

网络出版时间:2016-04-07 09:00

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.05.011

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160407.0900.022.html>

藏东南原始暗针叶林生长季的土壤呼吸特征

郭其强^{1,2,3}, 马和平^{1,2,3}, 钱登峰³, 叶彦辉³, 韩艳英³, 边巴多吉⁴

(1 西藏高原生态研究所, 西藏 林芝 860000; 2 西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站, 西藏 林芝 860000;

3 西藏农牧学院, 西藏 林芝 860000; 4 西藏自治区林业调查规划研究院, 西藏 拉萨 850000)

【摘要】【目的】探讨藏东南原始林生长季土壤呼吸特征, 以了解藏东南亚高山森林生态系统土壤碳循环过程及其关键驱动因子。【方法】在色季拉山东坡林芝云杉林和急尖长苞冷杉林中各设置典型样地 3 块, 用 LI-8100 土壤碳通量仪测定土壤呼吸速率, 并取土样测定其理化特性, 以此分析 2 种原始林土壤呼吸速率的变化规律及影响因素。【结果】(1) 林芝云杉林和急尖长苞冷杉林土壤呼吸速率日变化均呈近似“n”型, 日平均土壤呼吸速率分别为 (3.25 ± 0.74) 和 $(2.95 \pm 0.62) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 不同月份下 2 种原始林土壤呼吸速率均表现为 7 月 > 8 月 > 6 月, 同月份下为林芝云杉林大于急尖长苞冷杉林; 林芝云杉林土壤呼吸速率对温度的响应较急尖长苞冷杉林敏感。(2) 林芝云杉林和急尖长苞冷杉林土壤呼吸速率与土壤温度均呈极显著指数正相关 (R^2 分别为 0.75 和 0.94), 而与土壤湿度呈极显著线性负相关 (R^2 分别为 0.71 和 0.79)。(3) 林芝云杉林和急尖长苞冷杉林土壤日碳通量与土壤有机碳呈极显著指数正相关 (R^2 分别为 0.91 和 0.82), 而与微生物量碳呈极显著指数负相关 (R^2 分别为 0.88 和 0.89)。【结论】西藏暗针叶林生长季土壤呼吸主要受土壤温度和水分调控, 也与土壤有机碳和微生物量碳密切相关。

【关键词】 原始暗针叶林; 土壤呼吸; 土壤理化特性

【中图分类号】 S714.2

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2016)05-0082-07

Soil respiration characteristics of primitive dark coniferous forests during growing season in southeast Tibet

GUO Qi-qiang^{1,2,3}, MA He-ping^{1,2,3}, QIAN Deng-feng³,
YE Yan-hui³, HAN Yan-ying³, BIANBA Duo-ji⁴

(1 Institute of Tibet Plateau Ecology, Linzhi, Tibet 860000, China; 2 National Forest Ecosystem Observation & Research Station of Tibet Linzhi, Linzhi, Tibet 860000, China; 3 Tibet Agriculture and Animal Husbandry College, Linzhi, Tibet 860000, China; 4 Research Institute of Forestry Investigation in Tibet Autonomous Region, Lasa, Tibet 850000, China)

Abstract: 【Objective】Study on soil respiration characteristics of virgin dark coniferous forests in southeast Tibet was conducted to understand course and key driving factors of soil respiration rate. 【Method】Respiration rate of soil was determined by using the LI-8100 soil carbon flux determinator, and the physical and chemical characteristics of the soil samples were further measured, all these indicators were used to analyze the respiration rate of soil and the related environment factors in three typical plots of *Picea likiangensis* var. *linzhiensis* forest and in three typical plots of *Abies georgei* var. *smithii* forest on the eastern slope of Sejila Mountain. 【Result】The diurnal variation of soil respiration rates was in “n” shape curve in *P. likiangensis* var. *linzhiensis* forest and *A. georgei* var. *smithii* forest with daily average values

【收稿日期】 2014-09-29

【基金项目】 国家自然科学基金项目(41061033, 31460122, 31360119); 西藏林芝森林生态系统定位研究项目(2012-LYPT-DW-016); 西藏自治区自然科学基金项目(2015-2016)

