DOI: 10.3724/SP.J.1006.2020.94164

烟田生态系统碳收支研究

刘青丽¹ 蒋雨洲¹ 邹焱² 张云贵¹ 张恒² 石俊雄² 李志宏^{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 贵州省烟草科学研究院, 贵州贵阳 550081

摘要: 农业生态系统碳平衡对评估陆地生态系统的源和汇具有重要意义, 针对烤烟生长及管理的特殊性, 研究烟田生态系统碳收支, 为提升烟田管理及农业碳汇估算提供依据。本研究以定位试验为平台, 以单施化肥处理为研究对象, 于 2015—2017 年观测了烤烟生长季的碳收支。研究结果表明, 烤烟生物量平均为 $(5832.10 \pm 537.32) \text{ kg hm}^{-2}$; 烟株碳含量平均为 $(42.14 \pm 0.05)\%$, 累积固碳量为 $(2459.25 \pm 233.78) \text{ kg hm}^{-2}$ 。烤烟根系碳占烟株碳比例较高, 平均为 24.94%。烤烟生长季湿沉降碳达到了 $115.32 \text{ kg hm}^{-2}$, 干沉降碳量为 6.54 kg hm^{-2} , 两者占根系碳的 20.01%。烟生长季碳输出总量为 $2464.98 \text{ kg hm}^{-2}$, 其中 CO_2 排放碳占碳支出的 98.99%, 径流损失碳占支出的 0.76%, 淋溶损失碳占支出的 0.25%。烟田生态系统对大气而言是弱碳汇, 碳汇量 $116.13 \text{ kg hm}^{-2}$ 。虽然烤烟固碳总量相对较低, 但其根系对土壤碳贡献却相对较高。

关键词: 烤烟; 碳收支; 碳汇/源; 碳排放; 大气沉降

The study of carbon budget on field-tobacco ecosystem

LIU Qing-Li¹, JIANG Yu-Zhou¹, ZOU Yan², ZHANG Yun-Gui¹, ZHANG Heng², SHI Jun-Xiong², and LI Zhi-Hong^{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, China; ² Guizhou Academy of Tobacco Science, Guiyang 550081, Guizhou, China

Abstract: The carbon balance of the agricultural ecosystem is of great significance for the assessment of the source and sink of the terrestrial ecosystem. In view of the particularity of the growth and management of flue-cured tobacco, the carbon budget of the field-tobacco ecosystem was studied in order to provide the basis for the improvement of tobacco field management and the estimation of agricultural carbon sink. In this study, the carbon budget was observed with single application of chemical fertilizer using the long-term positioning test station for three years from 2015 to 2017. The results showed that the average cumulative biomass of flue-cured tobacco, the average carbon content of tobacco plant, and the cumulative carbon sequestration were $(5832.10 \pm 537.32) \text{ kg hm}^{-2}$, $(42.14 \pm 0.05)\%$, and $(2459.25 \pm 233.78) \text{ kg hm}^{-2}$, respectively. The ratio of root carbon to plant carbon was higher, with an average of 24.94%. The wet deposition carbon and the dry deposition carbon were $115.32 \text{ kg hm}^{-2}$ and 6.54 kg hm^{-2} respectively, both accounting for 20.01% of root carbon amount. The total carbon output in growing season was $2464.98 \text{ kg hm}^{-2}$, in which the CO_2 emission expenditure accounts for 98.99%, the runoff carbon expenditure 0.76%, and the leaching carbon accounts for 0.25%. The flue-cured tobacco ecosystem was a weak carbon sink to the atmosphere, with a carbon sink of $116.13 \text{ kg hm}^{-2}$. The total amount of carbon sequestration in flue-cured tobacco was relatively lower, whereas its root system had a relatively higher contribution to soil carbon.

Keywords: flue-cured tobacco; carbon budget; carbon sink/source; carbon emission; atmospheric deposition

农田生态系统是巨大的碳库, 是陆地生态系统 碳循环的重要组成部分, 农业生态系统碳平衡对于

本研究由国家烟草专卖局科技项目(110201402015, 110201901025[SJ-04])和中国烟草公司贵州省公司科技项目(201802)资助。

This study was supported by the National Tobacco Monopoly Bureau project (110201402015, 110201901025[SJ-04]) and the Guizhou Branch of China Tobacco Corporation Project (201802).

* 通信作者(Corresponding author): 李志宏, E-mail: lizhihong01@caas.ac.cn

第一作者联系方式: E-mail: liuqingli@caas.cn

Received (收稿日期): 2019-11-05; Accepted (接受日期): 2020-04-15; Published online (网络出版日期): 2020-05-11.

