

# 江苏省不同农业区土壤线虫群落分布特征<sup>\*</sup>

焦加国<sup>\*\*</sup> 刘贝贝 毛 妙 叶成龙 虞 丽 胡 锋 李辉信  
(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

**摘 要** 调查了江苏省不同农业区农田土壤线虫群落多样性,分析了土壤线虫数量和群落结构与土壤环境因子的关系,并探讨了土壤线虫对土壤健康的生物指示作用.结果表明:农田土壤线虫共鉴定出2纲7目19科41属.6个农业区的土壤线虫的密度、群落组成均具有一定的差异性.沿海农业区的线虫数量最多(每100 g干土400条),显著高于徐淮、宁镇扬和沿江农业区( $P<0.05$ ),而沿江农业区的土壤线虫数量最少(每100 g干土232条),这可能是由于土壤质地、年均降雨量和年均气温等因素的差异造成的.地理位置相近的农业区线虫优势属相似.相关性分析结果显示,土壤线虫数量与土壤有机质、全氮、速效氮、速效钾和速效磷均呈显著正相关关系;RDA分析表明,土壤全氮含量、速效磷及pH对线虫群落种属组成影响较大.分析江苏省农田土壤线虫群落空间分布特征,可为农田土壤生态系统健康状况评价提供数据支撑.

**关键词** 江苏省; 农业区; 土壤线虫; 群落结构

**文章编号** 1001-9332(2015)11-3489-08 **中图分类号** S154.38 **文献标识码** A

**Characteristics of soil nematode community of different agricultural areas in Jiangsu Province, China.** JIAO Jia-guo, LIU Bei-bei, MAO Miao, YE Cheng-long, YU Li, HU Feng, LI Hui-xin (College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2015, 26(11): 3489–3496.

**Abstract:** This paper investigated the genus diversity of soil nematodes of different agricultural areas in Jiangsu Province, analyzed the relationship between soil nematodes and soil environmental factors, and discussed the roles of soil nematodes as biological indicators of soil health. The results showed that, a total of 41 nematode genera were found in all six agricultural areas, belonging to 19 families, 7 orders, 2 classes. The numbers and community compositions of nematodes were obviously influenced by soil texture, fertilization and tillage practices. In all six agricultural areas, the numbers of nematodes in coastal agricultural area (400 individuals per 100 g dry soil) were significantly larger than that in Xuhuai, Ningzhenyang, and riverside agricultural areas. While the smallest number of nematodes was found in Yanjiang agricultural area (232 individuals per 100 g dry soil), which might be due to the differences in soil texture, annual rainfall and annual air temperature and other factors. The dominant genera of nematodes were similar in the adjacent agricultural areas. Correlation analysis showed that there was a significant positive correlation between the number of soil nematodes and levels of soil nutrients (soil organic matter, total nitrogen, available nitrogen, available potassium and available phosphorus). Redundancy analysis (RDA) indicated the total nitrogen, available potassium and pH obviously affected some soil nematode genera. The analysis of spatial distribution characteristics of soil nematode community in farmland of Jiangsu Province could provide data for health assessment of agricultural ecosystems.

**Key words:** Jiangsu Province; agricultural area; soil nematodes; community structure.

在农田生态系统中,生物多样性是维持农田生态系统稳定性和可持续性的前提条件.土壤动物是

分解作用和养分矿化作用等生态过程的主要调节者<sup>[1-3]</sup>.线虫作为土壤中数量最丰富的后生动物,其生活史和取食类型多样,在生态系统中发挥着重要作用,并在土壤食物网中扮演者不同的功能.土壤动物组成尤其是土壤线虫营养类群结构的变化与土壤

<sup>\*</sup> 江苏省野生动植物物种资源调查项目(R201061)和公益性行业(环保)科研专项(2013467036)资助.

<sup>\*\*</sup> 通讯作者. E-mail: jiaguojiao@njau.edu.cn

2015-01-04 收稿,2015-07-23 接受.

生态系统过程紧密联系,其群落组成能够反映气候条件、土壤质地、土壤有机质含量以及自然和人为的扰动情况等<sup>[4-7]</sup>.因此,线虫作为土壤健康指示生物受到广泛重视,并在多种生态系统中得到应用.以往对于线虫的研究大多集中在对农作物有害的植物寄生线虫,对线虫的生态学和群落结构的研究也大多集中在自然和半自然生态系统中,对区域范围农田生态系统中土壤线虫的关注较少<sup>[8]</sup>.随着人们对土壤线虫的多样性及其生态重要性的广泛关注,土壤线虫越来越多地被用来表征农田土壤生物多样性及其可持续性的指示生物,进而揭示农田土壤健康状况<sup>[9]</sup>.

本研究主要调查研究了江苏省徐淮、里下河、沿海、沿江、宁镇扬和太湖 6 大农业区的土壤线虫的群落结构,揭示江苏省不同农业区的土壤线虫分布特征及其与土壤养分的关系.研究结果对于保护农田土壤生物多样性,维护农田土壤健康和可持续发展具有重要的指导意义.

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 调查区概况及样点选择

根据江苏省自然条件的地域性、土壤资源类型组合的统一性、农林牧渔资源利用开发的基本一致性以及社会经济条件和耕地土壤养分状况及其变化规律等,将江苏省分为 6 大改良利用区,分别为:徐淮、里下河、沿海、沿江、宁镇扬、太湖农业区<sup>[10]</sup>.每个样区的样点数设为 6 个,基本均匀分布在各个农业区,所有样点的种植方式均为稻麦轮作.于 2010

年 6 月小麦收获前后进行土壤样品采集工作,采样深度为 0~15 cm,并用 GPS 定位.基本情况见表 1.

