

两种蛀干昆虫消化酶组成和活性比较

王健敏¹, 陈晓鸣^{1*}, 冯颖¹, 段兆尧²

(1. 中国林业科学研究院资源昆虫研究所; 国家林业局资源昆虫培育与利用重点实验室, 云南 昆明 650224

2 云南省林业科学院, 云南 昆明 650204)

摘要: 研究了松墨天牛幼虫、纵坑切梢小蠹幼虫和成虫消化酶的主要种类和活性。分析结果表明, 松墨天牛幼虫有 10 种消化酶, 纵坑切梢小蠹幼虫和成虫有 8 种消化酶。松墨天牛幼虫的消化酶活性大小排列顺序为: 果胶酶 > 淀粉酶 > Cx 酶 > 半纤维素酶 > 转化酶 > β -1, 4-葡萄糖苷酶 > Cl 酶 > 脂肪酶 > 类胰蛋白酶 > 胃蛋白酶; 小蠹幼虫和成虫不含 Cx 酶和 β -1, 4-葡萄糖苷酶, 活性顺序均为: 果胶酶 > 淀粉酶 > 半纤维素酶 > 转化酶 > Cl 酶 > 类胰蛋白酶 > 脂肪酶 > 胃蛋白酶。在 55℃、pH 值 8.6 时, 果胶酶活性最高。

关键词: 蛀干昆虫; 松墨天牛; 纵坑切梢小蠹; 消化酶

中图分类号: S763

文献标识码: A

Comparison of Components and Activity of Digestive Enzymes between Two Xylophagous Insects

WANG Jianmin¹, CHEN Xiaoming¹, FENG Ying¹, DUAN Zhao-yao²

(1. Research Institute of Resource Insects, CAF, Key Laboratory of Breeding and Utilization of

Resource Insects of State Forestry Administration, Kunming 650224, Yunnan, China

2. Yunnan Academy of Forestry, Kunming 650204, Yunnan, China)

Abstract The components and activity of digestive enzymes extracted from larvae of *Monochamus alternatus*, larvae and adults of *Tan icus piniperda* were analyzed in this paper. The results revealed that there were 10 digestive enzymes in *Monochamus alternatus* and 8 in *Tan icus piniperda*. The activity order of enzymes of larvae of *Monochamus alternatus* arranged as pectinase > amylase > endo- β -1, 4-glucanase (Cx-ase) > hemicellulase > invertase > β -1, 4-glucosidase > exo- β -1, 4-glucanase (Cl-ase) > lipase > trypsinlike enzyme > pepsin, and for larvae and adults of *Tan icus piniperda*, the activity order of enzymes arranged as pectinase > amylase > hemicellulase > invertase > exo- β -1, 4-glucanase (Cl-ase) > trypsinlike enzyme > lipase > pepsin. There were no Cx-ase and β -1, 4-glucosidase for both larvae and adults of *Tan icus piniperda*. The result pectinase had the highest activity under 55℃ and pH = 8.6.

Key words xylophagous insect; *Monochamus alternatus*; *Tan icus piniperda*; digestive enzyme

松墨天牛 (*Monochamus alternatus* Hope), 又名松褐天牛, 幼虫主要在树干和枝条的韧皮部及木质部蛀食危害, 破坏、切断输导组织, 造成树木枯死。在松材线虫疫区, 它还是松材线虫病害的主要携带

者和传播者; 松墨天牛已成为我国南方广大松林最具危险性的天牛^[1]。纵坑切梢小蠹 (*Tan icus piniperda* Linnaeus), 又叫松小蠹, 是针叶树木的主要蛀食性害虫, 主要取食树干的韧皮部和嫩梢, 广泛分

收稿日期: 2006-11-13

基金项目: 云南省自然科学基金重点项目“利用蛀干害虫作为指示昆虫诊断森林健康研究”

