

文章编号: 1000-5013(2011)05-0554-06

NADH 氧化酶的研究进展

卿三红¹, 方柏山²

(1. 华侨大学 福建省高校工业生物技术重点实验室, 福建 泉州 362021;

2. 厦门大学 化学化工学院, 福建 厦门 361005)

摘要: NADH 氧化酶是一类催化 NADH 氧化为 NAD^+ 并消耗氧气的氧化还原酶, 因其能够再生 NAD^+ 而成为人工调控微生物代谢流向的重要调控酶. 文中综述了 NADH 氧化酶的分类、理化性质、反应机制, 并分析 NADH 氧化酶清除细胞内氧毒性、介入细胞代谢过程, 以及调节细胞生理和代谢等重要的生理功能.

关键词: NADH 氧化酶; 再生 NAD^+ ; 氧代谢酶; 胞内氧平衡

中图分类号: Q 554

文献标志码: A

近年来, 随着氧化还原酶在催化制备手性醇、羟基酸、氨基酸等方面发挥越来越重要的作用, 在制药、食品、精细化工、农药等领域均表现出广泛的用途, 对这种类型的酶的研究也愈发受到人们的重视. 氧化还原酶在进行生物催化反应的同时, 需要消耗一定量的辅酶, 大约 80% 的氧化还原酶的辅酶为尼克酰胺腺嘌呤二核苷酸(NAD^+/NADH), 导致这类辅酶的在工业、科研上的需求也随之剧增. 然而, 辅酶的价格昂贵, 甚至比酶促反应所得产物的价格还要高, 而重复利用性和稳定性却很低. NADH 氧化酶是一类催化 NADH 氧化为 NAD^+ 并消耗氧气的氧化还原酶, 因其能够再生 NAD^+ 而成为人工调控微生物代谢流向的重要调控酶, 在工业上具有潜在的应用前景. NADH 氧化酶也是细胞中重要的氧代谢酶, 它能够清除细胞内氧毒性, 帮助细胞抗击外界氧压力, 对于维持胞内氧平衡具有重要意义. 从 20 世纪 80 年代开始, 国外陆续报道了与 NADH 氧化酶相关的研究, 而目前国内的相关研究仍然非常少. 本文对 NADH 氧化酶的常见菌种、理化性质、反应机理、生理特性等方面的情况进行了综述.

1 NADH 氧化酶的分类及常见菌种

NADH 氧化酶(NADH oxidase, NOX, EC 1.6.99.3)是一种能催化 NADH 氧化的氧化还原酶, 在 O_2 存在的条件下, 该酶催化 NADH 氧化为 NAD^+ , 同时 O_2 还原为 H_2O 或 H_2O_2 . 根据 O_2 还原后产物的不同, NOX 可分为两类: 一类还原为 H_2O_2 , 反应过程产生 2 个电子的转移, 称之为 NADH 过氧化酶或 H_2O_2 型 NADH 氧化酶(NOX-1); 另一类还原为 H_2O , 反应过程产生 4 个电子的转移, 即狭义的 NADH 氧化酶, 也称为 H_2O 型 NADH 氧化酶(NOX-2).

NOX 广泛存在于乳酸菌中^[1-2], 诸如乳酸杆菌属(*Lactobacillus*)、小球菌属(*Pediococcus*)、明串珠菌属(*Leuconostoc*)、球菌属(*Streptococcus*)和肠球菌属(*Enterococcus*)等 22 种乳酸菌株中都有 NOX 活性. Sakamoto 等^[2]发现, 大多数乳酸菌株在有氧条件下具有 NOX 酶活, 并且同时含有 NOX-1 和 NOX-2 的菌株在有氧条件下生长良好, 而只含有其中一种的菌株在有氧条件下生长缓慢. NOX 大部分分布在细胞质中, 在细胞膜上也检测出少部分 NOX 酶活. 在某些嗜热菌中也发现有 NOX, 如 Cocco 等^[3]在嗜热水生菌(*Thermus aquaticus* YT-1)中发现 NOX-1, 且这种酶能耐 95 °C 的高温. Park 等^[4]发现嗜热栖热菌(*Thermus thermophilus* HB8)中存在 NOX-1 活性. Masullo 等^[5]对两种古细菌嗜酸热硫化叶菌(*Sulfolobus acidocaldarius*)和硫磺矿硫化叶菌(*Sulfolobus solfataricus*)进行了分离纯化, 并对其

