

不同处理方式下湿地松人工林土壤呼吸及温度敏感性变化

沈 健^{1,2}, 何宗明^{1,2}, 董 强¹, 郜士垒^{1,2}, 林 宇³, 石 焱^{4*}

(1. 福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 2. 国家林业和草原局 杉木工程技术研究中心, 福建 福州 350002;
3. 闽侯白沙国有林场, 福建 福州 350100; 4. 国家林业和草原局 管理干部学院, 北京 102600)

摘 要:研究碳输入处理对沿海地区湿地松人工林土壤碳排放的影响,分析不同碳输入下各组分(植物根系、凋落物层及矿质土壤)的呼吸速率及其贡献,为人为干扰下滨海沙地碳循环模式和未来沿海地区气候变化提供参考。在福建省长乐大鹤国有防护林场的湿地松人工林中,采用随机区组试验改变湿地松人工林地上、地下碳输入方式,设置对照(SC)、去除根系(SR)、去除凋落物(SL)、环割(SG)、环割+去根(SGR)、环割+去凋落物(SGL)6个处理,采用开路式碳通量测定系统Li-8100测定不同处理样地每月的土壤呼吸速率、土壤温度和土壤湿度,并计算不同呼吸组分的速率和温度敏感性(Q_{10})。结果表明:1)观测期间,不同处理土壤呼吸年通量由大到小依次为对照($23.82 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、环割($20.04 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、去除凋落物($19.74 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、去除根系($14.4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、环割+去凋落物($14.39 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、环割+去根($14 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),与对照相比碳输入减少后土壤呼吸均有所降低。2)不同处理间的土壤湿度差异极显著($P < 0.01$),土壤温度差异不显著($P > 0.05$)。3)湿地松林地异养呼吸在总呼吸中占比60.4%,自养呼吸占比39.6%。各组分呼吸速率对总呼吸速率的贡献率分别为矿质土壤呼吸(43.3%)、根系呼吸(39.6%)、凋落物层呼吸(17.2%)。4)不同处理使土壤呼吸温度敏感性(Q_{10})均有所升高(除环割+去根处理),各处理 Q_{10} 依次为环割+去凋落物>去除凋落物>去除根系>环割>环割+去根=对照。不同碳输入处理对土壤 CO_2 排放有明显影响,碳输入方式是影响森林土壤呼吸速率的重要因子。

关键词:碳输入;碳排放;自养呼吸;异养呼吸;温度敏感性

中图分类号:S714.5

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)05-0010-09

Changes of Soil Respiration and Temperature Sensitivity in *Pinus elliottii* Plantation Under Different Treatments

SHEN Jian^{1,2}, HE Zong-ming^{1,2}, DONG Qiang¹, GAO Shi-lei^{1,2}, LIN Yu³, SHI Yan^{4*}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; 2. Engineering Research Center of Chinese Fir, National Forestry and Grassland Administration, Fuzhou 350002, Fujian, China;
3. Minhou Baisha State-Owned Forest Farm of Fujian Province, Fuzhou 350100, Fujian, China;
4. National Academy of Forestry and Grassland Administration, Beijing 102600, China)

Abstract: The objectives of this study were to study the effects of carbon input on soil carbon emissions from *Pinus elliottii* plantations in coastal areas, and to analyze the respiration rates of each component (plant root, litter layer and mineral soil) and their contributions under different carbon inputs, and to provide a reference for the carbon cycle patterns in coastal sandy areas under anthropogenic disturbance and future climate change in coastal areas. The experiment were carried out from September 2019 to August 2020 in *P. elliottii* plantation in Dahe State-owned Forest Farm, Changle, Fujian Province, China. A ran-

收稿日期:2022-07-15 修回日期:2022-09-14

基金项目:福建省林业科技基金([2022]52号)。

第一作者:沈 健。研究方向:森林培育。E-mail:1070920980@qq.com

* 通信作者:石 焱,教授,博士。研究方向:林业经济、林业信息化和生态保护修复研究。E-mail:71161365@qq.com

domized group experiment was adopted to change the above- and below-ground carbon input of *P. elliottii* plantation in six treatments: control (SC), root-trenching (SR), litter removal (SL), girding (SG), girding + root-trenching (SGR), and girding + litter removal (SGL), and an open-circuit carbon flux measurement system Li-8100 was used to determine monthly soil respiration, soil temperature, and soil moisture in the sample plots of different treatments, and the rate and temperature sensitivity (Q_{10}) of different respiration components were calculated. 1) The annual soil respiration fluxes of the different treatments during the observation period were in the order of magnitude SC (23.82) > SG (20.04) > SL (19.74) > SR (14.4) > SGL (14.39) > SGR (14 t · hm⁻² · a⁻¹), soil respiration decreased after the reduction of carbon input compared with the control. 2) The variability of soil moisture was extremely significant ($P < 0.01$), and soil temperature was not significant ($P > 0.05$) among treatments. 3) Heterotrophic respiration accounted for 60.4% of the total and autotrophic respiration accounted for 39.6% in the *P. elliottii* plantation. The contribution of the respiration rates of individual component to the total respiration rate were mineral soil respiration (43.3%), root respiration (39.6%), and litter respiration (17.2%). 4) All the treatments increased the temperature sensitivity of soil respiration (Q_{10}) (except girding + root-trenching treatment), and the order of Q_{10} was SGL > SL > SR > SG > SGR = SC. Different carbon input treatments have significant effects on soil CO₂ emissions, and the carbon input method is an important factor affecting the respiration rate of forest soil.

