

# 华北潮土区不同耕作方式下土壤动物丰富度与多样性<sup>①</sup>

朱强根<sup>1,2</sup>, 朱安宁<sup>1\*</sup>, 张佳宝<sup>1</sup>, 张焕朝<sup>2</sup>, 黄平<sup>1</sup>, 张丛志<sup>1</sup>

(1 封丘农业生态国家实验站, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室 (中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008;

2 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037)

**摘要:** 在黄淮海平原小麦-玉米一年两熟地区, 试验设置了5个处理, 分别为玉米小麦每年均翻耕 ( $C_TW_T$ )、玉米免耕+小麦每年翻耕 ( $C_{NT}W_T$ )、玉米免耕+小麦每2年翻耕 ( $C_{NT}W_{2T}$ )、玉米免耕+小麦每4年翻耕 ( $C_{NT}W_{4T}$ )、玉米小麦每年均免耕 ( $C_{NT}W_{NT}$ ), 所有处理的农作物地上秸秆全部移出。调查结果显示, 中小型土壤动物在数量上占总数的比例为83%~91%, 土壤动物主要分布在表层, 占有其总量的71.9%~73.2%。土壤动物存在显著的季节性动态, 其丰富度在玉米季高于小麦季。土壤动物 Shannon 多样性指数在整体上表现为翻耕高于免耕处理, 玉米季翻耕处理下有更高的均匀度指数, 但小麦季均匀度指数差异不显著。多元典范冗余分析表明, 耕作方式主要是对土壤动物的时间动态和垂直分布产生影响, 从而间接地影响了土壤动物的数量和组成。

**关键词:** 小麦-玉米轮作; 免耕; 土壤动物; 冗余分析

**中图分类号:** S185

免耕播种作为一项新型的农业技术, 已得到快速的发展, 不仅对土壤体积质量 (容重)、水稳性团聚体、土壤温度、土壤持水性能等物理性状具有改善作用<sup>[1]</sup>, 同时免耕也增强了土壤动物群落结构的丰富性与多样性<sup>[2-3]</sup>。根据土壤动物在食物分解过程中的作用, 通常将土壤动物分成微小、小型、中型和大型动物等几类。Wardle<sup>[4]</sup>从106个研究结果中总结得到, 大型土壤动物对耕作活动更为敏感, 而Miura<sup>[5]</sup>基于对多种土壤动物同时开展研究, 所获得的结论与这一结论存在差异。国外的许多研究认为, 土壤小节肢动物群体在以免耕和秸秆覆盖的保护性耕作下一般会得到增强<sup>[3,5,6-7]</sup>, 但个别研究发现, 农业耕作活动更有利于土壤小节肢动物数量上的增长, 理由是耕作活动使土壤大孔隙增加<sup>[4]</sup>。在国内, 目前开展较多的是施肥对土壤动物的影响<sup>[8-9]</sup>和不同土地利用方式下土壤动物群落结构与多样性的研究<sup>[10-11]</sup>, 而研究耕作方式对土壤动物影响的报道较少<sup>[12-13]</sup>。

本文以中国科学院封丘农业生态实验站为依托, 开展了不同耕作方式下农田试验, 调查了小麦-玉米轮作制度下耕作方式对土壤动物的影响, 旨在为优选农业耕作技术提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验地点位于黄淮海平原区中国科学院封丘农业生态国家实验站 (35°04'N, 113°10'E)。该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℃; 农田耕作采用小麦-玉米轮作制度, 土壤类型为轻质潮土。试验起始于2006年玉米季, 共设置5个处理, 分别为玉米免耕+小麦每年翻耕 ( $C_{NT}W_T$ ) (该处理为当前农民现行的耕作方式)、玉米免耕+小麦每2年翻耕 ( $C_{NT}W_{2T}$ )、玉米免耕+小麦每4年翻耕 ( $C_{NT}W_{4T}$ )、小麦玉米每年均免耕 ( $C_{NT}W_{NT}$ ), 同时设置对照小麦玉米每年均翻耕 ( $C_TW_T$ )。每个处理4个重复, 共20个小区, 采用完全随机排列。每小区14 m × 6.5 m, 采用人工翻地和播种, 小麦播种行距20 cm, 玉米播种行距60 cm, 株距27 cm。小区之间用深1 m, 厚6 cm 水泥墙隔开, 所有处理在农作物收获期, 地上部分秸秆全部移出。由于在本研究时间内, 处理 $C_{NT}W_{4T}$ 和 $C_{NT}W_{NT}$ 相同, 所以在数据分析中两者均视为同一处理 $C_{NT}W_{NT}$ , 即 $C_{NT}W_{NT}$ 有8个重复。

①基金项目：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项目(2005CB121103)资助。

\* 通讯作者(anzhu@issas.ac.cn)

