



**蔗叶还田下不同施肥模式对旱地红壤肥力及稳定性的影响**

王德鑫, 杜建军, 陈海斌, 崔鹏, 郭红梅, 陈卓, 范如芹

引用本文:

王德鑫, 杜建军, 陈海斌, 等. 蔗叶还田下不同施肥模式对旱地红壤肥力及稳定性的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2026, 43(1): 254–263.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.0874>

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

[长期定位施肥和地膜覆盖对棕壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响](#)

吕欣欣, 丁雪丽, 张彬, 孙海岩, 汪景宽

*农业资源与环境学报*. 2018, 35(1): 1–10 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0199>

[猪粪有机肥施用对潮土速效养分含量及团聚体分布的影响](#)

石纹磴, 刘世亮, 赵颖, 高焕平, 王洋洋, 李慧, 刘芳

*农业资源与环境学报*. 2017, 34(5): 431–438 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0070>

[长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物生物量和有机质结构的影响](#)

蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 吕真真, 冀建华, 冯兆滨, 刘秀梅

*农业资源与环境学报*. 2021, 38(5): 810–819 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0584>

[我国不同区域粮食作物产量对有机肥施用的响应差异](#)

任科宇, 徐明岗, 张露, 段英华, 王伯仁

*农业资源与环境学报*. 2021, 38(1): 143–150 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0150>

[紫云英翻压条件下氮肥运筹对双季稻产量和肥料利用率的影响](#)

王慧, 唐杉, 武际, 胡润, 韩上, 刘英, 朱勤, 李敏, 王允青, 石祖梁

*农业资源与环境学报*. 2018, 35(4): 327–333 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0321>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王德鑫, 杜建军, 陈海斌, 等. 蔗叶还田下不同施肥模式对旱地红壤肥力及稳定性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2026, 43(1): 254–263.

WANG D X, DU J J, CHEN H B, et al. Effects of different fertilization modes on the fertility and stability of red soil in upland under sugarcane leaf returning to field[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2026, 43(1): 254–263.



开放科学 OSID

# 蔗叶还田下不同施肥模式对旱地红壤肥力及稳定性的影响

王德鑫, 杜建军, 陈海斌, 崔鹏, 郭红梅, 陈卓, 范如芹\*

(仲恺农业工程学院资源与环境学院/广东省农业产地环境污染防控工程技术中心, 广州 510225)

**摘要:**为探索蔗叶还田下不同施肥模式对土壤改良的效果,提出优化组合,本研究以华南地区广泛分布的红壤为研究对象,通过盆栽试验,研究了蔗叶还田(S)与不还田条件下不施肥(CK)、常规施肥(F0)、鸽粪有机肥替代15%化肥(F1)、鸽粪有机肥替代30%化肥(F2)、优施化肥(FC)5个施肥模式对土壤肥力和团聚体粒级分布与稳定性等土壤性状的影响。结果表明:相同施肥处理下,与不还田相比,蔗叶还田显著提升了土壤肥力与稳定性。与SCK相比,SF1处理土壤有机质显著提升31.7%,SF1土壤养分含量增幅为21.0%~187.5%。各施肥处理较不施肥均呈现<0.25 mm团聚体比例下降、0.25~1 mm和>1 mm大团聚体比例上升的趋势,其中SF1处理平均质量直径、几何平均直径值分别显著提高54.0%、88.1%,<0.25 mm微团聚体比例显著降低28.4%( $P<0.05$ )。研究表明,蔗叶还田结合科学施肥能够提升红壤肥力和团聚体稳定性,其中结合鸽粪有机肥替代15%化肥处理提升效果最佳。

**关键词:** 秸秆还田; 有机肥替代; 红壤; 土壤养分; 团聚体稳定性

**doi:** 10.13254/j.jare.2024.0874

## Effects of different fertilization modes on the fertility and stability of red soil in upland under sugarcane leaf returning to field

WANG Dexin, DU Jianjun, CHEN Haibin, CUI Peng, GUO Hongmei, CHEN Zhuo, FAN Ruqin\*

(College of Resources and Environment, Zhongkai University of Agriculture and Engineering / Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center for Environmental Pollution Control in Agricultural Production Areas, Guangzhou 510225, China)

**Abstract:** To explore the effects of different fertilization modes on soil improvement under the return of sugarcane leaves to the field and to an optimized combination, this study focused on the widely distributed red soil in southern China. Through pot experiments, the effects of five fertilization modes, including sugarcane leaf return (S) and no fertilization (CK), conventional fertilization (F0), pigeon manure organic fertilizer replacing 15% fertilizer (F1), pigeon manure organic fertilizer replacing 30% fertilizer (F2), and optimal fertilizer application (FC), on soil fertility, aggregate size distribution and stability, and other soil properties were studied. Results showed that under the same fertilization treatment, returning sugarcane leaves to the field significantly improved soil fertility and stability compared with no-return treatments. Compared with SCK, SF1 treatment significantly increased soil organic matter by 31.7%, and soil nutrient contents by 21.0%–187.5%. All fertilization treatments showed lower proportion of <0.25 mm aggregates and an higher proportion of 0.25–1 mm and >1 mm macroaggregates compared with treatments without fertilizer. Among them, the *MWD* and *GMD* values of SF1 treatment significantly increased 54.0%, 88.1%, respectively, while the proportion of <0.25 mm microaggregates significantly decreased 28.4% ( $P<0.05$ ). The combination of sugarcane top returning and fertilization can improve the fertility and aggregate stability of red soil, and SF1 has the best effect.

**Keywords:** straw returning; organic fertilizer substitution; red soil; soil fertility; aggregate stability

收稿日期: 2024-11-03 录用日期: 2025-01-13

作者简介: 王德鑫(1999—),男,山东济南人,硕士研究生,研究方向为土壤有机碳固定、土壤改良。E-mail: 1549684473@qq.com

\*通信作者: 范如芹 E-mail: fanruqin2007@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177299)

我国甘蔗产量位居世界第三,蔗茎收获后会大量的蔗叶废弃物,传统的蔗叶处理方法往往是直接焚烧<sup>[1]</sup>。蔗叶中含有作物生长需要的大量营养元素及微量元素<sup>[2]</sup>。焚烧不仅浪费蔗叶资源,且产生的CO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>等污染物会给生态环境造成极大负担。同时,长期单施化肥而缺乏有机物料投入已经造成诸多问题,如土壤有机质含量降低、土壤酸化、土壤结构破坏等。因此,探索有效的蔗叶还田与科学施肥措施是消纳蔗叶、改善土壤质量的重要途径。

