

CO₂ 浓度和温度升高对红桦根际微生物的影响

肖 玲¹, 王开运^{1,2,*}, 张远彬¹

(1. 中国科学院成都生物研究所, 成都 610041; 2. 华东师范大学, 上海市城市化过程和生态恢复重点实验室, 上海 200062)

摘要: 应用自控、封闭、独立的生长室系统, 研究升高的大气 CO₂ 浓度(环境 CO₂ 浓度+ 350(±25) μmol·mol⁻¹, EC) 和温度(环境温度+ 2.0(±0.5) °C, ET) 及其交互作用(ECT) 对不同栽植密度条件下红桦根际土壤可培养微生物数量的影响。结果表明: (1) EC 显著增加了高密度条件下根际细菌数量; 在整个生长季中, 最大的根际细菌数量增加出现在 7 月份; 而 EC 对低密度处理的根际细菌数量影响不显著。除了 5 月和 6 月份, ET 在其余月份均显著增加了根际细菌数量, 但是与密度处理没有有显著的相关; ECT 对高低密度处理的根际细菌数量均未产生有统计意义的影响。(2) EC 对低密度条件下的根际放线菌数量有显著增加, 而对高密度条件下的根际放线菌数量无显著影响; ET 和 ECT 对高低密度条件下的根际放线菌数量均未产生有统计意义的影响。(3) EC 和 ET 对高低密度条件下的根际真菌数量无显著增加, 而 ECT 显著增加了根际真菌数量。

关键词: CO₂ 浓度升高; 温度升高; 根际微生物; 密度; 红桦

文章编号: 1009-0933(2006) 06-1701-08 中图分类号: Q143, Q948.112 文献标识码: A

Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration and increased temperature on *Betula albo-sinensis* rhizospheric microbe

XIAO Ling¹, WANG Kai-Yun^{1,2,*}, ZHANG Yuan-Bin¹ (1. Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041 China; 2. Shanghai Key Laboratory of Urbanization Processes and Ecological Restoration, East China Normal University, Shanghai 200062, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1701~ 1708.

Abstract It is well known that atmospheric CO₂ concentration and temperature are increasing as a consequence of human activities. In past decades, considerable efforts have been put into investigating the effects of climate change on processes of forest ecological system. In general, studies have been mainly focused on the effects of elevated atmospheric CO₂ on plant physiology and development, litter quality, and soil microorganisms. Studies showed that there was variation in the responses of root development and below-ground processes to climate between different plant communities. Since the concentration of CO₂ in soil is much higher (10~ 50 times) than in the atmosphere, increasing levels of atmospheric CO₂ may not directly influence below-ground processes. Rhizosphere was defined as the small district in soil that was influenced by living roots. In the small district, microbial population was great, the study and utilization of the rich microbial resource pool has been paid more and more attention to. However, there was lack of information and studies about the effect of elevated CO₂ concentration and increased temperature on rhizospheric microbe as so far.

Betula albo-sinensis, as a dominate tree species of sub-alpine dark coniferous in the west Sichuan province, which plays an important role in the structure and function of this kind of forest ecosystem. In our study, effects of elevated atmospheric CO₂

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90511008, 90202010); 中芬国际合作资助项目(30211130504); 中国科学院“百人计划”资助项目(01200108B)

收稿日期: 2005-10-02; **修订日期:** 2006-05-13

作者简介: 肖玲(1978~), 女, 四川宜宾人, 硕士, 主要从事土壤生态、恢复生态研究. E-mail: xiaolinger0327@tom.com

* **通讯联系人** Corresponding author. E-mail: wangky@cib.ac.cn

Foundation item: The Key Project of National Natural Science Foundation of China(No. 90511008, 90202010), Sino-Finland International Cooperative Project(No. 30211130504), the Program of 100 Distinguished Young Scientists of Chinese Academy of Sciences(No. 01200108B)

Received date: 2005-10-02; **Accepted date:** 2006-05-13

Biography: XIAO Ling, Master, mainly engaged in soil ecology and restoration ecology. E-mail: xiaolinger0327@tom.com

concentration (350 ± 25) $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, increased temperature (2.0 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$ and interaction between elevated CO_2 concentration and increased temperature on the number of rhizospheric microbe were studied by the independent and enclosed top chamber system under high-frigid conditions. Responses of rhizospheric bacteria, actinomycetes and fungi number of *Betula albo-sinensis* under different densities (high density with $86 \text{ stems} \cdot \text{m}^{-2}$, low density with $28 \text{ stems} \cdot \text{m}^{-2}$) to elevated CO_2 concentration and increased temperature were analyzed and discussed.

Results of the present study indicate that in comparing with the control, treatment EC increased the number of rhizospheric bacteria under high density significantly, in one growing season, the greatest increment of rhizospheric bacteria in July. However EC had no effect on the number of rhizospheric bacteria under low density. Except May and June, treatment ET increased the number of rhizospheric significantly. The effect of treatment ECT on the number of rhizospheric bacteria under different density was not significant.

Under treatment EC, the number of rhizospheric actinomycetes with low density increased significantly, however, treatment EC did not increase the number of rhizospheric actinomycetes with high density. Simultaneously, treatment ET and ECT did not affect the number of rhizospheric actinomycetes. Finally, treatment EC and ET did not increase the number of rhizospheric fungi under different density, but in treatment ECT, the number of rhizospheric fungi under high density increased significantly.

