

玉米秸秆还田对盐碱地土壤碳平衡和真菌群落多样性的影响

李磊, 李晓慧, 剡龙强, 朱志明, 樊丽琴, 纪立东

引用本文:

李磊, 李晓慧, 剡龙强, 朱志明, 樊丽琴, 纪立东. 玉米秸秆还田对盐碱地土壤碳平衡和真菌群落多样性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(11): 2507–2518.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0114>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黑土活性有机碳库与土壤酶活性对玉米秸秆还田的响应

贺美, 王立刚, 王迎春, 朱平, 李强, 沈欣

农业环境科学学报. 2018, 37(9): 1942–1951 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1725>

秸秆还田对麦玉系统土壤有机碳稳定性的影响

王学霞, 张磊, 梁丽娜, 宋宁宁, 刘东生, 王甲辰

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1774–1782 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0010>

秸秆和秸秆炭对黑土肥力及氮素矿化过程的影响

朱兴娟, 李桂花, 涂书新, 杨俊诚, 郭康莉, 冀拯宇, 刘晓, 张建峰, 姜慧敏

农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2785–2792 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0165>

秸秆炭化物长期还田下农田镉风险研究

朱文彬, 王慎强, 赵旭, 汪玉

农业环境科学学报. 2019, 38(1): 117–123 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0032>

转双价基因棉SGK321不同秸秆还田量对土壤线虫群落的影响

李静, 蔡连贺, 刘瑞华, 凤春, 李刚, 杨殿林, 赵建宁

农业环境科学学报. 2019, 38(4): 871–881 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1034>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李磊, 李晓慧, 剡龙强, 等. 玉米秸秆还田对盐碱地土壤碳平衡和真菌群落多样性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(11): 2507–2518.

LI L, LI X H, YAN L Q, et al. Analysis of soil carbon balance and fungal community diversity in saline-alkali soil under chopped straw returning[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(11): 2507–2518.

玉米秸秆还田对盐碱地土壤碳平衡和真菌群落多样性的影响

李磊^{1,5}, 李晓慧², 剡龙强³, 朱志明⁴, 樊丽琴^{1,5}, 纪立东^{1,5*}

(1. 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 银川 750002; 2. 宁夏回族自治区国土资源调查监测院, 银川 750002; 3. 甘肃农业大学, 兰州 730070; 4. 宁夏农技推广总站, 银川 750001; 5. 国家农业环境银川观测试验站, 银川 750002)

摘要:为探明粉碎秸秆还田量对宁夏银川北部地区土壤碳平衡及真菌群落多样性的影响,实现农业废弃物资源化利用、固碳减排、盐碱地改良的目标。研究建立2020—2022年短期粉碎秸秆还田试验,依据秸秆原位消纳原则,设置全量还田(CS9000)、2/3全量还田(CS6000)、1/3全量还田(CS3000)、未还田(CS0)4个处理,分析还田2年后不同还田量对土壤碳排放、水热盐碱因子变化及真菌微生物群落多样性影响。结果表明:相比CS0处理,粉碎秸秆还田后土壤全盐降低7.94%~19.57%,地温提高0.11~0.58℃,其中,CS9000处理抑盐增温效果明显,同时,该处理显著增加碳排放量与微生物异养呼吸碳,而CS6000处理相比其他处理显著增加净初级生产力固碳量,净生态系统生产力固碳量也分别比CS9000、CS3000、CS0处理显著增加27.11%、29.41%、35.22%。通过计算碳收支平衡得出CS6000、CS3000处理下农田生态系统是大气CO₂的“汇”,其中,CS6000处理对碳平衡提升效果最好,有助于增加土壤碳汇。另外,粉碎秸秆还田后土壤真菌多样性变化较大,CS6000处理相比CS0处理显著提高 S_{chao1} 、 H_{shannon} 指数,且该处理可明显增加子囊菌门(Ascomycota)、粪壳菌纲(Sordariomycetes)、被孢霉属(*Mortierella*)、镰刀菌属(*Fusarium*)优势群落相对丰度。从固碳减排、微生物多样性的角度考虑,粉碎秸秆还田量为6 000 kg·hm⁻²为该地区最佳还田量。

关键词:粉碎秸秆;碳平衡;净生态系统生产力;CO₂排放通量;真菌;多样性

中图分类号:S141.4;S156.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)11-2507-12 doi:10.11654/jaes.2023-0114

Analysis of soil carbon balance and fungal community diversity in saline-alkali soil under chopped straw returning

LI Lei^{1,5}, LI Xiaohui², YAN Longqiang³, ZHU Zhiming⁴, FAN Liqin^{1,5}, JI Lidong^{1,5*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China; 2. Ningxia Survey and Monitor Institute of Land and Resources, Yinchuan 750002, China; 3. Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 4. Ningxia Agricultural Technology Extension Station, Yinchuan 750001, China; 5. National Agricultural Environment Yinchuan Observation and Experiment Station, Yinchuan 750002, China)

Abstract: This study aimed to explore the effect of crushed straw returning on soil carbon balance and fungal community diversity in northern Yinchuan, Ningxia, and to achieve the goal of resource utilization of agricultural waste, carbon sequestration, emission reduction, and saline-alkali land improvement. Here, a short-term chopped straw returning experiment was established between 2020 and 2022.

收稿日期:2023-02-18 录用日期:2023-05-11

作者简介:李磊(1991—),男,研究实习员,主要从事盐碱地改良利用及废弃物资源化利用研究。E-mail: lilei867@163.com

*通信作者:纪立东 E-mail: jili521010@163.com

基金项目:宁夏自然科学基金项目(2021AAC03272);宁夏回族自治区农业高质量发展和生态保护科技创新示范项目(NGSB-2021-11-07)

Project supported: Natural Science Foundation of Ningxia (2021AAC03272); Ningxia Hui Autonomous Region Scientific and Technological Innovation Demonstration Project of Agricultural High-quality Development and Ecological Protection (NGSB-2021-11-07)

According to the principle of in situ absorption of straw, four treatments of total return (CS9000), 2/3 of total return (CS6000), 1/3 of total return (CS3000), and non-return (CS0) were used to analyze the effects of different returning amounts on soil carbon emission, water, heat, salt and alkali factors, and fungal microbial community diversity. The results revealed that compared with CS0 treatment, the total salt of soil decreased by 7.94%–19.57% and the ground temperature increased by 0.11–0.58 °C after large amount of straw returning. Among them, the effect of salt inhibition and warming was evident under CS9000 treatment, and the treatment significantly increased carbon emissions and microbial heterotrophic respiration carbon. Compared with other treatments, CS6000 treatment significantly increased net primary productivity carbon sequestration, and net ecosystem productivity carbon sequestration also significantly increased by 27.11%, 29.41%, and 35.22%, respectively, compared with CS9000, CS3000, and CS0. The carbon balance shows that the farmland under CS6000 and CS3000 treatments was the “sink” of atmospheric CO₂ in the ecosystem. Among them, the CS6000 treatment exhibited the best effect on carbon balance, which was helpful in increasing soil carbon sink. In addition, the diversity of soil fungi changed greatly after large amount of straw returning. Compared with the CS0 treatment, the CS6000 treatment significantly increased the S_{chao1} and H_{shannon} indices, and this treatment exhibited a significant effect on the dominant communities of Ascomycota, Sordariomycetes, *Mortierella*, and *Fusarium*. From the perspective of carbon sequestration, emission reduction, and microbial diversity, a chopped straw returning amount of 6 000 kg·hm⁻² was optimal in this area.

