

生物膜在低温污水处理中的应用与展望

刘云琦¹ 罗晓² 林冬庆¹ 李小曼¹ 吕鹏翼²

1 河北科技大学建筑工程学院，河北石家庄，050018；

2 河北科技大学环境科学与工程学院，河北石家庄，050018；

摘要：本文综述了生物膜在低温污水处理中的应用现状与展望。生物膜由于其独特的结构特征和微生物群落多样性，在低温条件下展现出优异的脱氮性能。文章首先介绍了生物膜的基本概念和结构特点，随后讨论了生物膜在低温污水处理中的应用现状，包括序批式生物膜反应器、固定化好氧反硝化混合菌、移动床生物膜反应器等。接着，文章分析了生物膜在低温污水处理中的优势，如空间异质性、微生物富集能力、稳定性等。同时，也指出了生物膜在低温污水处理中面临的挑战，如挂膜时间长、稳定性不足、HNAD 菌竞争排斥等。最后，文章展望了生物膜在低温污水处理中的未来发展方向，包括深入研究生物膜形成机制、优化生物膜性能、开发新型生物膜材料、优化工艺参数、与其他技术集成等。

关键词：生物膜；低温污水处理；脱氮；应用；展望

DOI：10.69979/3041-0673.25.10.067

引言

低温污水处理一直是污水处理领域的一大挑战。低温环境下，微生物的代谢活性降低，导致脱氮效率低下。然而，生物膜作为一种新型的生物处理技术，在低温条件下展现出优异的脱氮性能。生物膜是由微生物及其分泌的胞外聚合物构成的复杂结构，它们紧密附着于固体载体表面，形成具有三维空间结构的群落。这一结构的核心成分包括多糖、蛋白质和核酸，这些成分通过氢键和疏水相互作用来维持其稳定性^[1]。与悬浮污泥系统相比，生物膜具有明显的空间异质性特征，内部可以形成溶解氧梯和 pH 梯度，这为多菌群协同代谢提供了理想的条件^[2]。因此，生物膜在低温污水处理中具有广泛的应用前景。

1 生物膜在低温污水处理中的应用现状

相较于传统的活性污泥法占地面积大、工艺复杂、操作流程长、稳定性差、易受冲击的不足，生物膜法的核心优势就是通过脱氮菌的高效富集以及稳定性的提升来提高工艺的强度，在同一生化系统，生物膜法对硝化菌的富集能力是活性污泥法的 10 倍以上^[3]。除此之外，微生物可以分泌 EPS，这有利于生物膜的形成，增加微生物群落的稳定性^[4]，而且 EPS 的组成可以响应不同的操作条件，表明功能微生物的状态^[5]，EPS 还可以保护微生物免受不利环境的影响，并有助于系统的稳定性^[6]。

Zhang 等^[7]在序批式生物膜反应器（SBBR）中构建了 PNA 生物膜系统，该系统在低温条件下实现了稳定的污水脱氮，脱氮效率为 87.5% 左右，SBBR 中的微生物群落结构保持相对稳定，系统中检测到的厌氧氨氧化菌属为 Candidatus Brocadia，其丰度稳定在 0.3–0.5%。一

些能够分泌抗 EPS 的耐冷微生物，如黄杆菌属和热单胞菌属，在低温下得到富集，此外，其根据 EPS 的组成和特性分析发现，低温刺激了与细胞表面紧密结合的富含蛋白质的 EPS 的分泌，进一步提高了系统的稳定性，相对稳定的微生物群落结构、耐冷微生物的富集以及 EPS 分泌量的增加，对低温下污水脱氮的稳定运行起着重要作用。Chen 等^[8]对固定化好氧反硝化混合菌（IMADB）的反硝化性能进行了研究，在低碳氮比条件下，IMADB 表现出很强的温度适应性，在 5、15 和 25℃ 时，火山岩和聚酯纤维海绵固定化系统的 NO₃—N 去除率分别达到 83.95%–98.25% 和 89.71%–98.14%，在不同温度下，载体去除的 NO₃—N 含量占固定化系统去除 NO₃—N 含量的 41.18%–82.47%，在 NO₃—N 去除中起主要作用，温度越低，载体的作用越大。在相同温度下，载体的丰富度、多样性和均匀度相对较高，网络分析表明，与 NO₃—N 去除效率呈正相关的载体物种具有最大的操作分类单元（OTUs）和丰度，同时，载体具有最宽的生态位，在自然水系统中，IMADB 的总氮去除效率达到了 56.10%–62.31%，展现出良好的应用前景，微生物种群、EPS、载体和脱氮之间的关系还没有得到充分的了解，进一步了解这些相互作用将促进生物膜工艺的实际应用。