【作者简介】 郭其强(1980—), 男, 河南信阳人, 在读博士, 主要从事土壤碳循环与森林生态环境研究。

E-mail: hnguoqi@126.com

【通信作者】 叶彦辉(1980—), 男, 河南临颖人, 副教授, 主要从事西藏高原碳循环研究。E-mail: yeyanhui3554@126.com

of (3.25 ± 0.74) and $(2.95 \pm 0.62) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. The soil respiration rates were in a decreasing order of July > August > June in both virgin forests, and *P. likiangensis* var. *linzhiensis* forest had higher values than *A. georgei* var. *smithii* forest in each month. The response of soil respiration rate of *P. likiangensis* var. *linzhiensis* forest to temperature was more sensitive than that of *A. georgei* var. *smithii* forest. A significant positive exponential correlation was found between soil respiration rate and soil temperature in *P. likiangensis* var. *linzhiensis* forest and *A. georgei* var. *smithii* forest (R^2 are 0.75 and 0.94, separately), while a significant negative linear correlation existed between soil respiration rate and soil water content (R^2 are 0.71 and 0.79, separately). Diurnal carbon flux and organic carbon in soil were in significantly positive exponential correlation (R^2 are 0.91 and 0.82, separately) in *P. likiangensis* var. *linzhiensis* forest and *A. georgei* var. *smithii* forest, while diurnal carbon flux and microbial biomass carbon in soil were in significant negative exponential correlation (R^2 are 0.88 and 0.89, separately). 【Conclusion】 Temperature and water content of soil in virgin dark coniferous forests were the main factors for regulating soil respiration rate. They also closely related with organic carbon and microbial biomass carbon in soil.

Key words: primitive dark coniferous forests; soil respiration; soil physical and chemical characteristics

森林生态系统对土壤 CO_2 的释放贡献巨大,也是全球碳库的重要组成部分^[1]。森林土壤呼吸主要包括土壤自身呼吸、植物群落的根系呼吸、土壤微生物呼吸和动物呼吸 4 个部分^[2-3]。土壤中的微生物和动物活动强度的改变主要是由不同季节的气温变化引起的,从而导致森林土壤呼吸速率的变化^[4]。土壤呼吸不仅受土壤温度、湿度、有机质含量、C 和 N 含量等非生物因子的影响^[5],同时受植被类型和根系分布的影响^[6]。探讨土壤呼吸特征不仅能明确土壤碳释放规律及其影响因子,而且可为深入研究陆地生态系统的碳循环功能提供证据^[7-8]。林芝云杉(*Picea likiangensis* var. *linzhiensis*)林和急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *smithii*)林是藏东南原始暗针叶林的典型代表,二者分布面积占林芝地区森林面积的 60.7%和西藏森林面积的 50%,在分布区起着维护生态安全和调节小气候的重要功能。学者们针对藏东南暗针叶林的种群特性^[9]及天然更新^[10]、群落物种多样性^[11]、林地土壤理化性质^[12]和生态水文效应^[13]等开展了一系列研究,但对该区域森林碳循环特性的认识却较少,尤其是对林下土壤呼吸规律的研究还未见报道。因此,本研究探讨了急尖长苞冷杉林和林芝云杉林土壤呼吸规律及其影响因子,其结果有助于加深对藏东南亚高山森林生态系统碳循环过程及其关键驱动因子的了解,为准确评估青藏高原暗针叶林土壤碳收支提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

色季拉山($29^{\circ}10' \sim 30^{\circ}15' \text{ N}$, $93^{\circ}12' \sim 95^{\circ}35'$

E)位于藏东南雅鲁藏布江大拐弯西北侧,为念青唐古拉山向南延伸的余脉,海拔 4 750 m。据西藏林芝高山森林生态系统定位站(3 850 m)气象观测资料显示:该区域年均气温 -0.75°C ,月均最高气温(7月) 9.65°C ,最低气温(1月) -14.01°C ;年均相对湿度 87.5%;年均日照时数 1 169 h,其中 12 月的日照时数最高,为 158 h;年均降水量 1 160 mm,6—9 月为雨季,占全年降水量的 85%,其中 8 月份降水最多,平均为 310 mm,约占全年降水量的 26.7%,年均蒸发量 540 mm。土壤主要为酸性棕壤,土层深厚,伴有明显腐殖质化过程,pH 值 4~6。

色季拉山的主要森林植被类型为亚高山温带暗针叶林,乔木层以急尖长苞冷杉、林芝云杉和方枝柏(*Sabina saltuaria*)等为主。灌木层有薄毛海绵杜鹃(*Rhododendron aganniphum* var. *schizopeplum*)、雪层杜鹃(*R. nivale*)、鳞腺杜鹃(*R. lepidotum*)、金露梅(*Potentilla fruticosa*)、直立悬钩子(*Rubus stans*)、陇塞忍冬(*Lonicera tangutica*)、冰川茶藨子(*Ribes glaciale*)和西南花楸(*Sorbus rehderiana*)等;草本主要有风毛菊(*Saussurea* sp.)、宽叶苔草(*Carex siderosticta*)、岩白菜(*Bergenia purpurascens*)和长鞭红景天(*Rhodiola fastigiata*)等。

在色季拉山东坡林芝云杉林和急尖长苞冷杉林典型分布区,选择保存完好的林分为研究对象,各设置典型样地 3 块,面积为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$,林分概况见表 1。

1.2 土壤呼吸的测定方法

在样地中选取空间异质性较小且无人为及动物干扰的地段,沿对角线布设 5 个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的样方,

