

半干旱区和湿润区木麻黄海防林凋落物、土壤主要养分特征及其影响因素

杨彬,郝清玉*

(热带岛屿生态学教育部重点实验室,海南省热带动植物生态学重点实验室,海南师范大学 生命科学学院,海南 海口 571158)

摘要:以海南岛木麻黄海防林为研究对象,采用典型抽样调查方法,通过设立 71 个临时样,对其进行凋落物、土壤养分空间分布特征及其影响因素的研究。结果表明:1)木麻黄凋落物现存量较大,平均值和最大值分别为 $2.74 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $10.09 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,凋落物分解缓慢,半分解凋落物质量平均占比为 72.2%;2)土壤 pH、有机质含量、铵态氮、有效磷和速效钾变化范围均较大,分别为 4.83~9.51、0.30%~3.61% 和 2.26~49.43、2.92~342.55、3.36~111.93 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-2}$;3)有机质、速效钾和碱解氮整体较为缺乏,其中缺乏样地占比均>88.7%;有效磷则较为丰富,中等以上样地占 78.8%;4)土壤养分与凋落物、土壤 pH 和气候区有明显的相关性,其中速效钾与凋落物厚度和半分解凋落物质量都呈极显著负相关,铵态氮则与之呈现显著正相关;铵态氮与 pH 呈显著负相关,有效磷则与其呈显著正相关;湿润区土壤有机质和铵态氮均显著高于半干旱区,但有效磷和速效钾则无显著差异。这说明土壤养分虽然与凋落物现存量具有一定的相关性,但大量积累的凋落物并没有明显改善滨海沙土贫瘠土壤的状况,其原因可能与快速生长的木麻黄对土壤养分的利用大于凋落物的归还、沙土淋溶,包括凋落物分解缓慢等多项因素。

关键词:木麻黄海防林;凋落物;土壤养分;影响因素;海南岛

中图分类号:S792.93 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2022)03-0009-07

Characteristics and Impacting Factors of Litter Fall and Soil Nutrients in Coastal Protection Forests of *Casuarina equisetifolia* in Humid and Semi-Arid Regions

YANG Bin, HAO Qing-yu*

(Key Laboratory for Ecology of Tropical Islands, Ministry of Education, Key Laboratory of Tropical Animal and Plant Ecology of Hainan Province, College of Life Sciences, Hainan Normal University, Haikou 571158, Hainan, China)

Abstract:Forest litter fall is the main carrier of material cycle and energy flow, and plays an important role in promoting nutrient cycle in forest ecosystem. Revealing the relationship between soil nutrient changes and litter falls is helpful to better understand the mechanism of carbon cycle, and nitrogen, phosphorus and potassium cycle in forest ecosystem. In this study, the spatial distribution characteristics of litter falls and soil nutrients, and impacting factors of soil nutrients in the coastal protection forests of *Casuarina equisetifolia* (CPFC) in Hainan Island were studied by setting 71 temporary sample plots, with typical sampling method. The results showed that 1) the litter fall accumulation of *C. equisetifolia* was large, with an average amount of $2.74 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ and a maximum amount of $10.09 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively. The litter fall decomposition was slow, and the average mass ratio of semi-decomposed litter fall was 72.2%. 2) Soil pH, organic matter content, ammonium nitrogen, available phosphorus and rapidly available potassium all varied greatly among different regions, with the ranges of 4.83~9.51, 0.30%~3.61%, 2.26~49.43, 2.92~

收稿日期:2021-03-10 修回日期:2021-05-21

基金项目:国家自然科学基金(31760202)。

第一作者:杨彬。研究方向:恢复生态学。E-mail:1938075509@qq.com

*通信作者:郝清玉,教授。研究方向:恢复生态学。E-mail:hnhaoqy@126.com

342.55 and $3.36-111.93 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-2}$, respectively. 3) Organic matter, rapidly available potassium and alkali-hydrolyzable nitrogen in the CPFC were all deficient in general, in which sample plots under the nutrient deficiency accounted for more than 88.7%. The available phosphorus was more abundant, 78.8% of sample plots were found in medium or above level. 4) There were significant correlations between soil nutrients and litter falls, soil pH and climate regions. Rapidly available potassium was negatively correlated with the thickness of litter falls and the weight of semi-decomposed litter falls, while the ammonia nitrogen was positively correlated with the thickness of litter falls. There was a significant negative correlation between the ammonium nitrogen and pH, and a significant positive correlation between the available phosphorus and pH. The soil organic matter and ammonium nitrogen in humid region were significantly higher than those in semi-arid region, but there was no significant difference in the available phosphorus and rapidly available potassium. Although soil nutrients and litter fall accumulation had a certain correlation, a large amount of accumulated litter falls did not significantly improve the poor soil condition of coastal sandy soil. The reason may be related to several factors, such as the utilization of soil nutrients was more than litter return due to the rapidly growth of *C. equisetifolia*, sand leaching, slow litter decomposition, etc.

