

杨 铭. 秸秆还田与耕作方式对土壤微生物碳源代谢功能多样性的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(6): 175–180.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.06.029

# 秸秆还田与耕作方式对土壤微生物碳源代谢功能多样性的影响

杨 铭

(商丘职业技术学院, 河南商丘 476100)

**摘要:**为揭示小麦→花生轮作体系下不同秸秆还田与耕作方式对花生田土壤微生物碳源代谢功能的影响规律,通过 2 年田间定位试验,设置秸秆不还田免耕(NSP)、秸秆还田免耕(SP)、秸秆还田浅耕(SSP)和秸秆还田深耕(SDP)等 4 个处理,利用 Biolog Eco 生态板技术,研究不同秸秆还田与耕作方式下花生田土壤养分含量及碳源代谢功能的变化。结果表明,秸秆还田降低了土壤 pH 值,提高了土壤养分含量;SP 处理土壤速效磷含量较 NSP 处理显著增加 21.62%,土壤速效钾含量较 NSP、SSP 处理分别显著增加 13.07%、7.27%,土壤有机质含量较 NSP、SDP 处理分别显著增加 13.98%、7.61%,土壤 pH 值较 NSP、SDP 处理显著降低 1.23%、0.86%,其他指标均无显著性变化;平均颜色变化率(AWCD)表现为 SP>SDP>SSP>NSP;SP 处理土壤微生物对多聚化合物、羧酸化合物、碳水化合物、胺类化合物、氨基酸的利用能力均最高;SP 处理的 Shannon 指数较 SSP 和 SDP 处理分别提高 3.99%、0.94%,较 NSP 处理显著提高 4.55%,Simpson 指数与 McIntosh 指数均无显著性变化;RDA 分析表明,土壤速效钾含量(50.9%)是影响土壤微生物碳源代谢的主要驱动因子,土壤 pH 值(32.0%)、土壤速效钾含量(30.4%)是影响土壤微生物功能多样性的主要驱动因子;综合分析表明,秸秆还田与免耕组合表现较优。

**关键词:**秸秆还田;耕作方式;玉米;土壤微生物;碳源利用;多样性

**中图分类号:** S154.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2022)06-0175-06

农作物秸秆富含有机物料和植物营养元素,是农田土壤有机质的重要来源,秸秆还田对改善土壤养分平衡、提高土壤养分库容具有重要的意义<sup>[1-2]</sup>。我国的农作物秸秆超过 7 亿 t/年,但秸秆利用率较

低,农民为省时省力通常直接进行秸秆焚烧,不仅造成农业资源浪费,还对环境造成严重的污染<sup>[3-4]</sup>。因此,如何合理利用秸秆成为了发展绿色农业的重要研究课题。目前,秸秆主要配合机械耕作进行还田,但不同的秸秆还田和耕作方式对土壤养分含量变化、土壤微生态环境产生不同的影响<sup>[5-6]</sup>。韦安培等的研究表明,深松与秸秆还田可改善土壤理化性状,提高土壤微生物碳源代谢能力及代谢活性<sup>[7]</sup>;Gouaerts 等的研究表明,秸秆还田免耕增加了

收稿日期:2021-06-04

基金项目:高职高专国家级示范专业基金;河南省科技攻关项目(编号:152102110030)。

作者简介:杨 铭(1984—),女,河南商丘人,讲师,从事农业微生物专业教学、科研及技术服务工作。E-mail:sqzyym1984@163.com。

system containing damping particles using coupled multi-body dynamics and discrete element method[J]. Nonlinear Dynamics, 2019, 98(1): 129–149.

[23] Horabik J, Beczek M, Mazur R, et al. Determination of the restitution coefficient of seeds and coefficients of visco-elastic Hertz contact models for DEM simulations[J]. Biosystems Engineering, 2017, 161: 106–119.

[24] 赵漫菲. 紫花苜蓿种子筛分特性研究及其清选设备控制系统优化设计[D]. 北京:中国农业大学,2015.

[25] 王成军,李耀明,马履中,等. 小麦籽粒碰撞模型中恢复系数的测定[J]. 农业工程学报,2012,28(11): 274–278.

