而显著降低 ($P<0.01$), 全磷含量无明显的纬度变化; (3) 土壤碳氮比随纬度的升高而显著增大 ($P<0.05$), 碳磷比和氮磷比却显著下降 ($P<0.01$); (4) 土壤有机碳和全氮含量与年均气温、年均降水量、胸径呈显著正相关 ($P<0.05$), 与土壤 pH 值呈显著负相关 ($P<0.05$); 土壤碳磷比和氮磷比与年均气温、年均降水量、胸径、土壤黏粒含量呈显著正相关 ($P<0.05$), 与林分年龄呈显著负相关 ($P<0.05$); (5) 气候因子、林分特征和土壤性质总体上解释了 63.8% 土壤有机碳、全氮和全磷含量及其生态化学计量学特征的变化, 相对贡献率表现为气候因子 (46.3%) > 林分特征 (43.3%) > 土壤性质 (35.5%)。[结论] 在马尾松人工林中, 土壤碳氮比、碳磷比和氮磷比表现出明显的纬度变化, 年均气温、年均降水量、林分年龄、林分密度、胸径、土壤 pH 值、土壤黏粒含量是其驱动因素, 这些因素的交互效应大于单独效应。

关键词: 土壤碳、氮、磷含量; 生态化学计量学; 纬度梯度; 人工林; 马尾松

中图分类号: S791.248

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2022)02-0001-08

生态化学计量学是研究生物系统能量平衡和多重化学元素平衡(主要是碳、氮、磷元素)的科学, 在生态学各个层次和不同尺度方面已取得众多研究成果, 是当前生态学研究热点领域之一^[1-5]。土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征是表征土壤内

部碳、氮、磷平衡的重要参数^[6], 直接影响植被的生长、组成和分布^[7-8]。受纬度、水热条件、成土作用、植被分布和生长等环境因子影响^[5,9], 土壤碳、氮、磷及其生态化学计量学特征存在明显的纬度格局, 但这种格局在不同空间尺度或不同地区相

收稿日期: 2020-09-08 修回日期: 2021-12-07

基金项目: 国家重点研发计划课题“人工林生产力形成的关键生理生态与环境控制机制”(2016YFD0600201)

作者简介: 简尊吉, 在读博士。主要研究方向: 森林生态。Email: jianzunji2014@163.com

* 通讯作者: 肖文发, 研究员。主要研究方法: 森林生态。Email: xiaowenf@caf.ac.cn

似尺度上存在差异^[9], 如我国黄土高原地区土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征总体上随纬度升高而减小^[10-12], 而我国东部自然保护区和亚热带海岛天然林土壤碳、氮、磷含量却随纬度的升高而升高^[13-14]。控制这种差异的机制尚不完全清楚^[9], 但区域固有的特性(如气候、植被、土壤性质等)使得影响生态化学计量学特征的因素也有所不同。因此, 通过对不同区域生态系统土壤生态化学计量学特征及其影响因素的分析, 进一步验证和丰富土壤生态化学计量学特征, 有助于土壤养分的科学管理和生态系统生产力的提高^[5-6]。

马尾松(*Pinus massoniana* (Lamb.))是我国亚热带地区造林的先锋树种之一, 面积约0.08亿hm²^[15], 发挥着重要的生态功能(如碳汇、水土保持等)。目前, 关于马尾松林土壤生态化学计量学特征的研究主要集中在样点尺度, 如马尾松林与其他树种林地类型间^[16-17]、马尾松纯林与混交林间^[18]及马尾松不同林龄间^[19-20]的差异, 缺乏样带尺度上马尾松林土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征变化及其影响因素的研究。另外, 不管是区域尺度还是样点(带)尺度上, 关于影响土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征变化的主次因素也很少报道^[5,9]。本研究通过对亚热带东南至西北8个研究点马尾松人工纯林0~20 cm土壤进行采样分析, 研究土壤有机碳、全氮和全磷含量以及碳氮比、碳磷比和氮磷比随纬度梯度的变化特征及其影响主次因素, 为马尾松人工林的可持续经营和生产力提高提供科学依据。

