

翻压 9 种春油菜对潮土有机质及其氧化稳定性的影响

袁苗苗¹, 向春阳¹, 赵 秋², 史昕倩¹, 董家僖¹, 田秀平¹

(1. 天津农学院农学与资源环境学院, 天津 300384, 2 天津市农业科学院资源环境研究所, 天津 300192)

摘 要:为了提高华北地区土壤有机质含量,改善有机质品质,提高土壤肥力,开展了 9 种春油菜翻压对土壤有机质及其氧化稳定性影响的研究。结果表明:春油菜生物量以中油肥 1901 最高,植株含碳量中油肥 1904 最高(69.51%),中油肥 1901 次之(65.06%),春油菜总碳输入量以中油肥 1901 最高(4 662.25 kg·hm⁻²);春油菜翻压均可显著($P<0.05$)提高土壤有机质、腐殖质及易氧化有机质的含量,降低 Kos 值,以中油肥 1901 和中油肥 1907 增加土壤有机质最多,均比翻压春油菜前增加 7.24 g·kg⁻¹,腐殖质含量和易氧化有机质也是中油肥 1901 增加最大,较春油菜翻压前分别增加了 11.24 g·kg⁻¹和 16.55 g·kg⁻¹,显著高于其他品种,春油菜品种翻压后土壤有机质 Kos 值均显著低于对照,下降较多的是中油肥 1901、中油肥 1906 和中油肥 1907,显著低于其他品种;土壤有机质、腐殖质和易氧化有机质与春油菜生物量和春油菜总碳输入量之间呈极显著正相关,土壤有机质、腐殖质和易氧化有机质间相关性均达到呈极显著水平;灰色关联度综合评价得出,供试 9 个春油菜品种中,中油肥 1901 培肥土壤的效果最好,其次是中油肥 1907。

关键词:春油菜;翻压;土壤有机质;腐殖质;氧化稳定性

中图分类号:S153.6⁺2;S55 **文献标志码:**A

Effects of nine varieties of return to field spring rape on organic matter and oxidation stability of tidal soil

YUAN Miaomiao¹, XIANG Chunyang¹, ZHAO Qiu², SHI Xinqian¹, DONG Jiayi¹, TIAN Xiuping¹

(1. College of Resource and Environment, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China;

2. Institute of Resources and Environment, Tianjin Academy of Agricultural Science, Tianjin 300192, China)

Abstract: To increase the content of soil organic matter, organic matter quality and soil fertility in northern China, a field experiment was carried out to examine the impact of returning different cultivated varieties of spring rape to field on soil organic matter and its oxidation stability. The results showed that Zhongyoufei 1901 had the highest biomass. Zhongyoufei 1904 had the highest plant carbon content (69.51%), followed by Zhongyoufei 1901 (65.06%). The highest total carbon output of spring rape was Zhongyoufei 1901 (4 662.25 kg·hm⁻²). Spring rape significantly increased the content of soil organic matter, humus and easily oxidized organic matter, and reduced the Kos values. Different varieties of spring rape had different performances. Of which Zhongyoufei 1901 and Zhongyoufei 1907 increased the soil organic matter the most, which both increased by 7.24 g·kg⁻¹ compared with prior to returning spring rape to field. The humus content and easily oxidized organic matter had also the largest increase in Zhongyoufei 1901, which increased by 11.24 g·kg⁻¹ and 16.55 g·kg⁻¹ respectively compared with prior to returning spring rape, which was significantly higher than other varieties. The soil organic matter Kos value of different rape varieties was significantly lower than that of the control after returning to field, and the decline was significant in Zhongyoufei 1901, Zhongyoufei 1906 and Zhongyoufei 1907. Soil organic matter, humus and easily

oxidized organic matter were extremely positively and significantly correlated with spring rape biomass and total carbon input. There were also extremely significantly and positively correlations between soil organic matter, humus and easily oxidized organic matter. Comprehensive evaluation of gray correlation degree indicated that among nine spring rape varieties in the experiment, Zhongyoufei 1901 had the best effect on soil fertility, followed by Zhongyoufei 1907.

Keywords: spring rape; return to field; soil organic matter; humus; oxidation stability

华北地区是我国主要的粮食生产区之一,其中玉米产量占全国玉米总产量的 36%^[1]。作为我国玉米主产区之一,保持玉米产量的稳定性对我国粮食安全起到重要作用,土壤肥力对作物产量影响很大。长期以来,为了维持人口迅速增加对粮食的需求,该地区不断投入大量化学肥料,而忽视有机物料的投入,导致该地区土壤板结与酸化等现象普遍发生^[2-3]。2015 年,我国农业部开始实施 2020 年化肥零增长计划,倡导增施有机肥料来改善土壤理化性质^[4]。有机肥种类繁多,其中,绿肥被称为我国传统农业的瑰宝^[5],是一种高效、清洁且营养齐全的天然有机肥源,将其生长过程中所产生的全部活体,直接翻压到土壤中作为肥料^[6]。翻压后的绿肥通过淋溶、分解等过程向土壤提供大量有机碳,促进土壤有机质的腐解矿化,土壤养分循环及难溶性养分转化,同时为土壤微生物的活动提供能量来源,促进土壤有机质含量的增加^[7]。