[26] 葛 藤,贾智宏,周克栋. 计算点接触碰撞恢复系数的一种理论模型[J]. 机械设计与研究,2007,23(3): 14–15,22.

[27] 陆永光,吴 努,王 冰,等. 花生荚果碰撞模型中恢复系数的测定及分析[J]. 中国农业大学学报,2016,21(8): 111–118.

[28] 马彦华,宋春东,宣传忠,等. 苜蓿秸秆压缩仿真离散元模型参数标定[J]. 农业工程学报,2020,36(11): 22–30.

[29] 侯占峰,戴念祖,陈 智,等. 冰草种子物性参数测定与离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报,2020,36(24): 46–54.

[30] 吴佳胜,曹成茂,谢承健,等. 前胡种子物性参数测定及其离散元仿真模型参数标定[J]. 甘肃农业大学学报,2019,54(4): 180–189.

[31] 胡国明. 颗粒系统的离散元法分析仿真——离散元法的工业应用与 EDEM 软件简介[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2010.

[32] 彭才望,许道军,贺 喜,等. 黑水虻处理的猪粪有机肥离散元仿真模型参数标定[J]. 农业工程学报,2020,36(17): 212–218.

小麦→玉米轮作系统的土壤微生物群落多样性<sup>[8]</sup>；李玉洁等的研究表明，免耕和深松耕能改善土壤质量，为土壤微生物的生长繁殖提供丰富的可利用资源，提高土壤微生物群落碳源代谢能力<sup>[9]</sup>。由此可知，合理的秸秆还田和耕作方式能够改善土壤养分质量，提高土壤微生物群落功能多样性。

土壤微生物是土壤生态系统的重要组成部分，不仅参与土壤养分循环、能量流动等许多重要的生物化学过程，还会较大程度地影响植物与土壤的相互作用过程，对土壤物质循环、肥力演变具有重要的意义<sup>[1,10-11]</sup>。因此，研究土壤微生物群落对不同秸秆还田与耕作方式等措施的响应，对评价小麦→花生田土壤肥力及肥力演变具有重要的意义。秸秆还田与耕作方式对土壤微生物群落结构及功能多样性的研究有很多，但不同秸秆还田与耕作方式对小麦→花生轮作系统中土壤微生物群落碳源代谢能力及与土壤环境因子间相关性的研究却鲜有报道。因此，笔者期望通过研究不同秸秆还田与耕作方式对花生田土壤养分变化、碳源代谢能力及其相关性的影响，找到合理的秸秆还田与耕作方式组合，以期为小麦→花生轮作系统秸秆还田技术提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2018—2020 年在河南省商丘职业技术学院试验基地附近农户进行。试验地海拔 53 m，年平均气温 14.2℃，年平均日照时数 1 944 h，无霜期 211 d，年平均降水量 623 mm，四季分明，作物一年两熟，属典型暖温带半湿润大陆性季风气候。供试土壤为黄潮土，土壤基础肥力为：全氮含量 0.82 g/kg，全磷含量 0.96 g/kg，碱解氮含量 72.11 mg/kg，有效磷含量 56.73 mg/kg，速效钾含量 123.35 mg/kg，有机质含量 8.85 g/kg，pH 值 8.12。

### 1.2 试验设计

试验采用单因素随机区组设计，设置秸秆不还田免耕（NSP）、秸秆还田免耕（SP）、秸秆还田浅耕（SSP）和秸秆还田深耕（SDP）等 4 个处理，3 次重复，共 12 个小区，每个小区面积 64 m<sup>2</sup>。试验地常年为小麦—花生轮作种植制度，试验前小麦季与花生季均为犁地翻耕 0~30 cm。小麦种植密度 550 万株/hm<sup>2</sup>，施肥量为：纯氮 255 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 150 kg/hm<sup>2</sup>；花生种植密度 18 万株/hm<sup>2</sup>，株行距

