

油菜不同还田量对新疆盐碱土壤线虫群落的影响

杨涛,陈虹,张凤华

(石河子大学,新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室,新疆 石河子 832003)

摘要:油菜适应性广、抗逆性强,作绿肥还田可以改善土壤环境,有利于土壤生态系统的可持续发展。试验设置油菜不同还田量处理(CK:不还田;T1:21 000 kg·hm⁻²;T2:42 000 kg·hm⁻²;T3:84 000 kg·hm⁻²),利用高通量测序技术研究土壤线虫群落对油菜还田的响应。结果表明:(1)相较于CK,油菜不同还田量能够使土壤pH降低4.19%~6.59%,土壤总盐含量降低4.07%~6.86%,土壤容重降低9.68%~12.90%;T2处理土壤有机质含量较CK增加了27.42%,T3处理土壤碱解氮和速效钾含量较CK增加了35.46%和11.12%;(2)土壤样品中共检测出线虫3纲3目13科19属24种,各处理优势营养类群均为食细菌类线虫;随着油菜还田量的增加,食细菌类线虫与捕食杂食类线虫相对丰度逐渐降低,而食真菌类线虫与植物寄生类线虫的相对丰度逐渐升高;与CK相比,油菜还田后土壤线虫丰富度指数降低,多样性指数升高,富集指数EI与结构指数SI降低;(3)土壤有机质和速效钾是影响线虫群落结构变化的主要环境因子。综上所述,油菜还田能够改善土壤结构,提升土壤综合肥力,增加线虫群落的多样性和复杂性,使生态系统趋于稳定,还田量以84 000 kg·hm⁻²为宜。

关键词:油菜;绿肥;还田量;土壤线虫;多样性

中图分类号:S154.38⁺6;S156.4 **文献标志码:**A

Effects of different returning amount of rape on nematode community in saline alkali soil in Xinjiang

YANG Tao, CHEN Hong, ZHANG Fenghua

(Shihezi University, Xinjiang Production and Construction Group Key Laboratory of Oasis Ecoagriculture, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: Rape has wide adaptability and strong stress resistance. Returning green fertilizer to the field can improve the soil environment and is conducive to the sustainable development of soil ecosystem. In this study, rape was treated with different returning amounts (CK: no returning; T1: 21 000 kg·hm⁻²; T2: 42 000 kg·hm⁻²; T3: 84 000 kg·hm⁻²). High throughput sequencing was used to study the response of soil nematode community to rape returning. The results showed that: (1) Compared with CK, different returning amounts reduced soil pH by 4.19%~6.59%, total soil salt by 4.07%~6.86%, and soil bulk density by 9.68%~12.90%. The content of soil organic matter in T2 treatment increased by 27.42% compared with CK, and the contents of alkali hydrolysable nitrogen and available potassium in T3 treatment increased by 35.46% and 11.12% compared with CK. (2) 24 species, 19 genera, 13 families, 3 classes, 3 orders of nematoda were detected from all soil samples. The dominant trophic groups of each treatment were bacterial eating nematodes. With the increase of returning amount, the relative abundance of bacteria-eating nematodes and predatory omnivorous nematodes gradually decreased, while the relative abundances of fungal-eating nematodes and plant-parasitic nematodes gradually increased. Compared with CK, the soil nematode richness index decreased, the diversity index increased, and the enrichment index EI and structure index SI decreased. (3) Soil organic matter and available potassium were the main soil environmental factors affect-

收稿日期:2022-02-25

修回日期:2022-05-07

基金项目:新疆生产建设兵团科技合作计划项目(2020BC001)

作者简介:杨涛(1998-),男,新疆乌鲁木齐人,硕士研究生,研究方向为农业资源利用。E-mail:1716989238@qq.com

通信作者:张凤华(1970-),女,新疆石河子人,教授,博士生导师,主要从事农业生态与环境研究。E-mail:fenghuazhang2021@163.com

ing the change of nematode community structure. In conclusion, rape returning improved soil structure, enhanced soil comprehensive fertility, increased the diversity and complexity of nematode community, and made the ecosystem tend to be stable. The amount of rape returning should be 84 000 kg · hm⁻².

Keywords: rape; green manure; returning amount; soil nematode; diversity

土壤线虫是土壤生态系统的重要组成部分,能够通过调控物质的分解和转化影响土壤环境^[1-2]。除此之外,线虫还能通过影响生长素和赤霉素等其他物质的含量以调节土壤环境^[3]。因此土壤线虫常被看作是评价土壤环境和植物条件的指示生物^[4]。在农田管理措施中,耕作、灌溉以及施肥等都能改变土壤肥力及土壤微生物特性,从而影响线虫群落^[5]。已有研究表明,油菜等秸秆还田可显著提高紫色土中线虫、蚯蚓等土壤动物数量^[6]。

据调查,新疆盐碱地面积占可耕地总面积的 32.07%^[7],因此,盐碱改良是我国目前要解决的重大难题。近年来,绿肥还田作为一项新兴的生物改良技术,能够提升土壤肥力、改善土壤环境、提高后茬作物产量^[8]。有研究表明,油菜和紫云英还田能够提高土壤有机质和有效氮、磷的含量以及水稻产量。油菜作为十字花科芸薹属作物,其抗逆性强、适应性广^[9]。油菜作绿肥可以提高土壤肥力,还能降低土壤盐分含量^[10];此外,油菜所含的硫甾类物质能够有效抑制杂草及病虫害,根系的分泌物可增强土壤微生物活性^[11]。

