

寒冷气候下人工湿地中氮素的去除与强化

嵇 斌¹, 康佩颖¹, 卫 婷¹, 常雅婷¹, 乔尚校¹, 赵亚乾^{1,2}

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 爱尔兰都柏林大学土木工程系 Dooge 水研究中心, 爱尔兰)

摘 要: 寒冷气候下人工湿地除污效果较差,尤其是氮素的去除,限制了人工湿地在寒冷气候地区的应用与推广。综述了寒冷气候下影响人工湿地除氮效率的主要因素,指出溶解氧和微生物活性是制衡寒冷地区人工湿地脱氮的主要因子。从人工湿地内部结构的优化与设计和外界因素两方面探讨了可能的强化措施,提出通过合理选择湿地基质及多种功能基质的组合、植物的优选与管理及微生物活性强化,辅以经济有效的“保温、增氧、赋碳”等措施强化氮素的去除,并对寒冷地区人工湿地的研究与设计提出了建议与展望,以期为寒冷气候下人工湿地的应用与推广提供技术参考。

关键词: 人工湿地; 寒冷气候; 脱氮; 强化措施

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)16-0035-06

Removal and Enhancement of Nitrogen in Constructed Wetlands in Cold Climate: A Review

Ji Bin¹, Kang Pei-ying¹, Wei Ting¹, Chang Ya-ting¹, Qiao Shang-xiao¹,
Zhao Ya-qian^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Dooge Centre for Water Resources Research, School of Civil Engineering, University College Dublin, Ireland)

Abstract: The treatment performance of constructed wetlands (CWs) is poor in cold climate, especially the removal of nitrogen (N), which limits the promotion and application of CWs in practice. This paper reviewed the main factors affecting N removal in CWs in cold climate. The review supported that the dissolved oxygen and microbial activity were the main factors that controlled the N removal in cold regions. Probable and potential measures/actions from the internal configuration optimization, design attentions, and external environmental factors were discussed to enhance the CWs performance in cold climate. It was proposed that the reasonable substrate and mixed multi-functional substrate, optimization and management of plants and the improvement of wetland microbial activity and supplemented by cost-effective “insulation, aeration and carbonation” measures could strengthen nitrogen removal at low temperature in CWs. Some suggestions and outlooks were also proposed. It was expected to provide technical reference for extending the large application of CWs in cold climate regions.

Key words: constructed wetlands; cold climate; nitrogen removal; intensification measures

人工湿地广泛应用于各类污水处理,在合理的设计和运行下取得了良好的处理效果,在低运行维护成本的同时赋予污水处理的生态功能。人工湿地在寒冷气候下[最冷月平均温度低于 -3°C 或寒冷地区($N40^{\circ}$ 以上^[1])]污水处理效果相较于温带气候不够理想,尤其是对氮素的去除效果较差,生活污水中TN平均去除率仅为 $(57.00 \pm 21.67)\%$ ^[2]。因此,如何强化寒冷气候下人工湿地脱氮效果,是当前关注和研究的热点问题之一。

在寒冷气候下,人工湿地的脱氮效果不仅受到温度、溶解氧、微生物活性与群落结构、碳源供给情况等因素的影响,其设计与运行也影响着脱氮效果。为此,分析了人工湿地对氮素的去除途径,探讨寒冷气候对人工湿地脱氮的各种影响因素,并依据影响因素对可能的强化措施进行总结,以期为人造湿地在寒冷气候地区的应用与推广提供技术参考。

1 人工湿地中氮素的去除途径

污水中氮素存在形式多样且不同价态下可通过氧化还原相互转变^[3]。虽然转变难易程度有所不同,但这些转变过程均能在人工湿地系统中发生^[4],这使得人工湿地中氮循环途径十分复杂(见图1)。由图1可知,人工湿地中氮循环途径主要有微生物脱氮、氨的挥发、填料吸附和植物吸收等。

