

齐俊,余夏薇,黄静,等.不同比例猪粪沼液配施对小麦土壤线虫群落结构的影响[J].江苏农业科学,2024,52(2):228-234.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.02.032

不同比例猪粪沼液配施对小麦土壤线虫群落结构的影响

齐俊^{1,2},余夏薇²,黄静^{1,2},张坤^{2,3},张鑫^{2,3},郭肖颖²,胡淑恒¹

(1.合肥工业大学资源与环境工程学院,安徽合肥 230009; 2.安徽农业科学院农业工程研究所,安徽合肥 230031;

3.合肥学院生物食品与环境学院,安徽合肥 230022)

摘要:为探究猪粪沼液施用对小麦土壤线虫群落结构影响,试验设置了对照 CK(不施肥)、T30(沼液 110 t/hm²,化肥 1.2 t/hm²)、T50(沼液 180 t/hm²,化肥 0.9 t/hm²)、T70(沼液 250 t/hm²,化肥 0.55 t/hm²)4 个处理,比较不同比例沼液施用对土壤养分变化及土壤线虫群落的差异。结果表明,与不施肥相比,沼液不同比例施用土壤有机质、全氮、全磷和全钾含量提升明显,T50 处理小麦土壤肥力达到最佳水平。与不施肥相比,沼液施用有助于土壤线虫总数量的提升,T50 处理更有利于食细菌等有益线虫生长,而抑制植食性有害线虫的繁殖,且土壤线虫生长与土壤养分因子间联系密切。不同比例沼液施用自由线虫成熟度指数(MI)值较不施肥处理均有所提升,植食性线虫成熟度指数(PPI)值在 1.10~1.60,T50 处理时 PPI 值达到最低值,说明土壤受干扰程度小、稳定性增加,而 T70 处理瓦斯乐斯卡指数(WI)值小于 1,不利土壤系统维持稳定。本试验条件下,T50(沼液 180 t/hm²,化肥 0.9 t/hm²)处理能够有效提高土壤肥力,平衡不同食性土壤线虫占比,使得土壤生态环境趋向健康稳定,可为当地猪粪沼液的高效利用和土壤的健康运行提供理论参考依据。

关键词:施肥;沼液;土壤肥力;土壤线虫;线虫群落结构

中图分类号:S154.38⁺6;S181;S512.106 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)02-0228-07

土壤动物在农田生态系统中的作用不容忽视,土壤养分的转化、储存和释放以及微生物环境和土壤物理特性的变化,都与土壤动物的生存、取食和活动密切相关^[1-4]。线虫作为一种最为常见的土壤动物,因其易鉴别、世代周期短、对生境的快速反应等特性,经常被当作土壤生态系统敏感的指示生物^[5-6]。研究表明,土壤线虫在土壤食物网中占据多个营养级^[7],并直接参与土壤有机质分解、养分转化和能量传递,其线虫生态指数能够反映生态系统中独特的信息^[8]。因此开展对农田生态系统中土壤线虫的调查研究,对揭示土壤健康状况、土壤

生态系统演替或受干扰程度和指导农田施肥措施、改良土壤等方面具有十分重要的现实意义^[9]。

随着畜禽养殖业的规模化发展,畜禽粪污大量产生,经厌氧发酵后的畜禽粪污沼液因其富含 N、P、K 等多种植物需要的养分元素,具有肥效高、易被作物吸收等特点,可以充当有机肥料,对土壤肥力的改良、农作物产量和品质的提升有着积极作用^[10-11]。Xu 等在水稻—油菜轮作沼液施用研究中发现,合适比例沼液(165.1、182.1 t/hm²)灌溉可增加土壤孔隙度,有利于土壤团粒结构上微生物的附着,同时土壤肥力也得到提升^[12]。李国亮等研究发现,合理沼液施用对提高玉米(45 t/hm²)和小麦(60~75 t/hm²)产量、提升葡萄在果穗数以及单株产量有着积极作用^[13]。虽然畜禽沼液在农田施肥管理上有诸多优势,但由于气候、土壤条件和沼液理化性质等在各地区差异较大,很多地方缺乏合理科学的施肥管理经验,使得沼液肥料化利用率不高,以及严重时会导致作物品质下降和土壤环境污染等问题^[14]。目前,国内外对沼液利用的研究主要集中在对土壤物理特性的改变、作物品质的提升和土壤病虫害控制等方面,缺乏深入、系统性的理论

收稿日期:2023-03-09

基金项目:国家自然科学基金(编号:21407002);安徽省自然科学基金(编号:1508085MB39);农业农村部农村可再生资源开发利用重点实验室开放课题(编号:2018-007)。