作者简介: 王健敏 (1982-), 男, 云南昆明人, 在读硕士生。

* 通讯作者

布于欧亚各国及美洲, 危害严重时, 虫口密度急剧上升, 造成松林大面积死亡^[2]。由于生活环境的隐蔽性, 危害性大, 纵坑切梢小蠹已经成为重要的森林害虫。前人对松墨天牛和纵坑切梢小蠹的分布危害情况、生物学、生态学和防治技术等作了大量研究工作, 但是, 这两种昆虫的消化生理生化, 特别是消化酶的种类构成和活性比较的研究未见报道, 仅见关于松墨天牛纤维素酶的相关报道^[1, 3~5]。研究蛀干昆虫消化酶, 以期阐明两种昆虫的消化生理, 弄清并比较两种昆虫消化酶的种类和活性, 明确起主要消化作用的酶及其活性的影响制约因素, 了解虫体如何利用食物中的营养物质, 可以从消化酶的角度客观地分析和反映两种昆虫对树木成分的分解利用情况、分解速度及其影响因素。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

1.1.1 昆虫来源 松墨天牛幼虫、纵坑切梢小蠹幼虫及成虫采自云南省昆明市东北郊, 取云南松虫害木段木质部中的个体大小近似、健康活跃的松墨天牛老熟幼虫供试; 纵坑切梢小蠹取饲养在华山松 (*Pinus amandi* Franch.) 木段韧皮部中的个体大小近似、龄期一致的幼虫和成虫供试。

1.1.2 实验试剂 羧甲基纤维素钠 (LR); 水杨素、木聚糖、果胶、干酪素、半乳糖醛酸、D-木糖、L-酪氨酸均为生化试剂; 医用甲级脱脂棉; 100% 特级初榨橄榄油; 可溶性淀粉 (AR); 蔗糖 (AR); 葡萄糖 (AR)。

1.2 实验设计

1.2.1 混合酶液的制备 按索风梅等^[1]和殷幼平等^[6]方法, 解剖取出松墨天牛老熟幼虫完整消化道, 在乙酸-乙酸钠缓冲液 ($0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 值 4.6) 中匀浆, 匀浆液离心后取上清液贮于 -80°C 冰箱中作为供测酶液, 以检测果胶酶、淀粉酶、纤维素酶系 (Cx 酶、C1 酶和 β -1, 4-葡萄糖苷酶)、半纤维素酶、转化酶及其活性。

检测天牛脂肪酶、胃蛋白酶和类胰蛋白酶活性时所需的混合酶液的制备方法同上, 只须参照潘鲁清等^[7]方法将溶剂乙酸-乙酸钠缓冲液体系换成重蒸水即可, 对于脂肪酶则直接取部分离心前的匀浆液进行活性测定即可。

小蠹幼虫和成虫的混合酶液制备方法与天牛的不同, 由于小蠹虫虫体较小, 不便于解剖取完整消化道, 本实验直接取整虫加溶剂进行破碎匀浆、离心。

1.2.2 酶解产物标准溶液的配制和标准曲线的绘制 (1) 葡萄糖标准溶液的配制和标准曲线的绘制: 按照生物化学实验指导^[8]的方法进行。绘出的标准曲线可用于淀粉酶、纤维素酶系和转化酶活性测定的结果。(2) 半乳糖醛酸标准溶液的配制和标准曲线的绘制: 溶液配制和曲线绘制方法同葡萄糖, 此标准曲线可用于果胶酶活性测定的结果。(3) 木糖标准溶液的配制和标准曲线的绘制: 方法同上, 此标准曲线可用于半纤维素酶活性测定的结果。(4) 酪氨酸标准溶液的配制和标准曲线的绘制: 准确称取 105°C 下干燥至恒质量的 L-酪氨酸 0.100 g 用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HCl}$ 溶解定容至 100 mL , 即为 $1 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的酪氨酸溶液。吸取 $1 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的酪氨酸标准溶液 10 mL , 用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HCl}$ 定容至 100 mL , 即得 $100 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 酪氨酸标准溶液, 用 Folin 酚显色法绘制出标准曲线。此标准曲线可用于胃蛋白酶和类胰蛋白酶活性测定的结果。