### 1.2 测定指标与方法

**1.2.1 土壤理化指标的测定** 土壤性质的测定均采用常规法.土壤含水量采用烘干法;pH 采用水土比 2.5:1,酸度计测定;有机质采用重铬酸钾加热法;全氮采用开氏法;速效氮采用碱解扩散法;速效磷采用碳酸氢钠浸提钼锑抗比色法;速效钾采用乙酸铵浸提火焰光度法<sup>[11]</sup>.

**1.2.2 土壤线虫的分离与鉴定** 土壤线虫采用 Baermann 浅盘法分离,称取 50.0 g 鲜土置于 Baermann 浅盘上的滤纸上,加水使之完全润湿,在 22 ℃ 下培养 48 h,浅盘中的水过 500 目(孔径 25 μm)筛分离线虫.

线虫在体视镜下计数,最终线虫丰度(abundance)以每 100 g 干土中线虫总数来表达;记数后在 60 ℃ 下杀线虫 2 min,并保存在 4% 的福尔马林中<sup>[12]</sup>.每个样本随机对 100 条线虫进行鉴定,线虫属鉴定参考《中国土壤动物图鉴》<sup>[13]</sup>.对于线虫数少于 100 条的样本,对所有线虫进行鉴定划分.

根据线虫的取食习性和食道特征将其分成以下 4 个营养类群<sup>[14]</sup>:食细菌类(bacterivores, BF)、食真菌类(fungivores, FF)、植物寄生类(plant-parasites, PP)、捕食-杂食类(predators-omnivores, PO),并对线虫划分不同的生活史 c-p 值<sup>[15-16]</sup>.

**1.2.3 土壤线虫生态指数** 各营养类群相对丰度分别为每 100 g 干土中植食性线虫、食细菌线虫、食真菌线虫、捕食性线虫和杂食性线虫占线虫总数的百

表 1 江苏省 6 个农业区概述  
Table 1 Summary of six agricultural areas in Jiangsu Province

农业区 Agricultural area	气候类型 Climate type	区域范围 Area coverage	土壤类型 Soil type	年均气温 Annual average temperature (℃)	年均降雨量 Annual average precipitation (mm)
徐淮 Xuhuai	暖温带	江苏省北部的沂、沭河洪积、冲积平原和东部的滨海沉积平原	黄潮土、棕潮土、砂姜黑土等	13~14	800~950
里下河 Lixiahe	北亚热带	主要包括洪泽、金湖、楚州及洪泽湖、宝应湖、高邮湖周边的县市	水稻土	13~14	1000
沿海 Coastal	北亚热带	北起赣榆县锈针河口,南至启东市长江口,西至串场河、通榆公路以东一线,东至滨海滩涂	滨海盐土、盐潮土等	13~15	900~1050
沿江 Riverside	北亚热带	位于长江两岸,以江北为主,包括镇江新区、扬中、江都、邗江、靖江、泰兴、姜堰、如皋、通州、海门、江阴、张家港、常熟、太仓等县的沿江部分	潮土、水稻土等	14~15	900~1100
宁镇扬 Ningzhenyang	北亚热带	位于江苏省的西南部,包括镇江市、南京市的郊县、扬州市大部分县市及宜兴、溧阳的部分地区	黄棕壤、水稻土等	14~16	940~1200
太湖 Taihu	北亚热带	位于江苏省东南部,北和东北以长江、张家港及盐铁塘与沿江农业区为界,西和西南基本以 10 m 等高线与宁镇扬农业区为界	水稻土等	15~17	1180

表 2 不同农业区的土壤理化性状  
Table 2 Physical and chemical properties of soils in six agricultural areas (mean±SD)

农业区 Agricultural area	pH	速效氮 Available N (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷 Available P (mg·kg <sup>-1</sup> )	有机质 Organic matter (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N (g·kg <sup>-1</sup> )
徐淮 Xuhuai	7.52±0.29a	90.41±9.30b	81.16±12.87c	11.75±3.94bc	20.19±1.80b	1.08±0.11b
里下河 Lixiahe	6.16±0.16b	124.29±4.95a	167.40±9.52a	18.56±3.99ab	27.95±1.62a	1.64±0.11a
沿海 Coastal	7.79±0.11a	94.04±4.52b	129.81±15.64b	21.15±5.76a	20.26±0.72b	1.29±0.07b
沿江 Riverside	7.71±0.05a	92.65±10.02b	68.04±1.54c	10.12±1.98c	17.37±2.92bc	1.28±0.14b
宁镇扬 Ningzhenyang	5.88±0.16b	83.37±8.45b	121.50±11.30b	16.54±4.40abc	15.56±2.57c	1.19±0.18b
太湖 Taihu	5.96±0.09b	131.79±5.18a	118.70±9.82b	16.79±4.01abc	30.04±1.69a	1.73±0.11a

同列不同字母表示各农业区差异显著( $P<0.05$ ) Different letters in the same column indicated significant difference among agricultural areas at 0.05 level.

