

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

重庆市 PM _{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子	吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)
2012~2013 年间北京市 PM _{2.5} 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析	杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)
南京地区大气 PM _{1.1} 中 OC、EC 特征及来源解析	姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)
太原市大气 PM _{2.5} 中碳质组成及变化特征	张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)
朔州市市区 PM _{2.5} 中元素碳、有机碳的分布特征	刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)
中国 2013 年 1 月 PM _{2.5} 重污染过程卫星反演研究	薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)
高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究	廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)
重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量	覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)
海南五指山大气气态总汞含量变化特征	雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)
树叶烟尘中的有机碳和元素碳	陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)
介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析	姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)
长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价	母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)
河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素	王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)
岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究	蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)
岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析	卢丽, 王喆, 裴建国 (862)
两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例	闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)
三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)
夏、冬季降雨中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析	梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)
南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比	程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)
夏季大辽河河口区水体反硝化及其影响因素	杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)
太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性	叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)
汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析	王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)
三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化	黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)
太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算	金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)
贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析	苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)
物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用	史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)
磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响	殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)
矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究	王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)
PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝	和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)
微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用	宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)
生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究	汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)
污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究	罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)
高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律	卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)
MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制	郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)
基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响	滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)
天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究	何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)
开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价	李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)
不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响	邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)
种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘灵飞 (1053)
江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价	金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)
镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用	章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)
高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响	李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)
黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究	李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)
单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究	叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)
不同有机物料中的磷形态特征研究	邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)
北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究	施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)
燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述	段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)
菌根真菌金属耐性机制研究进展	陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)
亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展	沈李东 (1133)
《环境科学》征订启事 (830) 《环境科学》征稿简则 (846) 信息 (838, 861, 913, 935)	

亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展

沈李东

(南京信息工程大学农业资源与环境系, 南京 210044)

摘要: 亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化(nitrite-dependent anaerobic methane oxidation, N-DAMO)是新近发现的生物反应,是偶联碳氮循环的关键环节,是环境领域和微生物领域的重大发现. N-DAMO 的发现对于完善碳氮生物地球化学循环、丰富微生物学内容和研发新型生物脱氮除碳工艺均具有巨大的推动作用. 催化 N-DAMO 反应的微生物为 *Candidatus Methyloirabilis oxyfera* (*M. oxyfera*),其隶属于一新发现的细菌门——NC10 门. 近年来,*M. oxyfera* 的生物学研究取得了许多突破性进展,如初步探明了其个体形态特征、细胞化学组分特征、富集培养特征、生理生化特征及生态学特征,最突出的例子包括发现了 *M. oxyfera* 独特的细胞(星状)形态及特殊的脂肪酸($10\text{MeC}_{16:1\Delta 7}$)组分等. 最近,N-DAMO 的机制研究方面也有了突破性进展:发现了地球上第 4 种生物产氧途径. 目前认为,*M. oxyfera* 具有内产氧功能,其首先将 NO_2^- 还原为 NO,然后将 2 分子 NO 进行歧化反应生成 N_2 和 O_2 ,最后利用生成的 O_2 对甲烷进行氧化. 本文系统地介绍了 *M. oxyfera* 各方面的微生物特性.

关键词: N-DAMO; *Candidatus Methyloirabilis oxyfera*; 星形细胞形态; $10\text{MeC}_{16:1\Delta 7}$; 内产氧代谢; 甲烷汇

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-1133-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.03.049

Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria

SHEN Li-dong

(Department of Agricultural Resources and Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Nitrite-dependent anaerobic methane oxidation (N-DAMO) is a recently discovered process that constitutes a unique association between the two major global elements essential for life, carbon and nitrogen. This process is one of the most important discoveries in the fields of environmental science and microbiology. The discovery of N-DAMO process supplements biogeochemical cycles of carbon and nitrogen in nature, extends microbial diversity and urges development of novel simultaneous carbon and nitrogen removal process. The N-DAMO process is mediated by the bacterium “*Candidatus Methyloirabilis oxyfera*” (*M. oxyfera*), which belongs to the candidate phylum NC10. Currently, a series of breakthroughs have been made in the research of *M. oxyfera*. The properties of *M. oxyfera* morphology, chemical composition, enrichment culture, physiology and biochemistry, and ecology have been revealed. Most importantly, the special ultrastructure (star-like) of the cell shape and unique chemical composition ($10\text{MeC}_{16:1\Delta 7}$) of *M. oxyfera* have been revealed. In addition, a new intra-aerobic metabolism (the fourth biological pathway to produce oxygen) was discovered in *M. oxyfera*. It was observed that *M. oxyfera* bypassed the denitrification intermediate nitrous oxide by the conversion of two nitric oxide molecules to dinitrogen gas and oxygen, which was then used to oxidise methane. The present review summarises various aspects of microbiological properties of *M. oxyfera*.

Key words: N-DAMO; *Candidatus Methyloirabilis oxyfera*; star-like cell shape; $10\text{MeC}_{16:1\Delta 7}$; intra-aerobic metabolism; methane sink

长久以来,甲烷被认为只有在好氧条件下才能被微生物氧化. 缺氧的海洋环境中,甲烷氧化耦合硫酸盐还原生物过程的发现打破了这一传统认识^[1,2]. 研究发现,与硫酸盐还原耦合的甲烷厌氧氧化过程在控制海洋温室气体甲烷排放中起着极其重要的作用,据推断,海洋沉积层产生的 90% 以上的甲烷由此生物过程消耗^[3]. 然而,从热力学角度分析发现,以亚硝酸盐为电子受体的甲烷厌氧氧化反应是完全可能发生的,该反应在标准状况下的吉布斯自由能为 $-928 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$,而甲烷氧化耦合硫酸盐还原反应的吉布斯自由能仅为 $-16.6 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$.

