

黄保宏, 邹运鼎, 毕守东, 等. 2009 稀土元素对梅园主要土壤动物群落结构组成的影响 [J]. 环境科学学报, 29(9): 1849– 1857
Huang BH, Zou Y D, Bi S D, *et al*. 2009. Effects of rare earth elements on the composition of the soil fauna community in a plum orchard [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(9): 1849– 1857

稀土元素对梅园主要土壤动物群落结构组成的影响

黄保宏^{1*}, 邹运鼎², 毕守东², 巫厚长², 李桂亭², 彭军成¹

1 安徽科技学院, 凤阳 233100
2 安徽农业大学, 合肥 230036

收稿日期: 2008-11-19 修回日期: 2009-03-19 录用日期: 2009-06-12

摘要:为阐明不同稀土处理对梅园土壤动物群落组成的影响, 采用手拣法、干漏斗法和湿漏斗法对梅园各稀土处理区土壤动物群落组成进行系统调查, 共得土壤动物标本 8076 个, 隶属于 4 门 15 纲 31 目. 其中昆虫纲物种最为丰富, 有 12 目, 占全部种群数的 58.4%; 鞘翅目、膜翅目、蜚蠊目、双翅目和弹尾纲等 5 种优势类群占土壤动物个体总数的 81.44%. 5 种稀土处理区中, 杂食性土壤动物功能团所占的比例均高于植食性功能团所占的比例, 且杂食性土壤动物所占的比例依次为对照区 (CK) > La 处理区 (下同) > Ce 区 > Pr 区 > Nd 区 > Sm 区. 不同浓度稀土处理区中土壤动物类群和个体数量均随着稀土浓度增加而减少, 杂食性功能团所占的比例也高于植食性功能团所占的比例, 且杂食性功能团所占的比例依次为对照区 (CK) > 25 区 (mg kg⁻¹ 处理区, 下同) > 50 区 > 100 区 > 500 区 > 1000 区 > 2000 区 > 3000 区. 以 Pr 处理后的土壤动物物种数多, 个体数量大, 优势集中指数高, 优势物种优势性极明显, 其它 4 种稀土在类群数、个体数、优势集中指数和优势类群优势性和 Pr 规律基本相同, 依次为 Nd、Sm、Ce 和 La, 但均比 CK 小. 因此, 5 种稀土及其不同浓度处理区土壤动物群落的稳定性相对较差, 对土壤动物多样性、均匀性、优势度和类群数等群落指标产生影响, 使土壤动物群落组成产生较为显著的变化.
关键词: 稀土元素; 梅园; 土壤动物群落

文章编号: 0253-2468 (2009) 09-1849-09 中图分类号: X53 文献标识码: A

Effects of rare earth elements on the composition of the soil fauna community in a plum orchard

HUANG Baohong^{1,*}, ZOU Yunding², BISHoudong², WU Houchang², LIGuiting², PENG Junchen¹

1 Anhui Technology and Science University Fengyang 233100
2 Anhui Agricultural University, Hefei 230036

Received 19 November 2008; received in revised form 19 March 2009 accepted 12 June 2009

Abstract The composition of the soil fauna community in five rare earth element (RE)-treated plots located in a plum orchard were investigated by the hand-picking, Tullgren and Baermann methods. A total of 8076 soil animal samples belonging to 31 Orders, 15 Classes and 4 Phyla were collected from the different plots. Detailed analysis revealed that the majority of the different species identified belonged to 12 Orders of the Insecta, and together these accounted for 58.4% of the total number of species represented. The dominant fauna types in the treated plots belonged to the Coleoptera, Hymenoptera, Acarina, Diptera and Collembola, and together these accounted for 81.44% of the total animal population. The proportion of omnivores was higher compared to herbivores in all five of the differently RE-treated plots. The ratio of omnivores to herbivores was highest in untreated control plots and decreased upon RE-treatment in the order lanthanum (La), cerium (Ce), praseodymium (Pr), neodymium (Nd) and samarium (Sm). Both the number of species and individuals comprising the soil fauna in each treated plot and the proportion of omnivore populations were all increasingly suppressed with increasing RE concentrations within the range 0~3000 mg kg⁻¹ soil. Our data indicated that RE-treatments destroyed the stability of soil fauna communities, decreased the overall population of soil animals and resulted in significant differences in the composition of soil fauna communities compared to untreated soils.

Keywords rare earth element (RE); plum orchard; soil fauna community

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 30871444); 安徽省教育厅自然科学基金资助项目 (No. KJ2008B75ZC); 安徽省重点科研资助项目 (No. 07021004)
Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 30871444), the Natural Science Foundation of Anhui Province Education Department (No. KJ2008B75ZC) and the Key Natural Science Foundation of Anhui Province (No. 07021004)
作者简介: 黄保宏 (1966—), 男, 副教授 (博士), E-mail: bhh826@sohu.com; * 通讯作者 (责任作者)
Biography: HUANG Baohong (1966—), male, associate professor (Ph.D.), E-mail: bhh826@sohu.com; * Corresponding author
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 引言 (Introduction)

我国是世界上稀土资源最丰富和第一个把稀土作为商品应用于农牧林渔业等生产的国家. 始于“六五”期间的“稀土农用”等攻关项目已取得了可喜的成果, 大幅度 (4% ~ 14%) 地提高了某些农作物的产量给中国农业及稀土产业带来了丰厚的回报, 现已作为我国农业增产的一项重要措施大力推广 (郭伯生等, 1988). 但近年来, 大量稀土由叶面喷施改为土施, 且施入量一般为喷施法的 10 倍以上等不合理使用所造成的环境问题日益突出. 研究发现, 稀土进入土壤后很少向下迁移, 土壤中可溶态稀土一般只占全量的 10% 以下 (庞欣等, 2001), 稀土微肥长期以喷施和基肥等形式进入农田和无公害果园土壤耕作层中的稀土总量显著增加. 由于其在土壤中有效利用率较低, 加速了稀土的不断累积, 且存在富集趋势. 这将改变土壤有效使用条件与规律, 对土壤动物产生不良影响 (王咏梅等, 2004), 并通过生物链和食物链等各种渠道进入人体, 影响人类的健康. 如根茎类的薯类等对土壤中稀土具有明显的富集作用, 最终通过食物链将致使人体摄入稀土量超过自然水平, 并可能在某些脏器、组织内蓄积对人体健康有害. 近年来, 国内外在稀土元素 (rare earth element, RE) 进入机体后是否参与有关生物化学过程以及其是否对生物效应存在着 homeosis 现象等诸多环境和生态毒理效应问题已受到人们的广泛关注和研究 (Wytenbach *et al.*, 1998; 何跃君等, 2005; 王燕等, 2005; 刘苏静等, 2007; 彭安等, 2003). 为此, 我国已将 RE 确定为具有“潜在危险的或是新的环境污染元素”.

