

文章编号: 1008-2786-(2018)4-547-10

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000351

西双版纳香蕉园土壤 CO₂ 排放特征

张 锦^{1,2}, 吕 彤^{1,2}, 沙丽清^{1*}

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园 热带森林生态学重点实验室, 云南 勐仑 666303; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 香蕉种植园是目前西双版纳地区主要的土地利用类型之一, 为探讨常规施肥管理下香蕉种植园土壤 CO₂ 排放特征及其影响因子, 选取西双版纳地区典型的坝区香蕉种植园, 采用静态箱-气相色谱法开展了为期一年的试验。试验结果表明: (1) 旱季日变化观测日为晴天, 白天土壤 CO₂ 排放速率高于夜间, 雨季观测日下午有降雨, 土壤 CO₂ 排放速率夜间高于白天, 雨季种植台地土壤 CO₂ 日排放量显著高于旱季 ($p < 0.05$), 而排水沟土壤 CO₂ 日排放量在旱季和雨季无显著差异; (2) 香蕉植株下方、香蕉植株之间和排水沟土壤具有相同的土壤 CO₂ 排放季节变化特征; (3) 香蕉种植园土壤 CO₂ 排放表现为雨季高于旱季, 年排放总量为 $9.01 \pm 1.45 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$; (4) 香蕉种植园土壤 CO₂ 排放与气温、土温和土壤含水量存在极显著 ($p < 0.01$) 或显著 ($p < 0.05$) 正相关性。本研究结果为初步了解中国西双版纳乃至热带地区香蕉种植园土壤 CO₂ 排放现状, 为香蕉种植园生态系统碳循环和估算区域 CO₂ 排放量提供基础数据, 也可作为香蕉种植园可持续利用与管理提供科学依据。

关键词: 西双版纳; 香蕉种植园; 土壤排放

中图分类号: S718.5

文献标志码: A

土地利用变化是影响陆地生态系统碳循环的最大因素之一, 土地利用/土地覆盖变化既可改变土壤有机质的输入, 又可通过改变小气候和土壤条件来影响土壤有机碳的分解速率, 从而改变土壤有机碳储量^[1]。在全球变化中, 土地利用/土地覆盖变化是自然与人文过程交叉最为密切的问题, 土地利用/土地覆盖变化与全球变化和可持续发展的关系是该研究的核心问题^[2]。

近年来, 随着香蕉市场价格的一路攀升, 云南西双版纳连片种植的香蕉面积不断扩大, 现已成为云南省优质香蕉的主产区^[3-4]。西双版纳地区农户正不断地将橡胶林和水稻田转变为香蕉种植园, 由橡胶林或水稻田转变为香蕉种植园后, 人工管理更加频繁, 施用大量化肥和农药, 土壤基本理化性质发生

改变, 土壤微生物的群落组成和功能及活性都受到影响^[5], 土壤 CO₂ 的产生及释放过程发生改变, 从而对碳循环造成影响, 进而导致区域乃至全球气候变化。

国内外关于西双版纳土地利用与土地覆盖变化的研究已大量展开。研究内容主要集中在不同土地利用方式下土壤理化性质^[6-7]、当地的气候变化^[8-9]、土壤温室气体排放上^[10-12]。但目前关于西双版纳地区香蕉种植园土壤 CO₂ 排放的研究鲜见报道, 其排放特征尚不清楚。开展香蕉种植园土壤 CO₂ 排放特征研究, 可初步探讨香蕉种植园土壤 CO₂ 排放特征及变化规律, 明晰土地利用变化对土壤 CO₂ 排放的影响, 对进一步明确人类活动如何改变区域乃至全球碳循环有重要意义。本文选取西双

收稿日期 (Received date): 2018-02-26; 改回日期 (Accepted date): 2018-06-13

基金项目 (Foundation item): 中国科学院科技服务网络计划 (STS 计划) 项目 (KFJ-EW-ST-084)。[Science and Technology Service Network (STS) Plan, CAS (KFJ-EW-ST-084)]

作者简介 (Biography): 张锦 (1993-), 男, 湖北京山人, 硕士研究生, 主要研究方向: 环境生态学。[ZHANG Jin (1993-), male, born in Jingshan, Hubei province, M. Sc. candidate, research on environment ecology] E-mail: zhangjin@xtbg.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): 沙丽清 (1963-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 土壤生态与环境生态。[SHA Liqing (1963-), male, Ph. D., professor, specialized in soil ecology and environment ecology] E-mail: shalq@xtbg.ac.cn

版纳大面积种植的香蕉种植园为研究对象,采用静态箱-气相色谱法,开展了为期一年的试验,利用监测到的数据来分析该地区香蕉种植园土壤 CO₂ 排放特征,旨在初步了解中国热带地区香蕉种植园 CO₂ 排放现状,为热带地区香蕉种植园生态系统碳循环提供基础数据,同时有利于指导香蕉种植园的绿色生产,为提高香蕉种植园经济效益的同时兼顾生态效益、降低环境污染等提供理论依据及技术指导。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

试验样地位于云南省西双版纳傣族自治州(21°08'~22°36'N,99°56'~101°50'E),该地区终年受西南季风的影响,属于热带季风气候^[13],终年温暖,湿润多雨。一年可分为旱季和雨季,雨季长达5个月(5月下旬—10月下旬),旱季长达7个月(10月下旬—次年5月下旬)之久。全年平均气温为21.7℃,最冷的1月均温为15.5℃,年降水量1221 mm,雨季降雨量超过全年降雨量的85%^[9,14]。样地土壤为砖红壤,基本性质见表1。

1.2 试验设置

据调查,研究区蕉农每年约施用农药1.8 t hm⁻²,施用肥料4 t hm⁻²,所施肥料主要有金正大复合肥(N-P₂O₅-K₂O,15-15-15)和硫酸钾(氧化钾≥52%;硫≥18%;氯≤1.5%)。香蕉种植园的施肥方式是直接将复合肥颗粒成半月状撒在香蕉植株下方,独特的施肥方式导致香蕉种植园的施肥基本都是施在香蕉植株下方的土壤,而香蕉植株之间和排水沟基本不施肥。施肥频率为一年10次左右。在旱季进行人工灌溉,以补充香蕉生长所需水分。