Key words: Carbon dioxide enrichment; Elevated temperature; Rhizospheric microbe; Density; *Betula albo-sinensis*

自 19 世纪 70 年代工业革命以来, 由于煤炭、石油等化石燃料的燃烧和森林的大面积破坏, 大气中二氧化碳浓度正逐步上升, 在过去的 250a 间, CO_2 浓度已由 $280 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 上升到现在的 $350 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 且仍以每年 0.5% 的速度递增。随着二氧化碳及其它温室气体浓度升高, 大气温度及降水也已发生变化^[1]。全球大气耦合海洋环流模式对未来气温进行了预测, 发现在今后 50~100a 间地球表面温度可能升高 $1 \sim 3.5^{\circ}\text{C}$ ^[2]。因此, 以二氧化碳浓度和温度升高为主要特征的全球气候变化对人类生存和生态环境的影响引起了各国科学家、政府及公众的极大关注。目前已经开展了大量有关二氧化碳浓度升高对植物光合作用^[3,4]、生长^[5,6]、土壤 C、N 过程^[7-10] 等方面的研究工作。

土壤根际是指“受活的根系影响的土壤微小区域”^[11], 是由树木根(主要是细根)-土壤微生物和酶组成的特殊微生态系统。受植物根系分泌物和根系凋落物的影响, 根际土壤与根外土壤的物理、化学和生物学特性存在巨大差异。林木根际是各种养分及其它物质进入根系参与生物链物质循环的重要生态界面之一。有研究表明, 植物在生长过程中有高达 30% 的光合产物以有机碳的形式进入到根际土壤, 这些有机物质提供丰富的碳源使根际微生物种群较为丰富^[12]。

通常认为, 当大气中二氧化碳浓度升高时, 植物光合速率增加^[1]、根系活性加强^[13-16]、根系生物量增加^[17], 使更多的碳进入土壤。碳分配模式的改变影响根际微生物所利用的碳源; 与此同时, 随着大气二氧化碳浓度的上升, 碳分配模式的变化, 也将影响进入到土壤生态系统中的 N 量^[18,19]。因此, 植物-土壤系统中 C 和 N 通量在质和量的变化将使根际微生物的底物产生变化, 从而改变根际微生物类群的区系和生态分布。然而, 大气二氧化碳浓度和温度升高对林木根际土壤中微生物数量到底是否会产生影响? 迄今仍未清楚。要全面评价根际微生物在大气二氧化碳浓度和温度升高下的变化以及这些变化所产生的反馈作用, 就有必要对二氧化碳浓度和温度升高下的根际微生物的响应进行深入的研究与探讨。

本研究应用自控、独立、封闭的生长室系统(enclosed top chamber system)研究根际细菌、放线菌和真菌数量对环境二氧化碳浓度和温度升高及其交互作用的响应。

1 材料与方法

(1) 封闭式生长室系统 生长室系统位于中国科学院成都生物研究所茂县生态站($31^{\circ}41'07''\text{N}$, $103^{\circ}53'58''\text{E}$, 海拔 1800 m)。该系统由 6 个独立、自控、封闭的生长室(Chamber)组成(图 1)。生长室由下部近似圆柱体和上部近似球缺的两部分构成, 其体积为 24.5 m^3 。 CO_2 浓度系统由 CO_2 传感器、控制模块、电磁阀、流量计、减

压阀和 CO₂ 钢瓶构成。空气温度控制是通过与压缩机相连接的热交换器、电阻加热器以及新风流量控制阀等构成。本实验设置的参数分别为数据扫描间隔 15 s, 数据采集间隔 5 min, 实行 24 h 连续观测。

(2) 土壤与树种 实验树种为 1a 红桦幼苗, 在实验开始前一年的 9 月栽植在实验控制房中。实验土壤取自川西亚高山云杉和桦木林下的棕壤表土(0~30 cm)。取回的土壤混合均匀, 并用孔径为 1 cm 的钢筛过滤以除去石块。

(3) 环境变量 依照生长室系统记录的数据统计分析, 在生长季节(2004 年 5 月 1 日到 10 月 30 日), ET 和 ECT 生长室内的空气温度分别比环境空气温度平均升高(2.4±0.4)℃和(2.2±0.5)℃。EC 和 ECT 生长室内分别平均增加 CO₂ 浓度(347.1±22.1)μmol·mol⁻¹和(352.8±27.6)μmol·mol⁻¹。EC、ET、ECT 和 CK 中的月平均 CO₂ 浓度与温度见图 2。另外, 所有处理的土壤水分控制在土壤饱和持水量的 70% 左右。



图1 封闭式生长室系统
Fig. 1 Enclosed-top chamber system

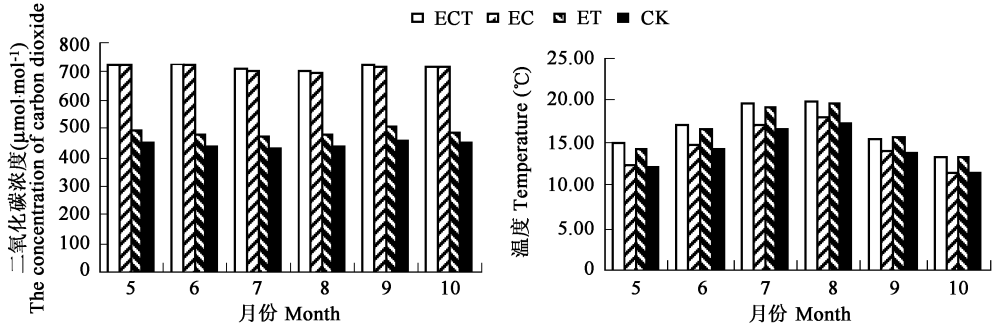


图2 不同处理下二氧化碳浓度和温度的月平均值
Fig. 2 Monthly mean concentration of carbon dioxide and mouthly mean temperature under different concond conditions