土壤动物群落与土壤重金属污染之间的关系是国内外环境科学领域研究的热点之一. 已有研究表明, 土壤动物群落结构的变化能较早期地预测环境质量及土壤养分的变化过程, 被认为是最有潜力的敏感性生物指标 (孙波等, 1997). 土壤和土壤动物均是果园生态环境的重要组分, 土壤动物是土壤活性和肥力的主要贡献者, 同时它们也担负着消费者和分解者等多重角色, 在土壤结构形成、熟化、改良以及在生态系统的能量转化和物质循环中都起着重要的作用 (梁文举等, 2001; 熊炳昆等, 2000), 同时, 由于土壤动物在各类土壤中普遍存在, 类群和个体数量丰富, 群落生物多样性高, 土壤动物可能成为土壤质量的指示生物 (Didden *et al.*, 2001;

Doring *et al.*, 2003). 随着社会经济的发展, 人们的绿色消费意识日益增强, 无公害、纯天然绿色食品倍受人们的关注. 果梅加工品素来以“健康食品”问世, 很受市场欢迎, 近年来, 果梅产区不断扩大. 科学合理地使用稀土微肥是保护生态环境和实现果梅可持续发展的基础. 因此, 从生态毒理学角度研究长期施用稀土对梅园土壤生态系统生物群落结构和果梅可持续发展的影响, 具有重要的意义. 目前, 国内外对稀土的生态环境影响的研究主要集中于多种稀土复合物或稀土氯化物对动植物生态毒理学 (刘苏静等, 2007; Patra *et al.*, 2004)、土壤微生物 (刘庆都等, 1998; 唐欣昀等, 2005) 或病原物的结构组成 (章健等, 2000) 和土壤学等方面研究 (孙波等, 1997; 褚海燕等, 2000), 而对稀土农用后对土壤动物群落结构影响的研究报道甚少. 农用稀土进一步大面积推广和应用之前有待解决的关键问题之一是农用稀土的环境风险. 因此, 本文系统研究了不同种类和浓度的 RE 对梅园土壤动物群落组成的影响, 旨在为综合评价稀土农用的环境生态安全性、合理使用, 稀土胁迫对土壤动物群落的影响机理和地下害虫综合治理提供相关科学依据.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 稀土及来源

试验稀土 La_2O_3 、 CeO_2 、 Pr_6O_{11} 、 Nd_2O_3 和 Sm_2O_3 等的纯度均为 99.99%, 均由惠州市天亿稀有材料有限公司生产.

2.2 稀土施用试验设计和调查方法

供试样地选在安徽科技学院和凤阳县园艺场梅园, 位于淮河中游南岸江淮流域皖东丘陵地带, 属于北亚热带湿润季风气候区, 年平均温度 14°C , 降雨量 800 mm. 地形由北向南倾斜, 土壤为粘盘湿润淋溶土, 其基本理化性状如下: pH 6.87, 有机质 17.3 g kg^{-1} , 阳离子交换量 $14.64\text{ cmol kg}^{-1}$, 机械组成: 砂粒 22.5%、砂粉粒 38.8%、粘粒 38.7%, 质地壤质粘土, 稀土总含量 144.2 mg kg^{-1} , 交换态稀土含量 1.05 mg kg^{-1} , La、Ce、Pr、Nd 和 Sm 等 5 种稀土在粘盘湿润淋溶土表层土壤中的最大吸附量均小于 6659 mg kg^{-1} (以稀土氧化物计算), 且土壤中 5 种稀土元素的背景值分别为 39.2 mg kg^{-1} 、 75.4 mg kg^{-1} 、 14.6 mg kg^{-1} 、 32.3 mg kg^{-1} 和 6.0 mg kg^{-1} . 果梅郁闭度 0.7~0.8, 面积约 20 hm^2 . 果梅品种为青梅 *Prunus Mume* Sieb. et Zucc., 树势生长

正常, 15a生, 树高约 2~ 2.5 m, 株行距 4m × 4m.

稀土试验设计及调查: La₂O₃、CeO₂、Pr₆O₁₁、Nd₂O₃和 Sm₂O₃等 5种稀土氧化物均分别用盐酸配制成 25、50、100、500、1000、2000、3000 mg·kg⁻¹等 7种浓度, 设置清水为对照 (CK), 每种浓度 3次重复, 采用完全随机区组设计, 共设 108个处理区 (2 × 2 m²). 稀土在 2007年 3月 20日结合梅园中耕除草时用 SX-MD5DA 型喷雾器一次性均匀喷施入梅园表土壤中, 并用清水淋溶湿润. 同年 11月 20日, 在每个处理区的对角线上取 3个样点, 先对梅园凋落物层进行调查, 用手拣法采集大型土壤动物和改良干漏斗法 (modified tullgren 2 mm标准筛) 和湿漏斗法 (Baermann) 分离提取中、小型土壤动物, 再用 100 cm³土壤环刀在 0~ 5、5~ 10、10~ 15 cm 处分层取样, 同时在每个处理区均匀布设 2个诱捕陷阱 (直径约 7cm, 深约 10cm 的罐头瓶, 瓶口平土面, 内放饵料、2% 的苯甲酸钠溶液作药剂和少量清洁剂以减少该溶液表面张力, 共约 1/3瓶容积), 收集活动在地表的各类土壤动物, 用 75% 酒精浸制作土壤动物标本, 在解剖镜下鉴定其种类和数量.

