

有机种植业土壤线虫群落特征的调查研究^①

毛 妙¹, 王 磊², 席运官², 肖兴基², 王 辉³, 李辉信¹, 焦加国^{1*}, 王 霞^{2*}

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042;

3 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘 要:为揭示有机种植对土壤线虫群落特征的影响,在2013—2014年期间,对华东、华中和西部地区9个样点的有机种植和常规种植的土壤进行了线虫群落的比较研究。在所有调查样点中,共鉴定出线虫27科57属。有机种植条件下,土壤线虫总数平均为1 037条/100 g干土,显著高于常规种植(748条/100 g干土),食细菌线虫的数量显著高于常规。食细菌线虫头叶属(*Cephalobus*)和真头叶属(*Eucephalobus*),食真菌线虫滑刃属(*Aphelenchoides*)和丝尾垫刃属(*Filenchus*)为有机种植业的共有线虫属。从土壤线虫的生态指数来看,有机种植的瓦斯乐斯卡指数(*WI*)>1,线虫通道指数(*NCR*)>0.5,表明有机农业的土壤呈相对健康的状态且腐屑食物网的分解途径主要依靠细菌。其他生态指数在有机和常规农业之间没有显著差异。土壤理化性质与线虫数量、*WI*指数和成熟度指数 *MI*、*PPI*之间存在明显的相关关系。

关键词:有机农业;土壤线虫;群落结构

中图分类号:S154.38;Q958.2

有机农业是遵循自然规律和生态学原理,采用施用有机肥、土壤培肥、免耕、作物轮作等一系列可持续发展的农业技术,通过不减少基因和物种多样性等方式,来保护生态环境、保持生态平衡的一种农业生产方式^[1]。有机农业禁止使用基因工程获得的生物及产物、化肥和化学合成的农药等,而强调在有机生产区域内建立封闭的物质循环体系^[2]。近年来,我国有机农业得到了迅速发展,截至2013年底,按照我国《有机产品》国家标准生产的有机植物类产品面积272.2万hm²(包括转换期),其中有机种植面积为128.7万hm²。大量研究表明,长期采用有机农业方法,可以显著增加土壤生物的数量和多样性^[3]。但是,也有部分研究报道,土壤动物在有机农田和常规农田之间没有显著差异^[4],甚至低于常规农田^[5]。开展有机农业与常规农业对农田生物多样性的比较研究,可以为有机农业在国内的推广提供合理的指导。

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^[6]。又因其对外界干扰反应迅速,形态结构简单,线虫作为土壤健康指示生物已成为人们的共识,并在多种生态系统中得到广泛的应用^[7]。本研究在华东、华中、西部地区选取了9个有机种植基地及其相应的常规种植基地,对其土壤线虫群落特征进行了调查研究,旨在明确有机和常规农业动物资源的差异,对有机农业的动物多样性保护效益进行评估,为验证有机农业支持多样性的观点提供更多不同类型的科学证据,为制定有机农业相关政策法规提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样点选择和土壤样品采集

样点选择:在我国华东、华中和西部地区共选择9个有机种植基地及对应的9个常规种植样点,具体情况见表1。

①基金项目:公益性行业(环保)科研专项(2013467036)和国家自然科学基金项目(41271270)资助。

* 通讯作者(jiaguojiao@njau.edu.cn; wangx@ofdc.org.cn)

作者简介:毛妙(1992—),女,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事土壤生态学研究。E-mail: 2013103063@njau.edu.cn

表 1 土壤线虫调查样点选择
Table 1 Sampling sites of soil nematode

样点	基地名称	种植作物	年均气温 (℃)	年均降水量 (ml)	有机年限 (年)	土壤类型	有机肥种类和用量 (t/hm ²)	采样时间
遵义	遵义高粱生产基地	高粱	15.2	1 075	4	黄壤	商品有机肥, 30	2014.7.16
头屯河	乌鲁木齐辣椒生产基地	辣椒	6.1	128	4	栗钙土	商品有机肥, 40	2014.6.25
溧水	南京普朗克有机蔬菜生产基地	空心菜	15.5	1 073	12	黄棕壤	商品有机肥, 45~75	2013.9.10
仪征	江扬生态农业有限公司	青菜	15.1	1 014	3	黄棕壤	腐熟鸡粪, 6.0~7.5	2013.9.30
句容	戴庄有机农业合作社	水稻	15.2	1 021	3	水稻土	红花草, 30; 米糠, 0.75	2013.9.30
崇明	跃进农业管理总站	水稻	15.2	1 025	12	水稻土	紫云英, 7.5; 有机肥 0.75~1.05	2013.9.23
婺源	江西婺源县有机茶叶生产基地	茶叶	16.8	1 962	18	黄壤	羊粪, 0.45~0.75	2013.9.28
长沙	长沙县有机茶叶生产基地	茶叶	17.2	1 362	14	黄壤	畜禽粪便, 15~22.5	2013.9.26
沅江	沅江赤山岛有机农业专业合作社	柑橘	16.9	1 322	13	红壤	沼渣和猪粪, 1.5	2013.9.27

土壤样品采集：于 2013 年 9 月和 2014 年 6—7 月对农作物生长期进行样品的采集。在每个有机种植基地，选取 3 块同样类型的有机种植样地作为重复，同时在周边选择与有机样地农作物相同的 3 块常规种植样地作为对照。在每个样地中，采用 S 形采样法，随机选取 6~8 个取样点，用土钻钻取 0~20 cm 深度的表层土，将土样混合放入自封袋。土样带回实验室后，挑出其中的石子和大的根系以及掰碎大的土块

后，一部分放入 4℃ 冰箱保存用于土壤线虫的鉴定，另一部分自然风干、过筛后用于土壤理化性质的测定。

1.2 土壤理化指标的测定

土壤 pH 采用酸度计测定(水土比 2.5:1)，有机质采用重铬酸钾加热法测定，全氮采用半微量开氏法测定，全磷采用酸溶-钼锑抗比色法测定，速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定^[8]。各样点的有机和常规种植的土壤理化性质见表 2。

表 2 有机和常规种植样地土壤理化性质
Table 2 Physical and chemical properties of tested soils under organic and conventional managements