- (4) 密度处理 实验进行了两种密度处理: 高密度处理为 86 株·m⁻², 低密度处理为 28 株·m⁻²。
- (5) 土壤取样 对不同处理下的红桦幼苗进行取样, 完整的取出一株植株, 收集根系上抖落下来的土壤作为根际土壤, 混合均匀过 2mm 孔径的筛后装入保鲜塑料袋, 并存放在冰箱中供相关分析。
- (6) 微生物分析 常规方法测定土壤水分含量。土壤微生物的室内分析是按严旭升等^[20]方法进行。细菌、放线菌和真菌的数量分析采用稀释平板表面涂抹法: 培养基分别为牛肉膏蛋白胨培养基、改良高氏一号培养基和查彼克氏培养基, 5 次重复。每克干土中菌数=(菌落平均数×稀释倍数)/干土重(g)。
- (7) 统计分析 单因素多样本的方差检验(One-way ANOVA)比较不同控制条件对红桦根际细菌、放线菌和真菌数量的影响, 以及不同密度之间的差异。

2 结果分析

2.1 CO₂ 浓度和温度升高及其交互作用对高低密度条件下根际细菌数量的影响

本项研究结果表明: 在 EC 实验中(图 3a, b), 高密度条件下的根际细菌数量均高于 CK, 其数量分别增加 28%、33%、423%、65%、43% 和 79%(*p* < 0.05); 低密度条件下的根际细菌数量除了 6 月份与 CK 之间具有显著差异(*p* < 0.05)以外, 其余月份差异均不显著(*p* > 0.05)。高密度条件下的根际细菌数量在 ET 下除了 5 月以外均高于 CK (图 3c), 其中 7、8 月份数量分别增加了 377% 和 107% (*p* < 0.05); 低密度条件下的根际细菌数量在 ET 下均有增加(图 3d), 其中 7、8 月份数量与 CK 相比分别增加了 27.2 % 和 27.8% (*p* < 0.05), 9、10 月份数量分别增加了 64% 和 48% (*p* < 0.01)。在 ECT 下(图 3e, f), 高密度条件下的根际细菌数量除了 5 月和 9

月份 ($p < 0.01$) 外, 其余均高于 CK; 低密度条件下的根际细菌数量均高于 CK, 但其中仅 5 月和 7 月份两者之间差异极显著 ($p < 0.01$)。因此本项研究结果表明, 在短期模拟实验中, EC 对高密度条件下的根际细菌数量产生显著影响 ($p < 0.05$), 对低密度根际细菌数量不产生影响 ($p > 0.05$); ET 对 7、8 月份高密度条件下的根际细菌数量产生显著影响 ($p < 0.05$), 对 7、8、9 和 10 月份低密度条件下的根际细菌产生显著影响 ($p < 0.05$); ECT 对高低密度条件下的根际细菌数量不产生影响 ($p > 0.05$)。

2.2 CO₂ 浓度和温度升高及其交互作用对高低条件下根际放线菌数量的影响

不同处理对高低密度根际放线菌数量的影响差异如图 4 所示。从图 4a 可以看出: 高密度条件下的根际放线菌数量仅在 5、6 月和 7 月份高于 CK, 且两者之间的差异均不显著 ($p > 0.05$), 可见 EC 对高密度根际放线菌数量不产生影响; 而低密度条件下的根际放线菌数量在 EC 下均有增加 (图 4b), 与 CK 相比分别增加了 13%、7%、16%、24%、9%、和 8% ($p < 0.05$), 说明 EC 能对低密度根际放线菌数量产生显著影响。在 ET 下 (图 4c, d), 高密度条件下的根际放线菌数量在 5、7 月和 8 月份高于 CK, 低密度条件下的根际放线菌在 6、9 月和 10 月份高于 CK, 说明 ET 对高低密度条件下的根际放线菌数量不产生影响。此外, 由图 4e 可见: 在 ECT 实验中, 高密度条件下的根际放线菌数量仅在 7 月份小于 CK, 且两者之间在 5、8 月份具有显著性差异 ($p < 0.05$); 低密度条件下的根际放线菌数量均高于 CK (图 4f), 其中仅 7 月根际放线菌数量与对照之间的差异极显著 ($p < 0.01$), 因此本项研究结果表明 ECT 对高低密度条件下的根际放线菌数量不产生影响 ($p > 0.05$)。