由于土壤动物分类难度较大, 所有土壤动物标本分类鉴定依据《中国土壤动物检索图鉴》只鉴定到纲或目 (尹文英, 1998), 依据其取食特性和在食物分解中的作用等将梅园土壤动物群落划分为植食性、捕食性、腐食性、杂食性、枯食性和菌食性功能团等 6种类型. 这样既能从较高水平揭示土壤动物群落组成与结构以及集团间的相互关系, 又能全面考虑个体数较少、分类鉴定较困难的物种在群落中所起的作用.

2.3 数据分析

2.3.1 土壤动物类群数量等级划分标准 梅园土壤动物类群数量等级按傅必谦等 (2002) 标准划分: 个体数占全部捕获的土壤动物总数 10% 以上为优势类群; 介于 1% ~ 10% 之间为常见类群; 介于 0.1% ~ 1% 之间为稀有类群; 0.1% 以下的为极稀有类群. 本文将优势类群和常见类群统归为主要类群, 稀有类群和极稀有类群统归为其它类群.

2.3.2 土壤动物群落分析方法 采用丰富度 (SR)、Shannon-wiener (1949) 多样性指数 (H')、Pielou (1975) 均匀度指数 (J)、Simpson 优势集中性指数 (C) 和 Berger-Parker 优势度指数 (D) 进行群落结构分析. 其计算公式参见邹运鼎等 (1989) 和徐汝梅 (1985) 方法. 所有数据处理均采用 SAS 软件 (阮

桂海等, 2003) 和 Excel 2003 进行.

3 结果 (Results)

3.1 不同稀土对梅园土壤动物群落组成的影响

由表 1 可知, 对样地的稀土各处理区进行系统调查, 共采集土样 108 个, 获土壤动物标本 8076 只, 隶属于 4 门 15 纲 31 目. 其中昆虫类群最为丰富, 有 12 目, 占全部物种数量的 58.41%; 共有土壤动物 37 类群 (目或纲), 优势类群 5 类: 鞘翅目、膜翅目、蜚蠊目、双翅目和弹尾纲 (81.44%), 分别占土壤动物个体总数的 25.22%、17.08%、15.39%、12.80%、10.95%; 常见类群有: 伪蝎目、盲蛛目、单齿目、蜘蛛目、后孔寡毛目、颤蚓目、山蛩目、缨翅目、矛线目、同翅目、小杆目和蠋线纲 (16.20%), 分别占土壤动物个体总数的 2.75%、1.62%、1.47%、1.41%、1.34%、1.24%、1.16%、1.09%、1.06%、1.04%、1.02% 和 1.00%; 稀有类群有半翅目、地蜈蚣目、蜚蠊目、鳞翅目、原尾纲和双尾纲 6 类群, 共占土壤动物个体总数的 1.57%; 极稀有类群占梅园土壤动物个体总数的 0.79%. 优势类群和常见类群共占土壤动物个体总数的 97.64%. 植食性和杂食性土壤动物功能团所占的比例为 96.85%. 这些土壤动物构成了梅园土壤动物的主要类群, 它们对梅园土壤环境具有较强的适应能力. 稀有类群对梅园环境的变化较为敏感, 在某一时期及土壤条件适宜时, 其种群数量会逐渐增加, 并成为这一时期的常见的类群. 从土壤动物类群总体分布特征来看, 5 种稀土处理间土壤动物类群数有一定的差异, 其中 La 区与 CK 区之间, Ce 区、Pr 区和 Nd 区之间均无差异.

梅园土壤动物营养功能团共采集到植食性、捕食性、腐食性、杂食性、枯食性和菌食性等 6 种, 不同种类稀土处理区土壤动物营养功能团数没有变化, 但营养功能团内个体组成有所不同 (表 1). 从土壤动物营养功能团的个体数的分布特征看, 5 种稀土处理均以土壤动物植食性功能团内个体数最多, 占功能团总个体数的 46.45%, 其它依次为杂食性功能团个体数 (26.79%)、捕食性功能团个体数 (19.17%)、枯食性功能团个体数 (4.67%)、腐食性功能团个体数 (2.81%) 和菌食性功能团个体数 (0.11%). 但在 5 种稀土处理中, 土壤动物杂食性功能团所占的比例却高于土壤动物植食性功能团所占的比例, 且杂食性功能团所占的比例依次为 CK

表 1 不同稀土和不同浓度稀土 La 处理梅园土壤动物类群组成和结构

Table 1 Group composition and community structure of soil fauna with different rare earth elements and concentrations of La in plum orchard (individual·kg⁻¹)