尽管在自然界中可检测到甲烷和亚硝酸盐或硝酸盐的共存,但在相当长的时期内科学家都未能在自然界中找到该反应,为此,催化此类反应的微生物曾一度被认为在自然界中是“失踪”的^[4].

2006 年,Raghoebarsing 等^[5]在实验室条件下获得了能够利用亚硝酸盐为电子受体的甲烷氧化微生物富集培养物,证实了甲烷氧化可耦合亚硝酸盐的还原. 该生物过程被称之为亚硝酸盐型甲烷厌氧氧

收稿日期: 2014-09-15; 修订日期: 2014-10-23

基金项目: 南京信息工程大学人才启动基金项目(S8113112001)

作者简介: 沈李东(1986~),男,博士,讲师,主要研究方向为环境微生物和微生物生态,E-mail: shenld@nuist.edu.cn

化(nitrite-dependent anaerobic methane oxidation, N-DAMO). N-DAMO 反应的发现对完善全球碳氮循环具有重要贡献,且作为温室气体甲烷潜在的汇,其在缓解全球温室效应中可能起着重要作用^[6]. 此外,N-DAMO 反应实现了甲烷和亚硝氮的同步去除,为研发新型生物脱氮除碳工艺提供了契机^[6~8]. 参与 N-DAMO 反应的微生物是一类新的微生物,属于一新发现的细菌门——NC10 门,该门的细菌迄今都是不可培养的,且与其它门细菌的亲缘关系较远(16S rRNA 基因相似度小于 85%). Ettwig 等^[9]将此类新发现的微生物命名为 *Candidatus Methyloirabilis oxyfera* (*M. oxyfera*). 近年来,研究者对 *M. oxyfera* 的生物学方面进行了深入研究,取得了许多突破性的进展. 本文系统地综述了 *M. oxyfera* 各方面的微生物特性,以期更好地认识此类微生物在碳氮生物地球化学循环、温室气体甲烷减排和新型生物脱氮除碳工艺研发中的重要意义.

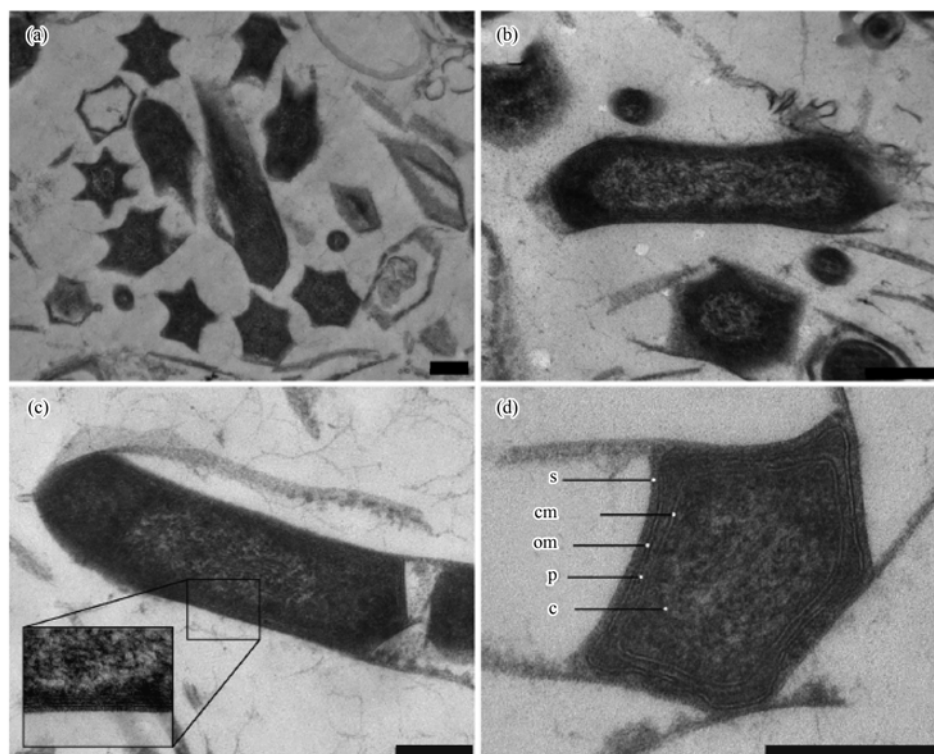
1 个体形态特征

M. oxyfera 是一种革兰氏阴性菌(G^-),细胞直径约 0.2 ~ 0.5 μm ,细胞长度约 0.8 ~ 1.1 μm ^[9,10].

透射电镜观察结果显示,*M. oxyfera* 具有非常独特的多边形(星状)细胞形态(图 1),此类多边形细胞形态至今未在其它种类微生物中发现,为此可作为鉴定 *M. oxyfera* 的一个重要形态学特征^[11]. 随后的研究也证实了 *M. oxyfera* 富集培养物中存在此类特殊的多边形细胞形态^[12,13]. 研究表明,*M. oxyfera* 基因组中含有编码类骨骼成分的基因(如 *mreB* 和 *ftsZ*),其对于细胞的形态具有重要影响^[14,15],为此,这些基因的存在被认为是导致其具有特殊星形细胞形态的重要原因^[11]. 细胞表面蛋白(S-layer protein)则被认为是维持此类微生物特殊细胞形态稳定性的重要蛋白^[11]. 透射电镜结果还显示,与其它已知的甲烷氧化菌细胞形态不一致,*M. oxyfera* 细胞中不具备提供颗粒性甲烷单加氧酶(particulate methane mono-oxygenase, pMMO)结合位点的细胞质内膜(intracytoplasmic membranes, ICMs)^[11]. 由于 ICMs 的合成需要耗费大量的能量,而 *M. oxyfera* 代谢速率低,推测其没有更多的能量来合成 ICMs^[11].

