

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

李曾燕¹ 邱细容¹ 陈冠陶¹ 郑军² 李娟¹ 涂利华^{1*}

(¹四川农业大学林学院, 长江上游森林资源保育与生态安全国家林业局重点实验室, 成都 611130; ²四川省遂宁市林业局, 四川遂宁 629000)

摘要 土壤动物在生态系统养分循环中扮演着重要角色, 其中土壤节肢动物在凋落物破碎和土壤团聚体形成中起着决定性作用。为探究多年模拟氮沉降对苦竹人工林土壤节肢动物的影响, 于2007年11月起在华西雨屏区苦竹人工林进行了每月1次的模拟氮沉降试验, 以硝酸铵为氮源, 设对照($0 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、低氮($5 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、中氮($15 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)和高氮($30 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)4个处理。在施氮6.5年后分别于2014年1月、10月, 2015年1月采集凋落物层和0~15 cm土层样品带回实验室分离鉴定。结果显示: 本试验共观察到土壤节肢动物1852只, 隶属于3门7纲18目; 凋落物层土壤节肢动物个体数和类群数随施氮浓度的升高而增加, 且高氮处理显著高于对照; 土壤层土壤节肢动物个体数和类群数随施氮浓度的升高而减少, 但与对照相比均不显著; 模拟氮沉降对凋落物层和土壤层土壤节肢动物多样性指数、均匀度指数和丰富度指数均无显著影响。

关键词 土壤节肢动物; 氮沉降; 苦竹; 华西雨屏区

Effects of long-term simulated nitrogen deposition on soil arthropods in a *Pleioblastus amarus* plantation in rainy area of western China. LI Zeng-yan¹, QIU Xi-rong¹, CHEN Guantao¹, ZHENG Jun², LI Juan¹, TU Li-hua^{1*} (¹Key Laboratory of National Forestry Administration on Forest Resources Conservation and Ecological Safety in the Upper Reaches of the Yangtze River, College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; ²Suining Forestry Bureau, Suining 629000, Sichuan, China).

Abstract: Soil fauna plays an important role in ecosystem nutrient cycling. Soil arthropods play a fundamental role in litter breaking process and in the formation of soil aggregates. We examined the effects of chronic N deposition on soil arthropod communities in a *Pleioblastus amarus* plantation in the rainy area of west China, with a field experiment involving monthly simulated N deposition using NH_4NO_3 since 2007. There were four levels of N addition: control ($0 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), low N ($5 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), medium N ($15 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) and high N ($30 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$). After six and half years of treatment, litter of *P. amarus* and soil samples were collected in January 2014, October 2014 and January 2015. The results showed that 1852 individuals of soil arthropods were found, which could be classified into 3 phyla, 7 classes and 18 orders. The individuals and species number of soil arthropods increased with increasing N deposition levels in the litter layer, being significantly higher in the high N treatment than that in control. In the soil layer, the individuals and species number of soil arthropods decreased with increasing N deposition levels, although there was no significant difference among the different treatments. Simulated N deposition had no significant effects on the Shannon diversity, Pielou evenness, and Menhinick richness indices of soil arthropods in both litter layer and soil layer.

Key words: soil arthropods; nitrogen deposition; *Pleioblastus amarus*; rainy area of western China.

土壤动物被称为“生态系统工程师”,是土壤生物群落最重要的组成部分之一,具有生物元素转化、存储和养分释放等重要作用(杨万勤,2006)。其中,土壤节肢动物因其种类组成丰富、数量庞大、生态功能重要而被广泛研究。近年来,我国对土壤节肢动物的研究多集中于植被类型对土壤节肢动物的影响(靳亚丽等,2017)以及土壤节肢动物对凋落物分解的影响(崔洋等,2012;Li *et al.*,2015)方面。例如,马香丽等(2016)对纯林和混交林的研究得出,混交林中土壤节肢动物个体密度和类群数显著高于纯林,而多样性指数和均匀度显示纯林高于混交林,且相关分析得出全氮含量是影响土壤节肢动物多样性的主要因子,其原因主要由土壤节肢动物取食偏好造成。土壤节肢动物中,螨类和弹尾类是数量最多和分布最广的两种类群,常被作为土壤质量、污染程度的指示生物,并且由于其在土壤团聚体的形成中具有重要作用而受到越来越多的人关注(朱永恒等,2012;邵元虎等,2015)。

