

衬膜水稻技术对科尔沁沙地土壤线虫群落特征的影响

效志怡, 吴 同, 尤鹤旋, 梁 雷*

辽宁大学环境学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2024年11月11日; 录用日期: 2024年12月10日; 发布日期: 2024年12月25日

摘 要

为了分析衬膜水稻对科尔沁沙地土壤线虫群落组成与结构特征的影响, 探明不同处理对科尔沁沙地土壤线虫群落组成与营养类群分布差异的成因, 本研究以未修复的沙地为对照, 分析了水稻田和休耕地0~10、10~20、20~30 cm土层中土壤线虫群落的变化特征。结果表明: (1) 沙地、水稻田、休耕地的线虫优势属存在差异, 小杆总科(*Rhabditidae*)为其共同的优势属, 随着水稻田和休耕地的修复, 威尔斯属(*Wilsonema*)、前矛线属(*Prodorylaimium*)成为新的优势属; (2) 随水稻田、休耕地的修复, 土壤线虫的总数呈先升高后降低的趋势, 在0~10、10~20 cm的土层中水稻田中土壤线虫的总数与沙地、休耕地的土壤线虫的总数存在显著差异; 而在20~30 cm的土层中沙地、水稻田、休耕地土壤线虫的总数之间则不存在显著差异; (3) 沙地、水稻田、休耕地土壤线虫生活史的策略在0~20 cm的土层中以c-p1为主, 偏向于r对策者, 而在20~30 cm的土层中, 土壤线虫生活史的策略以c-p4和c-p5为主, 偏向于K对策者。特别是在水稻田修复后, 休耕地各土层各c-p类群线虫的相对多度相比于沙地逐渐趋于稳定, 逐渐向K对策者转变, c-p4为其主要的优势类群; (4) 沙地、休耕地的土壤线虫营养类群的个体密度表现为杂食-捕食性线虫 > 食细菌线虫 > 食真菌线虫 > 植食性线虫, 而水稻田土壤线虫营养类群的个体密度表现为食细菌线虫 > 杂食-捕食性线虫 > 植食性线虫 > 食真菌线虫。土壤线虫群落分布特征可以反映衬膜水稻技术对科尔沁沙地土壤微环境的变化, 对土壤质量具有一定的指示作用, 能够为科尔沁沙地土壤生态系统的科学管理提供理论支撑。

关键词

土壤线虫, 衬膜水稻, 营养类群, 群落特征

Effects of Film Lined Rice Technology on Soil Nematode Community Characteristics in Horqin Sandy Land

Zhiyi Xiao, Tong Wu, Hexuan You, Lei Liang*

*通讯作者。

文章引用: 效志怡, 吴同, 尤鹤旋, 梁雷. 衬膜水稻技术对科尔沁沙地土壤线虫群落特征的影响[J]. 环境保护前沿, 2024, 14(6): 1320-1329. DOI: 10.12677/aep.2024.146166

Abstract

In order to analyze the influence of film lined rice on the composition and structural characteristics of soil nematode community in Horqin Sandy Land, and to find out the causes of different treatments on the composition and distribution of trophic groups of soil nematode community in Horqin Sandy Land, this study took the uncultivated sandy land as a control, and analyzed the changing characteristics of soil nematode community in 0~10, 10~20, 20~30 cm soil layers of rice fields and fallow land. The results showed that: (1) There were differences in the dominant genera of nematodes among sandy land, paddy fields, and fallow land, with *Rhabditidae* being the common dominant genus. With the restoration of paddy fields and fallow land, *Wilsonema* and *Prodorylaimium* became new dominant genera; (2) With the restoration of paddy fields and fallow land, the total number of soil nematodes showed a trend of first increasing and then decreasing. There were significant differences in the total number of soil nematodes between paddy fields and sandy and fallow land in the 0~10 and 10~20 cm soil layers; However, there was no significant difference in the total number of soil nematodes among sandy land, paddy fields, and fallow land in the soil layer of 20~30 cm; (3) The strategies for the life history of soil nematodes in sandy land, paddy fields, and fallow land are mainly based on c-p1 in the 0~20 cm soil layer, leaning towards the r strategy, while in the 20~30 cm soil layer, the strategies for the life history of soil nematodes are mainly based on c-p4 and c-p5, leaning towards the K strategy. Especially after the restoration of rice fields, the relative abundance of nematodes in different c-p groups in various soil layers of fallow land gradually stabilized compared to sandy land, and gradually shifted towards K strategies, with c-p4 being the main dominant group; (4) The individual density of soil nematode trophic groups in sandy and fallow land is as follows: omnivorous predatory nematodes > bacterial eating nematodes > fungal eating nematodes > herbivorous nematodes, while the individual density of soil nematode trophic groups in paddy fields is as follows: bacterial eating nematodes > omnivorous predatory nematodes > herbivorous nematodes > fungal eating nematodes. The distribution characteristics of soil nematode community can reflect the changes of soil microenvironment caused by film lined rice technology in Horqin Sandy Land, have a certain indication effect on soil quality, and can provide theoretical support for the scientific management of soil ecosystem in Horqin Sandy Land.