诸多研究<sup>[3-7]</sup>表明,蔗叶还田能够提升土壤肥力、改善土壤结构、避免土壤退化,并可减少对化肥的过度依赖。Galdos等<sup>[8]</sup>连续8年定位试验表明,蔗叶还田土壤总碳及有机碳含量分别较蔗叶焚烧提升了30%和380%。蔗叶还田对土壤团聚体等土壤结构也具有较好的改良作用。Tisdall等<sup>[9]</sup>将250 μm定为水稳性团聚体分为大团聚体(>250 μm)和微团聚体(<250 μm)的分界线,其与平均质量直径(*MWD*)和几何平均直径(*GMD*)等团聚体稳定性指标密切相关,使各类团聚体之间具有了可比性<sup>[10]</sup>。研究<sup>[11-12]</sup>发现秸秆还田能够提高土壤团聚体*MWD*和*GMD*,蔗叶还田相比于蔗叶焚烧的土壤团聚体稳定性提高了30.9%。在土壤养分含量方面,Wang等<sup>[13]</sup>发现秸秆还田可以提高土壤矿化氮、速效磷和交换钾含量,在提升土壤养分含量的同时调节碳、氮库以提升作物产量。此外,黄星瑜等<sup>[14]</sup>发现有机肥部分替代化肥能够显著提高肥料农学利用率、活化有效养分、提升土壤肥力。刘寒双等<sup>[15]</sup>的研究表明有机肥部分替代化肥较于常规施肥土壤有机质含量显著提升30.1%,并且提高了土壤酶活性。也有研究<sup>[16-17]</sup>发现仅秸秆还田而不配合合理的施肥措施可能会导致土壤环境碳氮比过高,氮素匮乏从而使秸秆腐解速率缓慢,并且可能产生“微生物掘氮效应”造成土壤养分损失。秸秆还田搭配合理施肥可以有效地调节秸秆腐解速率和土壤养分释放过程<sup>[18]</sup>,是改善土壤质量的重要农业措施。

目前关于蔗叶还田的研究重点关注单一还田措

施下而产生的效应方面,对配合不同施肥措施下蔗叶还田对旱地红壤产生的影响研究较少。因此,本试验从蔗叶还田结合不同施肥措施入手,探究其对红壤肥力及团聚体稳定性的影响规律,提出蔗叶还田与施肥方式的优化组合,为蔗叶还田利用和红壤地力提升提供数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

土壤样品采集于广州市从化区农业技术推广中心试验基地(23°57'N, 113°49'E),为华南地区典型旱地红壤,基本理化性质详见表1。供试玉米品种:闽审玉2016004(品种审定编号);供试肥料品种为尿素(含N 46%),过磷酸钙(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%),氯化钾(含K<sub>2</sub>O 60%),供试有机肥为鸽粪有机肥(OM 51.78%、N 3.91%、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 3.47%、K<sub>2</sub>O 3.01%)。

### 1.2 试验设计

设计为2因素(是否还田、施肥方式),10个处理,每个处理4个重复,采用随机区组排列。具体处理如表2所示。

### 1.3 试验过程

供试土壤风干后过2 mm筛<sup>[9]</sup>,每盆称取5 kg土壤与粉碎(<1 cm)蔗叶混合均匀,秸秆还田量按照当地每亩(1亩=1/15 hm<sup>2</sup>,下同)干蔗叶质量800 kg计算。用盆钵(高50 cm、底部半径30 cm)于温室大棚内进行玉米栽培试验。玉米播种后每个盆钵留长势一致的壮苗1棵。有机肥作为基肥一次性施入。化肥分期施用,按基肥(或苗肥)、拔节肥、穗肥3次施下:基肥(或苗肥)占10%用量,于播种前或定苗后施用;拔节肥占40%用量,于拔节初期施用;穗肥占50%用量,于大喇叭口期施用。常规施肥按照当地农民习惯施肥用量,N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O每亩用量分别为26.5、15.0 kg和15.0 kg。

### 1.4 样品采集与测定

#### 1.4.1 样品采集与处理

于玉米收获后采集0~20 cm土样,将采集后的土样在室内沿其自然结构轻轻掰碎成1 cm左右小块,剔除其中的植物残体、未腐解的秸秆和根系等杂质,

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the studied soil

土壤类型 Soil type	土壤pH Soil pH	有机质 Organic matter/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total phosphorus/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全钾 Total potassium/ (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Alkaline hydrolyzable nitrogen/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷 Olsen-P/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Olsen-K/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
红壤	4.78	13.80	0.28	0.30	13.15	62.79	3.54	35.00

表2 试验处理  
Table 2 Experiment treatments

处理 Treatment	是否秸秆还田 Straw return to the field or not	施肥方式 Fertilization method	化肥用量 Fertilizer application rate/(kg·hm <sup>-2</sup> )		
			N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
CK	否	不施肥	0	0	0
F0	否	常规化肥	397.5	225.0	225.0
F1	否	鸽粪有机肥替代 15% 化肥	337.95	172.05	179.85
F2	否	鸽粪有机肥替代 30% 化肥	278.25	119.10	133.20
FC	否	优施化肥(测土配方施肥)	300	150	255
SCK	是	不施肥	0	0	0
SF0	是	常规化肥	397.5	225.0	225.0
SF1	是	鸽粪有机肥替代 15% 化肥	337.95	172.05	179.85
SF2	是	鸽粪有机肥替代 30% 化肥	278.25	119.10	133.20
SFC	是	优施化肥(测土配方施肥)	300	150	255

在通风阴凉处自然风干备用。

#### 1.4.2 土壤理化性质的测定

土壤理化性质参照《土壤农化分析》<sup>[20]</sup>测定。土壤 pH 采用 2.5:1.0 水土比复合电极测定;土壤容重采用环刀法测定;土壤有机质采用重铬酸钾-外加热法测定;全氮采用全自动凯氏定氮仪测定;全磷采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定;全钾采用 NaOH 熔融-火焰光度法测定;碱解氮采用碱解扩散法测定;有效磷采用 NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾采用 NH<sub>4</sub>OAc 浸提-火焰光度计法测定。

#### 1.4.3 土壤团聚体稳定性的测定

水稳定团聚体采用湿筛法测定<sup>[21]</sup>:将 100 g 风干土置于套筛(1、0.25 mm)顶层并浸入水中 5 min,然后用自制湿筛仪以 30 mm 振幅上下振动套筛 2 min。收集筛上物于 60 °C 下烘干测定质量,可得不同粒级水稳性团聚体组分含量。

平均质量直径(MWD)与几何平均直径(GMD)采用下列公式计算:

$$MWD = \sum \left\{ X_i \times \frac{m_i}{m_t} \right\} \quad (1)$$

$$GMD = E_{xp} \left( \frac{\sum (m_i \times \ln X_i)}{\sum m_i} \right) \quad (2)$$

式中: $X_i$ 为第*i*级团聚体平均直径,mm; $m_i$ 为第*i*级团聚体质量,g; $m_t$ 为供试土壤总质量,g。

#### 1.5 数据处理

利用 Excel 2010 软件对试验数据进行处理;利用 SPSS 27.0 进行统计分析并对数据进行方差分析和显著差异(LSD)检验;利用 Origin 2022 制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 蔗叶还田与施肥措施对土壤理化性质的影响