氮沉降在全球范围内普遍存在,中国是目前NO_x和NH₃排放量最大的国家(Vet *et al.*,2014),氮沉降速率也居全球最高水平(Galloway *et al.*,2004),并且随着经济的发展,在未来数十年里将急剧增加(Nijssen *et al.*,2017)。通常情况下,大气氮沉降的增加提高了森林土壤氮素有效性,但长期而持续的高氮沉降将改变植物群落结构,影响生态系统碳储存,导致营养失衡甚至生态系统衰退(Chen *et al.*,2015),对土壤动物具有潜在重要影响。氮沉降可直接通过产生酸性沉降物影响土壤动物的数量、种类、多样性以及生态功能,也可能通过改变土壤理化性质、凋落物输入量、土壤pH、植被群落等间接影响土壤动物。在自然生态系统中,模拟氮沉降通常降低了土壤动物的多度和多样性(Gan *et al.*,2015;周丹燕等,2015;马香丽等,2016),Eisenhauer等(2012)发现,氮沉降对土壤生物多样性产生了不利影响。而Zhu等(2015)在农田生态系统的施肥研究表明,多样性指数随有机质增加而增加,尤其在土壤有机质匮乏的紫色土中,因为有机物为土壤动物群落的生存和发展提供了丰富的有机质。同时,徐国良等(2004)在苗圃地的施氮实验表明施氮处理有利于土壤动物群落的发展,但也有阈值效应,其原因为氮处理增加了土壤有机氮和微生物量。可见,氮沉降对土壤动物的影响在不同时间和空间上存在较大差异。

为探索日益增加的大气氮沉降对森林土壤节肢动物的影响,课题组在氮沉降量较高的“华西雨屏区”建立了长期模拟氮沉降试验地,该地区氮沉降速率达95 kg·N·hm⁻²(Xu *et al.*,2013)。课题组前期在该样地对凋落物分解、土壤养分状况、根系生物量等方面开展了大量研究并发现了一些重要结果。本研究主要探究以下问题:(1)多年的模拟氮沉降将如何改变凋落物层和土壤层土壤节肢动物的群落结构?(2)凋落物层和土壤层中土壤节肢动物对模拟氮沉降响应的内在机理是什么?

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于四川省洪雅县柳江镇(29°42'N,103°14'E),该地区属于中亚热带湿润性气候,年平均气温14~16℃,1月平均气温6.6℃,7月平均气温25.7℃。20年(1980—2000年)平均年降水量1489.8 mm,年内降水分布不均匀,主要集中在6—8月,年平均相对空气湿度为82%,试验地是2000年退耕还林工程建成的苦竹林(*Pleioblastus amarus*),郁闭度为0.9,株数密度52000株·hm⁻²,平均竹高为5 m,平均胸径为2.3 cm,林褥厚度为1.2 cm,土壤为紫色土,土层厚度约80 cm。开始施氮土壤特征见表1(涂利华等,2011)。

1.2 试验设计

于2007年10月在苦竹林内选择具有代表性的林分作为氮沉降的试验样地。在样地中建立12个3 m×3 m试验样方,每个样方间设大于3 m宽的缓冲带,用NH₄NO₃进行模拟氮沉降处理,共设置4个氮沉降水平:对照(CK,0 g N·m⁻²·a⁻¹)、低氮(LN,5 g N·m⁻²·a⁻¹)、中氮(MN,15 g N·m⁻²·a⁻¹)和高氮(HN,30 g N·m⁻²·a⁻¹),每个水平设3个重复。将年施用量平均分成12等分,从2007年11月开始,每月下旬对各样方定量的施氮,具体方法是将各水平所需NH₄NO₃溶解至1 L水中,用喷雾器在该水平样方中均匀喷洒,对照仅喷洒等量的清水。

表 1 华西雨屏区苦竹人工林样地 2007 年土壤特征
Table 1 Soil properties (0–20 cm) of the *Pleioblastus amarus* plantation in rainy area of Western China in 2007

	土壤 pH	TOC (mg·g ⁻¹)	TN (mg·g ⁻¹)	有效磷 (mg·kg ⁻¹)	速效钾 (mg·kg ⁻¹)
2007	4.6±0.1	8.9±0.1	0.81±0.01	7.6±0.2	91.0±0.6

