

FACE 条件下休闲和秸秆还田对稻麦轮作 农田麦季土壤酶活性的影响^①

周仕栋^{1,2}, 谢祖彬^{1*}, 朱建国¹⁻, 刘 钢¹, 孙会峰^{1,2}, 卑其成^{1,2}, 刘金山^{1,2}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 利用中国唯一的江都 FACE (Free-air CO₂ enrichment, 开放式空气 CO₂ 浓度升高) 平台, 研究了大气 CO₂ 浓度升高下休闲 (fallow, 不种作物, 但翻耕和施肥与其他处理相同) 和秸秆还田对土壤脱氢酶、β-葡萄糖苷酶、转化酶、芳基硫酸酯酶和荧光素二乙酸酯水解 (FDA) 的影响。研究表明: 大气 CO₂ 浓度升高对于休闲土壤酶活性没有影响。在没有秸秆还田的情况下, 大气 CO₂ 浓度升高刺激了土壤中脱氢酶、β-葡萄糖苷酶、转化酶、芳基硫酸酯酶的活性和 FDA 水解, 增加幅度分别达到了14.88%、19.41%、11.69%、17.12% 和 4.47%。除转化酶外, 秸秆还田使土壤酶活性增加。随着秸秆还田量的增加, FACE效应先增加后消失。

关键词: 大气 CO₂ 浓度升高; FACE; 土壤酶活性; 休闲; 秸秆还田

中图分类号: Q143; S154.1; S154.3

由于化石燃料的燃烧和森林的过度砍伐导致的大气 CO₂ 浓度升高引起了人们的广泛关注, 并促使人们去全面地认识生态环境对于大气 CO₂ 浓度升高的响应^[1]。过去 20 年的研究已经提高了我们对植物的认识, 如初级生产力, 种群的多样性, 群落的组成以及土壤呼吸的变化^[2-4]。通过对植物光合作用的刺激以及对地下 C 分配和根系分泌物的影响, CO₂ 浓度升高后输入到土壤中的 C 增加^[5-6]。谢祖彬等^[7]研究发现植物的生化组成也因为 CO₂ 浓度的升高而发生了变化。由于 CO₂ 浓度升高引起的植物生物量和生化性质的改变可能会对根际微生物种群的密度、多样性和功能以及土壤有机 C 的周转产生影响^[8-9]。

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, 酶在土壤中的生理生化过程中发挥着重要的作用。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中分泌出酶, 并且它们的死亡残体亦可溶出胞内酶进入土壤。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重要指标, 能够较敏感地反映出土壤质量在时间序列和各种不同条件下的变化。

近几年发展起来的田间开放的 FACE (Free-air CO₂ enrichment, 即开放式空气 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, 可以很好地研究大气 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, 以及在秸秆还田的情况下土壤酶活性的变化, 旨在为大气 CO₂ 浓度升高条件下土壤质量演变以及对未来大气 CO₂ 浓度下秸秆还田对于土壤质量的影响提供初步的科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验方法

^①基金项目: 国家自然科学基金项目 (40871146, 40571157)、科技部国家科技支撑项目 (2008BAD95B05)、农业部公益性行业专项 (200803033) 和江苏省自然科学基金项目 (BK2006252) 资助。

* 通讯作者 (zbxie@issas.ac.cn)

作者简介: 周仕栋 (1984—), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要从事全球气候变化下土壤微生物的研究。E-mail: sdzhou@issas.ac.cn

稻麦轮作 FACE 系统平台位于江苏省江都市小记镇 ($119^{\circ}42'0''E$, $32^{\circ}35'5''N$)。试验站位于亚热带湿润气候带,海拔 5 m,年降雨量 980 mm,蒸发量 1 100 mm,年平均气温 $14.9^{\circ}C$,年日照时间 2 100 h,无霜期 220 天,详细 FACE 系统设置可参阅文献[10]。