作者简介：朱强根(1975—)，男，江西人，博士研究生，主要从事土壤与环境研究工作。E-mail: zhuqgen@sohu.com

## 1.2 研究方法

分别在2008年5月小麦成熟期和9月玉米成熟期，采用35 mm直径的土钻，在每个小区按0~10 cm (ULayer)和10~20 cm (DLayer)两个层次多点采取土壤混合样，为增强处理间对比性，通常在作物行距中间位置取样，先用手拣法获取大型土壤动物，再采用改进的Tullgern干漏斗方法收集。土壤动物分类鉴定参照尹文英等<sup>[14]</sup>编著的《中国土壤动物检索图鉴》，鉴定到纲或目。体型大小依据其在食物分解过程中作用进行划分<sup>[15]</sup>。

## 1.3 数据分析

土壤动物群落分析采用 $\alpha$ 多样性指数测度方法。其中，丰富度指数包括Minhinick指数： $d_{Mi} = S/N^{1/2}$ ，Margalef指数： $d_{Ma} = (S-1)/\ln N$ ；多样性指数包括Simpson指数： $\lambda = \sum_i (p_i)^2$ ，Shannon-Weiner指数： $H' = -\sum_i p_i \ln p_i$ ，Hill指数： $(N_1 \text{ 和 } N_2) N_1 = e^{H'}$ ， $N_2 = 1/\lambda$ ；均匀度指数包括Pielou指数： $J = H'/\ln S$ 和Alatalo指数： $E_{21} = (N_2-1)/(N_1-1)$ 。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*占总数的比率。

采用多元统计分析，即冗余分析方法(redundancy analysis, RDA)，探讨不同耕作方式对土壤动物的影响，分析过程在CANOCO4.5软件<sup>[16]</sup>环境下

完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤动物丰富度与多样性

在小麦季和玉米季共收集到土壤动物12大类群，1202个个体，其中大型土壤动物所占比例分别为17%和9%，中小型土壤动物为83%和91%。弹尾目和蜱螨目是土壤动物优势类群，小麦季和玉米季2个类群数量之和占土壤动物总数比例均超过70% (表1)。在小麦季，弹尾目数量高于蜱螨目，而在玉米季蜱螨目数量所占比例明显提高，表现了两种优势类群在时间变化上的差异，在玉米季，优势类群数量表现更为显著。调查数据中，土壤动物类群在玉米季获得同翅目、蜘蛛目、综合纲和小蚓类，而在小麦季未见，由于玉米季土壤温度更高，有机质分解更迅速，土壤动物可利用资源相对更丰富，而且黄淮海平原玉米季是一年中的主要降雨季节，水分相对更充分，所以玉米季较小麦季有更高的土壤动物丰富度和多样性 (表1)。双尾目在小麦季和玉米季个体数量密度没有明显差异，但占有比例在玉米季均有显著下降，并从优势类群变为常见类群，大蚓类也有类似现象，从常见类群变为稀有类群，因此，在不同的时间上，土壤动物优势类群、常见类群和稀有类群的划分将可能发生变化。

表1 土壤动物群落组成变化(0~20 cm)

Table 1 Composition change of soil fauna during wheat and corn seasons

类群	大小	小麦季			玉米季		
		个体数 (只)	占总数比例 (%)	种群密度 (只/m <sup>2</sup> )	个体数 (只)	占总数比例 (%)	种群密度 (只/m <sup>2</sup> )
弹尾目 Collembola	小	101	43.721+++	2 624.431	422	43.461+++	10 965.453
蜱螨目 Acari	小	66	28.570+++	1 714.975	403	41.502+++	10 471.742
鞘翅目 Coleoptera	大	17	7.362++	441.742	45	4.635++	1 169.304
双翅目 Diptera	大	4	1.734++	103.940	13	1.338++	337.798
同翅目 Homoptera	大	-	-	-	1	0.102+	25.975
膜翅目 Hymenoptera	大	11	4.753++	285.826	19	1.953++	493.708
啮虫目 Psocoptera	大	2	0.872+	51.972	3	0.313+	77.952
双尾目 Diplura	小	24	10.388+++	623.633	30	3.091++	779.531
蜘蛛目 Araneae	大	-	-	-	6	0.620+	155.914
综合纲 Symphylans	小	-	-	-	2	0.212+	51.968
大蚓类 OIme§	大	6	2.601++	155.911	4	0.403+	103.940
小蚓类 OIMi	小	-	-	-	23	2.370++	597.643
大型		40	17.323	1 039.376	91	9.374	2 364.585
中小型		191	82.677	4 963.034	880	90.626	22 866.342