1.2.3 酶活性的测定 (1) Cx 酶、半纤维素酶、果胶酶、淀粉酶、转化酶、 β -1, 4-葡萄糖苷酶和 C1 酶均用 DNS 比色法测定酶活性。分别配制上述各酶作用的对应底物溶液: 1% 羧甲基纤维素钠、1% 木聚糖、1% 果胶、1% 可溶性淀粉、1% 蔗糖、1% 水杨素和脱脂棉, 于 50°C (C1 酶为 45°C) 下分别测定各酶的活性。以上底物溶液均用乙酸-乙酸钠缓冲液 ($0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 值 4.6) 配制。设置 1 组对照, 3 个平行组。取上述底物溶液 2 mL (C1 酶测定为每组取 50 mg 脱脂棉), 对照组加入 DNS 显色剂 1.6 mL , 于 50°C 水浴中预热 $5 \sim 10 \text{ min}$, 加入酶液 0.2 mL 混匀, 在 50°C 水浴中保温反应 30 min (C1 酶测定为 45°C 保温 24 h) 后取出, 立即加入 DNS 显色剂 1.6 mL (对照除外), 充分摇匀后于沸水浴中显色 5 min , 流水冷却, 蒸馏水定容至 20 mL , 充分混匀。以对照组为空白调零, 在 540 nm 波长下测吸光度值。根据 3 个平行组吸光度的平均值, 在相应的标准曲线上查出对应的还原糖含量, 按下式计算酶活性。以实验条件下单位虫体质量 (g)、单位时间 (h) 由底物经酶促反应生成 $1 \mu\text{mol}$ 还原糖所需的酶量定义为一个酶活力单位 (U)^[1, 7, 9~10]。

$$\text{酶活力} (\text{U} \cdot \text{g}^{-1}) = \frac{\text{还原糖含量} / \text{mg} \times \text{酶液定容总体积} / \text{mL} \times \text{稀释倍数} \times 10^3}{\text{酶液加入量} / \text{mL} \times \text{虫体总质量} / \text{g} \times \text{时间} / \text{h} \times \text{还原糖摩尔质量}}$$

(2)胃蛋白酶和类胰蛋白酶活性均用 Folin-酚法测定^[7 9-10]。用 0.2 mol·L⁻¹、pH 值 3.0 的柠檬酸-磷酸氢二钠缓冲液稀释配制的 0.5% 酪素溶液作为胃蛋白酶的底物,用 0.02 mol·L⁻¹、pH 值 7.5 的磷酸缓冲液稀释配制的 0.5% 酪素溶液作为类胰蛋白酶的底物,分别于 37℃ 下测定酶活性。

设置 1 组对照, 3 个平行组。取上述底物溶液 2 mL, 0.04 mol·L⁻¹ EDTA-Na₂ 0.1 mL, 上文提及的对应缓冲液 0.4 mL, 酶液 0.5 mL, 混匀, 在 37℃ 水浴中保温反应 15 min 后取出, 立即加入 10% 三氯乙酸 3 mL, 摇匀以终止反应(对照组的酶液和三氯乙酸加入顺序相反), 4 000 r·min⁻¹ 条件下离心 10 min, 取上清液 1 mL, 用 Folin-酚试剂测定酪氨酸的生成, 于 680 nm 处测吸光度值。以实验条件下单位虫体质量(g)、单位时间(h)由底物经酶促反应生成 1 μmol 酪氨酸所需的酶量定义为一个酶活力单位(U)。(3)脂肪酶活性用碱溶液滴定法测定^[7 11]。在对照组和平行组中分别加入 0.025 mol·L⁻¹、pH 值 7.5 的磷酸缓冲液 5 mL, 聚乙烯醇橄榄油乳化液 4 mL, 20% 牛磺胆酸钠溶液 0.4 mL, 于 40℃ 水浴中预热 5 min, 加入含有酶液的匀浆液 1 mL, 对照同时加入 95% 乙醇 15 mL 混匀, 在 40℃ 水浴中保温反应 15 min 后取出, 立即在平行组中加入 95% 乙醇 15 mL, 同时分别加入酚酞指示剂各 3 滴, 用 0.05 mol·L⁻¹ 的氢氧化钠标准溶液滴定产生的脂肪酸。以 1 mL 酶液在 40℃ 下作用于聚乙烯醇橄榄油乳化液 15 min, 最后消耗 1 mL 0.05 mol·L⁻¹ 氢氧化钠, 作为 100 个活性单位(U)。

1.2.4 果胶酶性质测定 (1)果胶酶最适作用温度的测定分别以 25、30、35、40、45、50、55、60、65、70℃ 恒温水浴保温反应液 30 min 后进行酶活性测定, 测定方法同 1.2.3(1)。

(2)果胶酶最适作用 pH 值的测定 分别用 pH 值 2.6、3.2、3.8、4.4、5.0、5.6、6.2、6.8、7.4、8.0、8.6、9.2 梯度的 Na₂HPO₄-柠檬酸缓冲液(0.2 mol·L⁻¹)配制 1% 果胶底物溶液, 同 1.2.3(1)进行酶活性测定。

