

我国农田生态系统土壤动物生态学研究进展*

宋理洪^{1,2} 武海涛¹ 吴东辉^{1**}

(¹中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; ²中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 综述了我国近 30 年来农田生态系统土壤动物生态学研究进展, 概述了我国农田土壤动物的群落多样性及其地理分布, 总结了农田生态系统中土壤动物对不同耕作方式、施肥和喷洒农药等农业措施、不同土地利用方式以及工业污染的响应, 并就土壤动物对农田生态系统健康状况的指示作用等研究的相关进展进行了讨论。通过与国外相关领域的研究进行比较, 指出目前研究中存在的问题, 提出农田生态系统未来研究的一些热点问题及展望。

关键词 农田生态系统; 土壤动物; 农业措施; 土地利用; 工业污染

中图分类号 Q968.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)12-2898-09

Soil fauna ecology in China cropland ecosystems: Research progress. SONG Li-hong^{1,2}, WU Hai-tao¹, WU Dong-hui^{1**} (¹Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(12): 2898-2906.

Abstract: This paper reviewed the research progress of soil fauna ecology in China cropland ecosystems over the past 30 years, with the focus on the community diversity and geographical distribution of soil fauna, its responses to different tillage modes, cultivation practices (including fertilization and pesticide application), land-use change, and industrial pollution, and its indicative roles in assessing the health state of the cropland ecosystems. The problems in the current related studies in China were pointed out, compared with the researches abroad, and the possible hot issues and perspectives in the future researches of soil fauna in cropland ecosystems were put forward.

Key words: cropland ecosystem; soil fauna; farming practice; land use; industrial pollution.

农田生态系统作为人类社会存在和发展的基础, 其功能对人类的可持续发展具有现实而深远的影响(尹飞等, 2006)。农业是人类生存的基础, 而土壤是农业的基础, 如果没有土壤, 就不可能有农业(林英华, 2003)。约有 90% 以上的昆虫生活在土壤中, 在耕作土壤中约占其中的 24% (土壤动物研究方法手册编写组, 1998)。土壤动物不只是土壤中的“居民”, 它们还是土壤的一部分(Hole, 1981), 其生存、取食、活动改变土壤结构和土壤理化性质(孙儒泳, 1987), 影响土壤物质能量的迁移转化, 促进土壤有机质的形成, 对改善农田生态系统土壤生态环境、增强作物对养分的吸收利用有着积极的作用(张友梅和王振中, 1984, 1986), 并在维持和发挥农

田生态系统正常功能上起着无可替代的作用(Mulder *et al.*, 2011)。土壤动物相关的研究可为评价农业生态系统的质量以及维护和管理提供理论基础(蒋海东等, 2006)。因此, 在我国开展农田生态系统中土壤动物的研究具有非常重要的作用和意义。本文综述了我国近 30 年农田生态系统土壤动物的生态学研究, 提出了现在研究中存在的一些问题以及未来研究的热点问题, 以为农田土壤动物的生态学研究提供参考。

1 我国农田生态系统土壤动物生态学研究历史

我国古代就有一些涉及土壤动物的零星资料, 如在《尔雅》《本草纲目》等中对蝼蛄、蚯蚓(地龙)、蚁和蛴螬等的描述, 散见于一些古籍中, 未进行系统的整理(尹文英, 1992; Yin *et al.*, 2010), 这可以算

* 国家自然科学基金项目(31070467, 40901036 和 40601047)资助。

** 通讯作者 E-mail: wudonghui@neigae.ac.cn

收稿日期: 2011-05-05 接受日期: 2011-08-26

作是我国早期关于农田土壤动物的研究。科学意义上关于农田土壤动物的研究始于 20 世纪 60 年代,赵善欢等(1965)谈到使用农药对农田土壤动物有一定杀害作用。但是,系统研究农田生态系统土壤动物则在 20 世纪 80 年代初期。李治祥(1982)探讨了农药对土壤动物区系的影响;张友梅和王振中(1984)在岳麓山地区对稻田、菜园、橘田、水田等不同生境条件下及不同土壤污染条件下的土壤动物进行初探,研究稻田土壤动物的群落组成、数量变化与稻田耕作制度、越冬期等环境的相关性。至此,我国农田生态系统土壤动物的研究正式拉开序幕。

一直到 20 世纪 90 年代中期,我国农田生态系统土壤动物生态学研究都集中在农田土壤动物的区系分布上。20 世纪 90 年代中后期以来,很多学者对农田土壤动物进行了更全面、深入的研究,研究范围遍及全国,主要涉及土地利用方式、农业生产及人类活动对农田生态系统土壤动物的群落结构及多样性变化的研究。如:殷秀琴等(2003)、吴玉红等(2009)探讨不同土地利用方式对农田土壤动物的影响;林英华等(2003)、王振中等(1996)、朱强根等(2010b)研究农田生态系统中土壤动物对施肥、喷洒农药等农业生产活动的响应。

进入 21 世纪以来,随着全球环境的不断变化,土壤圈作为与其他各个圈层及生物体和非生物环境间的重要联系,成为众多科学家研究的重点内容。土壤动物是土壤圈中的“工程师”,科学家对它们的研究更加关注,农田生态系统土壤动物生态学的研

究也得到进一步的发展,包括:学科基础理论的研究、资料的积累及生产实践应用等。主要涉及土壤动物的区系组成、多样性、生态分布、在生态系统物质循环中的作用及其与生物和非生物环境之间的关系等(Yin *et al.*, 2010)。

2 我国农田生态系统土壤动物生态学研究现状

2.1 土壤动物多样性及其分布

土壤动物群落组成及其分布是农田生态系统土壤动物研究的基础,经过近 30 年的系统研究,我国农田生态系统土壤动物区系调查和研究工作取得了较大的进展,全国大部分农田生态系统都已开展了土壤动物相关的研究(图 1)。

