

色季拉山4种林型土壤呼吸及其影响因子^{*}

马和平^{1, 2} 郭其强^{1, 2} 李江荣^{1, 2} 周晨霓^{1, 2}

(1 西藏农牧学院高原生态研究所, 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)

摘 要 土壤碳是森林生态系统最大的碳库, 是其森林生态系统碳循环的极其重要组分。森林土壤呼吸时陆地生态系统土壤呼吸的重要组成部分, 其动态变化对全球碳平衡有着重要的影响, 然而目前对藏东南地区森林土壤呼吸的研究还比较薄弱。为探讨不同林型土壤呼吸差异及其影响因子, 采用Li-8100便携式土壤呼吸测定仪, 研究了藏东南色季拉山4种原始森林生态系统(高山灌丛AS、方枝柏SS、杜鹃RF、急尖长苞冷杉AGSF)的土壤碳动态。结果表明:(1)藏东南色季拉山寒温带森林土壤呼吸具有明显的日变化和季节变化。在日变化方面, CO₂的排放通量存在明显的日变化规律, 排放通量在白天16:00左右最高, 最低值出现在凌晨6:00左右, 一天内土壤呼吸作用均呈单峰型曲线变化。季节变化方面, CO₂排放的通量的季节变化趋势表现为6月份随着天气转暖和植被生长土壤呼吸作用逐渐增大, 7月份气温最高时土壤呼吸作用也达到最大值随后, 9月份气温逐渐下降, 土壤呼吸作用也逐渐降低。(2)4种森林类型的土壤呼吸速率在植物生长季内与土壤表层(10 cm)土壤温度均呈不同程度的正相关, 而与土壤含水量的相关性较弱。土壤温度是决定藏东南色季拉山土壤呼吸季节变化的主要因子。该研究为明确森林生态系统土壤呼吸变化规律及其影响因素的控制提供参考, 同时对估算地区碳平衡、评估区域碳源汇具有重要意义。

关键词 土壤呼吸; 环境因子; 土壤温度; 西藏

中图分类号 S153.6 **文献标识码** A

土壤呼吸是土壤生态系统营养循环与能量转化的外在表现, 是控制陆地生态系统碳平衡的主要过程之一, 是影响大气CO₂浓度升高的关键生态学过程^[1]。不同植被类型、土壤温度、土壤含水量和地形地貌等均会造成区域微气候效应, 进而引起土壤呼吸变化^[2-4]。植被主要通过改变土壤温度、根系呼吸、光合产物及小气候等途径影响土壤呼吸, 但这种效应在不同植被之间差异很大。前人主要对我国各种植被类型生物量特征和生产力进行了大量研究^[5-6], 而有关亚高山植被系统中碳平衡方面的研究较少。高海拔植被既是影响温室气体的主体, 也是受气候变化影响最明显的生态系统。随着

海拔高度的变化, 植被类型、土壤质地表现出垂直地带性特征, 从而使得不同海拔生态系统的土壤呼吸有很多差异。同时, 即使在海拔高度和土壤类型相同的条件下, 植被类型也不一定相同, 对小尺度范围内植被变化对土壤呼吸的影响方面的研究鲜有报道。因此, 探明同一气候区不同植被类型土壤呼吸的动态变化特征及其影响因子, 对于预测区域土壤碳释放和不同时间尺度植被的源-汇(Source-sink)功能和揭示失踪的碳汇(Missing carbon sink)之谜提供有力证据, 以及为全球碳平衡及气候变化的研究具有重要的科学意义。

土壤呼吸的日变化和季节变化主要受环境因

^{*} 国家自然科学基金项目(41061033)和2014年西部提升计划项目(高原生态恢复研究方向)资助Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41061033) and the Ascension in the West in 2014 Projects (Academic team ability of ecology subject)

作者简介: 马和平(1977—), 男, 硕士, 主要从事高原生态研究。Tel: 13989043075; E-mail: maheping2006@21cn.com