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20200511.1400.006.html>

评估陆地生态系统的源和汇具有重要意义。烤烟2017年种植面积达到了98.12万公顷^[1], 研究烟田生态系统碳收支, 为烟田管理改进及农业碳汇估算提供依据。由于不同植物碳含量^[2]、碳效率^[3]及碳储量^[4]不同, 因此作物种类影响农田生态系统碳平衡^[5]。以往农田生态系统碳收支的研究多集中在小麦^[6-8]、玉米^[7,9-11]、水稻^[12-13]、棉花^[14]、蔬菜^[15-16]等作物上, 在特色经济作物上较少研究。烤烟是我国重要的叶用经济作物, 相对于烟叶产量, 生产上更注重烟叶品质。为了获得优质的烟叶, 生产上采用打顶、抹芽、控制氮肥施用等生产措施^[17], 这无疑会影响烤烟生物量累积和碳固定。本研究针对烤烟生长及管理的特殊性, 以长期定位试验为平台, 研究烟田生态系统碳收支途径, 为烟田管理提升及农业碳汇估算提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

于2015—2017年在贵州省贵阳市开阳县龙岗镇长期定位试验进行(26°52′24.8″N, 107°06′40.8″E)。

试验地相对平坦, 灌排方便, 供试土壤为黄壤, 含有机质含量 43.76 g kg^{-1} 、全氮含量 2.71 g kg^{-1} 、全磷 1.18 g kg^{-1} 、全钾 18.18 g kg^{-1} 、速效磷 52.11 mg kg^{-1} 、速效钾 $181.75 \text{ mg kg}^{-1}$, pH 6.75。此区无霜期 240~265 d, 年平均气温 $13.5\sim 14.6$, 年日照时数 948.2~1084.8 h, 平均降水量 1129.9~1205.9 mm。2015—2017 年温度和降水如图 1 所示。

1.2 试验设计与管理

龙岗长期定位试验始于 2008 年, 设置了缺素、单施化肥、厩肥配施化肥、生物有机肥配施化肥、连作、轮作等处理。本研究选择单施化肥轮作处理(NPK, 前茬作物玉米)开展研究; 由于定位试验无重复, 为了增加数据的可信度, 在每个小区进行了多点采样(3 点)。

NPK 处理烤烟季施氮肥 75 kg hm^{-2} 、磷肥 (P_2O_5) 75 kg hm^{-2} 、钾肥 150 kg hm^{-2} 。其中氮肥和钾肥分基肥和追肥 2 次使用(基追比为 7 : 3)、磷肥作为基肥一次性施用。基肥为复混肥(N 10%; P_2O_5 10%; K_2O 25%)、过磷酸钙(P_2O_5 14%)和硫酸钾(K_2O 51%), 追肥施用硝酸铵(N 35%)和硫酸钾(K_2O 51%)。基肥采用条施, 追肥采用穴施。

图1 龙岗长期定位试验站 2015—2017 年温度和降水量

Fig. 1 Temperature and precipitation variation of long-term position test station from 2015 to 2017 in Longgang

供试烤烟品种为 K326, 移栽规格为 $110 \text{ cm} \times 55 \text{ cm}$, 每个小区 8 垄, 栽培烤烟 240 株。2015 年, 4 月 30 日施基肥, 5 月 1 日移栽, 6 月 14 日施追肥, 8 月底烤烟采收结束。2016 年, 5 月 3 日施基肥, 5 月 4 日移栽, 6 月 1 日施追肥, 烤烟 9 月中旬采收结束。2017 年, 4 月 18 日施基肥, 4 月 24 日移栽, 5 月 31 日追肥, 烤烟 9 月上旬采收结束。

整个烤烟生长季仅移栽时浇定根水, 其他时期均无人工灌溉。其他田间管理制度, 按照烤烟田间

耕作栽培制度进行。

1.3 样品采集与测试

1.3.1 气体样品采集 2015—2017 年采用静态箱-气象色谱法测定 CO_2 。静态箱如图 2^[18]所示, 其中底座尺寸为 $60 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$, 上箱尺寸长 $60 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 。在小区内固定 3 个底座(烟株在底座中央), 取样时将箱体小心放置嵌入底座凹槽内, 用水密封, 保证箱体内外空气不发生交换。在 0~45 min 内, 每间隔 15 min 用 50 mL 注射器采集气

体, 迅速转移到 250 mL 铝膜气样袋中(大连光明化工研究所生产)。每间隔 15 d 取 1 次样, 一般在 8:00—11:00 时间段进行, 取样后尽快完成样品测定。

图 2 测定高秆作物生态系统温室气体排放的组合式采样箱
Fig. 2 Combined sampling box for measuring greenhouse gas emissions in high stem crop ecosystem

1: 不锈钢顶箱壁; 2: 气压平衡管; 3: 采样管及三通阀; 4: 温度传感器; 5: 外壁上的隔热材料; 6: 不锈钢平台; 7: 弹性密封材料; 8: 弹性密封材料; 9: 土壤表面; 10: 不锈钢底座壁; 11: 植株。
1: stainless steel wall of top-box; 2: air pressure balance pipe; 3: sampling pipe and three-way valve; 4: temperature sensor; 5: thermal insulation material on the outer wall; 6: stainless steel platform; 7: elastic sealing material; 8: elastic sealing material; 9: soil surface; 10: stainless steel base wall; 11: a plant.

