

314-920

76

第19卷第6期
1999年11月生态学报
ACTA ECOLOGICA SINICAVol. 19, No. 6
Nov. 1999

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

胡 锋, 李辉信, 谢连琪, 吴珊眉

S154.36

(南京农业大学资源与环境科学学院 农业资源与生态环境研究所, 南京 210095)

摘要: 采用悉生微缩体系, 研究了 40d 培养期内不添加外源基质条件下食细菌线虫 (*Protorhabditis* sp.) 和细菌 (*Pseudomonas* sp.) 的相互作用及其对 N、P 转化的影响。在种植及不种植小麦的土壤中, 发现接种线虫后细菌数量显著增加, 非根际土壤细菌的增加量又比根际土明显。在种植小麦体系中, 根际与非根际土壤线虫均比不种作物体系有增加趋势, 其中根际土壤线虫种群的提高尤为显著。只加细菌处理中土壤 N、P 均无净矿化, 相反培养前期出现轻微的生物固定。线虫的引入显著提高了土壤矿质 N、微生物量 N 和微生物量 P 的含量, 但对土壤有效 P 影响很小。这表明线虫活动主要是促进了 N 的矿化, 而 P 表现出较强的生物固定。文中还分析了线虫捕食对细菌的增殖作用以及线虫—细菌相互作用在 N、P 矿化和生物固定中的机理。

关键词: 食细菌线虫; 细菌; 生物相互作用; N 和 P; 矿化; 生物固定 土壤

Interactions of bacterivorous nematode and bacteria and their effects on mineralization - Immobilization of nitrogen and phosphorus

HU Feng, LI Hui-Xin, XIE Lian-Qi, WU Shan-Mei (College of Natural Resources and Environmental Sciences and Institute of Agricultural Resources and Eco-environment, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract A 40-day gnotobiotic microcosm experiment without addition of exogenous substrates was conducted to investigate the interactions of the bacterial-feeding nematode *Protorhabditis* and the bacterium *Pseudomonas* and the resultant influence on mineralization-immobilization of nitrogen and phosphorus. It was found that the bacteria numbers significantly increased in the presence of nematode with or without winter wheat (*Triticum aestivum*) planting and the bacteria increment was much higher in non-rhizosphere than in rhizosphere. In the microcosm with wheat the nematode numbers both in rhizosphere and in non-rhizosphere seemed to be greater than those in the no-plant microcosm and the nematode population increased more rapidly in the rhizosphere. In the treatment with bacteria only no net mineralized nitrogen and phosphorus were found, while slight immobilization occurred at the earlier stage of incubation. The introduction of nematode remarkably increased the soil mineral nitrogen, microbial biomass nitrogen and microbial biomass phosphorus, while it had little effect on soil available phosphorus, suggesting that the activity of nematode mainly enhances nitrogen mineralization, and strengthens the immobilization of phosphorus. The possible mechanisms involved were also discussed of the stimulation of bacteria growth by nematode grazing and of the mineralization-immobilization of nitrogen and phosphorus in relation to nematode and bacterium interactions.

Key words: bacterivorous nematodes; biological interactions; N and P; mineralization-immobilization; bacteria

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (39400077 和 3970134)

收稿日期: 1998-02-17; **修订日期:** 1998-06-02

在土壤养分矿化-生物固定研究中,过去一般把有机态养分矿化为无机态养分的过程归结为微生物区系的作用^[1],而很少考虑土壤动物区系在其中的功能^[2,3]。然而,愈来愈多的事实表明,土壤动物在有机物分解及养分矿化中比微生物更早地发挥作用,特别是土壤微型动物通过与微生物的相互作用对养分转化和循环过程产生重要影响^[3~7]。由于在陆地生态系统中矿化作用是供给植物生长所需 N 素和其他养分的关键过程,因此了解参与矿化的各种土壤动物、微生物的作用以及这些生物间的相互作用格局及养分生态效应,不仅对于丰富土壤生态学理论,而且对于挖掘利用土壤生物资源、改进土壤养分管理调控,提高土壤质量及土壤生产力均有重要意义。

