

地表凋落物对油松、沙棘人工林土壤呼吸的影响

谢育利¹, 陈云明^{1,2}, 唐亚坤², 吴旭¹, 温杰³

(1. 中国科学院 教育部 水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:通过对黄土丘陵区油松、沙棘人工林自然组(含凋落物)和去凋组(不含凋落物)土壤呼吸、5 cm 土壤温度和含水量的监测,研究地表凋落物对土壤呼吸的影响。在两种林分内分别设置 20 m×20 m 样地,样地内随机设置 5 个观测点,于 2015 年 6 月到 2016 年 5 月使用 LI-8100 系统进行监测。结果表明:(1) 自然组油松林和沙棘林土壤呼吸季节动态及日动态均表现为单峰型变化曲线,沙棘土壤呼吸年均值 $[2.10 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 显著高于油松 $[1.56 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$, $p<0.05$;去除凋落物后,两种林分土壤呼吸与自然组具有相似的季节及日动态特征,但土壤呼吸年均值不存在显著性差异。(2) 沙棘林自然组土壤呼吸年均值显著高于去凋组 $[1.58 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$, $p<0.05$,凋落物呼吸对土壤总呼吸的贡献率为 15.81%;油松林自然组与去凋组土壤呼吸年均值差异不显著,凋落物呼吸对土壤总呼吸的贡献率仅为 1.61%。(3) 自然组和去凋组中油松、沙棘林土壤呼吸与温度均存在显著指数关系($p<0.05$),与含水量则存在显著线性负相关关系($p<0.05$);两组处理土壤温度和含水量对土壤呼吸的单独解释量均较低(0.05%~37.82%),土壤呼吸主要受到温度和含水量共同作用的影响(8.01%~66.44%)。地表凋落物显著提高了沙棘林土壤呼吸的 Q_{10} 和土壤呼吸量,但仅显著提高了油松林的 Q_{10} ,对土壤呼吸量并未显著增加。油松林作为黄土丘陵区水土保持及生态恢复的造林树种更有利于该地区林地碳汇功能的提升。

关键词:凋落物;人工林;土壤呼吸;土壤温度;土壤含水量

中图分类号:S718.55

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)06-0052-10

Impact of Aboveground Litterfall on Soil Respiration in the *Pinus tabulaeformis* and *Hippophae rhamnoides* Plantations

XIE Yuli¹, CHEN Yunming^{1,2}, TANG Yakun², WU Xu¹, WEN Jie³

(1. Research Center of Institute of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The effects of surface litterfall on the soil respiration (R_s) were studied base on observation of R_s , soil temperature (T) and soil water content (W) at 5 cm depth under natural group (with litterfall) and exclusive group (without litterfall) treatments in *Pinus tabulaeformis* and *Hippophae rhamnoides* plantations in the hilly Loess Plateau region. Two plots (20 m×20 m) were established in these two plantations with 5 sampling points randomly set up in each plot. R_s , T and W were simultaneously monitored by LI-8100 soil flux system from June 2015 to May 2016 in these plots. The results showed that: (1) the seasonal and daily variation of R_s in the two plantations under natural group exhibited unimodal curve, and the annual average R_s in *H. rhamnoides* plantation $[2.10 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ was significantly higher than that in *P. tabulaeformis* plantation $[1.56 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$, $p<0.05$. After removal of the litterfall, seasonal and daily dynamic of R_s in the two plantations were similar to that in natural group, and the annual average R_s in exclusive group did not exhibit significant differences for both forest stands; (2) the annual average R_s in natural group was significantly higher than in exclusive group $[1.58 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$, $p<0.05$ for *H. rhamnoides* plantation, with a contribution of 15.81% occupied by litterfall respiartion; however, no significant difference of annual average R_s between natural and exclusive group was observed in *P. tabulaeformis* plantation, and the contribution of litterfall to soil respiration was only 1.61%; (3) R_s under natural and exclusive groups were both

收稿日期:2016-12-12

修回日期:2017-01-07

资助项目:国家自然科学基金“黄土丘陵区油松和沙棘人工林的水分来源变化及其生理响应研究”(41501576);公益性行业(国家气象局)科研专项(重大专项)“干旱气象科学研究—我国北方干旱致灾过程及机理”(GYHY2015060013)

第一作者:谢育利(1989—),女,广西玉林人,硕士研究生,主要研究方向:人工林土壤呼吸。E-mail:1406599313@qq.com

通信作者:陈云明(1967—),男,陕西渭南人,博士,研究员,主要研究方向:黄土高原植被与水土保持。E-mail:ymchen@ms.iswc.ac.cn

exponentially correlated with T and negative linearly correlated with W on daily and seasonal scales in these two plantations ($p < 0.05$); T and W (8.01%~66.44%) together could better explain the variation of R_s than T or W alone (0.05%~37.82%) in both plantations under natural and exclusive group; litterfall significantly enhanced both the temperature sensitivity of R_s and R_s amount in *H. rhamnoides* plantation, but only significantly improved temperature sensitivity of R_s in the *P. tabulaeformis* plantation. As an important tree species for soil and water conservation and ecological restoration in the hilly Loess Plateau region, the *P. tabulaeformis* was more conducive to the improvement of carbon sequestration function of forestland in the region.

Keywords: litterfall; plantation; soil respiration; soil temperature; soil water content

土壤呼吸是陆地生态系统碳素从土壤中返回大气的主要途径^[1],不仅维持着全球碳平衡,而且对调节全球气候也起着非常重要的作用^[2]。其形式包括根系呼吸、土壤有机质呼吸和凋落物呼吸,其中凋落物是土壤呼吸地上碳源的重要组成部分,在保持水土、涵养水源、保育生物多样性、幼苗更新以及物质循环中具有十分重要的地位^[3],且地表凋落物分解占土壤呼吸的8%~48%^[4]。Raich等^[5]研究发现森林土壤呼吸速率与凋落物量显著正相关,去除凋落物后土壤呼吸总量显著降低。余再鹏等^[6]研究也表明,去除凋落物导致米老排人工林土壤呼吸显著减少29.8%。凋落物显著影响土壤呼吸是由于凋落物会改变土壤有机质供应,影响地表微环境条件(温度、湿度等因子)进而降低或增加土壤呼吸速率^[7-8]。

