

杉木人工林养分循环随林龄变化的特征

陈日升¹ 康文星^{1,2,3*} 周玉泉¹ 田大伦^{1,2,3} 项文化^{1,3}

¹中南林业科技大学, 长沙 410004; ²南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004; ³湖南会同杉木林国家重点野外科学观测研究站, 湖南会同 418307

摘要 为弄清杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林不同林龄的养分循环特征, 为人工林丰产的经营管理提供科学依据, 利用湖南会同杉木林25年的定位连续测定数据, 根据杉木生长规律和养分吸收动态对杉木林不同林龄的养分循环进行了研究。结果表明: 对于同一林龄的杉木, 器官养分浓度大小依次为叶>枝>皮>根>干。林龄小于12年的, 杉木养分浓度随林龄增加而增高; 林龄大于12年的, 杉木养分浓度随林龄增加而降低。养分年均吸收量随林龄增长的变化曲线为双波峰。养分归还量随着林龄的增加逐渐增加。同一林龄, 各营养元素的利用效率都是磷(P) > 钾(K) > 氮(N) > 镁(Mg) > 钙(Ca)。林分郁闭后, 各营养元素的利用效率随着林木生长而增大。同一林龄, Ca、Mg的循环强度大于N、P, 各营养元素循环强度随林龄增长的变化曲线都为抛物线。同一林龄, N、P、K被杉木利用的时间比Ca、Mg长, 各元素被杉木利用的时间随着杉木生长的进行而缩短。研究显示: 不同林龄的养分吸收量除受生产量控制外, 还受这个林龄和前一个林龄杉木体内养分浓度的差异制约; 杉木体内养分再分配及贮备机制、杉木生长规律和不同生育阶段对养分的利用效率等共同调节控制着养分循环过程。

关键词 杉木; 人工林; 不同林龄; 养分循环; 湖南; 会同

陈日升, 康文星, 周玉泉, 田大伦, 项文化 (2018). 杉木人工林养分循环随林龄变化的特征. 植物生态学报, 42, 173–184. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0209

Changes in nutrient cycling with age in a *Cunninghamia lanceolata* plantation forest

CHEN Ri-Sheng¹, KANG Wen-Xing^{1,2,3*}, ZHOU Yu-Quan¹, TIAN Da-Lun^{1,2,3}, and XIANG Wen-Hua^{1,3}

¹Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; ²National Engineering Laboratory for Applied Technology of Forestry & Ecology in South China, Changsha 410004, China; and ³Huitong National Field Station for Scientific Observation and Research of Chinese Fir Plantation Ecosystem in Hunan Province, Huitong, Hunan 418307, China

Abstract

Aims The purpose of this study is to investigate the characteristics of nutrient cycling in *Cunninghamia lanceolata* plantations with different ages, and to provide scientific basis for the management of high-yield plantations in China.

Methods In this study, we used the ecological data of the past 25 years in Hunan Huitong Ecological Station and analyzed the nutrient cycling characteristics of the *C. lanceolata* plantation forests with different ages according to the law of tree growth and the dynamics of nutrient uptake.

Important findings For most nutrients, their concentrations ranked in order as leaf > twig > bark > root > stem for all *C. lanceolata* trees with any ages. When the tree age was less than 12 years, nutrient concentrations increased with age, while they decreased with age when the tree was more than 12 years old. The changes in average annual nutrient uptake with age showed two peaks. Nutrient return gradually increases with age. For the same age, the nutrient use efficiency followed the order of phosphorus (P) > potassium (K) > nitrogen (N) > magnesium (Mg) > calcium (Ca). After the stand was closed, the nutrient utilization efficiency increases with the growth and development of trees. The cycling intensity of Ca and Mg was greater than that of N and P at the same stand age. The changes in nutrient cycling intensity with age varying curve with stand age acted as parabolic curve. Utilization of N, P and K was longer than displayed a parabolic shape for all elements. The utilization time of each element got shorter with increasing stand age. These results suggested that the nutrient uptake in different growth stages was not only controlled by the quantity of biomass, but also affected by the difference in nutrient concentration between previous and current stages. The nutrient cycling processes were jointly controlled by the mechanisms of nutrient redistribution and storage in *Cunninghamia lanceolata*, during the growth and development stages, and the nutrient use efficiency during different growth stages.

收稿日期Received: 2017-08-10 接受日期Accepted: 2017-12-13

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201104009)、科技部公益性研究项目(2007-04-15)和国家野外科学观测研究站项目(20080615)。Supported by the National Forestry Public Welfare Industry Research Project (201104009), the Ministry of Science and Technology Public Welfare Research Project (2007-04-15), and the National Field Science Observation and Research Station Project (20080615).

* 通信作者Corresponding author (kwx1218@126.com)

Key words *Cunninghamia lanceolata*; plantation; different stand ages; nutrient cycle; Hunan; Huitong

Chen RS, Kang WX, Zhou YQ, Tian DL, Xiang WH (2018). Changes in nutrient cycling with age in a *Cunninghamia lanceolata* plantation forest. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 173–184. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0209

关于森林养分循环的研究, 国外学者(Ebermayer, 1876; Bazilevich & Rodin, 1966; Tsutsumi *et al.*, 1968; Bormann & Likens, 1979; Schlesinger *et al.*, 1989; Aerts & Chapin, 1999)在植被的不同系统水平上的养分循环分类、枯落物在养分循环的重要作用、生物地球化学循环和地球化学循环之间的定量关系等方面都做出了重要贡献, 为森林养分循环的深入研究提供了理论指导和方法。国内开展森林养分循环研究始于20世纪80年代, 潘维伟等(1983)、冯宗炜等(1985)相继开展了杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林养分循环的研究。随后我国进入森林尤其是人工林养分动态研究的快速发展阶段(余树全, 1994; 林德喜等, 2002; 张希彪和上官周平, 2006; 赵春梅等, 2008; 肖兴翠等, 2013; 俞月凤等, 2015; 庄志东等, 2016)。我国学者分析了不同类型林分养分吸收规律、归还动态以及养分利用和循环特征, 具有重要的实践和理论意义。但是大部分研究主要集中在林分某一时间段的养分循环, 虽然也有研究探讨不同林龄养分循环动态(项文化等, 2002; 何斌等, 2007; 佟志龙等, 2014; 纪文婧等, 2016), 但是大都只选取几个短时段进行探讨, 鲜见形成连续时间跨度的研究, 因而无法体现林分从幼林到成熟林不同林龄的养分循环规律; 且不同林龄的养分循环研究都采用“时空转换”方法, 由于立地条件的异质性, 研究结果可能偏离实际; 以往研究中养分吸收量无一例外都采用“吸收=存留+归还”的公式, 这可能与不同林龄时林木吸收养分状况不符(在研究方法中说明); 而且, 大都采用某林龄时测定的生物现存量减去前次测定生物现存量的差, 再加某林龄段的枯落物量估算某林龄段的生产量, 这也可能与常绿树种的枯枝落叶期不吻合。如何准确地估算不同林龄时林分生产力、养分吸收量? 一个林分从幼林到成熟期不同年龄时养分循环规律怎样? 这些都是森林养分循环深入研究中亟需解决的问题。

本研究利用会同杉木林25年(从幼林到成熟期)的定位连续测定数据, 采用某林龄段前、后两次测定的生物现存量 and 枝、叶的生长周期来估测某林龄段产生的生物量和枯死物量, 利用某林龄段前、后两次树木养分浓度数据来估算某林龄段的养分吸收

量等新方法, 探讨杉木林不同林龄的养分循环变化, 旨在揭示杉木林从幼林到成熟期的养分循环动态特征, 为人工林的经营管理提供科学依据, 也为森林的养分循环研究提供新方法。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

该研究在湖南会同杉木林国家重点野外科学观测研究站第3试验小集水区进行。地理位置26.83° N, 109.75° E, 面积1.984 hm², 海拔270–350 m, 坡向西北, 坡度15°–25°。研究区属于中亚热带季风湿润气候区, 年平均气温16.9 °C, 年降水量1 100–1 400 mm, 年平均相对湿度80%以上。土壤母岩为震旦纪板溪系灰绿色板岩, 风化程度较深, 土层厚度80 cm以上, 土壤为山地黄壤。

