

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

韦安培,丁文超,胡恒宇,隋业伟,刘少梅,陈子明,李 静

(山东省水土保持与环境保育重点实验室,山东省临沂大学资源环境学院,山东 临沂 276000)

摘 要:以小麦品种济麦 22 为试验材料,采用裂区试验设计,耕作方式为主区,分别设常规翻耕(C)、深松(S)、旋耕(R)处理,副区为秸秆还田量,分别设秸秆全还田(P)和秸秆不还田(A)处理,采用 Biolog Eco 技术测定土壤微生物碳源代谢功能,并分析土壤基本理化性质和作物产量。结果显示:深松与秸秆还田均有利于土壤含水量和有机碳含量的提高,0~15 cm 土层分别提高了 9.78%和 24.00%,15~30 cm 土层分别提高了 7.08%和 15.81%;深松提高了 15~30 cm 土层的 pH 值 6.67%,秸秆还田提高了 0~15 cm 土层的 pH 值 4.32%。深松和秸秆还田均有利于代谢多样性(丰富度指数、香浓多样性指数)、碳源代谢强度的提高,0~15 cm 土层分别提高了 26.84%、3.84%和 38.02%,15~30 cm 土层分别提高了 11.87%、3.63%和 14.74%。主成分分析表明常规翻耕秸秆不还田和旋耕耕作秸秆不还田碳源代谢功能相近,15~30 cm 层次内常规翻耕秸秆全还田碳源代谢功能和深松耕作秸秆全还田处理相近。深松和秸秆还田平均提高了小麦产量 5.82%,微生物碳源代谢功能与小麦产量具有极显著的相关性。

关键词:耕作方式;秸秆还田;土壤性状;土壤微生物碳源代谢能力;小麦

中图分类号:S344;S512 **文献标志码:**A

Effects of tillage methods and straw return on soil properties, metabolism of microbial carbon source and wheat yield

WEI Anpei, DING Wenchao, HU Hengyu, SUI Yewei, LIU Shaomei, CHEN Ziming, LI Jing

(Key laboratory of soil and water conservation and environmental conservation in Shandong Province,

College of resources and environment, Linyi University, Linyi, Shandong 276000, China)

Abstract: Using wheat 22 as test material, this experiment adopted a split-plot design, with tillage methods as main treatments including conventional tillage (C), subsoiling (S) and rotary tillage (R), with straw returning amount as sub treatments including straw returning (P) and no straw returning(A). We used Biolog Eco technology to measure metabolism function of carbon source of soil microorganisms, and analyzed basic physical and chemical properties of soil and crop yield. The results showed that, subsoiling and straw returning significantly enhanced soil water and organic carbon content, with 0~15 cm soil layers increased by 9.78% and 24.00%, 15~30 cm soil layers increased by 7.08% and 15.81%, respectively. Also, subsoiling increased the pH in 15~30 cm soil layer by 6.67%, and straw returning increased the pH of 0~15 cm soil layer by 4.32%. Subsoiling and straw returning significantly increased the metabolic diversity (richness index, aroma diversity index) and carbon metabolism intensity, 0~15 cm soil layer increased by 26.84%, 3.84% and 38.02%, and 15~30 cm soil layer increased by 11.87%, 3.63% and 14.74%, respectively. Principal component analysis showed that the metabolic functions of carbon source between AC and AR were similar, and the metabolic functions of carbon source between PC and PS were similar in 15~30 cm soil layer. Both subsoiling and straw returning significantly increased wheat yield by 5.82% on average, and the microbial carbon metabolism function had a very significant correlation with wheat yield.

Keywords: tillage methods; returning straw to field; soil properties; soil microbial carbon source metabolism capacity; wheat

耕作方式中能耗大、效率低以及成本过高,耕作过程中由秸秆焚烧等问题产生的生态环境破坏和高碳排放,对人们的生活造成了巨大的影响^[1]。因此,将不同的耕作方式与秸秆管理技术相结合,来改善生态环境以及实现农业可持续发展,对于现阶段我国的农业发展具有重要意义。

微生物群落不仅在有机质的形成与分解、土壤呼吸以及养分循环等很多土壤代谢过程中起着至关重要的作用,而且也与土壤系统服务的传递功能息息相关。通常情况下,微生物的遗传多样性越高,越有能力去利用更多的碳源^[2],而 Biolog 作为目前最常用来研究土壤微生物群落功能多样性的一种方法,具有简单、快速等优点^[3],通过分析微生物群落水平的生理特征得出其碳源利用能力,其中 Biolog EC 板经常用于微生物的特性和群落分析,而不同的碳源利用模式可以表征微生物群落的差异性^[4]。

根据前人的研究结果,在不同耕作条件的直接或间接影响下,土壤的物理性质^[5]以及农田耕层土壤的养分含量^[6]、土壤呼吸和酶活性^[7-8]都发生了一定的变化。此外,秸秆还田在控制温室气体的排放、提供养分、提高作物产量等方面具有重要的作用。本文通过分析不同的耕作方式(旋耕、常规翻耕、深松)和不同秸秆还田量(全还田、不还田)的交互作用,找出提高土壤微生物多样性的最佳组合,为农田生态改良和提高作物产量提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与试验设计