作者简介:齐俊(1995—),男,安徽铜陵人,硕士研究生,主要从事农业生态环境研究。E-mail:qjhfut@163.com。

通信作者:郭肖颖,博士,研究员,主要从事农业生态环境研究, E-mail:gyx2@mail.ustc.edu.cn;胡淑恒,博士,副教授,主要从事水污染治理、生态环境修复、环境规划与管理等研究, E-mail:hushuheng@hfut.edu.cn。

研究,特别是对沼液施用后土壤环境中的线虫动物的影响研究较少^[15]。

本研究通过大田试验,设置了不同比例的猪粪沼液施用处理,明确了不同比例沼液施用对土壤养分的影响,对土壤线虫的数量、营养类群结构组成以及线虫生态指数变化进行了评估,旨在为当地猪粪沼液的高效利用和农田土壤生态系统的健康运行提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验基地位于安徽省阜阳市颍上县六十铺镇(32°46'4"N,116°3'18"E),该地为淮北地区的典型冲积平原,处于北温带和亚热带的过渡地带,年平均温度为 15℃,年降水量 904.6 mm,土壤类型为棕壤。试验区建有猪舍 5 000 m²,黑膜沼液池 4 000 m²,氧化塘 4 000 m²,年产猪粪沼液约 3 万 t。

试验区按随机分区布置,设计 4 个施肥单元,每个处理单元重复 3 次,每个单元占地 2 000 m²,试验始于 2020 年 7 月,设置了对照组 CK(不施肥)、T30(沼液 110 t/hm²,化肥 1.2 t/hm²)、T50(沼液 180 t/hm²,化肥 0.9 t/hm²)、T70(沼液 250 t/hm²,化肥 0.55 t/hm²)4 个处理。沼液理化性质为:全盐量 1 620 mg/L,pH 值 7.52,化学需氧量 1 030 mg/L,总氮含量 521 mg/L,总磷含量 45.3 mg/L。沼液统一作冬麦基肥,采用管网配设流量计一次性定量施入,化肥经称质量后人工一次性施入,化肥采用氮磷钾复合肥(肥料中的 N、P₂O₅、K₂O 含量均为 15%)。为防止沼液施用后田间交互影响,田间垄沟采用塑料薄膜隔离。农田田间管理同一般大田生产,种植制度为冬麦—夏玉米轮作。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采样 2021 年 7 月采集成熟试验区小麦土壤样品。土壤采用“S”形五点采样,所采集的土层深为 0~20 cm,每个取样区域收集 5 份样点混样,取样量为 500 g。将采集的土壤样品放入事先准备好的塑料袋内,并将其编号,保存于 4℃冰箱中。所采集样品一部分用于土壤线虫研究,另一部分经风干、研磨和过筛后用于土壤理化性质测定。

1.2.2 土壤化学性质测定 测定土壤中的总氮(TN)、总磷(TP)、总钾(TK)、有机质(SOM)、速效养分含量及 pH 值,测定方法参照《土壤农化分析》^[16]。

1.2.3 线虫的分离与鉴别 利用线虫的趋水性和

密度差异性,采用蔗糖离心法对土壤中线虫进行分离^[17]。其操作方法如下:称取 50 g 新鲜土壤于离心管中,加 100 mL 水,混合均匀,用离心机以 2 000 r/min 离心 5 min,然后弃上清液,加入蔗糖溶液(0.8 g/mL)搅拌均匀,再次以 1 000 r/min 离心 1.5 min,把上清液倒入烧杯中,用水清洗过 400、500 目试验筛,收集分离出的线虫经过 24 h 饥饿处理,经 TAF 固定液(蒸馏水 91 mL、三乙醇胺 2 mL、40% 甲醛 7 mL)固定后,通过 OLYMPUS 光学显微镜对线虫进行计数,并对其进行形态学属的分类。每个处理取 50 g 新鲜土中分离出的线虫,按土壤含水率换算为 100 g 的干土中的线虫,每个处理重复 3 次。根据尾部形态、线虫头部及取食特点,将线虫分为四大营养类群:食细菌线虫(Ba)、食真菌线虫(Fu)、植食性线虫(PP)、杂食/捕食性线虫(OP)。线虫的种属鉴定参见《中国土壤动物检索图鉴》^[18]。