在每一样方中心设置 1 个 PVC 环(内径 20 cm、高 8 cm),将其 5 cm 埋于地下。PVC 环在整个观测过程中固定位置,以确保连续定位观测。

表 1 藏东南供试原始暗针叶林林分概况

森林类型 Forest type	海拔/m Altitude	坡向 Aspect	坡度/(°) Slope	郁闭度 Canopy density	物种组成 Species composition
林芝云杉林 <i>P. likiangensis</i> var. <i>linzhiensis</i> forest	3 650	东南 Southeast	12	0.65	急尖长苞冷杉 <i>A. georgei</i> var. <i>smithii</i> , 西南花楸 <i>S. rehderiana</i> , 硬毛杜鹃 <i>R. lepidotum</i> , 冰川茶藨子 <i>R. glacialis</i> , 杯萼忍冬 <i>L. inconspicua</i> , 柳叶忍冬 <i>L. lanceolata</i> , 峨眉蔷薇 <i>Rosa omeiensis</i> , 直立悬钩子 <i>Rubus stans</i> , 宽叶苔草 <i>C. siderosticta</i> , 贡山肋毛蕨 <i>Ctenitis fengiana</i> , 腋花扭柄花 <i>Streptopus simplex</i>
急尖长苞冷杉林 <i>A. georgei</i> var. <i>smithii</i> forest	3 800	东南 Southeast	13	0.76	西南花楸 <i>S. rehderiana</i> , 林芝云杉 <i>P. likiangensis</i> var. <i>linzhiensis</i> , 川滇高山栎 <i>Quercus aquifolioides</i> , 糙皮桦 <i>Betula albo-sinensis</i> , 冰川茶藨子 <i>R. glacialis</i> , 杯萼忍冬 <i>L. inconspicua</i> , 柳叶忍冬 <i>L. lanceolata</i> , 峨眉蔷薇 <i>R. omeiensis</i> , 直立悬钩子 <i>R. stans</i> , 宽叶苔草 <i>C. siderosticta</i> , 五裂蟹甲草 <i>Parasenecio quinquelobus</i> , 长柱鹿药 <i>Smilacina oleracea</i> , 酢酱草 <i>Oxalis corniculata</i> , 沼兰 <i>Malaxis monophyllos</i> , 六叶葎 <i>Galium asperuloides</i>

2013 年 6、7、8 月中旬,采用便携式土壤碳通量测量系统 LI-8100(LI-COR, Lincoln, USA)测量土壤呼吸(RS),同时通过 LI-8100 附带的温度探针和水分含量(ML2x)探头同步测定土壤 5 cm 深处的温度和土壤含水量。测定时,提前一天在尽量不扰动 PVC 环中土壤的情况下沿地面剪去 PVC 环内的植物,清除地表凋落物等杂物。每月中旬,选取晴朗天气连续观测 24 h,每 2 h 测定 1 次土壤呼吸。

1.3 土壤样品的采集与分析

2013 年 8 月,待土壤呼吸测定完毕,在 PVC 环内用 100 cm³ 环刀测定林芝云杉林和急尖长苞冷杉林表层(0~20 cm)土壤的体积质量,并采集土样约 200 g,分别装入自封袋中并做好标记。土样采集后再均匀分成 2 份,一份放入 4 ℃ 冰箱保存,用于测定

土壤微生物量碳;另一份装在土样袋中,运回实验室自然风干,用于测定土壤有机碳、有机质和 pH 值。

土壤微生物量碳含量采用氯仿熏蒸浸提法测定^[14-15],土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化法^[16]测定,土壤有机质含量采用灼烧法测定^[17],用雷磁 PHS-3C 型 pH 计测定土壤 pH 值。

