

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

耿文敬^{1,2} 曹森^{1,2} 樊琼² 张鑫^{2,3} 齐俊^{2,4} 王晓飞³ 朱江^{1*} 郭肖颖^{2*}

- (1. 安徽农业大学 资源与环境学院,合肥 230036;
2. 安徽省农业科学院 农业工程研究所,合肥 230031;
3. 合肥学院 生物食品与环境学院,合肥 230601;
4. 合肥工业大学 资源与环境工程学院,合肥 230009)

摘要 为探讨利用土壤线虫生态指标表征土壤健康状况的可行性,以安徽省农业科学院蒙城砂姜黑土有机肥长期定位试验基地为研究地点,以土壤线虫为研究对象,通过分析长期定位施肥条件下,农田土壤线虫数量、营养类群、生态指数的变化与土壤肥力水平的相关性,并进一步关联作物的产量指标。结果表明:砂姜黑土土壤肥力水平的等级由高到低依次为牛粪配施(NPK+CM)>猪粪配施(NPK+PM)>秸秆配施(NPK+S)>单施化肥(NPK)>不施肥(CK);随着土壤肥力水平的提高,线虫香农多样性指数、均匀度指数和瓦斯乐斯卡指数显著提高,植物寄生线虫成熟度指数显著降低,土壤健康状况变好;同时,NPK、NPK+S、NPK+PM、NPK+CM的产量较CK分别提升了337.87%、396.14%、495.43%、534.24%。因此,利用线虫生态指标的变化来表征砂姜黑土的土壤健康状况具有一定的可行性。

关键词 长期定位施肥;砂姜黑土;土壤线虫;生态指标;土壤健康状况

中图分类号 S154.38 **文章编号** 1007-4333(2021)12-0180-13 **文献标志码** A

Characterization of soil health by soil nematode ecological index in mortar black soil

GENG Wenjing^{1,2}, CAO Sen^{1,2}, FAN Qiong², ZHANG Xin^{2,3}, QI Jun^{2,4},
WANG Xiaofei³, ZHU Jiang^{1*}, GUO Xiaoying^{2*}

- (1. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;
2. Institute of Agricultural Engineering, Anhui Academy of Agricultural Science, Hefei 230031, China;
3. School of Biological Food and Environment, Hefei University, Hefei 230601, China;
4. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract Soil nematodes are widely distributed in the soil environment and their ecological indices are closely related to soil health. To explore the feasibility of using soil nematode ecological indices to characterize soil health status, soil nematode was taken as the research object by taking mortar black soil in the Mengcheng County of Anhui Province. The correlations among the total number of soil nematodes, nutritional groups, ecological indicators of soil nematodes and soil fertility conditions were analyzed. The crop yield indexes under the condition of long-term fertilization were determined. The results showed that: The soil fertility level of each fertilization treatment from high to low was NPK + PM > NPK + CM > NPK + S > NPK > CK; With the increase of soil fertility level, the Shannon-Weaver diversity index, the evenness index and Wasilewska index increased significantly, while the plant parasitic nematode maturation index

收稿日期: 2021-04-17

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

第一作者: 耿文敬, 硕士研究生, E-mail: 1390748857@qq.com

通讯作者: 朱江, 副教授, 主要从事植物营养学研究, E-mail: sy96123@163.com

郭肖颖, 研究员, 主要从事农业生态环境研究, E-mail: gxy2@mail.ustc.edu.cn

decreased remarkably, and the soil became healthier; Meanwhile, compared with CK, the yields of NPK, NPK + S, NPK + PM and NPK + CM treatments increased by 337.87%, 396.14%, 495.43% and 534.24%, respectively. The results indicated that the changes of nematode ecological indicators could be used to characterize soil health.

Keywords long-term location fertilization; mortar black soil; soil nematodes; ecological indicators; soil health state

土壤是人类赖以生存的重要资源,是农田生态系统的基础,土壤健康状况直接关系到环境质量和农产品安全。开展土壤健康评价,对于保障粮食安全和推进土壤可持续发展具有重要的现实意义^[1]。目前针对土壤健康状况的评价方法有多种,较常用的有内梅罗指数法^[2]、模糊判别法^[3]、灰色聚类法^[4]、地质累积指数法^[5]等评价法,这些评价方法各有其适用条件,但由于需要人为对评价指标赋权,存在一定主观判断上的局限。土壤线虫是土壤中一类十分活跃的生物,在土壤有机质的分解、营养物质的转化、养分循环和土壤理化性状的改善等方面发挥十分重要的作用,在土壤生态链中占有重要地位^[6]。已有研究表明土壤线虫的群落组成可以反映土壤的健康状况、污染状况、有机物质的输入状况及自然和人类的干扰程度等^[7-9]。随着对土壤线虫生态多样性研究的深入,土壤线虫常作为生物多样性的指示因子,用来评价土壤的健康状况和农田生态系统的稳定性^[10-12]。

砂姜黑土是典型的中低产土壤,结构不良,缺磷少氮,有机质含量低,种植小麦玉米等农作物产量普遍较低^[13-14]。施肥是砂姜黑土区域小麦增产的关键,其中施用氮肥对小麦增产的贡献率达到 69.4%^[15],施用磷肥平均亩产可增加 95.1%^[16-17]。目前关于砂姜黑土的研究多集中在研究土壤养分、作物产量、细菌群落等,将土壤线虫作为指示生物来

评价土壤健康状况的报道尚少^[18-19]。因此,本研究基于安徽省农业科学院蒙城砂姜黑土有机肥长期定位试验基地,拟以土壤线虫生态指标的变化作为土壤健康的指示因子,分析土壤线虫数量、营养类群、生态指数的变化与土壤肥力水平的相关性,并进一步关联作物的产量指标,探讨利用土壤线虫生态指标表征砂姜黑土土壤健康状况的可行性。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究以安徽省农业科学院蒙城砂姜黑土有机肥长期定位试验基地为研究对象。该试验站位于安徽省亳州市蒙城县马店村(116°37' E, 33°13' N),属于半湿润气候,年平均气温 16.5 °C,有效积温 5 479 °C,年平均降雨量 870 mm,年水分蒸发量为 1 027 mm,代表黄淮海平原典型的砂姜黑土区。

长期定位试验开始于 1982 年,冬小麦-大豆轮作,多年的长期定位施肥形成了不同肥力等级的稳定土壤环境。试验设 5 个处理(表 1),每个处理 4 次重复,共 20 个试验小区,每个试验小区面积为 66.7 m²,小区采用完全随机区组排列。秸秆含氮 5.5 g/kg、碳 482 g/kg;猪粪(干基)含氮 17 g/kg、碳 367 g/kg;牛粪(干基)含氮 7.9 g/kg、碳 380 g/kg;全部有机肥料和无机肥料于每年小麦种植整地前一次性施入,后茬大豆不施肥^[20]。

