

长期施肥对黄淮海平原农田中小型土壤节肢动物的影响*

朱强根^{1,2,3} 朱安宁^{1,2**} 张佳宝^{1,2} 张焕朝³ 钦绳武^{1,2} 信秀丽^{1,2}

(¹ 中国科学院南京土壤研究所封丘农业生态实验站, 南京 210008; ² 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; ³ 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037)

摘要 在2008年9月和2009年2月,采用改良干漏斗方法(Modified Tullgren)对黄淮海地区长期定位施肥试验下中小型土壤节肢动物进行调查。试验包括氮磷钾(NPK)、氮磷(NP)、氮钾(NK)、磷钾(PK)、有机肥(OM)、1:1化学氮肥与有机氮肥(OMNPK)和不施肥(CK)7个处理。结果表明,OM和OMNPK处理有利于提高土壤动物丰富度和多样性;NK处理不利于土壤动物的生存和发展,缺磷影响了土壤动物数量的增长;从优势类群弹尾目和蜱螨目来看,OM和OMNPK处理对弹尾目等节跳科、棘跳科和球角跳科的生长有利,而圆跳科在NPK处理下具有更高的数量;OMNPK处理对蜱螨目中气门亚目有显著的正效应,对前气门亚目和甲螨亚目也有一定的正向作用;氮肥对弹尾目没有表现出正相关关系,但在一定程度上增加了蜱螨目的数量。

关键词 长期施肥试验;土壤动物;生物多样性;冗余分析

中图分类号 Q968 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2010)1-0069-06

Effects of long-term fertilization on cropland soil meso-micro arthropods in Huang-Huai-Hai Plain of China. ZHU Qiang-gen^{1,2,3}, ZHU An-ning^{1,2}, ZHANG Jia-bao^{1,2}, ZHANG Huan-chao³, QIN Shen-wu^{1,2}, XIN Xiu-li^{1,2} (¹Fengqiu State Experimental Station of Agro-Ecology, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; ²State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; ³College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China). *Chinese Journal of Ecology* 2010 29(1) 69-74.

Abstract: By using modified Tullgren method, the community composition of meso-micro arthropods in agricultural soils under long-term fertilization in Huang-Huai-Hai Plain was investigated in September 2008 and February 2009. There were seven fertilization treatments, *i. e.*, chemical N, P and K (NPK), N and P (NP), N and K (NK), P and K (PK), organic manure (OM), OM and NPK (organic nitrogen: fertilizer nitrogen = 1:1) (OMNPK), and no-fertilization (CK). Treatments OM and OMNPK increased the abundance and diversity of arthropods, while treatment NK had significant negative effects on soil arthropods because of the P deficiency. As for the dominant groups Collembola and Acari, treatments OM and OMNPK benefited the growth of Isotomidae, Hypogastruridae, and Onychiuridae (Collembola), while treatment NPK benefited Sminthuridae (Collembola). Treatment OMNPK had significant positive effects on Mesostigmata (Acari), and had definite positive effects on Oribatida and Prostigmata (Acari). Nitrogen fertilizer had no positive effects on Collembola, but increased the number of Acari.

Key words: long-term fertilization experiment; soil fauna; biodiversity; redundancy analysis (RDA).

