

Response of Soil Animals to Nitrogen Deposition in Broad-Leaved Korean Pine Forest in the Xiaoxing'an Mountains

Jiaojiao Zhou, Qinggui Wang, Yuan Sun, Yajuan Xing*

College of Agricultural Resource and Environment, Heilongjiang University, Harbin Heilongjiang
Email: *xingyajuan@163.com

Received: Mar. 23rd, 2020; accepted: Apr. 9th, 2020; published: Apr. 16th, 2020

Abstract

Atmospheric nitrogen deposition in China is increasing every year, which has brought significant effects on the structure and function of ecosystems. An artificially simulated nitrogen deposition experiment was carried out in Fenglin National Nature Reserve to study the effect of broad-leaved Korean pine forest on soil biological community structure in the Xiaoxin'an Mountains under nitrogen deposition. Since 2010, nitrogen application (NH_4NO_3) has been performed in selected test plots in the growing season (May-September) each year, and four different gradients have been set: CK ($0 \text{ gN}^{-2}\text{m}^{-1}$), low nitrogen LN ($2.5 \text{ gN}^{-2}\text{m}^{-1}$), middle nitrogen MN ($5 \text{ gN}^{-2}\text{m}^{-1}$), high nitrogen HN ($7.5 \text{ gN}^{-2}\text{m}^{-1}$), for comparison experiment. The results showed that: 1) A total of 8769 soil animals were captured, of which 45 species were in total, belonging to 3 phylum, 11 classes and 25 orders. Among them, the dominant groups are Oribatida, Chironomidae, Isotomidae, accounting for 68.13% of the total number of individuals. 2) After nitrogen treatment, the number of groups all decreased; the number of individual soil animals in the soil layer at 0 to 10 cm reached the maximum at HN; the number of individual soil animals in the soil layer at 10 to 20 cm was highest at CK; but all these differences are not significant. 3) Seasonal dynamics of soil animals: in September, the total number of individuals is the highest; in May, the total number of groups is the highest. The difference is significant. 4) Vertical characteristics and performance of soil animals: both the number of individuals and the number of groups show obvious characteristics of surface aggregation. 5) On the whole, the community characteristics of soil animals all showed a very significant negative correlation with soil pH and a very significant positive correlation with NO_3^- -N and soil pH.

Keywords

Soil Animals, Nitrogen Deposition, Community Structure, Broad-Leaved Korean Pine Forest

小兴安岭阔叶红松林土壤动物对氮沉降的响应

周娇娇, 王庆贵, 孙元, 邢亚娟*

*通讯作者。

黑龙江大学农业资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨
Email: xingyajuan@163.com

收稿日期: 2020年3月23日; 录用日期: 2020年4月9日; 发布日期: 2020年4月16日

摘要

我国大气氮沉降呈逐年增加的趋势, 已对生态系统结构和功能产生了显著影响。为研究氮沉降下小兴安岭阔叶红松林对土壤动物群落结构的影响, 在丰林自然保护区内开展了人工模拟氮沉降试验, 从2010年开始, 于每年生长季(5月~9月)在选定的试验样地内进行施氮(NH_4NO_3), 分别设置了对照CK ($0 \text{ g N m}^{-2}\text{a}^{-1}$)、低氮LN ($2.5 \text{ g N m}^{-2}\text{a}^{-1}$)、中氮MN ($5 \text{ g N m}^{-2}\text{a}^{-1}$)、高氮HN ($7.5 \text{ g N m}^{-2}\text{a}^{-1}$)等4个不同梯度处理。研究表明: 1) 共捕获土壤动物8769只, 计45类, 隶属于3门11纲25目。其中优势类群为甲螨亚目、摇蚊幼科、等节跳科, 共占总个体数的68.13%。2) 施氮处理下类群数均发生减少; 0~10 cm土层土壤动物个体数在HN达到最大值; 10~20 cm土层土壤动物个体数在CK时最高; 但差异均不显著。3) 土壤动物的季节动态表现: 9月个体总数最高, 5月类群总数最高。差异显著。4) 土壤动物的垂直特征表现: 个体数与类群数呈现出明显表聚性特征。5) 土壤动物群落特征整体均与土壤pH、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 有极显著正相关。

关键词

土壤动物, 氮沉降, 群落结构, 阔叶红松林

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

随着工业化步伐的加快和人类活动的干扰导致大量含氮化合物在大气中通过干、湿沉降的方式落到地表, 进入生态系统中。研究表明, 适当的氮输入可以为生态系统提供营养元素, 但过量就会影响生态系统的功能及结构[1]。中国现已成为全球氮排量最多的国家之一, 且未来将会持续增加[2] [3] [4]。因此, 氮输入的增加会对生态系统造成多大程度的影响引起了国内外学者们极大的关注。

森林生态系统是陆地生态系统中的重要组成部分, 其具有调节环境因子、气候因子等生态系统功能[5]。而土壤动物是陆地生态系统中分布最广、数量最多的一类生物[6], 其可直接或间接地参与土壤中物质循环和能量流动的转化过程, 不仅是土壤和生态系统中的重要组成因子[7] [8], 还是全球变化对陆地生态系统影响不可或缺的指示生物[9] [10]。土壤动物的生长、繁殖、群落结构、生态功能及区域分布均会随氮添加浓度的变化受到直接影响, 也可通过改变土壤环境因子、地上植被群落结构等对土壤动物的取食、生长等行为间接影响土壤动物。其可敏感地反映出生态环境破坏、时空分布动态变化等状况[11] [12]。多个研究发现土壤动物群落结构对氮沉降的响应存在多样性, 存在促进[13] [14] [15] [16] [17]和抑制[18] [19]两方面作用。