#### 2.1.1 对土壤有机质(SOM)含量的影响

蔗叶还田与不同施肥措施对 SOM 产生了显著影响(表 3)。蔗叶不还田条件下,F0、F1、F2、FC 处理相比较于 CK 处理 SOM 含量显著提升 18.5%、39.1%、31.1%、20.9% ( $P < 0.05$ ),其中 F1 处理提升效果最佳。不同还田条件下,有机肥替代 15% 化肥对 SOM 含量均表现出较好的提升效果。相同施肥处理下,除 SF1 外,其余施肥处理均表现为蔗叶还田 SOM 高于不还田 ( $P > 0.05$ )。

#### 2.1.2 对土壤 pH 的影响

由表 3 可知,除不施肥处理外,各处理土壤 pH 均表现为蔗叶还田处理高于蔗叶不还田,且鸽粪有机肥替代 15% 化肥中蔗叶还田(SF1)处理 pH 显著高于不还田(F1) ( $P < 0.05$ )。蔗叶不还田条件下,F0 处理 pH 最低,其余施肥处理较之均有明显升高,其中 F2 提升效果最好,提升了 0.78 ( $P < 0.05$ ),其余施肥处理间均没有显著性差异 ( $P > 0.05$ )。蔗叶还田条件下,SF0 处理 pH 最低,SFC 处理 pH 最高,其较于 SF0 提升了 0.46,但施肥处理之间均没有显著性差异 ( $P > 0.05$ )。

#### 2.1.3 对土壤容重(BD)的影响

蔗叶还田与不同施肥措施对土壤容重产生明显影响(表 3)。蔗叶不还田条件下,各施肥处理容重均低于 F0,其中 F2 土壤容重最低(1.32 g·cm<sup>-3</sup>),显著低于 F0 ( $P < 0.05$ )。蔗叶还田条件下,土壤容重最高为 SCK 处理,其余处理与之比较均有所降低,但均未达到显著性水平 ( $P > 0.05$ )。其中 SFC 处理容重最低,为

表3 不同处理对土壤基本理化性质影响

Table 3 Effects of different treatments on basic physical and chemical properties of soil

处理 Treatment	有机质 Organic matter/(g·kg <sup>-1</sup> )		土壤pH Soil pH		土壤容重 Soil bulk density/(g·cm <sup>-3</sup> )	
	不还田	蔗叶还田	不还田	蔗叶还田	不还田	蔗叶还田
不施肥	13.26±1.22cA	13.94±1.03bA	5.93±0.05aA	5.85±0.23aA	1.37±0.03abA	1.35±0.00aA
常规施肥	15.71±0.58bA	16.19±1.94abA	5.47±0.15bA	5.82±0.07aA	1.42±0.02aA	1.33±0.01aB
鸽粪有机肥替代15%化肥	18.45±0.65aA	18.31±0.93aA	5.93±0.04aB	6.19±0.04aA	1.36±0.01abA	1.32±0.03aA
鸽粪有机肥替代30%化肥	17.38±0.26abA	17.99±0.70aA	6.08±0.13aA	6.25±0.09aA	1.32±0.02bA	1.31±0.04aA
优施化肥	16.03±0.67bA	18.67±0.98aA	6.03±0.13aA	6.28±0.10aA	1.37±0.03abA	1.30±0.05aA

注:同列数字后不同小写字母表示相同还田方式不同施肥处理下差异显著( $P<0.05$ );同行数字后不同大写字母表示相同施肥处理不同还田方式下差异显著( $P<0.05$ )。下同。

1.30 g·cm<sup>-3</sup>。相同施肥处理下,蔗叶还田土壤容重均低于不还田,其中蔗叶还田的SF0处理土壤容重显著低于不还田的F0处理( $P<0.05$ )。综上所述,蔗叶还田结合不同施肥措施相较于仅施肥措施更有利于降低土壤容重。

## 2.2 蔗叶还田与施肥措施对土壤养分含量的影响

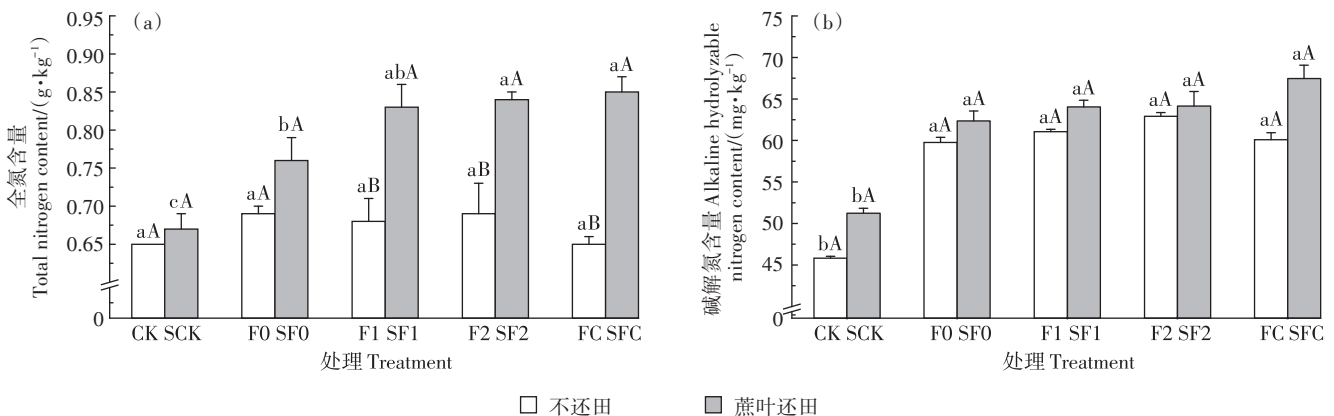
### 2.2.1 对土壤全氮和碱解氮的影响

由图1可知,不同施肥措施下蔗叶还田较不还田土壤全氮(TN)、碱解氮(AN)均有所提升。蔗叶不还田条件下,由图1a可以看出不同施肥处理间TN含量均没有显著性差异。图1b则表明F0、F1、F2、FC处理AN含量相较于CK均有显著性提升,提升幅度为30.4%、33.3%、37.3%、31.2%( $P<0.05$ )。蔗叶还田条件下,由图1a可知,SCK、SF0、SF1、SF2、SFC处理TN含量依次呈现递增趋势,且SF0、SF1、SF2、SFC相较于SCK提升幅度依次为11.8%、23.9%、25.4%、26.9%,差异显著( $P<0.05$ ),且SF2、SFC处理较于SF0分别提升了10.5%、11.8%( $P<0.05$ )。图1b表明SF0、SF1、SF2、

SFC比SCK处理AN含量也有显著性提升,提升幅度依次为21.7%、25.0%、25.2%、31.7%( $P<0.05$ )。由图1a可知,相同施肥处理下蔗叶还田TN均高于不还田,其中SF1、SF2以及SFC处理比F1、F2、FC分别提升了22.1%、21.7%、30.8%( $P<0.05$ )。由图1b可知,蔗叶还田AN含量比不还田处理均有所提升,但差异均没有达到显著性水平( $P>0.05$ )。综上所述,蔗叶还田结合合理施肥措施相较于仅施肥更有利于土壤TN含量的提升,尤其SFC提升效果最好(26.9%),且SF1、SF2、SFC之间没有显著差异。无论是否蔗叶还田,各施肥处理比不施肥均能够显著提升土壤AN含量。