15 cm×50 cm，每穴双粒，施肥量为：复合肥（N：P：K=15%：15%：15%）600 kg/hm<sup>2</sup>、过磷酸钙 225 kg/hm<sup>2</sup>，肥料全部作为底肥施入，生育期内不追肥。秸秆还田处理直接粉碎埋于地下，秸秆不还田处理通过人工移走作物秸秆。免耕处理全年不做任何耕作措施，人工完成播种与收获，避免机械压实土壤。浅耕处理犁地翻耕 0~30 cm，深耕处理犁地翻耕 30~60 cm，旋地后人工完成播种。试验从 2018 年小麦播种开始，小麦生育期为 2018 年 10 月 15 日至 2019 年 6 月 8 日，花生生育期为 2019 年 6 月 15 日至 9 月 25 日。小麦品种为百农 207，花生品种为冀花 4 号，均购自本地农资市场。

### 1.3 样品采集

2020 年 9 月 18 号花生收获前 1 周进行土壤样品采集，利用 5 点取样法，采集 0~30 cm 土样。剔除石砾和植物残根等杂物后过 1 mm 筛，利用保温箱将土样带回实验室，一部分自然风干，用于土壤理化性质的测定，其他部分保存于 -40℃ 冰箱，用于土壤微生物碳源代谢功能的测定。

### 1.4 测定方法

1.4.1 土壤理化性质分析 土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定；土壤碱解氮含量采用碱解扩散法测定；土壤全磷含量采用 HClO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 钼锑抗比色法测定；土壤速效磷含量采用 NaHCO<sub>3</sub> 浸提—钼锑抗比色法测定；土壤速效钾含量采用 NH<sub>4</sub>Ac 浸提—火焰光度法测定；土壤有机质含量采用重铬酸钾滴定法测定；土壤 pH 值采用电位法<sup>[12]</sup>测定。

1.4.2 土壤微生物群落碳源代谢利用 利用 Biolog Eco 生态板法。称取 10 g 新鲜土样置于 90 mL 0.85% 无菌 NaCl 溶液中，于摇床上振荡 30 min 后静置 15 min，利用移液枪吸取上清液 5 mL，加入 45 mL 0.85% 无菌 NaCl 溶液中，混匀后将稀释 1 000 倍的溶液接种到 Biolog Eco 培养板上，重复 3 次，在 28℃ 条件下进行培养，在中国科学院青藏高原研究所利用 Biolog 读板仪在 590 nm 处每 24 h 读数 1 次，连续读数 168 h。平均颜色变化率（AWCD）可用于评价土壤微生物对碳源的利用能力<sup>[13]</sup>。

$$AWCD = \sum (C_i - R) / n. \quad (1)$$

式中： $C_i$  为第  $i$  个非对照孔吸光度； $R$  为清水对照孔吸光度； $n$  为培养基孔数，Biolog-Eco 板中  $n=31$ 。

1.4.3 土壤微生物多样性指数 Simpson 指数（ $H'$ ）可用于评价土壤微生物群落常见类群优势度；

Shannon 指数 ( $D$ ) 可用于评价土壤微生物群落丰富度;McIntosh 指数 ( $U$ ) 可用于评价土壤微生物群落均匀度<sup>[14]</sup>。

$$H = - \sum P_i \times (\ln P_i); \tag{2}$$

$$D = 1 - \sum P_i^2; \tag{3}$$

$$U = (\sum C_i^2)^{1/2}. \tag{4}$$

式中: $P_i$  表示第  $i$  个非对照孔中吸光度与所有非对照孔吸光度总和的比值。

1.5 数据分析与处理

采用 WPS 进行数据计算和处理,采用 SPSS 19.0 软件进行差异显著性分析,采用 Canoco 5.0 进行 RDA 分析。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

由表 1 可知,不同秸秆还田与耕作方式对土壤

全氮、碱解氮和全磷含量变化产生明显影响。其中,SP 处理的土壤全氮、碱解氮、全磷含量均最高,但与其他处理差异不显著( $P > 0.05$ )。不同秸秆还田与耕作方式对土壤速效磷、速效钾、有机质的含量及 pH 值产生显著影响,SP 处理的土壤速效磷、速效钾、有机质含量较其他处理分别增加 6.78% ~ 21.62%、6.19% ~ 13.07% 和 6.43% ~ 13.98%,其中 SP、SSP、SDP 处理的土壤速效磷含量显著高于 NSP 处理,SP 处理的土壤速效钾含量显著高于 NSP、SSP 处理,SP 处理的土壤有机质含量显著高于 NSP、SDP 处理,而 SP 处理的土壤 pH 值较 NSP、SDP 处理显著降低 1.23%、0.86%。与秸秆还田处理相比,秸秆不还田处理的土壤全氮、全磷、速效磷、速效钾、有机质含量均最低,而 pH 值最高。由此可知,不同秸秆还田与耕作方式对土壤养分含量的影响不同。