土壤温度和含水量都是影响土壤呼吸的关键环境因素,通常情况下土壤温度显著影响微生物分解、根系呼吸及酶和基质的扩散,因此被认为是土壤呼吸的主要控制因素^[9]。然而土壤水分较低时,微生物分解、根系呼吸及酶和基质的扩散受到土壤水分限制而降低^[10],从而影响根系、根际微生物的活性^[11-12]以及土壤有机质的分解速率^[9,13-14]。而不同林分凋落物对温度和含水量的影响并不一致,周小刚等^[15]研究发现刺槐林地表凋落物可以显著提高土壤含水量,李晓杰等^[16]研究表明杉木林凋落物对土壤含水量无显著影响,但可以显著提高土壤温度0.3℃,米楮林则显著提高了0.3℃的土壤温度和1.5%的土壤含水量。另外有研究发现,在自然状态下,土壤呼吸的温度敏感性(Q_{10})会随着底物供应能力的变化而发生改变,而底物供应能力的变化受到温度的调控,凋落物改变了地表微环境的温湿度,进而会影响温度敏感性^[7-8,17],但凋落物对 Q_{10} 值的影响具有不确定性,不同凋落物可能显著提高 Q_{10} 值,也可能显著降低 Q_{10} 值^[16]。此外,关于土壤呼吸与土壤温度和含水量之间关系的研究大多集中于土壤呼吸与温度和含水量的相关性,而土壤温度和含水量各自对土壤呼吸的单

独解释量以及二者对土壤呼吸的交互作用仍需进一步深入分析^[3,6,16,18-21]。因此,研究不同林分凋落物对土壤呼吸的影响有助于揭示凋落物对土壤呼吸的影响机制,为准确评估不同树种凋落物对土壤呼吸的贡献以及林分碳吸存潜力提供参考^[21]。

黄土丘陵区属于典型的生态脆弱区,水土流失严重,人工造林是该地区水土流失治理和生态恢复的主要措施,目前人工林面积已经占到该地区森林面积的59.8%^[22]。近年来,有关土壤呼吸方面的研究不断增多,而黄土丘陵区油松和沙棘人工林凋落物对土壤呼吸的影响目前还缺乏相关报道^[3,15-16,19,23-25]。鉴于此,本文以黄土丘陵区主要造林树种油松(*Pinus tabulaeformis*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)纯林为研究对象,于2015年6月—2016年5月采用野外观测方法分别观测自然组(含凋落物)与去凋组(不含凋落物)土壤呼吸、土壤温度和土壤含水量,分析油松林和沙棘林凋落物对土壤呼吸的影响,以期对比两种造林树种土壤碳释放过程,揭示不同凋落物对土壤呼吸的影响机制,为该区基于固碳减排模式下人工造林树种的选择提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西安塞县中国科学院安塞水土保持综合试验站(109.32°E,36.85°N,海拔1198 m),该地区年平均气温8.8℃,极端最高和最低温度分别为36.8℃和-23.6℃。年降水量500 mm左右,其中全年72.9%的降雨集中于6—9月,具有明显的季节性干旱。土壤以黄绵土为主,土壤容重约为1.32 g/cm³,土壤孔隙度为57.77%;主要植物有油松(*Pinus tabulaeformis*),沙棘(*Hippophae rhamnoides*),白羊草(*Bothriochloa ischaemum*),细裂叶莲蒿(*Artemisia gmelinii*)等。

试验样地位于安塞试验站的山地试验场。2015年调查的油松人工林造林密度为1300(株/hm²),林下草本植物主要为甘草(*Glycyrrhiza uralensis* Fisch),铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)以及狗尾草(*Setaria viridis* (L.)

Beauv.)等;沙棘人工林为2000(株/hm²),林下草本植物主要为白羊草(*Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng.)等。油松、沙棘样地概况见表1。

表1 样地基本概况

林分	坡向/ (°)	坡度/ (°)	密度/ (株·hm ⁻²)	平均 胸径/cm	平均 树高/m	平均冠幅/m	
						东西	南北
油松	西北20	14	1300	3.93	2.99	2.34	2.63
沙棘	东北60	16	2000	3.18	2.76	1.82	1.76

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 2015年4月底,在油松、沙棘人工林中分别选择20 m×20 m的标准样地,在每块样地内随机设置5个测量点,每个测量点设置4个土壤呼吸环,分别做2种处理:(1)保留凋落物(保持自然状态的凋落物)为自然组;(2)去除凋落物(使用尼龙网包裹土壤呼吸环以防止凋落物落入环中)为去凋组。每种处理每个测量点设置2个重复。土壤呼吸环在测定前4周打入,其中每个土壤呼吸环内径20 cm,高度10 cm,距离树干距离为30 cm,打入土壤后离地高度为3 cm。

1.2.2 土壤呼吸、土壤温度及土壤含水量测定 采用土壤碳通量测定系统(LI-8100, LI-COR, USA)的便携式呼吸室(8100—104)测定土壤呼吸(R_s),土壤温度(T)及土壤含水量(W)使用LI-8100系统自带的温度探针及含水量探头(MI2x)与土壤呼吸同步测定,测定深度均为5 cm。观测时间为2015年6月至2016年5月,观测方法^[23]为:生长季(4—10月)每月观测3次,每次测定时间为9:00—11:00;非生长季(11—3月)每月观测1次,每次测定时间为9:00—11:00;旺盛生长季(6—10月)加强观测:每月进行3次日动态观测,每次测定时间为6:00—18:00,每2 h测定1次。

1.3 数据处理

1.3.1 变异系数

$$CV = (SD / \text{mean}) \times 100\% \quad (1)$$

式中:CV是变异系数;SD是标准差;mean是均值。

1.3.2 方程拟合 土壤呼吸 $[R_s, \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 与土壤温度($T, ^\circ\text{C}$)采用指数方程^[16]拟合;与土壤含水量($W, \%$)采用线性方程^[16]拟合,温度敏感性方程如下:

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (2)$$

式中: b 是拟合参数; Q_{10} 为温度敏感性。季节动态及季节尺度土壤呼吸与温度和含水量回归采用每天均值,日动态及日尺度土壤呼吸与温度和含水量的回归采用每2 h观测均值。

1.3.3 年土壤呼吸量计算^[26]:

$$R_s = \sum F_k \cdot \Delta t_k \quad (3)$$

式中: $\Delta t_k = t_{k+1} - t_k$ 表示每两个观测值之间的天数;

R_s 表示土壤呼吸总量; F_k 表示 $t_{k+1} - t_k$ 之间的土壤呼吸均值。

1.3.4 凋落物对土壤呼吸的贡献率计算^[16]

