

# 沟灌方式和有机肥配合对甜糯玉米产量和土壤有机碳组分及酶活性的影响

罗 慧<sup>1,2</sup>, 吴祥颖<sup>1,2</sup>, 李伏生<sup>1,2,3</sup>

(1. 广西大学农学院, 广西 南宁 530005; 2. 广西喀斯特地区节水农业新技术院士工作站, 广西 南宁 530005;  
3. 广西高校作物栽培学与耕作学重点实验室, 广西 南宁 530005)

**摘要:** 为探明有利于提高甜糯玉米鲜穗产量和土壤质量的水肥供应模式, 开展了 3 种有机肥料(牛粪 FC、生物有机肥 FB 和猪粪 FP)和 2 种有机无机 N 比例(70% 无机 N + 30% 有机 N(1), 60% 无机 N + 40% 有机 N(2))下, 3 种沟灌方式(常规沟灌 CFI, 交替隔沟灌 AFI 和隔沟灌溉 FFI)配合对甜糯玉米产量和土壤有机碳组分及酶活性影响的田间试验。结果表明: FFI 时, 与 FB 相比, FC 和 FP 甜糯玉米鲜穗产量分别提高 1.6% 和 2.3%, 且 FC 处理提高土壤易氧化有机碳(ROC)和微生物量碳, FP 处理提高土壤可溶性有机碳(DOC)含量。各沟灌方式下, 与 FC1 相比, FC2 不同程度提高甜糯玉米鲜穗产量、土壤过氧化氢酶和脲酶活性、有机碳(SOC)、ROC 和 DOC 含量, 其中土壤 ROC 和 DOC 含量分别提高 14.5% ~ 37.9% 和 24.3% ~ 78.5%。与 CFI 相比, FC1 时, 抽雄期 AFI 和 FFI 土壤 ROC、灌浆期 AFI 和成熟期 FFI 土壤 DOC 显著提高; FC2 时, 抽雄期 FFI 土壤有机碳提高 10.3%, 抽雄期和灌浆期 AFI 和 FFI 土壤 ROC 提高 19.8% ~ 31.5%, 灌浆期和成熟期 FFI 土壤 DOC 分别提高 57.9% 和 26.1%。玉米鲜穗产量与灌浆期土壤脲酶活性、SOC、ROC 和 DOC, 以及 SOC 与 ROC 之间呈显著相关关系, 其中鲜穗产量与 DOC 之间相关系数为 0.834。因此, 60% 无机 N + 40% 牛粪 N 与隔沟灌溉或交替隔沟灌结合是有利于提高甜糯玉米鲜穗产量和土壤质量的水肥供应模式。

**关键词:** 根区局部灌溉; 有机肥; 有机与无机 N 比例; 土壤酶活性; 土壤有机碳组分; 甜糯玉米

**中图分类号:** S275.3; S513 **文献标志码:** A

## Effect of furrow irrigation and organic manure on sweet – waxy maize yield and soil organic carbon and enzyme activity

LUO Hui<sup>1,2</sup>, WU Xiang-ying<sup>1,2</sup>, LI Fu-sheng<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530005, Guangxi, China;

2. Guangxi Academician Work Station of the New Technology of Water-saving Agriculture in Karst Region, Nanning 530005, Guangxi, China;

3. Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Crop Cultivation and Tillage, Nanning 530005, Guangxi, China)

**Abstract:** To improve maize yield and soil quality through irrigation and fertilization, a field experiment was conducted to investigate the effect of conventional furrow irrigation (CFI), alternate irrigation on every other furrow (AFI) and irrigation on every other furrow (FFI) on sweet-waxy maize yield and soil organic carbon fraction and enzyme activity. Three organic fertilization modes were used, i. e. cattle manure FC, biological-organic fertilizer FB and pig manure FP, and two ratios of inorganic to organic N, 70% inorganic N + 30% organic N treatment and 60% inorganic N + 40% organic N treatment. At FFI, compared to FB, FC and FP increased fresh yield of sweet-sticky maize by 1.6% and 2.3%, and FC increased soil readily oxidized organic carbon (ROC) and microbial biomass carbon, and FP increased soil dissolved organic carbon (DOC). Under the three furrow irrigation methods, compared to FC1, FC2 increased the fresh yield of sweet-sticky maize, the activities of catalase and invertase and the contents of organic carbon (SOC), ROC and DOC in soil, and increased the contents of ROC and DOC by 14.5% ~ 37.9% and 24.3% ~ 78.5%. Compared to

收稿日期: 2015-07-30

基金项目: 国家 863 计划“糯玉米水肥联合调控技术和模式”(2011AA100504); 国家自然科学基金“薄浅湿晒与干湿交替灌溉稻田甲烷和氧化亚氮排放机制和水氮运筹模式”(51469003); 中国科学院战略性先导科技专项子课题“喀斯特峰丛洼地型‘替代型草食畜牧业’模式增值增汇试验示范”(XDA05070403)

作者简介: 罗 慧(1982—), 女, 广西田阳人, 实验师, 博士研究生, 主要从事植物营养与水肥利用理论与技术的研究。E-mail: hui-qingtian@163.com。

通信作者: 李伏生(1963—), 男, 湖南邵阳人, 教授, 博士, 研究方向为植物营养与水肥利用理论与技术。E-mail: zhenz@gxu.edu.cn。

CFI, at FC1, the contents of ROC in AFI and FFI at tasselling stage, the contents of DOC in AFI at filling stage and FFI at maturing stage were significantly enhanced, while at FC2, it increased organic carbon in FFI at tasselling stage by 10.3%, ROC in AFI and FFI at tasselling and maturing stages by 19.8% ~ 31.5%, DOC in FFI at filling and maturing stages by 57.9% and 26.1%. The sweet-waxy maize yield was significantly positively correlated with the invertase, SOC, ROC and DOC at filling stage, and SOC and ROC was also significantly correlated at filling stage. Thus the combination of 60% inorganic N and 40% organic cattle manure N and fixed or alternate furrow irrigation is recommended as suitable method for improving the water and fertilizer use efficiency in the target areas.