Key words: carbon input; carbon emission; autotrophic respiration; heterotrophic respiration; temperature sensitivity

土壤呼吸(soil respiration)是指未扰动的土壤产生 CO₂ 的所有代谢过程,主要包括自养呼吸和异养呼吸以及含碳矿物质的化学氧化^[1],是森林生态系统能量流动和物质循环的重要生态过程。土壤是陆地生态系统中的巨大碳库,其碳含量是大气碳含量的 2 倍,据估计在全球范围内土壤每年释放到大气中的 CO₂ 高达 68 Pg^[2],土壤呼吸是土壤碳的主要输出途径和大气 CO₂ 的重要来源,土壤和大气之间的 CO₂ 交换在很大程度上影响着大气碳和热平衡^[3-4]。森林作为陆地生态系统的主体,在调控全球生态系统碳循环和气候动态方面起着至关重要的作用^[5],森林土壤碳库的细微变化都会对全球气候变化产生深远影响^[6]。然而土壤呼吸具有复杂性,易受凋落物数量和质量、细根生物量、温度有效性、水分有效性等影响^[7],且各影响因素之间还存在交互作用,因此,在全球变化进程下研究不同碳输入方式对土壤呼吸及其组分的影响十分重要。

自养呼吸指根系呼吸和根际微生物呼吸,异养呼吸指土壤微生物和动物呼吸^[8],两者会随各自影响因素的变化而变化,区分土壤呼吸组分是了解生态系统碳循环的重要部分^[9]。根系碳输入和凋落物分解是土壤呼吸的重要组成,对植物养分供应、土壤有机质形成有重要影响。环割处理会切断输送光合产物的韧皮部,但不会损伤运输水分和无机盐的木质部,植物蒸腾作用正常进行,土壤根系和根际微生物因缺少底物供应,呼吸强度会大幅度下降甚至停

止,因此认为此时土壤中排放的 CO₂ 通量为异养呼吸量。研究表明,不同地区、不同植被类型土壤各呼吸组分的占比各异,如左嫚等^[10]在云南松天然林中发现,根系呼吸在总呼吸中占比最大,其次是土壤有机质呼吸,凋落物层呼吸最少;吴君君等^[11]在米槠和杉木人工林的研究发现,异养呼吸年通量大于自养呼吸。

20 世纪初,欧洲和北美等国家开始研究土壤碳排放变化,主要包括凋落物、植物根系、林下植被、林火干扰、氮沉降等对土壤呼吸速率的影响。国内对土壤呼吸的研究起步较晚,大多集中在内陆地区,对于亚热带沿海地区人工林土壤呼吸变化规律还缺少系统、深入的研究。滨海沙地受海、陆、空三方面影响,土壤瘠薄易旱,生态环境脆弱,更新速度缓慢,大多学者对内陆森林生态系统碳循环过程的研究不适用于沿海地区人工林生态系统,因此研究、估算滨海沙地人工林土壤碳库的释放量对于当下及未来的气候变化和生态系统碳平衡都有着重要的意义。鉴于此,本研究以闽南沿海地区湿地松(*Pinus elliottii*)人工林为对象,通过设置去除根系、去除凋落物、环割、环割+去除根系、环割+去除凋落物和保持原状 6 种碳输入方式,分析不同碳输入方式下湿地松人工林土壤呼吸组分及温度敏感性的变化,探讨各组分(植物根系、凋落物层及矿质土壤)的呼吸速率及其贡献率,旨在为人为干扰下滨海沙地碳循环模式和未来沿海地区气候变化提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省长乐大鹤国有防护林场(119°40′43″E, 25°57′59″N), 该场始建于1964年, 东临东海, 属沿海台地地貌, 海拔5~13 m。试验样地隶属沿海防护林基干林带区域, 土壤多为风积沙土, 保水保肥能力较差。气候属亚热带海洋性季风气候, 年平均气温19.2℃, 最高温37.4℃, 平均湿度72.3%, 年日照时数1 837.6 h, 霜冻害少发生, 无霜期320 d以上, 晚霜多在2月, 早霜在12月, 气候温和, 雨量充沛, 全年无积雪现象。林下植物稀少, 林下层主要有马缨丹(*Lantana camara*)、大蓟(*Cirsium spicatum*)、硕苞蔷薇(*Rosa bracteata*)、白茅(*Imperata cylindrica*)等^[12]。

湿地松林龄为31 a, 林地初植密度2 500株·hm⁻², 现存密度1 367株·hm⁻², 平均胸径(17.74±0.36)cm, 平均树高(13.44±0.36)m, 郁闭度0.87, 年凋落物量12.93 t·hm⁻², 土壤容重(1.28±0.04)g·cm⁻³, 土壤pH为5.40±0.04。

1.2 试验设计

2019年9月, 在湿地松人工林中设置6种不同处理, 分别为: 1) 去除根系(SR), 采用挖壕沟法切断湿地松根系(壕沟深度为70 cm), 并埋入3层尼龙网防止植物根系生长进小区内; 2) 去除凋落物(SL), 清理地面上湿地松的凋落物, 并在距地面1 m处放置网框收集掉落的枯枝落叶, 防止凋落物进入小区内; 3) 环割(SG), 在湿地松树干距离地面1.5 m处进行环割处理, 主干韧皮部环割宽度为5 cm; 4) 环割+去除根系(SGR), 具体处理方法同SG和SR处理; 5) 环割+去除凋落物(SGL), 具体处理方法同SG和SL处理; 6) 对照(SC), 湿地松的凋落物和根系维持正常状态, 不用人为干扰。在湿地松人工林中共设置8个25 m×25 m的样方, 每个样方相距10 m以上, 每个样方内分别随机设置3个2 m×2 m的小区, 共计24个小区。采用随机区组的试验设计, 每处理4个重复。

1.3 土壤呼吸与温湿度测定及凋落物收集

将直径20 cm、高10 cm的PVC呼吸环埋设在每个小区的中心, 地上部分保留2 cm用于测定土壤呼吸速率。在PVC呼吸环放置24 h后开始第1次测定, 在研究期间呼吸环的位置不变。采用美国产开路式碳通量测定系统Li-8100^[13]测定土壤呼吸速率, 测定时间为2019年9月至2020年8月, 每月测定1次, 连续观测1 a, 选择月末晴朗的2~3 d, 每天09:00—11:00集中测定, 每个PVC呼吸环重复测

