

DOI: 10.5846/stxb201907141485

李媛媛, 廖家辉, 许子乾, 徐涵涓, 倪娟平, 黄石德, 阮宏华. 有机肥和植被去除管理对人工林土壤节肢动物多样性的影响. 生态学报, 2021, 41(7): 2761-2769.

Li Y Y, Liao J H, Xu Z Q, Xu H M, Ni J P, Huang S D, Ruan H H. Effects of organic fertilizer application and understory plant removal on the diversity of soil arthropods in poplar plantations. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(7): 2761-2769.

## 有机肥和植被去除管理对人工林土壤节肢动物多样性的影响

李媛媛<sup>1,2</sup>, 廖家辉<sup>2</sup>, 许子乾<sup>2</sup>, 徐涵涓<sup>2</sup>, 倪娟平<sup>2</sup>, 黄石德<sup>2,3</sup>, 阮宏华<sup>2,\*</sup>

1 南京晓庄学院食品科学学院, 南京 211171

2 南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037

3 福建省林业科学研究院, 福州 350012

**摘要:**施用有机肥和林下抚育(植被去除)是人工林重要的管理措施;土壤节肢动物物种丰富,是土壤生态系统的重要组成成分,对环境变化敏感,可以作为森林管理的指示生物。人工林植被去除和施肥管理影响土壤性质、资源输入量及微生物多样性,从而影响土壤节肢动物多样性,但是相关研究还十分缺乏。以沿海地区杨树人工林为对象,研究了施用有机肥和林下植被去除对土壤节肢动物的数量和多样性的影响。结果表明,有机肥和植被去除管理对不同土壤层土壤节肢动物的数量和多样性指标影响不一致。有机肥增加 0—10 cm 深度土壤节肢动物总数量、蜱螨目数量,降低土壤节肢动物群落物种丰富度、均匀度和 Shannon 多样性指数;植被去除减少 0—10 cm 深度土壤节肢动物总数量和弹尾目数量,降低均匀度指数。两种处理对 10—20 cm 深度土壤节肢动物群落的数量和各多样性指标影响不显著。总体来说(0—20 cm),有机肥处理土壤节肢动物的数量显著增加,优势类群前气门亚目(Prostigmata)的数量增长为对照的 4 倍,但是土壤节肢动物群落的均匀度和 Shannon 多样性指数显著降低,这可能是土壤节肢动物优势类群前气门亚目密度急剧增加,而物种丰富度没有变化所导致;此外,施用有机肥增加了土壤有机质、总氮、有效磷的含量,降低土壤 pH 值,并且与前气门亚目密度显著相关。林下植被去除没有影响 0—20 cm 深度土壤节肢动物的数量和各多样性指标。

**关键词:**土壤节肢动物;多样性;有机肥;林下植被去除;人工林

## Effects of organic fertilizer application and understory plant removal on the diversity of soil arthropods in poplar plantations

LI Yuanyuan<sup>1,2</sup>, LIAO Jiahui<sup>2</sup>, XU Ziqian<sup>2</sup>, XU Hanmei<sup>2</sup>, NI Juanping<sup>2</sup>, HUANG Shide<sup>2,3</sup>, RUAN Honghua<sup>2,\*</sup>

1 School of Food Science, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China

2 College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

3 Fujian Academy of Forestry Sciences, Fuzhou 350012, China

**Abstract:** Plantations provide important wood resources and also play an important role in mitigating climate change. Establishing poplar plantations is a common practice for improving the quality of reclaimed coastal saline soils in Eastern China. Organic fertilizer application and understory plant removal are two common management practices to promote plantation growth. Soil arthropod is a critical component in the ecosystem processes of organic matter decomposition and nutrient cycling. The abundance and diversity of arthropods can reflect changes in soil quality and ecosystem functionality. Studies have demonstrated that the abundance and diversity of soil arthropods might be impacted by changes in the quality

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFD0600204);江苏省高等学校自然科学研究面上项目(19KJD180003)

收稿日期:2019-07-14; 修订日期:2020-09-14

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hhruan@njfu.edu.cn

and quantity of forest understory plant materials, as well as soil chemical and physical properties. However, the extent to which intensive forest management practices to alter soil arthropod communities remains elusive. In this study, we examined the effects of applying organic fertilizers (OF) and removing understory plants (UP), on the abundance and diversity (i.e. richness, evenness, and Shannon's index) of soil arthropods of poplar plantations in a reclaimed coastal area of northern Jiangsu Province, China. We found that Acari and Collembola were the two of the most abundant soil arthropod groups. The OF application significantly increased the total abundance of soil arthropod and the abundance of Acari, significantly decreased diversity index while UP removal decreased the total abundance of soil arthropod, the abundance of Collembola, evenness in 0—10 cm soil. Both of the two practices had no impact on the total abundance and diversity index at 10—20 cm soil. As a whole 0—20 cm depth of the soil, the application of the OF significantly increased the total abundance of soil arthropods, while it decreased the evenness and Shannon's index. The abundance of Prostigmata mites increased almost four folds with the application of the OF treatment in contrast to the control. The increased abundance of dominant groups led to the decrease in the arthropod evenness and Shannon's index based on the Order level. In addition, it was also presumably a consequence of reduced soil pH and improved soil properties (e.g., OM, TN, AP) with the application of the OF in this reclaimed coastal saline soil. The removal of understory plants did not significantly influence the abundance, richness, evenness and Shannon's index of soil arthropods in 0—20 cm depth of soil. Our results suggested that the organic fertilizers application is a preferable management practice to understory plant removal in order to elevate the abundance of soil arthropods while promoting poplar plantation productivity.

