

不同秸秆还田方式对和田风沙土土壤微生物多样性的影响*

顾美英¹ 唐光木² 葛春辉² 马海刚² 张志东¹ 徐万里^{2**}

(1. 新疆农业科学院微生物应用研究所/新疆特殊环境微生物实验室/绿洲养分与水土资源高效利用重点实验室 乌鲁木齐 830091; 2. 新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所 乌鲁木齐 830091)

摘 要 秸秆还田是有效利用秸秆资源的重要途径,能够提高土壤养分含量、调节土壤微生物的群落结构和多样性,但目前还缺乏不同秸秆还田方式对新疆沙化土壤肥力和微生物多样性影响的系统报道。为探索新疆沙化土壤肥力可持续提升模式,于 2010—2012 年在和田风沙土土壤上设置秸秆直接还田(NPKS)、过腹还田(NPKM, 15.0 t·hm⁻²)和炭化还田(NPKB1, 2.5 t·hm⁻²; NPKB2, 15.0 t·hm⁻²)定位试验,研究不同秸秆还田处理对和田风沙土土壤养分、微生物数量、土壤酶活性和 Biolog 碳源利用的影响。结果表明: 1)与单施化肥(NPK)相比,不同秸秆还田方式均能显著提高风沙土土壤养分含量,其中 NPKM 处理效果最好,其次是 NPKB2 处理, NPKS 和 NPKB1 处理分别为第 3 和第 4。2)不同秸秆还田方式对土壤微生物数量影响差异显著,均增加了土壤中细菌、放线菌和生理菌群的数量,与 NPK 处理相比,细菌数量 NPKB2 处理最高,放线菌数量 NPKM 处理最高,分别显著提高了 413.16%和 574.19%。但 NPKB1 和 NPKB2 处理对生理菌群数量的提升效果好于 NPKS 处理和 NPKM 处理。土壤酶活性,不同秸秆还田方式总体好于 NPK 处理, NPKM 处理的提升效果最好。3)Biolog 碳源利用分析表明不同秸秆还田方式均能提高风沙土土壤微生物活性和丰富度指数。主成分分析表明,不同秸秆还田方式土壤微生物群落明显不同,起分异作用的碳源主要为羧酸类和糖类。聚类分析显示 NPKB2 和 NPKM 处理之间、NPKB1 和 NPKS 处理之间土壤微生物功能相似。由此可以看出,不同秸秆还田方式均能显著提高和田沙化土壤微生物活性和功能多样性,但不同方式的增效不同。从 3 年定位试验结果看,秸秆过腹还田和炭化还田的效果较好,秸秆直接粉碎还田有增加土传病害的风险。该结果将为南疆沙化土壤肥力可持续提升提供一定的理论指导。

关键词 秸秆还田方式 土壤微生物活性 土壤微生物多样性 土壤养分 土壤酶 风沙土

中图分类号: S154.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)04-0489-10

Effects of straw incorporation modes on microbial activity and functional diversity in sandy soil*

GU Meiyi¹, TANG Guangmu², GE Chunhui², MA Haigang², ZHANG Zhidong¹, XU Wanli^{2**}

(1. Institute of Microbiology, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences / Xinjiang Laboratory of Special Environmental Microbiology / Key Laboratory of Nutrient and Water Resources Efficient Utilization of Oasis, Urumqi 830091, China; 2. Institute of Soil and Fertilizer and Agricultural Sparing Water, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China)

Abstract Straw incorporation to soil is an effective way to utilize plant straw resource. It improves soil fertility and regulates

* 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201503136)、国家自然科学基金项目(41161055, 41261059)、新疆维吾尔自治区科技支撑计划项目(201431108)和新疆自治区公益性科研院所基本科研业务经费项目(ky2012059)资助

** 通讯作者: 徐万里, 主要从事农业废弃物资源化利用的研究。E-mail: wlxu2005@163.com

顾美英, 主要从事土壤微生物生态方面的研究。E-mail: gmyxj2008@163.com

收稿日期: 2015-08-04 接受日期: 2015-12-17

* Supported by the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201503136), the National Natural Science Foundation of China (41161055, 41261059), Xinjiang Key Technology Support Program (201431108) and Xinjiang Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (ky2012059)

** Corresponding author, E-mail: wlxu2005@163.com

Received Aug. 4, 2015; accepted Dec. 17, 2015

soil microbial community structure and diversity. Despite this, there are few reports on the effect of different straw incorporation modes on soil fertility and microbial diversity in sandy soils in Xinjiang. Field trials were conducted with direct straw incorporation (NPKS), abdomen-digested straw incorporation (sheep manure application, NPKM, 15.0 t·hm⁻²) and carbonized straw incorporation (biochar application, NPKB1, 2.5 t·hm⁻² and NPKB2, 15.0 t·hm⁻²) to the field to evaluate the effects of different straw incorporation modes on soil nutrient, microbial quantity, enzyme activity and microbial carbon utilization in sandy soils in southern Xinjiang during the period of 2010–2012. The results showed that: 1) Compare with the control (chemical fertilization, NPK) treatment, different straw incorporation modes significantly improved soil nutrient of sandy soils. NPKM treatment was the best, followed by NPKB2 treatment, NPKS treatment and then NPKB1 treatment. 2) Different straw incorporation modes had considerable effect on soil microbial population. The treatments increased the populations of soil bacteria and actinomycete and the number of physiological groups of bacterial. Compared with NPK treatment, the population of bacteria was highest under NPKB2 treatment while the population of actinomycete was highest under NPKM treatment; increasing significantly by 413.16% and 574.19%, respectively. The number of physiological groups of bacterial under NPKB1 and NPKB2 treatments was higher than that under NPKS treatment. Soil enzymes activities of different straw incorporation modes were generally higher than that under NPK treatment, and NPKM treatment had the best effect on soil enzymes activities. 3) Biolog carbon resources utilization analysis showed that different straw incorporation modes improved soil microbial activity and richness index. Principal component analysis showed that obvious differences in soil microbial community among different straw incorporation modes. The differences in carbon resources utilization were mostly caused by carboxylic acids and carbohydrates. Cluster analysis showed that between NPKB2 and NPKM, and between NPKB1 and NPKS had similar microbial functions. The results indicated that different straw incorporation modes significantly improved soil microbial activity and functional diversity in sandy soils. However, the effect of soil improvement was different for different modes. The 3-years (2010–2012) experimental results suggested that abdomen-digested straw incorporation and carbonized straw incorporation to the field had better effects, while direct straw incorporation to the field increased the risk of soil borne diseases. The results added to the existing theoretical guidance on establishing modern eco-efficient fertilization modes in sandy soils in southern Xinjiang.

