

# 土壤动物对模拟 N 沉降的响应

徐国良<sup>1,2</sup>, 莫江明<sup>1\*</sup>, Brown Sandra<sup>3</sup>, 李德军<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院华南植物园鼎湖山森林生态系统定位研究站, 广东肇庆鼎湖 526070; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;  
3. Winrock International, 1621 N. Kent St., Suite 1200, Arlington, VA 22209, USA)

**摘要:** 通过人工喷施  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  而建立一个模拟 N 沉降梯度系列的方法, 研究了苗圃试验样地土壤动物群落对 N 沉降增加的响应。实验分为 5 个处理: CK 对照, T1, T2, T3 和 T4, 分别接受 0, 5, 10, 15 和 30  $\text{g N}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  的处理。经 6 个月的施氮处理后, 土壤动物个体总数随着 N 沉降处理强度的变化, 在水平尺度和垂直尺度上均产生了相应的变化。在水平分布上, 由于 F1 层 (0~5cm) 受到 N 沉降处理最直接的影响, 其动物个体数的变化趋势较明显, 表现为  $T2 > T1 > CK > T3 > T4$ , 其中前两者显著高于其它处理 ( $P < 0.05$ ), 但 F2 层 (5~10cm) 和 F3 层 (10~15cm) 的情况变化比较复杂, 趋势不明显。在垂直分布上, T2 处理下多数土壤动物集中于 F1 层, 土层越深, 土壤动物愈少, 但在最大浓度 T4 处理下, 则完全相反, 由 F1 层向 F3 层逐渐增多。总的来说, 土壤动物在低 N 沉降下趋向表层, 而在高氮沉降下则趋向深层分布。与个体总数的分布格局相类似, 土壤各层动物类群数总体上呈现明显的单峰变化格局, T2 处理时类群最丰富, 并显著高于其它各处理 ( $P < 0.05$ ); 在垂直分布上, 也表现出先向表层集中后向土壤深层发展的趋势, T2 处理为其拐点。甲螨随 N 沉降强度加大变化的规律性很强, 它也有个先发展后受遏制的过程, T2 处理时达到峰值。上述研究结果证明, N 沉降对土壤动物群落的影响存在阈值效应。

**关键词:** N 沉降; 土壤动物; 响应; 南亚热带; 中国

## Effects of simulated N deposition on soil fauna

XU Guo-Liang<sup>1,2</sup>, MO Jiang-Ming<sup>1\*</sup>, Brown Sandra<sup>3</sup>, LI De-Jun<sup>1,2</sup> (1. Dinghushan Forest Ecosystem Research Station, South China Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Dinghu, Zhaoqing, Guangdong, 526070 2. the Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039 3. Winrock International, 1621 N. Kent St., Suite 1200, Arlington, VA 22209, USA). Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(10): 2245~2251

**Abstract** Nitrogen deposition is a serious global problem and will likely have a significant effect on ecosystem structure and function. The responses of soil fauna to a simulated N deposition were studied in a seedling site of subtropical China. Dissolved  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  was sprayed twice per month to the soil since January, 2003, equivalent to 0 (CK), 5 (T1), 10 (T2), 15 (T3) and 30 (T4)  $\text{g N}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ . After six months of the experiment, the total number of individual soil animals varied depending on the N treatment level and soil layer. The number of soil animals exhibited a significant nonlinear relationship with N treatment levels in the upper soil layer (layer I: 0~5cm). However, there was no such significant relationship in other soil layers (layer II: 5~10cm and layer III: 10~15cm). The highest number of individuals occurred in the upper soil layer (layer I: 0~5cm) under low N treatment level, however, the highest number occurred in the deeper soil layer (layer III: 10~15cm) under high N treatment level. The distribution pattern of the total number of soil fauna groups was similar to that of total individual

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (30270283); 中国科学院知识创新工程领域前沿资助项目; 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目 (KSCX2-SW-120); 中国科学院华南植物研究所所长基金资助项目; 广东省自然科学基金项目资助 (021524)

**收稿日期:** 2003-12-21; **修订日期:** 2004-06-30

**作者简介:** 徐国良 (1975~), 男, 江西德兴人, 博士生, 主要从事森林生态系统土壤动物结构、功能及与全球变化关系研究。E-mail: xugl75@scbg.ac.cn

\* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: mojm@scib.ac.cn

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 30270283); Field Frontiers Project of CAS Knowledge Innovation Program; Innovation Priority of CAS (No. KSCX2-SW-120); Director Foundation of South China Institute of Botany, CAS; Provincial Natural Science Foundation of Guangdong (No. 021524)

**Received date:** 2003-12-21; **Accepted date:** 2004-06-30

**Biography:** XU Guo-Liang, Ph.D. candidate, mainly engaged in the composition and function of soil fauna and its relations with global changes in forest ecosystems. E-mail: xugl75@scbg.ac.cn

number. Results from this study also suggested that soil oribatid is a good indicator of N deposition.