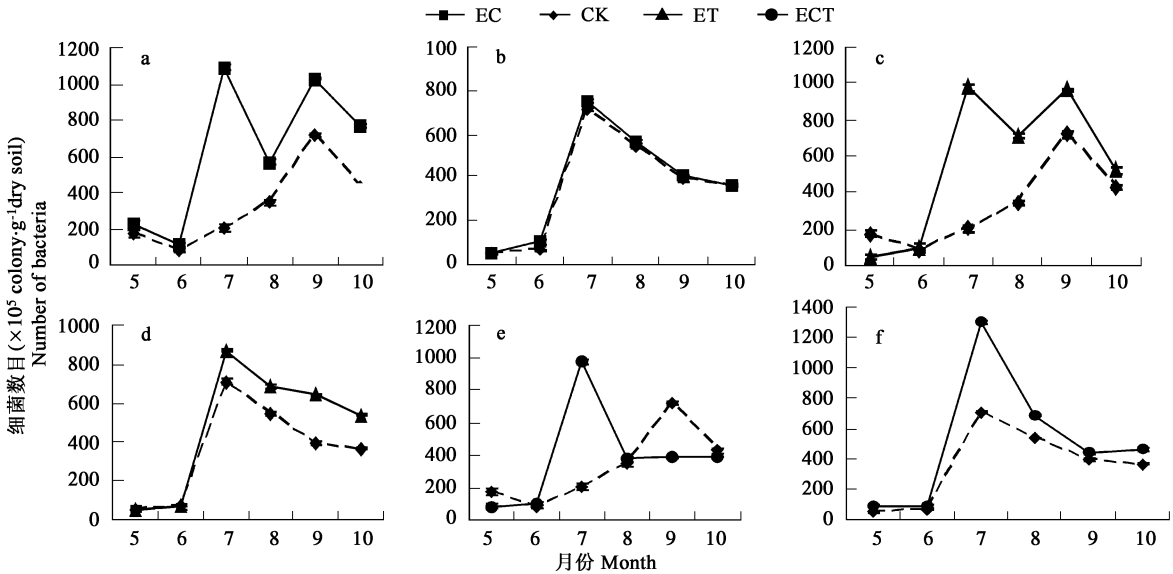


图 3 CO₂ 浓度和温度升高及其交互作用高(a, c, e)低(b, d, f)密度根际细菌的影响

Fig. 3 Effect of elevated atmospheric CO₂ concentration, increased temperature and interaction on the number of rhizospheric bacteria under high density (a, c, e) and low density (b, d, f)

图中的竖条代表标准偏差 ($n = 5$) Bars indicate SD ($n = 5$); 下同 the same below

2.3 CO₂ 浓度和温度升高及其交互作用对高低密度处理下根际真菌的影响

从图 5(a, b) 可见: 在 EC 下, 高密度条件下的根际真菌数量在 6、7、8 和 10 月高于 CK, 低密度条件下的根际真菌数量在 5、7、9、10 月高于 CK, 其差异均不显著 ($p > 0.05$)。在 ET 下 (图 5c, d), 高密度条件下的根际真菌数量在 8 月和 10 月高于 CK, 低密度条件下的根际真菌数量在 5、9、10 月高于 CK, 其中仅 8 月份高密度条件下的根际真菌数量与 CK 之间差异极显著 ($p < 0.01$)。在交互作用下 (图 5e, f), 高密度条件下的根际真菌数量均高于 CK, 其中高密度条件下的根际真菌数量在 6、7、8 月份和 10 月份与 CK 相比增加明显, 分别增加了 62%、44%、68% 和 44% ($p < 0.05$); 而低密度条件下的根际真菌数量仅 7、8 月份与 CK 之间差异显著 ($p < 0.05$)。因此, 本项研究表明 EC 和 ET 对高低密度条件下的根际真菌数量不产生影响 ($p > 0.05$), 而 ECT 对 6、

