

南方地区冷浸田土壤线虫的分布特征^①

邓绍欢, 叶成龙, 刘 婷, 刘满强, 李辉信, 焦加国*

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要:为了解南方地区冷浸田土壤线虫分布状况, 2011—2012 年期间, 对湖北、安徽、江西、湖南、福建、浙江、广东和贵州 8 个省份的冷浸田进行土壤线虫调查。结果表明: 在所有省份中, 共鉴定出 2 纲 8 目 24 科 55 属, 其中潜根属(*Hirschmanniella*)和丝尾垫刃属(*Filenchus*)为优势属, 两者占线虫总数的 46.36%, 丝尾垫刃属、潜根属、头叶属(*Cephalobus*)、滑刃属(*Aphelenchoïdes*)在我国南方 8 省份的冷浸田均有分布。冷浸田线虫密度为非冷浸田的 48.04%, 冷浸田线虫密度范围为 72~735 条/100 g 干土。冷浸田土壤线虫数量分布主要受土壤含水量和电导率因素影响, 潜根属与含水量显著正相关, 与电导率显著负相关。

关键词:南方地区; 冷浸田; 土壤线虫; 分布

中图分类号:S154.1

冷浸田是一类强潜育性的低产水稻田, 具有物理性质差、通透性差、有机质积累多、土壤温度低、有效养分缺乏、还原性强等特点, 我国冷浸田约有 346 万 hm², 占我国水稻田面积的 15.07%, 主要分布在我国南方地区, 广泛分布于江西、湖南、贵州、湖北、安徽、浙江、福建和广东 8 个省份^[1]。土壤线虫是数量和种类最丰富的后生动物, 在农田土壤中其多样性最为丰富^[2]。由于土壤线虫具有分布广、数量多、种类多等特征, 且在土壤功能中发挥着重要作用, 因此土壤线虫的群落组成及生态指数可用来反映土壤环境质量^[3~4], 评价农田土壤健康变化^[5~6]。

目前对冷浸田的研究多集中于冷浸田障碍特性分析以及改良措施等方面^[7~10], 关于土壤生物方面的研究较少, 而关于土壤线虫方面的研究未见报道。本文选择南方 8 个省份冷浸田、非冷浸田为调查对象, 通过对土壤线虫的密度分布、群落组成和营养类群结构等特征进行研究, 从而了解冷浸田这类低产水稻田的土壤线虫密度分布特点、线虫组成、群落结构和功能特点, 从土壤生态学角度来认识冷浸田的土壤健康状况, 为认识冷浸田土壤生态系统及评价冷浸田土壤健康提供科学依据。

1 研究地区及研究方法

1.1 样地选择

研究区位于我国冷浸田主要分布的南方丘陵地

区, 具体为湖北、安徽、江西、湖南、福建、浙江、广东和贵州 8 个省份, 各省份冷浸田农作物均为水稻, 该区域地理位置大致范围为 25°~31°N、105°~121°E, 气候属于亚热带季风区, 降雨量丰沛, 全区年降水量 1 000~2 000 mm, 无霜期 220~330 天, 年均气温 15℃~21℃, 土壤类型为水稻土。

1.2 样品采集

于 2011—2012 年期间, 采集了我国南方 8 个省份 27 个县区的冷浸田土壤样品, 同时采集附近的非冷浸田的土壤样品加以对照, 共采集冷浸田和非冷浸田土壤样品 102 份, 其中冷浸田 78 份, 非冷浸田 24 份, 采样深度均为 0~20 cm, 采样信息见表 1。对采集的土壤样品进行处理, 一部分存放于 4℃ 冰箱用于土壤线虫指标的测定, 另一部分自然风干、过筛, 用于土壤理化指标的测定。

1.3 土壤线虫的分离鉴定与土壤理化性质的测定

采用蔗糖离心法分离提取土壤线虫^[11], 在体视镜下计数, 随机挑选 100 条左右线虫制片(不足 100 条全部挑取), 在显微镜下鉴定至属, 参照尹文英等《土壤动物分类检索》^[12]、《De Nematoden Van Nederland》^[13]对线虫进行鉴定。根据土壤含水量, 将线虫数量折算成每 100 g 干土含有线虫数量。根据线虫的取食习性和消化道类型特征将线虫分成以下 4 个营养类群: 食细菌类群(bacterivores, BF)、食真菌类群(fungivores,

* 基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201003059)资助。

* 通讯作者(jiaguojiao@njau.edu.cn)

作者简介: 邓绍欢(1989—), 男, 江西石城人, 硕士研究生, 主要从事土壤生态学研究。E-mail: dengshaohuan@163.com

表1 冷浸田土壤样品采集情况
Table 1 Information of soil samples in cold waterlogged paddy

省份	采样地点	经纬度	样品数		采样时间 (年-月)	年均气温 (℃)	年均降雨量 (mm)
			冷浸田	非冷浸田			
湖北	黄石市、黄冈市、咸宁市	114.64°~115.20°E , 29.94°~30.56°N	18	6	2012-4	15~19	1 350~1 600
安徽	池州市、宣城市、黄山市	117.60°~118.67°E , 29.79°~30.86°N	14	1	2012-4	15~17	1 300~1 550
江西	吉安市、宜春市、景德镇市、 萍乡市	114.35°~117.32°E , 26.85°~29.35°N	12	2	2012-11	16~20	1 350~1 950
湖南	长沙市、浏阳市、湘西州	109.77°~113.32°E , 27.96°~28.45°N	8	3	2012-12	15~18	1 300~1 600
福建	三明市、南平市、福州市、 龙岩市	116.69°~119.07°E , 25.12°~28.03°N	6	5	2011-11	17~21	1 400~2 000
浙江	金华市、丽水市	119.59°~120.04°E , 27.82°~29.12°N	6	1	2011-5	15~19	1 100~1 600
广东	韶关市、河源市	111.99°~114.50°E , 24.28°~24.66°N	6	4	2012-2	19~24	1 400~2 000
贵州	黔东南州、遵义市	106.39°~106.76°E , 26.30°~26.64°N	8	2	2012-5	11~19	1 000~1 500