试验采用裂区设计, CO_2 浓度为主处理(环境浓度—Ambient 对照和 FACE 浓度—FACEF, 即 Ambient + 200 $\mu mol/mol$),土壤管理(休闲和秸秆还田)为次处理。休闲(不种作物,但翻耕和施肥同其他处理, fallow); 秸秆不还田(种植作物,但秸秆不还田,并在水稻、小麦收获后根系移出实验小区, 0res), 50% 秸秆还田(种植作物,小麦和水稻收获秸秆的 50% 还田,并且作物根系保留在实验小区, 0.5res), 150% 秸秆还田(种植作物,小麦和水稻收获秸秆的 150% 还田,并且作物根系保留在实验小区, 1.5res)。水稻收获后,水稻的秸秆在麦季还田;小麦收获后,小麦的秸秆在稻季还田。试验开始于 2004 年的水稻季,第一个生长季没有秸秆还田处理,接下来的小麦季开始秸秆还田处理。这个小麦生长季的还田的量(用 C 的量表示)和这个小麦生长季的还田的量分别为 $C\ 2\ 476\ kg/hm^2$ (0.5 倍秸秆还田) 和 $C\ 5\ 552\ kg/hm^2$ (1.5 倍秸秆还田)。

实验所用的土壤取自吉林省公主岭市 ($43^{\circ}31'N$, $124^{\circ}49'E$) $0\sim 15\ cm$ 中层黑土,属于均腐土。土壤性质如下:土壤有机 C 9.8 g/kg, 全 N 0.90 g/kg, 有效 P 42.84 mg/kg, 有效 K 127.50 mg/kg, 黏粒 ($<0.002\ mm$) 28.2.5% (重量百分数已剔除不用 g/kg), 粉粒 ($0.002\sim 0.05\ mm$) 47.0.7% (g/kg), 沙粒 ($0.05\sim 0.2\ mm$) 24.6.8% (g/kg)。根据美国土壤分类标准土壤质地为黏壤土。土壤取来后混匀、过筛 ($<10\ mm$),然后放到聚乙烯板制成的作物生长筐里,筐的大小是 $75\ cm\times 16\ cm\times 25\ cm$ (长 \times 宽 \times 高), 0.1 mm 孔径尼龙网放在聚乙烯筐底部。聚乙烯筐埋入土下 15 cm,按 $1.2\ g/cm^3$ 土壤体积质量填入土壤,填入高度为 15 cm。2008 年小麦收获期,分别在各处理中取土样,过 2 mm 筛,用于土壤酶活性的测定。脱氢酶活性用 TTC 法测定^[11],转化酶活性用 3,5-二硝基水杨酸法测定^[12], β -葡萄糖苷酶、芳基硫酸酯酶的活性和 FDA 水解测定

分别参照文献[13-15]中的方法进行。

1.2 数据处理

所有试验结果均以烘干土重为基础 ($105^{\circ}C$, 24 h),利用 SPSS 10.0 Duncan 多重比较来判断处理间差异显著性 ($p<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 大气 CO_2 浓度升高对土壤脱氢酶活性的影响

土壤脱氢酶是用来研究土壤生物活性的重要指标,脱氢酶只存在于生物活细胞体内,属于氧化还原酶类,因此脱氢酶活性可以作为微生物氧化还原系统的指标,能很好地估量土壤中微生物的氧化能力^[16]。本实验结果如图 1 显示,大气 CO_2 浓度升高促进了土壤脱氢酶活性,但整体上没有达到显著水平,休闲和秸秆还田处理 (fallow、0res、0.5res 和 1.5res) 在 FACE 条件下分别比 Ambient 处理高出 5.96%、14.88%、21.47% 和 34.97%。不论是 FACE 处理还是 Ambient 处理,小麦秸秆还田都促进了土壤脱氢酶的活性,0.5res 处理与 0res 处理之间没有差异,而 1.5res 处理比 0res 处理明显提高。