分比;Shannon 多样性指数: $H=-\sum P_i \ln P_i$ ;Pielou 均匀度指数: $J=H/\ln S$ ;其中  $H$  为 Shannon 多样性指数, $S$  为鉴定分类单元的数目;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;线虫通道指数(nematoda channel ratio): $NCR=N_B/(N_B+N_F)$ ;瓦斯乐斯卡指数(Wasilewska index, WI): $WI=(N_B+N_F)/N_{pp}$ ,其中  $N_B$  为食细菌线虫数量, $N_F$  为食真菌线虫数量, $N_{pp}$  为食植物类线虫数量;自由生活线虫成熟度指数(maturity index, MI)和植物寄生线虫成熟度指数(plant parasite index, PPI): $MI(PPI)=\sum v_i \times f_i$ ,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.

1.3 数据处理

数据统计采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 16.0.采用单因素方差分析( $\alpha=0.05$ ),如差异显著,则进行 LSD 多重比较.去趋势对应分析(detrended correspondence analysis,DCA)发现,土壤线虫群落组成的梯度长度(lengths of gradient)较小,均小于 1.5SD,表明土壤线虫群落组成对土壤因子梯度的响应属于线性响应模式.因此,土壤线虫群落与土壤因子之间的关系采用冗余分析(redundary analysis, RDA)<sup>[17]</sup>,RDA 由 CANOCO 4.5 软件完成.

2 结果与分析

2.1 不同农业区的土壤理化性状

由表 2 可知,6 个农业区 pH、速效氮、速效钾、速效磷、有机质、全氮均有显著差异.其中徐淮、沿海、沿江农业区土壤 pH 显著高于其他农业区,速效钾含量显著低于其他农业区;里下河、太湖农业区速效氮显著高于其他农业区;沿海农业区速效磷含量显著高于其他农业区;里下河、太湖农业区有机质、

全氮含量显著高于其他农业区.总的来看,里下河、沿海和太湖 3 个农业区的土壤养分含量高于其他 3 个农业区.

2.2 不同农业区的土壤线虫数量和群落组成

从图 1 可以看出,6 个农业区土壤线虫数量为每 100 g 干土 232~400 条,沿海农业区的线虫数量最多,为每 100 g 干土 400 条,显著高于徐淮、沿江和宁镇扬农业区,而沿江农业区线虫数量最少,为每 100 g 干土 232 条.不同农业区线虫总数顺序为:沿海农业区>里下河农业区>太湖农业区>宁镇扬农业区>徐淮农业区>沿江农业区.

江苏省不同农业区土壤线虫共鉴定出 19 科 41 属(表 3),其中徐淮农业区发现 25 属,里下河农业区发现 31 属,沿海农业区发现 26 属,沿江农业区发现 21 属,宁镇扬农业区发现 26 属,太湖农业区发现 27 属.

土壤线虫优势属为个体数占群落个体总数的 10%以上的属.由表 3 可知,6 个农业区的优势属分

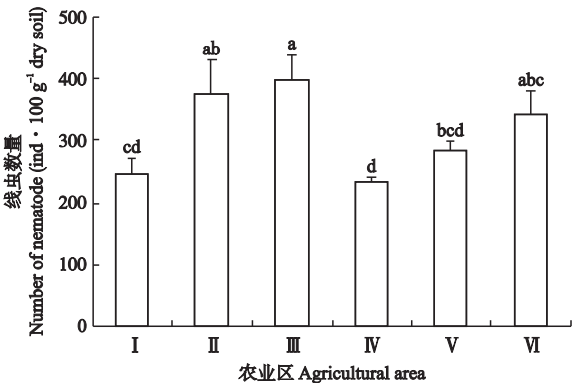


图 1 不同农业区土壤线虫数量  
Fig.1 Numbers of nematodes in different agricultural areas.  
I: 徐淮 Xuhuai; II: 里下河 Lixiahe; III: 沿海 Coastal; IV: 沿江 Riverside; V: 宁镇扬 Ningzhenyang; VI: 太湖 Taihu. 不同字母表示各农业区差异显著( $P<0.05$ ) Different letters indicated significant difference among agricultural areas at 0.05 level. 下同 The same below.

表 3 不同农业区的土壤线虫群落组成  
Table 3 Composition of soil nematode communities in different agricultural areas

