

鼎湖山亚热带常绿针阔叶混交林凋落物及矿质氮输入对土壤有机碳分解的影响*

孙丽娟^{1,2} 曾辉¹ 郭大立^{2**}

(¹北京大学深圳研究生院, 深圳市循环经济重点实验室, 广东深圳 518055; ²北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要 2010年7—12月,选取鼎湖山国家级自然保护区亚热带针阔叶混交林,采用全因子控制试验,研究不同类型的凋落物(针叶和阔叶凋落物)添加及氮处理(加氮模拟氮饱和、减氮模拟根吸收)对表层(0~10 cm)和下层(20~30 cm)土壤有机质分解(呼吸)的影响.结果表明:2010年7—11月间,两种凋落物的添加使土壤-凋落物系统的呼吸速率显著增加,但这种影响在12月消失.减氮和加氮处理均显著增加了土壤-凋落物系统的呼吸.叶凋落物短期内完全分解,对土壤碳分解和积累的影响十分有限,可能不是该系统中土壤有机质的主要来源.通过减少土壤可利用氮模拟根系对氮的吸收能够明显促进土壤有机质的分解.

关键词 氮移除 凋落物添加 土壤呼吸 土壤碳分解

文章编号 1001-9332(2011)12-3087-07 **中图分类号** S154.1, S718.5 **文献标识码** A

Effects of litter and mineral nitrogen input on soil organic carbon decomposition in subtropical mixed forest in Dinghu Mountain, South China. SUN Li-juan^{1,2}, ZENG Hui¹, GUO Da-li² (Shenzhen Key Laboratory of Recycling Economy, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, Guangdong, China; Ministry of Education Key Laboratory for Earth Surface Process, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(12): 3087-3093.

Abstract: In July–December 2010, a complete factor-controlled experiment was conducted to study the effects of litter and mineral nitrogen addition on soil organic matter decomposition (soil respiration) at the depths of 0–10 cm and 20–30 cm in Dinghu Mountain National Reserve. Coniferous needle litter and broadleaved litter were added, respectively, and 70 g N · m⁻² · yr⁻¹ of NH₄NO₃ was applied to simulate soil nitrogen saturation whereas soil mineral nitrogen was removed by ion-exchange membrane to simulate the decreased nitrogen absorption by root. The addition of both needle litter and broadleaved litter increased the respiration rate of soil-litter system significantly from July to November, but this effect disappeared in December. Both mineral nitrogen application and soil mineral nitrogen removal increased the soil-litter respiration significantly. These results suggest that litter decomposed completely in a short period therefor had limited effects on soil organic matter decomposition and accumulation, and thus, foliar litters could be not the major source of soil organic matter, whereas soil mineral nitrogen removal could obviously promote the soil organic matter decomposition in the system.

Key words: nitrogen removal; litter addition; soil respiration; soil organic carbon decomposition.

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库^[1],是植被碳库或大气碳库的2~3倍^[2],因此土壤碳库的动态对全球变化研究有着重要意义.随着大气中

CO₂浓度的增加,植物生长速率可能加快^[3],导致凋落物量增加,有更多的碳进入土壤中^[4].也有研究表明,随着凋落物输入的增加,土壤中碳量保持不变^[3,5],甚至减少^[6],这种格局可以由以下两个机制来解释:一方面,叶凋落物主要在地表分解,只有极少的分解残体进入土壤,土壤中的碳可能主要来自

* 国家自然科学基金项目(40971030,30870418)资助.

** 通讯作者. E-mail: dlguo@urban.pku.edu.cn

2011-05-19 收稿,2011-09-09 接受.

死根的分解残体和微生物残体^[7-8];另一方面,新鲜凋落物的输入对较老、较稳定的土壤碳产生激发作用,加速了稳定碳的分解^[6,9].因此,凋落物能否增加土壤稳定碳库的储量,可能是以上各个过程叠加的结果.

人为因素导致的氮沉降会对土壤碳的分解和积累产生深刻的影响,但影响的方向和机制目前尚不明确. Waldrop 等^[10]对北美阔叶林的3年施肥试验结果表明,氮添加使糖槭(*Acer saccharum*)林下的土壤碳储量减少了20%,而同地区黑栎(*Quercus velutina*)-白栎(*Quercus alba*)林下的土壤碳储量却增加了10%.这种格局可能是由于氮添加促进了易分解凋落物(如糖槭叶凋落物)及土壤碳的分解,抑制难分解凋落物(如栎叶凋落物)及土壤碳的分解.因此不同森林中不同性质的凋落物和土壤碳对氮的反应可能不同.