1.3.2 淋溶液收集 2015 年采用如图 3 的淋溶装置测定碳淋溶。将深 90 cm 土壤挖出, 在土壤中嵌入淋溶液收集桶, 上部用塑料薄膜沿剖面铺垫, 土壤按层回填, 尽量不破坏土体垂直结构, 形成一个

小型淋溶池, 利用抽气泵抽气产生负压提取淋溶液, 用 TOC 仪测定溶液中碳含量。

1.3.3 径流液收集 2016 年采用径流池测定碳径流。为使种植小区不被破坏, 在小区一侧挖掘并构建宽 1 m、深 1 m 的径流池, 贴小区一侧地面有直径为 5 cm 连接径流池内部的 PVC 管, 用于排小区内地表径流产生的水。降水或灌溉后收集径流水, 收集前将水样尽量混匀, 并将径流池中的水排空。收集到的水样立即送实验室低温保存或及时测定, 用 TOC 仪测定碳含量。

1.3.4 大气干湿沉降收集 2016 年参照国家标准方法(GB/T 15265-94), 设置干沉降和湿沉降缸(Φ150 mm), 收集大气干湿沉降。为减少地面起尘的影响, 降尘缸放置在高于地面 1.5 m 的铁架上, 安装不锈钢网罩防鸟类取水。湿沉降缸加盖, 在降雨时打开, 雨停后盖上盖子。干沉降缸中加入乙二醇溶液 60 mL 左右, 根据当地降雨和蒸发情况, 酌情加蒸馏水 50~100 mL; 遇降雨封盖, 雨停揭盖继续收集。干湿沉降样品, 每月采集 1 次。采用 TOC 仪测定碳含量。

1.3.5 植株样品采集 2015—2017 年, 烤烟成熟期, 每小区选择长势中等烟株 3 株, 采集整株植物样品, 分为根、茎(包含花絮及叶芽)、下部叶(底叶及 1~6 片叶)、中部叶(7~12 片)、上部叶(13 片以上),

图 3 土壤淋溶水收集装置
Fig. 3 Device of soil leaching solution collection from soil

杀青烘干之后称重。将标记株样品粉碎, 用 TOC 仪测定碳含量。

1.4 计算

CO₂ 排放速率(k): $C = kt + C_0$

式中, C 为 CO₂ 浓度($\mu\text{mol L}^{-1}$), t 为时间(min), 该线性方程的斜率 k 代表了 CO₂ 排放速率($\mu\text{mol L}^{-1} \text{min}^{-1}$)。

CO₂ 排放通量(F): $F = 60 \times H \times \frac{44 \times 1.013}{8.314 \times (273 + T)} \times k$

式中, F 为 CO₂ 的排放通量($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$), 常数 60 为时间换算, 从 min 转换为 h。 H 为采样箱的有效高度(cm), T 为采样时箱内平均气温(), 常数 44 为 CO₂ 的摩尔质量(g mol^{-1})。

烤烟生长季 CO₂ 排放总量(M):

$$M = \sum \left\{ \frac{F_{i+1} + F_i}{2} \right\} \times (t_{i+1} - t_i)$$

式中, M 为 CO₂ 累积排放量(kg hm^{-2}), F 为 CO₂ 排放通量($\text{kg hm}^{-2} \text{d}^{-1}$), i 为采样次数, t 为移栽后天数(d)。

$$\text{烟株固碳量}(\text{kg hm}^{-2}) = \sum_i^n C_i \times B_i$$

式中, C_i 为部位碳含量(%), B_i 为部位生物量(kg hm^{-2})。

烟株碳含量(%) = 烟株固碳量/烟株生物量

烟田生态系统收入碳(Input) = 烤烟固定碳 + 大气干沉降碳 + 湿沉降碳

烟田生态系统输出碳(Output) = CO₂ 排放碳 + 淋溶碳 + 径流碳

烟田生态系统碳平衡 = 烟田生态系统收入碳(Input) - 烟田生态系统输出碳(Output)