定3次。在PVC呼吸环周围使用时域反射仪(TDR, Model TDR300, Spectrum公司, 美国)测定0~10 cm处的土壤湿度, 使用数字式瞬时温度计(AM-11T, Avalon公司, 美国)测量0~10 cm处的土壤温度。

1.4 数据处理与分析

采用Excel 2019和SPSS 25.0软件对试验数据进行统计分析, 对湿地松林不同处理下的土壤呼吸和温度、湿度进行单因素方差分析, 对各呼吸组分进行组间差异分析。利用Origin 2021做图, 图中的数据为平均值±标准差。

土壤呼吸年通量: 每月测得的土壤呼吸速率之和。

土壤总呼吸速率(R_s): 测定SC处理的土壤呼吸速率。

壕沟法测定的异养呼吸速率(R_H): 测定SR处理的土壤呼吸速率。

壕沟法测定的自养呼吸(根系呼吸)速率(R_A): $R_A = R_s - R_H$ 。

凋落物层呼吸速率(R_L): $R_L = R_s - S_L$, S_L 表示去除凋落物。

矿质土壤呼吸速率(R_M): $R_M = R_s - R_L - R_A$ 。

环割法测定的异养呼吸速率(R_Y): 测定SG处理的土壤呼吸速率。

环割法测定的自养呼吸速率(R_Z): $R_Z = R_s - R_Y$ 。

土壤呼吸速率与土壤温度之间的关系采用指数模型拟合^[14]

$$R = a e^{bt} \quad (1)$$

式中: R 为土壤呼吸速率; a 为土壤温度0℃时的呼吸速率; b 为土壤对于温度的反应系数(温度敏感系数); t 为土壤温度。

$$\text{温度敏感性: } Q_{10} = e^{10b} \quad (2)$$

土壤呼吸速率与土壤湿度(W)之间采用二项式模型^[16]拟合:

$$R = a_1 W^2 + b_1 W + c_1 \quad (3)$$

式中: a_1 、 b_1 、 c_1 为常数。

2 结果与分析

2.1 不同处理方式下湿地松人工林土壤呼吸速率和温、湿度的月动态变化

从土壤呼吸速率的季节动态上来看(图1A), 湿地松人工林去除根系(SR)、去除凋落物(SL)、环割(SG)、环割+去根(SGR)、环割+去凋(SGL)和对照(SC)土壤呼吸年周期变化趋势基本一致, 最大值出现在6月, 最小值出现在1月。各处理土壤呼吸

速率月际动态变化均呈现出秋季、冬季变化幅度小而春季、夏季变化幅度大的趋势。SR 和 SL 处理土壤呼吸速率月平均值分别为 (1.20 ± 0.43) 、 $(1.64 \pm 0.45) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, SG 处理土壤呼吸速率月平均值为 $(1.67 \pm 0.66) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, SGR 和 SGL 处理土壤呼吸速率月平均值分别为 (1.17 ± 0.52) 、 $(1.20 \pm 0.36) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 均低于 SC

的 $(1.99 \pm 0.64) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 其中 SR、SGR 和 SGL 处理均与 SC 达到显著水平 ($P < 0.05$), SL 和 SG 处理与 SC 未达到显著水平 ($P > 0.05$)。不同处理土壤温度和湿度月平均值分别在 $12.58 \sim 28.45^\circ\text{C}$ 和 $2.20\% \sim 8.85\%$ 范围, 与 SC 相比, SL、SG、SGR、SGL 处理均升高了土壤温度, SR 和 SGR 处理均增加了土壤湿度(图 1B、图 1C)。

