

黄土丘陵区柠条人工林土壤呼吸速率对碳输入方式改变的响应

赵江平¹, 陈峰峰¹, 董从国¹, 赵敏¹, 陈云明^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100;

2. 中国科学院 水利部水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘要:凋落物和植物根系作为土壤碳储量的主要植物性碳源,其质及量的改变可影响土壤碳汇功能。以黄土丘陵区柠条人工林为对象,设置移除凋落物、双倍凋落物、切根、移凋切根和保持原状5种碳输入方式,利用LI-8100土壤碳通量测量仪测定生长季(5—10月)土壤呼吸速率,以期阐明柠条人工林土壤呼吸速率对碳输入方式改变的响应。结果表明:1)各碳输入方式5—10月土壤呼吸速率呈单峰趋势,均在7月最高,10月最低;相比保持原状,双倍凋落物下5—10月累计土壤呼吸速率增加了22.73%,而移凋、切根和移凋切根的5—10月累计土壤呼吸速率分别减少27.57%、40.90%和33.83%;2)根系呼吸、凋落物呼吸和土壤矿质呼吸对土壤呼吸的相对贡献率由大到小分别为土壤矿质呼吸(68.58%)>根系呼吸(38.41%)>凋落物呼吸(24.65%);3)各碳输入方式下土壤呼吸速率与土壤温度呈显著指数相关,而与土壤湿度的二次关系不显著;土壤温度和湿度的双变量复合模型对土壤呼吸速率月变化解释率53%~93%,高于土壤温度和湿度的单因子模型对土壤呼吸速率月变化解释率53%~74%和0.6%~23.2%;相比保持原状,去凋、双倍凋落物、切根和移凋切根均降低了土壤温度敏感性。研究表明,柠条人工林地表凋落物的积累过多可能减弱土壤碳汇功能。

关键词:黄土丘陵区;柠条人工林;土壤呼吸速率;碳输入;温度敏感性;DIRT

中图分类号:S718.3

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)04-0001-09

Response of Soil Respiration to Carbon Input in *Caragana korshinskii* Plantation in Loess Hilly Region

ZHAO Jiang-ping¹, CHEN Feng-feng¹, DONG Cong-guo¹, ZHAO Min¹, CHEN Yun-ming^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation,

Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation,

Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: Litter and plant roots are the main plant carbon sources of soil carbon storage, and their qualitative and quantitative changes can affect the function of soil carbon sinks. In this study, taking the *Caragana korshinskii* plantation in the loess hilly area as the research object, five modes of carbon input were set up, i. e., no litter (NL), double litter (DL), no root (NR), no litter and root (no carbon input, NI), and maintaining the original state (control). Soil carbon flux meter LI-8100 was used to measure the soil respiration rate (SRR) in growing seasons (May-October) to clarify the response of SRR of *C. korshinskii* plantation to the changes of carbon input. The results showed that 1) the SRR of each carbon input mode showed a single-peak trend from May to October, with the highest value in July and the lowest one in October. Com-

收稿日期: 2021-07-23 修回日期: 2021-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(41771556); 国家重点研发计划课题(2016YFC0501703); 陕西省水保研发项目(2017sbkj-01)。

第一作者: 赵江平。研究方向: 流域管理。E-mail: zjpsryx@163.com

* 通信作者: 陈云明, 研究员, 博士生导师。研究方向: 植被生态与水土保持。E-mail: ymchen@ms.iswc.ac.cn

pared with the control, the SRR with DL mode increased by 22.73% from May to October, while those with the modes of NL, NR, and NI decreased by 27.57%, 40.90% and 33.83%, respectively. 2) The relative contribution rates of root respiration, litter respiration and soil mineral respiration to soil respiration were 38.41%, 24.65%, and 68.58%. 3) There existed significant exponential relationship between SRR and soil temperature under five modes of carbon input, however, no significant quadratic relationship between SRR and soil moisture. The combined bivariate model of soil temperature and moisture explained the monthly variation of SRR by 53%—93%, while the single factor models of temperature and moisture explained by 53%—74% and 0.6%—23.2%, respectively. Compared with the control, other four modes of carbon input all reduced the soil temperature sensitivity. It was suggested that too much litter accumulation of on the ground of *C. korshinskii* plantation might weaken the soil carbon sink function.

Key words: loess hilly area; *Caragana korshinskii* plantation; soil respiration rate; carbon input; temperature sensitivity; DIRT

土壤呼吸作为陆地生态系统碳循环的重要过程,对维持碳平衡具有重要作用^[1,2]。在森林生态系统中,土壤呼吸所能利用的碳源主要来自地上植被凋落物和根系,其输入量的变化都可能使土壤呼吸发生改变^[3],并对气候变化产生正反馈或负反馈作用^[4]。但由于土壤碳库巨大,短时间内很难观察其明显的变化,而通过移除和添加凋落物,以及切除根系的方法(DIRT, detritus input and removal treatments),能短时间内监测到土壤碳储量及土壤呼吸的变化^[5],是评估森林生态系统植物性碳源的质及量变化对土壤呼吸过程作用的主要方法^[6-9]。

凋落物作为土壤有机质的主要来源,其质和量的变化都会影响土壤呼吸^[10-12]。众多研究表明,凋落物的添加会产生“启动效应”,进而增强土壤呼吸^[13],而去除凋落物可导致土壤呼吸作用变弱^[14,5]。植物根系不仅是植物吸收运输水分和营养的主要器官,而且是土壤有机质的关键来源之一,其生物量的增加可刺激真菌生长,促进土壤团聚体的形成,而团聚体对土壤有机质的物理保护作用下可弱化微生物对有机质的化学氧化作用,从而减弱土壤呼吸^[15-16];但切除根系不仅会阻断光合产物向土壤的输入,还可能使土壤溶解性有机质的淋失加强,进而对微生物异养呼吸过程产生作用^[17],加强土壤呼吸。其次根系呼吸作为土壤呼吸的主要组成部分,对土壤总呼吸的贡献率达40%~60%^[18],根系输入量的改变可能影响根系呼吸。因此,明确植物性碳源输入方式的改变对土壤呼吸速率的作用对明确土壤碳汇功能具有重要作用。

