

DOI: 10.5846/stxb201206160864

房彬, 李心清, 程建中, 王兵, 程红光, 张立科, 杨放. 西南喀斯特地区轮作旱地土壤 CO₂ 通量. 生态学报, 2013, 33(17): 5299–5307.

Fang B, Li X Q, Cheng J Z, Wang B, Cheng H G, Zhang L K, Yang F. CO₂ flux in the upland field with corn-rapeseed rotation in the karst area of southwest China. Acta Ecologica Sinica 2013, 33(17): 5299–5307.

西南喀斯特地区轮作旱地土壤 CO₂ 通量

房彬^{1,2}, 李心清^{1,*}, 程建中¹, 王兵¹, 程红光¹, 张立科^{1,2}, 杨放^{1,2}

(1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 中国已承诺大幅降低单位 GDP 碳排放, 农业正面临固碳减排的重任。西南喀斯特地区环境独特, 旱地面积占据优势比例, 土壤碳循环认识亟待加强。以贵州省开阳县玉米-油菜轮作旱地为研究对象, 采用密闭箱-气相色谱法对整个轮作期土壤 CO₂ 释放通量进行了观测研究, 结果表明: (1) 整个轮作期旱地均表现为 CO₂ 的释放源。其中油菜生长季土壤 CO₂ 通量为 (178.8 ± 104.8) mg CO₂·m⁻²·h⁻¹, 玉米生长季为 (403.0 ± 178.8) mg CO₂·m⁻²·h⁻¹, 全年平均通量为 (271.1 ± 176.4) mg CO₂·m⁻²·h⁻¹, 高于纬度较高地区的农田以及同纬度的次生林和松林; (2) CO₂ 通量日变化同温度呈现显著正相关关系, 季节变化与温度呈现显著指数正相关关系, 并受土壤湿度的影响, 基于大气温度计算得出的 Q₁₀ 为 2.02, 高于同纬度松林以及低纬度的常绿阔叶林; (3) CO₂ 通量与土壤 pH 存在显著线性正相关关系, 显示出土壤 pH 是研究区旱地土壤呼吸影响因子之一。

关键词: 土壤 CO₂ 通量; 温度; 湿度; 喀斯特地区

CO₂ flux in the upland field with corn-rapeseed rotation in the karst area of southwest China

FANG Bin^{1,2}, LI Xinqing^{1,*}, CHENG Jianzhong¹, WANG Bing¹, CHENG Hongguang¹, ZHANG Like^{1,2}, YANG Fang^{1,2}

1 State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institution of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract: Farmland ecosystems constitute great carbon sources in terrestrial ecosystems and have important influence on the global carbon cycle. As China has promised to reduce carbon emission significantly, China's agriculture is facing the challenge of carbon sequestration and reduction of carbon emission. As the environment in karst area of southwest China is unique and upland field covers a large scale, further research is badly needed to quantify diurnal and seasonal variations of soil CO₂ flux, and to investigate the effects of temperature, soil water content and soil properties on soil CO₂ flux.

Taking upland field with corn-rapeseed rotation in Kaiyang country of Guizhou province as our study subject, we used static enclosed chamber coupled with GC to observe the soil CO₂ flux of all the rotation period. Continuous measurements of soil temperature and moisture were conducted together with several other physical and chemical properties of the soil. It was found that the upland with corn-rapeseed rotation performed as the source of CO₂. The mean CO₂ flux was (178.8 ± 104.8) mg CO₂·m⁻²·h⁻¹ in the rapeseed growing season, (403.0 ± 178.8) mg CO₂·m⁻²·h⁻¹ in the maize growing season, and (271.09 ± 176.37) mg CO₂·m⁻²·h⁻¹ for the whole rotation period. These values are in the upper part of the range of published soil-surface CO₂ flux data. There were significant positive correlations between soil CO₂ flux and temperature in both diurnal changes and seasonal fluctuations. The diurnal fluctuations of CO₂ flux showed similar patterns and fluctuated

基金项目: 国家自然科学基金(40872212); 中国科学院战略性科技先导专项(碳专项); 贵州省农业攻关计划项目(黔科合 NY 字[2011]3079 号)

收稿日期: 2012-06-16; 修订日期: 2012-10-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xinqinglee@hotmail.com

<http://www.ecologica.cn>

from minimum around 12 pm to maximum at 1 pm to 3 pm. For the seasonal variations, soil CO₂ flux was positively correlated with temperature in the whole crop rotation with the minimum value of 31.10 mg CO₂·m⁻²·h⁻¹ in February and the maximum value of 665.46 mg CO₂·m⁻²·h⁻¹ in August. An exponential function provided the best fit for describing the relationship between seasonal soil CO₂ flux and temperature for the whole crop rotation, with the higher correlation found with the soil temperature at 5 cm depth. About 86.7% of the seasonal soil CO₂ flux variations can be explained by air temperature, while 80.5% by the soil temperature at 5 cm depth. The results showed that the temperature was the determinant factor controlling temporal variation of soil CO₂ flux both diurnally and seasonally. The correlations between soil CO₂ flux and soil water content differed for the two kinds of crops. For the rapeseed growing season when soil water content was relatively high, the soil CO₂ flux and soil water content had a positive correlation. While there was a negative relationship between soil CO₂ flux and soil water content for the maize growing season. Both the relationships were not statistically significant which indicated that the soil water content was not the determinant factor for the soil CO₂ flux changes. The Q_{10} value was calculated as 2.02 based on the atmospheric temperature, higher than pinewood at similar latitudes and evergreen broad-leaved forest at lower latitudes. This meant that the upland field corresponded more sensitively to the temperature changes. The significant positive correlation between soil CO₂ flux and soil pH indicated that the soil CO₂ flux was influenced by several parameters at the same time.