**Key Words:** soil arthropod; diversity; organic fertilizer addition; understory plant removal; poplar plantation

人工林生态系统,在木材生产,应对气候变化及生态环境保护中具有重要的功能和作用;全球人工林面积不断增加,我国人工林面积也在持续增长,截止 2019 年约占世界人工林面积的 27%<sup>[1]</sup>。维持土壤肥力对提高人工林生产力,进而减缓全球气候变化的影响至关重要。研究表明,施用有机肥和林下植被去除管理能够有效的维持土壤肥力和提高人工林生产力,但是如何影响土壤生物多样性尤其是土壤节肢动物多样性的研究比较缺乏。

土壤动物是森林生态系统的重要组成成分,其破碎和取食活动促进凋落物和有机物质的分解,提高土壤养分,尤其是土壤养分匮乏的情况下土壤动物促进凋落物对土壤养分的归还更为显著<sup>[2]</sup>。土壤动物的多样性受到食物资源的数量和质量<sup>[3-4]</sup>、土壤物理化学性质等因素的影响<sup>[5-8]</sup>。施用有机肥直接或间接的为土壤动物提供食物资源<sup>[9]</sup>,增加农田生态系统土壤动物的数量和多样性<sup>[10-11]</sup>。森林生态系统不同环境条件林下植被去除对土壤理化性质、微生物群落结构的影响尚无定论<sup>[12-13]</sup>。亚热带森林生态系统林下植被和树木去除降低了土壤线虫总密度<sup>[14]</sup>,对土壤节肢动物多样性的研究还不足。因此,有机肥和林下植被去除管理如何影响人工林土壤节肢动物多样性是需要探讨的科学问题。本文以江苏沿海地区 10 年生杨树人工林为研究对象,探讨人工林抚育措施(施用有机肥和林下植被去除)对土壤节肢动物多样性的影响,以期为制定合理的人工林经营措施,保护人工林土壤生物多样性和土壤肥力维持提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域位于江苏北部沿海地区盐城市东台黄海森林国家公园(32°33'—57'N, 102°07'—53'E),属于北亚热带海洋性季候风气候。年平均温度为 15.4℃,年降雨量 1494.0 mm,相对湿度为 76.0%。无霜期 220 d,年均日照时间为 2169.6 h。10 年生的杨树人工林纯林为研究样地,林下植被主要有禾本科(淡竹叶 *Lophatherum gracile*、求米草 *Oplismenils undulatifolius folius*、芒 *Miscanthus sinensis*);藤本(乌菟莓 *Cayratia trifolia*、薯蓣 *Dioscorea oppositifolia*);草本(一年蓬 *Erigeron annuus*、光果田麻 *Corchoropsis psilocarpa*)。林分郁闭度 55%,平

均树高 21.3 m, 平均胸径 23.1 cm。林下土壤为沙质土壤, pH 值为 8.2。

## 1.2 试验设计

试验采用随机区组设计, 设置 3 个处理, 包括: (1) 对照 (CK)、(2) 施用有机肥 (OF), 大豆榨油后的剩余物 ( $3750 \text{ kg/hm}^2$ ; 有机质: 75%; 氮 = 7%; 磷 = 1.12%; 钾 = 2.13%)、(3) 林下植被去除处理 (UP), 用刀割除所有林下植被。每个处理分别设置 3 个重复, 每个重复样地大小为  $20 \text{ m} \times 70 \text{ m}$  (重复样地间距离至少 500 m), 每个样地划分大小为  $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$  的样方 (每个样方间隔 10 m)。根据当地的管理措施分别于 2013 年 9 月和 12 月, 2014 年 3 月和 6 月进行施肥和林下植被去除。

## 1.3 样品采集及分析

2013 年 12 月至 2014 年 9 月进行样品采集, 每隔 3 个月采样一次, 一共采集 4 次。用直径为 4 cm 的土钻采集土壤层 0—10 cm 和 10—20 cm 的土壤动物样品, 手检采挖  $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$  样方至 20 cm 土壤动物<sup>[7]</sup>。所有土壤动物样品装入透气的收集袋保存, 迅速带回实验室。

采用 Tullgren 漏斗 (Tullgren Funnel Unit, BURKARD, UK) 分离收集土壤动物。收集的土壤动物存放在 75% 的酒精, 用生物显微镜 (Eclipse E200, Nikon, Japan) 进行镜检计数和分类。土壤动物主要分为甲螨亚目 (Oribatida)、前气门亚目 (Prostigmata)、弹尾目 (Collembola)、鞘翅目 (Coleoptera)、双翅目 (Diptera)、蜘蛛目 (Araneae)、千足虫目 (Polydesmida) 和膜翅目 (Hymenoptera) 等<sup>[15]</sup>。土壤动物多样性用土壤动物数量 (只/土钻)、丰富度 (物种种数)、均匀度<sup>[16]</sup> 和 Shannon 多样性指数<sup>[17]</sup> 表示。

2013 年 12 月至 2014 年 9 月野外采集 0—10 cm 和 10—20 cm 土样用于土样理化性质的测定, 每隔 3 个月采样一次, 一共采集 4 次。土壤含水率用鲜土烘干法测定, pH 值采用电位法测定。土壤总氮用元素分析仪进行测定 (Elementar, Vario ELIII, Elementar Analysen Systeme GmbH, Hanau, Germany)。土壤有效磷用  $\text{NaHCO}_3$  浸提——钼锑抗比色法测定。土壤有效钾用火焰原子吸收分光光度计法测定。土壤有机质用重铬酸钾容量法 (外加热法) 的原理测定<sup>[18]</sup>。