目前对油菜作绿肥的研究主要集中在养分释放及种植技术等方面^[12],而针对油菜还田后线虫群落变化特征的研究相对较少。因此本试验采用高通量测序技术对新疆盐碱土壤油菜作绿肥还田后的土壤线虫群落进行研究,阐明油菜还田对土壤线虫群落结构的影响,揭示影响土壤线虫群落结构变化的主要环境因子,为新疆盐碱土壤生物改良提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆生产建设兵团第八师石总场(44°27'47"N,86°0'54"E),光照充足,雨量稀少,属于典型的温带大陆性气候。该区年平均气温 6.6℃,年平均降水量 180 mm,年平均蒸发量 1 600 mm,年

平均日照时数 2 784 h,年平均无霜期 166 d,≥0℃积温 3 918℃。该区域地下水位较高,强烈的蒸发使得土壤盐分表聚,耕层土壤盐渍化程度较重。2020 年 10 月测定研究区土壤理化性质如表 1 所示。

1.2 试验设计

试验于 2020 年 7 月 15 日进行油菜播种。油菜品种为‘华油杂 62 号’(甘蓝型油菜,由华中农业大学提供),播种量为 15 kg · hm⁻²,滴灌栽培。播种时施用重过磷酸钙 300 kg · hm⁻²,出苗后 30 d 开始随水追施尿素,全生育期浇水 6~7 次,其他田间管理与实际生产一致。于 2020 年 10 月 17 日进行油菜打杆,10 月 27 日进行油菜粉碎翻压还田,油菜地上部鲜重为 84 000 kg · hm⁻²。试验设置油菜不还田(CK)、还田量 21 000 kg · hm⁻²(T1)、还田量 42 000 kg · hm⁻²(T2)、还田量 84 000 kg · hm⁻²(T3)4 个处理。每个处理设置 3 次重复,共计 12 个小区,小区面积为 5 m×5 m=25 m²,采取单因素完全随机区组设计,每两小区之间均设置 2 m 保护行。

1.3 样品采集

于 2021 年 7 月 7 日进行土壤样品采集,取样深度为 0~20 cm 耕层土壤。采用五点混合取样法进行取样,各处理的 3 个重复小区分别随机选取 5 个样点,将 5 个样点土样去除动植物残体及石块等杂物后均匀混合(3 次重复进行平均),置于透明无菌自封袋内,放入冰盒冷藏,并及时带回实验室。土壤样品过 1 mm 土筛后分为 2 份,一份储存在-80℃冰箱中用于线虫群落分析,另一份自然风干后用于土壤理化性质的测定。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 土壤理化性质测定 土壤容重采用环刀法进行测定;土壤含水率采用烘干法进行测定;土壤 pH 采用哈希 HQ411d 台式酸度计进行测定(蒸馏水浸提,水土比为 5:1);土壤电导率采用雷磁 DDSJ-308F 型电导率仪进行测定(蒸馏水浸提,水土比为 5:1);土壤总盐含量采用残渣烘干-质量法测定;

表 1 研究区土壤理化性质(2020 年)
Table 1 Physical and chemical properties of soil in the study area (2020)

pH	电导率 EC /(ms · cm ⁻¹)	总盐 SC /(g · kg ⁻¹)	含水率 MC /%	容重 BD /(g · cm ⁻³)	有机质 SOM /(g · kg ⁻¹)	碱解氮 AN /(mg · kg ⁻¹)	速效磷 AP /(mg · kg ⁻¹)	速效钾 AK /(mg · kg ⁻¹)
8.50	2.77	5.31	9.36	1.51	10.95	28.95	25.38	349.65

有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定;碱解氮采用碱解扩散法测定;速效磷采用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾采用 NH₄OAc 浸提-火焰光度计法测定^[13]。

1.4.2 土壤 DNA 提取、PCR 扩增及高通量测序
采用土壤 DNA 提取试剂盒 (MOBIO UltraClean™) 从 0.5 g 土壤样品中提取总 DNA, 保存于-20℃ 冰箱中备用。利用凝胶电泳检测基因组 DNA, 使用酶标仪测定其浓度和纯度。对样品进行序列检测扩增, 扩增区域为 NF1F_18Sr2bR, 扩增片段长度为 350 bp。PCR 产物利用 QuantiFluor™-ST 蓝色荧光定量系统 (Promega 公司, 美国) 进行定量, 混合后进行 Miseq 文库构建、拼接质控、OTU 聚类及生信分析。采用 Miseq PE300 平台进行序列的测序及分析 (上海美吉生物医药科技有限公司)。

1.4.3 土壤线虫群落分析 根据土壤线虫的特征结构及捕食习性将其分为 4 个营养类群: 食细菌类线虫 (Bacterivores)、食真菌类线虫 (Fungivores)、植物寄生类线虫 (Plant-parasites) 和捕食杂食类线虫 (Omnivores-predators); 并根据线虫的食性和生活策略划分不同的生活史 c-p 值。每 100 g 土壤中食细菌类线虫、食真菌类线虫、植物寄生类线虫和捕食杂食类线虫占线虫总数比例为各营养类群的相对丰度; 根据土壤线虫的分类结果计算其生态指数, 即:

(1) 线虫通道指数 (nematode channel ratio, NCR): $NCR = B / (B + F)$ 。式中, B 为食细菌类线虫所占比例; F 为食真菌类线虫所占比例。