表 1 秸秆还田与耕作方式对土壤养分含量的影响

处理	全氮含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	全磷含量 (g/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	有机质含量 (g/kg)	pH 值
NSP	0.77 ± 0.05a	54.56 ± 4.71a	0.72 ± 0.07a	36.64 ± 0.84b	149.08 ± 3.37b	9.30 ± 0.34b	8.13 ± 0.03a
SP	0.82 ± 0.10a	61.59 ± 3.54a	0.86 ± 0.06a	44.56 ± 3.14a	168.57 ± 8.10a	10.60 ± 1.05a	8.03 ± 0.03b
SSP	0.78 ± 0.07a	56.40 ± 3.50a	0.79 ± 0.07a	41.73 ± 0.87a	157.14 ± 3.43b	9.96 ± 0.55ab	8.07 ± 0.02ab
SDP	0.79 ± 0.10a	53.80 ± 5.03a	0.79 ± 0.12a	41.37 ± 1.87a	158.74 ± 3.57ab	9.85 ± 0.34b	8.10 ± 0.05a

注:同列数据后标有不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。表 2、表 3 同。

2.2 土壤微生物碳源综合利用

平均颜色变化率是衡量土壤微生物对碳源利用能力的重要指标,反映了土壤微生物的代谢活性<sup>[15]</sup>,其中 AWCD 越高,表示土壤微生物代谢活性越强。由图 1 可知,培养 0 ~ 24 h 时,各处理 AWCD 值变化均不大;培养 24 ~ 120 h,AWCD 值迅速增长,此时是土壤微生物代谢功能最旺盛的时期;培养 120 ~ 168 h 时,AWCD 值增长速度放缓趋于平稳。

而不同秸秆还田与耕作方式条件下,AWCD 值呈现出不同的变化,从培养 24 h 开始至结束,SP 处理的 AWCD 值均最高,其中培养 120 h 时,SP 处理的 AWCD 值较其他处理提高 24.71% ~ 63.08%。培养 0 ~ 48 h 时,SSP 处理与 SDP 处理的 AWCD 值差异不明显;而从 48 h 开始至结束,SDP 处理的 AWCD 均高于 SSP 处理。由此可见,不同秸秆还田与耕作方式改变了土壤微生物群落对碳源的利用能力。

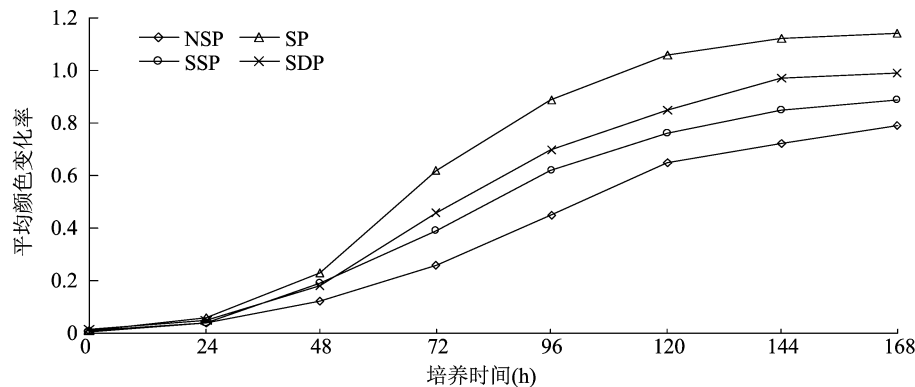


图 1 秸秆还田与耕作方式对土壤微生物群落平均颜色变化率的影响

2.3 土壤微生物各类碳源利用

分析土壤微生物对 Biolog Eco 生态板六大类 31 种碳源的利用能力时发现,不同秸秆还田与耕作方式条件下土壤微生物群落对各类碳源的利用能力有较大影响。由表 2 可知,选取 120 h AWCD 值进行计算,发现秸秆不还田处理土壤微生物对各类碳源的利用能力均低于秸秆还田处理,其中土壤微生物对多聚化合物、碳水化合物、胺类化合物、氨基酸的利用能力显著低于 SP 处理,而秸秆还田条件下

