

纳米酶标准术语

高利增¹ 梁敏敏^{1,2} 温涛³ 魏辉⁴ 张宇⁵ 范克龙¹
江冰⁶ 曲晓刚⁷ 顾宁⁵ 庞代文⁸ 许海燕³ 阎锡蕴¹

(1. 中国科学院生物物理研究所中国科学院纳米酶工程实验室,北京 100101;2. 北京理工大学材料学院,北京 100081;
3. 中国医学科学院基础医学研究所,北京 100005;4. 南京大学现代工程与应用科学学院生物医学工程系,江苏南京
210093;5. 东南大学生物科学与医学工程学院,江苏南京 210096;6. 郑州大学纳米酶医学研究中心,河南郑州 450052;
7. 中国科学院长春应用化学研究所稀土资源利用国家重点实验室,吉林长春 130022;8. 南开大学化学学院,天津 300071)

摘要: 纳米酶是一类本身蕴含酶学特性的纳米材料,能够催化酶的底物,产生如同天然酶类似的催化反应,并具有酶促反应动力学等特征,属于一类新型模拟酶。自2007年首次报道以来,纳米酶已成为多学科交叉的研究热点,其应用研究涉及医学、环境、农业、国防安全等多个领域。近年来,基于纳米酶的新技术不断涌现,已有纳米酶相关产品问世。此刻,十分有必要对纳米酶的相关术语进行研讨并形成规范,以便专业人员深入理解和准确评价纳米材料的类酶活性,也有助于促进纳米酶产业化。

关键词: 纳米酶;术语;标准化

中图分类号:N04 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1673-8578.2020.06.004

Standard Vocabulary for Nanozyme//GAO Lizeng, LIANG Minmin, WEN Tao, WEI Hui, ZHANG Yu, FAN Kelong, JIANG Bing, QU Xiaogang, GU Ning, PANG Daiwen, XU Haiyan, YAN Xiyun

Abstract: Nanozyme refers to a class of nanomaterials that possess enzyme-like properties, capable of catalyzing the substrates of enzymes following the similar enzymatic kinetics. Nanozyme is as a new class of enzyme mimics which may be used as enzyme alternatives to improve human health. Since firstly reported in 2007, nanozyme has become an emerging field as a multidisciplinary research hotspot with broad application potential in many important fields such as biomedicine, environment treatment, agriculture and national security. With more and more novel nanozyme-based technologies and products developing, it is essential to make the related terms uniformed and standardized for nanozyme, which would not only be beneficial for scientists in this field to deeply understand and precisely evaluate nanozymes' catalytic activities, but also promote the industrialization of nanozyme.

Keywords: nanozyme; vocabulary; standardization

引言

随着纳米科技的发展及纳米生物医学研究的不断深入,人们发现很多纳米材料自身具有与天然

酶类似的催化活性,能够在生理条件下催化天然酶的底物及其介导的生化反应,表现出类似的反应动力学和催化机理,将这类材料命名为纳米酶^[1-2]。此外,这种类酶催化活性与纳米材料的尺寸、成分、

收稿日期:2020-08-04

基金项目:国家重点研发计划“铁基纳米材料类酶效应与急性髓系白血病诊疗技术”(2017YFA0205500)

作者简介:高利增(1978—),男,博士,研究员,主要从事纳米酶开发与生物医学应用研究。通信方式:gaolizeng@ibp.ac.cn。

梁敏敏(1978—),女,博士,教授,从事仿生纳米材料(纳米酶)的生物工程化制备及其生物医学应用研究。通信方式:mmliang@bit.edu.cn。温涛(1986—),女,博士,助理研究员,主要从事金属纳米酶设计合成及肿瘤诊疗研究。通信方式:went@ibms.pumc.edu.cn。这三位作者对本文具有同等贡献。通讯作者:许海燕,阎锡蕴;通信方式:xuhy@pumc.edu.cn,yanxy@ibp.ac.cn。