Key words: *Casuarina equisetifolia*; litter fall; soil nutrient; impacting factor; Hainan Island

森林凋落物是林木新陈代谢的必然产物,在森林生态系统物质循环和养分平衡方面起着重要的作用^[1]。凋落物产量和组成影响土壤有机质和养分的输入^[2],而凋落物分解的快慢影响着土壤养分归还速率,从而影响土壤物理化学性质^[3],间接影响着森林生产力^[4]。研究表明,凋落物数量和养分归还量主要取决于纬度^[3]、林分类型和生境条件等因素^[5]。当生境条件一致时,凋落物基质质量(木质素等含碳化合物、N、P 和 K 等养分元素含量、C/N、C/P、木质素/氮比和酚类物质等)对凋落物分解起着关键作用,从而影响土壤养分含量^[6]。地表凋落物的化学含量以有机碳最高,其次为 N 或 Ca,然后是 K 和 Mg,P 含量最低^[3]。土壤有机碳及全氮含量与年凋落叶量和年凋落物总量均呈极显著正相关^[4]。土壤 N、P 含量与凋落物数量呈显著正相关^[3,7],但也会出现显著负相关或无关的情况^[8],这可能与土壤酸性酶活性^[9]及植物对土壤养分吸收利用程度^[8]等有关。

木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)林(20 a)年凋落物量为 $13.973 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,养分总量为 $280.27 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中每年通过凋落物分解释放进入林地土壤的养分总量为 $136.820 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[10]。由于木麻黄凋落物以小枝为主,占比达 88.990%^[11],因而分解速度较慢,年失重率仅为 48.800%,Olson 指数衰减模型预测木麻黄凋落物分解 95% 所需时间为 4.475 a^[12]。目前,关于木麻黄林分土壤养分^[13-15]、木麻黄凋落物养分元素含量、养分归还及分解释放进入林地等方面的研究较多^[10,13-14],但关于木麻黄土壤养分的影响因素研究得相对较少,主要集中在林地凋落物清理与否对土壤养分的影响^[16],林下植

物物种丰富度指数和多样性指数对土壤养分的影响^[17],土壤酶活性对土壤养分的影响^[18]。关于木麻黄凋落物现存量、气候因素等与土壤养分之间的关系尚未见报道。因而本研究采用典型抽样方法,研究海南岛全岛木麻黄海防林土壤养分空间分布特征,以及凋落物现存量、林分结构、光照生态因子、气候区对土壤养分的影响,以便有助于了解碳循环和土壤养分循环的驱动机制,为木麻黄海防林经营、保护和管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

海南岛位于我国的南部,地处 $18^{\circ}10' - 20^{\circ}10'$ N, $108^{\circ}37' - 111^{\circ}03'$ E, 四面环海, 海岸线长 1 823 km, 其中由木麻黄为主构建的沿海防护林带长约 1 450 km, 面积达 5.6 万 hm²^[19], 土壤类型多为滨海沙质土, 极少为赤红土。

海南岛属热带季风气候,年平均降水量分布不均,为 941~2 388 mm,整体上西部(东方市)降水量较少,其他地区降水量较多;各地气温分布较为均匀,年平均气温为 $23.1 - 26.3^{\circ}\text{C}$ 。根据年干燥指数和年降水量,车秀芬等^[20]将海南岛划分为半干旱区、半湿润区和湿润区 3 个气候区,其中半干旱区为东方市西部沿海小部分地区及昌江南部沿海,其他地区为湿润区和半湿润区。由于半湿润区与湿润区的年降水量较为接近,因此本研究将 3 个气候区简化为 2 个,即半干旱区和湿润区,其中湿润区包括半湿润区。

1.2 样地的选择与调查

2017 年 9 月至 2018 年 5 月采用典型抽样法对

海南岛木麻黄海防林进行了系统调查。临时样地设置在全岛海岸带有木麻黄分布的区域,有效样地共计71个,每个样地的面积通常为20 m×20 m,其中半干旱区样地数为14个,湿润区样地数为57个,样地调查面积总计2.43 hm²,样地具体分布位置参考文献[21]。

在各临时样地调查的项目主要有木麻黄林分结构、生态因子、凋落物及土壤养分等。林分结构调查主要测量并记录木麻黄胸径、树高、株数、林冠郁闭度、草本盖度等;生态因子调查主要测量光照强度、土壤理化性质等;凋落物调查主要测量凋落物厚度、鲜质量及干质量。

凋落物调查是在每个临时样地内,分散随机设置3个1 m×1 m的小样方,将样方框内凋落物按表层未分解的凋落物(外表无分解的痕迹)和下层半分解的凋落物(外表轮廓不完整,颜色近黑褐色)分别称量并记录鲜质量,然后分别称量部分样品封袋后带回实验室测量干质量,最后测量凋落物厚度。

根据样本容量和分组数的关系^[22],将凋落物现存量、半分解凋落物质量和凋落物厚度分别分为6组,组距分别为1.1、0.9 kg·m⁻²和1.3 cm,6个组的中值分别为:0.55、1.65、2.75、3.85、4.95 kg·m⁻²和6.05 kg·m⁻²;0.45、1.35、2.25、3.15、4.05 kg·m⁻²和4.95 kg·m⁻²;0.65、1.95、3.25、4.55、5.85 cm和7.15 cm。组中值范围按如下计算:下线值=分组中值-组距/2,上线值=(分组中值+组距/2)-0.001。

