

马尾松和苦槠林根际土壤矿化和根系分解 CO₂释放的温度敏感性 *

刘 煜¹ 胡小飞^{1**} 陈伏生² 袁平成²

(¹南昌大学生命科学与食品工程学院, 南昌 330031; ²江西农业大学林学院, 南昌 330045)

摘要 以中亚热带马尾松林和苦槠林为对象, 原位收集根际和非根际土壤、树木不同生态功能的根系, 开展 15 °C、25 °C、35 °C 和 45 °C 恒温培养模拟试验, 采用密闭气室碱液吸收法测定 53 d 内 CO₂ 释放的动态变化。结果表明: 两种森林类型不同温度下土壤矿化 CO₂ 释放速率的根际效应介于 1.12 ~ 3.09, 且培养前期高于培养后期; 15 °C 下马尾松林和苦槠林差异不显著, 25 °C 和 35 °C 下前者低于后者, 45 °C 下则相反。不同培养温度下两树种吸收根分解的 CO₂ 释放速率均高于过渡根和贮存根, 且马尾松均低于苦槠。两种森林类型 CO₂ 释放的 Q_{10} 值均为土壤 (1.21 ~ 1.83) 显著高于根系 (0.96 ~ 1.36)。两种森林类型土壤矿化 CO₂ 释放的 Q_{10} 值差异不显著, 而马尾松根系分解 CO₂ 释放的 Q_{10} 值高于苦槠。推断全球变暖导致的土壤矿化 CO₂ 释放的增量将远远高于根系分解, 且马尾松林高于苦槠林; 地带性顶极群落应对气候变化的抵抗力强于先锋树种群落。

关键词 根际效应 根序分级 Q_{10} 值 中亚热带森林 马尾松 苦槠

文章编号 1001-9332(2013)06-1501-08 **中图分类号** S718.5 **文献标识码** A

Temperature sensitivity of CO₂ fluxes from rhizosphere soil mineralization and root decomposition in *Pinus massoniana* and *Castanopsis sclerophylla* forests. LIU Yu¹, HU Xiao-fei¹, CHEN Fu-sheng², YUAN Ping-cheng² (¹College of Life Sciences and Food Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; ²College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(6): 1501–1508.

Abstract: Rhizospheric and non-rhizospheric soils and the absorption, transition, and storage roots were sampled from the mid-subtropical *Pinus massoniana* and *Castanopsis sclerophylla* forests to study the CO₂ fluxes from soil mineralization and root decomposition in the forests. The samples were incubated in closed jars at 15 °C, 25 °C, 35 °C, and 45 °C, respectively, and alkali absorption method was applied to measure the CO₂ fluxes during 53 days incubation. For the two forests, the rhizospheric effect (ratio of rhizospheric to non-rhizospheric soil) on the CO₂ flux from soil mineralization across all incubation temperature ranged from 1.12 to 3.09, with a decreasing trend along incubation days. There was no significant difference in the CO₂ flux from soil mineralization between the two forests at 15 °C, but the CO₂ flux was significantly higher in *P. massoniana* forest than in *C. sclerophylla* forest at 25 °C and 35 °C, and in an opposite pattern at 45 °C. At all incubation temperature, the CO₂ release from the absorption root decomposition was higher than that from the transition and storage roots decomposition, and was smaller in *P. massoniana* than in *C. sclerophylla* forest for all the root functional types. The Q_{10} values of the CO₂ fluxes from the two forests were higher for soils (1.21–1.83) than for roots (0.96–1.36). No significant differences were observed in the Q_{10} values of the CO₂ flux from soil mineralization between the two forests, but the Q_{10} value of the CO₂ flux from root decomposition was significantly higher in *P. massoniana* than in *C. sclerophylla* forest. It was suggested that the increment of CO₂ flux from soil mineralization under global warming was far higher than that from root decomposition, and for *P. massoniana* than for *C. sclerophylla* forest. In subtropics of China, the adaptability of zonal climax community to

* 国家自然科学基金项目(31160107, 31260199, 31000299)和江西省青年科学家培养对象项目(20122BCB23005)资助。

** 通讯作者. E-mail: huxiaofei@ncu.edu.cn

2012-08-30 收稿, 2013-04-01 接受.

global warming would be stronger than that of pioneer community.

Key words: rhizopheric effect; root branch order; Q_{10} value; mid-subtropical forest; *Pinus massoniana*; *Castanopsis sclerophylla*.

随着全球气候变化的加剧,地下生态学已成为生态学领域的研究热点,土壤矿化和根系分解对全球变暖的响应也越来越受到关注^[1]。有研究表明,由于根际微生物种类和数量显著有别于非根际^[2],因此根际土壤 CO₂ 释放速率通常比非根际土壤高^[3]。Kelting 等^[4]研究发现,根际微生物 CO₂ 释放(不包括根际土壤有机质分解)可占土壤 CO₂ 总释放的 20%。但由于树种根际碳沉淀和气候条件等方面的差异^[2],目前有关土壤 CO₂ 释放的根际效应的强弱及其对温度变化的敏感性尚不明确^[5],尤其是植物根际过程及其对气候变化响应的作用机制仍不清楚^[6]。