FF)、植物寄生类群(plant-parasites, PP)和捕食-杂食类群(predators-omnivores, PO), 并根据线虫的生活史策略, 对其赋予相应的 c-p 值 (colonizer-persister value)^[14]。土壤理化性质的测定参照《土壤农化分析(第三版)》^[15]。主要测定的指标和方法如下: 土壤 pH

采用电位法测定(土水比为 1:2.5); 有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定; 速效钾采用醋酸氨浸提-火焰光度法测定; 速效磷采用氟化铵二盐酸-钼锑抗比色法测定; 电导率采用电导率仪测定(土水比 1:5)。8 个省份冷浸田的土壤理化性质见表 2。

表2 各省份冷浸田的土壤理化性质
Table 2 Physicochemical properties of cold waterlogged paddy soils in different provinces

省份	含水量(%)	pH	有机质(g/kg)	速效钾(g/kg)	速效磷(mg/kg)	电导率(μS/cm)
湖北	1.01 ± 0.05 b	5.74 ± 0.22 a	30.54 ± 3.14 c	54.99 ± 9.39 b	0.93 ± 0.13 b	245.94 ± 42.91 b
安徽	0.56 ± 0.05 de	5.94 ± 0.25 a	37.51 ± 3.58 bc	80.68 ± 11.77 ab	2.72 ± 0.56 b	167.87 ± 35.51 b
江西	0.72 ± 0.03 bcd	5.00 ± 0.24 b	45.12 ± 4.13 bc	61.12 ± 11.33 b	1.68 ± 0.46 b	115.68 ± 17.73 b
湖南	1.40 ± 0.37 a	5.71 ± 0.37 a	44.65 ± 4.33 bc	57.68 ± 11.62 b	3.01 ± 0.78 b	223.25 ± 69.37 b
福建	0.96 ± 0.23 bc	4.75 ± 0.31 b	49.67 ± 7.58 b	58.74 ± 9.60 b	2.71 ± 0.87 b	125.90 ± 11.65 b
浙江	0.35 ± 0.08 e	4.75 ± 0.16 b	39.38 ± 3.09 bc	84.66 ± 8.22 ab	7.10 ± 2.86 b	199.48 ± 29.39 b
广东	0.53 ± 0.05 de	5.76 ± 0.10 a	34.06 ± 3.47 bc	58.71 ± 11.16 b	26.84 ± 13.02 a	131.67 ± 34.04 b
贵州	0.63 ± 0.04 cde	6.15 ± 0.17 a	74.08 ± 10.31 a	104.76 ± 29.72 a	4.16 ± 1.96 b	453.50 ± 48.80 a

注: 表中同列数据小写字母不同表示各省份间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平, 下表同。

1.4 数据处理

将单个省份冷浸田各采样点的土壤线虫数量和丰度取平均得到各个省份冷浸田土壤线虫数量和丰度, 将冷浸田所有样点和非冷浸田所有样点土壤线虫数量和丰度各取平均得到冷浸田和非冷浸田土壤线虫平均数量和平均丰度, 根据土壤线虫的相对丰度, 确定其数量优势度。各个类群线虫数量优势度划分如下: 个体数占总捕获量 10% 以上为优势属, 个体数占总捕获量 1%~10% 为常见属, 个体数占总捕获量 1% 以下为稀有属。采用以下生态指数对线虫群落进行分析: Shannon-Wiener 多样性指数 (H'): $H' = -\sum ni/N \times \ln(ni/N)$, 其中 ni 为第 i 个类群的个体数, N

为群落中所有类群的个体总数; Pielou 均匀度指数 (J): $J = H'/\ln S$, 其中 H' 为 Shannon-Wiener 多样性指数, S 为鉴定分类单元的数目; Margalef 丰富度指数 (SR): $SR = (S-1)/\ln N$; 线虫通道指数 (nematode channel ratio, NCR)^[16]: $NCR = BF/(BF+FF)$; 成熟度指数 (maturity index, MI)^[17]: $MI = \sum cp_i \times p_i$, 其中 cp_i 为自由生活土壤线虫第 i 类群的 c-p 值, p_i 为自由生活土壤线虫第 i 类群的个体数占群落总个体数的比例。

数据统计采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS18.0 进行分析, 方差分析前利用 Kolmogorov-Smirnov 法进行数据的正态分布检验, 必要时取对数转换以满足正态分布假设。应用 SPSS 18.0 软件对各省份冷浸田