为了使不同气候区木麻黄海防林土壤养分具有可比性,样本选择的原则是林分结构相似,凋落物积累量相当,具体选择方法详见文献[23]。采集的凋落物样品以80℃烘干36 h计算含水量,估算林下凋落物现存量,其中凋落物现存量=未分解凋落物质量+半分解凋落物质量。土壤测定样品采集于清除凋落物后的样方中,每个样方中按0~15 cm和15~30 cm分别采集表层(A)和下层(B)土壤样品,于实验室阴凉通风处阴干至沙土完全自然散开,研磨过筛。

1.3 数据处理与数据分析

土壤pH采用农业标准NY/T 1121.2—2006测定;铵态氮使用杭州汇尔仪器设备有限公司生产的土壤肥料养分速测仪YN 2000C及其配套试剂盒测定;有效磷以NY/T 1121.7—2014标准测定;有机质采用重铬酸钾氧化-比色法测定,速效钾采用乙酸铵提取-火焰光度计测定^[24]。

采用描述统计方法对林分结构、凋落物现存量及土壤主要养分含量进行分析。采用Pearson相关

分析法判别土壤养分与林分结构、生态因子及凋落物之间的相关性。采用一般线性模型中单变量方差分析方法检验各处理条件下土壤养分的差异性,多重比较采用Duncan方法。上述统计过程均在Excel 2019和SPSS 19.0软件中完成。

2 结果与分析

2.1 木麻黄海防林林分结构、凋落物现存量及土壤养分基本情况

从表1可知,木麻黄保留密度仅为1 425.1株·hm⁻²,比初始中等造林密度(2 500株·hm⁻²)减少了43%。相对于较为稀疏的林分结构而言,木麻黄凋落物厚度较厚,现存量较大,且主要处于半分解状态,厚度和凋落物现存量的平均值、最大值分别为3.629 cm、2.735 kg·m⁻²和8 cm、10.09 kg·m⁻²,半分解凋落物占比为72.249%。另外,林分结构、凋落物及土壤养分等各项指标的变异程度均较大。按照反映离散程度的变异系数大小,将其分为弱变异($CV \leq 10\%$)、中等变异($10\% < CV \leq 100\%$)和强变异($CV > 100\%$)^[25]。结果表明,林分结构和凋落物指标均为中等变异,变异系数范围分别为40.296%~69.902%和55.58%~96.002%;pH变异系数最小,为12.552%,有效磷AP、有效磷A和有效磷B变异最大,为强变异,其变化范围为114.987%~145.466%;其他土壤养分为中等变异,其变化范围为53.855%~94.585%。

根据海南土壤养分含量分级标准^[26],木麻黄海防林有机质整体较为缺乏,其中缺乏至极缺乏样地占88.732%;速效钾极为缺乏,其中缺乏至极缺乏样地占98.592%;有效磷则较为丰富,其中有效磷中等至很丰富样地占78.873%,缺乏至极缺乏样地占21.163%;土壤碱解氮整体较为缺乏,其中缺乏至极缺乏样地占100%(表2)。

2.2 木麻黄林分结构及主要生态因子对土壤养分的影响

通过对土壤养分含量和木麻黄林分结构及生态因子的线性相关分析发现,木麻黄密度、平均胸径、胸高断面面积、平均树高、郁闭度、草本盖度及光照因子与土壤有机质、铵态氮、速效钾和有效磷等均不相关($P > 0.05$),但pH与铵态氮呈显著负相关($r = -0.297, P < 0.05$),与有效磷呈显著正相关($r = 0.242, P < 0.05$)。

2.3 木麻黄凋落物与土壤养分的关系

2.3.1 凋落物厚度对土壤养分的影响 土壤有机质、铵态氮和有效磷含量均随凋落物厚度的增加,呈小幅波动变化,变化范围分别为1.038%~

1.492%、10.226~19.446 mg·kg⁻¹ 和 44.788~84.822 mg·kg⁻¹, 但不同凋落物厚度对应的有机质、铵态氮和有效磷含量均无显著差异($P>0.05$)。从图1可知,速效钾含量随凋落物厚度的增加则基本上呈递减的变化趋势,变化范围为 30.842~

12.003 mg·kg⁻¹,且凋落物厚度较小的 2 个组的速效钾含量显著高于凋落物厚度较大的 3 个组。土壤表层的速效钾和下层的速效钾含量变化趋势与速效钾基本一致,但不同凋落物厚度对应的下层速效钾含量无显著差异(图1)。

表1 木麻黄海防林林分结构、凋落物现存量及土壤主要养分含量

Table 1 Stand structure, litter fall accumulation and soil main nutrient content of the coastal protection forests of *Casuarina equisetifolia* (CPFC)