自生线虫是土壤中最丰富的微型动物,在农田土壤中因种群较高显得尤为重要,其中食微(包括食细菌和食真菌)线虫又占绝对优势^[8,9]。关于食微线虫在土壤养分循环中的作用前人已做过不少研究,但食微线虫与微生物相互作用及其对养分转化的影响程度及机理还不够清楚^[6,10,11],而国内尚未见任何相关报道。因此,作者选择食细菌线虫作为研究对象,利用悉生微缩培养系统(gnotobiotic microcosms),进一步探讨了食细菌线虫-细菌的相互作用及其对 N、P 矿化-生物固定的影响。

1 材料和方法

1.1 供试土壤及供试作物

供试土壤为长江冲积物形成的潮土,采自江苏南京雨花台区板桥镇,粘壤质地,种植制度为稻麦轮作,取样深度为 0~15cm。鲜土采集后,挑除根茬、石块及大型土壤动物,过 5mm 筛,之后立即进行线虫和微生物的分离,余土风干后磨碎过 1mm 筛,供室内培养试验用。土壤基本性状见表 1。供试作物为小麦(*Triticum aestivum*),品种是扬麦 157。

表 1 供试土壤基本性状

Table 1 The characteristics of soil used in experiments

pH _(H₂O)	有机碳(g/kg) Organic C	全氮(g/kg) Total N	矿质 N(μ g/g) Mineral N	有效 P(μ g/g) Available P	粘粒(g/kg) Clay(<0.002mm)
6.30	6.84	0.71	50.1	9.04	228.7

1.2 供试土壤线虫和细菌

将预处理的鲜土进行细菌和线虫的分离,获得细菌的单菌株,并富集培养。同时将分离所得的线虫在显微镜下剔除有口针的线虫(即植物寄生线虫和食真菌线虫),消毒后接种到长有不同细菌的培养基上,观察线虫的生长。如果线虫能在某种细菌的培养基上繁殖,说明线虫能以该细菌为食进行生长繁殖。重复培养 2~3 次,即可获得纯化的线虫。然后进行线虫和细菌的鉴定,本试验获得的线虫为原小杆线虫(*Protorhabditis* sp.),细菌为假单胞菌属(*Pseudomonas* sp.)。

1.3 试验设计

悉生培养(gnotobiotic culture)是指在严格控制的无菌培养体系中引入纯化的供试土壤动物和微生物,整个过程要保持无杂菌污染。本试验借鉴 Trofymow 使用的悉生培养方法^[12]并作适当改进,即在 600ml 高型烧杯中装入通过 1mm 筛的风干土 200g,浇水至田间持水量(20%),再用无菌培养容器封口膜封住烧杯口,平衡 24h 后高压灭菌锅中湿热(121℃)灭菌 2h。然后在无菌操作台中接种供试细菌,接种量为 2.5×10^6 /g 干土。在接种当天,每钵播入消毒后的小麦种子 3 粒。小麦种子表面灭菌用 150g/L 次氯酸钠处理 15min,再用去离子无菌水洗涤 5 次,置于 PDA 琼脂培养基上发芽,去除有污染的种子。10d 后再按 6 条/g 干土(与田间实际种群水平相近)接种表面灭菌的线虫。线虫的表面灭菌用 1.0g/L 的硫酸链霉素和 0.02g/L 的放线菌酮混合液处理 20min,离心去上清液,用无菌去离子水重复清洗 5~6 次。然后置于培养室培养,室内温度控制在 25 ± 2 ℃。通过重量法添加灭菌去离子水保持土壤水分在田间持水量的 80% 左

右。试验重复1次,于培养后10d、20d、30d、40d取样,分别测定根际、非根际土壤细菌和线虫的数量、土壤矿质N和有效P含量及土壤微生物量N、P。悉生培养试验处理如表2所示。

表2 试验设计

Table 2 Experimental design

处理及代号 Treatments and abbreviations					
不种作物 Without plant			种植小麦 Planting wheat		
土壤 Soil	土壤+细菌 Soil+bacteria	土壤+细菌+食细菌线虫 Soil+bacteria+bacterial-feeding nematode	土壤+小麦 Soil+wheat	土壤+小麦+细菌 Soil+wheat+bacteria	土壤+小麦+细菌+食细菌线虫 Soil+wheat+bacteria+bacterial-feeding nematode
s	sb	sbnb	sw	swb	swbnb

1.4 测定方法

细菌的计数用稀释平板法,线虫分离和计数用离心浮选法^[11];土壤矿质N用2NKCl浸提,FeSO₄-Zn粉还原后半微量开氏法测定;土壤有效P用0.5M NaHCO₃浸提,钼锑抗比色法^[12];土壤生物量N用氯仿灭菌-0.5MK₂SO₄提取法^[13];土壤生物量P用氯仿灭菌-0.5MNaHCO₃提取法^[14]。