数据进行方差分析、双变量相关性分析。单因素方差分析以 $\alpha = 0.05$ 作为差异显著水平，如果有显著差异，则进行 Duncan 法多重比较。

2 结果与讨论

2.1 冷浸田土壤线虫密度

我国 8 省份冷浸田与非冷浸田土壤线虫平均密度结果见图 1, 冷浸田土壤线虫平均密度为 344 条/100 g 干土, 其中食细菌线虫、食真菌线虫植物寄生线虫和捕食-杂食线虫所占比例分别为 30.14%、20.29%、41.29%、8.27%; 非冷浸田土壤线虫平均密度 716 条/100 g 干土, 其中食细菌线虫、食真菌线虫、植物寄生线虫和捕食-杂食线虫所占比例分别为 33.07%、19.85%、34.66%、12.44%。上述结果表明冷浸田土壤线虫密度总体低于非冷浸田土壤线虫密度, 为非冷浸田密度的 48.04%。已有报道显示, 水稻田(非冷浸田)的土壤线虫密度范围为 538~1 233 条/100 g 干土^[18-20]。土壤线虫密度在一定程度上反映土壤资源的总体有效性, 本研究结果表明冷浸田土壤的有效资源少于非冷浸田, 符合土壤有效养分低的特征。一方面土壤线虫群落的密度与其食物资源有着密切的关系, 细菌、真菌和植物根系分别为土壤食细菌线虫、食真菌线虫和植物寄生线虫的食物资源, 冷浸田土壤线虫食物资源状况影响着土壤线虫营养类群数量, 有研究表明冷浸田土壤线虫的食物资源少于非冷浸田, 柴娟娟等^[21]的研究表明冷浸田土壤细菌和真菌为非冷浸田土壤的 53.93% 和 43.33%, 另外冷浸田水稻根系数量也少于非冷浸田。另一方面土壤线虫群落的数量与土壤温度有关, 土壤温度通过影响线虫繁殖率来影响土壤线虫, Okada 等^[22]研究表明温度对水稻田土壤线虫的影响, 升高温度后土壤线虫数量增多。

我国 8 省份冷浸田土壤线虫密度见图 2, 由图 2 可知, 冷浸田土壤线虫密度范围为 72~735 条/100 g

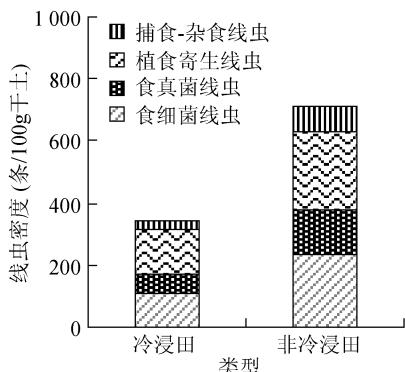


图 1 冷浸田和非冷浸田土壤线虫平均密度

Fig. 1 The nematode average densities in cold waterlogged paddy and non-cold waterlogged paddy

干土, 各省份土壤线虫密度大小顺序为: 福建 > 湖北 > 广东 > 安徽 > 江西 > 浙江 > 湖南 > 贵州。福建冷浸田土壤线虫密度最高, 达到 735 条/100 g 干土; 贵州冷浸田土壤线虫密度最低, 不及 100 条/100 g 干土; 湖北、安徽、江西、湖南、浙江和广东冷浸田土壤线虫数介于 200~400 条/100 g 干土范围。这可能与不同省份的气候环境有关系, 由表 1 可知, 广东、福建年平均气温较其他省份高 2℃~7℃, 年平均降雨量也较其他省份多, 其冷浸田土壤线虫数量分布较多, 湖北和安徽年平均温度和降雨量相近, 其土壤线虫数量也相差不大, 贵州年平均气温和年平均降雨量均较低, 其冷浸田土壤线虫数量分布也最少。由此看出年均气温和降雨对冷浸田土壤线虫分布有一定影响, 年均气温和降雨高的地方土壤线虫分布较多, Li 等^[23]对我国东北平原农田土壤线虫多样性的研究, 也表明年平均气温是影响土壤线虫分布的重要环境因子。

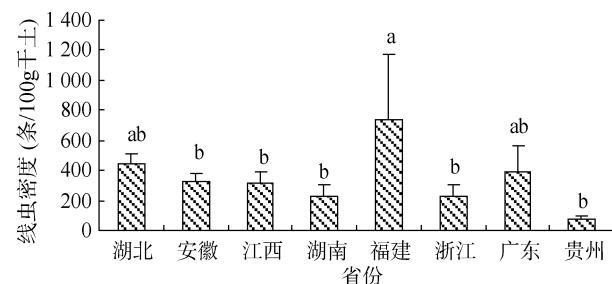


图 2 南方地区冷浸田土壤线虫个体密度

Fig. 2 The nematode individual densities in cold waterlogged paddy soil of southern region

2.2 冷浸田土壤线虫群落组成

我国 8 省份冷浸田土壤线虫群落组成见表 3, 由表 3 可知, 冷浸田土壤线虫共鉴定出 2 纲 8 目 24 科 55 属, 各个省份线虫类群数位于 12~29 属之间, 其中安徽和浙江冷浸田土壤线虫物种多样性最高, 广东冷浸田土壤线虫物种多样性最低。

