

厚荚相思中龄林养分分布与生物地球化学循环

何斌¹, 余春和², 何荣², 刘莉¹, 罗柳娟¹, 刘红英¹

(1 广西大学 林学院, 广西 南宁 530004; 2 广西七坡林场, 广西 南宁 530001)

摘要:采用标准样地法研究了7年生(中龄林)厚荚相思 *Acacia crassicaarpa* 人工林10种养分元素(N、P、K、Ca、Mg、Fe、Mn、Zn、Cu和B)的分布和生物循环特点。结果表明:1)厚荚相思不同器官营养元素含量为:树叶>干皮>树枝>树根>干材,各器官中大量营养元素含量以N最高,其次是Ca或K,然后是Mg,P最低,微量元素含量则以Mn和Fe最高,其次是Zn和B,Cu最低;2)厚荚相思人工林养分贮存量为1 121.07 kg·hm⁻²,其中乔木层、林下植物层和凋落物层积累量依次为848.94、116.05和156.08 kg·hm⁻²,分别占总积累量的75.72%、10.35%和13.92%,林木中不同器官养分元素贮存量排序为:干材>树叶>树枝>干皮>树根;3)厚荚相思人工林养分年吸收量、归还量、存留量分别为261.87、140.59和121.28 kg·hm⁻²·年⁻¹,循环系数为0.54,周转期为6.04年。因此,厚荚相思中龄林的营养元素利用率较低,归还速率较快,周转期较短,有利于林地地力的恢复和维持。

关键词:厚荚相思; 中龄林; 养分; 生物地球化学循环

中图分类号:S158.3

文献标志码:A

文章编号:1001-411X(2012)01-0053-05

Nutrient Distribution and Biogeochemical Cycling in Middle-Aged *Acacia crassicaarpa* Plantation

HE Bin¹, YU Chun-he², HE Rong², LIU Li¹, LUO Liu-juan¹, LIU Hong-ying¹

(1 College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530005, China;

2 Qipo Forest Farm of Guangxi, Nanning 530001, China)

Abstract: The standard plot method was used to study the distribution and biological cycling of 10 nutrient elements (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu and B) in the 7-year-old (middle-age) *Acacia crassicaarpa* plantation. The results indicated that concentrations of the 10 nutrient elements in different organs of *A. crassicaarpa* plantation were in the order of leaves > bark > branch > root > stem. The contents of N were the highest, K and Ca the second, Mg and P the lowest for macro-elements, whereas Mn and Fe were the highest, B and Zn the second, and Cu the lowest for micro-elements. The nutrient storage of the plantation was 1 121.08 kg·hm⁻², of which overstorey of *A. crassicaarpa* trees stored 848.94 kg·hm⁻² accounting for 75.72%, forest floor 116.05 kg·hm⁻² account for 10.35%, and standing litter 156.08 kg·hm⁻² account for 13.92%. The amounts of nutrient elements in different parts of trees was in the order of stem > leaves > branch > bark > root. The amounts of annual uptake, retention and return of 10 elements in the plantation were 261.87, 140.59 and 121.28 kg·hm⁻², respectively. The cycling coefficient and recycling period were 0.54 and 6.04. As was observed, the nutrient utilization efficiency in middle-aged *A. crassicaarpa* plantation was lower, but the return rate was higher and the turnover period was shorter, resulting in the recovery and maintenance of forestland fertilization.

Key words: *Acacia crassicaarpa*; middle-aged plantation; nutrients; biogeochemical cycling

森林生态系统的养分循环是生态系统的重要功能之一,直接影响着森林的生产力,很大程度上制约

收稿日期:2011-03-01

作者简介:何斌(1962—),男,研究员,硕士,E-mail:hebin8812@163.com

基金项目:广西自然科学基金(0640018);广西教育厅科研基金(2006-26);“十五”广西林业科学研究项目(2002-59)

着森林地力变化的方向和强度,对林地养分平衡的维持有重要作用^[1-2].厚荚相思 *Acacia crassicarpa* 又名粗果相思,原产澳大利亚、巴布亚新几内亚和印度尼西亚等地,具有速生、干形较直、耐干旱瘠薄和抗逆性强等特点,成为我国南方短周期工业用材林的主要造林树种之一,并取得良好的生态和经济效益^[3].国内外对厚荚相思的经营管理进行了大量的研究^[4-7],但有关其人工林养分含量、积累以及生物循环的研究文献较少^[8-9],仅见于林龄为1.5~4.5年生幼龄林养分生物循环的报道.为此,本文通过对7年生(中龄林)厚荚相思人工林10种养分元素含量、积累、分布和生物循环的研究,进一步揭示厚荚相思人工林的养分特征及其循环规律,为厚荚相思人工林经营管理尤其是林地养分管理提供科学依据.