Keywords Straw incorporation mode; Soil microbial activity; Soil microbial diversity; Soil nutrient; Soil enzyme; Sandy soil

新疆和田地区位于塔克拉玛干大沙漠南缘, 生态环境脆弱, 气候干燥、降雨量小、风沙危害严重, 属极端干旱区, 风沙土是其主要的土壤类型^[1], 是新疆主要农业耕作土壤和低产土壤之一。由于该类土壤颗粒粗大、质地松散、水肥易流失, 潜在养分含量低, 限制了农业的可持续发展。因此增施有机肥、秸秆还田或绿肥, 以提高土壤有机质含量, 逐步改善土壤肥力是改良风沙土的主要措施^[2]。

研究表明, 秸秆还田既可充分利用秸秆资源, 提高土壤有机质含量, 又可减轻焚烧秸秆对生态环境的负面影响, 是发展有机可持续农业的有效途径^[3–4]。传统的秸秆还田方式中, 秸秆过腹还田虽可增加土壤养分含量和微生物活性, 但用量需取决于当地农牧业的生产水平^[5–6]; 秸秆粉碎直接还田是目前主要的秸秆利用方式, 能提高肥力、丰富微生物多样性和增加产量^[7–9], 但存在肥效缓慢、化感物质积累、病虫害风险加重、重金属和抗生素等的污染风险^[10–12]。近年来, 秸秆炭化还田作为新型秸秆还田方式日益受到人们的关注^[13–15]。秸秆炭化后生成的生物炭(biochar)是生物质在缺氧或有限氧气供应和相对较低温度下(<700 °C)热解得到的富碳固体产物, 由于具有多孔性、高阳离子交换量和低容

重, 能改善土壤的理化性质、提高微生物多样性, 在土壤性状改良、环境污染修复、节能减排等方面发挥着重要作用^[16–19]。

目前关于不同秸秆还田方式的培肥效果及对土壤微生物的增效作用已有很多报道^[20–22], 但传统的秸秆还田方式与炭化还田相比, 对土壤养分和微生物差异等的研究还较少^[23]。在新疆和田持水保肥能力较差的沙化土壤和枣农间作模式条件下, 这几种秸秆还田方式的培肥效果和对微生物多样性的提升作用还不是很清楚, 值得进行深入研究。本文以新疆和田农业科学研究所枣麦间作模式下沙化土壤改良效果定位试验为依托, 采用测定可培养微生物、Biolog 碳源利用及土壤酶相结合的方法, 对不同秸秆还田方式下沙化土壤微生物多样性进行研究, 为优化秸秆还田方式对沙化土壤肥力培育、微生物系统健康演替和作物产量提高等方面提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2010 年 4 月—2012 年 9 月在和田地区农业科学研究所试验田(37°16'N, 79°90'E)进行。该试

验田位于新疆南疆塔里木盆地南缘,气候属典型暖温带极端干旱荒漠气候,夏季炎热,冬季寒冷,四季分明,热量丰富,昼夜温差大,无霜期长,降水稀少,蒸发强烈,空气干燥,日照时间长(年日照时间达2 500~3 500 h),降水量少,空气干燥,年平均降水量为150 mm左右,农业栽培以核桃(*Carya illinoensis* Koch.)、红枣(*Ziziphus jujube* L.)与小麦(*Triticum aestivum* L.)间作种植为主,土壤类型为风沙土。

1.2 试验设计及供试材料

试验种植模式为和田地区典型红枣间作冬小麦,小麦收获后复播绿豆[*Vigna radiata* (Linn.) Wilczek.]的模式。红枣株距1.0 m,行距6.0 m,小麦区面积180 m²。试验在小麦-绿豆间作区设置5个处理,分别为:1)对照(NPK),常规化肥处理;2)对照+秸秆(NPKS),小麦秸秆和绿豆秆粉碎后直接还田;3)对照+常量秸秆炭(NPKB1),生物炭施用量2.5 t·hm⁻²,全量小麦秸秆7.5 t·hm⁻²转化为生物炭,转化率约为1/3计算;4)对照+增量秸秆炭(NPKB2),生物炭施用量15.0 t·hm⁻²;5)对照+秸秆过腹还田(羊粪有机肥)处理(NPKM),羊粪有机肥施用量15.0 t·hm⁻²。每个处理面积180 m²,大区试验,不设重复。小麦复播绿豆区5个处理化肥用量均一致,即基肥为磷酸二铵375.0 t·hm⁻²,硫酸钾75 t·hm⁻²,尿素作为追肥,分别在小麦返青、拔节和扬花孕穗期,分3次追入,施入量分别为75 t·hm⁻²、120 t·hm⁻²和120 t·hm⁻²。

试验前取基础土壤,测定砂粒、粉粒和黏粒含量分别为40.52%、52.82%和6.66%;有机质7.20 g·kg⁻¹,速效氮28.60 mg·kg⁻¹,速效磷8.2 mg·kg⁻¹,速效钾90.0 mg·kg⁻¹,pH 8.20。对供试材料养分进行分析,小麦秸秆炭含有机质(有机碳换算)670 g·kg⁻¹,速效磷82.2 mg·kg⁻¹,速效钾1 590 mg·kg⁻¹,pH 9.85;热解温度350~550 °C,裂解时间4~8 h。将生物炭磨碎并通过2 mm筛,使其混合均匀后施入0~20 cm土层。小麦秸秆含N 0.67%,P₂O₅ 0.30%,K₂O 0.58%。将小麦秸秆粉碎为2.0~8.0 cm长度后翻压入5~20 cm土层。绿豆秆含N 1.30%,P₂O₅ 0.32%,K₂O 0.50%;羊粪含有机质24.2%,N 0.72%,P₂O₅ 0.45%,K₂O 0.50%。腐熟的羊粪均匀抛洒后翻压施入0~20 cm土层。

1.3 土样的采集及测定方法

1.3.1 土样的采集

2012年8月采集绿豆收获期0~20 cm根际土壤样品。采用抖土法采集,挖取0~20 cm土层绿豆完整根系,并除去根围附近较大的土壤团块,轻轻抖

下绿豆根表面的土壤作为根际土壤。每个处理均匀划分为3段,分别采集3个土样,每个土样至少随机采集7个点混合。将土壤样品混合均匀后分成两份,一份鲜样于4 °C保存,进行微生物数量计数和Biolog测定;另一份风干过筛后用于测定土壤养分和土壤酶。