研究林分是第3小集水区杉木林在1987年冬采伐后, 于1988年春在采伐迹地上炼山、全垦挖穴营造的第2代杉木林。造林密度约3 000株·hm⁻², 杉木栽上后前3年的春秋季节各抚育1次, 以后任其自然生长。

1.2 样品采集

在第2代杉木人工林内设立了4块固定标准样地(每块样地面积667 m²)。林分7、11、16、20和25年时的11月, 在4块固定标准地测定林分生物量。每次生物量测定采用按克拉夫特分级法, 把标准地内的林木分成I级木、II级木、III级木、IV级木、V级木5个生长级, 再进行每木调查。然后根据林木各生长级的平均胸径和平均树高, 在固定样地外选择各生长级标准木1株及全林平均木1株。将6株样木伐倒。每次测定生物量的同时采集养分待测样品。为了保证样品具有代表性, 在伐倒木上分成树干基部、中下、中、中上和上部5个区段, 每一区段采集相同重量的树干, 再把采集的树干混在一起组合成树干样本; 树皮取样采用树干取样的方法。根据田大伦等(2001)研究会同第2代林幼林的养分动态的方法, 将枝和叶按当年生、一年生、二年生、多年生; 根分成根头、大根(1 cm ≤ 根径)、粗根(0.2 cm ≤ 根径 < 1 cm)、细根(根径 < 0.2 cm)分别取样(根系用挖掘法

取样)。

1.3 养分测定

取适量待测杉木各器官组织样品置于85℃恒温干燥箱内烘干至恒质量,称干质量,磨碎,过60目筛,林龄≤11年的按《森林土壤定位研究方法》(张万儒和许本彤,1986),林龄>11年的按《土壤农业化学分析方法》(鲁如坤,2002)配置待测溶液(两者测定植物中的全磷(P)、全钾(K)、全氮(N)、全镁(Mg)、全钙(Ca)的方法相同)。植物中的全N用半微量凯氏法测定;全P用分光光度计测定;全K、全Ca、全Mg用原子吸收分光光度计测定。每个样品重复测定3次,用3次重复测定的平均值作为计量标准。

1.4 不同林龄林分养分积累现存量计算

林分某一林龄时养分积累现存量用下式计算:

$$M_1 = W_{1i} \times L_{1i} \quad (1)$$

式中: M_1 、 W_{1i} 、 L_{1i} 分别表示林分某一林龄时养分积累现存量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、杉木某器官现存生物量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、个林龄段以前生长的杉木器官在这林龄段仍存活的器官生物杉木某器官的养分浓度($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); $i = 1, 2, 3, 4, 5$ (干、皮、枝、叶、根)。

1.5 某林龄阶的生产量估算

杉木枝和叶都有一定的生长周期,假定杉木枝、叶的生长周期分别为A年和B年。本研究设杉木枝生长周期为10年(根据对会同杉木生长的长期观测结果),杉木叶生长周期为5年(采用刘爱琴等(2005)研究成果)。若某林龄段的林龄数为N年,此前一个林龄段林龄数为M年,某枝(叶)在前一个林龄段M中的第t年($t = 1, 2, 3, \dots, M$)生长出,若 $A(B) < M - t$,枝(叶)在前一个林龄段枯死;若 $A(B) > M - t$,枝(叶)就存留到下一林龄段。存留到下一个林龄段枝(叶)量中,有部分枝(叶)的 $A(B) < M - t + N$,这部分枝叶就会在具有N年的林龄段枯死;也有部分枝(叶)的 $A(B) > M - t + N$,这部分枝叶就会在具有N年的林龄段存留。设以前的林龄段生长的枝(叶)在此林龄段还存活的量为 W_{1i} ,用同样的方法可以估算出某林龄段生长的枝叶在某林龄段的枯死量(W_{3i})和存留量。利用某林龄时测定的枝叶现存量(W_{2i})和以前的林龄段生长枝(叶)在某林龄段还存活的量(W_{1i}),以及某林龄段生长的枝叶在此林龄段的枯死量(W_{3i}),用下式可求出某林龄段的枝叶生产量(W_1)。

$$W_1 = (W_{2i} - W_{1i}) + W_{3i} \quad (2)$$

式中: $i = 1, 2$ (枝、叶)。一般认为树干、皮在其生长过程中凋落甚少,随林龄增长其生物量不断积累,可以用某林龄段前后测定的这些器官现存量之差求得某林龄段新增加量。根系存在更新代谢过程,但准确测定根系的周转周期在技术上还存在很大难度,因此,本研究将根与干材和树皮同等对待(这样估算出的生产量要低于实际生产量)。这样某林龄段生长的树干、树皮和根的生物量(W_2)由下式求出:

$$W_2 = W_{2j} - W_{1j} \quad (3)$$

式中: W_{2j} 、 W_{1j} 分别表示某林龄时和前一林龄时测定的树干、树皮和根现存量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$); $j = 1, 2, 3$ (干、皮、根)。于是,某林龄段内生产的生物量(W)为:

$$W = (W_{2i} - W_{1i}) + W_{3i} + (W_{2j} - W_{1j}) \quad (4)$$

1.6 不同林龄段杉木活体内的养分转移量计算

如果某林龄时测定的杉木各器官养分浓度为 L_{1i} ,前一林龄时测定的浓度为 L_{2i} 。当 $L_{1i} < L_{2i}$ 时,这林龄以前生长的杉木器官在这林龄段仍存活的器官生物量(W_{2i})中的养分浓度从 L_{2i} 降低为 L_{1i} ,意味着这些生物量中有部分养分转移到这林龄段内生产的生物体内。其转移的养分量(M_2)计算方法如下:

$$M_2 = W_{2i} \times (L_{2i} - L_{1i}) \quad (5)$$

当 $L_{1i} > L_{2i}$ 时,这林龄段以前生长的在这林龄段还存活的杉木器官中的养分浓度从 L_{2i} 上升为 L_{1i} ,这些器官中增加的养分来自这林龄段林分从土壤中吸收的养分。以前生长的、在这林龄段还存活的杉木器官又吸收的养分量用下式计算:

$$M_2 = W_{2i} \times (L_{1i} - L_{2i}) \quad (6)$$

1.7 不同林龄段养分吸收量计算

利用公式(4)估算出某林龄段林分生的生物量并利用公式(5)及公式(6)估算出某林龄段的以前生产的在此林龄段还存活的生物量中转移出(或又吸收)的养分量后,不同林龄段养分吸收量计算不采用“吸收=存留+归还”方法计算,而是用以下公式求得。

当 $L_{1i} < L_{2i}$ 时,从土壤吸收的养分量(M_3)的计算公式为:

$$M_3 = W_{3i} \times L_{1i} - W_{2i} \times (L_{2i} - L_{1i}) \quad (7)$$

当 $L_{1i} > L_{2i}$ 时, M_3 的计算公式则为:

$$M_3 = W_{3i} \times L_{1i} + W_{2i} \times (L_{1i} - L_{2i}) \quad (8)$$

式中: W_{3i} 表示某林龄段生产量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$); W_{2i} 表示前一林龄段生产的在本林龄段仍存活的生物量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$); $i = 1, 2, \dots, 5$ (干、皮、枝、叶、根)。

1.8 不同林龄段养分归还量的计算

本研究中的养分归还量不是用某林龄段林地凋落物量乘以其养分浓度计算的,而是用前面分析某林龄段的生长量时,根据杉木枝、叶的生长周期估算该林龄段内的枝叶枯死量,然后乘以其养分浓度求得。

1.9 杉木林养分循环指标计算

杉木林养分循环的利用系数(C)、循环系数(U)和周转期(T)分别用下面公式计算。

$$C = M_1/M \quad (9)$$

$$U = M_2/M_1 \quad (10)$$

$$T = M/M_2 \quad (11)$$

式中: M_1 为养分年吸收量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); M_2 为养分年归还量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); M 为养分积累现存量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.10 数据分析处理

