

藏东南色季拉山不同海拔森林土壤基础呼吸特征

杨红^{1,2}, 刘合满^{1,*}, 曹丽花¹, 徐唱唱^{1,2}, 曹舰艇², 赛曼¹

(1. 西藏农牧学院 西藏高原气候变化与土壤圈物质循环研究中心, 西藏 林芝 860000; 2. 西藏高原生态研究所, 西藏 林芝 860000)

摘要: 为阐明不同海拔高度森林土壤基础呼吸对温度变化的响应, 为未来气候变化情景下不同海拔高度土壤碳动态预测提供科学依据, 以藏东南色季拉山不同海拔高度森林表层土壤为研究对象, 通过室内升温实验, 研究不同海拔高度森林表层土壤基础呼吸对温度变化的响应。结果表明, 土壤基础呼吸速率及土壤累积碳通量均随培养温度的升高呈增加趋势, 土壤基础呼吸速率随着土壤层次加深而降低。随着培养时间延长, 各土壤层次及海拔高度土壤基础呼吸速率总体呈先增加后降低的趋势, 局部表现为振荡变化的特征, 二者之间呈极显著 ($P < 0.01$) 负相关指数函数关系。随着培养时间延长, 土壤基础呼吸累积碳通量呈增加趋势, 且培养的前 14 d 土壤累积碳通量增幅明显, 之后逐渐趋于稳定。土壤基础呼吸累积碳通量与培养时间呈极显著 ($P < 0.01$) 正相关对数函数关系。总体来看, 温度升高将加速森林生态系统表层土壤呼吸碳排放。

关键词: 色季拉山; 森林土壤; 基础呼吸

中图分类号: S718.55

文献标志码: A

文章编号: 1004-1524(2018)05-0832-08

Characteristics of soil basic respiration in different altitude forests in Sejila Mountain, south-east of Tibet

YANG Hong^{1,2}, LIU Heman^{1,*}, CAO Lihua¹, XU Changchang^{1,2}, CAO Jianting², SAI Man¹

(1. *Research Center of Climate Change and Material Cycle of Pedosphere of Tibet Plateau, Tibet Agriculture and Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China*; 2. *Ecological Research Institute of Tibet Plateau, Linzhi 860000, China*)

Abstract: In order to clarify the responses of soil basal respiration to temperature changes at different altitudes, and to provide scientific basis for predicting soil carbon dynamics at different altitudes in the future climate change scenarios, the forest soils at different altitudes in Sejila Mountain were studied by laboratory simulated heating experiment. It was shown that soil basal respiration rate and soil accumulated carbon flux increased with the increase of temperature. With the deepening of the soil layer, soil basal respiration rate was decreased. Soil respiration rate of all layers and altitudes increased at first and then decreased with the extension of simulated culture time, while local parts showed a characteristic of concussion change. There was a significant ($P < 0.01$) negative correlation between soil basal respiration rate and culture time, which could be described as exponential function. The cumulative carbon flux of soil basal respiration showed an increasing trend with the prolongation of culture time, and the increases of soil accumulated carbon flux were obvious in the first 14 days, and then gradually became stable. There was a significant

收稿日期: 2017-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(41461055, #1461052); 西藏农牧学院“雪域英才工程”人才发展支持计划(XYYC2015-16); 西藏农牧学院研究生创新项目计划(YJS2015-09, YJS2016-7)

作者简介: 杨红(1991—), 男, 藏族, 甘肃甘南人, 硕士研究生, 研究方向为高原(高山)生态。E-mail: hyang2016@163.com

* 通信作者, 刘合满, E-mail: liuh-m@163.com

($P < 0.01$) positive correlation between accumulated soil carbon flux and incubation time, which could be described as logarithmic function. In summary, elevated temperature would accelerate carbon emission via surface soil respiration of forest ecosystem.

Key words: Sejila Mountains; forest soil; basal respiration

土壤基础呼吸(soil basal respiration, SBR)是指去除植物根系呼吸以外的呼吸作用,主要包括土壤微生物呼吸(土壤呼吸的主体)和土壤有机碳的矿化分解(土壤呼吸的反应底物),是陆地生态系统碳循环的关键环节,是碳素以 CO_2 形式归还到大气的主要途径,在全球碳循环中扮演着极其重要的角色^[1-2]。目前,土壤基础呼吸受到了国内外学者的广泛关注,但由于不同区域、不同海拔土壤基础呼吸速率存在差异,故量化土壤基础呼吸速率与全球变暖间的关系十分困难。尤其是在高海拔、高纬度地区,土壤基础呼吸速率对温度升高的响应较低纬度、低海拔敏感^[3],故深入研究高海拔、高纬度地区的土壤呼吸显得尤为重要。不同海拔高度地区,由于其长期所处的生态及气候条件差异,碳库构成不同,其矿化分解速率亦具有不同的温度敏感性。大量研究表明,土壤微生物在有机物质分解、养分转化和供应中起着主导作用,且强烈地响应于土壤温湿度的变化^[4-5]。温度的变化将造成土壤微生物群落结构及数量的改变,导致土壤微生物呼吸作用增强或减弱,从而影响土壤基础呼吸速率的变化,故温度条件的改变将影响土壤基础呼吸和碳循环过程。同时,温度还可以通过影响动植物残体的活动和改变土壤养分矿化速率等对土壤基础呼吸产生影响。开展不同温度条件下土壤基础呼吸碳排放速率的动态变化特征研究,有利于深化对未来气候变化情境下土壤碳循环的理解。为阐明温度对不同海拔高度土壤基础呼吸碳排放速率的影响及其时间效应,以藏东南色季拉山不同海拔高度森林表层土壤为研究对象,研究升温对不同海拔高度森林表层土壤基础呼吸的影响,以期对未来气候变化下的碳循环预测提供科学依据。