## 1.4 数据处理

双因素方差分析用于分析不同处理和不同土层土壤动物数量、丰富度、均匀度和 Shannon 多样性指数之间的差异。单因素方法分析不同处理间的差异。非度量多维尺度分析用于比较不同处理下土壤动物群落结构组成的变化。皮尔森相关系数用于分析一年 4 次采集的土壤动物群落结构与土壤理化性质的关系。为了简化分析, 主要分析气门亚目、甲螨亚目、膜翅目、弹尾目、双翅目和虱目 6 类主要类群进行分析<sup>[19]</sup>。对原始数据作  $\lg(x+1)$  转换以使数据符合或近似符合正态分布, 所有的统计分析用 R 软件进行 (3.3.3 版本)<sup>[20]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤环境因素变化

人工林经营管理措施影响了土壤的性质, 见表 1。施用有机肥增加了土壤有机质含量、总氮和有效磷的含量, 降低了土壤 pH 值。林下植被去除显著降低了土壤含水率, 对其他土壤性质指标没有显著影响。

### 2.2 土壤节肢动物群落组成与数量特征

土壤动物的数量在不同处理和不同土层间差异显著, 同时还受两者交互作用的影响 (表 2, 图 1)。施用有机肥显著增加了 0—10 cm 土层土壤节肢动物的数量 ( $P < 0.001$ ), 但对 10—20 cm 土层的土壤节肢动物的数量没有显著影响。林下植被去除显著减少了 0—10 cm 土层土壤节肢动物的数量 ( $P = 0.01$ ), 但是并没有影响 10—20 cm 土层土壤节肢动物数量。整合 0—20 cm 土壤层, 土壤动物的总数量在不同处理间差异显著。与对照相比, 施用有机肥显著增加土壤动物的总数量 ( $P < 0.001$ ), 林下植被去除并没有显著影响土壤动物的总数量 ( $P = 0.32$ )。

对照样地: 0—10 cm 土层 (图 2), 前气门亚目和甲螨亚目是优势类群, 其数量占总数量的 74%, 膜翅目、弹尾目、双翅目和蚤目共占总数的 22%, 稀有种群按照从高到低的顺序是蜈蚣目、鞘翅目、千足虫目、同翅目、

缨翅目和蜘蛛目。10—20 cm 土层对照样地,土壤节肢动物类群排序与 0—10 cm 土层排序基本一致,除了膜翅目消失以及前气门亚目和甲螨亚目的总数量减少至总数的 65%。总体看 0—20 cm 土层,土壤节肢动物主要类群的排序与 0—10 cm 土层相比,仅膜翅目和双翅目的排序位置互换,其余没有变化。

表 1 不同土层土壤理化性质指标

Table 1 Soil chemical parameters of 0—20 cm soil depth as influenced by the different treatments at the study site

处理 Treatments	有机质 OM Soil organic matter/ (g/kg)	总氮 TN Total nitrogen/ (g/kg)	碳氮比 C:N	有效磷 AP Available phosphorus/ (mg/kg)	有效钾 AK Available potassium/ (mg/kg)	pH	含水率/% Moisture
0—10 cm 土壤 Soil							
对照 CK	24.78±1.48b	1.06±0.1b	13.59±0.52a	2.80±0.28b	146.74±32.18	8.10±0.12a	24.88±0.36a
有机肥 OF	29.17±0.78a	1.46±0.09a	11.20±0.74b	4.03±0.35a	185.44±8.06	7.43±0.07b	25.6±0.44a
植被去除 UP	21.30±0.9b	1.07±0.09b	11.47±0.69ab	2.63±0.29b	178.38±18.88	8.16±0.29a	20.44±0.36b
10—20 cm 土壤 Soil							
对照 CK	22.93±0.44b	0.98±0.09b	13.73±1.14	2.17±0.22b	143.92±28.72	8.22±0.05a	24.60±0.27a
有机肥 OF	26.96±0.34a	1.21±0.06a	12.11±0.68	3.20±0.26a	187.29±9.39	7.76±0.12b	25.03±0.27a
植被去除 UP	19.97±1.84b	0.93±0.03b	12.22±0.58	2.03±0.35b	173.81±16.18	8.15±0.16a	23.94±1.09b

CK:对照 Control;OF:有机肥 Organic fertilizer;UP:林下植被去除 Understory plant removal;不同小写字母表示处理间差异显著( $\alpha=0.05$ );表中值为均值±标准误差( $n=3$ )

表 2 土壤节肢动物总数、主要类群数量、多样性指标在不同经营管理措施和不同土层间的变化

Table 2 The effects ( $F$  value) of treatment ( $T$ ) and soil layer ( $L$ ) on the total abundance and the number of major groups of soil arthropods

变量 Variables	处理 T Treatment	土壤层 L Layer	处理× 土壤层 T×L	变量 Variables	处理 T Treatment	土壤层 L Layer	处理× 土壤层 T×L
总数 Total	73.71 ***	120.41 ***	58.36 ***	双翅目 Diptera	3.5	5.93 *	0.32
甲螨亚目 Oribatida	8.5 **	30.74 **	4.34 *	鞘翅目 Coleoptera	2.93	2.49	0.72
前气门亚目 Prostigmata	161.61 ***	186.76 ***	95.49 *	丰富度 richness	4.19 *	3.2	0.18
膜翅目 Hymenoptera	5.64 *	1.49	11.51 **	均匀度 evenness	20.88 ***	21.21 ***	1.72
弹尾目 Collembola	0.19	1.04	6.35 *	Shannon 多样性	24.26 ***	11.48 **	1.8
蚤目 Siphonaptera	0.42	0.01	2.93	Shannon's index			

显著性差异: \*  $P<0.05$ , \*\*  $P<0.01$ , \*\*\*  $P<0.001$

有机肥处理样地:0—10 cm 土层(图 2),施用有机肥显著增加了前气门亚目( $P=0.02$ )和甲螨亚目的数量( $P<0.001$ ),占总数的比例从对照样地的 74% 提高到 92%;膜翅目消失。10—20 cm 土层,气门亚目数量在施用有机肥处理下数量比对照增加了三倍( $P=0.03$ )。双翅目数量仅占对照的 1/5( $P=0.02$ )。0—20 cm 土层整体看,施用有机肥显著增加了甲螨亚目( $P=0.04$ )和前气门亚目( $P<0.001$ )的数量,他们数量之和占土壤节肢动物的总数比例从 72% 提高到 90%。

