

郭树健,李淑娟,李娜,等.红壤旱地以玉米为主体的不同种植模式对土壤碳库管理指数的影响[J].华中农业大学学报,2022,41(6):128-136.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.06.014

# 红壤旱地以玉米为主体的不同种植模式对土壤碳库管理指数的影响

郭树健,李淑娟,李娜,黄国勤

江西农业大学生态科学研究中心,南昌 330045

**摘要** 为揭示红壤旱地种植模式对土壤有机碳库组分及碳库管理指数的影响差异,以有效反映种植模式与土壤质量的关系,以紫云英-玉米为对照(CK),设置马铃薯-玉米||大豆、“三花”混播(紫云英×油菜×肥田萝卜)-玉米||花生(TMP)、蚕豆-玉米||甘薯(BMS)、油菜-玉米||大豆(RMS)5种以玉米为主体的种植模式,分析了第1、2季收获后土壤有机碳及碳库管理指数的变化。结果显示:第2季间作玉米收获后,与CK处理(CK)相比,PMS、TMP、BMS、RMS的活性有机碳分别提高53.67%、67.89%、11.01%、57.80%;PMS、TMP、RMS处理的碳库活性、碳库活性指数与对照相比分别显著提高了52.63%~89.47%和53.49%~93.80% ( $P<0.05$ ),土壤碳库管理指数显著高于对照59.24%、60.71%、80.91% ( $P<0.05$ )。土壤碳库管理指数与活性有机碳含量呈极显著正相关 ( $P<0.01$ )。玉米间作产量均高于单作,且不同种植模式经济产量都高于对照。综合分析认为,红壤旱地以玉米为主体的不同种植模式有利于提高活性有机碳含量及碳素有效率、土壤碳库管理指数,也有利于提高玉米产量;马铃薯-玉米||大豆处理经济产量最高,三花-玉米||花生处理最有利于提高碳库管理指数,油菜-玉米||大豆处理次之。

**关键词** 红壤旱地;种植模式;土壤活性有机碳;碳库管理指数;土壤肥力

**中图分类号** S344.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)06-0128-09

红壤是我国主要土壤类型之一,我国南方旱地主要以红壤旱地为主,南方红壤区水、光、热资源丰富,自然条件优越,生产潜力巨大,是区域经济(粮、经、饲、菜)农业重要资源、重要生产基地。但由于红壤旱地限制因子多,加上耕作管理措施不当进而导致农田环境恶化,效益不高<sup>[1]</sup>。农田土壤固碳有助于碳循环,同时可以提升土壤肥力和质量。土壤有机碳可以预警农田土壤质量好坏,和土壤养分息息相关,活性有机碳(包括可溶性有机碳、易氧化有机碳等)能够体现人类活动所带来的土壤结构变化<sup>[2-4]</sup>。微生物量碳既能反映土壤微生物活跃程度,也能评价其生物肥力<sup>[5-6]</sup>。土壤碳库管理指数是表征土壤碳库变化的指标,取决于土壤总有机碳和碳稳定性,有助于评估土壤质量<sup>[7]</sup>。研究表明轮作模式有利于土壤有机质含量和碳库管理指数的提高<sup>[8-9]</sup>。韩明政等<sup>[10]</sup>和张洋等<sup>[11]</sup>研究结果表明间作可以提高植物

多样性,改良土壤结构,能有效提高碳库管理指数,增加土壤碳储量。蒲玉琳等<sup>[12]</sup>研究表明2种间作模式的碳库管理指数均大于100%,能不同程度提升土壤质量。目前,对红壤旱地研究较多的是施肥<sup>[13-14]</sup>、不同土地利用方式<sup>[2,15]</sup>对土壤碳库的影响,尚缺乏关于红壤旱地以玉米为主体的轮作及间作模式对土壤碳库管理指数的研究。本研究结合红壤旱地实际,设置不同轮作模式,以冬季作物为起点,第2季主要是玉米为主体的间作,通过分析第1、2季收获后的土壤碳库管理指数变化,筛选出适宜红壤旱地的不同种植模式,从而为提高土壤肥力、质量,优化种植制度提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2020年10月至2021年10月在江西农业

收稿日期:2022-04-26

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0300208);国家自然科学基金项目(41661070);中国工程院咨询研究项目(2017-XY-28)

郭树健,E-mail:1316248421@qq.com

通信作者:黄国勤,E-mail:hgqjxes@sina.com

大学科技园(28°76'N, 115°84'E)进行,该处地势平坦,属亚热带季风气候,光热资源充足,年均降水量为2 223.2 mm,年均气温16.5℃。试验初始土壤性状:pH 4.48,全氮1.29 g/kg,全磷1.08 g/kg,全钾53.40 g/kg,有效磷62.27 mg/kg,速效钾96.75 mg/kg,有机质26.03 g/kg,碱解氮96.49 mg/kg。

