

不同林龄杉木养分重吸收率及其 C : N : P 化学计量特征

邱岭军^{1,2}, 胡欢甜^{1,2}, 林宝平^{1,2}, 汪凤林^{1,2}, 林宇³, 何宗明^{1,2*}, 刘卓明^{1,2}

(1. 福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 2. 国家林业局 杉木工程技术研究中心, 福建 福州 350002;
3. 福建省长乐大鹤国有防护林场, 福建 长乐 350212)

摘 要:为探究不同林龄杉木成熟叶与衰老叶之间的重吸收率及其 C : N : P 化学计量特征, 以 8、14、21、46 年生杉木为研究对象, 测定并计算其鲜叶、凋落叶和表层土壤的养分含量、重吸收率及其 C : N : P 化学计量比。结果表明: 1) 不同林龄间叶片 C、N 含量差异显著 ($P<0.05$), 叶片、凋落叶 P 含量差异性均极显著 ($P<0.01$), 14 年生杉木叶片 N 含量显著高于其他 3 个年龄的树木 ($P<0.05$), 呈单峰型; 2) 较高的 C : N、C : P 比是植物对养分较高利用率的体现, 杉木鲜叶养分含量均与其重吸收率均呈负相关, N、P 利用效率在一定范围随 N、P 含量的升高而降低; 3) 本区植物 N、P 重吸收率分别在 33.89%~38.40% 和 37.49%~46.35% 之间, P 重吸收率 $>N$, 且不同林龄杉木成熟鲜叶 $N:P>16$, 表明该地区杉木的生长可能受到 P 元素限制。

关键词:杉木; C : N : P; 养分重吸收; 生态计量化学; 养分限制

中图分类号:S791.27 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2017)04-0022-06

Nutrient Resorption Efficiency and C : N : P Stoichiometry of *Cunninghamia lanceolata* Plantations with Different Ages

QIU Ling-jun^{1,2}, HU Huan-tian^{1,2}, LIN Bao-ping^{1,2}, WANG Feng-lin^{1,2}, LIN Yu³,
HE Zong-ming^{1,2*}, LIU Zhuo-ming^{1,2}

(1. Forestry College of Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China;
2. Chinese Fir Engineering Technology Research Center, State Forestry Administration, Fuzhou, Fujian 350002, China;
3. Changle Dahe State-Owned Protection Forest Farm of Fujian Province, Changle, Fujian 350212, China)

Abstract: To explore nutrient resorption efficiency and C : N : P stoichiometry of *Cunninghamia lanceolata* plantations with different ages, 8-, 14-, 21-, and 46-year-old *C. lanceolata* trees were used as research objectives. Nutrient contents in the fresh mature leaves, fallen leaves, and facial soil were measured. The rate of resorption and C : N : P stoichiometry were calculated. The results showed that 1) the contents of C, N and P in the trees was significantly higher than those in soil. The differences in the contents of C and N between the trees with different ages were significant ($P<0.05$), P contents in the fresh leaves and litter were very significantly different ($P<0.01$). The content of N in the leaves of 14-year-old trees was significantly higher than that in other three age groups ($P<0.05$). 2) Leaf C : N and C : P were less than that of litter, higher C : N and C : P ratio was the embodiment of higher utilization efficiency of the trees. 3) The N and P reabsorption rates of the plants in this area ranged from 33.89% to 38.40% and from 37.49% to 46.35%, P resorption efficiency was greater than N. The ratio of N : P in the fresh mature leaves in all age groups was greater than 16, indicating that P might be the main limiting factor for *C. lanceolata* growth.

