

大气 CO₂ 升高和蚯蚓活动对土壤 C、N 的影响

宋 琰 ,肖能文 ,戈 峰*

(中国科学院动物研究所,北京 100080)

摘要 :以加倍 CO₂ 浓度 (750 μmol/mol) 处理和正常 CO₂ 浓度 (370 μmol/mol) 生长下的棉花凋落叶为试验材料,以威廉腔蚓 *Metaphire guillemi* (Michaelsen, 1895) 和不同的 CO₂ 浓度 (750 μmol/mol 和 370 μmol/mol) 为作用因子,分析了蚯蚓、CO₂ 浓度通过叶片分解对土壤 C、N 含量的影响。结果表明 接种蚯蚓和加入凋落叶的联合作用对有机 C 有显著提高作用。接种蚯蚓对土壤全 N 含量影响不显著,但 CO₂ 浓度升高和蚯蚓联合作用对土壤全 N 含量有显著影响。CO₂、叶片、蚯蚓 3 因子联合作用对土壤 C、N 含量有显著提高作用,且与蚯蚓和叶片联合作用对土壤 C、N 含量的影响相比,其效果更显著。结果显示,CO₂ 浓度的升高通过改变植物凋落物 C 含量及其营养成分,影响了其潜在的降解有效性,同时大气 CO₂ 浓度的升高影响凋落物在蚯蚓体内降解过程,从而对凋落物的有效降解产生显著影响,最终改变土壤 C、N 含量。

关键词 蚯蚓;土壤生态;CO₂ 浓度;C;N

文章编号:1000-0933(2007)07-2922-07 中图分类号:Q143 文献标识码:A

Influence of earthworm on C & N content in soil under elevated CO₂

SONG Yan, XIAO Neng-Wen, GE Feng*

Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (7) 2922 ~ 2928.

Abstract : The influence of earthworm and elevated CO₂ on cotton leaf decomposition and C and N transformation in the soil by the 56 days experiment treated with earthworm under different levels of CO₂ were analyzed. The effect of different levels of CO₂, cotton leaf and their interactions on C content in soil was not significant, while interaction of earthworm and cotton leaf was significant. Earthworm didn't influence the N content solely, but the combined effect of elevated CO₂ and earthworm could influence the N content. The interaction of CO₂, earthworm and leaf was more significant than that of earthworm and leaf. Our results indicated that the elevated CO₂ made the component of litter decomposition easier and improved the ability of decomposition and transformation of litter through earthworm, resulted in the change of C and N content in soil.

Key Words : earthworm; soil ecology; CO₂; C; N

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2006CB102006);国家自然科学基金委资助项目(30571253, 30621003);国家科技基础条件平台建设资助项目(2005DKA21404)

收稿日期:2006-12-13;修订日期:2007-05-30

作者简介:宋琰(1980~),女,河北保定人,硕士生,主要从事生态毒理学研究。E-mail: songyan@ioz.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gef@ioz.ac.cn

Foundation item : The project was financially supported by the National Basic Research Program (973 Program), China (No. 2006CB102006) and The National Natural Science Foundation of China (NSFC) (No. 30571253, 30621003), National Science and Technology Basic Flat Project, China (No. 2005DKA21404)

Received date 2006-12-13; **Accepted date** 2007-05-30

Biography SONG Yan, Master, mainly engaged in ecotoxicology. E-mail: songyan@ioz.ac.cn

土壤圈、生物圈以及大气圈之间通过 C、N 等元素循环以及动力学过程相互作用,形成有机连续体。土壤 C、N 循环是地球各圈层相互作用的重要研究内容。土壤生物是地球化学过程(生物小循环)的驱动者,它们主要通过取食和代谢共栖等关系驱动 C、N 循环^[1]。异养型土壤生物(如土壤动物和土壤微生物)通过破碎枯枝落叶或者分解有机质获取 C 素,氧化有机化合物获取能量^[1],从而影响大气环境及全球气候变化。

