

海岸沙地主要森林的凋落物分解及生态化学计量特征

岳新建^{1,2}, 叶功富³, 高伟³, 陈智勇⁴, 陈梦瑶¹, 李蝶¹

(1.福建农林大学 林学院, 福州 350002; 2.福建省林业调查规划院, 福州 350003;

3.福建省林业科学研究院, 福州 350012; 4.长泰县林业局, 福建 漳州 363900)

摘 要:为探讨不同森林类型对滨海风沙土肥力质量影响的差异及机制,采用分解袋法研究了福建省海岸沙地防护林 5 种主要森林类型的凋落物生物量动态、分解动态,分析了不同凋落物的初始质量特征,分解过程的失重率、碳氮比、碳磷比、氮磷比特征及分解速率等。结果表明:5 种森林类型凋落物生物量为 10.08~12.99 t/(hm²·a),月动态差异不大。不同凋落物的初始质量指标差异显著;5 种凋落物分解过程的失重率变化均符合 Olson 模型规律,预测分解 95%需要时长分别为:天然次生林 3.31 a,尾巨桉 4.92 a,厚荚相思 5.38 a,木麻黄 8.18 a,湿地松 13.80 a。分解指数 k 与凋落物全磷、全氮含量极显著正相关,与碳氮比、纤维素含量极显著负相关;与土壤 pH 值、有效磷含量极显著正相关。随着分解时间的延长,5 种凋落物的碳氮比均呈指数型下降趋势,碳磷比变化规律各异,氮磷比在分解进程中相对稳定。凋落物分解受凋落物初始质量特征、沙土酸性强、养分贫瘠、干燥度高、风速大等因素的综合影响。在防护林经营过程中,应增加混交树种类型,以丰富凋落物种类,还可考虑通过施肥调节土壤碳氮磷比例、pH 值等,以达到调控凋落物分解速率、提高沙土“自肥”能力的目的。

关键词:沿海防护林;天然次生林;生态计量特征;东山赤山国有林场

中图分类号:S718.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)04-0077-07

Characteristics of Litter Decomposition and Ecological Stoichiometry of Different Forests on Coastal Sandy Land in Fujian Province

YUE Xinjian^{1,2}, YE Gongfu³, GAO Wei³, CHEN Zhiyong⁴, CHEN Mengyao¹, LI Die¹

(1.College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2.Forest Inventory and Planning Institute of Fujian Province, Fuzhou 350003, China; 3.Fujian Academy of Forestry Science, Fuzhou 350012, China; 4.Changtai County Forestry Bureau, Zhangzhou, Fujian 363900, China)

Abstract:To explore the effect of difference and mechanism of different forests on coastal sandy soil, a decomposition experiment was carried out by using the litterbag method. Litter biomass and decomposition dynamics of five main forest types of shelterbelt on coastal sandy land of Fujian Province were studied. Initial characteristics, weight loss rate, CN ratio, CP ratio and NP ratio during decomposition were analyzed. The results show that litter biomass of different forests ranged from 10.08 t/(hm²·a) to 12.99 t/(hm²·a), and monthly dynamics showed slight difference. There were significant differences in the initial quality properties, such as TC, TN, CN ratio, CP ratio, CP ratio, cellulose and lignin contents. Weight loss rate during decomposition period conformed to Olson exponential attenuation model, and the estimated time of decomposition to 95% was 3.31 years for secondary forest, 4.92 years for *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* plantation, 5.38 years for *Acacia crassiorpa* plantation, 8.18 years for *Casuarina equisetifolia* plantation, and 13.80 years for *Pinus elliottii* plantation. Decomposition index (k) was positively correlated with the contents of TP and TN of litter, negatively correlated with TC, CN ratio and cellulose content, and also positively correlated with soil pH and AP. With the extension of decomposition time, CN ratio decreased exponentially, while CP ratio showed different tendency, NP ratios were relatively stable. The decomposition of litter was subject to the comprehensive influence of initial quality characteristics of litter, strong acidity of sandy soil, poor nutrition, high dryness, high wind speed and other factors, which could be adjusted by

收稿日期:2020-04-02

修回日期:2020-10-02

资助项目:福建省科技重大专项(2018NZ0001-1);福建省属公益类科研院所基本科研专项(2014R1011-7);福建省森林培育与林产品加工利用重点实验室、福建省木麻黄工程技术研究中心共同资助

第一作者:岳新建(1984—),男,山东宁阳人,博士研究生,高级工程师,主要从事林业调查规划、水土保持等工作。E-mail:yxinj03@126.com
通信作者:叶功富(1966—),男,福建政和人,博士,教授级高级工程师,博士生导师,主要从事森林生态研究。E-mail:yegongfu@126.com

certain forest management, such as planting multiple tree species, fertilizing, as so as to regulate the decomposition rate of litter, improve the ability of self-fertilizing.

