

模拟大气 CO₂ 浓度和温度升高对亚高山冷杉 (*Abies faxoniana*) 林土壤酶活性的影响

冯瑞芳¹ 杨万勤^{1 2,*} 张 健¹ 邓仁菊¹ 简 毅¹ 林 静¹

(1. 四川农业大学林学院园艺学院, 四川 雅安 625014 2. 中国科学院成都生物研究所 四川 成都 610000)

摘要 采用控制环境生长室研究了川西亚高山森林生态系统中与 C、N、P 循环有关的土壤转化酶、脲酶、硝酸还原酶和酸性磷酸酶活性的月动态及其对模拟大气 CO₂ 浓度增加、温度升高以及交互作用的动态响应。在一个生长季节内, 土壤有机层和矿质土壤层的转化酶、脲酶、硝酸还原酶和酸性磷酸酶的活性高峰均出现在温度较高的夏季。其中, 土壤有机层的转化酶活性高峰出现在 6 月份, 但土壤矿质层的转化酶活性高峰出现在 7 月份, 土壤有机层和矿质土壤层的脲酶和酸性磷酸酶的活性高峰均出现在 7 月份, 而硝酸还原酶的活性高峰均出现在 8 月份。升高大气 CO₂ 浓度处理 (EC) 对土壤有机层和矿质土壤层的转化酶、脲酶、硝酸还原酶和酸性磷酸酶活性没有显著影响。升高温度处理 (ET) 显著增加了土壤有机层和矿质土壤层的酶活性, 并且土壤有机层的转化酶、硝酸还原酶和脲酶活性增加更显著。大气 CO₂ 浓度增加和温度升高之间的交互作用 (ECT) 对土壤有机层和矿质土壤层酶活性的影响主要是温度升高引起的。

关键词 高寒森林 土壤有机层 大气 CO₂ 浓度增加 温度升高 土壤酶活性

文章编号: 1000-0933 (2007) 10-4019-08 中图分类号: Q142 S154.1 S718.55 文献标识码: A

Effects of simulated elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature on soil enzyme activity in the subalpine fir forest

FENG Rui-Fang¹, YANG Wan-Qin^{1 2,*}, ZHANG Jian¹, DENG Ren-Ju¹, JIAN Yi¹, LIN Jing¹

¹ Faculty of Forestry & Horticulture, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China

² Chengdu Institute of Biology, CAS, Chengdu 610041, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (10) 4019 ~ 4026.

Abstract : Global change has been concerned about worldwide since climate change characterized by global warming and atmospheric CO₂ enrichment is changing the structure and function of terrestrial ecosystem. Meanwhile, numerous studies undertaken over the past decade have led to the general conclusion that enzymes in mineral soil and soil organic layer play a key role in the soil biochemical process and are closely related to the cycles of bioelements and energy fluxes in forest ecosystem. Therefore, understanding of soil enzyme activity responses to simulated atmospheric CO₂ enrichment, elevated temperature and their interactions remain essential for predicting the changes in the high-frigid forest ecosystem function and structure in the future. Little is known about the responses of the activities of soil enzymes that are related to the cycles of

基金项目 国家自然科学基金资助项目 (30471378); 国家“十一五”重大科技支撑计划课题资助项目 (2006BAC01A11); 四川省青年科技基金资助项目 (07JQ0081); 四川省重大应用基础研究和四川农业大学人才引进资助项目

收稿日期 2006-09-30; 修订日期 2007-04-29

作者简介 冯瑞芳 (1982 ~) 女, 山西人, 硕士, 主要从事土壤生态与全球变化研究. E-mail: yanerfei411@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangwq@cib.ac.cn

Foundation item The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30471378), National Key Technologies R&D Program, China (No. 2006BAC01A11), Sichuan Youth Science and Technology Foundation (No. 07JQ0081), Key Project of Applied & Basic Research of Sichuan and the Talent-Recruiting Program of Sichuan Agricultural University

Received date 2006-09-30; **Accepted date** 2007-04-29

Biography FENG Rui-Fang, Master, mainly engaged in soil ecology and global change. E-mail: yanerfei411@163.com