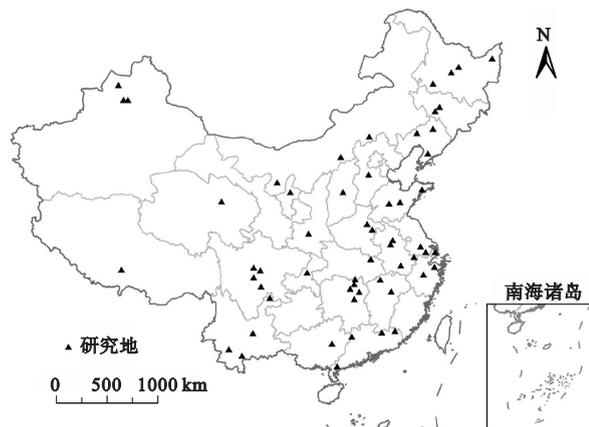


图 1 我国农田生态系统土壤动物研究地点分布示意图
Fig. 1 Geographical distribution of research sites on cropland soil fauna in China

表 1 我国不同地区农田生态系统土壤动物群落特征

Table 1 Characteristics of soil animal community in cropland ecosystem in different regions in China

地区	捕获土壤动物数(头)	Shannon 多样性指数	Simpson 优势度	Pielou 均匀度	个体密度(头·m ⁻²)	分离方法	资料来源
三江黑土 ^③	2470	1.6510	0.3310	0.5960	47550	TB	邵春华等,2010
吉林玉米地 ^③	1223	1.8400	0.4920	0.5100	—	HT	殷秀琴等,2003
山东菜地 ^{①②③④}	3284	1.8040	0.2165	0.6127	25656	HTB	董博等,2008
河南玉米地 ^③	471	1.0990	0.4280	0.4590	—	T	朱强根等,2009
河南麦田 ^③	3253	0.8450	0.4850	0.3670	—	HT	朱强根等,2010a
湖南稻田 ^②	1913	1.0591	0.6008	0.3479	—	TB	王广力等,2005
湖南农田 ^③	1989	1.9228	0.2445	0.5570	0.64/cm ³	HTB	韩立亮等,2007
四川茶园土 ^①	1190	1.4700	0.3860	0.3300	4407	HTB	申燕等,2009
成都市郊菜地 ^①	大型: 97 中小型: 330	1.9300 0.7100	0.1900 0.3200	0.7800 0.3200	129.3 13750	H TB	杨大星等,2009
银川蔬菜地 ^②	951	1.1042	0.5001	0.4305	0.198/cm ³	TB	贾彦霞等,2008
乌鲁木齐市蔬菜地 ^②	1208	1.9538	0.2313	0.6148	3957	HTB	吾玛尔·阿布力孜等,2010

①②③④分别为春季、夏季、秋季和冬季采样。“H”为手捡法分离的大型土壤动物,“T”为采用 Tullgren 法分离的中小型土壤动物,“B”为采用“Baermann”法分离的土壤动物。“—”为所引文献中相应统计数据缺失。

影响土壤动物群落分布及其多样性的因素复杂多样,包括:土壤温度、土壤湿度、pH值、有机质、容重、凋落物量、矿质元素、污染物质种类及含量、植被类型、气候状况和地形条件等(张雪萍,1995)。它们构成土壤动物群落的环境,对土壤动物群落组成与数量、水平结构和垂直结构等产生重大影响(朱永恒等,2005)。大量关于农田土壤动物的区系研究表明,我国不同地区的农田生态系统土壤动物主要涉及3大类,即螨类、弹尾类和线虫类。事实上,物种差别也很大,但由于分类精度不够,现在的研究中并未表现出来。因而,还需要进一步的工作。

从我国部分农田生态系统中土壤动物群落的数量特征(表1)来看,土壤动物群落的个体密度差别很大,具有明显的地域性。但是,群落指数由于土壤类型、作物类型、气候因素等环境条件以及不同强度的人为干扰的影响,其差异不明显。同一地区不同土地利用方式下,土壤动物群落特征差异较明显,菜地较其他类型农田土壤动物数量大、多样性高。

2.2 施肥对农田土壤动物的影响

施肥是农田生态系统重要的农业生产措施。20世纪60年代以前,我国农田养分投入以有机肥为主;60年代以后,随着我国化肥工业的迅速发展,投入农田生态系统化肥的种类及用量都迅猛增加;现在则以复合肥及其与有机肥的配合使用为主。农田使用化肥在改变土壤理化性质的同时也影响土壤动物群落特征(Cutz-Pool *et al.*, 2007; Liang *et al.*, 2009)。

施肥对土壤动物群落结构发生较大的影响(Lin *et al.*, 2005)。长期施肥条件下,土壤有机质和全氮与农田主要土壤动物群落组成及数量之间存在显著典型相关关系,肥料的种类与性质影响着土壤昆虫类群多样性与丰富度,且其影响具有不均衡性(林英华等,2003,2010)。农田大量施用化肥抑制土壤动物的生长,甚至致其死亡;增施有机肥则增加土壤动物的个体数量及多样性(曹志平等,2004;黄红英等,2010)。传统堆肥区土壤螨数量和种类较化肥区多,单纯施用化肥的农田土壤螨数量和种类呈较少趋势,群落结构稳定性差(郑长英等,2002)。增施化肥也致农田线虫群落结构和个体数降低(Liang *et al.*, 2002;梁文举等,2004)。然而,也有研究显示,在低肥力土壤中施用化肥能增加蚯蚓的数量(乔玉辉等,2004)。均衡施肥(NPK)对土壤动物的作用较大(林英华等,2010;朱强根等,2010a),朱强

