

DOI: 10.5846/stxb201711142028

黄石德, 叶功富, 林捷, 阮宏华, 游惠明, 许子乾, 李媛媛, 李庆晔. 干旱对土壤剖面不同深度土壤 CO₂ 通量的影响. 生态学报, 2018, 38(23): - .
Huang S D, Ye G F, Lin J, Ruan H H, You H M, Xu Z Q, Li Y Y, Li Q X. The influence of drought on the soil CO₂ flux at different depths in soil vertical profiles. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(23): - .

干旱对土壤剖面不同深度土壤 CO₂ 通量的影响

黄石德^{1,2,3}, 叶功富^{2,3}, 林捷^{2,3}, 阮宏华^{1,*}, 游惠明^{2,3}, 许子乾¹, 李媛媛¹, 李庆晔^{3,4}

1 南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037

2 福建省林业科学研究院, 福州 350012

3 武夷山森林生态系统国家定位观测研究站, 武夷山 354315

4 武夷山国家公园管理局, 武夷山 354315

摘要: 由于全球气候变化, 预计未来我国亚热带地区干旱频率和持续时间将会增加。森林土壤 CO₂ 的释放是陆地生态系统碳循环的重要组成部分, 然而, 有关不同深度土壤 CO₂ 通量对干旱响应的理解仍相当有限。选择武夷山针叶林 (Coniferous Forest, CF) 和常绿阔叶林 (Evergreen Broadleaved Forest, EBF) 为研究对象, 于 2014 年 6 月至 2015 年 12 月, 采用梯度法计算 10、30 cm 和 50 cm 深度各层土壤 CO₂ 通量, 探讨模拟干旱对其影响。结果表明: CF 和 EBF 样地土壤 CO₂ 浓度均随土壤深度的增加而升高。CF 和 EBF 样地对照 (CK) 处理 10 cm 深度土壤 CO₂ 生产量分别占总 CO₂ 生产量的 53.5% 和 55.7%, 表明土壤 CO₂ 生产量主要来源于浅层土壤, 这可能与浅层土壤有高的有机碳含量及细根生物量主要分布区有关。干旱处理使 CF 和 EBF 样地不同深度土壤 CO₂ 通量均显著减少。在两个样地土壤 CO₂ 通量的温度敏感性 (Q_{10}) 值均随着土壤深度的增加而减少。干旱处理显著减少了 CF 样地浅层土壤的 Q_{10} 值 ($P=0.02$), 对深层土壤影响不显著 (30 cm: $P=0.30$; 50 cm: $P=0.23$); 而在 EBF 样地干旱处理显著减少了深层土壤的 Q_{10} 值 (30 cm: $P=0.02$; 50 cm: $P=0.01$), 对浅层土壤影响不显著 ($P=0.32$)。

关键词: 干旱; CO₂ 通量; 土壤剖面; 浅层土壤; 温度敏感性

The influence of drought on the soil CO₂ flux at different depths in soil vertical profiles

HUANG Shide^{1,2,3}, YE Gongfu^{2,3}, LIN Jie^{2,3}, RUAN Honghua^{1,*}, YOU Huiming^{2,3}, XU Ziqian¹, LI Yuanyuan¹, LI Qingxi^{3,4}

1 College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

2 Fujian Academy of Forestry Sciences, Fuzhou 350012, China

3 Wuyi Mountain National Research Station of Forest Ecosystem, Wuyishan 354315, China

4 Administrative Bureau of Wuyi Mountain National Park, Wuyishan 354315, China

Abstract: Soil CO₂ flux to the atmosphere is a major factor affecting the global carbon cycle. The CO₂ flux between soil layers is driven by soil temperature, moisture, and substrate supply. Soil CO₂ flux and its major driving factors vary temporally and spatially within soil profiles. However, many studies have focused only on the surface soil, which is insufficient to correctly clarify the actual soil CO₂ release processes, because soil CO₂ flux is the addition of CO₂ production in each soil layer under different biological, chemical, and physical conditions. The vertical distribution of soil CO₂ flux should be considered to better understand the production processes in soil CO₂. Moreover, in the next few decades, an increasing frequency and duration of droughts is expected in subtropical regions in China as a result of global climate

基金项目: 十三五国家重点研发计划 (2016YFD0600204); 国家自然科学基金项目 (41461052); 福建省属公益类项目 (2015R1011-4)

收稿日期: 2018-11-14; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hhruan@njfu.edu.cn

change. However, our understanding of the effect of drought on the vertical partitioning of soil CO₂ flux is not well known. In the present study, a throughfall exclusion experiment was established to explore the soil CO₂ flux distribution in the vertical profile in response to simulated drought at two different elevations, including a coniferous forest (CF) at 1,450 m.a.s.l and an evergreen broadleaved forest (EBF) at 650 m a.s.l, in a subtropical region in southeastern China from June 2014 to December 2015. We used a CO₂ solid concentration detector to determine the CO₂ concentration at different soil depths, and measured soil CO₂ efflux from surface soils using an Li-8100 soil CO₂ automated measurement system. The soil CO₂ flux at 10, 30, and 50 cm soil depths was estimated using the gradient method. The results showed that soil CO₂ concentrations from the CF and EBF plots gradually increased with soil depth. Soil CO₂ production in the 10 cm soil depths in CF and EBF for the control treatment (CK) was 53.5% and 55.7% of the total soil CO₂ production, respectively, indicating that soil CO₂ production primarily appeared in shallow soil owing to the high soil organic carbon and fine root biomass. Drought treatment significantly reduced soil CO₂ flux in each soil layer from CF and EBF. The temperature sensitivity of soil CO₂ flux decreased with increasing soil depth. Drought treatment in CF significantly decreased Q_{10} in the shallow soil ($P=0.02$), but there were no significant differences in the deeper soil layers (30 cm: $P=0.30$; 50 cm: $P=0.23$); and in EBF, drought treatment significantly decreased Q_{10} in the deeper soil (30 cm: $P=0.02$; 50 cm: $P=0.01$), but was not significantly different in the shallow soil ($P=0.32$). The asymmetric response of Q_{10} in the shallow and deep soil with simulated drought at different elevations implied that the response mechanisms of the shallow and deep soil to drought were different.

Key Words: simulated drought; CO₂ flux; soil profile; shallow soil; temperature sensitivity

CO₂是土壤空气的重要组成部分,土壤空气中 CO₂浓度一般是大气的好几倍到数十倍^[1]。土壤空气中的 CO₂主要源于土壤呼吸,土壤和空气中 CO₂浓度的巨大差异是不同深度土壤微生物分解和根系呼吸共同作用的结果^[2]。而受土壤微生物和根系驱动的土壤 CO₂生产量有着时间、空间及土壤剖面垂直尺度上的变化^[3]。然而,目前多数研究集中在表层土壤碳通量时间和空间尺度上^[4-7],有关土壤剖面尺度 CO₂通量的研究鲜见报道^[8-11]。此外,由于土壤碳通量是各土层 CO₂生产量的累加,而各土层有着不同生物、物理和化学特征^[12],仅用表层温度敏感性指数 Q_{10} 值表征土壤整体可能导致预测土壤碳库时产生较大误差^[13]。因此,仅研究表层是不够的,不足以正确阐明土壤 CO₂通量真实的响应过程。区分不同深度土壤 CO₂通量及其温度敏感性是否存在土层深度的依赖性的认识,将有利于改善土壤碳通量模型的精度^[14]。因此,为了更好认识土壤中碳的机制和精确预测土壤呼吸,计算土壤 CO₂通量的垂直分布是很有必要的^[13]。

由于处于与空气接触的最前沿,多数表层土壤比底层土壤经历更大的土壤温湿度变化^[12]。一方面表层土壤更容易变干,凋落物分解驱动可能比深层矿质土壤驱动更为敏感^[15]。此外,源于表层土壤碳的输入通常高于底层,但底层土壤中来自根系部分的碳输入也很重要^[16]。不同深度土壤 CO₂通量受到土壤温度、含水量和基质供应的共同驱动,而这些变量存在明显的垂直变化,不同深度土壤 CO₂通量对环境的响应有相当大的不确定性^[3, 13]。目前,在土壤和空气界面的土壤碳通量常采用腔室法测定,而在某一特定深度 CO₂通量在野外无直接测定方法。梯度扩散法是一种基于菲克第一定律利用剖面浓度差异推算不同深度土壤 CO₂通量的间接方法^[17-18]。在过去十年里,随着新型探头和设备的发展,促进了梯度扩散法在土壤气体通量研究中广泛应用^[19-20]。