carbon ,nitrogen and phosphorus to simulated climate change , although numerous reports have been published on the responses of the forest structure and function to free atmospheric CO₂ enrichment. Therefore ,72 intact soil columns from the primary fir (*Abies faxoniana* Rehder & E. H. Wilson) forest were parked in the controlled environmental chamber , and the activities of invertase , urease , nitrate reductase and acid phosphatase , which are related to the cycles of organic carbon , nitrogen and phosphorus in mineral soil and organic layer under simulated atmospheric CO₂ concentration increase (350 ± 25) $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) (EC) , elevated temperature ($2.0^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$) (ET) and their interaction (ECT) were measured simultaneously to understand the monthly variations on enzyme activities and their responses to climate change in the future. The significant monthly variations on the activities of the studied enzymes were observed in soil organic layer and mineral soil with the highest enzyme activities in summer , implying that monthly variation of soil temperature was a main factor to regulate the monthly patterns of soil enzyme activities in the subalpine forest. The highest activities were observed in June for invertase in soil organic layer , in July for invertase in mineral soil and urease and acid phosphatase in organic layer and mineral soil , and in August for nitrate reductase in organic layer and mineral soil. The different monthly patterns of enzyme activities are attributed to enzyme sources and soil layer. The monthly dynamics on enzyme activities were of ecological significance for soil nutrient availability and tree nutrition in the subalpine forest ecosystem. EC had influenced slightly on the activities of the studied enzymes in organic layer and mineral soil resulting from the higher CO₂ concentration in soil atmosphere where was higher than 50000 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ and no direct effect owing to no trees planted on soils. ET increased the activities of the studied enzymes in organic layer and mineral soil significantly comparing with the control (CK) since the elevated temperature was beneficial to microbial growth and propagation. The increments of the enzyme activities in organic layer were higher than those in mineral soil , implying that soil organic layer was more sensitive to climate change. ECT sharply increased the activities of the studied enzymes in organic layer and mineral soil comparing with the EC and CK treatments , but there was no significant difference between the ET and ECT , which was also attributed to no indirect effect by elevated atmospheric CO₂ concentration owing to no trees planted on soils , implying that the increment of the enzyme activities resulted from the temperature effect. However , there was lack of researches on indirect effect and complex effect on soil enzyme activity caused by elevated atmospheric CO₂ concentration , temperature and their interactions , which limited the understanding of soil enzyme responses to climate change. More attentions should be paid to direct , indirect and interactive effects on soil enzyme activities in the future.

Key Words : high-frigid forest ; soil organic layer ; elevated atmospheric CO₂ concentration ; increased temperature ; soil enzyme activity

以大气 CO₂浓度和温度升高为主要特征的全球气候变化正在改变着陆地生态系统的结构和功能 ,威胁着人类的生存与健康 ,因而受到各国政府和科学家的普遍关注^[1]。过去 20 多年中 ,有关林木生长、森林生态系统的结构和功能、生物地球化学循环对气候变化的响应以及森林植被与全球碳循环的互动等方面的研究报道已浩如烟海^[2~5] ,有关土壤酶活性对大气 CO₂浓度升高的响应也逐步受到重视^[6,7] ,但有关其对大气 CO₂浓度升高、温度升高及其交互作用响应的研究报道还相当少见^[7,8] ,并且研究对象多还停留在矿质土壤层上 ,而对森林土壤有机层这一对全球气候变化更为敏感的生态界面 (ecological interface) 的研究还远远不够^[9]。川西高寒森林位于青藏高原东缘和长江上游地区 ,其在涵养水源、水土保持和维持土壤肥力等方面具有重要的、不可替代的作用^[8,9]。土壤有机层又是高寒森林生态系统中极具特征的重要组成部分 ,不仅控制着森林生态系统中的养分循环格局和有效性^[10] ,而且是有机碳和养分最为活跃的源 (source) 和汇 (sink) ,因而其对全球气候变化的响应可能比矿质土壤层更敏感^[11]。可见 ,同步研究高寒森林土壤有机层和矿质土壤层的酶活性对气候变化的响应对于深入了解未来气候变化条件下高寒森林土壤有机碳和养分动态具有十分重要的科学价值 ,但迄今为止的研究更加强调矿质土壤层的酶活性动态及其对模拟气候变化的响应 ,有关土壤有机层酶活

性动态及其对模拟气候变化的响应研究鲜见报道。因此,本文应用自控、独立、封闭的控制环境生长室 (controlled environmental chamber),同步研究了川西亚高山森林土壤有机层和矿质土壤层中与 C、N、P 循环密切相关的转化酶、脲酶、硝酸还原酶、酸性磷酸酶活性的月动态及其对环境 CO₂ 浓度加倍和温度升高及其交互作用的响应,以期深入了解未来气候变化条件下川西高寒森林土壤生态过程提供科学依据。

2 材料与方法

2.1 实验设计

控制实验于中国科学院成都生物研究所茂县生态站 (31°41'07"N,103°53'58"E,海拔 1800 m)的控制环境生长室进行。该系统由 6 个独立、自控、封闭的生长室 (chamber)组成。生长室由下部近似圆柱体和上部近似球缺两部分构成,其体积为 24.5 m³。CO₂ 浓度对照系统由 CO₂ 传感器、对照模块、电磁阀、流量计、减压阀和 CO₂ 钢瓶构成。空气温度对照是通过与压缩机相连接的热交换器、电阻加热器 (2kW)以及新风流量对照阀等构成。本实验设置的参数分别为数据扫描间隔 15s,数据采集间隔 5min,实行 24h 连续观测^[12]。