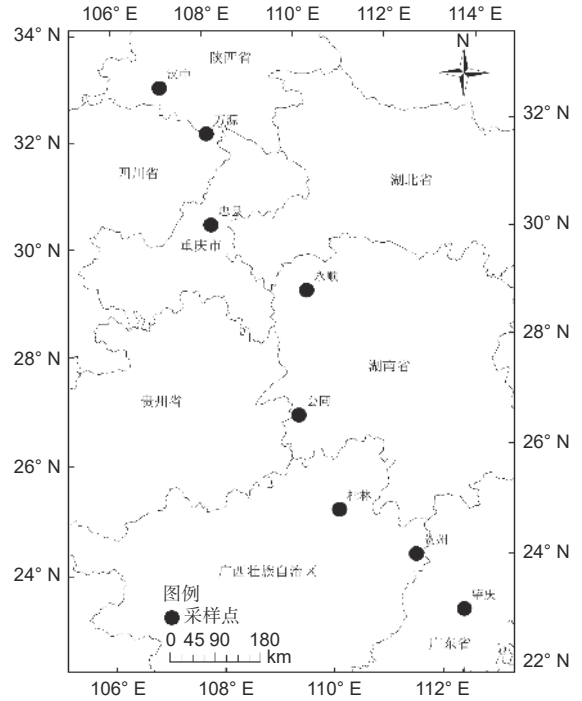


图1 马尾松人工林沿纬度梯度的采样点分布图
Fig. 1 Distribution of sampling site in *Pinus massoniana* (Lamb.) plantations along the latitudinal gradient

1 研究区概况

本研究样带地处23.09~33.01° N间(图1和表1)。研究点由东南至西北依次为: 广东肇庆、广西贺州和桂林、湖南会同和永顺、重庆忠县、四川万源、陕西汉中(图1)。这些研究点均属于亚热带季风气候, 1980—2012年的年均气温13.8~22.0℃, 年均降水量917~1 747 mm(表1),

表1 研究点基本信息

Table 1 Basic information of sampling sites

研究点 Site	经度 Long./ (°E)	纬度 Lat./ (°N)	年均气温 MAT/ ℃	年均降水量 MAP/ mm	土壤类型 Soil type	年龄 Age/ a	密度 Density/ (株·hm ⁻²)	胸径 DBH/ cm	pH	黏粒 Clay/ %
肇庆 Zhaoqing	112.50	23.09	22.0	1 747	红壤	19~24	617~2 500	18.87~24.30	4.58~4.76	17.70~32.92
贺州 Hezhou	111.70	24.15	20.5	1 631	红壤	23~25	440~617	23.34~29.61	4.81~4.90	35.97~46.65
桂林 Guilin	110.31	25.06	19.2	1 648	红壤	23~27	467~1 550	22.34~26.10	5.44~5.48	35.92~53.88
会同 Huitong	109.64	26.82	16.8	1 330	红壤	21~27	700~2 352	19.69~24.18	4.98~5.07	18.97~38.19
永顺 Yongshun	109.95	29.11	16.2	1 395	黄壤	18~23	733~883	18.49~20.74	5.12~5.82	29.75~33.20
忠县 Zhongxian	108.05	30.41	16.9	1 211	黄壤	21~39	700~2 167	16.54~19.49	4.40~5.11	27.52~38.74
万源 Wanyuan	108.04	32.13	15.5	1 091	黄壤	26~50	1 267~2 900	16.13~22.42	5.57~6.15	21.26~24.78
汉中 Hanzhong	107.07	33.01	13.8	917	黄棕壤	23~44	1 983~2 133	13.06~16.56	5.65~5.83	11.15~13.33

注: 土壤pH和黏粒(<0.002 mm)含量为0~20 cm土层的值。缩写词long.为经度, Lat.为纬度, MAT为年均气温, MAP为年均降水量, DBH为胸径。

Notes: Soil pH and clay (<0.002 mm) content represented the values of 0~20 cm layer. Long.: longitude; Lat.: latitude; MAT: mean annual temperature; MAP: mean annual precipitation; DBH: diameter at breast height of 1.3 m.

降雨季节性变化较大,集中在5—10月。地带性植被为亚热带常绿阔叶林,但大多数在20世纪中叶遭人为破坏,现存的植被以次生林或人工林为主。本研究在马尾松人工纯林内进行,以近熟林为主(表1)。马尾松人工林为人工栽植或飞播而成,林下植被稀少。土壤类型为红壤(肇庆、贺州、桂林、会同)、黄壤(永顺、忠县、万源)和黄棕壤(汉中)。另外,研究区(由东南至西北)跨越了南亚热带(肇庆、贺州)、中亚热带(桂林、会同、永顺、忠县)和北亚热带(万源、汉中),是适合研究马尾松人工林土壤养分及其生态化学计量学特征纬度变化的地带之一。

2 研究方法

2.1 土壤样品采集与测定

每个研究点随机选择3个研究样地,样地之间距离至少1 km。所选择的样地近年来未遭受火灾、施肥、间伐等干扰。用手持式全球定位系统(GPS, UniStrong G138, 中国)确定研究样地的经纬度(表1)。在每个研究样地仅设置1个研究样方(600 m²)。在样方内按“S”型选择10~15个采样点,剔除地表凋落物和草本植物后,用土钻(内径5 cm)分别采集0~10、10~20 cm两层土样。将鲜土中可见的根系和砾石等剔除,将同一层所有采样点土壤样品手动混合为一个样品。同时,对马尾松林分的年龄(生长锥法)、密度和平均胸径(每木检尺)进行调查和测定,其结果见表1。

