

亚热带红壤侵蚀区马尾松针叶生态化学计量特征

张欣影¹, 宁秋蕊^{1,2}, 李守中^{1,2}, 姜良超^{1,2}, 刘溶¹, 张昊泽¹, 陶晶晶¹

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007)

摘要: 为了解亚热带红壤侵蚀区马尾松(*Pinus massoniana*)针叶碳(C)、氮(N)、磷(P)化学计量特征, 在长汀河田地区选取12个样点并采集四个叶龄阶段马尾松针叶作为研究对象, 测定其C、N、P含量并分析C:N:P化学计量特征。结果表明: (1) 叶片中C、N、P的变化范围分别为 $(482.15 \pm 9.35) \sim (512.7 \pm 6.56) \text{ mg/g}$, $(7.35 \pm 0.75) \sim (10.49 \pm 1.34) \text{ mg/g}$, $(0.21 \pm 0.04) \sim (0.71 \pm 0.21) \text{ mg/g}$ 。不同叶龄阶段的C、N、P含量有显著差异。C随叶龄增长整体含量增长幅度较小, 变异系数仅为2.8%; N、P绝对含量较低, 在叶片生长后期含量显著下降($p < 0.05$)。 (2) C:N:P计量比变化与叶龄有关。N/P变化范围为 $(15.42 \pm 3.08) \sim (36.43 \pm 8.08)$, N/P随叶龄增加而逐渐增大, 说明该地区马尾松养分限制因素的变化与叶龄有显著关系, 随叶龄的增长受P限制表现更为突出。 (3) 马尾松针叶N、P含量有极显著正相关关系, C、P含量存在显著负相关关系, N、P元素间协同变化显著。本研究初步阐明了马尾松针叶不同叶龄阶段C、N、P化学计量特征及其变化规律, 为深刻了解亚热带红壤侵蚀区先锋树种马尾松的养分利用特征和机制提供理论基础。

关键词: 马尾松; 叶龄; 化学计量特征; 亚热带

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)02-0156-06

Stoichiometric Characteristics of *Pinus massoniana* Plantation in the Subtropical Red Soil Erosion Region

ZHANG Xinying¹, NING Qiurui^{1,2}, LI Shouzhong^{1,2}, JIANG Liangchao^{1,2},
LIU Rong¹, ZHANG Haoze¹, TAO Jingjing¹

(1. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

2. Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China)

Abstract: In order to understand the distribution pattern of carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P) and the stoichiometric characteristics of *Pinus massoniana* in the erosion-prone areas, we selected needles of four different ages from a masson pine plantation (12 sampling sites), and analyzed their C:N:P contents and characteristics of C:N:P stoichiometry. The results showed that the average contents of C, N and P in leaves ranged from 482.15 ± 9.35 to $512.7 \pm 6.56 \text{ mg/g}$, from 7.35 ± 0.75 to $10.49 \pm 1.34 \text{ mg/g}$, and from 0.21 ± 0.04 to $0.71 \pm 0.21 \text{ mg/g}$, respectively. With an increase of needle age, the C content increased slowly and the coefficient of variation was 2.8%, the N, P contents decreased significantly ($p < 0.05$). Leaf age had the significant impact on the C, N, and P contents. Ratios of N to P ranged from 15.42 ± 3.08 to 36.43 ± 8.08 . The ratio of N to P increased gradually with the increase of leaf age. In the region where masson pine was more severely limited in P, leaf age was correlated with the change of nutrient limiting factors. While the P content was positively correlated with N content in the needles of *Pinus massoniana*, there was the significant negative correlation between C and P contents. The synergy changes between N and P contents were significant. This study on C, N, P stoichiometry and its variation in the pine needles of different ages provided the theoretical basis for the better understanding of the nutrient utilization characteristics and mechanisms in the pioneer plants in areas subject to water and soil losses.