植物根系是森林生态系统中重要的碳库和矿质养分库,其呼吸和分解过程向大气释放大量 CO₂,通常可占到土壤 CO₂ 总释放的 32% 左右^[4],其中很重要的一部分是根系尤其是细根的分解^[7-8]。有研究表明,低级根的形态和结构决定了其主要功能是吸收养分和水分,CO₂ 释放速率高且寿命短;而高级根的形态和结构有利于运输和贮存养分,表现为 CO₂ 释放速率低且寿命长^[9-10]。因此,分析不同根序的分解动态可为评判根序分级的合理性提供依据。目前对不同根序分解应对全球气候变暖的研究很少,从而限制了准确评估根系分解对全球碳循环的贡献^[11]。

亚热带红壤丘陵区是我国陆地森林主要分布区之一^[12]。马尾松(*Pinus massoniana*)是中亚热带陆地早期演替群落的先锋树种,而苦槠(*Castanopsis sclerophylla*)是中亚热带陆地晚期顶极群落(常绿阔叶林)的代表性树种^[13]。两种树种应对全球气候变暖的规律能在一定程度上反映森林不同演替阶段的响应机制,对于评价中亚热带森林生态系统对全球气候变化的适应性,指导中亚热带森林生态系统的经营和管理有着重要意义。

本研究以不同培养温度对土壤矿化和根系分解 CO₂ 释放的影响为切入点,分析两种森林类型土壤矿化 CO₂ 释放的根际效应、树木不同根序的根系分解 CO₂ 释放的温度敏感性,以期检验以下假设:1)根际和非根际土壤矿化 CO₂ 释放速率及其根际效应均随培养温度的升高而提高;2)吸收根分解 CO₂ 释

放速率及其 Q_{10} 均高于贮存根;3)演替早期的马尾松林对气候变暖的响应比演替后期苦槠林更加灵敏,即前者土壤矿化和根系分解 CO₂ 释放的温度升高敏感性高于后者。研究结果可为准确构建全球气候变暖背景下土壤-根系系统 CO₂ 释放动态模型提供数据支撑^[14]。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验样地位于江西省南昌市郊区的前湖公园内(28°09'—29°11' N, 115°27'—116°35' E)。该地区属于中亚热带季风气候区,年均气温 17.5 ℃,年均降水量 1700 mm 左右,降水主要集中在 4—7 月,年均相对湿度 77%,年均日照时数 1900 h,年均无霜期 290 d。研究区内森林覆盖率在 60% 以上,分布有较大面积的马尾松林、少量次生混交林和常绿阔叶林。土壤类型为地带性的红壤^[12]。

本研究以先锋群落马尾松林及其相邻的常绿阔叶苦槠林为对象。在马尾松林中,马尾松呈单层优势,树龄 20 a 左右,平均树高 10 m,平均胸径 11.5 cm,郁闭度 0.7 左右;灌木层平均高度 3.5 m,盖度 50%,主要物种有:四川山矾(*Symplocos setchuensis*)和櫟木(*Loropetalum chinensis*)等;林下草本层稀少,主要有阔叶鳞毛蕨(*Dryopteris championii*)和狗脊(*Woodwardia japonica*)等。在苦槠林中,苦槠为优势种,树龄 25 a 左右,平均胸径 18 cm,平均树高 15 m,郁闭度 0.8;林中分布有少量枫香(*Liquidambar formosana*)和马尾松等;灌木层平均高度为 3.0 m,盖度 40%,物种主要有:黄瑞木(*Adinandra millettii*)、黄栀子(*Gardenia jasminoides*)和櫟木等;草本层物种稀少,主要有狗脊等。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 森林群落调查采用生态学常规野外调查方法^[15]。于 2010 年 9 月,以马尾松林和苦槠林相邻界面为轴,采用配对的方式,随机选取 3 对 20 m×20 m 的样地,共计 6 块。每块样地相邻边界均 >15 m。在每块样地中选取目标优势树种 3~5 株,在其树冠下挖掘出易辨别的目标树种的粗根,沿其生长方向寻找上一级的根系,自直径 8 mm 以下的根系开始收集根际土壤和树木的根系。用抖落法收

集根际和非根际土壤^[2,4]. 本研究将用手轻轻抖动根系后仍粘附于其上 4 mm 之内的土壤定义为根际土壤, 否则为非根际土壤. 同时, 挖取到足量的根系立即带回室内, 根据根序分级理论区分为吸收根(即最前端的 1~3 级)、过渡根(4~5 级)和贮存根(>5 级, 且直径<8 mm)^[16]. 取样当天完成以上步骤, 除取少许样品用于养分测定外, 其余样品用于 CO₂ 释放速率的培养测定.

1.2.2 CO₂ 释放速率的测定 采用传统的密闭气室碱液吸收法测定 CO₂ 释放速率^[17]. 土壤矿化和根系分解 CO₂ 释放均采用双因素多水平 3 次重复的试验设计. 前者因素一为根际和非根际土壤 2 个水平, 因素二为培养温度, 即 15 °C、25 °C、35 °C、45 °C 4 个水平. 后者因素一为吸收根、过渡根和贮存根 3 个水平, 因素二也为培养温度 4 个水平. 3 次重复.