注：+++，++，+ 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%)。

运用丰富度指数  $d_{Mi}$ 、 $d_{Ma}$ ；多样性指数  $\lambda$ 、 $H'$ 、 $N_1$ 、 $N_2$  及均匀度指数  $J$ 、 $E_{21}$  对小麦-玉米轮作免耕条件下土壤动物多样性进行测度，结果见表 2。从总体水平来看，小麦季土壤动物丰富度  $d_{Mi}$  为 0.945 ~ 1.332， $d_{Ma}$  为 0.202 ~ 0.438；多样性指数  $\lambda$  和  $H'$  分别为 0.411 ~ 0.542 和 0.538 ~ 1.043；均匀度指数  $J$  和  $E_{21}$  分别为 0.490 ~ 0.939 和 0.487 ~ 0.949。玉米季土壤动物丰富度指数  $d_{Mi}$  和  $d_{Ma}$  分别为 0.824 ~ 1.293 和 0.834 ~ 1.538；多样性指数  $\lambda$  和  $H'$  分别为 0.347 ~ 0.519 和 0.834 ~ 1.300；均匀度指数  $J$  和  $E_{21}$  分别为 0.735 ~ 0.852 和 0.739 ~ 0.870。土壤动物丰富度指数  $d_{Mi}$  在小麦季和玉米季之间的差异不明显，而  $d_{Ma}$  却呈现出玉米季丰富度指数显著高于小麦季，而且  $d_{Ma}$  的结果和土壤动物类群数表现一致，表明 Margalef 指数对物种丰富性较为敏感，用于衡量土壤动物丰富度较为合适。多样性指数  $\lambda$  主要反映物种优势度，由表 2 可见，小麦季土壤动物优势度明显高于玉米季。 $H'$ 、 $N_1$ 、 $N_2$  之间具有高度的相关性 ( $p < 0.001$ )，以  $H'$  来看，玉米季土壤动物多样性显著高于小麦季。均匀度指数  $J$  和  $E_{21}$  之间也显著相关 ( $p < 0.001$ )，两者均表现为玉米季弱高于小麦季。玉米季较高的均匀度和相对更低的优势度，导致了 Shannon-Weiner 多样性指数

$H'$  显著高于小麦季。土壤动物多样性呈现出一定的垂直层次变化，从平均值来看， $d_{Ma}$  表现为下层高于表层，而  $H'$  和  $J$  则相反。 $d_{Ma}$  大小同时受到物种类群数和个体数量的限制，下层土壤动物个体数量较少，导致了其有更大的  $d_{Ma}$  值，由此可见，比较个体数量差异很大的群落之间的丰富度，Margalef 指数仍具有一定的局限性。

不同耕作方式下土壤动物多样性在不同时间表现不完全一致 (表 2)。从表层来看，在小麦季， $d_{Ma}$  表现为  $C_{NT}W_{2T} > C_{NT}W_{NT} > C_TW_T > C_{NT}W_T$ ， $H'$  和  $J$  分别表现为  $C_TW_T > C_{NT}W_T > C_{NT}W_{NT} > C_{NT}W_{2T}$  和  $C_{NT}W_{NT} > C_TW_T > C_{NT}W_T > C_{NT}W_{2T}$ ；在玉米季， $d_{Ma}$  表现为  $C_{NT}W_T > C_{NT}W_{2T} > C_{NT}W_{NT} > C_TW_T$ ， $H'$  和  $J$  分别表现为  $C_{NT}W_T > C_{NT}W_{2T} > C_TW_T > C_{NT}W_{NT}$  和  $C_TW_T > C_{NT}W_{2T} > C_{NT}W_{NT} > C_{NT}W_T$ 。对于土壤动物丰富度，小麦季和玉米季表现一致，免耕有助于提高土壤动物丰富度，小麦、玉米每年均翻耕的处理表现为最低。土壤动物多样性指数整体表现出免耕处理低于翻耕处理，但  $C_{NT}W_{NT}$  和  $C_TW_T$  处理间没有显著水平上的差异 ( $p > 0.05$ )。土壤动物均匀度在小麦季和玉米季表现不一致，玉米季翻耕处理下有更高的均匀度指数，小麦季两者差异不明显。

表 2 各处理土壤动物群落丰富度指数、多样性指数和均匀度指数

Table 2 Indices of richness, diversity and evenness of soil fauna communities under different treatments