所有数据经Excel软件处理,用SPSS 20.0软件进行统计分析。采用最小显著差异法(LSD)对同林龄时和不同林龄时的各器官的养分浓度进行显著性检

验,显著水平 $p = 0.05$ 。

2 结果

2.1 养分浓度

从表1(为了表格制作简便,将测定的当年生、一年生、二年生、多年生叶的养分浓度,按它们在同一次测定的不同林龄叶的养分浓度中所占权重统计计算成叶的平均养分浓度,枝和根采用同样处理)看出,杉木幼林到成熟期的各器官养分浓度表现出:同一林龄时,养分浓度叶>枝>皮>根>干,且差异显著($p < 0.05$),同一器官不同元素浓度差异显著($p < 0.05$);各器官同一元素含量之和的大小顺序是 $N > Ca > K > Mg > P$,且差异显著($p < 0.05$)。不同林龄时,相同器官的养分浓度差异显著($p < 0.05$)。不同林龄时相同器官的同一元素浓度差异分析见表1。杉木器官养分浓度随林龄增加变化的趋势是,11年生以前随林龄增加而增加,11年生以后随林龄增加而下降。

表1 不同林龄时杉木器官养分氮(N)、磷(P)、钾(K)、钙(Ca)、镁(Mg)的含量(平均值±标准偏差)($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 1 Nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg) content of *Cunninghamia lanceolata* organs at different stand ages (mean ± SD) ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

林龄 Stand age	元素 Element	干 Stem wood	皮 Stem bark	枝 Twig	叶 Needle	根 Root	合计 Total
7年生 7-year-old	氮 N	1.69 ± 0.089 ^{aA#}	3.89 ± 0.169 ^{bA%}	5.12 ± 0.325 ^{cA*}	10.86 ± 0.567 ^{dA^}	2.93 ± 0.162 ^{eA@}	24.49 ^{A*}
	磷 P	0.10 ± 0.006 ^{aB*}	0.55 ± 0.018 ^{bB*}	0.76 ± 0.039 ^{cB&}	0.89 ± 0.037 ^{dB*}	0.26 ± 0.015 ^{eB*}	2.56 ^{B@}
	钾 K	0.64 ± 0.033 ^{aC@}	4.21 ± 0.204 ^{bC%}	4.92 ± 0.095 ^{cC@}	5.63 ± 0.419 ^{dC&}	2.27 ± 0.145 ^{eC%}	17.67 ^{C!}
	钙 Ca	0.51 ± 0.026 ^{aD&}	3.84 ± 0.227 ^{bD!}	5.54 ± 0.378 ^{cD\$}	9.97 ± 0.494 ^{dD@}	2.12 ± 0.128 ^{eD*}	21.98 ^{D*}
	镁 Mg	0.15 ± 0.007 ^{aE\$}	0.68 ± 0.052 ^{bE*}	2.15 ± 0.162 ^{cE@}	2.45 ± 0.164 ^{dE*}	0.63 ± 0.033 ^{eE&}	6.43 ^{E%}
11年生 11-year-old	氮 N	1.75 ± 0.073 ^{aA&}	4.39 ± 0.212 ^{bA&}	5.88 ± 0.342 ^{cA^}	11.42 ± 0.513 ^{dA*}	3.19 ± 0.176 ^{eA!}	26.63 ^{A&}
	磷 P	0.13 ± 0.006 ^{aB*}	0.63 ± 0.033 ^{bB%}	0.80 ± 0.051 ^{cB*}	0.93 ± 0.052 ^{dB&}	0.28 ± 0.021 ^{eB*}	2.73 ^{B#}
	钾 K	0.69 ± 0.032 ^{aC\$}	4.54 ± 0.224 ^{bC&}	5.12 ± 0.329 ^{cC*}	5.87 ± 0.425 ^{dC*}	2.35 ± 0.123 ^{eC^}	18.57 ^{C@}
	钙 Ca	0.57 ± 0.029 ^{aD!}	4.14 ± 0.239 ^{bD#}	5.96 ± 0.347 ^{cD*}	10.90 ± 0.573 ^{dD!}	2.16 ± 0.139 ^{eD%}	23.13 ^{D&}
	镁 Mg	0.17 ± 0.005 ^{aE*}	0.74 ± 0.068 ^{bE&}	2.44 ± 0.173 ^{cE!}	2.68 ± 0.189 ^{dE&}	0.69 ± 0.038 ^{eE*}	6.72 ^{E^}
16年生 16-year-old	氮 N	1.72 ± 0.074 ^{aA#}	4.28 ± 0.224 ^{bA*}	5.72 ± 0.397 ^{cA%}	11.02 ± 0.521 ^{dA%}	3.12 ± 0.159 ^{eA@}	25.86 ^{A^}
	磷 P	0.12 ± 0.005 ^{aB*}	0.61 ± 0.036 ^{bB%}	0.77 ± 0.046 ^{cB&}	0.90 ± 0.044 ^{dB&}	0.27 ± 0.017 ^{eB*}	2.67 ^{B@}
	钾 K	0.64 ± 0.037 ^{aC@}	4.32 ± 0.245 ^{bC#}	5.07 ± 0.318 ^{cC@}	5.75 ± 0.433 ^{dC\$}	2.18 ± 0.131 ^{eC@}	17.96 ^{C#}
	钙 Ca	0.52 ± 0.026 ^{aD&}	4.05 ± 0.239 ^{bD\$}	5.36 ± 0.335 ^{cD@}	10.17 ± 0.492 ^{dD\$}	2.05 ± 0.122 ^{eD!}	22.15 ^{D^}
	镁 Mg	0.14 ± 0.004 ^{aE\$}	0.70 ± 0.059 ^{bE&}	2.37 ± 0.125 ^{cE\$}	2.64 ± 0.137 ^{dE\$}	0.62 ± 0.031 ^{eE&}	6.47 ^{E\$}
20年生 20-year-old	氮 N	1.70 ± 0.071 ^{aA#}	4.20 ± 0.219 ^{bA#}	5.63 ± 0.367 ^{cA@}	10.87 ± 0.486 ^{dA@}	3.01 ± 0.143 ^{eA*}	25.41 ^{A^}
	磷 P	0.10 ± 0.005 ^{aB*}	0.60 ± 0.033 ^{bB%}	0.75 ± 0.039 ^{cB&}	0.88 ± 0.049 ^{dB*}	0.25 ± 0.019 ^{eB*}	2.58 ^{B@}
	钾 K	0.61 ± 0.033 ^{aC@}	4.25 ± 0.237 ^{bC!}	4.94 ± 0.294 ^{cC!}	5.68 ± 0.429 ^{dC\$}	2.13 ± 0.118 ^{eC@}	17.72 ^{C%}
	钙 Ca	0.48 ± 0.023 ^{aD^}	3.97 ± 0.246 ^{bD#}	5.23 ± 0.326 ^{cD#}	10.06 ± 0.473 ^{dD\$}	1.98 ± 0.124 ^{eD\$}	21.84 ^{D%}
	镁 Mg	0.11 ± 0.005 ^{aE\$}	0.71 ± 0.053 ^{bE&}	2.31 ± 0.176 ^{cE&}	2.59 ± 0.147 ^{dE#}	0.59 ± 0.028 ^{eE&}	6.27 ^{E*}
25年生 25-year-old	氮 N	1.68 ± 0.076 ^{aA#}	4.14 ± 0.234 ^{bA!}	5.57 ± 0.351 ^{cA!}	10.78 ± 0.445 ^{dA#}	2.90 ± 0.152 ^{eA*}	25.07 ^{AS}
	磷 P	0.09 ± 0.004 ^{aB*}	0.57 ± 0.031 ^{bB%}	0.72 ± 0.034 ^{cB&}	0.87 ± 0.043 ^{dB*}	0.24 ± 0.018 ^{eB*}	2.49 ^{B@}
	钾 K	0.58 ± 0.034 ^{aC@}	4.18 ± 0.248 ^{bC!}	4.88 ± 0.305 ^{cC!}	5.60 ± 0.396 ^{dC\$}	2.04 ± 0.115 ^{eC@}	17.28 ^{C*}
	钙 Ca	0.45 ± 0.026 ^{aD\$}	3.92 ± 0.233 ^{bD#}	5.12 ± 0.315 ^{cD!}	9.98 ± 0.415 ^{dD\$}	1.92 ± 0.126 ^{eD\$}	21.39 ^{D@}
	镁 Mg	0.10 ± 0.005 ^{aE\$}	0.65 ± 0.055 ^{bE&}	2.26 ± 0.156 ^{cE*}	2.55 ± 0.175 ^{dE#}	0.55 ± 0.024 ^{eE&}	6.11 ^{E#}

同一行小写字母相同表示差异不显著,不相同表示差异显著。某林龄时同一列中大写字母相同表示差异不显著,不相同表示差异显著。符号相同表示不同林龄时同一元素量,或不同林龄时相同的统计量差异不显著,不相同表示差异显著。

The same line in the same lowercase letters that the difference is not significant, not the same said significant difference. A certain age in the same column in the same letter that the difference is not significant, not the same significant difference. The same sign indicates that the same amount of elements at different ages, or the same statistic difference at different ages is not significant, and the difference is significant.