Keywords: *Pinus massoniana*; leaf age; stoichiometric characteristics; subtropical

生态化学计量学是一门结合生态学和化学计量学,研究生物系统能量平衡和多重化学元素平衡的科学,能够进一步分析揭示生物地球化学循环中的生态交互作用^[1-3]。碳(C)、氮(N)、磷(P)元素是重要的生命元素,它们是地球上所有生命化学组成的基础。C是构成植物体内干细胞的最主要的元素,其含量反映了植物对环境养分状态的响应,N,P元素是细胞内蛋白质和遗传物质组成的必需元素,也是自然陆地生态系统中限制植物生长的主要营养元素^[4],他们的化学计量比则与植物养分利用效率^[5]、限制性生态因子变化^[6-8]、植物生长速率^[9]有关,是决定群落结构和功能的关键性指标。通过调节元素内稳态机制和化学计量可塑性,来获得相对稳定的化学计量比^[10],可以满足植物适应环境变化的代谢需求。因此,探索C,N,P元素在植物中的化学计量比十分重要。

植物叶片占总体生物量比例较小,但因其养分储量大,在植物生长发育机制中起到重要作用,关于植物叶片养分化学计量特征的研究已成为生态化学计量研究领域中的热点^[10]。现有的研究表明,受个体大小^[10]、林龄^[11-12]、生活型^[13-14]、环境因子(土壤养分^[6-7,15]、气候^[15-17]、坡向^[6,18]和季节变化^[19-20])等因素的影响,全球陆地生态系统植物叶片的C,N,P含量及其生态化学计量比在区域尺度^[21]以及较小地点的不同生境都存在较大的变异,这些差异主要和研究区的水热供应条件有关。结合众多研究,Reich和Oleksyn^[22]提出温度—生物地球化学假说(temperature-biogeochimistry hypothesis, TBH),认为全球植被叶片N/P随温度降低、纬度增加而显著减少。TBH假说在大多数研究中得到了印证,王晶苑^[15]等和任书杰^[14]等人的研究也支持植物叶片N/P随纬度增加温度降低而减小。但杨惠敏等^[23]指出,西藏高寒草原、新疆山地草原等特殊的气候区域,温度降水的不同限制,可能造成C:N:P的特异变化,对环境产生差异响应。但这些特殊区域的研究大多集中在高寒干旱地区植被,对亚热带水土流失区先锋种群关注较少。

南方亚热带山地丘陵区是我国目前仅次于黄土高原的严重流失区,也是自然生态环境被破坏与退化非常严重的区域之一^[24]。这些地区人口稠密,人为的严重干扰,破坏了大量的森林资源,生态系统呈现不断的退化性的演替,侵蚀退化区的水土流失也带走大量土壤,使土壤结构遭到严重破坏,养分和黏粒物质减少,土壤的蓄水保肥能力极低,造成严重的养分胁迫,生态环境异常脆弱。在恢复演替过程中,先锋种群马尾松(*Pinus massoniana*)为主的针叶林占据了绝对优势^[25]。马尾松属亚热带常绿针叶乔木,具

有耐干旱、耐贫瘠的抗逆特点,因而常被用作我国南方水土流失区生态重建的先锋树种大面积栽植。而在养分严重胁迫的退化地上,马尾松种群出现的各种现象如生长缓慢,严重胁迫带来的小老头松等,深刻影响着生态恢复的速度和水平。因此研究先锋种群马尾松的叶片C,N,P生态化学计量特征,探索其在生态恢复过程中的生态指示作用,能够为进一步了解亚热带红壤侵蚀区先锋植物马尾松的养分利用特征和内稳态机制提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省西部的长汀县河田镇(25°33'—25°48'N, 116°18'—116°31'E),海拔238 m,属中亚热带湿润季风气候,年均气温17.5℃,年平均降水量1737 mm。严重的水土流失造成土壤极度贫瘠、氮磷钾等养分含量低、土壤持水能力差等特点,夏季短期干旱时还会产生60℃以上的地表温度。当地的地带性植被为中亚热带常绿阔叶林,以樟科、壳斗科、山茶科、蔷薇科等为主^[26]。乔木以马尾松为主,伴有稀疏芒萁草本植物,植物盖度25%左右,是典型的极强度退化生态系统水土流失区^[27]。

1.2 样品采集与处理

在河田镇质地均一的样地上,沿着统一等高线,随机采集年龄相近的成年样树12株。采集马尾松新生叶(I)、壮年叶(II)、衰老叶(III)、凋落叶(IV)四个叶龄阶段的马尾松针叶各100 g。其中:新生叶阶段(I),为3个月以内的树冠顶芽嫩叶;壮年叶阶段(II),为当年生马尾松针叶颜色偏浅绿部分,主要取叶簇中部的松针;衰老叶阶段(III),为2 a生针叶颜色偏深绿部分,取松枝叶簇下部的针叶;凋落叶阶段(IV),指已经脱离枝条但未进入分解状态的新凋落针叶。为避免冠层高度、方位对针叶养分含量产生影响,本文采集树冠中部四个方向的针叶混合样以代表整个冠层。

