

引用格式:

赵杨, 戴力, 李超, 高杜娟, 匡伟, 梁玉刚, 陈友德, 方宝华. 油稻免耕种植模式的土壤理化特性和酶活性[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(5): 507–512.

ZHAO Y, DAI L, LI C, GAO D J, KUANG W, LIANG Y G, CHEN Y D, FANG B H. Soil physical and chemical properties and enzyme activities of rape and rice planting patterns under no-tillage[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2022, 48(5): 507–512.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 油稻免耕种植模式的土壤理化特性和酶活性

赵杨<sup>1,2</sup>, 戴力<sup>1,2</sup>, 李超<sup>3</sup>, 高杜娟<sup>1,2</sup>, 匡伟<sup>1,2</sup>, 梁玉刚<sup>1,2</sup>, 陈友德<sup>1,2</sup>, 方宝华<sup>1,2\*</sup>

(1.湖南省水稻研究所, 湖南 长沙 410125; 2.农业农村部长江中下游水稻遗传育种重点实验室, 湖南 长沙 410125; 3.湖南省土壤肥料研究所, 湖南 长沙 410125)

**摘要:** 2016年, 在湖南省益阳市南县免耕试验基地开始设计不同种植模式处理; 2018—2020年, 采集冬闲-稻(IR)、冬闲-稻-稻(IRR)、油-稻(OR)、油-稻-稻(ORR)等4种油稻种植模式的土壤样品, 测定土壤的容重、微团聚体、养分和酶活性, 探究免耕条件下不同油稻种植模式对土壤理化特性和酶活性的影响。结果表明: 2018、2019年, 同一年内不同油稻种植模式土壤容重间的差异无统计学意义; 2020年, IR和IRR的土壤容重显著高于OR和ORR的; 2020年, OR和ORR的0.250~1.000 mm粒级微团聚体质量分数较2018年的分别降低了52.04%和49.41%, 不同种植模式对大粒级(>0.010 mm)微团聚体质量分数的影响较大, 对小粒级(<0.010 mm)的影响较小; 2018、2019年, 同一年内4种种植模式土壤有机质质量分数间的差异无统计学意义, 2020年, ORR的土壤有机质质量分数显著高于其他模式的; 同一年内, OR、ORR的土壤速效钾质量分数显著低于IR、IRR的, ORR的土壤纤维素酶、磷酸酶活性均较IRR的高。可见, 免耕条件下, 油-稻和油-稻-稻种植模式可减缓土壤的紧实度, 改变土壤微团聚体组分, 延缓有机质含量降低速率, 提高土壤纤维素酶和磷酸酶活性。

**关键词:** 油稻种植模式; 免耕; 土壤容重; 微团聚体; 土壤养分; 酶活性

中图分类号: S344.1<sup>+</sup>7 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2022)05-0507-06

## Soil physical and chemical properties and enzyme activities of rape and rice planting patterns under no-tillage

ZHAO Yang<sup>1,2</sup>, DAI Li<sup>1,2</sup>, LI Chao<sup>3</sup>, GAO Dujuan<sup>1,2</sup>, KUANG Wei<sup>1,2</sup>,  
LIANG Yugang<sup>1,2</sup>, CHEN Youde<sup>1,2</sup>, FANG Baohua<sup>1,2\*</sup>

(1.Hunan Rice Research Institute, Changsha, Hunan 410125, China; 2.Key Laboratory of India Rice Genetics and Breeding in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River Valley, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Changsha, Hunan 410125, China; 3.Hunan Soil and Fertilizer Institute, Changsha, Hunan 410125, China)

**Abstract:** The study began to design different planting pattern treatments in the rape season at Nanxian no-tillage experimental base in Yiyang City, Hunan Province in 2016. In order to study the effects of different rape and rice planting patterns on soil physical and chemical properties and enzyme activities under no-tillage conditions, soil samples of four planting patterns were collected, including winter idle-rice(IR), winter idle-rice-rice(IRR), rape-rice(OR), rape-rice-rice(ORR), and soil bulk density, microaggregates, nutrients and enzyme activities were determined from 2018 to 2020. The results showed that there was no difference in soil bulk density between different rape and rice planting patterns in 2018 and 2019, and the soil bulk densities of IR and IRR patterns were significantly higher than those of OR and ORR patterns in 2020. In 2020, the mass fractions of soil microaggregates in the 0.025-1.000 mm size of OR and ORR patterns decreased by 52.04% and 49.41% compared with 2018. The effects of different planting patterns on the mass fractions of large grain

