

模拟 N 沉降增加在干、湿季对土壤动物的影响*

徐国良^{1,2}, 莫江明¹, 周国逸¹, Brown Sandra³, 李德军^{1,2}

(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 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: 研究了湿季和干季环境下模拟 N 沉降增加对土壤动物群落影响的特征并进行了比较。研究表明 N 沉降处理对土壤动物的影响存在明显的阈值效应: 在受 N 沉降直接影响的土壤 F1 层 (0~5 cm), 无论在干或湿季, 无论是土壤动物的个体数量、类群数和 DG 指数指标, 随着处理水平的增加, 都体现出单峰曲线的变化态势, T2 处理 ($10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 值一般为拐点, 其值显著居高 ($P < 0.05$), 而 T4 处理 ($30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 值通常显著为低 ($P < 0.05$)。土壤动物在不同水平 N 沉降增加下的垂直分布体现了对 N 处理的敏感性: 在 2 个环境差异较大的季节内, 土壤动物各项指标的垂直分布都随着 N 处理水平的提高而呈现出由表聚向趋深转变的过程, 尤其是在最大浓度的 T4 处理下, 土壤动物皆成完全的逆层分布。季节也具有明显的影响, 具体表现在: ①干季土壤动物的个体数量、类群数和 DG 指数与湿季比都有不同幅度的增长, 其中个体数量的增长达到极显著水准 ($P < 0.01$); ②与对照样地相比, 干季对土壤动物的促进作用在各 N 处理样地表现得更为明显; ③与湿季相比, 干季使各 N 处理梯度之间的差别减弱, 或者说趋于同一性。文章认为, 在 N 沉降增加对土壤动物的影响和季节的作用中, N 饱和效应是重要的机制。

关键词: N 沉降增加; 干季; 湿季; 土壤动物

中图分类号: Q958.15 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2004) S2-0272-06

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 IBOY 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^[1]。同时, 全球变化下生物的响应机制也是当今的科学前沿问题。有关全球环境变化对土壤动物的影响, 国内外已开展部分工作, 例如土壤动物在人工生态环境模拟的 FACE (free-air CO_2 environment) 系统、重金属和农药污染下的反应研究^[2-5]。但对于日益严重的大气 N 沉降下的土壤动物响应问题, 国内外还没有专类研究。

气候的变化对土壤动物群落的影响也很明显, 尤其是热带、亚热带的湿季和干季之间, 由于温湿环境差异很大, 其影响效应更显著。杨效东等^[6-8]和廖崇惠等^[9]已在干、湿季对土壤动物群落结构和多样性的影响方面进行了研究。

由此, 作者通过人工模拟的方法开展了大气 N 沉降增加对土壤动物群落的干、湿季影响研究。以

进一步认识环境变化对土壤生物系统的影响。

在本项目的前期研究中已发现 N 沉降对土壤动物产生了一定的影响^[10]。本文是项目研究的进一步报道。

1 研究方法

1.1 研究背景

鼎湖山自然保护区位于广东省肇庆市境内, 距广州市 86 km, 位于 $23^{\circ}08'N$, $112^{\circ}35'E$, 地处南亚热带南缘, 总面积 1155 km^2 , 为大起伏山地。气候属亚热带季风气候, 年太阳总辐射约 $4655 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 年平均日照时数为 1433 h, 年平均气温 20.9°C 。该区雨量充沛, 年降雨量达 1900 mm, 但分布不均, 4-9 月为雨季, 10-3 月为旱季, 每年还受到数次热带气旋或台风的影响^[11,12]。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^[11]。

* 收稿日期: 2004-07-23

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; 中国科学院华南植物研究所所长基金资助项目; 广东省自然科学基金资助项目 (021524); 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目 (KSCX2-SW-120)

