

人工湿地堵塞监测方法的研究进展

张明珍^{1,2}, 徐 栋¹, 武俊梅¹, 吴振斌¹

(1. 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:比较分析目前人工湿地堵塞常见和可能的监测方法,对人工湿地堵塞监测方法和装置设备的研究方向及重点进行了展望,以期堵塞湿地的长期监测提供参考。根据湿地内部水力学分析、基质或堵塞物物理化学性质将监测方法分为原位法和异位法。原位法中基于水力传导率测定的下降水头法和恒定水头法应用广泛;示踪剂技术较为简明直观,常用作堵塞湿地水流模型的建立;时域反射探针、探地雷达以及核磁共振传感器等新型原位探针技术对湿地内部造成的干扰较小,在湿地堵塞物定性定量方面具有良好发展前景;基于湿地内部电阻效应的微生物燃料电池法是目前研究的热点;基于基质孔隙率和堵塞物成分和性质的异位测定法还有较大提升空间;新兴的以蚯蚓为主的生物监测和根区微生物监测同样值得探索。

关键词:人工湿地;堵塞;监测;原位法;异位法

中图分类号:X703.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2021)03-0121-06

人工湿地是 20 世纪 70 年代兴起的一种污水处理工艺。该工艺通过模拟天然湿地生态系统,利用湿地基质、植物、微生物 3 者的共同作用从而达到净化污水的目的(于涛等,2006)。根据水流的形式可将人工湿地分为表面流人工湿地和潜流人工湿地,而潜流人工湿地又可分为水平潜流和垂直潜流人工湿地以及复合垂直流人工湿地(Matós et al,2018)。人工湿地具有投资低、工艺简单、运行费用少等优点,在国内外得以广泛应用(于涛等,2006)。

然而大量的工程实践表明,随着人工湿地运行时间的增加,其内部会出现不同程度的堵塞。美国上百所投入使用的人工湿地约有一半在运行 5 年内会出现各种各样的堵塞问题(USEPA,1999),我国最早的人工湿地污水处理系统——深圳白泥坑人工湿地也存在各种堵塞问题(陈韞真和叶纪良,1996)。关于堵塞形成的原因,有研究表明,湿地堵塞过程的实质是湿地填料内有效孔隙逐渐减少、渗透系数缓慢下降,且大致可归结为物理、化学和生物 3 方面的原因:(1)物理机理:湿地进水中的有机、无机悬浮物

和难降解有机物沉积在湿地表面、基质颗粒之间以及基质颗粒内,使基质孔隙逐渐减小;(2)化学机制:基质和基质中水相的物理化学性质造成湿地堵塞,如基质的化学组成、孔隙率,水相的有机物组成、pH、氧化还原电位等;(3)生物机理:微生物利用湿地内积累的有机物,迅速生长形成大量的胞外聚合物,渗透系数缓慢下降,该物质还可与多糖类、聚脲类等物质形成低密度的孔径为纳米级的凝胶网状结构,拦截无机、有机颗粒物,使渗透系数下降到堵塞的程度(陈韞真和叶纪良,1996;于涛等,2006;骆慧敏,2014;白少元等,2016;项泽顺,2018)。

以上 3 种机制共同作用,使湿地表面雍水或出现短流现象(项泽顺,2018)。由于湿地堵塞现象的普遍性与复杂性,国内外的学者针对该问题进行了大量研究,其中如何描述湿地堵塞的程度成为其研究工作的重点。本文在总结前人研究成果基础上,比较分析了目前人工湿地堵塞常见和可能的监测方法,对人工湿地堵塞监测方法和装置设备的研究方向及重点进行了展望,以期堵塞湿地的长期监测提供参考。

