

大气 CO₂ 浓度升高对不同施氮土壤酶活性的影响苑学霞^{1,2,3}, 林先贵^{1,2*}, 褚海燕^{1,2}, 尹 睿^{1,2}, 张华勇^{1,2}, 胡君利^{1,2}, 朱建国⁴

(1. 中国科学院南京土壤研究所生物与生化研究室, 南京 210008; 2. 南京土壤研究所-香港浸会大学土壤与环境联合开放实验室, 南京 210008; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 4. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008)

摘要: 利用中国唯一的无锡 FACE (Free-air CO₂ enrichment, 开放式空气 CO₂ 浓度升高) 平台, 研究了大气 CO₂ 浓度升高对土壤 β-葡萄糖苷酶、转化酶、脲酶、酸性磷酸酶、β-氨基葡萄糖苷酶的影响。研究发现, 不同氮肥处理下大气 CO₂ 浓度升高对某些土壤酶活性的影响不同。在低氮施肥处理中, 大气 CO₂ 浓度升高显著降低 β-葡萄糖苷酶活性, 但是在高氮施肥处理下, 大气 CO₂ 浓度升高显著增加 β-葡萄糖苷酶活性。在低氮和常氮施肥处理中大气 CO₂ 浓度升高显著增加了土壤脲酶活性, 但在高氮水平下影响不显著。在低氮、常氮施肥处理中, 大气 CO₂ 浓度升高对土壤酸性磷酸酶活性没有影响, 而在高氮施肥处理中显著增强了土壤中磷酸酶活性。大气 CO₂ 浓度升高对土壤转化酶活性和 β-氨基葡萄糖苷酶的活性有增加趋势, 但影响不显著。研究还发现, 在不同的 CO₂ 浓度下, 土壤酶活性对不同氮肥处理的响应也不同。在正常 CO₂ 浓度下, 土壤中 β-葡萄糖苷酶活性随着氮肥施用量的增加而降低, 而在大气 CO₂ 浓度升高条件下, 却随着氮肥施用量的增加而增加。在大气 CO₂ 浓度升高条件下, 高氮施肥显著增加了转化酶和酸性磷酸酶活性, 而在正常 CO₂ 浓度下, 影响不显著。在大气 CO₂ 浓度升高条件下, 氮肥处理对脲酶活性的影响不大, 但在正常 CO₂ 浓度下, 脲酶活性随着氮肥施用量的增加而增加。氮肥对 β-氨基葡萄糖苷酶活性的影响不明显。

关键词: 大气 CO₂ 浓度升高; 土壤酶活性; 氮肥处理

文章编号: 1000-0933(2006)01-0048-06 中图分类号: Q143, S154.1, S154.3 文献标识码: A

Effects of elevated atmospheric CO₂ on soil enzyme activities at different nitrogen levelYUAN Xue-Xia^{1,2,3}, LIN Xian-Gui^{1,2*}, CHU Hai-Yan^{1,2}, YIN Rui^{1,2}, ZHANG Hua-Yong^{1,2}, HU Jun-Li^{1,2}, ZHU Jian-Guo⁴ (1. Laboratory of Biology and Biochemistry, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Joint Open Laboratory of Soil and the Environment, Institute of Soil Science and Hongkong Baptist University, Nanjing 210008, China; 3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 4. State Key Lab. of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 48 ~ 53.

Abstract: It has been predicted that elevated atmospheric CO₂ will increase enzyme activity as a result of CO₂-induced carbon entering the soil. The objective of this study was to investigate the effects of elevated atmospheric CO₂ on soil enzyme activities under a rice/wheat rotation. This experiment was conducted in Wuxi, Jiangsu, China under China FACE (Free Air Carbon dioxide Enrichment) Project system. Two atmospheric CO₂ concentrations ((580 ± 60) and (380 ± 40) μmol · mol⁻¹) and three N application treatments (low nitrogen, LN 150 kg · hm⁻², normal nitrogen, NN 250 kg · hm⁻² and high nitrogen, HN 350 kg · hm⁻²) were included. Soil samples (0 ~ 10 cm) were collected for analysis of β-glucosidase, invertase, urease, acid phosphates and β-glucosaminidase activities. Results revealed that with elevated atmospheric CO₂ β-glucosidase activity significantly decreased