2.2 不同林龄段吸收的养分量

因为1–7年生林分只有7年生时的养分测定数据, 所以, 除1–7年生林分应吸收的养分量(生产量乘以其养分浓度)等于实际吸收的养分量(考虑某林龄段林木体内前后两次的养分浓度差异得出的结果)外, 8–11年生林分实际吸收养分量大于应吸收养分量, 12–16、17–20、21–25年生林分实际吸收养分量则少于应吸收养分量。这是由于某林龄段前后两次测定杉木体内养分浓度差异引起的。由此可见, 估算某林龄段吸收养分量时, 若不考虑某生长阶段林木体内前后两次养分浓度的差异, 得出的结果与实际是不相符的。从本研究看出, 林分11年生以前(林冠郁闭前)

养分实际吸收量要大于应吸收养分量, 11年生以后(林冠郁闭后)养分实际吸收量要少于应吸收养分量。

会同杉木林1–7、8–11、12–16、17–20和21–25年内, 林分平均每年实际吸收养分量分别为80.64、171.82、165.42、192.51和188.86 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 各林龄段吸收营养元素量都是 $\text{N} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Mg} > \text{P}$ (表2)。从不同林龄段养分平均年吸收量看出, 养分平均每年吸收量随林龄增加的变化呈现双波峰曲线, 波峰分别出现在8–11年和17–20年。养分平均每年吸收量随林龄变化体现了林木在不同生长阶段对养分的需求。从幼木到枝叶的快速生长阶段(8–11年生), 林分所需养分逐年增加。12–16年进入干材阶段(树

表2 杉木林在不同林龄阶段的养分吸收动态

Table 2 Nutrient uptake of *Cunninghamia lanceolata* forest at different ages

林龄 Stand age	生物量 Biomass ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	项目 Item	养分元素 Nutrient element					合计 Total
			氮 Nitrogen	磷 Phosphorus	钾 Potassium	钙 Calcium	镁 Magnesium	
1–7年 1 to 7 years	43.17	应吸收 Required absorption ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	204.38	18.68	124.92	170.65	45.82	564.45
		以前生长生物量转移或新吸收的养分 NTAPB ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	0	0	0	0	0	0
		实际吸收 Actual absorption ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	204.38	18.68	124.92	170.65	45.82	564.45
		平均每年实际吸收 Average annual actual absorption ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	29.20	2.67	17.85	24.38	6.54	80.64
8–11年 8 to 11 years	42.51	应吸收 Required absorption ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	229.02	22.35	145.73	200.89	57.86	655.85
		以前生长生物量转移或新吸收的养分 NTAPB ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	+12.44	+1.46	+5.43	+7.86	+4.12	+31.31
		实际吸收 Actual absorption ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	241.56	23.81	151.16	208.75	61.98	687.26
		平均每年实际吸收 Average annual actual absorption ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	60.39	5.95	37.79	52.19	15.50	171.82
12–16年 12 to 16 years	64.12	应吸收 Required absorption ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	286.43	29.79	197.72	264.85	77.47	856.26
		以前生长生物量转移或新吸收的养分 NTAPB ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	–7.03	–2.14	–6.37	–9.49	–4.11	–29.14
		实际吸收 Actual absorption ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	279.40	27.65	191.35	255.36	73.36	827.12
		平均每年实际吸收 Average annual actual absorption ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	55.88	5.53	38.27	51.07	14.67	165.42
17–20年 17 to 20 years	66.03	应吸收 Required absorption ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	293.18	26.83	178.72	232.99	65.31	797.03
		以前生长生物量转移或新吸收的养分 NTAPB ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	–6.62	–2.12	–5.62	–9.02	–3.61	–26.99
		实际吸收 Actual absorption ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	286.56	24.71	173.10	223.97	61.70	770.04
		平均每年实际吸收 Average annual actual absorption ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	71.64	6.18	43.28	55.99	15.42	192.51
21–25年 21 to 25 years	73.76	应吸收 Required absorption ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	352.41	32.05	217.53	288.29	79.92	970.20
		以前生长生物量转移或新吸收的养分 NTAPB ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	–6.47	–2.02	–5.31	–8.83	–3.26	–25.89
		实际吸收 Actual absorption ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	345.94	30.03	212.22	279.46	76.66	944.31
		平均每年实际吸收 Average annual actual absorption ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	69.19	6.01	42.44	55.89	15.33	188.86

–, 以前生育阶段生长的植物体内养分中输送到这一生育阶段新生长生物量中的养分; +, 这一生育阶段新吸收的养分中流向以前生育阶段现存生物体内的养分。

–, the nutrient was transported from individuals at the previous stage to the new growth biomass at this stage; +, the newly absorbed nutrients in this growth stage flew to the nutrients of the existing organisms in the previous stage. NTAPB, representative nutrients transferred or newly absorbed in previously grown biomass.

高生长和树干长粗), 虽然林分生产力较高($12.83 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), 但主要增加干材生物量, 因干材的养分含量少, 养分平均每年吸收量下降。进入近熟期林分(17–20年生), 林分生产力很大($16.51 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), 而干材生长减弱, 枝叶生长量较前一生长阶段多, 所以养分平均每年吸收量上升。进入成熟期后, 各器官的生理功能逐渐减弱, 林分生产力下降($14.75 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), 导致养分平均每年吸收量减少。

2.3 不同林龄时乔木层积累(现存)养分量

从表3看出, 任一林龄时乔木层各养分元素积累量中N积累量居首位, 占总积累量的35.42%–37.88%; 其次是Ca, 占总积累量的27.11%–29.65%; 然后是K, 为养分元素积累总量的22.71%–24.16%, Mg、P积累量相对较少, 分别只占积累总量的7.40%–8.60%和3.34%–3.55%。这与不同生长期林分吸收各养分元素量的大小顺序一致(表2), 显然, 从土壤中吸收的某养分元素量越多, 积累在杉木体内的这种元素量也越多。

7年生时林分的N、Ca、K、Mg、P积累量分别为170.27、139.54、106.86、38.20和15.71 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 到25年生时分别增加到696.59、498.51、444.17、136.13和63.43 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 各养分元素积累量随着林龄的增加而增加。

从各养分元素积累量占总积累量的百分比随林龄变化(表3)看出, K积累量占总积累量的百分比随林龄增加而增大, Ca则随林龄增加而减少; 从7年生到11年生, N积累量占总积累量的百分比有所下降, 11年生后, 则随林龄增加而增加; Mg积累量占总积累量的百分比随林龄变化与N恰好相反; P积累量占总积累量的百分比, 在16年生以前随林龄增加而增加, 16年生后随林龄增加而下降, 但变化不大。表明各养分元素积累速率随林龄的变化情况是不同的。

2.4 不同林龄段乔木层的养分归还量

除1–7年林龄中的枯死物是这个林龄段生长的叶的枯死物外, 其余林龄段的枯死物都不是1–7年林龄段生长的枝叶枯死的, 而是以前林龄段生长的枝叶存留到这个生长阶段枯死的(因为本研究的林龄段内林龄数都少于枝叶的生长周期)。研究表明, 1–7、8–11、12–16、17–20和21–25年林分年平均归还养分量依次为11.94、47.21、76.19、111.62和101.63 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (表4)。1–20年内养分归还量随着林木生长阶段的提高而逐渐增加, 进入成熟期后养分归还量有所下降。研究还表明: 会同杉木林在任一林龄段归还的养分量中, Ca最多, 其后依次是N、K、Mg和P。