1 湿地堵塞的监测方法

目前有关人工湿地堵塞监测方法的研究取得颇多进展,可应用的方法有以下 4 种。

1.1 基于水力学分析的原位测定法

通过水力传导率法与示踪剂法,对流入湿地的

收稿日期:2019-12-06 修回日期:2020-04-25

基金项目:国家“十三五”水专项(2017ZX07602002-004);中国科学院科技服务网络计划资助(KFJ-STZ-ZDTP-038)。

作者简介:张明珍,1994 年生,女,硕士研究生,研究方向为水环境生态修复。E-mail:zhangmz@ihb.ac.cn

通信作者:徐栋,1977 年生,男,副研究员,研究方向为水污染控制工程与水环境生态修复工程。E-mail:xudong@ihb.ac.cn

水体进行相关的水力学分析,可反映其内部堵塞程度。

1.1.1 水力传导率法 测量湿地各点的水力梯度,使用达西定律可以计算点位间平均水力传导率(Knowles et al,2011;Nivala et al,2012)。

$$K = \frac{QL}{S(h_1 - h_2)} \quad \text{①}$$

式中: K 为湿地基质的饱和水力传导率, m/d ; Q 为进水流量, m^3/d ; L 为沿轴流方向上游点和下游点之间的距离, m ; S 为沿轴流方向上的横截面积, m^2 ; h_1 为上游水位的水头值, m ; h_2 为下游水位的水头值, m 。

根据上述公式,在 Q 一定的情况下,上下游区域之间的水力梯度 $(h_1 - h_2)/L$ 必定会因为堵塞而增加,从而导致水力传导率 K 减小,因此这种方法在一定程度上可以评价湿地堵塞的情况。但是通过该法测得的值仅表示轴流方向上横截面内的平均水力传导率,并不能表示该横截面内某特定垂直和横向位置处的堵塞严重程度,因此应用达西定律只能测得近似的介质水力传导率(Dittrich,2006)。

下降水头法(Pedescoll et al,2009;Pedescoll et al,2011)和恒定水头法(Knowles & Davies,2009)是基于上述原理衍生出的另外2种较复杂的方法。Pedescoll等(2011)使用下降水头法分别测得砂和砾石作为湿地介质的水力传导率,并将其值与一种标准的恒定水头测量法(实验室条件下)测得的值相比较,结果显示该方法的重复性在10%标准偏差范

围内。Knowles和Davies(2009)等使用其团队自行设计的原位恒定水头测定仪测量细硅砂介质的水力传导率,其值与标准恒定水头测量法(实验室条件下)测得的值基本一致,重复性在1%~4%标准偏差范围内。虽然这两种方法理论上都可应用于湿地现场水力传导率的原位测定,但由于其侵入性且会对样品造成干扰,因此测得结果可能不具有代表性(Nivala et al,2012)。

王宇擎等(2018)根据水力传导率法,自行设计改造了一种人工湿地堵塞原位测定仪,并利用该仪器测定4个已经运行了1~5a的潜流人工湿地堵塞系数(由水力传导率归一化所得),实验结果显示原位测定仪能很好地反映湿地的堵塞情况。该原位测定仪具有装置简单、计算简便等特点,具有一定的实践应用前景。

1.1.2 示踪剂法 示踪剂实验早期主要应用于描述地下水中目标物质(主要是污染物)的运动轨迹,以便分析其污染状况,从而更好地管理和保护水资源(Flury & Wai,2003)。后来,部分学者将其用于人工湿地系统的水力停留时间、水力效率以及湿地内部流体动力学、流动路径等相关信息的研究(Whitmer et al,2000)。近年,示踪剂实验对堵塞湿地水流变化规律的研究成为热点(Batchelor & Loots,1997;Knowles et al,2010;Garcia et al,2013),使其成为一种可以评估湿地堵塞状况的工具。表1中列举了一些常用的示踪剂及其优缺点和其适用情况。