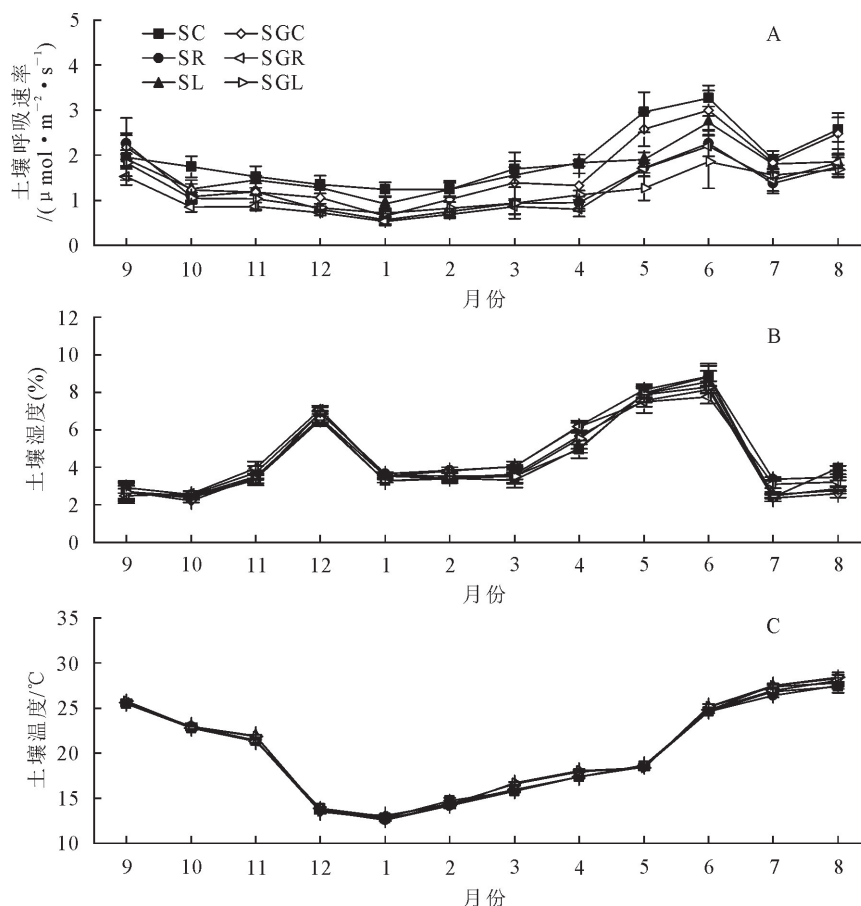


图 1 不同处理下湿地松人工林土壤呼吸速率和土壤温湿度的月动态变化

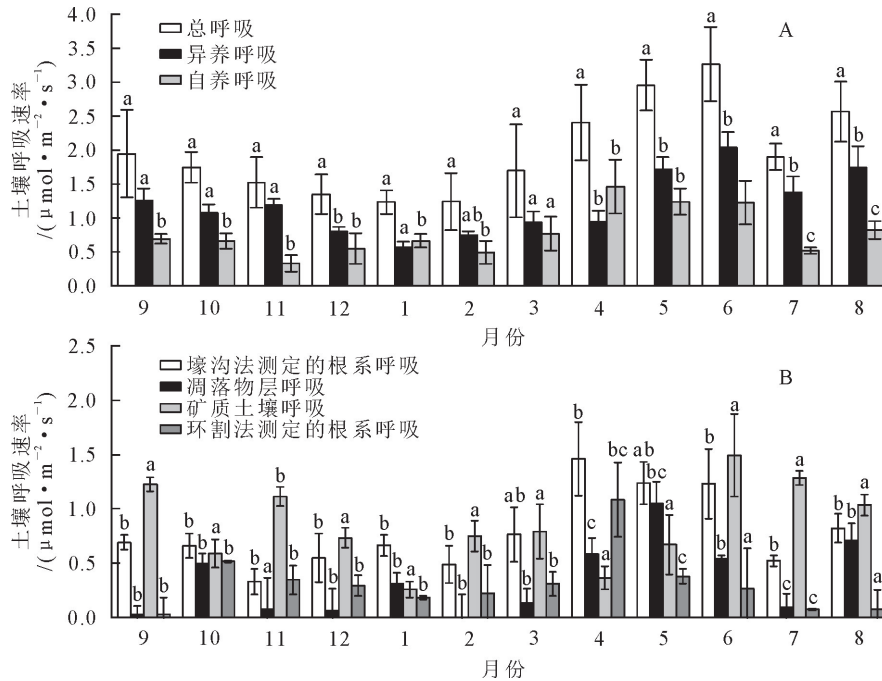
Fig. 1 Monthly dynamic changes of soil respiration, soil temperature and humidity in *P. elliotii* plantation under different treatments

2.2 不同处理方式下湿地松人工林土壤各组分呼吸速率的月动态变化

由图 2A 可见,在湿地松林地内土壤异养呼吸显著大于自养呼吸,壕沟法测定的异养呼吸速率月平均值为 $1.20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,自养呼吸速率月平均值为 $0.79 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;环割法测定的异养呼吸速率月平均值为 $1.67 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,自养呼吸速率月平均值为 $0.32 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,壕沟法测定的根系呼吸速率大于环割法测定的。在研究期间土壤各呼吸组分中矿质土壤呼吸速率对总呼吸的贡献率最大,月平均值为 $0.86 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;凋落物层呼吸速率月平均值为 $0.34 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。土壤呼吸各组分的贡献率大小为:矿质土壤呼吸速率>壕沟法测定的根系呼吸速率>凋落物层呼吸速率。

2.3 不同处理方式下湿地松人工林土壤呼吸年通量变化

从表 1 可知,各处理土壤呼吸年通量大小表现为对照>环割>去凋落物>去根>环割+去凋落物>环割+去根。在湿地松人工林中,对照(SC)、去除凋落物(SL)和环割(SG)处理土壤呼吸年通量均显著高于去除根系(SR)、环割+去根(SGR)和环割+去凋落物(SGL)处理。与对照相比,SR 和 SL 使土壤呼吸年通量降低了 39.6%、17.2%;与环割相比,SGR 和 SGL 使土壤呼吸年通量降低 30.1%、28.2%;环割区与对照相比,SG 使土壤呼吸年通量降低了 15.9%,SGR 和 SGL 使土壤呼吸年通量降低了 41.2%和 39.6%,表明环割对滨海地区湿地松人工林土壤碳排放速率的影响较小。



同一月份不同呼吸组分间未出现相同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图2 不同处理下湿地松人工林各组分呼吸速率的月动态变化

Fig. 2 Monthly dynamic changes of respiration rate of various components in *P. elliotii* plantation under different treatments

表1 湿地松人工林不同处理下的土壤呼吸年通量

Table 1 Annual fluxes of soil respiration under different treatments in *P. elliotii* plantations

项目	处理	湿地松
年通量/($t \cdot hm^{-2}$)	对照(SC)	23.82±0.64a
	去除根系(SR)	14.40±0.43b
	去除凋落物(SL)	19.74±0.45a
	环割(SG)	20.04±0.66a
	环割+去根(SGR)	14.00±0.52b
	环割+去凋(SGL)	14.39±0.36b

注:同列未出现相同小写字母表示差异显著。

2.4 不同处理方式下土壤呼吸与温湿度的关系及温度敏感性(Q_{10})变化

由表2可见,将湿地松人工林土壤呼吸与土壤温度建立指数拟合模型,可以更好地解释6种处理

土壤呼吸速率的变化,SC、SR、SL、SG、SGR和SGL处理下的土壤温度分别解释了34%、26.9%、38.7%、33%、36.7%和29.4%土壤呼吸速率的年变化,其中SL对温度有效性最敏感。将土壤呼吸与体积含水量间的关系进行二次项曲线模型拟合,可以更好地解释6种不同处理下呼吸速率的变化,SC、SR、SL、SG、SGR和SGL处理下的土壤湿度分别解释了34.5%、41.7%、39%、41.5%、40.5%和45.1%呼吸速率的年变化,其中SGL对水分有效性最为敏感。SC、SR、SL、SG、SGR和SGL处理的土壤呼吸 Q_{10} 分别为:0.827、0.861、0.869、0.835、0.827、0.878,与SC相比,除SGR处理土壤呼吸 Q_{10} 外,其余处理的土壤呼吸 Q_{10} 均有所提高。