2.5 不同生长阶段的养分循环特征

会同杉木林乔木层不同林龄养分循环中养分元素利用系数有以下规律: 同一林龄, Ca (0.112–0.220) > Mg (0.113–0.189) > N (0.099–0.179) > P (0.095–0.178) > K (0.096–0.172)。养分元素的利用系数越小, 林木对该元素的利用效率越高(温肇穆等, 1991)。由此可知, 会同杉木林任一个生长阶段的N、P、K的养分利用效率都大于Ca、Mg。N、P、K、Mg的利用系数随林龄增长出现相同的变化趋势, 11年以前随林龄增大而增加, 11年以后随林龄增长而下降, Ca的利用系数则随林龄增加而减少。可见林分郁闭后, 各养分元素的利用效率随着林木生长阶段的提高而增大。

不同林龄乔木层的养分循环系数有以下规律: 1–7年生为Mg > N > Ca > P > K, 8–11年生为Ca > Mg > N > K > P, 12–16年生为Ca > Mg > K > N = P, 17–20和21–25年生则为Mg > Ca > P > K > N。可见, 除幼林阶段(1–7年生)外, 7年生以后各发育阶段中, N、P、K的养分循环系数要小于Ca、Mg; N、P、K、

表3 杉木林不同林龄时乔木层积累的养分

Table 3 The nutrient accumulation in the tree layers of the *Cunninghamia lanceolata* forest at different ages

林龄 Stand age	现存生物量 Existing biomass ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	养分元素 Nutrient element ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)					合计 Total ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
		氮 Nitrogen	磷 Phosphorus	钾 Potassium	钙 Calcium	镁 Magnesium	
1–7年 1 to 7 years	40.06	170.27 (36.18)	15.71 (3.34)	106.86 (22.71)	139.54 (29.65)	38.20 (8.12)	470.58 (100)
8–11年 8 to 11 years	75.65	336.92 (35.42)	33.41 (3.51)	218.89 (23.01)	280.29 (29.46)	81.80 (8.60)	951.31 (100)
12–16年 12 to 16 years	114.67	480.69 (36.28)	47.48 (3.55)	313.36 (23.44)	376.64 (28.29)	113.85 (8.44)	1 332.02 (100)
17–20年 17 to 20 years	161.09	589.29 (37.14)	54.76 (3.45)	377.92 (23.88)	437.63 (27.59)	125.93 (7.94)	1 586.53 (100)
21–25年 21 to 25 years	209.84	696.59 (37.88)	63.43 (3.45)	444.17 (24.16)	498.51 (27.11)	136.13 (7.40)	1 838.83 (100)

括号内为百分数。

The number in brackets is a percentage.

www.plant-ecology.com

表4 杉木林不同林龄时的平均年归还的养分量
Table 4 The average amount of nutrient returned by *Cunninghamia lanceolata* at different stand ages

林龄 Stand age	器官 Organ	枯死物 Dead matter (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	养分元素 Nutrient element (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)					合计 Total (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)
			氮 Nitrogen	磷 Phosphorus	钾 Potassium	钙 Calcium	镁 Magnesium	
1-7年 1 to 7 years	枝 Twig	0	0	0	0	0	0	0
	叶 Needle	0.444	4.07	0.35	2.28	4.24	1.00	11.94
	合计 Total	0.444	4.07	0.35	2.28	4.24	1.00	11.94
8-11年 8 to 11 years	枝 Twig	0.175	0.93	0.13	0.85	1.01	0.41	3.33
	叶 Needle	1.555	14.58	1.26	8.17	16.09	3.78	43.88
	合计 Total	1.730	15.51	1.39	9.02	17.10	4.19	47.21
12-16年 12 to 16 years	枝 Twig	0.700	3.58	0.48	3.28	3.60	1.54	12.48
	叶 Needle	2.398	21.46	1.82	11.82	22.95	5.66	63.71
	合计 Total	3.098	25.04	2.30	15.10	26.55	7.20	76.19
17-20年 17 to 20 years	枝 Twig	1.750	8.65	1.15	7.86	8.70	3.74	30.10
	叶 Needle	3.153	27.46	2.30	14.94	29.60	7.22	81.52
	合计 Total	4.903	36.11	3.45	22.80	38.30	10.96	111.62
21-25年 21 to 25 years	枝 Twig	2.004	9.66	1.26	8.64	9.70	4.15	33.41
	叶 Needle	2.690	23.08	1.91	12.40	24.83	6.00	68.22
	合计 Total	4.694	32.74	3.17	21.04	34.53	10.15	101.63

Ca、Mg的循环系数随林龄增加的变化曲线均为抛物线, 抛物线顶点在17-20年内。25年时N、P、K、Ca、Mg的循环系数分别是7年时的3.40、4.02、3.91、4.65和4.33倍, 养分元素的循环系数随林龄增加而增加。养分的循环系数越大, 归还土壤的养分越多, 有利于土壤养分的积累, 反之亦然。由此可见, 7年生以后各发育阶段中, N、P、K的养分循环系数比Ca、Mg小, 表明林分养分归还不利于土壤的N、P、K积累。

会同杉木林不同林龄段元素周转期的大小: 1-7年> 8-11年> 20-25年> 12-16年> 17-20年。元素周转期表征元素在植物生长中被利用时间的长短, 周转期长, 利用时间就长。由此看出, 杉木幼林期(1-7年)和枝叶与树高快速生长期(8-11年), 各营养元素利用的时间比杉木干材生长阶段(12-16年)、近熟林阶段(17-20年)及成熟林阶段(21-25年)长。从表5还可看出, 7年生以后各发育阶段中, N、P、K的周转期大于Ca、Mg, 意味着它们被利用的时间比Ca、Mg长。

3 讨论

会同杉木营养元素浓度N>Ca>K>Mg>P, 且功能最活跃的叶的养分浓度最大, 生理活动最弱的树干中养分浓度最少, 这些与研究杉木养分的众多结果(潘维俦等, 1983; 冯宗炜等, 1985; 马祥庆等,

2000; 刘爱琴等, 2005)相同。杉木体内各营养元素浓度的高低是杉木长期进化与环境长期互相作用的结果。本研究表明当杉木进入速生阶段后, 体内养分浓度随生长阶段提高而下降。Miller (1984)认为高大乔木体内的养分浓度随着生长而下降是由于它们在自然界长期的生存竞争中, 在养分相对贫瘠的山地形成了独特的体内养分再分配及贮备机制。

会同杉木林归还的各营养元素中, Ca的归还量是最多的。已有研究表明, 植物枝叶在枯死时N、P、K都向活的叶组织转移(正转移), Ca的移动性差或不发生转移。还有研究发现枯死叶中Ca含量高于活叶的负转移现象(Kost & Boerner, 1985; Schlesinger *et al.*, 1989; 沈善敏等, 1993; 徐福余等, 1997)。由于杉木枝叶枯死时Ca几乎不向活组织转移, 枯死叶中Ca的浓度最大, 导致其归还量最多。

本研究中8-11年生杉木林各元素的循环系数(表5)与项文化等(2002)研究11年生本林分(N 0.26, P 0.25, K 0.27, Ca 0.68, Mg 0.60)相比, 除N的循环系数与项文化等(2002)的接近外, 其余元素的循环系数比项文化等(2002)的研究小; 除P、K循环系数较福建11年生杉木林(N 0.32, P 0.17, K 0.08, Ca 0.46, Mg 0.29)(刘爱琴等, 2005)大外, 其他元素小于福建11年生的。本研究21-25年生各元素的循环系数(表5)均大于会同21年生(N 0.45, P 0.49, K 0.29, Ca 0.35, Mg 0.39)(冯宗炜等, 1985), 福建31年生(N 0.39, P 0.24,

表5 杉木林不同林龄段的养分循环

Table 5 Nutrient cycle in different stand stages of *Cunninghamia lanceolata* forest