土壤有机碳周转时间随着剖面加深而增加^[11],下层土壤的碳周转较慢,通常认为是稳定碳;深层土壤碳浓度较低,但其总量超过土壤总碳量的50%^[12].表层和下层土壤存在诸多差异,包括土壤学特征、环境因素、理化性质等^[13],但核磁共振(NMR)的证据表明,这两类土壤中有机碳的类型和组分比例是相似的^[9,14].目前导致下层土壤稳定的原因仍不清楚^[15],因此,研究不同剖面深度土壤有机碳周转的控制因素,有助于了解影响土壤有机碳稳定性的机制.本研究以南亚热带针阔混交林为对象,通过添加或去除土壤中的矿质氮来改变可利用氮水平,结合不同类型凋落物的添加处理,研究叶凋落物和土壤可利用氮水平对不同层次土壤碳分解和土壤呼吸的影响,探索两种控制因素对土壤碳周转的调控机理.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究在广东省肇庆市境内的鼎湖山自然保护区(23°09'21"—23°11'30" N, 112°30'39"—112°33'41" E)内进行.该地区属南亚热带季风湿润气候,年均气温20.9℃,最冷月(1月)和最热月(7月)气温分别为12.0℃和28.0℃,干湿季明显,年均降水量1956 mm,降水主要集中在4—9月,占全年降水量的76%.土壤类型主要为赤红壤和红壤等^[16].2004和2005年度监测的雨水无机氮沉降为34和32 kg N · hm⁻² · a⁻¹,其中NH₄⁺-N占60%^[17].

本试验样地设置在保护区东南缓冲带的针阔叶

混交林中.该林源自20世纪30—40年代人工马尾松林,后受阔叶树种入侵而成,是当地演替系列中间阶段的代表类型^[18].林内乔木树种主要有马尾松(*Pinus massoniana*)、荷木(*Schima superba*)、锥栗(*Castanopsis chinensis*)、黄果厚壳桂(*Cryptocarya concinna*)、红皮紫椴(*Craibiodendron kwangtungense*)和滇粤山胡椒(*Lindera metcalfiana*)等^[19].

1.2 试验设计

试验的控制因素是叶凋落物类型和氮处理类型.其中叶凋落物类型分别是针叶凋落物组和阔叶凋落物组,以无凋落物组为对照;氮处理分为减氮处理组、无氮处理组(对照组)和加氮处理组(添加硝酸铵水溶液70 g N · m⁻² · a⁻¹)3个梯度.其中减氮处理通过异相离子交换树脂来实现,树脂膜有阴离子交换膜和阳离子交换膜两种,在试验中成对使用,可以同时吸附土壤中的NH₄⁺-N和NO₃⁻-N.由于不同层次土壤碳的性质差异较大(下层土壤碳可能更稳定),试验用土壤基质分为剖面表层土和剖面下层土壤经人为转移到剖面表面(简称下层土)两种.

试验为全因子设计,处理数为3×3×2,共18种.所有处理中均使用尼龙网隔离植物根系以去除自养呼吸,研究土壤有机质本身对各控制因子的响应.

1.3 样地布置

2010年5—6月,在鼎湖山自然保护区的针阔叶混交林中选择3个地形平缓面积为25 m×25 m的阳坡样地作为重复样地.每个样地随机设置前述的所有处理(以下称每个处理为一个地块,大小为60 cm×60 cm),在地块上安装铁架和纱网,防止天然凋落物进入试验土块.

在每个地块的地表0~10 cm剖面底部铺设400目的尼龙网隔根,再在网上左右各放置原位0~10 cm和剖面下层20~30 cm深处取出的土样,用PVC板隔开作为表层土和下层土处理.挑除土中的粗根与细根,保证剖面表层试验土块的底面和侧面与土壤剖面隔离开,令细根无法长入.在每个处理内各安置一个内径为20 cm的呼吸测定环.

在减少可利用氮的地块中,将树脂膜垂直放置到土壤10 cm深处.每月在测定土壤呼吸后,再为减氮处理更换树脂、施肥处理添加硝酸铵,以减小更换树脂等人为活动对土壤呼吸测定的干扰.将硝酸铵配成制12 g · L⁻¹的溶液,每个施肥地块每次均匀喷洒500 mL此溶液.