表1 几种常用示踪剂的优缺点及其适用情况

Tab.1 Advantages and disadvantages of common tracers

示踪剂	优点	缺点	适用情况
锂化物(氯化锂)	不易降解;自然背景低(Whitmer et al,2000;Smith et al,2005)	被湿地植物和其他生物吸收(Whitmer et al,2000;Smith et al,2005)	小到中等大小的湿地(Headley & Kadlec,2007)
溴化物(溴化钠、溴化钾、氯化钠)	不易降解;成本低(可以使用电导率测定仪在现场监测和记录)(Garcia et al,2004)	被湿地植物和其他生物吸收;自然背景值略高(高盐浓度可能对系统内的生物群和处理效果产生负面影响)(Smith et al,2005;Garcia et al,2004)	小到中等大小的湿地(Headley & Kadle,2007)
罗丹明 WT	检测限低;自然背景为零;相对成本低(Smart & Laidlaw,1977)	易受环境影响;易于生物降解、光解和吸附到有机固体、碎屑和一些塑料上(Smart & Laidla,1977;Headley & Kadle,2007)	适用于中等至高的初始浓度,短期试验(HRT约<7d)和非高度有机环境(Headley & Kadle,2007)

示踪剂实验最为简便的操作方法是将示踪剂通过进水口快速脉冲进入湿地中,经过一定时间,测量出口处示踪剂浓度。有研究通过示踪实验来研究人工湿地内部基于短流引起的堵塞问题对水流变化规律的影响(Batchelor & Loots,1997)。Ranieri等(2013)以KBr作示踪剂,在种植芦苇、菖蒲以及未

种植植物的3个湿地系统中进行示踪剂实验,发现2个种植植物湿地的示踪剂实验模型与实验数据间的相关性不太明显,而未种植植物的湿地,其模型与实验数据具有良好的相关性;李曼等(2017)以NaCl作为示踪剂,进行示踪实验,研究了湿地在运行初期、堵塞初期与后期水流形式的变化规律。

水力学行为有多种表现形式,在人工湿地上进行单一示踪实验可能仅代表一种可能性(Kadlec & Wallace, 2009);人工湿地具体的水力性能还取决于流量、蒸发和冻结等季节效应以及植物根系等因素(Hedges et al, 2008)。单一的示踪实验结果可能不具有代表性,还需结合水力传导率法或其他方法共同评估湿地的堵塞状况(Nivala et al, 2012)。

1.2 基于基质物理特性的原位测定法

基质作为人工湿地系统中一个重要的组成部分,其性质在一定程度上也能反映湿地内部状况。根据基质的物理性质与堵塞物的关系可作为判断湿

地堵塞情况的依据。

1.2.1 原位探针技术 时域反射探针(Malicki et al, 1992)、探地雷达(Cooper et al, 2005)以及核磁共振传感器(Morris et al, 2011)等原位探针技术是依据湿地基质的电磁特性和堵塞物之间关系开发出来的,并应用在人工湿地堵塞问题的研究上。表2列出了以上3种技术的原理以及优缺点。

相比前文提到的2种方法,上述3种技术对湿地内部造成的干扰较小,在湿地堵塞物定性定量方面具有良好发展前景,但其缺点限制了其应用范围,为扩大使用还需长期、大量研究。

表2 3种原位探针技术的原理与优缺点

Tab.2 Principles, advantages and disadvantages of three in-situ probe technologies

原位探针技术	原 理	优 点	缺 点
时域反射探针(TDR)	根据电磁波在介质中传播的速度与介电常数的平方根成反比,通过测定基质中高频电磁脉冲沿探头的传播速度,确定基质含水量,间接地反映出堵塞的位置(Malicki et al, 1992; Langergraber, 2003; 周健民和沈仁芳, 2013)	精度高、便于自动控制、适于原位连续测量且测量范围广;实时测量,远距离多点自动监测(Nivala et al, 2012; Malicki et al, 1992; Langergraber, 2003)	堵塞物质的含水量在90%以上时,测量结果可能会出现偏差,在湿地饱和系统中的应用有限(Nivala et al, 2012)
探地雷达(GPR)	利用电磁波在介质中的传播速度与介电常数之间的关系,计算出介电常数,根据介电常数与基质含水量的关系式确定基质的含水量(Cooper et al, 2005; 卢奕竹等, 2017)	无损、精度较高、速度快、适合中、小尺度监测;可得到湿地内部能量衰减图像(Cooper et al, 2005; Nivala et al, 2012)	无法精准地确定湿地内部堵塞物质的含量(Nivala et al, 2012)
核磁共振技术(NMR)	将探测器嵌入湿地基质中,利用其对水分子的敏感性,确定堵塞的程度以及生物质和颗粒的相对量,定性描述堵塞物的组成及相对含量(Kudryavtsev & Linert, 2014)	快速、无损,实时监测基质水分的动态变化;操作步骤简单、数据批量处理、显著提高实验效率(Morris et al, 2011; Nivala et al, 2012)	未在大型湿地现场使用过,仍需进一步研究(Nivala et al, 2012)