7、8 月份和 10 月份高密度、7 月份和 8 月份低密度条件下的根际真菌数量产生显著影响($p < 0.05$)。

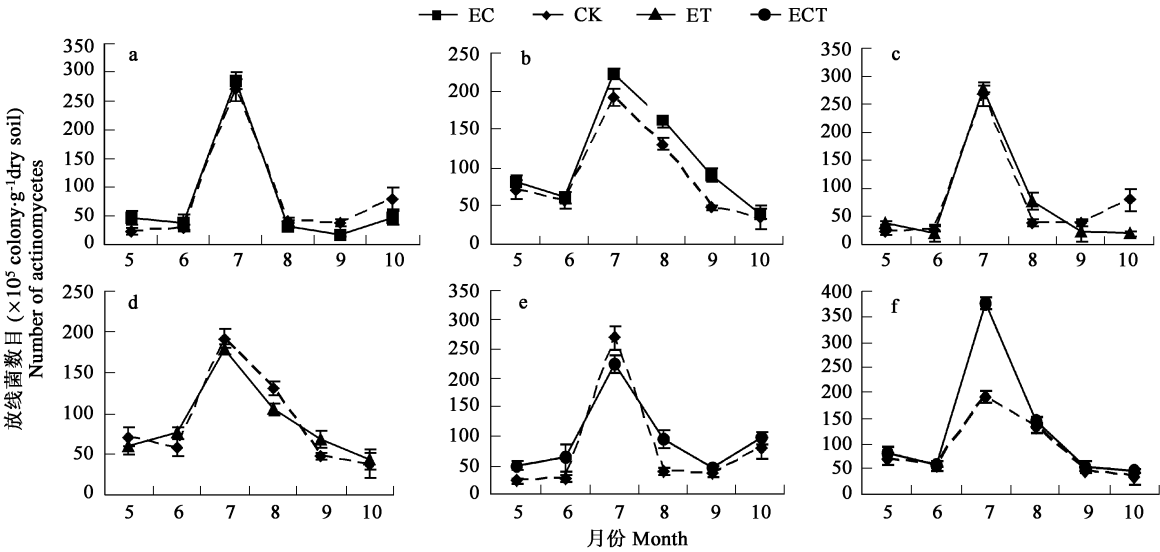


图4 CO₂ 浓度和温度升高及其交互作用高(a, c, e)低(b, d, f)密度根际放线菌的影响

Fig. 4 Effect of elevated atmospheric CO₂ concentration, increased temperature and interaction on the number of rhizospheric actinomycetes under high density (a, c, e) and low density (b, d, f)

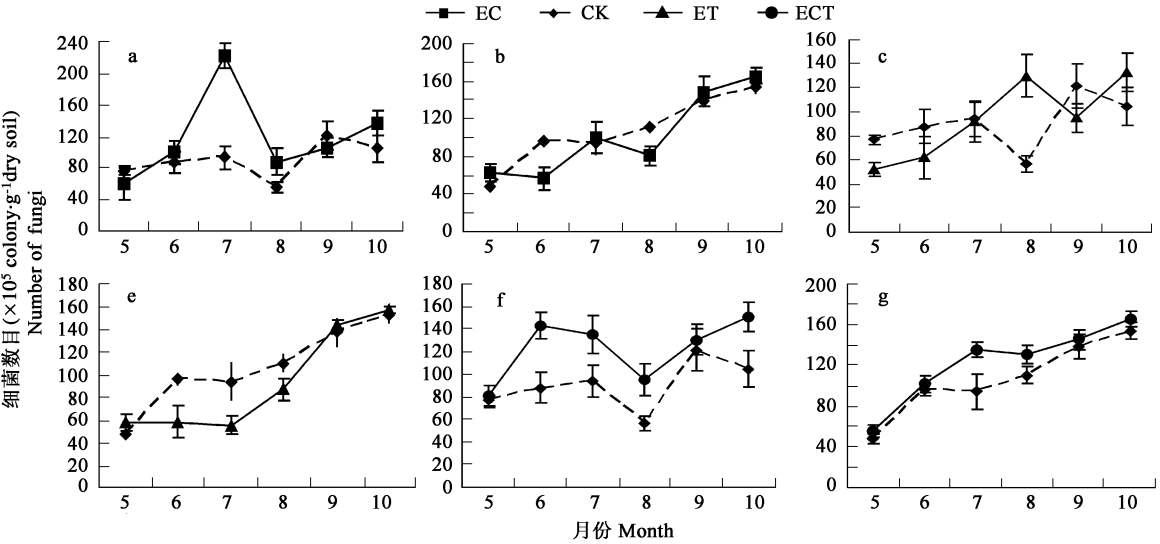


图5 CO₂ 浓度和温度升高及其交互作用高(a, c, e)低(b, d, f)密度根际真菌的影响

Fig. 5 Effect of elevated atmospheric CO₂ concentration, increased temperature and interaction on the number of rhizospheric fungi under high density (a, c, e) and low density (b, d, f)

2.4 密度对 CO₂ 浓度和温度升高及其交互作用下根际微生物的影响

2.4.1 密度对 CO₂ 浓度和温度升高及其交互作用下根际细菌的影响 从表 1 可见: 在 EC 下, 高密度条件下的根际细菌数量均高于低密度条件下的根际细菌数量, 尤其在 5、7、9 月份和 10 月份分别比低密度条件下根际细菌数量高 310%、44%、152% 和 110%; 在 ET 下, 除了 5 月份和 10 月份, 高密度条件下的根际细菌数量也均高于低密度条件下的根际细菌数量; 而在 ECT 下, 除了 6 月份, 高密度条件下的根际细菌数量均低于低密度条件下的根际细菌数量, 尤其是在 7 月份和 8 月份, 高密度条件下的根际细菌数量分别比低密度条件下的根际细菌数量低 33% 和 80%。因此, 本项研究表明, 密度对 EC 和 ET 及其 ECT 下的根际细菌不产生影响。此

外,从表 1 还可以看出,在红桦生长的萌动期(5 月份和 6 月份),所有处理下的根际细菌数量都较小,而进入指数生长期后(7 月份和 8 月份),根际细菌数量迅速增长,在 7 月达到最大值,随后生长进入到稳定期和停滞期(9 月份和 10 月份),根际细菌数量又逐渐减少。

表 1 高低密度条件下的根际细菌数量在 CO₂ 浓度和温度升高及其交互作用下的动态变化(2004 年 5~ 10 月)

Table 1 Seasonal fluctuations on quantity of rhizospheric bacteria of different densities in treatment EC, ET and ECT from May to October, 2004 (× 10⁶ colony·g⁻¹dry soil)

