DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180167

熊瑛, 王龙昌, 赵琳璐, 杜娟, 张赛, 周泉. 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): 1653−1662

XIONG Y, WANG L C, ZHAO L L, DU J, ZHANG S, ZHOU Q. Soil respiration, carbon balance, and economic and environmental benefits of triple intercropping system of fava bean, maize and sweet potato under conservation tillage[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(11): 1653−1662

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*

熊 瑛[1,2], 王龙昌[1**], 赵琳璐[1], 杜 娟[1], 张 赛[1], 周 泉[1]

(1. 西南大学农学与生物科技学院/三峡库区生态环境教育部重点实验室/南方山地农业教育部工程研究中心 重庆 400716;
2. 河南科技大学农学院 洛阳 471003)

摘 要: 垄作和秸秆覆盖是实现西南丘陵区旱地农田稳产高产和固碳的适宜保护性耕作模式。为探讨该保护性耕作模式下蚕豆/玉米/甘薯三熟制农田土壤碳排放的特征, 对平作无覆盖(T)、垄作无覆盖(R)、平作+秸秆半量覆盖(TS1)、垄作+秸秆半量覆盖(RS1)、平作+秸秆全量覆盖(TS2)、垄作+秸秆全量覆盖(RS2)6 种耕作模式下西南紫色土丘陵区蚕豆/玉米/甘薯三熟制农田土壤呼吸、粮食产量特征进行测定, 分析农田碳平衡及经济-环境效益, 为量化评估农田生态系统碳收支提供理论依据。结果表明: 在整个间套作系统内, 蚕豆、玉米和甘薯全生育期内土壤呼吸速率均值分别为 3.704 μmol·m^{-2}·s^{-1}、4.847 μmol·m^{-2}·s^{-1} 和 4.606 μmol·m^{-2}·s^{-1}, 垄作降低了 3 种作物的农田土壤呼吸速率(P<0.05), 秸秆覆盖则增加了土壤呼吸(P<0.05), 垄作和秸秆覆盖配合使用后土壤呼吸总量和微生物呼吸总量增加(P<0.05)。保护性耕作促进三熟制农田生态系统内作物固碳; 土壤-作物系统碳平衡表现为碳汇, RS2、TS2、RS1、TS1、R 分别较 T 高 25.41%、25.37%、9.84%、26.74%、13.26%。与平作相比, 垄作和秸秆覆盖提高了粮食产量, 以 RS2(17 460.45 kg·hm^{-2})最高, TS2(16 498.73 kg·hm^{-2})次之。蚕豆/玉米/甘薯三熟制农田生产每千克籽粒释放 CO_2 量处理间表现为 T(1.88 kg·kg^{-1})>TS1(1.83 kg·kg^{-1})>R(1.76 kg·kg^{-1})>TS2(1.75 kg·kg^{-1})>RS1(1.69 kg·kg^{-1})>RS2(1.68 kg·kg^{-1})。垄作和秸秆覆盖提高了套作的经济-环境效益, 秸秆覆盖量越高, 经济-环境效益越好。从农田碳平衡和经济-环境效益综合考虑, 垄作结合秸秆全量覆盖(RS2)具有最大的碳汇能力和最优的经济-环境效益, 可以优先作为该地区农田实现固碳增汇减排的耕作措施。

关键词: 土壤呼吸; 碳平衡; 碳汇; 经济-环境效益; 蚕豆/玉米/甘薯三熟制; 保护性耕作

中图分类号: S344.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2018)11-1653-10

Soil respiration, carbon balance, and economic and environmental benefits of triple intercropping system of fava bean, maize and sweet potato under conservation tillage*

XIONG Ying[1,2], WANG Longchang[1**], ZHAO Linlu[1], DU Juan[1], ZHANG Sai[1], ZHOU Quan[1]

(1. College of Agronomy and Biotechnology, Southwest University / Key Laboratory of Eco-Environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education / Engineering Research Center of South Upland Agriculture, Ministry of Education,

* 国家自然科学基金项目(31271673)和公益性行业(农业)科研专项(201503127)资助

** 通信作者: 王龙昌, 主要研究方向为农业生态与高效农作制度。E-mail: wanglc2003@163.com
熊瑛, 主要研究方向为农业资源高效利用。E-mail: amber1109@126.com

收稿日期: 2018-02-11 接受日期: 2018-05-18

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31271673) and the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201503127).

** Corresponding author, E-mail: wanglc2003@163.com

Received Feb. 11, 2018; accepted May 18, 2018

Chongqing 400716, China; 2. College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: Ridge tillage and straw mulching are suitable modes of conservation tillage that increase crop productivity and sequestrate carbon in the purple hilly region of Southwest China. A field experiment was conducted with six treatments — traditional tillage without straw mulching (T), ridge tillage without straw mulching (R), traditional tillage with straw mulching at 3 750 kg·hm^{-2} (TS1), ridge tillage with straw mulching at 3 750 kg·hm^{-2} (RS1), traditional tillage with straw mulching at 7 500 kg·hm^{-2} (TS2) and ridge tillage with straw mulching at 7 500 kg·hm^{-2} (RS2). The characteristics of soil respiration, carbon balance, crop yield, and economic and environmental benefits for the triple intercropping system of fava bean, maize and sweet potato were evaluated. The study provided the theoretical basis for quantifying carbon budget of farmland ecosystems in the region. It was noted that mean soil respiration rates during growth period of fava bean, maize and sweet potato were 3.704 μmol·m^{-2}·s^{-1}, 4.847 μmol·m^{-2}·s^{-1} and 4.606 μmol·m^{-2}·s^{-1}, respectively. Ridge tillage reduced soil respiration rate during growth period of three crops, whereas straw mulching increased it ($P < 0.05$). Ridge tillage with straw mulching increased cumulative soil respiration and cumulative microbial respiration ($P < 0.05$). All treatments of conservation tillage improved carbon sequestration of crops in the triple intercropping system. The soil-crop system exhibited carbon sink and the treatments of RS2, TS2, RS1, TS1 and R significantly increased carbon sequestration respectively by 25.41%, 25.37%, 9.84%, 26.74% and 13.26%, compared with treatment T. Ridge tillage and straw mulching treatments increased total crop yield of the triple intercropping system, which was highest under RS2 (17 460.45 kg·hm^{-2}) and next TS2 (16 498.73 kg·hm^{-2}). The amount of CO_2 released from soil per 1 kg grain in the triple intercropping system was in the order of: T (1.88 kg·kg^{-1}) > TS1 (1.83 kg·kg^{-1}) > R (1.76 kg·kg^{-1}) > TS2 (1.75 kg·kg^{-1}) > RS1 (1.69 kg·kg^{-1}) > RS2 (1.68 kg·kg^{-1}). This meant that both ridge tillage and straw mulching increased the economic and environmental benefit index. The more straw was added during mulching, the more was the economic and environmental benefits. In conclusion, the RS2 treatment (ridge tillage + straw mulching at 7 500 kg·hm^{-2}) had the largest carbon sink capacity and the optimal economic and environmental benefits. Thus, it was recommended for adoption as tillage pattern to increase carbon sequestration and reduce carbon release in the study area.