表2 不同处理下湿地松人工林土壤呼吸速率与土壤温湿度的单因素回归模型及 Q_{10}

Table 2 Single factor regression model and Q_{10} value of soil respiration, soil temperature and humidity in *P. elliotii* plantation under different treatments

处理	$R_s = a e^{bT}$				$R_s = a_1 W^2 + b_1 W + c_1$					Q_{10}
	a	b	R^2	P	a_1	b_1	c_1	R^2	P	
对照(SC)	2.848	-0.019	0.340	>0.05	3.796	-0.053	2.873	0.345	<0.05	0.827
去除根系(SR)	1.813	-0.015	0.269	<0.01	-0.001	0.030	1.391	0.417	>0.05	0.861
去除凋落物(SL)	2.259	-0.014	0.387	<0.05	7.234	-0.026	2.231	0.390	>0.05	0.869
环割(SG)	1.770	-0.018	0.330	<0.05	-6.769	0.009	1.477	0.415	>0.05	0.835
环割+去根(SGR)	2.566	-0.019	0.367	<0.01	-4.487	-0.012	2.317	0.405	>0.05	0.827
环割+去凋(SGL)	1.662	-0.013	0.294	<0.01	-8.670	0.025	1.313	0.451	>0.05	0.878

2.5 不同处理和测定月份对土壤呼吸及温湿度影响的重复测定方差分析

用SPSS软件对试验数据进行重复测量方差分

析,结果表明,在湿地松人工林中,不同处理与测定月份对土壤呼吸速率和土壤湿度的影响均达到极显著水平($P<0.01$),说明碳输入方式与测定月份对

林地土壤呼吸速率和土壤湿度影响较大;不同处理对土壤温度影响不显著($P>0.05$),测定月份对土壤呼吸速率、土壤温度和湿度的影响均达到极显著

水平($P<0.01$);不同处理与测定月份的交互效应对土壤温度、湿度的影响均达到了显著水平($P<0.05$)。

表 3 不同处理和测定月份对湿地松人工林土壤呼吸速率及温湿度影响的重复测定方差分析

Table 3 Repeated measures analysis of variance for the effects of different treatments and months on soil respiration, soil temperature and humidity in *P. elliotii* plantations

项目	d_f	土壤呼吸速率		土壤温度		土壤湿度	
		F	P	F	P	F	P
处理	5	24.42	<0.01	1.72	>0.05	5.21	<0.01
月份	11	75.04	<0.01	11 064.90	<0.01	938.44	<0.01
处理+月份	55	1.47	>0.05	1.79	<0.05	1.71	<0.05

3 结论与讨论

3.1 结论

林地土壤呼吸对不同处理的响应特征存在差异,去除植物残体和环割处理均会使土壤呼吸速率降低,其中环割+去根处理使土壤呼吸年通量下降幅度最大,环割对土壤呼吸的影响最小,去除根系比去除凋落物对湿地松人工林土壤呼吸的影响更大。去除凋落物后土壤呼吸对温度有效性最敏感,环割+去凋处理后土壤呼吸对水分有效性最敏感。在营林过程中要确保凋落物的自然输入状态,保证凋落物对土壤养分的自然归还。

3.2 讨论

3.2.1 不同处理方式对土壤呼吸年通量的影响

在湿地松人工林中各处理均降低了土壤呼吸速率,其中去根比去凋落物处理使土壤呼吸年通量降低幅度明显,环割+去根处理使土壤呼吸年通量降低幅度也高于环割+去凋,这与何可宜等^[17]在樟子松人工林中的结果不同(去除凋落物对土壤呼吸速率的影响要远大于切除根系),表明根系和凋落物对不同林地类型土壤呼吸的影响不同,在本研究中根系比凋落物对林地土壤呼吸的贡献更大。根据 Wunderlich 等^[18]、杨玉盛等^[19]、Akburak 等^[20]的研究表明,树种可以调控凋落物的数量和质量、地下碳分配比例及生物量等来影响林地土壤碳排放。根系是植物与土壤进行物质交换和能量传递的纽带,作为土壤呼吸的自养呼吸组分,对土壤总呼吸的贡献率达 40%~60%,去除根系将造成土壤呼吸降低。赵江平等^[21]研究发现,去除根系使黄土丘陵区柠条人工林土壤呼吸速率下降 40.90%;左强等^[22]研究发现,去除根系使蛟河红松阔叶混交林土壤呼吸降低 36.49%。本研究去除根系使土壤呼吸速率降低 39.60%,与以上学者的研究结果相似。根系去除后植物地上地下物质交换通道被切断,植物无法摄取土壤中供生长所需的水分和养分,也阻断了光合同

化物运输到地下,会降低根际微生物的数量和活性,阻碍根系向土壤分泌碳,导致林地土壤呼吸减弱。

森林地表凋落物是土壤呼吸底物的重要组成部分,其数量和质量改变会导致土壤微环境变化,进一步影响到土壤微生物的种类和数量,从而影响土壤碳排放。张超等^[8]研究发现,去除凋落物使樟树和马尾松混交林土壤呼吸降低 24.30%;王光军等^[23]发现去除凋落物使杉木人工林土壤呼吸降低 14.97%,本研究去除凋落物使土壤呼吸降低 17.20%,其值介于两者之间。去除凋落物减少了地表微生物可利用碳源,土壤微生物生物量和活性降低,造成林地土壤呼吸速率下降。湿地松林下凋落物数量虽然较多,但针叶的分解速率慢(含有较多的纤维素和木质素且碳氮比较高),不利于转化成土壤有机质,微生物(异养呼吸)可利用的底物会相对较少,林地凋落物层呼吸作用较弱,且对于湿地松林地来说,较高的细根生物量使根系呼吸这一组分在土壤呼吸中占据较为重要的位置,这也就解释了为什么在湿地松林中去除根系会比去除凋落物对土壤呼吸的影响更大。

