

周璞 魏亮 魏晓梦 等. 稻田土壤  $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶活性对温度变化的响应特征[J]. 环境科学研究, 2018, 31(7): 1282-1288.

ZHOU Pu, WEI Liang, WEI Xiaomeng *et al.* Responses of  $\beta$ -1,4-glucosidase activity to temperature changes in paddy soil [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(7): 1282-1288.

## 稻田土壤 $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶活性对温度变化的响应特征

周 璞<sup>1,2</sup>, 魏 亮<sup>2</sup>, 魏晓梦<sup>2</sup>, 祝贞科<sup>2,3</sup>, 袁红朝<sup>2</sup>, 李巧云<sup>1\*</sup>, 吴金水<sup>2</sup>

1. 湖南农业大学生物科学技术学院, 湖南 长沙 410128

2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 湖南 长沙 410125

3. 湖南省农业科学院, 农业部长江中游平原农业环境重点实验室, 湖南 长沙 410125

**摘要:** 温度是土壤酶活性的关键非生物影响因子, 调控着土壤物质周转过程. 为了探究温度变化对稻田土壤有机质周转及其关键胞外酶活性的影响, 设计室内培养试验, 分别在 5、15、25 和 35 °C 下测定亚热带稻田土壤 BG ( $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶) 活性. 探究温度对土壤胞外酶活性及其与碳氮转化过程的影响特征. 结果表明: 稻田土壤中  $w(\text{DOC})$  (DOC 为可利用态碳)、 $w(\text{NH}_4^+\text{-N})$  和  $w(\text{MBC})$  (MBC 为微生物量碳) 在 5~25 °C 下随着培养时间的增加而降低. 在第 15 天时 BG 活性达到 306.57~437.75 nmol/(g·h), 并随温度的增加表现为先增后减. 在第 3、75 天时, 25 °C 下 BG 活性为 184.46~207.60 nmol/(g·h). 土壤酶活性的  $Q_{10}$  (温度敏感性) 在 15 °C 升至 25 °C 时表现出正响应 ( $Q_{10}=1.5$ ), 而在 5~15 °C 和 25~35 °C 时  $Q_{10}<1$  表现为消除效应. 土壤酶活性的变化是多因素共同影响的结果, 温度作为关键影响因子, 升温显著改变了土壤中  $w(\text{DOC})$ 、 $w(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 、 $w(\text{MBC})$ 、 $w(\text{MBN})$  (MBN 为微生物量氮), 进而影响土壤 BG 活性; 土壤中  $w(\text{MBC})$  对 BG 活性具有直接的显著负影响作用. 研究显示, 对参与稻田土壤碳转化 BG 酶活性的温度敏感性及其与土壤关键理化因子之间的耦合关系进行量化, 有助于深入开展水稻土碳循环及其调控机制研究.

**关键词:** 稻田土壤; 土壤温度; 可利用态养分;  $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶活性; 温度敏感性

中图分类号: X144

文章编号: 1001-6929(2018)07-1282-07

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2018.01.13

## Responses of $\beta$ -1,4-Glucosidase Activity to Temperature Changes in Paddy Soil

ZHOU Pu<sup>1,2</sup>, WEI Liang<sup>2</sup>, WEI Xiaomeng<sup>2</sup>, ZHU Zhenke<sup>2,3</sup>, YUAN Hongzhao<sup>2</sup>, LI Qiaoyun<sup>1\*</sup>, WU Jinshui<sup>2</sup>

1. College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agriculture University, Changsha 410128, China

2. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

3. Key Laboratory for Agro-Environment in Midstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture, Changsha 410125, China

**Abstract:** As a key biotic factor, temperature affects the soil enzyme activity and regulates soil carbon (C) and nitrogen (N) cycling. In order to clarify the response of temperature changes to the  $\beta$ -1,4-glucosidase (BG) enzyme, which mainly involves in soil C and N turnover, an incubation experiment was conducted at 5, 15, 25 and 35 °C, respectively. The results showed that soil dissolved organic carbon (DOC), ammonium nitrogen ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) and soil microbial biomasses were decreased over time at 5 and 25 °C. The maximal enzyme activity potential of glucosidase was ranged in 306.57-437.75 nmol/(g·h) at 15 days after incubation. On the contrary, the highest activity of BG was 184.46-207.60 nmol/(g·h) at 25 °C on the 3<sup>rd</sup> and 75<sup>th</sup> day, and the high temperature sensitivity of BG was observed at 15-25 °C ( $Q_{10}=1.5$ ), while the cancelling effects of enzyme activity ( $Q_{10}<1$ ) was observed both at 5-15 °C and 25-35 °C, respectively. The change of soil enzyme activity was effected by multi-factors, and the increase of temperature stimulated soil microbial activities. As a result, temperature changed DOC and  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  content and exaggerated soil microbial biomass triggering changes in glucosidase activity. The study results quantified the temperature sensitivity of soil enzymes involved in the carbon conversion of paddy soil and their coupling with soil physical-chemical factors, which is of great significance for further carrying out the carbon cycle and regulation mechanism of paddy soil.