1.3.2 土壤养分的测定

按照常规方法进行土壤有机质、全氮、速效氮、速效磷、速效钾的测定^[24]。有机质测定采用重铬酸钾容量法,全氮测定采用半微量开氏法,速效氮测定采用碱解扩散法,速效磷测定采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法,速效钾测定采用醋酸铵浸提-火焰光度法。

1.3.3 土壤微生物数量测定

细菌、放线菌和真菌采用稀释平板涂抹培养计数法分析^[25]。细菌采用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基,放线菌采用改良的高氏一号培养基(每300 mL培养基中加3%重铬酸钾1 mL),真菌采用PDA培养基(每100 mL培养基加1%链霉素溶液0.3 mL)。微生物生理菌群数量均采用最大或然计数法(MPN法)计数^[25]。好氧性自生固氮菌采用阿须贝无氮培养基,纤维素分解菌采用赫奇逊氏培养基,氨化细菌用蛋白胨液体培养基,亚硝化细菌用铵盐培养基,反硝化细菌采用柠檬酸钠培养基。

1.3.4 土壤酶活性测定

土壤酶活性测定^[26]:磷酸酶采用磷酸苯二钠法,蔗糖酶采用3,5-二硝基水杨酸比色法,脲酶采用苯酚-次氯酸钠比色法,过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法,蛋白酶采用茚三酮比色法。

1.3.5 土壤微生物群落碳源代谢利用测定

采用Biolog ECO微平板法进行^[25]。称取10 g鲜土加入100 mL灭菌的生理盐水(0.85%)中,摇匀,静止片刻,然后将土壤样品稀释至10⁻³。取150 μL菌悬液接种到生态板的每一个孔中,25 °C恒温培养,每隔24 h分别在590 nm波长下读数,连续培养7 d。取120 h的平均光密度值进行主成分分析。

1.4 数据处理及统计分析

微平板孔中溶液吸光值平均颜色变化率(average well color development, AWCD)用于描述土壤微生物代谢活性,计算公式如下:

$$AWCD = \sum (Ci - Ri) / n \quad (1)$$

式中: Ci 为每个有培养基孔的吸光值; Ri 为对照孔的吸光值; n 为培养基孔数, Biolog Eco板 n 值为31。采用Simpson、Shannon和McIntosh 3个指数来表征土壤微生物群落功能多样性。其中Simpson指数(D)用于评估某些最常见种的优势度,Shannon指数(H)

用于评估物种的丰富度, McIntosh 指数(U)用于评估群落物种均匀度。计算公式如下:

$$\text{Simpson 指数}(D): D = 1 - \sum \frac{n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)} \quad (2)$$

$$\text{Shannon 指数}(H): H = - \sum p_i(\ln p_i) \quad (3)$$

$$\text{McIntosh 指数}(U): U = \frac{N - \sqrt{\sum n_i}}{N - \sqrt{N}} \quad (4)$$

式中: p_i 为第 i 孔的相对吸光值与所有整个微平板的相对吸光值总和的比值 $[(C_i - R_i) / \sum (C_i - R_i)]$, n_i 为第 i 孔的相对吸光值 $(C_i - R_i)$ 。

采用 DPS v9.50 版软件对所得到的数据进行方差分析、平均吸光值(AWCD)、多样性指数、主成分分析和聚类分析等。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)、最小显著差数法(LSD)进行多重比较差异显著性检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田方式对风沙土土壤养分的影响

从表 1 可以看出, 5 种秸秆还田方式对风沙土土

壤养分含量影响差异显著。与 NPK 处理相比, 土壤有机质和全氮含量秸秆还田处理(NPKS)和常量秸秆炭处理(NPKB1), 除 NPKB1 处理有机质含量显著提高 14.63%外, 其他差异不显著。增量秸秆炭和秸秆过腹还田处理均呈显著升高趋势, NPKM 和 NPKB2 处理有机质含量分别提高 17.07%和 37.80%, 全氮含量分别提高 33.33%和 16.67%。

与 NPK 处理相比, 土壤速效氮含量 NPKS 和 NPKB1 处理均呈显著下降趋势, 分别降低 4.39%和 9.40%; NPKM 处理显著提高 64.58%, 而 NPKB2 处理则显著下降 16.93%。速效磷含量 NPKS 处理显著升高 10.58%, 而 NPKB1 处理则显著降低 5.58%; NPKM 处理显著提高 21.15%, 而 NPKB2 处理则显著下降 9.33%。速效钾含量 NPKS 处理和 NPKB1 处理分别显著升高 48.57%和 13.33%; NPKB2 处理和 NPKM 处理分别显著提高 8.57%和 20.95%。总体而言, 秸秆直接还田和常量秸秆炭处理并没有显著增加全氮和速效氮的含量, 增量秸秆炭和过腹还田处理则增效明显。

表 1 不同秸秆还田方式对风沙土土壤养分含量的影响
Table 1 Effects of different straw incorporation modes on nutrient contents of sandy soil

处理 Treatment	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	速效氮 Available N (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg·kg ⁻¹)
NPK	0.82±0.01d	0.54±0.01c	31.90±2.25b	10.40±0.50c	105.00±8.72d
NPKS	0.85±0.01cd	0.54±0.01c	30.50±1.46c	11.50±0.20b	156.00±7.55a
NPKB1	0.94±0.03bc	0.54±0.01c	28.90±1.44d	9.82±0.12cd	119.00±6.08bc
NPKB2	1.13±0.04a	0.63±0.01b	26.50±1.87e	9.43±0.15d	114.00±4.58cd
NPKM	0.96±0.01b	0.72±0.03a	52.50±1.27a	12.60±0.56a	127.00±6.56b

NPK: 对照, 常规化肥处理; NPKS: 对照+秸秆处理, 小麦秸秆和绿豆秸秆粉碎后直接还田; NPKB1: 对照+常量秸秆炭处理, 生物炭施用量 2.5 t·hm⁻²; NPKB2: 对照+增量秸秆炭处理, 生物炭施用量 15.0 t·hm⁻²; NPKM: 对照+秸秆过腹还田(羊粪有机肥)处理, 羊粪有机肥施用量 15.0 t·hm⁻²。同列不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。NPK: normal chemical fertilizer application; NPKS: normal chemical fertilizer application with powdered wheat, mung bean straws incorporation; NPKB1: normal chemical fertilization plus cotton stalk biochar at 2.5 t·hm⁻² application; NPKB2: normal chemical fertilization plus cotton stalk biochar at 15.0 t·hm⁻² application; NPKM: normal chemical fertilization with sheep manure at 15.0 t·hm⁻² application. Different letters in the same column indicate significant difference at $P < 0.05$. The same below.