作者简介: 徐国良 (1975 年生), 男, 博士研究生; 通讯联系人: 莫江明; E-mail: mojm@scbg.ac.cn

1.2 方法

1.2.1 样地设置 2002年10月25日,建立试验

样地(22 m×23 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 m×23 m),包括CK

(对照,未施N)、T1(5 g·m⁻²·a⁻¹)、T2(10 g·

m⁻²·a⁻¹)、T3(15 g·m⁻²·a⁻¹)和T4(30 g·m⁻²·

a⁻¹)。每个处理组分成3个重复。

不同处理之间留有足够深的壕沟(宽0.75 m,

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NH₄NO₃。

1.2.2 采样 分别在湿季(2003年7月18-

22日)和干季(2003年10月20-24日)采样。

在每一个重复小样地内按对角线法选取5个点,在

每1点上用直径6 cm的采土器分F1层(0~5 cm)、

F2层(5~10 cm)、F3层(10~15 cm)3层取样,

将这5个采样点分土层混和成3个样。这样,每个

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。样品立即带回实验室,利用

Tullgren干漏斗法收集其中的土壤动物。

1.2.3 鉴定和分析方法 所有标本除螨类外,其

余各类都鉴定至科(总科)^[13,14]。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。

DC指数^[15]:

$$DC = \left(\frac{E}{C} \right) \sum_{i=1}^E (D_i C_i / D_{i \max} C)$$

式中, D_i 为第 i 类群个体数; $D_{i \max}$ 为各群中第 i 类

群的最大个体数; E 为群落中的类群数; C 为各群落

所包含的总类群数, C_i/C 为 C 个群落中第 i 个类群

出现的比率。

2 结果与分析

2.1 土壤动物个体数量的响应

在湿季, T3、T4 处理土壤动物个体数显著小

于 CK ($P < 0.05$) (图1)。N 处理水平的效应与土

层有关: 在 F1 层, 土壤动物个体数呈明显的单峰

曲线态势, 由 CK 到 T2 处理, 递次显著上升 ($P <$

0.05), 其后显著下降 ($P < 0.05$), T2 处理具有显

著性最高值, 而 T4 处理具有显著性最低值 (图

2); 但在 F3 层, 情况发生变化, T4 处理下具有最

大的动物个体数, 且显著性高于 T1、T2 和 T3 处理

($P < 0.05$) (图2)。土壤动物个体数的垂直分布比

较: CK 处理为 $F2 > F3 > F1$; T1 处理 $F2 > F3 > F1$;

T2 处理 $F2 > F1 > F3$; T3 处理 $F2 > F3 > F1$; T4 处

理 $F3 > F2 > F1$ 。土壤动物有先向表层发展后集中

向土壤深层的趋势, 在 T2 处理下各土层动物个体

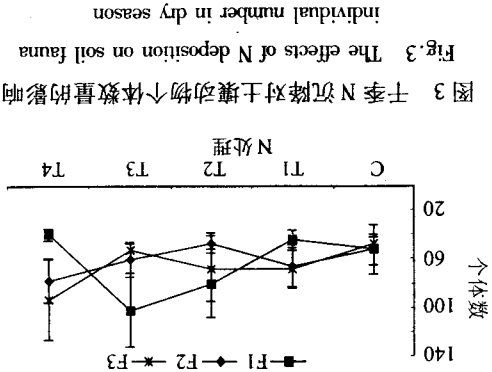


图3 干季 N 沉降对土壤动物个体数量的影响
Fig. 3 The effects of N deposition on soil fauna

由湿季至干季, 土壤动物的个体数量发生了极

显著的增长 ($P < 0.01$) (图1)。其中 T3 增加了

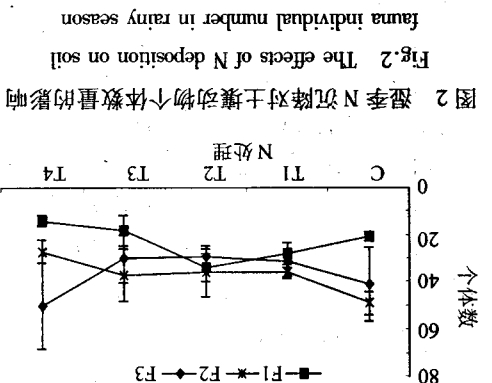


图2 湿季 N 沉降对土壤动物个体数量的影响
Fig. 2 The effects of N deposition on soil

在干季, 各 N 处理值几乎都显著高于 CK (P

< 0.05) (图1)。比较各 N 处理水平产生的效应:

在 F1 层, 仍呈单峰曲线变化, T2 和 T3 显著高于

其它处理 ($P < 0.05$) (图3); 在 F3 层, 倍 N 处理

下具最大动物个体数, 且显著高于 CK 和 T3 处理

($P < 0.05$) (图3)。比较动物个体数在各土层中的

垂直分布: CK 和 T2 处理下各层差异不显著, T3

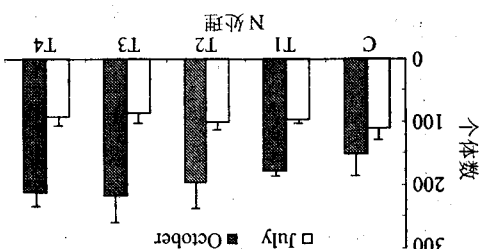
处理下 $F1 > F2 > F3$, F1 层显著为高 ($P < 0.05$);

但 T4 处理下完全相反 $F3 > F2 > F1$, F1 层显著为低

($P < 0.05$) (图3), 也可见动物由表聚向趋深变化

的趋势。

图1 干、湿季 N 沉降对土壤动物个体数量影响的比较
Fig. 1 Comparison of the effects of N deposition on soil fauna



具有显著性高值 ($P < 0.05$) (图2)。

数分布最均匀; T4 处理下呈完全逆层分布, F3 层

土壤动物多样性的垂直分布，在 T4 处理下都呈完

全的逆层分布 (图 8, 9)。

3 结论与讨论

3.1 N 沉降增加处理的影响

外界沉降下来的 N 素进入土壤中，由于土壤

的缓冲作用，使 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^[16,17]。可以看

到，在受 N 沉降直接影响的土壤 F1 层，无论在干

或湿季，无论是土壤动物的个体数量、类群数和

DG 指数指标，随着处理水平的增加，都体现出单

峰曲线的变化态势，T2 处理值一般为拐点，其值

显著居高 ($P < 0.05$)，而 T4 处理值通常显著为低

($P < 0.05$)，这种趋势非常明显。另外，由于土壤

动物对环境的变化自身会作出一定的反应，表现为

正或负的趋向性。因此，土壤动物在不同水平 N

沉降增加下的垂直分布可以体现其对 N 处理的敏

感性：在两个环境差异较大的季节内，土壤动物各

项指标的垂直分布都随着 N 处理水平的提高而呈

现出由表聚向趋深转变的过程，尤其是在最大浓度

的 T4 处理下，土壤动物皆完成完全的逆层分布，显

示此时 N 处理的强驱避性。

以上结论表明，N 沉降增加对土壤动物的影响

存在明显的阈值效应。许多有关 N 沉降对植物和

微生物影响的研究结果也证明，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^[18-20]。例如，在美国哈佛森林的长