样点	pH (H ₂ O)		有机质 (g/kg)		全氮 (g/kg)		全磷 (g/kg)		速效钾 (mg/kg)	
	有机	常规	有机	常规	有机	常规	有机	常规	有机	常规
遵义	7.21±0.21	5.93±0.10	35.82±0.64	47.00±1.13	2.09±0.04	2.43±0.03	0.80±0.01	0.90±0.02	178.89±10.21	219.15±7.64
头屯河	7.58±0.11	7.71±0.06	49.63±1.83	20.74±0.64	2.22±0.07	1.03±0.03	1.37±0.05	1.05±0.02	615.33±34.10	345.09±13.32
溧水	6.79±0.11	7.10±0.01	28.50±0.77	13.58±0.35	1.69±0.06	0.94±0.02	0.81±0.02	0.70±0.02	293.82±18.28	153.00±6.66
仪征	7.60±0.15	5.11±0.07	10.69±0.57	20.53±0.32	0.81±0.01	1.38±0.02	0.94±0.02	0.77±0.01	247.00±23.86	158.89±12.03
句容	6.22±0.05	5.09±0.06	17.29±0.37	20.02±0.23	1.05±0.04	1.23±0.02	0.42±0.02	0.55±0.02	204.88±17.10	63.04±2.28
崇明	7.72±0.13	7.28±0.05	25.86±0.51	18.47±0.22	1.55±0.03	1.05±0.02	0.88±0.02	0.76±0.01	85.95±5.18	83.05±4.53
婺源	4.56±0.06	4.22±0.05	29.04±0.71	29.36±0.38	1.77±0.03	1.81±0.04	0.39±0.01	0.45±0.02	49.96±1.70	45.00±2.31
长沙	3.81±0.08	4.45±0.06	50.57±1.08	9.99±0.08	2.60±0.09	0.43±0.01	0.49±0.01	0.17±0.00	153.00±8.33	71.08±4.43
沅江	4.49±0.06	4.59±0.09	23.62±0.92	21.60±0.23	1.35±0.07	1.36±0.05	0.70±0.02	0.51±0.00	134.92±9.53	202.13±11.03

1.3 土壤线虫的分离鉴定及线虫生态指数计算

称取土壤 50 g，采用浅盘法分离土壤线虫^[9-10]。分离出的线虫在解剖镜下进行计数，并根据土壤的含水量，将其换算成每 100 g 干土含有的线虫数量。然后在每个样品中随机挑取 100~200 条线虫进行制片，并在生物显微镜下鉴定至属。样品中线虫数量低于 100 条的，将其全部挑出并鉴定。线虫鉴定参考《中国土壤动物检索图鉴》^[11]。根据线虫的取

食习性和消化系统的形态特征将其分为 4 个营养类群：食细菌类(Bacterivores)、食真菌类(Fungivores)、植物寄生类 (Plant-parasites)、捕食-杂食类(Omnivores-predators)。并主制改革要根据生活史特征对 *r*-对策者向 *k*-对策者过渡的线虫赋予不同的 *c-p* 值：1~5^[12]。

采用多种线虫生态学指数^[12-13]对土壤线虫的多样性及群落结构进行评价。

1) Shannon-Wiener 多样性指数: $H' = -\sum p_i \ln p_i$, 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。

2) Pielou 均匀度指数: $J = H' / \ln S$, 其中 H' 为 Shannon-Wiener 多样性指数, S 为鉴定分类单元的数目。

3) Simpson 优势度指数: $\lambda = \sum p_i^2$, 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。

4) 线虫通道指数 (Nematode channel ratio): $NCR = Ba / (Ba + Fu)$ 。

5) 瓦斯乐斯卡指数 (Wasilewska index): $WI = (Ba + Fu) / PP$; Ba 为食细菌线虫数量, Fu 为食真菌线虫数量, PP 为植食线虫数量;

6) 自由生活线虫成熟度指数 MI (Maturity index) 和植物寄生线虫成熟度指数 PPI (Plant parasite index): $MI(PPI) = \sum v_i \times f_i$, 其中 v_i 为根据自由生活线虫(植物寄生线虫)在生态演替中的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。

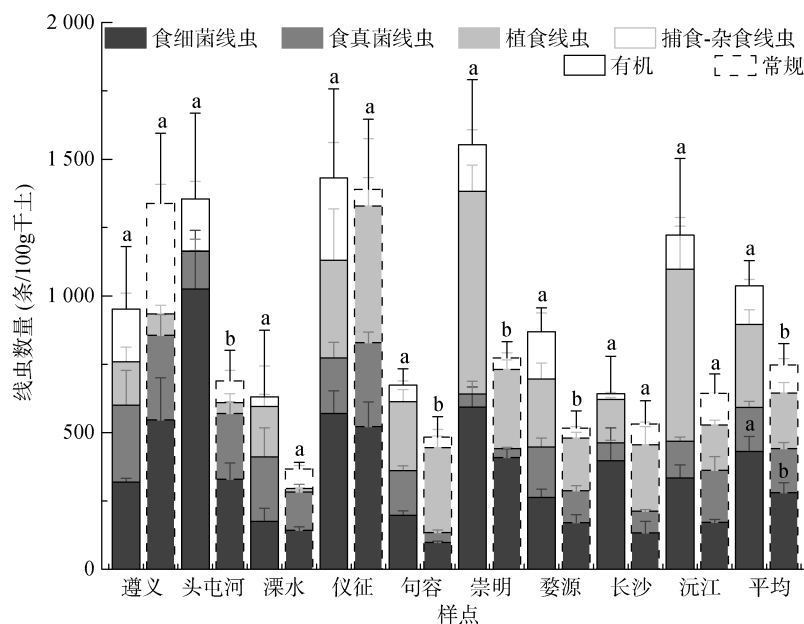
1.4 数据处理

数据统计采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 20.0 软件, 采用配对 t 检验来检验有机和常规种植下土壤线虫的差异, 分析前检验数据的正态分布, 必要时采用对数转换。否则采用非参数检验。并采用双因素方差分析 (Two-way ANOVA) 分析不同管理措施和地区对各变量的主效应和交互效应。采用 Statistica 7 软件对土壤线虫的营养类群进行主成分分析。以 $\alpha = 0.05$ 作为显著差异水平。制图采用 Origin 9.0 软件。

2 结果与分析

2.1 土壤线虫数量

有机种植样地的土壤线虫总数显著高于常规种植样地 ($P = 0.001$) (图 1)。这几乎适用于所有采样点。在所有调查样地中, 土壤线虫的数量为 370 ~ 1 600 条 (以 100 g 干土计, 下同), 其中崇明有机的线虫数量最大, 为 1 553 条, 溧水常规最少, 为 367 条。在有机种植样地中, 土壤线虫数量在 640 ~ 1 600 条之间, 平均为 1 037 条, 是常规种植样地线虫数量 (748 条) 的 1.4 倍。



(图中小写字母不同表示样点有机和常规处理之间差异显著 ($P < 0.05$))

图 1 不同样地中有机和常规种植的线虫数量差异

Fig. 1 Mean abundances of soil nematodes in different sampling sites

2.2 土壤线虫群落组成和营养类群结构

在本调查中, 共鉴定出 27 科 57 属线虫, 其中食细菌线虫 21 属, 食真菌线虫 9 属, 植食线虫 10 属, 捕食-杂食线虫 17 属。有机种植鉴定出 57 属线虫, 常规种植 51 属 (表 3)。所有样点中共有的线虫属包括食细菌线虫的头叶属 (*Cephalobus*)