1.5 统计分析方法

应用 SPSS21.0 统计软件, 对数据进行方差分析和多重比较(Duncan's), 用 Origin 8.0 作图。

2 结果与分析

2.1 烤烟碳含量特征

2.1.1 不同器官碳含量 碳储量一般根据碳含量及生物量来计算。在常规施肥下, 烟株平均碳含量为(42.14±0.05)%。方差分析显示, 烤烟不同部位碳含量差异显著(图 4), 其中根的碳含量最高, 平均为(44.03±1.38)%; 其次是茎, 碳含量平均为(43.27±0.37)%。叶的碳含量低于根和茎, 且随着叶位上升, 烟叶碳含量逐渐下降。下部叶、中部叶、上部叶碳含量分别为(41.96±0.44)%、(41.46±0.11)%、(39.76±1.00)%。

2.1.2 烤烟碳累积与分配 烤烟累积生物量 3 年平均为(5832.10±537.32) kg hm^{-2} , 同化碳量为

图 4 烤烟不同部位碳含量

Fig. 4 Carbon content of different parts in flue-cured tobacco

(2459.25±233.78) kg hm^{-2} , 年度变异系数为 8.73%。方差分析显示(图 5), 不同器官碳累积量差异显著, 其中叶碳累积量平均为 1170.59 kg hm^{-2} , 显著高于根和茎; 根和茎的碳累积量差异不显著, 分别为 611.27 kg hm^{-2} 和 677.39 kg hm^{-2} 。从碳的分配上来看, 烤烟根系固碳量最低, 仅占 24.94%, 茎固碳量占烟株的 27.41%, 叶碳累积量最高, 平均为 47.64%。根和茎占总碳量的 52.36%, 说明烤烟同化碳中有一半可以归还土壤。

图 5 烤烟固碳量及其分配

Fig. 5 Carbon sequestration and its distribution in flue-cured tobacco

2.2 烤烟生长季大气碳沉降

由表 1 可以看出, 烤烟生长季的湿沉降碳量为 115.32 kg hm^{-2} , 沉降时间主要在 6、7 月份, 8、9 月份湿沉降量较低。湿沉降的碳浓度与降雨量成负相关($r = -0.87$)。湿沉降碳含量平均为 17.21 mg L^{-1} , 贵州全年降雨量为 1154.1 mm, 合计年湿沉降碳总量为 198.64 kg hm^{-2} 。烤烟生长季干沉降量为 6.54 kg hm^{-2} , 沉降的时间主要在 8、9 月份, 5 月至 7 月干沉

表 1 试验区碳沉降量汇总表
Table 1 Summary of carbon deposition in the experimental area

时间 Time	湿沉降 Wet deposition			干沉降 Dry deposition			总计 Total (kg hm ⁻²)
	降雨量 Rainfall (mm)	碳浓度 Concentration (mg L ⁻¹)	沉降碳 Carbon (kg hm ⁻²)	灰尘 Dust (kg hm ⁻²)	碳浓度 Concentration (mg g ⁻¹)	沉降碳 Carbon (kg hm ⁻²)	
5 月 May	129.10	7.65	9.88	91.56	18.24	1.67	11.55
6 月 June	213.90	17.38	37.17	51.87	11.45	0.59	37.76
7 月 July	146.00	29.26	42.72	26.87	20.72	0.56	43.27
8 月 August	169.90	8.88	15.08	382.17	3.91	1.49	16.58
9 月 September	10.70	97.91	10.48	40.95	54.30	2.22	12.70
全年 Whole year	1154.10	17.21	198.64	1444.00	21.72	31.37	230.00

降量较低。干沉降碳含量平均为 21.72 mg g⁻¹，贵州全年干沉降量达到了 1444.0 kg hm⁻²，合计年干沉降碳量为 31.37 kg hm⁻²，年碳沉降总量为 230.00 kg hm⁻²。

2.3 烤烟生长季 CO₂ 排放规律

不同年份 CO₂ 的排放动态一致(图 6)，CO₂ 的排放动态与烤烟生长密切相关。从 3 年平均值可以看出，在烤烟移栽初期 (0~30 d) 较低，团棵期之后烤烟快速生长，CO₂ 的排放速率也迅速增加，至烤烟打顶期排放速率达到最大，之后开始下降。烤烟移栽后 110 d 左右，CO₂ 排放速率降至最低，之后 CO₂ 排放维持在较低的水平。CO₂ 日平均排放量为 74.56 kg hm⁻² d⁻¹，整个生长季 120 d 的 CO₂ 排放总量达到了 (8947.21±3245.26) kg hm⁻²，合计烟田生态系统碳排放量为(2440.15±885.07) kg hm⁻²。不同年份 CO₂ 排放量变动幅度较大(图 7)，2015 年、2016 年和 2017 年 CO₂ 排放量分别为 7795.32、12,611.29 和 6435.02 kg hm⁻²，变异系数达到了 36.27%。