我国亚热带地区水热资源丰富,森林生产力高,有高的碳库和碳通量^[21]。不同气候模型预测该地区干旱的强度和频率将呈加剧的趋势^[22-24]。然而,有关土壤 CO₂通量垂直分布对干旱响应的研究鲜见报道^[25]。此外,土壤碳通量对干旱的响应在生长季和非生长季间可能存在差异^[26-27]。因此,本文以武夷山 1450 m 的针叶林(Coniferous Forest, CF)和 650 m 的常绿阔叶林(Evergreen Broadleaved Forest, EBF)为研究对象,利用穿透雨排除装置模拟生长季干旱试验,开展不同深度土壤 CO₂浓度的测定,利用梯度扩散法,估算不同深度土壤

CO₂通量。本研究的目的是为了(1)分析不同深度土壤 CO₂通量对于干旱响应的差异;(2)分析不同深度土壤 CO₂通量温度敏感性对于干旱响应的差异。

1 试验地概况

研究地点位于武夷山国家级自然保护区(27°33′—27°54′N, 117°27′—117°51′E)内,地处福建省的西北部,其东西宽 22 km,南北长 52 km,保护区面积 56 527 hm²。该地区属中亚热带气候,年平均气温 12—18℃,年降雨量 2000 mm 左右^[28],降雨多集中在 3—8 月。保护区拥有世界同纬度带现存面积最大、保存最完整的中亚热带常绿阔叶林生态系统,境内植被垂直带谱完整。

选择 1450 m 的针叶林(CF)及 650 m 的常绿阔叶林(EBF)作为试验样地。CF 样地中黄山松(*Pinus taiwanensis*)为优势树种,占林分组成的 80%,伴生树种有木姜子(*Litsea pungens*)和高山杜鹃(*Rhododendron lapponicum*),样地密度 2122 株/hm²,平均胸径 14.3 cm,平均树高 9.6 m,胸高断面积 33.9 m²/hm²。EBF 样地中优势种是甜槠(*Castanopsis eyrei*)和米槠(*Castanopsis carlesii*),占林分组成的 65%,伴生树种有小叶赤楠(*Syzygium grijsii*)和青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)等,样地密度 1656 株/hm²,平均胸径 15.6 cm,平均树高 11.7 m,胸高断面积 31.5 m²/hm²。2014—2015 年 CF 和 EBF 样地年均气温分别为 12.10℃和 15.63℃,降雨量分别为 2461 mm 和 2641 mm,70%以上的降雨集中在 3—8 月(图 1)。样地土壤理化性质见表 1。

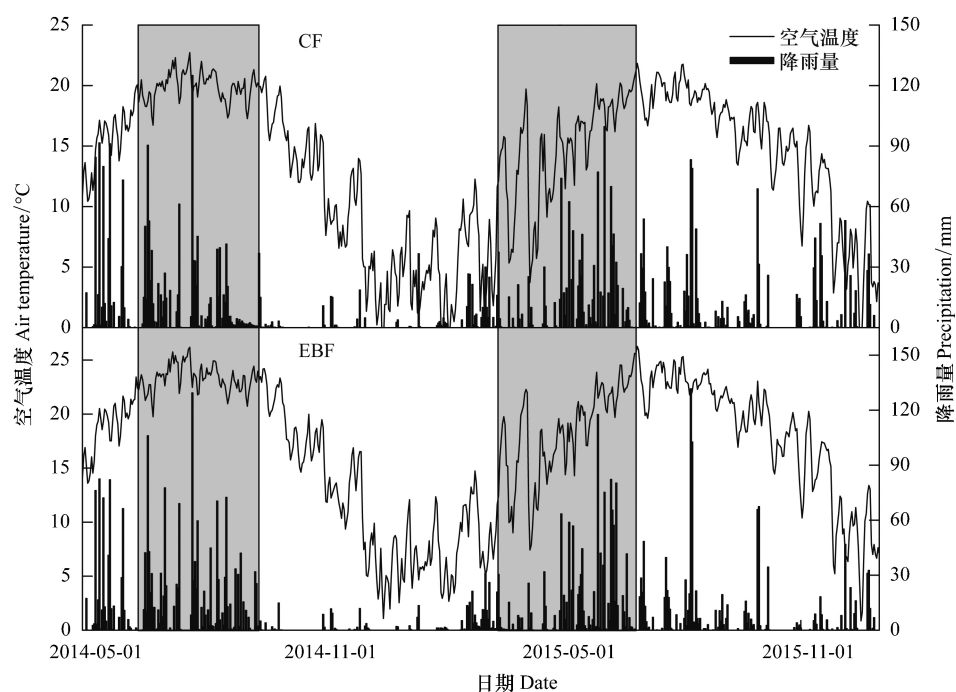


图 1 CF 和 EBF 样地 2014 年 5 月至 2015 年 12 月空气温度和降雨量的季节变化

Fig.1 Seasonal variation of air temperature and throughfall in the CF and EBF sites between May 2014 and December 2015

CF: 针叶林, coniferous forest; EBF: 常绿阔叶林, evergreen broadleaved forest. 阴影部分表示模拟干旱阶段

2 材料与方法

2.1 试验设计

在 CF 和 EBF 样地分别布设 3 个样方(30 m×30 m),每个样方相距 100 m 以上,其有相似的地形,坡度和植被类型。在每个样方中分别设置排除穿透雨(Throughfall exclusion, TFE)和对照处理(Control, CK)小样方,每个小样方 3 m×3 m,相距 10 m 以上,避免不同样方间的交互作用。在 CF 和 EBF 样地分别布设了 3 个 TFE 和 CK 处理的小样方,共计布设 12 个小样方。2014 年 6 月,在 CF 和 EBF 样地内布设 6 个便携 3 m×3 m

的排除穿透雨装置,这些装置是用镀锌钢管加工制作,装置的屋顶部分与坡面大致平行,支撑骨架上坡位一侧高度为 3 m,下坡位为 2 m,将其垂直埋于 TFE 处理小样方。本试验开展了连续两年的模拟生长季干旱试验,分别为 2014 年 6 月 13 日—9 月 12 日和 2015 年 3 月 15 日—6 月 27 日期间(即模拟生长季干旱阶段,期间塑料膜覆盖在排除穿透雨装置上),而试验的其余阶段移除塑料膜,使土壤重新获得降雨。2014 年样地共计排除穿透雨 91 d,CF 和 EBF 样地分别减少穿透雨 1054 mm 和 1436 mm;而在 2015 年排除穿透雨 103 d,CF 和 EBF 样地分别减少穿透雨 1150 mm 和 1292 mm。

表 1 武夷山针叶林和常绿阔叶林不同深度土壤理化性质

Table 1 Soil properties of different soil layers in the coniferous forest and evergreen broadleaved forest in the Wuyi Mountains

森林类型 Forest type	土壤 Soil	土层深度 Soil depths/cm	土壤容重 Bulk density/ (g/cm ³)	有机碳 Organic carbon/ (g/kg)	氮含量 Total nitrogen/ (g/kg)	pH (H ₂ O)
CF	黄壤	0—10	0.88(0.02)	82.5(3.7)	5.0(0.3)	4.7(0.1)
		10—30	0.91(0.03)	37.1(2.6)	2.6(0.2)	4.9(0.3)
		30—50	0.97(0.03)	23.8(2.5)	1.8(0.1)	5.2(0.2)
EBF	红壤	0—10	1.06(0.02)	55.4(0.8)	3.2(0.1)	4.5(0.1)
		10—30	1.14(0.02)	26.3(1.3)	1.7(0.2)	4.8(0.2)
		30—50	1.23(0.01)	16.1(1.0)	1.1(0.1)	5.0(0.2)

CF: 针叶林, coniferous forest; EBF: 常绿阔叶林, evergreen broadleaved forest. 括号内数值为标准误

2.2 不同深度土壤 CO₂浓度的测量

于 2014 年 3 月,在 CF 和 EBF 样地的 TFE 和 CK 处理中,用土钻在上述小样方内分别钻取深度为 10、30 cm 和 50 cm 的土壤孔洞,每个深度钻取 3 个,而后将略小于土壤孔洞的 PVC 管插入相应土层,回土压实。每根 PVC 管底端磨成尖形,便于插入土壤,并在其上 2 cm 的位置均匀分布若干通气孔,使相应土层土壤空气自由进入管内^[19, 29]。每根 PVC 管均露出土壤表面 20 cm,并用三通接头将每层的 3 根 PVC 管相连。每层 3 根 PVC 管起到混合特定深度 CO₂浓度的作用,减小土壤空间异质性。使用固体 CO₂检测器(GMT220 系列, Vaisala 公司,芬兰)测量不同深度土壤 CO₂浓度。测量时将 CO₂检测器插入管内,并用密封胶泥密封,即可测定不同深度土壤 CO₂浓度^[30]。同时利用便携式 CO₂记录仪(K33,美国)测定 0 cm 处 CO₂浓度。从 2014 年 6 月至 2015 年 12 月,每月选择晴好天气,于 8:00 左右到翌日 8:00,测定不同深度土壤 CO₂浓度。监测频率为每 0.5 h 采集 1 次数据,连续采集 24 h 以上。