选取中国科学院西双版纳热带植物园旁的城子村坝区香蕉种植园为试验区,海拔约600 m。该香蕉种植园于2015年由橡胶林改种成香蕉(品种为威廉斯),施肥方式由穴施转变为撒施,频率由一年两次变为一年多次,并且增加了灌溉、除草及喷洒农

药等管理方式。园内分为香蕉种植台地(宽约4 m)和排水沟(宽约0.6 m),种植密度为每公顷1800株。每年的收获季节在4—5月,6月中旬开始培育新的吸芽。由于香蕉种植园内的施肥方式、分布位置的不同,在香蕉植株下方、香蕉植株间和排水沟分别安置静态呼吸箱(底面积和高分别为0.12 m²和0.2 m),视为三处理,分别以A(施肥,土壤未扰动)、B(不施肥,土壤未扰动)、C(不施肥,土壤扰动)表示,每处理重复5次。香蕉园种植模式及呼吸箱的安置位置如图1所示。试验时间从2016年12月一直持续到2017年12月。

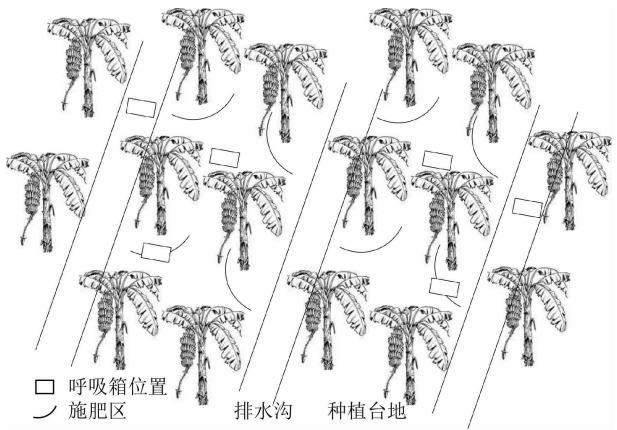


图1 香蕉园种植模式及呼吸箱安放位置示意图

Fig. 1 The planting pattern of banana plantation and the position of chambers

1.3 采样方法

使用带三通阀的100 ml医用注射器作为采样容器,每次采样前,先把采样箱箱盖扣在采样箱底座上。采集气样前要把残留在气路中的气体排出,即每次采集的第一管气体废弃(约100 ml),之后每隔15 min抽取约70 ml气体保存(每次抽气前用注射器来回抽气排气以混匀箱内气体),准确记录采样时间至秒,扣箱时间1 h,共抽取气样5次^[10,15]。在采样的同时测定林间大气温度、土壤5 cm、10 cm土层温度及5 cm土壤含水量。常规气体采样频率为

表1 研究区的土壤性质

Tab. 1 Soil properties of the study sites

研究区	容重/(g cm ⁻³)	pH	有机质/(g kg ⁻¹)	全碳/(g kg ⁻¹)	全氮/(g kg ⁻¹)	全磷/(g kg ⁻¹)	全钾/(g kg ⁻¹)
香蕉植株下方	1.52	5.02	11.32	6.57	0.91	0.62	19.38
香蕉植株之间	1.58	4.99	12.71	7.37	1.01	0.65	17.22
排水沟	1.45	6.44	10.50	6.09	0.83	0.49	16.93

两周一次,采样时间在上午 9:00~11:00。日变化观测在旱季和雨季分别进行一次,采样时间从观测日上午 9 时开始一直到次日上午 9 时结束。白天每 2 h 观测一次,夜晚每 3 h 观测一次。采样结束后,立即将气样带回实验室分析。

1.4 CO₂ 分析方法

气体分析使用经过改装的含有 FID 的气相色谱仪(Agilent 4890D GC System, Agilent Technologies, USA)测定 CO₂ 的浓度。气样 CO₂ 的检测是将气样通过镍触媒催化系统,在 375℃ 条件下将 CO₂ 转化成 CH₄,然后由 FID 检测器检测。载气为高纯氮气,燃气为高纯氢气,助燃气为合成空气。CO₂ 排放速率根据线性拟合由箱内气体浓度的变化率计算得出,计算公式如下^[16-17]:

$$F = \rho \frac{V}{A} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \frac{dCt}{dt} \quad (1)$$

式中: F 为 CO₂ 排放通量(mg C m⁻² h⁻¹); P_0 和 T_0 为理想气体标准状态下的空气压力与气温; ρ 为标准状态下的被测气体密度; V 为观测箱的容积; A 为观测时箱体所覆盖的地表面积; P 和 T 为采样时箱内的实际气压和气温; dCt/dt 为箱内 CO₂ 浓度随时间变化的回归直线斜率。

本研究观测了香蕉种植台地和排水沟的土壤 CO₂ 排放,由于各个观测对象在整个试验区所占面积不同,因此采用以下公式将各观测点的土壤 CO₂ 排放转换为整个试验区土壤 CO₂ 排放量。

$$F = 0.87 \left(\frac{F_A + F_B}{2} \right) + 0.13 F_C \quad (2)$$

式中, F 为试验区内土壤 CO₂ 排放通量, F_A 为香蕉植株下方土壤 CO₂ 排放通量, F_B 为香蕉植株间土壤 CO₂ 排放通量, F_C 为排水沟土壤 CO₂ 排放通量。各 CO₂ 排放通量单位均为 mg C m⁻² h⁻¹。公式(2)中的系数分别为各种地形在整个试验区内所占的面积比例。

1.5 数据处理与分析

数据由 Microsoft Excel 2003 进行基本整理和计算,然后采用 SPSS 18.0 进行统计分析。CO₂ 气体不同处理间,同处理不同季节的比较采用单因素方差分析。采用皮尔逊相关分析对影响温室气体通量的环境因子进行相关分析。文中的图由 Sigmaplot 12.0 进行绘制。在 $p < 0.05$ 水平上考虑显著性差异。

2 结果与分析

2.1 香蕉种植园大气及土壤温度日变化

旱季和雨季香蕉种植园林间大气温度和土壤温度日变化特征见图 2。与大气温度相比,土壤温度的最大值与最小值的出现时间均出现了滞后。大气温度和土壤温度的温差均是旱季大于雨季。无论旱季还是雨季,始终是大气温度的日温差最大,而土壤 10 cm 温度的温差最小。

