

不同碳源对植烟土壤碳平衡的影响

李健铭^{1, 2, 3}, 李志宏¹, 王 鹏², 张云贵¹, 熊维亮⁴,
张美娟¹, 李 君¹, 辛 刚^{2*}, 刘青丽^{1*}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 / 烟草行业生态环境与烟叶质量重点实验室, 北京 100081; 2. 黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江 大庆 163319; 3. 福建农林大学资源与环境学院, 福建 福州 350002; 4. 四川烟草公司攀枝花市公司, 四川 攀枝花 617026)

摘 要: 为探索不同碳源对土壤碳的提升作用, 开展了不同碳源对烤烟生长季土壤碳平衡影响的研究, 旨在为植烟土壤有机肥施用调控提供理论依据。试验设在四川省攀枝花市, 以烤烟为供试作物进行田间小区试验。设对照 (不施有机肥)、秸秆、农家肥、油枯、农家肥 + 油枯 5 个不同施肥处理, 3 次重复。采用 VaisalaMI70 土壤呼吸测量系统进行田间监测, 并同时观测环境条件。对烤烟根系进行收集, 测定土壤根系固碳量。研究结果显示, 1) 在烤烟生长季, 植烟土壤呼吸动态呈倒“S”型的先下降后上升再下降的变化规律, 施用有机肥增加了土壤呼吸强度, 尤其是在有机肥施用初期。2) 烤烟生长季碳排放量平均为 $385.84 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 不同处理碳排放量表现为对照 $293.11 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 秸秆 $396.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 农家肥 $363.36 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 油枯 $422.98 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 油枯 + 农家肥 $452.84 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。3) 不同碳源分解速率差异较大, 生长季分解系数为 $0.22 \sim 0.42$, 秸秆和农家肥分解系数低于油枯。4) 有机肥的施用对烤烟根系碳积累量的提升效果不明显, 而各有机肥处理相比, 农家肥以及农家肥与油枯混施相对于秸秆处理能够显著增加烤烟根系碳积累量。5) 当地耕作模式下, 整个生育期有 56.42% 的烤烟根系残留于土壤, 可补偿土壤碳 $260.56 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 烤烟根系碳是常规施肥下土壤碳的主要来源。6) 常规施肥下, 单施化肥植烟土壤表现为碳源, 有机无机配施下植烟土壤表现为碳汇。有机肥的施用能够提升土壤碳平衡, 减少碳损失; 采用农家肥与油枯混施也能够一定程度上促进烤烟根系碳积累的提升。

关键词: 攀枝花; 碳平衡; 烤烟; 土壤呼吸

农田生态系统是全球碳库中最活跃的部分, 频繁受到人类活动的干扰, 对全球碳库的动态变化有着深远的影响, 并可以在较短的时间尺度上调节碳库^[1]。土壤呼吸是陆地生态系统向大气释放 CO_2 的主要过程, 是表征农田土壤肥力和土壤质量的重要指标^[2-3]。对大气 CO_2 浓度有着重要影响的表现土壤呼吸速率能改变土壤碳的积累量, 并引起大气 CO_2 浓度的改变, 从而影响碳循环^[4]。在不同土地利用方式和管理措施下, 农田生态系统会成为碳源或碳汇。土壤呼吸作为农田生态系统有机碳的主要输出形式, 影响着生态系统的碳平衡^[5]。

已有研究表明, 施肥较不施肥可以显著增加土壤呼吸速率^[6], 不同施肥处理对土壤呼吸的影响结果也不一致^[7-9]。土壤呼吸强度与土壤有机质含量及矿化速率、土壤微生物种类及活性之间均存在密切的联系^[10]。土壤水分和温度是影响农田土壤 CO_2 排放的关键因素, 两者相互协调共同调控土壤 CO_2 排放, 耕作、施肥等措施直接或间接影响农田土壤水分和温度, 进而改变土壤 CO_2 排放量^[11-13]。此外, 不同种植作物类型下的土壤呼吸速率也存在显著差异^[14]。目前, 不同施肥条件下农田碳平衡的研究主要集中在水稻^[7-8]、玉米^[15-16]、小麦^[17-18]、棉花^[19]、大豆^[20]等种植作物的土壤上, 对植烟土壤在烤烟生长期土壤呼吸的变化和碳平衡方面的研究还鲜见报道, 因此, 研究不同碳源对植烟土壤碳平衡的影响, 对进一步评价农田生态系统碳源 / 汇具有重要意义。本研究主要在四川攀枝花地区, 以碳投入与碳排放为切入点, 通过研究不同碳源类型对土壤 CO_2 排放以及烤烟根系固碳量