1 试验地与林分概况

试验地位于广西南宁市北郊的广西高峰林场界牌分场,地理位置为108°21'E、22°58'N,地处南宁盆地的北缘,大明山山脉南伸的西支,林地平均海拔300 m以下,属亚热带季风气候,年平均温度21.8℃,极端最高气温40℃,≥10℃年积温约7 200℃,年平均降雨量1 350 mm,降雨多集中在5—9月,相对湿度79%.标准地位于山坡中部,海拔约200 m,坡度27~30°,坡向南偏东,土壤类型为砂页岩发育形成的赤红壤,土壤厚度在70 cm以上.

试验地前茬林分为杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林,2000年12月采伐杉木林并经炼山整地后,于2001年4月用厚荚相思实生苗定植,初植密度1 140株/hm².2008年1月调查时经自然稀疏和间伐后林分保留密度为850株/hm²,郁闭度0.75,林分平均胸径15.2 cm,平均树高14.8 m^[10].林下植物主要有毛桐 *Mallotus barbatus*、桃金娘 *Rhodomyrtus tomentosa*、潺槁树 *Litsea glutinosa*、越南悬钩子 *Rubus cochinchinensis* 等灌木,以及五节芒 *Miscanthus floridulus* 和蔓生莠竹 *Microstegium vegans* 等,凋落物层厚度3~4 cm,其中,落叶占85%以上.

2 研究方法

2.1 标准地设置与生物量测定

在对厚荚相思人工林全面踏查的基础上,设置3个20 m×20 m的标准地,测定标准地内树木的树高和胸径.根据林分生长调查结果,按林木的径级分布,在标准地选取各径级标准木(共5株)伐倒,地上部分采用2 m区分段“分层切割法”测定干材、干皮、活枝、枯枝、树叶鲜质量,地下部分(根系)采用全根

挖掘法^[10],按根桩、粗根(直径≥2.0 cm)、中根(直径0.5~2.0 cm)、细根(直径<0.5 cm)分别测定鲜质量,同时分别取样在85℃恒温下烘干至恒质量,计算其生物量.

2.2 林下植被生物量和现存凋落物量调查

在各标准地内分别设置5个面积为1 m×1 m小样方,调查样方内植物种类、个体数、高度和覆盖度等.按灌木层、草本层分别采用样方收获法收割和称量地上部鲜质量,再挖掘和称量样方地下20 cm范围内的根,并测定其生物量或现存量,同时收集和称量样方内凋落物,并取样测定其含水率和干质量.

2.3 年凋落物量的测定

年凋落物量测定采用直接收集法,在每个标准地内随机设置6个1 m×1 m的木框架尼龙网(孔径1 mm)收集器,每月月底收集凋落物1次,带回室内,按叶、枝、花果和杂物等组分烘干测定生物量.

2.4 植物样品的采集及养分元素分析

在测定各组分生物量的同时,按不同组分采集分析样品;凋落物样品按各月份凋落物质量比例各选取一定量的凋落物混合后作为化学分析样品.N、P、K含量采用浓H₂SO₄-HClO₄消化法消煮后,N用氨气敏电极法测定^[11],P用钼锑抗比色法测定,K用火焰光度计法测定^[12];Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn含量采用HClO₄-HNO₃消化法消煮,然后用原子吸收光谱法测定^[12];B含量用干灰化法灰化,然后用姜黄素比色法测定^[12].

2.5 养分循环参数的计算

采用养分利用系数、循环系数和周转时间等生物循环参数来分析养分循环的特征.根据生物循环公式:吸收量=存留量+归还量.上述养分利用系数为吸收量与贮存量的比值,表明林木维持其生长所需的营养元素量;循环系数为归还量与吸收量的比值,表征营养元素的循环强度;周转时间为营养元素经历一个循环周期所需的时间,为营养元素的总贮存量除以归还量^[8].