Keywords: Soil respiration; Carbon balance; Carbon sequestration; Economic and environmental benefits; Fava bean, maize and sweet potato triple intercropping system; Conservation tillage

农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分, 同时也是最活跃的部分, 频繁受人类活动的干扰[1]。在不同种植方式和管理措施下, 农田生态系统会成为大气的碳源或碳库。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[2]。在全球气候变暖和日益增长的粮食需求的背景下, 农田生态系统土壤呼吸和碳平衡问题日渐成为关注的热点, 探寻能够实现不同地区农田高产、低碳生产目标的适宜耕作方式显得尤为重要[3]。在我国西南紫色土丘陵区, 旱地面积占总耕地面积的60%以上, 是我国南方典型的旱作三熟制农业区[4]。针对该地区土层浅薄、水土流失严重的特点, 有学者研究发现, 以垄作和秸秆覆盖为主的保护性耕作具有提高作物产量、有效控制水土流失的优点, 是适宜西南丘陵地区农业可持续发展采用的耕作模式[5]。

有研究表明, 作物产量与农田生态系统碳平衡密切相关, 较高的作物产量表示有较多的净初级生产力(NPP), 有利于土壤碳固存[6]; 作物产量与土壤释放碳量的比值(经济-环境效益)通常被用来定量评价不同管理措施下农田具有的增产、减排的综合能力[7-9]。本课题组前期开展了垄作和秸秆覆盖模式下小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)、大豆(*Glycine max*)田的土壤呼吸及作物-土壤系统内的碳平衡特征研究[10-12], 较少涉及作物产量与土壤碳排放的量化研究。同时, 由于农田土壤呼吸影响因子的复杂性, 作物类型和耕作方式的改变涉及土壤温度和土壤湿度等气候因子、土壤微环境和结构、凋落物数量和质量以及根系呼吸作用等方面[13-14], 这些因素都会直接影响土壤呼吸作用, 进而影响农田生态系统碳源汇特征。基于此, 为完善三熟种植制度下农田土壤呼吸及碳平衡特征, 本研究以蚕豆(*Vicia faba*)/玉米/甘薯(*Ipomoea batatas*)三熟制农田生态系统为对象, 分析了以垄作和秸秆覆盖为主体的保护性耕作模式下农田土壤呼吸的变化特征, 探讨保护性耕作对旱三熟农田CO_2呼吸通量特性的影响效应, 分析农田的碳平衡、环境-经济效益状况, 旨在量化评估农田生态系统碳收支, 为实现作物增产、环境友好、农业可持续发展提供数据支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于重庆市北碚区西南大学教学实验农场(29°51′N, 106°27′E), 海拔244 m, 属亚热带季风湿润气候, 年均太阳总辐射量87 108 kJ·cm^{-2}, 年均总日照时数1 276.7 h, 多年平均气温18 ℃, ≥10 ℃年积温

5 979.5 ℃, 夏季最高气温达40 ℃左右, 无霜期达359 d, 多年平均降雨量1 133.7 mm, 春、夏、秋、冬降雨量分别为全年的25.5%、41.4%、27.9%、5.5%, 年蒸发量1 181.1 mm, 伏旱发生频率达93%。试验地土壤为旱地紫色土, 坡度较缓, 地力相对均匀。0~20 cm土层土壤基本理化性质如下: 土壤容重1.21 g·cm^{-3}, pH 6.47, 土壤有机质28.00 g·kg^{-1}, 全氮1.68 g·kg^{-1}, 全磷1.46 g·kg^{-1}, 全钾34.54 g·kg^{-1}, 速效磷18.13 mg·kg^{-1}, 速效钾270.23 mg·kg^{-1}, 碱解氮35.23 mg·kg^{-1}。

1.2　试验设计

试验地已经连续8年进行保护性耕作下三熟分厢复种套作栽培, 本试验自2013年11月起连续两年采用蚕豆/玉米/甘薯种植模式(即: 在蚕豆条带之间套作玉米, 蚕豆收获后在玉米条带之间套作甘薯)。供试作物蚕豆品种为当地品种, 种植密度180 000株·hm^{-2}; 玉米品种为‘东单80’, 移栽密度80 000株·hm^{-2}; 甘薯品种为‘渝紫七号’, 移栽密度 40 000株·hm^{-2}。蚕豆、玉米、甘薯各处理均施复合肥(N-P_2O_5-K_2O=16-16-16)225 kg·hm^{-2}, 作为基肥一次施入, 玉米在拔节期追施尿素450 kg·hm^{-2}。

试验设置2种耕作方式和3个覆盖水平。2种耕作方式分别为: 1)平作, 秋季整地后不起垄; 2)垄作, 于秋季整地后横向起垄, 垄宽1 m, 沟宽1 m, 垄高20 cm。3个覆盖水平分别为: 1)无覆盖, 各种作物收获后, 秸秆全部清除, 整个生育期内无覆盖; 2)秸秆半量覆盖, 作物生育期内分别将3 750 kg·hm^{-2}玉米秸秆和3 750 kg·hm^{-2}小麦秸秆均匀覆盖在垄上和沟内; 3)秸秆全量覆盖, 作物生育期内将7 500 kg·hm^{-2}玉米秸秆和7 500 kg·hm^{-2}小麦秸秆均匀覆盖在垄上和沟内。覆盖处理所用的玉米及小麦秸秆收获后人工截成10 cm左右, 分别于蚕豆播种后、玉米和甘薯移栽后进行全生育期覆盖处理。

试验共有6个处理, 分别为平作无覆盖(T)、垄作无覆盖(R)、平作+秸秆半量覆盖(TS1)、垄作+秸秆半量覆盖(RS1)、平作+秸秆全量覆盖(TS2)、垄作+秸秆全量覆盖(RS2), 随机区组排列, 重复3次, 小区长4 m, 宽8 m。所有小区横向分厢(2 m为一厢, 共4厢)按条带(每厢按1 m+1 m分为两个条带)种植, 每1 m条带种植2行作物, 行距为60 cm。长4 m宽1 m的条带上蚕豆18穴、玉米和甘薯12穴。蚕豆采用种子穴播, 每穴留苗3株; 玉米和甘薯均采用育苗移栽, 玉米每穴留苗2株, 甘薯每穴留苗1株。第1茬(蚕豆)和第3茬(甘薯)种植在一个条带, 第2茬(玉米)种植在另一条带上。垄作处理中蚕豆和甘薯种植在垄上, 玉米种植在沟内, 整个生育期内实行少耕, 常规管理。田间种植示意图见图1。

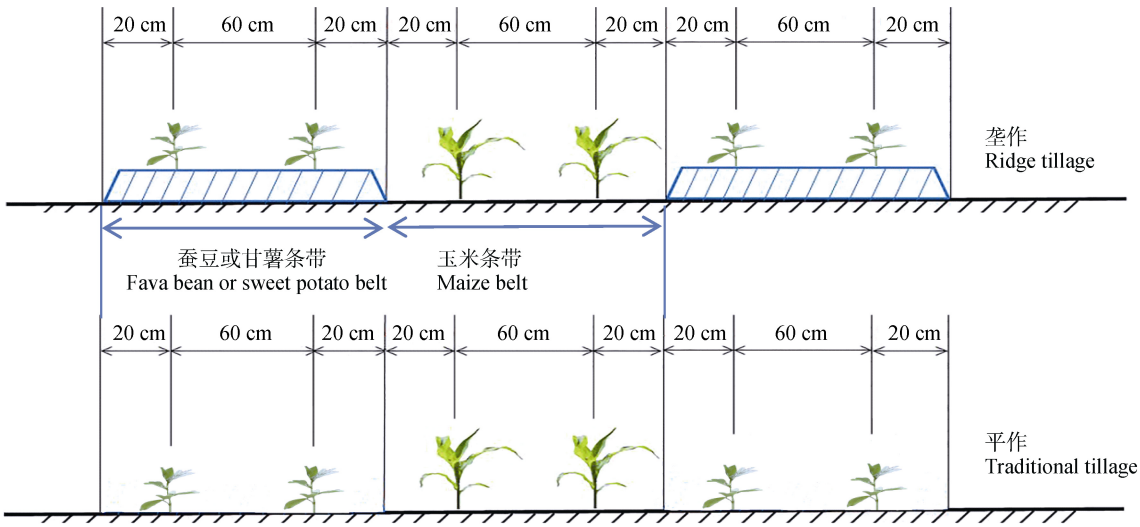

图 1　垄作和平作的蚕豆/玉米/甘薯套作田间试验示意图

Fig. 1　Schematic illustrations of ridge or traditional tillage patterns of intercropping of fabe bean/maize/sweet potato

