

蚯蚓对秸秆还田土壤细菌生理菌群 数量和酶活性的影响

陶 军, 张树杰, 焦加国, 李 沙, 刘满强, 胡 锋, 李辉信*

(南京农业大学 资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要:在连续 7a 稻麦轮作系统中,通过测定作物收获后表层土壤(0—20cm)中 4 种细菌生理菌群数量和 4 种酶活性的变化,研究接种蚯蚓(*Metaphire guillelmi*)对秸秆(表施或混施)还田土壤的细菌生理菌群数量和酶活性的影响。试验设 5 个处理:对照、秸秆表施、秸秆混施、秸秆表施且接种蚯蚓、秸秆混施且接种蚯蚓。结果表明,单独秸秆还田促进了土壤氨化细菌、固氮菌、纤维素分解菌和无机磷分解菌数量增加,且土壤酶活性显著地增强;在秸秆表施方式下,接种蚯蚓使得上述 4 种细菌生理菌群微生物的数量增加;秸秆混施方式下,接种蚯蚓增加氨化细菌和无机磷分解菌数量,且土壤蛋白酶和蔗糖酶活性显著地增强($P < 0.05$)。另外,蚓粪中 4 种细菌生理菌群微生物数量和水解酶活性都远远高于其周围土壤。在秸秆还田的作物轮作系统中,蚯蚓活动进一步增加土壤微生物数量和酶活性,对改善农田土壤肥力有着重要意义。

关键词:蚯蚓;秸秆;细菌生理菌群;土壤酶活性

Effects of earthworm on number of soil bacterial physiological groups and enzyme activity in a maize residue amended wheat agro-ecosystem

TAO Jun, ZHANG Shujie, JIAO Jiaguo, LI Sha, LIU Manqiang, HU Feng, LI Huixin*

College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

Abstract: The influence of earthworm activities on the number of soil bacterial physiological groups and enzyme activity was investigated in an agro-ecosystem during the wheat growth season of a maize residue amended seven years rice-wheat rotation. Experimental plots in the rotation had five treatments, i. e. incorporation or surface-application of maize residues with or without earthworm inoculation and a control. The application of maize residues to soil gave higher number of ammonifiers, nitrogen-fixing bacteria, cellulose-decomposing microbes, inorganic phosphorus-decomposing bacteria and significantly higher activities of soil enzyme than control soil. The inoculation of earthworms in maize residue surface-application had higher the numbers of four bacterial physiological groups than the same treatment without earthworms, while the inoculation of earthworms in maize residue incorporation had higher the number of ammonifiers and inorganic phosphorus-decomposing bacteria and significant ($P < 0.05$) increase in soil protease and invertase activities compared with the same treatment without earthworms. The numbers of four soil bacterial physiological groups and four soil enzyme activities in earthworm casts were significantly ($P < 0.05$) higher than those in the surrounding soil. Earthworm activity further increased soil microbial numbers and enzyme activities in crop residue amended agro-ecosystem, which was very important in improving soil fertilization.

Key Words: earthworm; maize residues; bacterial physiological groups; soil enzyme activity

传统的农业管理措施正面临越来越多的生态问题:温室气体排放量的增加,土壤微生物数量的减少,土壤

基金项目:教育部博士点基金资助项目(No. 20070307049)

收稿日期:2009-01-09; 修订日期:2009-03-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huixinli@njau.edu.cn