Keywords:coast protection forest, natural secondary forest, biometric characteristics, Chishan state forest farm of Dongshan County

凋落物是植物体的代谢产物,是土壤营养物质的主要来源,在维持森林生态系统生产力、碳储量、土壤肥力及林下群落演替等方面意义重大^[1-2]。地上部分凋落物覆盖地表,还具有涵养水源、保持水土,调节土壤温、湿度的作用,进而影响土壤动物、微生物种类、数量和活性及生态功能。尤其是在初级生态系统中,立地条件相对较差,养分输入匮乏,限制了其初级生产力。因此,凋落物在维持生态系统的物质平衡,持续改善土壤肥力等方面发挥着重要作用。不同森林因凋落物的质量特征是影响其分解速率、养分分解释放主要因素,对土壤肥力的改良效果各有不同。生态化学计量学(Ecological Stoichiometry)是研究各种化学元素及生物系统能量平衡及交互作用影响的一种理论科学^[3],为探究不同生态系统中元素迁移和元素限制提供了有效手段^[4-6],有助于深入了解森林生态系统物质和能量循环及演化规律。

滨海风沙土是由海岸沉积物经风浪作用堆积成的,属初育土纲—土质初育土亚纲,是我国东南沿海地区主要的非地带性土壤类型之一,福建省内面积约 3.5 万 hm^2 ^[7-8]。自 20 世纪 50 年代起营建的沿海防护林体系是海岸沙地上唯一的人工生态屏障,属于无林地上造林,在减轻强风危害、保障后沿工农渔业生产、改善区域小气候中发挥了重要作用。现阶段,沿海防护林体系受到较好保护,采伐、施肥等经营性活动基本停止,土壤肥力持续下降、森林自肥能力不强是制约防护林可持续经营的关键因素。以往对海岸防护林凋落物研究主要集中在木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)单一树种^[9-11],对其他森林类型的研究较少。因此,研究不同森林类型凋落物的生物量及初始质量特征,探讨凋落物分解过程碳氮磷释放特征,对深入了解不同森林类型对土壤肥力质量影响的差异及机制具有重要意义。

1 研究区概况

研究地点位于福建省东山县赤山国有防护林场($23^{\circ}38'21.22''\text{N}$, $117^{\circ}24'22.17''\text{E}$),属南亚热带海洋性季风气候,1 月份平均气温 13.1°C ,7 月份平均气温 27.3°C ,多年平均气温为 20.8°C ,终年无霜冻;多年平均降水 $1\,103.8\text{ mm}$,多年平均蒸发量 $2\,027.9\text{ mm}$,年均干燥度指数(蒸发量/降雨量)1.8,每年 10 月一次

年 1 月干燥度指数达到 5 以上;干湿季明显,雨季集中在 5—9 月,约占全年降雨量的 61%。年日照时数 $2\,351\text{ h}$;年均风速 7 m/s ,大风天气达 120 d,多为东北风(NE)。气温、风速、降雨量、蒸发量及干燥度指数规律见图 1。土壤类型主要为滨海风积沙土,厚度 $80\text{—}100\text{ cm}$,疏松贫瘠,持水保肥能力差,剖面无明显的腐殖质层和淋溶淀积层,剖面构型为 A—C 或 C 型。从粒径上看,以 $0.25\text{—}0.05\text{ mm}$ 沙粒为主,含量占 60%以上。