**Key words:** N deposition; soil fauna; effect; subtropics; China

文章编号: 1000-0933(2004)10-2245-07 中图分类号: Q 958.15 文献标识码: A

N 沉降是人类面临的重大环境问题之一。据估计,全球每年沉降到各类生物群系的活性氮达  $43.47 \text{Tg/a}^{[1]}$ , 沉降到海洋表面的活性氮达  $27 \text{Tg/a}^{[2]}$ 。欧洲和北美的部分地区,大气氮沉降的量比工业化前增加了 20 倍以上<sup>[3]</sup>。随着经济的发展,我国也出现了氮沉降水平很高的地区,1994 年广东全省降雨 pH 年均值为 4.86,较 1993 年降低了 0.07 个 pH 单位,其中  $\text{NH}_4^+$  浓度比美国酸雨区高出 5~10 倍<sup>[4]</sup>,广东鼎湖山地区降雨中的氮沉降达  $38.4 \text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{[5]}$ 。总体而言,我国已成为全球三大氮沉降集中区(欧洲、美国和中国)之一<sup>[1,6~8]</sup>。氮沉降的目前状况和未来的发展趋势已引起了国际社会的高度关注。

日益增加的大气氮沉降对各类森林生态系统的结构和功能造成了不同程度的影响<sup>[9]</sup>。国外一些生态学家认为氮素沉降是森林衰退的主要原因之一<sup>[10]</sup>。N 沉降量的绝大部分最终将进入土壤。土壤动物是土壤生物中一个庞大的群体,生物多样性极其显著,数量惊人,而且以其显著的生态系统功能被誉为“土壤生态系统的工程师”<sup>[11,12]</sup>。因此,为全面评价 N 沉降所造成的环境影响,急需开展 N 沉降下的土壤动物响应研究。

至今,国内外学者已对 N 沉降于植物和微生物的影响等方面开展了一些研究<sup>[13~16]</sup>,但在土壤动物群落方面,除了著名的 NITREX 项目<sup>[17]</sup>和 Huhta<sup>[18]</sup>在开展相关研究时曾提出存在这种影响外,国内外尚未有专门的研究。由此,作者在鼎湖山通过人工模拟的方法开展了 N 沉降下土壤动物的响应研究。

## 1 样地背景与研究方法

### 1.1 样地背景

鼎湖山自然保护区位于广东省肇庆境内,距广州市 86km,位于  $23^\circ 08' \text{N}$ ,  $112^\circ 35' \text{E}$ ,地处南亚热带南缘,总面积  $1155 \text{hm}^2$ ,为大起伏山地。气候属亚热带季风气候,年太阳总辐射约  $4655 \text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,年平均日照时数 1433h,年平均气温  $20.9^\circ \text{C}$ 。该区雨量充沛,年降雨量达 1900mm,但分布不均,年蒸发量 1115mm,年均相对湿度约 81.5%,每年还受到数次热带气旋或台风的影响。鼎湖山主要有砖红壤性红壤和黄壤两大类,土壤酸度较大,pH 值约 4.2~5.0。森林植物种类丰富,形成了 16 个植被类型<sup>[19]</sup>。

近年由于经济的高速发展等原因,华南地区成为我国酸雨出现的高频区和严重地区,自 1985 至 1990 年,广东省降水 pH 值逐年下降,同时酸雨频率逐年上升<sup>[19,20]</sup>。鼎湖山所在的肇庆地区又是广东省酸雨污染较为严重的地区之一,1991~1997 年间降水 pH 的年均值均低于全省平均水平<sup>[19]</sup>。据测定,由降水带入森林的总 N 量为  $38.4 \text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,居于全国的高水平<sup>[5]</sup>。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 样地设置** 2002 年 10 月 25 日,建立苗圃试验样地 ( $22 \text{m} \times 23 \text{m}$ )。样地所有土壤经过充分混匀。实验分 5 个处理组(各为  $3.5 \text{m} \times 23 \text{m}$ ),分别为 CK(对照,未施 N)、T1 ( $5 \text{gN}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ )、T2 ( $10 \text{gN}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ )、T3 ( $15 \text{gN}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ) 和 T4 ( $30 \text{gN}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ),每个处理组平均分成 3 块重复小样地。不同处理组之间留有足够深的壕沟(宽 0.75m,深 0.5m),防止相互之间造成干扰。从 2003 年 1 月开始,每月月中和月底分 2 次喷施  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 。由于样地同时进行植物幼苗生长等试验,每月锄草 1 次。除了施 N 浓度外,其它处理措施都保持一致。

**1.2.2 采样** 经过 6 个月的施 N 处理后,2003 年 7 月 18 日至 22 日,在每一个重复小样地内按对角线法选取 5 个点,在每一点上用直径 6cm 的采土器分 F1 层(0~5cm)、F2 层(5~10cm)、F3 层(10~15cm)3 层取样,将这 5 个采样点分土层混和成 3 个样。这样,每一个重复小样地内共得 3 个样,每个处理下的各个样品都有 3 个重复。

同期进行了自然林调查,包括季风常绿阔叶林、针阔混交林和马尾松林 3 个样地。在每个样地上随机选取 5 个点。在每个点上用直径 6cm 的采土器分 F1 层(0~5cm)、F2 层(5~10cm)和 F3 层(10~15cm)3 层取样,取 5 次,将这一点上同一土层混和成一个样品。这样,每个点可得 3 个样品。

**1.2.3 鉴定、分析方法** 所有标本除螨类外,其余各类都鉴定至科(总科)<sup>[21,22]</sup>。采用 ANOVA 方法分析氮处理对土壤动物的影响;处理间的差异显著性利用 SPSS 软件以 Duncan 多重检验实现。

## 2 结果与分析

### 2.1 试验样地土壤动物群落特征

试验样地经人工形成,它与自然状况会有一定差别。现根据对照样地(CK)的调查结果简述样地土壤动物的群落特征,以对本研究样地的状况有初步了解,也是进行 N 沉降处理效应比较研究的基础。