试验在临沂大学定位站进行,位于东经 116°02′~117°59′,北纬 35°38′~36°33′,属于温带半湿润大陆性气候,四季分明,该地区年平均气温 13.0℃,年均日照时数 2627.1 h,年均降雨量 697 mm,具有华北平原的典型特点。供试土壤为壤土,土层深厚。0~20 cm 土壤基本理化性状为:pH 值 7.09,有机碳 10.87 g·kg⁻¹,全氮 1.1 g·kg⁻¹,全磷 8.09 mg·kg⁻¹。

试验采用裂区设计,主区为常规翻耕耕作(C,耕深 30 cm)、深松耕作(S,耕深 40 cm)、旋耕耕作(R,耕深 15 cm) 3 种耕作方式,副区为全还田(P,玉米 7 500 kg·hm⁻²)和不还田(A)2 种秸秆还田方式,共 6 个处理,分别为 PC(常规翻耕耕作秸秆全还田)、AC(常规翻耕耕作秸秆不还田)、PS(深松耕作秸秆全还田)、AS(深松耕作秸秆不还田)、PR(旋

耕耕作秸秆全还田)、AR(旋耕耕作秸秆不还田)。每个小区面积为 15 m×4 m。本试验以小麦品种济麦 22 为材料,于 2016 年 10 月 13 日播种,播量 90 kg·hm⁻²,行距 20 cm,基施纯 N 225 kg·hm⁻²,P₂O₅ 180 kg·hm⁻²和 K₂O 180 kg·hm⁻²,各处理分别在冬小麦拔节期和夏玉米大口期浇水 60 mm,于 2017 年 6 月 13 日收获。

1.2 土壤样品采集

于 2017 年 5 月 17 日小麦灌浆期进行取样,每个小区内以土钻随机取 5 个点,0~15 cm 和 15~30 cm 两层土样分别收集并混合均匀,一部分过 2 mm 筛,置于 4℃ 冷藏箱中,于一周内分析不同处理对土壤微生物碳源代谢产生的影响;另一部分自然风干后过筛,用于测定其对土壤基本理化性质的影响。

1.3 土壤基本理化性质分析

土壤总有机碳(TOC)用重铬酸钾-硫酸外加热法测定^[9];总氮含量采用半微量凯式定氮法测定;铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)用 2 M KCl 浸提后采用连续流动分析仪测定^[10];土壤水分采用烘干法测定^[11];pH 值采用电位法测定^[11];土壤容重采用环刀法测定。

1.4 土壤微生物碳源代谢能力分析

采用群落水平代谢图谱法表征,用 Biolog Eco-Plate™(Biolog Inc., Hayward, CA, USA)测定^[12]。Biolog EC 板经常被用于微生物特性和群落分析,每个 EC 板包含 31 种碳源和四唑染料,另外,未加碳源的孔中加水作为对照。取相当于 10 g 干土的新鲜土样,加 95 mL 无菌的 0.85% NaCl 溶液振荡 30 min,静置 30 min 后,将土壤悬浮样液稀释至 1 000 倍,取 150 μL 稀释后的土壤溶液接种至 Biolog Eco-Plate™中,然后置于 25℃ 恒温培养箱培养 240 h,每 12 h 于 Biolog 微生物自动鉴定系统仪上读数 1 次,测定波长为 590 nm^[13]。

1.5 小麦测产

各处理分别取 2 m²的区域,测定实际产量和有效穗数,3 次重复;随机取 20 株有代表性的植株,进行室内考种,包括穗粒数和千粒重,3 次重复。

1.6 数据计算

碳源利用率用孔的平均颜色变化率(Average Well Color Development, AWCD)来表示。计算方法根据 Garland and Mills (1991)所述如下:

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

式中, C 为每个有培养基孔的吸光度值, R 为对照孔的吸光度值, n 为 Biolog 生态板上碳源的数目,即 31。若 $C - R$ 为负值则设置为 0^[14]。

本研究在培养 60 h(距离读数 240 h 内,最大 $AWCD$ 值的 50%所对应的读数时间)条件下,用 Logistic 方程拟合 $AWCD$ 得到的吸光度来表征 Biolog 生态板中微生物的代谢多样性^[15]。丰富度为单个基板的 $AWCD$ 在 60 h 下每个孔的数值减水孔后大于 0.25 的个数^[14]。香浓多样性计算公式如下:

$$H' = - \sum Pi \times \ln Pi \tag{2}$$

$$Pi = ni/N \tag{3}$$

式中, N 表示单个基板 96 h 下每个孔减水孔后的 $AWCD$ 的总数值, ni 是每个孔减水孔后的数值。

采用曲线整合方法估计碳源代谢强度,并用梯形面积(S) 代表代谢强度^[13]:

$$S = \sum ((v_i + v_{i-1})/2 \times (t_i - t_{i-1})) \tag{4}$$

式中, v_i 表示 $t = i$ 时间时的 $AWCD$ 值, $\sum$ 表示整个培养时间的总和,因为 240 h 内每隔 12 h 有 1 个 $AWCD$ 值,即 i 分别为 0 ~ 20。