目前对中国温带地区氮沉降背景下许多区域土壤动物的多样性以及环境对其影响机制还存在诸多薄弱。所以在小兴安岭地区建立长期模拟不同水平氮沉降试验基地, 就森林生态系统中土壤动物的群落结

构及时空分布格局对氮沉降的响应进行研究并讨论其内在机制, 本研究基于对前人研究结果的分析, 主要提出以下三个假设: 1) 同一气候环境下不同氮沉降处理对土壤动物群落结构的响应; 2) 不同氮沉降处理土壤动物群落季节动态及垂直分布特征; 3) 氮沉降下土壤环境因子对土壤动物的影响。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

丰林国家级自然保护区(48°02'~48°12'N, 128°58'~129°15'E)位于黑龙江省伊春市五营区, 该区地处小兴安岭南坡北段, 海拔高度 280~683 m, 地处典型北温带大陆性季风气候区, 年均温为-0.5°C, 年均降水量 680~750 mm, 年蒸发量为 930 mm, 年均无霜期 120 d, 土壤为典型暗棕壤, 样地植被类型为北温带阔叶混交林。是中国面积最大、保存最完整的原始红松林, 物种资源丰富。主要以红松(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.)、落叶松(*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.)等为主的针叶树种及以水曲柳(*Fraxinus mandshurica* Rupr.)黄菠萝(*Phellodendron amurense* Rupr.)等为主的阔叶林的阔叶树种。

2.2. 实验设计

于 2010 年 5 月在保护区内选取 12 块 20 m × 20 m 植被地形相似的小样方作为人工模拟氮沉降试验基地, 各样方间设有 10 m 宽的隔离带, 以防止不同处理的样地间相互干扰。以 NH_4NO_3 作为外施氮源于每年生长季 5~9 月进行喷施, 共设置对照 CK ($0 \text{ gNm}^{-2}\text{a}^{-1}$)、低氮 LN ($2.5 \text{ gNm}^{-2}\text{a}^{-1}$)、中氮 MN ($5 \text{ gNm}^{-2}\text{a}^{-1}$)、高氮 HN ($7.5 \text{ gNm}^{-2}\text{a}^{-1}$) 4 个不同浓度氮添加处理, 每个处理设计 3 个重复。

2.3. 样品采集

分别在 2019 年 5 月(春季), 7 月(夏季), 9 月(秋季)3 个季节采集土壤样品, 在每个小样方随机设置三个取样点, 分别用直径为 15 cm 的环形刀和直径为 5 cm 的土钻按 0~10 cm 和 10~20 cm 采集土壤样品两份, 一份用于土壤动物的分离, 另一份用于土壤理化性质的测定。土壤动物土样迅速带回实验室后采用改良过后的 Tullgren 干漏斗法进行土壤动物的分离, 将标本保存于 75% 的酒精后在解剖镜下根据尹文英《中国土壤动物图鉴》进行分离鉴定并分类统计, 部分土壤动物类群鉴定至科水平[20] [21]。

2.4. 数据处理与分析

首先运用 Excel 2010 统计土壤动物种类和数量, 按土壤动物种类的个体数占所捕获总个体数的百分比来计算相对多度。10% 以上为优势种, 1%~10% 为常见种, 1% 以下为稀有种[22]。将用于测定土壤理化性质的样品带回实验室进行预处理, 土壤全氮(TN)、全磷(TP)和速效氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$)采用连续流动分析仪(AA3, Bran-Luebbe, Hamburg, Germany)测定; 用 C/N 分析仪(multi N/C 3100, Analytik Jena AG, Germany)对土壤全碳(TC)进行干燃烧分析; 土壤含水率(SWC)采用烘干法测定; 土壤 pH 采用 PB-10 酸度计测定(水土比例为 2.5:1) [23]。土壤动物群落特征主要采用 Margalef 丰富度指数(D)、Shannon 多样性指数(H')、Simpson 优势度指数(C)、Pielou 均匀度指数(J)进行数据分析, 群落特征多样性指数计算公式如下:

$$D = (S - 1) / \ln N$$

$$H' = -\sum_{i=1}^S n_i / N \ln(n_i / N)$$

$$C = \sum_{i=1}^S (n_i / N)^2$$

$$J = H'/\ln S$$

式中, n_i 代表第 i 个类群的个体数; N 代表群落中所有类群的个体总数; S 代表类群数。

采用 Spss22.0 软件进行数据分析, 采用单因素方差分析(one-way ANOVA)对土壤动物的个体数、类群数及其群落特征进行差异显著性分析。用 Pearson 相关系数分析土壤动物群落特征与环境因子之间的相关性。