肥力的下降^[1]。利用作物秸秆还田后,其降解所释放的营养物质可为土壤微生物提供天然的食物,对土壤微生物的活动和数量具有促进作用。但农田施用秸秆带来一系列问题,如秸秆的难腐解、引起耕作困难、与作物争肥等。秸秆还田对土壤质量提高不仅取决于作物秸秆本身的质量,还要依赖于土壤中微生物和动物活性^[2]。蚯蚓作为陆地生态系统中重要的大型动物,它们的取食活动以及与土壤微生物相互作用能加快有机物料的分解、促进土壤养分转化和增强土壤微生物活性。有研究表明,土壤的细菌生理菌群和酶在生物物质(C、N和P)循环过程中完成对有机物质的分解,对于维持土壤肥力,改善土壤质量具有很大的作用^[3-4],同时土壤细菌生理类群能反映土壤生态系统结构的稳定性。但先前国内外对蚯蚓作用主要集中在土壤的养分和土壤中总微生物量的研究或室内培养试验的研究,而对酶活性的研究也集中在土壤表居型蚯蚓及其排泄蚓粪^[5-7]。而在上食下居型蚯蚓(Anecic)的作用下,土壤和排泄的蚓粪中细菌生理菌群微生物和酶活性的研究很少,尤其基于长期田间实际条件下的研究就更少了。为此,利用田间接种蚯蚓长期定位试验,研究蚯蚓活动对稻麦轮作农田土壤的细菌生理菌群数量和酶活性的影响,以期对蚯蚓引入农田秸秆管理,进一步改善土壤肥力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计和样品采集

试验小区由混凝土池子组成(2.8 m × 1.0 m × 0.6 m),池内填入 50 cm 厚的土层,土壤机械组成为:粘粒(< 0.002 mm) 11.4%,粉粒(0.002—0.05 mm) 84.1%,砂粒(0.05—2 mm) 4.5%;填土前用孔径为 4 mm 筛子筛分并结合手拣分离出土壤中的蚯蚓,在每季作物收获后进行蚯蚓种群调查与控制,接种蚯蚓小区保持在每季作物种植前蚯蚓生物量达 60—80 g m⁻²。从 2001 年麦季开始,设计 5 个处理:对照(CK)、秸秆表施(M)、秸秆表施且接种蚯蚓(ME)、秸秆混施(I)、秸秆混施且接种蚯蚓(IE),共计 5 个处理,每个处理 3 个重复。种植制度为稻麦轮作,其中水稻为早作。稻季氮、磷和钾肥用量分别为 21.0 g m⁻²(纯 N)、10.5 g m⁻²(纯 P)和 10.5 g m⁻²(纯 K),肥料品种为尿素、过磷酸钙和氯化钾;麦季氮、磷和钾肥用量分别为 22.5、12.0 g m⁻²和 12.0 g m⁻²。玉米秸秆(粉碎至 2 cm 左右)的施用量每季均为 750 g m⁻²。试验所用蚯蚓为威廉腔环蚓(*Metaphire guillelmi*),2006 年 6 月份小麦收获后,采集各处理小区 0—20 cm 土层土样,同时分别收集秸秆表施和混施且接种蚯蚓处理的土表蚓粪(MEC 和 IEC),鲜样保存于 4℃ 冰箱备用。

1.2 各指标的分析与测定方法

1.2.1 土壤细菌生理菌群^[8]

氨化细菌,蛋白胨琼脂平板表面涂布法;固氮细菌,阿西比(Ashby)无氮琼脂平板表面涂布法;纤维素分解菌,赫奇逊纤维(Hutchinson)培养基涂布法;无机磷分解菌,蒙古娜卵磷脂培养基涂布法。

1.2.2 土壤酶活性^[9]

尿酶(mg NH₄⁺ kg⁻¹ h⁻¹)采用苯酚钠比色法;蛋白酶(mg tyrosine kg⁻¹ h⁻¹)采用茆三酮比色法;碱性磷酸酶(mg phenol kg⁻¹ h⁻¹)采用磷酸苯二钠比色法;蔗糖酶(mg glucose kg⁻¹ h⁻¹)采用 3,5-二硝基水杨酸比色法。