大气 CO₂ 浓度升高已成为未来发展趋势,近年来,关于 CO₂ 升高对土壤生态系统间接作用的研究取得很大进展。大量文献表明,在 1~2a 的短期作用中,大气 CO₂ 浓度升高会刺激植物光合作用,提高陆地生态系统中 C 的摄入^[2,3]。而 CO₂ 浓度引起的 C 固定量的增加是否能有效的转化为土壤 C 库的储备,主要取决于植物生产量和微生物的降解量之间的平衡。有资料表明,CO₂ 的升高提高了植物对水份和营养的利用率^[2~4],对土壤微生物的生境造成影响。但是,有关大气 CO₂ 浓度升高对植物凋落物在土壤中的降解,特别是有关土壤动物对土壤碳(C)、氮(N)含量影响的研究很少。

全球气候变化下 CO₂ 浓度升高和土壤动物活动对土壤环境有深刻的影响^[2~4],而研究 CO₂ 浓度升高对土壤动物活动及其参与的物质循环过程,对于深入理解全球气候变化对土壤生态系统的影响有重要意义。本研究以高 CO₂ 浓度处理(750 μmol/mol)的开顶式 CO₂ 控制(OTC)内生长的棉花凋落叶及其对照处理下(370 μmol/mol)生长的棉花凋落叶为试验材料,以北方棉田生态系统的优势种蚯蚓威廉腔蚓 *M. guillemi* 为作用因子,研究 CO₂ 浓度升高情况下土壤蚯蚓对土壤 C、N 输入和转化的影响,旨在于综合分析 CO₂ 升高情况下蚯蚓活动对棉花凋落物分解的影响,明确 CO₂ 升高下蚯蚓活动对土壤有机 C 含量和全 N 含量的作用,以阐明全球气候变化下土壤动物在土壤生态系统养分循环中的功能。

1 材料和方法

1.1 试验材料

实验动物 威廉腔蚓采集于中科院动物所内棉花试验田。采集后在供试土壤中饲养 7d,以将其肠道内容物更换为供试土壤,然后将用清水冲洗干净后的蚯蚓用滤纸吸取水份,称重。

供试土壤 取自中科院动物所试验田 0~10 cm 表土,其有机 C 含量 1.5%,N 含量 0.134%。土壤经风干后过 2 mm 筛,实验开始 3d 以前,将其水份含量调整至其最大持水量的 50%,然后于恒温箱培养 3d。

供试棉叶凋落物 为转基因 GK-12 棉叶凋落物,于 2005 年 6 月 12 日将转基因棉 GK-12 置于 CO₂ 浓度为 750 μmol/mol 和 370 μmol/mol 的 OTC(有关 OTC 设置见陈法军等^[5])中,9 月 1 日收集新鲜棉叶凋落物存到实验室备用。两种凋落物的 C/N 分别为 13.1 和 11.2(具显著差异, $P < 0.05$),C 含量分别为 50.4% 和 42.5%(具显著差异, $P < 0.05$),N 含量分别为 3.9% 和 3.8%。本试验前洗净,剪成约 2 cm² 的小块,烘干至恒重并称量。

CO₂ 浓度设定及室内实验设备 根据国内外通行的研究方法,设置两个 CO₂ 浓度,即当前大气 CO₂ 浓度(370 μmol/mol)和高出近 1 倍的大气 CO₂ 浓度(750 μmol/mol)。蚯蚓处理在密闭式动态 CO₂ 气室中进行。该装置以 Ventostat 8102 型 CO₂ 浓度测控仪(Telaire Company, USA)监测和控制试验空间内 CO₂ 浓度,以普通钢瓶供给试验气体,以 HPG280H 型人工气候箱(哈尔滨东联电子公司)为试验空间,形成一个密闭式动态气室。称之为 CDCC-1 型动态 CO₂ 气室(Closed-dynamic CO₂ Chamber, CDCC)。目前,这套装置已经大量用于室内大气 CO₂ 浓度升高对植物-昆虫的影响^[6,7]。

1.2 试验处理

试验主要设置 4 种影响因子:蚯蚓(接种,未接种)、CO₂ 浓度(750, 370 μmol/mol)、棉叶凋落物(放入,未放入)和采样时间(0、14、28、56 d)。以下分别简称为蚯蚓因子(E)、CO₂ 因子(750 μmol/mol 用 + 表示)、叶片因子(L)和时间因子(T)。共 8 个处理:

- ① CO₂ 加倍 + 土壤(简称为 S+)
- ② CO₂ 加倍 + 土壤 + 蚯蚓(简称为 SE+)
- ③ CO₂ 加倍 + 土壤 + 高 CO₂ 浓度下生长的棉叶凋落物(简称为 SL+)

- ④CO₂加倍 + 土壤 + 蚯蚓 + 高 CO₂ 浓度下生长的棉叶凋落物 (简称为 SEL +)
- ⑤CO₂正常 + 土壤 (简称为 S)
- ⑥CO₂正常 + 土壤 + 蚯蚓 (简称为 SE)
- ⑦CO₂正常 + 土壤 + 正常 CO₂ 浓度下生长的棉叶凋落物 (简称为 SL)
- ⑧CO₂正常 + 土壤 + 蚯蚓 + 正常 CO₂ 浓度下生长的棉叶凋落物 (简称为 SEL)。

每个处理 12 个重复。每个重复在一个塑料盆内进行 ,将 100 g 供试土壤装入塑料盆钵。

在蚯蚓处理中 ,接种 1 条体重 500 mg 左右健康成蚓 ,并用纱网封住钵口以防蚯蚓逃逸。叶片处理中放入装有 2 g 烘干棉叶的小纱布袋 (CO₂加倍处理中放入的是在 CO₂加倍 OTC 中生长的棉花叶片凋落物 ,正常 CO₂处理中放入的是正常 CO₂对照 OTC 中生长的棉花叶片凋落物) ,CO₂加倍处理盆钵置于密闭式动态 CO₂气室 ,正常 CO₂处理盆钵置于人工气候箱内 (温度 (20 ± 1)℃ ,湿度 70% ~ 80% ,8h 光照)。

1.3 取样

试验的开始测定供试土壤的 C、N 含量 ,在实验的第 14、28、56 天采用破坏性取样 ,每个处理取 4 个重复 (盆) ,以供室内测定土壤的 C、N 含量。

土样 去除表土 ,将蚯蚓取出 ,装有叶片的纱布袋取出 ,并将所余土壤混匀 ,放入采集袋 ,置于冰袋上 ,在 24h 内运回实验室置于冰箱内保存不超过 48h。

未分解叶片 取出装有棉叶的纱布袋 ,风干 ,用 2 mm 筛将未充分分解叶片与土壤分离 ,之后将未充分分解的叶片清洗、烘干至恒重并称重^[1]。

1.4 棉叶分解量测定及凋落物 C、N 损失量计算

于投放前烘干并称重 ,采样时用 2 mm 筛将未充分分解叶片与土壤分离 ,取出烘干并称重 ,计算其前后差值即为分解量^[1] ,其凋落物 C、N 损失量为 :

$$\begin{aligned} \text{CO}_2\text{加倍处理组凋落物 C 损失量 (g)} &= \text{棉叶分解量 (g)} \times 0.504 \\ \text{CO}_2\text{加倍处理组凋落物 N 损失量 (g)} &= \text{棉叶分解量 (g)} \times 0.039 \\ \text{CO}_2\text{正常处理组凋落物 C 损失量 (g)} &= \text{棉叶分解量 (g)} \times 0.425 \\ \text{CO}_2\text{正常处理组凋落物 N 损失量 (g)} &= \text{棉叶分解量 (g)} \times 0.038 \end{aligned}$$

1.5 土壤有机 C、N 含量测定及土壤 C、N 含量增长量计算

土壤 C 含量采用有机 C 分析仪 (Apollo 9000) 。土壤全 N 含量测定采用凯氏定 N 法 ,使用 Kjeltec2100 自动定氮仪 ,其土壤 C、N 增长量为 :

$$\begin{aligned} \text{土壤有机 C 含量增长量 (g)} &= \text{土壤有机 C 含量 (g/kg)} \times 100\text{g} - 0.015 \\ \text{土壤全 N 含量增长量 (g)} &= \text{土壤全 N 含量 (g/kg)} \times 100\text{g} - 0.00134 \end{aligned}$$

1.6 数据统计分析

采用 SPSS 软件 (SPSS 10.0) 进行 *t* 检验 ,处理间差异采用 General Factorial ANOVA 多因素方差分析 ;叶片降解量、释放 C、N 量与土壤 C、N 量采用 Bivariate 分析。

