

鄂南 4 种典型土地利用方式红壤 CO₂ 排放及其影响因素

杜丽君, 金涛, 阮雷雷, 陈涛, 胡荣桂*

(华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要:以湖北省咸宁地区分布的红壤为研究对象, 采用静态箱法对 4 种典型土地利用方式(水稻-油菜轮作田, 旱地, 林地, 果园)土壤 CO₂ 的排放特征及其相关影响因子进行了观测研究. 结果表明, 4 种利用方式土壤 CO₂ 的年排放总量从高到低分别为水稻-油菜轮作田 1 129 g/(m²·a), 果园 828 g/(m²·a), 旱地 632 g/(m²·a), 林地 533 g/(m²·a). 土壤 CO₂ 排放通量呈现明显的季节性变异, 水田夏季淹水期排放低, 而其它 3 种土壤都是夏季最高, 春秋次之, 冬季最低, 并与对应的大气温度、土壤温度变化趋势基本一致. 其中 5 cm 地温与 4 种土壤 CO₂ 排放通量均成极显著的相关关系, 且以林地的相关性最大. 除水田外, 其它土壤 CO₂ 排放通量与大气温度均呈显著正相关关系. 根据 5 cm 地温与 CO₂ 排放通量的相关方程计算得出, 4 种利用方式红壤的 Q_{10} 分别为水田 1.51, 果园 1.88, 林地 2.08, 旱地 2.7. 土壤 CO₂ 排放通量与土壤 WFPS 之间并没有明显的相关关系. 土壤可溶性有机碳(DOC)含量与 CO₂ 排放通量的变化趋势基本一致, 且 DOC 在降水或淹水的情况下显著增大.

关键词: 静态箱法; CO₂ 排放; 土地利用方式; 红壤

中图分类号: X16; X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)07-1607-07

CO₂ Fluxes from Red Soil Under Four Land Use Types in Mid-Subtropical, China

DU Li-jun, JIN Tao, RUAN Lei-lei, CHEN Tao, HU Rong-gui

(College of Resources and Environmental Science, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: CO₂ fluxes from red soil under different land use (paddy, upland, woodland and orchard) were measured at Xianning city, Hubei province with closed chamber method. The results showed that the annual CO₂ emission were 1 129, 632, 533, and 828 g/(m²·a) for paddy, upland, woodland, and orchard respectively. Soil CO₂ fluxes revealed seasonal fluctuations, with the tendency that maximum value was in summer, minimum was in winter and intermediate in spring and autumn except for paddy soil. CO₂ fluxes for paddy soil were significantly higher than the other soils except it was submerged. An exponential relationship between soil CO₂ fluxes and soil temperature at 5cm depth could be received. Air temperature also had significant positive correlation with soil CO₂ fluxes except for paddy soil. The Q_{10} values were 1.51 (paddy), 1.88 (orchard), 2.08 (woodland), 2.7 (upland) respectively based on the exponential equation between soil CO₂ fluxes and soil temperature. The results indicated that there was no significant correlation between CO₂ fluxes and soil moisture. In addition, DOC had the same seasonal tendency as CO₂ fluxes, and it increased when soil was irrigated or rained.

Key words: closed chamber method; CO₂ fluxes; land use; red soil

自工业革命以来, 人类活动对生物圈的影响已从区域扩展到全球, 大量化石燃料的消耗及地表覆盖物的变化, 特别是森林砍伐, 使大气中 CO₂、CH₄ 和其它温室气体浓度逐年增加, 对地球生态系统产生深刻影响. CO₂ 作为一种主要的温室气体, 其源、汇及通量的测定受到格外重视. 土壤生态系统作为一个巨大的碳库(1.394×10^{18} g), 相当于地表以上大气圈、水圈和生物圈含碳量的总和, 所以, 土壤中碳含量的微小改变将使大气 CO₂ 浓度发生很大的变化^[1], 因此研究土壤呼吸对探讨全球气候变化具有十分重要的意义, 正成为全球碳循环研究的热点.