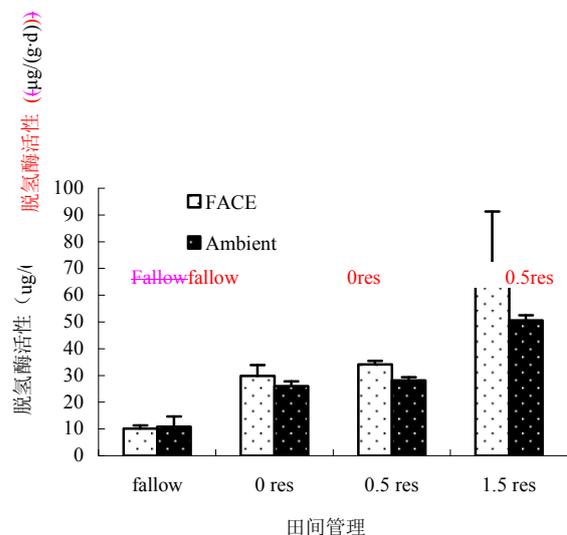


图1 大气 CO_2 浓度升高、休闲和秸秆还田对土壤脱氢酶活性的影响

Fig. 1 Effects of elevated CO_2 concentration, fallow and straw-straw amendments on soil dehydrogenase activity

2.2 大气 CO₂ 浓度升高对土壤 β-葡萄糖苷酶活性的影响

β-葡萄糖苷酶分布广泛，作为土壤微生物对特定底物的响应而合成，β-葡萄糖苷酶活性可以反映一个相对短的时期内土壤性质的变化^[17]。β-葡萄糖苷酶在降解有机 C 复合物（作物残茬、人畜粪便等）的过程中发挥着重要作用，并且其水解产物（糖类）是土壤微生物的主要能量来源。本实验结果如图 2 所示，大气 CO₂ 浓度升高促进了土壤 β-葡萄糖苷酶活性，但整体上没有达到显著水平，休闲和秸秆还田处理（fallow、0res、0.5res 和 1.5res）在 FACE 条件下，分别比对照高出 -0.55%、19.41%、10.48% 和 1.72%。小麦的种植和秸秆的还田都促进了土壤 β-葡萄糖苷酶活性，4 种田间管理之间差异显著。

2.3 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。本实验结果如图 3 所示，大气 CO₂ 浓度升高对土壤转化酶活性有促进作用，但是没有达到显著水平。休闲和秸秆还田处理（fallow、0res、0.5res 和 1.5res）在 FACE 条件下，分别比对照高出 0.90%、11.69%、16.62% 和 10.26%。小麦的种植（0res）相对于休闲（fallow）显著促进了土壤转化酶活性，秸秆还田对该酶活性的促进作用不明显。

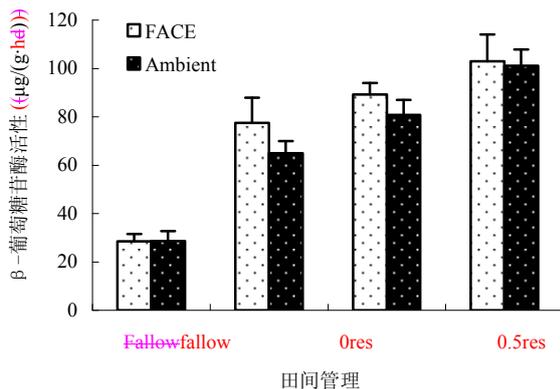


图2 大气 CO₂ 浓度升高、休闲和秸秆还田对土壤 β-葡萄糖苷酶活性的影响

Fig. 2 Effects of elevated CO₂ concentration, fallow and straw amendments on soil β-glucosidase activity

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。本实验结果如图3所示，大气CO₂浓度升高对土壤转化酶活性有促进作用，但是没有达到显著水平。休闲和秸秆还田处理（fallow、0res、0.5res和1.5res）在FACE条件下，分别比对照高出0.90%、11.69%、16.62%和10.26%。小麦的种植（0res）相对于休闲（fallow）显著促进了土壤转化酶活性，秸秆还田对该酶活性的促进作用不明显。

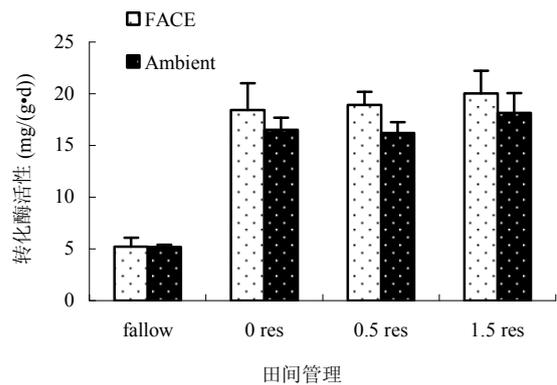


图3 大气 CO₂ 浓度升高、休闲和秸秆还田对土壤转化酶活性的影响

Fig. 3 Effects of elevated CO₂ concentration, fallow and straw amendments on soil invertase activity