环割会直接造成韧皮部筛管断连,使光合产物向下运输受阻,树木因根部饥饿而死亡,导致根部呼吸作用减弱,使土壤呼吸速率降低 15.9%。数据表明,环割法测定的异养呼吸显著高于壕沟法,主要因为环割法不能排除林下植被根呼吸,且环割后根部仍储存着一部分淀粉,短期内根和根际微生物呼吸仍然存在,其残体还会逐渐转变成可供土壤异养微生物呼吸利用的根际凋落物,为其提供能量来源和物质基础,所以环割后立即测定异养呼吸速率可能会高估林地实际情况。该方法优点是对环境扰动较小,不会破坏土壤结构,但环割后立即测定土壤异养呼吸会存在较大的误差,估算出的异养呼吸速率值偏高。采用壕沟法切断根系后,土壤中存在大量死根,对土壤异养微生物增长有促进作用,对数据的准确性存在影响,应采用缓冲法减小误差,即在切断根

系后保持一段时间再进行测定,以减少活根系呼吸和死根系腐烂的影响。为了确保试验数据的准确性,本研究提前4个月进行断根处理,以减少无根小区中根系呼吸(含残根分解)。

3.2.2 土壤温湿度对土壤呼吸的影响 温度和水分的有效性能够改变植物根系活性、凋落物分解速度及土壤微生物数量和质量,还会影响土壤自养呼吸和异养呼吸在总呼吸中所占比例。各处理的土壤碳排放通量存在差异,可能是因为不同碳输入处理使土壤下垫面的覆盖情况发生改变,从而导致其他环境因子以及多种影响因素之间的相互作用发生不同程度的变化^[5]。湿地松人工林对照样地中土壤呼吸速率与土壤温度无显著相关性($P>0.05$),这与张艳如等^[24]、吕海燕等^[25]、李亚菲等^[26]的研究结果不同,这可能与树种类型、林下植被、立地条件、土壤性质、气候变化以及土壤微生物群落结构等有关。但环割和去凋落物土壤呼吸速率与土壤温度显著相关($P<0.05$),去根、环割+去根、环割+去凋处理土壤呼吸速率与土壤温度极显著相关($P<0.01$),可能是处理后土壤温度发生改变。各处理中去除凋落物对温度有效性最敏感,可能是因为去除凋落物会通过改变土壤根系呼吸、微生物呼吸以及土壤基质来影响土壤呼吸速率,去除凋落物后地表裸露,会削弱土壤对外界环境的抵抗能力,增加土壤温度敏感性,还有一种可能是去除凋落物后会增大土壤表层的年温差,从而使土壤呼吸对温度的敏感性增加。

水分直接影响土壤根系活性和微生物活动,间接影响土壤基质和 O_2 的逸散。水分过高会阻塞土壤孔隙,阻碍异养呼吸所需的 O_2 进入,抑制土壤呼吸生成物(CO_2)释放;水分过低会破坏植物根系和微生物生境来影响土壤呼吸速率。SC土壤呼吸速率与土壤湿度呈显著正相关($P<0.05$),这与王光军等^[23]、段北星等^[27]、邵康等^[28]的研究结果有所不同(土壤呼吸与土壤湿度无显著相关性),可能是因为亚热带或湿润亚热带季风气候带,林地土壤水分含量高,水分波动小,细微变化对林木根系和土壤微生物生理活动影响不大,因此很多研究发现土壤中水分含量与呼吸速率相关性不显著或呈负相关,但在干旱、较干旱地区或滨海沙质土壤中水分含量较少,土壤微生物多处于对水分的“代谢机敏状态”,可能会导致土壤湿度代替土壤温度成为影响土壤呼吸的限制因素,轻微变化都会使林地土壤呼吸发生改变。各处理中环割+去凋对水分有效性最为敏感,环割+去除凋落物处理减少了地上、地下两部分的碳输入,对湿地松林地土壤呼吸影响最大,环割切断了植物运输光合产物的通道,短期内蒸腾作用不

会被影响,木质部水分继续向上运输;去除凋落物后地表裸露导致水分蒸发,无法通过凋落物来吸持和拦截水量以提高土壤蓄水能力。环割+去除凋落物的叠加作用使土壤微环境变化较大,对土壤水分影响明显,这也就导致了环割+去凋处理对水分响应的敏感值较高。

3.2.3 不同处理方式对土壤呼吸温度敏感性 Q_{10} 的影响 与对照相比,去根和去凋落物均提高了土壤呼吸 Q_{10} ,可能是根系和凋落物去除后土壤对外部环境变化的抵抗能力减弱,根系去除与朱凡等^[29]在杉木人工林去除根系试验中得到的结论一致;凋落物去除与左嫚等^[10]在云南松林地枯落物输入试验、覃志伟等^[30]在马尾松×红锥混交林中的结果一致,但与熊莉等^[31]在川西亚高山粗枝云杉人工林中的结果不同。土壤呼吸温度敏感性 Q_{10} 受底物供应和土壤生物等诸多因素的影响,在不同气候条件或森林生态系统中,林地土壤呼吸的 Q_{10} 对不同碳输入的响应具有差异性。对于不同处理下土壤温度相对应 Q_{10} 的变化发现,环割+去凋处理土壤温度敏感性 Q_{10} 最大,可能是因为去除凋落物使土壤呼吸的温度有效性最敏感,且移除地表凋落物后会残留较多难分解的碳基质,而 Q_{10} 会随着基质的难分解程度增加而增加,最后去除凋落物和环割处理均使土壤 Q_{10} 升高,2种处理的交互作用造成 Q_{10} 最大。