表 1 长期定位试验施肥处理

Table 1 Long-term located experiment fertilization treatment

处理 Treatment	施肥方式 Fertilization method	肥料养分含量 Fertilizer nutrient content
CK	不施肥	0
NPK	氮磷钾	纯氮 180 kg/hm ² , 五氧化二磷 90 kg/hm ² , 氧化钾 135 kg/hm ²
NPK+S	氮磷钾+秸秆	7 500 kg/hm ² 秸秆+纯氮 180 kg/hm ² , 五氧化二磷 90 kg/hm ² , 氧化钾 135 kg/hm ²
NPK+PM	氮磷钾+猪粪	15 000 kg/hm ² 猪粪(湿)+纯氮 180 kg/hm ² , 五氧化二磷 90 kg/hm ² , 氧化钾 135 kg/hm ²
NPK+CM	氮磷钾+牛粪	30 000 kg/hm ² 牛粪(湿)+纯氮 180 kg/hm ² , 五氧化二磷 90 kg/hm ² , 氧化钾 135 kg/hm ²

1.2 土壤样品采集

2019年采集该基地小麦收获后不同施肥处理的土壤样品。土样采集时采用“S”形五点取样法,每个试验小区随机采集5个样点的土壤混合成一个土样,20个试验小区共采集20份土样,每个试验小区采集约500g土壤。取样为0~20cm的耕层土壤,将取好的土样装入塑料袋并编号,4℃保存备用。

1.3 土壤线虫提取及鉴定

蔗糖离心漂浮法是比较高效常用的土壤线虫分离法,过程中采用淘洗—过筛—蔗糖梯度密度离心浮选的方法提取^[21]。称取50g鲜土于离心管中,加约100mL水并充分混匀,置于离心机内以2000r/min离心5min,弃掉上清液,加入蔗糖溶液(0.8g/mL)搅匀,再次以1000r/min离心1.5min,将上清液倒入预先装水的烧杯里,将烧杯内的液体通过用60、400和500目筛网过筛并用水冲洗,最后将400和500目筛网里的线虫洗到塑料培养皿中。分离的线虫经24h饥饿处理后,用TAF固定液(40%甲醛,7mL;三乙醇胺,2mL;蒸馏水,91mL)固定,在生物显微镜下进行计数和线虫属的鉴定。每个处理取50g鲜土分离出全部线虫,根据土壤含水量换算成100g干土中的线虫数量,每个样品做三次重复。根据线虫的头部、尾部的形态学特征和取食特性将其划分为4个营养类群:植物寄生线虫、食细菌线虫、食真菌线虫、杂食/捕食线虫^[22]。线虫的种属鉴定参见《中国土壤动物检索图鉴》^[23]。

1.4 线虫生态学指数度量方法

本研究中采用的线虫生态学指数有香农多样性指数、均匀度指数、优势度指数、植物寄生线虫成熟度指数、瓦斯乐斯卡指数、线虫通路指数,计算公式如下:

香农多样性指数

$$H' = - \sum p_i \ln p_i \quad (1)$$

均匀度指数

$$J' = H' / \ln S \quad (2)$$

优势度指数

$$\lambda = \sum p_i^2 \quad (3)$$

植物寄生线虫成熟度指数

$$PPI = \sum v_i f'_i \quad (4)$$

瓦斯乐斯卡指数

$$WI = (BF + FF) / PP \quad (5)$$

线虫通路指数

$$NCR = BF / (BF + FF) \quad (6)$$

式中: p_i 为第*i*个分类单元中个体占线虫总个体数量的比例; S 为线虫分类单元数; v_i 为根据土壤线虫在生态演替中的不同生活策略赋予的 c_p 值; f'_i 为植物寄生线虫科/属在线虫种群中所占的比重;BF、FF和PP分别为食细菌线虫、食真菌线虫和植物寄生线虫的数量。

1.5 土壤理化指标测定

土壤理化性质的测定皆采用常规法:pH, $m(\text{水}) : m(\text{土}) = 2.5 : 1$,进行酸度计测定;有机质,重铬酸钾加热法;全氮,开氏法;碱解氮,碱解扩散法;硝态氮,紫外分光光度法;全磷,氢氧化钠碱融-钼锑抗比色法;有效磷,碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;全钾,氢氧化钠碱融-火焰光度法;速效钾,乙酸铵浸提-火焰光度法^[24]。

1.6 小麦产量测定

2019年小麦收获期,在每个试验小区随机选取5个样点,每个样点收获1平方米范围内的全部小麦脱粒测产。

1.7 数据统计与分析

统计数据采用SPSS 25.0软件进行方差分析及主成分分析,用LSD新复极差法进行显著性检验,图表采用Microsoft Excel 2010生成。

2 结果与分析

2.1 不同施肥条件下的土壤肥力

2.1.1 不同施肥条件下的土壤养分

对砂姜黑土试验小区的土壤养分进行分析测定,不同施肥处理的土壤养分情况见表2。与CK相比,NPK+PM、NPK+CM提高了土壤pH,而NPK、NPK+S处理与CK相比则显著降低了土壤pH($P < 0.05$)。与不施肥相比,牛粪配施、猪粪配施能显著提高土壤pH,而单施化肥以及秸秆配施处理则显著降低了土壤pH。与CK相比,NPK、NPK+S、NPK+PM、NPK+CM4个施肥处理的土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾含量显著提高($P < 0.05$),其中长期施肥处理的土壤有机质含量与CK相比分别提升了28.95%、53.98%、103.44%和105.55%。NPK+CM、NPK+PM2个粪肥配施处理的土壤有机质、碱解氮、全磷和有效磷含量与NPK相比有显著提高($P < 0.05$),其中土壤有机质含量较NPK分别提高了32.12%和33.49%。

表 2 土壤养分含量分析

Table 2 Analysis of soil nutrient content

处理 Treatment	pH	有机质/(g/kg) Organic matter	全氮/(g/kg) Total nitrogen	碱解氮/ (mg/kg) Alkali-hydrolyzale nitrogen	硝态氮/ (mg/kg) Nitrate nitrogen	全磷/(g/kg) Total phosphorus	有效磷/ (mg/kg) Available phosphorus	全钾/(g/kg) Total potassium	速效钾/ (mg/kg) Rapidly available potassium
CK	6.44±0.03 b	16.58±1.77 d	0.90±0.05 d	101.85±8.48 d	3.65±0.51 b	0.49±0.04 bc	9.83±1.01 d	17.66±1.13 a	112.56±5.74 d
NPK	5.99±0.07 c	21.38±1.02 c	1.28±0.16 b	129.31±6.22 c	5.49±0.38 a	0.53±0.09 b	8.58±0.39 d	17.74±0.25 a	178.56±4.00 b
NPK+S	5.48±0.15 d	25.53±2.55 b	1.15±0.10 bc	147.59±2.42 b	3.33±0.35 b	0.63±0.10 ab	23.99±0.46 c	16.80±0.23 a	216.00±1.30 c
NPK+PM	6.48±0.07 b	33.73±1.03 a	1.73±0.12 a	186.69±7.51 a	4.00±0.61 b	0.75±0.06 a	38.86±1.13 b	16.78±1.90 a	335.33±2.19 a
NPK+CM	6.92±0.18 a	34.08±1.29 a	1.32±0.04 b	196.13±5.34 a	2.07±0.65 c	0.66±0.05 a	43.16±1.52 a	18.19±1.73 a	274.78±1.10 b

注：同列数据不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)，相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)。下表同。

Note: Within the same column, different letters represent significant differences ($P < 0.05$), while the same letters represent no significant differences ($P > 0.05$). The same below.