3 结果与分析

3.1 养分元素含量

从表1可以看出,厚荚相思中龄林以同化器官树叶养分元素含量最高,干材的养分含量最低;各组分养分含量由高到低次序为:树叶、干皮、活枝、中根、细根、根桩、粗根、枯枝、干材.各组分中的大量元素含量多数以N最高,其次是K、Ca和Mg,P的含量最低.微量元素以Mn和Fe的含量最高,其次是Zn和B,Cu最低.

厚荚相思中龄林林下植被(草本层和灌木层)和凋落物层的养分含量较丰富,除略低于厚荚相思树叶外,多数养分含量高于厚荚相思其他营养器官,因

此,厚荚相思人工林不同结构层次中的养分含量为草本植物>灌木植物>乔木植物,反映了厚荚相思人工林不同结构层次对养分元素的富集能力。

表 1 厚荚相思中龄林各组分养分元素含量¹⁾

Tab. 1 Nutrient element contents in different components of middle-aged *Acacia grasscarp* plantation

组分	$w/(g \cdot kg^{-1})$				
	N	P	K	Ca	Mg
树叶	17.65 ± 0.72	0.65 ± 0.03	6.72 ± 0.23	5.18 ± 0.34	1.39 ± 0.13
活枝	7.42 ± 0.14	0.24 ± 0.02	2.83 ± 0.18	2.11 ± 0.05	0.59 ± 0.10
枯枝	1.79 ± 0.08	0.16 ± 0.01	0.26 ± 0.02	2.78 ± 0.11	0.38 ± 0.06
干皮	4.80 ± 0.10	0.24 ± 0.02	3.86 ± 0.13	4.59 ± 0.21	0.54 ± 0.04
干材	2.22 ± 0.06	0.07 ± 0.00	0.98 ± 0.10	0.65 ± 0.03	0.30 ± 0.02
根桩	5.06 ± 0.12	0.28 ± 0.02	1.89 ± 0.52	1.35 ± 0.07	0.20 ± 0.02
粗根	5.04 ± 0.09	0.29 ± 0.01	2.13 ± 0.08	0.51 ± 0.02	0.31 ± 0.05
中根	4.50 ± 0.14	0.32 ± 0.02	2.80 ± 0.12	1.01 ± 0.03	0.30 ± 0.02
细根	3.41 ± 0.20	0.34 ± 0.03	3.07 ± 0.15	1.28 ± 0.10	0.26 ± 0.01
灌木	7.94 ± 0.13	0.62 ± 0.02	7.88 ± 0.94	4.09 ± 0.38	0.97 ± 0.05
草本	10.24 ± 0.30	0.73 ± 0.04	7.68 ± 0.66	8.02 ± 0.65	1.35 ± 0.03
凋落物	7.73 ± 0.22	0.48 ± 0.03	2.16 ± 0.10	5.08 ± 0.24	0.67 ± 0.02

组分	$w/(mg \cdot kg^{-1})$				
	Fe	Mn	Zn	Cu	B
树叶	52.46 ± 5.36	215.91 ± 8.10	10.64 ± 0.41	8.64 ± 0.50	15.93 ± 1.12
活枝	16.80 ± 1.18	36.24 ± 1.07	12.55 ± 0.70	6.62 ± 0.22	6.19 ± 0.38
枯枝	26.98 ± 3.68	34.25 ± 2.14	11.36 ± 0.52	12.45 ± 0.98	8.75 ± 0.40
干皮	28.10 ± 1.37	41.63 ± 2.38	3.64 ± 0.17	1.98 ± 0.15	8.92 ± 1.02
干材	11.42 ± 1.46	14.02 ± 1.06	3.94 ± 0.52	1.66 ± 0.22	2.90 ± 0.12
根桩	29.11 ± 2.17	26.99 ± 2.41	3.76 ± 0.30	2.65 ± 0.28	5.03 ± 0.33
粗根	37.68 ± 2.52	15.18 ± 0.78	2.41 ± 0.14	2.41 ± 0.19	3.84 ± 0.37
中根	40.55 ± 2.06	20.81 ± 1.94	3.68 ± 0.60	2.56 ± 0.20	5.43 ± 0.29
细根	113.06 ± 4.04	19.12 ± 1.56	2.46 ± 0.21	3.01 ± 0.17	8.67 ± 1.03
灌木	76.08 ± 2.33	432.72 ± 15.30	18.52 ± 1.45	9.13 ± 0.69	17.06 ± 1.77
草本	102.34 ± 3.47	583.37 ± 12.68	23.16 ± 1.60	12.40 ± 0.30	13.14 ± 1.08
凋落物	106.40 ± 4.86	380.05 ± 10.14	13.20 ± 0.87	4.82 ± 0.42	15.62 ± 0.96