收稿日期: 2015-04-28; 收到修改稿日期: 2015-07-14

素和植物生长的影响, 研究土壤呼吸的日变化和季节变化以及调控因素, 是准确预测未来气候变化条件下土壤呼吸变化的关键。许多研究表明, 温度是寒温带针叶林生态系统土壤呼吸作用的主要调控因子^[7-12]。其他研究也发现, 寒冷地区土壤呼吸作用对温度升高更加敏感^[13-14]。寒温带针叶林生态系统土壤呼吸作用空间变动性很大^[15-17], 同时, 土壤呼吸作用时空动态变化特征及其驱动因子研究对于预测生态系统对气候变化的响应至关重要^[18]。本研究以西藏林芝森林生态系统国家定位观测研究站为依托, 选择亚高山寒温带森林区域具有代表性的4种森林类型为研究对象, 进行了为期1年的土壤呼吸动态监测, 定量分析了不同干扰强度下不同林型土壤呼吸昼夜和季节变化, 分别从日尺度和季节尺度上探讨了影响我国亚高山寒温带针叶林土壤呼吸的主要驱动因子, 为准确估算该地区的碳收支状况和预测土壤呼吸对全球变暖的响应提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于藏东南色季拉山, 约在29° 38'N, 94° 43'E, 海拔3 600~4 400 m地带, 平均坡度35° 左右。由于雅鲁藏布江的水气通道作用, 该区域受印度洋暖湿季风的影响, 为亚高山寒温带半湿润区, 年均温-0.73 °C, 最暖月(7月)平均气温为9.8 °C, 最冷月(1月)平均气温为-13.8 °C; 年降水量1 134 mm; 蒸发量554 mm, 占全年降水的30%; 年平均相对湿度78%。在色季拉山, 随着海拔高度的增加, 主要植被类型也发生相应的变化。在3 600~4 400 m海拔范围内, 广布着急尖长苞冷杉原始森林, 多分布在阴坡中上部, 坡度在20~35° 之间, 林下多为杜鹃属灌木, 种类较多, 郁闭度随海拔高度增加而减小, 林线处郁闭度0.2。

1.2 研究方法

本研究依据中华人民共和国林业行业标准LY/T 1952-2011《森林生态系统长期定位观测方法》开展的研究。

样地设置: 2012—2013年, 在西藏林芝森林生态系统国家定位观测研究站选取(1)高山灌丛(Alpine shrub, AS)样地;(2)方枝

柏(*Sabina saltuaria*, SS)样地;(3)杜鹃林(*Rhododendron forest*, RF)样地;(4)急尖长苞冷杉林(*Abies georgei* var. *smithii forest*, AGSF)样地。样地立地状况和植被组成见表1。在上述不同固定样地各设置典型样地3块, 选择同一坡向且保存完好的林分为研究对象, 面积为20 m×20 m, 进行土壤呼吸日动态监测工作。在样地中选取空间异质性较小且无人及动物干扰的地段, 沿对角线布设5个1 m×1 m的样方, 在每个测定点安装一个PVC底座(内径20 cm、高11 cm), 将PVC环一端削尖沿坡面压入土中约3 cm深, 再将PVC环内的绿色植物齐地剪除, 安装过程中尽量减少对土壤的扰动。为了避免安装初期对土壤呼吸测量的可能影响, 底座安装至少两周后才进行相关指标测定工作, PVC环内在整个测定期间位置保持不变。

土壤呼吸日变化的测定: 2012年6月—2013年12月, 分别在每月中旬选择相对晴好的天气进行土壤呼吸日动态的测定。每种林型每月测定1次, 每次测定从上午11:00至第二天上午11:00, 持续24 h, 每1 h对每个样地样点进行逐一测定。以3个样地内土壤呼吸速率和环境因子的平均值代表该林分的土壤呼吸速率和环境因子。土壤呼吸测定采用Li-8100便携式土壤呼吸测定仪(Li-COR Inc, Nebraska, USA)。在测定的同时, 采用仪器自身配置的温度和水分探头测定10 cm深的土壤温度和土壤体积含水量。

1.3 统计分析

利用Excel和SPSS11.5 For windows统计软件对测定结果进行统计分析。

2 结 果

2.1 不同生态系统环境因子的变化

不同林型的10 cm深处土壤温度季节变化趋势基本一致, 呈现出明显的单峰曲线。1月份达到最低, 随后持续上升, 7至8月份达到最高, 而后持续下降(图1A)。AS、SS、RF、AGSF的土壤温度变化范围依次为: -4.6~9.8 °C, -4.5~9.7 °C, -3.8~9.0 °C, -3.7~9.0 °C。各林型的年平均土壤温度依次为: 2.71 ± 0.02 °C, 3.08 ± 0.04 °C, 3.27 ± 0.03 °C, 3.47 ± 0.05 °C。从表层土壤温度整体变化来分析(图1B), AGSF > RF > SS

表1 样地立地状况和植被组成

生态系统类型 Ecosystem type	坡度 Slope	坡向 Aspect	海拔 Elevation (m)	植被组成Vegetation composition	
				乔木层Overstory	下木层Understory
AS	34°	东East	4 346	1	8、9、10、11、12、13
SS	43°	东East	4 200	2、3、4、1、5、6、7	10、12、14、11、8、13
RF	44°	东East	3 900	3、15、5、1、16、17	18、19、20、21、22、23、24、25、26、27、28
AGSF	33°	东East	3 700	3、6、16、5、10	30、31、32、26、19、33、22、19、20、22、9、29、34、36、27、25