收稿日期: 2016-12-23 修回日期: 2017-03-08
基金项目: 福建省科技重大专项(2012NZ0001); 福建省林业科技项目(闽林科[2012]3号); 福建农林大学部级创新平台项目。
作者简介: 邱岭军, 男, 硕士研究生, 研究方向: 森林理水与保土功能。E-mail: 447446583@qq.com
* 通信作者: 何宗明, 男, 研究员, 研究方向: 森林培育、水土保持研究。E-mail: hezm2@126.com

Key words: *Cunninghamia lanceolata*; C : N : P; resorption efficiency; egcological stoichometry; nutrition limitation

养分重吸收(resorption efficiency, RE)是指叶片或其他树木组织枯萎前将养分迁移到植物其他组织再吸收的过程,既延长了养分在植物体的存留时间^[1],也减少了凋落物分解过程中养分的淋溶,内循环作用是植物应对养分贫瘠生境、增强竞争力的重要途径。R. Aerts^[2,4]、I. S. Regina^[3]等、康博文^[5]等认为生长在贫瘠环境的树木均含有高水平的养分保存能力而非很强的吸收能力,通常用养分重吸收率表示转移量大小,指植物器官在枯萎过程中养分回收量占衰老前养分量的百分率^[6]。生态化学计量学(ecological stoichiometry)为生态学、土壤化学与生物化学等研究领域提供了新方向^[7-8],是研究植物-凋落物-土壤相互作用与生态系统 C、N、P 重循环的科学,为探究生态系统中 C、N、P 的迁移和限制性元素的判断提供了有效的手段^[9]。土壤养分供应量、植物养分需求量以及凋落物分解过程中的返还量在生态系统中不断循环利用,使植物-凋落物-土壤构成一个极其复杂的微观生态环境,而生态化学计量学能更深入地揭示植物、凋落物与土壤养分比例的调控机制,阐明生态系统碳氮磷平衡^[10]。因此,通过研究养分重吸收率和 C : N : P 生态化学计量比,了解杉木林养分循环速率和养分保存利用效率,为杉木人工林的可持续发展提供新思路 and 理论依据。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是中亚热带地区重要的速生优良用材树种。第 8 次全国森林资源调查结果显示,全国杉木林面积为 1. 096 × 10⁷ hm²,占所查乔木总面积的 6. 7%^[11]。随着杉木连栽技术水平的快速发展,林木产量不断提高,减轻对天然林压力的同时,也导致地力衰退和生产力下

降的现象日益突出^[12]。施肥可以维持杉木高的生长速度,但操作难度大,投入高,杉木人工林结构相对单一,最有效的办法是建立自我养分循环机制。前人关于叶片养分重吸收的报道主要集中在不同物种的比较,而对同一物种不同年龄阶段的营养转移、养分利用策略等方面研究较少^[13]。本研究选取 8 年生(幼林龄)、14 年生(中林龄)、21 年生(近熟林)2 代杉木与 46 年生(过熟林)1 代杉木林为研究对象,综合分析杉木重吸收率以及 C : N : P 化学计量比,有助于加深杉木人工林经营过程中养分循环、利用效率等方面的认识,应对地力衰退和生产力下降的问题,通过叶片养分含量了解杉木生长发育状况,判断人工林 N、P 养分限制格局,对杉木人工林制定合理的施肥制度、施肥评估标准提供重要的科学与实践指导意义

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在福建省南平市峡阳国有林场(117° 59'E, 26° 48'N),属武夷山南伸支脉,平均海拔 238 ~ 650 m,该区为福建杉木中心产区。属中亚热带海洋季风气候,平均温度 20. 0℃(最高 38. 0℃,最低 0℃),3—9 月为雨季,年均降水量 1 653 mm,平均湿度 83%。土壤为绿泥片岩发育的红壤,土壤肥力较好,但均含有少量的砾石。杉木人工林林下植被有杨桐(*Adinandra millettii*)、芒萁(*Dicranopteris pedata*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、稀羽鳞毛蕨(*Dryopteris sparsa*)、福建莲座蕨(*Angiopteris fokiensis*)等。

表 1 不同年龄杉木人工林基本概况

Table 1 Characteristics of *C. lanceolata* plantations of different ages

林龄/a	土壤 pH	平均树高/m	平均胸径 DBH/cm	密度 /(株·hm ⁻²)	年凋落物量 /(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)
8	4. 66±0. 20 b	8. 59±0. 17 d	10. 86±0. 36 d	1768±88 a	1. 60±0. 24 c
14	4. 69±0. 10 b	14. 59±0. 49 c	18. 30±0. 81 c	1294±86 c	5. 10±0. 37 b
21	4. 98±0. 08 a	16. 83±0. 91 b	22. 06±0. 10 b	1386±104 b	6. 28±0. 33 a
46	5. 02±0. 19 a	20. 34±0. 41 a	28. 09±1. 91 a	1338±82 b	5. 32±0. 42 b