2.4 大气 CO₂ 浓度升高对土壤芳基硫酸酯酶活性的影响

芳基硫酸酯酶是土壤营养循环中非常重要的一个酶，因为它能通过水解反应释放出植物可以利用的SO₄²⁻，另一方面，它能间接地指示真菌的数量，因为只有真菌含有硫酸酯，而硫酸酯是该酶的底物^[17]。本实验结果如图 4 所示，大气 CO₂ 浓度升高促进了土壤芳基硫酸酯酶的活性，休闲和秸秆还田处理（fallow、0res、0.5res 和 1.5res）在 FACE 条件下，分别比对照高出 9.08%、17.12%、25.41% 和 25.23%，但因为存在巨大的变异性而使差异不显著。小麦的种植（0res）相对于休闲（fallow）促进了土壤芳基硫酸酯酶β-葡萄糖苷酶活性，随着秸秆还田量的增加土壤芳基硫酸酯酶的活性也增加。

2.3 大气CO₂浓度升高对土壤转化酶活性的影响

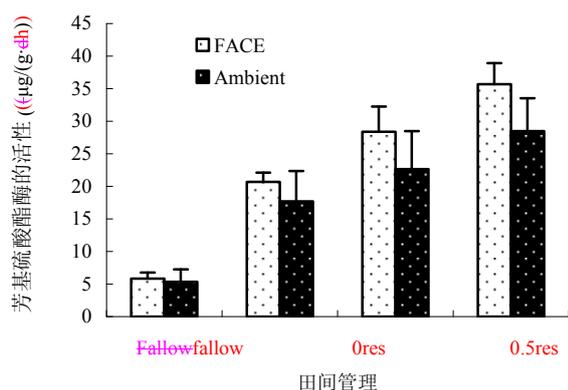


图 4 大气 CO₂ 浓度升高、休闲和秸秆还田对土壤芳基硫酸酯酶活性的影响

Fig. 4 Effects of elevated CO₂ concentration, fallow and straw amendments on soil arylsulphatase activity

2.5 大气 CO₂ 浓度升高对土壤 FDA (荧光素二乙酸酯) 水解的影响

FDA 水解反应被用来估计土壤中微生物的活性, 因为 FDA 的水解涉及到酯酶、蛋白酶和脂肪酶等所有的与土壤有机质微生物降解过程相关的酶。FDA 水解被成功地用来检测土壤水解反应活性。本实验结果如图 5 所示, 整体上大气 CO₂ 浓度升高对土壤 FDA 水解反应有促进作用但影响不显著, 休闲和秸秆还田处理 (fallow、0res、0.5-res 和 1.5res) 在 FACE 条件下, 分别比对照高出 -0.44%、4.47%、14.42% 和 -2.80%。小麦的种植和秸秆的还田都促进了土壤 FDA 水解的活性。

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

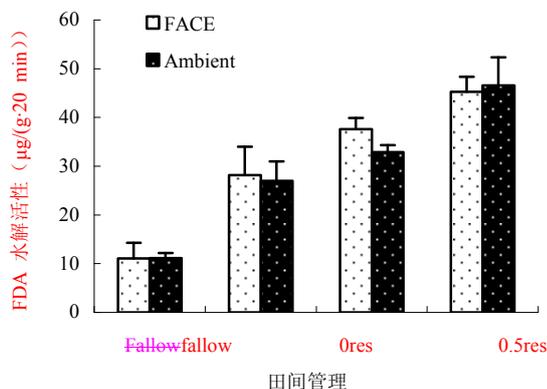


图 5 大气 CO₂ 浓度升高、休闲和秸秆还田对土壤 FDA 水解活性的影响

Fig. 5 Effects of elevated CO₂ concentration, fallow and straw amendments on soil FDA hydrolysis