1.3 样品采集与处理

分别于 2014 年 7 月,2014 年 10 月,2015 年 1 月进行样品采集。取样时,在每个样方中随机选择 3 个采样点,分别采集凋落物层和土壤层的样品。凋落物层取样面积为 10 cm×10 cm,大型土壤动物采用手拣法收集,并直接对号投入装有 75%酒精的小瓶中保存,同时收集该取样点内的凋落叶;土层用直径为 50 mm 的土钻取 0~15 cm 土样。凋落物层和土壤层土壤动物样品迅速带回实验室,用改良的 Tullgren 漏斗分离装置进行土壤动物分离,分离周期为 48 h,每 8 h 观测 1 次(张荣祖,1998)。采用生物显微镜进行镜检计数和分类,参照文献鉴定到“目”单位水平(尹文英,1998)。

1.4 计算和统计方法

土壤动物数量按 3 个等级划分,即:优势类群为个体密度量占土壤动物总量的 10%以上的类群;常见类群为个体密度量占土壤动物总量的 1%~10%的类群;稀有类群为个体密度量占土壤动物总量不足 1%的类群(张荣祖,1998)。表征土壤动物群落特征采用 Shannon 多样性指数(H),Pielou 均匀度指数(J)以及 Menhinick 丰富度指数(D_{mn})进行分析,计算公式如下:

Shannon 指数:

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

Pielou 指数:

$$J = H / \ln S$$

Menhinick 指数:

$$D_{mn} = S / \sqrt{N}$$

式中, N 是样方单元中的总个体数, S 是单元样方中的物种数或丰富度, P_i 是第 i 种的相对多度,即 $P_i = N_i / N$ 。

使用单因素方差分析(one-way ANOVA)对土壤动物个体数、类群数和表征土壤动物群落特征的指数进行统计分析,采用 LSD 法进行多重比较。统计分析使用软件 SPSS 20.0(SPSS Inc., USA),显著水平为 $\alpha = 0.05$,最后在 SigmaPlot 12.5 软件中绘制图表。

2 结果与分析

2.1 土壤节肢动物群落特征对模拟氮沉降的响应
本试验共观察到土壤节肢动物 1852 只,根据《中国亚热带土壤动物》(尹文英,1992)分类后隶属于 3 门 7 纲 18 目(表 2、3)。

表 2 凋落物层土壤节肢动物群落类群与数量组成
Table 2 Soil arthropods community groups and quantity composition in litter layer

土壤节肢动物	N 沉降水平				合计
	CK	LN	MN	HN	
蜱螨目 Acarina	35+++	216+++	87+++	252+++	590+++
弹尾目 Collembola	40+++	161+++	70+++	184+++	455+++
鞘翅目 Coleoptera	4++	3+	7++	24++	38++
双翅目 Diptera	4++	1+	15++	5+	25++
膜翅目 Hymenoptera	3++	4+	-	13++	20++
蜘蛛目 Araneae	2++	4+	4++	8++	18++
等足目 Isopoda	-	8++	-	8++	16++
等翅目 Isoptera	1++	1+	5++	6++	13++
双尾目 Diplura	-	3+	1+	6++	10+
后孔寡毛目 Oligochaeta opisthopora	-	-	2++	6++	8+
半翅目 Hemiptera	4++	-	-	2+	6+
缨翅目 Thysanoptera	-	-	1+	1+	2+
单宫目 Monhysterida	-	1+	-	-	1+
革翅目 Dermaptera	-	-	-	1+	1+
啮目 Psocoptera	-	-	1+	-	1+
个体总数	93	403	193	516	1205
类群总数	8	10	10	13	15
蜱螨目占比(%)	37.6	53.6	45.1	48.8	49.0
弹尾目占比(%)	43.0	40.0	36.3	35.7	37.8
优势类群占比(%)	80.6	93.6	81.4	84.5	86.8

+++表示优势类群,++表示常见类群,+表示稀有类群,-表示不存在该类群。

表 3 土壤层土壤节肢动物群落类群与数量组成
Table 3 Soil arthropods community groups and quantity composition in soil layer