注:数据为平均值±标准误,同一行未出现相同小写字母表示差异显著(P<0. 05)。

1.2 样品采集与分析

鲜叶采样:在 2013 年 7 月初,以 8、14、21 年生 2 代林、46 年生 1 代杉木人工林为研究对象(表 1),在杉木人工林的不同林龄中选取 3 个 25 m×25 m 的标准样地,随机选取 5 株标准木上中部向阳一侧无病虫害的 2 年生墨绿色叶混合均匀,置于烘箱,设定 105℃杀青 1 h 后,75℃烘干至恒重,用自动球磨

仪研磨后过 0. 149 mm 筛标记保存。

凋落叶取样:在每块标准样地随机布设 3 个 1 m×1 m 的凋落物收集框,每个月底将样地所收集的凋落物除去枝、花、鲜叶及其他杂质后混合装进信封,将样品 70℃烘至恒重量,研磨后过 0. 149 mm 筛装袋保存,进行养分测定。

土壤取样:在每个林龄的标准样地去除地表凋

落物,用直径为 5 cm 土钻沿对角线等距离分 9 个点采集 0~10 cm 土壤层样品,将土样混和均匀后装于自封袋低温冷藏带回室重。去除细根、杂物后风干,用自动球磨仪磨碎过 100 目筛测定养分含量。

植物和土壤 C、N 含量采用碳氮元素分析仪 (Elementar ELVario Max, 德国) 测定。鲜叶 P 的测定先用硫酸-高氯酸消煮法制成待测母液-钼锑抗比色,土壤 P 采用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法。

1.3 计算公式

研究植物重吸收率的方法有很多,在本研究中,利用新鲜叶片与衰老叶养分含量(N、P)的差计算出养分的重利用率^[14],养分重吸收率计算公式:

$$RE=(\frac{w1-w2}{w1})\times 100\% \tag{1}$$

式中:RE 为养分重吸收率,w1 为杉木新鲜叶片的养分含量(mg·g⁻¹),成熟叶一般用树枝中部深绿色的叶子(2 年生杉木鲜叶);w2 为衰老叶即黄中带点绿色的叶子养分含量(mg·g⁻¹),与凋落叶完全枯黄有差别。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 17.0 对数据进行处理分析,运用因素方差分析 (One-way ANOVA) 和多重比较 (LSD 法) 分析不同物种间叶片、凋落物、表层土壤 C、N、P 含量及 C : N、C : P、N : P 化学计量比进行差异分析;此外,采用 Pearson 相关系数及线性回归方法分析了叶片-凋落物-表层土壤 3 个组分之间 C、N、P 含量及化学计量比的关系,显著性水平设置为 $P=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同林龄杉木鲜叶、凋落叶和表层土壤 C、N、P 含量

杉木鲜叶 C 含量 489.63~506.37 mg·g⁻¹,N 含量 10.01~11.68 mg·g⁻¹,P 含量 0.58~0.72 mg·g⁻¹,方差分析显示,不同林龄间杉木叶片的 C、N 含量差异性显著($P<0.05$),P 含量差异性极显著($P<0.01$);凋落叶 C 含量 486.40~492.10 mg·g⁻¹,N 含量 6.24~7.72 mg·g⁻¹,P 含量 0.36~0.39 mg·g⁻¹,凋落片的 C、N 含量差异性显著($P>0.05$),P 含量差异性极显著($P<0.01$);土壤 C 含量 20.49~28.06 mg·g⁻¹,N 含量 1.44~1.99 mg·g⁻¹,P 含量 0.29~0.37 mg·g⁻¹,表层土壤的 C、N、P 含量均差异性显著($P<0.05$) (表 2)。可以发现 14 年生杉木叶片 N 含量显著>其他 3 个年龄的树木($P<0.05$),变化趋势为 14 a>21 a>8 a>46 a,呈单峰型,杉木鲜叶 P 含量 21 a>8 a