**Keywords:** partial root-zone irrigation; organic manure; ratio of organic to inorganic N; enzyme activity; organic carbon fraction; sweet-waxy maize

土壤有机碳是评价土壤质量和土地可持续利用管理中的重要指标,分为可溶性有机碳(DOC)、微生物量碳(MBC)、易氧化有机碳(ROC)和矿化有机碳等。DOC是土壤微生物可直接利用的有机物质部分,在提供土壤养分方面起着重要作用<sup>[2-3]</sup>。MBC是土壤有机碳中最活跃和易变化部分,与土壤碳转化密切相关,其含量高低是衡量土壤肥力重要指标<sup>[4-5]</sup>。ROC是易被土壤微生物分解矿化部分,对植物养分供应有直接作用<sup>[6]</sup>。土壤酶活性可表征物质在土壤中代谢快慢<sup>[7]</sup>,其中脲酶活性可反映有机氮向有效氮转化能力和土壤供氮能力<sup>[8]</sup>,过氧化氢酶活性可表征土壤氧化过程的强度<sup>[9]</sup>,转化酶活性可表征土壤熟化程度和肥力水平<sup>[10]</sup>。土壤中有机碳转化速度取决于土壤酶的酶促作用,土壤有机碳是土壤微生物活动能源,其含量大小影响着土壤酶活性。

有机无机肥配施或增施有机肥能增强土壤酶活性,有利于提高土壤MBC和有机碳组分含量的积累。刘益仁等<sup>[11]</sup>研究发现,化肥配施中高量有机肥有利于改善土壤微生物学特性;Chang等<sup>[12]</sup>发现,与单施化肥相比,施用有机肥可以提高土壤有机质、全氮、微生物数量和酶活性;任卫东等<sup>[13]</sup>研究表明,施用有机肥可显著提高根际和非根际土壤MBC。

交替隔沟灌和隔沟灌溉对增加作物产量、改善品质和提高水分利用效率等方面影响的研究已取得较大进展<sup>[14-16]</sup>,它们与施肥相结合对作物产量、土壤碳组分和酶活性的影响也有报道。如Li等<sup>[17]</sup>研究表明,分根区交替灌溉能提高其湿润区土壤过氧化氢酶、脲酶和转化酶活性。刘水等<sup>[18]</sup>结果表明,与常规灌溉相比,轻度缺水时拔节期-抽雄期进行分根区交替灌溉的玉米微生物量碳增加。张潇潇等<sup>[19]</sup>研究表明,与常规沟灌相比,交替隔沟灌明显增加开花期和成熟期土壤脲酶活性、开花期转化酶活性以及中肥时开花期和高肥时成熟期过氧化氢酶活性;隔沟灌溉增加开花期土壤转化酶活性和高肥时成熟期过氧化氢酶活性。当前玉米生产施用有机

肥料多为牛粪、猪粪或生物有机肥,且栽培方式推广使用一垄双行栽培,与之相结合的沟灌方式主要采用隔沟灌溉。因此,本文研究不同沟灌和有机肥运筹方式对甜糯玉米产量、土壤有机碳组分和酶活性的影响,揭示不同沟灌和有机肥配合下甜糯玉米土壤有机碳组分和酶活性变化规律,分析产量、土壤有机碳组分和酶活性之间关系以及探明有利于提高甜糯玉米鲜穗产量和土壤质量的水肥供应模式,为甜糯玉米生产水、肥管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

田间小区试验在广西大学农学院试验田进行,供试土壤为第四纪红色黏土发育的水稻田,其土壤质地是重黏土,田间持水量( $\theta_f$ )为27.5%(质量百分数),pH值5.5,容重 $1.29 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,碱解氮 $75.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效磷 $67.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾 $223.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和有机碳 $6.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。供试品种为美玉加甜糯11号。

### 1.2 试验方法

田间小区试验设3种沟灌方式,即常规沟灌(CFI,每次补充灌溉时相邻两条沟等量灌溉)、交替隔沟灌(AFI,前次补充灌溉时对相邻两条沟中一条沟进行灌溉,下次补充灌溉时对相邻两条沟中另一条沟进行灌溉,每次灌水量为70%的CFI灌水量)和隔沟灌溉(FFI,每次补充灌溉时仅固定对相邻两条沟中的一条沟进行灌溉,每次灌水量为70%的CFI灌水量,相邻两条沟中的另一条沟始终不灌溉);3种有机肥料,即牛粪(FC)、生物有机肥(FB)和猪粪(FP);以及2种有机无机N比例,即70%无机N+30%有机N(1)和60%无机N+40%有机N(2)。试验各处理均施N $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$   $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $\text{K}_2\text{O}$   $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,由尿素、过磷酸钙、氯化钾与有机肥按比例提供,经腐熟的牛粪和猪粪由广西大学农场提供,生物有机肥为绿色扬康(广东金饭碗公司),

供试肥料养分含量如表 1。磷肥与有机肥全部作基肥条施;60%的无机 N 和 K 作基肥条施,余下 40%的无机 N 和 K 肥在拔节期培土追施。试验按不完全方案设计,共 10 个处理(表 2),各施肥处理为 3 种有机肥料和 2 种有机、无机 N 比例组合,每个处理重复 3 次,共 30 个小区,随机区组排列,小区之间用田埂隔离,以防侧渗。玉米株行距 30 cm × 60 cm,分 4 行种植,面积 16.8 m<sup>2</sup>。

试验于 2013 年 9 月 9 日播种,每穴播 5 粒,9 月

21 日定苗,各小区每穴留长势一致植株 1 株。追肥在 10 月 9 日进行。试验期间当土壤含水量低于田间持水量的 80% 时进行灌溉,并分别于 10 月 24 日和 11 月 3 日进行了 2 次灌溉。常规沟灌 2 次灌水量分别为 17.45 mm 和 23.26 mm,隔沟灌溉或交替隔沟灌 2 次,灌水量分别为 12.21 mm 和 16.28 mm,灌水量由水表控制。玉米生长期间用雨量筒监测降雨量,得到整个生长期降雨量为 246.3 mm,降雨量和灌水时间如图 1 所示。12 月 9 日试验结束。

表 1 田间试验供试肥料  
Table 1 Fertilizers for field experiment

| 肥料 Fertilizer                            | N/%  | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /% | K <sub>2</sub> O/% | 有机质 Organic matter/% |
|--|------|----------------------------------|--------------------|----------------------|
| 尿素 Urea                                  | 46   | 0                                | 0                  | 0                    |
| 过磷酸钙 Calcium superphosphate              | 0    | 12                               | 0                  | 0                    |
| 氯化钾 Potassium chloride                   | 0    | 0                                | 60                 | 0                    |
| 牛粪 Cattle manure (FC)                    | 1.20 | 0.68                             | 2.16               | 34.8                 |
| 猪粪 Pig manure (FP)                       | 3.67 | 2.91                             | 1.15               | 30.0                 |
| 生物有机肥 Biological-organic fertilizer (FB) | 1.52 | 2.28                             | 0.47               | 31.6                 |