2 结果与分析

2.1 蚯蚓活动对土壤细菌生理菌群的影响

分析结果(表 1)表明,与对照土壤相比,玉米秸秆施入使得土壤氨化细菌、固氮菌、纤维素分解菌和无机磷分解菌等生理菌群的数量增加了两倍多。接种蚯蚓后,与单独的玉米秸秆表施和混施两处理相比,氨化细菌和无机磷分解菌的数量分别分别增加了 16.2%、19.2% 和 24.0% 和 6.6%。在玉米秸秆表施条件下,蚯蚓接种使固氮菌和纤维素分解菌的数量分别增加了 7.0% 和 18.8%,而在玉米秸秆混施条件下,蚯蚓接种这两类菌群的数量分别减少了 4.8% 和 8.3%。

从表 1 还可看出,土壤表面蚓粪中固氮菌、氨化细菌、纤维素分解菌和无机磷分解菌等生理菌群的数量远远地大于其周围土壤(增幅在 1.4—7.4 倍)。

表 1 土壤细菌生理菌群数量

Table 1 Soil bacterial physiological groups numbers

处理 Treatments	氨化细菌 Ammonifiers /($\times 10^6$ g $^{-1}$ dry soil)	固氮菌 Nitrogen-fixing bacteria /($\times 10^6$ g $^{-1}$ dry soil)	纤维素分解菌 Cellulose-Decomposing microbes /($\times 10^6$ g $^{-1}$ dry soil)	无机磷分解菌 Inorganic phosphorus decomposing bacteria /($\times 10^6$ g $^{-1}$ dry soil)
对照 (CK)	134.2	3.43	0.44	0.47
秸秆表施 (M)	274.3	8.80	0.96	1.83
秸秆表施 + 蚯蚓 (ME)	318.7	9.42	1.14	2.27
秸秆混施 (I)	268.9	10.85	1.20	2.44
秸秆混施 + 蚯蚓 (IE)	320.5	10.32	1.10	2.60
表面蚓粪 (MEC) (秸秆表施 + 蚯蚓)	1300.3	26.33	5.30	3.47
表面蚓粪 (IEC) (秸秆混施 + 蚯蚓)	2383.2	35.00	7.89	3.61

CK: 对照; M: 秸秆表施; I: 秸秆混施; ME: 秸秆表施 + 蚯蚓; IE: 秸秆混施 + 蚯蚓; MEC: 秸秆表施 + 蚯蚓的表面蚓粪; IEC: 秸秆混施 + 蚯蚓的表面蚓粪

2.2 蚯蚓活动对土壤酶活性的影响

由图 1 可知,不论秸秆表施或混施入土壤中,与对照相比,土壤蛋白酶、尿酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶的活性基本上均有显著($P < 0.05$)提高。在秸秆混施条件下,蚯蚓接种促进了这 4 种土壤酶活性的增强,但仅蛋白酶和蔗糖酶的活性有显著性差异($P < 0.05$);在秸秆表施条件下,蚯蚓接种没有改变 4 种土壤酶的活性。

从图 2 可以看出,蚯蚓的排泄物-蚓粪与其周围土壤相比较,蚓粪中 4 种酶活性都显著增强($P < 0.05$),特别是尿酶和蔗糖酶活性达极显著水平($P < 0.01$)。

3 讨论

3.1 土壤细菌生理菌群

细菌生理类群指相同或不同形态执行着同一种功能的一类细菌^[10]。在土壤中,各生理类群微生物直接参与 N、C 和 P 等营养元素的循环过程^[11],其数量和活性直接关系到土壤生态系统的维持和改善^[3]。此外,这些微生物与植物的根系接触紧密,为植物提供养分促其生长^[12-13]。

玉米秸秆中含有相当数量的碳、氮、磷、钾等营养元素,加入土壤后,对土壤微生物的活动、数量具有促进作用^[14],进而土壤中细菌生理菌群数量也得到较大的增加。无论秸秆以何种方式施入土壤中,接种蚯蚓增加

