文章编号:1000-7601(2022)05-0242-10

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2022.05.26

长期施肥对渭北旱塬麦田土壤 线虫群落特征的影响

杨盼盼1,2,黄菁华1,3,张欣玥3,4,陈静3,4,赵世伟1,2,3

(1.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;2.中国科学院大学,北京 100049;3.西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100;4.西北农林科技大学林学院,陕西 杨凌 712100)

摘 要:为探究长期定位施肥对黄土高原渭北旱塬麦田土壤线虫群落的影响,以长武国家黄土高原农业生态试验站的长期定位试验(1984—2018年)为平台,调查裸地(L)以及不施肥(CK)、施氮磷肥(NP)、单施有机肥(M)、氮磷肥配施有机肥(MNP)的小麦田土壤线虫群落数量、组成结构和生态功能指数,并分析其与土壤理化性质的关系。结果表明:(1)小麦田土壤线虫数量显著高于裸地,而 CK、M 和 MNP 处理使小麦田中土壤线虫数量比 NP 处理提高了 31.63%~56.20%;(2)施肥减缓了长期种植小麦导致的食细菌线虫(特别是头叶属)相对丰度的下降,单施有机肥的处理(M)植食性线虫相对丰度显著降低,同时,相比于 CK,施用有机肥的 M 和 MNP 处理杂食/捕食线虫相对丰度分别增加了 18.4%和 8.24%,表明有机肥对杂食/捕食线虫的促进作用;(3)长期施肥处理土壤线虫 Shannon 多样性指数(H)和指示土壤健康状况的瓦斯乐卡指数(WI)分别为 1.80~2.19 和 0.36~0.68,相较于裸地(H=2.36;WI=1.57)有所下降,但 M 和 MNP 处理的线虫成熟度指数(MI)和结构指数(SI)均高于其他处理(L、CK 和 NP 处理),表明施用有机肥有助于土壤食物网维持复杂的结构和成熟稳定的状态;(4)不同施肥措施下土壤全氮、有机碳、微生物生物量碳和氮以及可溶性碳的变化是影响土壤线虫数量和群落特征的重要环境因素。

关键词:线虫;群落特征;麦田;长期施肥;土壤理化性质;渭北旱塬

中图分类号:S154.38⁺6 文献标志码:A

Effects of long-term fertilization on soil nematode community of wheat field in Weibei dryland, China

YANG Panpan^{1,2}, HUANG Jinghua^{1,3}, ZHANG Xinyue^{3,4}, CHEN Jing^{3,4}, ZHAO Shiwei^{1,2,3}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A & F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To explore the effects of long-term fertilization on the characteristics of soil nematode communities of wheat field in Weibei dryland, a long-term positioning experiment (1984–2018) of the National Agricultural Ecological Experimental Station in Changwu County, Shaanxi Province was conducted. Different fertilization treatments, including bare land (L), as well as wheat fields without fertilizer (CK), nitrogen and phosphorus fertilizers (NP), organic fertilizer (M), nitrogen and phosphorus combined with organic fertilizer (MNP) were set up to investigate the abundance, composition, structure and ecological indices of soil nematode communities in farmlands. The relationships of nematode communities with soil physicochemical properties were also analyzed. The results showed that: (1) Soil nematode abundance in wheat fields were significantly higher than that of bare land. CK, M and MNP treatments increased the abundance of soil nematodes by 31.63% ~56.20%, compared with NP treatment. (2) Fertilizer treatments mitigated the decrease in the relative abundance of bacterial-feeding nematodes

收稿日期:2021-11-10 修回日期:2022-04-23

基金项目:国家自然科学基金项目(31500449);陕西省自然科学基础研究计划项目(2020JQ-435);陕西省引进博士经费(A279021836)

作者简介:杨盼盼(1995-),女,贵州安顺人,硕士研究生,研究方向为土壤生态学。E-mail: yangpanpan19@ mails.ucas.ac.cn

通信作者:黄菁华(1985-),女,陕西杨凌人,助理研究员,主要从事农业资源与环境及土壤生态学研究。E-mail:jhhuang@nwsuaf.edu.cn 赵世伟(1962-),男,四川荣县人,研究员,主要从事农业资源与环境及土壤生态学研究。E-mail: swzhao@ms.iswc.ac.cn (i.e. Cephalobus). The relative abundance of herbivorous nematodes decreased significantly in the treatment of organic fertilizer (M) treatment. At the same time, the relative abundance of omnivorous/predatory nematodes in M and MNP treatments increased by 18.4% and 8.24%, compared with CK, indicating the promotional effect of organic fertilizer on omnivorous/predatory nematodes. (3) Under long-term fertilization, soil nematode Shannon diversity index (H) and Wasilewska index (WI) were $1.80 \sim 2.19$ and $0.36 \sim 0.68$, respectively, which were lower than those in bare land (H=2.36; WI=1.57). However, compared with other treatments (L, CK and NP), M and MNP treatments obviously increased the maturity index (MI) and structure index (SI) of nematode community, indicating that organic fertilizer application helped maintain the structure complexity and stability of soil food web. (4) Changes in soil total nitrogen, organic carbon, microbial biomass carbon and nitrogen and dissolved organic carbon under different fertilization treatments were important environmental factors affecting soil nematode abundance and community pattern.

Keywords: nematodes; community structure; wheat field; long-term fertilization; physicochemical properties of soil; Weibei dryland

线虫是土壤中数量最多、种类最为丰富的后生动物^[1-2]。它们广泛存在于各种生境,占据土壤食物网多个营养级的关键位置,对植物生长和土壤有机质分解、养分循环等生态过程起着重要的调控作用^[3]。同时,由于线虫的生活史和营养类群多样,对环境变化响应迅速,而且其世代周期短,提取和分类鉴定相对简单,其群落特征有助于指示土壤食物网结构与功能的变化^[4],提供有关土壤生态过程的独特信息,因此被广泛作为评价土壤生态系统健康和受干扰状况的重要生物学指标^[5-7]。

作为农业生产中提高作物产量的重要措施,施 肥对农田土壤生态系统的影响一直备受关注。长 期单施化肥会导致土壤团聚体稳定性下降,土壤物 理结构遭到破坏、易板结,土壤养分和水分供应能 力变差[8-9]等问题,而有机肥与化肥配施能在一定 程度上改良土壤结构并且提高肥力[10]。对于土壤 线虫群落已有报道指出[11-12],长期施用化肥引起地 下植食性线虫的大量爆发,并导致线虫群落结构单 一,多样性降低,抑制了作物生长和土壤生态功能 的发挥。有机肥的施用能有效控制根系植食线虫 的增加[13],并提高杂食/捕食线虫的丰度[14],改善 土壤食物网的结构和功能。与土壤理化性质相比, 线虫的数量、群落结构和生态功能指数能够有效反 映施肥措施对土壤物理、化学、生物学性质的综合 影响[7],指示农田土壤质量和生态系统健康 状况[2]。