性质、土壤生物区系和植物产生明显的作用, 因而对土壤酶活性可能产生直接或间接的影响^[18]。休闲处理中, CO₂ 浓度升高对实验中的几种酶的活性影响很小, 这与人们一贯的猜测相一致, 因为土壤中 CO₂ 的浓度是大气中的 10~50 倍, 因此大气 CO₂ 浓度的升高不可能直接影响到土壤微生物^[19]。对于其他 3 个处理, 大气 CO₂ 浓度升高增加了土壤脱氢酶、β-葡萄糖苷酶

——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, 因而对土壤酶活性可能产生直接或间接的影响^[18]。休闲处理中, CO₂ 浓度升高对实验中的几种酶的活性影响很小, 这与人们一贯的猜测相一致, 因为土壤中 CO₂ 的浓度是大气中的 10~50 倍, 因此大气 CO₂ 浓度的升高不可能直接影响到土壤微生物^[19]。对于其他 3 个处理, 大气 CO₂ 浓度升高增加了土壤脱氢酶、β-葡萄糖苷酶、转化酶、芳基硫酸酯酶的活性和 FDA 水解, 但因为酶在土壤存在着较大的变异性, 其增加效果而不显著。这与前人的研究很相似。Dhillion 等^[20]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, 他们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^[21]对石灰质草地的研究也发现大气 CO₂ 浓度升高条件下, 转化酶、脲酶、蛋白酶、碱性磷酸酶等其活性都有不同程度的增加, 并且在春季影响更显著, 他们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。苑学霞等^[22]在 FACE 系统中的研究也证实大气 CO₂ 浓度升高刺激脱氢酶、葡萄糖苷酶、转化酶、脲酶和酸性磷酸酶活性。武术等^[23]在同一 FACE 系统中的研究发现, 添加秸秆下大气 CO₂ 浓度升高明显增加了土壤脱氢酶、脲酶和转化酶活性, 这与本研究的结果相似。本实验中芳基硫酸酯酶的活性在 FACE 条件下明显的比对照条件下高, 而芳基硫酸酯酶能表征土壤真菌的数量, 这一结果与徐国强等^[24]在同一 FACE 实验站所得到的结果相一致。另一方面, 苑学霞等^[25]的研究也证实在小麦生长结束后土壤微生

物量 C 是增加的。因此,我们可以认为由于大气 CO₂ 浓度升高增加了微生物生物量和微生物活性而引起土壤酶活性的增加。秸秆还田刺激了土壤酶的活性,而本实验中秸秆还田对转化酶的活性没有影响可能是因为我们的采样时间在作物的收获期,还田的秸秆容易分解的部分已经大量分解。李腊梅等^[26]对太湖地区长期秸秆还田的研究也证实秸秆的还田刺激了土壤脱氢酶、脲酶、葡萄糖苷酶、芳基硫酸酯酶的活性和 FDA 水解的活性。土壤酶活性对大气 CO₂ 浓度升高的响应受到秸秆还田的影响,除了葡萄糖苷酶和脱氢酶外,0.5 倍秸秆还田比不还田下 FACE 效应更显著,而 1.5 倍秸秆还田的 FACE 效应比 0.5 倍下降,原因可能是秸秆的添加为微生物提供更多的可利用性 C,为微生物提供了更多的底物而刺激了土壤酶分泌和活性,而土壤能承受的外源有机物的量是有限的,当秸秆还田的量继续增加,不论 FACE 还是对照 Ambient,都趋于饱和,而导致 FACE 效应的下降。CO₂ 浓度的升高刺激了葡萄糖苷酶的活性,但添加秸秆 FACE 效应下降,而 Mayr 等^[27]研究认为葡萄糖苷酶对于 CO₂ 浓度升高没有响应,他们认为植物通过根分泌的 C 是容易利用的 C,不需要葡萄糖苷酶来分解,而在同一个 FACE 平台下,苑学霞等^[22]的实验却发现葡萄糖苷酶的活性与 N 肥的使用有关,低 N 条件下没有 FACE 效应,而高 N 条件下有 FACE 效应。本实验中种植小麦情况下,0.5 倍秸秆还田的 FACE 效应没有无本秸秆还田的大,可能是由 FACE 条件下更多的光合产物分配到土壤中和更快的根系周转造成的,秸秆还田部分掩盖了 FACE 的光合产物分配和根系周转效应。脱氢酶的活性随着秸秆还田量的增加 FACE 效应越来越明显可能是因为相对于其他酶,脱氢酶比较敏感所致。