收稿日期: 2017-11-29

修订日期: 2018-01-21

作者简介: 周璞(1990-) 男, 湖南邵阳人, zplpcapb@163.com.

\* 责任作者 李巧云(1960-) 女, 山西运城人, 博士, 副教授, 主要从事环境生态学研究, 1065596897@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41501321); 湖南省自然科学基金项目(No.2016JJ3132); 农业部长江中游平原农业环境重点实验室开放基金

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.41501321); Natural Science Foundation of Hunan Province, China (No.2016JJ3132);

Ministry of Agriculture Key Laboratory of Agro-Environment of the Yangtze River Plain Open Fund, China

**Keywords:** paddy soil; soil temperature; soil available nutrient content;  $\beta$ -1,4-glucosidase; temperature sensitivity

随着工业发展、化石燃料燃烧及土地利用方式改变等人类活动的加剧,导致全球气温明显增加<sup>[1-3]</sup>. IPCC(2013) 报告<sup>[4]</sup> 预测,至 2100 年地表温度将会升高 1.4~5.8 °C. 全球升温将会增加土壤微生物呼吸活性,促进土壤碳的排放,使土壤由原有的碳汇变成碳源,从而降低土壤肥力<sup>[1]</sup>. 全球变暖导致的土壤温度升高可能会对陆地生态系统土壤生态过程产生深刻而复杂的影响,其中最直接的表现则是增加土壤微生物活性,增加温室气体排放,降低土壤有机碳含量<sup>[5-6]</sup>.

土壤微生物呼吸作用本质上是一系列酶促反应,土壤酶是土壤生态过程的重要组成部分,也是土壤新陈代谢的主要参与者,在地下生态系统中的起着十分重要的作用,推动着物质转化和能量流动,其活性大小表征着土壤肥力高低及养分循环速率快慢<sup>[7]</sup>. 土壤微生物胞外酶种类繁多,深度参与土壤有机质的转化过程,其中 BG( $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶) 主要是由以纤维素为底物的微生物分泌,它能够把纤维素分解为多糖,供微生物自身生长利用<sup>[8]</sup>; 因此, BG 本身作为土壤中重要的水解酶类,能够指示以土壤中有机或无机碳为底物的异养型呼吸强度.

土壤酶活性受到诸多环境因子的制约. 温度是影响土壤酶活性的一个关键非生物因子,全球变暖会改变土壤酶活性,从短期来讲全球变暖能显著增加酶促反应速率,加快土壤微生物的呼吸作用<sup>[7-8]</sup>. 而从长期来讲,全球变暖使土壤微生物群落对环境进行适应性演化,相应地胞内酶与胞外酶活性出现适应性转变,从而降低其在高温下的生理活性. 这主要体现在酶活性最适温度随温度的升高而增加以及  $Q_{10}$ (温度敏感性) 随温度的升高而降低两方面<sup>[3]</sup>. 如 Fenner 等<sup>[9]</sup> 在不同温度梯度下培养土壤,发现随着培养温度的升高,土壤多酚氧化酶和葡萄糖酶活性的最适温度也呈显著的上升趋势; 而 Nottingham 等<sup>[10]</sup> 发现,在秘鲁安第斯山脉中土壤  $\beta$ -葡萄糖苷酶和木聚糖酶的温度敏感性与年均温度呈显著负相关.

一般来说,来自植物的 BG 最适温度在 40 °C 左右,而由于土壤的高度异质性和植物-土壤-微生物系统的复杂性,土壤 BG 活性的最适温度仍存在争议. Razavi 等<sup>[11]</sup> 在不同温度下测定了耕地土壤 BG 活性,结果表明在 0~40 °C 范围内 BG 活性随温度的增加而增加. Sardans 等<sup>[12]</sup> 通过长期(1999—2005 年) 增温和干旱对地中海灌丛土壤酶活性的影响进行为期 1 a 的研究,发现增温会不同程度地增加土壤酶活性,且

主要通过对土壤温度和土壤含水量的改变来实现,而不是改变土壤有机质数量和营养状况. 可见短期增温(一个或多个生长季,或 1 a) 情况下,土壤温度升高会增加土壤酶活性. 温度对土壤酶活性的影响可能是通过增加土壤铵态氮和硝态氮有效性以及活跃真菌的总体多样性等方面实现<sup>[3]</sup>. 稻田作为一个典型的人工氧化还原生态系统,目前针对稻田土壤 BG 温度敏感性的研究并不多, BG 活性对温度升高的响应特征仍需深入研究.

该研究选择典型水稻土,在 4 个温度梯度(5、15、25 和 35 °C) 下进行培养试验. 选择与土壤呼吸相关的 BG 测定其动力学特征,分析不同培养阶段 BG 活性对温度的响应及其与土壤碳氮含量的耦合特征; 综合分析培养温度和时间效应对 BG 活性的影响,以期为全球变化背景下稻田土壤碳库变化特征提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤概况

采样点位于湖南省浏阳市北部北盛镇,该地区属亚热带季风气候,平均气温 16.3 °C,平均降水量 1 430 mm,年日照时数 1 519 h,土壤类型为花岗岩母质发育而成的第四纪红土红壤. 2016 年 3 月,用直径 5 cm 的不锈钢土钻采集舒化程度基本相近的典型水稻土耕作层(0~20 cm) 土壤,除去可见植物残体、石块以及土壤动物等,室内风干,过 2 mm 尼龙筛,常温储存.