>14 a>46 a,并未随林龄的增大而显现出有规律的增减。

2.2 不同林龄的杉木鲜叶 N、P 重吸收率

P 的重吸收率在 37.49%~46.35% 之间,变化趋势为 21 a>8 a>46 a>14 a,杉木的 P 重吸收率明显>N (图 1)。8、21 年生杉木鲜叶 P 的重吸收率显著>14、46 年生 ($p<0.05$);N 的重吸收率 33.89%~38.40%,杉木人工林叶片 N 重吸收率并未表现出随树木年龄的变化而有规律的增减,且 8、14、21 年生和 46 年生杉木林间 N 重吸收率差异性不显著。

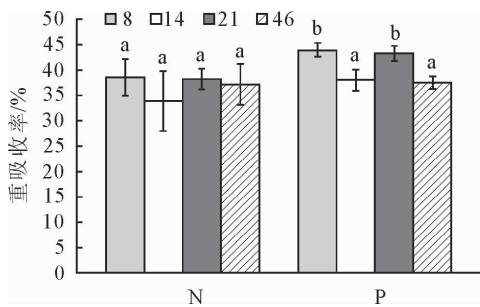


图 1 不同林龄杉木 N、P 重吸收率

Fig. 1 N and P resorption efficiency in *C. lanceolata* forests of different ages

2.3 杉木鲜叶、凋落叶和表层土壤 C : N : P 化学计量比

鲜叶 C : N、C : P 和 N : P 值的变化范围分别为 43.74~49.94、701.04~847.04、14.64~17.88,鲜叶的 C : P、N : P 不同林龄间存在极显著差异 ($P<0.01$);凋落叶 C : N、C : P 和 N : P 值的变化范围分别为 65.38~79.48、1 220.10~1 346.56、16.09~19.07,凋落叶不同林龄 C : N 和 N : P 差异性不显著 ($P>0.05$),C : P 极显著差异 ($P<0.01$);土壤 C : N、C : P 和 N : P 值的变化范围分别为 10.59~18.11、64.43~98.54、4.70~6.96,不同林龄土壤的 C : N 差异极显著 ($P<0.01$),C : P、N : P 差异性显著 ($P<0.05$)。鲜叶 C : N 能较好地反映林分对 N 的需求,8、46 年生杉木人工林 C : N 较高反映此时植物缺氮元素,C 和 N 元素更多地被植物吸收或在植物体重发生转移,使得 C、N 含量较为缺乏 (表 2)。

2.4 杉木 N、P 重吸收率与 C : N : P 化学计量特征的相关性分析

通过杉木 N、P 养分重吸收效率与 C : N : P 化学计量比之间建立相关性,由表 3 可见,杉木 N、P 重吸收率与鲜叶、凋落叶 C : N : P 化学计量比具有一定的相关性,N 重吸收率与鲜叶 C : N : P 比均无显著相关性;而 P 重吸收率与鲜叶的 C : P、N : P

呈极显著负相关,相关系数分别为(−0.88、−0.77)相关性外,与凋落叶 C : N、N : P 呈极显著相关;而 ($P<0.01$)。N 重吸收率与凋落叶的 C : P 无显著 P 重吸收率与凋落叶 C : N : P 比无显著相关性。

