



人工湿地生态除污的机制、影响因素和强化方法

丁 怡^{1,2}, 孙 园¹, 丁 冉¹, 刘兴坡^{1,2}, 宋新山³

(1. 上海海事大学海洋科学与工程学院, 上海 201306;

2. 上海海事大学海洋环境与生态模拟研究中心, 上海 201306;

3. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620)

[摘要] 水体富营养化已成为严重的全球性水环境问题, 威胁着水质安全, 亟需经济高效的水质生态修复技术。人工湿地具有低成本、生态化的去污禀赋, 可通过植物-基质-微生物之间形成的物理-化学-生物复合修复机制协同去除水体中的营养物质和有机污染物。归纳了人工湿地对水体中氮、磷及有机污染物的生态修复机制, 主要包括植物光合泌氧和吸收能力、基质表面附着和吸附性能以及微生物生化除污作用; 同时总结了影响人工湿地除污性能的主要因素, 即低温、湿地氧环境和湿地水力性能; 据此提出可通过强化湿地低温去污效率、调控湿地氧补充方式和水平以及改进湿地水力性能等措施增强人工湿地去污效率。最后, 针对人工湿地设计、使用及研究中存在的一些问题, 提出建议及展望, 为人工湿地的推广和应用提供科学依据。

[关键词] 人工湿地; 生态除污机制; 环境温度; 湿地氧环境; 湿地水力性能

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)06-0100-09

Mechanism, influencing factor and enhanced measure of ecological purification in constructed wetland

DING Yi^{1,2}, SUN Yuan¹, DING Ran¹, LIU Xingpo^{1,2}, SONG Xinshan³

(1. College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 2. Center for Marine Environmental and Ecological Modelling, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

3. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Eutrophication has caused serious problems on water environment in global world, which threatens the safety of water quality. It is necessary to develop cost-effective and ecological restoration technology for water quality improvement. Constructed wetland(CW) has the low-cost and ecological advantages on pollution removal, which can remove nutrients and organic pollutants in water body by physical-chemical-biological purification mechanisms among plant-substrate-microorganism of CW. The remediation mechanism of CW on nitrogen, phosphorus and organic matter was discussed, which mainly contained plant photosynthesis and absorption, substrate adhesion and adsorption, and biochemical decontamination of microorganisms. The main influencing factors on pollutant removal performance of CW including low temperature condition, oxygen environment and hydraulic performance of CW, were summarized simultaneously. Based on this, it was proposed that the decontamination efficiency of CW could be enhanced through measures such as enhancing CW performance under low temperature condition, regulating oxygen complement manners and level of CW, and improving CW hydraulic performance. At last, the suggestions and prospects on the design, application and research of CW were proposed, which aimed to provide scientific basis for the spread and application of CWs.

Key words: constructed wetland; ecological purification mechanism; ambient temperature; oxygen environment of wetland; hydraulic performance of wetland

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51809162); 国家重点研发计划(2019YFC0408604)

随着全球经济和工业的快速发展,加工及生产过程中衍生的各种污染物进入水体,造成全球水环境污染总体趋势愈发严峻。以我国为例,根据《2020中国生态环境状况公报》显示,在开展营养状态监测的110个湖泊中,中营养状态湖泊占61.8%,氨氮、总磷和COD仍是主要污染指标。富营养化问题不仅导致水体氧含量下降、水质变差、水生动植物生存环境受到破坏,也是藻类爆发和水华形成的重要因素,对饮用水安全产生严重威胁^[1-2]。传统的污水治理技术包括电解法、膜分离法、高级氧化法、活性污泥法及生物膜法等,虽然取得了一定成效,但普遍存在能耗大、技术成本高且无法长期持续使用等缺点^[3]。如何低成本、生态化、持续高效地去除导致水体富营养化的污染物质,是提高流域水环境质量的关键所在^[4-5]。人工湿地具有构建使用成本低、操作维护简便、低能耗和高成效等优点,可利用湿地中植物-基质-微生物之间形成的物理-化学-生物复合修复机制协同净化水体中常见的污染物质^[6-7]。但是,人工湿地当前普遍面临秋冬季节去除效率不佳的难题,主要原因在于低温条件限制了植物和微生物的生长,影响了植物吸收和微生物主导的降解除污过程。此外,湿地在长期运行过程中亦面临溶解氧不足和水力性能下降的困境,限制了氨氮转化、总磷去除和有机污染物的好氧降解,使湿地除污效率进一步下降^[8-9]。笔者系统归纳了人工湿地对水体中氮、磷及有机污染物的生态修复机制,总结了影响人工湿地除污性能的主要因素,并在综述文献研究的过程中提出针对性的解决方法。最后,根据当前人工湿地运行过程中存在的主要问题,提出了合理的建议及展望。

1 人工湿地生态除污机制

图1阐释了人工湿地生态除污的机制。

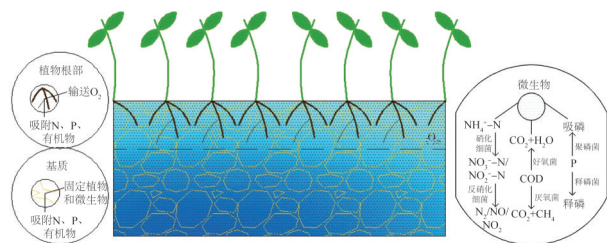


图1 人工湿地生态除污机制

Fig. 1 Ecological purification mechanisms in constructed wetlands

如图1所示,人工湿地通过植物、基质和微生物3部分的协同作用实现对水体污染进行生态修复的目标^[10],其中微生物主导的硝化反硝化作用是确保湿地有效除氮的关键所在^[11]。湿地脱氮微生物主要包括硝酸菌、亚硝酸菌和反硝化细菌等,硝酸菌和亚硝酸菌通常在好氧条件下生长,主导硝化反应的发生,将氨氮转化为硝态氮,因此湿地内氧水平成为硝化作用的主要限制因素;反硝化细菌通常在缺氧或厌氧条件下生长并主导反硝化过程的进行^[12],将硝化反应生成的硝态氮转化为气态氮逸出湿地^[13]。因此,硝化反应推动了湿地脱氮的进程,而反硝化反应则实现了湿地脱氮的目标。