1.3 元素测定

样品经105℃杀青10 min,然后65℃烘干至恒重。粉碎并过100目筛后,密封保存待测。叶片碳、氮含量采用CHNOS元素分析仪(Elemental Analyzer Vario EL III,德国)测定,植物样品消煮($H_2SO_4-HClO_4$)后采用连续流动分析仪(SKALAR SAN++ ,荷兰)对磷含量进行测定。

1.4 数据处理与分析

采用SPSS 19.0进行相关统计分析,Origin Pro 8软件作图。采用单因素方差分析和最小显著差异法LSD检验各组数据间的显著差异。

2 结果与分析

2.1 马尾松针叶 C, N, P 含量的叶龄动态特征

三种元素随叶龄的变化表现出不同的规律特征。马尾松针叶各叶龄阶段 C 平均含量为 $(497.19 \pm 13.74) \text{ mg/g}$, 随着叶龄的增长 C 呈现不断累积的趋势, 虽然在 IV 阶段达到峰值 $(512.7 \pm 6.56) \text{ mg/g}$, 但

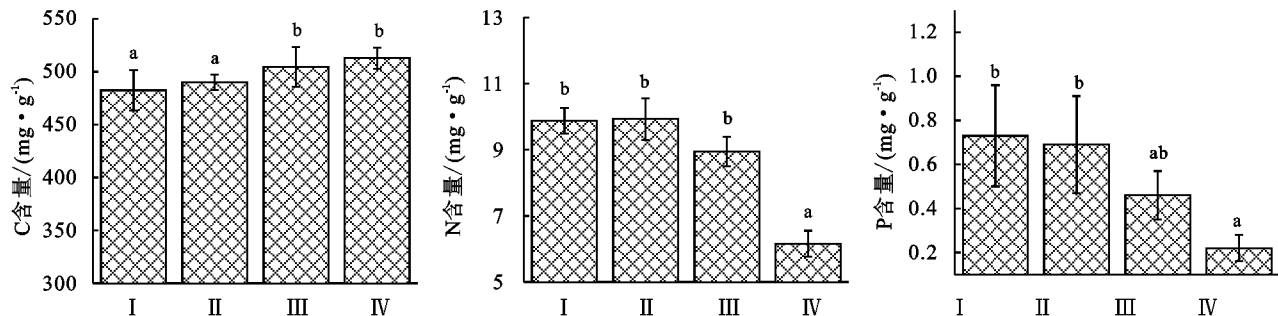


图 1 不同叶龄阶段 C, N, P 元素的含量变化

N 平均含量为 $(9.49 \pm 1.61) \text{ mg/g}$, 极大值出现在 II 阶段为 $(10.49 \pm 1.34) \text{ mg/g}$, 在 I—III 阶段中未表现出显著变化, 从 III 阶段开始出现大幅度下降, IV 阶段 N 含量与 I, II, III 阶段具有显著差异 ($p < 0.05$), IV 阶段含量降为 $(7.35 \pm 0.75) \text{ mg/g}$, 是峰值含量的 70%。最大变异系数与极大值同步出现在 II 阶段, 为 12.8%, 四阶段平均变异系数达到 17%。

P 平均含量为 $(0.51 \pm 0.25) \text{ mg/g}$, 在 I 阶段 $(0.71 \pm 0.21) \text{ mg/g}$ 出现最大值, 从 II 阶段开始存在一个较长时间段的显著下降过程 ($p < 0.05$), IV 阶段含量 $(0.21 \pm 0.04) \text{ mg/g}$ 仅剩为峰值的 29.5%, 其中 III 到 IV 阶段降幅最大, 50% 的损失发生在这个阶段。4 个叶龄阶段中, 最大变异系数出现在 I 阶段, 为 29.6%, 4 个阶段平均的变异系数高达 49%, 远高于 C, N 元素, 这可能与 P 元素的绝对含量较低有关。