1) 土壤矿化 CO₂ 释放试验: 取根际或非根际土壤 20 g(新样), 放入装有 5 mL 1 mol·L⁻¹ NaOH 溶液的广口瓶(500 mL)中, 密封置于 4 种温度(15 °C、25 °C、35 °C、45 °C)的恒温培养箱中培养, 于试验开始后的 3、6、9、14、19、26、33、43 和 53 d 时取出碱液, 用 0.2 mol·L⁻¹ 盐酸溶液滴定, 计算出 CO₂ 释放量. 土壤 CO₂ 释放量为装有土壤广口瓶的 CO₂ 释放量减去空白, 即无土壤广口瓶的 NaOH 溶液吸收的 CO₂ 量.

2) 根系分解 CO₂ 释放试验: 取吸收根、过渡根或贮存根各 5 g(新样), 放入装有 20 g 非根际土的 500 mL 广口瓶中. 瓶内放置一个盛有 5 mL 1 mol·L⁻¹ NaOH 溶液的小烧杯, 用来吸收释放出的 CO₂. 培养条件和测定天数同土壤. 不同生态功能根系 CO₂ 释放量为: 5 g 根系+20 g 非根际土广口瓶中

CO₂ 释放量—同一样地同一培养温度条件下 20 g 非根际土广口瓶中 CO₂ 释放量. 土壤含水量均调节到饱和含水量的 40%, 绝对含水量在 12% 左右, 最后将结果换算成样品干质量.

1.2.3 养分测定 新鲜土壤备份样品经风干后, 磨碎, 过 0.2 mm 筛, 测定土壤 pH 值、有机碳(C)、全氮(N)和全磷(P)含量^[17]. 根系样品 60 °C 烘干至恒量, 粉碎, 过 0.2 mm 筛, 测定 pH 值、有机 C、全 N 和全 P 含量, 并计算 C/N、C/P 和 N/P 的比值.

1.3 数据处理

CO₂ 释放对温度变化的响应强度(敏感性, Q₁₀)计算公式为: $Q_{10} = e^{10\beta_1}$. 式中: β_1 为 CO₂ 释放的指数曲线方程 $y = \beta_0 e^{\beta_1 T}$ 中的拟合常数; y 为 CO₂ 释放量; T 为培养温度^[18]. 根际效应用 R/S 表示, R 和 S 分别表现根际土壤和非根际土壤矿化 CO₂ 释放速率, R/S >1 为正效应, R/S <1 为负效应.

为了较好地描述 CO₂ 释放速率随培养时间的动态变化规律, 将 53 d 的培养期划分为 4 个阶段: 阶段 I: 1~9 d; 阶段 II: 10~19 d; 阶段 III: 20~33 d; 阶段 IV: 34~53 d.

所有数据均采用 SPSS 17.0 统计软件作单因素方差和双因素方差分析, 用 Tukey 最小显著差法(LSD)进行多重比较($a = 0.05$), Pearson 系数作相关分析.

2 结果与分析

2.1 两种森林类型的养分特征

由表 1 可以看出, 马尾松林土壤 pH 值低于苦槠林, 且根际土壤低于非根际土壤, 而苦槠林两者差

表 1 马尾松和苦槠林土壤和树木根系的养分特征

Table 1 Nutrient characteristics of soil and tree roots in *Pinus massoniana* and *Castanopsis sclerophylla* forests

林型 Forest type	组分 Component	pH	有机碳 Organic C (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P (g·kg ⁻¹)	C/N	N/P
Pm	RS	4.17±0.01c	57.32±6.50a	3.16±0.34a	0.88±0.10 ab	18.20±1.44 b	3.63±0.19a
	NS	4.35±0.01b	46.54±7.92b	1.83±0.35b	0.77±0.16b	25.68±0.78a	2.80±1.05a
	AR	4.46±0.17B	454.44±12.24A	14.95±4.04A	3.00±1.10AB	37.11±12.94C	5.81±1.17A
	TR	4.70±0.37AB	502.65±32.33A	7.53±1.20C	2.85±0.61AB	69.79±11.08A	2.71±0.29B
	SR	4.63±0.10AB	497.30±18.74A	11.85±3.30C	2.52±0.40B	50.53±16.27B	5.42±2.40A
Cs	RS	4.58±0.10a	62.59±5.43a	3.43±0.33a	1.14±0.18a	18.73±2.88b	3.23±0.71a
	NS	4.52±0.18a	46.92±3.07b	2.70±0.20ab	0.87±0.38ab	18.95±1.85b	3.13±0.34a
	AR	5.22±0.32A	454.01±11.87A	16.37±5.11A	5.19±1.37A	39.03±18.10BC	3.16±0.90B
	TR	4.81±0.06AB	476.02±21.4A	13.21±4.02AB	4.16±0.22A	41.65±9.68BC	3.20±1.01B
	SR	4.79±0.15AB	485.12±5.92A	10.19±3.76BC	3.16±0.64AB	47.79±21.66B	4.04±2.33AB

Pm: 马尾松林 *P. massoniana* forest; Cs: 苦槠林 *C. sclerophylla* forest. RS: 根际土 Rhizospheric soil; NS: 非根际土 Non-rhizospheric soil; AR: 吸收根 Absorption root; TR: 过渡根 Transition root; SR: 贮存根 Storage root. 小写和大写字母分别表示两种森林类型不同土壤组分和不同根系组分之间的差异 Small and capital letters indicated the differences among different soil components and among different root components in two forests, respectively. 下同 The same below.

