

上海崇明生态农业园区花菜田的碳平衡

王 适¹, 吴永波¹, 陈 杰², 丁晓叶¹

(1. 南京林业大学 森林与环境资源学院, 江苏 南京 210037; 2. 同济大学 现代农业科学与工程研究院, 上海 200092)

摘要: 以上海崇明岛生态农业园区花菜 *Brassica oleracea* var. *botrytis* 田为研究对象, 主要运用生物量法对花菜田植被碳储量、土壤呼吸及人工管理碳源进行测定, 估算花菜田碳平衡情况, 旨在通过对花菜田碳平衡的估算, 探讨农田碳增汇减排措施。研究表明: ①花菜在 1 个生育期内含碳率最小值为 25.73%, 最大值为 41.61%, 平均值为 34.12%。②植被在成熟收割时植被碳储量为 5.18 t·hm⁻², 土壤碳储量 84.74 t·hm⁻²。③花菜田土壤呼吸速率在生长初期最高, 然后逐渐减弱, 土壤异养呼吸通量为 2.38 t·hm⁻²。④生育期内人工碳源总排放量为 1.81 t·hm⁻²。⑤花菜 1 个生育期净固碳量为 0.99 t·hm⁻², 相当于固定二氧化碳 4.01 t·hm⁻²。崇明岛花菜田碳平衡测定结果为微弱碳汇, 针对地区土壤盐碱化现状, 当前最主要增汇减排措施是合理配施有机肥, 改善土壤, 增加产量从而增加碳汇, 其次还可以农林间种, 调整人员管理结构, 减少碳源。图 3 表 1 参 18

关键词: 生态学; 生态农业园; 碳汇; 碳源; 碳平衡; 花菜田

中图分类号: S181 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2014)02-0190-06

Carbon balance of *Brassica oleracea* var. *botrytis* from Chongming Ecological Agriculture Park in Shanghai

WANG Shi¹, WU Yongbo¹, CHEN Jie², DING Xiaoye¹

(1. College of Forest Resources & Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. Modern Agricultural Science & Engineering Institute, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To contribute to measurement techniques for carbon sink additions and emission reductions, and to provide data to support the development of a low-carbon agricultural park, the carbon balance of *Brassica oleracea* var. *botrytis* was estimated. To evaluate carbon balance, the main carbon storage components of *B. oleracea* var. *botrytis*, soil respiration, and carbon sources of artificial management were determined by measuring biomass in an eco-agricultural area on Chongming Island in Shanghai. The main results showed that (1) the minimum carbon content of *B. oleracea* var. *botrytis* was 25.7%, the maximum was 41.6%, and the average was 34.1%. (2) At harvest, carbon storage of the vegetable layer was 5.18 t·hm⁻², and the soil layer was 84.74 t·hm⁻². (3) The respiration rate of the soil was highest in the initial stages of growth, and then gradually weakened. For one growing period, soil heterotrophic respiration effluxes for the *B. oleracea* var. *botrytis* farmland was 2.38 t·hm⁻². (4) Total carbon emission was 1.81 t·hm⁻², and (5) net carbon sequestration in one growing period was 0.99 t·hm⁻² fixing CO₂ 4.01 t·hm⁻². Thus, to improve the weak carbon sink, reasonable fertilizer including organic fertilizer should be applied to increase production that will increase carbon sinks; as production increases, agroforestry intercropping and personnel management structure adjustments can be used to reduce the carbon source. [Ch, 3 fig. 1 tab. 18 ref.]

