

大气 CO₂ 浓度升高对长白赤松幼苗 土壤酶活性的影响

贾 夏^{1a,2}, 韩士杰², 赵永华^{1b}, 周玉梅²

(1 长安大学 a 环境科学与工程学院, b 资源学院, 陕西 西安 710054; 2 中国科学院沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳 110016)

【摘 要】 **【目的】**探讨长白赤松土壤酶活性对大气 CO₂ 浓度升高的响应规律。**【方法】**采用 1.2 m×0.9 m×0.9 m 的开顶箱控制 CO₂ 浓度, 试验设高浓度 CO₂ 处理(CO₂ 浓度分别为 700, 500 μmol/mol)及开顶箱对照(CK)和裸地对照(B), 2 个对照处理的 CO₂ 浓度均为大气 CO₂ 浓度(370 μmol/mol)。采用多点混合法于 7, 8, 9 月的中旬采集各处理 0~10 cm 土层土壤样品, 分析土壤水解酶和氧化还原酶活性的变化规律。**【结果】**与 2 个对照处理相比, 高浓度 CO₂ 条件下, 土壤脲酶、淀粉酶、转化酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶以及脱氢酶活性均升高, 而土壤蛋白酶和磷酸酶活性总体上表现出降低, 且不同高浓度 CO₂ 处理对土壤蛋白酶和磷酸酶活性的影响差异不显著。**【结论】**高浓度 CO₂ 处理下, 长白赤松土壤脲酶、转化酶、淀粉酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶以及脱氢酶活性明显增加, 而土壤蛋白酶和磷酸酶的活性明显降低; 各土壤酶活性的月动态规律在不同程度上受到了高浓度 CO₂ 的影响。

【关键词】 高浓度 CO₂; 长白赤松; 土壤酶活性

【中图分类号】 S718.8

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2010)12-0087-06

Effects of elevated CO₂ on soil enzyme activities associated with *Pinus sylvestris* seedlings

JIA Xia^{1a,2}, HAN Shi-jie², ZHAO Yong-hua^{1b}, ZHOU Yu-mei²

(1 a College of Environmental Science and Engineering, b College of Earth Science and Land Resources, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2 Institute of Applied Ecology, the Chinese Academy of Science, Shenyang, Liaoning 110016, China)

Abstract: **【Objective】** The study explored the mechanism of effects of elevated CO₂ on soil enzyme activities associated with *Pinus sylvestris* seedlings. **【Method】** OTCs(1.2 m×0.9 m×0.9 m) were used to control elevated CO₂(700 μmol/mol and 500 μmol/mol) during the growing season for *Pinus sylvestris* seedlings. At the same time, ambient CO₂-chamber and ambient were also set up. Soil samples (0—10 cm) from different sites were collected to be mixed in the middle ten days of a month in summer. And varying dynamic rules of soil hydrolase and oxidoreductase activities to elevated CO₂ were determined. **【Result】** Soil amylase, invertase, urease, catalase, dehydrogenase, and polyphenol oxidase activities increased under elevated CO₂, but protease and phosphatase activities generally decreased compared with those under ambient CO₂—chamber and ambient. And effects of different elevated CO₂ on soil protease and phosphatase activities were indistinctive. **【Conclusion】** Soil amylase, invertase, urease, catalase, dehydrogenase, and polyphenol oxidase activities increased significantly under elevated CO₂, and soil protease and phosphatase activities decreased significantly. Meanwhile, the varying dynamic rules of soil enzyme activities between different months were affected by elevated CO₂.

* [收稿日期] 2010-04-22

[基金项目] 长安大学中央高校基本科研业务费专项(CHD2009JC144); 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCXI-SW-01); 国家重点基础研究发展规划项目(2002CB412502)

[作者简介] 贾 夏(1975—), 女, 陕西府谷人, 副教授, 博士, 主要从事植物化学和土壤微生物分子生物学研究。

E-mail: jiaxianavy@163.com

Key words: elevated CO₂; *Pinus sylvestris*; soil enzyme activity

土壤酶能加速土壤有机质的化学反应,其活性的改变将影响土壤养分释放,从而影响植物的生长^[1]。土壤酶活性受多种因素影响,植物对大气 CO₂ 浓度升高的响应规律发生改变时是否会影响土壤酶的活性,已经成为当今土壤科学研究的热点。