土壤动物类别 Taxa	土壤动物类群数															功能 类群 Guild
	稀土种类 Kinds of rare earth element						稀土 La 不同浓度的处理 Treatment of La in different concentration/(mg·L ⁻¹)									
	CK															
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	频度 Percent	多度 Degree	25	50	100	500	1000	2000	3000	频度 Percent	
线形动物门 Nemata																
泄管纲 Secernentea																
小杆目 Rhabditida																
19	13	15	13	14	8	1.02%	++	5	3	2	1	1	1	0	1.19%	++
垫刃目 Tylenchida																
3	1	1	1	1	0	0.09%	△	1	0	0	0	0	0	0	0.09%	△
泄腺纲 Adenophora																
矛线目 Dorylaimida																
21	10	16	15	15	9	1.06%	++	3	2	2	1	1	1	0	0.92%	+
单齿目 Mononchida																
35	20	19	16	20	9	1.47%	++	8	5	3	2	1 _c	1	0	1.84%	++
单宫目 Monhysterida																
2	1	1	1	0	0	0.06%	△	1	0	0	0	0	0	0	0.09%	△
窄咽目 Araeolaimida																
1	1	0	0	0	0	0.02%	△	1	0	0	0	0	0	0	0.09%	△
蝎线纲 Pauropoda																
31	11	14	9	8	8	1.00%	++	4	3	1	1	1	1	0	1.01%	++
环节动物门 Annelida																
寡毛纲 Oligochaeta																
颤蚓目 Tubificida																
21	17	19	18	14	11	1.24%	++	7	5	2	1	1	1	0	1.56%	++
后孔寡毛目 Oligochaet opisthopora																
24	18	20	17	15	14	1.34%	++	7	6	1	1	1	1	1	1.65%	++
近孔寡毛目 Oligochaet plesiopora																
3	1	1	1	1	0	0.09%	△	1	0	0	0	0	0	0	0.09%	△
软体动物门 Tardigrada																
腹足纲 Gastropoda																
柄眼目 Stylommatophora																
2	1	1	1	0	1	0.07%	△	1	0	0	0	0	0	0	0.09%	△
节肢动物门 Arthropoda																
蛛形纲 Arachnida																
蜘蛛目 Araneae																
29	20	21	19	13	12	1.41%	++	7	5	4	3	1	0	0	1.84%	++
盲蛛目 Opiliones																
43	19	21	20	15	13	1.62%	++	6	5	4	2	1	0	0	1.74%	++
伪蝎目 Pseudoscorpiones																
65	39	33	30	28	27	2.75%	++	11	9	7	6	3	1	1	3.58%	++
蜱螨目 Acarina																
359	193	201	180	157	153	15.39%	+++	51	45	37	22	19	4	4	17.72%	+++
软甲纲 Malacostraca																
等足目 Isopoda																
1	1	1	1	1	0	0.06%	△	1	0	0	0	0	0	0	0.09%	△
倍足纲 Diplopoda																
山蛭目 Spirobolida																
29	15	17	13	11	9	1.16%	++	5	4	3	1	1	0	0	1.38%	++
唇足纲 Chilopoda																
唇足纲 Chilopoda																
唇足纲 Chilopoda																

土壤动物类别 Taxa	土壤动物类群数										稀土 La 不同浓度的处理							功能 类群 Guild		
	稀土种类 Kinds of rare earth element					Treatment of La in different concentration/(mg·L ⁻¹)														
	CK		La			Ce	Pr	Nd	Sm	频度 Percent	多度 Degree	25	50	100	500	1000	2000		3000	频度 Percent
地蜈蚣目 Lithobiomorpha	13	6	7	5	5	1	0.46%	+	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0.55%	+	Pr
石蜈蚣目 Geophilomorpha	1	1	0	0	0	0	0.02%	△	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.09%	△	Pr
蜈蚣 Scolopendromorpha	2	1	1	0	0	0	0.05%	△	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.09%	△	Pr
综合纲 Symphyla																				
综合目 Symphyla	1	1	0	0	0	0	0.02%	△	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.09%	△	S
少足纲 Paupoda	0	1	0	0	0	0	0.01%	△	1	0	0	0	0	0	0b	0	0	0.09%	S/Ph	
原尾纲 Protura	4	1	1	1	1	1	0.11%	+	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.09%	+	F
弹尾纲 Collembola	273	132	133	128	120	98	10.95%	++ +	37	29	23	18	12	9	4	12.12%	++ +			
双尾纲 Diplura	2	2	2	1	1	0	0.10%	+	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0.18%	+	O
昆虫纲 Insecta																				
膜翅目 Hymenoptera	417	200	25	10	64	162	17.08%	++ +	59	50	34	20	17	12	8	18.37%	++ +			Ph/O
鞘翅目 Coleoptera	551	303	340	330	295	218	25.23%	++ +	77	58	52	39	31	26	20	27.82%	++ +			Ph/Pr
双翅目 Diptera	429	137	153	116	107	92	12.80%	++ +	39	31	27	17	13	8	3	12.58%	++ +			Pr/S
缨翅目 Thysanoptera	33	14	16	10	8	7	1.09%	++	5	3	2	1	1	1	1	1.29%	++			Ph/S
同翅目 Homoptera	34	3	15	8	7	7	1.04%	++	5	3	2	2	1	0	0	1.19%	++			Ph
半翅目 Hemiptera	11	5	6	6	4	3	0.43%	+	2	1	1	1	0	0	0	0.46%	+			Ph
蜚蠊目 Blattoptera	9	3	4	3	3	2	0.30%	+	2	1	0	0	0	0	0	0.28%	+			O
鳞翅目 Lepidoptera	4	3	3	2	2	0	0.17%	+	1	1	1	0	0	0	0	0.28%	+			Ph
直翅目 Orthoptera	1	2	1	1	1	0	0.08%	△	1a	1	0	0	0	0	0	0.28%	+			Ph
啮虫目 Psocoptera	2	1	2	1	0	1	0.09%	△	1	0	0	0	0	0	0	0.09%	△			S/D
脉翅目 Neuroptera	1	1	1	1	1	0	0.06%	△	1	0	0	0	0	0	0	0.09%	△			Pr
革翅目 Deramptera	1	1	1	1	0	0	0.05%	△	1	0	0	0	0	0	0	0.09%	△			O
总个体数 Total individuals	2477.0 ± 24.7 ^a	1209 ± 10 ^b	1322 ± 17 ^b	1170 ± 8 ^b	1032.0 ± 11.2 ^b	866.0 ± 7.4 ^c	100%		359.0 ± 24.8 ^a	273.0 ± 16.0 ^b	209.0 ± 8.3 ^b	140.0 ± 5.0 ^c	106.0 ± 7.0 ^c	81.0 ± 3.1 ^d	42 ± 2 ^d	100%				
类群数 Number of groups	37.0 ± 2.3 ^a	37.0 ± 1.4 ^a	33.0 ± 1.1 ^b	32.0 ± 1.0 ^b	30.0 ± 1.2 ^b	24.0 ± 0.5 ^c			37.0 ± 2.1 ^a	23.0 ± 1.0b	20.0 ± 1.2 ^b	19.0 ± 1.0 ^b	17.0 ± 1.1 ^b	15.0 ± 0.9 ^c	8.0 ± 0.8 ^c					
功能团数 Number of function group	6.0 ± 0.8 ^a	6.0 ± 0.6a	6.0 ± 0.9 ^a	6.0 ± 0.4 ^a	6.0 ± 0.7 ^a	6.0 ± 0.5 ^a			6.0 ± 0.7 ^a	5.0 ± 1.0 ^a	5.0 ± 0.90 ^a	5.0 ± 0.9 ^a	5.0 ± 0.7 ^a	5.0 ± 1.0 ^a	5.0 ± 0.8 ^a					