林下植被去除样地:0—10 cm 土层(图 2),弹尾目的数量与对照比减少了 1/4( $P=0.01$ ),其排序位置从第四位降为第五位。10—20 cm 土层,膜翅目数量的大量增加并且占据第一位。0—20 cm 土层整体看,前气门亚目数量减少至对照的一半( $P=0.02$ ),排序位置从第一位降为第二位。

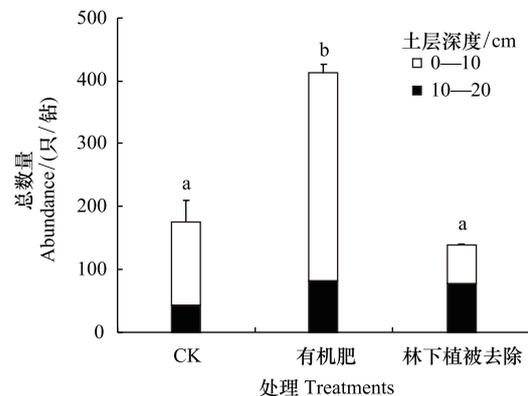


图 1 土壤节肢动物的数量在不同处理下的变化

Fig. 1 The effect of treatment on soil arthropod community abundance (number of individuals per soil core) with error bars CK:对照, control; OF:有机肥, organic fertilizer; UP:林下植被去除, understory plant removal;下同。不同小写字母表示处理间差异显著(Tukey's HSD test,  $P<0.05$ );图中值为均值±标准误差( $n=3$ )

### 2.3 土壤节肢动物多样性指标变化

土壤节肢动物群落的均匀度和 Shannon 多样性指数在不同处理和不同土层差异显著(表 2,图 3),但是丰富度在不同土层间没有差异。0—10 cm 土层,土壤节肢动物群落的丰富度、均匀度和 Shannon 多样性在有机肥处理下均降低( $P < 0.01$ ),10—20 cm 土层多样性指数降低( $P = 0.03$ )。均匀度指数在林下植被去除处理 0—10 cm 土层里显著降低( $P < 0.01$ )。0—20 cm 土层整体看,与对照比均匀度指数( $P < 0.01$ )和多样性指数( $P < 0.001$ )在有机肥处理下显著降低,丰富度没有显著变化。林下植被去除管理对土壤节肢动物群落结构的三个指标没有显著的影响。

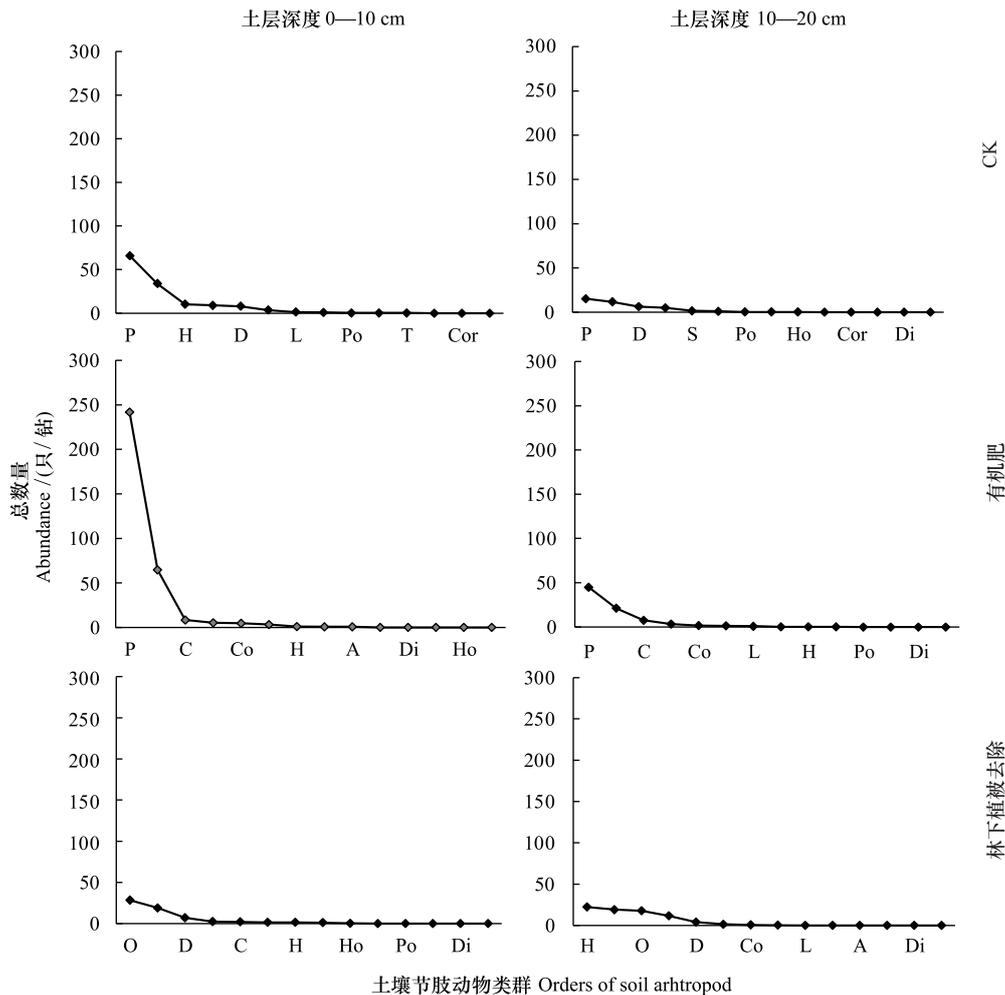


图 2 土壤节肢动物类群的排序变化

Fig.2 Order abundance rank

P: 前气门亚目 Prostigmata; O: 甲螨亚目 Oribatida; H: 蚂蚁 Hymenoptera; C: 弹尾目 Collembola; D: 双翅目 Diptera; S: 蚤目 Siphonaptera; L: 蜈蚣 Lithobiomorpha; Co: 鞘翅目 Coleoptera; Po: 马陆 Polydesmida; Ho: 同翅目 Homoptera; T: 缨翅目 Thysanoptera; A: 蜘蛛 Araneae; Cor: 啮虫目 Corrodentia; Di: 双尾目 Diplura