2.3 土壤微气候环境的测定

于 2014 年 5 月,在 CF 和 EBF 样地的 TFE 和 CK 处理中,分别在 10、30 cm 和 50 cm 深度的土壤中安装 ECHO 土壤湿度传感器,每半个小时记录一次土壤湿度。温度传感器被置于土壤湿度相同深度检测 10、30 cm 和 50 cm 深度的土壤温度。在 CF 和 EBF 样地分别安装小气候观测系统(HOBO Weather Station Data Logger)用于观测样地内的降雨量和空气温度,在本研究的观测期间(2014 年 5 月至 2015 年 12 月),每 30 min 记录 1 次。

2.4 细根生物量的测定

在 CF 和 EBF 样地的 TFE 和 CK 处理中进行细根生物量的取样。在每个样方中,分别随机选择 3 个样点,采用直径为 3.8 cm 的根钻由上至下分 3 层(0—10、10—30、30—50 cm)钻取土芯样品,将采回的土芯分别放入自封袋中,同一样方相同层次的土芯混合后编号。采样前需对土壤表面新鲜和半分解的凋落物残体进行清除。土芯分别在 2014 和 2015 年的 9 月采集。每份土芯样品都浸泡过夜,冲洗过筛,并根据外形、颜色和弹性等人工挑选出细根^[31]。将挑选出的细根在 60℃ 下烘干至恒重。

细根生物量(g/m²)= 平均每根土芯细根干质量×10⁴/[$\pi(3.8/2)^2$]。

2.5 表层土壤碳通量测定

在测定不同深度 CO₂浓度的同时,使用 Li-8100 便携式碳通量测量系统(Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA)

测量表层土壤碳通量,用于检验用扩散法计算土壤碳通量的准确程度。于 2013 年 12 月,在每个小样方内永久性安装 2 个 PVC 土壤呼吸圈(直径 20 cm,高 7.5 cm,插入土层深度 3—5 cm),共布设 24 个土壤呼吸圈。定期清理土壤呼吸圈内新生的植物和凋落物,并保持其在整个试验期间固定不动,减少机械扰动的影响。从 2014 年 6 月至 2015 年 12 月,每月选择晴朗无风天气,使用 Li-8100 便携式碳通量测量系统测定土壤呼吸,在 8:00—12:00 间测定土壤碳通量,每次测定持续 3—4 h。为了避免日变化趋势的混合效应,碳通量测定的顺序是随机的,但干旱处理的测定总是在相应对照处理后进行^[32]。每个圈测定 2 次,每次持续 120 s,在两次测定期间有 30 s 的间隔,期间腔室自动开放允许腔室空气与周边空气的自由流通。

2.6 数据分析

采用 Fick 扩散第一定律计算不同深度土壤 CO₂通量($F_s, \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)^[19],公式如下:

$$F_s = -D_s \frac{\Delta C(z)}{\Delta z} \quad (1)$$

$$D_s = \varepsilon D_a \quad (2)$$

式中, D_s 为土壤中 CO₂的扩散系数(m^2/s); $C(z)$ 为深度 $z(\text{m})$ 土层 CO₂浓度($\mu\text{mol}/\text{m}^3$); ε 为相对气体扩散系数; D_a 为自由大气中 CO₂的扩散系数, $D_a = 1.47 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ 。

本研究采用以下 5 种常见的 ε 模型来推算不同深度土壤 CO₂通量^[30,33]:

Penman 模型: $\varepsilon = 0.66(\varphi - \theta) \quad (3)$

Marshall 模型: $\varepsilon = (\varphi - \theta)^{1.5} \quad (4)$

Millington 模型: $\varepsilon = \frac{(\varphi - \theta)^{10/3}}{\varphi^2} \quad (5)$

Moldrup-1997 模型: $\varepsilon = 0.66(\varphi - \theta) \left(\frac{\varphi - \theta}{\varphi} \right)^{\frac{12-m}{3}} \quad (6)$

Moldrup-2000 模型: $\varepsilon = \frac{(\varphi - \theta)^{2.5}}{\varphi} \quad (7)$

式中, θ 为土壤体积含水量(cm^3/cm^3); φ 为土壤孔隙度($\varphi = \rho_b/\rho_m$,其中 ρ_b 为土壤容重(g/cm^3), ρ_m 为土壤比重,矿质土壤 $\rho_m = 2.65 \text{g}/\text{cm}^3$); m 为常数 3。

土层 CO₂生产量可以通过土层净 CO₂通量估算,也就是土层上下边界的土壤 CO₂通量差层与原本储存在土层中的 CO₂之和^[34]。由于土层中储存的 CO₂量远小于土层边界的 CO₂通量,因此在计算各土层 CO₂生产量时对土层中储存的 CO₂量忽略^[35]。

$$P_{\text{CO}_2} = F_i - F_{i-1} \quad (8)$$

式中, F_i 和 F_{i-1} 分别为 i 层土层上下边界 CO₂通量。

各土层 CO₂生产量贡献率的计算公式为:

$$C = P_{\text{CO}_2}/F_t \quad (9)$$

温度敏感性指数 Q_{10} 利用指数函数计算

$$F_i = \alpha_i \cdot e^{\beta_i T_i} \quad (10)$$

$$Q_{10,i} = e^{10\beta_i} \quad (11)$$

式中, F_i 为第 i 层土壤 CO₂通量, α_i 、 β_i 分别为第 i 层相关变量, $Q_{10,i}$ 为第 i 层温度敏感性指数, T_i 为第 i 层土壤温度。

所有数据图表均为 Origin 8.5 处理完成,运用 SPSS 19.0 统计分析软件进行方差分析和回归分析。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)比较不同深度以及干旱和对照处理土壤温度、湿度、土壤 CO₂浓度和通量的差异水平,显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。以梯度扩散法计算获得的结果与 Li-8100 腔室法测量的通量进行线性拟合。

3 结果与分析

3.1 不同深度土壤温度、土壤湿度和 CO₂ 浓度季节变化

如图 2 所示,整个试验期间,CF 样地 CK 处理 10、30 cm 和 50 cm 深度土壤温度分别为 13.84、14.07℃ 和 14.10℃,EBF 样地 CK 处理 10、30 cm 和 50 cm 深度土壤温度分别为 17.08、17.23℃ 和 17.34℃。排除穿透雨处理对各层土壤温度的影响均不显著 ($P>0.05$),使 CF 样地 10、30 cm 和 50 cm 深度土壤温度分别降低 0.03、0.11℃ 和 0.12℃;使 EBF 样地 10、30 cm 和 50 cm 深度土壤温度分别降低 0.08、0.08℃ 和 0.07℃。如图 3 所示,在干旱处理期间,除 EBF 样地 50 cm 深度外,排除穿透雨处理均显著减少各层土壤湿度 ($P<0.05$),其中 CF 样地 10、30 cm 和 50 cm 深度土壤湿度分别较 CK 处理减少 18.0%、12.7% 和 12.9%,而 EBF 样地 10、30 cm 和 50 cm 深度土壤湿度分别较 CK 处理减少 18.3%、11.5% 和 6.6%。如图 4 所示,CF 和 EBF 样地 CK 处理不同深度土壤 CO₂ 浓度均表现与土壤温度相似的季节变化格局。随着土壤温度的增加,不同深度土壤 CO₂ 浓度逐渐升高,在 8—9 月间达到峰值;12 月至 1 月间最小值。如表 2 所示,随着土壤深度的增加,土壤 CO₂ 浓度随之增加。在整个试验观测期间,CF 样地 CK 处理 10、30 cm 和 50 cm 深度土壤 CO₂ 浓度分别为 (3624.2 ± 238.0)、(5623.7 ± 373.5) $\mu\text{mol/mol}$ 和 (7128.4 ± 402.5) $\mu\text{mol/mol}$,CO₂ 浓度的变异幅度(最大值/最小值)分别为 7.57、5.40 和 5.64;EBF 样地 10、30 cm 和 50 cm 深度土壤 CO₂ 浓度分别为 (5546.6 ± 207.9)、(8645.0 ± 295.7) $\mu\text{mol/mol}$ 和 (9993.4 ± 474.4) $\mu\text{mol/mol}$,CO₂ 浓度的变异幅度分别为 7.63、5.14 和 5.13。本研究中地表空气 CO₂ 浓度变化幅度较小,CF 和 EBF 样地变异幅度分别为 1.14 和 1.24,未受到土壤中 CO₂ 浓度的影响。