尽管土壤有机质只占土壤总重量的一部分,但其数量和品质与土壤肥力密切相关。在一定的范围内土壤有机质含量多则土壤肥力就高,反之,土壤肥力就低^[8-9]。近年来,人们对土壤有机质的研究从数量层次深入到品质层次,开始注重土壤有机质的氧化稳定性。土壤有机质的稳定性影响碳分解和储存,并且对土壤养分和质量具有重要作用,土壤有机质的氧化稳定性与腐殖质抗氧化能力有关^[10]。前人研究表明,绿肥翻压可以提高土壤有机质含量及其氧化稳定性^[11-15]。邓小华等^[16]研究发现,连续 3 a 翻压绿肥,土壤有机质含量提高 3.73%~8.76%。杜威等^[17]通过绿肥翻压也发现,翻压绿肥后可使当季土壤有机质含量有一定的提高,有效改善土壤养分平衡。史吉平等^[18]发现长期施用有机肥,或有机无机肥配施,均可提高潮土和旱地红壤的腐殖质含量。邵月红等^[19]研究表明,长期施用有机肥对土壤有效碳库有很大影响,在提高活性碳方面绿肥和稻草秸秆肥优于厩肥。因此,绿肥翻压对土壤有机质及其氧化稳定性的影响研究具有重要意义。油菜(*Brassica campestris* L.)作为绿肥,不仅鲜草含量大,养分含量高,繁殖期短,而且对环境

的适应能力强^[20]。研究表明,油菜翻耕入土之后,可以有效活化土壤,改良土壤物理性质,显著提高土壤有机质含量,并能长期作用于土壤,对一些劣质土壤具有很好的改良作用^[21-22]。李文广等^[23]研究黄土高原旱地麦后复种饲料油菜还田对后茬麦田土壤养分的影响,结果表明,与常规种植模式相比,饲料油菜还田可不同程度提升土壤养分及酶活性,其中有机质含量提升范围最大,为 11.73%~60.5%。严红星^[24]通过冬闲地种植绿肥(油菜、箭舌豌豆、黑麦草)和利用晚稻草在烟草移栽前翻压还田发现,油菜等还田可提高土壤有机质及活性有机质含量,且对土壤腐殖质组分有一定影响。

本研究以不同春油菜品种为研究对象,研究其翻压后对土壤有机质、腐殖质及其稳定性的影响,并探讨油菜生物学产量与土壤有机质的响应关系,以期为华北地区农业生产中合理种植油菜绿肥,改善土壤肥力提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于天津市宁河区林场(117.82°E, 39.33°N),气候类型属于大陆性季风气候,暖温带半干旱半湿润带。年平均气温 11.2℃,平均湿度 66%,最低气温出现在 1 月份,平均为 -5.8℃,最高气温出现在 7 月份,平均为 25.7℃。年平均降水量 642 mm,降水量 70%集中在 6—8 月份,全年无霜期 240 d。

1.2 试验材料

供试土壤为潮土,2019 年春试验播前耕作层(0~20 cm)土壤的基本理化性状:有机质 16.07 g·kg⁻¹,全氮 0.96 g·kg⁻¹,全磷 0.36 g·kg⁻¹,全钾 23.59 g·kg⁻¹,碱解氮 65.06 mg·kg⁻¹,有效磷 31.63 mg·kg⁻¹,速效钾 127.78 mg·kg⁻¹,pH 值 8.01,电导率 222 μs·cm⁻¹。供试绿肥有 9 个不同的油菜品种,分别是中油肥 1、中油肥 2、中油肥 1802、中油肥 1804、中油肥 1901、中油肥 1903、中油肥 1904、中油肥 1906、中油肥 1907,代号分别为 ZYF1、ZYF2、ZYF3、ZYF4、ZYF5、ZYF6、ZYF7、ZYF8、ZYF9,由中

国农科院油料作物研究所提供。

1.3 试验设计

采用田间小区试验,共设置 10 个处理,其中,有 9 个不同春油菜品种处理,1 个春闲处理作为对照(CK),采用完全随机区组排列,每个处理设 3 次重复。油菜于 2019 年 3 月 18 日播种,采用条播,每个品种播种量为 $0.6\text{ kg} \cdot 666.7\text{ m}^{-2}$,行距 25~30 cm,于 6 月 8 日进行翻压。翻压后种夏玉米,玉米种植前每个小区施底肥尿素(含 N 46%)、磷酸二铵(含 N 11%、含 P_2O_5 46%)和氯化钾(含 K_2O 50%),施肥量为 $\text{N } 110.72\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5\text{ } 89.36\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O } 63.83\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.4 测定项目与方法

绿肥翻压前,每个品种分别取 3 个样方,每个样方 1 m^2 ,测定植株生物量,并取代表性根系样(鲜重不少于 150 g)、取代表性地上部分样(鲜重不少于 200 g),烘干后用于测定植株含碳量;未种油菜前在每个小区多点取 0~20 cm 耕层混合土样作为基础土样,测定土壤养分等指标;在油菜未翻压前的 5 月 30 日在不同小区中采用多点法取 0~20 cm 土层混合土样,油菜翻压后种植玉米,在玉米收获后的 9 月 29 日,分别在不同小区中采用多点法取 0~20 cm 土层混合土样,在实验室风干,进行土壤有机质、腐殖质及易氧化有机质等的测定。