各省份冷浸田的土壤线虫的优势属、常见属和稀有属见表 3。由表 3 可知, 冷浸田主要优势属为 2 属(潜根属(*Hirschmanniella*)和丝尾垫刃属(*Filenchus*)), 共占线虫总数的 46.36%; 非冷浸田优势属 3 属(潜根属、丝尾垫刃属和头叶属(*Cephalobus*)), 共占线虫总数的 59.86%, 共同优势属为潜根属和丝尾垫刃属。冷浸田常见属有 17 属, 共占线虫总数的 46.95%, 非冷浸田常见属 14 属, 共占线虫总数的 35.29%, 其中共同常见属为真滑刃属(*Apelenchus*)等 13 属。冷浸田稀有属有 36 属, 共占线虫总数的 6.70%, 非冷浸田稀有属有 18 属, 共占线虫总数的 4.85%,

表3 南方地区冷浸田土壤线虫的类群组成及平均丰度(%)
Table 3 The proportions of soil individual nematode taxa in cold waterlogged paddy soil of southern region

类群(属)	c-p	冷浸田								平均值	
		湖北	安徽	江西	湖南	福建	浙江	广东	贵州	冷浸田	非冷浸田
食细菌线虫 Bacterivores		45.18	28.86	9.90	37.51	31.35	35.73	10.57	30.44	30.14	33.07
异双胃属 <i>Diplogasteriana</i>	1	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00
原杆属 <i>Protorhabditis</i>	1	0.00	0.00	0.15	0.32	0.00	1.74	0.00	0.00	0.21	0.54
小杆属 <i>Rhabditis</i>	1	4.35	0.00	0.42	0.00	0.00	8.35	0.00	0.00	1.80	1.15
中杆属 <i>Mesorhabditis</i>	1	7.78	0.38	0.55	0.17	0.00	0.00	0.00	4.36	2.38	2.05
广杆属 <i>Caenorhabditis</i>	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.08	0.21	0.00
钩唇属 <i>Diploscapter</i>	1	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00
盆咽属 <i>Panagrolaimus</i>	1	2.57	4.00	0.23	4.45	0.40	0.00	0.00	1.79	1.99	1.53
单宫属 <i>Monhystera</i>	1	0.00	0.18	0.00	0.00	2.42	0.00	0.00	1.34	0.35	0.07
真单宫属 <i>Eumonhystera</i>	1	0.00	0.00	0.00	1.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00
头叶属 <i>Cephalobus</i>	2	10.54*	7.07	5.05	8.61	10.42*	15.00*	6.39	10.42*	8.95	16.84*
真头叶属 <i>Eucephalobus</i>	2	2.87	5.33	0.19	0.00	16.79*	1.09	1.56	2.08	3.33	3.37
板唇属 <i>Chiloplacus</i>	2	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.47	0.00	0.89	0.15	0.18
丽突属 <i>Acrobeloides</i>	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	0.00	0.00	0.03	0.00
拟丽突属 <i>Acrobeloides</i>	2	0.60	0.22	0.00	0.00	0.68	0.00	0.00	1.08	0.34	0.33
绕线属 <i>Plectus</i>	2	3.68	4.08	0.27	0.67	0.00	4.28	0.00	6.40	2.70	1.11
似绕线属 <i>Anaplectus</i>	2	1.40	0.93	0.00	0.00	0.00	0.00	1.11	0.00	0.57	0.48
角绕线属 <i>Ceratoplectus</i>	2	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
连胃属 <i>Chronogaster</i>	2	10.76*	5.77	3.02	22.07*	0.25	2.90	0.51	0.00	6.48	4.88
无齿属 <i>Anonchus</i>	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.53	0.00	0.00	0.14	0.00
杆咽属 <i>Rhabdolaimus</i>	3	0.00	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.00	0.14	0.00
棱咽属 <i>Prismatolaimus</i>	3	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.45
隐咽属 <i>Aphanolaimus</i>	3	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
无咽属 <i>Alaimus</i>	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.03	0.07
食真菌线虫 Fungivores		23.62	22.66	22.03	21.64	11.10	11.72	26.32	14.58	20.29	19.85
滑刃属 <i>Aphelenchoïdes</i>	2	1.86	6.80	1.01	2.05	0.13	2.97	0.51	4.92	2.80	2.39
真滑刃属 <i>Aphelenchus</i>	2	1.54	1.89	0.17	0.00	7.69	0.57	0.00	0.38	1.38	0.20
茎属 <i>Ditulenches</i>	2	7.80	3.10	2.30	1.56	0.35	1.69	0.00	4.92	3.51	5.24
丝尾垫刃属 <i>Filenchus</i>	2	12.42*	10.87*	18.55*	18.04*	2.92	6.48	25.82*	4.36	12.60*	12.02*
植物寄生线虫 Plant-parasites		24.10	45.54	65.20	38.14	31.65	21.55	61.09	49.50	41.29	34.66
垫刃属 <i>Tylenchus</i>	2	0.00	6.54	1.72	0.82	0.00	0.29	9.11	0.00	2.22	0.10
裸矛属 <i>Psilenchus</i>	2	1.23	1.64	0.22	1.90	2.67	0.00	3.75	0.00	1.28	1.13
野外垫刃属 <i>Aglenchus</i>	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.81	0.00	0.00	0.16	0.00
潜根属 <i>Hirschmanniella</i>	2	22.13*	33.20*	63.11*	35.43*	28.86*	3.12	33.11*	46.17*	33.76*	31.00*
短体属 <i>Pratylenchus</i>	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.64	0.00	1.25	0.36	0.00
环属 <i>Criconema</i>	3	0.00	0.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.17
轮属 <i>Criconmoides</i>	3	0.37	0.00	0.10	0.00	0.00	0.58	0.00	2.08	0.36	0.00
根结属 <i>Meloidogyne</i>	3	0.00	1.70	0.00	0.00	0.00	0.00	15.13*	0.00	1.45	1.41
螺旋属 <i>Helicotylenchus</i>	3	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00	0.57	0.00	0.00	0.08	0.07
盘旋属 <i>Rotylenchus</i>	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.53*	0.00	0.00	1.11	0.18
肾形属 <i>Rotylenchulus</i>	3	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
矮化属 <i>Tylenchorhynchus</i>	3	0.37	1.30	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.00	0.32	0.60

