

广州市农作物系统与大气 CO₂ 交换

何介南, 康文星*, 田 徵, 赵仲辉, 田大伦, 邓湘雯

(中南林业科技大学, 长沙 410004)

摘要:在广泛收集资料和实验分析的基础上,研究了广州市各种农作物系统与大气 CO₂ 交换。分析了各种农作物系统净生产力吸收 CO₂ 的能力和碳汇功能大小。结果表明:2005 年广州市 8 种农作物系统作物净生产力吸收 CO₂ 4 032 366t·a⁻¹, 其土壤 CO₂ 排放 3981753t·a⁻¹, 吸收大于排放, 对大气 CO₂ 而言, 整个农作物系统是一个弱的碳汇; 水稻、甘蔗、木薯和果用瓜 4 种连作或高秆作物系统每年作物净生产力吸收 CO₂ 量大于土壤 CO₂ 的排放量, 系统具有较大的碳汇功能, 花生、大豆、花卉和蔬菜 4 种矮秆作物系统每年作物净生产力吸收 CO₂ 量小于土壤 CO₂ 的排放量, 系统起着碳源作用; 果实或经济产量生长在地上部分的作物其单位面积吸收 CO₂ 能力比果实(块根)生长在地下的作物大; 除花生在生育期间生物量吸收 CO₂ 量少于同期土壤排放以外, 其余 7 种作物在生育期间生物量吸收 CO₂ 的量大于同期土壤排放, 大多数农作物在生育期间具有碳汇功能, 在撂荒期才体现碳源作用。

关键词:农作物生态系统; 碳排放; 碳吸收; 碳汇功能; 广州市

文章编号:1000-0933(2009)05-2527-08 中图分类号:Q143, S181, S314 文献标识码:A

The exchange of carbon dioxide between crop system and atmosphere in Guangzhou City

HE Jie-Nan, KANG Wen-Xing*, TIAN Zheng, ZHAO Zhong-Hui, TIAN Da-Lun, DENG Xiang-Wen

Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China.

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2527 ~ 2534.

Abstract: Base on broad collected data and experimental analysis, the carbon dioxide exchange between crop systems and atmosphere was studied in Guangzhou City. Both the CO₂ absorb ability in all crop systems net productivity process and carbon sink function had been analyzed. Results showed that the CO₂ absorb ability in the eight Crop systems net productivity process was 4 032 366t·a⁻¹; the amount of CO₂ outlet in the soil was 3981753t·a⁻¹, less than the CO₂ adsorb ability, so that the whole crop system was a weaker carbon sink process in the atmosphere. The continue planting species such as Rice, sugarcane, cassava, and melon crop or high haulm crops have the characteristics of annually crop net productivity CO₂ absorb ability bigger than soil CO₂ outlet and this systems had bigger carbon sink function ability; the short haulm crop systems of peanut, soybean, flowers, and vegetable annually crops net productivity CO₂ absorb ability less than soil CO₂ out let, but also carbon sink source. The CO₂ absorb ability of fruits and economic parts above ground bigger than that which growth under ground. Except of the CO₂ absorb ability less than the soil CO₂ outlet in the peanut during growth in procreate period, the other seven crops CO₂ absorb ability were bigger than that soil CO₂ outlet during procreate period. Most of crops during growth in procreate period had carbon sink function ability, and only in barren period showed the carbon source function phenomenon.

Key Words: crops ecosystem; carbon let; carbon absorb; carbon sink; Guangzhou City

基金项目:广州市林业局重点资助项目(No. 200506)

收稿日期:2008-05-04; 修订日期:2008-11-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kwx1218@126.com

Bouwman 认为,大气中 20% 的 CO_2 、70% 的 CH_4 来源于农业活动及其相关过程^[1],全球每年排放耕作损失的碳为 $0.8\text{Gt}^{[2]}$,大部分以 CO_2 的形式释放大气中去。农业土壤对温室气体累计贡献最大,积累量占人类活动释放大气 CO_2 的 $1/4^{[3,4]}$ 。农业系统是碳源,还是碳汇,是近年来人们争论较为激烈的问题之一,也是目前该研究领域的前沿和热点^[5~13]。近年来,国内外逐渐开展了关于农业和农田碳汇问题的研究,一些研究结果认为农业系统是大气 CO_2 的一个源。也有研究表明,在不同天气条件和作物生长阶段分别具有碳汇和源的功能^[14~23]。刘允芬以 1990、1995 和 2000 年为例,对周年碳平衡进行分析,我国农业系统的碳排放均小于碳吸收,当年的碳固定量占吸收量 14% 以上,无论是现阶段还是气候变化后,我国农业系统对碳的吸收均大于排放,对大气 CO_2 而言,不是源而是汇^[24]。

本文在获得大量数据的基础上,对广州市农作物系统对大气 CO_2 的吸收和土壤 CO_2 的排放进行了研究,其目的是弄清广州市农作物生态系统对大气 CO_2 的交换是碳源还是碳汇,并为陆地生态系统碳汇功能的研究提供基础数据。