土壤养分、有机质、腐殖质等指标测定方法参照《土壤农化分析》^[25];土壤 pH 值的测定:水浸提,酸度计测定;土壤 EC 的测定:水浸提,电导率仪测定;土壤全氮的测定:浓硫酸消煮,半微量开氏法;土壤全磷的测定:氢氧化钠熔融,钼锑抗分光光度计法测定;土壤全钾的测定:硝酸和高氯酸消煮,火焰光度计测定;土壤有效磷的测定:碳酸钠浸提,钼锑抗分光光度计法测定;土壤速效钾的测定:醋酸钠浸提,火焰光度计测定;土壤碱解氮的测定:碱解扩散法测定;土壤有机质的测定:重铬酸钾外加热法;土壤腐殖质的测定:焦磷酸钠-氢氧化钠提取法;易氧化有机质的测定:高锰酸钾氧化法;植株含碳量的测定:重铬酸钾-硫酸氧化法。

难氧化有机质=总有机质-易氧化有机质
Kos 值=难氧化有机质/易氧化有机质
春油菜总碳输入量=春油菜生物量×春油菜植株含碳量

1.5 数据分析

用 Microsoft Excel 对原始数据进行统计和作图,并用 SPSS 软件进行差异显著性分析,运用灰色关联度综合评价不同春油菜品种的改土效果,关联

度越大,其土壤肥力越高,关联度越小,土壤肥力越低。关联系数计算公式^[26]:

$$\xi = \frac{\frac{\min_i \min_k |X_o(k) - X_i(k)| + \rho \frac{\max_i \max_k |X_o(k) - X_i(k)|}{\max_i \max_k |X_o(k) - X_i(k)|}}{\frac{\min_i \min_k |X_o(k) - X_i(k)| + \rho \frac{\max_i \max_k |X_o(k) - X_i(k)|}{\max_i \max_k |X_o(k) - X_i(k)|}}$$

式中, X 为品种; X_o 为参考序列; X_i 为比较序列,且 $i = 1, 2, 3, \dots, n$; ρ 为分辨系数,此处取值 0.5; n 为品各性状指标的个数; k 为性状; i 为品种编号; $|X_o(k) - X_i(k)|$ 为绝对差值,记作 $\Delta_i(k)$ 。

关联度(r_i) = $\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k)$ (其中 n 为样本数)

权重系数(w_i) = $\frac{r_i}{\sum r_i}$

加权关联度(r'_i) = $\sum_{k=1}^n w_i(k) \xi_i(k)$

2 结果与分析

2.1 不同春油菜品种翻压前生物量及碳含量

从表 1 可以看出,不同春油菜品种生物量及碳含量有所不同,ZYF5 的生物量最高($7\ 167\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),其次是 ZYF4,ZYF6 的生物量最低。方差分析结果表明,ZYF5 显著高于 ZYF1、ZYF2、ZYF3、ZYF6、ZYF7 及 ZYF8,但与 ZYF4 和 ZYF9 之间差异不显著;ZYF7 的植株含碳量最高,为 $695.1\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,ZYF5 次之,为 $650.6\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,两者显著高于(除 ZYF5 与 ZYF6 和 ZYF8 之间)其他品种;虽然 ZYF7 植株含碳量最高,但春油菜总有机碳输入量则以 ZYF5 最高,为 $4\ 662.25\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其次是 ZYF4,为 $4\ 041.49\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,两者显著高于其他品种,ZYF1

表 1 不同品种春油菜生物量、碳含量及有机碳输入量
Table 1 Biomass, carbon content, and total carbon input of different varieties of *Brassica campestris* L.

品种 Variety	生物量 Biomass /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	植株含碳量 Plant carbon content/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	总碳输入量 Total carbon input /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
ZYF1	4689±239.85de	492.6±0.6g	2309.70±2.81g
ZYF2	5889±616.32bc	537.9±0.81f	3167.57±4.78e
ZYF3	4584±629.25de	606.3±0.24de	2779.57±1.09f
ZYF4	6577±539.16ab	614.5±0.64cde	4041.49±4.23b
ZYF5	7167±521.88a	650.6±0.42b	4662.25±2.98a
ZYF6	3747±140.99ef	640.6±0.40bc	2400.27±1.48g
ZYF7	4918±263.22cd	695.1±1.04a	3418.78±5.10e
ZYF8	4882±326.28cd	633.2±0.61bcd	3090.89±2.96d
ZYF9	6457±759.13ab	596.3±1.54e	3850.47±9.92c

注:不同小写字母代表差异显著($P<0.05$),下同。
Note: Different lowercase letters represent significant differences($P<0.05$), the same below.

最低,与 ZYF6 之间无显著差异,但显著低于其他品种。绿肥作物翻压前的生物量和养分含量影响着土壤的培肥效果,对土壤的矿化及腐殖化起到一定的作用。

2.2 不同春油菜品种翻压对土壤有机质含量的影响

由表 2 可以看出,5 月 30 日未翻压油菜之前,土壤有机质总量范围在 15.25~17.48 g·kg⁻¹,种植 ZYF5 土壤有机质含量最高,ZYF7 最低,ZYF7 和 ZYF3 没有差异,均低于其他处理。从 6 月 8 日翻压春油菜到 9 月 29 日,不同处理土壤中有机质含量变化不同,其中,ZYF5 处理土壤中含量最高,9 月 29 日测定结果除了与 ZYF9 差异不显著外,显著高于其他处理。未翻压春油菜的 CK 处理,土壤中有机质最低,供试所有春油菜品种都提高了土壤有机质含量,但增加程度不同,从绝对变化量上看,ZYF5 和 ZYF9 增加较多,比没翻压春油菜的 5 月 30 日土壤有机质量都增加了 7.24 g·kg⁻¹,ZYF7 和 ZYF8 分别增加了 5.28 g·kg⁻¹和 5.79 g·kg⁻¹,其余品种增加都在 5 g·kg⁻¹以下,ZYF2 和 ZYF6 增加量较低,在 3 g·kg⁻¹以下。

