

DOI: 10.5846/stxb201910172174

刘合满, 曹丽花, 李江荣, 杨红. 色季拉山急尖长苞冷杉林不同层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度对短时降雨的响应. 生态学报, 2020, 40(22): 8354-8363.

Liu H M, Cao L H, Li J R, Yang H. Response of soil CO<sub>2</sub> concentration at different depth of *abies georgei* var *smithii* forest to short-time rainfall on Sejila Mountain, southeastern Tibet. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(22): 8354-8363.

## 色季拉山急尖长苞冷杉林不同层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度对短时降雨的响应

刘合满<sup>1,3,\*</sup>, 曹丽花<sup>1,3</sup>, 李江荣<sup>2,3</sup>, 杨红<sup>4</sup>

1 信阳农林学院, 信阳 464000

2 西藏农牧学院高原生态研究所, 林芝 860000

3 西藏高原森林生态教育部重点实验室, 林芝 860000

4 西藏农牧学院资源与环境学院, 林芝 860000

**摘要:**为阐明不同层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度日变化特征及对短时降雨的响应,以西藏东南部色季拉山急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *smithii*) 林为研究对象,在自然降雨条件下,分析短时降雨及水分再分布过程中各层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度变化特征。结果表明:在 0—60 cm 层次内,土壤 CO<sub>2</sub> 浓度随土壤层次的加深而显著增加( $P < 0.01$ ),二者之间呈显著对数函数关系( $R = 0.9764, P < 0.01$ );短时降雨脉冲使表层 5 cm 土壤 CO<sub>2</sub> 浓度显著下降,而 10 cm 层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度显著增加;在降雨和水分再分布阶段,5 cm 与 10 cm 层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度之间极显著负相关,10、20、40 cm 和 60 cm 之间均呈极显著正相关( $P < 0.01$ );5 cm 层次土壤含水量显著影响 0—60 cm 剖面 CO<sub>2</sub> 浓度,降雨阶段,二者之间极显著线性正相关( $P < 0.001$ ),而水分再分布阶段,二者之间符合极显著幂函数负相关( $P < 0.001$ )。即降雨引起表层土壤含水量的快速增加,显著提高土壤剖面 CO<sub>2</sub> 浓度,而降雨停止后,有利于土壤 CO<sub>2</sub> 向土表的释放;土壤温度和含水量对 CO<sub>2</sub> 浓度的影响效应在各层次之间表现不一致,除 40 cm 均为正效应外,其他各层均表现为相反的影响效应。这些结果表明,短时降雨使各层次土壤含水量增加,减少土壤表面 CO<sub>2</sub> 释放量,使下层土壤体系中 CO<sub>2</sub> 浓度升高,在分析土壤 CO<sub>2</sub> 通量时间变化时,应考虑短时降雨对不同层次土壤 CO<sub>2</sub> 的影响。

**关键词:**色季拉山;短时降雨;土壤 CO<sub>2</sub> 浓度;土壤温度;土壤含水量

### Response of soil CO<sub>2</sub> concentration at different depth of *abies georgei* var *smithii* forest to short-time rainfall on Sejila Mountain, southeastern Tibet

LIU Heman<sup>1,3,\*</sup>, CAO Lihua<sup>1,3</sup>, LI Jiangrong<sup>2,3</sup>, YANG Hong<sup>4</sup>

1 Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang 464000, China

2 Research Institute of Tibet Plateau Ecology, Tibet agriculture and Animal Husbandry university, Linzhi 860000, China

3 Tibet Key Laboratory of Forest Ecology in Plateau Area, Ministry of Education, Linzhi 860000, China

4 Department of Resources and Environment, Tibet Agriculture and Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China

**Abstract:** Soil respiration is an important ecological process in which CO<sub>2</sub> from different depths of the soil is transported to the soil surface and released to the atmosphere. The CO<sub>2</sub> production and diffusion rates at different depths in the soil significantly affect the CO<sub>2</sub> flux from the soil surface. Rainfall is a frequent weather event that causes an increase in the soil water content (SWC), and temperature changes induce dramatic variations in soil CO<sub>2</sub> production and transport. To clarify diurnal variations in soil CO<sub>2</sub> concentrations and the response to short-term rainfall, we selected Sejila Mountain in

基金项目:国家自然科学基金项目(41561052, 41461055)

收稿日期:2019-10-17; 网络出版日期:2020-09-23

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hmliu@cau.edu.cn

Southeastern Tibet as a model area. Under natural rainfall conditions, the characteristics of *abies georgei* var *smithii* forest soil CO<sub>2</sub> concentrations at different depths were analyzed. The results showed that the soil CO<sub>2</sub> concentration increased with soil depth in the following order 60 cm > 40 cm > 20 cm > 10 cm > 5 cm. Mean values were 5365, 5304, 4990, 4335 and 4179 μmol/mol, respectively. There was a significant logarithmic relationship between the CO<sub>2</sub> concentration and the soil depth, given by  $y = 531.1 \ln D + 3274$  ( $R = 0.9764, P = 0.004$ ). The soil CO<sub>2</sub> concentrations at 5 cm and 10 cm showed obvious diurnal variations, and could be expressed as a single-peak curve, while diurnal variations at 20 cm, 40 cm and 60 cm were very small. Short-term rainfall significantly affected the CO<sub>2</sub> concentrations in the 5 cm and 10 cm soil layers; the CO<sub>2</sub> concentration in the 5 cm soil layer decreased from 4196 μmol/mol to 4176 μmol/mol at the rainfall stage, and the CO<sub>2</sub> concentration in the 10 cm soil layer increased significantly from 4252 μmol/mol to 4354 μmol/mol. But there was a significant increase in CO<sub>2</sub> in the 5 cm soil layer and a decreased in CO<sub>2</sub> in the 10 cm soil layer during soil water redistribution. Closure of the CO<sub>2</sub> transport channel by water may be an important mechanism governing the increase in the CO<sub>2</sub> concentration in soil layers below 5 cm. At the rainfall and water redistribution stage, there was a significantly negative correlation between the CO<sub>2</sub> concentrations at 5 cm and 10 cm ( $P < 0.001$ ), but a significantly positive correlation at 10 cm, 20 cm, 40 cm and 60 cm ( $P < 0.01$ ). The SWC of the 5 cm layer had a significant effect on the CO<sub>2</sub> concentration in the 0—60 cm soil profile. There was a significant linear positive correlation ( $P < 0.001$ ) between the SWC at 5 cm and the CO<sub>2</sub> concentration profile at the rainfall stage, while at the water redistribution stage it followed a power function model, and had a significantly negative correlation ( $P < 0.001$ ). In other words, rainfall caused a rapid increase in the SWC of the 5 cm layer, which induced a significant increase in CO<sub>2</sub> in the 0—60 cm profile. The decrease in the SWC of the 5 cm layer at the water redistribution stage promoted a release of CO<sub>2</sub> from the soil into the atmosphere from the soil profile and caused the CO<sub>2</sub> content to decrease. The effects of soil temperature and SWC on the CO<sub>2</sub> concentration were not consistent among the different layers in the 0—60 cm soil profile, which showed that the other layers had the opposite effect, except at a depth of 40 cm. Overall, the results of this study indicate that the CO<sub>2</sub> emission flux induced in the soil by short-term rainfall decreased; however, the CO<sub>2</sub> concentration increased in the layer below 5 cm. This study suggests that diurnal variations in the CO<sub>2</sub> concentrations in the soil are affected by short-term rainfall.

