

泥炭沼泽土壤酶活性对水热条件变化的响应 及其与 CO₂ 释放通量的关系 ——以小兴安岭地区为例

贺灵¹, 向武^{1, 2*}, 孙兴庭¹, 赵玉龙¹

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学生物地质和环境地质教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074

摘要: 采用实验室培养的方法, 研究了小兴安岭地区两类典型的泥炭沼泽: 苔草型泥炭沼泽和泥炭藓型泥炭沼泽中几种水解酶活性 (β -葡萄糖苷酶、酚氧化酶) 对不同温度和水位变化的响应, 以及与 CO₂ 释放通量的相互关系。结果表明: β -葡萄糖苷酶活性在两类泥炭沼泽中受多种因素制约, 在一定湿度范围内受水位控制较明显, 当土壤湿度降低到一定程度时, 温度对土壤酶活性影响增强。酚氧化酶活性与温度密切相关, 但对温度变化的响应存在明显的季节性差异。相对而言, 苔草型泥炭沼泽中 β -葡萄糖苷酶和酚氧化酶活性显著高于相同培养条件下泥炭藓型泥炭沼泽。总体上, 苔草型泥炭沼泽中水解酶活性较泥炭藓型泥炭沼泽中高, 但是其 CO₂ 释放通量却低于泥炭藓型泥炭沼泽, 表明与有机碳分解有关的水解酶的活性高低不能作为解释泥炭沼泽 CO₂ 释放通量大小的唯一指标。

关键字: 泥炭沼泽; 酶活性; CO₂ 释放通量; 碳循环; 全球变化

中图分类号: S154.2

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 06-2326-08

北方泥炭沼泽拥有全球陆地生态系统近 1/3 的碳储量^[1]。较低的温度和较低的 pH 使得北方泥炭沼泽中有机碳的分解速率低于其生成速率, 因此, 长期以来北方泥炭沼泽一直扮演着全球“碳汇”的功能, 积累了巨大的碳储量。政府间气候变化委员会 (IPCC) 2007 年的研究报告预测, 随着全球变暖, 北方高纬度地区将面临频繁、严重的夏季干旱, 而这里也是北方泥炭沼泽大面积分布的地区^[2], 其有机碳分解速率的微小波动将会对全球碳循环造成巨大的影响。全球变暖所导致的水热条件变化对泥炭沼泽土壤碳循环的影响已成为全球变化研究的热点, 由于泥炭沼泽中碳循环机制比较复杂, 水热条件变化对其碳分解的影响仍存在较多争议^[3]。

泥炭沼泽中, 有机碳主要以有机化合物的形式存在, 如有机酸, 木质素, 酚类化合物等。与碳循环有关的酶直接制约有机碳的分解, 其活性变化是泥炭沼泽中有机碳分解的指示器^[4]。 β -葡萄糖苷酶与纤维素分解有关, 其活性不仅受环境水热条件变化的影响, 也受酚氧化酶活性的制约^[5]。同时, 泥炭沼泽中存在大量的木质素, 经微生物分解后可产生大量的酚类物质, 许多植物根系也能分泌酚类物质。酚类物质能显著抑制部分水解酶 (β -葡萄糖苷酶、磷酸酶等) 活性从而导致有机碳极低的分解速率, 因此, 高浓度酚类物质的存在是泥炭沼泽中有

机碳积累的关键因素之一^[5,6]。酚氧化酶的作用是部分氧化或提供氧化媒介, 使复杂的酚类化合物分解为简单的有机物, 从而起到促进泥炭沼泽有机碳分解的作用^[7]。因此, 研究 β -葡萄糖苷酶和酚氧化酶对水热条件变化的响应, 对于评估全球变化下泥炭沼泽碳循环过程具有十分重要的意义。环境因素对酶活性的影响及酶活性与泥炭沼泽中有机碳分解之间的关系已有大量的研究, 特别在欧洲、北美等地区的研究较多^[5, 8-10]。一般认为: 温度和水分都是控制酶活性的重要因素, 升高温度对提高酶活性有显著的促进作用, 水分对酶活性的控制作用也不容忽视。然而, 泥炭沼泽中酶活性的高低与 CO₂ 释放通量的相互关系尚缺乏足够的研究。中国北方泥炭沼泽是全球北方泥炭沼泽的重要组成部分, 具有其独特的气候、地理特征, 但相关研究明显不足。因此, 在中国北方开展此类研究十分必要。泥炭沼泽中, 表层泥炭 (0~10 cm) 对环境因素的变化比较敏感; 此外, 作为深部泥炭的覆盖层和保护层, 表层泥炭中有机碳分解对环境水热条件变化的响应对于合理评估泥炭沼泽碳收支以及保护底部泥炭极为重要。本研究选择小兴安岭地区两类典型的泥炭沼泽 (苔草型泥炭沼泽、泥炭藓型泥炭沼泽) 的表层样品 (0~10 cm) 作为研究对象。

本研究的目的在于: 1) 试验研究水热条件变

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40772205)