2.2 马尾松针叶化学计量比叶龄变化特征

马尾松针叶 C/N, C/P 整体均值为 54.22 ± 11.28 , 1296.14 ± 788.43 , 随着叶龄的增加比值不断增大, 最大值出现在 IV 阶段为 70.63 ± 8.52 , 2441.4 ± 467.37 , 方差分析表明, 前三个阶段, 叶片 C/N, C/P 变化关系不显著 ($p > 0.05$), IV 阶段化学计量比值存在显著增加 ($p < 0.05$)。其中, C/P 的平均变异系数为 60.8%, 高于 C/N 20.8% 平均变异系数, 说明 C/P 在叶龄变化的四个阶段中变异程度较高。

马尾松针叶的 N/P 整体均值为 22.49 ± 9.71 , 在初始 I 阶段出现最小值为 15.42 ± 3.08 , 峰值出现在 IV 阶段为 36.43 ± 8.08 , 随叶龄增加比值不断增大。IV 阶段马尾松针叶的 N/P 显著高于 I, II, III 阶段 ($p < 0.05$) (表 1)。

整体含量的增加仅是 I 阶段的 1.06 倍, 主要的 C 积累出现在 I 阶段之前。就四个生长阶段而言, I, II 阶段针叶 C 含量与 III, IV 的含量存在差异显著 ($p < 0.05$), 最大累积速率出现在 II, III 阶段, 这表明有机质在生长后期阶段出现相对较强的累积。在叶片生长的四个阶段, 变异系数较小仅有 2.8%, 最大变异系数出现在 I 阶段, 为 1.9%。

2.3 马尾松针叶 C, N, P 相关关系

从 pearson 相关分析结果可以看出, 马尾松针叶 C 含量和 N 含量相关性不显著 ($p > 0.05$)。马尾松针叶 C 含量和 P 含量呈现显著负相关 ($p < 0.05$)。N, P 含量的线性 N 含量和 P 含量极显著正相关 ($p < 0.01$)。因为 $R_b^2 < R_c^2$, 所以马尾松 N, P 含量的相关关系强于 C, P 含量的相关关系。综合比较可以发现, N, P 元素呈现出较好的协同变化趋势。

3 讨论

3.1 马尾松针叶 C, N, P 养分含量影响因素

亚热带红壤侵蚀区马尾松针叶 C 元素在 I 阶段之前就完成了主要的累积, 四个叶龄阶段的变异系数较低, 这是因为 C 是构成植物体内干细胞的最主要的元素, 提供了结构基础, 占生物量干重的 50% 左右^[28], 而在 I 阶段新生叶生成之后, 植物叶片已经基本完成基础生物量的生产, 生物量在四个叶龄阶段中, 改变较小。随叶龄的增加, C 元素在生长过程中仍不断累积, 含量显著增加 ($p < 0.05$), 可能是在生长过程中, 植物通过光合作用同化积累 C, 不断形成干物质, 提供各种生理生态过程底物和能量。III, IV 阶段马尾松针叶 C 含量显著高于 I, II 阶段, 表明有机质在生长后期阶段出现相对较强的累积, 马尾松针叶的固碳能力随叶龄增加有所增加。另一方面, 长汀马尾松针叶 C 平均含量 $(497.19 \pm 13.74 \text{ mg/g})$ 接近其他地区同类林的平均水平 (亚热带马尾松人工林 C 平均含量为 $522.59 \pm 15.97 \text{ mg/g}$ ^[15]), 说明了相同生活型的植物, 有相对稳定的 C 含量, 受到外部环境的影响较小。

表 1 不同叶龄阶段针叶养分化学计量比及变异系数

叶龄	C		N		P		C/N	CV/ %	C/P	CV/ %	N/P	CV/ %
	含量/ (mg·g ⁻¹)	CV/ %	含量/ (mg·g ⁻¹)	CV/ %	含量/ (mg·g ⁻¹)	CV/ %						
	(mg·g ⁻¹)	%	(mg·g ⁻¹)	%	(mg·g ⁻¹)	%						
I	482.15±9.35a	1.9	10.27±0.67b	6.5	0.71±0.21b	29.6	47.15±3.08a	6.5	683.9±169.04a	24.7	15.42±3.08a	20.0
II	490.28±4.19a	0.9	10.49±1.34b	12.8	0.68±0.19b	27.9	47.47±5.65a	11.9	723.65±172.19a	23.8	16.07±2.46a	15.3
III	503.65±7.14b	1.4	9.86±1.12b	11.4	0.46±0.1ab	21.7	51.64±4.85a	9.4	1094.89±218.06a	19.9	22.04±3.23a	14.7
IV	512.7±6.56b	1.3	7.35±0.75a	10.2	0.21±0.04a	19.1	70.63±8.52b	12.1	2441.4±467.37b	19.1	36.43±8.08b	22.2
均值	497.19±13.74	2.8	9.49±1.61	17.0	0.51±0.25	49	54.22±11.28	20.8	1296.14±788.43	60.8	22.49±9.71	43.2