黄土高原是我国传统旱作农业区,渭北旱塬是 黄土高原地区重要的小麦生产基地,该地区土壤贫 瘠、肥力低下、作物产量低。长期以来,大量施用化 肥显著提高了该地区粮食产量,但对农田生态系统 的可持续发展也造成了一系列不利影响[15]。在过 去几十年间,大量研究聚焦于不同施肥措施对渭北早塬农田土壤生态环境的影响^[16],但土壤线虫群落对长期定位施肥的响应及其生态指示作用却较少受到关注。本研究依托长武黄土高原农业生态试验站长期定位施肥试验平台,调查和分析长期施用不同肥料的小麦田土壤线虫群落特征及其与土壤理化性质的关系,评价不同施肥措施对土壤质量和生态系统可持续发展潜力的影响,以期为渭北旱塬农田施肥管理和土地可持续利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究依托中国科学院水利部水土保持研究所长武黄土高原农业生态试验站进行。该站位于陕西省长武县(35°12′N,107°40′E),属于黄土高原渭北旱塬区,海拔 1 200 m,气候为半干旱湿润性季风气候,1985—2016 年多年平均降水量 560 mm,其中最高年份为 954 mm,最低年份为 296 mm。年均温 9.2℃,大于 10℃积温为 3 029℃,无霜期 171 d。土壤为粘壤质黑垆土。该试验站的长期定位施肥试验开始于 1984 年,布设试验时耕层(0~20 cm)土壤有机碳(1900)含量为 1900 190 1900 1

1.2 试验设计

长期定位施肥试验于 1984 年设置,种植模式为小麦连作,本研究选择 5 种不同施肥处理的农田作为研究对象:(1)裸地(L),每年定期移除杂草;(2)未施肥小麦田(CK);(3)施氮磷肥小麦田(NP);(4)施有机肥的小麦田(M);(5)氮磷肥配施有机肥的小麦田(MNP)(表 1)。每个处理设置 3 个重复小区,共 15 个试验小区,采用随机区组排列,小区长

10.26 m,宽 6.5 m,小区间距 0.5 m,区组间距 1 m。 所有肥料于作物播种前全部一次性撒施于地表,翻 入土中。田间管理采用当地常规农业管理措施。 不同处理的具体施肥种类和施肥量见表 1。

表 1 试验区作物种植和肥料施用情况表

Table 1 Trial treatment setting table

处理 Treatment	作物 Crop	氮 Nitrogen /(kg·hm ⁻²)	磷 Phosphate /(kg·hm ⁻²)	有机肥 Organic manure /(t·hm ⁻²)
MNP	小麦 Wheat	120	26	75
NP	小麦 Wheat	120	26	0
M	小麦 Wheat	0	0	75
CK	小麦 Wheat	0	0	0
L	无 None	0	0	0

注:(1)施肥种类: 氮肥为尿素, 磷肥为三料磷肥或过磷酸钙, 有机肥为牛粪。(2) 1985 年和 1986 年所有施氮处理用量为 60 kg·hm⁻², 其他年份所有施氮处理用量为 120 kg·hm⁻²。(3) 小麦品种: 1984—1985 年采用长武县农业技术推广中心选育的 7211(4), 1986—1990 年采用 76(39) -131, 1991 年至今为 89(1) 3-4。

Note: (1) Nitrogen fertilizer is urea, phosphate fertilizer is three–material phosphate fertilizer or superphosphate, organic fertilizer is cow dung. (2) In 1985 and 1986, the application rate of nitrogen fertilizer was 60 kg \cdot hm⁻², in other years, all nitrogen application was 120 kg \cdot hm⁻². (3) Wheat species: 7211(4) in 1984–1985, 76(39)–131 in 1986–1990, and 89(1)3–4 since 1991. All wheat species were selected by Changwu County Agricultural Technology Extension Center.

1.3 土壤样品采集

于 2018 年 6 月在小麦收获后,采用"S"型多点采样法,在每个小区沿"S"形路线均匀设置 12 个取样点,用直径 5 cm 土钻对 $0\sim20$ cm 土壤进行采集并充分混合,作为 1 个重复的土样。采集的土壤样品去掉杂质,装入自封袋带回实验室,将其分为两份,一份过 5 mm 筛后置于冰箱(4 $^{\circ}$)内,于 7 d 内提取线虫并测定土壤活性碳、氮指标,另一份室内自然风干后用于测定土壤理化性质。

1.4 土壤理化性质测定

土壤理化性质测定采用常规土壤农化分析方法^[18]。土壤 pH 值采用电位法(水土比为 2.5:1),含水量采用烘干法,有机碳采用重铬酸钾-外加热法,全氮采用半微量凯氏定氮法,铵态氮和硝态氮以 KCL 浸提后用流动分析仪测定(Bran Luebbe,德国),微生物生物量碳和氮采用氯仿熏蒸-硫酸钾溶液浸提法进行浸提,浸提液中有机碳和氮的含量分别采用总有机碳自动分析仪(TOC,TOC-V MP,日本)和紫外分光光度计(UV2310II,上海天美科技公司)测定。可溶性有机碳和氮采用蒸馏水浸提,浸提液中碳氮含量的测定同微生物生物量碳和氮的测定

方法。

1.5 土壤线虫分离和鉴定

1.6 数据分析

1.6.1 线虫生态指数计算 (1) Shannon 多样性指 数^[22]: $H = -\sum_{i} P_{i} \ln P_{i}$: (2) Simpson 指数^[23]: $\lambda =$ $\sum P_i^2$,其中 P_i 为第i个分类单元中个体占线虫总个 体数量的比例;(3)成熟度指数^[21]: $MI = \sum v_i f_i$, 其 中 v_i 为自由生活线虫的生活史c-p值, f_i 为某一科 /属(i) 在自由生活线虫 (不包括植食性线虫)总数 中所占的比例,反映土壤生态系统稳定性和受干扰 影响的程度; (4) 植物寄生线虫指数 $^{[21]}$: PPI = $\sum v_i f'_i$,其中 f'_i 为第 i类植物寄生线虫在线虫群落 中所占的比例;(5) 线虫通路比值^[24]:NCR = B/(B+F),其中B和F分别是食细菌和食真菌线虫数量; (6) 瓦斯卡乐指数^[25]:WI = (B + F)/PP,其中PP为 植食线虫数量,能指示土壤健康状况:(7) 富集指 数: $EI = 100 \times (e/(e+b))$;(8) 结构指数:SI = s/(s+b)×100,根据构成线虫群落的功能团组分变化,定 性评价土壤食物网的养分富集状况,以及对外界干扰 的响应和恢复状况^[26],在计算公式中,b、e、s 是基于 线虫食性和生活史策略(c-p值)划分的不同功能团 组分,分别代表基础组分、富集组分和结构组分。 1.6.2 统计分析 数据统计分析采用 SPSS 22.0 和