作者简介: 贺灵 (1985 年生), 男, 硕士研究生, 主要从事环境地球化学研究。E-mail: lingh1237@163.com

*通讯作者: E-mail: bgegwx@yahoo.cn

收稿日期: 2009-09-30

化对两类泥炭沼泽中酶活性及 CO₂ 释放通量的影响; 2) 研究酶活性与 CO₂ 释放通量的相互关系; 以便科学合理地评估全球变化对泥炭沼泽中碳收支的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国东北小兴安岭地区, 具体研究区隶属黑龙江省伊春市红星林业局。该区纬度高, 为温带季风气候, 冬季严寒漫长, 夏季暖和短促。每年4月底到11月为冻融期, 11月到次年4月为冰冻期。该区地势平坦, 地表水丰富, 泥炭沼泽发育且类型齐全。有以泥炭藓 (*Sphagnum*) 为主要植被类型的高位泥炭沼泽; 以木本植物为主要植被的低位泥炭沼泽, 以及属于两者过渡类型的中位泥炭沼泽^[11]。本研究选取该区两类典型的泥炭沼泽为研究对象: 苔草型泥炭沼泽 (*marsh*), 其植被以苔草 (*Carex tristachya*) 为主; 泥炭藓型泥炭沼泽 (*bog*), 其植被以泥炭藓为主。

1.2 样品采集与实验室培养

采样点分别选取小兴安岭红星林场中两类典型泥炭沼泽: 苔草型泥炭沼泽 (48°18'50.87"N, 129°33'55.11"E) 和泥炭藓型泥炭沼泽 (48°21'23.48"N, 129°09'43.85"E)。我们于2008年8月和10月分别采集样品。每次每类泥炭沼泽中各采集9个泥炭柱。采样时, 用自制的PPV塑料管(长30 cm, 内径10 cm) 竖直压入泥炭中(泥炭样品上下层位保持原状, 未受采样扰动), 待泥炭柱表面几乎和塑料管口同高时用力一起拔出(泥炭柱长约25 cm, 直径10 cm)。采样完成后将塑料管两端加盖密封, 迅速带回实验室培养。

培养实验分两步进行, 两类泥炭样品的处理方式相同, 下面仅以一种泥炭类型样品的处理过程为例说明培养过程。首先, 将9个泥炭柱分成三组, 分别置于高、中、低三种水位下培养四周(高水位=(-0±1) cm; 中水位=(-10±1) cm; 低水位=(-18±1) cm)。培养结束后将塑料管破开, 完整取出泥炭柱, 除去表面的植物和根系, 自上而下分成四段(0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm、15~20 cm)。将同一水位条件下的三个同层泥炭样品混合为一个样品(如将高水位下三个泥炭柱0~5 cm部分混合为一个样), 戴一次性塑料手套, 在专用净化桶内挑去残余植物根系和砂石。此时样品已经准备好, 可以进行相应的试验分析测试。待分析测试完成后, 将上一步同一水位条件下混合所得的样品再一次混合(如将高水位0~5 cm和5~10 cm两个样品混合为一个样品), 然后将其分成三等份。将分好的样品分别用保鲜膜包裹, 防止水分蒸发, 然后放在自制的样品

盒内, 分别置于5 °C、15 °C、25 °C恒温培养箱, 培养两周。培养完成后, 测试样品中酚氧化酶活性、 β -葡萄糖苷酶活性、pH、CO₂ 释放通量等指标。

1.3 样品实验分析测试

1.3.1 β -葡萄糖苷酶活性测试

β -葡萄糖苷酶活性测试方法据[12]略做修改, 测定吸收波长为405 nm。酶活性以泥炭中每1 g有机质干物质每1 h产生的对硝基酚(*P-Nitrophenol*) 计算, 单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ (即 $10^{-6}\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)。

1.3.2 酚氧化酶活性测定

酚氧化酶活性测定过程与[13]相同, 据[2]略作改动。在均质袋中加入1 mL新鲜泥炭和5 mL二次蒸馏水, 利用均质器使之充分混合均匀。取0.9 mL混合液作为测试用样品, 另取0.9 mL当作空白, 样品与空白实验均重复三次。测定吸收波长为450 nm。酚氧化酶活力表示方法为泥炭中每1 g有机质干物质每1 min内所产生的3-dihydroindole-5, 6-quinone-2-carboxylate(*Diqc*) 的物质的量(以n mol计), 单位为 $\text{n mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

1.3.3 CO₂ 释放通量测定

采用静态箱法测定CO₂ 释放通量, 测定过程如下: 室温下, 将泥炭样品用一塑料罩罩住, 保证罩内和罩外无气体交换。塑料罩上钻有一孔, 与外界通过三通阀连接。实验开始, 抽取罩内空气测出CO₂ 初始体积分数 φ_1 , 然后关闭三通阀, 让泥炭样品呼吸产生的CO₂ 在罩内持续累积, 45 min后再从罩内抽取气体样品测定CO₂ 体积分数 φ_2 。根据两者之差计算出CO₂ 释放通量。CO₂ 气体体积分数 φ 用GC7900气相色谱仪测定。测定条件: 离子火焰检测器(FID), 色谱柱为不锈钢填充柱(TDX-01, 1 m×3 mm), 柱温100 °C, 进样温度100 °C, 检测器温度350 °C、载气为氮气, 载气流量30 mL·min⁻¹。气相色谱仪测出的CO₂ 体积分数单位用10⁻⁶表示, 本文中CO₂ 释放通量用mg·h⁻¹·m⁻²表示。换算方法据文献[14]。