1) 表中数据为平均值 ± 标准误, $n=3$ 。

3.2 养分贮存量及其分配

从表 2 可以看出,厚荚相思中龄林养分贮存量为 $1\,121.07\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。乔木层作为有机物的主要生产者,所积累的养分达到 $848.94\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,占总贮存量的 75.72%,乔木层不同器官养分贮存量为干材>树叶>树枝>树皮>树根。从乔木层各种养分看,以 N 的贮存量最多,为 $434.69\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,占乔木层养分贮存量的 54.19%,分别为 P ($17.46\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的 24.90 倍、K ($186.68\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的 2.33 倍、Ca ($162.24\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的 2.67 倍和 Mg ($41.09\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的 10.58 倍。如把林木器官分为

树冠(树枝和树叶)、树干(干材和干皮)和树根 3 部分,则厚荚相思中龄林上述 3 部分养分贮存量依次占乔木层贮存量为 44.28%、41.49% 和 14.23%。

厚荚相思中龄林灌木层和草本层养分贮存量依次为 58.95 和 $57.10\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别占林分养分贮存总量的 5.26% 和 5.09%;凋落物层养分贮存量为 $156.08\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,明显高于相近林龄的巨尾桉 *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* 人工林^[13],虽然其占林分养分贮存量的比例(13.92%)不很高,却是改善林地土壤肥力性状的基础,由于凋落物中绝大部分是比较容易分解的树叶,难分解的树枝等所占比例

较小,而且凋落物中 N 的贮存量较大 ($72.51 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 所占凋落物中养分贮存量比例达到 46.46% , 因此在维持和提高林地土壤肥力尤其是提高土壤 N 素供应水平方面起着极其重要的作用。

表2 厚荚相思中龄林养分贮存量

Tab.2 Nutrient storage of middle-aged *Acacia grasscarp* plantation $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

组分	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B	合计
树叶	114.37	4.19	43.55	33.57	8.99	0.34	1.40	0.07	0.06	0.10	206.64
树枝	88.68	3.37	31.84	35.89	8.23	0.31	0.55	0.19	0.13	0.11	169.30
干皮	45.89	2.28	36.90	43.90	5.20	0.27	0.40	0.03	0.02	0.09	134.98
干材	113.49	3.48	50.10	33.18	15.23	0.58	0.72	0.20	0.08	0.15	217.21
树根	72.26	4.14	24.29	15.71	3.44	0.50	0.33	0.05	0.04	0.07	120.82
乔木小计	434.69	17.46	186.68	162.24	41.09	2.00	3.40	0.54	0.33	0.51	848.94
灌木	20.99	1.50	15.74	16.44	2.77	0.21	1.20	0.05	0.03	0.03	58.95
草本	20.49	1.60	20.33	10.55	2.50	0.20	1.32	0.05	0.02	0.04	57.10
凋落物	72.51	4.50	20.26	47.65	6.28	1.00	3.56	0.12	0.05	0.15	156.08
总计	548.68	25.06	243.01	236.88	52.64	3.41	9.48	0.76	0.43	0.73	1 121.07

3.3 养分年净积累量

由表3可以看出,7年生厚荚相思人工林10种养分元素的年净积累量为 $121.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{年}^{-1}$, 其中 N、P、K、Ca、Mg 等5种元素的存留量为 $120.31 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{年}^{-1}$, 明显高于相近气候带的广西武宣8、14和23年生马尾松人工林和福建尤溪8、14和24

年生杉木人工林的年净积累量^[14-15], 表明厚荚相思人工林有较强的养分积累能力. 不同养分元素的年净积累量以 N 的最多, 占10种元素年净积累量的 52.70% , 这更进一步说明厚荚相思对 N 具有很强的吸收与富集能力; 其他元素年净积累量依次为 $\text{K} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{P} > \text{Mn} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{B} > \text{Cu}$.