指标	木麻黄密度 /(株·hm ⁻²)	平均胸径 /cm	断面积 /(m ² ·hm ⁻²)	凋落物厚 /cm	未分解凋落物质量 /(kg·m ⁻²)	半分解凋落物质量 /(kg·m ⁻²)
样本数量	71	71	71	71	71	71
最小值	100	4.31	0.15	0	0.21	0
最大值	5 700	28.94	47.4	8	2.41	8.73
平均值	1 425.100±963.738	11.232±4.526	13.157±9.197	3.629±2.017	0.759±0.438	1.976±1.897
变异系数(%)	67.626	40.296	69.902	55.58	57.708	96.002
指标	凋落物现存量 LA/(kg·m ⁻²)	pH	pH-A	pH-B	有机质(%)	
样本数量	71	71	71	71	71	
最小值	0.21	4.83	4.7	4.97	0.3	
最大值	10.09	9.51	9.48	9.54	3.61	
平均值	2.735±2.014	8.118±1.019	8.072±1.019a	8.164±1.032a	1.242±0.720	
变异系数(%)	73.638	12.552	12.624	12.641	57.971	
指标	有机质-A (%)	有机质-B (%)	铵态氮 AN /(mg·kg ⁻¹)	铵态氮-A /(mg·kg ⁻¹)	铵态氮-B /(mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP /(mg·kg ⁻¹)
样本数量	71	71	71	71	71	71
最小值	0.33	0.11	2.26	2.26	2.2	2.92
最大值	4.04	3.2	42.85	49.43	59.71	342.55
平均值	1.660±0.894A	0.853±0.653B	14.360±8.777	15.365±9.144a	13.355±9.833a	62.274±74.367
变异系数(%)	53.855	76.553	61.121	59.512	73.628	119.419
指标	有效磷-A /(mg·kg ⁻¹)	有效磷-B /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 /(mg·kg ⁻¹)	速效钾-A /(mg·kg ⁻¹)	速效钾-B /(mg·kg ⁻¹)	
样本数量	71	71	71	71	71	
最小值	2.22	1.14	3.36	2.72	3.33	
最大值	430.77	551.2	111.93	127.07	96.78	
平均值	62.233±71.560a	62.315±90.647a	18.908±16.399	21.811±20.630a	16.005±13.044b	
变异系数(%)	114.987	145.466	86.73	94.585	81.5	

注:不同小写字母表示不同土层深度土壤养分之间存在显著差异,不同大写字母则表示不同土层深度土壤养分之间存在极显著差异。

表2 各级别土壤养分的样本占比

Table 2 Sample plot proportions of soil nutrients at different classifications

%

土壤养分	分级					
	6(极缺乏)	5(很缺乏)	4(缺乏)	3(中等)	2(丰富)	1(很丰富)
有机质	21.127	16.901	50.704	5.634	5.634	0
速效钾	85.915	9.859	2.817	1.408	0	0
有效磷	1.408	2.817	16.901	18.310	11.268	49.296
碱解氮*	69.014	23.944	7.042			

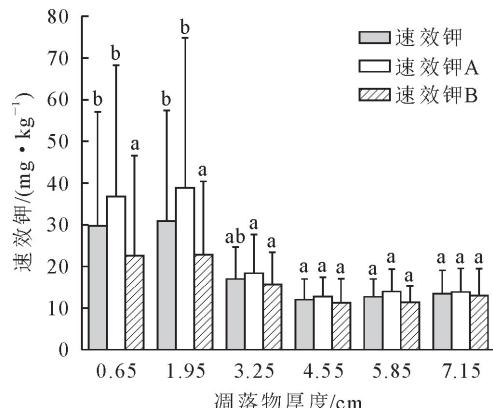
注: * 表示铵态氮换算为碱解氮。假设碱解氮≈硝态氮+铵态氮,并根据海南岛已知木麻黄林硝态氮和铵态氮含量^[29-31],计算铵态氮在碱解氮的占比,选择铵态氮占比最小值(53.419%),以便推算碱解氮可能的最大值。

另外,土壤养分含量和凋落物厚度的 Pearson 相关分析表明凋落物厚度与铵态氮呈显著正相关($r=0.237, P<0.05$),与速效钾呈极显著负相关($r=-0.399, P<0.01$)。

2.3.2 不同半分解凋落物质量之间土壤养分的比较 土壤有机质、铵态氮和有效磷含量大体上随半分解凋落物质量的增加呈小幅波动变化,变化范围

分别为 1.063%~1.575%、12.324~20.329 mg·kg⁻¹ 和 30.139~99.022 mg·kg⁻¹,但不同半分解凋落物质量组对应的有机质、铵态氮和有效磷含量均无显著差异($P>0.05$)。速效钾、速效钾 A 和速效钾 B 随半分解凋落物质量的增加呈递减的趋势,且最大值均出现在半分解凋落物质量最小的 0.45 组,分为 27.965、34.282、21.648 mg·kg⁻¹,其中

0.45组的速效钾和表层速效钾A显著高于其他半分解凋落物组,但各组间下层速效钾B含量则均无显著差异(图2)。

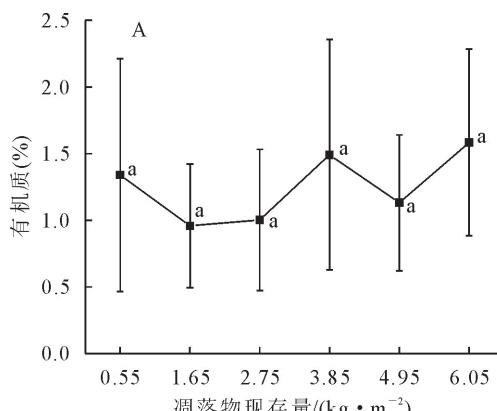


注:不同小写字母表示0.05水平差异显著。下同。

图1 凋落物厚度与土壤速效钾的关系

Fig. 1 Relationship between different litter fall thicknesses and soil rapidly available potassium

土壤养分含量和半分解凋落物质量的Pearson相关分析表明,半分解凋落物质量与铵态氮呈显著正相关($r=0.237, P<0.05$),与速效钾呈极显著负相关($r=-0.352, P<0.01$)。



