doi:10.11707/j.1001-7488.20161102

凋落物对中亚热带米槠天然林和人工林土壤呼吸的影响*

李 伟 刘小飞 陈光水 赵本嘉 邱 曦 杨玉盛

（湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地 福建师范大学地理科学学院 福州 350007）

摘 要： 【目的】研究凋落物对米槠天然林和人工林土壤呼吸的影响，为未来气候变化条件下评估森林土壤 CO_2 排放提供科学依据。【方法】以福建省三明市格氏栲自然保护区内林龄约200年的米槠天然林和林龄50余年的米槠人工林为对象，在每种林分内设置3块20 m×20 m样地，每块样地内随机布设9个1 m×1 m的试验小区，设置对照（CK），枯落物、凋落物去除（no Litter，NL）和枯落物保留、凋落物加倍（double litter，DL）3种处理。于2013年1月至2014年12月，每月月中及月末在9:00—12:00采用LI-8100A测定不同处理的土壤呼吸，并测定5 cm土深土壤温度及0～10 cm土层土壤体积含水率。【结果】研究期内NL、DL、CT处理的土壤温度在米槠天然林分别为18.2，18.0和17.98 ℃，在米槠人工林分别为18.68，18.70和18.76 ℃，均无显著差异，但人工林土壤温度显著高于天然林；凋落物对土壤呼吸的贡献率在米槠天然林中为11.8%，在米槠人工林中为29.7%；米槠天然林DL处理比CK处理土壤呼吸年通量增加了25.2%（$P<0.05$），表现出激发效应，而米槠人工林DL处理土壤呼吸年通量与CK无显著差异；2种林分土壤呼吸速率与5 cm土深土壤温度均呈极显著的指数关系（$P<0.001$），与0～10 cm土层土壤体积含水量均显著正相关（$P<0.05$）。【结论】凋落物添加对米槠天然林土壤呼吸产生激发效应，而对人工林土壤呼吸无显著影响。

关键词： 凋落物处理试验；激发效应；土壤呼吸；米槠；天然林；人工林；温度敏感性

中图分类号：S714.5；S750 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-7488(2016)11-0011-08

Effects of Litter Manipulation on Soil Respiration in the Natural Forests and Plantations of *Castanopsis carlesii* in Mid-Subtropical China

Li Wei Liu Xiaofei Chen Guangshui Zhao Benjia Qiu Xi Yang Yusheng

（*State Key Laboratory Breeding Base of Humid Subtropical Mountain Ecology School of Geographical Sciences*，*Fujian Normal University Fuzhou* 350007）

Abstract： 【Objective】We investigated the effects of litter manipulation on soil respiration in *Castanopsis carlesii* forest and *C. carlesii* plantation to provide a scientific basis for an estimate of carbon dioxide emission in forest soil for the global climate change in the future.【Method】Our experimental sites are located at the *C. kawakamii* Nature Reserve，Sanming，Fujian，China，where a *C. carlesii* forest（less man-made interference in recent 200 years）and a *C. carlesii* plantation（planted 50 years ago）were selected. We set 3 plots（20 m×20 m）in each forest. And each plot was set 9 subplots（1 m×1 m）. A litter manipulation experiment（No Litter，NL；Double Litter，DL and Control，CK）was carried out in these subplots. Soil respiration was measured using a soil carbon flux system（LI-8100A）during the period from January 2013 to December 2014. Soil temperature and moisture were also monitored at the same time.【Result】The mean soil temperature of *C. carlesii* forest in NL，DL，and CK were 18.2，18.05，and 17.98 ℃，respectively. And the mean soil temperature of *C. carlesii* plantation in NL，DL，and CK were 18.68，18.70，and 18.76 ℃，respectively. The results showed that soil temperature did not change significantly among different sample plots. However，the soil temperature was significantly larger in plantation than in natural forest. Litter respiration increased significantly from 11.8% to 29.7% in *C. carlesii* plantation. DL significantly increased soil respiration by 25.2%（$P<0.05$）in *C. carlesii* forest，indicating

收稿日期：2015-10-10；修回日期：2016-10-15。

基金项目：常绿阔叶林人促更新对红壤有机质维持的作用（31130013）。

* 刘小飞为通讯作者。

priming effects. But there were no significant change in *C. carlesii* plantation with DL treatment, which had no priming effects. A very significant exponential relationship was founded between soil respiration and soil temperature at 5 cm soil depth in litter manipulation plots ($P < 0.001$), while a significant linear relationship was found between soil respiration and soil moisture at 0 - 10 cm depth in all study plots ($P < 0.05$).【Conclusion】The results suggested that increased litter in natural forest of *Castanopsis carlesii* least to priming effect on the soil respiration, but no significant impacts on soil respiration of plantations.