2 结果分析

2.1 蚯蚓活动和 CO₂ 升高对棉叶凋落物降解的影响

不同 CO₂ 浓度处理 OTC 下生长的棉花叶片凋落物 ,在蚯蚓活动和 CO₂ 升高的 4 个处理组中 ,随处理时间的延长 ,各处理组叶片的降解量呈显著增高趋势 (图 1) 。在第 56 天降解量达到最大 ,其中添加叶片、添加蚯蚓、CO₂ 加倍处理的处理组 (SEL +) 中降解量为 1.82 mg ,降解率达到 91% 。

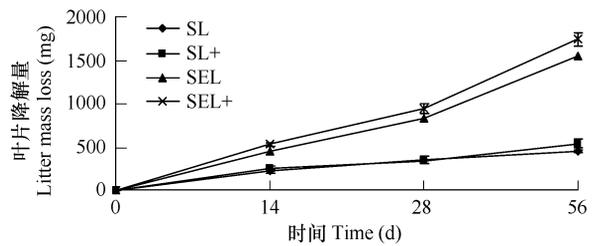


图 1 蚯蚓活动与 CO₂ 升高处理下棉叶凋落物的分解过程

Fig. 1 Leaf litter mass loss during 8 weeks of decomposition

SL + :CO₂加倍 + 土壤 + 叶片 ;SEL + :CO₂加倍 + 土壤 + 蚯蚓 + 叶片 ;SL :CO₂正常 + 土壤 + 叶片 ;SEL :CO₂正常 + 土壤 + 蚯蚓 + 叶片 ;SL + :double CO₂ concentration + soil + leaf ;SEL + :double CO₂ concentration + soil + earthworm + leaf ;SL :normal CO₂ concentration + soil + leaf ;SEL :normal CO₂ concentration + soil + earthworm + leaf

为模拟 CO₂ 加倍处理凋落物在土壤中的降解,本实验采用的棉叶分别是在 CO₂ 加倍 OTC 中生长的棉叶凋落物和对照正常 CO₂ 浓度下生长的棉叶凋落物,其 C/N 值分别为 13.1 和 11.2。据此,得出如表 1 中第 56 天时,各处理组叶片降解量及其土壤 C、N 变化。

对第 56 天不同处理组叶片分解量的方差分析结果表明(见表 1),添加蚯蚓处理组与为添加蚯蚓处理组的棉叶凋落物分解量有显著差异 ($P < 0.05$)。而 CO₂ 升高对降解量无显著影响 ($P > 0.05$) ,SEL+ 与 SEL 处理下第 56 天叶片降解量并无显著差异 ($P > 0.05$)。在 CO₂ 加倍处理和 CO₂ 正常处理组,添加蚯蚓处理组叶片降解量分别为对照不加蚯蚓处理组叶片降解量的 3.29 和 3.39 倍。

表 1 第 56 天各处理组叶片分解量及 C、N 损失量以及对应土壤 C、N 含量增量

Table 1 Litter mass loss, their C&N content and soil C&N content change in treatments treated with litter

处理 Treatments	降解量 (g) Litter mass loss	叶片降解 C 损失量 (g) Litter C loss	叶片降解 N 损失量 (g) Litter N loss	土壤中有机增量 (g) Soil TOC increment	土壤中全 N 增量 (g) Soil TN increment
SL	0.456 ± 0.055 ^a	0.191 ± 0.01 ^a	0.017 ± 0.002 ^a	0.159 ± 0.02 ^b	0.011 ± 0.002 ^b
SLE	1.545 ± 0.156 ^b	0.648 ± 0.07 ^b	0.059 ± 0.006 ^b	0.512 ± 0.05 ^c	0.050 ± 0.006 ^c
SL+	0.530 ± 0.051 ^a	0.270 ± 0.03 ^a	0.021 ± 0.002 ^a	0.201 ± 0.02 ^{bc}	0.015 ± 0.003 ^b
SLE+	1.744 ± 0.180 ^b	0.889 ± 0.08 ^b	0.068 ± 0.007 ^b	0.719 ± 0.08 ^c	0.059 ± 0.007 ^c