大气 CO₂ 浓度升高可以提高植物生长代谢水平^[2-3],其结果是植物代谢分泌物的种类和数量发生变化,由植物光合作用变化引起的植物枯落物的质量和化学组分也相应发生改变,从而对土壤环境产生直接或间接的影响。此外,植物根圈微生物种群数量、土壤呼吸等生物或生物化学活性等在高浓度 CO₂ 条件下均会发生相应的变化^[4-5]。在大气 CO₂ 浓度升高条件下,上述因素的改变会对生态系统中营养元素循环与周转产生重要作用,最终对主要来源于植物和土壤微生物的土壤酶活性产生影响。目前,已有关于土壤酶活性对大气 CO₂ 浓度增加响应的报道,但由于供试土壤、植物种类、施放 CO₂ 系统等的不同,许多研究结果互相矛盾,如 Korner 等^[4]研究发现,高浓度 CO₂ 可使土壤蛋白酶、木聚糖酶活性增加,而 Kandeler 等^[6]则认为二者活性未发生变化;Dhillon 等^[7]发现,土壤脱氢酶、纤维素分解酶、木聚糖酶、磷酸酶活性均有增加,而 Moorhead 等^[8]则证明植物根圈磷酸酶活性增加,纤维素分解酶活性则降低;Ross 等^[9]对不同土壤进行了研究,结果表明一年高浓度 CO₂ 处理土壤蔗糖酶活性增加。陈利军等^[10]发现,红壤脲酶和磷酸酶活性在高浓度 CO₂ 条件下显著增加。张玉兰等^[11]研究表明,在 FACE(开放式空气 CO₂ 浓度增高)条件下,土壤脲酶活性随水稻生育期的变化而变化。此外张丽莉等^[12]研究发现,在 FACE 条件下小麦和水稻土壤蔗糖酶活性升高,而纤维素分解酶活性略微下降。目前,有关大气 CO₂ 浓度升高对土壤酶活性影响的研究主要集中于草本植物,对木本植物的研究较少。本试验以开顶箱(OTCs)系统为依托,研究了 CO₂ 浓度升高对长白赤松土壤水解酶和氧化还原酶活性的影响,以探讨土壤酶活性对大气 CO₂ 浓度升高的响应规律,为全球 CO₂ 浓度升高条件下土壤酶活性的变化规律研究提供基础资料。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

试验地设在中国科学院长白山森林生态系统开

放研究站院内,海拔高度约 740 m,土壤类型为在火山灰母质上发育的暗棕壤。研究试材取自从 1998 年开始在生长季以不同高浓度 CO₂ 处理的长白赤松幼苗苗圃。试验设高浓度 CO₂ 处理(CO₂ 浓度分别为 100,500 μmol/mol)及开顶箱对照(CK)和裸地对照(B),其中 CK 和 B 处理 CO₂ 浓度均为大气 CO₂ 浓度(370 μmol/mol)。CO₂ 控制采用 1.2 m×0.9 m×0.9 m 的 OTCs 进行,每处理种植 100 棵实生小苗,各处理之间相距较远(2.5 m),彼此间的干扰因素可忽略不计。在夏季(7—9 月中旬),以多点混合法采集各处理 0~10 cm 土层土样,过孔径 2 mm 筛,带回实验室于 4℃ 冰箱中储存,并于 1 个月内完成土壤酶活性分析。

1.2 测定项目及方法

土壤蛋白酶活性采用茚三酮比色法测定;土壤脲酶活性采用靛青比色法测定;土壤淀粉酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定;土壤转化酶活性采用硫代硫酸钠滴定法测定;土壤中中性磷酸酶活性采用苯磷酸二钠比色法测定;土壤过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定;土壤多酚氧化酶活性采用邻苯三酚比色法测定;土壤脱氢酶活性采用三苯基四氮唑氯化物(TTC)比色法测定^[13]。试验所用化学试剂均为分析纯。

1.3 数据处理

数据采用 SPSS10.0 和 Excel 软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 高浓度 CO₂ 对土壤水解酶活性的影响