2.3.3 凋落物现存量不同组别之间土壤养分的比较 从图3可知,随着凋落物现存量的增加,土壤有机质含量呈震荡升高的态势,铵态氮基本上呈增加的趋势,有效磷呈V型态势,变化范围分别为 $0.958\% \sim 1.583\%$, $11.940 \sim 18.347 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $6.05 \sim 113.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,但不同凋落物现存量组别之间的土壤有机质、铵态氮和有效磷含量均无显著差异。

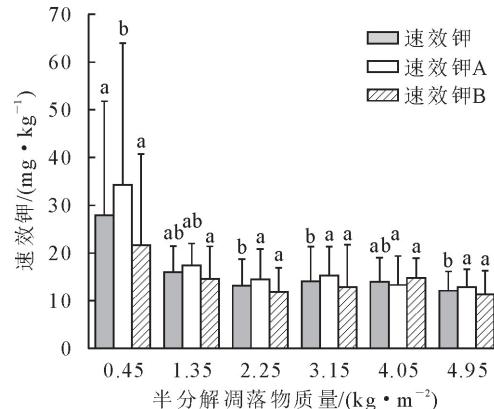
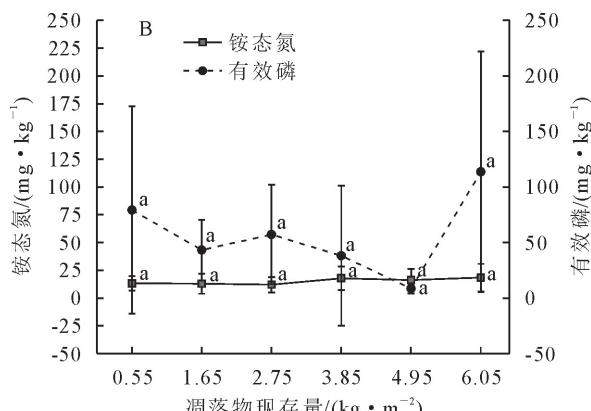


图2 不同半分解凋落物质量与土壤速效钾的关系

Fig. 2 Relationship between different semi-decomposable litter fall mass and rapidly available potassium



注:A. 凋落物现存量与土壤有机质的关系;B. 凋落物现存量与铵态氮和有效磷之间的关系。

图3 不同凋落物现存量与土壤有机质、铵态氮和有效磷之间的关系

Fig. 3 Relationship between different amounts of current accumulated litter fall and soil organic matter, ammonium nitrogen and available phosphorus

速效钾、速效钾A和速效钾B基本上随凋落物现存量的增加呈递减的趋势(图4),其中凋落物现存量最小组($0.55 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)显著高于其他组对应的速效钾和速效钾A的含量。速效钾B的含量在0.55、1.65和4.95组之间无显著差异,但显著高于其他3个组。此外,土壤养分含量和凋落物现存量的Pearson相关分析表明凋落物现存量与速效钾呈极显著负相关($r=-0.362, P<0.01$)。

2.4 干湿不同气候区凋落物积累量和土壤养分的比较

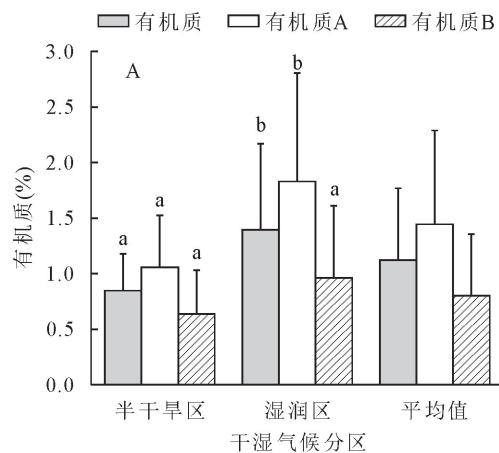
从图5可知,湿润区土壤有机质和铵态氮均高

于半干旱区,其中湿润区的土壤有机质和表层有机质A均显著高于半干旱区,但干湿不同气候区下层有机质B则无显著差异;湿润区土壤铵态氮、表层铵态氮A和下层铵态氮B分别极显著高于半干旱区。干湿不同气候区土壤有效磷和速效钾则均无显著差异($P>0.05$),其平均值分别为 67.061 、 $71.335 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 14.874 、 $12.371 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

3 结论与讨论

海南岛木麻黄海防林林分结构异质性明显,其中平均胸径、密度和胸高断面积变化范围较大,变异

系数高达 40.296%~69.902%。其主要原因是木麻黄海防林受台风破坏影响严重,导致林分密度逐渐减小,局部区域往往需要重新造林,因此出现径级结构参差不齐的现象。林分结构的异质性在一定程度上会影响土壤的异质性,尤其是有机质、全磷和速效钾与林分结构呈显著相关^[27],J. G. Ehrenfeld et al^[28]认为二者没有显著相关性,这与本研究的结果相一致,这可能与滨海沙土的立地条件、生态环境的特殊性及树种叶片特征等有关。从图 1~图 5 中不难发现土壤养分含量的标准差很大,表明不同样地之间土壤养分差异很大,即使凋落物质量和气候区相同,土壤养分的空间异质性也很明显,说明土壤养分并非受单一因素影响,而是受多种因素的共同影响。