1.7 数据统计与分析

本文应用 Excel 表格进行原始数据处理,绘图

应用 SigmaPlot 11.0 和 Origin 8 软件。利用 SPSS 16.0软件进行方差分析;应用 SPSS 软件进行主成分分析(PCA)。

2 结果与分析

2.1 耕作方式与秸秆还田对土壤基本理化性质的影响

耕作方式、秸秆还田、耕作方式和秸秆的交互作用均显著影响了土壤 pH 值、含水量、容重、有机碳含量、总氮、铵态氮、硝态氮含量(表 1)。pH 值整体在 5.69~7.47 范围内变化,深松和旋耕各处理,15 ~ 30 cm 土层下的 pH 值,平均高于 0~15 cm 土层下的 pH 值 6.67%。同种耕作方式下,0~15 cm 土层,秸秆还田 pH 值平均高于秸秆不还田 4.32%,相同秸秆还田模式下,常规翻耕 pH 值显著高于深松和旋耕,且深松显著高于旋耕。15~30 cm 土层的平均含水量为 15.56%,高于 0~15 cm 土层含水量 14.84%。在 0~15 cm 和 15~30 cm 土层内,秸秆还田含水量分别显著高于秸秆不还田的 9.24%和7.47%,0~15 cm 内,深松显著高于旋耕和常规翻耕 7.58%和 6.24%;15~30 cm 内,深松和旋耕高于常规翻耕 6.24%和 5.2%。容重表现为随土层加深而增加。0

表 1 耕作方式与秸秆还田对土壤基本理化性质的影响
Table 1 Effects of tillage methods and straw returning on basic physical and chemical properties of soil

土层/cm Soil layer	处理 Treatment	pH	含水量/% Water content	容重/(g · cm ⁻³) Bulk density	有机碳/(g · kg ⁻¹) Soil organic carbon	总氮/(g · kg ⁻¹) Total nitrogen	铵态氮/(mg · kg ⁻¹) NH ₄ ⁺ -N	硝态氮/(mg · kg ⁻¹) NO ₃ ⁻ -N
0~15	PC	6.54a	15.18b	1.47b	15.94d	1.42d	4.29e	16.02d
	AC	6.49a	13.53d	1.56a	15.43d	1.14e	4.30e	14.34e
	PS	6.40b	16.00a	1.26d	19.81a	1.76a	5.09a	23.36b
	AS	6.39b	14.89b	1.49b	16.70c	1.43d	4.56d	25.31a
	PR	6.05c	15.30b	1.41c	17.22b	1.57b	4.76b	15.55d
	AR	5.69d	14.13c	1.56a	14.82e	1.48c	4.65c	21.51c
单因素及交互分析 Single factor and interaction analysis	T	* *	* *	* *	* *	* *	* *	* *
	S	* *	* *	* *	* *	* *	* *	* *
	T×S	* *	ns	* *	* *	* *	* *	* *
15~30	PC	6.16c	15.73bc	1.73b	15.45a	1.38a	4.59c	18.93a
	AC	6.21c	14.26d	1.79a	14.23b	1.12b	4.64b	19.43a
	PS	7.18ab	16.45a	1.50f	14.50b	1.06c	4.69a	14.79b
	AS	7.47a	15.41c	1.63e	11.23cd	0.86d	4.53d	10.35c
	PR	6.59bc	16.20ab	1.66d	11.78c	0.78f	3.48e	10.29c
	AR	6.26c	15.35c	1.69c	11.06d	0.83e	4.60c	14.35b
单因素及交互分析 Single factor and interaction analysis	T	*	* *	* *	* *	* *	* *	* *
	S	ns	* *	* *	* *	* *	* *	ns
	T×S	ns	ns	* *	* *	* *	* *	* *

注:表中同一土层下同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$);* 表示显著性差异($P<0.05$),** 表示极显著差异($P<0.01$),ns 表示差异不显著。T:耕作因素;S:秸秆因素;T×S:耕作与秸秆交互作用。下同。

Note: Different lowercase letters of the same soil layer in the same column show significant differences ($P<0.05$). *: Significant difference ($P<0.05$); **: Extremely significant difference ($P<0.01$); ns: No significant difference; T: Tillage factors; S: Straw factor; T×S: Interaction between tillage and straw. The same below.

~15 cm 土层内,常规耕作秸秆不还田和旋耕耕作秸秆不还田显著高于深松耕作秸秆全还田处理 16.27%,秸秆不还田显著高于秸秆还田 11.71%;15~30 cm 内,常规翻耕秸秆不还田最高为 1.79 g·cm⁻³,常规翻耕秸秆还田次之为 1.73 g·cm⁻³,均显著高于深松耕作秸秆还田,秸秆不还田显著高于秸秆还田的 4.5%;且两土层内耕作与秸秆还田的交互作用均达到显著水平。