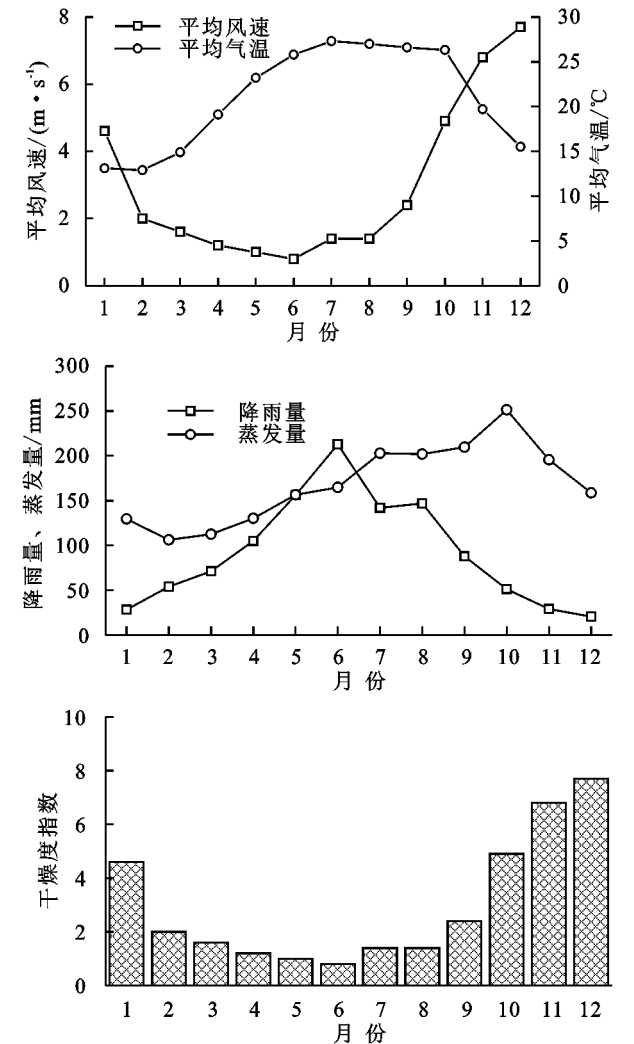


图 1 研究区主要气象因子

2 材料与方法

2.1 试验设计

2.1.1 样地设置 首先,查阅当地最新森林资源建档资料,初步确定拟研究森林类型。筛选出木麻黄

(*Casuarina equisetifolia*, CE)、尾巨桉(*Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*, EE)、湿地松(*Pinus elliotii*, PE)、厚荚相思(*Acacia crassicarpa*, AC) 4 种人工林分以及天然次生林(Secondary Forest, SF)小班。然后实地踏查,根据林龄、林分健康状况等确定样地具体位置。所选小班距离海岸线 3.0~5.0 km,处于基干林带后沿。林分基本情况详见表 1。初值密度均为 2.0 m×2.0 m(株行距),挖穴规格 60 cm×60 cm×60 cm,每穴下客土(黄壤土)15 kg,拌施钙镁磷肥。天然次生林林龄超过 50 a(询问当地群众获得)。现阶段沿海防护林均受到严格保护,经营性活动如采伐、施肥、抚育等基本停止,林分凋落物保护较好。人工林分地被稀疏,灌草盖度在 5% 以下。天然次生林主要为风水林,受当地百姓保护,郁闭度较高,植被丰富,乔、灌、草层清晰。主要乔木树种包括潺槁木姜子(*Litsea glutinosa*)和朴树(*Celtis sinensis*),灌木层包括毛果算盘子(*Glochidion eriocarpum*)、豺皮樟(*Litsea rotundifolia*)、土蜜树(*Bridelia tomentosa*)、鳝藤(*Anodendron affine*)等,高度 0.8~1.5 m,盖度 20% 以上,草本层主要为沿阶草(*Ophiopogon bodinieri*)、荩草(*Arthraxon hispidus*)等^[12]。

表 1 5 种森林类型现状调查

项目	指标	尾巨桉	湿地松	天然次生林	厚荚相思	木麻黄
林分情况	海拔/m	18.71	18.77	13.64	20.7	20.7
	林龄/a	11	22	>50	22	22
	平均胸径/cm	15.6	21	9.7	21.1	17.9
	平均树高/m	11.4	13.9	5.6	12.5	14.9
	密度/(株·hm ⁻²)	1290	1487	1392	944	1587
	郁闭度	0.8	0.8	0.9	0.7	0.9
	容重/(g·cm ⁻³)	1.35ab	1.24bc	1.16c	1.31b	1.44a
	pH 值	5b	4.7c	6.6a	4.7c	4.7c
土壤特征	有机碳含量/(g·kg ⁻¹)	6.7b	5.4b	12.7a	4.1b	3.2b
	碳氮比	12.0a	10.9a	9.9ab	7.7b	11.6a
	有效磷/(mg·kg ⁻¹)	0.57b	0.61b	20.49a	1.26b	0.89b

每种森林设置 4 个 20 m×20 m 样地,样地间设隔离带。对样地内胸径≥5 cm 的乔木树种进行每木检尺,记录灌木草本种类、盖度等因子,详见表 1。

2.1.2 凋落物月动态 在布设好的小区内,沿对角线“S 型”布设 5 个 50 cm×50 cm 的凋落物收集器,距离地面 10—20 cm(防止与土壤接触导致凋落物加速分解),每种林分类型布设 20 个。2015 年 3 月—2016 年 2 月每月收集 1 次,全部带回实验室。70℃ 烘干至恒重,测定其含水率,推算生物量。

2.1.3 凋落物分解试验 采用原位分解袋法研究凋落叶(小枝)的分解动态。2015 年 6 月,在样地内收

集新鲜凋落叶(小枝),确保叶片(小枝)规格大小均匀,轻去掉沙土,风干后称取 10 g 装入规格 25 cm×15 cm,40 目的尼龙袋中,集中放置,每种林分放置 30 袋。另各取 50 g 左右带回实验室,测定初始质量指标。分解袋放置前清理现有未分解凋落物,露出原地表。分解袋与表面沙土充分接触。平均每 2 个月收回一次,每次 3 袋。回收后,清除附着的沙土杂质等,放入 70℃ 恒温烘干至恒重并称重,测得失重率;用植物样品粉碎机粉碎,并通过 0.5 mm 筛后备用。