自黄土丘陵区大规模实施退耕还林(草)工程以来,人工林面积约占该区森林面积的59.8%^[3,19],该地区土壤有机碳的固存量显著提高^[20-21]。柠条(*Caragana korshinskii*)因其适应性强,成活率高,是黄土丘陵区水土保持的主要树种,尽管众多学者

基于不同碳输入对土壤呼吸的影响开展了众多研究,但主要集中于热带、亚热带地区,而对黄土高原地区研究较少,且研究对象多以乔木为主。另外,凋落物及根系输入量对土壤呼吸速率的作用无统一结论,且因植被类型^[22]、时间跨度^[23]及水热条件^[24-25]的差异而不同。鉴于此,本研究以黄土丘陵区柠条人工林为对象,通过设置添加双倍凋落物、切根、移除凋落物、移除切根和保持原状5种碳输入方式,分析不同碳输入方式对土壤呼吸速率和土壤温度、湿度的作用,探讨不同碳输入方式下土壤呼吸与土壤水热因子的关系,为准确评估柠条人工林土壤碳汇功能提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市安塞区纸坊沟流域(36°51'30"N, 109°19'30"E),属典型的黄土丘陵沟壑区,该地区气候主要受大陆性季风气候的影响,年均气温为8.8℃,年均降水量为500 mm,其中6—9月为雨季,占全年降水量的72.9%。黄绵土是研究区主要的土壤类型,面积约占该地区95%。植被类型属于暖温带落叶阔叶林向干旱草原过度的半干旱森林草原区,天然林已遭破坏,现有植被主要为退耕还林(草)工程营造的人工林和封禁后恢复的天然灌丛及草地,乔木主要有油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等,灌木有杠柳(*Periploca sepium*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)柠条等,草本群落以白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、华北米蒿(*Artemisia giraldii*)为优势种。

1.2 研究方法

1.2.1 样地信息 以柠条人工林为对象,在柠条内

布设 3 块坡度、坡向、海拔和树龄相近,面积大小为 20 m×20 m 的样地 A、B、C,样地间距>100 m。于 2019 年 8 月上旬调查样地信息,调查结果见表 1。

1.2.2 试验设计 2019 年 8 月下旬,在每个样地布设 5 个 1 m×1 m 样方,分别设置添加双倍凋落物(DL)、移除凋落物(NL)、切根(NR)、去凋切根

(NI)和保持原状(CK)5 种碳输入方式,具体做法如表 2 所示。在各样方内插入 1 个固定的 PVC 环(内径 10 cm,高 7 cm),将 PVC 环的一端削尖压入土中约 4 cm 深,以减少对土壤的镇压作用,测定前去除环内活植物体,呼吸环露出地面 2~3 cm,在整个试验期间保持 PVC 环的位置不变。

表 1 柠条人工林样地基本情况

Table 1 Basic profile of <i>Caragana korshinskii</i> plantation plot											
样地	海拔 /m	林龄 /a	坡度 /(°)	坡向	坡位	密度 /(株·hm ⁻²)	平均地径 /cm	平均树高 /m	土壤容重 /(g·cm ⁻³)	盖度 (%)	其他植物
A	1 283.3	20	27	半阴坡	上部	1 825	2.23	1.75	1.24 ± 0.04	60	1、2、3、4
B	1 285.1	20	21	半阴坡	上部	1 950	2.01	1.68	1.15 ± 0.03	70	1、2、3、5
C	1 275.5	20	26	半阴坡	上部	1 875	2.04	1.64	1.33 ± 0.07	68	1、2、3、4、5

注:1 为白羊草;2 为长芒草;3 为华北米蒿;4 为华北覆盆子(*Rubus idaeus*);5 为针茅(*Stipa capillata*)。

表 2 凋落物添加/去除和根系去除试验描述

Table 2 Description of the treatments of adding and removing litter/roots	
处理	方法
NL	用尼龙网框将呼吸环包裹用于收集凋落物,并在每次测量土壤呼吸的前一天将环内的凋落物清除
DL	将尼龙网框收集的所有凋落物均匀地撒在添加双倍凋落物的样方内
NR	采用挖壕沟法,在样地内挖长、宽各 0.5 m,深 1.2 m 的土柱,剪除土柱中根系后铺上塑料膜,并将土进行回填
NI	对样方进行切根和去凋的双重处理,处理方法与上述相应的处理一致
CK	对样方不做任何处理,保持自然状态

注:CK 为对照;NL 为移除凋落物;DL 为双倍凋落物;NR 为切根;NI 为去凋切根。下同。

1.3 土壤呼吸、温度和湿度的测定方法

2020 年生长季(5—10 月)内,选择天气良好的上午,在 9:00—11:00 测定土壤呼吸,以减轻林地环境的日变化对土壤呼吸速率的干扰,采用 LI-8100A 土壤呼吸仪(LI-COR, USA)测定土壤呼吸速率,同时采用 WET 土壤三参数仪(FDR, UK)测定 0~5 cm 土壤温度和湿度,每月测量 2 次,每次测定时间至少间隔 10 d,取其均值为该月土壤呼吸均值。

1.4 数据分析及处理

分别采用线性模型^[26]和指数模型^[27-28]拟合土壤呼吸速率与土壤湿度和温度的关系(式 1,式 2),用线性和非线性关系方程分别拟合土壤呼吸速率与土壤温度、湿度的双变量关系模型(式 3,式 4),并计算土壤呼吸温度敏感性系数 Q_{10} (式 5)及累计土壤呼吸速率(cumulative soil respiration flux, R_s)^[3](式 6),各计算及拟合公式具体如下:

$$R_s = dW + c \tag{1}$$

$$R_s = a e^{bt} \tag{2}$$

$$R_s = a(T \times W) + b \tag{3}$$

$$R_s = a + bT + cW \tag{4}$$

$$Q_{10} = e^{10b} \tag{5}$$

$$R_s = 44 \times 10^{-6} \times 86\,400 \times \sum R_{s_x} \times D_x \tag{6}$$