**Key Words:** Sejila mountain; short-time rainfall; soil CO<sub>2</sub> concentration; soil temperature; soil water content

土壤 CO<sub>2</sub>排放是陆地生态系统碳循环的一个重要途径,在大气 CO<sub>2</sub>浓度增加方面起着不可忽视的作用。有估计全球陆地生态系统土壤 CO<sub>2</sub>排放量达到  $77 \times 10^{15}$  g C/a<sup>[1]</sup>,是化石燃料排放的 10 倍以上。土壤 CO<sub>2</sub>主要来自于土体内植物根系、土壤微生物、动物等生物呼吸和有机碳氧化分解的非生物学过程,所产生的 CO<sub>2</sub>通过土壤孔隙传导至土壤表面最终释放大气中。这一过程受土壤微生物、植物根系等生物及土壤温度、含水量、土壤孔隙状况等非生物因素<sup>[2-3]</sup>的综合影响。土壤孔隙是水和空气贮存的场所,又是土体内部空气交换与传输的重要通道,故土壤孔隙状况和水分含量将直接影响 CO<sub>2</sub>的产生和在土壤中的扩散<sup>[4]</sup>,尤其是降雨过程可快速改变表层土壤含水量、温度及土壤气体扩散速率,并可能对土壤呼吸 CO<sub>2</sub>产生激发或抑制效应,在生态系统碳循环对气候变化的瞬态响应中发挥着重要作用<sup>[5]</sup>。如 Liu 等<sup>[6]</sup>研究表明,土壤水分条件良好的森林,降雨引起的干湿交替可使土壤呼吸速率显著降低,CO<sub>2</sub>浓度下降,这可能是由于降雨在土壤孔隙中的快速替代作用,阻碍了氧气向土壤中的扩散,从而抑制了微生物的呼吸作用。在降雨量小的干旱盐生荒漠植被群落区,土壤 CO<sub>2</sub>释放量与总降雨量之间极显著正相关,降雨引起土壤 CO<sub>2</sub>脉冲式增加,水分成为土壤 CO<sub>2</sub>通量的主要限制因子<sup>[7-8]</sup>。在土壤含水量较低时,小的降雨事件即能引起土壤 CO<sub>2</sub>通量的显著增加<sup>[9]</sup>。然而,降雨对土壤 CO<sub>2</sub>代谢的影响具有较大的不确定性,这将不利于我们对土壤呼吸时空变化机制的理解,和对碳通量的准确估算<sup>[10-11]</sup>。

森林是西藏东南部一类重要的陆地生态系统,具有受人为扰动小、植被生物量大、地表土壤有机质含量高

等特点,从而成为研究自然生态系统土壤碳循环的一个天然实验室。而目前围绕藏东南森林生态系统有机碳循环的研究,主要集中在土壤有机碳含量<sup>[12]</sup>、土壤呼吸 CO<sub>2</sub> 排放特征<sup>[13]</sup> 等方面,对于短时降雨事件对不同层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度影响的研究尚未见报道,且目前常用土壤呼吸测定系统受呼吸罩的影响,呼吸环内无法接受降雨,从而不利于进行降雨对土壤 CO<sub>2</sub> 排放的影响评价。降雨事件是西藏东南部森林生态区经常发生的天气事件,科学阐明短时降雨对不同层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度的影响,有利于揭示土壤呼吸 CO<sub>2</sub> 排放的时间异质性及对土壤含水量响应的机制。本研究以西藏东南部色季拉山急尖长苞冷杉林为研究对象,采用不同层次 CO<sub>2</sub> 测量系统自动监测 CO<sub>2</sub> 浓度,分析降雨和降雨停止后的水分再分布阶段,不同层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度的变化特征,以期对青藏高原森林生态系统土壤 CO<sub>2</sub> 浓度变化对短时降雨的响应预测提供科学基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

色季拉山(93°12′—95°35′E,29°10′—30°15′N)属念青唐古拉山脉,位于西藏东南部林芝市境内,地处雅鲁藏布江中下游,是尼洋河流域与帕隆藏布江的分水岭。山体土壤与植被垂直分布规律,急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *smithii*)、林芝云杉(*Picea likiangensis* var. *linzhiensis*)、高山栎(*Quercus semicarpifolia* Smith)等森林植被分布广泛。土壤以山地酸性棕壤、山地棕壤分布最多。气候属于半湿润与湿润区过渡地带,山体气候条件差异较大,年均温由海拔 3326 m 的 5.07℃ 到东坡林线(海拔 4390 m)区的 0.26℃,最冷月(1月)气温分别为-3.51℃ 和-7.89℃<sup>[14-15]</sup>。

### 1.2 实验设计

本研究选择西藏东南部色季拉山急尖长苞冷杉林为研究对象,在位于 94°42′56″ E,29°39′1″ N 的区域,选择林窗位置,去除表层苔藓层和枯落物堆积层。于 2018 年 7 月 19 日,挖开一个 0—70 cm 层次的土壤剖面,在挖剖面时尽可能减少对被测面土壤的扰动,将各测定探头分别平行插入各测定深度(5,10,20,40 cm 和 60 cm),同一层次上,TDR 探头与 CO<sub>2</sub> 采气矛水平相距 5 cm 左右。埋设好探头后,将挖出的土壤重新填回,使其自然沉实。然后开启仪器,设置测定时间步长为 30 min。为减少插入传感器对土壤的扰动而影响测定结果的准确度,在插入传感器 3 d 后正式开始采集数据。土壤剖面 CO<sub>2</sub> 浓度采用 Envidata-SC 土壤剖面 CO<sub>2</sub> 梯度监测系统测定。CO<sub>2</sub> 浓度测量采用芬兰 Vaisala 公司生产的 Carbocap CO<sub>2</sub> 传感器,测量范围为 0—10000 μmol/mol,精度±1.5%。TDR 土壤水分、温度传感器为 Trime-Pico32 型,土壤水分(体积含水量,即土体中水的体积与土壤总体积之比)测定范围为 0—100%,精度为±1.0%,温度测定范围-15—50℃,测量精度为±0.2℃。为研究自然降雨对不同层次土壤 CO<sub>2</sub> 的影响,根据表层 5 cm 层次土壤含水量变化情况,选择 8 月 10 日 4:00—8 月 11 日 24:00 的降雨和降雨停止后的水分再分布阶段,其中 8 月 10 日 4:00—20:30 为降雨阶段,表层土壤含水量快速增加,然后降雨停止,表层土壤含水量开始下降,即为水分再分布阶段。

