

文章编号: 1001-1498(2008)04-0500-06

不同林龄油松人工林叶凋落物分解特性

刘 勇, 李国雷

(北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 2005年在北京市延庆县营盘村附近中山采用网袋法,比较 21、29、36年生油松叶凋落物分解动态、分解速率、基质质量的差异。结果表明:在所观测的 14个月内,不同林龄油松叶凋落物分解动态差异较小,均呈快—慢—快的规律,翌年 5至 7月份凋落物分解速率低于 2005年同期的分解速率。21 a、29 a、36 a油松叶凋落物分解速率分别为 26.97%、26.10%和 23.96%,半分解周期分别为 2.21 a、2.29 a和 2.54 a,周转期分别为 9.54 a、9.91 a和 10.94 a,凋落物分解速率、半周转期、周转期失重率仅在 0.1水平上差异显著。林龄对叶凋落物 N影响最大 ($P=0.004$),对粗灰分 ($P=0.028$)影响显著。林龄对纤维素、木质素、粗脂肪、粗蛋白影响不显著。不同林龄叶凋落物 C/N ($P=0.009$)、木质素/N ($P=0.048$)显著差异,C/N、木质素/N与叶凋落物分解速率相关系数均为 -0.333。

关键词: 油松;人工林;林龄;分解速率;基质质量

中图分类号: S791.254 **文献标识码:** A

Decomposition Characteristics Affected by Forest Age in *Pinus tabulaeformis* Plantations

LIU Yong, LI Guo-lei

(Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Decomposition characteristics such as decomposition dynamics, decomposition rate and leaf substrate quality affected by forest age were manipulated by mesh bags in 21-, 29- and 36-year-old *Pinus tabulaeformis* stands in the middle hilly lands of Yingpan, Yanqing Country of Beijing in 2005. The results showed that the minimum discrepancy was in the decomposition dynamics, indicating that the decomposition rate exhibited rapid-slow-rapid trend in all three stands with different ages and the decomposing rate was slower during the period from May to July in 2006 than that in 2005. The decomposition rate of the leaf litter was 26.97%, 26.10% and 23.96%, respectively. The half-turnover and turnover among the three stands were 2.21, 2.29 and 2.54 years as well as 9.54, 9.91 and 10.94 years, respectively. However, the importance of the decomposition rate, half-turnover and turnover in the forests was not significant but at 0.1 level. The N content of the leaf litter was the most affected by age ($P=0.004$), followed by the crude ash ($P=0.028$). The contents of cellulose, lignin, coarse fat and coarse protein were not significant at the 0.1 level. Although the ratios of both C/N and lignin/N in the leaf litter were affected by forest age markedly, the relation coefficients of the both ratio and decomposition rate were -0.333.

Key words: *Pinus tabulaeformis*; plantation; forest age; decomposing rate; substrate quality

凋落物是森林生态系统的组成部分和森林土壤物质转化的基础,凋落物作为养分的基本载体,在养

分循环中是连接植物与土壤的“纽带”,是生态系统的养分库。从全球尺度解释各森林类型凋落物分解

收稿日期: 2007-12-21

基金项目: 国家自然科学基金(30471380);北京市教委项目资助(JD100220648)

作者简介: 刘勇(1961—),男,教授,博士生导师。主要研究方向:森林培育学。E-mail: lyong@bjfu.edu.cn

速率的差异,凋落物质量只处于次要地位^[11],但在同一气候带内,凋落物质量对分解起主要作用^[2],辽东栎(*Quercus liaotungensis* Mayr)、五角枫(*Acer mono Maxim.*)、蒙椴(*Tilia mongolica Maxim.*)、糠椴(*Tilia mandshurica Rupr et Maxim.*)^[3]、刺槐(*Robinia pseudoacacia L.*)、山杏(*Prunus sibirica (L.) Lam.*)、侧柏(*Platycladus orientalis (L.) Franco*)、黄栌(*Cotinus coggygia Scop.*)^[4]、杉木(*Cunninghamia lanceolata (Lamb.) Hook*)^[5-6]、福建柏(*Fokienia hodginsii (Dunn) Henry et Thomas*)^[6]等树种分解与基质质量的关系已有报道。