异不显著。两种森林类型的土壤有机C、全N和全P含量差异不显著,总体表现为根际土壤高于非根际土壤。土壤C/N和C/P均表现为马尾松林非根际土壤高于马尾松林根际土壤以及苦槠林的根际和非根际土壤。而土壤N/P在两种森林类型以及根际和非根际土壤之间差异均不显著。

根系pH值总体表现为马尾松低于苦槠,而同一树种不同生态功能的根系之间差异不显著。根系全N和全P含量及N/P总体表现为马尾松低于苦槠,且随吸收根到过渡根和贮存根呈下降的趋势,而C/N和C/P的变化规律反之。

2.2 根际和非根际土壤矿化CO₂的释放速率

马尾松林和苦槠林根际土壤CO₂的释放量均明显高于非根际土壤,且随着培养温度的升高呈增加的趋势(图1)。对于根际土壤,15℃和25℃下,53d内CO₂的释放总量为马尾松林低于苦槠林,35℃下两者差异不显著,而45℃下为马尾松林高于苦槠林。对于非根际土壤,15、25和35℃下,CO₂的释放总量为马尾松林高于苦槠林,而45℃下为马尾松林低于苦槠林。

不同培养温度条件下,两种森林类型土壤CO₂的释放量均表现出明显的根际效应(表2)。马尾松

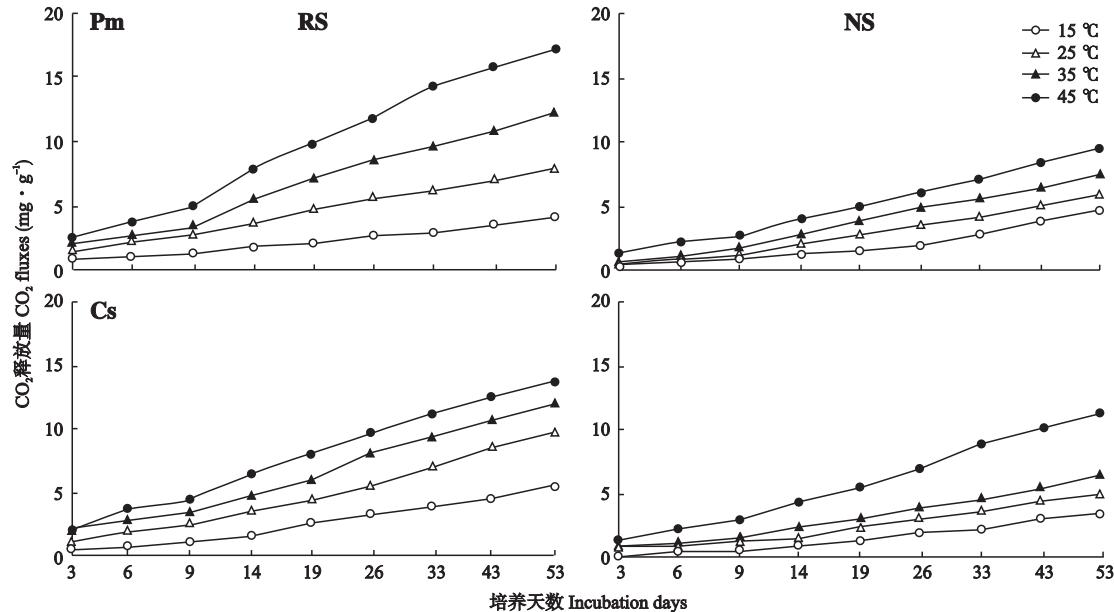


图1 不同温度条件下马尾松和苦槠林根际(RS)和非根际(NS)土壤矿化CO₂释放量

Fig. 1 CO₂ fluxes in rhizospheric (RS) and non-rhizospheric (NS) soils under different incubation temperatures in *Pinus massoniana* and *Castanopsis sclerophylla* forests.

Pm:马尾松林 *P. massoniana* forest; Cs:苦槠林 *C. sclerophylla* forest. 下同 The same below.

表2 马尾松和苦槠林不同温度培养条件下各阶段土壤矿化CO₂释放的根际效应(R/N)

Table 2 Rhizospheric effect of soil mineralization CO₂ fluxes at different incubation temperatures and stages in *Pinus massoniana* and *Castanopsis sclerophylla* forests

林型 Forest type	培养温度 Incubation temperature (℃)	阶段 Stage				全部 All tages (1~53 d)
		I (1~9 d)	II (10~19 d)	III (20~33 d)	IV (34~53 d)	
Pm	15	1.86±0.96a	1.67±0.35ab	1.70±0.28ab	1.38±0.89b	1.53±0.49BC
	25	2.53±1.08a	1.69±0.38b	1.12±0.30c	1.30±0.44bc	1.57±0.47B
	35	2.66±1.21a	1.68±0.34b	1.47±0.22c	1.69±0.42b	1.64±0.11B
	45	1.88±0.39ab	2.19±0.20a	2.01±0.27a	1.27±0.18b	1.82±0.18A
Cs	15	1.97±0.41b	3.09±1.97a	1.78±0.60ab	1.44±0.42b	1.57±0.42B
	25	2.36±0.73ab	2.54±1.45a	2.35±0.61ab	1.98±0.51b	2.12±0.42A
	35	2.32±0.62a	1.92±0.48ab	2.12±0.32ab	1.50±0.06b	1.93±0.25A
	45	1.72±0.43a	1.48±0.41b	1.25±0.43bc	1.16±0.24c	1.40±0.38C

小写字母表示同一培养温度不同培养阶段之间的差异,大写字母表示不同森林类型及不同培养温度的平均值的差异 Small letters indicated the differences among different incubation stages at the same incubation temperature, and capital letters indicated the differences among different forest types and incubation temperatures based on the average value of 1~53 days.