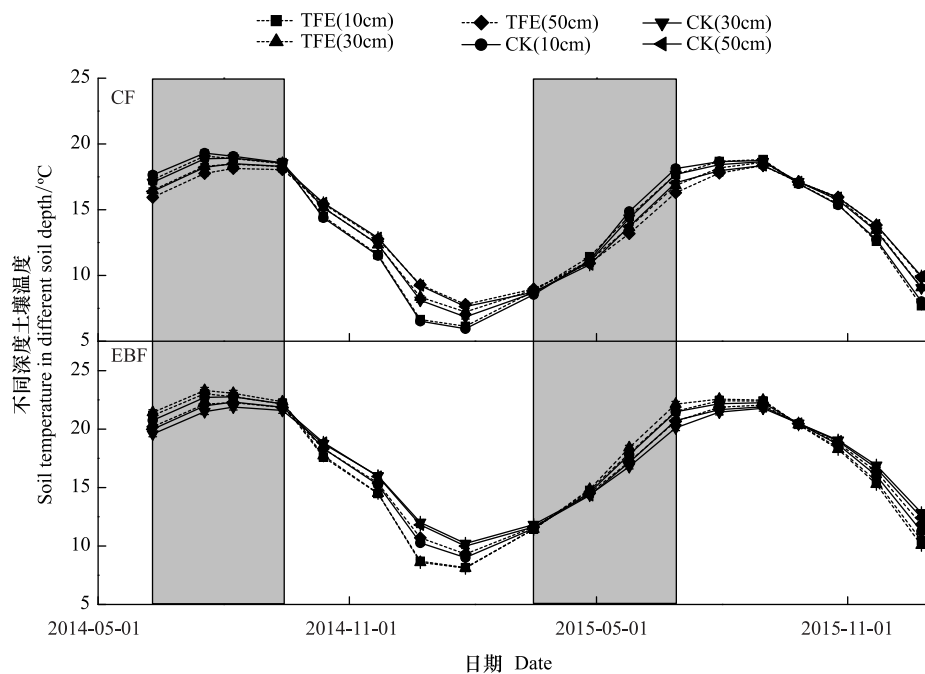


图 2 TFE 和 CK 处理不同深度土壤温度的季节变化格局

Fig.2 Seasonal variation of soil temperature in different soil depth from the TFE and CK treatments

TFE:排除穿透雨 Throughfall exclusion; CK:对照 Control

模拟干旱期间,TFE 处理使 CF 样地 10、30 cm 深度土壤 CO₂ 浓度分别减少 21.2%、12.4%,而 50 cm 土壤 CO₂ 浓度增加 8.9%;使 EBF 样地 10、30 cm 和 50 cm 深度分别减少 61.2%、59.8% 和 56.7%。如表 2 所示,在整个试验观测期间,除 CF 样地 50 cm 深度外,TFE 处理使 CF 和 EBF 样地土壤 CO₂ 浓度显著减少 ($P<0.05$),其中 CF 样地 10 cm 和 30 cm 深度土壤 CO₂ 浓度分别减少 11.4% 和 6.1%,EBF 样地 10、30 cm 和 50 cm 深度土壤 CO₂ 浓度分别减少 47.7%、45.5% 和 41.8%。

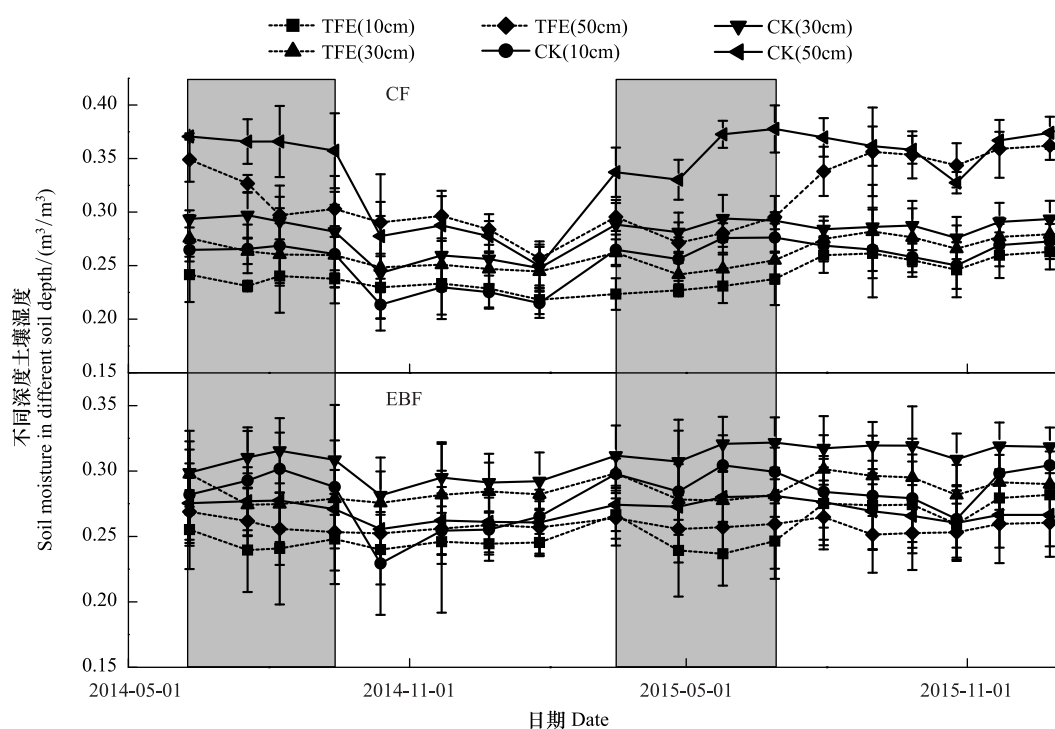


图 3 TFE 和 CK 处理不同深度土壤湿度的季节变化格局

Fig.3 Seasonal variation of soil moisture in different soil depth from TFE and CK treatments

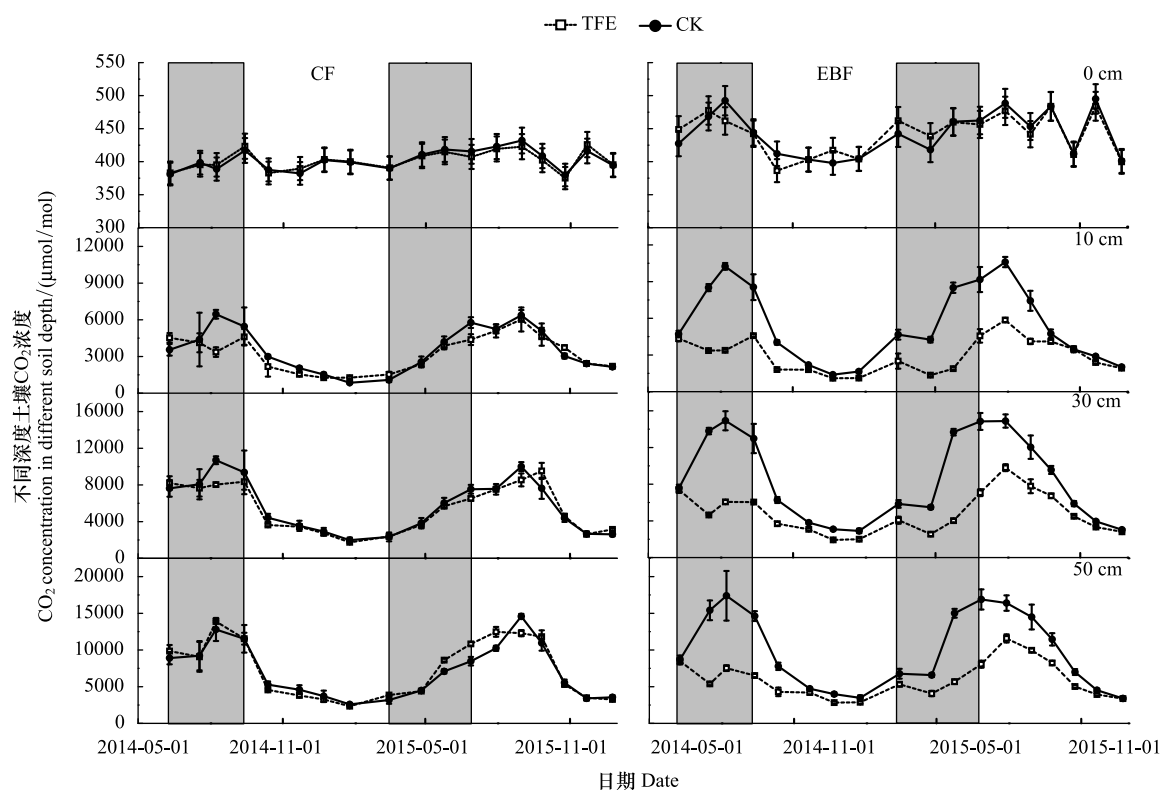
图 4 TFE 和 CK 处理不同深度土壤 CO₂ 浓度的季节格局Fig.4 Seasonal variation of soil CO₂ concentration in different soil depth from the TFE and CK treatments