1.4 数据统计分析

数据处理、作图用Excel 2003完成。

2 实验结果

2.1 β -葡萄糖苷酶活性对温度变化的响应

由图1可以看出, 在苔草型泥炭沼泽或者泥炭藓型泥炭沼泽中, β -葡萄糖苷酶活性在三种不同水位培养条件下随温度升高有几乎一致的变化趋势。在苔草型泥炭沼泽 (*marsh*) 中, β -葡萄糖苷酶在5 °C时有较高的活性, 温度升高到15 °C时, β -葡萄糖苷酶活性有所降低, 降幅约20%~30%。当培养温度升高到25 °C时, 其活性又有所升高。在泥炭藓型泥炭沼泽 (*bog*) 中, β -葡萄糖苷酶在5 °C时活性

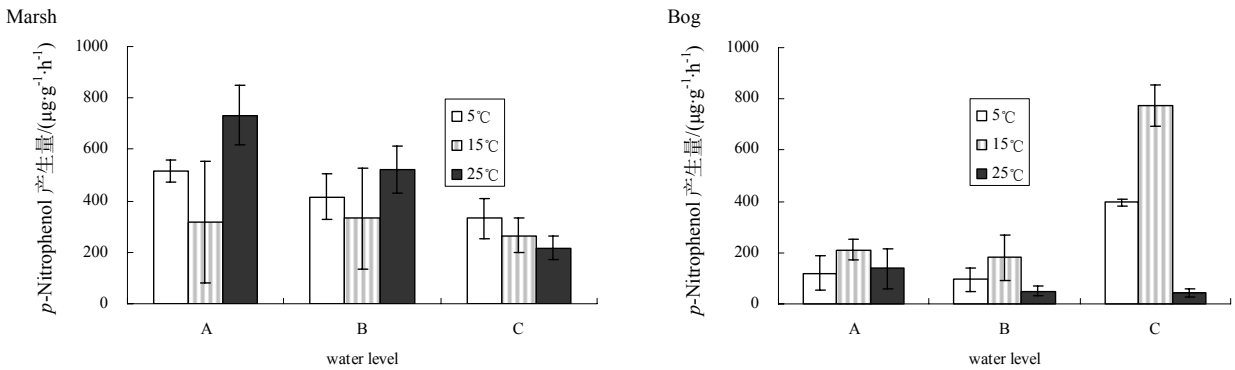


图 1 8 月份两类泥炭沼泽中不同温度、不同水位下 β -葡萄糖苷酶活性 ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)

Fig.1 β -glucosidase activity under different temperature and water levels at August, 2008. A = samples incubated at high water level; B = samples incubated at mid water level; C = samples incubated at low water level.

A = 高水位样品, B = 中水位样品, C = 低水位样品

较低, 温度升高到 15 °C 时, β -葡萄糖苷酶活性明显增高, 增幅约 70%~100%。当培养温度进一步升高到 25 °C 时, 酶活性又大幅降低, β -葡萄糖苷酶在 15 °C 时表现出最大活性。整体来讲, 苔草型泥炭沼泽中 β -葡萄糖苷酶活性高于泥炭藓型泥炭沼泽。

与 8 月份相比, 10 月份两类泥炭沼泽中 β -葡萄糖苷酶活性[图 2]表现出明显不同的特点: 高、中水位培养条件下, β -葡萄糖苷酶在两类泥炭沼泽中具有一致的变化趋势, 且在 15 °C 时表现出最大活性。低水位培养条件下, 苔草型泥炭沼泽中 β -葡萄糖苷酶活性随培养温度升高而不断增加; 在泥炭藓型泥炭沼泽中, β -葡萄糖苷酶活性随培养温度升高表现出先降后升的特点。整体来讲, 苔草型泥炭沼泽中 β -葡萄糖苷酶活性仍然高于泥炭藓型泥炭沼泽。

2.2 酚氧化酶活性对温度变化的响应

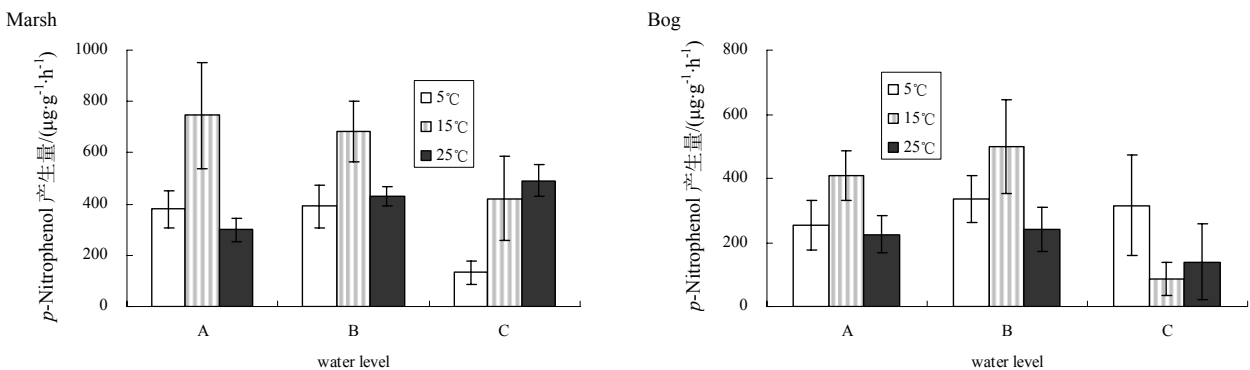
如图 3 所示, 8 月份酚氧化酶活性在两种沼泽中对水热条件变化的响应趋势基本相同。在苔草型泥炭沼泽中, 酚氧化酶在 5 °C 时有较高的活性, 温度