3. 结果与分析

3.1. 土壤动物群落组成结构对氮沉降的响应

3 个采样期(2019.05~09 月)共计捕获到土壤动物 8769 只, 计 45 类, 隶属于 3 门 11 纲 25 目(表 1)。小兴安岭地区森林生态系统的优势类群为甲螨亚目、摇蚊幼科、等节跳科 3 类, 占总个体数的 68.13%; 常见类群为双翅目幼科、球角跳科、棘跳科、革螨科、鳞跳科、辐螨亚目、线蚓科、线虫 8 类, 占 24.6%; 这些类群构成了小兴安岭森林生态系统土壤动物的主体, 剩余 37 类为稀有类群, 占 7.27%。

Table 1. Community groups and quantitative statistics of soil Animals in the Xiaoxing'an Mountains
表 1. 小兴安岭地区土壤动物群落类群和数量统计

名称 Name	体型 Size	CK	LN	MN	HN	百分比 Percent (%)	多度 Degree
后孔寡毛目 Opisthopora 正蚓科 Lumbricidae	Macro	18	15	11	35	0.9	
近孔寡毛目 Plesinpora 线蚓科 Enchytraeidae	Macro	31	26	14	41	1.28	**
线虫目 Nemata	Micro	17	33	16	23	1.01	**
蜘蛛目 Araneae	Macro	19	18	5	3	0.51	
伪蝎目 Pseudoscorpiones	Macro	-	1	1	-	0.02	
盲蛛目 Opiliones	Macro	1	3	1	-	0.06	
寄螨目 Parasiformes 革螨科 Mesostigmata	Meso/Micro	60	51	76	66	2.89	**
硬蜱科 Ixodidae	Meso/Micro	3	1	1	-	0.06	
节腹螨亚目 Opilioacarida	Meso/Micro	2	-	1	1	0.05	
软蜱科 Argasidae	Meso/Micro	-	1	-	1	0.02	
真螨目 Acariformes 甲螨亚目 Oribatida	Meso/Micro	788	559	696	848	32.97	***
辐螨亚目 Actinetidida	Meso/Micro	83	41	40	55	2.5	**
叶螨科 Tetranychidae	Meso/Micro	14	4	13	2	0.38	
等足目 Isopoda 鼠妇科 Porcellionidae	Macro	3	11	16	5	0.4	
圆马陆目 Sphaerotheriida 生圆马陆科 Sphaeropoeidae	Macro	13	4	4	3	0.27	
地蜈蚣目 Geophilomorpha 地蜈蚣科 Geophilidae	Macro	13	16	15	17	0.7	
石蜈蚣目 Lithobiomorpha 石蜈蚣科 Lithobiidae	Macro	1	1	2	-	0.05	
蜈蚣目 Scolopendromorpha 大蜈蚣科 Scolopendromorpha	Macro	3	2	3	3	0.13	
综合纲 Symphyla 纣蚰科 Scutigereidae	Macro	12	8	6	12	0.43	
蛎目 Acerentomata 蛎科 Acerentomidae	Meso/Micro	4	5	8	5	0.25	
弹尾目 Collembola 等节跳科 Isotomidae	Meso/Micro	375	251	365	312	14.86	***

Continued

	棘跳科 Onychiuridae	Meso/Micro	109	49	58	46	2.99	**
	球角跳科 Hypogastruridae	Meso/Micro	130	74	82	77	4.14	**
	鳞跳科 Tomoceridae	Meso/Micro	56	43	71	85	2.91	**
	圆跳科 Sminthuridae	Meso/Micro	11	7	8	7	0.38	
	疣跳科 Neanuridae	Meso/Micro	2	2	1	1	0.07	
	跳虫科 Poduridae	Meso/Micro	1	1	1	-	0.03	
	长角跳科 Paronellidae	Meso/Micro	17	10	8	15	0.57	
双尾目 Diplura	康虫八总科 Campodeidae	Macro	3	6	5	1	0.17	
缨翅目 Thysanoptera	蓟马科 Thripidae	Macro	3	3	2	2	0.11	
半翅目 Hemiptera	鞭蝽科 Dipsocoridae	Meso/Micro	1	1	-	1	0.03	
	蝉科 Cicadidae	Meso/Micro	-	1	-	1	0.02	
鞘翅目 Coleoptera	隐翅甲科 Staphylinidae	Macro	9	5	5	13	0.36	
	虎甲科 Cicindelidae	Meso/Micro	0	1	-	1	0.02	
	象甲科 Curculionidae	Meso/Micro	2	-	1	-	0.03	
鞘翅目幼 Coleopteralarvae	水龟甲科 Hydrophilidae	Meso/Micro	1	-	-	-	0.01	
	步甲科 Carabidae	Meso/Micro	13	5	13	13	0.5	
	金龟甲科 Scarabaeidae	Meso/Micro	-	-	-	1	0.01	
鳞翅目 Lepidoptera	夜蛾科 Noctuidae	Macro	2	4	2	6	0.16	
双翅目 Diptera	摇蚊科 Chironomidae	Macro	446	394	339	601	20.3	***
	虻科 Tabanidae	Macro	-	1	-	-	0.01	
	双翅目幼虫 Diptera	Macro	150	154	141	158	6.88	**
	大蚊科 Tipulidae	Macro	7	2	1	12	0.25	
膜翅目 Hymenoptera	小蜂科 Chalcidae	Macro	3	6	2	5	0.18	
	蚁科 Formicidae	Macro	1	1	-	1	0.03	
	食牙蝇科 Syrphidae	Macro	-	2	-	2	0.05	
直翅目 Orthoptera	蟋蟀科 Gryllidae	Macro	-	1	2	-	0.03	
脉翅目 Neuroptera	蚁蛉科 Myrmeleontidae	Macro	-	-	-	1	0.01	
总计 Total	个体数 Individuals	Macro/Meso/Micro	2427	1824	2036	2482		
	类群数 Groups	Macro/Meso/Micro	43	38	39	39		