近年来, 在气候与环境变化研究中, 不同区域之土壤-植被-大气相互作用及其对全球和区域气候生

态系统的影响已成为最重要的研究内容之一. 其目的就是要明确陆地生态系统在全球性碳循环中源和汇的关系及其对全球变化的贡献^[2]. 20 世纪 70 年代以来, 国外就开始重视对生态系统 CO₂ 排放通量的研究^[3,4]. 近年来, 国外不仅开展了自然生态系统释放 CO₂ 过程, 还进行了如大气 CO₂ 浓度升高对土壤呼吸及其它生物过程影响方面的模拟实验研究. 目前, 国内对森林^[5,6] 和草原生态系统^[7,8] 的 CO₂ 排放研究比较多, 但对其它生态系统释放 CO₂ 的过程和

收稿日期: 2006-08-21; 修订日期: 2007-01-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(40471131); 教育部重点基金项目(03118)

作者简介: 杜丽君(1980~), 女, 硕士, 助教, 主要研究方向为土壤生态环境, E-mail: dulijun@webmail.hzau.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: honggui@163.com

特征研究鲜见报道.我国红壤地区位于亚热带季风湿润气候带,面积广阔,水热资源丰富,地域特点独特,土地利用方式多种多样,其土壤呼吸作用与北方干旱半干旱地区相比差异较大,但对该区域土壤CO₂排放特征研究较少,尤其缺乏CO₂排放的季节性变动及其影响因子的长期定位观测资料,影响了对该区域碳收支平衡的准确评价.

本研究采用静态箱法对湖北省咸宁地区4种不同土地利用方式红壤CO₂排放通量进行了测定.分析了该地区土壤CO₂排放通量的季节变化特征及其与环境因子(包括土壤温度、大气温度、水分及有机碳水平)之间的关系.以期科学评估我国南方红壤地区的土壤碳库动态,以及中国陆地生态系统碳源、汇总量研究提供基础数据和依据.

表 1 供试土壤基本理化性状

Table 1 Selected soil chemical and physical properties

土地利用类型	pH	有机碳 /g·kg ⁻¹	田间最大持水量 /g·(100 g) ⁻¹	容重 /g·mL ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	机械组成/%		
						砂粒	粉粒	粘粒
水稻-油菜								
轮作田	5.11	16.87	56.83	1.37	2.55	59.12	34.44	6.44
旱地	5.15	9.33	47.68	1.23	1.90	49.01	48.63	2.36
林地	5.02	9.95	46.76	1.36	1.87	18.24	79.56	2.2
果园	5.07	6.29	51.80	1.24	1.38	51.32	46.64	2.04

响比较小的地方,尽量保证采集到的土样能够反映天然状态的特性.

1.2 采样时间与方法

试验地主要为水稻-油菜轮作田(水稻-油菜轮作,10月中旬水稻收割,移栽油菜),旱地(芝麻),林地(杉树林,年龄为26 a),果园(桃,年龄为11 a)等4块地.除林地不施肥外,其余3块土地均采用常规施肥法.试验自2004-07~2005-12.采样时间选在上午09:00~11:00之间,约10 d取样1次.

采样方法为静态箱法测定CO₂排放通量.用一圆形不绣钢圆桶(高为25 cm,直径为20 cm)作为气体采样箱.该箱顶部密封,有2孔分别固定有玻璃管,一管连接一气袋置于箱内,用来调节采样箱内的压强,一管接一具有三通阀的橡胶管用来采集气样(此管深入箱顶下大约1/3处).采样的时候,首先剪去地面杂草,然后去除凋落物,在作物行间进行.将采样箱垂直插入土壤中5 cm并将箱周围压实,以防漏气.20 min后,用聚丙烯注射器通过采样管将300 mL气体转移密封袋中,同时采取大气样作为空白^[9].在相隔2~3 m的范围以相同的方法重复采3个点.在采集气体样品的同时,测定箱内温度(在箱内斜放置一温度计以测定箱内温度),大气温度(测

1 材料与方法

1.1 试验点自然环境

试验设在湖北省咸宁市(东经133°31′~144°58′,北纬29°02′~30°18′)贺胜桥镇.境内多低丘、垅岗,具有典型的平原-丘陵过渡地带特征,属于中亚热带向北亚热带过度的气候区,呈较明显的半湿性季风气候特点.该地区气候温和,降水充沛,日照充足,四季分明,雨热同期,无霜期长,冬季偏冷干燥,夏季高温多雨,年平均气温16.8℃,年平均降水量为1 577.4 mm,集中在6~7月.

该地区土壤以第四纪粘土沉积物母质发育的棕红壤为主,呈弱酸性,质地粘重.耕层(0~20 cm表层)土壤的基本理化性质见表1.采样点设在人为影

定接近采样箱高度的大气温度),地下5 cm、10 cm温度.气体CO₂的浓度用红外气体分析仪(ZFP-5, Fuji Electric Co., Ltd., Tokyo, Japan)测定.