和真头叶属 (*Eucephalobus*), 食真菌的滑刃属 (*Aphelenchoides*) 和丝尾垫刃属 (*Filenchus*) (表 3)。食细菌线虫的广杆属 (*Caenorhabditis*)、双胃属 (*Diplogaster*)、鹿角唇属 (*Cervidellus*)、威尔斯属 (*Wilsonema*) 和捕食-杂食线虫拟桑尼属 (*Thorneella*)、伊龙属 (*Ironus*) 仅在有机种植中出现。每个样地平

均有 3 个优势属,其数量占总个体数的 50% 以上,而稀有属和常见属的属数占总属数的 80% 以上。各样点有机样地和常规样地土壤线虫的优势属发生了变化,并且有机样地的优势属较常规样地有增加的趋势。

在所调查的样地中,食细菌线虫均为优势类群(表 3),分别占总数的 28.5%~76.6%(有机种植)和 21.4%~52.8%(常规种植)。除水稻种植样地外,

食真菌线虫在其余样地中为优势类群。植食线虫仅在头屯河有机种植中为稀有类群,在其余样地中为常见类群或优势类群。捕食-杂食线虫在 18 个样地中为常见类群或优势类群,在四大营养类群中所占比例平均约为 12.8%。有机种植中,食细菌线虫的数量平均为 422 条,显著高于常规种植($P<0.01$)(图 1),而其他营养类群数量无显著差异。

表 3 有机和常规种植样地土壤线虫的群落组成及平均丰度(%)
Table 3 Community components and mean abundances of nematodes under organic and conventional managements

管理措施	线虫属	c-p	属数	遵义	头屯河	溧水	仪征	句容	崇明	婺源	长沙	沅江	平均值
有机种植	食细菌线虫 Bacterivores		21	37.8	76.6	36.0	45.1	29.6	38.8	31.3	59.7	28.5	42.6
	原杆属 <i>Protorhabditis</i>	1		1.5	32.7*	4.6	18.2*	0.8		0.6	27.4*		9.5
	头叶属 <i>Cephalobus</i>	2		6.1	17.0*	2.5	7.4	9.9	5.9	6.4	13.8*	8.6	8.6
	真头叶属 <i>Eucephalobus</i>	2		7.3	7.2	22.0*	2.1	0.3	2.9	5.9	7.5	3.7	6.5
	中杆属 <i>Mesorhabditis</i>	1		18.8*	9.5	4.5	14.6*			0.6	0.8	0.4	5.5
	杆咽属 <i>Rhabdolaimus</i>	3						16.3*	26.5*				4.8
	小杆属 <i>Rhabditis</i>	1			1.5					12.9*	1.9	1.8	2.0
	无咽属 <i>Alaimus</i>	4		1.3			0.7	0.5	1.1	2.3		11.3*	1.9
	食真菌线虫 Fungivores		9	26.5	10.0	36.1	13.9	24.2	2.4	21.6	10.7	11.7	17.5
	丝尾垫刃属 <i>Filenchus</i>	2		8.1	2.1	10.2*	2.4	18.0*	1.2	8.0	2.2	3.1	6.2
	茎属 <i>Ditylenchus</i>	2		1.3	4.5	11.3*	4.6			7.8	4.7	4.2	4.3
	真滑刃属 <i>Aphelenchus</i>	2		14.6*	2.7	10.9*	5.2	0.9	0.2			1.0	4.0
	滑刃属 <i>Aphelenchoides</i>	2		2.2	0.7	0.6	1.8	5.2	1.0	2.5	3.8	2.9	2.3
	植食线虫 Plant-parasites		10	16.1	0.2	21.5	21.8	37.1	48.1	28.2	26.3	49.5	27.6
	潜根属 <i>Hirschmanniella</i>	3		1.9				19.1*	44.2*	6.3			8.0
	短体属 <i>Pratylenchus</i>	3							2.7	3.4	1.1	30.8*	4.2
	螺旋属 <i>Helicotylenchus</i>	3				21.5*				6.3			3.1
	针属 <i>Paratylenchus</i>	2			0.2					0.6	24.3*		2.8
	垫刃属 <i>Tylenchus</i>	2						18.0*	1.2	2.8		2.6	2.7
	半穿刺属 <i>Rotylenchulus</i>	3					21.8*						2.4
	根结属 <i>Meloidogyne</i>	2								3.2		12.2*	1.7
	裸矛属 <i>Psilenchus</i>	2		13.0*									1.4
	环属 <i>Criconea</i>	3								5.5	0.9	4.0	1.2
	捕食-杂食线虫 Omnivore-predators		17	19.7	13.3	6.3	19.2	9.1	10.6	18.9	3.3	10.3	12.3
	中矛线属 <i>Mesodorylaimus</i>	5		0.9		2.5	10.7*	3.4	6.9	3.5	0.3	2.7	3.4
	微矛线属 <i>Microdorylaimus</i>	4			11.8*		3.0			0.2			1.7
	孔咽属 <i>Aporcelaimus</i>	5		2.0	1.5	1.1	3.3	2.1		2.9		1.6	1.6
	单齿属 <i>Mononchus</i>	4		0.7						5.7	1.7	3.7	1.3
	真矛线属 <i>Eudorylaimus</i>	4		8.6		0.5				0.6			1.1

