

DOI: 10.5846/stxb201908151704

左嫚, 陈奇伯, 黎建强, 杨关吕, 胡景, 孙轲. 枯落物输入变化对云南松林地 CO₂ 释放的影响. 生态学报, 2021, 41(11): 4552-4561.

Zuo M, Chen Q B, Li J Q, Yang G L, Hu J, Sun K. Effects of alteration in forest litter input on CO₂ release in *Pinus yunnanensis* forestland in central Yunnan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(11): 4552-4561.

枯落物输入变化对云南松林地 CO₂ 释放的影响

左 嫚, 陈奇伯, 黎建强*, 杨关吕, 胡 景, 孙 轲

西南林业大学生态与环境学院, 昆明 650224

摘要:为研究枯落物输入变化对云南松(*Pinus yunnanensis*)林地 CO₂ 释放的影响。本研究于 2018 年 3 月至 2020 年 2 月, 应用枯落物添加和去除实验(DIRT), 设置对照(CK)、双倍枯落物(DL)、去除枯落物(NL)、去除有机层和 A 层(O/A-Less)、去除根系(NR)和无输入(NI)6 个处理水平, 采用 Li-6400 便携式光合作用测量仪及 TRIME®-PICO 64/32 土壤温度水分测定仪对不同处理样地每月的 CO₂ 通量(R_s)、土壤温度和土壤水分(15cm)进行了测定。结果表明: (1) 不同处理样地 CO₂ 通量均呈现出明显的月变化, 7 至 8 月最高, 1 至 4 月最低, 平均值表现为 R_{s(DL)} = 8.10 μmol m⁻² s⁻¹ > R_{s(CK)} = 6.27 μmol m⁻² s⁻¹ > R_{s(NL)} = 5.44 μmol m⁻² s⁻¹ > R_{s(NR)} = 4.46 μmol m⁻² s⁻¹ > R_{s(O/A-Less)} = 3.86 μmol m⁻² s⁻¹ > R_{s(NI)} = 2.94 μmol m⁻² s⁻¹。(2) 与 CK 相比, DL 样地 CO₂ 通量升高了 29.12%, 而去除地上枯落物和地下根系样地 CO₂ 通量显著降低, CO₂ 通量平均变幅分别为 α(NR) = -28.85%, α(NI) = -53.14%, α(O/A-Less) = -38.46%, α(NL) = -13.29%。(3) 不同处理土壤水分和土壤温度均存在显著的月变化(P < 0.01), NL 和 O/A-Less 的土壤水分显著低于 CK, 而其余处理与 CK 间无显著差异(P > 0.05); 不同处理间土壤温度表现为 NR 和 NI 均显著高于 CK, 其余处理与 CK 间无显著差异(P > 0.05)。(4) 不同处理样地 CO₂ 通量与土壤温度呈显著指数相关(P < 0.01), 与土壤水分在 NI 和 O/A-Less 处理中无显著相关(P > 0.05); 与 CK 相比, NI、O/A-Less 和 NL 处理的 Q₁₀ 增加, 而 NR 和 DL 处理的 Q₁₀ 则降低; 不同处理林地 CO₂ 通量与土壤水热因子双因素模型能更好的解释林地 CO₂ 通量的变化。本研究表明枯落物不同处理通过改变土壤碳输入和土壤环境因子从而影响生态系统碳排放, 研究结果可为未来气候变化和人为干扰下云南松林的碳循环提供基础数据。

关键词:磨盘山; 云南松林; 枯落物输入变化; CO₂ 通量; 土壤温度; 土壤水分

Effects of alteration in forest litter input on CO₂ release in *Pinus yunnanensis* forestland in central Yunnan Plateau

ZUO Man, CHEN Qibo, LI Jianqiang*, YANG Guanlü, HU Jing, SUN Ke

School of Ecology & Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

Abstract: In order to study the impact of aboveground/underground litter input change on the release of CO₂ in *Pinus yunnanensis* forestland. From March 2018 to February 2020, a litter addition and removal experiment (DIRT) was carried out on the *Pinus yunnanensis* forest in the Mopan Mountains in central Yunnan Plateau. Treatments include normal litter input (CK), double litter (DL), removing aboveground litter (NL), removing organic layer and A layer (O/A-Less), no root inputs (NR), and removing aboveground litter and root inputs (NI). The Li-6400 portable photosynthesis meter (equipped with Li-6400-09 soil respiration chamber) and the TRIME®-PICO 64/32 soil temperature and moisture meter were used to measure the monthly CO₂ flux (R_s), soil temperature, and soil moisture (15 cm) of different treatment plots. The results show that: (1) the CO₂ flux of the six treatment plots showed obviously monthly changes, with the highest from

基金项目:国家自然科学基金项目(31660146); 云南省高校土壤侵蚀与控制重点实验室建设项目(云教科(2016)37 号); 西南林业大学博士基金项目(111705); 云南省科技厅农业联合面上项目(2018FG001-050)

收稿日期:2019-08-15; **网络出版日期:**2021-04-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: JQ-Lee83125@hotmail.com

July to August and the lowest from January to April. The average performance was $R_{s(DL)} > R_{s(CK)} > R_{s(NL)} > R_{s(NR)} > R_{s(O/A-Less)} > R_{s(NI)}$. (2) Compared with CK, the CO₂ flux of the DL plot increased by 29.12%, while the CO₂ flux of the ground litter removal and underground root plots were significantly reduced, and the average change of the CO₂ flux was $\alpha(NR) = -28.85\%$, $\alpha(NI) = -53.14\%$, $\alpha(O/A-Less) = -38.46\%$, $\alpha(NL) = -13.29\%$. (3) There were significantly monthly changes in soil moisture and soil temperature in the six treatments ($P < 0.01$). The soil moisture in NL and O/A-Less was significantly lower than that in CK, while there was no significant difference between the remaining treatments and CK. The soil temperature between different treatments showed that both NR and NI were significantly higher than CK, and there was no significant difference between the other treatments and CK ($P > 0.05$). (4) The CO₂ flux in different treatment plots was significantly exponentially correlated with soil temperature ($P < 0.01$), but not significantly correlated with soil moisture in NI and O/A-Less treatments ($P > 0.05$). Compared with CK (soil respiration temperature sensitivity $Q_{10} = 2.39$), NI, O/A-Less and NL treatments improved Q_{10} , while NR and DL treatments reduced Q_{10} , which were 3.86, 3.56, 2.48, 2.32, and 2.01. The two-factor model of forestland CO₂ flux and soil water-heat factor under different treatments can better explain the changes of forestland CO₂ flux. The change of litter input has a significant effect on the forestland CO₂ flux by changing the forestland soil carbon input and soil environmental factors.