收稿日期: 2011-03-29

通信作者: 方柏山(1957-), 男, 教授, 主要从事生物反应工程的研究. E-mail: fbs@xmu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(2067604)

酶学性质进行了分析,发现两种酶均为 H_2O_2 型,并对温度和 pH 值都有很好的耐受性. 此外,氨基戊酸梭菌(*Clostridium aminovalericum*)、猪痢疾蛇形螺旋体(*Serpulina hyodysenteriae*)、莱氏阿原体(*Acholeplasma laidlawii*)、短乳杆菌(*Lactobacillus brevis*)和十二指肠贾第鞭毛虫(*Giardia duodenalis*)等微生物中^[6-10]也发现存在 NOX 活性.

2 NADH 氧化酶的理化性质

2.1 相对分子质量

NOX 大部分为同源二聚体,单个亚基相对分子质量一般 46~56 kDa,全酶相对分子质量为 92~112 kDa. 嗜热菌 NOX 的相对分子质量一般较小,如嗜热栖热菌和嗜酸热硫化叶菌的 NOX 均为单体蛋白,相对分子质量分别为 25,27 kDa. 硫磺矿硫化叶菌为同源二聚体,单个亚基的相对分子质量为 35 kDa. NOX 除了有单体蛋白、二聚体外,还有三聚体、四聚体、六聚体等,如莱氏阿原体(*Acholeplasma laidlawii*)^[8]为异源三聚体,亚基相对分子质量分别为 65,40,19 kDa,亚基之间相差很大. 此外,细枝真杆菌(*Eubacterium ramulus*)^[11]由 12 个亚基组成,相对分子质量为 450 kDa.

2.2 最适 pH 值及 pH 稳定性

pH 值直接影响酶活性中心必需基团的解离状态,过酸或过碱都会破坏酶的空间结构,从而引起酶构象的改变. 这些都可能酶活性的降低或丧失,因而只有在适宜的 pH 值范围内,酶才能显示其催化活性. 大部分 NOX 在 pH 值为 5.0~9.0 范围内,能够保持其催化活性. 最适 pH 值在 6.0~7.5 左右. 嗜酸菌 NOX 具有较强的 pH 耐受性,它在 pH 值较低的范围都能保持其活性.

2.3 最适温度及热稳定性

每种酶都有其适宜的温度范围和最适温度. 在适宜的温度范围内,酶才能够进行催化反应,在最适温度条件下,酶的催化反应速率达到最大. 大多数微生物 NOX 的适宜的温度范围为 20~50 ℃. 少数嗜热菌具有很高的热稳定性,如栖热水生菌(*Thermus aquaticus* YT-1)的 NOX^[3]在 95 ℃下仍具有较高的酶活性.

2.4 底物特异性

NOX 催化反应的最适电子供体为 β -NADH,也有少部分能够以 β -NADPH, α -NADH 作为底物,但是反应速率都很低. Park 等^[4]发现的 NOX-1 能够分别以 β -NADH, β -NADPH 作为底物,生成 H_2O_2 ,但前者的 $K_{\text{cat}}/K_{\text{m}}$ 比后者大 6 倍多. Koike 等^[12]对肠膜状明串珠菌(*Leuconostoc mesenteroides*)的 NOX 进行研究时发现,催化反应中除了 β -NADH 可作为电子受体外, α -NADH 也能够和 O_2 反应生成水,但前者 V_{max} 是后者的 3 倍.

NADH 氧化酶的另一底物,即电子受体,在有氧条件下是 O_2 ,而在厌氧条件下,有的酶能够用其他的氧化剂代替,如甲基蓝、铁氰化物、二氯靛酚、细胞色素 c 等^[4,11]也能从 NADH 那里得到电子而被还原. 对于产物为 H_2O 的 NOX-2,有研究发现,它还能够以 H_2O_2 为底物生成 H_2O . 动力学特性研究表明, O_2 是该酶的最佳电子受体.