升高到 15 °C 时, 酚氧化酶活性有所降低, 降幅约 10%~30%。当培养温度升高到 25 °C 时, 酶活性又升高。在泥炭藓型泥炭沼泽中, 酚氧化酶在 5 °C 时活性较低, 温度升高到 15 °C 时, 酚氧化酶活性变化不大, 当培养温度升高到 25 °C 时, 酶活性增加约 30%~100%, 酚氧化酶在 25 °C 时表现出最大活性。

如图 4 所示, 10 月份, 在苔草型泥炭沼泽中, 当培养温度由 5 °C 升高到 15 °C 时, 酚氧化酶活性降低约 10%~30%。当温度升高到 25 °C 时, 酶活性又相应升高, 并在 25 °C 时表现出最大活性。在泥炭藓型泥炭沼泽中, 温度由 5 °C 升高到 15 °C 时, 高、中水位条件下酚氧化酶活性变化不大, 低水位下其活性则明显降低。当温度升高到 25 °C 时, 高、中水位下酶活性进一步下降, 而低水位下酶活性则有小幅度的增加。

2.3 泥炭土壤 CO₂ 释放通量对温度变化的响应

从图 5 可以看出, 8 月份两类泥炭沼泽中 CO₂ 释放通量对温度变化均有明显的响应。两类泥炭沼



A = 高水位样品, B = 中水位样品, C = 低水位样品

图 2 10 月份两类泥炭沼泽中不同温度、不同水位下 β -葡萄糖苷酶活性 ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)

Fig.2 β -glucosidase activity under different temperature and water levels at October, 2008. A = samples incubated at high water level; B = samples incubated at mid water level; C = samples incubated at low water level

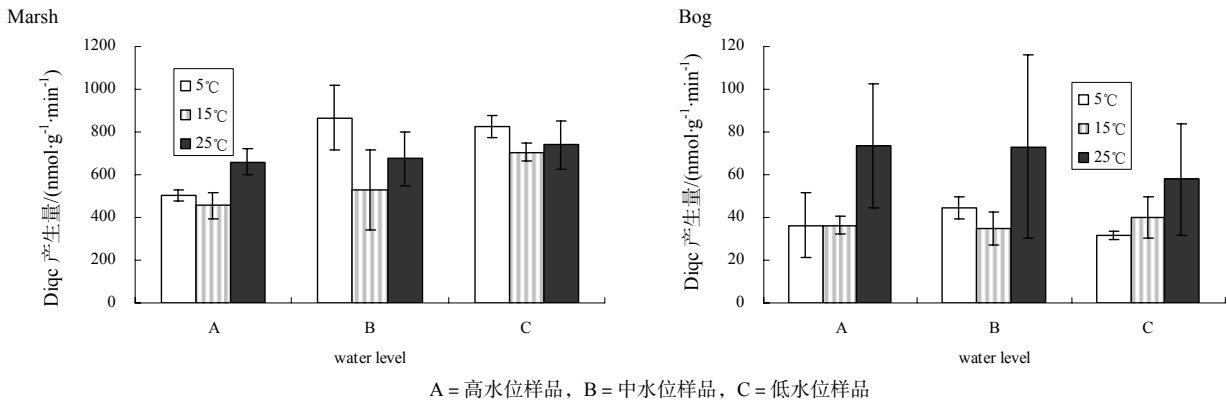


图3 8月份两类泥炭沼泽中不同温度、不同水位下酚氧化酶活性 (nmol·g⁻¹·min⁻¹)

Fig.3 Phenol oxidase activity under different temperature and water levels at August, 2008. A = samples incubated at high water level; B=samples incubated at mid water level; C=samples incubated at low water level

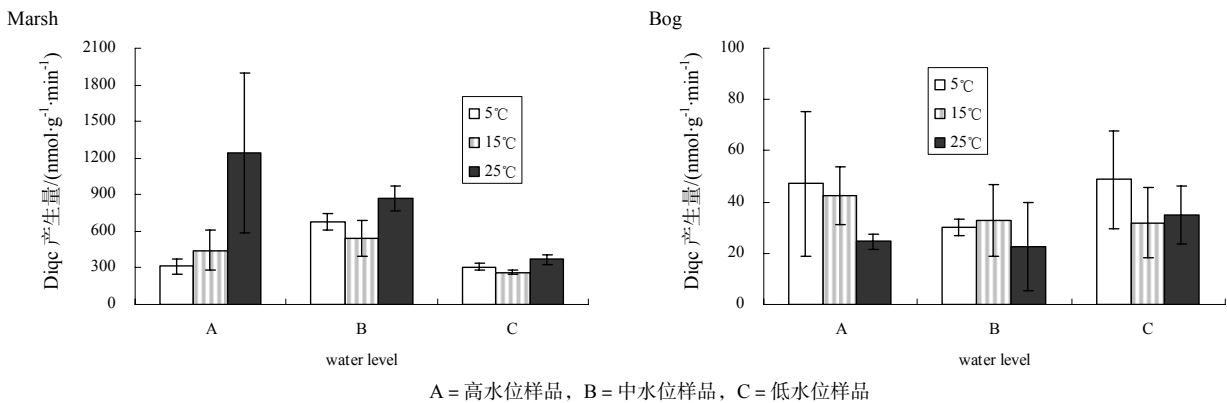


图4 10月份两类泥炭沼泽中不同温度、不同水位下酚氧化酶活性 (nmol·g⁻¹·min⁻¹)