林龄 Stand age	项目 Item	养分元素 Nutrient element					合计 Total
		氮 Nitrogen	磷 Phosphorus	钾 Potassium	钙 Calcium	镁 Magnesium	
1–7年 1 to 7 years	7年生现存量 7-year-old existing stock (kg·hm ⁻²)	170.27	15.71	106.86	139.54	38.20	470.58
	年吸收量 Annual absorption (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	29.20	2.67	17.85	24.38	6.54	80.64
	年归还量 Annual restitution (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	4.07	0.35	2.28	4.24	1.00	11.94
	利用系数 Utilization coefficient	0.171	0.170	0.167	0.220	0.171	0.171
	循环系数 Cycling coefficient	0.139	0.131	0.127	0.133	0.153	0.148
	周转时间 Turnover period (a)	41.83	44.88	46.87	43.07	38.20	39.41
8–11年 8 to 11 years	11年生现存量 11-year-old existing stock (kg·hm ⁻²)	336.92	33.41	218.89	280.29	81.80	951.31
	年吸收量 Annual absorption (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	60.39	5.95	37.79	52.19	15.50	171.82
	年归还量 Annual restitution (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	15.51	1.39	9.02	17.10	4.19	47.21
	利用系数 Utilization coefficient	0.179	0.178	0.172	0.186	0.189	0.181
	循环系数 Cycling coefficient	0.257	0.234	0.239	0.328	0.270	0.275
	周转时间 Turnover period (a)	21.93	24.04	24.49	16.38	19.26	20.15
12–16年 12 to 16 years	16年生现存量 16-year-old existing stock (kg·hm ⁻²)	480.69	47.48	313.36	376.64	113.85	1 332.02
	年吸收量 Annual absorption (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	55.88	5.53	38.27	51.07	14.67	165.42
	年归还量 Annual restitution (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	25.04	2.30	15.10	26.55	7.20	76.19
	利用系数 Utilization coefficient	0.116	0.116	0.122	0.136	0.129	0.124
	循环系数 Cycling coefficient	0.448	0.416	0.395	0.520	0.491	0.461
	周转时间 Turnover period (a)	19.20	20.64	20.77	14.17	15.79	17.48
17–20年 17 to 20 years	20年生现存量 20-year-old existing stock (kg·hm ⁻²)	589.29	54.76	377.92	437.63	125.93	1 586.53
	年吸收量 Annual absorption (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	71.64	6.18	43.28	55.99	15.42	192.51
	年归还量 Annual restitution (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	36.11	3.45	22.80	38.30	10.96	111.62
	利用系数 Utilization coefficient	0.114	0.113	0.115	0.128	0.122	0.121
	循环系数 Cycling coefficient	0.504	0.560	0.527	0.684	0.711	0.580
	周转时间 Turnover period (a)	16.32	15.83	16.58	11.43	11.48	14.21
21–25年 21 to 25 years	25年生现存量 25-year-old existing stock (kg·hm ⁻²)	696.59	63.43	444.17	498.51	136.13	1 838.83
	年吸收量 Annual absorption (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	69.19	6.01	42.44	55.89	15.33	188.86
	年归还量 Annual restitution (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	32.74	3.17	21.04	34.53	10.15	101.63
	利用系数 Utilization coefficient	0.099	0.095	0.096	0.112	0.113	0.103
	循环系数 Cycling coefficient	0.473	0.527	0.496	0.618	0.662	0.538
	周转时间 Turnover period (a)	21.28	20.78	21.11	14.44	13.41	18.09

K 0.19, Ca 0.52, Mg 0.42)(刘爱琴等, 2005)杉木林养分循环系数, 均小于广西24–28年生(N 0.87, P 0.72, K 0.73, Ca 0.74, Mg 0.93)(温肇穆等, 1991)杉木林养分循环系数。

本研究8–11年生杉木林养分利用系数(表5)中, Ca、Mg比项文化等(2002)研究的11年生的同一林分(N 0.15, P 0.13, K 0.15, Ca 0.33, Mg 0.27)小, N、P、K比项文化等(2002)的大; 除Ca略小于福建11年生杉木林(N 0.17, P 0.14, K 0.12, Ca 0.20, Mg 0.15)(刘爱琴等, 2005)外, 其余元素利用系数均大于福建的。本研究21–25年生杉木林养分利用系数(表5)与冯宗炜等(1985)研究的会同21年生杉木林的结果(N

0.10, P 0.12, K 0.07, Ca 0.10, Mg 0.09)相近; 除P利用系数大于广西24–28年生杉木林外, 其余元素均小于广西的(温肇穆等, 1991); Ca和Mg利用系数与福建31年生杉木林(N 0.14, P 0.11, K 0.07, Ca 0.11, Mg 0.12)(刘爱琴等, 2005)相近, P比福建的大, N、K比福建的小。

本研究8–11年生杉木林营养元素的周转期(表5), 其中K与项文化等(2002)研究的11年生杉木林的结果(N 25.54 a, P 30.94 a, K 24.74 a, Ca 4.41 a, Mg 6.20 a)相同, N、P 周转时间比项文化等(2002)的短, Ca、Mg比项文化等(2002)的长; Ca、N周转时间比福建11年生杉木林(N 17.94 a, P 41.11 a, K 103.00 a,

Ca 11.26 a, Mg 22.21 a)的长, P、K、Mg比福建的短。本研究21–25年生杉木林各元素的循环周期(表5)均比广西24–28年生杉木林(N 7.5 a, P 17.1 a, K 11.3 a, Ca 6.7 a, Mg 3.0 a)(温肇穆等, 1991)时间长; 除N的周转时间比福建31年生杉木林(N 19.02 a, P 37.21 a, K 82.28 a, Ca 16.95 a, Mg 20.01 a)(刘爱琴等, 2005)长外, 其余元素周转期都比福建的时间短。

本研究中的林分与项文化等(2002)研究的是同一林分, 且11年生时测定的生物现存量 and 养分浓度数据都相同。相同的数据得出不同的结果, 这是因为以下原因: (1)项文化等(2002)取的是一个时间段1–11年生, 本研究中把它分成1–7年和8–11年两个时间段, 所取的时间尺度不一样, 导致研究结果不一样。(2)项文化等(2002)的研究中枯死物量是根据研究的林龄段内测定的林地凋落物量估算, 本研究是利用枝叶的生长周期估算, 得出的枯死物量不完全相等, 因而其养分归还量不同。(3)研究方法不同, 项文化等(2002)用生物现存量加凋落物量估算生产量, 本研究利用枝叶的生长周期和某林龄段前、后两次测定的生物量数据估算某林龄段生产量; 项文化等(2002)采用“吸收=存留+归还”的方法估算林分养分吸收量, 本文研究方法与之不同。正因如此, 才导致用相同生物现存量 and 养分浓度基础数据的同一林分所分析出的林分养分循环特征有所不同。与其他研究结果存在差别, 除上面的原因外, 还有一个原因是本研究与其他同类研究的立地环境条件不完全相同, 同一树种在不同的立地环境条件下, 可能造成其林木对土壤养分的吸收和林木养分浓度的差异, 进而导致养分循环特征上的差异。

在研究森林养分循环上, 众多学者无一例外地都采用“吸收=存留+归还”这个平衡式来分析森林养分循环特征。这是因为这些研究者只在林分某一林龄时测定了林分生物量和树木的养分浓度, 由于只有一次测定数据, 用这个平衡式来分析从造林到测定林分生物量和树木的养分浓度的这一林龄时的林分的养分循环, 但这种方法掩盖了养分循环过程的动态变化。由于乔木独特的体内养分再分配及贮备机制(Miller, 1984), 某林龄段吸收的养分并不全部存留在这个林龄段中生产的物质内, 有些输送到前一林龄段林分生产的在本林龄段还存活的物质内。或者本林龄段林分生产物质的养分并不都来自土壤, 有些是前一林龄段林分生产的在本林龄段还

存活的物质内转移出来的养分再利用。当这个林龄段林木的养分浓度高于前一林龄段时, 前一林龄段林分生产的在本林龄段还存活的物质内养分就增多了, 因此, 本林龄段林分吸收土壤的养分有一些转移到前一林龄段林分生产的在本林龄段还存活的物质内。如果这个林龄段林木的养分浓度低于前一林龄段, 那么前一林龄段林分生产的在本林龄段还存活的物质内养分就降低了, 这些还存活的物质中有部分转移出来再用于林分的物质生产。此外, 一个常绿林分, 虽然枝叶在树木生长过程中不断代谢, 但由于枝、叶都有一定的生长周期, 某林龄段(尤其是研究的林龄段的年份数小于枝、叶的生长周期)的枯死物并不完全是在这个林龄段中生产的物质, 有一部分可能是以前林龄段中生产的物质, 它们存留下来在本林龄段才枯死。由此可见, 在林分某林龄段的养分吸收量并不完全等于这个林龄段的养分存留量与归还量之和。森林生物地球化学循环是一个非常复杂的生物过程, 因此, “吸收=存留+归还”的平衡式并不能全面反映森林养分循环过程的各个环节。必须根据树种生物学特性、不同环境条件、不同循环环节, 寻求既科学又符合实际的研究养分循环的方法。