在鼎湖山收集新凋落的尚未明显分解的新鲜叶凋落物,阔叶取林下凋落物的混合物,针叶为马尾松

纯林中收集的单一种凋落物。所有叶凋落物烘干至恒量,根据地块的面积和试验设计,称取相应的生物量均匀铺在地表。不放置凋落物的地块均用双层尼龙网遮阴。当地 1982—1990 年的阔叶年均凋落量为 $8.84 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 1982—1990 年和 1993—1999 年的针叶年均凋落量为 $2.53 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 阔叶处理添加量为每地块 500 g , 即 $1388.89 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 约为年均量的 1.5 倍; 针叶处理添加量为每地块 250 g , 即 $694.44 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 大致是天然凋落量的 3 倍^[20]。

样地布置好后,使用直径 2 cm 的土钻在每个处理中钻取 10 cm 的土样,用于测定土壤碳氮元素。经过一个月的恢复期,2010 年 7—12 月每月进行土壤呼吸测定,测定时不移除呼吸测定环内的凋落物。

1.4 测定方法

2010 年 7 月 7 日—12 月 10 日,每月选取无降雨的 8:00—12:00,采用 LI-8100 土壤呼吸系统 (LI-8100-103 Soil Respiration System) 测定所有处理的土壤呼吸速率,并记录半日进程,通过校正以消除采样时间对数据可能造成的差异。测量间隔约 30 d ,根据降雨情况略有调整。LI-8100 增置的土壤温湿度传感器同时记录下每个处理实时的温湿度变化。土壤碳氮元素使用碳氮分析仪 Elementar Vario EL (Germany) 进行分析。

1.5 数据处理

数据经正态性检验后,对叶凋落物类型、氮处理、土壤层次和季节 4 个因素做单因素方差分析 (one-way ANOVA),使用 HSD 两两比较,分析叶凋落物和氮两个因素处理水平间差异的显著性,并通过 Tukey 检验。显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。所有统计工作皆在 PASW Statistics 18 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 常绿针阔叶混交林土壤和凋落物基本性质

试验区土壤剖面上的 O 层很薄, A 层平均厚度在 $7 \sim 10 \text{ cm}$ 。剖面 30 cm 左右出现强烈风化的母质和石块。表层土壤碳、氮含量分别为 $(1.83 \pm 0.06)\%$ 和 $(0.11 \pm 0.01)\%$, C/N 比值为 16.07 ± 0.17 ; 下层土壤碳含量为 $(0.45 \pm 0.02)\%$, 氮含量 $< 0.10\%$ 。马尾松凋落物的碳、氮含量分别为 $(49.83 \pm 0.11)\%$ 和 $(0.88 \pm 0.06)\%$, C/N 比值为 56.91 ± 3.81 ; 阔叶混合凋落物的碳、氮含量分别为 $(46.94 \pm 0.72)\%$ 和 $(1.10 \pm 0.03)\%$, C/N 比值为 42.65 ± 1.93 。

2.2 常绿针阔叶混交林土壤呼吸的季节变化

2010 年 7—12 月,常绿针阔叶混交林土壤呼吸

通量季节变化均呈夏季高、冬季低的格局。由于该地区雨热同期,这种格局也可以理解为雨季高、旱季低。最高月的土壤平均温度和平均湿度均出现在 7 月,分别为 $(30.48 \pm 0.09)^\circ\text{C}$ 和 $(35.74 \pm 0.07)\%$, 最低月土壤均温和平均湿度均出现在 12 月,分别为 $(14.46 \pm 0.13)^\circ\text{C}$ 和 $(11.25 \pm 0.08)\%$ 。最高月的土壤呼吸均值出现在 8 月,达 $(3.79 \pm 0.28) \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 对应的土壤平均温度和平均湿度为 $(28.50 \pm 0.06)^\circ\text{C}$ 和 $(35.66 \pm 0.07)\%$; 最低值出现在 12 月,仅有 $(0.99 \pm 0.18) \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。表层土壤处理中呼吸强度的季节变化比下层土壤更为明显 (图 1)。

2.3 凋落物添加对土壤呼吸的影响

试验的 6 个月内,对照组、针叶和阔叶处理组的呼吸均值分别为 (1.84 ± 0.08) 、 (3.54 ± 0.20) 和 $(2.72 \pm 0.11) \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 两种类型凋落物的添加均显著增加了土壤呼吸通量 (表 1、表 2)。其中,针叶凋落物处理对两种类型土壤呼吸的影响从 7 月持续到 11 月, 12 月的影响均不显著; 阔叶凋

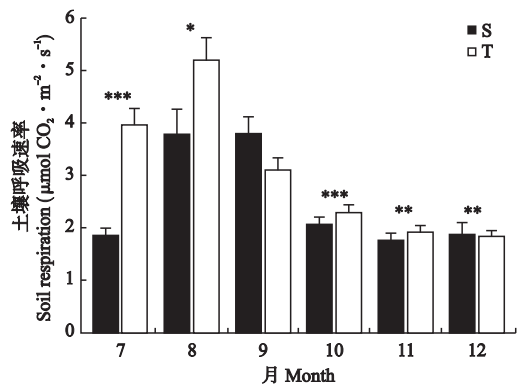


图 1 表层(T)和下层(S)土壤呼吸通量的季节变化
Fig. 1 Seasonal dynamics of topsoil (T) and subsoil (S) (mean±SE, $n = 54$).