2.2.2 基于主成分分析的土壤肥力

本研究选取 pH、有机质、全氮、碱解氮、硝态氮、全磷、有效磷、全钾和速效钾 9 个养分因子,采用主成分分析法对不同施肥处理的土壤肥力水平进行评价,结果见表 3。按照主成分分析特征值 > 1 的原则,提取了 2 个主成分。如表 3 所示,第 1 主成分对总方差的贡献率为 65.455%,第 2 主成分的贡献为 22.070%,累计贡献率达到 87.525%,说明提取的 2

个主成分基本能反映土壤肥力的信息。由表 4 因子载荷矩阵可知,第 1 主成分与有机质、碱解氮、全磷、有效磷、速效钾正向密切相关,其因子载荷值均大于 0.95,表明有机质、碱解氮、全磷、有效磷、速效钾含量的变化对土壤肥力水平差异起主要影响作用。第 2 主成分与 pH、全钾正向密切相关(因子载荷值在 0.50 以上),这表明土壤 pH、全钾含量也是土壤肥力水平差异的关键作用因子。

表 3 主成分特征向量及累计贡献率

Table 3 Eigenvectors and cumulative contribution rate principal component

主成份 Principal component	特征值 Characteristic value	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Accumulated Contribution rate
1	5.891	65.455	65.455
2	1.986	22.070	87.525

表 4 初始因子载荷与成分得分系数矩阵

Table 4 The initial factor load and component score coefficient matrix

项目 Item	因子载荷 Component factor load		得分系数 Component score coefficient	
	主成分 1 Component 1	主成分 2 Component 2	主成分 1 Component 1	主成分 2 Component 2
	pH	0.433	0.747	0.073
有机质 Organic matter	0.991	0.039	0.168	0.020
全氮 Total nitrogen	0.828	-0.375	0.141	-0.189
碱解氮 Alkali-hydrolyzale nitrogen	0.979	0.090	0.166	0.045
硝态氮 Nitrate nitrogen	-0.479	-0.606	-0.081	-0.305
全磷 Total phosphorus	0.960	-0.260	0.163	-0.131
有效磷 Available phosphorus	0.969	0.185	0.164	0.093
全钾 Total potassium	-0.189	0.877	-0.032	0.442
速效钾 Rapidly available potassium	0.976	-0.197	0.166	-0.099

由于土壤肥力因子在数量级和量纲上各不相同,需对原始数据进行标准化处理,采用 SPSS 25.0 对 9 个土壤肥力因子进行标准化处理,结果见表 5。根据主成分的得分系数矩阵可以求出各主成分得分的计算公式为: $F_1 = 0.073 Z_{pH} + 0.168 Z_{SOM} + 0.141 Z_{TN} + 0.166 Z_{AN} - 0.081 Z_{NO_3^-} + 0.163 Z_{TP} + 0.164 Z_{AP} - 0.032 Z_{TK} + 0.166 Z_{AK}$, $F_2 = 0.376 Z_{pH} + 0.02 Z_{SOM} - 0.189 Z_{TN} + 0.045 Z_{AN} - 0.305 Z_{NO_3^-} - 0.131 Z_{TP} + 0.093 Z_{AP} +$

$0.442 Z_{TK} - 0.099 Z_{AK}$ 。式中: Z_{pH} 、 Z_{SOM} 、 Z_{TN} 、 Z_{AN} 、 $Z_{NO_3^-}$ 、 Z_{TP} 、 Z_{AP} 、 Z_{TK} 、 Z_{AK} 分别为 pH、有机质、全氮、碱解氮、硝态氮、全磷、有效磷、全钾和速效钾的标准化数据。进而求出土壤肥力综合得分 (IFI), 计算公式为 $IFI = 0.655F_1 + 0.221F_2$ 。该土壤肥力综合得分 IFI 值越大表示肥力越高;反之,则表示肥力越低。由表 6 可知,各施肥处理的土壤肥力等级由高到低依次是 $NPK + CM > NPK + PM > NPK + S > NPK > CK$, 表明粪肥配施处理

NPK+CM 和 NPK+PM 的土壤肥力水平较高, 秸秆配施 NPK+S 土壤肥力水平次之, 单施化肥

NPK 肥力水平低于秸秆配施, 不施肥处理 CK 肥力最低。

表 5 各土壤肥力指标标准化数据

Table 5 Standardized data for soil fertility indicators

处理 Treatment	ZpH	ZSOM	ZTN	ZAN	ZNO ₃ ⁻	ZTP	ZAP	ZTK	ZAK
CK	0.325 30	-1.262 90	-1.244 17	-1.281 82	-0.047 01	-1.172 86	-0.941 53	0.363 53	-1.290 79
NPK	-0.497 08	-0.636 67	0.013 24	-0.584 32	1.444 20	-0.788 32	-1.019 71	0.492 22	-0.522 50
NPK+S	-1.429 11	-0.095 24	-0.416 93	-0.119 99	-0.306 34	0.173 04	-0.055 91	-1.019 83	-0.086 68
NPK+PM	0.398 40	0.974 57	1.502 27	0.873 17	0.236 65	1.326 68	0.874 10	-1.052 00	1.302 41
NPK+CM	1.202 50	1.020 23	0.145 59	1.112 96	-1.327 49	0.461 45	1.143 04	1.216 07	0.597 56

注: ZpH、ZSOM、ZTN、ZAN、ZNO₃⁻、ZTP、ZAP、ZTK、ZAK 分别为 pH、有机质、全氮、碱解氮、硝态氮、全磷、有效磷、全钾和速效钾的标准化数据。

Note: ZpH, ZSOM, ZTN, ZAN, ZNO₃⁻, ZTP, ZAP, ZTK and ZAK are the standardized data of pH, organic matter, total nitrogen, alkali-hydrolyzable nitrogen, nitrate nitrogen, total phosphorus, available phosphorus, total potassium and available potassium, respectively.

