

温度和元素含量对流溪河 2 个树种粗木质残体呼吸季节动态的影响

慈航, 李兆佳, 周光益*, 赵厚本, 邱治军, 杨乐苏

(中国林业科学研究院热带林业研究所, 热带林业研究国家林业局重点实验室, 广东广州 510520)

摘要: [目的] 研究粗木质残体(CWD)呼吸释放 CO_2 速率 (R_{CWD}) 的年季节动态特征与温度及元素含量的关系, 为 CWD 呼吸的碳通量计算和碳库模型建立提供参考数据。[方法] 采用红外气体分析法 (Li-Cor 8100) 对马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 和石栎 (*Lithocarpus glaber* (Thunb.) Nakai) 的 CWD 进行连续 1 年的呼吸测定, 同时测定 CWD 初始元素含量, 分析温度及元素含量对 R_{CWD} 年季节动态的影响。[结果] 表明: R_{CWD} 的动态特征与温度变化趋势一致, 表现出明显的单峰曲线格局; 在所测定的温度范围 (14.5 ~ 28.5 °C) 内, R_{CWD} 与温度呈显著正相关 ($p < 0.01$), 温度驱动着 R_{CWD} 动态变化的 64.0% ~ 86.2%, 温度可预测马尾松 R_{CWD} 的 64.0% ~ 75.6%, 可预测石栎 R_{CWD} 的 69.3% ~ 86.2%, 马尾松的 R_{CWD} 总体小于石栎的; 马尾松的温度敏感系数 Q_{10} 值 (3.05) 显著低于石栎的 Q_{10} 值 (5.05)。针叶树种马尾松 CWD 的初始 C 含量显著高于阔叶树种石栎, 而初始 N、P 含量显著低于石栎; R_{CWD} 与初始 C 含量、C/N 和 C/P 呈负相关, 相关系数 R^2 分别是 0.383、0.590 和 0.546, 与初始 N 含量成显著正相关, 相关系数 R^2 为 0.416, 与初始 P 含量和 N/P 正相关但不显著, 初始元素含量可以解释 R_{CWD} 变化的 38.3% ~ 59.0%。[结论] 温度和初始元素含量对 R_{CWD} 均有较好的解释作用, 温度和初始 C/N 能解释 R_{CWD} 变化的 50% 以上, 温度和初始元素含量显著影响 CWD 的呼吸或分解的整个动态过程。

关键词: 粗木质残体; 呼吸; 季节动态; 温度; 元素含量

中图分类号: S791

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2018)05-0074-08

Effects of Temperature and Element Content on the Seasonal Dynamics of Coarse Woody Debris Respiration of 2 Tree Species in Liuxihe National Forest Park, Guangzhou

CI Hang, LI Zhao-jia, ZHOU Guang-yi, ZHAO Hou-ben, QIU Zhi-jun, YANG Le-su

(Key Laboratory of State Forestry Administration on Tropical Forestry Research, Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] To study the effects of temperature and elemental content on annual seasonal dynamic of coarse woody debris (CWD) respiration rate (R_{CWD}) and provide reference for calculating the carbon flux of CWD respiration and the establishment of carbon pool model. [Method] The R_{CWD} of *Pinus massoniana* and *Lithocarpus glaber* were measured using an infrared gas exchange analyzer (Li-Cor8100) and the CWD initial element content. The effect of temperature and element content on R_{CWD} were discussed. [Result] The dynamics of R_{CWD} were in accordance with the trend of seasonal temperature, which showed a distinct single peak curve pattern. Within the temperature range of 14.5 - 28.5 °C measured, the R_{CWD} was significant positively correlated with temperature ($p <$

收稿日期: 2017-12-06

基金项目: 广东省林业科技创新项目 (2013KJCX018-01); 国家自然科学基金 (31170664); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (CAFYBB2017SY024, RITFYWZX201504); 广州市林业和园林局科技专项

作者简介: 慈航 (1992—) 女, 硕士研究生, 研究方向: 森林干扰与恢复. Email: cihangcaf@163.com

* 通讯作者: 周光益 (1964—) 男, 研究员. Email: cheersritf@163.com

0.01). The temperature can predict 64.0% – 75.6% of *P. massoniana* R_{CWD} , and 69.3% – 86.2% of *L. glaber* R_{CWD} . The Q_{10} of *P. massoniana* (3.05) was significantly lower than that of *L. glaber* (5.05). The R_{CWD} of *P. massoniana* was less than that of *L. glaber*, meanwhile the initial C content of *P. massoniana* was significantly higher than that of the *L. glaber*, and the initial N and P content was significantly lower than that of the *L. glaber*. R_{CWD} was negatively correlated with initial C content, C/N and C/P, and the correlation coefficients R^2 were 0.383, 0.590 and 0.546 respectively. R_{CWD} was positively correlated with the initial N content, the correlation coefficient R^2 was 0.416. But there was no significant correlation among R_{CWD} , P content and N/P. These indicated that initial element content can explain the 38.3% – 59.0% of the R_{CWD} changes. [**Conclusion**] The study shows that temperature and initial C/N can explain more than half R_{CWD} changes in what place. Temperature and initial element content significantly affect the whole process of CWD respiration or decomposition.