Key words: litter manipulation experiment; priming effect; soil respiration; *Castanopsis carlesii* ; natural forest; plantation; Q_{10}

土壤呼吸是指土壤释放 CO_2 到大气的过程，包括根系呼吸、枯落物层呼吸、矿质土壤层呼吸，是全球碳循环的重要环节，其动态变化直接影响全球碳平衡。研究指出，全球变化（CO_2 浓度升高、变暖等）通过增加森林净初级生产力（NPP）导致森林凋落物（枯落物）量增加（Hickler *et al.*, 2008; Angelis *et al.*, 2005; Raich *et al.*, 2006）。凋落物量改变将引起土壤呼吸速率的改变，进而影响生态系统碳储量（李化山等，2014; Hobbie *et al.*, 2000）。凋落物控制试验是在野外控制土壤碳来源的长期试验，目的是研究在碳源改变下土壤有机质和养分的变化动态（Wan *et al.*, 2007）。凋落物去除试验发现，由于有效阻止碳源输入，土壤呼吸速率显著降低（Ruan *et al.*, 2005; 李化山等，2014）。有机碳（凋落物）输入的改变会导致微生物群落改变而增加土壤呼吸速率（Wang *et al.*, 2013），凋落物添加后还会因激发作用而加速土壤呼吸速率，降低土壤碳储量（Leff *et al.*, 2012; Sayer *et al.*, 2011），可见凋落物输入的改变对土壤呼吸的影响是十分复杂的过程。

我国中亚热带地区常绿阔叶林是全球同纬度特有的重要森林类型，具有极高的生物量和生产力，对全球陆地生态系统碳贮存发挥着重要贡献（吴君君等，2014）。但本区降雨量大且集中，山高坡陡，生态系统较为脆弱，对人类活动响应极为敏感。长期以来，大面积天然林通过皆伐、炼山等方式转变为结构简单的人工林（陈光水等，2005），显著改变了森林生态系统的结构、功能与景观格局。近年来在不同地区我国研究者对单一（李化山等，2014; 熊莉等，2015; 周小刚等，2012）或多种人工林（王光军等，2009a; 余再鹏等，2014）开展了凋落物控制试验，观测凋落物改变对土壤呼吸的影响。大多数研究认为去除凋落物会降低人工林土壤呼吸速率（周小刚等，2012），添加凋落物会增加人工林土壤呼吸速率，可能产生激发效应（王光军等，2009a）。然而凋落物改变对天然林土壤呼吸影响的研究较鲜见，尚不清楚天然林转换为人工林是否会改变凋落物对土壤呼吸的影响。本研究选取我国中亚热带地区广泛分布的米槠（*Castanopsis carlesii*）天然林和人工林，开展凋落物控制试验，研究凋落物处理对土壤呼吸的影响，探讨未来气候变化背景及土地利用变化下的土壤呼吸变化，为评估森林土壤 CO_2 排放提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于福建省三明市格氏栲自然保护区（117°28′E，26°11′N），海拔 305 ~ 315 m，坡度 15° ~ 20°。该保护区属中亚热带季风气候，具冬冷夏热、水热同季、湿润多雨等特点，年均气温 20.1 ℃，年降水量 1 670 mm，集中在 3—8 月。土壤为砂岩发育的山地红壤，表层疏松，土层深厚。本试验研究的米槠天然林林龄约 200 年，人为干扰较少，2012 年的群落调查表明，林下植被主要有华山姜（*Alpinia chinensis*）、硃砂根（*Ardisia crenata*）、香花崖豆藤（*Millettia dielsiana*）、桂北木姜子（*Litsea subcoriacea*）和狗脊（*Woodwardia japonica*）等；米槠人工林前身为米槠天然林，20 世纪 60 年代经皆伐、火烧、挖穴后造林和幼林抚育而形成，其林下植被主要有硃砂根、香花崖豆藤、狗骨柴（*Diplospora dubia*）和黄楠（*Machilus grijsii*）等。2 种林分基本情况见表 1。

2 研究方法

2.1 试验设置

2012 年 6 月，在米槠天然林和人工林的上、中、下坡位分别随机布设 3 块 20 m × 20 m 样地，在每块样地内随机布设 9 个 1 m × 1 m 的试验小区，在各小区内设置对照处理（CK）、枯落物及凋落物（NL）、枯落物保留、凋落物加倍（DL）3 种处理，每种处理 9 个重复。在每个小区内布设 1 个土壤呼吸圈（PVC 环，内径 20 cm，高 10 cm），用于测定土壤呼吸。NL 处理将地上枯落物清走，并在呼吸圈上方 50 cm 高处固定 1 m × 1 m（长 × 宽）凋落物收集网，用于收集新增凋落物且防止凋落物掉入该范围内。DL 处理