表 2 田间试验处理  
Table 2 Treatments of field experiment

| 沟灌方式<br>Furrow method                                     | 施肥处理<br>Fertilization treatment | 有机肥<br>Organic manure | 有机无机 N 肥比例<br>Ratio of organic to inorganic N |
|---|---------------------------------|-----------------------|---|
| 常规沟灌<br>Conventional furrow irrigation(CFI)               | FC1                             | 牛粪 FC                 | 70%无机 N + 30%有机 N(1)                          |
|   | FC2                             | FC                    | 60%无机 N + 40%有机 N(2)                          |
| 交替隔沟灌<br>Alternate irrigation on every other furrow (AFI) | FC1                             | FC                    | 1   |
|   | FC2                             | FC                    | 2   |
| 隔沟灌溉<br>Irrigation on every other furrow (FFI)            | FC1                             | FC                    | 1   |
|   | FC2                             | FC                    | 2   |
|   | FB1                             | 生物有机肥 FB              | 1   |
|   | FB2                             | FB                    | 2   |
|   | FP1                             | 猪粪 FP                 | 1   |
|   | FP2                             | FP                    | 2   |

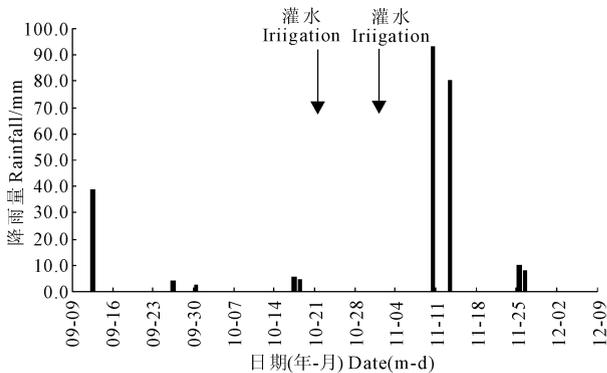


图 1 试验期间降雨量和灌水时间  
Fig.1 Dates of rainfall and irrigation during experimental period

### 1.3 土壤采集与测定

试验在玉米抽雄期、灌浆期和成熟期采集土样。每次用土钻在玉米垄上、两株玉米之间采集 0 ~ 20 cm 土层土壤,每个小区内用“S”型进行采样,采集 6 个样点,混合均匀,采集后土壤一部分风干,过 1 mm 筛,封袋保存,用于测定土壤酶活性和总有机碳,同时用烘干法测定土壤含水率;另一部分立即处理或者保存在 4℃ 冰箱里,测定前去除多余的植物残体和杂物,过 2 mm 孔径筛,混匀,调节土壤湿度至田间持水量的 40% 左右,用于测定微生物量碳和可溶性碳。

土壤过氧化氢酶活性用高锰酸钾滴定法测定,

以每克干土 1 h 消耗的  $0.002 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KMnO}_4$  溶液的体积(mL)数表示;脲酶活性用苯酚-次氯酸钠比色法测定,以 24 h 后 1 g 土壤中  $\text{NH}_3 - \text{N}$  的毫克数表示;转化酶活性用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定<sup>[20]</sup>,转化酶以 24 h 后,1 g 干土生成葡萄糖毫克数表示。

土壤有机碳(SOC)用重铬酸钾容量法—外加热法测定<sup>[21]</sup>;易氧化有机碳(ROC)采用  $\text{KMnO}_4$  ( $333 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )氧化法测定<sup>[22]</sup>;微生物量碳(MBC)用氯仿熏蒸法测定,其结果以单位质量干土中 MBC 质量( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )表示。MBC 计算方法:

$$\text{MBC} = E_c / 0.38$$

式中,  $E_c$  为熏蒸土样有机碳量与未熏蒸土样有机碳量之差,0.38 为氯仿熏蒸杀死的微生物体中的碳被浸提出来的比例<sup>[21]</sup>。可溶性有机碳(DOC)测定方法与 MBC 中不熏蒸土样浸提有机碳的方法相同<sup>[21]</sup>。

#### 1.4 数据分析

试验数据采用 Excel 2007 和 SPSS 16.0 软件进行分析,用 Duncan 法对不同处理各指标平均值进行多重比较,并用 Pearson 相关性系数表示甜糯玉米鲜穗产量与土壤有机碳组分和酶活性间相关性。

## 2 结果与分析

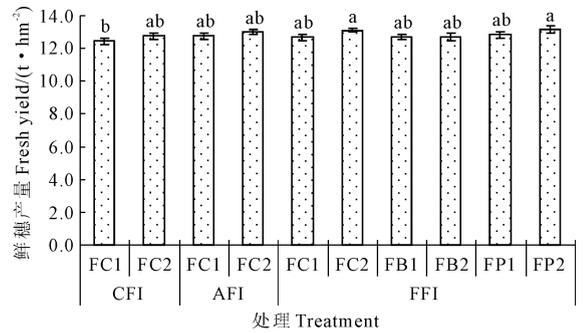
### 2.1 各处理鲜穗产量分析

图 2 表明,在相同牛粪(FC)处理下,与常规沟灌(CFI)相比,交替隔沟灌(AFI)和隔沟灌溉(FFI)处理增加玉米鲜穗产量 1.9%~2.9%,但是差异不显著。相同 FFI 下,与生物有机肥(FB)相比,FC 和 FP 处理分别提高平均鲜穗产量 1.6%和 2.3%,但是差异不显著。3 种沟灌方式下,与 70%无机 N + 30%牛粪 N(FC1)相比,60%无机 N + 40%牛粪 N(FC2)提高玉米鲜穗产量 2.2%~3.4%;FFI 条件下,FP2 比 FFI 提高鲜穗产量 2.68%。与 CFI-FC1 处理相比,FFI-FC2 以及 FFI-FP2 处理分别提高鲜穗产量 5.7%和 5.4%,这表明隔沟灌溉结合施用高量牛粪或猪粪效果较好。