本文研究会同杉木林不同林龄段的养分循环时, 在某林龄段的生产量、枯死物量和养分吸收量的估算上, 采用了与传统方法不同的方法。而分析不同林龄段的养分循环特征时, 仍用养分利用系数、循环系数、周转周期等参数来描述。既然不用“吸收=存留+归还”的平衡式来表达养分循环, 那么本研究这样利用的养分利用系数、循环系数、周转周期等参数是否符合养分循环的生理生态过程和原理? 首先从这些参数的定义上分析。养分利用系数的定义是单位时间、单位面积植物所吸收的某种元素的量与存在于植物现存量中的相应元素总量之比; 周转周期的定义则为存在于该系统中物质总量与出入于一个系统内的单位时间、单位面积或体积内物质输出量之比(陈灵芝和Lindley, 1983)。本研究用某林龄段林分单位面积的某元素年吸收量除以积累在林分现存量中的相应元素总量求出该养分元素利用系数, 用积累在林分现存量中的某元素总量除以某林龄段林分单位面积的相应元素年归还量得出某元素的周转周期, 这样看来我们利用的养分利用系数、周转周期等参数并没有改变它们原来的含义。循环系数

为单位时间、单位面积植物归还的某种元素的量与单位时间、单位面积植物吸收某种元素量之比(温肇穆等, 1991), 我们也正是用这种概念求算循环系数的。问题在于, 在“吸收=存留+归还”的平衡式方法下求得的循环系数中的养分归还量完全是在这单位时间、单位面积植物吸收养分中归还的。也可以这样理解, 在研究林分某林龄段养分循环时, 只要求得某林龄段内的养分吸收量和归还量, 就无需考虑归还的养分是该林龄段吸收养分中的还是积累在原来生长的物质中的, 只需要确定这些养分是在这个林龄段归还的(在循环系数定义中并没有明确指出单位时间内归还的养分一定是这一单位时间吸收的养分中的)。而且前面已分析, 由于常绿针叶林林木生长的生理特性, 枝叶具有一定的生长周期, 完全有可能某林龄段的枯死物并不完全是这林龄段内生产的物质中枯死的, 有些是以前林龄段生长、留到此林龄段内才枯死的。显然养分归还量完全是在这单位时间、单位面积植物吸收养分中归还的, 与林木枝叶的生长规律不符。因此, 我们有理由认为本文研究林分养分循环的方法和循环指标符合养分循环的生理生态过程和原理, 也符合林木不同发育阶段体内养分再分配及贮备机制(Miller, 1984)和林木生长过程中枝叶的生长规律。

本研究是在同一林分定位连续测定不同林龄段林分生物量和杉木器官的养分浓度基础上进行的, 避免了“时空转换”研究方法的缺陷, 研究结果保证了空间尺度的一致性和时间尺度的连续性。

4 结论

在林龄1–25年内, 会同杉木器官养分浓度, 叶>枝>皮>根>干, 各器官同一元素含量之和的大小顺序是 $N > Ca > K > Mg > P$ 。当林冠郁闭后(12年生后), 器官养分浓度随林龄增加而下降。

在林龄1–25年内, 林分吸收各营养元素的量都是 $N > Ca > K > Mg > P$, 除1–7年生林分吸收的养分量等于生产物质量(包括枯死物)乘以物质的养分浓度外, 7年生后各生长阶段吸收的养分并不等于某生长阶段生产的物质乘以物质的养分浓度。这是由于林分郁闭后的林木体内养分再分配及贮备机制引起的。养分平均年吸收量随林龄的变化呈现双波峰曲线, 波峰分别出现在8–12年和17–20年。

除1–7年生林分归还养分量是在该林龄段内生

产的物质的枯死物中归还外, 其余各林龄段归还的养分量不完全是在该林龄段内生长的枝叶枯死物中归还的, 有些是在以前的林龄段生长的枝叶存留到该林龄段中的枯死物归还的。养分归还量随着林木生长进程而逐渐增加。在任一林龄段归还的养分量中, Ca元素量最多, 其次是N、K、Mg和P。

在1–25年林龄内, 会同杉木林各营养元素的利用效率都是 $P > K > N > Mg > Ca$; N、P、K利用效率随林龄增长而增大, Ca、Mg利用效率在1–11年生林龄内逐渐下降, 11年生后都随林龄增长而增大。在林龄1–25年内, Ca、Mg的循环强度大于N、P; 各营养元素循环强度随林龄增长的变化曲线都为抛物线。就整体变化趋势而言, 各元素循环强度随林龄增加而增大。同一林龄段N、P、K被杉木利用的时间比Ca、Mg长, 各元素被杉木生长利用的时间随着发育进程而缩短。

“吸收=存留+归还”的平衡式只适用于只测定一次林分生物量和树木的养分浓度, 分析从造林到测定林分生物量和树木的养分浓度的这一林龄时的林分养分循环的情况, 用来分析常绿针叶林不同林龄段的养分循环不一定完全适合。

参考文献

- Aerts R, Chapin FS (1999). The mineral nutrition of wild plants revisited: A reevaluation of processes and patterns. *Advances in Ecological Research*, 37, 1–67.
- Bazilevich NI, Rodin LE (1966). The biological cycle of nitrogen and ash elements in plant communities of the tropical and subtropical zones. *Forestry Abstracts*, 27, 357–372.
- Bormann FH, Likens GE (1979). *Pattern and Process in a Forest Ecosystem*. Springer, New York. 253–259.
- Chen LZ, Lindley DK (1983). Nutrient cycling in Hampsfell bracken grassland ecosystem, England. *Acta Botanica Sinica*, 25, 67–74. [陈灵芝, Lindley DK (1983). 英国 Hampsfell 的蕨类草地生态系统的营养元素循环. 植物学报, 25, 67–74.]
- Ebrmayer E (1876). *Die Qesamte Lehreter Woldstreumit Ruck-sichtauf die Chemische Staticdes Woldbaues*. Julius Spruiger Press, Berlin. 116.
- Feng ZW, Chen CY, Wang KP, Zhang JW, Zeng SY, Zhao JZ, Deng SJ (1985). Accumulation, distribution and cycling of nutrient elements in a subtropical Chinese fir stand. *Acta Phytoecologicaet Geobotanica Sinica*, 9, 245–256. [冯宗炜, 陈楚莹, 王开平, 张家武, 曾士余, 赵吉录, 邓仕坚 (1985). 亚热带杉木纯林生态系统中营养元素的积累、分配和循环的研究. 植物生态学与地植物学丛刊, 9,