续表

类群(属)	c-p	冷浸田								平均值	
		湖北	安徽	江西	湖南	福建	浙江	广东	贵州	冷浸田	非冷浸田
捕食-杂食线虫 Predators-omnivores		7.10	2.94	2.87	2.71	25.90	31.00	2.02	5.48	8.27	12.42
三孔属 <i>Tripyla</i>	3	2.55	0.00	0.00	0.47	0.00	4.43	0.00	1.53	1.18	1.24
托布利属 <i>Tobrilus</i>	3	2.66	0.00	0.00	2.07	10.00*	11.18*	0.00	0.19	2.58	3.93
异色矛属 <i>Achromadora</i>	3	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.72	0.00	0.00	0.08	0.00
微矛线属 <i>Microdorylaimus</i>	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57	0.00	0.00	0.05	0.00
单齿属 <i>Mononchus</i>	4	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.32
锯齿属 <i>Prionchulus</i>	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
等齿属 <i>Miconchus</i>	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
基齿属 <i>Iotonchus</i>	4	0.00	0.00	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00
矛线属 <i>Dorylaimus</i>	4	0.33	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	3.13	0.41	0.46
拟桑尼属 <i>Thorneella</i>	4	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.16
拟矛线属 <i>Dorylaimoides</i>	4	0.00	0.31	0.00	0.00	0.00	8.72	0.00	0.45	0.87	0.00
前矛线属 <i>Prodorylaimus</i>	5	0.87	0.98	0.21	0.00	2.85	1.84	0.00	0.00	0.78	2.39
丝尾属 <i>Oxydirus</i>	5	0.00	0.00	0.60	0.00	0.00	0.72	0.00	0.00	0.15	0.00
孔咽属 <i>Aporcelaimus</i>	5	0.00	0.00	0.33	0.00	0.40	0.77	0.00	0.00	0.15	0.42
中矛线属 <i>Mesodorylaimus</i>	5	0.69	1.49	1.09	0.00	11.24*	2.03	2.02	0.19	1.80	3.46
穿咽属 <i>Nygolaimus</i>	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.67	0.00	0.00	0.00	0.05	0.04

注 : * 表示优势属 , 丰度 > 10%。

冷浸田稀有属中的 16 属为共同稀有属 , 其余稀有属 20 属未在非冷浸田土壤线虫群落中出现。上述结果表明冷浸田土壤线虫优势属、常见属与非冷浸田总体相似 , 差异主要表现在稀有属上 , 冷浸田稀有属数较非冷浸田多 , 主要是由于样品数差异造成。冷浸田大部分稀有属线虫只在单个省份分布 , 而优势属丝尾垫刃属、潜根属以及常见属头叶属、滑刃属 4 属在 8 个省份均有分布 , 这表明冷浸田土壤线虫各类群空间分布的广狭与个体数量的多少在一定程度上表现出一致性。

潜根属和丝尾垫刃属作为植物寄生线虫和食真菌线虫 , 是水稻田区别于旱稻地的线虫属^[24] , 在线虫群落中起着重要作用 , 常以优势属出现在水稻田线虫群落中。多数研究报道表明 , 水稻田土壤的优势线虫属为潜根属和丝尾垫刃属^[19-20, 25-26] , Liao 等^[27]研究表明潜根属广泛分布于我国南方水稻田。

2.3 冷浸田土壤线虫群落营养类群结构

土壤线虫营养类群反映了土壤线虫食物资源组成比例。8 个地区冷浸田营养类群结果见表 3 , 由表 3 可知 , 总体看来冷浸田土壤线虫营养类群结构与非冷浸田相似 , 均表现为 : 植物寄生线虫 > 食细菌线虫 > 食真菌线虫 > 捕食 - 杂食线虫。这反映了冷浸田与非冷浸田在土壤线虫的食物资源组成比例方面并无显著差异 , 植物寄生线虫和食细菌线虫是主要营养类

群。土壤食细菌线虫和食真菌线虫反映了土壤微生物结构 , 冷浸田土壤食细菌线虫丰度和食真菌线虫丰度与非冷浸田相近 , 这表明冷浸田土壤食微线虫的食物资源组成比例与非冷浸田差异不大 , 即土壤细菌、真菌比例差异不大。在柴娟娟等^[21]的研究中 , 经计算冷浸田的土壤细菌与真菌的比值为 19/1 , 非冷浸田的土壤细菌与真菌的比值为 16/1 , 两者比值相差不大 , 也表明冷浸田与非冷浸田土壤微生物结构差异不大。

由表 3 可知 , 湖北、湖南、安徽和贵州 4 省份冷浸田土壤线虫以植物寄生线虫和食细菌线虫为主 , 其相对丰度达到 69.28% ~ 79.94% ; 江西和广东线虫营养类群结构相似 , 均以植物寄生线虫为主 , 植物寄生线虫相对丰度达到 61% 以上 ; 福建和浙江线虫营养类群结构相似 , 捕食 - 杂食线虫分布较多 , 其相对丰度达 25.90% 和 31.00%。上述结果表明冷浸田土壤线虫营养类群结构因地域差异而不同 , 主要原因在于各地冷浸田土壤线虫的食物资源组成比例存在差异 , 作为土壤线虫食物资源的微生物和水稻根系在各地分布不一样^[21]。