图 6 烟田生态系统 CO₂ 排放动态
Fig. 6 Dynamics variation of CO₂ emission in field-tobacco ecosystem

图 7 不同年份 CO₂ 排放量
Fig. 7 Amount of CO₂ emission in different years

2.4 烟田生态系统碳支出

烤烟生长季碳输出包括碳排放、径流损失、淋溶损失，三者输出量分别为(2440.15±885.07)、18.65、(6.18±0.29) kg hm⁻²，合计碳输出量 2464.98 kg hm⁻²。通过径流或淋溶造成的碳损失较低，占生态系统碳输出量的 0.76%，淋溶碳占生态系统碳输出量的 0.25%。而通过 CO₂ 排放造成的碳输出量占总量的 98.99% (图 8)。由此可见，烟田生态系统碳输出主要是土壤微生物呼吸和根系呼吸。

2.5 烟田生态系统碳平衡

在不施用有机肥条件下，进入烟田生态系统的碳主要包括大气沉降碳和作物固定碳，合计输入碳量为 2581.80 kg hm⁻²。烟田生态系统通过土壤呼吸(根系和微生物)、径流、淋溶等输出碳，输出碳总量为 2464.98 kg hm⁻²。通过输入和输出对比显示，烤烟生态生态系统碳盈余 116.13 kg hm⁻² (图 9)。由此可见，在不施有机肥的情况下，烟田生态系统为大气的“弱碳汇”。

图 8 烟田生态系统碳输出途径及贡献

Fig. 8 Pathways of carbon output and its contribution in field-tobacco ecosystem

3 讨论

作物固定碳是作物生态系统主要的碳来源之一。烤烟是叶用经济作物, 为了获得优质的烟叶, 生产上多采用打顶及抹芽等农艺措施, 且严格限制氮

肥施用量^[17], 这些措施改变了烤烟自然生长, 从而限制了烤烟碳累积, 整个生长季烤烟累积生物量平均为 $(5832.10 \pm 537.32) \text{ kg hm}^{-2}$, 累积固碳量为 $(2459.25 \pm 233.78) \text{ kg hm}^{-2}$ 。以往研究显示, 玉米生物量达到了 19.7 t hm^{-2} ^[19], 水稻碳累积量达到了 4418 kg hm^{-2} ^[20], 小麦碳累积量为 $10,093.8 \text{ kg hm}^{-2}$ ^[8], 可见烤烟生物量及碳累积量低于大田作物。与此同时, 烟株碳含量略低于或等于大田作物, 研究显示, 烟株平均碳含量为 $(42.14 \pm 0.05)\%$, 而玉米碳含量 $45.64\% \sim 46.2\%$ ^[4,19]、小麦碳含量 45.61% ^[4]、水稻碳含量 $41.97\% \sim 43.3\%$ ^[4,20]。虽然烤烟碳累积量低于大田作物, 但烤烟根系的分配比例却高于大田作物。研究显示, 烤烟根系碳占烟株碳 24.76% , 而小麦^[8]、玉米^[19]、水稻^[20-21]根系碳仅占总生物量的 7.0% 、 $4.9\% \sim 6.1\%$ 、 $9.9\% \sim 10.6\%$ 。因此烤烟虽然总生物量低, 但其根对土壤碳的贡献却相对较高。

图 9 烟田生态系统碳平衡

Fig. 9 Carbon balance in field-tobacco ecosystem

一般认为, 生态系统碳来源包括根系输入和人为施入的有机碳, 除此之外, 大气中的有机碳、元素碳气溶胶在重力作用及雨水冲刷下, 经过沉降过程进入到地面环境, 这是碳循环过程中的重要环节之一, 而在目前地球化学碳循环的研究中, 这部分碳汇经常被忽略。Lohse 等^[22]研究显示, 大气沉降对干旱城市内和附近的营养和碳贫乏的沙漠生态系统的生物地球化学循环很重要。Mladenov 等^[23]认为, 大气沉降碳是高山贫瘠土壤碳的重要来源。国内也有研究分析了降雨和干沉降碳的组成^[24-25], 本研究通过对大气碳沉降的研究显示, 烤烟生长季湿沉降碳达到了 $115.32 \text{ kg hm}^{-2}$, 烤烟生长季干沉降碳量为

6.54 kg hm^{-2} , 两者占根系碳的 20.01% , 全年碳沉降总量达到了 $230.00 \text{ kg hm}^{-2}$, 可见在研究生态系统碳收支时, 沉降碳也应有所考虑。