Keywords: coarse woody debris; respiration; seasonal dynamics; temperature; element content

粗木质残体(CWD)是指森林中一定直径的倒木、立枯木、大枯枝、地面根桩和地下粗根残体等,是森林生态系统中重要的结构和功能要素,也是森林自然更新的重要基质,在保持森林生态系统完整性方面扮演着重要角色^[1-2]。CWD占地上有机物贮量的1%~45%^[3],占热带森林碳库的10%~40%^[4],是森林生态系统重要的营养库和碳库,而且CWD碳库十分活跃,易受外界的影响^[5]。CWD中50%左右是有机碳,其中,约70%通过呼吸以CO₂的形式排放到大气中^[6]。因此,研究CWD分解过程中的呼吸作用对森林生态系统碳平衡的影响具有重要意义^[7]。

CWD分解过程中呼吸作用释放出的CO₂是森林生态系统输出碳源的最主要途径之一,其分解过程复杂,气候(温度、湿度)、树种自身基质(元素含量、径级等)和分解者(昆虫、微生物)等影响CWD分解的整个过程^[8-9]。在CWD分解的初期,呼吸的碳损失占其质量损失的95%以上^[10],而温度是影响呼吸速率的主导环境因子,CWD呼吸释放CO₂的速率与温度的关系是估算CO₂年通量的基础^[11-15]。现有关CWD呼吸速率(R_{CWD})的研究多集中在温带森林^[16-17],国内仅见对东北温带树种 R_{CWD} 的部分报道和中亚热带树种及南亚热带鼎湖山的锥栗(*Castanopsis chinensis* Hance)、木荷(*Schima superba* Gardn. et Champ.) R_{CWD} 的少量研究^[10,18-19],对广东南亚热带其它树种 R_{CWD} 与温度的关系报道较少。广东地区常绿阔叶次生林的CWD储量达8.25 t·hm⁻²^[20],温度是如何影响南亚热带森林 R_{CWD} 的,能在多大程度上解释 R_{CWD} ,温度对 R_{CWD} 的影响程度在针阔树种之间是否一样仍需进行探究。

除环境中温度因素较显著影响 R_{CWD} 外,不同树

种的化学元素组成在很大程度上也影响 R_{CWD} ^[21]。耿元波等^[22]指出:用于指示分解的指标有C、N含量、C/N和木质素含量等,且初始N含量和C/N比木质素含量能更好的预测凋落物的分解速率。Weedon等^[23]综合了多篇文献发现,较高N、P含量的被子植物比高C含量的裸子植物相对分解快。Noh等^[24]研究韩国红松林的CWD分解及分解过程中C、N积累时也指出,CWD分解速率与N浓度和C/N密切相关,且C/N是影响分解的关键因素。呼吸作用是分解过程中至关重要的一个环节,呼吸速率同样受初始C、N、P含量的影响;但目前关于C、N、P等化学元素含量与分解速率关系的研究多数是以凋落物为对象开展的,仅少量研究针对CWD分解速率与化学元素的关系,或是研究CWD分解过程中C、N、P等元素的变化动态^[18,25]。有关化学元素含量对 R_{CWD} 影响的研究较少^[12],尤其是化学元素能解释 R_{CWD} 的动态变化的范围尚不清楚。

本研究选取南亚热带森林常见树种马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)和石栎(*Lithocarpus glaber* (Thunb.) Nakai)为研究对象,测定其CWD的初始C、N、P元素含量和不同月份的呼吸速率,分析CWD分解的季节动态特征,阐明温度、元素含量对呼吸速率的影响,旨在探讨 R_{CWD} 对温度和初始化学元素含量的响应机制,量化 R_{CWD} 与温度和化学元素的关系,为CWD呼吸模型的建立和CWD对森林生态系统碳平衡的影响提供参考数据。

1 研究区概况

研究区位于北回归线北侧的广州从化流溪河国家森林公园附近大芒坳山区(119°01' E, 31°36' N),属南亚热带湿润季风气候,温高湿重。土壤为红壤,

肥性较差,呈中性或微酸性。该地区具有独特的山地气候和森林小气候特征,年平均气温 20.3℃,年平均降水量 2 104.7 mm。植被为皆伐后自然生长的次生常绿阔叶林,林分乔木平均胸径 9.89 cm。乔木层主要由壳斗科(Fagaceae)、松科(Pinaceae)、樟科(Lauraceae)、山茶科(Theaceae)、五加科(Araliaceae)、卫矛科(Celastraceae)树种组成;乔木树种以马尾松、石栎、木荷、罗浮锥(*Castanopsis fabri* Hance)、鸭脚木(*Schefflera octophylla* (Lour.) Harms)、黄杞(*Engelhardtia roxburghiana* Wall.)、阿丁枫(*Altingia chinensis* (Champ.) Oliv. ex Hance)、铁榄(*Sinosideroxylon pedunculatum* (Hemsl.) H. Chuang)、华润楠(*Machilus chinensis* (Champ. ex Benth.) Hemsl.)等为主。林下植被层主要有茜草科(Rubiaceae)、紫金牛科(Myrsinaceae)、

芸香科(Rutaceae)、大戟科(Euphorbiaceae)、菝葜科(Smilacaceae)的植物。

2 研究方法

2.1 实验设计与样品采集

2016年7月,在广州从化流溪河大芒坳山区选择典型南亚热带次生林群落为研究对象,随机选取3块面积40 m×40 m的样地,并以样地中数量最多的马尾松和石栎CWD作为实验材料。收集样地中相似直径(10±2) cm的CWD。根据其外观形态并借助钢针(直径2 mm,长度20 cm)等工具,将其划分成5个分解等级^[14,26](表1)。将I~III分解等级的CWD锯成30 cm左右段,测量其两端直径、长度(表2)。由于IV~V等级样品腐烂程度较高,锯断