土壤中氨化细菌和无机磷分解菌的数量。这可能因为蚯蚓活动增加整个土壤的微生物量^[15],还可能和它们活动形成蚓穴和蚓粪中生理菌群微生物数量的增加有关。Parkin 和 Berry 通过室内试验研究得出,在土体蚓穴壁有较高的氨化细菌数量^[16]。同时,他们在田间试验研究中测得蚓际土壤中氨化细菌数量显著高于非蚓穴土壤。此外,通过收集接种蚯蚓处理的土壤表面新鲜蚓粪,测得蚓粪中有较高的氨化细菌和无机磷分解菌数量(表 1)。土壤中氨化细菌数量的增加,使更多不能被植物所利用的有机含氮化合物转化为可给态氮,也为植物及其它微生物的繁殖和活动创造了良好的营养条件^[17-18]。无机磷分解菌在土壤的 P 素的转化过程中起了重要作用^[19]。蚯蚓活动使得这类菌数量增加,促进土壤中不溶性的无机磷转化成可溶性磷盐^[20],从而促使土壤中易被植物吸收利用的有效 P 量的增加。

在玉米秸秆表施条件下,接种蚯蚓表现出促进了土壤固氮细菌和纤维素分解菌数量的增加。纤维素是组成植物残体的主要成分,纤维素分解菌积极参与植物残体中纤维素的分解^[21]。在玉米秸秆表施条件下,蚯蚓

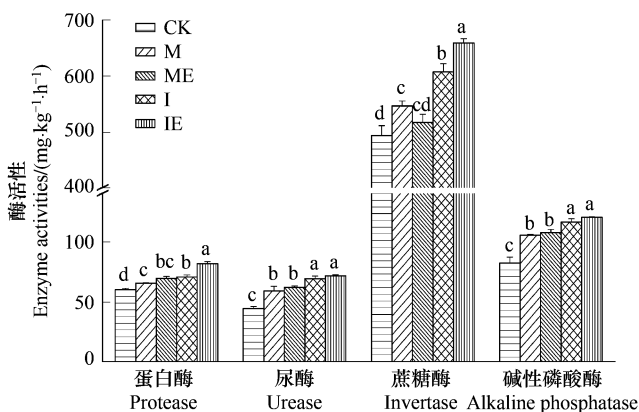


图 1 土壤的酶活性

Fig. 1 Soil enzyme activities

CK: 对照; M: 秸秆表施; I: 秸秆混施; ME: 秸秆表施 + 蚯蚓; IE: 秸秆混施 + 蚯蚓; 不同小写字母表示差异达 5% 显著水平 (Duncan 检验)

活动并没有使玉米秸秆在麦季收获时完全分解,因此纤维素分解菌数量在增加。从固氮菌和纤维素分解菌的互生关系表明:固氮菌需要纤维素分解菌将作物秸秆分解成较小的分子碳水化合物作为其能源,进行固氮作用^[22],因此土壤中固氮菌的数量可能随纤维素分解菌数量增加而增加。土壤固氮细菌的增加可以更多地固定大气中氮,从而可以提高土壤氮素量。总之,由于蚯蚓在土壤中的取食活动强烈地影响土壤的物理和生物化学性状,改变了土壤微生物的生存环境^[23],可能有利于土壤细菌生理菌群数量的增加。

另外,本文实验测得土壤表面蚓粪中 4 种细菌生理菌群微生物的数量远远高于其周围土壤。这可能因为蚓粪有适合微生物生长繁殖的生境^[7,23]。Šimek 和 Pill 室内试验研究表明在蚯蚓的体表和肠道中有固氮菌的出现^[24],随着蚯蚓排泄活动使得固氮菌的数量在蚓粪中增加,进而有利于其它生理微生物菌群在蚓粪上的繁殖生长^[25]。