表 2 不同林龄叶片、凋落叶和土壤 C、N、P 含量与 C : N : P 化学计量特征							
Table 2 Carbon, nutrient contents (N and P) and C : N : P stoichiometry of fresh leaf, litter and soil among different ages							
组成	林龄/a	C/(mg · g ^{−1})	N/(mg · g ^{−1})	P/(mg · g ^{−1})	C : N	C : P	N : P
鲜叶	8	504.58±1.47a	10.13±0.30a	0.69±0.01bc	49.94±1.37b	729.56±12.33ab	14.64±0.41a
	14	506.37±3.12a	11.68±0.62b	0.65±0.02b	43.74±2.44a	778.32±32.59b	17.88±0.70b
	21	501.49±2.87a	10.51±0.21ab	0.72±0.005c	47.79±0.96ab	701.04±3.60a	14.68±0.23a
	46	489.63±4.63b	10.01±0.34a	0.58±0.005a	49.10±1.90ab	847.04±6.31c	17.32±0.58b
	<i>P</i>	0.013	0.044	0.000	0.115	0.000	0.001
凋落叶	8	487.48±1.85a	6.24±0.49a	0.39±0.004b	79.48±0.54a	1 258.57±1.43a	16.09±1.22a
	14	492.10±5.72a	7.72±0.78a	0.41±0.01b	65.38±0.54a	1 220.10±1.11a	19.07±1.64a
	21	488.83±3.98a	6.47±0.15a	0.39±0.01b	75.70±0.24a	1 274.87±2.53a	16.89±0.59a
	46	486.40±4.45a	6.28±0.42a	0.36±0.004a	78.38±0.49a	1 346.56±2.19b	17.35±0.96a
	<i>P</i>	0.796	0.188	0.004	0.189	0.004	0.361
土壤	8	25.97±0.75b	1.44±0.06a	0.31±0.01a	18.11±0.64c	84.87±4.05ab	4.70±0.32a
	14	26.8±0.53b	1.90±0.12b	0.37±0.02b	14.16±0.68b	72.44±2.56a	5.15±0.35a
	21	20.49±1.51a	1.95±0.13b	0.32±0.01ab	10.59±1.04a	64.43±5.48a	6.11±0.28ab
	46	28.06±1.73b	1.99±0.08b	0.29±0.01a	14.10±0.32b	98.54±12.57b	6.96±0.74b
	<i>P</i>	0.011	0.013	0.033	0.001	0.046	0.034

注:数据为平均值±标准差,同一类型叶片不同林龄间未出现相同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

表 3 杉木 N、P 重吸收率与 C : N : P 化学计量比的相关性						
Table 3 Correlation between N,P reabsorption and C : N : P stoichiometric ratio						
重吸收率 <i>RE</i>	鲜叶			凋落叶		
	C : N	C : P	N : P	C : N	C : P	N : P
N	0.11	−0.033	−0.101	0.793* *	0.391	−0.799* *
P	0.12	−0.88* *	−0.77* *	0.242	0.083	−0.24

注: * 显著相关($P<0.05$); * * 极显著相关($P<0.01$)。

3 结论与讨论

3.1 结论

养分重吸收是植物应对贫瘠土壤生境的一种机制,是减少生态系统的养分流失的重要途径,杉木人工林 P 重吸收率与鲜叶 C : P、N : P 均呈极显著负相关,N 重吸收率与凋落叶 C : N、N : P 有极显著正相关,说明杉木 N、P 重吸收率与 C : N : P 化学比具有一定的相关性。中亚热带地区是氮沉降最严重的区域、凋落叶元素残量及鲜叶 N : P>16 等均表明杉木人工林的限制性因子为 P 元素。

本研究主要从养分角度来探讨杉木连栽导致的衰退问题,目的是通过养分重吸收效率来比较不同年龄杉木对养分的保存能力,检验杉木对贫瘠养分生境的适应能力,由于本研究并未进行长期观测,我们不能确定所得结果是短期效应还是真实效应,因此下一步要加强此方面的研究以便更精确了解杉木的养分元素的生长策略和变化规律,为人工林可持续经营提供理论基础。

3.2 讨论

通常 C 在大多数植物体含量高且变异小^[15],而

N、P 是最常见的限制性因子,N 和 P 的变化是影响 C : N 和 C : P 变化的主要因素^[16]。杉木人工林鲜叶平均 N 含量为 10.58 mg · g^{−1},明显低于 W. Han^[17]等研究中国 753 种陆地植物研究得出的平均值 18.6 mg · g^{−1},鲜叶 P 含量平均值为 0.66 mg · g^{−1},明显低于我国 753 种陆地植物(1.21 mg · g^{−1})。显然,本区土壤的氮和磷含量偏低,可能是由于植物元素的特定区间及不同区域土壤元素的可利用率决定的,结果显示,14 年生的杉木叶的 N 含量最高(11.68 mg · g^{−1}),46 年生的最低(10.01 mg · g^{−1})。8 年生杉木林对养分需求量大,组织发育不完善,不得不把更多的养分分配给杉木细根维持高速生长^[18],46 年生杉木进入强烈的自然稀疏时期,林下草本植物层增多带来的养分竞争导致土壤养分含量降低^[19]。杉木叶片的 N、P 含量并未随林龄的变化而表现出应有的增减规律,造成这种现象的原因可能受到其生长立地土壤养分可利用状况和土壤含水量等的差异影响^[20]。有研究表明,杉木养分含量与其重吸收均呈负相关,N、P 利用效率在一定范围重随 N、P 含量的升高而降低^[21]。