## 1.2 试验设计

本研究采用随机区组设计,共设计5个处理,分别是紫云英(*Astragalus sinicus* L.)-玉米(*Zea mays* L.)(CM)为对照(CK)、马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)-玉米||大豆(*Glycine max* (Linn.) Merr.)(PMS)、“三花”混播(紫云英×油菜×肥田萝卜(*Raphanus sativus* L.))-玉米||花生(*Arachis hypogaea* Linn.)(TMP)、蚕豆(*Vicia faba* L.)-玉米||甘薯(*Dioscorea esculenta* (Lour.) Burkill)(BMS)、油菜(*Brassica campestris* L.)-玉米||大豆(RMS)。每处理设置3次重复,共15个小区,小区长6 m,宽5.5 m,小区面积33.0 m<sup>2</sup>。紫云英品种为余江大叶籽,马铃薯品种为东农303,肥田萝卜品种为南畔洲萝卜,蚕豆品种为青蚕1号,油菜品种为阳光121,玉米品种为赣新糯7号,大豆品种为绿宝石,花生品种为华赣1号,甘薯品种为广薯87,作物种子均购自南昌种子商店。紫云英、“三花”撒播,紫云英播种量为37.48 kg/hm<sup>2</sup>，“三花”中的紫云英、油菜、肥田萝卜按照5:1:1质量比播种,紫云英播种量为7.50 kg/hm<sup>2</sup>、油菜1.5 kg/hm<sup>2</sup>、肥田萝卜1.5 kg/hm<sup>2</sup>;马铃薯株距25 cm,行距50 cm,密度5 336株/667 m<sup>2</sup>;蚕豆株距25 cm,行距50 cm,密度5 336兜/667 m<sup>2</sup>(每兜3株);油菜株距20 cm,行距30 cm,10 914株/667 m<sup>2</sup>。单作玉米行距为65 cm,大豆与大豆、花生与花生行距为30 cm,甘薯与甘薯的行距为35 cm,大豆、花生、甘薯与玉米的行距均为50 cm;间作3个处理分别是2行玉米分别间作2行大豆、2行花生、2行甘薯,6行大豆、花生、甘薯,8行玉米;玉米株距25 cm,大豆、花生、甘薯株距均为20 cm。玉米密度3 880株/667 m<sup>2</sup>,大豆、花生、甘薯密度为2 910株/667 m<sup>2</sup>。

## 1.3 田间管理

于2020年10月26日播种紫云英和“三花”,2021年3月31日盛花期进行翻压。2020年10月27日播种油菜,2021年4月26日收获。2020年11月6日播种蚕豆,2021年4月23日收获。2020年12月8日播种马铃薯,2021年4月19日收获。2021年5月5日同

时播种玉米、大豆、花生和甘薯,2021年玉米和大豆于7月29日收获,花生于8月30日收获,甘薯于10月7日收获。第1、2季作物基肥:复合肥750 kg/hm<sup>2</sup>、有机肥1 500 kg/hm<sup>2</sup>,撒施后开沟播种。施肥量详见表1。水分管理主要依靠自然降水以及干旱季节滴灌,灌水时间及水量一致,其他管理同大田。

表1 不同种植模式的施肥情况

| 处理<br>Treatment | 作物<br>Crop                                | 施肥量<br>Fertilizer application rate                      |
|-----------------|---|---|
| CM(CK)          | 紫云英<br>Chinese milk vetch                 | 钙镁磷肥45<br>Calcium and magnesium phosphate fertilizer 45 |
|                 | 玉米Maize                                   | N 190, P 86, K 165                                      |
| PMS             | 马铃薯Potato                                 | N 102, P 68, K 155                                      |
|                 | 玉米Maize                                   | N 190, P 86, K 165                                      |
|                 | 大豆Soybean                                 | N 190, P 86, K 165                                      |
| TMP             | “三花”混播<br>“Three flowers”<br>mixed sowing | 钙镁磷肥45<br>Calcium and magnesium phosphate fertilizer 45 |
|                 | 玉米Maize                                   | N 190, P 86, K 165                                      |
|                 | 花生Peanut                                  | N 102, P 68, K 155                                      |
| BMS             | 蚕豆Broad bean                              | N 102, P 68, K 155                                      |
|                 | 玉米Maize                                   | N 190, P 86, K 165                                      |
|                 | 甘薯Sweet potato                            | N 102, P 68, K 155                                      |
| RMS             | 油菜Rape                                    | N 102, P 68, K 155                                      |
|                 | 玉米Maize                                   | N 190, P 86, K 165                                      |
|                 | 大豆Soybean                                 | N 190, P 86, K 165                                      |

## 1.4 测定项目及方法

1)作物产量测定。各小区实打实收,测定各作物产量。

2)土壤样品采集与测定。在第1、2季作物收获时,每个小区采用5点取样法,在单、间作植株根际周围钻土,取0~20 cm耕层土,混合均匀,用于测定各指标。土壤有机碳(total organic carbon, TOC)采用重铬酸钾外加热法测定,土壤活性有机碳(active organic carbon, AOC)采用高锰酸钾氧化法测定<sup>[16]</sup>,土壤可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)采用滤液提取分析测定<sup>[17]</sup>,土壤微生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)采用氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>法测定<sup>[18]</sup>,土壤易氧化有机碳(readily oxidizable organic carbon, ROC)采用333 mmol/L KMnO<sub>4</sub>氧化比色法

测定<sup>[19]</sup>。选取试验田试验前红壤旱地作为参考农田,碳库活度(carbon pool activity, A)、碳库指数(carbon pool index, CPI)、碳库活度指数(carbon pool activity index, AI)、碳库管理指数(carbon pool management index, CPMI)计算方法参照文献[16]。

### 1.5 数据分析

采用Excel 2019处理数据,利用SPSS 22.0对数据进行单因素方差分析和Pearson相关性分析,利用Origin 2018进行作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同种植模式对土壤有机碳及活性有机碳各组分含量的影响

由表2可知,第1季收获后,各处理的土壤总有机碳含量(TOC)及微生物量碳(MBC)、易氧化有机碳(ROC)含量没有明显规律,但以CK微生物量碳(MBC)含量最高。另外,CK的可溶性有机碳(DOC)含量为最大值,显著高于BMS处理32.00% ( $P<0.05$ )。BMS处理的活性有机碳(AOC)含量最高,与对照、RMS处理相比有显著差异( $P<0.05$ ),均