AS: 高山灌丛Alpine shrub; SS: 方枝柏Sabina saltuaria; RF: 杜鹃林Rhododendron forest; AGSF: 急尖长苞冷杉林 (*Abies georgei* var. *smithii* forest). 1. 薄毛海绵杜鹃 *Rhododendron aganniphum*, 2. 方枝柏*Sabina saltuaria*, 3. 急尖长苞冷杉*Abies georgei* var. *smithii* (Viguie et Gaussen) Cheng et L. K. Fu., 4. 林芝杜鹃 *Rhododendron nyingchiense* R. C. Fang et S. H. Huang, 5. 西南花楸 *Sorbus rehderiana* Koehne, 6. 冰川茶藨子 *Ribes glaciale* Wall, 7. 硬叶柳 *Salix sclerophylla*, 8. 长鞭红景天 *Rhodiola fastigiata*, 9. 香根芹 *Osmorhiza aristata* (Thunb.) Makino et Yabe, 10. 小叶金露梅 *Potentilla parvifolia*, 11. 直立悬钩子 *Rubus stans* Focke, 12. 双花堇菜*Viola biflora*, 13. 唐松草 *Thalictrum aquilegifolium*, 14. 总序黄鹌菜 *Youngia racemifera*, 15. 杯萼忍冬 *Lonicera inconspicua* Batal., 16. 柳叶忍冬 *Lonicera lenceolata* Wall., 17. 峨眉蔷薇 *Rosa omelensis* Rolfe, 18. 西南铁线莲 *Clematis pseudopogonandra* Finet, 19. 翅柄蓼 *Polygonum sinomontanum* Sam, 20. 无翅兔耳风 *Ainsliaea foliosa* DC., 21. 假百合 *Notholirion bulbuliferum*, 22. 长柱鹿药 *Smilacina oleracea*, 23. 五裂蟹甲草 *Cacalin pentaloba*, 24. 贡山肋毛蕨 *Ctenitis fengiana*, 25. 水枸子 *Cotoneaster multiflorus*, 26. 凉山悬钩子 *Rubus fockeanus*, 27. 腋花扭柄花 *Streptopus simplex*, 28. 西藏对叶兰 *Listera pinetorum*, 29. 宽叶苔草 *Carex siderosticta*, 30. 矮生柳叶菜 *Epilobium kingdonii*, 31. 光蔓茎堇菜 *Viola diffusoides*, 32. 三裂碱毛茛 *Halerpestes tricuspis*, 33. 荨麻叶凤仙花*Impatiens urticifolia*, 34. 沼生橐吾 *Ligularia lamarum*, 35. 糙苏 *Phlomis umbrosa*, 36. 葶叶獐芽菜 *Saertra phragmiti* phyla

> AS。其中，SS、RF和AGSF差异不显著 ($p > 0.05$)，而AS较SS、RF和AGSF差异显著 ($p < 0.05$)。2012年各林型10cm深处的土壤含水量显著高于2013年的土壤含水量。根据研究结果表明 (图2A)，2012年5~12月和2013年2~6月份AS、SS、RF和AGSF土壤含水量变化范围依次为：11.1%~20.6%、12.3%~30.2%、19.7%~26.8%、13.9%~31.8%和3.9%~14.7%、2.1%~25.8%、6.2%~22.6%、3.8%~22.8%。从表层土壤温度整体变化来分析 (图2B)，RF>SS>AGSF>AS。其中，RF和SS的土壤含水量显著

高于AS和AGSF的土壤含水量，且AS和AGSF之间差异不显著 ($p > 0.05$)，AS和AGSF之间差异显著 ($p < 0.05$)。

2.2 4种不同林型土壤呼吸的日动态变化

图3是2013年6月8—9日、2013年7月8—9日、2013年8月10—11日、2013年9月10—11日土壤呼吸作用日动态变化。通过图3 (A、B、C、D) 可以看出，CO₂的排放通量存在明显的日变化规律，排放通量在白天16:00左右最高，最低值出现在凌晨6:00左右，一天内土壤呼吸作用均呈单峰型曲线变化。6月份日变动幅度：AS、SS、RF、AGSF