期生态系统研究 (ILTER) 中，从 1988 年开始针对

叶林和落叶阔叶林开展模拟 N 沉降实验。经过 9 a

的施 N 处理，它们的林木生物量比 CK 都有不同幅

度的增加，但 9 a 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

CK 比显著减少^[18]。

N 沉降增加所产生的阈值效应可能受土壤系统

N 饱和和机制的驱动。在 N 沉降过程中，适量 NO_3^-

的输入可被森林生态系统所利用，过剩的 NO_3^- 将

通过淋溶或可能的反硝化作用而从土壤中除去或有

少部分在土壤中积累下来，当氮通量 (矿化和外部

输入) 与生物和土壤的吸收能力相等时，生态系统

可被认为是达到了“氮饱和”^[21]。当生态系统达到

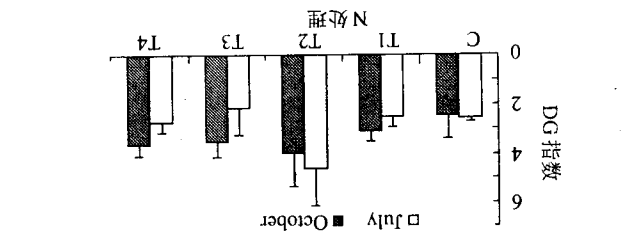


图 7 干、湿季 N 沉降对土壤动物 DG 指数影响的比较

Fig. 7 Comparison of the effects of N deposition on soil fauna

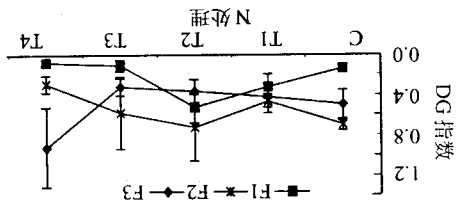


图 8 湿季 N 沉降对土壤动物 DG 指数的影响

Fig. 8 The effects of N deposition on soil fauna DG index in rainy season

上升，反显著高于 F1 层 ($P < 0.05$)，并使得动物

多样性呈完全的逆层分布 (图 9)。

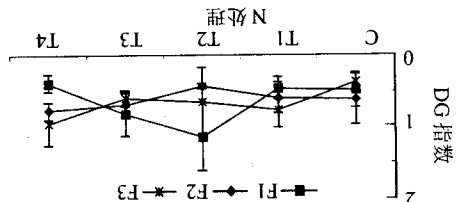


图 9 干季 N 沉降对土壤动物 DG 指数的影响

Fig. 9 The effects of N deposition on soil fauna

由湿季到干季，总体上，土壤动物的多样性增

长了，其中 T3 处理上升幅度最大，达 61.75%，T4

为 33.58%，T1 为 22.89%，T2 与 CK 分别下降了

13.45% 和 3.54%。T2 处理的负向增长可能与其在

湿季期极大的丰度有关 (甚至高于干季的各处理

值) (图 7)。

由湿季至干季，各 N 处理水平之间的显著性

差异消失，显示其效应的均一化；另外，可以注意

到在湿季与 T1、T3 和 T4 处于同一水平的 CK 处

理，至干季，前三者都有较大幅度增长，而 CK 处

理却出现下降，并显著低于其它 N 处理 ($P <$

0.05)，即干季 N 处理下动物多样性的整体增长幅

度明显高于 CK (图 7)。

由湿季至干季，F1 层动物的多样性都随处理

加大而呈单峰曲线变化，最大值在 T2 处理；F3 层

动物多样性在 T4 处理下都有明显上升 (图 8, 9)。

用明显。相反,干季相对抑制了N饱和和出现,因此表现明显的正向作用。然而,土壤N矿化率不仅受温湿度的影响,还与土壤动物和微生物生物量、异养菌、植物和硝化细菌之间对氮的竞争、硝化作用和反硝化作用等因素相关,其中的机制是很复杂的,以上只是初步的推测,具体情况需要进一步的研究和更详尽的资料。

综上所述,通过人工模拟N沉降增加对土壤动物群落影响的干、湿季研究,可以明确,大气N沉降将对土壤生物产生明显的影响,但它也受沉降水平和季节的明显作用,尤其是其中阈值效应的存在。这些都将对我国南方日益严重的大气N沉降环境问题的评价和治理提供有益的参考。

参考文献:

- [1] 赵士洞,任毅.国际生物多样性观察年(IBOY)核心项目——内容介绍及建议[J].生物多样性,2001,9(2):196-200.
- [2] RUNION C B, CURT E A, ROGERS H H, et al. Effects of CO_2 enrichment on microbial populations in the rhizosphere and phyllosphere of cotton [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1994, 70: 117-130.
- [3] 王振中,张友梅.有机磷杀虫剂对土壤动物群落结构的影响[J].生态学报,1996,16(4):357-366.
- [4] 王振中,张友梅,李忠武,等.有机磷杀虫剂对土壤动物的影响[J].生态学报,1996,16(4):357-366.
- [5] 梁文学,李琪,陈立杰.开放式空气 CO_2 浓度增高对水稻田生态系统线虫营养类群产生的影响[J].应用生态学报,2002,13(12):1663-1666.
- [6] 杨效东,张建设.西双版纳人工群落林土壤动物的旱季群落组成与分布特征[J].东北林业大学学报,1998,26(6):65-70.
- [7] 杨效东,沙丽清.西双版纳“龙山”片断热带雨林中小型土壤动物群落组成与多样性研究[J].应用生态学报,2001,12(2):261-265.
- [8] 廖崇惠,李健雄,杨悦屏,张振才.海南尖峰岭热带林土壤动物群落——群落结构的季节变化及其气候因素[J].生态学报,2003,23(1):139-147.
- [9] 徐国良,莫江明,Per Gundersen,等.土壤动物对模拟N沉降响应的初步研究[J].生态学报,2003,23(11):2453-2463.
- [10] 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[J].生态学报,2002,22(9):1552-1559.
- [12] 夏汉平,余清发,张德强.鼎湖山3种不同林型下的土壤酸度和养分含量差异及其季节动态变化特性[J].生态学报,1997,17(6):645-653.
- [13] 尹文英.中国土壤动物图鉴[M].北京:科学出版社,1998.