时间	土层 (cm)	处理	丰富度指数		多样性指数				均匀度指数	
			$d_{mi}$	$d_{ma}$	$\lambda$	$H'$	$N_1$	$N_2$	$J$	$E_{21}$
小麦季	0 ~ 10	$C_TW_T$	1.118 ± 0.212	0.257 ± 0.023	0.411 ± 0.033	1.043 ± 0.132	2.878 ± 0.637	2.556 ± 0.475	0.843 ± 0.103	0.809 ± 0.112
			bc	a	ab	bc	bc	bc	bc	bc
		$C_{NT}W_T$	1.016 ± 0.137	0.202 ± 0.043	0.483 ± 0.052	0.962 ± 0.165	2.776 ± 0.521	2.329 ± 0.506	0.745 ± 0.097	0.712 ± 0.069
			ab	a	bc	bc	bc	ab	ab	ab
		$C_{NT}W_{2T}$	1.317 ± 0.246	0.332 ± 0.051	0.542 ± 0.067	0.756 ± 0.095	2.364 ± 0.604	2.261 ± 0.418	0.720 ± 0.092	0.707 ± 0.113
		c	ab	c	ab	ab	ab	ab	ab	
		$C_{NT}W_{NT}$	1.151 ± 0.372	0.287 ± 0.034	0.452 ± 0.044	0.936 ± 0.104	2.576 ± 0.518	2.300 ± 0.623	0.844 ± 0.095	0.813 ± 0.256
			bc	a	bc	bc	ab	ab	bc	bc
10 ~ 20	$C_TW_T$	0.945 ± 0.214	0.267 ± 0.042	0.423 ± 0.041	0.538 ± 0.049	1.968 ± 0.478	1.694 ± 0.445	0.490 ± 0.011	0.487 ± 0.047	
		ab	a	b	a	a	a	a	a	
	$C_{NT}W_T$	1.227 ± 0.358	0.367 ± 0.045	0.464 ± 0.028	0.826 ± 0.089	2.371 ± 0.553	2.283 ± 0.537	0.960 ± 0.130	0.949 ± 0.083	
		bc	ab	bc	b	ab	ab	c	d	
	$C_{NT}W_{2T}$	1.332 ± 0.379	0.438 ± 0.057	0.500 ± 0.038	0.747 ± 0.077	2.146 ± 0.496	2.067 ± 0.395	0.939 ± 0.124	0.927 ± 0.316	
	c	b	bc	ab	ab	ab	c	cd		
	$C_{NT}W_{NT}$	1.166 ± 0.402	0.304 ± 0.035	0.512 ± 0.024	0.593 ± 0.052	2.050 ± 0.512	1.855 ± 0.468	0.593 ± 0.072	0.579 ± 0.064	

时间	土层 (cm)	处理	丰富度指数		多样性指数			均匀度指数		
			$d_{mi}$	$d_{ma}$	$\lambda$	$H'$	$N_1$	$N_2$	$J$	$E_{21}$
			bc	ab	bc	ab	a	a	a	ab

续表 2

玉米季	0~10	C <sub>T</sub> W <sub>T</sub>	0.824 ± 0.239	1.078 ± 0.177	0.381 ± 0.017	1.135 ± 0.133	3.219 ± 0.714	2.727 ± 0.647	0.802 ± 0.132	0.810 ± 0.091	
			a	cd	ab	bc	cd	bc	bc	bc	
		C <sub>NT</sub> W <sub>T</sub>	1.172 ± 0.403	1.538 ± 0.208	0.347 ± 0.021	1.300 ± 0.326	3.806 ± 0.783	3.043 ± 0.868	0.735 ± 0.095	0.739 ± 0.083	
			bc	e	a	c	d	c	ab	ab	
		C <sub>NT</sub> W <sub>2T</sub>	1.077 ± 0.311	1.311 ± 0.269	0.363 ± 0.026	1.211 ± 0.358	3.369 ± 0.802	2.789 ± 0.753	0.752 ± 0.156	0.752 ± 0.106	
		ab	de	a	c	cd	bc	ab	ab		
		C <sub>NT</sub> W <sub>NT</sub>	0.831 ± 0.267	1.095 ± 0.223	0.404 ± 0.031	1.096 ± 0.279	3.059 ± 0.771	2.547 ± 0.724	0.745 ± 0.076	0.766 ± 0.077	
		a	cd	ab	bc	bc	bc	ab	bc		
		10~20	C <sub>T</sub> W <sub>T</sub>	1.056 ± 0.272	1.020 ± 0.197	0.426 ± 0.043	0.981 ± 0.115	2.770 ± 0.545	2.559 ± 0.561	0.852 ± 0.103	0.861 ± 0.092
		ab	cd	b	bc	bc	bc	bc	bc	cd	
		C <sub>NT</sub> W <sub>T</sub>	1.293 ± 0.443	1.328 ± 0.328	0.377 ± 0.045	1.157 ± 0.218	3.253 ± 0.683	2.824 ± 0.692	0.837 ± 0.248	0.790 ± 0.115	
		bc	de	a	bc	cd	bc	bc	bc	bc	
		C <sub>NT</sub> W <sub>2T</sub>	1.095 ± 0.388	1.192 ± 0.286	0.391 ± 0.031	1.095 ± 0.174	3.218 ± 0.597	2.931 ± 0.579	0.847 ± 0.172	0.870 ± 0.099	
		ab	d	ab	bc	cd	c	bc	cd		
		C <sub>NT</sub> W <sub>NT</sub>	0.880 ± 0.265	0.834 ± 0.111	0.519 ± 0.047	0.834 ± 0.088	2.467 ± 0.669	2.217 ± 0.547	0.755 ± 0.134	0.777 ± 0.075	
		ab	c	c	b	ab	ab	ab	ab	bc	