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,属念青唐古拉

山脉,地理坐标 $29.63^\circ \sim 29.68^\circ \text{N}$ 、 $94.71^\circ \sim 94.72^\circ \text{E}$,海拔高度 $3\ 800 \sim 4\ 100 \text{ m}$ 。受印度洋暖湿季风的影响,研究区气候具有冬温夏凉、干湿季分明的特点,冬春少雨,夏秋雨丰,年均气温在 $2.1 \sim 3.9^\circ \text{C}$ 之间,年均降水量 $1\ 134 \text{ mm}$ 、蒸发量 554 mm ,年空气平均相对湿度 $60\% \sim 80\%$ 。整个山体海拔由低到高广布云杉(*Picea asperata* Mast)、冷杉(*Abies georgei* Orr)和杜鹃(*Rhododendron*)林等,林下灌木及草本种类较多,郁闭度随海拔高度增加而减小。研究区土壤类型均为山地酸性棕壤。

1.2 土壤样品采集与测定

2016年5月,在藏东南色季拉山东坡,分别在海拔 $3\ 800$ 、 $3\ 990$ 、 $4\ 100 \text{ m}$ 处各选1块样地,每样地选择3个样点作为重复,每个样点分别采集 $0 \sim 5$ 、 $5 \sim 10$ 、 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 层次土壤样品,共采集土壤样品27个,装入自封袋带回实验室。室内去除可见石块、植物残体等非土壤成分后,用于测定土壤基础呼吸。土壤基础呼吸采用碱液吸收法测定:每个样品称取5份,每份 50 g ,共135份,装入 500 mL 透明广口瓶底部并标记,同时向广口瓶中放入盛有一定体积 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaOH}$ 溶液的塑料盒(开口),并用凡士林封口。另取同样体积的广口瓶,同上处理,唯不加土壤,作为空白对照。然后将广口瓶置于提前设置好温度(5 、 10 、 15 、 20 、 25°C)的恒温培养箱中进行培养(每个温度条件下培养27个土壤样品),分别在培养 0.5 、 1 、 2 、 3 、 4 、 5 、 7 、 9 、 11 、 14 、 17 、 22 、 29 d 时取出吸收瓶,以酚酞为指示剂,加入过量 BaCl_2 ,用 $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HCl}$ 滴定剩余的 NaOH ,然后根据空白和样品两者消耗的 HCl 量之差,求出吸收土壤 CO_2 所消耗的 NaOH 量。每消耗 $1 \text{ mL } 0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaOH}$ 相当于 $2.2 \text{ mg } \text{CO}_2$,据此折算 CO_2 释放量。

1.3 数据分析

采用Excel 2007进行数据处理。对不同海拔高度、不同温度及不同层次土壤基础呼吸进行

单因素方差分析 (one-way ANOVA), 在 SPSS 17.0 (IBM 公司 美国) 平台上进行。制图在 Origin 9.0 (Originlab 公司 美国) 平台上进行。

2 结果与分析

2.1 土壤基础呼吸速率变化特征

2.1.1 土壤基础呼吸的海拔效应

由图1可知,在5℃和10℃条件下,除了10℃下10~20 cm层次土壤基础呼吸表现为3990 m > 3800 m > 4100 m之外,其他情况下,各层次土壤基础呼吸均随海拔高度的增加呈降低趋势。在15℃条件下:0~5 cm层次4100 m海拔高度土壤基础呼吸分别较3990 m和3800 m处低5.57%和54.66%,且4100 m与3800 m海拔高度土壤基础呼吸速率之间差异达显著水平($P < 0.05$);5~10 cm层次,各海拔高度土壤基础呼吸速率之间无显著差异;10~20 cm层次,3990 m海拔高度土壤基础呼吸速率与4100、3800 m之间的差异均达显著水平($P < 0.05$)。在20℃和25℃条件下:0~5、10~20 cm层次土壤基础呼吸速率表现为3800 m > 4100 m > 3990 m;5~10 cm层次土壤基础呼吸速率表现为随海拔高度增加而降低(3800 m > 3990 m > 4100 m);10~20 cm层次各海拔高度土壤基础呼吸速率之间差异达显著水平($P < 0.05$)。