Keywords: chopped straw; carbon balance; net ecosystem productivity; CO₂ emission; fungal; diversity

宁夏引黄灌区位于黄河上游下段,该地区土壤盐渍化与次生盐渍化问题受到了广泛关注,其问题集中表现为中、重度盐碱地面积减少,轻度盐碱地面积增加的趋势,盐碱地作为一种具有开发潜力的资源,充分利用对于粮食安全意义非凡^[1-3]。近年来,专家学者陆续在该地区从工程、物理、化学及生物角度为盐碱地改良利用做了大量工作。而在诸多改良利用措施中,基于固碳减排、农副产品资源高效利用的大背景下,秸秆还田无疑为最经济、环保且改良效果显著的农艺改良措施^[4-9]。为此,我国学者在还田种类、方式、深度等方面开展了具体研究^[10-12]。其中,中国农业科学院逢焕成、李玉义研究团队的秸秆“抑盐层”技术在宁、蒙灌区取得了很好的改良效果^[13]。然而,秸秆还田易受气候条件影响,秸秆腐解便成为关键环节^[14-16]。宁夏地区干旱少雨、昼夜温差大等特点,加之土壤微生物消耗氮源,降低了秸秆腐解速率与养分吸收。相比秸秆直接还田,粉碎形态有利于加快微生物的腐解进程,并且能够提高土壤微生物群落多样性及丰富度,同时也会降低土壤碳排放通量^[14-17]。诸多研究者在南方地区开展秸秆还田试验发现,玉米秸秆、稻秸还田均能够增加土壤真菌微生物多样性和群落丰富度^[18-23]。萨如拉等^[24]研究了西辽河灌区玉米秸秆还田对土壤真菌群落的影响,认为还田量为 6 kg·m⁻²可改变盐碱土壤中的菌属种类,增加土壤微生物群落的多样性;卢培娜^[25]在内蒙古连续3年秸秆还田量 11 250 kg·hm⁻²定位试验中得出,还田处理会增加土壤真菌丰富度和多样性。此外,王维钰^[26]研究认为西北地区秸秆全量

还田处理下碳排放通量相比未还田处理显著提高 3.6%~5.7%;任立军等^[27]的设施微区试验结果表明,秸秆还田条件下土壤温度、含水量影响土壤呼吸速率,进而改变土壤碳排放进程。

基于上述研究得出,秸秆粉碎还田促进土壤真菌微生物活性及增加土壤碳汇,且不同气候区适宜还田量有所差异。为明确宁夏银北灌区有利于土壤真菌微生物群落、固碳减排的秸秆最佳还田量及土壤关键影响因子,本文建立短期粉碎秸秆还田定位试验,分析不同还田量下生态系统碳平衡及土壤真菌微生物群落多样性变化特征,阐明秸秆还田改善效应,筛选最佳还田量,探讨土壤关键影响因子与真菌微生物、碳平衡的关系,以为盐碱地农艺改良利用、秸秆合理高效利用及农业“双碳”目标提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

于2020年10月在宁夏石嘴山市惠农区移民海燕村建立短期粉碎秸秆还田定位试验。该地区西依贺兰山,东临黄河,为典型大陆性气候,常年干旱少雨,年均降雨量 180 mm 左右,盛行西北风,平均风速 2~3 m·s⁻¹。土地盐碱化程度高、灌溉困难、基础薄弱。通过基础土壤样品分析,土壤质地为粉砂质壤土。土壤 pH 8.45,全盐 3.07 g·kg⁻¹,属于中度盐化水平。土壤盐分离子分析得出,阳离子以 Na⁺ 为主,平均占全盐总量的 35.67%,阴离子以 SO₄²⁻ 和 Cl⁻ 为主,分别平均占全盐含量的 23.31% 和 28.45%,属氯化物-硫酸盐盐渍土。参照中国土壤第二次普查分级,养分库容结果显

示有机质 $8.58 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效氮含量 $65.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 二者处于五级较低水平, 有效磷含量 $8.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 处于四级偏低水平, 速效钾含量 $189.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 处于二级丰富水平。

1.2 试验设计

本试验为短期粉碎玉米秸秆还田定位试验, 秸秆为农户上年自然风干的玉米秸秆, 常规分析秸秆碳、氮、磷、钾含量分别为 400.7 、 6.2 、 3.8 、 $12.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。采用单因素多水平随机区组设计, 以秸秆未还田(CS0)为对照, 分别设置 1/3 全量还田: 还田量为 $3\ 000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (CS3000); 2/3 全量还田: 还田量为 $6\ 000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (CS6000); 全量还田: 还田量为 $9\ 000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (CS9000)。另外增施氮肥调节 C/N 为 25:1, 其中 CS0 处理不施氮, CS3000 处理施氮量为 $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, CS6000 处理施氮量为 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, CS9000 处理施氮量为 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。每个处理 3 次重复, 共 12 个试验小区, 每个小区面积为 48 m^2 ($6 \text{ m} \times 8 \text{ m}$), 各小区四周用土叠梗进行单排单灌, 小区之间保留 0.6 m 过道。还田措施于 10 月份完成, 翌年操作与上年相一致。秸秆施入前进行人工粉碎, 粉碎机粉碎至 $3 \sim 5 \text{ cm}$ 小段, 机械深耕 30 cm 翻压, 按照质量比 100:1 配施秸秆腐熟剂, 然后冬灌返田。每年 4 月中旬播种, 宽窄行 ($70 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$) 种植, 株距 20 cm 。播前统一施用过磷酸钙 $750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 硫酸钾 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 氮肥施用量为 $375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 40% 基施, 剩余的 60% 分别在玉米拔节期、抽雄期追施。灌溉水采用地下水 (矿化度为 $1.05 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 7.72) 漫灌。指示作物品种为青贮玉米“登海青贮 393”。

1.3 测定项目及方法

2020 年 10 月完成首次粉碎秸秆还田试验, 还田前采集土壤样品分析基础养分值。鉴于宁夏地区气候类型特征, 秸秆还田后腐解速率较慢, 因此监测土壤含水量、全盐及 pH 变化的时间选为 2021 年 10 月还田后 210、225、240、255、270、285、300、315 d, 采集 0~30 cm 土壤样品, 做好标签带回实验室测定。

1.3.1 土壤盐分组成及养分含量测定

采样方法为每一小区采五点, 采样深度为 0~30 cm 耕作层, 各点土样混合成一个土样, 装袋、标记后带回实验室, 风干、过筛。机械组成采用比重计法测定, 国际制计算; 容重采用环刀法测定; 土壤质量含水量采用铝盒烘干法测定; 土壤 pH 采用 pH 计测定 (水土比 2.5:1); 土壤电导率采用 DDS-11 电导率仪测定, 全盐含量由电导率与含盐浓度关系式

反推求出; 地下水矿化度直接通过 DDS-11 电导率仪测定读取; Na^+ 采用火焰光度计法, Cl^- 采用 AgNO_3 滴定法, SO_4^{2-} 采用 EDTA 间接络合滴定法测定; 有机质采用重铬酸钾-浓硫酸加热法测定; 速效氮采用碱解扩散法测定; 速效磷采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定; 速效钾采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 醋酸铵溶液浸提-火焰光度计法测定^[28-29]。

1.3.2 土壤 CO_2 排放通量测定^[27]。

土壤 CO_2 排放速率采用 LI-8100A 土壤碳通量自动测定仪 (Li-Cor, Lincoln, NE, 美国) 测定。在测定之前的 2~3 d 将土壤环均匀插入土壤中, 尽可能减小土壤扰动造成的实验误差。每个处理设置 3 个重复, 每个重复测定 3 次。测定时间与土壤 pH、全盐及含水量指标监测保持同步, 周期为 15 d, 选取天气晴朗的上午 08:00—11:00 时间段测定土壤 CO_2 排放速率, 同时采用地温计读取土壤温度。

$$F_{\text{CO}_2} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{F_{i+1} + F_i}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \times 0.1584 \times 24 \times 10 \right] \quad (1)$$

式中: F_{CO_2} 为土壤 CO_2 排放通量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; F_i 为第 i 次测定的土壤 CO_2 排放速率, $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; $(t_{i+1} - t_i)$ 为连续两次测定间隔时间, d; n 为测定的次数; $0.1584 \times 24 \times 10$ 是将碳排放数值单位 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 转换为 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的系数。

1.3.3 植株生物量与养分测定

在青贮玉米收获期, 每个小区采取 5 株青贮玉米, 清洗根系后装入网袋挂上标签后带回实验室分成根、地上部及籽粒 3 部分, 样品切碎, 在 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 杀青 30 min 后调温至 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至质量恒定, 然后用电子秤称量其生物量并记录。最后, 样品用高速粉碎机粉碎过 0.25 mm 筛, 采用重铬酸钾-硫酸氧化法测定植株全碳含量, 平均含量为 40.45%。而净初级生产力 (NPP) 是玉米收获时地上所有生物量、籽粒生物量及地下部分根生物量总和, 将其乘以植株全碳含量求得地上与地下部分固定碳总和 (C_{NPP})^[30]。

1.3.4 真菌微生物多样性测定

目前 AccuITSTM 真菌绝对定量测序服务项目主要包括真菌 ITS1 和 ITS2 区域检测, AccuITSTM 真菌绝对定量实验部分流程包括: 样本质量检测, 目的区域预扩增, 样本真菌拷贝数含量预估, 添加 spike-in DNA, 文库构建与质检, 样本上机测序。本项目引物信息, 目的区域 ITS2: Primer F=Illumina adapter sequence1 + GCATCGATGAAGAACGCAGC;