相对于 0~15 cm 土层,15~30 cm 土层的土壤有机碳含量呈显著下降趋势。在 0~15 cm 土层内,土壤有机碳含量表现为深松耕作秸秆还田处理最高,显著高于其他处理,秸秆还田显著高于秸秆不还田 12.81%,深松分别显著高于常规翻耕和旋耕 16.35%和 14.06%;在 15~30 cm 土层中,秸秆还田处理有机碳含量显著高于秸秆不还田 14.33%,常规翻耕耕作有机碳含量分别显著高于深松和旋耕 13.41%和 30.75%。除常规翻耕处理的全氮含量在两土层内基本无差异外,深松和旋耕处理的 15~30 cm 全氮含量明显低于 0~15 cm 土层全氮含量,且耕作、耕作与秸秆交互作用均达到显著水平。两土层内秸秆还田全氮含量均显著高于秸秆不还田处理;0~15 cm 内,深松和旋耕全氮含量显著高于常规翻耕,而 15~30 cm 土层内常规翻耕显著高于深松和旋耕。除常规翻耕处理外,铵态氮、硝态氮含量均随土层加深而减小。0~15 cm 内,铵态氮、硝态氮含量均表现为深松耕作最高,常规翻耕最低;而在 15~30 cm 层次内,常规翻耕铵态氮、硝态氮含量最高,深松次之,旋耕最低,且秸秆不还田显著高于秸秆还田处理。

2.2 耕作方式与秸秆还田对土壤微生物碳源代谢功能的影响

2.2.1 土壤微生物 AWCD 值变化 AWCD 值是 Biolog 板微生物群落碳源代谢总体活性的指标^[16],AWCD 值越大,表示微生物碳源代谢能力越强。碳源包括氨基酸类、胺类、聚合物类、其他类、羧酸类和糖类等 6 大类物质,不同处理下的土壤微生物对 6 大类碳源利用的 AWCD 均呈 Logistic 型变化,各处理土壤微生物整体对聚合物类、糖类、氨基酸碳源利用度较高,因此这里针对这三大类进行分析(图 1)。

0~15 cm 土层内,无论哪种耕作方式,聚合物类、糖类、氨基酸碳源 AWCD 大致均表现为秸秆还田处理大于秸秆不还田处理,同一秸秆量还田模式下,聚合物类、糖类、氨基酸碳源均表现为深松最高,旋耕最低,而糖类在秸秆不还田下,表现为深松最高,常规翻耕最低。

15~30 cm 土层内,氨基酸类碳源的 AWCD 在常规翻耕、深松耕作方式下均表现为秸秆全还田处理大于不还田,而在旋耕下秸秆还田处理却小于秸秆不还田;聚合物类和糖类 2 大类碳源的 AWCD 值在 PC、PS 处理较高,PR、AS 次之,AC、AR 较低。

2.2.2 不同处理下土壤微生物碳源代谢多样性和代谢强度 碳源代谢丰富度反映土壤微生物功能多样性,除 AR 处理外,15~30 cm 土层下的碳源丰富度较 0~15 cm 都有所降低(表 2)。

0~15 cm 土层内,方差分析结果表明,PC 和 PS 处理的丰富度为 28.5 吸光度单位,显著高于其他处理,深松处理丰富度显著高于常规翻耕和旋耕,且常规翻耕显著高于旋耕;15~30 cm 土层内,PC、PS、AR 处理的丰富度为 24 吸光度单位,显著高于其他处理;两层次内,AC 处理丰富度均最低,方差分析结果仍表明秸秆还田丰富度均显著高于秸秆不还田。

香浓多样性指数用来计算细菌群落的生理多样性^[16]。方差分析结果表明(表 2)土壤微生物碳源代谢香浓多样性,除了在 15~30 cm 土层中 AS 显著小于 AR 外,综合两土层,深松处理的平均香浓多样性指数高于旋耕和常规翻耕,AC 在两土层中香浓多样性指数均最低,而秸秆还田因素起到了显著作用,秸秆还田平均香浓多样性指数高于秸秆不还田。

表 2 不同处理下土壤微生物碳源代谢多样性和代谢强度
Table 2 Metabolic diversity and metabolic intensity of soil microbial carbon sources under different treatments

土层/cm Soil layer	处理 Treatment	碳源代谢 丰富度 The abundance of carbon source metabolism	香浓多样 性指数 Fragrant diversity index	碳源代谢强度 Carbon source metabolic intensity
0~15	PC	28.5a	3.22a	318.83b
	AC	19.0e	3.01c	206.79e
	PS	28.5a	3.23a	332.17a
	AS	23.0c	3.10b	247.78d
	PR	23.5b	3.12b	260.76c
	AR	20.5d	3.11b	202.75e
15~30	PC	24.0a	3.16bc	281.37a
	AC	17.0c	2.94e	205.86e
	PS	24.0a	3.21a	264.87b
	AS	22.0b	3.13cd	248.76c
	PR	22.0b	3.10d	226.40d
	AR	24.0a	3.17b	207.82e