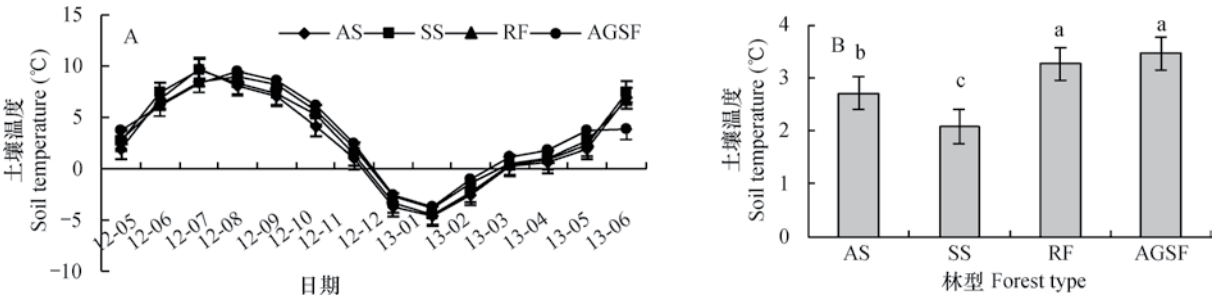


图1 不同林型表层10 cm土壤温度的季节变化A和年均值B

Fig. 1 Seasonal variation (A) annual mean (B) of soil temperature in the surface soil layer (10 cm) relative to type of the forest

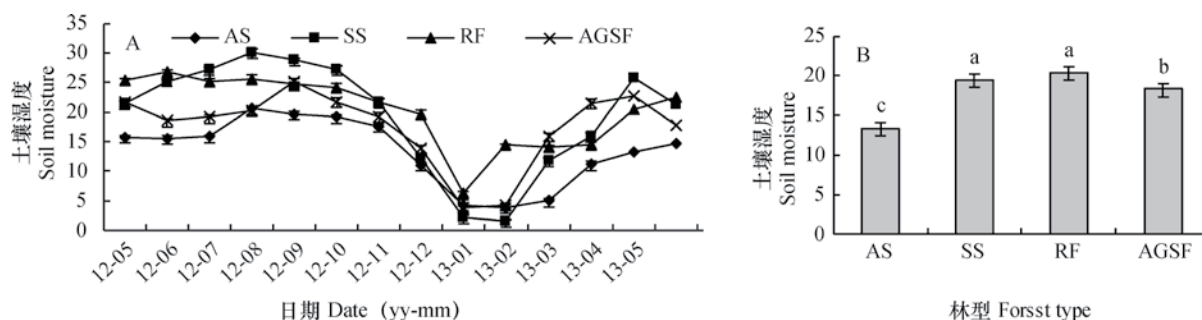


图2 不同林型表层10 cm深土壤含水量的季节变化A和年均值B

Fig. 2 Seasonal variations (A) and annual mean (B) of soil moisture content in the surface soil layer (10 cm) relative to type of the forest