注: ***: 优势类群($\geq 10\%$); **: 常见类群 $1\% \sim 10\%$; -: 未发现此类群; $n = 3$ 。

0~10 cm 土层共捕获 6979 只, 占土壤动物总个体数的 79.59%, 共计 45 类。由图 1 可知, 甲螨亚目、摇蚊幼科、等节跳科为优势类群, 共占 0~10 cm 土壤动物总个体数的 68.26%; 双翅目幼虫、球角跳科、鳞跳科、棘跳科、革螨科、辐螨亚目等 7 类为常见类群, 占 24.22%; 线虫目、正蚓科等剩余 35 类为稀有类群, 占 7.52%。总体来看, 0~10 cm 土层土壤动物的个体总数在高氮(HN)处理下达到最高, 低氮(LN)处理下最低; 与 CK 处理相比, 氮沉降处理下土壤动物类群总数表现出降低的趋势。

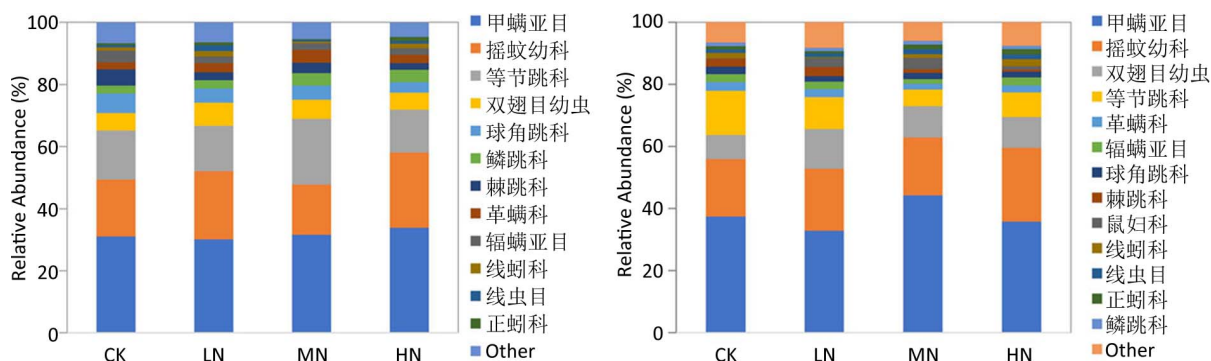


Figure 1. Community groups and quantitative statistics of soil animals in 0~10 cm and 10~20 cm layers in the Xiaoxing'an Mountains

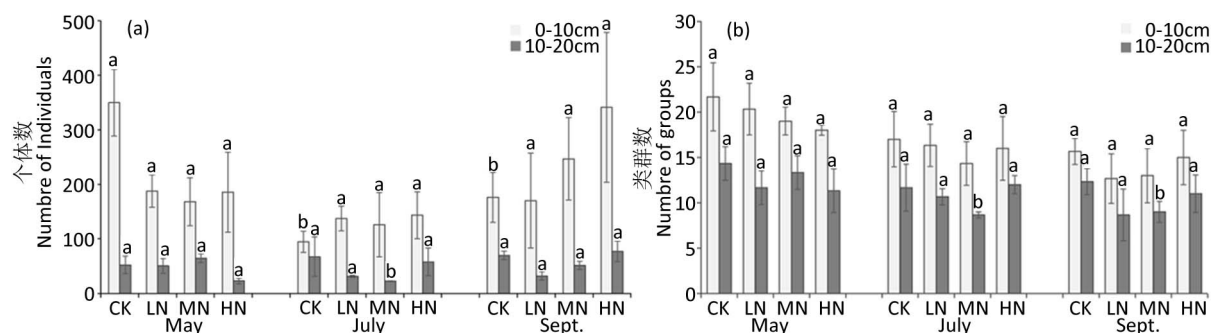
图 1. 小兴安岭地区 0~10 cm 和 10~20 cm 层土壤动物主要类群

10~20 cm 土层共捕获 1790 只, 占总个体数的 20.41%, 43 类, 甲螨亚目、摇蚊幼科为优势类群, 占 10~20 cm 土壤动物个体数总数的 57.82%; 双翅目幼虫、等节跳科、革螨科、辐螨亚目、球角跳科、棘跳科等 11 类为常见类群, 占 35.14%; 地蜈蚣科等 30 类为稀有类群, 占 7.04% (图 1)。10~20 cm 土层对照处理样地的土壤动物个体数和类群数均大于氮添加处理样地。其中优势类群甲螨亚目、常见类群辐螨亚目、革螨科、球角跳科、棘跳科及鳞跳科等的个体数在氮沉降处理下均有不同程度减少; 其余各类群对氮沉降的响应程度不一, 但均有增加或减少的趋势。