不同耕作方式处理土壤微生物对各类碳源的利用能力也有较大影响。SP 处理土壤微生物对多聚化合物、羧酸化合物、碳水化合物、胺类化合物、氨基酸的利用能力均最高,其中对多聚化合物的利用能力较 SSP 处理显著提高 16.49%,对碳水化合物和胺类化合物的利用能力较 SSP 和 SDP 处理分别显著提高 18.63% 和 11.01%、26.15% 和 74.47%,其他指标均无显著变化,SDP 处理对芳香化化合物的利用能力最高,但与其他处理均无显著性变化。

表 2 不同处理土壤微生物对六大类 31 种碳源利用的变化

处理	AWCD					
	多聚化合物	羧酸化合物	碳水化合物	胺类化合物	氨基酸	芳香化合物
NSP	0.91 ± 0.09c	0.62 ± 0.05a	0.91 ± 0.06d	0.40 ± 0.08c	0.89 ± 0.08b	0.22 ± 0.03a
SP	1.13 ± 0.06a	0.75 ± 0.07a	1.21 ± 0.12a	0.82 ± 0.06a	0.98 ± 0.04a	0.26 ± 0.04a
SSP	0.97 ± 0.07bc	0.69 ± 0.05a	1.02 ± 0.11c	0.65 ± 0.08b	0.93 ± 0.13ab	0.23 ± 0.04a
SDP	1.09 ± 0.06ab	0.71 ± 0.08a	1.09 ± 0.07b	0.47 ± 0.05c	0.97 ± 0.09ab	0.28 ± 0.11a

2.4 土壤微生物多样性指数

由表 3 可知,不同处理土壤微生物群落功能多样性指数差异较大。秸秆不还田处理 Shannon 指数、McIntosh 指数均低于秸秆还田处理,其中 NSP 处理 Shannon 指数较 SP 处理显著降低 4.55%,Simpson 指数高于秸秆还田处理。秸秆还田条件下,不同耕作方式处理的 Shannon 指数、Simpson 指数和 McIntosh 指数表现各不相同,其中 SP 处理的 Shannon 指数最高,较 SSP 和 SDP 处理分别提高 3.99%、0.94%,Simpson 指数和 McIntosh 指数均最低,SSP 处理 Simpson 指数和 McIntosh 指数均最高,但与其他处理均无显著性差异。由此可知,不同秸秆还田和耕作方式条件下土壤微生物群落代谢功能多样性发生了不同的变化。

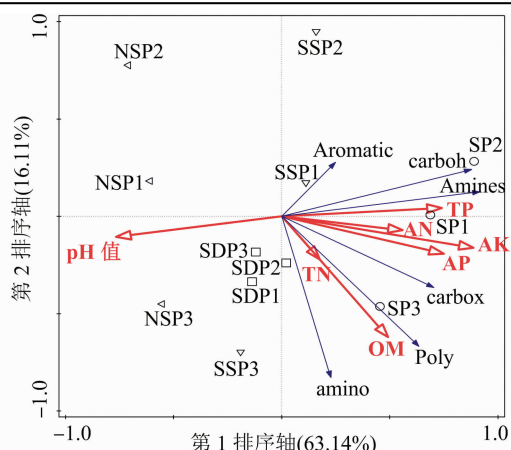
养分含量的 RDA 分析的第 1、第 2 排序轴分别解释了 63.14% 和 16.11% 的变异。从图 2 还可以看出,各处理点较为分散并位于不同的象限,说明不同秸秆还田与耕作方式条件下,土壤环境因子在影响土壤微生物碳源利用能力的过程中存在着相互促进或相互制约的复杂关系。土壤微生物对多聚化合物、羧酸化合物、碳水化合物、胺类化合物、氨基酸的利用能力与土壤全氮、土壤全磷含量、碱解氮含量、速效磷含量、速效钾含量和有机质含量呈正相关关系,与土壤 pH 值呈负相关关系;土壤微生物对芳香化化合物的利用能力与土壤的全氮、全磷、碱解氮、速效磷和速效钾含量呈正相关,与土壤 pH 值、有机质含量呈负相关关系。说明土壤 pH 值的降低会促进以 6 类化合物为基质的土壤微生物代谢强度,土壤有机质含量的增加会抑制以芳香化合物为基质的土壤微生物代谢活性。假设性测验结果(pseudo-F 值=7.5,P 值=0.002)表明,所有排序轴都是极显著的,其中土壤速效钾含量(50.9%)为主要驱动因子。