### 2.2 土壤酶活性

表 3 表明,不同水肥处理下,土壤过氧化氢酶活性随着玉米的生长呈现递增的趋势。FC1 时,灌浆期 AFI 和 FFI 土壤过氧化氢酶活性比 CFI 分别降低 2.3%和 14.8%,成熟期 FFI 土壤过氧化氢酶活性比 CFI 降低 16.8%;FC2 时,灌浆期 FFI 土壤过氧化氢酶活性比 FC1 提高了 46.9%。FFI 灌浆期 FC2 土壤过氧化氢酶活性比 FC1 提高 29.4%。FFI 时,抽雄

期 FFI 土壤过氧化氢酶活性比 FC1 降低 7.5%,成熟期 FB1 土壤过氧化氢酶活性比 FC1 提高了 17.9%;与 FC2 相比,灌浆期 FB2 土壤过氧化氢酶活性降低 36.2%。



注:图中数值点为平均值±标准误( $n=3$ ),柱状图上小写字母不同表示差异显著( $P<5\%$ ),小写字母相同表示差异不显著( $P>5\%$ )。

Note: Date points are means ± standard errors ( $n=3$ ). Different letters on the bar indicate significant difference ( $P<5\%$ ), the same letters indicate no significant difference ( $P>5\%$ ).

图 2 沟灌方式和有机肥配合对甜糯玉米鲜穗产量的影响

Fig. 2 Effect of furrow irrigation method and organic manure management on fresh yield of sweet-sticky maize

从表 3 可看出,不同水肥处理下,抽雄期土壤脲酶活性高于成熟期。与 CFI 相比,FC1 时抽雄期 FFI 土壤脲酶活性降低 6.3%。与 FC1 相比,FFI 抽雄期 FC2 土壤脲酶活性提高 5.1%。FFI 时,抽雄期 FB1、FB2 土壤脲酶活性分别比 FC1 提高 42.4%和 10.2%。

从表 3 可看出,不同水肥处理下,土壤转化酶活性随着玉米的生长呈现降低的趋势,玉米抽雄期其值最大。但是两个时期施肥处理和沟灌方式对土壤转化酶活性的影响不显著。

### 2.3 土壤有机碳和活性碳组分

表 4 表明,不同水肥处理下,土壤有机碳含量灌浆期、成熟期均显著高于抽雄期。FC2 时,抽雄期 FFI 土壤有机碳含量比 CFI 提高了 10.3%。

表 4 表明,不同水肥处理下,3 个生育期土壤 ROC 含量差异不显著。FC1 时,抽雄期 AFI、FFI 土壤 ROC 含量比 CFI 分别提高了 18.5%和 21.0%;FC2 时,抽雄期 AFI、FFI 土壤 ROC 含量分别提高了 23.8%和 31.2%,灌浆期 AFI 土壤 ROC 含量降低了 24.6%,成熟期 FFI 土壤 ROC 含量提高了 34.9%。CFI 时灌浆期 FC2 土壤 ROC 含量比 FC1 提高了 37.9%,AFI 时抽雄期 FC2 土壤 ROC 含量提高了 14.5%,FFI 时抽雄期、灌浆期和成熟期 FC2 土壤

ROC 含量分别提高了 19.8%、31.5% 和 15.5%。FFI 15.8%;与 FC2 相比,猪粪和生物有机肥处理下 3 个时,成熟期 FB1 土壤 ROC 含量比 FC1 降低了 生育期土壤 ROC 含量呈现一般降低。

表 3 沟灌方式和有机肥配合对土壤酶活性的影响

Table 3 Effect of furrow irrigation method and organic manure management on soil enzyme activity

| 沟灌方式<br>Furrow<br>method | 施肥处理<br>Fertilization<br>treatment | 过氧化氢酶 Catalase<br>/(mL·g <sup>-1</sup> ) |                         |                          | 脲酶 Urease<br>/(mg·g <sup>-1</sup> ) |                         |                          | 转化酶 Invertase<br>/(mg·g <sup>-1</sup> ) |                         |                          |
|--------------------------|------------------------------------|--|-------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------|---|-------------------------|--------------------------|
|                          |                                    | 抽雄期<br>Tasselling<br>stage               | 灌浆期<br>Filling<br>stage | 成熟期<br>Maturing<br>stage | 抽雄期<br>Tasselling<br>stage          | 灌浆期<br>Filling<br>stage | 成熟期<br>Maturing<br>stage | 抽雄期<br>Tasselling<br>stage              | 灌浆期<br>Filling<br>stage | 成熟期<br>Maturing<br>stage |
| CFI                      | FC1                                | 0.92 ±<br>0.02ab                         | 1.28 ±<br>0.10abc       | 1.61 ±<br>0.03ab         | 0.63 ±<br>0.01ab                    | 0.55 ±<br>0.02b         | 0.49 ±<br>0.06           | 30.50 ±<br>2.75                         | 26.69 ±<br>1.87         | 21.57 ±<br>1.21ab        |
|                          | FC2                                | 0.93 ±<br>0.02a                          | 0.96 ±<br>0.25b         | 1.67 ±<br>0.01a          | 0.65 ±<br>0.03ab                    | 0.59 ±<br>0.02ab        | 0.50 ±<br>0.02           | 28.06 ±<br>1.57                         | 25.44 ±<br>1.57         | 22.40 ±<br>1.54ab        |
| AFI                      | FC1                                | 0.94 ±<br>0.01a                          | 0.98 ±<br>0.16d         | 1.58 ±<br>0.04ab         | 0.67 ±<br>0.01b                     | 0.59 ±<br>0.02ab        | 0.53 ±<br>0.03           | 25.54 ±<br>1.83                         | 22.92 ±<br>1.83         | 22.65 ±<br>0.58a         |
|                          | FC2                                | 0.93 ±<br>0.01a                          | 1.05 ±<br>0.13bcd       | 1.66 ±<br>0.03a          | 0.63 ±<br>0.02ab                    | 0.61 ±<br>0.01ab        | 0.49 ±<br>0.03           | 26.17 ±<br>1.09                         | 23.56 ±<br>1.09         | 20.30 ±<br>0.88ab        |
| FFI                      | FC1                                | 0.91 ±<br>0.01ab                         | 1.09 ±<br>0.03cd        | 1.34 ±<br>0.09c          | 0.59 ±<br>0.02c                     | 0.60 ±<br>0.02ab        | 0.55 ±<br>0.03           | 26.45 ±<br>3.94                         | 23.83 ±<br>3.94         | 18.92 ±<br>2.04ab        |
|                          | FC2                                | 0.93 ±<br>0.03a                          | 1.41 ±<br>0.07a         | 1.63 ±<br>0.03ab         | 0.62 ±<br>0.01ab                    | 0.64 ±<br>0.03a         | 0.51 ±<br>0.01           | 29.81 ±<br>3.03                         | 27.20 ±<br>3.03         | 19.21 ±<br>0.75ab        |
|                          | FB1                                | 0.88 ±<br>0.02ab                         | 1.26 ±<br>0.04abc       | 1.58 ±<br>0.04ab         | 0.84 ±<br>0.03a                     | 0.62 ±<br>0.01ab        | 0.53 ±<br>0.01           | 26.96 ±<br>2.73                         | 24.35 ±<br>2.73         | 18.02 ±<br>4.40b         |
|                          | FB2                                | 0.88 ±<br>0.04ab                         | 0.9 ±<br>0.02d          | 1.40 ±<br>0.12bc         | 0.63 ±<br>0.01ab                    | 0.65 ±<br>0.04a         | 0.54 ±<br>0.03           | 28.26 ±<br>4.66                         | 25.65 ±<br>4.66         | 21.96 ±<br>1.94ab        |
|                          | FP1                                | 0.86 ±<br>0.00b                          | 1.26 ±<br>0.02ab        | 1.75 ±<br>0.14a          | 0.65 ±<br>0.04ab                    | 0.62 ±<br>0.01ab        | 0.48 ±<br>0.04           | 28.29 ±<br>1.03                         | 25.68 ±<br>1.03         | 18.58 ±<br>1.89ab        |
|                          | FP2                                | 0.89 ±<br>0.01ab                         | 1.30 ±<br>0.04abc       | 1.66 ±<br>0.07a          | 0.64 ±<br>0.02ab                    | 0.65 ±<br>0.01a         | 0.57 ±<br>0.02           | 29.04 ±<br>0.99                         | 26.43 ±<br>1.99         | 18.27 ±<br>1.54ab        |