Key Words: Mopan Mountain; *Pinus yunnanensis* forest; alteration in forest litter; soil CO₂ flux; soil temperature; soil moisture

在全球气候变化和人类活动影响加剧的背景下,气候变暖、温室气体 CO₂ 浓度的升高和全球降雨量的重新分配改变了森林生态系统的生物多样性和森林生产力^[1-3],从而导致森林枯落物输入量增加^[4-7]。相反,全球大气污染、干旱胁迫、森林病原体入侵、人为移除枯落物和控制火烧等人类活动对森林生态系统的影响加剧,则降低森林生产力和减少林地枯落物量^[7]。这种枯落物输入变化使森林土壤地表覆盖层和地下根系周转量发生了重要的变化,进而对土壤功能产生了重要的影响^[8-10]。森林土壤呼吸作为土壤中的 CO₂ 返回大气的主要途径,对陆地生态系统中碳平衡起着重要的调控作用^[11],其微小的变化都将显著影响大气 CO₂ 量和全球碳平衡^[12]。枯落物添加和去除试验(DIRT, Detritus input and removal treatments)为研究全球气候变化和人类活动影响加剧背景下地上/地下枯落物输入变化对林地 CO₂ 释放的影响提供了一个较为全面的研究方式方法^[13]。在森林生态系统中添加和去除枯落物显著改变了林地 CO₂ 通量^[7,14-15],主要是因为枯落物添加和去除改变了土壤碳源的供给,并改变了土壤的水热条件^[15-16]。同时,添加和去除枯落物通过改变土壤微生物的数量和活性而直接或间接影响土壤呼吸^[13]。此外,由于枯落物数量的变化导致的枯落物分解速率的变化和对枯落物输入对土壤有机质所产生的“激发效应”也会对林地 CO₂ 通量产生影响^[13,17]。目前,国内外开展了一系列的枯落物添加和去除对土壤呼吸影响的研究^[7,13,18],树种主要有杉木^[19]、枫香和樟树^[20]、油松^[21]等,然而枯落物添加和去除对土壤呼吸的影响会因森林类型^[15]、试验周期^[1]、气候条件、枯落物性质、微生物和土壤动物^[22]等的不同而异。因此,本研究以滇中高原磨盘山云南松林为研究对象,对枯落物输入变化条件下 CO₂ 释放量进行了研究。

云南松林在云南地区约占森林的面积的 70%^[23],是云南省乃至我国西南地区最重要的森林资源^[24],对于云南松土壤呼吸的研究主要包括人工林和天然林的对比研究及增加降水对云南松林土壤呼吸的影响^[25-26],而目前还未见枯落物输入变化对云南松林地 CO₂ 释放影响的研究。因此,本研究以滇中高原磨盘山云南松林为研究对象,采用枯落物添加和去除实验,即人为控制土壤中枯落物的输入量,通过分析云南松林在改变枯落物输入后土壤呼吸变异规律及影响因子的动态变化,探讨了枯落物输入变化对云南松林地 CO₂ 释放量的影响,为科学评价云南松森林生态系统碳收支平衡及其对气候变化和人类活动影响反馈作用的科学预测提供理论依据。

1 试验地概况

1.1 研究区概况

研究区位于云南省玉溪市磨盘山森林生态系统国家定位观测研究站内(23°46′18″—23°54′34″N, 101°16′06″—101°16′12″E)。滇中高原磨盘山是北亚热带与南亚热带的过渡地区,海拔高差在 1260.0—2614.4 m 之间,植被垂直分布特征明显。研究区年平均气温为 15 ℃,年平均雨量为 1050 mm,有较明显的旱(11 月—次年 4 月)雨(5 月—10 月)季之分。研究区土壤以红壤为主,高海拔地区有黄棕壤分布。

1.2 研究样地概况

在研究区云南松天然林内选择具有代表性、立地条件基本一致的地段作为实验样地,海拔 2151 m,坡向 NE51°,坡度约 10°。研究区云南松林平均树龄为 26 年,平均树高为 13.45 m,平均胸径为 18.43 cm,郁闭度约 65%;伴生树种有槲栎(*Quercus aliena*)、木荷(*Schima superba*)、越橘(*Vaccinium vitis-idaea* Linn.)等;林下植被稀少,灌木主要有碎米花杜鹃(*Rhododendron spiciferum*)、野山楂(*Crataegus cuneata* Sieb. et Zucc.)、黑果菝葜(*Smilax glaucochina* Warb.)等,草本植物主要有薹草(*Carex* spp),藤本植物蓬莱葛(*Gardneria multiflora* Makino)等,林下灌草盖度约 15%。

2 研究方法

2.1 实验设计

于 2018 年 1 月,在研究区内设置了 1 个对照和 5 个枯落物控制共 6 种处理(表 1)。每个处理 3 次重复,样地面积为 5 m × 10 m,各处理样地随机排列,其中每个样地设置 3 个 1 m × 1 m 观测小区。

表 1 不同枯落物处理样地描述
Table 1 Description of DIRT treatments

处理 Treatments	描述 Description
去除根系 No Roots, NR	采用挖壕沟方法排除根系(壕沟深度达到土壤 C 层顶部),维持地上部分枯落物正常输入
无输入 No Inputs, NI	采用挖壕沟方法排除根系,并每月定期移除地上枯落物,即无地上枯落物输入,也无地下根系输入
去除有机层和 A 层 O/A-Less	除去有机层和 A 层的上部,并且每月定期移除地上部分枯落物
去除枯落物 No Litter, NL	每月定期移除地上部分枯落物
对照 Normal Litter Inputs, CK	维持正常情况的枯落物输入
双倍枯落物 Double Litter, DL	将 NL 小区中的枯落物叶加入本小区,使地上部分的枯落物输入加倍