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40271066); 国家自然科学基金重点资助项目(40231003); 中国科学院创新方向资助项目(KZCXZ-408)**收稿日期:** 2004-10-10; **修订日期:** 2005-04-11**作者简介:** 苑学霞(1980 ~), 女, 博士生, 主要从事土壤微生物和环境生物学研究. E-mail: xxyuan@issas.ac.cn; yuanxuexia@sohu.com

* 通讯作者 Author for correspondence

Foundation item: the National Natural Science Foundation of China (No. 40271066), the Key project of National Natural Science Foundation of China (No. 40231003), the Project of Knowledge Innovation of CAS (No. KZCXZ-408)**Received date:** 2004-10-10; **Accepted date:** 2005-04-11**Biography:** YUAN Xue-Xia, Ph.D. candidate, mainly engaged in soil microbe and environmental biology. E-mail: xxyuan@issas.ac.cn; yuanxuexia@sohu.com

($p < 0.05$) at low N application rates; had no significant effect with a normal N application rate; and significantly increased ($p < 0.05$) with a high N application rate. For urease activity, at low and normal N application rates (but not high N application rate), elevated atmospheric CO₂ significantly increased ($p < 0.05$) it. With acid phosphatase elevated atmospheric CO₂ only had significant higher effects ($p < 0.05$) at high N application rates. Under different CO₂ concentration, effects of N fertilization are also different. Soil β -glucosidase activity at ambient CO₂ concentration decreased with N fertilization, while it increased at elevated CO₂ concentration. In addition, invertase and acid phosphatase activities at elevated CO₂ concentrations, significantly increased ($p < 0.05$) with N treatments, but there was no effect with the ambient CO₂ concentration. For urease activity, at ambient CO₂ concentrations, N fertilization increased it significantly ($p < 0.05$), whereas at elevated CO₂ concentrations were not significant. Additionally, with β -glucosaminidase activity, there were no significant effects from N application. In general, then, elevated atmospheric CO₂ increased soil enzyme activity, which may be attributed to the following two factors: (1) elevated atmospheric CO₂ leading to more plant biomass in the soil, which in turn stimulated soil microbial biomass and activity; and (2) elevated atmospheric CO₂ that increased plant photosynthesis, thereby increasing plant-derived soil enzymes.

Key words: elevated atmospheric CO₂; soil enzyme activity; N fertilization treatment

随着全球环境变化对陆地生态系统的影响逐渐成为公众和科学界关注的热点,CO₂ 作为一种重要的温室气体受到格外重视。大气 CO₂ 浓度升高将直接影响陆地植物的光合作用^[1-3],光合产物约有 20% ~ 50% 被运送到地下,通过根系分泌及死亡输入土壤^[4],从而将会对陆地生态系统产生深远影响。

土壤中所进行的一切生物学和化学过程都要有酶的催化作用才能完成,酶作为土壤的重要组成部分,通常认为土壤酶在很大程度上起源于土壤微生物,也有一部分来源于植物和土壤动物,它们通过生理代谢向土壤分泌出酶,并且它们的死亡残体亦可溶出胞内酶进入土壤^[5,6]。土壤酶是土壤生态系统代谢的一类重要动力,其活性高低可反映土壤营养物质转化、能量代谢等过程能力的强弱,特别是 β -葡萄糖苷酶、转化酶、脲酶等。土壤酶作为土壤质量的一个指标,能够较敏感的反映出土壤质量在时间序列和各种不同条件下的变化^[7,8]。大气 CO₂ 浓度升高主要通过以下 3 方面对土壤系统产生影响:(1)刺激了植物的光合作用,植物的生物量增加,输入到土壤中的物质增加。(2)大气 CO₂ 浓度升高条件下植物的碳氮比增加,输入到土壤中的物质成分改变。(3)大气 CO₂ 浓度升高降低植物的气孔导度,增加水分利用率,减少蒸腾,增加土壤中的水分含量,影响土壤中物理、化学过程^[9]。因此,大气 CO₂ 浓度升高对植物代谢功能及土壤微生物的影响,均可能对在生态系统营养元素循环与周转中发挥着重要作用的土壤酶活性产生影响。

