

# 接种蚯蚓和食细菌线虫对红壤性状及花生产量的影响<sup>①</sup>

孔令雅, 李根, 李引, 王同, 刘满强, 焦加国, 胡锋, 李辉信\*

(南京农业大学资源与环境科学学院土壤生态实验室, 南京 210095)

**摘要:** 通过温室花生盆栽试验研究了接种有益土壤动物(蚯蚓和食细菌线虫)对旱地红壤生物学性质(微生物生物量碳氮、基础呼吸、微生物熵、脲酶和酸性磷酸酶活性)、土壤速效养分(碱解氮和速效磷)及花生产量的影响。试验包含 4 个处理: 不接种处理(CK)、仅接种蚯蚓(E)、仅接种食细菌线虫(N)、联合接种蚯蚓和食细菌线虫(EN)。结果表明: 蚯蚓和食细菌线虫均提高了土壤微生物生物量碳氮的含量, 线虫对微生物生物量碳的贡献大于蚯蚓。除花生成熟期的接种蚯蚓处理外, 接种蚯蚓和食细菌线虫后土壤基础呼吸均有所增加, 且食细菌线虫的影响也大于蚯蚓。除花生结荚期无显著性差异外, 蚯蚓和食细菌线虫均极显著提高了土壤脲酶和酸性磷酸酶活性( $P < 0.05$ )。蚯蚓和食细菌线虫均能增加土壤速效磷和碱解氮含量。接种蚯蚓和食细菌线虫后花生产量的增幅为 17% ~ 20%。总之, 在 4 个花生生长时期, 相对于不接种的对照处理, 接种蚯蚓和食细菌线虫能明显改善红壤性状并最终提高花生产量。

**关键词:** 蚯蚓; 线虫; 微生物量; 酶活性; 花生

**中图分类号:** S154.1

我国南方红壤地区占全国土地总面积的 1/5, 虽然具有丰富的光、温、水、土和生物资源, 但红壤质量的退化已成为限制这一地区农业持续发展的障碍因素<sup>[1-2]</sup>。土壤动物是重要的生物资源, 其对各种干扰反应较为敏感, 被认为是最有潜力的土壤质量指示者<sup>[3]</sup>。红壤生态系统的退化和恢复通常伴随着其生物群落和功能的变化, 因此, 通常用土壤生物学指标来评价红壤的退化——恢复过程<sup>[4]</sup>。

蚯蚓作为大型土壤动物的重要代表, 在农业生态系统中的作用已经成为许多研究者关注的焦点, 已有的大量研究表明了蚯蚓活动可以改善土壤的理化性质、生物学性质和提高作物产量<sup>[5-10]</sup>。与蚯蚓相比, 对微型土壤动物在土壤生态系统中的功能地位关注较少。实际上, 线虫是土壤动物的主要功能类群之一, 广泛分布于各种生境的土壤中<sup>[11-12]</sup>, 线虫对于包括有机物分解、养分循环及植物生长在内的各项生态功能都有重要的影响<sup>[13-16]</sup>。蚯蚓和线虫都与土壤微生物有强烈的交互作用, 同时线虫又可能是蚯蚓的食物之一, 因此蚯蚓-线虫之间可能存在强烈的交互作用<sup>[17]</sup>。有研究认为, 当有蚯蚓或蚓粪时可能促进食细菌线虫的生存和繁衍<sup>[18]</sup>。近期研究表明, 接种蚯蚓降低了土壤中线虫的数量, 主要是因为蚯蚓对线虫

的直接取食及与线虫之间对食物资源的竞争作用<sup>[17,19]</sup>。不过, 蚯蚓和线虫二者之间的关系对土壤生态系统的影响却少有关注, 而相关知识对于我们全面了解土壤食物网水平上群落结构与功能的贡献, 揭示土壤生物相互作用对于土壤生态系统服务功能却至关重要<sup>[20]</sup>。

为了探究蚯蚓、食细菌线虫及二者交互作用对土壤质量和作物生长的影响, 本研究采用完全随机的交互因子试验设计, 设置不接种、仅接种蚯蚓、仅接种食细菌线虫和联合接种线虫和蚯蚓的试验处理, 借助盆栽试验, 探讨蚯蚓和食细菌线虫对土壤生物学性状、土壤养分和作物产量的影响, 旨在进一步阐明大型土壤动物(蚯蚓)和微型土壤动物(线虫)在红壤生态恢复中的功能, 为旱地红壤生态系统的生物培肥技术提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 供试土壤

供试红壤采自江西省进贤县连续种植了 3 年的花生旱地, 母质为第四纪红黏土, 采样深度为 0 ~ 20 cm。采回的土壤经风干、粉碎后过 2 mm 筛待用。供试土壤的基本性状为 pH(H<sub>2</sub>O)5.32, 有机质 10.11 g/