根等(2010b)在黄淮海平原开展的长期定位施肥实验也表明,施有机肥及有机肥和NPK混施能增加土壤动物的丰富度和多样性。

肥料品种丰富多样,主要包括N肥、P肥、K肥、有机肥、微肥、复合肥以及缓释肥等;施肥方式多样,包括表施、深施、环施等。不同品种的肥料对农田土壤动物的影响程度不同,不同种类的农田土壤动物对肥料的响应也应该有所差异,这些相对基础的研究目前却较少涉及。不同的施肥方式对土壤动物的影响也应该有所不同,目前却未见有关这方面的报道。

2.3 喷洒农药对农田土壤动物的影响

喷洒农药是农田生态系统进行农业生产的另一重要特征。我国是一个有着悠久历史的农业大国,在人口的巨大压力下,对粮食的需求促使化肥、农药的使用量不断增加。农药的使用改善了作物的生长环境,在清除农业害虫的同时也对包括有益昆虫在内的农田土壤动物等非靶标生物产生不同程度的杀害作用,破坏生态平衡。

农药对农田生态系统土壤动物的影响主要包括:改变土壤动物群落组成,导致土壤动物多样性降低(张宗炳,1988a)。农药对蚯蚓有很强的毒性(Heimbach,1992);土壤螨类和线虫对农药也很敏感(王一华,2004;张靖楠等,2008)。残留在土壤中的农药,对土壤中生存的节肢动物如步甲、虎甲、蚂蚁、蜘蛛等,环节动物如蚯蚓,软体动物如蛞蝓以及线虫动物如线虫等都有不同程度的影响(Fox,1967;张宗炳,1988b;王一华,2004)。有机磷农药废水污染区调查表明,土壤动物种类与个体数随着污染程度的增加而明显减少,群落结构发生显著变化(王振中等,1996)。随着敌敌畏农药处理浓度的提高,土壤动物种类数及个体数均出现不同程度的减少(李忠武等,1999)。对土壤进行杀虫双农药染毒实验表明,土壤动物个体数量和科(属)数量显著减少,与杀虫双处理浓度呈明显负相关,优势类群的数量亦随农药处理浓度的递增而减少(邢协加等,1997)。

应用于农田生态系统中的农药分为杀虫剂和除草剂,除草剂对农田土壤动物的影响比杀虫剂小(张宗炳,1988b)。2种以上农药对农田土壤动物的复合污染的研究在我国也有报道(梁继东等,2003;左海根,2005)。然而,农药的残留(李淑梅,2007),以及更长时间内,多种残留农药的复合污染,是我国

目前农业生产中普遍存在的现象,这种污染对生活 在其中的土壤动物影响应该是长远的、巨大的。因此,在时间尺度上的研究在我国亟待开展。

2.4 耕作方式对农田土壤动物的影响

农田土壤动物与农业耕作密切相关(Baker, 1990)。有研究者认为翻耕比使用杀虫剂更能较大的影响节肢动物的群落结构(Stinner *et al.*, 1986)。长期耕作的农田由于高强度的人为干预,土壤环境较天然生态系统不同,导致农田生态系统中的土壤动物群落组成、个体数量发生变化。

垄作免耕有利于改善稻田土壤生态环境,提高土壤肥力,增加土壤动物数量、提高土壤动物多样性(高明等,2004)。翻耕初期一般都会降低土壤动物种群数量,Loring 等(1981)认为是翻耕改变了土壤湿度和机械损伤所致。翻耕促进螨类向耕层下部活动(吴东辉等,2006b),而大型土壤动物对耕作活动更为敏感(Wardle, 1995;朱强根等,2010a)。耕作活动一方面对生物体及其居所带来的直接损伤,另一方面导致鸟类对其更易于捕食,而这种间接的影响比直接损伤更为强烈(Jordan *et al.*, 2004)。翻耕干扰阶段土壤动物的丰富度呈下降趋势,恢复阶段丰富度增加并且翻耕处理比免耕处理下有更高的土壤动物丰富度(朱强根等,2010a)。长期耕作条件下,不同土壤类型间农田土壤动物群落均匀性差异显著,撂荒地土壤动物类型最多(林英华等,2010),即农业耕作减少土壤动物的多样性。免耕耕作制度有益于土壤动物的生长繁殖,并能改善土壤的化学性质,土壤动物平均密度是垄作免耕>垄作常耕>平作免耕>平作常耕(黄伦先和沈世华,1996)。

2.5 土地利用方式对农田土壤动物的影响

不同土地利用方式导致土壤理化性质发生不同程度的改变,进而影响土壤动物群落结构、数量及其分布。目前我国主要进行的还是短期的试验,主要是对土壤动物群落结构影响的研究,有关长期的、机理性的研究还较少。

不同的土地利用方式下,大型土壤动物群落的结构以及多样性均有不同的响应:在强干扰无植被条件下,大型土壤动物种类数和个体数均较少;在单一人工控制的稻田中大型土壤动物的种类数和个体数居中,而荒草地和菜园的种类数和个体数最大(葛宝明等,2005)。退耕还草情况下,各类型土壤动物种群、个体数及生物量相对农田均较多(刘新民等,2009)。与旱田、水田和林地相比,撂荒地土