收稿日期: 2019-11-29; 录用日期: 2020-02-21

基金项目: 中国烟草总公司四川省公司科技项目 (SCYC201702, SCYC201707)。

作者简介: 李健铭 (1993-), 男, 黑龙江伊春人, 博士研究生, 主要研究方向为生态系统碳循环。E-mail: lijianmingsci@163.com。

通讯作者: 刘青丽, E-mail: lql1000@126.com; 辛刚: E-mail: xingang19692003@163.com。

的影响，明确维持土壤碳平衡的有机物质投入量，探索不同碳源对土壤碳的提升作用，以期为烟田生态系统碳循环和碳平衡的深入研究提供相关理论依据和方法。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2017年4~9月在四川省攀枝花市仁和区平地镇进行。东经101°47′51″，北纬

26°12′7″，海拔1910 m，土壤类型为暗紫泥土-紫色土，土壤养分状况：全碳1.151%，硝态氮8.4 mg·kg⁻¹，铵态氮1.7 mg·kg⁻¹，有效磷14.3 mg·kg⁻¹，速效钾136.5 mg·kg⁻¹，pH 7.7，仁和区属亚热带季风气候，四季不分明，昼夜温差大，气候干燥，日照长，年平均气温20.4℃，年积温达7450℃，年日照时数达2745 h，无霜期300 d以上。2017年烤烟生长季月平均温度为20.01℃，降水量696.2 mm，具体条件如图1所示。

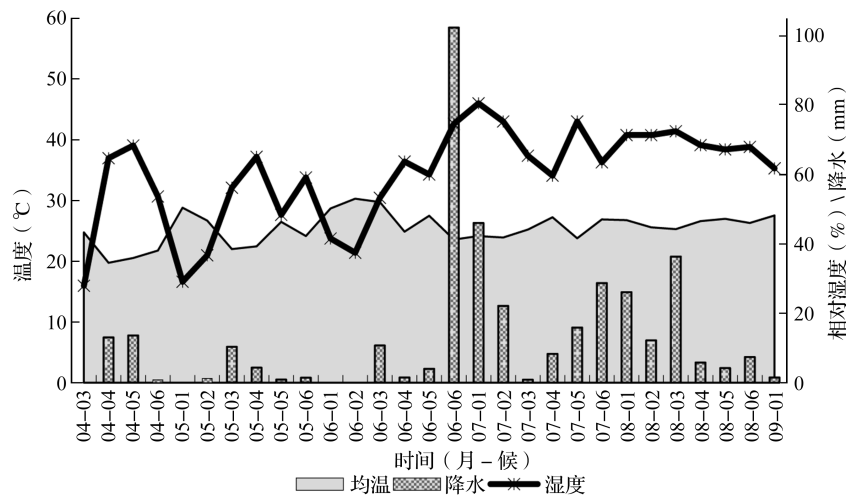


图1 烤烟生长季的主要气候条件

1.2 试验设计

试验共设置5个处理：T1：不施有机肥（对照）；T2：秸秆；T3：农家肥；T4：油枯；T5：农家肥+油枯，各处理施肥量如表1。化肥采用烟草专

用肥（12-12-25）、烟草上廂肥（5-5-46），有机肥采用农家肥（羊粪）、油枯、秸秆（水稻），有机肥养分含量如表2所示。

表1 各处理肥料投入量 (kg·hm⁻²)

处理	化肥施用量			有机肥施用量	
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	大田	静态箱收集区
T1	对照	87.00	87.00	288.00	0.00
T2	秸秆	87.00	87.00	288.00	300.00
T3	农家肥	87.00	87.00	288.00	750.00
T4	油枯	87.00	87.00	288.00	225.00
T5	农家肥+油枯	87.00	87.00	288.00	225.00+225.00

表2 有机肥养分含量

有机肥名称	有效磷 (mg·kg ⁻¹)	速效钾 (mg·kg ⁻¹)	硝态氮 (mg·kg ⁻¹)	铵态氮 (mg·kg ⁻¹)	全碳 (%)	全氮 (g·kg ⁻¹)	含水量 (%)
农家肥	846.61	321.32	658.00	0.70	17.98	17.23	50.00
油枯	5621.98	442.48	0.00	58.50	33.02	62.25	14.29
秸秆	228.26	207.13	0.00	4.40	30.87	5.33	9.52