植物地上活体从自然界获取养分之后便在植物

器官不断积聚和介入各类生命代谢活动,在叶片枯落之前又通过养分重循环的方式对 N、P 进行重吸收,本区 N 的养分重吸收 33.89%~38.40%,较低的氮重吸收率也能满足植物的生长是氮沉降区的一大特性,P 的重吸收率在 37.49%~46.35%之间,表明 8 年生树木组织发育不完善,需要大量的蛋白质和核酸,必须提高重吸收率维持植物健康生长,而 P 的重吸收率略>N,土壤 P 含量较低,表明该区树木生长主要受 P 元素的限制。

土壤作为植物体生长的物质能量来源,其 N、P 含量可影响植物 N、P 含量及化学计量特性^[22]。而植物叶片和凋落叶又在一定程度反映土壤营养状况、营养吸收能力^[23]。植物体 C:N、C:P 可在一定程度显示养分供给量水平或是植物对养分的利用效率及同化 C 的能力,较高的 C:N、C:P 是植物对 N、P 高利用率的体现。由于凋落物在进入土壤转为有机质的过程中经历了复杂的淋溶、分解过程,大量有机 C、N、P 被腐蚀矿化,导致土壤的 C、N、P 元素及 C:N:P 比显著<叶片和凋落物,凋落叶的 C:N、C:P 比>叶片,植物>土壤,这与 M. E. McGroddy^[24]等对全球丛林叶片、凋落物 C:N:P 计量比的研究结果一致。土壤 C:N 比较高时,说明氮含量较低,则微生物须要输入氮元素来满足他们自身的生长;在 C:N 较低时,氮含量超过微生物所需要的部分就会释放到土壤中^[25]。王绍强^[7]等研究表明鲜叶 C:N 比值低,分解速率快,形成的腐殖质少,而干枯老化且 C:N 比值高的植物残体则相反。

通过植物 N:P 判断 N 饱和以及 P 贫缺在不同的生态系统中得到了广泛的研究^[26]。S. Güsewell^[27]等总结了大量的研究结果认为:当植被的 N:P<14 时,意味着植物受 N 限制,施用 N 肥可增加植被的生物量,而 N:P>16 时,意味着植物 P 受限,施用 P 肥可增加植被的生物量,N:P 值介于二者之间可能受 N 和 P 的共同限制,施肥对植被生物量的效果与 N:P 关系不明显^[27]。本研究不同林龄杉木成熟鲜叶 N:P 平均值为 16.13,说明该地区杉木的生长受到 P 的限制,这与我国南方丘陵地区土壤普遍缺 P 的结论一致。

利用 Pearson 相关系数研究表明,杉木人工林 P 重吸收率与鲜叶 C:P、N:P 均呈极显著负相关,而 N 重吸收率与鲜叶 C:N:P 比无显著相关性。N 重吸收率与凋落叶 C:N、N:P 有极显著正相关,P 重吸收率与凋落叶 C:N:P 比呈无显著相关性,说明杉木氮、磷重吸收率与 C:N:P 化学比具有一定的相关性。在本研究中,杉木鲜叶、凋落叶 C

:N:P 化学计量特征与 N 重吸收率相关性较强,而与 P 重吸收相关性较差。安 卓^[29]等主要通过施 N 肥来探讨 N、P 重吸收率和 C:N:P 化学计量比的影响及其内在联系,但养分的添加可能使重吸收效率增大或减小,使得不确定因素增多,R. K. Koerber^[30]等认为,出现不同研究结果的主要原因是树种的差异、环境因素的影响和方法上的差异。因此,要详细了解植物重吸收率与化学计量特征之间的关系需进一步的研究工作^[19]。该区氮素水平较高,而杉木鲜叶对 P 的重吸收率略>N,表明本地区杉木生长受 P 元素的限制。

参考文献:

[1] AERTS R. Nutrient resorption from senescing leaves of perennials: are there general patterns? [J]. Journal of Ecology, 1996,84(4):597-608.