Keywords

Soil Nematode, Film Lined Rice, Trophic Groups, Community Characteristics

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤线虫是全球最丰富的后生动物，广泛地存在于各种生境中。因线虫形态和习性多样，数量巨大，是土壤食物网功能群的重要组成部分，对土壤有机质的分解、物质循环和能量流动具有重要的作用[1]。此外，土壤线虫与土壤环境联系紧密，与环境扰动的敏感性强，对外界干扰反应迅速、形态结构简单。因此，土壤线虫群落可以作为指示生物来指示和反映土壤食物网结构和功能的变化提供有关土壤生态过

程的独特信息[2]。

科尔沁沙地地处半干旱农牧交错带, 由于长期气候干旱等自然因素和过度放牧等人为因素的影响, 沙化问题严重[3]、生态系统较脆弱、更容易发生演替或退化。为了减缓并修复科尔沁沙地土壤, 从 2014 年起本课题组在内蒙古自治区通辽市奈曼旗科尔沁沙地建立衬膜水稻试验基地并展开研究, 经过不懈的努力, 最终形成了较为成熟的技术和一定规模的衬膜水稻试验地。衬膜水稻技术是利用无土栽培原理, 在有水源的沙区, 充分利用沙地温度高、通气性好的有利条件, 克服漏水、漏肥的不利条件, 在养分含量极低、风沙活动强烈、自然条件下农作物根本无法生长的沙丘上, 通过平沙造田铺设塑料薄膜防渗层, 采取配方施肥、节水灌溉、丰产栽培管理等一系列措施。目前, 针对科尔沁沙地研究区的土壤肥力、土壤微生物、沙地植物等有所研究, 但是关于科尔沁沙地土壤线虫的研究较少。因此, 本文以土壤线虫为研究对象, 通过对科尔沁沙地研究区的土壤线虫群落进行调查研究, 分析不同修复方式下土壤线虫群落特征的差异, 从而确定衬膜水稻对荒漠化土壤线虫群落的组成及其变化特征, 分析环境变化对荒漠化土壤生态系统中土壤线虫的影响, 有利于揭示衬膜水稻技术修复后土壤线虫群落的演变规律, 为荒漠土壤的保护、恢复一定的理论依据和现实意义。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

试验样地位于科尔沁沙地南部, 行政区划隶属于内蒙古自治区通辽市奈曼旗(42°14'40"N~43°32'30"N, 120°19'40"E~121°31'44"E), 研究区属于北温带大陆性季风干旱气候, 春夏季降水较多, 秋冬季降水较少[4], 一年中降水集中在夏季(6~8月), 年均降水量 366 mm, 年蒸发量 1935 mm [5]。科尔沁沙地年平均气温 6.00℃~6.50℃, 无霜期平均约 150 天, 全年日照率 66.00%~69.90%, 平均每日日照 8.70~9.20 h, 年平均风速 3.60~4.10 m·s⁻¹。试验样地土壤类型为风沙土, 植被类型主要是黄柳、白茅、大针茅、山杏、羊草。

2.2. 研究方法

2.2.1. 取样方法

研究区设置三种处理样地, 分别为: 沙地即未修复沙漠土壤(CK)、水稻田即衬膜水稻修复 10 年土壤(PF)、休耕地即种植衬膜水稻 9 年后休耕 1 年土壤(FF)。以沙地为对照, 于 2024 年 8 月, 分别在上述 3 个样地中, 采用五点取样法, 选取 5 个 1 m × 1 m 取样点, 用土钻分别采集 3 个研究区的 0~10、10~20、20~30 cm 土层土样。将每个采样点 0~10、10~20、20~30 cm 土层的土壤样品中的根系、杂质等直接剔除, 然后混合均匀, 用四分法缩分至密封袋中贴上标签, 每个样地重复 3 次。将土样带回实验室, 用于测定分析。

2.2.2. 土壤线虫鉴定方法

采集好的新鲜土壤样品要放置于 4℃ 冰箱冷藏保存, 以便于进行线虫的分离、提取和鉴定。线虫的分离提取采用改良的浅盘法[6], 从 100 g 新鲜土样中利用改良的浅盘法对土壤线虫进行分离提取, 然后将提取的土壤线虫 60℃ 水浴杀死, 并用 $\varphi = 4\%$ 的福尔马林(TAF)固定, 倒入标本瓶中, 在解剖镜下直接观察计数。每个样品随机抽取 100 条线虫(不足 100 条的处理全量鉴定)在光学显微镜下进行科属鉴定[7], 线虫的科属、线虫 c-p 类群及营养类群的划分依据 Bongers [8]及 Bongers 和 Bongers [9]。

2.2.3. 分析方法

根据土壤线虫的食性特征、食道(oesophagus/esophagus)的结构和捕食方法等, Yeates 等[10]的研究将

土壤线虫分为 4 个营养类型：食细菌类(bacterivores, Ba)、食真菌类(fungivores, Fu)、植物寄生类(plant-parasites, PP)和捕食/杂食类(predators/omnivores, P/O)。