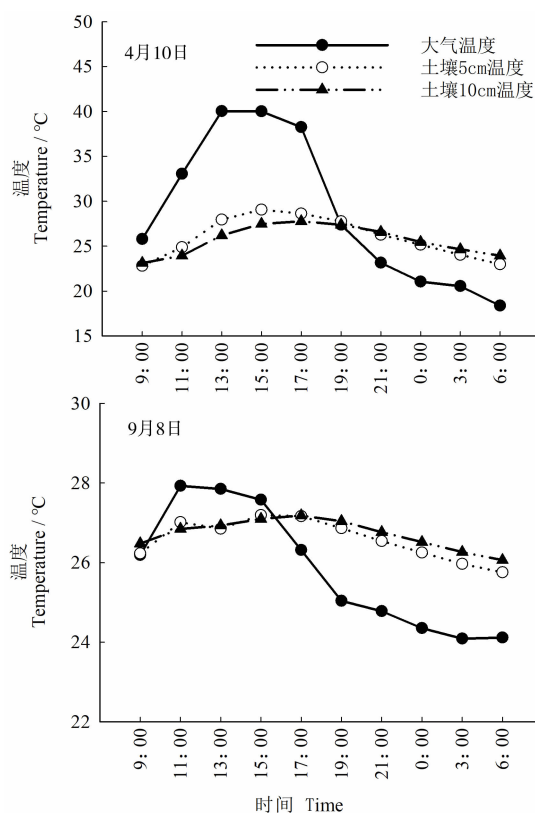


图2 香蕉园大气温度及土壤温度日变化

Fig.2 Diurnal change of temperature in banana plantation

2.2 香蕉种植园温度和土壤含水量季节变化

香蕉种植园土壤温度在旱季高于大气温度而雨季低于大气温度(图3)。年均大气温度、土壤 5 cm 土层和 10 cm 土层温度分别为 23.2℃、23.0℃ 和 23.5℃。土壤含水量在旱季维持较低水平,在 5 月初达到最低(14.7%)。进入雨季后,土壤含水量开始升高,随后保持在一年中较高水平,到雨季结束后开始降低(图3)。香蕉植株下方(A)、香蕉植株之间(B)、排水沟(C)年均土壤含水量分别为 29.9%、29.6%、34.8%,雨季土壤含水量比旱季高出了

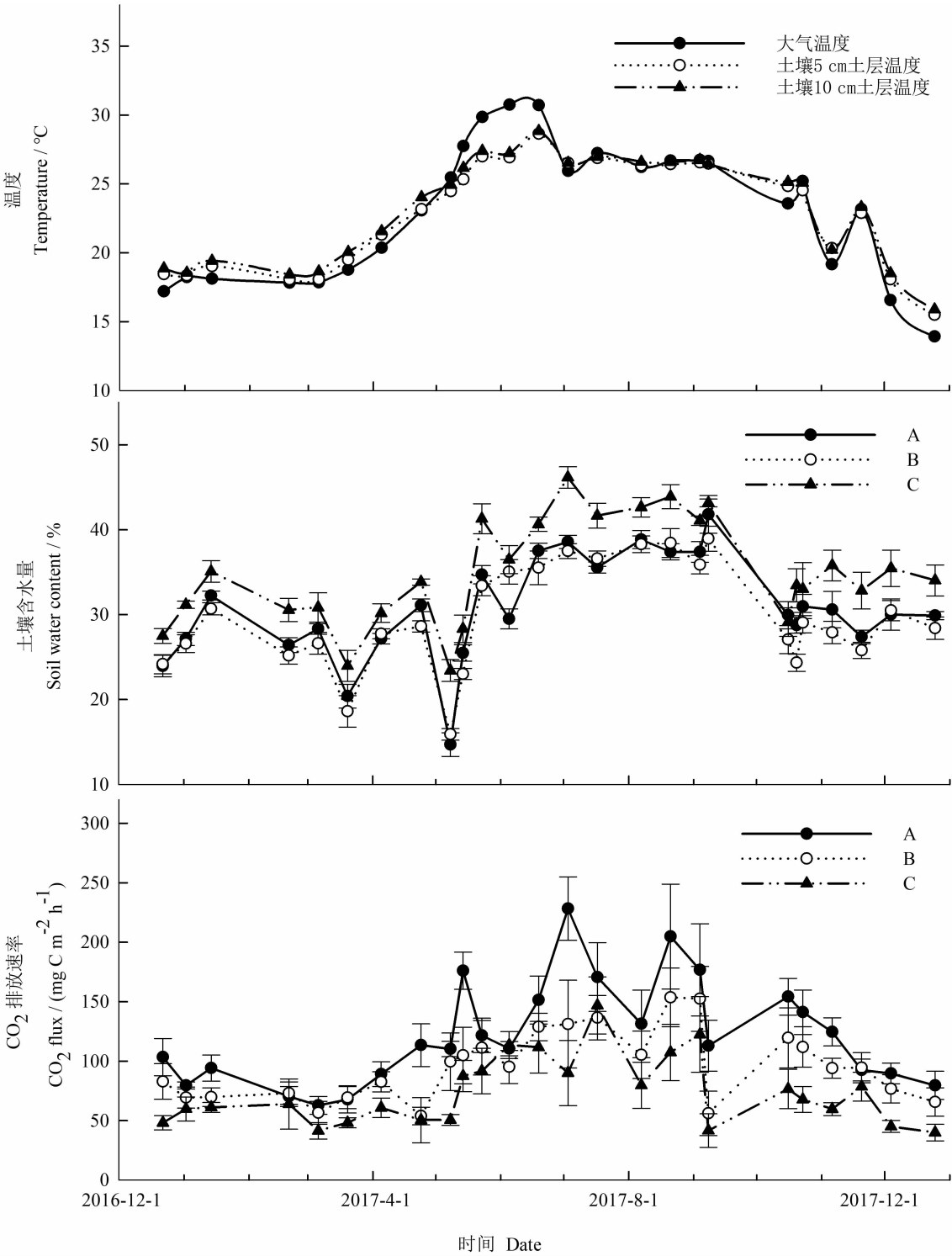


图3 香蕉种植园温度、土壤含水量及土壤 CO₂ 排放通量的季节变化

Fig.3 Seasonal variation of temperature, soil water content and CO₂ flux in banana plantation