### 2.4 土壤节肢动物分布与土壤环境因素的关系

相关性分析表明,甲螨亚目和前气门亚目和土壤有机质、总氮和有效磷含量显著正相关,与 pH 值负相关(表 3)。非度量多维尺度分析显示土壤节肢动物群落结构组成在不同经营管理措施下的二维结构变化(stress:0.128),土壤节肢动物群落结构组成在有机肥处理下与其余两个措施分离(图 4)。这一差异主要是由于甲螨亚目、前气门亚目、膜翅目(蚂蚁)和蚤目的变化引起。非度量多维尺度分析的轴 1 与土壤有机质含量( $P = 0.04$ )和总氮( $P < 0.01$ )显著相关(表 4)。

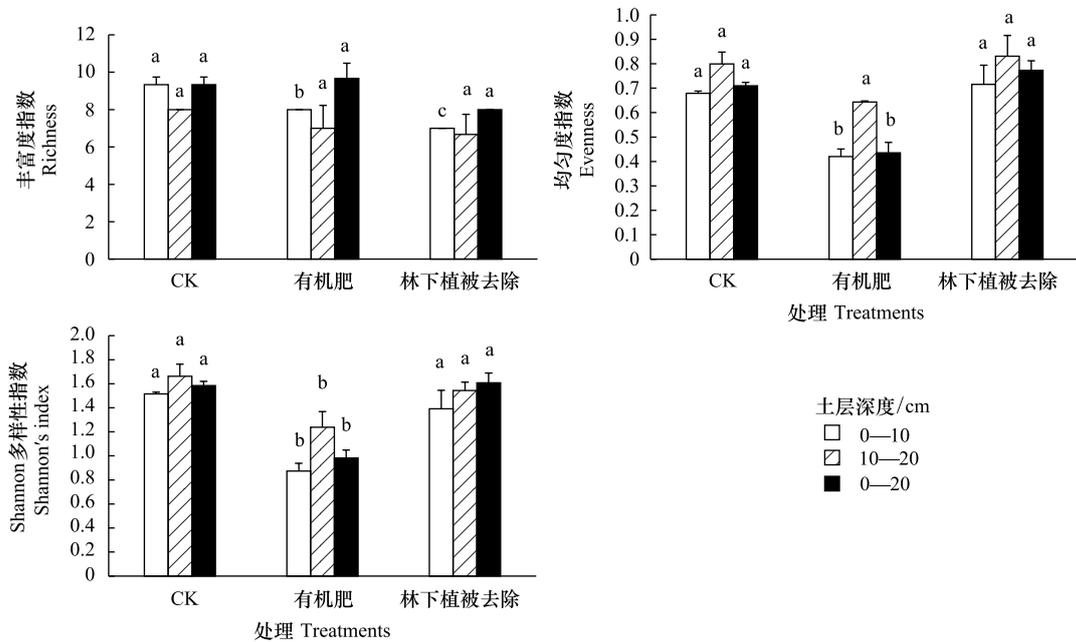


图 3 土壤节肢动物群落丰富度、均匀度和多样性指标在不同处理下的变化

Fig.3 The effects of treatment on Order richness, Order evenness, and Shannon's index with error bars

不同小写字母表示处理间差异显著 (Tukey's HSD test,  $P < 0.05$ ); 图中值为均值  $\pm$  标准误差 ( $n = 3$ )

表 3 土壤节肢动物的总数及优势种与土壤理化性质相关性分析

Table 3 Correlation between individual groups of soil arthropods and soil chemical characteristics under three treatments

变量 Variables	有机质 OM	总氮 TN	碳氮比 C:N	有效磷 AP	有效钾 AK	pH	含水率 Moisture
甲螨亚目 Oribatida	0.58 *	0.78 ***	-0.55	0.62 **	0.08	-0.47	0.17
前气门亚目 Prostigmata	0.74 ***	0.8 ***	-0.36	0.75 ***	0.19	-0.71 ***	0.45
膜翅目 Hymenoptera	-0.33	-0.36	0.15	-0.27	-0.11	0.17	0.15
弹尾目 Collembola	-0.02	0.12	-0.2	-0.2	0.01	-0.05	0.33
双翅目 Diptera	-0.11	-0.03	0.12	-0.14	-0.41	0.26	-0.28
蚤目 Siphonaptera	-0.15	-0.39	0.42	-0.01	0.21	-0.07	0.04

显著性差异: \*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ , \*\*\*  $P < 0.001$