采集土样(0~20 cm土层),带回实验室后,测定含水量,然后去杂并过2 mm筛,一部分鲜样于4℃以下保存,用来测定土壤可溶性有机碳^[10]等项目;一部分土壤风干磨细,供测定pH、有机质、全氮等.

1.3 数据计算与统计

CO₂排放通量的计算公式如下:

$$F = \rho \times V/A \times c/t \times 273/T \times \alpha$$

式中, F 为CO₂排放通量[mg/(m²·h)], ρ 为标准状况下CO₂的浓度(1.98 kg·m⁻³); V (m³)和 A (m²)是采样箱的体积与底面积; c/t [10⁻⁶ m³/(m³·h)]为在一定时间内CO₂浓度变化的速率; T 是绝对温度; α 是CO₂换算到C(12/44)的转换因子^[9].

在本研究中,CO₂排放通量与温度的关系采用国内外广泛认同的指数形式模型进行描述,其方程式如下:

$$R_s = ae^{bT}$$

式中, R_s 为土壤呼吸(CO₂排放通量); T 为气温(绝

对温度); a 是温度为 0°C 时的土壤呼吸, 也有研究者将之称为基础呼吸; b 为温度反应系数^[17]. Q_{10} 值通过下式确定: $Q_{10} = e^{10b}$.

土壤充水孔度(WFPS)代表了土壤的水分饱和和程度, 一般用 WFPS 表示, 计算方法如下:

$$\text{WFPS}(\%) = \frac{\text{土壤重量含水量} \times \text{土壤容重}}{\text{土壤总孔隙度}}$$

式中, 土壤总孔隙度 = $1 - \text{土壤容重}/2.65$.

2 结果与讨论

2.1 不同土地利用类型的 CO₂ 排放通量

图 1 是 4 种不同土地利用方式红壤 CO₂ 排放通量、大气温度、土壤温度和水分季节性变化曲线图. 4 种土地利用方式红壤 CO₂ 排放通量均呈现明显的季节性变化[图 1(a)], 且在观测试验期间, 均是夏季高, 春秋季节次之, 冬季最低, 并与对应的大气温度和土壤温度的变化趋势基本一致[图 1(b)、1(c)].

表 2 是 CO₂ 排放通量的 4 季平均值, 其中水田夏季的排放量是冬季的 8 倍, 是春秋季节的 2.7 倍, 并且水田土壤 CO₂ 排放通量在非淹水期间是淹水期间的 4 倍; 旱地夏季排放是冬季的 13 倍, 是春秋季节的 2 倍; 林地夏季排放是冬季的 3.4 倍, 春秋季节