1.4 数据分析

利用 Origin8. 5 软件绘图,用 SPSS13. 0 For Windows 统计软件进行回归分析和方程拟合。

2 结果与分析

2.1 不同原始林土壤呼吸速率的日变化与月变化
由图 1 可知,林芝云杉林和急尖长苞冷杉林土壤呼吸速率日变化过程基本呈“n”型变化。

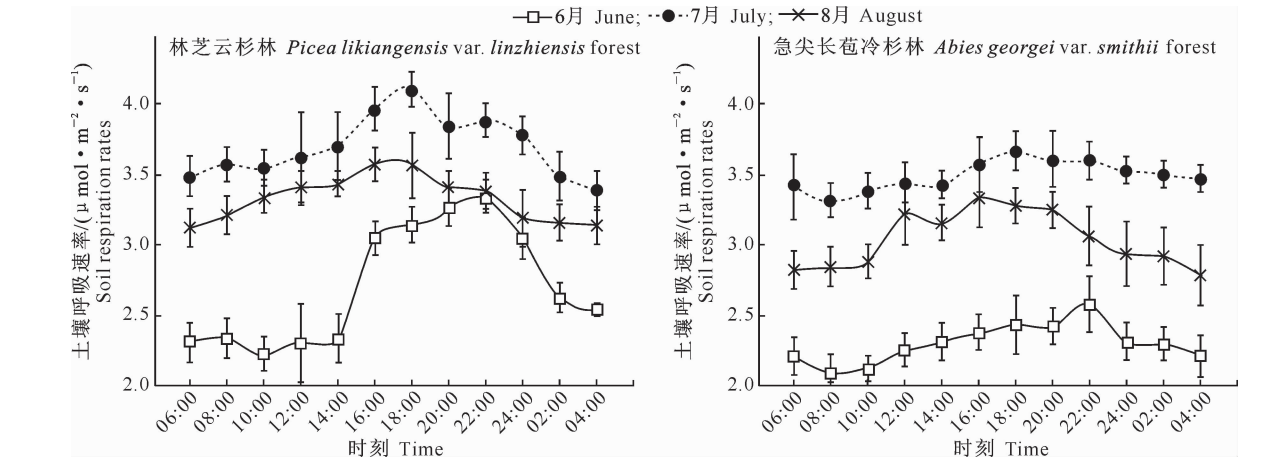


图 1 藏东南不同原始暗针叶林土壤呼吸速率的日变化

Fig. 1 Diurnal variation of soil respiration rates of different virgin dark coniferous forests in Southeast Tibet
林芝云杉林土壤呼吸速率在 7、8 月份的 06:00—18:00 均持续升高并达到最大值(4.10 和

3.57 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),此后呈逐渐下降趋势;6 月份土壤呼吸速率日变化趋势与 7、8 月份基本相同,不同的是其最大值(3.34 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)出现在 22:00。急尖长苞冷杉林土壤呼吸速率日变化在 06:00—18:00 为波动上升,在 6、7 和 8 月份的日变化最大值分别出现在 22:00(2.58 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、18:00(3.66 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)和 16:00(3.33 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。林芝云杉林和急尖长苞冷杉林在 3 个月份的日平均土壤呼吸速率分别为(3.25 $\pm$ 0.74)和(2.95 $\pm$ 0.62) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

2 种原始林土壤呼吸速率均表现为 7 月>8 月>6 月;同月份不同林分比较,林芝云杉林土壤呼吸速率大于急尖长苞冷杉林。

2.2 不同原始林土壤温度和湿度的变化特征

林芝云杉林和急尖长苞冷杉林生长季的土壤温度、湿度日变化如图 2 所示。由图 2 可知,2 种林分中,土壤温度在 06:00—18:00 均呈波动性升高,在 18:00—20:00 达到最高,此后呈持续降低的变化趋势。同种林分不同月份相比,2 种林分土壤温度均在 7 月份最高,其次是 8 月份,而 6 月份最低。同月份不同林分比较,林芝云杉林土壤温度总是高于急尖长苞冷杉林。2 种林分土壤湿度的昼夜变化呈曲线波动,总体表现为夜间高而白天低;除了急尖长苞冷杉林 8 月份最低值出现在 16:00 左右、6 月份最低值出现在 18:00 左右外,其在 7 月份及林芝云杉林在各月份最低点均出现在 20:00—22:00。

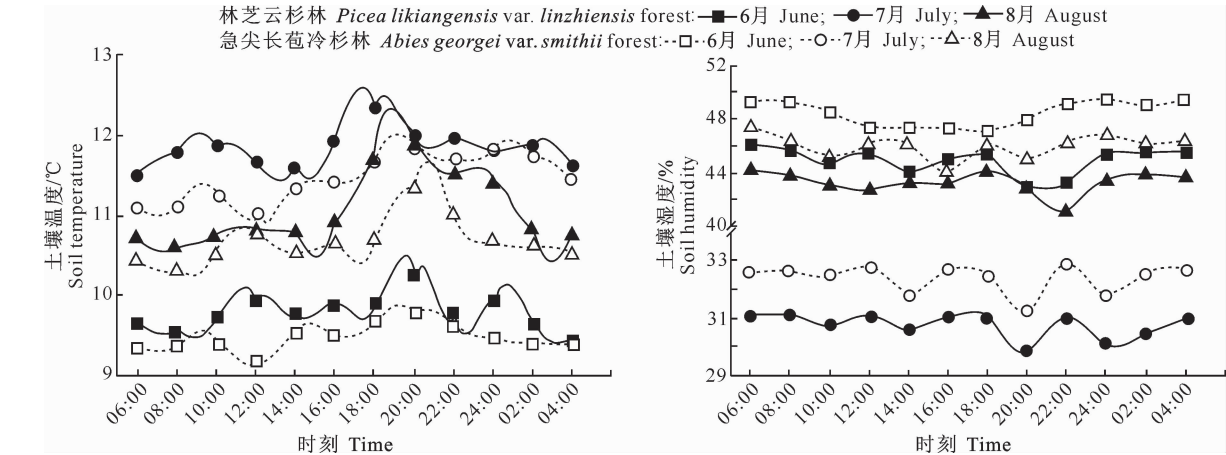


图 2 藏东南不同原始暗针叶林土壤温度和湿度的日变化

Fig. 2 Diurnal variation of soil temperature and humidity of different virgin dark coniferous forests in Southwest Tibet

