

# 蚯蚓对麦秸分解速率的影响及其对氮矿化的贡献

庞军柱<sup>1</sup>, 乔玉辉<sup>1,\*</sup>, 孙振钧<sup>1</sup>, 李云乐<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100094; 2. 北京农学院, 北京 102206)

**摘要:** 蚯蚓在有机物分解和土壤的碳氮循环中起着重要作用。研究采用室内微宇宙模拟试验, 研究接种不同密度的蚯蚓对秸秆分解和土壤氮素矿化的贡献。设置 3 个处理, HDT 为接种 6 条蚯蚓, LDT 为接种 2 条 (相当于田间蚯蚓密度水平), ZDT 为不接种作为对照。结果表明: 整个分解过程中, 蚯蚓的引入加速了秸秆的分解, 尤其在分解前期, 处理 ZDT 与 HDT、LDT 处理之间无论是分解率还是分解速率差异显著 ( $P < 0.05$ ), 随着蚯蚓密度的增加, 蚯蚓在分解过程中的作用比例增大。秸秆分解的整个过程中, 蚯蚓对氮的矿化速率, HDT、LDT 两个处理都递减, 并且到后期两个处理趋于一致 (HDT 处理为  $24.2 \sim 14.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , LDT 处理为  $20.3 \sim 10.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ), 说明从长期来看, 在田间蚯蚓密度水平上增大蚯蚓的密度并不能增大基于地下食物网的蚯蚓对氮的矿化速率。

**关键词:** 蚯蚓; 麦秸; 分解速率; 氮矿化

文章编号: 1000-0933(2009)02-1017-07 中图分类号: Q143, Q945, Q958 文献标识码: A

## Effects of earthworm (*Eisenia foetida*) on wheat straw decomposition and its contribution to nitrogen mineralization

PANG Jun-Zhu<sup>1</sup>, QIAO Yu-Hui<sup>1,\*</sup>, SUN Zhen-Jun<sup>1</sup>, LI Yun-Le<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Agricultural Resource and Environment, China Agricultural University, Beijing 100094, China

<sup>2</sup> Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 1017 ~ 1023.

**Abstract:** Earthworms, the most important macro-fauna in terrestrial ecosystem play an important role in organic matter decomposition and nutrient cycling. The influence of the earthworm (*Eisenia foetida*) on these processes was evaluated under a laboratory experiment in which wheat straw has been incorporated into soil under three different treatments (incubated with earthworms at zero (ZDT), low (LDT, as earthworm density of arable land in Quzhou experimental station, Hebei Province) and high density (HDT, three times higher than LDT). Each treatment was regularly destructively sampled to determine decomposition rates of residue and changes of nitrogen. The results showed that decomposition rates were accelerated by the increasing of *Eisenia foetida* density. Compared to ZDT, earthworm significantly increased the decomposition rates ( $P < 0.05$ ) during the prophase of the experiment (days 0–14). During the decomposition process, the nitrogen mineralization rate was slowed down in the HDT and LDT treatments, and was almost similar in the anaphase of the decomposition process (HDT:  $24.2 \sim 14.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , LDT:  $20.3 \sim 10.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ), so in the long run, the increase of earthworm density at farmland level would not increase the nitrogen mineralization rate.

**Key Words:** organic matter; decomposition rate mineralization

蚯蚓是温带、热带和亚热带陆地系统中最为重要的大型土壤无脊椎动物, 它对土壤的形成和发育、理化性

基金项目: 国家“973”重大基础研究前期研究专项资助项目(2002CCA00800); 北京市生态重点学科资助项目(XK10018440)