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$.

表 1 土壤呼吸全部控制因素方差分析

Table 1 Results of ANOVA for soil respiration on relative factors ($n = 6$)

因子 Factor	自由度 df	F	P
土壤层次 Depth (D)	1	77.976	<0.001
月份 Month (M)	5	47.482	<0.001
凋落物类型 Litter (L)	2	64.785	<0.001
氮处理 Nitrogen (N)	2	6.157	0.002
土壤层次×月份 D×M	5	4.614	<0.001
氮处理×凋落物类型 N×L	4	4.543	0.001
凋落物类型×月份 L×M	10	16.497	<0.001
氮处理×凋落物类型×月份 N×L×M	30	2.244	<0.001

表2 凋落物和氮处理对土壤呼吸作用的 HSD 比较

Table 2 Results of HSD for soil respiration on the factor of litter addition and nitrogen treatment ($n=36$)

处理 I Treatment I	处理 J Treatment J	均值差值 D value of means (I-J)	标准误差 SE	Sig.	95% 置信区间 95% confidence interval	
					下限 Lower limit	上限 Higher limit
无凋落物 Control (CK)	针叶 N	-1.6977 *	0.15005	<0.001	-2.0503	-1.3451
针叶 Needle (N)	阔叶 B	-0.8767 *	0.15023	<0.001	-1.2297	-0.5237
阔叶 Broadleaf (B)	无凋落物 CK	1.6977 *	0.15005	<0.001	1.3451	2.0503
减氮 N removal (-N)	阔叶 B	0.8210 *	0.15005	<0.001	0.4684	1.1736
无氮 Control (CK')	无凋落物 CK	0.8767 *	0.15023	<0.001	0.5237	1.2297
加氮 N addition (+N)	针叶 N	-0.8210 *	0.15005	<0.001	-1.1736	-0.4684
无氮 Control (CK')	无氮 CK'	0.5042 *	0.15006	0.002	0.1516	0.8568
加氮 N addition (+N)	加氮 +N	0.1462	0.14988	0.593	-0.2060	0.4984
减氮 N removal (-N)	减氮 -N	-0.5042 *	0.15006	0.002	-0.8568	-0.1516
加氮 N addition (+N)	加氮 +N	-0.3580 *	0.15040	0.046	-0.7114	-0.0046
减氮 N removal (-N)	减氮 -N	-0.1462	0.14988	0.593	-0.4984	0.2060
无氮 Control (CK')	无氮处理 CK'	0.3580 *	0.15040	0.046	0.0046	0.7114

凋落物对表层土壤的促进作用只持续到10月,对下层土壤的促进作用持续到11月;到了12月,对两类土壤的促进作用均不显著(图2)。同时,两类凋落物在地表也没有可辨认的残体,这与前述结果可能有对应的关系。虽然针叶凋落物的添加量小于阔叶凋落物,在凋落物处理对土壤呼吸有促进作用的月份内,针叶凋落物对土壤呼吸通量增加的贡献却显著大于阔叶凋落物(图2)。

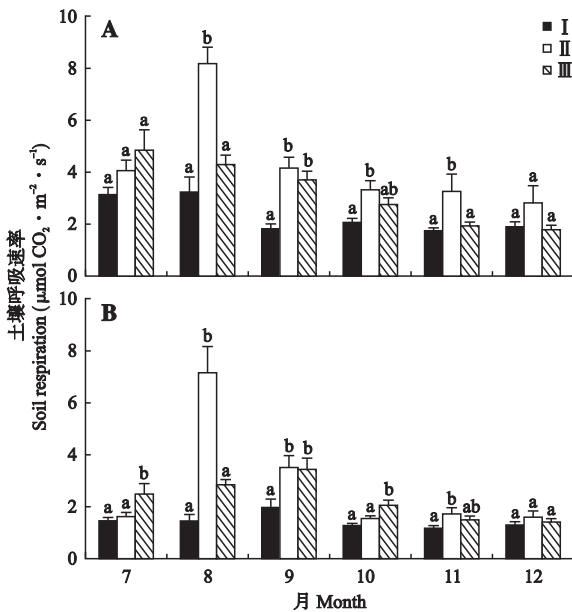


图2 凋落物处理条件下表层(A)和下层(B)土壤呼吸的季节变化

Fig. 2 Seasonal dynamics of litter treatments on topsoil and subsoil respiration (mean±SE, $n=36$)

I: 无凋落物 No litter; II: 针叶凋落物 Needle litter; III: 阔叶凋落物 Broadleaf litter.