注：+ + +：优势类群 Dominant groups(个体数占样地总数10%以上)；+：常见类群 Common groups(个体数占样地总数1%~10%)；+：稀有类群 Rare groups(个体数占样地总数0.1%~1%)；△：极稀有类群 Few rare groups(个体数占样地总数<0.1%)；Ph：植食性 Phytophage；D：枯食性 Debris-feeder；s：F：腐食性 Saprozoic；O：杂食性 Omnivores；表中数据均为3次重复的平均值，同行中不同字母为0.05水平下的差异显著性。下同。Data in table were the average values of three replicates. The data in the same rows with the different letters mean significant difference at the 0.05 levels. The same as below.

区(处理区,下同)> La区> Ce区> Pr区> Nd区> Sm区. 5种稀土处理对土壤动物功能团总数无影响,但对功能团内土壤动物个体数影响差异显著. 因此, 5种稀土对土壤动物的个体总数和类群数有一定的影响,但对其功能团数不影响.

3 2 稀土浓度对梅园土壤动物群落组成的影响

以不同浓度稀土 La处理区为例,来说明不同浓度稀土对梅园土壤动物群落的类群组成和群落结构的影响. 由表 1可知,在不同浓度稀土 La处理区中,土壤动物类群和个体数均随着 La浓度增加而减少,即土壤动物类群和个体数均依次为 CK区> 25区($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理区,下同)> 50区> 100区> 500区> 1000区> 2000区> 3000区. 经 Duncan's新复极差法检验,不同浓度稀土 La处理对土壤动物类群分布影响差异显著,表明土壤动物类群分布与稀土 La浓度有一定关系. 在 7种浓度稀土 La处理条件下土壤动物的个体总数和类群数变化趋势基本一致,但只有矛线目由原来常见类群变为稀有类群,直翅目由原来极稀有类群变为稀有类群(表 1).

从土壤动物功能团的分布特征看,7种浓度的稀土 La处理区土壤动物功能团数相同,均比 CK少;以杂食性功能团内个体数量最大,占功能团个体总数的 48.50%,其它依次为植食性功能团(25.39%)、捕食性功能团(19.83%)、枯食性功能团(4.23%)、腐食性功能团(1.96%)和菌食性功能团(0.09%);杂食性功能团所占的比例也高于植食性功能团所占的比例,且杂食性功能团所占的比例依次为对照区(CK)> 25区($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理区,下

同)> 50区> 100区> 500区> 1000区> 2000区> 3000区. 不同浓度稀土 Ce、Pr、Nd和 Sm等对土壤动物功能团的影响与稀土 La处理的规律基本相似. 可见, 5种稀土不同浓度处理的土壤动物功能团个体数量分布均达到了差异显著.

3 3 稀土对梅园土壤动物群落特征参数的影响

由表 2可知,5种稀土处理区的土壤动物群落多样性指数 H' 、 J 、SR和类群数(N)(稀土 La处理区 N 除外)均小于 CK,且表现为 CK区> Pr区> Nd区> Sm区> Ce区> La区,达到了显著水平;5种稀土处理区的土壤动物群落 C 和 D (稀土 La处理区 D 除外)都比 CK区大些,则表现为 Pr区> Nd区> Sm区> Ce区> La区> CK,达到了显著水平; H' 和 J 呈现出相反的方向发展,而土壤动物功能团数量则不变. 这表明 5种稀土处理区土壤动物在梅园的分布是不均匀的,其群落的稳定性相对较差,5种稀土对梅园土壤动物多样性、均匀性、优势度和类群数等群落指标有一定的影响,使梅园土壤动物群落结构有一定的变化. 在不同浓度稀土 La处理区中, H' 、 J 、SR和类群数(N)随着 La浓度增加而降低,且表现为对照区(CK)> 25区> 50区> 100区> 500区> 1000区> 2000区> 3000区,达到了显著水平; C 和 D 则增加,表现为 3000区> 2000区> 1000区> 500区> 100区> 50区> 25区> CK区,达到了显著水平;而功能团数也基本不变;同理,不同种类和浓度的稀土 Ce、Pr、Nd和 Sm等对土壤动物群落参数的影响与稀土 La处理区基本相似.

表 2 不同稀土和不同浓度的稀土 La对梅园土壤动物群落参数的影响						
Table 2 Effects of different concentrations of La and kinds of rare earth elements on the soil fauna communities in a plum orchard						
群落参数 Community parameter	CK	稀土种类 Kinds of rare earth element				
		Pr	Nd	Sm	Ce	La
多样性指数 H' Diversity index	1.985±0.026 ^a	1.580±0.018 ^b	1.563±0.020 ^b	1.528±0.031 ^b	1.502±0.027 ^b	1.435±0.019 ^c
均匀度指数 J Evenness index	0.997±0.016 ^a	0.986±0.014 ^a	0.964±0.015 ^a	0.948±0.012 ^a	0.891±0.009 ^b	0.765±0.080 ^c
优势集中性 C Dominant centralization	0.763±0.008 ^c	0.998±0.014 ^a	0.906±0.017 ^a	0.899±0.012 ^b	0.862±0.021 ^b	0.798±0.015 ^c
优势度指数 D Dominant index	0.569±0.015 ^c	0.898±0.017 ^b	0.862±0.014 ^b	0.833±0.018 ^b	0.817±0.011 ^b	0.885±0.007 ^a
物种丰富度 SR Species richness	0.993±0.026 ^a	0.949±0.023 ^b	0.937±0.027 ^b	0.886±0.017 ^b	0.881±0.010 ^b	0.810±0.014 ^c
类群数 N Number of groups	37±3 ^a	33±2 ^a	32±1 ^a	30±3 ^c	24±1 ^c	36±2 ^a
功能团数 Number of function groups	6±1 ^a	6±1 ^a	6±1 ^a	6±1 ^a	6±1 ^a	6±1 ^a