**2.1.1 群落组成特征** 据统计,共采集土壤动物 16 类,111 头。其中螨目的前气门亚目占 51.35%,甲螨亚目 14.41%,等节跳虫科 14.41%,它们属于优势类群(超过全捕量的 10%);球角跳虫科 7.21%,露尾甲科幼虫 1.80%,隐翅甲科幼虫 1.80%,它们为常见类群(占全捕量的比率在 1%~10%);其它 10 类为稀有类群(占全捕量比率小于 1%)。同期进行的自然林(季风常绿

阔叶林、针阔混交林和马尾松林)调查结果(平均)为(分至大类): 螨类(66.27%) > 弹尾目(20.96%) > 综合纲(2.17%) > 原尾目(1.92%) > 鞘翅目幼虫(1.57%) > 虫蜀虫戈纲(1.56%) > 鞘翅目成虫(1.32%); 与之比较, 本研究样地结果为: 螨类(65.77%) > 弹尾目(23.42%) > 鞘翅目幼虫(3.60%) > 虫齿目(2.70%) > 蜘蛛目(1.80%)。可见, 在优势类群的组成及优势程度(占全捕量的比率)上两者几乎一致; 但是, 本样地土壤动物的类群丰富度远不如自然林, 而且在常见类群上, 除鞘翅目昆虫外(很容易理解, 它与鞘翅目昆虫的活动性有关), 两者区别较大。由于本研究样地建立在 3 种自然林环绕的一块平地上, 因此, 两者的土壤动物群落有一定的相似性, 但因为其由人工形成, 受到较大人为干扰, 两者的差异性较明显。

2.1.2 垂直分布特征 表 1 可见, 土壤动物的个体数和类群数均以 F1 层最低, F2 层最高, 而且 F1 层土壤动物的个体数和类群数与 F2、F3 层之间存在显著差异( $P < 0.05$ )。这与一般自然条件下的土壤动物的表聚特征相异。它是由每月一次的锄草活动造成的: 经过多次搅动, 表层土壤动物群落受到了影响。不过, 由于各处理(包括对照组)均进行一致的锄草活动, 通过不同处理之间的比较, 可实现本项试验的研究目的。

2.2 土壤动物对 N 沉降处理的响应

2.2.1 个体数量

(1)垂直分布 在 CK 处理下(图 1), 土壤 F2 层的动物个体数最多; 但在 T2 处理下, 多数土壤动物集中于 F1 层, 同时土层越深, 土壤动物愈少; 当接受最大浓度 T4 处理时, 土壤各层动物个体数的分布则完全与 T2 处理相反, 由 F1 层向 F3 层逐渐增多, 最深的 F3 层具有最大的土壤动物个体数, 即在高浓度 N 处理下, 土壤动物似乎向深层趋避。同时, 在 T2 处理下, 土壤各层动物个体数分布最均匀。因此, 由 CK 至 T4 处理, 土壤动物个体数的垂直分布呈现了两种发展趋势。

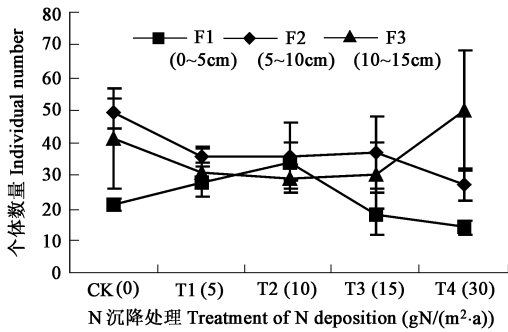


图 1 N 沉降对土壤动物个体数量垂直分布的影响

Fig 1 The effects of N deposition on vertical distribution of soil fauna individual number

表 1 CK 样地土壤动物群落特征  
Table 1 The characteristics of soil fauna community in CK treatment

项目 Item	土层 Soil layer(cm)		
	F1(0~ 5)	F2(5~ 10)	F3(10~ 15)
类群数 Number of groups	2.33(0.33)a	5.33(0.33)b	4.67(0.33)b
个体数 Individual number	7(0.58)a	16.33(1.45)b	13.67(4.67)b

\* 所给数值为各重复的平均值; 括号内为标准差; 同一行中不同字母者表示差异显著 ( $P < 0.05$ , Duncan 多重检验) Mean value is given; S E in the parenthesis; and values with different letters in the same row mean significant difference among the N treatments ( $P < 0.05$ , Duncan's multiple range test)

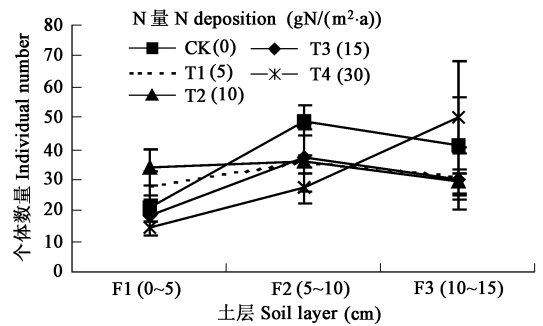


图 2 N 沉降对土壤动物个体数量水平分布的影响

Fig 2 The effects of N deposition on the horizontal distribution of soil fauna individual number