2004 年 9 月从王朗亚高山原始冷杉 (*Abies faxoniana* Rehder & E. H. Wilson)林下采集原状土柱 72 个,土壤有机层和矿质层的厚度分别为 (20 ± 5)cm,分别置于花钵 (Φ30 cm × 50 cm)中,于 4 种处理的控制环境生长室中进行控制实验。EC (环境 CO₂ 浓度 + 350 (± 25) μmol · mol⁻¹)、ET (环境温度 + 2.0 (± 0.5) °C)、ECT (同时升高 CO₂ 浓度和温度处理)和 CK (对照——未做 CO₂ 浓度增加和温度升高处理)。原状土壤剖面上的水分控制通过跟踪原始冷杉林下土壤剖面上的水分状况的方法进行动态控制。每个处理同时做 3 个重复。

2.2 样品采集及测定方法

2005 年 5 ~ 10 月期间,基于 Chapin III 等^[13]和 Papamichos^[14]的方法,每月中旬分土壤有机层 (OL)和矿质土壤层 (MS)采集控制环境实验条件下原状土壤剖面上的样品置于经紫外线消毒的布袋中,迅速带回实验室内作处理。土壤有机层样品略作风干后,立即去除石块、动物残体和根系后研磨,过 2mm 筛,混匀,装于保鲜袋中,贮于 4 °C 的冰箱中待测。矿质层土壤样品带回实验后立即去掉石块、动植物残体和根系后,研磨、过 2mm 筛、混匀,装入保鲜袋,贮于 4 °C 的冰箱中待测。所有样品在 1 个月内完成实验分析。

土壤有机层和矿质土壤层的转化酶、脲酶、硝酸还原酶和酸性磷酸酶活性分别采用 3,5-二硝基水杨酸比色法、靛酚蓝比色法、酚二磺酸比色法和磷酸苯二钠比色法测定^[15]。转化酶、脲酶、硝酸还原酶和酸性磷酸酶活性单位分别用 EU_{INV}、EU_{URA}、EU_{NIR}和 EU_{APA}表示。EU_{INV}表示在 37 °C 条件下 1 g 土壤有机层或矿质土壤层样品中的转化酶在 1d 内水解生成的葡萄糖的 mg 数;EU_{URA}表示在 37 °C 条件下 1 g 土壤有机层或矿质土壤层样品中的脲酶在 1d 内水解生成的氨基氮的 mg 数;EU_{NIR}表示在 30 °C 条件下 1 g 土壤有机层或矿质土壤层样品中的硝酸还原酶在 1d 内水解生成的氮态氮的 mg 数;EU_{APA}表示在 37 °C 条件下 1 g 土壤有机层或矿质土壤层样品中的酸性磷酸酶在 1d 内水解生成的酚的 mg 数。所有分析做 3 个重复。

2.3 数据分析

所有实验结果是以烘干土重为基础计算 (105 °C,24 h)。利用 SPSS 10.0 Duncan 多重比较来判断不同月份之间、土壤有机层和矿质土壤层之间、CK 与 EC 之间、CK 与 ET 之间、CK 与 ECT 之间、EC 与 ET 之间、EC 与 ECT 之间以及 ET 与 ECT 之间的酶活性的差异显著性 (P < 0.05)。

3 结果

3.1 转化酶活性的月动态及其对升高 CO₂ 浓度、温度及交互作用的响应

在一个生长季节内,土壤有机层和矿质土壤层的转化酶活性均呈现出较为明显的月变化规律,酶活性的相对大小及活性高峰取决于土壤层次及处理间的差异 (图 1)。如图 1 (a)所示,在 CK、EC、ET 和 ECT 处理条件下,土壤有机层的转化酶活性最高峰均出现在 6 月份,但 6、7 月份间的酶活性没有显著差异 (P > 0.05)。如图 1 (b)所示,所有处理条件下,矿质土壤层的酶活性高峰出现在 7 月份,且显著高于其它月份 (P < 0.05)。EC 处理没有显著增加或降低土壤有机层和矿质土壤层的转化酶活性,ET 和 ECT 处理显著增加了转化酶活性,但 ET 和 ECT 处理之间的转化酶活性并没有显著差异。比较图 1 (a)和 (b)可发现,在相同月份内,土壤有