3.2.4 土壤呼吸组分对总呼吸的贡献率 本研究中,湿地松人工林采用壕沟法测定的自养呼吸年通量占土壤总呼吸年通量的39.6%,异养呼吸年通量占土壤总呼吸年通量的60.4%。吴君君等^[32]在米楮林和杉木林中研究发现,自养呼吸的贡献率分别为32.5%和24.1%,异养呼吸贡献率为67.5%和75.9%。陈玮^[33]在太行山南麓不同植被类型试验中发现,在林地、灌丛、草地、裸地中自养呼吸贡献率分别为36.2%、35.7%、32.7%、31%,而异养呼吸贡献率为62.7%、61.9%、60.3%、58.7%。造成各呼吸组分在总呼吸中占额比例差异的原因有很多,如树种、植被类型、森林群落多样性、观测季节以及测定时对土壤产生的干扰等。采用环割法测定的自养呼吸年通量占土壤总呼吸年通量的15.8%,异养呼吸年通量占土壤总呼吸年通量的84.2%。总体上看, R_H 对于土壤 R_S 的贡献率更高,是湿地松人工林主要的土壤呼吸组分。

矿质土壤呼吸是异养呼吸中贡献率最高的组分(50.6%),这与孟春等^[34]在北方森林(哈尔滨落叶松林)中的研究结果一致,但与雷蕾等^[35]在南方森林(湖北地区马尾松)中的结果(R_M 贡献率较低)不同,造成结果差异的原因可能受地域的影响。根系

呼吸的贡献率为39.6%,与韩尚君等^[36]在油松林中的试验结果不一致(根系呼吸的贡献率较低,3个不同林龄分别为12.2%、14.8%和19.9%),其原因可能与研究地区沙土中水分含量较少,根系扎根较深活动频繁有关,此外根系呼吸贡献率还会受到植被类型、气候环境、立地条件差异等多种因素的影响。凋落物层呼吸贡献率较低(9.8%),可能是因为湿地松林地凋落物(针叶碳氮比较高)分解速率慢,微生物可利用底物较少。

参考文献:

- [1] 张扬,朱高峰,赵楠,等.敦煌市葡萄园土壤呼吸及其组分变化[J].水土保持通报,2021,41(1):73-81.
ZHANG Y, ZHU G F, ZHAO N, *et al.* Soil respiration and its components at vineyard in Dunhuang City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 73-81. (in Chinese)
- [2] LI Y H, LIN S, CHEN Q, *et al.* Response of soil respiration to environmental and photosynthetic factors in different Subalpine forest-cover types in a loess alpine hilly region[J]. Journal of Forestry Research, 2022, 33(2): 653-665.
- [3] 魏书精,罗碧珍,孙龙,等.森林生态系统土壤呼吸时空异质性及影响因子研究进展[J].生态环境学报,2013,22(4):689-704.
WEI S J, LUO B Z, SUN L, *et al.* Spatial and temporal heterogeneity and effect factors of soil respiration in forest ecosystems: a review [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(4): 689-704. (in Chinese)
- [4] YAN J X, FENG Y, LI J J, *et al.* Response of soil respiration and Q_{10} to temperature and moisture in naturally regenerated and bare lands based on an 11-year observation period[J]. Catena, 2022, 208: 105711.
- [5] 吴鹏,崔迎春,赵文君,等.改变凋落物输入对喀斯特森林主要演替群落土壤呼吸的影响[J].北京林业大学学报,2015,37(9):17-27.
WU P, CUI Y C, ZHAO W J, *et al.* Effects of litter exclusion and addition on soil respiration of major forest communities at two successional stages in Maolan karst forest of southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(9): 17-27. (in Chinese)
- [6] 高明磊,满秀玲,段北星.林下植被和凋落物对我国寒温带天然林土壤 CO_2 通量的短期影响[J].北京林业大学学报,2021,43(3):55-65.
GAO M L, MAN X L, DUAN B X. Short-term effects of understory vegetation and litter on soil CO_2 flux of natural forests in cold temperate zone of China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(3): 55-65. (in Chinese)
- [7] 张慧东,尤文忠,邢兆凯,等.辽东山区天然次生林和落叶松人工林的土壤呼吸[J].水土保持学报,2011,25(3):198-201, 224.
- [8] 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)
- [9] HÖGBERG P, NORDGREN A, BUCHMANN N, *et al.* Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration[J]. Nature, 2001, 411(6839): 789-792.
- [10] 左嫚,黎建强,杨关吕,等.基于DIRT处理的云南松林地土壤呼吸及其组分研究[J].中南林业科技大学学报,2021,41(8):125-133.
ZUO M, LI J Q, YANG G L, *et al.* Using DIRT treatments to access the soil respiration and its components in *Pinus yunnanensis* forest land in central Yunnan plateau[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 41(8): 125-133. (in Chinese)
- [11] 吴君君,杨智杰,刘小飞,等.米槎和杉木人工林土壤呼吸及其组分分析[J].植物生态学报,2014,38(1):45-53.
WU J J, YANG Z J, LIU X F, *et al.* Analysis of soil respiration and components in *Castanopsis carlesii* and *Cunninghamia lanceolata* plantations[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(1): 45-53. (in Chinese)
- [12] 桑昌鹏,万晓华,余再鹏,等.凋落物和根系去除对滨海沙地土壤微生物群落组成和功能的影响[J].应用生态学报,2017,28(4):1184-1196.
SANG C P, WAN X H, YU Z P, *et al.* Effects of litter and root exclusion on soil microbial community composition and function of four plantations in subtropical sandy coastal plain area, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(4): 1184-1196. (in Chinese)
- [13] 李键,刘鑫铭,姚成硕,等.武夷山国家公园不同林地土壤呼吸动态变化及其影响因素[J].生态学报,2021,41(9):3588-3602.
LI J, LIU X M, YAO C S, *et al.* Dynamic change of soil respiration and its effecting factors in different forest lands of Wuyishan national park[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3588-3602. (in Chinese)
- [14] 张彦军.凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素[J].环境科学,2017,38(8):3497-3506.
ZHANG Y J. Variation in the temperature sensitivity of surface litter respiration and its influencing factors[J]. Environmental Science, 2017, 38(8): 3497-3506. (in Chinese)
- [15] 左强,何怀江,张春雨,等.采伐对蛟河阔叶红松混交林土壤呼吸的影响[J].北京林业大学学报,2016,38(4):71-76.
ZUO Q, HE H J, ZHANG C Y, *et al.* Effects of cutting on soil respiration in a mixed broadleaf-Korean pine forest in western foothill of Changbai Mountain, northeast China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(4): 71-76. (in Chinese)
- [16] 雷蕾,肖文发,曾立雄,等.不同营林措施对马尾松林土壤呼吸影响[J].林业科学研究,2015,28(05):713-719.
LEI L, XIAO W F, ZENG L X, *et al.* Effect of forest management on soil respiration of *Pinus massoniana* [J]. Forest Research, 2015, 28(5): 713-719. (in Chinese)
- [17] 何可宜,沈亚文,冯继广,等.植物残体输入改变对樟子松人工林土壤呼吸及其温度敏感性的影响[J].北京大学学报:自然科学版,2021,57(2):361-370.