* 中国科学院知识创新工程重大项目(KSCX1-YW-09-05)和国家重点基础研究发展计划资助项目(2005CB121103)。

** 通讯作者 E-mail: anzhu@issas.ac.cn

收稿日期:2009-05-04 接受日期:2009-09-16

随着农业管理向现代化转变,管理技术水平已不断提高,但是施肥仍是现行补充土壤养分,提高作物产量行之有效的重要方法。大量使用肥料的农田管理措施已对土壤物理化学特性产生了重要的影响(Stamatiadis *et al.*, 1999; Wuest *et al.*, 2005),同时也改变了土壤生物群落结构以及土壤动物的生存环境(Cole *et al.*, 2005)。农田生物多样性的变化与农业管理措施有着密不可分的联系(Brennan *et al.*, 2006),长期施肥导致了一些无脊椎动物数量的减少,增加了如弹尾目和蛴螬目等类群的数量(Gudleifsson, 2002),高氮量施肥对中型蛴螬的生存发展有不利影响(Reeleder *et al.*, 2006)。土壤动物作为土壤中重要的生物群落,对土壤质量的变化起着指示的作用,其群落的个体数量,丰富度和多样性等可作为土壤质量评价的重要指标(Ponge *et al.*, 2003)。中国对森林生态系统土壤动物开展调查相对较多(王有年等, 2007; 王军, 2008; 陈小鸟等, 2009),而施肥条件下的农田系统土壤动物研究还很缺乏(林英华等, 2006a, 2006b; 吴玉红等, 2009),因此,研究长期施肥对农田土壤动物群落产生的影响对于农田生物多样性的保护和维持提高土壤质量均有着重要的意义。

黄淮海平原是中国重要的粮食核心生产区,大量使用肥料仍是该地区保持和提高作物产量的重要措施。本文基于长期施肥试验,调查了施用有机、无机肥料或有机无机混合施用条件下的土壤动物群落结构和多样性,为该地区施用肥料对农田生物群落带来的影响提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 长期肥料试验

长期肥料试验设置于黄淮海平原中国科学院封丘农业生态国家实验站内(35°01'N, 114°32'E)。该地区属半干旱半湿润的暖温带季风气候,年平均降水量605 mm,主要集中在7—9月,年平均气温为13.9℃。土壤为轻质潮土。试验始于1989年冬小麦,采用冬小麦和夏玉米轮作的种植制度。试验包括氮磷钾(NPK)、氮磷(NP)、氮钾(NK)、磷钾(PK)、1:1化学氮肥与有机氮肥(OMNPK)、全部有机肥(OM)和不施肥(CK),共7个处理,每处理3次重复。具体施肥量与农田管理参见孟磊等(2005)。试验初始耕作层(0~20 cm)土壤理化性质为:有机质5.83 g·kg⁻¹、全氮0.445 g·kg⁻¹、全磷0.50 g·

kg⁻¹、全钾1.93 g·kg⁻¹、速效氮9.51 mg·kg⁻¹、速效磷1.93 mg·kg⁻¹、速效钾78.8 mg·kg⁻¹、pH 8.65和土壤容重1.62 g·cm⁻³。土壤肥力为缺氮、缺磷和富钾。

1.2 研究方法

分别在夏秋(2008年9月下旬)和冬春(2009年2月下旬)季节对长期施肥试验地进行了土壤动物调查,采用35 mm直径的土钻,在每个小区多点随机钻取土壤混合样,并按0~10 cm和10~20 cm分成表层和下层。钻取的土样带回实验室,采用改良的Tullgern干漏斗方法收集土壤动物。土壤动物分类鉴定参照《中国土壤动物检索图鉴》(尹文英, 1998)。

1.3 数据分析

土壤动物群落分析采用 α 多样性测度方法。主要包括:

Simpson 优势度指数:

$$\lambda = \sum_i^s [N_i(N_i - 1)] / [N(N - 1)] \quad (1)$$

Shannon-Weiner 多样性指数:

$$H' = - \sum_i^s P_i \ln P_i \quad (2)$$

Pielou 均匀度指数:

$$J_s = H' / \ln S \quad (3)$$

式中, S 为类群数量, N 为群落总个体数, N_i 为第*i*个类群的个体数, P_i 为类群*i*个体数占总数的比率。

土壤动物群落数据方差分析采用SPSS 12.0,多元典范冗余分析(redundancy analysis, RDA)采用CANOCO 4.5软件(Lap s &  milauer, 2003)完成。

2 结果与分析

2.1 土壤动物群落组成与多样性

在长期试验地21个小区中共收集到土壤动物3964只,优势类群有4类:棘跳科、等节跳科、甲螨亚目和前气门亚目,常见类群有2类:球角跳科和中气门亚目;其他类群为稀有类群或极稀有类群(表1)。土壤动物存在显著的时间季节变化($P < 0.01$),其中棘跳科、长角跳科、中气门亚目、双尾目、原尾纲和综合纲在9月的数量较2月均有显著的增加,而球角跳科、圆跳科和隐翅甲科的数量在2次取样时间上差异没有显著差异($P > 0.05$),蠋(虫)纲数量在9月反而减少甚至没有收集到。鞘翅目和双翅目幼虫在时间变化上表现不一致,前者在