傅金祥等^[9]针对北方地区冬季低温导致脱氮效率低下的问题，采用序批式移动床生物膜反应器（SBMBBR）对低温市政污水进行处理，并对不同规格的聚乙烯填料进行了比较分析，结果表明，黑色聚乙烯填料与白色聚乙烯填料均能有效提升低温污水脱氮效率，在稳定运行期间，投加黑色聚乙烯填料的 R2 反应器中化学需氧量（COD）、NH₄⁺—N 和总磷（TP）的去除率分别为 79.4%、

71.2%和54.9%，相较于无填料的反应器，污染物去除率有所提高，而投加白色聚乙烯填料的R3反应器中，COD、NH₄⁺-N和TP的去除率分别达到了83.6%、74.4%和60.8%，显示出白色聚乙烯填料在处理效果上的优势，这一研究成果为北方地区冬季低温污水处理提供了新的思路和技术支持。闫艺明^[10]针对污水厂进水水温偏低所导致的生物活性降低以及脱氮除磷效果下降的问题，对A20反应器进行了改良，经过一段时间的稳定运行，反应器出水水质显著提升，其中COD、TN、NH₄⁺-N和TP的浓度分别降至37.62 mg/L、10.70 mg/L、0.94 mg/L和0.15 mg/L，这些指标均达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》GB18918-2002中规定的一级A类排放标准，这一改良措施有效提升了污水厂在低温条件下的处理效能，有助于实现更严格的环保要求。

Qin等^[11]研究人员在探索更高效的高氨氮废水处理工艺的过程中，提出了一种新型纯生物膜旋转生物接触器（RBC）的设计，并在其中接种了HNAD细菌，简称H-RBC，通过与接种传统活性污泥的RBC（S-RBC）进行比较，研究结果表明，H-RBC中的污染物去除效率随着转速的增加而有所提升，其中NH₄⁺-N的去除率超过了75.11%，TN的去除率也超过了73.73%，特别是在11 r/min的最佳转速下，H-RBC对NH₄⁺-N和TN的平均去除效率分别比S-RBC高出54.22%和64.68%，显示出显著的性能优势，这一发现不仅为高氨氮废水处理提供了新的思路，也为生物膜反应器的设计和优化提供了重要的参考依据。Wu等^[12]研究人员开发了一种A/O生物膜系统，并对其进行了评估，以探究接种HNAD菌株Alcaligenes faecalis WT14对系统污染物去除效率的影响，对比了接种WT14菌株的A/O生物膜系统（TWT14系统）与未接种的系统（CK系统）的性能结果表明，TWT14系统在污染物去除方面表现出优于CK系统的性能，其NH₄⁺-N、TN和COD的去除效率分别提高了11.22%、21.96%和12.51%，此外，TWT14系统排放的水质达到了国家排放标准的要求，这一改进显著地展示了接种WT14菌株对于提升A/O生物膜系统污染物去除能力的积极作用，为生物膜系统的优化和效能提升提供了有力的实验依据。

2 生物膜在低温污水处理中的优势

生物膜作为一种新型的生物处理技术，在低温污水处理中展现出了一系列显著的优势，这些优势使其成为解决低温条件下污水处理难题的有效手段。

2.1 空间异质性

生物膜的空间异质性是其最重要的特征之一。生物膜内部可以形成溶解氧梯和pH梯度，这些梯度的存在为多菌群协同代谢提供了理想的条件。具体而言，生物膜内部的溶解氧梯度可以支持不同类型的微生物在不