2.1.1 蛋白酶和脲酶 土壤蛋白酶活性受高浓度 CO₂ 影响的变化规律见图 1。由图 1 可知,在 7,8,9 月中,土壤蛋白酶活性受高浓度 CO₂ 的影响较为明显,与裸地对照相比,在 7 月和 9 月,700 和 500 μmol/mol CO₂ 处理的土壤蛋白酶活性显著降低($P<0.05$),而 8 月份土壤蛋白酶活性则明显增加。在同一月中,与裸地对照相比,开顶箱对照处理土壤蛋白酶活性增加,由此可以看出,开顶箱的温室效应是不能忽视的,但大气 CO₂ 浓度升高对长白赤松土壤蛋白酶活性产生了较为明显的影响。高浓度 CO₂ 处理的长白赤松土壤蛋白酶活性的月动态规律主要表现为 8 月>7 月>9 月,而开顶箱对照和裸地对照表现为 7 月>8 月>9 月。

脲酶是土壤中 N 转化的关键酶,主要来源于微

生物及植物活体分泌和死亡残体分解释放 2 个方面,目前探讨大气 CO₂ 浓度增加对土壤脲酶活性影响的报道较为少见。有研究表明,土壤脲酶的主要来源物质植物和微生物对大气 CO₂ 浓度升高有直接的响应^[10]。也有相关研究表明,在大气 CO₂ 浓度升高时,植物生理活性、进入土壤的凋落物数量、土壤微生物活性和数量等都会发生相应变化,这些变化极可能会引起土壤脲酶含量及活性的变化;同时土壤腐殖酸共聚物的增加亦会提高土壤脲酶活性,而大气 CO₂ 浓度升高条件下进入土壤的凋落物数

量的增加会引起土壤腐殖质含量增加^[8-9],从而也会提高脲酶的活性。本研究土壤脲酶活性受高浓度 CO₂ 影响的变化规律见图 2。由图 2 可知,与开顶箱对照和裸地对照相比,除 7 月份 500 μmol/mol 处理土壤脲酶活性降低外,同一高浓度(500 和 700 μmol/mol)CO₂ 处理下土壤脲酶活性极显著增高($P<0.01$);在同一个月份,700 与 500 μmol/mol CO₂ 处理的土壤脲酶活性差异极显著($P<0.01$)。高浓度 CO₂ 处理土壤脲酶活性月动态规律表现为 9 月>8 月>7 月。

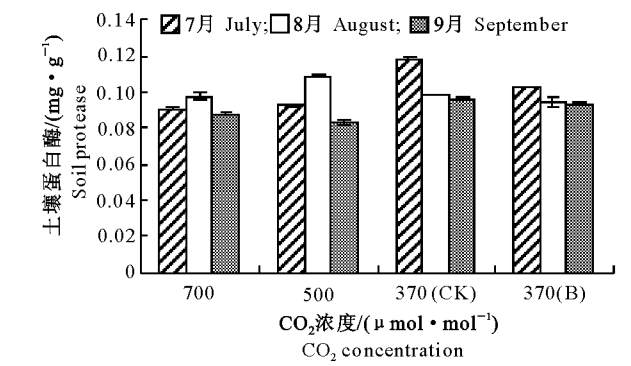


图 1 高浓度 CO₂ 对土壤蛋白酶活性的影响
Fig.1 Effects of elevated CO₂ on soil protease

2.1.2 淀粉酶和转化酶 淀粉酶广泛存在于土壤中,主要参与土壤有机碳的代谢,其活性大小可以反映有机碳代谢的快慢。由图 3 可以看出,在 7,8,9 月中,700 μmol/mol CO₂ 处理的长白赤松土壤淀粉酶活性均较开顶箱对照(8 月份除外)和裸地对照显著增高($P<0.05$);在 500 μmol/mol CO₂ 处理下,除 7 月份外,其他月份土壤淀粉酶活性较开顶箱对照和裸地对照极显著增高($P<0.01$);当 CO₂ 处理浓度相同时,不同月份土壤淀粉酶活性的变化无明显规律性。