表 2 TFE 和 CK 处理不同深度土壤 CO₂ 浓度

样地 Site	处理 Treatment	不同深度土壤 CO ₂ 浓度 Soil CO ₂ concentration in different soil depth/(μmol/mol)		
		10 cm	30 cm	50 cm
CF	TFE	3209.8±231.2Cb	5283.7±206.9Bb	7340.2±241.0Aa
	CK	3624.2±238.0Ca	5623.7±373.5Ba	7128.4±402.5Aa
EBF	TFE	2899.0±90.1Cb	4712.0±125.7Bb	5814.3±168.9Ab
	CK	5546.6±207.9Ca	8645.0±295.7Ba	9993.4±474.4Aa

TFE: 排除穿透雨 Throughfall exclusion; CK: 对照 Control. 小写字母不同表示同一深度土壤不同处理差异显著, 大写字母不同表示同一处理不同深度土壤差异显著

3.2 扩散法与腔室法结果对比

使用 GMT220 系列 CO₂ 浓度检测器原位连续测量不同深度土壤 CO₂ 浓度的变化, 并利用 Fick 第一扩散法计算碳通量。本研究选择 5 种广泛使用的气体扩散系数计算土壤 CO₂ 通量与 Li-8100 实测值结果进行对比。结果发现, Moldrup-2000 模型的计算结果与实测值最接近。在后续计算中, 采用 Moldrup-2000 模型计算通量分析不同深度土壤 CO₂ 通量的变化。

如图 5 所示, 在 CF 和 EBF 样地 CK 处理两种方法获得的土壤碳通量之间存在较好的线性相关性, 决定系数 R^2 分别为 0.919 和 0.846; 而在 TFE 处理两个样地的决定系数 R^2 略为下降, 但两种方法仍表现为极显著相关 ($P<0.01$)。采用梯度法估算 CF 样地 TFE 和 CK 处理的表层土壤 CO₂ 通量分别比腔室法高 0.37 和 0.11 μmol m⁻² s⁻¹, 分别高估 15.5% 和 3.5%; 而在 EBF 样地则分别比腔室法高 0.28 和 0.83 μmol m⁻² s⁻¹, 分别高估 10.9% 和 19.9%。

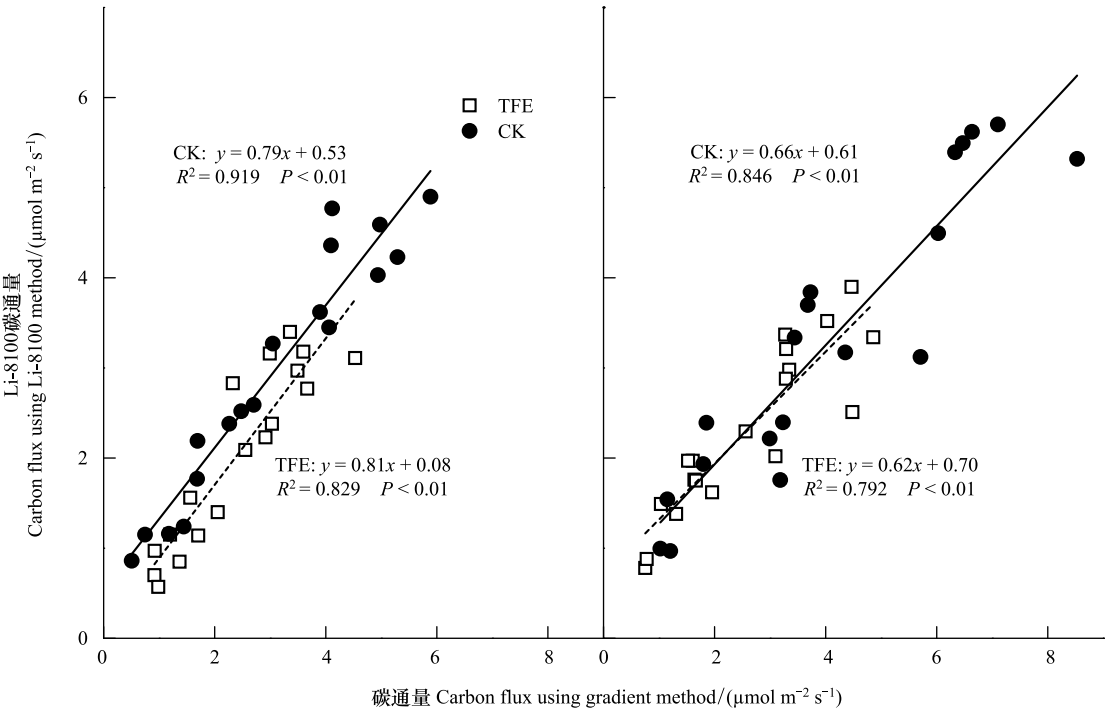


图 5 梯度法与 Li-8100 碳通量数据拟合分析

Fig.5 Fitting analysis on CO₂ flux between gradient method and data from Li-8100

3.3 不同深度土壤 CO₂ 通量的季节变化

如图 6 所示, CF 和 EBF 样地的对照 (CK) 处理不同深度土壤 CO₂ 通量与土壤温度有基本一致的季节变化格局 (图 2)。CF 样地 CK 处理 10、30 cm 和 50 cm 深度土壤 CO₂ 通量最大值均出现在 8 月, 分别为 5.89、1.85

$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $0.76 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 而最小值出现在 12—次年 1 月间, 分别为 0.51 、 $0.18 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $0.14 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。EBF 样地 CK 处理 10、30 cm 和 50 cm 深度土壤 CO₂ 通量最大值出现在 7—8 月, 分别为 8.53 、 $2.08 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $1.58 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 而最小值出现在 12 月, 分别为 1.02 、 $0.37 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $0.23 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

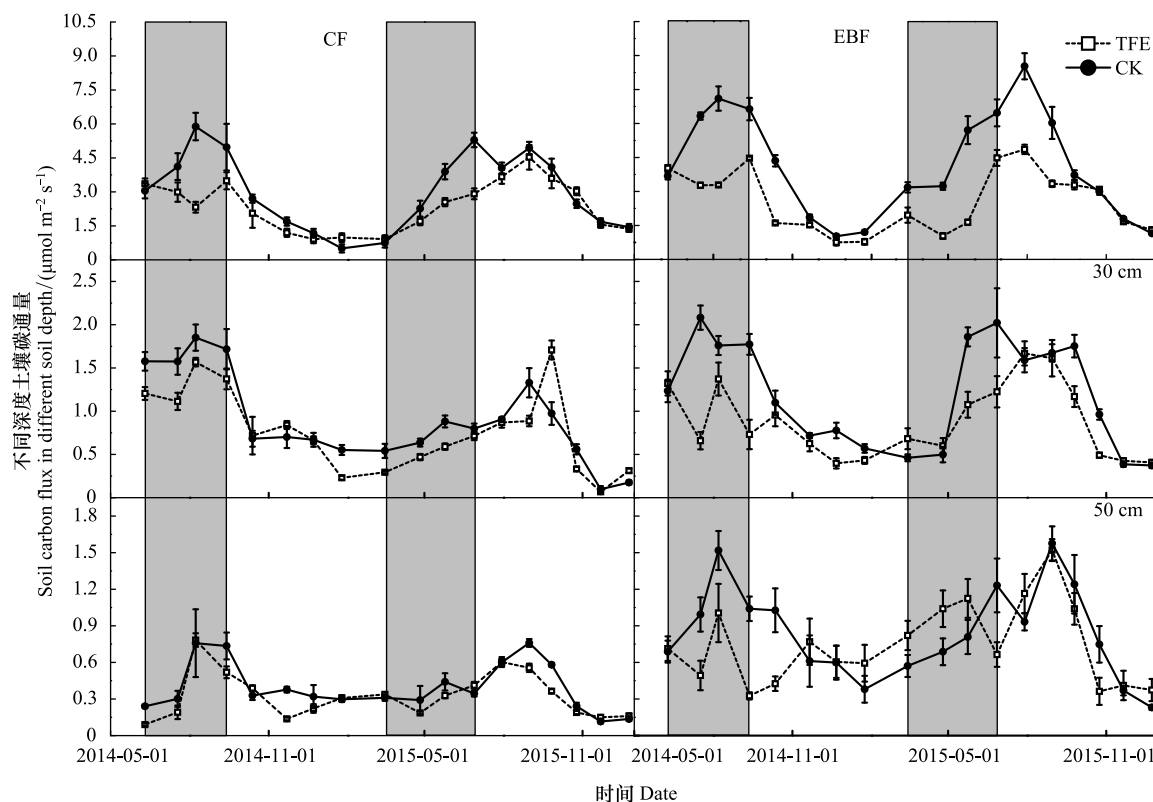


图 6 TFE 和 CK 处理不同深度土壤 CO₂ 通量的季节变化

Fig.6 Seasonal variation of soil CO₂ flux in vertical profiles from the TFE and CK treatments