林龄影响凋落物产量及组成已在马占相思(*Acacia mangium Willd.*)、湿地松(*Pinus elliottii Engelm.*)、荷木(*Schinus superba Gardn & Champ.*)^[7]、木麻黄(*Casuarina equisetifolia L.*)^[8-9]、马尾松(*Pinus massoniana Lamb.*)^[10]、油松(*Pinus tabulaeform Carr.*)^[11]、冷杉(*Abies fabric (Mast). Craib*)^[12]、杉木^[13]等树种上均有报道。因林龄的不同,杉木叶凋落物分解速率有所差异^[9,11,13],但分解速率的差异性与其受控的基质质量之间的定量研究尚很少涉及。为此,本文以 21、29、36 年生的暖温带地带性植被油松为对象,比较不同林龄油松叶凋落物基质质量对分解速率的影响。

1 研究地概况

研究地点位于北京市延庆县刘斌堡乡营盘村附近中山。地理位置为 40°16' N, 115°40' E。该地区属燕山山脉系统,多为海拔 800 m 以上的中山,其中佛爷顶地势最高,海拔为 1 252 m。暖温带大陆性季风气候,年平均气温 6.7℃,全年 0℃和 10℃积温分别为 3 310.7℃和 2 939.7℃。无霜期仅 144 d。全年降水量 519.6 mm,蒸发量为 1 457.2 mm。年平均日照 2 690.7 h。土壤类型为含石砾较多的山地褐土,成土母岩以花岗岩为主。按中国森林区的具体区划,该地区地带性植被属于

暖温带森林带—华北山地森林区—燕山山地森林亚区^[14]。海拔 800~1 200 m 的山区,分布有蒙古栎(*Quercus mongolica Fisch Ex Ledeb.*)、灌木以鼠李属(*Rhamnus L.*)、榛属(*Corylus L.*)、荆条(*Vitex nigundo var heterophylla (Franch.) Rehd.*)等为主,草本有披针叶苔草(*Carex lanceolata Boott.*)、黄精属(*Polygonatum Mill.*)及菊科(Compositae)的多种植物。由于人类的过分干扰,该地区以蒙古栎为主的地带性植被已被破坏,仅保留下蒙古栎萌生丛或指示华北植物区系的原生植被的灌木和草本群落。20 世纪 50—80 年代大面积进行人工造林,树种以油松、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii Mayr.*)、侧柏、刺槐等为主。

上述 3 种林龄的油松人工林均是在生有绣线菊(*Spiraea salicifolia L.*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor Turcz.*)、六道木(*Abelia biflora Turcz.*)、木本香薷(*Elsholtzia stauntonii Benth.*)等灌丛和灌木状蒙古栎等植被上的山地上沿等高线穴状整地营造而成。3 种林龄的林分基本情况分述如下。21 年生林分:1987 年春,按 1.5 m × 2.0 m 栽植 3 龄的油松苗,造林面积 12 hm²,造林成活率达 90% 左右,2002 年 2 月对油松进行了下层间伐。29 年生林分:1978 年春,按 1.5 m × 1.5 m 栽植 2 龄的油松苗,造林面积 30 hm²,造林成活率达 85% 左右,1996 年 11 月对林分进行了下层间伐,保留密度大致在 3 300 株 · hm⁻² 左右,2001 年 11 月进行了第 2 次间伐。36 年生林分:1971 年春,按 1.0 m × 1.5 m 栽植 2 龄的油松苗,造林面积 32 hm²,造林成活率达 85% 左右,1990 年 10 月对林分进行了下层间伐,保留密度大致在 4 500 株 · hm⁻² 左右,1996 年 11 月对林分进行第二次下层间伐,保留密度大致在 3 300 株 · hm⁻² 左右,2001 年 10 月对上述林分实施第 3 次间伐。2005 年 3 月初,在上述不同林龄的油松林中,分别选定 20 m × 20 m 的 2 块有代表性的实验地作为样地林分,调查样地基本因子,结果见表 1。