式中: R_{s_x} 为第 x 月平均土壤呼吸速率; D_x 为第 x

月天数,其余数值为单位换算系数。 t 为土壤温度; a 为待定参数, b 为温度敏感性系数; W 为土壤湿度; c 为截距, d 为水分反应系数。

参照 Rey 等^[29]的研究方法,根据不同碳输入处理土壤呼吸速率间差值即可获得植物根系呼吸速率(respiration rate of plant root, R_R)、地表凋落物呼吸速率(respiration rate of litterfall, R_L)土壤矿质呼吸速率(respiration rate of soil mineral, R_M)等各土壤分室呼吸速率,计算公式如下:

$$R_R = R_{CK} - R_{NR} \tag{7}$$

$$R_L = R_{CK} - R_{NL} \tag{8}$$

$$R_M = R_{NI} \tag{9}$$

式中: R_{CK} 为对照呼吸速率; R_{NR} 为切根呼吸速率; R_{NL} 为移除凋落物呼吸速率; R_{NI} 为去凋切根呼吸速率。

各分室土壤呼吸的贡献率计算公式如下:

凋落物呼吸对土壤呼吸的贡献率 = $R_L / R_{CK} \times 100\%$

根呼吸对土壤呼吸的贡献率 = $R_R / R_{CK} \times 100\%$

矿质呼吸对土壤呼吸的贡献率 = $R_M / R_{CK} \times 100\%$

采用 Excel 2007 和 SPSS 统计软件进行数据处理和统计分析,利用单因素方差分析(one-way ANOVA)分析添加双倍凋落物、移除凋落物、切根和去凋切根及保持原状间土壤呼吸速率、土壤温度

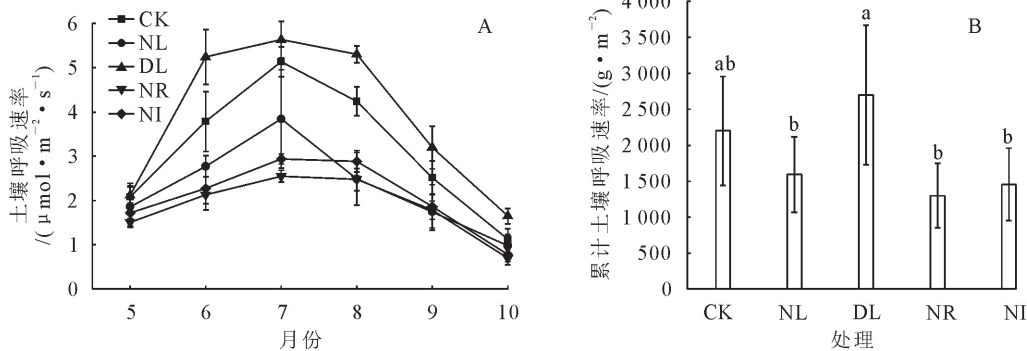
和湿度的差异性,最小差异显著(LSD)法进行多重比较($P < 0.05$)。采用 origin 2017 绘图。

2 结果与分析

2.1 改变碳输入方式对土壤呼吸速率的影响

不同碳输入方式土壤呼吸速率月变化均呈单峰趋势,且均在7月达到最高值,在10月最低(图1A)。5—10月的 R_s 均值表现为切根($1.86 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) $<$ 去凋切根($2.08 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

$<$ 移除凋落物($2.28 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) $<$ 保持原状($3.15 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) $<$ 双倍凋落物($3.86 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。不同碳输入方式间5—10月累计土壤呼吸速率差异显著($P < 0.05$),双倍凋落物方式下,累计土壤呼吸速率显著高于移除凋落物、切根和去凋切根方式下的累计土壤呼吸速率(图1B)。相比保持原状,双倍凋落物累计土壤呼吸速率增加了22.73%,而移除凋落物、切根和去凋切根分别减少了27.57%、40.90%和33.83%。



注:不同小写字母代表同一月份不同碳输入方式间显著性差异($P < 0.05$)。下同。

图1 不同碳输入方式下柠条人工林土壤呼吸速率的月动态(A)和月累计土壤呼吸速率变化(B)

Fig.1 Monthly dynamics of soil respiration rate of *C. korshinskii* plantation under different carbon input modes (A) and monthly cumulative soil respiration rate changes (B)

2.2 改变碳输入方式后土壤呼吸速率的变化幅度

5—10月,仅双倍凋落物方式下的土壤呼吸速率变化幅度为正,其余碳输入方式 R_s 变化幅度均为负(图2)。双倍凋落物方式下, R_s 平均上升24.81%,10月 R_s 上升幅度到达46.56%,5月上升幅度最小,仅2.04%,而移除凋落物、切根和去凋切根方式使 R_s 平均下降24.65%、38.41%和31.42%。由此说明,双倍凋落物方式对柠条人工林 R_s 有促进作用,而移除凋落物、切根和去凋切根方式对柠条人工林 R_s 有抑制作用。

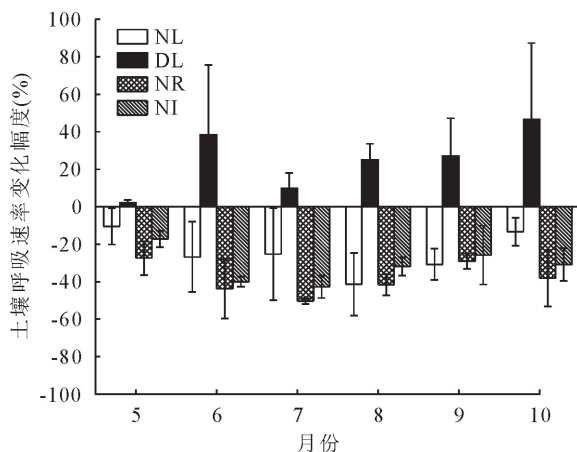


图2 柠条人工林不同碳输入方式土壤呼吸速率变化幅度

Fig.2 Changes in soil respiration rate of *C. korshinskii* plantation with different carbon input methods