2.3 不同春油菜品种翻压土壤中腐殖质含量的差异

土壤腐殖质是土壤中高分子有机胶体,结构复杂,不易被微生物分解,是土壤有机质最稳定的部分,是土壤固碳的重要标志。由表 3 可以看出,5 月 30 日春油菜未翻压前土壤腐殖质含量范围在 11.40~12.76 g·kg⁻¹,种植 ZYF2 含量最高,ZYF9 含量最低。春油菜翻压土壤后先进行矿化作用,然后再进

行腐殖质作用,到了 9 月 29 日所有处理腐殖质含量均高于 5 月 30 日,不同处理土壤腐殖质含量增加幅度不同,排序为:ZYF5>ZYF8>ZYF4>ZYF3>ZYF9>ZYF1>ZYF7>ZYF2=ZYF6>CK。其中,ZYF5 处理土壤腐殖质含量最高,为 23.41 g·kg⁻¹,较春油菜翻压前增加了 11.24 g·kg⁻¹,显著高于其他处理,CK 最低,翻压前后变化很小,只增加了 1.00 g·kg⁻¹。

2.4 不同春油菜品种翻压土壤有机质氧化稳定性的差异

土壤有机质的氧化稳定性决定了有机质矿化的难易,影响着土壤养分的供应强度。易氧化有机质与总有机质之比可代表土壤有机质的活化度,是作为评价土壤肥力的重要指标^[27]。由图 1 可以看出,与对照相比,9 个春油菜品种翻压后土壤易氧化有机质含量均有所提高,其中,ZYF5 增加最多,显著高于其他处理,其次是 ZYF9、ZYF8,也显著高于其他处理,CK 最低,显著低于翻压春油菜的所有处理。春油菜生长过程中会吸收下层土壤养分积累到植株体内,翻压到土壤后,不但为土壤提供大量的有机物质,而且在春油菜矿化分解过程中,也会释放养分到表层土壤中,使得耕层土壤具有更高的养分浓度,从而为后茬玉米根向表土层聚集提供了良好的条件,增加根系的凋落物和分泌物,而凋落物和根系分泌物经微生物的分解,成为土壤易氧化有机质的重要来源;以氧化稳定性系数 Kos 值作为衡量有机质氧化稳定性的指标,由图 2 看出,不同春油菜品种翻压后土壤有机质 Kos 值均显著低于 CK,下降较多的是 ZYF5、ZYF8 和 ZYF9 处理,显著低于其他处理;翻压春油菜各处理土壤易氧化有机质占

表 2 不同春油菜翻压下土壤有机质含量/(g·kg⁻¹)
Table 2 Soil organic matter content under different spring rape overturning

处理 Treatmnet	取样时间 Sampling time(Y-m-d)		变化量 Variation
	2019-05-30	2019-09-29	
CK	16.02±0.29bcde	16.69±0.26f	0.67±0.03e
ZYF1	15.44±0.39de	19.70±0.09de	4.26±0.48cd
ZYF2	16.49±0.38abede	19.47±0.09e	2.98±0.29d
ZYF3	15.36±0.15e	19.88±0.47de	4.52±0.67bcd
ZYF4	16.94±0.04abc	21.31±0.00c	4.37±0.04cd
ZYF5	17.48±0.09a	24.72±0.02a	7.24±0.11a
ZYF6	15.89±0.83cde	17.13±0.04f	1.24±0.78e
ZYF7	15.25±0.19e	20.53±0.48cd	5.28±0.67bc
ZYF8	17.32±0.29ab	23.29±0.53b	5.97±0.37ab
ZYF9	16.74±0.56abcd	23.98±0.12ab	7.24±0.44a

注:变化量(A₁)=玉米收获后土壤有机质含量-春油菜翻压前土壤有机质含量。

Note: Variation (A₁)= soil organic matter content after cron harvest -soil organic matter content before spring rape overturning.

表 3 不同春油菜翻压土壤腐殖质含量/(g·kg⁻¹)
Table 3 Soil humus content under different spring rape overturning

处理 Treatment	取样时间 Sampling time(Y-m-d)		变化量 Variation
	2019-05-30	2019-09-29	
CK	11.65±0.23bc	12.65±0.24f	1.00±0.47e
ZYF1	11.41±0.47c	16.71±0.47d	5.29±0.00cd
ZYF2	12.76±0.00a	16.47±0.24de	3.71±0.24d
ZYF3	12.00±0.50abc	18.59±0.00bc	6.59±0.50bc
ZYF4	12.59±0.23ab	19.94±0.02b	7.35±0.25b
ZYF5	12.18±0.24abc	23.41±0.13a	11.24±0.11a
ZYF6	11.47±0.47c	15.18±0.23ef	3.71±0.24d
ZYF7	11.76±0.00abc	16.94±1.18d	5.18±1.18cd
ZYF8	12.12±0.24abc	19.76±0.23b	7.65±0.47b
ZYF9	11.40±0.13c	17.65±0.00cd	6.25±0.13bc

注:变化量(A₂)=玉米收获后土壤腐殖质含量-春油菜翻压前土壤腐殖质含量。

Note: Variation (A₂)= soil humus content after corn harvest—soil humus content before spring rape overturning.