土壤样品在室内荫蔽处自然风干后,一部分样品经研钵磨细后过0.154 mm网筛,用于测定土壤有机碳、全氮、全磷含量;另一部分样品经研钵磨细后过2 mm网筛,用于测定土壤pH值和质地。有机碳和全氮含量采用干烧法—元素分析仪(Euro EA, Hekatech GmbH, Germany)测定,全磷含量采用硝酸+高氯酸+氢氟酸混合溶液消解—等离子发射光谱仪(IRIS Intrepid II XSP, Thermo Fisher Scientific, USA)测定。pH值由1:2.5(V:V)的水浸—电位法(HI2221, Hanna, Italy)测定。质地(黏粒<0.002 mm、粉粒0.002~0.02 mm、砂粒0.02~2.0 mm)由比重计法测定。

2.2 气象数据的获取

基于全国气象站经度、纬度和海拔信息,利用气象站1980—2012年的年均气温和年均降水量数据,在ArcGIS 10.2中通过普通克里格方法内插,

形成空间分辨率为1 km × 1 km的原始数据库;随后,基于样地经度、纬度和海拔信息,提取每个样地的年均气温和年均降水量(表1)。

2.3 数据处理

采用Excel 2003软件对数据进行整理。本研究中土壤碳氮比、碳磷比和氮磷比均为质量比。由于0~10 cm和10~20 cm土层间土壤数据差异不显著(Mann-Whitney U检验, $P>0.05$),本研究中仅对0~20 cm土层土壤数据(即0~10 cm和10~20 cm土层的算术平均值)进行分析。为了满足数据的正态性,每个研究点的土壤数据未进行平均化,即数据分析的样方数为24($N=3 \times 8=24$)。采用SPSS 19.0软件对数据进行统计分析。用Kolmogorov-Smirnov法检验土壤数据的正态性($P>0.05$),用Pearson法和冗余分析(RDA)对土壤数据和环境数据(年均气温、年均降水量、林分年龄、林分密度、胸径、土壤pH值和土壤黏粒含量)的关系进行分析。为了说明所选择的环境变量对土壤养分含量及其生态化学计量学特征的相对贡献率,采用方差分解分析(VPA)来区分三组环境变量(气候、林分和土壤)的独立效应和共同效应。冗余分析和方差分解分析在Canoco 5.0软件中进行。采用Origin 9.0对土壤数据的纬度变化进行线性拟合和作图。表中数据为平均值±标准差。

3 结果与分析

3.1 土壤有机碳、全氮、全磷含量及其纬度变化

从表2可看出:土壤有机碳、全氮、全磷含量的平均值分别为16.02、1.22、0.35 g·kg⁻¹,变异系数分别为42.5%、50.4%、24.7%;土壤全磷含量的空间变异性低于土壤有机碳和全氮含量,三者均服从正态分布($P>0.05$)。由图2可知:土壤有机碳和全氮含量随纬度的升高而显著降低($P<0.01$),土壤全磷含量未表现出显著的纬度变化趋势。

3.2 土壤碳氮比、碳磷比、氮磷比及其纬度变化

从表2还看出:土壤碳氮比、碳磷比、氮磷比的平均值分别为14.18、47.01、3.59,变异系数分别为33.7%、38.5%、47.4%,土壤碳氮比的空间变异性低于土壤碳磷比和氮磷比,三者均服从正态分布($P>0.05$)。由图2还可知:土壤碳氮比随纬度的升高而显著增大($P<0.05$),但碳磷比和氮磷比均随纬度的增加而显著减小($P<0.01$)。

表 2 土壤有机碳、全氮、全磷含量及其生态化学计量学特征

Table 2 Soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus contents and their ecological stoichiometry

指标 Indicator	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	变异系数 Coefficient of variation/%	正态性检验 Normality test
有机碳 Organic carbon/(g·kg ⁻¹)	7.30	27.01	16.02±6.80	42.5	0.423
全氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	0.49	2.31	1.22±0.62	50.4	0.505
全磷 Total phosphorus/(g·kg ⁻¹)	0.25	0.70	0.35±0.09	24.7	0.044
碳氮比 C:N ratio	9.65	33.29	14.18±4.78	33.7	0.090
碳磷比 C:P ratio	15.26	72.08	47.01±18.09	38.5	0.449
氮磷比 N:P ratio	1.02	6.84	3.59±1.70	47.4	0.807