[2] AERTS R, PEIJL M J V D. A Simple model to explain the dominance of low-productive perennials in nutrient-poor habitats[J]. Oikos, 1993,66(1):144-147.

[3] REGINA I S, LEONARDI S, RAPP M. Foliar nutrient dynamics and nutrient-use efficiency in *Castanea sativa* coppice stands of southern Europe[J]. Forestry, 2001,74(1):1-10(10).

[4] AERTS R. Nitrogen partitioning between resorption and decomposition pathways: a trade-off between nitrogen use efficiency and litter decomposability[J]. Oikos, 1997,80(3):603-606.

[5] 康博文,刘建军,李文华,等. 樟子松苗木生长规律研究[J]. 西北林学院学报, 2009,24(1):74-77.

KANG B W, LIU J J, LI W H, *et al.* Studied on the growth regularity of *Pinus sylvestris* var. *monglica* seedling[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009,24(1):74-77. (in Chinese)

[6] KILLINGBECK K T. The terminological jungle revisited: making a case for use of the term resorption[J]. Oikos, 1986,46(2):263.

[7] 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):3937-3947.

WANG S Q, YU G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008,28(8):3937-3947. (in Chinese)

[8] 刘冰燕,陈云明,曹扬. 渭北黄土区刺槐人工林氮、磷生态化学计量特征[J]. 西北林学院学报, 2016,31(1):1-6.

LIU B Y, CHEN Y M, CAO Y. Nitrogen and phosphorus stoichiometry characteristics of robinia pseudoacacia plantation in Weiwei loess plateau region[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016,31(1):1-6. (in Chinese)

[9] 林波,刘庆,吴彦,等. 森林凋落物研究进展[J]. 生态学杂志, 2004,23(1):60-64.

[10] 葛晓改,曾立雄,肖文发,等. 三峡库区森林凋落叶化学计量学性状变化及与分解速率的关系[J]. 生态学报, 2015,35(3):779-787.

GE X G, ZENG L X, XIAO W F, *et al.* Dynamic of leaf litter

stoichiometric traits dynamic and its relations with decomposition rates under three forest types in Three Gorges reservoir area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(3): 779-787. (in Chinese)

[11] 李 斌,方 晰,项文化,等. 湖南省杉木林植被碳贮量、碳密度及碳吸存潜力[J]. *林业科学*, 2013, 49(3): 1001-7488.

LI B, FANG X, XIANG W H, *et al.* Carbon storage, carbon Density, and carbon sequestration potential of *Cunninghamia lanceolata* plantations in hunan province[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(3): 1001-7488. (in Chinese)

[12] 孙启武,杨承栋,焦如珍. 江西大岗山连栽杉木人工林土壤性质的变化[J]. *林业科学*, 2003, 39(3): 1001-7488.

SUN Q W, YANG C D, JIAO R Z. The changes of soil properties of the successive Chinese fir plantation in dagang ountain of Jiangxi Province[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, 39(3): 1001-7488. (in Chinese)

[13] HELMISAARI H S. Nutrient retranslocation in three *Pinus sylvestris*, stands[J]. *Forest Ecology & Management*, 1992, 51(4): 347-367.

[14] 苏波,韩兴国,黄建辉,等. 植物的养分利用效率(NUE)及植物对养分胁迫环境的适应策略[J]. *生态学报*, 2000, 20(2): 335-343.

SU B, HAN X G, HUANG J H, *et al.* The nutrient use efficiency (NUE) of plants and it's implications on the strategy of plant adaptation to nutrient—stressed environments[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(2): 335-343. (in Chinese)

[15] HENDRICK J J, ABER J D, NADELHOFFER K J, *et al.* Nitrogen controls on fine root substrate quality in temperate forest ecosystems[J]. *Ecosystems*, 2000, 3(1): 57-69.

[16] VITOUSEK P M, HOWARTH R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: how can it occur? [J]. *Biogeochemistry*, 1991, 13(2): 87-115.