表1 0~20 cm 土层中土壤动物群落组成和数量

Tab.1 Composition and number of soil fauna in 0-20 cm soil layer on two sampling dates

类群		2月	9月	总计	频度	多度
弹尾目 Collembola	棘跳科 Onychiuridae (Ony.)	252	635	887	22.38	+++
	球角跳科 Hypogastruridae (Hyp.)	60	62	122	3.08	++
	鳞跳科 Tomoceridae (Tom.)	2	-	2	0.05	+
	等节跳科 Isotomidae (Iso.)	137	519	656	16.55	+++
	驼跳科 Cyphederidae (Cyp.)	1	6	7	0.18	+
	长角跳科 Entomobryidae (Ent.)	-	18	18	0.45	+
	圆跳科 Sminthuridae (Smi.)	13	11	24	0.61	+
	蜱螨目 Acari	甲螨亚目 Oribatida (Ori.)	438	357	795	20.06
中气门亚目 Mesostigmata (Mes.)		37	189	226	5.70	++
前气门亚目 Prostigmata (Pros.)		413	612	1025	25.86	+++
鞘翅目 Coleoptera	隐翅甲科 Staphylinidae (Sta.)	15	18	33	0.83	+
	葬甲科 Silphidae (Sil.)	-	2	2	0.05	+
	扁甲科 Cupedidae (Cup.)	1	-	1	0.03	+
	苔甲科 Scydmaenidae (Scy.)	-	5	5	0.13	+
	粪金龟科 Geotrupidae (Geo.)	-	2	2	0.05	+
同翅目 Homoptera	蚜科 Aphididae (Aph.)	3	-	3	0.08	+
膜翅目 Hymenoptera	蚁科 Formicidae (For.)	1	6	7	0.18	+
啮虫目 Psocoptera (Pso.)		1	3	4	0.10	+
双尾目 Diplura (Dipl.)		-	30	30	0.75	+
蜘蛛目 Araneae (Ara.)		3	21	24	0.60	+
综合纲 Symphylans (Sym.)		-	17	17	0.41	+
蠍(虫戈)纲 Pauropoda (Pau.)		17	-	17	0.41	+
原尾纲 Protura (Prot.)		3	12	15	0.37	+
幼虫	鞘翅目 Coleoptera (ICol.)	3	-	3	0.08	+
	双翅目 Diptera (IDip.)	7	32	39	0.98	+
总计		1407	2557	3964	100	

括号内为土壤动物名称缩写; + + + + + 分别表示优势类群(占总数比例 > 10%)、常见类群(占总数比例 1% ~ 10%)和稀有类群(占总数比例 < 1%)。

9月数量较少,而后者从2—9月,数量得到了显著的增长。

从类群数来看,在2月表现为 OM > PK > NPK > OMNPK > NK > NP > CK, 9月表现为 OMNPK > OM > PK > NPK = NP > NK > CK(表2)。2个取样时间上均表现 OM 处理能显著提高土壤动物类群丰富性,不施肥处理 CK 为最低。PK 施肥处理土壤动物类群数高于 NPK、NP 和 NK 处理,表现了施用氮肥没有显著提高土壤动物类群丰富性。从多样性指数 (H') 来看,在2月表现为 OM > OMNPK > PK > CK > NP > NPK > NK, 9月表现为 NPK > OMNPK > NP > CK > PK > OM > NK(表2)。由于 Shannon 多样性指数要同时受到土壤动物分布的优势度 (λ) 和均匀度 (J_s) 的影响,所以 CK 处理下相对较低的优势度和较高的均匀度导致了 CK 处理在2次取样时间上均有较大的 Shannon 多样性指数。OM 处理在2月具有最高的多样性指数值,而在9月多样性指数仅高于 NK 处理。主要原因是9月 OM 处理下优势类群得到了迅速的增加,增大了优势度值而降低了多样