壤动物其密度、种类数和多样性等都显著提高(柯欣等,2004)。刀耕火种农业和林地2种不同土地利用方式,土壤动物群落类群数、个体数量明显下降并达到显著水平(杨效东等,2001;邓晓保等,2003)。四川紫色土退耕林地、果园和农田边界的个体密度和DG多样性指数显著高于农田(吴玉红等,2009)。以人类活动为主导的菜地中,土壤动物的活性及其群落多样性均有所降低(吾玛尔·阿布力孜等,2010);玉米地和居民点园地土壤螨类多样性较低(吴东辉等,2006a)。相较于天然次生林、防护林和市区公园绿地等典型不同土地利用生境下,农田生态系统中的大、中型土壤动物在种群数量、密度及分布上均较少(吴东辉等,2001,2006b,2007)。

2.6 农作物及土壤环境对土壤动物的影响

地下生物与作物是农田生态系统最重要的2个要素,二者相互影响、反馈,共同影响生物群落结构和生态系统进程(Wardle *et al.*, 2004)。植物根系分泌的化感物质能够对土壤生物产生影响(梁文举等,2005)。人为长期干扰的农田生态系统,作物相对单一,土壤理化性质发生较大改变,进而导致生活在其中的土壤动物多样性发生变化。特别是我国东北地区的连作,在带来高的经济效益的同时对地下生物多样性的打击可能是致命的。间作套种有利于提高作物的资源有效利用性(Willey, 1979),在农业生产上应用较多。然而,其对农田土壤动物的影响及其机理,目前还需要进一步研究。

种植不同作物的农田生态系统中土壤线虫群落类型及其分布有所不同(李琪等,2007)。植物种类多样性和特性对土壤食物网中的各个营养级都会产生影响(Wardle *et al.*, 2003;李琪等,2007)。大麦根系分解引起线虫群落的增加(Griffiths *et al.*, 1993);马铃薯包囊线虫的多度在很大程度上依赖于作物轮作过程中马铃薯的种植次数(Ritz & Trudgill, 1999);玉米不同生长季,土壤线虫群落结构差异显著(Liang *et al.*, 2002)。线虫多样性在作物混合系统中要高于单作系统(de Deyn *et al.*, 2004)。而吴东辉等(2006b)报道,长春市生境植物类型群落差异对土壤螨类群落结构特征影响不大。

我国幅员辽阔,南北东西不同农田其土壤类型差异大,理化性质也有很大的差异,也是影响农田生态系统土壤动物分布的主要因素,但是目前有关研究鲜有报道。

2.7 工业污染对农田土壤动物的影响

我国近年来工矿业发展迅速,特别是在东部沿海地区,工矿企业排放的大量“三废”物质通过大气沉降、污水灌溉、残渣堆积等方式进入农田,污染农田生态系统,影响农田土壤动物的数量及分布(王振中和张友梅,1990),并且通过食物链、食物网进入农副产品,威胁食品安全。伴随着我国西部大开发的进程,工业化对农田生态系统的影响逐步向内陆地区延伸。目前,我国有关工业污染对农田生态系统的土壤动物的研究需要加强。

土壤动物群落结构和种群分布形式受到污水灌溉影响显著,土壤动物的群落结构衰退,多样性和均匀度下降,垂直分布出现逆分布型(闫冬春,2000;杜习乐等,2010)。距离污染源越远,土壤动物的密度和种类数随着污染程度的减少而增加(王振中和张友梅,1990;王振中等,1994)。交通要道两旁农田生态系统中,重金属含量明显高于对照和土壤背景值,随着采样距104国道的距离的减小,土壤动物类群和个体数量呈现减少的趋势;在土层垂直分布上,呈现出表聚性减弱的现象(李涛等,2010)。当前,我国工业化、城镇化的进程还在不断的加强,越来越多、越复杂的工业污染物将大量的进入农田,污染农田生态系统,对生活在其中的土壤动物造成毁灭性的危害。

2.8 对农田生态系统健康的指示作用

农田生态系统健康是指农田生态系统免受“失调综合症”、处理胁迫的状态和满足持续生产农产品的能力(梁文举等,2002)。人类活动向土壤中添加了许多物质,这些物质在改变土壤理化性质的同时也改变了土壤动物的生存环境。土壤动物是反映土壤污染的敏感指示生物,当污染物在土壤中积累超过一定限度时,作物尚未受到明显影响,土壤动物的生存繁衍却受到显著抑制(王振中和张友梅,1990)。因而,土壤动物可以作为土壤污染监测和土壤质量评价的重要指示生物。应用土壤动物建立土壤质量评价体系是目前研究的一个热点,同时其难以量化也是一个难点。利用土壤动物评价农田生态系统质量的研究在国内还有待加强。

在农药污染严重的农田土壤中,耐污生物种类相对增多(Eijsackers,1983)。大型土壤动物蚯蚓的染毒实验表明(李忠武等,1999;朱永恒等,2006):蚯蚓可以作为农药污染的重要指示动物。重金属污染可以导致土壤动物群落中的优势类群及其数量急

剧减少,一些敏感类群消失,进而可以判断出土壤是否污染以及受污染的程度(王振中和张友梅,1990)。土壤线虫也被看作是生态系统变化和农田生态系统受到农业管理措施等干扰的敏感性指示生物(Bongers,1990;Yeates & Bongers,1999;梁文举等,2001;Neher,2001)。