收稿日期: 2007-08-29; 修订日期: 2007-11-05

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qiaoyh@cau.edu.cn

质的改变、有机物的分解和养分的循环起着重要作用<sup>[1,2]</sup>。蚯蚓通过粉碎、消化、呼吸、排泄对氮矿化和有机质的分解做出直接贡献,通过捕食或者影响其它生物的生存环境进而影响土壤生物的种群动态而对氮矿化和有机质分解做出间接贡献<sup>[2-5]</sup>。在分解过程中,蚯蚓的作用仅次于土壤微生物而居于其它动物之上<sup>[6]</sup>。在耕作土壤中,蚯蚓对于养分的动态,尤其是对于氮的动态具有潜在的重要影响<sup>[7]</sup>。Marinissen 等认为,随着有机肥施用的增加,土壤动物和微生物对养分循环和有机质分解的影响更加重要,氮的矿化也较高<sup>[5]</sup>。李辉信、王霞、Willems 等也认为接种蚯蚓具有促进有机氮矿化的作用<sup>[8-10]</sup>。

土壤食物网是地下氮循环的必须途径,在国外一些长期的定位试验已通过将土壤微生物、土壤动物构建食物网,划分功能团,进而计算其对氮矿化的贡献<sup>[11]</sup>。在地下食物网中,蚯蚓占据着较高层营养级,因此与氮循环密切相关,然而在国内,缺少基于地下食物网的蚯蚓对氮矿化贡献的研究,为此将蚯蚓对氮矿化的贡献与秸秆的分解以及蚯蚓的活动结合起来研究蚯蚓对氮矿化的贡献和秸秆分解的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验方案

本试验在试验室人工气候箱中进行,采用塑料小花盆(高 10cm,直径为 12cm)作为分解器。试验用土壤取自曲周试验站农田 0~15cm 的表层土壤,经手拣和过 2mm 筛,去除了蚯蚓和大的有机质碎片,质地为壤土,基础理化性质见表 1。试验开始后,每个小花盆加入 10.2g 已粉碎成 2~3mm 的小麦秸秆(对照于每公顷 9t 的秸秆还田量),基础理化性质见表 2,与土壤充分混匀,整个混合物重量为 300g,调节土壤含水量到 21.6% (在田间试验条件下获得的适宜于蚯蚓的湿度<sup>[12]</sup>)。

表 1 供试土壤的基础理化性质

Table 1 Physicochemical characteristics of soils

有机质 Organic matter (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen (mg·kg <sup>-1</sup> )	有效氮 Available nitrogen (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available potassium (mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available phosphor (mg·kg <sup>-1</sup> )	pH (0.01mol·L <sup>-1</sup> CaCl <sub>2</sub> )	含盐量 Salinity (mg·kg <sup>-1</sup> )
17.0	110	102.02	73.55	34.37	7.93	0.88

表 2 秸秆基础组分

Table 2 Chemical compositions of the wheat residue (%)

项目 Item	有机质碳 Organic carbon	全氮 Total nitrogen	纤维素 Cellulose	木质素 Lignin	碳氮比 C:N
秸秆 Wheat residue	44.6	0.41	52.57	22.99	99.11

设立 3 个处理,HDT 为接种 6 条蚯蚓,LDT 为接种 2 条(相当于田间蚯蚓密度水平),ZDT 为不接种作为对照,每个处理 3 个重复,分别在试验开始后的第 0、7、14、28、60 天取样,共取 5 次样。

引入的蚯蚓为表居型的赤子爱胜蚓,为曲周试验站农田里的优势种<sup>[13]</sup>,接种蚯蚓后调节土壤含水量以促进蚯蚓尽快适应环境,置于温度为 22℃、湿度为 50%、每天的光照时间为 12h 的人工气候箱中,用保鲜膜封住小花盆,防止蚯蚓逃跑,在保鲜膜上钻上许多小孔以通气,每一个或两个星期调节土壤含水量到 21.6%。

### 1.2 采样及分析方法

分别在第 0、7、14、28、60 天毁灭性取样,用滤纸吸水称重法测蚯蚓生物量<sup>[14]</sup>,用灰化法测样品的有机质含量,用浓硫酸双氧水消煮开氏定氮法测秸秆的氮含量,用重铬酸钾容量法-外加热法测秸秆的碳含量<sup>[15]</sup>。

