

# 基于 CiteSpace 的盐度对厌氧氨氧化菌影响研究现状可视化分析

陈文达

大连海洋大学

DOI:10.12238/eep.v8i5.2679

**[摘要]** 盐度会抑制厌氧氨氧化菌活性,影响其对含盐高氮废水的处理。为全面了解该领域的研究进展,采用文献计量学方法,系统的对Web of Science数据库中从建库至2025年间的相关文献进行可视化分析。分析结果表明未来研究应着重于原位检测、胞外聚合物、亲和性溶质等研究方向,为科学评价盐度对厌氧氨氧化菌的影响提供理论基础,进而有效防范盐度对厌氧氨氧化菌处理含盐高氮废水的潜在威胁。

**[关键词]** 盐度; 厌氧氨氧化菌; Cite Space; 可视化分析

中图分类号: P75 文献标识码: A

## Visual Analysis of the Current Research Status on the Impact of Salinity on Anammox Bacteria Based on CiteSpace

Wenda Chen

Dalian Ocean University

**[Abstract]** Salinity can inhibit the activity of anaerobic ammonium oxidation bacteria and affect their treatment of high-nitrogen wastewater with high salt content. To comprehensively understand the research progress in this field, a bibliometric method was adopted to conduct a systematic visualization analysis of relevant literature in the Web of Science database from the establishment of the database to 2025. The analysis results indicate that future research should focus on in-situ detection, extracellular polymers, and affinity solutes, providing a theoretical basis for scientifically evaluating the impact of salinity on anaerobic ammonium oxidation bacteria and effectively preventing the potential threat of salinity to the treatment of high-salt and high-ammonium wastewater by anaerobic ammonium oxidation bacteria.

**[Key words]** salinity; anammox; Cite Space; visualization analysis

### 引言

高盐废水危害巨大,废水中的无机盐、有机物、重金属元素会导致淡水矿化、水体富营养化、食物链重金属积累等现象出现,直接或间接影响人类健康。并且高盐废水还会改变土壤结构和渗透性,降低土壤透水性,增加发生洪涝灾害的可能性,阻碍了农作物生长和发育,大大降低了农业生产力,对社会经济发展产生负面影响。

厌氧氨氧化菌是完成厌氧氨氧化工艺的主要菌种。厌氧氨氧化系统中以厌氧氨氧化菌为主体的污泥常为絮状或颗粒状。厌氧氨氧化菌在自然生态系统的缺氧区域广泛存在,如,湿地、旱地、地下水层和海洋沉积物,在全球氮循环中发挥着重要作用,最适条件为: 温度 $35\pm 2^{\circ}\text{C}$ , pH7~8, 严格厌氧或缺氧(<5%氧分压)。

厌氧氨氧化菌会对盐度产生高敏感性,高盐环境会对厌

氧氨氧化菌活性及脱氮效能造成明显的影响,盐度驯化后,厌氧氨氧化菌会对盐度有一定的耐受性,但如此高的含盐量会对常规厌氧氨氧化菌工艺产生明显的抑制作用,驯化后的厌氧氨氧化菌也无法适应工业废水的盐浓度。而且高盐废水的盐度波动较大,盐度波动会导致微生物细胞快速释放或吸收某些成分来调节细胞内的渗透压,这使得微生物细胞无法适应不稳定的盐度环境,这些不足之处阻碍了厌氧氨氧化工艺处理高盐废水的应用<sup>[1]</sup>。在现实应用中必须考虑高盐废水对厌氧氨氧化的潜在负面影响,实现厌氧氨氧化工艺在此类废水处理中的有效应用,因此研究盐度对厌氧氨氧化菌的影响是必要的。

### 1 数据来源与研究方法

以全面掌握盐度对厌氧氨氧化菌的影响为目标,系统分析国内外在该领域的研究现状及进展。数据来源于Web of Science

(WOS)核心合集,时间设置为建库以来至2025年7月21日。利用WOS数据库高级检索功能,检索式: TS=(Anammox)AND TS=(salinity),文献类型为论文(Article)和综述(Review Article),经人工筛选,最终得到310篇英文文献。将筛选后的文献全记录(Fully documented and cited references)以纯文本文件(Plain text file)导入CiteSpace软件,通过发文国家、发文机构、发文作者、关键词等角度进行可视化分析,数据库时间分区为2005-2025年,时间切片设置为“1年”。