CANOCO for windows 5.0 软件。采用单因素方差分析法(One-way ANOVA)评价不同施肥处理间土壤理化性质和线虫群落特征的差异显著性(P<0.05),平均值多重比较采用最小显著极差法(LSD)。采用主成分分析方法(PCA)揭示不同处理间土壤线虫群落组成差异。采用 Pearson 相关分析和冗余分析法(RDA),研究线虫群落特征与土壤理化性质的相关关系。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理下土壤的理化性质

由表 2 可知,裸地(L)土壤含水量显著高于所有种植小麦的处理(P<0.05),但不同施肥处理的小麦田土壤含水量无显著差异(P>0.05)。与裸地(L)和未施肥小麦田(CK)相比,施用有机肥(M)和化肥(NP),以及二者配施(MNP)均显著促进了土壤有机碳、全氮、可溶性碳和氮、微生物生物量碳和氮含量的增加(P<0.05),并且除了可溶性氮之外,其余指标均表现出 MNP>M>NP 的变化趋势。可溶性氮含量同样在 MNP 处理中最高,但在 NP 处理下显著高于 M 处理。铵态氮含量在 NP 处理中最高,但与 M 和 MNP 处理无显著差异(P>0.05)。硝态氮含量在 MNP 处理中显著高于其他处理,其变化趋势为 NP>L>M>NP>CK。

2.2 土壤线虫的数量和群落组成

本研究对长期施肥试验小区进行土壤线虫群落调查,共鉴定线虫1575条,个体密度平均427条·100g⁻¹干土,隶属于2纲6目17科33属,包括食细菌线虫8属,食真菌线虫3属,植食性线虫10属以及杂食/捕食类线虫12属(表3)。

长期施用不同肥料对土壤线虫数量有极显著的影响(P<0.01)(图 1),土壤线虫数量变化顺序为 M>MNP>CK>NP>L,其中裸地(L)土壤线虫数量低于其他处理,而单施氮磷肥(NP)相较于加入有机肥的处理(M和MNP)和不施肥对照(CK)线虫总数明显降低,而施入有机肥的 M和MNP处理线虫数量最高(图 1)。

土壤线虫群落组成也在不同施肥处理间具有显著差异(表3,图1)。裸地(L)中土壤线虫数量最低,但共检测到29个线虫属,明显高于其他处理(21~23个属),其中食细菌线虫头叶属(Cephalobus),食真菌线虫真滑刃属(Aphelenchus),植食线虫短体属

(Pratylenchus)和茎属(Ditylenchus)为优势属(相对丰 度>10%)(表3)。裸地(L)中头叶属(Cephalobus)和 真滑刃属(Aphelenchus)相对丰度显著高于其他处理 (P<0.01)(表3),其中 CK 处理的头叶属(Cephalobus) 相对丰度降幅大于 M、NP 和 MNP。同时,短体 属(Pratylenchus)在其他 4 个种植小麦的处理中也 均为优势属,相对丰度为 28.57%~49.84%,显著高 于裸地(相对丰度为 13.02%)(P<0.01)(表 3),单 施有机肥(M)处理的短体属(Pratylenchus)相对丰 度分别比 CK、NP 和 MNP 降低了12.7%、9.84%和 21.27%,表明了单施有机肥(M)处理对短体属 (Pratylenchus)线虫的控制作用。值得注意的是,施 用有机肥的 M 和 MNP 处理孔咽属(Aporcelaimellus) 相对丰度显著高于其他处理,单施有机肥的 M 处理 索努斯属(Thonus)相对丰度也显著高于其他处理, 表明了有机肥对杂食/捕食线虫的促进作用。

主成分分析(PCA)结果表明,长期施肥的3个处理(M,NP和MNP)的土壤线虫群落组成(属水平上)较为相似,与L和CK处理均存在较大差异。PCA前两轴分别解释了53.57%和20.58%的变异信息(图2)。

2.3 土壤线虫群落的营养类群结构

不同施肥处理的土壤线虫群落营养类群结构存在较大差异(图3)。在所有施肥处理下,植食线虫均占据最大比例(相对丰度34.29%~62.22%),但在不同处理间其相对丰度具有显著差异(P<0.05),具体排列顺序为CK> MNP>NP >M>L;食细菌线虫相对丰度具体排序为L(29.20%)>NP(23.49%)>M(19.37%)>MNP(16.19%)>CK(10.48%);食真菌线虫同样在裸地(L)中相对丰度最高(23.17%),其次为CK处理(12.38%),在M、NP和MNP中较低(3.81%~7.62%);施有机肥的2个处理杂食/捕食线虫的相对丰度(M:33.33%;MNP:23.17%)明显高于其他处理(13.33%~15.86%)(P<0.05)(图3)。

表 2 不同施肥处理下土壤的理化性质

Table 2 Effects of different fertilization treatments on soil physicochemical properties

处理 Treatment	рН	SWC/%	SOC /(g · kg ⁻¹)	TN /(g · kg ⁻¹)	NO ₃ -N /(mg • kg ⁻¹)	NH_4^+-N $/(mg \cdot kg^{-1})$	DOC /(mg • kg ⁻¹)	DON /(mg • kg ⁻¹)	MBC /(mg · kg ⁻¹)	MBN /(mg • kg ⁻¹)
L	7.82±0.04a	15.49±0.45a	6.56±0.34d	0.76±0.04d	0.76±0.07b	0.38±0.02ab	2.25±0.15d	5.80±0.16d	37.38±2.9d	7.21±0.91c
CK	$7.92 \pm 0.07a$	13.96±0.18b	$7.18 \pm 0.05 d$	$0.82 \pm 0.01 d$	$0.20 \pm 0.08 \mathrm{d}$	$0.31 \pm 0.04 b$	$2.44 \pm 0.04 d$	$5.01 \pm 0.09 d$	61.29±4.14c	$8.19 \pm 0.98c$
M	$7.84 \pm 0.03a$	13.52±0.34b	$10.67 \pm 0.22 \mathrm{b}$	1.27 ± 0.01 b	$0.41 \pm 0.07 c$	$0.37 \pm 0.02 ab$	$4.58 \pm 0.14 b$	$10.29 \pm 0.36c$	96.91±5.84ab	14.53 ± 1.31 b
NP	$7.84 \pm 0.02a$	13.35±0.27b	9.67±0.23c	$1.05 \pm 0.03 c$	$0.38 \pm 0.02 \mathrm{cd}$	$0.40 \pm 0.02a$	$3.68 \pm 0.18c$	13.30±0.5b	91.87±2.99b	13.87±0.66b
MNP	$7.89 \pm 0.03a$	13.84±0.52b	11.63±0.18a	1.39±0.01a	1.35±0.06a	$0.34 \pm 0.01 ab$	6.44±0.19a	21.71±1.06a	107.35±3.05a	17.56±0.59a

