



广州市科学技术协会

广州市南山自然科学学术交流基金会

广州市合力科普基金会

资助出版

Microbial Extracellular Respiration:
Principle and Application

微生物胞外呼吸： 原理与应用

周顺桂 等 编著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版
广州市科学技术协会
广州市南山自然科学学术交流基金会 资助出版
广州市合力科普基金会

微生物胞外呼吸：原理与应用

周顺桂 等 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书由国家科学技术学术著作出版基金与广州市南山自然科学学术交流基金会资助出版。本书图文并茂,内容详实,共 11 章,涵盖内容广泛而自成体系,前三章主要介绍微生物胞外呼吸概论、胞外呼吸菌及其胞外电子传递机制;第四章至第六章分别介绍铁呼吸、腐殖质呼吸以及产电呼吸;第七章至第十章着重介绍利用微生物胞外呼吸原理发展的各项应用技术;第十一章为大家呈现自然界中存在的天然生物地球电池效应。

本书可作为高等院校的微生物电化学教材,也可供微生物学科各领域的研究人员和科技工作者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

微生物胞外呼吸:原理与应用/周顺桂等编著. —北京:科学出版社, 2016.10

ISBN 978-7-03-050053-3

I. ①微… II. ①周… III. ①微生物-呼吸-研究 IV. ①Q939

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 235426 号

责任编辑:李秀伟 / 责任校对:张怡君

责任印制:肖 兴 / 封面设计:北京图阅盛世文化传媒有限公司

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 10 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 10 月第一次印刷 印张: 19 1/4

字数: 450 000

定价: 168.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

微生物胞外呼吸 (extracellular respiration) 是近年来发现的新型微生物能量代谢形式, 是指厌氧条件下, 微生物在胞内氧化有机物释放电子, 产生的电子经胞内呼吸链传递到胞外电子受体使其还原, 并产生能量维持微生物自身生长的过程。胞外呼吸与传统胞内厌氧呼吸存在两点显著差异: ①电子最终必须传递至胞外。与 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 等可溶性电子受体不同, 胞外呼吸的电子受体为固体 (如铁/锰氧化物、固体电极) 或大分子有机物 (如腐殖质), 无法进入细胞, 因此氧化过程产生的电子必须设法“穿过”非导电的细胞膜/壁传递至胞外受体。②电子传递途径不同。与常规电子传递链相比, 胞外呼吸产生的电子必须经过周质组分的传递到达细胞外膜, 然后通过外膜上的多血红素细胞色素 *c*、“纳米导线” (nanowires) 或电子穿梭体等方式传递到胞外。根据胞外电子受体的不同, 胞外呼吸主要分为铁呼吸、腐殖质呼吸和产电呼吸三种形式。

胞外呼吸的发现拓宽了人们对微生物呼吸多样性的认识, 其本质问题是微生物与胞外电子受体的相互作用, 即微生物如何将电子从胞内转移至胞外受体, 并获取生命活动的能量。在理论方面, 胞外呼吸的发现为呼吸链电子传递、胞外电子转移、能量产生途径等科学问题提供了新的视角。例如, 当胞外呼吸菌的电子受体是其他微生物时, 两种微生物之间形成一种新的种间电子传递方式——“电子”互营, 这种不同于传统“种间氢转移”或“种间甲酸转移”的互营方式, 为理解自然界中微生物之间的相互作用提供了全新的思路。在应用方面, 胞外呼吸在碳、氮、硫、铁等元素生物地球化学循环、污染物的转化脱毒及生物能源利用等方面均具有重要意义。例如, 伴随微生物铁/腐殖质还原过程的进行不仅可以使高价金属元素还原, 还可以改变其金属元素在环境中的移动性、毒性及放射性, 已有成功案例是美国科罗拉多州来复镇一个废弃的铀矿处理厂, 利用地杆菌原位修复铀污染地下水。

近年来, 胞外呼吸的生态学和环境学意义受到越来越多的关注, 但目前还没有较为全面系统的总结。本书以微生物胞外呼吸为核心, 从原理到应用, 结合国内外研究进展, 旨在为感兴趣的研究人员提供相关的知识背景, 以便他们更好地理解和应用微生物胞外呼吸作用。