1 研究地概况

广州市域位于中国南部,广东省东南偏北的珠江口,北纬 $22^\circ26'$ ~ $23^\circ56'$,东经 $112^\circ27'$ ~ $114^\circ03'$,处于粤中低山与珠江三角洲之间的过渡地带,地势由东北向西南倾斜,地貌层次结构明显。北部以山地为主,中部以岗阶地为主。境内发育着沉积岩、岩浆岩和变质页岩。地带性土壤为赤红壤,山地垂直带谱上还分布着红壤、黄壤等类型。

广州市属于亚热带季风气候,热量丰富,年总辐射量 $4400 \sim 5000 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;雨量充沛,年降水量在 $1600 \sim 2300 \text{ mm}$ 之间,降水主要集中在 4~9 月份;气候暖和,年平均气温 $21.4 \sim 22.4^\circ\text{C}$,最冷月 1 月份平均气温 $12.4 \sim 13.5^\circ\text{C}$,最热月 7 月份平均气温 $28.4 \sim 28.7^\circ\text{C}$ 。

2005 年广州市主要农作物种植面积 257452 hm^2 、其中稻谷 81170 hm^2 、大豆 953 hm^2 、甘蔗 4535 hm^2 、花生 8293 hm^2 、木薯 344 hm^2 、花卉 10056 hm^2 、蔬菜 151514 hm^2 和果用瓜 587 hm^2 。主要农作物经济产量稻谷 450276 t 、大豆 2617 t 、甘蔗 517282 t 、花生 22372 t 、木薯 4688 t 、蔬菜 3488899 t 和果用瓜 13664 t 。花卉是以经济收入统计的,收入 $237852 \text{ 万元}^{[25]}$ 。广州市农业产业结构已从传统水稻种植向经济作物种植转化。

2 研究方法

2.1 农作物生物量估算

2005 年广州市各种农作物的经济产量、种植面积等数据由《广州市统计年鉴 2006》得出^[25]。每种农作物的经济产量部分混合抽取 5 个样本,7 种作物共 35 个样本,用烘干恒重法测定各样品的含水率,得出各种作物样品的绝干物质质量,然后根据样本的绝干物质质量再推算广州市 2005 年各种作物经济产量的年干物质质量。《广州市统计年鉴 2006》中的经济作物花卉只有收入的钱数,没有花卉的生物量产量数,选取 20 种不同价格花卉样品也用烘干恒重法求出它们的干物质质量,再以此干物重和它们的价格数,根据 2005 年广州市花卉出产收入求得广州市 2005 年花卉生产的干物质重量。

作物生物量除了主产品生物量(稻谷、大豆等有经济价值的部分)外,还有副产品生物量(如谷物的秸秆,瓜类的藤蔓等生物量)。依据北京市农林局编的《农业常用数字手册》^[26]提供的有关数据,各谷物籽实与其秸秆产量的比为 1:1、大豆为 0.6:1、甘蔗为 5:1、薯类为 1:1.5、瓜类为 1:2.5、花生 0.54:1、蔬菜 1:1.52,来计算广州市有关作物的秸秆等副产品生物量。

2.2 农作物吸收 C 量的估算

作物地上部分生物量吸收碳量以后,会将部分碳的同化物质运输到地下供给根生长。作物的根系在生长的同时会向土壤分泌有机物质。根据 Kuzyakov 等的研究^[27],粮食作物根系和根系分泌物质的含碳量占作物总同化量的 20%~30%,牧草类占 30%~40%。本文根系和根系分泌物含碳量占同化量按 25% 计算。具体步骤是,各种作物生长在地上部分的生物量吸收的碳量,根据各种农作物地上部分的干物质重和它们碳吸收率^[28]进行估算。作物生育期间碳吸收的估算公式为:

$$W = (F \cdot T) C$$

式中, W 为作物吸收固定的碳量(t); F 为作物合成单位有机干物质的碳的吸收率; T 为作物的单位面积干物质重($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$); C 为作物的种植面积(hm^2)。

然后认为作物地上生物量的固碳量应是总固碳量的 75%, 地下根系和根系分泌物的固碳量应有总的固碳量的 25%, 再把这两部分数量相加就是该作物除开本身呼吸后净固定的碳量, 其计算公式为: 作物碳的固定总量 = 作物地上部分干物质质量固碳量 + 根系及根系分泌物的固碳量。

2.3 土壤 CO₂ 排放吸收的测定

采用静态箱-气相色谱法测定种植面积大的水稻和蔬菜地土壤呼吸速率(水稻和蔬菜各设 3 个测点, 水稻田的测定参照刘惠等^[29]的方法)。其余几种农作物土壤 CO₂ 排放量利用刘允芬^[30] 研究资料进行估算。水稻田在水淹情况下在排放 CO₂ 的同时, 也还排放 CH₄, 因此, 在测定水稻田土壤 CO₂ 排放的同时也测定 CH₄ 的排放。从 2005 年 3 月 1 日到 2005 年 12 月 31 日, 每月上、中、下旬各选择一个晴天进行 24 h 日变化观测, 白天每 2 h 观测 1 次, 晚上每 3 h 观测 1 次。水稻和蔬菜地的各箱体同时平行采样, 采样时间分别为盖箱后的 0、10、20、30 min, 每次抽样 100 ml 气体样品带回实验室 24 h 内用改装后的 HP5890II 型气相色谱分析气体中的 CO₂ 和 CH₄ 浓度, CO₂ 和 CH₄ 检测器为 FID(氢焰离子化检测器), 载气为 N₂, 流速 30 ml·min⁻¹, H₂ 为燃气, 流速 30 ml·min⁻¹, 空气为助燃气, 流速为 40 ml·min⁻¹。检测器温度为 200 °C, 分离柱温度为 55 °C, 气体排放速率由 3 个气样浓度值经回归分析得出。气体排放通量用下式计算:

$$F = \frac{\Delta m}{A \Delta t} = \frac{P \cdot V \cdot \Delta C}{A \cdot \Delta t} = \rho \cdot h \cdot \frac{\Delta C}{\Delta t}$$

式中, F 为气体通量($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), ρ 为实验时温度下的气体密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), Δm 和 ΔC 分别为 Δt 时间内的采样箱中变化的气体质量(g)和混合比浓度, h 、 A 、 V 分别表示箱高(cm)、底面积(cm^2)和体积(cm^3)。在每次采样时, 对于各箱的气温、地表温度、地下 5 cm 的土壤温度用 JM624 型便携式数字温度计测定。温度计的测量范围: -30 ~ +50 °C, 测量准确度为 0.5 °C, 读数分辨率为 0.1 °C。

农作物土壤排放的 CO₂, 包括微生物呼吸、根系呼吸、土壤动物呼吸和碳矿化物质的化学氧化作用^[31]。研究表明: 土壤呼吸释放的 CO₂ 中约 30% ~ 50% 来自根系活动或自养呼吸, 其余部分主要源于土壤微生物对有机质的分解作用即异养呼吸作用^[32]。在计算作物吸收 CO₂ 时, 不是用初级生产量, 而是用净生产量来计算, 这里已包含了根系的呼吸作用。在实测的土壤排放 CO₂ 量中也包括了根系自养呼吸释放的 CO₂ 量, 为了不使计算量重复, 应在实测土壤排放 CO₂ 量减去根系自养呼吸释放的 CO₂ 量, 才是土壤的异养呼吸释放的 CO₂。根据 Bowden 等研究结果^[32], 用实测土壤 CO₂ 排放量数据乘上 55% 后的结果作为土壤异养呼吸的 CO₂ 排放量。

3 结果与分析

3.1 农作物吸收 CO₂ 量

从表 1 中可看出 2005 年广州市各类农作物吸收 CO₂ 4039026 t·a⁻¹ 其中固定在主产品生物量中的碳折合成 CO₂ 1824648 t·a⁻¹, 在副产品固定碳折合成 CO₂ 是 1204655 t·a⁻¹, 固定在根系和根系分泌物中的碳折合成 CO₂ 量有 1009723 t·a⁻¹。

各种农作物吸收 CO₂ 量的大小顺序是: 蔬菜(2122485 t·a⁻¹)、稻谷(1465304 t·a⁻¹)、甘蔗(204888 t·a⁻¹)、花卉(119289 t·a⁻¹)、花生(84283 t·a⁻¹)、果用瓜(24794 t·a⁻¹)、大豆(10744 t·a⁻¹)、木薯(7239 t·a⁻¹)。各种作物年吸收 CO₂ 量的多少主要由它们的单位面积产量和种植面积决定的。

单位面积吸收 CO₂ 能力最大的是甘蔗为 45.18 t·hm⁻² a⁻¹。果用瓜作物单位面积的吸收 CO₂ 能力也很强是 42.23 t·hm⁻² a⁻¹。随后的是木薯吸收 CO₂ 量 21.04 t·hm⁻² a⁻¹, 水稻吸收 18.05 t·hm⁻² a⁻¹。单位面积吸收 CO₂ 能力最差的花生, 仅吸收 10.16 t·hm⁻² a⁻¹, 不足甘蔗和果用瓜的 25%, 也只有稻谷的 56.4%。

表 1 2005 年广州市农作物固定 C 和 CO₂ 量(t·a⁻¹)Table 1 The fixation of C and CO₂ of crops of Guangzhou City in 2005