高于16.94%。在第2季玉米间作其他作物收获后,各处理土壤有机碳库组分均发生了变化。各处理的TOC、AOC、DOC含量没有显著差异,但TMP处理的AOC、DOC、MBC含量均为最大值,活性有机碳(AOC)、可溶性有机碳(DOC)和微生物量碳(MBC)含量分别高于其他处理6.40%~67.89%、3.13%~22.22%和12.50%~45.95%,其中微生物量碳(MBC)含量与PMS处理有显著差异( $P<0.05$ )。对照处理与PMS、BMS处理的易氧化有机碳(ROC)含量有显著差异( $P<0.05$ )。各处理活性有机碳含量(AOC)分别高于对照53.67%、67.89%、11.01%、57.80%。第2季较第1季土壤总有机碳(TOC)及各组分含量出现不同幅度的升降,且差异不大。各处理的微生物量碳(MBC)都有所下降;但除对照处理和BMS处理外,活性有机碳(AOC)含量在第2季都得到了提升;除对照处理和RMS处理,可溶性有机碳(DOC)含量也得到了提升。

表2 不同种植模式下土壤有机碳及活性有机碳各组分含量

Table 2 Soil organic carbon and active organic carbon components under different planting patterns g/kg

| 采样时间<br>Sampling time              | 处理<br>Treatment | 总有机碳<br>Total organic carbon | 活性有机碳<br>Active organic carbon | 可溶性有机碳<br>Dissolved organic carbon | 微生物量碳<br>Microbial biomass carbon | 易氧化有机碳<br>Readily oxidizable organic carbon |
|------------------------------------|-----------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---|
| 第1季收获后<br>After the first harvest  | CM(CK)          | 14.17±1.06a                  | 2.48±0.07b                     | 0.33±0.02a                         | 0.67±0.02a                        | 1.94±0.16a                                  |
|                                    | PMS             | 15.94±1.74a                  | 2.52±0.12ab                    | 0.27±0.01ab                        | 0.58±0.02a                        | 2.13±0.17a                                  |
|                                    | TMP             | 14.90±0.19a                  | 2.68±0.19ab                    | 0.28±0.01ab                        | 0.58±0.03a                        | 1.96±0.21a                                  |
|                                    | BMS             | 15.49±1.49a                  | 2.90±0.11a                     | 0.25±0.02b                         | 0.60±0.07a                        | 1.78±0.20a                                  |
|                                    | RMS             | 15.89±0.44a                  | 2.48±0.10b                     | 0.28±0.04ab                        | 0.56±0.04a                        | 2.14±0.23a                                  |
| 第2季收获后<br>After the second harvest | CM(CK)          | 14.73±0.53a                  | 2.18±0.18ab                    | 0.31±0.04a                         | 0.48±0.03ab                       | 2.05±0.02a                                  |
|                                    | PMS             | 14.34±1.27a                  | 3.35±0.18a                     | 0.32±0.01a                         | 0.37±0.02b                        | 1.81±0.08b                                  |
|                                    | TMP             | 13.80±0.71a                  | 3.66±0.03a                     | 0.33±0.01a                         | 0.54±0.08a                        | 1.89±0.02ab                                 |
|                                    | BMS             | 12.95±0.57a                  | 2.42±0.15ab                    | 0.33±0.01a                         | 0.41±0.04ab                       | 1.78±0.05b                                  |
|                                    | RMS             | 15.40±0.46a                  | 3.44±0.15a                     | 0.27±0.03a                         | 0.46±0.03ab                       | 1.89±0.08ab                                 |

注:数据为3次重复平均值,同列不同小写字母表示0.05水平差异显著,下同。Note: The data is the average value of three repetitions. Different lowercase letters in the same column mean that the level of 0.05 is significantly different, the same as below.

### 2.2 不同种植模式对土壤碳素有效率的影响

由表3可知,第1季收获后,紫云英翻压处理(CK)的可溶性有机碳有效率和微生物量碳有效率最高,微生物量碳有效率高于其他处理26.20%~45.68%,其中与PMS、BMS、RMS处理差异显著

( $P<0.05$ )。第2季收获后,各组分碳素有效率变化较大,和CK相比,其他玉米间作处理的活性有机碳有效率均高于对照,除BMS处理外,分别显著高于CK49.53%、68.71%、41.48% ( $P<0.05$ ); BMS处理的可溶性有机碳有效率最高,高于对照34.04%,但差

异不显著,与RMS处理有显著差异( $P<0.05$ );TMP处理的微生物量碳有效率最高,与PMS处理有显著差异。与第1季相比,除对照和BMS处理外,第2季的活性有机碳有效率均高于第1季;第2季各处理的微生物量碳有效率也均高于第1季。因此,红壤旱地

以玉米为主体的种植模式可以引起土壤有机碳组分有效率的变化,不同多熟种植的处理均可以提高微生物量碳有效率,PMS、TMP、RMS处理可以提高活性有机碳有效率。

表3 不同种植模式下土壤碳素有效率

Table 3 Soil carbon efficiency under different planting patterns

| 采样时间<br>Sampling time              | 处理<br>Treatment | 活性有机碳有效率<br>Efficiency of activated organic carbon (AOCE) | 可溶性有机碳有效率<br>Efficiency of dissolved organic carbon (DOCE) | 微生物量碳有效率<br>Efficiency of microbial biomass carbon (MBCE) |
|------------------------------------|-----------------|---|--|---|
| 第1季收获后<br>After the first harvest  | CM(CK)          | 17.87±1.67a   | 4.77±0.36a   | 2.36±0.17a  |
|                                    | PMS             | 16.27±2.24a   | 3.75±0.41a   | 1.72±0.13b  |
|                                    | TMP             | 18.00±1.50a   | 3.88±0.17a   | 1.87±0.12ab   |
|                                    | BMS             | 19.15±2.13a   | 4.03±0.78a   | 1.62±0.16b  |
|                                    | RMS             | 15.56±0.23a   | 3.50±0.24a   | 1.74±0.19b  |
| 第2季收获后<br>After the second harvest | CM(CK)          | 15.79±1.55d   | 1.88±0.24ab  | 3.31±0.33ab   |
|                                    | PMS             | 23.61±1.65ab  | 2.29±0.27ab  | 2.62±0.12b  |
|                                    | TMP             | 26.64±1.25a   | 2.44±0.20ab  | 3.84±0.37a  |
|                                    | BMS             | 18.69±0.69cd  | 2.52±0.03a   | 3.16±0.38ab   |
|                                    | RMS             | 22.34±1.14bc  | 1.76±0.18b   | 3.03±0.25ab   |