2.2 林地 CO₂ 通量及土壤温湿度的测定

于 2018 年 3 月至 2020 年 2 月连续观测 2 a,每月于月初选择晴朗天气测定,如遇降雨等气象因素可提前或延迟 1—3 d,测定时段为上午 9:00—11:00,分别对林地 CO₂ 通量、土壤温度和土壤水分进行测定。林地 CO₂ 通量(μmol m⁻² s⁻¹)采用 Li-6400 便携式光合作用测量仪(配备 Li-6400-09 土壤呼吸室)测定,测定前提前 24h 将土壤呼吸圈(内径 10 cm × 高 5 cm 的 PVC 管)嵌入每个观测小区内枯落物和土壤中,以减少因底座的嵌入对土壤的扰动。并在在呼吸圈附近采用 TRIME® -PICO 64/32 自动测定仪同步测定 15 cm 处的土壤水分(体积含水量,%)和土壤温度(℃)。

2.3 数据处理与统计分析

采用 Excel2010 软件进行数据整理和图表制作。采用 SPSS21.0 单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)进行差异显著性检验,采用回归分析对林地 CO₂ 通量与土壤温湿度的关系进行分析。

3 结果与分析

3.1 不同处理条件下林地 CO₂ 通量动态变化

枯落物不同处理条件下林地 CO₂ 通量动态变化见图 1,不同枯落物处理林地 CO₂ 通量均有显著差异($P <$

0.01)。不同处理林地 CO₂ 通量变化规律相似,随季节呈有规律的变化,不同月份双倍枯落物处理的林地 CO₂ 通量均高于其余处理,而无输入(NI)处理样方的林地 CO₂ 通量均低于其他处理,且不同处理间林地 CO₂ 通量差异显著($P < 0.01$)。不同处理样地平均 CO₂ 通量依次为: $R_{s(DL)} = 8.10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} > R_{s(CK)} = 6.27 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} > R_{s(NL)} = 5.44 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} > R_{s(NR)} = 4.46 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} > R_{s(O/A-Less)} = 3.86 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} > R_{s(NI)} = 2.94 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

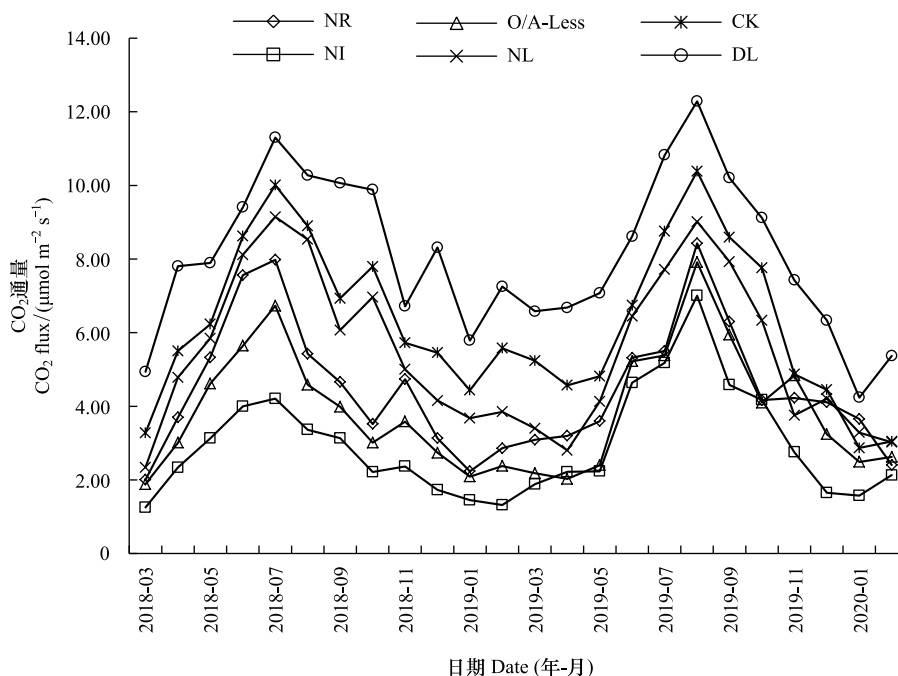


图1 枯落物不同处理条件下林地 CO₂ 通量月动态

Fig.1 Monthly variations of CO₂ flux in DIRT treatments

NR: 去除根系 No Roots; NI: 无输入 No Inputs; O/A-Less: 去除有机层和 A 层 Organic layer and the upper 20 cm of the A layer were removed; NL: 去除枯落物 No Litter; CK: 对照 Normal Litter Inputs; DL: 双倍枯落物 Double Litter; 图中数据为平均值($n = 9$)

林地 CO₂ 通量变化幅度用下式表示: 变幅($\alpha\%$) = $100 \times (\text{不同处理 CO}_2 \text{ 通量} - \text{对照处理 CO}_2 \text{ 通量}) / \text{对照处理 CO}_2 \text{ 通量}$ 。不同枯落物处理对云南松林地 CO₂ 通量的影响显著, DL 样方 CO₂ 通量变化幅度为正值, 即 DL 样方 CO₂ 通量增加, 而其余样方 CO₂ 通量变化幅度均为负值, 即林地 CO₂ 通量均降低。在整个观测期内, 去除枯落物和根系处理的 CO₂ 通量年均变幅分别为 $\alpha_{(NR)} = -28.85\%$, $\alpha_{(NI)} = -53.14\%$, $\alpha_{(O/A-Less)} = -38.46\%$, $\alpha_{(NL)} = -13.29\%$, 而添加枯落物处理的 CO₂ 通量年均变幅 $\alpha_{(DL)} = 29.12\%$ (图 2)。

3.2 不同处理条件下土壤水分和土壤温度动态变化

观测期内, 不同枯落物处理的土壤水分含量随季节呈现有规律的变化(图 3)。整体来看, 土壤水分含量在不同处理之间存在显著的月变化($P < 0.01$), 且不同处理间土壤水分含量差异显著($P < 0.05$), NL 和 O/A-Less 的土壤水分含量显著低于 CK ($P < 0.05$), 而 NR、NI 和 DL 处理与 CK 差异不显著($P > 0.05$), 平均土壤体积含水量依次为: $W_{(DL)} = 28.86\% > W_{(NI)} = 28.75\% >$