- HE K Y, SHEN Y W, FENG J G, *et al.* Effects of altered plant detritus input on soil respiration and its temperature sensitivity in a *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2021, 57(2):361-370. (in Chinese)
- [18] WUNDERLICH S, SCHULZ C, GRIMMEISEN W, *et al.* Carbon fluxes in coniferous and deciduous forest soils[J]. Plant and Soil, 2012, 357(1/2):355-368.
- [19] 杨玉盛, 陈光水, 王小国, 等. 中国亚热带森林转换对土壤呼吸动态及通量的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(7):1684-1690.
- [20] AKBURAK S, MAKINECI E. Temporal changes of soil respiration under different tree species[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(4):3349-3358.
- [21] 赵江平, 陈峰峰, 董从国, 等. 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[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(4):1-9.
- ZHAO J P, CHEN F F, DONG C G, *et al.* Response of soil respiration to carbon input in *Caragana korshinskii* plantation in Loess Hilly region[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(4):1-9. (in Chinese)
- [22] 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.
- [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.* Effects 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] 张艳如, 陈秋文, 孙美美, 等. 黄土丘陵区 4 种植被类型土壤呼吸季节及年际变化[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(4):729-734.
- ZHANG Y R, CHEN Q W, SUN M M, *et al.* Seasonal and interannual variation of soil respiration in four vegetation types in the Loess Hilly region[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018, 24(4):729-734. (in Chinese)
- [25] 吕海燕, 李玉灵, 孟平, 等. 华北南部低丘山地刺槐林地非主要生长季土壤微生物的呼吸特征[J]. 中国农业气象, 2011, 32(2):174-178.
- [26] 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):2687-2697.
- 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):2687-2697. (in Chinese)
- [27] 段北星, 蔡体久, 宋浩, 等. 寒温带兴安落叶松林凋落物层对土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(4):1357-1366.
- DUAN B X, CAI T J, SONG H, *et al.* Effect of soil litterfall on soil respiration in cold-temperate *Larch* forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4):1357-1366. (in Chinese)
- [28] 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)
- [29] 朱凡, 王光军, 田大伦, 等. 杉木人工林去除根系土壤呼吸的季节变化及影响因子[J]. 生态学报, 2010, 30(9):2499-2506.
- ZHU F, WANG G J, TIAN D L, *et al.* Seasonal variation of soil respiration by root exclusion and its controlling factors in a *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(9):2499-2506. (in Chinese)
- [30] 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.
- QIN Z W, ZHOU X G, WEN Y G, *et al.* Effects of litter removal and addition on soil respiration in a *Pinus massoniana* × *Castanopsis hystrix* mixed plantation [J]. Guangxi Sciences, 2019, 26(2):199-206. (in Chinese)
- [31] 熊莉, 徐振锋, 杨万勤, 等. 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[J]. 生态学报, 2015, 35(14):4678-4686.
- XIONG L, XU Z F, YANG W Q, *et al.* Aboveground litter contribution to soil respiration in a subalpine dragon spruce plantation of western Sichuan [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14):4678-4686. (in Chinese)
- [32] 吴君君, 杨智杰, 刘小飞, 等. 米槎和杉木人工林土壤呼吸及其组分分析[J]. 植物生态学报, 2014, 38(1):45-53.
- [33] 陈玮. 太行山南麓不同植被类型土壤呼吸特征及其温度敏感性[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2):92-98.
- CHEN W. Soil respiration and its temperature sensitivity of different vegetation types at southern foothill of Taihang Mountain[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2):92-98. (in Chinese)
- [34] 孟春, 罗京, 庞凤艳. 落叶松人工林生长季节土壤呼吸通量各组分的变化[J]. 应用生态学报, 2013, 24(8):2135-2140.
- MENG C, LUO J, PANG F Y. Variations of soil respiration flux components in a *Larix gmelinii* plantation during growth season[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(8):2135-2140. (in Chinese)
- [35] 雷蕾, 肖文发, 曾立雄, 等. 马尾松林土壤呼吸组分对不同营林措施的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(17):5360-5370.
- LEI L, XIAO W F, ZENG L X, *et al.* Responses of soil respiration and its components to forest management in *Pinus massoniana* stands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(17):5360-5370. (in Chinese)
- [36] 韩尚君, 韩海荣, 程小琴, 等. 改变凋落物输入对不同林龄油松林土壤呼吸的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(11):3576-3587.
- HAN S J, HAN H R, CHENG X Q, *et al.* Effects of alterations in litter inputs on soil respiration of *Pinus tabulaeformis* forests at different ages[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(11):3576-3587. (in Chinese)