土壤节肢动物	N 沉降量				合计
	CK	LN	MN	HN	
蜱螨目 Acarina	162+++	125+++	114+++	42+++	443+++
弹尾目 Collembola	39+++	41+++	18+++	26+++	124+++
鞘翅目 Coleoptera	4++	4++	1+	2++	11++
膜翅目 Hymenoptera	1+	8++	-	-	9++
综合目 Symphyla	2+	7++	-	-	9++
双翅目 Diptera	3++	-	1+	3++	7++
等翅目 Isoptera	2+	1+	1+	2++	6+
蜘蛛目 Araneae	-	2++	2++	1++	5+
啮虫目 Psocoptera	4++	-	-	-	4+
原尾目 Protura	1+	-	-	-	1+
个体总数	218	188	137	76	619
类群总数	9	7	6	6	10
蜱螨目占比 (%)	74.3	66.5	83.2	55.3	71.6
弹尾目占比 (%)	17.9	21.8	13.2	34.2	20.0
优势类群占比 (%)	92.2	88.3	96.3	89.5	91.6

+++表示优势类群,++表示常见类群,+表示稀有类群,-表示不存在该类群。

凋落物层优势类群(占全捕量的 10% 以上)为蜱螨目和弹尾目,分别占 49.0% 和 37.8%; 常见类群(占全捕量的 1%~10%)为鞘翅目、双翅目、膜翅目、蜘蛛目、等足目和等翅目,分别占 3.2%、2.1%、1.7%、1.5%、1.3% 和 1.1%; 其余 7 类为稀有类群(占全捕量的 1% 以下)共占总捕量的 2.5% (表 2)。模拟氮沉降增加了凋落物层土壤节肢动物个体总数、类群总数,升高了优势类群个体数和占比,其中蜱螨目和弹尾目占比随着施氮浓度的升高分别表现为增大和减小。

土壤层优势类群(占全捕量的 10% 以上)为蜱螨目和弹尾目,分别占 71.6% 和 20.0%; 常见类群(占全捕量的 1%~10%)为鞘翅目、综合目、双翅目和等翅目,分别占 1.8%、1.5%、1.5% 和 1.1%; 其余 5

类为稀有类群(占全捕量的 1% 以下)共占总捕量的 2.6% (表 3)。土壤层对照处理中土壤节肢动物的个体总数、类群总数均大于其余 3 个处理,且随施氮浓度升高而减小;除 MN 外,模拟氮沉降降低了土壤层土壤节肢动物优势类群占比,其中,蜱螨目占比随施氮浓度梯度的升高而减小,而弹尾目占比则随施氮浓度的升高而升高。土壤层的 11 个类群中除蜱螨目、弹尾目、鞘翅目和等翅目 4 个类群在 4 个处理中均有分布外,其余类群在各个处理样地中分布不一。

Shannon 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Menhinick 丰富度指数显示,模拟氮沉降对凋落物层和土壤层土壤节肢动物群落结构无显著影响(表 4)。仅从数值看,模拟氮沉降对土壤节肢动物群落结构的影响整体表现为氮沉降减小了凋落物层土壤动物各表征指数,增大了土壤层土壤节肢动物各表征指数。

2.2 土壤节肢动物个体数和类群数对模拟氮沉降的响应

模拟氮沉降对凋落物层和土壤层土壤节肢动物的个体数及类群数影响情况如图 1、2 所示。随着

表 4 凋落物层和土壤层土壤节肢动物多样性指数
Table 4 Soil arthropods diversity index in litter layer and soil layer

层次	氮处理	Shannon 指数	Pielou 指数	Menhinick 指数
凋落物层	CK	1.33±0.09 A	0.71±0.03 B	1.23±0.25 A
	LN	1.02±0.07 A	0.50±0.03 A	0.69±0.11 A
	MN	1.11±0.23 A	0.62±0.07 AB	0.75±0.12 A
	HN	1.28±0.13 A	0.61±0.04 AB	0.66±0.10 A
土壤层	CK	0.64±0.14 A	0.46±0.09 A	0.48±0.03 A
	LN	0.88±0.13 A	0.58±0.11 A	0.64±0.10 A
	MN	0.66±0.18 A	0.51±0.12 A	0.73±0.19 A
	HN	0.98±0.05 A	0.74±0.07 A	0.90±0.12 A