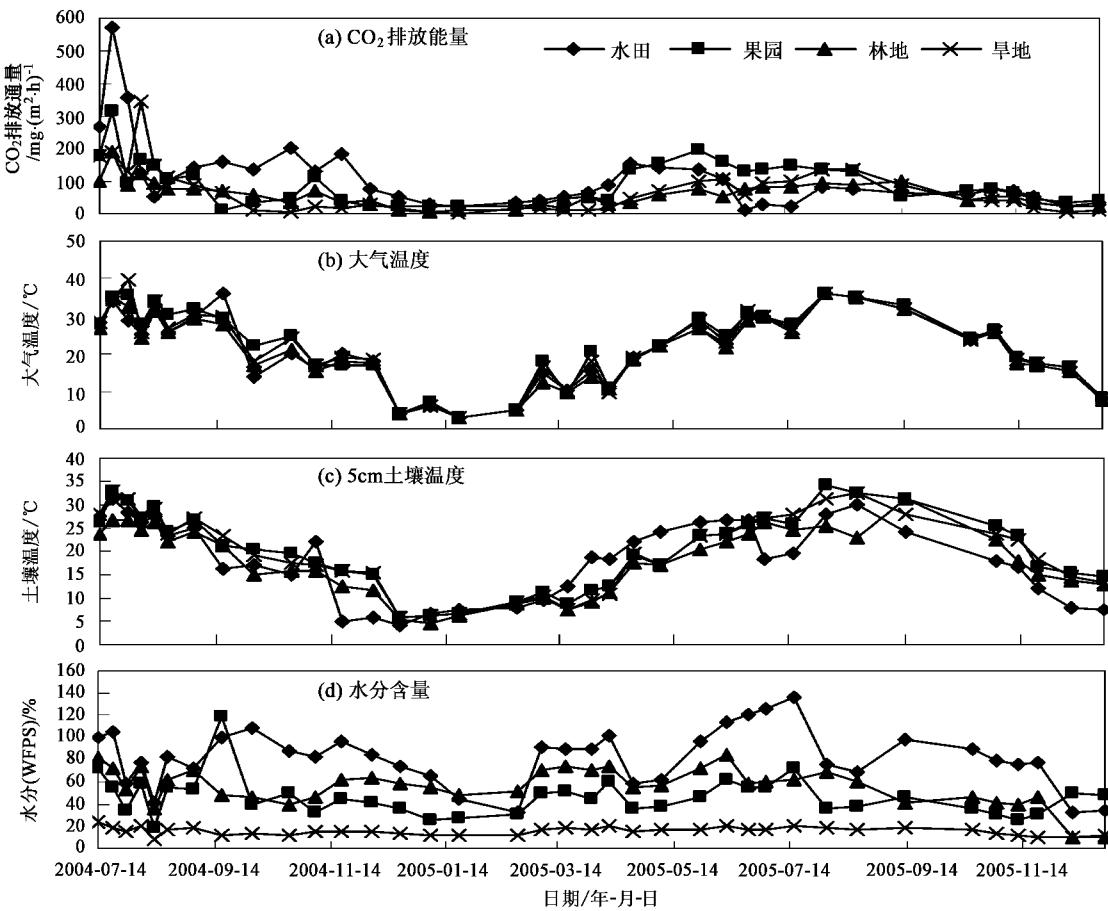


图 1 不同土地利用方式红壤 CO₂ 排放通量、大气温度、5 cm 土壤温度、水分含量(WFPS)的季节变化
Fig.1 Seasonal variation of soil respiration rates, air temperature, soil temperature in 5 cm depth, and soil moisture(WFPS)

节的 1.5 倍; 果园夏季排放是冬季的 3.6 倍, 是春秋季节的 1.8 倍. 由此可见, 旱地季节差异最大.

比较不同土地利用方式红壤 CO₂ 排放通量可以看出, 不同利用方式土壤的 CO₂ 排放通量存在较大的差异. 表 3 是 4 种不同土地利用方式红壤 CO₂ 排放通量统计表, 从中可以看出, 4 种土地利用方式土壤 CO₂ 平均排放通量是水田 > 果园(桃) > 旱地

表 2 土壤 CO₂ 排放速率 4 季比较¹⁾/mg·(m²·h)⁻¹

Table 2 Seasonal comparison of soil respiration rate/mg·(m²·h)⁻¹

季节	水田	旱地	林地	果园
春季	98.17	41.26	46.51	89.94
夏季	55.94(淹水)/221.41	106.06	79.08	139.91
秋季	64.75	45.55	57.02	62.1
冬季	27.52	8.07	23.26	38.6
全年	1 129	632	533	828

1)水田夏季分别计算了淹水及非淹水期 CO₂ 排放值

> 林地(杉). 水田无论是排放均值还是排放总量都明显高于其他土壤, 主要是因为水田土壤的有机质含量较高, 在适宜的条件下, 有机质分解会释放大量的 CO_2 . 从年间排放总量来看, 水田远高于其它土地利用方式, 且年间波动比较大. 如在 2004 年夏季水

田 CO_2 排放通量明显高于其它利用类型, 这主要是因为当时温度高且处落干时期, 故其排放量高达 $567.77 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. 林地年间排放量最低, 这可能是由于林地土壤长期处在阴暗的环境下, 土壤温度比较低所造成的.

表 3 4 种不同土地利用方式红壤 CO_2 排放通量统计值 ($n = 34$)

土地利用类型	平均值	变化范围	标准差	变异系数/%	年排放总量
	$/\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$	$/\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$			$/\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$
林地	60.88	7.75 ~ 187.23	39.28	64.53	533.31
旱地	72.09	6.73 ~ 342.04	71.56	107.57	631.51
果园	94.57	9.27 ~ 314.86	74.46	78.74	828.43
水田	128.84	14.59 ~ 567.77	109.12	91.27	1 128.64

不同土地利用方式(如耕作, 灌溉条件等)不仅改变了地表植被, 而且改变了土壤透气性, 从而使土壤有机质含量、微生物的组成和活性、根系生物量发生改变, 相应的土壤呼吸也大不相同^[11, 12]. 尤其在当前人类活动对自然界的影 响越来越大的情况下, 土地利用方式的改变对全球土壤 CO_2 排放通量的影响是十分巨大的^[18].