近几年发展起来的田间开放的 FACE(Free-air CO₂ enrichment 开放式空气 CO₂ 浓度升高)系统没有任何隔离设施,除大气中 CO₂ 增加外,其他条件十分接近自然生态环境,可以很好的研究大气 CO₂ 浓度升高对陆地生态系统的影响。本试验以中国稻麦轮作 FACE 系统为平台,初步研究了在稻麦轮作系统中大气 CO₂ 浓度升高对土壤酶活性的影响,旨在为大气 CO₂ 浓度升高条件下土壤质量演变提供初步科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验方法

稻麦轮作 FACE 系统平台位于江苏省无锡市安镇年余农场(120°27'51"E, 31°37'24"N)。土壤类型为水耕人为土,耕作层厚度为(13.0 ± 1.6) cm,容重(1.2 ± 0.7) g·cm⁻³,总孔隙度 54% ± 2%,粘粒(< 0.005 mm)含量 37%,有机质含量(25.8 ± 0.4) g·kg⁻¹,全 N 含量(1.59 ± 0.25) g·kg⁻¹,全 P 含量(1.23 ± 0.32) g·kg⁻¹,有效 N 114 mg·kg⁻¹,有效 P 10.4 mg·kg⁻¹,pH 6.8。年降水量 1100 ~ 1200 mm,年平均温度约 16℃。年日照时间大于 2000 h,年无霜期天数大于 230 d,耕作方式为水稻、冬小麦轮作。平台共有 3 个 FACE 试验圈和 5 个对照圈。白天对照圈内 CO₂ 浓度为(380 ± 40) μ mol·mol⁻¹,FACE 圈内为(580 ± 60) μ mol·mol⁻¹。试验采用裂区设计,CO₂ 浓度为主处理,N 水平为副处理。氮肥设低氮(LN, 150 kg·hm⁻²)、常氮(NN, 250 kg·hm⁻²)、高氮(HN, 350 kg·

hm⁻²)3 个水平。

在 FACE 运行 3 个稻麦轮作后,分别在 3 个 FACE 圈和 5 个对照圈内用直径为 7.5cm 的土钻采取 0 ~ 10cm 的新鲜土,随机取 10 个点混匀,室内过 2mm 筛后用于土壤酶活性分析。TTC 法测定土壤中脱氢酶活性,靛酚比色法测定脲酶活性,对硝基苯磷酸二钠法测定磷酸酶活性,3,5-二硝基水杨酸法测定转化酶活性^[6], β -葡萄糖苷酶、 β -氨基葡萄糖苷酶测定方法分别见^[10,11]。

1.2 数据处理

所有试验结果是以烘干土重为基础(105℃,24h),利用 SPSS10.0 Duncan 多重比较来判断处理间显著性差异($p < 0.05$)。

2 结果

2.1 大气 CO₂ 浓度升高对土壤 β -葡萄糖苷酶活性的影响

β -葡萄糖苷酶在降解有机碳复合物(作物残茬、人畜粪便等)的过程中发挥重要作用,并且其水解产物(糖类)是土壤微生物的主要能量来源^[12]。由图 1 可以看出,大气 CO₂ 浓度升高对土壤 β -葡萄糖苷酶活性的影响与土壤中氮肥施用量有关,在低氮施肥处理中,大气 CO₂ 升高显著降低 β -葡萄糖苷酶活性;在常氮施肥处理中作用不明显;但是在高氮施肥处理中,大气 CO₂ 升高中 β -葡萄糖苷酶活性比正常 CO₂ 浓度下高出 27.0%。

图 1 还表明,在正常大气 CO₂ 浓度中,土壤中 β -葡萄糖苷酶活性随着氮肥施用量的增加而降低,而在大气 CO₂ 浓度升高条件下, β -葡萄糖苷酶活性却随着氮肥施用量的增加而增加。