Key Words: soil CO₂ flux; temperature; moisture; karst area

土壤碳库是地球表层系统中最大、最活跃的碳库之一^[1]。土壤呼吸作用是土壤碳库向大气输出主要方式,包含植物根系的自养呼吸和微生物的异养呼吸^[2]。据估算 2008 年全球土壤碳库向大气中的碳输出量为 (98±12) Gt,是化石燃料燃烧排放量的十倍左右^[3],其碳通量绝对值仅次于陆地生态系统光合作用的碳吸收量^[3-4]。因此土壤呼吸作用对大气 CO₂ 浓度影响重大,是陆地生态系统碳循环的重要环节,决定着陆地生态系统碳收支的平衡^[5-6]。

作为碳排放大国,中国在国际社会面临碳减排的巨大压力。中国已经在 2011 年德班气候大会上做出减排承诺。走低碳发展道路对于保障经济社会发展空间,减缓气候变化至关重要。从农业角度来看,全球耕地面积为 1369 Mhm²,占全球陆地面积的 10.5%,农业 CO₂ 排放占据了全球人为排放量的 15%^[7]。探索农田生态系统土壤呼吸变化规律及控制机理不仅对于减少农业土壤碳排放有重要指导意义,还对减缓我国因工业发展带来的减排压力有现实意义。

中国西南喀斯特地区属低纬度热带-亚热带气候,较为湿热的气候条件下土壤呼吸特征及对环境因子的响应可能与其他生态系统不同;另外,特殊地质背景造就了其生态环境脆弱性和敏感性,加之人地矛盾尖锐,土壤退化日益严重,土壤碳库储量急剧下降^[8-9],因而这一地区的土壤碳通量需要深入研究。目前喀斯特地区碳通量研究还相对薄弱,已有研究主要集中在林地和草地^[10-11],对农田生态系统 CO₂ 通量的研究开展的还比较少。此外,对于碳循环昼夜变化的监测明显不足,导致无法精确估算这一地区碳通量。旱地农田是西南喀斯特地区面积较大的生态系统,以贵州为例,旱耕地面积约占 335.43 万 hm²^[12],在陆地生态系统碳收支中有重要作用。研究这一地区农田生态系统 CO₂ 通量及其影响因素不仅能为认识该地区碳收支、评估它在区域和全球碳循环中的作用提供依据,而且对于如何提高土壤有机质含量、保持土壤碳库都有重要意义。本研究选择地处喀斯特地区的贵阳市开阳县开展了旱地农田碳通量的观测研究,以认识: 1) 西南喀斯特地区轮作旱地土壤 CO₂ 通量日变化以及季节变化规律。2) CO₂ 通量与土壤水热条件的关系。3) CO₂ 通量与土壤 pH 等理化性质间的关系。4) 据此估算贵州旱地 CO₂ 的年排放量。

1 研究区域概况

研究地区位于贵州省贵阳市开阳县东南,地理位置为 107°02′48.1″E, 27°00′39.9″N,海拔 1118 m。地貌上,属于云贵高原东侧梯状斜坡地带,附近喀斯特发育较为典型。气候类型属亚热带季风性湿润气候,四季分

明, 年均气温介于 10.6—15.3 °C 之间, 最热为 7 月, 平均温度 22.3 °C, 最低温度为 1 月, 平均气温 2.0 °C; 雨水充沛, 全年降水量 926.5—1419.2 mm, 降水多集中在夏季, 雨季平均为 180d。全年日照时数 898.1—1084.7h, 其中夏季日照时数占全年 39%。试验田土壤类型为石灰土, 土壤基本理化性质见表 1。

表 1 实验土地土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical characteristics of the soil

	pH	有机质 Organic matter /(g/kg)	全氮 Total N /(g/kg)	硝态氮 Nitrate N /(mg/kg)	铵态氮 Ammonium N /(mg/kg)	有效磷 Available P /(mg/kg)
平均值 Mean	8.30	33.40	2.67	16.0	3.1	11.9
标准偏差 SD	0.08	2.80	0.52	17.4	3.6	3.8

本研究样地的油菜-玉米轮作是当地典型轮作制度, 在喀斯特地区旱地具有很强的代表性。油菜种植期是从 2010 年 11 月 18 日到 2011 年 6 月 9 日, 玉米种植期从 2011 年 6 月 15 日到 9 月 24 日, 作物田间管理同区域旱地管理方法。在油菜种植期, 油菜种植当天按 1250 kg/hm² 的比例施复合底肥, 然后于 2011 年 2 月 5 日和 2011 年 2 月 24 日按 300 kg/hm² 的比例追施尿素两次。玉米种植当天按 370 kg/hm² 的比例施复合肥, 2011 年 7 月 10 日按 325 kg/hm² 的比例追施尿素一次。

2 研究方法

2.1 CO₂ 采集、测定和通量计算

本次研究农田土壤呼吸监测时间为 2010 年 11 月到 2011 年 10 月, 包含了完整的油菜-玉米轮作周期。每 2 周监测 1 次, 基本涵盖了本地区土壤温度和含水量的季节变化范围, 其中前一次监测时间从 11:00 持续到 17:00, 重复 4 次(4 次 CO₂ 通量平均值和日平均值基本一致), 第 2 次监测时间从 13:00 持续到翌日 11:00, 重复 11 次, 重复之间的间隔为 2h。