3.2. 模拟氮沉降对土壤动物群落分布特征

3.2.1. 季节分布特征

不同季节模拟氮沉降对土壤动物个体数和类群数的响应如图 2 所示, 所有处理下土壤动物的个体总数表现为: 9 月 > 5 月 > 7 月, 差异显著 ($P < 0.05$)。其中 0~10 cm 土层土壤动物整体上个体数表现为先减少后增加, 但并未达到显著水平。CK 和 LN 处理下土壤动物的个体数随季节变化均表现为递减趋势, 其中 5 月 CK 处理下个体数显著高于 7 月和 9 月 ($P < 0.05$), MN 和 HN 处理下个体数随季节的变化先减少后增加, 均未能达到显著差异。10~20 cm 土层 CK 和 HN 处理下土壤动物个体数随季节的变化表现为递增趋势; LN 处理为递减趋势; MN 处理为先减少后增加; 其中 7 月 MN 处理显著低于 5 和 9 月 ($P < 0.05$)。



注: 不同字母表示相同处理下不同月份间差异 ($P < 0.05$); $n = 3$ 。

Figure 2. Individual number and group number of soil animals under simulated nitrogen precipitation in different seasons

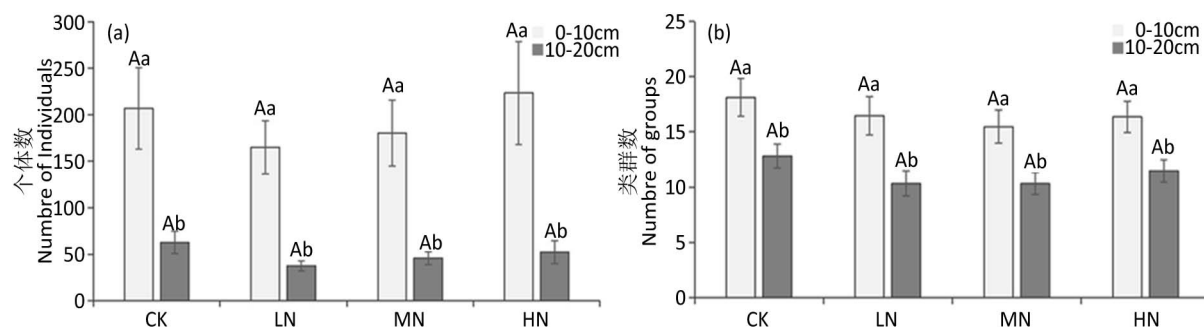
图 2. 不同季节模拟氮沉降下土壤动物的个体数与类群数

总体来看, 类群总数 5 月显著高于 7 月和 9 月 ($P < 0.05$)。其中 0~10 cm 土层土壤动物的类群数整体表现为降低的趋势, 在不同季节 CK 处理下的土壤动物类群数均高于氮添加处理样地, 但未有显著变化。

10~20 cm 土层土壤动物的类群数在 5 月和 9 月的 CK 处理下均处于最高；CK、LN、MN 处理下土壤动物类群数随季节的变化整体表现为递减的趋势；其中 5 月 MN 处理下类群数显著高于 7 和 9 月($P < 0.05$)。

3.2.2. 垂直分布特征

在模拟不同浓度氮添加处理下土壤动物的个体数和类群数的垂直分布特征如图 3 所示，0~10 cm 土层和 10~20 cm 土层的个体数和类群数均呈现为先减少后增加的趋势，方差分析结果显示所有处理下 0~10 cm 土层土壤动物个体数及类群数均显著高于 10~20 cm 土层($P < 0.05$)，呈现出明显表聚性特征。



注：同一土层大写字母表示相同处理间差异；同一土层小写字母表示相同处理下不同土层间差异； $n = 3$ 。

Figure 3. Vertical distribution characteristics of simulated nitrogen deposition on individual number and group number of soil animals

图 3. 模拟氮沉降对土壤动物的个体数与类群数的垂直分布

3.3. 土壤动物群落结构与土壤理化性质的相关性分析

由表 2 可知，CK 处理下 0~10 cm 土层土壤动物的丰富度(D)、多样性(H)、优势度(C)、均匀度(J)、类群数均高于氮沉降处理，而个体数在 HN 处理达到最大值；与 CK 相比，施氮处理下 10~20 cm 土层土壤动物丰富度、个体数及类群数降低；多样性和优势度除 HN 处理外均有减少，均匀度除 MN 处理外均增加；但均未达到显著处理。

Table 2. Community diversity of soil animals in different soils under simulated nitrogen deposition

表 2. 模拟氮沉降下不同土层土壤动物的群落多样性

层次	氮处理	丰富度(D)	多样性(H)	优势度(C)	均匀度(J)	Group number	Total number
0~10 cm	CK	3.32 ± 0.28	1.98 ± 0.11	0.78 ± 0.02	0.39 ± 0.03	206.78 ± 43.93	18.11 ± 1.72
	LN	3.06 ± 0.29	1.92 ± 0.11	0.77 ± 0.02	0.38 ± 0.02	165 ± 28.33	16.44 ± 1.50
	MN	2.86 ± 0.26	1.85 ± 0.10	0.76 ± 0.02	0.37 ± 0.02	180.22 ± 35.18	15.44 ± 1.41
	HN	2.95 ± 0.22	1.88 ± 0.09	0.77 ± 0.02	0.37 ± 0.02	223.44 ± 55.50	16.33 ± 1.72
10~20 cm	CK	2.94 ± 0.23	1.83 ± 0.11	0.74 ± 0.03	0.47 ± 0.04	62.89 ± 11.94	12.78 ± 1.09
	LN	2.54 ± 0.25	1.76 ± 0.15	0.74 ± 0.05	0.49 ± 0.04	37.67 ± 5.47	10.33 ± 1.11
	MN	2.50 ± 0.21	1.68 ± 0.11	0.71 ± 0.04	0.46 ± 0.04	46 ± 6.96	10.33 ± 0.99
	HN	2.82 ± 0.25	1.87 ± 0.11	0.75 ± 0.04	0.51 ± 0.06	52.33 ± 12.14	11.44 ± 0.97