蚕豆于 2014 年 11 月上旬播种、2015 年 5 月上旬收获, 甘薯于 2015 年 5 月下旬移栽、同年 10 月下旬收获, 玉米于 2015 年 4 月上旬移栽、同年 7 月底收获。4 月上旬到 5 月上旬为蚕豆和玉米的共生期, 5 月下旬到 7 月底为玉米和甘薯的共生期。蚕豆和甘薯种植于同一厢内, 玉米移栽于另一厢内, 移栽前和移栽后该厢内不种植任何作物, 为空闲状态。

1.3　测定项目和方法

1.3.1　土壤呼吸测定

采用 LI 6400 便携式光合作用系统连接 6400-09 呼吸室测定土壤呼吸。小区内按照行间、株间和条带边缘 3 个位置选取 3 个固定点(图 2), 放置 PVC 环, 底面积

80 cm^2, 高 5 cm, 插入土壤 2 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, 设定 2 个循环, 每个处理 3 次重复, 共 6 个数据, 取其平均值作为日土壤呼吸值。蚕豆、玉米和甘薯 3 种作物均于整个生育期内每半个月测定一次, 如遇下雨天气则适当调整, 测定时间统一为上午 9:00—11:00。

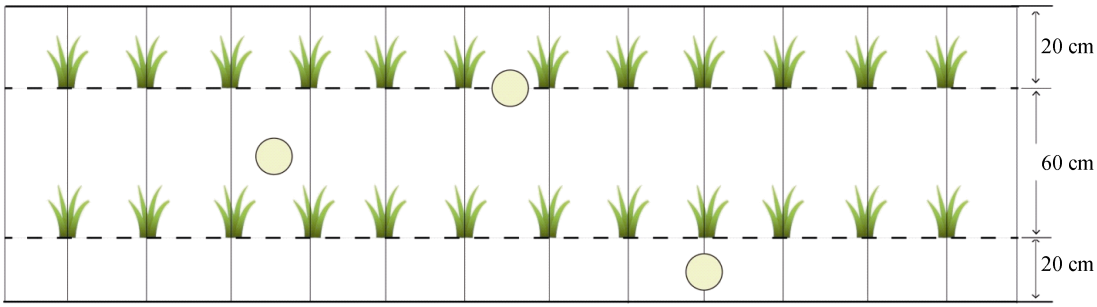

图 2 测定土壤呼吸用的 **PVC** 环在田间的安放位置

Fig. 2 Installed positions of PVC collars for soil respiration measurement in the test plot

图内小圆圈代表一个 1 m 条带内布置的 PVC 环, 从左到右依次为行间、株间和条带边缘。The small circles in the chart represent PVC collars arranged in a 1 m belt, being placed successively at interline, interplant and belt edge from left to right.

本试验采用根排除法区分土壤呼吸与土壤微生物呼吸, 具体做法为: 各处理分别在每小区的 4 厢中选择 1 厢不种植作物, 在测定种植作物土壤呼吸的同时测定不种植作物的土壤呼吸, 种植作物土壤呼吸记作土壤呼吸(R_s), 不种植作物土壤呼吸记作土壤微生物呼吸(R_m)[15]。R_s 和 R_m 单位均为 μmol·m^{-2}·s^{-1}, 按照 1 μmol·m^{-2}·s^{-1}=1.036 8 g(C)·m^{-2}·d^{-1}=10.368 kg(C)·hm^{-2}·d^{-1}, 把土壤呼吸速率换算为土壤呼吸量。土壤呼吸总量和土壤微生物呼吸总量的计算公式为:

$$F=\sum\left[\frac{(R_i+R_{i+1})}{2}\times(T_{i+1}-T_i)\right] \quad (1)$$

式中: F 为土壤呼吸总量或土壤微生物呼吸总量[kg(C)·hm^{-2}], R_i 和 R_{i+1} 分别为第 i 次和第 i+1 次测定时土壤呼吸或土壤微生物呼吸速率, T_i 和 T_{i+1} 分别为第 i 次和第 i+1 次测定时作物播种或移栽后天数。

1.3.2 作物生物量测定与计算

分别在作物收获时选取长势均匀一致的植株 6 株, 以茎为中心, 取长 20 cm、宽 20 cm, 蚕豆和甘薯为深 40 cm、玉米深 60 cm 的土块, 装入尼龙袋中, 用自来水冲洗, 之后将根系 80 ℃烘干至恒重后测定根系干重, 并按照种植密度计算根系生物量。同时测定地上生物量(包括地上部分各器官以及地表凋落物)。采用小区全收获法测定作物产量: 蚕豆、玉米产量为籽粒风干重; 甘薯产量为块根鲜重, 并按鲜重乘以 1/5 换算成粮食产量。

1.3.3 碳平衡计算

采用净生态系统生产力(NEP)来表示生态系统碳平衡[16]。NEP 为正值时, 表示系统是大气 CO_2 的吸收汇; 反之为大气 CO_2 的排放源。碳平衡计算公式为:

$$NEP=NPP-R_m \quad (2)$$

式中: NPP 为作物地上部碳积累量与地下部碳积累量的总和, 作物地上部组织(茎、叶、荚)和根的碳含量由总有机碳分析仪(TOC-5000AShimadiu)测定; 土壤微生物异养呼吸碳释放量(R_m)为各处理下相应不种植作物土壤呼吸在整个作物生育期间农田 CO_2 的排放量。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据作图, 采用 SPSS 22.0 一般性检验中单变量方差分析进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 保护性耕作下蚕豆/玉米/甘薯三熟制农田土壤呼吸的动态变化

在蚕豆/玉米/甘薯间套作系统中, 不同作物的土壤呼吸速率变化均有明显的差异性(图 3); 在蚕豆生育期内呈单峰曲线变化, 在玉米生育期内呈双峰曲线变化, 在甘薯生育期内呈先降低后增加再降低的趋势。自蚕豆播种(11 月上旬)到播种后 64 d(翌年 1 月中旬), 气温和土壤温度都较低, 土壤呼吸维持在一个较低水平。随着气温和土壤温度的升高, 土壤呼吸逐渐升高, 到播种后 131 d(翌年 3 月中旬)达到峰值, 此时蚕豆处于开花结荚期, 随后土壤呼吸逐渐下降。玉米移栽后 25 d 土壤呼吸出现一个小高峰, 这是由于此时进行秸秆覆盖引起的, 随后土壤呼吸逐渐升高, 在玉米吐丝期(移栽后 71 d)达到高峰, 随后各处理土壤呼吸逐渐下降。由于土壤耕作的影响, 甘薯移栽后土壤呼吸较高, 随后逐渐降低, 到移栽后 26 d 降到最低, 而后逐渐增加至茎叶盛长