2.3 不同原始林土壤呼吸速率与影响因子间的关系

2.3.1 土壤呼吸速率与土壤温度和湿度 土壤呼吸速率主要受温度和水分的共同影响,二者之间的关系可用多种函数描述^[18],其中指数模型不仅可以很好地表征温度与土壤呼吸速率之间的关系^[19],还能拟合土壤呼吸速率与温度敏感系数 Q_{10} 。如表 2 所示,对 2 种原始暗针叶林的土壤呼吸速率与土壤温度、湿度进行回归分析,发现 2 种林分中土壤呼吸

速率与土壤温度呈极显著指数回归关系($P<0.01$)。根据土壤呼吸速率与土壤温度拟合的指数方程计算 Q_{10} 值($Q_{10}=e^{10b}$,其中 b 在林芝云杉林、急尖长苞冷杉林中分别取值 0.202 和 0.186)^[20-21],林芝云杉林和急尖长苞冷杉林 Q_{10} 值分别为 7.54 和 6.42,说明林芝云杉林土壤呼吸速率对温度的敏感性稍高。

表 2 藏东南不同原始暗针叶林土壤呼吸与土壤温度和湿度的相关性

Table 2 Correlation between soil respiration rate and soil temperature/humidity of different virgin dark coniferous forests in Southwest Tibet			
森林类型 Forest type	土壤呼吸速率(y)-土壤温度(T_s) Soil respiration rate-soil temperature	Q_{10}	土壤呼吸速率(y)-土壤湿度(W) Soil respiration rate-soil humidity
林芝云杉林 <i>P. likiangensis</i> var. <i>linzhiensis</i> forest	$y=0.514e^{0.202T_s}$ $R^2=0.746(P<0.01)$	7.54	$y=66.210-9.320 W$ $R^2=0.712(P<0.01)$
急尖长苞冷杉林 <i>A. georgei</i> var. <i>smithii</i> forest	$y=0.514e^{0.186T_s}$ $R^2=0.938(P<0.01)$	6.42	$y=73.437-11.206 W$ $R^2=0.789(P<0.01)$

2 种原始暗针叶林土壤含水量与土壤呼吸速率呈极显著负相关($P<0.01$),说明土壤含水量较低

时有利于土壤呼吸速率升高,随着土壤含水率升高,土壤呼吸速率则会受抑制。

2.3.2 土壤呼吸速率与土壤体积质量、有机质和 pH 值 土壤中 CO₂ 释放速率与土壤体积质量、有机质和 pH 值具有一定的相关性^[4-5,21]。对林芝云杉林和急尖长苞冷杉林样地内样点土壤 CO₂ 昼夜平均释放速率与样地土壤体积质量、有机质及 pH 值进行相关性分析,发现 2 种林分土壤理化性质与

土壤呼吸速率具有一定的相关性。如表 3 所示,林芝云杉林和急尖长苞冷杉中土壤体积质量与土壤呼吸速率的相关性最高(R^2 分别为 0.36 和 0.38),其次是土壤有机质含量(R^2 分别为 0.32 和 0.33),而土壤 pH 值对土壤呼吸速率的影响力度最小(R^2 分别为 0.29 和 0.31)。

表 3 藏东南不同原始暗针叶林土壤呼吸速率与土壤体积质量、有机质及 pH 值的相关性
Table 3 Correlation between soil respiration rate and soil bulk density,organic matter content and pH of different virgin dark coniferous forests in Southwest Tibet

森林类型 Forest type	土壤呼吸速率(y)- 土壤体积质量(S_b) Soil respiration rate- bulk density	土壤呼吸速率(y)- 土壤有机质含量(S_{oc}) Soil respiration rate- organic matter content	土壤呼吸速率(y)- 土壤 pH 值(S_p) Soil respiration rate-pH
林芝云杉林 <i>P. likiangensis</i> var. <i>linzhiensis</i> forest	$y=0.03S_b+0.13$ $R^2=0.36(P<0.05)$	$y=2.08S_{oc}+0.13$ $R^2=0.32(P<0.05)$	$y=-0.17S_p+7.91$ $R^2=0.29(P<0.05)$
急尖长苞冷杉林 <i>A. georgei</i> var. <i>smithii</i> forest	$y=0.02S_b+0.27$ $R^2=0.38(P<0.05)$	$y=10.16S_{oc}+147.76$ $R^2=0.33(P<0.05)$	$y=-0.17S_p+5.14$ $R^2=0.31(P<0.05)$

2.3.3 土壤呼吸速率与土壤有机碳和微生物量碳 根据林芝云杉林和急尖长苞冷杉林样地内样点土壤 CO₂ 昼夜平均释放速率,计算出 2 种原始林的土壤日碳通量值,日碳通量(g/m²)=日平均土壤呼吸速率($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \times 24(\text{h}) \times 3\,600(\text{s}) \times 10^{-6} \times 12$