1.3 田间管理

大田试验品种均采用当地主栽烤烟品种“云烟87”，移栽苗选用漂浮育苗。试验于2017年5月2日进行移栽，种植密度为 $16500 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在烤烟移栽前土壤深耕起垄，以110 cm行距、55 cm株距打穴，之后施肥。施肥方法为：烟草专用肥的基肥和追肥比例为3:2，有机肥全部做基肥施用。基肥中烟草专用肥和有机肥混合穴施，将肥料与穴内(20 cm × 20 cm × 10 cm)土壤混合，施肥移栽后覆盖地膜。移栽后20 d追肥，将烟草专用肥用少量水溶解浇在距烟根5 cm处，用土覆盖。烤烟移栽后35 d揭膜，再次追施烟草专用肥与上廋肥于烟根5 cm处，上廋培土覆盖，现蕾后打顶。田间管理按优质烟生产技术措施实施。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 土壤呼吸参数的测定

采用静态箱—红外 CO_2 分析法测定土壤呼吸参数。仪器为便携式红外 CO_2 分析仪(型号VaisalaMI70, 芬兰)。静态箱为自制, 采用不透明PVC材料制成, 箱体尺寸为直径20 cm、高25 cm的圆柱体, 箱顶设有分析仪和温湿度计探头插口(用硅胶密封), 并通过水压测试, 静态箱与底座对接, 采用水密封方式隔绝箱外气体。小区内在左数第3垄的中间位置选取固定点, 在垄上放置直径为20 cm的圆形PVC底座, 高20 cm, 插入土壤15 cm左右。为减少对土壤的干扰, PVC环于测定前一天安置好。每个PVC环测定1次, 每次测量5 min, 每个处理3次重复, 共3个数据, 取其平均值作为日土壤呼吸值。于烤烟整个生育期内每7 d测定一次, 如遇下雨天气则适当调整, 测定时间统一为8:00 ~ 11:00。

1.4.2 作物生物量的测定与计算

于烤烟成熟期, 选取长势均匀一致的植株, 每个重复取样1株, 以根茎为中心, 将垄方向55 cm、垂直方向60 cm、深20 cm的土层全部挖出, 通过水洗及高密度网过滤法, 收集烤烟根系置于烘箱中, 105℃杀青30 min, 70℃烘干至恒重, 测定干重, 并按照种植密度计算根系生物量。

1.4.3 土壤呼吸速率的计算

$$F = H \times mP / [R \times (273 + T)] \times dC/dt$$

式中: F 为 CO_2 排放量($\text{mg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$); H 为箱体有效高度, m 为 CO_2 的摩尔质量; P 为采样点大气压力, 通常视为标准大气压, 即 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$; R 为普适气常数 $8.314 \text{ (J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$; T 为采样时箱内平均气

温($^{\circ}\text{C}$); dC/dt 为 CO_2 排放速率($\text{ppm} \cdot \text{min}^{-1}$)^[21]。

1.4.4 农田土壤碳平衡测算

烤烟根系碳残留系数 = (田间试验根系生物量 - 农户移除根系生物量) / 田间试验根系生物量

土壤碳平衡 = 植株根系固碳量 × 烤烟根系碳残留系数 + 有机碳施入量 - 土壤碳排放量

1.5 数据处理

试验数据采用Excel 2007处理, 运用SPSS 21.0单因素方差分析对不同处理各项指标进行显著性检验($P < 0.05$), 使用Origin 2018做图。

2 结果与分析

2.1 不同碳源下土壤呼吸动态

土壤呼吸速率可以反映土壤中有有机碳的分解强度, 研究结果(图2)显示, 处理T1、T2、T3、T4和T5土壤 CO_2 的排放速率变化范围分别在21.63 ~ 47.95、15.72 ~ 120.09、32.74 ~ 79.40、19.29 ~ 88.78和23.57 ~ 159.50 $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。各处理于烤烟移栽初期(5月9日)土壤呼吸排放量最高, 且随着烤烟移栽后生育期的推进, 排放动态总体表现为倒“S”型, 呈先下降后上升再下降的变化趋势, 各处理于7月4日与8月1日前后分别出现了低峰与高峰两个峰值。这主要是由于烤烟种植初期农事活动与肥料的施用对土壤扰动提升了土壤碳排放, 而烤烟生育期后期, 降水量与土壤呼吸排放量呈正相关造成的。从不同处理来看, 烤烟移栽初期各处理土壤呼吸速率差异较大, 表现为 $T5 > T2 > T4 > T3 > T1$, 施用有机肥处理土壤呼吸速率大于单施化肥处理; 随着生育期的推进, 不同处理之间的差异变小, 表明施用有机肥增加了土壤呼吸速率, 且在施用初期影响最大。