1.2.2 基质孔隙率原位测定法 湿地基质孔隙率的测定可以通过填料饱和和放空时的水量体积来进行计算:以圆柱形湿地为例,湿地通入水,基质吸水达到饱和后,量得充满水(水面刚好淹没基质表面)时填料高度 h ,测定圆形横截面的内径为 D ,水放空后测得放出水的体积 V ,通过以下公式算出孔隙率 A (熊佐芳等, 2011)。

$$A = \frac{4V}{\pi D^2 h} \quad (2)$$

Langergrabe等(2003)的研究表明由有机和无机颗粒的积累所导致的堵塞层不断压缩,会造成填料孔隙率的下降,这也是湿地发生堵塞的一个重要原因。许多相关研究也都证实了这一原因(Suliman et al, 2006; Hua et al, 2017)。

1.3 微生物燃料电池法(MFC)

自20世纪始,MFC就作为一种新型的水处理技术,引起了很多学者与专家的关注。相较于传统的水处理技术,MFC的创新之处在于它通过微生物的作用,将储存在有机物中的化学能转化为电能,达到能源回收与再生的目的(王同悦等, 2015)。MFC

一般是由阴极、阳极、隔板及外电路组成,其具体的工作原理为:在阳极区,微生物氧化污水中的有机物产生电子和质子,电子通过外电路到达阴极,而质子随着液体的流动通过隔板到达阴极,电子与质子在阴极区反生还原反应,形成完整回路(Doherty et al, 2015)。近年有研究将MFC与人工湿地系统耦合,这种复合系统不仅可以提高污水处理效率,且有潜力发展为一种评价人工湿地堵塞状况的工具。Corbella等(2016)利用模拟的潜流人工湿地堵塞系统,来研究MFC是否适用于其堵塞状况的评估,实验结果表明MFC中积聚的污泥对其产电性能有直接影响,具体表现为随着人工湿地堵塞程度的增加,微生物燃料电池内积聚的污泥量增加转移的电子量减少,导致外电路的电压减小;以上结果仍需在实际条件下开展更进一步的研究,但仍可表明MFC在监测人工湿地堵塞方面具有很大的潜力。汪龙眠等(2017)设计出一套MFC-人工湿地装置,用来评估人工湿地堵塞程度,并进行了一系列的实验,其实验结果与Corbella等(2016)的研究结论一致,证实了该方法具有可行性。

近期,原位监测技术又有了新的发展,白少元等(2018)提出利用堵塞区域与非堵塞区域电阻率的不同,通过测量堵塞监测杆上电极周围电阻率的变化实现对人工湿地运行状况的监测。

1.4 基于堵塞物成分和性质的异位测定法

在造成人工湿地堵塞的诸多因素中,有机物的累积被认为是主要原因。当湿地内部有机物的含量达到一定程度时,基质上会形成黑色的凝胶状生物膜,这层膜可以拦截无机、有机颗粒,造成湿地堵塞(白少元等,2016;项泽顺,2018;Fu et al,2013;Du et al,2016)。测定基质中积累的有机质量可以定量地判断湿地堵塞程度。其测量方法可分为2种,一为直接灼烧法:提取一定量的填料,从填料中清洗出堵塞物质,然后在105℃烘干至恒重,再在600℃下灼烧可以得出堵塞物中的有机质量(Tanner et al,1998);二为重铬酸钾容量法:将采集到的原位砂样经自然风干后过0.15 mm筛,称取适量砂样并向其中缓慢加入重铬酸钾标准溶液,于170~180℃的油浴锅中加热煮沸5 min,冷却后用标准硫酸亚铁溶液进行滴定,根据公式计算出有机质含量(付贵萍等,2004)。