### 2.2.2 对土壤全磷和有效磷的影响

由图2可知,各施肥处理全磷(TP)、有效磷(AP)相较于不施肥均有明显提升。蔗叶不还田条件下,F0、F1、F2、FC相较于CK处理TP含量均显著性提升,增幅分别为67.6%、52.9%、41.2%、52.9%( $P<0.05$ )。由图2b得知,F0、F1、F2、FC处理AP含量呈现递减的规律,且较CK提升了185.4%~315.8%( $P<0.05$ )。蔗



图中不同小写字母表示相同蔗叶处理下不同施肥处理差异显著( $P<0.05$ );不同大写字母表示相同施肥处理下秸秆还田与不还田处理差异显著( $P<0.05$ )。下同。

图1 不同处理对土壤全氮和碱解氮含量的影响

Figure 1 Effects of different treatments on soil nitrogen contents

叶还田条件下, SF0、SF1、SF2、SFC 处理 TP 含量较 SCK 提升幅度均达到了显著性水平, 分别提升了 70%、86.7%、70%、86.7% ( $P < 0.05$ )。各处理间 AP 含量变化规律与 TP 一致, 即各施肥处理均显著高于不施肥处理, 增幅为 134.1%~187.5% ( $P < 0.05$ )。相同施肥措施下, 蔗叶还田与不还田处理 TP、AP 含量差异均没有达到显著性水平 ( $P > 0.05$ )。

### 2.2.3 对土壤全钾(TK)和速效钾(AK)含量的影响

由图 3 得知, 蔗叶还田与不同施肥措施相较于仅施肥均可提升土壤 TK、AK 含量。蔗叶不还田条件下, 由图 3a 可知, CK、F0、F1、F2、FC 处理间 TK 含量差异较小, 各处理间均未达到显著性差异 ( $P > 0.05$ )。由图 3b 可知, 各施肥 (F0、F1、F2、FC) 处理相较于不施肥土壤 AK 含量均有所提升。其中 F2 提升效果最好, 提升了 52.2%, 其次是 FC, 提升了 46.4%, 均达到了显著水平 ( $P < 0.05$ )。其余施肥处理较 CK 提升不显著 ( $P > 0.05$ )。蔗叶还田条件下, 除 SF0 外, SF1、SF2、SFC 处理相较于不施肥 TK 含量均有显著性提升, 增幅分别为 21.9%、21.0%、17.7% ( $P < 0.05$ )。SF0、SF1、SF2、

SFC 处理比不施肥 AK 含量均有所提升, 但仅 SF1 和 SF2 增幅达到显著水平, 增幅分别为 39.4% 和 47.0% ( $P < 0.05$ )。相同施肥处理下, 除不施肥外其余处理 TK 含量均为蔗叶还田高于不还田。SF2 处理比 F2 提升了 18.1% ( $P < 0.05$ )。SF1 比 F1 提升了 12.3%, 但未达到显著性水平 ( $P > 0.05$ )。由图 3b 可知, 各施肥处理中蔗叶还田对土壤 AK 含量的提升效果均优于不还田, 其中 CK (SCK)、F1 (SF1)、F2 (SF2) 处理分别提升了 43.5%、55.9%、38.6%, 均达到了显著性水平 ( $P < 0.05$ )。F0 (SF0)、FC (SFC) 处理中蔗叶还田比不还田 AK 含量, 分别提升了 21.0%、7.8% 但未达到显著水平 ( $P > 0.05$ )。综上所述, 蔗叶还田与不同施肥措施较不还田更有利于 TK、AK 含量的提升, 其中有机肥替代对 TK 提升效果较好, 且 SF1 对 AK 含量提升最高 (55.9%), 达到显著性水平 ( $P < 0.05$ )。