总有机质的比例也显著高于 CK,也是 ZYF5、ZYF8 和 ZYF9 较高,显著高于 ZYF1、ZYF2、ZYF3 和 ZYF6。因此,翻压春油菜改变了土壤有机质的品质。

2.5 春油菜生长指标与土壤有机质之间的关系

从表 4 看出,土壤有机质、腐殖质和易氧化有机质与春油菜生物量和总碳输入量之间呈极显著正相关,易氧化有机质与春油菜植株含碳量呈显著正相关,土壤有机质和腐殖质与春油菜植株含碳量之间相关不显著,土壤有机质、腐殖质和易氧化有机质之间均呈极显著正相关。以上说明,土壤有机质和腐殖质与春油菜生物量及春油菜总碳输入量关系更密切,植株含碳量的高低更多地代表了植株养分碳含量贮备量,增加土壤有机质含量,一定考虑其归还到土壤中的生物总量。

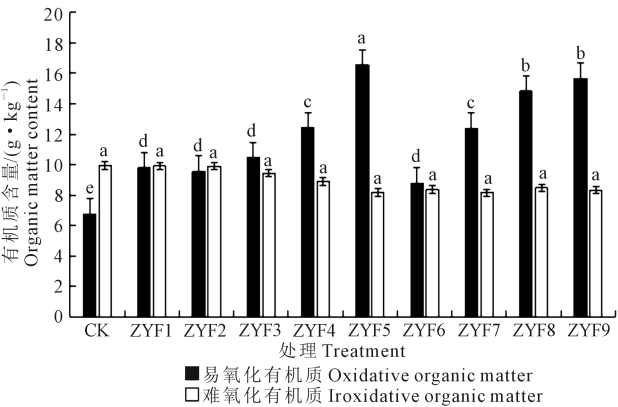


图 1 不同处理下土壤易氧化有机质和难氧化有机质含量的差异

Fig.1 Difference of content of easily oxidized organic matter and difficult to oxidize organic matter in different treatments

2.6 综合评价

采用灰色系统关联度理论,选取土壤有机质、土壤腐殖质、易氧化有机质 3 项指标的均值,对其进行灰色关联度综合评价(表 5)。各处理的排序为 ZYF5>ZYF9>ZYF8>ZYF4>ZYF7>ZYF3>ZYF1>ZYF2>ZYF6>CK,表明种植并翻压 9 个油菜品种,其改善土壤有机质品质的效果均优于春闲,且以种植 ZYF5 为最佳,其次是 ZYF9。

3 讨论与结论

综合考虑土壤有机质数量和质量是研究绿肥培肥能力的一个方向,腐殖质和易氧化有机质是重要的衡量指标,腐殖质含量和氧化稳定性很大程度上受不同绿肥种类的影响,本研究验证了这一观点,即不同春油菜品种翻压下土壤有机质及其氧化稳定性存在差异。有机质是土壤微生物的碳源和氮

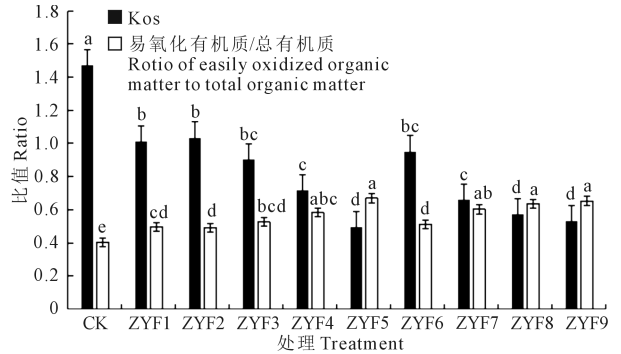


图 2 不同处理下土壤有机质 Kos 值和易氧化有机质与总有机质比值的差异

Fig.2 Difference of soil Kos value and ratio of easily oxidized organic matter to total organic matter in different treatments

表 4 春油菜生长指标与土壤有机质的相关性

Table 4 Relationship between biomass of spring rape and soil organic matter

	油菜生物量 Rape biomass	总碳输入量 Total carbon input	植株含碳量 Plant carbon content	土壤有机质 Soil organic matter	土壤腐殖质 Soil humus	土壤易氧化有机质 Soil easily oxidized organic matter
油菜生物量 Rape biomass	1.000					
总碳输入量 Total carbon input	0.917**	1.000				
植株含碳量 Plant carbon content	0.020	0.414*	1.000			
土壤有机质 Soil organic matter	0.744**	0.781**	0.231	1.000		
土壤腐殖质 Soil humus	0.684**	0.768**	0.303	0.785**	1.000	
土壤易氧化有机质 Soil easily oxidized organic matter	0.682**	0.798**	0.418*	0.974**	0.757**	1.000

注 Note: n = 27, r_{0.05} = 0.381, r_{0.01} = 0.487.