同一指标中不同小写字母表示差异达 5% 显著水平 (t 检验); SL+ :CO₂ 加倍 + 土壤 + 叶片 ;SEL+ :CO₂ 加倍 + 土壤 + 蚯蚓 + 叶片 ;SL :CO₂ 正常 + 土壤 + 叶片 ;SEL :CO₂ 正常 + 土壤 + 蚯蚓 + 叶片

Different lower case letters indicate differences between treatments after 56 days ; SL+ :double CO₂ concentration + soil + leaf ;SEL+ :double CO₂ concentration + soil + earthworm + leaf ;SL :normal CO₂ concentration + soil + leaf ;SEL :normal CO₂ concentration + soil + earthworm + leaf

通过进一步对叶片分解 C、N 损失量与土壤 C、N 量增量的相关分析表明,叶片损失 C、N 量与土壤 C、N 量增量两者显著相关 ($R = 0.922$, $P = 0.003$)。

2.2 蚯蚓活动和 CO₂ 升高对土壤有机 C、全 N 平均含量的影响

通过对不同处理的土壤有机 C 和全 N 的测定结果(图 2、图 3)表明,在实验的第 56 天,不同处理组土壤 C、N 含量均有增长,但不同处理组增长幅度不同,其中无土壤和叶片处理组增长与处理前相比未达到显著差异 ($P > 0.05$)。各处理组土壤有机 C 含量变化幅度为 15.2 ~ 19.8 g/kg;土壤全 N 含量变化幅度为 1.23 ~ 1.73 g/kg。在添加叶片的处理组中,添加蚯蚓的处理组 C、N 含量显著高于无蚯蚓作用的处理组。

方差分析表 2 表明,土壤 C、N 含量与 CO₂ 浓度相关不显著 ($P > 0.05$),土壤有机 C 含量与蚯蚓活动相关显著 ($P < 0.05$),但土壤 N 与蚯蚓活动相关不显著 ($P > 0.05$);土壤 C、N 含量与叶片因子相关不显著 ($P > 0.05$),蚯蚓和叶片交互作用对土壤 C、N 量影响显著 ($P < 0.05$)。

凋落叶片单独作用、CO₂ 单独作用、CO₂ 和叶片联合作用单独对土壤 C、N 含量作用都不显著 ($P > 0.05$)。但蚯蚓因子和叶片因子联合作用对有机 C 有显著提高作用 ($P < 0.001$)。蚯蚓单独作用有降低 C 含量的趋势,其对土壤全 N 含量影响不显著 ($P > 0.05$),但 CO₂ 和蚯蚓联合作用对土壤全 N 含量有显著影响 ($P = 0.003$)。CO₂、叶片、蚯蚓 3 因子联合作用对土壤 C、N 含量有

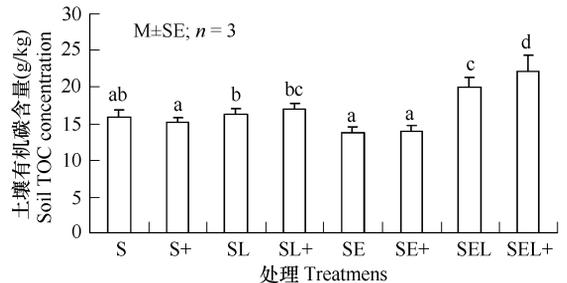


图 2 第 56 天各处理组土壤有机 C 含量

Fig. 2 Soil TOC concentrations of different treatments on the 56 day. Different lower case letters indicate differences between treatments after 56 days. S+ :double CO₂ concentration + soil ;SE+ :double CO₂ concentration + soil + earthworm ;SL+ :double CO₂ concentration + soil + leaf ;SEL+ :double CO₂ concentration + soil + earthworm + leaf ;S :CO₂ 正常 + 土壤 ;SE :CO₂ 正常 + 土壤 + 蚯蚓 ;SL :CO₂ 正常 + 土壤 + 叶片 ;SEL :CO₂ 正常 + 土壤 + 蚯蚓 + 叶片 ;下同

Different lower case letters indicate differences between treatments after 56 days. S+ :double CO₂ concentration + soil ;SE+ :double CO₂ concentration + soil + earthworm ;SL+ :double CO₂ concentration + soil + leaf ;SEL+ :double CO₂ concentration + soil + earthworm + leaf ;S :normal CO₂ concentration + soil ;SE :normal CO₂ concentration + soil + earthworm ;SL :normal CO₂ concentration + soil + leaf ;SEL :normal CO₂ concentration + soil + earthworm + leaf ; the same below