注:同一列数值后的不同小写字母代表同一测定指标在 0.05 水平上差异显著。

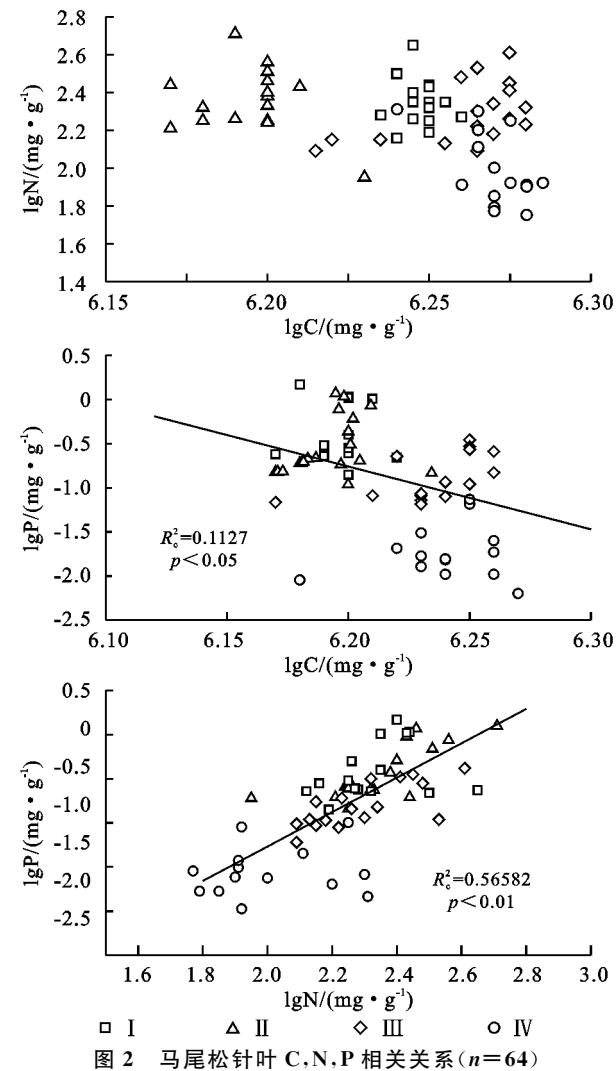


图 2 马尾松针叶 C,N,P 相关关系(n=64)

N,P 是自然陆地生态系统中限制植物生长的主要营养元素^[4],是细胞结构物质组成的必需矿质元素,不同叶龄阶段的 N,P 养分特征,不仅反映了植物自身的生长特性,也是对生境长期适应的结果。研究中,马尾松针叶 N,P 表现出较好的协同趋势,在生长速率较强的叶片生长初期(I,II)出现峰值,这两个阶段生长速率较快,需要大量蛋白质和核酸以满足自身的快速生长,对 N,P 的选择吸收较多。随着叶片的衰老生长速率的降低,呼吸作用不停消耗植物叶片中的碳水化合物、核酸等有机物,N,P 含量逐渐减少。同时,II,III 阶段也是植株开花结果的阶段,这阶段含

量的降低,也可能是参与内循环的可利用元素的重新分布的体现。在凋落期前,N,P 含量均出现了大幅度显著降低($p<0.05$),发生了 30%~50%不同程度的损失,在这个阶段可能发生了养分转移。随叶龄变化的阶段中,N,P 元素呈现出极显著正相关的协同变化($p<0.01$),与叶片形成过程中按比例投入的 N,P 元素^[5]有关。这样的变化趋势,也与 Sterner 的结论叶 C 与 N(P)的负相关性以及叶 N 与 P 的正相关性是高等陆生植物 C,N,P 元素计量的普遍特征的结论相吻合。这种植物在长期进化过程中形成的内稳态机制,能够使自身化学组成在外部环境的变动下,还能让内部环境变化在一个较小的范围波动,维持一种相对恒定的状态^[28],在许多生态系统中,这种内稳态关系,更是种群能够稳定生长发育的有力保障,是植物的最基本的特性之一^[23]。