供试土壤基本理化性质: pH 为 5.78,阳离子交换量(CEC) 为 9.00 cmol/kg,  $\mu$ (SOC) (SOC 为土壤有机碳) 为 11.77 g/kg,  $\mu$ (MBC) (MBC 为微生物生物量碳) 为 440 mg/kg,  $\mu$ (TN) 为 1.13 g/kg,  $\mu$ ( $\text{NH}_4^+$ -N) 为 20.8 mg/kg,  $\mu$ (MBN) (MBN 为微生物生物量氮) 为 44.5 mg/kg,  $\mu$ (TP) 为 0.343 g/kg,  $\mu$ (速效磷) 为 1.9 mg/kg, C/N 为 10.4,黏粒、粉粒和砂粒占比分别为 68.36%、24.13%和 7.51%.

### 1.2 试验设计

取风干过筛的土壤样品,分装在 4 个 PVC 容器中,淹水 2~3 cm,分置于 5、15、25 和 35 °C 下淹水预培养 14 d. 培养结束后,将 PVC 容器中的土样(干土) 以 80 g/瓶分装到 250 mL 塑料瓶中,向瓶中加入 160 mL 水,将塑料瓶剩余空间用高纯  $\text{N}_2$  置换完全后保持密封,并置于相应的培养温度下继续培养,每个处理 12 个重复. 在培养开始后的第 3、15、75 天进行 3 次破坏性采样,每个处理随机取出 4 个瓶子,分别采集其中土样用于土壤含水率、碳氮含量、微生物生

物量和酶活性测定.

### 1.3 测定方法

在培养第3、15和75天采样时,土壤理化指标测定方法均参照文献[13]:用Mettler-toledo320 pH计按水土比1:2.5测定土壤pH;阳离子交换量采用乙酸铵交换法测定; $w(\text{SOC})$ 和 $w(\text{TN})$ 采用碳氮元素分析仪(VARIO MAX C/N,德国)测定(干烧法); $w(\text{TP})$ 采用氧化钠熔融法紫外分光光度计(UV-2450,日本)测定;土壤机械组成采用比重计法测定. $w(\text{MBC})$ 采用氯仿熏蒸提取-碳自动分析法测定<sup>[14]</sup>,同时测定未熏蒸土壤对照,得到土壤 $w(\text{DOC})$ (DOC为溶解性有机碳).以熏蒸与未熏蒸土样提取的 $w(\text{SOC})$ 差值乘以转换系数( $K_c=0.45$ )得到土壤 $w(\text{MBC})$ .采用0.5 mol/L的 $\text{K}_2\text{SO}_4$ 溶液浸提土壤MBN和 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,采用流动注射仪(Fiastar 5000,瑞典福斯)测定二者含量.土壤胞外酶活性测定采用96微孔酶标板荧光分析法<sup>[15]</sup>,多功能酶标仪(Scientific Fluoroskan Ascent FL, Thermo, Switzerland)在激发波

长365 nm、发射波长450 nm的条件下测定,最终用米氏方程(Michaelis-Menten)拟合得到土壤酶的 $V_{\max}$ (最大活性潜势)、 $K_m$ (土壤酶亲和力),二者的比值即为 $K_a$ (催化效率).