控制条件 Treatments	密度 Density	月份 Month					
		5	6	7	8	9	10
EC	Low	54.5±4.5 cdD	105.0±13.7 abD	754.8±8.0 cA	565.9±5.7 aB	407.4±2.5 cC	365.4±2.1 bC
	High	223.7±22.5 aC	111.3±8.5 aC	1088.9±15.0 abA	567.9±13.0 aB	1027.8±7.0 aA	767.4±9.5 aB
ET	Low	53.5±15.6 cdD	70.1±3.5 cD	870.9±3.5 bcA	688.9±12.5 aB	644.4±4.7 bAB	539.9±4.0 bC
	High	49.0±7.8 dC	100.7±17.1 abC	975.9±20.2 abcA	713.3±11.6 aAB	966.7±5.5 aA	523.1±18.0 bB
ECT	Low	91.6±5.1 bD	83.5±11.6 bcD	1297.0±12.1 aA	688.5±5.7 aB	438.4±7.6 cC	453.2±6.4 bC
	High	85.1±13.0 bcD	101.2±10.6 abD	972.6±13.9 abcA	382.9±8.5 bC	387.3±3.1 cB	391.1±1.5 bB

不同字母代表密度之间(小写字母)以及月份之间(大写字母)的差异显著($p < 0.05, n = 5$) Different letters within a column indicate the significant differences among the densities(small letter) and months(capital letter) ($p < 0.05, n = 5$), 下同 the same below

2.4.2 密度对 CO₂ 浓度和温度升高及其交互作用下根际放线菌和根际真菌的影响 本项研究表明:除了 EC 下 7 月份和 10 月份、ET 下 7 月份和 ECT 下 10 月份外,低密度条件下的根际放线菌数量均比高密度条件下的根际放线菌数量高(表 2),说明密度对根际放线菌数量不产生影响。其次,研究结果还表明低密度条件下的根际放线菌数量月份动态表现为 7 月份最大,8 月份次之,10 月份最小;而高密度条件下的根际放线菌数量除了在 7 月达到最大值以外,其余月份变化趋势则不明显。

表 2 高低密度条件下根际放线菌数量在 CO₂ 浓度和温度升高及其交互作用下的季节变化(2004 年 5~ 10 月)

Table 2 Seasonal fluctuations on quantity of rhizospheric actinomycetes of different densities in treatment EC, ET and ECT from May to October, 2004 (× 10⁶ colony·g⁻¹dry soil)

控制条件 Treatments	密度 Density	月份 Month					
		5	6	7	8	9	10
EC	Low	81.1±9.5 abCD	61.0±8.5 abD	222.6±6.5 cA	163.1±11.4 aB	91.2±8.6 aC	39.4±6.7 bE
	High	47.6±11.0 cB	39.6±14.5 bcBC	285.2±15.6 bA	33.8±4.0 cBC	19.0±3.1 dC	46.6±11.7 bB
ET	Low	59.6±10.5 bcCD	76.8±7.0 aC	179.3±6.0 dA	105.2±7.8 bB	69.3±10.2 bC	43.6±12.1 bD
	High	38.5±3.6 cC	22.2±15.1 cC	277.6±6.7 bA	79.0±15.3 bB	23.8±18.8 dC	19.7±4.0 cC
ECT	Low	83.1±11.8 aC	63.1±6.0 abD	376.6±11.9 aA	143.7±7.4 aB	56.6±9.1 bcD	48.1±4.6 bD
	High	50.2±7.6 dD	59.2±22.5 abCD	224.3±15.6 bA	95.3±15.6 bBC	47.1±2.7 cD	97.3±10.5 aB

密度对 EC、ET 及 ECT 下根际真菌的影响见表 3。可以看出:在 EC 和 ET 下,6、7 月和 8 月份低密度条件下的根际真菌数量低于高密度条件下的根际真菌数量;在 ECT 下 5 月份和 6 月份低密度条件下的根际真菌数量低于高密度条件下的根际真菌数量。这就表明密度对不同环境因子条件下的根际真菌数量不产生影响。

表 3 高低密度条件下根际真菌数量在 CO₂ 浓度和温度升高及其交互作用下的季节变化(2004 年 5~ 10 月)

Table 3 Seasonal fluctuations on quantity of rhizospheric fungi of different densities in treatment EC, ET and ECT from May to October, 2004 (× 10⁵ colony·g⁻¹d soil)

控制条件 Treatments	密度 Density	月份 Month					
		5	6	7	8	9	10
EC	Low	62.9±8.6 aC	56.9±11.7 cC	100.3±17.1 bB	81.3±10.1 bBC	148.6±16.1 aA	165.6±8.3 aA
	High	61.3±21.1 aC	99.9±14.4 bB	112.9±10.8 abAB	87.9±16.5 bBC	106.0±12.1 bAB	137.0±16.5 bA
ET	Low	58.2±7.6 aC	58.5±8.1 cC	55.6±4.6 cC	87.3±14.1 bB	144.9±17.7 aA	157.1±5.5 abA
	High	52.2±5.3 aC	62.1±17.6 bcC	91.4±16.0 bB	129.6±17.5 aA	94.8±11.6 bB	133.1±16.1 bA
ECT	Low	55.9±6.1 aD	101.6±8.0 bC	135.5±7.6 aB	131.0±9.5 aB	145.2±10.2 aAB	165.6±8.1 aA
	High	80.8±9.5 aB	142.3±11.5 aA	135.4±16.7 aA	95.3±14.2 bB	130.4±13.5 abA	150.3±13.1 abA

此外, 研究结果还表明在整个生长季, 根际真菌数量并不是随着红桦的生长而变化, 即它的数量并没有在红桦的指数生长期(7月份和8月份)达到最大值, 而是在红桦进入了停滞期(10月份)后达到了最大值。