表 1 油松人工林样地基本因子

样地	林龄 / a	现存密度 / (株 · hm ⁻²)	树高 / m	胸径 / cm	海拔 / m	坡位	坡向	坡度 / (°)	土壤厚度 / cm
	21	1 875	5.24	9.29	880	中	N	16	53
	21	1 525	5.34	9.64	880	中	N	19	51
	29	1 925	7.73	12.03	887	中	N	16	53
	29	1 700	7.86	12.14	885	中	N	18.5	51
	36	1 650	9.84	13.72	915	中	N	23.5	53
	36	1 425	9.77	13.60	903	中	N	25	52

2 研究方法

凋落物分解速率的研究采用分解袋法^[15]。2005年4月初,在标准地分别收集上一年自然凋落的、上层未分解的针叶,同一样地收集的凋落物充分混合后,称取新鲜凋落物 50 g 直接装入网眼直径 0.5 mm,规格 20 cm × 20 cm 尼龙分解袋中。2005年4月底,每个标准地中随机放置凋落袋 120 个,将样品随机放置于标准地内清除过枯落物的地表,使之与腐殖质层充分接触^[9]。同时,取出一部分叶凋落物在 80 条件下持续烘干 8 h 至恒质量,计算其含水量,凋落物全 N 采用靛酚蓝比色法^[16],全 C 采用 SSM-TOC 法,粗灰分采用干灰化法,粗纤维和酸洗纤维采用 Weende 法,粗脂肪采用索氏提取法,粗蛋白采用半微量凯氏法,木质素采用酸性洗涤法^[15]。自放置日期起,每隔两个月随机取回凋落物 6 袋,去除凋落袋表面的土块、碎石、琐屑等杂物,烘干法测定凋落物残留量^[9,17-18]。凋落物分解动态采用失重率法^[19-20]。

试验数据采用 Excel 和 SPSS 统计分析软件分析。

3 结果与分析

3.1 不同林龄油松人工林叶凋落物分解动态

如图 1 所示,一年内 3 种林龄油松叶凋落物分解速率整体趋势相似,分解动态主要体现在量的差异,曲线具有以下 3 个特征。其一是,快速分解阶段与慢速分解阶段交替进行。2005年7月至9月是全年中叶凋落物分解速率最快的阶段。从 2005年11月至 2006年1月 6 块样地油松叶凋落物平均分解速率自 5.08% 急剧下降到 2.25%。2006年3月油松叶凋落物分解速率开始回升,2006年3月、5月和7月 6 样地油松叶凋落物平均分解速率为 2.60%、3.20% 和 4.11%。整个分解阶段呈现快—慢—快的规律,年分解动态与该地区气温和降水变化特征基本吻合。其二是,2005年7月 6 样地油松叶凋落物的平均分解速率为 5.71%,高于翌年同期分解速率。其三是,在整个分解阶段,油松人工林因林龄或密度的不同,叶凋落物分解动态而有一定差异。在 2005年7月至9月的快速分解阶段,21年生和油松叶凋落物分解速率 7 月份最大,其余 4 样地分解速率在 9 月份达到峰值,这种差异可能是由林龄引起的。在 2006年的 5 月至 7 月温度回升过程中,样地油松叶凋落物的分解速率反而出现一定的下