2.3 各分室土壤呼吸速率及其相对贡献率

5—10月植物根系呼吸速率、地表凋落物呼吸速率和土壤矿质呼吸速率均呈先升后降的趋势,植物根系呼吸速率和土壤矿质呼吸速率在7月最大,而地表凋落物呼吸速率在8月最大(图3)。各月份矿质呼吸的呼吸速率及对土壤呼吸的相对贡献率均显著高于植物根系和地表凋落物的呼吸速率及对土壤呼吸的相对贡献率(图3)。5—10月植物根系呼吸速率、地表凋落物呼吸速率和土壤矿质呼吸速率平均值依次为 1.29 、 $0.87 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $2.08 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,三者对土壤呼吸的相对贡献率均值分别为38.41%、24.65%、68.58%。

2.4 改变碳输入方式对土壤温湿度的影响

不同碳输入方式0~5 cm土壤温度和湿度月变化动态相同,均呈先升后降的趋势,温度均在7月最大,10月最低,而湿度均在8月最大,5月最低,同一月份不同碳输入方式0~5 cm土壤温度和湿度均无差异($P > 0.05$)(图4A)。

5—10月,不同碳输入方式0~5 cm土壤温度和湿度均值大小不同(图4B)。土壤温度均值为:去凋切根 20.16°C 、保持原状 19.39°C 、切根 19.51°C 、双倍凋落物 20.16°C 、移除凋落物 20.32°C ,而湿度均值由小到大为:双倍凋落物(9.13%) $<$ 保持原状(11.10%) $<$ 移除凋落物(12.35%) $<$ 去凋切根

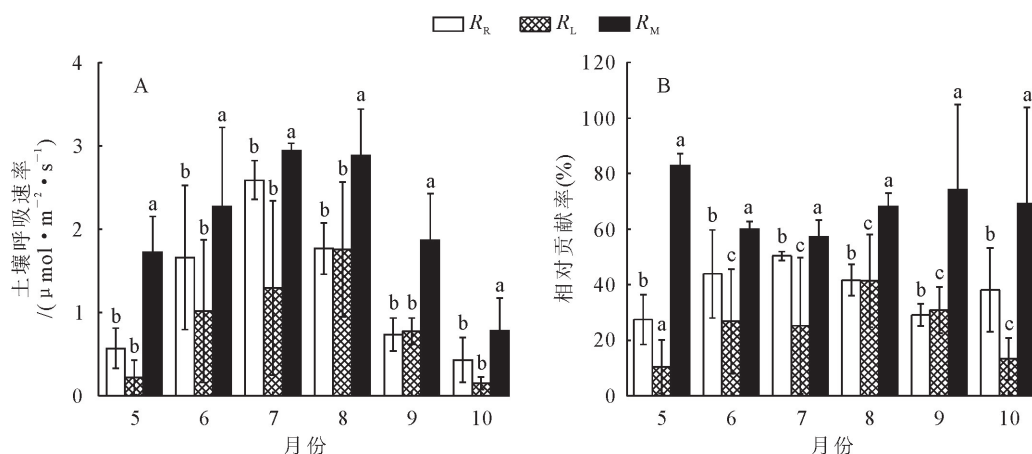
(13.04%) < 切根(14.48%), 但5—10月碳输入方式0~5 cm土壤温度和湿度均值均无差异。

2.5 土壤呼吸速率与温、湿度的关系

不同碳输入方式 R_s 与土壤温度均存在显著指数关系($P < 0.001$), 但与土壤湿度间的二次曲线关系不显著($P > 0.05$) (表3、表4)。相比保持原状, 移除凋落物、双倍凋落物、切根和去凋切根土壤呼吸的温度敏感

系数分别降低了11.5%、17.4%、19.4%和17.4%。

2种双变量复合模型(线性和非线性)对土壤温湿度与土壤呼吸的复合关系结果显示, 4种复合模型的 R^2 相比于0~5 cm土壤温度和湿度的单因子模型均有一定的提升, 复合模型对土壤呼吸的预测准确性提高, 土壤温、湿度可共同解释土壤呼吸月变化的53%~93%。



注: R_R 为植物根系呼吸速率; R_L 为地表凋落物呼吸; R_M 为土壤矿质呼吸速率。

图3 柠条人工林土壤分室呼吸速率(A)和各组分土壤呼吸相对贡献率(B)

Fig. 3 Soil compartment respiration rate of *C. korshinskii* plantation (A) and relative contribution rate of soil respiration of each component (B)

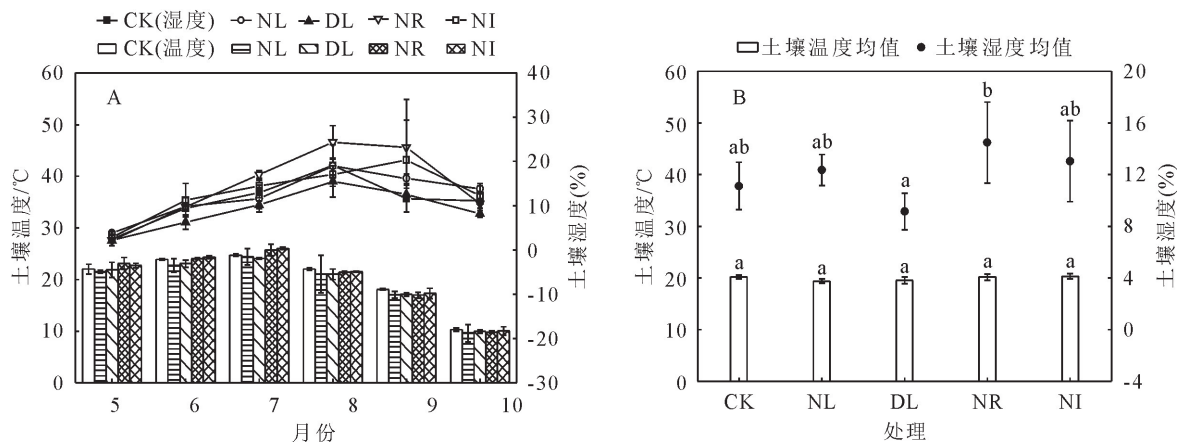


图4 表层土壤(0~5 cm)温度、湿度时间变化(A)和不同碳输入方式下土壤温度、湿度的月平均值(B)