本研究中, 4 种土地利用方式土壤 CO_2 排放通量的变化范围在 $7 \sim 568 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 之间. 这些结果基本都在 Raich 等所报道的温带土壤 CO_2 排放通量的范围内 $[21 \sim 506 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$ ^[1]. 我国对农田土壤 CO_2 年排放通量报道不多, 娄运生等在我国同纬度地区测得土壤呼吸速率在 $374 \sim 745 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之

间^[13]. 本研究中, 土壤呼吸速率在 $533 \sim 1 129 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间变化, 变化范围大于娄运生等的结果. 而周志田等在江西省千烟洲地区的实验测得 CO_2 年排放总量依次为玉米地 $5 799 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 、柑桔园 $4 176 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 、水稻田 $3 388 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 和杉木林 $3 119 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ^[14], 其结果明显高于本研究测定结果.

2.2 温度对 CO_2 排放通量的影响

温度对土壤 CO_2 排放的影响是通过多种途径起作用的, 如可以提高作物根系的呼吸, 加速土壤中有机质的分解和提高微生物活性等, 从而促进 CO_2 的释放. 经过分析发现, CO_2 排放通量与大气温度(图 2)、土壤 5 cm 深处温度(图 3)呈正相关, 其中以土壤 5 cm 处温度与 CO_2 排放通量的相关性最好, 其

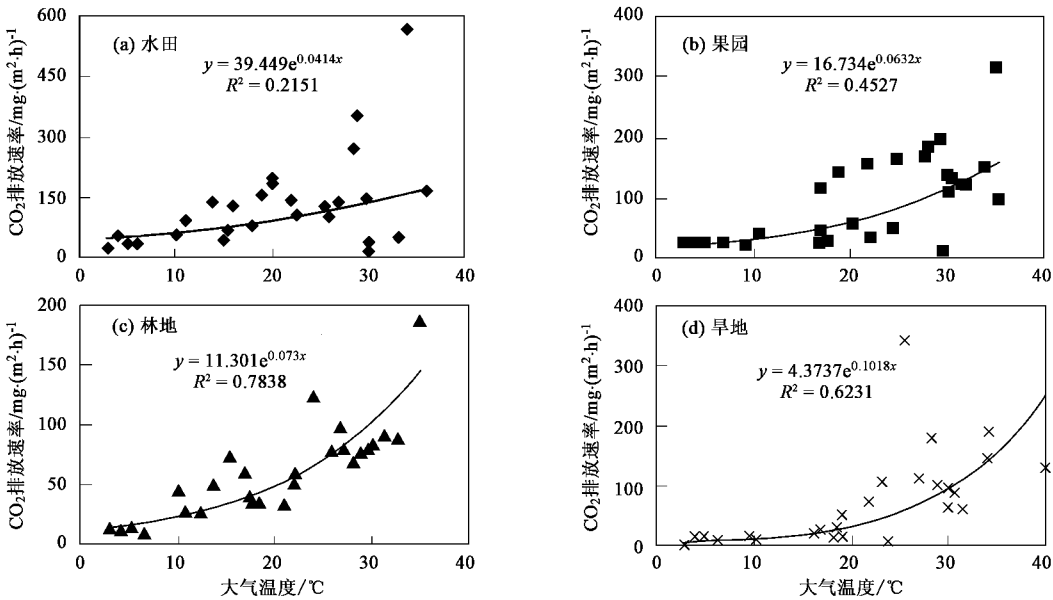


图 2 4 种土地利用方式土壤呼吸速率与大气温度的关系

Fig. 2 Relations between soil respiration rate and the air temperature in different land use