(2)水平分布 总的来说, 土壤动物的总个体数随处理效应的加大而减少(表 2)。另外, 由于 N 素首先当其冲降落在土壤 F1 层, 因此 F1 层受到 N 沉降最直接的影响。在不同 N 沉降处理下, 可以看到(图 2)F1 层土壤动物个体数量的排序为: T2 > T1 > CK > T3 > T4, 即以 CK 为参照, 由 T1 至 T2 处理, 土壤动物的个体数量逐渐增加; 但到 T3、T4 处理时, 土壤动物的个体数量递减, 显示了两种相反的变化趋势。F2 层和 F3 层的情况变化比较复杂, 趋势不明显。

2.2.2 类群数

(1)垂直分布 与对个体数的影响相似, 从 CK 至 T4 处理, 土壤各层次动物类群数的相对变化表现出先向表层集中后向土壤深层发展的趋势, T2 处理为其拐点(图 3)。CK 样地土壤 F2 层动物类群数最多, 而当处理效应增加到 T2 时, F1 层土壤动物的类群数明显升高, 但在 T4 处理下, 土壤动物类群数呈现完全的逆层分布。虽然 T2 处理时各土层动物类群的均匀程度稍逊于 T1 处理, 但在 T2 处理下各层动物类群数都明显处于最大值。

(2)水平分布 在不同浓度 N 沉降处理下, 土壤动物类群数总体上呈现明显的单峰变化的格局, T2 处理样地具有最丰富的动物类群, 而且其显著高于其它各处理( $P < 0.05$ ) (表 2)。同时可清楚地看出(图 4), 在各个土壤层都具有这种趋势, 显示

T2 处理样地的生境条件较为适宜。可见,不同程度的 N 沉降处理产生了不同的效应,而且并非简单的线性关系。

表 2 N 沉降处理梯度对土壤动物群落的影响

Table 2 The effects of N deposition on soil fauna community

土壤动物 Soil fauna	N 沉降量 N deposition ( $\text{gN}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ )				
	CK	T1	T2	T3	T4
等节跳虫科 Iso tomidae	5.33(3.84) a	3.33(1.45) a	3.33(1.86) a	5.67(1.86) a	4.67(1.67) a
球角跳虫科 Hypogastruridae	2.67(0.33) a	1.00 0.00 b	1.67(0.88) b	1.00(1.00) b	1.33(0.33) b
长角跳虫科 Entomobryidae	0.33(0.33) a	0.00 0.00 a	0.00 0.00 a	0.33(0.33) a	0.33(0.33) a
驼跳虫科 Cyphoderidae	0.00 0.00 c	0.00 0.00 c	1.67(0.33) a	0.00 0.00 c	0.33(0.33) b
古虫元科 Eosentomidae	0.33(0.33) a	0.33(0.33) a	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b
短虫蜀虫戈科 Brachypauropodidae	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b	0.33(0.33) a	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b
康虫八科 Campodeidae	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b	0.67(0.33) a	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b
铁虫八科 Japygidae	0.33(0.33) b	0.00 0.00 b	0.67(0.33) b	0.33(0.33) b	2.00(1.00) a
么蛭科 Scolopendrellidae	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b	0.33(0.33) a	0.33(0.33) a	0.00 0.00 b
甲螨亚目 Oribatida	5.33(2.40) a	4.33(0.67) ab	3.67(0.67) b	1.00(0.58) c	1.67(0.33) c
前气门亚目 Prostigmata	19.00(2.08) a	14.00(1.15) b	10.33(0.88) c	13.67(1.33) b	13.00(1.53) b
中气门亚目 Mesostigmata	0.00 0.00 b	0.67(0.67) a	0.33(0.33) ab	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b
逍遥蛛科 Philodromidae	0.00 0.00 b	0.67(0.67) a	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b
幽灵蛛科 Pholcidae	0.33(0.33) a	0.00 0.00 a	0.33(0.33) a	0.00 0.00 a	0.33(0.33) a
弱蛛科 Leptonetidae	0.33(0.33) a	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b
线蚓科 Enchytraeidae	0.00 0.00 a	0.00 0.00 a	0.33(0.33) a	0.33(0.33) a	0.33(0.33) a
隐翅甲科幼 larvae of Staphylinidae	0.67(0.33) b	1.33(0.88) a	0.67(0.33) b	0.33(0.33) b	0.67(0.33) b
隐翅甲科 Staphylinidae	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b	0.33(0.33) a	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b
葬甲科 Silphidae	0.33(0.33) ab	0.67(0.33) a	0.67(0.33) a	0.00 0.00 b	0.33(0.33) ab
露尾甲科幼 larvae of Nitidulidae	0.67(0.67) a	1.33(0.33) a	1.00(1.00) a	1.33(0.88) a	1.33(0.33) a
苔甲科幼 larvae of Scydmaenidae	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b	0.67(0.33) a	0.33(0.33) ab	0.00 0.00 b
蚁科 Formicidae	0.00 0.00 c	0.00 0.00 c	1.67(1.67) b	2.00(0.58) ab	3.00(1.15) a
虱虫齿科 Liposcelididae	0.33(0.33) b	2.33(1.20) a	0.33(0.33) b	0.33(0.33) b	0.00 0.00 b
沼虫齿科 Elipsocidae	0.33(0.33) ab	0.67(0.67) a	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b	0.33(0.33) ab
球虫齿科 Sphaeropsocidae	0.33(0.33) ab	0.67(0.67) a	0.33(0.33) ab	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b
管蓟马科 Phlaeothripidae	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b	0.33(0.33) a	0.33(0.33) a	0.00 0.00 b
蓟马科 Thripidae	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b	1.33(0.88) a	0.00 0.00 b	0.33(0.33) b
纹蓟马科 Aeolothripidae	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b	0.67(0.33) a	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b
长足虻科 Dolichopodidae	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b	0.33(0.33) a	0.00 0.00 b
摇蚊科 Chironomidae	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b	0.33(0.33) a	0.00 0.00 b
叶蝉总科 Cicadellidae	0.33(0.33) a	0.33(0.33) a	0.33(0.33) a	0.33(0.33) a	0.00 0.00 a
蚜总科 Aphididae	0.00 0.00 b	0.00 0.00 b	1.00(1.00) a	0.00 0.00 b	0.33(0.33) b
个体总数 Total number	37.00(6.11) a	31.67(2.40) ab	33.00(4.16) ab	28.33(5.55) b	30.33(5.24) b
类群总数 Total groups	8.33(0.67) b	9.00(0.58) b	13.67(0.88) a	8.33(1.76) b	8.00 0.00 b