收稿日期: 2021-09-12

修回日期: 2022-09-30

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2019JJ50335)

作者简介: 赵杨(1985—), 女, 山西太原人, 博士, 助理研究员, 主要从事水稻高产高效栽培研究, zhaoyang6560@126.com; \*通信作者, 方宝华, 博士, 研究员, 主要从事水稻高产绿色栽培研究, fangrock@163.com

microaggregates( $>0.010$  mm) were greater than those of small grain microaggregates( $<0.010$  mm). There was no difference in soil organic matter mass fraction among the four patterns in 2018 and 2019. The soil organic matter mass fraction of ORR patterns in 2020 was significantly higher than the other three patterns. In the same year, the soil available K mass fractions of OR and ORR patterns were significantly lower than those of IR and IRR patterns, and the soil cellulase and phosphatase activities in ORR pattern were higher than those in IRR pattern. In conclusion, rape-rice and rape-rice-rice patterns under no-tillage could slow down soil compaction rate, change soil microaggregate composition, delay the decrease rate of organic matter mass fraction, and improve soil cellulase and phosphatase activities.

**Keywords:** rape and rice planting pattern; no-tillage; soil bulk density; microaggregate; soil nutrient; enzyme activity

免耕是一种保护性耕作方式。相比于传统的翻耕,免耕能减轻土壤的风蚀和水蚀,改变表层土壤的理化性质,增加表层土壤有机质含量,保持地力,节约生产成本,提高农业经济效益<sup>[1]</sup>。土壤理化性质和酶活性都是反映土壤质量的重要指标,直接反映土壤养分现状和周围生态环境的耦合效果<sup>[2]</sup>。不同栽培措施和管理方式都会影响土壤理化特性和土壤酶活性。郑凤君等<sup>[3]</sup>研究发现,黄土高原旱作农业区免耕秸秆还田,可改善土壤团聚体结构,增加土壤水分含量,实现土壤保墒和作物增产的协同效应。刘兰清等<sup>[4]</sup>研究发现,免耕条件下合理施肥,可增加土壤有机碳、碱解氮、速效磷和速效钾的含量,提高土壤质量。SINGH等<sup>[5]</sup>采集免耕3年后的土壤样品,发现免耕可增加土壤脱氢酶、葡萄糖酶和碱性磷酸酶的活性。

目前,多数研究主要集中在免耕条件下施肥、秸秆还田、土壤改良剂等方面对土壤质量的影响,而不同种植模式下土壤的理化特征和土壤酶活性的变化规律研究较少。水稻和油菜是湖南省种植面积最大的2种农作物。典型的油菜种植模式有冬闲-中稻、冬闲-双季稻、油菜-一季晚稻、油菜-双季稻等4种。本研究中,采集免耕条件下经过2~4年不同油菜种植模式处理后的土壤样品,研究免耕条件下油菜种植模式对土壤理化特性和酶活性的影响。现将结果报告如下。

## 1 试验区概况

试验于 2018—2020 年在湖南省益阳市南县三仙湖镇太平桥村(112°24'E, 29°09'N)进行。试验区属湿润亚热带季风气候,年平均气温 16.6℃,降水量 1238 mm,日照时间 1776 h。土壤为湖积物发育的紫潮泥,其水解氮、有效磷、速效钾分别为 202.2、21.5、80.1 mg/kg,全氮、全钾、全磷、有机质分别为 2.76、1.31、25.91、41.51 g/kg, pH 为 8.01。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验设计

试验田于 2009 年开始免耕,2009—2016 年为油-稻双免耕双直播模式,2016 年油菜季开始设置 4 个种植模式处理,分别为冬闲-稻(IR)、油-稻(OR)、油-稻-稻(ORR)、冬闲-稻-稻(IRR),油菜和水稻收获后均为高秆还田。采用大区设计,每个大区面积 282 m<sup>2</sup>(47 m×6 m),大区进行开沟分厢,每个厢面宽 1.8 m,沟宽、沟深分别为 30、20 cm。