表1 流溪河2个树种粗木质残体分解等级划分方法

Table1 The classification method of coarse woody debris of the decay classes for two tree species at Liuxihe

分解等级 Decay classes	树皮特征 Bark character	木质结构及其完整性 Wood structure and integrity	木质颜色 Wood color	钢针刺入深度 Steel needle penetration depth
I	存在 Present	坚固,完整 Solid, intact	原色 Original color	基本无法刺入 Can not penetrate
II	存在 Present	坚固,边材开始腐烂,较完整 Solid, Sapwood rot, intact	原色 Original color	可刺入数毫米 Penetrates a few millimeters
III	大部分存在 Partly present	较坚固,边材部分腐烂,心材完整 Solid, Sapwood rot, heartwood intact	部分褪色 Original color to faded	可刺入2 cm Penetrates 2 cm
IV	大部分脱落 Partly absent	部分坚固,边材基本腐烂,心材部分腐烂 Solid, Sapwood rot, heartwood rot	部分褪色 Partly faded	可刺入2~5 cm Penetrates 2-5 cm
V	无 Absent	松软,心材完全腐烂 Soft, heartwood rot	严重褪色 Faded	完全刺入 Penetrates all the way

表2 3个重复样地马尾松和石栎不同分解等级粗木质残体的物理性状

Table2 Physical properties of the CWD for *P. massoniana* and *L. glaber* and decay classes in three sample plots

样地号 Sample plots	树种 Tree species	分解等级 Decay classes	样品数量 Sample number	直径 D/cm		长度 Length/cm	
				均值 Mean	标准误 SE	均值 Mean	标准误 SE
1	马尾松 <i>P. massoniana</i>	I	12	10.60	0.21	30.18	0.53
		II	12	11.64	0.36	30.19	0.19
		III	15	9.13	0.21	28.35	1.01
	石栎 <i>L. glaber</i>	I	10	8.79	0.31	28.85	1.08
		II	14	9.21	0.23	29.45	0.37
		III	13	10.04	0.30	28.85	0.60
2	马尾松 <i>P. massoniana</i>	I	11	10.47	0.32	1.91	0.58
		II	12	11.70	0.25	0.66	0.19
		III	13	9.38	0.24	4.19	1.16
	石栎 <i>L. glaber</i>	I	10	8.68	0.23	31.61	1.08
		II	12	9.10	0.36	31.69	0.43
		III	12	8.70	0.29	29.64	0.41
3	马尾松 <i>P. massoniana</i>	I	11	11.09	0.29	30.91	0.58
		II	11	11.42	0.23	30.96	0.20
		III	14	9.55	0.24	29.04	1.08
	石栎 <i>L. glaber</i>	I	10	8.74	0.21	29.65	1.08
		II	12	9.76	0.40	30.15	0.43
		III	15	9.45	0.21	30.15	0.49

对其损坏较大,故本实验未对 IV ~ V 分解等级的 CWD 进行研究。每个样地共有 I ~ III 分解等级的 CWD 各 10 ~ 15 段,将这些 CWD 平铺在样地中,为防止样品接触对分解过程造成干扰,2 个树种的 CWD 间距 ≥ 1.5 m,同一树种不同分解等级的 CWD 间距 ≥ 1 m,相同树种相同分解等级的 CWD 间距约 20 cm。

2.2 CWD 呼吸和温度的测定

2016 年 8 月至 2017 年 7 月每个月月初的晴天上午 9:00—12:00,对 3 块样地中马尾松和石栎的 CWD,每个样地每个树种每个分解等级随机选择样品 1 ~ 2 个,采用红外气体分析仪 Li-Cor 8100 与自制的动态封闭气室(内径 20 cm,高度 33 cm 的底端密封的 PVC 桶)相连进行 CWD 呼吸通量测定。具体操作是:将 CWD 放入自制的 PVC 动态封闭气室,静置 10 min,等气体混合均匀至平衡时,盖上呼吸仪开始操作,每个样品测定 3 次,每次测定时间 5 min,同时用水银温度计测定距离地面 10 cm 的大气温度。

2.3 CWD 化学元素含量测定

2016 年 8 月,进行第 1 次呼吸测定后,对 3 个样地中 2 个树种的 CWD,每个样地每个树种的 I ~ III 等级 CWD 样品分别随机取样 2 根,即每个树种每个等级共取样 6 根,再将取得的 CWD 样品截取一段 5 cm 厚的圆盘带回实验室。将取得的圆盘装入牛皮纸信封 65℃ 烘干至恒质量,然后称质量并劈成小薄片,粉碎后充分混合,过 1 mm 筛后用作植物全 C、N、P 的测定和分析。全 C 采用元素分析仪(Elemental/vario MAX CNS 德国)测定,全 N 采用凯氏定氮法测定,全 P 采用钼锑抗吸光光度法测定^[18,27]。

2.4 数据处理与分析

参考范跃新等^[26]的公式计算 CWD 的 R_{CWD} 。

$$R_{CWD} = \frac{R_A (V_{桶} + V_{腔室}) S_{桶}}{(V_{桶} + V_{腔室} - V_{CWD}) S_{CWD}}$$