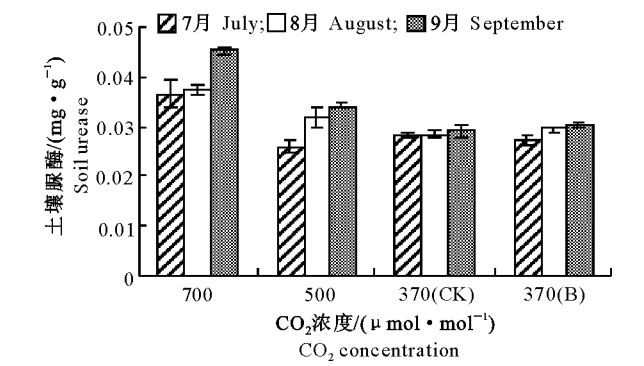


图 2 高浓度 CO₂ 对土壤脲酶活性的影响
Fig.2 Effects of elevated CO₂ on soil urease

土壤转化酶是参与土壤有机碳循环的酶,广泛存在于土壤中,主要来源于植物根系以及微生物等,是表征土壤生物学活性的重要水解酶之一,能裂解蔗糖分子中果糖基的 β-葡萄糖苷键,使蔗糖水解成葡萄糖和果糖,所以对动植物残体的分解具有重要作用。此外,转化酶活性与土壤肥力关系密切,土壤转化酶含量增加有利于土壤有机质的转化及土壤肥力水平的提高^[14]。高浓度 CO₂ 对长白赤松土壤转化酶活性的影响见图 4。

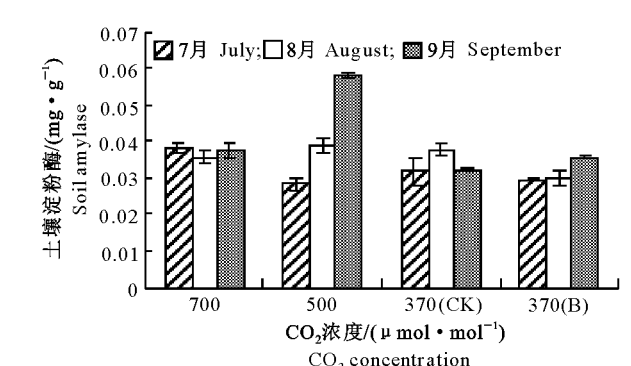


图 3 高浓度 CO₂ 对土壤淀粉酶活性的影响
Fig.3 Effects of elevated CO₂ on soil amylase

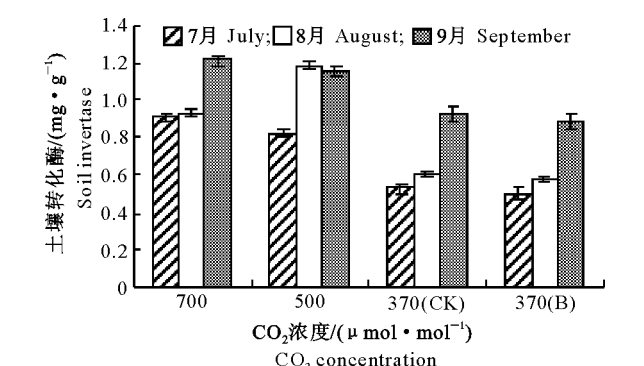


图 4 高浓度 CO₂ 对土壤转化酶活性的影响
Fig.4 Effects of elevated CO₂ on soil invertase

由图 4 可知,在 7,8,9 月中,高浓度 CO₂ 处理下,长白赤松土壤转化酶活性极显著增高($P<$

0.01);而开顶箱对照与裸地对照之间土壤转化酶活性差异不明显,表明开顶箱的温室效应可以忽略不计。当 CO₂ 处理浓度相同时,土壤转化酶活性总体表现为 9 月>8 月>7 月。

2.1.3 中性磷酸酶 土壤中的磷大部分是以有机磷化合物的形式存在的,土壤磷酸酶能促进土壤有机磷化合物的水解,其活性在很大程度上取决于土壤腐殖质含量、有效磷含量及分解有机磷化合物的微生物数量和植物种类^[14]。有研究表明,土壤磷酸酶活性与有机质含量呈正相关^[14],而磷酸酶活性与无机磷含量的关系仍存在争议。土壤磷酸酶可分为酸性磷酸酶、碱性磷酸酶和中性磷酸酶 3 类,在不同酸碱性土壤中,3 种磷酸酶的比例是不同的。本研究根据试验土壤特性主要测定了中性磷酸酶的活性。