2.2 样品测定

凋落物全碳、全氮采用元素分析仪(Vario EL III)测定;全磷采用 H₂SO₄-HClO₄ 消煮后采用电感耦合等离子体—发射光谱仪(ICP-OES, PekinElmer)测定;凋落物纤维素、木质素采用酸性洗涤法测定。

2.3 数据处理及分析

利用 Excel 2003 进行凋落物失重率及 Olson 模型分解指数的计算;利用 SPSS 19.0 进行单因素方差分析,Duncan 法检验;对凋落物失重率与分解时长间(a)进行回归分析;对凋落物初始全碳 TC、全氮 TN、全磷 P 含量及 C/N, C/P, N/P 与分解指数 k 进行 Perason 相关分析;Origin 8.5 作图。

采用 Olson 指数衰减模型拟合凋落物失重率变化规律。

Olson 模型为: $y = 1 - e^{-kt}$ (1)

式中: y 为凋落物年失重率(% ,分解期结束时的残留量与初始重的百分比); t 为分解时间(a); k 为凋落物分解指数(k 值越大,分解速度越快)。

常用凋落物分解的半衰期($t_{0.5}$)及完全分解年限:

$t_{0.5} = \ln 0.5 / (-k)$ (2)

$t_{0.95} = \ln 0.95 / (-k)$ (3)

式中: $t_{0.5}$ 为凋落物分解 50% 时所需年限,即半衰期(a); $t_{0.95}$ 为凋落物分解 95% 时所需的年限(a)。

3 结果与分析

3.1 不同森林类型凋落物生物量动态

从凋落物年生物量上看,湿地松生物量最高,为 12.99 t/(hm²·a),其次为天然次生林 12.69 t/(hm²·a),尾巨桉 12.31 t/(hm²·a),厚荚相思 10.08 t/(hm²·a),木麻黄 10.08 t/(hm²·a)。从月动态上看,5 种林分凋落物量均呈现双峰型,在 7 月、11 月各出现一次峰值,其中 7 月份生物量较大,详见图 2。

3.2 凋落物初始质量特征

凋落物初始性质选择了 TC、TN、TP、碳氮比、碳磷比、氮磷比、纤维素含量、木质素及木质素氮含量 9

个因子,详见表 2。5 种凋落物 TC 含量 473.43~513.73 g/kg,依次为:厚荚相思>湿地松>木麻黄>尾巨桉>天然次生林;TN 含量 6.60~16.4 g/kg,依次为:天然次生林>厚荚相思>木麻黄>尾巨桉>湿地松;TP 平均含量 0.25~0.93 g/kg,依次为天然次生林>湿地松>厚荚相思>木麻黄>尾巨桉;碳氮比在 28.05~82.5,依次为尾巨桉>湿地松>木麻黄>厚荚相思>天然次生林;碳磷比在 537.15~2 027.28,依次为尾巨桉>厚荚相思>木麻黄>湿地松>天然次生林;氮磷比在 13.28~39.1,依次为尾巨桉>厚荚相思>木麻黄>天然次生林>湿地松。从凋落物纤维素含量上看,木麻黄最高,为 275.20 g/kg,其次为湿地松 217.9 g/kg,厚荚相思 172.13 g/kg,天然次生林 157.35 g/kg,尾巨桉最低,为 114.80g/kg;凋落叶木质素含量上看,厚荚相思最

高为 449.33 g/kg,其次为湿地松 365.9 g/kg,天然次生林为 300.65 g/kg,尾巨桉最低,为 179.93 g/kg。从木质素氮含量上看,湿地松最高,为 56.5 g/kg,其次为厚荚相思 29.8 g/kg,木麻黄 25.8 g/kg,尾巨桉 19.6 g/kg,天然次生林 18.2 g/kg。