Primer R=Illumina adapter sequence 2 + TCCTCC-GCTTATTGATATGC。

1.4 相关指标计算

1.4.1 碳平衡计算

采用 Woodwell 等^[31]提出的净生态系统生产力固定碳(C_{NEP})与有机肥碳投入量(C_{input})计算土壤碳平衡(C_B), C_B 为正值时,表明此农田是大气 CO_2 的“汇”,反之,则为大气 CO_2 的“源”。计算公式为:

$$C_B = C_{NEP} + C_{input} \quad (2)$$

$$C_{NEP} = C_{NPP} - C_{RM} \quad (3)$$

$$C_{RM} = C_E \times 0.865 \quad (4)$$

$$C_E = F_{CO_2} \times 0.2727 \quad (5)$$

式中: C_{RM} 为土壤微生物异养呼吸碳排放量; C_E 为玉米生育期碳排放量, $kg \cdot hm^{-2}$; 0.865 为土壤微生物异养呼吸转化系数; 0.2727 为 C 占 CO_2 分子量的比例^[31-32]。

1.4.2 多样性指数计算

S_{chao1} 用于估计样本中物种总数,数值越大代表物种越多; $H_{shannon}$ 、 $D_{simpson}$ 用来估算样本中微生物的多样性, $H_{shannon}$ 值越大,说明群落多样性越高, $D_{simpson}$ 指数值越大,说明群落多样性越低。

$$S_{chao1} = S_{obs} + \frac{n_1(n_1 - 1)}{2(n_2 + 1)} \quad (6)$$

$$H_{shannon} = - \sum_{i=1}^{S_{obs}} \frac{n_i}{N} \ln \frac{n_i}{N} \quad (7)$$

$$D_{simpson} = \frac{\sum_{i=1}^{S_{obs}} n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)} \quad (8)$$

式中: S_{obs} 表示实际测量处的 OTU 数目; n_i 表示第 i 个 OTU 含有的序列数目; N 表示所有的序列数; n_1 表示只含有 1 条序列的 OTU 数; n_2 表示只含有 2 条序列的 OTU 数。

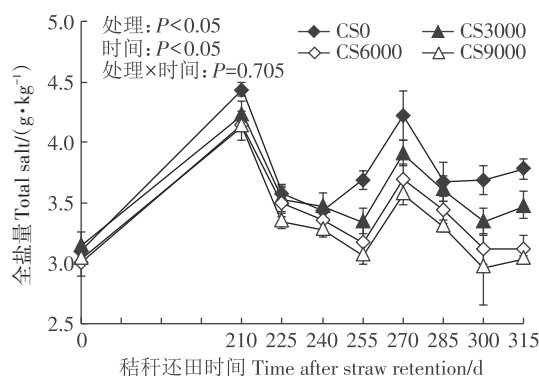
1.5 数据分析与处理

试验数据采用 Excel 2003 软件进行整理,利用 SPSS Statistics 17.0 单因素和双因素方差分析(ANOVA)比较土壤盐分、含水量、pH、地温和 CO_2 排放速率。采用最小显著性检验(LSD)、Duncun(SSR)新复极差法进行差异显著性检验($P < 0.05$, $n=5$);采用皮尔逊(Pearson)双尾检验法进行相关分析;采用 QIIME 软件通过计算真菌多样性指数来评估群落内的生物多样性和丰富度;采用 ANOVA 比较处理间多样性指数;采用 CANOCO version 5.0 软件进行冗余分析(RDA);采用 Excel 2003 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 粉碎秸秆还田量对土壤全盐、pH 及水热因子的影响

粉碎秸秆还田措施实施前,耕层土壤全盐含量平均为 $3.07 g \cdot kg^{-1}$,属于中度盐化水平;还田后 210 d 土壤全盐含量达到生育期返盐高峰期,含量平均为 $4.24 g \cdot kg^{-1}$,该时期还田处理相比未还田处理有降低土壤全盐含量的趋势;随后在还田 255 d 时土壤全盐处于第一个低谷期,该时期 CS9000 处理相比 CS0 处理可显著降低土壤全盐含量 16.50%;还田 270 d 后土壤全盐含量处于第二个返盐高峰期,相比秸秆还田后 210 d 的全盐含量有所降低,平均降幅为 4.95%~13.73%;还田 270 d 之后全盐含量稳定下降,在还田 315 d 时还田处理相比未还田降低了 7.94%~19.57%,其中 CS9000 处理降幅最大(图 1)。耕层土壤 pH 平均水平在 8.45 左右,还田后土壤 pH 变化较为稳定(图 2)。耕层土壤含水量在各处理间变化趋势一致,240 d 后还田处理土壤质量含水量相比未还田处理均有小幅度增加,且随着还田量增加,土壤含水量表现为增加趋势(图 3)。各处理耕层土壤地温在还田后 315 d 内均随着生育期推延呈现为先增加后降低的趋势,且处理间无显著性差异,还田后 285 d 时各处理土壤温度最高,其中,CS9000 处理相比 CS0 处理可增加土壤温度 $0.50 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。综合整个生育期内土壤温度发现,秸秆还田有助于增加土壤温度,其中 CS3000、CS6000、



处理为 CS0、CS3000、CS6000 及 CS9000;时间为土壤取样时间; P 为双因素方差分析(two-way ANOVA)的显著性水平采用 LSD。下同。

Treatment indicates the CS0, CS3000, CS6000 and CS9000 treatments; Time, the soil sampling time; P , the significance level of two-way ANOVA (two-tailed) by LSD. The same below.

图 1 粉碎秸秆还田量对土壤全盐量的影响

Figure 1 Influence of chopped straw returning amount on soil total salt

CS9000处理分别相比CS0处理增加土壤温度0.11、0.24、0.58℃。

2.2 粉碎秸秆还田量对青贮玉米生育期内土壤CO₂排放通量的影响

2.2.1 土壤CO₂排放通量

粉碎秸秆不同还田量下的土壤CO₂排放速率表

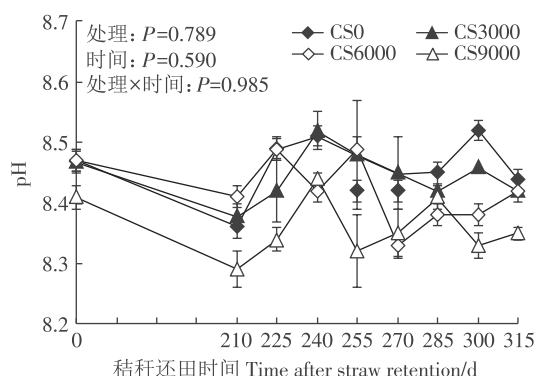


图2 粉碎秸秆还田量对土壤pH的影响

Figure 2 Influence of chopped straw returning amount on soil pH

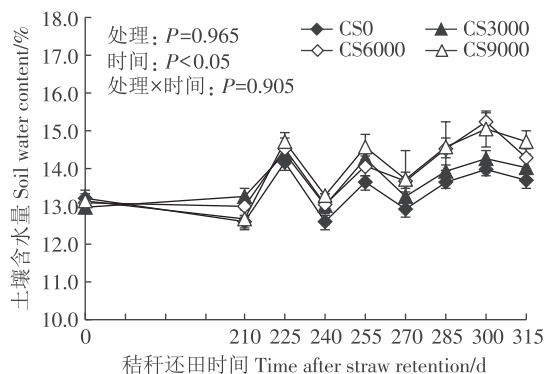


图3 粉碎秸秆还田量对土壤含水量的影响

Figure 3 Influence of chopped straw returning amount on soil water content

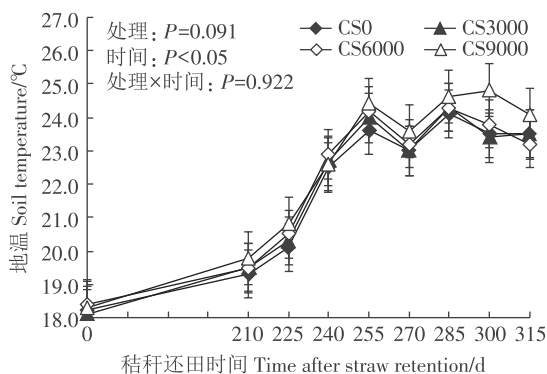


图4 粉碎秸秆还田量对土壤温度的影响

Figure 4 Influence of chopped straw returning amount on soil temperature

现出明显差别,综合发现,土壤CO₂排放速率随青贮玉米生育进程呈典型的“单峰”曲线,在还田后255 d时达到高峰点,随后排放速率逐渐降低,在还田后285 d时CO₂排放速率最低,随后的一个月表现出平稳变化。不同还田量处理在还田210~270 d内表现为CS6000、CS9000处理相比CS3000、CS0处理显著提高CO₂排放速率(图5)。通过计算青贮玉米生育期内CO₂排放通量,结果显示粉碎秸秆还田能提高CO₂排放通量,且随着还田量增加表现出增强趋势,其中,CS6000、CS9000处理相比CS0处理显著增加19.86%、25.50%(图6)。