2.4 可利用氮水平对土壤呼吸的影响

施氮处理显著改变了土壤呼吸(表1)。试验的6个月内,对照、加氮和减氮处理的土壤呼吸均值分别为 (2.06 ± 0.12) 、 (2.15 ± 0.13) 和 (2.17 ± 0.13) $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,减氮和加氮处理均显著促进了总体土壤呼吸(表2),其中,减氮处理明显促进了表层土壤呼吸,在下层土壤中也有此格局,但是统计分析上不显著;土壤可利用氮的增加对两种土壤类型的呼吸都有促进作用,但是统计检验不显著(图3)。

3 讨论

3.1 季节变化对土壤呼吸的影响

本研究中,土壤呼吸与季节变化有明显的相关关系,夏季高、冬季低;由于该地区雨热同期,即雨季

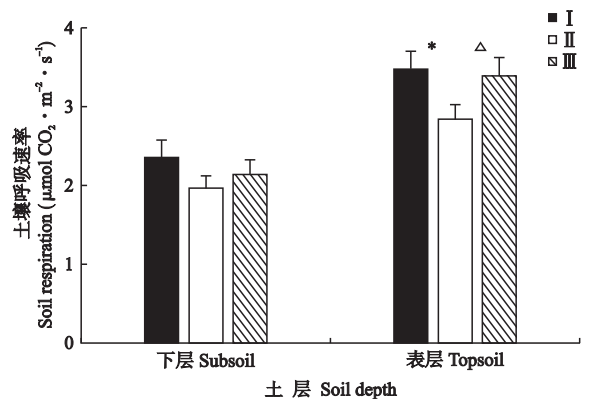


图3 氮处理对不同层次土壤呼吸的影响

Fig. 3 Seasonal dynamics of nitrogen treatments on topsoil respiration (mean±SE, $n=108$).

I: 减氮处理 Nitrogen removal; II: 对照 Control; III: 加氮处理 Nitrogen addition. * $P < 0.05$; $\Delta P = 0.055$.

高、旱季低。随着季节的变化,土壤呼吸受到温、湿度的共同影响,能够解释土壤呼吸速率变异的 70% ~ 97%^[21]。在北半球大多数森林生态系统中,土壤呼吸通常在 2 月最小,7、8 月最大,季节性变化趋势呈单峰曲线^[22-23],本研究结果趋势与此相符。此外,下层土壤的碳含量显著小于表层土壤,因此下层土壤有机碳的分解强度可能远低于表层土壤,其土壤呼吸的季节变化也没有表层土壤呼吸强烈。

3.2 叶凋落物对土壤呼吸的影响

本研究中,阔叶处理添加 $1388.89 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,约为年均量的 1.5 倍;针叶处理添加 $694.44 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,大致是天然凋落量的 3 倍,目的是提高凋落物对土壤有机碳的贡献量、增强其对稳定的土壤碳的激发效应。7—11 月,凋落物添加显著提高了表层和下层土壤及凋落物的总呼吸通量。与对照相比,凋落物添加组土壤呼吸通量的增加主要来自凋落物的自身分解,但不排除凋落物添加对稳定的土壤碳的激发效应的影响。到 12 月,凋落物添加处理已不再对呼吸有显著影响,与凋落物能够持续促进土壤呼吸的预测不一致。其原因可能是凋落物向土壤系统的碳输入增加,同时激发作用引发的土壤稳定碳分解也增加,输入、输出平衡导致土壤碳储量和土壤呼吸没有发生显著变化;另外,亚热带地区凋落物分解速度很快^[24],凋落物在土壤表层就已分解完毕,只有极少量的(甚至没有)碳输入土壤。下层土壤的碳含量(0.45%)远小于表层土壤碳含量(1.83%),也说明淋溶作用对土壤下层碳的贡献很小。12 月时样地地表已无可辨认的凋落物残体,即使凋落物的分解产物向土壤贡献了数量可观的碳。当月土壤呼吸通量降至空白处理水平的现象也表明,这部分凋落物来源的碳在短期内已完全分解^[25]。

前人认为,大气中 CO_2 浓度的增加将促进植物生长^[3],导致更多的凋落物输入土壤。本研究中,凋落物的输入只能短期改变土壤呼吸通量;即使增加地表输入量,叶凋落物对土壤碳的分解和积累也未必能形成长期的影响^[8]。土壤稳定碳真正的来源可能是根系凋落物^[7]和微生物代谢产物^[26]。本研究没有使用同位素标记的凋落物和土壤,无法区分凋落物输入碳和原有土壤有机质的周转,未来的研究可以通过同位素手段来阐明凋落物对土壤碳的贡献。

本研究中叶凋落物的分解有两点结果有别于同类生态系统中其他研究:其一,叶凋落物分解速度明显快于同类研究结果^[27],可能是因为本研究中凋落物直接放置在地表,通过铁架纱网防止天然凋落物