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2009BAD6B003)资助。

\* 通讯作者(huixinli@njau.edu.cn)

作者简介: 孔令雅(1986—), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤生态方面的研究。E-mail: 2008kly@163.com

kg, 全氮 1.16 g/kg, 全磷 0.56 g/kg, 碱解氮 37.78 mg/kg, 速效钾 47.98 mg/kg, 速效磷 7.63 mg/kg。

### 1.2 供试蚯蚓和线虫

供试蚯蚓为赤子爱胜蚓, 购于南京市某蚯蚓养殖场, 试验前先将蚯蚓放入红壤和牛粪(粪/土=3/100)的混合物中预培养和驯化。接种前, 洗净蚯蚓表面的土壤和牛粪, 然后放于铺有湿润滤纸的周转箱中, 黑暗培养 24 h 后洗净, 挑取活性强、个体壮、体重基本一致的具有环带的蚯蚓, 在干燥滤纸上吸水后称重, 最后接入盆栽土壤中。接种量为 6 条/kg 干土, 即(1.2 ± 0.1) g/kg 干土。

线虫的富化培养: 线虫分离自供试红壤中的优势属——小杆属食细菌线虫(*Rhabditis* sp.)。线虫在马铃薯蔗糖琼脂培养基(PSA)中 22℃ 恒温培养, 接种大肠杆菌(*E. coli* strain OP50)作为食源, 反复连续进行培养<sup>[21]</sup>。通过离心和体视显微镜检查获得大小基本一致的成体线虫用于接种, 接种量为 20 条/g 干土。

### 1.3 肥料

有机肥采用江苏省新天地有机肥有限公司提供的花生专用有机肥。其基本性状为: pH(H<sub>2</sub>O)6.52, 有机质 371.1 g/kg, 全氮 41.3 g/kg, 全磷 10.1 g/kg, 全钾 10.4 g/kg。有机肥在种植前全部作为基肥与土样拌匀。考虑到有机肥养分含量较高, 同时也为了减少实验干扰因素, 故在花生全生育期内不施无机肥料。

### 1.4 试验处理

本试验在温室大棚中进行, 共设有 4 个处理: 不接种蚯蚓和食细菌线虫的对照(CK); 仅接种蚯蚓(E); 仅接种食细菌线虫(N); 接种蚯蚓和食细菌线虫(EN)。每个处理在各采样期均设 3 个重复。

将 7.0 kg 风干土与 70.0 g 有机肥(以干重计算)充分混匀后装于上下口直径分别为 33 cm, 28 cm, 高为 30 cm 的塑料盆钵中。盆底铺有约 3 cm 厚的石英砂(改善盆钵内土壤的通透性), 其上铺一层细纱网。对接种蚯蚓的盆钵, 为防止蚯蚓逃逸, 利用高 25 cm 的双层硬质细纱网竖立在盆钵的周边, 其中 10 cm 插在土中, 15 cm 在土表上方。种植花生前, 调节土壤的含水量至田间持水量的 80%, 预培养 3 天后, 所有处理均穴施由南京农业大学微生物系提供的花生根瘤菌(ATCC 14134), 并在相应的盆钵中接入蚯蚓和食细菌线虫, 随后播种花生。试验期间, 严格控制土壤含水量。

### 1.5 花生种植和采样期

花生品种采用江西地方品种赣花 1 号, 选取大小一致的健康种子, 播种密度 2 颗/盆。6 月 9 日种植花

生, 在花生出苗期间密切观测, 出苗 3 天后, 间苗至每盆 1 株。分别在花生的苗期(7 月 5 日)、花针期(7 月 26 日)、结荚期(9 月 7 日)和成熟期(10 月 10 日)进行破坏性采样, 采集土壤样品。土壤样品剔除根系及有机残体后, 将部分样品放入 4℃ 冰箱保存, 用于微生物学性状和酶活性的测定; 剩余的土壤经风干, 进行土壤养分的测定。

### 1.6 测定方法

线虫分离采用浅盘法<sup>[22]</sup>, 土壤线虫计数采用直接镜检法。

土壤理化性质采用常规方法, 碱解氮(available nitrogen, AN)用碱解扩散硼酸吸收法; 速效磷(available phosphorus, AP)用盐酸-氟化铵溶液浸提, 钼锑抗比色法<sup>[23]</sup>。考虑到土壤理化性质变化较缓慢, 故本实验仅对花生收获后的土壤进行了理化性质的测定。