性指数值。从取样时间上看,9月土壤动物类群数和多样性均显著高于2月,而优势度指数和均匀度在2次取样时间上差异不明显。

2.2 土壤动物群落影响因素

从土壤动物总数来看,施肥处理和取样时间对土壤动物总量均有极显著的影响 ($P < 0.01$),且在不同的取样时间上,施肥处理之间的差异表现不一致(表3)。棘跳科、等节跳科、甲螨亚目和前气门亚目受施肥处理的影响显著,而棘跳科、等节跳科和前气门亚目存在取样时间上的显著差异,等节跳科、甲螨亚目和前气门亚目具有显著的土壤层次分布差异。施肥和取样时间存在显著的交互效应,仅甲螨亚目表现为不显著,其他类群交互效应显著。施肥处理和土壤层次之间的交互作用对棘跳科、甲螨亚目和前气门亚目有显著的影响。甲螨亚目的土壤层次分布存在取样时间上的差异(表3)。

在分析生物的群落结构时,由于其类群丰富,影响因素繁多,常常需要借助多元统计分析方法来对生物群落做一个综合的分析。以施肥处理为协变

表2 不同施肥处理下0~20 cm土层中土壤动物群落多样性

Tab.2 Diversity of soil fauna in 0–20 cm soil layer across seven fertilization treatments

处理	2月				9月			
	S	λ	H'	J_s	S	λ	H'	J_s
CK	7	0.243	1.587	0.816	12	0.203	1.855	0.746
NK	9	0.317	1.393	0.634	13	0.265	1.733	0.676
PK	12	0.255	1.623	0.653	16	0.211	1.786	0.644
NP	8	0.260	1.561	0.750	14	0.190	1.920	0.728
NPK	11	0.267	1.535	0.640	14	0.167	1.981	0.751
OM	13	0.220	1.749	0.682	18	0.223	1.783	0.617
OMNPK	10	0.212	1.697	0.737	19	0.182	1.971	0.669

表3 处理、时间和土层对土壤动物丰富度影响的方差分析(F值)

Tab.3 F value of ANOVA on the effect of treatment, sampling date, soil layer and two-way interactions among them on abundance of dominant groups of soil fauna

类群	处理	时间	土层	处理×时间	处理×土层	时间×土层
棘跳科	11.88**	33.79**	0.59	4.37**	2.23*	0.40
等节跳科	16.92**	87.65**	25.42**	13.74**	2.08	0.001
甲螨亚目	4.95**	2.03	27.63**	1.05	2.93*	5.97*
前气门亚目	3.56**	19.10**	6.83*	3.20**	2.35*	0.001
总计	14.73**	64.28**	0.04	5.90**	1.39	0.29

** $P < 0.01$, * $P < 0.05$.

量,通过冗余分析建立排序图,可以直观地反映出取样时间(图1)和土壤层次(图1)对土壤动物群落的影响。图1中 van Dobben 圆用以衡量取样时间或土壤层次对土壤动物类群的影响是否显著(Ter Braak & Šmilauer, 2002)。土壤动物类群矢量箭头落在圆中表示具有显著的正效应(与影响因素方向相同)或负效应(与影响因素方向相反),其结果与方差分析类似。由图1可见,在9月,长角跳科、驼跳科和前气门亚目等多数土壤动物类群的数量都得到了显著的增长,而甲螨亚目在2月有较大的分布(图1)。土壤动物的垂直分布主要表现为,甲螨亚目趋于0~10 cm的表层分布,而等节跳科、蜘蛛目、蚁科和隐翅甲科趋于分布在10~20 cm的下层土壤中(图1)。

为了进一步探讨不同施肥处理对土壤动物群落的影响,以取样时间和土壤层次为协变量,通过冗余分析建立排序图(图2)。图2中第一排序轴解释了土壤动物数量变异的13.7%,体现了土壤动物群落与施肥处理之间相关关系的69.4%。7种施肥处理共同解释了土壤动物数量变异的19.8%。由图2可见,OM、PK和OMNPK处理与大多数土壤动物之间均呈现正相关关系,而CK和NK处理不利于土壤