进入,而未使用其他分解试验采用分解包(袋),有利于土壤动物进入样地。试验期间观察到明显的土壤动物活动痕迹,因此不能排除土壤动物对凋落物分解产生的加速或者搬作用^[28]。其二,针叶凋落物比阔叶凋落物对土壤呼吸的促进作用更强。这可能是由于阔叶和针叶凋落物分解过程不同,淋溶导致阔叶凋落物分解过程中生物量损失较大,而对针叶的影响十分有限^[29];另一方面,淋溶得到的可溶性物质依赖于降雨,降雨后其对土壤呼吸有脉冲式的促进作用,但由于这类物质的分解速度很快,脉冲促进的持续时间很短,而土壤呼吸测量通常选在无雨的时段,因此可能没有监测到这种脉冲促进作用。

3.3 氮处理对土壤呼吸的影响

在本研究中,氮处理显著影响了土壤呼吸。加氮和减氮处理均促进了土壤呼吸(表 1,表 2,图 3)。前人研究表明,在苔原^[30]和泥炭沼^[31]等生态系统,加氮可以增加土壤呼吸。Bowden 等^[32] 13 年的施肥试验表明,施肥前期显著促进了土壤呼吸。另外,施加氮肥可以使纤维素酶和葡萄糖苷酶等水解酶的活性增加^[31,33]。也有研究表明,加氮可以抑制土壤呼吸,但这种氮抑制作用于自养呼吸还是异养呼吸却说法不一^[34]。Haynes 和 Grower^[35] 以及 Olsson 等^[36] 通过环割试验得出施肥使植物自养呼吸下降,这与 N 添加后细根生物量显著减少^[34,37]的结论相一致,说明植物对土壤可利用氮增加的响应对策可能是减少吸收根的生产,施肥氮虽然导致细根(直径 < 2 mm)生物量下降,但植物的自养呼吸反而有可能升高^[37]。还有研究认为,加氮抑制了异养呼吸^[33,38],氮沉降使土壤微生物生物量减少^[37,39],并且抑制木质素酶、过氧化物酶和几丁质酶等以难分解有机物为底物的氧化酶的数量和活性^[31,33]。加氮促进土壤呼吸的结果多出现在寒带和温带生态系统中,主要是由于这类系统中土壤分解速率较慢,土壤碳中留存的易分解碳组分更多^[31],而这类碳的分解通常是氮限制的,增加可利用氮可以提高其分解速率。本研究所处的气候带为南亚热带,与前述同类试验结果所处的气候带有很大的差异。由于该地区气温高、水分条件好,亚热带森林中碳的分解速度很快,土壤碳中易分解组分的比例很小,加氮对易分解组分的促进作用不足以改变土壤碳总体的呼吸速率。然而,本试验中加氮对土壤呼吸有显著的促进作用,说明土壤中可以水解酶作用的碳组分比例并不少。与莫江明等^[40]在鼎湖山同类林型中的施肥试验结果相比,本试验施肥的剂量显著高于其最高浓度 $10 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2}$

· a⁻¹,但莫江明等试验中出现的施肥抑制呼吸的格局,在本试验中并没有出现.通常,加氮对土壤呼吸的抑制作用会随着剂量的增加而更加显著,本研期间,每个施氮处理地块上施用的无机氮剂量是 350 g · m⁻²,相当于 70 g N · m⁻² · a⁻¹,过多无机氮添加能够显著增加氮淋溶,因此输入的无机氮并不能有效地停留在系统内^[41];同时,试验时间与雨季重叠,强降雨造成的淋洗可能使土壤中实际可利用氮水平远低于添加的氮水平.本文没有测定土壤实际获得的可利用无机氮量,因此无法与同类试验定量比较.此外,本文通过隔根排除了自养呼吸,只关注微生物分解土壤有机质的过程,这也可能是与同系统中其他研究结果不同的原因之一.

减氮处理在总体上促进了土壤呼吸,这与以往的研究结果不同.Lamersdorf等^[42]通过8年的野外减氮试验发现,土壤呼吸增加影响自养呼吸贡献.本试验中隔除了根系,减氮处理对土壤呼吸的促进来源于异养呼吸,可能是在氮素不足情况下,微生物增加了对难分解有机质的分解,从中获取氮^[43],即“nitrogen mining”.Fontaine等^[44]认为,土壤有机质是一个“养分银行(nutrient bank model)”.当环境中缺乏养分时,微生物通过分解土壤有机质获得养分;当环境养分条件较好时,其激发效应小、分解减少,碳氮等被保存在有机质中.本研究中,减氮处理是对植物根系吸收作用的模拟,因此,减氮对土壤呼吸的促进作用可以看作根系通过吸收矿质氮减少土壤氮有效性,从而促进微生物从稳定的土壤有机氮中获取可利用氮.这种植物和微生物相互调控的关系通常是通过根际效应^[45]达成的,即植物经由根系分泌物为微生物提供碳源,微生物利用碳源获得能量来分解土壤有机质,再将得到的各种营养元素回报给植物^[46].