### 1.3 数据处理

#### 1.3.1 秸秆的分解率用公式

$$FLi = (SaAFDM - SiAFDM) / (LiAFDM - SiAFDM)$$

式中,FLi 为每次取样时小花盆中的秸秆所占的重量比;SaAFDM 为每次取样时所取样品中的有机质占整个所取样品重量的比例;SiAFDM 为小花盆中土壤的有机质重量比例;LiAFDM 为初始的将土壤与秸秆混匀后

其中的有机质重量比例。

该公式是用来计算当凋落物袋中混入土壤时,凋落物袋中凋落物重量比。该公式的推导基于 3 个假设 (1) 在整个分解过程中,凋落物袋中的土壤有机质比例不变;(2) 在整个分解过程中,凋落物袋中的凋落物有机质比例不变;(3) 凋落物袋中只有一种接触物质——土壤。将该公式用来计算不同的分解阶段小花盆中小麦秸秆的重量比,然后乘以整个小花盆中混合物的重量就是小花盆中小麦秸秆的重量,也就是在该次取样时剩余的秸秆重量。而初始的加入每个小花盆的小麦秸秆为 10.2g,这样就可以算出不同的取样时间的小麦秸秆分解率<sup>[16]</sup>。

### 1.3.2 每天的分解速率常数 $k$ 用公式<sup>[17]</sup>

$$\ln(\text{remaining mass}/\text{initial mass}) = -k \times \text{time}$$

### 1.3.3 蚯蚓对氮的矿化速率用公式<sup>[5]</sup>

$$N_{c,s} = (1/R_s - P_{c,s}/R_c)R_{c,s}/(1 - P_{c,s})$$

式中, $N_{c,s}$ 是氮的矿化速率; $R_s$ 是秸秆的碳氮比; $R_c$ 是蚯蚓的碳氮比; $P_{c,s}$ 是生产速率; $R_{c,s}$ 是呼吸速率。这是 1993 年 Marinissen 和 de. Ruiter 推导的估算蚯蚓对氮的矿化量的公式,该公式考虑了蚯蚓对土壤微生物的激活作用,本文根据所给定的相关参数对  $P_{c,s}$ 、 $R_{c,s}$  进行了推导,其中蚯蚓的特定死亡速率、同化效率、生产效率直接引用,其它的参数通过试验测得:

$$P_{c,s} = \{ \text{Biomass}_{\text{取样}} - [ \text{Biomass}_{\text{初始}} \times (1 + \text{取样的间隔天数}/(365 \times \text{蚯蚓的特定死亡速率})) ] \} / (\text{取样的间隔天数} \times \text{微宇宙的面积})$$

$$R_{c,s} = [ (\text{初始的秸秆质量} - \text{取样时的秸秆质量}) \times \text{蚯蚓的作用比率} \times \text{蚯蚓的同化效率} \times (1 - \text{蚯蚓的生产效率}) ] / (\text{取样的间隔时间} \times \text{微宇宙的面积})$$

### 1.3.4 蚯蚓在分解过程中的作用比例用差减法<sup>[18]</sup>

$$BF = (A - B) / (100 - B) \times 100\%$$

式中, $A$  为没有蚯蚓的微宇宙中剩余的秸秆百分比, $B$  为有蚯蚓的微宇宙中剩余的秸秆百分比。

## 1.4 数据统计方法

OFFICE EXCEL2003 计算分析工具;WINDOWS SPSS V11.0 版统计分析程序。

## 2 结果与分析

### 2.1 接种蚯蚓对秸秆分解率的影响

图 1 是接种不同密度的蚯蚓秸秆的分解率变化动态,从图可以看出,在整个分解过程中,秸秆的分解率处理之间  $HDT > LDT > ZDT$ ,在分解的初始阶段,ZDT、LDT 处理的分解率都不到 40%,而 HDT 处理的分解率已超过了 50%,在分解到 60d 时,ZDT 处理的分解率为 56.8%,而 LDT、HDT 处理的分解率都超过了 70%,HDT 处理更是接近 80%。说明蚯蚓的引入在整个分解过程中都加速了秸秆的分解,Mackey 和 Kladvko 也报道了在有蚯蚓的情况下,大豆和玉米秸秆碎片的分解被加快<sup>[19]</sup>。