2 细胞化学组分特征

M. oxyfera 被证实由特殊的脂肪酸组成. Kool 等^[16]研究了几种 *M. oxyfera* 富集培养物中的脂质



(a) 类似星状细胞形态; (b) 和 (c): 细胞纵截面; (d): 细胞横截面; om 为外膜; p 为细胞周质; cm 为细胞质膜; c 为细胞质; s 为 S 层蛋白; 标尺为 200 nm

图 1 *M. oxyfera* 透射电镜照片^[11]

Fig. 1 Transmission electron micrograph of *M. oxyfera*

组成,发现脂肪酸 10-甲基十六烷酸($10\text{MeC}_{16:0}$)是优势脂肪酸,其含量占富集培养物脂肪酸总量的 46%. 研究还发现,*M. oxyfera* 富集培养物中存在一种特殊的脂肪酸—— $10\text{MeC}_{16:1\Delta 7}$,该脂肪酸迄今未在其它种类微生物中发现,其含量占了富集培养物脂肪酸总量的 10%,是 *M. oxyfera* 细胞特有的脂肪酸组分^[16]. 由于该脂肪酸的特殊性,Kool 等^[16]认为其可作为 *M. oxyfera* 的生物标记物. Zhu 等^[17]和 Kool 等^[16]分别利用 qPCR 和脂质分析技术对受含氮地下水污染泥炭地 *M. oxyfera* 的水平进行定量分析,结果表明 *M. oxyfera* 的细胞数量与 $10\text{MeC}_{16:1\Delta 7}$ 的含量呈显著正相关,证实了脂肪酸 $10\text{MeC}_{16:1\Delta 7}$ 可作为 *M. oxyfera* 的生物标记物.

3 富集培养特征

M. oxyfera 的富集培养通常选用环境样品(如河道沉积物、活性污泥和水稻土等, *M. oxyfera* 富集培养物见表 1. 由于 *M. oxyfera* 为厌氧微生物,故

在此类微生物富集培养过程中要保证严格的厌氧环境. 亚硝酸盐是 *M. oxyfera* 生长所需的基质之一,因此通常采用含有适量亚硝酸盐和营养元素的培养液(表 2)^[18] 在生物反应器内对此微生物进行富集培养. 甲烷亦是 *M. oxyfera* 生长所需的基质之一,它的存在对于富集 *M. oxyfera* 也是必需的,因而研究者通常向生物反应器内持续曝甲烷气体或通过增加甲烷分压的方法,提高液相中溶解性甲烷浓度,以此为 *M. oxyfera* 提供充足的基质甲烷^[5,10,13,17~21]. 根据 Ettwig 等^[18]的研究发现,*M. oxyfera* 富集培养物中的 NC10 门细菌主要分为两大类群,即 group A 和 group B. 后期研究发现,富集培养初期,group A 和 group B 往往共存于培养物中,而随着时间的推移,group B 被逐渐淘汰,通常仅剩 group A 存在于培养物中(表 1),表明 group A 的 NC10 门细菌是 N-DAMO 反应的主要功能微生物^[13,17~21]. 目前,有关 group B 的 NC10 门细菌能否执行 N-DAMO 反应有待进一步探明.

表 1 目前已报道的 *M. oxyfera* 富集培养物
Table 1 Reported enrichment cultures of *M. oxyfera*

接种物	NC10 门细菌组成	亚硝酸还原速率 /nmol·(mg·min) ⁻¹	文献
河道沉积物	group A	6.2	[5]
河道沉积物	group A	3.7	[10]
河道沉积物	group A	3.4~5.6	[18]
河道沉积物(以 NO ₃ ⁻ -N 计)	group A	36~37.8 mg·(L·d) ⁻¹	[21,22]
泥炭土	group A	4.3	[17]
混合接种(以 NO ₃ ⁻ -N 计) ¹⁾	group A 和 group B	2.4 mmol·(g·d) ⁻¹	[19]
废水污泥	group A	0.9	[20]
产甲烷污泥(以 CH ₄ 计)	group A	0.8 μmol·(g·h) ⁻¹	[13]
淡水沉积物(以 CH ₄ 计)	group A	1.0 μmol·(g·h) ⁻¹	[13]
水稻土(以 CH ₄ 计)	group A	1.4 μmol·(g·h) ⁻¹	[13]

1) 混合接种:湖泊沉积物、厌氧消化污泥和活性污泥

迄今获得的 *M. oxyfera* 富集培养物的代谢活性均较低(表 1),其亚硝酸还原速率明显低于传统的反硝化速率. 研究还发现,富集培养后期,N-DAMO 活性往往无法进一步提升,甚至出现降低趋势^[10,17,18,21~23]. 最近,Kampman 等^[22]通过降低水力停留时间和增加进水铜(pMMO 酶所需的关键元素)离子浓度成功使得降低的 N-DAMO 活性得到了不同程度的恢复. 由此,Kampman 等^[22]认为 *M. oxyfera* 富集培养中可能存在某些抑制性的中间代谢产物或缺少了某些未知的生长因子,导致了富集培养后期 N-DAMO 活性受到抑制. 目前 *M. oxyfera* 的富集大多采用的是人工培养基(表 2),但 Zhu 等^[17]采用泥炭地的原位地表水作为培养基成功获

得了一种新的 *M. oxyfera* 富集培养物,暗示了原位环境水体中可能含有某些特殊的同时又是 *M. oxyfera* 所必需的生长因子. 但是,原位环境水体中的某些营养成分含量往往较低,这也可能会限制 N-DAMO 活性. 为此,在未来的研究中可以结合人工培养基和天然培养基进行 *M. oxyfera* 的富集,以期快速获得高活性的 *M. oxyfera* 富集培养物,为研发经济环保的新型生物脱氮除碳工艺奠定基础.