降,这一现象表明,除林龄这一主导因子外,密度也可能是调控凋落物分解的因素。

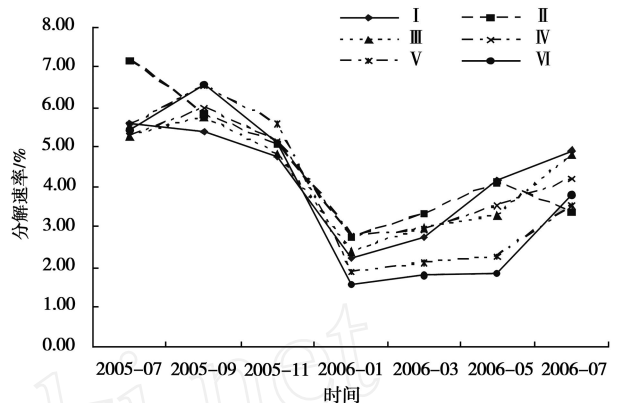


图 1 油松叶凋落物分解速率

3.2 不同林龄油松人工林叶凋落物分解参数

凋落物的年度分解动态可用 Olson 指数衰减模型^[21]来拟合,同时,也可用它来估算凋落物的半衰期 $t_{0.5}$ (凋落物分解 50% 时所需年限) 和 $t_{0.95}$ (凋落物分解 95% 时所需年限), 结果见表 2。21、29 a 和 36 a 油松半分解周期分别为 2.21、2.29 a 和 2.54 a, 随林龄增大, 半周期依次增大。3 种林龄的油松周期分别为 9.54、9.91 a 和 10.94 a, 平均周期为 10.13 a, 而半周期平均值仅为 2.35 a, 即凋落物分解后一半所需时间高达 7.78 a。半分解周期 ($P=0.054$) 和周期 ($P=0.054$) 仅在 0.1 水平上显著, 且 21、29 a 油松叶凋落物差异不显著。整个分解失重可分为 2 个主要阶段, 前期的快速失重阶段主要是非生物作用过程, 主要是可溶成分的淋溶, 后期的裂解阶段主要是生物作用过程^[22], 初期分解物质主要为水溶性物质和易分解的碳水化合物, N、P、S 等元素的浓度对此阶段分解速率起着主要影响作用, 随着分解继续, 木质素等难分解物质不断积累, 凋落物分解受抑, 分解速率明显减慢^[2], 因此也就不难理解油松叶凋落物后一半分解所用时间为何将近是分解前一半的 3 倍了, 而林龄间的差异也日益明显。此外, 21、29、36 a 油松叶凋落物 14 个月平均分解速率分别为 26.97%、26.10%、23.96%, 分解速率仅在 0.1 水平上显著 ($P=0.058$), 且在该水平上 21、29 a 叶凋落物分解速率差异并不明显。林地凋落物分解后向土壤释放的养分元素是林木维持自身生长所需养分的重要来源之一, 与森林生态系统的养分循环及

林地生产力关系密切^[20,23-24]。随油松林龄的增大叶凋落物分解速率下降,养分返回速率降低,

这可能是中、近熟油松林土壤质量较幼龄林低的原因。

表 2 油松叶凋落物分解速率参数

样地	x_0/g	x/g	t/a	$k/(g \cdot g^{-1} \cdot a^{-1})$	$t_{0.50}/a$	$t_{0.95}/a$	失重率/%
	256.42	189.12	1.167	0.304	2.28	9.84	26.25
	257.31	186.08	1.167	0.324	2.14	9.24	27.68
(平均)	256.87	187.60	1.17	0.31	2.21a	9.54a	26.97a
	254.76	188.77	1.167	0.300	2.31	9.99	25.90
	257.77	190.01	1.167	0.305	2.27	9.82	26.29
(平均)	256.27	189.39	1.17	0.30	2.29a	9.91a	26.10a
	253.68	191.54	1.167	0.281	2.47	10.66	24.50
	268.26	205.42	1.167	0.267	2.60	11.22	23.42
(平均)	260.97	198.48	1.17	0.27	2.54b	10.94b	23.96b

注(1): x_0 :初始质量; x :最后干质量; t :分解时间; k :分解系数; $t_{0.50}$:分解干质量 50%所需时间; $t_{0.95}$:分解干质量 95%所需时间。

(2)均值标注的字母表示在 0.10 水平的 LSD 多重比较结果。

3.3 不同林龄油松人工林叶凋落物主要化学性质

叶片基质质量是影响凋落物分解的重要因子,不同林龄油松叶初始凋落物主要成分见表 3。由表 3 可知,21、29、36 a 油松叶凋落物的粗灰分含量分别为 61.3、49.6 $g \cdot kg^{-1}$ 和 45.7 $g \cdot kg^{-1}$ 。纤维素、木质素含量均以 21 a 油松最大,36 a 次之,29 a 最小。随林龄增大,粗脂肪含量由 88.2 $g \cdot kg^{-1}$ 增大到 90.1 $g \cdot kg^{-1}$ 。粗蛋白含量则以 36 a 最大,21 a 次之,29 a 最小。N 含量也以 29 a 油松最小,21 a 最大,36 a 居中。可见,21 a 油松叶凋落物中所含纤维素、木质素等难分解组分含量最多,而所含粗蛋白、全 N 等易分解组分也较大。除粗灰分 ($P=0.028$)、N ($P=0.004$) 显著