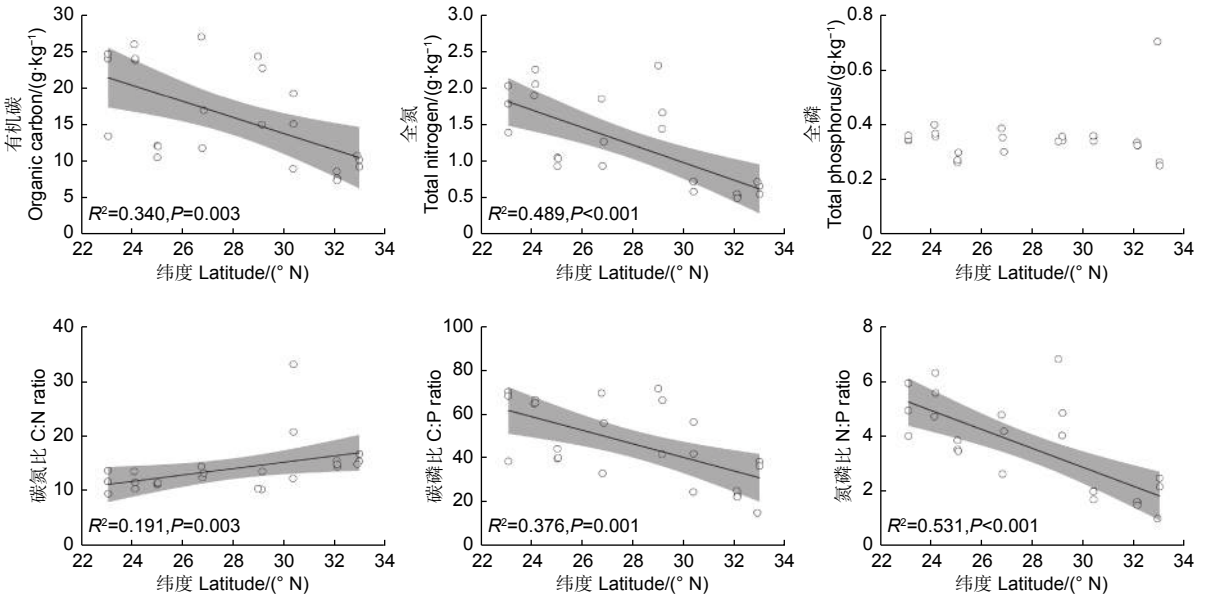


图 2 土壤有机碳、全氮、全磷含量及其生态化学计量学特征随纬度的变化

Fig. 2 Latitudinal variations of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus contents and their ecological stoichiometry

3.3 土壤有机碳、全氮、全磷含量及其生态化学计量学特征与环境因子的相关性

相关分析结果 (表 3) 表明: 土壤有机碳含量与年均气温 ($P<0.01$)、年均降水量 ($P<0.01$) 和胸径 ($P<0.05$) 呈显著正相关, 与 pH 值 ($P<0.01$) 呈显著负相关; 土壤全氮含量与年均气温 ($P<0.01$)、年均降水量 ($P<0.01$)、胸径 ($P<0.01$) 和黏粒含量 ($P<0.05$) 呈显著正相关, 与林分年龄 ($P<0.01$)、林分密度 ($P<0.05$) 和 pH 值 ($P<0.05$) 呈显著负相关。土壤碳磷比和氮磷比与年均气温 ($P<0.01$)、年均降水量 ($P<0.01$)、胸径 ($P<0.05$) 和黏粒含量 ($P<0.05$) 呈显著正相关, 与林分年龄 ($P<0.05$) 呈显著负相关; 土壤碳磷比与 pH 值 ($P<0.01$) 和土壤氮磷比与林分密度 ($P<0.05$) 呈显著负相关 (表 3)。另外, 土壤碳

氮比与林分年龄 ($P<0.05$) 和林分密度 ($P<0.05$) 呈显著正相关, 与年均降水量 ($P<0.01$) 和胸径 ($P<0.05$) 呈显著负相关 (表 3)。

冗余分析结果 (图 3) 表明: 第一和第二排序轴共同解释了 63.8% (两个排序轴解释率分别为 54.6% 和 9.2%) 土壤有机碳、全氮和全磷含量及其生态化学计量学特征的纬度变化, 且土壤有机碳、全氮和全磷含量及其生态化学计量学特征的纬度变化与年均气温 ($P<0.01$)、年均降水量 ($P<0.01$)、林分年龄 ($P<0.01$)、林分密度 ($P<0.05$)、胸径 ($P<0.01$)、土壤 pH 值 ($P<0.01$) 和土壤黏粒含量 ($P<0.05$) 均显著相关。方差分解结果 (图 3) 表明: 气候因子 (年均气温和年均降水量)、林分特征 (年龄、密度和胸径) 及土壤性质 (pH 值和黏粒含量) 总体上解释了 64.8% 土壤