续表 2

群落参数 Community parameter	稀土 La不同浓度的处理 Treatment of La in different concentration/(mg L ⁻¹)						
	25	50	100	500	1000	2000	3000
多样性指数 H' Diversity index	1.347±0.022 ^b	1.331±0.014 ^b	1.266±0.015 ^b	1.253±0.029 ^b	1.129±0.018 ^b	1.126±0.012 ^b	1.012±0.010 ^b
均匀度指数 J Evenness index	0.616±0.005 ^b	0.604±0.004 ^b	0.594±0.002 ^b	0.575±0.008 ^b	0.550±0.010 ^b	0.539±0.015 ^b	0.533±0.007 ^b
优势集中性 C Dominant centralization	0.767±0.003 ^b	0.770±0.007 ^b	0.772±0.019 ^b	0.8521±0.017 ^a	0.873±0.004 ^a	0.878±0.016 ^a	0.893±0.018 ^a
优势度指数 D Dominant index	0.636±0.012 ^b	0.576±0.006 ^c	0.574±0.014 ^c	0.641±0.060 ^b	0.717±0.020 ^a	0.583±0.017 ^c	0.737±0.023 ^a
物种丰富度 SR Species richness	0.918±0.016 ^b	0.915±0.019 ^b	0.907±0.017 ^b	0.893±0.024 ^b	0.821±0.015 ^c	0.817±0.012 ^c	0.808±0.005 ^c
类群数 N Number of groups	37±2 ^b	23±1 ^c	20±2 ^c	19±2 ^c	17±3 ^c	15±1 ^c	8±1 ^d
功能团数 Number of function groups	6±1 ^a	5±1 ^a	5±1 ^a	5±1 ^a	5±1 ^a	5±1 ^a	5±1 ^a

由此可见,以稀土 Pr处理梅园土壤动物的类群数多,个体数量大,优势集中性指数高,优势类群优势性极明显,其它 4种稀土在类群数、个体数、优势集中性指数和优势类群优势性和 Pr规律基本相同,依次为 Nd、Sm、Ce和 La 但均比 CK 小。

4 讨论 (Discussion)

施肥等园艺活动改变了土壤动物的生境,必然干扰了其生长发育 (Holland 2003), 对其群落个体产生了负面的影响 (Doring *et al.* 2003). 不同种类和浓度稀土处理的梅园生境土壤动物群落类群数和个体数存在差异,其顺序依此为 CK 区 > La 区 > Ce 区 > Pr 区 > Nd 区 > Sm 区. RE对土壤动物构成不同程度的影响. 土壤动物群落的类群数和个体数均随着稀土浓度的增加而减小,在高浓度污染的土壤中优势类群数量急剧减少,稀有类群明显减少. 这说明 RE对土壤动物的生物效应存在着 homeosis 现象. 不同类群土壤动物对 5种稀土响应是不同的,其原因不清,需要进一步研究. 稀土处理区中土壤动物群落的个体数、类群数与土壤中的理化性质因子(有机质含量、水分含量和 pH 值)有一定的相关性(周青等, 2004). 再者,鞘翅目、弹尾目、颤蚓目和线虫目等类群数量急剧减少,这与 Asteraki等报道的生产活动会减少捕食性鞘翅目昆虫的类群数和个体数量以及褚海燕研究黄褐土中高含量 Ce³⁺ 改变了放线菌、真菌和氨化细菌的群落结构的研究结果基本是一致的 (Asteraki *et al.*, 2004 褚海燕, 2000), 这些类群的数量变化对 RE 污染程度和相关生态系统恢复程度提供一定的指示作用. 因此, RE

作为微肥使用可能造成研究区内土壤动物类群数和个体数比 CK 区低,且各 RE 处理区土壤动物类群数和个体数存在差异.

土壤动物作为土壤生态系统的重要组成部分,肯定会受到来自周围环境的影响. 土壤动物的类群数、个体数、多样性、均匀性以及优势度是反映土壤动物群落结构、功能和水平分布差异性的重要指标. 多样性、均匀度与优势度都取决于群落类群数和各类群的个体数. 多样性指数大,说明群落物种丰富,结构复杂,类群数量分布均匀. 优势度反映类群优势集中的程度,优势度指数愈大,多样性与均匀性指数愈低. RE 对土壤动物群落结构的影响则表现出随着稀土污染浓度的增大,多样性指数、均匀性指数等趋于减小,优势度指数趋于增大. 说明土壤动物群落结构指数可作为无公害果梅土壤环境质量评价的间接指标,也可为土壤稀土污染监测提供科学依据 (刘苏静等, 2007). 稀土农用不仅会对果梅产生影响,还会对土壤动物和一些土壤酶的活性产生影响,且稀土对不同的土壤施用所产生的影响也不同. 这与褚海燕研究 La对红壤微生物区系变化结果是一致的,即低浓度 La³⁺ 对红壤中细菌、真菌和放线菌数量作用均不明显,高浓度时表现为抑制作用,浓度达到 500mg kg⁻¹时抑制作用才达到显著水平,显著干扰土壤微生物群落的演变和功能 (褚海燕等, 2000). 本文仅研究了果梅在一个生长季节内 5种稀土及其不同浓度实验,若长期施用,稀土可能在土壤中的积累,积累后是否会产生累加效应则有待于进一步研究.