2.2.2 土壤碳平衡参数

粉碎秸秆还田对青贮玉米净初级生产力固碳量的影响显著(表1),CS6000处理下青贮玉米净初级生

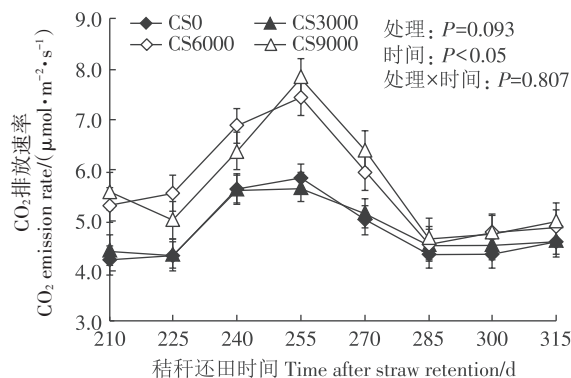
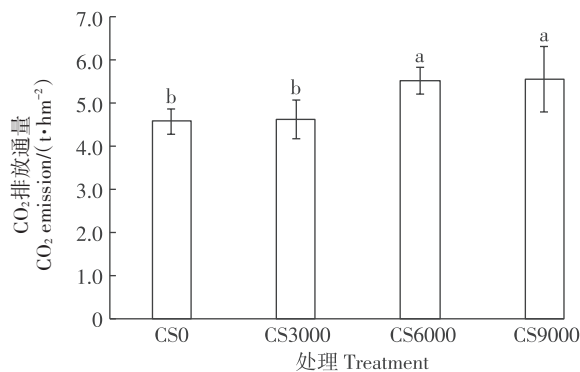


图5 粉碎秸秆还田量对青贮玉米生育期内土壤CO₂排放速率的影响

Figure 5 Influence of chopped straw returning amount on soil CO₂ emission rate



不同小写字母表示处理间在0.05水平上差异显著。下同。
Different lowercase letters show significant differences at the 0.05 level. The same below.

图6 粉碎秸秆还田量对青贮玉米生育期土壤CO₂排放通量的影响

Figure 6 Influence of chopped straw returning amount on soil average CO₂ emission

表1 粉碎秸秆还田量对土壤碳平衡参数的影响

Table 1 Influence of chopped straw returning amount on soil carbon balance parameters			
处理 Treatment	净初级生产力固碳量 $C_{NPP}/(t \cdot hm^{-2})$	碳排放量 $C_E/(t \cdot hm^{-2})$	微生物异养呼吸碳排放量 $C_{RM}/(t \cdot hm^{-2})$
CS0	4.23±0.32c	4.98±0.02b	4.31±0.02b
CS3000	4.42±0.05b	5.03±0.02b	4.35±0.02b
CS6000	5.72±0.12a	6.20±0.15a	5.37±0.13a
CS9000	4.50±0.13c	6.25±0.07a	5.41±0.06a

注:同一列不同小写字母表示处理间在0.05水平上差异显著。下同。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The same below.

产力固碳量相比其他处理显著提高,分别比CS9000、CS3000、CS0显著增加27.11%、29.41%、35.22%;碳排放量在各处理间大小依次表现为CS9000>CS6000>CS3000>CS0,其中,CS6000、CS9000处理分别比CS0显著增加24.50%、25.50%;微生物异养呼吸碳排放量的变化规律与碳排放量趋势一致。

2.2.3 农田生态系统碳平衡

图7表明,净生态系统生产力固碳量在各处理间存在显著差异,大小依次为CS6000>CS3000>CS0>CS9000,其中,CS3000、CS6000处理下 C_{NEP} 为正值,表明该处理下青贮玉米农田在生态系统尺度上均是大气CO₂的“汇”,而CS0、CS9000处理下 C_{NEP} 为负值,表明该处理下青贮玉米农田在生态系统尺度上均是大气CO₂的“源”。结合秸秆输入的碳量计算土壤碳平衡结果(图8)发现,CS3000、CS6000、CS9000处理土壤碳平衡为正值,足以补偿碳呼吸释放的碳,CS9000处理虽然外源输入碳含量最高,但其微生物异养呼吸释放碳也明显增加,导致碳平衡略低于CS6000处理。而

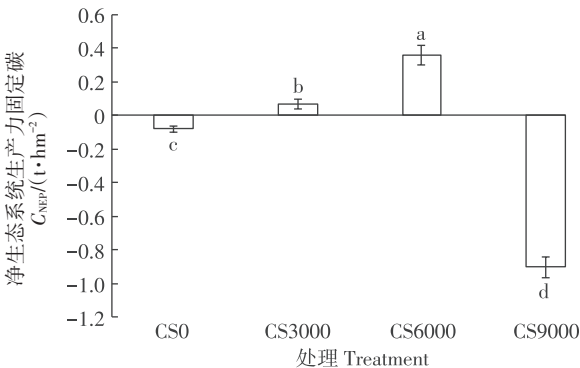


图7 粉碎秸秆还田量对青贮玉米生育期内净生态系统生产力固碳的影响

Figure 7 Influence of chopped straw returning amount on C_{NEP}

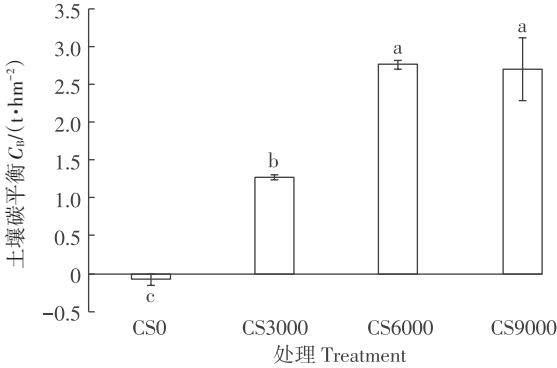


图8 粉碎秸秆还田量对青贮玉米生育期内土壤碳平衡的影响
Figure 8 Influence of chopped straw returning amount on C_B

CS0处理因未得到外源碳输入补充,表现为碳匮乏状态。由此可见,CS6000处理对于生态系统碳平衡提升效果相对较好,而CS0处理会打破生态系统碳平衡。

2.3 土壤酸、碱、水、热因子与土壤碳平衡相关性分析

通过相关性矩阵发现,净初级生产力固碳量与土壤全盐、pH间存在极显著负相关($P<0.01$),与含水量间存在极显著正相关($P<0.01$);碳排放量与含水量、温度间存在极显著($P<0.01$)、显著($P<0.05$)正相关,而与pH间存在极显著负相关($P<0.01$);碳平衡与土壤含水量间存在极显著正相关($P<0.01$),而与土壤pH间存在极显著负相关($P<0.01$)。由此可见,土壤全盐、pH显著抑制了净初级生产力固碳量,土壤含水量促进了净初级生产力固碳量,而温度与含水量共同加速了土壤碳排放量(表2)。

表2 相关性分析

Table 2 Correlation analysis

指标 Index	净初级生产力固碳量 C_{NPP}	碳排放量 C_E	净生态系统生产力固碳量 C_{NEP}	碳平衡 C_B
全盐 Total salt	-0.760**	-0.472	0.095	-0.570
含水量 SWC	0.840**	0.839**	-0.230	0.850**
pH	-0.765**	-0.726**	0.287	-0.819**
温度 Temperature	0.546	0.652*	-0.471	0.436

注:*在0.05水平(双尾)相关性显著;**在0.01水平(双尾)相关性极显著。
Note: * At level 0.05 (two-tailed), the correlation was significant; ** At level 0.01 (two-tailed), the correlation was extremely significant.