2 结果与分析

2.1 两种昆虫的消化酶种类构成

从松墨天牛幼虫的消化道中检测到纤维素酶系(Cx酶、C1酶和 β-1, 4-葡萄糖苷酶)、半纤维素酶、果胶酶、淀粉酶、转化酶、类胰蛋白酶、胃蛋白酶和脂肪酶。纵坑切梢小蠹幼虫和成虫的消化酶中均检测出 C1酶、半纤维素酶、果胶酶、淀粉酶、转化酶、类胰蛋白酶和脂肪酶, 小蠹幼虫和成虫均未检测出胃蛋白酶活性, 同时也未检测出构成纤维素酶系的两种组分酶(Cx酶和 β-1, 4-葡萄糖苷酶), 这一结果支持了小蠹虫不具备完整纤维素酶系^[12]的观点(表 1)。

从上面的结果中可以看出: 同样是以松属植物作为寄主的蛀干昆虫, 松墨天牛(天牛科)和纵坑切梢小蠹(小蠹科)虽然隶属于不同的科, 但是从消化酶的构成来看二者却极其相似, 唯一不同的就是松墨天牛具有完整纤维素酶系, 而纵坑切梢小蠹只含 C1酶。因此, 在一定程度上, 消化生理的相似性反映出蛀干昆虫食性和取食行为的相似性。这两种昆虫食性和取食行为的差异: 松墨天牛既可钻蛀寄主韧皮部, 也可以钻蛀木质部, 但纵坑切梢小蠹只取食韧皮组织, 可能是松墨天牛具有完整纤维素酶系而纵坑切梢小蠹不具备的原因。另一方面, 两种昆虫体内存在的消化酶的种类也反映出这两种蛀干昆虫所需求的松属寄主树的营养成分构成是以多糖类有机质为主体。

表 1 松墨天牛和纵坑切梢小蠹体内消化酶种类和活性比较

虫种及虫态	消化酶/(U·g ⁻¹)									
	果胶酶	淀粉酶	Cx酶	半纤维素酶	转化酶	β-1, 4-葡萄糖苷酶	C1酶	脂肪酶	类胰蛋白酶	胃蛋白酶
天牛幼虫	872.52	156.94	152.12	73.00	48.87	43.33	28.88	7.50	3.25	1.17
小蠹幼虫	7180.06	3889.85	-	1225.42	808.14	-	197.19	57.50	58.61	0.0
小蠹成虫	10102.25	3338.73	-	2403.16	953.92	-	190.78	12.50	15.31	0.0

注: 上表中“-”处表示不含此酶; “0”表示未检测到活性, 但尚不能确证是否存在此酶。

2.2 两种昆虫的消化酶活性比较

从天牛幼虫和小蠹幼虫及成虫消化酶活性测定的结果来看, 各种酶的活性大小排列顺序在两种昆虫中基本一致(表 1), 这个结果间接反映了两种昆

虫食性的相似性, 一定程度上说明了蛀干昆虫对于食物中各种营养成分的依赖和利用程度的多少具有某些共同的规律性: 果胶、淀粉和纤维物质等简单的均一多糖是两种昆虫大量需要消化吸收的营养成