本书共 11 章: 第一章简述微生物胞外呼吸的发现、产能代谢、电子传递及其主要形式。第二章介绍关于胞外呼吸菌分离纯化、纯菌胞外呼吸属性验证、生理生化特性鉴定、胞外呼吸菌种保藏、胞外呼吸菌遗传改造的相关方法。第三章从呼吸作用的本质入手, 解析电子在胞内传递、胞内到胞外、细胞至细胞这几个过程中的传递机制及重要功能组分。第四章至第六章分别详述最主要的胞外呼吸类型: 铁呼吸、腐殖质呼吸和产电呼吸, 包括其原理、电子转移机制及其环境效应, 研究案例大部分来自本课题组近几年的研究成果。第七章介绍胞外呼吸应用的研究热点——微生物燃料电池技术, 包括电池原理、电池构型、电池材料、应用案例及前景。第八章 MXC 技术总结了微生物电解池

产氢技术、微生物电合成系统、微生物脱盐燃料电池、生物电芬顿系统、微生物太阳能电池及其相关应用案例。第九章介绍基于微生物胞外呼吸过程的原位生物修复技术的原理、应用领域及应用案例。第十章详述基于微生物产电呼吸的各种生物电化学器件，以及其在环境监测、生物计算和生物能源等领域的应用案例。第十一章综述最新概念“天然微生物燃料电池”的效应、形成机制、研究方法、效应模型及其生态学意义。

微生物胞外呼吸是一个非常前沿的研究方向，涉及多个学科领域，发展日新月异，由于编著者水平有限，书中难免存在一些不足之处，敬请读者批评指正。

周顺桂

2016年4月

术 语 表

英文名称	缩写	中文名称
2,4-dichlorophenoxyacetic acid	2,4-D	2,4-二氯苯氧乙酸
2-amino-3-carboxy-1,4-napthoquinone	ACNQ	2-氨基-3-羧基-1,4-萘醌
2-hydroxy-1,4-naphthoquinone	2-HNQ	2-羟基-1,4-萘醌
454 pyrosequencing		454 焦磷酸测序
5,5',7,7'-indigo tetrasulfonate	I4S	靛蓝四磺酸
5,5',7-indigo trisulfonate	I3S	靛蓝三磺酸
5,5'-indigo disulfonate	I2S	靛蓝二磺酸
5,8-dihydroxy-1,4-naphthoquinone	5,8-DHNQ	5,8-二羟基-1,4-萘醌
5-hydroxy-1,4-naphthoquinone	5-HNQ	5-羟基-1,4-萘醌
9,10-anthraquinone-2-carboxylic acid	AQC	9,10-蒽醌-2-羧酸
9,10-anthraquinone-2-sulfonic acid	AQS	9,10-蒽醌-2-磺酸
Abiotic cathode		非生物型阴极
Acetate	Ac	乙酸
Acetyl-coenzyme A	CoA	乙酰辅酶 A
Acid volatile sulfide	AVS	酸挥发性硫化物
Adenosine triphosphate	ATP	腺苷三磷酸
Aerobic respiration		有氧呼吸
Akaganeite	β -FeOOH	四方纤铁矿
Algae-based microbial fuel cell	AMFC	蓝藻微生物燃料电池
Alizarin	Ali	茜素
Anabolism		合成代谢
Anaerobic methanotrophic archaea	ANME	厌氧甲烷氧化古菌
Anaerobic oxidation of methane	AOM	厌氧甲烷氧化
Anaerobic respiration		无氧呼吸
Anion-exchange membrane	AEM	阴离子交换膜
Anthraquinone-2,6-disulfonate	AQDS	蒽醌-2,6-二磺酸
Aromaticity		芳香环
Benzaldehyde		苯甲醛

续表

英文名称	缩写	中文名称
Benzene		苯
Benzoate	Bzo	安息香酸，苯酸盐
Benzylalcohol		苄醇
Biocapacitor		生物电容器
Biocathode		生物型阴极
Biochemical oxygen demand	BOD	生化需氧量
Bioelectrochemical system	BES	微生物电化学系统
Biofilm		生物膜
Biogeobattery		生物地球电池
Biological computer		生物计算机
Bioventing		生物通风
Butanol	BtOH	丁醇
Butyrate	Buty	丁酸
Capacitance	C	电容
Carbon felt	CF	碳毡
Carbon tetrachloride	CT	四氯化碳
Carminic acid	Car	胭脂红酸
Catabolism		分解代谢
Cation exchange membrane	CEM	阳离子交换膜
Chemical activated bar		化学活性栅
Chemical oxygen demand	COD	化学需氧量
Chronoamperometry		计时电流法
cis-Dichloroethene		顺式二氯乙烯
cis-1,2-Dichloroethene	cis-DCE	二氯乙烯
Co-metabolism		共代谢
Conducting probe atomic force microscopy		导电探针原子力显微镜
Counter electrode	CE	对电极
c-type cytochromes	Cyt c	细胞色素 c
Cyclic voltammetry	CV	循环伏安法
Cysteine	Cys	半胱氨酸
Cytoplasmic membrane	CM	细胞质膜
Deep sequencing		深度测序