表 5 不同油菜品种改良土壤有机质的关联度及排名

Table 5 Correlation and ranking of improved soil organic matter in different *Brassica campestris* L. varieties

处理 Treatment	关联系数 Correlation coefficient			关联度 Association	权重 Weight	加权关联度	
	总有机质 Total organic matter	腐殖质含量 Humus content	易氧化有机质 Easily oxidized organic matter			Weighted association degree	排序 Sort
CK	0.333	0.333	0.333	0.333	0.067	0.333	10
ZYF1	0.444	0.445	0.420	0.437	0.087	0.572	7
ZYF2	0.433	0.437	0.412	0.427	0.085	0.548	8
ZYF3	0.453	0.527	0.445	0.475	0.095	0.678	6
ZYF4	0.541	0.608	0.543	0.564	0.113	0.953	4
ZYF5	1.000	1.000	1.000	1.000	0.200	3.000	1
ZYF6	0.346	0.395	0.386	0.376	0.075	0.424	9
ZYF7	0.489	0.454	0.540	0.494	0.099	0.733	5
ZYF8	0.737	0.596	0.739	0.6691	0.138	1.432	3
ZYF9	0.844	0.483	0.846	0.7724	0.145	1.575	2

源^[28],其含量与春油菜绿肥的根系分泌物和残留物有关^[29],土壤有机质的动态平衡取决于土壤中有机的输入量和输出量,提高土壤有机质含量是培肥的重要任务。前人研究表明^[30-31],不同有机肥对土壤有机质的影响差异很大,但绿肥不同程度地提高土壤有机质含量已经得到认可。本研究结果表明 9 个油菜品种翻压后较 CK 土壤有机质含量均有所提高,比 CK 土壤有机质高 2.64%~48.11 %。ZYF5 提高有机质最多,原因是其生物量最高,为7 166.5 kg·hm⁻²,显著高于其他品种,可以为微生物代谢提供更多可供分解的植物残体,ZYF2 的生物量虽然较高,但其植株含碳量低,归还土壤中提高有机质量也不高。春油菜的腐解是物质与能量相互转化的生化过程,随着油菜翻压后腐解,油菜植株体内碳元素进行分解和合成的转化,不同春油菜品种生物量和分泌物有所差异,导致土层中植物残体的数量和性质发生改变,影响土壤有机质的合成和分解,造成对土壤碳库补充程度不同,且植物本身碳氮比含量不同,所以不同春油菜品种翻压后对参与矿化作用的土壤微生物新陈代谢率的影响不同,从而土壤有机质的变化不同^[31]。

腐殖质是由木质素和芳香烃碳等结构复杂的化合物经土壤微生物作用后形成的非晶形高分子有机化合物,属于较稳定的惰性有机质,其组成与性质是衡量有机质的重要质量指标^[29,31-32]。翻压绿肥可以更新和活化土壤中的腐殖质,本研究结果显示,不同春油菜品种翻压均可提高土壤腐殖质含量,原因可能是春油菜具有较多的表面官能团及较大的比表面积,为微生物提供了活动场所,加速了春油菜残体向腐殖质转化^[33]。其中,也以翻压 ZYF5 土壤的腐殖质含量提高最多,达到 11.77 g·kg⁻¹。ZYF9 的有机质含量虽然较高,但其腐殖质含量并不高,说明该品种转化为腐殖质的能力较

弱,主要提高土壤中轻组有机质部分,但该品种提高易氧化有机质较多,在提高土壤养分供应上具有一定作用,说明这个品种春油菜易氧化有机质是土壤有机质的重要组成部分之一,具有易分解的作用,可以更好反映土壤质量变化和养分循环^[34]。影响土壤腐殖质分解的因素有很多,如植物残体的特性、土壤特性等,具体提高土壤腐殖含量的机制及增加了腐殖质哪些组分有待进一步研究。

土壤活性有机质对调节土壤养分流有很大影响,与土壤内在的生产力高度有关。在不施有机物料条件下,土壤地力的耗竭主要体现在易氧化有机质被大量消耗,土壤养分供应能力下降,本供试土壤质地重,不利于难氧化有机质的矿化,如果仅施化肥,根茬残留量不足以补充土壤有机质消耗,使土壤易氧化有机质下降,难氧化有机质上升,土壤有机质活化度降低。春油菜翻压后增加外源有机物的投入,为微生物提供充足的碳源,而微生物分解的有机物质是活性有机质组分的主要来源,因此本研究中 9 个春油菜品种土壤易氧化有机质含量均有所提高。土壤易氧化有机质占有有机质总量的比率作为衡量土壤有机质稳定性的方法之一,可以表征不同油菜品种翻压后土壤有机质活性大小以及土壤有机质的质量,两者之间的比率越大,表明土壤有机质活性越强,被分解转化的可能性越大^[35]。不同品种间,易氧化有机质含量、易氧化有机质与有机质总量的比值均以 ZYF5 最高,且 Kos 值也以 ZYF5 最低,这可能是因为春油菜翻压后提高了土壤有机质的氧化度和有机结构分子的复杂度,从而提升了有机质的氧化稳定性,也可能是因为春油菜中含有较多的易被微生物分解的物质,纤维素、半纤维素和木质素较少。由此得出,华北地区采用春油菜翻压可有效提高土壤有机质含量、土壤腐殖质含量,且对土壤有机质氧化稳定性起到一定影响。一

方面油菜翻压增加了土壤有机碳含量,促进了土壤有机质腐解、矿化、养分循环及难溶性有机质的转化,同时为土壤微生物的活动提供了能量来源,从而促进土壤中有机质含量的增加,另一方面有机质活性增加会加速有机质的分解,再加上土壤中微生物的作用,可促进土壤中不同组分有机质含量增加,从而使得土壤有机质的稳定性降低。说明春油菜的输入对华北地区潮土的改良起关键作用,其中春油菜中油肥1901在提高有机质总量、腐殖质含量和易氧化有机质量上效果最佳,中油肥1907号有利于提高总有机质和易氧化有机质含量,但不利于土壤腐殖质的积累。

参考文献:

[1] 王乐.长期施肥下华北土壤化学肥力指标和作物产量演变及影响因素分析[D].北京:中国农业科学院,2020.
WANG L. Analysis of soil chemical fertility index and crop yield evolution and influencing factors in north China under long-term fertilization [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.