3.2 土壤酶活性

土壤微生物活性与土壤酶活性密切相关。土壤酶积极参与土壤中养分元素 C、N 和 P 矿化过程,因此其活性可以作为监测土壤微生物活性和肥力的重要指标^[4]。

在玉米秸秆混施条件下,接种蚯蚓表现出促进了土壤酶活性的增强,尤其是蛋白酶和蔗糖酶活性的显著增加。蚯蚓活动促进了秸秆与土壤的更好接触,加速秸秆分解,提高了土壤微生物量和活性^[15],有利于土壤酶活性的增强。有研究表明,蚯蚓和微生物的相互作用刺激了土壤中蛋白水解的微生物和尿素代谢微生物的增加^[26-27],进而可能分泌更多蛋白酶到土壤中。蚯蚓增加土壤蔗糖酶活性,可能是土壤微生物活性增强和土壤中基质浓度的增加^[7]。总之,蚯蚓活动能够促进土壤酶活性的增加,其中蚯蚓的蚓粪和蚓穴也有贡献。Tiunov 和 Scheu 研究发现,蚓穴壁土壤中有较高的总微生物量和细菌量^[28]。另外,试验所接种的蚯蚓,它们的取食活动将排泄大量的蚓粪:一部分堆积在土壤表面;另一部分堆积粘附在土壤内穴道壁上,且占到总蚓粪量的 36%—53%^[29]。由于测得土壤表面蚓粪中 4 种酶活性显著地增强,所以推论出,分布在土壤内的高酶活性蚓粪可能有助于提高土壤中一些酶的活性。

实验结果发现,蚓粪中 4 种酶活性都远远地高于其周围土壤,这可能归功于蚯蚓的肠道和蚓粪相关过程:丰富养分的蚓粪促进了微生物生长繁殖,微生物的丰富同时也分泌出更多的土壤酶。蚓粪中高的酶活性也可能来源于蚯蚓本身肠道所具有的酶^[5]。但也有研究发现,蚓粪中酶活性显著低于原土。如,2000 年张宝贵等通过短期室内接种这类蚯蚓的试验,测得蚓粪中蛋白酶和磷酸酶活性显著低于原土,认为是受酶促作用产物抑制的原因^[5]。本试验是在田间有作物生长条件下,酶促作用产物对土壤酶活性的抑制在试验中影响可能较小。

4 结论

(1) 在秸秆表施还田措施下,接种蚯蚓表现出进一步增加土壤 4 种细菌生理菌群数量,但对土壤水解酶的活性没有显著影响;在秸秆混施还田措施下,接种蚯蚓表现出进一步增加土壤氨化细菌和无机磷分解菌群的数量和土壤水解酶的活性。表明在秸秆还田的稻麦轮作农田土壤中,蚯蚓活动增加土壤微生物数量和活性,增强土壤生态系统结构的稳定性;同时有利于土壤肥力的提高和改善。

(2) 蚯蚓取食后排泄在土壤表面的蚓粪中,细菌生理菌群的数量和水解酶活性都远远地高于其周围土

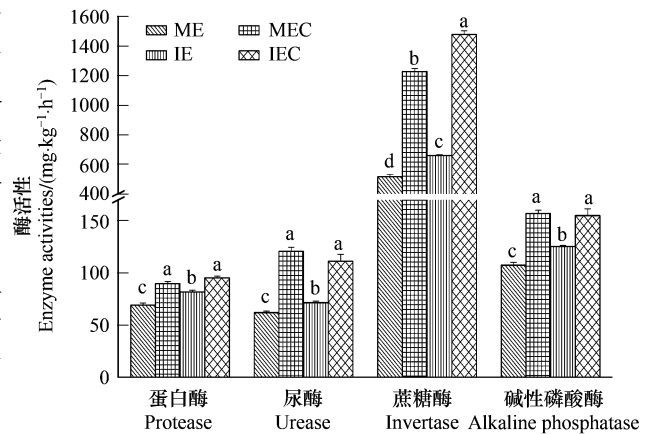


图 2 土壤和蚓粪中酶活性

Fig. 2 Enzyme activities of soil and earthworm cast

ME: 秸秆表施 + 蚯蚓; IE: 秸秆混施 + 蚯蚓; MEC: 秸秆表施 + 蚯蚓的表面蚓粪; IEC: 秸秆混施 + 蚯蚓的表面蚓粪; 不同小写字母表示差异达 5% 显著水平 (Duncan 检验)