期(移栽后 91~118 d)达到峰值, 随后下降。

在整个间套作系统内, 蚕豆、玉米和甘薯全生育期内土壤呼吸的变化范围分别为 0.974~14.963 μmol·m^{-2}·s^{-1}、1.760~12.327 μmol·m^{-2}·s^{-1}和 2.315~8.112 μmol·m^{-2}·s^{-1}, 均值分别为 3.704μmol·m^{-2}·s^{-1}、4.847 μmol·m^{-2}·s^{-1}和 4.606 μmol·m^{-2}·s^{-1}, 蚕豆的土壤呼吸速率显著低于玉米和甘薯(P<0.05), 玉米与甘薯间差异不显著。对 6 种处理下不同作物整个生育期内土壤呼吸速率平均值进行分析比较, 发现在蚕豆和玉米生育期内各处理间表现为 TS2>RS2>RS1>TS1>T>R, 甘薯则表现为 RS2>TS2>T>R>RS1>TS1。方差分析结果表明, 3 种作物生育期内垄作处理土壤呼吸速率均低于平作, 差异均达到显著水平(P<0.05), 说明垄作降低了蚕豆、玉米、甘薯田土壤呼吸速率。不同覆盖量间比较发现, 在蚕豆和玉米田秸秆全量覆盖土壤呼吸显著高于秸秆半量覆盖处理, 且两种处理均显著高于无覆盖处理(P<0.05); 在甘薯田则表现为秸秆全量覆盖土壤呼吸显著高于无覆盖处理, 均显著高于秸秆半量覆盖处理(P<0.05)。说明秸秆全量覆盖还田提高了蚕豆/玉米/甘薯三熟制农田土壤呼吸, 而秸秆半量覆盖对土壤呼吸的影响则因作物种类不同而存在差异。

2.2　保护性耕作下蚕豆/玉米/甘薯三熟制系统内作物固碳特征

如表 1 所示, 不同作物的固碳量存在显著差异, 表现为玉米>甘薯>蚕豆, 固碳量均值分别为 12 022.78 kg(C)·hm^{-2}、7 933.16 kg(C)·hm^{-2}和 4 930.09 kg(C)·hm^{-2}。秸秆、根系和籽粒的固碳量在蚕豆和玉米上表现为秸秆>籽粒>根系, 在甘薯上表现为籽粒(块根)>秸秆>根系。保护性耕作措施提高了作物的固碳量, 在蚕豆和甘薯上表现尤为显著, 基本表现为垄作高于平作(P<0.05), 秸秆全量覆盖高于秸秆半量覆盖高于无覆盖(P<0.05), 以 RS2 处理最高。垄作(R 处理)并不会显著降低玉米的固碳量, 配合秸秆覆盖后(RS1 和 RS2 处理)固碳量增加, 6 个处理下的固碳量以 TS1 处理最高。从整个农田系统出发, 综合考虑 3 种作物固碳量总和, 保护性耕作提高了农田生态系统固碳量, 处理间表现为 RS2>TS1>RS1>TS2>R>T, 分别较 T 处理高 36.58%、26.10%、23.69%、20.22%和 4.62%, 差异显著(R 处理除外)。

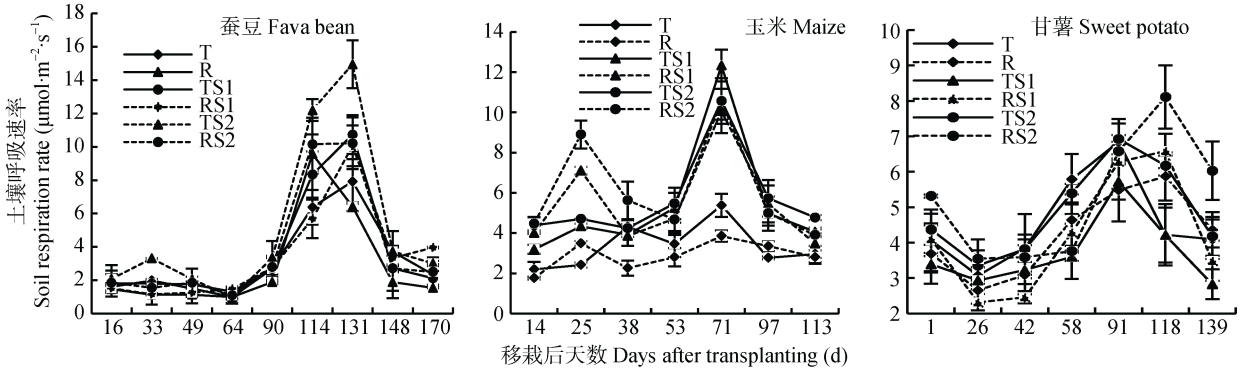

图 3　不同保护性耕作处理下蚕豆/玉米/甘薯三熟制系统农田土壤呼吸速率动态变化

Fig. 3　Dynamics of soil respiration rates in field of triple intercropping system of fava bean, maize and sweet potato under different conservation tillage treatments

T: 平作无覆盖; R: 垄作无覆盖; TS1: 平作+秸秆半量覆盖; RS1: 垄作+秸秆半量覆盖; TS2: 平作+秸秆全量覆盖; RS2: 垄作+秸秆全量覆盖。T: traditional tillage without straw mulching; R: ridge tillage without straw mulching; TS1: traditional tillage with straw mulching at 3 750 kg·hm^{-2}; RS1: ridge tillage with straw mulching at 3 750 kg·hm^{-2}; TS2: traditional tillage with straw mulching at 7 500 kg·hm^{-2}; RS2: ridge tillage with straw mulching at 7 500 kg·hm^{-2}.

2.3　保护性耕作下蚕豆/玉米/甘薯三熟制农田土壤呼吸总量、微生物呼吸总量与碳平衡

在西南紫色土丘陵区旱地蚕豆/玉米/甘薯间套种模式下, 蚕豆生育期内土壤呼吸总量各处理表现为 TS2>RS2>TS1>RS1>T>R, 玉米表现为 RS2>TS1>TS2>RS1>T>R, 甘薯表现为 RS2>TS1>RS1>TS2>T>R, 空闲期表现为 RS2>TS2>T>TS1>RS1>R, 6 个处理的土壤呼吸总量在不同作物下表现不同(表 2)。从不同作物来看, 保护性耕作下蚕豆、玉米和甘薯生育期内土壤呼吸总量分别占全年蚕豆/玉米/甘薯农田土壤呼吸总量的 22.6%、20.7%和 30.8%, 均值依次为 5 971.51 kg·hm^{-2}、5 525.34 kg·hm^{-2}和 8 067.81 kg·hm^{-2}, 甘薯显著高于蚕豆和玉米。从蚕豆/玉米/甘薯间套作体系整体出发, 6 个处理的土壤呼吸总量表现为 RS2>TS2>TS1>RS1>T>R, 分别高于对照 23.7%、21.1%、14.2%、8.3%、−3.3%, RS2 和 TS2 处理显著高于对照, 其余处理与对照间差异不显著。

表 1 不同保护性耕作处理下蚕豆/玉米/甘薯三熟制系统的作物固碳量

Table 1 Amount of carbon sequestration by each crop in the triple intercropping system of fava bean, maize and sweet potato under different conservation tillage treatments kg(C)·hm^{-2}