2.2 大气 CO₂ 浓度升高对土壤转化酶活性的影响

转化酶广泛存在于土壤中,它是表征土壤生物学活性的一个重要的酶,它对增加土壤中易溶物质起重要作用^[13]。图 2 表明,在大气 CO₂ 浓度升高条件下,转化酶活性随着氮肥施用量的增加而增加,而在正常大气 CO₂ 浓度中基本保持不变。不论是高氮还是低氮施肥处理,大气 CO₂ 浓度升高对土壤转化酶活性的影响不显著。

2.3 大气 CO₂ 浓度升高对土壤脲酶活性的影响

土壤脲酶是土壤中氮素转化的关键酶,主要来源于微生物和植物-包括活体分泌和死亡残体分解释放。脲酶的酶促反应产物氨是植物氮源之一,它的活性可以用来表示土壤氮素状况^[13]。大气 CO₂ 浓度升高在低氮和常氮施肥处理下显著增加了土壤脲酶活性,但在高氮施肥处理下影响不显著。大气 CO₂ 浓度升高条件下,脲酶活性基本保持不变,而在正常大气 CO₂ 浓度中脲酶活性随着氮肥施用量的增加而增加(图 3)。

2.4 大气 CO₂ 浓度升高对土壤酸性磷酸酶活性的影响

土壤中磷酸酶是催化土壤中磷酸单酯和磷酸二酯水解的酶。它能将有机磷酸水解为无机磷酸。土壤中微生物和植物根系分泌物是磷酸酶的主要来源^[14]。由图 4 可以看出,在低氮、常氮施肥处理中,大气 CO₂ 浓

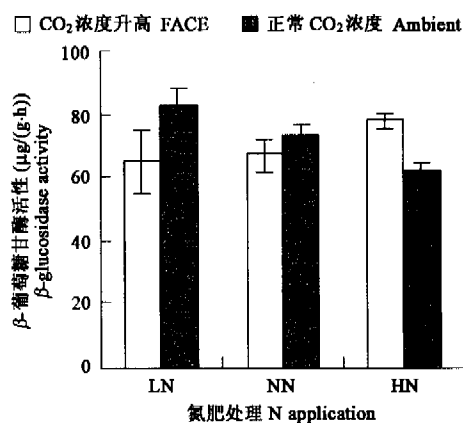


图 1 大气 CO₂ 浓度升高对 β -葡萄糖苷酶活性的影响

Fig.1 Effect of elevated atmospheric CO₂ on β -glucosidase activity

LN 低氮 Low nitrogen, NN 常氮 Normal nitrogen, HN 高氮 High nitrogen; 下同 the same below

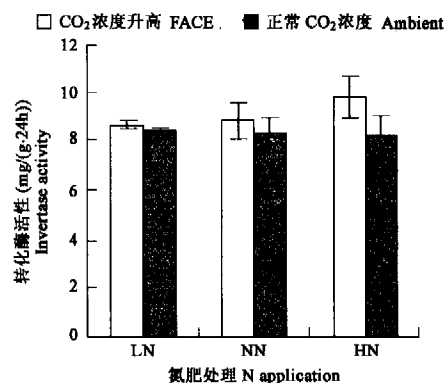


图 2 大气 CO₂ 浓度升高对转化酶活性的影响

Fig.2 Effect of elevated atmospheric CO₂ on invertase activity

度升高对土壤酸性磷酸酶活性没有显著影响,而在高氮施肥处理中,在大气 CO₂ 浓度升高条件下土壤酸性磷酸酶活性比正常 CO₂ 浓度下高 27.9%,作用显著。

2.5 大气 CO₂ 浓度升高对土壤 β-氨基葡萄糖苷酶活性的影响

β-氨基葡萄糖苷酶在土壤的碳、氮循环中扮演重要角色,此酶与土壤中真菌生物量密切相关,主要存在于昆虫和真菌的细胞壁中^[11]。图 5 表明,大气 CO₂ 浓度升高对 β-氨基葡萄糖苷酶活性的作用不明显,只是有略微增加的趋势。不论在正常大气 CO₂ 浓度、还是在大气 CO₂ 浓度升高条件下,氮肥处理对土壤 β-氨基葡萄糖苷酶活性的影响也不明显。