注：同列不同字母表示处理间差异显著 (p<0.05)。

### 2.2 土壤动物垂直分布

从土壤动物的垂直分布来看，土壤动物主要分布在表层 (0~10 cm) (图 1)，在小麦季和玉米季，表层土壤动物分别占总数的 73.2% 和 71.9%。在小麦季，C<sub>T</sub>W<sub>T</sub>

和 C<sub>NT</sub>W<sub>NT</sub> 处理下表层显著高于下层 (p<0.05)，而 C<sub>NT</sub>W<sub>T</sub> 和 C<sub>NT</sub>W<sub>2T</sub> 处理下土壤动物丰富度上下层差异不显著；在玉米季，仅 C<sub>NT</sub>W<sub>2T</sub> 处理下土壤动物丰富度上下层差异不显著，其他处理均达到显著差异 (p<0.05)。

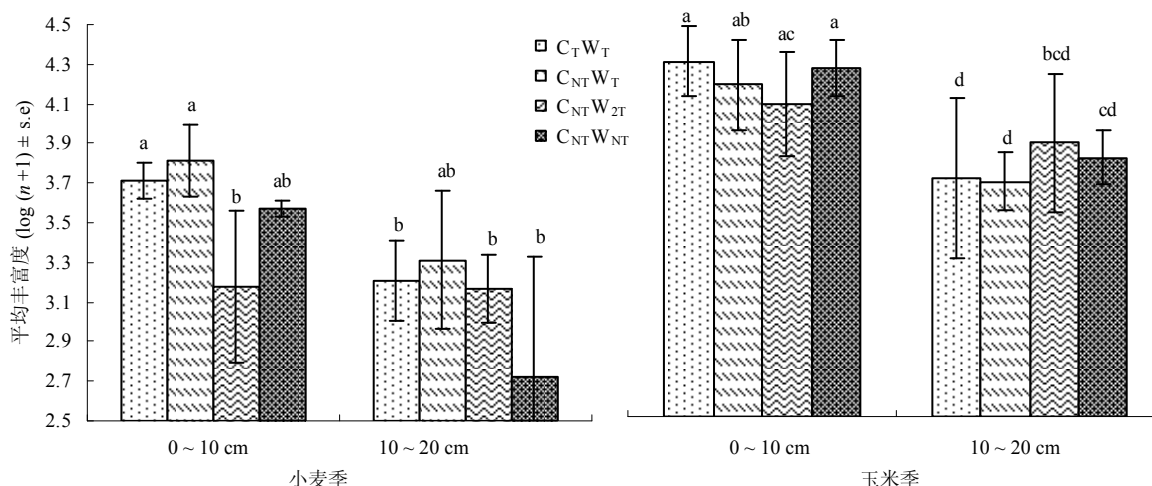


图 1 不同土壤层次下土壤动物丰富度 (1/m<sup>2</sup>) (不同字母表示在相同时间上处理间差异显著 (p<0.05))

Fig. 1 Abundance of soil fauna under different treatments at 0~10 cm and 10~20 cm