以呼吸圈为中心,圈出 1 m×1m(长×宽)范围,每个月月末将 NL 处理上方凋落物收集框内凋落物均匀撒入该范围(包括呼吸圈内)。

表 1　试验地概况

Tab. 1　Survey of *Castanopsis carlesii* natural forest and plantation

项目 Item	土层 Soil layer	米槠天然林 *Castanopsis carlesii* forest	米槠人工林 *Castanopsis carlesii* plantation
土壤密度 Soil density/ ($g \cdot cm^{-3}$)	0~10 cm	0.95	1.00
	10~20 cm	1.14	1.26
土壤全氮含量 Soil total N content/($g \cdot kg^{-1}$)	0~10 cm	2.34	1.97
	10~20 cm	1.48	1.36
土壤全磷含量 Soil total P content / ($g \cdot kg^{-1}$)	0~10 cm	0.48	0.52
	10~20 cm	0.43	0.53
土壤总有机碳含量 Soil total organic carbon content / ($g \cdot kg^{-1}$)	0~10 cm	43.0	29.8
	10~20 cm	23.1	17.9
细根生物量 Fine root biomass/ ($g \cdot cm^{-2}$)	0~10 cm	191.1	82.6
	10~20 cm	63.3	32.6
林分密度 Stand density/ ($tree \cdot hm^{-2}$)		1 955	2 042
平均胸径 Mean DBH/cm		20.0	16.6
平均树高 Mean tree height/m		11.9	14.2
林冠郁闭度 Canopy closure		0.89	0.82
枯落物现存量 Forest floor/ ($t \cdot hm^{-2}$)		7.92	5.91
凋落物量 Litterfall biomass/ ($t \cdot hm^{-2}$)		9.15	8.90

2.2　土壤呼吸速率、温度、湿度测定和凋落物收集

采用 Li-8100A 土壤碳通量测量系统(LI-COR, USA)测定土壤呼吸速率,从 2013 年 1 月至 2014 年 12 月,每月月中及月末在 9:00—12:00 各测定 1 次呼吸速率,每年测定 24 次。在观测土壤呼吸速率的同时使用手持长杆电子温度探针(SK-250WP, Sato Keiryoki, Kanda, Japan)测定 5 cm 深处的土壤温度; 使用时域反射仪(TDR300, Spectrum, Aurora, USA)测定每个呼吸圈附近 0~10 cm 土层的土壤体积含水量。在每个样地内放置 5 个 0.71 m×0.71 m(长×宽)凋落物收集网,共 15 个,每月月末收集 1 次,在 65 ℃下烘干至恒质量后称干质量。

2.3　数据分析

年通量计算: 将每次测得的土壤呼吸速率作为每半个月平均呼吸速率,通过计算并累加得出土壤呼吸年通量。

凋落物的土壤呼吸贡献率为 CK 土壤呼吸年通量与 NL 的差值占 CK 土壤呼吸年通量的比值。

所有统计分析均采用 SPSS19.0。采用重复测量方差分析(repeated-measures ANOVA)和多重比较分别检验米槠天然林和人工林在不同凋落物处理土壤呼吸速率、温度、水分的差异显著性,用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验不同凋落物处理土壤呼吸年通量、温度敏感性系数(Q_{10})的差异显著性,用独立样本 t 检验来检验 2 类林分的各指标差异显著性,分别采用线性和非线性模型拟合土壤呼吸速率与温度和土壤含水率的关系($R_s = ae^{bT}$; $R_s = aW + b$。式中:R_s为土壤呼吸速率,T 为 5 cm 深处土温,W 为 0~10 cm 土层土壤体积含水率,a 和 b 为待定参数)。Q_{10}通过以下模型确定: $Q_{10} = e^{10b}$。

3　结果与分析

3.1　凋落物处理对土壤温度及水分影响

在米槠天然林,NL,DL 与 CT 间的 5 cm 土深处土壤温度差异均不显著($P>0.05$,图 1)。但土壤温度的季节差异显著($P<0.01$),2013 年最高温出现在 6 月下旬,最低温出现在 1 月上旬; 而 2014 年最高温出现在 8 月上旬,最低温出现在 1 月下旬,2014 年 5 cm 土深处土壤年均温显著高于 2013 年($P<0.01$);NL、DL 和 CK 处理 2 年的平均土壤温度分别为 18.2,18.05 和 17.98 ℃。

在米槠人工林,NL、DL 和 CK 间 5 cm 土深处土壤温度差异也均不显著($P>0.05$,图 1)。但土壤温度具有显著的季节差异($P<0.01$),2013 年最高温均出现在 6 月下旬,最低温出现在 1 月上旬;而 2014 年最高温则出现在 7 月上旬,最低温出现在 2 月上旬,2014 年 5 cm 土深处土壤年均温度显著高于 2013 年($P<0.01$);NL、DL 和 CK 处理 2 年的平均土壤温度分别为 18.68,18.70 和 18.76 ℃。米槠天然林各处理的土壤温度均显著低于人工林($P<0.05$)。

米槠天然林和人工林的土壤含水量变化较为复杂,但是两林分的不同处理都有相似的变化曲线,且

具有显著的季节差异($P<0.01$,图 1)。分析表明,同一林分不同处理间土壤含水量无显著差异($P>0.05$)。米槠人工林土壤含水量为6.00% ~27.76%,天然林为 6.00% ~32.43%,两者无显著差异($P>0.05$)。