3 与发达国家研究情况对比

发达国家开展农田生态系统土壤动物生态学研究的历史比我国长,早在20世纪50年代就已开展了相关工作,并积累了丰富的资料。最早的工作是关注农药的使用对土壤动物的影响,Lichtenstein(1957)从1954年开始研究农田中DDT对地下土壤动物的影响;Edwards等(1967)于1967年研究发现,DDT和艾尔德林杀虫剂对螨类和跳虫有副作用。后来逐步涉及农业耕作、土地利用方式对土壤动物的影响(Aritajat,1977;Hendrix *et al.*, 1986;Robertson *et al.*, 1994)以及喷洒农药和施肥等(Björn, 1973;Wardle,1995;Jordan *et al.*, 2004)对土壤动物的影响,而我国直到20世纪90年代才陆续有人开始做这方面的研究。21世纪以前,发达国家主要关注各环境因素对农田土壤动物的影响。21世纪开始以来,发达国家更为注重农田土壤生物多样性及其保护等前沿问题,并涉及土壤动物在农田生态系统中的生态作用,例如对耕作方式的研究,相比于正常的农业耕作,免耕种植对土壤动物更加有益(Rizk & Mikhail, 1999);对农药的管理研究,Sarkar等(2000)和Tripathi等(2005)分别做了农药对农田生态系统中土壤动物的生殖和适应性的研究,探讨如何更合理地使用农药;对土壤动物改善土壤环境的研究,Förster等(2004)研究土壤动物对有机质分解的影响。在保护土壤动物多样性方面开展的工作更多,Debeljak等(2007)开展环境因素及农田管理方式等综合作用对农田土壤动物的影响。

我国开展农田土壤动物生态学的研究虽然较国外发达国家晚,但也正是如此,国内研究可以借鉴国外的经验,从而使全国各地农田土壤动物的基础研究更加全面、彻底。相对于西方国家,我国独特的农业生产模式,加之研究历史背景的差异,进而导致研究的侧重点不同。差异表现在:研究多为短期的控制实验,侧重不同农田生态系统土壤动物的区系研究;探讨农田土壤动物对不同农业生产活动的生态响应,而其在农田生态系统中的生态作用研究较少;

农田土壤动物多样性的在农田生态系统中的综合作用的研究还存在不足等。

虽然我国开展农田生态系统土壤动物生态学的研究相比国外发达国家起步晚,但是随着科学技术的发展及国际交流的日益加强,进入21世纪后我国的研究与国外发达国家的差距正在缩小。由于独特的地理条件,我国开展农田生态系统土壤动物的研究有着独特的优势,南北纬度差异大、东西跨度大,有着更多的农田生态系统类型便于研究和比较,但同时这也是一个挑战与考验。我国目前开展的农田生态系统土壤动物的研究主要集中在中东部地区,对于广大的西部及西北部地区则涉及较少。多学科交叉在我国农田生态系统土壤动物的研究中也待进一步加强。

4 展 望

农田生态系统是人类生存的基础,生活在其中的土壤动物在改善土壤环境、减轻污染、提高农作物产量等方面具有重要的研究意义。尽管我国农田土壤动物生态学研究起步晚,但经过近30年,在全体相关学者的辛勤努力下,我国在农田生态系统土壤动物研究方面积累了丰富的资料,取得了一定的成果。然而,我国现在关于农田生态系统土壤动物的研究主要集中在生态群落的调查及农业生产对土壤动物影响的研究上,深入的研究还相对薄弱,研究方法主要借鉴于其他生态系统土壤动物的研究方法,没有形成自己独立完善的研究体系,也没有关于农田生态系统土壤动物研究的专著产生。

目前的研究中存在的问题:1)在研究农田施肥对农田土壤动物影响的研究时,较少涉及单种肥料处理对土壤动物的影响,很多工作都是研究复合施肥条件下农田土壤动物的响应;2)长期进行农田耕作,农田作物单一化过程,例如长期连作,势必导致土壤动物在种群数上发生变化,但是国内对此的长期定位研究还很少;3)在研究各农田环境因素对土壤动物的影响时大部分工作是分析各种处理导致土壤动物在种群或群落组成和个体数量上的变化,对于这些变化深层次的探究涉及很少。

未来农田生态系统土壤动物的研究将在以下几个方面亟需关注:1)更加详细的分类学研究。目前关于农田生态系统土壤动物的研究,还主要集中在科或属及其以上这一高的分类层次上,很少达到种及其以下这一水平。提高分类精度,在深入研究其

与农田环境间、农作物之间的作用具有重要意义。引用分子生物学技术和基因技术在分类学上的应用,既能提高分类的精度又能提高其准确度;2)探索土壤动物在农田生态系统物质循环和能量流动方面的作用机制,研究土壤动物与农作物之间的关系。现代农业生产施用大量的农药及化肥,在带来巨大经济效益的同时对土壤动物也有一定副作用。因而,探索土壤动物在农田生态系统中物质循环和能量流动方面的作用机制,协调土壤营养库与作物需求之间的关系,甚至对于病虫害的防治都有重要的前景及意义;3)加强单因子条件下的农业生产活动对农田土壤动物影响的研究。确定农田土壤动物对各因素的响应,发挥其在农田生态系统中的重要作用;4)深入探讨地下生物多样性在农田在生态系统中的作用,农田土壤动物作为一个群体维持和改变着农田地下生态环境,而不是以单一物种的形式;5)阐明农田土壤动物和环境因子的关系,建立土壤动物对环境变化的指示指标,将土壤动物指标纳入土壤质量评价指标体系。进一步明确土壤动物与土壤其他质量指标的关系,指示农田污染程度及土地利用状况;6)加强分子生物学、基因工程等前沿科学在农田土壤动物研究中的应用,从分子机理解释土壤动物在农田环境发生变化的下的响应及其对农田生态系统的作用;7)结合全球热点问题。目前全球气候变暖、大气温室气体排放和N沉降等是环境科学研究的热点,同时转基因作物的种植也可能对农田生态环境产生重大影响,可结合这些热点问题,利用土壤动物解决当前有关农田生态系统的一些问题。

参考文献

- 曹志平, 乔玉辉, 王宝清. 等. 2004. 不同土壤培肥措施对华北高产农田生态系统蚯蚓种群的影响. *生态学报*, **24**(10): 2302-2306.
- 邓晓保, 邹寿青, 付先惠, 等. 2003. 西双版纳热带雨林不同土地利用方式对土壤动物个体数量的影响. *生态学报*, **23**(1): 130-138.
- 董博, 张仁陟, 荆世杰, 等. 2008. 寿光市不同棚龄温室土壤动物群落结构. *应用生态学报*, **19**(8): 1769-1744.
- 杜习乐, 马建华, 吕昌河, 等. 2010. 污灌农田土壤动物及其对重金属污染的响应——以开封市化肥河污灌区为例. *地理研究*, **29**(4): 617-628.
- 高明, 周保同, 魏朝富, 等. 2004. 不同耕作方式对稻田土壤动物、微生物及酶活性的影响研究. *应用生态学报*, **15**(7): 1177-1181.