大气 CO₂ 浓度升高对长白赤松土壤中性磷酸酶活性的影响见图 5。由图 5 可以看出,在 7,8,9 月中,高浓度 CO₂ 处理的中性磷酸酶活性均较开顶箱对照和裸地对照极显著降低($P<0.01$),而且 500 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂ 处理土壤的中性磷酸酶活性较 700 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂ 处理低,但差异不显著;与裸地对照相比,开顶箱对照土壤中性磷酸酶活性降低。高浓度 CO₂ 处理不同月份土壤中性磷酸酶活性表现为 7 月>8 月>9 月,而 2 个对照土壤的中性磷酸酶活性表现为 7 月>9 月>8 月。

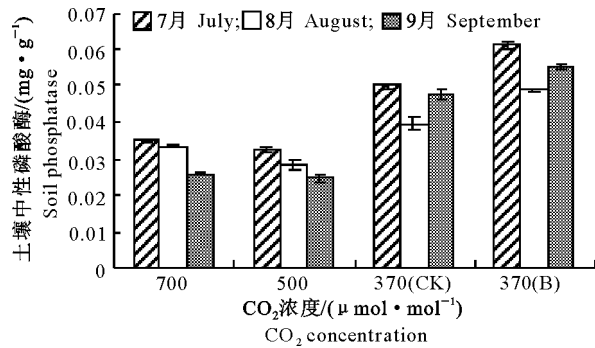


图 5 高浓度 CO₂ 对土壤中性磷酸酶活性的影响
Fig. 5 Effects of elevated CO₂ on soil phosphatase

2.2 高浓度 CO₂ 对土壤氧化还原酶活性的影响

2.2.1 过氧化氢酶 过氧化氢酶是在生物呼吸过程中有机物各种生物化学氧化反应而形成的^[15],能促进过氧化氢对各种化合物的氧化,可反映土壤的总呼吸强度,表示土壤氧化的强度,无论在何土壤中其活性大小均可指示土壤氧化还原能力的强弱,是与土壤有机质转化速度密切相关的一个指标^[15],同时也是衡量土壤生物学活性强弱的理想酶类。过氧化氢酶主要来源于土壤微生物和植物根系分泌

物。不同植物群落分泌物和枯枝落叶化学组成的差异及其生境条件的不同,均可导致土壤有机质和营养成分的差异,进而使过氧化氢酶在各植物群落土壤中的分布呈现出不均一性。大气 CO₂ 浓度升高对植物生理产生影响的同时,是否会引起土壤过氧化氢酶活性的改变,这方面的研究还较少。

由图 6 可以看出,在 7,8,9 月中,高浓度 CO₂ 处理下,长白赤松土壤过氧化氢酶活性极显著增加($P<0.01$),其中在 7 和 9 月,700 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂ 处理下的土壤过氧化氢酶活性较 500 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂ 处理显著增高($P<0.05$),在 8 月,二者差异不显著。在 7,8,9 月中,开顶箱对照和裸地对照之间过氧化氢酶活性差异不显著,说明开顶箱的温室效应对土壤过氧化氢酶活性的影响不明显。上述结果表明,大气 CO₂ 浓度升高对长白赤松土壤过氧化氢酶活性有促进作用。CO₂ 处理浓度相同时,长白赤松土壤过氧化氢酶活性均表现为 8 月>7 月>9 月。