4 结论

(1) 大气 CO₂ 浓度升高不会直接影响土壤酶的活性。

(2) 大气 CO₂ 浓度升高通过植物的分泌等刺激土壤脱氢酶、转化酶、葡萄糖苷酶、芳基硫酸酯酶的活性和 FDA 水解。

(3) 秸秆还田对土壤酶活性有刺激作用。

(4) CO₂ 浓度升高和秸秆还田对土壤酶的综合作用是:一般 0.5 倍秸秆还田下的 FACE 效应最显著,而 1.5 倍下 FACE 效应消失。

参考文献:

- [1] IPCC Climate Change, 2007. Synthesis Report. Summary for Policymaker. <http://www.ipcc.ch/> (November 2007)
- [2] Zak DR, Pregitzer KS, King JS, Holmes WE. Elevated atmospheric CO₂, fine roots and the response of soil microorganisms: review and hypothesis. *New Phytol.*, 2000, 47(1): 201-222
- [3] Ainsworth EA, Long SP. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist*, 2005, 165(2): 351-371
- [4] Rasse DP, Peresta G, Drake BG. Seventeen years of elevated CO₂ exposure in a Chesapeake Bay wetland: Sustained but contrasting responses of plant growth and CO₂ uptake. *Global Change Biology*, 2005, 11(3): 369-377
- [5] Pendall E, Mosier AR, Morgan JA. Rhizodeposition stimulated by elevated CO₂ in a semiarid grassland. *New Phytologist*, 2004, 162(2): 447-458
- [6] Allard V, Robin C, Newton PCD, Lieffering M, Soussana JF. Short and long-term effects of elevated CO₂ on *Lolium perenne* rhizodeposition and its consequences on soil organic matter turnover and plant N yield. *Soil Biol. Biochem.*, 2006, 38(6): 1178-1187
- [7] Xie ZB, Zhu JG, Pan HL. Stimulated rice growth and decreased straw quality under elevated atmospheric pCO₂. *The Proceedings of China Association for Science and Technology*. Beijing/New York: Science Press, 2004:640-645
- [8] Kandeler E, Mosier AR, Morgan JA, Milchunas DG, King JY, Rudolph S, Tschirko D. Response of soil microbial biomass and enzyme activities to the transient elevation of carbon dioxide in a semi-arid grassland. *Soil Biol. Biochem.*, 2006, 38(8): 2448-2460
- [9] Haase S, Philippot L, Neumann G, Marhana S, Kandeler E. Local response of bacterial densities and enzyme activities to elevated atmospheric CO₂ and different N supply in the rhizosphere of *Phaseolus vulgaris* L. *Soil Biol. Biochem.*, 2008, 40(5): 1225-1234
- [10] 刘钢, 韩勇, 朱建国, 冈田益己, 中村浩史, 吉本真由美. 稻麦轮作FACE系统平台 I. 系统结构与控制. *应用生态学报*, 2002, 13(10): 1253-1258
- [11] Chendrayan K, Adhya TK, Sethunathan N. Dehydrogenase and invertase activities of flooded soils. *Soil Biol. Biochem.*, 1980, 12(3): 271-73
- [12] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1987
- [13] Wang XC, Lu Q. Activity of β-glucosidase in paddy soils in the Taihu Lake Region. *Pedosphere*, 2006, 16(1): 118-124