- 葛宝明, 孔军苗, 程宏毅, 等. 2005. 不同利用方式土地秋季大型土壤动物群落结构. *动物学研究*, **26**(3): 272-278.
- 韩立亮, 王勇, 王广力, 等. 2007. 洞庭湖湿地与农田土壤动物多样性研究. *生物多样性*, **15**(2): 199-206.
- 黄红英, 徐剑, 叶吉龙, 等. 2010. 不同耕作方式对菜地土壤动物种类组成及多样性的影响. *广东农业科学*, **37**(5): 87-89.
- 黄伦先, 沈世华. 1996. 免耕生态系统中土壤动物对土壤养分的影响的研究. *农村生态环境*, **12**(4): 8-10.
- 贾彦霞, 王新谱, 才旺计美, 等. 2008. 银川市蔬菜地土壤动物群落组成和结构初步研究. *西北农业学报*, **17**(2): 258-261, 265.
- 蒋海东, 杨青, 吕宪国. 2006. 土壤动物在农业生态系统中的研究进展. *土壤通报*, **37**(4): 805-808.
- 柯欣, 梁文举, 宇万太, 等. 2004. 下辽河平原不同土地利用方式下土壤微节肢动物群落结构研究. *应用生态学报*, **15**(4): 600-604.
- 李琪, 梁文举, 姜勇. 2007. 农田土壤线虫多样性研究现状及展望. *生物多样性*, **15**(2): 134-141.
- 李涛, 李灿阳, 俞丹娜, 等. 2010. 交通要道重金属污染对农田土壤动物群落结构及空间分布的影响. *生态学报*, **30**(18): 5001-5011.
- 李淑梅. 2007. 化学除草剂对土壤动物影响的研究进展. *农业与技术*, **27**(5): 95-96.
- 李治祥. 1982. 农药对土壤动物区系的影响. *农业环境科学学报*, (3): 30-32.
- 李忠武, 王振中, 邢协加, 等. 1999. 农药污染对土壤动物群落影响的实验研究. *环境科学研究*, **12**(1): 49-53.
- 梁继东, 周启星. 2003. 甲胺磷、乙草胺和铜单一与复合污染对蚯蚓的毒性效应研究. *应用生态学报*, **14**(4): 593-596.
- 梁文举, 姜勇, 李琪, 等. 2004. 施用化肥对下辽河平原稻田土壤线虫群落产生的影响. *土壤通报*, **35**(6): 773-775.
- 梁文举, 武志杰, 闻大中. 2002. 21世纪初农业生态系统健康研究方向. *应用生态学报*, **13**(8): 1022-1026.
- 梁文举, 张万民, 李维光, 等. 2001. 施用化肥对黑土地地区线虫群落组成及多样性产生的影响. *生物多样性*, **9**(3): 237-240.
- 梁文举, 张晓珂, 姜勇, 等. 2005. 根分泌的化感物质及其对土壤生物产生的影响. *地球科学进展*, **20**(3): 330-337.
- 林英华, 黄庆海, 刘骅, 等. 2010. 长期耕作与长期定位施肥对农田土壤动物群落多样性的影响. *中国农业科学*, **43**(11): 2261-2269.
- 林英华. 2003. 长期施肥对农田土壤动物群落影响及安全评价(博士学位论文). 北京, 中国农业科学院.
- 刘新民, 门丽娜. 2009. 内蒙古武川县农田退耕还草对大型土壤动物群落的影响. *应用生态学报*, **20**(8): 1965-1972.
- 乔玉辉, 曹志平, 王宝清, 等. 2004. 不同培肥措施对低肥力土壤生态系统蚯蚓种群数量的影响. *生态学报*, **24**(4): 700-705.
- 邵春华, 张雪萍, 张鹏. 2010. 三江平原农田土壤动物组成与结构分析. *中国农学通报*, **26**(21): 335-340.
- 申燕, 郑子成, 李廷轩, 等. 2009. 茶园土壤动物群落结构特征研究. *茶叶科学*, **29**(4): 275-281.
- 孙儒泳. 1987. *动物生态学原理*. 北京: 北京师范大学出版社.
- 土壤动物研究方法手册编写组. 1998. *土壤动物研究方法手册*. 北京: 北京林业出版社.
- 王广力, 王勇, 韩立亮, 等. 2005. 洞庭湖区不同土地利用方式下的土壤动物群落结构. *生态学报*, **25**(10): 2629-2630.
- 王一华. 2004. 农药污染对土壤动物群落影响的定量研究(硕士学位论文). 济南: 山东师范大学.
- 王振中, 邓继福, 郭永灿, 等. 1994. 湖南省清水塘工业区重金属污染对土壤动物群落生态影响的研究. *地理科学*, **14**(1): 64-72.
- 王振中, 颜亨梅, 张友梅, 等. 1996. 有机磷农药对土壤动物群落结构的影响研究. *生态学报*, **16**(4): 357-366.
- 王振中, 张友梅. 1990. 湘江流域工业污染源对农田生态系统土壤动物群落影响的研究. *应用生态学报*, **1**(2): 156-164.
- 吴东辉, 张柏, 安艳芬. 2006a. 吉林省中部黑土区农业土地利用方式对土壤螨类群落特征的影响. *土壤通报*, **37**(1): 121-125.
- 吴东辉, 张柏, 卜照义, 等. 2006b. 长春市不同土地利用生境土壤螨类群落结构特征. *生态学报*, **26**(1): 16-25.
- 吴东辉, 张柏, 陈鹏. 2001. 吉林省中西部平原区土壤螨类群落结构特征. *动物学报*, **51**(3): 401-412.
- 吴东辉, 张柏, 陈鹏. 2007. 长春市不同土地利用生境土壤甲虫群落结构特征. *地理科学*, **27**(3): 420-425.
- 吴玉红, 蔡青年, 林超文, 等. 2009. 四川紫色土丘陵区不同土地利用方式下中型土壤动物群落结构. *生态学杂志*, **28**(2): 277-282.
- 吾玛尔·阿布力孜, 孜比尔妮莎·吾布力, 阿布都如苏力·吐孙. 2010. 乌鲁木齐市蔬菜地土壤动物群落结构特征的初步研究. *新疆农业科学*, **47**(7): 1441-1449.
- 邢协加, 王振中, 张友梅, 等. 1997. 杀虫双农药对土壤螨类和弹尾类影响的研究. *湖南师范大学学报(自然科学)*, **20**(1): 79-84.
- 闫冬春. 2000. 污水灌溉对农田土壤动物群落结构的影响. *烟台大学学报(自然科学版)*, **13**(4): 282-285.
- 杨大星, 吴鹏飞, 陈智华. 2009. 成都市郊油菜地土壤动物群落多样性. *西南农业学报*, **22**(2): 377-381.
- 杨效东, 唐勇, 唐建维. 2001. 热带次生林刀耕火种过程中土壤节肢动物群落结构及多样性的变化. *生物多样性*, **9**(3): 222-227.
- 殷秀琴, 王海霞, 周道玮. 2003. 松嫩草原区不同农业生态系统土壤动物群落特征. *生态学报*, **23**(6): 1071-1078.
- 尹飞, 毛任钊, 傅伯杰, 等. 2006. 农田生态系统服务功能及其形成机制. *应用生态学报*, **17**(5): 929-934.
- 尹文英. 1992. *中国亚热带土壤动物*. 北京: 科学出版社.
- 张靖楠, 梁文举, 李琪. 2008. 施用化学农药对大豆田土