如表 3 所示, TFE 处理使 CF 和 EBF 样地各土层 CO₂ 通量均显著减少 ($P < 0.05$)。试验观测期间 CF 样地 TFE 处理 10、30 cm 和 50 cm 深度土壤 CO₂ 通量均值分别为 2.40 、 $0.78 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $0.33 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 分别比 CK 处理相应土层低 21.3%、13.3%和 17.5%; 而在 EBF 样地 TFE 处理 10、30 cm 和 50 cm 深度土壤 CO₂ 通量均值分别为 2.58 、 $0.88 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $0.75 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 分别比 CK 处理相应土层低 38.1%、26.7%和 11.8%。

表 3 TFE 和 CK 处理不同深度土壤 CO₂ 通量

Table 3 The CO₂ flux of different soil depth from the TFE and CK treatments

样地 Site	处理 Treatment	不同深度土壤 CO ₂ 通量 Soil CO ₂ flux in different depth / ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		
		10 cm	30 cm	50 cm
CF	TFE	$2.40 \pm 0.20 \text{Ab}$	$0.78 \pm 0.08 \text{Bb}$	$0.33 \pm 0.02 \text{Cb}$
	CK	$3.05 \pm 0.19 \text{Aa}$	$0.90 \pm 0.05 \text{Ba}$	$0.40 \pm 0.04 \text{Ca}$
	差值	0.66	0.13	0.07
EBF	TFE	$2.58 \pm 0.09 \text{Ab}$	$0.88 \pm 0.05 \text{Bb}$	$0.75 \pm 0.08 \text{Bb}$
	CK	$4.17 \pm 0.16 \text{Aa}$	$1.20 \pm 0.06 \text{Ba}$	$0.85 \pm 0.07 \text{Ca}$
	差值	1.59	0.32	0.10

小写字母不同表示同一土层不同处理差异显著, 大写字母不同表示同一处理不同土层差异显著

3.4 不同深度土壤 CO₂生产量的贡献

如图 7 所示,CF 样地 CK 处理 10、30 cm 和 50 cm 深度土壤 CO₂生产量分别占总 CO₂生产量的 53.5%、37.7%和 8.8%,而 TFE 处理 10、30 cm 和 50 cm 深度分别占 53.7%、36.2%和 10.1%。EBF 样地 CK 处理 10、30 cm 和 50 cm 深度土壤 CO₂生产量分别占总 CO₂生产量的 55.7%、39.7%和 4.7%,而 TFE 处理 10、30 cm 和 50 cm 深度分别占 58.5%、38.5%和 2.9%。CF 样地 CK 处理 10、30 cm 和 50 cm 深度细根生物量分别为 98.04、45.97 g/m²和 17.04 g/m²,分别占总细根生物量的 60.9%、28.5%和 10.6%;而 TFE 处理 10、30 cm 和 50 cm 深度细根生物量的比例分别为 53.7%、34.7%和 11.6%。EBF 样地 CK 处理 10、30 cm 和 50 cm 深度细根生物量分别为 124.12、55.98 g/m²和 17.85 g/m²,分别占总细根生物量的 62.7%、28.3%和 9.0%;而 TFE 处理 10、30 cm 和 50 cm 深度细根生物量的比例分别为 58.6%、31.9%和 9.6%。

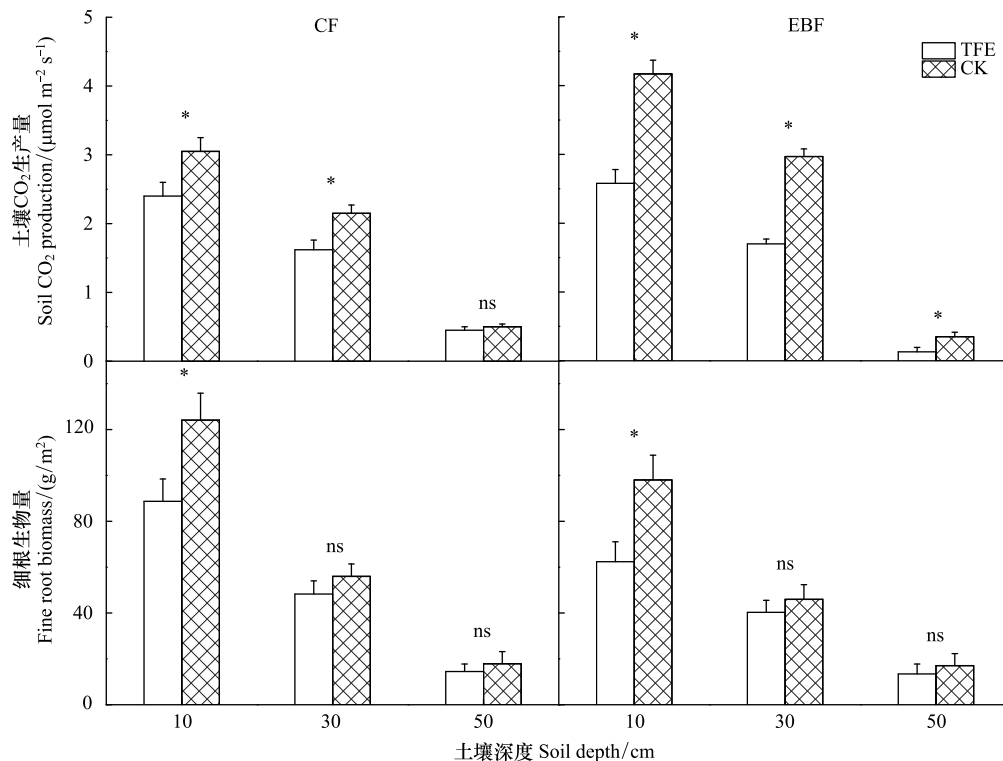


图 7 TFE 和 CK 处理土壤 CO₂生产量和细根生物量的垂直分布

Fig.7 Vertical distribution in soil CO₂ production and fine root biomass from TFE and CK treatments

标准棒为标准误; * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$; ns 表示不显著

3.5 不同深度土壤 CO₂通量温度敏感性

如图 8 所示,CF 和 EBF 样地 CK 处理土壤 CO₂通量的 Q_{10} 值随土层深度的增加而逐渐减小,其中 CF 样地从浅层 4.10 减少到深层 1.95;EBF 样地从浅层 3.18 减少到深层 2.54。模拟干旱对不同海拔不同深度 Q_{10} 值的影响并不一致。在 CF 样地,干旱处理显著减少了浅层土壤的 Q_{10} 值 ($P = 0.02$),而对深层土壤影响不显著 (30 cm: $P = 0.30$; 50 cm: $P = 0.23$);在 EBF 样地,干旱处理显著减少深层土壤的 Q_{10} (30 cm: $P = 0.02$; 50 cm: $P = 0.01$),而对浅层土壤影响不显著 ($P = 0.32$)。

4 讨论

4.1 不同深度土壤 CO₂浓度和 CO₂通量对干旱的响应

本研究中土壤 CO₂浓度随土层深度的增加呈递增的趋势,这主要是由于土壤扩散率随深度的增加迅速下降所致。多数森林土壤剖面浓度变化均观察到类似的现象^[3,30,36-37]。在加拿大温哥华 54 年生的花旗松中,观

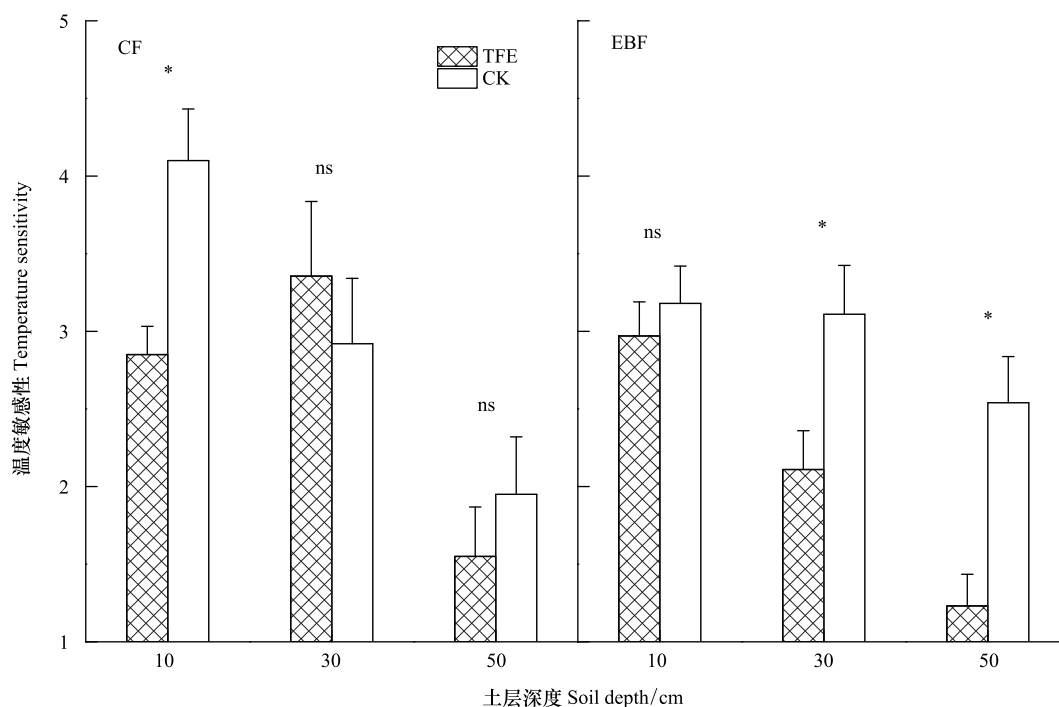
图8 不同深度土壤 CO₂ 通量温度敏感性

Fig.8 Temperature sensitivity of soil carbon flux in different soil depth under CF and EBF sites