机层的转化酶活性显著高于矿质层,在 ET 和 ECT 处理条件下,土壤有机层的转化酶活性增幅更大。

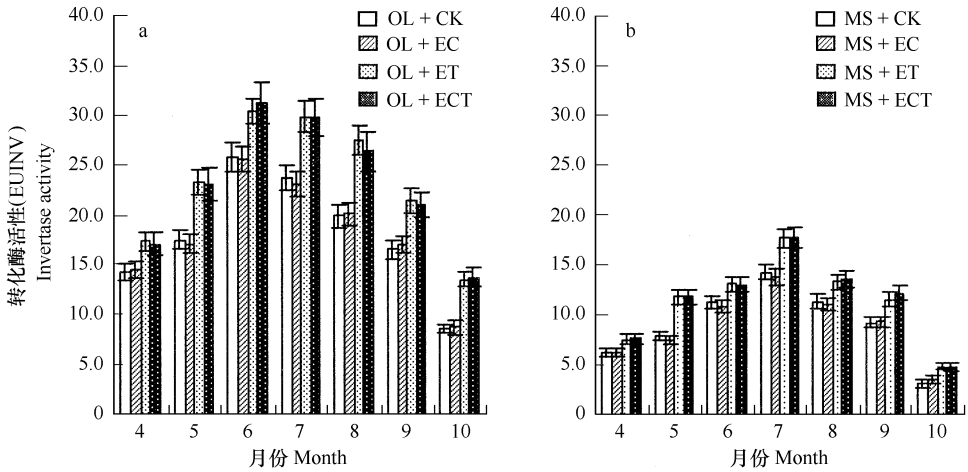


图1 升高大气 CO₂ 浓度 (EC)、温度 (ET)及其交互作用 (ECT)对亚高山冷杉林土壤有机层 (OL)和矿质土壤层 (MS)转化酶活性的影响
Fig. 1 Effects of elevated atmospheric CO₂ (EC), increased temperature (ET) and their interaction (ECT) on invertase activity in soil organic layer (OL) and mineral soil (MS) from subalpine fir (*Abies faxoniana* Rehder & E. H. Wilson) forest

3.2 脲酶活性动态及其对升高 CO₂ 浓度、温度及交互作用的响应

图2 表明,在一个生长季节内,土壤有机层和矿质土壤层的脲酶活性也呈现出明显的月变化规律,但其活性高峰和变化规律不同于转化酶。如图2所示,EC、ET 和 ECT 及 CK 条件下,土壤有机层和矿质土壤层的脲酶活性高峰均出现在7月份,且显著高于其它月份 ($P < 0.05$)。所有月份中,EC 处理并没有显著增加土壤有机层和矿质土壤层的脲酶活性,ET 和 ECT 处理显著增加了脲酶活性,但 ET 和 ECT 处理之间的脲酶活性没有显著差异。尽管 ET 和 ECT 处理条件下,土壤有机层的脲酶活性增加的绝对值显著高于矿质土壤层,但后者的增幅高于前者。

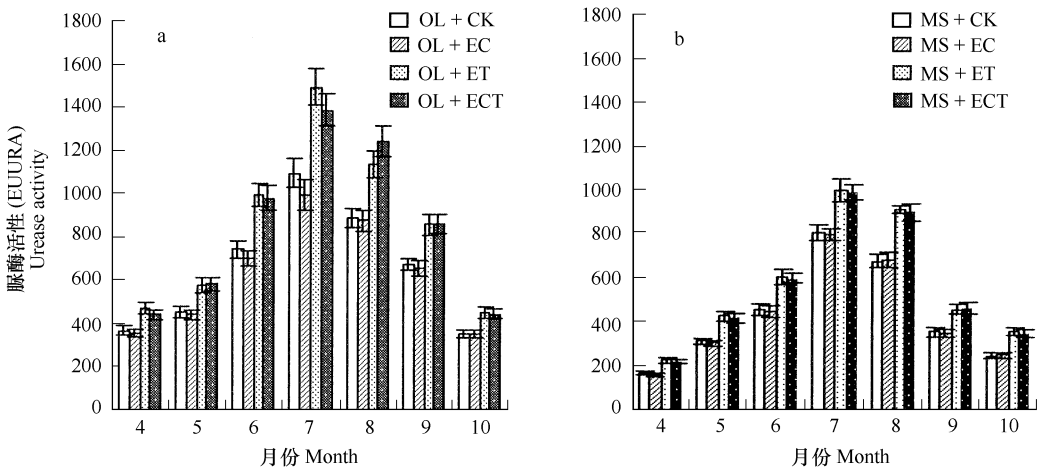


图2 升高大气 CO₂ 浓度 (EC)、温度 (ET)及其交互作用 (ECT)对亚高山冷杉林土壤有机层 (OL)和矿质土壤层 (MS)脲酶活性的影响
Fig. 2 Effects of elevated atmospheric CO₂ (EC), increased temperature (ET) and their interactions (ECT) on urease activity in soil organic layer (OL) and mineral soil (MS) from subalpine fir (*Abies faxoniana* Rehder & E. H. Wilson) forest

3.3 硝酸还原酶活性动态及其对升高 CO₂ 浓度、温度及交互作用的响应

与转化酶和脲酶相似,土壤有机层和矿质土壤层的硝酸还原酶活性也呈现出明显的月变化规律,但所有处理条件下的酶活性高峰均出现在8月份(图3)。EC 处理增加了土壤有机层的硝酸还原酶活性,7、8月份的