多样性指数是群落的一个重要指标,其高低能

反映出群落的稳定性. 在众多表征群落多样性的指数中, Pielou (1967) 等学者更倾向于将 Shannon-Wiener 多样性指数应用于群落多样性的分析 (马克平等, 1994). 但由于受土壤动物分类的限制, 无法进一步鉴定, 而许多土壤动物群落等级属性表现非常明显, 本研究把梅园土壤动物群落类群按 Root (1967) 提出的功能团概念, 将划分为植食性功能团 (植食性昆虫、螨类等)、捕食性功能团 (包括蜘蛛、所有捕食性昆虫和螨类)、杂食性功能团、腐食性功能团、枯食性功能团和菌食性功能团, 对于少数不能确定其食性的节肢动物, 根据其所在类群的代表食性确定. 因此, 在分析比较土壤动物群落多样性分析比较时, 若对物种鉴定困难较大, 可考虑从功能团的水平进行分析, 这样既能充分利用所获得的信息, 又能在一定程度上体现群落中各组间的营养关系; 同时采用 Shannon-Wiener 多样性指数分析方法, 且较为简单.

5 结论 (Conclusions)

1) 稀土处理的梅园土壤动物群落组成较为丰富, 隶属于 4 门 15 纲 31 目. 其中, 昆虫纲物种最为丰富, 有 12 目; 鞘翅目、膜翅目、蛛形目、双翅目和弹尾目等是稀土处理梅园土壤动物群落优势类群, 占土壤动物个体总数的 81.44%, 对其群落结构特征起决定作用.

2) 5 种稀土处理区中杂食性土壤动物功能团所占的比例均高于植食性功能团所占的比例, 且杂食性土壤动物所占的比例依次为对照区 (CK) > La 处理区 (下同) > Ce 区 > Pr 区 > Nd 区 > Sm 区. 不同浓度稀土处理区中土壤动物类群和个体数量均随着稀土浓度增加而减少, 杂食性功能团所占的比例也高于植食性功能团所占的比例, 且杂食性功能团所占的比例依次为对照区 (CK) > 25 区 (mg kg^{-1} 处理区, 下同) > 50 区 > 100 区 > 500 区 > 1000 区 > 2000 区 > 3000 区. 以 Pr 处理后的土壤动物物种数多, 个体数量大, 优势集中性指数高, 优势物种优势性极明显, 其它 4 种稀土在类群数、个体数、优势集中性指数和优势类群优势性和 Pr 规律基本相同, 依次为 Nd、Sm、Ce 和 La 但均比 CK 小.

3) 5 种稀土及其不同浓度处理区土壤动物群落的稳定性相对较差, 土壤动物多样性、均匀性和类群数减少, 优势度增大, 使其群落组成产生了较为显著的变化. 运用土壤动物群落结构变化, 尤其

是优势类群的种类、数量以及多样性指数等变化来评价稀土对土壤污染的局部影响是可行的.

参考文献 (References):

- Asterki E J, Hart B J, Ings T C, *et al*. 2004 Factors influencing the plant and invertebrate diversity of arable field margins [J]. *Agriculture Ecosystem and Environment* 102: 219–231
- 陈祖义. 1999. 稀土的生物效应与农用稀土的累积影响 [J]. *农村生态环境*, 15 (3): 44–48
- Chen Z Y. 1999. Reflection on the biological effects of rare earth and the cumulative impacts of its agricultural application [J]. *Rural Eco-Environment* 15 (3): 44–48 (in Chinese)
- 褚海燕, 李振高. 2000. 稀土元素镧对红壤微生物区系的影响 [J]. *环境科学*, 21 (6): 28
- Chu H Y, Li Z G. 2000. Effect of Lanthanum on the microflora of red soil [J]. *Environmental Science*, 21 (6): 28 (in Chinese)
- Didden W, Rombke J. 2001. Enchytraeids as indicator organisms for chemical stress in terrestrial ecosystems [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 50: 25–43
- Doring T F, Hiler A, Wehke S, *et al*. 2003. Biotic indicators of carabid species richness on organically and conventionally managed arable fields [J]. *Agriculture Ecosystem and Environment* 98: 133–139
- 傅必谦, 陈卫, 董晓晖, 等. 2002. 北京松山四种大型土壤动物群落组成和结构 [J]. *生态学报*, 22 (2): 215–223
- Fu B Q, Chen W, Dong X H, *et al*. 2002. The composition and structure of the four soil macrofaunas in Songshan mountain in Beijing [J]. *Acta Ecology Sinica* 22 (2): 215–223 (in Chinese)
- 郭伯生, 竺伟民, 熊炳昆, 等. 1988. 农业中的稀土 [M]. 北京: 中国农业科学出版社, 23–208
- Guo B S, Zhu W M, Xiong B K, *et al*. 1988. Rare Earths in Agriculture [M]. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 23–208 (in Chinese)
- 何跃君, 薛立. 2005. 稀土元素对植物的生物效应及其作用机理 [J]. *应用生态学报*, 16 (10): 1983–1989
- He Y J, Xue L. 2005. The biological effects of rare earth elements on plants and its mechanism [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 16 (10): 1983–1989 (in Chinese)
- Holland J M, Reynolds C J M. 2003. The impact of soil cultivation on arthropod (Coleoptera and Araneae) emergence on arable land [J]. *Pedobiologia* 47: 181–191
- 李桂亭, 江俊起, 陈洁, 等. 2006. 稀土元素对土壤动物群落结构的影响及对蛭蟥的生态毒性 [J]. *应用生态学报*, 17 (1): 159–162
- Li G T, Jiang J Q, Chen J, *et al*. 2006. Effects of rare earth elements on soil fauna community structure and their ecotoxicity to *Hobtrichia parallela* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17 (1): 159–162 (in Chinese)
- 梁文举, 闻大中. 2001. 土壤生物及其对土壤生态学发展的影响 [J]. *应用生态学报*, 12 (1): 137–140
- Liang W J, Wen D Z. 2001. Soil biota and its role in soil ecology [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 12 (1): 137–140 (in Chinese)
- 刘庆都, 章健, 承河元, 等. 1998. 镧对软腐欧文氏菌生长及其胞外