林土壤 CO_2 释放的根际效应随着培养温度的升高呈增加的趋势,而苦槠林表现为 25 ℃ 和 35 ℃ 下高于 15 ℃ 和 45 ℃ 下。两种森林类型土壤 CO_2 释放的根际效应总体上均表现为培养前期(阶段 I 和 II)高于培养后期(阶段 III 和 IV); 25 ℃ 和 35 ℃ 下马尾松林低于苦槠林, 45 ℃ 下为马尾松林高于苦槠林, 而 15 ℃ 下两者差异不显著。

2.3 不同生态功能根系分解的 CO_2 释放量

随着培养温度的升高,两个树种不同生态功能的根系分解的 CO_2 释放量均呈增加趋势(图 2)。培养前期(阶段 I 和阶段 II, 前 19 天)的 CO_2 释放量占到整个培养期(53 d)的 51% ~ 70%, 且随培养温度的升高, 所占的比例也增加。总体来看, 不同培养温度条件下, 两个树种的吸收根分解 CO_2 释放量均高于过渡根和贮存根, 且马尾松不同生态功能根系分解的 CO_2 释放量均低于苦槠。

2.4 土壤矿化和根系分解 CO_2 释放的温度敏感性

(Q_{10})

两种森林类型 CO_2 释放的 Q_{10} 值均为土壤显著高于根系, 且总体上随着培养天数的延长呈下降趋势(表 3)。马尾松林不同培养阶段根际土壤 CO_2 释放的 Q_{10} 值均高于非根际土壤, 而苦槠林却是根际土壤低于非根际土壤; 培养 53 d 根际土壤 CO_2 释放 Q_{10} 值为马尾松林高于苦槠, 而非根际土壤为马尾松低于苦槠。

马尾松根系分解 CO_2 释放的 Q_{10} 值高于苦槠。同一树种不同生态功能根系分解 CO_2 释放的 Q_{10} 值差异不显著, 均表现为培养前期 $Q_{10} > 1$, 随着培养温度升高, CO_2 释放速率增加, 到了后期 Q_{10} 值接近 1, 甚至 <1。

相关分析发现, 土壤矿化 CO_2 释放的 Q_{10} 值与其 pH 和 C/N 呈负相关; 而根系分解 CO_2 释放的 Q_{10} 值与有机碳含量呈正相关, 与全 P 含量呈负相关(表 4)。