### 1.3 数据处理

数据的基本处理采用 EXCEL 2007 进行,作图采用 Origin 9.0 进行,不同层次土壤含水量、温度及 CO<sub>2</sub> 浓度之间差异,将不同时间点所测数据作为各层次的重复,然后采用单因素方差分析(One way analysis of variance),LSD 多重比较法进行,土壤 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤层次、温度和含水量之间回归分析,及不同层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度之间相关性分析采用 SPSS 20.0 软件进行。同一层次土壤及 0—60 cm 层次 CO<sub>2</sub> 的平均浓度均采用不同测定时间或不同层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度的算术平均数进行计算。

## 2 结果与分析

### 2.1 降雨对不同层次土壤含水量的影响

在测定的时间段内,各层次土壤含水量变化特征如图 1 所示,不同层次土壤含水量表现为 5 cm>10 cm>40 cm>60 cm>20 cm,即 5 cm 土壤含水量最高,中间层(20 cm)含水量最低。5、10 cm 和 40 cm 层次土壤平均

含水量分别为 0.408、0.392 和 0.330。降雨发生时,表层 5 cm 土壤含水量快速增加,由初始的 0.375 增加到 0.424,然后降雨停止,土壤水分开始进入再分布阶段,5 cm 层次土壤含水量开始下降,由 0.424 降低到 0.400。10 cm 层次土壤含水量由初始的 0.375 增加到 0.400,但最大值出现的时间较 5 cm 延迟了 4 个小时。此次降雨事件主要使表层 5 cm 和 10 cm 土壤含水量增加,水分尚未入渗到 20 cm,同时 20 cm 层次土壤为表层壤土向下层沙壤土的过渡层,具有良好的导水性,故在土壤水分以蒸发为主时,20 cm 层次土壤水也易于向上层蒸发损失,从而呈现较低的含水量。20 cm 和 60 cm 层次土壤含水量之间差异不显著,平均值分别为 0.291 和 0.292,其他各层次之间差异均达极显著水平( $P < 0.001$ )。从时间变异上来看,5 cm > 10 cm > 20 cm > 40 cm > 60 cm,变异系数分别为 2.93%、2.20%、0.31%、0.23% 和 0.17%,即土壤含水量在时间动态上的变化随土壤层次的加深而减小。

## 2.2 不同层次土壤温度变化特征

不同层次土壤温度表现为 5 cm > 10 cm > 20 cm > 40 cm > 60 cm,即随着土壤层次的加深(图 1),土壤温度呈降低趋势,表现为日射型变化特征。除 5 cm 与 10 cm 之间差异不显著外,其他各层土壤温度之间差异均达极显著水平( $P < 0.001$ ),观测时段内均值分别为 11.40、11.12、10.41、9.93、9.62℃。5 cm 和 10 cm 土壤温度具有较明显的日变化特征,呈单峰型,在无明显降雨的 8 月 11 日,5 cm 层次土壤温度在 0:00—10:00 之间呈降低趋势,最低值出现在 10:00 时为 10.98℃,然后开始增加,到 19:30 时达最大值,为 12℃,并开始逐渐降低。观测的 8 月 10 日同样表现相似的日变化特征,但由于降雨的影响,使日最低值和最高值均较 8 月 11 日有所推迟,分别出现在 11:30 和 20:00。10 cm 层次土壤温度亦呈单峰型变化特征,但变化幅度低于 5 cm,且峰值出现时间延迟于 5 cm。8 月 11 日 10 cm 层次土壤温度最低值和最高值分别出现在 13:30 和 24:00。该样点 20、40、60 cm 土壤温度具有小的日变化幅度,在测定的时间段内,变异系数分别为 0.12%、0.14% 和 0.17%,而 5 cm 和 10 cm 分别为 2.61% 和 1.04%。由此可知,在该含水量条件下,各层次土壤热量传导较慢。将测定两天的土壤温度按照时间及对应层次平均后进行回归,可得土壤温度(ST)与深度(D)之间显著负相关( $R = 0.9560$ ,  $F = 32.149$ ,  $P = 0.011$ ),回归方程为  $ST = -0.032D + 11.35$ ,即在 0—60 cm 剖面上,深度每增加 1 cm,土壤温度大约降低 0.032℃。

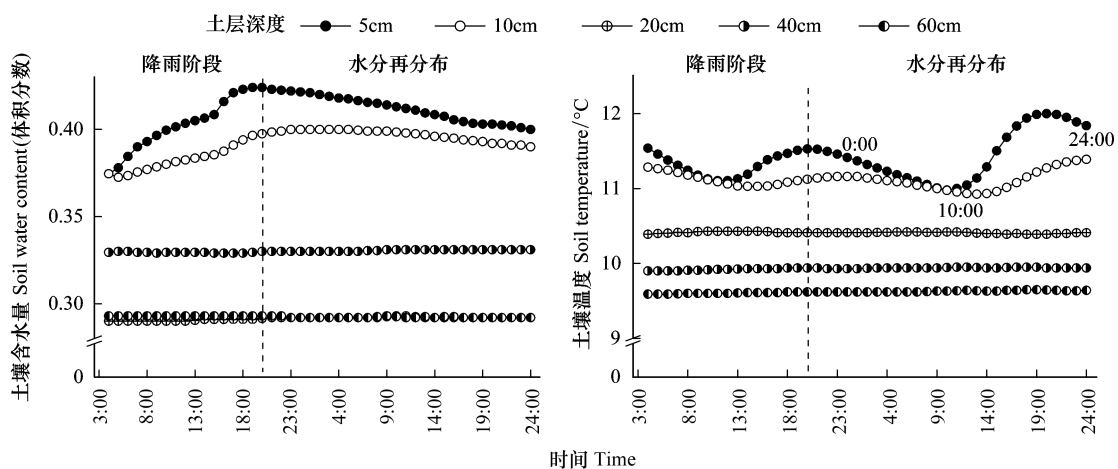


图 1 不同层次土壤含水量及土壤温度变化特征

Fig.1 The variation of soil water content and soil temperature in different depth