式中: R_{CWD} 为 CWD 呼吸释放的 CO_2 速率 ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$); R_A 为呼吸仪测出的 CWD 呼吸释放的 CO_2 速率 ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$); $V_{桶}$ 为自制 PVC 桶的体积; $V_{腔室} = 4\ 073.5\ cm^3$ (呼吸仪自身腔室的体积); $S_{桶} = 317.8\ cm^2$ (自制 PVC 桶底面积); V_{CWD} 为 CWD 的体积; S_{CWD} 为 CWD 的表面积。

采用指数模型拟合 R_{CWD} 与大气温度 (T) 之间的关系^[28]。

$$R_{CWD} = ae^{bT}$$

$$Q_{10} = e^{10b}$$

式中: a 、 b 为模型中的参数; Q_{10} 为温度敏感系数,它表示在一定范围内,温度每升高 10℃, R_{CWD} 增加的倍数。

采用 SPSS21.0 和 Microsoft Excel 2007 处理和分析数据,采用单因素方差分析和邓肯多重比较检验不同分组之间 CWD 的差异性,采用 WPS 制作图表。

3 结果与分析

3.1 粗木质残体呼吸的季节动态

马尾松和石栎的 R_{CWD} 年变化与该地的气温变化趋势基本吻合,都表现出明显的单峰曲线格局。在观测的 1 年时间里,最高温出现在 7 月, R_{CWD} 最大值同步出现在 7 月(图 1)。石栎的年平均 R_{CWD} 为 $2.57\ \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,马尾松的年平均 R_{CWD} 为 $1.49\ \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,石栎的 R_{CWD} 总体上比马尾松的高,尤其是在温度相对较高的 6 月至 10 月,差异显著 ($p < 0.05$);但在温度较低的月份里,2 个树种的 R_{CWD} 差异不显著。石栎的 R_{CWD} 年变化幅度比马尾松大,其 7 月的平均 R_{CWD} ($7.67\ \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) 是 1 月平均 R_{CWD} ($0.35\ \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) 的近 22 倍;马尾松的 R_{CWD} 年变化幅度相对较小,不及石栎明显。

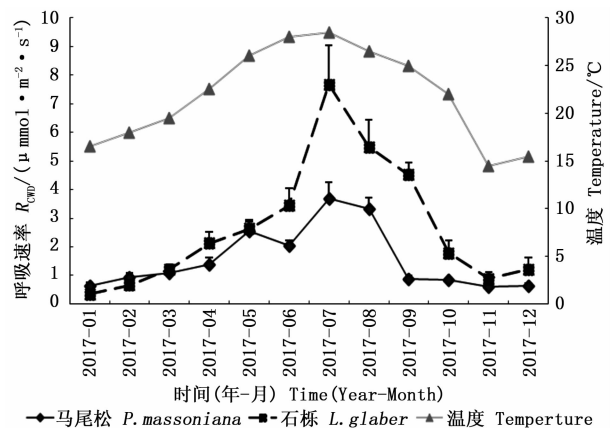


图1 马尾松和石栎 CWD 的呼吸的年变化动态

Fig.1 Seasonal dynamics of CWD respiration rate of *P. massoniana* and *L. glaber*

3.2 R_{CWD} 与温度的关系及温度敏感系数 Q_{10}

在野外观测的温度区间 ($14.5 \sim 28.5^\circ C$) 内,不同分解等级马尾松和石栎的 R_{CWD} 与温度存在显著的指数正相关关系 ($p < 0.01$); 温度对呼吸速率的变化有较好的解释作用,温度驱动着 R_{CWD} 动态变化

的 64.0%~86.2% (图 2)。马尾松和石栎的 R_{CWD} 对温度的响应程度不同,温度可预测马尾松 R_{CWD} 的 64.0%~75.6%,可预测石栎 R_{CWD} 的 69.3%~86.2%。总体而言,温度对石栎 R_{CWD} 的解释程度比马尾松的高;但温度对马尾松和石栎不同分解等级 R_{CWD} 的解释程度均无明显的规律可循。

根据对马尾松和石栎的 R_{CWD} 与温度的分析得出:马尾松的 Q_{10} 值为 3.05,石栎的 Q_{10} 值为 5.05。石栎的 Q_{10} 值是马尾松 Q_{10} 值的近 1.7 倍,说明在相同温度范围内阔叶树种石栎的 CWD 呼吸作用对温度更敏感。