#### 2.1.1 冬闲-稻(IR)处理

供试水稻品种为 Y 两优 900,采用免耕人工撒播,播种量为 45 kg/hm<sup>2</sup>。水稻播种后 3~4 叶期施 90 kg/hm<sup>2</sup> 的尿素,5~6 叶期施 600 kg/hm<sup>2</sup> 的复合肥(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 分别占 17%、5%、26%),幼穗分化期施 120 kg/hm<sup>2</sup> 的复合肥作穗肥。病虫害和田间灌溉管理措施同一般高产田。

#### 2.1.2 油-稻(OR)处理

供试油菜品种为华湘油 16,水稻品种为深两优 5814,均采用免耕人工撒播,播种量分别为 3、45 kg/hm<sup>2</sup>。油菜播种时用 45 kg/hm<sup>2</sup> 的尿素拌种作促苗肥,3~4 叶时追施 150 kg/hm<sup>2</sup> 的尿素,5~6 叶时追施 300 kg/hm<sup>2</sup> 的复合肥(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 分别占 26%、10%、15%),以保证冬发壮苗。水稻施肥、病虫害和水分管理措施同 IR。

#### 2.1.3 油-稻-稻(ORR)处理

供试油菜品种为华湘油 16,早稻品种为中早 39,晚稻品种为 H 优 518。油菜播种、施肥、病虫害和水分管理措施同 OR。早、晚稻均采用免耕抛秧。早、晚稻密度分别为 40、35 万穴/hm<sup>2</sup>。抛秧 7 d 后施 150 kg/hm<sup>2</sup> 的尿素,幼穗分化期施 450 kg/hm<sup>2</sup>

的复合肥(N、 $P_2O_5$ 、 $K_2O$  分别占 17%、5%、26%)。

#### 2.1.4 冬闲-稻-稻 (IRR)

早、晚稻供试品种、播种方式、病虫害和肥水管理措施同 ORR。

### 2.2 样品采集及前处理

于 2018 年 10 月 12 日和 18 日、2019 年 10 月 21 日、2020 年 11 月 12 日采集土壤样品。由于长期免耕土壤扰动较少,作物根系多集中在土壤表层,表层土壤理化性质和微生物变化明显,因此,样品采集 0~5 cm 耕层土壤。将每个大区分为 3 个小区,每个小区分别随机取 5 点原状土壤和混合土壤。原状土壤用于测定土壤容重和微团聚体;混合土壤剔除石砾和植物残根等杂物,混合制样,过孔径 2 mm 筛后,于 4℃ 冰箱内保存,用于测定土壤的酶活性和养分含量。

### 2.3 测定项目与方法

采用环刀法测定土壤容重;采用干筛法测定土壤微团聚体;依次采用硝基水杨酸比色法、高锰酸钾滴定法、靛酚蓝比色法和磷酸苯二钠比色法<sup>[6]</sup>分别测定土壤纤维素酶、过氧化氢酶、脲酶、磷酸酶活性。纤维素酶以 72 h 后 10 g 土壤中生成葡萄糖的毫克数表示;过氧化氢酶活性以每克土消耗 0.02 mol/L 高锰酸钾毫升数表示;磷酸酶活性以每克土酚的毫克数表示;脲酶活性以每 100 g 土  $NH_3-N$  的毫克数表示。参考文献[7],采用电位法测定土壤 pH 值;采用重铬酸钾-浓硫酸-加热法测定土壤有机质质量分数;采用凯氏定氮法测定土壤全氮;采用碱解扩散法测定土壤碱解氮;采用高氯酸-硫酸法测定土壤全磷;采用碳酸氢钠法测定土壤有效磷;采用氢氧化钠熔融法测定土壤全钾;采用火焰分光光度计法测定土壤速效钾。

### 2.4 数据处理与统计分析

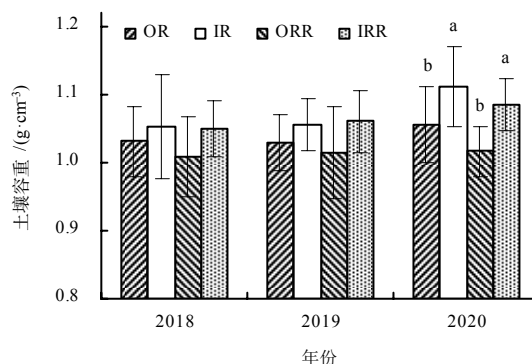
运用 Excel 2007 处理数据和绘图;运用 Statistix 8.0 进行方差分析,采用 LSD 法进行多重比较。