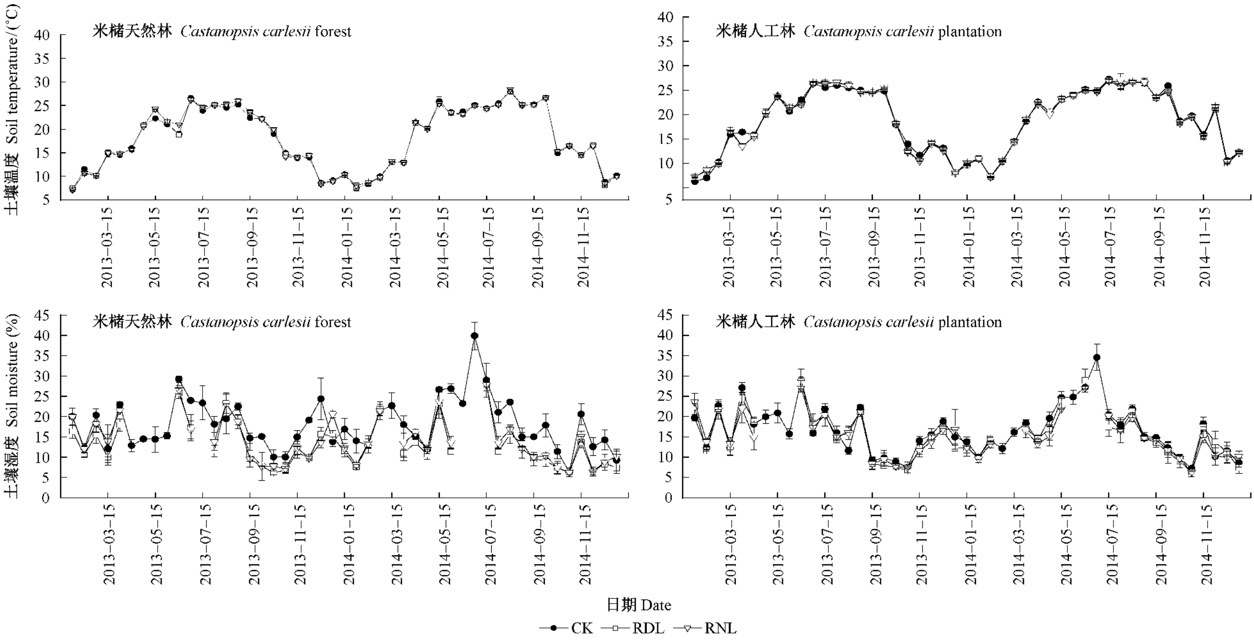

图 1 米槠天然林和人工林去除(NL)、加倍(DL)凋落物和对照(CK)的土壤温度和湿度的季节动态

Fig. 1 Seasonal dynamics of soil temperature and moisture of no litter(NL), double litter(DL), and control (CK) in *Castanopsis carlesii* forests and *Castanopsis carlesii* plantations

3.2 土壤呼吸速率及其与凋落物量、环境因子的关系

连续 2 年观测表明,米槠天然林和人工林的土壤呼吸速率变化呈明显的单峰曲线(图 2)。凋落物输入显著改变了土壤呼吸速率($P<0.001$)(图 2)。米槠天然林 DL、NL 和 CK 土壤呼吸速率分别为 1.39 ~8.05,0.72 ~5.65 和 0.92 ~7.00 $\mu mol \cdot m^{-2} s^{-1}$,2013,2014 年最大值分别出现在 7,8 月,最小值均

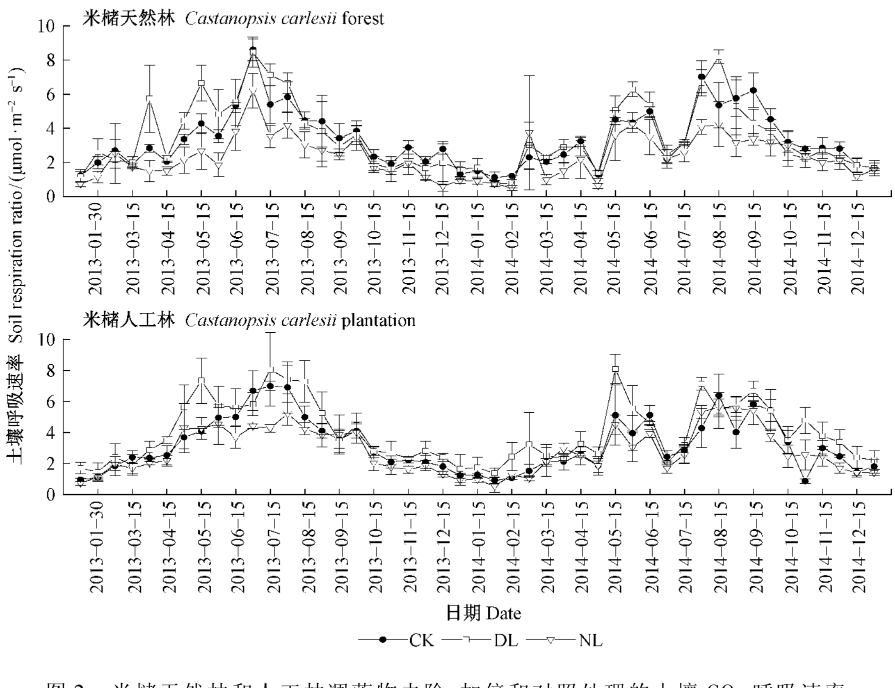

图 2 米槠天然林和人工林凋落物去除、加倍和对照处理的土壤 CO_2 呼吸速率

Fig. 2 Soil respiration ratio for the no litter, double litter and control treatment in *Castanopsis carlesii* forests and *Castanopsis carlesii* plantations