1.2.4 土壤线虫生态学指数的计算 土壤线虫主要生态指数计算如下:(1)Shannon-Wiener 多样性指数: $H' = -\sum p_i \times \ln p_i$,式中: p_i 为第 i 个分类单元中线虫数占线虫总数的比值。(2)自由生活线虫成熟度指数: $MI = \sum (c - p_i) \times p_i$ 。(3)植物线虫成熟度指数: $PPI = \sum (v_i \times f_i)$ 。上式中 $c - p_i$ 、 v_i 分别为自由生活线虫、植食性线虫根据不同生活策略分别赋予的 $c - p$ 值; f_i 为第 i 种线虫的个体数占群落总个体数的比例。(4)瓦斯乐斯卡指数: $WI = (Ba + Fu)/PP$,式中: Ba 、 Fu 和 PP 分别表示食细菌线虫、食真菌线虫和植食性线虫数量。(5)富集指数: $EI = 100 \times e/(e + b)$,结构指数: $SI = 100 \times s/(s + b)$,式中: b 指 Ba_2 和 Fu_2 两类群, e 指 Ba_1 和 Fu_1 两类群, s 代表食物网结构成分,包括 $Ba_3 - 5$ 、 $Fu_3 - 5$ 、 $OP_3 - 5$ 、 $Ca_2 - 5$ 类群(分别为食细菌线虫、食真菌线虫和杂食线虫中 $c - p$ 值 3~5 的类群以及捕食线虫中 $c - p$ 值为 2~5 的类群)。

1.3 数据统计与分析

在 Excel 2010 中开展数据统计,利用 SPSS 25.0 进行方差分析和土壤肥力综合得分主成分分析,采用 origin 2018 软件对所得数据进行图形处理分析,使用 R 语言软件 Corplot 程序包进行相关性热图分析。

2 结果与分析

2.1 不同比例沼液施用对土壤养分的影响

2.1.1 不同比例沼液施用对土壤理化性质的影响 由表 1 可知,不同比例沼液施用土壤有机质含量

提升明显,T70 处理土壤有机质含量达到最大值,较不施肥处理显著提高 47. 13% ($P < 0.05$)。土壤总氮、总磷(除 T30 处理外)和总钾含量随着沼液施用量增加均得到不同程度提高。土壤有效磷和速效

钾含量均在 T50 处理时最高,与不施肥处理相比,T30、T70 处理有效磷和速效钾养分含量均降低。经不同沼液处理,土壤 pH 值在 5. 12 ~ 5. 17 之间,与 CK 处理差异不明显。

表 1 不同施肥对土壤理化性质的影响

处理	有机质含量 (g/kg)	pH 值	总氮含量 (g/kg)	总磷含量 (g/kg)	总钾含量 (g/kg)	有效磷含量 (g/kg)	速效钾含量 (g/kg)
CK	12.01 ± 0.60b	5.22 ± 0.13a	1.11 ± 0.06b	0.54 ± 0.02a	14.85 ± 0.32a	29.98 ± 1.76ab	320.82 ± 7.01ab
T30	16.23 ± 1.66a	5.17 ± 0.12a	1.18 ± 0.05b	0.53 ± 0.02a	14.94 ± 0.47a	25.82 ± 4.51b	260.05 ± 24.1b
T50	13.54 ± 0.56b	5.17 ± 0.05a	1.22 ± 0.07ab	0.61 ± 0.11a	14.97 ± 0.10a	36.14 ± 2.74a	336.14 ± 8.69a
T70	17.67 ± 1.06a	5.12 ± 0.11a	1.36 ± 0.09a	0.59 ± 0.11a	14.92 ± 0.26a	22.73 ± 3.71b	256.71 ± 6.31b

注:同列数据后不同小写字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$)。表 5 同。

2.1.2 不同比例沼液施用土壤肥力水平分析 土壤的基础是肥力。本研究土壤肥力水平分析选取有机质(SOM)、总氮(TN)、总钾(TK)、pH 值、速效磷(AK)和速效钾(AP)共 7 个土壤养分因子,采取 PCA 为提取方法进行主成分分析^[19]。数据经标准化处理,共提取出 3 个主成分,主成分 1 特征值 2.842,方差贡献率为 40.60%,主要与 SOM、TN 有着正密切相关(表 2),其载荷因子均 > 0.8 。主成分 2 特征值 1.721,方差贡献率为 24.57%,主要与 TK 和 pH 值密切正相关,其载因子载荷均 > 0.6 。主成分 3 特征值 1.337,方差贡献率为 19.10%,主要与 TP 有着密切正相关(载荷因子在 0.5 水平以上)。

根据主成分分析原理,按照得分系数矩阵结合各主成分贡献率计算出各土壤因子下土壤肥力得分: $F = 0.406\ 0F_1 + 0.245\ 9F_2 + 0.191\ 0F_3$,式中 F_1 、 F_2 、 F_3 为各主成分得分权重(表 3),得分 F 值越小,表明土壤肥力越低,反之越高。不同施肥处理下,土壤肥力等级高低顺序为:T50 $>$ T70 $>$ T30 $>$ CK,说明 CK 处理土壤肥力最低,各不同比例沼液施用均不同程度地提高了土壤肥力,尤其 T50 处理,土壤肥力达到最高水平,其次为 T70 和 T30 处理。