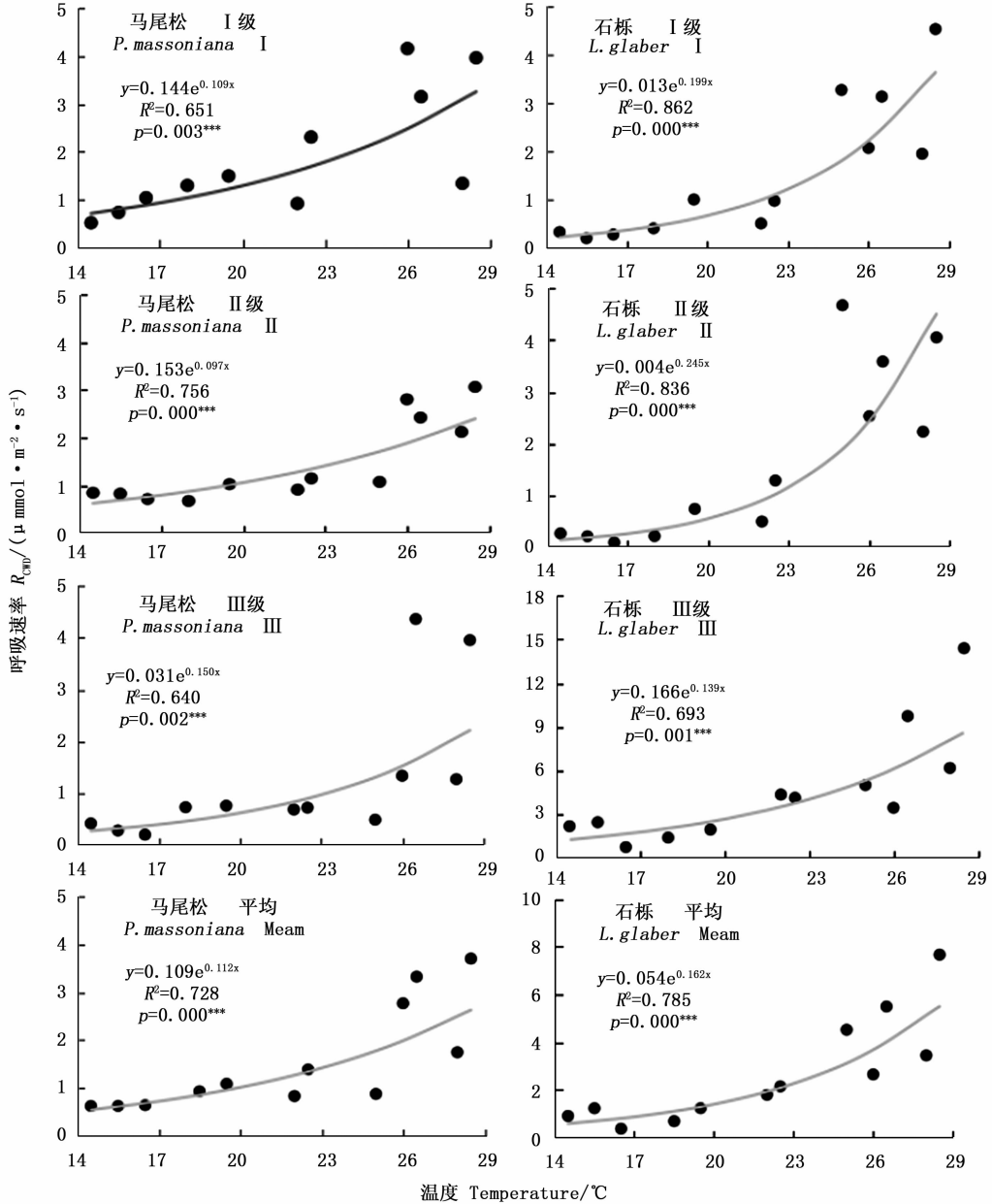


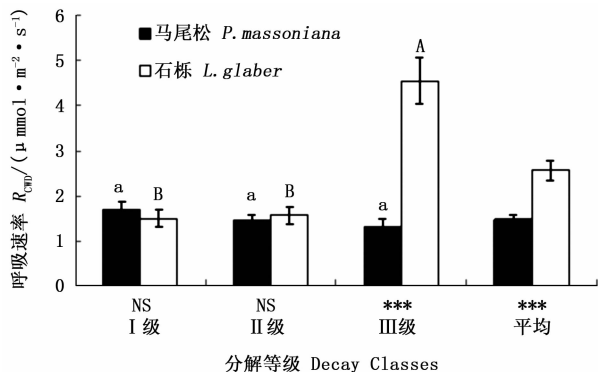
图2 马尾松和石栎不同腐解等级 CWD 呼吸速率与大气温度的关系

Fig.2 The relationship between CWD respiration rate and air temperature of different decay classes of *P. massoniana* and *L. glaber*

3.3 2个树种不同分解等级的 R_{CWD}

计算2个树种不同分解等级的年平均 R_{CWD} 发现:马尾松的 R_{CWD} 不同分解等级之间差异不显著;而石栎 II 级的 R_{CWD} 平均值高于 I 级的,但差异不显

著,石栎 III 级的 R_{CWD} 显著高于 I 级和 II 级的。石栎和马尾松的 R_{CWD} 在分解 I 级、II 级间差异较小,但石栎分解 III 级的 R_{CWD} 和平均 R_{CWD} 值显著高于马尾松的(图 3)。



注:图中误差线表示标准误;***表示 2 树种间 R_{CWD} 差异极显著 ($P < 0.001$), NS 表示 2 树种间 R_{CWD} 差异不显著 ($P > 0.05$)。不同小写字母表示马尾松 (*P. massoniana*) 不同分解等级之间 R_{CWD} 差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示石栎 (*L. glaber*) 不同分解等级之间 R_{CWD} 差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: The error bars in the figure are represented by standard errors, *** indicates that the R_{CWD} between two tree species is significantly different ($P < 0.001$). NS indicates that the R_{CWD} between two tree species is not significantly different ($P > 0.05$). The different lowercase letters indicate the R_{CWD} in different decay classes of *P. massoniana* is significantly different ($P < 0.05$). The different capital letters indicate the R_{CWD} in different decay classes of *L. glaber* is significantly different ($P < 0.05$).