作物名称 Crops	稻谷 Rice	大豆 Soybean	甘蔗 Sugarcane	花生 Peanut	木薯 Cassava	花卉 Flower	蔬菜 Vegetable	果用瓜 Melon	合计 Total
面积 Area(hm ²)	81170	953	4535	8293	344	10056	151514	587	257452
含碳率 Carbon(%)	41.44	45.00	45.00	45.00	42.26	41.00	40.72	42.26	-
主产品 Main products									
生物量 Biomass	360220	1832	77540	13424	1401	47570	697780	3413	1203180
固碳量 Carbon fix	149725	824	34893	6040	592	19503	284136	1442	497155
固 CO ₂ 量 CO ₂ fix	549490	3006	128057	22166	2172	71576	1042779	5392	1824648
副产品 Byproducts									
生物量 Biomass	360220	3053	15508	24857	2101	11892	367423	8532	793586
固碳量 Carbon fix	149725	1374	6978	11185	888	4875	149615	3605	328245
固 CO ₂ 量 CO ₂ fix	549490	5042	25609	41048	3258	17891	549087	13230	1204655
合计 Total									
固碳量 Carbon fix	299450	2198	41871	17225	1480	24378	433751	5047	825400
固 CO ₂ 量 CO ₂ fix	1098980	8058	153666	63214	5430	89467	1591866	18622	3029303
根系及分泌物固碳量 Carbon content of Roots and roots secretion	99816	732	13957	5741	493	8126	144583	1682	275140
根系及分泌物固 CO ₂ 量 Carbon CO ₂ fix	366324	2686	51222	21069	1809	29822	530619	6172	1009723
总计 Total									
固碳量 Carbon fixation	399266	2930	55828	22966	1973	32504	578344	6729	1100540
固 CO ₂ 量 CO ₂ Fixation	1465304	10744	204888	84283	7239	119289	2122485	24794	4039026
单位面积固 CO ₂ 量 CO ₂ Fixation per unit(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	18.05	11.27	45.18	10.16	21.04	11.86	14.00	42.23	

高秆作物比矮秆作物的单位面积吸收 CO₂ 能力大,如高秆作物甘蔗每公顷年固定的 CO₂ 量分别是矮秆作物花生 4.45 倍、大豆的 4.02 倍和花卉的 3.81 倍。长蔓藤作物果用瓜单位面积的吸收 CO₂ 能力也比花生大 3.14 倍,比大豆和花卉分别大 2.74 和 2.55 倍。木薯单位面积的吸收 CO₂ 能力也比矮秆作物大豆、花生、花卉大 107.2% ~ 77.5%。

经济产量生长在地下部分的作物单位面积吸收 CO₂ 能力明显比生长在地上部分低。如花生的单位面积年吸收 CO₂ 量只有所有经济产量生长地上部分作物的 22.5% ~ 90.3%。又如木薯是高秆作物,它与同是高秆作物经济产量生长在地上部分的甘蔗和果用瓜作物相比,其单位面积吸收 CO₂ 能力还不足甘蔗和果用瓜的 50%。经济产量生长在地下部分作物单位面积的吸收 CO₂ 能力为什么比生长在地上部分的作物低,其原因有待进一步研究。

作物连作提高复种指数也能提高单位面积的作物吸收 CO₂ 量。水稻属于矮秆作物,在广州市域内每年种植 2 次(早稻和晚稻)。2005 年稻谷作物每公顷固定 CO₂ 量是种植 1 次大豆的 1.60 倍,花卉的 1.52 倍,花生的 1.77 倍。

3.2 农作物土壤 CO₂ 的释放量

从表 2 中看出,水田作物和旱土作物土壤 CO₂ 排放的速率不同。各种旱土作物土壤 CO₂ 排放量从 15.76 t·hm⁻²·a⁻¹ 到 19.70 t·hm⁻²·a⁻¹,稻田土壤为 14.40 t·hm⁻²·a⁻¹ (包括 CH₄ 的温室效应值是 CO₂ 21 倍的量),旱土作物土壤比水田作物土壤每年每公顷多排放 1.36 ~ 15.30 t CO₂。

果实和块根在地下生长的旱土作物土壤释放 CO₂ 量明显大于果实或经济产量生长在地上部分的作物土壤碳释放量。花生和木薯耕作土壤释放 CO₂ 量为 19.70 t·hm⁻²·a⁻¹,比其它旱土作物高出 15% ~ 25%。

无论是哪一种农作物,在生育期土壤 C 排放速率要高于撂荒期。水稻作物生育期间(早稻 90d,晚稻 95d)土壤 C 平均释放速率(包括 CH₄ 的 C) 52.09 mg·m⁻²·h⁻¹,撂荒期 32.73 mg·m⁻²·h⁻¹,生育期比撂荒期高

出 $19.36 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。大豆、甘蔗、花卉和果用瓜生育期土壤 C 排放速率 ($66.04 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), 要比撂荒期 ($36.14 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 大 82.7%。蔬菜作物生育期土壤排放 C 速率比撂荒期大 67.8%, 木薯和花生作物生育期比撂荒期也高出 83.6%。