表 3 秸秆还田与耕作方式对土壤微生物群落多样性的影响			
处理	Shannon 指数	Simpson 指数	McIntosh 指数
NSP	17.42 ± 0.20b	0.98 ± 0.24a	4.87 ± 0.76a
SP	18.25 ± 0.35a	0.72 ± 0.07a	4.90 ± 0.60a
SSP	17.55 ± 0.40ab	0.84 ± 0.12a	5.24 ± 0.46a
SDP	18.08 ± 0.35ab	0.78 ± 0.07a	5.09 ± 0.14a

2.5 土壤微生物群落碳源利用能力、多样性指数与环境因子间的相关分析

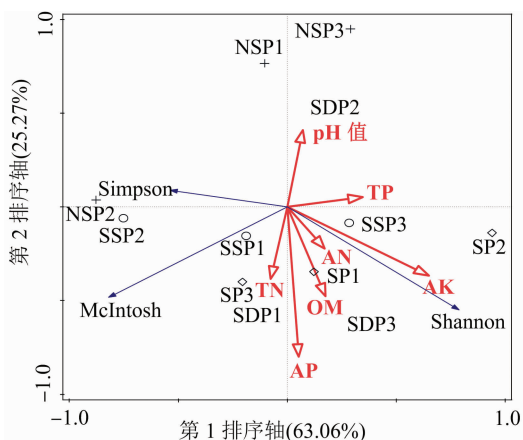
基于不同处理土壤微生物群落碳源利用能力与其对应的土壤环境因子进行 RDA 分析(图 2),不同秸秆还田与耕作方式下土壤微生物群落与土壤

在进行不同秸秆还田与耕作方式下土壤微生物群落功能多样性与土壤养分的 RDA 分析(图 3)时,第 1、第 2 排序轴分别解释了 63.06%、25.27% 的变异。Shannon 指数与土壤全氮、全磷、碱解氮、速效磷、速效钾和有机质含量呈正相关关系,与土壤 pH 值呈负相关关系;Simpson 指数与土壤 pH 值呈正相关关系,与土壤全氮、全磷、碱解氮、速效磷、



carboh、poly、carbox、aromatic、amino、amines 分别表示碳水化合物、多聚化合物、羧酸类化合物、芳香化合物、氨基酸、胺类化合物；TN、TP、AP、AK、AN、OM 和 pH 值分别表示全氮、全磷、速效磷、速效钾、碱解氮、有机质和 pH 值

图2 土壤微生物群落碳源利用能力与土壤养分间的 RDA 分析



Shannon、Simpson、McIntosh 分别表示丰富度指数、优势度指数、均匀度指数

图3 土壤微生物群落多样性指数与土壤养分间的 RDA 分析

速效钾和土壤有机质含量呈负相关关系；McIntosh 指数与土壤全氮、速效磷、有机质含量呈正相关关系，与土壤全磷、碱解氮、速效钾含量和土壤 pH 值呈负相关关系。说明土壤全氮、全磷、碱解氮、速效磷、速效钾和有机质含量的提高以及土壤 pH 值的降低会提高 Shannon 指数、Simpson 指数，而土壤全磷、碱解氮、速效钾含量和土壤 pH 值的提高会降低 McIntosh 指数。假设性测验结果 (pseudo -  $F$  值 = 6.5,  $P$  值 = 0.01) 表明，所有排序轴都是极显著的。土壤 pH 值 (32.0%)、土壤速效钾含量 (30.4%) 也是影响土壤微生物功能多样性的主要驱动因子。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