表 6 土壤肥力等级综合评价结果

Table 6 Comprehensive evaluation of soil fertility grades

处理 Treatment	主成分 Principal component			综合排名 Comprehensive ranking
	F ₁	F ₂	IFI	
CK	-1.14	0.64	-0.61	5
NPK	-0.75	-0.39	-0.58	4
NPK+S	-0.14	-0.84	-0.28	3
NPK+PM	1.14	-0.83	0.56	2
NPK+CM	0.89	1.42	0.90	1

2.2 不同施肥条件下的土壤线虫生态指标

2.2.1 不同施肥条件下的土壤线虫数量

试验对不同肥力水平的土壤线虫数量分析结果显示, 线虫总数范围为 307~787 条/100 g 干土, 不同肥力条件的土壤线虫总数存在显著差异(图 1, $P < 0.05$), 其中 NPK+S 的线虫总数最多, 达到 787 条/100 g(干土), CK 的线虫总数最少。与 CK 相比, NPK、NPK+S、NPK+PM、NPK+CM 四个

肥力水平相对高的施肥处理线虫总数显著高于不施肥处理, 表明提高土壤肥力能够显著增加土壤线虫总数。与单施化肥相比, 有机无机肥配施 NPK+S、NPK+PM、NPK+CM 的线虫总数显著提高, 表明长期有机无机肥配施处理的土壤线虫总数显著高于单施化肥处理。有机无机肥配施处理中, NPK+PM、NPK+CM 的土壤线虫总数显著低于 NPK+S, 表明长期秸秆配施处理对线虫总数的提高效果

优于猪粪配施和牛粪配施。

土壤线虫总数由大到小依次是 $NPK + S > NPK + CM > NPK + PM > NPK > CK$, 可以发现肥力水平相对较低的 $NPK + S$ 线虫总数高于 $NPK + CM$ 和 $NPK + PM$, 这与土壤肥力水平的变化趋势并不一致。可能是由于土壤线虫总数包含了植物寄

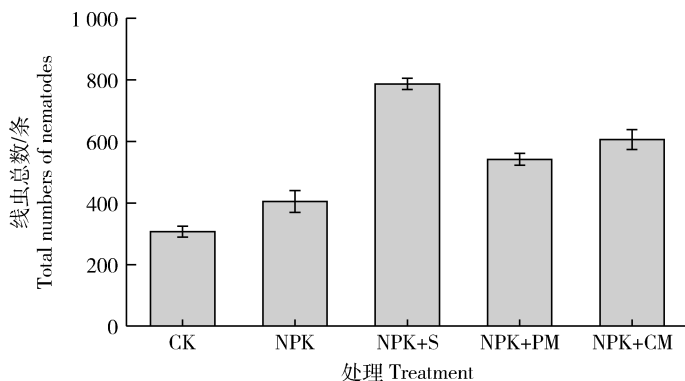


图1 不同肥力水平对土壤线虫数量的影响

Fig. 1 Effects of different fertility levels on the number of soil nematodes

2.2.2 不同施肥条件下的土壤线虫营养类群

对土壤线虫营养类群的分析结果见表7, 试验共鉴定出20个属线虫, 其中, CK鉴定出16属, NPK鉴定出15属, $NPK + S$ 鉴定出19属, $NPK + PM$ 鉴定出18属, $NPK + CM$ 鉴定出18属。与CK相比, 有机无机肥配施处理 $NPK + S$ 、 $NPK + PM$ 、 $NPK + CM$ 明显增加了线虫属的数量, 由于有机无机肥配施处理的土壤肥力显著高于不施肥处理, 因此可以说明提高土壤肥力能增加砂姜黑土土壤线虫属的数量。所有土壤肥力条件的优势属线虫共有5种, 分别为螺旋属、矮化属、短体属、丝尾垫刃属、真头叶属。CK、NPK、 $NPK + S$ 处理优势属主要是螺旋属、矮化属、短体属和丝尾垫刃属等对土壤健康有害的植物寄生线虫属, 而土壤肥力较高的粪肥配施处理 $NPK + PM$ 、 $NPK + CM$ 则出现真头叶属一类的食细菌线虫成为优势属。 $NPK + PM$ 、 $NPK + CM$ 处理的植物寄生线虫的相对丰度显著低于CK、NPK、 $NPK + S$ 处理, 与CK相比, $NPK + PM$ 、 $NPK + CM$ 处理的植物寄生线虫相对丰度分别下降28.38%、35.45%。由于植物寄生线虫一般以取食植物为生, 因此 $NPK + PM$ 、 $NPK + CM$ 处理比CK土壤更有利于作物生长, 可能因为猪粪配施和牛粪配施抑制了植物寄生线虫的发生, 增加了食细菌性线虫的相对丰度^[26]。刘艳军等^[27]的研究结果同

生类线虫、食细菌类线虫、食真菌类线虫和杂食-捕食类线虫4个营养类群, 其中植物寄生线虫以作物根系为食, 是对作物生长有害的一类线虫, 其所占比例的增加并不能提高土壤的健康水平^[25]。因而, 利用土壤线虫数量指示土壤健康状况具有一定的局限性。

样表明长期有机无机肥配施不仅大大提高了土壤中食细菌线虫的相对丰度, 而且能明显降低植物寄生线虫的数量, 对土壤植物寄生线虫的多样性也有明显的抑制作用, 有利于土壤发育和作物生长。

2.2.3 不同施肥条件下的土壤线虫生态指数

由表8可见不同肥力条件下的香农多样性指数(H')的大小在2.00~2.51, 均匀度指数(J')的大小在0.67~0.85, 瓦斯乐斯卡指数(WI)的大小在0.18~0.61。 $NPK + PM$ 的 H' 值、 J' 值和WI值最大, CK最小。土壤肥力水平较高的长期施肥处理香农多样性指数(H')、均匀度指数(J')和瓦斯乐斯卡指数(WI)较CK显著提高($P < 0.05$)。与NPK相比, $NPK + PM$ 和 $NPK + CM$ 的 H' 值、 J' 值和WI值显著提高($P < 0.05$)。 $NPK + S$ 与NPK的 H' 值、 J' 值和WI值差异不显著, $NPK + PM$ 和 $NPK + CM$ 之间 H' 值、 J' 值和WI值差异不显著。

NPK 、 $NPK + S$ 的优势度指数(λ)比不施肥略有降低, 但差异不显著。 $NPK + PM$ 、 $NPK + CM$ 的优势度指数(λ)较CK显著降低($P < 0.05$), $NPK + PM$ 和 $NPK + CM$ 的 λ 值差异不显著。本试验中, 所有肥力水平的线虫通路指数(NCR)在0.77~0.88, 表明试验中土壤有机质分解过程主要以细菌分解为主。