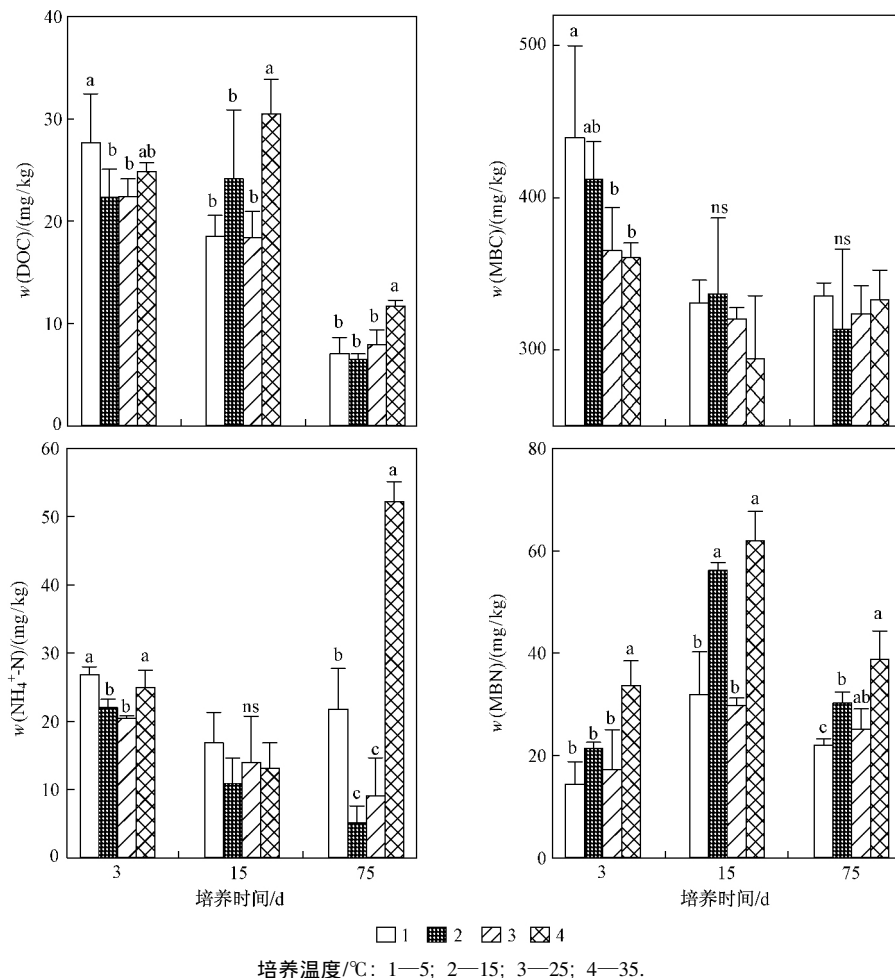
### 1.4 数据处理和统计分析

采用Sigmaplot 12.5、Microsoft Excel 2013和SPSS 21.0进行数据处理和统计分析( $P<0.05$ ),不同处理显著性用One-way ANOVA(单因素方差分析)进行检验,采用Duncan多重比较分析组间差异,结构方程模型用Amos 17.0进行分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同温度条件下土壤碳氮含量的变化特征

稻田土壤中 $w(\text{DOC})$ 和 $w(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 在5、15和25℃下均随着培养时间延长而降低,但35℃下随培养时间的延长, $w(\text{DOC})$ 表现为先增后减, $w(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 则为先减后增;土壤 $w(\text{MBC})$ 随培养时间延长而降低(见图1).在培养试验的第3天,



注:不同小写字母表示相同采样时间各处理间在 $P<0.05$ 水平上差异显著;ns为无显著差异.

图1 不同温度下土壤 $w(\text{DOC})$ 、 $w(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、 $w(\text{MBC})$ 、 $w(\text{MBN})$

Fig.1 Contents of soil DOC,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , MBC and MBN under different incubation temperatures

$w$  (MBC) 随温度的升高显著降低, 温度升高显著增加了  $w$  (MBN). 在 4 个温度条件下  $w$  (MBN) 均随培养时间延长表现为先升(3~15 d) 后降(15~75 d); 而在不同温度条件下  $w$  (MBN) 均表现为 15 和 35 °C 分别高于 5 和 25 °C. 在第 15 天时, 15 和 35 °C 条件下的  $w$  (MBN) 均分别是 5 和 25 °C 下的 2 倍.

2.2 不同温度条件下土壤 BG 活性的变化特征

培养温度以及培养时间均影响土壤 BG 活性( 见图 2 和表 1). BG 活性在 3 个采样时期均随温度的增加表现为先增后减, 在第 3 和 75 天时, 25 °C 条件下

BG 活性最大值为 184.46~207.60 nmol/(g·h). 在培养初期, 35 °C 时 BG 活性被抑制, 但是随着时间的延长 BG 活性恢复到最大. BG 活性随培养时间延长表现为先升后降, 在 15 d 时达到最高, 为 306.57~437.75 nmol/(g·h). 培养初期相对高温条件下  $K_m$  显著高于低温, 随着培养时间延长, 温度处理间的差异性逐渐降低. 低温下 BG 的  $K_a$  更高, 但仅在第 3 天时对温度表现出显著差异 ( $P < 0.05$ ).

表 1 不同培养温度土壤 BG 活性动力学参数

Table 1 Kinetic parameters of soil  $\beta$ -1 *A*-glucosidase under different incubation temperatures

时间	培养温度/ °C	$V_{max}$ / [nmol/(g·h)]	$K_m$ / ( $\mu$ mol/g)	$K_a$
第 3 天	5	135.61±25.09 <sup>b</sup>	17.48±4.65 <sup>c</sup>	8.08±1.97 <sup>a</sup>
	15	110.75±9.41 <sup>c</sup>	16.89±1.60 <sup>c</sup>	6.63±1.13 <sup>a</sup>
	25	184.46±7.95 <sup>a</sup>	47.83±3.41 <sup>a</sup>	3.87±0.29 <sup>b</sup>
	35	87.32±1.26 <sup>d</sup>	25.86±1.68 <sup>b</sup>	3.39±0.21 <sup>b</sup>
第 15 天	5	336.83±23.03 <sup>b</sup>	44.98±7.26 <sup>a</sup>	7.67±1.55
	15	306.57±33.15 <sup>b</sup>	32.63±1.67 <sup>b</sup>	9.39±0.84
	25	404.58±42.40 <sup>a</sup>	45.88±6.53 <sup>a</sup>	8.86±0.53
	35	437.75±26.07 <sup>a</sup>	51.82±2.31 <sup>a</sup>	8.47±0.81
第 75 天	5	162.33±36.01 <sup>ab</sup>	52.48±11.36	3.15±0.73 <sup>a</sup>
	15	205.58±95.68 <sup>a</sup>	69.26±14.57	3.58±1.97 <sup>a</sup>
	25	207.60±29.72 <sup>a</sup>	70.83±13.64	3.15±0.91 <sup>a</sup>
	35	114.29±19.63 <sup>b</sup>	55.49±10.18	2.11±0.47 <sup>b</sup>

注: 拟合曲线  $R^2 > 0.9$ ; 相同培养时间内不同温度的 Duncan 多重比较 ( $P < 0.05$ ), 无显著差异的未标出.