2.3 不同种植模式对土壤碳库管理指数的影响

由图1可知,第1季收获后,BMS处理的碳库管理指数为最大值,高于对照18.76%,与RMS处理有显著差异( $P<0.05$ ),其余各处理的各指标没有明显规律。由图2可知,第2季收获后,除BMS外,各处理的A、AI、CPMI均差异显著且高于对照,TMP处理的A、AI、CPMI均最大,与其他各处理差异显著,

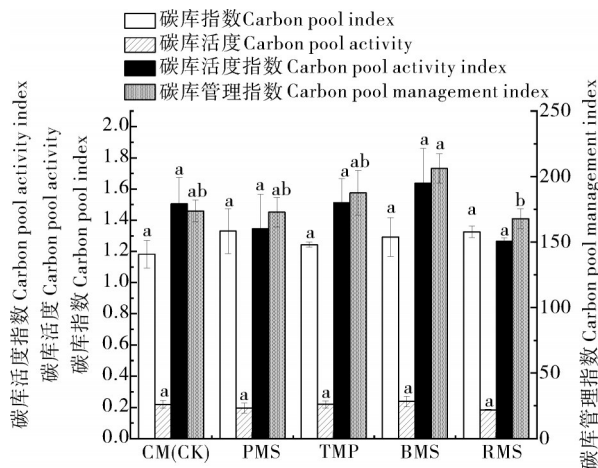


图1 第1季收获后不同种植模式下土壤碳库管理指数  
Fig.1 Soil carbon pool management index under different planting patterns after the first harvest

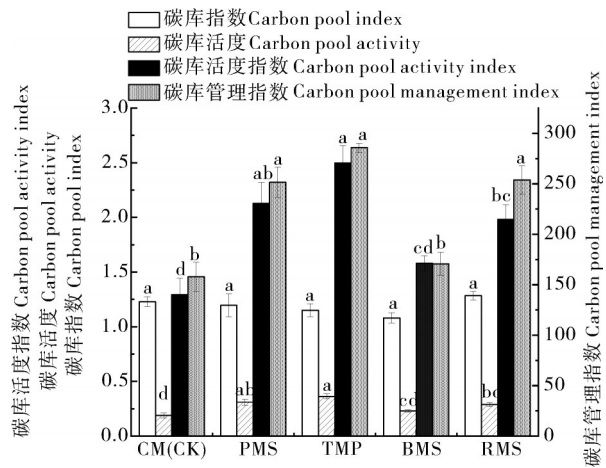


图2 第2季收获后不同种植模式下土壤碳库管理指数  
Fig.2 Soil carbon pool management index under different planting patterns after the second harvest

尤其与对照有明显差异( $P<0.05$ )。另外,PMS、TMP、RMS处理的碳库活性、碳库活性指数与对照相比分别显著提高了52.63%~89.47%和53.49%~93.80% ( $P<0.05$ )。除BMS处理外,PMS、TMP、RMS处理的土壤碳库管理指数显著高于对照59.24%、60.71%、80.91% ( $P<0.05$ )。与第1季相比,除对照和BMS处理外,第2季的碳库活性、碳库

活度指数、碳库管理指数均有一定的升幅,增幅分别为55.00%~63.64%、57.14%~65.56%、45.60%~52.39%。总体来说,红壤旱地以玉米为主体的各种种植模式可以引起土壤碳库管理指数较明显变化,PMS、TMP、RMS处理均有利于提高土壤碳库活度、碳库活度指数和碳库管理指数,尤以TMP处理表现最佳。因此,本研究中红壤旱地以玉米为主体的各种种植模式有利于提高土壤碳库管理指数。

#### 2.4 不同种植模式对作物生物量和产量的影响

由表4可知,不同种植模式的总生物量分

别是24 133.14、55 354.05、47 672.25、54 717.53、37 118.03 kg/hm<sup>2</sup>,其中,总生物量最高的是PMS处理,最低的是对照处理。经济产量最高的是PMS处理,PMS、TMP、BMS、RMS处理分别比对照的经济产量高出141.06%、67.54%、126.73%、53.81%。因此,相较于传统单作模式,间作模式的生物量积累潜力大,经济产量表现更优。从表4还可以看出,玉米产量较高的是PMS、RMS处理中的玉米间作大豆处理,对照处理产量最低。各间作模式下玉米产量分别比单作(对照)的产量高出25.00%、10.94%、5.90%、14.24%。