续表

英文名称	缩写	中文名称
Delocalization		离域
Denaturing gradient gel electrophoresis	DGGE	变性梯度凝胶电泳
Dichloro diphenyl trichloroethane	DDT	滴滴涕
Dichlorophenol	DCP	二氯苯酚
Dimethyl sulfoxide	DMSO	二甲基亚砷
Direct interspecies electron transfer	DIET	直接种间电子传递
Dissimilatory iron(III) reduction bacteria	DIRB	异化铁还原菌
Dissimilatory metal reduction	DMR	异化金属还原
DNA nanoball sequencing		DNA 纳米球测序
Electrical charge		电量
Electricigenic respiration		产电呼吸
Electroactive biofilm	EAB	电活性生物膜
Electrobiocommodities		电化学生物商品
Electrochemical impedance spectroscopy	EIS	电化学阻抗谱
Electrochemical snorkel		电化学通气管
Electrochemistry and time-resolved surface-enhanced resonance raman	ETR-SERR	结合电化学和时间分辨的表面增强拉曼光谱
Electron accepting capacity	EAC	电子接受能力
Electron donating capacity	EDC	电子供给能力
Electron shuffle		电子拖曳
Electron shuttle		电子穿梭体
Electron transfer	ET	电子传递
Electron transfer capacity	ETC	电子转移容量
Electron transport chain	ETC	电子传递链
Energy taxis		能量趋向性
Enhanced-bioremediation		生物强化
Ethanol	EtOH	乙醇
Ethylenediamine-tetraacetic acid	EDTA	乙二胺四乙酸
Exoelectricigens		产电微生物
Extracellular electron transport	EET	胞外电子传递
Extracellular polymer substances	EPS	胞外聚合物
Extracellular respiration	ER	胞外呼吸
Fermentation		发酵
Ferric citrate	Fe(III)-cit	柠檬酸铁

续表

英文名称	缩写	中文名称
Ferric hydroxide	Fe(III)-H	羟基氧化铁
Ferric nitriloacetic acid	Fe(III)-NTA	氨三乙酸铁
Ferric pyrophosphate	Fe(III)-P	焦磷酸铁
Ferrihydrite	Fe ₅ HO ₈ ·4H ₂ O	水铁矿
Ferrozine		菲洛嗉
Flavin		黄素
Flavin adenine dinucleotide	FAD	黄素腺嘌呤二核苷酸
Flavin mononucleotide	FMN	黄素单核苷酸
Flow cytometry		流式细胞仪
Formal potential		条件电位
Formate	For	甲酸
Fulvic acid	FA	富里酸
Gallocyanine		花菁
Geothite	α -FeOOH	针铁矿
German collection of microorganisms and cell cultures	DSMZ	德国菌种保藏中心
Glucose	Glu	葡萄糖
Glycerol	Glyc	丙三醇
Gram negative	G ⁻	革兰氏阴性
Gram positive	G ⁺	革兰氏阳性
Hematite	α -Fe ₂ O ₃	赤铁矿
High potential		高电位
High-throughput sequencing		高通量测序技术
Humin		胡敏素
Hopping		跳跃
Humic acid	HA	腐殖酸
Humic substances	HS	腐殖质
Humus-respiration		腐殖质呼吸
Hydroquinone		氢醌
Hydroxyphenylacetate	HPE	羟基苯乙酸
Illumina (Solexa) sequencing		Solexa 基因测序
Indigo		靛蓝
Inductance		电感
Initial potential		初始电位