属 Genus	徐淮 Xuhuai		里下河 Lixiahe		沿海 Coastal		沿江 Riverside		宁镇扬 Ningzhenyang		太湖 Taihu	
	丰度 Abundance (%)	优势度 Dominance	丰度 Abundance (%)	优势度 Dominance	丰度 Abundance (%)	优势度 Dominance	丰度 Abundance (%)	优势度 Dominance	丰度 Abundance (%)	优势度 Dominance	丰度 Abundance (%)	优势度 Dominance
滑刃属 <i>Aphelenchoides</i>	2.8	++	2.3	++	5.0	++	3.7	++	4.0	++	2.9	++
真滑刃属 <i>Apelenchus</i>	0.7	+	2.9	++	2.9	++	1.8	++	4.0	++	2.0	++
轮属 <i>Criconrmoides</i>					0.2	+						
茎属 <i>Ditylenchus</i>	0.3	+	0.4	+	1.6	++	1.4	++	0.9	+	0.8	+
垫刃属 <i>Tylenchus</i>	0.4	+	0.9	+	1.6	++	4.5	++	0.5	+	2.2	++
裸矛属 <i>Psilenchus</i>	1.3	++	0.7	+	3.2	++	3.3	++	10.6	+++	2.2	++
丝尾垫刃属 <i>Filenchus</i>	15.0	+++	26.5	+++	31.8	+++	25.6	+++	10.2	+++	27.0	+++
野外垫刃属 <i>Aglenchus</i>	0.4	+	0.9	+	2.4	++	1.4	++	0.2	+	1.0	++
矮化属 <i>Tylenchorhynchus</i>	2.4	++	3.0	++	2.9	++	1.4	++	0.3	+	1.7	++
螺旋属 <i>Helicotylenchus</i>	36.1	+++	16.6	+++	8.3	++	8.8	++	19.0	+++	1.8	++
盘旋属 <i>Rotylenchus</i>	0.9	+										
盾线属 <i>Scutellonema</i>	0.5	+	0.3	+	0.2	+			0.9	+		
短体属 <i>Pratylenchus</i>	1.7	++	3.0	++	0.8	+	1.1	++	4.4	++	0.8	+
潜根属 <i>Hirschmanniella</i>	2.6	++	8.6	++	8.3	++	9.1	++	21.4	+++	25.1	+++
头叶属 <i>Cephalobus</i>	9.6	++	1.2	++	2.3	++	1.3	++	1.0	++	1.6	++
真头叶属 <i>Eucephalobus</i>	2.6	++	0.7	+	1.7	++	3.9	++	1.4	++	8.4	++
板唇属 <i>Chilopacus</i>	6.1	++	8.3	++	16.3	+++	20.3	+++	10.0	+++	9.3	++
原杆属 <i>Protorhabditis</i>	1.2	++	0.3	+					0.2	+		
中杆属 <i>Mesorhabditis</i>	0.2	+	0.2	+	1.1	++	0.6	+	0.7	+	0.2	+
小杆属 <i>Rhabditis</i>			0.1	+	0.4	+						
单齿属 <i>Mononchus</i>									0.5	+		
锯齿属 <i>Prionchulus</i>									0.3	+		
等齿属 <i>Miconchus</i>			1.2	++							0.8	+
锉齿属 <i>Mylonchulus</i>	0.2	+	0.3	+			0.3	+				
基齿属 <i>Iotonchus</i>			0.2	+								
无咽属 <i>Alaimus</i>					0.1	+						
大矛属 <i>Enchodelun</i>			0.7	+			0.6	+				
孔咽属 <i>Aporcelaimus</i>	11.4	+++	10.5	+++	3.9	++	7.7	++	5.2	++	1.4	++
矛线属 <i>Dorylaimus</i>											1.2	++
中矛线属 <i>Mesodorylaimus</i>	0.2	+	1.2	++	0.5	+	0.5	+	1.5	++	0.2	+
前矛线属 <i>Prodorylaimus</i>	2.5	++	3.9	++	3.3	++	1.8	++	1.9	++	5.3	++
真矛线属 <i>Eudorylaimus</i>			0.2	+	0.2	+			0.2	+	0.2	+
拟桑尼属 <i>Thorneella</i>			2.4	++	0.2	+	1.1	++	0.2	+	0.2	+
短矛属 <i>Doryllium</i>											0.9	+
细齿属 <i>Leptonchus</i>	0.2	+										
穿咽属 <i>Nygolaimus</i>											0.2	+
真单官属 <i>Eumonhystera</i>											0.2	+
绕线属 <i>Plectus</i>			1.7	++	0.3	+			0.5	+	2.3	++
连胃属 <i>Chronogaster</i>	0.2	+										
无齿属 <i>Anonchus</i>	0.5	+	0.3	+	0.4	+					0.2	+
托布利属 <i>Tobrilus</i>			0.2	+								

+++：RA>10%优势属 Dominant genera；++：1%≤RA≤10%常见属 Common genera；+：RA<1%稀有属 Rare genera.

布不尽相同.所有农业区中,均以丝尾垫刃属(*Filenchus*)为优势属,分别达到所分离线虫总量的15.0%、26.5%、31.8%、25.6%、10.2%和27.0%.此外,在徐淮农业区和里下河农业区,螺旋属(*Helicotylenchus*)和孔咽属(*Aporcelaimus*)为优势属;沿海和沿江农业区中,板唇属(*Chilopacus*)为优势属;宁镇

扬和太湖农业区中,潜根属(*Hirschmanniella*)为优势属.按照农业区从南至北的地理位置来看,地理位置相近的农业区线虫优势属相似,这说明了地理位置因素影响农业区中优势属的分布.

2.3 不同农业区的土壤线虫营养类群结构  
江苏省所有农业区中,植食类群绝对丰度均最



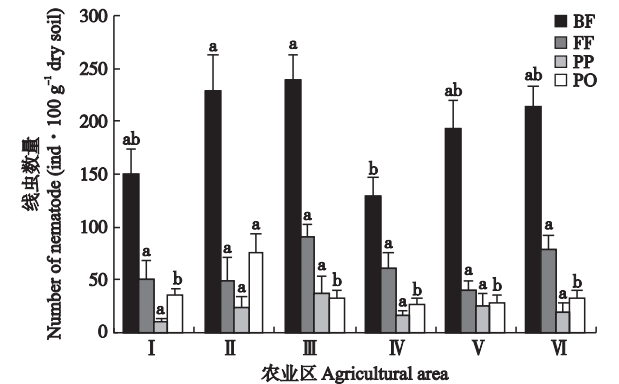


图2 不同农业区土壤线虫营养类群  
Fig.2 Soil nematode numbers of different trophic groups in different agricultural areas.  
BF: 食细菌类 Bacterivores; FF: 食真菌类 Fungivores; PP: 植物寄生类 Plant-parasites; PO: 捕食-杂食类 Predators-omnivores.