注:表中数值为平均值 ± 标准误(n = 3),同一列处理间小写字母不同表示差异显著(P < 5%),小写字母相同或没有标字母都表示差异不显著(P > 5%)。下同。

Note: Values are means ± standard errors (n = 3). Different letters in the same column indicate significant difference (P < 5%), the same letters or no letter labeled indicate no significant difference (P > 5%). The same as below.

从表 4 可看出,不同水肥处理下,3 个生育期土壤 DOC 含量成熟期高于抽雄期。FC1 时灌浆期 AFI 土壤 DOC 含量比 CFI 提高了 50.0%,成熟期 FFI 土壤 DOC 含量提高了 70.8%;FC2 时,灌浆期 AFI、FFI 土壤 DOC 含量分别提高了 18.8%和 57.9%,成熟期 FFI 土壤 DOC 含量提高了 26.1%。与 FC1 相比,3 个生育时期 CFI 土壤 DOC 含量均有不同程度的升高,成熟期 AFI 土壤 DOC 含量提高了 24.3%,抽雄期和灌浆期 FFI 土壤 DOC 含量分别提高了 33.3%和 78.5%。FFI 时抽雄期和灌浆期 FP1 土壤 DOC 含量比 FC1 分别提高了 88.0%和 94.0%; FFI 时抽雄期和灌浆期 FP2 土壤 DOC 含量比 FC2 分别提高了 45.0%和 17.3%,灌浆期 FB1 土壤 DOC 含量降低了 42.7%。

表 4 表明,不同水肥处理下,3 个生育期土壤 MBC 含量差异不显著。与 FC2 相比,FFI 时抽雄期

FP2 土壤 MBC 含量降低了 39.6%。

2.4 产量与土壤有机碳组分、酶活性相关关系

对沟灌方式和有机肥配合下灌浆期玉米鲜穗产量、土壤有机碳组分和酶活性相互之间的关系进行相关分析(表 5),结果表明,玉米鲜穗产量与土壤有机碳组分、酶活性间呈正相关关系。SOC 与 ROC 之间呈极显著相关关系;SOC 与脲酶之间呈显著相关关系;产量与脲酶、SOC、ROC、DOC 之间呈显著相关关系,其中产量与 DOC 之间关系较密切,相关系数为 0.834,说明脲酶、SOC、ROC、DOC 能体现土壤质量和土壤肥力变化,影响作物产量,且与 DOC 相关系数最高。

3 讨 论

3.1 甜糯玉米产量

王同朝等<sup>[22]</sup>研究表明,采用时空交替灌溉方式

有利于夏玉米产量和土壤水分高效利用的同步提升;农梦玲等<sup>[23]</sup>结果表明,在充分灌水和 1/2 土壤 50% 施肥量及 1/2 土壤 50% 施肥量 F1 条件下,与常

规灌溉相比,分根区交替灌溉增加玉米鲜穗产量 15.7%。本研究表明,FFI 与 FC2 或 FP2 组合提高玉米鲜穗产量效果更好。

表 4 沟灌方式和有机肥配合对土壤有机碳组分的影响

Table 4 Effect of furrow irrigation method and organic manure management on soil organic carbon fraction