续表

英文名称	缩写	中文名称
<i>In-situ</i> bioremediation		原位生物修复
Integrated photobioelectrochemical system	IPBS	生物光电化学系统
Interspecies electron transfer	IET	种间电子传递
Ion semiconductor sequencing		离子半导体测序
Ion-selective microelectrode	ISE	离子选择性微电极
Iron/manganese respiration		铁（锰）呼吸
Isoalloxazine		异咯嗪
Lactate	Lac	乳酸
Land farming		土地耕作
Lepidocrocite	γ -FeOOH	纤铁矿 ⁺
Linear sweep cycle voltammetry		线性扫描伏安法
Low potential		低电位
Mackinawite		四方硫铁矿 ⁺
Magnetite	Fe ₃ O ₄	磁铁矿
Maltol		麦芽糖醇
Mannose	Man	甘露糖
Massively parallel signature sequencing	MPSS	大规模平行签名测序
Menaquinone	MQ	甲基萘醌
Methanol	MeOH	甲醇
Metabolism		代谢
Methyl tert-butyl ether	MTBE	甲基叔丁基醚
Microbial desalination cell	MDC	微生物脱盐燃料电池
Microbial electrolysis and desalination cell	MEDC	微生物电解脱盐电池
Microbial electrolysis cell	MEC	微生物电解池
Microbial electrosynthesis	MES	微生物电合成
Microbial fuel cell	MFC	微生物燃料电池
Microbial nanowire		微生物纳米导线
Microbial solar cell	MSC	微生物太阳能电池
Microelectrode		微电极
Mineralization		矿化
Methyl tertiary butyl ether	MTBE	甲基叔丁基醚
Nanowire		纳米导线

续表

英文名称	缩写	中文名称
Neutral red		中性红
New methylene blue		新亚甲基蓝
Nicotinamide adenine dinucleotide	NADH	烟酰胺腺嘌呤二核苷酸 (还原型)
Non-aqueous phase liquids	NAPLs	非水相流体
Octogen	HMX	奥克托金
<i>o</i> -phenanthroline		邻菲罗啉
Ortho-substituted halophenols	OHP	邻卤代苯酚
Outer membrane	OM	细胞外膜
Outer membrane cytochromes	OMCs	外膜细胞色素
Outer membrane protein	OMP	外膜蛋白
Oxidation-reduction potential	ORP	氧化还原电位
Oxidation-reduction reactions		氧化还原反应
Para-benzoquinone		1,4-苯醌
<i>p</i> -Cresol		对甲酚
Peak current		峰电流
Peak potential		峰电位
Pentachlorophenol	PCP	五氯苯酚
Peptone	Pep	蛋白胨
Phenanthrene		菲
Phenazine ethosulfate		吩嗪硫酸乙酯
Phenazine-1-carboxamide		吩嗪-1-甲酰胺
Phenol		苯酚
Photosynthetic bacteria	PSB	光合细菌
Photosynthetic bacteria microbial fuel cell	PBMFC	光合细菌微生物燃料电池
<i>p</i> -Hydroxybenzaldehyde		羟基苯甲醛
<i>p</i> -Hydroxybenzoate		羟基安息香酸盐
<i>p</i> -Hydroxybenzylalcohol		对羟基苯甲醇
Plant microbial fuel cell	PMFC	植物微生物燃料电池
Polony sequencing		聚合酶克隆测序
Polycyclic aromatic hydrocarbon	PAHs	多环芳烃
Polypyrrole	Ppy	聚吡咯

续表

英文名称	缩写	中文名称
Propanol	PrOH	丙醇
Propionate	Prop	丙酸
Pyocyanine		绿脓菌素
Pyrite		黄铁矿
Pyrrhotine		磁黄铁矿
Pyruvate	Pyr	丙酮酸
Readily oxidizable organic matter	ROOM	易氧化有机质
Reduced flavin adenine dinucleotide	FADH ₂	黄素腺嘌呤二核苷酸（还原型）
Reduction potential		还原势
Reference electrode	RE	参比电极
Resistance	R	电阻
Resorufin		试卤灵
Rhamnose	Rha	鼠李糖
Rhein	Rhe	莱茵
Rhodamine B	RhB	罗丹明 B
Riboflavin		核黄素
Scanning electron microscope	SEM	扫描式电子显微镜
Scanning tunneling microscopy	STM	隧道扫描电镜
Schwertmannite	Fe ₈ O ₈ (OH) ₆ SO ₄	施氏矿物
Secretion systems		分泌系统
Sediment microbial fuel cells	SMFC	沉积物微生物燃料电池
Self-potential	SP	自然电位
Semiquinone		半醌
Siderite	FeCO ₃	菱铁矿
Stack microbial desalination cell	SMDC	堆叠型微生物脱盐电池
Substrate level phosphorylation	SLP	底物水平磷酸化
Sucrose	Suc	蔗糖
Sulfate reducing bacteria	SRB	硫还原细菌
Syntrophy		互营
Terminal restriction fragment length polymorphism	T-RFLP	末端限制性片段长度多态性
Tetrachloroethene	PCE	四氯乙烯
Tetrachlorophenol	TTCP	四氯苯酚