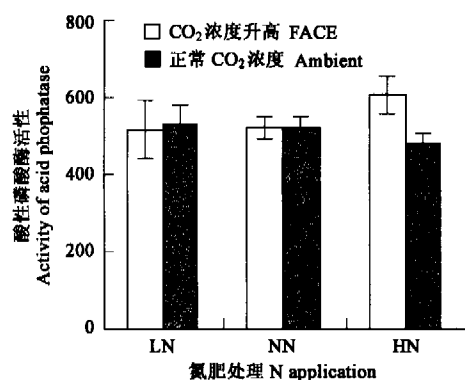


图 4 大气 CO₂ 浓度升高对酸性磷酸酶活性的影响

Fig.4 Effect of elevated atmospheric CO₂ on acid phosphatase activity

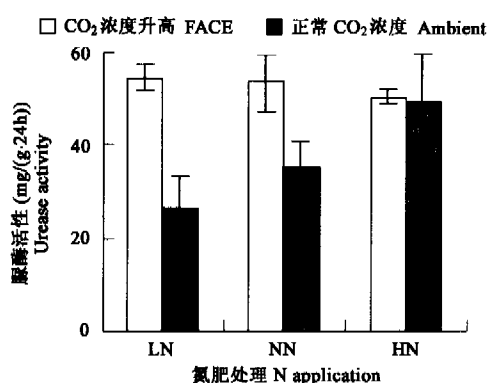


图 3 大气 CO₂ 浓度升高对脲酶活性的影响

Fig.3 Effect of elevated atmospheric CO₂ on urease activity

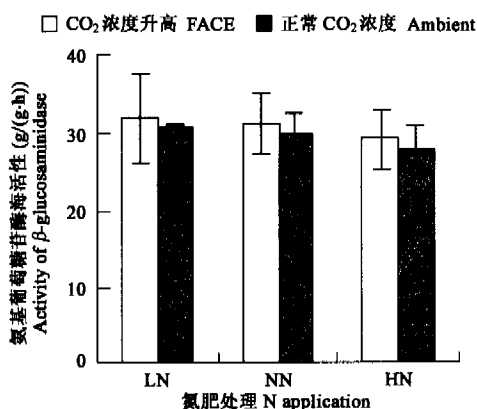


图 5 大气 CO₂ 浓度升高对 β-氨基葡萄糖苷酶活性的影响

Fig.5 Effect of elevated atmospheric CO₂ on β-glucosaminidase activity

3 讨论

土壤中所进行的生物和生物化学过程是陆地生态系统功能的基础,这些过程之所以能够持续进行,得益于土壤中酶的作用。大气 CO₂ 浓度升高对土壤理化性质、土壤生物区系和植物产生明显的作用,因而对土壤酶活性很可能产生直接或间接的影响。本试验中,大气 CO₂ 浓度升高增加了土壤中脲酶活性,另外,在高氮施肥处理中,大气 CO₂ 浓度升高对其它几种土壤酶活性均表现为刺激作用。这也与以前的结果大气 CO₂ 浓度升高有增加土壤脱氢酶的活性的趋势相一致^[15]。Dhillon 等^[16]的研究表明,大气 CO₂ 浓度升高刺激了土壤中脱氢酶、木聚糖酶、纤维素酶和磷酸酶活性,他认为这主要是因为大气 CO₂ 浓度升高增加了微生物生物量和微生物活性。Ebersberger 等^[9]对石灰质草地的研究也发现大气 CO₂ 浓度升高下,转化酶、脲酶、蛋白酶、碱性磷酸酶等都有不同程度的增加,并且在春季影响更显著,他认为土壤酶活性的增加是因为更多的植物来源的酶分泌到土壤中。本试验系统中其他人的结果发现大气 CO₂ 浓度升高显著提高水稻产量^[17],并且增加了细菌的数量和土壤呼吸作用^[18]。因此本试验中大气 CO₂ 浓度升高条件下,土壤酶的活性的增加可能是因为以下两种原因:一是大气 CO₂ 浓度升高增加了输入到土壤中的植物生物量,微生物可利用的有机物质增加,因而增加了微生物生物量、刺激了微生物活性;二是大气 CO₂ 浓度升高刺激了植物光合作用,植物向土壤中分泌更多酶。