从分解阶段来看,在分解的前期,处理 ZDT 与处理 LDT、HDT 之间差异显著( $P < 0.05$ ),说明在分解的前期,蚯蚓的引入对有机物的分解起着更为重要的作用,而分解后期各处理之间并不显著。这是因为新鲜的秸秆碎片被认为是蚯蚓最好的食物源,秸秆碎片中易于同化的碳水化合物含量高,木质素-纤维素复合物的含量低,而在分解的后期,由于秸秆已经腐败变质,木质素-纤维素等不易分解的物质的积聚,很少被蚯蚓取食<sup>[20,21]</sup>,可以认为,在分解的前期是蚯蚓的直接作用加间接作用,在分解的后期蚯蚓只是起间接作用。

### 2.2 接种蚯蚓对秸秆分解速率的影响

图 2 是接种不同密度的蚯蚓秸秆的分解速率变化动态,从图可以看出,在整个分解过程中,ZDT、LDT、HDT 3 个处理秸秆分解过程都是前期分解快,后期分解慢,说明蚯蚓的引入并没有改变分解的整个进程,与经典的两个阶段的分解模型相符<sup>[22]</sup>。另外,在分解的初始阶段,ZDT、LDT 处理的分解速率比较接近,分别为  $2.59 \times 10^{-2} \text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  和  $2.99 \times 10^{-2} \text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,而 HDT 处理的分解速率却高达  $4.32 \times 10^{-2} \text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,这是因

为 6 条蚯蚓的取食作用要远大于 2 条蚯蚓,并且在分解的初始阶段,蚯蚓的取食作用是主要的<sup>[22,23]</sup>。

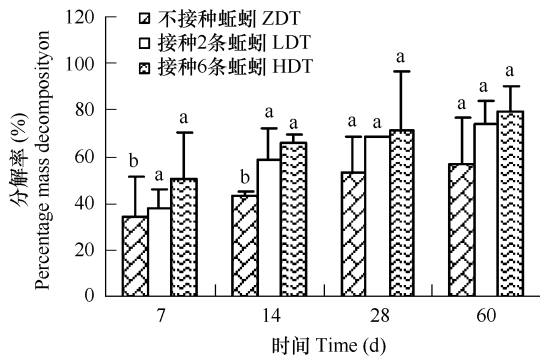


图 1 接种不同密度蚯蚓条件下秸秆的分解率变化动态

Fig. 1 Percentage mass decomposition of wheat residue under different earthworm densities condition

a, b, c 为 Duncan's 多重比较,不同的字母表示处理之间差异显著,  $P < 0.05$  Duncan's Multiple Range Test, Different letters (a, b, c) indicate significant differences between treatments ( $P < 0.05$ )

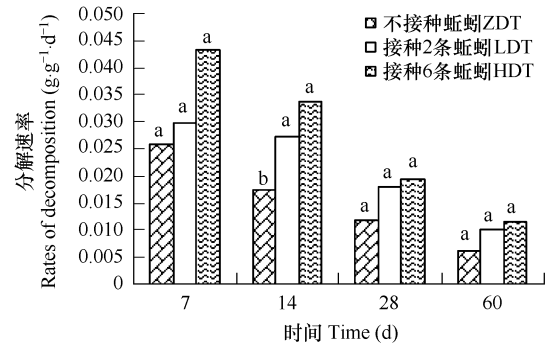


图 2 接种不同密度蚯蚓条件下秸秆的分解速率变化动态

Fig. 2 Decomposition rates of wheat residue under different earthworm densities condition

a, b, c 为 Duncan's 多重比较,不同的字母表示处理之间差异显著,  $P < 0.05$  Duncan's Multiple Range Test, Different letter (a, b, c) indicate significant differences between treatments ( $P < 0.05$ )