Fig.4 Phenol oxidase activity under different temperature and water levels at October, 2008. A = samples incubated at high water level; B=samples incubated at mid water level; C=samples incubated at low water level

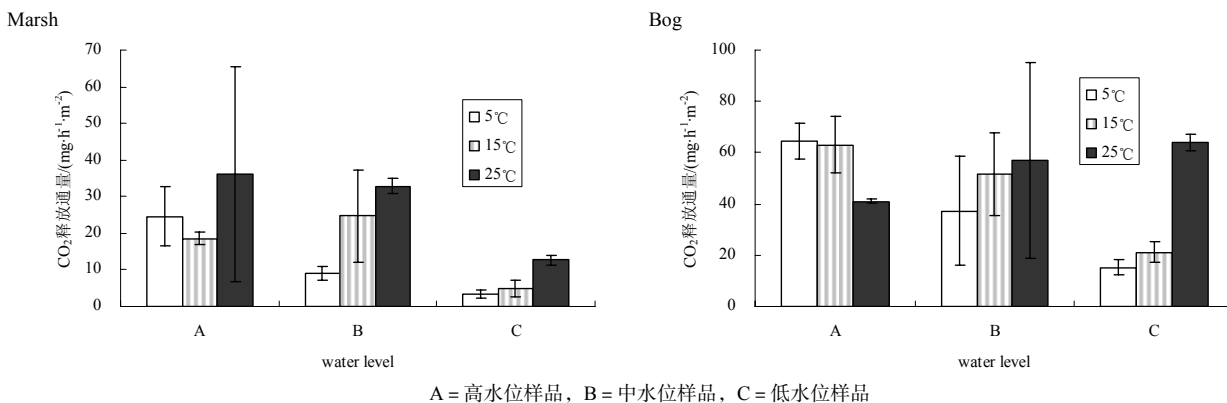


图5 8月份两类泥炭沼泽中不同温度下 CO₂ 释放通量 (mg·h⁻¹·m⁻²)

Fig.5 CO₂ emission flux under different temperature at August, 2008. A = samples incubated at high water level; B=samples incubated at mid water level; C=samples incubated at low water level

泽中, 高、中水位条件下 CO₂ 释放通量均明显高于低水位条件, 约为低水位的 5~6 倍, 且均在 25 °C 时表现出最大值。泥炭藓型泥炭沼泽中 CO₂ 释放通量约为苔草型泥炭沼泽的 2 倍。

10 月份, 两类泥炭沼泽中 CO₂ 释放通量与 8 月份略有不同[图 6], 表现在泥炭藓型泥炭沼泽中 CO₂ 释放通量与苔草型泥炭沼泽基本持平。另外, 两类泥炭沼泽中, CO₂ 释放通量对温度变化的响应

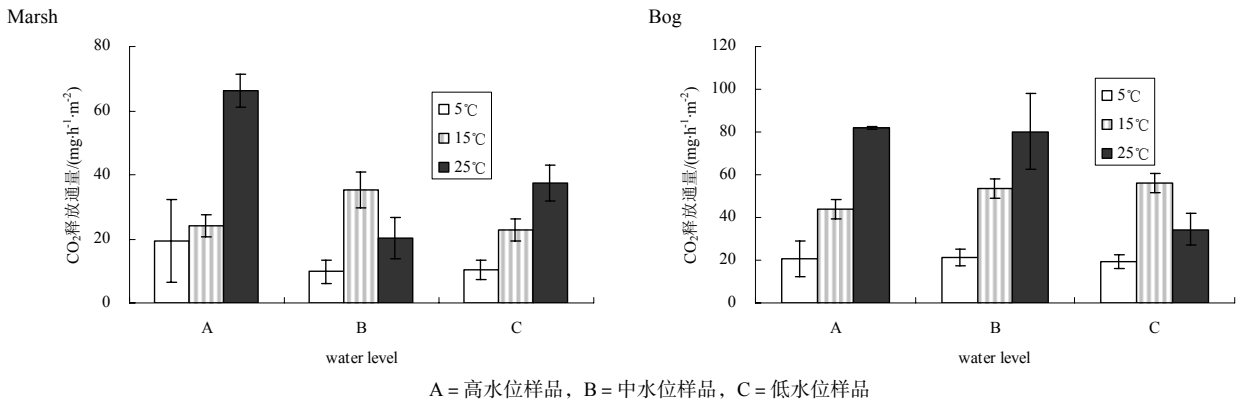


图6 10月份两类泥炭沼泽中不同温度下CO₂释放通量(mg·h⁻¹·m⁻²)

Fig.6 CO₂ emission flux under different temperature at October, 2008. A = samples incubated at high water level; B=samples incubated at mid water level; C=samples incubated at low water level