\* 所给数值为各重复的平均值; 括号内为标准差; 同一行中标不同字母者表示差异显著 ( $P < 0.05$ , Duncan 多重检验) Mean value is given; S.E. in the parenthesis; and values with different letters in the same row mean significant difference among the N treatments ( $P < 0.05$ , Duncan's multiple range test)

2.2.3 土壤甲螨 随着 N 沉降处理浓度的加大, 土壤甲螨的变化与整个动物群落的变化趋势相同(图 5)。以 F1 层为例, 由 CK 至 T2, 土壤甲螨的比率渐升, T2 处理时达最高值; 当处理效应增加到 T3、T4 时 F1 层已经采集不到甲螨了。各个土层的甲螨在不同处理下的变化趋势都呈单峰曲线: F1 层的最大值在 T2 处理; 而受土壤缓冲作用的影响, 在土壤 F2 层迟滞了一个处理梯度, 其最大值在 T3 处理; 由于没有进一步的 T5 处理, 因此 F3 层的曲线只有一个上扬的过程, 否则 T4 可能是其最大值处。可见, 土壤甲螨随环境质量而变化的规律性很强。

### 3 讨论

#### 3.1 土壤动物学研究与人工模拟实验

经过 20 多年的研究, 国内土壤动物学界已在大尺度水平上

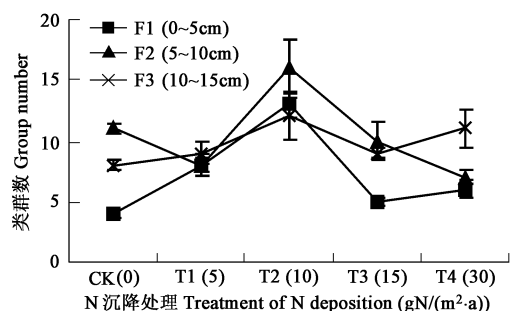


图 3 N 沉降对土壤动物类群数垂直分布的影响

Fig. 3 The effects of N deposition on vertical distribution of soil fauna group

对土壤动物的诸多生态学问题有了比较全面的了解,但是小尺度水平上的工作却比较贫乏。当前环境变化是全球面临的最严重的问题之一,土壤动物由于其重要的生态功能及对环境变化的敏感性而成为国际研究热点之一。1996年 DIVERSITAS 操作计划和 2001 年的 BOY 计划将土壤动物有关研究列为迫切需要解决的十大项目和核心项目之一<sup>[23]</sup>。因此,对于土壤动物在全球环境变化下的响应进行一些小尺度的细致的工作非常必要。国外早在 10 多年前就开始进行室内人工控制环境下的土壤动物学研究,在野外试验上, Huh ta<sup>[18]</sup>, Vilkam aa 和 Huh ta<sup>[24]</sup> 研究了施肥对土壤动物的影响。20 世纪 90 年代 Runion 等<sup>[25]</sup> 利用人工生态环境模拟的 FACE (Free-Air CO<sub>2</sub> Environment) 系统研究土壤线虫对大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高的响应。国内王振中等<sup>[26,27]</sup> 对土壤动物在重金属和农药污染下的反应; 梁文举等<sup>[28]</sup> 最近通过建立稻田 FACE 系统对 CO<sub>2</sub> 浓度升高对线虫的影响等方面也开展了或正在开展较为深入的研究。本研究通过模拟自然 N 沉降过程,人为建立一个沉降强度梯度系列,拟在小尺度水平上研究 N 沉降对土壤动物的影响。可以肯定,人为试验系统与自然状态存在偏差,例如本研究样地土壤动物群落的丰富度及常见类群的构成与自然条件下的调查有明显差异;但是,人工系统能最大程度地控制环境的变异性,对于某一研究主题而言,能得到精确的结论,尤其对于生境异质性相当大而且本身极其复杂的土壤动物群落,其意义更为显著。