### 3 讨论

本研究中,施用有机肥显著增加土壤动物的数量,与施用有机肥<sup>[11]</sup>和绿肥<sup>[21]</sup>均增加土壤动物数量的研究结论相一致。土壤动物的数量和多样性受可食用食物资源和栖息环境的影响<sup>[19, 22]</sup>。一方面,施用有机肥直接为碎屑食者的土壤动物提供食物<sup>[11]</sup>,微生物生物量的增加为微生物食者的土壤动物提供食物来源<sup>[11, 23]</sup>。另一方面,施用有机肥改善了土壤环境,有利于土壤动物的生存<sup>[24-25]</sup>。此外,土壤节肢动物群落结构组成在有机肥处理下显著不同于对照主要是由前气门亚目和甲螨亚目的变化引起。和草地<sup>[26]</sup>,林地<sup>[27-28]</sup>和农田<sup>[10]</sup>生态系统一样,甲螨亚目和前气门亚目也是优势类群,在有机肥处理下占绝对优势,其数量占土壤节肢动物的总数从对照的 72%增加至 90%。前气门亚目主要为捕食者<sup>[29]</sup>,甲螨亚目主要以真菌和腐殖质为食<sup>[30]</sup>,并且对土壤养分和 pH 值的变化较敏感<sup>[21]</sup>。施用有机肥改善了土壤环境质量增加了土壤有机质、总氮及有效磷含量,降低了土壤 pH,并且与前气门亚目和甲螨亚目数量显著相关。因此,土壤环境变化可能是森林生态系统施用有机肥增加弹尾目数量的重要原因<sup>[31]</sup>。

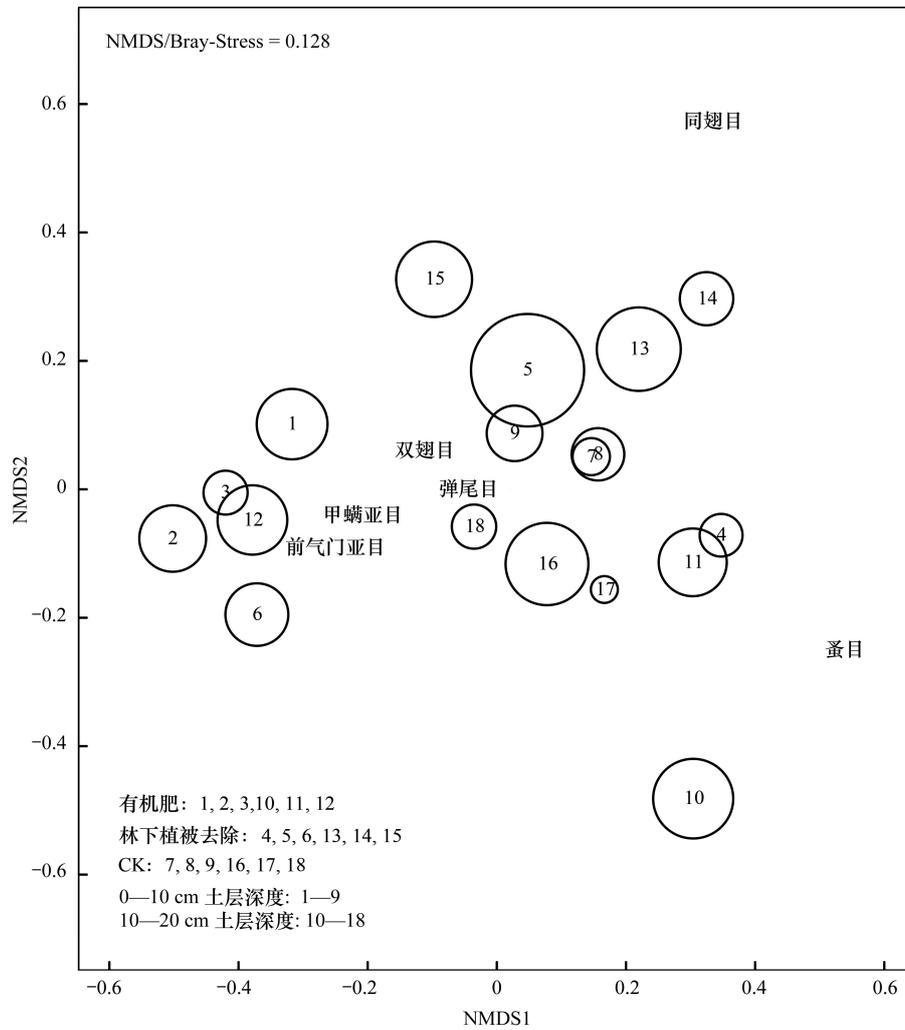


图 4 非度量多维尺度分析土壤节肢动物群落结构组成在不同管理措施和不同土层间的变化

Fig.4 Nonmetric multidimensional scaling (NMDS) analysis showing a two-dimensional representation of soil arthropod composition associated with treatment and soil layer

非度量多维尺度 Optimal NMDS solution was attained at a stress of 0.128; 气泡表示每个样方的拟合度, 气泡越大表示拟合度越差

表 4 非度量多维尺度分析土壤节肢动物群落结构组成及和土壤理化性质相关性

Table 4 Correlation matrix of associations between NMDS axes scores, soil arthropod community composition, and soil physicochemical characteristics

组成 Composition	NMDS1	P	NMDS2	P
土壤节肢动物 Soil arthropod				
甲螨亚目 Oribatida	-0.99	<0.001 ***	0.13	0.64
前气门亚目 Prostigmata	-0.99	<0.01 **	-0.09	0.83
膜翅目 Hymenoptera	0.35	0.03 *	0.93	<0.01 **
弹尾目 Collembola	-0.24	0.63	0.97	0.18
双翅目 Diptera	-0.29	0.41	0.96	0.09
蚤目 Siphonaptera	0.83	<0.001 ***	-0.55	<0.01 **
土壤性质 Soil properties				
有机质 OM	-0.67	0.04 *	-0.75	0.11
总氮 TN	-0.89	<0.01 **	-0.45	0.18
碳氮比 C:N	0.99	0.02 *	-0.11	0.84
有效磷 AP	-0.69	0.14	-0.72	0.28
有效钾 AK	0.35	0.82	-0.94	0.66
pH	0.67	0.53	0.74	0.64
含水率 Moisture	-0.18	0.94	-0.98	0.78