2010 年 11 月在样地内随机布置 3 个不锈钢基座, 压入土中并保持位置固定, 注水到基座凹槽以进行密封。采样基座布置完毕后, 至少 24h 后开始第 1 次测定。采用较为常用的密闭静态箱法进行土壤呼吸的监测, 具体操作是: 将不透明有机玻璃密闭箱(箱体大小约为 30 cm×30 cm×50 cm) 罩在基座上, 在罩箱后的 0、7、14、21、28 min 分别抽取箱内气体 30mL 注入提前抽成高真空的 labco 12mL 顶空进样瓶, 在实验室用气相色谱仪(Agilent7890A) 测定 CO₂ 浓度, 并用 CO₂ 释放通量公式(1) 式计算土壤呼吸 CO₂ 通量(mg CO₂·m⁻²·h⁻¹)。

$$F = \frac{60}{100} \rho_0 H \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T_0 + T_a} \frac{dc_t}{dt} \quad (1)$$

式中 F 为 CO₂ 排放通量 mg CO₂·m⁻²·h⁻¹, ρ_0 为标准状态下 CO₂ 密度(g/L), H 为采样箱气室的高度(cm), p 为采样点的气压, p_0 为标准状态下的大气压力(1.013×10⁵), T_0 为绝对温度(K) 273.15, T_a 为采样时箱内平均气温(°C), dc_t/dt 为采样箱内 CO₂ 浓度(μL/L) 对时间 t (min) 的变化率。

在每次监测土壤呼吸的同时, 测定通量箱内部温度、土壤 5 cm 温度、大气压力以及气温日间变化。温度用水银温度计测量, 大气压力由数字大气压力表测定。

2.2 土壤样品的采集和理化性质测定

土壤样品取自地表 0—10cm 土层, 除硝态氮、铵态氮和含水量测定用新鲜土外, 其余土壤样品室内风干, 过筛。土壤基本理化性质参照鲁如坤方法^[13] 测定: 硝态氮测定采用酚二磺酸比色法, 铵态氮测定采用 KCl 浸提-靛酚蓝比色法, 土壤质量含水量采用 105 °C 烘干法, 土壤 pH 值采用电位法(水土比 2.5:1), 以上各种理化性质每月测定 2 次。此外, 有机质含量采用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法, 有效磷采用 Olson 碳酸氢钠法, 考虑到有机质和有效磷变化性较小, 每月测定 1 次有机质和有效磷含量; 土壤总氮用元素分析(PE2400) 测定。按下式计算土壤孔隙含水量(WFPS):

$$\text{土壤孔隙度}(\%) = (1 - \text{土壤容重}/2.65) \times 100\%$$

土壤孔隙含水量(%) = (土壤质量含水量×土壤容重×100) / 土壤孔隙度

2.3 数据处理

采用 Excel 软件进行数据整理, SPSS16.0 软件做统计分析。图形的绘制采用 Sigmaplot10.0。

为了得到土壤 CO₂ 释放通量 F 对温度变化的敏感系数 Q_{10} , 采用如下指数模型^[14-16] 拟合 F 与 T 之间的关系:

$$F = \alpha e^{\beta T} \quad (2)$$

式中, T 为土壤表层温度或近地表大气温度(°C); α 为温度为 0°C 时的土壤 CO₂ 释放通量 β 为温度反应系数。

Q_{10} 通过下式确定^[17]:

$$Q_{10} = e^{10\beta} \quad (3)$$

3 结果与讨论

3.1 CO₂ 通量日变化及其控制因素

在油菜和玉米生长季分别进行的 6 次和 3 次 CO₂ 通量日变化观测结果表明, 试验田土壤一直表现为 CO₂ 的释放源。CO₂ 通量日变化一种表现为规律性变化, 另一种表现为非规律性变化(图 1)。在天气正常、没有人扰动情况下, CO₂ 通量呈现出白天高夜晚低的规律性日变化特征, 与气温和地表温度变化趋势一致。一天中, 排放量最大值出现在 13:00—15:00, 缓慢下降后在 24:00 左右达到最小值, 而后缓慢上升至次日中午又达到最大值。受多种环境因子共同影响, CO₂ 通量平均值在不同月份出现时间。很多研究利用一天中 9:00—11:00 这段时间来表征土壤 CO₂ 通量平均值和环境因子指标^[18], 不适用于本研究, 而 11:00—17:00 的不同时间段平均 CO₂ 通量能很好代表日变化平均值。在异常天气条件下, 比如冷空气过境或是阴雨天气, 昼夜温差不大时, 土壤 CO₂ 通量变化则表现为另一种变化趋势: 全天变化幅度很小, 没有白天夜晚的起伏变化。

温度是土壤呼吸作用的影响因子中最重要的一个^[19-21]。不同月份土壤 CO₂ 通量日变化与大气温度及土壤表层温度相关关系(表 2) 分析显示, 绝大多数 CO₂ 通量的日变化与温度呈现显著正相关。而且在玉米和油菜生长的不同月份, CO₂ 通量日变化形式基本相同。这种关系表明, 在较短时间尺度内, 当土壤条件、气候因素和植物体以及土壤微生物维持在一个较为稳定状态时, 温度是造成玉米和油菜田 CO₂ 通量日变化的主要驱动因素。