2.2 不同秸秆还田方式对风沙土土壤微生物群落结构的影响

从图 1 可看出, 与 NPK 处理相比, 不同秸秆还田方式土壤细菌和放线菌数量差异显著, 均呈增高趋势。其中 NPKB2 处理细菌数量显著提高 413.16%, NPKM 处理放线菌数量显著提高 574.19%。真菌数量除 NPKS 处理显著提高外, 其余处理土壤差异不显著, NPKB1 和 NPKM 处理则分别降低 30%和 10.00%。

从图 1 可看出不同秸秆还田方式显著影响风沙土土壤生态, 引起土壤中生理菌群数量的变化, 且差异显著。NPK 处理除自生固氮菌数量最高外

(5.00×10^5 cfu·g⁻¹), 其余 4 种生理菌群数量均处于较低水平。5 种生理菌群数量的增加幅度随有机肥种类不同而不同。与 NPK 处理相比, NPKS 处理显著增加了土壤氨化细菌和纤维素分解菌数量, 分别增加 566.67%和 450.00%。秸秆炭化后 NPKB1 处理增加了亚硝化细菌、反硝化细菌和纤维素分解菌数量, 分别增加 80.00%、328.57%和 450.00%。NPKB2 处理显著增加了氨化细菌、亚硝化细菌、反硝化细菌和纤维素分解菌数量, 分别增加 900.00%、80.00%、542.86%和 450.00%。NPKM 处理显著增加了土壤中反硝化细菌数量, 增加 185.71%。

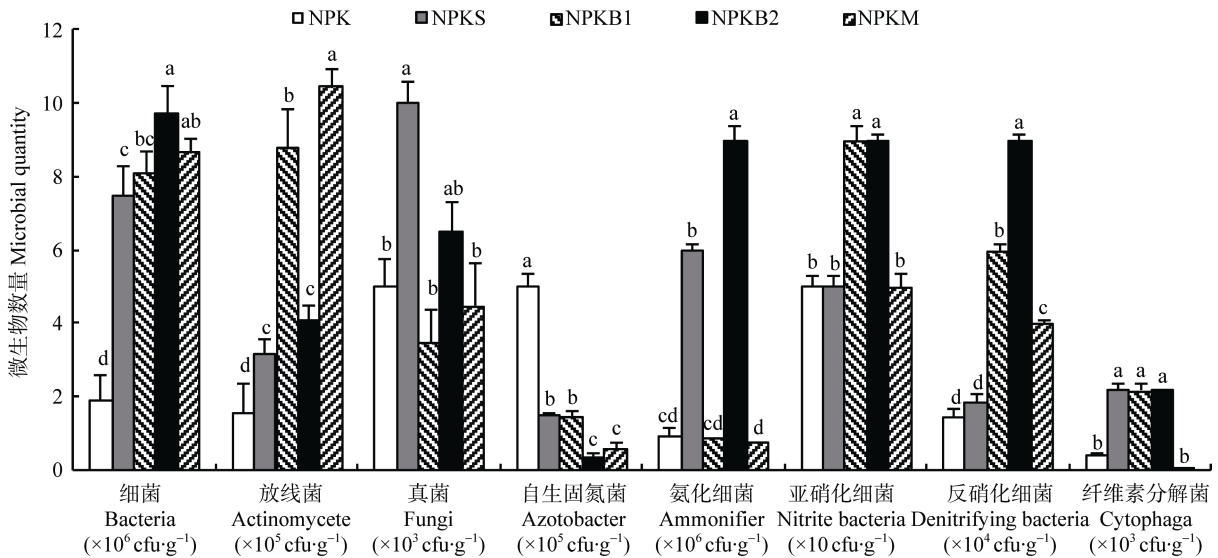


图 1 不同秸秆还田方式对土壤微生物数量的影响

Fig. 1 Effects of different straw incorporation modes on soil microbial quantity

研究表明, 与 NPK 相比, 不同秸秆还田方式均提高了土壤细菌和放线菌数量, NPKS 处理显著提高了土壤真菌数量; 与秸秆还田和过腹还田相比, 秸秆炭多孔结构对养分的持留作用更有利于生理菌群数量的增长, 尤其是亚硝化细菌、反硝化细菌和纤维素分解菌的数量。

2.3 不同秸秆还田方式对风沙土土壤酶活性的影响

从表 2 不同秸秆还田方式对风沙土土壤酶活性的影响趋势来看, 不同处理之间存在一定的差异。与 NPK 化肥处理相比, NPKS 和 NPKB1 处理过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶、蛋白酶和磷酸酶活性分别升

高 6.51%和 13.36%、10.12%和 29.37%、11.76%和 11.76%、0.00%和 22.32%、26.92%和 28.85%, 但两处理间差异不显著。MPKB2 和 NPKM 处理 5 种土壤酶活性均高于 NPK 处理, 过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶、蛋白酶和磷酸酶活性分别升高 8.47%和 12.38%、16.95%和 60.43%、5.88%和 17.65%、32.47%和 -1.24%、19.23%和 32.69%; 但两处理间除蛋白酶外其余差异不显著。由此可见, 不同秸秆还田方式总体上能提高风沙土土壤酶活性。常量秸秆炭比秸秆直接还田处理土壤酶活性更高, 但增量秸秆炭的土壤酶活性较秸秆过腹还田低。

表 2 不同秸秆还田方式对土壤酶活性的影响

Table 2 Effects of different straw incorporation modes on soil enzymes activities

处理 Treatment	过氧化氢酶 Catalase [mL(KMnO ₄)-g ⁻¹ ·20min ⁻¹]	蔗糖酶 Invertase [mL(C ₆ H ₆ O)-g ⁻¹ ·24h ⁻¹]	脲酶 Urease [mg(NH ₃ -N)-g ⁻¹ ·24h ⁻¹]	蛋白酶 Protease [mg(NH ₂ -N)-mg ⁻¹ ·24h ⁻¹]	磷酸酶 Alkaline phosphatase [mL(P ₂ O ₅)-100g ⁻¹ ·2h ⁻¹]
NPK	3.07±0.08c	13.04±2.92b	0.17±0.02c	8.87±0.83ab	0.52±0.03c
NPKS	3.27±0.10bc	14.36±1.09ab	0.19±0.02bc	8.87±1.17ab	0.66±0.06ab
NPKB1	3.48±0.08ab	16.87±2.93ab	0.19±0.01bc	10.85±1.00ab	0.67±0.07ab
NPKB2	3.33±0.29abc	15.25±1.60ab	0.18±0.01bc	11.75±1.52a	0.62±0.08bc
NPKM	3.45±0.05abc	20.92±1.62a	0.20±0.01abc	8.76±0.94b	0.69±0.07ab