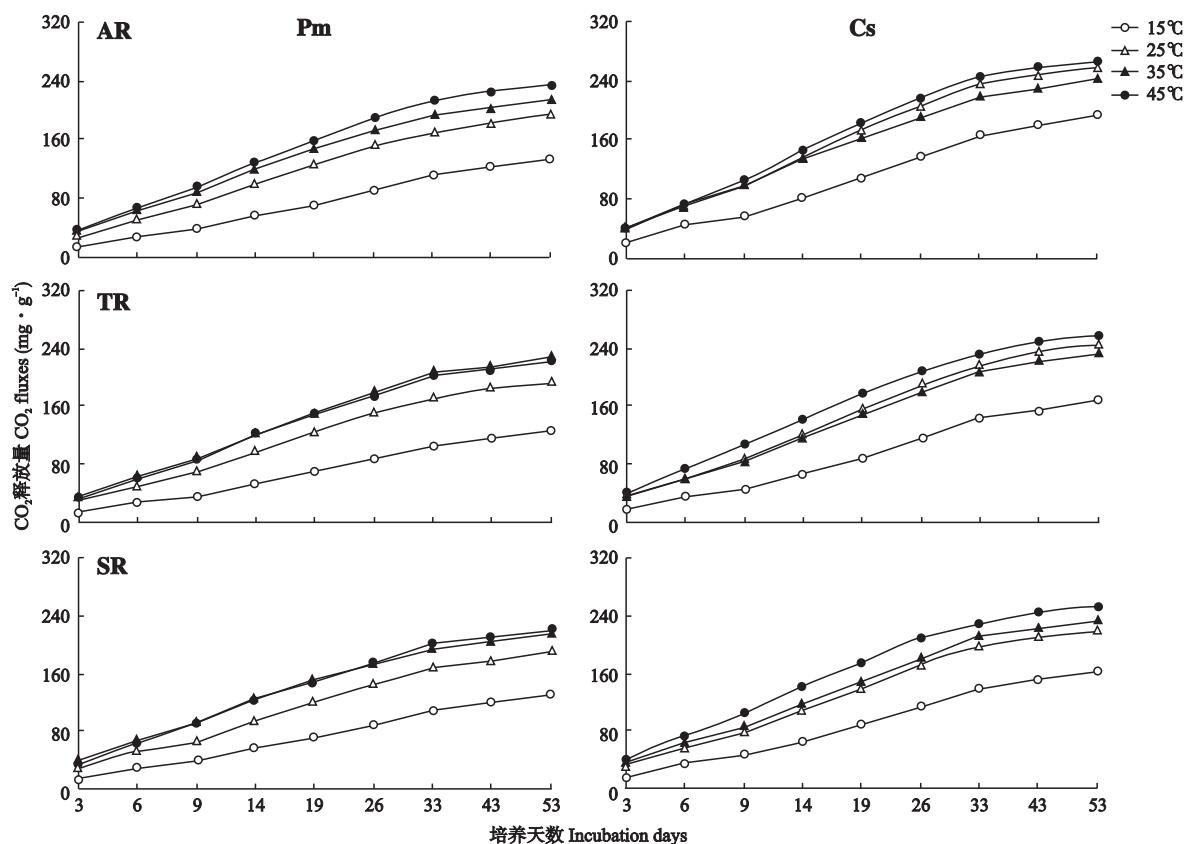


图 2 不同温度条件下马尾松和苦槠不同生态功能根系分解的 CO_2 释放量

Fig. 2 CO_2 fluxes of decomposition for different functional roots of *Pinus massoniana* and *Castanopsis sclerophylla* under different incubation temperatures.

AR: 吸收根 Absorbing root; TR: 过渡根 Transitional root; SR: 贮存根 Storage root.

表3 马尾松和苦槠林土壤矿化和根系分解CO₂释放的温度敏感性

Table 3 Temperature sensitivity (Q_{10}) of CO₂ flux during soil mineralization and root decomposition processes in *Pinus massoniana* and *Castanopsis sclerophylla* forests

林型 Forest type	组分 Component	阶段 Stage				全部 All stages
		I	II	III	IV	
Pm	RS	1.55±0.30a	1.81±0.32a	1.83±0.31a	1.51±0.26a	1.64±0.18a
	NS	1.46±0.14a	1.65±0.31a	1.21±0.11ab	1.35±0.35a	1.34±0.15ab
	AR	1.36±0.01b	1.26±0.03b	1.08±0.02b	0.98±0.02b	1.20±0.01b
	TR	1.35±0.05b	1.21±0.06b	1.13±0.09b	0.98±0.02b	1.20±0.04b
	SR	1.35±0.03b	1.20±0.02b	1.09±0.02b	0.99±0.00b	1.19±0.01b
Cs	RS	1.62±0.13A	1.39±0.21B	1.37±0.09B	1.31±0.19A	1.41±0.15A
	NS	1.73±0.27A	1.55±0.10A	1.54±0.16A	1.40±0.21A	1.47±0.11A
	AR	1.23±0.04B	1.10±0.03C	1.02±0.05C	0.96±0.03B	1.10±0.03B
	TR	1.29±0.05B	1.19±0.05C	0.98±0.04C	0.98±0.03B	1.13±0.02B
	SR	1.28±0.02B	1.17±0.02C	1.06±0.05C	0.96±0.02B	1.15±0.03B

不同小写和大写字母分别表示马尾松林和苦槠林不同组分之间的差异 Small and capital letters indicated the differences among different components in *Pinus massoniana* and *Castanopsis sclerophylla* forests, respectively.

表4 土壤和根系养分与CO₂释放Q₁₀值的相关系数

Table 4 Correlation coefficients among nutrient and Q_{10} of CO₂ fluxes from soil and root

组份 Component	n	pH	有机 C Organic C	全 N Total N	全 P Total P	C/N	C/P	N/P
土壤 Soil	4	-0.53 *	-0.46 ns	0.12 ns	-0.28 ns	-0.59 **	-0.15 ns	0.26 ns
根系 Root	6	-0.27 ns	0.46 *	-0.32 ns	-0.47 *	0.31 ns	0.34 ns	0.05 ns

* P<0.1; ** P<0.05; ns: 不显著 Not significant.

3 讨 论

3.1 土壤矿化CO₂的释放格局及其温度敏感性

森林土壤矿化和微生物呼吸与温度具有良好的相关性,在一定温度范围内,温度升高通常会增加土壤中CO₂的释放速率^[19]. 本研究表明,随着培养温度的升高,马尾松林和苦槠林根际土壤和非根际土壤矿化CO₂的释放速率均呈增加的趋势. 其机制可能是:低温培养时土壤矿化释放的CO₂主要来源于易分解的有机碳,而高温培养时难分解的有机碳比例增加^[20]. 与此同时,土壤矿化CO₂释放速率总体上表现为随培养时间的延长呈显著下降的趋势,除马尾松林非根际土壤15℃下外,阶段I和II(前19天)所释放CO₂量占到总释放量的50%~60%. 此外,土壤矿化CO₂释放Q₁₀值总体上随培养时间的延长呈下降的趋势,且根际效应总体上表现为培养前期(阶段I和II)高于培养后期(阶段III和IV). 这些都表明易分解的有机碳在较短的时间内即可较快地分解释放出CO₂,而较难分解的有机碳分解速率明显缓慢^[21],但培养温度升高对两种有机碳形态分解均起到明显加速的作用. 这与Hopkins等^[22]的研究结果相吻合.