| 沟灌方式<br>Furrow<br>method | 施肥处理<br>Fertilization<br>treatment | 有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> )<br>Organic carbon<br>(SOC) |                         |                          | 易氧化有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> )<br>Readily oxidized<br>organic carbon(ROC) |                         |                          | 可溶性有机碳/(mg·kg <sup>-1</sup> )<br>Dissolved organic<br>carbon (DOC) |                         |                          | 微生物量碳/(mg·kg <sup>-1</sup> )<br>Microbial biomass<br>carbon (MBC) |                         |                          |
|--------------------------|------------------------------------|--|-------------------------|--------------------------|---|-------------------------|--------------------------|--|-------------------------|--------------------------|---|-------------------------|--------------------------|
|                          |                                    | 抽雄期<br>Tasselling<br>stage                           | 灌浆期<br>Filling<br>stage | 成熟期<br>Maturing<br>stage | 抽雄期<br>Tasselling<br>stage  | 灌浆期<br>Filling<br>stage | 成熟期<br>Maturing<br>stage | 抽雄期<br>Tasselling<br>stage   | 灌浆期<br>Filling<br>stage | 成熟期<br>Maturing<br>stage | 抽雄期<br>Tasselling<br>stage  | 灌浆期<br>Filling<br>stage | 成熟期<br>Maturing<br>stage |
|                          |                                    | CFI  | FC1                     | 8.97 ± 0.25c             | 11.71 ± 0.12bc  | 11.90 ± 0.66            | 2.38 ± 0.14e             | 2.53 ± 0.12b   | 2.76 ± 0.16bcd          | 38.64 ± 2.97e            | 41.20 ± 2.94e   | 54.74 ± 4.21e           | 163.41 ± 23.46ab         |
|                          | FC2                                | 9.16 ± 0.34c   | 12.15 ± 0.14abc         | 12.60 ± 0.57             | 2.61 ± 0.14de   | 3.49 ± 0.09a            | 2.49 ± 0.11d             | 53.51 ± 5.15bcd  | 55.92 ± 2.94d           | 77.48 ± 5.90bc           | 196.03 ± 22.15ab  | 160.14 ± 22.85ab        | 177.30 ± 11.08ab         |
| AFI                      | FC1                                | 9.23 ± 0.23bc  | 11.89 ± 0.16bc          | 12.30 ± 0.51             | 2.82 ± 0.17cd   | 2.74 ± 0.15b            | 2.68 ± 0.10bcd           | 47.56 ± 5.95cde  | 61.81 ± 5.10cd          | 64.85 ± 5.85de           | 209.97 ± 23.42ab  | 149.07 ± 11.95ab        | 188.38 ± 11.78ab         |
|                          | FC2                                | 10.34 ± 0.27bc                                       | 12.29 ± 0.12abc         | 12.80 ± 0.57             | 3.23 ± 0.08ab   | 2.80 ± 0.17b            | 2.63 ± 0.09cd            | 65.40 ± 2.97cde  | 66.46 ± 5.23c           | 80.85 ± 2.53bc           | 216.94 ± 33.14ab  | 116.78 ± 17.41b         | 194.93 ± 14.50a          |
| FFI                      | FC1                                | 9.37 ± 0.20bc  | 12.36 ± 0.24abc         | 12.50 ± 0.31             | 2.88 ± 0.11bcd  | 2.72 ± 0.03b            | 2.91 ± 0.19bc            | 44.59 ± 5.15de   | 49.45 ± 2.70de          | 93.48 ± 3.86ab           | 202.22 ± 39.05ab  | 136.95 ± 26.84ab        | 190.69 ± 12.40ab         |
|                          | FC2                                | 10.10 ± 0.21ab                                       | 13.10 ± 0.13a           | 12.84 ± 0.24             | 3.45 ± 0.17a  | 3.59 ± 0.07a            | 3.36 ± 0.07a             | 59.45 ± 2.97bc   | 88.29 ± 5.10b           | 97.69 ± 3.37a            | 241.49 ± 15.67a   | 198.75 ± 17.02a         | 195.86 ± 9.82a           |
|                          | FB1                                | 9.62 ± 0.11abc                                       | 12.01 ± 0.10bc          | 11.59 ± 0.60             | 2.50 ± 0.08de   | 2.94 ± 0.14b            | 2.45 ± 0.13d             | 35.67 ± 5.51e  | 52.98 ± 5.0de           | 75.79 ± 3.86cd           | 198.50 ± 13.27ab  | 157.32 ± 19.59ab        | 188.38 ± 11.08ab         |
|                          | FB2                                | 9.45 ± 0.30abc                                       | 12.66 ± 0.31ab          | 12.24 ± 0.16             | 2.21 ± 0.06e  | 2.98 ± 0.17b            | 3.01 ± 0.14abc           | 47.56 ± 2.97cde  | 50.62 ± 3.82de          | 88.43 ± 2.92abc          | 163.41 ± 23.46ab  | 134.75 ± 9.83ab         | 144.05 ± 1.78b           |
|                          | FP1                                | 9.35 ± 0.34bc  | 11.66 ± 0.33c           | 11.60 ± 0.58             | 2.55 ± 0.18de   | 2.59 ± 0.25b            | 2.74 ± 0.15bcd           | 83.83 ± 3.57a  | 95.95 ± 5.23ab          | 92.64 ± 4.21ab           | 196.03 ± 22.15ab  | 160.14 ± 22.85ab        | 177.30 ± 11.08ab         |
|                          | FP2                                | 10.32 ± 0.42a  | 12.39 ± 0.68abc         | 11.97 ± 0.30             | 3.2 ± 0.08abc   | 2.53 ± 0.12b            | 3.09 ± 0.09ab            | 86.21 ± 2.97a  | 103.60 ± 3.28a          | 94.32 ± 3.67ab           | 209.97 ± 23.42ab  | 149.07 ± 11.95ab        | 188.38 ± 11.78ab         |

表 5 玉米鲜穗产量与土壤酶活性和有机碳组分的相关关系(灌浆期)

Table 5 Relations among fresh yield of sweet-sticky maize and soil enzyme activity and organic carbon fraction (filling stage)

| 项目<br>Item       | 鲜穗产量<br>Fresh yield | 过氧化氢酶<br>Catalase | 转化酶<br>Invertase | 脲酶<br>Urease | 有机碳<br>SOC | 易氧化有机碳<br>ROC | 可溶性有机碳<br>DOC | 微生物量碳<br>MBC |
|------------------|---------------------|-------------------|------------------|--------------|------------|---------------|---------------|--------------|
| 鲜穗产量 Fresh yield | 1                   | 0.317             | 0.175            | 0.690*       | 0.705*     | 0.672*        | 0.834*        | 0.232        |
| 过氧化氢酶 Catalase   |                     | 1                 | 0.591            | 0.123        | 0.172      | 0.202         | 0.507         | 0.317        |
| 转化酶 Invertase    |                     |                   | 1                | 0.22         | 0.381      | 0.468         | 0.334         | 0.469        |
| 脲酶 Urease        |                     |                   |                  | 1            | 0.729*     | 0.549         | 0.599         | 0.346        |
| 有机碳 SOC          |                     |                   |                  |              | 1          | 0.781**       | 0.401         | 0.456        |
| 易氧化有机碳 ROC       |                     |                   |                  |              |            | 1             | 0.47          | 0.585        |
| 可溶性有机碳 DOC       |                     |                   |                  |              |            |               | 1             | 0.175        |
| 微生物量碳 MBC        |                     |                   |                  |              |            |               |               | 1            |

注: \* 表示显著相关 ( $P < 5\%$ ), \*\* 表示极显著相关 ( $P < 1\%$ )。

Note: \* indicates significant correlation ( $P < 5\%$ ), \*\* indicates markedly significant correlation ( $P < 1\%$ ).