收稿日期: 2013-03-26; 修回日期: 2013-06-04

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2009BAC62B04)

作者简介: 王适, 从事环境生态学研究。E-mail: wangshi_198803@163.com。通信作者: 吴永波, 副教授, 从事生态学研究。E-mail: yongbowu0920@163.com

Key words: ecology; eco-agriculture area; carbon sinks; carbon source; carbon balance; *Brassica oleracea* var. *botrytis* farmland

近年来,人们发现农业生态系统中的碳库是全球碳库中最活跃的部分。在人类活动的影响下,农田土壤碳库正在迅速变化。农田碳平衡主要从 2 个方面研究:碳汇(系统固定碳)与碳源(系统释放碳)。现今农田碳汇多采用最大收获法(生物量法)来计算,该方法与调查森林地上植被碳蓄积量方法类似。如罗怀良^[1]长期观测中丘陵地区农田植被碳储量,刘允芬等^[2]对青藏高原农田植被碳蓄积进行了测算,丁晓叶^[3]在对崇明岛人工林与农田碳储量研究时都用到生物量法。此外,还有赵荣钦等^[4]的模型法,其主要是将作物有机碳含量与经济产量、经济系数相结合,粗略估算植被碳储量。农田碳源侧重土壤呼吸碳源研究,国内使用较多的是静态气室法和动态气室法^[5]。农田系统存在特殊的人工管理投入碳排放。管理活动碳源主要包括投入农用化学品的能源碳源和农田人工管理活动(机耕、灌溉、收获)碳源。当前越来越多的学者把注意力投到农用化学品、灌溉和机耕活动碳源上,但对收获活动带来的碳源的关注较少。一直以来关于农田生态系统究竟是碳源还是碳汇的问题存在争议。一些学者如 Lal 等^[6]认为:农田碳汇量巨大,全球耕地总的固碳潜力为 $0.75\sim 1.0 \text{ Pg}\cdot\text{a}^{-1}$;而韩冰等^[7]针对中国农业措施,提出中国农田固碳潜力为 $182.1 \text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$;赵荣钦等^[4]研究发现,中国沿海地区农田碳吸收总量为 $22\,482.4 \text{ 万 t}$,属于明显碳汇。而有部分学者则认为农田主要是一种碳源,如孙艳丽等^[8]对华北平原冬小麦 *Triticum aestivum* ($-1.98 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$),玉米 *Zea mays* ($-1.38 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) 轮作农田碳平衡进行测定,指出农田属于碳源,而 Bouwman^[9]也认为农业活动是重要的温室气体排放源。本研究运用生物量法,对上海乃至全国第 1 个“低碳农业园”崇明现代农业园区主要种植的花菜 *Brassica oleracea* var. *botrytis* 田,从植被动态含碳率和固碳量、土壤呼吸碳源释放及人工管理碳源几个方面定量分析花菜田系统碳平衡特征,通过估算判断其是碳汇还是碳源,并根据碳平衡特征探讨增汇减排技术,旨在为今后低碳农业园的建立提供理论指导与数据支持。

1 研究区概况

崇明岛位于 $31^{\circ}27'00''\sim 31^{\circ}51'15''\text{N}$, $121^{\circ}09'30''\sim 121^{\circ}54'00''\text{E}$,处于北亚热带南缘,气候温和湿润,夏季湿热,冬季干冷,四季分明,具有明显的亚热带海洋性季风性气候。岛内常年平均气温为 15.3°C ,1 月份最低,7-8 月份气温最高,全岛东部年平均温度略高于西部。崇明岛年平均降水量为 $1\,055.6 \text{ mm}$,降水主要集中于汛期。岛上土壤类型主要为冲积母质上发育而成的滨海盐碱土,此外还有淋溶土和半水成土。全年平均日照 $2\,104 \text{ h}$,日照百分率为 47%,2 月日照时数最少,为 131.1 h 。11 月至 2 月多刮北风和西北风^[10]。实验时间为 2011 年 9 月初到 2012 年 1 月中旬,地点位于陈家镇现代农业园内,地处崇明东部,以园区中花菜田为研究对象,花菜生育期从种植到收获历时 140 d 左右。实验样地表层土壤氮质量分数为 $1.83 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,磷 $1.35 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机碳为 $12.71 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2 材料与方

根据现有研究结论^[11],农田碳平衡研究公式为净生产力=净第一生产力-土壤异养呼吸碳源。广义的农田碳平衡还包括人工管理投入碳源。由于花菜生长期凋落物生物量几乎为 0,所以在本研究忽略不计。本研究的土壤呼吸碳源采用土壤异氧呼吸碳释放量计算,忽略作物根呼吸的影响,因为在计算根的碳储量时,直接是扣除呼吸作用消耗的碳以后的碳储量,因此,在计算作物生物量时将作物地上部分与地下部分统一计算。