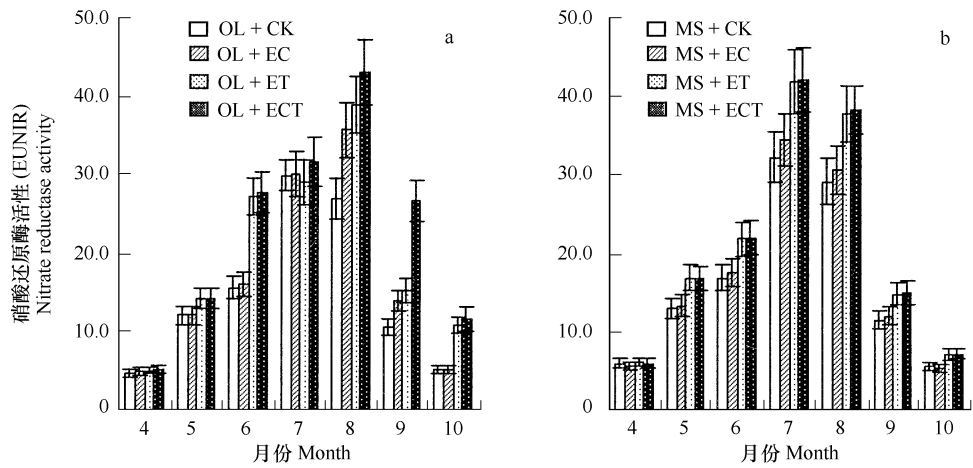


图3 升高 CO₂ 浓度 (EC)、温度 (ET) 及其交互作用 (ECT) 对亚高山冷杉林土壤有机层 (OL) 和矿质土壤层 (MS) 硝酸还原酶活性的影响

Fig.3 Effects of elevated atmospheric CO₂ (EC), increased temperature (ET) and their interaction (ECT) on nitrate reductase activity in soil organic layer (OL) and mineral soil (MS) from subalpine fir (*Abies faxoniana* Rehder & E. H. Wilson) forest

增长幅度分别达到了 32.0% 和 31.3% ,但没有达到显著性水平 ($P > 0.05$)。ET 和 ECT 处理显著增加了土壤有机层和矿质土壤层的硝酸还原酶活性 ,而且 ECT 处理对土壤有机层的硝酸还原酶活性的影响显著高于 ET 处理 ,但 ET 和 ECT 处理条件下的矿质土壤层的硝酸还原酶活性没有显著的差异 ($P > 0.05$)。

3.4 酸性磷酸酶活性动态及其对升高 CO₂ 浓度、温度及交互作用的响应

图 4 表明 ,在一个生长季节内 ,土壤有机层和矿质土壤层的酸性磷酸酶活性同样呈现出较为明显的月变化规律 ,且和土壤脲酶一样。在 EC、ET、ECT 和 CK 处理条件下 ,土壤有机层和矿质土壤层的脲酶活性高峰均出现在 7 月份。EC 处理没有显著增加或降低土壤有机层和矿质土壤层的酸性磷酸酶活性。ET 和 ECT 处理显著增加了土壤有机层和矿质土壤层酸性磷酸酶活性。与土壤转化酶不同 ,相同月份内 ,ET 和 ECT 处理条件下 ,土壤矿质层的酸性磷酸酶活性增幅更大 ,但 ET 和 ECT 处理之间的酸性磷酸酶活性并没有显著差异。

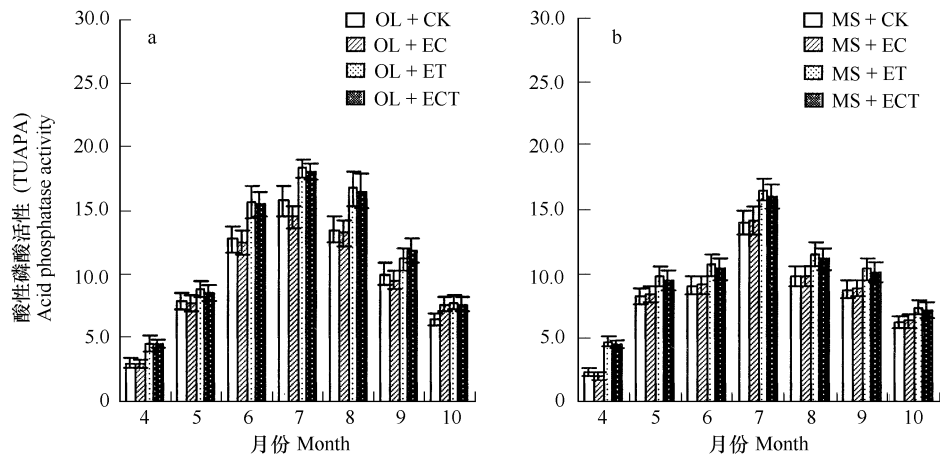


图4 升高 CO₂ 浓度 (EC)、温度 (ET) 及其交互作用 (ECT) 对亚高山冷杉林土壤有机层 (OL) 和矿质土壤层 (MS) 酸性磷酸酶活性的影响

Fig.4 Effects of elevated atmospheric CO₂ (EC), increased temperature (ET) and their interaction (ECT) on acid phosphatase activity in soil organic layer (OL) and mineral soil (MS) from subalpine fir (*Abies faxoniana* Rehder & E. H. Wilson) forest