2 结果与分析

2.1 土壤线虫与细菌的相互作用

2.1.1 接种线虫对细菌数量的影响 表3的结果显示了不接种线虫时,种植小麦处理非根际土的细菌数量比不种小麦处理有增加的趋势,但除第30天外,其差异不显著,而根际土的细菌数量显著大于不种小麦处理(P<0.01)。种植小麦处理细菌的根际效应较明显,在第10天时最高,R/S比达4.65,之后稳定在2左右,这是由于作物根系为细菌提供了更多的碳源,促进其生长繁殖。不种植作物处理中,接种线虫后,第10天时细菌数量变化不大,之后细菌数量明显增加,与无线虫对照相比增幅达104%至185%,差异极显著(P<0.01)。在种植小麦系统中,当接种线虫后,根际、根外细菌数与无线虫处理相比都有增加,其中根外细菌增加量较大,在第20天和第30天时差异达极显著水平(P<0.01);而根际细菌增加量较小,只是前期有所增加,后期基本不变。这可能是根际细菌基数较大,细菌的生长繁殖受环境容量的控制,使得线虫对细菌的增殖效应不明显。

表3 接种土壤线虫对细菌种群数量的影响

Table 3 Effects of inoculating soil nematode on bacteria population

处理 Treatments	细菌数量 Numbers of bacteria ($\times 10^3$ /g dry soil)				
	10d	20d	30d	40d	
土壤+细菌 (sb)	2.27	3.27	2.76	4.31	
土壤+细菌+线虫 (sbnb)	2.40	8.07	7.87	8.79	
土壤+小麦+细菌 (swb)	根外(S)	1.88	3.42	5.09	5.47
	根际(R)	8.74	6.02	10.16	10.95
	R/S	4.65	1.76	1.99	2.00
土壤+小麦+细菌+线虫 (swbnb)	根外(S)	3.12	6.95	7.62	6.51
	根际(R)	9.14	8.88	10.18	10.69
	R/S比	2.93	1.28	1.34	1.63
LSI _{0.05}	3.10	1.30	1.34	1.25	
LSI _{0.01}	4.29	1.80	1.85	1.72	

表4 培养过程中线虫的种群动态

Table 4 Population dynamics of nematode during incubation

处理 Treatments	线虫数 Numbers of nematodes ($\times 10^3$ /kg dry soil)				
	10d	20d	30d	40d	
土壤+细菌+线虫(sbnb)	7.70	11.53	20.87	16.88	
土壤+小麦+细菌+线虫(swbnb)	根外(S)	10.42	17.24	22.72	14.73
	根际(R)	14.61	25.74	34.22	24.89
	R/S比	1.40	1.49	1.51	1.68
LSI _{0.05}	3.15	3.00	3.20	3.76	
LSI _{0.01}	4.77	4.51	4.81	5.70	

2.1.2 土壤线虫在培养过程中的数量变化 从表 4 可以看出,种植小麦的处理其非根际的线虫数与无植物处理相比有增加趋势,但未达到显著差异。而根际土的线虫数比无植物处理显著增加($P < 0.01$),说明根际环境有利于线虫的种群增长。线虫的数量随培养时间的延长而增加,到第 30 天时数量达高峰,30d 后数量有所下降。而细菌数量一般在第 10 天或第 20 天达到高峰,因此线虫的数量增加要相对滞后于细菌。

2.2 线虫与细菌相互作用对土壤氮、磷转化的影响

2.2.1 对氮素转化的影响 (1)土壤矿质氮的变化 表 5 的结果显示了对照处理(s)中土壤矿质 N 含量在试验培养期间波动很小。接种细菌后,矿质 N 含量与对照相比在第 10d 稍有降低,以后几乎没有变化。这表明只接种细菌对土壤 N 的净矿化没有贡献,甚至可能出现 N 的生物固定。但当引入线虫后,第 10 天、第 20 天、第 30 天和第 40 天土壤矿质 N 比土壤+细菌处理分别增加了 8.0%、23.6%、20.8%和 35.1%,除第 10 天外,其它时间的差异均达显著水平($P < 0.01$)。引入线虫后矿质 N 增加而且随培养时间的延长而提高,说明线虫的存在确能促进 N 素矿化和土壤矿质 N 的增加。