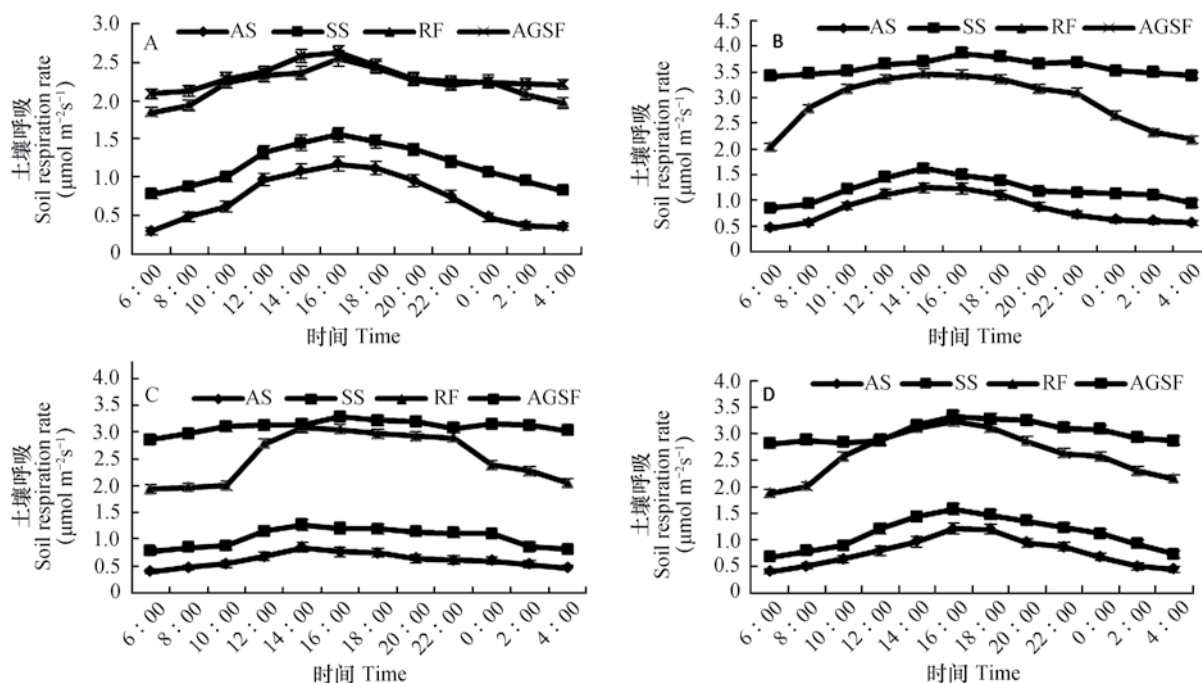


图3 2012年不同林型生长季土壤呼吸作用日动态变化 (A: 6月8-9日; B: 7月8-9日; C: 8月10-11日; D: 9月10-11日)

Fig. 3 Diurnal variation of soil respiration rate in 2012, relative to forest type (A: Jun. 8-9, B: Jul. 8-9, C: Aug. 10-11 and D: Sep. 10-11)

分别为 CO_2 0.87、0.78、0.70、0.54 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。7月份：AS、SS、RF、AGSF分别为 CO_2 0.78、0.77、1.43、0.45 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。8月份：AS、SS、RF、AGSF分别为 CO_2 0.45、0.49、1.15、0.42 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。9月份：AS、SS、RF、AGSF分别为 CO_2 0.81、0.91、1.36、0.52 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。10:00和22:00的土壤呼吸作用最接近一天的平均值。因此，可以选择10:00左右测定的土壤呼吸作用平均值作为日平均值。

通过土壤呼吸速率与10 cm处土壤温度的回归分析发现，4种林型的土壤呼吸速率10 cm处土温均呈较高的指数正相关（表2）。决定系数（ R^2 ）

越大表明模型的拟合程度越好。这些回归方程的显著性检验和回归系数显著性检验均通过检验（ $p < 0.01$ ），达到极显著水平。

Q10值是反映土壤呼吸速率对温度变化敏感性的重要指标。由表2所示，基于同一土壤深度的土壤温度，随着海拔的升高，AS和SS土壤呼吸的Q10值显著大于RF和AGSF（ $p < 0.05$ ）。但SS和RF之间差异并不显著（ $p > 0.05$ ）。

2.3 不同林型土壤呼吸的季节动态变化

在观测期内，各观测点土壤呼吸作用随时间变化波动十分显著（图4）。

表2 4种林型土壤呼吸日变化与土层温度（10 cm）指数回归关系

林型	回归方程	Q10	R^2	p
Forest type	Regressive equation			
AS	$Rs=0.2137e^{0.1076Ts}$	6.29	0.72	< 0.01
SS	$Rs=0.3825e^{0.1294Ts}$	3.13	0.55	< 0.01
RF	$Rs=0.4764e^{0.1465Ts}$	3.25	0.47	< 0.01
AGSF	$Rs=0.6932e^{0.1671Ts}$	3.47	0.62	< 0.01

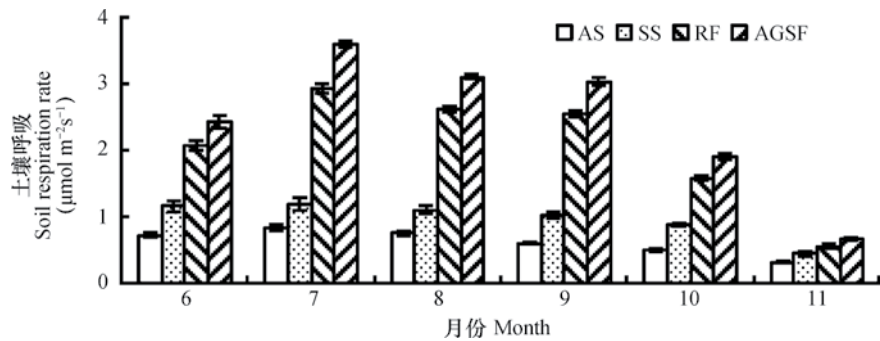


图4 不同林型土壤呼吸作用季节动态变化

Fig. 4 Seasonal variation of soil respiration rate relative to forest type

图4给出了2013年6–11月土壤呼吸作用的动态变化。CO₂排放的通量的季节变化趋势表现为6月份随着天气转暖和植被生长土壤呼吸作用逐渐增大，7月份气温最高时土壤呼吸作用也达到最大值，即AS、SS、RF、AGSF分别为CO₂ 0.83、1.20、2.92、3.60 μmol m⁻² s⁻¹。随后，9月份气温逐渐下降，土壤呼吸作用也逐渐降低，到11月份AS、SS、RF和AGSF分别降至CO₂ 0.32、0.45、0.56、0.67 μmol m⁻² s⁻¹，从而表现出明显的季节变化。AS、SS、RF和AGSF土壤呼吸变化值为CO₂ 0.51、0.75、1.96、2.93 μmol m⁻² s⁻¹。