## 3 结果与分析

### 3.1 种植模式对土壤容重的影响

从图 1 中可以看出,2018 和 2019 年,4 种植

模式对土壤容重的影响较小,模式间差异无统计学意义;2020 年,各模式土壤容重较前 2 年均有一小幅增加,IR 和 IRR 的土壤容重显著高于 OR 和 ORR 的,说明免耕条件下冬季种植油菜可减缓土壤紧实速率。



同一年内图柱上不同字母示种植模式间差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。

图 1 不同种植模式的土壤容重

Fig.1 Soil bulk density of different planting patterns

### 3.2 种植模式对土壤微团聚体质量分数的影响

从种植年限来看,4 种植模式随免耕种植年限增加,除 2019 年 IR 的 0.050~0.250 mm 粒级外,0.250~1.000 mm 和 0.050~0.250 mm 粒级土壤微团聚体质量分数呈不断减少的趋势,0.010~0.050 mm 和 0.005~0.010 粒级微团聚体质量分数呈上升趋势(表 1)。从种植模式来看,2018 年,除 IR 的 0.250~1.000 mm 粒级微团聚体质量分数显著低于其他模式的外,其他等级的微团聚体质量分数在不同模式间的差异均无统计学意义;2019 年,0.250~1.000 mm 粒级微团聚体质量分数除 OR 和 IRR 间的差异无统计学意义外,不同模式间的差异均有统计学意义,IR 的 0.050~0.250 mm 粒级微团聚体质量分数显著高于其他模式的;2020 年,IRR 的 0.250~1.000 mm 粒级微团聚体质量分数显著高于其他模式的,IR 的 0.010~0.050 mm 粒级微团聚体质量分数显著高于 ORR 和 IRR 的。可见,不同种植模式对大粒级微团聚体(>0.010 mm)的影响较大,而对小粒级(<0.010 mm)的影响较小。OR 和 ORR 的 0.250~1.000 mm 粒级微团聚体质量分数随种植年限增加而下降的幅度较大,2020 年其质量分数较 2018 年的分别降低 52.04%和 49.41%。

表 1 不同种植模式的土壤微团聚体质量分数

Table 1 The mass fraction of microaggregates under different planting patterns		%					
年份	种植模式	微团聚体质量分数					
		0.250~1.000 mm	0.050~0.250 mm	0.010~0.050 mm	0.005~0.010 mm	0.001~0.005 mm	<0.001 mm
2018	OR	30.19a	19.85	22.99	9.86	13.74	3.37
	IR	21.04b	21.84	26.15	11.02	14.86	3.77
	ORR	29.65a	19.64	23.11	9.67	13.27	3.34
	IRR	30.07a	19.49	22.96	8.37	13.28	3.15
2019	OR	24.49a	17.20b	28.52	10.91	13.33	3.42
	IR	18.14c	21.96a	29.08	12.37	14.72	3.39
	ORR	21.32b	19.01b	29.09	11.71	13.72	3.15
	IRR	25.89a	17.74b	28.31	10.95	12.65	3.13
2020	OR	14.48b	17.02	30.60ab	13.38	21.52	4.66
	IR	13.83b	17.13	32.52a	13.29	20.64	3.94
	ORR	15.00b	17.30	29.97b	12.69	20.07	3.98
	IRR	20.58a	16.84	28.51b	11.83	18.67	3.56

同一年内同列不同字母示种植模式间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

### 3.3 不同种植模式对土壤养分的影响

不同种植模式具有不同的施肥方式,在各模式正常施肥的情况下,2018—2020 年,同一年内 4 种植模式间的土壤 pH 和全氮、全磷、全钾质量分数差异均无统计学意义(表 2);随种植年限的增加,4 种植模式的土壤有机质质量分数均不断下

降,在同一年内,除 2020 年 ORR 的土壤有机质质量分数显著高于其他模式的外,4 种植模式间的土壤有机质质量分数的差异均无统计学意义;2018—2020 年,同一年内 OR、ORR 的土壤速效钾质量分数均显著低于 IR、IRR 的,IRR 的土壤碱解氮、有效磷和速效钾质量分数均为最高。