土壤微生物生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)和生物量氮(microbial biomass nitrogen, MBN)采用氯仿熏蒸提取法测定<sup>[24]</sup>。土壤基础呼吸(basal respiration, BR)采用室内恒温培养、碱液吸收法测定<sup>[23]</sup>。土壤代谢熵(metabolic quotient, qCO<sub>2</sub>)<sup>[24]</sup>, 是基础呼吸与微生物生物量碳间的比率, 即每形成单位微生物量碳所需呼吸的 CO<sub>2</sub>-C。土壤脲酶(urease activity, URE)采用土壤加脲素基质溶液在 37℃ 下培养 2 h, 蒸馏法测定释放的氨态氮量。土壤酸性磷酸酶(acid phosphatase activity, APE)采用土壤与磷酸苯盐溶液在 37℃ 下培养 2 h, 测定酚的释放量<sup>[25]</sup>。

### 1.7 数据统计分析

运用 SPSS 16.0 软件的双因素重复测量方差分析(repeated-measurement ANOVA), 估计蚯蚓、线虫及二者交互作用对土壤微生物学特性参数的影响; 采用双因素方差(two-way ANOVA)分析蚯蚓和线虫两因素对土壤理化性质及花生产量的影响; 采用单因子方差和 Duncan 法分析各处理间的显著差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 蚯蚓和线虫生物量

相对于接种时的密度(6 条/kg 干土), 经过 4 个月的培养, 蚯蚓的数量显著降低(表 1)。长时间生长于相对狭小的盆钵环境, 再加上花生生长后期温室大棚中的高温环境可能是造成蚯蚓成活率不高的主要原因。

接种线虫处理(EN 和 N)的线虫数量显著高于不接种处理( $P < 0.05$ ), 表明线虫具有一定的定殖能力。

表 1 花生成熟期时蚯蚓和线虫的生物量  
Table 1 Mean biomass of earthworms and nematodes at end of pod-filling stage of peanut

生物量	CK	E	N	EN
蚯蚓(条/kg)	0.00 ± 0.00	2.00 ± 0.58	0.00 ± 0.00	2.67 ± 0.67
线虫(条/g)	4.52 ± 0.44 b	6.13 ± 0.55 b	11.08 ± 2.55 a	15.16 ± 4.41 a

注：表中数据为平均值±标准差，同行不同小写字母表示不同处理在  $P < 0.05$  水平差异显著。

接种蚯蚓刺激了线虫的生长,使得接种蚯蚓和线虫的 EN 处理的线虫数量大于仅接种线虫的 N 处理。

## 2.2 接种蚯蚓和线虫对红壤微生物学性质的影响

重复测量方差分析表明(表 2),食细菌线虫显著影响土壤微生物生物量碳氮、脲酶和酸性磷酸酶,基础呼吸和微生物代谢熵( $P < 0.05$ );而蚯蚓显著影响微生物生物量碳、脲酶和酸性磷酸酶和微生物代谢熵( $P < 0.05$ );蚯蚓和线虫对微生物生物量氮、脲酶和酸性磷酸酶产生显著的交互作用( $P < 0.01$ )。

采样时间对土壤微生物学各项性质也有明显的影响,尤其是蚯蚓、食细菌线虫对土壤基础呼吸、脲酶、酸性磷酸酶等指标的影响在不同采样期影响程度不同;对微生物量碳、基础呼吸、微生物代谢熵和脲酶的影响是生长旺盛时期(苗期和花针期)强于后期(结荚期和成熟期);而其他性质的影响却是后期更大(图 1 和图 2)。

接种蚯蚓和线虫均提高了土壤微生物生物量碳氮的含量(图 1A 和 B)。对于微生物生物量碳,花针期的 EN 和 N 处理以及结荚期的 N 处理显著高于 CK 处理( $P < 0.05$ ),这说明线虫对微生物生物量碳的贡献大于蚯蚓(表 2)。对于微生物生物量氮,除花针期各处理间无显著差异外,其他 3 个时期接种处理(E、N 和 EN)均显著高于 CK( $P < 0.05$ )。其中,提高幅度最大的是 EN 处理,相比 CK,4 个时期分别增加了 14.73、2.34、26.62 和 21.43 mg/kg。

接种蚯蚓和线虫后,除成熟期的 E 处理外,土壤基础呼吸均有所增加(图 1C)。总的来说,土壤基础呼吸呈现趋势为先增加后降低并趋于稳定。EN 处理对土壤呼吸的促进作用最强,它在苗期和花针期均显著高于 CK( $P < 0.05$ ),提高幅度分别为 80.1%和 50.9%。图 1D 还表明,在花生生长的 4 个时期,E、N 和 EN 处理对微生物代谢熵的影响均大于 CK,其中 E 处理在花针期和结荚期、N 处理在苗期、EN 处理在苗期和成熟期分别显著大于 CK( $P < 0.05$ )。