通过 Pearson 相关系数分析发现(表 3, 表 4)，0~10 cm 土层土壤动物的丰富度(D)、多样性(H)、优势度(C)、均匀度(J)整体均与土壤 SWC 和 TN 含量呈显著负相关($P < 0.05$)；与土壤 pH 值显著正相关($P < 0.05$)。多样性(H)与土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量显著正相关($P < 0.05$)。总个体数与土壤 pH 值和 TP 含量呈显著正相关($P < 0.05$)。

Table 3. Correlation coefficient of 0~10 cm soil physicochemical properties with soil animal community
表 3. 0~10 cm 土壤理化性质与土壤动物群落的相关系数

Diversity index	SWC	pH	TC	TN	TP	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N
丰富度指数(D)	-0.379*	0.555**	-0.292	-0.341*	0.286	0.206	0.304
多样性指数(H)	-0.451**	0.473**	-0.275	-0.442**	0.263	0.106	0.342*
优势度指数(C)	-0.413*	0.396*	-0.266	-0.470**	0.203	0.037	0.302
均匀度指数(J)	-0.402*	0.368*	-0.218	-0.530**	0.068	-0.121	0.212
Group number	0.132	-0.037	0.037	0.254	0.167	0.277	0.096
Total number	-0.311	0.488**	-0.268	-0.207	0.337*	0.286	0.292

注: *: 差异显著(P < 0.05); **: 差异极显著(P < 0.01); n = 3。

Table 4. 10~20 cm correlation analysis between environmental factors and soil animal communities
表 4. 10~20 cm 土壤理化性质与土壤动物群落的相关系数

Diversity index	SWC	pH	TC	TN	TP	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N
丰富度指数(D)	-0.369*	0.432**	-0.265	-0.377*	0.133	-0.067	0.462**
多样性指数(H)	-0.436**	0.403*	-0.388*	-0.515**	0.137	-0.175	0.346*
优势度指数(C)	-0.391*	0.344*	-0.430**	-0.541**	0.138	-0.134	0.276
均匀度指数(J)	-0.449**	0.287	-0.505**	-0.636**	0.07	-0.231	0.159
Group number	0.155	0.096	0.289	0.364*	0.076	0.181	0.131
Total number	-0.227	0.389*	-0.076	-0.135	0.135	0.05	0.470**

注: *: 差异显著(P < 0.05); **: 差异极显著(P < 0.01); n = 3。

10~20 cm 土层土壤动物丰富度(D)、多样性(H)、优势度(C)、均匀度(J)整体均与土壤 SWC 含量和 TN 含量显著负相关(P < 0.05); 除均匀度(J)外其余指数和个体数都与土壤 pH 值显著正相关(P < 0.05); 除丰富度(D)外其余指数都与土壤 TC 含量显著负相关(P < 0.05); 土壤动物的丰富度(D)、多样性(H)、优势度(C)、均匀度(J)和类群总数均与土壤 TN 含量显著正相关(P < 0.05); 丰富度(D)、多样性(H)和总个体数与土壤 NO₃⁻-N 含量显著正相关(P < 0.05)。

4. 讨论

本研究中, 甲螨亚目和摇蚊幼虫是 0~10 cm 和 10~20 cm 土层中的共有优势种, 优势种和常见种是土壤动物群落的主体, 对小兴安岭地区森林生态系统的群落特征起着决定性作用, 可反映出它们在森林生态系统的适应能力较强[24] [25]。分析结果显示模拟氮沉降对不同土层的土壤动物个体数的响应存在多样性, 而对类群数存在负效应。其中在 0~10 cm 土层中, HN 处理样地的土壤动物个体数达到最大值, 原因应是氮沉降处理会增加凋落物氮素的有效性, 提高凋落物数量及质量, 从而促进土壤动物主要类群的繁殖[26]。10~20 cm 土层中, CK 处理样地的土壤动物个体数达到最大值, 施氮样地个体数减少, 这是由于深层土壤中食物资源减少、养分含量降低及土壤环境不适宜所导致的[27]。且多个研究证实, 适当的氮沉降对土壤生物可能是有利的, 但过量的氮沉降就会起抑制作用[28] [29] [30]。关键在于生态系统是否达到“氮饱和”状态[31]。类群数均在 CK 处理样地最高, 说明氮沉降会抑制某些种群的生长。因此, 土壤动物群落结构会对因氮沉降所造成的土壤环境质量高低和生态稳定性存在一定的指示作用[15], 且对氮沉降的响应存在多样性。