表 2 不同种植模式的土壤养分含量

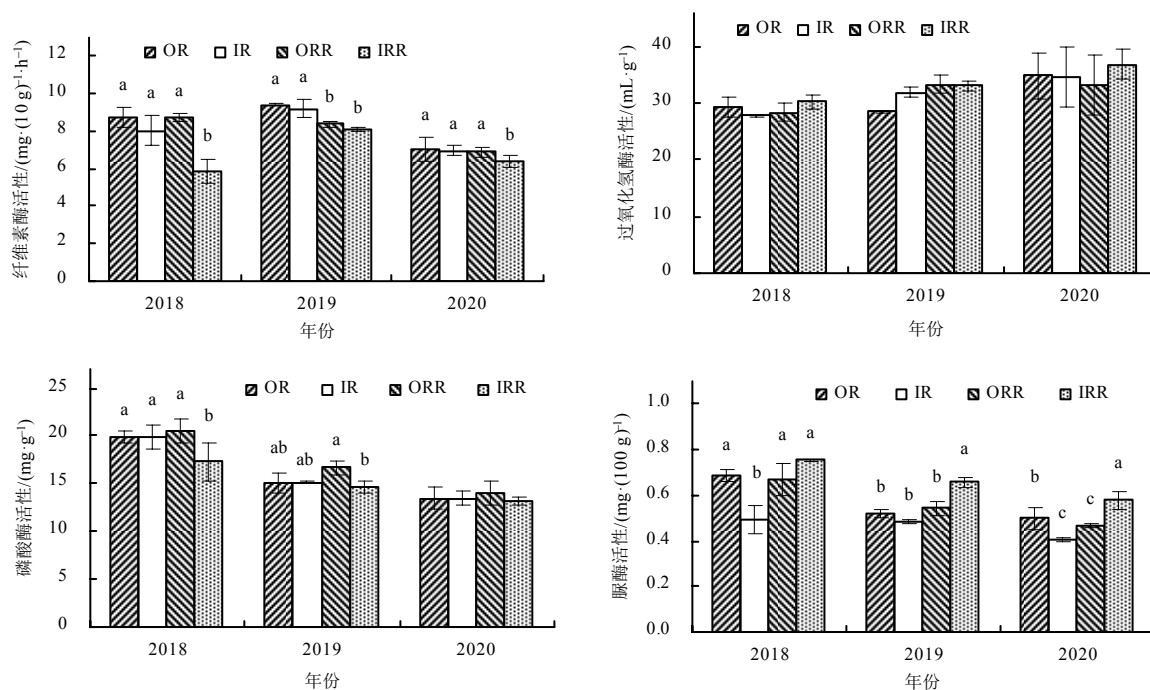
Table 2 The soil nutrient content under different planting patterns									
年份	种植模式	pH	碱解氮/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	有效磷/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	速效钾/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	全氮/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	全磷/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	全钾/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	有机质/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
2018	OR	7.97	203.41a	18.85b	58.16b	2.72	1.29	25.29	41.01
	IR	7.83	192.34b	19.36b	66.32a	2.59	1.26	25.58	39.34
	ORR	7.91	187.93b	21.19ab	59.49b	2.76	1.28	25.25	41.67
	IRR	7.89	207.67a	25.21a	66.39a	2.97	1.37	24.91	39.65
2019	OR	8.12	166.19b	15.83b	56.94c	2.40	1.19	23.15	34.02
	IR	8.09	163.63b	15.16b	60.52b	2.47	1.16	22.96	33.81
	ORR	8.09	166.54b	16.39b	55.63c	2.54	1.17	23.65	35.65
	IRR	8.06	175.26a	19.34a	63.47a	2.50	1.21	23.81	34.91
2020	OR	8.13	147.83b	10.25b	52.19b	2.01	1.14	22.33	32.56b
	IR	8.06	131.61c	9.81b	57.81a	1.96	1.09	22.24	32.68b
	ORR	8.14	151.55b	10.93b	50.37b	2.12	1.16	21.86	35.37a
	IRR	8.08	168.16a	14.41a	62.49a	2.28	1.21	22.00	33.05b