分, 这些营养成分对于蛀干昆虫正常的生长发育应该是至关重要的。酶活性测定的结果一定程度上可以体现两种昆虫的营养利用状态指标, 例如实验测出的果胶酶活性占所测定酶总活性的 50% 以上, 说明两种昆虫摄取的食物最终能够真正被消化利用的养分中可能有一半左右是果胶, 这也从侧面一定程度上反映出树木中各种成分被分解利用的状况。该实验除了反应环境要求相对苛刻且活性较低的类胰蛋白酶(偏碱性环境)、胃蛋白酶(酸性环境)和脂肪酶(偏碱性环境)外, 其余消化酶几乎都在同等温度(50℃)和 pH(4-6)条件下(除 C1 酶为 45℃、pH 值 5.0 外)进行活性测定, 力求模拟昆虫活体内多种酶共同作用时较为统一的环境, 增加试验结果的客观性和酶活性结果之间的可比性。试验结果一致表明果胶酶活性远远高于其它酶的活性(相比酶活性排在第 2 位的淀粉酶最少也高出近 2 倍), 因此推断果胶酶是两种昆虫重要的关键消化酶, 而淀粉酶活性居其次, 天牛幼虫的 C_x 酶、半纤维素酶和小蠹幼虫及成虫的半纤维素酶活性相对也很高, 因此它们在虫体的食物消化过程中也起着非常重要的作用, 而蛋白酶和脂肪酶活性都排在最后, 且在酶活性大小的排序中, 所有的糖类水解酶活性都高于蛋白酶和脂肪酶的活性, 推测蛋白酶和脂肪酶在这两种蛀干昆虫体内发挥作用的的空间较小, 这与蛀干昆虫的食性和食物成分有关, 充分体现了植食性的特点, 也反映出多糖类物质是寄主树木中被主要消耗和利用的部分, 是蛀干昆虫的主要营养来源。类胰蛋白酶活性都远高于胃蛋白酶活性, 表明类胰蛋白酶对于蛋白质的水解能力比胃蛋白酶强, 这也从一个侧面反映出体内消化酶分泌水平的调节是以能应对内外环境的变化为原则, 以对内外环境的适应性为指导。

从小蠹虫与天牛的各对应消化酶活性的比较中可看出: 相同的消化酶, 在小蠹虫体内的活性要远远高于在天牛体内的活性, 可能小蠹虫对营养物质的利用效率更高, 也可能小蠹虫对营养物质的相对需求量(即相对进食量)更大, 或者二者皆有。从表 1 可发现, 小蠹幼虫与成虫相比, 虽然果胶酶和半纤维素酶活性较低, 但是脂肪酶和类胰蛋白酶活性却高出很多倍, 可能是在幼虫期小蠹虫生长发育对于脂肪和蛋白质具有一定的需求, 进入成虫期, 用于生长发育和身体建造的营养物质需求渐小, 而用于旺盛的新陈代谢所需的能量物质需求增多。因此, 随着虫体的成长, 更多的果胶和半纤维素等多糖类物质成为虫体新陈代谢和生长发育的

必需品, 而对于脂肪和蛋白质的需求则逐渐减少。这一结果说明不同发育期, 虫体对于营养成分的需求及需求比例是不同的。虫体要维持正常的生长发育和生殖, 必须不同发育阶段对摄取的食物进行选择性的消化吸收。有相关研究报道称^[13], 碳水化合物和蛋白质都是昆虫营养上所必需的, 但是两者的比例即氮碳比(N/C)对昆虫生长发育有很大影响。在幼虫不同的发育阶段所需 N/C 不同, 幼虫生长初期需要含蛋白质较多的食物, 而后期则需碳水化合物较多的食物。

2.3 温度对果胶酶活性的影响

温度对酶的作用具有双重影响^[14]: 一方面升高温度增加底物分子的热能, 加速酶的反应速率; 另一方面较高的温度导致酶蛋白变性而丧失催化活性。因此, 每一种酶的催化反应都有适宜的温度范围和最适温度。

小蠹幼虫果胶酶活性随温度变化的实验表明(图 1), 温度逐渐升高, 果胶酶活性也随之增强, 随着温度的变化, 酶活性存在着一个最大值, 出现这个最大值时对应的温度即为最适作用温度, 而超过最适温度继续加温, 活性不增反而骤降下来。从果胶酶测定的结果可看出, 55℃是其最适温度, 大于或小于此温度, 酶活性都将逐渐降低, 而其适宜作用温区(酶活性均在最适点的 80% 以上)为 50~65℃。

2.4 溶液 pH 值对果胶酶活性的影响

pH 值主要是通过改变不同酸碱条件下酶分子和底物分子中基团的解离状态, 从而影响酶分子的构象以及酶与底物的结合能力和催化活性。因此, 每一种酶都有其各自的适宜 pH 值范围和最适 pH 值。

天牛幼虫和小蠹幼虫果胶酶活性随反应 pH 值变化的研究表明, 两种昆虫体内的果胶酶在应对一系列不同的 pH 值反应环境时表达出极其近似的活性曲线(图 2), 从这一组曲线中可以看出: 果胶酶具有很广泛的 pH 值作用范围(从 pH 值 3.0~9.2 以上), 随着 pH 值逐渐升高, 酶活性一开始呈现很缓和的增加, 到 pH 值刚过 6 特别是 pH 值 8 时活性陡然上升, 到 pH 值 8.6 时活性出现最大值, 即为其最适作用 pH 值, 超过最适值 8.6 继续提升 pH 值, 酶活性又陡然下降, 大于或小于最适 pH 值, 酶活性都将迅速降低, 因此, 果胶酶适宜作用的 pH 值范围(酶活性均在最适点的 80% 以上)相对较窄: 8.0~9.2。