同一列不同大写字母表示氮水平之间差异显著 ($P<0.05$)。

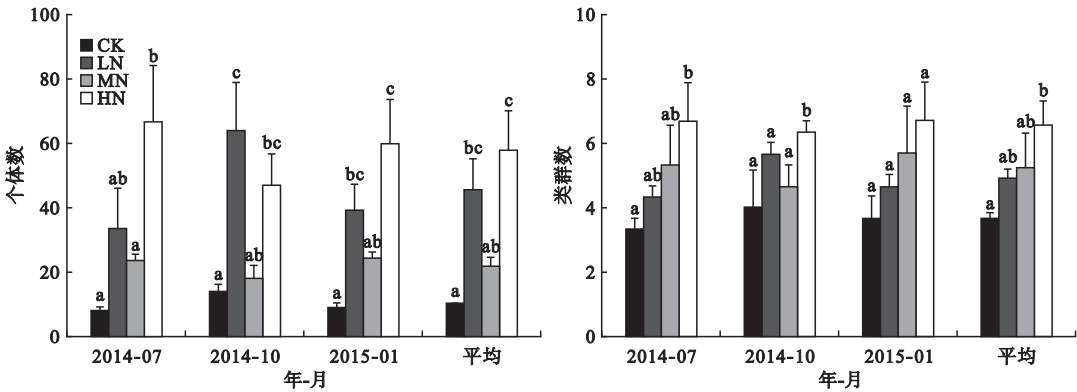


图 1 凋落物层土壤节肢动物个体数和类群数
Fig.1 Soil arthropods individuals and number of groups in litter layer
不同字母表示处理间差异显著 (one-way ANOVA 和 Fisher's LSD, $P<0.05$)。

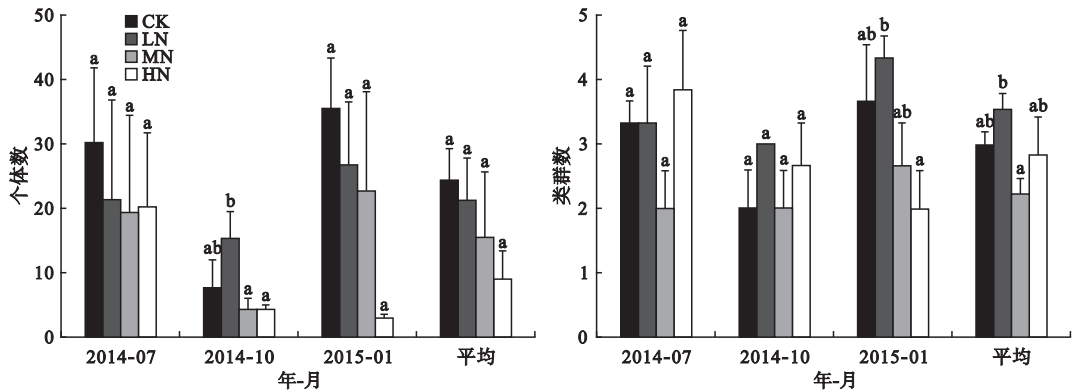


图2 土壤层土壤节肢动物个体数和类群数

Fig.2 Soil arthropods individual numbers and number of groups in soil layer

不同字母表示处理间差异显著 (one-way ANOVA 和 Fisher's LSD, $P < 0.05$)。

施氮浓度的升高,凋落物层土壤节肢动物个体数和类群数呈增加趋势(图1)。LN 和 HN 处理下凋落物层土壤节肢动物数量显著高于对照, MN 处理高于对照但未达显著水平。凋落物层土壤节肢动物类群数随着施氮浓度的升高呈递增趋势,且 HN 处理显著高于对照处理。模拟氮沉降对于凋落物层土壤动物个体数和类群数为促进作用。凋落物层土壤节肢动物个体数和类群数季节动态明显,在 2014 年 10 月时达最大值。

随着施氮浓度的升高,土壤层土壤节肢动物个体数逐渐减少,但未达显著水平;土壤层土壤节肢动物类群数则随施氮浓度的升高表现为先增大后减小,但与对照相比均未达显著水平。土壤层土壤节肢动物个体数和类群数季节动态明显,在 2014 年 10 月时达最小值(图2)。

3 讨论

3.1 华西雨屏区苦竹人工林土壤节肢动物组成和季节动态

华西雨屏区苦竹人工林生态系统中优势类群为蜱螨目和弹尾目,为亚热带常见优势类群(尹文英, 1992)。苦竹人工林生态系统土壤节肢动物组成简单,共 18 目,而哀牢山不同类型亚热带森林(苔藓矮林、常绿阔叶林、滇山杨林)土壤节肢动物调查中,仅凋落物层均有 20 目以上(杨赵等, 2011)。四川盆地紫色土总体上表现为有机质缺乏($< 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、氮素肥力不高($< 1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、磷的有效性偏低(黄兴成, 2016),加之研究地植被组成为单一树种苦竹,导致该试验地土壤节肢动物多样性低。