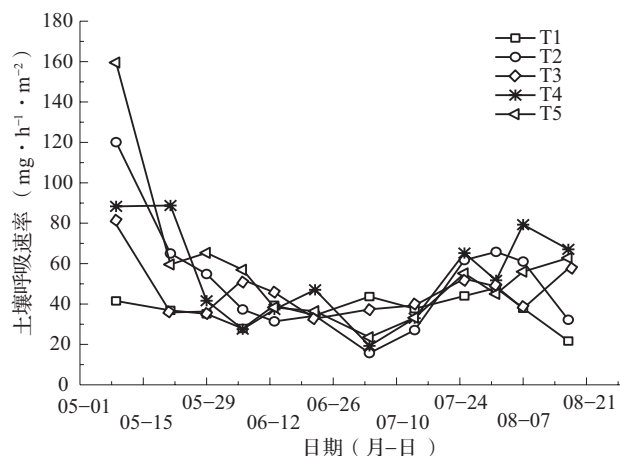


图2 不同处理生长季 CO_2 排放动态

2.2 不同碳源对土壤 CO₂ 排放及碳损失的影响

2.2.1 土壤 CO₂ 排放总量

研究结果(图3)显示,土壤 CO₂ 排放量在 1074.72 ~ 1660.41 kg·hm⁻²,不同处理 CO₂ 排放量表现为 T5>T4>T2>T3>T1,其中,T5 处理处于最高值,T1 处理处于最低值。有机肥处理与对照相比,T2、T3、T4 处理 CO₂ 与碳排放量分别高于对照 380.59、257.62、476.20 与 103.79、70.25、129.87 kg·hm⁻²,但差异不显著,表明秸秆、油枯、农家肥的施用提高了土壤 CO₂ 的排放总量,但效果不明显。T5 处理与对照相比,CO₂ 与碳总排放量分别提高了 585.69 和 159.73 kg·hm⁻²,差异达到显著水平,表明采用农家肥与油枯混施增加了土壤有机物质的分解。

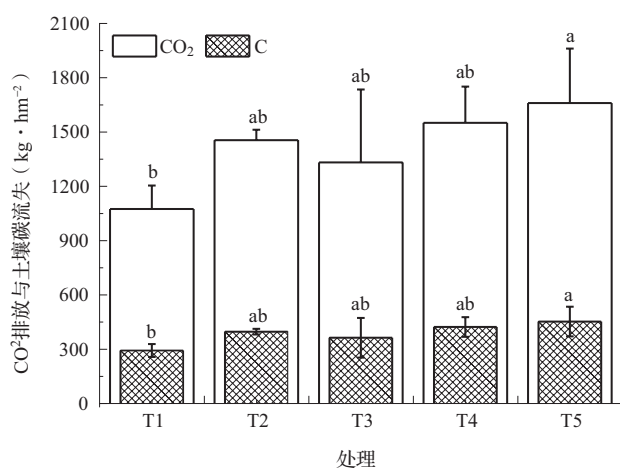


图3 烤烟生长季 CO₂ 与碳排放总量

注:小写字母不同表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

2.2.2 不同碳源在烤烟生长季的分解率

不同碳源在烤烟生长季节分解率有所差异(表3),各处理有机肥分解率在 0.22 ~ 0.42 之间,有机肥分解率表现为 T3<T2<T5<T4,其中油枯分解率最高,农家肥分解率最低,秸秆以及农家肥与油枯混施分解率则处于中间水平。说明各有机肥处理相比,油枯处理有机肥分解率较高,有利于有机材料中碳的分解与转化,农家肥处理有机肥分解率偏低,相对于其他有机材料而言,有利于碳在土壤中的固定。

表3 有机肥在烤烟生长季的分解率

	处理			
	T2	T3	T4	T5
分解率	0.26	0.22	0.43	0.39
方差	0.12	0.31	0.16	0.21

2.3 不同碳源对烤烟根系固碳的影响

2.3.1 烤烟根系碳累积

烤烟根系碳累积量平均为 461.78 kg·hm⁻²,不同施肥处理碳累积量如图4所示。有机肥处理与对照相比,烤烟根系碳累积量无显著差异,而在有机肥处理中,T3、T4、T5 处理间烤烟根系碳累积量无显著差异,而 T3 与 T5 处理显著高于 T2 处理,说明有机肥的施用对烤烟根系碳累积量的增加效果不明显。而有机肥处理中,农家肥以及农家肥与油枯混合施用相对于秸秆处理,其对烤烟根系碳累积的提升有明显的促进作用。