作物 Crop	处理 Treatment	秸秆 Straw	根系 Root	籽粒(块根) Grain (tuber)	总量 Total
蚕豆 Fava bean	T	1 926.75±69.41b	825.70±68.66c	1 253.63±103.10d	4 006.08±146.12d
	TS1	1 816.09±6.91b	1 274.82±87.35b	1 791.11±84.79abc	4 882.02±47.89b
	TS2	2 431.11±150.23a	1 228.95±80.29b	1 967.76±68.07ab	5 627.82±269.95a
	R	1 895.86±89.01b	782.03±30.90c	1 678.27±53.09c	4 356.16±53.72c
	RS1	1 820.60±191.31b	1 182.07±50.78b	1 749.15±75.88bc	4 751.82±156.68b
	RS2	2 311.75±164.33a	1 582.80±129.39a	2 062.09±198.27a	5 956.64±286.54a
玉米 Maize	T	6 155.96±227.02bc	570.44±33.66d	4 541.14±40.47b	11 005.42±187.66d
	TS1	7 446.33±248.31a	1 481.31±99.37a	5 044.14±39.68a	13 468.78±127.62a
	TS2	5 780.23±252.74c	846.46±22.21c	4 279.02±123.86c	11 670.83±131.16c
	R	5 470.18±287.80c	1 263.56±152.18b	3 868.12±93.36d	10 601.86±90.47d
	RS1	7 095.51±199.28ab	1 324.89±108.72ab	4 895.37±280.17a	12 756.09±182.92b
	RS2	6 450.24±234.32b	1 288.09±67.11b	4 335.69±87.56bc	12 633.70±122.42b
甘薯 Sweat potato	T	1 967.92±33.21e	154.58±14.47c	3 860.30±7.34e	5 982.82±44.71e
	TS1	3 094.36±48.90a	256.87±9.72a	4 771.54±65.20c	8 122.78±79.80c
	TS2	2 150.32±66.64d	178.49±17.59bc	5 612.98±176.68b	7 941.80±195.01c
	R	2 595.89±28.03c	180.01±25.82bc	4 231.07±104.88d	7 006.99±111.95d
	RS1	2 768.55±73.55b	209.82±27.41b	5 482.83±122.62b	8 461.21±86.12b
	RS2	2 100.15±115.41d	104.32±9.70d	7 878.85±187.08a	10 083.34±127.27a

T: 平作无覆盖; R: 垄作无覆盖; TS1: 平作+秸秆半量覆盖; RS1: 垄作+秸秆半量覆盖; TS2: 平作+秸秆全量覆盖; RS2: 垄作+秸秆全量覆盖。同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。T: traditional tillage without straw mulching; R: ridge tillage without straw mulching; TS1: traditional tillage with straw mulching at 3 750 kg·hm^{-2}; RS1: ridge tillage with straw mulching at 3 750 kg·hm^{-2}; TS2: traditional tillage with straw mulching at 7 500 kg·hm^{-2}; RS2: ridge tillage with straw mulching at 7 500 kg·hm^{-2}. Different letters in the same column show significant differences among treatments at 5% level.

表 2 不同保护性耕作处理下蚕豆/玉米/甘薯三熟制农田土壤呼吸总量、微生物呼吸总量与碳平衡

Table 2 Cumulative soil respiration, cumulative microbial respiration and carbon balance in the triple intercropping system of fava bean, maize and sweet potato under different conservation tillage treatments kg(C)·hm^{-2}

作物 Crop	项目 Item	T	TS1	TS2	R	RS1	RS2
蚕豆 Fava bean	CRs	5 297.21±412.42c	5 996.09±96.09eb	8 138.05±479.88a	4 932.01±32.01ec	5 241.64±236.13c	6 224.10±114.89b
	CRm	2 921.83±154.70a	2 855.69±186.42a	3 013.76±219.54a	2 613.90±155.16a	3 563.65±176.60a	3 139.49±274.10a
	NPP	4 006.08±146.12d	4 882.01±47.89b	5 627.82±269.94a	4 356.15±53.71c	4 751.83±156.68b	5 956.63±286.54a
	NEP	1 084.25±146.12c	2 026.32±47.89b	2 614.06±269.94a	1 742.25±53.71b	1 188.18±156.68c	2 817.14±286.54a
玉米 Maize	CRs	4 147.85±83.03b	6 509.51±602.76a	6 454.36±547.41a	3 611.25±353.80b	5 912.33±321.24a	6 516.75±670.51a
	CRm	2 396.01±131.19b	4 116.06±664.41a	4 530.67±781.75a	2 408.46±69.58b	4 471.48±579.54a	4 498.88±581.75a
	NPP	11 005.42±175.14d	13 468.78±173.44a	11 670.83±171.07c	10 601.86±348.91d	12 756.09±378.95b	12 633.70±252.90b
	NEP	8 609.41±175.14b	9 352.72±173.44a	7 140.16±171.07c	8 193.40±348.91b	8 284.60±378.95b	8 134.82±252.90b
甘薯 Sweat potato	CRs	7 725.66±237.06b	8 089.31±555.99b	7 814.70±468.07b	7 770.08±158.14b	8 041.70±518.96b	8 965.38±157.36a
	CRm	5 186.50±190.58b	6 169.31±228.89a	5 238.08±487.80b	4 929.33±434.72b	6 028.12±287.29a	6 190.24±169.55a
	NPP	5 982.82±44.71e	8 122.78±79.80c	7 941.80±195.01c	7 006.99±111.95d	8 461.21±86.12b	10 083.34±127.27a
	NEP	796.32±44.71e	1 953.47±79.80d	2 755.30±195.01b	2 077.66±111.95cd	2 270.97±86.12c	4 055.22±127.27a
空闲 Unplanted	CRs	6 634.25±134.31b	6 597.04±468.22b	6 706.11±308.35b	6 414.39±387.17b	6 593.09±463.23b	7 745.56±207.07a
	CRm	3 304.99±262.89b	4 226.26±309.45b	3 449.70±365.70b	3 875.40±220.34b	4 013.96±332.27b	5 834.07±381.59a
	NPP	—	—	—	—	—	—
	NEP	—	—	—	—	—	—
总量 Total	CRs	23 804.97±760.78d	27 191.95±497.57b	29 113.22±633.16a	22 727.73±472.12d	25 788.76±756.60c	29 451.79±465.26a
	CRm	13 809.33±558.90d	17 392.32±142.07b	16 232.20±532.80c	13 827.09±186.91d	18 077.20±742.07b	19 712.67±363.62a
	NPP	20 994.31±363.67e	26 473.58±231.05b	25 240.45±115.97c	21 965.00±327.74d	25 969.13±573.87b	28 673.67±463.77a
	NEP	7 184.98±85.69c	9 106.26±70.61a	9 008.24±19.16a	8 137.92±186.87b	7 891.92±149.02b	9 010.99±219.47a

T: 平作无覆盖; R: 垄作无覆盖; TS1: 平作+秸秆半量覆盖; RS1: 垄作+秸秆半量覆盖; TS2: 平作+秸秆全量覆盖; RS2: 垄作+秸秆全量覆盖。CRs: 土壤呼吸总量; CRm: 土壤微生物呼吸总量; NPP: 净初级生产力; NEP: 净生态系统生产力。同行不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平上差异显著。T: traditional tillage without straw mulching; R: ridge tillage without straw mulching; TS1: traditional tillage with straw mulching at 3 750 kg·hm^{-2}; RS1: ridge tillage with straw mulching at 3 750 kg·hm^{-2}; TS2: traditional tillage with straw mulching at 7 500 kg·hm^{-2}; RS2: ridge tillage with straw mulching at 7 500 kg·hm^{-2}. CRs: cumulative soil respiration; CRm: cumulative microbial respiration; NPP: net primary productivity; NEP: net ecosystem productivity. Different letters in the same line represent significant differences among different treatments at 0.05 level.