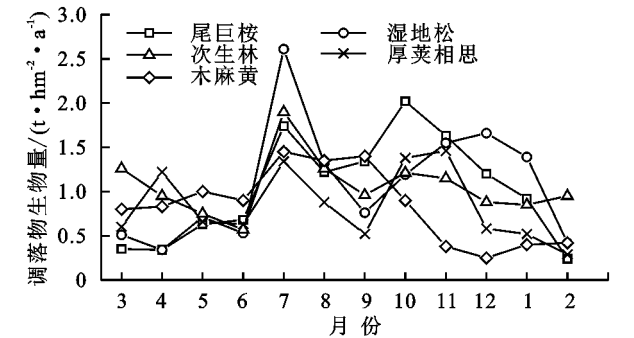


图 2 5 种林分凋落物生物量月平均动态

表 2 5 种森林凋落物初始质量因子

指标	天然次生林	尾巨桉	湿地松	厚荚相思	木麻黄
全碳含量/(g·kg ⁻¹)	459.83c	473.43c	499.73ab	513.73a	497.7ab
全氮含量/(g·kg ⁻¹)	16.40a	8.85c	6.60d	15.10b	9.20c
全磷含量/(mg·kg ⁻¹)	0.93a	0.25c	0.50b	0.43b	0.35bc
碳氮比	28.05c	82.50a	77.10a	34.08c	56.45b
碳磷比	537.15d	2027.28a	1012.90c	1250.08bc	1581.88b
氮磷比	19.45c	39.10a	13.28c	36.73a	28.13b
纤维素含量/(g·kg ⁻¹)	157.35c	114.80d	217.90b	172.13c	275.20a
木质素含量/(g·kg ⁻¹)	300.65c	179.93e	365.90b	449.33a	227.5d
木质素氮含量/(g·kg ⁻¹)	18.30c	19.60c	56.50a	29.80b	25.80b

注:表中数据为平均值,同行相同字母表示差异不显著($p>0.05$),不同字母表示差异显著($p<0.05$)。

3.3 凋落物分解动态特征

Olson 指数衰减模型是研究凋落物分解的常用模型。由表 3 可以看出,5 种森林凋落物分解过程中的失重率均符合 Olson 模型规律。从预测分解 50% 时间上看,除了天然次生林、尾巨桉 $t_{0.5}<1$ a 外,其他 3 种林分凋落物均 >1 a,其中天然次生林最短,为 0.60 a,湿地松最长,为 2.29 a,尾巨桉、厚荚相思、木

麻黄分别为 0.95,1.03,1.60 a。实际分解 50% 所需时间天然次生林、尾巨桉均较预测时间较长,原因可能在于试验所用的尼龙网袋限制了大型土壤动物进入,减缓了解进程。从预测分解 95% 所需的时间上看,与分解 50% 所需时间规律一致,最长的是湿地松,为 13.80 a,最短的为天然次生林,需要 3.31 a,尾巨桉、厚荚相思、木麻黄分别为 4.92,5.38,8.18 a。

表 3 凋落物分解失重率 Olson 模型预测结果

森林类型	模型公式	R 检验	预测分解 50% 所需	预测分解 95% 所需	实际分解 50% 所用
			时间($t_{0.5}$)/a	时间($t_{0.95}$)/a	时间($t_{0.5}$)/a
尾巨桉(EE)	$y=0.869e^{-0.58 t}$	$R^2=0.972$	0.95	4.92	0.98
湿地松(SE)	$y=0.790e^{-0.20 t}$	$R^2=0.967$	2.29	13.80	—
天然次生林(SF)	$y=0.834e^{-0.85 t}$	$R^2=0.981$	0.60	3.31	0.62
厚荚相思(AC)	$y=0.865e^{-0.53 t}$	$R^2=0.984$	1.03	5.38	1.08
木麻黄(CE)	$y=0.875e^{-0.35 t}$	$R^2=0.979$	1.60	8.18	—