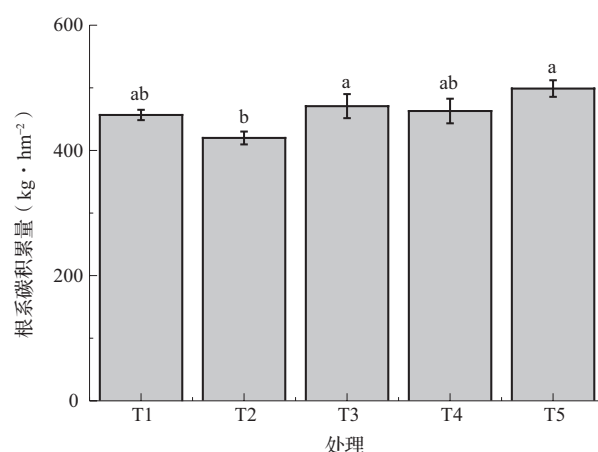


图4 不同碳源下烤烟根系碳累积量

2.3.2 烤烟根系碳还田系数及还田量

试验采集的根系生物量与农民耕作结束后从田间移除的根系生物量的差值换算成含碳量,即为烤烟根系碳还田量。研究结果(图5)显示,试验操作采集的根系生物量约 63.61 g·株⁻¹;农民在正常耕作模式下,在烤烟采收结束后通过人工拔除的植株根系生物

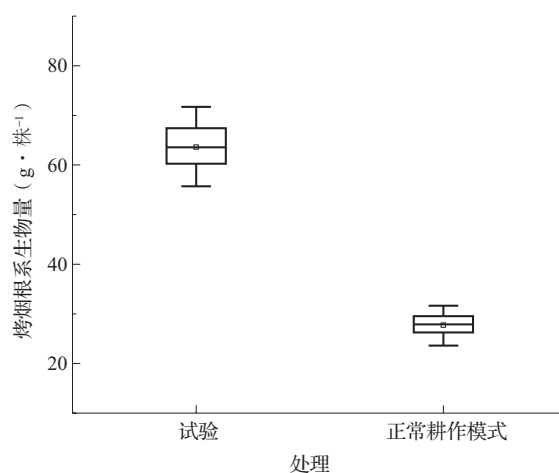


图5 烤烟根系生物量

量约 $27.72 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$, 农民正常耕作模式下取得的根系生物量占总根系生物量的 43.58%, 因此根系残留量占总根系碳量的 56.42%, 即烟农收获烤烟后, 烤烟根系碳在土壤中残留量为 $260.56 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

2.4 不同碳源下的土壤碳平衡

不施用有机肥条件下, 烤烟生长季碳的输入量略小于输出量, 土壤碳略亏缺; 在 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 秸秆 (T2) 或 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (T4) 油枯投入下, 土壤碳基本平衡; 在 $750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 农家肥或在 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 农家肥 + $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 油枯 (T5) 投入下, 土壤碳略有盈余, 表明烟农常规施用有机肥下, 植烟土壤碳平衡为碳汇。土壤碳主要来源于根系和外源施用有机碳, 从表 4 可以看出, 烟农常规施肥下, 施肥投入有机碳 $63.67 \sim 83.90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 仅占烤烟生长季碳投入量的 19.75% ~ 26.02%, 而烤烟根系输入 $236.89 \sim 281.40 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占烤烟生长季碳投入的 73.98% ~ 87.77%, 由此可见, 在常规施肥下, 植烟土壤碳主要源于烤烟根系。

表 4 烤烟生长季农户常规施肥下土壤碳平衡

($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

处理	碳投入		土壤碳损失	土壤碳平衡
	根系碳 积累量	有机碳 输入量		
T1	257.64ab	0.00	293.11b	-35.47c
T2	236.89b	83.79	314.62ab	6.06b
T3	265.56a	67.44	307.67ab	25.33ab
T4	261.19ab	63.67	320.03ab	4.84b
T5	281.40a	83.90	326.21a	39.09a

注: 同列小写字母不同表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 植烟土壤呼吸动态

农田土壤呼吸是一个复杂的生物学过程, 受多种因素影响, 包括作物类型、净初级生产力、地上与地下生物量分配等生物因子、土壤温度、土壤水分、土壤有机质等非生物因子及土壤耕作、施肥等人为活动因子, 各因子之间既相互独立又相互联系地影响土壤呼吸^[14, 22]。通过对不同碳源下植烟土壤呼吸的动态研究发现, 烤烟大田生长期, 不同施肥处理的土壤呼吸速率均呈倒“S”型变化, 峰值出现在 70 d, 这与戴衍晨等^[23]的“M”型研究结果不同, 这可能是由于烤烟种植地区的维度不同使生育期长短产生了变化。不同施肥处理的土壤呼