结构和表面修饰等因素密切相关,属于一类独特的纳米效应。因此,纳米酶既不同于传统的小分子化学催化剂,也不同于以往的纳米载体固定化酶,属于新一代人工模拟酶^[3-4],兼具催化高效性、高稳定性、多功能性、成本低且可大规模制备等特点,在生物医药、环境保护、农业、安全检测等方面展现出巨大的应用前景。纳米酶已成为纳米生物交叉领域一个快速发展的新热点^[5],吸引了来自纳米科技、材料、物理、化学、酶学、生物学、医学等多领域研究人员的兴趣,从自身的背景对纳米酶及其应用进行了广泛的研究。迄今已有超过 800 种纳米材料和纳米结构被发现具有类似天然酶的催化活性,如金属氧化物类,包括四氧化三铁(Fe_3O_4)、四氧化三钴(Co_3O_4)、氧化铈(CeO_2)、氧化铜(CuO)、二氧化锰(MnO_2)、五氧化二钒(V_2O_5)等,贵金属类,包括金(Au)、铂(Pt)等,碳类,包括碳纳米管、石墨烯、富勒烯、碳点、碳纳米球体等,以及上述几类材料的复合物^[6]。

在对纳米酶相关基础研究和应用开发的描述中,涌现出大量新的词汇和术语,繁杂多样,对该类材料的命名、酶学特性和机制等均缺少统一的规范和标准^[7-10],容易造成概念混淆和理解差异,不利于这一领域的发展。

本术语体系的提出,有利于规范纳米酶的研发与评价,使不同学科背景和领域的人对本领域形成统一的认识和理解,对于学术研究、标准制定、技术转化和产品研发等均具有重要意义。

一 描述纳米酶的基本术语

1. 纳米酶 nanozyme

一类具有类似天然酶催化活性和酶促反应动力学特征的纳米材料。

2. 纳米材料的类酶活性 enzyme-like activity of nanomaterials

纳米材料表现出的类似天然酶的催化活性。

3. 纳米酶活性 nanozyme activity

也称纳米酶活力,是指纳米酶催化特定化学反应的能力。

4. 纳米酶活力单位 nanozyme unit

在最适反应条件下,每分钟内催化 1 微摩尔底物转化为产物所需的纳米酶质量为 1 个纳米酶活性单位,用 U 表示。

5. 纳米酶比活力 nanozyme specific activity

也称纳米酶比活性,为每单位质量的纳米酶所含的纳米酶活力单位数,通常用 U/mg 表示。

6. 纳米酶活性调控 nanozyme activity modulation

通过改变纳米尺寸、(组成)元素、结构、形貌、表面修饰等因素来调控其催化活性的行为。

7. 纳米酶动力学 nanozyme kinetics

研究纳米酶结合底物能力和催化反应速率及其影响因素,通过酶反应分析法(enzyme assay)来获得用于酶动力学分析的反应速率数据。

8. 纳米酶动力学常数 nanozyme kinetics constant

纳米酶的催化反应通常遵循米氏方程,反应动力学常数包括:纳米酶反应最大速率、纳米酶米氏常数、纳米酶催化常数、纳米酶专一性常数。

9. 纳米酶反应最大速率 nanozyme maximum velocity

指一定条件下,当纳米酶被底物饱和时的反应速率,通常用 V_{max} 表示。

10. 纳米酶最适条件 nanozyme optimal condition

使纳米酶的催化反应速率最大的反应条件,包括温度、pH、底物、离子强度等。

11. 纳米酶米氏常数 nanozyme Michaelis-Menten constant

反应速率达到最大反应速率一半时的底物浓度,通常用 K_m 表示。

12. 纳米酶催化常数 nanozyme catalytic number

也称转换数,纳米酶被饱和时每秒钟每个纳米酶颗粒转化底物的数量,通常用 k_{cat} 表示。

13. 纳米酶专一性常数 nanozyme selectivity constant

纳米酶催化底物形成产物的表观二级速率常数,通常用 k_{cat}/K_m 表示。

14. 纳米酶表征 nanozyme characterization

利用纳米、生物、物理、化学等技术描述纳米酶的物理、化学、生物学等特征。

15. 纳米酶多酶活性 nanozyme with multienzyme-

like activity

指一种纳米材料表现出不同的类酶活性。

二 描述特定催化类型纳米酶的术语

1. 氧化—还原纳米酶 oxidoreductase nanozyme

能够催化氧化—还原反应,即分子间的电子转移反应的纳米酶,主要包括氧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶、超氧化物歧化酶。例如:

①过氧化物纳米酶 peroxidase nanozyme

具有与过氧化物酶相似催化活性的纳米材料,即以过氧化氢为电子受体催化底物氧化的纳米酶。

②氧化纳米酶 oxidase nanozyme

具有氧化酶相似催化活性的纳米材料,即催化氧化底物并将氧还原成过氧化氢的纳米酶。

③超氧化物歧化纳米酶 superoxide dismutase nanozyme

具有超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 相似催化活性的纳米材料,即催化超氧阴离子自由基产生氧气和双氧水的纳米酶。

④过氧化氢纳米酶 catalase nanozyme

具有过氧化氢酶相似催化活性的纳米材料,即催化过氧化氢分解成氧和水的纳米酶。

⑤卤代过氧化物纳米酶 haloperoxidase nanozyme

具有卤代过氧化物酶相似催化活性的纳米材料,即在过氧化氢存在的条件下,可催化卤化物氧化为相应的次卤酸的纳米酶。

⑥谷胱甘肽过氧化物纳米酶 glutathione peroxidase nanozyme

具有谷胱甘肽过氧化物酶相似催化活性的纳米材料,即可以催化过氧化氢将还原型谷胱甘肽氧化为氧化型谷胱甘肽的纳米酶。

⑦尿酸氧化纳米酶 uricase nanozyme

具有尿酸氧化酶相似催化活性的纳米材料,即可催化尿酸氧化,最终生成尿囊酸的纳米酶。

⑧葡萄糖氧化纳米酶 glucose oxidase nanozyme

具有葡萄糖氧化酶相似催化活性的纳米材料,即可催化葡萄糖氧化,最终生成葡萄糖酸的纳米酶。

⑨甲烷单加氧纳米酶 methane monooxygenase nanozyme

具有甲烷单加氧酶相似催化活性的纳米材料,即可催化甲烷发生单加氧反应生产甲醇的纳米酶。

2. 水解纳米酶 hydrolase nanozyme

是催化水解反应的一类纳米酶的总称,根据水解底物的不同,又可细分为酯酶-、磷酸酶-、蛋白酶-、酸酐-纳米酶。

3. 裂合纳米酶 lyase nanozyme

催化分解不同化学键的纳米酶,但不包括水解及氧化反应,过程中通常会形成一个新的双键或一个新的环状结构。

4. 转移纳米酶 transferase nanozyme

催化底物之间进行基团转移的纳米酶,比如乙酰基、甲基、氨基等基团。

5. 异构纳米酶 isomerase nanozyme

催化同分异构体转变的纳米酶。

6. 连接纳米酶 ligase nanozyme

催化两分子底物合成为一分子产物的纳米酶。

三 描述特定纳米酶的术语

对纳米酶的描述,应具有“材料组成/术式”+“类酶活性”+纳米酶的组成。

常见几类主要有(此处仅为举例,不限于这些类型):