2.3 不同比例沼液施用对土壤线虫群落结构的影响

2.3.1 不同比例沼液施用对土壤线虫总数和营养类群的影响 由图 1 可知,不同施肥处理土壤线虫营养结构存在较大差异。本试验观测出土壤线虫数量 1 466 条/100 g 干土。各不同施肥处理土壤线虫总数变化顺序为:T50 $>$ T30 $>$ T70 $>$ CK(图 1-a),说明不同比例沼液处理土壤线虫总数均高于 CK 处理,且 T50 处理土壤线虫数量最高($P < 0.05$)。

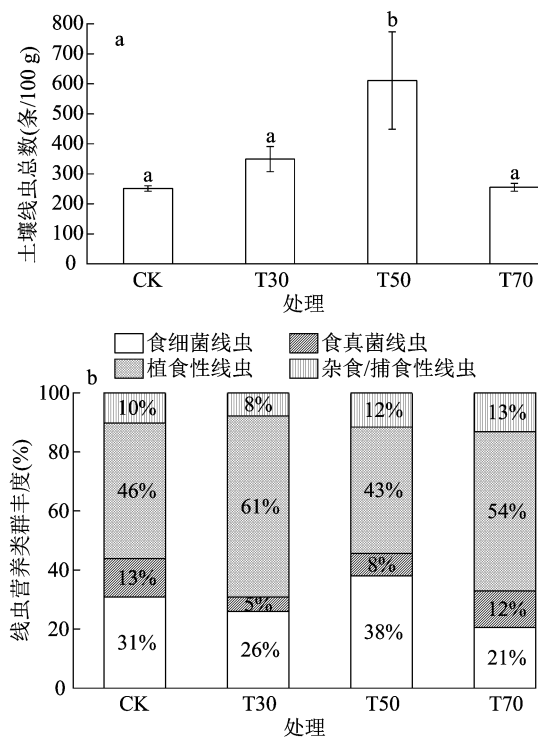
表 2 主成分的初始载荷和得分权重

项目	因子载荷			得分权重		
	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 1	主成分 2	主成分 3
SOM	0.921	-0.155	-0.131	0.546	-0.119	-0.113
TN	0.878	0.106	0.333	0.521	0.080	0.288
AK	-0.820	-0.350	0.250	-0.487	-0.267	0.216
AP	-0.608	0.463	0.468	-0.361	0.353	0.405
TK	0.105	0.824	-0.354	0.062	0.628	-0.306
pH	-0.298	0.634	-0.458	-0.176	0.484	-0.396
TP	0.284	0.517	0.769	0.169	0.394	0.666

表 3 不同施肥处理土壤肥力综合得分排名

施肥处理	F_1	F_2	F_3	综合得分	排名
CK	-2.044	-0.315	-0.197	-2.265	4
T30	0.501	-0.313	-0.909	-0.767	3
T50	-0.549	0.914	0.954	1.177	1
T70	2.092	-0.286	0.153	0.792	2

食细菌线虫和植食性线虫在各施肥处理土壤线虫总数中起决定作用(图 1-b),其中食细菌线虫在土壤营养类群中占 21% ~ 38%,植食性线虫丰度为 43% ~ 61%,食真菌线虫和杂食/捕食性线虫丰度较低。随着沼液施用比例增加,T50 处理食细菌线虫丰度明显提高,T30 和 T70 处理食细菌线虫丰度较 CK 处理均有所降低。植食性线虫丰度变化趋势与食细菌线虫相反,在 T50 处理植食性线虫丰度最低,T30 和 T70 处理植食性线虫丰度较 CK 处理均有所提升。与 CK 处理相比,随着沼液的施用,杂食/捕食性线虫(除 T30)丰度比例呈上升趋势,食真菌线虫丰度有所下降。



不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)

图1 不同施肥措施对线虫数量(a)和营养类群(b)的影响

2.3.2 不同比例沼液施用对小麦土壤线虫营养类群及组成的影响 由表4可知,本研究共鉴定出线虫属26个,其中食细菌线虫7属,食真菌线虫4属,植食性线虫7属,捕食/杂食性线虫8属。结果表明,不同施肥处理真头叶属、短体属和丝尾垫刃属均为优势属,本试验中小麦土壤短期不同比例沼液施用,并未明显改变小麦土壤线虫优势种属。