注:SWC: 土壤含水量;SOC: 土壤有机碳;TN: 全氮; NO_3^-N :硝态氮; NH_4^+-N :铵态氮;DOC: 土壤可溶性碳;DON: 土壤可溶性氮;MBC: 微生物生物量碳;MBN: 微生物生物量氮。下同。同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

Note: SWC:Soil moisture content; SOC:Soil organic carbon; TN: Total nitrogen; NO₃-N:Nitrate nitrogen; NH₄+N: Ammonium nitrogen; DOC: Soil dissolved carbon; DON: Soil dissolved nitrogen; MBC: Microbial biomass carbon; MBN: Microbial biomass nitrogen. The same as below. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments (P<0.05).

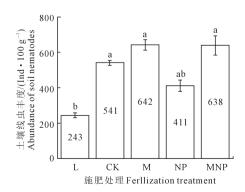
表 3 不同施肥处理下土壤线虫群落各属的相对丰度/%

Table 3 Mean relative abundance of soil nematode genera under different fertilization treatments

营养类群	属	缩写	<i>c−p</i> 值			处理 Treatmen	t	
Trophic group	Genera	Abbr.	c-p value	L	CK	M	NP	MNP
	丽突属 Acrobeles	Acr	2	3.17b	1.59b	5.08ab	8.25a	4.76ab
	头叶属 Cephalobus	Cep	2	15.87a	5.40b	7.62b	8.89b	7.62b
	鹿角纯属 Cervidellus	Cer	2	0.32	0.00	0.95	0.00	0.95
DE	板唇属 Chiloplacus	Chi1	2	$0.63 \mathrm{bc}$	0.32e	3.49a	2.86ab	1.90abo
BF	真头叶属 Eucephalobus	Euc	2	2.22	1.27	0.32	1.59	0.63
	小杆属 Rhabditis	Rha	1	2.54a	0.00b	0.32b	1.27ab	0.00b
	唇绕线属 Chiloplectus	Chi2	2	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00
	绕线属 Plectus	Ple	2	4.13	1.90	1.59	0.63	0.32
	滑刃属 Aphelenchoides	Aph 1	2	0.63	0.32	0.63	0.32	0.32
FF	真滑刃属 Aphelenchus	Aph2	2	21.59a	9.84b	5.40b	6.35b	3.17b
	垫咽属 Tylencholaimus	Tyl1	4	0.95	2.22	1.59	0.95	0.32
	茎属 Ditylenchus	Dit	2	12.70ab	16.83a	8.25bc	9.84abc	4.13c
	螺旋属 Helicotylenchus	Hel	3	1.59	2.54	0.63	1.27	0.63
PP	新平滑垫刃属 Neopsilenchus	Neo	2	0.95	0.63	0.00	0.63	0.00
	拟盘旋属 Pararotylenchus	Par1	3	0.63	0.00	0.00	0.00	0.32
	针属 Paratylenchus	Par2	2	0.63a	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b
	短体属 Pratylenchus	Par3	3	13.02e	41.27ab	28.57b	38.41ab	49.84a
	盘旋属 Rotylenchus	Rot	3	0.32	0.63	0.95	1.90	0.63
	矮化属 Tylenchorhynchus	Tyl2	3	0.00	0.00	0.63	0.00	0.95
	垫刃属 Tylenchus	Tyl3	2	0.32	0.32	0.63	0.95	0.32
	剑属 Xiphinema	Xip	5	4.13	0.00	0.00	0.00	0.00
	孔咽属 Aporcelaimellus	Apo	5	6.03b	5.71b	18.73a	5.71b	13.65a
	高知属 Kochinema	Koc	4	0.32	0.32	0.95	1.27	1.90
	微矛线属 Microdorylaimus	Mic	4	1.90	1.59	0.00	1.90	1.59
	Paraxonchium	Par4	5	0.63	0.95	0.63	0.32	0.00
	前矛线属 Prodorylaimus	Pro	4	0.00	1.27	0.00	0.00	0.00
OD	索努斯属 Thonus	Tho	4	2.86b	4.13b	11.75a	5.08b	4.76b
OP	狭咽属 Discolaimium	Dis 1	4	0.00	0.32	0.00	0.63	1.27
	盘咽属 Discolaimus	Dis2	4	0.00	0.00	0.32	0.63	0.00
	穿咽属 Nygolaimus	Nyg	5	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00
	Paravulvus	Par5	5	0.32	0.00	0.32	0.00	0.00
	锯齿属 Prionchulus	Pri	4	0.63	0.32	0.00	0.00	0.00
	Trischistoma	Tri	3	0.32	0.32	0.63	0.32	0.00
	优势属 Dominant genera(>	10%)		63.18	58.10	59.05	38.41	63.49
	常见属 Common genera(1-	-10%)		28.57	37.46	33.02	56.18	31.10
	稀有属 Rare genera(<1	%)		8.24	4.45	7.91	5.38	5.39
	线虫属数 Genera number of			29	23	23	23	21

注:BF: 食细菌线虫;FF: 食真菌线虫;PP: 植食线虫;OP: 杂食/捕食线虫。下同。同行不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。未标注字母表明该属相对丰度在各处理间差异不显著。

Note: BF: Bacterial feeders; FF: Fungal feeders; PP: Plant-parasites; OP: Omnivores-predators. The same as below. Different lowercase letters in the same line indicate significant differences among treatments (P < 0.05), while unlabeled letters indicate insignificant differences among treatments in relative abundance of this genus.



注:图中不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05),误差线表示标准误差。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments (P<0.05). Error bars represent standard errors.