在分解的后期, LDT、HDT 处理的分解速率比较接近,分别为  $1.00 \times 10^{-2} \text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  和  $1.15 \times 10^{-2} \text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,而 ZDT 处理的分解速率只有  $0.61 \times 10^{-2} \text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。这是因为在分解过程后期,土壤有机质主要是由高度凝聚的胡敏酸分子构成,这些胡敏酸分子不易被土壤微生物分解,蚯蚓通过创造适宜的环境和提供易于同化的富含能量的底物来激活游离的土壤微生物<sup>[24]</sup>,对土壤有机物进一步分解。HDT、LDT 处理分解速率比较接近的原因可能是 LDT 处理的蚯蚓密度对照于田间 ( $20.50 \text{individual} \cdot \text{m}^{-2}$ ),HDT 处理的蚯蚓密度为 LDT 处理的 3 倍,相比于田间 HDT、LDT 处理蚯蚓种群组成单一,在田间赤子爱胜蚓占总的调查个体数的 60% 以上,但还有别的蚯蚓种<sup>[13]</sup>,年龄结构也比较单一,所以在微宇宙中,只能占据相同的生态幅,随着蚯蚓活性和生物量的增大,种群内部有互斥作用,对于 HDT 处理,蚯蚓种群内部的互斥作用更强烈,所以,在狭小的微宇宙中, HDT、LDT 处理分解速率比较接近。

### 2.3 蚯蚓在分解过程中的作用

用差减法对蚯蚓在分解过程中的作用进行量化<sup>[18]</sup>,图 3 表示了蚯蚓在有机物分解过程中所起的作用。总体来看,在整个分解过程中,蚯蚓的作用比例 HDT 处理大于 LDT 处理,从 7d 到 14d, LDT 处理有一个明显的增加,从 10.7% 增加到 26.7%,增大了两倍多,到了分解的中后期,蚯蚓的作用比例在 23% 左右。HDT 处理从 14d 到 28d,蚯蚓的作用比例有一个明显的降低,从 35.2% 降低到 26%。

Tian 等认为蚯蚓对高的 C:N 比的秸秆分解贡献率更大,在分解的初始阶段,秸秆高的氮含量促进了秸秆的分解,但是在分解的后期,氮与木质素相互作用,产生了不易分解的木质素——氮化合物,减缓了秸秆的分解<sup>[25]</sup>。

从图 3 中还可以看出,在分解的初始阶段,蚯蚓的作用 HDT 处理远大于 LDT 处理, HDT 处理为 32.1%, LDT 处理为 10.7%,而在分解的后期,蚯蚓的作用 HDT、LDT 处理比较接近, HDT 处理为 26.0% 左右, LDT 处理为 23.0% 左右,可以认为分解刚开始时由于秸秆碎片新鲜,而蚯蚓由于刚引入微宇宙,生物量比较小,直接的作用(取食、粉碎)是主要的,间接的作用(挖掘、穿插)比较小。随着秸秆的分解,直接的作用不断的减弱,由于蚯蚓生物量的增大,间接的作用不断增强,在分解到 14d 左右时,直接作用加间接作用达到最大,这时,由于秸秆已经腐败变质,并且木质素、多酚等不易分解的物质的积聚,蚯蚓的取食作用迅速的减小,蚯蚓的主要作用是通过挖掘、穿插为其它土壤生物分解有机质创造有利的条件<sup>[5,20,21]</sup>,但由于蚯蚓密度和生物量增大时,其种群内部强烈的互斥作用,使得蚯蚓的作用在 HDT、LDT 处理比较接近。