(g/mol)^[22]。对土壤日碳通量与土壤有机碳及微生物量碳进行回归分析,结果(表 4)发现,林芝云杉林和急尖长苞冷杉林土壤日碳通量与土壤有机碳呈极显著正相关(R^2 分别为 0.91 和 0.82),但与微生物量碳呈极显著负相关(R^2 分别为 0.88 和 0.89)。

表 4 藏东南不同原始暗针叶林土壤日碳通量与土壤有机碳及微生物量碳的相关性
Table 4 Correlation between diurnal carbon flux and soil organic carbon/microbial biomass carbon of different virgin dark coniferous forests in Southwest Tibet

森林类型 Forest type	日碳通量(y)-土壤有机碳(T_c) Diurnal carbon flux-soil organic carbon	日碳通量(y)-微生物量碳(T_m) Diurnal carbon flux-microbial biomass carbon
林芝云杉林 <i>P. likiangensis</i> var. <i>linzhiensis</i> forest	$y=e^{-7.28+4.83T_c-0.53T_c^2}$ $R^2=0.91(P<0.01)$	$y=e^{21.54-7.56T_m+0.85T_m^2}$ $R^2=0.88(P<0.01)$
急尖长苞冷杉林 <i>A. georgei</i> var. <i>smithii</i> forest	$y=e^{-4.82+4.51T_c-0.53T_c^2}$ $R^2=0.82(P<0.01)$	$y=e^{10.92-2.61T_m+0.27T_m^2}$ $R^2=0.89(P<0.01)$

3 讨论

3.1 不同林分土壤呼吸速率的差异

在同一气候区的不同植被类型下,树种组成、群落结构和土壤质地的差异均会强烈地影响土壤微环境,进而影响土壤呼吸^[23-24]。本研究 中 2 种原始林相比,林芝云杉林土壤呼吸速率高于急尖长苞冷杉林,其原因可能是由林芝云杉林林分概况和土壤温度决定的。林芝云杉林郁闭度较低,且林下植被覆盖率低,白天太阳光通过林间空隙照射到林下,导致林下表层土壤温度较高,使得土壤微生物活动和根系呼吸更为旺盛,因此林下土壤呼吸速率较高。林芝云杉林和急尖长苞冷杉林的土壤呼吸速率日变化具有一定的相似性,但也有差异。其原因是由于二者地处同一气候区,类似的土壤水、热条件^[25]使得二者日变化均呈近似“n”型;同月份条件下,林芝云杉林与急尖长苞冷杉林相比,其林下土壤温度高且

湿度较低,因而使得其土壤呼吸速率较高。本研究区的 2 种原始暗针叶林的土壤呼吸 Q_{10} 值均高于长白山、祁连山和川西区域的云杉林,这与前人研究认为土壤呼吸 Q_{10} 值在低温条件下比高温条件下要高^[25]的结论相同。由于林芝云杉林分布海拔较高,常年温凉的气候使土壤呼吸速率对温度升高的反应更加敏感,这也进一步说明了青藏高原森林碳循环对全球变化响应的高敏感性^[26-27]。林芝云杉林与急尖长苞冷杉林相比,前者 Q_{10} 稍高于后者,这可能与 2 种林分中根系数量与生活力有关。

3.2 土壤理化特性对土壤呼吸速率的影响

据土壤样品分析测试结果,2 种原始林中土壤体积质量(林芝云杉林和急尖长苞冷杉林分别为 (0.23 ± 0.11) 和 (0.30 ± 0.07) g/cm³)和微生物量碳(林芝云杉林和急尖长苞冷杉林分别为 (137.23 ± 11.58) 和 (145.21 ± 13.52) mg/kg)均无显著差异($P>0.05$),但 pH 值差异显著($P<0.05$),表现为

林芝云杉林(5.4 ± 0.83) > 急尖长苞冷杉林(4.73 ± 0.65);而有机质和有机碳含量均表现为急尖长苞冷杉林((171.36 ± 5.43) , (99.40 ± 6.54) g/kg) > 林芝云杉林((61.62 ± 3.15) , (35.74 ± 7.04) g/kg) ($P < 0.01$)。由于土壤理化性质的差异也会对土壤呼吸速率产生一定影响,其中土壤体积质量、有机质和pH值等都是影响土壤呼吸速率的重要因子^[28]。本研究中2种林分土壤体积质量差异不显著,说明土壤体积质量不是造成二者土壤呼吸差异的主要因子;由于土壤有机碳和微生物量碳含量分别与2种林分土壤呼吸速率呈极显著正相关和负相关关系,这说明土壤有机碳含量高对土壤CO₂释放有促进作用,而土壤微生物量碳增加对于提高土壤碳“汇”功能具有重要作用。本研究中急尖长苞冷杉林土壤有机碳含量明显高于林芝云杉林,但其土壤呼吸速率仍低于后者,说明土壤有机碳含量在增加2种林分土壤呼吸速率方面贡献较小。pH值通过调控土壤酸性影响土壤微生物生长^[29],并最终影响土壤呼吸速率。本研究位于青藏高原东南部原始林,其土壤为酸性土,微生物数量和群落相对丰富,pH值小幅升高并不会显著抑制微生物活性,因而也不是决定2种林分土壤呼吸速率的主要因子。由回归分析中的相关系数可知,土壤理化性质影响着2种林分的土壤呼吸速率,但影响力度较小。