季节变化对土壤动物的个体数和类群数存在显著性差异, 说明不同类群的土壤动物对环境的适应能力

是不一致的[32]。9月个体数量达到最高,这种差异主要原因是环境温湿度与凋落物的质量和数量所造成的,9月正当秋季温度比较适宜,大量凋落叶的累积为土壤动物提供了较好的生存条件,栖息在凋落物层的土壤动物开始大量繁殖,因此个体数量增加明显[33]。而5月类群数达到最大值是由于在秋冬两个季节,凋落物被土壤动物分解后更易捕食,所以丰富的食源使类群数增加[34];因此氮的持续输入会使土壤动物多样性减少,趋向于单一化,但个体总数增加[12]。也有研究表明,不同土壤动物类群适宜生存的温度是不一致的,所以随着季节变化它会在土层间移动来躲避不适宜的温度。如本研究中两个土层的优势种和常见种是存在差异的。因此随着季节的变化,环境因子也会发生改变,土壤动物类群也会发生变化。

小兴安岭模拟氮沉降下不同土层土壤动物的个体数与类群数均在垂直分布上显示出明显的表聚性特征,具体表现为0~10 cm土层土壤动物的个体总数与类群总数显著高于10~20 cm土层[35] [36] [37]。研究表明由于10~20 cm土层的养分含量低,因此被发现的土壤动物数量与类群较少。但影响土壤动物垂直分布的内在机制仍需进一步研究[38]。

土壤动物群落受土壤性质、地上植被、地形及气候等多种环境因素相结合的影响,这些因素对土壤动物的群落结构、栖息环境等均会产生重大影响[38] [39] [40]。本研究中土壤理化性质与土壤动物群落特征的相关性分析发现,整体上土壤pH值、NO₃-N含量对本样地土壤动物群落组成有较强的相关性,土壤动物对养分速效氮有明显响应[41],并与宛丽娟等人[42]发现土壤pH值对土壤动物群落组成起正相关响应研究结果相似,因此,在此样地氮沉降浓度升高对土壤pH值的影响较小,所以对土壤动物起到促进作用。

5. 结论

本试验研究基地位于小兴安岭天然阔叶红松林内,此样地人工模拟氮沉降试验已进行了11年,因此在这里进行土壤动物的调查和观测对丰富氮沉降对小兴安岭森林生态系统影响的评价内容具有重要研究意义。随着N沉降浓度的升高,整体上类群数减少;而0~10 cm土层土壤动物的个体总数在HN处理下达到最大值;10~20 cm土壤动物的个体总数在CK处理下最多;差异均未达到显著($P > 0.05$)。季节动态表现为9月 > 5月 > 7月,9月个体总数最高,5月类群总数最高,因此季节变化对土壤动物群落结构影响显著。小兴安岭地区土壤动物主要集中分布于0~10 cm土层,个体数与类群数的表聚性特征均明显。土壤动物的优势种与常见种对环境因子变化的响应存在显著差异。

参考文献

- [1] Galloway, J.N., et al. (2008) Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions. *Science*, **320**, 889-892. <https://doi.org/10.1126/science.1136674>
- [2] 肖辉林. 大气氮沉降与森林生态系统的氮动态[J]. 生态学报, 1996(1): 90-99.
- [3] 常运华, 刘学军, 李凯辉, 吕金岭, 宋韦. 大气氮沉降研究进展[J]. 干旱区研究, 2012, 29(6): 972-979.
- [4] Galloway, J.N., et al. (2004) Nitrogen Cycles: Past, Present, and Future. *Biogeochemistry*, **70**, 153-226. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-0370-0>
- [5] 李俊清. 森林生态学[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [6] Decaëns, T., et al. (2006) The Values of Soil Animals for Conservation Biology. *European Journal of Soil Biology*, **42**, S23-S38. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2006.07.001>
- [7] 尹文英. 土壤动物学研究的回顾与展望[J]. 生物学通报, 2001(8): 1-3.
- [8] 吕若菲, 魏存争. 氮沉降对土壤动物影响的研究进展[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2017, 35(2): 185-188.
- [9] Reay, D.S., et al. (2008) Global Nitrogen Deposition and Carbon Sinks. *Nature Geoscience*, **1**, 430-437. <https://doi.org/10.1038/ngeo230>
- [10] Menta, C. (2012) Soil Fauna Diversity: Function, Soil Degradation, Biological Indices, Soil Restoration. In: *Biodiversity Conservation and Utilization in a Diverse World*, InTech, London, 59-94. <https://doi.org/10.5772/51091>