2.4 粉碎秸秆还田量对土壤真菌群落结构的影响

2.4.1 土壤真菌群落OTU数

操作分类单元(OTU)是在系统发生学研究或群体遗传学研究中,为便于分析而人为设置的分类单元标志。以97%的相似性对序列进行聚类,相似度大

于97%的序列将聚为同一个OTU。通过采用16s rDNA高通量测序技术,获得样本质控与统计,基于分类学分析统计门、纲、目、科、属、种7个分类水平的物种丰度,其结果如图9所示。各分类水平下不同处理间OTU数无显著差异,大小依次为CS6000>CS3000>CS0>CS9000,由此可见,适量粉碎秸秆还田措施会提高土壤真菌群落OTU数,但还田高量处理会降低土壤真菌群落OTU数。

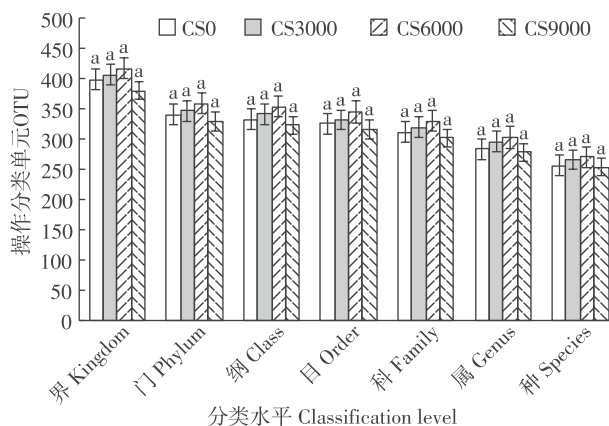


图9 粉碎秸秆还田量对土壤OTU数的影响

Figure 9 Influence of chopped straw returning amount on soil OTU

2.4.2 土壤真菌群落多样性指数

分析结果(表3)发现,CS3000、CS6000处理相比CS0处理会增加 S_{chao1} 指数,增幅分别为7.62%、23.96%,而CS9000处理相比CS0处理 S_{chao1} 指数降低23.88%; $H_{shannon}$ 指数在各处理间大小表现为CS6000>CS0>CS3000>CS9000,其中,CS6000处理相比CS0、CS9000处理显著增加10.21%、41.46%; $D_{simpson}$ 指数在CS9000处理下显著增加。由此可见,粉碎秸秆还田量6000 kg·hm⁻²有助于提高土壤真菌群落多样性与物种丰富度。

2.4.3 土壤真菌优势群落结构组成

基于HiSeq高通量测序,研究粉碎秸秆还田量下门、纲、科、属水平下真菌优势群落组成。结果(图10)发现,子囊菌门(Ascomycota)相对丰富度约占整个菌门的31.72%~43.75%,相比CS0处理,CS3000、CS6000处理增加了子囊菌门的相对丰富度,而CS9000处理降低了子囊菌门的相对丰富度,同时,该处理增加了Unidentified菌门的相对丰富度,此外,CS3000、CS6000、CS9000处理相比CS0处理明显降低了劣势菌门的相对丰富度。纲水平下,除Unidentified菌纲

表3 粉碎秸秆还田量对土壤真菌群落多样性指数的影响

Table 3 Influence of chopped straw returning amount on soil fungal community diversity index

处理 Treatment	S_{chao1}	$H_{shannon}$	$D_{simpson}$
CS0	393.67±31.63ab	4.21±0.21ab	0.04±0.01b
CS3000	423.67±23.67a	4.05±0.21ab	0.06±0.03ab
CS6000	488.00±39.95a	4.64±0.10a	0.02±0.00b
CS9000	299.67±32.0b	3.28±0.44b	0.15±0.05a

外,粪壳菌纲(Sordariomycetes)相对丰富度较高,其中,CS6000处理明显增加该菌纲相对丰富度;科水平下,CS3000、CS6000、CS9000处理相比CS0处理明显降低毛壳菌科(Chaetomiaceae)相对丰富度,毛壳菌科属于营腐生型真菌,是有较强分解纤维素能力的类群;属水平下,CS6000、CS9000处理相比CS0处理增加了镰刀菌属(*Fusarium*)的相对丰富度,镰刀菌能产生植物刺激素(赤霉素),这对于作物增产具有重要意义;CS3000、CS6000处理下被孢霉属(*Mortierella*)的相对丰富度明显增加,而CS9000处理明显降低该菌属的相对丰富度。整体而言,粉碎秸秆还田会改变不同分类水平下真菌群落结构组成,增加优势菌群的相对丰富度,且对于劣势菌群起到抑制作用。

2.5 真菌群落与土壤酸、碱、水、热因子RDA分析

利用RDA分析了土壤酸、碱、水、热因子与真菌群落组成的关系,结果见图11。RDA1和RDA2两轴可共同解释门、纲、科、属水平真菌群落结构差异的95.93%、95.58%、92.75%、96.11%。土壤酸、碱、水、热因子中对不同水平下真菌群落结构组成影响最大的因子为温度,其次为土壤含水量,温度和土壤含水量与优势菌群子囊菌门、Unidentified菌纲、粪壳菌纲、Unidentified菌科以及Unidentified菌属、镰刀菌属间呈正相关关系。

此外,门、纲水平下,CS6000与CS9000处理的样本点相对集中(图11A和图11B),科、属水平下仅CS6000处理的样本点相对集中,集中点表示同一处理的样品群落结构相似度较高,且各处理下样本点相对CS0处理明显区分(图11C和图11D),由此可见,粉碎秸秆还田处理改变了土壤真菌群落结构,而CS6000处理下样本相对稳定地改变了群落结构。