显著提高作用 ($P < 0.001$), 与蚯蚓和叶片联合作用对土壤 C、N 含量的影响相比 ($P = 0.014$, $P < 0.001$), 其效果更显著。

3 讨论

蚯蚓作为最有益的土壤动物, 其活动对土壤生态系统的影响受到国内外众多研究者的重视^[9,10]。CO₂ 浓度升高对土壤养分影响也正成为新的研究热点, 其中最重要的研究内容之一是有有关 CO₂ 升高对地表植物凋落物降解的影响。本实验通过设置多个针对单一因子的处理及对照, 严格控制实验条件, 研究了短期作用下 (3 个月) 接种蚯蚓和增加 CO₂ 浓度对单一类型凋落物降解转化及对土壤 C、N 含量的单独及综合效应, 为了解在未来全球气候变化背景下土壤动物对土壤养分循环和转化的作用及机理奠定基础。

蚯蚓等土壤生物影响土壤元素的过程可以分为以取食活动为主的分解活动和体内消化转化的有效降解活动^[11~14]。实验通过测定棉叶分解量和土壤有机碳、全氮含量分别对两个过程进行了分析, 从而较全面地分析整个转化过程。

土壤中的植物凋落物分解及转化主要由土壤动物和土壤微生物活动共同造成^[15~17]。大气 CO₂ 浓度升高对凋落物分解量的影响主要通过直接影响土壤微生物活动和通过影响土壤动物 (如蚯蚓) 活动而对凋落物降解和物质转化造成影响。在没有土壤动物作用下, 大气 CO₂ 浓度升高影响凋落物分解的可能途径主要为通过直接影响土壤微生物活动促进分解。实验结果表明, SEL+ 和 SEL 处理在第 56 天的棉叶分解量之间差异并未达到显著水平, 说明在本实验中大气 CO₂ 对土壤微生物活动造成的分解量并未产生显著作用。在有蚯蚓的处理中, 大气 CO₂ 浓度升高对叶片分解的影响可以通过直接影响土壤微生物活动和通过影响土壤动物 (如蚯蚓) 活动而对凋落物分解和物质转化两种途径。但实验结果显示, SL+ 和 SEL 之间处理在第 56 天的降解量之间差异同样未达到显著水平, 说明短期内大气 CO₂ 升高对蚯蚓的取食活动未产生显著影响。此结果说明短期内大气 CO₂ 升高对叶片降解量并无显著影响, 而本试验其他试验结果表明它对土壤 C、N 有效成分含量具有影响, 推测其途径可能是通过影响地表植物的生长而改变凋落物成分, 从而影响了蚯蚓和土壤微生物对棉叶凋落物降解转化的有效性。

CO₂ 对土壤 C、N 库产生影响主要通过影响地表植物的 C、N 含量和直接影响其在土壤中的有效降解 (引起土壤元素变化) 过程两个途径。其可能的影响地表植物有效降解的途径有两种: 一是直接影响土壤微生物量和其群落结构, 二是通过影响土壤动物蚯蚓的取食和消化活动从而影响其有效降解, 同时通过影响蚯蚓体内和微环境微生物群落构成及其代谢活动而对土壤 C、N 成分产生影响。对于蚯蚓来说, 它一方面在生命活动中, 为了维持自身的生长发育, 和其它土壤异养生物一样, 主要依赖土壤有机物作为生命活动的能量来源^[18]。蚯蚓活动会造成土壤有机 C 和其它土壤养分的损耗。另一方面, 植物残体或者施入的有机物料经过蚯蚓破碎、过腹之后, 大部分又以碎屑或代谢产物 (蚓粪) 的形式返回到土壤^[18], 只有其中的部分被蚯蚓自身新陈代谢所消耗, 而同时土壤动物也会起到触媒的作用, 即当蚯蚓与土壤微生物相互作用的时候, 活性微生物增多^[18,19], 凋落物养分能更迅速地释放到土中, 比动物本身代谢量所产生的效果更大, 从而造成土壤 C 含量