2005 年广州市农作物土壤释放 CO₂ 总量 $4180011 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ (包括 CH₄ 的温室效应值是 CO₂ 21 倍的量, 下同), 耕地面积平均释放 $16.123 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。在 CO₂ 释放总量中, 水田释放 $1168625 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ (包括 CH₄ 的温室效应值是 CO₂ 21 倍的量, 下同) 占总量的 28.0%, 旱土释放 $3011386 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 为释放总量的 72.0%。在旱土作物中, 土壤 CO₂ 释放最大的是蔬菜地为 $25869091 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 分别占总释放量、旱土释放量的 61.8% 和 85.9%。其它经济作物面积较小, 土壤 CO₂ 释放量在 $6777 \sim 163394 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间, 只占 CO₂ 总释放量的 0.16 ~ 3.91%。水稻土壤向大气排放温室气体有两种气态物质, 一种是 CO₂, 另一种是 CH₄。水稻土壤向大气排放 CO₂ $1088620 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 排放 CH₄ $3815 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。就其 C 素来说, CO₂ 中的 C 是 $269869 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, CH₄ 的 C 量 $29861 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。排放 CH₄ 中的 C 量不足 CO₂ 的 11.1%。若对温室效应贡献而言, 将 CH₄ 温室效应值是 CO₂ 21 倍折算成 CO₂ 量也只有 $80005 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1} \text{CO}_2$, CO₂ 排放对温室效应的贡献是 CH₄ 的 13.6 倍。因此, 就广州市水稻田土壤排放的温室气体而言 CO₂ 的排放占主要地位。

表 2 2005 年广州市农田土壤释放 CO₂ 量Table 2 The release amount of CO₂ of farmland soil of Guangzhou City in 2005

作物名称 Crops	时段 Period	除去根呼吸 CO ₂ 释放速率 Excepted roots CO ₂ let ratio ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	CO ₂ 释放量 Amount of CO ₂ let (t)	单位面积 CO ₂ 释放量 Amount of let in per unit ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	CH ₄ 的 释放速率 Let ratio of CH ₄ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	CH ₄ 的释放量 Amount of CH ₄ let per area ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	CO ₂ 总释放量 Total amount of CO ₂ let ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$)	单位面积 CO ₂ 年释放量 Annually amount of CO ₂ let in per area ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)
稻谷 Rice	早稻 晚稻 裸田	164.24 212.60 119.87	354712 376628 357280	4.37 4.64 4.40	0.71 1.16 0.06	1250 2378 187	1168625 ^① 15023	14.40 ^① 15.76
大豆 ^[30] Soybean	生长期 撂荒期	242.16 132.55	9415 5608	9.88 5.88			71495	15.76
甘蔗 ^[30] Sugarcane	生长期 撂荒期	242.16 132.55	44806 26689	9.88 5.88			163394	19.70
花生 ^[30] Peanut	生长期 撂荒期	303.24 165.15	102584 60810	12.37 7.33			6777	19.70
木薯 ^[30] Cassava	生长期 撂荒期	303.24 165.15	4255 2522	13.27 7.33			158535	15.76
花卉 ^[30] Flower	生长期 撂荒期	242.16 132.55	99353 59182	9.88 5.88			2586909	17.07
蔬菜 Vegetable	生长期 撂荒期	242.16 132.55	1591280 966595	1050.00 6.37			9253	15.76
果用瓜 ^[30] Melon	生长期 撂荒期	242.16 132.55	5799 3454	9.88 5.88				

①包括了 CH₄ 折算成 CO₂ 的温室效应量 Included the amount of the greenhouse effect of CH₄ Converted into CO₂

3.3 广州市农作物系统与大气 CO₂ 交换分析

从表 3 中看出, 稻谷作物年吸收的 CO₂ 量 $1465304 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 土壤释放 $1168625 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 吸收与释放相抵, 净吸收大气 CO₂ $296679 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。单位面积净吸收 CO₂ 能力为 $3.65 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。甘蔗作物吸收 CO₂ 是 $204888 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 土壤释放 CO₂ $71495 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 净吸收大气 CO₂ $133393 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 单位面积吸收 CO₂ $29.41 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。木薯作物净吸收大气 CO₂ $462 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 单位面积吸收 CO₂ $1.34 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 果用瓜作物年净吸收大气 CO₂ $15541 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 单位面积吸收 CO₂ 能力 $26.47 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。研究结果看出, 对大气 CO₂ 而言, 这几种作物系统具有碳汇功能, 尤其是甘蔗和果用瓜这两种作物系统具有较强的碳汇能力。

表 3 2005 年广州市农业系统碳汇功能

Table 3 Function of carbon sink of agricultural ecosystem of Guangzhou city in 2005

作物名称 Crops	单位面积 固定 CO ₂ Fix CO ₂ per area (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	固定 CO ₂ 总量 Total amount CO ₂ fix (t·a ⁻¹)	单位面积 释放 CO ₂ CO ₂ let per area (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	释放 CO ₂ 总量 Total CO ₂ let (t·a ⁻¹)	净固 CO ₂ Net CO ₂ Fix (t·a ⁻¹)	净释放 CO ₂ Net CO ₂ Let (t·a ⁻¹)	系统净固定 CO ₂ Net system CO ₂ fix (t·a ⁻¹)
稻谷 Rice	18.05	1465304	14.40 ^①	1168625 ^②	296679		
大豆 Soybean	11.27	10744	15.76	15023		4279	
甘蔗 Sugarcane	45.18	204888	15.76	71495	133393		
花生 Peanut	10.16	84283	19.7	163394		79111	
木薯 Cassava	21.04	7239	19.7	6777	462		
花卉 Flower	11.86	119289	15.76	158535		39246	
蔬菜 Vegetable	14.00	2122485	15.76	2388651		266166	
果用瓜 Melon	42.23	24794	15.76	9253	15541		
合计或平均 Total or average	15.69	4039026	15.46	3981753	446075	388802	57273