2.1 样地设置

在花菜种植期间,选择相邻的 3 块 $20 \text{ m}\times 20 \text{ m}$ 的田块作为实验样地,每块样地随机设置 3 块 $1 \text{ m}\times 1 \text{ m}$ 的小样方,隔 15 d 在样方内用收获法收割花菜植株,封装后带回实验室测定。

2.2 植被含碳率与碳储量测定

将每次采集的花菜样品封装带回实验室保存,最后将所有采集的样品在粉碎前均放入 85°C 的恒温箱中烘至恒量,再经粉碎、碾磨、过筛后,采用重铬酸外加热法^[12]测定植被含碳率,再结合植被生物量计算碳储量。 $C=B\times O$ 。其中: C 为碳储量($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$), B 为生物量($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$), O 为含碳率。

2.3 土壤有机碳储量测定

选择样点 3 个·样地⁻¹，随机设置 3 个重复·样点⁻¹。由于农田基本在土壤表层耕作，不如林地对低层土壤影响作用大，所以研究时土壤剖面挖 60 cm 深，按 0~5、5~10、10~20、20~40、40~60 cm 分层取样，相同层次混合，同时用环刀法^[13]测定土壤容重。采集的土样在室内自然风干后过 2 mm 筛，用重铬酸钾氧化-外加热法^[13]测定土壤有机质质量分数，进而计算土壤有机碳储量^[14]： $C_0 = \sum 0.1 H_i B_i O_i$ 。其中： C_0 为土壤有机碳储量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)；0.1 为单位换算系数； H_i 为第 i 层土壤厚度(cm)； B_i 为第 i 层土壤的容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)； O_i 是第 i 层土壤有机碳质量分数($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

2.4 土壤呼吸测定

在 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 样方内随机设置 3 个重复，采用 Li-6400 便携式光合作用仪测量，安装 09 土壤呼吸叶室测定土壤呼吸。在测定前 1 天将标准规格的聚氯乙烯土壤隔离圈打入土中 1~2 cm 深，保证每个月的测定都在同一地点进行，免除测定点移位带来的干扰。每次测定的前 1 天，在不破坏土壤的情况下彻底剪除隔离圈内的地表植被，从而减少土壤扰动及根系损伤对测量结果的影响。测定时间为 6: 00–18: 00，2 h 测定 1 次，每个土壤隔离圈重复 3 次。

土壤异氧呼吸采用开沟法测定，在小样方四周挖掘 70~100 cm 深、50 cm 宽的壕沟，沟中放入玻璃纤维薄片以阻止根向样方内生长，排除根系呼吸的干扰，然后把沟填平再测定，所测得的土壤呼吸即为土壤异养呼吸。

2.5 农田管理碳排放测定

管理碳排放主要包括能耗碳排放、灌溉碳排放和人工碳排放。能耗碳排放包括杀虫剂和肥料生产的碳排放。灌溉碳排放估算： $C_i = V_i \times w \times h \times n_i$ 。其中： V_i 为煤电的碳强度系数($0.92 \text{ kg} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)； w 为灌溉所用的电机功率(kW)； h 为每次灌溉工作时数； n_i 为灌溉次数。人工投入碳排放估算： $C_r = V_r \times N$ 。其中： V_r 为成人(60 kg 体质量)每天呼出的二氧化碳容积； N 为 1 个作物生长季投入的人工总数($\text{人} \cdot \text{d}^{-1}$)。

根据现有中国生产肥料的化石能源碳排放研究：生产 1 t 杀虫剂排放碳 $4\,931.93 \text{ kg} \cdot \text{Mg}^{-1}$ ；生产 1 t 氮肥排放 1.74 t 碳；1 t 钾肥排放 120.28 kg 碳，1 t 磷肥排放 165.09 kg 碳。