Fig. 4 Temporal changes of soil temperature and moisture in the surface soil (0-5 cm) (A) and monthly average of soil temperature and moisture under different carbon input modes (B)

3 结论与讨论

3.1 讨论

3.1.1 不同碳输入方式对土壤呼吸速率的影响

本研究结果表明, 双倍凋落物添加提高了土壤呼吸速率, 但移除凋落物、切根、移除凋切根均降低了土壤呼吸速率。这与左强等^[18]、邵康等^[3]和Wu等^[1]研究结果一致。微生物对含碳化合物的分解过程在土壤呼吸中占据主导地位, 而相比植物根系, 地上植被凋落物是土壤微生物的主要碳源^[30-32], 其质及量的

变化对土壤呼吸具有重要作用^[30-32]。凋落物的添加给微生物带来可利用碳源, 满足了其新陈代谢和生长增殖等生物过程的需要, 提高了微生物量及微生物活性, 进而加快了有机质分解, 提高了土壤呼吸速率。相反, 凋落物的移除减少了地表微生物可利用碳源, 抑制了地表微生物活性, 使得土壤碳排放减少^[33]。双倍增加凋落物可增加土壤入渗, 从而降低了植物水分胁迫, 促进了植物生长, 植物性碳源输入量的增加可提高土壤呼吸。

表 3 土壤呼吸速率与 0~5 cm 土壤温度的指数关系模型

$$(R_s = a e^{bt})$$

Table 3 The exponential relationship model between soil respiration rate and 0~5 cm soil temperature ($R_s = a e^{bt}$)

处理	参数				
	$a \pm SE$	$b \pm SE$	R^2	P	Q_{10}
CK	$0.43 \pm 0.11^{***}$	$0.092^{***} \pm 0.014$	0.74	<0.01	2.52
NL	$0.43 \pm 0.12^{***}$	$0.080^{***} \pm 0.016$	0.68	<0.01	2.23
DL	$0.83 \pm 0.24^{***}$	$0.073^{***} \pm 0.016$	0.53	<0.01	2.08
NR	$0.41 \pm 0.10^{***}$	$0.070^{***} \pm 0.014$	0.73	<0.01	2.03
NI	$0.42 \pm 0.13^{***}$	$0.073^{***} \pm 0.019$	0.65	<0.01	2.08

注: *** 表示在 0.001 水平上差异显著;SE 为标准误差。

表 5 土壤呼吸 (R_s) 与 0~5 cm 深度土壤温度 (T) 及土壤湿度 (W) 的复合关系方程Table 5 The compound relation equation of soil respiration (R_s), soil temperature (T) and soil moisture (W) at a depth of 0~5 cm

处理	线性关系	非线性关系		
	$R_s = a(T \times W) + b$	$R_s = a + bT + cW$	$R_s = aT^b + W^c$	$R_s = a e^{bT} W^c$
CK	$R_s = 0.008(T \times W) + 1.26$ $R^2 = 0.60$	$R_s = -2.78 + 0.23T + 0.12W$ $R^2 = 0.85$	$R_s = 0.006 T^{1.82} + W^{0.36}$ $R^2 = 0.92$	$R_s = 0.172 e^{0.10T} W^{0.36}$ $R^2 = 0.93$
NL	$R_s = 0.003(T \times W) + 1.52$ $R^2 = 0.12$	$R_s = -1.16 + 0.16T + 0.03W$ $R^2 = 0.55$	$R_s = 0.008 T^{1.77} + W^{0.15}$ $R^2 = 0.59$	$R_s = 0.219 e^{0.10T} W^{0.15}$ $R^2 = 0.62$
DL	$R_s = 0.124(T \times W) + 1.47$ $R^2 = 0.07$	$R_s = -2.66 + 0.25T + 0.18W$ $R^2 = 0.74$	$R_s = 0.017 T^{1.57} + W^{0.36}$ $R^2 = 0.86$	$R_s = 0.304 e^{0.09T} W^{0.37}$ $R^2 = 0.87$
NR	$R_s = 0.002(T \times W) + 1.14$ $R^2 = 0.53$	$R_s = -0.65 + 0.10T + 0.04W$ $R^2 = 0.89$	$R_s = 0.399 T^{1.10} + W^{0.21}$ $R^2 = 0.91$	$R_s = 0.316 e^{0.06T} W^{0.22}$ $R^2 = 0.87$
NI	$R_s = 0.003(T \times W) + 1.42$ $R^2 = 0.21$	$R_s = -0.50 + 0.11T + 0.02W$ $R^2 = 0.59$	$R_s = 0.046 T^{1.15} + W^{0.14}$ $R^2 = 0.64$	$R_s = 0.410 e^{0.06T} W^{0.14}$ $R^2 = 0.62$