高(图2),食细菌类群次之,两者之和达到了总数的80%,而食真菌类群和捕食-杂食类群较低.从不同农业区间的土壤线虫营养类群差异来看,沿江农业区的植食类线虫数量显著低于里下河和沿海农业区,里下河农业区的捕食-杂食类群的线虫数量显著高于其他农业区.食细菌类和食真菌类在6个农业区中并未达到显著性差异.董道峰等<sup>[18]</sup>研究表明,常规农田和休闲地中的线虫优势类群为植食类,而日光温室中的线虫优势类群为食细菌类.6个农业区所采集的土壤样品均为常规农田,进一步验证了在常规农田中植食线虫为优势类群这一结果.

2.4 不同农业区的土壤线虫群落结构评价

采用多样性指数( $H$ )、均匀性指数( $J$ )、优势度指数( $\lambda$ )来分析不同农业区土壤线虫群落多样性. $H$ 的大小能够反映出线虫种类多样性的高低,在农田

生态系统中, $H$ 的增高通常与食真菌线虫和捕食/杂食性线虫等发生频率的增长有关.由表4可知, $H$ 分布趋势为里下河农业区>宁镇扬农业区>沿江农业区>沿海农业区>太湖农业区>徐淮农业区; $J$ 分布趋势与 $H$ 相似;而 $\lambda$ 则为徐淮农业区>太湖农业区>沿海农业区>沿江农业区>宁镇扬农业区>里下河农业区.说明不同农业区的群落多样性具有差异性,里下河农业区土壤线虫群落比较稳定,多样性比较高.

线虫通路比值(NCR)、瓦斯乐斯卡指数(WI)、成熟度指数(MI)和PPI/MI可用于表征土壤线虫群落功能结构特征及受干扰程度.徐淮农业区、沿江农业区和太湖农业区的NCR指数均大于0.75,说明土壤分解的过程以细菌通道为主,而其他农业区以真菌通道为主;WI指数用于分析土壤食物网的矿化途径,6个农业区的WI值都小于1,说明矿化途径主要由植物到植食线虫进行;MI指数用于评价扰动程度的指标,低的MI值表明系统扰动强烈,反之则表明系统稳定,里下河农业区的MI值最高,沿海农业区的MI值最低,说明沿海农业区受到的外界扰动比较大;PPI/MI多用于评价不同土壤的营养状况,里下河农业区的PPI/MI值相对较低,表明土壤较肥沃,而其他农业区间的PPI/MI值无显著差异,土壤肥力状况也相差不大.PPI/MI反映的不同农业区土壤肥沃程度与表2中的土壤理化性状的结果基本一致,即里下河地区的土壤有机质、全氮和速效养分含量均较高.

2.5 土壤线虫群落与土壤养分的相关性

不同农业区农田土壤线虫数量、属数、营养类群数量、生态指标与土壤理化性状的相关性分析结果

表4 不同农业区土壤线虫生态指标  
Table 4 Ecological indices of soil nematode community in different agricultural areas

生态指数 Ecological index	徐淮 Xuhuai	里下河 Lixiahe	沿海 Coastal	沿江 Riverside	宁镇扬 Ningzhenyang	太湖 Taihu
多样性指数 Diversity index ( $H$ )	2.20±0.16c	2.50±0.02a	2.39±0.10ab	2.38±0.01ab	2.42±0.01ab	2.32±0.06bc
均匀性指数 Evenness index ( $J$ )	0.68±0.05b	0.78±0.07a	0.73±0.01ab	0.73±0.07ab	0.75±0.01ab	0.70±0.02ab
优势度指数 Dominance index ( $\lambda$ )	0.18±0.03a	0.12±0.02c	0.15±0.01abc	0.14±0.01bc	0.13±0.01bc	0.16±0.01ab
线虫通道指数 Nematode channel ratio (NCR)	0.79±0.06a	0.67±0.02b	0.70±0.01b	0.78±0.03a	0.61±0.01c	0.77±0.02a
瓦斯乐斯卡指数 Wasilewska index (WI)	0.40±0.05cd	0.32±0.06d	0.54±0.05ab	0.61±0.12a	0.34±0.01d	0.47±0.02bc
自由生活线虫成熟度指数 Maturity index of free-living nematode (MI)	3.01±0.09b	3.34±0.16a	2.48±0.15d	2.70±0.12c	2.78±0.01c	2.58±0.02cd
植物寄生线虫成熟度指数 Plant parasite index (PPI)	2.72±0.17a	2.52±0.05b	2.35±0.11c	2.37±0.02bc	2.68±0.01a	2.48±0.16bc
PPI/MI	0.90±0.09a	0.76±0.02b	0.95±0.04a	0.88±0.01a	0.97±0.01a	0.96±0.09a

同行不同字母表示各农业区差异显著( $P<0.05$ ) Different letters in the same row indicated significant difference among agricultural areas at 0.05 level.

表 5 土壤线虫数量、属数、营养类群数量、生态指数与土壤养分因子的相关系数  
Table 5 Correction coefficients between numbers of nematode, numbers of genera, numbers of nematode tropic groups, ecological indices and soil nutrient factors