- [11] Throop, H.L. and Lerdau, M.T.J.E. (2004) Effects of Nitrogen Deposition on Insect Herbivory: Implications for Community and Ecosystem Processes. *Ecosystems*, **7**, 109-133. <https://doi.org/10.1007/s10021-003-0225-x>
- [12] 徐国良, 莫江明, 周国逸, 彭少麟. 土壤动物与 N 素循环及对 N 沉降的响应[J]. 生态学报, 2003(11): 2453-2463.
- [13] 徐国良, 莫江明, 周国逸, 薛璟花, 李德军. 模拟氮沉降对苗圃地土壤动物群落的影响[J]. 生态环境, 2004(4): 487-492.
- [14] 徐国良, 莫江明, Brown Sandra, 李德军. 土壤动物对模拟 N 沉降的响应[J]. 生态学报, 2004(10): 2245-2251.
- [15] 李曾燕, 邱细容, 陈冠陶, 郑军, 李娟, 涂利华. 多年模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹人工林土壤节肢动物的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(5): 1419-1425.
- [16] Coulson, J. and Butterfield, J. (1978) An Investigation of the Biotic Factors Determining the Rates of Plant Decomposition on Blanket Bog. *Journal of Ecology*, **66**, 631-650. <https://doi.org/10.2307/2259155>
- [17] 徐国良, 莫江明, 周国逸. 氮沉降对三种林型土壤动物群落生物量的影响[J]. 动物学研究, 2005(6): 609-615.
- [18] van Diepen, L.T., et al. (2010) Simulated Nitrogen Deposition Causes a Decline of Intra- and Extra-Radical Abundance of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Changes in Microbial Community Structure in Northern Hardwood Forests. *Ecosystems*, **13**, 683-695. <https://doi.org/10.1007/s10021-010-9347-0>
- [19] Wei, C., et al. (2012) Nitrogen Addition Regulates Soil Nematode Community Composition through Ammonium Suppression. *PLoS ONE*, **7**, e43384. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043384>
- [20] 尹文英. 中国土壤动物[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [21] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [22] 土壤动物研究方法手册编写组. 土壤动物研究方法手册[M]. 北京: 中国林业出版社, 1998.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- [24] 辛未冬, 殷秀琴, 秦丽杰, 陈颖彪, 张雪萍, 陈鹏. 小兴安岭森林生态系统中小型土壤动物生态地理分布特征[J]. 地理科学, 2009, 29(1): 129-133.
- [25] 张雪萍, 张毅, 侯威岭, 殷秀琴. 小兴安岭针叶凋落物的分解与土壤动物的作用[J]. 地理科学, 2000(6): 552-556.
- [26] Micks, P., et al. (2004) Decomposing Litter as a Sink for ^{15}N -Enriched Additions to an Oak Forest and a Red Pine Plantation. *Forest Ecology and Management*, **196**, 71-87. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.03.013>
- [27] 张丽娜, 李军, 范鹏, 曹裕, 居玛汗·卡斯木. 黄土高原典型苹果园地深层土壤氮磷钾养分含量与分布特征[J]. 生态学报, 2013, 33(6): 1907-1915.
- [28] Magill, A.H., et al. (2000) Long-Term Nitrogen Additions and Nitrogen Saturation in Two Temperate Forests. *Ecosystems*, **3**, 238-253. <https://doi.org/10.1007/s100210000023>
- [29] 周丹燕, 卜丹蓉, 葛之葳, 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[J]. 生态学杂志, 2015, 34(9): 2553-2560.
- [30] 徐国良, 莫江明, 周国逸. N 沉降下土壤动物群落的响应: 1 年研究结果综述[J]. 北京林业大学学报, 2006(3): 1-7.
- [31] 肖辉林. 大气氮沉降对森林土壤酸化的影响[J]. 林业科学, 2001(4): 111-116.
- [32] 张利敏, 杨树安, 张立辉, 张雪萍, 万敏. 土壤动物与全球变化的关系[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2016, 32(1): 137-140.
- [33] 何振, 赵琴, 李迪强, 李密. 八大公山土壤跳虫群落结构与多样性的季节动态[J]. 林业科学研究, 2018, 31(3): 68-77.
- [34] Scheu, S., et al. (2005). Interactions between Microorganisms and Soil Micro- and Mesofauna. In: *Microorganisms in Soils: Roles in Genesis and Functions*, Springer, Berlin, 253-275. https://doi.org/10.1007/3-540-26609-7_12
- [35] 王邵军, 阮宏华, 汪家社, 徐自坤, 吴焰玉. 武夷山典型植被类型土壤动物群落的结构特征[J]. 生态学报, 2010, 30(19): 5174-5184.
- [36] 曹国华, 张玲, 吴思思, 葛之葳, 阮宏华. 氮添加对苏北杨树人工林土壤动物群落垂直结构的影响[J]. 江苏林业科技, 2015, 42(6): 10-14.
- [37] 黄玉梅. 土壤动物群落多样性研究进展[J]. 西部林业科学, 2004(3): 63-68.
- [38] 叶贺, 红梅, 赵巴音那木拉, 霍利霞, 高海燕. 水氮控制对荒漠草原中小型土壤动物的影响[J]. 中国环境科学, 2018, 38(11): 4325-4333.
- [39] 罗梦娇, 李松松, 强大宏, 刘长海. 南泥湾湿地土壤动物群落组成与土壤理化性质的关系[J]. 生态环境学报, 2018, 27(8): 1432-1439.

- [40] 邵元虎, 张卫信, 刘胜杰, 王晓丽, 傅声雷. 土壤动物多样性及其生态功能[J]. 生态学报, 2015, 35(20): 6614-6625.
- [41] Huhta, V.J.P. (2007) The Role of Soil Fauna in Ecosystems: A Historical Review. *Pedobiologia*, **50**, 489-495.
<https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2006.08.006>
- [42] 宛丽娟, 朱永恒, 谢鑫. 铜陵市横冲流域杉木林下土壤动物群落与土壤理化性质的关系[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(14): 299-304.