2.3.3 不同比例沼液施用对土壤线虫生态指数的影响 由表5可知,不同施肥处理土壤线虫生态指数存在差异。与不施肥(CK)相比,不同比例沼液施用,自由生活线虫成熟度指数(MI)均得到不同提升,T70处理MI较CK处理提高43.14% ($P < 0.05$)。T50处理植食性线虫成熟度指数(PPI)值达到最低水平,较CK处理降低10.57% ($P < 0.05$),T30和T70处理PPI均高于CK处理。不同比例沼液施用瓦斯乐斯卡指数(WI)在T50处理达到最高值,T70处理显著低于CK处理($P < 0.05$)。线虫多样性指数(H')在不同施肥处理差异不明显。与不施肥(CK)相比,不同比例沼液施用线虫富集指数(EI)和结构指数SI均高于CK,其值均超过50,EI差异显著。

2.4 土壤线虫与土壤养分间的相关性分析

由图2可知,土壤肥力F与土壤线虫总数、杂

食/捕食线虫数量、食细菌线虫数量呈正相关,与植食性线虫数量呈极显著负相关($P < 0.01$)。就各具体土壤养分因子而言,不同施肥土壤线虫总数与土壤总钾、磷($P < 0.05$)含量呈正相关,与土壤有机质、速效钾含量呈负相关($P < 0.05$)。食细菌线虫数量与土壤有机质、总氮含量呈负相关,与土壤pH值及总磷、总钾含量呈正相关。植食性线虫与土壤有机质含量呈正相关,与总磷、有效磷和速效钾含量呈负相关。此外,杂食/捕食类线虫数量与土壤总氮、总磷含量呈正相关。

3 讨论

3.1 不同比例沼液施用对土壤养分的提升

沼液作为一种高效液态有机肥料,合理的施用能提高土壤孔隙度,改善土壤结构,沼液中丰富的营养物质对土壤有机质和养分含量有着显著提升作用^[20]。樊文华等研究认为,与不施肥相比,施用沼肥土壤有机质含量增加9.8%~31.9%,而氮素含量增加10%^[21]。在本试验中,随着沼液施用比例的提高,土壤有机质、总磷、总钾(除T30处理外)含量较不施肥处理均得以显著提升,这与前人研究结论一致。主成分分析发现,土壤有机质、总氮、总钾、pH值等是土壤肥力组成的关键因子,T50(沼液170 t/hm²,化肥0.9 t/hm²)处理时肥力达到最佳,说明合适比例沼液施用对改善土壤养分含量、提升土壤肥力有着积极作用。

3.2 土壤线虫总数和营养类群对不同比例沼液施用的响应

土壤线虫作为一种敏感指示生物,对土壤环境改变反应迅速,能够有效指示土壤生态系统的变化状况^[22]。在农田生态系统中,外界资源输入引起土壤养分的变化,是影响土壤线虫多样性和线虫群落组成变化的主要原因^[23]。大量研究表明,施用有机肥能够显著提高土壤线虫总数^[24]。胡诚等研究认为,施化肥土壤线虫数量降低明显,而有机肥施用则能显著增加土壤线虫数量^[25]。在本试验中,与不施肥(CK)相比,不同比例沼液施用均不同程度增加土壤线虫总数,这与前人研究结果一致,说明对农田系统进行有机肥管理能够促进土壤线虫的生长^[26]。施肥能够有效提升土壤养分,为线虫提供更为广泛的食物来源,这有利于平衡土壤中不同食性线虫比例^[27]。叶成龙等研究认为,有机料与化肥配施对食细菌线虫(有益线虫)繁殖起到促进作用,而

表 4 不同施肥处理土壤线虫营养类群及组成

营养类群	属	功能团	丰度(%)			
			CK	T30	T50	T70
食细菌线虫			30.7	26.2	38.0	20.5
	头叶属	Ba ₂	0.9	1.2	0.3	0.3
	真头叶属	Ba ₂	19.7 *	15.1 *	25.1 *	15.0 *
	小杆属	Ba ₁	0.0	0.0	0.0	0.3
	中杆属	Ba ₁	0.0	0.0	0.3	0.6
	原杆属	Ba ₁	2.5	2.4	2.0	1.0
	板唇属	Ba ₂	5.9	6.1	8.2	2.3
	棱咽属	Ba ₃	1.6	1.1	2.1	1.0
食真菌线虫			13.0	4.8	7.5	12.3
	滑刃属	Fu ₂	4.7	1.7	1.8	3.6
	真滑刃属	Fu ₂	0.0	0.0	0.4	0.3
	垫咽属	Fu ₄	0.3	0.0	0.0	0.6
	茎属	Fu ₂	7.7	3.2	5.3	7.8
植食性线虫			46.2	60.9	42.6	54.2
	矮化属	Pl ₃	0.0	1.0	0.0	0.0
	短体属	Pl ₃	25.3 *	36.8 *	24.7 *	30.1 *
	潜根属	Pl ₃	0.0	1.0	0.4	0.6
	盘旋属	Pl ₃	0.9	3.0	1.2	4.9
	螺旋属	Pl ₃	4.5	7.8	1.9	6.2
	垫刃属	Pl ₂	1.2	0.6	0.6	2.0
	丝尾垫刃属	Pl ₂	14.2 *	10.8 *	13.8 *	10.4 *
杂食/捕食性线虫			10.2	8.0	12.0	13.0
	真矛线属	Om ₄	0.3	0.4	0.6	0.3
	前矛线属	Om ₄	3.8	2.9	3.4	4.5
	中矛线属	Pr ₅	0.3	0.3	0.0	1.0
	拟矛线属	Pr ₄	0.0	0.2	0.2	0.0
	盘咽属	Om ₅	0.0	0.3	0.0	0.0
	孔咽属	Om ₅	5.7	3.6	7.4	6.2
	拟桑尼属	Om ₄	0.0	0.2	0.0	0.7
	桑尼属	Om ₄	0.0	0.0	0.4	0.3
			17.1	23.9	41.7	17.3