注:不同大写字母表示 0.01 水平差异显著。

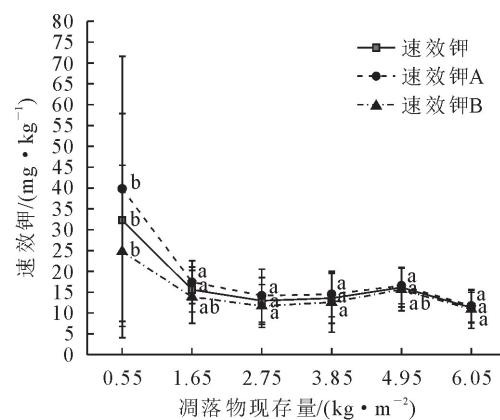
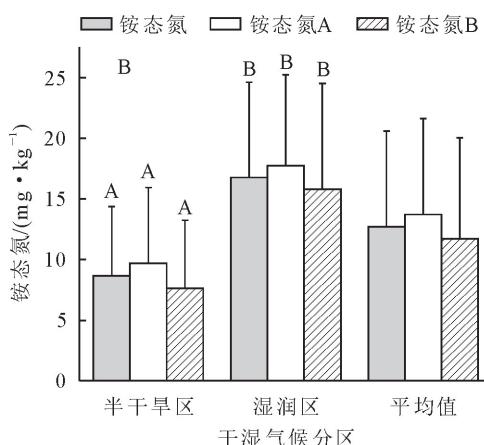


图 4 调落物现存量与速效钾的关系

Fig. 4 Relationship between current accumulated litter fall amount and available potassium



质,与植株的光合作用密切相关,其含量影响光合产物的累积和运转分配^[35]。木麻黄海防林土壤有机质、速效钾和碱解氮的变化范围均较大,且整体上较为缺乏,但有效磷则较为丰富。土壤有效磷较为丰富,与何松等^[36]、王康雄等^[15]在海口和文昌木麻黄林的研究结果相一致,这与凋落物的归还量关系不大,可能主要与土壤母质、成土作用和耕作施肥的影响有关^[37],因为本研究结果表明,土壤有效磷与各种凋落物指标均无显著相关性($P \geq 0.05$)。

植物群落与土壤养分间相互作用，两者之间存在着非常显著的相互反馈作用^[38]。木麻黄海防林凋落物虽然对土壤有效磷无显著影响，但是土壤其他养分的主要影响因素之一。土壤氨态氮与木麻黄凋落物厚度和半分解凋落物质量呈显著正相关，这与阎恩荣等^[3]研究结果相一致。原因可能与木麻黄是固氮植物有关。土壤速效钾与凋落物厚度、半分解凋落物质量和凋落物现存量分别呈极显著负相关，这与陈凯等^[39]的研究结果相一致，但通过方差

进一步分析表明,凋落物各分组之间,仅凋落物较小的组与其他较大组对应的速效钾之间存在显著差异。针阔混交林和针叶林的凋落物质量与土壤有机质含量呈显著正相关^[3],但本研究土壤有机质与木麻黄凋落物质量无显著相关性。木麻黄土壤养分较低、速效钾与凋落物负相关、有机质和有效磷与凋落物不相关,这可能与木麻黄凋落物养分含量较低^[3,40]、分解缓慢^[12]、过度消耗土壤养分(生长迅速)等有关。

气候因素(年均温和年均降水量)是在全球和区域内决定凋落物养分的主要非生物因素之一^[41]。年均降水量对凋落物碳、氮、磷和钾变异的解释率最大,且阔叶树种凋落物养分与气候的关系明显^[42]。干湿不同气候区对木麻黄海防林土壤有机质和铵态氮含量有显著影响,但有效磷和速效钾则无显著差异。这说明与半干旱区相比,湿润区雨量充足,凋落物和土壤保持湿润状态持久,有利于微生物对凋落物的分解及养分归还。