续表

管理措施	线虫属	c-p	属数	遵义	头屯河	滦水	仪征	句容	崇明	婺源	长沙	沅江	平均值
常规种植	食细菌线虫 Bacterivores		17	39.2	47.6	38.9	39.7	21.4	52.8	32.7	24.8	27.1	36.3
	头叶属 <i>Cephalobus</i>	2		6.7	13.8*	17.0*	22.3*	14.4*	14.0*	20.3*	12.1*	18.1*	15.3
	真头叶属 <i>Eucephalobus</i>	2		3.9	14.0*	7.4	2.4	2.7	9.7	5.6	3.5	5.4	6.1
	原杆属 <i>Protorhabditis</i>	1		3.9	7.3	3.1	10.0*	0.9		0.4	2.0		3.2
	中杆属 <i>Mesorhabditis</i>	1		17.4*	2.4	0.7	3.3		0.7		0.4		2.8
	杆咽属 <i>Rhabdolaimus</i>	3							21.3*				2.4
	拟丽突属 <i>Acrobeloides</i>	2			1.9	3.0	0.9		3.9		1.7		1.3
	盆咽属 <i>Panagrolaimus</i>	1			1.2	5.1		1.5	0.4	1.1	0.9		1.2
	食真菌线虫 Fungivores		9	22.7	35.2	37.9	23.3	7.2	4.5	22.5	15.7	28.8	21.8
	滑刃属 <i>Aphelenchoides</i>	2		5.5	26.8*	0.4	7.4	3.4	1.8	8.2	4.6	8.9	7.4
	茎属 <i>Ditylenchus</i>	2		3.5	1.2	21.5*	4.6	0.6	1.1	5.5	7.8	3.8	5.6
	丝尾垫刃属 <i>Filenchus</i>	2		6.7	1.4	6.5	3.5	3.3	1.5	7.3	3.2	6.2	4.4
	真滑刃属 <i>Aphelenchus</i>	2		6.8	5.5	6.9	7.8					7.2	3.7
	植食线虫 Plant-parasites		10	7.6	6.6	3.3	33.2	63.0	37.3	37.2	44.2	25.8	28.8
	潜根属 <i>Hirschmanniella</i>	3		1.6				54.8*	34.3*		0.3		10.4
	针属 <i>Paratylenchus</i>	2								3.1	42.1*		5.2
	环属 <i>Criconema</i>	3								30.6*			3.5
	螺旋属 <i>Helicotylenchus</i>	3		0.3		2.6	22.4*						2.9
	短体属 <i>Pratylenchus</i>	3			5.6	0.3				0.4		24.7*	2.8
	垫刃属 <i>Tylenchus</i>	2					0.7	6.0	3.0	3.1	1.8	0.3	1.7
	半穿刺属 <i>Rotylenchulus</i>	3					10.1*						1.2
	捕食-杂食线虫 Omnivore-predators		15	30.5	10.5	19.9	3.7	8.3	5.4	7.6	15.3	18.3	13.2
	中矛线属 <i>Mesodorylaimus</i>	5		19.3*	3.0	6.0	2.0	4.3	2.8	3.0	1.3	0.6	4.8
	孔咽属 <i>Aporcelaimus</i>	5		0.8	0.4	3.4	0.4	0.9		3.4	8.5	4.7	2.4
	单齿属 <i>Mononchus</i>	4		1.2							4.0	8.2	1.3
	微矛线属 <i>Microdorylaimus</i>	4			7.1		1.3				2.4		1.2
	异色矛属 <i>Achromadora</i>	3				5.6		1.0	2.4				1.0

注：1)鉴于篇幅过大，仅列出有机和常规样点中的常规属(10%≥丰度≥1%)和优势属(丰度>10%)；2)*：表示优势属。

对 9 个样点的有机和常规种植下的土壤线虫营养类群的丰度进行主成分分析。前两个主成分的累积方差贡献率为 78.19%(第一、二主成分分别为 42.87%和 35.32%)，表明全部信息的 78.19% 已被归纳为两个主成分，可以解释总方差的绝大部分。结果显示每个样点的有机和常规线虫群落结构发生了变化(图 2)。植食线虫在第一主成分上占有较大的载荷，食细菌线虫在第二主成分上占有较大的载荷。头屯河点、崇明点和长沙点的有机和常规处理在主成分二轴上出现了明显的分异。其余 6 个样点的有机和常规处理在主成分一轴上发生了明显的分异。

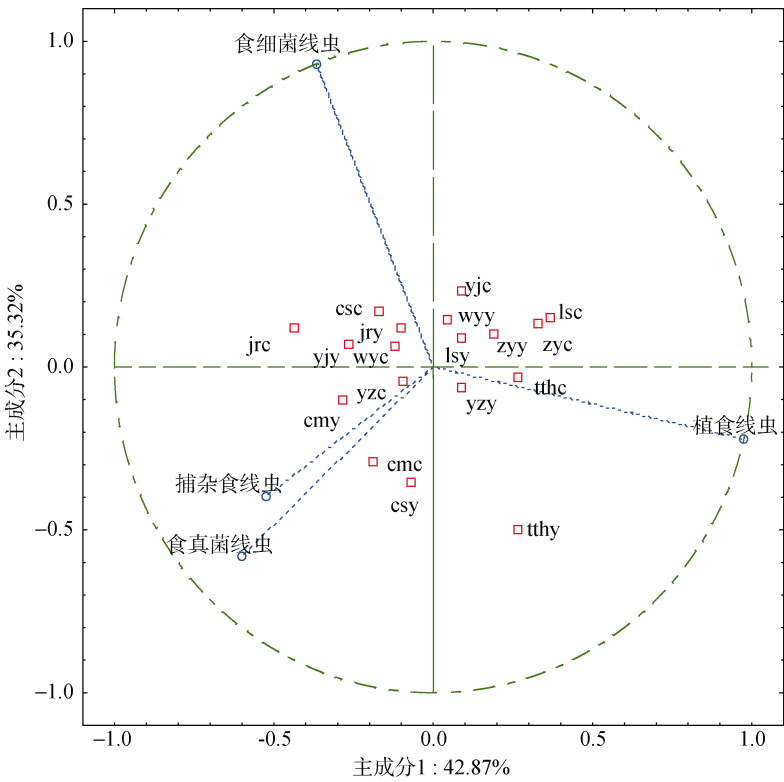
2.3 土壤线虫群落结构评价

通常用多样性指数(H')、均匀度指数(J)和优势度指数(λ)来评价线虫群落的多样性。多样性指数(H')越大表明土壤线虫的生物多样性越大。均匀度

指数越大(J)，表明线虫属丰度分布更均匀，土壤线虫的群落结构更稳定。在本试验中，均匀度指数(J)和多样性指数(H')情况基本一致。与常规相比，仪征、句容和婺源的有机种植的 H' 值和 J 值较大(表 4)，表明其有机农田土壤线虫的多样性更高，群落结构更稳定。

在优势度指数(λ)中优势属的权重比较大，优势度指数的大小可以反映优势属的分布情况，其值越小，表明优势属在群落中的作用越小，土壤线虫多样性越高，丰度分布越均匀，群落结构更加稳定。与常规相比，仪征、句容、婺源和长沙的有机种植的 λ 值较小。

土壤中的分解过程虽然最终依赖于植物资源作为基础，但可分为以细菌为基础的能量通道和分解速率较慢的真菌为主的通道^[14]。线虫通道指数



(zzy：遵义有机；zyc：遵义常规；tthy：头屯河有机；tthc：头屯河常规；lsy：溧水有机；lsc：溧水常规；zyy：仪征有机；zyc：仪征常规；jry：句容有机；jrc：句容常规；cmj：崇明有机；cmc：崇明常规；wyy：婺源有机；wyc：婺源常规；csy：长沙有机；csc：长沙常规；yjy：沅江有机；yjc：沅江常规)

图 2 有机和常规样地线虫营养类群的主成分分析图

Fig. 2 Principle component analysis of nematode community components under organic and conventional managements

表 4 有机和常规样地土壤线虫群落的生态指数
Table 4 Nematode ecological indices under organic and conventional managements