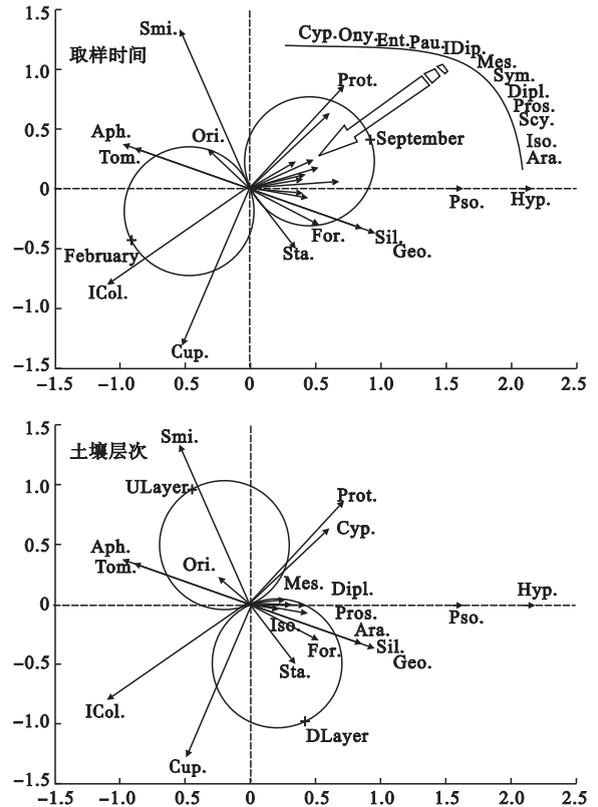


图1 取样时间和土壤层次对土壤动物影响冗余分析

Fig.1 Redundancy analysis (RDA) of soil fauna with sampling date and soil layer as factors, while fertilization treatments as covariables

土壤动物名称缩写见表1。下同。

动物的生存和发展。OMNPK处理显著提高了中气门亚目、双尾目和球角跳科的数量,OM处理与等节跳科和蚁科类群具有显著的正相关关系,OMNPK和OM处理下均有利于棘跳科类群数量上的增长。PK处理表现为对双尾目和蚁科类群有显著的正向影响。蠟(蜱)纲在CK处理条件下具有较高的个体数量,而与OMNPK处理表现为负相关。NPK和NP处理与甲螨亚目、前气门亚目和圆跳科均具有较强的正相关性。

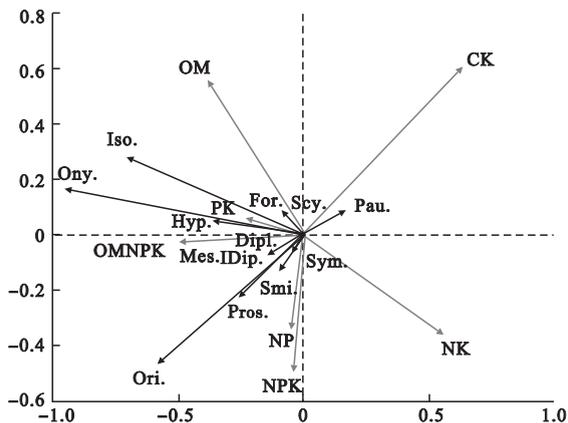


图2 7种施肥处理对土壤动物群落影响的冗余分析(RDA)

Fig. 2 Redundancy analysis (RDA) of soil fauna with seven fertilization treatments as factors, while sampling date and soil layer as covariables

3 讨论

土壤动物的群落组成和数量具有显著的季节性变化。本试验选择2次典型的时间对土壤动物进行调查,其中9月处于夏秋季节,累计降雨32.5 mm,月均气温为20.9℃,而2月为冬春,累计降雨16.2 mm,月均气温为5.1℃。相比之下,9月温度和水分条件相对较高,土壤动物数量和多样性均显著高于2月。但是,不同土壤动物类群的季节变化表现不完全一致,如土壤动物优势类群甲螨亚目在2次取样时间上的差异仅达到近显著水平($P < 0.10$),而综合纲和隐翅甲科表现与取样的时间无关(图1),表明综合纲和隐翅甲科对土壤温度水分条件的适应范围较大。蠋(虫戈)纲在9月没有收集到,而在温度和降雨量较低的2月出现,表现了该类群的季节性动态与其他类群存在很大差异。