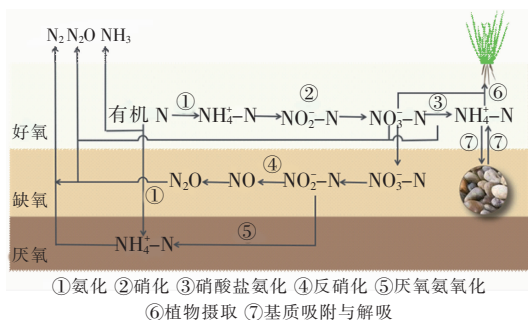


图1 人工湿地氮循环途径

Fig.1 Nitrogen cycling pathways in constructed wetland

2 寒冷气候下人工湿地除氮主要影响因素

2.1 温度

低温是抑制人工湿地脱氮能力的直接因素,但温度对氮循环过程中各个环节影响不同。硝化/反硝化是人工湿地脱氮的主要途径,氨氧化菌(AOB)活性决定了硝化过程的畅通与否,AOB对温度环境敏感,当温度 $<10^{\circ}\text{C}$ 时,氨氧化速率受到严重抑制。但低温下人工湿地仍具有硝化能力,维维国等^[5]考

察了潜流人工湿地在冬季($-10 \sim 15^{\circ}\text{C}$)的运行效果,发现气温 $<4^{\circ}\text{C}$ 时,硝化率为 $8\% \sim 22\%$ 。人工湿地中抑制硝化过程的临界温度值可能与湿地中硝化菌种群结构及对寒冷气候的适应性有关。低温影响反硝化细菌的增殖速率和活性,温度每降低 1°C ,反硝化速率降低 9% ^[6]。

厌氧氨氧化与硝化反硝化是湿地氮去除的两个关键途径。在温度 $<15^{\circ}\text{C}$ 时厌氧氨氧化受到抑制,温度 $<10^{\circ}\text{C}$ 时厌氧氨氧化过程可忽略不计^[7]。低温对人工湿地中厌氧氨氧化和反硝化作用可能表现出不同的影响^[8]。

寒冷气候下生境恶化,湿地植物枯萎死亡,氮去除能力减弱,甚至会释氮。但湿地植物不可或缺,种植植物的人工湿地根系周围AOB菌数量高于未种植植物的湿地^[9]。寒冷气候下人工湿地中氨的挥发、植物摄取对于除氮贡献较小,文中不再赘述。

2.2 溶解氧

溶解氧的不足将极大地抑制氮循环途径中氨化与硝化过程,使氮循环被迫停留在硝化阶段,氮素去除效果受到严重抑制。寒冷气候下人工湿地多处于低溶解氧(DO)状态,主要原因如下:①当气温降至冰点或出现降雪时,湿地被冰雪覆盖,阻断了大气复氧;②寒冷气候下植物休眠,植物泌氧减少;③虽然低温水中氧的溶解度增大,但湿地中保温层的存在和植物体休眠,气体交换途径被阻碍。寒冷气候下人工湿地前段是氨化作用的重点功能区^[10],氨化反应快于硝化反应,进水中DO在湿地前端大量被氨化消耗,湿地中后段呈现缺氧环境,硝化被严重抑制,呈现出高氨氮积累的特征,TN去除效果差。在缺氧环境下人工湿地中可能存在短程硝化反硝化、厌氧氨氧化等低耗氧脱氮途径,但这些途径在低温下对于氮素的去除贡献需要进一步研究和量化。

2.3 碳源

当寒冷地区人工湿地受纳污水为城市污水厂尾水时,其进水多呈现低C/N比的特点^[11],碳源的不足抑制了脱氮微生物活性和反硝化过程。寒冷气候下人工湿地仍可取得较为理想的有机物去除效果^[12],表明进水中有机碳被充分利用,但大部分碳源在人工湿地前端好氧区域被异养微生物消耗,当水流推流至反硝化功能区时,易降解碳源已消耗殆尽,反硝化过程被抑制。寒冷气候下人工湿地有机碳源的合理分配与高效利用对于氮的去除具有重要

影响。

2.4 微生物生理及群落结构

人工湿地因其结构的特殊性,同一空间下兼具好氧/缺氧/厌氧环境,氮循环过程中各类微生物均有适宜的生境。而寒冷气候会抑制人工湿地中微生物活性和改变微生物群落结构^[13]。低温下,氮循环中氨化、硝化及反硝化过程中微生物活性均受到抑制;低温胁迫下,微生物会分泌大量胞外聚合物并附着在基质表面^[14],阻碍了微生物对营养物的摄取,也抑制了硝化过程。湿地中不同基质层中微生物类型和数量存在显著差异,表层以好氧微生物为主,中层及下层以缺氧/厌氧微生物为主。在低温胁迫下表层好氧微生物逐渐向下迁移,导致湿地微生物群落结构(物种丰富度和生物多样性)和代谢途径的变化^[15],进而影响了湿地中氮循环。