显著性差异: \*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ , \*\*\*  $P < 0.001$

本研究中,土壤节肢动物群落均匀度和 Shannon 多样性指数在有机肥处理下降低,这与施用有机肥提高土壤动物多样性的研究结论相反<sup>[10, 25]</sup>。一方面,可能是由于长期施肥导致土壤节肢动物的栖息环境和食物资源均质化,从而导致物种分布不均匀。另一方面,施用有机肥加剧了优势物种前气门亚目和甲螨亚目的数量的急剧增加,尤其是前气门亚目的数量是对照处理的 4 倍。土壤节肢动物物种丰富度不改变,优势类群数量的急剧增加导致了土壤节肢动物群落均匀度降低,从而引起土壤节肢动物多样性的降低。因此在本研究中,施用有机肥改善了盐碱地地区土壤环境质量有益于优势类群数量的增加是影响该地区土壤节肢动物均匀度和 Shannon 多样性指数降低的重要原因,但是这种数量增加而多样性降低的现象可能会影响土壤节肢动物群落结构进而影响土壤生态系统功能。

本研究中,林下植被去除管理没有显著影响 0—20 cm 深度土壤动物多样性,与亚热带森林生态系统林下植被去除不影响小型土壤节肢动物密度结果一致<sup>[14]</sup>。土壤节肢动物的数量受到不同管理措施和不同土层交互作用的影响,并且不同管理措施对土壤节肢动物数量的影响主要发生在表层 0—10 cm 土壤层。林下植被去除仅减少了 0—10 cm 土层土壤动物的数量。这可能是由于植被的去除减少了根系生物量、根系碎屑的输入和菌根真菌的数量<sup>[32]</sup>,从而影响了植食性、捕食真菌和碎屑食者土壤动物的数量。此外,林下植被去除通过改变土壤动物的生存环境从而影响其活动<sup>[33]</sup>。0—10 cm 土层土壤含水量减少了 17%与 10—20 cm 土层相比。土壤动物为躲避土壤表层的干燥会向下层土壤迁移寻找适合的生存环境<sup>[34]</sup>。土壤动物如弹尾目,为了躲避紫外线的直接照射也会向土壤下层迁移<sup>[35]</sup>。林下植被去除导致了紫外线的直接照射引起土壤动物向下迁移。而本研究中林下植被去除没有改变土壤理化性质。因此,以上原因可能是林下植被去除没有改变 0—20 cm 土层土壤动物总数变化的原因。

本研究中,施用有机肥增加了土壤节肢动物的数量,但是由于前气门亚目数量的急剧增加(几乎增加了 4 倍),引起土壤节肢动物群落均匀度和 Shannon 多样性指数的降低。这些变化可能是由于施用有机肥提高了土壤质量如土壤有机质、总氮和有效磷含量,降低了 pH 值之结果。林下植被去除没有显著影响 0—20 cm 土壤层土壤动物的数量和各多样性指标。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 梅梦媛,雷一东.我国人工林新时代发展形势分析.世界林业研究,2019,32(3):73-77.
- [ 2 ] Peguero G, Sardans J, Asensio D, Fernández-Martínez M, Gargallo-Garriga A, Grau O, Llusà J, Margalef O, Múrquez L, Ogaya R, Urbina I, Courtois E A, Stahl C, van Langenhove L, Verryckt L T, Richter A, Janssens I A, Penuelas J. Nutrient scarcity strengthens soil fauna control over leaf litter decomposition in tropical rainforests. *Proceedings of the Royal Society: Biological Sciences*, 2019, 286(1910): 20191300.
- [ 3 ] Bian H X, Geng Q H, Xiao H R, Shen C Q, Li Q, Cheng X L, Luo Y Q, Ruan H H, Xu X. Fine root biomass mediates soil fauna community in response to nitrogen addition in poplar plantations (*Populus deltoids*) on the east coast of China. *Forests*, 2019, 10(2): 122.
- [ 4 ] Wu P F, Wang C T. Differences in spatiotemporal dynamics between soil macrofauna and mesofauna communities in forest ecosystems: the significance for soil fauna diversity monitoring. *Geoderma*, 2019, 337: 266-272.
- [ 5 ] Wardle D A, Yeates G W, Barker G M, Bonner K I. The influence of plant litter diversity on decomposer abundance and diversity. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(5): 1052-1062.
- [ 6 ] Haddad N M, Crutsinger G M, Gross K, Haarstad J, Knops J M H, Tilman D. Plant species loss decreases arthropod diversity and shifts trophic structure. *Ecology Letters*, 2009, 12(10): 1029-1039.
- [ 7 ] Callahan M A Jr, Blair J M, Todd T C, Kitchen D J, Whiles M R. Macroinvertebrates in North American tallgrass prairie soils: effects of fire, mowing, and fertilization on density and biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(8): 1079-1093.
- [ 8 ] Rousseau L, Venier L, Aubin I, Gendreau-Berthiaume B, Moretti M, Salmon S, Handa I T. Woody biomass removal in harvested boreal forest leads to a partial functional homogenization of soil mesofaunal communities relative to unharvested forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 133: 129-136.
- [ 9 ] 蒋林惠,罗琰,肖正高,李大明,陈小云,刘满强,胡锋.长期施肥对水稻生长和抗虫性的影响:解析土壤生物的贡献.生物多样性,2016,24(8):907-915.
- [ 10 ] Zhu X Y, Zhu B. Diversity and abundance of soil fauna as influenced by long-term fertilization in cropland of purple soil, China. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146: 39-46.
- [ 11 ] Birkhofer K, Bezemer T M, Bloem J, Bonkowski M, Christensen S, Dubois D, Ekelund F, Fließbach A, Gunst L, Hedlund K, Mäder P, Mikola