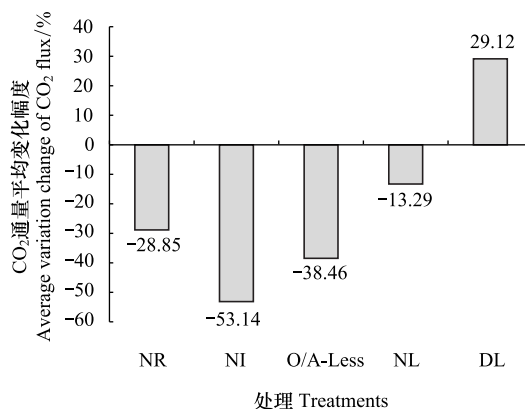


图2 枯落物不同处理条件下林地 CO₂ 通量平均变化幅度

Fig.2 The average variation change of CO₂ flux in DIRT treatments

NR: 去除根系 No Roots; NI: 无输入 No Inputs; O/A-Less: 去除有机层和 A 层 Organic layer and the upper 20 cm of the A layer were removed; NL: 去除枯落物 No Litter; CK: 对照 Normal Litter Inputs; DL: 双倍枯落物 Double Litter; 图中数据为平均值($n = 216$)

$W_{(NR)} = 28.73\% > W_{(CK)} = 27.50\% > W_{(O/A-Less)} = 24.27\% > W_{(NL)} = 21.65\%$ 。

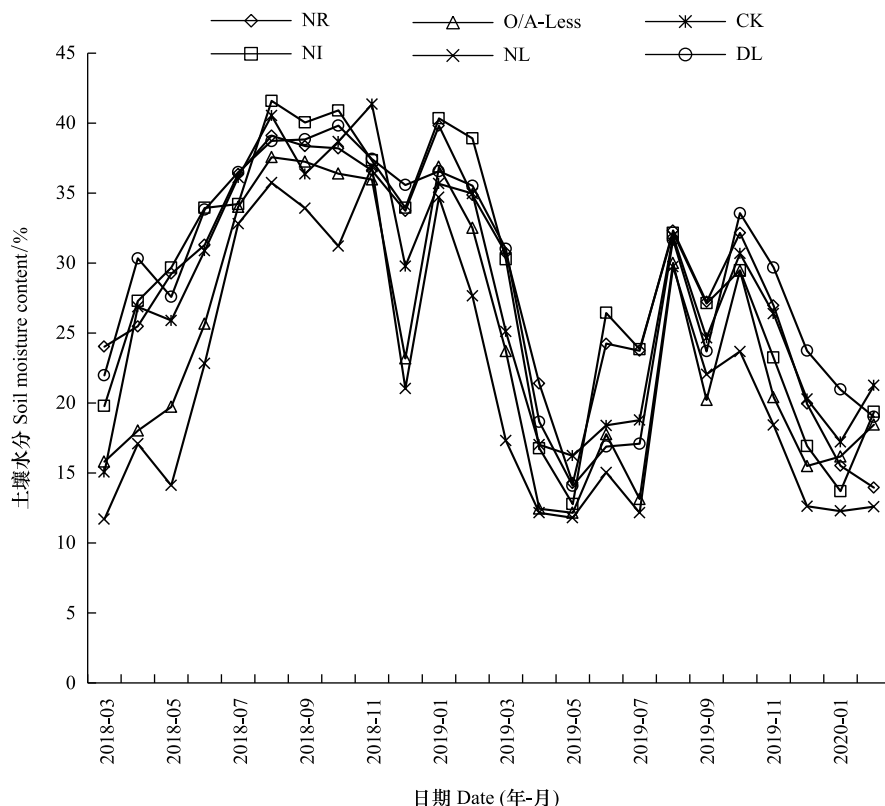


图3 枯落物不同处理条件下土壤水分月动态

Fig.3 Monthly variations of soil moisture in DIRT treatments

NR: 去除根系 No Roots; NI: 无输入 No Inputs; O/A-Less: 去除有机层和A层 Organic layer and the upper 20 cm of the A layer were removed; NL: 去除枯落物 No Litter; CK: 对照 Normal Litter Inputs; DL: 双倍枯落物 Double Litter; 图中数据为平均值 ($n=9$)

不同处理的土壤温度月变化达到了极显著差异水平 ($P<0.01$), 且整体变化趋势相似 (图4)。不同处理土壤最高温度年内变化与气温变化一致, 土壤最高温度出现在6—7月, 而最低土壤温度出现在1月。土壤温度在不同处理间差异显著 ($P<0.05$), NR 和 NI 均显著高于 CK 处理的土壤温度, 其余处理与 CK 间无显著差异 ($P>0.05$)。平均土壤温度大小顺序为 $T_{(NR)} = 19.42\text{ }^{\circ}\text{C} > T_{(NI)} = 18.88\text{ }^{\circ}\text{C} > T_{(O/A-Less)} = 18.37\text{ }^{\circ}\text{C} > T_{(NL)} = 18.32\text{ }^{\circ}\text{C} > T_{(DL)} = 18.26\text{ }^{\circ}\text{C} > T_{(CK)} = 18.21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3.3 不同处理条件下林地 CO_2 通量与水热因子的关系

本研究采用单因素指数模型、广义线性模型对林地 CO_2 通量与土壤温度和土壤水分的关系进行了分析 (表2)。建立的四个模型分别为: 模型 I $_{Q_{10}}$: $R_s = ce^{T\alpha_T}$; 模型 II: $R_s = c + \alpha_T T$; 模型 III: $R_s = c + \alpha_T T + \alpha_W W$; 其中 α_T 表示温度系数; α_W 表示水分的回归系数; c 表示常数; T 表示土壤温度 ($^{\circ}\text{C}$); W 表示体积含水量 (%)。

不同枯落物处理样地 CO_2 通量与土壤温度呈极显著 ($P<0.01$) 指数相关。 Q_{10} 为土壤呼吸的温度敏感性, 其物理意义表示温度每升高 10°C , 土壤呼吸速率增加的倍数。结合表2中指数模型 I $_{Q_{10}}$, 计算的6个处理土壤呼吸的温度敏感性分别为 $Q_{10(NR)} = 2.32$ 、 $Q_{10(NI)} = 3.86$ 、 $Q_{10(O/A-Less)} = 3.56$ 、 $Q_{10(NL)} = 2.48$ 、 $Q_{10(CK)} = 2.39$ 、 $Q_{10(DL)} = 2.01$, 与 CK 相比, NI、O/A-Less 和 NL 处理提高了 Q_{10} , 而 NR 和 DL 处理则降低了 Q_{10} 。

土壤温度和水分单因素线性回归模型结果显示, 土壤温度与林地 CO_2 通量的均达到了极显著 ($P<0.01$) 相关, 其相关系数以 NI 处理样地最大, 其次是 O/A-Less 处理 (在模型 I 中 $R^2_{(NI)} = 0.575$, $R^2_{(O/A-Less)} = 0.361$),