4 讨论与结论

土壤酶活性不仅是表征土壤肥力的重要生物指标^[15,22] ,而且与生物元素循环密切相关^[16] ,已成为生态

系统过程研究中必不可少的监测指标之一^[8]。最近,土壤酶活性对升高大气 CO₂ 浓度的响应也逐渐受到关注^[7],但过去的研究更加关注矿质土壤层的酶活性动态及其对变化环境的响应^[9],缺乏对森林土壤有机层和矿质土壤层酶活性动态及其对环境变化响应的同步监测。因此,本项研究首次同步监测了控制实验条件下川西亚高山冷杉林土壤有机层和矿质土壤层中与 C、N、P 循环有关的转化酶、脲酶、硝酸还原酶和酸性磷酸酶活性的月动态及其对升高大气 CO₂ 浓度和温度的响应。

由于土壤酶活性对环境变化的敏感性,因而土壤酶活性的月动态或季节动态一直是土壤酶研究的重点内容之一^[8],但有关土壤酶活性的月变化规律的研究结果并不一致。例如,杨万勤等^[7]对含四川大头茶的森林群落土壤酶活性研究结果表明,土壤转化酶和蛋白酶的活性高峰出现在春季和秋季,熊浩仲等^[18]对川西亚高山森林土壤酶动态研究则表明,土壤酶活性的高峰期主要出现在温度较高的夏季(7、8)月份,或是凋落物高峰期的10月份。Xiang 等^[19]对不同气候带土壤酶活性的研究表明,在湿润地区,酶活性在冬季最低,而干旱地区其酶活性在夏季最低。本项研究表明,土壤有机层和矿质土壤层的转化酶、脲酶、硝酸还原酶和酸性磷酸酶活性均具有明显的月变化规律,酶活性高峰出现在温度较高的夏季(6~8月份),并取决于土壤层次和酶类本身。土壤有机层的转化酶活性高峰出现在6月份,但矿质土壤层的转化酶活性高峰出现在7月份;土壤有机层和矿质土壤层的脲酶和酸性磷酸酶的活性高峰均出现在7月份,而硝酸还原酶的活性高峰均出现在8月份。这与亚热带和热带森林土壤酶活性的研究结果不同^[7],但与温带和寒温带森林土壤酶活性的月变化规律相似^[20~22]。这是因为尽管与土壤酶活性有关的微生物受到凋落物的“激发效应(Priming effect)”的影响^[15,17],但本项研究是以原状土柱作为实验材料,没有栽植植物,不存在凋落物的“激发效应”问题,而且秋季温度较低,即使存在“激发效应”也可能被低温的抑制作用所掩盖。这意味着,温度的月动态是调控川西亚高山森林土壤有机层和矿质土壤层的酶活性动态的最主要因素。由于林木的生长高峰在雨热同季的夏季,因此,土壤有机层和矿质土壤层中与 C、N、P 循环有关的酶活性出现在温度较高的月份对于提高土壤 N、P 的有效性和促进林木生长具有十分重要的生态学意义。

以大气 CO₂ 浓度和温度升高为主要特征的气候变化可能通过直接或间接的途径对土壤有机层和矿质土壤层的酶活性产生显著的影响,从而影响土壤生态过程^[9]。本项研究表明,模拟大气 CO₂ 浓度增加对土壤有机层和矿质土壤层的转化酶、脲酶和酸性磷酸酶活性没有显著影响。这是因为土壤有机层和矿质土壤层空气中的 CO₂ 浓度较高(可达到 50000 μmol · mol⁻¹),因而增加大气 CO₂ 浓度对微生物群落没有直接的影响^[6,23~25]。但大气 CO₂ 浓度增加可能通过改变林木凋落物生化特性(例如 C/N 比、木质素/N 比)的影响而改变土壤微生物群落的组成和活性,从而对土壤有机层和矿质土壤层的酶活性产生不同程度的影响。例如,Dhillon 等^[3]的研究表明,由于大气 CO₂ 浓度升高增加了微生物生物量和微生物活性,因而大气 CO₂ 浓度升高增强了土壤脱氢酶、木聚糖酶、纤维素酶和磷酸酶活性。Ebersberger 等^[6]对石灰质草地的研究也发现,大气 CO₂ 浓度升高可促进转化酶、脲酶、蛋白酶、碱性磷酸酶活性的增加,并且在春季影响更显著,他们认为这是因为有更多的植物来源的酶分泌到土壤中。本项研究以原状土柱作为研究对象,没有栽植植物,因而没有凋落物和根系分泌物的输入,没有改变土壤有机层和矿质土壤层的有机物质特性(如 C/N 比)。由于硝酸还原酶主要来源于厌氧微生物群落,因此,本项研究中土壤有机层和矿质土壤层的硝酸还原酶活性在升高大气 CO₂ 浓度条件下的增加幅度相对较大,但没有达到显著水平。