根系作为植物与土壤环境间进行物质和能量交换的纽带,其从土壤中摄取水分和养分以供植物生长需要。切断根系阻断了植物生理活动的维持呼吸,阻止植物地上部分的光合产物向地下部分的分配,降低了根系活力和微生物量,且切根后,可利用碳源的减少抑制了微生物代谢活性^[18],从而降低了土壤呼吸。但也有研究发现,切断根系使土壤呼吸在试验初期不仅没有降低土壤呼吸,反而增加土壤呼吸^[5,34-35]。这可能与植物根系在切断后仍会存活并维持一段时间呼吸有关,且死根在分解过程中会减少根系呼吸的贡献率^[5]。本研究于 2019 年进行切根处理,2020 年进行监测,并在剪除土柱中根系后铺上塑料薄膜,减少了早期去根处理后残根分解对试验的干扰。土壤呼吸速率不仅与凋落物量有关,其化学组成可改变土壤微生物结构,以致土壤有机质分解速率及模式迥异。尽管相比对照,切根处理下有较高的地上植被凋落物,但土壤温度及湿度的变化可能改变凋落物的内部化学结构,导致土壤中厌氧绳菌纲、甲基养菌、披毛菌属和脱硫球菌属丰度的增加弱化了土壤碳同化,进而降低了土壤呼吸。

3.1.2 土壤温度和湿度对土壤呼吸速率的影响

本研究结果表明,各碳输入方式下柠条人工林土壤

表 4 土壤呼吸速率与 0~5 cm 土壤湿度的线性关系模型

$$(R_s = dW + c)$$

Table 4 Model of linear relationship between soil respiration rate and 0~5 cm soil moisture ($R_s = dW + c$)

处理	参数			
	$c \pm SE$	$d \pm SE$	R^2	P
CK	1.74 ± 0.45	0.127 ± 0.065	0.232	>0.05
NL	2.54 ± 0.62	-0.021 ± 0.043	0.010	>0.05
DL	2.41 ± 0.53	0.158 ± 0.076	0.194	>0.05
NR	1.37 ± 0.33	0.034 ± 0.013	0.213	>0.05
NI	1.96 ± 0.58	0.009 ± 0.002	0.006	>0.05

呼吸速率在生长季内均呈单峰模型,这与众多研究结果一致^[1,28,36],这可能与土壤温度的月变化有关。土壤温度对土壤呼吸有着显著影响(表 2),同时土壤温度与土壤呼吸速率的月变化趋势一致,然而这仅能解释土壤呼吸的月动态,不能解释土壤呼吸对移除凋落物、双倍凋落物及切根响应,因为各月份土壤温度在不同处理间无显著差异;另外,5—10 月,虽然土壤温度均值表现为移除凋落物 > 对照 = 切根 > 双倍凋落物 > 移除凋落物,但土壤呼吸速率均值表现为切根 < 移除凋落物 < 移除凋落物 < 对照 < 双倍凋落物,土壤呼吸均值与土壤温度均值的大小关系基本相反,这与本文得出的土壤呼吸与土壤温度呈指数正相关关系的结论相反。本研究中,4 种复合模型的 R^2 相比于 0~5 cm 土层温度和湿度的单因子模型均有一定的提升,可见温度和湿度共同影响柠条人工林土壤呼吸。主要是因为微生物异养呼吸作为土壤呼吸的关键贡献过程,土壤酶活性及微生物代谢活性决定其强度,在一定范围内,尽管温度升高可提高微生物代谢活性,进而提高土壤呼吸,但如若土壤湿度的降低可导致微生物生长环境过于干燥,不利于土壤微生物量积累,可抑制微生物活性,降低土壤呼吸。由此可见不能仅以土壤温度或湿度

评价柠条人工林土壤呼吸速率的高低。

Q_{10} 作为评价土壤呼吸对土壤温度的敏感程度的关键因子^[37],对预测未来气候变化下的土壤碳平衡具有重要意义^[38]。本研究中保持原状下的 Q_{10} (2.52)处于陆地生态系统土壤呼吸 Q_{10} (1.3~5.6)变化范围之内^[28],但低于我国亚热带森林的平均值2.55,可能与该地区温度、水分、土壤矿物学性质和土壤质地等有关^[39-40],尤其在干旱地区,土壤水分作为该地区的关键胁迫因子,土壤有机质被限制在土壤颗粒表面的水膜之上,呼吸底物移动性及可利用性降低,从而导致土壤异养呼吸对温度变化的敏感低下^[41-42]。本研究结果表明,移凋、双倍凋落物、切根和移凋切根均降低了 Q_{10} ,这与已有研究结果一致^[1,43-44]。通常,微生物异养呼吸作为土壤呼吸的关键过程,其与土壤中分解底物的有效性及量有关,且土壤呼吸的温度敏感性随微生物呼吸底物量及有效性的下降而降低^[42],去凋、切根和移凋切根导致微生物生长所需碳源减少,土壤中微生物会因缺少呼吸底物而死亡,以致 Q_{10} 降低,尽管双倍添加凋落物满足了微生物生长及代谢所需碳源,但 Q_{10} 降低可能与土壤碳源有效性降低有关。总之,碳源输入方式可降低柠条人工林土壤呼吸温度敏感性,在未来的人工造林工程中,应考虑植被地上及地下生产力,以避免人工林对全球气候变化产生正反馈作用。

3.2 结论

双倍凋落物增加了土壤呼吸速率,而移除凋落物、切根和移凋切根降低了土壤呼吸速率。相比保持原状,双倍凋落物处理使累计土壤呼吸通量增加了22.73%,移除凋落物、切根和移凋切根处理使累计土壤呼吸通量分别减少27.57%、40.90%和33.83%,减少幅度为切根>移凋切根>移除凋落物。

土壤矿质呼吸、凋落物呼吸和根系呼吸对土壤总呼吸的相对贡献率由大至小依次为土壤矿质呼吸(68.58%)>根系呼吸(38.41%)>凋落物呼吸(24.65%)。

双倍凋落物、移除凋落物、切根和移凋切根方式下,土壤呼吸速率与土壤温度呈显著指数关系,且均降低了温度敏感性。土壤温湿度与土壤呼吸的双变量复合模型能有效反映土壤呼吸,土壤温度、湿度共同解释土壤呼吸速率月变化的53%~93%。

黄土丘陵区柠条人工林土壤碳库对碳输入方式的响应十分敏感,凋落物和植物根系是土壤碳循环的关键,在黄土丘陵区柠条人工林的经营过程中应加强对凋落物的管理,实现凋落物对土壤养分的自然归还,保护黄土丘陵区柠条人工林碳库的良性循环。