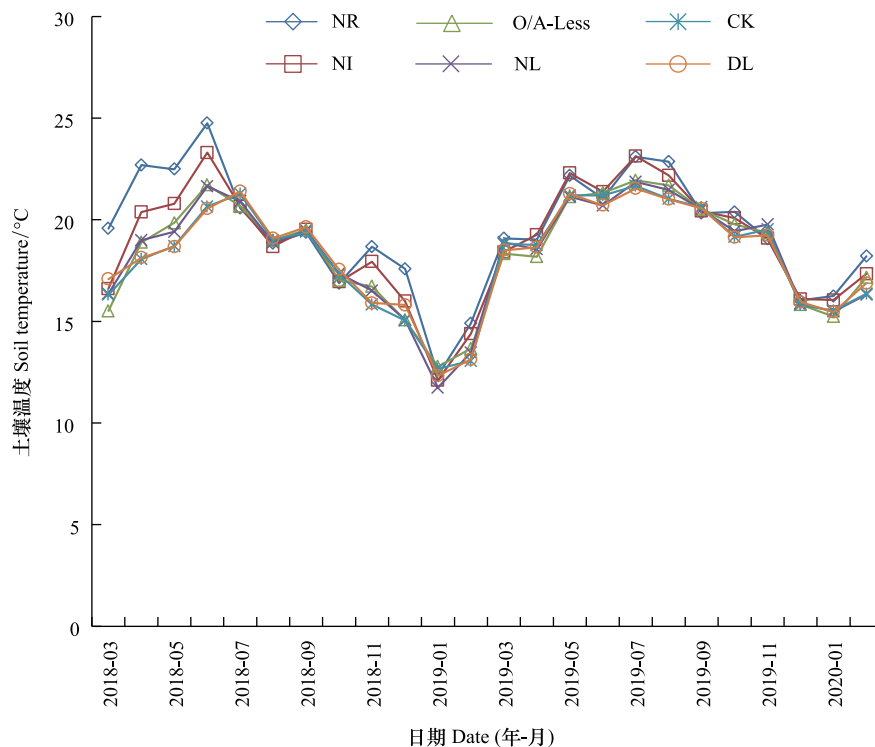


图 4 枯落物不同处理条件下土壤温度月动态

Fig.4 Monthly variations of soil temperature in DIRT treatments

NR: 去除根系 No Roots; NI: 无输入 No Inputs; O/A-Less: 去除有机层和 A 层 Organic layer and the upper 20 cm of the A layer were removed; NL: 去除枯落物 No Litter; CK: 对照 Normal Litter Inputs; DL: 双倍枯落物 Double Litter; 图中数据为平均值 ($n=9$)

表 2 不同处理条件下林地 CO₂ 通量与水热因子关系模型Table 2 Model of relationship between CO₂ flux and hydrothermal factors in DIRT treatments

处理方式 Treatments	模型 Model	系数及显著性 Coefficient and Significance					
		c	α_T	α_W	Q_{10}	R^2	P
NR	I _{Q10}	0.794	0.084		2.32	0.316	<0.01
	I	-2.721	0.370			0.308	<0.01
	II	3.028		0.05		0.046	<0.01
	III	-5.616	0.408	0.075		0.408	<0.01
NI	I _{Q10}	0.203	0.135		3.86	0.575	<0.01
	I	-4.293	0.383			0.488	<0.01
	II	2.306		0.022		0.017	>0.05
	III	-6.011	0.408	0.044		0.553	<0.01
O/A-Less	I _{Q10}	-0.324	0.127		3.56	0.361	<0.01
	I	-4.506	0.456			0.394	<0.01
	II	3.428		0.018		0.007	>0.05
	III	-5.972	0.481	0.041		0.433	<0.01
NL	I _{Q10}	-0.938	0.091		2.48	0.311	<0.01
	I	-3.381	0.481			0.336	<0.01
	II	3.127		0.107		0.189	<0.01
	III	-7.177	0.538	0.128		0.601	<0.01
CK	I _{Q10}	1.194	0.087		2.39	0.311	<0.01
	I	-3.182	0.519			0.332	<0.01

续表

处理方式 Treatments	模型 Model	系数及显著性 Coefficient and Significance				
		c	α_T	α_W	Q_{10}	P
DL	II	3.278		0.109		0.165
	III	-8.408	0.597	0.138		0.592
	I _{Q10}	2.142	0.070		2.01	0.289
	I	-1.998	0.553			0.316
	II	5.543		0.089		0.091
	III	-8.200	0.672	0.140		0.527

NR: 去除根系 No Roots; NI: 无输入 No Inputs; O/A-Less: 去除有机层和 A 层 Organic layer and the upper 20 cm of the A layer were removed; NL: 去除枯落物 No Litter; CK: 对照 Normal Litter Inputs; DL: 双倍枯落物 Double Litter; 表中每个样本重复数 $n = 216$

而土壤水分与林地 CO₂ 通量在 NI 和 O/A-Less 处理中无显著相关关系。从单个因子来看, 土壤水分对林地 CO₂ 通量的影响程度明显小于土壤温度。模型 III 为不同处理林地 CO₂ 通量与土壤水热(土壤温度、土壤含水量) 因子双因素模型, 综合反映了枯落物不同处理样地土壤水分和土壤温度对林地 CO₂ 通量的影响。不同处理林地 CO₂ 通量与土壤水热因子相关关系均达到极显著相关水平 ($P < 0.01$), 其相关系数 R^2 分别为: $R^2_{(NR)} = 0.408$, $R^2_{(NI)} = 0.553$, $R^2_{(O/A-Less)} = 0.433$, $R^2_{(NL)} = 0.601$, $R^2_{(CK)} = 0.592$, $R^2_{(DL)} = 0.527$ 。