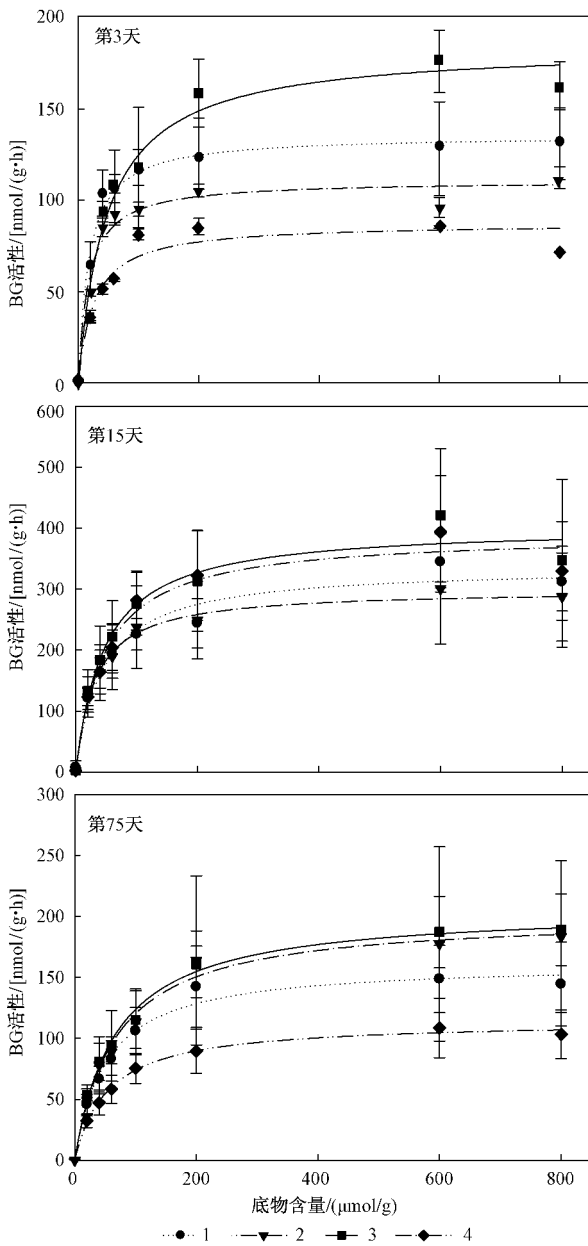
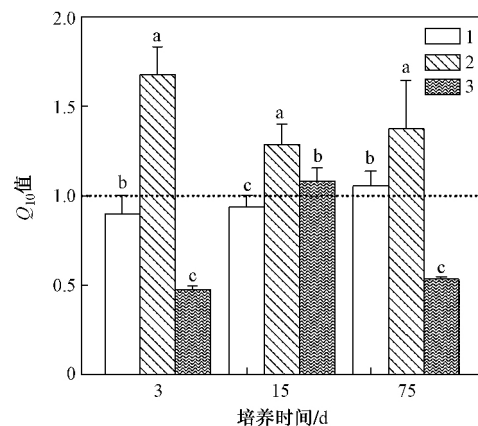


图 2 不同培养温度土壤 BG 活性动力学特征

Fig.2 Enzyme kinetics of  $\beta$ -1 *A*-glucosidase under different incubation temperatures

2.3 土壤酶活性的温度敏感性

BG 活性对温度变化响应明显,  $Q_{10}$  值在 3 个温度区间存在显著差异( 见图 3). BG 活性对温度的响应主要是在 15~25 °C 时表现出正响应, 其  $Q_{10}$  值约为



注: 图中虚线为  $Q_{10} = 1$  的临界值.

温度/°C: 1—5~15; 2—15~25; 3—25~35.

图 3 BG 活性的  $Q_{10}$  值

Fig.3 Temperature sensitivity ( $Q_{10}$ ) of  $\beta$ -1 *A*-glucosidase activity

1.5; 在 5~15 °C 和 25~35 °C 时, BG 活性  $Q_{10}$  值小于 1 表现为消除效应,即在低温和高温阶段 BG 活性对温度变化不敏感.

2.4 土壤生物化学因子对土壤酶活性的影响

土壤酶活性的变化是多因素共同影响的结果,培养温度和时间及其交互作用均对土壤 BG 活性有显著影响(见表 2),而时间为主要因素. BG 活性与  $w(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、 $w(\text{MBC})$  和  $w(\text{MBN})$  均呈显著相关性 ( $P < 0.01$ ).