- 245–256.]
- He B, Qin WM, Wu HG, Liu YH, Qin L, Qin YH (2007). Biological cycling of nutrients in different ages classes of *Acacia mangium* plantation. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 5158–5167. [何斌, 秦武明, 余浩光, 刘运华, 覃林, 覃永华 (2007). 不同年龄阶段马占相思(*Acacia mangium*) 人工林营养元素的生物循环. 生态学报, 27, 5158–5167.]
- Ji WJ, Cheng XQ, Han HR, Kang FF, Yang J, Zhu J, Zhao J, Bai YC, Ma JY (2016). The biomass and nutrient distribution in *Larix principis-ruppechtii* Magyr plantations at different forest age. *Journal of Applied and Environmental Biology*, 22, 277–284. [纪文婧, 程小琴, 韩海荣, 康峰峰, 杨杰, 朱江, 赵敬, 白英辰, 马俊勇 (2016). 不同林龄华北落叶松人工林生物量及营养元素分布特征. 应用与环境生物学报, 22, 277–284.]
- Kost JA, Boerner RE (1985). Foliar nutrient dynamics and nutrient use efficiency in California. *Ecology*, 66, 602–606.
- Lin DX, Liu KH, Luo SF (2002). Dynamics and cycling analysis of nutrient elements in *Eucalyptus urophylla*. *Journal of Applied and Environmental Biology*, 8, 148–153. [林德喜, 刘开汉, 罗水发 (2002). 尾叶桉营养元素动态和循环分析. 应用与环境生物学报, 2, 148–153.]
- Liu AQ, Fan SH, Lin KM, Ma XQ, Sheng WT (2005). Comparison on nutrient cycling in different generation plantations of Chinese fir. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 11, 273–278. [刘爱琴, 范少辉, 林开敏, 马祥庆, 盛炜彤 (2005). 不同栽植代数杉木林养分循环的比较研究. 植物营养与肥料学报, 11, 273–278.]
- Lu RK (2002). *Soil Agricultural Chemical Analysis Methods*. China Agricultural Science and Technology Press, Beijing. 128–133. [鲁如坤 (2002). 土壤农业化学分析方法. 中国农业科技出版社, 北京. 128–133.]
- Ma XQ, Liu AQ, Ma Z, Fan SH (2000). A comparative study on nutrient accumulation and distribution of different generations of Chinese fir plantations. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 11, 501–506. [马祥庆, 刘爱琴, 马壮, 范少辉 (2000). 不同代数杉木林养分积累和分布的比较研究. 应用生态学报, 11, 501–506.]
- Miller HG (1984). *Dynamics of Nutrient Cycling in Plantation Ecosystems*. In: Bowen GD, Nambiar EKS eds. *Nutrition of Plantation Forests*. Academic Press, London. 53–78.
- Pan WC, Tian DL, Lei ZX, Kang WX (1983). Studies on the nutrient cycling in the Chinese fir plantations. II. Content accumulation rate biological cycling of nutrient elements in the fast-growing in the Chinese fir forest in the hill regions. *Journal of Central South Forestry University*, 3, 1–17. [潘维伟, 田大伦, 雷志星, 康文星 (1983). 杉木人工林养分循环的研究(二): 丘陵区速生杉木林的养分含量、积累速率和生物循环. 中南林学院学报, 3, 1–17.]
- Schlesinger WH, Delucia EH, Billings WD (1989). Nutrient-use efficiency of woody plants on contrasting soils in the western Great Basin, Nevada. *Ecology*, 56, 105–113.
- Shen SM, Yu WT, Zhang L, Hian HZ (1993). Internal and external nutrient cyclings of *Populus* tree. II. Transferring and cycling of nutrients in and out of the tree before and after leaf fallen. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 4, 27–31. [沈善敏, 宇万太, 张璐, 廉鸿志 (1993). 杨树主要营养元素内循环及外循环研究. 2. 落叶前后养分在植株体内外的迁移和循环. 应用生态学报, 4, 27–31.]
- Tian DL, Pan HH, Kang WX, Fang HB (2001). Studies of nutrient dynamics of the second generation of china fir plantation. *Journal of Central South Forestry University*, 18, 11–16. [田大伦, 盘宏华, 康文星, 方海波 (2001). 第二代杉木林养分动态研究. 中南林学院学报, 18, 11–16.]
- Tong ZL, Chen QB, Wang YX, Xiong HQ, Wu JX (2014). Accumulation and distribution characteristics of nutrients in *Pinus yunnanensis* forests with different ages. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition)*, 42, 100–106, 114. [佟志龙, 陈奇伯, 王艳霞, 熊好琴, 吴晋霞 (2014). 不同林龄云南松林营养元素积累与分配特征研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 42, 100–106, 114.]
- Tsutsuimi T, Kawahara T, Shidei T (1968). The circulation of nutrients in forest ecosystems (1): On the amount of nutrients contained in the above-ground parts of single tree of stand. *Japanese Forestry Society*, 3, 66–74.
- Wen ZM, Liang HW, Li Y (1991). Studies on the biocycling of nutrient elements of tree layer of *Cunninghamia lanceolata* mature plantations. *Acta Phytoecologica et Geobotanica Sinica*, 15, 36–45. [温肇穆, 梁宏温, 黎跃 (1991). 杉木成熟林乔木层营养元素生物循环的研究. 植物生态学与地植物学学报, 15, 36–45.]
- Xiang WH, Tian DL (2002). Nutrient cycling *Pinus massoniana* stands of different age classes. *Acta Phytoecologica Sinica*, 26, 89–95. [项文化, 田大伦 (2002). 不同年龄阶段马尾松人工林养分循环的研究. 植物生态学报, 26, 89–95.]
- Xiang WH, Tian DL, Yan WD, Kang WX, Fang HB (2002). Nutrient elements distribution and cycling in the second rotation Chinese Fir plantation at fast-growing stage. *Scientia Silvae Sinicae*, 38(2), 2–8. [项文化, 田大伦, 闫文德, 康文星, 方海波 (2002). 第2代杉木林速生阶段营养元素的空间分布特征和生物循环. 林业科学, 38(2), 2–8.]
- Xiao XC, Li ZH, Tang ZJ, Zeng Q, Wang HF (2013). Effects of stand density on nutrient cycling rate and use efficiency of *Pinus elliottii* plantation. *Chinese Journal of Ecology*, 32, 2871–2880. [肖兴翠, 李志辉, 唐作钧, 曾琴, 王海凤 (2013). 林分密度对湿地松人工林养分循环速率和利用效率的影响. 生态学杂志, 32, 2871–2880.]
- Xu FY, Wang LH, Li PZ, Xu SM, Zhang SY (1997). Internal and external nutrient transfers in foliage of some north deciduous trees. I. Changes of nutrient concentrations and

- contents. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 8, 1–6. [徐福余, 王力华, 李培芝, 许思明, 张颂云 (1997). 若干北方落叶树木叶片养分的内外迁移. I. 浓度和含量的变化. 应用生态学报, 8, 1–6.]
- Yu SQ (1994). Studies on the nutritive cycling of plantation system of Cupressaceae: (2). The nutrient accumulation distribution and utilization in arbor layer. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 12, 505–510. [余树全 (1994). 柏木人工林生态系统养分循环研究(2). 乔木层营养元素积累、分配和利用. 四川农业大学学报, 12, 505–510.]
- Yu YF, He TG, Peng SX, Song TQ, Zeng FP, Du H, Han C, Li SS (2015). Dynamics of nutrient elements in different types of forests in depressions between karst hills. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 7531–7542. [俞月凤, 何铁光, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 杜虎, 韩畅, 李莎莎 (2015). 喀斯特峰丛洼地不同类型森林养分循环特征. 生态学报, 35, 7531–7542.]
- Zhang WR, Xu BT (1986). *Research Method of Forest Soil Location*. China Forestry Publishing House, Beijing. 20–36. [张万儒, 许本彤 (1986). 森林土壤定位研究方法. 中国林业出版社, 北京. 30–36.]
- Zhang XB, Shangguan ZP (2006). Nutrient distributions and bio-cycle patterns in both natural and artificial *Pinus tabulaeformis* forests in Hilly Loess Regions. *Acta Ecologica Sinica*, 26, 373–382. [张希彪, 上官周平 (2006). 黄土丘陵区油松人工林与天然林养分分布和生物循环比较. 生态学报, 26, 373–382.]
- Zhao CM, Cao JH, Jiang JS, Li XB, Xie GS (2008). Nutrient accumulation, distribution and biological cycling in *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Muell. Arg. plantation ecosystem. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 24, 467–470. [赵春梅, 曹建华, 蒋菊生, 李晓波, 谢贵水 (2008). 橡胶人工林生态系统养分积累、分配与生物循环. 中国农学通报, 24, 467–470.]
- Zhuang ZD, Chen QB, Zhao YY, Xiong XQ (2016). Distribution pattern of nutrient elements in evergreen broad-leaved forest in Mopanshan, Middle Yunnan Plateau. *Journal of Northeast Forestry University*, 44(3), 26–32. [庄志东, 陈奇伯, 赵洋毅, 熊好琴 (2016). 滇中高原磨盘山常绿阔叶林营养元素分配格局. 东北林业大学学报, 44(3), 26–32.]

特邀编委: 陈 槐 责任编辑: 王 葳