烟田生态系统碳的输出途径有多种, 包括 CO_2 排放、径流或淋溶损失、风蚀等。本研究显示, 烟生长季碳输出总量 $2438.16 \text{ kg hm}^{-2}$, 其中 CO_2 排放支出占 99.03% , 径流碳支出占 0.73% , 淋溶碳占 0.24% , 表明 CO_2 排放是系统碳支出的主要途径。虽然径流或淋溶碳对土壤生物意义较大^[26], 但从系统碳收支角度看, 径流或淋溶碳可以忽略不计。 CO_2 排放主要是土壤微生物呼吸和根系呼吸, 其与烤烟生长密切相关。研究显示, 在烤烟移栽初期(0~30 d)

较低, 团棵期之后烤烟快速生长, CO_2 的排放速率也迅速增加, 至烤烟打顶期排放速率达到最大, 之后开始下降。表明生长季 CO_2 的排放动态主要受烤烟生长的影响。

通过输入和输出对比显示, 无人碳源输入下, 烟田生态生态系统对大气而言是弱碳汇, 碳汇量 $142.95 \text{ kg hm}^{-2}$ 。相关文献综合分析显示, 小麦、水稻、玉米、大豆的平均碳汇量分别为每年 1.57 、 4.39 、 5.55 、 1.43 t hm^{-2} [27-32]。与大田作物相比, 烟田生态系统碳汇量较低, 主要原因在于烤烟生物量低于大田作物。

4 结论

为了获得优质的烟叶, 生产上多采用打顶及抹芽剂等农艺措施, 限制了烤烟碳累积, 使烤烟生物量及碳累积量低于大田作物。然而烤烟总生物量虽然低, 但由于根系碳占总碳比例高, 其对土壤碳贡献却相对较高。烟田生态系统碳输出有多种途径, 但 CO_2 排放是系统碳支出的主要途径。在无人碳源输入下, 烟田生态系统对大气而言是“弱碳汇”, 如何提高烟田生态系统碳汇量、提升其生态价值, 有待进一步研究。

References

- [1] 陈江华. 中国烟叶生产实用技术指南. 北京: 中国烟叶公司, 2018. pp 1-2.
Chen J H. Practical Technical Guide for Tobacco Production in China. Beijing: China Tobacco Company, 2018. pp 1-2 (in Chinese).
- [2] 郑唯婕, 包维楷, 辜彬, 何晓, 冷俐. 陆生高等植物碳含量及其特点. 生态学杂志, 2007, 26: 307-313.
Zheng W J, Bao W K, Gu B, He X, Leng L. Carbon concentration and its characteristics in terrestrial higher plants. *Chin J Ecol*, 2007, 26: 307-313 (in Chinese with English abstract).
- [3] 左红娟, 曹辉, 石彦召, 白保勋, 陈东海. 华北平原主要农作物的碳效率及固碳价值. 贵州农业科学, 2015, 43(12): 190-193.
Zuo H J, Cao H, Shi Y Z, Bai B X, Chen D. Carbon efficiency and carbon fixation economic evaluation of the main crops in north China plain. *Guizhou Agric Sci*, 2015, 43(12): 190-193 (in Chinese with English abstract).
- [4] 罗怀良. 中国农田作物植被碳储量研究进展. 生态环境学报, 2014, 23: 692-697.
Luo H L. Advances on carbon storage in crops of China. *Ecol Environ Sci*, 2014, 23: 692-697 (in Chinese with English abstract).
- [5] 余玮, 黄璜, 官春云, 陈阜, 陈光辉. 我国典型农作区作物生产碳汇功能研究. 中国工程科学, 2016, 18(1): 106-113.
She W, Huang H, Guan C Y, Chen F, Chen G H. Study on the carbon sink function of crop production in typical agricultural areas of China. *Eng Sci*, 2016, 18(1): 106-113 (in Chinese with English abstract).
- [6] 左红娟, 曹辉, 石彦召. 河南省小麦-玉米典型农田生态系统碳源/汇变化分析. 农业科技通讯, 2017, (7): 63-65.
Zuo H J, Cao H, Shi Y Z. Analysis of carbon source/sink changes in typical wheat-maize farmland ecosystem in Henan province. *Bull Agric Sci Technol*, 2017, (7): 63-65 (in Chinese with English abstract).