图 2A 显示,除结荚期外,E、N 和 EN 处理在苗期和成熟期以及 EN 处理在花针期的脲酶活性均显著高于 CK( $P < 0.05$ )。在花生生长的 4 个时期里,E、N 和 EN 处理均显著( $P < 0.05$ )提高土壤酸性磷酸酶活性(结荚期 E 处理除外);总体上看,EN 处理对酸性磷酸酶活性的提高幅度大于 E 和 N 处理(图 2B)。

## 2.3 接种蚯蚓和线虫对土壤速效养分和花生产量的影响

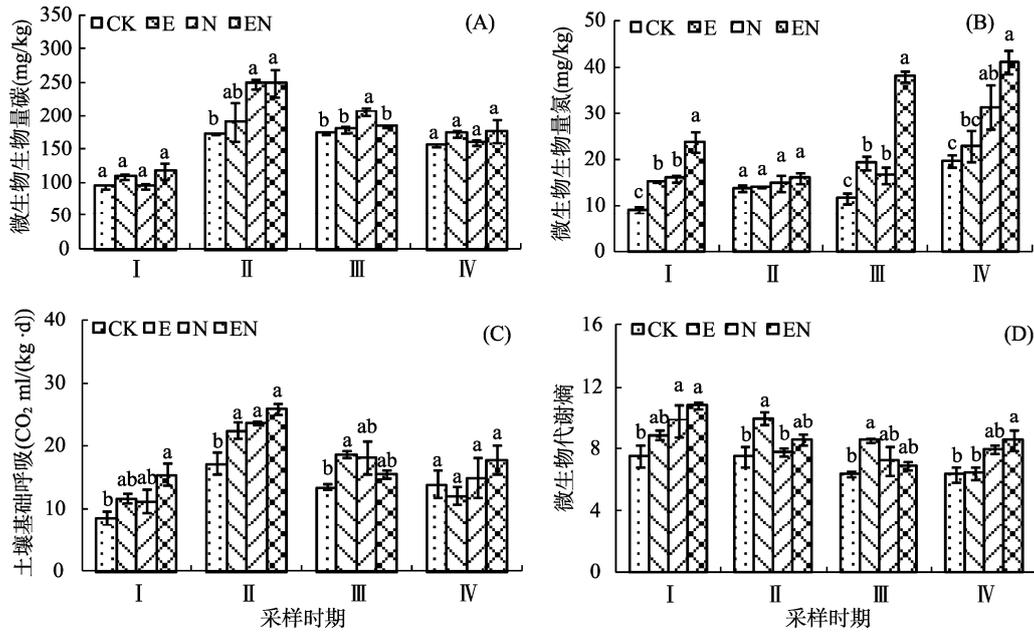
双因素方差分析表明(表 3):蚯蚓和线虫均能极显著和显著影响土壤速效磷含量;线虫因素对碱解氮的影响大于蚯蚓,而蚯蚓因素对花生产量的提高作用大于线虫,但均未达到显著性差异。

单因素分析结果表明接种土壤动物的 E、N 和 EN 三个处理均能增加土壤速效磷、碱解氮和单株花生产量(表 4)。其中,EN 处理能显著地增加土壤速效磷的含量( $P < 0.05$ )相比 CK 处理增加了 5.71 mg/kg,

表 2 蚯蚓和线虫对土壤微生物学性质影响的重复测量方差分析结果  
Table 2 Repeated-measure ANOVA results for effects of earthworms and nematodes on microbial properties

变异来源	d.f.	MBC	MBN	BR	qCO <sub>2</sub>	URE	APE
组间							
蚯蚓	1	2.78	77.85***	4.24	10.97*	16.16**	75.88***
线虫	1	17.75**	122.29***	7.33*	6.15*	25.29***	52.05***
蚯蚓 × 线虫	1	0.86	12.00**	0.33	2.49	16.85**	13.33**
误差	8						
组内							
时间	3	75.56***	38.24***	39.54***	14.95***	52.67***	138.25***
时间 × 蚯蚓	3	1.26	7.49*	1.45	1.16	4.36*	22.35***
时间 × 线虫	3	7.59***	7.89*	1.53	8.26***	2.39	36.78***
时间 × 蚯蚓 × 线虫	3	0.53	2.05	3.56*	1.83	3.49*	31.37***
误差	24						

注：表中 d.f. 为自由度，MBC 为微生物生物量碳，MBN 为微生物生物量氮，BR 为基础呼吸，qCO<sub>2</sub> 为微生物代谢熵，URE 为脲酶活性，APE 为酸性磷酸酶活性；\* 表示在  $P < 0.05$  水平显著，\*\* 表示在  $P < 0.01$  水平显著，\*\*\* 表示在  $P < 0.001$  水平显著，表 3 同。