- 壤线虫群落的影响. 土壤通报, **39**(4): 900-903
- 张雪萍. 1995. 土壤动物与环境质量关系探讨. 哈尔滨师范大学学报(自然科学版), **11**(4): 95-99.
- 张友梅, 王振中. 1984. 农田生态系统土壤动物群落初探. 湖南师院学报(自然科学版), (3): 90-96.
- 张友梅, 王振中. 1986. 稻田土壤动物群落初步调查. 生态学杂志, **5**(5): 22-26.
- 张宗炳. 1988a. 农药对农田生态系统的影响(1). 生态学杂志, **7**(3): 25-29.
- 张宗炳. 1988b. 农药对农田生态系统的影响(2). 生态学杂志, **7**(4): 30-34.
- 赵善欢, 屠豫钦. 1965. 关于农药合理使用的几个问题. 植物保护, (4): 157-160.
- 郑长英, 胡敦孝, 李维炯. 2002. 施用EM堆肥对土壤螨群落结构的影响. 生态学报, **22**(7): 1116-1121.
- 朱强根, 朱安宁, 张佳宝, 等. 2009. 黄淮海平原保护性耕作下玉米季土壤动物多样性. 应用生态学报, **20**(10): 2417-2423.
- 朱强根, 朱安宁, 张佳宝, 等. 2010a. 黄淮海平原保护性耕作下土壤动物短期动态研究. 土壤通报, **41**(4): 819-824.
- 朱强根, 朱安宁, 张佳宝, 等. 2010b. 长期施肥对黄淮海平原农田中小型土壤节肢动物的影响. 生态学杂志, **29**(1): 69-74.
- 朱永恒, 濮励杰, 赵春雨, 等. 2006. 土地污染的一个评价指标:土壤动物. 土壤通报, **37**(2): 374-377.
- 朱永恒, 赵春雨, 王宗英, 等. 2005. 我国土壤动物群落生态学研究综述. 生态学杂志, **24**(12): 1477-1481.
- 左海根. 2005. 农药对蚯蚓的单一及复合毒性研究(硕士学位论文). 南京: 南京农业大学.
- Aritajat U, Madge DS, Gooderham PT. 1977. Effects of compaction of agricultural soils on soil fauna. I. Field investigations. *Pedobiologia*, **17**: 262-282.
- Baker GH. 1990. Recognizing and responding to the influences of agriculture and other land-use practices on soil fauna in Australia. *Applied Soil Ecology*, **9**: 302-310.
- Björn A, Ulrik L, Helene L, et al. 1973. Effects of Nitrogen Fertilization on the Abundance of Soil Fauna Populations in a Scots pine stand. Stockholm: Royal College of Forestry.
- Bongers T. 1990. The maturity index: An ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia*, **83**: 14-19.
- Cutz-Pool LQ, Palacios-Vargas JG, Castaño-Meneses G, et al. 2007. Edaphic Collembola from two agroecosystems with contrasting irrigation type in Hidalgo State, Mexico. *Applied Soil Ecology*, **36**: 46-52.
- de Deyn GB, Raaijmakers CE, van Ruijven J, et al. 2004. Plant species identity and diversity effects on different trophic levels of nematodes in the soil food web. *Oikos*, **106**: 576-586.
- Debeljak M, Cortet J, Demšar D, et al. 2007. Hierarchical classification of environmental factors and agricultural practices affecting soil fauna under cropping systems using Bt maize. *Pedobiologia*, **51**: 229-238.
- Edwards CA, Dennis EB, Empson DW. 1967. Pesticides and the soil fauna: Effects of aldrin and DDT in an arable field. *Annals of Applied Biology*, **60**: 11-22.
- Eijsackers H. 1983. Soil fauna and soil microflora as possible indicators of soil pollution. *Environmental Monitoring and Assessment*, **3**: 307-316.
- Förster B, van Gestel CAM, Koolhaas JE, et al. 2004. Ring-testing and field-validation of a Terrestrial Model Ecosystem (TME): An instrument for testing potentially harmful substances: Effects of carbendazim on organic matter breakdown and soil fauna feeding activity. *Ecotoxicology*, **13**: 129-141.
- Fox CJS. 1967. Effects of several chlorinated hydrocarbon insecticides on the springtails and mites of grassland soil. *Journal of Economic Entomology*, **60**: 77-79.
- Griffiths BS, Ekelund F, Rønn R, et al. 1993. Protozoa and nematodes on decomposing barley roots. *Soil Biology and Biochemistry*, **25**: 1293-1295.
- Heimbach F. 1992. Correlation between data from laboratory and field tests for investigating the toxicity of pesticides to earthworms. *Soil Biology and Biochemistry*, **24**: 1749-1753.
- Hendrix PF, Parmelee RW, Crossley DA, et al. 1986. Detritus food webs in conventional and no-tillage agroecosystems. *Bioscience*, **36**: 374-380.
- Hole FD. 1981. Effects of animals on soil. *Geoderma*, **25**: 75-112.
- Jordan D, Miles RJ, Hubbard VC, et al. 2004. Effect of management practices and cropping systems on earthworm abundance and microbial activity in Sanborn Field: A 115-year-old agricultural field. *Pedobiologia*, **48**: 99-110.
- Liang WJ, Chen LJ, Li Q, et al. 2002. Responses of nematode communities to inorganic fertilizer disturbance in a farmland ecosystem. *Pedosphere*, **12**: 193-200.
- Liang WJ, Lou YL, Li Q, et al. 2009. Nematode faunal response to long-term application of nitrogen fertilizer and organic manure in Northeast China. *Soil Biology and Biochemistry*, **41**: 883-890.
- Lichtenstein EP. 1957. DDT accumulation in Mid-western orchard and crop soils treated since 1945. *Journal of Economic Entomology*, **50**: 545-547.
- Lin YH, Yang XY, Zhang FD, et al. 2005. Impact of long-term fertilization on cropland soil fauna community at loess soil, Shannxi, China. *Agricultural Sciences in China*, **4**: 924-930.
- Loring SJ, Snider RJ, Robertson LS. 1981. The effects of three tillage practices on Collembola and Acarina populations. *Pedobiologia*, **22**: 172-184.
- Mulder C, Boit A, Bonkowski M, et al. 2011. A belowground perspective on Dutch agroecosystems: How soil organisms interact to support ecosystem services. *Advances in Ecological Research*, **44**: 277-357.
- Neher DA. 2001. Nematode Communities as Ecological Indicators of Agroecosystem Health. Boca Raton: CRC Press.