2.4 冷浸田土壤线虫群落的生态指标

采用多样性指数(H')、均匀性指数(J)以及丰富度指数(SR)来分析南方不同省份冷浸田土壤线虫群落多样性 , 采用线虫通道指数(NCR)、成熟度指

数(MI)反映不同省份冷浸田土壤线虫群落功能和结构特征,计算结果见表4。由表4可知,冷浸田

与非冷浸田土壤线虫群落的生态指标总体并无显著差异。

表4 南方地区冷浸田土壤线虫的生态指标

Table 4 Ecological indices of soil nematode community in cold waterlogged paddy soil of southern region

项目	省份	多样性指数 H'	均匀度指数 J	丰富度指数 SR	线虫通道指数 NCR	成熟指数 MI
冷浸田	湖北	1.72 ± 0.07 ab	0.83 ± 0.02 ab	1.23 ± 0.07 b	0.66 ± 0.07 a	1.91 ± 0.08 c
	安徽	1.86 ± 0.12 a	0.79 ± 0.04 ab	1.83 ± 0.14 a	0.61 ± 0.06 a	2.05 ± 0.06 bc
	江西	0.90 ± 0.13 c	0.49 ± 0.05 c	0.99 ± 0.54 b	0.47 ± 0.16 ab	2.47 ± 0.27 bc
	湖南	1.29 ± 0.13 bc	0.69 ± 0.03 b	1.15 ± 0.46 b	0.56 ± 0.16 ab	1.97 ± 0.07 c
	福建	1.37 ± 0.16 bc	0.71 ± 0.07 b	1.19 ± 0.64 b	0.69 ± 0.26 a	2.96 ± 0.36 a
	浙江	2.00 ± 0.14 a	0.81 ± 0.04 ab	2.11 ± 0.52 a	0.63 ± 0.21 a	2.58 ± 0.24 ab
	广东	1.28 ± 0.13 bc	0.75 ± 0.05 b	0.88 ± 0.30 b	0.26 ± 0.12 b	2.22 ± 0.18 bc
	贵州	1.04 ± 0.27 c	0.91 ± 0.06 a	0.72 ± 0.85 b	0.75 ± 0.30 a	1.97 ± 0.13 bc
	平均值	冷浸田	1.46 ± 0.56	0.74 ± 0.17	1.28 ± 0.64	0.59 ± 0.31
	非冷浸田	1.54 ± 0.51	0.74 ± 0.15	1.24 ± 0.50	0.56 ± 0.30	2.42 ± 0.73

多样性指数(H')、均匀性指数(J)、丰富度指数(SR)、线虫通道指数(NCR)、成熟度指数(MI)在各省份之间差异显著($P < 0.05$)。由表4可知,浙江、湖北、安徽土壤线虫种类比其他省份丰富,湖北、安徽、浙江、贵州省份冷浸田土壤线虫种类的丰度分布较其他省份均匀,其线虫群落结构较其他省份稳定,江西冷浸田线虫群落多样性和稳定性低于其他省份,线虫种类丰度分布最不均匀,线虫群落结构也最不稳定。线虫通道指数(NCR)可以用于表示土壤有机质的分解途径, NCR 为0,有机质分解完全依靠真菌分解途径, NCR 为1,完全依靠细菌分解途径。由表4可知,湖北、安徽、湖南、福建、浙江、贵州6个省份冷浸田的 NCR 均>0.5,说明其土壤有机质的分解均以细菌为主;江西和湖南的 NCR 值接近0.5,表明其有机质的分解以细菌和真菌两者为主;广东的 NCR 值<0.5,表明其有机质的分解以真菌为主。成熟度指数(MI)用于反映线虫群落的演替状态和土壤环境的受胁迫程度, MI 值较低表明土壤环境受扰动强烈,反之则表明环境处于较稳定状态。福建冷浸田土壤线虫的 MI 值最高,其土壤环境比其他省份的冷浸田土壤环境稳定,安徽、浙江、广东和江西的冷浸田土壤环境相近,湖北、湖南和贵州冷浸田土壤环境最不稳定。

2.5 冷浸田土壤线虫与土壤理化性质的相关关系

冷浸田土壤线虫数量、优势属数量、营养类群与土壤理化性状的相关性关系分析结果见表5,由表5可知土壤含水量与线虫数量、潜根属有显著正相关关系;电导率与线虫数量、潜根属、丝尾垫刃属有显著负相关关系,与食细菌线虫相对丰度有显著的正相关关系;pH与食细菌线虫相对丰度有显著正相关关系;有机质与食真菌线虫相对丰度有显著负相关关系。上

述结果表明冷浸田土壤养分因子(有机质、速效钾、速效磷)并不是影响土壤线虫数量的主要因子,土壤含水量和电导率则成为影响冷浸田土壤线虫的主要因素,土壤含水量和电导率通过影响优势线虫属潜根属、丝尾垫刃属来影响线虫总数,两者对土壤线虫数量的影响相反,高的土壤含水量促进土壤线虫数量的增长,电导率是测定土壤水溶性盐的重要指标之一,过高的水溶性盐能抑制土壤线虫数量的增长。刘贝贝等^[28]对湿地土壤线虫与土壤性质的相关性的研究,也表明土壤线虫数量与可溶性盐显著负相关;王雪峰等^[29]的研究也表明湿地土壤线虫总数与电导率显著负相关。