图 3 马尾松和石栎不同分解等级 R_{CWD} 的差异

Fig. 3 Difference of R_{CWD} between *P. massoniana* and *L. glaber* in different decay classes

3.4 R_{CWD} 与化学元素含量的关系

表 3 表明:马尾松和石栎 CWD 中的 C、N、P 含量差异显著;马尾松 CWD 的 C 含量、C/P 和 C/N 均显著高于石栎的,尤其马尾松 CWD 的 C/N (313.139) 是石栎 CWD 的 C/N (123.239) 的 2.5 倍以上, N 含量仅为石栎 N 含量的 1/2, 且马尾松 CWD 的 P 含量及 N/P 均显著低于石栎的。

由表 4 可知: R_{CWD} 与 C 含量、C/N 和 C/P 间存在较强的负相关关系, 相关系数 R 的平方值 R^2 分别为 0.383、0.590 和 0.546, 与 C/N 极显著负相关 ($P < 0.01$); R_{CWD} 与 N 含量存在显著正相关 ($p < 0.05$), 但 R_{CWD} 与 P 含量、N/P 无明显相关性。在 C、N、P 元素含量的指标中, R_{CWD} 与 N 含量的相关性最强 ($R^2 = 0.416$), N 含量对呼吸速率影响较显著。

4 讨论

4.1 R_{CWD} 的季节动态和温度对 R_{CWD} 的影响

在影响 CWD 呼吸动态的诸多环境因子中, 温度起主导作用, 它主要通过影响微生物活性进而影响 R_{CWD} 的^[14]。野外实验和室内控制实验对比结果指出: 对于欧洲主要树种, 在野外条件下, R_{CWD} 受温度影响显著^[29]。温度对 R_{CWD} 的影响在季节动态中表现尤为明显, 驱动着 R_{CWD} 的整个动态变化过程。本研究中, R_{CWD} 随季节的变化呈明显的单峰曲线格局,

表 3 马尾松和石栎 CWD 的元素含量

Table 3 Average element content of CWD of *P. massoniana* and *L. glaber*

树种 Tree species	C/%	N/%	P/%	C/N	N/P	C/P
马尾松 <i>P. massoniana</i>	45.928 ± 1.105	0.159 ± 0.043	0.006 ± 0.001	313.139 ± 17.293	29.597 ± 1.655	9 436.070 ± 764.802
石栎 <i>L. glaber</i>	38.761 ± 2.749	0.310 ± 0.013	0.010 ± 0.001	123.239 ± 8.986	36.960 ± 2.872	4 882.311 ± 512.821
Sig. (p)	0.011	0.008	0.000	0.001	0.023	0.000

表 4 马尾松和石栎 R_{CWD} 与元素含量的相关关系

Table 4 The relationship between R_{CWD} and element changes *P. massoniana* and *L. glaber*

元素 (x) Element (x)	模型 Model	R^2	自由度 df	p
C	$y = 1 332.7e^{-0.135x}$	0.383	11	0.042 *
N	$y = 1.13e^{3.883x}$	0.416	11	0.032 *
P	$y = 1.41e^{85.182x}$	0.272	11	0.100 NS
C/N	$y = 7.76e^{-0.004x}$	0.590	11	0.006 **
N/P	$y = 2.23e^{0.007x}$	0.015	11	0.725 NS
C/P	$y = 6.98e^{-1E-04x}$	0.546	11	0.009 **

注: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; NS: $p > 0.05$ 。

马尾松、石栎的 R_{CWD} 与温度呈显著正相关。张利敏^[14] 研究东北山区的 11 个温带树种 R_{CWD} 与温度的关系得出, R_{CWD} 与温度关系符合指数模型, 决定系数 R^2 为 0.26 ~ 0.56; 吴家兵等^[30] 对长白山红松和紫椴倒木的呼吸研究得出, 温度决定 R_{CWD} 的 67% ~ 76%; 刘强等^[19] 研究福建万木林 CWD 呼吸的季节动态及影响因素时指出, 温度可以决定 R_{CWD} 季节变化的 70.2% ~ 85.6%; Herrmann 等^[29] 研究欧洲重要树种 CWD 呼吸后指出, 温度可单独解释野外 CWD 呼吸的 94% ~ 96%; 而范跃新等^[26] 通过室内温度控制实验进一步证明, 温度可以解释 R_{CWD} 变化的 92.1% ~ 97.7%。本研究对流溪河大芒坳的马

最高峰出现在温度最高的 7 月, 这与之前的研究结果一致^[13]。

尾松和石栎 R_{CWD} 与温度的回归分析发现,在该地区的温度范围内, R_{CWD} 与温度呈指数正相关,温度决定呼吸速率的 64.0%~86.2%,和前人的研究结果相吻合,表明温度是影响 CWD 分解和呼吸的重要因素,主要原因可能是温度影响微生物活力和酶的活性^[31]。在一定范围内,温度较低抑制可溶性物质的扩散,温度升高可以加速有机碳的矿化作用,促进 CO_2 的释放^[14,32],使 R_{CWD} 随温度的升高而增大。从图 2 指数模型的模拟结果看,指数模型较适合模拟 CWD 分解呼吸过程中 CO_2 的释放,这结果有利于 CWD 呼吸的碳通量计算和碳库模型的建立;但限于抽样量较少,本研究结果应该谨慎应用于区域呼吸通量估算,后期需要铺设更多样品,进行更频繁的测定来建立更精确的呼吸模型。