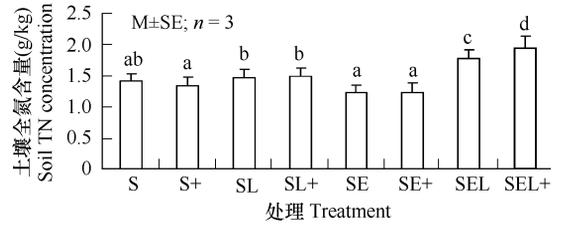


图3 第56天各处理组土壤全N含量

Fig. 3 Soil TN concentrations of different treatments on the 56 day

表2 土壤有机C及全N方差分析结果

Table 2 Results of ANOVA of the effects of earthworms, CO₂, litter and sampling time on TOC and TN

项目 Item	df	土壤有机碳含量 Soil TOC concentration		土壤N含量 Soil TN concentration	
		df	F	df	F
E	1	0.82	0.018	0.001	0.232
CO ₂	1	0.04	0.452	0.001	0.534
L	1	0.09	0.066	0.003	0.098
T	3	0.45	<0.001	0.012	<0.001
E × CO ₂	1	0.80	0.007	0.004	0.003
E × L	1	0.78	0.014	0.022	<0.001
CO ₂ × L	1	0.12	0.579	0.008	0.397
E × L × CO ₂	1	2.32	<0.001	1.357	<0.001

df: 自由度; E: 蚯蚓; L: 叶片; T: 时间

的增加^[20, 21]。

通过测定不同处理下土壤 C、N 含量, 并采用多因子方差分析各因子的作用, 试验结果表明: 凋落叶片单独作用、CO₂ 单独作用、CO₂ 和叶片联合作对土壤 C、N 含量作用都不显著, 这说明大气 CO₂ 的增加并不能影响土壤微生物对土壤 C、N 的转化, 经此途径对地表植物凋落物有效降解的影响甚微。但蚯蚓因子和叶片因子联合作用对有机 C 有显著提高作用。蚯蚓单独作用有降低 C 含量的趋势。叶片的降解对土壤 C 含量的提高起主要作用, 但没有蚯蚓的参与叶片降解缓慢, 而蚯蚓的加入加速了降解, 使土壤 C、N 量变化显著。相关分析也说明, 叶片降解释放的 C、N 量和土壤 C、N 增加量显著相关, 进一步说明本实验中土壤成分构成主要由地表植物降解情况决定, 而植物降解受蚯蚓影响显著。

结果还表明, 蚯蚓单独作用对土壤全 N 含量影响不显著, 但 CO₂ 和蚯蚓联合作用对土壤全 N 含量有显著影响, 说明大气 CO₂ 的增加会显著影响蚯蚓对土壤全 N 的转化。CO₂、叶片、蚯蚓 3 因子联合作用对土壤 C、N 含量有显著提高作用, 与蚯蚓和叶片联合作用对土壤 C、N 含量的影响相比, 其效果更显著, 表明大气 CO₂ 的增加会显著影响蚯蚓对土壤有机碳、全 N 的转化。相关研究表明, 大气 CO₂ 的增加可影响动物生理活性^[6], 本试验中大气 CO₂ 的增加影响蚯蚓对土壤 C、N 的转化的原因可能是大气 CO₂ 的增加影响了蚯蚓体内微生物功能或酶活性, 从而改变了其对所取食叶片的降解能力, 或者是因为大气 CO₂ 的增加改变棉叶的成分, 使其更易于被有效降解转化。

综上所述, CO₂ 浓度的升高通过提高地表植物 C 含量, 改变其营养成分, 影响了其潜在的降解有效性, 同时大气 CO₂ 浓度的升高会影响蚯蚓的体内降解过程, 从而对凋落物的有效降解产生显著影响, 最终改变土壤 C、N 结构。

References :