有机无机肥配施能提高作物产量,如张秀芝等<sup>[24]</sup>结果表明,氮、磷、钾肥与有机肥配施(牛粪 + NPK、秸秆 + NPK)有利于玉米产量的提高,与不施

肥相比,分别提高 218.3% 和 192.6%;孙文涛等<sup>[25]</sup>结果表明,与单施化肥处理相比,有机物料和化肥配合施用可增产 1.64% ~ 8.91%;在等碳量条件下,化

肥配施高量猪粪增产效果最为明显。本试验也表明,各沟灌方式下,与 FC1 或 FP1 相比,FC2 或 FP2 在不同程度上提高了甜糯玉米鲜穗产量。

### 3.2 土壤酶活性

有机肥料能提供营养物质,改善土壤理化性质,增强土壤保水肥性和缓冲能力,进而提高土壤酶活性<sup>[26]</sup>。张继光等<sup>[27]</sup>研究表明,通过长期施用有机肥或与无机肥配施,增加土壤微生物量和酶活性,从而显著提高土壤肥力和土壤持续生产力。魏猛等<sup>[28]</sup>研究表明,有机、无机肥配施能够显著提高土壤脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶、过氧化氢酶的活性。本试验结果也表明,与 FC1 相比,FC2 在不同程度上提高土壤过氧化氢酶、脲酶和转化酶活性。与 FC1 相比,FFI 时 FB 在不同程度上提高土壤过氧化氢酶和脲酶活性。

本试验各沟灌条件的 FC 处理和 FFI 时的 FB 处理不同程度提高了土壤酶活性,这与前述 Li 等<sup>[17]</sup>研究结果相似。

### 3.3 土壤有机碳组分

彭娜等<sup>[29]</sup>结果表明,有机无机肥配施有利于土壤有机碳和活性有机碳的积累;艾孜古丽·木拉提等<sup>[30]</sup>结果表明,每公顷施用氮肥 330 kg 有利于耕层土壤有机碳及其组分的积累,配施秸秆还田效果更佳;曹宏杰和汪景宽<sup>[31]</sup>研究表明,有机肥配施化肥有利于提高土壤 DOC 含量,高量有机肥与化肥配施处理 DOC 含量最高。本试验结果也表明,与 FC1 相比,FC2 不同程度提高了土壤有机碳、ROC、DOC 含量。

本试验还发现,与 CFI 相比,FC 下,FFI 不同程度提高土壤有机碳、ROC 和 DOC 含量,AFI 也不同程度提高 ROC 和 DOC 含量,说明交替隔沟灌和隔沟灌溉对土壤有机碳组分的积累有积极作用;而各沟灌条件下对土壤 MBC 影响不明显,可能原因是干湿交替影响着微生物生物量及其活性,且加速土壤微生物体分解,释放营养元素<sup>[32]</sup>。

### 3.4 玉米产量、土壤有机碳组分和酶活性之间的关系

研究表明,作物产量与土壤有机碳各组分呈显著相关。如刘莉莉等<sup>[33]</sup>研究结果表明,小麦产量与土壤 SOC 呈极显著相关性;刘淑霞<sup>[34]</sup>等结果表明,作物产量与土壤 ROC 呈显著相关关系;王顾希<sup>[35]</sup>结果表明,产量与土壤 DOC 有显著相关性。本试验对玉米产量和土壤有机碳组分相关分析也发现,灌

浆期玉米产量与土壤 SOC、ROC、DOC 之间呈显著相关关系。本试验也发现玉米鲜穗产量与土壤脲酶活性间呈显著相关关系,这与鲁艳红<sup>[36]</sup>研究结果相似。

土壤酶活性影响土壤活性有机碳转化过程。万忠梅<sup>[37]</sup>等结果表明,土壤微生物量碳、可溶性有机碳与土壤总有机碳和酶活性存在显著正相关关系。本试验也发现,土壤有机碳组分和酶活性间呈正相关关系,SOC 与 ROC 和脲酶之间呈显著相关关系,说明 SOC 与 ROC 关系较为密切,土壤脲酶活性变化对 SOC 影响较大。

## 4 小 结

(1) 隔沟灌溉 (FFI) 时,与生物有机肥 (FB) 相比,牛粪 (FC) 和猪粪 (FP) 分别提高鲜穗产量 1.6% 和 2.3%,且 FC 处理提高土壤易氧化态碳 (ROC) 含量和微生物量碳,FP 处理提高土壤可溶性碳 (DOC) 含量。

(2) 各沟灌方式下,与 70% 无机氮 + 30% 牛粪氮 (FC1) 相比,60% 无机氮 + 40% 牛粪氮 (FC2) 能提高甜糯玉米鲜穗产量 2.2% ~ 3.4%,不同程度提高土壤过氧化氢酶和脲酶活性、有机碳 (SOC)、ROC 和 DOC 含量,其中土壤 ROC 和 DOC 含量分别提高 14.5% ~ 37.9% 和 24.3% ~ 78.5%。

(3) 与常规沟灌 (CFI) 相比,FC1 时,抽雄期交替隔沟灌 (AFI) 和 FFI 土壤 ROC 提高 18.5% ~ 21.0%,灌浆期 AFI 和成熟期 FFI 土壤 DOC 提高 50.0% ~ 70.8%;FC2 时,抽雄期 FFI 土壤有机碳提高 10.3%,抽雄期和灌浆期 AFI 和 FFI 土壤 ROC 提高 19.8% ~ 31.5%,灌浆期和成熟期 FFI 土壤 DOC 分别提高 57.9% 和 26.1%。

(4) 玉米鲜穗产量与灌浆期土壤脲酶活性、SOC、ROC 和 DOC,以及 SOC 与 ROC 之间呈显著相关关系,其中鲜穗产量与土壤 DOC 含量之间相关系数为 0.834。