2.4 土壤温度和土壤含水量对其呼吸的影响

在许多同地域的土壤呼吸研究中，土壤呼吸与土壤温度之间存在较为明显的相关性^[19]。本研究表明，温度越高，土壤呼吸速率越大。这是因为作为土壤总呼吸主要贡献者的土壤微生物主要分布在土壤表层（10 cm），因此相对于气温和地表温度，土壤呼吸速率对表层土壤温度的变化比较敏感。土壤含水量小于27%时，土壤呼吸与土壤含水量为正相关，而大于27%时则为负相关。在7月份，土壤温度达到最大值，之后逐渐降低。同时在7月份，土壤呼吸也达到最大值。而土壤含水量在

8月份达到最大值。过多的土壤水分影响了土壤通透性，抑制土壤微生物的活性，进而使得8月份的土壤呼吸反而低于7月份的土壤呼吸。究其原因，出现这样的积极性变化可能与该区域土壤冻土逐渐消融、土壤含水量升高加之气温有所回升，从而提高了土壤微生物的活性，加速CO₂的排放有关。此外，融冻过程CO₂的排放还有可能是上冻期间被封闭在土壤中的CO₂随着融冻过程释放所致。5月份，观测点地温仍然较低，较低的土壤温度抑制了土壤微生物的活性，CO₂的产量较低。从6月份开始，研究区域开始进入雨季，土壤含水量与土壤温度均开始回升，CO₂的排放通量随着缓慢上升。7月份，土壤温度达到最大值，加速了林下土壤有机质的分解，释放更多的CO₂，10月份以后，研究区域逐渐温度逐渐下降，降雨也逐渐减少，CO₂产生量逐渐减小，土壤呼吸速率也随之降低。

2.5 林型对土壤呼吸的影响

AS、SS、RF、AGSF 4种林型土壤呼吸速率均呈现显著的季节性变化（ $p < 0.001$ ，图4），呼吸速率均呈单峰曲线。4种林型土壤呼吸速率6—11月份平均值分别为CO₂ 0.63、0.97、2.07、2.46 μmol m⁻² s⁻¹，差异明显（表3）。其中，AS土壤呼

吸速率在CO₂ 0.32 ~ 0.83 μmol m⁻² s⁻¹之间, SS土壤呼吸速率在CO₂ 0.45 ~ 1.20 μmol m⁻² s⁻¹之间, RF土壤呼吸速率为CO₂ 0.56 ~ 2.92 μmol m⁻² s⁻¹之间, AGSF土壤呼吸速率在CO₂ 0.67 ~ 3.60 μmol m⁻² s⁻¹之间, 最大土壤呼吸速率是最小的3.9倍。这是由于土壤呼吸受生物因素可能会随着季节的变化而发生变化, 从而导致土壤呼吸具有明显的季节性变异。此外, 由于各森林植被的凋落物数量和分解速率、根呼吸速率、土壤状况及小气候条件等而影响土壤呼吸。

表3 主要林型的土壤呼吸比较

Table 3 Comparison between the four types of forest in soil respiration		
林型 Forest type	土壤呼吸速率 Soil respiration (μ mol m ⁻² s ⁻¹)	
	均值Mean	标准差Standard deviation
AS	0.63	0.13
SS	0.97	0.24
RF	2.07	0.33
AGSF	2.46	0.22

3 讨 论

在本研究区, 低海拔地区的温度高于高海拔地区, 而土壤湿度与之相反。由于色季拉山所处的独特的地理位置和气候条件, AS、SS、RF和AGSF等植被类型的土壤水分在全年的供应比较充足, 而水分供应的类型主要由于冰雪消融及大气降水的双重作用, 使得土壤水分含量较高。在色季拉山, 随着海拔的上升, 土壤水分含量呈现上升趋势。这一方面是随海拔上升, 大气降水增加, 土壤变得相对湿润; 另一方面, 高海拔地区季节性冻土分布比较普遍, 随着生长季气温逐步升高, 冻土融化的水分成为土壤水分保持较高水平的另外一个原因。AS位于海拔最高处, 以灌木为主, 光照强, 紫外线辐射强, 蒸发量大, 低海拔区域由于受到印度洋暖湿气流的影响, 降水相对频繁, 综合这些因素的影响, 出现了本研究区域不同植被土壤含水量的大小为: RF> SS> AGSF> AS。本研究表明, 对于西藏高海拔地区通常光照较充足, 生态系统碳通量因植被和环境因子的变化, 具有明显的季节特征, 而温度和水分成为限制生态系统光合生产力的主要因素。虽然RF位于海拔较高处, 但由于其受到的光照强, 紫外线辐射强, 这就使得RF表层土壤(10 cm)温度反而高于AS和SS的表层土壤温度。AGSF位于海拔最低处, 表层土壤(10 cm)温度最高。