壤,说明蚓粪对提高整个土壤的微生物活性和改善土壤质量起重要作用。

References:

- [1] Prasad R. Fertilizer urea, food security, health and the environment. *Current Science*, 1998, 75: 667-683.
- [2] Ouédraogo E, Mando A, Zombré N P. Use of compost to improve soil properties and crop productivity under low input agricultural system in West Africa. *Agricultural Ecosystem Environment*, 2001, 84: 259-266.
- [3] Yang Y S, Qiu R H, Yu X T, Huang B L. Study on soil microbes and biochemical activity in the continuous plantations of *Cunninghamia lanceolata*. *Chinese Biodiversity*, 1999, 7(1):1-7.
- [4] Ceccanti B, García C. Coupled chemical and biochemical methodologies to characterize a composting process and the humic substances. In: Senesi N, Miano T (eds) *Humic substances in the global environment and its implication on human health*. Elsevier, New York, 1994, 1279-1285.
- [5] Zhang B G, Li G T, Shen T S, Wang J K, Zhao S. Changes in microbial biomass C, N and P and enzyme activities in soil incubated with the earthworms *Metaphire guillelmi* or *Eisenia fetida*. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 2055-2062.
- [6] Aira M, Monroy F, Domínguez J. Ageing effects on nitrogen dynamics and enzyme activities in casts of *Apprrectodea caliginosa* (Lumbricidae). *Pedobiologia*, 2005, 49: 467-473.
- [7] Parthasarathi K, Ranganathan L S. Aging effect on enzyme activities in pressmud vermicasts of *Lampito mauritii* (Kinberg) and *Eudrilus eugeniae* (Kinberg). *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 30: 347-350.
- [8] Xu G H, Zhang H Y. *Analytical handbook of soil microbes*. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [9] Guan S Y, *Study way of soil enzymes*. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [10] Wang G H, Yu L J. The study and its ecological significance on physiological groups of bacteria. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 39(1): 128-133.
- [11] Anderson T H. Microbial eco-physiological indicators assess soil quality. *Agricultural Ecosystem Environment*, 2003, 98: 285-293.
- [12] Andrade G. Interacciones microbianas en la rizosfera // Siqueira, J. O., Moreira, F. M. S., Lopes, A. S., Guilherme, L. R., Faquin, V., Furtinni, A. E., Carvalho, J. G. eds. *Soil fertility, Soil biology and Plant Nutrition Interrelationships*. Brazilian Soil Science Society/Federal University of Lavras/Soil Science Department (SBSC/UFLA/DCS), Lavras, Brasil, 1999: 551-575.
- [13] Vessey J K. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant Soil*, 2003, 255: 571-586.
- [14] Cui J T, Dou S, Zhang W, Liu Y D. Effects of corn stalk on microbiological characteristics of soil. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2005, 27(4): 424-428.
- [15] Hu F, Wang X, Li H X, Yu J G, Wang D D. Effects of earthworms on soil microbial biomass carbon in rice-wheat rotation agro-ecosystem. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(6): 965-969.
- [16] Parkin T B, Berry E C. Microbial nitrogen transformations in earthworm burrows. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31: 1765-1771.
- [17] Bilal R. Associative of nitrogen-fixing plant growth promoting rhizobacteria (PGFPR) with kallar grass rice. *Plant and Soil*, 1997, 194: 37-44.
- [18] Bila R M, Rasul G, Malik K A. Nitrogenase activity and nitrogen-fixing bacteria associated with the roots of *Atriplex* spp growing in saline soil of Pakistan. *Biology and Fertility Soils*, 1991, 9: 315-320.
- [19] Luo A C, Sun X, Zhang Y S. Species of inorganic phosphate solubilizing bacteria in red soil and the mechanism of solubilization. *Pedosphere*, 1993, 3: 285-288.
- [20] Chen Y P, Rekha P D, Arun A B, Shen F T, Lai W A, Young C C. Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities. *Applied Soil Ecology*, 2006, 34:33-41.
- [21] Xu G H, Zheng H Y, Zhang D S, Lu Y P, Li Y K, Zhang S X, Liu Z Z, Wu W F, Zhang Z Y, Li F Z, Liu R J. Study on ecological distribution and biochemical properties of forest soil microorganism on the northern slope of the Changbaishan Mountain Natural Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 1984, 4(3): 207-222.
- [22] Xiao J Y, Zhang L, Xie D T, Wei C F. Study on the relationship between soil microbes and soil fertility in paddy fields of long-term no-tillage and ridge culture. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2002, 24(1): 82-85.
- [23] Görres J H, Savin M C, Amador J A. Soil micropore structure and carbon mineralization in burrows and casts of an anecic earthworm (*Lumbricus terrestris*). *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 33: 1881-1887.
- [24] Šimek M, Pill V. The effect of earthworm (Lumbricidae) on nitrogenase activity in soil. *Biology and Fertility of Soil*, 1988, 7: 370-373.
- [25] Abril A, Bucher E H. The effects of overgrazing on soil microbial community and fertility in the Chaco dry savannas of Argentina. *Applied Soil Ecology*, 1999, 12: 159-167.
- [26] Parthasarathi K, Ranganathan L S. Pressmud vermicasts are 'hot spots' of fungi and bacteria. *Ecology Environment Conservation*, 1998, 4: 81-86.