土壤动物丰富度是土壤肥力的重要标志,其群落多样性可作为衡量土壤质量的重要指标之一。生物群落多样性指数有很多,其中类群数和Shannon多样性指数是常用的指标,对生物群落具有较强的区别能力(Taylor, 1978)。类群数和多样性均表明,OM和OMNPK处理具有最高的土壤动物多样性,这和林英华等(林英华等, 2006a)的研究结果类似。一方面,使用有机肥料增加了土壤的有机质含量,为土壤动物提供了重要的可利用资源(Kautz *et al.*, 2006);另一方面,有机肥能改善土壤的结构和pH值等土壤物理化学特性,从而为土壤动物提供更为合适的生存微环境(Mijangos *et al.*, 2006)。PK处

理土壤动物多样性高于NP和NPK处理,表现了施用氮肥对增加土壤动物丰富度与多样性没有明显的正效应(李淑梅等, 2008)。NK处理下土壤动物多样性较低,原因可能和该地区的缺磷富钾土壤有关,而磷素影响了土壤微生物和地上植物的生长,从而间接地对土壤动物增长构成了一个限制因素。CK处理具有最小的土壤动物类群数,但Shannon多样性指数仍较大。可见,在一定的条件下,类群数和多样性指数在衡量群落多样性上仍可能存在差异。一般地,强调物种丰富度的指数比强调优势度或均匀度的指数具有更大的区别群落差异的能力(马克平, 1994)。综合土壤动物数量与多样性指数来看,由于CK处理下土壤质量下降,土壤结构性差,不利于土壤动物的生存和发展。

土壤动物类群对环境具有一定的选择适应性,弹尾目和蜱螨目通常是土壤动物中的主要优势类群。从弹尾目来看,OM处理有利于弹尾目等节跳科、棘跳科和球角跳科类群的生长,原因可能是增施有机肥能提高土壤的真菌数量(刘树堂等, 2006),而弹尾目类群主要是以真菌为食,还能刺激真菌菌丝体的生长,二者相互促从而得到发展(Hedlund *et al.*, 1991; Reeleder *et al.*, 2006)。施用有机肥和无机肥结合的OMNPK处理也与等节跳科、棘跳科和球角跳科有很强的相关性,这和林英华等(林英华等, 2006b)研究得到的使用化肥和有机肥混施能显著提高土壤弹尾目的数量是一致的。本试验在缺氮肥的PK处理下,表现了和弹尾目有很强的正相关,而在NP和NPK处理下没有促进弹尾目等节跳科、棘跳科和球角跳科数量上的增长,甚至对其表现了一定的负效应(图2)。圆跳科与NPK处理有很强的正相关关系,表现了圆跳科在环境适应性上,与等节跳科、棘跳科和球角跳科存在较大的差异。从蜱螨目类群来看,中气门亚目和OMNPK处理有显著的正相关关系($P < 0.05$),甲螨亚目和前气门亚目也在OMNPK处理下均有较高的丰富度,表现了施用有机无机混合肥有利于提高蜱螨目类群的丰富度。仅施用有机肥的OM处理与中气门亚目表现了不显著的正相关关系,对甲螨亚目和前气门亚目也没有明显的影响。而在有氮肥的NP和NPK处理下,表现了对蜱螨目类群有较强的正向作用。综上所述,在施用有机肥料OM处理下,有利于弹尾目数量的增长,OMNPK处理对弹尾目和蜱螨目类群均有正向的作用。氮肥的使用对弹尾目没有显著的正效