出现在 1 月(图 2)，土壤呼吸速率 2 年平均值分别为 4.01，2.82 和 3.20 $\mu mol \cdot m^{-2} s^{-1}$。米槠人工林 DL、NL 及 CK 处理的土壤呼吸速率分别为 1.12 ~ 8.60，0.51 ~ 6.21 和 0.75 ~ 8.19 $\mu mol \cdot m^{-2} s^{-1}$；2013，2014 年最大值分别出现在 6，7 月，最低值分别出现在 1，2 月(图 2)。观测期间，米槠人工林 DL、NL 和 CK 处理土壤呼吸速率平均值分别为 3.50，2.35 和 3.34 $\mu mol \cdot m^{-2} s^{-1}$，NL 显著降低土壤呼吸速率($P = 0.001$)，但 DL 与 CK 无显著差异。

回归分析表明，2 个林分 DL、NL 与 CK 的土壤呼吸均与 5 cm 土深处土壤温度呈极显著的指数关系($P < 0.01$，表 2)。米槠天然林 5 cm 土深处土壤温度分别可解释 DL、NL 与 CK 土壤呼吸速率变异的 80.1%，82.4% 和 84.2%；DL 降低了其温度敏感性(表 2)。米槠人工林 5 cm 土深处土壤温度分别可以解释 DL、NL 与 CK 土壤呼吸速率变异的 69.0%，75.0% 和 73.3%；DL 和 NL 都增加了米槠人工林温度敏感性(表 2)。米槠天然林除了 NL 处理外，其他 2 种处理土壤呼吸速率均与 0 ~ 10 cm 土层体积含水量显著正相关($P < 0.05$)，且分别可解释土壤呼吸速率变异的 10.1%，10.4% 和 11.1%；而米槠人工林各处理土壤呼吸速率均与 0 ~ 10 cm 土层土壤体积含水量显著正相关($P < 0.01$)，分别可解释土壤呼吸速率变异的 24.1%，12.9% 和 14.1%(表 2)。

表 2　土壤呼吸速率与土壤温度(T)和土壤含水量(W)不同模型的参数①

Tab. 2　Parameters for different models showing the relationships among soil respiration, soil temperature (T), and soil water content (W)

林分类型 Stand type	处理 Treatment	$R_s = aW + b$			$R_s = ae^{bT}$			Q_{10}
		a	b	R^2	a	b	R^2	
米槠天然林	CK	1.55	0.09	0.11*	0.66	0.08	0.84**	2.51A
Castanopsis	DL	2.48	0.10	0.10*	1.00	0.07	0.80**	2.08B
carlesii forests	NL	2.26	0.03	0.10	0.55	0.08	0.82**	2.31A
米槠人工林	CK	1.59	0.10	0.14*	0.92	0.06	0.73**	1.93B
Castanopsiss	DL	0.69	0.17	0.24**	0.70	0.08	0.69**	2.18A
carlesii plantation	NL	1.12	0.08	0.13*	0.50	0.08	0.75**	2.31A

① **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$. a，b 为不同模型的参数，不同大写字母表示相同林分不同处理间差异显著。a and b represent the parameters of model fitting, and different capital letters in the same stand type indicate significant difference between different treatents in the same stand type.

3.3　土壤呼吸年通量

米槠天然林的 DL、NL 与 CK 的土壤呼吸年通量在 2013 年分别为 14.72，10.25 和 12.20 t $C \cdot hm^{-2} a^{-1}$，2014 年分别为 14.56，10.38 和 11.18 t $C \cdot hm^{-2} a^{-1}$(图 3)；在观测期间，与 CK 相比，DL 处理土壤呼吸年通量增加 25.2%($P < 0.05$)，而 NL 处理土壤呼吸年通量降低 11.8%($P < 0.05$)。米槠人工林的 DL、NL 与 CK 的土壤呼吸年通量 2013 年分别为

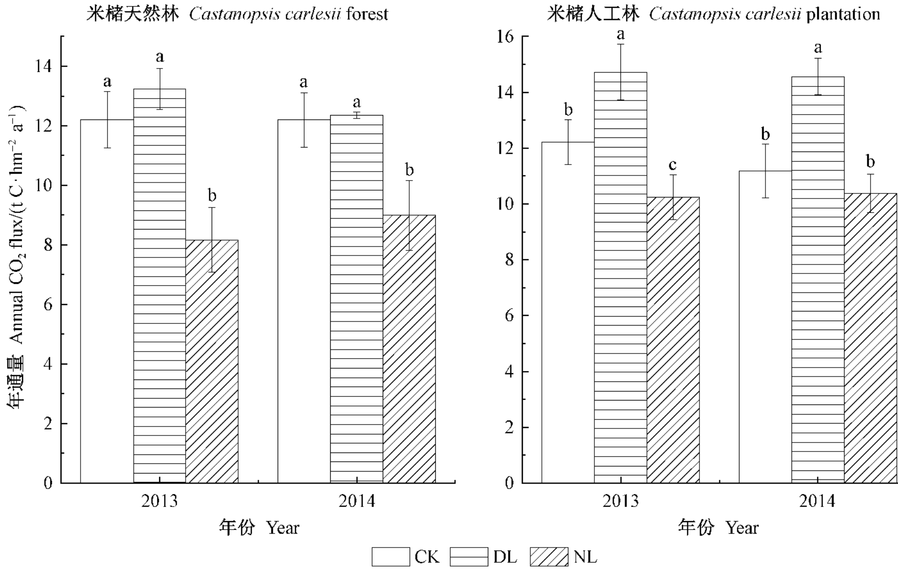

图 3　米槠天然林和人工林凋落物去除、加倍和对照的土壤呼吸年通量

Fig. 3　Annual soil respiration flux of no litter, double litter, and control in *Castanopsis carlesii* forests and plantations