- [14] Tabatabai MA. Soil enzymes // Weaver RW, Angel JS, Bottomley PS. *Methods of Soil Analysis, Part 2. Microbiological and Biochemical Properties*. Madison: Soil Science Society of America, 1994: 775-833
- [15] Adam G, Duncan H. Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. *Soil Biol. Biochem.*, 2001, 33(8): 943-951
- [16] 尹睿, 张华勇, 黄锦法, 林先贵, 王俊华, 曹志洪(补全全部作者)等. 保护地菜地与稻麦轮作土壤为生物学特征的比较. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(1): 57-62
- [17] Bandick AK, Dick RP. Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biol. Biochem.*, 1999, 31(11): 1471-1479
- [18] 吴秀臣, 孙辉, 杨万勤. 土壤酶活性对温度和 CO₂ 浓度升高的响应研究. *土壤*, 2007, 39(3): 358-363
- [19] Schortemeyer M, Hartwig UA, Hendrey GR, Sadowsky MJ. Microbial community changes in the rhizospheres of white clover and perennial ryegrass exposed to free air carbon dioxide enrichment (FACE). *Soil Biol. Biochem.*, 1996, 28(12): 1717-1724
- [20] Dhillon SS, Roy Jand Abrams M. Assessing the impact of elevated CO₂ on soil microbial activity in a Mediterranean model ecosystem. *Plant and Soil*, 1996, 187(2): 333-342
- [21] Ebersberger D, Niklaus PA, Kandeler E. Long term CO₂ enrichment stimulates N-mineralisation and enzyme activities in calcareous grass and Soil. *Soil Biol. Biochem.*, 2003, 35(7): 951-965
- [22] 苑学霞, 林先贵, 褚海燕, 尹睿, 张华勇, 胡君利, 朱建国. 大气 CO₂ 浓度升高对不同施 N 土壤酶活性的影响. *生态学报*, 2006, 26(1): 48-53
- [23] 武术, 林先贵, 尹睿, 胡君利, 毛婷婷, 冯有智, 朱建国. 大气 CO₂ 浓度升高对添加秸秆条件下稻田土壤酶活性的影响. *生态与农村环境学报*, 2008, 24(4): 32-36
- [24] 徐国强, 李扬, 史奕, 黄国宏. 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*, 2003, 13(10): 1358-1359
- [25] 苑学霞, 林先贵, 褚海燕, 尹睿, 朱建国. 大气 CO₂ 浓度升高对几种土壤微生物学特征的影响. *中国环境科学*, 2006, 26(1): 25-29
- [26] 李腊梅, 陆琴, 严蔚东, 王校常. 太湖地区稻麦二熟制长期秸秆还田对土壤酶活性的影响. *土壤*, 2006, 38(4): 422-428
- [27] Mayr C, Miller M, Insam H. Elevated CO₂ alters community-level physiological profiles and enzyme activities in alpine grassland. *J. Microbiol. Methods*, 1999, 36(1/2): 35-43

Response of Soil Enzyme Activity to Elevated Atmospheric pCO₂ at Fallow and Straw Amendments in Wheat Season of a Rice/Wheat Rotation Ecosystem

ZHOU Shi-dong^{1,2}, XIE Zu-bin¹, ZHU Jian-guo¹, LIU Gang¹, Lin Xian-gui¹, SUN Hui-feng^{1,2}, BEI Qi-cheng^{1,2}, LIU Jin-shan^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper a FACE (free air carbon dioxide enrichment) experiment with 4 kinds of soil managements (fallow, 0 organic matter amendment (0-res), 50% harvested straw amendment (0.5-res) and 150% harvested straw amendment (1.5-res)) was conducted to investigate the responses of soil enzyme activities. Results showed that elevated CO₂ had no effect on fallow soil. Straw amendment increased the activities of soil dehydrogenase, β-glucosidase, arylsulphatase and FDA hydrolysis. With no straw amendment elevated CO₂ concentration increased the activities of soil dehydrogenase, β-glucosidase, arylsulphatase, invertase and FDA hydrolysis by 14.88%, 19.41%, 17.12%, 11.69% and 4.47% respectively. FACE effect increased firstly then disappeared with the increase of straw amendments.

Key words: Elevated CO₂; FACE; Enzyme activities; Fallow; Straw amendments

~~注：请将文中所有原图件激活，以便排版人员能打开图件进行线条和图例等的统一性修改和文字编辑。
注意文中用红色标注的地方。~~