不同作物生育期内土壤微生物呼吸总量均值表现为甘薯>玉米>蚕豆, 分别为 5 627.76 kg·hm^{-2}、3 736.93 kg·hm^{-2} 和 3 026.39 kg·hm^{-2}, 三者间差异达显著水平(表 2)。从间套作体系整体出发, 6 个处理的土壤微生物呼吸总量表现为 RS2>RS1>TS1>TS2>R>T, 仅 RS2 处理显著高于对照, 其余处理间差异不显著。

在蚕豆、玉米、甘薯生育期内对不同处理下土壤呼吸总量和土壤微生物呼吸总量进行两因素方差分析, 结果表明, 土壤呼吸总量和土壤微生物呼吸总量均表现为在传统耕作平作和垄作之间差异不显著(P>0.05), 而秸秆覆盖量间差异显著(P<0.05), 秸秆全量覆盖和秸秆半量覆盖均显著高于无覆盖处理, 但秸秆全量覆盖和秸秆半量覆盖间差异不显著, 说明秸秆覆盖还田可以显著提高农田土壤呼吸总量和土壤微生物呼吸总量, 与秸秆覆盖量的多少无关。

保护性耕作下蚕豆/玉米/甘薯三熟制农田碳平衡计算结果见表 2。西南丘陵区旱地三熟制农田 6 种处理均为碳汇。与平作处理相比, 其余 5 处理碳汇总量均显著提高, RS2、TS2、RS1、TS1 和 R 分别较 T 高 25.41%、25.37%、9.84%、26.74%和 13.26%, 说明在西南紫色土丘陵区旱地条件下, 在蚕豆/玉米/甘薯三熟体系中垄作或秸秆覆盖均能显著提高农田生态系统碳汇能力。

2.4　保护性耕作下蚕豆/玉米/甘薯三熟制农田经济-环境效益

蚕豆/玉米/甘薯三熟制农田粮食产量如表 3 所示。秸秆覆盖后蚕豆、玉米、甘薯 3 种作物的产量均表现出增产, 且随着覆盖量的增加而增加。垄作措施对垄上作物蚕豆和甘薯具有增产效应, 但对垄沟内种植的玉米则表现出减产效应。从综合效应上考虑, 保护性耕作模式下三熟制系统的粮食产量表现为 RS2>TS2>RS1>TS1>R>T, 分别较 T 高 38.22%、30.61%、20.82%、17.79%、3.57%, 与 T 差异显著。依据三熟制农田的土壤呼吸总量和蚕豆、玉米、甘薯 3 种作物粮食产量, 得出 6 种处理下每千克粮食收获时土壤释放的 CO_2 量即农田的经济-环境效益[7-9], T、TS1、TS2、R、RS1、RS2 处理下农田经济-环境效益值分别为 1.88 kg·kg^{-1}、1.83 kg·kg^{-1}、1.75 kg·kg^{-1}、1.76 kg·kg^{-1}、1.69 kg·kg^{-1}、1.68 kg·kg^{-1}。与平作相比, 垄作和秸秆覆盖的保护性耕作处理在获得单位粮食产量时农田土壤分别释放 CO_2 量显著降低, 同时秸秆覆盖还田量越高, 经济-环境效益值越低, 说明保护性耕作措施对提高三熟制农田经济-环境效益是有利的, 垄作与秸秆覆盖还田配合施用效果更明显。

表 3　不同保护性耕作处理下蚕豆/玉米/甘薯三熟制农田粮食产量和经济-环境效益值

Table 3　Crop yield and economic-environmental benefit value of the triple intercropping system of fava bean, maize and sweet potato under different conservation tillage treatments

处理 Treatment	粮食产量 Crop yield (kg·hm^{-2})				土壤呼吸总量 Cumulative soil respiration [kg(C)·hm^{-2}]	经济-环境效益 Economic-environmental benefit value (kg·kg^{-1})
	蚕豆 Fava bean	玉米 Maize	甘薯 Sweet potato	总量 Total		
T	1 905.81±53.86d	7 088.90±405.11de	3 637.08±112.25e	12 631.79±295.74d	23 804.97±760.78d	1.88±0.05a
TS1	2 072.84±128.01cd	8 221.48±394.01bc	4 585.14±175.05c	14 879.45±295.42c	27 191.95±497.57b	1.83±0.01b
TS2	2 137.95±99.33c	9 133.56±769.93a	5 227.22±90.92b	16 498.73±690.96b	29 113.22±633.16a	1.75±0.02c
R	2 150.73±140.19c	6 701.72±239.69e	4 230.83±225.84d	13 083.29±210.31d	22 727.73±472.12d	1.76±0.02c
RS1	2 407.44±91.92b	7 529.31±679.24cd	5 325.42±260.50b	15 262.17±460.75c	25 788.76±756.60c	1.69±0.02d
RS2	2 792.53±88.81a	8 396.25±311.15ab	6 271.67±267.58a	17 460.45±425.72a	29 451.79±465.26a	1.68±0.01d

T: 平作无覆盖; R: 垄作无覆盖; TS1: 平作+秸秆半量覆盖; RS1: 垄作+秸秆半量覆盖; TS2: 平作+秸秆全量覆盖; RS2: 垄作+秸秆全量覆盖。同列不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。甘薯产量按照块根鲜重乘以 1/5 折算成粮食产量。T: traditional tillage without straw mulching; R: ridge tillage without straw mulching; TS1: traditional tillage with straw mulching at 3 750 kg·hm^{-2}; RS1: ridge tillage with straw mulching at 3 750 kg·hm^{-2}; TS2: traditional tillage with straw mulching at 7 500 kg·hm^{-2}; RS2: ridge tillage with straw mulching at 7 500 kg·hm^{-2}. Different lowercase letters in the same column show significant differences among different treatments at 0.05 level. The yield of fresh tubes of sweet potato was converted into grain yield by multiplying 1/5.

3　讨论

3.1　农田土壤呼吸的影响因素

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(NPP)、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[17], 各因子之间既相互独立又相互联系地影响土壤呼吸。

1)作物类型影响农田土壤呼吸。本研究中, 玉米和甘薯的土壤呼吸速率显著高于蚕豆, 这一结果取

决于作物自身特点和非生物因子的共同作用。其一，玉米和甘薯属于夏季作物，生长期内较高的气温促进作物生长，增加光合产物向地下的输送，使得土壤呼吸作用较冬季作物蚕豆强烈。其二，作物自身的特性即 NPP[18]、根系生物量等也影响土壤呼吸：蚕豆、玉米、甘薯 3 种作物相比，玉米的 NPP 显著高于甘薯和蚕豆，甘薯地下生物量显著高于玉米和蚕豆。NPP 是作物光合作用的结果，而光合作用作为土壤呼吸作用的物质基础来源[19]，其强度与土壤呼吸速率呈协同上升的关系；根系呼吸作为土壤呼吸的重要组成部分，根系生物量和根系活性通过影响根系呼吸来影响土壤呼吸作用[20]，根系的参与促进了土壤呼吸[21-22]，夏季较高的土壤温度有利于土壤微生物和根系活性的增加，从而进一步促进土壤呼吸[23]。

2)耕作措施也会影响土壤呼吸。田间起垄栽培后，垄上与垄沟内的小气候与平作存在差异，进而影响农田的土壤呼吸。王同朝等[24]研究发现垄作促进了小麦生长季土壤呼吸作用，而对玉米的影响不显著；张赛等[10-12]研究表明，垄作条件下玉米田土壤呼吸低于传统平作，而小麦田和大豆田则高于传统平作。而本研究中垄作降低了蚕豆、玉米和甘薯生长季农田土壤呼吸总量，目前针对垄作对土壤呼吸作用的影响研究较少，不同地区、不同种植模式下得到的结论不一，说明垄作对土壤呼吸的影响效应与作物类型以及多熟种植制度有关。一方面，种植模式的不同导致农田小气候环境不同，间套作系统内不同作物由于形态和生态型上的错位搭配形成的空间生态位互补和生育期上的时间生态位互补会影响农田碳排放[25-26]，土壤温度、土壤水分等环境因子的差异影响土壤呼吸。另一方面，不同作物之间存在化感效应，对土壤微生物的活动以及作物根系生长带来一定的影响，作物类型和根系属性在不同程度上也会影响土壤呼吸，但对土壤呼吸的作用机理目前还不明确，仍需要进一步研究。