4 生理生化特征

M. oxyfera 是自养型细菌,CH₄ 为其唯一能源,通过卡尔文循环固定 CO₂,将 CH₄ 氧化成 CO₂ 获取能量^[9,24]. *M. oxyfera* 生长缓慢,倍增时间需约 1~2

表 2 富集 *M. oxyfera* 的营养液成分Table 2 Nutrients used for *M. oxyfera* enrichment

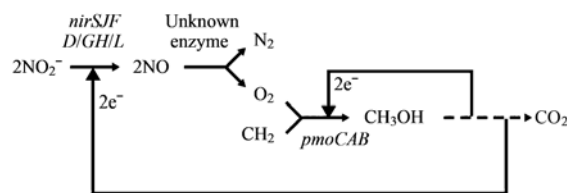
营养液	质量浓度/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$
KHCO_3	0.5 ~ 1.0
KH_2PO_4	0.05
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.3
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.2
NaNO_3	0.425
NaNO_2	0.034 5 ~ 1.38
酸性微量元素 ($100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HCl}$)	$0.5 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2.085
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.068
$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.12
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.5
CuSO_4	0.32
$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.095
H_3BO_3	0.014
碱性微量元素 ($10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaOH}$)	$0.2 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$
SeO_2	0.067
$\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.050
Na_2MoO_4	0.242

周^[18],甚至长达一个月以上^[17,21,22,25],但对基质 CH_4 的亲合力非常强 ($K_s < 5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)^[10],远强于以硫酸盐为电子受体的甲烷厌氧氧化菌对 CH_4 的亲合力 (K_s 一般为 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 级别)^[26]. 此外,当外界环境中的甲烷浓度低至 $0.6 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, *M. oxyfera* 仍可利用甲烷完成 N-DAMO 反应^[5],暗示在自然环境中 *M. oxyfera* 对甲烷的亲合力可能更强 ($K_s < 0.6 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$). *M. oxyfera* 富集培养物动力学研究表明, *M. oxyfera* 对基质 NO_2^- 的亲合力较差, K_s 为 $0.9 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[25]. 自然生境中由于 NO_2^- 极不稳定,且含量通常较低,为此推测自然生境中 *M. oxyfera* 对 NO_2^- 的 K_s 值应远小于富集培养物中获得的 K_s 值. 研究表明, *M. oxyfera* 对氧敏感,当外界氧浓度超过 2% 时, *M. oxyfera* 的活性受到明显抑制^[27],但对于微量溶解氧或间歇性供氧对 *M. oxyfera* 的影响还有待探明.

由于缺乏足够的富集培养物, N-DAMO 的机制研究较为滞后. 起初的研究结果认为, N-DAMO 反应由细菌和古菌共同催化完成. Raghoebarsing 等^[5] 认为甲烷在甲烷厌氧氧化古菌 (ANME-2) 的作用下经逆向产甲烷途径转化为 CO_2 , 生成的中间代谢产物 (如甲酸和乙酸等) 和释放的电子提供给 *M. oxyfera* 完成 $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$ 的还原. 然而,随后的研究表明, N-DAMO 反应并不需要古菌的参与. Ettwig 等^[10] 通过专一性抑制实验发现,向 *M. oxyfera* 富集培养物中添加溴乙烷磺酸 (逆向产甲烷途径的专一

性抑制剂) 并不影响甲烷氧化活性,为此, N-DAMO 反应的完成并不依赖于古菌的逆向产甲烷途径. 研究还发现,在大多数 *M. oxyfera* 富集培养后期,古菌的比例逐渐减少,直至完全消失,但富集培养物甲烷氧化速率仍保持较为稳定的状态^[10,13,17,18,20,21]. 最近, Haroon 等^[28] 证实了 *M. oxyfera* 富集培养物中的古菌具有甲烷氧化耦合硝酸盐还原的能力,这也解释了古菌通常仅存在于添加 NO_3^- 的富集培养初期.

Ettwig 等^[9] 在 N-DAMO 的机制研究方面取得了突破性进展,发现了地球上第 4 种生物产氧途径. *M. oxyfera* 富集培养物的宏基因组分析发现, *M. oxyfera* 并不具备催化完整反硝化途径必备的所有基因,其缺少编码氧化亚氮 (N_2O) 还原酶基因. 然而, *M. oxyfera* 能够产生 N_2 , 因而其必然存在一种未知酶能催化某种中间产物生成 N_2 . 研究还发现, *M. oxyfera* 拥有完整的编码甲烷好氧氧化酶的所有基因,并且能够转录、翻译和表达,据此推测 *M. oxyfera* 拥有完整的甲烷好氧氧化途径. 富集培养物的同位素示踪实验表明 *M. oxyfera* 能够自产氧,其产生的氧气用于甲烷的氧化,获取能量. 在此基础上, Ettwig 等^[9] 提出了 *M. oxyfera* 的理论代谢模型 (图 2), 该模型认为 *M. oxyfera* 首先将 NO_2^- 还原为 NO , 然后在某种未知的 NO 歧化酶作用下将产生的 2 分子 NO 歧化生成 O_2 , 最后用生成的 O_2 完成甲烷的好氧氧化. 尽管同位素实验中 O_2 的浓度一直低于检出限, Wu 等^[29] 发现 *M. oxyfera* 基因组中存在 4 组终端呼吸氧化酶 (2 种细胞色素 *c* 氧化酶、泛醌氧化酶和抗氰化物交替氧化酶) 基因并都进行了转录,其中一组氧化酶 (泛醌氧化酶) 基因进行了翻译^[29],进一步佐证了 *M. oxyfera* 具有内产氧功能. Wu 等^[12] 还通过免疫金标记实验证实了催化甲烷氧化和亚硝酸还原的两种关键酶 pMMO 和亚硝酸盐还原酶 (Nir) 共存于 *M. oxyfera* 细胞内. *M. oxyfera* 内产氧功能的发现,表明在植物出现之前细菌就可能已在地球上制造氧气,从而弥补了地球演化过程



nirSJFD/GH/L 为亚硝酸还原酶编码基因;