6.5%~11.2%。无论在雨季还是旱季,土壤含水量均为 C>A>B。统计结果显示 A 和 B 之间年均土壤含水量差异并不显著($p>0.05$),但 A 和 B 均与 C 间的年均土壤含水量均达到显著水平($p<0.05$) (图 4),即香蕉种植园排水沟的年均土壤含水量显

著高于种植台地。
2.3 香蕉种植园土壤 CO₂ 排放日变化
旱季和雨季土壤 CO₂ 排放日变化为单峰模式 (图 5)。旱季土壤 CO₂ 排放速率白天高于夜间,且最大排放速率与最高大气及土壤温度出现时间相吻

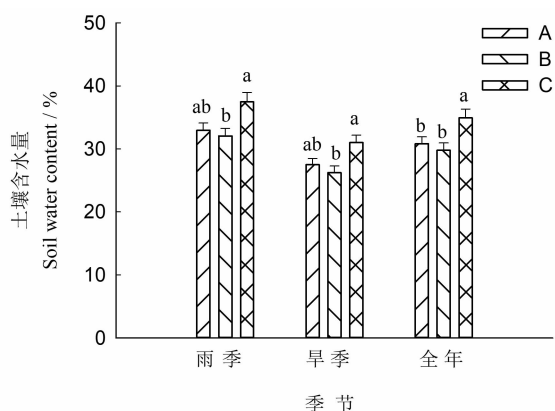
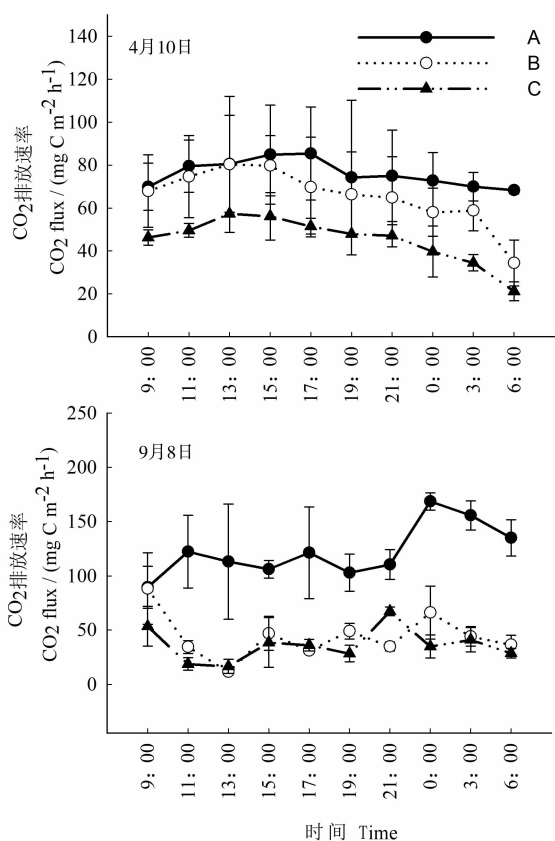


图4 土壤含水量季节变化

Fig.4 Seasonal variation of soil water content

图5 旱季及雨季土壤 CO₂ 排放通量日变化Fig.5 Diurnal change of CO₂ flux in dry and rainy season

合。雨季土壤 CO₂ 排放日变化模式与旱季正好相反,为夜间高于白天。香蕉种植台地(A和B)旱季和雨季土壤 CO₂ 排放速率之间存在显著差异($p < 0.05$),而排水沟(C)土壤 CO₂ 排放速率在旱季和雨季并无差异($p > 0.05$)。土壤 CO₂ 日排放速率顺序为 $A > B > C$,在旱季彼此间的差异均达到极显著水平($p < 0.01$),而雨季 B 与 C 之间差异不显著($p > 0.05$),A 与 B、C 间的差异均达到显著水平($p <$

0.05)。

2.4 香蕉种植园土壤 CO₂ 排放季节变化

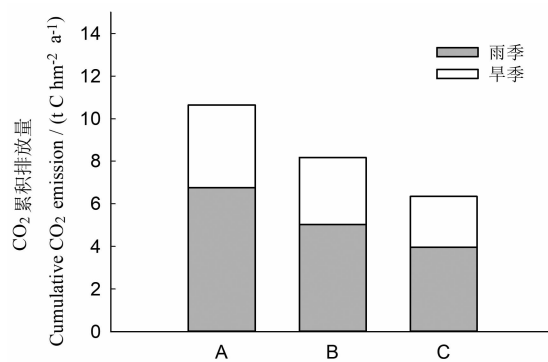
香蕉园土壤 CO₂ 排放通量在时间上存在波动,不同地点土壤 CO₂ 排放通量的变化趋势大致相同(图3),呈现出雨季高而旱季低的季节变化。从2016年12月到2017年4月,土壤 CO₂ 排放速率保持在全年最低水平。从4月底开始,土壤 CO₂ 排放速率逐渐增加,在5月达到第一个高峰,随后一直保持在较高水平,在10月初出现最后一个小排放高峰后逐渐降低。不论是在旱季、雨季还是全年,A、B、C土壤呼吸速率间均存在显著差异($p < 0.05$)(表2)。

2.5 香蕉种植园土壤温室气体排放与温、湿度的关系

本研究发现在整个观测周期内,A、B和C土壤 CO₂ 排放通量与大气温度、土壤5 cm和10 cm土层温度间均呈现出极显著正相关;A、C与土壤含水量有极显著正相关,B与土壤含水量呈现显著正相关(表3)。

2.6 香蕉种植园土壤 CO₂ 累积排放量

A、B和C的土壤 CO₂ 累积排放量分别为 10.62 ± 1.53 、 8.24 ± 1.42 、 6.34 ± 1.29 t C hm⁻² a⁻¹,其中雨季土壤 CO₂ 累积排放量分别占年累计排放量的63.7%、61.0%和62.6%(图6),表明雨季土壤 CO₂ 排放量要高于旱季。结合香蕉种植园各地点 CO₂ 排放量,可计算出西双版纳香蕉种植园 CO₂ 年排放总量为 9.03 ± 1.45 t C hm⁻² a⁻¹。