同时,因为在植物生长过程中,P 元素的缺失速度明显高于 N 元素,这也造成 N,P 元素最大值出现在不同阶段^[4]。研究发现,虽然各叶龄阶段的 N,P 变化趋势存在极显著的正相关关系,但各阶段 N,P 的绝对含量均显著低于江西千烟洲^[15]、和浙江天童^[21]等地的同类林。在植物生长过程中,N 元素的缺乏,可能导致植株矮小,分枝较少;P 元素缺乏时,细胞蛋白质合成受到阻碍,影响细胞分裂,导致其生长缓慢。对比研究发现,长汀马尾松 N,P 含量普遍低于其他地区的原因可能是:(1) 植物的营养含量在一定程度上反映其生境条件,研究区长汀是典型的亚热带红壤侵蚀区,存在较强的土壤流失和水分丢失,可能导致该地区保水保肥能力较差,土壤养分全氮全磷浓度较低(变化范围大致为 0.01~0.05 mg/g,0.05~0.07 mg/g)^[29]。与其他生态系统相比,土壤养分极度贫瘠,可能导致马尾松对养分的吸收减少,造成植物体内养分含量的减少。(2) 与落叶树种相比,常绿树种对贫瘠生境的适应造成了其较低的 N,P 含量。相较落叶树种,常绿树能够通过延长叶寿命来减少养分损失,使其在养分胁迫环境中具有更大的竞争力^[6]。

3.2 针叶养分化学计量比的指示意义

植物叶片 C/N 和 C/P 可表征植物吸收营养所能同化 C 的能力,在一定程度上反映了植物的生长速率^[2]。

本研究中马尾松针叶 C/N, C/P 随着叶龄的增长而增长, I, II, III 阶段无显著差异 ($p > 0.05$), 说明在相同的 N, P 条件下, 叶龄对马尾松叶片碳固定的效率影响不显著。相较同类林来说, 本研究区马尾松 C/N, C/P 显著高于亚热带人工马尾松林 (35.3/512.3)^[15]。这是因为在低营养条件下, 植物的生长缓慢, 较高的 C/N, C/P 可以提高植物对营养的利用率^[11], 较高的 C/N 可能是马尾松对养分胁迫环境的适应。同时, 生长快速的有机体通常需要核糖体快速地合成蛋白质, 通常具有较低的 C/P 值^[4]。而在养分胁迫严重的长汀地区, P 元素含量较低, 生长速率受到严重影响, 较高的 C/P 影响了马尾松林的生长发育, 发育了大面积生长滞缓的马尾松林, 强度侵蚀地区则形成了“小老头松”林。基于这些情况, 在生长相对较为旺盛的 I, II 阶段, 适当施 P 肥, 有助于提高长汀马尾松林的生产力。

植物叶片或生物量中 N/P 是判断环境对植物生长的养分供应状况的重要指标^[7], 反映了土壤养分的供给能力, 被广泛地用来诊断植物个体、群落、生态系统的 N, P 养分限制格局^[4]。研究区域、生长阶段及植物种类的差异都会影响 N/P 临界值的变化。Koerselam 和 Meuleman 研究认为, 植物生长受 N 和 P 限制的 N/P 阈值为 14, 16, 即 $N/P < 14$ 时, 群落水平上的植物生长主要受 N 限制; 当 $N/P > 16$ 时, 植物生长主要受 P 限制; 当 N/P 在 14~16 时, 则受 N 和 P 的共同限制。本研究中, 在 I 阶段时 $14 < N/P < 16$, 表明在马尾松针叶发育的 I 阶段初级生产力受 NP 的共同限制较为严重, II, III 阶段 > 16 , 受 P 元素的限制越来越严重, IV 阶段 N/P 显著高于前三个阶段 ($p < 0.05$), 说明凋落物的分解受到 P 的限制严重, 不易分解^[28]。造成这种变化原因可能有: (1) 在恢复演替过程中, P 元素的损失速度明显高于 N 元素, 再加上 P 元素的周转速度慢且更不易获得, 造成了可供植物吸收的有效 P 不足^[4]。(2) 显著低于全国、全球 P 平均水平^[23]的研究区土壤 P 含量, 限制了植物叶片的 P 含量。(3) 相较于叶片中 N 含量, P 含量与环境因子有更显著的相关性, 具有强烈的纬度梯度变化, P 含量随纬度的降低和减少^[28]。同时符合 TBH 假说^[27], 随纬度的减小叶片 N/P 显著增加, 处于亚热带山地丘陵区的福建长汀相较于北方地区, 也更容易受到 P 的限制。虽然 Koerselam 和 Meuleman 研究中 NP 限制的阈值 14/16, 获得了大多数学者的认同, 但仍有部分学者认为较高的 N/P 意味着受到 N, P 的共同限制^[27], 不同植物可能存在不同的最佳 N/P 值, 所以评价马尾松的最适 N/P/ 还需进一步借助其他辅助手段进行判断。