本试验中发现大气 CO₂ 浓度升高对土壤中酶活性的影响与土壤施氮肥量的多少有关,尤其是以脲酶活性最为显著。在正常大气 CO₂ 浓度中,脲酶活性随着氮肥施用量的增加而增加,而在大气 CO₂ 浓度升高条件

下,脲酶活性基本保持不变,这可能是因为在正常大气 CO_2 浓度中,土壤中氮肥施用量增加,脲酶活性受所施氮肥刺激而增加,而在大气 CO_2 浓度升高条件下,在低氮施肥土壤中可利用的氮严重不足,从而刺激土壤中脲酶活性增加,以补充氮素供用,在高氮施肥处理中,脲酶活性受所施氮肥的影响多一些,因此各氮肥处理中,脲酶活性差异不大。Hu 等^[19]通过对大气 CO_2 浓度升高下土壤中微生物量碳、氮的研究发现,氮是大气 CO_2 浓度升高条件下微生物降解的限制因素。Mayr 等^[20]的研究也发现大气 CO_2 浓度升高对 β -1,4-外切葡聚糖酶、 β -氨基葡萄糖苷酶活性的影响因氮肥施用量不同而不同。但是与本试验不同的是,在不施肥处理中,大气 CO_2 浓度升高增加了 β -氨基葡萄糖苷酶活性,而在施肥处理中,大气 CO_2 浓度升高对 β -氨基葡萄糖苷酶活性没有影响;不论在施肥还是不施肥处理中,大气 CO_2 浓度升高对 β -葡萄糖苷酶活性没有影响。而本试验发现,无论是高氮还是低氮施肥处理,大气 CO_2 浓度升高对 β -氨基葡萄糖苷酶活性都没有影响;在高氮施肥处理中,大气 CO_2 浓度升高显著增加了 β -葡萄糖苷酶活性。这可能是因为土壤类型^[21]、气候条件、植被^[22]等影响地下部分对大气 CO_2 浓度升高的响应的程度和时间。

References:

- [1] Vu J C V, Allen L H Jr, Boote K J, *et al.* Effects of elevated CO_2 and temperature on photosynthesis and rubisco in rice and soybean. *Plant Cell and Environment*, 1997, 20: 68 ~ 76.
- [2] Wall G W, Brooks T J, Adam N P, *et al.* Leaf photosyntheses and water relations of grain sorghum grown in free-air CO_2 enrichment (FACE) and water stress. *New Phytologist*, 2001, 152: 231 ~ 248.
- [3] Moore B D, Cheng S H, Sims D, *et al.* The biochemical and molecular basis for photosynthetic acclimation to elevated atmospheric CO_2 . *Plant Cell and Environment*, 1999, 3: 101 ~ 113.
- [4] Lambers H. Growth, respiration, exudation and symbiotic associations: the fate of carbon translated to the roots. In: Gregory P J, *et al.* eds. *Root Development and Function*. Cambridge University Press, 1987. 125 ~ 146.
- [5] Cao H, Sun H, Yang H, *et al.* A review: soil enzyme activity and its indication for soil quality. *Chinese Journal of applied Environment and Biology*, 2003, 9(1): 105 ~ 109.
- [6] Zheng H Y, Zhang D H. *Research methods of soil dynamic biochemistry*. Beijing: Science Press, 1982.
- [7] Yang W Q, Wang K Y. Advances on soil enzymology. *Chinese Journal applied Environment and Biology*, 2002, 8(5): 564 ~ 570.
- [8] He W X, Jiang X, Bian Y R, *et al.* Study on soil enzyme activity effected by dimehypo. *Journal of West-north Agricultural and Forest Technology University*, 2002, 30(1): 13 ~ 17.
- [9] Ebersberger D, Niklaus P A, Kandeler E. Long term CO_2 enrichment stimulates N-mineralisation and enzyme activities in calcareous grassland. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35: 965 ~ 972.
- [10] Klose S, Tabatabai M A. Response of glycosidases in soils to chloroform fumigation. *Biology and Fertility Soils*, 2002, 35: 262 ~ 269.
- [11] Parham J A, Deng S P. Detection, quantification and characterization of β -glucosaminidase activity in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 1183 ~ 1190.
- [12] Acosta-Martínez V, Tabatabai M A. Enzyme activities in a limed agricultural soil. *Biology and Fertility Soils*, 2000, 31: 85 ~ 91.
- [13] Sun R L, Zhao B Q, Zhang L S, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil enzyme activities and its role in adjusting controlling soil fertility. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9 (4): 406 ~ 410.
- [14] Cheng G H, Guo S F, Xue J Z, *et al.* Effect of the long-term application of chloride-containing fertilizers on the activities of enzymes in soil. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 1994, 25(4): 360 ~ 365.
- [15] Yuan X X, Lin X G, Yin R, *et al.* Effects of elevated atmospheric CO_2 on the decomposition of wheat straw in paddy field. *Journal Agro-environment Science*, 2005, 24(2): 242 ~ 246.
- [16] Dhillon S S, Roy J, Abrams M. Assessing the impact of elevated CO_2 on soil microbial activity in a Mediterranean model ecosystem. *Plant and Soil*, 1997, 187(2): 333 ~ 342.
- [17] Huang J Y, Yang H J, Dong G C, *et al.* Effects of free-air CO_2 enrichment (FACE) on yield formation in rice. *Chinese Journal Applied Ecology*, 2002, 13(10): 1210 ~ 1214.
- [18] Xu G Q, Li Y, Shi Y, *et al.* Effects of free-air CO_2 enrichment on the soil microbe in paddy field. *Chinese Journal Applied Ecology*, 2002, 13(10): 1358 ~ 1359.