## 2.3 不同层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度的变化特征

不同层次 CO<sub>2</sub> 浓度随着土壤层次的加深而增加(图 2),各层次土壤 CO<sub>2</sub> 平均浓度之间差异均达极显著水平( $P < 0.01$ ),分别为 4179、4335、4990、5304、5365 μmol/mol,60 cm 层次土壤 CO<sub>2</sub> 平均浓度分别较以上其他层次高 1.16%、7.52%、23.78% 和 28.39%。土壤深度与 CO<sub>2</sub> 浓度之间符合极显著( $R = 0.9764$ ,  $P = 0.004$ )对数函

数关系,  $y = 531.1 \ln D + 3274$ ,  $y$  为土壤  $\text{CO}_2$  浓度 ( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ),  $D$  为土壤深度 (cm), 即随着土壤层次的加深, 土壤具有更高的  $\text{CO}_2$  浓度。

各层次土壤  $\text{CO}_2$  小时平均浓度之间相关性如表 1 所示, 5 cm 与 10 cm 土壤  $\text{CO}_2$  浓度之间极显著负相关 ( $R = -0.693$ ), 与 20、40、60 cm 之间正相关, 但未达显著水平。而 10 cm 层次与其以下各层  $\text{CO}_2$  浓度之间均极显著正相关, 尤其是相邻两层之间相关性更强, 如 20 cm 和 40 cm 之间相关系数达到 0.918, 40 cm 和 60 cm 之间达到 0.980。这些结果表明, 5 cm 层次土壤  $\text{CO}_2$  浓度可能更敏感的响应于降雨及含水量的变化, 并主要对其相邻的 10 cm 层次土壤  $\text{CO}_2$  产生影响, 当降雨发生时, 5 cm 土壤含水量增加, 在水对土壤孔隙的封闭和压力作用下, 使 5 cm 层次土壤  $\text{CO}_2$  向下迁移, 浓度降低, 而增加了 10 cm 层次土壤  $\text{CO}_2$  浓度。反之, 降雨停止, 5 cm 层次土壤含水量逐渐下降, 土壤孔隙对空气的传导能力增强, 促进 10 cm 层次土壤  $\text{CO}_2$  向上层迁移, 从而增加 5 cm 土壤  $\text{CO}_2$  浓度, 而使 10 cm 土壤  $\text{CO}_2$  浓度下降。

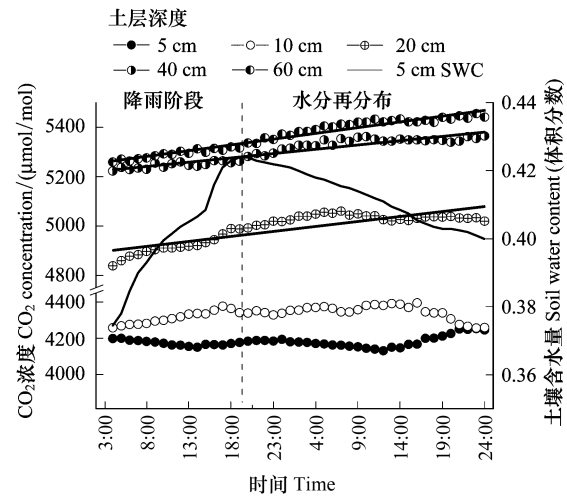


图 2 降雨和水分再分布阶段不同层次土壤  $\text{CO}_2$  浓度变化特征

Fig.2 Variation of soil  $\text{CO}_2$  concentration in rainfall and water redistribution stage

表 1 不同层次土壤  $\text{CO}_2$  浓度相关性分析 ( $R$ )

Table 1 Correlation analysis of  $\text{CO}_2$  concentration in different soil layer

土壤层次 Soil layer/cm	10	20	40	60
5	-0.693**	0.029	0.094	0.158
10		0.584**	0.447**	0.404**
20			0.918**	0.906**
40				0.980**

\*\* 表示相关性达到  $\alpha = 0.01$  极显著水平

#### 2.4 短时降雨对土壤 $\text{CO}_2$ 浓度的影响效应

降雨阶段, 5 cm 层次土壤  $\text{CO}_2$  浓度呈降低趋势, 而 10 cm 和 20 cm 层次有一个明显的增加 (图 2)。5 cm 土层  $\text{CO}_2$  浓度由 4196  $\mu\text{mol}/\text{mol}$  下降到 19:00 时的 4176  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ , 而 10 cm 层次则从 4252  $\mu\text{mol}/\text{mol}$  增加到 18:30 时的 4354  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ , 到 20:30 时为 4343  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。

本研究时间段内, 5 cm 层次土壤含水量均高于初始含水量, 故水分可能是土壤  $\text{CO}_2$  浓度变化的主要因素。表层 5 cm 和 10 cm 土壤  $\text{CO}_2$  浓度具有较为明显的波动, 在测试时间段内, 分别有两个峰值和两个低值, 20 cm 层次土壤  $\text{CO}_2$  浓度有一个峰值, 出现时间大约在停止降雨后 5 个小时。而 40 cm 和 60 cm 两个层次土壤  $\text{CO}_2$  浓度随着测定时间的延长, 呈极显著线性增加趋势, 增加幅度分别为 3.45  $\mu\text{mol mol}^{-1} \text{h}^{-1}$  和 4.66  $\mu\text{mol mol}^{-1} \text{h}^{-1}$  ( $P < 0.0001$ ), 由此可知, 随着土壤层次的加深, 降雨对土壤  $\text{CO}_2$  的影响效应逐渐延迟。

降雨和水分再分布阶段, 5 cm 层次土壤含水量与 0—60 cm 层次土壤  $\text{CO}_2$  浓度平均值相关性如图 3 所示, 在降雨阶段, 土壤  $\text{CO}_2$  浓度显著增加, 与 5 cm 层次土壤含水量之间呈线性极显著正相关 ( $R = 0.9821, P < 0.001$ ), 即短时降雨可显著促进土壤体系  $\text{CO}_2$  浓度的增加。在降雨停止的水分再分布阶段, 土壤体系内  $\text{CO}_2$  浓度逐渐下降, 与 5 cm 土壤含水量之间极显著幂函数负相关 ( $R = -0.7624, P < 0.001$ ), 即降雨停止后, 随着表层 5 cm 土壤含水量的下降, 土壤剖面  $\text{CO}_2$  浓度显著降低。