2.5 酶活抑制剂

一般而言,如 Cu^{2+} , Hg^{2+} , Zn^{2+} 等重金属离子能够强烈抑制 NADH 氧化酶的酶活,甚至使其完全失活^[13]. 如奎纳克林、奎宁等黄素酶抑制剂,抑制 NADH 氧化酶的部分酶活,但不会使酶完全失活^[7,12]. 氨基水杨酸、碘乙酸盐等巯基激活剂,也是 NADH 氧化酶的强烈抑制剂,抑制率几乎 100%^[14]. 某些代谢产物,如 ATP 和腺嘌呤,就有研究称其能够竞争性抑制 NADH 氧化酶的酶活^[12]. 另外,对于嗜酸热硫化叶菌和硫磺矿硫化叶菌这两种古细菌,则尿素、胍是其主要的抑制剂^[5]. 金属螯合物 EDTA 对大多数 NADH 氧化酶并不存在抑制作用.

3 NADH 氧化酶的作用机理

3.1 NADH 氧化酶的辅因子

NADH 氧化酶纯化以后分别在 270,380,460 nm 处存在吸收峰,具有黄素蛋白的光谱特性,所以这

是一种黄素酶. NADH 氧化酶的辅酶主要是 FAD, 少数为 FMN. 同一个菌中, 酶的分布位置不同, 其辅因子有可能不同. 如 Yoshitaka 等^[13]从猪源芽孢乳杆菌(*Sporolactobacillus inulinus*)的细胞质里和细胞膜上都分离出了 NADH 氧化酶, 并发现前者的辅因子为 FAD, 而后者则是 FMN 和金属离子. 一般来说, 每个亚基对应一个 FAD 或 FMN, 单体蛋白对应一个 FAD. FAD 有的与酶共价结合, 也有的以游离形式存在.

3.2 NADH 氧化酶的作用机理

对于 H_2O_2 型的 NADH 氧化酶(NOX-1), 电子从 NADH 传给 H_2O_2 或 H_2O 的过程中, 通常会经过过氧离子 O_2^- 中间体. NADH 先将电子传给 FAD 或 FMN 的半醌形式(FADH 或 FMNH), 使其完全还原并将电子再传给 O_2 , 形成 O_2^- 中间体. O_2^- 再与 H^+ 反应生成 H_2O_2 . 对于具有 Fe-S 簇的 NOX-1, 电子还可以通过 Fe-S 簇传给 O_2 形成 O_2^- . 莱氏阿原体(*Acholeplasma laidlawii*)的 NOX-1^[8], 同时具有 FMN 结合域和 Fe-S 簇, 因此 O_2 既可以通过 FMN 也可以借由 Fe-S 键得到电子, 从而形成 O_2^- 中间体, 如图 1 所示. 对于嗜热水生菌的 NOX-1^[3], 其催化反应中的电子传递是与酶结合的辅酶 FAD 和细胞中游离存在的 FAD 共同作用的结果, 如图 2 所示.