也更显著。随着温度升高,两类泥炭沼泽中CO₂释放通量均有逐渐升高的趋势(排除掉个别样品可能由于实验误差导致的异常反应)。CO₂释放通量与温度呈正相关关系。

3 讨论

3.1 水热条件变化对泥炭沼泽土壤酶活性的影响

3.1.1 温度、水位变化对泥炭沼泽中β-葡萄糖苷酶活性的影响

从实验结果可以看出,8月份苔草型泥炭沼泽中,随着培养温度升高,其活性表现出先降低后升高的变化趋势。但是,在三种培养温度下β-葡萄糖苷酶活性均表现出随水位降低而降低的特点,说明此时温度虽然对酶活性有较大的影响,但是主要控制因素是水位条件。一方面,水位降低导致环境湿度降低,从而限制了β-葡萄糖苷酶和底物分子的接触速率,导致其活性降低^[2]。另一方面,水位降低可导致氧化还原条件变化,从而影响环境pH,使得β-葡萄糖苷酶活性受到影响。Bonnett等(2006)研究指出:β-葡萄糖苷酶活性与水分含量密切相关,较高的水分含量对应着较高的β-葡萄糖苷酶活性^[15]。这个结论与我们的结果一致。

10月份泥炭藓型泥炭沼泽、苔草型泥炭沼泽中,β-葡萄糖苷酶活性随着培养温度升高表现出比较相似的响应特征:基本上在15℃表现出最大酶活性。这可能是由于两者的环境湿度比较相似所致。说明当环境比较干旱的时候,水分对其活性的制约已经小于温度对其的控制作用。此外,10月份,研究区的最高气温在15℃左右,而两类泥炭沼泽样品中β-葡萄糖苷酶在15℃表现出最高活性,这与FENNER N等(2005)的研究结果一致。他们发现β-葡萄糖苷酶活性与不同季节的野外环境温度密切相关,一般其活性最高值与野外最高环境温度

一致^[8]。

泥炭沼泽中,β-葡萄糖苷酶活性变化受多种因素的影响,如温度、水位、有机质含量、pH等^[15]。β-葡萄糖苷酶活性在泥炭沼泽中是多种环境因素共同作用下的结果,不同的沼泽类型具有不同的微环境(如pH、植被组成、湿度等),因此,β-葡萄糖苷酶活性在两类泥炭沼泽中对水热条件变化具有明显不同的响应特点。

3.1.2 温度、水位变化对泥炭沼泽中酚氧化酶活性的影响

在泥炭沼泽中关于酚氧化酶活性的研究已有一些报道^[2,5,13]。这些研究的焦点一般集中在环境状态(厌氧、有氧环境等)对酚氧化酶的影响以及酚氧化酶与其他水解酶之间的相互关系上。关于温度对其活性的影响方面的研究不多^[8,15]。本研究结果中体现出一个趋势:即酚氧化酶活性随着培养温度的持续升高,一般都会有较大幅度的增长。说明较高温度下,泥炭沼泽中各种生物化学作用均比较活跃,这些活动能产生较多的酚类化合物^[4],酚类物质的持续累积为酚氧化酶的分解活动提供了足够的底物,促进了酚氧化酶活性的提高。

Bonnett等(2006)研究指出:酚氧化酶活性在泥炭沼泽中受多种因素制约,它与温度既不呈线性相关也不呈指数相关关系^[15]。而Fenner等(2005)的研究表明酚氧化酶活性与野外环境温度关系密切^[8]。Toberman等(2008)的研究表明,酚氧化酶活性与水分含量相关。夏季干旱条件下,降水减少,酚氧化酶活性受到抑制^[2]。Freeman等(2004)则指出,酚氧化酶活性与环境分子氧的可获得性关系密切,水位降低可以使淹水厌氧环境转变为有氧环境,使酚氧化酶能获得更多的分子氧,从而大大促进酚氧化酶活性^[5]。从我们的实验结果可以看出,

酚氧化酶在两类泥炭沼泽中, 其活性对水热条件变化表现出明显不同的响应, 但没有统一的响应规律, 表明酚氧化酶活性和环境水热条件具有密切的关系, 其具体机制仍有待进一步研究。本研究中, 酚氧化酶活性变化在相同月份不同类型沼泽中, 或者相同沼泽类型不同月份中均有差异, 这一结果间接地说明了酚氧化酶活性的影响因子比较复杂, 以致其活性在相似的环境中也有较大的差异。

3.2 泥炭沼泽土壤中酶活性与 CO₂ 释放通量的关系

由表 1 可以看出, 与泥炭藓型泥炭沼泽中酶活

性相比, 苔草型泥炭沼泽中的酶活性明显高很多。两类沼泽中相同培养温度和水位条件下泥炭样品酶活性的比值范围为: β -葡萄糖苷酶 10.4~0.3 (8 月)、5.0~0.4 (10 月); 酚氧化酶 26.1~9.0 (8 月)、50.7~6.3 (10 月); 仅仅有三个样品的 β -葡萄糖苷酶活性比值小于 1.0, 说明同种水解酶活性 (β -葡萄糖苷酶、酚氧化酶) 在苔草型泥炭沼泽中比泥炭藓型泥炭沼泽中更高。我们测定了苔草型泥炭沼泽和泥炭藓型泥炭沼泽中酚类化合物质量分数, 发现苔草型泥炭沼泽和泥炭藓型泥炭沼泽中酚类化合物的

表 1 苔草型泥炭沼泽与泥炭藓型泥炭沼泽中水解酶活性的比值以及 CO₂ 释放通量的比值

Table 1 Ratios of enzyme activities and ratios of CO₂ emission fluxes between marsh and bog