[2] 马亚娟,徐福利,王渭玲,等.氮磷提高华北落叶松人工林地土壤养分和酶活性的作用[J].植物营养与肥料学报,2015,21(3):664-674.
MA Y J, XU F L, WANG W L, et al. Increase of soil nutrients and enzymatic activity by adding nitrogen and phosphorus to Larix principis-rupprechtii plantation[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2015, 21(3): 664-674.

[3] 徐绮雯,马淑敏,朱波,等.生物炭与化肥配施对紫色土肥力与微生物特征及油菜产量品质的影响[J].草业学报,2020,29(5):121-131.
XU Q W, MA S M, ZHU B, et al. Effects of the combined application of biochar and chemical fertilizer on fertility and microbial characteristics of purple soil and yield and quality of oilseed rape [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(5): 121-131.

[4] 高菊生,黄晶,杨志长,等.绿肥和稻草联合还田提高土壤有机质含量并稳定氮素供应[J].植物营养与肥料学报,2020,26(3):472-480.
GAO J S, HUANG J, YANG Z C, et al. Improving organic matter content and nitrogen supply stability of double cropping rice field through co-incorporation of green manure and rice straw[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2020, 26(3): 472-480.

[5] 曹卫东,包兴国,徐昌旭,等.中国绿肥科研60年回顾与未来展望[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1450-1461.
CAO W D, BAO X G, XU C X, et al. Reviews and prospects on science and technology of green manure in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2017, 23(6): 1450-1461.

[6] 赵秋,高贤彪,宁晓光,等.华北地区春玉米—冬绿肥轮作对碳、氮蓄积和土壤养分以及微生物的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(4):1005-1011.
ZHAO Q, GAO X B, NING X G, et al. Effects of spring maize and winter cover crop rotation on accumulation of carbon and nitrogen and -soil nutrition and microbe in north China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(4): 1005-1011.

[7] 刘正刚,裴柏洋,王宪帅.岷江上游干旱河谷不同土地利用类

型的土壤有机碳和易氧化态碳特征[J].水土保持研究,2011,18(3):24-27,31.
LIU Z G, PEI B Y, WANG X S. Characteristics of SOC and ROC under different land use types at arid valley in the upper reaches of Minjiang River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(3): 24-27, 31.

[8] 黄运湘,王改兰,冯跃华,等.长期定位试验条件下红壤性水稻土有机质的变化[J].土壤通报,2005,36(2):181-184.
HUANG Y X, WANG G L, FENG Y H, et al. Changes of organic matter in paddy soil derived from red soil in a long-term located experiment[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(2): 181-184.

[9] 柳书俊,姚新转,赵德刚,等.渭潭茶园土壤养分特征及肥力质量评价[J].草业学报,2020,29(11):33-45.
LIU S J, YAO X Z, ZHAO D G, et al. An evaluation of soil nutrient status and balance in Meitan tea plantations[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(11): 33-45.

[10] 董雪,王春燕,黄丽,等.侵蚀程度对不同粒径团聚体中养分含量和红壤有机质稳定性的影响[J].土壤学报,2013,50(3):525-533.
DONG X, WANG C Y, HUANG L, et al. Effect of erosion on nutrient content in aggregates of different particle-size fractions and stability of organic matter in ultisols[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(3): 525-533.

[11] 余坤,李国建,李百凤,等.不同秸秆还田方式对土壤质量改良效应的综合评价[J].干旱地区农业研究,2020,38(3):213-221.
YU K, LI G J, LI B F, et al. Comprehensive evaluation of soil quality under different straw incorporation approaches[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(3): 213-221.

[12] 魏凡,郝明明,南丽丽.轮作绿肥作物对陇中旱作区土壤主要理化性质的影响[J].草原与草坪,2019,39(6):33-37,48.
WEI F, HAO M M, NAN L L. Effect of planting different leguminous green manures on soil chemical properties in the arid region of central Gansu[J]. Grassland and Turf, 2019, 39(6): 33-37, 48.

[13] 王忠,施鸿鑫,楼玲,等.不同培肥措施对新垦耕地红壤肥力和作物产量的影响[J].土壤通报,2019,50(6):1378-1383.
WANG Z, SHI H X, LOU L, et al. Effect of different fertilization methods on fertility and yield of crop in newly reclaimed red soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(6): 1378-1383.

[14] 乔赵崇,王炯琪,赵海超,等.种植模式对冀西北坝上土壤活性有机质和碳库管理指数的影响[J].生态环境学报,2020,29(6):1139-1146.
QIAO Z C, WANG J Q, ZHAO H C, et al. Effects of planting patterns on active soil organic matter and carbon pool management index in Bashang area of northwest Hebei Province[J]. Ecology and Environment Sciences, 2020, 29(6): 1139-1146.

[15] SHACKELFORD G E, KELSEY R, DICKS L V. Effects of cover crops on multiple ecosystem services: ten meta-analyses of data from arable farmland in California and the Mediterranean[J]. Land Use Policy, 2019, 88: 104204.

[16] 邓小华,石楠,周米良,等.不同种类绿肥翻压对植烟土壤理化性状的影响[J].烟草科技,2015,48(2):7-10,20.
DENG X H, SHI N, ZHOU M L, et al. Effects of green manure on physical and chemical properties of tobacco planting soils[J]. Tobacco Science & Technology, 2015, 48(2): 7-10, 20.