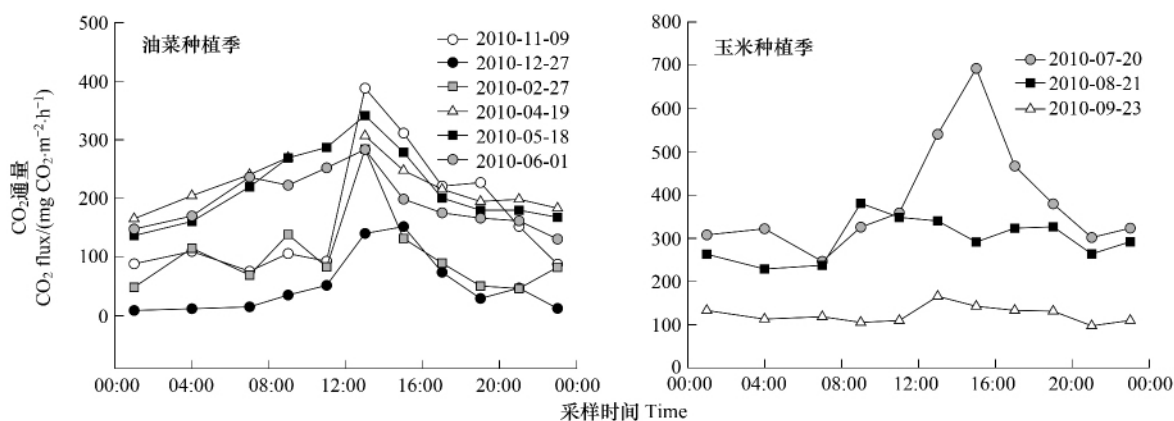


图 1 轮作期不同月份 CO₂ 通量日变化

Fig. 1 Diurnal change of CO₂ flux in different months during the crop rotation

3.2 CO₂ 通量变化的人为影响

土壤扰动造成 CO₂ 通量的显著增加。图 2 所示的是 2011 年 6 月 15 日 CO₂ 通量日变化, 其中在 6 月 15

表 2 各昼夜观测土壤 CO₂ 通量与温度相关性

Table 2 Correlation analysis between soil CO₂ flux and temperature in the diurnal observation

观测时间 Observation date	气温 Air temperature	土壤表层温度 Soil temperature in 5 cm depth	观测时间 Observation date	气温 Air temperature	土壤表层温度 Soil temperature in 5 cm depth
2010-11-09	0.775**	0.776**	2010-12-27	0.849**	0.823**
2011-02-27	0.644*	0.392	2011-04-19	0.843**	0.910**
2011-05-18	0.943**	0.858*	2011-06-01	0.649*	0.505
2011-07-20	0.872**	0.887**	2011-08-21	0.665*	0.283
2011-09-23	0.316	0.171			

* 表示相关性显著 (P<0.05) , ** 表示相关性极显著 (P<0.01)

号下午的土地翻耕(翻耕深度约为 20 cm,持续时间如图中阴影部分所示)使得 CO₂ 通量显著增加,在正常情况下出现释放低值的 21:00 至 23:00 出现释放峰值。其原因在于翻耕使得土壤中不稳定碳组分加速氧化,增加了土壤呼吸过程,同时破坏了土块和土壤团聚体,使其暴露在空气中,而土壤团聚体中具有更高的 CO₂ 浓度^[22]。有机质含量分析显示翻耕之后第 2 天土壤有机质含量降低至全年平均水平之下,证实翻耕加快了有机质分解^[23],导致 CO₂ 的大量释放。

3.3 CO₂ 通量季节变化及其控制因素

土壤 CO₂ 通量季节变化规律比较明显,与大气温度的季节动态变化总体上较为一致(图 3)。从 2010 年 12 月到 2011 年 8 月,CO₂ 通量呈现逐渐升高的趋势,最低值出现在气温最低的 2 月,最高值则出现在气温和土壤 WFPS 都最高的 8 月。2011 年 8 月之后,CO₂ 通量随着气温的降低开始回落。从整个轮作期看,各月份之间差异和波动比较大。统计结果表明,玉米生长期 CO₂ 通量平均值为(403.0±178.8) mg CO₂·m⁻²·h⁻¹,高于油菜生长期的(178.8±104.8) mg CO₂·m⁻²·h⁻¹,且两者存在显著性差异,其原因在于玉米生长期气温显著高于油菜,更利于微生物及根际的呼吸作用。轮作期土壤平均 CO₂ 通量为(271.1±176.4) mg CO₂·m⁻²·h⁻¹,这一通量值高于喀斯特地区次生林土壤的 CO₂ 通量((259.6±448.4) mg CO₂·m⁻²·h⁻¹),低于马尾松林土壤(491.7±288.9) mg CO₂·m⁻²·h⁻¹ 的通量^[11],位于二者之间,同时高于纬度略低的亚热带地区的鼎湖山混交林、松林土壤 CO₂ 通量(不含凋落物)(233.3±20.6)和(178.6±20.8) mg CO₂·m⁻²·h⁻¹^[24],这显示出轮作农田旱地是喀斯特地区重要的碳源。

根据公式(2)指数模型,采用大气温度对 CO₂ 通量进行指数拟合,得到的拟合方程为 $y = 46.444e^{0.0705x}$ ($R^2 = 0.867$, $P < 0.01$, $n = 17$) (图 4); 同样采用土壤表层