表 7 不同类群的土壤线虫的平均丰度和所占比例

Table 7 Average abundance and proportion of soil nematodes of different groups

营养类型 Trophic group	属 Genus	土壤线虫相对丰度 Mean relative abundance of nematodes				
		CK	NPK	NPK+S	NPK+PM	NPK+CM
植物寄生线虫 Plant-parasites		80.31	69.82	77.35	59.10	53.07
	螺旋属 <i>Helicotylenchus</i>	39.42 *	35.14 *	32.95	19.15 *	14.89 *
	盘旋属 <i>Rotylenchus</i>	5.16	4.11	7.23	3.44	2.15
	矮化属 <i>Tetylenchus</i>	14.84 *	10.01 *	15.31 *	12.23 *	16.05 *
	短体属 <i>Pratylenchus</i>	10.62 *	7.86	3.11	12.25 *	13.62 *
	潜根属 <i>Hirschmanniella</i>	1.35	0.34	3.12	2.11	0.64
	丝尾垫刃属 <i>Filendus</i>	8.74	11.6 *	13.23 *	6.06	2.26
	垫刃属 <i>Tylenchus</i>	0.18	0.76	2.18	3.86	3.46
	裸矛属 <i>Psilenchus</i>	0	0	0.22	0	0
食细菌线虫 Bacterivores		13.03	16.48	14.85	23.96	28.05
	头叶属 <i>Cephalobus</i>	4.41	4.49	2.08	1.82	1.96
	真头叶属 <i>Eucephalobus</i>	6.59	8.84	5.86	11.69 *	13.36 *
	丽突属 <i>Acrobeles</i>	0	0	1.52	0	1.18
	板唇属 <i>Chiloplacus</i>	0	0	1.74	1.25	3.45
	单宫属 <i>Monhyster</i>	0.58	3.15	0	4.51	2.88
	小杆属 <i>Rhabditis</i>	1.45	0	3.65	4.69	5.22
食真菌线虫 Fungivores		1.81	4.98	2.99	3.79	4.25
	滑刃属 <i>Aphelenchoides</i>	0.81	2.93	0.86	2.71	3.39
	真滑刃属 <i>Aphelenchus</i>	1	2.05	2.13	1.08	0.86
杂食/捕食线虫 Predators/Omnivores		4.85	8.72	4.81	13.15	14.63
	孔咽属 <i>Aporcelaimus</i>	3	5.05	0.22	7.25	1.47
	真矛线属 <i>Eudorylaimus</i>	1.53	0.25	2.81	2.17	5.56
	中矛线属 <i>Mesodorylaimus</i>	0.32	3.42	1.56	3.37	7.60
	单齿属 <i>Mononchus</i>	0	0	0.22	0.36	0

注：* 优势属，个体数占土壤线虫群落个体总数的 10% 以上。

Note: * represents dominant genera, which is accounted for over 10% of soil nematode community.

表 8 不同施肥处理的土壤线虫生态指数

Table 8 Ecological index of soil nematodes under different fertilization treatments

生态指数 Ecological index	CK	NPK	NPK+S	NPK+PM	NPK+CM
H'	2.00±0.09 c	2.16±0.07 b	2.24±0.02 b	2.54±0.11 a	2.51±0.04 a
J'	0.67±0.03 c	0.72±0.01 b	0.75±0.03 b	0.85±0.01 a	0.84±0.03 a
WI	0.18±0.01 d	0.31±0.03 c	0.23±0.01 c	0.47±0.06 b	0.61±0.01 a
NCR	0.88±0.01 a	0.77±0.03 b	0.83±0.01 a	0.86±0.05 a	0.87±0.03 a
λ	0.21±0.03 a	0.17±0.02 a	0.16±0.01 ab	0.10±0.01 c	0.10±0.03 c
PPI	2.32±0.07 a	1.97±0.05 bc	2.16±0.03 b	1.67±0.04 d	1.53±0.09 d

注：同行数据不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)，相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)。

Note: Within the same column, different letters represent significant differences ($P < 0.05$), while the same letters represent no significant differences ($P > 0.05$).

植物寄生线虫成熟度指数(PPI)在长期施肥和不施肥之间差异显著($P < 0.05$),其中NPK、NPK+S、NPK+PM、NPK+CM的PPI值显著低于CK。有机无机肥配施处理中,NPK+S的PPI值显著高于NPK($P < 0.05$),而NPK+PM、NPK+CM的PPI值显著低于NPK($P < 0.05$)。

2.2.4 不同肥力水平的小麦产量及构成

为了进一步证明土壤线虫生态指标表征土壤健康状况的可行性,本试验在小麦成熟期进行了测产,结果如图2所示。结果表明,通过30多年的定位施肥,肥力水平相对较高的施肥处理NPK、NPK+S、NPK+PM、NPK+CM,其小麦千粒重、每平方米穗

数、穗粒数以及产量都远远高于CK。图2(d)可以看出,不同长期施肥处理的小麦产量存在显著差异,小麦产量表现为NPK+CM>NPK+PM>NPK+S>NPK>CK,NPK、NPK+S、NPK+PM、NPK+CM的产量较CK分别提升了337.87%、396.14%、495.43%和534.24%,表明随着土壤肥力水平的提高,砂姜黑土作物产量显著增加。有机无机肥配施NPK+S、NPK+CM、NPK+PM比NPK对作物产量提升的幅度更大,表明有机无机肥配施是砂姜黑土作物产量提升的重要途径。有机无机肥配施处理中NPK+CM对小麦产量提升的效果最好,其次是NPK+PM,NPK+PM效果优于NPK+S。