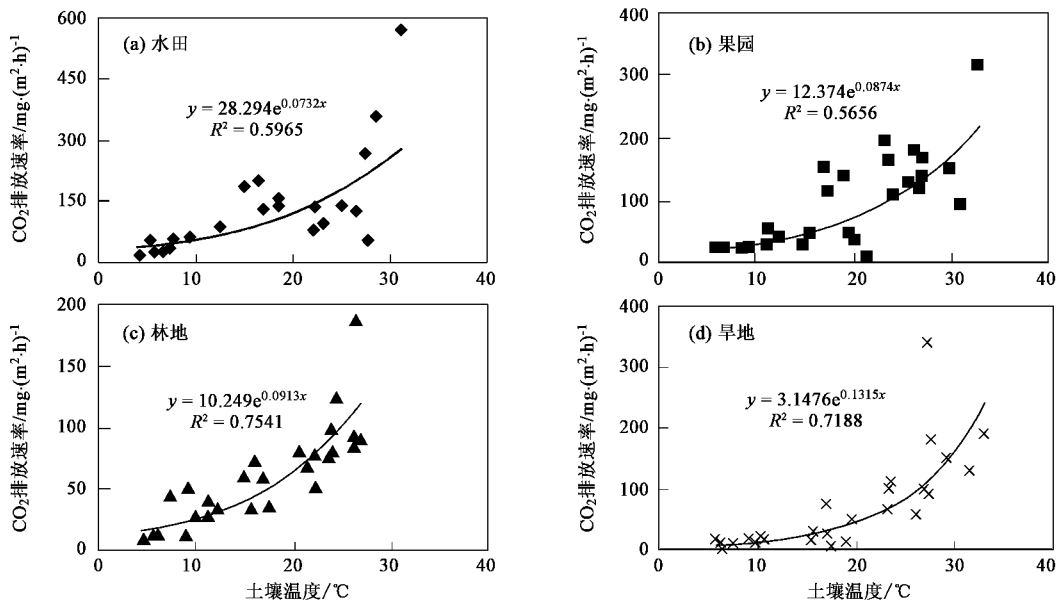


图 3 4 种土地利用方式土壤呼吸速率与 5 cm 土壤温度的关系

Fig.3 Relations between soil respiration rate and the soil temperature 5 cm depth in different land use

拟合方程分别为水田 $y = 0.0283e^{0.0732x}$, 果园 $y = 0.0124e^{0.0874x}$, 林地 $y = 0.0102e^{0.0913x}$, 旱地 $y = 0.0031e^{0.1315x}$. 研究表明, 土壤 5 cm 温度至少可以解释 CO₂ 排放通量变化的 60% 以上. 此外, 在温度较低的情况下 CO₂ 排放通量的散点集中在拟合曲线附近, 而温度较高的时候, 点就散开了(图 2, 3). 这一现象表明温度较低的情况下土壤呼吸受温度变化的影响较显著, 而温度较高的情况下, 其他因素的影响就更为突出. 李凌浩等^[15]也有报道类似的研究结果.

Q_{10} 表示温度升高 10℃ 时 CO₂ 排放通量的变化速率, 它被认为是表达 CO₂ 排放通量与温度之间关系较好的参数^[16]. 所以多数研究者采用 Q_{10} 值反映 CO₂ 排放通量对温度的敏感性. 利用 CO₂ 排放通量与 5 cm 处土温的幂函数方程计算得到 4 种土壤的 Q_{10} 值分别是: 水田 1.51, 果园 1.88, 林地 2.08, 旱地 2.77. 该结果表明旱地对温度的敏感性最高, 而水田最低. Raich 等^[1]报道了各种生态系统中 Q_{10} 变化在 1.3~3.3 之间, 平均为 2.4. 本研究所获得的 Q_{10} 值恰好在此范围内.

根据土壤 CO₂ 排放通量与土壤 5 cm 温度, 以及与大气温度的关系建立的相关模型 $R_s = ae^{bT}$. 经过比较可以看出, 果园、林地、旱地都是以 5 cm 土温和 CO₂ 排放通量拟合的指数方程中 b 值较大, 而水田则是 CO₂ 排放通量与大气温度的指数方程中 b 值比较大. 这一结果说明, 水田土壤 CO₂ 排放速率

对大气温度的变化更为敏感, 而其他利用方式的 CO₂ 排放通量对 5 cm 土温的变化更为敏感.

2.3 土壤水分含量状况对 CO₂ 排放通量的影响

图 4 是 4 种利用方式土壤 CO₂ 排放通量与同时测定的 0~20 cm 耕层土壤 WFPS 的散点图. 分析表明, CO₂ 排放通量与土壤 WFPS 的相关性不显著, 回归方程的决定系数都小于 0.2. 土壤温度和水分是影响土壤呼吸的关键环境因素, 不过, 土壤含水量对土壤 CO₂ 排放的影响较为复杂, 往往同时取决于温度的相互协调情况. 在土壤水分含量适宜的条件下, 土壤呼吸与土壤温度呈正相关, 而在水分含量成为限制因子的干旱、半干旱地区, 水分含量和温度共同起作用^[18]. 水分过多或过少都会限制温度对土壤呼吸的作用, 如水田处于淹水时期 CO₂ 排放通量明显低于落干时期, 尽管当时温度比较高. 例如 2005-06-22, 气温达到 30℃, 但土壤 CO₂ 排放通量仅为 10 mg·(m²·h)⁻¹. 与此不同的是降雨可以使 CO₂ 排放通量明显增加. 2005-04-22 为雨天, 但土壤 CO₂ 排放通量明显比温度相当而天气晴朗时要高.