南亚热带 2 个常见树种的 R_{CWD} 对温度的敏感性 Q_{10} 的范围是 3.05~5.05,显著高于之前报道的北美五大湖地区温带落叶林树种的 Q_{10} 值(2.20~2.57)^[15]、加拿大中南部黑云杉林的 Q_{10} 值(1.7~4.1)^[11] 以及我国东北温带森林树种的 CWD 呼吸变化的 Q_{10} 值(2.22~3.67)^[14],这可能是呼吸测定的温度区间不同造成的。有研究指出,在温度范围为 5~20℃ 时, Q_{10} 平均值为 4.1,而 20~42℃ 时, Q_{10} 平均值为 1.7^[33]。范跃新等^[26] 的室内温度控制实验也证明了 Q_{10} 值与选定的温度区间有关,在 5~45℃, Q_{10} 随温度的升高呈先增(5~25℃)后减(25~45℃)的趋势。本研究的温度范围是 14.5~28.5℃,该温度下,微生物具有良好的适应性,活动活跃,从而使 CWD 的呼吸较旺盛,这可能导致所计算的 Q_{10} 比其它研究偏高。另外,本研究中阔叶树种石栎和针叶树种马尾松的 R_{CWD} 对温度的敏感程度不同,石栎的 Q_{10} 值是马尾松 Q_{10} 值的近 1.7 倍,这与石栎分解速率总体低于马尾松的规律一致。此外,针阔叶树种本身的结构、化学特性和分解基质不同,针叶树种高木质素含量和低纤维素含量导致其总体的 R_{CWD} 普遍低于阔叶树种^[14],针叶树种 R_{CWD} 的年季节动态的变化幅度也较阔叶树种的小,从而引起针叶树种的温度敏感性较阔叶树种的低。

4.2 化学元素含量差异与 R_{CWD} 的关系

马尾松和石栎的 C、N 和 P 含量差异显著,其呼吸速率也存在显著差异。Noh 等^[24] 指出, R_{CWD} 与 N 含量成正比,与 C 含量成反比。章广琦等^[34] 研究油松林和刺槐林生态系统的化学计量特征与枯落物分解速度关系后指出,油松各器官的 C 含量显著高于

刺槐,但 N、P 含量显著低于刺槐,结果显示,油松林枯落物比刺槐林的分解慢。本研究显示,马尾松初始 C 含量显著高于石栎,初始 N、P 含量显著低于石栎(表 3),而马尾松的 R_{CWD} 总体小于石栎的(图 3)。说明 C、N、P 等化学元素的含量在针阔树种间差异显著,且 CWD 中初始元素含量能较好地预测 CWD 的分解速率和呼吸速率。高 N 含量能加快 CWD 分解的主要原因可能是,N 素是 CWD 分解微生物生长繁殖必不可少的营养基质,微生物活动对 N 含量有一定的要求。CWD 中含 N 量越高,微生物代谢越强,生长繁殖越快,分解速率也越快^[21]。

C/N 对衡量 CWD 分解快慢具有指示作用^[1]。2 个树种的 R_{CWD} 与 C/N 极显著负相关,决定系数 R^2 达 0.590(表 4)。Mackensen 等^[12] 研究澳大利亚辐射松(*Pinus radiata* D. Don)和 2 种桉树(王桉(*Eucalyptus regnans* F. Muell.)和斑皮桉(*Eucalyptus maculata* Hook. f.))的 CWD 呼吸与元素含量的关系,结果表明, R_{CWD} 与 C/N 呈负相关,相关系数达 0.86,与本文的研究结果基本一致,证明 CWD 的初始 C/N 能很好的解释 CWD 的呼吸速率。此外,本研究指出, R_{CWD} 与 C/P 的相关系数也达 0.546,表明 C/P 对 R_{CWD} 也具有较好的解释作用。微生物较适宜的 C/P 为 34~50^[22],而本研究中石栎和马尾松 CWD 的 C/P 分别高达 4 882.311 和 9 436.070,对微生物群落和活性会产生较大影响。微生物是 CWD 的主要分解者,微生物对于 CWD 的呼吸过程及其影响机制仍需要进行更长期更深入的研究。

5 结 论

2 个树种 R_{CWD} 的年变化与该地区气温变化趋势一致,均呈明显的单峰曲线格局。温度和 2 个树种的 R_{CWD} 呈正相关,相关系数为 0.640~0.862; R_{CWD} 与初始 C 含量、C/N 和 C/P 呈负相关关系,相关系数为 0.383~0.590,与 N 含量呈显著正相关,相关系数 R^2 是 0.416,与 P 含量和 N/P 不显著相关。温度和初始元素含量显著影响 CWD 的呼吸速率,针叶树种马尾松的 C 含量和 C/N 比阔叶树种石栎的高, R_{CWD} 的平均值及年变化幅度比石栎小,对温度的敏感性比石栎的低。

参 考 文 献:

- [1] Harmon M E, Franklin J F, Swanson F J, et al. Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems[J]. *Advances in Ecological*