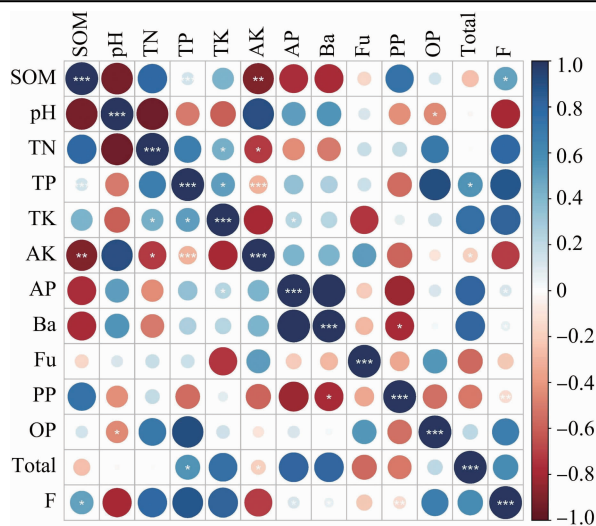
注: * 表示优势属,个体数占土壤线虫群落个体总数的 10% 以上。

表 5 不同施肥对线虫生态指数的影响

处理	生态指数					
	MI	PPI	WI	H'	SI	EI
CK	1.53 ± 0.03b	1.23 ± 0.24a	1.00 ± 0.39b	3.07 ± 0.59a	57.88 ± 3.11a	45.33 ± 2.54d
T30	1.69 ± 0.11b	1.60 ± 0.20a	1.55 ± 0.25b	2.68 ± 0.40a	67.34 ± 7.91a	88.24 ± 1.31c
T50	1.58 ± 0.06b	1.10 ± 0.14b	1.72 ± 0.18b	3.03 ± 0.19a	65.15 ± 2.28a	80.01 ± 2.38b
T70	2.19 ± 0.09a	1.41 ± 0.07ab	0.66 ± 0.30a	3.00 ± 0.37a	60.03 ± 8.31a	68.54 ± 1.35a

植食性线虫(有害线虫)数量下降明显^[28]。在本研究中,在 T50 处理(沼液 170 t/hm²,化肥 0.9 t/hm²)时,食细菌线虫丰度明显增加,植食性线虫繁殖受到抑制效果明显;T30 和 T70 处理较不施肥处理食细菌线虫丰度有所下降,植食性线虫得到有效繁

殖。这与前人研究结果^[29]存在一定差异,可见对植食线性虫的抑制作用与沼液用量有关。研究发现不同比例沼液施用(T30 除外)杂食/捕食线虫丰度提升明显,这主要是沼液施用为杂食/捕食线虫提供了更多的土壤食物来源^[30]。



F—土壤肥力; Total—土壤线虫总数; Ba—食细菌线虫数量; Fu—食真菌线虫数量; PP—植食性线虫数量; OP—杂食/捕食性线虫数量, 其他字母含义与上文相同。*、** 分别表示差异水平达 0.05、0.01, 圆形大小代表相关性大小, 蓝色为呈正相关, 红色为呈负相关