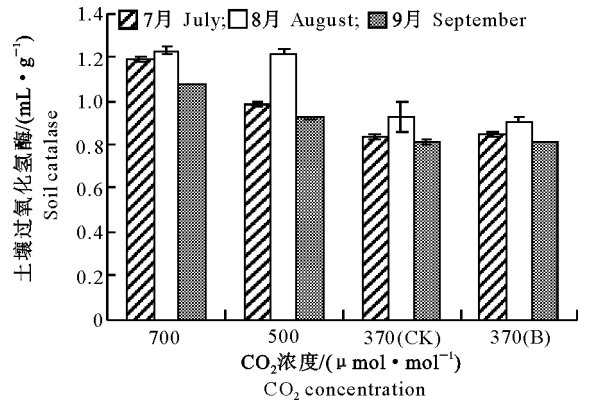


图 6 高浓度 CO₂ 对土壤过氧化氢酶活性的影响
Fig. 6 Effects of elevated CO₂ on soil catalase

2.2.2 多酚氧化酶 多酚氧化酶在土壤有机质形成过程中起着极其重要的作用,在土壤芳香族有机化合物转化为腐殖质的过程中也有重要作用,其底物酚酸类物质主要来源于枯枝落叶的分解以及根系的分泌作用。高浓度 CO₂ 对长白赤松土壤多酚氧化酶活性的影响见图 7。由图 7 可以看出,在 7,8,9 月中,高浓度 CO₂ 处理的土壤多酚氧化酶活性较高。与开顶箱对照和裸地对照相比,700 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂ 处理土壤多酚氧化酶活性极显著升高($P<0.01$),表明在 700 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂ 条件下长白赤松土壤的腐殖质化可能增加;除 7 月份外,500 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂ 处理的土壤多酚氧化酶活性亦极显著升高($P<0.01$)。与裸地对照相比,开顶箱对照土壤多酚氧化酶活性无显著变化。开顶箱对照、裸地对照和 700 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂ 处理土壤多酚氧化酶

活性的月动态变化规律表现为 7 月 > 9 月 > 8 月;而 500 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂ 处理的土壤多酚氧化酶活性表现为 9 月 > 7 月 > 8 月。除 8 月份外,其他月份 700 与 500 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂ 处理之间土壤多酚氧化酶的活性差异极显著 ($P < 0.01$)。

2.2.3 脱氢酶 土壤脱氢酶存在于所有活的生物细胞中,主要作用是促进有机物脱氢,在土壤中,碳水化合物和有机酸可作为氢的供体,使脱氢酶从基质中析出氢而进行氧化作用^[16]。由于土壤脱氢酶反应需要细胞内电子传递系统的参与,所以土壤脱氢酶一般不可能存在于土壤微生物细胞之外^[17],而那些对微生物生长代谢有影响的因子都将影响到土壤脱氢酶的活性,故其活性变化是土壤活性重要的

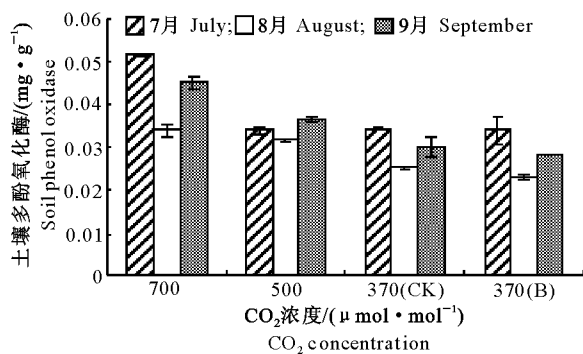


图 7 高浓度 CO₂ 对土壤多酚氧化酶活性的影响

Fig. 7 Effects of elevated CO₂ on soil phenol oxidase

3 讨 论

大气 CO₂ 浓度升高对植株的生长、光合作用及生物量产生了较大的影响,主要表现为植株的光合速率提高、生长加快、根冠比增加,枝繁叶茂,且 CO₂ 对不同类型植物的影响程度有所差异,一般 C₃ 植物比 C₄ 植物受益更大,在 CO₂ 浓度倍增条件下, C₃ 植物的生长量平均提高 41% 左右,而 C₄ 植物在 500 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂ 条件下提高 22%^[19]。

大气 CO₂ 浓度升高可改变植物的根系形态(如直径变粗、中柱变厚、栓皮层变宽等),使次生根和土表根系数量增加,根系变发达。很多研究表明,高浓度 CO₂ 可促进根系生物量,其中细根生物量的增加大于粗根^[26]。有研究表明,在大气 CO₂ 浓度升高条件下,直径小于 1 mm 的细根生物量增加 63%,直径 1~3 mm 的细根生物量增加 37%,而粗根仅增加 16%^[4]。Bentson 等^[20]发现,在植物生长初期,高浓度 CO₂ 可促进根系生物量增加,而在生长后期则加速了根系的损失,使更多的根系生物量转移到土壤中。由于在生长后期高浓度 CO₂ 加速了根系生物

敏感性综合指标^[17-18]。

高浓度 CO₂ 对长白赤松土壤脱氢酶活性的影响见图 8。由图 8 可以看出,在 7, 8, 9 月中,与开顶箱对照和裸地对照相比,700 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂ 处理土壤脱氢酶活性极显著增高 ($P < 0.01$);除 8 月外,500 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂ 处理的土壤脱氢酶活性也明显增加 ($P < 0.01$)。在 7 和 9 月,开顶箱的温室效应对脱氢酶活性的影响不明显,而 8 月份的温室效应较明显,表现为开顶箱对照的土壤脱氢酶活性明显增加。在同一月份,700 与 500 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂ 处理之间土壤脱氢酶活性的差异极显著 ($P < 0.01$)。CO₂ 处理浓度相同时,土壤脱氢酶活性在不同月份之间的变化规律均为 8 月 > 9 月 > 7 月。