基质对磷的吸附是湿地除磷的重要途径,其性能取决于基质的化学组成(铝、铁和钙的含量)和物理性质(比表面积、孔隙度、粒径大小),因此在湿地中应首选吸附能力强、比表面积大的基质^[14]。此外,基质也为微生物生长繁殖提供了附着表面,在基质表面形成的生物膜中,微生物和各类目标降解物发生化学反应,最终实现除污功效。特定微生物还可以同化吸收水体中的磷元素,例如聚磷菌对磷的摄取作用已成为湿地除磷的重要机制^[15],因此定期清洗基质层中老化的生物膜,不仅有助于持续稳定地发挥湿地除磷功效,还可保障湿地水力性能的通畅。另外,植物生长过程中也需要吸收一部分氮和磷作为营养元素,因此在湿地中种植吸收氮磷能力强的植物亦有助于提高湿地除污能力。注重湿地植物级配,首选吸收能力强、根系发达、四季常青的植物组合,可有力保障湿地植物在低温环境下发挥除污效能^[16-20]。

污水中的有机污染物通常分为3种形态:可溶态、胶体态和微粒态。在人工湿地中,大多数胶体态和微粒态的有机物通过沉淀和过滤后被截留下来,而可溶态有机物作为污水中有机碳的主要组成,其去除过程较为复杂^[21],一般通过植物根系、基质吸附及异养微生物代谢降解作用被去除。根据湿地内氧环境差异,表层复氧及植物光合泌氧使人工湿地中上层区域内保持较好的氧环境,促进好氧微生物在植物根际及基质生物膜内生长,保证有机物被好氧菌分解生成小分子的二氧化碳和水^[22];中下层区域因远离植物泌氧根区,一般呈现缺氧和厌氧状态,厌氧微生物通常在该区域内生长,有机物易被厌氧菌分解成二氧化碳和甲烷^[23]。

2 影响人工湿地去污的主要因素

2.1 低温

植物和微生物不仅是人工湿地的重要组成部分,更是湿地发挥去污作用的重要参与者。然而低温条件会对植物和微生物生长产生抑制,进而影响两者除污作用的发挥。

大多数植物在低温条件下会进入休眠状态,此时植物泌氧和新陈代谢能力都呈现下降趋势,植物出现凋零衰败的迹象,植物根区的好氧、缺氧和厌氧状态遭受破坏,人工湿地氧水平被进一步削弱,进而导致硝化作用和有机物好氧降解能力受到限制;植物凋零衰败后形成湿地枯落物,所吸收的氮磷随之分解进入湿地中,进一步增加人工湿地的去污负荷^[24-25];同时植物残体易造成湿地基质堵塞,降低基质间的水力传递效率和污水的处理总量,从而影响湿地净污能力和除污效率。

湿地微生物一般最适宜的生长环境是 25~35℃,而秋季平均气温为 10~15℃,冬季平均气温为 -5~5℃,显然秋冬季节湿地微生物的生长代谢和去污能力都将受到明显抑制和影响。低温主要通过减弱微生物细胞膜的渗透功能及体内的化学反应速率降低细胞对营养物质的吸收及代谢速率,进而影响细菌的降解能力和活性^[26]。

2.2 湿地氧环境

目前,氨氮和有机物是地表水体中的主要污染因子,也是典型的耗氧污染物^[27]。溶解氧作为人工湿地去除耗氧污染物的重要限制因素和控制条件,决定着氨氮和有机物是否能被有效去除^[28]。人工湿地中氧环境存在如下变化规律:(1)湿地表层因接近大气,复氧效果好,呈现好氧状态,而底层则呈现明显的缺氧或厌氧状态;(2)湿地进水区域氧含量相对较高,但随着水体中氨氮和有机物在好氧条件下被转化及降解,湿地沿程氧含量逐步减少,出水区域往往呈现缺氧的状态;(3)湿地植物通过根系泌氧使近根区形成好氧状态,而远离根际的区域则形成缺氧或厌氧状态。因此,人工湿地内氧含量会随着时间的及沿程而变化,当污水总量或其中耗氧污染物浓度增高时,湿地沿程氧含量将骤减,直至消耗殆尽。其中,有机物好氧降解还将与硝化脱氮竞争消耗溶解氧,导致硝化反应进行不畅;随着有机物浓度减少,反硝化脱氮又将受到有机碳源不足的制约,最终

导致总氮去除受到影响^[29-30]。

种植根系泌氧能力强的植物、改变湿地运行模式及人工机械增氧等,是改善湿地内氧水平的主要方法^[31]。其中植物泌氧能力有限,而间歇增氧和连续增氧是当前使用较普遍的 2 种人工机械增氧技术,但是连续增氧除了增加能耗及使用成本外,还易使湿地整体呈现好氧条件,不利于反硝化脱氮的进行,进而影响总氮的去除;间歇增氧能解决连续增氧产生的问题,一方面降低能耗、减少操作成本,另一方面为湿地创造好氧-缺氧-厌氧的交替环境,使有着不同氧需求的微生物菌群发挥除污作用,更有利于氮、磷及有机污染物的去除^[32]。另外,从节约能耗的角度出发,通过改变湿地运行模式或利用藻类光合作用进行无动力增氧的方式,正受到广泛关注及研究,以满足生态化、低成本的可持续污水治理需要。