(2) 自由生活线虫成熟度指数 (maturity index of free-living nematodes, MI); 植物寄生类线虫成熟度指数 (plant parasite index, PPI): $MI(PPI) = \sum vi \times fi$ 。其中, vi 为自由生活线虫 (或植物寄生类线虫) 被赋予的 c-p 值, fi 为第 i 种线虫的数量占群落总数的比例。

(3) 富集指数 (EI): $EI = 100 \times e / (b + e)$; 结构指数 (SI): $SI = 100 \times s / (b + s)$; 式中, b 代表食物网基础

成分, 指 Ba2 和 Fu2 这两个类群; e 代表食物网富集成分, 指 Ba1 和 Fu2 这两个类群; s 代表食物网结构成分, 包括 Ba3-Ba5、Fu3-Fu5、Om2-Om5 类群 (其中 Ba2 代表食细菌类线虫中 c-p 值为 2 的线虫数量, Fu2 代表食真菌类线虫中 c-p 值为 2 的线虫数量, Om2 代表捕食杂食类线虫中 c-p 值为 2 的线虫数量)。

1.5 数据处理与分析

利用 Microsoft Excel 2021 对土壤理化结果进行整理, 采用 SPSS 26 进行方差分析和相关性分析, 采用 Duncan 法检验处理间差异显著性 ($P < 0.05$)。

高通量测序结果使用 Fastp 0.19.6 进行质控, 采用 Flash 1.2.11 进行双端序列拼接获得有效数据。使用 QIIME 软件包挑选各 OTU 的代表序列, 并将其与数据库进行对比注释。采用 Uparse 7.0.1090 软件按照 97% 相似性进行 OTU 聚类, 各 OTU 中丰度最高的序列为代表序列, 所有样本的覆盖率均高于 99.7%。采用 RDP Classifier 2.11 贝斯叶算法对 97% 相似性的 OTU 代表序列进行序列分类注释, 设置信度阈值为 0.7, 与 NT (Nucleotide Sequence Database) 数据库进行数据比对。采用 Origin 2021 对群落组成作图。采用 Mothur 1.30.2 对优化序列提取非重复序列, 在 97% 相似水平分析样品多样性指数。采用主坐标分析 (PCoA) 分析油菜不同还田量处理土壤线虫群落组成差异。利用方差膨胀因子 (VIF) 筛选环境因子, 对土壤理化性质及土壤线虫群落结构进行冗余分析 (RDA)。

2 结果与分析

2.1 油菜不同还田量土壤理化性质

从表 2 可以看出, 与 CK 相比, 油菜各还田处理均显著降低了土壤容重、pH、EC 及总盐含量 ($P < 0.05$)。土壤含水率随着还田量的增加逐渐上升, T3 处理最高, 较 CK 增加了 23.66%。与 CK 相比, 油菜各还田处理均显著增加了土壤有机质含量, T2 处理

表 2 油菜不同还田量土壤理化性质
Table 2 Soil physiochemical properties in different rapeseed returning amounts

处理 Treatment	pH	电导率 EC /(ms · cm ⁻¹)	总盐 SC /(g · kg ⁻¹)	含水率 MC /%	容重 BD /(g · cm ⁻³)	有机质 SOM /(g · kg ⁻¹)	碱解氮 AN /(mg · kg ⁻¹)	速效磷 AP /(mg · kg ⁻¹)	速效钾 AK /(mg · kg ⁻¹)
CK	8.34a	2.45a	4.66a	10.23b	1.55a	11.96c	36.52c	26.74d	375.13c
T1	7.99b	2.35b	4.47b	10.99ab	1.40b	13.69b	37.45c	33.21c	404.52b
T2	7.81c	2.3c	4.39c	12.34ab	1.35c	15.24a	42.94b	61.44a	399.79b
T3	7.79c	2.29c	4.34c	12.65a	1.39b	14.56ab	49.47a	44.99b	416.85a

注: 同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters after the data in the same column indicate that there are significant differences between different treatments ($P < 0.05$). EC: Electric conductivity; SC: Soil salt content; MC: Moisture content; BD: Bulk density; SOM: Soil organic matter; AN: Alkali hydrolyzed nitrogen; AP: Available phosphorus; AK: Available potassium. The same below.

最高,较 CK 增加了 27.42%。T3 处理土壤碱解氮与速效钾含量均显著高于其他处理 ($P<0.05$),与 CK 相比分别增加了 35.46%和 11.12%;而土壤速效磷含量在 T2 处理时最高,与 CK 相比增加了 56.48%,且与其他处理之间差异显著 ($P<0.05$)。

2.2 油菜不同还田量土壤线虫群落

对各样本土壤线虫进行高通量测序,保留了 217 864 条有效序列,有效序列长度为 220~434 bp,平均序列长度为 320 bp。基于 97%的序列相似性进行聚类,所有样品中共检测出 40 个 OTU,被划分为 3 纲 3 目 13 科 19 属 24 种。其中食细菌类线虫 5 属,食真菌类线虫 4 属,植物寄生类线虫 3 属,捕食杂食类线虫 4 属,未分类线虫 3 属。

从图 1a 可以看出,各处理中相对丰度 $\geq 1\%$ 的线虫科共有 4 个,分别为:头叶科 (Cephalobidae)、孔咽科 (Aporcelaimidae)、盆咽科 (Panagrolaimidae) 和异皮科 (Heteroderidae)。各处理土壤线虫的主要线虫科均是头叶科,在 T1 处理相对丰度最高,达 89.98%;在 T3 处理最低,为 81.97%。随着还田量的增加,孔咽科的相对丰度呈下降趋势,异皮科则相反。粒科 (Anguinidae) 与刺科 (Belonolaimidae) 仅在油菜还田处理中被检测出。