2.1.2 土壤基础呼吸的层次效应

由图1可知,土壤基础呼吸速率随着土壤深度的增加呈降低趋势。除了3990 m海拔高度在15℃条件下,不同层次土壤基础呼吸速率差异为显著水平($P < 0.05$)外,在5、10、15℃条件下,各海拔高度0~5 cm层次土壤基础呼吸速率与5~10、10~20 cm层次之间的差异均达极显著水平($P < 0.01$)。

在20℃条件下,除3990 m海拔高度处土壤基础呼吸速率在各层次之间无显著差异外,3800、4100 m海拔高度处0~5 cm层次土壤基础呼吸速率与5~10、10~20 cm层次之间的差异均达极显著水平($P < 0.01$)。

在25℃条件下:3800 m海拔高度处0~5 cm层次土壤基础呼吸速率在3.09~14.12 mg·kg⁻¹·h⁻¹之间,显著($P < 0.05$)高于5~10、10~

20 cm层次;3990 m海拔高度处0~5 cm与10~20 cm层次的土壤基础呼吸速率差异显著($P < 0.05$);4100 m海拔高度处0~5 cm与5~10、10~20 cm层次的土壤基础呼吸速率差异达极显著水平($P < 0.01$)。

2.1.3 土壤基础呼吸的时间效应

由图1可知,随着培养时间延长,土壤基础呼吸速率整体上呈先增加后降低的趋势,局部呈振荡变化趋势。培养2~4 d,土壤基础呼吸速率达最大值,之后随着模拟培养时间的延长呈降低趋势,培养7 d后趋于稳定。回归分析显示,培养时间与土壤呼吸速率呈极显著($P < 0.01$)负相关指数函数关系(表1)。随着模拟培养时间的延长,土壤基础呼吸呈降低趋势,且降低幅度随培养温度的升高而增加。由回归方程系数可知,在同一海拔高度,土壤基础呼吸速率下降幅度表现为0~5 cm > 5~10 cm > 10~20 cm,说明0~5 cm层次土壤有机碳库相对于下层来说不稳定。

2.1.4 土壤基础呼吸的温度效应

由图1可知,各海拔高度土壤基础呼吸平均速率随着培养温度的升高呈增加趋势。在4100、3990 m海拔高度处,25℃条件下的土壤基础呼吸速率除了与20℃条件下差异为显著水平($P < 0.05$)外,与其他各温度条件下的土壤呼吸速率之间的差异均达极显著水平($P < 0.01$);在3800 m海拔高度处,25℃条件下的土壤基础呼吸速率除了与20℃条件下无显著差异外,与其他各温度条件下的土壤基础呼吸速率之间的差异均达极显著水平($P < 0.01$)。

2.2 土壤累积碳通量变化特征

2.2.1 土壤累积碳通量的海拔效应

由图2可知,在5、10、15℃条件下,0~5、5~10 cm层次土壤累积碳通量随着海拔的升高而降低,而10~20 cm层次则表现为3990 m > 4100 m > 3800 m。5℃和10℃条件下,0~5、5~10 cm层次不同海拔高度处土壤累积碳通量无显著差异,10~20 cm层次4100 m与3990、3800 m海拔高度处的土壤累积碳通量之间差异达极显著水平($P < 0.01$)。15℃条件下:0~5 cm层次4100、3990 m与3800 m海拔高度处土壤累积碳通量之间差异均达显著水平($P < 0.05$);5~10 cm层次各海拔高度处土壤累积碳通量无显著