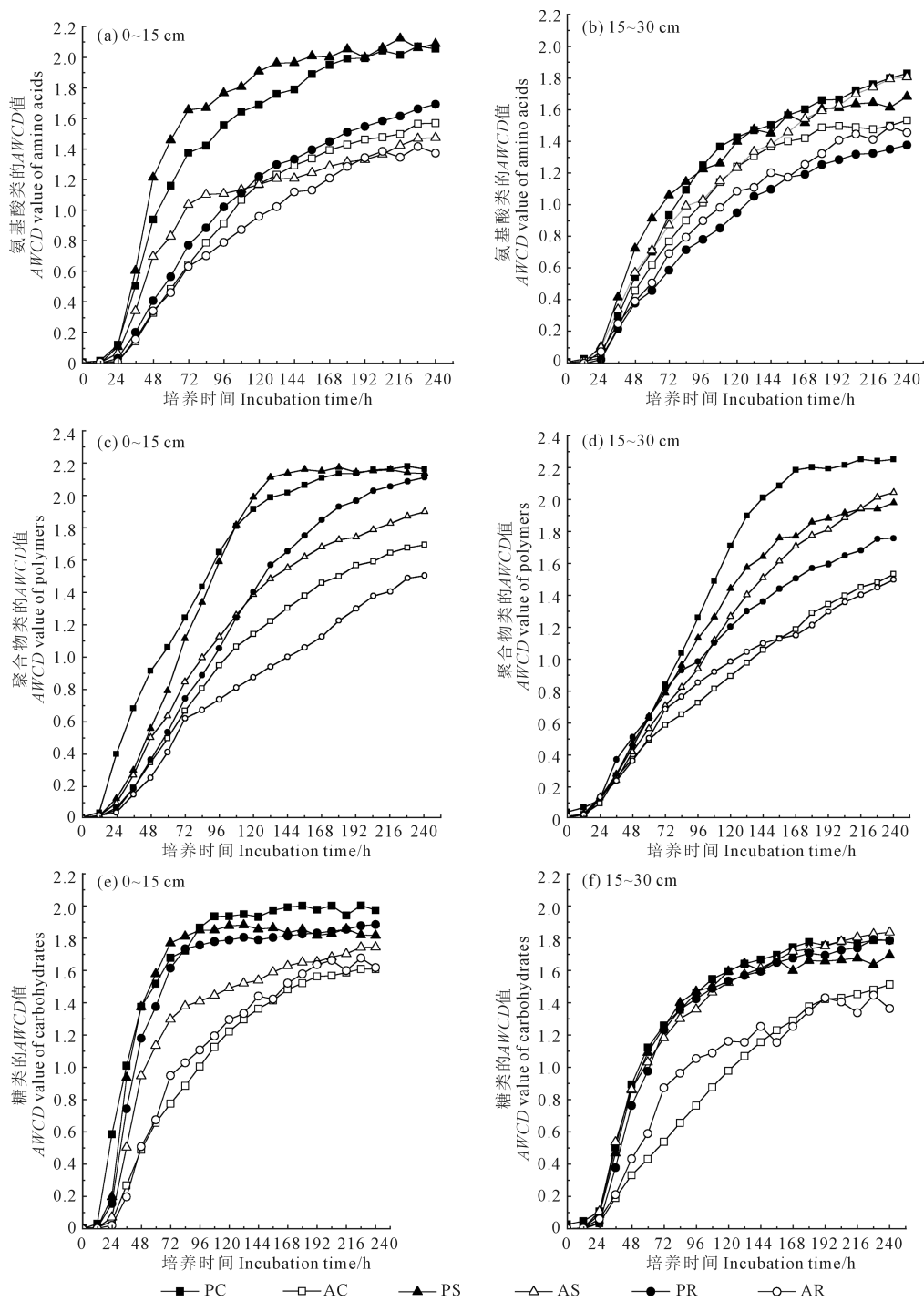


图 1 各土层氨基酸类、聚合物类、糖类 AWCD 值变化

Fig.1 Changes in AWCD value of amino acids, polymers and carbohydrates in different soil layer

15~30 cm 土层中各处理的碳源代谢强度整体上比 0~15 cm 表层土呈下降趋势(表 2),相同还田处理条件下,除 15~30 cm 土层的 PC 高于 PS 外,其余均表现为深松显著高于常规翻耕和旋耕;而相同耕作方式下,秸秆还田处理的碳源代谢强度均显著高于无秸秆还田处理。

0~15 cm 中,PS 碳源代谢强度最高为 318.83,显著高于其他处理,AC 最低为 206.79,显著低于其

他处理;15~30 cm 土层中,PC 最高为 281.37,显著高于其他处理,AC 代谢强度最低为 205.86,显著低于其他处理。

2.2.3 供试土壤微生物碳源利用类型的主成分分析 应用主成分分析 (Principal Component Analyses, PCA) 来研究不同耕作方式与秸秆还田下土壤微生物群落对微平板上 31 种碳源的利用情况,可以直观反映不同样本微生物群落的代谢特征,可

用来解释微生物对碳源利用的多样性。本试验采用培养 60 h 后的数据进行主成分分析,共提取出 2 个主成分。0~15 cm 土层提取与土壤微生物碳源利用功能多样性相关的 2 个主成分,累积贡献率达到 80.0%,第一主成分(PC1)的特征根和贡献率为 20.428和65.9%,第二主成分(PC2)的特征根和贡献率为4.356%和 14.1%;15~30 cm 土层提取的 2 个主成分,累积贡献率达到 69.1%,第一主成分(PC1)的特征根和贡献率为 13.479 和 43.52%,第二主成分(PC2)的特征根和贡献率为 7.94 和 25.64%;这表明 PC1 和 PC2 是变异的主要来源,并且提取主要特征来源,可以解释变量的绝大部分信息(图 2)。