根据土壤线虫的生活史对策又将线虫划分为 5 种不同的功能群，即 c-p (colonizer-persister)值 1~5 类群，这 5 个类群表明线虫在 r-对策和 K-对策之间变化[11]。c-p1，是 r-对策生物，其特点产卵量大，寿命短，在食物丰富的条件下能爆发性增长，是典型的机会主义者，对环境耐受力强；c-p2，是 r-对策生物，与 c-p1 特点相似，寿命短和高繁殖率，但不能形成持久幼虫群，在食物丰富和缺乏的条件下均能存在，且在干扰和污染条件下均有很强的忍耐力；c-p3，其特点介于 c-p2 和 c-p4 之间，具有较长世代时间，对环境变化敏感；c-p4 特点是长的世代时间，有渗透的角质层，对污染物敏感；c-p5，其低繁殖率但寿命长，产卵量小但卵大低代谢活性，移动性差，具有渗透的角质层及对污染物和干扰非常敏感，是典型的 K 对策者[9]。

线虫数据进行 $\ln(x + 1)$ 转化后采用 SPSS 25 和 Excel 2408 进行统计分析，图表的绘制采用 OriginPro 2021。

3. 结果与分析

3.1. 土壤线虫群落组成变化(土壤线虫属)

本研究土壤样品共采集到 3403 条线虫，隶属于 22 科 35 属。由表 1 可知，其中属的种类最多的是 CK 0~10 cm，最少的是 PF 10~20 cm 和 PF 20~30 cm。CK 0~10、10~20 和 20~30 cm 的土层中土壤线虫优势属(相对丰度大于 10%的线虫属)包括盘旋属(*Rotylenchus*)、真滑刃属(*Aphelenchus*)、小杆总科(*Rhabditidae*)、异头叶属(*Heterocephalobus*)、螯属(*Pungentus*)、托那斯属(*Thonus*)、真矛线属(*Eudorylaimus*)、无孔小咽属(*Aporcelaimellus*)、前矛线属(*Prodorylaimium*)，其中，CK 10~20 和 20~30 cm 的土层中土壤线虫优势属较为相似均为真滑刃属(*Aphelenchus*)，小杆总科(*Rhabditidae*)、螯属(*Pungentus*)、托那斯属(*Thonus*)、无孔小咽属(*Aporcelaimellus*)；PF 中 0~10、10~20 和 20~30 cm 的土层中土壤线虫优势属包括垫咽属(*Tylencholaimus*)、小杆总科(*Rhabditidae*)、威尔斯属(*Wilsonema*)、前矛线属(*Prodorylaimium*)，并且随着土层的加深土壤线虫的优势属并没有发生太大的变化，只有垫咽属(*Tylencholaimus*)在 PF 20~30 cm 的土层中的成为了新的优势属。FF 0~10、10~20 和 20~30 cm 的土层中土壤线虫优势属包括垫咽属(*Tylencholaimus*)、小杆总科(*Rhabditidae*)、威尔斯属(*Wilsonema*)、前矛线属(*Prodorylaimium*)，并且随着土层的加深土壤线虫的优势属并未发生改变。在 CK、PF、FF 的 0~10、10~20、20~30 cm 的土层中小杆总科(*Rhabditidae*)一直是其优势属。而在 PF、FF 中的优势属小杆总科(*Rhabditidae*)和威尔斯属(*Wilsonema*)则随着土层深度的增加其相对丰度也呈持续上升的趋势。

对所有线虫属进行方差分析发现(表 1)，30 种线虫属在处理间存在显著差异($P < 0.05$)，剩余 5 种线虫属的变化则不显著，包括短体属(*Pratylenchus*)、茎属(*Ditylenchus*)、柱咽属(*Cylindrolaimus*)、棱咽属(*Prismatolaimus*)、小矛线属(*Microdorylaimus*)。

Table 1. Community composition of soil nematodes in different soil layers under membrane rice remediation

表 1. 衬膜水稻修复下不同土层的土壤线虫的群落组成

属	c-p	CK			PF			FF		
	c-p group	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm
植物寄生线虫 Plant-parasites										
裸矛属 <i>Psilenchus</i>	2	0.33bc	1.00ab	0.33bc	1.00ab	1.33a	1.00ab	0.00c	0.00c	0.00c