吸速率均值表现为施用有机肥处理高于不施肥处理, 这与前人^[6, 9, 24]的研究结果一致。施肥处理土壤呼吸的敏感性大于不施肥处理, 这是因为随着土壤呼吸底物的增加, 土壤呼吸对温度的敏感性升高^[25]。但单施化肥与化肥配施有机肥处理对土壤呼吸速率的影响无显著差异, 这与刘晓雨等^[7]及赵峰等^[8]的研究结果一致, 且本研究发现, 采用农家肥与油枯混施处理能够明显提升土壤呼吸排放量。土壤水分是影响陆地生态系统 CO_2 通量的重要环境要素, 对植被的生长、根系分布、微生物活性等与土壤呼吸密切相关的生物因子起控制作用^[26], 土壤湿度是影响土壤呼吸的另一个重要因子。土壤湿度对土壤呼吸的直接影响是通过影响根和微生物的生理过程, 对土壤呼吸的间接影响是通过影响底物和氧气的扩散。相关研究结果表明, 土壤呼吸速率和土壤湿度之间存在正相关、负相关或是没有相关性^[27]。本研究中, 土壤 CO_2 排放量与降水量呈正相关, 说明降水量的增加促进了 CO_2 的排放。

3.2 不同碳源的碳分解与碳排放

羊粪农家肥是一种弱碱性肥料, 具有养分浓度高, 有机质含量多, 氮、磷、钾含量高等特点^[28]。油枯属于饼肥的一种, 饼肥施用后可以提高土壤有机质的含量, 为土壤微生物提供了营养和能量, 给微生物的活动提供了良好的环境条件, 土壤微生物活动旺盛, 促进了土壤中细菌、真菌、放线菌数量的增加, 同时提高了土壤中酶的活性, 促进了土壤有机养分的分解^[29]。秸秆的施用可通过增加土壤有机碳的直接输入实现固碳, 维持土壤有机质平衡^[30-31]。当有机肥施入土壤后, 受土壤微生物、温度和水分等条件的影响而发生有机质的机械粉碎、分解、合成等作用, 最后成为土壤有机质的重要组成部分^[32]。试验研究结果表明, 有机肥处理中, 农家肥与油枯混施土壤 CO_2 排放量最高, 其次为油枯处理, 而有机质分解率表现为油枯处理分解率最高, 其次为农家肥 + 油枯处理, 说明农家肥与油枯混施有利于 CO_2 向气体转化并排放到大气中, 而单施油枯处理 C 的去向更倾向于在土壤中的固定, 这可能与农家肥本身有机物质含量高, 而油枯更倾向于促进土壤微生物活性来改善土壤环境, 且农家肥与油枯混施起到的双重作用有关; 秸秆与农家肥相比, 土壤 CO_2 排放量与有机质分解率呈正相关, 说明土壤 CO_2 排放量随着有机物料施入量的增加而增加, 土壤 C 的运行途径有更为明确的规律性, 这与

宋大利等^[30]及刘禹池等^[31]的研究结果相似。

3.3 植株根系对碳的固定与土壤碳平衡

施用有机肥和不施有机肥对烤烟根系碳积累总量的提升影响不大。而有机肥处理中农家肥以及农家肥与油枯混施与秸秆处理相比,对烤烟根系碳积累量的增加有明显的促进作用,已有研究表明,有机肥的施用有利于提高土壤中有机碳的含量^[33-34]。在本研究中,有机肥的施用提升了土壤碳平衡,这与前人研究结果相似,而在有机肥处理中,农家肥与油枯混施处理下的土壤碳平衡效果更为理想;烤烟根系是植烟土壤碳的主要来源,而在烤烟生产结束后,农民会手动将烤烟连根拔出,部分根系由于人为操作的影响离开了土壤,相当于烤烟总根系生物量的43.58%,从而减少了土壤中C的固定,对土壤碳平衡产生了影响;且当地常规施肥情况下,单施化肥的土壤碳平衡为正数,表现为碳源,而有机肥与无机肥配施的土壤碳平衡为负数,表现为碳汇。

4 结论

有机肥的施用直接影响了土壤碳平衡,在烤烟生长期间,植烟土壤呼吸动态呈倒“S”型的先下降后上升再下降的变化规律,在烤烟旺长期(烤烟移栽后49 d左右)出现了低峰值,在烤烟打顶期(烤烟移栽70 d左右)出现了高峰值。有机肥的施用增加了土壤呼吸的强度,但对烤烟根系碳积累量的提升效果不明显。单施用化肥的植烟土壤表现为碳源,而有机肥与化肥配施使植烟土壤成为碳汇。在当地耕作模式下,整个生育期有56.42%的烤烟根系残留于土壤当中,使烤烟根系成为常规施肥下土壤碳的主要来源。因此,施用有机肥能够提升土壤碳平衡,减少碳损失,且采用农家肥与油枯混施也能够一定程度上促进烤烟根系碳积累量的提升。