凋落物对土壤呼吸的贡献率=凋落物层呼吸/自然组呼吸×100%

凋落物层呼吸=自然组呼吸-去凋组呼吸

1.3.5 凋落物量测定 在每个样地内分别放置4个直径为36 cm的圆形凋落物收集网,每月月底收集一次凋落物,带回实验室于烘箱65℃下烘干至恒重后称其质量。

1.3.6 数据分析 本研究使用Excel软件对土壤呼吸数据进行整理和计算,使用SigmaPlot 10.0绘图。使用R-freedom software version 3.2.2中的冗余分析(RDA)量化温度和含水量对土壤呼吸的解释量,使用SPSS 16.0(SPSS, USA)对油松林和沙棘林土壤呼吸差异性进行分析以及进行土壤呼吸与土壤温度、含水量和凋落物的方程拟合,使用一般线性模型(GLM)对 Q_{10} 曲线参数进行显著性检验^[27-28]。

2 结果与分析

2.1 油松、沙棘人工林土壤呼吸、土壤温度和含水量季节动态

观测期间油松、沙棘人工林自然组与去凋组土壤呼吸均呈现单峰型曲线变化(图1A,图2A),最高值均出现在6月,最低值均出现在2月。油松林自然组和去凋组土壤呼吸年均值分别为 $1.56 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $1.54 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,变异系数分别为40.42%和43.60%;沙棘林自然组和去凋组土壤呼吸年均值分别为 $2.10 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $1.58 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,变异系数分别为45.52%和48.51%。油松林自然组土壤呼吸年均值高于去凋组,但差异不显著($p > 0.05$);沙棘林自然组土壤呼吸年均值则显著高于去凋组(图3)($p < 0.05$)。两种林分自然组与去凋组土壤温度差异均不显著($p > 0.05$),且变化趋势一致,整体均表现为单峰曲线(图1B,图2B),最高值均出现在7月。油松林自然组土壤含水量与去凋组差异不显著($p > 0.05$),而沙棘林自然组土壤含水量显著高于去凋组($p < 0.05$),但两种林分土壤含水量变化具有相似的动态特征,6—8月较低,12月达到最高值,之后又逐步降低(图1C,图2C)。

此外,油松林自然组与去凋组土壤呼吸年呼吸总量分别为 $19.24 \text{ tCO}_2/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 和 $18.93 \text{ tCO}_2/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 图3,凋落物呼吸对全年土壤呼吸的贡献为1.61%,土壤呼吸与凋落物积累量不存在相关性(图4A);沙棘林自然组与去凋组土壤呼吸年呼吸总量分别为23.72

$\text{tCO}_2/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 和 $19.97 \text{ tCO}_2/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,凋落物呼吸对全年土壤呼吸的贡献为 15.81% ,土壤呼吸与凋落物积累量呈显著线性正相关($p<0.05$)(图 4B)。

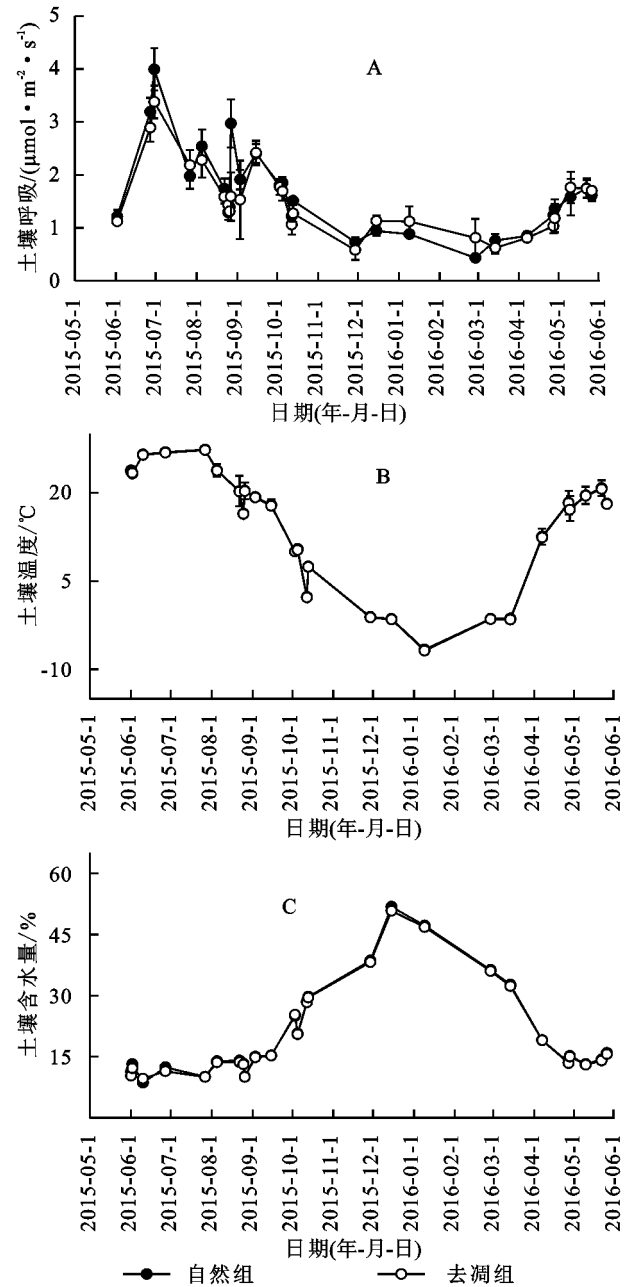
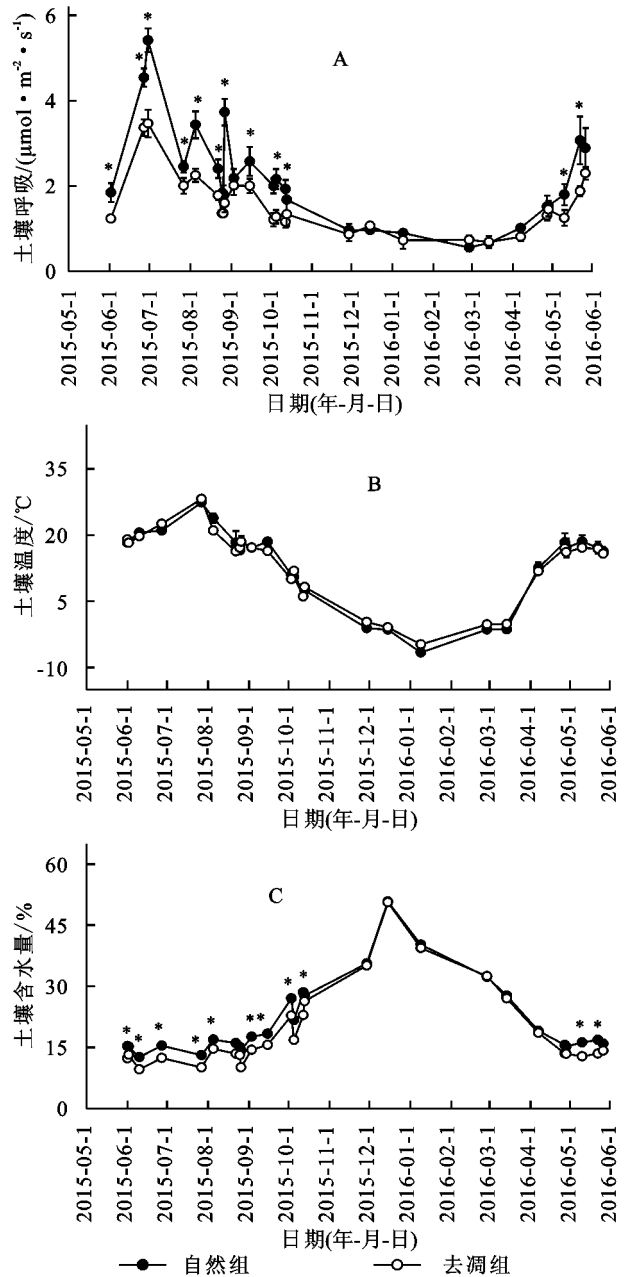