注:“—”表示未到分解时长。

3.4 碳氮磷计量特征

由图 3—5 可以看出,随着分解时间的延长,凋落物碳氮比呈现指数下降的趋势,碳磷比呈现各异的变

化规律,其中尾巨桉、厚荚相思、天然次生林木麻黄呈线性变化,湿地松呈指数变化,而木麻黄呈对数变化规律,而氮磷比随着分解进程相对稳定。

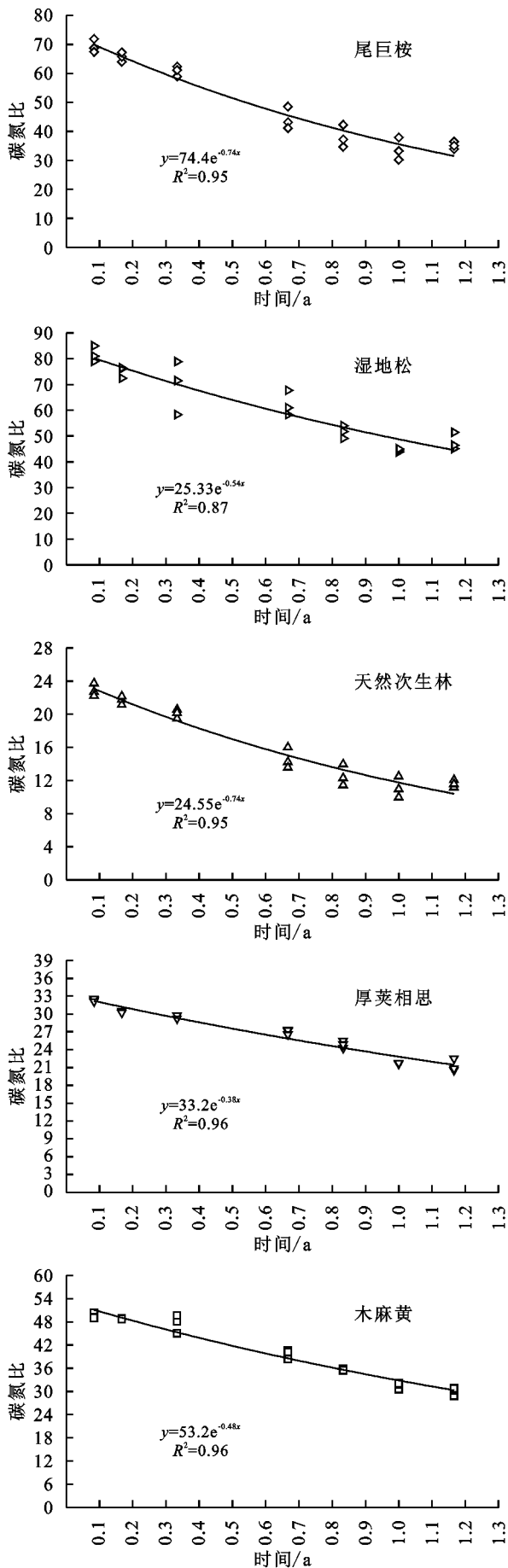


图 3 研究期内不同森林凋落物碳氮比动态特征

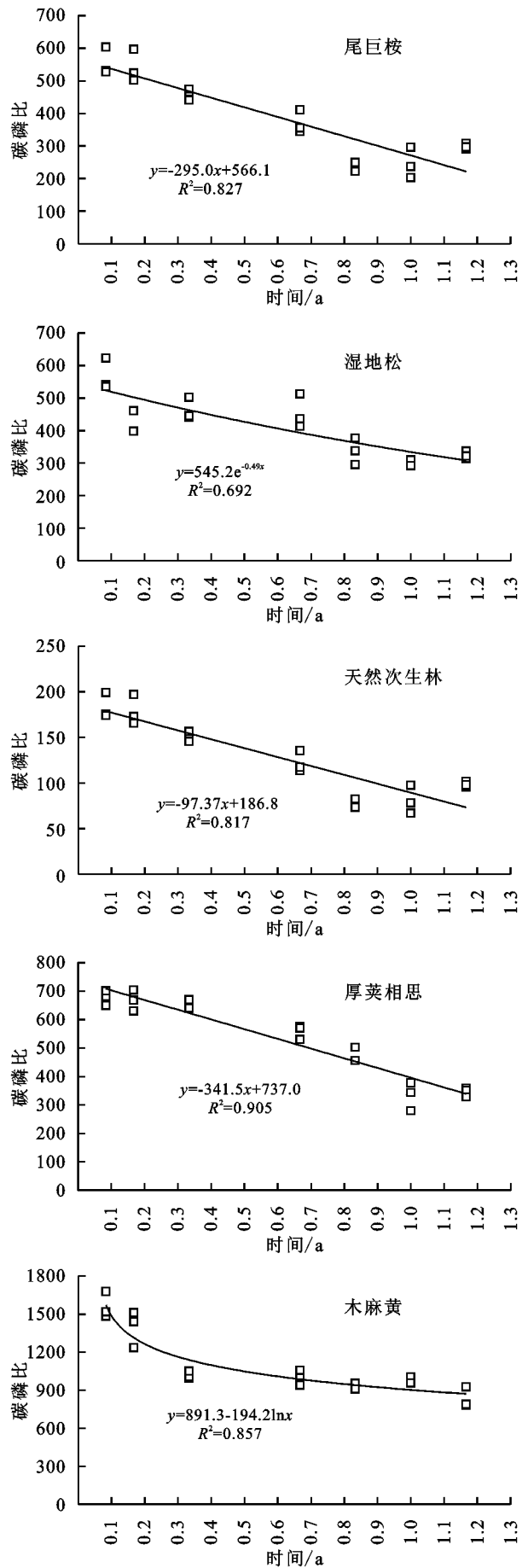


图 4 研究期内 5 种不同森林类型凋落物碳磷比动态特征

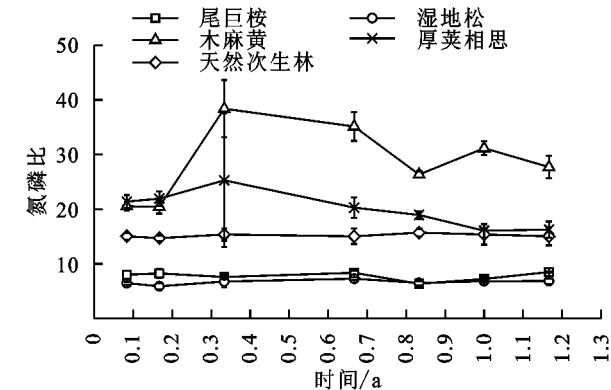


图 5 研究期内 5 种林分凋落物氮磷比动态特征

4 讨论

凋落物分解是植物向土壤转移养分的重要环节，也是生态系统维持自肥能力的关键因素，是森林生态系统养分的主要来源，可满足植物生长所需总量的 69%~87%，森林每年通过凋落物分解归还土壤的总氮量占森林生长所需总氮量的 70%~80%，总磷量的 65%~80%，总钾量的 30%~40%^[13]。在土壤养分贫瘠、生物初级生产力低下、外来养分输入匮乏的生态系统，凋落物在维持生态系统物质平衡、改善土壤肥力等方面意义重大^[14-18]，分解速率的差异直接影响养分归还的效率。本研究所选森林类型中 4 种为人工林，1 种天然次生林，人工林中包括 2 个固氮树种（厚荚相思、木麻黄），1 个针叶树种、1 个速生树种，是防护林建设最常用的树种类型，适应性强，在福建省沿海地区应用比较广泛。除了天然次生林外，人工林下植被稀疏，种类及生物量较低，短期内对土壤肥力的影响不大^[19]。5 种森林的凋落物失重率均满足 Olson 衰减模型，从时间特征值来看，分解至 95% 所需时间为分解 50% 所需时间的 5~6 倍，体现了分解前期较快后期缓慢的特点，与前人研究结果一致。分解过程中，5 种凋落物的氮磷比变化不大，说明 5 种森林凋落物的氮磷施放具有较强的一致性^[20]。

表 4 凋落物初始养分含量及其与分解指数的相关性分析

指标	凋落物初始性质								土壤性质		
	全碳	全氮	全磷	碳氮比	碳磷比	氮磷比	纤维素	木质素含量	pH 值	碳氮比	有效磷
分解指数 <i>k</i>	-0.56 *	0.83 **	0.53 *	-0.60 **	-0.28	0.22	-0.63 **	-0.13	0.85 **	0.41	0.70 **

注：* 表示在 0.05 水平（双侧）上显著相关；** 表示在 0.01 水平（双侧）上显著相关。