表3 厚荚相思中龄林养分的年净积累量

Tab.3 Annual net accumulation of nutrients at middle-aged *Acacia grasscarp* plantation $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{年}^{-1}$

组分	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B	合计
树叶	16.34	0.60	6.22	4.80	1.28	0.05	0.20	0.01	0.01	0.01	29.52
树枝	12.67	0.48	4.55	5.13	1.18	0.04	0.08	0.03	0.02	0.02	24.19
干皮	6.56	0.33	5.27	6.27	0.74	0.04	0.06	0.00	0.00	0.01	19.28
干材	16.21	0.50	7.16	4.74	2.18	0.08	0.10	0.03	0.01	0.02	31.03
树根	10.32	0.59	3.47	2.24	0.49	0.07	0.05	0.01	0.01	0.01	17.26
合计	62.10	2.49	26.67	23.18	5.87	0.29	0.49	0.08	0.05	0.07	121.28

3.4 养分元素的生物循环

生物地球化学循环是指养分在植物-凋落物-土壤的循环流动过程, 包括吸收、存留和归还3个环节, 且遵循“吸收 = 存留 + 归还”的平衡式^[14]. 由于受到实际工作的限制, 本研究未将降水淋洗以及树干茎流和死根归还量等估算进去, 所以养分归还量和循环速率计算结果较林分实际归还偏低(其中尤以移动性强的 K 元素更为明显). 表4列出了厚荚相思人工林10种养分元素的生物循环参数.

7年生厚荚相思人工林养分元素年吸收量为 $261.87 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{年}^{-1}$, 其中 53.69% 的吸收量 ($140.59 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{年}^{-1}$) 以凋落物的形式归还于土

壤, 高于存留于立木中的 $121.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{年}^{-1}$ (占 46.31%), 并且凋落物中 N 素 ($69.40 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{年}^{-1}$) 占 49.36% , 因此, 厚荚相思人工林通过较多的富含 N 素的凋落物归还土壤, 从而对土壤尤其是贫瘠缺 N 土壤起到良好的固 N 改土作用.

养分利用系数、循环系数和周转时间是森林生态系统养分循环的重要特征. 厚荚相思中龄林10种元素的利用系数为0.31, 循环系数为0.54, 周转时间为6.04年, 其中以 Mn 周转期最短, K 和 P 最长, 这与林地土壤 K、P 养分比较缺乏密切相关, 同时也表明, K、P 素的缺乏可能是影响厚荚相思人工林正常发育的重要原因之一.

表 4 厚荚相思中龄林营养元素的生物循环

Tab. 4 Biological cycling of nutrient elements in middle-aged *Acacia grasscarp* plantation

元素	贮存量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	年循环量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{年}^{-1}$)			利用 系数	循环 系数	$t_{\text{周转}}/\text{年}$
		吸收量	存留量	归还量			
N	434.69	131.50	62.10	69.40	0.30	0.53	6.26
P	17.46	4.47	2.49	1.98	0.26	0.44	8.83
K	186.68	42.55	26.67	15.88	0.23	0.37	11.75
Ca	162.24	66.13	23.18	42.95	0.41	0.65	3.78
Mg	41.09	13.66	5.87	7.79	0.33	0.57	5.28
Fe	2.00	0.83	0.29	0.54	0.41	0.65	3.69
Mn	3.40	2.23	0.49	1.74	0.66	0.78	1.95
Zn	0.54	0.22	0.08	0.14	0.41	0.65	3.76
Cu	0.33	0.10	0.05	0.05	0.30	0.53	6.23
B	0.51	0.18	0.07	0.11	0.36	0.60	4.71
合计	848.94	261.87	121.28	140.59	0.31	0.54	6.04

4 讨论与结论

厚荚相思中龄林不同器官的养分元素含量大致为:树叶 > 干皮 > 活枝 > 中根 > 细根 > 根桩 > 粗根 > 枯枝 > 干材。厚荚相思群落垂直结构中各组分养分含量为草本植物 > 灌木植物 > 乔木植物,表明森林植物群落不同垂直结构层次植物对土壤养分富集能力的差异^[2,16]。不论是群落各结构层次还是林木中各器官,N 素含量明显高于其他养分元素,既表明厚荚相思对 N 具有很强的吸收与富集能力,同时又体现了 N 在建造植物体中的重要作用,是森林生长的主要限制因子。