续表

锥科 <i>Dolichodoridae</i>	3	1.00a	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	0.67ab	0.00b
盘旋属 <i>Rotylenchus</i>	3	19.67a	0.00c	4.33b	0.00c	0.00c	0.00c	5.33b	2.00bc	3.00bc
短体属 <i>Pratylenchus</i>	3	0.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Zygotylenchus</i>	3	2.67a	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b
<i>Macroposthonia</i>	3	1.33a	0.00b	0.00b	1.00a	0.00b	0.00b	1.67a	1.67a	0.00b
食真菌线虫										
Fungivores										
茎属 <i>Ditylenchus</i>	2	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
真滑刃属 <i>Aphelenchus</i>	2	4.33a	2.33b	2.00b	0.00c	0.00c	0.00c	4.00a	4.00a	0.00c
垫咽属 <i>Tylencholaimus</i>	4	0.00c	0.00c	0.00c	6.00a	0.00c	0.00c	1.33b	0.00c	0.00c
食细菌线虫										
Bacterivores										
小杆总科 <i>Rhabditidae</i>	1	2.33c	3.00c	0.00c	67.33b	93.67a	0.67c	1.33c	0.33c	0.00c
头叶属 <i>Cephalobus</i>	2	1.33a	0.00c	0.00c	0.00c	0.00c	0.00c	0.00c	0.00c	0.67b
真头叶属 <i>Eucephalobus</i>	2	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	12.33a	0.00b	0.00b	0.00b
异头叶属 <i>Heterocephalobus</i>	2	14.33b	0.33d	8.33c	1.33d	0.00d	2.67d	2.33d	34.33a	13.33b
丽突属 <i>Acrobeles</i>	2	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	29.00a	1.00b	1.00b
拟丽突属 <i>Acrobeloides</i>	2	2.00a	0.00c	1.00b	0.00c	0.00c	0.00c	0.00c	0.00c	0.00c
板唇属 <i>Chiloplacus</i>	2	1.33a	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b
威尔斯属 <i>Wilsonema</i>	2	0.00c	0.00c	0.00c	10.67a	2.00b	0.00c	0.00c	0.00c	0.00c
连胃属 <i>Chronogaster</i>	3	0.33b	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	1.00a	0.00b	0.00b	0.00b
柱咽属 <i>Cylindrolaimus</i>	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
棱咽属 <i>Prismatolaimus</i>	3	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
杂食 - 捕食线虫										
Omnivores-predators										
<i>Clarkus</i>	4	0.00c	0.00c	1.67a	0.67b	0.00c	0.00c	0.00c	0.00c	0.00c
<i>Aetholaimus</i>	5	0.00b	0.00b	0.67a	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b
托那斯属 <i>Thonus</i>	4	6.67a	2.67b	2.00bc	0.00d	0.00d	0.33d	0.00d	0.67cd	3.00b
真矛线属 <i>Eudorylaimus</i>	4	6.67a	1.33c	0.67c	0.00c	0.00c	0.00c	4.00b	4.00b	7.67a
表矛线属 <i>Epidorylaimus</i>	4	2.00b	0.00c	3.33a	1.33b	0.00c	0.00c	4.33a	0.00c	0.00c
<i>Dorydorella</i>	4	0.00d	0.00d	3.00b	0.00d	0.33d	0.00d	0.00d	9.67a	1.67c
小矛线属 <i>Microdorylaimus</i>	4	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
无孔小咽属 <i>Aporcelaimellus</i>	5	14.67c	8.00d	3.67e	0.00f	0.00f	2.33ef	49.33a	33.67b	13.67e
无孔咽属 <i>Aporcelaimus</i>	5	0.00b	1.33a	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	0.33b	0.33b	0.00b
盘咽属 <i>Discolaimus</i>	4	0.33b	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	0.67ab	1.33a
拟矛线属 <i>Dorylaimoides</i>	4	0.67b	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	1.67a	0.00b	0.00b	0.00b
前矛线属 <i>Prodorylaimium</i>	4	0.67cd	0.00d	0.00d	15.67a	3.00c	0.00d	2.33cd	9.67b	9.67b
中矛线属 <i>Mesodorylaimus</i>	4	7.33b	0.00d	1.33cd	0.00d	0.33d	19.00a	0.67cd	3.67c	1.33cd

续表

咽矛线属 <i>Laimydorus</i>	4	2.67b	0.00c	4.33a	0.00c	0.00c	0.33c	1.67b	0.33c	1.67b
螯属 <i>Pungentus</i>	4	2.67b	3.00b	0.00c	0.00c	0.00c	0.00c	13.67a	2.67b	0.33c

注：不同小写字母表示处理间的显著差异($P < 0.05$)；下同。

3.2. 土壤线虫总数

由图 1 可以看出 CK、PF、FF 的土壤线虫总数最高值出现在 PF 的 0~10 cm 的土层(平均值为 645 条/100 g 干土)，最低值出现在 CK 的 10~20 cm 的土层(平均值为 23 条/100 g 干土)。在 0~10 cm 的土层中 PF 的土壤线虫总数最多，CK 的土壤线虫总数最少，且 PF 的土壤线虫总数与 CK、FF 的土壤线虫总数存在显著差异，CK 与 FF 之间的土壤线虫总数没有显著差异。在 10~20 cm 的土层中 PF 的土壤线虫总数最多，CK 的土壤线虫总数最少，并且 CK、PF、FF 三者间均存在显著差异。在 20~30 cm 的土层中 FF 的土壤线虫总数最多，CK 的土壤线虫总数最少，CK、PF、FF 三者间均不存在显著差异。统计分析结果表明随着土层深度的增加 CK、PF、FF 的土壤线虫数量的显著性总体上呈逐渐降低的趋势，并且随着土层的加深 CK、PF、FF 之间土壤线虫总数之间的差异逐渐降低。