图 1 不同施肥处理下土壤线虫的丰度

Fig.1 Abundance of soil nematodes under different fertilization treatments

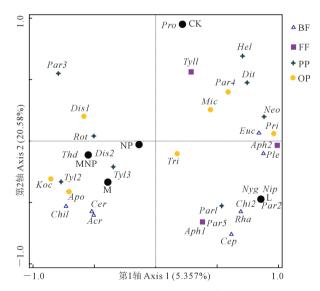
2.4 土壤线虫群落的生态指数

长期施用不同肥料对土壤线虫生态指数有显著影响(P<0.05)(表 4),表明土壤食物网的结构和功能发生显著变化。与裸地(L)相比,所有小麦田中线虫多样性指数(H)均有所降低,但仅与氮磷肥配施有机肥(MNP)处理具有显著差异(P<0.05),而优势度的趋势与多样性指数(H)相反。然而,在施入有机肥的处理中(M和MNP)土壤线虫成熟度指数(MI)显著高于裸地(L)(P<0.05),而植物寄生线虫指数(PPI)在不同处理中无显著差异(P>0.05)。瓦斯乐卡指数(WI)与线虫多样性指数(H)呈现相似的变化趋势,即在裸地(L)中最高(1.57),而在氮磷肥配施有机肥处理(MNP)中最低(0.36)。线虫通路指数(NCR)在未施肥 CK 处理中较低并小于

0.5,表明土壤有机质分解以分解速率较慢的真菌分解途径为主,在裸地(L)中略有上升,而在施入肥料的处理中(M、NP和MNP)均明显升高并大于0.5,表明施肥后分解速率较快的细菌分解途径占据主要地位。线虫结构指数(SI)在所有处理间无显著差异(P>0.05),但所有小麦田相较于裸地(L)都有所增加,特别是M和MNP。富集指数(EI)均小于50,并在M和MNP处理中较低,显著低于裸地(P<0.05),说明施用有机肥显著降低了土壤食物网对可利用资源的响应敏感性,但同时促进其结构化程度增加。

2.5 土壤理化性质与土壤线虫群落的关系

冗余分析(RDA)前两轴分别解释了 26.71%和 10.46%的变异信息,结果表明,土壤全氮、有机碳、微生物生物量碳和氮、可溶性碳是影响线虫群落组成重要因素(P<0.01)(图 4)。土壤全氮、有机碳、微生物生物量碳和氮、可溶性有机碳和氮均与优势线虫短体属(Par3),以及杂食/捕食线虫孔咽属(Apo)和索努斯属(Tho)比例呈正相关关系,与茎属(Dit)和真滑刃属(Aph2)比例呈负相关关系,而土壤

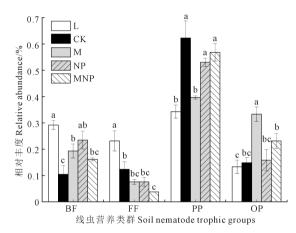


注:图中斜体字母为线虫属名缩写,具体含义见表 3;加粗 黑色字体 L、CK、M、NP 和 MNP 代表不同施肥处理;BF、FF、PP 和 OP 代表线虫不同营养类群。下同。

Note: The italics represent the abbreviations of nematode genera, as shown in Table 3. The capital letters in bold black front, namely L, CK, M, NP, and MNP, represent different fertilization treatments. BF, FF, PP, and OP represent different trophic groups of soil nematodes. The same as below.

图 2 不同施肥处理下土壤线虫群落主成分分析(PCA)图 Fig.2 Principal component analysis (PCA) of soil nematode communities under different fertilization treatments

含水量则正相反(图 4)。相关分析结果表明,土壤理化性质与线虫数量、群落结构及生态指数也有着密切的关系(表 5)。线虫数量(TNA)、杂食/捕食线虫比例(OP%)、成熟度指数(MI)、线虫通路指数(NCR)和结构指数(SI)均与土壤全氮、微生物生物量碳和氮,以及可溶性有机碳呈显著正相关关系(P<0.05),而食真菌线虫比例(FF%)、Shannon 多样性指数(H)和富集指数(EI)则相反,与这些土壤性质呈显著负相关关系(P<0.05)。此外,食真菌线虫比例、瓦斯乐卡指数(WI)和富集指数(EI)与土壤含水量呈显著正相关关系(P<0.05)。



注:不同小写字母表示相同营养类群下处理间差异显著(P <0.05)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments under the same trophic group (P<0.05).

图 3 不同施肥处理土壤线虫各营养类群比例/%

Fig.3 Proportions of soil nematode trophic groups under different fertilization treatments

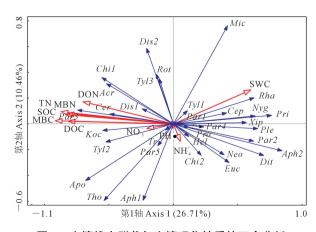


图 4 土壤线虫群落与土壤理化性质的冗余分析

Fig.4 Redundancy analysis (RDA) for the relationships between nematode communities and soil physicochemical properties

表 4 不同施肥处理下土壤线虫群落生态指数

Tabla 4	Faalasiaal	indiana of an	1 mamatada	communities under	different	fautilization to	two.outo

处理 Treatment	Н	λ	MI	PPI	NCR	WI	EI	SI
L	2.36±0.18a	$0.13\pm0.03a$	$2.51 \pm 0.12c$	2.79±0.23a	$0.56 \pm 0.04 ab$	1.57±0.27a	39.43±6.11 a	58.89±11.94a
CK	$1.94 \pm 0.21 ab$	$0.25 \pm 0.07a$	$3.12 \pm 0.15 ab$	$2.70\pm0.09a$	$0.45 \pm 0.08 \mathrm{b}$	$0.39 \pm 0.11 ab$	32.71 ± 3.33 ab	$80.92 \pm 8.06a$
M	$2.19 \pm 0.03 ab$	0.16±0.01a	$3.47 \pm 0.21a$	$2.77 \pm 0.05 a$	$0.72 \pm 0.02 ab$	$0.68 \pm 0.09 \mathrm{ab}$	$21.35 \pm 2.18 \text{ bc}$	87.37±4.97a
NP	$2.10 \pm 0.05 ab$	$0.19 \pm 0.01a$	$2.80 \pm 0.2 bc$	$2.79\pm0.05a$	$0.75 \pm 0.06 ab$	$0.59 \pm 0.06 ab$	$29.01 \pm 7.22 ab$	71.43±5.61a
MNP	$1.80 \pm 0.03 \mathrm{b}$	$0.28 \pm 0.02a$	$3.39 \pm 0.06a$	2.92±0.03a	$0.81 \pm 0.01a$	$0.36 \pm 0.03 \mathrm{b}$	$15.06 \pm 1.40 c$	86.04±2.43a

注:H: Shannon 多样性指数; λ : 优势度指数;M! 成熟度指数;PP! 植物寄生线虫指数;NCR:线虫通路比值;WI: 瓦斯乐卡指数;EI: 富集指数;SI: 结构指数。下同。同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

Note:H: Shannon diversity index; λ : Simpson dominance index;MI: Maturity index; PPI: Plant parasites index; NCR: Nematode channel ratio; WI: Wasilewska index; EI: Enrichment index; SI: Structure index. The same below. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments (P<0.05).