同的氧气浓度下生存和代谢，从而实现多种生物化学反应的共存。例如，好氧微生物可以在生物膜的外层进行代谢活动，而厌氧微生物则可以在内部缺氧或无氧的环境中发挥作用。这种空间异质性不仅增加了生物膜中微生物的种类和数量，而且提高了微生物的代谢活性，从而增强了生物膜的脱氮性能。

在低温条件下，生物膜的空间异质性尤为重要。由于低温会抑制微生物的代谢活性，因此，生物膜中不同微生物的共存和协同代谢成为提高脱氮效率的关键。研究表明，在低温条件下，生物膜中可以形成多种微生物共生体系，如好氧菌与厌氧菌的共生体系，这些共生体系能够有效地实现氮素的转化和去除。此外，生物膜中的pH梯度也有助于维持微生物的生理平衡，进一步促进脱氮反应的进行。

2.2 微生物富集能力

生物膜具有强大的微生物富集能力，能够有效地富集和稳定脱氮菌群，从而提高脱氮效率。在低温条件下，微生物的代谢活性降低，但生物膜中的微生物仍然能够维持一定的代谢活性，这主要得益于生物膜中的微生物富集作用。

生物膜中的微生物富集作用主要体现在以下几个方面：首先，生物膜提供了一个稳定的附着基质，使微生物能够牢固地附着在其上，从而避免了因水流冲刷而导致的微生物流失；其次，生物膜中的微生物可以通过分泌胞外聚合物（EPS）来增强自身的附着能力，EPS不仅可以增加微生物之间的粘附力，还可以提高微生物对基质的附着能力；最后，生物膜中的微生物可以通过相互之间的协同作用来提高脱氮效率，例如，好氧菌可以提供电子供体，而厌氧菌则可以利用这些电子供体进行脱氮反应。

研究表明，在低温条件下，生物膜中的微生物富集作用可以显著提高脱氮效率。例如，通过接种特定的脱氮菌群，可以显著提高生物膜中的脱氮活性，从而实现更高的氮素去除效率。此外，生物膜中的微生物富集作用还可以提高系统的稳定性，减少因微生物流失而导致的系统冲击。

2.3 稳定性

生物膜在低温条件下具有较强的稳定性，这是其在低温污水处理中的另一个重要优势。生物膜的稳定性主要体现在以下几个方面：

首先，生物膜的结构稳定性。生物膜中的微生物通过分泌EPS来形成一种凝胶状的基质，这种基质不仅可以增强微生物之间的粘附力，还可以提高生物膜的整体稳定性。在低温条件下，EPS的分泌量可能会增加，这有助于提高生物膜的抗剪切能力，从而保持生物膜的稳

定性。

其次，生物膜的生物稳定性。生物膜中的微生物种类繁多，包括好氧菌、厌氧菌、真菌、原生动物等多种生物。这些微生物之间存在着复杂的相互作用，如共生、竞争、捕食等，这些相互作用有助于维持生物膜的生物稳定性。在低温条件下，生物膜中的微生物可以通过调整自身的代谢途径和生理特性来适应环境变化，从而保持生物膜的生物稳定性。

最后，生物膜的功能稳定性。生物膜中的微生物可以协同完成多种生物化学反应，如硝化、反硝化、氨氧化等，这些反应共同构成了生物膜的脱氮功能。在低温条件下，生物膜中的微生物可以通过调节自身的代谢活性来适应环境变化，从而保持生物膜的功能稳定性。

综上所述，生物膜在低温污水处理中的稳定性是其成功应用的关键因素之一。生物膜的结构稳定性、生物稳定性和功能稳定性共同保证了其在低温条件下的高效脱氮性能。通过进一步研究和优化生物膜的培养条件、载体材料和工艺参数，有望进一步提高生物膜在低温污水处理中的稳定性和脱氮效率。