13.24,8.17 和 12.20 t C·$hm^{-2}a^{-1}$，2014 年为 12.36,8.99 和 12.19 t C·$hm^{-2}a^{-1}$；米槠人工林 DL 处理土壤呼吸年通量与 CK 无显著差异，而 NL 比 CK 降低 29.7%（$P<0.05$）。米槠天然林与人工林的土壤呼吸年通量没有显著差异。凋落物对土壤呼吸的贡献率在米槠天然林中为 11.8%，在米槠人工林中为 29.7%（图 3）。

4 讨论

本研究发现，中亚热带米槠林土壤呼吸对凋落物量的改变表现非常敏感（图 1）。经过 2 年的凋落物控制试验，凋落物加倍（DL）处理显著增加了米槠天然林土壤呼吸，而凋落物去除（NL）处理均显著降低米槠天然林和人工林土壤呼吸速率，与其他地区研究（Sayer *et al.*，2007；王光军等，2009a）类似。本研究中米槠天然林凋落物层的土壤呼吸年通量贡献率为 11.8%，接近川西亚高山粗枝云杉（*Picea asperata*）人工林的 14.2%（熊莉等，2015），高于日本落叶松（*Larix kaempferi*）林的 6%（Liang *et al.*，2010），低于凋落物对中国森林贡献的平均水平 20.2%（陈光水等，2008）。米槠人工林凋落物去除后土壤呼吸年通量下降 29.7%，这一结果接近巴西热带森林的 28%（Vasconcelos *et al.*，2004）和太岳山油松（*Pinus tabulaeformis*）林的 27.77% ~ 30.36%（李化山等，2014），但高于亚热带枫香（*Liquidambar formosana*）林的 18.62%（王光军等，2009a）及亚热带樟树（*Cinnamomum camphora*）林的 39%（Yan *et al.*，2012）。在全球范围内凋落物去除后土壤呼吸降低幅度为 6% ~68%（Nadelhoffer *et al.*，1998；Li *et al.*，2004；Liang *et al.*，2010；Yan *et al.*，2012），造成此差异的原因可能是不同气候带水热条件差异较大，凋落物数量及分解速率响应的不同。Hornsby 等（1995）发现分解速度随温度升高而加快，Singh（1999）也证明温度升高促进凋落物分解的作用，同时通过降雨淋溶作用直接影响凋落物的分解速率，也可能通过影响微生物分解者而影响凋落物的分解速率。正是由于热带地区持续高温和年降水量大，其分解速率远高于其他温度带。此外，不同树种的凋落物量及质量并不相同，可能导致凋落物贡献不同。米槠天然林转换为人工林后，凋落物对土壤呼吸的贡献显著变大，可能米槠天然林土壤有机碳含量较高（表 1），提供了土壤呼吸所需能量，对土壤呼吸的贡献较大；而米槠人工林经过皆伐、火烧、造林等措施，土壤有机碳含量及养分下降（表 1），需分解更多凋落物支持微生物活动，从而凋落物层呼吸贡献大于天然林。

米槠天然林 DL 处理使土壤呼吸增加 25.2%，远大于 CK 处理中凋落物对土壤呼吸的贡献率（11.8%），即产生了激发效应。但凋落物输入加倍对米槠人工林土壤呼吸无显著影响，其原因可能为：一般认为外源有机物的添加可能产生激发效应（Schaefer *et al.*，2009；Cleveland *et al.*，2010；Kuzyakov *et al.*，2000），而 Zheng 等（2009）发现激发效应的大小随有机物的增多而增大，米槠人工林的凋落物量（外源有机物）比天然林显著降低（表 1），可能使激发效应没有体现出来；米槠人工林是米槠天然林经过皆伐、火烧等干扰后人工经营的林分，在初期大量养分流失，土壤有效性养分、活性有机碳含量等低于天然林（李伟等，2015），而土壤养分有效性较低时激发效应效果并不明显（Nottingham *et al.*，2011）。如 Leff 等（2012）在哥斯达黎加的土壤养分相对贫瘠的低山热带雨林进行了 2 年的 DIRT 试验，也没表现出激发效应，这与本研究结果一致。