[17] 杜威,王紫泉,和文祥,等.豆科绿肥对渭北旱塬土壤养分及生态化学计量学特征影响[J].土壤学报,2017,54(4):999-1008.

DU W, WANG Z Q, HE W X, et al. Effects of leguminous green manure on soil nutrients and their ecological stoichiometry characteristics in Weibei rainfed highland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(4): 999-1008.

[18] 史吉平,张夫道,林葆.长期定位施肥对土壤腐殖质理化性质的影响[J].中国农业科学,2002,35(2):174-180.

SHI J P, ZHANG F D, LIN B. Effects of long-term located fertilization on the physico-chemical property of soil humus [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(2): 174-180.

[19] 邵月红,潘剑君,孙波.长期施用有机肥对瘠薄红壤有效碳库及碳库管理指数的影响[J].土壤通报,2005,36(2):177-180.

SHAO Y H, PAN J J, SUN B. Effects of long-term application of organic manure on available carbon pool and carbon pool management indexes in infertile red soils [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(2): 177-180.

[20] 傅廷栋,梁华东,周广生.油菜绿肥在现代农业中的优势及发展建议[J].中国农技推广,2012,28(8):37-39.

FU T D, LIANG H D, ZHOU G S. Advantages and development suggestions of rapeseed green fertilizer in modern agriculture[J]. China Agricultural Technology Extension, 2012, 28(8): 37-39.

[21] BOLAN N S, BASKARAN S, THIAGARAJAN S. An evaluation of the methods of measurement of dissolved organic carbon in soils, manures, sludges, and stream water [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1996, 27 (13/14): 2723-2737.

[22] 李红燕,胡铁成,曹群虎,等.旱地不同绿肥品种和种植方式提高土壤肥力的效果[J].植物营养与肥料学报,2016,22:1310-1318.

LI H Y, HU T C, CAO Q H, et al. Effect of improving soil fertility by planting different green manures in different patterns in dryland[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2016, 22 (5): 1310-1318.

[23] 李文广,杨晓晓,黄春国,等.饲料油菜作绿肥对后茬麦田土壤肥力及细菌群落的影响[J].中国农业科学,2019,52(15):2664-2677.

LI W G, YANG X X, HUANG C G, et al. Effects of rapeseed green manure on soil fertility and bacterial community in dryland wheat field [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52 (15): 2664-2677.

[24] 严红星.绿肥、稻草还田对植烟土壤有机质的影响[D].长沙:湖南农业大学,2018.

YAN H X. Effect of green manure and straw returning on planting tobacco soil organic matter [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2018.

[25] 鲍士旦.土壤农化分析[M].第3版.北京:中国农业出版社,2000.

BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[26] 何国兴,宋建超,温雅洁,等.不同根瘤菌肥对紫花苜蓿生产力及土壤肥力的综合影响[J].草业学报,2020,29(5):109-120.

HE G X, SONG J C, WEN Y J, et al. Effect of different rhizobium fertilizers on alfalfa productivity and soil fertility [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(5): 109-120.

[27] 田秀平.三江平原白浆土养分演变规律及其有效性的长期定位研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2004.

TIAN X P. Studies on variation and availability of nutrient under long-term stationary albic soil in the three river plain [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2004.

[28] SCHLEUSS P M, WIDDIG M, BIEDERMAN L A, et al. Microbial substrate stoichiometry governs nutrient effects on nitrogen cycling in grassland soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 155: 108168.

[29] JILLING A, KEILUWEIT M, GUTKNECHT J L M, et al. Priming mechanisms providing plants and microbes access to mineral-associated organic matter [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 158: 108265.

[30] 郑健,李欣怡,马静,等.生物炭配施沼液对渗出水电导率、全氮含量及土壤理化性质的影响[J].干旱地区农业研究,2020,38(3):134-144.

ZHENG J, LI X Y, MA J, et al. Effects of combined application of biochar and biogas slurry on percolate electrical conductivity, total nitrogen and soil physical and chemical properties [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(3): 134-144.

[31] 李太魁,朱波,王小国,等.土地利用方式对土壤活性有机碳含量影响的初步研究[J].土壤通报,2012,43(6):1422-1426.

LI T K, ZHU B, WANG X G, et al. A preliminary study on the effects of land use on the contents of soil active organic carbon [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(6): 1422-1426.

[32] MCLEOD M L, BULLINGTON L, CLEVELAND C C, et al. Invasive plant-derived dissolved organic matter alters microbial communities and carbon cycling in soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 156: 108191.

[33] FINN D, PAGE K, CATTON K, et al. Ecological stoichiometry controls the transformation and retention of plant-derived organic matter to humus in response to nitrogen fertilization [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 99: 117-127.

[34] 龙攀.有机物料还田对麦玉两熟农田土壤有机碳和系统碳净平衡影响研究[D].北京:中国农业大学,2014.

LONG P. Effects of organic wastes incorporation on soil organic carbon and net carbon balance in wheat-maize farming system [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.

[35] 雷娜.治沟造地不同土地利用方式土壤有机碳和易氧化碳分析[J].西部大开发(土地开发工程研究),2018,3(5):51-56.

LEI N. Soil organic carbon and readily oxidizable carbon of gully control and land reclamation under different land uses [J]. Land Development and Engineering Research, 2018, 3(5): 51-56.