土壤含水量及土壤温度是影响土壤动物季节动

态的主导因素。本试验地位于“华西雨屏区”,降水量大且降水频率高,7 月雨水最多且温度最高,1 月雨水最少且温度最低(涂利华等, 2011)。本研究中秋凋落物层土壤节肢动物个体数、类群数在 7 月和 1 月相对较低,在 10 月相对较高,说明土壤温、湿度过高或过低都不利于土壤动物生存,这样的季节动态符合亚热带土壤动物的一般规律(尹文英, 1992)。土壤层土壤节肢动物的季节动态与凋落物层土壤节肢动物季节动态出现了逆向分布,说明当温度过高或过低时,土壤动物会向土壤层下移以躲避温度不适,因而土壤层土壤动物在夏秋季节个体数和类群数较高。

3.2 模拟氮沉降对苦竹人工林凋落物层和土壤层土壤节肢动物的影响

多样性指数由类群数的多少和各类群个体数量的分配状况共同决定。土壤节肢动物类群的变化主要是由于常见类群和稀有类群的变化,而土壤节肢动物数量的变化则主要取决于优势类群蜱螨目和弹尾目数量的消长。模拟氮沉降增大了凋落物层土壤节肢动物优势类群占比,即个体分配不均匀程度增大,但类群数的变化相对值较小,因此在凋落物层中表现为各多样性指数减小;而在土壤层中表现为增大。可见,凋落物层和土壤层土壤节肢动物群落结构的变化对因氮沉降产生的土壤环境变化有一定的指示意义。

食物来源是影响土壤节肢动物群落结构的重要因子之一。凋落物是凋落物层土壤节肢动物的主要食物来源和重要栖息地(Li *et al.*, 2015; 靳亚丽等, 2017),其数量的多寡和质量的优劣均会对土壤节肢动物群落结构产生重要影响(余广彬等, 2007)。

表 5 华西雨屏区苦竹人工林样地 2014 年各施氮水平下土壤特征和 Order 2 生物量 (Chen *et al.*, 2016, 2018)
Table 5 Soil properties (0–20 cm) and Order 2 biomass of the *Pleioblastus amarus* plantation under different nitrogen levels in 2014, rainy area of western China (Chen *et al.*, 2017, 2018)

处理	Order 2 生物量 (g · m ⁻²)	土壤 pH	Al ³⁺ (cmol · kg ⁻¹)	TOC (g · kg ⁻¹)	TN (g · kg ⁻¹)
CK	174.5±40.4 a	4.71±0.09 a	5.52±0.48 a	10.30±0.47 a	0.74±0.02 a
LN	142.7±24.8 a	4.62±0.08 a	5.46±0.45 a	10.67±0.24 a	0.75±0.03 a
MN	134.3±13.3 a	4.71±0.08 a	5.99±0.94 a	9.72±0.38 a	0.75±0.01 a
HN	98.3±34.6 a	4.40±0.09 b	10.35±0.52 b	10.75±0.74 a	0.80±0.04 a

同一列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

该样地在施氮 2~3 年时,凋落物量、凋落叶中的 N、P、K、Ca、Mg 元素含量及这几种养分元素的年输入量显著增加(肖银龙等,2013),同时,模拟氮沉降显著抑制了苦竹林凋落叶和枝的分解速率(涂利华,2011)。此外,施氮处理使大量的氮留存于凋落物层中,增加了凋落物层氮素有效性(Micks *et al.*, 2004),提高了凋落物质量(C/N)。例如,优势类群之一的弹尾目的个体数与凋落物厚度和地表凋落物层的 N 储量呈显著的正相关关系(杨赵等,2011;高敏等,2017)。凋落物量的增多和凋落物质量的提高为凋落物层土壤节肢动物和微生物提供了丰富的食物资源,而微生物又作为土壤节肢动物的重要食物来源之一进一步增加了土壤节肢动物的食物。在土壤层中土壤节肢动物的重要食物来源为细根,大部分土壤节肢动物能够直接从根系和根系分泌物中获得碳或通过取食根际微生物来促进生长(Fujii *et al.*, 2014)。然而,在该研究地同时期的试验结果表明,长期的模拟氮沉降试验减少了根系生物量,尤其是低级根(表 5),根系生物量的减少可能导致根系分泌物减少、根际微生物量减少,从而直接减少土壤动物的食物来源。此外,优势类群之一的弹尾目能从真菌中获得大部分食物(Gan *et al.*, 2014),但真菌对亚热带森林的氮肥比较敏感,氮沉积增加会导致根部和丛枝菌根真菌分配的营养减少(Hasselquist *et al.*, 2016),从而减少真菌生物量,进而减少弹尾目和其他土壤动物的食物来源。