应用以上2种方法计算出的是可溶性有机物质量,而Nguyen(2000)的研究表明,造成湿地堵塞的有机物中,有90%以上是难降解有机化合物,63%~96%是腐殖酸、富里酸和腐殖质;Fu等(2013)利用3个垂直流人工湿地小试系统调查了种植植物和未种植植物的湿地堵塞期间有机物各组分的含量变化,实验结果表明可溶性有机物和富里酸的含量是造成湿地堵塞最重要的因素,其次是腐殖质。在用有机物的含量评估湿地堵塞的程度时,要注意研究有机物中各组分的累积性和生物降解性,这不仅可以更深入地理解有机物在湿地堵塞中所起的作用,还能为缓解堵塞问题提供思路(Nivala et al,2012)。

2 总结与展望

本文所述6种监测方法中应用最广的是水力传导率法和示踪剂法,但这2种方法都有明显的缺点,如水力传导率在测量过程中易受干扰、示踪剂消耗量大且易吸附等。最具前景的监测方法则是基于基质电磁和电阻特性的原位测定法,该类方法快速、无损,可以有效地反映湿地堵塞状况,但此法的应用及推广,还需要进行大量的研究。此外,孔文文等(2018)采应用自主开发的人工湿地植物增长信息提取软件,通过测定湿地植物投影面积和质量,实现人

工湿地植物的无损监测;董梦珂等(2017)通过在传统污泥干化湿地中投加蚯蚓,研究了蚯蚓人工湿地处理污泥技术的可操作性;这表明堵塞湿地的生物监测方法有望得到发展。

综上所述,在目前人工湿地堵塞的研究基础上,为便于堵塞湿地的精确监测,对今后的研究工作提出以下几点建议:(1)寻找更高回收率的示踪剂以便得到更加准确地流态分析,从而更加精确地确定堵塞湿地的短流区与“死区”,为湿地工艺设计提供参考资料;(2)调查湿地运行过程中的微生物群落演替状况,找出导致堵塞的优势种,并寻找其对湿地外观变化的影响,开发一种生物监测技术以填补此领域的技术空白;(3)对当前具有前景的监测方法进行深入研究,开发出具有小型化、可视化、标准化、实用化的湿地堵塞监测技术;(4)开发以植物或微生物等生物为主体的人工湿地堵塞监测方法。

参考文献

- 白少元,李雪芬,丁彦礼,等,2016. 强化曝气对潜流人工湿地堵塞物分布规律的影响[J]. 环境科学学报,36(5): 1717-1722.
- 白少元,2018-06-25. 预埋多监测杆的堵塞原位监测人工湿地:ZL201810656956.5[P].
- 陈真猛,叶纪良,1996. 深圳白泥坑、雁田人工湿地污水处理场[J]. 电力环境保护,(1): 47-51.
- 丁彦礼,2018-06-25. 围墙嵌入监测电极的堵塞原位监测人工湿地:ZL201810656951.2[P].
- 董梦珂,李怀正,徐一啸,2017. 不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果[J]. 环境科学,38(3): 317-324.
- 付贵萍,吴振斌,张晟,等,2004. 构建湿地堵塞问题的研究[J]. 环境科学,25(3): 144-149.
- 孔文文,黄岁樑,刘霄,等,2018. 人工湿地植物无损监测方法的建立与应用[J]. 环境工程学报,12(1): 356-364.
- 李曼,华国芬,姬雨雨,2017. 垂直流人工湿地堵塞和轮休过程中水流变化规律[J]. 水处理技术,43(1): 57-61.
- 卢奕竹,宋文龙,路京选,等,2017. 探地雷达测量土壤水方法及其尺度特征[J]. 南水北调与水利科技,15(2): 37-44.
- 骆慧敏,2014. 波形潜流人工湿地基质堵塞解除模式和机理研究[D]. 武汉:华中科技大学.
- 汪龙眼,2017-06-07. 一种基于微生物燃料电池评测人工湿地堵塞状况的装置和方法:ZL201720659410.6[P].
- 王同悦,Liam Doherty,赵晓红,等,2015. 人工湿地/微生物燃料电池技术的发展现状[J]. 中国给水排水,31(17): 129-136.
- 王宇擎,张智,王乾,等,2018. 潜流人工湿地堵塞程度的原位测定研究[J]. 环境科学研究,31(12): 2021-2027.