表4 不同种植模式的作物生物量

| 处理<br>Treatment | 作物<br>Crop                          | 经济产量<br>Economic output | 秸秆产量<br>Straw yield | 总生物量<br>Total biomass |
|-----------------|-------------------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|
|                 | 紫云英 Chinese milk vetch              | —                       | 2 840.62            | 2 840.62              |
| CM(CK)          | 玉米 Maize                            | 11 170.90               | 10 121.62           | 21 292.52             |
|                 | 总计 Total                            | 11 170.9                | 12 962.24           | 24 133.14             |
|                 | 马铃薯 Potato                          | 16 100.00               | 8 040.00            | 24 140                |
| PMS             | 玉米 Maize                            | 13 963.62               | 10 268.67           | 24 232.29             |
|                 | 大豆 Soybean                          | 2 661.76                | 4 320.00            | 6 981.76              |
|                 | 总计 Total                            | 32 725.38               | 22 628.67           | 55 354.05             |
|                 | “三花”混播 “Three flowers” mixed sowing | —                       | 8 038.31            | 8 038.31              |
| TMP             | 玉米 Maize                            | 12 392.71               | 11 241.04           | 23 633.75             |
|                 | 花生 Peanut                           | 3 253.52                | 12 746.67           | 16 000.19             |
|                 | 总计 Total                            | 15 646.23               | 32 026.02           | 47 672.25             |
|                 | 蚕豆 Broad bean                       | 2 489.16                | 5 092.33            | 7 581.49              |
| BMS             | 玉米 Maize                            | 11 830.29               | 10 719.08           | 22 549.37             |
|                 | 甘薯 Sweet potato                     | 17 226.67               | 7 360.00            | 24 586.67             |
|                 | 总计 Total                            | 31 546.12               | 23 171.41           | 54 717.53             |
|                 | 油菜 Rape                             | 2 243.58                | 3 115.26            | 5 358.84              |
| RMS             | 玉米 Maize                            | 12 761.20               | 11 562.55           | 24 323.75             |
|                 | 大豆 Soybean                          | 31 15.44                | 4 320.00            | 7 435.44              |
|                 | 总计 Total                            | 18 120.22               | 18 997.81           | 37 118.03             |

#### 2.5 土壤活性有机碳组分、碳素效率、碳库管理指数与玉米产量的相关性

从表5可以看出,土壤总有机碳含量与易氧化有机碳含量呈显著正相关( $P<0.05$ ),与可溶性有机碳有效率呈极显著负相关( $P<0.01$ )。土壤活性有机碳含量、可溶性有机碳含量、微生物量碳含量分别与其碳有效率呈极显著正相关( $P<0.01$ )。土壤碳库

管理指数与土壤活性有机碳含量、活性有机碳有效率均呈极显著正相关。碳素效率与活性有机碳组分相关,这也反映出土壤碳库管理指数与活性有机碳含量的关系更为紧密。但玉米产量与活性有机碳组分、碳素效率、碳库管理指数没有相关关系,相关性系数较大的是总有机碳、活性有机碳和碳库管理指数。

表5 土壤有机碳组分、碳素效率、碳库管理指数与玉米产量的相关性分析  
Table 5 Correlation between soil organic carbon composition, carbon efficiency, carbon pool management index and maize yield

| 指标<br>Index      | 总有机碳<br>TOC | 活性有机碳<br>AOC | 可溶性有机<br>碳DOC | 微生物量碳<br>MBC | 易氧化<br>有机碳<br>ROC | 活性有机<br>碳有效率<br>AOCE | 微生物量碳<br>有效率<br>MBCE | 可溶性有<br>机碳有效<br>率DOCE | 土壤碳库<br>管理指数<br>CPMI |
|------------------|-------------|--------------|---------------|--------------|-------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| 总有机碳 TOC         | 1           |              |               |              |                   |                      |                      |                       |                      |
| 活性有机碳 AOC        | 0.266       | 1            |               |              |                   |                      |                      |                       |                      |
| 可溶性有机碳 DOC       | -0.262      | 0.072        | 1             |              |                   |                      |                      |                       |                      |
| 微生物量碳 MBC        | 0.248       | 0.183        | -0.475        | 1            |                   |                      |                      |                       |                      |
| 易氧化有机碳 ROC       | 0.511*      | -0.158       | -0.124        | 0.072        | 1                 |                      |                      |                       |                      |
| 活性有机碳有效率 AOCE    | -0.234      | 0.872**      | 0.222         | 0.042        | -0.383            | 1                    |                      |                       |                      |
| 微生物量碳有效率 MBCE    | -0.230      | 0.050        | -0.339        | 0.882**      | -0.180            | 0.148                | 1                    |                       |                      |
| 可溶性有机碳有效率 DOCE   | -0.692**    | -0.072       | 0.875**       | -0.492       | -0.348            | 0.290                | -0.153               | 1                     |                      |
| 土壤碳库管理指数 CPMI    | 0.153       | 0.992**      | 0.126         | 0.154        | -0.194            | 0.923**              | 0.074                | 0.024                 | 1                    |
| 玉米产量 Maize yield | 0.349       | 0.463        | -0.057        | -0.150       | -0.108            | 0.296                | -0.323               | -0.177                | 0.407                |

注:\*表示显著相关( $P < 0.05$ ),\*\*表示极显著相关( $P < 0.01$ )。Note:\* indicates significant correlation ( $P < 0.05$ ),\*\* indicates extremely significant correlation ( $P < 0.01$ ).

### 3 讨论

#### 3.1 红壤旱地以玉米为主体的不同种植模式对不同形态碳素及碳素有效率的影响

旱地施肥因不同作物对养分的需求、吸收而存在差异,导致土壤肥力的高低<sup>[20]</sup>。另外,研究发现相对于单季种植,不同轮作模式会对红壤性质产生有利影响<sup>[8,21]</sup>。紫云英翻压后的对照处理微生物量碳和可溶性有机碳含量最高,与前人研究紫云英翻压可以提高土壤养分的结果相符<sup>[22]</sup>。本研究有机碳及其各组分第1季和第2季差异不明显且不规律可能是由于因冬季种植作物的不同,不同间作模式下植物归还残体的种类和数量有差异,而有机碳积累的关键是有机物的输入<sup>[23]</sup>。对于农田来说,作物地上部收获被带走,轮作处理的SOC主要来源于残留根系及其分泌物<sup>[6]</sup>,与第2季玉米间作的作物不同,导致第2季收获后不同种植模式有机碳组分发生了变化,而且土壤MBC有所降低。孙涛等<sup>[24]</sup>研究表明间作种植条件下,作物根系生物量高,间作有利于土壤大团聚体形成,有利于提高有机碳含量。但Dijkstar等<sup>[25]</sup>认为间作系统下进入土壤的有机碳源分解速率高,降低了土壤有机碳的含量。本研究中,间作对于土壤有机碳的影响并不明显。