本研究中凋落物处理并没有对土壤温度和水分产生显著影响（图 1）。土壤温度和湿度是影响土壤呼吸最重要的 2 个环境因子，一般通过影响微生物活动及根系代谢而影响土壤呼吸。森林土壤凋落物决定了土壤表层微环境，凋落物去除后土壤被暴露在地表，可能导致土壤温度升高和土壤含水量降低。然而，本研究土壤温度和含水量并无显著变化（图 1），可能与米槠天然林和人工林的郁闭度较高有关（Xu *et al.*，2013）。米槠天然林和人工林土壤呼吸速率与 5 cm 土深土壤温度呈极显著的指数关系，这是因温度升高凋落物分解加快，土壤呼吸速率增高，这与前人研究（熊莉等，2015；王光军等，2009b）一致。一般认为，水分对土壤呼吸的影响比较复杂，过高或过低都会抑制土壤呼吸。本研究中两林分土壤呼吸与土壤含水量显著正相关（表 2），这与中亚热带森林较适宜的土壤水分条件有关。

5 结论

米槠天然林经过皆伐、火烧、造林等干扰后形成的米槠人工林，经过 50 余年的恢复，土壤呼吸已与米槠天然林无差异，但各组分呼吸并不一致。米槠天然林中植物根系和矿质土的呼吸占比例较大，凋落物贡献仅 11.8%，而米槠人工林的凋落物贡献达到 29.7%；对于凋落物加倍（DL）处理，米槠天然林表现出了激发效应，而土壤养分条件较差的米槠人工林却没表现出激发效应。在未来气候变化下，凋落物增加可能会由于激发效应引起米槠天然林土壤

呼吸的迅速增加，对 50 年生以下的米槠人工林的土壤呼吸影响可能不大，但对于更大年龄的人工林的影响还有待研究。

参　考　文　献

陈光水，杨玉盛，吕萍萍，等. 2008. 中国森林土壤呼吸模式. 生态学报，28 (4)：1748 – 1761.

(Chen G S，Yang Y S，Lü P P，*et al.* 2008. Regional patterns of soil respiration in China's forests. Acta Ecologica Sinica，28 (4)：1748 – 1761. [in Chinese])

陈光水，杨玉盛，王小国，等. 2005. 格氏栲天然林与人工林根系呼吸季节动态及影响因素. 生态学报，25 (8)：1941 – 1947.

(Chen G S，Yang Y S，Wang X G，*et al.* 2005. Root respiration in a natural forest and two plantations in subtropical China：seasonal dynamics and controlling factors. Acta Ecologica Sinica，25 (8)：1941 – 1947. [in Chinese])

李化山，汪金松，赵秀海，等. 2014. 模拟氮沉降下去除凋落物对太岳山油松林土壤呼吸的影响. 生态学杂志，33 (4)：857 – 866.

(Li H S，Wang J S，Zhao X H，*et al.* 2014. Effects of litter removal on soil respiration under simulated nitrogen deposition in a *Pinus tabuliformis* forest in Taiyue Mountain，China. Chinese Journal of Ecology，33 (4)：857 – 866. [in Chinese])

李　伟，王巧珍，刘小飞，等. 2015. 森林转换对土壤可溶性有机碳和微生物生物量碳的影响. 亚热带资源与环境学报，10 (1)：43 – 50.

(Li W，Wang Q Z，Liu X F，*et al.* 2015. Effects of forest conversion on dissolved soil organic and microbial biomass carbon in subtropical China. Journal of Subtropical Resources and Environment，10 (1)：43 – 50. [in Chinese])

王光军，田大伦，闫文德，等. 2009a. 去除和添加凋落物对枫香(*Liquidambar formosana*)和樟树(*Cinnamomum camphora*)林土壤呼吸的影响. 生态学报，29 (2)：643 – 652.

(Wang G J，Tian D L，Yan W D，*et al.* 2009a. Impact of litter addition and exclusion on soil respiration in a *Liquidambar formosana* forest and a nearby *Cinnamomum camphora* forest of central southern China. Acta Ecologica Sinica，29 (2)：643 – 652. [in Chinese])

王光军，田大伦，闫文德，等. 2009b. 马尾松林土壤呼吸对去除和添加凋落物处理的响应. 林业科学，45 (1)：27 – 30.

(Wang G J，Tian D L，Yan W D，*et al.* 2009b. Response of soil respirations to litterfall exclusion and addition in *Pinus massoniana* plantation in Hunan，China. Scientia Silvae Sinicae，45 (1)：27 – 30. [in Chinese])

吴君君，杨智杰，翁发进，等. 2014. 米槠天然林和人工林土壤呼吸的比较研究. 环境科学，35 (6)：2426 – 2432.

(Wu J J，Yang Z J，Weng F J，*et al.* 2014. Comparison of soil respiration in natural *Castanopsis carlesii* forest and plantation forest. Environmental Science，35 (6)：2426 – 2432. [in Chinese])

熊　莉，徐振锋，杨万勤，等. 2015. 川西亚高山粗枝云杉人工林地上凋落物对土壤呼吸的贡献. 生态学报，35 (14)：1 – 12.

(Xiong L，Xu Z F，Yang W Q，*et al.* 2015. Aboveground litter contribution to soil respiration in a subalpine dragon spruce plantation of western Sichuan. Acta Ecologica Sinica，35 (14)：1 – 12. [in Chinese])

余再鹏，万晓华，胡振宏，等. 2014. 亚热带杉木和米老排人工林土壤呼吸对凋落物去除和交换的响应. 生态学报，34 (10)：2529 – 2538.