同一年内同列不同字母示种植模式间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

### 3.4 不同种植模式对土壤酶活性的影响

从图 2 中可以看出,同一年内 4 种植模式中,土壤纤维素酶活性均以 OR 的最高,IRR 的最低,且除 2019 年的 ORR 外,IRR 的土壤纤维素酶活性均显著低于其他种植模式的,表明免耕条件下冬季种植油菜可提高土壤纤维素酶活性;同一年内各种种植模式的土壤过氧化氢酶活性间的差异均无统计学意

义;同一年内 4 种植模式中,土壤磷酸酶活性以 ORR 的最高,且 2018 和 2019 年 ORR 的土壤磷酸酶活性显著高于 IRR 的,表明两季水稻免耕连作后,冬季增种油菜,可显著提升土壤磷酸酶活性;同一年内 4 种植模式中,土壤脲酶活性均以 IR 的最低,可能是由于只种植一季水稻,施肥量较其他模式少,参与氮素转化的关键酶脲酶活性也随之更低。



同一年内图柱上不同字母示种植模式间的差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。

图 2 不同种植模式的土壤酶活性

Fig.2 Soil enzyme activity under different planting patterns

#### 4 结论与讨论

土壤质量的基本定量指标主要包括物理指标、化学指标和生物指标 3 个方面。土壤容重和土壤微团聚体均为土壤质量的物理指标,反映土壤的松紧和结构状况。本研究中,随种植年限延长,4 种种植模式的土壤容重均不断增加,表明免耕可增加土壤容重,使土壤更加紧实,这与周虎等<sup>[8]</sup>的研究结果相似。但土壤容重随种植年限增加变化较缓慢,2018—2019 年,各种种植模式的容重增加幅度极小,且各种种植模式间的差异无统计学意义;2020 年,不同种植模式对土壤容重的影响才初步显现出来,冬闲-稻、冬闲-稻-稻模式的土壤容重显著高于油-稻、油-稻-稻模式的,且土壤容重增加幅度比前 2 年的大。王志强等<sup>[9]</sup>经过 6 年的冬季种植合适作物与冬季休闲处理相比,发现冬季种植油菜土壤容重降低 17.12%。表明免耕方式下冬季早种一季油菜可减缓土壤紧实速率,郑思文等<sup>[10]</sup>的研究也有相似的结果。

本研究中,4 种种植模式下,不同粒级的微团聚体的变化规律不同,2020 年,0.050~1.000 mm 粒级微团聚体质量分数较 2018 年减少,而 0.005~0.050 mm 粒级质量分数较 2018 年增加,可能与各粒级的微团聚体在营养元素的保持、供应及转化能力等方

面发挥着不同的作用有关。陈恩凤等<sup>[11]</sup>研究发现,小粒级(<0.010 mm)与大粒级(>0.010 mm)微团聚体在水分和养分的保持与释放及生物转化强度等方面都有不同的作用和明显的差异;小粒级微团聚体有较强的持水性和氮磷储备潜力,大粒级微团聚体具有较强的释水性和氮磷供应能力,只有当大、小粒级微团聚体的比例适当时,才能协调土壤水分与养分的储存与供应。

土壤养分是评价土壤质量的重要化学指标。本研究中,2018—2020 年,4 种免耕模式处理在正常施肥的情况下,土壤有机质质量分数均随种植年限的增加而不断降低。李景等<sup>[12]</sup>和 HAO 等<sup>[13]</sup>的研究表明,免耕可增加 0~10 cm 土层土壤有机质含量,本研究的结果与其不同。可能是由于本研究只施用化肥,未施用有机肥,且只保留高秆还田,未进行全量秸秆还田的原因。2020 年,油-稻-稻模式土壤有机质质量分数显著高于其他 3 种模式的,表明在不另外施用有机肥的前提下,双季稻模式加一季油菜能减缓土壤有机质含量的下降速率。有研究<sup>[14]</sup>表明,有机质对土壤氮、磷、钾具有吸附作用,且能提高氮、磷、钾的有效性,有机质的不断减少也造成土壤全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾含量降低。同一年内,油-稻、油-稻-稻模式的土

壤速效钾质量分数均显著低于冬闲-稻、冬闲-稻-稻模式的,这与李继福等<sup>[15]</sup>的研究结果相似,秸秆部分还田或不还田,直播油菜更依赖于外源钾肥投入。