图6 旱季和雨季土壤 CO₂ 累积排放量Fig.6 Cumulative CO₂ emission during rainy and dry season

3 讨论

3.1 影响香蕉种植园土壤 CO₂ 排放的环境因子

土壤温度和土壤含水量是影响土壤 CO₂ 排放

表 2 不同季节香蕉种植园土壤 CO₂ 排放速率
Tab.2 CO₂ flux in different season

CO ₂ 排放速率 /(mg C m ⁻² h ⁻¹)	旱季			雨季			全年		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
最小速率	62.71	53.81	41.37	110.45	56.02	41.53	62.71	53.81	41.37
最大速率	124.60	94.41	78.51	228.25	153.53	146.84	228.25	153.53	146.84
平均速率	89.73a	74.55b	57.14c	153.04a	115.81b	91.30c	125.51a	97.87b	76.45c

注:不同字母表示不同处理间通量值在 $p < 0.05$ 的水平上有差异。

表 3 土壤 CO₂ 排放通量与大气温度、土壤温度
及土壤含水量的相关性

Tab.3 Correlation of soil CO₂ flux with air temperature,
soil temperature and soil water content

	大气温度	5 cm 土层温度	10 cm 土层温度	土壤 含水量
A	0.50 * *	0.62 * *	0.61 * *	0.28 * *
B	0.41 * *	0.47 * *	0.45 * *	0.17 *
C	0.56 * *	0.55 * *	0.54 * *	0.30 * *

注: * *: $p < 0.01$; *: $p < 0.05$ 。

最为重要的两个因素^[18-19]。温度主要是通过影响土壤微生物活性及植物根系生长从而影响土壤 CO₂ 的排放。土壤微生物以及土壤酶都有一个最适温度,当温度过高和过低时,土壤微生物活性以及植物根系相应的酶活性就会受到明显的抑制。也就是说,在一定温度范围内,土壤 CO₂ 排放速率随土壤温度的升高而增强,当土壤温度超过某一极限温度后土壤 CO₂ 排放速率随着温度的升高而减弱^[20]。本研究表明土壤 CO₂ 排放速率与大气温度、土壤温度都存在极显著的正相关性(表 3),与前人的研究相符^[20-23]。

土壤含水量通过影响土壤通气状况来影响土壤微生物种类、数量及其活性进而影响有机质的分解速率及温室气体的生成速率和扩散速率^[24]。在土壤水分饱和或过于干旱的情况下,土壤 CO₂ 排放都将受到抑制^[25-27]。土壤 CO₂ 排放随季节性温度变化而发生变化,只有在降雨较少的季节其排放速率才会受到水分的限制^[28-29]。本研究结果表明无论在旱季还是雨季,土壤含水量均为排水沟高于种植台地,而种植台地内香蕉植株下方土壤含水量高于香蕉植株间土壤,与前人在哥斯达黎加香蕉种植园的研究结果一致^[30],可能原因是香蕉植株会通过冠层和茎秆流的方式改变香蕉种植园种植台地的土壤

含水量,但香蕉植株对雨水的再分配的深入机理和格局还有待进一步研究。本研究土壤 CO₂ 排放与土壤含水量之间存在显著正相关性,与前人研究结果相同^[23]。

施加肥料会增加土壤碳、氮、磷等养分元素的含量,改变土壤化学元素组成,增加土壤中易分解有机物质的含量,进而增加了土壤呼吸所需底物含量。通过施肥还会促进植物根系生长,促进土壤微生物活性及植物根系呼吸,从而促进土壤 CO₂ 排放^[31]。前人就施肥对土壤 CO₂ 排放的影响已经做了大量研究,总体上可分为促进作用^[22,32-33]、无影响^[10,23,34]及抑制作用^[35-36]。本研究中施肥的香蕉植株下方土壤 CO₂ 排放速率显著高于不施肥的香蕉植株间及排水沟,但本研究未对香蕉植株根系分布进行研究,因此只能说明施肥可能会促进 CO₂ 的排放,同时本研究未对化肥进行定量添加,因此在今后还需对根系和不同化肥添加量对香蕉种植园土壤 CO₂ 排放的影响展开更深入的研究。

3.2 香蕉种植园土壤 CO₂ 排放特征及年累积排放量

在本研究中,根据西双版纳地区香蕉种植园的垦殖方式把试验小区分为香蕉种植台地和排水沟,其中香蕉种植台地又分为施肥的香蕉植株下方和不施肥的香蕉植株之间。

日变化观测结果表明旱季白天土壤 CO₂ 排放速率高于夜间,且排放最大值出现在中午和下午(图 5),基本与观测到的最高大气温度和土壤温度出现的时间相吻合。而雨季夜间土壤 CO₂ 排放速率高于白天且排放最大值出现在夜晚(图 5),其原因可能是西双版纳地区雨季阴雨天较多,在我们的观测日中午和下午均有降雨,夜间放晴,气温波动幅度小,土壤含水量充足,CO₂ 有很大一部分不能够顺利排放到大气中^[23,37],因此造成了 CO₂ 排放峰值出现在夜间的排放模式。与前人研究结果一致^[38-39],

本研究 9~11 时观测到的土壤 CO₂ 排放速率接近全天土壤 CO₂ 排放的平均值。

本研究结果表明,西双版纳香蕉种植园不同地点拥有相同的土壤 CO₂ 排放时间变化特征:总体上呈现雨季香蕉种植园土壤 CO₂ 平均排放量高于旱季(表 2),7 月出现最大值,3 月出现最小值(图 3)。原因可能是土壤 CO₂ 的排放主要受水热条件影响。西双版纳的香蕉在旱季末收获,收获后将香蕉植株砍倒,培育新长出的吸芽。被砍倒的香蕉植株残体会快速分解,土壤有机质含量增加,会对土壤微生物的活动有明显的增强效果^[40],因此在 5 月初砍伐香蕉后出现第一个土壤 CO₂ 排放高峰。随后的雨季由于土壤含水量和土壤温度均升高(图 3),在这种高温高湿的环境下,土壤 CO₂ 排放速率维持在较高水平。从 9 月开始,由于降雨的减少,致使土壤含水量降低,土壤 CO₂ 排放也出现下降的趋势。进入旱季后,大气、土壤温度和土壤含水量继续降低,环境变得更不利于土壤 CO₂ 排放,因此雨季土壤 CO₂ 的排放量高于旱季,本研究土壤 CO₂ 排放模式与该地区热带雨林及橡胶林的众多研究结果一致^[10-12,23,41]。