除食物来源外,生境微环境是影响土壤节肢动物的另一个重要因子。凋落物层的增厚能为凋落物层土壤节肢动物提供更稳定的温、湿度环境,并且能缓解由于降雨作用对土壤节肢动物生存环境的直接冲刷,对土壤节肢动物起到一定的保护作用。但在土壤层,模拟氮沉降显著降低了 0~20 cm 土壤层土壤 pH,并使交换性 Al³⁺ 含量提高 70%(表 5)。土壤酸化不利于土壤动物的生存,同时 Al³⁺ 浓度升高对土壤动物有一定的毒害作用,且这种影响在瘠薄的

地方会表现得更为明显(Nijssen *et al.*, 2017)。这与 Chen 等(2015)在草地生态系统中的研究结果一致,即氮沉降在一定程度上增加了地上和地下生物量,但土壤酸化导致的负面影响超过了地下碳分配对地下群落产生的积极影响,最终表现为对土壤层土壤节肢动物的抑制作用。总之,模拟氮沉降通过增加凋落物层凋落物量和凋落物养分含量,为凋落物层土壤动物提供更丰富的食物和更适宜的生存环境,最终使凋落物层土壤动物个体数和类群数增加;而土壤层土壤节肢动物食物来源的减少和土壤理化性质的不适宜是导致土壤层土壤节肢动物减少的主要原因。

4 结 论

模拟氮沉降通过改变土壤节肢动物的食物来源和其生存的微环境对凋落物层和土壤层土壤节肢动物产生影响。本试验研究对象为南方广泛分布的竹林,且模拟氮沉降试验已进行了 6.5 年,在当前严峻大气氮沉降形式及该地区高氮沉降背景下,进行土壤节肢动物的调查和观测具有重要意义。通过单因素试验探索不同梯度施氮浓度对凋落物层和土壤层土壤节肢动物群落特征的影响,可为当前氮沉降这一热门课题下多种生态系统的研究提供数据支撑和理论补充。该苦竹林土壤养分含量不高,土壤节肢动物组成简单,且模拟氮沉降对土壤层土壤节肢动物表现为抑制作用。因此,在经营管理时,应在尽量减少人为干扰的基础上适当增施复合肥或有机肥,以提高该生态系统的生产力。

参考文献

崔 洋, 汪思龙, 于小军, 等. 2012. 森林土壤动物对凋落物早期分解及养分释放的影响. 生态学杂志, **31**(11): 2709–2715.
高 敏, 马香丽, 杨晋宇, 等. 2017. 冀北山地华北落叶松人工林与白桦混交改造模式对土壤动物群落的影响. 林业科学, **53**(1): 70–81.