### 3.2 N 沉降对土壤动物群落影响的生物学基础

自然生态系统中的生物系列保持着一种平衡,额外 N 素的输入必然影响这种平衡,因此生物群体会对 N 沉降产生一定的反应,只是不同水平的 N 沉降将产生不同的效应,而非简单的正向或负向关系。当植物生长受 N 限制时,一定的 N 沉降量可以增加生产力;当生态系统处于 N 饱和状态时,N 沉降就会减少生产力。在美国哈佛森林的长期生态系统研究(LTER)中,从 1988 年开始对针叶林和落叶阔叶林开展模拟 N 沉降实验。经过 9a 的施 N 处理,它们的林木生物量比对照都有不同幅度的增加<sup>[13]</sup>。但 9a 以后,松林林木生物量随着 N 输入量的增加而减少,高 N 处理样方林木生物量与对照比显著减少<sup>[13]</sup>。在欧洲的 NITREX 研究中对 N 沉降量高的森林进行去 N 处理,其 NPP 增长了 50%<sup>[17]</sup>。N 沉降会引起土壤酸化,当酸化达一定程度时,会对土壤微生物造成危害<sup>[29]</sup>。试验表明,土壤酸化使糖槭的菌根数量显著地减少<sup>[30]</sup>;在瑞典一个模拟 N 沉降的实验中,3~4a 内每年施用硝酸铵 60 和 180kg/(hm<sup>2</sup>·a),结果几乎造成所有菌根子实体停止生长<sup>[16]</sup>。植被系统是土壤动物分解基质和栖境的创造者,土壤微生物是其重要食源,两者的变化必然对土壤动物造成影响。本研究的结果证明了土壤动物在不同 N 沉降水平下会产生一系列的响应。

### 3.3 土壤动物群落对 N 沉降的响应

N 素沉降到土壤中,由于土壤的缓冲作用,F1 层具有最直接的处理效果,随着土层的加深,它的效应逐渐减弱<sup>[31,32]</sup>。同时,土壤动物对环境的变化自身会作出一定的反应,造成其群落结构的变化。本文同时从 N 处理水平效应和垂直效应两方面研究土壤动物在 N 沉降下的反应。从研究结果可知,N 沉降对土壤动物群落造成了明显影响。无论是个体数量还是类群丰富度,随着 N 处理浓度的加大,由 CK 至 T2 处理,土壤动物向土壤表层发展;但由 T2 至 T4,土壤动物群落却相反地趋向土壤深层发展。

### 3.4 N 沉降对土壤动物群落的影响存在阈值问题

许多有关 N 沉降对植物和微生物影响的研究结果证明,一定限度内的 N 沉降对生物可能是有利的,但过量的 N 沉降则会造成负面影响<sup>[13-15]</sup>。因此,作为自然界生物必须的一种重要营养元素,N 素输入的增加,与其它污染物不同,并没有一个绝对的正向或负向关系,而是存在一个阈值的问题。本研究的土壤动物学结果也证实了这种趋势。从数量特征看,以受 N 沉降影响最明显的土壤 F1 层为例,随着处理浓度的加大,由 CK 至 T4,土壤动物的个体总数经历了先升后降的过程,在 T2 处理时达到高峰,经差异显著性检验,T1、T2 处理下土壤动物总数显著高于其它处理( $P < 0.05$ )。从类群丰富度来看,随着处理强度的加大,由 CK 至 T4,土壤动物的类群数逐渐上升,至 T2 达最大值;随后逐渐下降,至 T4 时为最小值。不同处理下各土层土壤动物类群

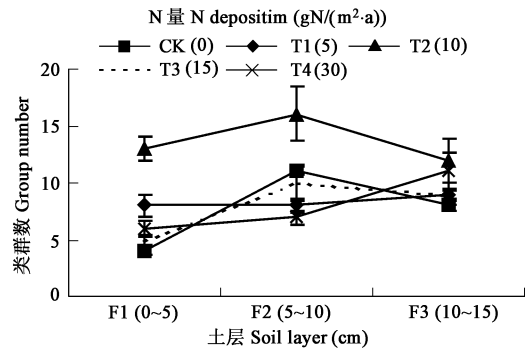


图 4 N 沉降对土壤动物类群数水平分布的影响

Fig 4 The effects of N deposition on horizontal distribution of soil fauna group number

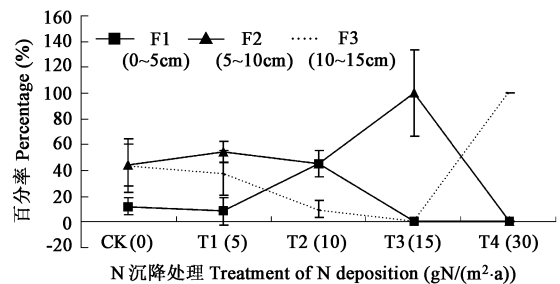


图 5 N 沉降对土壤 Oribatid 的影响

Fig 5 The effects of N deposition on soil Oribatid

丰富度变化趋势都呈单峰曲线, T2 处理时各土层的类群丰富度都显著高于其它处理 ( $P < 0.05$ ), 显示其环境较为适宜土壤动物发展; 同时可知, 相对于绝对数量, 类群丰富度用于反映环境的变化具有较好的拟合性。