在种植小麦的情况下,接种细菌处理的土壤矿质 N 含量与对照处理(sw)相比有所降低,这是由于该处理作物长势较好吸收了更多的 N 所致。当接种线虫后,除第 10d 外土壤矿质 N 显著高于前两个处理,而其作物吸收带走的 N 均比前两个处理高,因此该处理较前两个处理为作物提供了更多的 N 素营养,这与前述的不种作物条件下引入线虫处理的矿质 N 变化趋势一致。将 swbn₀ 处理与原土处理(s)相比,其土壤矿质 N 相近,这就意味着由根系活动、线虫和细菌的相互作用所矿化提供的 N 能基本上弥补作物吸收带走的那部分 N。

(2)土壤微生物量氮的变化 当接种线虫后,由于线虫体自身的贡献以及对微生物的增殖效应,这些处理中的土壤生物量 N 均比只接种细菌处理(sb 和 swb)有所增加(表 6)。不种小麦情况下,接种线虫后微生物量 N 增加幅度较少,除第 20 天外均没有达显著差异,但种小麦接种线虫处理其土壤微生物量 N 较单接种细菌处理有显著增加($P < 0.05$),也就是说线虫的引入对土壤微生物量 N 库也有明显的增加作用。

表 5 接种土壤线虫对土壤矿质氮的影响

Table 5 Effects of inoculating soil nematode on soil mineral N

处理 Treatments	矿质氮 Mineral N(mg/kg)			
	10d	20d	30d	40d
土壤(s)	68.68	67.74	69.66	71.91
土壤+细菌(sb)	66.50	67.79	71.94	71.99
土壤+细菌+线虫(sbnb ₀)	71.79	83.76	86.92	97.27
LSD0.05	5.31	2.80	3.31	1.75
LSD0.01	8.04	4.24	5.02	2.65
土壤+小麦(sw)	52.87	57.44	55.33	49.90
土壤+小麦+细菌(sw b)	48.75	50.50	49.69	48.70
土壤+小麦+细菌+线虫(sw bnb ₀)	49.47	64.36	68.38	67.72
LSD0.05	4.69	2.00	2.92	2.98
LSD0.01	7.11	3.03	4.43	4.51

表 6 接种土壤线虫对土壤微生物量 N 的影响

Table 6 Effects of inoculating soil nematode on soil microbial biomass N

处理 Treatments	微生物量氮(mg/kg) Microbial biomass N(mg/kg)			
	10d	20d	30d	40d
土壤+细菌(sb)	8.36	10.10	10.47	11.25
土壤+细菌+线虫(sbnb ₀)	9.13	12.12	11.39	12.36
土壤+小麦+细菌(sw b)	8.55	11.79	13.65	12.87
土壤+小麦+细菌+线虫(sw bnb ₀)	9.97	13.45	14.87	14.72
LSD0.05	1.40	1.37	1.27	1.17
LSD0.01	2.01	1.96	1.83	1.68

2.2.2 对土壤磷素转化的影响 (1)土壤有效磷的变化 从表 7 可以看出,与对照处理(s)相比,引入细菌后土壤有效 P 培养前期稍有降低,到最后基本持平,接种细菌+线虫后,土壤有效 P 也是降低,到后期有所上升,且比对照略有增加,但处理间均未达显著差异。在种植作物的条件下,由于小麦吸收带走一部分磷,所以 3 个处理的土壤有效 P 均比对照(S)要低,但 3 个处理之间土壤有效 P 没有明显差异。说明线虫的存在对土壤有效 P 的含量没有明显的影响。

(2)土壤微生物量 P 的变化 与土壤微生物量 N 一样,土壤微生物量 P 在接种线虫后也有增加,而且

提高幅度很大(表8)。不种植物条件下,土壤生物量P的增加幅度为21.3%~60.3%,除第10天外,其它时间的差异都达极显著水平($P < 0.01$);种植小麦条件下,生物量P的增加幅度为10.3%~79.6%,同样也是除第10天外,其余时间差异达极显著水平($P < 0.01$)。上述结果表明线虫的引入显著地增加了土壤的微生物量P库,促进了P的生物固定。微生物量P的增加对土壤P的活化和潜在供应有积极作用,但在土壤有效P较低的情况下可能会发生与作物争P的问题。