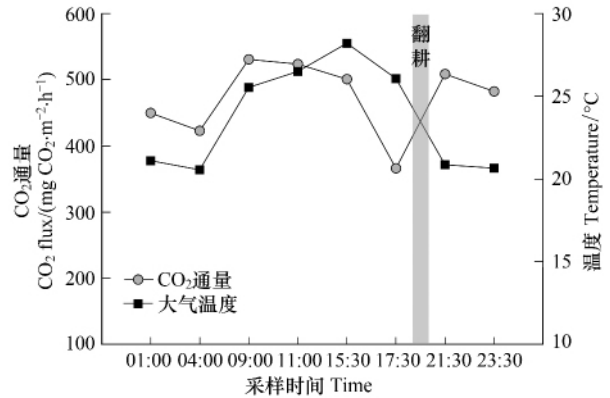


图 2 受扰动后土壤 CO₂ 通量及气温昼夜变化

Fig. 2 Soil CO₂ flux and temperature variation after disruption

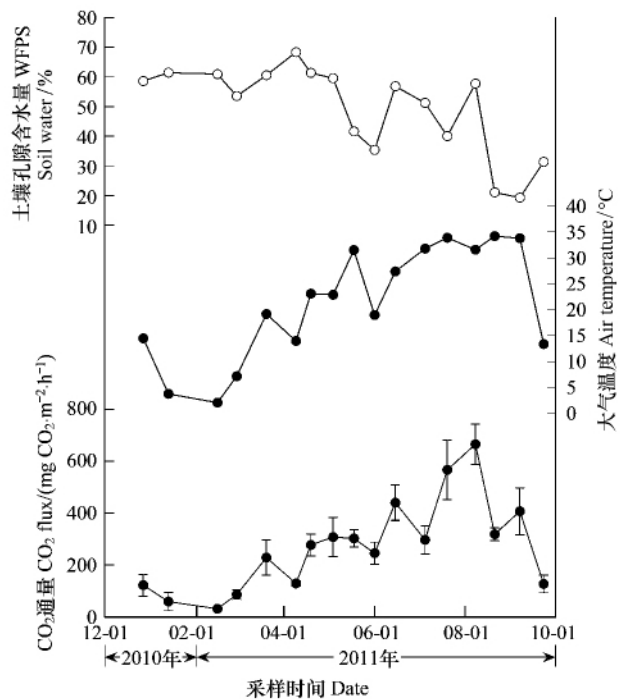


图 3 轮作期内 CO₂ 通量、大气温度以及 WFPS 季节变化

Fig. 3 Seasonal changes of CO₂ flux, temperature and WFPS during the crop rotation

温度对 CO_2 通量进行拟合,得到的拟合方程为 $y = 43.682e^{0.0768x}$ ($R^2 = 0.805$, $P < 0.01$, $n = 17$) (图5)。两方程能较好描述 CO_2 通量与大气温度以及地表温度的指数函数相关关系,表明温度是土壤 CO_2 通量变化的主要驱动因子,这与之前的研究结果是一致的^[16, 25-26]。对比相关系数,土壤 CO_2 通量与大气温度的相关性优于土壤表层温度。 Q_{10} 通常被用来土壤呼吸对温度变化的敏感程度^[14, 21, 27]。根据公式(3),可以计算油菜—玉米轮作农田基于大气温度和土壤地表温度的 Q_{10} 分别为 2.02 和 2.16,略高于喀斯特地区马尾松林土壤的 1.92^[11],也高于纬度略低的鼎湖山季风常绿阔叶林的 1.86^[24],以及针阔叶混交林的 2.00^[18],显示了在全球变暖背景下,轮作旱地地表 CO_2 排放对于温度升高的响应比相同气候条件下的部分森林生态系统更敏感。