3)秸秆覆盖还田作为常见的田间管理措施，在为土壤提供额外养分的同时也对土壤微生物的活性产生影响，促进土壤有机质的矿化，进而引起土壤呼吸的变化[27-28]。关于秸秆覆盖对土壤呼吸的影响结论大体一致，一般认为秸秆还田会促进土壤中 CO_2 的释放，不同的研究表明秸秆覆盖均在不同程度增强了土壤呼吸，且随着秸秆分解后期对土壤呼吸的影响逐渐减弱[29]。本研究也表明，垄作与秸秆覆盖还田结合使用后，提高了农田土壤呼吸总量，但与覆盖量的多少无关。本研究发现，保护性耕作措施尤其是秸秆覆盖还田下土壤微生物呼吸碳通量占农田 NPP 的 62%~69%，在提高农田碳储量的同时促进了由土壤微生物呼吸引起的土壤碳排放，秸秆覆盖在地表使表层的土壤有机碳增加[30]，在某种程度上输入土壤的碳越多，土壤微生物的呼吸作物就越大[31]。

3.2 保护性耕作对农田系统碳平衡及经济-环境效益的影响

有关碳平衡的研究表明，东北地区一年一熟制[32]和华北地区一年两熟制农田[33]均表现为碳汇。本研究中西南旱地丘陵蚕豆/玉米/甘薯三熟制农田也表现为 CO_2 的吸收汇。在农田生态系统中，作物通过光合作用将大气中的 CO_2 以有机碳的形式固定于作物中，作物碳储量增加，可以提高农田生态系统的碳汇能力。黄土高原春玉米农田年均 NPP 约为 8 440 kg(C)·hm^{-2}[34]，华北平原地区小麦-玉米轮作农田 NPP 为 9 675~14 708 kg(C)·hm^{-2}[33]。本研究中，西南旱地丘陵蚕豆/玉米/甘薯三熟制农田 NPP 为 20 994~28 673 kg(C)·hm^{-2}，农田表现为碳汇。以垄作和秸秆覆盖为主体的保护性耕作模式下作物的固碳能力增加，垄作和秸秆覆盖还田有利于农田生态系统碳汇的结论得到认可[34-35]。然而，也有一些研究表明，秸秆还田并不能提高农田碳汇的能力[36-38]。Wang 等[38]发现华北平原冬小麦-夏玉米农田秸秆还田后年平均碳汇为–770 kg(C)·hm^{-2}，长期的秸秆还田会导致农田土壤有机碳含量达到饱和水平；Liu 等[39]通过对已经发表的 176 篇论文的研究结果经过 Meta 分析发现，连续 12 年的秸秆还田后土壤有机碳达到一个新平衡状态。因此，本研究认为蚕豆/玉米/甘薯三熟制农田表现为碳汇的原因与较低的土壤原始有机碳含量有关，在土壤有机碳尚未达到饱和的情况下，垄作和秸秆覆盖为主体的保护性耕作增加农田碳汇的能力还将持续。

经济-环境效益值通常用来衡量不同管理措施下农田增产和减排的综合效益。本研究中，西南旱地丘陵蚕豆/玉米/甘薯三熟制农田的经济-环境效益值为 1.68~1.88 kg·kg^{-1}，与孟磊等[7](0.29~1.92 kg·kg^{-1})、崔凤娟[8](2.16~3.27 kg·kg^{-1})及涂纯等[9](2.96~3.16 kg·kg^{-1})的研究不同。地区的空间异质性、研究对象的差异以及农田管理措施的不同，导致作物产量和土壤呼吸出现异质性，进而影响农田生态系统的综合效益。本研究中以垄作和秸秆覆盖为主体的保护性耕作措施提高了旱地三熟农田经济-环境效益，垄作结合秸秆全量覆盖具有最优的经济-环境效益，这与涂纯等[9]在降水较少的年份得出的结论一致。因此，在西南旱地农田中，

可以通过垄作结合秸秆覆盖还田使更多的 CO_2 进入农田生态系统中, 提高农田的经济-环境效益, 从而实现农田固碳增汇减排的目的。

4　结论

西南旱地丘陵蚕豆/玉米/甘薯三熟制农田生态系统中, 3 种作物全生育期内平均土壤呼吸速率表现为玉米>甘薯>蚕豆, 分别为 4.847 μmol·m^{-2}·s^{-1}、4.606 μmol·m^{-2}·s^{-1} 和 3.704 μmol·m^{-2}·s^{-1}, 玉米和甘薯显著高于蚕豆; 甘薯的土壤呼吸总量和微生物呼吸总量最高, 分别占全年总量的 30.8%和 34.1%; 作物固碳量能力以玉米最高, 可占到农田生态系统固碳总量的 48.3%。

垄作显著降低了 3 种作物的土壤呼吸速率, 秸秆覆盖促进农田土壤呼吸。从三熟制系统整体出发, 垄作和秸秆覆盖配合使用后土壤呼吸总量和土壤微生物呼吸总量显著提高, 同时, 促进了系统的作物固碳量, 以 RS2 处理最高。西南旱地丘陵蚕豆/玉米/甘薯三熟制农田表现为碳汇, 以垄作和秸秆覆盖为主体的保护性耕作显著提高了农田的碳汇能力, 以 RS2、TS2、TS1 3 处理的碳汇强度最大。保护性耕作下蚕豆/玉米/甘薯三熟制系统的粮食产量显著增加, 表现为 RS2>TS2>RS1>TS1>R>T, 依次为 17 460.45 kg·hm^{-2}、16 498.73 kg·hm^{-2}、15 262.17 kg·hm^{-2}、14 879.45 kg·hm^{-2}、13 083.29 kg·hm^{-2} 和 12 631.79 kg·hm^{-2}。经济-环境效益值表现为 T>TS1>R>TS2>RS1>RS2, 分别为 1.88 kg·kg^{-1}、1.83 kg·kg^{-1}、1.76 kg·kg^{-1}、1.75 kg·kg^{-1}、1.69 kg·kg^{-1} 和 1.68 kg·kg^{-1}。从农田碳平衡和经济-环境效益综合考虑, 垄作结合秸秆全量覆盖具有最大的碳汇能力和最优的经济-环境效益, 可以优先作为该地区农田实现增产、固碳增汇的耕作措施。

参考文献 References

[1] 韩广轩, 周广胜, 许振柱. 中国农田生态系统土壤呼吸作用研究与展望[J]. 植物生态学报, 2008, 32(3): 719–733
HAN G X, ZHOU G S, XU Z Z. Research and prospects for soil respiration of farmland ecosystems in China[J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(3): 719–733

[2] SCHLESINGER W, ANDREWS J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 7–20

[3] SENAPATI N, CHABBI A, SMITH P. Modelling daily to seasonal carbon fluxes and annual net ecosystem carbon balance of cereal grain-cropland using DailyDayCent: A model data comparison[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 252: 159–177

[4] 李军. 农作学[M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2016: 222–225
LI J. Science of Farming System[M]. 2nd edition. Beijing: Science Press, 2016: 222–225

[5] 王龙昌, 邹聪明, 张云兰, 等. 西南“旱三熟”地区不同保护性耕作措施对农田土壤生态效应及生产效益的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(10): 1880–1890
WANG L C, ZOU C M, ZHANG Y L, et al. Influences of conservation tillage practices on farmland soil ecological factors and productive benefits in dryland region with triple cropping system in Southwest China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(10): 1880–1890

[6] WIESMEIER M, HÜBNER R, KÖGEL-KNABNER Ⅰ. Stagnating crop yields: An overlooked risk for the carbon balance of agricultural soils?[J]. Science of the Total Environment, 2015, 536: 1045–1051

[7] 孟磊, 丁维新, 蔡祖聪, 等. 长期定量施肥对土壤有机碳储量和土壤呼吸影响[J]. 地球科学进展, 2005, 20(6): 687–692
MENG L, DING W X, CAI Z C, et al. Storage of soil organic C and soil respiration as effected by long-term quantitative fertilization[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(6): 687–692