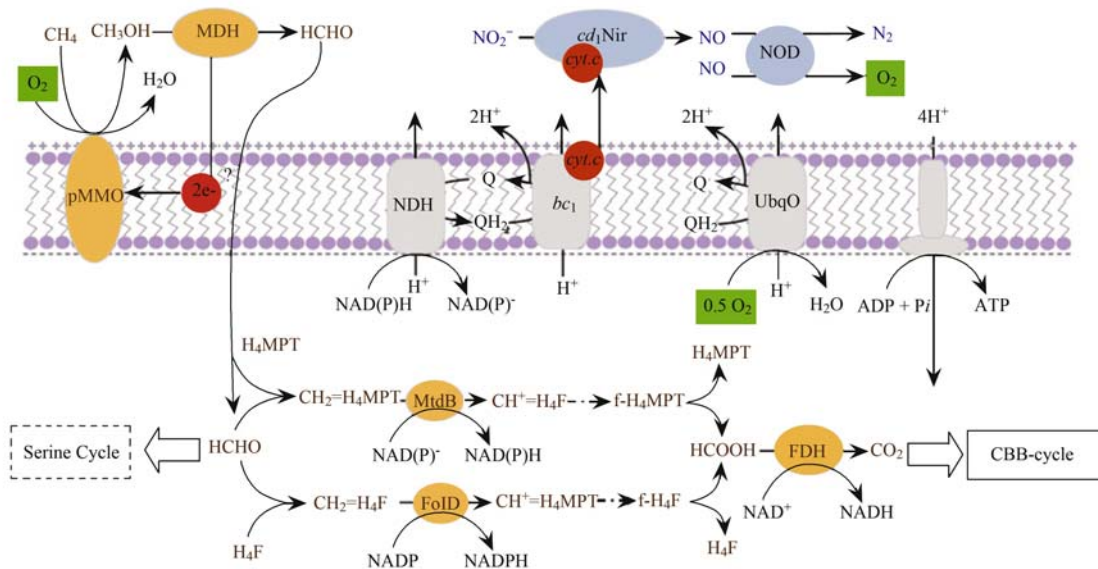
pmoCAB 为颗粒性甲烷单加氧酶编码基因

图 2 *M. oxyfera* 的代谢模型^[9]Fig. 2 Metabolic pathways of *M. oxyfera*

中“缺失的一环”^[9].

随后, Wu 等^[30]进一步细化了 *M. oxyfera* 的中心代谢和能量代谢途径(图3). 在甲烷氧化途径方面:甲烷首先在 pMMO 酶的催化下转化为甲醛,然后甲醛在亚甲基-四氢甲基蝶呤(H_4MPT)脱氢酶(MtdB)或亚甲基-四氢叶酸(H_4F)脱氢酶(FoID)的作用下转化为甲酸,最后甲酸在甲酸脱氢酶(FDH)的作用下最终转化为二氧化碳,产生的二氧化碳可进入卡尔文循环进行碳的固定^[24,30]. 此外,甲烷氧化途径中产生的甲醛被推测可进入丝氨酸途径进行碳的固定^[30]. 在亚硝酸

酸还原酶(Nir)的作用下转化为 NO, 然后 2 分子的 NO 在一氧化氮歧化酶(NOD)的作用下生成 N_2 和 O_2 , 最后生成的 O_2 中有 3/4 用于甲烷的氧化,剩余的 1/4 进入正常呼吸链进行产能代谢^[30]. 作为呼吸型的微生物, *M. oxyfera* 可通过化学渗透机制来产能(图3). NAD(P)H 脱氢酶复合体可耦合 NADH 的氧化和醌的还原,并伴随质子的泵出,实现跨膜质子梯度来合成 ATP. 细胞色素 bc_1 复合体则可对还原性醌进行氧化,继而可再次实现质子的跨膜转移. 细胞色素 c 则作为电子供体将电子传递给 cd_1 型 Nir, 实现亚硝酸



橙色的表示甲烷氧化途径;蓝色的表示亚硝酸还原途径;cyt. c 表示细胞色素 c ;FDH 表示甲基脱氢酶;FoID 表示亚甲基- H_4F 脱氢酶;MtdB 表示亚甲基- H_4MPT 脱氢酶;NDH, ND(P)H 表示脱氢酶复合体;Nir 表示亚硝酸还原酶;NOD 表示 NO 歧化酶;pMMO 表示颗粒性甲烷单加氧酶;UbqO 表示泛醌氧化酶

图3 *M. oxyfera* 的中心代谢和能量代谢^[30]

Fig. 3 Central catabolism and energy metabolism of *M. oxyfera*

总之,内产氧机制能较好地解释 N-DAMO 反应中甲烷氧化耦合亚硝酸盐还原机制,但遗憾的是 N-DAMO 反应的关键酶 NOD 至今仍未被分离和纯化. 为此, N-DAMO 反应的内产氧机制还需进一步的研究证实.

5 生态学特征

N-DAMO 反应发生的前提条件是甲烷和亚硝酸盐/硝酸盐的共存及缺氧的环境^[31]. 沉积物和湿地土壤等由于长期水淹具有好氧/缺氧界面,同时沉积物和土壤含有丰富的有机质,其分解过程会释放出甲烷,硝化和反硝化等生物过程又可释

放出中间代谢产物亚硝氮,是发生 N-DAMO 反应的合适生境. 迄今已有不少研究者报道了 *M. oxyfera* 在不同生境类型中的分布,如湖泊沉积物^[32~34]、水库水体^[35]、河流沉积物^[36]、海洋沉积物^[37,38]和湿地土壤^[17,39~45]等. 最近,研究者通过 ^{13}C 稳定同位素示踪手段证实不同湿地类型(包括下渚湖天然湿地、城市次生湿地西溪湿地和水稻田湿地)中均存在 N-DAMO 反应^[41,42,44]. 基于测得的 N-DAMO 的稳定同位素活性数据, Hu 等^[41] 推测全球湿地系统中由 N-DAMO 反应所致的甲烷氧化量可高达 4.1 ~ 6.1 Tg, 约占当前全球湿地甲烷排放总量的 2% ~ 6%,证实了 N-DAMO