2.4 不同秸秆还田方式对风沙土土壤微生物碳源利用的影响

2.4.1 平均颜色变化率

平均颜色变化率(AWCD)反映微生物对碳源的利用率, AWCD 值越大, 表明对碳源利用强度越强, 微生物的代谢活性越高。从图 2 可以看出, 不同秸秆还田方式土壤的 AWCD 值随培养时间的延长而提高。不同处理土壤 AWCD 值在开始的 24 h 变化不明

显, 说明碳源基本未被利用; 而在 24~96 h 内表现出快速增长的趋势, 微生物活性进入对数增长期, 随后增长缓慢, 趋于稳定, 直到 168 h 培养结束。从 AWCD 值可以看出, 与 NPK 处理相比, 除 NPKB1 处理显著降低外, 其余则显著升高, 但 3 个处理间差异不显著。由此可见, 秸秆还田、增量秸秆炭和秸秆过腹还田土壤微生物的代谢活性高于单施化肥处理, 但这 3 个处理之间差异不显著。

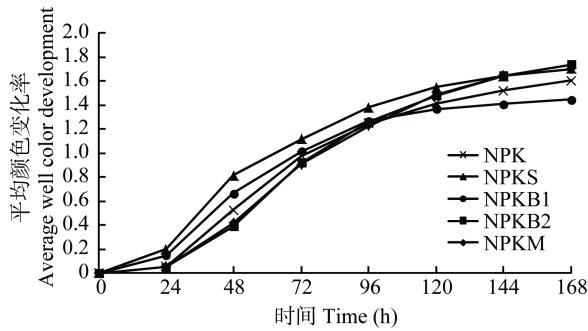


图 2 不同秸秆还田方式土壤微生物群落平均颜色变化率
Fig. 2 Average well color development (AWCD) of soil microbial communities under different straw incorporation modes

2.4.2 多样性指数分析

根据不同处理碳源利用情况,综合考虑其变化趋势,选取光密度趋于稳定,且不同处理之间有较

好分形的 144 h 的 AWCD 值进行土壤微生物群落代谢多样性分析(表 3)。多样性指数显著性分析结果显示, Simpson 优势度指数和 McIntosh 均匀度指数各处理间差异均不显著($P>0.05$)。而 Shannon 丰富度指数各处理间差异显著($P<0.05$)。NPK 处理丰富度指数最低,不同秸秆还田方式均能提高风沙土土壤微生物丰富度,说明这几种处理方式利用碳源的种类较多;其中 NPKS 处理最高, NPKB1、NPKB2 和 NPKM 处理次之,但这 3 个处理间差异不显著($P>0.05$)。由此可见,作为土壤微生物的营养源和能源,向土壤中施加秸秆、炭化和过腹的秸秆增加了土壤中碳素含量,能够调控土壤微生物群落的代谢功能和结构,改善土壤质量,其中不处理的秸秆提供了更多的碳源。

表 3 不同秸秆还田方式土壤微生物群落功能多样性指数
Table 3 Diversity indexes of soil microbial communities under different straw incorporation modes

处理 Treatment	平均颜色变化率 Average well color development (AWCD)	Simpson 指数 Simpson index	Shannon 指数 Shannon index	McIntosh 指数 McIntosh index
NPK	1.52±0.03b	0.98±0.01a	3.23±0.03c	0.93±0.01a
NPKS	1.64±0.02a	0.98±0.01a	3.33±0.01a	0.94±0.01a
NPKB1	1.41±0.01c	0.98±0.01a	3.30±0.02b	0.94±0.01a
NPKB2	1.65±0.01a	0.98±0.00a	3.31±0.02b	0.94±0.01a
NPKM	1.65±0.01a	0.98±0.02a	3.31±0.04b	0.94±0.02a

2.4.3 主成分分析

利用培养 144 h 的 AWCD 值,对不同秸秆还田方式土壤微生物利用单一碳源特性进行主成分分析。选取方差贡献率最高的前两个主成分 PC1(第 1 主成分)和 PC2(第 2 主成分)进行微生物群落功能多样性分析。主成分分析表明(图 3),不同秸秆还田方式碳源利用在 PC 轴上差异显著,在 PC1 轴上, NPKS、

NPKM 和 NPKB2 分布在正方向上,而 NPK 和 NPKB1 处理分布在负方向上;在 PC2 轴上, NPK、NPKB1 和 NPKS 处理分布在正方向上,而 NPKM 和 NPKB2 处理分布在负方向上。

初始载荷因子反映主成分与碳源利用的相关系数,载荷因子越高,表示该碳源对主成分的影响越大。表 4 显示,对 PC1 贡献较大的碳源有 6 种,主要包括糖类(3 种)、羧酸类(2 种)和聚合物类(1 种);而对 PC2 贡献较大的碳源有 5 种,主要包括氨基酸类(1 种)、羧酸类(2 种)、聚合物类(1 种)和其他类(1 种)。羧酸类和糖类是微生物利用的主要碳源。

2.4.4 聚类分析

本研究采用欧式距离中的最短距离法,对培养 144 h 的碳源利用情况进行聚类分析。结果表明, NPK 处理单独聚为一类,与不同秸秆还田方式土壤微生物群落碳源利用差异显著。不同秸秆还田方式可聚为两类, NPKB2 和 NPKM 处理被归为一类, NPKB1 和 NPKS 处理被归为另一类(图 4)。说明增量生物炭和秸秆过腹还田处理之间、常量秸秆炭和秸秆还田处理之间具有相似的微生物群落碳源利用模式。

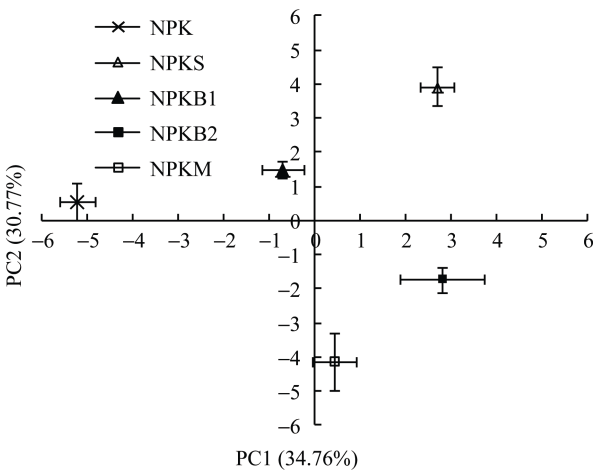


图 3 不同秸秆还田方式土壤微生物群落主成分分析
Fig. 3 Principal component analysis of soil microbial communities under different straw incorporation modes