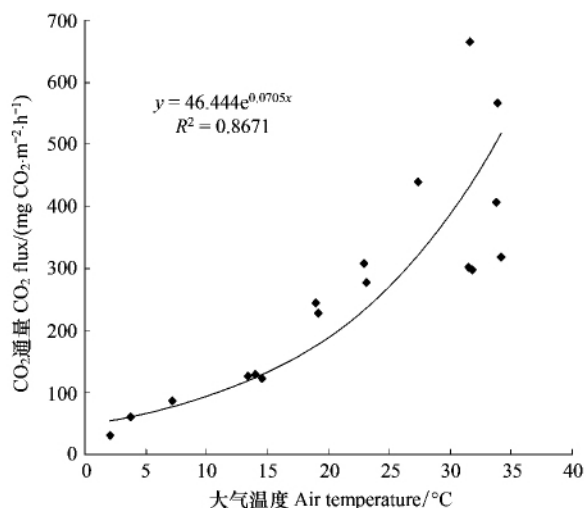


图4 土壤 CO_2 通量与大气温度的关系

Fig. 4 Relationship between soil CO_2 flux and air temperature

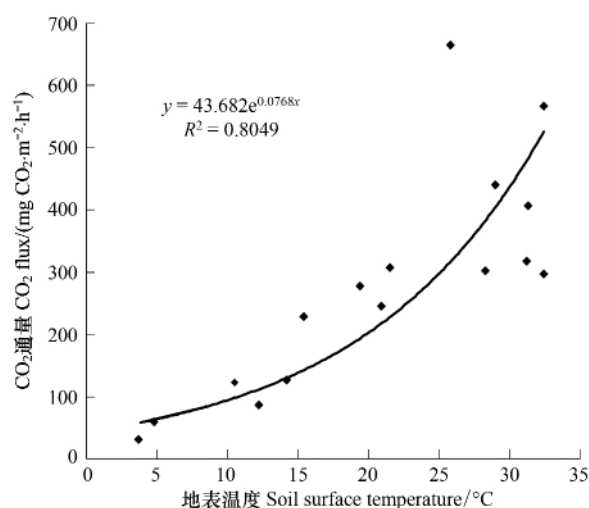


图5 土壤 CO_2 通量与土壤表层温度的关系

Fig. 5 Relationship between soil CO_2 flux and soil temperature in 5cm depth

土壤含水量对于植物根系、微生物群落的数量和活动有很大影响,是影响 CO_2 通量另一重要的因子^[28]。将整个轮作期的 CO_2 通量与土壤 WFPS(变化范围在 19.3%—68.3%,平均值为 49.3%,变异系数为 0.30) 进行数理统计分析,结果表明:两者之间没有显著的线性相关关系($R^2 < 0.1$)。进一步将油菜和玉米的 CO_2 通量与土壤 WFPS 分别作线性相关分析,结果表明,油菜生长期间的 CO_2 通量与土壤 WFPS 表现为负相关($R^2 = 0.164$, $n = 10$),但玉米生长期两者之间表现为正相关($R^2 = 0.21$, $n = 7$)。土壤含水量对于土壤呼吸作用的影响较为复杂。在土壤含水量超过一定阈值时,氧气扩散受阻,土壤微生物呼吸速率受到抑制^[29];当土壤含水量较低时,土壤根际微生物及根系对水分的依赖性加强,土壤 CO_2 通量会受土壤温度和含水量的共同影响,随含水量的增加而增加^[30]。Xu 和 Qi^[17] 对黄松林的研究表明,当土壤体积含水量 $< 19\%$ 时,土壤呼吸强度和体积含水量正相关;土壤体积含水量 $> 19\%$ 时,二者负相关。本研究油菜生长期,平均土壤 WFPS 为 56.1% (相应土壤体积含水量为 28.1%),变异系数为 0.18。土壤含水量在很长一段时间维持在一个相对较高状态,可能成为土壤呼吸的限制因子。玉米生长期,平均土壤 WFPS 为 39.6% (相应土壤体积含水量为 19.8%),显著低于油菜生长期 ($P < 0.05$)。8—9 月土壤体积含水量低至 10% 左右,此情况下,含水量可能是土壤呼吸作用增强的驱动因子。

Kucera 和 Kirkham^[31] 指出,只有在土壤水分达到土壤微生物永久性萎蔫点或者超过了田间最大持水量的情况下,土壤 CO_2 通量才会减少。如果所观测到的水分变化没有超出极端范围,不足以影响土壤微生物与植物根系的活动,则难以检测出水分对土壤呼吸的影响。在本研究中,土壤含水量并没有超出极端范围,与土壤 CO_2 通量之间相关关系也没有达到显著水平,表明水分并没有成为本实验观测期间影响 CO_2 通量的最主要限制因子。

3.4 土壤 pH 对 CO₂ 通量的影响

在 CO₂ 通量监测期间, 采集试验田土壤测定理化性质, 主要是 pH 值、土壤有机质含量、硝态氮、铵态氮和有效磷(表 1)。相关分析表明, CO₂ 通量和 pH 达到显著正相关关系($R^2 = 0.398$, $P < 0.01$, $n = 17$), 显示了 pH 的升高有利于 CO₂ 的释放。pH 的升高能促进微生物活性, 进而提高 CO₂ 通量, 这在世界上其它地区土壤碳通量研究中也得到证实^[32-33]。已有研究表明土壤微生物维持生物活性适宜的 pH 值最小为 3, 最大是 7—8^[34]; 当 pH 值 > 9 时, 土壤呼吸作用可能受抑制而减弱^[33], 本研究土壤 pH 均值为 8.3, 因而升高时对土壤呼吸有促进作用。

3.5 国内不同地区旱地土壤 CO₂ 通量比较

将本研究中 CO₂ 通量与国内其他地区相近植被的结果进行比较如表 3。研究区旱地农田 CO₂ 通量处于同属于亚热带地区的江西鹰潭^[35]、四川盆地^[36]的旱地农田 CO₂ 通量变化范围之内。除了只有一季玉米观测结果的山西农田^[37], 研究区亚热带农田土壤 CO₂ 通量大于温带农田, 反映出地表 CO₂ 通量随纬度降低而升高的趋势, 出现这种现象的原因除了各自研究区的作物及土壤类型差异外, 可能主要原因在于低纬度地区较高的温度更有利于土壤呼吸。

旱地生态系统的碳收支(NEP) 由土壤异养呼吸和净初级生产力(NPP) 共同决定。为精确估算生态系统碳收支, 必须对自养呼吸和异养呼吸占土壤呼吸的比例进行量化^[38]。这是以后喀斯特地区旱地碳通量研究需要加强的地方。

表 3 国内和世界上不同地区旱地农田土壤 CO₂ 通量值的比较

Table 3 Comparison of CO₂ fluxes in upland field of different areas in China

地点 Site	作物类型 Crop	测量时间 Observation time	土壤 CO ₂ 通量/(mg CO ₂ ·m ⁻² ·h ⁻¹) Soil CO ₂ flux	文献来源 References
贵州	油菜-玉米	1a	271.1±176.4	本研究
四川	玉米-小麦	1a	182.21	[36]
江西	小米-大麦	1a	161.0—324.2	[35]
山西	玉米	1季	418.2	}
陕西	小麦-玉米	1a	183.1	[39]
山东	小麦	1季	145.58±137.51	[40]
西藏	冬小麦	1a	241.7	[41]