2.3 湿地水力性能

湿地水力性能的主要评价参数包括水流状况、水力停留时间、水力负荷和水位变化等。在水力性能不佳的情况下,湿地易发生短流、水流滞留及死区面积扩大等影响湿地运行的问题,因此适宜的水力状况对保障湿地有效去污发挥着重要作用^[33]。

基质粒径大小、水流流速、基质材料属性和进出水方式共同影响着湿地中水体的流态及流程,其中基质的颗粒大小主要决定着湿地系统的孔隙度和污染物质在湿地中的停留时间。通常选择较大粒径的基质和较低的水流流速,这样能够延长水流流程和平均停留时间,进而提高湿地的有效体积比和水力效率,使湿地中基质、微生物与污染物质有更充分的接触面积和反应时间,进而提升湿地去污效率^[34]。另外,基质材料属性也是影响湿地水力性能的重要因素,当人工湿地长期处理高浓度的难降解有机废水时,基质极易出现堵塞现象,进而影响系统水力传导性和除污效率,而铁碳基质可利用铁碳颗粒间形成的原电池效应促进难降解有机物质的分解,在提高废水可生化性的同时,进一步强化湿地除污效能^[35]。湿地进出水方式除了影响水流流程外,也将影响溶解氧分布,从而对耗氧污染物的去除产生影响。

水力停留时间是指污水进入湿地后,在湿地内的平均停留时间。停留时间越长意味着污水与湿地中植物、基质和微生物的接触越充分,污水中的污染物越能够通过物理、化学及生物机制等被逐步转化并去

除^[36]。通常情况下,湿地内污染物去除率与水力停留时间成正比,为降低湿地运行成本、提高湿地去污总量,确定合理的水力停留时间是至关重要的管理措施。

水力负荷是指单位时间内通过单位面积的污水水量,调控水力负荷就是决定污水在湿地内的平均停留时间。当水力负荷增大时,一方面意味着污水在湿地内的停留时间变短,另一方面意味着污染物负荷有所增高。较高负荷的污染物无法被湿地内植物、基质及微生物充分吸收、吸附及降解,最终将影响湿地去污效率,因此确定适宜的水力负荷是发挥湿地水力性能的关键所在^[37]。

水位变化能影响湿地内的氧含量,因此通过设置人工湿地的饱和水位,可达到调控湿地内好氧区及厌氧区分布的效果,以满足不同去污微生物生长繁殖所需的氧环境^[38]。例如,通过调低湿地水位,可使湿地基质孔隙间产生空隙吸力,令空气进入基质层间,好氧微生物将保持较高的活性,这有利于湿地硝化过程的进行及有机物好氧降解;而当调高水位至完全饱和状态时,湿地整体趋于厌氧环境,反硝化细菌生长得到有力保障,有助于硝态氮的高效去除^[39]。

3 强化人工湿地去污效率的措施

3.1 强化湿地低温去污措施

现有的低温强化措施主要包括非生物强化和生物强化措施,其中非生物措施主要包括植物覆盖和地膜覆盖。植物覆盖是指将收割后的植物覆盖在湿地表层以起到保温效果,该方法虽有一定成效,但铺设植物残体也易造成二次污染;地膜覆盖是将薄膜覆盖在湿地表面,该方法铺设过程较复杂,投资高,同时易造成白色污染^[40]。

常见的生物强化措施主要为培养低温复合菌种和固定化微生物。复合菌种可以弥补单一菌种作用的局限性,Yuanyuan SHAO等^[41]从人工湿地植物根际土壤中分离出6种耐低温的异源反硝化菌株,将其培养成复合菌种后接种至人工湿地中,发现与没有接种复合菌的湿地相比,接种复合菌的湿地对COD、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN的去除率明显提高,分别达到85.7%、90.4%、96.8%和96.7%;该复合菌提高了微生物的整体活性,但由于水流的侵蚀作用,微生物接种效率不够稳定,需多次接种以保障湿地除污菌种的有序生长和存活。Xinyue ZHAO等^[42]将具有硝化和反硝化作用的混合菌株接种至垂直流人工湿地

内,发现与非生物强化系统相比,生物强化后的湿地内COD、TN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率分别提高了5.6%、8.8%和13.3%,这主要是因为经生物强化的湿地内部建立了新的细菌群落平衡,丰富了土壤微生物群落结构。微生物固定化技术将游离的微生物固定在特定区域,有效避免了菌种的流失,在增加微生物量的同时还能保持微生物代谢活性,实现菌株的连续重复利用^[43]。微生物固定化技术主要包括交联固定化、吸附固定化和包埋固定化技术,其中包埋固定化技术最常见^[44]。王硕等^[45]首先利用梯度降温方式富集得到耐冷氨氧化功能菌群,随后通过海藻酸钠将其包埋固定后投加到人工湿地中,发现经微生物固定化后,人工湿地内氨氮平均去除率可达86%,比未固定微生物的对照组湿地提高了26%;微生物包埋固定化通过实现固液分离,降低外界不利环境及毒害物质对微生物生长的影响,不仅充分保障了氨氧化功能菌群的增长,也能促使湿地其他菌种含量的提升,从而整体提高湿地对污染物的去除效果。邹海燕等^[46]利用聚乙烯醇和海藻酸钠复合材料对低温混合菌实现包埋固定化,并将其负载于生物炭上后投入人工湿地内,发现人工湿地去污效率显著提升,对COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TP的去除率分别达到92.21%、94.70%、91.08%和89.75%,且去污效率持续稳定。导致此结果的原因可能是:(1)低温混合菌能够抵御并适应寒冷环境,进而增强人工湿地微生物除污过程;(2)生物炭比表面积大、吸附能力强,能够改良土壤理化性状,为植物和微生物生长提供良好环境;(3)湿地利用负载固定化低温混合菌的生物炭作为填料,增大了低温菌附着面积和生物密度,为低温环境下湿地除污提供有利条件。