表3 土壤有机碳、全氮、全磷及其生态化学计量学特征与环境因子之间的相关系数

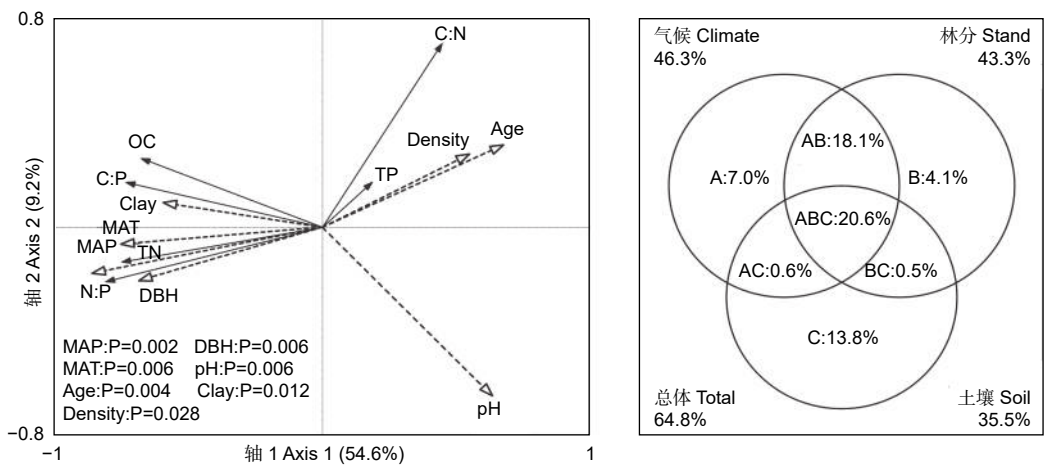
Table 3 Correlation coefficient between soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and their ecological stoichiometry and environmental factors

项目 Item	有机碳 Total carbon	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	碳氮比 C : N	碳磷比 C : P	氮磷比 N : P
年均气温 Mean annual temperature	0.528**	0.617**	-0.104	-0.323	0.538**	0.627**
年均降水量 Mean annual precipitation	0.551**	0.691**	-0.183	-0.444*	0.598**	0.737**
林分年龄 Stand Age	-0.333	-0.518**	0.381	0.507*	-0.443*	-0.604**
林分密度 Stand density	-0.302	-0.467*	0.085	0.421*	-0.330	-0.497*
胸径 Diameter at breast height	0.453*	0.596**	-0.056	-0.426*	0.453*	0.609**
pH	-0.600**	-0.405*	-0.006	-0.265	-0.570**	-0.356
黏粒含量 Clay content	0.398	0.418*	-0.252	-0.082	0.459*	0.472*

注Note: * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

碳、氮、磷及其生态化学计量学特征的纬度变化, 相对解释率大小表现为气候因子 (46.3%) > 林分特征 (43.3%) > 土壤性质 (35.5%)。气候因子、林分特征和土壤性质的共同作用对土壤碳、氮、磷及其生态化学计量学特征的纬度变化相对

解释率最高 (20.6%), 其次是气候因子与林分特征的交互作用 (18.1%), 气候因子或林分特征与土壤性质的共同作用相对解释率较低 (0.6% 或 0.5%) (图3)。



注: 气候 (A) 包括年均气温 (MAT) 和年均降水量 (MAP), 林分 (B) 包括年龄 (Age)、密度 (Density) 和胸径 (DBH), 土壤 (C) 包括 pH 值和黏粒含量 (Clay)。A、B 和 C 是单一效应, AB、AC、BC 和 ABC 是共同效应。OC 为有机碳, TN 为全氮, TP 为全磷。

Notes: Climatic factors included mean annual temperature (MAT) and mean annual precipitation (MAP), stand characteristics included age, density and diameter at breast height of 1.3m (DBH), and soil variables included pH value and clay content. The capital letters of A, B and C in the right figure represented the single effect, and AB, AC, BC and ABC represented the intersection effects. OC: organic carbon; TN: total nitrogen; TP: total phosphorus.

图3 土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征与环境因子的冗余分析排序图 (左) 和方差分解韦恩图 (右)

Fig. 3 Ordination biplot (left) based on redundancy analysis and Venn diagrams (right) based on variation partitioning analysis of soil C-N-P contents and stoichiometry and environmental factors

4 讨论

4.1 环境因子对土壤有机碳、全氮、全磷含量纬度变化的影响

本研究发现, 亚热带地区马尾松人工林土壤有机碳和全氮含量随纬度的升高而降低 (图2), 这

与我国东部天然林土壤有机碳和全氮含量的纬度变化趋势不一致^[13]。这种差异可能与不同空间尺度生态系统养分循环特征有关^[13-14]。土壤有机碳主要取决于土壤有机质含量和凋落物的分解, 土壤氮主要来源于凋落物分解与合成的有机质或大气氮沉降^[21]。本研究中, 年均气温、年均降水量、林分年龄、林