综上所述,木麻黄凋落物和土壤养分空间异质性明显,有机质、速效钾和碱解氮较为缺乏,有效磷较为丰富。木麻黄凋落物、土壤pH和干湿气候区对木麻黄海防林土壤养分具有显著影响。土壤养分与林分结构虽然不直接相关,但由于林分结构的差异性,导致凋落物现存量的异质性,从而间接影响土壤养分的空间分布格局。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 邹秉章.亚热带主要森林类型凋落物量和土壤养分的关系[J].福建林业科技,2019,46(3):8-12.
- [3] 阎恩荣,王希华,周武.天童常绿阔叶林不同退化群落的凋落物特征及与土壤养分动态的关系[J].植物生态学报,2008,32(1):1-12.
- [4] 倪惠普,苏文会,范少辉,等.养分输入方式对森林生态系统土壤养分循环的影响研究进展[J].生态学杂志,2019,38(3):863-872.
- [5] 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.
- [6] HOBBIE S E,CHAPIN F S. The response of tundra plant biomass, aboveground production, nitrogen, and CO₂ flux to experimental warming[J]. Ecology,1998,79(5):1526-1544.
- [7] XIA S W,CHEN J,Schaefer D,*et al*. Scale-dependent soil macronutrient heterogeneity reveals effects of litterfall in a tropical rainforest[J]. Plant Soil,2015,391(1/2):51-61.
- [8] 戴雯笑,楼晨阳,许大明,等.浙西南常绿阔叶林凋落物空间分布及其对土壤养分的影响[J].生态学报,2021,41(2):513-521.
- [9] 魏翠翠,刘小飞,林成芳,等.凋落物输入改变对亚热带两种米槠次生林土壤酶活性的影响[J].植物生态学报,2018,42(6):692-702.
- [10] 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(Supp.1):21-26.
- [11] 伍恩华,刘强,王敏英.海南岛北部木麻黄防护林凋落物量及养分归还动态[J].华南师范大学学报:自然科学版,2012,44(2):123-128.
- [12] 尤龙辉,叶功富,陈增鸿,等.滨海沙地主要优势树种的凋落物分解及其与初始养分含量的关系[J].福建农林大学学报:自然科学版,2014,43(6):585-591.
- [13] 林文泉,高伟,叶功富,等.南亚热带海岸沙地不同林分凋落物量及养分归还[J].森林与环境学报,2019,39(3):225-231.
- [14] 葛露露,何宗明,林宇,等.滨海沙地不同树种人工林生物量及凋落物碳氮养分归还[J].西北林学院学报,2019,34(1):39-46.
- GE L L,HE Z M,LIN Y,*et al*. Biomass and litter carbon and nitrogen return of different plantations in the sandy coastal plain area[J]. Journal of Northwest Forestry University,2019,34(1):39-46. (in Chinese)
- [15] 王康雄,王小燕,薛杨,等.海南省文昌市9个不同植被类型林地土壤成分分析研究[J].安徽农业科学,2015,43(32):281-283.
- [16] 伍恩华,刘强.海南岛北部木麻黄林凋落物与土壤养分、细根生物量的关系[J].广西植物,2013,33(4):488-495.
- [17] 张彩凤,杨小波,李东海,等.木麻黄海防林下物种多样性及其与土壤因子关系[J].林业资源管理,2012(4):80-85.
- [18] 宫欢欢,尤一泓,林勇明,等.不同林龄木麻黄纯林土壤酶活性与土壤养分研究[J].江西农业大学学报,2017,39(3):516-524.
- [19] 刘强,张亚辉.海口地区木麻黄林根瘤调查及影响结瘤的因素探讨[J].林业科学,2002,38(5):175-180.
- [20] 车秀芬,张京红,黄海静,等.海南岛气候区划研究[J].热带农业科学,2014,34(6):60-65.
- [21] 杨彬,王玉,郝清玉.海南岛木麻黄海防林天然更新特征及更新树种筛选[J].广西植物,2020,40(3):412-421.
- [22] 李春喜,姜丽娜,邵云,等.生物统计学[M].3版.北京:科学出版社,2005.7.
- [23] 郝清玉,杨彬,周玉萍.木麻黄凋落物现存量的数量特征及影响因素[J].森林与环境学报,2020,40(4):1-7.
- [24] 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.
- [25] 李云洲,闫见敏,须文,等.番茄种质资源主要植物学性状的遗传多样性及相关性[J].贵州农业科学,2019,47(2):68-74.
- [26] 海南省农业厅土肥站.海南土壤[M].海口:海南三环出版社,1993:181-183.
- [27] 严宏,谭伟,柴宗政,等.黔中马尾松成熟林表层土壤养分与林分结构的异质性及其耦合关系[J].福建农林大学学报:自然科学版,2018,47(3):304-312.
- [28] EHRENFIELD J G,HAN X,ZHU W. On the nature of environmental gradients: temporal and spatial variability of soils and vegetation in the New Jersey Pinelands[J]. Journal of Ecology,1997,85(6):785-798.
- [29] 张朔,吴燕,陈楠.土壤酸碱度来源及国内外测定方法研究[J].广州化工,2017,45(23):19-21.

(下转第36页)