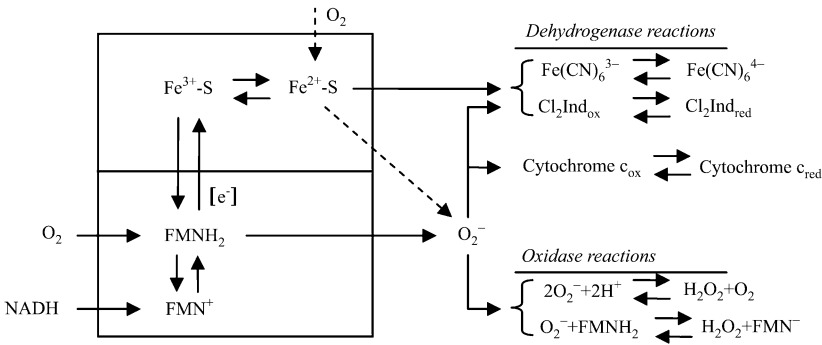


图 1 莱氏阿原体的 NOX-1 的催化反应机理

Fig. 1 Catalytic reaction mechanism of NOX-1 from *Acholeplasma laidlawii*

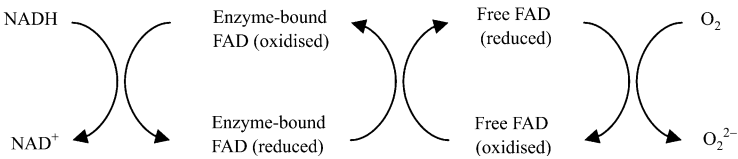


图 2 游离 FAD 在嗜热水生菌的 NOX-1 的催化反应中的作用

Fig. 2 Role of free FAD in the catalytic reaction of NOX-1 from *Thermus aquaticus*

此外, 也有研究表明, O_2 可以不经过 O_2^- 中间体而形成 H_2O_2 . 如嗜热菌的 NOX-1^[4], 酶活并不受双氧化物歧化酶抑制剂的抑制, 因此可以推断催化反应过程中并没有过氧阴离子 O_2^- 中间体的产生. 木聚糖芽孢杆菌(*Amphibacillus xylanus*)的 NADH 氧化酶也是 H_2O_2 型的, 反应中的电子传递通过 FAD 疏水基团和两个 $-\text{S}-\text{S}-$ 键完成. 对于 H_2O 型 NADH 氧化酶 NOX-2, 借由反应中心的 FAD(或 FMN)和二硫键之间的氧化原来达到电子传递的目的. 图 3 表明了粪链球菌(*Streptococcus faecalis* ATCC 11700)产 H_2O 型 NADH 氧化酶的反应机制^[15].

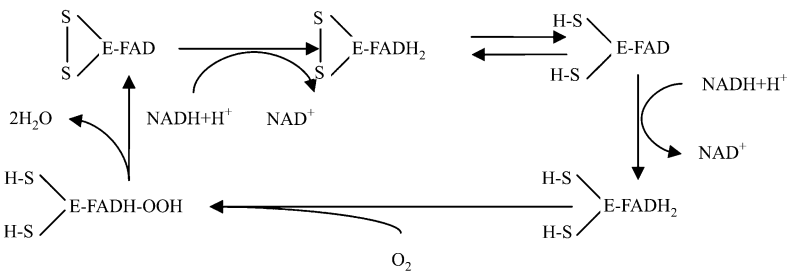


图 3 粪链球菌产 H_2O 型 NADH 氧化酶的反应机制

Fig. 3 Mechanism of H_2O -forming NADH oxidase from *Streptococcus faecalis*

4 NOX 的生理特性

4.1 清除细胞内氧毒性

氧气自身不可能对细胞产生任何影响,然而在细胞代谢过程中,氧部分被还原成水而导致活性氧分子的形成,如 O_2^- , OH^- , H_2O_2 等,这些中间体有很高的氧化潜力,可能对细胞产生氧毒性^[16-18]. NOX 具有重要的抗氧化功能,在细菌的有氧生长中,它充当着保护性的角色. 研究证实,NOX-1/NOX-2 系统是作为在乳酸链球菌及其他的一些乳酸细菌中最常见的抗氧化机制. Niimura 等^[19]研究发现,木聚糖双芽孢杆菌通过 NOX 催化体内有氧代谢途径中产生的 NADH 来再生 NAD^+ . 同时,该酶也作为细胞内的 H_2O_2 清除体系中的一个部分起作用.

Riebe 等^[20]的研究发现,丙酮/丁醇梭状芽孢杆菌(*Clostridium acetobutylicum*)中有一种非血红素的二铁蛋白 revRbr,这种蛋白同时具有 NADH 氧化酶和 NADH 过氧化酶的活性,并在 H_2O_2 和 O_2 的脱氧过程中起重要作用,保护细胞对抗外界氧压力. André 等^[21]对乳酸杆菌(*Lactobacillus sanfranciscensis*)有氧条件下的生长进行研究,发现它能在有氧环境中快速的生长,与其他完全厌氧的乳酸菌相比,乳酸杆菌(*Lactobacillus sanfranciscensis*)能够抵抗氧毒性的主要防御屏障是有 NOX 参与的细胞代谢.