4种不同植被类型土壤呼吸变化AGSF> RF> SS> AS, 说明土壤温度和土壤湿度共同影响土壤呼吸速率, 但4种林型土壤呼吸与土壤温度关系模

型的决定系数R²值差别不大, 在0.47 ~ 0.72之间, 关系方程均达显著水平, 说明样地土壤呼吸的变化主要受土壤温度的控制, 土壤水分对土壤呼吸的影响较小, 指数方程可以很好地解释土壤呼吸与土壤温度的关系。这与胡婵娟等^[20]的研究结论一致。

植被类型也影响这本区域的土壤呼吸, 从而使得AS、SS、RF、AGSF 4种林型土壤呼吸速率均呈现显著的季节性变化($p<0.001$)。原因是由于土壤呼吸受生物因素可能会随着季节的变化而发生变化, 从而导致土壤呼吸具有明显的季节性变异。此外, 由于各森林植被的凋落物数量和分解速率、根呼吸速率、土壤状况及小气候条件等而影响土壤呼吸。

4 结 论

藏东南色季拉山寒温带森林土壤呼吸具有明显的日变化和季节变化。在日变化方面, CO₂的排放通量存在明显的日变化规律, 排放通量在白天16:00左右最高, 最低值出现在夜间6:00左右, 一天内土壤呼吸作用均呈单峰型曲线变化。变化的趋势与湿度和温度的季节变化一致。季节变化方面, CO₂排放的通量的季节变化趋势表现为6月份随着天气转暖和植被生长土壤呼吸作用逐渐增大, 7月份气温最高时土壤呼吸作用也达到最大值随后, 9月份气温逐渐下降, 土壤呼吸作用也逐渐降低。不同森林类型的土壤呼吸速率在植物生长季内与土壤表层(10 cm)土壤温度均呈不同程度的正

相关,而与土壤含水量的相关性较弱。土壤温度是决定藏东南色季拉山土壤呼吸季节变化的主要因子。

参 考 文 献

- [1] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48 (1) : 7—20
- [2] Gaumont G D, Andrew B T, Griffis T J, et al. Influence of temperature and drought on season and internal variation of soil bole and ecosystem respiration in a boreal aspen stand. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 40: 203—219
- [3] Khonik M, Arain M, Mccaughey J H. Temporal and spatial variability of soil respiration in a boreal mixed wood forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 40: 244—256
- [4] Saiz G, Green C. Seasonal and spatial variability of soil respiration in four Sitka stands. *Plant and Soil*, 2006, 287: 161—176
- [5] 吴宁. 贡嘎山东坡亚高山针叶林的林窗动态研究. *植物生态学报*, 1999, 23 (3) : 228—237
Wu N. Dynamics of forest gaps in subalpine coniferous forests on the eastern slope Gong Ga Mountain (In Chinese). *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, 23 (3) : 228—237
- [6] 贾丙瑞, 周广胜, 蒋延玲, 等. 寒温带针叶林土壤呼吸作用的时空特征. *生态学报*, 2013, 33 (23) : 7516—7524
Jia B R, Zhou G S, Jiang Y L, et al. Temporal-spatial characteristics of soil respiration in Chinese boreal forest ecosystem (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (23) : 7516—7524
- [7] Ralch J W, Schlesinger W H. The global carbon-dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 1992, 44 (2) : 81—99
- [8] Pangle R, Seller J. Influence of seedling roots, environmental factors and soil characteristics on soil CO₂ efflux rates in a 2-year-old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation in the Virginia Piedmont. *Environmental Pollution*, 2002, 287 (5460) : 85—96
- [9] Rayment M B, Jarvis P G. Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32 (1) : 35—45
- [10] Swanson R V, Flangan L B. Environmental regulation of carbon dioxide exchange at the forest floor in a boreal black spruce ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108: 165—181
- [11] Khomik M, Arain M A M, McCaughey J H. Temporal and spatial variability of soil respiration in a boreal mixed wood forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140: 244—256
- [12] Karhu K, Fritze H, Tuomi M, et al. Temperature sensitivity of organic matter decomposition in two boreal forest soil profiles. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42 (1) : 72—82
- [13] Peng S S, Piao S L, Wang T, et al. Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in China. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41 (5) : 1008—1014
- [14] Liao Y, Yang Z F, Xia X Q, et al. Research on temperature sensitivity of soil respiration and different active organic carbon fraction of Qinghai-Tibet Plateau permafrost. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18 (6) : 85—93
- [15] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rate in *Picea abies* stands. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32 (11/12) : 1625—1635
- [16] Yim M H, Joo S J, Shutou K, et al. Spatial variability of soil respiration in a larch plantation: Estimation of the number of sampling points required. *Forest Ecology and Management*, 2003, 175 (1/3) : 585—588
- [17] Rodeghiero M, Cescatti A. Spatial variability and optimal sampling strategy of soil respiration. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255 (1) : 106—112
- [18] Li H J, Yan J X, Yue X F, et al. Significance of soil temperature and moisture for soil respiration in a Chinese mountain area. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148 (1) : 311—318
- [19] 张赛, 王龙昌, 张晓雨, 等. 紫色土丘陵区保护性耕作下旱地土壤呼吸及影响因素. *土壤学报*, 2014, 51 (3) : 520—530
Zhang S, Wang L C, Zhang X, et al. Respiration of upland soil under conservation tillage in purple hilly regions and its influence factors (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (3) : 520—530
- [20] 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. *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 woodlands in the hilly area of the Loess Plateau (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 (9) : 4700—4709