应,但在施用氮肥的 NP 和 NPK 处理下,表现了与蟬蟪目类群有较好的正相关关系。

参考文献

- 陈小鸟,由文辉,易兰. 2009. 浙江天童太白山不同海拔土壤动物的群落结构, *生态学杂志*, **28**(2): 270-276.
- 李淑梅,史留功,李青芝. 2008. 不同施肥条件下农田土壤动物群落组成及多样性变化. *安徽农业科学*, **36**(7): 2830-2831, 2989.
- 林英华,朱平,张夫道,等. 2006a. 吉林黑土区不同施肥处理对农田土壤昆虫的影响. *生态学报*, **26**(4): 1122-1130.
- 林英华,朱平,张夫道,等. 2006b. 吉林黑土区不同施肥条件下农田土壤动物组成及多样性变化. *植物营养与肥料学报*, **12**(3): 412-419.
- 刘树堂,刘培利,韩晓日,等. 2006. 长期定位施肥对无石灰性潮土生物环境影响研究. *水土保持通报*, **26**(1): 26-33.
- 马克平. 1994. 生物多样性的测度方法. I. a 多样性的测度方法(上). *生物多样性*, **2**(3): 162-168.
- 孟磊,丁维新,蔡祖聪,等. 2005. 长期定量施肥对土壤有机碳储量和土壤呼吸影响. *地球科学进展*, **20**(6): 687-692.
- 王军,姚海元,麦俊伟,等. 2008. 广州长岗山森林凋落物土壤动物群落结构及其季节变化, *生态学杂志*, **27**(3): 408-413.
- 王有年,张铁强,李奕松,等. 2007. 枣园节肢动物群落的时间动态, *生态学杂志*, **26**(8): 228-232.
- 吴玉红,蔡青年,林超文,等. 2009. 四川紫色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.
- 尹文英. 1998. *中国土壤动物检索图鉴*. 北京:科学出版社.
- Brennan A, Fortune T, Bolger T. 2006. Collembola abundances and assemblage structures in conventionally tilled and conservation tillage arable systems. *Pedobiologia*, **50**: 135-145.
- Cole L, Buckland SM, Bardgett RD. 2005. Relating microarthropod community structure and diversity to soil fertility manipulations in temperate grassland. *Soil Biology & Biochemistry*, **37**: 1707-1717.
- Gudleifsson BE. 2002. Impact of long term use of fertilizer on surface invertebrates in experimental plots in a permanent hayfield in Northern-Iceland. *Agricultural Society of Iceland*, **15**: 37-49.
- Hedlund K, Boddy L, Preston CM. 1991. Mycelial responses of the soil fungus, *Mortierella isabellina*, to grazing by *Onychiurus armatus* (Collembola). *Soil Biology & Biochemistry*, **23**: 361-366.
- Kautz T, López-Fando C, Ellmer F. 2006. Abundance and biodiversity of soil microarthropods as influenced by different types of organic manure in a long-term field experiment in Central Spain. *Applied Soil Ecology*, **33**: 278-285.
- Lapš J, Šmilauer P. 2003. *Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Mijangos I, Pérez R, Albizu I, et al. 2006. Effects of fertilization and tillage on soil biological parameters. *Enzyme and Microbial Technology*, **40**: 100-106.
- Ponge JF, Gillet S, Dubs F. 2003. Collembolan communities as bioindicators of land use intensification. *Soil Biology & Biochemistry*, **35**: 813-826.
- Reeleder RD, Miller JJ, Ball Coelho BR, et al. 2006. Impacts of tillage, cover crop, and nitrogen on populations of earthworms, microarthropods, and soil fungi in a cultivated fragile soil. *Applied Soil Ecology*, **33**: 243-257.
- Stamatiadis S, Werner M, Buchanan M. 1999. Field assessment of soil quality as affected by compost and fertilizer application in a broccoli field (San Benito County, California). *Applied Soil Ecology*, **12**: 217-225.
- Taylor LR. 1978. A variety of diversities// Mound LA, Warloff N, eds. *Diversity of Insect Faunas*. 9th Symposium of the Royal Entomological Society. Oxford: Blackwell: 1-18.
- Ter Braak CJF, Šmilauer P. 2002. *CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5)*. Ithaca, NY: Microcomputer Power.
- Wuest SB, Caesar-TonThat TC, Wright SF, et al. 2005. Organic matter addition, N, and residue burning effects on infiltration, biological, and physical properties of an intensively tilled silt-loam soil. *Soil Tillage and Research*, **84**: 154-167.

作者简介 朱强根,男,1975年生,博士研究生。主要从事土壤与环境研究工作。E-mail: zhuqgen@sohu.com
责任编辑 刘丽娟