参考文献:

- [1] WU J, ZHANG Q, YANG F, *et al.* Does short-term litter input manipulation affect soil respiration and its carbon-isotopic signature in a coniferous forest ecosystem of central China? [J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 113.
- [2] 刘文娟,李春友,张劲松,等.华北低山丘陵区石榴-小麦间作系统的土壤呼吸特征——以河南省济源市试验点为例[J].西北林学院学报,2012,27(3):17-22.
LIU W J, LI C Y, ZHANG J S, *et al.* Soil respiration of *Punica granatum-Triticum aestivum* intercropping system in hilly area of Northern China[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2012, 27(3): 17-22. (in Chinese)
- [3] 邵康,贡璐,何学敏,等.改变碳输入对新疆天山雪岭云杉林土壤呼吸的短期影响[J].环境科学,2020,41(8):3804-3810.
SHAO K, GONG L, HE X M, *et al.* Short term effects of a changing carbon input on the soil respiration of *Picea schrenkiana* forests in the Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(8): 3804-3810. (in Chinese)
- [4] HEIMANN M, REICHSTEIN M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks[J]. *Nature*, 2008, 451(7176): 289-292.
- [5] 汪金松,赵秀海,张春雨,等.改变C源输入对油松人工林土壤呼吸的影响[J].生态学报,2012,32(9):2768-2777.
WANG J S, ZHAO X H, ZHANG C Y, *et al.* Changes of carbon input influence soil respiration in a *Pinus tabulaeformis* plantation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(9): 2768-2777. (in Chinese)
- [6] ZHOU L, ZHOU X, SHAO J, *et al.* Interactive effects of global change factors on soil respiration and its components: a meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(9): 3157-3169.
- [7] WANG W, FANG J. Soil respiration and human effects on global grasslands[J]. *Global and Planetary Change*, 2009, 67(1-2): 20-28.
- [8] 陈灿,江灿,范海兰,等.凋落物去除/保留对杉木人工林林窗和林内土壤呼吸的影响[J].生态学报,2017,37(1):102-109.
CHEN C, JIANG C, FAN H L, *et al.* Effects of removing/keeping litter on soil respiration in and outside the gaps in Chinese fir plantation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(1): 102-109. (in Chinese)
- [9] 杨玉盛,陈光水,董彬,等.格氏栲天然林和人工林土壤呼吸对干湿交替的响应[J].生态学报,2004,24(5):953-958.
YANG Y S, CHEN G S, DONG B, *et al.* Responses of soil respiration to soil rewetting in a natural forest and two monoculture plantations in subtropical China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5): 953-958. (in Chinese)
- [10] 覃志伟,周晓果,温远光,等.去除和添加凋落物对马尾松×红锥混交林土壤呼吸的影响[J].广西科学,2019,26(2):199-206.
- [11] 李化山,汪金松,赵秀海,等.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[J].生态学报,2014,33(4):857-866.
LI H S, WANG J S, ZHAO X H, *et al.* Effects of litter removal on soil respiration under simulated nitrogen deposition in a *Pinus tabulaeformis* forest in Taiyue Mountain, China