表 5 土壤理化性质与线虫群落特征的相关性系数

Table 5 Correlation coefficients between soil physicochemical properties and nematode community characteristics

指标 Index	SWC	SOC	TN	NO_3^N	NH_4^+-N	DON	DOC	MBN	MBC
TNA	-0.27	0.82 * *	0.78 * *	0.59 *	0.09	0.93 * *	0.83 * *	0.82 * *	0.76 * *
BF%	0.37	-0.21	-0.18	0.11	0.47	-0.11	-0.25	-0.22	-0.34
FF%	0.54 *	-0.78 * *	-0.75 * *	-0.16	0.29	-0.68 * *	-0.75 * *	-0.82 * *	-0.88 * *
PP%	-0.30	0.15	0.12	-0.03	-0.46	0.28	0.21	0.23	0.31
OP%	-0.37	0.67 * *	0.66 * *	0.11	-0.02	0.32	0.59 *	0.61 *	0.64 * *
H	0.50	-0.60*	-0.58 *	-0.33	-0.25	-0.64 *	-0.56*	-0.53 *	-0.57 *
λ	0.47	-0.41	-0.41	-0.23	-0.22	-0.45	-0.38	-0.32	-0.39
MI	-0.43	0.65 * *	0.64 *	0.12	-0.32	0.41	0.65 * *	0.65 * *	0.70 * *
PPI	0.25	0.33	0.33	0.43	-0.44	0.37	0.39	0.34	0.25
NCR	-0.28	0.78 * *	0.77 * *	0.49	0.17	0.79 * *	0.76 * *	0.80 * *	0.72 * *
WI	0.56 *	-0.53 *	-0.48	0.03	0.45	-0.46	-0.52*	-0.56*	-0.69 * *
EI	0.52 *	-0.86 * *	-0.88 * *	-0.39	0.20	-0.77 * *	-0.88 * *	-0.83 * *	-0.85 * *
SI	-0.46	0.60 *	0.59 *	0.07	-0.39	0.40	0.61 *	0.62 *	0.71 * *

注:*和**分别代表在P<0.05和P<0.01差异显著。TNA为线虫总数量;BF%,FF%,PP%和OP%分别代表食细菌、食真菌、植食、杂食/捕食性线虫的相对丰度;线虫生态指数含义见表 4;土壤理化性质含义见表 1。

Note: * and * * represent significant differences at P<0.05 and P<0.01, respectively. TNA is total nematode abundance; BF%, FF%, PP%, and OP% represent the relative abundance of bacterial feeders, fungal feeders, plant parasites, and omnivore-predators, respectively. The abbreviations of nematode ecological indices and soil physicochemical properties are shown in Table 4 and Table 2, respectively.

3 讨论

3.1 长期施肥对土壤线虫群落组成和结构的影响

长期施肥对土壤线虫数量有着极为显著的影响。与裸地相比,种植小麦导致输入土壤的资源数量和质量提高^[27-28],改善了土壤资源有效性(表2),为线虫提供了更丰富的食物资源^[29],因此线虫数量显著增加(*P*<0.05)。在所有施肥处理中,氮磷肥配施有机肥(MNP)处理对土壤资源有效性的改善作用最为明显,其土壤有机碳、全氮、硝态氮、可溶性碳和氮、微生物生物量碳和氮含量均高于其他处理,这可能与该处理的养分投入量最高有关^[30]。与之相应的,MNP处理的土壤线虫数量也较高。此外,单施有机肥(M)以及氮磷肥配施有机肥(MNP)处理中,土壤线虫数量明显高于单施氮磷肥(NP)的

处理,可能是由于长期施用有机肥能更为有效地促进土壤有机碳和全氮的增加,改善土壤保肥供肥能力^[28-29](表2)。因此,本研究结果初步证实了土壤线虫数量能够有效指示施用不同肥料类型和数量对农田土壤资源有效性的影响^[2]。

长期施肥对土壤线虫群落组成和结构有重要的调控作用。与裸地相比,所有小麦田中食细菌线虫头叶属(Cephalobus)和食真菌线虫真滑刃属(Aphelenchus)的比例明显降低,而植食线虫短体属(Pratylenchus)比例显著增加,这导致小麦田中食微线虫比例下降,而植食线虫比例明显上升(除了单施有机肥处理)。植食线虫多为有害类群,一般通过刺破根系表皮,取食植株内养分维持自身生长繁殖^[31]。小麦发达的根系为植食线虫提供丰富的食物资源^[32],同时小麦生长对土壤水分的消耗,使生

活在土壤颗粒表面水膜中的自由生活线虫也受到抑制从而比例降低,进一步增加了植食线虫危害[33-35]。

相较于未施肥小麦田(CK),单施有机肥处理 (M)显著降低了土壤中短体属(Pratylenchus)和茎 属(Ditylenchus)线虫比例(表3),抑制了植食线虫 的增加(图3)。事实上,施用有机肥一直被认为是 控制作物根系植食线虫的最为有效途径[13,31,36]。 相比化肥,有机肥能够更好地促进土壤养分的缓慢 释放和补充微量元素,维持植株内营养均衡,增强 其对植食者的抗性和耐受性[37]. 同时促进对植食线 虫有制约作用的自由生活线虫发展[13,36]。本研究 中,单施有机肥(M)显著提高孔咽属(Aporcelaimellus) 和索努斯属(Thonous)的比例,增加了线虫群落中杂 食/捕食线虫的优势度。杂食/捕食线虫位于土壤 食物网较高营养级,对环境干扰响应敏感,通过取 食作用对植食和食微线虫产生自上而下的调控作 用,是影响土壤食物网构建的关键生物类群[25]。本 研究结果表明 长期施用有机肥有利于提高土壤食 物网结构复杂性,促使土壤生态系统向更加成熟稳 定的方向发展。然而,与未施肥处理(CK)相比,氮 磷肥和有机肥配施(MNP)并未显著改变植食线虫 和杂食/捕食线虫的比例,这可能与化肥的施用对 植食性线虫的促进作用有关[11];此外,该处理的养 分投入量较高,这对杂食/捕食线虫可能产生一定 的抑制作用[38]。

线虫生态指数能有效指示土壤食物网的结构 和功能,评价生态系统健康状况[25]。与裸地相比, 种植小麦后土壤线虫属数、多样性指数(H)和指示 土壤健康的瓦斯乐卡指数(WI)均有所下降,并在氮 磷肥配施有机肥处理(MNP)中降至最低,而优势度 指数(λ)的变化则相反。这是因为种植小麦促进了 植食线虫的相对丰度迅速提高,导致线虫丰富度和 多样性降低[14],土壤健康状况受到影响[26]。同时, 在 MNP 处理中,较高的养分投入量可能对部分线虫 类群产生胁迫作用[39],使线虫多样性和 WI 指数进 一步下降[38]。然而,相比裸地,所有小麦田线虫成 熟度指数(MI)和结构指数(SI)均有所提高,特别是 在 M 和 MNP 处理中更为显著。有机肥的施用增加 了 c-p 值较高的线虫类群(特别是杂食/捕食线虫) 的相对丰度,有助于控制植食线虫的发展,使土壤 食物网维持较为复杂的结构和成熟稳定的状 态[22, 26]。长期施肥显著促进了线虫通路指数 (NCR)的提高,表明施肥有助于土壤中可利用资源的增加,进而使得土壤食物网中对易分解养分分解速率较快的细菌通道占据更重要的地位^[27],而这种变化在养分投入量最高的 MNP 处理中尤为显著。