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 枯落物输入变化对林地 CO₂ 通量的影响

枯落物不同处理对云南松林地 CO₂ 通量影响幅度按增减排序为: DL > NL > NR > O/A-Less > NI, 在整个观测期内与 CK 相比添加枯落物使林地 CO₂ 通量平均增加了 29.12%, 而去除枯落物则使林地 CO₂ 通量平均降低了 13.29%, 该结果表明枯落物输入变化对云南松林地 CO₂ 通量具有显著的影响。这种枯落物添加和去除引起林地 CO₂ 通量的增加和减小, 一方面可能是由于添加或去除枯落物改变了土壤有机碳的输入, 引起有机质分解的增加(正激发效应)或减少(负激发效应)^[13,17,27] 从而导致起林地 CO₂ 通量的变化。另一方面, 地上/地下枯落物的添加或去除通过影响土壤温度、土壤水分等环境因子间接影响林地 CO₂ 通量^[28]。因此, 枯落物的添加和去除可以直接和间接地影响林地 CO₂ 通量。在本研究中, 与 CK 相比, NR 的林地 CO₂ 通量平均降低了 28.85%, 这一结果低于 Sulzman 等^[27] 在针叶林中通过切根实验所得出的结果(58%), 但与朱凡等^[29] 在杉木林去除根系所得结果(30.4%) 相似。去除根系(NR) 处理的林地 CO₂ 通量显著降低, 一方面因为去除根系人为阻止了植物通过根系分泌向土壤中输入碳, 另一方面是去除根系减少了根枯落物的数量和降低了根系活性。根系分泌的有机物和根枯落物是土壤微生物重要的能量和物质来源, 其数量的多少会对土壤微生物数量, 特别是根际微生物的量产生重要影响, 去除根系后随着微生物可利用碳源的减少从而使土壤微生物数量和活性降低^[12]。此外, 碳源的改变及环境因子的变化将通过改变自养呼吸(根呼吸和根际微生物呼吸) 与异养呼吸(土壤微生物及动物呼吸) 的速率和组成从而影响该处理条件下林地 CO₂ 通量^[30]。O/A-Less 样方的林地 CO₂ 通量与 CK 相比降低了 38.46%, 这表明去除的有机层和 A 层上部与林地 CO₂ 通量变化有直接关系, 这是因为去除枯落物的输入及有机层和 A 层上部, 使土壤温度和土壤水分等环境因子和土壤呼吸组分占比发生改变, 破坏了正常输入的呼吸平衡关系, 进而影响该处理条件下的林地 CO₂ 通量^[13]。NI 处理比 CK 降低了 53.14%, 这可能是由于 NI 处理释放的 CO₂ 主要来源于土壤有机质的分解, 已有研究表明 NI 处理下土壤中难分解碳库随时间流逝而降低^[31]。

4.1.2 枯落物不同处理条件下土壤水热因子对林地 CO₂ 通量的影响

林地 CO₂ 通量的变化受土壤温度、水分的变化的显著影响^[32], 因此林地 CO₂ 通量月变化与全年干湿季节变化密切相关^[26]。土壤水分可通过影响根系和微生物的生理过程, 也可通过影响底物和氧气的扩散从而对

林地 CO₂ 通量产生影响,土壤作为土壤中水分运动和气体扩散通道,其细微地改变,也会影响到林地 CO₂ 通量^[33]。本研究中不同处理土壤水分有显著的月变化,其年均土壤体积含水率表现为 DL > NI > NR > CK > O/A-Less > NL。NI 及 NR 处理的土壤体积含水率均高于对照,这可能与挖壕沟处理阻碍了根系对水分的吸收,同时隔离挡板阻止了土壤水分的流失,而增加了土壤含水量。DL 处理样地的土壤水分均高于其他处理,这是由于双倍的地上枯落物对截留部分降雨并减少土壤水分蒸发的作用明显有所提升^[34],从而 DL 样方的土壤水分比 CK 高。NL 和 O/A-Less 的土壤水分显著低于 CK 处理,这是因为 NL 和 O/A-Less 处理无枯落物截留与防止蒸发,且两种处理均保留了根系,根系的存在会使土壤水分参与植物的蒸腾作用^[35]。本研究中土壤水分对 NI 和 O/A-Less 的 CO₂ 通量影响不显著 ($P>0.05$),这主要是因为土壤水分含量只有在超出土壤微生物活动和土壤根系生长耐性的情况下才会抑制林地 CO₂ 通量^[27,36],而 NI 和 O/A-Less 样地的土壤水分含量仍在土壤微生物活动和土壤根系生长耐性的范围内。

土壤温度主要通过对土壤微生物、根呼吸、土壤酶及其活性的影响从而对林地 CO₂ 通量产生影响^[37]。本研究不同枯落物处理对土壤温度有一定影响,且不同处理的土壤温度月变化显著 ($P<0.05$) (图 4)。不同处理条件下土壤温度与林地 CO₂ 通量的指数拟合或线性拟合 R^2 均在 0.289—0.575 范围内,且相关性显著 ($P<0.05$),这表明林地 CO₂ 通量与土壤温度密切相关,而造成不同处理与相应林地 CO₂ 通量的相关性存在差异的原因可能是不同处理方式通过改变林地下垫面的覆盖情况导致其他环境因子也发生改变,进而导致各因子的交互作用发生改变。已有研究表明单因子很难客观地描述林地 CO₂ 通量的复杂变化,土壤温湿度对森林生态系统林地 CO₂ 通量的交互作用过程,比单个因子对林地 CO₂ 通量的影响更大^[26-27],因此本研究中土壤温湿度与林地 CO₂ 通量的线性关系复合模型拟合 R^2 为 0.408—0.601,均达到了极显著 ($P<0.01$) 相关水平,比单因模型能更好的预测林地 CO₂ 通量变化。但在本实验中,单因子或双因子与林地 CO₂ 通量 R^2 均在 0.70 以下,这是因为土壤呼吸包括了多个物理、化学和生物过程,而不同生物和非生物因子,如底物供应、湿度、温度、氧气供应、氮、碳氮比、土壤 pH 和土壤质地又对土壤呼吸过程产生影响,且不同的因子间存在交互作用^[37],因此,土壤呼吸受到多个因子及其交互作用的影响,进行多因子的控制实验来检验多个因子对土壤呼吸的交互作用是非常重要的^[38]。

本研究中不同枯落物处理的林地 CO₂ 通量与土壤温度显著相关,随着土壤温度的升高,林地 CO₂ 通量呈现增长趋势。本研究 7 月至 8 月不同枯落物处理的林地 CO₂ 通量达全年最高,这是由于此时正值夏季,也是降水量最多的季节,土壤温度和水分维持在较高水平,促进了土壤中异养呼吸和自养呼吸作用^[37],从而使得林地 CO₂ 释放量达到全年最大。而土壤 CO₂ 通量在 1—4 月达到最低,该月份的土壤温度较低,而且正值旱季,降雨量小,土壤水分含量较低,土壤中异养呼吸和自养呼吸作用都维持在较低水平。不同处理林地 CO₂ 通量呈现显著月动态变化,这是因为在植被和土壤类型相同情况下,土壤水分和温度是土壤微生物数量和活性的主要影响因素^[39],而土壤释放的 CO₂ 中部分来自土壤微生物的活动。此外,土壤温湿度不仅作用于土壤微生物,还会影响其他环境因子,共同导致林地 CO₂ 的释放量发生变化^[23,37-38]。