- 苗叶片叶绿素荧光特性的影响[J].东北林业大学学报,2012,40(11):48-52.
- [20] 陈歆,刘贝贝,韩丙军,等.土壤水分胁迫对槟榔幼苗叶绿素荧光动力学参数的影响[J].热带作物学报,2012,33(2):230-237.
- [21] 李得禄,刘世增,康才周,等.水分胁迫下云杉属两种植物荧光参数特征研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(6):117-121.
- [22] 杨会肖,廖焕琴,杨晓慧,等.土壤水肥胁迫对尾叶桉叶绿素荧光参数的影响[J].林业与环境科学,2018,34(3):1-5.
- [23] 白向历,孙世贤,刘明,等.玉米叶片光合生理与抗旱性关系研究[J].种子,2009,28(8):4-8.
- [24] RACHIDA N, MERYEME L, CHAHINEZ B, et al. Interactive effect of potassium and cadmium on growth, root morphology and chlorophyll a fluorescence in tomato plant[J]. Scientific reports, 2021, 11(1). 5384-5384.
- [25] 白杰,潘存德,胡安鸿,等.新疆 6 个核桃品种叶绿素荧光特征比较[J].西北林学院学报,2010,25(6):13-18.
BAI J, PAN C D, HU A H, et al. Comparison of chlorophyll fluorescence characteristics of six walnut varieties in Xinjiang [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(6): 13-18. (in Chinese)
- [26] 柯裕州,周金星,卢楠,等.盐胁迫对桑树幼苗光合生理及叶绿素荧光特性的影响[J].林业科学研究,2009,22(2):200-206.
- [27] 周朝彬,宋于洋,王炳举,等.干旱胁迫对胡杨光合和叶绿素荧光参数的影响[J].西北林学院学报,2009,24(4):5-9.
ZHOU C B, SONG Y Y, WANG B J, et al. Effects of drought stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of *Populus euphratica* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(4): 5-9. (in Chinese)
- [28] 李灿,曾凤,赵阳阳,等.水涝胁迫对 4 种姜科植物叶绿素荧光参数的影响[J].热带农业科学,2019,39(2):45-50.
- [29] 段娜,贾玉奎,郝玉光,等.干旱胁迫对欧李叶绿素荧光特性的影响[J].西北林学院学报,2018,33(6):10-14.
DUAN N, JIA Y K, HAO Y G, et al. Effects of drought stress on chlorophyll fluorescence characteristics of *Cerasus humilis* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(6): 10-14. (in Chinese)
- [30] 杨玉珍,陈刚,彭方仁.干旱胁迫对不同种源香椿主要叶绿素荧光参数的影响[J].东北林业大学学报,2010,38(7):49-51.
- [31] 闫海霞.黄顶菊对逆境适应性生理学机制研究[D].保定:河北农业大学,2015.
- [32] 孙存华,李扬,贺鸿雁,等.藜对干旱胁迫的生理生化反应[J].生态学报,2005,21(10):2556-2561.
- [33] 李瑞姣,岳春雷,李贺鹏,等.干旱胁迫对日本葵莲幼苗生理生化特性的影响[J].西北林学院学报,2018,33(2):56-61,103.
LI R J, YUE C L, LI H P, et al. Effects of drought stress on the physiological and biochemical characteristics of *Viburnum japonicum* seedlings [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(2): 56-61, 103. (in Chinese)
- [34] 孔艳菊.皂角、君迁子和紫荆苗木对盐旱交叉胁迫反应的研究[D].泰安:山东农业大学,2007.
- [35] 孙存华,杜伟,徐新娜,等.干旱胁迫对藜叶片干旱诱导蛋白的影响[J].干旱区研究,2009,26(3):372-376.
- [36] 黄钰,刘代亿,李甜江,等.云油茶 5 个优良品种苗木抗旱性研究[J].西部林业科学,2017,46(2):144-149.
HUANG Y, LIU D Y, LI T J, et al. Study on drought resistance of five varieties of *Camellia oleifera* [J]. Journal of West China Forestry Science, 2017, 46(2): 144-149. (in Chinese)

(上接第 15 页)

- [30] 薛杨,陈毅青,刘宪钊,等.海南东北部 4 种典型人工林土壤化学性质研究[J].生态科学,2014,33(6):1142-1146.
- [31] 詹道华,陈祥泽,王小燕,等.海南乐东 3 种不同森林类型样地土壤化学性质分析[J].安徽农业科学,2018,46(12):127-130.
- [32] 李金凤,王槐岳,王小燕,等.海南万宁市 5 种不同森林植被土壤化学性质比较研究[J].热带林业,2018,46(2):22-25.
- [33] 李婷,张世熔,干文芝.成都平原土壤 pH 的时空分布特征及影响因素研究[J].四川农业大学学报,2006,24(3):313-318.
- [34] 王丽云,刘小金,徐大平,等.林木营养生长和生殖生长调控技术研究进展[J].世界林业研究,2019,32(6):6-12.
- [35] MONTESINOS D, VILLAR-S P, GARCÍA-F P, et al. Genders in Juniperus thurifera have different functional responses to variations in nutrient availability[J]. The New Phytologist, 2012, 193: 705-712.
- [36] 何松,薛雁文,宿少锋,等.海口市海防林不同类型森林土壤肥力差异分析[J].现代农业科技,2020(6):168-170.
- [37] 刘骄,黄义雄,叶功富,等.福建沿海主要防护林树种的生物量、凋落物及其对林下土壤养分的影响[J].水土保持研究,2011,18(1):146-152.
LIU J, HUANG Y X, YE G F, et al. Research on biomass and undergrowth soil nutrient of main tree species for shelterbelt along Fujian coastal area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(1): 146-152. (in Chinese)
- [38] WARDLE D A, BARDGETT R D, KLIRONOMOS J N, et al. Ecological linkages between aboveground and belowground biota[J]. Science, 2004, 304: 1629-1633.
- [39] 陈凯,翟志军,王振宇,等.杉木纯林及杉木火力楠混交林林分结构及土壤养分分析[J].防护林科技,2018(8):1-4.
- [40] 叶功富,高伟,陈增鸿,等.滨海沙地主要优势树种凋落物热值与养分特征[J].东北林业大学学报,2014,42(8):57-60.
YE G F, GAO W, CHEN Z H, et al. Litter calorific value and nutrient characteristics of major dominant tree species in coastal sandy areas [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(8): 57-60. (in Chinese)
- [41] RRANT A N, CHEN H Y H. Patterns and mechanisms of nutrient resorption in plants[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2015, 34: 471-486.
- [42] GE J, WANG Y, XU W, et al. Latitudinal patterns and climatic drivers of leaf litter multiple nutrients in Chinese broad-leaved tree species: Does leaf habit matter[J]. Ecosystems, 2017, 20: 1124-1136.