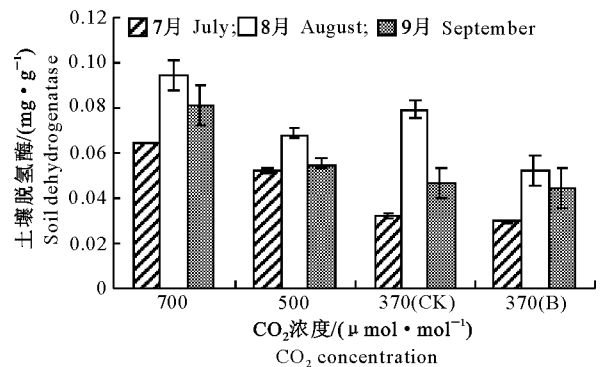


图 8 高浓度 CO₂ 对土壤脱氢酶活性的影响

Fig. 8 Effects of elevated CO₂ on soil dehydrogenase

量的损失,使根系中的某些化学成分发生变化,如淀粉、木质素和纤维素的含量下降,油脂的含量增加等^[21];此外,大气 CO₂ 浓度升高条件下植物叶片化学成分也会发生相应的变化,如非结构碳水化合物(淀粉、多糖等)的总量增加,叶片 N 含量的降低及次生代谢物的变化均会使凋落物的化学组成成分发生变化^[20]。此外,高浓度 CO₂ 使作物对 C 的吸收和同化量增加,同化的光合产物有 20%~50% 被运送到地下,通过根系的分泌和死亡输入土壤,使根际土壤的物理、化学及生物特性发生显著变化^[22-24]。CO₂ 浓度升高有可能改变土壤-植物系统中的碳通量,使输入土壤的碳量增加,土壤成为一个潜在的碳库,从而有可能缓解大气 CO₂ 浓度的升高。由于 CO₂ 浓度升高后,会给根际微生物带来更多的底物,从而提高微生物活性,加速养分的矿化过程,改善植物的养分状况^[25]。根系在生长发育过程中向土壤释放一些化学物质,如植物铁载体、根系磷酸酶、有机酸类、化感物质等,目前已知 CO₂ 浓度升高后,根系分泌物成分可能会发生变化。由于土壤中 CO₂ 浓度几乎可达大气中的 50 倍,因而大气 CO₂ 浓度

升高对根际微生物及其活性的影响很可能不是直接的,然而根系沉积物如果随 CO₂ 浓度升高而增加,则有可能改变微生物群落结构及根际微生物的活性。此外,植株地上部分累积生物量的增加会使凋落物量随之增加。所有这些变化都会间接地给土壤的生物活性带来影响^[26]。

长白赤松土壤中的各类酶活性在高浓度 CO₂ 条件下的变化可能是由于上述原因引起的,即在高浓度 CO₂ 条件下,长白赤松光合速率、生长量和根系生物量的增加和植株叶片碳水化合物的改变^[27-28]及根系分泌物的变化,改变了土壤微生物生活所需的 C、N 源的结构,从而导致主要来源于微生物的酶活性发生改变,同时来源于植物根系的酶活性也由于上述原因而发生改变。在大气 CO₂ 浓度升高时,长白赤松土壤氧化还原酶活性的增加,可能预示着土壤氧化还原过程加强,土壤腐殖质再合成能力提高。

4 结 论

高浓度 CO₂ 对长白赤松土壤脲酶、转化酶、淀粉酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶以及脱氢酶活性具有极显著($P<0.01$)的促进作用,而对土壤蛋白酶和磷酸酶的活性却有明显的抑制作用。各土壤酶活性的月动态变化规律在不同程度上受到了高浓度 CO₂ 的影响。

[参考文献]

[1] 郑 巍,刘惠君,刘维屏.吡虫啉及代谢物对土壤过氧化氢酶活性的影响[J].中国环境科学,2000,20(6):524-527.
Zheng W, Liu H J, Liu W P. Influence of pesticide imidacloprid and its metabolites on catalase activity in soil [J]. China Environmental Science, 2000, 20(6): 524-527. (in Chinese)

[2] Delucia E H, Hamilton J G, Naidu S L, et al. Net primary production of a forest ecosystem with experimental CO₂ enrichment [J]. Science, 1999, 284: 1177-1179.