0~15 cm 土层,碳源分为六大类后,对 PC1 轴贡献最大的碳源为胺类,其次为氨基酸类和其他类;对 PC2 轴贡献最大的碳源为胺类,其次为羧酸类。由图 2a 可知,不同处理在 PC 轴上表现出明显的差异,PS、PC 偏向于利用右边区域的碳源,而 AR、AC 则偏向于利用左边区域的碳源,相比而言 PS、PC 处理更有利于微生物对大部分碳源的利用。PS 处理的土壤微生物倾向于利用胺类和羧酸类,PC 倾向于利用其他糖类和氨基酸类,而 AS 和 PR 处理的土壤微生物也能够利用这些碳源,利用的种类无差异,但是利用的强度较低,得分较低,因此在图中偏左下方显示。同理可知 AC 和 AR 的处理(表 3)。

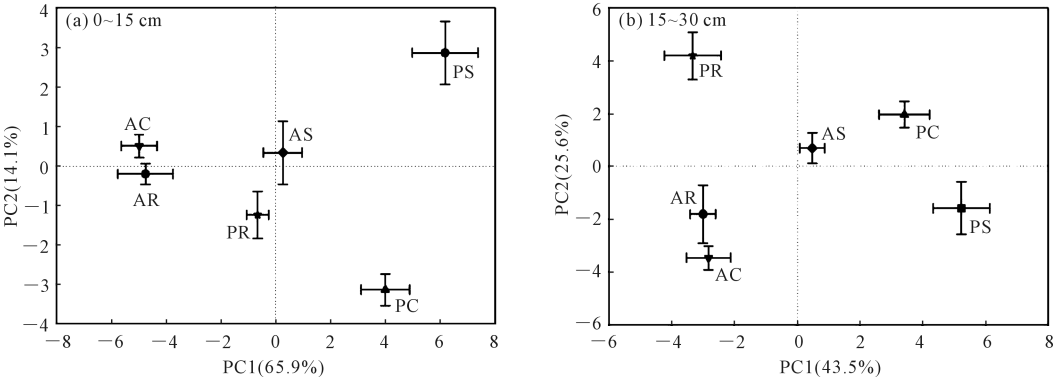
15~30 cm 土层,碳源分为六大类后,对 PC1 轴贡献最大的碳源为胺类,其次为氨基酸类;对 PC2 轴贡献最大的碳源为羧酸类,其次为糖类和胺类。由图 2b 可知,PC、PS、AS 偏向于利用右边区域的碳源,PR、AR、AC 偏向于利用左边区域的碳源,相比而

言,PS、PC 更有利于微生物对大部分碳源的利用。通过图 2b 分析表明:PC 处理土壤微生物倾向于利用羧酸和聚合物类,PS 处理土壤微生物倾向于利用糖类、氨基酸类和胺类,PR 处理土壤微生物倾向于利用羧酸类和胺类。而 AS、AR、AC 处理土壤微生物得分较低,利用强度较低,但是也能利用这六大类范围的碳源(表 3)。

表 3 不同处理下土壤微生物的碳源利用倾向性

Table 3 Carbon source utilization tendency of soil microorganisms under different treatments

土层/cm Soil layer	处理 Treatment	碳源利用倾向性 Tendency of carbon source utilization
0~15	PC	其他糖类和氨基酸类 Other sugars and amino acids
	AC	利用强度相对较小 Utilization intensity is relatively small
	PS	胺类和羧酸类 Amines and carboxylic acids
	AS	利用强度相对较小 Utilization intensity is relatively small
	PR	利用强度相对较小 Utilization intensity is relatively small
	AR	利用强度相对较小 Utilization intensity is relatively small
15~30	PC	羧酸和聚合物类 Carboxylic acids and polymers
	AC	利用强度相对较小 Utilization intensity is relatively small
	PS	糖类、氨基酸类和胺类 Sugar, amino acids and amines
	AS	利用强度相对较小 Utilization intensity is relatively small
	PR	胺类和羧酸类 Amines and carboxylic acids
	AR	利用强度相对较小 Utilization intensity is relatively small



注:各处理的中心点分别对应 PC1 轴和 PC2 轴的垂直投影数值,其符号与旁边标注的处理号对应。穿过中心点的横线和竖线是分别平行于 PC1 轴和 PC2 轴的误差线。

Note:The center point of each processing corresponds to the vertical projection value of PC1 axis and PC2 axis ,espectively, and its symbol corresponds to the processing number marked nearby. The horizontal and vertical lines passing through the center point are error lines parallel to PC1 axis and PC2 axis ,respectively.

图 2 微生物碳源利用载荷系数分布的主成分分析

Fig.2 Principal component analysis and load coefficient distribution of microbial carbon source utilization

2.3 不同处理下的小麦产量及其构成因素

不同处理对小麦产量及其构成因素有不同的影响(表 4),秸秆还田显著提高了穗粒数、千粒重及产量。穗粒数表现为深松显著高于常规翻耕和旋耕;千粒重表现为深松显著高于旋耕和常规翻耕,且旋耕显著高于常规翻耕;产量表现为深松耕作平均产量最高为 7.375 t·hm⁻²,显著高于常规翻耕和旋耕的 6.34%和 6.96%,但常规翻耕和旋耕之间并无显著差异。

表 4 不同处理下的小麦产量及其构成因素
Table 4 Wheat yield and its components under different treatments