和根际 $\text{Al}^{3+}/\text{Ca}^{2+}$ 比率通常可作森林土壤酸化和潜在的森林危害的指标^[5]。因此, NO_3^- 浓度的上升将提高土壤溶液的酸度和 Al^{3+} 浓度,可直接或间接地引起森林生态系统衰退。所以, N 素作为生态系统所必需的一种营养元素,在 N 饱和的限度内一般是有利的,但一旦超过饱和限度,即造成负面影响,这很可能就是 N 处理阈值效应的产生机制。在本研究中, T2 处理对土壤动物产生了良好的促进效应,但随后即显现负面影响,而且处理强度越大,负作用越明显,在 T4 处理下,土壤动物都趋向土壤深层。这可能暗示了在本试验中, T2 处理浓度是生态系统所能接受的饱和值。但当然这个值将与生态系统的本质特性密切相关,另外,气候因子也会存在一定影响,下文将提及之。

3.2 季节的影响

与湿季相比,干季期土壤动物总体增长,其中个体数发生了极显著的增长 ($P < 0.01$)。这与气候因素密切相关。在众多的气象要素中,对土壤动物有重要影响的是气温和降水量。14.3~24.3℃之间的土壤动物生存最适宜的温度范围;而在降水上可以明确的是大量的降雨不仅有较强的冲刷作用,而且使土壤容重高,结构紧密,对中小型土壤动物物种和个体数的分布与发展产生负面影响;特别是暴雨,会即时对线虫群落和其它大、中型土壤动物群落造成破坏^[7-10]。根据鼎湖山的观测资料,7月地表平均温度为 32.2℃,10月份为 25.8℃;7月的平均降水量为 240.3 mm,接近全年的最高水平,而10月为 145.7 mm,雨量适中^[26]。可见干、湿季节间的温湿差异非常大,干季(10月)的温湿效应明显比湿季(7月)适于土壤动物的发展。

从湿季至干季,土壤动物不仅发生了总体增长,而且可以注意到, N 沉降增加处理下的土壤动物增长幅度高于 CK,而且各不同 N 处理水平整体得到均一化的发展,差异减小,阈值效应减弱。干季环境这种对 N 沉降增加效应的明显正向作用可能与其抑制 N 饱和的出现有关。土壤中无机游离子 N 化合物的含量与 N 的矿化效率密切相关,而土壤温、湿度是影响总氮矿化的最重要因子^[27]。在一定温度范围内,氮矿化随温度升高而升高^[28];氮矿化也随土壤水分增加而增加,且水分波动能增加氮矿化^[29,30],但当土壤水分增加到一定值时,氮矿化就迅速下降^[28]。因此,可能的情况是:湿季高温高湿的环境促进 N 的矿化,再加上外界的处理输入,使得土壤 N 素淋失水平高于干季,因此土壤系统更易达到 N 饱和水平,从而不仅限制了 N 输入的利好作用,还使 N 处理水平的阈值分界作