## 2.4 蚯蚓对氮的矿化速率的影响

图 4 表示了蚯蚓在有机物分解过程中对氮的矿化速率。蚯蚓对氮的矿化速率公式涉及到好几个变量和参数, 蚯蚓的生物量(见图 5)和秸秆的碳氮比是两个很重要的变量, 并且蚯蚓的生产效率、呼吸速率、碳氮比也会随着蚯蚓所处生境的变化、种类的不同以及生长期的不同而变化, 所以该公式的结果是一种估算。

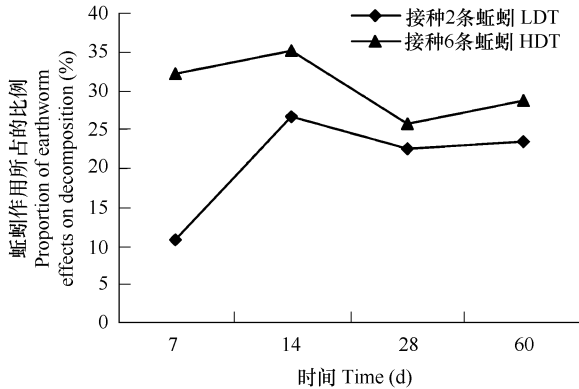


图 3 秸秆的分解过程中蚯蚓作用变化动态

Fig. 3 Proportion of earthworm effects on decomposition during the decomposition processes

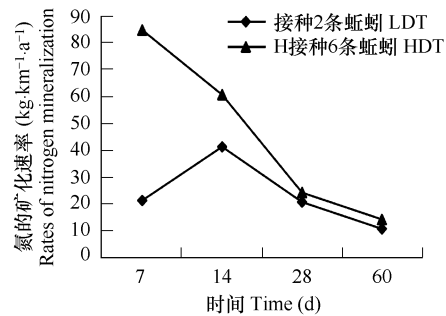


图 4 秸秆分解过程中蚯蚓对氮的矿化速率变化动态

Fig. 4 Rates of nitrogen mineralization with different earthworm densities

从图 4 可以看出, 蚯蚓对氮的矿化速率 HDT 处理一直降低, 从 7d 的  $84.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  降低到 28d 的  $24.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 降低了 70%, 然后降低的比较缓慢。LDT 处理先增大后降低从 7d 的  $21.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  增大到 14d 的  $40.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 增大了将近 1 倍, 然后迅速降低到 28d 的  $20.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , LDT 处理和 HDT 处理趋于一致, 说明从长期来看, 在田间蚯蚓密度水平上增大蚯蚓的密度并不能增大蚯蚓对氮的矿化速率, 而 Lachniet 等做的室内模拟试验得出结论, 净的氮矿化随着蚯蚓密度的增加显著的增加<sup>[26]</sup>, 这是由于本文得出的结论是基于地下食物网的蚯蚓对氮的矿化速率, 主要包含的是蚯蚓通过消化、呼吸、排泄对氮矿化的贡献, 也就是直接的贡献, 而在实际情况中, 还应包括蚯蚓的间接作用, 即蚯蚓与其它的土壤生物, 尤其是与土壤微生物的相互作用而对氮的矿化的贡献。但由于土壤生物是土壤圈的核心组分, 对土壤的矿质营养循环起推动作用, 所以基于地下食物网的营养物质循环是土壤生态学研究热点<sup>[8,27-29]</sup>, 具有重要的理论意义。

## 3 主要结论

**3.1** 秸秆的整个分解过程中, 蚯蚓的引入加速了秸秆的分解, 研究结果表明随着蚯蚓密度的增大秸秆的分解率和分解速率也随之增大, 尤其是在分解的前期, 处理 ZDT 与 HDT、LDT 处理之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

**3.2** 随着蚯蚓密度的增加, 蚯蚓在分解过程中的作用比例增大, 尤其是在分解的前期, HDT 处理远大于 LDT 处理, 在分解的中后期, HDT 处理与 LDT 处理比较接近, 这主要与分解过程中秸秆组分的变化有关, 也与蚯蚓生物量变化有关。