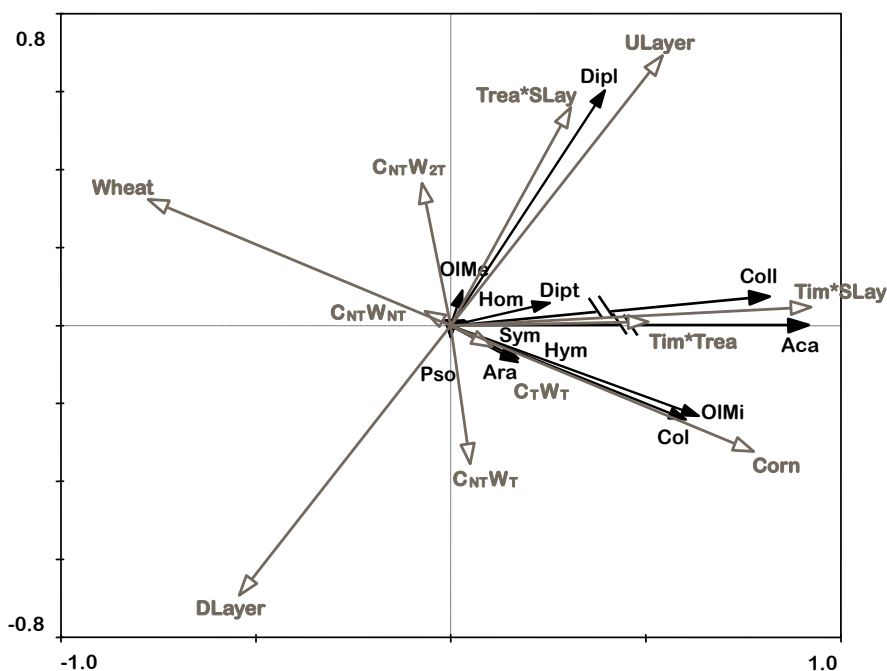
### 2.3 不同耕作方式对土壤动物的影响

CANOCO 软件在分析生物群落多样性及其影响因

素中，已经得到越来越多的广泛应用，通过软件建立的排序图能直观地反映出数据所包含的大量信息。本研究

中,选择线性模型,即冗余分析来建立土壤动物取样时间、土壤层次和耕作方式对土壤动物影响的排序图(图2),其中,第一排序轴解释了土壤动物变异的42.6%,第二排序轴为2.3%,所有典范轴累计贡献为47.2%。由图2可见,多数土壤动物类群与玉米季和土壤表层成显著正相关,表现为土壤动物丰度在玉米季显著高于小麦季,表层高于下层。耕作方式对土壤动物的影响总体表现为,  $C_{NT}W_T$  和  $C_TW_T$  有利于提高蜘蛛目、鞘翅目和小蚓类的增长,而  $C_{NT}W_{NT}$  和  $C_{NT}W_{2T}$  不利于蜱螨目和蜘蛛目的发展,但和双尾目、大蚓类呈正相关关系。

弹尾目、蜱螨目、鞘翅目、蜘蛛目、双翅目、膜翅目和小蚓类均显著受取样时间的影响,弹尾目、蜱螨目、双尾目和小蚓类存在显著的土壤垂直分布差异。耕作方式与时间和土壤层次之间均存在显著的交互效应( $p < 0.05$ ),不同处理条件下,弹尾目、蜱螨目和双翅目的土壤垂直分布特征不同,而弹尾目和小蚓类在不同时间上,各处理之间差异表现不一致。时间和土壤层次之间也存在显著的交互效应( $p < 0.05$ ),主要表现为蜱螨目和小蚓类在不同的取样时间,其垂直分布(表层土壤动物占总数的比例)将发生变化。



(Coll: 弹尾目 Collembola, Aca: 蜱螨目 Acari, Col: 鞘翅目 Coleoptera, Dipt: 双翅目 Diptera, Dipl: 双尾目 Diplura, Hom: 同翅目 Homoptera, Hym: 膜翅目 Hymenoptera, Ara: 蜘蛛目 Araneae, Pso: 啮虫目 Psocoptera, Sym: 综合纲 Symphyla, OIMi: 小蚓类 Microdrile oligochaetes, OIMe: 大蚓类 Megadrile oligochaetes; Trea: 处理, Tim: 时间, Slay: 土壤层次)

图 2 耕作方式、土壤层次和时间对土壤动物群落影响的冗余分析 (RDA)

Fig.2 Redundancy analysis (RDA) of soil fauna under different tillage types, soil layers and time

### 3 讨论

土壤动物是农田生物群落的重要类群,是用以农田土壤质量评价的重要生物学指标之一<sup>[17]</sup>,但其影响因素非常繁多,主要包括耕作方式、轮作制度的影响<sup>[18-19]</sup>,同时也受土壤类型、气候条件和取样时间等的限制<sup>[19-20]</sup>。黄淮海平原属于半干旱半湿润地区,一年中降雨主要集中在玉米季,气温也较小麦季高,所以在玉米季收集到的土壤动物数量和丰富度显著高于小麦季。但是总体上来看,玉米季和小麦季所

收集到的土壤动物数量不高,因为从取样时间上看,选择的是作物成熟期,土壤含水量相对更低,另外试验地作为不同耕作方式处理,长期秸秆全部移出,土壤有机质含量不高,平均约为0.8%,土壤养分含量可能成为土壤动物增长的一个限制因素。

土壤动物丰富度在免耕处理下高于翻耕处理,这一结果和其他学者<sup>[3]</sup>得到的少免耕能增加土壤节肢动物的丰富度是一致的。另外,与传统耕作不同,免耕条件下农药、杀虫剂等对节肢动物的损伤也有一定的