- 黄兴成. 2016. 四川盆地紫色土养分肥力现状及炭基调理剂培肥效应研究(硕士学位论文). 成都: 西南大学.
- 靳亚丽, 李必成, 耿 龙, 等. 2017. 上海大金山岛不同植被类型下土壤动物群落多样性. 生物多样性, **25**(3): 304–311.
- 马香丽, 杨晋宇, 黄选瑞, 等. 2016. 塞罕坝落叶松纯林和混交林凋落物层中小型土壤动物群落特征. 四川农业大学学报, **34**(2): 147–152.
- 邵元虎, 张卫信, 刘胜杰, 等. 2015. 土壤动物多样性及其生态功能. 生态学报, **35**(20): 6614–6625.
- 涂利华. 2011. 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹人工林生态系统碳循环过程和特征的影响(博士学位论文). 成都: 四川农业大学.
- 涂利华, 胡庭兴, 张 健, 等. 2011. 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林土壤有机碳和养分的影响. 植物生态学报, **35**(2): 125–136.
- 肖银龙, 涂利华, 胡庭兴, 等. 2013. 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林凋落物基质质量的影响. 生态学报, **33**(20): 6587–6594.
- 徐国良, 莫江明, 周国逸, 等. 2004. 模拟氮沉降对苗圃地土壤动物群落的影响. 生态环境学报, **13**(4): 487–492.
- 杨万勤. 2006. 森林土壤生态学. 成都: 四川科学技术出版社.
- 杨 赵, 杨效东. 2011. 哀牢山不同类型亚热带森林地表凋落物及土壤节肢动物群落特征. 应用生态学报, **22**(11): 3011–3020.
- 尹文英. 1992. 中国亚热带土壤动物. 北京: 科学出版社.
- 尹文英. 1998. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社.
- 余广彬, 杨效东. 2007. 不同演替阶段热带森林地表凋落物和土壤节肢动物群落特征. 生物多样性, **15**(2): 188–198.
- 张荣祖. 1998. 土壤动物研究方法手册. 北京: 中国林业出版社.
- 周丹燕, 卜丹蓉, 葛之葳, 等. 2015. 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, **34**(9): 2553–2560.
- 朱永恒, 李克中, 陆 林. 2012. 根际土壤动物及其对植物生长的影响. 生态学杂志, **31**(10): 2688–2693.
- Chen D, Lan Z, Hu S, *et al.* 2015. Effects of nitrogen enrichment on belowground communities in grassland: Relative role of soil nitrogen availability vs. soil acidification. *Soil Biology & Biochemistry*, **89**: 99–108.
- Chen G, Tu L, Peng Y, *et al.* 2017. Effect of nitrogen additions on root morphology and chemistry in a subtropical bamboo forest. *Plant and Soil*, **412**: 441–451.
- Chen G, Tu L, Chen G, *et al.* 2018. Effect of six years of nitrogen additions on soil chemistry in a subtropical *Pleioblastus amarus* forest, Southwest China. *Journal of Forestry Research*, **29**: 1657–1664.
- Eisenhauer N, Cesarz S, Koller R, *et al.* 2012. Global change belowground: Impacts of elevated CO₂, nitrogen, and summer drought on soil food webs and biodiversity. *Global Change Biology*, **18**: 435–447.
- Fujii S, Saitoh S, Takeda H. 2014. Effects of rhizospheres on the community composition of Collembola in a temperate forest. *Applied Soil Ecology*, **83**: 109–115.
- Galloway JN, Dentener FJ, Capone DG, *et al.* 2004. Nitrogen cycles: Past, present, and future. *Biogeochemistry*, **70**: 153–226.
- Gan H, Zak DR, Hunter MD. 2014. Trophic stability of soil oribatid mites in the face of environmental change. *Soil Biology & Biochemistry*, **68**: 71–77.
- Hasselquist NJ, Metcalfe DB, Marshall JD, *et al.* 2016. Seasonality and nitrogen supply modify carbon partitioning in understory vegetation of a boreal coniferous forest. *Ecology*, **97**: 671–683.
- Li X, Yin X, Wang Z, *et al.* 2015. Litter mass loss and nutrient release influenced by soil fauna of *Betula ermanii* forest floor of the Changbai Mountains, China. *Applied Soil Ecology*, **95**: 15–22.
- Micks P, Downs MR, Magill AH, *et al.* 2004. Decomposing litter as a sink for ¹⁵N-enriched additions to an oak forest and a red pine plantation. *Forest Ecology and Management*, **196**: 71–87.
- Nijssen ME, WallisDeVries MF, Siepel H. 2017. Pathways for the effects of increased nitrogen deposition on fauna. *Biological Conservation*, **212**: 423–431.
- Vet R, Artz RS, Carou S, *et al.* 2014. A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus. *Atmospheric Environment*, **93**: 3–100.
- Xu Z, Tu L, Hu T, *et al.* 2013. Implications of greater than average increases in nitrogen deposition on the western edge of the Szechwan Basin, China. *Environmental Pollution*, **177**: 201–202.
- Zhu X, Zhu B. 2015. Diversity and abundance of soil fauna as influenced by long-term fertilization in cropland of purple soil, China. *Soil & Tillage Research*, **146**: 39–46.

作者简介 李曾燕,女,1995年生,硕士研究生,主要从事森林土壤研究。E-mail: 1594806913@qq.com
责任编辑 魏中青