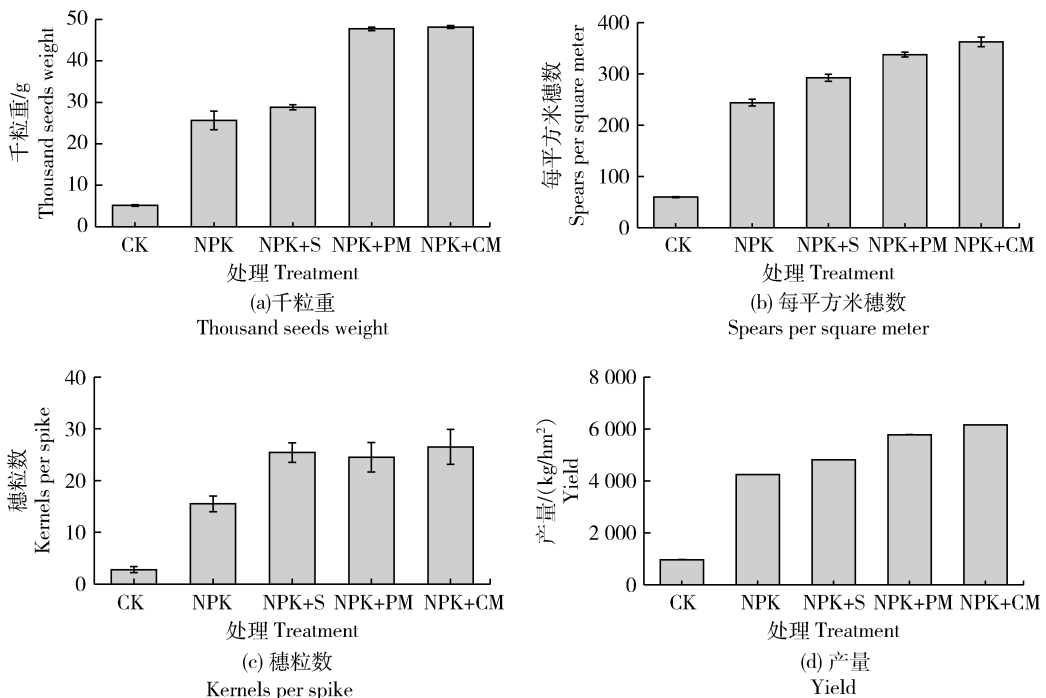


图2 不同肥力水平的小麦产量及构成因素

Fig. 2 Wheat yield and composition factors under different fertility levels

2.3 土壤线虫生态指标与土壤肥力和小麦产量及构成的相关性分析

为探讨土壤线虫生态指标的变化与土壤肥力水平、小麦产量及构成的关系,将上述所做土壤肥力指标、小麦产量及构成指标与土壤线虫生态指标做了相关性分析。Spearman相关性分析结果如表9所示,可以发现,土壤肥力综合得分IFI与植物寄生线虫数量、食细菌线虫数量、杂食/捕食线虫数量显著正相关,与土壤线虫生态指数WI、 H' 、 J' 值显著正相关,与PPI和 λ 值显著负相关。小麦千粒重与食细菌线虫数量WI、 H' 、 J' 值显著正相关,与植物

寄生线虫数量、PPI、 λ 值显著负相关。小麦产量与 H' 、 J' 值显著正相关,与 λ 值显著负相关。结果表明,IFI、小麦产量与土壤线虫生态指标之间具有显著的相关性,土壤线虫生态指标的变化与土壤肥力水平的差异具有一致性。

3 讨论

土壤肥力是土壤供给作物生长所需养分的能力,其核心是土壤中各种养分的含量。土壤养分含量与土壤肥力的高低密切相关^[28]。作物生长需要持续从土壤中带走一部分养分,不对土壤做施肥处

表 9 土壤线虫生态指标与土壤肥力条件和小麦产量及构成的相关性

Table 9 Correlation of soil nematode ecological index with soil fertility conditions and wheat yield and composition

生态指数 Ecological index	土壤肥力综合 评分 IFI	千粒重 Thousand seeds weight	每平方米穗数 Spears per square meter	穗粒数 Kernels per spike	产量 Yield
线虫总数 Total numbers of nematodes	0.415	0.581	0.714	0.852	0.701
PP	-0.917 *	-0.894 *	-0.786	-0.656	-0.805
BF	0.967 **	0.908 *	0.78	0.676	0.802
FF	0.341	0.552	0.678	0.536	0.665
OP	0.891 *	0.858	0.727	0.581	0.749
PPI	-0.879 *	-0.926 *	-0.852	-0.725	-0.867
WI	0.942 *	0.888 *	0.775	0.660	0.795
H'	0.945 *	0.992 **	0.901 *	0.844	0.918 *
NCR	0.481	0.179	-0.091	-0.039	-0.055
J'	0.945 *	0.992 **	0.901 *	0.844	0.918 *
λ	-0.947 *	-0.989 **	-0.895 *	-0.823	-0.913 *

注：* 表示在 0.05 级别(双尾)。** 表示在 0.01 级别(双尾)。

Note: * represents significantly correlated at 0.05 level (double-tailed). ** represents significantly correlated at 0.01 level (double-tailed).

理会持续降低土壤的养分含量,即降低土壤肥力水平^[29]。毛伟等^[30]研究有机氮替代对土壤养分的影响发现施肥处理能显著增加土壤肥力,提高土壤有效养分的含量。邹文秀等^[31]研究发现长期施有机肥能显著提高土壤肥力,增加土壤有机碳、全氮、全磷、碱解氮、速效磷和速效钾的含量。本研究中,长期不同施肥处理的土壤肥力也不同,肥力水平由高到低的顺序是:猪粪配施>牛粪配施>秸秆配施>单施化肥>不施肥,与江春等的研究结果一致^[29]。

土壤健康状况与土壤中各种养分的含量密切相关,土壤肥力的变化会直接或间接影响土壤线虫群落结构,通过改变土壤线虫的生态指标来表征土壤的健康状况^[32-34]。本试验中,随着土壤肥力水平的提高,线虫香农多样性指数(H')、均匀度指数(J')和瓦斯乐斯卡指数(WI)显著提高,植物寄生线虫成熟度指数(PPI)显著降低,表明肥力水平的提高能够增加土壤线虫的物种多样性和种群分布的均匀性,增强土壤线虫群落结构的稳定性,同时能够降低土壤中植物寄生线虫的比例,使土壤生态系统向稳定健康的方向发展。上述结果与任宏飞等^[35]研究

结果一致,说明采用土壤线虫生态指标表征砂姜黑土的土壤健康状况是可行的。

因为试验是砂姜黑土在长期定位下不同施肥处理的条件下进行,因此,土壤肥力水平与土壤线虫生态指标的变化与施肥处理密切相关。有机肥和无机肥配施处理的条件下,猪粪配施和牛粪配施处理的线虫香农多样性指数(H')、均匀度指数(J')和瓦斯乐斯卡指数(WI)较单施化肥均显著提高,植物寄生线虫成熟度指数(PPI)较单施化肥显著降低,这与土壤肥力水平所表现的趋势一致,表明肥力水平相对较高的猪粪配施和牛粪配施处理对土壤线虫的生物多样性更好,更能优化土壤线虫的群落结构,并且能降低有害的植物寄生线虫的比例,这与前人的研究结果相一致^[36-38]。因此,采用香农多样性指数(H')、均匀度指数(J')、瓦斯乐斯卡指数(WI)和植物寄生线虫成熟度指数(PPI)可以表征砂姜黑土的土壤健康状况。

土壤线虫生态指标的变化与土壤肥力水平密切相关,土壤肥力水平直接的表达就是地上部分作物的产量高低^[39-40]。本研究发现,土壤肥力水平相对

较高的长期施肥处理,其土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾含量明显增加,小麦千粒重、每株穗数、穗粒数以及产量都远远高于肥力水平最低的不施肥处理,表明土壤肥力水平是影响小麦产量高低的重要因素^[41]。

土壤线虫群落结构的变化与地上作物产量的形成显著相关^[42-43]。该观点在本研究中得到证实。本研究发现:随着土壤肥力水平的提高,线虫香农多样性指数(H')、均匀度指数(J')和瓦斯乐斯卡指数(WI)显著提高,植物寄生线虫成熟度指数(PPI)显著降低,土壤健康状况逐渐变好,小麦产量会随之逐渐增加;Spearman相关性分析结果显示,土壤线虫生态指标与土壤肥力和小麦产量及其构成之间具有显著相关性,其中土壤肥力综合评分IFI和小麦产量都与土壤线虫生态指标WI、 H' 、 J' 值显著正相关,与PPI值显著负相关。进一步说明采用香农多样性指数(H')、均匀度指数(J')、瓦斯乐斯卡指数(WI)和植物寄生线虫成熟度指数(PPI)可以表征出砂姜黑土的土壤健康状况。