表 4 不同秸秆还田方式 Biolog-Eco 板碳源在 PC1 和 PC2 上的载荷值 ($|r| > 0.8$)

Table 4 Loaded values of different carbon source utilization with PC1 and PC2 ($|r| > 0.8$) under different straw incorporation modes

碳源类型 Type of carbon source			PC1	PC2
氨基酸 Amino acids	L-精氨酸 L-arginine		-0.27	-0.91
糖类 Carbohydrates	D-木糖 D-xylose		0.93	0.18
	N-乙酰基-D-葡萄糖胺 N-acetyl-D-glucosamine		0.96	-0.20
羧酸类 Carboxylic acids	I-赤藻糖醇 I-erythritol		0.8	-0.45
	衣康酸 Itaconic acid		0.84	-0.14
	D-苹果酸 D-malic acid		0.96	0.28
聚合物类 Polymers	D-葡萄糖胺酸 D-glucosaminic acid		-0.30	0.87
	D-半乳糖内酯 D-galactonic acid-lactone		-0.09	-0.87
	a-环式糊精 a-cyclodextrin		-0.35	-0.84
其他类 Miscellaneous	吐温 40 Tween 40		-0.80	-0.17
其他类 Miscellaneous	D,L-a-甘油 D,L-a-glycerol		-0.39	0.86

3 讨论

新疆和田地区地处塔克拉玛干沙漠南缘，风沙土是其主要土壤类型。风沙土有机质含量低、供肥保肥保水能力差，采用秸秆还田、增施牛羊粪等有机肥是培肥土壤的主要途径。本研究表明，几种秸秆还田方式中秸秆直接还田腐解速度慢，对风沙土土壤养分的提升作用不显著，这与在新疆灰漠土的研究结果一致^[27]。而秸秆炭和羊粪有机肥对土壤养分的影响随施加量的增加逐渐增高^[28]。因此秸秆直接还田和常量秸秆炭处理没有显著增加风沙土土壤养分含量，而增量秸秆炭处理和过腹还田处理由于添加了较高的有机质，增加了土壤有效营养元素，对风沙土土壤肥力的提升作用好于秸秆直接还田处理。

土壤微生物在秸秆腐解和营养元素释放过程中起着关键作用，同时秸秆还田方式、还田数量也会

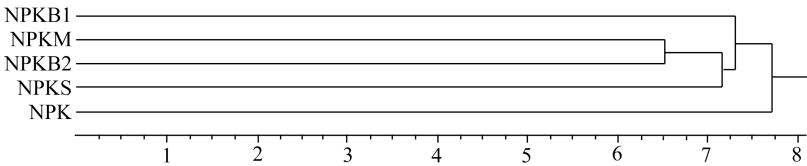


图 4 不同秸秆还田方式土壤微生物群落碳源利用的聚类分析图

Fig. 4 Cluster analysis of carbon source utilization of soil microbial communities under different straw incorporation modes

对土壤微生物产生较大的影响^[29]。本研究表明不同秸秆还田方式(秸秆直接还田、过腹还田、炭化还田)对风沙土土壤生理菌群数量和土壤酶活性均有一定促进作用。较多文献报道认为施用粪便类有机肥和作物秸秆还田，增加了土壤有机物数量，对土壤微生物和土壤酶起促进作用^[30-33]。但也有少量相反报道^[34]。生物炭养分组成中含有 38%~76%的碳，其他养分(氮、磷、钙、镁)含量也较高；同时生物炭表面复杂的孔隙结构、丰富的含氧官能团和较高的阳离子交换能力，形成了生物炭良好的吸附特性以及对酸碱的缓冲能力，可起到改善土壤理化性质，调控土壤微生物生态等作用^[35-38]。本研究表明秸秆炭与其他几种秸秆还田方式相比更有利于风沙土土壤生理菌群数量的增长，尤其是亚硝化细菌、反硝化细菌和纤维素分解菌的数量。常量秸秆炭处理比秸秆直接还田土壤酶活性更高，但增量秸秆炭酶活性较秸秆过腹还田处理低。

目前秸秆直接还田、过腹还田、炭化还田这几种秸秆还田方式对土壤微生物影响的比较研究报道较少。李卉等^[39]研究表明水稻秸秆添加对微生物生物量有促进作用，其促进程度高于生物炭。陈利军

等^[40]的研究表明施用等碳的秸秆、猪粪和生物炭处理细菌群落结构相似，但与单施化肥有显著差异。本研究也显示秸秆直接还田对土壤肥力的提升效果仅好于单施化肥处理，与秸秆炭化还田相当。与单施化肥相比，秸秆直接还田和炭化还田均可以提高土壤微生物数量，但由于这两种处理所含养分多是缓效的，微生物分解慢^[34,41]，不能快速提升土壤肥力。该试验还需进行长期定位监测。

土壤微生物是土壤生态系统的重要组成部分，土壤微生物与作物根系分泌物、残留物及地上部生长关系密切。杨金娟等^[42]研究表明不同秸秆还田方式可增加农田残茬、枯落物及植物根系分泌物，导致土壤碳、氮增加，土壤微生物可利用碳源增加，从而增加土壤微生物活性，增强对土壤碳水化合物、氨基酸、胺类化合物等碳源的利用能力。许文欢等^[43]研究发现不同施肥方式在碳源利用上差异不明显，表明微生物群落功能稳定，短期施肥没有改变微生物碳源代谢多样性，而生物炭虽然可以显著提高土壤微生物代谢活性，但并没有显著改变其碳源代谢多样性，高浓度的生物炭添加会促进喜食聚合物的微生物群落生长，并具有改变土壤微生物多样性的

潜力。本研究采用红枣/小麦复播绿豆间作模式,不同作物根系分泌物的相互作用复杂,土壤环境将发生很大改变。Biolog 主成分分析表明,不同秸秆还田方式对土壤微生物群落有显著促进作用,起分离作用的碳源主要为羧酸类和糖类。