3 讨论

3.1 粉碎秸秆还田量对土壤碳排放及碳平衡的影响

土壤在微生物作用下,通过异养呼吸会向大气中释放CO₂,这是生态系统碳循环的重要进程,也是土

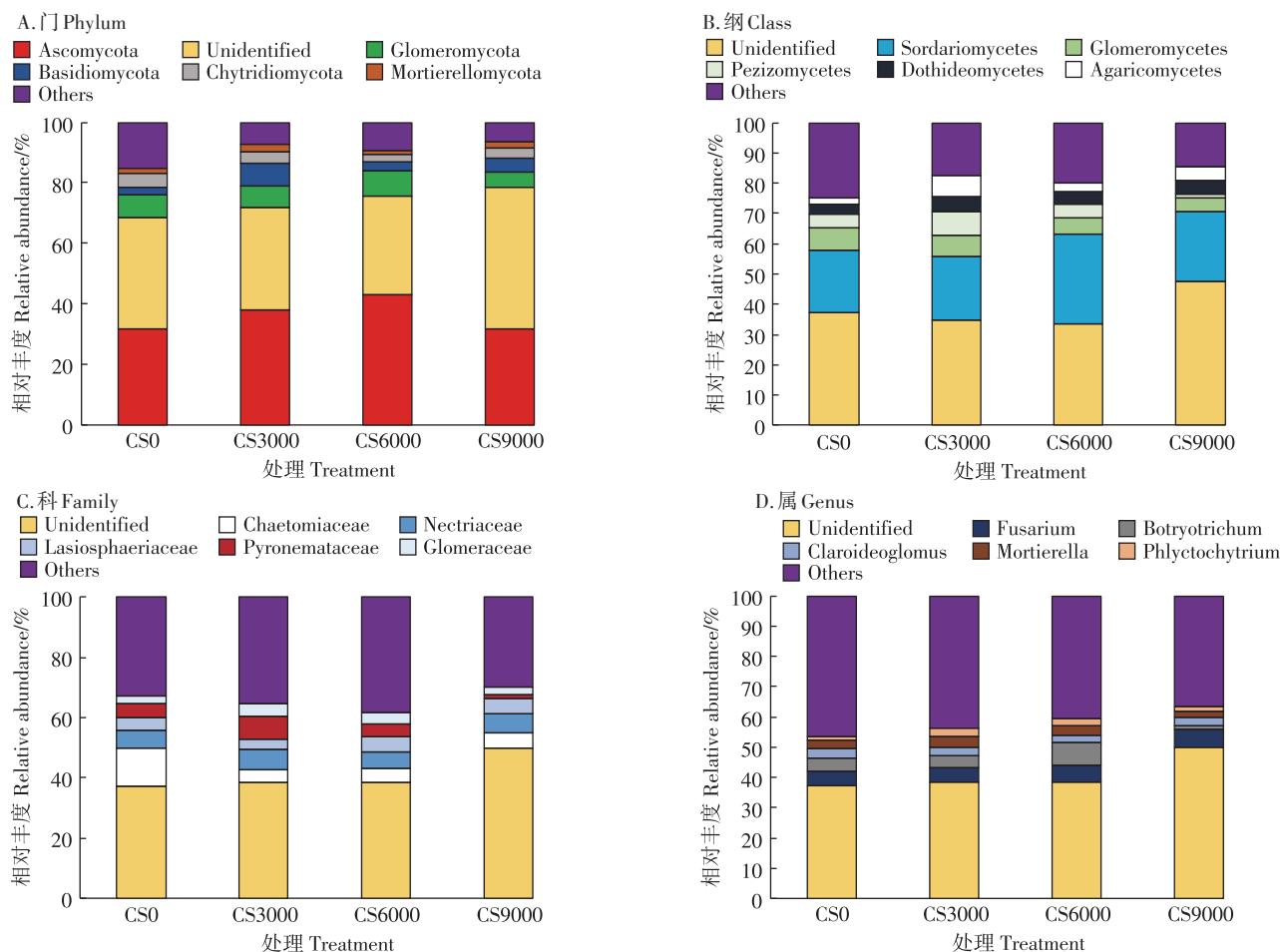
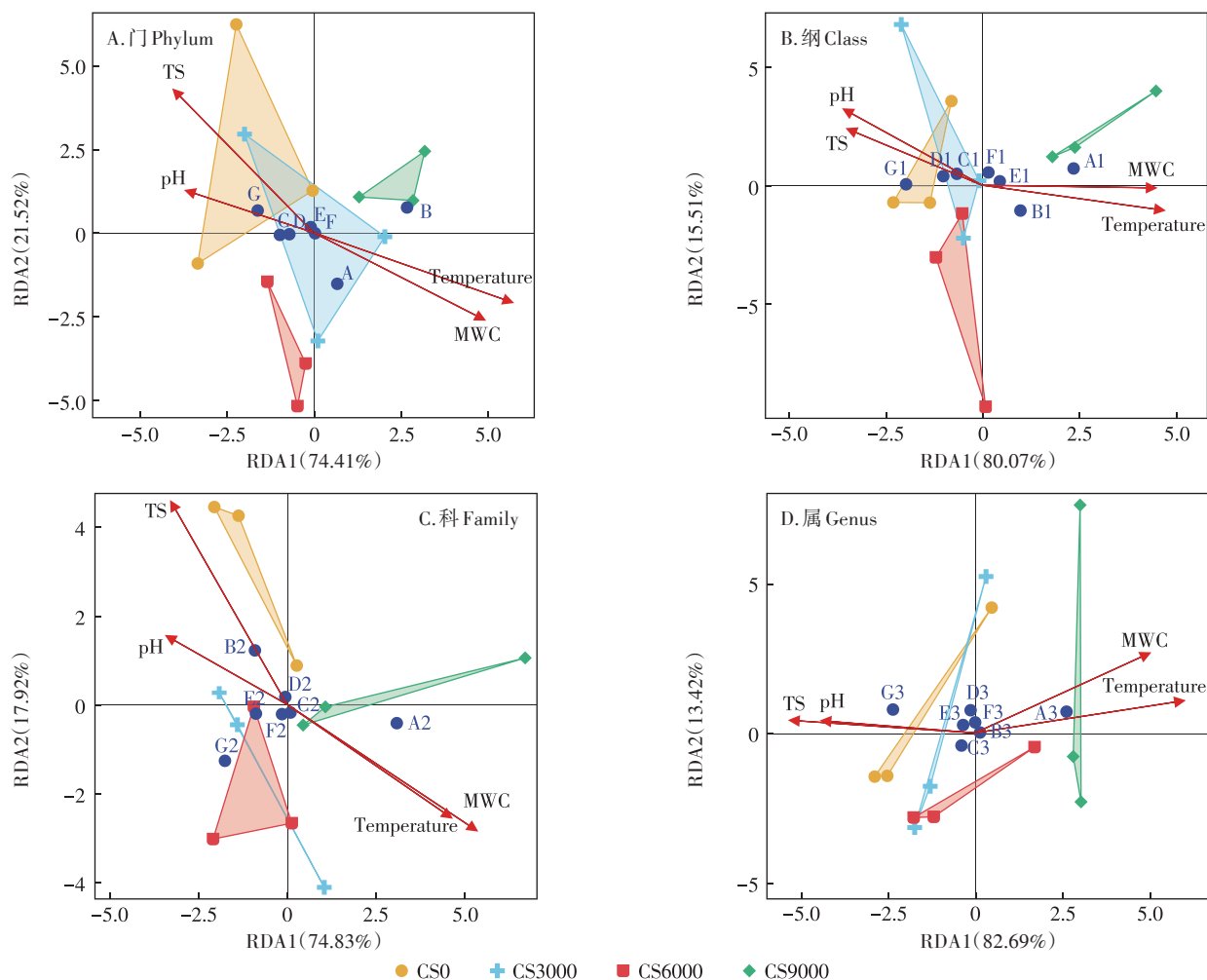


图10 粉碎秸秆还田量对土壤真菌优势群落结构的影响

Figure 10 Effects of chopped straw returning amount on soil fungal dominant community structure

壤碳库向外界环境输出的主要途径之一^[33]。秸秆还田是目前学界公认的一种固碳减排农艺改良措施,其可为土壤呼吸提供大量的碳源,同时,还田量和还田形态会明显影响土壤有机碳的矿化,进而对土壤碳排放产生重要影响^[34]。赵亚丽等^[35]的研究表明,粉碎秸秆还田集合深耕措施下作物生长季的土壤呼吸速率明显加快,提高了土壤CO₂排放量;余坤等^[36]的研究表明氮化粉碎秸秆还田有助于提高秸秆腐解速率,进一步加快土壤碳排放,呼吸速率相比覆盖还田可显著提高109.66%~170.13%;本研究结果表明粉碎秸秆还田量6 000 kg·hm⁻²和9 000 kg·hm⁻²处理显著增加土壤CO₂排放量,这与赵亚丽、余坤等的研究结果相一致。Bremer等^[37]研究发现,颗粒秸秆还田会降低CO₂排放量。而本研究与Bremer等的研究结果有所差别,分析原因可能是<5 cm的粉碎秸秆还田后由于体积小,容易被土壤中黏粒吸附,很难被微生物分解利用,进而降低了土壤CO₂排放量。

本研究表明粉碎秸秆还田量6 000 kg·hm⁻²处理能显著提高净初级生产力固碳量,其主要原因为粉碎秸秆还田降低了土壤全盐含量,减轻了土壤环境渗透压,提高了作物对养分离子的吸收,再者,粉碎秸秆还田后经微生物作用形成的腐植酸与土壤钙镁离子形成水稳性团聚体^[38],改善了砂壤土物理结构,提高了土壤保水能力,有效地抑制土壤水分损耗,为作物生长创造了良好环境,这两点都在本研究中得到证实。净生态系统生产力固碳量表明了陆地生态系统的源汇关系问题,该值如果为正值,则认为该生态系统为大气CO₂的“汇”,反之,则该生态系统为大气CO₂的“源”^[31]。本研究表明,还田量6 000 kg·hm⁻²处理与3 000 kg·hm⁻²处理下的生态系统为大气CO₂的“汇”,而还田量9 000 kg·hm⁻²处理与未还田处理下的生态系统为大气CO₂“源”。分析原因为高量秸秆还田下土壤孔隙通道增加,从而增加了土壤碳排放量,土壤异养呼吸释放的碳随之增加;同时,鉴于当地气候特



红色射线表示环境因子,射线越长表示影响越大;蓝色圆点表示样本群落,其中,A、B、C、D、E、F、G分别代表子囊菌门、球囊菌门、担子菌门、壶菌门、被孢霉门、未鉴定菌门、其他菌门;A1、B1、C1、D1、E1、F1、G1分别代表未鉴定菌纲、粪壳菌纲、球囊菌纲、盘菌纲、座囊菌纲、伞菌纲、其他菌纲;A2、B2、C2、D2、E2、F2、G2分别代表未鉴定菌科、毛壳菌科、丛壳科、毛球壳科、火丝菌科、球囊霉科、其他菌科;A3、B3、C3、D3、E3、F3、G3分别代表未鉴定菌属、镰刀菌属、毛霉属、近明囊霉属、被孢霉属、囊壶菌属、其他菌属。

Red ray represents environmental factors, the longer the ray, the greater the impact; Blue dots represent sample communities, where A, B, C, D, E, F, G respectively represent Ascomycota, Glomeromycota, Basidiomycota, Chytridiomycota, Mortierellomycota, Unidentified, Others; A1, B1, C1, D1, E1, F1, G1 respectively represent Unidentified, Sordariomycetes, Glomeromycetes, Pezizomycetes, Dothideomycetes, Garicomycetes, Others; A2, B2, C2, D2, E2, F2, G2 respectively represent Unidentified, Chaetomiaceae, Nectriaceae, Lasiosphaeriaceae, Pyrenomataceae, Glomeraceae, Others; A3, B3, C3, D3, E3, F3, G3 respectively represent Unidentified, *Fusarium*, *Botryotrichum*, *Claroideoglossum*, *Mortierella*, *Phlyctochytrium*, Others.