- Research, 1986, 15: 133–302.
- [2] Guo X. Natural regeneration on coarse woody debris[D]. Vancouver of BC Canada; University of British Columbia, 2011.
- [3] Moseley K R, Castleberry S B, Ford W M. Coarse woody debris and pine litter manipulation effects on movement and microhabitat use of *Ambystoma talpoideum* in a *Pinus taeda* stand[J]. Forest Ecology and Management, 2004, 191(1/3): 387–396.
- [4] Lee S, Kim S, Roh Y, et al. Effects of termite activities on coarse woody debris decomposition in an intact lowland mixed dipterocarp forest of Brunei Darussalam[C]//EGU. General Assembly Conference Abstracts, 2016, 18: 10873.
- [5] Magnússon R í, Tietema A, Cornelissen J H C, et al. Tamm review: Sequestration of carbon from coarse woody debris in forest soils[J]. Forest Ecology and Management, 2016, 377: 1–15.
- [6] 张利敏, 王传宽, 唐艳. 11种温带树种粗木残体分解初期结构性成分和呼吸速率的变化[J]. 生态学报, 2011, 31(17): 5017–5024.
- [7] Chao K J, Chen Y S, Song G Z M, et al. Carbon concentration declines with decay class in tropical forest woody debris[J]. Forest Ecology and Management, 2017, 391: 75–85.
- [8] Brischke C, Rapp A O. Influence of wood moisture content and wood temperature on fungal decay in the field: observations in different micro-climates[J]. Wood Science and Technology, 2008, 42(8): 663–677.
- [9] Shorohova E, Kapitsa E. Influence of the substrate and ecosystem attributes on the decomposition rates of coarse woody debris in European boreal forests[J]. Forest Ecology and Management, 2014, 315(315): 173–184.
- [10] 吕明和, 周国逸, 张德强, 等. 鼎湖山锥栗粗木残体的分解和元素动态[J]. 热带亚热带植物学报, 2006, 14(2): 107–111.
- [11] Wang C, Bond-Lamberty B, Gower S T. Environmental controls on carbon dioxide flux from black spruce coarse woody debris[J]. Oecologia, 2002, 132(3): 374–381.
- [12] Mackensen J, Bauhus J. Density loss and respiration rates in coarse woody debris of *Pinus radiata*, *Eucalyptus regnans* and *Eucalyptus maculata*[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 35(1): 177–186.
- [13] 孙秀云, 王传宽. 东北主要树种倒木分解释放的 CO₂ 通量[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5130–5137.
- [14] 张利敏. 11个温带树种粗木残体分解过程中碳动态及影响因素[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010.
- [15] Gough C M, Vogel C S, Kazanski C, et al. Coarse woody debris and the carbon balance of a north temperate forest[J]. Forest Ecology and Management, 2007, 244(1/3): 60–67.
- [16] Jomura M, Kominami Y, Dannoura M, et al. Spatial variation in respiration from coarse woody debris in a temperate secondary broad-leaved forest in Japan[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(1): 149–155.
- [17] 矫海洋, 王顺忠, 王曼霖, 等. 大兴安岭北坡兴安落叶松粗木残体呼吸动态[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(6): 29–33.
- [18] 杨方方, 李跃林, 刘兴诏. 鼎湖山木荷(*Schima Superba*)粗木残体的分解研究[J]. 山地学报, 2009, 27(4): 442–448.
- [19] 刘强, 杨智杰, 贺旭东, 等. 中亚热带常绿阔叶林粗木残体呼吸季节动态及影响因素[J]. 生态学报, 2012, 32(10): 3061–3068.
- [20] 樊小丽, 周光益, 赵厚本, 等. 岭南黎蒴栲-罗浮栲群系粗木残体的基本特征[J]. 林业科学研究, 2016, 29(3): 448–454.
- [21] Noll L, Leonhardt S, Amstadt T, et al. Fungal biomass and extracellular enzyme activities in coarse woody debris of 13 tree species in the early phase of decomposition[J]. Forest Ecology and Management, 2016, 378: 181–192.
- [22] 耿元波, 史晶晶. 草原凋落物的分解及营养元素的释放和累积[J]. 地理科学进展, 2012, 31(5): 655–663.
- [23] Weedon J T, Cornwell W K, Cornelissen J H C, et al. Global meta-analysis of wood decomposition rates: a role for trait variation among tree species[J]. Ecology Letters, 2009, 12(1): 45–56.
- [24] Noh N J, Yoon T K, Kim R H, et al. Carbon and nitrogen accumulation and decomposition from coarse woody debris in a naturally regenerated Korean red pine (*Pinus densiflora* S. et Z.) forest[J]. Forests, 2017, 8(6): 214.
- [25] Katsumata S, Hobara S, Osono T, et al. Mass, nitrogen content, and decomposition of woody debris in forest stands affected by excreta deposited in nesting colonies of Great Cormorant[J]. Ecological Research, 2015, 30(4): 555–561.
- [26] 范跃新, 杨智杰, 郭剑芬, 等. 万木林自然保护区不同分解等级粗木残体呼吸的温度敏感性[J]. 亚热带资源与环境学报, 2010, 5(3): 36–42.
- [27] 国家教育委员会. JY/T 017-1996. 元素分析仪方法通则[S]. 北京: 科学技术文献出版社, 1996.
- [28] Zell J, Kändler G, Hanewinkel M. Predicting constant decay rates of coarse woody debris—a meta-analysis approach with a mixed model[J]. Ecological Modelling, 2009, 220(7): 904–912.
- [29] Herrmann S, Bauhus J. Effects of moisture, temperature and decomposition stage on respirational carbon loss from coarse woody debris (CWD) of important European tree species[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2013, 28(4): 346–357.
- [30] 吴家兵, 关德新, 韩士杰, 等. 长白山地区红松和紫椴倒木呼吸研究[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(2): 14–19.
- [31] Chen H, Harmon M E, Griffiths R P, et al. Effects of temperature and moisture on carbon respired from decomposing woody roots[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 138(1): 51–64.
- [32] Davidson E A, Janssens I A, Luo Y. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q_{10} [J]. Global Change Biology, 2006, 12(2): 154–164.
- [33] 贺旭东. 万木林常绿阔叶林粗木残体碳库及其呼吸通量研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2010.
- [34] 章广琦, 张萍, 陈云明, 等. 黄土丘陵区刺槐与油松人工林生态系统生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2018, 38(4): 1328–1336.