- [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(4): 857-866. (in Chinese)
- [12] 张超, 闫文德, 郑威, 等. 凋落物对樟树和马尾松混交林土壤呼吸的影响[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(3): 22-27.
ZHANG C, YAN W D, ZHENG W, *et al.* Influence of litter on soil respiration in camphor tree-masson pine mixed forest [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(3): 22-27. (in Chinese)
- [13] SÉBASTIEN F, SÉBASTIEN B, PIERRE B, *et al.* Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. [J]. Nature, 2007, 450: 277-280.
- [14] 李秋梅, 黎胜杰, 王欣丽, 等. 改变碳输入对沂蒙山区典型次生林土壤微生物碳源代谢功能的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4110-4119.
LI Q M, LI S J, WANG X L, *et al.* Influences of changing carbon inputs on soil microbial carbon metabolism in natural secondary forests in Yimeng Mountainous area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4110-4119. (in Chinese)
- [15] YANG C B, ZHANG X P, NI H J, *et al.* Soil carbon and associated bacterial community shifts driven by fine root traits along a chronosequence of Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) plantations in subtropical China [J]. Science of the Total Environment, 2021, 752: 142333.
- [16] L. BAUMERT V, J. FORSTNER S, T. ZETHOF J H, *et al.* Root-induced fungal growth triggers macroaggregation in forest subsoils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 157: 108244.
- [17] 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[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4): 1075-1081.
WANG Q K. Responses of forest soil carbon pool and carbon cycle to the changes of carbon input [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(4): 1075-1081. (in Chinese)
- [18] 左强, 何怀江, 赵秀海. 改变碳源输入对蛟河红松阔叶混交林土壤呼吸的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21(6): 1136-1142.
ZUO Q, HE H J, ZHAO X H. Influence of carbon input changes on the soil respiration in a mixed broadleaved-Korean pine forest in the western foothill of Changbai Mountain [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2015, 21(6): 1136-1142. (in Chinese)
- [19] JIA G D, YUXX, DENGWP. Seasonal water use patterns of semi-arid plants in China [J]. The Forest Chronicle, 2013, 89(2): 169-177.
- [20] 王征, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(14): 3947-3952.
WANG Z, LIU G B, XU M X. Effect of revegetation on soil organic carbon concentration in deep soil layers in the hilly Loess Plateau of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(14): 3947-3952. (in Chinese)
- [21] 董莉茹. 黄土丘陵区刺槐林深层土壤碳通量研究[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2014.
- [22] SHENG H, YANG Y, YANG Z, *et al.* The dynamic response of soil respiration to land-use changes in subtropical China [J]. Global Change Biology, 2010, 16(3): 1107-1121.
- [23] 王光军, 田大伦, 闫文德, 等. 改变凋落物输入对杉木人工林土壤呼吸的短期影响[J]. 植物生态学报, 2009, 33(4): 739-747.
WANG G J, TIAN D L, YAN W D, *et al.* Effect of aboveground litter exclusion and addition on soil respiration in a *Cunninghamia lanceolata* plantation in China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(4): 739-747. (in Chinese)
- [24] WANG Y F, HAO Y B, CUI X Y, *et al.* Responses of soil respiration and its components to drought stress [J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, 14(1): 99-109.
- [25] 王红, 王邵军, 李宇航, 等. 森林土壤呼吸及其主要调控因素研究进展[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(1): 92-97.
WANG H, WANG S J, LI J H, *et al.* Characteristics and the influencing factors of forest soil respiration: a review [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(1): 92-97. (in Chinese)
- [26] 王光军, 李树战, 闫文德, 等. 樟树人工林土壤呼吸的动态变化[J]. 中南林业科技大学学报, 2008(4): 118-122.
WANG G J, LI S Z, YAN W D, *et al.* Diurnal and seasonal dynamics of soil respiration in *Cinnamomum camphora* plantation [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2008(4): 118-122. (in Chinese)
- [27] 郑鹏飞, 余新晓, 贾国栋, 等. 北京山区不同植被类型的土壤呼吸特征及其温度敏感性[J]. 应用生态学报, 2019, 30(5): 1726-1734.
ZHENG P F, YU X X, JIA G D, *et al.* Soil respiration and its temperature sensitivity among different vegetation types in Beijing mountain area, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(5): 1726-1734. (in Chinese)
- [28] 谢慧慧, 樊军, 齐丽彬, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错区典型植被下土壤呼吸季节变化特征与影响因素[J]. 环境科学, 2010, 31(12): 2995-3003.
XIE H H, FAN J, QI L B, *et al.* Seasonal characteristics of soil respiration and affecting factors under typical vegetations in the water-wind erosion crisscross region of the Loess Plateau [J]. Environmental Science, 2010, 31(12): 2995-3003. (in Chinese)
- [29] REY A, PEGORARO E, TEDESCHI V, *et al.* Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy [J]. Global Change Biology, 2002, 8(9): 851-866.
- [30] WANG Y D, WANG H M, MA Z Q, *et al.* Contribution of aboveground litter decomposition to soil respiration in a subtropical coniferous plantation in Southern China [J]. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 45(2): 137-147.
- [31] SULZMAN E W, BRANT J B, BOWDEN R D, *et al.* Contribution of aboveground litter, belowground litter, and rhizosphere respiration to total soil CO₂ efflux in an old growth coniferous forest [J]. Biogeochemistry, 2005, 73(1): 231-256.
- [32] SCHLESINGER W H, DIETZE M C, JACKSON R B, *et al.* Forest biogeochemistry in response to drought [J]. Global Change Biology, 2016, 22(7): 2318-2328.
- [33] BRANT J B, SULZMAN E W, MYROLD D D. Microbial community utilization of added carbon substrates in response to long-term carbon input manipulation [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(8): 2219-2232.
- [34] LEE M, NAKANE K, NAKATSUBO T, *et al.* Seasonal

- changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool-temperate deciduous forest[J]. *Plant and Soil*, 2003, 255(1): 311-318.
- [35] YI Z G, FU S L, YI W M, *et al.* Partitioning soil respiration of subtropical forests with different successional stages in South China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 243(2): 178-186.
- [36] WANG Q K, HE T X, WANG S L, *et al.* Carbon input manipulation affects soil respiration and microbial community composition in a subtropical coniferous forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 178-179(15): 152-160.
- [37] OHASHI M, GYOKUSEN K, SAITO A. Measurement of carbon dioxide evolution from a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forest floor using an open-flow chamber method[J]. *Forest Ecology and Management*, 1999, 123(2/3): 105-114.
- [38] 高强, 马明睿, 韩华, 等. 去除和添加凋落物对木荷林土壤呼吸的短期影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(5): 1189-1197.
- GAO Q, MA M R, HAN H, *et al.* Short-term effects of aboveground litter exclusion and addition on soil respiration in a *Schima superba* forest in Zhejiang Province, Eastern China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(5): 1189-1197. (in Chinese)
- [39] 杨庆朋, 徐明, 刘洪升, 等. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性[J]. *生态学报*, 2011, 31(8): 2301-2311.
- YANG Q P, XU M, LIU H S, *et al.* Impact factors and uncertainties of the temperature sensitivity of soil respiration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(8): 2301-2311. (in Chinese)
- [40] 武传胜, 沙丽清, 张一平. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林凋落物对土壤呼吸及其温度敏感性的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2012, 40(6): 37-40.
- WU C S, SHA L Q, ZHANG Y P. Effect of litter on soil respiration and its temperature sensitivity in a montane evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountains, Yunnan[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2021, 40(6): 37-40. (in Chinese)
- [41] 范志平, 王红, 邓东周, 等. 土壤异养呼吸的测定及其温度敏感性影响因子[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(7): 1221-1226.
- FAN Z P, WANG H, DENG D Z, *et al.* Measurement methods of soil heterotrophic respiration and key factors affecting the temperature sensitivity of the soil heterotrophic respiration[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(7): 1221-1226. (in Chinese)
- [42] DAVIDSON E A, JANSSENS I. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. *Nature*, 2006, 440(7081): 165-173.
- [43] 李亚非, 胡宗达, 余昊, 等. 改变凋落物输入对川西亚高山天然次生林土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(7): 2687-2691.
- LI Y F, HU Z D, YU H, *et al.* Effects of litter manipulation on soil respiration in natural secondary forest in subalpine area of Western Sichuan Province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(7): 2687-2691. (in Chinese)
- [44] 周小刚, 郭胜利, 车升国, 等. 黄土高原刺槐人工林地表凋落物对土壤呼吸的贡献[J]. *生态学报*, 2012, 32(7): 2150-2157.
- ZHOU X G, GUO S L, CHE S G, *et al.* Aboveground litter contribution to soil respiration in a black locust plantation in the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(7): 2150-2157. (in Chinese)