参考文献:

- [1] 李银坤,陈敏鹏,夏旭,等.不同氮水平下夏玉米农田土壤呼吸动态变化及碳平衡研究[J].生态环境学报,2013,22(1):18-24.
- [2] Schimel D, Stephens B B, Fisher J B. Effect of increasing CO₂ on the terrestrial carbon cycle [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(2): 436-441.
- [3] 杨玲,张前兵,王进,等.管理措施对绿洲农田土壤总有机碳及易氧化有机碳季节变化的影响[J].石河子大学学报(自然科学版),2013,31(5):549-555.
- [4] Smith P. Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context [J]. European Journal of Agronomy, 2004, 20: 229-236.
- [5] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle [J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 7-20.
- [6] 高会议,郭胜利,刘文兆,等.黄土旱塬区冬小麦不同施肥处理的土壤呼吸及土壤碳动态[J].生态学报,2009,29(5):2551-2559.
- [7] 刘晓雨,潘根兴,李恋卿,等.太湖地区水稻土长期不同施肥条件下油菜季土壤呼吸CO₂排放[J].农业环境科学学报,2009,28(12):2506-2511.
- [8] 赵峥,岳玉波,张翼,等.不同施肥条件对稻田温室气体排放特征的影响[J].农业环境科学学报,2014,33(11):2273-2278.
- [9] 乔云发,苗淑杰,王树起,等.不同施肥处理对黑土土壤呼吸的影响[J].土壤学报,2007,44(6):1028-1035.
- [10] 李海防,夏汉平,熊燕梅,等.土壤温室气体产生与排放影响因素研究进展[J].生态环境,2007,16(6):1781-1788.
- [11] 李虎,邱建军,王立刚.农田土壤呼吸特征及根呼吸贡献的模拟分析[J].农业工程学报,2008,24(4):14-20.
- [12] 张丁辰,蔡典雄,代快,等.旱作农田不同耕作土壤呼吸及其对水热因子的响应[J].生态学报,2013,33(6):1916-1925.
- [13] 张俊丽, Tanveer S K, 温晓霞,等.不同耕作方式下旱作玉米田土壤呼吸及其影响因素[J].农业工程学报,2012,28(18):192-199.
- [14] 江国福,刘畅,李金全,等.中国农田土壤呼吸速率及驱动因子[J].中国科学:生命科学,2014,44(7):725-735.
- [15] 张俊丽,张锦丽,赵晓进,等.不同耕作方式下旱作玉米田土壤CO₂排放量及其与土壤水热的关系[J].干旱地区农业研究,2018,36(4):88-93.
- [16] 伏星舟,王立,杨彩红,等.不同耕作方式对绿洲区夏玉米农田土壤呼吸及酶活性的影响[J].水土保持通报,2018,38(5):103-108.
- [17] 张晓龙,沈冰,权全,等.渭河平原农田冬小麦土壤呼吸及其影响因素[J].应用生态学报,2016,27(8):2551-2560.
- [18] 王雪,李景,汪俊玉,等.免耕施肥条件下冬小麦季土壤呼吸速率及影响因素[J].中国土壤与肥料,2017(3):105-110.
- [19] 张前兵,杨玲,王进,等.干旱区不同灌溉方式及施肥措施对棉田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J].中国农业科学,2012,45(12):2420-2430.
- [20] 张赛,罗海秀,王龙昌,等.保护性耕作下大豆农田土壤呼吸及影响因素分析[J].中国生态农业学报,2013,21(8):913-920.
- [21] 黄耀.地气系统碳氮交换—从实验到模型[M].北京:气象出版社.2003.
- [22] 熊瑛,王龙昌,赵琳璐,等.保护性耕作下蚕豆/玉米/甘薯三熟制农田土壤呼吸、碳平衡及经济—环境效益特征[J].中国生态农业学报,2018,26(11):1653-1622.
- [23] 戴衍晨,王瑞,申国明,等.不同施肥条件下烤烟生长期土壤呼吸变化及其影响因素[J].烟草科技,2016,49(1):8-13.