(Yu Z P，Wan X H，Hu Z H，*et al.* 2014. Contrasting responses of soil respiration to litter manipulation in subtropical *Mytilaria laosensis* and *Cunninghamia lanceolata* plantations. Acta Ecologica Sinica，34 (10)：2529 – 2538. [in Chinese])

周小刚，郭胜利，车升国，等. 2012. 黄土高原刺槐人工林地表凋落物对土壤呼吸的贡献. 生态学报，32 (7)：2150 – 2157.

(Zhou X G，Guo S L，Che S G，*et al.* 2012. Aboveground litter contribution to soil respiration in a black locust plantation in the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica，32 (7)：2150 – 2157. [in Chinese])

Angelis P D，Delucia E H，King J S. 2005. Forest response to elevated CO_2 is conserved across a broad range of productivity. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America，102 (50)：18052 – 18056.

Cleveland C C，Wieder W R，Reed S C，*et al.* 2010. Experimental drought in a tropical rain forest increases soil carbon dioxide losses to the atmosphere. Ecology，91 (8)：2313 – 2323.

Hickler T，Smith B，Prentice I C，*et al.* 2008. CO_2 fertilization in temperate FACE experiments not representative of boreal and tropical forests. Global Change Biology，14 (7)：1531 – 1542.

Hobbie S E，Vitousek P M. 2000. Nutrient limitation of decomposition in Hawaiian forests. Ecology，81 (7)：1867 – 1877.

Hornsby D C，Lockab B G，Chappelka A H. 1995. Chappelka influence of microclimate on decomposition in loblolly pine stands：a field microcosm approach. Canadian Journal of Forest Research，25 (10)：1570 – 1577.

Kuzyakov Y，Friedel J K，Stahr K. 2000. Review of mechanisms and quantification of priming effects. Soil Biology and Biochemistry，32 (11)：1485 – 1498.

Leff J W，Wieder W R，Taylor P G，*et al.* 2012. Experimental litterfall manipulation drives large and rapid changes in soil carbon cycling in a wet tropical forest. Global Change Biology，18 (9)：2969 – 2979.

Liang N，Hirano T，Zheng Z M，*et al.* 2010. Soil CO_2 efflux of a larch forest in northern Japan. Biogeosciences，7 (11)：3447 – 3457.

Nadelhoffer K J，Boone R D. 1998. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. Nature，396：570 – 572.

Nottingham A T，Turner B L，Chamberlain P M，*et al.* 2011. Priming and microbial nutrient limitation in lowland tropical forest soils of contrasting fertility. Biogeochemistry，111 (1/3)：219 – 237.

Raich J W，Nadelhoffer K J. 1989. Belowground carbon allocation in forest ecosystems：global trends. Ecology，70 (5)：1346 – 1354.

Ruan H H，Li Y Q，Zou X M. 2005. Soil communities and plant litter decomposition as influenced by forest debris：variation across tropical riparian and upland sites. Pedobiologia，49 (6)：529 – 538.

Sayer E J，Heard M S，Grant H K，*et al.* 2011. Soil carbon release enhanced by increased tropical forest litterfall. Nature Climate Change，1 (6)：304 – 307.

Sayer E J，Powers J S，Tanner E V J. 2007. Increased litterfall in tropical forests boosts the transfer of soil CO_2 to the atmosphere. Plos One, 2 (12): e1299.

Schaefer D A, Feng W, Zou X. 2009. Plant carbon inputs and environmental factors strongly affect soil respiration in a subtropical forest of southwestern China. Soil Biology and Biochemistry, 41 (5): 1000 - 1007.

Singh K. 1999. Litterfall, litter decomposition and nutrient release patterns in four native tree species raised on coal mine spoil at Singrauli, India. Biology and Fertility of Soils, 29: 371 - 378.

Vasconcelos S S, Zarin D J, Capanu M, *et al*. 2004. Moisture and substrate availability constrain soil trace gas fluxes in an eastern Amazonian regrowth forest. Global Biogeochemical Cycles, 18 (2): 193 - 204.

Wan S, Norby R J, Ledford J, *et al*. 2007. Responses of soil respiration to elevated CO_2, air warming, and changing soil water availability in a model old-field grassland. Global Change Biology, 13 (11): 2411 - 2424.

Wang Q K, He T X, Wang S L, *et al*. 2013. Carbon input manipulation affects soil respiration and microbial community composition in a subtropical coniferous forest. Agricultural and Forest Meteorology, 178 (17): 152 - 160.

Xu S, Liu L L, Sayer E J. 2013. Variability of above-ground litter inputs alters soil physicochemical and biological processes: a meta-analysis of litterfall-manipulation experiments. Biogeosciences, 10 (11): 7423 - 7433.

Yan W D, Chen X Y, Tian D L, *et al*. 2012. Impacts of changed litter inputs on soil CO_2 efflux in three forest types in central south China. Chinese Science Bulletin, 58 (7): 750 - 757.

Zheng Z M, Yu G R, Fu Y L, *et al*. 2009. Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: a trans-China based case study. Soil Biology and Biochemistry, 41 (7): 1531 - 1540.

（责任编辑　于静娴）