(图中误差线为标准误，同一时期不同小写字母表示处理间在  $P < 0.05$  水平差异显著； : 苗期； : 花针期； : 结荚期； : 成熟期，下图同)

图 1 蚯蚓和线虫对土壤微生物量碳氮、土壤呼吸和微生物代谢熵的影响

Fig. 1 Effects of earthworms and nematodes on soil microbial biomass carbon and nitrogen, basal respiration and metabolic quotient

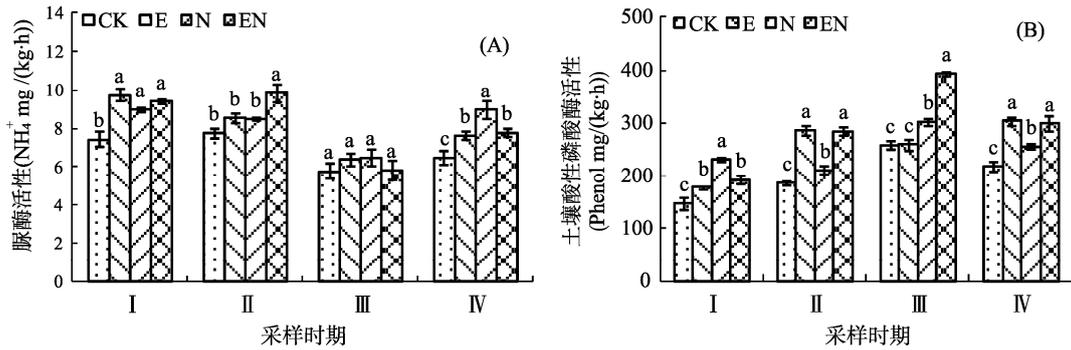


图 2 蚯蚓和线虫对土壤脲酶和酸性磷酸酶的影响

Fig. 2 Effects of earthworms and nematodes on urease and acid phosphatase activities

增幅达 55.8%。接种食细菌线虫的 N 处理显著地增加了土壤碱解氮含量 ( $P < 0.05$ )。E、N 和 EN 处理的单株花生生产量分别比 CK 增加了 1.78、1.45 和 2.02 g/株，增幅为 17% ~ 20%，由于重复间变异较大，故相对于 CK，均未能达到显著性水平。

表 3 接种蚯蚓和线虫对速效磷、碱解氮和花生产量影响的双因素方差分析

Table 3 Two-way ANOVA results for effects of earthworms and nematode on soil AP, AN and peanut yield

变异来源	d.f.	AP	AN	花生产量
蚯蚓	1	13.76**	0.05	1.09
线虫	1	7.47*	4.64	0.56
蚯蚓 × 线虫	1	2.87	3.77	0.29
误差	8			

表 4 接种蚯蚓和线虫对土壤速效养分和花生生产量的影响  
Table 4 Effects of earthworms and nematodes on soil AP, AN and peanut yield

处理	AP (mg/kg)	AN (mg/kg)	花生产量 (g/株)
CK	10.24 ± 0.09 b	44.42 ± 0.20 b	8.42 ± 0.23 a
E	12.02 ± 0.62 b	46.78 ± 0.86 ab	10.20 ± 1.82 a
N	11.16 ± 1.07 b	48.88 ± 1.96 a	9.87 ± 1.30 a
EN	15.95 ± 2.81 a	47.01 ± 0.33 ab	10.44 ± 0.03 a

注：同列不同小写字母表示处理间差异在  $P < 0.05$  水平显著。

### 3 讨论

土壤动物尤其是取食微生物的土壤动物和微生物之间的相互作用对土壤生态系统起着重要的调节作用<sup>[32]</sup>，蚯蚓和食细菌线虫作为土壤中广泛存在的

土壤动物,都能通过与微生物相互作用而参与养分循环、有机质分解和植物生长过程<sup>[33]</sup>。本试验结果表明,接种了蚯蚓和食细菌线虫后,土壤微生物生物量碳氮、基础呼吸、微生物代谢熵、酶活性、土壤速效养分和花生产量均有不同程度的提高;总的来说,接种蚯蚓和线虫(EN)处理对土壤性质和花生产量的影响大于仅接种蚯蚓(E)和仅接种线虫(N)的处理。