林地 CO₂ 通量对温度的敏感性通常用 Q_{10} 来描述,且因地理位置和生态系统类型等不同相差很大^[40],本试验不同处理样地土壤 Q_{10} (表 2) 介于中国森林 Q_{10} 变化范围 (1.10—5.18) 内^[41]。不同处理林地按敏感程度排序依次为 $Q_{10}(\text{NI}) > Q_{10}(\text{O/A-Less}) > Q_{10}(\text{NR}) > Q_{10}(\text{CK}) > Q_{10}(\text{DL})$ 。从这一结果来看,NI 处理的 Q_{10} 值最高,其次是 O/A-Less,这可能是因为 NI 和 O/A-Less 处理条件下土壤难分解碳的含量高,土壤碳分解速率降低。已有研究表明,越难分解的碳 Q_{10} 越大且 Q_{10} 值和 CO₂ 的产生呈负相关^[42],结合本试验 NI 和 O/A-Less 的林地 CO₂ 通量结果也印证了这一结论 (图 1)。而 O/A-Less 的 Q_{10} 仅次于 NI 的原因可能是因为 O/A-Less 处理中根系呼吸对土壤呼吸的贡献较大,而根系呼吸对温度变化较为敏感^[43-44]。整体来看,无枯落物覆盖处理的温度敏感性明显高于有枯落物覆盖处理的温度敏感性,且 NR 与 CK 的温度敏感性比较接近,尤以 DL 处理的温度敏感性 ($Q_{10}=2.01$) 最低。本研究结果表明加倍地表枯落物条件下林地 CO₂ 通量对升温不敏感,这可能是因为地表枯落物加倍后由于枯落物层较厚而抑制了土壤中 CO₂ 的排放^[45]。此外,已有研究结果表明 Q_{10} 在土壤温

度、土壤水分过高或过低时降低^[46],因此地表枯落物的增加使土壤水分和土壤温度增加导致 Q_{10} 降低,使得加倍地表枯落物条件下林地 CO_2 通量对升温不敏感。

4.2 结论

本研究中,枯落物加倍显著促进了林地 CO_2 的释放,而去除地上枯落物和地下根系样地的 CO_2 通量显著降低。不同处理中,NL 和 O/A-Less 的土壤水分显著低于 CK ($P<0.05$),而 NR 和 NI 的土壤温度均显著高于 CK ($P<0.05$)。与 CK 相比,NI、O/A-Less 和 NL 处理的 Q_{10} 增加,而 NR 和 DL 处理的 Q_{10} 则降低。林地 CO_2 通量与土壤温度呈显著指数相关 ($P<0.01$),而土壤水分与林地 CO_2 通量在 NI 和 O/A-Less 处理中无显著相关性 ($P>0.05$)。本研究表明枯落物不同处理通过改变土壤碳输入和土壤环境因子从而影响生态系统碳排放,研究结果可为未来气候变化和人为干扰下云南松林的碳循环提供基础数据。

参考文献 (References):

- [1] Sayer E J. Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems. *Biological Reviews*, 2006, 81 (1): 1-31.
- [2] Langley J A, Megonigal J P. Ecosystem response to elevated CO_2 levels limited by nitrogen-induced plant species shift. *Nature*, 2010, 466(7302): 96-99.
- [3] Rózsa P, Novák T. Mapping anthropic geomorphological sensitivity on a global scale. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 2011, 55(1): 109-117.
- [4] Wang F G, Xu Y J, Dean T J. Projecting climate change effects on forest net primary productivity in subtropical Louisiana, USA. *AMBIO*, 2011, 40(5): 506-520.
- [5] Finzi A C, Allen A S, DeLucia E H, Ellsworth D S, Schlesinger W H. Forest litter production, chemistry, and decomposition following two years of free-air CO_2 enrichment. *Ecology*, 2001, 82(2): 470-484.
- [6] Allen A S, Andrews J A, Finzi A C, Matamala R, Richter D D, Schlesinger W H. Effects of free-air CO_2 enrichment (face) on belowground processes in a *Pinus taeda* forest. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 437-448.
- [7] Nadelhoffer K J, Boone R D, Bowden R D, Canary J D, Kaye J, Micks P, Ricca A, Aitkenhead J A, Lajtha K, McDowell W H. The DIRT experiment: litter and root influences on forest soil organic matter stocks and function//Foster D, Aber J, eds. *Forest Landscape Dynamics in New England: Ecosystem Structure and Function as a Consequence of 5000 years of Change*. Synthesis Volume of the Harvard Forest LTER Program. Oxford: Oxford University Press, 2004.
- [8] Thomas F M, Blank R, Hartmann G. Abiotic and biotic factors and their interactions as causes of oak decline in Central Europe. *Forest Pathology*, 2002, 32(4/5): 277-307.
- [9] Chapin III F S, McFarland J, McGuire A D, Euskirchen E S, Ruess R W, Kielland K. The changing global carbon cycle: linking plant-soil carbon dynamics to global consequences. *Journal of Ecology*, 2009, 97(5): 840-850.
- [10] Carrillo Y, Pendall E, Dijkstra F A, Morgan J A, Newcomb J M. Carbon input control over soil organic matter dynamics in a temperate grassland exposed to elevated CO_2 and warming. *Biogeosciences Discussions*, 2010, 7(2): 1575-1602.
- [11] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature*, 2010, 464(7288): 579-582.
- [12] Burton A J, Pregitzer K S. Field measurements of root respiration indicate little to no seasonal temperature acclimation for sugar maple and red pine. *Tree Physiology*, 2003, 23(4): 273-280.
- [13] 王清奎. 碳输入方式对森林土壤碳库和碳循环的影响研究进展. *应用生态学报*, 2011, 22(4): 1075-1081.
- [14] Sayer E J, Powers J S, Tanner E V J. Increased litterfall in tropical forests boosts the transfer of soil CO_2 to the atmosphere. *PLoS One*, 2007, 2 (12): e1299.
- [15] Wang Q K, He T X, Wang S L, Liu L. Carbon input manipulation affects soil respiration and microbial community composition in a subtropical coniferous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 178-179: 152-160.
- [16] Leff J W, Wieder W R, Taylor P G, Townsend A R, Nemergut D R, Grandy A S, Cleveland C C. Experimental litterfall manipulation drives large and rapid changes in soil carbon cycling in a wet tropical forest. *Global Change Biology*, 2012, 18(9): 2969-2979.
- [17] Kuzyakov Y. Priming effects: interactions between living and dead organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(9): 1363-1371.
- [18] 李晓杰, 刘小飞, 熊德成, 林伟盛, 林廷武, 施友文, 谢锦升, 杨玉盛. 中亚热带杉木人工林和米槠次生林凋落物添加与去除对土壤呼吸的影响. *植物生态学报*, 2016, 40(5): 447-457.
- [19] 王光军, 田大伦, 闫文德, 朱凡, 项文化, 梁小翠. 改变凋落物输入对杉木人工林土壤呼吸的短期影响. *植物生态学报*, 2009, 33(4): 739-747.