香蕉种植园作为典型的人工种植园,受人为干扰较大,灌溉、施肥、喷洒农药等田间管理频繁。本试验选取的研究区是由人工橡胶林改种而来,在种植香蕉前开挖排水沟(深约 20~30 cm),将排水沟表层土壤覆盖于种植台地表面。尽管我们的观测时间是在种植香蕉一年后,土壤环境基本稳定,但由于排水沟表层土壤被移除,而深层土壤的有机质含量低于表层^[42],这可能是排水沟土壤 CO₂ 排放较低的原因之一。香蕉种植园的肥料都是施在香蕉植株下方,但雨季频繁的降雨以及旱季的灌溉会使部分肥料颗粒溶解并随之带入香蕉植株之间土壤和排水沟土壤,对土壤 CO₂ 的排放也有一定影响。喷洒农药也可能会对土壤温室气体的排放有所影响,但本试验仅探讨常规管理下香蕉种植园土壤 CO₂ 排放特征,今后可开展不同管理模式土壤 CO₂ 排放特征研究。

本研究中香蕉植株下方、香蕉植株间及排水沟土壤 CO₂ 累积排放量分别为 10.62 ± 1.53 、 8.24 ± 1.42 和 $6.34 \pm 1.29 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。结合不同观测点所占的面积比例计算出香蕉种植园土壤 CO₂ 总累积排放量为 $9.01 \pm 1.45 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,高于西双版

纳地区橡胶林土壤 CO₂ 累积排放量^[10,43],但低于西双版纳热带雨林、亚马逊热带雨林及泰国热带雨林的观测结果^[26,41,44]。

本研究选取的香蕉种植园是由橡胶林改种而来,而西双版纳橡胶林土壤 CO₂ 累积排放量要低于香蕉种植园土壤 CO₂ 总累积排放量^[10,43],因此在西双版纳地区将大面积橡胶林改种为香蕉种植园后,土壤 CO₂ 排放量增加,可能会对碳循环产生深远影响而导致区域气候变化。本研究未对自养和异养呼吸进行区分,未来研究应当侧重于香蕉种植园的自养呼吸和异养呼吸的区分以更精细量化人工橡胶林改种成香蕉种植园后对碳循环的影响。

4 结论

(1)西双版纳香蕉种植园土壤 CO₂ 日排放呈现单峰模式,旱季观测日为晴天,白天土壤 CO₂ 排放速率高于夜间,雨季土壤 CO₂ 排放速率为夜间高于白天,原因是雨季日变化观测日下午出现降雨,雨季种植台地土壤 CO₂ 日排放量显著高于旱季,而排水沟土壤 CO₂ 日排放量在旱季和雨季未发现显著差异。

(2)香蕉种植园内不同地点土壤 CO₂ 排放拥有相同的时间变化特征,总的来说为雨季大于旱季,香蕉种植台地土壤 CO₂ 排放量显著高于排水沟,香蕉种植台地内香蕉植株下方土壤 CO₂ 排放量显著高于香蕉植株之间。

(3)香蕉种植园土壤 CO₂ 年排放总量为 $9.01 \pm 1.45 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

(4)香蕉种植园土壤 CO₂ 排放速率与大气温度、土壤温度及土壤含水量间存在显著正相关性。

致谢:本研究得到了中国科学院西双版纳热带植物园中心实验室及生物地球化学实验室的大力支持和杨东海、高进波、周瑞伍、周立国和汤显辉等的帮助,在此一并表示感谢!

参考文献(References)

- [1] 王义祥,翁伯琦,黄毅斌. 土地利用和覆被变化对土壤碳库和碳循环的影响[J]. 亚热带农业研究, 2005, 1(3): 44-51 [WANG Yixiang, WENG Boqi, HUANG Yibin. Effects of land use/cover changes on soil carbon storage and carbon cycle [J]. Subtropical Agriculture Research, 2005, 1(3): 44-51]
- [2] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域-土地利用/土地覆被