4 结 论

通过对生长季藏东南原始林芝云杉林和急尖长苞冷杉林土壤呼吸速率及其影响因子的分析,得出如下研究结论:

1)不同原始林土壤呼吸速率存在异同性。2种林分土壤呼吸昼夜变化均呈近似“n”型,最大值在7、8月份均出现在18:00左右,而6月份则出现在22:00左右;同月份条件下林芝云杉林土壤呼吸速率高于急尖长苞冷杉林;不同月份条件下2种林分土壤呼吸速率均表现为7月>8月>6月。

2)土壤温度和水分是影响2种原始林土壤呼吸速率的主要环境因子。白天土壤温度对于2种原始林土壤呼吸速率的影响更大,而夜间则主要受土壤含水率的控制; Q_{10} 说明林芝云杉林土壤呼吸速率对温度的响应比急尖长苞冷杉林更敏感。

3)2种林分中土壤理化性质不是造成土壤呼吸速率差异的主要原因;但土壤有机碳含量高会促进土壤呼吸速率,而土壤微生物量碳的作用则相反。

[参考文献]

- [1] Lindroth A, Grelle A, Morén A S. Long-term measurements of boreal forest carbon balance reveal large temperature sensitivity [J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(4): 443-450.
- [2] 乔云发, 苗淑杰, 王树起, 等. 不同施肥处理对黑土土壤呼吸的影响 [J]. *土壤学报*, 2007, 44(6): 1028-1035.
Qiao Y F, Miao S J, Wang S Q, et al. Soil respiration affected by fertilization in black soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(6): 1028-1035. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] 施 政, 汪家社, 何 容, 等. 武夷山不同海拔植被土壤呼吸季节变化及对温度的敏感性 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(11): 2357-2363.
Shi Z, Wang J S, He R, et al. Seasonal variation and temperature sensitivity of soil respiration under different plant communities along an elevation gradient in Wuyi Mountains of China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(11): 2357-2363. (in Chinese)
- [5] 王光军, 田大伦, 闫文德, 等. 亚热带杉木和马尾松群落土壤系统呼吸及其影响因子 [J]. *植物生态学报*, 2009, 33(1): 53-62.
Wang G J, Tian D L, Yan W D, et al. Soil system respiration and its controlling factors in *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* subtropical China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(1): 53-62. (in Chinese)
- [6] 张法伟, 刘安花, 李英年, 等. 青藏高原高寒湿地生态系统CO₂通量 [J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 453-462.
Zhang F W, Liu A H, Li Y N, et al. CO₂ flux in alpine wetland ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 453-462. (in Chinese)
- [7] Cao M, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change [J]. *Nature*, 1998, 393(6682): 249-252.
- [8] Heimann M, Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks [J]. *Nature*, 2008, 451(7176): 289-292.
- [9] 任青山, 杨小林, 崔国发, 等. 西藏色季拉山林线冷杉种群结构与动态 [J]. *生态学报*, 2007, 27(7): 2669-2677.
Ren Q S, Yang X L, Cui G F, et al. Smith fir population structure and dynamics in the timberline ectone of the Sejila Mountain, Tibet, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2669-2677. (in Chinese)
- [10] 罗大庆, 郭泉水, 薛会英, 等. 西藏色季拉山冷杉原始林林隙更新研究 [J]. *林业科学研究*, 2002, 15(5): 564-569.
Luo D Q, Guo Q S, Xue H Y, et al. A research of gap regeneration of virgin fir forest in Mount Sejila in Tibet [J]. *Forest Research*, 2002, 15(5): 564-569. (in Chinese)
- [11] 杨小林, 崔国发, 任青山, 等. 西藏色季拉山林线植物群落多样