4.2 介入细胞代谢过程

细胞内的氧化还原平衡是维持细胞正常生长和代谢的一个基本条件. 细胞内的氧化还原水平极大程度上依赖于细胞内两种嘧啶核苷酸系统,即 NADH/NAD^+ 和 $\text{NADPH}/\text{NADP}^+$ 的浓度比率. NADH/NAD^+ 是生物代谢过程中一种重要的辅酶. 它参与了代谢网络中超过 300 个氧化还原反应^[22-23]. 在糖分解代谢流中, NADH/NAD^+ 更是扮演着重要角色. 氧化态 NAD^+ 在糖降解过程中作为电子受体被还原, NAD^+ 的缺乏将导致糖酵解的停止^[24].

Masako 等^[25]的研究发现,在有氧条件下,变异链球菌的碳水化合物代谢中 NOX-2 参与糖酵解途径中所必需的 NAD^+ 的再生. 董志姚等^[26]发现 NOX 的过量表达导致 NADH/NAD^+ 比率大幅度降低,从而将 NADH 氧化途径从大量形成 ATP 的氧化磷酸化途径转向形成水的 NADH 氧化酶途径,保证了高酵解速度所需的高 NAD^+ 水平和低 ATP 水平. 从而解除了 NAD^+ 浓度不足对糖酵解途径关键酶活性的限制以及减轻了高含量 ATP 对糖酵解关键酶的变构抑制. Heuxa 等^[27]在酵母中表达了来自乳酸乳球菌的 *nox-2* 基因,表明在酵母中表达 NOX 可以使乙醇产量减少 15%,这是调节葡萄酒中乙醇浓度的一个生物调节途径.

4.3 调节细胞生理和代谢

Isabelle 等^[28]研究发现,肺炎链球菌的 *nox* 基因缺失菌株的生长速率和生物量在有氧和厌氧条件下并没有变化,但 *nox* 基因突变导致的能力效率的降低跟 *nox* 基因没有发生突变的菌株在缺氧条件下的情况相似. 这意味着经由 NOX 输入氧气到代谢途径当中对贯穿生长始终的能力发展的控制是很重要的,而这并不涉及到通过氧气来调节 NOX 的表达. 在对老鼠血浆实验时发现,虽然肺炎链球菌的能量代谢是在厌氧条件下进行的,但 *nox* 基因缺失菌能通过对氧气进行响应,来调节例如 NADH 氧化酶的活力、遗传交换的能力或者在哺乳动物宿主中的毒力. 由 *nox* 基因编码的 NOX 活力可能参与细胞外部信号的传导,通过获取氧可用性的信息,来调节细胞生理和代谢. 因此,该酶可能充当一种氧传感器的功能. 该研究工作首次确立了 O_2 在调节肺炎球菌的转化能力和毒力方面所充当的角色.

4.4 一种原始的呼吸系统

在缺乏电子传递链的情况下,乳酸细菌的一些菌株可以通过胞质的 NOX 将分子氧还原为水来免受氧损伤. Sakamoto 等^[2]对来自乳酸细菌,包括 *Lactobacillus*, *Pediococcus*, *Leuconostoc*, *Streptococcus*, *Enterococcus* 等菌属的 22 种细菌进行好氧培养实验,发现大部分菌株在好氧条件下生长很快,生物量也相应增加. 在有氧条件下,细胞代谢由同型乳酸发酵转向异型乳酸发酵,生成乙酸,同时乳酸和/或乙醇的产量有所下降. 这说明有氧培养是增加这些菌株的生物量的有效途径. 因此,乳酸细菌在进化过程中可能为了适应有氧环境获得了一种原始的呼吸系统.