3.2 调控湿地氧补充方式及水平

当前,人工湿地内溶解氧水平总体呈现不足的态势,限制了氨氮和有机污染物的转化和去除。为改善这个问题,研究人员尝试了多种增氧技术,目前常见的湿地增氧方式见表1。

如表1所示,常见湿地增氧方式主要包括:(1)通过自然改变湿地运行方式来提高湿地氧含量,例如采取潮汐流运行、跌水复氧及出水回流模式等,该方法能耗低、使用简便;(2)人工机械增氧,即通过铺设多孔换气管、鼓风机曝气、进水预曝气和喷淋进水等方式增氧,该增氧方式能耗较高,但增氧效果较显

表 1 常见湿地增氧方式对比

Table 1 Comparison of common aeration technologies in constructed wetlands

增氧类型	常见技术	增氧效果 [DO/(mg·L ⁻¹)]	去除率/%			主要特点	参考文献
			COD	TN	NH ₄ ⁺ -N		
自然增氧	跌水增氧	0.80 → 1.20 ΔDO=0.40	74.5	57.2	59.0	重力充氧,但增氧效果有限	[47]
	出水回流增氧	1.50 → 2.19 ΔDO=0.69	65.0	65.0	—	循环往复式运行复氧	[48]
	潮汐流运行增氧	0.98 → 4.09 ΔDO=3.11	85.9	96.4	72.8	传氧速率较高,耗能低	[49]
人工增氧	机械曝气增氧	2.7 → 4.2 ΔDO=1.5	82.3	75.2	88.8	成本高,曝气易过量	[50]
	微曝气增氧	0.46 → 3.00 ΔDO=2.54	91.0	75.3	91.3	成本较低,可实现局部增氧	[51]
	间歇曝气增氧	0.39 → 5.62 ΔDO=5.23	95.6	85.8	96.1	调控充氧量,实现氧环境交替	[52]
生物增氧	植物泌氧	0.78 → 3.60 ΔDO=2.82	—	96.1	98.2	易受光照和温度影响	[53]
	蚯蚓增氧	2.10 → 2.70 ΔDO=0.60	74.0	68.7	—	疏通基质通气,缓解湿地堵塞	[54]
	藻类增氧	1.96 → 5.21 ΔDO=3.25	82.3	86.4	88.3	藻类光合泌氧效果佳,但出水藻类易成二次污染	[55]

著,通常使用的增氧策略为间歇增氧或连续增氧,增氧位置为水平潜流人工湿地的前端、中端或后端及垂直潜流人工湿地的表层、中层或下层;(3)利用藻类、植物和蚯蚓等生物实现湿地增氧。

跌水增氧是常见的自然增氧方式之一。王宁宁等^[56]通过回流泵将出水回流至进水处,再采用自然跌水方式,使水流跌入湿地,形成复氧进水效应,经研究证实,当湿地内溶解氧维持在 8 mg/L 时,氨氮、总氮、总磷和 COD 的去除率达到最高,分别为 94.70%、91.00%、80.13% 和 86.56%。自然跌水复氧过程一方面对水流产生推动作用,另一方面有助于提高湿地微生物种类和活性,进而促进湿地的去污效果。出水回流增氧通过将湿地出水重新引入湿地的方式使湿地氧含量得到有效补充,同时进一步提升污染物深度净化的效果。

作为新兴的人工湿地系统,潮汐流人工湿地可利用淹没和排水交替运行的方式将大气中的氧气吸入湿地填料中,解决间歇或连续增氧方式产生的高能耗问题。潮汐流运行模式为微生物生长提供了有利的微环境,并有效提高了湿地内微生物群落丰度,在实现节能增氧的同时,也达到显著提升湿地去污效率的目标。Jing LI 等^[57]比较了间歇增氧和潮汐流运行增氧对人工湿地氧水平及去污效能的影响,结果显示,潮汐流人工湿地中氧的传输效率及含量最高, NH₄⁺-N(98.30%)、TN(72.22%) 及 COD(93.21%) 的平均去除率最佳。

尚亚丹等^[58]比较了不曝气、间歇曝气和连续曝

气 3 种条件下人工湿地对生活污水的处理效果,结果显示间歇曝气条件下湿地去污的整体效率最佳,对生活污水中 NH₄⁺-N、TN、TP 和 COD 的去除率分别达到 99.70%、78.49%、90.30% 和 98.58%。微曝气增氧和间歇曝气均为相对经济且有效的增氧技术,但微曝气通常只能实现局部增氧且增氧量相对有限。要想经济、快速、有效地提升人工湿地的去污效率和降低能源消耗,需根据人工湿地类型和污水性质,探究合适的增氧条件(曝气量、曝气时间、曝气速率、曝气范围)。Haiming WU 等^[59]研究了曝气时间(1~10 h/d)和曝气速率(0.1~2.0 L/min)对垂直流人工湿地净化生活污水的影响,结果表明当曝气时间和速率分别为 4 h/d 和 1.0 L/min 时, COD、NH₄⁺-N 和 TN 去除率最高,分别达到 97.2%、98.4% 和 90.6%。此外,调控间歇曝气增氧策略不仅有助于提高湿地氧含量,同时还可以优化湿地氧分布,为去除氨氮和有机污染物创造好氧-厌氧交替的有利条件。Xiaoou WANG 等^[60]研究发现曝气位置可以影响湿地内溶解氧的分布,进而对不同区域内污染物的去除产生影响。从垂直流人工湿地中层开启增氧时,溶解氧可同时向上下 2 个方向扩散,因此拓展了湿地好氧区域,此时 COD 和氨氮得到更有效的去除;而从垂直流人工湿地底层开启增氧时,溶解氧分布单一化,好氧区域主要集中在底层,氧浓度由底层到表层呈现减少的趋势,表层更有利于总氮去除。