3 结果与分析

3.1 花菜含碳率变化

实验测得含碳率数据如图 1 所示。花菜生长期含碳率波动范围为 30%~40%，生长初期最小，为 25.73%，生长旺期最大，为 41.61%，平均含碳率为 35.12%。花菜只有在生长旺期才达到中国主要农作物平均含碳率水平^[15](水稻 *Oryza sativa* 为 41.45%，玉米为 47.09%，大豆 *Glycine soja* 为 45.00%，小麦为 48.53%等)。

3.2 花菜碳储量

将每次采集的花菜样品经烘干称量测得生物量，结合含碳率测得花菜碳储量如图 2 所示。花菜在生长初期生长缓慢，生物量基本无变化，此时的碳储量($0.279\,4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)与移栽前($0.307\,3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)相比略有降低，而在第 4 次测定时，也就是生长 1 个半月时花菜碳储量有明显增加，通过测定第 4 次到第 8 次之间为生长旺期，生物量增速最快，含碳率也相对较高，从而测得生长期最大碳储量为 $0.684\,9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，一般收割均在生长末期之前，生长末期碳储量逐渐减少，但变化不大。综合计算花菜 1 个生育期固碳量为 $5.18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

3.3 土壤有机碳储量及分布

如表 1 所示：花菜田 0~5 cm 土壤有机碳最高为 $15.77 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，是底层土壤 $8.59 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 1.84 倍。土壤总碳储量为 $84.74 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，其中表层土(0~20 cm)总碳储量为 $31.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，占总碳储量的 36.88%。这可能与表层土壤经常翻耕，大部分化肥等原料停留在表层有关。

表 1 花菜田各土壤层有机碳储量

Table 1 Organic carbon storage of the *Brassica oleracea* var. *botrytis* soil layer

土壤深度/cm	有机碳/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碳储量/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	总计/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)
0~5	15.77 ± 0.053	9.36	
5~10	13.48 ± 0.147	8.16	
10~20	10.85 ± 0.103	13.73	
20~40	10.43 ± 0.037	28.82	
40~60	8.59 ± 0.064	24.67	84.74

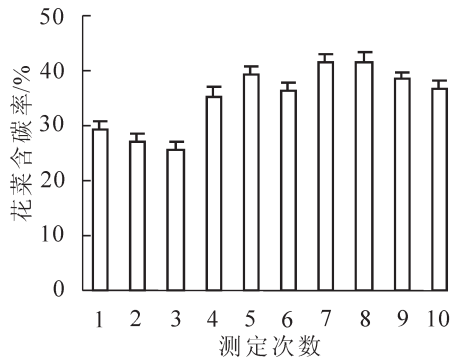


图 1 花菜生育期内含碳率动态变化

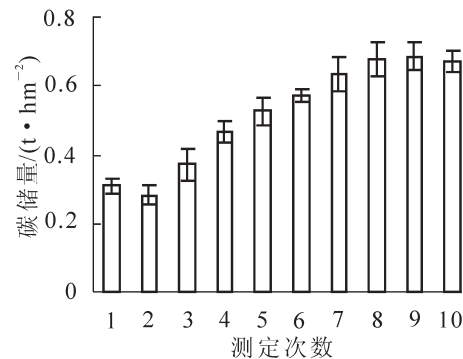
Figure 1 Dynamics of carbon content of *Brassica oleracea* var. *botrytis* in one growth period

图 2 花菜生长期间碳储量动态变化

Figure 2 Dynamics of carbon storage of *Brassica oleracea* var. *botrytis* in one growth period

3.4 土壤呼吸月变化

从图 3 可以看出：花菜生长初期土壤呼吸速率普遍较高，第 4 次测得最高总呼吸速率为 $5.46 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，此时花菜开始进入生长旺期。之后随着花菜的生长，总呼吸速率反而降低，逐渐减弱直至收割时最低为 $0.47 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，生育期内总呼吸平均呼吸速率为 $3.16 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

花菜田异养呼吸速率动态变化与总呼吸基本一致，也是生长旺期开始时最高，成熟后逐渐降低，收获时最低，异养呼吸速率变化范围为 $0.43 \sim 2.84 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，平均值为 $1.72 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