4 结论

(1) 亚热带红壤侵蚀区马尾松不同叶龄阶段的 C, N, P 含量有显著差异。C 含量积累主要发生在 I 阶段之前, 随叶龄增长整体含量变化较小, 变异系数仅为 2.8%; N, P 绝对含量较低, 在 III—IV 阶段显著减少 ($p < 0.05$), 可能发生养分转移。

(2) 在不同叶龄阶段中, I, II, III 阶段 C/N, C/P 无显著差异, 说明在相同的 N, P 条件下, 叶龄对马尾松叶片碳固定的效率影响不显著。计量比均值显著高于同类林, 说明研究区马尾松生长速率较低。较高的 N/P 说明 P 元素是长汀地区马尾松生长的主要限制因素。马尾松的最适 N/P 有待进一步研究。

(3) 马尾松针叶 C, N, P 元素变化在一定范围内存在协同作用, 体现了植物体内养分元素平衡。其中 C, P 存在显著负相关关系, N, P 存在极显著正相关关系。

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] Fife D N, Nambiar E K, Saur E. Retranslocation of foliar nutrients in evergreen tree species planted in a Mediterranean environment[J]. Tree Physiology, 2008, 28(2): 187-96.
- [3] 贺金生, 韩兴国. 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] 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.
- [5] 曾德慧, 陈广生, 陈伏生, 等. 不同林龄樟子松叶片养分含量及其再吸收效率[J]. 林业科学, 2005, 41(5): 21-26.
- [6] 陈亚南, 马露莎, 张向茹, 等. 陕西黄土高原刺槐枯落叶生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2014, 34(15): 4412-4422.
- [7] 张珂, 何明珠, 李欣荣, 等. 阿拉善荒漠典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征[J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6538-6547.
- [8] 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[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 947-952.
- [9] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 等. 云南普洱季风常绿阔叶林优势物种不同生长阶段叶片碳、氮、磷化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2015, 39(1): 52-62.
- [10] 张蕾蕾, 钟全林, 程栋梁, 等. 刨花楠叶片碳氮磷化学计量比与个体大小的关系[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1928-1934.
- [11] 崔宁洁, 刘小兵, 张丹桔. 不同林龄马尾松人工林碳氮磷分配格局及化学计量特征[J]. 生态环境学报, 2014, 23(2): 188-195.
- [12] 杨会侠, 汪思龙, 范冰, 等. 不同林龄马尾松人工林年凋落量与养分归还动态[J]. 生态学杂志, 2010, 29(12):