图2 土壤线虫与施肥后土壤养分间的相关性分析

3.3 土壤线虫生态学指数对不同比例沼液施用的响应

线虫的生态指数可反映土壤线虫群落和结构的差异,以及土壤在不同施肥处理后土壤受干扰程度。本试验主要研究了 MI、PPI、WI、 H' 、SI 和 EI 共 6 种生态指数。自由线虫成熟度指数 (MI) 和植食性线虫成熟度指数 (PPI) 常用于评价土壤生态系统的受外界干扰程度,MI 越高表明土壤受干扰程度越小^[31],而 PPI 同时与土壤肥力和生产力有着密切关系,PPI 越低则土壤环境稳定性愈高^[32]。大量研究显示,施有机肥能够显著改善土壤中的线虫群落成熟度指数,减少外界环境变化对土壤的扰动^[33-34],本研究中不同比例的沼液施用较 CK 处理 MI 值有所提升的结论与之一致。在 T50 处理 (沼液 170 t/hm²,化肥 0.9 t/hm²) 时,PPI 指数达到最低值 ($P < 0.05$),说明 T50 处理更有利于土壤环境维持稳定,结合土壤肥力在 T50 达到最佳水平 (表 3),也初步证实 PPI 用来指示土壤肥力的可行性。瓦斯乐斯卡指数 (WI) 可用来反映土壤健康状况,值越小则土壤健康状况越差,本研究中,T70 处理 WI < 1 ,达到显著性最低水平,说明较高量沼液处理 T70 (沼液 250 t/hm²,化肥 0.55 t/hm²) 施用不利于土壤的健康稳定。研究发现,沼液不同比例的施用线虫富集指数 (EI) 得以显著提高,说明合理比例沼液施用能够改善土壤养分富集状况,为线虫提供更为丰富食物来源^[35],线虫结构指数 (SI) 也有所提升,但不

明显。

3.4 土壤线虫与施肥后土壤养分变化间的关系

在以施肥为主要管理措施的农田生态系统中,土壤生物与土壤养分因子联系密切,多表现出对土壤环境的选择适应性。有研究指出,高养分含量的环境条件更适合较高 c-p 值的线虫类群 (对环境压力敏感线虫属) 生存^[36],例如食细菌线虫和杂食捕食线虫的生长依赖于充足的食物来源。在本试验中,不同比例沼液施用,以土壤有机质、总氮、总钾等为关键养分因子的土壤肥力 F 与线虫总数、食细菌线虫数量密切正相关,进一步证实了合适比例沼液 (沼液 170 t/hm²,化肥 0.9 t/hm²) 施用对土壤肥力的改善,有利于土壤线虫数量的提升。植食性细菌线虫数量与土壤肥力呈极显著负相关,这可能与土壤肥力的提升促进了食细菌线虫的生长,使其占据有利生态位,进而抑制了植食性线虫的繁殖有关^[37]。

4 结论

本研究针对不同比例沼液施用对小麦土壤养分和线虫群落结构的影响进行研究。得到以下结论: (1) 沼液一定比例的施用有利于土壤养分的改善和肥力的提升,且在 T50 (沼液 180 t/hm²,化肥 0.9 t/hm²) 时,土壤肥力达到最佳水平。 (2) 不同比例沼液施用能够显著增加土壤线虫总数,特别是在 T50 处理时,食细菌等有益线虫数量明显提升,植食性等有害线虫的繁殖受到抑制,且土壤线虫生长与土壤养分因子间联系密切。 (3) 结合线虫生态指数分析可知,不同比例沼液施用能够提高自由线虫成熟度指数 MI 值,T50 处理时,植食性线虫成熟度指数 PPI 值最低,降低了对土壤环境的干扰程度,T70 处理 WI 值小于 1,不利于土壤维持稳定。

综合考虑,T50 (沼液 180 t/hm²,化肥 0.9 t/hm²) 处理能够有效改善土壤养分、提升肥力,对平衡各不同食性线虫数量有着促进作用,有利于土壤维持稳定,可为当地猪粪沼液高效还田利用和土壤健康运行提供参考依据。

参考文献:

- [1] 刘 萍,刘红文,张 森,等. 典型黑土区农田土壤线虫群落的纬度分布格局及其驱动机制[J]. 生物多样性,2022,30(12):95-105.
- [2] Liang S W, Kou X C, Li Y B, et al. Soil nematode community composition and stability under different nitrogen additions in a