## 2.3 蔗叶还田与不同施肥措施对土壤团聚体稳定性的影响

### 2.3.1 土壤团聚体粒级组分

由图 4 可以看出, 蔗叶不还田条件下, 各施肥处

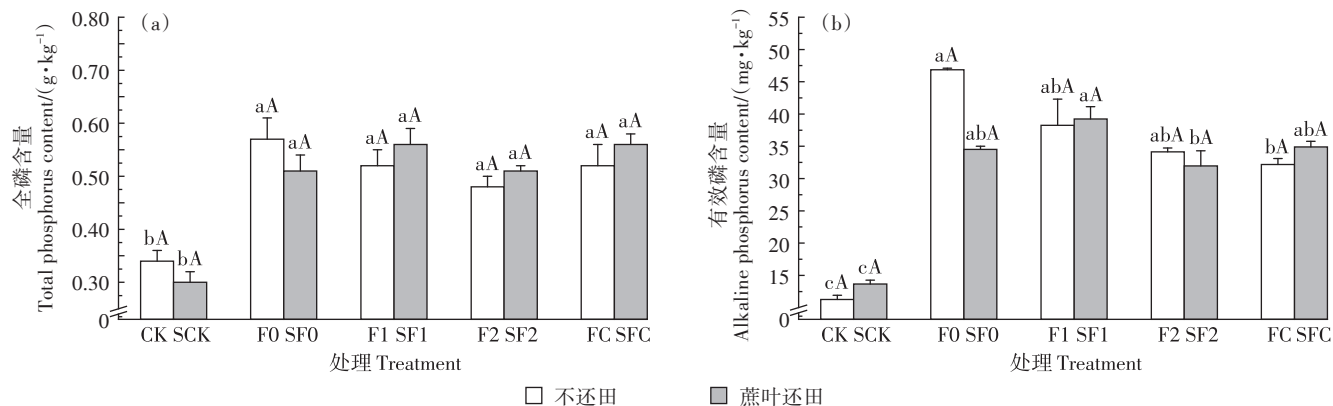


图 2 不同处理对土壤全磷和有效磷含量的影响

Figure 2 Effects of different treatments on soil phosphorus concentrations

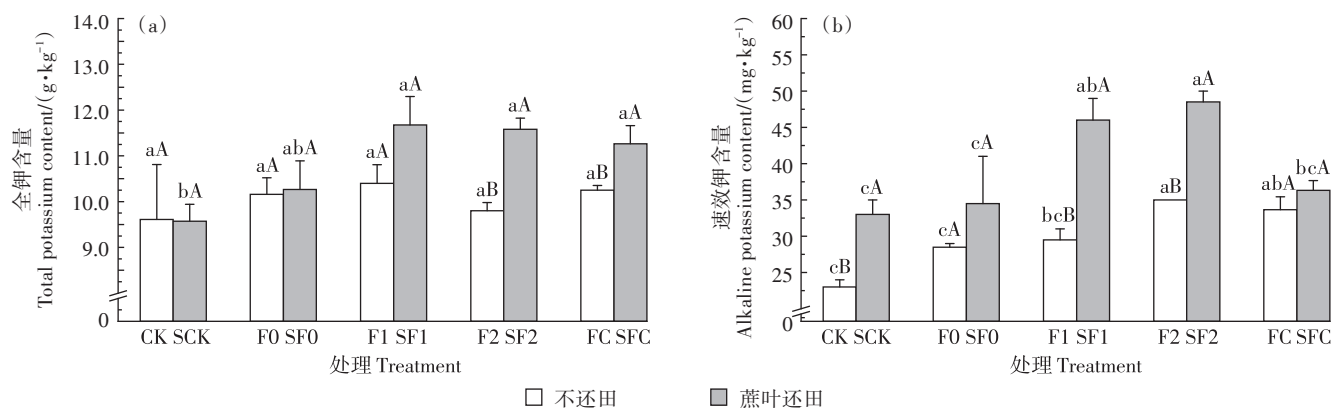


图 3 不同处理对土壤全钾与速效钾含量的影响

Figure 3 Effects of different treatments on soil potassium concentrations

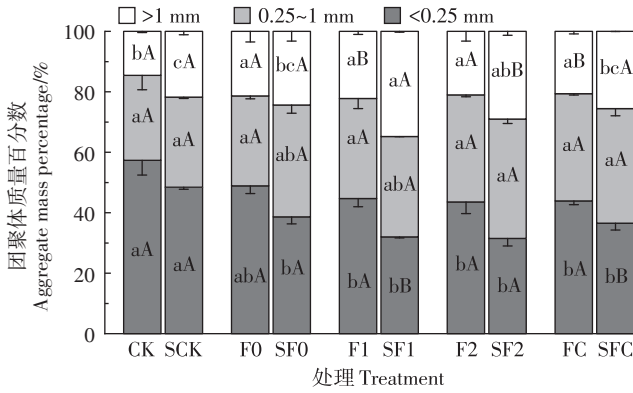


图4 不同处理中不同粒级团聚体分布

Figure 4 Distribution of aggregates with different particle sizes in different treatments

理相较于CK均能显著提升>1 mm粒级团聚体的比例,增幅为41.7%~52.4% ( $P<0.05$ );0.25~1 mm粒级团聚体比例提升幅度为6.0%~26.1%,均达到显著性水平 ( $P<0.05$ );各施肥处理<0.25 mm粒级团聚体比例较CK降低幅度范围为17.3%~31.6%,除F0外,均达到显著性水平 ( $P<0.05$ )。蔗叶还田条件下,各施肥处理>1 mm粒级团聚体比例较SCK提升幅度为11.9%~59.8%,其中SF1、SF2增幅达到显著水平 ( $P<0.05$ );0.25~1 mm粒级团聚体比例则表现为:除SF0、SF1外其余施肥处理相较于SCK均有显著性升高,增幅为27.1%~32.6% ( $P<0.05$ );各施肥处理<0.25 mm粒级团聚体比例相较于SCK均显著下降,范围在20.1%~35.0% ( $P<0.05$ )。相同施肥处理条件下蔗叶还田相比于不还田>1 mm和0.25~1 mm粒级团聚体比例均有所升高,而<0.25 mm粒级团聚体比例则与之相反。其中SF1较F1处理>1 mm团聚体比例提升了56.8%,SFC较FC处理提升了23.9%。SF1较F1处理<0.25

mm粒级团聚体比例降低了28.4%,SFC较FC处理降低了16.8%,差异均达到显著性水平 ( $P<0.05$ )。

### 2.3.2 团聚体平均重量直径(MWD)与几何平均直径(GMD)

由图5可知不同施肥处理MWD及GMD有明显差异。蔗叶不还田条件下,各施肥处理相较于CK处理MWD均有所提升。除FC外,增幅均达到了显著性水平,范围在39.8%~46.0% ( $P<0.05$ )。由图5b可知,各施肥处理GMD相较于CK均有显著增加,且除F0外均达到了显著性差异,增幅为46.6%~51.2% ( $P<0.05$ )。蔗叶还田条件下,MWD及GMD均表现出各施肥处理比SCK处理有所提高。且其中SF1、SF2处理均达到显著性水平,MWD增幅分别为54.0%、31.6%,GMD增幅分别为88.1%、62.4% ( $P<0.05$ )。各施肥处理蔗叶还田对比不还田MWD与GMD均有所增加,其中MWD表现为SCK较CK提高42.6%,SF1较F1提高50.0%、SFC较FC提高21.5%,达到显著性水平 ( $P<0.05$ )。GMD相应提升幅度分别为40.6%、74.8%和29.3% ( $P<0.05$ )。可见,施肥能够增加团聚体MWD与GMD,蔗叶还田与不同施肥措施对MWD及GMD的提升效果优于仅施肥处理,其中SF1处理MWD、GMD值最高。

### 2.4 MWD、GMD与土壤肥力的相关性

由图6分析可知,土壤团聚体稳定性(MWD、GMD)与土壤肥力之间的相关性在蔗叶还田条件下(图6b)相较于不还田(图6a)更为密切。蔗叶不还田条件下,AN、TP、AP之间互为极显著正相关(相关系数为0.59~0.82) ( $P<0.01$ )。SOM与AN之间呈显著正相关 ( $P<0.05$ ),且二者皆与MWD、GMD呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ),MWD与GMD呈极显著正相关(相关系