两种森林类型相比,根际土壤在15℃和25℃

下,马尾松林土壤矿化CO₂释放速率低于苦槠林,而45℃下马尾松林显著高于苦槠林. 非根际土壤15℃、25℃和35℃下,马尾松林土壤矿化CO₂释放速率显著高于苦槠林,但45℃下反之. 可见,土壤有机碳的数量和质量共同控制土壤矿化过程^[23],且与培养温度存在明显的耦合效应^[24]. 此外,本研究也发现,土壤矿化CO₂释放的Q₁₀值与pH值和C/N呈显著负相关(表4). 这表明根际效应易导致根际土壤pH下降,可溶性的C积累和微生物数量增加,其CO₂释放的温度灵敏性也较高. Curtin等^[25]通过添加Ca(OH)₂调节pH值,结果也证实土壤C/N矿化速率与pH值呈显著负相关. 另外,本研究中土壤有机碳的质量(C/N)在控制有机碳矿化CO₂释放的温度敏感性上具有突出的作用,估计与本研究区土壤养分贫瘠、N不足限制微生物的生长有关^[13]. 可见,影响土壤矿化CO₂释放格局的因素较多,土壤特性与培养温度存在耦合效应;其中土壤可溶性C含量、土壤质量(C/N)是控制本研究区土壤矿化CO₂释放温度敏感性的关键因子^[26].

3.2 根系分解CO₂的释放格局及温度敏感性

根系分解在生态系统碳循环中的贡献已有较多的研究报道^[27~28],但结合根系生态功能分级来揭示树木根系分解CO₂释放格局的研究较少见^[15]. 本研究发现,3种生态功能的根系分解CO₂释放速率均

随培养温度的升高呈增加的趋势; 培养前期(阶段Ⅰ和Ⅱ)CO₂的释放量占到4个阶段总释放量的51%~70%,且表现为随培养温度的升高,前期所占的比例越来越大。可见,根系分解CO₂释放的时间动态及其受培养温度的影响与土壤矿化CO₂释放格局基本一致。显然,根系有机碳也包含可溶性和难分解两部分^[29]。而根系分解培养前期CO₂的释放量占总释放量的比例比土壤矿化高出10%左右,估计与分解前期根系尚未完全死亡,活根自身呼吸的贡献有关^[30~31]。

本研究还发现,同一培养温度条件下,两个树种吸收根分解CO₂的释放速率均高于过渡根和贮存根。这与贾淑霞等^[15]的研究结论类似,1级根生理代谢能力最强,5级根生理代谢能力最弱,维持呼吸速率随着根序升高而逐渐下降。这可能与吸收根全N和全P含量高于过渡根和贮存根有关。以往的研究表明,较高N和P含量的根系往往具有较快的分解速度^[30]。本研究4个培养温度条件下根系分解CO₂释放速率与根系全N和全P含量均具有较好的相关性($r>0.45$, $n=6$, $P<0.1$),这也进一步证实了以上推断。此外,本研究发现,根系分解培养后期(阶段Ⅳ)的CO₂释放速率显著下降,且随着培养温度的升高,后期CO₂释放速率越来越低。根系分解4个阶段CO₂释放的 Q_{10} 值呈现出明显下降的趋势,至阶段Ⅲ和Ⅳ时,有些生态功能的根系 Q_{10} 值接近1,甚至<1,即随着培养温度的升高,CO₂释放速率不再增加,甚至下降。从理论上来讲,根系有机碳含量很高,C源是充足的,推断其他因素限制了培养温度较高条件下根系的分解^[32]。本研究中根系分解CO₂释放的 Q_{10} 值与根系C/P呈显著负相关,P不足导致根系分解后期CO₂释放的温度敏感性减弱^[31]。

同一生态功能的根系分解CO₂释放的 Q_{10} 值表现为马尾松高于苦槠,可能与根系有机碳形态组成有一定的关系。然而,不同生态功能的根系分解CO₂释放 Q_{10} 值差异不显著,估计是根系可溶性C、全N和全P含量耦合作用于温度敏感性的结果^[20,23~25,31]。相关分析发现,根系分解CO₂释放 Q_{10} 值与根系有机碳含量呈显著正相关,而不同树种和不同生态功能根系有机碳含量无显著差异。导致不同生态功能根系分解CO₂释放的温度敏感性差异的机制尚不明确。

综合马尾松和苦槠林土壤矿化和根系分解CO₂释放 Q_{10} 值的异同,推断中亚热带地带性顶极群落应对气候变化的抵抗力强于先锋树种群落。

参考文献

- [1] Trumbore S. Carbon respired by terrestrial ecosystems: Recent progress and challenges. *Global Change Biology*, 2006, **12**: 141~153
- [2] Phillips RP, Fahey T. Tree species and mycorrhizal associations influence the magnitude of rhizosphere effects. *Ecology*, 2006, **87**: 1302~1313
- [3] Kuzyakov Y, Domanski G. Model for rhizodeposition and CO₂ efflux from planted soil and its validation by ¹⁴C pulse labeling of ryegrass. *Plant and Soil*, 2002, **239**: 87~102
- [4] Kelting DL, James AB, Gerry SE. Estimating root respiration, microbial respiration in the rhizosphere, and root-free soil respiration in forest soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 1998, **30**: 961~968
- [5] Nguyen C. Rhizodeposition of organic carbon by plants: Mechanisms and controls. *Agronomie*, 2003, **23**: 375~396
- [6] Dijkstra FA, Cheng W, Johnson DW. Plant biomass influences rhizosphere priming effects on soil organic matter decomposition in two differently managed soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, **38**: 2519~2526
- [7] Zhang X-J (张秀娟), Wu C (吴楚), Wang Z-Q (王政权). Root decomposition and nutrient release of *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelinii* plantations. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(8): 1370~1376 (in Chinese)
- [8] Song S (宋森), Guo D-L (郭大立), Wang Z-Q (王政权), et al. Fine-root decomposition of *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelinii* plantations. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2008, **32**(6): 1227~1237 (in Chinese)
- [9] Pregitzer KS, DeForest JL, Burton AJ, et al. Fine root architecture of nine North American trees. *Ecological Monographs*, 2002, **72**: 293~309
- [10] Guo DL, Mitchell RJ, Hendricks JJ. Fine root branch orders respond differentially to carbon source-sink manipulations in a longleaf pine forest. *Oecologia*, 2004, **140**: 450~457
- [11] Guo DL, Mitchell RJ, Withington JM, et al. Endogenous and exogenous controls of root life-span, mortality and nitrogen flux in a longleaf pine forest: Root branch order predominates. *Journal of Ecology*, 2008, **96**: 737~745
- [12] Chen F-S (陈伏生), Yu K (余焜), Gan L (甘露), et al. Effects of temperature, moisture and forest succession on nitrogen mineralization in hillside red soils in mid-subtropical region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(7): 1529~1535 (in Chinese)
- [13] Zhan S-X (詹书侠), Chen F-S (陈伏生), Hu X-F (胡小飞), et al. Soil nitrogen and phosphorus availability in forest ecosystem at different stages of succession in the central subtropical region. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(9): 4673~4680 (in Chinese)
- [14] Wardle DA, Bardgett RD, Klironomos JN, et al. Eco-