3.2 影响土壤线虫群落的主要环境因素

土壤养分和水分含量是影响线虫群落的重要环境因素^[29]。已有研究表明^[40],土壤养分含量的变化通过影响植物生长和微生物群落来改变不同营养类群线虫的食物资源状况,调控线虫数量和群落结构^[7],土壤含水量变化则对生活在土壤颗粒水膜中的线虫(主要是自由生活线虫)有着显著的调控作用^[1,25]。本研究中,RDA 和相关分析结果也表明,不同施肥措施下土壤线虫数量、组成结构以及生态指数的差异与土壤全氮、有机碳、微生物生物量碳和氮以及可溶性碳的变化密切相关(图 4,表5)。

线虫总数量(TNA)与土壤全氮、微生物生物量碳和氮,可溶性有机碳和氮,以及土壤硝态氮含量均呈现显著正相关关系(P<0.05),表明线虫数量对农田土壤资源有效性具有良好指示作用^[41]。相比裸地,作物的种植能够改善土壤碳氮资源^[17],促进土壤线虫数量增加。同时,相比氮磷肥处理,长期施用有机肥(单施和配施)能够更为显著地促进土壤有机碳和全氮含量的增加,线虫数量达到较高水平,还有助于控制植食线虫的危害,构建更为复杂和成熟稳定的线虫群落。因此,土壤有机碳和全氮含量与杂食/捕食类线虫比例、成熟度指数(MI)、线虫通路指数(NCR)和结构指数(SI)也呈显著正相关关系,而与植食线虫比例呈负相关关系。

值得注意的是,土壤水分含量与食真菌线虫比例、瓦斯乐卡指数(WI)和富集指数(EI)显著正相关。在本研究中,土壤水分含量在裸地和小麦田之间差异显著,主要是由于小麦生长过程中对水分的消耗导致土壤含水量显著下降^[33],而这也引起小麦田中自由生活线虫比例和线虫多样性下降,危害土壤食物网养分富集功能和健康状况。我们的研究结果表明,在渭北旱塬区,农田土壤水分含量不仅是制约小麦生长和产量的重要因素^[33],还可能对土壤生物多样性、食物网结构和功能、以及生态系统健康具有重要影响^[7]。然而,由于土壤含水量受采样时间的影响较大,在不同年份和季节间有显著差异^[33],而单一时间点对土壤水分含量的测定并不能全面反映不同施肥措施下农田土壤水分的变化。

因此,在未来研究中,需进一步探索渭北旱塬小麦田土壤含水量的动态变化及其与线虫群落的关系。

4 结 论

长期施肥能够显著影响渭北旱塬小麦田土壤 线虫数量、群落结构和生态指数特征。相比裸地, 小麦田土壤线虫数量均有提高,但食细菌和食真菌 线虫(特别是头叶属(Cephalobus)和真滑刃属(Aphelenchus))比例下降,而施肥减缓了长期种植小麦导 致的头叶属(Cephalobus)线虫相对丰度的下降,此 外,种植小麦的处理植食线虫(特别是短体属(Pratylenchus))比例显著增加,导致线虫属数、Shannon 多样性指数(H)和指示土壤健康状况的瓦斯乐卡指 数(WI)均有所下降。相较于未施肥和施用氮磷肥 处理,单独施用有机肥促使小麦田中短体属(Pratvlenchus)和茎属(Ditylenchus)线虫比例下降,有效抑 制了植食线虫优势度的增加,并促进了杂食/捕食 类线虫比例显著增加,线虫成熟度指数(MI)显著提 高。这表明长期施用有机肥有利于土壤食物网结 构化程度提高,土壤生态系统向更加成熟稳定的方 向发展。土壤全氮、有机碳、微生物生物量碳和氮 以及可溶性碳是影响不同施肥措施下土壤线虫数 量和群落格局的重要环境因素。

参考文献

- [1] NEHER D A. Role of nematodes in soil health and their use as indicators [J]. Journal of Nematology, 2001, 33(4): 161-168.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] BONGERS T, BONGERS M. Functional diversity of nematodes [J]. Applied Soil Ecology, 1998, 10(3): 239-251.
- [5] BONGERS T. De nematoden van nederland[M]. Utrecht: Stichting Uitgeverij Koninklijke Nederlandse Natuurhistorische Vereniging, 1988: 7-408.
- [6] 梁文举,葛亭魁,段玉玺.土壤健康及土壤动物生物指示的研究与应用[J].沈阳农业大学学报,2001,32(1):70-72.

 LIANG W J, GE T K, DUAN Y X. Bioindication of soil fauna to soil health[J].Journal of Shenyang Agricultural University, 2001, 32(1): 70-72.
- [7] 李玉娟,吴纪华,陈慧丽,等.线虫作为土壤健康指示生物的方法及

- 应用[J].应用生态学报,2005,16(8):1541-1546.
- LI Y J, WU J H, CHEN H L, et al. Nematodes as bioindicator of soil health; methods and applications [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(8): 1541-1546.
- [8] 赵丹丹,王俊,付鑫.长期定位施肥对旱作农田土壤有机碳及其组分的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(1):97-102.

 ZHAO D D, WANG J, FU X. Effect of long-term fertilization on soil organiccarbon and its fractions under dryland farming system[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(1): 97-102.
- [9] ZHOU H, FANG H, HU C S, et al. Inorganic fertilization effects on the structure of a calcareous silt loam soil [J]. Agronomy Journal, 2017, 109(6); 2871-2880.
- [10] 李燕青.不同类型有机肥与化肥配施的农学和环境效应研究[D]. 北京:中国农业科学院,2016.
 LI Y Q. Study on agronomic and environmental effects of combined application of different organic manures with chemical fertilizer[D].
 Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [11] 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.
- [12] 梁文举,姜勇,李琪,等.施用化肥对下辽河平原稻田土壤线虫群落产生的影响[J].土壤通报,2004,35(6):773-775.

 LIANG W J, JIANG Y, LI Q, et al. Effect of chemical fertilizers on paddysoil nematode communities in the lower reaches of Liaohe Plain [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(6): 773-775.
- [13] OKADA H, NIWA S, TAKEMOTO S, et al. How different or similar are nematode communities between a paddy and an upland ricefields across a flooding-drainage cycle? [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(10): 2142-2151.
- [14] 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.