不同耕作方式能够直接或间接地影响土壤养

分变化及其有效性<sup>[16]</sup>。黄炳林的研究表明，合理的耕作模式能够促进土壤氮磷钾元素的累积，可以优化土壤结构<sup>[17]</sup>；王淑兰等的研究表明，免耕及免耕深松轮耕能够提高土壤养分含量，减少水分流失<sup>[18]</sup>。本研究表明，秸秆还田降低了土壤 pH 值，提高了土壤养分含量，其中秸秆还田免耕处理显著提高了土壤速效磷、速效钾及有机质的含量，可能是因为小麦和花生农作物秸秆腐烂分解释放了其中的养分和可溶性有机质，提高了土壤肥力。秸秆还田免耕处理各养分含量均高于秸秆还田浅耕与秸秆还田深耕处理，土壤 pH 值低于秸秆还田浅耕与秸秆还田深耕处理，可能因为免耕促使秸秆分解的养分和可溶性有机质在土壤表层积累，而下层养分减少，浅耕或深耕则把养分均匀打散在不同土层中，减缓了秸秆分解速度及效率，从而使得免耕处理的养分含量高于耕作处理。

土壤微生物群落碳源代谢特征可以反映土壤微生物活性及对不同碳源的利用能力<sup>[19-20]</sup>。有研究表明，免耕覆盖能够提高作物产量，增强土壤微生物群落的碳源代谢功能，且作物产量与微生物群落碳源代谢功能有明显的正相关性<sup>[21]</sup>；陆思旭等的研究表明，免耕可显著提高土壤微生物活性、丰富度指数和香农指数，而优势度指数和均匀度指数均无显著差异<sup>[22]</sup>。在本研究中土壤微生物群落对单一碳源的利用能力表现为：秸秆还田免耕 > 秸秆还田深耕 > 秸秆还田浅耕 > 秸秆不还田免耕；秸秆还田免耕处理土壤微生物对多聚化合物、羧酸化合物、碳水化合物、胺类化合物、氨基酸的利用能力均最高，Shannon 指数最高，秸秆不还田免耕处理 Simpson 指数最高，McIntosh 指数最低，这与前人研究的结果<sup>[22]</sup>相似。分析认为秸秆具有较高的 C/N，为土壤微生物代谢活动提供了丰富的碳源，使得秸秆还田处理碳源代谢活动明显高于不还田处理，而免耕处理减少对土壤微生物和土壤动物的扰动，减少对土层结构的破坏，有利于土壤养分的累积，为土壤微生物代谢繁殖提供丰富的可利用资源，从而优于浅耕和深耕处理。

RDA 分析结果表明，土壤环境因子能够影响土壤微生物群落碳源代谢功能对秸秆还田与耕作方式处理的响应，而土壤微生物的碳源代谢功能又与土壤各养分指标密切相关<sup>[7]</sup>。土壤速效钾含量 (50.9%) 是不同秸秆还田与耕作方式条件土壤微生物碳源利用能力的主要驱动因子，且假设性测验

结果(pseudo- $F$  值 = 7.5,  $P$  值 = 0.002)表明影响是极显著的,而土壤 pH 值(32.0%)、速效钾含量(30.4%)是影响土壤微生物功能多样性的主要驱动因子。土壤微生物群落碳源代谢功能与土壤环境因子密切相关。由此可知,不同秸秆还田与耕作方式对土壤微生物群落碳源代谢功能产生不同的影响。