①、②包括了 CH₄折算成 CO₂的温室效应值 ①、②Included the amount of the greenhouse effect of CH₄ Converted into CO₂

大豆土壤每年释放的 CO₂比作物每年吸收的 CO₂多 4279 t·a⁻¹,其作物土壤净释放 CO₂ 4.49 t·hm⁻²·a⁻¹。花生、花卉和蔬菜每年土壤释放的 CO₂与作物吸收 CO₂相抵后还分别多 79111、39246、266166 t·a⁻¹,土壤 CO₂净排放依次为 8.86、3.90 t·hm⁻²·a⁻¹和 1.75 t·hm⁻²·a⁻¹。研究的结果显示,这几种作物系统起着碳源的作用。

广州市 8 种农作物每年吸收 CO₂4039026 t·a⁻¹,农作物土壤释放 CO₂ 3981753 t·a⁻¹,吸收比土壤释放多 57273 t·a⁻¹。单位面积平均净吸收 CO₂ 0.23 t·hm⁻²·a⁻¹。也就是说,就平均而言广州市农作物生态系统具有弱碳汇功能。

仔细分析表 3 和表 2,不难发现,除花生这种作物在生育期间吸收的 CO₂少于同时期土壤排放的 CO₂外,其余 7 种作物在生育期是生物量吸收 CO₂的量大于土壤碳排放,这表明大多数农作物系统在作物生育期具有碳汇功能,在无作物生长期才显示碳源的作用。

4 结语与讨论

水稻田土壤长期在水淹的情况下,降低了土壤通气性能,减弱了土壤中的生物活动过程,抑制了土壤中的有机物质分解和矿化过程,减少了 CO₂的排放。因此,水耕熟化作用使水田土壤中有有机碳得到稳定而提高。据我国第二次土壤普查资料统计,全国水田土壤有机碳含量普遍高于旱地土壤^[33]。此外水稻栽植后,一般在水淹的状态下生长,人们对它的管理不象旱土经济作物一样为了获得较大的经济效益而经常除草、松土,这种耕作条件不同,使得土壤 CO₂排放量不一样。频繁耕作经常搅动土壤,破坏土壤结构,使土壤表层环境经常处于变动之中,从而导致土壤有机质的物理保护层破坏,使有机质暴露于化学和微生物的分解之下,有机质分解迅速,增大了 CO₂排放量。土壤搅动还增加土壤通气性能,刺激土壤中的生物生理活性,进而加剧土壤中有机质分解过程。这也是旱土作物土壤 CO₂释放量普遍高于水稻田土壤的原因之一。

作物的果实和块根在地下生长时,它在生长发育过程中各种生命活动与周围的土壤接触,使土壤中微生物活性加强,促进了土壤中有机物质的分解和氧化,增大了土壤 CO₂排放的量。使得这些旱土作物土壤 CO₂排放量大于经济产量生长在地上部分的旱土作物。

作物生育期间,地下根系生长过程促进了周围土层中的生物的活动能力,加速了土壤有机质分解的过程,因此作物生育期土壤 C 释放速率大于撂荒期。

研究结果认为广州市农作物生态系统是一个弱碳汇系统。与刘允芬^[24]用碳平衡模型研究中国农业系统碳汇功能,农业系统当年碳的固定量占吸收量的 14% 以上,农业系统是碳的一个弱汇的结论相同;也与赵荣钦^[19]对我国沿海地区农田生态系统碳吸收和碳排放总量的对比分析中得出,从总量上来说,农田碳吸收明显大于主要途径的碳排放的结果相近。

要使农田系统具有碳汇功能,关键是,一方面要提高作物的生产力,增大碳的吸收量,另一方面降低土壤碳的排放量。碳增汇与减排是一个问题的两个方面,前者是从“汇”的角度来考虑,后者是以“源”作为出发点,即所谓“减源增汇”,其实际是采取合理有效的措施将更多的碳固定于农业系统中。根据我们的研究结果和广州市农业系统的现状,农业系统要实现碳的减源增汇应采取如下措施。

(1) 多种植适合当地气候环境条件又具有高生物产量的作物,高的生物产量能增加碳的吸收和存储。如本项研究中,甘蔗的单位面积生物产量是其它作物的许多倍,它吸收的碳量也是其它作物的几倍,如果广州市农业多种植象甘蔗一样高产农作物,则碳汇的作用更加明显。

(2) 改变耕作方式,耕作常常被认为是引起农田土壤有机质含量下降的主要原因。一些研究者发现^[33,34],农田有机碳的损失主要发生在 0~30 cm 土层内,特别是 0~10 cm 土层,Six 等研究表明,耕作会导致富碳大团聚体减少,使低碳微团聚体的含量增加^[35]。免耕法是一种对土壤搅动最小的耕作方式,能非常有效地提高农田土壤有机碳^[36,37]。据估算,美国普遍采用免耕技术后,在 30a 内能截留 $2.8 \times 10^8 \sim 4.5 \times 10^8$ t 碳。因此,免耕技术是农业生态系统增加碳汇功能的主要途径,采用适当的耕作方式能够达到增加碳汇的目的。