4 结论

(1) 贵州喀斯特地区轮作旱地土壤表现为 CO₂ 的释放源, 由于生长期气温的差异, 油菜生长季 CO₂ 通量, 显著小于玉米生长季 CO₂ 通量。整个轮作期的平均 CO₂ 通量为(271.1±176.4) mg CO₂·m⁻²·h⁻¹, 显示轮作农田土壤是这一地区重要的碳源。

(2) CO₂ 通量日变化呈现白天高夜晚低的特征, 主要受温度变化的影响, 与大气温度和地表温度相关性显著。CO₂ 通量的季节变化与大气温度或是地表温度呈现显著的指数正相关关系, 表明温度是土壤呼吸最重要的驱动因子。CO₂ 通量与土壤湿度(WFPS) 相关关系不显著, 但土壤含水量过高或过低时, 会和温度协同影响土壤呼吸。研究区基于大气温度的 Q_{10} 为 2.02, 表明轮作旱地 CO₂ 通量对温度的响应较为敏感。

(3) 传统耕作方式的翻耕能在短时间内促进 CO₂ 排放, 加快土壤有机质分解。

(4) CO₂ 通量与土壤 pH 存在极显著线性正相关关系, 说明对于喀斯特旱地土壤, pH 的升高能促进微生物的活动, 进而提高土壤呼吸作用。

References:

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623.
 [2] Trumbore S. Carbon respired by terrestrial ecosystems—recent progress and challenges. *Global Change Biology*, 2006, 12(2): 141–153.

- [3] Peters GP , Marland G , Le Quéré C , Boden T , Canadell J G , Raupach M R. Rapid growth in CO₂ emissions after the 2008—2009 global financial crisis. *Nature Climate Change* , 2011 , 2(1) : 2–4.
- [4] Bond-Lamberty B , Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature* , 2010 , 464(7288) : 579–582.
- [5] Jenkinson D , Adams D , Wild A. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming. *Nature* , 1991 , 351(6324) : 304–306.
- [6] Valentini R , Matteucci G , Dolman A , Schulze E D , Rebmann C , Moors E , Granier A , Gross P , Jensen N , Pilegaard K. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature* , 2000 , 404(6780) : 861–865.
- [7] FAO. World agriculture: towards 2015/2030: an FAO perspective. Rome: Earthscan/James & James , 2003.
- [8] Zhao Z Q , Hou L S , Cai Y L. The process and mechanism of soil degradation in Karst area in Southwest China. *Earth Science Frontiers* , 2006 , 13(3) : 185–189.
- [9] Zheng Y C , Wang S J. Geological cause of calcareous soil erosion and land rocky desertification in Karst area , Guizhou province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* , 2002 , 11(5) : 461–465.
- [10] Liu F , Liu C Q , Wang S L , Lü Y C. Fluxes of CO₂ from soils in central of Guizhou province and its controlling factors. *Ecology and Environment* , 2008 , 17(3) : 1120–1124.
- [11] Cheng J Z , Lee X Q , Zhou Z H , Wang B , Xing Y , Peng Y , Cheng H G , Yan H , Pang X B , Huang D K , Zhang Y L. Studies on soil CO₂-C fluxes of several major types of land covers in the Karst region of southwestern China. *Geochimica* , 2010 , 39(3) : 258–265.
- [12] Jiang T M , Wei C F , Xie D T , Xiao H J , Xia J H , Deng Y. Study on water holding capacity of yellow soil in Karst area of central Guizhou. *Journal of Soil and Water Conservation* , 2006 , 20(6) : 25–29.
- [13] Lu R K. Analytical Methods of Soil and Agricultural Chemistry. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press , 2000: 12–289.
- [14] Luo Y , Wan S , Hui D , Wallace LL. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature* , 2001 , 413(6856) : 622–625.
- [15] Jia B , Zhou G. Integrated diurnal soil respiration model during growing season of a typical temperate steppe: Effects of temperature , soil water content and biomass production. *Soil Biology and Biochemistry* , 2009 , 41(4) : 681–686.
- [16] Han G , Zhou G , Xu Z , Yang Y , Liu J , Shi K. Soil temperature and biotic factors drive the seasonal variation of soil respiration in a maize (*Zea mays* L.) agricultural ecosystem. *Plant and Soil* , 2007 , 291(1) : 15–26.
- [17] Xu M , Qi Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Global Change Biology* , 2001 , 7(6) : 667–677.
- [18] Zhang D Q , Sun X M , Zhou G Y , Yan J H , Wang Y S , Liu S Z , Zhou C Y , Liu J X , Tang X L , Li J. CO₂ efflux from different forest soils and impact factors in Dinghu Mountain , China. *Sci China(D)* , 2006 , 36(A01) : 130–138.
- [19] Fang C , Moncrieff J. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology and Biochemistry* , 2001 , 33(2) : 155–165.
- [20] Raich J , Schlesinger W. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B* , 1992 , 44(2) : 81–99.
- [21] Reichstein M , Rey A , Freibauer A , Tenhunen J , Valentini R , Banza J , Casals P , Cheng Y , Grunzweig J , Irvine J. Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability , temperature and vegetation productivity indices. *Global Biogeochemical Cycles* , 2003 , 17(4) : 1104.
- [22] Reicosky D , Archer D. Moldboard plow tillage depth and short-term carbon dioxide release. *Soil and Tillage Research* , 2007 , 94(1) : 109–121.
- [23] Anderson D , Coleman D C. The dynamics of organic matter in grassland soils. *Journal of Soil and Water Conservation* , 1985 , 40(2) : 211–216.
- [24] Zhou C Y , Zhou G Y , Zhang D Q , Wang Y H , Liu S Z. CO₂ efflux from different forest soils and impact factors in Dinghu Mountain , China. *Sci China(D)* , 2004 , 34(II) : 175–182.
- [25] Lloyd J , Taylor J. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional ecology* , 1994: 315–323.
- [26] Zhou G S , Jia B R , Han G X , Zhou L. Toward a general evaluation model for soil respiration (GEMSR) . *Science in China Series C: Life Sciences* , 2008 , 51(3) : 254–262.
- [27] Friedlingstein P , Dufresne J L , Cox P , Rayner P. How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle? *Tellus B* , 2003 , 55(2) : 692–700.
- [28] Howard D , Howard P. Relationships between CO₂ evolution , moisture content and temperature for a range of soil types. *Soil Biology and Biochemistry (United Kingdom)* , 1993.
- [29] Davidson E A , Janssens I A , Luo Y. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q₁₀. *Global Change Biology* , 2006 , 12(2) : 154–164.
- [30] Raich J W , Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles* , 1995 , 9(1) : 23–36.
- [31] Kucera C , Kirkham D R. Soil respiration studies in tallgrass prairie in Missouri. *Ecology* , 1971: 912–915.
- [32] Ellis S , Howe M , Goulding K , Mugglestone M , Dendooven L. Carbon and nitrogen dynamics in a grassland soil with varying pH: Effect of pH on