标准棒为标准误; * 表示 $P < 0.05$; ns 表示不显著

察到随土层深度的增加,土壤 CO₂ 浓度随之增加^[11]。本研究中,除了 CF 样地 50 cm 土层外,TFE 处理使 CF 和 EBF 样地不同深度土壤 CO₂ 浓度均显著减少。首先,干旱造成了土壤孔隙度增加,促进了大气和土壤中气体的交换,这可能解释干旱处理土壤 CO₂ 浓度显著减少。在日本的温带落叶林中,土壤 CO₂ 浓度随土壤的变干逐渐减少,这被归因为该阶段降雨较少引起土壤水分亏缺^[12]。另一方面,长期干旱可能导致细根生物量的大量死亡^[38],进而减少了源于根系自养呼吸 CO₂ 通量^[39]。此外,干旱使土壤微生物活性减弱,降低土壤有机质分解^[40],减少土壤空气中 CO₂ 的来源。而本研究中,模拟干旱对 CF 样地 50 cm 土层 CO₂ 浓度影响不显著,这可能与 CF 样地海拔较高有关,其有较低的土壤温度(图 2),削弱了干旱对土壤 CO₂ 浓度的影响。另一方面底层土壤受干旱影响较弱,土壤温湿度等环境因素处于较稳定的水平(图 2 和图 3),这可能使干旱对 CF 样地底层土壤的 CO₂ 浓度影响较弱。本研究中干旱处理使 CF 和 EBF 样地各土层 CO₂ 通量均显著减少,这可能被归因为干旱引起的气体扩散率的减少^[25]。在日本的温带针叶林中也观察到类似的现象,他们发现较少降雨的 8 月,使表层 CO₂ 生产量减少了 40%^[12]。另一方面,不同深度土壤 CO₂ 通量均由微生物呼吸和根系自养呼吸两部分组成^[41],干旱可能减少微生物和根系的活性^[25],这也可能解释本研究中各层土壤 CO₂ 通量减少。

4.2 不同深度土壤 CO₂ 生产量的贡献

本研究中 CF 和 EBF 样地 CK 处理 10 cm 深度土壤 CO₂ 生产量分别占 CO₂ 总生产量的 53.5% 和 55.7%,表明本研究中两个样地土壤 CO₂ 生产量主要集中在最上层 10 cm 土壤中。这可能与表层土壤含有较多的细根生物量和较高的土壤有机碳含量有关。如图 6 所示,CF 和 EBF 样地中最上层 10 cm 土壤中的细根生物量分别占总细根生物量的 60.9% 和 62.7%;而最上层 10 cm 土壤有机碳分别占总土壤有机碳的 39.0% 和 37.1% (表 1)。在 50 年生的欧洲赤松中,发现 87% 的 CO₂ 生产量集中在 0—30 cm 土层,这与细根和土壤有机碳库的垂直分布类似,分别有 66% 的细根生物量和 81% 的土壤有机碳库集中在该土层^[42]。在加拿大 54 年生的花旗松超过 75% 的 CO₂ 生产量来源于土壤表层 20 cm 的土层,而底层土壤(50 cm)的贡献很小^[11]。在北方森林 A、B 和 C 层分别占总 CO₂ 生产量的 69.9%、19.8% 和 10.4%^[36]。在美国的混交硬木林也观察到类似的现象,保守

估计有 40%—48% 的 CO_2 生产量来源于 O 层^[3]。本研究中 CF 和 EBF 样地 CK 处理 50 cm 深度土壤 CO_2 生产量分别占总生产量的 8.8% 和 4.7%, 这可能是由于该层土壤有较低的细根生物量, 另外深层土壤有更强的土壤有机质的物理保护, 避免微生物的分解利用^[43]。

4.3 不同深度土壤 CO_2 通量温度敏感性

本研究中土壤 CO_2 通量的温度敏感性随土层深度的增加而呈逐渐减小, 其中 CF 样地浅层土壤温度敏感性 (4.10) 显著高于深层 (1.95); EBF 样地浅层 (3.18) 显著高于深层 (2.54), 这可能是由于随着土壤深度的增加, 难分解碳所占碳库比例增加, 底物质量相对较低^[9], 因此土壤 CO_2 通量的温度敏感性随土壤深度的增加逐渐降低。在日本名古屋的温带落叶林中观察到类似的现象, 浅层土壤温度敏感性 (6.39) 显著高于底层土壤 (1.63), 他们把其归因为表层土壤的微生物群落更显著的季节变化以及根系呼吸的温度依赖性随植物生理的变化而变化^[13]。也有报道与本研究结果相反, 美国的乔治亚州发现随土层深度的增加温度敏感性逐渐增加, 他们认为这可能是由于随土层深度增加土壤温度变化幅度减少引起的^[18]。在温带森林土壤中观察到 O 层 CO_2 生产量比矿质层有更低的温度敏感性^[3], 这可能反映了根系生长和根系的输入在矿质土壤层中比 O 层有相对更大的重要性。也有研究报道底层更高的温度敏感性还与湿度的限制作用和养分可用性等因素有关^[44-45]。

本研究中排除穿透雨显著减少了 CF 样地浅层土壤 CO_2 通量的温度敏感性, 而对深层土壤影响不显著。这一方面可能是由于 CF 样地浅层土壤细根生物量比深层土壤减少的更为显著, 而这限制了浅层土壤基质的供应^[46]; 另一方面浅层土壤干旱引起的水分亏缺更为显著^[3], 增加了浅层土壤基质扩散的阻力, 减少了基质、胞外酶和分解相关微生物间的接触, 削弱了浅层土壤的温度敏感性^[32]。而在 EBF 样地排除穿透雨显著减少了深层土壤的温度敏感性, 而对浅层土壤影响不显著, 这表明了除了浅层土壤外, 开展底层土壤 CO_2 通量的研究是非常有必要的, 有利于改善干旱情境下土壤碳通量模型的精度^[14]。

5 结论

本研究中 CF 和 EBF 样地土壤 CO_2 浓度均随土壤深度的增加而升高。CF 和 EBF 样地对照处理 10 cm 土壤 CO_2 生产量分别占总生产量的 53.5% 和 55.7%。干旱处理使 CF 和 EBF 样地不同深度土壤 CO_2 通量均显著减少。本研究中土壤 CO_2 通量的温度敏感性值均随土层深度增加而减少。干旱处理显著减少了 CF 样地浅层土壤 CO_2 通量的 Q_{10} 值, 对深层土壤影响不显著; 而在 EBF 样地显著减少了深层土壤的 Q_{10} 值, 对浅层土壤影响不显著。表明干旱处理后, 浅层和深层土壤对土壤温度的响应发生改变, 即浅层和深层土壤的温度敏感性对于干旱处理的响应机制不同。未来需进一步加强不同土层土壤有机碳组成和来源及根系质量等生物因子及对气候变化响应的研究, 以期解析垂直剖面土壤碳通量的调控机理。

致谢:福建省森林培育与林产品加工利用重点实验室和福建省林业科学研究院自选项目(闽林研[2015]73号)对本研究的开展提供支持, 武夷山国家公园管理局金昌善, 徐自坤等对本研究野外调查给予帮助, 特此感谢!

参考文献 (References):

- [1] Lewicki J L, Evans W C, Hilley G E, Sorey M L, Rogie J D, Brantley S L. Shallow soil CO_2 flow along the San Andreas and Calaveras Faults, California. *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*, 2003, 108(B4): 2187.
- [2] Kuzyakov Y. Sources of CO_2 efflux from soil and review of partitioning methods. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(3): 425-448.
- [3] Davidson E A, Savage K E, Trumbore S E, Borken W. Vertical partitioning of CO_2 production within a temperate forest soil. *Global Change Biology*, 2006, 12(6): 944-956.
- [4] Pang X Y, Bao W K, Zhu B, Cheng W X. Responses of soil respiration and its temperature sensitivity to thinning in a pine plantation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 171-172: 57-64.