### 3.2 结论

与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理降低了土壤 pH 值,提高了土壤各养分含量;秸秆还田免耕处理土壤全氮、碱解氮、全磷、速效磷、速效钾、有机质的含量均最高,其中土壤速效磷、速效钾、有机质含量较其他处理分别增加 6.78% ~ 21.62%、6.19% ~ 13.07% 和 6.43% ~ 13.98%;平均颜色变化率表现为秸秆还田免耕处理 > 秸秆还田深耕处理 > 秸秆还田浅耕处理 > 秸秆不还田免耕处理;秸秆还田免耕处理土壤微生物对多聚化合物、羧酸化合物、碳水化合物、胺类化合物、氨基酸的利用能力均最高,对芳香化合物的利用能力最低;秸秆还田免耕处理 Shannon 指数最高,秸秆不还田免耕处理 Simpson 指数最高,McIntosh 指数最低;土壤微生物群落碳源代谢活性受多种环境因子共同制约。综上所述,秸秆还田 + 免耕组合表现较优。

### 参考文献:

- [1] Chen J, Zheng M J, Pang D W, et al. Straw return and appropriate tillage method improve grain yield and nitrogen efficiency of winter wheat[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(8): 1708 – 1719.
- [2] 董建新. 耕作方式和秸秆颗粒化还田对植烟土壤质量提升机制研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2020.
- [3] 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]. 植物营养与肥科学报, 2018, 24(1): 1 – 21.
- [4] 武喜红, 刘 婷, 程永政, 等. 多源卫星遥感秸秆焚烧过火面积动态监测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 153 – 159, 315.
- [5] 姜 英, 王峰宇, 廉宏利, 等. 耕作和秸秆还田方式对东北春玉米吐丝期根系特征及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(15): 3071 – 3082.
- [6] 韩 上, 武 际, 李 敏, 等. 深耕结合秸秆还田提高作物产量并改善耕层薄化土壤理化性质[J]. 植物营养与肥科学报, 2020, 26(2): 276 – 284.
- [7] 韦安培, 丁文超, 胡恒宇, 等. 耕作方式及秸秆还田对土壤性质、微生物碳源代谢及小麦产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(6): 145 – 152.
- [8] Govaerts B, Mezzalama M, Unno Y, et al. Influence of tillage, residue management, and crop rotation on soil microbial biomass and catabolic diversity[J]. Applied Soil Ecology, 2007, 37(1/2): 18 – 30.
- [9] 李玉洁, 王 慧, 赵建宁, 等. 耕作方式对农田土壤理化因子和生物学特性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 939 – 948.
- [10] 楚海燕, 李若南, 李靖雯, 等. 中亚热带森林转换对土壤微生物群落结构的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(1): 23 – 28.
- [11] 蒋 婧, 宋明华. 植物与土壤微生物在调控生态系统养分循环中的作用[J]. 植物生态学报, 2010, 34(8): 979 – 988.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [13] 高文翠, 杨卫君, 贺佳琪, 等. 生物炭添加对麦田土壤微生物群落代谢的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(12): 3998 – 4004.
- [14] 费裕舫, 刘 丽, 陈 钢, 等. 不同有机肥处理对紫色土油茶林土壤微生物碳源利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(5): 101 – 108.
- [15] 闫 冰, 李俊生, 陆 晴, 等. 北京城市公园绿地土壤微生物群落碳源代谢活性特征[J]. 环境科学研究, 2019, 32(9): 1567 – 1574.
- [16] 王碧胜, 蔡典雄, 武雪萍, 等. 长期保护性耕作对土壤有机碳和玉米产量及水分利用的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2015, 21(6): 1455 – 1464.
- [17] 黄炳林. 不同耕作措施对土壤与大豆产量的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020.
- [18] 王淑兰, 王 浩, 李 娟, 等. 不同耕作方式下长期秸秆还田对旱作春玉米田土壤碳、氮、水含量及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1530 – 1540.
- [19] 王楠楠, 韩冬雪, 孙 雪, 等. 降水变化对红松阔叶林土壤微生物功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(3): 868 – 876.
- [20] 夏品华, 寇永珍, 喻理飞. 喀斯特高原退化湿地草海土壤微生物群落碳源代谢活性研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(8): 2549 – 2555.
- [21] 唐海明, 肖小平, 李 超, 等. 冬季覆盖作物秸秆还田对双季稻田根际土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(18): 6559 – 6569.
- [22] 陆思旭. 不同耕作与施肥对渭北旱塬土壤养分、有机碳和微生物功能多样性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.