是湿地系统中被忽视的甲烷汇,其对全球温室气体甲烷减排具有潜在的重要意义. 从目前 *M. oxyfera* 的分布特征来看,其主要分布于具有稳定环境条件的湖泊深层沉积物^[32,33]和湿地深层土壤^[17,39~44]. 研究还发现,某些环境因子(如亚硝酸盐/硝酸盐浓度、甲烷浓度、有机碳浓度、温度和

盐度等)对自然生境中 *M. oxyfera* 的分布和生物活性有重要影响^[36~39,41,42,44]. 目前对 *M. oxyfera* 的生态学研究主要依赖分子生物学手段,包括聚合酶链式反应(PCR)、变性梯度凝胶电泳(DGGE)和荧光原位杂交(FISH)等. *M. oxyfera* 生态学研究常用的 PCR 引物见表 3.

表 3 *M. oxyfera* 生态学研究常用的 PCR 引物

Table 3 PCR primers usually used in ecological research of <i>M. oxyfera</i>			
引物	序列(5'-3')	特异性	文献
8F	GACCAAAGGGGCGAGCG	细菌 16S rRNA	[46]
1043R	TCTCCACGCTCCCTTGCG	<i>M. oxyfera</i> 16S rRNA	[18]
202F	GACCAAAGGGGCGAGCG	<i>M. oxyfera</i> 16S rRNA	[18]
1545R	CAKAAAGGAGGTGATCC	细菌 16S rRNA	[44]
NC10-202Fdeg	RACCAAAGGRGGCGAGCG	<i>M. oxyfera</i> 16S rRNA	[32]
NC10-1043Rdeg	TCTCCRCGYTCCCTTGCG	<i>M. oxyfera</i> 16S rRNA	[32]
qP1F	GGGCTTGACATCCCACGAACCTG	<i>M. oxyfera</i> 16S rRNA	[18]
qP1R	CGCCTTCCTCCAGCTTGACGC	<i>M. oxyfera</i> 16S rRNA	[18]
qP2F	GGGGAAGTCCAGCGTCAAG	<i>M. oxyfera</i> 16S rRNA	[18]
qP2R	CGCCTTCCTCCAGCTTGACGC	<i>M. oxyfera</i> 16S rRNA	[18]
A189_b	GGNGACTGGGACTTGTGG	<i>M. oxyfera</i> <i>pmoA</i> ¹⁾	[47]
emo682	AAAYCCGGCRAAGAACGA	<i>M. oxyfera</i> <i>pmoA</i>	[47]
emo182	TCACGTTGACGCCGATCC	<i>M. oxyfera</i> <i>pmoA</i>	[47]
emo568	GCACATACCCATCCCCATC	<i>M. oxyfera</i> <i>pmoA</i>	[47]
A189	GGNGACTGGGACTTCTGG	<i>pmoA</i>	[48]
682_NC10	AAATCCGGCGAAGAACGA	<i>M. oxyfera</i> <i>pmoA</i>	[33]
NA638Rdeg	RAATGTTGCGAGCGTVCCBC	<i>M. oxyfera</i> <i>pmoA</i>	[32]
NA720R	TCCCCATCCACACCCACCAG	<i>M. oxyfera</i> <i>pmoA</i>	[32]
HP3F1	CCCAGTACTTCATGTGGGARAARAT	<i>M. oxyfera</i> <i>pmoA</i>	[40]
HP3R1	GGGGGCCAGCCANRYCCARTT	<i>M. oxyfera</i> <i>pmoA</i>	[40]

1) *pmoA*:pMMO 酶 α 编码基因

6 结论与展望

(1) N-DAMO 反应是微生物碳氮循环的革命性发现,它的发现对于认识碳氮生物地球化学循环,丰富微生物学内容,研发新型生物脱氮除碳工艺均具有重要意义. 近年来对于 N-DAMO 反应的功能微生物 *M. oxyfera* 的研究取得了许多突破性成果,初步探明了 *M. oxyfera* 的个体形态特征、细胞化学组分特征、富集培养特征、生理生化特征和生态学特征,并提出了 N-DAMO 反应的内产氧代谢机制.

(2) 由于 *M. oxyfera* 生长极其缓慢,至今尚未获得纯培养,为此需要继续对 *M. oxyfera* 进行富集培养,以期获得 *M. oxyfera* 的纯培养或更多的高纯培养物,并重点开展以下研究:①分离和纯化 N-DAMO 反应的关键酶(尤其是 NOD),进一步搞清 *M. oxyfera* 的生理生化特性和内产氧代谢途径;②寻找获得高活性 *M. oxyfera* 富集培养物的限制因子,缩短 *M. oxyfera* 的富集培养时间,研发经济环保的新

型生物脱氮除碳工艺;③建立完善的 *M. oxyfera* 分子生态学研究方法,探明其在自然生态系统中的分布特征,确定此类微生物在碳氮生物地球化学循环和温室气体甲烷减排中的贡献.

参考文献:

[1] Martens C S, Berner R A. Methane production in the interstitial waters of sulfate-depleted marine sediments[J]. Science, 1974, **185**(4157): 1167-1169.

[2] Reeburgh W S. Methane consumption in Cariaco Trench waters and sediments[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1976, **28**(3): 337-344.

[3] Hinrichs K U, Boetius A. The anaerobic oxidation of methane: new insights in microbial ecology and biogeochemistry[A]. In: Wefer G, Billett D, Hebbeln D, et al (Eds.). Ocean Margin Systems[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. 457-477.

[4] Strous M, Jetten M S M. Anaerobic oxidation of methane and ammonium[J]. Annual Review of Microbiology, 2004, **58**: 99-117.