- [19] Hu S, Chapin III F S, Firestone MK, *et al.* Nitrogen limitation of microbial decomposition in a grassland under elevated CO₂. *Nature*, 2001, 409: 187 ~ 191.
- [20] Mayr C, Miller M, Insam H. Elevated CO₂ alters community-level physiological profiles and enzyme activities in alpine grassland. *Journal Microbiology Method*, 1999, 36: 35 ~ 43.
- [21] Sinsabaugh R L, Saiya-Cork K, Long T. Soil microbial activity in a Liquidambar plantation unresponsive to CO₂-driven increases in primary production. *Applied Soil Ecology*, 2003, 24: 263 ~ 271.
- [22] Deiglmayr K, Philippot L, Hartwig U A, *et al.* Structure and activity of the nitrate-reducing community in the rhizosphere of *Lolium perenne* and *Trifolium repens* under long-term elevated atmospheric pCO₂. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004, 49: 445 ~ 454.

参考文献:

- [5] 曹慧,孙辉,杨浩,等.土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展.应用与环境生物学报,2003,9(1):105~109.
- [6] 郑洪元,张德生.土壤动态生物化学研究法.北京:科学出版社,1982.
- [7] 杨万勤,王开运.土壤酶研究动态与展望.应用与环境生物学报,2002,8(5):564~570.
- [8] 和文祥,蒋新,卞永荣,等.杀虫双对土壤酶活性影响的研究.西北农林科技大学学报,2002,30(1):13~17.
- [13] 孙瑞莲,赵秉强,朱鲁生,等.长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用.植物营养与肥料学报,2003,9(4):406~410.
- [14] 程国华,郭树凡,薛景珍,等.长期施用含氯化肥对土壤酶活性的影响.沈阳农业大学学报,1994,25(4):360~365.
- [15] 苑学霞,林先贵,尹睿,等.大气 CO₂ 浓度升高对稻田中小麦秸秆分解的影响.农业环境科学学报,2005,24(2):242~246.
- [17] 黄建晔,杨洪建,董桂春,等.开放式空气 CO₂ 浓度增高对水稻产量形成的影响.应用生态学报,2002,13(10):1210~1214.
- [18] 徐国强,李杨,史奕,等.开放式空气 CO₂ 浓度增高(FACE)对稻田土壤微生物的影响.应用生态学报,2002,13(10):1358~1359.