图 1 油松林自然组与去凋组土壤呼吸、土壤温度和土壤含水量季节动态

2.2 旺盛生长季油松、沙棘人工林土壤呼吸、土壤温度和含水量日动态

油松、沙棘人工林自然组与去凋组土壤呼吸及土壤温度均呈现单峰曲线的日动态变化特征。土壤呼吸最高值集中出现在 10:00—12:00(图 5A—E,图 6A—E),土壤温度则集中在 14:00(图 5F—J,图 6F—J),12:00 之前土壤呼吸大都随着温度升高呈上升趋势,12:00 之后温度继续上升土壤呼吸保持不变甚至出现了下降趋势(图 5A—J,图 6A—J)。土壤含

水量则表现为下降趋势,通常在 12:00 达到最低值,随后缓慢回升(图 5K—O,图 6K—O)。自然组油松林日均值为 $1.41\sim2.42 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,变异系数为 $8.59\%\sim14.54\%$,沙棘林为 $1.86\sim2.58 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,变异系数为 $3.99\%\sim13.74\%$;去除凋落物后,油松林日均值为 $1.36\sim2.18 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,变异系数为 $8.68\%\sim15.85\%$,沙棘林为 $1.30\sim2.40 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,变异系数为 $7.78\%\sim15.57\%$ 。油松林自然组与去凋组土壤呼吸、土壤温度和含水量差异均不显著(图 5, $p>0.05$),沙棘林自然组土壤呼吸和土壤含水量则大多显著高于去凋组(图 6, $p<0.05$)。



注: * 表示自然组与去凋组差异显著($p<0.05$),下同。

图 2 沙棘林自然组与去凋组土壤呼吸、土壤温度和土壤含水量季节动态

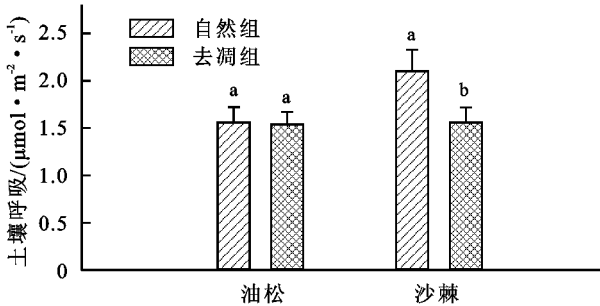
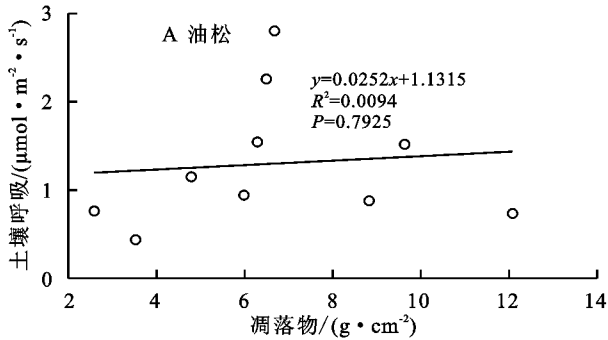


图 3 油松林和沙棘林自然组与去凋组土壤呼吸年均值

2.3 油松、沙棘人工林土壤呼吸与土壤温度和含水量的关系

在季节尺度上,两种林分自然组与去凋组土壤呼吸与土壤温度之间均存在显著指数关系($p<0.01$),与土壤含水量之间均存在显著线性负相关关系($p<0.01$,表 2)。自然组油松林温度敏感性(Q_{10})显著低于沙棘林($p<0.01$), Q_{10} 值分别为 1.48,1.49;去除凋落物后,油松林和沙棘林温度敏感性均显著降低,



Q_{10} 值分别为 1.42,1.47,但沙棘林 Q_{10} 值仍然显著高于油松林($p<0.01$)。采用 RDA 量化季节尺度土壤温度和含水量对土壤呼吸的解释量,结果发现土壤温度能够单独解释油松林中自然组和去凋组土壤呼吸季节变化的 37.82%和 20.65%,沙棘林中自然组和去凋组土壤呼吸季节变化的 7.87%和 13.13%。两种林分中土壤含水量对土壤呼吸季节变化的解释量都比较低,只有 0.23%~5.96%。而土壤温度与含水量的交互作用能够解释油松林中自然组和去凋组土壤呼吸季节变化的 8.01%和 24.04%,沙棘林中自然组和去凋组土壤呼吸季节变化的 38.64%和 30.91%(表 3)。油松林中凋落物去除后,降低了土壤温度对土壤呼吸 0.4 倍的单独解释量,提高了土壤水分 16.03 的单独解释量,提高了温度和含水量 2 倍的交互解释量;而沙棘林中凋落物提高了土壤温度对土壤呼吸变异 0.83 倍的单独解释量,提高了土壤含水量 2.09 的单独解释量,降低了 0.2 倍的交互解释量(表 3)。