- 项泽顺,2018. 垂直流人工湿地基质堵塞及恢复方法的研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学.
- 熊佐芳,周云新,洗萍,等,2011. 水力负荷对垂直流人工湿地堵塞影响研究[J]. 水处理技术,37(7): 34-36.
- 于涛,吴振斌,徐栋,等,2006. 潜流型人工湿地堵塞机制及其模型化[J]. 环境科学与技术,29(6): 74-76.
- 周健民,沈仁芳,2013. 土壤学大辞典[M]. 北京: 科学出版社.
- Batchelor A, Loots P, 1997. A critical evaluation of a pilot scale subsurface flow wetland: ten years after commissioning[J]. Water Science and Technology, 35 (5): 337-343.
- Cooper D, Griffin P, Cooper P, 2005. Factors affecting the longevity of sub-surface horizontal flow systems operating as tertiary treatment for sewage effluent[J]. Water Science & Technology, 51(9): 127-135.
- Corbella C, Garcia J, Puigagut J, 2016. Microbial fuel cells for clogging assessment in constructed wetlands[J]. Science of the Total Environment, 569: 1060-1063.
- Dittrich E, 2006. Experiences on hydraulic performance of subsurface flow constructed wetlands[J]. Pollack Periodica, 1 (1): 53-66.
- Doherty L, Zhao Y, Zhao X, et al, 2015. A review of a recently emerged technology: Constructed wetland-Microbial fuel cells[J]. Water Research, 85: 38-45.
- Du M P, Xu D, Trinh X, et al, 2016. EPS solubilization treatment by applying the biosurfactant rhamnolipid to reduce clogging in constructed wetlands[J]. Bioresource Technology, 218: 833-841.
- Flury M, Wai N N, 2003. Dyes as tracers for vadose zone hydrology[J]. Reviews of Geophysics, 41(1): 2-1-2-37.
- Fu G P, Zhang J H, Chen W, et al, 2013. Medium clogging and the dynamics of organic matter accumulation in constructed wetlands[J]. Ecological Engineering, 60(11): 393-398.
- Garcia J, Ojeda E, Sales E, et al, 2003. Spatial variations of temperature, redox potential, and contaminants in horizontal flow reed beds[J]. Ecological Engineering, 21 (2/3): 129-142.
- Garcia J, Chiva J, Aguirre P, et al, 2004. Hydraulic behaviour of horizontal subsurface flow constructed wetlands with different aspect ratio and granular medium size[J]. Ecological Engineering, 23: 177-187.
- Headley T R, Kadlec R H, 2007. Conducting hydraulic tracer studies in constructed wetlands: a practical guide[J]. Ecohydrology and Hydrobiology, 8(3/4): 269-282.
- Hedges P D, Fermor P M, Dusek J, 2008. The hydrological sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment[M]// Vymazal J. Wastewater Treatment, Plant Dynamics and Management in Constructed and Natural Wetlands. Springer, Netherlands: 111-120.
- Hua G F, Kong J, Ji Y Y, et al, 2017. Influence of clogging and resting processes on flow patterns in vertical flow constructed wetlands[J]. Science of the Total Environment, 621: 1142-1150.
- Kadlec R H, Wallace S D, 2009. Treatment Wetlands, second[M]. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Knowles P, Dotro G, Nivala J, et al, 2011. Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: occurrence and contributing factors[J]. Ecological Engineering, 37(2): 99-112.
- Knowles P R, Davies P A, 2009. A method for the in-situ determination of the hydraulic conductivity of gravels as used in constructed wetlands for wastewater treatment[J]. Desalination and Water Treatment, 5 (1/2/3): 257-266.
- Knowles P R, Griffin P, Davies P A, 2010. Complementary methods to investigate the development of clogging within a horizontal sub-surface flow tertiary treatment wetland[J]. Water Research, 44 (1): 320-330.
- Kudryavtsev A B, Linert W, 2014. NMR-Basic Principles [M]. Physico-Chemical Applications Of Nmr: A Practical Guide.
- Langergraber G, 2003. Simulation of subsurface flow constructed wetlands-results and further research needs[J]. Water Science and Technology, 48 (5): 157-166.
- Malicki M A, Plagge R, Renger M, et al, 1992. Application of time-domain reflectometry (TDR) soil moisture mini-probe for the determination of unsaturated soil water characteristics from undisturbed soil cores[J]. Irrigation Science, 13(2): 65-72.
- Matos M P D, Sperling M V, Matos A T D, 2018. Clogging in horizontal subsurface flow constructed wetlands: influencing factors, research methods and remediation techniques[J]. Reviews in Environmental Science & Bio/technology, 17(1): 87-107.
- Morris R H, Newton M I, Knowles P R, et al, 2011. Analysis of clogging in constructed wetlands using magnetic resonance[J]. Analyst, 136 (11), 2283-2286.
- Nguyen L M, 2000. Organic matter composition, microbial biomass and microbial activity in gravel-bed constructed wetlands treating farm dairy wastewaters[J]. Ecological Engineering, 16: 199-221.
- Nivala J, Knowles P, Dotro G, et al, 2012. Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: measurement, model-