另外,土壤AOC是能灵敏监测、反映土壤质量的指标。不同作物轮作的残留根系、分泌物等影响

SOC的矿化,同时也会使土壤AOC的量发生变化<sup>[26]</sup>。本研究发现,除BMS处理外,不同种植模式均增加了土壤AOC含量,且提高了活性有机碳有效率,其中以玉米间作花生、大豆处理较好,表明禾本科间作豆科作物有利于活性有机碳积累并提高其碳素有效率。可溶性有机碳属于活性有机碳,作为土壤碳库稳定性评估的重要指标,也在一定程度上得到了提高。土壤微生物量碳活跃且易变化,能有效评价土壤生物肥力<sup>[27]</sup>,虽然第2季收获后土壤MBC含量有所下降,但本研究中不同轮作处理均可以提高微生物量碳有效率。总的来说,红壤旱地以玉米为主体的种植模式有利于提高活性有机碳各组分及碳素有效率。

#### 3.2 红壤旱地以玉米为主体的种植模式对土壤碳库管理指数的影响

相比土壤总有机碳,以土壤碳库管理指数(CPMI)评价土壤质量变化、土壤肥力状况以及管理措施的影响更全面、客观<sup>[28-29]</sup>,碳库管理指数变大说明肥力得到提高。已有研究表明,轮作作物类型和轮作模式与CPMI关系密切<sup>[9,30-31]</sup>。在本研究中,除对照外,第2季的CPMI和第1季相比,都有明显的提高,说明轮作模式相比单季种植是有利于提高碳库管理指数的;并且第2季的碳库管理指数各指标都高于对照,这些指标和活性有机碳含量密切相关,BMS处理

碳库管理指数表现欠佳也是因为BMS处理活性有机碳含量较低,且不同轮作模式对土壤肥力影响不同。在本研究中,除对照外,第2季均为间作处理,间作相比单作能提高碳库管理指数,有利于增强土壤固碳能力,这与前人研究结果一致<sup>[10-12]</sup>。其中尤以禾本科玉米间作豆科作物花生、大豆效果较好,玉米间作甘薯处理优势不明显,也说明间作作物类型对碳库管理指数有一定的影响。

土壤CPMI与土壤AOC含量、活性有机碳有效率呈极显著相关( $P<0.01$ ),活性有机碳组分与碳素有效率呈极显著相关( $P<0.01$ ),可见,土壤碳库管理指数与活性有机碳含量的关系更为密切,活性有机碳组分与碳素有效率息息相关。玉米产量与有机碳、活性有机碳及碳素效率、碳库管理指数没有相关关系,这与第2季是间作处理有关,间作中存在其他作物竞争养分。但间作处理产量高于单作玉米产量,这与前人研究结果<sup>[32]</sup>相符。相关性系数较大的是总有机碳、活性有机碳和碳库管理指数,表明还是有一定关联,后续可以进行更加深入的研究。

以玉米为主体的不同种植模式中,土壤有机碳的表现最好的是油菜-玉米||大豆处理,对照次之;土壤活性有机碳和土壤碳库管理指数表现较好的是“三花”-玉米||花生、油菜-玉米||大豆处理;玉米产量均高于对照。马铃薯-玉米||大豆(PMS)、“三花”-玉米||花生(TMP)、油菜-玉米||大豆(RMS)3种红壤旱地种植模式均有利于提高土壤活性有机碳含量,从而促进碳库活度、碳库活度指数、碳库管理指数的提高。本研究中“三花”-玉米||花生(TMP)处理最有利于积累活性有机碳及微生物量碳,其碳库管理指数也表现最佳。马铃薯-玉米||大豆(PMS)处理的玉米产量最高。土壤活性有机碳与碳库管理指数呈极显著正相关。综上,红壤旱地以玉米为主体的各种种植模式有利于提高活性有机碳各组分及碳素有效率、土壤碳库管理指数,也有利于提高玉米产量,其中马铃薯-玉米||大豆处理有利于提高经济产量,“三花”-玉米||花生处理最有利于提高碳库管理指数,油菜-玉米||大豆处理次之。