4 结 论

1)长期不同施肥处理后的土壤肥力等级由高到低依次是:NPK+CM>NPK+PM>NPK+S>NPK>CK。其中,粪肥配施处理NPK+CM和NPK+PM的土壤肥力水平最高,秸秆配施NPK+S土壤肥力水平次之,单施化肥NPK肥力水平低于秸秆配施,不施肥处理CK肥力最低。

2)土壤线虫生态指标与土壤肥力水平和小麦产量密切相关。随着土壤肥力水平的提高,线虫香农多样性指数(H')、均匀度指数(J')和瓦斯乐斯卡指数(WI)显著提高,植物寄生线虫成熟度指数(PPI)显著降低,土壤健康状况显著提高。此时,NPK、NPK+S、NPK+PM、NPK+CM的产量较CK分别提升了337.87%、396.14%、495.43%和534.24%,因此采用香农多样性指数(H')、均匀度指数(J')、瓦斯乐斯卡指数(WI)和植物寄生线虫成熟度指数(PPI)来表征砂姜黑土的土壤健康状况具有一定的可行性。

致谢

感谢安徽省农业科学院土壤肥料研究所提供的长期定位试验基地,感谢王道中老师、花可可老师在试验选点和样品采集中给予的帮助和支持。

参考文献 References

- [1] Kibblewhite M G, Ritz K, Swift M J. Soil health in agricultural systems[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 2008, 363(1492): 685-701
- [2] 张浩, 王辉, 汤红妍, 温嘉伟, 徐仁扣. 铅锌尾矿库土壤和蔬菜重金属污染特征及健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(3): 1085-1094
Zhang H, Wang H, Tang H Y, Wen J W, Xu R K. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in soils and vegetables of lead-zinc tailings[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(3): 1085-1094
- [3] 孟国欣, 查同刚, 巩潇, 张晓霞, 陈茜, 刘峥, 周金星. 污泥添加园林废弃物堆肥过程参数变化及腐熟度综合评价[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(8): 1538-1546
Meng G X, Zha T G, Gong X, Zhang X X, Chen Q, Liu Z, Zhou J X. Parameter changes and comprehensive evaluation of maturity during the composting process of adding garden waste to servage sludge[J]. *Ecological and Environmental Sciences*, 2018, 27(8): 1538-1546 (in Chinese)
- [4] 郭绍英, 林皓, 谢好, 饶瑞晔, 张江山, 郑育毅. 基于改进灰色聚类法的矿区土壤重金属污染评价[J]. *环境工程*, 2017, 35(10): 146-150
Guo S Y, Lin H, Xie Y, Rao R Y, Zhang J S, Zheng Y Y. Evaluation on heavy metal pollution in soil of mining area based on improved grey clustering method [J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(10): 146-150. (in Chinese)
- [5] Ochiagha K E, Okoye P A C, Eboagu N C. The geo-accumulation index of some heavy metals in the roadsides soils of onitsha south local government area anambra state[J]. *Science Journal of Chemistry*, 2020, 8(2): 42-47
- [6] Hoeksema J D, Lussenhop J, Teeri J A. Soil nematodes indicate food web responses to elevated atmospheric CO₂[J]. *Pedobiologia - International Journal of Soil Biology*, 2000, 44(6): 725-735
- [7] Yeates G W. Nematodes as soil indicators: Functional and biodiversity aspects[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 37(4): 199-210
- [8] Bongers T. The maturity index: An ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition [J]. *Oecologia*, 1990, 83(1): 14-19
- [9] Wang X T, Nielsen U N, Yang X L, Zhang L M, Zhou X H, Du G Z, Li G X, Chen S Y, Xiao S. Grazing induces direct and indirect shrub effects on soil nematode communities[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 121: 193-201
- [10] Li J M, Wang D C, Fan W, He R C, Yao Y Y, Sun L, Zhao X Y, Wu J G. Comparative effects of different organic materials on nematode community in continuous soybean monoculture soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 125: 12-17

- [11] 李静, 蔡连贺, 刘瑞华, 凤春, 李刚, 杨殿林, 赵建宁. 转双价基因棉 SGK321 不同秸秆还田量对土壤线虫群落的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4): 871-881
Li J, Cai L H, Liu R H, Feng C, Li G, Yang D L, Zhao J N. Effect of transgenic cotton SGK321 with different amounts of straw on soil nematode communities [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4): 871-881 (in Chinese)
- [12] Song D G, Tariq A, Pan K W, Chen W K, Zhang A P, Sun X M, Ran Y, Zeng F J. Effects of straw mulching practices on soil nematode communities under walnut plantation [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 15351
- [13] 孙瑞波, 郭熙盛, 王道中, 褚海燕. 长期施用化肥及秸秆还田对砂姜黑土细菌群落的影响[J]. 微生物学通报, 2015, 42(10): 2049-2057
Sun R B, Guo X S, Wang D Z, Chu H Y. The impact of long-term application of chemical fertilizers and straw returning on soil bacterial community [J]. *Microbiology China*, 2015, 42(10): 2049-2057 (in Chinese)
- [14] 杜群, 欧阳竹. 淮北砂姜黑土区小麦单产变化及影响因素分析[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1434-1438
Du Q, Ouyang Z. Changes in per-hectare yield of wheat and related factors in Shajiang black soil region of the Huaibei Plain [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(6): 1434-1438 (in Chinese)
- [15] Porazinska D L, Duncan L W, McSorley R, Graham J H. Nematode communities as indicators of status and processes of a soil ecosystem influenced by agricultural management practices [J]. *Applied Soil Ecology*, 1999, 13(1): 69-86
- [16] 何静安. 论砂姜黑土的磷肥效应与优化施用技术[J]. 华北农学报, 1988, 3(1): 56-61
He J A. Study on the effect and best applying technique of phosphoric fertilizer in the sand concretion black soil [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1988, 3(1): 56-61 (in Chinese)
- [17] 花可可, 王道中, 郭志彬, 李丛丛. 施肥方式对砂姜黑土钾素利用及盈亏的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(4): 978-988
Hua K K, Wang D Z, Guo Z B, Li C C. Effects of long-term fertilization on soil potassium utilization and budgeting in vertisol relative to application method [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(4): 978-988 (in Chinese)
- [18] 王道中, 花可可, 郭志彬. 长期施肥对砂姜黑土作物产量及土壤物理性质的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4781-4789
Wang D Z, Hua K K, Guo Z B. Effects of long-term fertilization on crop yield and soil physical properties in lime concretion black soil [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, (23): 4781-4789 (in Chinese)
- [19] 王道中, 郭熙盛, 何传龙, 刘枫. 砂姜黑土长期定位施肥对小麦生长及土壤养分含量的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(1): 55-57
Wang D Z, Guo X S, He C L, Liu F. Effect of long-term positioning fertilization on wheat growth and soil nutrition status in Shajiang black soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(1): 55-57 (in Chinese)
- [20] 朱敏, 郭志彬, 曹承富, 郭熙盛, 杨剑波. 不同施肥模式对砂姜黑土微生物群落丰度和土壤酶活性的影响[J]. 核农学报, 2014, 28(9): 1693-1700
ZHU M, Guo Z B, Cao C F, Guo X S, Yang J B. Impact of model of fertilization on microbial abundance and soil enzyme activity in lime concretion black soil [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2014, 28(9): 1693-1700 (in Chinese)
- [21] 陈立杰, 王旭, 段玉玺, 孙晓铭. 蔗糖离心法分离土壤线虫的最佳条件筛选[J]. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(6): 849-851
Chen L J, Wang X, Duan Y X, Sun X M. Extraction effectiveness of soil nematodes with sucrose-centrifugation method [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2007, 38(6): 849-851 (in Chinese)
- [22] Yeates G W, Bongers T, de Goede R G, Freckman D W, Georgieva S S. Feeding habits in soil nematode families and genera—an outline for soil ecologists [J]. *Journal of Nematology*, 1993, 25(3): 315-331
- [23] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998
Yin W Y. *Pictorial Keys Soil Animals of China* [M]. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese)
- [24] 鲍士旦. 土壤化学分析[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: Chinese Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [25] Yang Y Q, Liu Q Z. Effects of maize pre-cultivation on soil deterioration indicated by the soil nematode community in replanted apple orchard [J]. *Biocontrol Science and Technology*, 2020, 30(9): 878-896
- [26] Forge T A, Bittman S, Kowalenko C G. Responses of grassland soil nematodes and protozoa to multi-year and single-year applications of dairy manure slurry and fertilizer [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(10): 1751-1762
- [27] 刘艳军, 张喜林, 高中超, 周宝库. 长期施肥对哈尔滨黑土土壤线虫群落的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(5): 1112-1115
Liu Y J, Zhang X L, Gao Z C, Zhou B K. Effects of long-term fertilization on soil nematode communities in Harbin black soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(5): 1112-1115 (in Chinese)
- [28] 何浩, 张宇彤, 危常州, 李俊华. 等养分条件下不同有机肥替代率对玉米生长及土壤肥力的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(2): 454-461
He H, Zhang Y T, Wei C Z, Li J H. Effects of different organic fertilizer substitution rates on maize growth and soil fertility under equal-nutrient conditions [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(2): 454-461 (in Chinese)
- [29] 江春, 黄菁华, 李修强, 李辉信, 孙波. 长期施用有机肥对红壤旱地土壤线虫群落的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(06):