## 2 结果与分析

### 2.1年度发文量分析

盐度对厌氧氨氧化菌影响的文章最早记录是2005年,之后相关主题发文量呈上升趋势,2021年发文量为历史新高35篇,在2021年之前发文量大体分为两个阶段:初步发展阶段(2005-2015年)、快速增长阶段(2016-2021年),平均发文量分别为7篇和22篇(见图1)。在2022年到2025年上半年相关文献发文量略有下降趋势,不过依然保持较高的发文量,平均发文量为26篇。

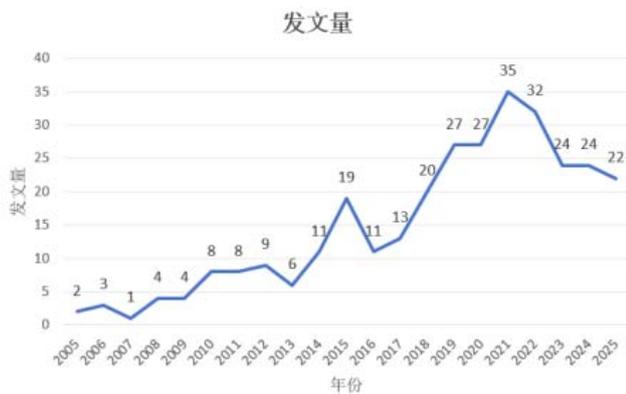


图1 发文量统计

### 2.2国家合作分析

通过Citespace软件对WOS数据库筛选出的文献进行国家合作分析,生成国家合作图谱(见图2)。图中(N=46, E=75)表示共有46个节点,75个链接线,说明共有46个国家在该领域发表过文章,75条连接线相互穿插,可以看出在该领域各国间的研究关系较为密切。中心性科学计量的一个指标,其含义为一个节点的中心性越高,在网络中的影响力和重要程度就越大,它在该领域就起到更多的引导作用<sup>[2]</sup>。在CiteSpace中,中心性超过0.1的节点被称为关键节点,显示为紫色环。通过统计发现,参与盐度对厌氧氨氧化菌影响研究的关键节点共有6个,分别为中国、美国、韩国、波兰、西班牙、荷兰,中心性分别为0.57、0.26、0.19、0.16、0.12、0.11。该结果表明我国是目前该领域的领导者,研究成果具有较强的影响力,亚洲和欧美地区的发文质量和影

响力还有很大的发展潜力。

### 2.3研究机构分析

关于盐度对厌氧氨氧化菌影响的研究,各科研机构间的合作网络如图3所示。每个节点代表1个研究机构,共有249个节点,238条连接线,网络密度为0.0077,发文量较多的机构是中国科学院34篇,北京工业大学16篇,杭州师范大学14篇,均为我国的研究团队。从该图可以看出,在该研究方向上各个研究机构之间合作并不紧密,更倾向于独立研究,团队间的交流合作可以进一步加强。



图2 国家合作共现图

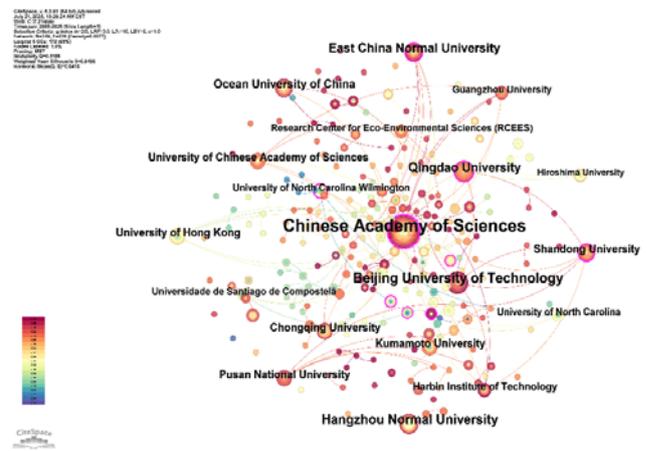


图3 研究机构合作网络

### 2.4关键词聚类、时间、突显性可视化分析

通过Citespace软件中的LLR聚类算法对已经筛选出的文献关键词进行聚类分析,见图4。该可视化图分为10个聚类群,聚类标签为#0~9,该模块的聚类值Q=0.5186(Q>0.3),平均剪切值S=0.8408(S>0.5),该聚类结果具有合理性、可信性,聚类结构具有可信度。通过分析发现在近20年来相关研究文献中,反硝化作用、黑海、硝酸盐异化还原成铵(dnra)、硫酸化菌(sulfur-