4 结论

1) 秸秆直接还田、过腹还田和炭化还田对土壤养分均有提升作用,其中秸秆过腹还田效果最好,其次是增量秸秆炭处理,秸秆直接还田和常量秸秆炭处理效果较低。

2) 不同秸秆还田方式对土壤微生物数量影响显著。与单施化肥相比,秸秆直接还田、过腹还田和炭化还田均提高了土壤细菌、放线菌和生理菌群的数量,但秸秆直接还田提高了土壤真菌数量,增加了土传病害风险;秸秆炭化还田对土壤生理菌群数量的提升效果好于秸秆直接还田和过腹还田;不同秸秆还田方式均对土壤酶活性有提高作用。

3) Biolog 分析表明,与单施化肥相比,不同秸秆还田方式均能显著提高风沙土壤微生物的代谢活性和丰富度指数,但这几种秸秆还田方式之间差异不显著。聚类分析表明增量秸秆炭和过腹还田处理之间、常量秸秆炭化还田和秸秆直接还田处理之间土壤微生物功能相似。

总之,不同秸秆还田方式均能显著提高和田沙化土壤微生物活性和功能多样性,但不同方式的增效不同,从 3 年定位试验结果看,秸秆过腹还田和炭化还田的效果较好,秸秆直接粉碎还田有增加土传病害的风险。该结果将为南疆沙化土壤肥力持续提升提供一定的理论指导。

参考文献 References

- [1] 李新平, 崔方让, 魏迎春, 等. 新疆和田开发区土壤系统分类研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(12): 133–137
Li X P, Cui F R, Wei Y C, et al. Soil taxonomy in Hetian Development Zone, Xinjiang[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2007, 35(12): 133–137
- [2] 魏自民, 周连仁, 赵越. 有机物料培肥对风沙土肥力的影响[J]. 东北农业大学学报, 2003, 34(1): 68–71
Wei Z M, Zhou L R, Zhao Y. Effect of organic manure on main fertilities in wind blown soil[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2003, 34(1): 68–71
- [3] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 526–535
Pan J L, Dai W A, Shang Z H, et al. Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(5): 526–535
- [4] 杨振兴, 周怀平, 关春林, 等. 长期秸秆还田对旱地土壤硝态氮分布与累积的影响[J]. 华北农学报, 2013, 28(3): 179–182
Yang Z X, Zhou H P, Guan C L, et al. Effect of long-term straw returning on distribution and accumulation of nitrate nitrogen in dryland soil[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2013, 28(3): 179–182
- [5] 王小彬, 蔡典雄, 张镜清, 等. 旱地玉米秸秆还田对土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2000, 33(4): 54–61
Wang X B, Cai D X, Zhang J Q, et al. Effects of corn stover incorporated in dry farmland on soil fertility[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2000, 33(4): 54–61
- [6] Chakraborty A, Chakrabarti K, Chakraborty A, et al. Effect of long-term fertilizers and manure application on microbial biomass and microbial activity of a tropical agricultural soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, 47(2): 227–233
- [7] 慕平, 张恩和, 王汉宁, 等. 不同年限全量玉米秸秆还田对玉米生长发育及土壤理化性状的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 291–296
Mu P, Zhang E H, Wang H N, et al. Effects of continuous straw return to soil on maize growth and soil chemical and physical characteristics[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(3): 291–296
- [8] 武晓森, 杜广红, 穆春雷, 等. 不同施肥处理对农田土壤微生物区系和功能的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 99–109
Wu X S, Du G H, Mu C L, et al. Effects of different fertilization on structure and function of soil bacterial community[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(1): 99–109
- [9] 朱敏, 郭志彬, 曹承富, 等. 不同施肥模式对砂姜黑土微生物群落丰度和土壤酶活性的影响[J]. 核农学报, 2014, 28(9): 1693–1700
Zhu M, Guo Z B, Cao C F, et al. Impact of model of fertilization on microbial abundance and enzyme activity in Lime Concretion Black Soil[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2014, 28(9): 1693–1700
- [10] 奚振邦, 王寓群, 杨佩珍. 中国现代农业发展中的有机肥问题[J]. 中国农业科学, 2004, 37(12): 1874–1878
Xi Z B, Wang Y Q, Yang P Z. The issue on organic manure in developing modern agriculture in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(12): 1874–1878
- [11] 李洪林, 刘凤艳, 龚振平, 等. 稻秆还田对水稻主要病害发生的影响[J]. 作物研究, 2012, 26(1): 7–10
Li H L, Liu F Y, Gong Z P, et al. Effect of straw return back to paddy field on occurrence of rice major diseases[J]. Crop Research, 2012, 26(1): 7–10
- [12] Macdonald L M, Farrell M, van Zwieten L, et al. Plant growth responses to biochar addition: An Australian soils perspective[J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, 50(7): 1035–1045
- [13] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学, 2013, 46(16): 3324–3333