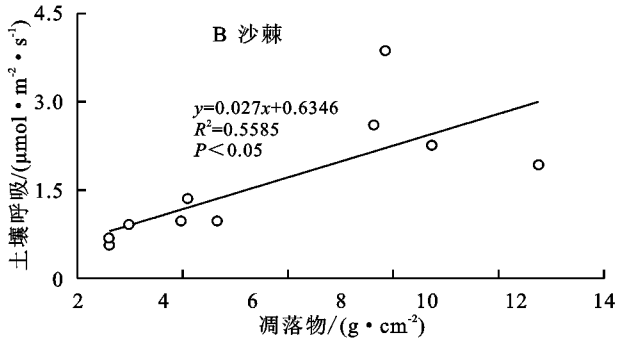


图 4 油松林和沙棘林土壤呼吸与凋落物相关性

在日尺度上,两种林分自然组与去凋组土壤呼吸与土壤温度之间均存在显著指数关系($p<0.05$),与土壤含水量之间均存在显著线性负相关关系($p<0.05$,表 4)。RDA 分析结果显示,两种林分自然组土壤呼

吸主要受到温度和含水量的交互作用(15.42%~66.44%),去除凋落物后,土壤温度和含水量对土壤呼吸日尺度变异的单独解释量为 1.61%~17.12%,交互作用为 33.66%~55.74%(表 5)。

表 2 季节尺度土壤呼吸与土壤温度和含水量函数拟合

林分	处理	样本	$R_s=aW+b$			$R_s=ae^{bT}$			Q_{10} 年均值
			a	b	R^2	a	b	R^2	
油松	自然组	26	-0.0407	2.5077	0.37**	0.8786	0.0394	0.48**	1.48aB
	去凋组	26	-0.0297	2.1572	0.30**	0.8813	0.0348	0.48**	1.42bB
沙棘	自然组	26	-0.0643	3.3128	0.34**	1.1888	0.0400	0.38**	1.49aA
	去凋组	26	-0.0429	2.4688	0.32**	0.9622	0.0383	0.43**	1.47bA

注: ** 表示拟合方程达到显著水平($p<0.01$);不同小写字母表示相同林分不同处理间差异($p<0.01$);不同大写字母表示相同处理不同林分间差异($p<0.01$)。

表 3 季节尺度土壤呼吸与土壤温度和含水量的 RDA 分析

林分	处理	温度水分	温度单独	水分单独	交互解
		总解释量/%	解释量/%	解释量/%	释量/%
油松	自然组	46.18	37.82	0.35	8.01
	去凋组	50.65	20.65	5.96	24.04
沙棘	自然组	46.74	7.87	0.23	38.64
	去凋组	44.75	13.13	0.71	30.91

3 讨论

3.1 凋落物对季节尺度和日尺度土壤呼吸的影响

凋落物作为土壤呼吸底物的重要组成部分,显著影响土壤呼吸。在本研究观测期间(2015 年 6 月—2016 年 5 月),凋落物对土壤呼吸量在季节尺度及日尺度上均有提高作用,其中对沙棘林的提高作用达显

著水平($p<0.05$),对油松林的提高作用则不显著($p>0.05$)。季节尺度油松林和沙棘林凋落物分别提高了 7.23%和 20.95%的土壤呼吸,日尺度上提高了 4.76%~15.82%和 7.50%~74.64%。周小刚等^[15]研究发现,凋落物显著影响土壤呼吸,去除凋落物后土壤呼吸显著减少了 22%。余再鹏等^[6]研究表明,去除凋落物分别显著降低了米老排和杉木人工林 29.8%和 6.1%的土壤呼吸。其原因可能是去除凋落物一方面减少了有机碳的输入,同时也去除了生长在凋落物上的微生物,可能改变土壤微生物群落结构,进而降低土壤呼吸速率^[29]。然而,沙棘林凋落物呼吸对全年土壤呼吸的贡献为 15.81%,油松林却只有 1.61%。两个林分凋落物呼吸对土壤呼吸贡献不同,可能与不同林分凋落物积累量、分解速率不同有关^[16]。在本研究观测期间,沙棘林月均凋落物积累量高于油松林,分别为 4.47 kg/m² 和 1.60 kg/m²。杨万勤等^[30]研究发现针叶林 C/N、木质素/N、萜类物质和酚类物质含量较高,分解较慢,易形成酸性粗腐殖质,抑制土壤微生物活性,土壤微生物群落生长和繁衍受到限制。这可能是油松林凋落物对土壤呼吸贡献量较沙棘林低的原因。

表 4 日尺度土壤呼吸与土壤温度和含水量的函数拟合

林分	样本	日期	处理	R ²	
				T(Q ₁₀)	W(L)
油松	7	6 月 10 日	自然组	0.48	0.63*
	7		去凋组	0.51*	0.72*
	7	7 月 27 日	自然组	0.43	0.25
	7		去凋组	0.14	0.69
	7	8 月 22 日	自然组	0.41*	0.59*
	7		去凋组	0.53*	0.72*
	7	9 月 15 日	自然组	0.66*	0.5*
	7		去凋组	0.62*	0.65*
	7	10 月 11 日	自然组	0.34	0.41
	7		去凋组	0.65*	0.44
	7	6 月 10 日	自然组	0.53	0.71*
	7		去凋组	0.48*	0.62*
	7	7 月 27 日	自然组	0.40	0.12
	7		去凋组	0.00	0.001
	7	8 月 22 日	自然组	0.00	0.05
	7		去凋组	0.07	0.24
沙棘	7	9 月 15 日	自然组	0.32	0.37
	7		去凋组	0.64*	0.66*
	7	10 月 11 日	自然组	0.56*	0.65*
	7		去凋组	0.48*	0.66*

注: T(Q₁₀), 土壤呼吸与土壤温度指数回归; W(L), 土壤呼吸与土壤含水量线性回归; * 表示拟合方程达到显著水平 ($p<0.05$)。

表 5 日尺度土壤呼吸与土壤温度和含水量的 RDA 分析

林分	日期	处理	温度水分总 解释量/%	温度单独 解释量/%	水分单独 解释量/%	交互解 释量/%
油松	8 月 22 日	自然组	33.49	0.05	18.02	15.42
		去凋组	60.51	6.36	17.12	37.03
	9 月 15 日	自然组	68.24	1.54	0.26	66.44
		去凋组	70.02	10.59	3.69	55.74
沙棘	10 月 11 日	自然组	57.09	0.90	0.34	55.85
		去凋组	46.07	1.61	10.80	33.66