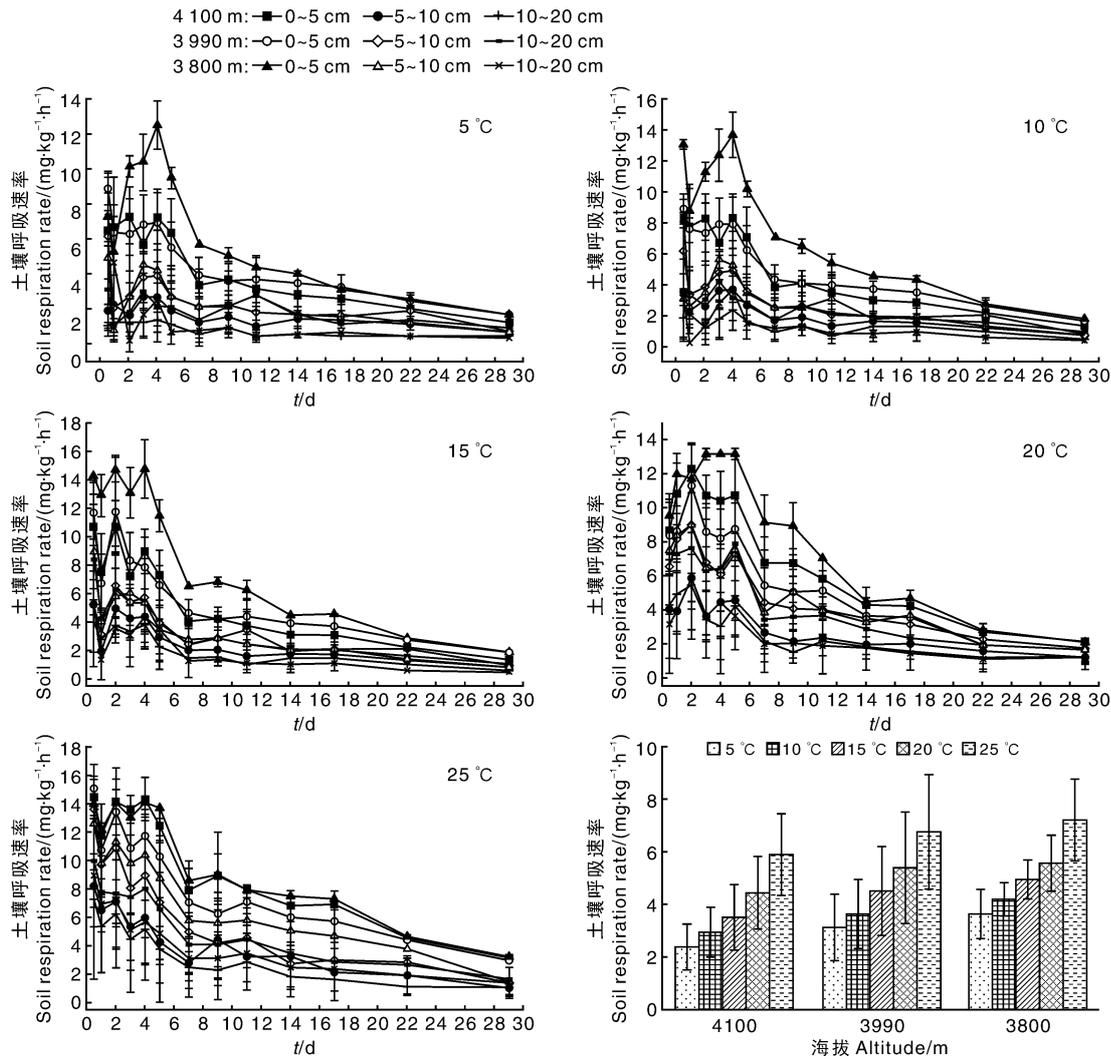


图1 土壤基础呼吸变化特征

Fig.1 Variation characteristics of soil basal respiration

表1 土壤基础呼吸速率与培养时间的回归方程

Table 1 Regression equation of soil basal respiration rate and culture time

样点 Site	层次 Layer	回归方程 Regression equation				
		5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C
1	0~5	$y = 7.251e^{-0.063x} **$	$y = 8.467e^{-0.068x} **$	$y = 9.402e^{-0.07x} **$	$y = 11.84e^{-0.06x} **$	$y = 14.69e^{-0.05x} **$
	5~10	$y = 2.259e^{-0.039x} **$	$y = 3.397e^{-0.053x} **$	$y = 3.946e^{-0.06x} **$	$y = 4.518e^{-0.05x} **$	$y = 6.701e^{-0.06x} **$
	10~20	$y = 1.210e^{-0.045x} **$	$y = 1.8494e^{-0.04x} **$	$y = 3.339e^{-0.06x} **$	$y = 4.174e^{-0.06x} **$	$y = 5.692e^{-0.07x} **$
2	0~5	$y = 7.200e^{-0.052x} **$	$y = 8.172e^{-0.055x} **$	$y = 9.221e^{-0.06x} **$	$y = 10.13e^{-0.07x} **$	$y = 12.74e^{-0.07x} **$
	5~10	$y = 3.620e^{-0.048x} **$	$y = 4.650e^{-0.055x} **$	$y = 5.663e^{-0.06x} **$	$y = 7.884e^{-0.06x} **$	$y = 10.41e^{-0.07x} **$
	10~20	$y = 2.276e^{-0.029x} **$	$y = 3.271e^{-0.039x} **$	$y = 5.798e^{-0.06x} **$	$y = 7.453e^{-0.06x} **$	$y = 8.477e^{-0.06x} **$
3	0~5	$y = 10.46e^{-0.061x} **$	$y = 12.86e^{-0.07x} **$	$y = 15.15e^{-0.08x} **$	$y = 14.27e^{-0.07x} **$	$y = 14.94e^{-0.05x} **$
	5~10	$y = 3.923e^{-0.057x} **$	$y = 5.148e^{-0.066x} **$	$y = 6.133e^{-0.07x} **$	$y = 8.202e^{-0.06x} **$	$y = 11.87e^{-0.06x} **$
	10~20	$y = 2.770e^{-0.09x} **$	$y = 2.607e^{-0.072x} **$	$y = 3.418e^{-0.08x} **$	$y = 4.043e^{-0.05x} **$	$y = 7.12e^{-0.07x} **$

y 为土壤基础呼吸速率 x 为模拟培养时间。 ** 表示土壤基础呼吸速率与模拟培养时间之间呈极显著 ($P < 0.01$) 负相关。

y meant soil basal respiration; x meant simulated culture time. ** indicated that soil basal respiration was significantly ($P < 0.01$) negatively correlated with simulated culture time.