3 强化措施

3.1 人工湿地内部结构设计与优化

3.1.1 基质优选

基质是湿地中氮循环过程的主要场所,基质的选择对于维持和强化寒冷气候下湿地对氮的去除尤为关键。基质的各类理化性质,如孔隙率、比表面积、化学组成、ORP等均能参与氮循环过程^[16]。基质粒径的分布与分层影响着基质的渗透性能,进而影响脱氮效果;疏松基质材料有利于大气复氧,促进硝化;多孔基质比表面积大,持水量高,有助于形成缺氧环境促进反硝化;Fe、Mn等多价金属基质可作为电子供体参与微生物脱氮过程^[17],缓解碳源的缺失;基质的氧化还原电位影响微生物活性,间接影响到湿地的除氮效率。寒冷气候下应充分利用不同基质的理化性质,对多种功能性基质进行组合配比,缓解低温对脱氮效果的影响。

3.1.2 植物优选与管理

合理选择寒冷气候下人工湿地植物的种类,可有效强化低温下氮素的去除。在寒冷气候下,人工湿地中某些耐寒植物具有一定的生物活性,能够提高基质中AOB菌的丰度^[16],促进氮的去除。此外,多种湿地植物的优化组合可强化人工湿地低温下的脱氮效果。寒冷地区人工湿地需及时收割衰亡植物,合理制定收割湿地植物的计划和措施,可强化植物的除氮效果,并提高湿地微生物种群多样性和物种丰富度^[18]。植物收割后在湿地中存留部分茎秆及根系,可固定床体表面并支撑形成冰面保温层。

收割后植物可用作寒冷气候下湿地保温材料及碳源补充。

3.1.3 微生物强化

寒冷气候下提高脱氮微生物活性和增加微生物数量是保障氮循环畅通的关键因素。提高低温下微生物活性的可能的途径是从极地寒冷地区获得含有特定的嗜冷脱氮微生物群落的土壤并用作湿地基质等,但这一途径成本高昂,这与人工湿地优势相悖。另一种途径是外加嗜冷脱氮微生物,从土著微生物群落中筛选、分离、纯化、培养富集后,再次投加至湿地中^[19-20]。投加纯化后嗜冷脱氮微生物短期内强化了低温下人工湿地的脱氮效果,但这些研究均为实验室小试,处理规模有限,在实际应用中将面临很大的挑战。投配富含脱氮微生物的活性污泥可提高湿地微生物的数量,但污泥的投加会加速人工湿地的堵塞,运行后期将严重恶化湿地整体处理效果。

寒冷地区人工湿地微生物活性的强化,应着重于湿地内部原有土著微生物活性的提高,外加微生物对于湿地长期处理效果的提高有限。

3.1.4 工艺设计

人工湿地工艺设计会改变湿地内部微观环境,进而影响寒冷气候下氮素的循环。通过工艺设计创造出良好的硝化反硝化环境可有效强化湿地在寒冷气候下氮的去除。已建和拟建的湿地工艺设计与调整有所区别,已建湿地可从以下途径对运行工艺进行调整:①增加回流。出水回流既可稀释进水,减轻污水负荷,也可利用进水中的碳源将回流污水中的硝态氮还原,促进反硝化,回流时可采用低扬程水泵,通过水力喷射或跌水等方式增加水中的溶解氧,从而提高硝化效率^[21]。②延长水力停留时间(HRT),削减水力负荷(HLR)。低温下延长HRT可强化硝化效果,但HRT过大时,易在湿地中形成“死区”^[22],应根据实际情况及时调整。③间歇式运行。低温下人工湿地采用间歇式运行可以提高氧的传递,强化寒冷地区湿地氮素的去除,采用间歇运行可在湿地前端设置稳定塘暂存污水。对于寒冷地区拟建设的人工湿地,可以在设计时考虑采取多级组合湿地、备用湿地轮作、与其他污水处理工艺联用及多点进水等措施强化氮素的去除。

3.2 环境因素

3.2.1 保温

在人工湿地外部增加保温结构可缓解低温对脱