本实验室在秸秆还田条件下接种蚯蚓的研究表明蚯蚓的活动能够增加土壤微生物生物量碳氮含量<sup>[8,26]</sup>。胡锋等<sup>[35]</sup>认为尽管蚯蚓会吞噬微生物,植物也在吸收微生物体释放的养分,但在养分迅速而大量的转化中,微生物量碳库仍有增大的趋势。但张宝贵等<sup>[27]</sup>在短期的研究中发现接种威廉环毛蚯蚓能降低总土壤微生物量,对基础呼吸没有显著影响,却增加了土壤活性微生物量(如  $qCO_2$ )。同时蚯蚓与微生物群落的关系是非常复杂的,它与蚯蚓品种、土壤类型等都有着极大的联系<sup>[28]</sup>,如粉正蚓(*Lumbricus rubellus*)能够增加针叶腐殖质微生物呼吸达到 15% ~ 18%<sup>[29]</sup>。Tiwari 等<sup>[36]</sup>认为蚓粪中土壤酶活的增强也主要归因于土壤微生物量的增加。刘德辉等<sup>[39]</sup>在添加稻草、花生秸、油菜秸 3 种有机物料基础上,比较了接种与不接种秉氏环毛蚓对红壤磷素有效性的影响,结果表明蚯蚓改变了土壤微生物种群类型及其数量,提高了土壤磷酸酶活性,增加了土壤中有机磷含量,从而提高了土壤有效磷含量。Aira 等<sup>[37]</sup>也认为蚯蚓的存在和较高的碱性磷酸酶关系密切,归因于蚯蚓活动增加了速效磷含量,从而增加了土壤微生物量。Tao 等<sup>[34]</sup>在以往的研究发现,不管是稻季还是麦季,接种蚯蚓能增强土壤脲酶活性。接种蚯蚓处理土壤矿质氮含量提高,旱作水稻和小麦均有一定的增产<sup>[8]</sup>。

食细菌线虫对细菌的捕食会造成细菌的正反馈响应<sup>[16]</sup>,较普遍的观点是线虫中等强度的捕食使细菌种群保持快速增长和繁殖或者活性提高,最终表现为线虫对细菌的取食不但没有减少细菌的数量,反而刺激了细菌的增殖<sup>[14,30-31]</sup>。如陈小云等<sup>[15]</sup>的研究显示食细菌线虫既刺激了细菌的增殖,又刺激了真菌和放线菌的生长,因此导致了微生物生物量碳、氮、磷的大幅度增加。土壤细菌、真菌和放线菌等是土壤酶的重要来源之一,土壤酶活性与土壤微生物数量、微生物多样性、微生物生物量和土壤动物数量等呈显著或极显著正相关<sup>[38]</sup>。Djigal 等<sup>[40]</sup>发现食细菌线虫可以使玉米鲜重提高 12%,接种线虫后玉米对无机氮的吸收率增加了 16%。尽管大量研究表明食细菌线虫有助于养分矿化进而促进植物生长,但这种作用会随不同的

土壤基质 C/N 比、不同的线虫种类、微生物种类以及植物种类而异<sup>[16]</sup>。如 Ingham 等<sup>[31]</sup>发现,无论有无植物存在,添加食细菌线虫均比仅有细菌的处理出现更多的磷固定。胡锋等<sup>[14]</sup>也发现,原小杆属食细菌线虫的活动并没有促进磷矿化,反而出现较强的微生物固持,这可能是因为线虫和细菌的 C/P 比相近,线虫取食细菌时释放的磷很少。这些均间接解释了本实验中食细菌线虫增加微生物数量及活性而对土壤养分增加幅度较小,尤其是对速效磷含量没有显著影响的原因。

蚯蚓作为大型土壤动物,在本实验中并没有比微型土壤动物(线虫)表现出更为显著的作用。原因可能是蚯蚓是较高级的土壤动物对环境要求较高,盆栽条件、土壤有机质较少、花生结荚期时较高的气温等均导致蚯蚓的生命活性未能得到充分的表现,这些因素也导致花生生长最后时期,蚯蚓的数量显著地减少了。线虫的数量虽然比接种时的数量有所降低,但仍然保持了较高的种群密度。蚯蚓的存在并没有降低食细菌线虫的数量,反而刺激了其生长,这与 Senapati<sup>[18]</sup>的研究结果相似,他认为蚯蚓的粪便可以刺激食细菌线虫增加。接种蚯蚓和线虫的(EN)处理对土壤性质和花生产量的影响较仅单一接种蚯蚓或线虫的(E、N)处理更为显著,结合表 2 中的双因素重复测量方差分析,可以推测蚯蚓和线虫之间必然存在着强烈的交互作用,但本实验并没有明确两者之间的相互作用,这还有待于进一步的研究探索。

总之,蚯蚓和食细菌线虫的活动增加了旱地红壤的微生物生物量,提高土壤基础呼吸和微生物代谢熵,表明它们在提高红壤微生物总量和活性方面具有重要的生态意义;土壤酸性磷酸酶和速效磷含量提高,说明它们在红壤磷素释放上有很好的潜力;土壤微生物生物量氮、碱解氮和土壤脲酶活性提高,说明蚯蚓和线虫具有扩大土壤氮库和促进有机氮矿化的作用;接种蚯蚓和线虫均不同程度地增加了花生的产量,这对于产出较低的红壤旱地具有较好的应用前景。