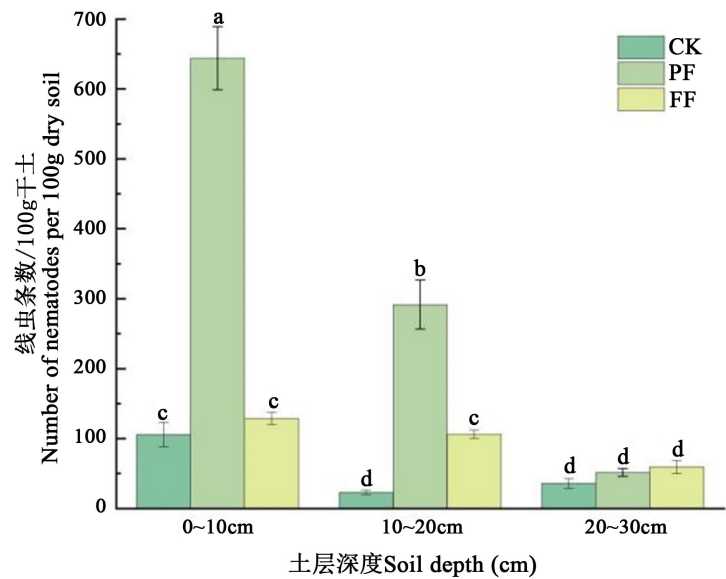


Figure 1. The impact of film lined rice cultivation on the total number of nematodes in desertified soil
图 1. 衬膜水稻种植对荒漠化土壤线虫总数的影响

3.3. 土壤线虫 c-p 类群

图 2 可以发现，CK、PF、FF 的 0~10、10~20、20~30 cm 的土层中土壤线虫生活史策略组成以 c-p2 和 c-p4 类群占据优势。就土壤深度而言，c-p1 线虫的相对多度在 CK、PF 的 10~20 cm 的土层相对较高，c-p2 线虫的相对多度在 FF 的 0~10、10~20、10~20 cm 的土层相对较高。c-p1、c-p2 线虫的相对多度随土层深度的增加呈先上升后下降的趋势，即在土壤表层偏向于 r 对策者。c-p3 的线虫的相对多度随土层深度的增加总体均趋于平稳，c-p4 的线虫的相对多度则随土层深度的增加总体均趋于下降趋势。而 c-p5 线虫的相对多度在 PF 的 0~10 cm 和 CK 的 20~30 cm 的土层相对较高，且 c-p5 的线虫的相对多度随土层深度的增加呈先下降后上升的趋势，与 c-p1、c-p2 的相反。与 CK 相比，PF、FF 显著降低了 0~10 cm 土层的 c-p3 线虫，并且在 PF 修复后，FF 各土层各 c-p 类群线虫的相对多度相比于 CK 逐渐趋于稳定，逐渐

向 K 对策者转变，c-p4 为其主要的优势类群。

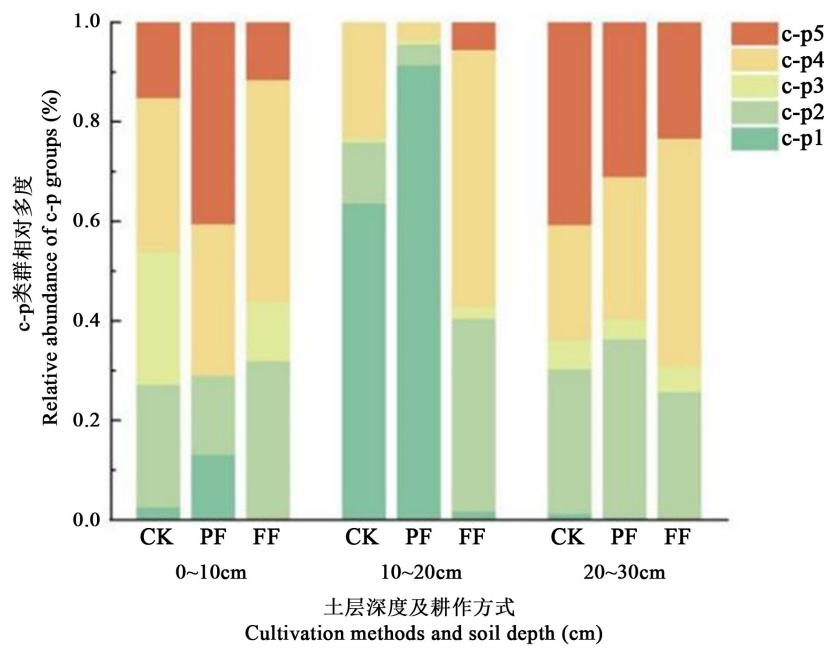


Figure 2. The impact of film lined rice cultivation on the c-p group of soil nematodes in desertification
图 2. 衬膜水稻种植对荒漠化土壤线虫 c-p 类群的影响

3.4. 土壤线虫营养类群变化

不同处理对各营养类群中个体数量的影响差别较大。由方差分析可得，CK、PF、FF 的 0~10、10~20、20~30 cm 的土层土壤线虫营养类群分布有所差异(表 2)。其中，CK 和 FF 均以杂食 - 捕食线虫寄生线虫为优势类群，占个体总数的 44%以上，显著高于食细菌线虫的相对丰度($P < 0.05$)，而 PF 以食细菌线虫为其优势类群，其比例在 40%以上，且显著高于食真菌线虫($P < 0.05$)。