属水平土壤线虫群落组成如图 1b,平均相对丰度 $\geq 1\%$ 的线虫属共有 5 个,分别为:拟丽突属 (*Acrobeloides*)、丽突属 (*Acrobeles*)、无环属 (*Aporcella*)、盆咽属 (*Panagrolaimus*) 和刻点胞囊属 (*Punctodera*)。其中,拟丽突属在所有处理中均为优势属 (平均丰度 $> 75.00\%$),在 T1 处理中相对丰度最高,达 87.75%。无环属的相对丰度随还田量的增加逐渐下降,T3 处理最低,较 CK 降低了 99.82%。而刻点胞囊属的相对丰度则随着还田量的增加而升高。米卡垫刃属 (*Miculenchus*) 与刺属 (*Belonolaimus*) 仅在还田处理中被检测出。

不同还田量处理土壤线虫各营养类群的相对丰度如图 2 所示。所有处理优势营养类群均为食细菌类线虫,T2 处理下其相对丰度最高,随后呈下降趋势;捕食杂食类线虫的相对丰度随还田量的增加呈下降趋势,而食真菌类线虫与植物寄生类线虫的相对丰度逐渐升高。

通过分析不同还田量处理线虫群落的丰富度指数、多样性指数、线虫通道指数、成熟度指数等发现,所有处理覆盖度均大于 0.9970 (表 3),这说明测序数据合理,能够较真实地反映油菜还田后土壤样本的线虫群落特征。如图 3 所示,Chao1 指数与 ACE 指数均随着还田量的增加而降低,CK 处理最高,T3 处理最低;T3 处理 Chao1 指数和 ACE 指数较

CK 分别降低 41.07%和 35.44%。Shannon 指数在 T2 处理最高,T1 处理最低,而 Simpson 指数则相反。从表 3 可以看出,自由生活线虫成熟度指数 MI 随着还田量的增加呈下降趋势,CK 处理最高,T3 处理最低,T3 较 CK 降低了 16.80%;与 CK 相比,油菜还田处理植物寄生线虫成熟度指数 PPI 均有所增加,处理间差异不显著 ($P>0.05$);油菜还田处理富集指数 EI 均低于 CK 但处理间差异不显著,而结构指数 SI 较 CK 均显著降低 ($P<0.05$)。

如图 4 所示,在 OTU 水平上进行 PCoA 分析,2 个主成分坐标轴共解释了总变异的 91.73%,PCoA1 和 PCoA2 分别解释了总变异的 77.24%和 14.49%。说明不同处理之间土壤线虫群落存在差异。

2.3 土壤理化性质对线虫群落的影响

利用方差膨胀因子 VIF 分析筛选,保留了土壤有机质、碱解氮、速效磷、速效钾和含水率等环境因子。如图 5 为土壤理化性质与土壤线虫群落结构间的冗余分析 (RDA)。RDA1 和 RDA2 共同解释了线虫群落总变异的 97.94%,分别解释了总变异的 93.74%和 0.24%。土壤有机质 ($R^2 = 0.666$, $P = 0.005$) 和速效钾 ($R^2 = 0.845$, $P = 0.001$) 是影响土壤线虫群落结构的主要土壤环境因子 (图 5,表 4)。

表 5 为土壤理化性质与土壤线虫群落生态指数的相关性。Chao1 指数和 Simpson 指数与土壤 EC 呈显著正相关,与土壤碱解氮显著负相关;自由生活线虫成熟度指数 MI 和结构指数 SI 与土壤 pH、EC 及总盐含量呈极显著正相关,与土壤碱解氮呈极显著负相关。

3 讨论与结论

3.1 油菜不同还田量对土壤理化性质的影响

本研究结果表明,油菜还田显著降低了土壤容重、pH、EC 和总盐含量,且随着油菜还田量的增加,土壤含水率呈上升趋势。已有研究表明油菜能够通过自身代谢合成大量有机酸,从而调节自身的渗透平衡。当油菜翻压还田后,其体内的有机酸进入土壤中,加之微生物对油菜植株的分解也会产生部分有机酸,从而降低了土壤 pH^[14]。还有研究表明绿肥还田能够增加土壤孔隙度,从而疏松土壤,降低土壤容重^[15]。绿肥还田后还能与土壤颗粒胶结形成稳定的团粒结构,从而增强土壤透气性和透水性^[16]。土壤盐分含量下降可能是由于油菜对土壤 Na⁺的吸收能力显著高于其他作物,种植并翻压油菜可以显著降低土壤含盐量和 Na⁺含量^[10]。