Qiu JIN 等^[54]向人工湿地中引入蚯蚓后发现出水水质满足城市污水处理厂污染物排放标准,蚯蚓

的引入不仅可以改善溶解氧的状况,还可以疏通基质,缓解湿地基质堵塞的难题。Yi DING 等^[61]将高效藻类塘与人工湿地联用后发现,污水在高效藻类塘内停留一段时间后,藻类光合作用释放的氧气显著提高了水体中的氧含量,当这部分富氧水体进入人工湿地后,湿地内氧环境得到明显改善,促进湿地硝化反应进行的同时,也有利于水体中总氮的去除。

3.3 改进湿地水力性能

水力性能和去污效果是人工湿地2个最重要的评价指标,而人工湿地去污效果与湿地的水流运动状况、水深、水力停留时间和水力负荷等有着密切联系,优化水力运行条件可以改善湿地内部的水力性能,从而提高湿地的去污效果。Yuhui WANG 等^[62]通过氯化钠和染料示踪试验考察了基质粒径、水流流速和进出水方式对人工湿地水力性能及运行效果的影响,结果显示,选择较大粒径的基质和较低的水流流速能促进水流平稳、均匀地向前推动,减少死区面积和短流现象发生;另外,湿地底部进水和顶部出水的运行方式能使水流克服重力流动,延长水流流程,提高湿地有效体积比和水力性能。郭士林等^[63]设置4个水位变幅(0、3、6和9 cm/d)研究水位变化对水平潜流人工湿地脱氮效率的影响,结果表明,水位变化可改变湿地氧环境,有助于提高湿地内硝化强度,但一定程度上也抑制了反硝化强度;水位变幅6 cm/d的湿地系统内氮素去除效果最佳。周斌等^[64]探讨了间歇和连续运行方式对水平潜流人工湿地脱氮效率的影响,结果证实间歇运行方式下湿地的硝化和反硝化作用均优于连续运行方式,主要原因在于间歇运行有利于湿地复氧,使人工湿地内形成好氧-缺氧-厌氧的交替环境,不仅解除了湿地脱氮的限制性因素,还能确保硝化和反硝化过程同时畅通,提升总氮去除效果。K. ANGASSA 等^[65]将水力负荷由0.025 m/d调整至0.05 m/d后发现,人工湿地中COD、TN和TP的去除率分别由95.0%、95.2%和95.2%下降至90.8%、86.8%和88.5%,提高水力负荷意味着增加了系统中有机物和营养物质负荷,同时减少了这部分污染物在系统中的停留和反应时间,从而降低了湿地去污效率;研究还发现与有机物去除相比,水力停留时间延长对总氮去除的影响更明显,因为湿地氧含量随着停留时间延长而逐步减少,为厌氧反硝化的充分进行创造了有利环境,总氮去除率因此获得提升。王橦橦等^[66]构建了三级复合潜流人工湿地,其中一、

二级处理单元为上行流布水效果的垂直潜流湿地,而三级处理单元为下行流布水效果的水平潜流湿地,该布水方法既可避免湿地“短流”问题产生,又增大了湿地的作用面积,使污水与湿地中植物、基质和微生物的接触更充分,有助于进一步提高湿地的除污效率;复合湿地系统对COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均有着较好的处理效果,最佳水力负荷区间为0.356~0.378 $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,而COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的最佳水力停留时间梯度区间分别为0.76~0.80 d和0.79~0.85 d。因此,适宜的水力负荷和水力停留时间有助于提高湿地水力性能及除污效果。

4 结语和展望

(1)低温条件已经成为制约人工湿地运行效率和除污效果的主要因素,造成人工湿地在我国北方地区的推广普及受到严重限制。一系列新型湿地应运而生,例如铁碳微电解人工湿地、电极强化型人工湿地和微生物燃料电池型人工湿地。新型湿地旨在解决低温条件下微生物生长和活性受限的难题,其能较好地改善湿地水力条件、促进微生物生长繁殖;但其使用成本较高,运行稳定性和成效性有待长期验证,对于经济和技术水平相对滞后的偏远农村地区而言,推广应用仍需时日。如何经济、快速、有效地提高低温条件下人工湿地的除污效果和应用范围是今后的研究重点。

(2)氧含量对湿地中微生物生长和耗氧污染物去除有较大影响。通常,好氧环境中微生物种类更丰富、微生物群落多样性更高。间歇或连续曝气是常用的动力增氧技术,效果虽好,但成本较高;采取潮汐流运行、自然跌水复氧或藻类光合增氧等无动力增氧方式,不仅能降低湿地运行成本,同时可有效提高湿地氧含量。但氧含量过高也易造成湿地系统内碳源不足,碳氧水平的有效调控是提高湿地除污效果的关键。今后的研究应利用系统动力学原理,深入分析人工湿地生态系统中碳氮氧平衡变化和微生物生长参数之间的相互关系,为优化人工湿地的调控管理提供科学依据。

(3)污染物负荷过高,加重湿地负荷,导致污染物在湿地中的反应时间减少,同时可能加重湿地基质堵塞的风险,影响人工湿地处理时效和使用寿命。选择较大粒径的基质、较低的水流流速及底端进水-顶端出水的运行方式,能延长水流流程和平

均停留时间,减少死区面积,提高湿地的有效体积比和水力效率。今后应当以不同类型的人工湿地为研究对象,构建并求解相对应的水力数学模型和水质处理数学模型,以掌握各类型人工湿地的水力效率和特性,为进一步优化湿地结构参数、运行效率和去污效果提供理论依据。