- 变化的国际研究动向[J]. 地理学报, 1996, **51**(6): 553–557 [LI Xiubin. A review of the international researches on land use/land cover change [J]. Acta Geographica Sinica, 1996, **51**(6): 553–557]
- [3] 史永忠. 西双版纳香蕉产业发展对策初探[J]. 产业论坛, 2012, **29**(4): 15–16 [SHI Yongzhong. The development strategy of Xishuangbanna banana industry [J]. Industry Forum, 2012, **29**(4): 15–16]
- [4] 蒋晓云, 李芳, 依涛香, 等. 西双版纳州香蕉产业发展现状及存在问题及对策[J]. 中国园艺文摘, 2015, **8**: 79–80 [JIANG Xiaoyun, LI Fang, YI Taoxiang, et al. Development status, existing problems and countermeasures of Xishuangbanna banana industry [J]. Chinese horticulture abstract, 2015, **8**: 79–80]
- [5] 彭琴, 董云社, 齐玉春. 氮输入对陆地生态系统氮循环关键过程的影响[J]. 地球科学进展, 2008, **23**(8): 874–883 [PENG Qin, DONG Yunshe, QI Yuchun. Influence of external nitrogen input on key processes of carbon cycle in terrestrial ecosystem [J]. Advanced in Earth Science, 2008, **23**(8): 874–883]
- [6] 李明锐, 沙丽清. 西双版纳不同土地利用方式下土壤氮矿化作用研究[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(1): 54–58 [LI Mingrui, SHA Liqing. Soil nitrogen mineralization under different land use patterns in Xishuangbanna [J]. Chinese Journal of applied ecology, 2005, **16**(1): 54–58]
- [7] 孟盈, 薛敬意, 沙丽清, 等. 西双版纳不同热带森林下土壤铵态氮和硝态氮动态研究[J]. 植物生态学报, 2001, **25**(1): 99–104 [MENG Ying, XUE Jingyi, SHA Liqing, et al. Variations of soil $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ and N mineralization under different forests in Xishuangbanna, Southwest China [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2001, **25**(1): 99–104]
- [8] 李红梅. 西双版纳勐仑地区 40 余年气候变化[J]. 气象, 2001, **27**(10): 20–24 [LI Hongmei. Climate changes of Menglun in Xishuangbanna for the last 40 years [J]. Meteorological Monthly, 2001, **27**(10): 20–24]
- [9] 农定飞, 马友鑫, 李红梅, 等. 西双版纳地区土地利用/覆盖变化对气温的影响[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2012, **34**(5): 548–553 [NONG Dingfei, MA Youxin, LI Hongmei, et al. The influence of land use /land cover change on temperature in Xishuangbanna [J]. Journal of Yunnan University (Nature science), 2012, **34**(5): 548–553]
- [10] 董钰鑫, 张一平, 沙丽清, 等. 施肥对西双版纳橡胶林土壤 CO_2 排放的影响[J]. 生态学杂志, 2014, **34**(9): 2576–2582 [DONG Yuxin, ZHANG Yiping, SHA Liqing, et al. Impacts of fertilizer application on CO_2 emissions in rubber (*Hevea brasiliensis*) plantation in Xishuangbanna, Southwest China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, **34**(9): 2576–2582]
- [11] 卢华正, 沙丽清, 王君, 等. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸的季节变化[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(10): 2315–2322 [LU Huazheng, SHA Liqing, WANG Jun. Seasonal variation of soil respiration and its components in tropical rain forest and rubber plantation in Xishuangbanna, Yunnan [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, **20**(10): 2315–2322]
- [12] 房秋兰, 沙丽清. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸[J]. 植物生态学报, 2006, **30**(1): 97–103 [FANG Qiulan, SHA Liqing. Soil respiration in a tropical seasonal rain forest and rubber plantation in Xishuangbanna, Yunnan, SW China [J]. Journal of Plant Ecology, 2006, **30**(1): 97–103]
- [13] 张克映. 滇南气候的特征及其形成因子的初步分析[J]. 气象科学, 1963, **33**(2): 218–230 [ZHANG Keying. A preliminary analyse of the charecteristic and its formation factor of the climate in southern Yunnan [J]. Acta Meteorologica Sinca, 1963, **33**(2): 218–230]
- [14] ZHANG Jianhou, CAO Min. Tropical forest vegetation of Xishuangbanna, SW China and its secondery changes, with special reference to some problems in local nature conservation [J]. Biological Conservation, 1995, **73**: 229–238
- [15] ZHOU Wenjun, JI Hongli, ZHU Jing, et al. The effects of nitrogen fertilization on N_2O emissions from a rubber plantation [J]. Scientific Report, 2016, **6**: 28230
- [16] 王跃思, 刘广仁, 王迎红, 等. 一台气相色谱仪同时测定陆地生态系统 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, **4**(10): 84–90 [WANG Yuesi, LIU Guangren, WANG Yinghong, et al. Simultaneous measurement of CO_2 , CH_4 and N_2O emission from terrestrial ecosystem with one improved gas chromatography [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2003, **4**(10): 84–90]
- [17] WANG Yuesi, WANG Yinghong. Quick measurement of CO_2 , CH_4 and N_2O emissions from a short-plant ecosystem. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, **20**(5): 842–844
- [18] SCHIMEL D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle [J]. Global Change Biology, 1995, **1**: 77–91
- [19] ISE T, MOORCROFT P R. The global-scale temperature and moisture dependencies of soil organic carbon decomposition: an analysis using a mechanistic decomposition model [J]. Biogeochemistry, 2006, **80**(3): 217–231
- [20] RAICH J W, POTTER C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1995, **9**(1): 23–36
- [21] 刘惠, 赵平, 孙谷畴, 等. 华南丘陵区冬闲稻田二氧化碳、甲烷和氧化亚氮的排放特征[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(1): 57–62 [LIU Hui, ZHAO Ping, SUN Guchou, et al. Charecteristics of CO_2 , CH_4 and N_2O emissions from winter-fallowed paddy fields in hilly area of South China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, **18**(1): 57–62]
- [22] 黄晶, 刘宏斌, 王伯仁. 长期施肥下红壤旱地 CO_2 、 N_2O 排放特征[J]. 中国农学通报, 2009, **25**(24): 428–433 [HUANG Jing, LIU Hongbin, WANG Boren. CO_2 , N_2O emission from red soil dry-land under long-term fertilization [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, **25**(24): 428–433]
- [23] 徐凡珍, 胡古, 沙丽清. 施肥对橡胶人工林土壤呼吸、土壤微生物生物量碳和土壤养分的影响[J]. 山地学报, 2014, **32**(2): 179–186 [XU Fanzhen, HU Gu, SHA Liqing. The effect of nitrogen and phosphorus fertilizers on soil respiration, soil