续表

英文名称	缩写	中文名称
Thermophilic anaerobic oxidation of methane	TAOM	嗜热厌氧甲烷氧化
Thionine		硫堇
Toluene		甲苯
Toluidine blue		甲苯胺蓝
Tricarboxylic acid cycle	TCA	三羧酸循环
Trichloroacetic acid	TCA	三氯乙酸
Trichloroethylene	TCE	三氯乙烯
Trichlorophenol	TCP	三氯苯酚
Tunneling		隧穿
Tunneling spectroscopy		隧道光谱
Type II secretion system	T2S	二型分泌系统
Upflow anaerobic sludge blanket	UASB	升流式厌氧污泥床反应器
Vinyl chloride		氯乙烯
Viologen		甲基紫精
Working electrode	WE	工作电极

目 录

前言

术语表

第一章 微生物胞外呼吸概论.....	1
第一节 微生物胞外呼吸的发现.....	1
第二节 微生物的产能代谢.....	1
一、呼吸	3
二、发酵	7
第三节 微生物胞外呼吸.....	7
一、铁/锰呼吸	9
二、腐殖质呼吸.....	9
三、产电呼吸.....	10
四、胞外呼吸的应用.....	10
参考文献	12
第二章 胞外呼吸菌的分离纯化及遗传改造.....	14
第一节 胞外呼吸菌的分离纯化.....	14
一、样品采集.....	14
二、Fe(III)/腐殖质还原菌的分离筛选	14
三、产电菌的分离筛选.....	21
第二节 纯菌的胞外呼吸属性验证.....	22
一、腐殖质还原.....	22
二、Fe(III)还原	22
三、电极还原.....	22
第三节 生理生化特性的鉴定.....	23
一、生理指标鉴定.....	23
二、生化特性的鉴定.....	26
三、分子生物学特性的鉴定.....	27
第四节 胞外呼吸菌种保藏.....	28
一、厌氧菌甘油保藏.....	28
二、厌氧菌冷冻干燥保藏.....	28
第五节 胞外呼吸菌的遗传改造.....	29
一、对胞外呼吸菌自身的遗传改造.....	29
二、胞外呼吸菌基因的外源表达.....	31
三、设计“超级细菌”的构想.....	35

四、胞外呼吸菌遗传改造面临的挑战.....	38
第六节 研究案例.....	38
一、案例 1: 利用 U 形微生物燃料电池分离胞外产电菌 <i>Ochrobactrum anthropi</i> YZ-1 (Zuo et al., 2008)	38
二、案例 2: <i>Thermincola ferriacetica</i> sp. nov., 一株具有异化 Fe(III) 还原能力的厌氧、嗜热、兼性能自养菌 (Zavarzina et al., 2007)	42
三、案例 3: <i>Thauera humireducens</i> sp. nov., 一株分离自微生物燃料电池的腐殖质还原菌 (Yang et al., 2013)	45
四、小结	47
参考文献	47
第三章 微生物胞外呼吸的电子传递机制.....	52
第一节 电子从细胞内膜传递到细胞外膜: 胞内电子传递链.....	52
第二节 电子从细胞外膜传递到电子受体: 从胞内到胞外.....	53
一、细胞色素 <i>c</i> (c-type cytochromes, Cyt <i>c</i>)	55
二、纳米导线 (nanowire)	58
三、电子穿梭体 (中介体)	64
第三节 微生物直接种间电子传递: 从细胞至细胞.....	73
一、 <i>Geobacter</i> 属至 <i>Geobacter</i> 属.....	74
二、 <i>Geobacter</i> 属至 <i>Methanogens</i>	76
三、 <i>Geobacter sulfurreducens</i> 至 <i>Thiobacillus denitrificans</i>	78
四、厌氧甲烷氧化古菌至硫还原细菌.....	79
参考文献	80
第四章 铁呼吸	86
第一节 环境中的铁元素.....	86
一、土壤中的铁氧化物.....	86
二、铁在生物代谢中的重要性.....	88
第二节 土壤中的铁循环.....	88
一、微生物 Fe(II) 氧化.....	89
二、Fe(III) 还原.....	92
第三节 铁呼吸	94
一、铁呼吸原理.....	94
二、铁还原菌.....	98
第四节 铁呼吸的环境效应.....	102
一、有机污染物降解.....	103
二、无机污染防治.....	104
三、生物成矿.....	105
第五节 研究案例.....	105
一、案例 1: 有机氯的生物还原脱氯 (李晓敏等, 2009)	105
二、案例 2: 铁还原菌驱动的偶氮染料脱色降解 (武春媛等, 2013)	107