#### 2.5 土壤含水量和温度对不同层次土壤 $\text{CO}_2$ 浓度的影响效应

### 2.5.1 土壤含水量和温度对 5 cm 土壤 CO<sub>2</sub> 的影响效应

降雨和水分再分布阶段,5 cm 层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度与温度和含水量之间的关系较为复杂,但最大值主要出现在高温低含水量区(图 4)。以土壤 CO<sub>2</sub> 浓度为因变量,土壤温度(ST)和含水量(SWC)为自变量进行回归分析,可得  $y = 3448.37 - 404.24SWC + 78.61ST$ 。回归分析结果表明,土壤 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤温度之间极显著正相关( $P < 0.001$ ),与土壤含水量之间极显著负相关( $P = 0.002$ ),回归方程  $R = 0.8579$  ( $P < 0.001$ ),即平均而言,土壤含水量增加 0.1 个单位,则该层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度下降 40.42  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ,而当温度增加 1 $^{\circ}\text{C}$ 时,土壤 CO<sub>2</sub> 浓度增加 78.61  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。在降雨阶段,土壤 CO<sub>2</sub> 浓度与含水量和温度之间回归方程为  $y = 3745.01 - 621.69SWC + 60.03ST$  ( $P < 0.001, n = 34$ ),即在降雨阶段,5 cm 层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度更强烈的受土壤含水量的影响,随着含水量的增加,CO<sub>2</sub> 浓度显著下降。在降雨停止后的水分再分布阶段,回归方程  $y = 2903.68 + 526.41SWC + 92.76ST$ ,方程检验达极显著水平( $P < 0.001, n = 55$ ),但在此阶段,土壤含水量对土壤 CO<sub>2</sub> 浓度的影响效应未达显著水平( $P = 0.186$ ),即在水分再分布阶段,5 cm 层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度可能更多的受土壤温度的影响。但在单独考虑土壤 CO<sub>2</sub> 与土壤含水量及土壤温度的相关性时,CO<sub>2</sub> 浓度与土壤含水量之间极显著负相关( $R = -0.480, P < 0.001$ ),与土壤温度之间极显著正相关( $R = 0.875, P < 0.001$ )。

### 2.5.2 土壤含水量和温度对 10 cm 土壤 CO<sub>2</sub> 的影响效应

10 cm 层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度整体与 5 cm 呈相反趋势(图 4),高值区主要集中在低温高含水量的区域内,低值区出现在低含水量高温区,即较低含水量和较高温度时,有利于土壤 CO<sub>2</sub> 向上层的扩散传导,从而使该层次 CO<sub>2</sub> 浓度下降。土壤 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤温度和含水量的回归方程为  $y = 6023.01 + 2221.57SWC - 230.15ST$  ( $R = 0.938$ ),各回归系数检验均达极显著水平( $P < 0.0001$ ),即该回归方程具有显著意义。由方程回归系数可知,10 cm 层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤温度之间极显著负相关( $R = -0.826, P < 0.0001$ ),而与土壤含水量之间呈极显著正相关( $R = 0.704, P < 0.0001$ )。10 cm 层次土壤含水量变化较小,根据含水量情况可分为水分增加和降低两个阶段,在含水量增加和降低阶段,土壤 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤含水量和温度之间的回归方程分别为  $y = 5624.50 + 2329.80SWC - 198.06ST$  ( $P < 0.001, n = 73$ ) 和  $y = 6253.34 + 3859.56SWC - 307.63ST$  ( $R = 0.948, P < 0.001, n = 16$ )。其中在含水量增加阶段,土壤含水量和温度对土壤 CO<sub>2</sub> 浓度之间的回归系数均达显著或极显著水平,而在含水量下降阶段,土壤含水量与 CO<sub>2</sub> 浓度之间的回归系数未达显著水平( $P = 0.727$ )。

### 2.5.3 土壤含水量和温度对 20 cm 及以下各层土壤 CO<sub>2</sub> 的影响效应

20、40、60 cm 土壤含水量受地表短时降雨的影响很小,CO<sub>2</sub> 浓度对土壤含水量和温度的响应关系较表层 5 cm 和 10 cm 简单。相同温度条件下,20 cm 层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度随含水量(0.290—0.293)的增加而增加(图 4),土壤 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤温度和含水量的回归方程为  $y = -12979.53 + 63326.63SWC - 46.95ST$ ,回归方程  $R = 0.919$ ,回归系数检验表明,土壤 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤含水量之间回归关系达极显著水平( $P < 0.001$ ),而与温度之间关系不显著( $P = 0.839$ )。即在该试验条件下,20 cm 层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度主要受土壤含水量的影响,在 0.290—0.293 含水量范围内,含水量越高,土壤 CO<sub>2</sub> 浓度越大。

40 cm 层次土壤,当温度相同含水量增加,或含水量相同温度增加时,土壤 CO<sub>2</sub> 浓度均呈增加趋势(图 4)。土壤 CO<sub>2</sub> 浓度与含水量及温度之间回归方程为  $y = -22157.29 + 29980.94SWC + 1767.99ST$  ( $R = 0.908, P < 0.001$ ),方程有科学意义。对回归系数检验,结果表明,土壤含水量和温度对土壤 CO<sub>2</sub> 的影响效应均达极显著水平

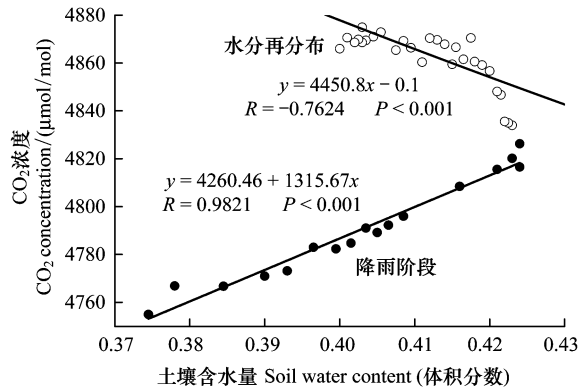


图 3 0—60 cm 层次土壤 CO<sub>2</sub> 平均浓度与 5 cm 土壤含水量的相关性

Fig.3 Correlation analysis of SWC of 5 cm layer and mean CO<sub>2</sub> concentration in 0—60 cm layer