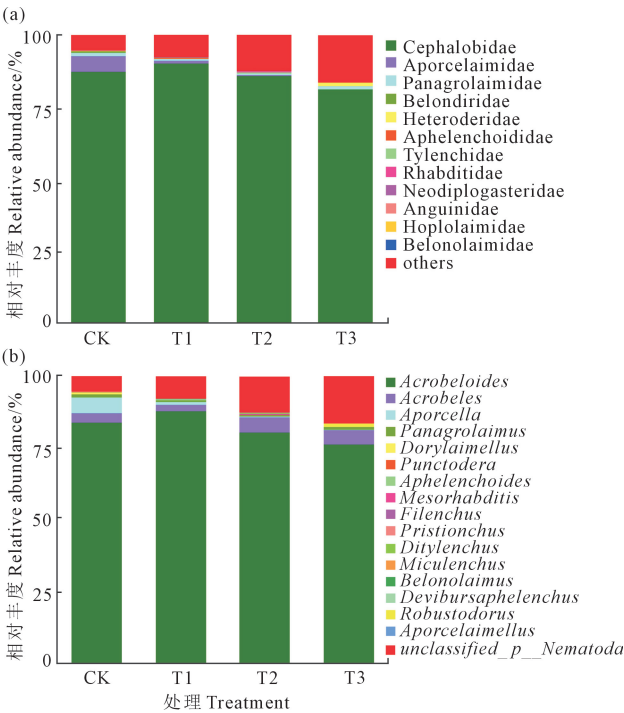
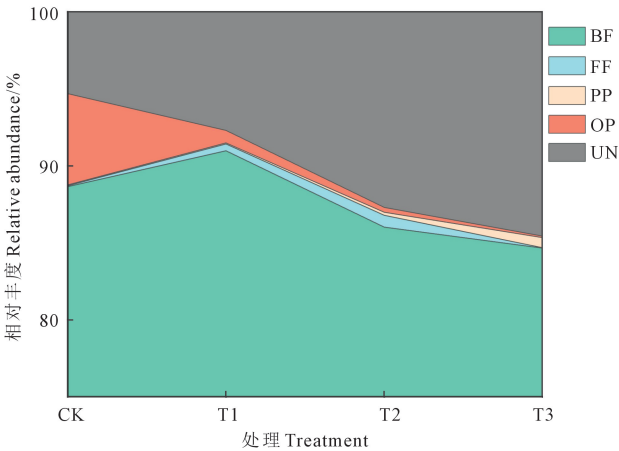


图 1 不同还田量下线虫科 (a) 和属 (b) 的相对丰度
Fig.1 Relative abundance of nematode family (a) and genus (b) in different returning amounts



注:BF:食细菌类线虫; FF: 食真菌类线虫; PP: 植物寄生类线虫; OP: 捕食杂食类线虫; UN: 未分类线虫。
Note: BF: Bacterivores; FF: Fungivores; PP: Plant-parasites; OP: Omnivores-predators; UN: Unclassified_Nematode.

图 2 不同还田量下土壤线虫各营养类群相对丰度
Fig.2 Relative abundance of soil nematodes in different returning amounts

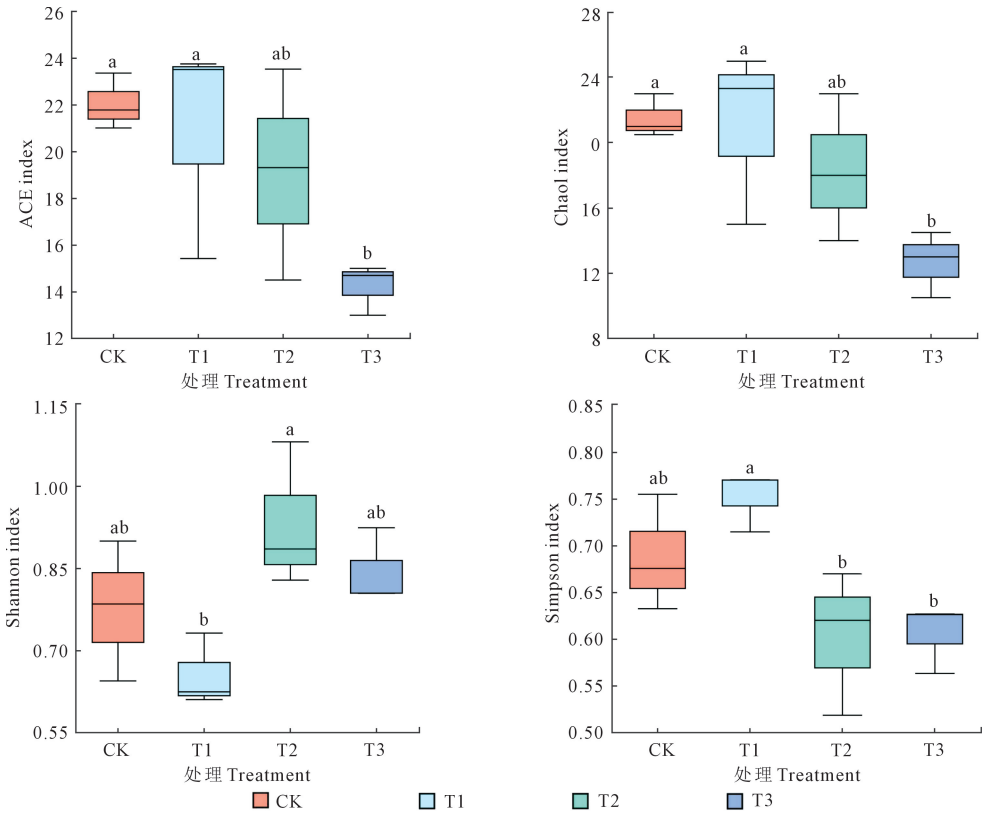


图 3 不同还田量下土壤线虫多样性指数
Fig.3 Diversity index of soil nematodes in different returning amounts

表 3 油菜不同还田量下土壤线虫生态指数

Table 3 Ecological index of soil nematodes in different returning amounts

处理 Treatment	覆盖度 Coverage	线虫通道指数 NCR	自由生活线虫成熟度指数 MI	植物寄生线虫成熟度指数 PPI	富集指数 EI	结构指数 SI
CK	0.9998a	0.9994a	205.75a	0.17a	1.58a	6.37a
T1	0.9996a	0.9995ab	186.57b	0.20a	1.08a	0.89b
T2	0.9993a	0.9991b	175.20c	0.56a	1.37a	0.28b
T3	0.9985a	0.9996a	171.18c	1.96a	0.82a	0.11b

Note;NCR: Nematode channel ratio; MI: Maturity index of free-living nematodes; PPI: Plant parasitic nematode index; EI: Enrichment Index; SI: Structure Index.