3 讨论

土壤微生物是土壤生态系统中最活跃的成分, 不仅担负着分解动植物残体的重要使命, 还参与土壤中复杂有机物质的分解和再合成, 它的数量直接影响土壤的生物化学活性及土壤养分的组成与转化^[21]。细菌作为土壤中微生物种类中数量最多的一个类群, 在土壤有机质的分解过程中起着巨大的作用, 直接参与土壤中含氮有机化合物的氨化作用, 把植物不能同化的、复杂的含氮有机物变为可利用态。有研究表明细菌在底物丰富的土壤中生长和分化迅速^[22]。因此大气 CO₂ 浓度所引起的光合作用的变化^[11]而带来的额外的可供利用的碳源^[17]和氮源^[19]就可能会对细菌的生长产生影响。本项研究表明: CO₂ 浓度升高对根际可培养细菌数量产生显著影响, 这可能是由于大气 CO₂ 浓度的升高在一定程度上能使光合产物增多, 刺激根系的生长和活性, 使根的质量、数目、长度、根密度以及根系所能伸展的范围都有所提高^[13~16], 为根际细菌的代谢提供了更多的有机底物, 从而刺激根际细菌的生长, 这一结果与徐国强等^[23]的结果相似。一般说来在高密度条件下, 林分个体之间的竞争比在低密度条件下大, 随着林木的生长, 林木个体对光照和水分的需求量就越大, 环境因子对林木的限制作用也会越来越大, 导致林下微生物的生长受到限制。然而本项研究结果却表明 CO₂ 浓度升高对高密度条件下的根际细菌产生显著影响, 而不对低密度条件下的根际细菌数量产生影响, 其原因尚需进一步研究。此外, CO₂ 浓度升高对高密度条件下的根际放线菌数量以及高低密度条件下的根际真菌不产生影响。可以认为这与放线菌生长缓慢且只有当各类微生物的竞争压力减少时才出现^[24]以及真菌数量相对较少的特性有关。

温度升高一方面直接导致进入土壤中的有机残体和中间产物的分解加快, 最终改善了土壤中微生物所利用有机物质质量, 使其数量增加; 另一方面, 温度升高会造成微生物呼吸的指数上升, 加速有机 C 的矿化, 增加了 C 的有效性, 使微生物活性加强, 生长加快^[25]。本项研究表明温度升高仅对 7、8 月高低密度条件下的根际细菌数量产生显著影响, 这可能是因为根际细菌在温暖湿润的环境下生长迅速^[24], 因而在土壤水分不受限制的条件下, 温度升高使土壤温度进一步升高, 导致根际细菌数量显著提高。

CO₂ 浓度和温度升高的交互作用对高低密度处理的根际细菌数量和根际放线菌数量的影响不显著, 而对根际真菌尤其是高密度下的根际真菌数量产生显著影响。这可能是因为真菌在分解枯枝落叶的微生物群体中占有较大的优势, 它的数量与可利用的有机物的量成正相关^[20], 因而当 CO₂ 浓度和温度单独升高时所引起的变化并不能对根际真菌数量产生作用, 而两者的交互作用却在一定程度上加大 CO₂ 浓度或温度单独升高时对根际真菌的作用。但仍需要对其作用机理进行更深入的研究。

一般来说, 随着密度增加, 微生物活动会受到限制。然而本项研究却表明在 CO₂ 浓度和温度升高及其交互作用下, 低密度条件下的根际细菌、放线菌和真菌数量并不是显著高于高密度条件下的数量, 说明在 CO₂ 浓度和温度升高及其交互作用下, 密度对土壤微生物没有显著影响。这可能是因为微生物数量不仅与土壤 C、N 有关, 而且与其它土壤因素, 如水分、空气、酸碱度等因素有关^[26]。此外, 结果还表明根际细菌数量与根际放线菌数量在 CO₂ 浓度和温度升高及其交互作用下均在 7 月达到最大值, 这是因为 7 月份是红桦生长最迅速的时期, 其根系活动旺盛, 分泌的物质增多而带来的额外的底物, 这为根际细菌和放线菌的生长繁殖提供了有利条件。

由于本实验是短期的模拟实验, 尚不能满足人们全面、深入地了解土壤微生物对气候变化的长期响应, 更加长期的实验和分析正在进行。

References:

- [1] Fang J Y, Tang Y H, Chang J. Changing global climates. In: Fang J Y ed. Global Ecology — Climate Change and Ecological Responses. Beijing: Higher Education Press, Heidelberg: Springer-Verlag, 2000. 11~42.