差异; 10~20 cm 层次 3 990 m 与 4 100、3 800 m 海拔高度处土壤累积碳通量之间差异达极显著水平 ($P < 0.01$)。20 °C 和 25 °C 条件下: 0~5 cm 层次土壤累积碳通量表现为 3 800 m > 4 100 m > 3 990 m, 但各海拔高度处的差异不显著; 5~10 cm 层次土壤累积碳通量随海拔高度的升高呈降低趋势, 3 800 m 与 4 100、3 990 m 之间的差异达显著水平 ($P < 0.05$); 10~20 cm 层次土壤累积碳通量表现为 3 990 m > 3 800 m > 4 100 m, 3 990 m 与 3 800、4 100 m 之间的差异达极显著水平 ($P < 0.01$)。

2.2.2 土壤累积碳通量的温度效应

由图 2 可知, 随着温度升高, 土壤累积碳通量均呈增加趋势, 以 4 100 m 处 0~5 cm 层次的土壤累积碳通量增幅最大, 3 800 m 海拔高度处 0~5 cm 的增幅最小。在 4 100 m 海拔高度处, 0~5 cm 层次 25 °C 条件下的土壤累积碳通量较 5、10、15、20 °C 条件下分别增加了 1 530.56、1 358.29、1 219.69、665.00 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 在 3 800 m 海拔高度处 0~5 cm 层次 25 °C 条件下的土壤累积碳通量较 5、10、15、20 °C 条件下分别增加了 934.86、662.72、343.92、349.98 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.2.3 土壤累积碳通量的层次效应

由图 2 可知, 随着土壤层次的加深, 平均累积碳通量降低。在 5 °C 条件下 3 个海拔高度处 0~5 cm 层次土壤累积碳通量均极显著 ($P < 0.01$) 高于 5~10、10~20 cm 层次。

在 10 °C 条件下 3 个海拔高度处 0~5 cm 层次土壤累积碳通量均极显著 ($P < 0.01$) 高于 5~10、10~20 cm 层次, 且以 3 800 m 海拔高度处 0~5 cm 层次土壤累积碳通量最高 (2 257.31 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、4 100 m 海拔高度处 10~20 cm 层次土壤累积碳通量最低 (406.49 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

在 15 °C 条件下: 3 800 m 海拔高度处 0~5 cm 层次土壤累积碳通量最高, 且极显著 ($P < 0.01$) 高于 5~10、10~20 cm 层次, 分别是 5~10、10~20 cm 层次的 1.42、3.24 倍; 3 990 m 海拔高度处 0~5 cm 与 5~10、10~20 cm 层次土壤累积碳通量的差值最小, 差值分别为 676.43、686.36 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 差异显著 ($P < 0.05$)。

在 20 °C 条件下, 除 3 800 m 海拔高度处 0~5 cm 与 10~20 cm 层次土壤累积碳通量的差值

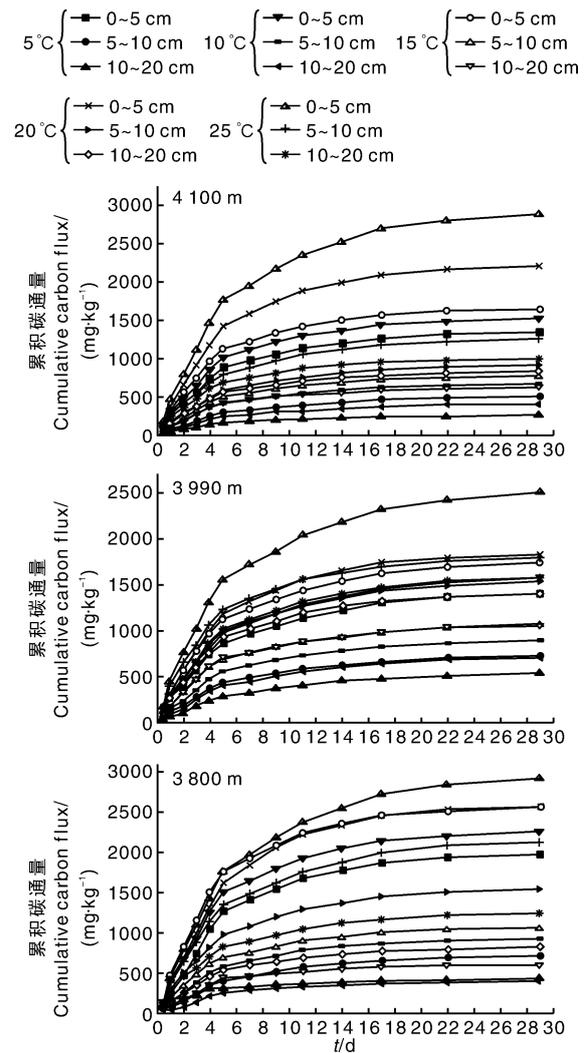


图 2 土壤累积碳通量变化特征

Fig. 2 Soil total carbon flux variation characteristics

大于 4 100 m 海拔高度处外, 0~5 cm 与 5~10、10~20 cm 层次土壤累积碳通量之间的差值均表现为 4 100 m > 3 800 m > 3 990 m。