参考文献

- [1] WU Di, YAN Huyong, SHANG Mingsheng, et al. Water eutrophication evaluation based on semi-supervised classification: A case study in Three Gorges Reservoir[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 81:362-372.
- [2] LI Ang, STROKAL M, BAI Zhaohai, et al. How to avoid coastal eutrophication: A back-casting study for the North China Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 692:676-690.
- [3] SEHAR S, NASSER H A A. Wastewater treatment of food industries through constructed wetland: A review[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, 16(10): 6453-6472.
- [4] WANG Baodong, XIN Ming, WEI Qinsheng, et al. A historical overview of coastal eutrophication in the China seas[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 136:394-400.
- [5] 方海涛, 宋林旭, 纪道斌, 等. 香溪河夏季水华暴发差异性研究及其机制分析[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(9):68-74.
- FANG Haitao, SONG Linxu, JI Daobin, et al. Regional differences and mechanism analysis of summer blooms in Xiangxihe Reservoir Bay[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 42(9):68-74.
- [6] ZHANG Xinwen, HU Zhen, NGO H H, et al. Simultaneous improvement of waste gas purification and nitrogen removal using a novel aerated vertical flow constructed wetland[J]. *Water Research*, 2018, 130:79-87.
- [7] NANDAKUMAR S, PIPIL H, RAY S, et al. Removal of phosphorous and nitrogen from wastewater in *Brachiaria*-based constructed wetland[J]. *Chemosphere*, 2019, 233:216-222.
- [8] LI Xiaoyan, DING Aizhong, ZHENG Lei, et al. Relationship between design parameters and removal efficiency for constructed wetlands in China[J]. *Ecological Engineering*, 2018, 123:135-140.
- [9] ZHANG Dong qing, JINADASA K B S N, GERSBERG R M, et al. Application of constructed wetlands for wastewater treatment in developing countries: A review of recent developments(2000-2013)[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 141:116-131.
- [10] 林莉莉, 鲁纳, 肖恩荣, 等. 人工湿地生物堵塞研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(6):207-214.
- LIN Lili, LU Rui, XIAO Enrong, et al. Bioclogging in constructed wetlands: State-of-the-art[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 42(6):207-214.
- [11] LI Xi, LI Yuyuan, LI Yong, et al. Enhanced nitrogen removal and quantitative analysis of removal mechanism in multistage surface flow constructed wetlands for the large-scale treatment of swine wastewater[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 246: 575-582.
- [12] SAEED T, HAQUE I, KHAN T. Organic matter and nutrients removal in hybrid constructed wetlands: Influence of saturation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 371:154-165.
- [13] HUANG Juan, CAO Chong, LIU Jialiang, et al. The response of nitrogen removal and related bacteria within constructed wetlands after long-term treating wastewater containing environmental concentrations of silver nanoparticles[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 667:522-531.
- [14] YANG Yixiao, LIU Junhua, ZHANG Ning, et al. Influence of application of manganese ore in constructed wetlands on the mechanisms and improvement of nitrogen and phosphorus removal[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 170:446-452.
- [15] DU Lu, CHEN Qianru, LIU Panpan, et al. Phosphorus removal performance and biological dephosphorization process in treating reclaimed water by integrated vertical-flow constructed wetlands (IVCWs)[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 243:204-211.
- [16] 赵梦云, 熊家晴, 郑于聪, 等. 植物收割对人工湿地中污染物去除的长期影响[J]. *水处理技术*, 2019, 45(11):112-116.
- ZHAO Mengyun, XIONG Jiaqing, ZHENG Yucong, et al. Long-term effect of plant harvesting on pollutants removal in constructed wetlands[J]. *Technology of Water Treatment*, 2019, 45(11): 112-116.
- [17] LUO Pei, LIU Feng, LIU Xinliang, et al. Phosphorus removal from lagoon-pretreated swine wastewater by pilot-scale surface flow constructed wetlands planted with *Myriophyllum aquaticum*[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 576:490-497.
- [18] GRACE K A, JUSTON J M, FINN D, et al. Substrate manipulation near the outflow of a constructed wetland reduced internal phosphorus loading from sediments and macrophytes[J]. *Ecological Engineering*, 2019, 129:71-81.
- [19] LAN Wei, ZHANG Jian, HU Zhen, et al. Phosphorus removal enhancement of magnesium modified constructed wetland microcosm and its mechanism study[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 335:209-214.
- [20] XU Defu, WANG Lin, LI Huili, et al. The forms and bioavailability of phosphorus in integrated vertical flow constructed wetland with earthworms and different substrates[J]. *Chemosphere*, 2015, 134:492-498.
- [21] DU Xiaoli, XU Zuxin, LI Junqi, et al. Characterization and removal of dissolved organic matter in a vertical flow constructed wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 73:610-615.
- [22] LIU Huaqing, HU Zhen, ZHANG Jian, et al. Optimizations on supply and distribution of dissolved oxygen in constructed wetlands: A review[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 214:797-805.
- [23] WU Haiming, MA Wenmei, KONG Qiang, et al. Spatial-temporal dynamics of organics and nitrogen removal in surface flow constructed wetlands for secondary effluent treatment under cold tem-