分密度、胸径大小、土壤 pH 值、土壤黏粒含量与土壤有机碳和全氮含量密切相关(表 3)。纬度影响温度和降水,通常温度和降水量随着纬度的升高而降低(表 1)。低纬度地区高温湿润的环境加速凋落物碳和氮养分循环过程,更有利于有机质积累^[22-23];而在高纬度地区,植物生产力以及温度和降水的降低,导致凋落物产量及其分解率也不断降低^[24-25],致使输送到土壤中凋落分解合成的有机质含量降低。调查发现,马尾松人工林凋落物现存量均随纬度的增加而增加。研究表明,马尾松凋落物分解率^[25]和林分生产力^[26]及本研究地带的大气氮沉降^[27]均随纬度升高而降低。这些应该是马尾松人工林土壤有机碳和全氮含量从东南向西北降低的主要原因。另外,林分年龄和土壤类型是影响土壤有机碳和全氮含量的重要因素,马尾松林下土壤有机碳和全氮含量在林分年龄组间差异显著^[19-20],但在土壤类型间差异不显著($P>0.05$)。土壤颗粒越小,其比表面积越大,吸附的有机物质也越多^[28],导致土壤有机碳和全氮含量与土壤黏粒含量正相关(表 3)。实际上,气候因子(年均气温和年均降水量)、林分特征(年龄、密度和胸径)和土壤性质(pH 值和黏粒含量)主要通过交互作用影响马尾松林土壤有机碳和全氮含量的纬度变化(图 3)。

亚热带地区马尾松人工林土壤全磷含量的纬度格局不明显(图 2),这与其他研究结果不同^[10-14]。磷是一种沉积性元素,在土壤中迁移率很低,主要来源于母质风化,并受气候、植被和土壤性质等一系列因素的影响^[21]。气候通过风化(温度)和淋溶(降雨)作用来影响(负向作用)土壤磷含量,高温和多雨通常加快土壤的风化和磷元素的淋溶^[29],因此,热带和亚热带地区土壤磷含量通常较低且空间分布均匀^[30-32]。另外,土壤类型也是影响土壤磷含量的重要因素,如黄土高原地区土壤磷含量的纬度变化格局就受土壤类型差异的影响^[10-12]。本研究区域从东南至西北土壤类型依次为红壤—黄壤—黄棕壤,但以红壤和黄壤为主(表 1),土壤全磷含量在红壤与黄壤间无显著差异($P>0.05$)。研究发现,土壤磷含量^[30-31]及土壤磷释放(淋溶)量^[33]在亚热带地区没有显著的纬度变化。这些结果表明,马尾松人工林土壤全磷含量的空间变异性小(表 2)和无显著的纬度变化(图 2)。然而,本研究中所选择的环境变量对马尾松人工林土壤全磷

含量均没有显著影响(表 3),是否有其他环境因子(如母质)对其有显著影响仍需研究。

4.2 环境因子对土壤碳氮比、碳磷比、氮磷比纬度变化的影响

尽管土壤有机碳和全氮含量的空间变异性较大(表 2),但二者空间格局的一致性(图 2)和显著正相关($r=0.888, P<0.01$),导致土壤碳氮比较稳定,这与黄土高原^[10-12]和全国^[31-32]土壤碳氮比相对稳定的结果一致。有研究认为,土壤全氮含量在纬度梯度上减小的速率大于土壤有机碳,会造成土壤碳氮比随纬度的升高而增加^[10,12]。本研究中,土壤全氮含量(0.12)随纬度升高而降低的速率(斜率)小于土壤有机碳含量(1.10),土壤碳氮比与土壤全氮含量显著负相关($r=-0.460, P<0.05$),导致土壤碳氮比随着纬度的升高而显著增加(图 2)。另外,年均降水量和林分年龄通过影响土壤全氮含量,显著影响土壤碳氮比的纬度变化(表 3)。

土壤碳磷比和氮磷比随着纬度升高而直线递减(图 2),这主要是由土壤全磷含量的纬度变化幅度小且稳定,而土壤有机碳和全氮含量的纬度变化受环境因素影响而显著降低所致,其他研究^[10-13,31]也有类似结果。相关分析表明,土壤碳磷比和氮磷比与年均气温、年均降水量、林分年龄、土壤黏粒含量显著相关(表 3),与土壤有机碳和全氮含量也显著相关($r=0.819\sim 0.966, P<0.01$)。土壤有机碳、全氮含量是决定土壤碳磷比、氮磷比的主要因素,其他环境因子主要通过影响土壤有机碳和全氮含量间接影响土壤碳磷比和氮磷比^[11]。总体来看,环境因子对亚热带马尾松人工林土壤碳氮磷含量及其生态化学计量学特征纬度变化的相对解释率表现为气候因子(46.3%)>林分特征(43.3%)>土壤性质(35.5%),这些因素的共同效应大于单一效应(图 3)。但冗余分析和方差分解分析表明,气候、土壤和林分因子对马尾松林土壤碳、氮、磷及其生态化学计量学特征的纬度变化总体解释率分别为 63.8% 和 64.8%,因此,这些因素相互作用的途径以及其他环境因子的影响有待于进一步研究和验证。