- [14] 郑乐怡, 归鸿. 昆虫分类[M]. 南京: 南京师范大学出版社, 1999.
- [15] 廖崇惠, 李健雄, 黄海涛. 南亚热带森林土壤动物群落多样性研究[J]. 生态学报, 1997, 17(5): 549–555.
- [16] BENTSSON J. Temporal predictability in forest soil communities[J]. J Anim Ecol, 1994, 63, 653–665.
- [17] HAIMI J, SIIRA-PIETIKÄINEN A. Decomposer animal communities in forest soil along heavy metal pollution gradient[J]. Fresenius' J Anal Chem, 1996, 354: 672–675.
- [18] MAGILL A H, ABER J D, BERNTSON G M, et al. Long-term nitrogen additions and nitrogen saturation in two temperate forests[J]. Ecosystems, 2000, 3: 238–253.
- [19] ABER J D, McDOWELL W, NADELHOFFER K J, et al. Nitrogen saturation in Northern forest ecosystems, hypotheses revisited[J]. Bioscience, 1998, 48: 921–934.
- [20] 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[J], 2003, 23(9): 1891–1900.
- [21] 肖辉林. 大气氮沉降对森林土壤酸化的影响[J]. 林业科学, 2001, 37(4): 111–116.
- [22] FOSTER N W, HAZLETT P W, MCOLSON J A, et al. Long leaching from a sugar maple forest in response to acidic deposition and nitrification[J]. Water Air Soil Pollut, 1989, 48: 251–261.
- [23] WATMOUGH S A, HUTCHINSON T C, SAGER E P S. The impact of simulated acid rain on soil leachate and xylem chemistry in a Jack pine (*Pinus banksiana* Lamb) stand in northern Ontario, Canada[J]. Water Air Soil Pollut, 1999, 111: 89–108.
- [24] BERGKVIST B, FOLKESON L. Soil acidification and element fluxes of a *Fagus sylvatica* forest as influenced by simulated nitrogen deposition[J]. Water Air Soils Pollut, 1992, 65: 111–133.
- [25] KROS J, De VRIES W, JANSSEN P H M, et al. The uncertainty in forecasting trends of forest soil acidification[J]. Water Air Soil Pollut, 1993, 66: 29–58.
- [26] 黄展帆, 范征广. 鼎湖山的气候[J]. 热带亚热带森林生态系统研究, 1982(1): 11–16.
- [27] 李贵才, 韩兴国, 黄建辉, 等. 森林生态系统土壤 N 矿化影响因素研究进展[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1187–1192.
- [28] BERNHARD-REVERSAT F. Soil nitrogen mineralization under a *Eucalyptus* plantation and a natural *Acacia* forest in Senegal[J]. For Ecol Manage, 1988, 23: 233–244.
- [29] SAHRAWAT K L. Soil and fertilizer nitrogen transformations under alternate folding drying moisture regimes[J]. Plant and Soil, 1980, 66(2): 225–223.
- [30] SCOTT N A, BINKLEY D. Foliage litter quality and annual net N mineralization: comparison across North American forest sites[J]. Oecologia, 1997, 111: 151–159.

Effects of Simulated N Deposition Addition on Soil Fauna in Dry and Rainy Seasons

XU Guo-liang^{1,2}, MO Jiang-ming¹, ZHOU Guo-yi¹, BROWN Sandra³, LI De-jun^{1,2}

(1. Dinghushan Forest Ecosystem Research Station, South China Institute
of Botany, Chinese Academy of Sciences, Dinghu, Zhaoqing, 526070, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Winrock International, 1621 N. Kent St., Suite 1200, Arlington, VA 22209, USA)

Abstract: The effects of simulated N deposition addition on soil fauna were studied in dry and rainy seasons. It was proved that there must be a threshold for the responses of soil fauna under different N deposition addition. In soil layer F1 (0~5 cm), whenever in rainy or dry seasons, the individuals, group numbers and DG indexes of soil fauna changed with a one-peak curve under different N treatments, and there laid significantly the highest values under T2 treatment ($10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) and significantly the lowest values under T4 treatment ($30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) generally ($P < 0.05$). For the vertical distribution, soil fauna first developed to the upper layers then to the deeper layers with the treatments from CK to T4 treatment. Especially, under T4 treatment there were all contrast vertical distribution: F3 (10~15 cm) > F2 (5~10 cm) > F1 (5~10 cm) in all of the studies. Based on the comparison between dry and rainy seasons, they were concluded: ① the individuals, group numbers and DG indexes all increased in dry season, and the individuals in dry season were significant higher than in rainy season ($P < 0.01$); ② the promotions of soil fauna under N treatments were higher than under CK treatment; ③ the difference among N treatments decreased in dry season. It was suggested that the effects of “N saturation” were very important in the reaction of soil fauna to N deposition addition and to the differences between rainy and dry seasons.

Key words: N deposition addition; dry season; rainy season; soil fauna