比较对象	高水位样品			中水位样品			低水位样品		
	5 °C	15 °C	25 °C	5 °C	15 °C	25 °C	5 °C	15 °C	25 °C
Glu (Aug)	4.3	1.5	5.3	4.4	1.8	10.4	0.8	0.3	5.0
Glu (Oct)	1.5	1.8	1.3	1.2	1.4	1.8	0.4	5.0	3.5
Pho (Aug)	13.8	12.5	9.0	19.4	15.2	9.2	26.1	17.7	12.8
Pho (Oct)	6.6	10.5	50.7	22.5	16.5	38.7	6.3	8.3	10.6
CO ₂ (Aug)	0.4	0.3	0.9	0.2	0.5	0.6	0.2	0.1	0.2
CO ₂ (Oct)	1.0	0.6	0.8	0.5	0.7	0.3	0.5	0.4	1.1

Glu = β -葡萄糖苷酶, Pho = 酚氧化酶, Aug = 八月, Oct = 十月, 表中第一行第一列的数值 4.3 表示: 在高水位, 5 °C 的培养条件下, 苔草型泥炭沼泽中 β -葡萄糖苷酶的活性是相同培养条件下泥炭藓型泥炭沼泽中的 4.3 倍, 依此类推。

质量分数平均值分别为 50 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 200 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。FREEMAN C 等 (2004) 研究指出, 较高的酚类物质浓度可以强烈地抑制水解酶活性, 他们的实验测得当酚类物质的质量浓度由 4.37 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到 1.62 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, β -葡萄糖苷酶的活性增长了 26%, $p < 0.05$ 。这可以部分地解释泥炭藓型泥炭沼泽中水解酶活性比苔草型泥炭沼泽中低的现象。另一个可能的原因是两种类型的泥炭沼泽其植被类型的差异, 导致了其酶活性的差异^[5]。

然而, 从上表中 CO₂ 释放通量比值来看, 苔草型泥炭沼泽和泥炭藓型泥炭沼泽中的 CO₂ 释放通量比值范围为: 0.1~0.9, 均值 0.34 (8 月)、0.3~1.1, 均值 0.65 (10 月)。总体来讲, 泥炭藓型泥炭沼泽中 CO₂ 释放通量明显高于苔草型泥炭沼泽。两种不同类型的泥炭沼泽中, 酶活性差异明显, CO₂ 释放通量也有较大的区别。苔草型泥炭沼泽中酶活性相对较高、但其 CO₂ 释放通量反而比泥炭藓型泥炭沼泽低, 其具体机制还有待深入研究。Bonnett 等 (2006) 研究指出, 酶活性受到抑制时土壤有机碳矿化受到限制, 没有充足的动态有机碳供应微生物活动, 从而可能会限制 CO₂ 释放^[15]。Fenner 等 (2005) 的研究表明, 在不同的季节里, 酚氧化酶和 β -葡萄糖苷酶活性与 CO₂ 释放相关, 三者均在原位环境的最高温度表现出最大值^[8]。这些研究表明酶活性与

泥炭沼泽中有机碳分解密切相关, 酶活性越高, 泥炭沼泽中有机碳分解越快。我们的研究表明: 相对泥炭藓型泥炭沼泽来说, 苔草型泥炭沼泽中酶活性高得多、其 CO₂ 释放通量反而比较低。这说明酶活性与 CO₂ 释放通量的正相关关系只有在特定的环境中成立, 而且是一种相对趋势。两种不同类型的泥炭沼泽中, 由于其微环境的差异, 可导致其酶活性和 CO₂ 释放的差异, 因此, 不能笼统地用两者的绝对值相比较从而做出武断的结论。由于泥炭沼泽中的碳循环机理异常复杂, 很多问题还没有得到统一的认识, 酶活性与 CO₂ 释放通量之间的相互制约关系还有待进一步深入研究。

4 结论

通过实验室模拟培养的方法, 研究了小兴安岭地区两类典型的泥炭沼泽中酶活性对水热条件变化的响应及其与 CO₂ 释放通量的关系。结果表明: 1) 温度可以显著影响泥炭沼泽中 β -葡萄糖苷酶和酚氧化酶的活性, 环境温度升高可刺激酶活性; 2) 环境温度升高可促进泥炭土壤 CO₂ 释放通量增长, 两者表现为正相关关系; 3) 与有机碳分解有关的水解酶, 其活性高低不能作为解释泥炭沼泽 CO₂ 释放通量大小的唯一指标, 仅可作为衡量其有机碳分解速率的参考依据。不同的沼泽环境中, 由于其生态结构存在差异, 较高的酶活性也可能对应着较低

的 CO₂ 释放通量。泥炭沼泽中酶活性(与碳循环相关的酶)与 CO₂ 释放通量的相互关系及其机制仍有待深入研究。

土壤温度可以通过影响微生物活动间接影响酶活性,也可以通过改变酶动力学直接影响酶活性^[17]。水位变化则可以导致氧化还原条件、微生物活性、湿度等因素的改变从而影响酶活性。水热条件变化对酶活性的影响是一个综合的生物化学过程,没有哪个单一的影响因素可以解释酶活性对水热条件变化的响应。因此,必须对影响酶活性的多种因素进行综合研究,以确定各种影响因素对酶活性变化的贡献。另外,泥炭沼泽作为一个巨大的碳库,在全球变化的影响下,其作为“碳汇”或者“碳源”的功能与时间尺度有重要的关系。实验室的模拟研究或者短期的野外研究只能反映一定时间范围内其有机碳对环境条件变化的响应。要想更加科学合理地评估北方泥炭沼泽对全球变化的响应,还需要进行大量的、长期性的野外实验研究。