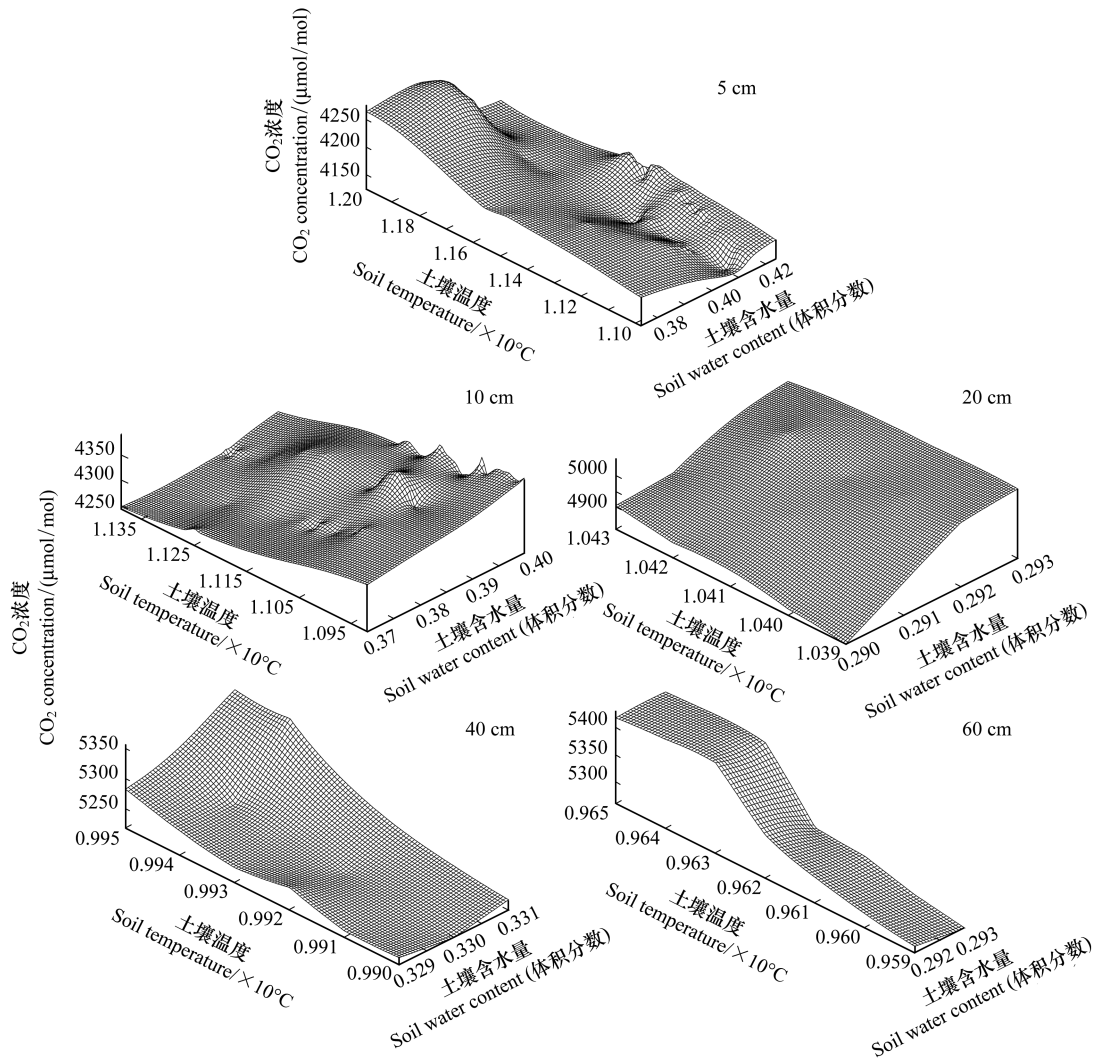


图4 土壤温度和含水量对不同层次 CO<sub>2</sub> 浓度的影响效应

Fig.4 Effects of soil temperature and water content on CO<sub>2</sub> concentration in soil profile

( $P < 0.001$ ), 相关系数分别为 0.807 和 0.812, 即该层次土壤 CO<sub>2</sub> 随土壤含水量和温度的增加而显著增加。

本研究 60 cm 层次土壤含水量具有较小的时间变异性(图 4), 在 0.292—0.293 之间。在含水量相同时, 随着温度的增加, 土壤 CO<sub>2</sub> 浓度呈增加趋势, 而温度相同, 土壤 CO<sub>2</sub> 浓度随含水量的增加而降低, 如在测定时间段内, 平均温度 11.44℃, 含水量为 0.292 和 0.293 时, 土壤 CO<sub>2</sub> 浓度分别为 5414 μmol/mol 和 5276 μmol/mol。回归方程为  $y = -9954.87 - 37640.36SWC + 2736.97ST$ , 回归方程  $R = 0.933$  ( $P < 0.001$ ), 各回归系数检验均达极显著水平 ( $P < 0.001$ )。

由不同层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤温度和含水量的相关系数可知(表 2), 除 40 cm 层次土壤温度和含水量对 CO<sub>2</sub> 均具有正效应外, 其他各层均为相反的影响效应。在 5 cm 和 60 cm 层次上, 土壤 CO<sub>2</sub> 与土壤含水量之间极显著负相关, 而与温度之间极显著正相关。剖面的中间层(10—40 cm), 土壤 CO<sub>2</sub> 浓度与含水量之间极显著正相关, 而 10 cm 和 20 cm 层次与土壤温度之间极显著负相关。

### 3 讨论

#### 3.1 不同层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度变化特征

本研究表明,色季拉山急尖长苞冷杉林 0—60 cm 层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度随土壤深度的增加而增加,这与 Tang 等<sup>[16]</sup>在橡树林、王超等<sup>[17]</sup>在人工杉木林、Jassal<sup>[18]</sup>等在加拿大温哥华海岸花旗松林的研究结果一致。但在 0—60 cm 层次剖面上,土壤 CO<sub>2</sub> 浓度与植物细根生物量<sup>[19]</sup>和微生物数量<sup>[20]</sup>的垂直分布呈相反趋势,这表明不同层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度除受土壤根系、微生物和动物的呼吸作用影响外,还可能更多的受土壤通气性的影响,尤其是深层土壤。如有研究表明,森林生态系统表层 0—15 cm 层次土壤占 CO<sub>2</sub> 总通量的比例可达 50% 以上<sup>[17,21]</sup>,亦有研究表明,土壤 CO<sub>2</sub> 释放量超过 75% 来自于表层 20 cm 土壤<sup>[18]</sup>,即表层土壤所产生的 CO<sub>2</sub> 更易于通过土壤孔隙向土表释放,从而使其 CO<sub>2</sub> 浓度相对较低。下层土壤 CO<sub>2</sub> 的来源相对较少,但受长期高含水量、低空气交换量等因素的影响,不利于 CO<sub>2</sub> 向表层迁移,从而使其具有较高的浓度。

表 2 不同层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤温度及含水量的相关性分析Table 2 Correlation analysis of CO<sub>2</sub> concentration and SWC, ST in different soil layer

土壤性质 Soil properties	5 cm	10 cm	20 cm	40 cm	60 cm
含水量 Soil water content	-0.307 **	0.727 **	0.919 **	0.807 **	-0.755 **
温度 Soil temperature	0.842 **	-0.826 **	-0.237 *	0.812 **	0.904 **