4 结 论

在南亚热带森林生态系统中,叶凋落物迅速在地表分解;一旦分解完毕,土壤呼吸水平即回归对照值,因此凋落物添加未必会增加稳定的土壤有机质.通过减少土壤可利用氮来模拟根系对氮的吸收能够显著促进土壤有机质的分解,支持“植物以碳交换土壤中的氮”的理论.未来研究中需要引进同位素标记方法,明确叶凋落物对土壤有机碳输入的影响,以及可利用氮水平对土壤各组分作用的响应机制.

参考文献

[1] Schlesinger WH. An overview of the C cycle// Lal R,

- ed. *Soils and Global Change*. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1995
- [2] Couteaux M, Bottner P, Berg B, *et al.* Litter decomposition, climate and litter quality. *Trends in Ecology and Evolution*, 1995, **10**: 63–66
- [3] Körner C, Arnone III JA. Responses to elevated carbon dioxide in artificial tropical ecosystems. *Science*, 1992, **257**: 1672–1675
- [4] Karlen DL, Cambardella CA. Conservation strategies for improving soil quality and organic matter storage// Carter MR, ed. *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*. Boca Raton: CRC Press, 1996
- [5] Campbell CA, Lafond GP, Zentner RP, *et al.* Influence of fertilizer and straw baling on soil organic matter in a thick black chernozem in Western Canada. *Soil Biology & Biochemistry*, 1991, **23**: 443–446
- [6] Carney KM, Hungate BA, Drake BG, *et al.* Altered soil microbial community at elevated CO₂ leads to loss of soil carbon. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, **104**: 4990–4995
- [7] Rasse DP, Rumpel C, Dignac MF. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil*, 2005, **269**: 341–356
- [8] Fontaine S, Bardoux G, Abbadie L, *et al.* Carbon input to soil decrease soil carbon content. *Ecology Letters*, 2004, **7**: 314–320
- [9] Fontaine S, Barot S, Barré P, *et al.* Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, 2007, **450**: 277–280
- [10] Waldrop MP, Zak DR, Sinsabaugh RL, *et al.* Nitrogen deposition modifies soil carbon storage through changes in microbial enzymatic activity. *Ecological Applications*, 2004, **14**: 1172–1177
- [11] Trumbore SE. Age of soil organic matter and soil respiration: Radiocarbon constraints on belowground C dynamics. *Ecological Applications*, 2000, **10**: 399–411
- [12] Batjes NH. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, **47**: 151–163
- [13] Salomé C, Nunan N, Pouteau V, *et al.* Carbon dynamics in topsoil and in subsoil may be controlled by different regulatory mechanisms. *Global Change Biology*, 2010, **16**: 416–426
- [14] Schöning I, Morgenroth G, Kögel-Knabner I. O/N-alkyl and alkyl C are stabilised in fine particle size fractions of forest soils. *Biogeochemistry*, 2005, **73**: 475–497
- [15] Chabbi A, Kögel-Knabner I, Rumpel C. Stabilized carbon in subsoil horizons is located in spatially distinct parts of the soil profile. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, **41**: 256–261
- [16] He J-H (何金海), Chen Z-Q (陈兆其), Liang Y-E (梁永奕). *Soils of Dinghushan Biosphere Reserve. Tropical and Subtropical Forest Ecosystem (热带亚热带森林生态系统研究)*, 1982, **1**: 25–38 (in Chinese)
- [17] Fang YT, Gundersen P, Mo JM, *et al.* Input and output of dissolved organic and inorganic nitrogen in subtropical forests of South China under high air pollution. *Biogeochemistry*, 2008, **5**: 339–352
- [18] Wang Z-H (王铸豪), He S-Y (何少颐), Song S-D (宋绍墩). *The vegetation of Dinghushan Biosphere Reserve. Tropical and Subtropical Forest Ecosystem (热带*