- 2334-2340.
- [13] 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.
- [14] 任书杰,于贵瑞,姜春明,等.中国东部南北样带森林生态系统 102 个优势种叶片碳氮磷化学计量学统计特征[J].应用生态学报,2012,23(3):119-124.
- [15] 王晶苑,王绍强,李幼兰,等.中国四种森林类型主要优势植物 C, N, P 化学计量特征[J].植物生态学报,2011,35(6):587-595.
- [16] Han W, Fang J, Guo D, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. New Phytologist, 2005,168(2):377-385.
- [17] 李从娟,徐新文,孙永强,等.不同生境下三种荒漠植物叶片及土壤 C, N, P 的化学计量特征[J].干旱区地理,2014(5):996-1004.
- [18] 潘复静,张伟,王克林,等.典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C : N : P 生态化学计量特征[J].生态学报,2011,31(2):335-343.
- [19] 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 化学计量的季节变化[J].植物生态学报,2010,34(1):23-28.
- [20] Millard P, Grelet G A, Rennenberg H, et al. Nitrogen storage and remobilization by trees: ecophysiological relevance in a changing world. [J]. Tree Physiology, 2010,30(9):1083-1095.
- [21] 阎恩荣,王希华,郭明,等.浙江天童常绿阔叶林、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.
- [22] 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.
- [23] 杨惠敏,王冬梅.草—环境系统植物碳氮磷生态化学计量学及其对环境因子的响应研究进展[J].草业学报,2011,20(2):244-252.
- [24] 谢锦升,杨玉盛,解明曙.亚热带花岗岩侵蚀红壤的生态退化与恢复技术[J].水土保持研究,2004,11(3):154-156.
- [25] 曾从盛.福建典型区生态环境研究[M].北京:中国环境科学出版社,2006.
- [26] 李守中,余丽凡,邹怡静,陈金梅袁宏伟方舟易.长汀侵蚀退化地区生态恢复过程中植被多样性与土壤肥力的变化研究[J].安徽农学通报,2008,14(19):49-51.
- [27] 郑怀舟,朱锦懋,李守中,等.福建长汀土壤严重侵蚀区马尾松树干液流对台风天气的响应[J].亚热带植物科学,2011,40(1):13-17.
- [28] 邢伟,吴昊平,史俏,等.生态化学计量学理论的应用、完善与扩展[J].生态科学,2015,34(1):190-197.
- [29] 赵颖,李守中,林培治,等.长汀水土流失区 5 种主要植物的气体交换和荧光特征比较研究[J].海南师范大学学报:自然科学版,2013,26(4):432-438.

(上接第 155 页)

参考文献:

- [1] 张志才,陈喜,王文,等.贵州降雨变化趋势与极值特征分析[J].地球与环境,2007,35(4):351-356.
- [2] 林鸿州,于玉贞,李广信,等.坡地地质灾害的减灾策略[J].水科学进展,2006,17(4):490-495.
- [3] 田育新,李锡泉,张灿明,等.植被恢复与重建过程中小流域降雨及水沙变化特征研究[J].湖南林业科技,2005,32(6):29-32.
- [4] 李娜,许有鹏,陈爽.苏州城市化进程对降雨特征影响分析[J].长江流域资源与环境,2006,15(3):335-339.
- [5] 张明珠,俞烦,宋新山,等.岷江中上游及青衣江流域近 50 年来降水变化特征分析[J].南水北调与水利科技,2008,6(3):46-53.
- [6] 张钰,唐颖丰,韩克明,等.洮河流域径流年内分配变化规律分析[J].干旱区资源与环境,2011,25(9):71-74.
- [7] 王兆礼,陈晓宏,杨涛.东江流域径流序列年内分配特征研究[J].人民黄河,2011,33(2):37-39.
- [8] 邢万秋,王卫光,吴杨青,等.淮河流域降雨集中度的时空演变规律分析[J].水电能源科学,2011,29(5):1-5.
- [9] 刘士余,章俊霞,罗志军,等.近 50 年赣西北大坑小流域径流对降雨的响应[J].水土保持研究,2012,19(1):19-22.
- [10] 王纪军,裴铁璠,顾万龙,等.降水年内分配不均匀性指标[J].生态学杂志,2007,26(9):1364-1368.
- [11] 刘士余.降雨与植被变化对赣西北大坑小流域水文特征的影响研究[D].北京:北京林业大学,2008.
- [12] 代俊峰,张学洪,王敦球,等.北部湾经济区径流、降雨分配特点及其变化分析[J].中国农村水利水电,2011(6):1-3.
- [13] 刘文莉.基于格点数据的近 52a 来陕西省降水量时空变化特征[D].兰州:西北师范大学,2014.
- [14] 黄晓亚,陈喜,张志才,等.西南喀斯特地区降雨集中度及其变化特征分析:以乌江流域中上游为例[J].地球与环境,2013(3):203-208.
- [15] 顾璟冉,张兴奇,顾礼彬,等.黔西高原侵蚀性降雨特征分析[J].水土保持研究,2016,23(2):39-43.
- [16] 刘伟,何俊仕,陈杨.浑河流域降水与径流变化特征及同步性分析[J].水土保持研究,2016,23(1):150-154.
- [17] 周赞,胡顺.毕节市喀斯特石漠化的成因及防治措施[J].贵州大学学报:自然科学版,2007,24(4):421-425.
- [18] 张文源,王百田,杨光敏,等.喀斯特黄壤区侵蚀性降雨及产沙特征分析[J].生态环境学报,2014,23(11):1776-1782.