\* 表示相关性达  $\alpha=0.05$  显著水平, \*\* 表示相关性达到  $\alpha=0.01$  极显著水平

本研究中,5 cm 层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度显著高于王超<sup>[17]</sup>等 3 月份在杉木人工林上测定的平均结果(892.6  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ),也显著高于 Bekele<sup>[22]</sup>等在加拿大针叶林上夏季的测定结果(3000  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ),这可能是由于本研究测定时间处于该区域的雨季,表层土壤含水量高,不利于 CO<sub>2</sub> 的释放。同时本研究区表层土壤有机碳具有较高含量水平<sup>[23]</sup>,为微生物呼吸提供了丰富的生活基质,从而促进 CO<sub>2</sub> 的产生。

### 3.2 降雨对不同层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度的影响效应

水分对土壤孔隙中 CO<sub>2</sub> 的替代、对 CO<sub>2</sub> 扩散的阻滞,及对植物根系和微生物活性与数量的影响是降水对土壤 CO<sub>2</sub> 影响的重要机制<sup>[24]</sup>。本研究表明,降雨使 5 cm 层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度显著降低,而 10 cm 层次显著升高。这可能是由于降雨使土壤—大气界面产生压力脉冲,降低 5 cm 层以下土壤气体扩散率,同时表层 5 cm 土壤水替代孔隙中 CO<sub>2</sub> 使部分 CO<sub>2</sub> 快速排出土壤,和在水压作用下部分 CO<sub>2</sub> 向下层转移,使表层土壤 CO<sub>2</sub> 浓度的短期下降<sup>[25]</sup>,同时促进了 5 cm 层以下土壤 CO<sub>2</sub> 浓度升高,这与 Jassal 等<sup>[18]</sup>的研究结果一致。本研究中,降雨阶段 5 cm 层次土壤含水量与 0—60 cm 层次土壤 CO<sub>2</sub> 平均浓度极显著正相关( $P<0.001$ ),而在降雨停止的水分再分布阶段,二者之间极显著负相关( $P<0.001$ ),即短时降雨整体上促进了土壤 CO<sub>2</sub> 浓度的升高,这与游贤慧<sup>[26]</sup>等的研究结果一致。这主要是由于降雨可能引发土壤微生物呼吸的瞬间脉冲<sup>[5,27]</sup>及降低下层土壤空气的扩散率,从而使土体 CO<sub>2</sub> 浓度增加。一次小的降雨(10 mm)事件引起土壤总微生物、真菌和细菌数量<sup>[28]</sup>或活性增加<sup>[29]</sup>,促进土壤微生物产生 CO<sub>2</sub> 量的增加。同时,土壤含水量显著影响着土壤 CO<sub>2</sub> 的扩散速率,二者之间极显著负相关<sup>[25]</sup>,故在降雨阶段,下层土壤 CO<sub>2</sub> 浓度增加,而在水分再分布阶段,表层土壤含水量逐渐下降,则使土壤中 CO<sub>2</sub> 扩散速率增加,促进土壤 CO<sub>2</sub> 向大气中排放,从而使土壤 CO<sub>2</sub> 浓度下降。

### 3.3 土壤含水量和温度对土壤 CO<sub>2</sub> 的综合影响效应

土壤含水量和温度是土壤 CO<sub>2</sub> 产生和释放的重要参量<sup>[17,30]</sup>,共同决定了土壤中与碳循环相关的生物和非生物过程。在年际尺度上,土壤温度的变化可以 50% 地解释土壤 CO<sub>2</sub> 总通量的变异,而含水量可以解释 18%<sup>[31]</sup>。土壤表面 CO<sub>2</sub> 通量来自于各层次 CO<sub>2</sub> 向土表的迁移,故各层次土壤 CO<sub>2</sub> 对温度和含水量的响应将直接决定土壤 CO<sub>2</sub> 的总通量,如有研究表明土壤表面 CO<sub>2</sub> 通量与 50 cm 深土壤 CO<sub>2</sub> 浓度显著线性正相关<sup>[18]</sup>。

本研究中,不同层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度对土壤含水量和温度的响应特征不同,5 cm 和 60 cm 层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤含水量极显著负相关,与土壤温度显著正相关,而 10、20、40 cm 则与土壤含水量显著正相关,但对土壤温度的响应分别为显著负相关、不显著负相关和显著正相关。10 cm 和 20 cm 层次土壤 CO<sub>2</sub> 浓度与温度之间负相关,可能是由于这两个层次距离土表较近,在温度较高条件下,空气分子活性增强,土壤空气的扩散率



增加,促进 CO<sub>2</sub>向表层的迁移释放;而与土壤含水量之间正相关,可能是由于含水量增加促进土壤包气带的形成及增加土壤孔隙的粘滞性,从而使其具有较高的 CO<sub>2</sub>浓度。本研究亦表明,短时降雨使表层土壤含水量快速增加,从而使土壤含水量成为 0—60 cm 层次土壤 CO<sub>2</sub>浓度的关键控制因素。

#### 4 结论

(1) 0—60 cm 剖面上,土壤 CO<sub>2</sub>浓度随土壤层次的加深而增加,即:60 cm>40 cm>20 cm>10 cm>5 cm;

(2) 短时降雨主要对表层 5 cm 和 10 cm 土壤 CO<sub>2</sub>浓度产生影响,使 5 cm 层次土壤 CO<sub>2</sub>浓度显著降低,而 10 cm 层次则呈升高趋势,降水停止后,5 cm 层次 CO<sub>2</sub>浓度呈增加趋势,而 10 cm 层次则降低;

(3) 短时降雨引起表层 5 cm 土壤含水量的增加,显著提高了 0—60 cm 层次土壤 CO<sub>2</sub>的浓度,而在水分再分布阶段,0—60 cm 层次土壤 CO<sub>2</sub>浓度与表层 5 cm 土壤含水量之间显著负相关。