- the denitrification potential and dynamics of the reduction enzymes. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(3): 359–367.
- [33] Reth S, Reichstein M, Falge E. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO₂ efflux — A modified model. *Plant and Soil*, 2005, 268(1): 21–33.
- [34] Scheffer F, Schachtschabel P. *Lehrbuch der Bodenkunde*. Berlin: Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 2002.
- [35] Lou Y, Li Z, Zhang T, Liang Y. CO₂ emissions from subtropical arable soils of China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(11): 1835–1842.
- [36] Wang X G, Zhu bo, Wang Y Q, Zheng X H. Soil respiration and its sensitivity to temperature under different land use conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 1960–1968.
- [37] Liu S, Yan C R, He W Q, Liu Q. Soil respiration and it's affected factors under different tillage systems in dryland production systems. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(11): 2919–2924.
- [38] Larionova A, Yermolayev A, Blagodatsky S, Rozanova L, Yevdokimov I, Orlinsky D. Soil respiration and carbon balance of gray forest soils as affected by land use. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 27(3): 251–257.
- [39] Dai W H, Wang Y Q, Huang Y, Liu J, Zhao L. Study on soil CO₂ emission in agri-ecosystems. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry*, 2004, 32(12): 1–7.
- [40] Chen S Y, Li J, Lu P L, Wang Y H, Yu Q. Soil respiration characteristics in winter wheat field in North China Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(9): 1552–1560.
- [41] Shi P L, Zhang X Z, Zhong Z M, Ouyang H. Diurnal and seasonal variability of soil CO₂ efflux in a cropland ecosystem on the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(3): 220–233.

参考文献:

- [8] 赵中秋, 后立胜, 蔡运龙. 西南喀斯特地区土壤退化过程与机理探讨. *地学前缘*, 2006, 13(3): 185–189.
- [9] 郑永春, 王世杰. 贵州山区石灰土侵蚀及石漠化的地质原因分析. *长江流域资源与环境*, 2002, 11(5): 461–465.
- [10] 刘芳, 刘丛强, 王仕禄, 吕迎春. 黔中土壤 CO₂ 的释放特征及其影响因素. *生态环境*, 2008, 17(3): 1120–1124.
- [11] 程建中, 李心清, 周志红, 王兵, 邢英, 彭艳, 程红光, 闫慧, 庞小兵, 黄代宽. 西南喀斯特地区几种主要土地覆被下土壤 CO₂-C 通量研究. *地球化学*, 2010, 39(003): 258–265.
- [12] 蒋太明, 魏朝富, 谢德体, 肖厚军, 夏锦慧, 邓英. 贵州中部喀斯特地区黄壤持水性能的研究. *水土保持学报*, 2007, 20(6): 25–29.
- [13] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 12–289.
- [18] 张德强, 孙晓敏, 周国逸, 闫俊华, 王跃思, 刘世忠, 周存宇, 刘菊秀, 唐旭利, 李炯. 南亚热带森林土壤 CO₂ 排放的季节动态及其对环境变化的响应. *中国科学: D 辑*, 2006, 36(A01): 130–138.
- [24] 周存宇, 周国逸, 张德强, 王迎红, 刘世忠. 鼎湖山森林地表 CO₂ 通量及其影响因子的研究. *中国科学: D 辑*, 2004, 34(II): 175–182.
- [36] 王小国, 朱波, 王艳强, 郑循华. 不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性. *生态学报*, 2007, 5: 1961–1968.
- [37] 刘爽, 严昌, 何文清, 刘勤. 不同耕作措施下旱地农田土壤呼吸及其影响因. *生态学报*, 2010, 11: 2919–2924.
- [39] 戴万宏, 王益权, 黄耀, 刘军, 赵磊. 农田生态系统土壤 CO₂ 释放研究. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2005, 32(12): 1–7.
- [40] 陈述悦, 李俊, 陆佩玲, 王迎红, 于强. 华北平原麦田土壤呼吸特征. *应用生态学报*, 2004, 15(9): 1552–1560.