图 11 真菌群落与土壤酸、碱、水、热因子的 RDA 分析

Figure 11 RDA analysis of fungal community and soil acid, alkali, water and heat factors

征,秸秆在土壤中腐解较慢,且在土壤微生物作用下,消耗大量氮源,降低了养分输送量,提升净初级生产力固碳量效果不佳,导致成为大气 CO₂的“源”。通过碳平衡收支计算得出,粉碎秸秆还田由于自身有机碳输入,从而表现出极强的碳汇特征,而未还田处理因无外源碳输入,从而打破了碳平衡,由此可见,粉碎秸秆还田能够提高农田生态系统碳平衡,推荐还田量为 6 000 kg·hm⁻²。

3.2 粉碎秸秆还田量对土壤真菌群落多样性的影响

土壤真菌微生物作为土壤生态系统中最活跃成

分,参与动、植物残体的分解,成为土壤中氮、碳循环不可缺少的动力,其多样性越高,越有利于维持土壤生态平衡^[39]。辛励等^[40]通过连续 6 年的莱阳潮土区长期定位秸秆还田试验得出秸秆还田可有效地改善土壤微生态,进而间接地提高土壤肥力;Li 等^[41]的研究表明水稻秸秆腐解过程中真菌物种丰富度与多样性明显增加;张翰林等^[42]的 7 年稻麦轮作长期定位监测试验表明秸秆还田措施下,子囊菌门的相对丰度增幅较大;Zhao 等^[43]的研究结果表明,秸秆还田增加了土壤真菌群落 Chao1 指数,真菌群落组成中子囊菌门的

相对丰度显著增加,而本试验也得到相同结果,还田量 $6\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理下 S_{chao1} 指数、 H_{shannon} 指数明显增加,群落组成中子囊菌门为优势菌群,其有效促进了土体中的纤维素降解。被孢霉属作为土壤碳及养分转化的关键微生物成员,对于溶解土壤固定磷元素具有良好效果。李红宇等^[44]研究发现随秸秆还田量增加,被孢霉属的相对丰度呈增加的趋势,而本试验结果表明,还田量 $3\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $6\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理下被孢霉属的相对丰度明显增加,而还田量 $9\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理反而降低了该菌属的相对丰度,分析原因可能为被孢霉属为腐生型真菌,依靠土壤有机物料汲取养分生长,在适量的秸秆还田内其相对丰度明显增加,而过量秸秆因其碳源较多,微生物物质循环下消耗土壤大量氮源,降低了该菌属能量动力来源,从而导致丰度有降低趋势^[45]。

3.3 粉碎秸秆还田量对土壤碳平衡和真菌群落结构组成的影响因素分析

粉碎秸秆还田量通过对土壤全盐、pH、含水量及温度的影响而间接影响土壤碳平衡与真菌群落结构组成。碳平衡与土壤关键因子相关性分析发现,土壤温度和含水量与碳排放量间存在显著正相关关系,这主要与温度、水分增加土壤 CO_2 排放速率密切相关;而土壤 pH 与碳平衡间存在极显著负相关关系 ($P < 0.01$),不利于农田生态系统碳平衡维持。本研究采用 RDA 对各处理下的土壤真菌群落进行门、纲、科、属多维尺度分析,结果发现:土壤温度对群落结构组成影响最大,其次为土壤含水量,且二者关键因子与优势菌群子囊菌门、Unidentified 菌纲、粪壳菌纲、Unidentified 菌科以及 Unidentified 菌属、镰刀菌属间呈正相关关系。而粉碎秸秆还田可有效增加土壤含水量且提高土壤温度,证实了其可为微生物群落活动提供良好环境,促进优势菌群繁殖^[46]。

4 结论

相比粉碎秸秆未还田处理,还田处理能有效降低土壤全盐含量,提高土壤温度,且对土壤碳排放产生显著影响,其中, $9\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理在土壤抑盐、增温方面效果明显,同时,该处理显著增加碳排放量与微生物异养呼吸碳,造成土壤碳损失。还田 $6\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理下净初级生产力相比未还田处理可显著增加 61.33% ,且该处理显著提高净生态系统生产力与土壤碳平衡,表现为大气 CO_2 的“汇”,可增加土壤碳储量。同时,该处理也能显著提高土壤真菌 S_{chao1} 、

H_{shannon} 指数,且对子囊菌门、粪壳菌纲、被孢霉属、镰刀菌属等的相对丰度优势群落有明显增加效果。另外,相关性及 RDA 分析表明,土壤含水量、pH 对土壤碳排放及碳平衡影响较大,而温度与真菌群落结构组成关系密切。因此,从盐碱地土壤碳汇与真菌群落丰富度、多样性角度考虑,还田量 $6\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理效果最佳。但本试验因考虑土壤碳氮比平衡而引入不同氮肥用量,因此,仍需在下一步工作中补充碳氮交互对碳平衡和真菌群落多样性的影响机制。

参考文献:

- [1] 杨劲松,姚荣江,王相平,等. 中国盐渍土研究:历程、现状与展望[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 10–27. YANG J S, YAO R J, WANG X P, et al. Research on salt-affected soils in China: history, status quo and prospect[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(1): 10–27.
- [2] 刘涛. 宁夏引黄灌区盐碱荒地水肥盐与植物根系调控技术研究[D]. 北京:北京林业大学, 2020. LIU T. The control techniques of water-nutrient-salt and plant root in a saline-alkali wasteland of Ningxia Irrigation Area[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [3] 郭军成,王明国,耿荣,等. 宁夏银北灌区盐碱地盐渍化特征分析[J]. 中国农学通报, 2021, 37(5): 38–42. GUO J C, WANG M G, GENG R, et al. Salinity characteristics analysis of saline-alkali soil in Yinbei Irrigation district of Ningxia[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(5): 38–42.
- [4] 张叶叶,莫非,韩娟,等. 秸秆还田下土壤有机质激发效应研究进展[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1381–1392. ZHANG Y Y, MO F, HAN J, et al. Research progress on the native soil carbon priming after straw addition[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(6): 1381–1392.
- [5] 丛萍,逢焕成,王婧,等. 粉碎与颗粒秸秆高量还田对黑土亚耕层土壤有机碳的提升效应[J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 811–823. CONG P, PANG H C, WANG J, et al. Effect of returning chopped and pelletized straw at a high rate enhancing soil organic carbon in subsoil of farmlands of blacksoil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(4): 811–823.
- [6] 李磊,樊丽琴,吴霞,等. 秸秆还田对盐碱地土壤物理性质、酶活性及油菜产量的影响[J]. 西北农业学报, 2019, 28(12): 1997–2004. LI L, FAN L Q, WU X, et al. Effects of straw returning to field on physical properties, enzyme activity of saline alkali soil and yield of oil sunflower[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2019, 28(12): 1997–2004.
- [7] 曾莉. 不同氮肥用量下潮土中秸秆分解过程及其微生物多样性研究[D]. 重庆:西南大学, 2021. CENG L. Decomposition process and microbial diversity of straw in a fluvo-aquic soil under different nitrogen application rates[D]. Chongqing: Southwest University, 2021.
- [8] 石祖梁,贾涛,王亚静,等. 我国农作物秸秆综合利用现状及焚烧碳排放估算[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(9): 32–37. SHI Z L, JIA T, WANG Y J, et al. Comprehensive utilization status of crop straw and estimation of carbon from incineration in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(9): 32–37.