生态指数	管理措施	遵义	头屯河	溧水	仪征	句容	崇明	婺源	长沙	沅江
多样性指数 (<i>H'</i>)	有机	2.38 ± 0.08a	2.00 ± 0.08a	1.81 ± 0.08b	2.15 ± 0.08a	2.05 ± 0.09a	1.63 ± 0.16a	2.78 ± 0.09a	1.92 ± 0.15a	2.19 ± 0.12a
	常规	2.43 ± 0.14a	2.21 ± 0.17a	2.40 ± 0.16a	1.98 ± 0.15a	1.58 ± 0.21b	1.91 ± 0.08a	2.15 ± 0.06b	2.00 ± 0.20a	2.31 ± 0.12a
均匀度 (<i>J</i>)	有机	0.81 ± 0.04a	0.78 ± 0.04a	0.74 ± 0.03b	0.79 ± 0.02a	0.81 ± 0.00a	0.68 ± 0.02a	0.86 ± 0.02a	0.75 ± 0.03a	0.75 ± 0.05a
	常规	0.86 ± 0.03a	0.80 ± 0.03a	0.85 ± 0.02a	0.78 ± 0.05a	0.63 ± 0.06b	0.75 ± 0.02a	0.81 ± 0.02a	0.75 ± 0.07a	0.84 ± 0.01a
优势度 (<i>λ</i>)	有机	0.14 ± 0.02a	0.19 ± 0.02a	0.24 ± 0.03a	0.17 ± 0.02a	0.16 ± 0.01b	0.29 ± 0.02a	0.09 ± 0.02b	0.20 ± 0.03a	0.19 ± 0.04a
	常规	0.12 ± 0.02a	0.15 ± 0.04a	0.13 ± 0.02b	0.20 ± 0.04a	0.36 ± 0.08a	0.20 ± 0.02b	0.17 ± 0.01a	0.23 ± 0.06a	0.13 ± 0.01a
线虫通道指数 (<i>NCR</i>)	有机	0.58 ± 0.12a	0.88 ± 0.02a	0.51 ± 0.19a	0.73 ± 0.08a	0.55 ± 0.03b	0.95 ± 0.05a	0.59 ± 0.06a	0.84 ± 0.03a	0.71 ± 0.01a
	常规	0.63 ± 0.03a	0.58 ± 0.05b	0.51 ± 0.07a	0.63 ± 0.01a	0.74 ± 0.04a	0.92 ± 0.01a	0.59 ± 0.02a	0.60 ± 0.08b	0.49 ± 0.07b
瓦斯乐斯卡 指数 (<i>WI</i>)	有机	4.10 ± 0.51a	175.00*	6.60 ± 3.41b	4.95 ± 3.23a	1.48 ± 0.17a	0.86 ± 0.09b	2.03 ± 0.48a	2.86 ± 0.65a	0.84 ± 0.17b
	常规	16.33 ± 6.69a	27.57 ± 23.43	25.56 ± 5.48a	2.95 ± 1.65a	0.47 ± 0.08b	1.56 ± 0.14a	1.49 ± 0.08a	1.00 ± 0.26b	2.17 ± 0.08a
自由生活线 虫成熟指数 (<i>MI</i>)	有机	2.29 ± 0.13b	1.78 ± 0.04b	2.18 ± 0.02b	2.32 ± 0.31a	2.61 ± 0.11a	3.06 ± 0.24a	2.58 ± 0.41a	1.63 ± 0.18b	2.92 ± 0.08a
	常规	2.76 ± 0.09a	2.14 ± 0.09a	2.41 ± 0.03a	1.99 ± 0.08a	2.50 ± 0.08a	2.47 ± 0.04a	2.34 ± 0.04a	2.65 ± 0.11a	2.72 ± 0.05b
植物寄生线 虫成熟指数 (<i>PPI</i>)	有机	2.20 ± 0.03a	2.00*	3.00 ± 0.00a	3.00 ± 0.00a	2.53 ± 0.17a	2.97 ± 0.02a	2.77 ± 0.01a	2.08 ± 0.02a	2.72 ± 0.18a
	常规	2.67 ± 0.33a	3.00 ± 1.00	2.89 ± 0.11a	2.97 ± 0.02a	2.90 ± 0.06a	2.93 ± 0.02a	2.83 ± 0.06a	2.01 ± 0.01b	2.96 ± 0.03a
成熟度指数 (<i>PPI/MI</i>)	有机	0.97 ± 0.07a	1.16*	1.38 ± 0.01a	1.35 ± 0.20a	0.97 ± 0.07a	0.98 ± 0.07b	1.14 ± 0.21a	1.31 ± 0.14a	0.93 ± 0.06b
	常规	0.98 ± 0.14a	1.38 ± 0.09	1.20 ± 0.05b	1.50 ± 0.06a	1.16 ± 0.06a	1.18 ± 0.01a	1.21 ± 0.02a	0.76 ± 0.03b	1.09 ± 0.02a

注：表中小写字母不同表示有机和常规处理之间差异显著($P<0.05$)；* 头屯河样点中只有 1 块有机样地有植食线虫。

(*NCR*)能反映出不同分解通道在分解过程中的重要性，其值在 0(分解过程完全由真菌控制)和 1(分解过程完全由细菌控制)之间。所调查样地的 *NCR* 值都大于 0.5，表明土壤有机质的分解途径均以细菌

通道为主。除遵义和句容外，其余 7 个样点有机种植的 *NCR* 值均大于常规。

瓦斯乐斯卡指数(*WI*)用于分析土壤食物网的矿化途径，反映土壤的健康状况。低的 *WI* 值表明矿化途径是从植物到植食性线虫，而高的 *WI* 值表明矿化途径主要是由食微线虫参与^[15]。*WI* 值>1，表明土壤中食微线虫数量大于植食性线虫的数量，土壤处于相对健康的状态^[16]。在 9 个样点中，*WI* 值基本都大于 1，表明土壤均处于相对健康的状态。头屯河、仪征、句容、婺源和长沙的有机种植的 *WI* 值均大于常规。

自由生活线虫成熟度指数(*MI*)和植食性线虫成熟度指数(*PPI*)是根据线虫功能类群对环境变化的反应，进而表明线虫群落的演替状况和土壤的营养状况以及受外界干扰的程度^[17]。*MI* 越小，表明土壤受外界扰动较大(*c-p* 值大的线虫的减少)或者表明土壤呈营养富集状态(*c-p* 值小的线虫的大量繁殖)。*PPI* 值越大，表明地上植被生长状况相对较好。*PPI/MI* 值可用于评价不同土壤的营养状况及反映土壤生态系统对外界干扰的恢复程度。*PPI/MI* 值

越小，表明土壤较肥沃，线虫主要从分解土壤有机质的土壤微生物获取营养^[18]。仪征、句容、崇明、婺源和沅江有机种植的 *MI* 值大于常规的，表明这些地区的有机农田所受的环境干扰较小。溧水、仪征、崇明和长沙有机种植的 *PPI* 值大于常规，表明其有机种植地上植被生长状态较好。除溧水和长沙以外的 7 个样点的有机种植的 *PPI/MI* 值小于常规的，表明这些地区的有机农田的土壤状况较好，恢复的程度较好。