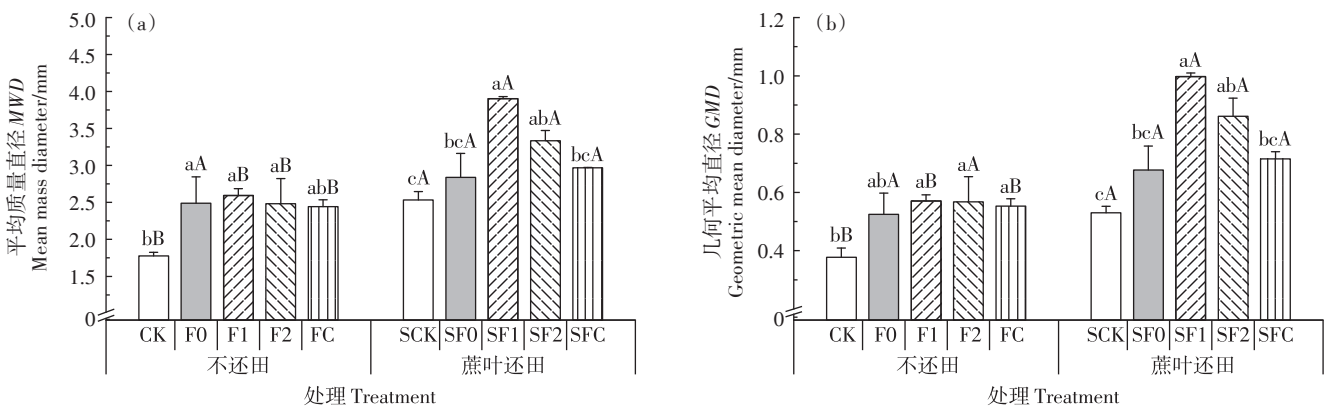


图5 不同处理对MWD、GMD的影响

Figure 5 Effects of different treatments on MWD and GMD

数为0.95)( $P<0.01$ )。此外, TN与TK、MWD、GMD均呈显著正相关, AP与MWD也具有显著正相关性( $P<0.05$ )。蔗叶还田条件下, SOM、TP、AN、AP两两之间均达到极显著性相关(相关系数为0.68~0.92)( $P<0.01$ )。TN、TK与MWD、GMD之间存在极显著正相关性(相关系数为0.78~0.85)( $P<0.01$ ), TP、TK、TN之间存在极显著正相关性(相关系数为0.69~0.84)( $P<0.01$ ); SOM与TK、GMD存在显著正相关性( $P<0.05$ ), 与MWD存在极显著正相关性( $P<0.01$ ); 此外, TN与AP, TK与AK以及MWD与GMD之间存在极显著正相关性( $P<0.01$ ), TP、AK与MWD、GMD之间有显著正相关性(相关系数为0.62~0.71,  $P<0.05$ ); TN与AK, TK与AP之间也存在显著正相关性( $P<0.05$ )。

由图6a与图6b对比可知, 蔗叶不还田条件下, SOM表现为与AN存在显著相关性, 与MWD、GMD存在极显著正相关性(相关系数为0.78~0.86,  $P<0.01$ ); AN、AP、TP之间互为极显著正相关性(相关系数为0.70~0.90,  $P<0.01$ )。蔗叶还田条件下SOM表现为与TK、GMD存在显著相关性, 与TN、TP、AN、MWD、GMD呈极显著正相关(相关系数为0.75~0.90,  $P<0.01$ ); MWD表现为与SOM、TN、TK均存在极显著正相关性(相关系数为0.78~0.83,  $P<0.01$ ), 与TP、AK存在显著相关性( $P<0.05$ ); GMD表现为与TN、TK均存在极显著正相关性(相关系数为0.80~0.85,  $P<0.01$ ), 与SOM、TP、AK存在显著相关性( $P<0.05$ )。综上, 蔗叶

还田后SOM、MWD、GMD与土壤肥力指标相关性达到显著性水平, 这表明蔗叶还田较于不还田能够使土壤养分含量与团聚体之间相关性更高, 有利于土壤肥力的提升。

### 3 讨论

为探究蔗叶还田与施肥模式的最优组合, 本研究对蔗叶还田下不同施肥模式中土壤养分含量、SOM及团聚体粒级分布、MWD、GMD等指标进行分析, 发现蔗叶还田配合施肥对土壤养分含量(TN、TP、TK、AN、AP、AK)均具有提升效果, 其中有机肥替代和优施化肥与不施肥相比, 除AK外其余养分含量提升效果均达到了显著性水平, 与常规施肥相比显著提升了TN、TK含量。这可能是由于有机肥替代化肥及优施化肥在蔗叶还田条件下为微生物提供了生命活动所需的营养元素(尤其是氮素), 从而增加了土壤微生物丰度。随着土壤细菌和真菌多样性的增加, 对土壤氮循环趋于平稳起促进作用, 进而有效减少氮素的损失<sup>[22]</sup>。同时秸秆还田后当季钾素释放率可达85%<sup>[23]</sup>, 使钾素含量得到极大地提高, 这些由秸秆腐解产生的养分含量最终归于土壤, 从而对土壤N、P、K含量起到提升效果。此外, 本研究结果表明蔗叶还田下各施肥处理均不同程度地提高了土壤pH, 降低了土壤容重, 并提升了SOM含量, 其中SF1、SFC相较于SFO提升效果更显著。这表明蔗叶还田条件下减少化肥施用量, 采用鸽

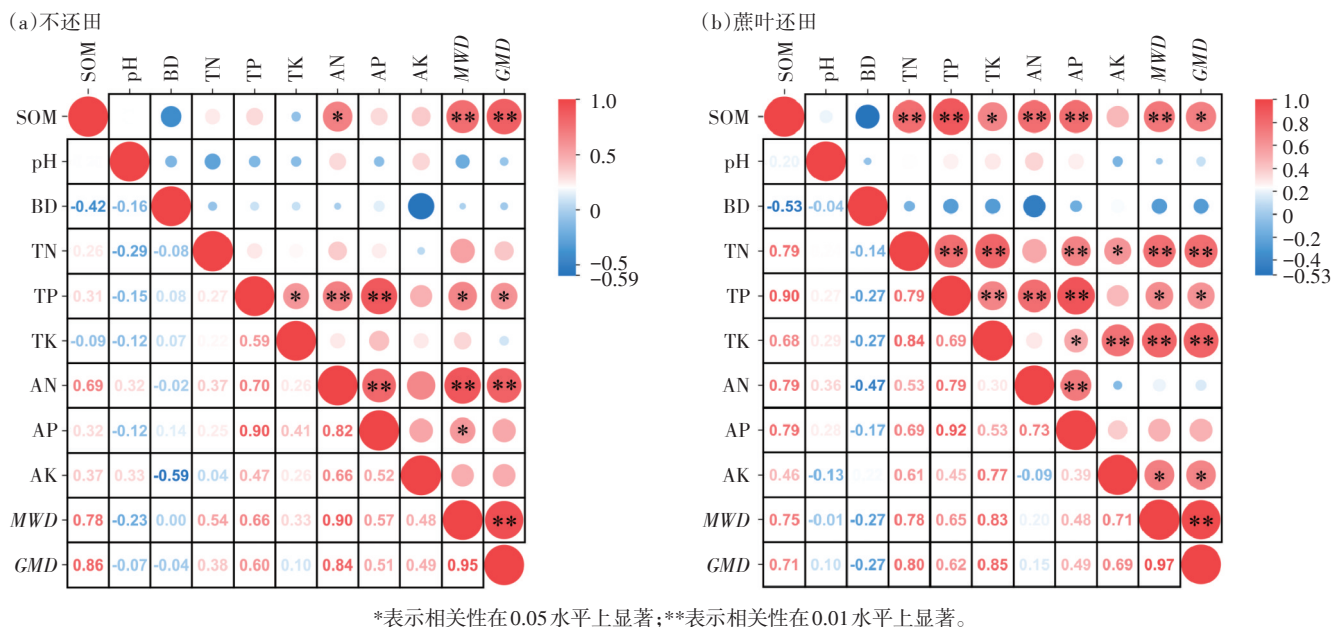


图6 不同还田方式下土壤肥力与MWD、GMD相关性分析

Figure 6 Correlation analysis of soil fertility with MWD and GMD under different straw returning methods