### 3.5 土壤甲螨是优良的指示生物

土壤甲螨数量多, 分类及营养多样化显著, 容易受外界环境因子的干扰, 能够反映环境的细微变化。因此, 土壤甲螨可以作为监测环境质量的指示生物。影响甲螨的主要因素有水解 N、活性有机质、有机磷、pH 值、含水量和放线菌的数量等, 尤其是水解 N 和活性有机质影响最大<sup>[31]</sup>。20 多年前国外根据甲螨能敏感地反映土壤中的细微变化而将其作为监测土壤污染的指示生物进行研究<sup>[34]</sup>。近年来国内也开展了一些相关的研究, 如郑经鸿等<sup>[35]</sup>证明土壤甲螨的分布与生态环境息息相关。在本研究 N 沉降处理下, 土壤甲螨也表现出其变化的敏感性及其反映环境质量的代表性。从土壤 F1 层甲螨数量随 N 处理浓度增加而表现出的趋势看, 与整个土壤动物群落的反应一样, 它经历了一个先升后降的过程, 其峰值在 T2 处理; 同时, 比较不同处理的土壤甲螨垂直分布百分率曲线可知, 与 CK 比较, T1 处理时 F2 层比率值有比较明显的升高, T2 处理时 F1 层比率明显高于其它处理, 至 T3 处理只在 F2 层采到甲螨, T4 处理只在 F3 层采到。整个趋势很明显: 随处理浓度加大, 由 CK 至 T2, 土壤甲螨先向表层会集, 但其后由 T2 至 T4 时则向土壤深层聚集, 反映了土壤环境由适宜转为恶化的过程。

### References

- [1] Holland E A, Dentener F J, Braswell B H, *et al*. Contemporary and pre-industrial global reactive nitrogen budgets. *Biochemistry*, 1999, **46**: 7~ 43
- [2] Galloway J N and Cowling E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change. *Ambio*, 2002, **31**: 64~ 71
- [3] Bartnicki J, Alcamo J. Calculating nitrogen deposition in Europe. *Water Air and Soil Pollution*, 1989, **47**: 101~ 123
- [4] Chou R L, Wu Q. Study on the sensitivity to terrestrial ecosystem to acid precipitation. *Advances in environmental science*, 1997, **5**(4): 8~ 22
- [5] Zhou G Y, Yan J H. The characteristics of regional precipitation and the impact of its nutrient concentration on the development of forest ecosystem in Dinghushan. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(12): 2002~ 2012
- [6] Townsend A R, Braswell B H, Holland E A, *et al*. Spatial and temporal patterns in terrestrial carbon storage due to deposition of fossil fuel nitrogen. *Ecological Applications*, 1996, **6**: 804~ 814
- [7] Li D J, Mo J M, Fang Y T, *et al*. Impact of nitrogen deposition on forest plants. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(9): 1891~ 1900
- [8] Xu G L, Mo J M, Zhou G Y, *et al*. Relationship of soil fauna with N cycling and its response to N deposition. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(11): 2453~ 2463
- [9] Fenn M E, Poth M A, Aber J D, *et al*. Nitrogen excess in North American ecosystems: predisposing factors, ecosystem responses, and management strategies. *Ecological Applications*, 1998, **8**(3): 706~ 733
- [10] Nihlgård B. The ammonium hypothesis—an additional explanation to the forest dieback in Europe. *Ambio*, 1985, **14**: 2~ 8
- [11] Jones C G, Lawton J H and Shachak M. Organisms as ecosystem engineers. *Oikos*, 1994, **69**: 373~ 386
- [12] Lavelle P. Faunal activities and soil processes: adaptive strategies that determine ecosystem function. In: Etchevers J D, Aguilar A, Nunez R, *et al*, Eds. *Trans 15th world Cong. Soil Sci 1*, 1994. 189~ 220
- [13] Magill A H, Aber J D, Berntson G M, *et al*. Long-term nitrogen additions and nitrogen saturation in two temperate forests. *Ecosystems*, 2000, **3**: 238~ 253
- [14] Aber J D, McDowell W, Nadelhoffer K J, *et al*. Nitrogen saturation in Northern forest ecosystems, hypotheses revisited. *Bioscience*, 1998, **48**: 921~ 934
- [15] Liljelund L E, Torstensson P. Critical loads of nitrogen with regard to effects on plant composition. In: Nilsson J, Grennfelt P, ed. *Critical loads for sulfur and nitrogen. Report 1988: 15. Copenhagen: Nordic Council of Ministers*, 1988. 363~ 374
- [16] Taylor A F S, Martin F, Read D J. Fungal diversity in ectomycorrhizal communities of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and Beech (*Fagus sylvatica* L.) in forests along north-south transects in Europe. In: Schulze E-D, ed. *Carbon and nitrogen cycling in European forest ecosystems. Ecological studies*, Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2000. **142**: 343~ 365
- [17] Boxman A W, Blanck K and Brandrud T, *et al*. Vegetation and soil biota response to experimentally-changed nitrogen inputs in coniferous forest ecosystems of the NITREX project. *Forest Ecology and Management*, 1998, **101**: 65~ 79
- [18] Huhta V. Response of coccinellid sphaerotum (Enchytraeidae) to manipulation of pH and nutrient status in coniferous forest soil. *Pedobiologia*, 1988, **27**: 245~ 260
- [19] Hou A M, Peng S L, Zhou G Y. Tree-ring chemical changes and possible impacts of acid precipitation in Dinghushan, South China. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(9): 1552~ 1559
- [20] Liu J X, Zhou G Y, Wen D Z. Properties of surface soil on selected forest ecosystem affected by acid deposition on Guangdong.