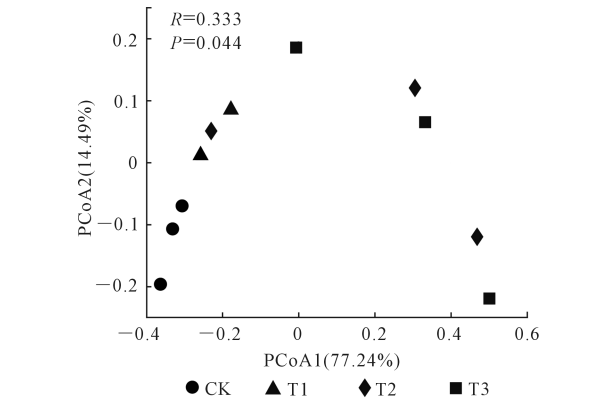


图 4 不同还田量土壤线虫群落组成主坐标 (PCoA) 分析

Fig.4 Principal co-ordinates analysis (PCoA) of soil nematode community composition in the treatments with different returning amounts

表 5 土壤理化性质与土壤线虫生态指数的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between soil physiochemical properties and soil nematode ecological index

指数 Index	pH	电导率 EC	总盐 SC	含水率 MC	容重 BD	有机质 SOM	碱解氮 AN	速效磷 AP	速效钾 AK
ACE	0.566	0.563	0.503	0.119	0.077	-0.126	-0.570	-0.406	-0.487
Chao1	0.569	0.593 *	0.559	0.133	0.147	-0.088	-0.631 *	-0.466	-0.554
Shannon	-0.499	-0.440	-0.382	0.063	-0.273	0.126	0.444	0.524	0.032
Simpson	0.626 *	0.625 *	0.571	0.070	0.287	-0.210	-0.669 *	-0.671 *	-0.266
NCR	-0.025	0.091	0.007	-0.127	0.401	-0.211	0.149	-0.451	0.095
MI	0.872 **	0.890 **	0.845 **	0.140	0.692 *	-0.587 *	-0.831 * *	-0.790 * *	-0.630 *
PPI	-0.350	-0.132	-0.079	-0.268	-0.549	0.317	0.099	0.254	0.078
EI	-0.025	0.156	0.200	0.224	-0.266	0.049	-0.225	0.056	-0.189
SI	0.886 **	0.919 **	0.916 **	0.273	0.566	-0.545	-0.838 **	-0.727 *	-0.823 **

本研究还表明油菜还田能提高土壤养分含量,这与邓力超等^[17]的研究结果一致。油菜还田后能产生大量可溶性有机物,并将自身的多种元素归还到土壤当中,提供多种有效养分,促进土壤养分的循环^[18]。与 CK 相比,不同还田量处理速效磷含量均显著提高,这是因为油菜还田能活化土壤中的难

表 4 Envfit 环境因子表

Table 4 Envfit environmental factor table

指标 Index	RDA1	RDA2	R ²	P value
有机质 SOM	0.673	-0.739	0.666	0.005 * *
碱解氮 AN	0.880	-0.474	0.649	0.011 *
速效磷 AP	0.968	-0.252	0.508	0.041 *
速效钾 AK	0.927	-0.376	0.845	0.001 * *
含水率 MC	-0.843	0.538	0.048	0.786

注: * 表示 $P<0.05$, * * 表示 $P<0.01$,下同。

Note: * indicates $P<0.05$, * * indicates $P<0.01$. The same below.

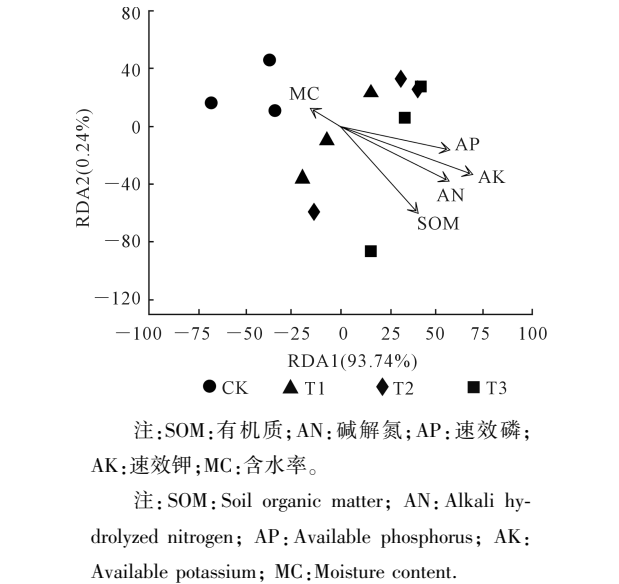


图 5 土壤理化性质与线虫群落间的冗余分析 (RDA)

Fig.5 Redundancy analysis (RDA) of soil physical and chemical properties and soil nematode communities