土壤氮和磷是植物生长最需要的大量元素和最常见的限制性元素^[1-5],有机质的分解速率往往决定着土壤有效磷含量的高低,土壤磷有效性越高,土壤碳磷比和氮磷比反而越低^[6]。因此,本研究中,土壤碳氮比和氮磷比的纬度格局说明马尾松人

工林土壤磷有效性随着纬度的升高而增加。调查发现,马尾松人工林土壤有效磷含量随纬度的升高而增加。一般认为,土壤磷有效性较低的区域,磷元素是植被生长的限制因子^[2,4];但在本研究地带,马尾松生长是否受土壤磷元素的限制,还得结合磷循环与生长和生产力以及磷添加试验对马尾松生长的影响等进行进一步研究。

5 结论

亚热带马尾松人工林土壤有机碳和全氮含量以及碳磷比和氮磷比随纬度升高而显著降低,土壤碳氮比随纬度升高而显著增大,土壤全磷无显著纬度格局。年均气温、年均降水量、林分年龄、林分密度、胸径大小、土壤pH值、土壤黏粒含量是土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征纬度变化的驱动因子。环境因子的相对贡献率为气候因子>林分特征>土壤性质,这些因素的共同效应大于单一效应。

参考文献:

[1] 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.

[2] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, *et al.* Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems[J]. Ecology Letters, 2007, 10(12): 1135-1142.

[3] 贺金生,韩兴园.生态化学计量学:探索从个体到生态系统的统一化理论[J].植物生态学报,2010,34(1):2-6.

[4] Sardans J, Rivas-Ubach A, Peñuelas J. The C:N:P stoichiometry of organisms and ecosystems in a changing world: A review and perspectives[J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2012, 14(1): 33-47.

[5] 程瑞梅,王娜,肖文发,等.陆地生态学生态化学计量学研究进展[J].林业科学,2018,54(7):130-136.

[6] 王绍强,于贵瑞.生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J].生态学报,2008,28(8):3928-3947.

[7] 盛炜彤.关于我国人工林长期生产力的保持[J].林业科学研究,2018,31(1):1-14.

[8] Zemunik G, Davies S J, Turner B L. Soil drivers of local-scale tree growth in a lowland tropical forest[J]. Ecology, 2018, 99(12): 2844-2852.

[9] 冯德枫,包维楷.土壤碳氮磷化学计量比时空格局及影响因素研究进展[J].应用与环境生物学报,2017,23(2):400-408.

[10] 张向茹,马露莎,陈亚南,等.黄土高原不同纬度下刺槐林土壤生态化学计量学特征研究[J].土壤学报,2013,50(4):818-825.

[11] 李婷,邓强,袁志友,等.黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征[J].环境科学,2015,36(8):2988-2995.

[12] 曾全超,李鑫,董扬红,等.陕北黄土高原土壤性质及其生态化

学计量的纬度变化特征[J].自然资源学报,2015,30(5):870-879.

[13] 蒋俊,王晓学,屠乃美,等.中国东部土壤生物化学性质空间分异及质量评价[J].生态环境学报,2014,23(4):561-567.

[14] 妥彬,田文斌,郭超,等.中国东部海岛森林和灌丛土壤碳氮磷养分库的纬度变化[J].应用生态学报,2019,30(8):2631-2638.

[15] 国家林业和草原局.中国森林资源报告(2014-2018)[M].北京:中国林业出版社,2019.

[16] 喻林华,方晰,项文化,等.亚热带4种林分类型枯落物层和土壤层的碳氮磷化学计量特征[J].林业科学,2016,52(10):11-21.

[17] 张亚冰,吕文强,易武英,等.贵州月亮山5种森林类型土壤生态化学计量特征研究[J].热带亚热带植物学报,2016,24(6):617-625.

[18] 秦娟,孔海燕,刘华.马尾松不同林型土壤C、N、P、K的化学计量特征[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2016,44(2):68-76,82.

[19] 雷丽群,卢立华,农友,等.不同林龄马尾松人工林土壤碳氮磷生态化学计量特征[J].林业科学研究,2017,30(6):954-960.

[20] 向云西,陈胜魁,潘萍,等.马尾松叶片-凋落物-土壤的碳氮磷化学计量特征[J].森林与环境学报,2019,39(2):120-126.

[21] Chapin F S, Matson P A, Vitousek P M. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology (2nd Edition) [M]. New York: Springer Science & Business Media, USA, 2011.

[22] Tian J, He N P, Hale L, *et al.* Soil organic matter availability and climate drive latitudinal patterns in bacterial diversity from tropical to cold temperate forests[J]. Functional Ecology, 2018, 32(1): 61-70.