对影响 BG 活性的可利用态养分进行结构方程模型分析(见图 4)发现,土壤  $w(\text{NH}_4^+-\text{N})$  和  $w(\text{DOC})$

表 2 培养时间和温度对土壤 BG 活性影响的多重比较

Table 2 Effects of incubation time and temperature on soil glucosidase activity

因素	df	F	P
培养时间	2	195.214	<0.001
培养温度	3	6.637	0.001
时间×温度	6	7.379	<0.001

主要通过影响土壤  $w(\text{MBN})$  进而影响 BG 活性,而  $w(\text{MBC})$  对 BG 活性具有直接显著负影响,  $w(\text{MBC})$  和  $w(\text{MBN})$  之间具有显著负相关关系,该模型解释了 BG 活性 57% 的变异.

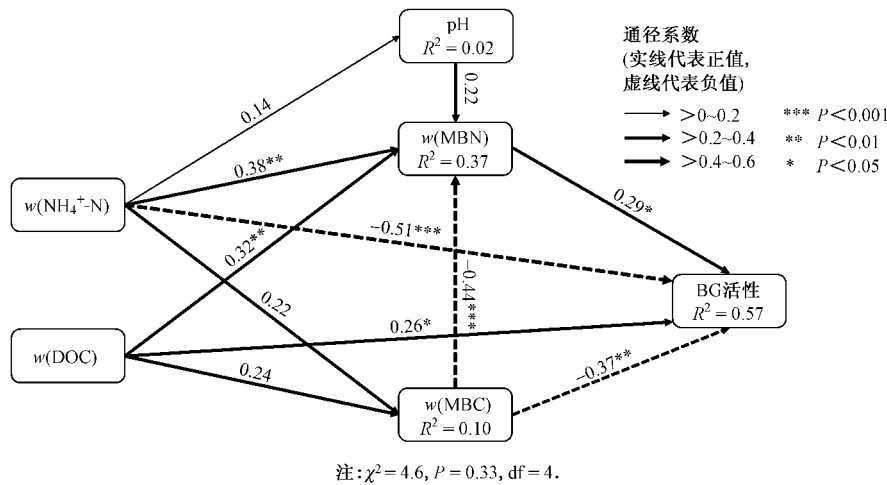


图 4 影响 BG 活性的结构方程模型分析

Fig.4 A structural equation model assessing the multivariate effects on  $\beta$ -1 *A*-glucosidase activity

3 讨论

3.1  $\beta$ -1 *A*-葡萄糖苷酶活性对温度变化的响应特征

土壤酶是土壤生态系统物质循环和能量流动的积极参与者,全球气候变化深刻地影响地下生态系统的生物地球化学过程,而土壤酶在其中扮演着十分重要的角色<sup>[8]</sup>. 土壤酶活性变化反映了土壤分解者群落对环境变化的响应,而温度往往是影响土壤酶活性的重要环境因子<sup>[16-17]</sup>. 土壤酶活性与温度变化通常是一个先升高后降低的过程,即在一定温度范围内酶活性随着温度的升高而升高,到达最适温度后土壤酶活性下降,但是不同酶的最适温度存在差异. 秦纪洪等<sup>[18]</sup>对四川亚高山林地土壤 BG 温度敏感性研究中发现,在 0~37 °C 范围内 2~5 °C 为温度最敏感范围,而 15~25 °C 次之. 笔者发现,在稻田土壤中 BG 活性在 5~25 °C 区间逐渐增加,而温度继续增至 35 °C 时抑制了 BG 活性. 而且, BG 活性在 5~25 °C 区间对温度的敏感性也最大 ( $Q_{10} = 1.67$ ) (见图 3). 这表明 BG

活性及其对温度的响应受到生态系统类型、土壤微生物群落、土壤水分、底物质量和数量等方面的影响<sup>[19-21]</sup>. 该研究中对影响 BG 活性的多因素分析(见图 4)也发现,稻田土壤 BG 活性受到生物和非生物因子的共同影响. 在一定温度范围内,土壤酶的温度敏感性随温度增加而增加,可能是因为在不同温度条件下,土壤微生物和动物群落组成结构和呼吸作用等间接地影响土壤酶活性. 此外,随温度的升高土壤  $w(\text{MBN})$  增加(见图 1),表明增温增加了土壤微生物生物量,可能增加了土壤微生物特定功能种群数量和丰富度<sup>[16, 22-23]</sup>,刺激了土壤胞外酶的产生,进而增加其活性.

3.2 温度对稻田土壤碳氮转化及其  $\beta$ -1 *A*-葡萄糖苷酶活性的影响特征

土壤温度影响酶活性和碳氮转化过程,对土壤微生物生物量及其种群也有着显著影响<sup>[24-25]</sup>. 在试验初期(第 3 天)  $w(\text{MBC})$  随温度的升高显著降低,且

随着培养时间的延长而降低; 温度升高显著增加了  $w$ (MBN) (第3~15天), 表明在培养初期微生物消耗氮素, 加大土壤氮素的固持的同时也加速了土壤原有有机碳的分解, 从而降低土壤  $w$ (DOC). 而在培养后期(第15~75天), 由于微生物的分解利用, 土壤  $w$ (DOC) 持续降低, 易利用态碳源的受限抑制了微生物生长, 进而降低了微生物氮素固持.