	pH	速效氮 Available N	速效钾 Available K	速效磷 Available P	有机质 Organic matter	全氮 Total N
线虫数量 Numbers of nematode	-0.116	0.591 *	0.809 * *	0.845 * *	0.632 *	0.602 *
属数 Numbers of genera	-0.313	0.553	0.938 * *	0.810 * *	0.604 *	0.554
植食类群 Plant-parasites (PP)	-0.253	0.476	0.829 * *	0.831 * *	0.522	0.486
食细菌类群 Bacterivores (BF)	0.288	0.428	0.153	0.495	0.452	0.447
食真菌类群 Fungivores (FF)	-0.074	0.127	0.624 *	0.771 * *	0.126	0.274
捕食-杂食类群 Predators-omnivores (PO)	-0.138	0.562	0.644 *	0.345	0.582 *	0.491
线虫通道指数 Nematode channel ratio (NCR)	0.487	0.239	-0.517	-0.318	0.282	0.083
瓦斯乐斯卡指数 Wasilewska index (WI)	0.479	0.048	-0.373	-0.032	0.010	0.118
优势度指数 Dominance index ( $\lambda$ )	0.407	0.082	-0.496	-0.307	0.169	-0.088
多样性指数 Diversity index ( $H$ )	-0.236	0.215	0.747 * *	0.622 *	0.149	0.378
均匀性指数 Evenness index ( $J$ )	0.091	-0.331	-0.176	-0.182	-0.461	-0.153
自由生活线虫成熟度指数 Maturity index of free-living nematode (MI)	-0.085	0.141	0.25	-0.11	0.164	0.024
植物寄生线虫成熟度指数 Plant parasite index (PPI)	-0.482	-0.313	0.065	-0.183	-0.241	-0.394
PPI/MI	-0.259	-0.281	-0.146	0.037	-0.259	-0.209

\*  $P<0.05$ ; \* \*  $P<0.01$ .

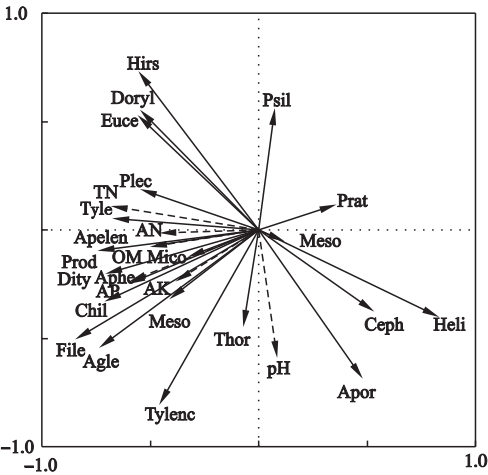


图 3 土壤线虫群落组成与土壤养分因子之间相关性的冗余分析 (RDA) 排序图

Fig.3 Redundary analysis (RDA) diagram of the relation between soil nematode community composition and soil nutrient factors.

Hris: 潜根属 *Hirschmanniella*; Doryl: 矛线属 *Dorylaimus*; Psil: 裸矛属 *Psilenchus*; Plec: 绕线属 *Plectus*; Tyle: 垫刃属 *Tylenchus*; Prod: 前矛线属 *Prodorylaimus*; Dity: 茎属 *Ditylenchus*; Mico: 等齿属 *Miconchus*; Mesod: 中杆属 *Mesorhabditis*; Mes: 中矛线属 *Mesodorylaimus*; Agle: 野外垫刃属 *Aglenchus*; Thor: 拟桑尼属 *Thorneella*; Tylenc: 矮化属 *Tylenchorhynchus*; Aphe: 滑刃属 *Aphelenchoides*; Aphel: 真滑刃属 *Apelenchus*; Apor: 孔咽属 *Aporcelaimus*; Ceph: 头叶属 *Cephalobus*; Chil: 板唇属 *Chilopacus*; Euce: 真头叶属 *Eucephalobus*; File: 丝尾垫刃属 *Filenchus*; Heli: 螺旋属 *Helicotylenchus*; Prat: 短体属 *Pratylenchus*. TN: 全氮 Total nitrogen; OM: 有机质 Organic matter; AN: 速效氮 Available nitrogen; AP: 速效磷 Available phosphorus; AK: 速效钾 Available potassium.

(表 5) 表明,不同农业区农田土壤线虫数量与土壤速效氮、速效钾、速效磷、有机质、全氮均呈显著正相关关系;线虫属数与土壤速效钾、速效磷、有机质具

有显著正相关关系;植食类群数量、食真菌类群数量均与速效钾、速效磷显著正相关;捕食-杂食类群数量与速效钾、有机质显著正相关.在土壤线虫生态指数方面,线虫生态指数与土壤理化性质的相关性并不是很高,线虫通道指数 (NCR)、瓦斯乐斯卡指数 (WI)、优势度指数 ( $\lambda$ )、均匀性指数 ( $J$ )、自由生活线虫成熟度指数 (MI)、植物寄生线虫成熟度指数 (PPI)、PPI/MI 与土壤理化性质的相关性未达到显著水平,而多样性指数 ( $H$ ) 与速效钾、速效磷显著正相关.

通过 RDA 建立土壤线虫属组成与土壤因子之间的排序图 (图 3),RDA 的典型轴 1 和轴 2 共解释了土壤线虫属和土壤养分因子总体变异的 57%. RDA 排序图中,土壤因子矢量箭头的长短代表土壤因子对线虫群落结构的影响程度的大小,其两者箭头之间的夹角表示土壤因子与线虫群落的相关性,夹角越小,相关性越大.从 RDA 排序图可以看出,土壤全氮 (TN)、速效磷 (AP) 和 pH 对线虫群落种属组成影响较大.其中速效磷含量与滑刃属 (*Aphelenchoides*) 和等齿属 (*Miconchus*) 有较强的正相关,与短体属 (*Pratylenchus*) 呈负相关,土壤有机质 (OM) 含量与真滑刃属 (*Apelenchus*) 和前矛线属 (*Prodorylaimus*) 呈较强的正相关,土壤速效钾 (AK) 与丝尾垫刃属呈较强的正相关.土壤养分因子与裸矛属 (*Psilenchus*)、短体属呈负相关,与其他大部分线虫属呈正相关.