- [2] IPCC(Intergovernmental Panel on Climate). Climate change 2001: Radiative Forcing of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [3] Szarek S R, Holthe P A and Ting I P. Minor physiological response to elevated CO₂ by the CAM plant *Agave vilmoriniana*. *Plant Physiol*, 1987, 83: 938~940.
- [4] Wong S C. Elevated atmospheric partial pressure of CO₂ and plant growth I. Interactions of nitrogen nutrition and photosynthetic capacity in C3 and C4 plants. *Oecologia (Berl.)*, 1979, 44: 68~74.
- [5] Idso K and Idso S B. Plant responses to atmospheric CO₂ enrichment in the face of environmental constraints: a review of the past 10 years research. *Agriculture for Meteorology*, 1994, 69: 153~203.
- [6] Murray D R. Plant responses to carbon dioxide. *American Journal of Botany*, 1995, 82: 690~697.
- [7] Cao M and Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, 393: 245~249.
- [8] Marie-Anne DE Graaff, Johan Six, David Harris, *et al.* Decomposition of soil and plant carbon from pasture systems after 9 years of exposure to elevated CO₂: impact on C cycling and modeling. *Global Change Biology*, 2004, 10: 1922~1935.
- [9] Amone J A III and Bohlen P J. Stimulated N₂O flux from intact grassland monoliths after two growing seasons under elevated atmospheric CO₂. *Oecologia*, 1998, 116: 331~335.
- [10] Bruce A Hungate, Paul Dijkstra, Dale W. Johnson, *et al.* Elevated CO₂ increases nitrogen fixation and decreases soil nitrogen mineralization in *Florida scrub oak*. *Global Change Biology*, 1999, 5: 781~789.
- [11] Sindhu S S, Gupta S K, Dadarwal K R. Antagonistic effect of *Pseudomonas* spp on pathogenic fungi and enhancement of growth of green gram (*Vigna radiata*). *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29(1): 62~68.
- [12] Lamber H. Growth, respiration, exudation and symbiotic associations: The fate of carbon translocated to the roots. In: Gregory P J, eds. *Root Development and Function*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987, 125~146.
- [13] Norby R J. Issue and perspectives for investigating root responses to elevated atmospheric carbon dioxide. *Plant Soil*, 1994, 165: 9~20.
- [14] Idso S B, *et al.* Effects of two and a half years of atmospheric CO₂ enrichment on the root density distribution of three-year-old sour orange trees. *Agriculture for Meteorology*, 1991, 55: 345~349.
- [15] Rogers H H, *et al.* Plant responses to atmospheric CO₂ enrichment with emphasis on roots and the rhizosphere. *Environ. Pollut.*, 1994, 83: 155~189.
- [16] Van Veen J A, *et al.* Carbon fluxes in plant-soil systems at elevated atmospheric CO₂ levels. *Ecol. Appl.*, 1991, 1: 175~181.
- [17] Williams M A, Rice C W, Owensby C E. Carbon dynamics and microbial activity in tallgrass prairie exposed to elevated CO₂ for 8 years. *Plant Soil*, 2000, 227: 127~137.
- [18] Bertson G M, Bazzaz F A. Nitrogen cycling in microcosms of Yellow Birch exposed to elevated CO₂: Simultaneous positive and negative feedbacks. *Global Change Biology*, 1997, 3: 247~258.
- [19] Bruce A Hungate, Paul Dijkstra, Dale W. Johnson, *et al.* Elevated CO₂ increases nitrogen fixation and decreases soil nitrogen mineralization in *Florida scrub oak*. *Global Change Biology*, 1999, 5: 781~789.
- [20] Yan X S. Study method of soil fertility. Beijing: Agricultural Press, 1998, 212~233.
- [21] Jiao R Z, Yang C D, Tu X N, *et al.* The change of undergrowth, soil microorganism, enzyme activity and nutrient in different developing stage of the Chinese Fir plantation. *Forest Research*, 1997, 10(4): 373~379.
- [22] Chapin F S III, Pansela A M, Harold A M, *et al.* Terrestrial decomposition. In: F. Stuart C *et al.* *Principles of terrestrial ecosystem ecology*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. 151~175.
- [23] Xu G Q, Li Y, Shi Y. *et al.* Effect of free-air CO₂ enrichment on soil microbe in paddy field. *Chin J Appl Ecol*, 2002, 13(10): 1358~1359.
- [24] Zhou Z B, Li P J. Ecological distribution of soil microorganism in artificial greenbelt in hinterland of Taklimakan desert and their relations with soil factors. *Chin J Appl Ecol*, 2003, 14(8): 1246~1250.
- [25] Hu S, Firestone M K, Chapin F S III, *et al.* Soil microbial feedbacks to atmospheric CO₂ enrichment. *Tree*, 1999, 11(11): 433~437.
- [26] Zhang W J, Xu Q, Wang X K, *et al.* Impacts of experimental atmospheric warming on soil microbial community structure in a tallgrass prairie. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1746~1751.

参考文献:

- [1] 方精云, 唐艳鸿, 常杰. 变化中的全球气候. 见: 方精云主编. *全球生态学——气候变化与生态响应*. 北京: 高等教育出版社, 海德堡: 施普林格出版社, 2000. 11~29.
- [20] 严旭升主编. *土壤肥力研究方法*. 北京: 农业出版社, 1998, 212~233.
- [21] 焦如珍, 杨承栋, 屠星南, 等. 杉木人工林不同发育阶段林下植被、土壤微生物、酶活性及养分的变化. *林业科学研究*, 1997, 10(4): 373~379.
- [23] 徐国强, 李杨, 史奕, 等. 开放式 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.
- [24] 周智彬, 李培军. 塔克拉玛干沙漠腹地人工绿地土壤中微生物的生态分布及其与土壤因子间的关系. *应用生态学报*, 2003, 14(8): 1246~1250.
- [26] 张卫建, 许泉, 王绪奎, 等. 气温上升对草地土壤微生物群落结构的影响. *生态学报*, 2004, 24(8): 1746~1751.