- logical linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 2004, **304**: 1629–1633
- [15] Zhang J-A (章家恩). General Experimental Methods and Techniques in Ecological Research. Beijing: Chemistry Industry Press, 2007 (in Chinese)
- [16] Jia S-X (贾淑霞), Zhao Y-L (赵妍丽), Wang Z-Q (王政权). Relationship among fine-root morphology, anatomy, tissue nitrogen concentration and respiration in different branch root orders in *Larix gmelinii* and *Fraxinus mandshurica*. *Chinese Bulletin of Botany* (植物学报), 2010, **45**(2): 174–181 (in Chinese)
- [17] Xiang S-S (向珊珊), Wang G-B (王国兵), Luo Z-J (罗治建), et al. Sensitivity of soil respiration to temperature in a *Quercus variabilis* secondary forest and a *Pinus taeda* plantation in north subtropical area of China: A laboratory simulation. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2008, **27**(8): 1296–1301 (in Chinese)
- [18] Boone RD, Nadelhoffer KJ, Canary JD, et al. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, 1998, **396**: 570–572
- [19] Irvine J, Law BE. Contrasting soil respiration in young and old-growth ponderosa pine forests. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 1183–1193
- [20] Bais HP, Weir TL, Perry LG, et al. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. *Annual Review of Plant Biology*, 2006, **57**: 233–266
- [21] Conant RT, Ryan MG, Ågren GI, et al. Temperature and soil organic matter decomposition rates: Synthesis of current knowledge and a way forward. *Global Change Biology*, 2011, **17**: 3392–3404
- [22] Hopkins FM, Torn MS, Trumbore SE. Warming accelerates decomposition of decades-old carbon in forest soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, **109**: 1753–1761
- [23] Rovira P, Vallejo VR. Organic carbon and nitrogen mineralization under Mediterranean climatic conditions: The effects of incubation depth. *Soil Biology & Biochemistry*, 1997, **78**: 413–427
- [24] Rey A, Petsikos C, Jarvis PG. Effect temperature and moisture on rates of carbon mineralization in a Mediterranean oak forest soil under controlled and field conditions. *European Journal of Soil Science*, 2005, **56**: 589–599
- [25] Curtin D, Campbell CA, Jalil A. Effects of acidity on mineralization: pH-dependence of organic matter mineralization in weakly acidic soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 1998, **30**: 57–64
- [26] Trofymow JA, Morley CR, Coleman DC, et al. Mineralization of cellulose in the presence of chitin and assemblages of microflora and fauna in soil. *Oecologia*, 1983, **60**: 103–110
- [27] Silver WL, Miya RK. Global patterns in root decomposition: Comparisons of climate and litter quality effects. *Oecologia*, 2001, **129**: 407–419
- [28] Lin C-F (林成芳), Yang Y-S (杨玉盛), Guo J-F (郭剑芬), et al. Root decomposition characteristics of *Castanopsis carlesii* stand in Wanmulin Natural Reserve of Fujian Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(6): 1278–1284 (in Chinese)
- [29] Rong L (荣丽), Li S-J (李守剑), Li X-W (李贤伟), et al. Carbon dynamics of fine root (grass root) decomposition and active soil organic carbon in various models of land use conversion from agricultural lands into forest lands. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(1): 137–144 (in Chinese)
- [30] Burton AJ, Pregitzer KS, Ruess RW, et al. Root respiration in North American forests: Effects of nitrogen concentration and temperature across biomes. *Oecologia*, 2002, **131**: 559–568
- [31] Illeris L, Michelsen A, Jonasson S. Soil plus root respiration and microbial biomass following water, nitrogen, and phosphorus application at a high arctic semi desert. *Biogeochemistry*, 2003, **65**: 15–29
- [32] Kaspari M, Garcia MN, Harms KE, et al. Multiple nutrients limit litterfall and decomposition in a tropical forest. *Ecology Letters*, 2008, **11**: 35–43

作者简介 刘煜,男,1990年生,硕士研究生。主要从事植物生态学研究,发表论文2篇。E-mail: liuyuncdx@163.com

责任编辑 李凤琴