- [7] 曲奕威. 豫北平原冬小麦-夏玉米典型农田生态系统碳通量的研究. 河南农业大学硕士学位论文, 河南郑州, 2008.
Qu Y W. Study on the Carbon Flux of Typical Farmland Ecosystem of Winter Wheat Double Cropped with Summer Maize in the North Henan Plain. MS Thesis of Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan, China, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [8] 牛海生, 李大平, 张娜, 郝维维, 徐文修, 张洋, 赵有来, 胡春辉. 不同灌溉方式冬小麦农田生态系统碳平衡研究. 生态环境学报, 2014, 23: 749-755.
Niu H S, Li D P, Zhang N, Hao W W, Xu W X, Zhang Y, Zhao Y L, Hu C H. Effect of irrigation modes on carbon budget in winter wheat field. *Ecol Environ Sci*, 2014, 23: 749-755 (in Chinese with English abstract).
- [9] 滕园园. 免耕密植玉米间作豌豆农田生态系统碳平衡特征研究. 甘肃农业大学硕士学位论文, 甘肃兰州, 2017.
Teng Y Y. Characteristics of Carbon Balance for Maize-pea Intercropping System with No-tillage and High Planting Density Principles. MS Thesis of Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu, China, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [10] Gao X, Gu F, Hao W, Mei X, Li H, Gong D, Mao L, Zhang Z. Carbon budget of a rainfed spring maize cropland with straw returning on the Loess Plateau, China. *Sci Total Environ*, 2017, 586: 1193-1203.
- [11] Wang Y, Hu C, Dong W, Li X, Zhang Y, Qin S, Oenema O. Carbon budget of a winter-wheat and summer-maize rotation cropland in the North China plain. *Agric Ecosyst Environ*, 2015, 206: 33-45.
- [12] 何介南, 康文星. 广州市水稻作物生态系统碳汇功能. 中国农学通报, 2010, 26(2): 246-249.
He J N, Kang W X. Carbon sink function of rice-crop ecosystem in Guangzhou city. *Chin Agric Sci Bull*, 2010, 26(2): 246-249 (in Chinese with English abstract).
- [13] 路壹, 黄璜, 郑华斌, 姚林, 贺慧, 刘建霞, 李静怡. 水稻生产系统固碳能力与碳足迹研究——以湖南省为例. 作物研究, 2015, 29(3): 240-243.
Lu Y, Huang H, Zheng H B, Yao L, He H, Liu J X, Li J Y. Evaluation of the carbon sequestration capacity and carbon footprints in the rice production systems—a case of Hunan province. *Crop Res*, 2015, 29(3): 240-243 (in Chinese with English abstract).
- [14] 魏雪峰, 吕光辉, 徐敏, 冉启洋, 崔楠, 刘东. 棉花和芦苇光合特性、环境适应策略及固碳效应比较研究. 新疆农业科学, 2014, 51: 941-950.
Wei X F, Lyu G H, Xu M, Ran Q Y, Cui N, Liu D. Comparative study on photosynthetic physiological characteristics, environmental adaptation strategies, effect of carbon sequestration of *Gossypium* and *Phragmites communis*. *Xinjiang Agric Sci*, 2014,