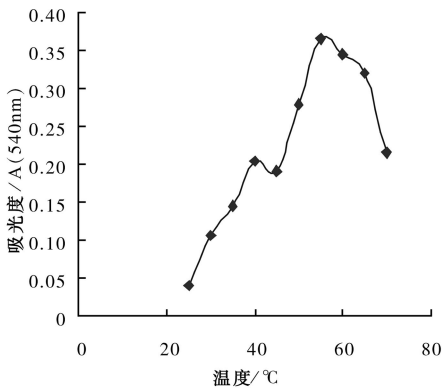


图 1 温度对吸光度 (即果胶酶活性) 的影响

注: 酶活性与吸光度值呈线性相关, 因此温度对吸光度的影响也就反映了温度对酶活性的影响。

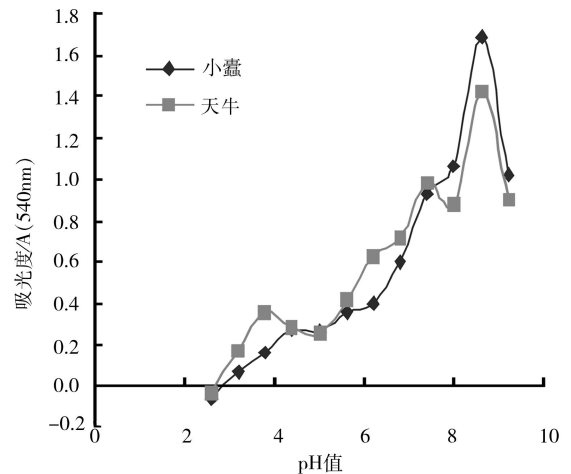


图 2 反应液 pH 值对吸光度 (即果胶酶活性) 的影响

3 讨论

已有研究报道称, 一些小蠹体内具有消化纤维素的完整酶系^[15, 16], 能真正消化、利用食物中的纤维素成分。该实验对松墨天牛的研究结果也充分验证了这一结论, 但对于纤维素酶的来源问题尚存在争议: 有认为是天牛自身分泌的内源性酶; 也有赞成纤维素的消化是天牛肠道内共生微生物作用的结果, 因此酶的来源问题仍有待进一步的研究证实。小蠹虫不具有完整的纤维素酶系, 在纤维消化方面仅能分泌纤维二糖酶^[12] (即 β -1, 4 葡萄糖苷酶)。该研究结果支持小蠹虫纤维素酶系不完整的观点, 但对于具体存在的酶却有不同结论: 检测到 C1 酶和半纤维素酶, 而不含 C_x 酶和纤维二糖酶。

比较两种昆虫各对应的消化酶活性, 可看出: 小蠹虫的酶活性均比天牛高很多, 可能小蠹虫对营养物质的利用效率更高, 也可能小蠹虫对营养物质的相对需求量 (即相对进食量) 更大, 或者二者皆有。从虫体大小来看, 不论是幼虫还是成虫, 天牛都远远大于小蠹虫, 绝对取食量也是小蠹虫的许多倍。产生这种“相悖”现象的原因尚待深入研究探讨, 是否暗示了生物个体 (生物量) 越大, 对能量物质的利用和转化效率却越低的可能?

对于小蠹幼虫和成虫的实验均未检测出胃蛋白酶的存在 (活性为 0), 可能因为胃蛋白酶含量很低, 而实验采用的反应条件不是最适或方法不够灵敏, 未能检测出来, 或是小蠹虫本身不含胃蛋白酶, 而以

类胰蛋白酶来弥补和实现对蛋白质的利用。两种昆虫的脂肪酶活性都较低, 这可能与食物成分中脂肪相对含量不很高有关。当然也有可能是采用的方法不够灵敏, 尚须改进; 或是这两种昆虫本身体内分泌的脂肪酶就很少, 而是与酯酶共同来完成对脂类的消化。