表7 接种土壤线虫对土壤有效磷的影响

Table 7 Effects of inoculating soil nematode on soil available P

处理 Treatments	有效磷(mg/kg) Available P(mg/kg)			
	10d	20d	30d	40d
土壤(s)	17.28	16.15	16.34	16.59
土壤+细菌(sb)	16.91	15.48	15.01	16.96
土壤+细菌+线虫(sbn _b)	16.67	15.14	16.57	17.23
LSD _{0.05}	0.79	1.38	0.80	0.81
LSD _{0.01}	1.19	2.09	1.22	1.25
土壤+小麦(sw)	14.81	14.98	14.08	14.83
土壤+小麦+细菌(swb)	15.36	14.35	16.12	14.97
土壤+小麦+细菌+线虫(swb _b)	14.71	14.76	15.88	14.47
LSD _{0.05}	0.68	1.27	1.43	0.85
LSD _{0.01}	1.04	1.92	2.93	1.28

表8 接种土壤线虫对土壤微生物量磷的影响

Table 8 Effects of inoculating soil nematode on soil microbial biomass P

处理 Treatments	微生物量磷(mg/kg) Microbial biomass P(mg/kg)			
	10d	20d	30d	40d
土壤+细菌(sb)	4.90	5.16	6.22	6.16
土壤+细菌+线虫(sbn _b)	5.94	8.27	9.76	9.78
土壤+小麦+细菌(swb)	5.54	6.68	7.02	7.66
土壤+小麦+细菌+线虫(swb _b)	6.11	10.84	12.61	11.66
LSD _{0.05}	1.29	1.17	1.37	1.40
LSD _{0.01}	1.85	1.68	1.97	2.01

3 讨论

线虫对细菌的捕食作用已有不少报道,但结果不尽相同。Coleman等^[17]、Anderson等^[18,19]和Woods等^[20]发现,在加葡萄糖和N基质的微缩土壤系统中,线虫活动明显降低了细菌数量。Anderson等的结果显示,在不加C源和N源的系统中线虫对细菌的减少量要少些^[21]。但Trofymow和Coleman则发现,添加纤维素或几丁质后食微线虫显著增加了细菌数量^[22],而Ingham等的试验表明,无论是添加几丁质与否,接种食微线虫处理细菌数量均有提高^[16]。Abrams和Mitchell^[23]、Opperman等^[24]发现,用污泥作基质时线虫对细菌的促进更为强烈。本研究表明,在40d培养期内不添加任何基质,原小杆线虫(*Protorhabditis*)对土壤及小麦根际细菌种群都有明显的增殖作用。这些结果的差异性与供试线虫的种类及捕食强度、细菌的类群和土壤及基质条件等因素有关,同时还受到试验观测方法的影响。实际上,所有的食细菌线虫都可能刺激细菌的增长,但有的种或某些试验在观察到细菌的净增长之前,增殖的细菌已被线虫消费。例如,Anderson等用*Mesodiplogaster lheritieri*捕食细菌,发现细菌现存量的降低,但他测算要维持线虫的生物量生产约需消耗5倍于细菌的现存量^[19]。这证明细菌的数量确实是增加了,只是增加的部分很快又被线虫取食,而细菌的快速消长很难在间隔较长的采样期内检测出来。看来,土壤微型动物和被食微生物的关系与大型动物的捕食者-猎物关系有很大不同。食细菌线虫虽然在某些条件下可抑制微生物种群,但总体上起着激活、增殖“培养”微生物的作用。食细菌线虫促进细菌种群可能有3个机理。第一,线虫摄食的细菌通过肠道后大部分仍保持活性^[25],而且这些细菌可能在肠道内获得某些激素和限制性营养物质,因而当排出后生长加快;第二,线虫的移动能力较强,可将细菌携带、传播到营养物质丰富的区域^[26],而这些区域通过细菌本身的活动很难迅速到达;第三,线虫的分泌和排泄物为细菌生长提供了更易于利用的基质及无机营养,这对非根际土壤环境中细菌的增殖尤为重要。

细菌对线虫的影响主要是其作为食物来源支持了线虫的种群及其次级生产。在田间试验中发现食细菌线虫数与细菌数量基本呈正相关关系^[27]。本试验中根际土壤线虫种群显著高于非根际或不种植作物的