[5] Raghoebarsing A A, Pol A, van de Pas-Schoonen K T, et al. A microbial consortium couples anaerobic methane oxidation to denitrification[J]. Nature, 2006, **440**(7086): 918-921.

- [6] Shen L D, He Z F, Zhu Q, *et al.* Microbiology, ecology and application of the nitrite-dependent anaerobic methane oxidation process[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2012, **3**: 269, doi: 10.3389/fmicb.2012.00269.
- [7] 沈李东, 胡宝兰, 郑平. 甲烷厌氧氧化微生物的研究进展[J]. *土壤学报*, 2012, **48**(3): 619-628.
- [8] 袁梦冬, 朱静, 吴伟祥. 微生物厌氧甲烷氧化反硝化研究进展[J]. *微生物学报*, 2014, **54**(2): 129-138.
- [9] Ettwig K F, Butler M K, Le Paslier D, *et al.* Nitrite-driven anaerobic methane oxidation by oxygenic bacteria[J]. *Nature*, 2010, **464**(7288): 543-548.
- [10] Ettwig K F, Shima S, Van De Pas-Schoonen K T, *et al.* Denitrifying bacteria anaerobically oxidize methane in the absence of *Archaea*[J]. *Environmental Microbiology*, 2008, **10**(11): 3164-3173.
- [11] Wu M L, van Teeseling M C F, Willems M J R, *et al.* Ultrastructure of the denitrifying methanotroph “*Candidatus* Methyloirabilis oxyfera”, a novel polygon-shaped bacterium[J]. *Journal of Bacteriology*, 2012, **194**(2): 284-291.
- [12] Wu M L, van Alen T A, van Donselaar E G, *et al.* Co-localization of particulate methane monooxygenase and *cd₁* nitrite reductase in the denitrifying methanotroph “*Candidatus* Methyloirabilis oxyfera”[J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2012, **334**(1): 49-56.
- [13] He Z F, Cai C, Shen L D, *et al.* Effect of inoculum sources on the enrichment of nitrite-dependent anaerobic methane-oxidizing bacteria[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014, doi: 10.1007/s00253-014-6033-8.
- [14] Young K D. Bacterial shape[J]. *Molecular Microbiology*, 2003, **49**(3): 571-580.
- [15] Margolin W. Sculpting the bacterial cell[J]. *Current Biology*, 2009, **19**(17): R812-R822.
- [16] Kool D M, Zhu B L, Rijpstra W I, *et al.* Rare branched fatty acids characterize the lipid composition of the intra-aerobic methane oxidizer “*Candidatus* Methyloirabilis oxyfera”[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, **78**(24): 8650-8656.
- [17] Zhu B L, van Dijk G, Fritz C, *et al.* Anaerobic oxidation of methane in a minerotrophic peatland: enrichment of nitrite-dependent methane-oxidizing bacteria[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, **78**(24): 8657-8665.
- [18] Ettwig K F, van Alen T, van de Pas-Schoonen K T, *et al.* Enrichment and molecular detection of denitrifying methanotrophic bacteria of the NC10 phylum[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, **75**(11): 3656-3662.
- [19] Hu S H, Zeng R J, Burow L C, *et al.* Enrichment of denitrifying anaerobic methane oxidizing microorganisms[J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2009, **1**(5): 377-384.
- [20] Luesken F A, van Alen T A, van der Biezen E, *et al.* Diversity and enrichment of nitrite-dependent anaerobic methane oxidizing bacteria from wastewater sludge[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, **92**(4): 845-854.
- [21] Kampman C, Hendrickx T L G, Luesken F A, *et al.* Enrichment of denitrifying methanotrophic bacteria for application after direct low temperature anaerobic sewage treatment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **227-228**: 164-171.
- [22] Kampman C, Temmink H, Hendrickx T L G, *et al.* Enrichment of denitrifying methanotrophic bacteria from municipal wastewater sludge in a membrane bioreactor at 20°C[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, **274**: 428-435.
- [23] Hu S H, Zeng R J, Keller J, *et al.* Effect of nitrate and nitrite on the selection of microorganisms in the denitrifying anaerobic methane oxidation process[J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2011, **3**(3): 315-319.
- [24] Rasigraf O, Kool D M, Jetten M S M, *et al.* Autotrophic Carbon Dioxide Fixation via the Calvin-Benson-Bassham Cycle by the Denitrifying Methanotroph “*Candidatus* Methyloirabilis oxyfera”[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2014, **80**(8): 2451-2460.
- [25] He Z F, Cai C, Geng S, *et al.* Modeling a nitrite-dependent anaerobic methane oxidation process: parameters identification and model evaluation[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **147**: 315-320.
- [26] Nauhaus K, Boetius A, Kruger M, *et al.* In vitro demonstration of anaerobic oxidation of methane coupled to sulphate reduction in sediment from a marine gas hydrate area[J]. *Environmental Microbiology*, 2002, **4**(5): 296-305.
- [27] Luesken F A, Wu M L, Op den Camp H J M, *et al.* Effect of oxygen on the anaerobic methanotroph “*Candidatus* Methyloirabilis oxyfera”: kinetic and transcriptional analysis[J]. *Environmental Microbiology*, 2012, **14**(4): 1024-1034.
- [28] Haroon M F, Hu S H, Shi Y, *et al.* Anaerobic oxidation of methane coupled to nitrate reduction in a novel archaeal lineage[J]. *Nature*, 2013, **500**(7464): 567-570.
- [29] Wu M L, de Vries S, van Alen T A, *et al.* Physiological role of the respiratory quinol oxidase in the anaerobic nitrite-reducing methanotroph “*Candidatus* Methyloirabilis oxyfera”[J]. *Microbiology*, 2011, **157**(3): 890-898.
- [30] Wu M L, Ettwig K F, Jetten M S M, *et al.* A new intra-aerobic metabolism in the nitrite-dependent anaerobic methane-oxidizing bacterium “*Candidatus* Methyloirabilis oxyfera”[J]. *Biochemical Society Transactions*, 2011, **39**(1): 243-248.
- [31] Thauer R K, Shima S. Biogeochemistry: methane and microbes[J]. *Nature*, 2006, **440**(7086): 878-879.
- [32] Deutzmann J S, Schink B. Anaerobic oxidation of methane in sediments of Lake Constance, an oligotrophic freshwater lake[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011, **77**(13): 4429-4436.
- [33] Kojima H, Tsutsumi M, Ishikawa K, *et al.* Distribution of putative denitrifying methane oxidizing bacteria in sediment of a freshwater lake, Lake Biwa[J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2012, **35**(4): 233-238.
- [34] 朱群, 沈李东, 胡宝兰, 等. 西湖底泥中的反硝化型甲烷厌氧