- [5] 张涛, 罗雷, 雷杰, 宋秀丽, 王鹏程. 三峡库区马尾松林土壤呼吸的空间变异特征. 华中农业大学学报, 2017, 36(1): 28-34.
- [6] Mande H K, Abdullah A M, Aris A Z, Ainuddin A N. Factors responsible for spatial and temporal variation of soil CO₂ efflux in a 50 year recovering tropical forest, Peninsular Malaysia. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(9): 5559-5569.
- [7] Archmiller A A, Samuelson L J, Li Y R. Spatial variability of soil respiration in a 64-year-old longleaf pine forest. Plant and Soil, 2016, 403(1/2): 419-435.
- [8] Wiaux F, Vanclooster M, Van Oost K. Vertical partitioning and controlling factors of gradient-based soil carbon dioxide fluxes in two contrasted soil profiles along a loamy hillslope. Biogeosciences, 2015, 12(15): 4637-4649.
- [9] 蒲晓婷, 林伟盛, 杨玉盛, 杨智榕, 郑蔚, 元晓春, 刘小飞, 熊德成, 陈岳民. 杉木幼林土壤垂直剖面 CO₂通量对土壤增温的响应. 环境科学学报, 2017, 37(1): 288-297.
- [10] Liang N, Hirano T, Zheng Z M, Tang J, Fujinuma Y. Continuous measurement of soil CO₂ efflux in a larch forest by automated chamber and concentration gradient techniques. Biogeosciences Discussions, 2010, 7(1): 1345-1375.
- [11] Jassal R, Black A, Novak M, Morgenstern K, Nesic Z, Gaumont-Guay D. Relationship between soil CO₂ concentrations and forest-floor CO₂ effluxes. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 130(3-4): 176-192.
- [12] Hirano T, Kim H, Tanaka Y. Long-term half-hourly measurement of soil CO₂ concentration and soil respiration in a temperate deciduous forest. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(D20): 4631.
- [13] Takahashi A, Hiyama T, Takahashi H A, Fukushima Y. Analytical estimation of the vertical distribution of CO₂ production within soil; application to a Japanese temperate forest. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 126(3/4): 223-235.
- [14] Subke J A, Reichstein M, Tenhunen J D. Explaining temporal variation in soil CO₂ efflux in a mature spruce forest in Southern Germany. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(11): 1467-1483.
- [15] Joos O, Hagedorn F, Heim A, Gilgen A K, Schmidt M W I, Siegwolf R T W, Buchmann N. Summer drought reduces total and litter-derived soil CO₂ effluxes in temperate grassland-clues from a ¹³C litter addition experiment. Biogeosciences, 2010, 7(3): 1031-1041.
- [16] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Applications, 2000, 10(2): 423-436.
- [17] Koehler B, Zehe E, Corre M D, Veldkamp E. An inverse analysis reveals limitations of the soil-CO₂ profile method to calculate CO₂ production and efflux for well-structured soils. Biogeosciences, 2010, 7(8): 2311-2325.
- [18] Pongthana N, Leclerc M Y, Beasley J P Jr, Zhang G S, Senthong C. Assessment of the soil CO₂ gradient method for soil CO₂ efflux measurements: comparison of six models in the calculation of the relative gas diffusion coefficient. Tellus B, 2010, 62(1): 47-58.
- [19] Maier M, Schack-Kirchner H. Using the gradient method to determine soil gas flux: A review. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 192-193: 78-95.
- [20] Sullivan B W, Dore S, Kolb T E, Hart S C, Montes-Helu M C. Evaluation of methods for estimating soil carbon dioxide efflux across a gradient of forest disturbance. Global Change Biology, 2010, 16(9): 2449-2460.
- [21] Yu G R, Chen Z, Piao S L, Peng C H, Ciais P, Wang Q F, Li X R, Zhu X J. High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(13): 4910-4915.
- [22] Zhang X B, Zwiers F W, Hegerl G C, Lambert F H, Gillett N P, Solomon S, Stott P A, Nozawa T. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. Nature, 2007, 448(7152): 461-465.
- [23] Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C, Changnon S A, Karl T R, Mearns L O. Climate extremes: observations, modeling, and impacts. Science, 2000, 289(5487): 2068-2074.
- [24] Dai A G. Drought under global warming: a review. WIREs Climate Change, 2011, 2(1): 45-65.
- [25] Sotta E D, Veldkamp E, Schwendenmann L, Guimarães B R, Paixão R K, De Lourdes P Ruivo M, Da Costa A C L, Meir P. Effects of an induced drought on soil carbon dioxide (CO₂) efflux and soil CO₂ production in an Eastern Amazonian rainforest, Brazil. Global Change Biology, 2007, 13(10): 2218-2229.
- [26] Suseela V, Dukes J S. The responses of soil and rhizosphere respiration to simulated climatic changes vary by season. Ecology, 2013, 94(2): 403-413.
- [27] Zhang X, Zhang Y P, Sha L Q, Wu C S, Tan Z H, Song Q H, Liu Y T, Dong L Y. Effects of continuous drought stress on soil respiration in a tropical rainforest in southwest China. Plant and Soil, 2015, 394(1/2): 343-353.
- [28] 何容, 汪家社, 施政, 方燕鸿, 徐自坤, 权伟, 张增信, 阮宏华. 武夷山植被带土壤微生物量沿海拔梯度的变化. 生态学报, 2009, 29(9): 5138-5144.
- [29] 刘芳, 刘丛强, 王仕禄, 朱正杰. 喀斯特地区土壤剖面 CO₂、CH₄和 N₂O 浓度的相关关系. 生态学杂志, 2010, 29(4): 717-723.
- [30] 王超, 黄群斌, 杨智杰, 黄蓉, 陈光水. 杉木人工林不同深度土壤 CO₂通量. 生态学报, 2011, 31(19): 5711-5719.

- [31] Brassard B W, Chen H Y H, Cavard X, Laganière J, Reich P B, Bergeron Y, Paré D, Yuan Z Y. Tree species diversity increases fine root productivity through increased soil volume filling. *Journal of Ecology*, 2013, 101(1): 210-219.
- [32] Schindlbacher A, Wunderlich S, Borken W, Kitzler B, Zechmeister-Boltenstern S, Jandl R. Soil respiration under climate change: prolonged summer drought offsets soil warming effects. *Global Change Biology*, 2012, 18(7): 2270-2279.
- [33] 董莉茹, 许明祥, 孙会. 黄土丘陵区刺槐林土壤碳通量模拟研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(6): 122-130.
- [34] 郑蔚, 李超, 元晓春, 郑永, 陈岳民, 林伟盛, 杨玉盛. 皆伐火烧对亚热带森林不同深度土壤 CO₂ 通量的影响. *生态学报*, 2017, 37(4): 1221-1231.
- [35] Risk D, Kellman L, Beltrami H. Soil CO₂ production and surface flux at four climate observatories in eastern Canada. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4): 1122.
- [36] Pumpanen J, Iivesniemi H, Kulmala L, Siivola E, Laakso H, Kolari P, Helenelund C, Laakso M, Uusimaa M, Hari P. Respiration in boreal forest soil as determined from carbon dioxide concentration profile. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(5): 1187-1196.
- [37] 纪宝明, 王艳芬, 李香真, 王跃思, 陈佐忠, 郑循华. 内蒙古锡林河流域主要类型草原土壤中 CH₄ 和 CO₂ 浓度的变化. *植物生态学报*, 2001, 25(3): 371-374.
- [38] Moser G, Schuldt B, Hertel D, Horna V, Coners H, Barus H, Leuschner C. Replicated throughfall exclusion experiment in an Indonesian perhumid rainforest: wood production, litter fall and fine root growth under simulated drought. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1481-1497.
- [39] Balogh J, Papp M, Pintér K, Fóti S, Posta K, Eugster W, Nagy Z. Autotrophic component of soil respiration is repressed by drought more than the heterotrophic one in dry grassland. *Biogeosciences*, 2016, 13(18): 5171-5182.
- [40] Borken W, Savage K, Davidson E A, Trumbore S E. Effects of experimental drought on soil respiration and radiocarbon efflux from a temperate forest soil. *Global Change Biology*, 2006, 12(2): 177-193.
- [41] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, Andrews J A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 115-146.
- [42] Goffin S, Aubinet M, Maier M, Plain C, Schack-Kirchner H, Longdoz B. Characterization of the soil CO₂ production and its carbon isotope composition in forest soil layers using the flux-gradient approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 188: 45-57.
- [43] Delogu E, Longdoz B, Plain C, Epron D. Seasonal and vertical variations in soil CO₂ production in a beech forest: an isotopic flux-gradient approach. *Biogeosciences Discussions*, 2016, doi: 10.5194/bg-2016-194.
- [44] Davidson E A, Janssens I A, Luo Y Q. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q₁₀. *Global Change Biology*, 2006, 12(2): 154-164.
- [45] Graf A, Weihermüller L, Huisman J A, Herbst M, Bauer J, Vereecken H. Measurement depth effects on the apparent temperature sensitivity of soil respiration in field studies. *Biogeosciences Discussions*, 2008, 5(3): 1867-1898.
- [46] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 2006, 440(7081): 165-173.