- [27] Caravaca F, Roldán A. Effect of *Eisenia foetida* earthworms on mineralization kinetics, microbial biomass, enzyme activities, respiration and labile C fractions of three soils treated with a composted organic residue. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 38: 45-51.
- [28] Tiumov, A V, Scheu S. Microbial respiration, biomass, biovolume and nutrient status in burrow wall of *Lumbricus terrestris* L. (Lumbricidae). *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31: 2039-2048.
- [29] Decaëns T. Degradation dynamics of surface earthworm casts in grasslands of the eastern plains of Colombia. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 32: 149-156.

参考文献:

- [3] 杨玉盛, 邱仁辉, 俞新妥, 黄宝龙. 杉木连栽土壤微生物及生化特性的研究. *生物多样性*, 1999, 7(1): 1-7.
- [8] 许光辉, 郑洪元编. 土壤微生物分析方法手册. 北京: 农业出版社, 1986.
- [9] 关松荫编. 土壤酶及其研究方法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [10] 王国惠, 于鲁冀. 细菌生理群的研究及其生态学意义. *生态学报*, 1999, 39(1): 128-133.
- [14] 崔俊涛, 窦森, 张伟, 刘亚东. 玉米秸秆对土壤微生物性质的影响. *吉林农业大学学报*, 2005, 27(4): 424-428.
- [15] 胡锋, 王霞, 李辉信, 于建光, 王丹丹. 蚯蚓活动对稻麦轮作系统中土壤微生物量碳的影响. *土壤学报*, 2005, 42(6): 965-969.
- [21] 许光辉, 郑洪元, 张德生, 卢耀波, 李玉坤, 张淑贤, 刘增柱, 吴文芳, 赵振英, 李凤珍, 刘瑞君. 长白山北坡自然保护区森林土壤微生物生态分布及其生化特性的研究. *生态学报*, 1984, 4(3): 207-222.
- [22] 肖剑英, 张磊, 谢德体, 魏朝富. 长期免耕稻田的土壤微生物与肥力关系研究. *西南农业大学学报*, 2002, 24(1): 82-85.