处理 Treatment	穗粒数 Grains perspike	千粒重/g 1000-grain weight	产量/(t·hm ⁻²) Yield
PC	34.02b	34.64b	7.47b
AC	33.05c	31.61d	6.40e
PS	36.85a	36.75a	7.81a
AS	34.38b	34.88b	6.94d
PR	34.43b	34.96b	7.33c
AR	32.86c	33.07c	6.46e
T	* *	ns	* *
S	* *	*	* *
T×S	ns	ns	*

3 讨 论

3.1 微生物碳源代谢功能对产量的影响

研究发现,在秸秆还田处理下,微生物碳源代谢的活性及能力明显高于秸秆不还田处理,对于耕作方式而言,深松条件下的碳源代谢活性及能力明显高于常规翻耕和旋耕。例如:秸秆还田能为微生物提供外源有机物,即提供了丰富的能量和易分解的碳源,因此秸秆还田能提高风沙土土壤的微生物活性和丰富度指数;李玉洁等^[17]学者认为免耕、少耕和秸秆还田等方式可能会产生较少的土壤扰动,即保持一个较为稳定的土壤微环境,在某种程度上提高了土壤的微生物多样性^[18]。

本研究表明深松和秸秆还田均能明显提高作物产量,而土壤中微生物的碳源代谢功能与作物的产量具有明显的正相关性,即土壤中微生物的碳源代谢功能被增强,作物的产量也会得到较大的提高,Nielsen 等^[19]的研究也证实了这一点,土壤功能得到改善的指标为微生物数量和活性的增加,进而提高了作物的产量,对实现农业的可持续发展具有重要意义。

3.2 土壤理化性质对微生物碳源代谢功能的影响

RDA 分析结果表明,土壤基本理化性质能够影响微生物群落碳源代谢功能对耕作方式与秸秆还田处理的响应,而土壤微生物的碳源代谢功能又与土壤的水分、容重、总氮、pH 等指标密切相关。本研

究中,在 AC 和 AR 处理条件下的容重表现最高,因此在容重较高的情况下不利于提高土壤中的微生物碳源代谢能力,并且对于容重会制约土壤中微生物碳源代谢能力的相关结论已被侯银^[20]证实。

试验结果表明,在一定程度上,铵态氮和硝态氮含量的变化能够合理地解释微生物碳源代谢功能的变异,但效果并不明显。马慧君等^[21]试验表明,硝态氮可能会提高微生物的活性,并抑制微生物绝对优势种群的出现,释放生态位,从而提高了土壤微生物的多样性,因此在一定的氮浓度范围内,随土壤中硝态氮含量的增多,土壤微生物的代谢水平、Shannon 多样性均会被明显增强,呈现出明显的正相关现象^[22]。本研究表明,在综合分析比较之下,总氮含量环境数据与 PS 处理物种数据的联系最为紧密,表明在较高氮含量的条件下,有利于增强土壤中微生物的碳源代谢功能。

3.3 耕作方式与秸秆还田对土壤理化性质的影响

研究结果表明,土壤含水量在秸秆还田和深松耕作处理下均被明显提高,通过秸秆还田提供的有机物,使土壤结构更加稳定,水分蒸发减少,并大大改善土壤孔性,最终使土壤中的含水量得到明显增加。本研究结果还表明,随着土层的加深,土壤容重也随之增加,同时秸秆还田和深松处理下的土壤容重分别小于秸秆不还田和其他耕作处理下的土壤容重,因此秸秆还田和深松能明显减低土壤容重^[23],这与本文研究结果一致,但也有与其相反的研究表明^[24],土壤的入渗量在免耕和少耕的条件下会减少,导致土壤表层的容重增大。

本研究结果表明,在深松和旋耕处理下,随着土层的加深,pH 值有增加的趋势,在 15~30 cm 土层,相比于旋耕和常规翻耕,深松耕作可以明显提高土壤中的 pH 值;在 0~15 cm 土层,秸秆还田能够明显提高土壤中的 pH 值,然而 Thomas 等^[25]的研究结果却与之截然不同,提出在 0~30 cm 土层内,耕作和残茬覆盖处理并不会影响土壤的 pH 值;但另有试验结果表明^[26],在 0~30 cm 土层内,土壤 pH 平均值在 0~10 cm 内没有明显改变,但是在 10~30 cm 土层有明显增加。

本试验中,秸秆还田对提高土壤中铵态氮和硝态氮含量的作用并不明显,但明显提高了土壤中的总氮含量。将 3 种耕作方式进行比较后发现,在 0~15 cm 土层,深松耕作明显提高了土壤中的总氮、硝态氮和铵态氮含量,而在 15~30 cm 土层内,与旋耕和深松相比,常规翻耕处理下的总氮、硝态氮和铵态氮含量均表现出较高水平。同样有研究表明^[27],

秸秆还田能提高土壤中的总氮含量,而非传统耕作方式则有利于增加土壤中的养分并提高土壤中的全氮含量,最终改善了土壤状况^[28],这与本试验的结果一致。有学者提出,深松可以在不增加深层土壤硝态氮含量的基础上促进 0~60 cm 土层的氮素吸收。本研究结果还表明,在 0~15 cm 土层内,深松和秸秆还田处理下的土壤有机碳含量表现出最高水平,而在 15~30 cm 土层中,与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理下的有机碳含量明显高出 14.33%。但也有研究表明:长期旋免耕后进行深松对土壤有机碳及其组分周转的影响较为明显,而下层土壤(10~30 cm)的土壤碳库活性在长期免耕转变为深松处理后能够被明显提高。