- Agricultural Protection*, 2001, **20**(4): 231~ 234
- [21] YiW Y. *Pictorial keys to soil animals of China*. Beijing: Science Press, 1998
- [22] Zhen L Y, Gui H. *Insect classification*. Nanjing Normal University Press, 1999.
- [23] Zhao S D, Ren Y. The core projects of International Biodiversity Observation Year (BOY): introduction and suggestions *Biodiversity Science*, 2001, **9**(2): 196~ 200
- [24] Vilkkamaa P, Huhta V. Effects of fertilization and pH on communities of Collembola in pine forest soil *Ann Zool Fennici*, 1986, **23**, 167 ~ 174
- [25] Runion G B, Curl E A and Rogers H H, *et al* Effects of CO<sub>2</sub> enrichment on microbial populations in the rhizosphere and phyllophere of cotton *Agricultural and Forest Meteorology*, 1994, **70**: 117~ 130
- [26] Wang Z Z, Zhang Y M, Li Z W, *et al* Effect of organophosphorus pesticide toxicity on soil animal *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(12): 1663~ 1666 :
- [27] Wang Z Z, Zhang Y M, *et al* Effect of organophosphorus pesticide on community structure of soil animal *Acta Ecologica Sinica*, 1996, **16**(4): 357~ 366
- [28] Liang W J, Li Q, Chen L J, *et al* Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on nematode trophic groups in a Chinese paddy-field ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(10): 1269~ 1272
- [29] Tomlinson G H. A possible mechanism relating increased soil temperature to forest decline. *Water Air Soil Pollut*, 1993, **66**: 365~ 380
- [30] Hutchinson T C, Watmough S A, Sager E P S, *et al* The impact of simulated acid rain and fertilizer application on a mature sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) forest in central Ontario, Canada *Water Air Soil Pollut*, 1999, **109**: 17~ 39
- [31] Bengtsson J. Temporal predictability in forest soil communities *J. Anim. Ecol*, 1994, **63**: 653~ 665
- [32] Haimi J, Siira-Pietika E. Decomposer animal communities in forest soil along heavy metal pollution gradient *Fresenius' J. Anal. Chem.*, 1996, **354**: 672~ 675
- [33] Wang D C, Yang Z L, Zhang N Q, *et al* The proceeding and state of soil mites studies in China *Journal of Liaoyang Agricultural College*, 2001, **18**(1): 61~ 65
- [34] Chen G D, Zhu W, Li M D, *et al* Study on using oribatid for indicating soil pollution. *China Environmental Science*, 1991, **11**(2): 100 ~ 103
- [35] Zheng J H, *et al* Study on the distribution rule of meadow oribatid in China *Acta Ecologica Sinica*, 1993, **13**(2): 171~ 176

#### 参考文献:

- [5] 周国逸, 闫俊华. 鼎湖山区域大气降水特征和物质元素输入对森林生态系统存在和发育的影响 *生态学报*, 2001, **21**(12): 2002~ 2012
- [7] 李德军, 莫江明, 方运霆, 等. 氮沉降对森林植物的影响 *生态学报*, 2003, **23**(9): 1891~ 1900
- [8] 徐国良, 莫江明, 周国逸, 等. 土壤动物与 N 循环及其对 N 沉降的响应 *生态学报*, 2003, **23**(11): 2453~ 2463
- [19] 侯爱敏, 彭少麟, 周国逸. 鼎湖山地区马尾松年轮元素含量与酸雨的关系 *生态学报*, 2002, **22**(9): 1552~ 1559
- [20] 刘菊秀, 周国逸, 温达志, 等. 酸沉降影响下广东陆地生态系统表层土壤特征 *农业环境保护*, 2001, **20**(4): 231~ 234
- [21] 尹文英. *中国土壤动物图鉴*. 北京: 科学出版社, 1998
- [22] 郑乐怡, 归鸿. *昆虫分类*. 南京: 南京师范大学出版社, 1999
- [23] 赵士洞, 任毅. 国际生物多样性观察年(BOY)核心项目——内容介绍及建议 *生物多样性*, 2001, **9**(2): 196~ 200
- [26] 王振中, 张友梅, 李忠武, 等. 有机磷杀虫剂对土壤动物的影响 *应用生态学报*, 2002, **13**(12): 1663~ 1666
- [27] 王振中, 张友梅. 有机磷杀虫剂对土壤动物群落结构的影响 *生态学报*, 1996, **16**(4): 357~ 366
- [28] 梁文举, 李琪, 陈立杰. 开放式空气 CO<sub>2</sub> 浓度增高对中国稻田生态系统线虫营养类群产生的影响 *应用生态学报*, 2002, **13**(10): 1269 ~ 1272
- [33] 王东昌, 杨振玲, 张乃琴, 等. 我国土壤螨研究现状进展 *莱阳农学院学报*, 2001, **18**(1): 61~ 65
- [34] 陈国定, 朱文, 黎明达. 应用甲螨监测土壤污染的研究 *中国环境科学*, 1991, **11**(2): 100~ 103
- [35] 郑经鸿, 等. 新疆草地甲螨分布规律研究 *生态学报*, 1993, **13**(2): 171~ 176