3.2 凋落物对土壤呼吸与土壤温度和含水量之间关系的影响

在本研究中,季节尺度及日尺度上用指数方程分别拟合油松林和沙棘林两组凋落物处理土壤呼吸与土壤温度之间的关系达显著水平($p<0.05$),与以往研究结果一致^[16,18-19,21],但土壤呼吸与土壤含水量之间的关系表现为线性负相关,与李晓杰等^[16]土壤呼吸与土壤含水量显著正相关的研究结果相反。车升国等^[29]研究发现土壤含水量对土壤呼吸具有双向调节作用,土壤水分处于相对缺水状态时,土壤含水量的增加会促进土壤呼吸,相反当土壤水分超过某个阈值时,土壤水分增加会抑制土壤呼吸。越来越多的研究表明,水分对土壤呼吸的影响具有复杂性与不确定性,不同生态系统土壤水分与呼吸之间分别存在正相关、负相关及不相关关系。多数生态系统土壤水分含量在永久萎蔫点与田间持水量之间时,随着含水量提高,根系发育良好,根际微生物新陈代谢加强,土壤呼吸增加明显,因此土壤呼吸与土壤含水量呈显著正相关^[25]。土壤含水量在一定的范围内(田间持水量和萎蔫系数之间)时,含水量对土壤呼吸没有显著影响。而土壤含水量超过田间持水量后,土壤水分饱和,氧气向土壤中扩散受阻,根系和微生物呼吸受到抑制,随着土壤含水量的增加土壤呼吸速率反而下降。在我们的研究中,2015 年 6—8 月试验样地降雨量仅为潜在蒸发量的 12%,9 月份之后干旱状况得到缓解。但在季节动态中,土壤温度对土壤呼吸的控制作用大于含水量(表 3)。2015 年 9—12 月,随着降雨量的增加,土壤含水量逐渐升高,但温度逐渐降低,土壤呼吸也逐渐下降。2016 年 1—5 月土壤含水量呈现下降趋势,但此时温度逐渐增加,土壤呼吸呈增加趋势。因此导致本研究土壤呼吸与含水量出现了负相关关系。由此可见土壤呼吸影响因素众多,影响机制复杂,不同条件下影响和决定土壤呼吸的机制有所变化,因此土壤含水量对土壤呼吸的影响无法用统一的方程表达式来描述。