在 25 °C 条件下, 4 100 m 海拔高度处 0~5 cm 层次土壤累积碳通量与 5~10、10~20 cm 层次的差值最大, 分别为 1 616.93 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 1 868.25 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 差异达极显著水平 ($P < 0.01$)。3 990 m 海拔高度处次之, 3 800 m 海拔高度处最小。

2.2.4 土壤累积碳通量的时间效应

随着培养时间延长, 各土壤层次及海拔高度土壤累积碳通量均呈增加趋势, 且培养的前 14 d 土壤累积碳通量增幅明显, 之后逐渐趋于稳定。回归分析显示, 培养时间与土壤累积碳通量之间

呈极显著 ($P < 0.01$) 正相关对数函数关系(表 2)。各海拔高度不同层次土壤累积碳通量增加幅

度表现为 $0 \sim 5 \text{ cm} > 5 \sim 10 \text{ cm} > 10 \sim 20 \text{ cm}$ 这与土壤呼吸底物的量、异养呼吸者的数量及种类有关。

表 2 土壤累积碳通量与模拟培养时间的回归方程

Table 2 Regression equation of soil accumulated carbon flux and simulated culture time

样点 Site	层次 Layer	回归方程/Regression equation				
		5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C
1	0~5	$Y = 343.4 \ln x + 261.8^{**}$	$Y = 384.1 \ln x + 315.6^{**}$	$Y = 414.6 \ln x + 364.9^{**}$	$Y = 576.7 \ln x + 402.8^{**}$	$Y = 741.1 \ln x + 489.9^{**}$
	5~10	$Y = 128.5 \ln x + 76.1^{**}$	$Y = 168.4 \ln x + 126.8^{**}$	$Y = 197.1 \ln x + 149.3^{**}$	$Y = 235.7 \ln x + 165.7^{**}$	$Y = 309.4 \ln x + 267.2^{**}$
	10~20	$Y = 65.6 \ln x + 45.6^{**}$	$Y = 103.5 \ln x + 63.6^{**}$	$Y = 156.6 \ln x + 135.1^{**}$	$Y = 205.4 \ln x + 182.8^{**}$	$Y = 245.1 \ln x + 241.2^{**}$
2	0~5	$Y = 351.3 \ln x + 267.5^{**}$	$Y = 395.4 \ln x + 301.6^{**}$	$Y = 432.4 \ln x + 366.2^{**}$	$Y = 472.1 \ln x + 353.1^{**}$	$Y = 626.4 \ln x + 470.2^{**}$
	5~10	$Y = 182.5 \ln x + 133.2^{**}$	$Y = 226.1 \ln x + 165.9^{**}$	$Y = 262.4 \ln x + 228.6^{**}$	$Y = 389.9 \ln x + 293.1^{**}$	$Y = 439.1 \ln x + 436.7^{**}$
	10~20	$Y = 139.9 \ln x + 65.9^{**}$	$Y = 186.2 \ln x + 99.9^{**}$	$Y = 258.4 \ln x + 239.6^{**}$	$Y = 357.7 \ln x + 282.6^{**}$	$Y = 393.9 \ln x + 321.7^{**}$
3	0~5	$Y = 534.4 \ln x + 316.7^{**}$	$Y = 588.4 \ln x + 436.0^{**}$	$Y = 660.1 \ln x + 555.9^{**}$	$Y = 689.5 \ln x + 432.7^{**}$	$Y = 759.1 \ln x + 478.8^{**}$
	5~10	$Y = 194.5 \ln x + 127.1^{**}$	$Y = 1.385 \ln x + 5.7^{**}$	$Y = 264.2 \ln x + 237.9^{**}$	$Y = 393.6 \ln x + 303.8^{**}$	$Y = 538.4 \ln x + 417.7^{**}$
	10~20	$Y = 100.8 \ln x + 203.1^{**}$	$Y = 117.8 \ln x + 112.5^{**}$	$Y = 155.6 \ln x + 135.6^{**}$	$Y = 213.5 \ln x + 161.1^{**}$	$Y = 303.8 \ln x + 290.1^{**}$

Y 为土壤累积碳通量, x 为模拟培养时间。** 表示土壤累积碳通量与模拟培养时间呈极显著 ($P < 0.01$) 正相关。

Y meant soil cumulative flux; x meant simulated culture time. ** indicated that the cumulative carbon flux in soil was significantly ($P < 0.01$) positively correlated with the simulated culture time.