Soil Respiration and Its Affecting Factors Relative to Type of Forest in the Sygera Mountains of Southeast Tibetan Plateau

MA Heping^{1, 2} GUO Qiqiang^{1, 2} LI Jiangrong^{1, 2} ZHOU Chenni^{1, 2}

(1 Research Institute of Plateau Ecology, Tibet Agriculture and Animal Husbandry College, Nyingchi, Tibet 860000, China)

(2 National Forest Ecosystem Observation&Research Station in Nyingchi of Tibet, Nyingchi, Tibet 860000, China)

Abstract Being the largest carbon pool of the forest ecosystem, soil carbon is a very important component of the carbon cycle in the system, and being a vital part of the soil respiration of the terrestrial ecosystem, soil respiration of the forest ecosystem influences significantly the global carbon balance. However, so far little research has been done on soil respiration of the forest ecosystems in southeastern Tibet. Therefore, in order to investigate soil respiration and its influencing factors relative to type of the forest ecosystem, a field experiment was conducted using an LI-8100 (Nebraska, USA) to measure soil respirations in four different types of forests [Alpine shrubs (AS) , Sabina saltuaria (SS) , Rhododendron forest (RF) and *Abies georgei* var. *smithii* forest (AGSF)] , typical of the Sygera Mountains of the Southeast Tibetan Plateau, for analysis of soil respiration dynamics and their major affecting factors therein. Results show that the soil respirations varies sharply in a day and with the seasons. Diurnally, CO₂ emission flux follows an apparent one-peak pattern of peaking around 16: 00 and bottoming around 06: 00, while seasonally, it did another of beginning to rise in June when the weather turns warm and the vegetation starts to grow in June, peaking in July, when the air temperature is the hottest in a year in that region, and starting to decline in September, when the air temperature begins to descend. In the four types of forest ecosystems, soil respiration rate during the vegetation growth season is positively related soil temperature of the surface layer (10 cm) to a varying extent, but not so much to soil moisture content. In terms of soil respiration rate, the 4 different types of forest ecosystems follows an order of AGSF > RF > SS > AS. The determination coefficient (R^2) of the relationship between soil respiration and soil temperature varies with the type of the forest ecosystem in the range of 0.47 ~ 0.72, demonstrating that the relationship reaches the significant level. On such a basis, it can be concluded that soil temperature is a primary constraint on soil respiration and soil water plays a secondary role. Type of the vegetation or ecosystem also affects soil respiration in the region, which causes differences between AS, SS, RF and AGSF in seasonal variation of soil respiration ($p < 0.001$) . The Q_{10} value of soil respiration is higher at high elevations than at low elevations. The findings indicate that in the case of global warming in the future, soils higher in elevation might contribute more CO₂ to the atmosphere. In short, the findings may serve as reference for the study on rules of the variation of soil respiration in forest ecosystems and mechanisms for controlling its affecting factors, and are sure of some important significance to budgeting of global carbon and assessment of regional carbon sources and pools.

Key words Soil respiration; Environmental factor; Soil temperature; Tibet

(责任编辑：卢 萍)