该研究测定了两种昆虫体内的果胶酶、淀粉酶等 10 种消化酶, 但并不是说这两种昆虫体内就没有其它消化酶的存在, 已有报道天牛体内存在麦芽糖酶^[17], 天牛和小蠹虫体内存在酯酶^[18] 等。

在植物体中, 果胶主要以果胶酸钙的形式大量存在于植物细胞壁中, 淀粉则是一种在植物中广泛存在、能够被果胶酶^[13]、淀粉酶等多种消化酶作用的最容易被消化吸收的多糖, 纤维素和半纤维素是蛀干昆虫寄主主要的组成成分。推测由于在寄主植物中这些物质含量较高、分布广泛、营养丰富且相对容易利用, 因此, 在长期的进化过程中, 这些物质被选择作为蛀干昆虫大量需求的主要营养成分, 也因此成为树木中被分解利用的主要成分。

对活性最高的果胶酶进行离体条件下的性质测定结果表明, 果胶酶在 55 °C、pH 值 8.6 情况下有着最高的酶活性。在蛀干昆虫正常的体内环境中, pH 值 8.6 是可能出现的, 但 55 °C 的高温是不可能出现的, 如果没有其它因素的影响, 这个结果只能说明: 正常情况下, 两种昆虫体内果胶酶的催化反应都处于低于最适温度的状况中, 因此, 仅就果胶酶而言高温条件下还有很大的作用潜力, 可能蛀干昆虫对于热的耐受程度存在着很大的潜力, 有着很强的环境

适应性。

参考文献:

- [1] 索风梅, 林长春, 王浩杰, 等. 松墨天牛纤维素酶的研究 I. 纤维素酶性质研究 [J]. 林业科学研究, 2004, 17(5): 583~589
- [2] 朱雨行, 申富勇, 张丽娟. 纵坑切梢小蠹危险性分析 [J]. 河南林业科技, 2003, 23(3): 15~17
- [3] 索风梅, 王浩杰, 陈洪宝, 等. 松墨天牛纤维素酶的研究 II. 离体条件下金属离子对松墨天牛纤维素酶活性的影响 [J]. 林业科学研究, 2006, 19(2): 205~210
- [4] 王浩杰, 索风梅, 郭付新, 等. 松墨天牛纤维素酶的研究 III. 活体条件下金属离子对松墨天牛纤维素酶活性的影响 [J]. 林业科学研究, 2006, 19(4): 472~476
- [5] 吴明, 丁中文. 纤维素酶抑制剂对松墨天牛消化生理的影响 [J]. 浙江林业科技, 2003, 23(1): 1~4
- [6] 殷幼平, 程惊秋, 蒋书楠. 桑粒肩天牛纤维素酶的性质研究 [J]. 林业科学, 1996, 32(5): 454~459
- [7] 潘鲁清, 王克行. 中国对虾幼体消化酶活力的实验研究 [J]. 水产学报, 1997, 21(1): 26~31
- [8] 北京大学生物系生物化学教研室. 生物化学实验指导 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1980 71~72
- [9] 吕淑霞, 唐咏, 阚国仕. 基础生物化学实验指导 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2002
- [10] 魏华, 赵维信. 罗氏沼虾幼体及成虾消化酶活性 [J]. 水产学报, 1996, 20(1): 61~64
- [11] 李建武, 萧能赓, 余瑞元, 等. 生物化学实验原理和方法 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1994 311~312
- [12] W 莫尔迪尤, G J 戈兹沃西, 等. 昆虫生理学 [M]. 北京: 科学出版社, 1986 15~17
- [13] 彩万志, 庞雄飞, 花保祯, 等. 普通昆虫学 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2001 106~121
- [14] 罗贵民. 酶工程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003 25
- [15] 蒋书楠, 殷幼平, 王中康. 几种天牛纤维素酶的来源 [J]. 林业科学, 1996, 32(5): 441~446
- [16] Paulson K Z, Kurtz L T. Michaelis constants of urease [J]. Soil Sci Soc Proc 1970, 34 70~72
- [17] 李小平, 曹保华. 桑天牛幼虫消化系统组织学和形态学观察 [J]. 淮北煤炭师范学院学报, 2004, 25(1): 44~46
- [18] 陈辉, 唐明, 朱长俊, 等. 华山松大小蠹和共生真菌分泌酶组成分析 [J]. 林业科学, 2004, 40(5): 123~126