PF 和 FF 显著改变了 CK 0~10、10~20、20~30 cm 植物寄生线虫、食细菌线虫和杂食 - 捕食线虫的比例。随着修复的进行，食细菌线虫的比例呈先升高后下降的趋势，而植物寄生线虫、杂食 - 捕食线虫的比例呈现先降低后升高的趋势。特别是在 CK、PF、FF 10~20 cm 的土层中食细菌线虫比例与 0~10、20~30 cm 的土层差异显著($P < 0.05$)。

Table 2. The impact of film lined rice cultivation on the nutritional groups of soil nematodes in desertification
表 2. 衬膜水稻种植对荒漠化土壤线虫营养类群的影响

处理	深度	植物寄生线虫	食真菌线虫	食细菌线虫	杂食 - 捕食线虫
CK	0~10 cm	27.54 ± 5.35A	5.68 ± 1.81B	21.89 ± 2.25A	44.89 ± 2.17C
	10~20 cm	4.43 ± 0.74C	10.24 ± 2.42A	14.19 ± 3.24B	71.14 ± 3.89A
	20~30 cm	12.84 ± 0.94B	5.24 ± 1.85B	25.32 ± 1.06A	56.6 ± 1.94B
PF	0~10 cm	0.95 ± 0.07B	0.95 ± 0.07A	80.44 ± 1.38B	17.67 ± 1.25B
	10~20 cm	1.3 ± 0.59B	0.97 ± 0.04B	94.18 ± 1.59A	3.54 ± 1.38C
	20~30 cm	2.45 ± 0.33A	0 ± 0B	40.22 ± 1.63C	57.33 ± 1.45A
FF	0~10 cm	4.39 ± 0.92Ab	4.68 ± 1A	28 ± 1.64B	62.93 ± 1.89Ab
	10~20 cm	2.43 ± 0.44B	5.16 ± 1.29A	32.49 ± 4.08A	59.92 ± 5.57B
	20~30 cm	5.2 ± 1.97A	0 ± 0B	25.7 ± 1.6B	69.1 ± 0.59A

4. 讨论

土壤线虫作为土壤生态系统中的重要角色,对土壤的矿化和提高养分具有重要作用[12]。而土壤环境因子的变化对线虫群落组成和结构特征也会产生较大的影响,导致土壤线虫对其生活的土壤微环境做出响应[13]。

4.1. 衬膜水稻技术对科尔沁沙地土壤线虫属、总数的影响

对3种不同处理模式的0~10、10~20、20~30 cm土层的土壤线虫进行分离和形态学上的鉴定,共分离鉴定出土壤线虫22科35属。针对不同处理方式而言,PF、FF的优势属相较于CK在0~10、10~20、20~30 cm的土层几乎一致,都包括垫咽属(*Tylencholaimus*)、小杆总科(*Rhabditidae*)、威尔斯属(*Wilsonema*)、前矛线属(*Prodorylaimium*),只有PF的0~10、10~20 cm的土层中垫咽属(*Tylencholaimus*)不是其优势属。而在CK中,10~20、20~30 cm的土层其优势属几乎一致,包括真滑刃属(*Aphelenchus*)、小杆总科(*Rhabditidae*)、螯属(*Pungentus*)、托那斯属(*Thonus*)、无孔小咽属(*Aporcelaimellus*),CK 0~10 cm的土层其优势属为盘旋属(*Rotylenchus*)、异头叶属(*Heterocephalobus*)、无孔小咽属(*Aporcelaimellus*),这不仅与CK的10~20、20~30 cm的土层差异较大,而且还和PF、FF的0~10、10~20、20~30 cm的土层差异较大。可能是因为CK 0~10 cm的土层可能受到一些人为干扰,导致其优势属与其他处理产生一定的差异。而PF、FF的0~10、10~20、20~30 cm土层的土壤线虫优势属相较于CK有所差异,这一现象可能与PF、FF土壤食物网的结构及受干扰程度相关[14]。

就土壤线虫总数而言,PF在0~10、10~20 cm的土层中土壤线虫总数量显著高于CK、FF,而PF在20~30 cm的土层中的土壤线虫总数量与CK、FF的20~30 cm的土层差异不显著。这可能是由于水稻种植导致其土壤表层的植被种类、生物量及土壤养分的差异所致[15]。且Villenave等[16]和Liang等[17]对农田生态系统下土壤线虫群落的研究表明,有机肥的施用使得c-p值为1和2的食微线虫数量的增加,且这是导致土壤线虫总数提高的原因之一。而在休耕后表层的植被数量减少,养分有所流失导致FF 0~10、10~20 cm土层中土壤线虫总数量显著降低。

4.2. 衬膜水稻技术对科尔沁沙地土壤线虫c-p类群及营养类群结构特征的影响

不同c-p类群线虫的相对多度随土层深度的变化规律不同,这与其深度及其引起的土壤环境因子的变化的响应不同[18]。由于耕作方式的不同,其对土壤线虫c-p类群的响应也不同,在本研究中,土壤线虫生活史的策略在0~20 cm的土层中以c-p1为主,偏向于r对策者,特别是PF,这可能因为表层土壤受环境的扰动较大且食物资源更加丰富,这与张晓珂等2013[19]年提出在养分富集的土壤中,c-p1的类群占优势的结论一致。并且Liang[17]等研究发现,农业开垦确实会使土壤线虫的c-p1类群和c-p2类群增加。而在20~30 cm的土层中,土壤线虫生活史的策略以c-p4和c-p5为主,偏向于K对策者,表明土壤受到的胁迫较小,生态系统向更成熟阶段发展[19]。