5 结论

人工林分在海岸沙地生态环境改善、土壤肥力持续改良过程中发挥着至关重要的作用。在现有的防护林经营管理模式下，主要依靠森林的“自肥”机制来

凋落物的初始碳氮磷含量及比值是常见的凋落物质量评价指标，含氮量高的凋落物分解速率要高于含氮量低的^[21]。5 种新鲜凋落物的碳含量均高于全球陆生植物平均值（464 g/kg），湿地松和木麻黄叶片（小枝）氮磷含量均低于中国平均值（18.6, 1.21 g/kg）、全球平均值（17.7, 1.58 g/kg）。氮磷比方面，仅湿地松小于 14，其余均大于 16。在分解试验过程中，尾巨桉、湿地松凋落物的氮磷比均小于 14，天然次生林稳定在 15 左右，厚荚相思在分解前期大于 16，后期小于 16 但大于 14。分解试验表明，针叶树种（湿地松）凋落物分解最慢，半衰期要 2.29 a，分解至 95% 需要 13.8 a，与研究区实际情况相符（湿地松林下凋落物较厚，约 15—20 cm，腐殖化程度差，腐殖质层较薄）。天然次生林因树种组成多样性丰富，林下植物多样，成土时间较长，土壤微生物活性较强等原因，凋落物分解速度较快。

凋落物分解速率受外部因素和内部因素的共同影响^[22]，外部因素主要为气候因素、土壤类型等。气候因素包括平均气温、降雨量等^[23]。土壤因素主要为土壤肥力状况、土壤微生物种类和丰富程度等。微生物在凋落物分解各个阶段发挥着重要作用^[24]。而微生物对 N、P 等养分有很高需求，当凋落物含这些养分较高时，土壤微生物活性高，分解速度也更快^[21]。由于 5 种森林距离相近，土壤母质类型一致，空气温湿度等气候因素对分解速率差异的影响可忽略。利用 5 种森林各 3 个重复的凋落物、土壤性质进 Pearson 相关分析，探讨凋落物初始性质与分解指数 *k* 的关系，详见表 4。Pearson 相关分析表明，分解指数 *k* 与凋落物全磷显著正相关，与凋落物全碳显著负相关（ $p < 0.05$ ），与凋落物全氮极显著正相关（ $p < 0.01$ ），与凋落物碳氮比、纤维素含量极显著负相关（ $p < 0.01$ ），与全氮极显著正相关（ $p < 0.01$ ）。土壤性质与凋落物分解指数的关系方面，土壤 pH 值及有效磷含量与分解指数极显著正相关（ $p < 0.01$ ）。

实现可持续经营，尤其是前沿基干林带。林分所处的气候条件、土壤以及林分凋落物的质量特征等因素影响着凋落物的分解速率。福建省人工海防林的凋落物分解速度缓慢，影响因素中，气候条件中的降雨量、干燥度、风速等因子，土壤的 pH 值、有效磷含量，凋