因此,60% 无机 N + 40% 牛粪 N 与交替隔沟灌或隔沟灌溉结合是有利于提高甜糯玉米鲜穗产量和土壤质量的水肥供应模式。

### 参 考 文 献:

- [1] Weil R R, Isiam K R, Stine M A, et al. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use[J]. American Journal of Alternative Agriculture, 2003, 18(1):3-

- 17.
- [2] Kalpitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review[J]. *Soil Science*, 2000, 165(4):2772-3041.
- [3] Jandl R, Sollins P. Water-extractable soil carbon in relation to the below ground carbon cycle[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, 25(2):196-201.
- [4] 万忠梅,郭岳,郭跃东.土地利用对湿地土壤活性有机碳的影响研究进展[J].*生态环境学报*,2011,20(3):567-570.
- [5] Gregorich E G, Carter M R, Angers D A, et al. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils[J]. *Canada Journal of Soil Science*, 1994, 74(4):367-385.
- [6] 张仕吉,项文化.土地利用方式对土壤活性有机碳影响的研究进展[J].*中南林业科技大学学报*,2012,32(5):134-143.
- [7] Frankenberger W T J, Dick W A. Relationship between enzyme activities and microbial growth and activity indices in soil[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1983,47(5):945-951.
- [8] 王冬梅,王春枝,韩晓日,等.长期施肥对棕壤主要酶活性的影响[J].*土壤通报*,2006,37(2):263-267.
- [9] 樊军,郝明德.土高原旱地轮作与施肥长期定位试验研究 I:长期轮作与肥料对土壤酶活性的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2003,9(1):9-13.
- [10] 周礼恺.土壤酶学[M].北京:科学出版社,1987.
- [11] 刘益仁,郁洁,李想,等.有机无机肥配施对麦-稻轮作系统土壤微生物学特性的影响[J].*农业环境科学学报*,2012,31(5):989-994.
- [12] Chang E H, Chung R S, Tsai Y H. Effect of different application rates of organic fertilizer on soil enzyme activity and microbial population[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007,53(2):132-140.
- [13] 任卫东,贾莉洁,王莲莲,等.长期施肥对小麦、玉米根际和非根际土壤微生物量碳及水溶性有机碳含量的影响[J].*西北农业学报*,2011,20(12):145-151.
- [14] 杨启良,张富仓,刘小刚,等.沟灌方式和水氮对玉米产量和水分传导的影响[J].*农业工程学报*,2011,27(1):15-21.
- [15] 徐正飞,夏桂敏,郑丽丽,等.不同灌溉方式对大豆性状、产量及品质的影响[J].*灌溉排水学报*,2011,30(6):128-130.
- [16] 王振昌,杜太生,杨磊.西北荒漠绿洲区隔沟交替灌溉对棉花生长及产量与经济效益的影响[J].*干旱地区农业研究*,2008,26(5):84-88.
- [17] Li F S, Yu J M, Nong M L, et al. Partial root-zone irrigation enhanced soil enzyme activities and water use of maize under different ratios of inorganic to organic nitrogen fertilizers[J]. *Agricultural Water Management*, 2010,97:231-239.
- [18] 刘水,李伏生,韦翔华,等.分根区交替灌溉对玉米水分利用和土壤微生物量碳的影响[J].*农业工程学报*,2012,28(8):71-77.
- [19] 张潇潇,钱慧慧,吴祥颖,等.沟灌方式和施肥水平对甜糯玉米产量、土壤养分和酶活性的影响[J].*节水灌溉*,2014,(6):1-4.
- [20] 关松荫,张德生,张志明.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.
- [21] 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,2000.
- [22] 王同朝,李小艳,杜园园,等.时空交替间隔灌溉对夏玉米田水分和产量形成的影响[J].*华北农学报*,2013,28(4):115-122.
- [23] 农梦玲,谢振兴,李伏生.灌水方式和水平与施肥方式对糯玉米产量和水肥利用的影响[J].*节水灌溉*,2014,(4):22-26.
- [24] 张秀芝,高洪军,彭畅,等.等氮量投入下有机无机肥配施对玉米产量及氮素利用的影响[J].*玉米科学*,2012,20(6):123-127.
- [25] 孙文涛,宫亮,包红静,等.不同有机无机配比对玉米产量及土壤物理性质的影响[J].*中国农学通报*,2011,27(3):80-84.
- [26] 陈刚,王璞,陶洪斌,等.有机无机配施对旱地春玉米产量及土壤水分利用的影响[J].*干旱地区农业研究*,2011,30(6):139-144.
- [27] 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.
- [28] 魏猛,诸葛玉平,姜燕宏,等.施肥对文冠果生长及土壤酶活性的影响[J].*水土保持学报*,2010,24(2):237-240.
- [29] 彭娜,王开峰,谢小立,等.长期有机无机肥配施对稻田土壤基本理化性状的影响[J].*中国土壤与肥料*,2009,(2):6-10.
- [30] 艾孜古丽·木拉提,同延安,杨宪龙,等.不同施肥对农田土壤有机碳及其组分的影响[J].*土壤通报*,2012,43(6):1461-1466.
- [31] 曹宏杰,汪景宽.长期不同施肥处理对黑土不同组分有机碳的影响[J].*国土与自然资源研究*,2012,(3):39-41.
- [32] 徐永刚,宇万太,马强,等.长期不同施肥制度对潮棕壤肥力及微生物活性的影响[J].*生态学杂志*,2010,(6):1135-1142.
- [33] 刘莉莉,马忠明,吕晓东.多年固定道保护性耕作对土壤有机碳和小麦产量的影响[J].*麦类作物学报*,2013,33(5):1025-1029.
- [34] 刘淑霞,刘景双,赵明东,等.土壤活性有机碳与养分有效性及作物产量的关系[J].*吉林农业大学学报*,2003,25(5):539-543.
- [35] 王顾希.基于鸡粪制造的有机无机复混肥对土壤易变有机碳组分的影响[D].雅安:四川农业大学,2012.
- [36] 鲁艳红.长期施肥条件下红壤性水稻土有机质特征及其与土壤质量的关系[D].长沙:湖南农业大学,2011.
- [37] 万忠梅,宋长春,杨桂生,等.三江平原湿地土壤活性有机碳组分特征及其与土壤酶活性的关系[J].*环境科学学报*,2009,29(2):406-412.