土壤线虫营养类群的组成与结构对土壤环境具有很好的指示效应,是评价土壤线虫群落及土壤质量的重要指标[20],土壤中线虫营养类群结构也可以反映土壤中食物网稳定状态。由表2可知,CK、FF土壤线虫的个体密度表现为杂食-捕食性线虫 > 食细菌线虫 > 食真菌线虫 > 植食性线虫,PF土壤线虫的个体密度表现为食细菌线虫 > 杂食-捕食性线虫 > 植食性线虫 > 食真菌线虫。一方面,这是因为捕食-杂食性线虫既能以土壤微生物为食,也能以其它营养类群线虫为食,丰富的食物资源能够促进撂荒地食细菌线虫和捕食-杂食性线虫数量的增加[15]。所以这可能是CK、FF捕食-杂食性线虫比例高的原因之一。而PF中食细菌线虫比例高的原因可能与水稻的种植和有机肥的施用有关,这与Liang[17]等研究一致。由于食细菌线虫在水稻田中是优势类群,所以它在一定程度上也决定了土壤线虫总量的态势[21]。但

是若某一类群线虫比例过高则食物网变得简单,单一化程度加强,土壤生物环境不稳定[22]。此外,食真菌线虫的数量在 PF 中出现的比例很小,这是因为真菌是好气菌在淹水状态受抑制后使食真菌线虫数量也受抑制。Bakonyi 等[23]研究表明土壤水分近饱和状态对食真菌线虫抑制作用更明显。

刘志奇等[24]-REF_Ref10895\ref[26]曾经报道,食细菌线虫和食真菌线虫数量之和与植物线虫数量的比值至少等于 1,在一定范围内比值越大,土壤越健康。本研究的结果显示,食细菌线虫和食真菌线虫数量之和与植物线虫数量的比值都大于 1,且 $PF > FF > CK$,这表明 PF 和 FF 可以使土壤朝着更健康的方向发展。另一方面,杂食-捕食性线虫也可以决定土壤食物网复杂性的关键生物类群[27],经 PF 修复后,FF 中的杂食-捕食性线虫在 0~10、10~20、20~30 cm 土层的比例占据主导且趋于稳定,表明休耕之后,FF 土壤食物网复杂性相较于之前有所提高,土壤趋于健康发展。并且 PF 与 FF 的线虫群落结构与 CK 间的差异逐渐缩小,说明线虫群落结构随环境的突然改变(CK 与 PF)而剧烈变化,但随着休耕的进行逐渐稳定,可能与生态系统的稳定性有关[28]。

5. 结论

综上所述,衬膜水稻种植(PF)确实会影响科尔沁沙地土壤线虫群落特征,我们可以发现衬膜水稻种植(PF)确实能够显著影响土壤线虫的优势属、总数、c-p 类群和营养类群结构,但主要集中在 0~20 cm 的土壤表层。在衬膜水稻种植(PF)中,相较于未修复的沙地(CK)其新增的优势属为垫咽属(*Tylencholaimus*)、威尔斯属(*Wilsonema*)、前矛线属(*Prodorylaimium*)等;土壤线虫的总数与未修复的沙地(CK)之间存在显著差异,并且随着土层深度的增加而逐渐减小;c-p 类群偏向于 c-p1,以 r 对策者为主;营养类群结构以食细菌线虫为主。而休耕(FF)后土壤线虫的优势属与衬膜水稻种植(PF)相比几乎没有发生改变;但是土壤线虫的总数出现下降并且和未修复的沙地(CK)无显著变化;c-p 类群则以 c-p4 和 c-p5 为主,更偏向于 K 对策者;营养类群结构以杂食-捕食性线虫和食细菌线虫为主。由此可见,土壤线虫的群落特征变化与外界环境的变化有很大的关系。通过探究衬膜水稻对荒漠化土壤线虫群落特征的变化,可以有效地指示和反映土壤环境的变化,从而为衬膜水稻修复荒漠化土壤提供一定的科学依据和理论支持。

基金项目

2022 年度沈阳市科学技术计划科研立项:沈阳市浑南区李相街道农村厕卫改造科技特派团(k500000376)。

参考文献

- [1] Yeates, G.W. and Bongers, T. (1999) Nematode Diversity in Agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **74**, 113-135. [https://doi.org/10.1016/s0167-8809\(99\)00033-x](https://doi.org/10.1016/s0167-8809(99)00033-x)
- [2] Hofmann, P., Kahnt, K., Mätz-Rensing, K., Brack, M. and Kaup, F. (2001) Three Spontaneous Lymphomas in a Colony of Cotton-Top Tamarins (*Saguinus oedipus*). *Journal of Medical Primatology*, **30**, 322-327. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0684.2001.300606.x>
- [3] 张晓珂,董锡文,梁文举,蒋德明,姜思维. 科尔沁沙地流动沙丘土壤线虫群落组成与多样性研究[J]. 土壤, 2009, 41(5): 749-756.
- [4] 王康富. 内蒙科尔沁沙地奈曼地区沙漠化土地综合整治初步研究[J]. 中国沙漠, 1989, 9(1): 33-37.
- [5] 于艳华, 乌兰图雅, 阿拉腾图雅. 科尔沁沙地退耕还林还草的生态效应分析——以通辽市奈曼旗为例[J]. 国土资源科技管理, 2007, 24(1): 23-28.
- [6] de Goede, R.G.M. and Verschoor, B. (2000) The Nematode Extraction Efficiency of the Oostenbrink Elutriator-Cotton-wool Filter Method with Special Reference to Nematode Body Size and Life Strategy. *Nematology*, **2**, 325-342. <https://doi.org/10.1163/156854100509204>
- [7] Bongers, T. (1988) *The Nematodes of the Netherlands*.