土壤异养呼吸主要受土壤温度、湿度等环境因子及微生物活动的影响，将它与自养呼吸分开讨论，对于研究未来全球碳动态变化具有十分重要的意义。

3.5 花菜田管理碳源

据统计，花菜种植期间施农药 $0.043 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，化肥 $9.000 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，其中磷肥 $2.000 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，钾肥 $3.000 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，氮肥 $4.000 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，计算得能源总碳排放为 $0.790 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ；栽植期间共灌溉 3 次， $6 \text{ h} \cdot \text{次}^{-1}$ ，收获时雇佣 17 人以人工方式收割，无机耕活动，计算得人工管理活动碳排放为 $1.02 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。统计得花菜 1 个生育期内管理碳排放为 $1.81 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

3.6 花菜田碳平衡计算

由于花菜生育期内凋落物量几乎为 0，所以在计算中忽略不计。通过对各子系统碳汇源计算发现，花菜 1 个生育期内植被固碳量为 $5.18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，花菜田土壤释放碳量为 $2.38 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，农田管理碳排放量为 $1.81 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，花菜田表现为弱碳汇，测得净碳汇为 $0.99 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，相当于固定二氧化碳 $4.01 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

4 讨论

实验测得花菜含碳率基本为 30%~40%，平均值为 35.12%，结合生物量计算得花菜植被生育期内固碳量为 $5.18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。与前人研究相比，低于河南 1997 年平均固碳量 ($5.65 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和 2007 年平均固碳量 ($9.77 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[4]，但高于江西 2003 年和 2007 年平均固碳量 ($1.12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $1.51 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[16]，同时介于李洁静等^[17]测算的太湖地区水稻 ($4.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和油菜 ($8.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 固碳量之间。花菜含碳率较低，固碳能力较弱，但花菜植被固碳是花菜田系统的主要碳汇方式，因此，增加植被碳储量是最好的碳增汇措施，而要增加碳储量主要是通过增加花菜产量实现。由于崇明岛地区土壤盐碱化较严重、土地贫瘠，目前，最适宜的增汇方式就是增加有机肥配施，但有机肥施用也不能无限制增加，如何找到一个最利于作物生长的比例还需要长期实验研究。此外，还可以在同一块田地上进行轮作，通过不同品种的更替减缓

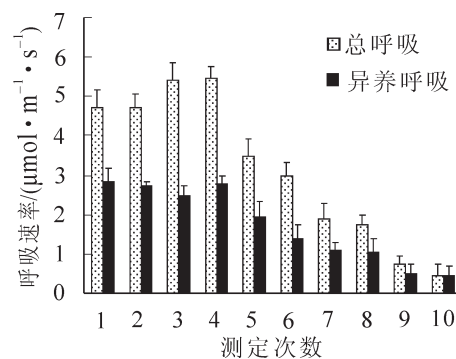


图 3 花菜田土壤总呼吸与异养呼吸月变化

Figure 3 Month dynamics of soil total and heterotrophic respiration for *Brassica oleracea* var. *botrytis* farmland

土壤流失, 增加土壤碳储量, 从而促进作物生长。

花菜田1个生育期内异养呼吸碳排放量为 $2.38 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。呼吸作用是农田最主要碳源, 因此, 要增加花菜田碳汇能力就要减少碳源释放, 也就是减小土壤呼吸作用。农田土壤异养呼吸速率一般比人工林土壤异养呼吸速率大, 因为农田郁闭度相对较低, 阳光能更多的到达地面, 从而引起农田土温快速上升, 再加上农田施用肥料, 使得土壤微生物活性较强, 进而释放出更多二氧化碳。针对这一特点, 在构建低碳园区时可以采取农林间作的方式, 降低农田郁闭度, 进而降低土壤表面温度, 以减弱农田土壤呼吸。

花菜在1个生育期内管理碳源总排放量为 $1.81 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。由于农田对管理的特殊依赖性, 人工管理碳源也是碳释放的重要途径, 要减少人工管理碳源就要求园区进行不断管理改革, 改变农田管理方式, 减少人员或机械投入, 或者引进节能机器等从而减少人工管理碳源。