4 结 论

与常规耕作秸秆不还田相比,深松和秸秆还田均可显著改善土壤理化性质,进而显著提高土壤微生物碳源代谢能力和代谢活性,最终显著增加了小麦产量;但旋耕较常规翻耕而言,未体现明显的优势。本试验表明了深松与秸秆还田结合有利于华北平原农田生态系统增强微生物碳源代谢多样性,促进小麦产量的提高,具有实践推广价值。

参 考 文 献:

[1] 王丙文. 保护性耕作农田碳循环规律和调控研究[D]. 泰安:山东农业大学,2013.

[2] Jiang L L, Han G M, Lan Y, et al. Corn cob biochar increases soil culturable bacterial abundance without enhancing their capacities in utilizing carbon sources in Biolog Eco-plates [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(3):713-724.

[3] 郑华,欧阳志云,方治国,等. Biolog 在土壤微生物群落功能多样性研究中的应用[J].土壤学报, 2004, 41(3): 456-461.

[4] 李滕,季民,王灿. Biolog-ECO 法用于 PAC-A/O 系统微生物群落分析[J]. 中国积水排水,2015, 31(1): 10-12.

[5] Chen X W, Zhan X P, Liang A Z, et al. Effects of tillage mode on black soils penetration resistance and bulk density [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(2):439-444.

[6] Xu S Q, Cui S Y, Chen F, et al. Effect of tillage on content of density fractions of paddy soil organic carbon and its spatial distribution [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(1):127-132.

[7] Wang Y, Han B, Shi Z Q, et al. Effects of conservation tillage on soil microbial characters and soil enzyme activities [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(4):120-122, 142.

[8] 李晓莎,武宁,刘玲,等. 不同秸秆还田和耕作方式对夏玉米农田土壤呼吸及微生物活性的影响[J]. 应用生态学报,2015, 26(6): 1765-1771.

[9] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass carbon [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1987, 19(6):703-707.

[10] Markus D K, McKinnon J P, Buccafuri A F. Automated analysis of nitrite, nitrate, and ammonium nitrogen in soils [J]. Soil Science Society of America Journal. 1985, 49(5):1208-1215.

[11] 中国土壤学会.土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000, 1-664.

[12] Winding A. Fingerprinting bacterial soil communities with BIOLOG microtiter plates [J]. 1994, 3;85-94.

[13] Wang Y, Ouyang Z, Zheng H, et al. Carbon metabolism of soil microbial communities of restored forests in Southern China [J]. Journal of Soils & Sediments Protection Risk Assessment & Rem, 2011, 11(5):789-799.

[14] Kaufmann K, Christophersen M, Buttler A, et al. Microbial community response to petroleum hydrocarbon contamination in the unsaturated zone at the experimental field site Vrlse, Denmark [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2004, 48(3):387-399.

[15] Lindstrom J E, Barry R P, Braddock J F. A kinetic approach to constructing potential C source utilization patterns [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1998, 30(2):231-239.

[16] Kenarova A, Radeva G, Traykov I, et al. Community level physiological profiles of bacterial communities inhabiting uranium mining impacted sites [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 100: 226-232.

[17] 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.

[18] 孙冰洁. 不同耕作方式下土壤微生物在黑土有机碳固定中的作用研究[D]. 长春:中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所),2016.

[19] Nielsen M N, Winding A, Binnerup S, et al., Microorganisms as indicators of soil health [J]. NERI Technical Reports, 2002: 388.

[20] 侯银. 林分结构对杨树人工林土壤微生物多样性的影响[D]. 南京:南京林业大学,2013.

[21] 马慧君,张雅坤,许文欢,等. 模拟氮沉降对杨树人工林土壤微生物群落碳源利用类型的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2017, 41(5): 1-6.

[22] 胡婵娟,傅伯杰,刘国华. 黄土丘陵沟壑区典型人工林下土壤微生物功能多样性[J]. 生态学报,2009, 29(2): 727-733.

[23] Varsa E C, Chong S k, Abolaji J O, et al. Effects of deep tillage on soil physical characteristics and corn (*Zea mays* L.) root growth and production [J]. Soil and Tillage Research, 1997, 43(3-4):219-228.

[24] Glab T, Kulig B. Effect of mulch and tillage system on soil porosity under wheat (*Triticum Aestivum*) [J]. Soil and Tillage Research, 2008, 99(2):169-178.

[25] Thomas G A, Dalal R C, Standley J. No-till effects on organic matter, pH, cation exchange capacity and nutrient distribution in a Luvisol in the semi-arid subtropics [J]. Soil & Tillage Research, 2007, 94(2):295-304.

[26] 侯雪坤. 不同耕作方式下土壤耕层理化性状和生物学特性时空分布研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2011.

[27] 王子臣. 周年秸秆还田与土壤耕作对水稻产量、品质及稻季温室气体排放的影响[D]. 扬州:扬州大学, 2010.

[28] 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.