- J, Robin C, Setälä H, Tatin-Froux F, van der Putten W H, Scheu S. Long-term organic farming fosters below and aboveground biota: implications for soil quality, biological control and productivity. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(9): 2297-2308.
- [12] Yang Y, Zhang X Y, Zhang C, Wang H M, Fu X L, Chen F S, Wan S Z, Sun X M, Wen X F, Wang J F. Understory vegetation plays the key role in sustaining soil microbial biomass and extracellular enzyme activities. *Biogeosciences*, 2018, 15(14): 4481-4494.
- [13] Osburn E D, Elliott K J, Knoepp J D, Miniat C F, Barrett J E. Soil microbial response to *Rhododendron* understory removal in southern Appalachian forests: effects on extracellular enzymes. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 127: 50-59.
- [14] Zhao J, Wang X L, Shao Y H, Xu G L, Fu S L. Effects of vegetation removal on soil properties and decomposer organisms. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(5): 954-960.
- [15] 尹文英, 胡圣豪, 沈韞芬, 宁应之, 孙希达, 吴纪华, 诸葛燕, 张云美, 王敏, 陈建英, 徐成钢, 梁彦龄, 王洪铸, 杨潼, 陈德牛, 张国庆, 宋大祥, 陈军, 梁来荣, 胡成业, 王慧芙, 张崇州, 匡溥人, 陈国孝, 赵立军, 谢荣栋, 张骏, 刘宪伟, 韩美贞, 毕道英, 肖宁年, 杨大荣. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.
- [16] Pielou E C. The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, 13: 131-144.
- [17] Whittaker R H. Evolution and measurement of species diversity. *Taxon*, 1972, 21(2/3): 213-251.
- [18] Howard P J A, Howard D M. Use of organic carbon and loss-on-ignition to estimate soil organic matter in different soil types and horizons. *Biology and Fertility of Soils*, 1990, 9(4): 306-310.
- [19] Wu P F, Liu X L, Liu S R, Wang J X, Wang Y. Composition and spatio-temporal variation of soil microarthropods in the biodiversity hotspot of northern Hengduan Mountains, China. *European Journal of Soil Biology*, 2014, 62: 30-38.
- [20] R Development Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2016.
- [21] Wang S J, Chen H Y H, Tan Y, Fan H, Ruan H H. Fertilizer regime impacts on abundance and diversity of soil fauna across a poplar plantation chronosequence in coastal Eastern China. *Scientific Reports*, 2016, 6: 20816.
- [22] 周丹燕, 卜丹蓉, 葛之威, 严靖, 肖晗冉, 阮宏华, 曹国华. 氮添加对沿海不同林龄杨树人工林土壤动物群落的影响. *生态学杂志*, 2015, 34(9): 2553-2560.
- [23] Rotheray T D, Boddy L, Jones T H. Collembola foraging responses to interacting fungi. *Ecological Entomology*, 2009, 34(1): 125-132.
- [24] Fu S L, Zou X M, Coleman D. Highlights and perspectives of soil biology and ecology research in China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(5): 868-876.
- [25] Wang S J, Tan Y, Fan H, Ruan H H, Zheng A B. Responses of soil microarthropods to inorganic and organic fertilizers in a poplar plantation in a coastal area of eastern China. *Applied Soil Ecology*, 2015, 89: 69-75.
- [26] Menta C, Leoni A, Gardi C, Conti F D. Are grasslands important habitats for soil microarthropod conservation? *Biodiversity and Conservation*, 2011, 20(5): 1073-1087.
- [27] 杨宝玲, 张文文, 范换, 王邵军, 阮宏华, 沈彩芹, 曹国华. 苏北沿海地区不同土地利用类型下土壤动物群落结构特征. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2017, 41(6): 120-126.
- [28] Li Y Y, Chen H Y H, Song Q Y, Liao J H, Xu Z Q, Huang S D, Ruan H H. Changes in soil arthropod abundance and community structure across a poplar plantation chronosequence in reclaimed coastal saline soil. *Forests*, 2018, 9(10): 644.
- [29] Hernandez F A, de Castro T M M G, Venancio R. Prostigmata (acari: trombidiformes) as biological control agents//Carrillo D, de Moraes G J, Peña J E, eds. *Prospects for Biological Control of Plant Feeding Mites and Other Harmful Organisms*. Cham: Springer, 2015.
- [30] Gao M X, He P, Zhang X P, Liu D, Wu D H. Relative roles of spatial factors, environmental filtering and biotic interactions in fine-scale structuring of a soil mite community. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 79: 68-77.
- [31] 李媛媛, 许子乾, 徐涵涓, 陈月琴, 阮宏华. 施肥对陆地生态系统土壤动物影响的研究述评. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2018, 42(5): 179-184.
- [32] Nascimento E, Reis F, Chichorro F, Canhoto C, Gonçalves A L, Simões S, Sousa J P, Martins da Silva P. Effects of management on plant litter traits and consequences for litter mass loss and Collembola functional diversity in a Mediterranean agro-forest system. *Pedobiologia*, 2019, 75: 38-51.
- [33] Xiong Y M, Xia H X, Li Z A, Cai X A, Fu S L. Impacts of litter and understory removal on soil properties in a subtropical *Acacia mangium* plantation in China. *Plant and Soil*, 2008, 304(1/2): 179-188.
- [34] Briones M J I, Ineson P, Poskitt J. Climate change and *Cognettia sphagnetorum*: effects on carbon dynamics in organic soils. *Functional Ecology*, 1998, 12(4): 528-535.
- [35] Krab E J, Oorsprong H, Berg M P, Cornelissen J H C. Turning northern peatlands upside down: disentangling microclimate and substrate quality effects on vertical distribution of Collembola. *Functional Ecology*, 2010, 24(6): 1362-1369.