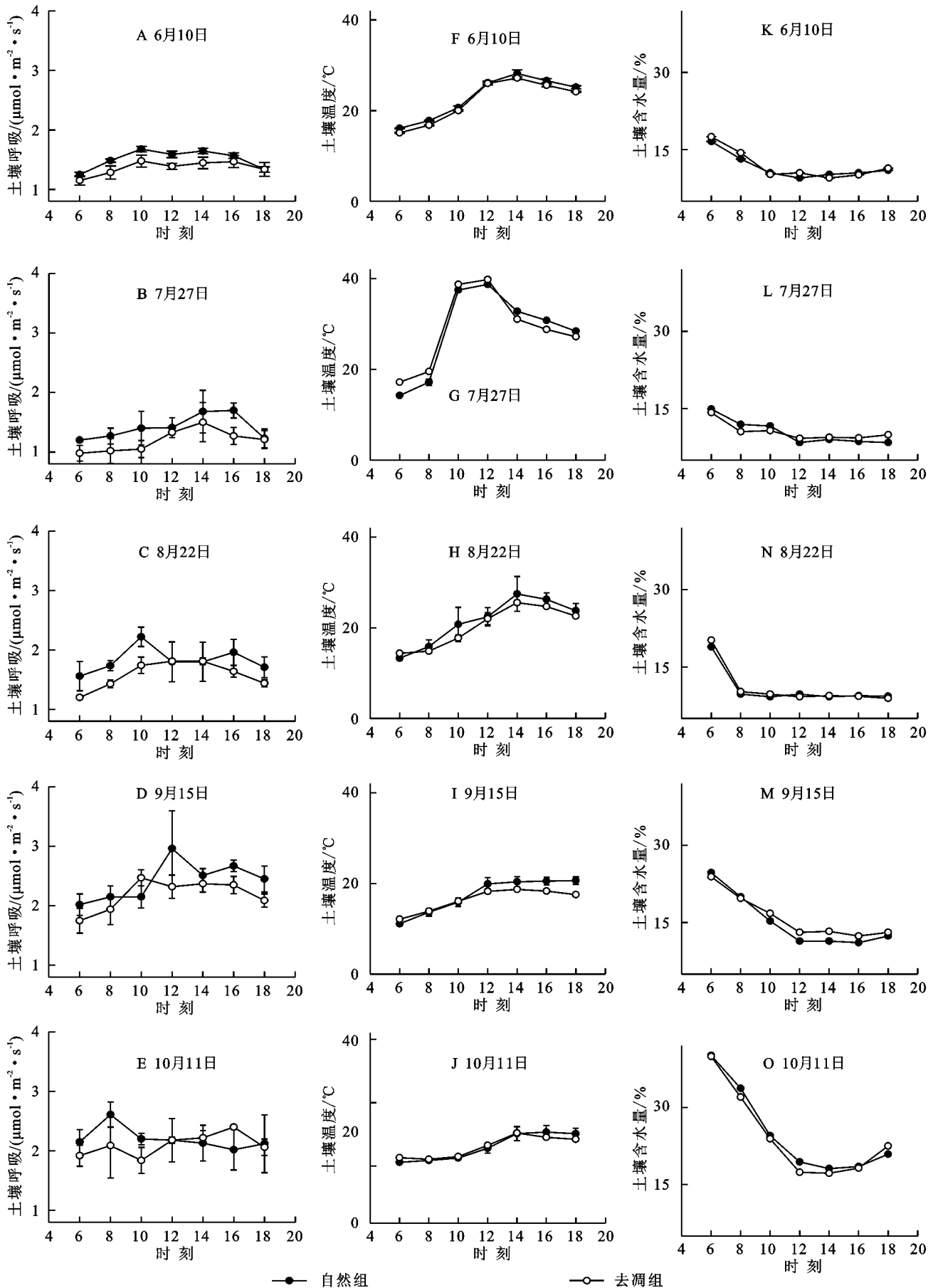


图5 油松林自然组和去凋组土壤呼吸(A-E)、土壤温度(F-J)和土壤含水量(K-O)6-10月日动态

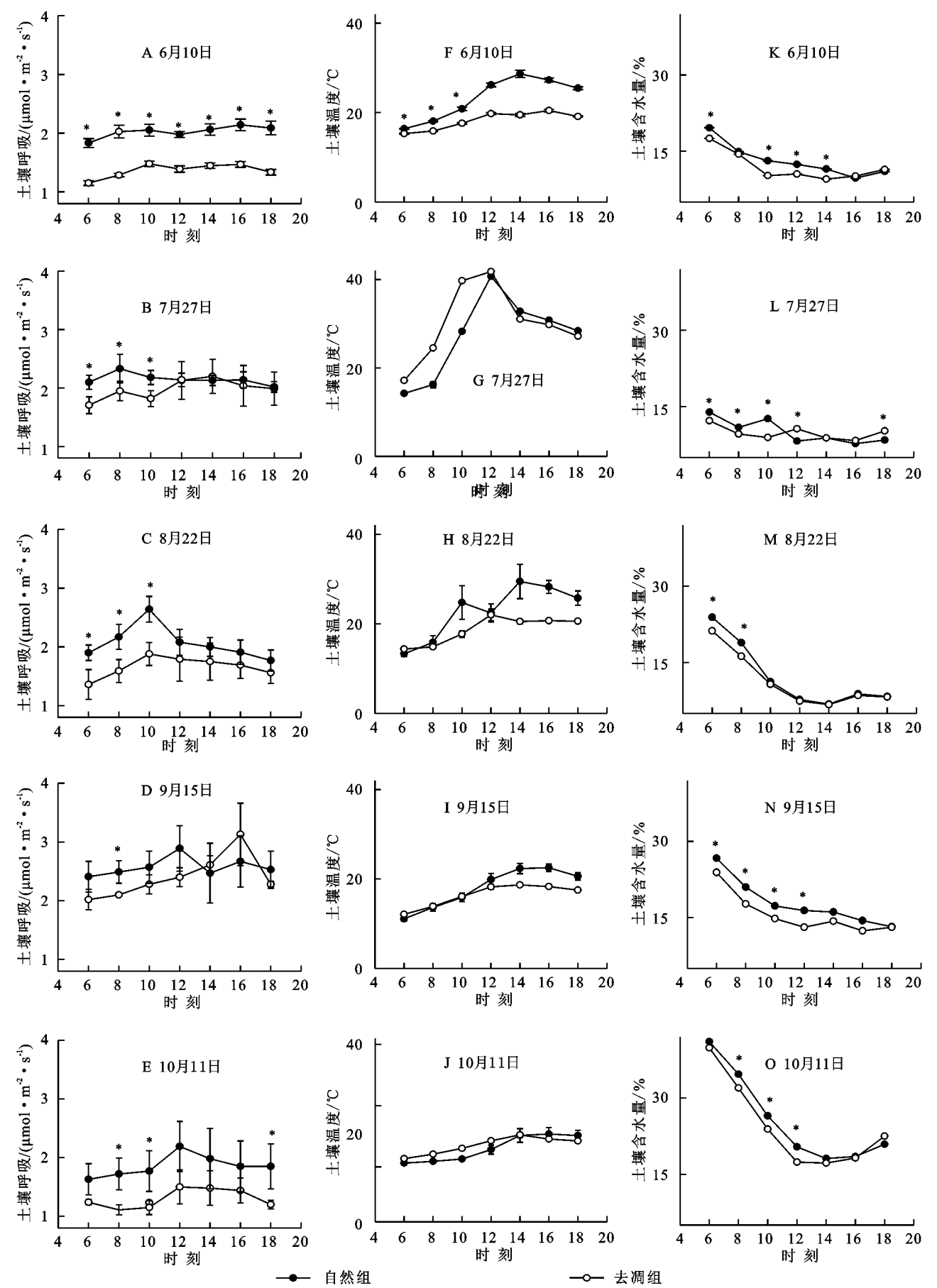


图 6 沙棘林自然组和去凋组土壤呼吸(A—E)、土壤温度(F—J)和土壤含水量(K—O)6—10月日动态

本研究中油松林和沙棘林自然组土壤呼吸温度敏感性均显著高于去凋组(表2),这可能是因为凋落物层对生态系统的环境、土壤和植被均有一定的影响^[25],通过在土壤和大气之间形成的缓冲层调控着土壤小气候^[20],为微生物维持了适宜的环境使得微生物具有较好活性,因而对温度变化更为敏感^[17]。自然组油松林土壤呼吸温度敏感性均显著低于沙棘林($p < 0.01$)。不同森林类型土壤呼吸温度敏感性的差异可能是底物供应的季节变化差异所造成^[17]。Janssens等^[31]研究发现,在相同的温度变化范围内底物供应的季节变化越大,土壤呼吸的温度敏感性就越大。韩其晟等^[32]研究发现阔叶林凋落物更容易被土壤微生物分解利用,较针叶林具有更高的物质循环速率,因此阔叶林底物供应的季节变化更大,进而具有更高的土壤呼吸温度敏感性。而去除凋落物后油松林土壤呼吸温度敏感性也显著低于沙棘林($p < 0.01$),这可能是因为不同林分根际土壤微生物对温度响应的不同。Balser和Wixon^[33]对3个不同生态系统的根际土壤微生物种群结构进行研究后发现,微生物种群数量和结构特征会显著地影响到土壤呼吸的温度敏感性,不同种群结构的微生物具有不同的温度敏感性。而细菌由于个体小,代谢强,繁殖快,与土壤接触面积大,导致细菌起主要作用的微生物群落具有较高的温度敏感性。张海涵等^[34]研究发现,油松林和沙棘林均具有丰富的土壤微生物,而沙棘林较油松具有更丰富的细菌微生物群落。这可能是去除凋落物后沙棘林土壤呼吸温度敏感性仍显著高于油松林的原因。此外,研究表明针叶林根系可能会对温度产生适应,而落叶阔叶林则对温度变化较为敏感^[31],而在本研究中,关于油松和沙棘两种林分根系呼吸机制的差异有待于进一步研究。