[23] Wang C H, Wang N N, Zhu J X, *et al.* Soil gross N ammonification and nitrification from tropical to temperate forests in eastern China[J]. Functional Ecology, 2018, 32(1): 83-94.

[24] 何东进,何小娟,洪伟,等.森林生态系统粗死木质残体的研究进展[J].林业科学研究,2009,22(5):715-721.

[25] 宋新章,江洪,马元丹,等.中国东部气候带凋落物分解特征—气候和基质质量的综合影响[J].生态学报,2009,29(10):5219-5226.

[26] Huang X, Huang C B, Teng M J, *et al.* Net primary productivity of *Pinus massoniana* dependence on climate, soil and forest characteristics[J]. Forests, 2020, 11(4): 404.

[27] Zhu J X, Wang Q F, He N P, *et al.* Imbalanced atmospheric nitrogen and phosphorus depositions in China: implications for nutrient limitation[J]. Journal of Geophysical Research:Biogeosciences, 2016, 121(6): 1605-1616.

[28] Gérard F. Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils – A myth revisited.[J]. Geoderma, 2016, 262: 213-226.

[29] Hou E Q, Chen C R, Luo Y Q, *et al.* Effects of climate on soil phosphorus cycle and availability in natural terrestrial ecosystems[J]. Global Change Biology, 2018, 24(8): 3344-3356.

[30] Zhang C, Tian H Q, Liu J Y, *et al.* Pools and distribution of soil phosphorus in China[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19(1): GB1020(1-8).

[31] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, *et al.* Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1): 139-151.

[32] Chen L Y, Li P, Yang Y H. Dynamic patterns of nitrogen: phosphorus ratios in forest soils in China under changing environment[J]. *Journal of Geophysical Research:Biogeosciences*, 2016, 121(9): 2410-2421.

[33] Liu X, Sheng H, Jiang S Y, *et al.* Intensification of phosphorus cycling in China since the 1600s[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(10): 2609-2614.

Latitudinal Variations of Soil C-N-P Stoichiometry in *Pinus massoniana* (Lamb.) Plantations

JIAN Zun-ji¹, NI Yan-yan¹, XU Jin¹, ZENG Li-xiong^{1,2},
LEI Lei^{1,2}, ZHU Jian-hua^{1,2}, XIAO Wen-fa^{1,2}

(1. Institute of Forest Ecology, Environment and Nature Conservation, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China; 2. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] To explore the latitudinal variations of soil organic carbon (C), total nitrogen (N) and total phosphorus (P) and their ecological stoichiometry in *Pinus massoniana* (Lamb.) plantations of subtropical China. [Method] Soil samples of 0-20 cm layer were collected from the pure plantations in eight sites ranging from southeast to northwest to determine the contents of soil organic C, total N and total P. The variations of soil C-N-P contents and their ecological stoichiometry along the latitudinal gradient were explored by regression analysis. The relationships of climatic factors (mean annual temperature, MAT and mean annual precipitation, MAP), stand characteristics (age, density and DBH) and soil key properties (pH value and clay content) with soil C-N-P contents and stoichiometry were examined by Pearson's correlation analysis and redundancy analysis. Besides, the relative contribution rates of these environmental factors to the variations in soil C-N-P contents and stoichiometry were analyzed using the variation partitioning analysis. [Result] The average contents of soil organic C, total N and total P were 16.02, 1.22, and 0.35 g·kg⁻¹, respectively; and the average ratios of soil C:N, C:P and N:P were 14.18, 47.01, and 3.59, respectively. Both soil organic C and total N decreased significantly ($P<0.01$) with increasing latitude, while no obvious spatial pattern of total P was found. Soil C:N significantly increased ($P<0.05$) while soil C:P and N:P decreased ($P<0.01$) over latitude. The soil organic C and total N were significantly positively correlated with MAT, MAP, and diameter at breast height (DBH) ($P<0.05$), but negatively correlated with soil pH value ($P<0.05$). The soil C:P and N:P were significantly positively correlated with MAT, MAP, DBH, and soil clay content ($P<0.05$), while negatively correlated with stand age ($P<0.05$). Climatic factors, stand characteristics and soil key properties totally explained 63.8% of latitudinal variations in soil organic C, total N, total P and soil C:N, C:P, N:P, with characteristics of climatic factors (46.3%) > stand characteristics (43.3%) > soil properties (35.5%). [Conclusion] Soil C:N, C:P and N:P in *P. massoniana* (Lamb.) plantations follows obvious latitudinal patterns, which are driven by MAT, MAP, stand age, stand density, DBH, soil pH value, and soil clay content. Importantly, the interaction effects of these environmental factors are greater than the single effects.

Keywords: soil C-N-P content; ecological stoichiometry; latitudinal gradient; plantation; *Pinus massoniana*