致谢:感谢为本试验提供试验材料的南京农业大学的杨兴明和钟增涛两位老师以及江西省红壤研究所的黄欠如老师,同时向本实验室的黄菁华、江春和姜瑛等协助测定分析表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 赵其国. 我国红壤的退化问题[J]. 土壤, 1995, 27(6): 281-285

- [2] 孙波, 赵其国. 红壤退化中的土壤质量评价指标及评价方法[J]. 地理科学进展, 1999, 18(2): 118-128
- [3] Paoletti MG, Favretto MR, Stinner BR, Purrington FF, Bater JE. Invertebrates as bioindicators of soil use[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1991, 34: 341-362
- [4] 刘满强, 胡锋, 何园球, 李辉信. 退化红壤不同植被恢复下土壤微生物量季节动态及其指示意义[J]. 土壤学报, 2003, 40(6): 937-944
- [5] Dorda RJ, Miles VC, Hubbars TL. Effect of management practices and cropping systems on earthworm abundance and microbial activity in Sanborn Field: A 115-years-old agricultural field[J]. Pedobiologia, 2004, 48: 99-110
- [6] Lee KE. Earthworms: Their Ecology and Relationships with Soils and Land Use[M]. London: Academic Press, 1985: 224-441
- [7] 胡锋, 吴珊眉, 黄瑞采. 蚯蚓活动在红壤生态系统物质循环中的作用 // 张先婉. 土壤肥力研究进展[C]. 北京: 中国科技出版社, 1992: 176-183
- [8] 李辉信, 胡锋, 沈其荣, 陈小云, 仓龙, 王霞. 接种蚯蚓对秸秆还田土壤 C、N 动态和作物产量的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(12): 1 637-1 641
- [9] 张宝贵, 李贵桐. 土壤生物在土壤磷有效化中的作用[J]. 土壤学报, 1998, 35(1): 105-110
- [10] 张立宏, 许光辉. 微生物和蚯蚓的协同作用对土壤肥力影响的研究[J]. 生态学报, 1990, 10(2): 116-120
- [11] 梁文举, 史奕. 农业生态系统线虫多样性研究进展[J]. 应用生态学报, 2000, 11(增刊): 1-4
- [12] Bernard EC. Soil nematode biodiversity[J]. Biology and Fertility of Soils, 1992, 14: 99-103
- [13] 陈小云, 刘满强, 胡锋, 毛小芳, 李辉信. 根际微型土壤动物—原生动物和线虫的生态功能[J]. 生态学报, 2007, 27(8): 3 132-3 143
- [14] 胡锋, 李辉信, 谢涟琪, 吴珊眉. 土壤食细菌线虫与细菌的相互作用及其对 N、P 矿化-生物固定的影响及机理[J]. 生态学报, 1999, 19: 914-920
- [15] 陈小云, 李辉信, 胡锋, 刘满强. 食细菌线虫对土壤微生物量和微生物群落结构的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2 825-2 831
- [16] 吴纪华, 宋慈玉, 陈家宽. 食细菌线虫对植物生长及土壤养分循环的影响[J]. 生物多样性, 2007, 15(2): 124-133
- [17] Tao J, Chen XY, Liu MQ, Hu F, Griffiths BS, Li HX. Earthworms change the abundance and community structure of nematodes and protozoa in a maize residue amended rice-wheat rotation agro-ecosystem[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(5): 898-904
- [18] Senapati BK. Biotic interactions between soil nematodes and earthworms[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1992, 24(12): 1 441-1 444
- [19] Ilieva-Makulec K, Makulec G. Effect of the earthworm *Lumbricus rubellus* on the nematode community in a peat meadow soil[J]. European Journal of Soil Biology, 2002, 38: 59-62
- [20] Jouquet P, Dauber J, Lagerlöf J, Lavelle P, Lepage M. Soil invertebrates as ecosystem engineers: intended and accidental effects on soil and feedback loops[J]. Applied Soil Ecology, 2006, 32, 153-164
- [21] 李辉信, 陈小云, 胡锋. 土壤食细菌线虫的分离和富集培养方法[J]. 南京农业大学学报, 2002, 25(2): 71-74
- [22] 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
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999
- [24] Wardle DA, Ghani A. A critique of the microbial metabolic quotient ( $qCO_2$ ) as a bioindicator of disturbance and ecosystem development[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1995, 27(12): 1 601-1 610
- [25] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 274-340
- [26] 于建光, 陈小云, 刘满强. 秸秆施用下接种蚯蚓对农田土壤微生物特性的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 99-103
- [27] 张宝贵, 李贵桐, 申天寿. 威廉环毛蚯蚓对土壤微生物量及活性的影响[J]. 生态学报, 2000, 20(1): 168-172
- [28] Burtelow AE, Bohlen PJ, Groffman PM. Influence of exotic earthworm invasion on soil organic matter, microbial biomass and denitrification potential in forest soils of the northeastern United States[J]. Applied Soil Ecology, 1998, 9: 197-202
- [29] Haimi J, Huhta V. Effects of earthworms on decomposition processes in raw humus forest soil: a microcosm study[J]. Biology and Fertility of Soils, 1990, 10: 178-183
- [30] Griffiths BS, Bardgett RD. Interactions between micro-feeding invertebrates and soil microorganisms // Elsas JD, Trevors JT, Welling-ton EMH. Modern Soil Microbiology[C]. New York: Marcel Dekker, 1997: 165-182
- [31] Ingham RE, Trofymow JA, Ingham ER, Coleman DC. Interactions of bacteria, fungi and their nematode grazers: effects on nutrient cycling and plant growth[J]. Ecological Monographs, 1985, 55: 119-140
- [32] Bonkowski M. Protozoa and plant growth: the microbial loop in soil revisited[J]. New Phytologist, 2004, 162: 617-631
- [33] Bardgett RD, Chan KF. Experimental evidence that soil fauna enhance nutrient mineralization and plant nutrient uptake in montane grassland ecosystems[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31: 1 007-1 014
- [34] Tao J, Griffiths BS, Zhang SJ, Chen XY, Liu MQ, Hu F, Li HX. Effects of earthworms on soil enzyme activity in an organic residue amended rice-wheat rotation agro-ecosystem[J]. Applied Soil Ecology, 2009, 4(3): 1 278-1 283
- [35] 胡锋, 王霞, 李辉信, 于建光, 王丹丹. 蚯蚓活动对稻麦轮作系统中土壤微生物量碳的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42(6): 965-969