oxidizing bacteria)等聚类标签颇受关注,是主要的热点研究方向。

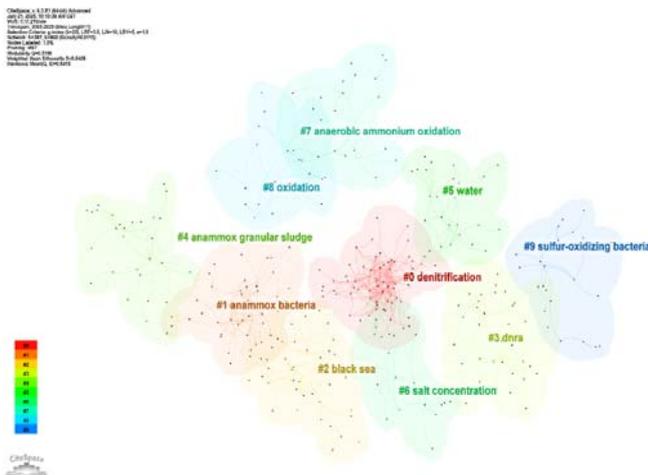


图4 关键词聚类分析

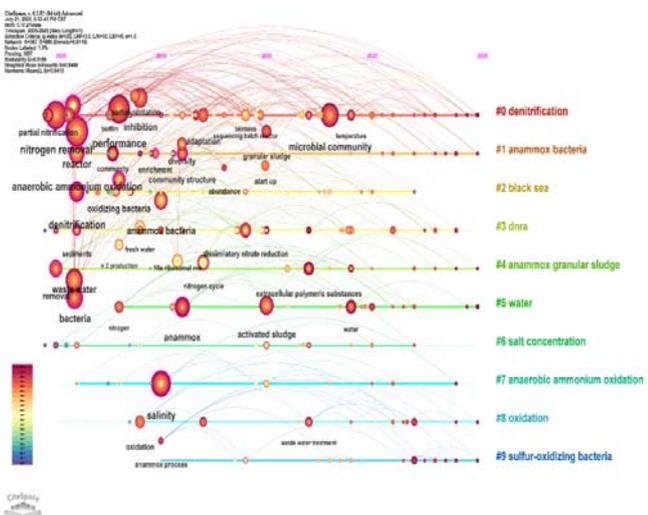


图5 关键词时间线图谱

通过Citespace绘制关键词时间线图,见图5,分析关键词首次出现年份与持续分布情况。早期研究主要聚焦于“denitrification”、“dnra”、“salt concentration”三个聚类标签,也是最早兴起的聚类标签,首篇参考文献出现在2005年,随着时间增加,更多的关注度也逐渐转向了“water”、“anammox bacteria”等聚类标签。其中“water”和“anaerobic ammonium oxidation”两个话题贯穿该研究领域的各大聚类,是该领域研究的核心目的和主要目标。在聚类内部关键词出现密度和时间跨度的角度分析,“salt concentration”、“anaerobic ammonium oxidation”、“oxidation”“sulfur-oxidizing bacteria”四个聚类标签在

图中出现密度低,跨度大,说明目前其关注度较低,相对冷门。而图中“denitrification”、“anammox bacteria”、“black sea”、“dnra”、“anammox granular sludge”几个关键词聚类的出现密度高,跨度小,是该研究领域相对热门的方向。