3 讨论

3.1 土壤基础呼吸对温度升高的响应

本研究通过对藏东南色季拉山不同海拔高度森林表层土壤升温培养的研究发现,升温能明显提高森林表层土壤基础呼吸速率,且对高海拔土壤基础呼吸的促进作用较低海拔强。这与不同学者在不同区域的研究结果一致。刘琪璟等^[6]研究表明,模拟气温升高 $1 \text{ }^\circ\text{C}$,全年土壤呼吸量增加 8% 左右。相关森林土壤模拟增温试验研究发现,增温后土壤基础呼吸速率显著提高^[7],这主要是因为增温改变了土壤微生物的活性(土壤呼吸的主体)、土壤有机碳的分解速率(土壤呼吸的主要反应底物),影响土壤呼吸速率,最终影响碳的输出。土壤微生物以土壤有机碳为主要碳源进行物质代谢,并通过分泌酶参与土壤有机碳的解吸附、解聚、溶解等分解过程^[8]。增温对土壤微生物及酶活性的影响必然决定着土壤有机碳对增温的响应,从而导致不同培养温度下的土壤基础呼吸速率存在差异。另外,本研究区常年处于较低温度条件下,土壤生物过程及细菌代谢对低温具有较强的适应能力和抵抗性,但亦能敏感地对温度升高做出响应。升高温度提高了土壤生物过程及土壤酶的活性,从而提高了土壤有机碳的矿化速率,增加了土壤碳的

输出^[9]。

3.2 土壤基础呼吸速率的层次变化特征

本研究中 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 层次土壤基础呼吸速率显著高于 $5 \sim 10$ 、 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 层次。王传华等^[10]研究表明, $0 \sim 5 \text{ cm}$ 层次土壤呼吸速率较 $5 \sim 10 \text{ cm}$ 层次高出约 2.5 倍。这主要是因为呼吸底物构成和数量是影响土壤基础呼吸速率和时间动态的重要机制^[11]。 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 层次土壤有机质、活性有机碳^[12]含量及土壤微生物碳含量^[13]相对较高,故在培养过程中更易于促进微生物对有机碳的分解,从而表现出更高的基础呼吸速率。同时 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 层次直接与空气接触,凋落物输入量高,利于微生物繁殖的底物较丰富,微生物数量及活性较高^[14-15],这也是表层土壤具有更强的基础呼吸速率的一个重要机制。

3.3 土壤基础呼吸速率的海拔变化特征

土壤有机碳的分解速率主要由其化学组成结构决定,而有机碳的化学组成结构主要取决于植物残体分解。此外,土壤有机碳的分解速率还取决于土壤矿质颗粒对其的物理化学保护作用,如团聚体的包裹、与土壤矿质颗粒的化学键吸附、冰冻作用等。Hunter 等^[16]研究发现,海拔高度变化将会改变土壤结构、碳库构成、土壤微生物及动物活性等一系列因子,而这些因子均会对土壤呼吸速率的动态变化造成影响,最终影响土壤碳排放。本研究区海拔落差 300 m ,海拔从低至高林型分布明显,土壤结构和冰冻条件差异明

显,这可能是导致本研究中高海拔土壤呼吸速率低于低海拔的关键因素。

3.4 土壤基础呼吸速率对培养时间的响应

本研究发现,培养 2~4 d,土壤基础呼吸速率达到最大值,之后呈下降趋势,培养 7 d 后趋于稳定。Melillo 等^[17]认为,出现这种现象的原因,一方面是因为土壤活性有机碳含量不足,另一方面是因为森林土壤存在氮限制,增温提高了氮素的有效性,可以在一定程度上促进碳的积累。但黄懿梅等^[18]在黄土高原土壤的研究结果表明,培养前 3 d 土壤基础呼吸速率呈快速下降趋势,而后开始增加。本研究结果与此结论存在差异。这可能与本研究区域在长期的气候条件下形成的土壤生物属性、土壤呼吸主要反应底物的含量等有关。本研究区土壤长期处于年均气温 4℃ 以下,故在升温后,土壤微生物和酶活性等快速增加,从而使土壤基础呼吸速率呈增加趋势,而在土壤微生物适应这种温度条件后,土壤中易于分解的有机碳含量逐渐下降,使得土壤排放的 CO₂ 量不断下降。

4 结论

本研究发现,土壤基础呼吸速率及土壤累积碳通量均随着温度的升高而增加,随土层加深而降低,在同一温度条件下随海拔高度的增加而降低。随着培养时间延长,各土壤层次及海拔高度土壤基础呼吸速率总体呈先增加后降低的趋势,局部表现为振荡变化特征。土壤基础呼吸速率与培养时间之间极显著负相关,二者之间呈指数函数关系。随着培养时间的延长,各土壤层次及海拔高度土壤累积碳通量均呈增加趋势,且培养的前 14 d 土壤累积碳通量增幅明显,之后逐渐趋于稳定。土壤累积碳通量与培养时间之间呈极显著正相关,二者之间呈对数函数关系。

参考文献(References):