- 51: 941–950 (in Chinese with English abstract).
- [15] 王艳. 中国温室农业生态系统碳平衡研究. 浙江大学博士学位论文, 浙江杭州, 2010.
Wang Y. Carbon Balance of Plastic Greenhouse Ecosystems in China. PhD Dissertation of Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang, China, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [16] 朱大威, 金之庆, 石春林. 东北平原农作物生产力及固碳能力模拟. 江苏农业学报, 2010, 26: 1222–1226.
Zhu D W, Jin Z Q, Shi C L. Simulating of production and carbon sequestration of crops under climate change scenarios in the northeast China. *Jiangsu Agric Sci*, 2010, 26: 1222–1226 (in Chinese with English abstract).
- [17] 徐雨, 周国荣, 李淮源, 陈建军, 钟光华, 李军业, 何澎, 邓世媛. 栽培措施对烤烟上部叶可用性影响的研究进展. 安徽农业科学, 2019, 47(13): 8–11.
Xu Y, Zhou G R, Li H Y, Chen J J, Zhong G H, Li J Y, He P, Deng S Y. Research progress on the effect of cultivation measures on the usability of upper leaves of flue-cured tobacco. *J Anhui Agric Sci*, 2019, 47(13): 8–11 (in Chinese with English abstract).
- [18] 王立刚, 邱建军. 农业源温室气体监测技术规程与控制技术研究. 北京: 科学出版社, 2018. pp 43–44.
Wang L G, Qiu J J. Agricultural Source of Greenhouse Gas Monitoring Technology Research Procedures and Control Technology. Beijing: Science Press, 2018. pp 43–44 (in Chinese).
- [19] 苗惠田. 长期施肥条件下作物碳含量及分配比例. 西北农林科技大学硕士学位论文, 陕西杨凌, 2010.
Miao H T. Effects of Long-term Fertilization on Assimilated Carbon Content and Its Distribution Proportion of Crops. MS Thesis of Northwest Agriculture and Forest University, Yangling, Shaanxi, China, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [20] 冯蕾, 童成立, 石辉, 吴金水, 陈安磊, 周萍. 不同氮磷钾施肥方式对水稻碳、氮累积与分配的影响. 应用生态学报, 2011, 22: 2615–2621.
Feng L, Tong C L, Shi H, Wu J S, Chen A L, Zhou P. Effects of different nitrogen, phosphorous and potassium fertilization modes on carbon and nitrogen accumulation and allocation in rice plant. *Chin J Appl Ecol*, 2011, 22: 2615–2621 (in Chinese with English abstract).
- [21] 王勇, 任海, 王浩, 曾军. 施肥对水稻植株碳氮分配与积累的影响. 现代农业科技, 2016, (14): 12–13.
Wang Y, Ren H, Wang H, Zeng J. Effect of fertilizers on rice plant carbon and nitrogen distribution and accumulation. *Modern Agric Sci Technol*, 2016, (14): 12–13 (in Chinese with English abstract).
- [22] Lohse K A, Hope D, Sponseller R, Allen J O, Grimm N B. Atmospheric deposition of carbon and nutrients across an arid metropolitan area. *Sci Total Environ*, 2008, 402: 95–105.
- [23] Mladenov N, Williams M W, Schmidt S K, Cawley K. Atmospheric deposition as a source of carbon and nutrients to an alpine catchment of the Colorado Rocky Mountains. *Biogeosciences*, 2012, 9: 3337–3355.
- [24] 许涛. 广州大气降雨中有机质组成分布特征研究. 中国科学院研究生院博士学位论文, 北京, 2005.
Xu T. A study on the Characteristics of Organic Composition and Distribution in the Rainwater of Guangzhou. PhD Dissertation of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, 2005 (in Chinese with English abstract).
- [25] 张帆. 南昌市大气中有机碳、元素碳的干湿沉降的研究. 南昌大学硕士学位论文, 江西南昌, 2014.
Zhang F. Study on Dry Deposition of Atmospheric Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanchang. MS Thesis of Nanchang University, Nanchang, Jiangxi, China, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [26] 丁虎, 郎赞超, 刘丛强. 土壤碳淋溶流失研究进展. 地球与环境, 2016, 44(1): 139–146.
Ding H, Lang Y C, Liu C Q. Advances in study on leaching loss of carbon from soil. *Earth Environ*, 2016, 44(1): 139–146 (in Chinese with English abstract).
- [27] 黄斌, 王敬国, 龚元石, Stahr K, 杨倩. 冬小麦夏玉米农田土壤呼吸与碳平衡的研究. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 156–160.
Huang B, Wang J G, Gong Y S, Stahr K, Yang Q. Soil respiration and carbon balance in winter wheat and summer maize fields. *J Agro-Environ Sci*, 2006, 25(1): 156–160 (in Chinese with English abstract).
- [28] 梁尧, 韩晓增, 乔云发, 李禄军, 尤孟阳. 小麦–玉米–大豆轮作下黑土农田土壤呼吸与碳平衡. 中国生态农业学报, 2012, 20: 395–401.
Liang Y, Han X Z, Qiao Y F, Li L J, You M Y. Soil respiration and carbon budget in black soils of wheat–maize–soybean rotation system. *Chin J Eco-Agric*, 2012, 20: 395–401 (in Chinese with English abstract).
- [29] 李洁静, 潘根兴, 张旭辉, 费庆华, 李志鹏, 周萍, 郑聚锋, 邱多生. 太湖地区长期施肥条件下水稻–油菜轮作生态系统净碳汇效应及收益评估. 应用生态学报, 2009, 20: 1664–1670.
Li J J, Pan G X, Zhang X H, Fei Q H, Li Z P, Zhou P, Zheng J F, Qiu D S. An evaluation of net carbon sink effect and cost/benefits of a rice–rape rotation ecosystem under long-term fertilization from Tai Lake region of China. *J Appl Ecol*, 2009, 20: 1664–1670 (in Chinese with English abstract).
- [30] 宋秋来, 赵泽松, 龚振平, 马春梅, 董守坤, 姚玉波, 闫超. 东北黑土区旱作农田土壤 CO₂ 排放规律. 农业工程学报, 2012, 28(23): 200–207.
Song Q L, Zhao Z S, Gong Z P, Ma C M, Dong S K, Yao Y B, Yan C. CO₂ emission law of dry farmland soil in black soil region of Northeast China. *Trans CSAE*, 2012, 28(23): 200–207 (in Chinese with English abstract).
- [31] Hollinger S E, Bernacchi C J, Meyers T P. Carbon budget of mature no-till ecosystem in north central region of the United States. *Agric For Meteorol*, 2005, 130: 59–69.
- [32] Verma S B, Dobermann A, Cassman K G, Walters D T, Knops J M, Arkebauer T J, Suyker A E, Burba G G, Amos B, Yang H S, Ginting D, Hubbard K G, Gitelson A A, Walter-Shea E A. Annual carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize-based agroecosystems. *Agric For Meteorol*, 2005, 131: 77–96.