外,不同林龄叶凋落物对纤维素、木质素、粗脂肪、粗蛋白、C 等基质物质在 0.1 水平上并无显著影响,因此,用单个组分来评价叶凋落物基质质量需要慎重。

不同林龄油松叶凋落物 C/N ($P=0.009$) 和木质素/N ($P=0.048$) 分别达极显著和显著水平。油松 21、29、36 a 木质素/N 比分别为 15.44、23.10、18.53, C/N 比分别为 25.91、41.96、32.89, 即 C/N 比和木质素/N 比最小的 21 a 油松叶凋落物分解速率最快,而两者比值最高的 29 a 叶凋落物分解速率居中, C/N 比和木质素/N 比与凋落物分解速率趋势并不呈完全相反趋势。

表 3 油松叶凋落物的物质化学组成

样地	粗灰分/ ($g \cdot kg^{-1}$)	纤维素/ ($g \cdot kg^{-1}$)	木质素/ ($g \cdot kg^{-1}$)	粗脂肪/ ($g \cdot kg^{-1}$)	粗蛋白/ ($g \cdot kg^{-1}$)	C/ ($g \cdot kg^{-1}$)	N/ ($g \cdot kg^{-1}$)	木质素/N	C/N
	61.4	238.0	30.40	94.3	41.2	480.7	18.4	16.51	26.10
	61.1	212.0	278.0	82.1	42.2	497.9	19.4	14.36	25.72
(平均)	61.3a	225.0a	291.0a	88.2a	41.7a	489.3a	18.9A	15.44a	25.91A
	47.0	221.0	280.0	96.6	37.0	498.1	11.2	24.92	44.33
	52.1	207.0	263.0	82.1	43.5	489.2	12.4	21.28	39.59
(平均)	49.6ab	214.0a	271.5a	89.4a	40.3a	493.7a	11.8B	23.10b	41.96B
	48.3	211.0	276.0	94.8	44.1	491.7	15.1	18.25	32.51
	43.1	221.0	280.0	85.4	42.9	495.5	14.9	18.80	33.27
(平均)	45.7b	216.0a	278.0a	90.1a	43.5a	493.6a	15.0C	18.53ab	32.89AB

注:均值标注的大、小写字母分布表示在 0.01、0.05 水平的 LSD 多重比较结果。

3.4 分解速率与主要化学成分的相关分析

由表 4 可知,分解速率与叶凋落物中难分解成分纤维素、木质素、粗脂肪等均负相关。分解速率与叶凋

落物易分解的 N 正相关。失重率与木质素/N、C/N 比均呈负相关,相关系数均为 -0.333。需要指出的是,分解速率与这些指标相关性均没有达到显著水平。

表 4 分解速率与叶凋落物主要成分化学成分相关系数

项目	纤维素	木质素	粗脂肪	粗蛋白	N	木质素/N	C/N
失重率	-0.138	-0.138	-0.414	-0.067	0.333	-0.333	-0.333