- 氧化菌的分子生物学检测[J]. 环境科学学报, 2013, **33** (5): 1321-1325.
- [35] Kojima H, Tokizawa R, Kogure K, *et al.* Community structure of planktonic methane-oxidizing bacteria in a subtropical reservoir characterized by dominance of phylotype closely related to nitrite reducer[J]. Scientific Reports, 2014, **4**: 5728, doi: 10.1038/srep05728.
- [36] Shen L D, Liu S, Zhu Q, *et al.* Distribution and diversity of nitrite-dependent anaerobic methane-oxidising bacteria in the sediments of the Qiantang River[J]. Microbial Ecology, 2014, **67**(2): 341-349.
- [37] Chen J, Zhou Z C, Gu J D. Occurrence and diversity of nitrite-dependent anaerobic methane oxidation bacteria in the sediments of the South China Sea revealed by amplification of both 16S rRNA and *pmoA* genes [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2014, **98**(12): 5685-5696.
- [38] Shen L D, Zhu Q, Liu S, *et al.* Molecular evidence for nitrite-dependent anaerobic methane-oxidising bacteria in the Jiaojiang Estuary of the East Sea (China) [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2014, **98**(11): 5029-5038.
- [39] Wang Y, Zhu G B, Harhangi H R, *et al.* Co-occurrence and distribution of nitrite-dependent anaerobic ammonium and methane oxidizing bacteria in a paddy soil [J]. FEMS Microbiology Letters, 2012, **336**(2): 79-88.
- [40] Han P, Gu J D. A newly designed degenerate PCR primer based on *pmoA* gene for detection of nitrite-dependent anaerobic methane-oxidizing bacteria from different ecological niches[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, **97** (23): 10155-10162.
- [41] Hu B L, Shen L D, Lian X, *et al.* Evidence for nitrite-dependent anaerobic methane oxidation as a previously overlooked microbial methane sink in wetlands. [J] Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, **111**(12): 4495-4500.
- [42] Shen L D, Huang Q, He Z F, *et al.* Vertical distribution of nitrite-dependent anaerobic methane-oxidising bacteria in natural freshwater wetland soils [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2014, doi: 10.1007/s00253-014-6031-x.
- [43] Zhou L L, Wang Y, Long X E, *et al.* High abundance and diversity of nitrite-dependent anaerobic methane-oxidizing bacteria in a paddy field profile[J]. FEMS Microbiology Letters, 2014, **360**(1): 33-41.
- [44] Shen L D, Liu S, Huang Q, *et al.* Evidence for the co-occurrence of nitrite-dependent anaerobic ammonium and methane oxidation processes in a flooded paddy field [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2014, **80**(24): 7611-7619.
- [45] Zhu G B, Zhou L L, Wang Y, *et al.* Biogeographical distribution of denitrifying anaerobic methane oxidizing bacteria in Chinese wetland ecosystems [J]. Environmental Microbiology Reports, 2014, doi: 10.1111/1758-2229.12214.
- [46] Juretschko S, Timmermann G, Schmid M C, *et al.* Combined molecular and conventional analyses of nitrifying bacterium diversity in activated sludge: *Nitrosococcus mobilis* and *Nitrospira*-like bacteria as dominant populations [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1998, **64**(8): 3042-3051.
- [47] Luesken F A, Zhu B L, van Alen T A, *et al.* *pmoA* primers for detection of anaerobic methanotrophs [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2011, **77**(11): 3877-3880.
- [48] Holmes A J, Costello A, Lidstrom M E, *et al.* Evidence that participate methane monooxygenase and ammonia monooxygenase may be evolutionarily related [J]. FEMS Microbiology Letters, 1996, **132**(3): 203-208.

CONTENTS

Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in Chongqing	WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i> (759)
Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Beijing During 2012-2013	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (768)
Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM _{1.1} from Nanjing	JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (774)
Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Taiyuan, China	ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (780)
Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shouzhou City	LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (787)
Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China	XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i> (794)
Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i> (801)
Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing	QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i> (809)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan	LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (817)
Organic and Element Carbon in Foliar Smoke	CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i> (824)
Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge	JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (831)
Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas	MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i> (839)
Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors	WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i> (847)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (855)
Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedium in Karst Underground River	LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo (862)
Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i> (869)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (879)
Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season	LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (888)
Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation	CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i> (898)
Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors	YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei (905)
Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i> (914)
Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake	WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (922)
Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China	HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (928)
Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu	JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (936)
Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beiji River	GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (946)
Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus	SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (955)
Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation	YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i> (963)
Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material	WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i> (969)
Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles	HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> (980)
Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst	SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i> (989)
Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange	WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (995)
Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System	LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (1000)
Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content	ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i> (1006)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR	GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i> (1013)
Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell	TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (1021)
Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite	HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i> (1027)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China	LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i> (1037)
Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions	QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i> (1045)
Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province	ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i> (1053)
Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk	JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i> (1060)
Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (1069)
Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow	LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i> (1075)
Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China	LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1084)
Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts	YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i> (1092)
Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials	DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1098)
Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing	SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i> (1105)
Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants	DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (1117)
Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi	CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (1123)
Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria	SHEN Li-dong (1133)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行