- [8] Bongers, A.M.T. (1988) De nematoden van Nederland. Stichting Uitgeverij Koninklijke Nederlandse Natuurhistorische Vereniging.
- [9] Bongers, T. and Bongers, M. (1998) Functional Diversity of Nematodes. *Applied Soil Ecology*, **10**, 239-251. [https://doi.org/10.1016/s0929-1393\(98\)00123-1](https://doi.org/10.1016/s0929-1393(98)00123-1)
- [10] Norton, J.H., Shepherd, M.A., Abdon-Naguit, M.R. and Lindsay, S. (1993) Mortalities in the Giant Clam Hippopus Hippopus Associated with Rickettsiales-Like Organisms. *Journal of Invertebrate Pathology*, **62**, 207-209. <https://doi.org/10.1006/jipa.1993.1100>
- [11] Bongers, T. (1990) The Maturity Index: An Ecological Measure of Environmental Disturbance Based on Nematode Species Composition. *Oecologia*, **83**, 14-19. <https://doi.org/10.1007/bf00324627>
- [12] 戴征凯, 赵菊林, 宋瑾琦, 等. “绿色南京”林业建设新增林地的土壤生物的群落结构[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 66-69.
- [13] 洪毅, 张伟东, 王雪峰, 等. 庄河口湿地不同土地利用方式下土壤线虫群落特征[J]. 生态环境学报, 2014(10): 54-59.
- [14] 佟富春, 肖以华, 王庆礼. 长白山次生林演替过程中土壤线虫群落结构特点[J]. 华南农业大学学报, 2009, 30(3): 63-68.
- [15] 华建峰, 姜勇, 梁文举. 植被覆盖对土壤线虫营养类群空间分布的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(2): 295-299.
- [16] Kang, B.S., Kim, S., Ren, F., Gila, B.P., Abernathy, C.R. and Pearton, S.J. (2005) Comparison of MOS and Schottky W/Pt-GaN Diodes for Hydrogen Detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **104**, 232-236. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2004.05.018>
- [17] Liang, W., Lou, Y., Li, Q., Zhong, S., Zhang, X. and Wang, J. (2009) Nematode Faunal Response to Long-Term Application of Nitrogen Fertilizer and Organic Manure in Northeast China. *Soil Biology and Biochemistry*, **41**, 883-890. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.06.018>
- [18] 胡宁, 娄翼来, 梁雷. 保护性耕作对土壤线虫 c-p 类群及功能团的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2349-2353.
- [19] 张晓珂, 梁文举, 李琪. 长白山森林土壤线虫[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- [20] 邢树文, 李云, 李金林, 等. 不同种植年限蕉柑根际土壤线虫群落及营养类群结构特征[J]. 果树学报, 2017, 34(12): 1599-1609.
- [21] 欧伟, 李琪, 梁文举, 等. 稻田不同水分管理方式对土壤线虫群落的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1921-1925.
- [22] 梁林琳, 刘奇志, 谢娜, 等. 枯黄草坪土壤线虫营养类群结构及其调节因素[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(5): 948-954.
- [23] Bakonyi, G. and Nagy, P. (2000) Temperature and Moisture-Induced Changes in the Structure of the Nematode Fauna of a Semiarid Grassland—Patterns and Mechanisms. *Global Change Biology*, **6**, 697-707. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00354.x>
- [24] 刘奇志, 梁林琳, 杨端, 等. 北京永丰地区绿化带草坪土壤线虫群落特征分析[J]. 草业学报, 2009, 18(5): 136-141.
- [25] 刘奇志, 边勇, 谢文闻, 等. 甘肃天水麦田土壤线虫种群结构与土壤健康指数初探[J]. 西北农业学报, 2006, 15(2): 81-84.
- [26] Wasilewska, L. (1994) The Effect of Age of Meadows on Succession and Diversity in Soil Nematode Communities. *Pedobiologia*, **38**, 1-11.
- [27] 钟爽, 曾会才, 金志强. 不同土壤类型蕉园土壤线虫群落结构的分布特征[J]. 广东农业科学, 2013, 40(17): 64-67+70.
- [28] Wu, Y., Chen, W., Entemake, W., Wang, J., Liu, H., Zhao, Z., et al. (2021) Long-Term Vegetation Restoration Promotes the Stability of the Soil Micro-Food Web in the Loess Plateau in North-West China. *Catena*, **202**, Article 105293. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105293>