(4) 不同层次土壤 CO<sub>2</sub>浓度对土壤温度和含水量的响应特征不同,40 cm 层次 CO<sub>2</sub>浓度与土壤温度和含水量之间均呈正响应,而其他各层次土壤 CO<sub>2</sub>浓度与温度和含水量之间呈现相反的影响效应。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(1): 23-36.
- [ 2 ] Smith K A, Ball T, Conen F, Dobbie K E, Massheder J, Rey A. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54(4): 779-791.
- [ 3 ] Mitra B, Miao G F, Minick K, McNulty S G, Sun G, Gavazzi M, King J S, Noormets A. Disentangling the effects of temperature, moisture, and substrate availability on soil CO<sub>2</sub> efflux. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124(7): 2060-2075.
- [ 4 ] Pla C, Cuezva S, Martinez-Martinez J, Fernandez-Cortes A, Garcia-Anton E, Fusi N, Crosta G B, Cuevas-Gonzalez J, Cañaveras J C, Sanchez-Moral S, Benavente D. Role of soil pore structure in water infiltration and CO<sub>2</sub> exchange between the atmosphere and underground air in the vadose zone: a combined laboratory and field approach. *CATENA*, 2017, 149: 402-416.
- [ 5 ] Lee X, Wu H J, Sigler J, Oishi C, Siccama T. Rapid and transient response of soil respiration to rain. *Global Change Biology*, 2004, 10(6): 1017-1026.
- [ 6 ] Liu Y C, Liu S R, Wang J X, Zhu X L, Zhang Y D, Liu X J. Variation in soil respiration under the tree canopy in a temperate mixed forest, central China, under different soil water conditions. *Ecological Research*, 2014, 29(2): 133-142.
- [ 7 ] Ma J, Zheng X J, Li Y. The response of CO<sub>2</sub> flux to rain pulses at a saline desert. *Hydrological processes*, 2012, 26(26): 4029-4037.
- [ 8 ] 马杰, 于丹丹, 郑新军. 盐生荒漠土壤 CO<sub>2</sub>通量及其环境影响因素. *生态学报*, 2013, 32(10): 2532-2538.
- [ 9 ] Yuste J C, Janssens I A, Carrara A, Ceulemans R. Annual Q<sub>10</sub> of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity. *Global Change Biology*, 2004, 10(2): 161-169.
- [ 10 ] Fazlina M I S, Azhar A T S, Abdullah M E, Sunar N M, Embong Z, Aziman M. Effect of rainfall patterns on concentration of CO<sub>2</sub>, soil temperature and matric suction for acidic barren soil. *Journal of Physics Conference Series*, 2018, 1049: 012089.
- [ 11 ] 李新鸽, 韩广轩, 朱连奇, 陈超男. 降雨引起的干湿交替对土壤呼吸的影响: 进展与展望. *生态学报*, 2019, 38(2): 567-575.
- [ 12 ] 杨红, 扶胜兰, 刘合满, 曹丽花, 曹舰艇, 郭丰磊. 藏东南色季拉山不同海拔森林土壤碳氮分布特征. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(10): 15-23.
- [ 13 ] 马和平, 郭其强, 李江荣, 周晨霓. 色季拉山 4 种林型土壤呼吸及其影响因子. *土壤学报*, 2016, 53(1): 253-260.
- [ 14 ] 刘合满, 曹丽花, 曾加芹. 藏东南色季拉山沟壑区土壤氮素空间分布特征. *生态学报*, 2016, 36(1): 127-133.
- [ 15 ] 刘合满. 西藏东南部色季拉山土壤有机碳含量与呼吸作用特征[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [ 16 ] Tang J W, Baldocchi D D, Qi Y, Xu L K. Assessing soil CO<sub>2</sub> efflux using continuous measurements of CO<sub>2</sub> profiles in soils with small solid-state sensors. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 118(3/4): 207-220.
- [ 17 ] 王超, 黄群斌, 杨智杰, 黄蓉, 陈光水. 杉木人工林不同深度土壤 CO<sub>2</sub>通量. *生态学报*, 2011, 31(19): 5711-5719.
- [ 18 ] Jassal R, Black A, Novak M, Morgenstern K, Nescic Z, Gaumont-Guay D. Relationship between soil CO<sub>2</sub> concentrations and forest-floor CO<sub>2</sub> effluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 130(3/4): 176-192.
- [ 19 ] 幸福梅, 刘济铭, 杨小林, 赵垦田. 色季拉山急尖长苞冷杉叶片及细根性状随海拔的变异特征. *生态学报*, 2017, 37(8): 2719-2728.
- [ 20 ] 付战勇, 孙景宽, 李传荣, 池源, 夏家宝, 屈凡柱, 宋爱云, 杨红军, 董林水. 黄河三角洲贝壳堤土壤微生物生物量对不同生境因子的响应. *生态学报*, 2018, 38(18): 6594-6602.

- [21] Gaudinski J B, Trumbore S E, Davidson E A, Zheng S H. Soil carbon cycling in a temperate forest: radiocarbon-based estimates of residence times, sequestration rates and partitioning of fluxes. *Biogeochemistry*, 2000, 51(1): 33-69.
- [22] Bekele A, Kellman L, Beltrami H. Soil profile CO<sub>2</sub> concentrations in forested and clear cut sites in Nova Scotia, Canada. *Forest Ecology and Management*, 2007, 242(2/3): 587-597.
- [23] 马和平, 郭其强, 刘合满, 钱登锋. 藏东南色季拉山西坡土壤有机碳库研究. *生态学报*, 2013, 33(10): 3122-3128.
- [24] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 阎志丹. 水分对土壤呼吸的影响及机理. *生态学报*, 2003, 23(5): 972-978.
- [25] Maier M, Schack-Kirchner H, Hildebrand E E, Holst J. Pore-space CO<sub>2</sub> dynamics in a deep, well-aerated soil. *European Journal of Soil Science*, 2010, 61(6): 877-887.
- [26] 游贤慧, 杨琰, 徐刚, 邹晓岗, 何志立, 田宁, 田洪明, 曾朱周. 喀斯特槽谷区土壤 CO<sub>2</sub> 浓度的短时变化及影响因素研究. *地球与环境*, 2019, 47(1): 16-25.
- [27] Borken W, Davidson E A, Savage K, Gaudinski J, Trumbore S E. Drying and wetting effects on carbon dioxide release from organic horizons. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(6): 1888-1896.
- [28] Deng Q, Hui D F, Chu G W, Han X, Zhang Q F. Rain-induced changes in soil CO<sub>2</sub> flux and microbial community composition in a tropical forest of China. *Scientific Reports*, 2017, 7: 5539.
- [29] Sugihara S, Funakawa S, Kadono A, Takata Y, Sawada, Fujii K, Kosaki T. *In situ* short-term dynamics of CO<sub>2</sub> flux and microbial biomass after simulated rainfall in dry croplands in four tropical and continental ecosystems. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2015, 61(3): 392-403.
- [30] Epron D, Farque L, Lucot É, Badot P M. Soil CO<sub>2</sub> efflux in a beech forest: dependence on soil temperature and soil water content. *Annals of Forest Science*, 1999, 56(3): 221-226.
- [31] Fenn K M, Malhi Y, Morecroft M D. Soil CO<sub>2</sub> efflux in a temperate deciduous forest: environmental drivers and component contributions. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(10): 1685-1693.