5 总结与展望

随着工业生物技术的发展,氧化还原酶得到了越来越多的应用.但辅酶价格昂贵,这使得辅酶再生成为重要议题. NADH 氧化酶由于其能再生氧化型辅酶 NAD^+ ,已尝试和多种酶偶联,并成功地实现了辅酶的再生. 烟酰型辅酶 NAD^+ 和 NADH 参与细胞中大量的氧化还原反应,对于细胞的代谢起着至关重要的作用. 目前, NADH 氧化酶的另一个重要用途,就是利用它来调节细胞内 NADH/NAD^+ 的比率,从而改变菌体的代谢路径,以得到需要的特定产物. 很多嗜热嗜酸菌都具有很高的热稳定性和酸耐受性,如嗜热栖热菌^[4]产的 NOX 能耐至少 80 ℃ 的高温,并且在 pH 值为 5.0,4 ℃ 下可放置 10 个月以上,而栖热水生菌的 NOX 在 95 ℃ 下仍具有较高的酶活性. 利用这些高稳定性的 NOX 做成生物传感器^[29],也将成为当前比较热门的研究课题.

参考文献:

- [1] SEAMUS C. Responses of lactic acid bacteria to oxygen[J]. Microbiology,1987,46(3):269-280.
- [2] SAKAMOTO M, KOMAGATA K. Aerobic growth of and activities of NADH oxidase and NADH peroxidase in lactic acid bacteria[J]. Journal of Fermentation and Bioengineering,1996,82(3):210-216.
- [3] COCCO D, RINALDI A, SAVINI I. NADH oxidase from the extreme thermophile *Thermus aquaticus* YT-1 purification and characterization[J]. Biochemistry,1988,174(2):267-271.
- [4] PARK H J, REISER C O A, KONDRUWEIT S, et al. Purification and characterization of a NADH oxidase from the thermophile *Thermus thermophilus* HB8[J]. Biochemistry,1992,205(3):887-893.
- [5] MASULLO M, RAIMO G. Purification and characterization of NADH oxidase from the archaea *Sulfolobus acidocaldarius* and *Sulfolobus solfataricus*[J]. Biotechnology and Applied Biochemistry,1996,23(22):47-54.
- [6] KAWASAKI S, ISHIKURA J, CHIBA D, et al. Purification and characterization of an H_2O -forming NADH oxidase from *Clostridium aminovalericum*: Existence of an oxygen-detoxifying enzyme in an obligate anaerobic bacteria[J]. Archives of Microbiology,2004,181(4):324-330.
- [7] STANTON T B, JENSEN N S. Purification and characterization of NADH oxidase from *Serpulina (Treponema) hyodysenteriae*[J]. Bacteriology,1993,175(10):2980-2987.
- [8] REINARDS R, KUBICKI J, OHLENBUSCH H D. Purification and characterization of NADH oxidase from membranes of *Acholeplasma laidlawii*, a copper-containing iron-sulfur flavo-protein[J]. Biochemistry,1981,120(2):329-337.
- [9] HUMMEL W, RIEBEL B. Isolation and biochemical characterization of a new NADH oxidase from *Lactobacillus brevis*[J]. Biotechnology Letters,2003,25(1):51-54.
- [10] BROWN MD, UPCROFT AJ, UPCROFT P. A H_2O -producing NADH oxidase from the protozoan parasite *Giardia duodenalis*[J]. Biochemistry,1996,241(1):155-161.
- [11] HERLES C, BRAUNE A, BLAUT M. Purification and characterization of an NADH oxidase from *Eubacterium ramulus*[J]. Microbiology,2002,178(1):71-74.
- [12] NISHIYAMA Y, MASSEY V, AAZAI Y, et al. Purification and characterization of NADH oxidase from a strain of *Leuconostoc mesenteroides*[J]. Biochemistry Tokyo,1985,97(5):1279-1288.
- [13] NISHIYAMA Y, MASSEY V, AAZAI Y, et al. Purification and characterization of *Sporolactobacillus inulinus* NADH oxidase and its physiological role in aerobic metabolism of the bacterium[J]. Journal of Fermentation and Bioengineering,1997,84(1):22-21.
- [14] STANTON BT, JENSEN SN. Purification and characterization of NADH oxidase from *Serpulina (Treponema) hyodysenteriae*[J]. Bacteriology,1993,175: 2980-2987.
- [15] SCHMIDT H L, STOCKLEIN W, DANZER J, et al. Isolation and properties of an H_2O -forming NADH oxidase from *Streptococcus faecalis*[J]. Biochemistry,1986,156(1):149-155.
- [16] FARR S B, KOGOMA T. Oxidative stress responses in *E. coli* and *S. typhimurium*[J]. Microbiology,1991,55(4):561-585.
- [17] FRIDOVICH I. Oxygen toxicity: A radical explanation[J]. Biology,1998,201(8):1203-1209.
- [18] STORZ G, IMIAY J A. Oxidative stress[J]. Microbiology,1999,2(2):188-194.