酶是微生物利用土壤中碳氮元素的动力, 微生物能通过酶促反应促进土壤中碳氮的转化<sup>[7-8]</sup>, 增加  $w$ (DOC) 和  $w$ ( $\text{NH}_4^+$ -N) 供给自身营养和繁殖生长. 结构方程模型分析表明  $w$ (DOC) 和  $w$ ( $\text{NH}_4^+$ -N) 是影响土壤 BG 活性的重要因子, 也能够通过影响土壤微生物而影响土壤 BG 活性的变化.  $w$ (DOC)、 $w$ (MBC) 均与 BG 活性表现出相反的关系表明, 土壤易利用态碳是微生物生长的限制因子, 较高的  $w$ (DOC) 增加微生物量而降低 BG 活性. 同时, 多重比较分析也发现培养时间对 BG 活性的影响效应大于温度对其的影响(见表2), 表明在培养初期, 微生物有足够可利用的底物, 降低了 BG 活性; 而培养试验后期, 随着温度的增加和土壤呼吸不断消耗土壤中的有机碳<sup>[26-27]</sup>, 降低了土壤中可利用态有机物, 为了满足自身生长的需要, 微生物加快分泌土壤 BG<sup>[8, 28-30]</sup>, 使得 BG 活性显著大于试验初期的活性. 研究四季气温变化分明的亚热带典型稻田土壤碳氮转化关键酶活性的温度响应特征, 对于优化田间肥料投入管理和保持土壤肥力具有重要的理论意义.

#### 4 结论

a) 土壤碳氮转化是在微生物作用下多因素相互作用的过程, 土壤酶作为碳氮转化的直接参与者, 调控土壤微生物碳氮的平衡. 在培养初期, 稻田土壤  $w$ (DOC) 和  $w$ (MBC) 随时间的延长和温度的增加而降低, 后期  $w$ (MBC) 在温度间无显著差别, 底物可利用性限制因素强于温度对酶活性的影响.

b) 土壤温度作为土壤酶活性重要的非生物影响因素, 温度升高通过增加微生物活性, 改变土壤  $w$ (DOC) 和  $w$ ( $\text{NH}_4^+$ -N), 同时改变土壤  $w$ (MBC) 和  $w$ (MBN) 进而影响土壤 BG 活性, 且土壤  $w$ (MBC) 对 BG 活性具有直接的显著负影响作用.

#### 参考文献(References):

[1] BONDLAMBERTY B, THOMSON A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record[J]. *Nature* 2010, 464(7288): 579-582.

[2] REINSCH S, AMBUS P, THORNTON B, *et al.* Impact of future climatic conditions on the potential for soil organic matter priming

[J]. *Soil Biology & Biochemistry* 2013, 65(4): 133-140.

[3] WHITBY T G, MADRITCH M D. Native temperature regime influences soil response to simulated warming[J]. *Soil Biology & Biochemistry* 2013, 60: 202-209.

[4] IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change: the physical science basis. Working Group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. summary for policy makers [R]. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change 2013: 13-67.

[5] BOSATTA E, ÅGREN G I. Soil organic matter quality interpreted thermodynamically [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31(13): 1889-1891.

[6] BARRETT J E, BURKE I C. Potential nitrogen immobilization in grassland soils across a soil organic matter gradient [J]. *Soil Biology & Biochemistry* 2000, 32(11): 1707-1716.

[7] DEFOREST J L. The influence of time, storage temperature, and substrate age on potential soil enzyme activity in acidic forest soils using MUB-linked substrates and l-DOPA [J]. *Soil Biology & Biochemistry* 2009, 41(6): 1180-1186.

[8] SINSABAUGH R L, SHAH J J F. Ecoenzymatic stoichiometry and ecological theory [J]. *Annual Review of Ecology Evolution & Systematics* 2012, 43(1): 313-343.

[9] FENNER N, FREEMAN C, LOCK M A, *et al.* Interactions between elevated  $\text{CO}_2$  and warming could amplify DOC exports from peatland catchments [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(9): 3146-3152.

[10] NOTTINGHAM A T, TURNER B L, WHITAKER J, *et al.* Temperature sensitivity of soil enzymes along an elevation gradient in the Peruvian Andes [J]. *Biogeochemistry* 2016, 127(2/3): 217-230.

[11] RAZAVI B S, BLAGODATSKAYA E, KUZYAKOV Y. Temperature selects for static soil enzyme systems to maintain high catalytic efficiency [J]. *Soil Biology & Biochemistry* 2016, 97: 15-22.

[12] 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(2): 223-235.

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2005.

[14] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用 [M]. 北京: 气象出版社, 2006.

[15] SAIYACORK K R, SINSABAUGH R L, ZAK D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil [J]. *Soil Biology & Biochemistry* 2002, 34(9): 1309-1315.