金属氧化物

Fe_3O_4 -过氧化物纳米酶 Fe_3O_4 -peroxidase nanozyme

Co_3O_4 -过氧化物纳米酶 Co_3O_4 -peroxidase nanozyme

Cu_2O -过氧化物纳米酶 Cu_2O -peroxidase nanozyme

MnO_2 -过氧化物纳米酶 MnO_2 -peroxidase nanozyme

MoO_3 -过氧化物纳米酶 MoO_3 -peroxidase nanozyme

CeO_2 -超氧歧化物纳米酶 CeO_2 -SOD nanozyme

TiO_2 -过氧化物纳米酶 TiO_2 -peroxidase nanozyme

V_2O_5 -过氧化物纳米酶 V_2O_5 -peroxidase nanozyme

FePO₄-超氧歧化物纳米酶 FePO₄-SOD nanozyme

MnFe₂O₄-超氧歧化物纳米酶 MnFe₂O₄-SOD nanozyme

金属硫化物

CuS-过氧化物纳米酶 CuS-peroxidase nanozyme

MoS₂-过氧化物纳米酶 MoS₂-peroxidase nanozyme

金属复合物

普鲁士蓝-过氧化物纳米酶 Prussian blue-peroxidase nanozyme

Fe-N-C-氧化纳米酶 Fe-N-C-oxidase nanozyme

金属有机框架化合物-氧化纳米酶 metal-organic framework-oxidase nanozyme

金属有机框架化合物-过氧化物纳米酶 metal-organic framework-peroxidase nanozyme

金属有机框架化合物-水解纳米酶 metal-organic framework-hydrolase nanozyme

金属

金-过氧化物纳米酶 Au-peroxidase nanozyme

铂-过氧化氢纳米酶 Pt-catalase nanozyme

钯-过氧化物纳米酶 Pd-peroxidase nanozyme

铱-过氧化物纳米酶 Ir-peroxidase nanozyme

Au-Pd-氧化纳米酶 Au-Pd-oxidase nanozyme

碳

碳球-过氧化物纳米酶 Carbon sphere-peroxidase nanozyme

C₃N₄-过氧化物纳米酶 C₃N₄-peroxidase nanozyme

氧化石墨烯-过氧化物纳米酶 Graphene oxide-peroxidase nanozyme

C₆₀-超氧化物歧化纳米酶 C₆₀-SOD nanozyme

碳点-过氧化物纳米酶 Carbon dots-peroxidase nanozyme

四 学科名称

纳米酶学 nanozymology

研究纳米酶的活性、催化机制、材料设计和工

程转化应用的学科。

五 结 语

纳米酶术语体系的建立和标准化,对纳米酶的基础研究、应用研究、产品开发和行业市场标准的制定都具有十分重大的意义。本文介绍了该领域的最新进展,以期从事纳米酶、模拟酶、纳米材料领域的专家学者和技术人员提供参考。

参考文献

- [1] Gao L, Zhuang J, Nie L, et al. Intrinsic peroxidase-like activity of ferromagnetic nanoparticles [J]. Nat Nanotechnol, 2007, 2:577-583.
- [2] 高利增, 阎锡鑫. 纳米酶的发现与应用[J]. 生物化学与生物物理进展, 2013, 40(10):892-902.
- [3] Wei H, Wang E. Nanomaterials with enzyme-like characteristics (nanozymes): next-generation artificial enzymes [J]. Chem Soc Rev, 2013, 42:6060-6093.
- [4] Wu J, Wang X, Wang Q, et al. Nanomaterials with enzyme-like characteristics (nanozymes): next-generation artificial enzymes (II) [J]. Chem. Soc. Rev, 2018, 48: 1004-1079.
- [5] Meng X, Fan K, Yan X. Nanozymes: an emerging field bridging nanotechnology and enzymology [J]. Sci China Life Sci, 2019, 62 (11):1543-1546.
- [6] Yan X. Nanozymology. Nanostructure Science and Technology [M]. Springer, Singapore, 2020
- [7] Jiang B, Duan D, Gao L, et al. Standardized assays for determining the catalytic activity and kinetics of peroxidase-like nanozymes [J]. Nat Protoc, 2018, 13:1506-1520.
- [8] Liang M, Yan X. Nanozymes: From New Concepts, Mechanisms, and Standards to Applications [J]. Acc Chem Res, 2019, 52 (8): 2190-2200.
- [9] Huang Y, Ren J, Qu X. Nanozymes: Classification, Catalytic Mechanisms, Activity Regulation, and Applications [J]. Chem Rev, 2019, 119 (6): 4357-4412.
- [10] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 纳米技术 氧化铁纳米颗粒类过氧化物酶活性测量方法: GB/T 37966—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.