花菜田生育期净碳汇为 $0.99 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 表现为弱碳汇。这一数值与中国其他学者关于农田碳汇研究结果相比, 低于朱咏莉等^[18]测得的亚热带稻田净固定碳量, 但与郝庆菊等^[5]测定的水旱轮作农田的净碳汇值相当。本研究主要根据现今崇明岛农业园区耕作方式, 选择园区主要种植品种花菜进行研究, 虽然园区目前已将部分田地退还还林, 但人工林种植面积相对于农田较小, 且种植时间较短, 固碳能力较弱。园区主要碳流动载体依然以农田为主, 如何根据农田碳流动方式采取碳增汇减排措施是当前最主要问题, 也是构建低碳农业园区最主要环节。

研究中将作物生长期的生物产量作为碳吸收, 实际上已包括了作物凋落物所带来的碳, 并扣除了作物呼吸作用消耗的碳。如果需要进一步细化不同时期的碳流动方式, 还需进一步测定各时期作物光合作用与呼吸作用对碳变化量的影响, 再结合土壤呼吸与根呼吸释放碳量进行分析。本研究中对人工管理活动碳排放的计算只适用于崇明地区, 因为不同地区、不同耕作方式所需要的人力物力不同, 从而计算结果也会有所不同。其次是燃料标准, 由于目前对燃料没有较为严格的要求和规范, 所以在计算时也存在一定的不确定性。同一种燃料碳的含量可能有很大差别, 而在选择碳排放系数时, 还要根据生产化肥、杀虫剂的过程不同, 以及灌溉耗电对化石燃料的利用不同来进行选取。

5 结论

研究表明: 崇明农业园区花菜田生态系统表现出微弱碳汇能力, 花菜田系统固碳主要是通过植被固碳, 主要碳释放途径为土壤呼吸与人工管理碳释放。现阶段关于崇明岛农业园区农田碳增汇减排技术最可行的措施就是改善施肥制度, 比如等氮投入、不同氮源施肥、有机-无机肥配施处理等。建议通过不同配比实验, 寻找最适合当地土壤条件的有机肥配施标准, 提高作物生物量, 并最大限度地减少土壤碳排放, 在耕作强度很大的农田, 最有效的办法是提高土壤中稳定态氮含量及比例。

参考文献:

- [1] 罗怀良. 中丘陵地区近55年来农田植被碳储量动态研究: 以四川省盐亭县为例[J]. 自然资源学报, 2009, **24**(2): 251 - 258.
LUO Huailiang. Dynamic of vegetation carbon storage of farmland ecosystem in hilly area of central Sichuan Basin during the last 55 years: a case study of Yanting County, Sichuan Province [J]. *J Nat Resour*, 2009, **24**(2): 251 - 258.
- [2] 刘允芬, 欧阳华, 曹广明, 等. 青藏高原东部生态系统土壤碳排放[J]. 自然资源学报, 2001, **16**(2): 152 - 160.
LIU Yunfen, OU Yanghua, CAO Guangmin, et al. Soil carbon emission from ecosystems of eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *J Nat Resour*, 2001, **16**(2): 152 - 160.
- [3] 丁晓叶. 崇明现代农业园区人工林和农田碳平衡研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2011.
DING Xiaoye. *Research on Carbon Balance of Plantation and Farmland in Chongming Modern Agricultural Zone* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011.
- [4] 赵荣钦, 刘英, 丁明磊, 等. 河南省农田生态系统碳源/汇研究[J]. 河南农业科学, 2010(7): 40 - 44.
ZHAO Rongqin, LIU Ying, DING Minglei, et al. research on carbon source and sink of farmland ecosystem in Henan Province [J]. *J Henan Agric Sci*, 2010(7): 40 - 44.
- [5] 郝庆菊, 王跃思, 宋长春, 等. 三江平原农田 CO_2 收支研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(4): 1556 -