- [20] 王光军, 田大伦, 闫文德, 朱凡, 李树战. 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, 2015, 29(2): 643-652.
- [21] 汪金松, 赵秀海, 张春雨, 康峰峰, 尚宝山, 池青俊. 改变 C 源输入对油松人工林土壤呼吸的影响. 生态学报, 2012, 32(9): 2768-2777.
- [22] Jiang Y F, Yin X Q, Wang F B. The influence of litter mixing on decomposition and soil fauna assemblages in a *Pinus koraiensis* mixed broad-leaved forest of the Changbai Mountains, China. European Journal of Soil Biology, 2013, 55: 28-39.
- [23] Wang S J, Zhao J X, Chen Q B. Controlling factors of soil CO₂ efflux in *Pinus yunnanensis* across different stand ages. PLoS One, 2015, 10(5): e0127274.
- [24] 邓喜庆, 皇宝林, 温庆忠, 华朝朗, 陶晶. 云南松林在云南的分布研究. 云南大学学报: 自然科学版, 2013, 35(6): 843-848.
- [25] 刘尉, 王丽华, 符饶, 周世兴, 刘林, 吴小辉, 黄从德. 增加降水对干旱河谷区云南松人工林土壤呼吸的影响. 生态学报, 2017, 37(5): 1391-1400.
- [26] 赵吉霞, 王邵军, 陈奇伯, 王艳霞, 舒蛟靖. 滇中高原云南松天然林和人工林土壤呼吸特征的比较. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(1): 96-103.
- [27] Sulzman E W, Brant J B, Bowden R D, Lajtha K. Contribution of aboveground litter, belowground litter, and rhizosphere respiration to total soil CO₂ efflux in an old growth coniferous forest. Biogeochemistry, 2005, 73(1): 231-256.
- [28] Wood T E, Lawrence D, Clark D A, Chazdon R L. Rain forest nutrient cycling and productivity in response to large-scale litter manipulation. Ecology, 2009, 90(1): 109-121.
- [29] 朱凡, 王光军, 田大伦, 闫文德, 项文化. 杉木人工林去除根系土壤呼吸的季节变化及影响因子. 生态学报, 2010, 30(9): 2499-2506.
- [30] 沈小帅, 陈书涛, 胡正华, 史艳妹, 张勇. 亚热带次生林土壤自养和异养呼吸研究. 环境科学, 2011, 32(11): 3181-3187.
- [31] Wilson L I. Characterization of Soil Carbon and Nitrogen Pools Following A Decade of Detritus Manipulation in A Temperate Coniferous Forest[D]. Corvallis: Oregon State University, 2008.
- [32] 张彦军. 凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素. 环境科学, 2017, 38(8): 3497-3506.
- [33] Dilustro J J, Collins B, Duncan L, Crawford C. Moisture and soil texture effects on soil CO₂ efflux components in southeastern mixed pine forests. Forest Ecology and Management, 2005, 204(1): 87-97.
- [34] Jordan D, Ponder Jr F, Hubbard V C. Effects of soil compaction, forest leaf litter and nitrogen fertilizer on two oak species and microbial activity. Applied Soil Ecology, 2003, 23(1): 33-41.
- [35] 高丽, 杨劫, 刘瑞香. 不同土壤水分条件下中国沙棘雌雄株光合作用、蒸腾作用及水分利用效率特征. 生态学报, 2009, 29(11): 6025-6034.
- [36] Liu X Z, Wan S Q, Su B, Hui D F, Luo Y Q. Response of soil CO₂ efflux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem. Plant and Soil, 2002, 240(2): 213-223.
- [37] Luo Y Q, Zhou X H. 土壤呼吸与环境. 姜丽芬, 曲来叶, 周玉梅, 温逸馨, 译. 北京: 高等教育出版社, 2007: 67-88.
- [38] Norby R J, Luo Y Q. Evaluating ecosystem responses to rising atmospheric CO₂ and global warming in a multi-factor world. New Phytologist, 2004, 162(2): 281-293.
- [39] 汪海静. 土壤微生物多样性的主要影响因素. 北方环境, 2011, 23(1): 90-91, 118-118.
- [40] Simmons J A, Fernandez I J, Briggs R D, Delaney M T. Forest floor carbon pools and fluxes along a regional climate gradient in Maine, USA. Forest Ecology and Management, 1996, 84(1/3): 81-95.
- [41] Xu Z F, Tang S S, Xiong L, Yang W Q, Yin H J, Tu L H, Wu F Z, Chen L H, Tan B. Temperature sensitivity of soil respiration in China's forest ecosystems: patterns and controls. Applied Soil Ecology, 2015, 93: 105-110.
- [42] Leifeld J, Fuhrer J. The temperature response of CO₂ production from bulk soils and soil fractions is related to soil organic matter quality. Biogeochemistry, 2005, 75(3): 433-453.
- [43] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, Kaye J P. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. Nature, 1998, 396(6711): 570-572.
- [44] 彭信浩, 韩海荣, 徐小芳, 蔡锰柯, 白英辰, 程小琴. 间伐和改变凋落物输入对华北落叶松人工林土壤呼吸的影响. 生态学报, 2018, 38(15): 5351-5361.
- [45] Yan W D, Chen X Y, Tian D L, Peng Y Y, Wang G J, Zheng W. Impacts of changed litter inputs on soil CO₂ efflux in three forest types in central south China. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(7): 750-757.
- [46] 杨庆朋, 徐明, 刘洪升, 王劲松, 刘丽香, 迟永刚, 郑云普. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性. 生态学报, 2011, 31(8): 2301-2311.