2.4 土壤线虫与土壤理化性质的相关关系

表 5 是有机管理措施下，土壤线虫与土壤理化性质的相关性关系。土壤线虫数量与土壤全磷有显著的正相关性。在营养类群方面，食细菌线虫与土壤 pH 呈显著正相关性，与土壤全磷和速效钾有极显著的正相关性。植食线虫与土壤有机质和速效钾有显著的负相关性。在线虫生态指数方面，*H'*、*J*、 λ 、*NCR* 与土壤理化性质的相关性未达到显著水平。*WI* 与土壤有机质、全磷和速效钾呈极显著的正相关性。*MI* 与土壤有机质、全氮和速效钾呈显著的负相关性。*PPI* 与土壤有机质、全氮呈极显著的负相关性。

表 5 有机样地线虫数量、营养类群、生态指数与土壤理化指标的相关系数
Table 5 Correlation coefficients between nematode abundance, trophic groups, ecological indices and soil physical-chemical properties under organic management

指标	pH	有机质	全氮	全磷	速效钾
线虫数量	0.368	-0.153	-0.182	0.474*	0.107
食细菌线虫数量	0.402*	0.324	0.197	0.751**	0.560**
食真菌线虫数量	0.199	-0.149	-0.111	0.032	0.051
植食线虫数量	-0.020	-0.429*	-0.368	-0.118	-0.453*
捕杂食线虫数量	0.346	-0.244	-0.233	0.323	0.078
多样性指数(<i>H'</i>)	-0.329	-0.088	0.000	-0.352	-0.236
均匀度指数(<i>J</i>)	-0.141	-0.058	-0.014	-0.251	-0.008
优势度指数(λ)	0.269	0.059	-0.005	0.339	0.116
线虫通道指数(<i>NCR</i>)	0.076	0.283	0.225	0.362	0.162
瓦斯乐斯卡指数(<i>WI</i>)	0.254	0.408*	0.229	0.565**	0.809**
自由生活线虫成熟指数(<i>MI</i>)	0.052	-0.583**	-0.525**	-0.225	-0.473*
植食寄生线虫成熟指数(<i>PPI</i>)	0.310	-0.726**	-0.670**	0.142	-0.217
成熟度指数(<i>PPI/MI</i>)	0.010	0.096	0.092	0.119	0.205

注：*表示在 $P<0.05$ 水平(双侧)上显著相关；**表示在 $P<0.01$ 水平(双侧)上显著相关。

3 讨论与结论

3.1 有机种植土壤线虫总数和群落结构

在本研究中,有机种植条件下的土壤线虫总数显著高于常规种植，这主要是因为有机种植下 *c-p* 值为 1 的食细菌线虫和 *c-p* 值为 4 的捕杂食线虫的

数量显著增加。叶成龙等^[19]研究小麦-玉米轮作体系下施肥对土壤线虫群落结构的影响发现，添加秸秆和猪粪的有机肥处理能够显著增加食细菌线虫的丰度；Villenave 等^[20-21]和 Liang 等^[20-21]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。由于有机肥能够增加微生物的数量^[22-23]，从而进一步为食微线虫(即食细菌线虫、食真菌线虫和杂食性线虫)提供食物来源。此外，有机肥也能够促进植物根系的生长和增加根系分泌物进而为某些线虫提供食物来源，例如直接取食根部的植食性线虫，取食根系微生物(如菌根真菌)的食真菌线虫和以植物分泌物或凋落物为食物的杂食性线虫^[24]。施用粪肥和作物残茬等有机物质能够提高土壤线虫总数的 30% ~ 120%^[21, 25-26]。

综合所有采样点的平均值来看，有机种植条件下的食细菌线虫数量显著高于常规种植。有研究表明，有机种植的土壤总有机碳、氮、磷含量显著提高，土壤体积质量下降，pH 更接近于中性，土壤微生物量以及土壤酶活性也显著高于常规^[27-29]。有机种植方式下，土壤质地和土壤肥力得到了很大的改善。同时，相关分析显示，土壤有机质、全氮、全磷和速效钾的增加有利于食细菌线虫数量的繁殖(表 5)。尤其在头屯河和长沙两个采样点，其有机种植的食细菌线虫数量显著高于常规种植(表 3)。头屯河和长沙两地施用较高量的畜禽粪便(15 ~ 40 t)，因而促进了食细菌线虫原杆属 *Protorhabditis* 数量大量增加(增幅为 127% ~ 348%)。原杆属 *Protorhabditis* 是 $c-p$ 值为 1 的富集类线虫，对于养分的添加能够产生迅速响应。 $c-p$ 值为 1 的食细菌线虫数量的增加是有机种植条件下食细菌线虫数量增加的主要原因。然而值得一提的是，在句容和崇明两个样点中，有机种植 $c-p$ 值为 1 和 2 的食细菌线虫数量较常规相比平均分别减少 62.5% 和 22.6%，

而 $c-p$ 值为 3 的食细菌线虫数量则大幅度增加。这可能与水田和旱地不同的土壤环境有关。同时表明了食细菌线虫由 r -策略者向 k -策略者的转变，另外， $c-p$ 值为 3 的食细菌线虫在有机年限较长(大于 10 年)的溧水、婺源、长沙、沅江样点中数量都有增加，而在有机年限较短的遵义、头屯河和仪征点中数量均有减少。由此表明，在长期的有机管理措施下，食细菌线虫的群落有向更高阶段的生态系统发展的趋势。

与常规种植相比，有机种植的土壤食真菌线虫的数量并没有显著增加(除句容样点外)。在句容样点，有机种植的食真菌线虫的数量能够增加，这是由于丝尾垫刃属 *Filenchus* 的相对丰度从常规种植的 3.3% 增加到 18.0%。这可能是由于句容所用的有机肥料主要是红花草，而其他样点所用的肥料则主要是粪肥。植物的根茎叶等残茬被证明对食真菌线虫的生长有较大促进作用。刘婷等^[30]研究发现，在稻麦轮作的农田生态系统下施用秸秆比猪粪更有益于食真菌线虫数量的增加，尤其是丝尾垫刃属 *Filenchus*。Villanave 等^[25]的研究中也有相似结果。这可能是由于植物体中较易分解的可溶性化合物和半纤维素等可依靠细菌快速分解，而其中较难分解的物质如木质素等则依靠真菌分解，真菌为其主要的分解微生物且分解耗时很长(一般为 4 ~ 6 个月)^[31-32]，因而可以为食真菌线虫提供长久且丰富的食物来源。

总体而言，有机种植和常规种植下的植食线虫和杂食捕食性线虫的丰度均无显著差异。方差分析显示，有机管理措施对植食线虫也产生了一定的影响(表 6)，但是由于管理措施和样点之间产生