通过Citespace软件Burstness功能生成关键词突现图,对“盐度对厌氧氨氧化菌影响”研究领域进行前沿分析,见图6。自从该研究领域开展以来关键词“in situ detection”和“kinetics”一直保持较高的热度,“in situ detection”在2006年有较高的突现性,“kinetics”在近三年呈现较高的突显强度。这说明关键词“in situ detection”、“kinetics”在该研究领域具有较高的研究价值。“in situ detection”原位检测技术,是利用抗体、酶、核酸探针、凝集素等物质将某一分子从细胞或组织内的众多生物分子中挑选出来,然后测定此分子在细胞组织原有位置上的分布范围和凝集程度,以判断此分子在细胞组织内的生理效应和病理意义。原位微生物检测因为不同水平可分为BrdU标记、DNA-SIP(稳定同位素核酸探针技术)、FISH(荧光原位杂交)和环境转录组等方法,并且可与高通量测序、单细胞测序等技术相结合来捕获原位活性微生物组。如Takanori等<sup>[3]</sup>通过荧光原位杂交和16S rRNA系统发育等技术手段分析并得出结论:厌氧氨氧化优势菌在短期运行中不能适应低温,但厌氧氨氧化菌的优势菌种并没有因为温度变化而改变。Borin<sup>[4]</sup>通过荧光原位杂交和16S rRNA基因序列分析,鉴定了海洋厌氧氨氧化菌属Candidatus Scalindua的代表性序列,并推测它们是新的可操作分类单元,与已发现的具有厌氧氨氧化活性的海洋环境中检索到的序列密切相关。

“kinetics”动力学研究的是微生物转化底物的速率以及影响该速率的因素,动力学研究不仅有助于对微生物性能的评估,还有助于深入了解微生物生理与代谢的过程。如Xiong<sup>[5]</sup>等利用动力学研究钼和硫酸盐对厌氧氨氧化菌的影响。Li<sup>[6]</sup>通过动力学分析表明,修正后的Logistic模型可以很好地模拟Fe(III)强化厌氧氨氧化过程。

“partial nitrification”、“compatible solutes”、“partial denitrification”、“extracellular polymeric substances”在近十年内具有较高的突现性,是近些年该研究领域比较热门的关键词。“partial nitrification”部分亚硝化是废水生物脱氮过程中的一个关键步骤,是部分亚硝化/厌氧氨氧化(PN/A)工艺一部分,该工艺与传统的硝化反硝化(N/DN)工艺相比,具有无需外加碳源、污泥产量小、能耗低等优点,已被广泛应用于垃圾渗滤液中氨氮的去除。如Huang<sup>[7]</sup>利用部分亚硝化-厌氧氨氧化序批式反应器在不同盐度下对垃圾渗滤液进行脱氮处理。“compatible solutes”亲和性溶质是低分子量有机化合物,可以以无害的方式与大分子相互作用,以维持渗透压在细胞之间的平衡。微生物可以通过使用细胞合成或外部提供的亲和性

溶质来缓解盐水条件下的渗透胁迫。高外部渗透胁迫可以通过相容的溶质在细胞质内平衡,而不需要细胞内酶的任何特异性适应。亲和性溶质可以被分为不同的种类:碳水化合物、多元醇、氨基酸及其衍生物,甘氨酸甜菜碱(GB)是亲和性溶质中的一种,广泛存在于耐盐细菌和植物中。如Zuo<sup>[8]</sup>研究发现在30g/L的盐度胁迫下,1mM的GB投加量可显著提高脱氮效果。“partial denitrification”部分反硝化与厌氧氨氧化连用是一种很有前途的同时去除废水中氨氮和硝酸盐的方法。Xu<sup>[9]</sup>等人利用部分反硝化厌氧氨氧化新工艺(ST-PDA)处理含盐废水。“extracellular polymeric substances”胞外聚合物是在一定环境条件下由微生物,主要是细菌,分泌于体外的一些高分子聚合物。主要成分与微生物的胞内成分相似,是一些高分子物质,如多糖、蛋白质和核酸等聚合物,在生物膜的结构和功能中起着关键作用。如Wang<sup>[10]</sup>等通过胞外聚合物的变化来研究厌氧氨氧化菌耐盐的机制。

究机构包括:中国科学院、北京工业大学和杭州师范大学,发文总量分别为34篇、16篇、14篇,各机构更倾向于独立研究;关键词分析显示,原位检测技术、动力学研究、部分亚硝化、部分反硝化、亲和性溶质、胞外聚合物等方面是近几年该领域的研究热点,这表明未来研究方向将侧重亲和性溶质、胞外聚合物、分子方面研究等方面。盐度对厌氧氨氧化菌影响的研究具有多个研究方向与方法的融合,建议加强各研究团队的合作交流。未来研究应着重于原位检测、胞外聚合物、亲和性溶质等研究方向,为科学评价盐度对厌氧氨氧化菌影响提供理论基础,进而有效防范盐度对厌氧氨氧化菌处理含盐高氨氮废水的潜在威胁。

### [参考文献]

[1]吴国栋.厌氧氨氧化处理高盐废水脱氮效能强化研究[D].青岛大学,2017.