### 3 讨 论

通过对 6 个农业区的土壤线虫群落的调查研究发现,不同农业区间土壤线虫数量和群落组成均有一定的差异性。沿海农业区的线虫总数最多,沿江农业区的土壤线虫总数显著小于其他农业区。一方面,土壤线虫分布与土壤养分状况密切相关,土壤有机质、速效钾、速效磷、速效氮、全氮均能对农业区土壤线虫数量产生显著影响,里下河、沿海、太湖 3 个农业区土壤养分状况较其他农业区高,其土壤线虫分布也较其他农业区多,刘贝贝等<sup>[4]</sup>的研究也表明,土壤线虫数量与土壤养分状况呈显著正相关。另一方面,不同农业区年均气温和降雨可能对其土壤线虫分布有一定影响,Li 等<sup>[19]</sup>的研究表明,年平均气温是影响土壤线虫分布的重要环境因子,徐淮农业区年均气温、年均降雨量较低,其线虫数量分布也较少。这可能与不同农业区的土壤质地、施肥措施和耕作方式有关,这些因素主要通过影响农田土壤扰动程度、土壤肥力状况和土壤含水量等来影响土壤线虫数量<sup>[9]</sup>。而从线虫的群落组成来看,丝尾垫刃属在各个农业区中都为优势属,且所占线虫数量比例较高,刘婷等<sup>[20]</sup>和孙震等<sup>[21]</sup>的研究同样表明,江苏省农田土壤中线虫丝尾垫刃属也作为优势属出现。这可能是由于地理位置相近的农业区,其温度、降雨量及土壤环境等较为相近,而这些因素刚好是影响土壤线虫的群落组成的重要因素。梁文举等<sup>[22]</sup>对下辽河平原稻田土壤的研究表明,施肥能够显著降低土壤线虫的数量;胡诚等<sup>[23]</sup>的研究认为,施用化肥后土壤线虫数量下降,而施用有机肥则可显著增加土壤线虫数量。

6 个农业区中,土壤线虫的营养类群均以植食线虫占据优势,食细菌线虫次之,而食真菌类线虫和杂食-捕食线虫所占比例很小,这个结果支持了 Yeates 等<sup>[24]</sup>关于捕食-杂食性线虫在农田出现较少的结论。本研究中,植食线虫为优势营养类群,这一结论与胡诚等<sup>[23]</sup>的研究结果亦相同,这可能是由于所采集土壤样品均来自农业区的耕层土壤,而大多数植食线虫都存活于土壤耕层中,特别是根际土壤中,而且耕层土壤中植物根系较多,可以为植食线虫提供食物来源,使得植食线虫易生存繁殖。农业区土壤的食细菌线虫的数量仅次于植食线虫,原因可能是江苏省各农业区的土壤有机质含量较高,为食细菌线虫提供了丰富的营养来源,可滋养大量的细菌。Meng 等<sup>[25]</sup>研究表明,食细菌线虫与土壤食物网中有

机质和营养循环有着密切的联系,因而可将食细菌线虫作为指示农田土壤肥力的一个潜在的生物指标。

在土壤生态系统中,土壤生物对土壤环境具有一定的选择适应性,与土壤生境因子有着密切的关系<sup>[26]</sup>。在农田生态系统中,土壤质地、耕作方式、养分管理、土壤含水量和适宜食物的可利用性是决定线虫多样性的主要因素<sup>[9,27]</sup>。在本研究中,RDA 排序图结果同样表明,土壤养分与线虫群落具有一定的相关性,徐淮农业区和沿江农业区的土壤全氮、速效磷、速效钾含量相对较低,土壤偏碱性,导致土壤线虫密度和群落多样性低于其他农业区。主要是由于土壤理化性质的改变可以通过直接或间接的作用影响地上植被生长状况和微生物活动,进而可以改变土壤线虫群落。

本研究中里下河农业区的 MI 值最大,而 PPI/MI 值最低,说明里下河农业区的土壤线虫群落功能类群间关系较为稳定,而且土壤较为肥沃。这表明农耕和施肥影响了线虫群落,线虫群落对于外界扰动强度和土壤肥力状况也会做出响应。基于土壤线虫群落的生态指数,可以在生态系统功能水平上更好地揭示土壤环境的健康状态。相对于其他生态指数,线虫 MI 指数和 PPI 指数与土壤环境干扰程度、土壤肥力及作物产量相关,而它们的比值(PPI/MI)为比较不同耕作措施对土壤环境的扰动和揭示土壤养分状态提供了可能<sup>[28]</sup>。

### 4 结 论

江苏省不同农业区间的土壤线虫密度、群落组成均具有一定的差异性。植食线虫和食细菌线虫是农田土壤线虫的优势营养类群。丝尾垫刃属在各个农业区中都为优势属,除此之外,各个农业区的其他优势属不尽相同。地理位置相近的农业区的线虫优势属表现出较好的一致性。土壤线虫群落与土壤养分的相关性分析结果表明,不同农业区农田土壤线虫数量、属数和群落结构与农田土壤养分均有明显的相关关系。线虫 MI、PPI 指数和 PPI/MI 值能够很好地揭示土壤养分状态和土壤环境的扰动情况。研究农田生态系统中土壤线虫的多样性,不仅有助于指导农业生产,还可为更好地发挥土壤线虫的生物指示作用提供理论依据。