- [24] Ding W X, Meng L, Yin Y F, et al. CO₂ emission in an intensively cultivated loam as affected by long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39 (2): 669–679.
- [25] 花可可, 王小国, 朱波. 施肥方式对紫色土土壤异养呼吸的影响 [J]. *生态学报*, 2014, 34 (13): 3602–3611.
- [26] Rustad L E, Huntington T G, Boone R D. Controls on soil respiration: Implications for climate change [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48 (1): 1–6.
- [27] 孔雨光, 张金池, 王因花, 等. 苏北淤泥质海岸典型防护林地土壤呼吸及其温度敏感性 [J]. *生态学报*, 2009, 29 (8): 4084–4093.
- [28] 芦伟, 高月锋, 简路洋, 等. 羊粪作为有机肥对植物和土壤的影响 [J]. *家畜生态学报*, 2019, 40 (9): 86–90.
- [29] 郭群召, 吴学巧, 黄平俊. 饼肥对土壤性状、烤烟生长及烟叶品质的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2007 (6): 68–70.
- [30] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24 (1): 1–21.
- [31] 刘禹池, 冯文强, 秦鱼生. 长期秸秆还田与施肥对成都平原稻-麦轮作下作物产量和土壤肥力的影响 [J]. *西南农业学报*, 2015, 28 (1): 240–247.
- [32] 汪张懿, 宗良纲, 褚慧, 等. 有机肥分解及其对土壤有机碳矿化影响的模拟研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32 (1): 36–42.
- [33] 郭胜利, 高会议, 党廷辉. 施氮水平对黄土旱塬区小麦产量和土壤有机碳、氮的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15 (4): 808–814.
- [34] 张鹏, 李涵, 贾志宽, 等. 秸秆还田对宁南旱区土壤有机碳含量及土壤碳矿化的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30 (12): 2518–2525.

Effects of different carbon sources on carbon balance in tobacco soil

LI Jian-ming^{1, 2, 3}, LI Zhi-hong¹, WANG Peng², ZHANG Yun-gui¹, XIONG Wei-liang⁴, ZHANG Mei-juan¹, LI Jun¹, XIN Gang^{2*}, LIU Qing-li^{1*} (1. Institute of Agricultural Resource and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Ecological Environment and Tobacco Quality in Tobacco Industry, Beijing 100081; 2. College of Agriculture Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing Heilongjiang 163319; 3. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou Fujian 350002; 4. Sichuan Tobacco Company Panzhihua City Company, Panzhihua Sichuan 617026)

Abstract: In order to explore the promotion effects of different carbon sources on soil carbon, a study was carried out on the influence of different carbon sources on soil carbon balance in the growing season of flue-cured tobacco, aiming at providing theoretical basis for the regulation of soil organic fertilizer application. A field experiment was conducted in Panzhihua city, Sichuan province, using flue-cured tobacco as tested crop. Five fertilization treatments were set up: control (no organic fertilizer), straw, farmyard fertilizer, oil cake, farmyard fertilizer and oil cake, and repeated for 3 times. Field monitoring was conducted using VaisalaMI70 soil respiration measuring system, and environmental conditions were observed at the same time. The carbon sequestration of flue-cured tobacco roots was measured. The results showed that: 1) In the growth season of flue-cured tobacco, the soil respiration dynamics of tobacco plants showed an inverted “S” pattern, at first it went down, then rose and fell again. The application of organic fertilizer increased the soil respiration intensity, especially in the early application of organic fertilizer. 2) The average carbon emission of flue-cured tobacco in the growing season was 385.84 kg · hm⁻², and the carbon emission of different treatments was 293.11, 396.9, 363.36, 422.98, 452.84 kg · hm⁻², for the treatment of contrast, straw, farmyard fertilizer, oil cake, oil cake+farmyard fertilizer, respectively. 3) The decomposition rate of different carbon sources was significantly different, with a decomposition coefficient of 0.22 ~ 0.42 in the growing season. The decomposition coefficient of straw and farmyard fertilizer was lower than that of oil cake. 4) The application of organic fertilizer had no obvious effect on the improvement of root carbon accumulation in flue-cured tobacco. Farmyard fertilizer as well as farmyard fertilizer and oil residue mixed fertilizer significantly increased the root carbon accumulation of flue-cured tobacco compared with the treatment of straw. 5) In the local farming, the 56.42% roots of flue-cured tobacco remained in soil though the whole growth period, which compensated soil carbon by 260.56 kg · hm⁻². The root carbon of flue-cured tobacco is the main source of soil carbon under conventional fertilization. 6) In conventional fertilization, the tobacco soil under single application of fertilizer presented carbon source, while the tobacco soil under organic and inorganic fertilization presented carbon sink. The application of organic fertilizers can improve soil carbon balance and reduce carbon loss. Up to a point, the application of farmyard fertilizer mixed with oil cake can also promote the growth of flue-cured tobacco root carbon accumulation.

Key words: Panzhihua; carbon-balance; flue-cured tobacco; soil respiration