- perature[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 350: 445-452.
- [24] DAL FERRO N, IBRAHIM H M S, BORIN M. Newly-established free water-surface constructed wetland to treat agricultural waters in the low-lying Venetian plain: Performance on nitrogen and phosphorus removal[J]. Science of the Total Environment, 2018, 639: 852-859.
- [25] LI Xi, LI Yuyuan, LI Yong, et al. Enhanced nitrogen removal and quantitative analysis of removal mechanism in multistage surface flow constructed wetlands for the large-scale treatment of swine wastewater[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 246: 575-582.
- [26] HUSSEIN A, SCHOLZ M. Dye wastewater treatment by vertical-flow constructed wetlands[J]. Ecological Engineering, 2017, 101: 28-38.
- [27] LIU Xuelan, ZHANG Yan, LI Xinhua, et al. Effects of influent nitrogen loads on nitrogen and COD removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands during different growth periods of *Phragmites australis*[J]. Science of the Total Environment, 2018, 635: 1360-1366.
- [28] SGROI M, PELISSARI C, ROCCARO P, et al. Removal of organic carbon, nitrogen, emerging contaminants and fluorescing organic matter in different constructed wetland configurations[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 332: 619-627.
- [29] ILYAS H, MASIH I. The performance of the intensified constructed wetlands for organic matter and nitrogen removal: A review[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 198: 372-383.
- [30] ROUS V, VYMAZAL J, HNÁTKOVÁ T. Treatment wetlands aeration efficiency: A review[J]. Ecological Engineering, 2019, 136: 62-67.
- [31] LIU Huaqing, HU Zhen, ZHANG Jian, et al. Optimizations on supply and distribution of dissolved oxygen in constructed wetlands: A review[J]. Bioresource Technology, 2016, 214: 797-805.
- [32] LI Jing, HU Zhen, LI Fazhan, et al. Effect of oxygen supply strategy on nitrogen removal of biochar-based vertical subsurface flow constructed wetland: Intermittent aeration and tidal flow[J]. Chemosphere, 2019, 223: 366-374.
- [33] CHANG T J, CHANG Yusheng, LEE W T, et al. Flow uniformity and hydraulic efficiency improvement of deep-water constructed wetlands[J]. Ecological Engineering, 2016, 92: 28-36.
- [34] YANG Yan, ZHAO Yaqian, LIU Ranbin, et al. Global development of various emerged substrates utilized in constructed wetlands[J]. Bioresource Technology, 2018, 261: 441-452.
- [35] ZHU Xinyan, CHEN Xinjian, YANG Zemeng, et al. Investigating the influences of electrode material property on degradation behavior of organic wastewaters by iron-carbon micro-electrolysis[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 338: 46-54.
- [36] OKHRAVI S, ESLAMIAN S, FATHIANPOUR N. Assessing the effects of flow distribution on the internal hydraulic behavior of a constructed horizontal subsurface flow wetland using a numerical model and a tracer study[J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2017, 17(4): 264-273.
- [37] ÇAKIR R, GIDIRISLIOGLU A, ÇEBİ U. A study on the effects of different hydraulic loading rates (HLR) on pollutant removal efficiency of subsurface horizontal-flow constructed wetlands used for treatment of domestic wastewaters[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 164: 121-128.
- [38] PELISSARI C, ÁVILA C, TREIN C M, et al. Nitrogen transforming bacteria within a full-scale partially saturated vertical subsurface flow constructed wetland treating urban wastewater[J]. Science of the Total Environment, 2017, 574: 390-399.
- [39] 刘国臣, 王福浩, 梁家成, 等. 不同水位垂直流人工湿地中植物及微生物特征[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2019, 49(2): 98-105.
- LIU Guochen, WANG Fuhao, LIANG Jiacheng, et al. Characteristics of plant and nitrogen transformation microorganism in vertical flow constructed wetlands with various saturated water level[J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(2): 98-105.
- [40] WANG Mo, ZHANG Dongqing, DONG Jianwen, et al. Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate: A review[J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, 57: 293-311.
- [41] SHAO Yuanyuan, PEI Haiyan, HU Wenrong, et al. Bioaugmentation in lab scale constructed wetland microcosms for treating polluted river water and domestic wastewater in Northern China[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2014, 95: 151-159.
- [42] ZHAO Xinyue, YANG Jixian, BAI Shunwen, et al. Microbial population dynamics in response to bioaugmentation in a constructed wetland system under 10 °C[J]. Bioresource Technology, 2016, 205: 166-173.
- [43] SUN Shiyong, FAN Shenglan, SHEN Kexuan, et al. Laboratory assessment of bioleaching of shallow eutrophic sediment by immobilized photosynthetic bacteria[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(28): 22143-22151.
- [44] YU Guanlong, PENG Haiyuan, FU Yongjiang, et al. Enhanced nitrogen removal of low C/N wastewater in constructed wetlands with co-immobilizing solid carbon source and denitrifying bacteria[J]. Bioresource Technology, 2019, 280: 337-344.
- [45] 王硕, 胡振, 刘紫君. 耐冷氨氧化功能菌群强化人工湿地低温脱氮[J]. 中国环境科学, 2020, 40(2): 640-646.
- WANG Shuo, HU Zhen, LIU Zijun. Enhanced nitrogen removal of constructed wetland under low temperature based on cold resistant ammonia-oxidizing functional consortia[J]. China Environmental Science, 2020, 40(2): 640-646.
- [46] 邹海燕, 徐子衡, 闫淼, 等. 生物炭固定低温混合菌在人工湿地中的应用[J]. 水处理技术, 2020, 46(3): 128-134.
- ZOU Haiyan, XU Ziheng, YAN Miao, et al. Application of biochar fixed low temperature mixed bacteria in constructed wetland[J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46(3): 128-134.
- [47] 熊仁, 谢敏, 冯传禄, 等. 厌氧+跌水曝气+人工湿地组合工艺处理农村生活污水[J]. 环境工程学报, 2019, 13(2): 327-331.
- XIONG Ren, XIE Min, FENG Chuanlu, et al. Rural domestic sew-