[2]林德明,陈超美,刘则渊.共被引网络中介中心性的Zipf-Pareto分布研究[J].情报学报,2011,30(1):76-82.

[3]Awata T,Goto Y,Kindaichi T,et al.Nitrogen removal using an anammox membrane bioreactor at low temperature[J].Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research,2015,72(12):2148.

[4]Borin S,Mapelli F,Rolli E,et al.Anammox bacterial populations in deep marine hypersaline gradient systems[J].Extremophiles,2013,17(2):289-299.

[5]Xiong X,Li Y,Yang X,et al.Insights into the response of Anammox sludge to the individual and combined stress of neodymium and salinity and the role of hydroxylamine regulation[J].Journal of Environmental Chemical Engineering,2023,11(5).

[6]Li Jin, Feng Li,Biswal Basanta Kumar, Chen Guang-hao, Wu Di.Bioaugmentation of marine anammox bacteria (MAB)-based anaerobic ammonia oxidation by adding Fe(III) in saline wastewater treatment under low temperature[J].Bioresource Technology: Biomass, Bioenergy, Biowastes, Conversion Technologies, Biotransformations, Production Technologies,2020,295.

[7]Huang X,Mi W, Ito H,et al.Probing the dynamics of three freshwater Anammox genera at different salinity levels in a partial nitritation and Anammox sequencing batch reactor treating landfill leachate[J].Bioresource Technology, 2021,319(000).

[8]Zuo L,Yao H,Chen H,et al.The application of glycine betaine to alleviate the inhibitory effect of salinity on one-stage partial nitritation/anammox process[J].Water Environment Research[2025-07-26].

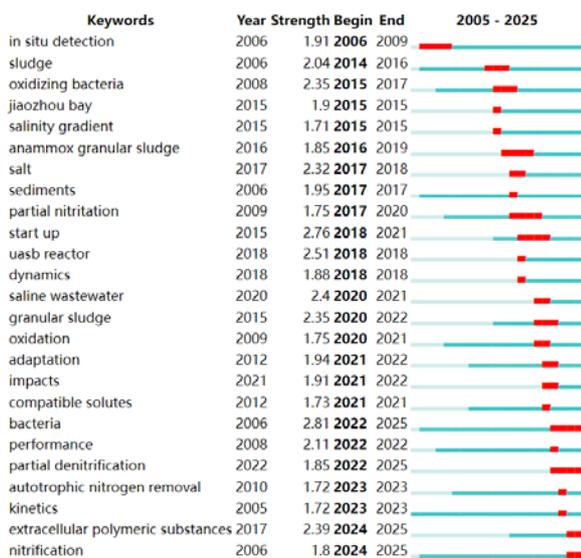


图6 关键词突显图谱

### 3 结论与建议

本研究成果主要聚焦于盐度对厌氧氨氧化菌影响领域的科研文献在发文量、研究机构、关键词等方面的深入分析。通过分析软件Citespace对国家、研究机构的合作关系以及关键词聚类、时间线、突显等进行详细的图谱分析,这些分析有助于识别该领域内具有显著影响力的国家地区和研究机构。揭示了未来研究的热点方向,为之后的研究提供理论参考和实践指导。

近二十年,该研究领域发展迅速,特别是2016年至今发文量呈现快速增长的态势。现阶段该领域的相关研究力量以亚洲和欧美地区为主导,其中,中国在该领域的发文量最高;主要的研

[9]Xu A,Yu D,Qiu Y,et al.A novel process of salt tolerance partial denitrification and anammox(ST-PDA)for treating saline wastewater[J].Bioresource Technology: Biomass, Bioenergy, Biowastes,ConversionTechnologies,Biotransformations,Production Technologies,2022(345-):345.

[10]Wang Q,He S,Yang W,Zhu J,Zhang W,Xue R,Liu L.The effe

cts of salinity changes on anammox performance: The response rule and tolerance mechanism[J]. Water Environ Res.2022Sep; 94(9):e10789.

**作者简介:**

陈文达(1999--),男,汉族,辽宁沈阳人,硕士研究生,研究方向: 海洋科学及废水处理。