3 生物膜在低温污水处理中面临的挑战

尽管生物膜与低温 HNAD 菌群联用的潜力得到了广泛认可，但在工程化应用过程中，仍面临着不少挑战。首先，低温条件下生物膜的挂膜时间较长，通常需要 20-30 d，且生物膜的稳定性有待提高。研究指出，在没有预接种功能菌的情况下，生物膜在初期的脱氮效率往往不足 50%，这主要是由于低温环境抑制 EPS 的分泌以及 HNAD 菌的定植。此外，HNAD 菌在生物膜内部容易受到硝化菌或反硝化菌的竞争排斥，这进一步影响了其脱氮性能的发挥。为了克服这些挑战，需要深入研究生物膜的形成机制以及 HNAD 菌的生理特性，优化挂膜条件和生物膜结构，确保生物膜的稳定性和脱氮效率。通过技术创新和工艺改进，我们有望实现生物膜与 HNAD 菌群的更高效整合，为低温条件下的污水处理提供可靠的解决方案。

4 未来发展方向

随着低温污水处理技术的不断发展，生物膜的应用前景日益广阔。然而，为了充分发挥生物膜在低温条件下的脱氮效能，以下未来研究方向值得深入探讨：

生物膜形成机制的深入研究：当前对生物膜的形成和结构演变过程的认识尚不充分。未来的研究应聚焦于生物膜形成的关键因素，如微生物的附着、生物膜基质的组成、微生物之间的相互作用等。通过分子生物学技术，如宏基因组学和转录组学，探究低温条件下生物膜形成的分子机理，以期为优化生物膜培养条件提供理论基础。

生物膜性能优化：针对低温条件下生物膜性能的稳定性，未来的研究应关注生物膜结构的优化，包括生物膜厚度、孔隙率和生物量分布。研究不同生物膜载体材料和改性技术对生物膜性能的影响，以及如何通过调控生物膜厚度和结构来提高低温条件下的脱氮效率。

新型生物膜材料的开发：开发具有良好生物相容性、耐低温性和机械强度的生物膜材料是未来的重要研究方向。研究应集中在新型纳米材料和复合材料的设计与合成，以及这些材料在低温污水处理中的应用效果和稳定性。

生物膜工艺参数的优化：通过实验研究，确定低温条件下生物膜反应器的最佳操作参数，如水力停留时间 (HRT)、溶解氧浓度、温度等。同时，探索新型监测技术，如在线生物膜厚度监测和微生物活性评估，以实现对生物膜系统的实时监控和优化。

生物膜系统与其他技术的集成：研究生物膜系统与其他污水处理技术的集成，如与高级氧化过程 (AOPs)、膜分离技术等相结合，以提高系统的整体处理效率和氮素去除效果。

低温条件下微生物群落多样性的研究：通过高通量测序技术，研究低温条件下生物膜中微生物群落的多样性、功能和稳定性，以及不同微生物在脱氮过程中的作用和相互关系。

通过上述研究方向的努力，可以进一步拓展生物膜在低温污水处理中的应用范围，提高系统的处理效率和稳定性，为我国低温污水处理技术的进步和环境保护事业的发展做出贡献。

5 结论

生物膜在低温污水处理中具有显著的优势，但仍面临一些挑战。通过深入研究生物膜形成机制、优化生物膜性能、开发新型生物膜材料、优化工艺参数、与其他技术集成等，可以进一步提高生物膜在低温污水处理中的脱氮效率。未来的研究将推动生物膜技术在低温污水处理领域的应用，为我国水环境保护和可持续发展贡献力量。

参考文献

- [1] 杨新慈, 李军, 周家中, 等. 生物膜和活性污泥用于污水高标准脱氮对比 [J]. 中国给水排水, 2025, 41(02): 95-100.
- [2] 傅金祥, 张桐, 丁丽, 等. 聚乙烯填料序批式移动床生物膜反应器工艺处理低温市政污水效能研究 [J]. 环境污染与防治, 2023, 45(01): 63-7.
- [3] 闫艺明. 改良 A2O 工艺低温污水处理效率及稳定运行技术研究 [D], 2019.