[19] NIIMURA Y, NISHIYAMA Y. A hydrogen peroxide-forming NADH oxidase that functions as an alkyl hydroperoxide reductase in *Amphibacillus xylanus*[J]. Bacteriology, 2000, 182(18): 5046-5051.

[20] RIEBE O, FISCHER R J, WAMPLER A D, et al. Pathway for H₂O₂ and O₂ detoxification in *Clostridium acetobutylicum*[J]. Microbiology, 2009, 155(1): 16-24.

[21] JANSCH A, FREIDING S, BEHR J, et al. Contribution of the NADH-oxidase (Nox) to the aerobic life of *Lactobacillus sanfranciscensis* DSM20451^T[J]. Food Microbiology, 2011, 28(1): 29-37.

[22] FOSTER J W, PARK Y K, PENFOUND T, et al. Regulation of NAD metabolism in *Salmonella typhimurium*: Molecular sequence analysis of the bifunctional nadR regulator and the nadA-pnuC operon[J]. Bacteriology, 1990, 172(8): 4187-4196.

[23] DE FELIPE F L, KLEEREBEZEM M, DE VOS W M, et al. Cofactor engineering: a novel approach to metabolic engineering in *Lactococcus lactis* by controlled expression of NADH oxidase[J]. Bacteriology, 1998, 180(15): 3804-3808.

[24] LUTTIK M A, OVERKAMP K M, KOTTER P, et al. The *Saccharomyces cerevisiae* NDE1 and NDE2 genes encode separate mitochondrial NADH dehydrogenases catalyzing the oxidation of cytosolic NADH[J]. Biological Chemistry, 1998, 273(38): 24529-24534.

[25] HIGUCHI M, YAMAMOTO Y, KAMIO Y. Molecular biology of oxygen tolerance in lactic acid bacteria: Functions of NADH oxidases and Dpr in oxidative stress[J]. Bioscience and Bioengineering, 2000, 90(5): 484-493.

[26] 董志姚, 李秀芬, 刘立明, 等. 过量表达 NADH 氧化酶加速光滑球拟酵母合成丙酮酸[J]. 微生物学报, 2008, 48(8): 1061-1066.

[27] HEUXA S, CACHONB R, DEQUIN S. Cofactor engineering in *Saccharomyces cerevisiae*: Expression of a H₂O-forming NADH oxidase and impact on redox metabolism[J]. Metabolic Engineering, 2006, 8(4): 303-314.

[28] AUZAT I, CHAPUY-REQUAUD S, LE BRAS G, et al. The NADH oxidase of *Streptococcus pneumoniae*: Its involvement in competence and virulence[J]. Molecular Microbiology, 1999, 34(5): 1018-1028.

[29] CREANGA C, MURR N E. Development of new disposable NADH biosensors based on NADH oxidase[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2011, 656(1/2): 179-184.

Recent Progress in Research of NADH Oxidase

QING San-hong¹, FANG Bai-shan²

(1. Key Laboratory of Industrial Biotechnology of Fujian Province, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;
2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: NADH oxidase is a kind of oxidoreductase which catalyzes the oxidation conversion from NADH to NAD⁺ along with the oxygen consumption. As it can be applied in NAD⁺ recycling, NADH oxidase becomes a significant regulatory enzyme used in the artificial regulation of microbial metabolism flow. This paper reviewed the classification of NADH oxidase, its physical and chemical properties and the reaction mechanisms. This paper also analyzed some important physiological functions of NADH oxidase such as it can alleviate the oxygen toxicity in cells and intervene in cell metabolism, as well as it can adjust cell physiology and metabolism.

Keywords: NADH oxidase; NAD⁺ recycling; oxygen metabolism enzyme; intracellular oxygen balance

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 刘源岗)