- 1560.
- HAO Qingju, WANG Yuesi, SONG Changchun, *et al.* CO₂ budget in agro-ecosystems in the Sanjiang Plain[J]. *J Agro-Environ Sci*, 2007, **26**(4): 1556 – 1560.
- [6] LAL R, BRUCE J P. The potential of world cropland soil to sequester C and mitigate the greenhouse effect [J]. *Environ Sci & Polic*, 1999, **2**: 177 – 185.
- [7] 韩冰, 王效科, 逯非, 等. 中国农田土壤生态系统固碳现状与潜力[J]. 生态学报, 2008, **28**(2): 612 – 619.
- HAN Bing, WANG Xiaoke, LU Fei, *et al.* Soil carbon sequestration and its potential by cropland ecosystems in China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(2): 612 – 619.
- [8] 孙艳丽, 陆佩玲, 李俊, 等. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作田土壤 N₂O 通量特征及影响因素[J]. 中国农业气象, 2008, **29**(1): 1 – 5.
- SUN Yanli, LU Peiling, LI Jun, *et al.* Characteristics of soil N₂O flux in a winter wheat-summer maize rotation system in north China Plain and analysis of influencing factors.[J]. *Chin J Agrometeorol*, 2008, **29**(1): 1 – 5.
- [9] BOUWMAN A F. *Soils and the Greenhouse Effect*[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 1990.
- [10] 崇明县人民政府.崇明岛概况(地理环境)[EB/OL]. 上海崇明岛政府网. [2013-03-04]. <http://www.cmx.gov.cn>.
- [11] BALDOCCHI D D. Assessing carbon balance:problems and prospects of the eddy covariance technique[J]. *Global Change Biol*, 2003, **9**: 478 – 492.
- [12] 黄斌, 王敬国, 龚元石, 等. 冬小麦夏玉米农田土壤呼吸与碳平衡研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(1): 156 – 160.
- HUANG Bin, WANG Jingguo, GONG Yuanshi, *et al.* Soil respiration and carbon balance in winter wheat and summer maize fields [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2006, **25**(1): 156 – 160.
- [13] 张树人, 赵协哲, 宋钢, 等. 吉林省土壤微量元素含量与分布规律研究: 土壤中的铜和锌[J]. 吉林农业科学, 1987, **12**(3): 50 – 57.
- ZHANG Shuren, ZHAO Xiezhe, SONG Gang, *et al.* Trace elements content and distribution in soils of Jilin Province(I) copper and zinc in soil [J]. *J Jilin Agric Sci*, 1987, **12**(3): 50 – 57.
- [14] 方晰, 田大伦, 项文化, 等. 不同密度湿地松人工林中碳的积累和分配[J]. 浙江林学院学报, 2003, **20**(4): 374 – 379.
- FANG Xi, TIAN Dalun, XIANG Wenhua, *et al.* On carbon accumulation, distribution of different densities in slash pine plantation [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2003, **20**(4): 374 – 379.
- [15] 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[J]. 生态与农村环境学, 2007, **23**(2): 1 – 6, 11.
- ZHAO Rongqin, QIN Mingzhou. Temporospacial variation of partial carbon source/sink of farmland ecolystem in coastal China[J]. *J Ecol Rural Environ*, 2007, **32**(2): 1 – 6, 11.
- [16] 金姝兰, 杨芳英. 江西农作物碳储量估算与分析[J]. 广东农业科学, 2011(2): 216 – 219.
- JIN Shulan, YANG Fangying. Carbon stock estimation and analysis of crops in Jiangxi [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2011(2): 216 – 219.
- [17] 李洁静, 潘根兴. 太湖地区长期施肥条件下水稻-油菜轮作净碳汇效应及收益评估[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(7): 1664 – 1670.
- LI Jiejing, PAN Genxing. 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]. *Chin J Appl Ecol*, 2009, **20**(7): 1664 – 1670.
- [18] 朱咏莉, 吴金水, 周卫军, 等. 亚热带稻田生态系统 CO₂ 排放及影响因素[J]. 中国环境科学 2005, **25**(2): 151 – 154.
- ZHU Yongli, WU Jinshui, ZHOU Weijun, *et al.* CO₂ emission from the paddy in subtropical region and its influence factors [J]. *China Environ Sci*, 2005, **25**(2): 151 – 154.