[8] 崔凤娟. 免耕秸秆覆盖对旱作农田土壤呼吸和碳平衡的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011
CUI F J. Effects of zero tillage and mulching on soil resperation and carbon balance in rainfed field[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011

[9] 涂纯, 王俊, 官情, 等. 秸秆覆盖对旱作冬小麦农田土壤呼吸、作物产量及经济环境效益的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(8): 931–937
TU C, WANG J, GUAN Q, et al. Effect of straw mulching on soil respiration, crop yield, economy-environment benefit in rainfed winter wheat fields[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(8): 931–937

[10] 张赛, 张晓雨, 王龙昌, 等. 西南丘陵区保护性耕作下小麦农田土壤呼吸及影响因素分析[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2815–2820
ZHANG S, ZHANG X Y, WANG L C, et al. Analysis of soil respiration and influence factors in wheat farmland under conservation tillage in southwest hilly region[J]. Environmental Science, 2013, 34(7): 2815–2820

[11] 张赛, 王龙昌, 周航飞, 等. 西南丘陵区不同耕作模式下玉米田土壤呼吸及影响因素[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6244–6255
ZHANG S, WANG L C, ZHOU H F, et al. Analysis of soil respiration and influencing factors in maize farmland under different tillage patterns in hilly area in southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6244–6255

[12] 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
ZHANG S, LUO H X, WANG L C, et al. Analysis of soil respiration and the influencing factors in soybean fields under conservation tillage[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(8): 913–920

[13] RAICH J W, TUFEKCIOGUL A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 71–90

[14] 张俊丽, SIKANDER K T, 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
ZHANG J L, SIKANDER K T, WEN X X, et a1. Soil respiration and its affecting factors in dry-land maize field under different tillage systems[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(18):

192–199

[15] WOODWELL G M, WHITTAKER R H, REINERS W A, et al. The biota and the world carbon budget[J]. Science, 1978, 199(4325): 141–146

[16] 骆亦其, 周旭辉, 姜丽芬, 等. 土壤呼吸与环境[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007
LUO Y Q, ZHOU X H, JIANG L F, et al. Soil Respiration and the Environment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007

[17] 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
JIANG G F, LIU C, LI J Q, et al. Soil respiration and driving factors of farmland ecosystems in China[J]. Scientia Sinica Vitae, 2014, 44(7): 725–735

[18] REICHSTEIN M, REY A, FREIBAUER A, et al. Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2003, 17(4): 1104–1104

[19] LOHILA A, AURELA M, REGINA K, et al. Soil and total ecosystem respiration in agricultural fields: Effect of soil and crop type[J]. Plant and Soil, 2003, 251(2): 303–317

[20] 孙文娟, 黄耀, 陈书涛, 等. 作物生长和氮含量对土壤-作物系统 CO_2 排放的影响[J]. 环境科学, 2004, 25(3): 1–6
SUN W J, HUANG Y, CHEN S T, et al. CO_2 emission from soil-crop system as influenced by crop growth and tissue N content[J]. Environmental Science, 2004, 25(3): 1–6

[21] 郑聚锋, 张旭辉, 潘根兴, 等. 水稻土基底呼吸与 CO_2 排放强度的日动态及长期不同施肥下的变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 485–494
ZHENG J F, ZHANG X H, PAN G X, et al. Diurnal variation of soil basal respiration and CO_2 emission from a typical paddy soil after rice harvest under long-term different fertilizations[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(4): 485–494

[22] 张前兵, 杨玲, 孙兵, 等. 干旱区灌溉及施肥措施下棉田土壤的呼吸特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 77–84
ZHANG Q B, YANG L, SUN B, et al. Respiration characteristics of cotton soil under irrigation and fertilization measures in arid region[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(14): 77–84

[23] GRAND S, RUBIN A, VERRECCHIA E P, et al. Variation in soil respiration across soil and vegetation types in an alpine valley[J]. PLoS One, 2016, 11(9): e0163968

[24] 王同朝, 卫丽, 田原, 等. 冬小麦-夏玉米一体化垄作覆盖下农田土壤呼吸变化研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(9): 1970–1974
WANG T C, WEI L, TIAN Y, et al. Dynamic changes of soil respiration on mulched bed planting under winter wheat and summer maize double cropping integration[J]. Journal of Agro-Enivironment Science, 2009, 28(9): 1970–1974

[25] TAKIM F O. Advantages of maize-cowpea intercropping over sole cropping through competition indices[J]. Journal of Agriculture and Biodiversity Research, 2012, 1(4): 53–59

[26] CHAI Q, QIN A Z, GAN Y T, et al. Higher yield and lower carbon emission by intercropping maize with rape, pea, and wheat in arid irrigation areas[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2014, 34(2): 535–543

[27] 王维钰, 乔博, KASHIF A, 等. 免耕条件下秸秆还田对冬小麦-夏玉米轮作系统土壤呼吸及土壤水热状况的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(11): 2136–2152
WANG W Y, QIAO B, KASHIF A, et al. Effects of straw returning to field on soil respiration and soil water heat in winter wheat-summer maize rotation system under no tillage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(11): 2136–2152

[28] YIN H J, ZHAO W Q, LI T, et al. Balancing straw returning and chemical fertilizers in China: Role of straw nutrient resources[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81(2): 2695–2702

[29] FUENTES M, HIDALGO C, ETCHEVERS J, et al. Conservation agriculture, increased organic carbon in the top-soil macro-aggregates and reduced soil CO_2 emissions[J]. Plant and Soil, 2012, 355(1/2): 183–197

[30] 贾淑霞, 孙冰洁, 梁爱珍, 等. 耕作措施对东北黑土微生物呼吸的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(9): 1764–1773
JIA S X, SUN B J, LIANG A Z, et al. Effect of conservation tillage on microbial respiration of black soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(9): 1764–1773

[31] JACINTHE P A, LAL R, KIMBLE J M. Carbon budget and seasonal carbon dioxide emission from a central Ohio Luvisol as influenced by wheat residue amendment[J]. Soil and Tillage Research, 2002, 67(2): 147–157

[32] 梁尧, 韩晓增, 乔云发, 等. 小麦-玉米-大豆轮作下黑土农田土壤呼吸与碳平衡[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(4): 395–401
LIANG Y, HAN X Z, QIAO Y F, et al. Soil respiration and carbon budget in black soils of wheatmaize-soybean rotation system[J]. Chinese Journal OF Eco-Agriculture, 2012, 20(4): 395–401

[33] 张庆忠, 吴文良, 王明新, 等. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(11): 2883–2887
ZHANG Q Z, WU W L, WANG M X, et al. The effects of crop residue amendment and N rate on soil respiration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11): 2883–2887

[34] GAO X, GU F X, HAO W P, et al. Carbon budget of a rainfed spring maize cropland with straw returning on the Loess Plateau, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 586: 1193–1203

[35] LIU S Y, ZHANG X P, LIANG A Z, et al. Ridge tillage is likely better than no tillage for 14-year field experiment in black soils: Insights from a 15 N-tracing study[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 179: 38–46

[36] GARCÍA-ORENES F, CERDÀ A, MATAIX-SOLERA J, et al. Effects of agricultural management on surface soil properties and soil-water losses in eastern Spain[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 106(1): 117–123

[37] BUYSSE P, ROISIN C, AUBINET M. Fifty years of contrasted residue management of an agricultural crop: Impacts on the soil carbon budget and on soil heterotrophic respiration[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 167: 52–59

[38] WANG Y Y, HU C S, DONG W X, et al. Carbon budget of a winter-wheat and summer-maize rotation cropland in the North China Plain[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 206: 33–45

[39] LIU C, LU M, CUI J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2014, 20(5): 1366–1381