**3.3** 秸秆分解的整个过程中, 蚯蚓对氮的矿化速率 HDT、LDT 两个处理都递减, 并且到后期两个处理趋于一致 (HDT 处理为  $24.2 \sim 14.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , LDT 处理为  $20.3 \sim 10.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ), 说明从长期来看, 在田间蚯蚓密度水平上增大蚯蚓的密度并不能增大基于地下食物网的蚯蚓对氮的矿化速率。

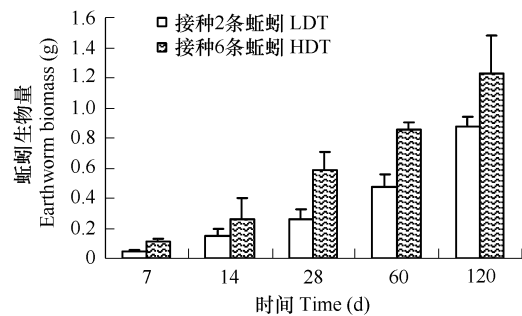


图 5 秸秆分解过程中蚯蚓生物量变化动态

Fig. 5 Dynamic changes of earthworm biomass during the decomposition processes

**References:**

- [ 1 ] Yin W Y, *et al.* Soil animals of China. Beijing: Science Press, 2000.
- [ 2 ] Brown G G, Barois I, Lavelle P. Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic functional domains. *European Journal of Soil Biology*, 2000,36:179 — 198.
- [ 3 ] Whalen J K, Costa C. Linking spatio-temporal dynamics of earthworm population to nutrient cycling in temperate agricultural and forest ecosystems. *Pedobiologia*, 2003,47:801 — 806.
- [ 4 ] Lavelle P, Spain A V. *Soil Ecology*. Kluwer Academic Publishers, 2001.359 — 460.
- [ 5 ] Marinissen J C Y, Ruiten P C. Contribution of earthworms to carbon and nitrogen cycling in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 1993,47:59 — 74.
- [ 6 ] Qiao Y H, Cao Z P, Wu W L. Secondary succession of earthworm population in high production agro-ecosystem in north China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004,24(10):2307 — 2311.
- [ 7 ] Binet F and Trehen P. Experimental microcosm study of the role of *Lumbricus Terrestris* (Oligochaeta: Lumbricidae) on nitrogen dynamics in cultivated soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1992,24:1501 — 1506.
- [ 8 ] Li H X, Hu F, Shen Q R, *et al.* Effects of earthworm inoculation on soil carbon and nitrogen dynamics and on crop yield with application of corn residues. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(12):1637 — 1641.
- [ 9 ] Wang X, Hu F, Li H X, *et al.* Effects of earthworm on soil carbon, nitrogen on upland-rice soil under different manipulation of corn straw. *Ecology and Environment*, 2003, 12(4):462 — 466.
- [ 10 ] Willems J J G M, Marinissen J C Y, Blair J. Effects of earthworm on nitrogen mineralization. *Biology and Fertility of Soils*, 1996,23:57 — 63.
- [ 11 ] Ruiten P C, Moore J C, Zwart K B, *et al.* Simulation of nitrogen mineralization in below-ground food webs of two winter wheat fields. *Journal of Applied Ecology*, 1993,30:95 — 106
- [ 12 ] Li Y L, Qiao Y H, Sun Z J, *et al.* The eco-process of agricultural organic matter decomposition under different soil conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6):1933 — 1939.
- [ 13 ] Wu W L, Qiao Y H, Xu Q, *et al.* An ecological study on earthworm in farmland of salinity transforming area in North China Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7):1109 — 1113.
- [ 14 ] Cortez J, Bouche M B. Decomposition of Mediterranean leaf litters by *Nicodrilus meridionalis* (lumbricidae) in laboratory and field experiments. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001,33:2023 — 2035.
- [ 15 ] Huang C Y. *Soil Science*. Beijing: Chinese Agricultural Press, 1999.38.
- [ 16 ] Blair J M. Nitrogen, Sulfur and phosphorus dynamics and soil respiration in decomposing deciduous leaf litter in the southern Appalachians. *Soil Biology and Biochemistry*, 1988,20:693 — 701.
- [ 17 ] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 1963,44:322 — 331.
- [ 18 ] Seastedt T R. The role of microarthropod in decomposition and mineralization processes. *Annual Review of Entomology*, 1984,29:25 — 46.
- [ 19 ] Mackay A D, Kladviko E J. Earthworm and rate of breakdown soybean and maize residues in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985,17:851 — 857.
- [ 20 ] Lavelle P. Earthworm activities and the soil system. *Biology and Fertility of Soils*,1988,6:237 — 251.
- [ 21 ] Cotrufo M F, Ineson P, Roberts J D. Decomposition of birth litters with varying C to N ratios. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(9):1219 — 1221.
- [ 22 ] Berg B, Staaf H. Decomposition rate and chemical change of Scots pine needle litter II. influence of chemical composition. *Ecological Bulletin (Stockholm)*, 1980,32:363 — 372.
- [ 23 ] Cortez J, Demard J M, Bottner P, *et al.* Decomposition Mediterranean leaf litters: a microcosm experiment investigating relationship between decomposition rates and litter quality. *Soil Biology Biochemistry*, 1996, 28(4-5):443 — 452.
- [ 24 ] Fragoso C, Brown G G, Patron J C, *et al.* Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function in the tropics: the role of earthworms. *Applied Soil Ecology*, 1997, 6(1):17 — 35.