由表5还可知土壤电导率与线虫均匀度指数(J)、线虫通道指数(NCR)有显著的正相关关系;pH与 J 有显著正相关关系,有机质与 NCR 有显著正相关关系;速效钾与多样性指数(H')、丰富度指数(SR)有显著正相关关系。多样性指数(H')表明线虫生物多样性情况,本研究中速效钾对 H' 有一定影响,王琳等^[30]研究也表明农田土壤施钾肥后线虫多样性(H')增大。

3 结论

冷浸田是一类低产水稻田,其土壤处于亚健康状态,我国南方8省份冷浸田土壤线虫密度为344条/100 g干土,为非冷浸田土壤线虫密度(716条/100 g干土)的48.04%。冷浸田与非冷浸田土壤线虫营养结构相似,总体表现为植物寄生线虫>食细菌线虫>食真菌线虫>捕食-杂食线虫,其中冷浸田植物寄生线虫、食细菌线虫、食真菌线虫和捕食-杂食线虫相对丰度分别为30.14%、20.29%、41.29%、8.27%。

表 5 冷浸田线虫数量、优势属数量、营养类群、生态指数与土壤理化性质的相关系数($n = 78$)
Table 5 Correction coefficients between nematode abundance, dominant group abundance, nematode trophic groups, ecological indices and soil physical-chemical properties

	含水量	pH	有机质	速效钾	速效磷	电导率
线虫数量	0.272*	-0.093	-0.098	-0.054	-0.107	-0.261*
潜根属 (<i>Hirschmanniella</i>)	0.236*	-0.136	-0.101	-0.13	-0.099	-0.255*
丝尾垫刃属 (<i>Filenchus</i>)	0.105	-0.030	-0.205	0.026	-0.060	-0.272*
食细菌线虫 BF(%)	0.124	0.240*	0.047	0.020	-0.055	0.284*
食真菌线虫 FF(%)	-0.044	0.080	-0.237*	0.063	-0.007	-0.135
植物寄生线虫 PP(%)	-0.025	-0.079	0.090	-0.190	0.079	-0.124
捕食-杂食性线虫 PO(%)	-0.068	-0.213	0.059	0.166	-0.027	0.007
多样性指数(H')	-0.091	0.160	-0.179	0.261*	0.036	0.044
丰富度指数(SR)	-0.182	0.108	-0.112	0.295**	-0.008	0.005
均匀度指数(J)	-0.089	0.267*	-0.067	0.164	0.111	0.329**
线虫通道指数(NCR)	0.102	0.176	0.299**	-0.003	-0.116	0.329**
线虫成熟指数(MI)	-0.135	-0.302**	0.013	-0.024	0.079	-0.198

注 : * 和 ** 分别表示相关性达到 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 显著水平。

优势线虫属丝尾垫刃属 (*Filenchus*)、潜根属 (*Hirschmanniella*)以及常见属头叶属 (*Cephalobus*)、滑刃属 (*Aphelenchooides*)在我国南方 8 省份的冷浸田均有分布, 土壤线虫各类群空间分布的广狭与个体数量的多少在一定程度上表现出一致性。年均气温、土壤含水量和电导率可能是影响冷浸田土壤线虫分布的主要因素。

致谢: 本研究以公益性行业(农业)科研专项(201003059)研究工作为基础, 该项目由江西省农业科学院刘光荣研究员主持。在研究过程中, 得到了浙江省农业科学院杨生茂研究员、江西省农业科学院徐昌旭研究员、安徽省农业科学院张祥明研究员、湖南省农业科学院罗尊长研究员、湖北省农业科学院熊又升研究员、广东省农业科学院徐培智研究员、福建省农业科学院林新坚研究员和贵州省农业科学院朱青研究员的大力支持, 特此致谢!

参考文献 :

- [1] 柴娟娟, 廖敏, 徐培智, 解开治, 徐昌绪, 刘光荣, 杨生茂. 我国主要低产水稻冷浸田养分障碍因子特征分析[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 284–288
- [2] Yeates GW. Nematodes as soil indicators: Functional and biodiversity aspects[J]. Biol. Fert. Soils, 2003, 37(4): 199–210
- [3] Ugarte CM, Zaborski ER, Wander MM. Nematode indicators as integrative measures of soil condition in organic cropping systems[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 64: 103–113
- [4] Schloter M, Dilly O, Munch JC. Indicators for evaluating soil quality[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment,
- [5] García-Ruiz R, Ochoa V, Viñegla B, Hinojosa MB, Peña-Santiago R, Liébanas G, Linares JC, Carreira JA. Soil enzymes, nematode community and selected physico-chemical properties as soil quality indicators in organic and conventional olive oil farming: Influence of seasonality and site features[J]. Applied Soil Ecology, 2009, 41(3): 305–314
- [6] Zhang XK, Li Q, Zhu AN, Liang WJ, Zhang JB, Steinberger Y. Effects of tillage and residue management on soil nematode communities in North China[J]. Ecological Indicators, 2012, 12(1): 75–81
- [7] 董稳军, 徐培智, 张仁陟, 黄旭, 郑华平, 解开治. 土壤改良剂对冷浸田土壤特性和水稻群体质量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(7): 810–816
- [8] 王飞, 李清华, 林新坚, 林诚, 何春梅, 李昱. 福建省冷浸田治理利用的思考[J]. 农业现代化研究, 2012, 33(2): 221–224
- [9] 徐祥玉, 张志毅, 王娟, 熊又升, 袁家富, 王时秋. 起垄和施肥对冷浸田土壤氧化还原状况的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(6): 666–673
- [10] 张祥明, 王文军, 凌国宏, 洪国胜, 方明, 郭熙盛. 不同氮量水平下冷浸田水稻氮和钾的吸收特征研究[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 180–184
- [11] 毛小芳, 李辉信, 陈小云, 胡锋. 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
- [12] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 51–89
- [13] Bongers T. De Nematoden Van Nederland[M]. Utrecht: Stichting Uitgeverij Koninklijke Nederlandse Natuurhistorische Vereniging, 1988: 53–382
- [14] Yeates GW, Bongers T, De Goede RGM, Georgieva SS. Feeding habits in nematode families and genera: An outline for soil ecologists[J]. Nematology, 1993, 25: 315–331