- semiarid grassland[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 22: e00965.
- [3] Wilschut R A, Stefan G. Nematodes as drivers of plant performance in natural systems[J]. *Trends in Plant Science*, 2020, 26(3): 237 – 247.
- [4] 杨贝贝, 朱新萍, 赵 一, 等. 放牧强度对干旱区高寒草地土壤线虫群落结构的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(1): 55 – 64.
- [5] 刘艳方, 刘 攀, 王文颖, 等. 土壤线虫作为生态指示生物的研究进展[J]. *生态科学*, 2020, 39(2): 207 – 214.
- [6] du Preez G, Daneel M, de Goede R, et al. Nematode – based indices in soil ecology: application, utility, and future directions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 169: 108640.
- [7] Ansari K G M T, Pattnaik A K, Rastogi G, et al. Characterization of benthic habitat settings in a lagoonal ecosystem using free – living nematodes as proxy[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2018, 26(2): 175 – 194.
- [8] Renčo M, Čermák V, Čerevková A. Composition of soil nematode communities in native birch forests in Central Europe [J]. *Nematology*, 2012, 14(1): 15 – 25.
- [9] Barros P A, Pedrosa E M R, de Oliveira Cardoso M S, et al. Relationship between soil organic matter and nematodes in sugarcane fields[J]. *Semina – Ciencias Agrarias*, 2017, 38(2): 551 – 560.
- [10] Du H Y, Gao W X, Li J J, et al. Effects of digested biogas slurry application mixed with irrigation water on nitrate leaching during wheat – maize rotation in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 882 – 893.
- [11] 陆国弟, 杨扶德, 陈红刚, 等. 沼液应用的研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(1): 339 – 345.
- [12] Xu M, Xian Y, Wu J, et al. Effect of biogas slurry addition on soil properties, yields, and bacterial composition in the rice – rape rotation ecosystem over 3 years[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(5): 2534 – 2542.
- [13] 李国亮, 王维生. 沼液还田措施的利用及示范推广的分析[J]. *农业开发与装备*, 2020(12): 93 – 94.
- [14] 王小彬, 闫 湘, 李秀英. 畜禽粪污厌氧发酵沼液农用之环境安全风险[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(1): 110 – 139.
- [15] 吴飞龙, 叶美锋, 林代炎. 沼液综合利用研究进展[J]. *能源与环境*, 2009(1): 94 – 95, 105.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25 – 114.
- [17] 耿文敬, 曹 森, 樊 琼, 等. 利用土壤线虫生态指标表征砂姜黑土土壤健康状况的探讨[J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26(12): 180 – 192.
- [18] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 51 – 88.
- [19] 温延臣, 李燕青, 袁 亮, 等. 长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(7): 91 – 99.
- [20] 刘 敏. 沼液肥料化还田应用效果研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2021: 6 – 7.
- [21] 樊文华, 刘晋峰, 王志伟, 等. 施用沼肥对温室土壤养分和重金属含量的影响[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2011, 31(1): 1 – 4.
- [22] Villenave C, Saj S, Pablo A L, et al. Influence of long – term organic and mineral fertilization on soil nematofauna when growing *Sorghum bicolor* in Burkina Faso[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 46(7): 659 – 670.
- [23] 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.
- [24] Hu C, Qi Y C. Effect of compost and chemical fertilizer on soil nematode community in a Chinese maize field [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46(3/4): 230 – 236.
- [25] 胡 诚, 曹志平, 白娅舒, 等. 长期不同施肥措施对土壤线虫群落的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2007, 23(3): 31 – 35.
- [26] Nahar M S, Grewal P S, Miller S A, et al. Differential effects of raw and composted manure on nematode community, and its indicative value for soil microbial, physical and chemical properties [J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 34(2/3): 140 – 151.
- [27] Jiang C, Sun B, Li H X, et al. Determinants for seasonal change of nematode community composition under long – term application of organic manure in an acid soil in subtropical China[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 55: 91 – 99.
- [28] 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.
- [29] 李其胜, 张顺涛, 赵 贺, 等. 化肥减量配施有机物料对油菜地土壤线虫群落结构的影响[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(12): 3970 – 3981.
- [30] Ferris H, Bongers T, de Goede R G M. A framework for soil food web diagnostics; extension of the nematode faunal analysis concept [J]. *Applied Soil Ecology*, 2001, 18(1): 13 – 29.
- [31] Bongers T. The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition [J]. *Oecologia*, 1990, 83(1): 14 – 19.
- [32] 孙 震, 刘满强, 桂 娟, 等. 减施氮肥和控制灌溉对稻田土壤线虫群落的影响[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(3): 659 – 665.
- [33] 张 婷, 孔 云, 修伟明, 等. 生物有机肥与化肥配施对华北潮土区冬小麦田土壤线虫群落的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(1): 223 – 229, 236.
- [34] 杨盼盼, 黄菁华, 张欣玥, 等. 长期施肥对渭北旱塬麦田土壤线虫群落特征的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(5): 242 – 251.
- [35] 任宏飞, 高 伟, 黄绍文, 等. 设施蔬菜有机肥/秸秆替代化肥模式对土壤线虫群落的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(7): 1303 – 1317.
- [36] Verschoor B C, De Goede R G M. The nematode extraction efficiency of the Oostenbrink elutriator – cottonwool filter method with special reference to nematode body size and life strategy[J]. *Nematology*, 2000, 2(3): 325 – 342.
- [37] Ferris H. Form and function; metabolic footprints of nematodes in the soil food web [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46(2): 97 – 104.