从图 4 中还可以看出, 不同土壤 WFPS 变化范围是不相同的, 而且变化范围都比较小, 这也可能是造成 WFPS 与 CO₂ 排放通量相关性不高的一个重要原因.

2.4 土壤可溶性有机碳(DOC)及其与土壤有机质的关系

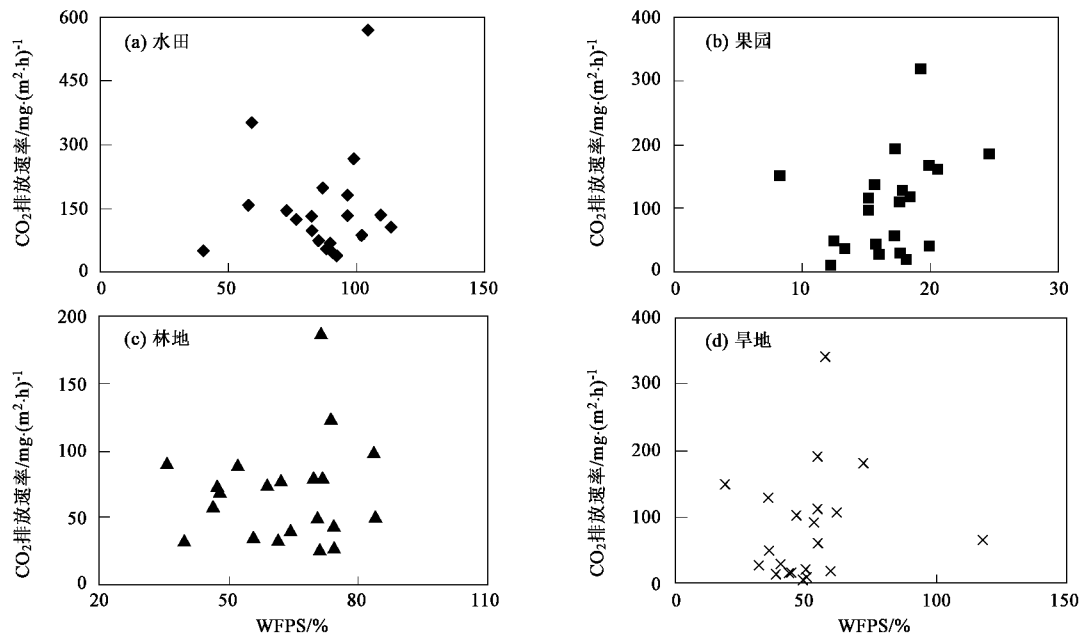


图 4 4 种土地利用方式土壤 WFPS 与土壤呼吸速率的关系

Fig.4 Relationship between soil respiration rate and soil moisture in different land use

土壤 DOC 在陆地生态系统碳循环中起着重要的作用,它是土壤环境变化的敏感指标,可用来反映环境条件的变化.研究表明,土壤 DOC 含量变化在 14.5 ~ 330.8 mg/kg 之间变化.由图 5 看出,土壤 DOC 含量与 CO₂ 排放通量的变化趋势基本一致,但是,相关性分析表明,DOC 与 CO₂ 排放通量的相关性并不显著,不同利用类型决定系数在 0.1 ~ 0.2 之间.从图 5 中还可以看出,DOC 在淹水期间或降雨后显著增大,这是由于土壤水分的变化引起土壤溶液中有有机碳总量的变化.焦坤等的研究表明,降雨和灌水可明显提高 DOC 含量,是落干时含量的 1.44 ~ 2.50 倍^[19].水田 DOC 含量明显高于其他土壤,主要原因可能是水田有机质含量明显高于其他土壤(表 1).

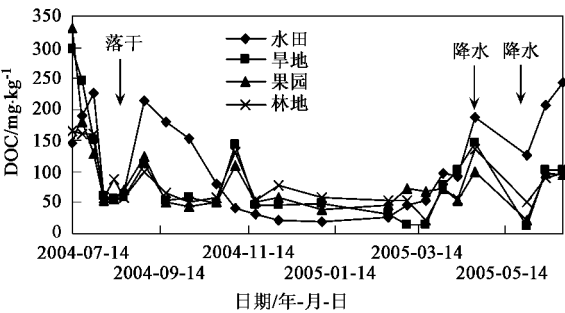


图 5 4 种土地利用方式 DOC 季节变化曲线

Fig.5 Seasonal variation of DOC in different land use

3 结论

(1) 4 种土地利用方式红壤 CO₂ 排放通量呈现明显的季节性变异,为夏季最高,春秋次之,冬季最低.土壤 CO₂ 排放通量的季节性变化与相对应的土壤温度,大气温度的变化趋势基本一致.