- [15] 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
- [16] Bongers T, Bongers M. Functional diversity of nematodes[J]. Applied Soil Ecology, 1998, 10(3): 239–251
- [17] Bongers T. The maturity index: An ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition[J]. Oecologia, 1990, 83(1): 14–19
- [18] 周际海, 陶军, 陈小云, 胡锋, 李辉信. 安徽农药厂厂区及周边农田土壤线虫数量特征[J]. 生物多样性, 2008, 16(6): 613–617
- [19] 刘婷, 叶成龙, 陈小云, 冉炜, 沈其荣, 胡锋, 李辉信. 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
- [20] 孙震, 刘满强, 桂娟, 李辉信, 胡锋, 焦加国. 减施氮肥和控制灌溉对稻田土壤线虫群落的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(3): 659–665
- [21] 柴娟娟, 廖敏, 徐培智, 解开治, 徐昌绪, 刘光荣, 杨生茂. 我国主要低产水稻冷浸田土壤微生物特征分析[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 247–251
- [22] Okada H, Sakaia H, Tokidaa T, Usuia Y, Nakamurab N, Hasegawaa T. Elevated temperature has stronger effects on the soil food web of a flooded paddy than does CO₂[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 70: 166–175
- [23] Li Q, Jiang Y, Liang W J, Wang H, Jiang SW. Nematode diversity in pheozem agroecosystems of northeast China[J]. Pedosphere, 2009, 5: 597–605
- [24] Okada H, Sakai H, Tokida T, Usui Y, Nakamura H, Hasegawa T. How different or similar are nematode communities between a paddy and an upland rice fields across a flooding-drainage cycle? [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43, 2 142–2 151
- [25] 戚琳, 陈法军, 刘满强, 陈小云, 祝向钰, 李辉信, 胡锋. 三种转Bt水稻短期种植对土壤微生物生物量和线虫群落的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(4): 975–980
- [26] 刘雨迪, 陈小云, 刘满强, 秦江涛, 李辉信, 胡锋. 不同稻作年限下土壤微生物学性质和线虫群落特征的变化[J]. 生物多样性, 2013, 21(3): 334–342
- [27] Liao JL, Feng ZX, Li SM, Hu YM. Species of *Hirschmanniella* on rice and their distribution in China[J]. Nematologia Mediterranea, 2000, 28: 107–110
- [28] 刘贝贝, 叶成龙, 虞丽, 焦加国, 刘满强, 胡锋, 李辉信. 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
- [29] 王雪峰, 苏永中, 刘文杰, 杨荣, 杨晓. 不同生境柽柳灌丛土壤线虫群落特征[J]. 干旱区研究, 2011, 28(6): 1 057–1 063
- [30] 王琳, 张利敏, 林琳, 张雪萍. 土壤线虫群落对过量施用农用化学品的响应[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(6): 728–736

Distribution of Soil Nematodes in Cold Waterlogged Paddy Soil of Southern Region

DENG Shao-huan, YE Cheng-long, LIU Ting, LIU Man-qiang, LI Hui-xin, JIAO Jia-guo*

(College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: In order to understand the distribution of soil nematodes in cold waterlogged paddy soil of the southern region, an investigation was conducted from 2011 to 2012 on the characteristics of soil nematode communities in cold waterlogged paddy soils of 8 provinces (Hubei, Anhui, Jiangxi, Hunan, Zhejiang, Fujian, Guangdong and Guizhou). The results showed that a total of 2 classes, 8 orders, 24 families, and 55 genera of nematodes were identified in all cold waterlogged paddy soils. *Hirschmanniella* and *Filenchus* were the dominant genera which accounted for 46.36% of the total individuals. *Cephalobus*, *Eucephalobus*, *Aphelenchoïdes*, *Filenchus* and *Hirschmanniella* existed in all provinces. The nematode individual density of cold waterlogged paddy soil accounted for 48.04% of non-cold waterlogged paddy soil and varied from 72 to 735 individuals/100g dry soil. The nematode individual density of cold waterlogged paddy soil was affected by soil moisture and electronic conductivity. *Hirschmanniella* was positively correlated with soil moisture and negatively correlated with electronic conductivity.

Key words: Southern region; Cold waterlogged paddy soil; Soil nematodes; Distribution