### 参考文献

- [1] Yeates GW. Variation in soil nematode diversity under pasture with soil and year. *Soil Biology and Biochemis-*



- try, 1984, **16**: 95–102
- [2] Bongers T. The maturity index: An ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia*, 1990, **83**: 14–19
  - [3] Fu SL, Coleman DC, Hendrix PF, *et al.* Responses of trophic groups of soil nematodes to residue application under conventional tillage and no-till regimes. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**: 1731–1741
  - [4] Liu B-B (刘贝贝), Ye C-L (叶成龙), Yu L (虞丽), *et al.* Characteristics of soil nematode communities in coastal wetlands with different vegetation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23** (11): 3057–3064 (in Chinese)
  - [5] Li Y-J (李玉娟), Wu J-H (吴纪华), Chen H-L (陈慧丽), *et al.* Nematodes as bioindicator of soil health: Methods and applications. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16** (8): 1541–1546 (in Chinese)
  - [6] Rasmann S, Ali JG, Helder J, *et al.* Ecology and evolution of soil nematode chemotaxis. *Journal of Chemical Ecology*, 2012, **38**: 615–628
  - [7] Zhang XK, Guan PT, Wang YL, *et al.* Community composition, diversity and metabolic footprints of soil nematodes in differently-aged temperate forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **80**: 118–126
  - [8] Ritz K, Trudgill DL. Utility of nematode community analysis as an integrated measure of the functional state of soils: Perspective and challenges. *Plant and Soil*, 1999, **212**: 1–11
  - [9] Li Q (李琪), Liang W-J (梁文举), Jiang Y (姜勇). Present situation and prospect of soil nematode diversity in farmland ecosystems. *Biodiversity Science* (生物多样性), 2007, **15** (2): 134–141 (in Chinese)
  - [10] Zhao Q-G (赵其国). Soil Records of Jiangsu. Nanjing: Jiangsu People's Press, 1976 (in Chinese)
  - [11] Lu R-K (鲁如坤). Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
  - [12] Griffiths BS, Bengough AG, Neilson R, *et al.* The extent to which nematode communities are affected by soil factors: A pot experiment. *Nematology*, 2002, **4**: 943–952
  - [13] Yin W-Y (尹文英). Pictorial Keys to Soil Animals of China. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese)
  - [14] Yeates GW, Bongers T, De Goede RG, *et al.* Feeding habits in nematode families and genera: An outline for soil ecologists. *Journal of Nematology*, 1993, **25**: 315–331
  - [15] Bongers T. The maturity index: An ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia*, 1990, **83**: 14–19
  - [16] Bongers T, Bongers M. Functional diversity of nematodes. *Applied Soil Ecology*, 1998, **10**: 239–251
  - [17] Borcard D, Legendre P, Drapeau P. Partialling out the spatial component of ecological variation. *Ecology*, 1992, **73**: 1045–1055
  - [18] Dong D-F (董道峰), Hu C (胡诚), Cao Z-P (曹志平). Effect of different agricultural management systems on soil nematode community and structure. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2008, **16** (1): 80–85 (in Chinese)
  - [19] Li Q, Jiang Y, Liang WJ, *et al.* Nematode diversity in pheazem agroecosystems of Northeast China. *Pedosphere*, 2009, **5**: 597–605
  - [20] Liu T (刘婷), Ye C-L (叶成龙), Chen X-Y (陈小云), *et al.* Effects of different organic manure sources and their combinations with chemical fertilization on soil nematode community structure in a paddy field of East China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24** (12): 3508–3516 (in Chinese)
  - [21] Sun Z (孙震), Liu M-Q (刘满强), Gui J (桂娟), *et al.* Reduction of nitrogen amendment and irrigation influences paddy soil nematode community. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2014, **33** (3): 659–665 (in Chinese)
  - [22] Liang W-J (梁文举), Jiang Y (姜勇), Li Q (李琪), *et al.* Effect of chemical fertilizers on paddy soil nematode communities in the lower reaches of Liaohu Plain. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2004, **35** (6): 773–775 (in Chinese)
  - [23] Hu C (胡诚), Cao Z-P (曹志平), Bai Y-S (白娅舒), *et al.* Effects of long-term fertilization on nematode community. *Journal of Ecology and Rural Environment* (生态与农村环境学报), 2007, **23** (3): 31–35 (in Chinese)
  - [24] Yeates GW, Bird AF. Some observations on the influence of agricultural practices on the nematode faunae of some South Australian soils. *Fundamental and Applied Nematology*, 1994, **17**: 133–145
  - [25] Meng FX, Ou W, Li Q, *et al.* Vertical distribution and seasonal fluctuation of nematode trophic groups as affected by land use. *Pedosphere*, 2006, **16**: 169–176
  - [26] Su YZ, Wang XF, Yang R, *et al.* Soil fertility, salinity and nematode diversity influenced by *Tamarix ramosissima* in different habitats in an arid desert oasis. *Environmental Management*, 2012, **50**: 226–236
  - [27] Ito T, Araki M, Komatsuzaki M, *et al.* Soil nematode community structure affected by tillage systems and cover crop managements in organic soybean production. *Applied Soil Ecology*, 2015, **86**: 137–147
  - [28] Bongers T, Van der MH, Korthals G. Inverse relationship between the nematode maturity index and plant parasite index under enriched nutrient conditions. *Applied Soil Ecology*, 1997, **6**: 195–199

作者简介 焦加国,男,1981年生,博士,副教授.主要从事土壤生态研究. E-mail: jiaguojiao@njau.edu.cn

责任编辑 肖红