[17] 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.

[18] 林勇明,崔 鹏,葛永刚,等. 泥石流频发区人工恢复新银合欢林种重竞争——以云南东川蒋家沟流域为例[J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(3): 13-17.

LIN Y M, CUI P, GE Y G, *et al.* Competition of *Leucaena leucocephala* plantation in the area of high frequency debris flow: taking the Jiangjiagou gully as an example[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(3): 13-17. (in Chinese)

[19] 邓浩俊,陈爱民,严思维,等. 不同林龄新银合欢重吸收率及其C:N:P化学计量特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2015, 21(3): 522-527.

DENG H J, CHEN A M, YAN S W, *et al.* Nutrient resorption efficiency and C:N:P stoichiometry in different ages of *Leucaena leucocephala* [J]. *Chin. J. Appl. Environ. Biol.*, 2015, 21(3): 522-527. (in Chinese)

[20] 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重吸收效率[J]. *林业科学*, 2005, 41(5): 21-27.

ZENG D H, CHEN G S, CHEN F S, *et al.* Foliar nutrients and their resorption efficiencies in four *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations of different ages on sandy soil[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(5): 21-27. (in Chinese)

[21] 刘宏伟,刘文丹,王 微,等. 重庆石灰岩地区主要木本植物叶片性状及养分重吸收特征[J]. *生态学报*, 2015, 35(12): 4071-4080.

LIU H W, LIU W D, WANG W, *et al.* Leaf traits and nutrient resorption of major woody species in the karst limestone area of Chongqing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(12): 4071-4080. (in Chinese)

[22] STOCK W D, VERBOOM G A. Phylogenetic ecology of foliar N and P concentrations and N:P ratios across mediterranean-type ecosystems[J]. *Global Ecology & Biogeography*, 2012, 21(12): 1147-1156.

[23] 周 丽,张卫强,唐洪辉,等. 南亚热带中幼龄针阔混交林生态化学计量特征[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(11): 1732-1738.

ZHOU L, ZHANG W Q, TANG H H, *et al.* Ecological stoichiometry characteristics of young-and-middle aged conifer-broadleaved plantation in southern subtropical region[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(11): 1732-1738. (in Chinese)

[24] MCGRODDY M E, DAUFRESNE T, HEDIN L O. Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial redfield-type ratios[J]. *Ecology*, 2004, 85(9): 2390-2401.

[25] 仇少君,彭佩钦,刘 强,等. 土壤微生物生物量氮及其在氮素循环中作用[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(4): 443-448.

QIU S J, PENG P Q, LIU Q, *et al.* Soil microbial biomass nitrogen and its role in nitrogen cycling[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(4): 443-448. (in Chinese)

[26] 王维奇,徐玲琳,曾从盛,等. 河口湿地植物活体-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2011, 31(23): 7119-7124.

WANG W Q, XU L L, ZENG C S, *et al.* Carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometric ratios among live plant-litter-soil systems in estuarine wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(23): 7119-7124. (in Chinese)

[27] GÜSEWELL S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. *New Phytologist*, 2004, 164: 243-266.

[28] 赵琼,刘兴宇,胡亚林,等. 氮添加对兴安落叶松养分分配和重吸收效率的影响[J]. *林业科学*, 2010, 46(5): 14-19.

ZHAO Q, LIU X Y, HU Y L, *et al.* Effects of nitrogen addition on nutrient allocation and nutrient resorption efficiency in *Larix gmelinii* [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(5): 14-19. (in Chinese)

[29] 安 卓,牛得草,文海燕,等. 氮素添加对黄土高原典型草原长芒草氮磷重吸收率及C:N:P化学计量特征的影响[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(8): 801-807.

AN Z, NIU D C, WEN H Y, *et al.* Effects of N addition on nutrient resorption efficiency and C:N:P stoichiometric characteristics in *Stipa bungeana* of steppe grasslands in the Loess Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(8): 801-807. (in Chinese)

[30] KOBER R K, LEPCZYK C A, IYER M. Resorption efficiency decreases with increasing green leaf nutrients in a global data set[J]. *Ecology*, 2005, 86: 2780-2792.