溶性磷,使得土壤有效磷含量增加^[19]。除此之外,油菜还田还能通过提高土壤酸性磷酸酶的活性来提高土壤有效磷含量^[20]。

3.2 油菜不同还田量对土壤线虫群落的影响

相对于形态学鉴定,高通量测序技术的发展及应用为土壤生物群落研究提供了新途径^[21]。本研

究通过高通量测序对土壤线虫进行了鉴定,研究结果表明,食细菌类线虫与捕食杂食类线虫的相对丰度随着还田量的增加呈下降趋势,而食真菌类线虫与植物寄生类线虫的相对丰度呈上升趋势。有研究表明秸秆还田过程中能产生大量真菌,从而使其相对丰度增加^[22]。捕食杂食类线虫对土壤扰动响应极为敏感,油菜还田过程中对土壤的扰动可能会使其相对丰度降低甚至导致一些属消失。叶成龙等^[5]研究发现施用有机肥能增加土壤植物寄生类线虫的相对丰度,这可能是还田增加了植物生物量,形成了更多的取食位点,有利于植物寄生类线虫的取食与繁衍,进而增加其相对丰度^[23]。

线虫生态指数能全面地反映线虫群落之间的差异。本研究结果表明油菜还田降低了土壤线虫群落的丰富度,提高了线虫群落的多样性,且部分属如米卡垫刃属与刺属仅在还田处理中被检测出,说明油菜还田提高了食物网的复杂性,使生态系统趋于成熟稳定。本研究结果表明所有处理线虫通道指数 NCR 均大于 0.5,说明有机物质分解主要以细菌分解为主。自由生活线虫成熟度指数 MI 随着还田量的增加而下降,而植物寄生线虫成熟度指数 PPI 呈上升趋势。这可能是由于油菜还田增加了植物对线虫取食的承载能力,使得植物寄生类线虫成熟度指数 PPI 增加^[24]。富集指数 EI 与结构指数 SI 可以指示土壤环境所受到的扰动和食物网的状况。本研究发现富集指数 EI 与结构指数 SI 较 CK 均有所下降,T3 处理最低,这可能是由于油菜还田借助机械耕作,对土壤扰动程度较高,使得土壤处于胁迫状态,原本食物网遭到破坏,其抗外界干扰能力变弱。

3.3 土壤理化性质对线虫群落的影响

土壤理化性质的变化会影响土壤线虫群落结构,不同的理化性质对线虫群落有着不同影响。本研究通过 RDA 冗余分析,表明土壤有机质和土壤速效钾是影响土壤线虫群落变化的主要环境因子。Chao1 指数与土壤 EC 呈显著正相关,与土壤碱解氮呈显著负相关,这与陈丽燕等^[25]的研究结果一致。已有研究表明土壤线虫与土壤有机质的分解和土壤物质能量循环密切相关^[6],因为油菜还田增加了土壤有机质含量,使得线虫食物来源更加丰富,促进了土壤食物网结构化,从而增加其多样性。卢焱焱等^[26]对红壤线虫群落的研究表明,微生物量碳和有效氮更能影响土壤线虫群落组成。这些环境因子的差异可能与试验地土壤及气候条件、试验处理及方法等因素不同有关。

综上所述,油菜还田能降低土壤容重及盐分含量,改善土壤结构,培肥效果显著;油菜还田还降低了食细菌类线虫的相对丰度,提高了食真菌类线虫与植物寄生类线虫的相对丰度,增加了土壤线虫群落的多样性和复杂性,降低了土壤线虫群落的结构指数。影响土壤线虫群落变化的主要环境因子为土壤有机质和速效钾。

参 考 文 献:

[1] 卢萍, 徐演鹏, 谭飞, 等. 黑土区农田土壤节肢动物群落与土壤理化性质的关系[J]. 中国农业科学, 2013, 46(9): 1848-1856.
LU P, XU Y P, TAN F, et al. Relationship between cropland soil arthropods community and soil properties in black soil area[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(9): 1848-1856.

[2] 张晓珂, 梁文举, 李琪. 我国土壤线虫生态学研究进展和展望[J]. 生物多样性, 2018, 26(10): 1060-1073.
ZHANG X K, LIANG W J, LI Q. Recent progress and future directions of soil nematode ecology in China[J]. Biodiversity Science, 2018, 26(10): 1060-1073.

[3] MAO X F, HU F, GRIFFITHS B, et al. Do bacterial-feeding nematodes stimulate root proliferation through hormonal effects? [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(7): 1816-1819.

[4] NEHER D A. Ecology of plant and free-living nematodes in natural and agricultural soil [J]. Annual Review of Phytopathology, 2010, 48: 371-394.

[5] 叶成龙, 刘婷, 张运龙, 等. 麦地土壤线虫群落结构对有机肥和秸秆还田的响应[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 997-1005.
YE C L, LIU T, ZHANG Y L, et al. Response of soil nematode community to application of organic manure and incorporation of straw in wheat field[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(5): 997-1005.

[6] 朱新玉, 朱波. 不同施肥方式对紫色土农田土壤动物主要类群的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(5): 911-920.
ZHU X Y, ZHU B. Effect of different fertilization regimes on the main groups of soil fauna in cropland of purple soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(5): 911-920.

[7] 乔建明, 王洪军, 李举文, 等. 土壤盐碱地现状、改良利用及盐碱治理在新疆农业发展中的意义[J]. 新疆农垦科技, 2015, 38(10): 54-56.
QIAO J M, WANG H J, LI J W, et al. Present situation, improvement and utilization of soil saline alkali land and significance of saline alkali treatment in agricultural development in Xinjiang[J]. Xinjiang Farm Research of Science and Technology, 2015, 38(10): 54-56.