- 酶活性的影响 [J]. 中国稀土学报, 16(3): 262
- Liu Q D, Zhang J, Chen H Y, *et al*. 1998. Effect of Lanthanum on growth and extracellular enzyme activity of *ew inia chrysanthem* in vitro [J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 16(3): 262 (in Chinese)
- 刘苏静, 周青. 2007. 农用稀土的生态毒理学效应 [J]. 中国生态农业学报, 15(3): 187—190
- Liu S J, Zhou Q. 2007. Ecotoxic effects of rare earths in agriculture [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 15(3): 187—190 (in Chinese)
- 刘铮. 1993. 土壤与植物中稀土元素研究的进展 [J]. 土壤学进展, 21(3): 1
- Liu Z. 1993. Advances of recent research on rare earth elements in soil and plant [J]. Advances on soil science, 21(3): 1 (in Chinese)
- 马克平, 刘玉明. 1994. 生物群落多样性的测度方法 I a多样性的测度方法 (下) [J]. 生物多样性, 2: 231—239
- Ma K P, Liu Y M. 1994. Measurement of biotic community diversity I α diversity (Part2) [J]. Chinese Biodiversity, 2: 231—239 (in Chinese)
- Patra M, Bhownik N, Bandopadhyay B, *et al*. 2004. Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance [J]. Environ exper Botany, 52: 199—223
- 彭安, 朱建国. 2003. 稀土元素的环境化学及生态效应 [M]. 北京: 中国环境科学出版社
- Peng A, Zhu J G. 2003. Rare Earth Elements in environmental chemistry and ecological effects [M]. Beijing: China Environmental Science Press (in Chinese)
- 庞欣, 邢晓燕, 王东红, 等. 2001. 农用稀土在土壤中形态变化的研究 [J]. 农业环境保护, 20(5): 319—321
- Pang X, Xing X Y, Wang D H, *et al*. 2001. Change of rare-earth elements (REEs) forms using them as fertilizers [J]. Agro-environmental protection, 20(5): 319—321 (in Chinese)
- 阮桂海. 2005. SAS统计分析实用大全 [M]. 北京: 清华大学出版社, 245—333
- Ruan G H. 2005. Practical Encyclopedia of statistical analysis system of SAS [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 245—333 (in Chinese)
- 孙波, 赵其国, 张桃林, 等. 1997. 土壤质量与持续环境 III 土壤质量评价的生物学指标 [J]. 土壤, 29(5): 225—234
- Sun B, Zhao Q G, Zhang T L, *et al*. 1997. Soil quality and sustainable environment III The biological assessment indicators of soil quality [J]. Soil, 29(5): 225—234 (in Chinese)
- 唐欣均, 孙亦阳, 温宗庆, 等. 2005. 低剂量外源稀土积累对黄褐土中微生物主要生理类群的生态效应 [J]. 农业环境科学学报, 24(2): 279—283
- Tang X Y, Sun Y Y, Wen C Q, *et al*. 2005. Ecological effects of major soil microbial consortia in yellow cinnamon soil after receiving low dose of rare earth elements (REEs) [J]. Journal of Agro-Environment Science, 24(2): 279—283 (in Chinese)
- 王燕, 孙彩云, 杨平平, 等. 2005. 稀土元素对微生物的生物学作用研究进展 [J]. 山东轻工业学院学报, 19(3): 14—17
- Wang Y, Sun C Y, Yang P P, *et al*. 2005. The survey of effect of rare earth elements on microorganisms [J]. Journal of Shandong Institute of Light Industry, 19(3): 14—17 (in Chinese)
- 王咏梅, 赵仕, 林超凡, 等. 2004. 农用稀土肥料对环境影响的研究 [J]. 四川师范大学学报 (自然科学版), 27(2): 201—205
- Wang Y M, Zhao S L, Zhao F, *et al*. 2004. Study on the effect of agricultural rare earth fertilizers on environment [J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science), 27(2): 201—205 (in Chinese)
- Wytenbach A, Furrer V, Schleppi P, *et al*. 1998. Rare earth elements in soil and in soil-grown plants [J]. Plant and Soil, 199: 267—269
- 解惠光. 1991. 中国稀土元素在农业上的应用研究进展 [J]. 科学通报, 8: 561—563
- Xie H G. 1991. The research progress on the application of rare earth elements in agriculture in China [J]. Chinese Science Bulletin, 8: 561—563 (in Chinese)
- 熊炳昆, 陈蓬. 2000. 稀土农林研究与应用 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 126—128
- Xiong B K, Chen P. 2000. Rare Earth Element Research and Applications in Chinese Agriculture and Forest [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 126—128 (in Chinese)
- 徐汝梅. 1985. 昆虫种群生态学 [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 97—100
- Xu R M. 1985. Insect Population Ecology [M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 97—100 (in Chinese)
- 尹文英. 1998. 中国土壤动物检索图鉴 [M]. 北京: 科学出版社
- Yin W Y. 1998. Pictorial Keys to Soil Animals of China [M]. Beijing: Science Press (in Chinese)
- 章健, 承河元. 2000. 稀土元素对油菜菌核病生长及其生化性状影响的研究 [J]. 应用生态学报, 11(3): 382—384
- Zhang J, Chen H Y. 2000. Effect of rare earth elements on the *Sclerotinia* growth and its biological and chemical traits [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 11(3): 382—384 (in Chinese)
- 章健, 刘庆都, 承河元, 等. 1997. 稀土积累对植物病原细菌生长的影响 [J]. 稀土, 18(4): 50—53
- Zhang J, Liu Q D, Chen H Y, *et al*. 1997. Effect of rare earth accumulation on the growth of phytopathogenic bacteria [J]. Chinese Rare Earth, 18(4): 50—53 (in Chinese)
- 邹运鼎, 王弘法. 1989. 农林昆虫生态学 [M]. 合肥: 安徽科技出版社
- Zou Y D, Wang H F. 1989. Insect Ecology In Agriculture and Forestry [M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press (in Chinese)