## 参考文献 References

- [1] 黄国勤,刘秀英,刘隆旺,等.红壤旱地多熟种植系统的综合效益评价[J].生态学报,2006,26(8):2532-2539.HUANG G Q, LIU X Y, LIU L W, et al.Evaluation on comprehensive benefits of multiple cropping systems on upland red soil[J].Acta ecologica sinica, 2006, 26(8): 2532-2539(in Chinese with English abstract).
- [2] 武琳,黄尚书,叶川,等.土地利用方式对江西红壤旱地碳库管理指数的影响[J].土壤,2017,49(6):1275-1279.WU L, HUANG S S, YE C, et al.Effects of land uses on carbon pool management index of red soil in Jiangxi[J].Soils, 2017, 49(6): 1275-1279(in Chinese with English abstract).
- [3] 柳敏,宇万太,姜子绍,等.土壤活性有机碳[J].生态学杂志,2006(11):1412-1417.LIU M, YU W T, JIANG Z S, et al.Soil active organic carbon[J].Chinese journal of ecology, 2006(11): 1412-1417(in Chinese with English abstract).
- [4] HAYNES R J.Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand[J].Soil biology & biochemistry, 2000, 32(2): 211-219.
- [5] 薛菁芳,高艳梅,汪景宽,等.土壤微生物量碳氮作为土壤肥力指标的探讨[J].土壤通报,2007,38(2):247-250.XUE J F, GAO Y M, WANG J K, et al.Microbial biomass carbon and nitrogen as an indicator for evaluation of soil fertility[J].Chinese journal of soil science, 2007, 38(2): 247-250(in Chinese with English abstract).
- [6] 李增强,赵炳梓,张佳宝.土地利用和轮作方式对旱地红壤生化性质的影响[J].土壤,2014,46(1):53-59.LI Z Q, ZHAO B Z, ZHANG J B, et al.Effects of land management and crop rotation on upland red soil biochemical properties[J].Soils, 2014, 46(1): 53-59(in Chinese with English abstract).
- [7] VIEIRA F, BAYER C, ZANATTA J A, et al.Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems[J].Soil & tillage research, 2007, 96(1/2): 195-204.
- [8] 陈先茂,彭春瑞,关贤交,等.红壤旱地不同轮作模式的效益及其对土壤质量的影响[J].江西农业学报,2009,21(6):75-77.CHEN X M, PENG C R, GUAN X J, et al.Benefit of different crop rotation modes and their effects on quality of red-yellow dry soil[J].Acta agriculturae Jiangxi, 2009, 21(6): 75-77(in Chinese with English abstract).
- [9] 袁嘉欣,杨滨娟,胡启良,等.长江中游稻田种植模式对土壤有机碳及碳库管理指数的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(7):1205-1214.YUAN J X, YANG B J, HU Q L, et al.Effects of paddy field cropping patterns on soil organic carbon and carbon pool management index in the middle reaches of the Yangtze River[J].Chinese journal of eco-agriculture, 2021, 29(7): 1205-1214(in Chinese with English abstract).
- [10] 韩明政,田佳,姚允聪,等.土壤碳库对苹果幼树间作芳香植物的响应研究[J].北京农学院学报,2020,35(3):28-32.HAN M Z, TIAN J, YAO Y C, et al.Response of soil carbon pool to intercropping aromatic plants in apple treelet[J].Journal of Beijing University of Agriculture, 2020, 35(3): 28-32(in Chinese with English abstract).
- [11] 张洋,刘月娇,倪九派,等.柑橘/大蒜盖菇间作对三峡库区紫色土活性有机碳库的影响[J].草业学报,2015,24(5):53-65.ZHANG Y, LIU Y J, NI J P, et al.Effect of *Citrus* tree/*Stro-*

- pharia* mushrooms intercropping on "Purple soil" labile organic carbon in the Three Gorges Reservoir region [J]. *Acta prataculturae sinica*, 2015, 24 (5) : 53-65 (in Chinese with English abstract).
- [12] 蒲玉琳,叶春,张世熔,等.若尔盖沙化草地不同生态恢复模式土壤活性有机碳及碳库管理指数变化[J].生态学报,2017,37(2):367-377.PU Y L, YE C, ZHANG S R, et al. Effects of different ecological restoration patterns on labile organic carbon and carbon pool management index of desertification grassland soil in zoige [J]. *Acta ecologica sinica*, 2017, 37 (2) : 367-377 (in Chinese with English abstract).
- [13] 张继光,秦江涛,要文倩,等.长期施肥对红壤旱地土壤活性有机碳和酶活性的影响[J].土壤,2010,42(3):364-371.ZHANG J G, QIN J T, YAO W Q, et al. Effects of long-term fertilization on soil active organic carbon and soil enzyme activities in upland red soils [J]. *Soils*, 2010, 42 (3) : 364-371 (in Chinese with English abstract).
- [14] 夏文建,王萍,刘秀梅,等.长期施肥对红壤旱地有机碳、氮和磷的影响[J].江西农业学报,2017,29(12):27-31.XIA W J, WANG P, LIU X M, et al. Effects of long-term fertilization on organic carbon, nitrogen and phosphorus in upland red soil [J]. *Acta agriculturae Jiangxi*, 2017, 29 (12) : 27-31 (in Chinese with English abstract).
- [15] 邵继承.不同土地利用和起源农田土壤有机碳及其组分含量变化[D].南京:南京农业大学,2012.TAI J C. Variation of soil organic carbon and the fractions with land use and soil origin of croplands: a case study of Jiangnan and Poyang Lake Plains China [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012 (in Chinese with English abstract).
- [16] 徐明岗,于荣,王伯仁.长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J].土壤学报,2006,43(5):17-23.XU M G, YU R, WANG B R. Labile organic matter and carbon management index in red soil under long-term fertilization [J]. *Acta pedologica sinica*, 2006, 43 (5) : 17-23 (in Chinese with English abstract).
- [17] 韩琳,张玉龙,金烁,等.灌溉模式对保护地土壤可溶性有机碳与微生物量碳的影响[J].中国农业科学,2010,43(8):1625-1633.HAN L, ZHANG Y L, JIN S, et al. Effect of different irrigation patterns on soil dissolved organic carbon and microbial biomass carbon in protected field [J]. *Scientia agricultura sinica*, 2010, 43 (8) : 1625-1633 (in Chinese with English abstract).
- [18] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1999.LU R K. Methods of soil agricultural chemical analysis [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999 (in Chinese).
- [19] BLAIR G. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural system [J]. *Australian journal of agricultural research*, 1995, 46 (7) : 1459-1466.
- [20] 曾希柏,李菊梅,徐明岗,等.红壤旱地的肥力现状及施肥和利用方式的影响[J].土壤通报,2006,37(3):434-437.ZENG X B, LI J M, XU M G, et al. Fertility of red upland soil and effects of fertilization and utilization on its fertility [J]. *Chinese journal of soil science*, 2006, 37 (3) : 434-437 (in Chinese with English abstract).
- [21] 官会林,段庆钟,沈有信.不同轮作方式下高原山地红壤肥力变化特征[J].西南大学学报(自然科学版),2008(5):116-121.GUANG H L, DUAN Q Z, SHEN Y X, et al. Effects of different rotation systems on variation in soil fertility in upland red soil of Yunnan Plateau [J]. *Journal of Southwest University (natural science edition)*, 2008 (5) : 116-121 (in Chinese with English abstract).
- [22] 戴伊莎,成欣,刘帮艳,等.秸秆和紫云英协同覆盖对西南旱地土壤养分、酶活性及小麦产量的影响[J].土壤通报,2021,52(6):1339-1347.DAI Y S, CHENG X, LIU B Y, et al. Impacts of synergistic mulching of straw and milk vetch on soil nutrients, enzyme activities and wheat yield in upland of Southwest China [J]. *Chinese journal of soil science*, 2021, 52 (6) : 1339-1347 (in Chinese with English abstract).
- [23] 向蕊,伊文博,赵薇,等.间作对土壤团聚体有机碳储量的影响及其氮调控效应[J].水土保持学报,2019,33(5):303-308.XIANG R, YI W B, ZHAO W, et al. Effects of intercropping on soil aggregate-associated organic carbon storage and nitrogen regulation [J]. *Journal of soil and water conservation*, 2019, 33 (5) : 303-308 (in Chinese with English abstract).
- [24] 孙涛,冯晓敏,赵财,等.西北绿洲区间作模式对土壤团聚体组成及其有机碳含量的影响[J].农业资源与环境学报,2021,38(5):874-881.SUN T, FENG X M, ZHAO C, et al. Effects of intercropping regimes on soil aggregate composition and their organic carbon content in an oasis area of northwest China [J]. *Journal of agricultural resources and environment*, 2021, 38 (5) : 874-881 (in Chinese with English abstract).
- [25] DIJKSTRA F A, HOBBI E S E, REICH P B, et al. Divergent effects of elevated CO<sub>2</sub>, N fertilization, and plant diversity on soil C and N dynamics in a grassland field experiment [J]. *Plant & soil*, 2005, 272 (1) : 41-52.
- [26] HAO Y, LAL R, OWENS L B, et al. Effect of cropland management and slope position on soil organic carbon pool at the North Appalachian Experimental Watersheds [J]. *Soil and tillage research*, 2002, 68 (2) : 133-142.
- [27] 张春霞,郝明德,魏孝荣,等.不同农田生态系统土壤微生物生物量碳的变化研究[J].中国生态农业学报,2006,14(1):81-83.ZHANG C X, HAO M D, WEI X R, et al. Change of soil microbial biomass carbon in different agroecosystems [J]. *Chinese journal of eco-agriculture*, 2006, 14 (1) : 81-83 (in Chinese with English abstract).
- [28] PATRA D D, CHAND S, ANWAR M. Seasonal changes in microbial biomass in soils cropped with palmarosa (*Cymbopogon martinii* L.) and Japanese mint (*Mentha arvensis* L.) in subtropical India [J]. *Biology & fertility of soils*, 1995, 19 (2/3) : 193-196.
- [29] JENKINSON D S, RAYNER J H. The turnover of soil organic matter in some of the rothamsted classical experiments [J]. *Soil science*, 2006, 123 (5) : 298-305.