厚荚相思中龄林乔木层养分贮存量为 $848.94 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,占林分养分贮存量($1\,121.07 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)的 75.72%,其中树冠(树枝和树叶)和树根养分贮存量占乔木层贮存量为 58.51%,可见如采伐(主伐或间伐)时仅利用树干,而把其他采伐剩余物留在林地,造成养分输出不大,因而对林地生产力的影响也较小。而厚荚相思人工林凋落物层养分贮存量达到 $156.08 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,占林分贮存量的 13.92%,均高于相同发育阶段的杉木和马尾松 *Pinus massoniana* 等速生树种^[14-15],表明厚荚相思人工林归还土壤的养分比较丰富,同时也是其具有培肥土壤等生态功能的重要原因。

7 年生厚荚相思人工林的养分年吸收量、归还量和存留量分别为 261.87、140.59 和 121.28 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{年}^{-1}$ 。养分循环系数为 0.54,养分各元素的循环系数排序为 $\text{Mn} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Ca} > \text{B} > \text{Mg} > \text{Cu} > \text{N} > \text{P} > \text{K}$;周转期为 6.04 年,养分各元素的周转期排序为 $\text{K} > \text{P} > \text{N} > \text{Cu} > \text{Mg} > \text{B} > \text{Ca} > \text{Zn} > \text{Fe} > \text{Mn}$,其中除 P 和 K 外,其他元素周转期均小于林分实际年龄,与 2.5 ~ 4.5 年生厚荚相思人工林相

似^[8-9]。因此,总的来看,厚荚相思人工林具有较快的养分循环、较强的养分自我调节能力,但由于厚荚相思人工林的 P、K 循环周期较长,而南方红壤尤其是第四纪红土发育的红壤地区土壤 P、K 尤其是 P 严重缺乏,因此,应加强 P、K 管理,如施用 P、K 肥等措施,改善林地生态条件,加快林地养分循环,从而进一步提高林地生产力。

参考文献:

- [1] SHARMA J C, SHARMA Y. Nutrient cycling in forest ecosystems-a review[J]. *Agricultural Reviews*, 2004, 25(3): 157-172.
- [2] 何斌,秦武明,余浩光,等. 不同年龄阶段马占相思 (*Acacia mangium*) 人工林营养元素的生物循环[J]. *生态学报*, 2007, 27(12): 5158-5167.
- [3] 方发之,林资贵,尤甫逸. 马占相思、厚荚相思良种选育技术研究[J]. *热带林业*, 2006, 34(1): 27-301.
- [4] 韦增建,丘小军,莫钊志. 相思类树种种质资源收集保存研究[J]. *广西林业科学*, 1996, 25(4): 181-188, 205.
- [5] 林榕庚. 10 个相思树种的生长比较与评价[J]. *广西林业科学*, 1995, 24(1): 18-20.
- [6] 韩金发. 厚荚相思对风沙地土壤性状的改良[J]. *福建林学院学报*, 2001, 21(3): 253-256.
- [7] 秦武明,何斌,覃世赢. 厚荚相思人工林生物量和生产力变化规律研究[J]. *西北林学院学报*, 2008, 23(2): 17-20.
- [8] 秦武明,何斌,覃世赢,等. 厚荚相思人工林营养元素生物循环的研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(4): 103-108.
- [9] 荣慧,何斌,秦武明,等. 厚荚相思人工林微量元素的生物循环[J]. *东北林业大学学报*, 2009, 37(12): 30-34.
- [10] 何斌,余春和,王安武,等. 厚荚相思人工林碳素贮量及其空间分布[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2009, 33(3): 46-50.
- [11] 何斌. 植物氮、磷、钾的自控远红外快速联合消化和测定法[J]. *理化检验: 化学分册*, 1992, 28(4): 44-451.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 111-336.
- [13] 李跃林,李志辉,谢耀坚. 巨尾桉人工林养分循环研究[J]. *生态学报*, 2001, 21(10): 1734-1740.
- [14] 项文化,田大伦. 不同年龄阶段马尾松人工林养分循环的研究[J]. *植物生态学报*, 2002, 26(1): 89-95.
- [15] MA Xiang-qing, HEAL K V, LIU Ai-qin, et al. Nutrient cycling and distribution in different-aged plantations of Chinese fir in Southern China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 243: 61-74.
- [16] 何斌,温远光,梁宏温,等. 英罗港红树植物群落不同演替阶段植物元素分布及其与土壤肥力的关系[J]. *植物生态学报*, 2002, 26(5): 518-524.

【责任编辑 李晓卉】