(2) 4 种利用方式土壤 CO₂ 的年排放总量从高到低分别为水稻-油菜轮作田 1 129 g/(m²·a),果园 828 g/(m²·a),旱地 632 g/(m²·a),林地 533 g/(m²·a).

(3) 4 种土壤 CO₂ 排放通量与 5 cm 地温呈极显著相关,林地的相关性最大.除水田外,其它土地利用方式土壤 CO₂ 排放通量与大气温度之间都呈显著正相关关系.而土壤 CO₂ 排放通量与土壤 WFPS 之间并没有明显的相关关系.

(4) 根据土壤 CO₂ 排放通量与 5 cm 深处土温的相关方程,计算得出 4 种土地利用方式的 Q₁₀ 值分别是水田 1.51,果园 1.88,林地 2.08,旱地 2.77.

参考文献:

[1] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. Tellus, 1992, 44: 81 ~ 99.

[2] Raich J M, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1994, 9: 23 ~ 36.

[3] de Jong E, Scharppetr J V. Calculation of soil respiration and activity from CO₂ profiles in the soil[J]. Soil Science, 1972, 113: 328 ~ 333.

[4] Anderson J M. Carbon dioxide evolution from two temperate, Deciduous woodland soils [J]. J Appl Ecol, 1973, **17**(10): 361 ~ 368.

[5] 林丽莎, 韩士杰, 王跃思, 等. 长白山四种林分土壤 CO₂ 释放通量的研究[J]. 生态学杂志, 2004, **23**(5): 42 ~ 45.

[6] 吴仲民, 曾庆波, 李意德. 尖岭峰热带森林土壤 C 储量和 CO₂ 排放量的初步研究[J]. 植物生态学报, 1997, **21**(5): 416 ~ 423.

[7] 杨靖春, 倪平, 祖元刚. 东北羊草草原土壤微生物呼吸速率的研究[J]. 生态学报, 1989, **9**(2): 139 ~ 142.

[8] 陈四清, 崔骁勇, 周广胜, 等. 内蒙古锡林河流域大针茅草原土壤呼吸和掉落物分解的速率研究[J]. 植物学报, 1999, **41**: 645 ~ 650.

[9] Hu R, Hatano R, Kusa K, *et al.* Soil respiration and net ecosystem production in an onion field in central Hokkaido, Japan[J]. Soil Sci Plant Nutr, 2004, **50**(1): 27 ~ 33.

[10] 张甲, 陶澍, 曹军. 土壤中水溶性有机碳测定中的样品保存与前处理方法[J]. 土壤通报, 2000, **31**(4): 174 ~ 176.

[11] Badia D V, Aleaniz J M. Basal and specific microbial respiration in semiarid agricultural soils: Organic amendment and irrigation management effects[J]. Journal of Geomicrobiology, 1993, **11**(3): 261 ~ 274.

[12] Chagas C I, Santanatoglia O J, Castiglioni M G, *et al.* Tillage and cropping effects on selected properties of an argiudoll in Argentina [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1995, **26** (5 ~ 6): 643 ~ 655.

[13] 娄运生, 李忠佩, 张桃林. 不同利用方式对红壤 CO₂ 排放的影响[J]. 生态学报, 2004, **24**(5): 469 ~ 476.

[14] 周志田, 成升魁, 刘允芬, 等. 中国亚热带红壤丘陵区不同土地利用方式下土壤 CO₂ 排放规律初探[J]. 资源科学, 2002, **24**(2): 83 ~ 87.

[15] 李凌浩, 王其兵, 白永飞. 锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究[J]. 植物生态学报, 2000, **24**(6): 680 ~ 686.

[16] Tang J, Baldocchi D D, Qi Y, *et al.* Assessing soil CO₂ efflux using continuous measurements of CO₂ profiles in soils with small solid-state sensors[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, **118**(3): 207 ~ 220.

[17] Luo y, Wan S, Hui D, *et al.* Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie [J]. Nature, 2001, **413**: 622 ~ 625.

[18] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响[J]. 生态学报, 1997, **17**(5): 469 ~ 476.

[19] 焦坤, 李忠佩. 红壤稻田土壤溶解有机碳含量动态及其生物降解特征[J]. 土壤, 2005, **37**(3): 272 ~ 276.