- [25] Tian G, Brussaard L, Kang B T. Breakdown of plant residues with contrasting chemical compositions under humid tropical conditions: effects of earthworms and millipedes. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(3):277–280.
- [26] Lachnicht S L, Hendrix P F. Interaction of the earthworm *Diplocardia mississippiensis* (Megascolecidae) with microbial and nutrient dynamics in a subtropical Spodosol. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33:1411–1417.
- [27] Beare M H, Parmelee R W, Hendrix P F, *et al.* Microbial and faunal interactions and effects on litter nitrogen and decomposition in agroecosystems. *Ecological Monographs*, 1992, 62(4):569–591.
- [28] Ruitter P C, Veen J A, Moore J C, *et al.* Calculation of nitrogen mineralization in soil foodwebs. *Plant Soil*, 1993, 157(2):263–273.
- [29] Fu S L, Cabera M L, Coleman D C, *et al.* Soil carbon dynamics of conventional tillage and no-tillage agroecosystems at Georgia Piedmont-HSB-C models. *Ecological Modelling*, 2000, 131(2-3): 229–248.

#### 参考文献:

- [1] 尹文英,等. 中国土壤动物. 北京:科学出版社,2000.
- [6] 乔玉辉,曹志平,吴文良. 华北高产农田生态系统中蚯蚓种群次生演替规律. *生态学报*,2004,24(10):2302~2311.
- [8] 李辉信,胡锋,沈其荣,等. 接种蚯蚓对秸秆还田土壤碳、氮动态和作物产量的影响. *应用生态学报*,2002,13(12):1637~1641.
- [9] 王霞,胡锋,李辉信,等. 秸秆不同还田方式下蚯蚓对旱作稻田土壤碳、氮的影响. *生态环境*,2003,12(4):462~466.
- [12] 李云乐,乔玉辉,孙振钧,等. 不同土壤培肥措施下农田有机物分解的生态过程研究. *生态学报*,2006,26(6):1933~1939.
- [13] 吴文良,乔玉辉,徐芹,等. 华北盐渍化改造区农田蚯蚓生态学研究——以河北省曲周县为例. *生态学报*,2001,21(7):1109~1113.
- [15] 黄昌勇. 土壤学. 北京:中国农业出版社,1999.