- [1] SCHLESINGER W H, ANDREWS J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [2] LUAN J, LIU S, WANG J, et al. Rhizospheric and heterotrophic respiration of a warm-temperate oak chronosequence in China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(3): 503-512.
- [3] 施政. 武夷山不同海拔高度土壤呼吸动态研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2007.
SHI Z. Study on soil respiration dynamics at different altitudes in Wuyi Mountains[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [4] 何容, 汪家社, 施政, 等. 武夷山植被带土壤微生物量沿海拔梯度的变化[J]. *生态学报*, 2009, 29(9): 5138-5144.
HE R, WANG J S, SHI Z, et al. Variations of soil microbial biomass across four different plant communities along an elevation gradient in Wuyi Mountains, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 5138-5144. (in Chinese with English abstract)
- [5] MALIK A, BLAGODATSKAYA E, GLEIXNER G. Soil microbial carbon turnover decreases with increasing molecular size[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 62(62): 115-118.
- [6] 刘琪璟, 张国春, 徐倩倩, 等. 长白山高山苔原季节性雪斑土壤呼吸对温度响应的模拟研究[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(5): 477-487.
LIU Q J, ZHANG G C, XU Q Q, et al. Simulation of soil respiration in response to temperature under snowpacks in the Changbai Mountain, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(5): 477-487. (in Chinese with English abstract)
- [7] 刘艳, 陈书涛, 胡正华, 等. 模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤基础呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2010, 33(12): 4205-4211.
LIU Y, CHEN S T, HU Z H, et al. Effects of simulated warming on soil respiration in a cropland under winter wheat soybean rotation[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2010, 33(12): 4205-4211. (in Chinese with English abstract)
- [8] CONANT R T, RYAN M G, ÅGREN G I, et al. Temperature and soil organic matter decomposition rates: synthesis of current knowledge and a way forward[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(11): 3392-3404.
- [9] RIVKINA E M, FRIEDMANN E I, MCKAY C P, et al. Metabolic activity of permafrost bacteria below the freezing point[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2000, 66(8): 3230-3233.
- [10] 王传华, 陈芳清, 王愿, 等. 鄂东南低丘马尾松林和枫香林土壤异养呼吸及温湿度敏感性[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 600-606.
WANG C H, CHEN F Q, WANG Y, et al. Soil heterotrophic respiration and its sensitivity to soil temperature and moisture in *Liquidambar formosana* and *Pinus massoniana* forests in hilly areas of southeast Hubei Province, China[J]. *Chi-*

- nese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(3): 600 - 606. (in Chinese with English abstract)
- [11] 黄靖宇, 宋长春, 张金波, 等. 凋落物输入对三江平原弃耕农田土壤基础呼吸和活性碳组分的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(7): 3417 - 3424. HUANG J Y, SONG C C, ZHANG J B, et al. Influence of litter importation on basal respiration and labile carbon in restored farmland in Sanjiang Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(7): 3417 - 3424. (in Chinese with English abstract)
- [12] 周晨霓, 任德智, 马和平, 等. 西藏色季拉山两种典型天然林分土壤活性有机碳组分与土壤基础呼吸特征研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(2): 557 - 563. ZHOU C N, REN D Z, MA H P, et al. Analysis of the active organic carbon components and soil respiration characteristics from two typical natural forests in Sygara mountains, Tibet, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(2): 557 - 563. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王宁, 杨雪, 李世兰, 等. 不同海拔红松混交林土壤微生物量碳、氮的生长季动态[J]. 林业科学, 2016, 52(1): 150 - 158. WANG N, YANG X, LI S L, et al. Seasonal dynamics of soil microbial biomass carbon nitrogen in the Korean pine mixed forests along elevation gradient [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52(1): 150 - 158. (in Chinese with English abstract)
- [14] 崔喜博, 余雪标, 陈小花, 等. 海南文昌滨海台地 3 种森林类型土壤微生物数量分布特征研究[J]. 热带作物学报, 2016, 37(4): 797 - 803. CUI X B, YU X B, CHEN X H, et al. Distribution status of soil microbiota under three forest types in Wenchang, Hainan [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2016, 37(4): 797 - 803. (in Chinese with English abstract)
- [15] LUAN J, LIU S, WANG J, et al. Rhizospheric and heterotrophic respiration of a warm-temperate oak chronosequence in China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(3): 503 - 512.
- [16] HUNTER M D, LINNEN C R, REYNOLDS B C. Effects of endemic densities of canopy herbivores on nutrient dynamics along a gradient in elevation in the southern Appalachians [J]. *Pedobiologia*, 2003, 47(3): 231 - 244.
- [17] MELILLO J M, STEUDLER P A, ABER J D, et al. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system [J]. *Science*, 2002, 298(5601): 2173 - 2176.
- [18] 黄懿梅, 安韶山, 刘连杰, 等. 黄土丘陵区土壤基础呼吸对草地植被恢复的响应及其影响因素[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(5): 862 - 869. HUANG Y M, AN S S, LIU L J, et al. Soil basal respiration response to grass vegetation restoration and its affecting factors in the Loess Hilly-Gully Region [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(5): 862 - 869. (in Chinese with English abstract)

(责任编辑 高峻)