4 结论

(1) 黄土丘陵区油松、沙棘人工林自然组与去凋组土壤呼吸具有相似的季节动态趋势,最高值均出现在6月,最低值均出现在2月,且自然组沙棘林土壤呼吸年均值显著高于油松林($p < 0.05$)。

(2) 凋落物呼吸对沙棘林土壤呼吸的贡献量($3.75 \text{ tCO}_2/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)高于油松林($0.31 \text{ tCO}_2/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$),两种林分凋落物呼吸分别占林分土壤总呼吸的15.81%和1.61%。

(3) 两种林分自然组与去凋组土壤呼吸与土壤温度和含水量均存在显著相关性($p < 0.05$),土壤呼

吸主要受到土壤温度和含水量的共同作用,且凋落物显著提高了两种林分土壤呼吸的温度敏感性。

参考文献:

- [1] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO_2 emissions from soil in response to global warming [J]. *Nature*, 1991, 351(6324): 304-306.
- [2] 王新源,李玉霖,赵学勇,等. 干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展[J]. *生态学报*, 2012, 32(15): 4890-4901.
- [3] 赵昕,张万军,沈会涛,等. 针阔树种人工林地表凋落物对土壤呼吸的贡献[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(11): 1318-1325.
- [4] Deforest J L, Chen J, McNulty S G. Leaf litter is an important mediator of soil respiration in an oak-dominated forest [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2009, 53(2): 127-134.
- [5] Raich J W, Nadelhoffer K J. Belowground carbon allocation in forest ecosystems: Global trends [J]. *Ecology*, 1989, 70(5): 1346-1354.
- [6] 余再鹏,万晓华,胡振宏,等. 亚热带杉木和米老排人工林土壤呼吸对凋落物去除和交换的响应[J]. *生态学报*, 2014, 34(10): 2529-2538.
- [7] Xu S, Liu L L, Sayer E J. Variability of above-ground litter inputs alters soil physicochemical and biological processes: A meta-analysis of litterfall-manipulation experiments [J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(11): 7423-7433.
- [8] Kuzyakov Y. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(9): 1363-1371.
- [9] Jassal R S, Black T A, Novak M D, et al. Effect of soil water stress on soil respiration and its temperature sensitivity in an 18-year-old temperate Douglas-fir stand [J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(6): 1305-1318.
- [10] Yuste J C, Janssens I A, Carrara A, et al. Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime pine forest [J]. *Tree Physiology*, 2003, 23(18): 1263-1270.
- [11] Hallett P D, Young I M. Changes to water repellence of soil aggregates caused by substrate-induced microbial activity [J]. *European Journal of Soil Science*, 1999, 50(1): 35-40.
- [12] Drenovsky R E, Vo D, Graham K J, et al. Soil water content and organic carbon availability are major determinants of soil microbial community composition [J]. *Microbial Ecology*, 2004, 48(3): 424-430.
- [13] Liu W, Zhang Z, Wan S. Predominant role of water in regulating soil and microbial respiration and their re-

- sponses to climate change in a semiarid grassland [J]. *Global Change Biology*, 2009,15(1):184-195.
- [14] Moyano F E, Vasilyeva N, Bouckaert L, et al. The moisture response of soil heterotrophic respiration: Interaction with soil properties [J]. *Biogeosciences*, 2012,9(3):1173-1182.
- [15] 周小刚,郭胜利,车升国,等. 黄土高原刺槐人工林地地表凋落物对土壤呼吸的贡献[J]. *生态学报*, 2012,32(7): 2150-2157.
- [16] 李晓杰,刘小飞,熊德成,等. 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[J]. *植物生态学报*, 2016,40(5):447-457.
- [17] 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.
- [18] 姚辉,胡雪洋,朱江玲,等. 北京东灵山3种温带森林土壤呼吸及其20年的变化[J]. *植物生态学报*, 2015,39(9):849-856.
- [19] 颜廷武,尤文忠,张慧东,等. 辽东山区落叶松人工林非生长季土壤呼吸及其影响因子研究[J]. *辽宁林业科技*, 2015,(1):20-22,52.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 陈云明,刘国彬,徐炳成. 黄土丘陵区人工沙棘林水土保持作用机理及效益[J]. *应用生态学报*, 2005,16(4): 595-599.
- [23] Shi W Y, Yan M J, Zhang J G, et al. Soil CO₂ emissions from five different types of land use on the semiarid Loess Plateau of China, with emphasis on the contribution of winter soil respiration [J]. *Atmospheric Environment*, 2014,88:74-82.
- [24] Zhou Z, Zhang Z, Zha T, et al. Predicting soil respiration using carbon stock in roots, litter and soil organic matter in forests of Loess Plateau in China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013,57(2013):135-143.
- [25] 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.
- [26] Shi X, Zhang X, Yang X, et al. Contribution of winter soil respiration to annual soil CO₂ emission in a Mollisol under different tillage practices in northeast China [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012,26(2):1029-2011.
- [27] Wei Y F, Fang J, Liu S, et al. Stable isotopic observation of water use sources of *Pinus sylvestris* var. *Mongolica* in Horqin Sandy Land, China [J]. *Trees*, 2013,27(5):1249-1260.
- [28] 吴旭,陈云明,唐亚坤. 黄土丘陵区刺槐和侧柏人工林树干液流特征及其对降水的响应[J]. *植物生态学报*, 2015,39(12):1176-1187.
- [29] 车升国,郭胜利,张芳,等. 黄土区夏闲期土壤呼吸变化特征及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2010,47(6):1159-1169.
- [30] 杨万勤,邓仁菊,张健. 森林凋落物分解及其对全球气候变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2007,18(12):2889-2895.
- [31] Janssens I A, Carrara A, Ceulemans R. Annual Q₁₀ of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity [J]. *Global Change Biology*, 2004,10(2):161-169.
- [32] 韩其晟,任宏刚,刘建军. 秦岭主要森林凋落物中易分解和难分解植物残体含量及比值研究[J]. *西北林学院学报*, 2012,27(5):6-10.
- [33] Balser T C, Wixon D L. Investigating biological control over soil carbon temperature sensitivity [J]. *Global Change Biology*, 2009,15(12):2935-2949.
- [34] 张海涵,唐明,陈辉,等. 黄土高原5种造林树种菌根根际土壤微生物群落多样性研究[J]. *北京林业大学学报*, 2008,30(3):85-90.