- 亚热带森林生态系统研究), 1982, **1**: 77-141 (in Chinese)
- [19] Mo JM, Brown S, Xue JH, *et al.* Response of litter decomposition to simulated nitrogen deposition in disturbed, rehabilitated and mature forests in subtropical China. *Plant and Soil*, 2006, **285**: 135-151
- [20] Yan J-H (闫俊华), Zhou G-Y (周国逸), Tang X-L (唐旭利), *et al.* Characteristics of litter and its contained water in three succession communities in Dinghushan Mountain, China. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2001, **12**(4): 509-512 (in Chinese)
- [21] Rey A, Pegoraro E, Tedeschi V, *et al.* Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 851-866
- [22] Fang C, Moncrief JB. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, **33**: 155-165
- [23] Raich JW, Potter CS, Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 800-812
- [24] Cleveland CC, Reed SC, Townsend AR. Nutrient regulation of organic matter decomposition in a tropical rain forest. *Ecology*, 2006, **87**: 492-503
- [25] Schlesinger WH, Lichter J. Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO₂. *Nature*, 2001, **411**: 466-469
- [26] Kögel-Knabner I. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, **34**: 139-162
- [27] Zhang D-Q (张德强), Ye W-H (叶万辉), Yu Q-F (余清发), *et al.* The litter-fall of representative forests of successional series in Dinghushan. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2000, **20**(6): 938-944 (in Chinese)
- [28] Hättenschwiler S, Jørgensen HB. Carbon quality rather than stoichiometry controls litter decomposition in a tropical rain forest. *Journal of Ecology*, 2010, **98**: 754-763
- [29] Berg B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *Forest Ecology and Management*, 2000, **133**: 13-22
- [30] Mack MC, Schuur EAG, Bret-Harte MS, *et al.* Ecosystem carbon storage in arctic tundra reduced by long-term nutrient fertilization. *Nature*, 2004, **431**: 440-443
- [31] Bragazza L, Freeman C, Jones T, *et al.* Atmospheric nitrogen deposition promotes carbon loss from peat bogs. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, **103**: 19386-19389
- [32] Bowden RD, Eavidson E, Savage K, *et al.* Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest. *Forest Ecology and Management*, 2004, **196**: 43-56
- [33] Carreiro MM, Sinsabaugh RL, Repert DA, *et al.* Microbial enzyme shifts explain litter decay responses to simulated nitrogen deposition. *Ecology*, 2000, **81**: 2359-2365
- [34] Phillips RP, Fahey TJ. Fertilization effects on fineroot biomass, rhizosphere microbes and respiratory fluxes in hardwood forest soils. *New Phytologist*, 2007, **176**: 655-664
- [35] Haynes BE, Gower ST. Belowground carbon allocation in unfertilized and fertilized red pine plantations in northern Wisconsin. *Tree Physiology*, 1995, **15**: 317-325
- [36] Olsson P, Linder S, Giesler R, *et al.* Fertilization of boreal forest reduces both autotrophic and heterotrophic soil respiration. *Global Change Biology*, 2005, **11**: 1745-1753
- [37] Jia SX, Wang ZQ, Li XP, *et al.* N fertilization affects on soil respiration, microbial biomass and root respiration in *Larix gmelinii* and *Fraxinus mandshurica* plantations in China. *Plant and Soil*, 2010, **333**: 325-336
- [38] Fisk MC, Fahey TJ. Microbial biomass and nitrogen cycling responses to fertilization and litter removal in young northern hardwood forests. *Biogeochemistry*, 2001, **53**: 201-223
- [39] van Diepen LTA, Lilleskov EA, Pregitzer KS, *et al.* Simulated nitrogen deposition causes a decline of intra- and extraradical abundance of arbuscular mycorrhizal fungi and changes in microbial community structure in northern hardwood forests. *Ecosystems*, 2010, **13**: 683-695
- [40] Mo JM, Zhang W, Zhu WX, *et al.* Response of soil respiration to simulated N deposition in a disturbed and a rehabilitated tropical forest in southern China. *Plant and Soil*, 2007, **296**: 125-135
- [41] Fang YT, Gundersen P, Mo JM, *et al.* Nitrogen leaching in response to increased nitrogen inputs in subtropical monsoon forests in southern China. *Forest Ecology and Management*, 2009, **257**: 332-342
- [42] Lamersdorf NP, Borken W. Clean rain promotes fine root growth and soil respiration in a Norway spruce forest. *Global Change Biology*, 2004, **10**: 1351-1362
- [43] Craine JM, Morrow C, Fierer N. Microbial nitrogen limitation increases decomposition. *Ecology*, 2007, **88**: 2105-2113
- [44] Fontaine S, Henault C, Aamor A, *et al.* Fungi mediate long term sequestration of carbon and nitrogen in soil through their priming effect. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, **43**: 86-96
- [45] Dijkstra FA, Cheng WX. Interactions between soil and tree roots accelerate long-term soil carbon decomposition. *Ecology Letters*, 2007, **10**: 1046-1053
- [46] Drake JE, Gallet-Budynek A, Hofmockel KS, *et al.* Increases in the flux of carbon belowground stimulate nitrogen uptake and sustain the long-term enhancement of forest productivity under elevated CO₂. *Ecology Letters*, 2011, **14**: 349-357

作者简介 孙丽娟,女,1986年生,硕士研究生.主要从事全球变化生态学与地下生态学研究. E-mail: sunlijuan_86@126.com

责任编辑 李凤琴