致谢: 张然、吴言根在野外采样工作中给予了协助,胡晓芳参与了实验分析工作,作者在此一并致谢。

参考文献:

- [1] GORHAM E. Northern Peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming [J]. *Ecological Applications*, 1991, 1: 182-195.
- [2] TOBERMAN H, CHRIS D E, FREEMAN C, et al. Summer drought effects upon soil and litter extracellular phenol oxidase activity and soluble carbon release in an upland Calluna heathland[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40: 1519-1532.
- [3] LAIHO R. Decomposition in peatlands: Reconciling seemingly contrasting results on the impacts of lowered water levels [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38: 2011-2024.
- [4] SHACKLE V J, FREEMAN C, REYNOLDS B. Carbon supply and the regulation of enzyme activity in constructed wetlands[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32: 1935-1940.
- [5] FREEMAN C, OSTLE N J, FENNER N, et al. A regulatory role for phenol oxidase during decomposition in peatlands[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36: 1663-1667.
- [6] 向武, Chris Freeman. 北方泥炭沼泽中酚类释放的热敏感性研究 - 以英国威尔士地区雨养和矿养泥炭沼泽为例[J]. *地球化学*, 2008, 37(2): 157-164.
- [7] XIANG Wu, FREEMAN C. Temperature sensitivity of phenolics production in north peatlands: A case study of Bog and Fen in Wales, UK [J]. *Geochimica*, 2008, 37(2): 157-164.
- [8] BURKE M, CAIRNEY J W G. Laccases and other polyphenol oxidases in ecto- and ericoid mycorrhizal fungi[J]. *Mycorrhiza*, 2002, 12: 105-116.
- [9] FENNER N, FREEMAN C, REYNOLDS B. Observations of seasonally shifting thermal optimum in peatland carbon-cycling processes; implications for the global carbon cycle and soil enzyme methodologies[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37: 1814-1821.
- [10] SARDANS J, PENUELAS J, ESTIARTE M. Changes in soil enzymes related to C and N cycle and in soil C and N content under prolonged warming and drought in a Mediterranean shrubland[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 39: 223-235.
- [11] BUBIER J L, CRILL P M, MOORE T R, et al. Seasonal patterns and controls on net ecosystem CO₂ exchange in a boreal peatland complex[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1998, 12: 703-714.
- [12] 史书杰. 小兴安岭红星林业局不同泥炭类型理化性质与酶活性的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2003:1-14.
- [13] SHI Shujie. The Studies on the Physical and Chemical Properties and Enzyme Activities of Different Turfs of Hongxing Forestry Bureau in Xiaoxingan Mountain[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2003:1-14.
- [14] 章家恩. 生态学实验常用技术与方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 166-167.
- [15] ZHANG Jiaen. The commonly used methods and technology of Ecology experiments[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007:166-167.
- [16] PIND A, FREEMAN C, LOCK M A. Enzymatic degradation of phenolic materials in peatlands- measurement of phenol oxidase activity[J]. *Plant and Soil*, 1994, 159: 227-231.
- [17] 赵美萍, 邵敏. 环境化学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005:14-16.
- [18] ZHAO Meiping, SHAO Min. Environmental Chemistry [M]. Beijing: Peking University Press, 2005:14-16.
- [19] BONNETT S A F, OSTLE N, FREEMAN C. Seasonal variations in decomposition processes in a valley-bottom riparian peatland[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 370: 561-573.
- [20] 常建国, 刘世荣, 史作民, 等. 锐齿栎林土壤呼吸对土壤水热变化的响应[J]. *林业科学*, 2006, 42(12): 21-27.
- [21] CHANG Jianguo, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al. Response of Soil Respiration to Soil Temperature and Moisture Regimes in the Natural Forest of Quercus aliena var. acuteserrata[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(12): 21-27.
- [22] FREEMAN C, KANG H. Phosphatase and arylsulphatase activities in wetland soils: annual variation and controlling factors[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31:449-54.

The responses of enzyme activities to temperature and water level changes and the relationship between enzyme activity and CO₂ emission flux in peatlands: A case study in Xiao'Xing'An'Ling mountain area.

HE Ling¹, XIANG Wu^{1,2}, SUN Xingting¹, ZHAO Yulong¹

1. The Faculty of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The responses of two enzyme activities, β -glucosidase and phenol oxidase, to temperature and water level changes, and the relationship between the enzyme activity and CO₂ emission flux in two typical peatlands, marsh and bog, which located in Xiao'Xing'An'Ling mountain area, were investigated with laboratory incubation experiments. The results indicated that soil enzyme activities were affected by confounding factors. The activities of β -glucosidase were regulated mainly by water level within limits. Further more, the activities of β -glucosidase were regulated more by temperature in peatlands with soil moisture decreasing. The effect of temperature on the activity of phenol oxidase was remarkable, but exhibited obviously seasonal variations. In comparison, the activities of β -glucosidase and phenol oxidase were higher in marsh than in bog under the same incubation conditions. However, The CO₂ emission fluxes were lower in marsh than in bog, implying that soil enzyme activities can not independently be used as a parameter indicating CO₂ fluxes.

Key words: peatlands; enzyme activity; CO₂ emission flux; carbon cycle; global change