粪有机肥替代化肥可以有效促进SOM含量的提升。其原因可能是秸秆还田有效增加了土壤的孔隙结构<sup>[24]</sup>,并随着秸秆的腐解过程产生大量腐殖物等有机物质,这些腐解产物中含有大量有机阴离子和部分碳酸盐对土壤酸化进行调控<sup>[25]</sup>,从而降低土壤容重、减缓土壤酸化、提升SOM含量。秸秆还田伴随有机肥的施加使秸秆中木质素、半纤维素的含量有效降低,进一步促进秸秆腐解<sup>[26-27]</sup>以及微生物的生长繁殖。通过提高土壤微生物活性,又可加快微生物对秸秆养分、土壤有效态物质的释放与分解<sup>[28]</sup>,并促进SOM与土壤养分含量的提升。

此外,本研究中蔗叶还田比不还田各施肥处理<0.25、0.25~1、>1 mm三种粒级团聚体分布比例呈现微团聚体比例下降、大团聚体比例升高的明显趋势,其中SF1处理>1 mm团聚体比例占比最高。这表明蔗叶还田与鸽粪代替有机肥15%处理能够促进微团聚体向大团聚体的转变,更有利于提高大团聚体比例。原因可能是由于蔗叶还田后腐解产生的多糖、木质素、纤维素等物质对大团聚体的形成起到了促进作用<sup>[29]</sup>。而蔗叶还田下施用有机肥一方面能够为土壤微生物提供丰富的碳源和氮源,从而提升微生物丰度及其新陈代谢能力,其代谢过程产生的分泌物可以有效促进微团聚体向大团聚体进行转变<sup>[30]</sup>。另一方面,SOM是微团聚体形成大团聚体重要的胶结物质,蔗叶还田配施有机肥施入土壤后通过加速SOM生成过程,从而促进了大团聚体的形成<sup>[31]</sup>。不同粒级团聚体分布比例直接影响团聚体MWD和GMD,二者作为衡量团聚体稳定性的重要指标,其数值越大则表明团聚体稳定性越高。本研究发现蔗叶还田不同程度地提升了MWD、GMD值,其中无论蔗叶是否还田均为鸽粪代替有机肥15%处理MWD、GMD值最高,且SF1相较于F1均有显著性提升。这表明蔗叶还田与鸽粪代替有机肥15%配合施用对提高团聚体稳定性具有积极的影响。这与Karami等<sup>[32]</sup>研究发现施用有机肥和秸秆能有效改善土壤理化性质、提升土壤质量及提高土壤团聚体稳定性的结论一致。其原因可能是秸秆腐解过程中产生的胶结剂(胞外聚合物、真菌菌丝)以及微生物转化过程产生的分泌物(胞外聚合物、真菌菌丝等)能够聚集微团聚体形成大团聚体,有利于团聚体稳定。此外,本研究中SF1处理显著提升了SOM含量,这也可能是促进土壤团聚体稳定性的重要原因。陆峰等<sup>[33]</sup>的研究表明,土壤SOM含量可以引起不同粒级团聚体含量的变化,从而对团聚体稳定性产生积极

影响。

相关性分析表明,蔗叶不还田条件下,AN与MWD、GMD呈极显著正相关,而TN与MWD、GMD的相关性并不显著,蔗叶还田后则恰恰相反。同时,蔗叶还田相较于不还田TK与MWD、GMD存在极显著正相关性,而AK则具有显著性正相关。其次SOM与土壤养分含量之间相关性增强达到显著性水平。综上,蔗叶还田相比不还田SOM、团聚体稳定性(MWD、GMD)与土壤养分含量之间关系更为复杂和密切。一方面秸秆还田配施有机肥可以改善土壤结构、提升SOM含量,进而促进微团聚体向大团聚体的转变并且提升土壤团聚体稳定性,另一方面团聚体稳定性的提升反过来增强了团聚体对于SOC的物理保护作用。何宇等<sup>[34]</sup>研究发现,稳定的大团聚体比例越高,N含量也越高。这可能是因为微团聚体通过根系、菌丝等胶结物质团聚形成大团聚体,而大团聚体能够隔绝微生物和氧气从而避免N素过多的分解损耗。李委涛等<sup>[35]</sup>也发现养分含量与团聚体稳定性呈显著相关,秸秆和有机肥的施加能够促使更多的养分富集在大团聚体内。

## 4 结论

- (1)蔗叶还田相较于不还田更有利于改善土壤肥力。
- (2)蔗叶还田下鸽粪有机肥替代15%化肥对土壤有机质、土壤养分含量显著提升了31.7%、21.0%~187.5%。
- (3)不同施肥模式均能提高大团聚(>1 mm)比例和平均质量直径、几何平均直径,其中蔗叶还田与鸽粪有机肥替代15%化肥提升效果最好。
- (4)蔗叶还田与鸽粪有机肥替代15%化肥施肥组合对于促进蔗叶还田利用、提升旱地红壤肥力、改善土壤结构效果最优。

## 参考文献:

- [1] LIU Y F, TAN Y M, LIANG D, et al. Effects of sugarcane leaf return and fertilizer reduction on maize growth, yield and soil properties in red soil[J]. *Plants*, 2023, 12(5): 1029.
- [2] 赵丽萍. 蔗叶还田对土壤理化性状、生态环境及甘蔗产量的影响[J]. *土壤通报*, 2014, 45(2): 500-507. ZHAO L P. Effect of trash returning on physical and chemical properties of soil, ecological environment and yields of sugarcane[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(2): 500-507.
- [3] STEWART G A, KINGSTON G. An estimate of the production of