土壤,即与种植作物后根系分泌物刺激细菌大量增殖有关。由于线虫个体较大,世代较长,故种群动态变化滞后于细菌,在盆栽试验中也有这种现象^[26]。

国外有关食微者对土壤生态系统 N、P 转化的报道较多。早在 1937 年 Doyle 和 Harding 即发现大多数细菌被原生动动物(纤毛虫)取食后 6h 内就有 NH_4^+-N 排泄出来^[26]。Coleman 等发现,接种细菌到加糖的灭菌土壤中,21h 后几乎所有的土壤 NH_4^+-N 和 40% 的初始 P 被细菌固定;当引入原生动动物或线虫后被固定的 N 重新矿化出来,而在只加细菌的处理中仅有不到 1/3 的 N 被矿化^[17]。Cole 等的试验表明原生动动物(变形虫)能将微生物固定的大部分 P 重新矿化成无机 P,而线虫对 P 矿化影响很小^[30]。事实上,几乎所有的微缩系统研究都得出这样一个结论,即引入原生动动物或线虫后,系统的呼吸作用和土壤 N 的矿化作用增强,N 的有效性提高^[17~24,31,32]。本文研究结果也支持上述结论。线虫活动对 N、P 矿化及有效性的影响是由线虫的代谢特点及其与微生物的相互作用机制所决定的。线虫的代谢活动较强,摄取细菌中的 C 源仅有一小部分用于构建生命体,大部分消耗于呼吸代谢^[33],因此,与 C 源相联系的那部分 N、P 源,除满足线虫自身需要外,若有多余就可能释放出来,增加土壤有效 N、P。由于细菌的 C/N 比为 5:1 左右^[20],而线虫的 C/N 比为 10:1^[19],所以线虫在取食细菌进行次级生产时会有多余的 N 释放出来。但是,由于线虫的 C/P 比和细菌比较相近^[19],线虫利用细菌时释放的 P 较少,而且在土壤有效 P 较低时这部分 P 可能被土壤微生物再次固定。本文对土壤有效 P 和微生物态 P 的研究结果(表 7 和表 8)即表明了这种情况。线虫捕食活动中释放出来的有效养分的再固定问题,特别是 P 在土壤中的生物与非生物(化学)固定问题,需要进一步研究。此外,线虫对养分的活化作用还与微生物周转速率有关。从理论上分析,线虫不仅能促进细菌数量的增殖,而且还可能加快细菌的周转,通过微生物快速周转矿化的养分或许比线虫捕食代谢直接释放养分的贡献更大。这种假说正确与否要在今后的试验中加以证实。

参考文献

- [1] Alexander M. *Introduction to Soil Microbiology*. 2nd edition, John Wiley, New York, USA. 1977.
- [2] Woodmansee R G, Vallis I and Mott J J. Grassland nitrogen. *Ecological Bulletins-NFR*, 1981, 33:443~462.
- [3] Coleman D C, et al. Biological strategies of nutrient cycling in soil systems. *Advances in Ecological Research*, 1983, 13:1~55.
- [4] Stout J D. The role of protozoa in nutrient cycling and energy flow. *Advances in Microbial Ecology*, 1980, 4:1~50.
- [5] Seastedt T R. The role of microarthropods in decomposition and mineralization processes. *Ann. Rev. Entomol.*, 1984, 29:25~46.
- [6] Coleman D C. The role of microfloral and faunal interactions in affecting soil processes. In: *Microfloral and Faunal Interactions in Natural and Agro-ecosystems*. Mitchell M J and Nakas J P eds. Martinus Nijhoff/Dr W. Junk Publishers, Dordrecht. 1986. 317~348.
- [7] Edwards C A and Stinner B R. Interactions between soil-inhabiting invertebrates and microorganisms in relation to plant growth and ecosystem processes; an introduction. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1988, 24:1~3.
- [8] Söhlenius B. Abundance, biomass and contribution to energy flow by soil nematodes in terrestrial ecosystems. *Oikos*, 1980, 34:186~194.
- [9] 胡 锋,林茂松,吴翊眉. 赣中低丘红壤生态系统线虫种群特征. 红壤生态系统研究(第 2 集). 南昌:江西科学技术出版社,1993. 177~182.
- [10] Ingham R E, et al. Interactions of bacteria, fungi, and their nematode grazers; effects on nutrient cycling and plant growth. *Ecological Monographs*, 1985, 55(1):119~140.
- [11] Griffiths B S. Microbial-feeding nematodes and protozoa in soil; their effects on microbial activity and nitrogen mineralization in decomposition hotspots and the rhizosphere. *Plant and Soil*, 1994, 164(1):25~33.
- [12] Trofymow J A, Gurnsey A J and Coleman D C. A gnotobiotic plant microcosm. *Plant and Soil*, 1980, 55:167~170.
- [13] [日]土壤微生物研究会编. 叶维青,等译. 土壤微生物实验法. 北京:科学出版社,1983.