三、案例 3: 水铁矿-腐殖酸共沉淀物的异化还原与形态转化 (Shimizu et al., 2013)	109
四、小结	112
参考文献	112
第五章 腐殖质呼吸	119
第一节 环境中的腐殖质	119
一、腐殖质的定义及形成	119
二、腐殖质的组成及基本性质	120
三、腐殖质的吸附特性	121
四、腐殖质的电化学性质	123
五、腐殖质的环境修复属性	124
第二节 腐殖质呼吸的原理及影响因素	125
一、腐殖质呼吸的电子接受位点	125
二、腐殖质电子转移容量表征	126
三、腐殖质呼吸的影响因素	127
四、增强腐殖质电子转移能力的措施	129
第三节 腐殖质呼吸与铁呼吸的异同及关系	129
一、电子受体的特点	129
二、腐殖质呼吸菌与铁呼吸菌	130
三、腐殖质呼吸与铁呼吸	130
第四节 腐殖质呼吸的生态学意义	131
一、作为电子受体加速有机碳厌氧矿化及难降解污染物的降解	131
二、作为电子穿梭体介导金属脱毒及有机污染物厌氧降解	131
三、作为电子供体促进高氧化态电子受体的还原及减少温室气体的排放	133
第五节 研究案例	134
一、案例 1: 有机污染物甲基叔丁基醚 (MTBE) 的生物降解 (Finneran and Lovley, 2001)	134
二、案例 2: 固态胡敏素介导五氯苯酚 (PCP) 的生物还原脱氯 (Zhang and Katayama, 2012)	135
三、案例 3: 腐殖质介导 2,4-二氯苯氧乙酸 (2,4-D) 的还原脱氯 (王弋博等, 2011)	137
四、小结	138
参考文献	139
第六章 产电呼吸	143
第一节 产电细菌与电极相互作用	143
第二节 电活性生物膜	144
第三节 EAB 研究方法	145
一、EAB 培养成膜	145
二、EAB 三维结构表征	146

- 三、EAB 电化学表征..... 147
- 第四节 研究案例..... 160
 - 一、案例一：电化学方法研究 EAB 活性对 pH 的响应机制
(Yuan et al., 2011) 160
 - 二、案例二：表面增强拉曼光谱表征 EAB 界面电子转移动力学过程
(Ly et al., 2013) 163
 - 三、案例三：接种物影响 EAB 形成和性能的微生物机制研究
(Miceli et al., 2012) 165
 - 四、小结 167
- 参考文献 168
- 第七章 微生物燃料电池技术..... 170
 - 第一节 微生物燃料电池原理..... 170
 - 一、阳极底物生物氧化..... 171
 - 二、阳极还原..... 176
 - 三、外电路电子传输..... 176
 - 四、质子迁移..... 176
 - 五、阴极反应..... 177
 - 第二节 微生物燃料电池 (MFC) 构型 179
 - 一、双室 MFC 179
 - 二、单室 MFC 180
 - 第三节 微生物燃料电池 (MFC) 材料 182
 - 一、隔膜 182
 - 二、阳极材料..... 182
 - 三、阴极催化剂..... 184
 - 第四节 MFC 放大及应用中试 186
 - 一、MFC 的放大 186
 - 二、MFC 技术应用的瓶颈问题 188
 - 三、应用案例..... 189
 - 参考文献 192
- 第八章 MXC 技术..... 196
 - 第一节 微生物电解池产氢技术..... 196
 - 一、基本原理..... 196
 - 二、MEC 产氢系统设计与运行 197
 - 第二节 微生物电合成系统..... 200
 - 一、基本原理..... 200
 - 二、微生物 200
 - 三、电能来源..... 201
 - 四、电子传递方式..... 202
 - 第三节 微生物脱盐燃料电池..... 203