- [9] 马铭婧, 郝凤明, 尹岩, 等. 碳中和视角下秸秆处置方式对碳源汇的贡献[J]. 应用生态学报, 2022, 33(5): 1331–1339. MA M J, XI F M, YIN Y, et al. Contribution of straw disposal to carbon source and sink under the framework of carbon neutrality[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(5): 1331–1339.
- [10] CHEN Z, WANG H, LIU X, et al. Changes in soil microbial community and organic carbon fractions under short-term straw return in a rice-wheat cropping system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 165: 121–127.
- [11] 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.
- [12] SONG X L, SUN R J, CHEN W F, et al. Effects of surface straw mulching and buried straw layer on soil water content and salinity dynamics in saline soils[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2019, 100(1): 1–11.
- [13] 张宏媛, 逢焕成, 宋佳伟, 等. 亚表层有机培肥调控盐渍土孔隙结构与水盐运移机制[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 355–364. ZHANG H Y, PANG H C, SONG J K, et al. Effects of pore structure and water salt movement for saline soil under subsurface organic amendment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2022, 53(2): 355–364.
- [14] WANG X, SUN B, MAO J D, et al. Structural convergence of maize and wheat straw during two-year decomposition under different climate conditions[J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, 46(12): 7159–7165.
- [15] 谢佳贵, 侯云鹏, 尹彩侠, 等. 施钾和秸秆还田对春玉米产量、养分吸收及土壤钾素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1110–1118. XIE J G, HOU Y P, YIN C X, et al. Effect of potassium application and straw returning on spring maize yield, nutrient absorption and soil potassium balance[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(5): 1110–1118.
- [16] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 1–21. SONG D L, HOU S P, WANG X B, et al. Nutrient resource quantity of crop straw and its potential of substituting[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 1–21.
- [17] 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.
- [18] GUO L J, ZHANG Z S, WANG D D, et al. Effects of short-term conservation management practices on soil organic carbon fractions and microbial community composition under a rice-wheat rotation system[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2015, 51(1): 65–75.
- [19] SUN R, DSOUZA M, GILBERT J A, et al. Fungal community composition in soils subjected to long-term chemical fertilization is most influenced by the type of organic matter[J]. *Environmental Microbiology*, 2016, 18(12): 5137–5150.
- [20] 于寒, 梁烜赫, 张玉秋, 等. 不同秸秆还田方式对玉米根际土壤微生物及酶活性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(3): 305–311. YU H, LIANG X H, ZHANG Y Q, et al. Effects of different straw returning modes on the soil microorganism and enzyme activity in corn field[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(3): 305–311.
- [21] LOU Y, LIANG W, XU M, et al. Straw coverage alleviates seasonal variability of the topsoil microbial biomass and activity[J]. *Catena*, 2011, 86(2): 117–120.
- [22] WANG J, ZHANG H, LI X, et al. Effects of tillage and residue incorporation on composition and abundance of microbial communities of a fluvo-aquic soil[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2014, 65: 70–78.
- [23] 李鹏, 李永春, 史加亮, 等. 水稻秸秆还田时间对土壤真菌群落结构的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(13): 4309–4317. LI P, LI Y C, SHI J L, et al. Rice straw return of different decomposition days altered soil fungal community structure[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(13): 4309–4317.
- [24] 萨如拉, 杨恒山, 邵继承, 等. 玉米秸秆还田对盐碱地土壤真菌多样性的影响[J]. 土壤通报, 2017, 48(4): 937–942. SA R L, YANG H S, TAI J C, et al. Effect of maize straw returning on soil fungal diversity in saline alkali soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(4): 937–942.
- [25] 卢培娜. 菌肥与腐熟秸秆对盐碱地燕麦土壤微生态环境的调控机制[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021. LU P N. Regulatory mechanism of bio-fertilizer and rotten straw on soil microecological environment of oat in a saline-alkaline land[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [26] 王维钰. 秸秆周年投入与施肥对小麦-玉米轮作温室气体排放效应及农田生产力的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019. WANG W Y. Impact of annual straw management and fertilizer on agriculture ecosystem greenhouse gas emissions and productivity in wheat-maize rotation system[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.
- [27] 任立军, 赵文琪, 李金, 等. 不同施肥模式对设施土壤CO₂排放特征及碳平衡的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(4): 874–881. REN L J, ZHAO W Q, LI J, et al. Characteristics of soil CO₂ emission and carbon balance in greenhouse soil under different fertilization patterns[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(4): 874–881.
- [28] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [29] 李西开. 土壤农化分析结果计算式的正确表达[J]. 土壤通报, 2000, 31(6): 275–276. LI Y K. Correct expression of calculation formula for soil agrochemical analysis results[J]. *Journal of Soil Science*, 2000, 31(6): 275–276.
- [30] 周永杰, 谢军红, 李玲玲, 等. 长期少免耕与氮肥减量对全膜双垄沟播玉米产量及碳排放的调控作用[J]. 中国农业科学, 2021, 54(23): 5054–5067. ZHOU Y J, XIE J H, LI L L, et al. Effects of

- long-term reduce/zero tillage and nitrogen fertilizer reducing on maize yield and soil carbon emission under fully plastic mulched ridge-furrow planting system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(23):5054-5067.
- [31] 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.
- [32] KUZUYAKOV Y. Separating microbial respiration of exudates from root respiration in non-sterile soils: a comparison of four methods[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34:1621-1631.
- [33] 陈少鹏, 段跃芳. 中国农业碳效应研究的现状、热点与趋势[J]. *地球科学进展*, 2023, 38(1):86-98. CHEN S P, DUAN Y F. Research on status, focus, and developing trend of agricultural carbon effect in China[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2023, 38(1):86-98.
- [34] 王小彬, 武雪萍, 赵全胜, 等. 中国农业土地利用管理对土壤固碳减排潜力的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(11):2284-2293. WANG X B, WU X P, ZHAO Q S, et al. Effects of cropland-use management on potentials of soil carbon sequestration and carbon emission mitigation in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(11):2284-2293.
- [35] 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 等. 耕作方式与秸秆还田对土壤呼吸的影响及机理[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(19):155-165. ZHAO Y L, XUE Z W, GUO H B, et al. Effects of tillage methods and straw returning on soil respiration and its mechanism[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(19):155-165.
- [36] 余坤, 冯浩, 赵英, 等. 氨化秸秆还田加快秸秆分解提高冬小麦产量和水分利用效率[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(19):103-111. YU K, FENG H, ZHAO Y, et al. Ammoniated straw incorporation promoting straw decomposition and improving winter wheat yield and water use efficiency[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(19):103-111.
- [37] BREMER E, VAN H W, VAN K C. Carbon dioxide evolution from wheat and lentil residues as affected by grinding, added nitrogen, and the absence of soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1991, 11:221-227.
- [38] 宋依依, 曹阳, 段鑫盈, 等. 秸秆还田深度对土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. *土壤*, 2022, 54(2):344-350. SONG Y Y, CAO Y, DUAN X Y, et al. Effects of different straw-returning depths on soil aggregate composition and organic carbon distribution[J]. *Soil*, 2022, 54(2):344-350.
- [39] 曹云, 孙应龙, 姜月清, 等. 黄河流域净生态系统生产力的时空分异特征及其驱动因子分析[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(11):2101-2110. CAO Y, SUN Y L, JIANG Y Q, et al. Analysis on temporal-spatial variations and driving factors of net ecosystem productivity in the Yellow River Basin[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(11):2101-2110.
- [40] 辛励, 陈延玲, 刘树堂, 等. 长期定位秸秆还田对土壤真菌群落的影响[J]. *华北农学报*, 2016, 31(5):186-192. XIN L, CHEN Y L, LIU S T, et al. Fungal community development of long-term straw returning soil[J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 31(5):186-192.
- [41] LI P, LI Y, ZHENG X, et al. Rice straw decomposition affects diversity and dynamics of soil fungal community, but not bacteria[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2018, 18(1):248-258.
- [42] 张翰林, 白娜玲, 郑宪清, 等. 秸秆还田与施肥方式对稻麦轮作土壤细菌和真菌群落结构与多样性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2021, 29(3):531-539. ZHANG H L, BAI N L, ZHENG X Q, et al. Effects of straw returning and fertilization on soil bacterial and fungal community structures and diversities in rice-wheat rotation soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(3):531-539.
- [43] ZHAO S, QIU S, XU X, et al. Change in straw decomposition rate and soil microbial community composition after straw addition in different long-term fertilization soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 138:123-133.
- [44] 李红宇, 王志君, 范名宇, 等. 秸秆连续还田对苏打盐碱水稻土养分及真菌群落的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(2):15-23. LI H J, WANG Z J, FAN M Y, et al. Effects of continuous straw returning on nutrients of soda saline-alkaline paddy soil and fungal community[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(2):15-23.
- [45] 宁琪, 陈林, 李芳, 等. 被孢霉对土壤养分有效性和秸秆降解的影响[J]. *土壤学报*, 2022, 59(1):206-217. NING Q, CHEN L, LI F, et al. Effects of *Mortierella* on nutrient availability and straw decomposition in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(1):206-217.
- [46] ZHANG M M, ZHAO G X, LI Y Z, et al. Straw incorporation with ridge-furrow plastic film mulch alters soil fungal community and increases maize yield in a semiarid region of China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 167:104038.