(3) 秸秆还田使土壤有机碳含量与作物残留物返回量呈线性相关^[19]。对于增加农田碳汇来说,秸秆还田是一项重要而又切实可行的措施,在当前的经济条件下,是最经济而且易推广的技术措施。广州市作物秸秆大都没有还田,据 2004 年广州市环境统计手册,全市秸秆焚烧总量达 $40087 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,燃烧释放的碳为 $14887 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 碳,直接增大了农田系统的碳源作用,如果把秸秆还田,就能增大农田系统的碳汇功能。

(4) 作物轮作或连作。水稻这种矮秆作物因为连作,单位面积吸收的碳量比其它没有连作的矮秆作物高许多。虽然作物生育期间,土壤碳的排放量要大于撂荒期,研究结果说明,大多数作物在生育期吸收的碳量大于同时期土壤排放的碳量具有碳汇作用,而不像撂荒期成为实实在在的碳源。

实际上,农田碳增汇与减排技术并不像工业减排温室气体一样可能会带来经济的衰退,寻求合适的技术,进行合理地使用,来实现农田生态系统碳的增汇减排的目的。

References:

- [1] Bouwman A F. Soils and the greenhouse effect. Chichester, England: John Wiley & Sons, 1990. 78.
- [2] Aguilar R E, Kelly F, Heil R D. effects of cultivation on soils in northern great plains rangeland. Soil. Sci. Soc. Amer. J. 1988, 52: 1081—1085.
- [3] IPCC. Climate Change 1995: The science of climate change, Report of Working Group I. Cambridge University Press, New York, NY, 1996. 4.
- [4] Duxbury J M. The significance of agricultural sources of greenhouse gases. Fertilizer Research, 1994, 38: 151—163.
- [5] Buringh P. Original carbon in soils of the world. In: Woodwell G M. ed. The Role of Terrestrial Vegetation in the Global Carbon Cycle. John Wiley & Sons, 1984, 23: 247.
- [6] Somebroek W G, Nachtergaele F O, Hebel A. Amounts, dynamics and sequestration of carbon in Tropic and Subtropical soils. Ambio., 1993, 22: 417; 426.
- [7] Burke I C, Laurenroth W K, Coffin D P, Recovery of soil organic matter and N mineralization in semiarid grasslands: Implications for the conservation reserve program. Ecological Applications, 1995, 5: 793—801.
- [8] Paustian K, Andren O, Janzen H, et al. Agricultural soil as a C sink to offset CO₂ emission. Soil Use and Management, 1997, 13: 230—244.
- [9] Angers D A, Bolinder M A, Carter M R, et al. Impact of tillage practices on organic carbon and nitrogen storage in cool, humid soils of eastern Canada. Soil and Tillage Research, 1997, 41: 191—201.
- [10] Yang X M, Kay B D, Rotation and tillage effects on soil organic carbon sequestration in a typical Hapludalf in southern Ontario, Soil & Till. Res., 2001, 59: 107—114.
- [11] Gregorich E G, Greer K J, et al. Carbon distribution and losses: erosion and deposition effects. Soil & Tillage Research, 1998, 47: 291—302.
- [12] Naklang K, Whitebread A, Lefroy R, et al. The management of rice straw, fertilizers and leaf litters in rice cropping systems in Northern Thailand: Soil carbon dynamics. Plant and Soil, 1999, 209: 21—28.
- [13] Zdruli P, Eeswaran H, Kimble J. Organic carbon contents and rates of sequestration in soils of Albania. Soil Science society of American Journal, 1995, 59: 1684—1687.
- [14] Paustian K, Andren O, Janzen H, et al. Agricultural soil as a C sink to offset CO₂ emission. Soil Use and Management, 1997, 13(4): 230—244.
- [15] Cole C V. Agricultural Options for Mitigation of Greenhouse Gas Emission. In: Watson R T, Zinyowera M C, Moss R H. Climate Change 1995-Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 1—27.
- [16] Lal R, Bruce J P. The potential of world crop land soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect. Environmental Science & Policy, 1999,