[3] Schlesinger W H, Lichter J. Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO₂ [J]. Nature, 2001, 411: 466-469.

[4] Korner C, Arnone J A III. Responses to elevated carbon dioxide in artificial tropical ecosystems [J]. Science, 1992, 257: 1672-1675.

[5] Zak D R, Pregitzer K S, Curtis P S, et al. Elevated atmospheric CO₂ and feedback between carbon and nitrogen cycles [J]. Plant and Soil, 1993, 151: 105-117.

[6] Kandeler E, Tschermo K, Bardegett R D, et al. The response of soil microorganisms and roots to elevated CO₂ and temperature in a terrestrial model ecosystem [J]. Plant and Soil, 1998, 202:

251-262.

[7] Dhillon S S, Roy J, Abrams M. Assessing the impact of elevated CO₂ on soil microbial activity in a mediterranean model ecosystem [J]. Plant and Soil, 1996, 187: 333-342.

[8] Moorhead D L, Linkkins A E. Elevated CO₂ alters belowground exoenzyme activities in tussock tundra [J]. Plant and Soil, 1997, 189: 321-329.

[9] Ross D T, Tate K R, Feltham C W, et al. Elevated CO₂ and temperature effects on soil carbon and nitrogen cycling in ryegrass/white clover turves of an Endoaquept soil [J]. Plant and Soil, 1995, 176: 37-49.

[10] 陈利军, 武志杰, 黄国宏, 等. 大气 CO₂ 增加对土壤脲酶、磷酸酶活性的影响 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(10): 1356-1357.
Chen L J, Wu Z J, Huang G H, et al. Effect of elevated atmospheric CO₂ on soil urease and phosphatase activities [J]. Chin J Appl Ecol, 2002, 13(10): 1356-1357. (in Chinese)

[11] 张玉兰, 张丽莉, 陈利军, 等. 稻-麦轮作系统土壤水解酶及氧化还原酶活性对开放式 CO₂ 浓度增高的响应 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(6): 1014-1018.
Zhang Y L, Zhang L L, Chen L J, et al. Response of hydrolase and oxidoreductase activities to free-air carbon dioxide enrichment (FACE) under rice-wheat rotation [J]. Chin J Appl Ecol, 2004, 15(6): 1014-1018. (in Chinese)

[12] 张丽莉, 张玉兰, 陈利军, 等. 稻-麦轮作系统土壤糖酶活性对开放式 CO₂ 浓度增高的响应 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(6): 1019-1024.
Zhang L L, Zhang Y L, Chen L J, et al. Response of soil saccharidase activities to free-air carbon dioxide enrichment (FACE) under rich-wheat rotation [J]. Chin J Appl Ecol, 2004, 15(6): 1019-1024. (in Chinese)

[13] 关松荫. 土壤酶及研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986: 323.
Guan S Y. Soil enzymes and its methodology [M]. Beijing: Agricultural Press, 1986: 323. (in Chinese)

[14] 谷思玉, 隋跃宇. 红松人工纯林、人工混交林和天然林几种土壤酶活性比较 [J]. 农业系统科学与综合研究, 2007, 23(4): 486-488, 493.
Gu S Y, Sui Y Y. Comparison of enzyme activities of several soils from pure artificial korean pine forest, mixture plantation and natural forest [J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2007, 23(4): 486-488, 493. (in Chinese)

[15] 鲁 萍, 郭继勋, 朱 丽. 东北羊草草原主要植物群落土壤过氧化氢酶活性的研究 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 675-679.
Lu P, Guo J X, Zhu L. Soil catalase activity of main plant communities in Leymus chinensis grassland in northeast China [J]. Chin J Appl Ecol, 2002, 13(6): 675-679. (in Chinese)

[16] 郭 明, 陈红军, 王春蕾. 4 种农药对土壤脱氢酶活性的影响 [J]. 环境化学, 2000, 19(6): 523-527.
Guo M, Chen H J, Wang C L. Effect on soil dehydrogenase activity of four pesticides [J]. Environmental Chemistry, 2000, 19(6): 523-527. (in Chinese)