在一定的范围内,升高温度将有利于微生物群落的生长和繁衍,提高微生物活性^[26]。本项研究表明,升高温度处理(ET)显著增加了所研究的月份中土壤有机层和矿质土壤层的转化酶、脲酶、硝酸还原酶、酸性磷酸酶活性。这是因为亚高山森林土壤温度升高有利于土壤有机层和矿质土壤层中微生物群落的生长与繁衍,提高了微生物活性。研究结果还表明,升高温度对土壤有机层的转化酶、脲酶和酸性磷酸酶活性的影响较矿质土壤层更加显著。这一方面支持了“土壤有机层是高寒森林土壤-植被之间进行物质和能量交换最为活跃的生态界面”的观点,另一方面验证了“土壤有机层对气候变化的响应比矿质层更敏感”的假说。升高温度对森林土壤有机层酶活性的影响比矿质层更为敏感的原因可能包括以下两方面:(1)升高温度可能直接提高了

森林土壤有机层与 C、N、P 循环有关的酶系统活性 ,从而加速了土壤有机层中有机物质的分解 ,提高了养分的有效性 ,加速了系统内的生物元素循环 ;2) 升高温度提高了土壤有机层微生物活性和养分有效性 ,促进了植物的光合作用 ,提高了森林群落的生产力和凋落物产量 ,从而间接地提高土壤有机层的酶系统活性。

普遍认为 ,大气 CO₂ 浓度增加和温度升高之间的交互作用可通过对土壤微生物群落和植物生长的作用而对土壤酶活性产生直接或间接的影响^[8,9]。本项研究表明 ,与 EC 和 CK 处理相比 ,ECT 处理显著增加了土壤有机层和矿质土壤层的转化酶、脲酶、硝酸还原酶和酸性磷酸酶活性 ,但 ET 和 ECT 处理之间的酶活性并没有显著差异 ,即交互作用对土壤有机层和矿质土壤层酶活性的促进作用主要来源于升高温度对微生物活性的促进作用。大气 CO₂ 浓度增加与温度升高之间的交互作用主要是通过通过对森林凋落物产量和质量及根系分泌物等的作用对土壤微生物活性产生不同程度的影响 ,而本项实验以原状土柱作为研究对象 ,没有栽植植物 ,因此 ,二者的交互作用并没有显著影响所研究的土壤有机层和矿质层的酶活性。

土壤有机层是高寒森林植被与土壤之间进行物质循环和能量转换的最为活跃的生态界面之一 ,其生化特性的轻微变化可能直接影响到林木营养、土壤碳汇/源动态和森林生态系统过程^[9]。大气 CO₂ 浓度增加、温度升高及其交互作用可通过对土壤生物群落、林木生长、凋落物产量和质量以及根系分泌物、根系生长动态及根系凋落和分解动态等的直接或间接作用而对土壤有机层生化特性产生直接或间接的复杂影响 ,从而改变森林土壤生态过程^[9]。本文只报道了大气 CO₂ 浓度增加、温度升高及其交互作用对土壤有机层和矿质土壤层酶活性的直接影响 ,有关其间接效应有待深入研究。

References :

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2001 :The Scientific Basis. Cambridge Univ. Press ,Cambridge ,2001.

[2] Sinsabaugh R L , Saiya-Cork K , Long T , *et al.* Soil microbial activity in a Liquidambar plantation unresponsive to CO₂-driven increases in primary production. *Applied Soil Ecology* ,2003 ,24 :263 — 271.

[3] Dhillon S S , Roy J , Abram M. Assessing the impact of elevated CO₂ on soil microbial activity in a Mediterranean model ecosystem. *Plant and Soil* , 1997 ,187 (2) :333 — 342.

[4] Moorhead D L , Sinsabaugh R L. Simulated patterns of litter decay predict patterns of extracellular enzyme activities. *Applied Soil Ecology* ,2000 , 14 :17 — 79.

[5] Tschenko D , Kandeler E , Jones T H. Effect of temperature on below-ground N-gynamics in a weedy model ecosystem at ambient and elevated atmospheric CO₂ levels. *Soil Biology & Biochemistry* ,2001 ,33 #9 — 51.

[6] Ebersberger D , Niklaus P A , Kandeler E. Long term CO₂ enrichment stimulates N mineralization and enzyme activities in calcareous grassland. *Soil Biology and Biochemistry* ,2003 ,5 :965 — 972.

[7] Yuan X X , Lin X G , Chu H Y , *et al.* Effects of elevated atmospheric CO₂ on soil enzyme activities at different nitrogen application treatments. *Acta Ecologica Sinica* ,2006 ,26 (1) ,48 — 53.