- [36] Tiwari SC, Tiwari BK, Mishra RR. Microbial populations, enzyme activities and nitrogen–phosphorus–potassium enrichment in earthworm casts and in the surrounding soil of a pineapple plantation[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1989, 8: 178–182
- [37] Aira M, Monroy F, Domínguez J. Earthworms strongly modify microbial biomass and activity triggering enzymatic activities during vermincompositing independently of the application rates of pig slurry[J]. *Science of the total Environment*, 2007, 385: 252–261
- [38] Groffman PM, McDowell WH, Myers JC, Merriam JL. Soil microbial biomass and activity in tropical riparian forests[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33: 1 339–1 348
- [39] 刘德辉, 胡锋, 胡佩. 蚯蚓活动对红壤磷素有效性的影响及其活化机理研究[J]. *生态学报*, 2003, 23(11): 2 299–2 306
- [40] Djigal D, Sy M, Brauman A, Diop TA, Mountport D, Chotte JL, Villenave C. Interactions between *Zeldia punctata* (Cephalobidae) and bacteria in the presence or absence of maize plants[J]. *Plant and Soil*, 2004, 262: 33–44

## Effects of Earthworms and Bacteria-feeding Nematodes on Soil Quality and Peanut Yield in Upland Red Soil

KONG Ling-ya, LI Gen, LI Yin, WANG Tong, LIU Man-qiang, JIAO Jia-guo, HU Feng, LI Hui-xin\*

(*Soil Ecology Laboratory, College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China*)

**Abstract:** A pot experiment was conducted to study how soil animals (earthworms and bacteria-feeding nematodes) impact microbial characteristics (microbial biomass carbon and nitrogen, basal respiration, microbial quotient, urease and acid phosphatase), soil nutrients (available phosphorus and nitrogen) and peanut yield in upland red soil. Four treatments were designed: no inoculation (CK), inoculated earthworms (E), inoculated bacteria-feeding nematodes (N), inoculated earthworms and nematodes (EN). The results showed that: Both earthworms and nematodes increased microbial biomass carbon and nitrogen, nematodes contributed more to soil microbial biomass carbon than earthworms; inoculating soil animal (earthworms and/or nematodes) enhanced soil basal respiration, nematode enhanced more than earthworm, except E treatment in pod filling stage; E, N and EN significantly increased soil urease and acid phosphatase activities ( $P < 0.05$ ) except in pod setting stage; E, N and EN increased soil available phosphorus and available nitrogen; the increase range of peanut yield was 17% to 20% after inoculating soil animal. In conclusion, inoculation of earthworms and nematodes could improve microbiological characteristics, soil fertility of upland red soil and finally increase peanut yield.

**Key words:** Earthworms, Nematodes, Microbial biomass, Enzyme activity, Peanut