落物质量指标中的全氮、碳氮比等因子作用显著。受研究区限制,未对降水量、干燥度、大气温度对凋落物分解影响进行量化研究,后期将作为室内模拟试验的方向。在防护林经营过程中,可适当考虑不同阔叶树种混交造林,以丰富凋落物种类;通过施肥调节凋落物碳氮磷比例、土壤 pH 值等,以合理调控凋落物的分解速率,加快沙土的“培肥”进程,实现沿海防护林体系可持续经营。

参考文献:

- [1] 杨万勤,邓仁菊,张健.森林凋落物分解及其对全球气候变化的响应[J].应用生态学报,2007,18(12):2889-2895.
- [2] 李志安,邹碧,丁永祯,等.森林凋落物分解重要影响因素及其研究进展[J].生态学杂志,2004,23(6):77-83.
- [3] 程瑞梅,王娜,肖文发,等.陆地生态系统生态化学计量学研究进展[J].林业科学,2018,54(7):130-136.
- [4] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. Ecology Letters, 2010, 3(6):540-550.
- [5] Elser J J, Fagan W F, Kerkhoff A J, et al. Biological stoichiometry of plant production: metabolism, scaling and ecological response to global change[J]. New Phytologist, 2010, 186(3):593-608.
- [6] 王璐,喻阳华,邢容容,等.喀斯特高寒干旱区不同经济树种的碳氮磷钾生态化学计量特征[J].生态学报,2018,38(15):127-137.
- [7] 赵国帅,叶功富,王军邦.1949—2014 年福建沿海沙地动态演变及其驱动因素[J].中国沙漠,2018,38(4):701-708.
- [8] 岳新建,叶功富,陈梦瑶,等.南亚热带海岸沙地不同林分土壤微生物功能多样性及影响因素[J].中南林业科技大学学报,2019,39(2):1-10.
- [9] 叶功富,侯杰,张立华,等.木麻黄连栽林地根际土壤化学性质与酶活性动态[J].亚热带水土保持,2012,24(2):1-4.
- [10] 叶功富,徐俊森,林武星,等.木麻黄连栽林地土壤肥力动态与地力维持[J].防护林科技,1996(S1):49-53,89.
- [11] 徐志霞,王璇,李慧敏,等.不同林龄木麻黄林地土壤细菌及与土壤因子的相关性分析[J].基因组学与应用生物学,2018,37(2):780-788.
- [12] 高伟,叶功富,黄志群,等.改变碳输入对南亚热带海岸沙地典型天然次生林土壤呼吸的影响[J].中国水土保持科学,2017,15(2):9-17.
- [13] 秦源.子午岭森林凋落叶对土壤微生物群落特征的影响研究[D].西安:陕西师范大学,2013.
- [14] 赵红梅,黄刚,马健,等.荒漠区地表凋落物分解对季节性降水增加的响应[J].植物生态学报,2012,36(6):471-482.
- [15] 张雪梅,王永东,徐新文,等.塔里木沙漠公路防护林地凋落物分解对施肥的响应[J].生态学报,2017,37(5):1506-1514.
- [16] 于洋,贾志清,朱雅娟,等.高寒沙地植被恢复区乌柳人工防护林对土壤的影响[J].林业科学,2013,49(11):9-15.
- [17] 刘昀东,高广磊,丁国栋,等.风蚀荒漠化地区土壤质量演变研究进展[J].南京林业大学学报:自然科学版,2017,41(5):161-168.
- [18] 李清雪,贾志清.高寒沙地不同植被恢复类型土壤肥力质量差异及评价[J].土壤通报,2015,46(5):1145-1154.
- [19] Zilliox C, Frédéric G. Tree species diversity and abundance as indicators of understory diversity in French mountain forests: Variations of the relationship in geographical and ecological space[J]. Forest Ecology & Management, 2014, 321:105-116.
- [20] 李雪峰,韩士杰,胡艳玲,等.长白山次生针阔混交林叶凋落物中有机物分解与碳、氮和磷释放的关系[J].应用生态学报,2008,19(2):245-251.
- [21] Cortez J, Demard J M, Bottner P, et al. Decomposition of mediterranean leaf litters: A microcosm experiment investigating relationships between decomposition rates and litter quality[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1996, 28(4/5):443-452.
- [22] Xuluc-Tolosa F J, Vester H F M, Ramírez-Marcial N, et al. Leaf litter decomposition of tree species in three successional phases of tropical dry secondary forest in Campeche, Mexico[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 174(1/3):401-412.
- [23] István Fekete, Zsolt Kotroczó, Varga C, et al. Variability of organic matter inputs affects soil moisture and soil biological parameters in a European detritus manipulation experiment[J]. Ecosystems, 2012, 15(5):792-803.
- [24] Alberti G, Nock C, Fornasier F, et al. Tree functional diversity influences belowground ecosystem functioning[J]. Applied Soil Ecology, 2017, 120:160-168.