表 6 线虫数量和生态指数方差分析
Table 6 Two-way analyses of variances for nematode populations and ecological indices

指标	管理措施		样点		管理措施×样点	
	<i>F</i> -test	<i>P</i> -value	<i>F</i> -test	<i>P</i> -value	<i>F</i> -test	<i>P</i> -value
线虫总数	10.347	**	5.599	***	1.779	NS
食细菌线虫	15.492	***	10.917	***	4.615	***
食真菌线虫	0.000	NS	4.921	***	1.245	NS
植食寄生线虫	4.411	*	5.397	***	2.455	*
捕杂食线虫	2.797	NS	5.425	***	3.771	***
多样性指数(<i>H'</i>)	0.012	NS	6.68	***	4.163	***
均匀度指数(<i>J</i>)	0.447	NS	3.056	*	3.141	***
优势度指数(<i>λ</i>)	0.017	NS	3.839	***	3.881	***
线虫通道指数(<i>NCR</i>)	4.662	*	5.871	***	2.572	*
瓦斯乐斯卡指数(<i>WI</i>)	40.606	***	60.196	***	36.39	***
自由生活线虫成熟指数(<i>MI</i>)	0.814	NS	6.905	***	5.035	***
植物寄生线虫成熟指数(<i>PPI</i>)	14.619	***	15.992	***	3.608	***
成熟度指数(<i>PPI/MI</i>)	0.396	NS	4.699	***	3.213	***

注：NS 表示没有显著差异；* 表示在 $P<0.05$ 水平差异显著；** 表示在 $P<0.01$ 水平差异显著；***表示在 $P<0.001$ 水平差异显著。

了较强的交互作用,在较多样点下,表现出不一致的趋势。在头屯河、仪征、句容等有机种植年限较短的样点中,其植食线虫的数量低于常规种植,原因是植食性线虫与土壤有机质含量、速效钾呈显著的负相关关系,这和前人的许多研究结果一致,即有机肥的施用能够抑制土壤中植食性线虫的生长^[26, 33]。然而在溧水、崇明、婺源和沅江等有机年限较长的样点中,其植食线虫数量较常规种植均有不同幅度增加。也有研究表明有机肥能够促进植物寄生线虫的生长,是因为施用有机肥后根系生物量的增加为植物寄生线虫提供了更多的取食位点而导致植物寄生线虫丰度的增加^[34]。同时,从常规种植向有机种植转换的初期很可能会出现减产,尤其是在原来严重依赖化肥和农药投入的地区,故在长期实行有机种植措施的地区植食线虫的数量会因作物产量而增长^[33]。此外,这可能还与捕食性线虫对植食性线虫的调控作用有关。

3.2 有机种植土壤线虫生态指数

在本研究中, H' 与 J 趋势一致,与 λ 相反,然而 H' 、 J 、 λ 在有机种植和常规种植中未达显著差异。方差分析同样显示,有机管理措施并没有显著提高线虫的多样性指数(表 6)。甚至在所调查的样点中,更多的样点表现出常规管理措施下线虫的多样性指数更好的趋势(表 4)。多样性指数与线虫的物种丰富度和均匀度有关。一般来讲,物种丰富度越高,均匀度越高,多样性指数越大。并且多样性指数(H')对物种的丰富度更为敏感^[35]。在仪征、句容、婺源这 3 个样点中,有机种植的线虫丰富度指数(属数)明显高于常规种植,其多样性指数也优于常规。但在其余 6 个样点中,有机种植的线虫丰富度指数(属数)与常规种植差异不大,因此,多样性指数则对线虫的均匀度更为敏感。有机种植的优势种群要多于常规,且个别优势种群的数量比例占绝对优势(例如沅江其中一个有机样地的优势属短体属 *Pratylenchus* 占整个线虫的 49.7%),打破了均匀的程度,降低了正常属和稀有属对指数的贡献。同时也有研究表明,施肥对 H' 的影响因作物而异^[26, 36],主要取决于不同线虫属对作物根系分泌物的不同响应。

方差分析显示,不同的管理措施对 NCR 和 WI 指数有显著影响。整体而言,有机种植 NCR 值要高于常规。这是由于有机管理措施下,食细菌线虫的数量显著增长的原因导致。而 WI 值与 NCR 值的趋势略有不同,崇明和沅江样点的有机样地的 WI 值显著低于常规,这与其植食线虫数量的显著增加有关。而这两个样点实施有机管理措施的年限长达十余年。因

此,我们推断长期的有机种植可能导致植食线虫数量的增加,但在茶园点的表现不明显,原因可能是植食线虫不易刺破茶树粗壮根系的表皮。头屯河有机样点的 WI 值高达 175.0,原因可能是地膜的使用改变了小气候条件而导致了植食线虫的减少。另外,也有相关研究表明, NCR 值和 WI 值在不同作物间的差别很大^[37]。

方差分析显示,管理措施对 PPI 指数有显著影响。在年限较长的有机样地中, $c-p$ 3 的植食性线虫数量均有增加,而在年限较短的有机样地中情况则相反。除仪征有机样地只有 $c-p$ 3 的植食性线虫外, $c-p$ 2 的植食性线虫在有机年限较短的样地中,数量均有增加。故在所调查的样地中,有机年限较长的样地 PPI 值增加,年限较短的样地 PPI 值下降。而在年限较长的婺源和沅江样地中, PPI 值要小于常规的,可能与其使用少量的粪肥(0.45 ~ 1.5 t),促进 $c-p$ 2 植食性线虫的生长有关。研究表明,有机管理可以显著增加线虫的 MI 值,降低 PPI/MI 值^[19]。但在本研究中,遵义、头屯河、溧水和长沙 4 个样点的有机样地 MI 值均小于常规种植,原因是这些有机样地和其他样地相比,施用了大量的有机肥和畜禽粪便,使得食细菌线虫大量繁殖。同样的道理,溧水和长沙两个样点的有机样地分别施加了最多的有机肥和畜禽粪便,使得 PPI/MI 值增加。而在其余地区,有机样地的 PPI/MI 值都小于常规。由此可见,过量有机肥的施用对土壤干扰程度较大^[38]。

综上所述,有机种植下土壤线虫的数量显著增加。有机种植对于土壤线虫群落结构的影响依赖于有机肥的种类和施用量。并且线虫生态指数能在一定程度上指示有机种植中土壤线虫群落受干扰的程度和土壤的营养状况。因此,开展对土壤线虫群落特征的调查研究,有利于揭示有机种植对土壤生态系统的影响,从而为有机农业的可持续发展提供理论指导。

参考文献:

- [1] 欧阳喜辉,周绪宝,王宇. 有机农业对土壤固碳和生物多样性的作用研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(11): 224-230
- [2] 李现华,张树礼,尚学燕,等. 发展有机农业与生物多样性保护[J]. 内蒙古环境保护, 2005, 17(2): 11-15
- [3] Tu C, Ristaino J B, Hu S J. Soil microbial biomass and activity in organic tomato farming systems: Effects of organic inputs and straw mulching[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38(2): 247-255
- [4] Melnychuk N A, Olfert O, Youngs B, et al. Abundance and diversity of Carabidae (Coleoptera) in different farming

- systems[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2003, 95(2): 69–72
- [5] Weibull A C, Ostman O, Granqvist A. Species richness in agroecosystems: The effect of landscape, habitat and farm management[J]. *Biodiversity & Conservation*, 2003, 12(7): 1 335–1 355
- [6] Yeates G W, Bongers T. Nematode diversity in agroecosystems[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 1999, 74(1–3): 113–135
- [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): 1 541–1 546
- [8] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 12–290
- [9] 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
- [10] 王楠, 陈小云, 刘满强, 等. 红壤旱地和水田土壤用量对线虫分离效果的影响[J]. *土壤*, 2015, 47(1): 128–134
- [11] 尹文英, 胡圣豪, 沈韞芬, 等. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 51–89
- [12] Bongers T. The maturity index: An ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition[J]. *Oecologia*, 1990, 83(1): 14–19
- [13] 刘贝贝, 叶成龙, 虞丽, 等. 不同植被类型的滩涂湿地土壤线虫群落特征[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(11): 3 057–3 064
- [14] Moore J C, Hunt H W. Resource compartmentation and the stability of real ecosystems[J]. *Nature*, 1988, 333(6170): 261–263
- [15] Wasilewska L. Long-term changes in communities of soil nematodes on fen peat meadows due to the time since their drainage[J]. *Ekologia Polska*, 1991, 39(1): 59–104
- [16] 刘婷, 叶成龙, 陈小云, 等. 不同有机肥源及其与化肥配施对稻田土壤线虫群落结构的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(12): 3 508–3 516
- [17] Bongers T, Ferris H. Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1999, 14(6): 224–228
- [18] 董道峰, 胡诚, 曹志平. 不同农业管理措施对土壤线虫的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(1): 80–85
- [19] 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): 997–1 005
- [20] Villenave U, Bongers T, Ekschmitt K, et al. Changes in nematode communities after manuring in millet fields in Senegal[J]. *Nematology*, 2003, 5(3): 351–358
- [21] Liang W, Lou Y, Li Q, Zhong S, et al. Nematode faunal response to long-term application of nitrogen fertilizer and organic manure in Northeast China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(5): 883–890
- [22] Esperschuetz J, Gattinger A, Mader P, et al. Response of soil microbial biomass and community structures to conventional and organic farming systems under identical crop rotations[J]. *Fems Microbiology Ecology*, 2007, 61(1): 26–37
- [23] 夏昕, 石坤, 黄欠如, 等. 长期不同施肥条件下红壤性水稻土微生物群落结构的变化[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3): 697–705
- [24] Ge T, Liu C, Yuan H, et al. Tracking the photosynthesized carbon input into soil organic carbon pools in a rice soil fertilized with nitrogen[J]. *Plant & Soil*, 2015, 392(1/2): 17–25
- [25] Villenave C, Saj S, Pablo A, et al. Influence of long-term organic and mineral fertilization on soil nematofauna when growing *Sorghum bicolor* in Burkina Faso[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2010, 46(7): 659–670
- [26] Hu C, Qi Y. 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
- [27] 汪润池, 宗良纲, 邱晓蕾, 等. 有机与常规种植蔬菜地土壤微生物群落特征的比较[J]. *南京农业大学学报*, 2012, 35(2): 99–104
- [28] 高嵩涓, 曹卫东, 白金顺, 等. 长期冬种绿肥改变红壤稻田土壤微生物生物量特性[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 902–910
- [29] 姜蓉, 申思雨, 吕贻忠. 华北地区有机种植与常规种植土壤质量比较研究[J]. *土壤*, 2015, 47 (4): 805–811
- [30] 刘婷, 叶成龙, 李勇, 等. 不同有机类肥料对小麦和水稻根际土壤线虫的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(19): 6 259–6 268
- [31] McMahon S K, Williams M A, Bottomley P J, et al. Dynamics of microbial communities during decomposition of carbon-13 labeled ryegrass fractions in soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(4): 1 238–1 247
- [32] Henriksen T M, Breland T A. Carbon mineralization, fungal and bacterial growth, and enzyme activities as affected by contact between crop residues and soil[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2002, 35(1): 41–48
- [33] 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
- [34] Wang K H, Mcsorley R, Marshall A, et al. Influence of organic *Crotalaria juncea* hay and ammonium nitrate fertilizers on soil nematode communities[J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 31(3): 186–198
- [35] 许晴, 张放, 许中旗, 等. Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数若干特征的分析及“稀释效应”[J]. *草业科学*, 2011, 28(4): 527–531
- [36] Bulluck L R, Barker K R, Ristaino J B. Influences of organic and synthetic soil fertility amendments on nematode trophic groups and community dynamics under tomatoes[J]. *Applied Soil Ecology*, 2002, 21(2): 233–250
- [37] 姜翼来, 李慧, 姜勇, 等. 设施菜地长期施肥对土壤线虫群落结构和多样性的影响[J]. *土壤通报*, 2013, 44(1): 106–109
- [38] 江春, 黄菁华, 李修强, 等. 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(6): 1 235–1 241

Survey on Ecological Characteristics of Soil Nematodes in Organic Agriculture in China

MAO Miao¹, WANG Lei², XI Yunguan², XIAO Xingji², WANG Hui³,
LI Huixin¹, JIAO Jiaguo^{1*}, WANG Xia^{2*}

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2 Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China; 3 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: In order to know the ecological characteristics of soil nematodes in organic agriculture, soil nematode abundance and diversity were compared in 9 organic cultivation and conventional cultivation soils from East, Central and West China during the period of 2013—2014. The results showed that 27 families and 57 genera of nematodes were identified. The total number of nematodes was about 1 037 individuals per 100 g dry soil with organic management, remarkably different from that with conventional management, so was the bacterivores. The bacterivorous nematodes (*Cephalobus* & *Eucephalobus*) and the phytophagous nematodes (*Aphelenchoides* & *Filenchus*) existed in all the organic sampling sites. From the aspect of nematode ecological indices, overall, Wasilewska index (*WI*) and Nematode Channel Ratio (*NCR*) of the organic farming system indicated that soil conditions were relatively healthy with bacteria dominant in the decomposition of the soil debris food web. While no significant difference was found between the organic and conventional managements in other ecological indices. Significant correlations were observed between soil physicochemical characteristics and the nematode numbers, *WI*, *MI* and *PPI*.

Key words: Organic agriculture; Soil nematode; Community structure