[8] 李其胜, 赵贺, 汪志鹏, 等. 有机肥替代部分化肥对稻麦轮作土壤养分利用和酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(4): 912-919.
LI Q S, ZHAO H, WANG Z P, et al. Effects of organic fertilizer replacing partial chemical fertilizer on nutrient utilization and soil enzyme activity in a rice-wheat cropping system[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(4): 912-919.

[9] 朱孔志, 吴明昊, 申玉香, 等. 不同油菜品种在盐碱地的耐盐性鉴定及筛选[J]. 浙江农业科学, 2018, 59(8): 1354-1356, 1364.
ZHU K Z, WU M H, SHEN Y X, et al. Identification and screening of salt tolerance of different rape varieties in saline alkali soil[J]. Journal

- of Zhejiang Agricultural Sciences, 2018, 59(8): 1354-1356, 1364.
- [10] 王旺年, 葛均筑, 杨海昌, 等. 大田作物在不同盐碱地的饲料价值评价[J]. 作物学报, 2022, 48(6): 1451-1462.
- WANG W N, GE J Z, YANG H C, et al. Adaptation of feed crops to saline-alkali soil stress and effect of improving saline-alkali soil[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(6): 1451-1462.
- [11] 顾炽明, 李银水, 谢立华, 等. 浅析油菜作为绿肥的应用优势[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (1): 180-183.
- GU Z M, LI Y S, XIE L H, et al. Analysis on application advantages of rapeseed as green manure[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019, (1): 180-183.
- [12] 董章辉, 张艳丽, 王虎, 等. 我国绿肥油菜研究进展及发展前景展望[J]. 河北农业科学, 2021, 25(4): 67-70, 87.
- DONG Z H, ZHANG Y L, WANG H, et al. Research progress and development prospect of green manure rape in China[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2021, 25(4): 67-70, 87.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 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.
- [14] WANG W C, PANG J Y, ZHANG F H, et al. Integrated transcriptomics and metabolomics analysis to characterize alkali stress responses in canola (*Brassica napus* L.)[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 166: 605-620.
- [15] 张树杰, 陈灿, 张红升, 等. 翻压油菜绿肥对枸杞产量和土壤养分含量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 157-161.
- ZHANG S J, CHEN C, ZHANG H S, et al. Effects of rapeseed green manuring on the fruit yield and soil nutrient content of wolfberry[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(3): 157-161.
- [16] 张哲, 殷艳, 刘芳, 等. 我国油菜多功能开发利用现状及发展对策[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(5): 618-623.
- ZHANG Z, YIN Y, LIU F, et al. Current situation and development countermeasures of Chinese rapeseed multifunctional development and utilization[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5): 618-623.
- [17] 邓力超, 李莓, 范连益, 等. 绿肥油菜翻压还田对土壤肥力及水稻产量的影响[J]. 湖南农业科学, 2018, (2): 18-20.
- DENG L C, LI M, FAN L Y, et al. Effects of green manure rape returned to field on rice yield and soil fertility[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2018, (2): 18-20.
- [18] 刘慧, 李子玉, 白志贵, 等. 油菜绿肥翻压还田对新疆盐碱土壤的改良效果研究[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6): 914-923.
- LIU H, LI Z Y, BAI Z G, et al. Effects of rape green manure returned to field on saline alkali soil improvement in Xinjiang[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(6): 914-923.
- [19] 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.
- [20] 王丹英, 彭建, 徐春梅, 等. 油菜作绿肥还田的培肥效应及对水稻生长的影响[J]. 中国水稻科学, 2012, 26(1): 85-91.
- WANG D Y, PENG J, XU C M, et al. Effects of rape straw manuring on soil fertility and rice growth[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2012, 26(1): 85-91.
- [21] GEISEN S, SNOEK L B, TEN HOOVEN F C, et al. Integrating quantitative morphological and qualitative molecular methods to analyse soil nematode community responses to plant range expansion[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2018, 9(6): 1366-1378.
- [22] 饶继翔, 陈昊, 吴兴国, 等. 不同秸秆还田方式对土壤线虫群落特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2473-2480.
- RAO J X, CHEN H, WU X G, et al. Effects of different straw returning methods on soil nematode community characteristics[J]. Journal of Agro-environment Science, 2020, 39(10): 2473-2480.
- [23] WANG K H, MCSORLEY R, MARSHALL A, et al. Influence of organic *Crotalaria juncea* hay and ammonium nitrate fertilizers on soil nematode communities[J]. Applied Soil Ecology, 2006, 31(3): 186-198.
- [24] 李琪, 梁文举, 姜勇. 农田土壤线虫多样性研究现状及展望[J]. 生物多样性, 2007, 15(2): 134-141.
- LI Q, LIANG W J, JIANG Y. Present situation and prospect of soil nematode diversity in farmland ecosystems[J]. Biodiversity Science, 2007, 15(2): 134-141.
- [25] 陈丽燕, 戴华鑫, 陈江华, 等. 豫中烟区土壤微生物特性及其与土壤理化性质的关系[J]. 烟草科技, 2017, 50(5): 1-9.
- CHEN L Y, DAI H X, CHEN J H, et al. Microbial characteristics and their relationships with physicochemical properties of soils in central Henan tobacco growing areas[J]. Tobacco Science & Technology, 2017, 50(5): 1-9.
- [26] 卢焱焱, 王明伟, 陈小云, 等. 生物质炭与氮肥配施对红壤线虫群落的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 263-274.
- LU Y Y, WANG M W, CHEN X Y, et al. Influences of biochar and nitrogen fertilizer on soil nematode assemblage of upland red soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(1): 263-274.