- 2(2): 177—185.
- [17] Lal R, Kimble J M, Follett R F, *et al.* The potential of US crop land to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. Chelsea, M I: Sleeping Bear Press Inc., 1998. 128.
- [18] Zhao R Q, Huang A M, Qin M Z, *et al.* Progress in the studies of techniques of adding carbon sinks and reducing carbon emissions in agroecosystems of China. *Journal of Henan University(Natural Science)*, 2004, 34(1): 60—65.
- [19] Zhao R Q, Qin M Z. Temporospatial variation of partial carbon source/sink of farmland ecosystem in coastal China. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23(2): 1—6, 11.
- [20] Yang X M, Zhang X P, Fang H J. Importance of agricultural soil sequestering carbon to offsetting global warming. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(1): 101—106.
- [21] Li C S. Loss of soil carbon threatens Chinese agriculture: a comparison on agroecosystem carbon pool in China and the U. S. *Quaternary Sciences*, 2000, 20(4): 345—350.
- [22] Han B, Wang X K, Ou Z Y. Saturation levels and carbon fix potential in China crops ecosystem soil. *Rural Eco-Environment*, 2005, 21(4): 6—11.
- [23] Li J, Wang M X, Wang Y S, *et al.* Advance of researches on greenhouse gases emission from Chinese agricultural ecosystem. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(4): 740—749.
- [24] Liu Y F. China agricultural ecosystem carbon sink function. *Agricultural Environment Protection*, 1998, 17(5): 197—202.
- [25] Statistic Bureau of Guangzhou. *Guangzhou Statistical Yearbook-2006*. Beijing: China Statistics Press, 2006.
- [26] Agricultural Bureau of Beijing. *Common Agricultural Figure Notebook*. Beijing: Beijing Press, 1980.
- [27] Li K R. Land use Change, Net emission of Greenhouse gas and Terrestrial Ecosystem Carbon Cycle. Beijing: China Meteorological Press, 2000.
- [28] Wu J S. Soil organic matter and its dynamics. In: He D Y ed. *Soil Fertility in South China and Crops Fertilization*. Beijing: Science Press, 1994.
- [29] Liu H, Zhao P, Wang Y S, *et al.* CO₂ emission and its affecting factors in paddy field of agroforestry ecosystem in South China hilly area. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(5): 471—476.
- [30] Liu Y F, Ou Y H, Zhang X Z, *et al.* Carbon balance in agro-ecosystem in Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Pedagogica Sinica*, 2002, 39(5): 636—642.
- [31] Liu S H, Fang J Y. Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5): 469—476.
- [32] Bowden R D, Nadelhoffer K J, Boone R D, *et al.* Contributions of above ground litter, below ground litter, and root respiration to total soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Can. J. For. Res.*, 1993, 23: 1402—1407.
- [33] Doran J W, Elliott E T, Paustian K. Soil microbial activity, nitrogen cycling, and longterm changes in organic carbon pools as related to fallow tillage management. *Soil and Tillage Research*, 1998, 49(1-2): 3—18.
- [34] Mikhailova E A, Bryant R B, Vassenev I I, *et al.* Cultivation Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents at Depth in the Russian Chernozem. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 738—745.
- [35] Six J, Paustian K, Elliott E T, *et al.* Soil structure and organic matter I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 681—689.
- [36] Jin F, Yang H, Zhao Q G. Advance of soil organic carbon reserves and effective facts. *Soil*, 2000, 32(1): 11—17.
- [37] Li Y N, Wang G Y, Li W. Soil respiration and carbon cycle. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2): 351—357.

参考文献:

- [18] 赵荣钦, 黄爱民, 秦明周, 等. 中国农田生态系统碳增汇/减排技术研究进展. *河南大学学报(自然科学版)*, 2004, 34(1): 60—65.
- [19] 赵荣钦, 秦明周. 中国沿海地区农田生态系统部分碳源/汇时空差异. *生态与农村环境学报*, 2007, 23(2): 1—6.
- [20] 杨学明, 张晓平, 方华军. 农业土壤固碳对缓解全球变暖的意义. *地理科学*, 2003, 23(1): 101—106.
- [21] 李长生. 土壤碳储量减少: 中国农业之隐患——中美农业生态系统碳循环对比研究. 第四纪研究, 2000, 20(4): 345—350.
- [22] 韩冰, 王效科, 欧阳志云. 中国农田生态系统土壤碳库的饱和水平及其固碳潜力. *农村生态环境*, 2005, 21(4): 6—11.
- [23] 李晶, 王明星, 王跃思, 等. 农田生态系统温室气体排放研究进展. *大气科学*, 2003, 27(4): 740—749.
- [24] 刘允芬. 中国农业系统碳汇功能. *农业环境保护*, 1998, 17(5): 197—202.
- [25] 广州市统计局编. *广州统计年鉴 2006*. 北京: 中国统计出版社, 2006.
- [26] 北京市农业局编. *农业常用数字手册*. 北京: 北京出版社, 1980.
- [27] 李克让. *土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环*. 北京: 气象出版社, 2000. 250.
- [28] 吴金水. 土壤有机质及其周转动力学. 见何电源主编. *中国南方土壤肥力与栽培作物施肥*. 北京: 科学出版社, 1994.
- [29] 刘惠, 赵平, 王跃思, 等. 华南丘陵农林复合生态系统稻田二氧化碳排放及其影响因素. *生态学杂志*, 2006, 25(5): 471—476.
- [30] 刘允芬, 欧阳华, 张宪洲, 等. 青藏高原农田生态系统碳平衡. *土壤学报*, 2002, 39(5): 636—642.
- [31] 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. *生态学报*, 1997, 17(5): 469—476.
- [36] 金峰, 杨浩, 赵其国. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展. *土壤*, 2000, 32(1): 11—17.
- [37] 李玉宁, 王关玉, 李伟. 土壤呼吸作用与全球碳循环. *地学前缘*, 2002, 9(2): 351—357.