- 1235-1241
Jiang C, Huang J H, Li X Q, Li H X, Sun B. Responses of soil nematode community to long-term application of organic manure in upland red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(06): 1235-1241 (in Chinese)
- [30] 毛伟, 曾洪玉, 李文西, 唐宝国, 姚开文, 陈明, 赵海涛. 不同土壤肥力下有机氮部分替代化学氮对小麦产量构成及土壤养分的影响[J]. *江苏农业学报*, 2020, 36(5): 1189-1196
Mao W, Zeng H Y, Li W X, Tang B G, Yao K W, Chen M, Zhao H T. Effects of partial substitution of organic nitrogen replacing chemical nitrogen on wheat yield components and soil nutrients under different soil fertility[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 36(5): 1189-1196 (in Chinese)
- [31] 邹文秀, 邱琛, 韩晓增, 郝翔翔, 刘晓洁, 陆欣春, 严君, 陈旭. 长期施用有机肥对黑土土壤肥力和玉米产量的影响[J]. *土壤与作物*, 2020, 9(4): 407-418
Zou W X, Qiu C, Han X Z, Hao X X, Liu X J, Lu X C, Yan J, Chen X. Effects of long-term application of organic fertilizer on soil fertility and maize yield in black soil[J]. *Soils and Crops*, 2020, 9(4): 407-418
- [32] 薛会英, 胡锋, 罗大庆. 藏北高寒草甸植物群落对土壤线虫群落的影响[J]. *土壤学报*, 2013, 50(3): 507-516
Xue H Y, Hu F, Luo D Q. Effect of plant community on soil nematode community in alpine meadows in north Tibet[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(3): 507-516 (in Chinese)
- [33] 杨贝贝, 朱新萍, 赵一, 陈小云, 贾宏涛, 李辉信. 生物炭基肥施用对棉田土壤线虫群落结构的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(4): 66-71
Yang B B, Zhu X P, Zhao Y, Chen X Y, Jia H T, Li H X. Effect of biochar based application on soil nematode community structure in cotton field[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(4): 66-71 (in Chinese)
- [34] Yeates G W, Bongers T. Nematode diversity in agroecosystems [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 1999, 74(1-3): 113-135
- [35] 任宏飞, 高伟, 黄绍文, 张国刚, 唐继伟, 李明悦, 栾好安. 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
Ren H F, Gao W, Huang S W, Zhang G G, Tang J W, Li M Y, Luan H A. Effects of partial substitution of chemical fertilizer with manure and straw on soil nematode community in greenhouse vegetable production [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(7): 1303-1317 (in Chinese)
- [36] 叶成龙, 刘婷, 张运龙, 张俊伶, 沈其荣, 李辉信. 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, Zhang J L, Shen Q R, Li H X. 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 (in Chinese)
- [37] Li Q, Jiang Y, Liang W J, Lou Y L, Zhang E P, Liang C H. Long-term effect of fertility management on the soil nematode community in vegetable production under greenhouse conditions[J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 46(1): 111-118
- [38] Forge T A, Bittman S, Kowalenko C G. Responses of grassland soil Nematodes and protozoa to multi-year and single-year applications of dairy manure slurry and fertilizer [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(10): 1751-1762
- [39] Hu C, Xia X G, Han X M, Chen Y F, Qiao Y, Liu D H, Li S L. Soil nematode abundances were increased by an incremental nutrient input in a paddy-upland rotation system [J]. *Helminthologia*, 2018, 55(4): 322-333
- [40] 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
- [41] Tripathi R C, Kalyani V K, Jha S K, Srivastava N K, Thakur S K. Impact of plant nutrients on prediction of wheat crop yield from pond ash amended field by artificial neural networks [J]. *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, 2019, 45(1): 76-83
- [42] Liang W J, Lou Y L, Li Q, Zhong S, Zhang X K, Wang J K. Nematode faunal response to long-term application of nitrogen fertilizer and organic manure in Northeast China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(5): 883-890
- [43] 王伊琨, 王维瑞, 王胜涛, 刘彬, 颜芳, 哈雪姣, 刘继培, 赵跃. 长期不同施肥处理对设施蔬菜产量及土壤肥力的影响[J]. *安徽农学通报*, 2021, 27(1): 113-115, 170
Wang Y K, Wang W R, Wang S T, Liu B, Yan F, Ha X J, Liu J P, Zhao Y. Effect of different long-term fertilization on yields and soil nutrients in a greenhouse vegetable field[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2021, 27(1): 113-115, 170 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东