4 结论与讨论

逯军峰等^[11]在林龄分别为 7、10、16、23、30 a 的油松人工林中分别设置典型样地,发现随着人工林的生长,分解率逐渐增加,7 a 油松林凋落物的分解率最小,30 a 油松分解率最大,23 a 油松人工林由于无阔叶树种,导致凋落物分解率小于 16 a 和 30 a 油松人工林的分解率。谭芳林^[9]指出不同林龄木麻黄凋落物分解速率存在差异,同时指出,20 a 林分凋落物及其各组分中养分元素的含量高于 7 a 木麻黄。盛炜彤等^[13]认为栽植代数、地位指数、林龄均可引起杉木林叶片 N 浓度差异,随林龄提高,杉木叶 N 呈增加趋势,而叶的其他营养元素浓度无明显变化。由于前人仅对不同林龄林分叶凋落物分解速率差异这一现象进行了描述或观察到了林龄不同的叶凋落物营养元素特别是 N 有所不同,但并未就分解速率和这些营养物质进行深入分析,更未涉及叶凋落物后期分解起主导的木质素、纤维素等大分子物质。本研究表明,林龄对叶片初始 N、粗灰分有影响,而对木质素、纤维素、粗脂肪、粗蛋白等影响并不显著。Berg B^[25]和 Sariyildiz 等^[26]认为 C 源与养分含量的相互作用所形成的影响实际上比它们的单独作用重要的多,C/N 比和木质素/N 比最能反映凋落物分解速率。油松 21、29、36 a 木质素/N 比分别为 15.44、23.10、18.53,C/N 比分别为 25.91、41.96 和 32.89,而年分解速率为 26.97%、26.10%、23.96%,尽管林龄对叶凋落物 C/N 比、木质素/N 比影响显著(见表 3),但 C/N 比、木质素/N 比与分解速率负相关并不显著(见表 4)。这表明除叶凋落物基质质量外,受控于林龄的林下植被、土壤微生物等也可能是影响叶凋落物分解的因子。因此,探明基质性质、林内小环境等因子对不同林龄油松叶凋落物分解的贡献率具有重要意义。

N 是植物需要量最大和造成植物生长差异最为显著的营养物质^[27],由于林龄对 C 和木质素影响并不显著,因此油松叶凋落物 N、C/N 比、木质素/N 比等显著变化可能是由 N 引起的,盛炜彤等^[13]也发现杉木叶片营养元素主要体现在 N 的不同上。油松林龄间叶凋落物基质物质的不同可能是由不同林龄林分对土壤养分吸收^[28-29]、养分在各个器官的分配^[28]以及叶凋落前向其它组织转移养分^[30]等差异性引起的。油松叶凋落物 N 元素的差异可从以下两个方面给予解释。一方面,对基本还处于幼龄林阶

段的 21 a 油松人工林而言,林分前一段的发育是由单株向郁闭方向发展,油松个体间竞争平缓,林分对土壤肥力特别是 N 要求较低,而 29 a 和 36 a 油松造林密度较幼龄林大,养分竞争激烈,经过 30~40 a 的生长发育,对土壤肥力消耗过大,土壤肥力下降。土壤质量的不同必然引起油松生长状况的差异。植物的元素化学成分是反映着植物在一定生境下从土壤中吸取或积蓄的矿物养分^[31],叶是植物生命活动的中心部位^[32]。油松生长状况的不同可能首先表现在叶片质量以及因叶片质量引起的光合产物的不同上。因此,也就不难理解林龄不同的油松叶凋落物基质质量为何有所差异了。另一方面,元素转移现象普遍存在,不同林龄的油松叶凋落前将这些元素转移到新生叶片中的量可能也有差异,这种营养元素“减”的效应也可能是引起叶凋落物基质质量不同的另一原因。

参考文献:

- [1] Aerts R. Climate, leaf chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship [J]. *Oikos*, 1997, 79: 439 - 449
- [2] 郭剑芬,杨玉盛,陈光水,等. 森林凋落物分解研究进展 [J]. *林业科学*, 2006, 42(4): 93 - 100
- [3] 王瑾,黄建辉. 暖温带地区主要树种叶片凋落物分解过程中主要元素释放的比较 [J]. *植物生态学报*, 2001, 25(3): 375 - 380
- [4] 陈灵芝,黄建辉,严昌荣. 中国森林生态系统养分循环 [M]. 北京:气象出版社, 1997
- [5] 田大伦. 杉木林生态系统定位研究方法 [M]. 北京:科学出版社, 2004
- [6] 杨玉盛,郭剑芬,陈银秀,等. 福建柏和杉木林凋落物分解及养分动态的比较 [J]. *林业科学*, 2004, 40(3): 19 - 25
- [7] 邹碧,李志安,丁永祯,等. 南亚热带 4 种人工林凋落物动态特征 [J]. *生态学报*, 2006, 26(3): 715 - 721
- [8] 叶功富,隆学武,潘惠忠,等. 木麻黄林的凋落物动态及分解 [J]. *防护林科技*, 1996(7): 30 - 37, 76
- [9] 谭芳林. 木麻黄防护林生态系统凋落物及养分释放研究 [J]. *林业科学*, 2003, 39(专刊 1): 21 - 26
- [10] 黄承才,葛滢,朱锦茹,等. 浙江省马尾松生态公益林凋落物及与群落特征关系 [J]. *生态学报*, 2005, 25(10): 2507 - 2513
- [11] 逯军峰,王辉,曹靖,等. 油松人工林凋落物对土壤理化性质的影响 [J]. *西北林学院学报*, 2007, 22(3): 25 - 28
- [12] 罗辑,程根伟,宋孟强,等. 贡嘎山峨眉冷杉林凋落物的特征 [J]. *植物生态学报*, 2003, 27(1): 59 - 65
- [13] 盛炜彤,范少辉. 杉木人工林长期生产力保持机制研究 [M]. 北京:科学出版社, 2005
- [14] 蒋有绪,郭泉水,马娟,等. 中国森林群落分类及其群落学特征 [M]. 北京:科学出版社, 1998
- [15] 董鸣,王义凤,孔繁志,等. 陆地生物群落调查观测与分析

- [M]. 北京:中国标准出版社, 1996
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京:中国农业出版社, 2005
- [17] 马祥庆, 刘爱琴, 何智英, 等. 杉木幼林生态系统凋落物及其分解作用研究 [J]. 植物生态学报, 1997, 21(6): 564 - 570
- [18] 林开敏, 洪 伟, 俞新妥, 等. 杉木与伴生植物凋落物混合分解的相互作用研究 [J]. 应用生态学报, 2001, 12(3): 321 - 325
- [19] 董世仁, 沈国舫, 聂道平. 油松人工林养分循环的研究: 油松人工林养分元素的动态特性 [J]. 北京林业大学学报, 1986, 8(1): 11 - 22
- [20] 沈海龙, 丁宝永, 沈国舫, 等. 樟子松人工林下针阔叶凋落物分解动态 [J]. 林业科学, 1996, 32(5): 393 - 402
- [21] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems [J]. Ecology, 1963, 44: 323 - 331
- [22] 彭少麟, 刘 强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应 [J]. 生态学报, 2002, 22(9): 1534 - 1544
- [23] 张德强, 叶万辉, 余清发. 鼎湖山演替系列中代表性森林凋落物的研究 [J]. 生态学报, 2000, 20(6): 938 - 944
- [24] 张万儒. 森林土壤凋落物结构与功能的研究 [J]. 土壤学报, 1990, 27(2): 121 - 131
- [25] Berg B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils [J]. Forest Ecology and Management, 2000, 133: 13 - 22
- [26] Sariyildiz T, Anderson J M. Interactions between litter quality, decomposition and soil fertility: a laboratory study [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35: 391 - 399
- [27] Frederick R T, Louis M T. Soil and Soil Fertility [M]. Oxford: Blackwell Publishing, 2006
- [28] 高甲荣, 肖 斌. 桥山林区油松人工林营养元素分配与积累的研究 [J]. 应用生态学报, 2001, 12(5): 667 - 671
- [29] 张希彪, 上官周平. 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 [J]. 生态学报, 2006, 26(2): 373 - 382
- [30] 沈国舫, 董世仁. 油松人工林养分循环的研究: 营养元素的含量及分布 [J]. 北京林业大学学报, 1985, 7(4): 1 - 14
- [31] 侯学煜. 中国植被地理及优势植物化学成分 [M]. 北京: 科学出版社, 1982
- [32] 刘 洋, 张 健, 冯茂松. 巨桉人工林凋落物数量、养分归还量及分解动态 [J]. 林业科学, 2006, 42(7): 1 - 9