- Chen W F, Zhang W M, Meng J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16): 3324–3333
- [14] 杨旭, 兰宇, 孟军, 等. 秸秆不同还田方式对旱地棕壤 CO₂ 排放和土壤碳库管理指数的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(3): 805–809
- Yang X, Lan Y, Meng J, et al. Effects of different stover-incorporation ways on CO₂ emission in dryland brown soil and soil carbon pool management index[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(3): 805–809
- [15] Conte P. Biochar, soil fertility, and environment[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(8): 1175
- [16] 张杰, 黄金生, 刘佳, 等. 秸秆、木质素及其生物炭对潮土 CO₂ 释放及有机碳含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(2): 401–408
- Zhang J, Huang J S, Liu J, et al. Carbon dioxide emissions and organic carbon contents of fluvo-aquic soil as influenced by straw and lignin and their biochars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(2): 401–408
- [17] 张伟明, 管学超, 黄玉威, 等. 生物炭与化学肥料互动的大豆生物学效应[J]. *作物学报*, 2015, 41(1): 109–122
- Zhang W M, Guan X C, Huang Y W, et al. Biological effects of biochar and fertilizer interaction in soybean plant[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(1): 109–122
- [18] 何莉莉, 杨慧敏, 钟哲科, 等. 生物炭对农田土壤细菌群落多样性影响的 PCR-DGGE 分析[J]. *生态学报*, 2014, 34(15): 4288–4294
- He L L, Yang H M, Zhong Z K, et al. PCR-DGGE analysis of soil bacterium community diversity in farmland influenced by biochar[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(15): 4288–4294
- [19] 郑瑞伦, 王宁宁, 孙国新, 等. 生物炭对京郊沙化土壤性质及苜蓿生长、养分吸收的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(5): 904–912
- Zheng R L, Wang N N, Sun G X, et al. Effects of biochar on soil properties and alfalfa growth and nutrient uptake in desertified land in Beijing suburb[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(5): 904–912
- [20] Chen X F, Li Z P, Liu M, et al. Microbial community and functional diversity associated with different aggregate fractions of a paddy soil fertilized with organic manure and/or NPK fertilizer for 20 years[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(2): 292–301
- [21] Wang J Z, Wang X J, Xu M G, et al. Crop yield and soil organic matter after long-term straw return to soil in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 102(3): 371–381
- [22] 杨滨娟, 黄国勤, 钱海燕. 秸秆还田配施化肥对土壤温度、根际微生物及酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(1): 150–157
- Yang B J, Huang G Q, Qian H Y. Effects of straw incorporation plus chemical fertilizer on soil temperature, root micro-organisms and enzyme activities[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(1): 150–157
- [23] Belyaeva O N, Haynes R J. Comparison of the effects of conventional organic amendments and biochar on the chemical, physical and microbial properties of coal fly ash as a plant growth medium[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(7): 1987–1997
- [24] 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
- Lu R K. *Analytical Methods for Soil and Agricultural Chemistry*[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [25] 姚槐应, 黄昌勇. 土壤微生物生态学及其实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006
- Yao H Y, Huang C Y. *Edaphon Ecology and Experimental Technology*[M]. Beijing: Science Press, 2006
- [26] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986
- Guan S Y. *Soil Enzymes and Its Research Methods*[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986
- [27] 徐万里, 唐光木, 葛春辉, 等. 长期施肥对新疆灰漠土土壤微生物群落结构与功能多样性的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(2): 468–477
- Xu W L, Tang G M, Ge C H, et al. Effects of long-term fertilization on diversities of soil microbial community structure and function in grey desert soil of Xinjiang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2): 468–477
- [28] 赵占辉, 张丛志, 蔡太义, 等. 不同稳定性有机物料对砂姜黑土理化性质及玉米产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(10): 1228–1235
- Zhao Z H, Zhang C Z, Cai T Y, et al. Effects of different stable organic matters on physicochemical properties of lime concretion black soil and maize yield[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(10): 1228–1235
- [29] 伍玉鹏, 彭其安, Shaaban M, 等. 秸秆还田对土壤微生物影响的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(29): 175–183
- Wu Y P, Peng Q A, Shaaban M, et al. Research progress of effect of straw returning on soil microorganism[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(29): 175–183
- [30] Kamaa M M, Mburu H N, Blanchart E, et al. Effects of organic and inorganic applications on soil bacterial and fungal microbial communities diversity and impacts of earthworms on microbial diversity in the Kabete Long-term Trial, Kenya[M]//Bationo A, Waswa B, Kihara J, et al. *Lessons Learned from Long-term Soil Fertility Management Experiments in Africa*. Netherlands: Springer, 2012: 121–136
- [31] 李秀英, 赵秉强, 李絮花, 等. 不同施肥制度对土壤微生物的影响及其与土壤肥力的关系[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(8): 1591–1599
- Li X Y, Zhao B Q, Li X H, et al. Effects of different fertilization systems on soil microbe and its relation to soil fertility[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(8): 1591–1599
- [32] 刘光荣, 冯兆滨, 刘秀梅, 等. 不同有机肥源对红壤旱地耕层土壤性质的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2009, 31(5): 927–932
- Liu G R, Feng Z B, Liu X M, et al. Effects of different manure sources on soil characters in upland red soil[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2009, 31(5): 927–932
- [33] 萨如拉, 高聚林, 于晓芳, 等. 玉米秸秆深翻还田对土壤有益微生物和土壤酶活性的影响[J]. *干旱区资源与环境*,

- 2014, 28(7): 138–143
- Sa R L, Gao J L, Yu X F, et al. Effect of straw-deep incorporation on soil beneficial microorganism and soil enzyme activities[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(7): 138–143
- [34] 罗希茜, 郝晓晖, 陈涛, 等. 长期不同施肥对稻田土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(2): 740–748
- Luo X Q, Hao X H, Chen T, et al. Effects of long-term different fertilization on microbial community functional diversity in paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 740–748
- [35] Ghosh S, Ow L F, Wilson B. Influence of biochar and compost on soil properties and tree growth in a tropical urban environment[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2015, 12(4): 1303–1310
- [36] Zhang Y, Tan Q L, Hu C X, et al. Differences in responses of soil microbial properties and trifoliate orange seedling to biochar derived from three feedstocks[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(3): 541–551
- [37] 顾美英, 刘洪亮, 李志强, 等. 新疆连作棉田施用生物炭对土壤养分及微生物群落多样性的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(20): 4128–4138
- Gu M Y, Liu H L, Li Z Q, et al. Impact of biochar application on soil nutrients and microbial diversities in continuous cultivated cotton fields in Xinjiang[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(20): 4128–4138
- [38] Sun Z C, Bruun E W, Arthur E, et al. Effect of biochar on aerobic processes, enzyme activity, and crop yields in two sandy loam soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(7): 1087–1097
- [39] 李卉, 李宝珍, 邹冬生, 等. 水稻秸秆不同处理方式对亚热带农田土壤微生物生物量碳、氮及氮素矿化的影响[J]. *农业现代化研究*, 2015, 36(2): 303–308
- Li H, Li B Z, Zou D S, et al. Impacts of rice straw and its biochar product on the amounts of soil microbial biomass carbon and nitrogen and the mineralization of soil organic nitrogen in subtropical croplands[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2015, 36(2): 303–308
- [40] 陈利军, 孙波, 金辰, 等. 等碳投入的有机肥和生物炭对红壤微生物多样性和土壤呼吸的影响[J]. *土壤*, 2015, 47(2): 340–348
- Chen L J, Sun B, Jin C, et al. Effect of organic manure and biochar with equal amount of carbon input on microbial diversity and respiration of red soil[J]. *Soils*, 2015, 47(2): 340–348
- [41] Schmidt M W I, Noack A G. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 777–793
- [42] 杨金娟, 马琨, 丁东, 等. 不同培肥方式对旱作区耕地土壤的影响[J]. *西北农业学报*, 2013, 22(12): 75–81
- Yang J J, Ma K, Ding D, et al. Effects of different fertilizer management on soil in the arid region[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2013, 22(12): 75–81
- [43] 许文欢, 张雅坤, 王国兵, 等. 不同施肥方式对苏北杨树人工林土壤微生物碳源代谢的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(7): 1791–1797
- Xu W H, Zhang Y K, Wang G B, et al. Response of carbon metabolism by soil microbes to different fertilization regimes in a poplar plantation in coastal area of northern Jiangsu, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(7): 1791–1797