- sugarcane tops and trash in Queensland[J]. *Resource Recovery and Conservation*, 1979, 4(3):239-246.
- [4] 孙星, 刘勤, 王德建, 等. 长期秸秆还田对土壤肥力质量的影响[J]. 土壤, 2007, 39(5):782-786. SUN X, LIU Q, WANG D J, et al. Effect of long-term straw application on soil fertility[J]. *Soils*, 2007, 39(5):782-786.
- [5] BARZEGAR A R, ASOODAR M A, ANSARI M. Effectiveness of sugarcane residue incorporation at different water contents and the proctor compaction loads in reducing soil compactibility[J]. *Soil and Tillage Research*, 2000, 57(3):167-172.
- [6] SPAIN A V, HODGEN M J. Changes in the composition of sugarcane harvest residues during decomposition as a surface mulch[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1994, 17:225-231.
- [7] MEIER E A, THORBURN P J, WEGENER M K, et al. The availability of nitrogen from sugarcane trash on contrasting soils in the wet tropics of north Queensland[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 75:101-114.
- [8] GALDOS M V, CERRI C C, CERRI C E P. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil[J]. *Geoderma*, 2009, 153(3):347-352.
- [9] TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2):141-163.
- [10] 刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2023, 60(3):627-643. LIU Y L, WANG P, WANG J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: progress and prospect[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(3):627-643.
- [11] GRAHAM M H, HAYNES R J, MEYER J H. Changes in soil chemistry and aggregate stability induced by fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa[J]. *European Journal of Soil Science*, 2002, 53(4):589-598.
- [12] 白雪冬, 和江鹏, 赵海超, 等. 冀西北旱作春玉米秸秆还田模式对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(21):58-62. BAI X D, HE J P, ZHAO H C, et al. Effect of spring maize straw returning model in northwest Hebei Province on soil aggregation stability[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2024, 52(21):58-62.
- [13] WANG Y W, QIN M G, ZHAN M, et al. Straw return-enhanced soil carbon and nitrogen fractions and nitrogen use efficiency in a maize-rice rotation system[J]. *Experimental Agriculture*, 2024, 60:e5.
- [14] 黄星瑜, 朱安繁, 姚锋先, 等. 有机肥替代部分化肥对油菜产量和品质、肥料利用率及土壤性质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(1):141-148. HUANG X Y, ZHU A F, YAO F X, et al. Effects of partial substitution of chemical fertilizer by organic fertilizer on rapeseed yield, quality and fertilizer utilization rate as well as soil properties[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2024(1):141-148.
- [15] 刘寒双, 崔纪菡, 刘猛, 等. 有机肥替代部分化肥对谷子产量、土壤养分及酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(7):71-81. LIU H S, CUI J H, LIU M, et al. Effects of replacing part of chemical fertilizer with organic fertilizer on Foxtail Millet yield, soil nutrients and enzyme activities[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(7):71-81.
- [16] 欧阳鸿伟, 欧金秀, 林兆里, 等. 还田作物秸秆腐解研究进展[J]. 中国农学通报, 2023, 39(30):74-81. OUYANG H W, OU J X, LIN Z L, et al. Advances in the decomposition of straw from returned crops[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(30):74-81.
- [17] 鲁耀, 郑波, 段宗颜, 等. 不同有机物料在植烟土壤中的腐解及活性有机碳、氮含量的变化[J]. 西南农业学报, 2014, 27(4):1616-1620. LU Y, ZHENG B, DUAN Z Y, et al. Decomposing and activity organic carbon and nitrogen content of different organic materials in tobacco soil[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 27(4):1616-1620.
- [18] 石琳, 金梦灿, 单旭东, 等. 不同形态氮素对玉米秸秆腐解与养分释放的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(2):277-285. SHI L, JIN M C, SHAN X D, et al. Influences of different forms of nitrogen fertilizer on the decomposition and release of nutrients from corn straw residue[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(2):277-285.
- [19] 符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 等. 氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(9):4538-4547. FU P J, JI H K, HE Q X, et al. Effects of nitrogen fertilizer application times and nitrification inhibitor on N<sub>2</sub>O emission from potted maize[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(9):4538-4547.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2008. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2008.
- [21] CAMBARDELLA C A, ELLIOTT E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(4):1071-1076.
- [22] GAO Y, LIANG A Z, HUANG D D, et al. Effects of long-term no-tillage on the functional potential of microorganisms involved in the nitrogen, phosphorus and sulfur cycles of black soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(4):913-920.
- [23] 刘晓永, 李书田. 中国秸秆养分资源及还田的时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21):1-19. LIU X Y, LI S T. Temporal and spatial distribution characteristics of crop straw nutrient resources and returning to farmland in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(21):1-19.
- [24] 苗运彩, 何铁虎, 袁俊吉, 等. 有机肥部分替代化肥对河套灌区土壤有机碳和向日葵产量的影响[J]. 北方农业学报, 2024, 52(1):46-54. MIAO Y C, HE T H, YUAN J J, et al. Effects of partial substitution of chemical fertilizer with organic fertilizer on soil organic carbon and sunflower yield in Hetao Irrigation Area[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2024, 52(1):46-54.
- [25] 许映慧, 杜建军, 范如芹, 等. 秸秆腐解产物阻隔红壤复酸化促进玉米生长[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(5):826-839. XU Y H, DU J J, FAN R Q, et al. Straw decayed products inhibit re-acidification of red soils and improve maize growth[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(5):826-839.
- [26] 许仁良, 王建峰, 张国良, 等. 秸秆、有机肥及氮肥配合使用对水稻

- 土微生物和有机质含量的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(13):3584-3590. XU R L, WANG J F, ZHANG G L, et al. Changes of microbe and organic matter content in paddy soil applied with straw, manure and nitrogen fertilizer[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(13):3584-3590.
- [27] 梁萌, 王志方, 马健, 等. 还田棉秆腐解与土壤理化性质对氮肥施用的响应特征[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(8):1427-1434. LIANG M, WANG Z F, MA J, et al. Study on the response characteristics of cotton stalk decomposition and soil physical and chemical properties to nitrogen fertilizer application[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2021, 58(8):1427-1434.
- [28] 董林林, 王海侯, 陆长婴, 等. 秸秆还田量和类型对土壤氮及氮组分构成的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4):1143-1150. DONG L L, WANG H H, LU C Y, et al. Effects of straw returning amount and type on soil nitrogen and its composition[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4):1143-1150.
- [29] 王秀娟, 解占军, 董环, 等. 秸秆还田对玉米产量和土壤团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. 玉米科学, 2018, 26(1):108-115. WANG X J, XIE Z J, DONG H, et al. Effects of straw returning on yield and soil aggregates composition and organic carbon distribution [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2018, 26(1):108-115.
- [30] BLAUD A, LERCH T Z, CHEVALLIER T, et al. Dynamics of bacterial communities in relation to soil aggregate formation during the decomposition of  $^{13}\text{C}$ -labelled rice straw[J]. *Applied Soil Ecology*, 2012, 53:1-9.
- [31] HATI K M, JHA P, DALAL R C, et al. 50 years of continuous no-tillage, stubble retention and nitrogen fertilization enhanced macro-aggregate formation and stabilisation in a Vertisol[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 214:105163.
- [32] KARAMI A, HOMAEE M, AFZALINIA S, et al. Organic resource management: impacts on soil aggregate stability and other soil physico-chemical properties[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 148:22-28.
- [33] 陆峰, 廖超林, 肖志鹏, 等. 烟-稻复种连作对红壤性水稻土团聚体组成及稳定性的影响[J]. 中国农学通报, 2022, 38(26):56-61. LU F, LIAO C L, XIAO Z P, et al. Effects of tobacco-rice continuous cropping on distribution and stability of soil aggregates in red paddy soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(26):56-61.
- [34] 何宇, 盛茂银, 王轲, 等. 土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及C、N、P化学计量特征的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(7):3752-3762. HE Y, SHENG M Y, WANG K, et al. Effects of land use change on constitution, stability, and C, N, P stoichiometric characteristics of soil aggregates in southwest China Karst[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(7):3752-3762.
- [35] 李委涛, 李忠佩, 刘明, 等. 秸秆还田对瘠薄红壤水稻土团聚体内酶活性及养分分布的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20):3886-3895. LI W T, LI Z P, LIU M, et al. Enzyme activities and soil nutrient status associated with different aggregate fractions of paddy soils fertilized with returning straw for 24 years[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(20):3886-3895.