- 性格局及林线的稳定性 [J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(1): 14-20.
- Yang X L, Cui G F, Ren Q S, et al. Plant diversity pattern and stability of the timberline community on Sejila Mountain in Tibet, western China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(1): 14-20. (in Chinese)
- [12] 任青山. 西藏冷杉原始森林土壤物理性质特征分析 [J]. 林业科学, 2002, 38(3): 57-62.
- Ren Q S. Characteristic analysis of soil of physical properties *Abies georgei* var. *smithii* virgin forest in Tibet [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2002, 38(3): 57-62. (in Chinese)
- [13] 王景升, 任青山, 兰小中. 急尖长苞冷杉原始森林降水分配格局 [J]. 林业科技, 2002, 27(6): 7-10.
- Wang J S, Ren Q S, Lan X Z. Study on the distribution pattern of precipitation in *Abies georgei* var. *smithii* virgin forest [J]. Forestry Science & Technology, 2002, 27(6): 7-10. (in Chinese)
- [14] Brookes P, Landman A, Pruden G, et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen; a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1985, 17(6): 837-842.
- [15] Vance E, Brookes P, Jenkinson D. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1987, 19(6): 703-707.
- [16] 梁重山, 党志, 刘丛强. 土壤沉积物样品中有机碳含量的快速测定 [J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 129-133.
- Liang Z S, Dang Z, Liu C Q. Rapid determination of total organic carbon in soil/sediment samples [J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(1): 129-133. (in Chinese)
- [17] 李静. 土壤有机质测定方法比对分析 [J]. 绿色科技, 2012(5): 203-204.
- Li J. Comparative analysis of soil organic matter determination methods [J]. Journal of Green Science and Technology, 2012(5): 203-204. (in Chinese)
- [18] Fang C, Moncrief J B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(2): 155-165.
- [19] 胡宗达, 刘世荣, 史作民, 等. 川西亚高山草甸土壤呼吸的昼夜变化及其季节动态 [J]. 生态学报, 2012, 32(20): 6376-6386.
- Hu Z D, Liu S R, Shi Z M, et al. Diel variations and seasonal dynamics of soil respirations in subalpine meadow in western Sichuan Province, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(20): 6376-6386. (in Chinese)
- [20] 刘洪升, 刘华杰, 王智平, 等. 土壤呼吸的温度敏感性 [J]. 地理科学进展, 2008, 27(4): 51-60.
- Liu H S, Liu H J, Wang Z P, et al. The temperature sensitivity of soil respiration [J]. Progress in Geography, 2008, 27(4): 51-60. (in Chinese)
- [21] 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)
- [22] 胡婵娟, 刘国华, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵沟壑区典型人工林土壤 CO₂ 释放规律及其影响因子 [J]. 生态学报, 2009, 29(9): 4700-4709.
- Hu C J, Liu G H, Fu B J, et al. Soil CO₂ emission and the driving factors of typical artificial wood lands in the hilly area of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 4700-4709. (in Chinese)
- [23] 严俊霞, 尤龙凤, 岳晓峰, 等. 植被变化对土壤呼吸与土壤温度和水分关系的影响 [J]. 山西大学学报(自然科学版), 2008, 31(2): 273-278.
- Yan J X, You L F, Yue X F, et al. Effect of vegetation change on both soil respiration and its relations to soil temperature and moisture [J]. Journal of Shanxi University(Nat Sci Ed), 2008, 31(2): 273-278. (in Chinese)
- [24] 袁渭阳, 李贤伟, 张健, 等. 不同年龄巨桉林土壤呼吸及其与土壤温度和细根生物量的关系 [J]. 林业科学, 2009, 45(11): 1-8.
- Yuan W Y, Li X W, Zhang J, et al. Soil respiration variations and their relationships with soil temperature and fine root biomass in an age series of *Eucalyptus grandis* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(11): 1-8. (in Chinese)
- [25] Adachi M, Bekku Y S, Konuma A, et al. Required sample size for estimating soil respiration rates in large areas of two tropical forests and of two types of plantation in Malaysia [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 210(1): 455-459.
- [26] 田玉强, 高琼, 张智才, 等. 青藏高原高寒草地植物光合与土壤呼吸研究进展 [J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 711-721.
- Tian Y Q, Gao Q, Zhang Z C, et al. The advances in study on plant photosynthesis and soil respiration of alpine grass lands on the Tibetan Plateau [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(2): 711-721. (in Chinese)
- [27] 姚檀栋, 朱立平. 青藏高原环境变化对全球变化的响应及其适应对策 [J]. 地球科学进展, 2006, 21(5): 459-464.
- Yao T D, Zhu L P. The response of environmental changes on Tibetan Plateau to global changes and adaptation strategy [J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(5): 459-464. (in Chinese)
- [28] 秦娟, 上官周平. 白榆/刺槐不同林型生长季土壤呼吸速率的变化特征 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 91-98.
- Qin J, Shangguan Z P. Variation characteristics of soil respiration rate in *Ulmus pumila*-*Robinia pseudocacia* in different forest types during the growing season [J]. Journal of Northwest A&F University(Nat Sci Ed), 2012, 40(6): 91-98. (in Chinese)
- [29] 门倩, 海江波, 岳忠娜, 等. 化肥减量对玉米田土壤酶活性及微生物量的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 133-140.
- Men Q, Hai J B, Yue Z N, et al. Effects on maize field soil enzyme activities and microbial biomass of chemical fertilizer reduction [J]. Journal of Northwest A&F University(Nat Sci Ed), 2012, 40(6): 133-140. (in Chinese)