- Ritz K, Trudgill DL. 1999. Utility of nematode community analysis as an integrated measure of the functional state of soils; Perspectives and challenges. *Plant and Soil*, **212**: 1–11.
- Rizk MA, Mikhail WZA. 1999. Impact of no-tillage agriculture on soil fauna diversity. *Zoology in the Middle East*, **18**: 113–120.
- Robertson LN, Kettle BA, Simpson GB. 1994. The influence of tillage practices on soil macrofauna in a semi-arid agroecosystem in northeastern Australia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **48**: 149–156.
- Sarkar K, Pramanik R, Joy VC. 2000. Reproductive toxicity of pesticides on soil microarthropod fauna as ecotoxicological tool. *Journal of Environmental Biology*, **21**: 227–234.
- Stinner BR, Krueger HR, McCartney DA. 1986. Insecticide and tillage effects on pest and non-pest arthropods in corn agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **15**: 11–21.
- Tripathi G, Sharma BM. 2005. Effects of habitats and pesticides on aerobic capacity and survival of soil fauna. *Bio-medical and Environmental Sciences*, **18**: 169–175.
- Wardle DA, Bardgett RD, Klironomos JN, *et al.* 2004. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, **304**: 1629–1633.
- Wardle DA, Yeates GW, Watson RN, *et al.* 1995. The detritus food-web and the diversity of soil fauna as indicators of disturbance regimes in agro-ecosystems. *Plant and Soil*, **170**: 35–43.
- Wardle DA, Yeates GW, Williamson W, *et al.* 2003. The response of a three trophic level soil food web to the identity and diversity of plant species and functional groups. *Oikos*, **102**: 45–56.
- Willey RW. 1979. Intercropping: Its importance and research needs. Part I, Competition and yield advantage. *Field Crops Abstracts*, **32**: 1–10.
- Yeates GW, Bongers T. 1999. Nematode diversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **74**: 113–135.
- Yin XQ, Song B, Dong WH, *et al.* 2010. A review on the ecology of soil fauna in China. *Journal of Geographical Sciences*, **20**: 333–346.

作者简介 宋理洪,男,1987年生,硕士研究生。主要从事土壤动物生态学研究。E-mail: songlihong10@mails.gucas.ac.cn

责任编辑 刘丽娟