土壤酶活性常被作为土壤质量的重要指标来研究<sup>[16]</sup>。不同种植模式对土壤酶活性产生影响,主要原因可能是作物根系分泌物和熟制具有不同生物量,导致土壤的微生物数量、种类及代谢过程改变,从而使得主要由土壤微生物产生的土壤酶活性发生变化<sup>[17-18]</sup>。本研究,中,随免耕种植年限增加,4种酶活性不断发生变化,主要是由于免耕条件下土壤容重增加,土壤越来越紧实,导致土壤孔隙度减小,氧气含量降低,影响了土壤微生物的繁衍,使好氧微生物生命活动减弱,厌氧微生物生命活动增强,土壤酶活性也相应发生不同的变化。本研究中发现,多熟制氮肥用量多,可减少脲酶活性降低速率,可能是由于脲酶直接参与尿素形态转化,其活性通常与全氮和速效氮相关,这与 NING 等<sup>[19]</sup>的研究结果相似。本研究中还发现,双季稻模式下,冬季再加种一季油菜,可促进土壤纤维素酶和磷酸酶活性增加,这可能是由于多一季油菜增加了周年生物产量,改善了土壤环境,有利于土壤微生物和蚯蚓等动物生长所致。

#### 参考文献:

- [1] 王昌全,魏成明,李廷强,等.不同免耕方式对作物产量和土壤理化性状的影响[J].四川农业大学学报,2001,19(2):152-154.
- [2] 靳玉婷,李先藩,蔡影,等.秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响[J].环境科学,2021,42(8):3985-3996.
- [3] 郑凤君,王雪,李生平,等.免耕覆盖下土壤水分、团聚体稳定性及其有机碳分布对小麦产量的协同效应[J].中国农业科学,2021,54(3):596-607.
- [4] 刘兰清,杨晨璐,王维钰,等.免耕条件下秸秆还田与施肥对小麦-玉米轮作系统土壤养分和酶活性的影响[J].华北农学报,2017,32(6):213-221.
- [5] SINGH G, BHATTACHARYA R, DAS T K, et al. Crop rotation and residue management effects on soil enzyme activities, glomalin and aggregate stability under zero tillage in the Indo-Gangetic Plains[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 184: 291-300.
- [6] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.
- [7] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [8] 周虎,吕贻忠,杨志臣,等.保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J].中国农业科学,2007,40(9):1973-1979.
- [9] 王志强,缪建群,刘英,等.长江中游双季稻田不同轮作方式对土壤质量的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(11):1703-1714.
- [10] 郑思文,朱彦光,严磊,等.桂林地区轮作与非轮作条件下水稻土收缩变化研究[J].西南农业学报,2018,31(2):270-275.
- [11] 陈恩凤,周礼恺,武冠云.微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评断土壤肥力水平中的意义[J].土壤学报,1994,31(1):18-25.
- [12] 李景,吴会军,武雪萍,等.长期免耕和深松提高了土壤团聚体颗粒态有机碳及全氮含量[J].中国农业科学,2021,54(2):334-344.
- [13] HAO X Y, HE W, LAM S K, et al. Enhancement of no-tillage, crop straw return and manure application on field organic matter content overweigh the adverse effects of climate change in the arid and semi-arid Northwest China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 295: 108199.
- [14] 罗珠珠,黄高宝,张仁陟,等.保护性耕作对旱作农田耕层土壤肥力及酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(5):1085-1092.
- [15] 李继福,张旭,冉娇,等.秸秆还田下直播稻-油轮作的钾肥效应及适宜用量[J].华中农业大学学报,2019,38(6):77-85.
- [16] ZHANG L G, CHEN X, XU Y J, et al. Soil labile organic carbon fractions and soil enzyme activities after 10 years of continuous fertilization and wheat residue incorporation[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 11318.
- [17] GHOSH A, SINGH A B, KUMAR R V, et al. Soil enzymes and microbial elemental stoichiometry as bio-indicators of soil quality in diverse cropping systems and nutrient management practices of Indian Vertisols[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 145: 103304.
- [18] 袁仁文,刘琳,张蕊,等.植物根际分泌物与土壤微生物互作关系的机制研究进展[J].中国农学通报,2020,36(2):26-35.
- [19] NING C C, GAO P D, WANG B Q, et al. Impacts of chemical fertilizer reduction and organic amendments supplementation on soil nutrient, enzyme activity and heavy metal content[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(8): 1819-1831.

责任编辑:邹慧玲  
英文编辑:柳正