[16] CREAMER C A, MENEZES A B D, KRULL E S, *et al.* Microbial community structure mediates response of soil C decomposition to litter addition and warming [J]. *Soil Biology & Biochemistry* 2015, 80: 175-188.

[17] ERHAGEN B, ILSTEDT U, NILSSON M B. Temperature sensitivity of heterotrophic soil  $\text{CO}_2$  production increases with increasing carbon substrate uptake rate [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 80: 45-52.

- [18] 秦纪洪,张文宣,王琴,等.亚高山森林土壤酶活性的温度敏感性特征[J].土壤学报,2013,50(6):1241-1245.  
QIN Jihong,ZHANG Wenxuan,WANG Qin,*et al.* Temperature sensitivity of enzyme activity in subalpine forest soil in southwest China[J].Acta Pedologica Sinica,2013,50(6):1241-1245.
- [19] POWER J M,WETTENHALL R L.Does a general temperature-dependent  $Q_{10}$  model of soil respiration exist at biome and global scale? [J].Journal of Integrative Plant Biology Formerly Acta Botanica Sinica,2005,47(11):1288-1302.
- [20] 于昊天,黄时豪,刘亚军,等.鄱阳湖湿地土壤酶及微生物生物量的剖面分布特征[J].环境科学研究,2017,30(11):1715-1722.  
YU Haotian,HUANG Shihao,LIU Yajun,*et al.* Profile distribution characteristics of soil enzymes and microbial biomass in the Poyang Lake Wetland [J].Research of Environmental Sciences,2017,30(11):1715-1722.
- [21] 辛芝红,李君剑,赵小娜,等.煤矿区不同复垦年限的土壤有机碳矿化和酶活性特征[J].环境科学研究,2017,30(10):1580-1586.  
XIN Zhihong,LI Junjian,ZHAO Xiaona,*et al.* Characteristics of soil organic carbon mineralization and enzyme activities in coal mining area different reclamation times [J].Research of Environmental Sciences,2017,30(10):1580-1586.
- [22] ANDREWS J A,MATAMALA R,WESTOVER K M,*et al.* Temperature effects on the diversity of soil heterotrophs and the  $\delta^{13}\text{C}$  of soil-respired  $\text{CO}_2$  [J].Soil Biology & Biochemistry,2000,32(5):699-706.
- [23] 贾璇,任连海,李鸣晓,等.芦苇酶解对氢气-甲烷联产过程微生物群落演替规律的影响[J].环境科学研究,2016,29(1):138-145.  
JIA Xuan,REN Lianhai,LI Mingxiao,*et al.* Effects of enzymatic pretreatment on microbial community succession in hydrogen and methane coproduction from reed straw [J].Research of Environmental Sciences,2016,29(1):138-145.
- [24] VANHALA P,KARHU K,TUOMO M,*et al.* Temperature sensitivity of soil organic matter decomposition in southern and northern areas of the boreal forest zone [J].Soil Biology & Biochemistry,2008,40(7):1758-1764.
- [25] ZHANG H,VORONEY R P,PRICE G W.Effects of temperature and processing conditions on biochar chemical properties and their influence on soil C and N transformations [J].Soil Biology & Biochemistry,2015,83:19-28.
- [26] 邬建红,潘剑君,葛序娟,等.不同土地利用方式下土壤有机碳矿化及其温度敏感性[J].水土保持学报,2015,29(3):130-135.  
WU Jianhong,PAN Jianjun,GE Xujuan,*et al.* Variations of soil organic carbon mineralization and temperature sensitivity under different land use type [J].Journal of Soil and Water Conservation,2015,29(3):130-135.
- [27] 许巧玲,王小毛,崔理华,等.垂直流湿地基质中酶的分布与氮磷及有机质的关系[J].环境科学研究,2016,29(8):1213-1217.  
XU Qiaoling,WANG Xiaomao,CUI Lihua,*et al.* Spatial distribution of substrate enzyme and its relationship with TN,TP and organic matter content in a vertical flow constructed wetland [J].Research of Environmental Sciences,2016,29(8):1213-1217.
- [28] ROSS D J,SPEIR T W,KETTLES H A,*et al.* Soil microbial biomass,C and N mineralization and enzyme activities in a hill pasture: influence of season and slow-release P and S fertilizer [J].Journal of Raman Spectroscopy,1995,26(1):15-26.
- [29] CUI Yongxing,FANG Linchuan,GUO Xiaobin,*et al.* Ecoenzymatic stoichiometry and microbial nutrient limitation in rhizosphere soil in the arid area of the northern Loess Plateau,China [J].Soil Biology and Biochemistry,2018,116:11-21.
- [30] 魏亮,汤珍珠,祝贞科,等.水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应[J].环境科学,2017,38(8):3489-3496.  
WEI Liang,TANG Zhenzhu,ZHU Zhenke,*et al.* Responses of extracellular enzymes to nitrogen application in rice varying ages with rhizosphere and bulk soil [J].Environmental Science,2017,38(8):3489-3496.

(责任编辑:周巧富)