缓冲作用<sup>[21]</sup>, 这也使免耕增强了土壤动物的丰富度和多样性。 $H'$ 、 $N_1$ 、 $N_2$  之间具有高度的相关性 ( $p < 0.001$ ), 以 Shannon-Weiner 指数来反映土壤动物多样性来看, 由于免耕处理下土壤动物优势度整体高于翻耕处理, 而土壤动物均匀度在小麦季和玉米季表现不一致, 并且玉米季翻耕处理下有更高的均匀度指数, 小麦季两者差异不明显, 结果土壤动物 Shannon-Weiner 多样性指数整体表现出免耕处理低于翻耕处理, 原因也可能和耕作施肥活动能提高腐食性和真菌食性的群体有关<sup>[22]</sup>。但是  $C_{NT}W_{NT}$  和  $C_TW_T$  处理间 Shannon-Weiner 多样性指数没有统计学上的显著水平差异, 随着耕作处理时间的延长, 翻耕和免耕处理间土壤动物多样性差异是否有显著的变化, 目前尚不清楚。

免耕增加土壤表面植物残体, 而耕作使有机质与土壤混合, 改善了有机质的分布状况, 结果导致了土壤生物在免耕条件下形成层化现象<sup>[23]</sup>。长期免耕处理  $C_{NT}W_{NT}$  在小麦季和玉米季表层土壤动物丰富度均显著高于下层 (图 1)。 $C_TW_T$  处理下层土壤动物丰富度高于下层, 可能是耕作活动使土壤大孔隙增加, 改善了土壤通气条件, 有利于土壤动物的移动和取食, 为土壤动物提供了优越的微生境居住环境<sup>[4]</sup>。图 2 分析中是在纳入交互作用下的冗余分析, 如不考虑交互变量, 时间、土壤层次和耕作方式 3 因素共同解释了土壤动物变异的 42.9%, 时间和土壤层次占其中的主要部分, 耕作方式所占比例不足 1%。如仅用时间、土壤层次和耕作方式彼此之间的一级交互变量进行冗余分析, 结果得到它们能解释土壤动物变异的 37.2%, 表明时间、土壤层次和耕作方式对土壤动物的影响存在显著的交互作用。在以时间、土壤层次和耕作方式为协变量的条件下, 其一级交互变量仍能够解释土壤动物变异量的 4.2%, 并在 Monte Carlo 排列检验下达到极显著水平 ( $p = 0.008$ )。由此可见, 耕作方式不仅影响了土壤动物的时间动态, 而且影响了土壤动物丰富度的垂直分布状况。

#### 4 结论

(1) 在小麦季和玉米季, 大型土壤动物所占比例分别为 17% 和 9%, 中小型土壤动物为 83% 和 91%。弹尾目和蛴螬目是土壤动物优势类群, 2 个类群数量之和占有土壤动物总数比例超过 70%。土壤动物组成和数量存在显著的时间动态, 其丰富度和个体数量在玉米季显著高于小麦季。从土壤层次上看, 土壤动物主要分布在表层, 占总数比例为 71.9%~73.2%。

(2) 翻耕有利于提高蜘蛛目、鞘翅目和小蚓类的增长, 而免耕和双尾目、大蚓类呈正相关关系。耕作方式与取样时间和土壤层次之间均存在显著的交互效应 ( $p < 0.05$ ), 表明耕作方式主要是对土壤动物的时间动态和垂直分布产生影响, 从而间接地影响了土壤动物的数量和组成。