[8] Yang W Q , Wang K Y. Advances in Forest Soil Enzymology. *Scientia Silvae Sinicae* ,2004 ,8 (5) :564 — 570

[9] Feng R F , Yang W Q , Zhang J. Review on biochemical property in forest soil organic layer and its responses to climate change. *Chinese Journal of Applied & Environment Biology* ,2006 ,12 (5) :734 — 739.

[10] Quideau S A , Chadwick O A , Benesi A , *et al.* A direct link between forest vegetation type and soil organic matter composition. *Geoderma* ,2001 , 104 :41 — 60.

[11] Currie W S. The responsive C and N biogeochemistry of the temperate forest floor. *Tree* ,1999 ,14 :316 — 320.

[12] Xiao L , Wang K Y , Zhang Y B. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration and increased temperature on *Betula albo-sinensis* rhizospheric microbe. *Ecologica Sinica* ,2006 ,26 (6) :1701 — 1708.

[13] Chapin II Stuart , Matson P A , Mooney H A. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. New York :Springer-Verlag ,2002. 436.

[14] Papamichos N. Forest Soils. Aristotle University of Thessaloniki ,1990 ,414.

[15] Guan S Y ed. Soil Enzymology and Its Methodology. Beijing :Agricultural Publishing Press ,1986. 353.

[16] Zhang D L , Mao Z J , Zhang L , *et al.* Advances of Enzyme Activities in the Process of Litter Decomposition. *Scientia Silvae Sinicae* ,2006 ,42 (1) :106 — 109.

[17] Yang W Q , Zhong Z C , Han Y P. Study on the distribution characteristics and seasonal dynamics of forest soil enzymatic activities and its relations

with *Gordonia Acuminata* on Mt. Jinyun. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science), 1999, 24 (3): 318—324.

[18] Xiong H Z, Wang K Y, Yang W Q. Seasonal variations of soil enzyme activities in fir and birch forests in subalpine area of western Sichuan. Chin J Appl Environ Biol, 2004, 10 (4): 416—420.

[19] Xiang Z L, Pariente S. Enzyme activities along a climatic transect in the Judean Desert. Catena, 2003, 53: 349—363.

[20] Criquet S, Farnet A M, Tagger S. Annual variations of phenoloxidase activities in an evergreen oak litter: influence of certain biotic and abiotic factors. Soil Biol Biochem, 2000, 32: 1505—1513.

[21] Garcia C, Hernandez M T. Research and Perspectives of Soil Enzymology in Spain. Murcia, Spain: CEBAS-CSIC, 2000.

[22] Yang W Q, Wang K Y. Advances on soil enzymology. Chinese Journal Applied Environment and Biology, 2002, 8 (5): 564—570.

[23] Van Veen J A, Liljeroth E, Iekkerkerk L J, et al. Carbon fluxes in plant-soil systems at elevated atmospheric CO₂ levels. Ecological Application, 1991, 1: 175—181.

[24] Paterson E H, Hall J M, Rattray E A S, et al. Effect of elevated CO₂ on rhizosphere carbon flow and microbial processes. Global Change Biology, 1997, 3: 363—377.

[25] Kampichler C, Kandeler E, Bardgett R D, et al. Impact of elevated atmospheric CO₂ concentrations on soil microbial biomass and activity in a complex, weedy field model ecosystem. Global Change Biology, 1998, 4: 335—346.

[26] Rustad L E, Campbell J L, Marion G M, et al. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. Oecologia, 2001, 126: 543—562.

参考文献：

[7] 苑学霞, 林先贵, 褚海燕, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对不同施氮土壤酶活性的影响. 生态学报, 2006, 26 (1), 48 ~ 53.

[8] 杨万勤, 王开运. 森林土壤酶研究进展. 林业科学, 2004, 8 (5) 564 ~ 570.

[9] 冯瑞芳, 杨万勤, 张健. 森林土壤有机层生化特性及其对气候变化响应的研究进展. 应用与环境生物学报, 2006, 12 (5): 734 ~ 739.

[12] 肖玲, 王开运, 张远彬. CO₂ 浓度和温度升高对红桦根际微生物的影响. 生态学报, 2006, 26 (6): 1701 ~ 1708.

[15] 关松荫编著. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986.

[16] 张东来, 毛子军, 张玲, 等. 森林凋落物分解过程中酶活性研究进展. 林业科学, 2006, 42 (1): 106 ~ 109.

[17] 杨万勤, 钟章成, 韩玉萍. 缙云山森林土壤酶活性的分布特征、季节动态及其与四川大头茶的关系研究. 西南师范大学学报 (自然科学版), 1999, 24 (3): 318 ~ 324.

[18] 熊浩仲, 王开运, 杨万勤. 川西亚高山冷杉林和白桦林土壤酶活性季节动态. 应用与环境生物学报, 2004, 10 (4): 416 ~ 420.

[22] 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.