- [1] Han X G, Wan Z P. Soil biodiversity and trace gases (CO₂, CH₄, N₂O) metabolism: a review. *Biodiversity Science* 2003, (4) 322—332.
- [2] Berntson G M, Bazzaz F A. Belowground positive and negative feedbacks on CO₂ growth enhancement. *Plant Soil*, 1996, (187) 119—131.
- [3] Paterson E. Effect of elevated CO₂ on rhizosphere carbon flow and soil microbial processes. *Globe Change Biology*, 1997, (3) 363—377.
- [4] Jackson R B. CO₂ alters water use, carbon gain, and yield for the dominant species in a natural grassland. *Oecologia*, 1994, (98) 257—262.
- [5] Chen F J, Ge F. An improved top-open chamber for research on effects of elevated CO₂ on agricultural pests in field. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24 (5) 585—590.
- [6] Ge F, Chen F J. Impacts of elevated CO₂ on insects. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (3) 935—944.
- [7] Chen F J, Ge F. A climatic chamber for controlling CO₂ concentrations—CDCC-1 chamber. *Entomological Knowledge*, 2004, 41 (3) :279—281.
- [8] Martin Zimmer, Guido K, Werner T. Do woodlice and earthworm interact synergistically in leaf litter decomposition? *Functional Ecology* 2005, 19: 7—16.
- [9] Edwards C A. The importance of earthworms as key representatives of the soil fauna. In: Edwards CA ed. *Earthworm Ecology*. CRC Press LLC, 2004. 3—9.
- [10] Edwards C A, Bohlen P J. *Biology and Ecology of Earthworms*, 3rd ed. London: Chapman&Hall, 1996. 23—29.
- [11] Helling B, Larink O. Contribution of earthworms to nitrogen turnover in agricultural soil treated with different mineral N-fertilizers. *Appl. Soil Ecol.*, 1998, 9: 319—325.
- [12] James S W. Soil, nitrogen, phosphorus, and organic mater processing by earthworm in a tallgrass prairie. *Ecology*, 1991, (72) 2101—2109.
- [13] Sublet S, Baranski C M, Edwards C A. Earthworm additions increased short-term nitrogen availability and leaching in two grain-crop agroecosystems. *Soil Biol Biochem.*, 1997, (29) 413—421.
- [14] Whalen J K, Parmelee P M, Cartney D A, et al. Movement of N from decomposing earthworm tissue to soil, microbial and plant N pools. *Soil Biol. Biochem.*, 1999, (31) 487—492.
- [15] Brown G G. How do earthworms affect microfloral and faunal community diversity? *Plant Soil*, 1995, (170) 209—231.
- [16] Edwards C A, Fletcher K E. Interactions between earthworms and microorganisms in organic mater breakdown. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 1988,

Q4) 235—247.

- [17] Enami Y, Okano S, Yada H, *et al.* Influence of earthworm activity and rice straw application the soil microbial community structure analyzed by PLEA pattern. *Eur. J. Soil. Biol.*, 2001, (37) 269—272.
- [18] Yin W Y. A brief review and prospect on soil zoology. *Bulletin of Biology*, 2001 36 (8) :1—3.
- [19] Zhang B G, Li G T, Shen T S. Influence of the earthworm *Pheretima guillelmi* on soil microbial biomass and activity. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20 (1) :168—172.
- [20] Syers J K, Springet J A. Earthworms and soil fertility. *Plant Soil*, 1984, (76) 93—104.
- [21] Amador J, Gorres J H, Savin M C. Carbon and nitrogen dynamics in *Lumbricus terrestris* (L.) burrow soil: Relationship to plant residues and macropores. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 2003, (67) :1755—1762.

参考文献:

- [1] 韩兴国, 王智平. 土壤生物多样性与微量气体 (CO₂、CH₄、N₂O) 代谢. *生物多样性*, 2003, (4) 322~332.
- [5] 陈法军, 戈峰. 用于研究大气二氧化碳浓度升高对农田有害生物影响的田间试验装置——改良的开顶式气室. *生态学杂志*, 2005, 24 (5) 585~590.
- [6] 戈峰, 陈法军. 大气二氧化碳浓度的增加对昆虫的影响. *生态学报*, 2006 26 (3) 935~944.
- [7] 陈法军, 戈峰. 一套用于控制 CO₂ 浓度的人工气候箱——CDCC-1 型密闭式动态 CO₂ 气室. *昆虫知识*, 2004, 41 (3) :279~281.
- [9] 尹文英. 土壤动物学研究的回顾与展望. *生物学通报* 2001 36 (8) :1~3.
- [10] 张宝贵, 李贵桐, 申天寿. 威廉环毛蚓对土壤微生物量及活性的影响. *生态学报*, 2000, 20 (1) :168~172.