#### 参考文献:

- [1] Six J, Feller C, Denef K, Ogle SM, Sa JCM, Albrecht A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils-effects of no-tillage. *Agronomie*, 2002, 22: 755-775
- [2] Okada H, Harada H. Effects of tillage and fertilizer on nematode communities in a Japanese soybean field. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35: 582-598
- [3] Miyazawa K, Tsuji H, Yamagata M, Nakano H, Nakamoto T. The effect of cropping systems and fallow managements on microarthropod populations. *Plant Production Science*, 2002, 5: 257-265
- [4] Wardle DA. Impacts of disturbance on detritus food webs in agroecosystems of contrasting tillage and weed management practices. *Advances in Ecological Research*, 1995, 26: 105-185
- [5] Miura F, Nakamoto T, Kanedab S, Okano S, Nakajima M, Murakami T. Dynamics of soil biota at different depths under two contrasting tillage practices. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(2): 406-414
- [6] Barot S, Ugolini A, Brikci FB. Nutrient cycling efficiency explains the long-term effect of ecosystem engineers on primary production. *Functional Ecology*, 2007, 21: 1-10
- [7] Coleman DC, Fu S, Hendrix PF, Crossley Jr DA. Soil foodwebs in agroecosystems: Impacts of herbivory and tillage management. *European Journal of Soil Biology*, 2002, 38: 21-28
- [8] 林英华, 朱平, 张夫道, 彭畅, 高洪军, 刘淑环. 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*, 2006, 26(4): 1122-1130
- [9] 刘骅, 林英华, 王西和, 谭新霞, 张云舒. 长期配施秸秆对灰漠土质量的影响. *生态环境*, 2007, 16(5): 1492-1497
- [10] 艾尼瓦尔·吐米尔, 余曙光. 乌鲁木齐北郊不同土地利用方式下大中型土壤动物群落分布特征. *生态与农村环境学报*, 2008, 24(2): 36-40
- [11] 王金凤, 由文辉. 上海城市绿地生境中春季大型土壤动物群落结构研究. *生态与农村环境学报*, 2007, 23(1): 19-23
- [12] 朱艳, 陈立杰, 段玉玺. 不同耕作方式对大豆胞囊线虫群体数量的影响. *大豆科学*, 2007, 26(2): 208-212
- [13] 高明, 周保同, 魏朝富, 谢德体, 张磊. 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, 2004, 15(7): 1177-1181
- [14] 尹文英等. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998
- [15] Swift MJ, Heal OW, Anderson JM. Decomposition in terrestrial ecosystems. Berkeley: California University Press, 1979
- [16] Lapš J, Šmilauer P. Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO. United Kingdom: Cambridge University Press, 2003
- [17] 唐玉姝, 魏朝富, 颜廷梅, 杨林章, 慈恩. 土壤质量生物学指标研究进展, 土壤, 2007, 39(2):157-163
- [18] Brennan A, Fortuneb T, Bolgera T. Collembola abundances and assemblage structures in conventionally tilled and conservation tillage arable systems. Pedobiologia, 2006, 50:135-145
- [19] Govaerts B, Mezzalama M, Sayre KD, Crossa J, Nicol JM, Deckers J. Long-term consequences of tillage, residue management, and crop rotation on maize/wheat root rot and nematode populations in subtropical highlands. Applied Soil Ecology, 2006, 32: 305-315
- [20] Kováč L, Miklisová D. Collembolan communities (Hexapoda, Collembola) in arable soils of East Slovakia. Pedobiologia, 1997, 41: 62-68
- [21] Badjia CA, Guedesa RNC, Silva AA, Araújo RA. Impact of deltamethrin on arthropods in maize under conventional and no-tillage cultivation. Crop Protection, 2004, 23:1031-1039
- [22] Larink O. Springtails and mites: Important knots in the food web of soils // Benckiser G. Fauna in Soil Ecosystems: Recycling Processes, Nutrient Fluxes, and Agricultural Production. Marcel Dekker, New York, USA, 1997: 225-264
- [23] Fu S, Cabrera ML, Coleman DC, Kisselle KW, Garrett CJ, Hendrix PF, Crossley DA. Soil carbon dynamics of conventional tillage and no-till agroecosystems at Georgia Piedmont—HSB-C models. Ecological Modelling, 2000, 131: 229-248

## Abundance and Diversity of Soil Fauna Under Different Tillage Systems in Fluvo-Aquic Soil in North China

ZHU Qiang-gen<sup>1,2</sup>, ZHU An-ning<sup>1</sup>, ZHANG Jia-bao<sup>1</sup>, ZHANG Huan-chao<sup>2</sup>, HUANG Ping<sup>1</sup>, ZHANG Cong-zhi<sup>1</sup>

(1 State Experimental Station for Agro-Ecology, Chinese Academy of Sciences; State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;

2 College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** An experiment was conducted to study the effects of tillage practices on soil fauna in areas of two crops a year of wheat-corn rotation in Huang-Huai-Hai Plain. Five treatments included: corn tillage annually + wheat tillage annually ( $C_T W_T$ ), corn no-tillage annually + wheat tillage annually ( $C_{NT} W_T$ ), corn no-tillage annually + wheat tillage every other year ( $C_{NT} W_{2T}$ ), corn no-tillage annually + wheat tillage every four years ( $C_{NT} W_{4T}$ ), corn no-tillage annually + wheat no-tillage annually ( $C_{NT} W_{NT}$ ). The results showed that: mesofauna and microfauna together accounted of 83% - 91% of total soil fauna, and macrofauna accounted for 9% - 17%. More soil fauna distributed at 0 - 10 cm soil layer which accounted of 71.9% - 73.2% of total soil fauna. Significant seasonal dynamics was observed for soil fauna, the richness of soil fauna was higher in corn season than in wheat season. The evenness of soil fauna was higher in tillage plots than in no-tillage plots in corn season but Shannon diversity index was contrary. By redundancy analysis, it suggests that tillage practices primarily influence seasonal dynamics and vertical distribution pattern of soil fauna, thus cause the changes in richness and diversity of soil fauna.

**Key words:** Wheat-corn rotation, No-tillage, Soil fauna, Redundancy analysis