- [30] BLAIR N, CROCKER G J. Crop rotation effects on soil carbon and physical fertility of two Australian soils [J]. *Soil research*, 2000, 38(1): 71-84.
- [31] 张鹏, 钟川, 周泉, 等. 不同冬种模式对稻田土壤碳库管理指数的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(8): 1163-1171. ZHANG P, ZHONG C, ZHOU Q, et al. Effects of different winter planting patterns on carbon management index of paddy field [J]. *Chinese journal of eco-agriculture*, 2019, 27(8): 1163-1171 (in Chinese with English abstract).
- [32] 张向前, 黄国勤, 卞新民, 等. 间作对玉米品质、产量及土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(22): 7082-7090. ZHANG X Q, HUANG G Q, BIAN X M, et al. Effects of intercropping on quality and yield of maize grain, microorganism quantity, and enzyme activities in soils [J]. *Acta ecologica sinica*, 2012, 32(22): 7082-7090 (in Chinese with English abstract).

## Effects of different planting patterns with maize as the main body on index of carbon pool management in red soil dryland

GUO Shujian, LI Shujuan, LI Na, HUANG Guoqin

*Center for Ecological Science, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China*

**Abstract** The Chinese milk vetch - maize (CM) was used as the control (CK) and five maize based planting patterns including potato-maize || soybean (PMS), “three flowers (Chinese milk vetch × rapeseed × radish in fertilizer field)” mixed sowing-maize || peanut (TMP), broad bean-maize || sweet potato (BMS), rapeseed-maize || soybean (RMS) were set up in red soil dryland to study the effects of planting patterns on the organic carbon pool components, carbon pool management indices and quality in soil. The changes of the organic carbon and carbon pool management index in soil after harvest in the first and second seasons were analyzed. The results showed that the active organic carbon of PMS, TMP, BMS and RMS increased by 53.67%, 67.89%, 11.01% and 57.80% compared with the control. The activity and activity index of carbon pool of PMS, TMP and RMS were significantly ( $P < 0.05$ ) increased by 52.63%- 89.47% and 53.49% - 93.80%, respectively. The carbon pool management index in soil of PMS, TMP and RMS was significantly ( $P < 0.05$ ) higher than that of the control by 59.24%, 60.71% and 80.91%. There was a significant positive correlation between the carbon pool management index and the content of active organic carbon in soil ( $P < 0.01$ ). The yield of maize intercropping was higher than that of monoculture. The economic yield under different planting patterns was higher than that of the control. The result of comprehensive analyses showed that the different planting patterns with maize as the main body in red soil dryland are conducive to improve the content of active organic carbon, the efficiency of carbon, the carbon pool management index in soil and the yield of maize. The economic yield under the PMS pattern was the highest. TMP pattern was most favorable to improve the carbon pool management index in soil, followed by the RMS pattern.

**Keywords** red soil dryland; planting patterns; soil active organic carbon; carbon pool management index; soil fertility

(责任编辑: 张志钰)