- microbial biomass carbon and soil nutrients of rubber plantation in Xishuangbanna, SW China [J]. *Mountain Research*, 2014, **32** (2): 179–186]
- [24] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体 (CO₂、CH₄、N₂O) 的源/汇强度及其温室效应研究进展 [J]. *中国生态农业学报*, 2011, **19** (4): 966–975 [ZHANG Yuming, HU Chunsheng, ZHANG Jiabao, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO₂, CH₄ and N₂O in agricultural soils [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, **19** (4): 966–975]
- [25] SUSEELA V, CONANT R T, WALLENSTEIN M D, et al. Effects of soil moisture on the temperature sensitivity of heterotrophic respiration vary seasonally in an old-field climate change experiment [J]. *Global Change Biology*, 2012, **18** (1): 336–348
- [26] DAVIDSAN E A, VERCHOT L V, CATTANIO J H, et al. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48** (1): 53–69
- [27] MERINO A, PEREZ P, MACIAS F. Responses of soil organic matter and greenhouse gas fluxes to soil management and land use changes in a humid temperate region of southern Europe [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36** (6): 917–925
- [28] CONANT R T, KLOPATEK J M, MALIN R A, et al. Carbon pools and fluxes along a semiarid gradient in northern Arizona [J]. *Biogeochemistry*, 1998, **43**: 43–61
- [29] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2005, **20** (7): 778–785 [ZHANG Dongqiu, SHI Peili, ZHANG Xianzhou. Some advance in the main factors controlling soil respiration [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, **20** (7): 778–785]
- [30] VELDKAMP E, KELLER M. Nitrogen oxide emissions from a banana plantation in the humid tropics [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, **102** (D13): 15889–15898
- [31] 阮雷雷. 湖北咸宁地区几种土地利用类型的温室气体排放及增温潜势 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2007 [RUAN Leilei. Greenhouse gases emissions from different land use types and their global warming potential at Xianning, Hubei, China [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007]
- [32] BORKEN W, MUHS A, BEESE F. Application of compost in spruce forests: effects on soil respiration, basal respiration and microbial biomass [J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, **159**: 49–58
- [33] IQBAL J, HU Ronggui, LIN Shan, et al. CO₂ emission in a subtropical red paddy soil (Ultisol) as affected by straw and N-fertilizer applications: A case study in Southern China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, **131** (3–4): 292–302
- [34] ZHANG X X, YIN S, LI Y S, et al. Comparison of greenhouse gas emissions from rice paddy fields under different nitrogen fertilization loads in Chongming Island, Eastern China [J]. *Science of Total Environment*, 2014, **472**: 381–388
- [35] JONG E. de, SCHAPPERT H J V, MACDONALD K B. Carbon dioxide evolution from virgin and cultivated soil as affected by management practices and climate [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1974, **54**: 299–307
- [36] MO J M, ZHANG Wei, ZHU W X, et al. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China [J]. *Global Change Biology*, 2008, **14** (2): 403–412
- [37] MIYATA A, LEUNING R, DENMEAD O T, et al. Carbon dioxide and methane fluxes from an intermittently flooded paddy field [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, **102**: 287–303
- [38] 田慎重, 宁堂原, 迟淑筠, 等. 不同耕作措施的温室气体排放日变化及最佳观测时间 [J]. *生态学报*, 2012, **32** (3): 879–888 [TIAN Shenzhong, NING Yuantang, CHI Shuyun, et al. Diurnal variations of the greenhouse gases emission and their optimal observation duration under different tillage systems [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32** (3): 879–888]
- [39] 朱金霞, 张源沛, 郑国保, 等. 水稻田土壤 N₂O 和 CO₂ 排放日变化规律及最佳观测时间的确定 [J]. *中国农学通报*, 2014, **30** (3): 146–150 [ZHU Jinxia, ZHANG Yuanpei, ZHENG Guobao, et al. The diurnal variation of the emission of N₂O and CO₂, and the best observation time in paddy field [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, **30** (3): 146–150]
- [40] 谭周进, 周卫军, 张杨珠, 等. 不同施肥制度对稻田土壤微生物的影响研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, **13** (2): 430–435 [TAN Zhoujin, ZHOU Weijun, ZHANG Yangzhu, et al. On the effect of rice-straw returned to the field on microbes and enzyme activity in paddy soil [J]. *Acta Ecology Sinica*, 2007, **13** (2): 430–435]
- [41] 沙丽清, 郑征, 唐建维, 等. 西双版纳热带季节雨林的土壤呼吸研究 [J]. *中国科学 (D 辑: 地球)*, 2004, **34**: 167–174 [SHA Liqing, ZHENG Zheng, TANG Jianwei, et al. Soil respiration in tropical rainforest in Xishuangbanna [J]. *Science in China (series D: Earth sciences)*, 2004, **34**: 167–174]
- [42] 蒋薇, 王克勤, 郭玲梅, 等. 不同地类红土剖面土壤有机质及氮素分布研究 [J]. *广东农业科学*, 2014, **15**: 61–65 [JIANG Wei, WANG Keqin, GUO Lingmei, et al. Analysis of soil organic matter and nitrogen distribution on slopes under different land use types in red soil region [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, **15**: 61–65]
- [43] 周文君, 沙丽清, 沈守良, 等. 西双版纳橡胶林土壤呼吸季节变化及其影响因子 [J]. *山地学报*, 2008, **26** (3): 317–325 [ZHOU Wenjun, SHA Liqing, SHEN Shougen, et al. Seasonal change of soil respiration and its influence factors in rubber (*Hevea Brasiliensis*) plantation in Xishuangbanna, SW China [J]. *Mountain Research*, 2008, **26** (3): 317–325]
- [44] HASHIMOTO S, TANAKA N, SUZUKI M, et al. Soil respiration and soil CO₂ concentration in a tropical forest, Thailand [J]. *Journal of Forest Research*, 2004, **9** (1): 75–79.

Soil CO₂ Emission from Banana Plantation in Xishuangbanna, Yunnan, Southwest China

ZHANG Jin^{1, 2}, LV Tong^{1, 2}, SHA Liqing^{1 *}

(1. Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Menglun, Yunnan 666303, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Nowadays banana plantation has been one main type of land use in Xishuangbanna. A one-year study was conducted in a banana plantation in Xishuangbanna to gain the character of CO₂ emission and its influence factors using the static chamber and gas chromatography techniques. The results showed that: (1) The CO₂ flux was higher in day-time than in night in dry season when the observation day was sunny, but we found opposite result in rainy season as the rainfall in the afternoon of this day. The diurnal CO₂ flux in rainy season was significantly ($p < 0.05$) higher than in dry season on the terrace bench, but no difference was observed on the drainage ditch. (2) The seasonal pattern of soil CO₂ emission was the same under different sites (soils under banana plants, between banana plants and on the drainage ditch). (3) For all sites, soil CO₂ emissions were higher in rainy season than in dry season, and the total annual emission was $9.01 \pm 1.45 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$. (4) The CO₂ flux had significant positive correlations with both air and soil temperature ($p < 0.01$) and soil water content ($p < 0.05$). The results of this study provided a preliminary understanding of CO₂ emissions from soil under banana plantation in tropical regions of China that revealed basic data for the carbon cycling in banana plantation ecosystem and provided a scientific theoretical basis for sustainable management of banana plantations.

Key words: Xishuangbanna; banana plantation; soil CO₂ emission