- age treatment by a combined process of anaerobic tank, drop-aeration and constructed wetland[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(2): 327-331.
- [48] DECEZARO S T, WOLFF D B, PELISSARI C, et al. Influence of hydraulic loading rate and recirculation on oxygen transfer in a vertical flow constructed wetland[J]. Science of the Total Environment, 2019, 668: 988-995.
- [49] TAN Xu, YANG Yanling, LIU Yongwang, et al. Enhanced simultaneous organics and nutrients removal in tidal flow constructed wetland using activated alumina as substrate treating domestic wastewater[J]. Bioresource Technology, 2019, 280: 441-446.
- [50] MURPHY C, RAJABZADEH A R, WEBER K P, et al. Nitrification cessation and recovery in an aerated saturated vertical subsurface flow treatment wetland: Field studies and microscale biofilm modeling[J]. Bioresource Technology, 2016, 209: 125-132.
- [51] 翟俊, 李岳. 微曝气强化人工湿地处理生活污水试验研究[J]. 土木与环境工程学报, 2020, 42(6): 178-184.
- ZHAI Jun, LI Yue. The effects of domestic wastewater treatment by micro-aerated hybrid constructed wetland[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(6): 178-184.
- [52] FAN Jinlin, ZHANG Jian, GUO Wenshan, et al. Enhanced long-term organics and nitrogen removal and associated microbial community in intermittently aerated subsurface flow constructed wetlands[J]. Bioresource Technology, 2016, 214: 871-875.
- [53] SUN Haishu, XU Shengjun, WU Shanghua, et al. Enhancement of facultative anaerobic denitrifying communities by oxygen release from roots of the macrophyte in constructed wetlands[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 246: 157-163.
- [54] JIN Qiu, LI Wei, LI Xianning. Effect of earthworm *Eisenia foetida* in constructed wetland on purification of country wastewater[J]. Procedia Engineering, 2016, 154: 406-411.
- [55] 姚燃, 刘锋, 吴露, 等. 三级绿狐尾藻表面流人工湿地对养殖废水处理效应研究[J]. 地球与环境, 2018, 46(5): 475-481.
- YAO Ran, LIU Feng, WU Lu, et al. Performance of three-stage surface flow constructed wetlands planted with *Myriophyllum aquaticum* gaudich for swine wastewater treatment[J]. Earth and Environment, 2018, 46(5): 475-481.
- [56] 王宁宁, 赵阳国, 孙文丽, 等. 溶解氧含量对人工湿地去除污染物效果的影响[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2018, 48(6): 24-30.
- WANG Ningning, ZHAO Yangguo, SUN Wenli, et al. Effect of dissolved oxygen on the removal of pollutants in artificial wetland[J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(6): 24-30.
- [57] LI Jing, HU Zhen, LI Fazhan, et al. Effect of oxygen supply strategy on nitrogen removal of biochar-based vertical subsurface flow constructed wetland: Intermittent aeration and tidal flow[J]. Chemosphere, 2019, 223: 366-374.
- [58] 尚亚丹, 李张伟, 海热提, 等. 间歇曝气铁碳微电解耦合人工湿地脱氮除磷研究[J]. 水处理技术, 2018, 44(10): 99-102.
- SHANG Yadan, LI Zhengwei, HAI Reti, et al. Study on intermittent aeration of iron carbon micro-electrolysis coupling with constructed wetland for nitrogen and phosphorus remove[J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(10): 99-102.
- [59] WU Haiming, FAN Jinlin, ZHANG Jian, et al. Optimization of organics and nitrogen removal in intermittently aerated vertical flow constructed wetlands: Effects of aeration time and aeration rate[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2016, 113: 139-145.
- [60] WANG Xiaou, TIAN Yimei, ZHAO Xinhua, et al. Effects of aeration position on organics, nitrogen and phosphorus removal in combined oxidation pond-constructed wetland systems[J]. Bioresource Technology, 2015, 198: 7-15.
- [61] DING Yi, WANG Wei, LIU Xingpo, et al. Intensified nitrogen removal of constructed wetland by novel integration of high rate algal pond biotechnology[J]. Bioresource Technology, 2016, 219: 757-761.
- [62] WANG Yuhui, SONG Xinshan, LIAO Weihong, et al. Impacts of inlet-outlet configuration, flow rate and filter size on hydraulic behavior of quasi-2-dimensional horizontal constructed wetland: NaCl and dye tracer test[J]. Ecological Engineering, 2014, 69: 177-185.
- [63] 郭士林, 叶春, 李春华, 等. 水位波动对水平潜流人工湿地脱氮效果的影响[J]. 中国环境科学, 2017, 37(3): 932-940.
- GUO Shilin, YE Chun, LI Chunhua, et al. Impact of water level fluctuation on nitrogen removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands[J]. China Environmental Science, 2017, 37(3): 932-940.
- [64] 周斌, 宋新山, 王宇晖, 等. 运行方式对潜流人工湿地氧分布及脱氮的影响[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(12): 110-113.
- ZHOU Bin, SONG Xinshan, WANG Yuhui, et al. Effect of operation modes of subsurface flow constructed wetlands for spatial distribution of dissolved oxygen and nitrogen removal[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(12): 110-113.
- [65] ANGASSA K, LETA S, MULAT W, et al. Effect of hydraulic loading on bioremediation of municipal wastewater using constructed wetland planted with *Vetiver grass*, Addis Ababa, Ethiopia[J]. Nanotechnology for Environmental Engineering, 2019, 4(1): 1-11.
- [66] 王橧橧, 吴勇, 卓勇, 等. 复合潜流人工湿地试验平台水力特性及去除效果研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(27): 305-310.
- WANG Xiaotong, WU Yong, ZHUO Yong, et al. Study on the effect of removing and hydraulic characteristics of complex subsurface flow constructed wetland test platform[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(27): 305-310.
- [作者简介] 丁怡(1988—), 博士, 副教授. E-mail: yding@shmtu.edu.cn. 通讯作者: 宋新山, 教授. E-mail: newmountain@dhu.edu.cn.
- [收稿日期] 2022-03-08(修改稿)