- [14] 中国土壤学会农业化学专业委员会编. 土壤农业化学常规分析方法. 北京: 科学出版社, 1983.
- [15] Brookes P C, *et al.* Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method for measuring microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biol. Biochem.*, 1985, **17**(6):837~840.
- [16] Brookes P C, Powelson D S and Jenkinson D S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. *Soil Biol. Biochem.*, 1982, **14**:319~329.
- [17] Coleman D C. *et al.* An analysis of rhizosphere-saprophage interactions in terrestrial ecosystems. *Ecological Bulletin-NFR*, 1977, **25**:299~309.
- [18] Anderson R V, *et al.* The use of soil microcosms in evaluating bacteriophage nematode responses to other organisms and effects on nutrient cycling. *International Journal of Environmental Studies*, 1979, **13**:175~182.
- [19] Anderson R V, *et al.* Organic and inorganic nitrogenous losses by microbivorous nematodes in soil. *Oikos*, 1983, **40**:75~80.
- [20] Woods L E, *et al.* Nitrogen transformations in soil as affected by bacterial-microfaunal interactions. *Soil Biol. Biochem.*, 1982, **14**:93~98.
- [21] Anderson R V, *et al.* Trophic interactions in soil as they affect energy and nutrient dynamics. II. Biotic interactions of bacteria, amoebae, and nematodes. *Microb. Ecol.*, 1978, **4**:361~371.
- [22] Trofymow J A and Coleman D C. The role of bacterivorous and fungivorous nematodes in cellulose and chitin decomposition. In: *Nematodes in Soil Ecosystems*, ed, Freckman D W. University of Texas Press, Austin, Texas, USA. 1982, 117~138.
- [23] Abrams B I and Mitchell M J. Role of nematode-bacterial interactions in heterotrophic systems with emphasis on sewage sludge decomposition. *Oikos*, 1980, **35**:404~410.
- [24] Opperman M H, *et al.* Nematode and nitrate dynamic in soils treated with cattle slurry. *Soil Biol. Biochem.*, 1993, **25**(1):19~24.
- [25] Smerda S M, Jensen H J and Anderson A W. Escape of Salmonellae from chlorination during ingestion by *Pristionchus lheritieri* (Nematoda: Diplogasterinae). *J. Nematology*, 1971, **3**:201~204.
- [26] Anderson R V *et al.* Phosphorous mineralization in spent oil shale as affected by nematodes. *Soil Biol. Biochem.*, 1981, **14**:365~371.
- [27] Hu Feng, Li Huixin and Wu Shanmei. Differentiation of soil fauna populations in conventional tillage and no-tillage red soil ecosystems. *Pedosphere*, 1997, **7**(4):339~348.
- [28] 胡锋, 李辉信, 史玉英, 等. 两种基因型小麦根际土壤生物动态及根际效应. *土壤通报*, 1998, **29**(3):133~135.
- [29] Doyle W L and Harding J F. Quantitative studies on the ciliate glaucocoma excretion of ammonia. *J. Exp. Biol.*, 1973, **14**:462~469.
- [30] Cole C V, *et al.* Trophic interactions in soils as they affect energy and nutrient dynamics. V. Phosphorus transformations. *Microb. Ecol.*, 1978, **4**:381~387.
- [31] Bouwman L A, *et al.* Short-term and long-term effects of bacterivorous nematodes and nematophagous fungi on carbon and nitrogen mineralization in microcosms. *Biol. Fertil. Soils*, 1994, **17**:249~256.
- [32] Hassink J, Neutel A M and De Ruiter P C. C and N mineralization in sandy and loamy grassland soils: the role of microbes and microfauna. *Soil Biol. Biochem.*, 1994, **26**(11):1565~1571.
- [33] Nicholas W. *The Biology of Free-living Nematodes*. New York. Clarendon Press, Oxford. 1964.