 ZHANG T, KONG Y, XIU W M, et al. Effects of coupled bio-organic
 - ZHANG T, KONG Y, XIU W M, et al. Effects of coupled bio-organic and chemical fertilizers on soil nematode communities in winter wheat field in the fluvo-aquic soil region of northern China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(1): 223-229, 236.
- [15] 摄晓燕,谢永生,郝明德,等 黄土旱塬长期施肥对小麦产量及养分平衡的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(6):27-32.

 SHE X Y, XIE Y S, HAO M D, et al. Effect of long-term fertilization on wheat yield and nutrient balance in dryland of the Loess Plateau [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(6): 27-32.
- [16] 高明霞,孙瑞,崔全红,等.长期施用化肥对塿土微生物多样性的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(6):1572-1580.

 GAO M X, SUN R, CUI Q H, et al. Effect of long-term chemical fertilizer application on soil microbial diversity in anthropogenic loess soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(6): 1572-1580.
- [17] 郭胜利.黄土旱塬农田土壤有机碳、氮的演变与模拟[D].咸阳;西 北农林科技大学,2001. GUO S L. Evolution and simulation of soil organic C, N of dry farmland in gully area of the Loess Plateau[D]. Xianyang; Northwest A
- [18] 鲁如坤.土壤农化分析[M].北京:中国农业科技出版社,2000:

and F University, 2001.

[33]

2730-2746.

12-105.

2004, 23(3): 149-151.

Press, 1998: 8-239.

- LU R K.Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing; China Agriculture Press, 2000; 12-105.
- [19] 毛小芳,李辉信,陈小云,等.土壤线虫三种分离方法效率比较[J]. 生态学杂志,2004,23(3):149-151. MAO X F, LI H X, CHEN X Y, et al. Extraction efficiency of soil nematodes by different methods [J]. Chinese Journal of Ecology,
- [20] 尹文英.中国土壤动物检索图鉴[M].北京:科学出版社,1998; 8-239. YIN W Y.Pictorical keys to soil animals of China[M].Beijing:Science
- [21] BONGERS T. The maturity index; an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition[J]. Oecologia, 1990, 83(1): 14-19.
- [22] SHANNON C E. A mathematical theory of communication [J]. The Bell System Techical Journal, 1948,27(3):379-423.
- [23] SIMPSON E H. Measurement of diversity [J]. Nature, 1949, 163 (4148): 688.
- [24] YEATES G W. Nematodes as soil indicators; functional and biodiversity aspects[J]. Biology and Fertility of Soils, 2003, 37(4): 199-210.
- [25\] WASILEWSKA L. The effect of age of meadows on succession and diversity in soil nematode communities[J]. Pedobiologia, 1994, 38; 1-11.
- [26] 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.
- [27] 高小峰,闫本帅,吴春晓,等.长期施肥对黄土丘陵坡地农田土壤质量和谷子产量的影响[J].干旱地区农业研究,2021,39(5):76-83.

 GAO X F, YAN B S, WU C X, et al. Effects of long-term fertilization on soil quality and millet yield on slope farmland in loess hilly areas [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021,39 (5):76-83.
- 李春越,常顺,钟凡心,等种植模式和施肥对黄土旱塬农田土壤团聚体及其碳分布的影响[J].应用生态学报,2021,32(1):191-200. LI C Y, CHANG S, ZHONG F X, et al. Effects of fertilization and planting patterns on soil aggregate and Carbon distribution in farmland of the Loess Plateau, northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(1): 191-200.
- [29] 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.
- [30] 柳燕兰.长期定位施肥土壤酶活性及其肥力变化研究[D].咸阳; 西北农林科技大学,2009. LIU Y L. Study on the enzyme activities and fertility change of soils by a long-term located utilization of different fertilizers [D]. Xianyang; Northwest A&F University, 2009.

- [31] COLLANGE B, NAVARRETE M, PEYRE G, et al. Root-knot nematode (*Meloidogyne*) management in vegetable crop production; the challenge of an agronomic system analysis[J]. Crop Protection, 2011, 30(10); 1251-1262.
- [32] 孙仁华.农田有机管理和植物篱对生物多样性的影响[D].北京: 中国农业科学院,2021. SUN R H. Effect of organic management and hedgerows on biota diversity in farmland[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.
- 壞水分效应长周期模拟研究[J].中国农业科学,2015,48(14):2730-2746.

 ZHANG Y J, LI J, GUO Z, et al. Long-term simulation of winter wheat yield and soil water response to conservation tillage rotation in Weibei highland [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(14):

张玉娇,李军,郭正,等.渭北旱塬麦田保护性轮耕方式的产量和土

- [34] RUAN W B, SANG Y, CHEN Q, et al. The response of soil nematode community to nitrogen, water, and grazing history in the Inner Mongolian steppe, China[J]. Ecosystems, 2012, 15(7): 1121-1133.
- [35] 张梦亭,刘萍,黄丹丹,等.东北黑土线虫群落对长期免耕后土壤扰动的响应[J].中国农业科学,2021,54(22):4840-4850.

 ZHANG M T, LIU P, HUANG D D, et al. Response of nematode community tosoil disturbance after long-term no-tillage practice in the black soil of northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(22): 4840-4850.
- [36] TABARANT P, VILLENAVE C, RISÈDE J M, et al. Effects of organic amendments on plant-parasitic nematode populations, root damage, and banana plant growth[J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, 47(3): 341-347.
- [37] ALTIERI M A, NICHOLLS C I. Soil fertility management and insect pests; harmonizing soil and plant health in agroecosystems [J]. Soil and Tillage Research, 2003, 72(2): 203-211.
- [38] 孔云,张婷,李刚,等.不同施肥措施对华北潮土区玉米田土壤线虫 群落的影响[J].华北农学报,2018,33(6):205-211. KONG Y, ZHANG T, LI G, et al. Effects of different fertilization regimes on maize field nematode community in fluvo-aquicsoil in North China[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2018, 33(6): 205-211.
- [39] TENUTA M, FERRIS H. Sensitivity of nematode life-history groups to ions and osmotic tensions of nitrogenous solutions [J]. Journal of Nematology, 2004, 36(1): 85-94.
- [40] ZHANG Z Y, ZHANG X K, XUM G, et al. Responses of soil microfood web to long-term fertilization in a wheat-maize rotation system [J]. Applied Soil Ecology, 2016, 98; 56-64.
- [41] 杨悦,鲍雪莲,鲁彩艳,等.增施氮肥能够缓解麦田土壤线虫群落对O₃浓度升高的响应[J].生态学报,2015,35(8):2494-2501 YANG Y, BAO X L, LU C Y, et al. N fertilization regulates the response of soil nematode communities to elevated O₃ in a wheat field [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(8): 2494-2501.