- ing and management[J]. *Water Research*, 46(6): 1625 - 1640.
- Pedescoll A, Uggetti E, Llorens E, et al, 2009. Practical method based on hydraulic conductivity used to assess clogging in subsurface flow constructed wetlands [J]. *Ecological Engineering*, 35(8): 1216 - 1224.
- Pedescoll A, Samsó R, Romero E, et al, 2011. Reliability, repeatability and accuracy of the falling head method for hydraulic conductivity measurements under laboratory conditions[J]. *Ecological Engineering*, 37 (5): 754 - 757.
- Ranieri E, Gorgoglione A, Solimeno A, 2013. A comparison between model and experimental hydraulic performances in a pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetland[J]. *Ecological Engineering*, 60: 45 - 49.
- Smart P L, Laidlaw I M S, 1977. An evaluation of some fluorescent dyes for water tracing[J]. *Water Resources Research*, 13 (1): 15 - 33.
- Smith E, Gordon R, Madani A, et al, 2005. Cold climate hydrological flow characteristics of constructed wetlands [J]. *Canadian Biosystems Engineering*, 47: 1.1 - 1.7.
- Suliman F, French H K, Haugen L E, et al, 2006. Change in flow and transport patterns in horizontal subsurface flow constructed wetlands as a result of biological growth[J]. *Ecological Engineering*, 27(2): 124 - 133.
- Tanner C C, Sukias J P S, Upsdell M P, 1998. Organic matter accumulation and maturation of gravel bed constructed wetlands treating dairy farm wastewaters[J]. *Water Research*, 32(10): 3046 - 3054.
- USEPA, 1999. *Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters* [R]. Cincinnati: Ohio: Office of Research and Development.
- Whitmer S, Baker L, Wass R, 2000. Loss of Bromide in a Wetland Tracer Experiment[J]. *Journal of Environmental Quality*, 29(6): 2043 - 2049.

(责任编辑 张俊友 郑金秀)

Review of Methods for Monitoring Clogging of Constructed Wetlands

ZHANG Ming-zhen^{1,2}, XU Dong¹, WU Jun-mei¹, WU Zhen-bin¹

- (1.State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P.R.China;
2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

Abstract: Clogging of constructed wetlands is a subject of global interest. In this paper, based on a review of published research results, we compared and analyzed both current and potential methods for monitoring clogging of constructed wetlands. Research directions and primary monitoring methods and devices were considered, with the aim of providing a reference for effective long-term monitoring of wetland clogging. The monitoring methods can be classified as in-situ and ex-situ, depending on the hydraulic properties of the constructed wetland and the physicochemical properties of both the substrate and the material responsible for clogging. Among in-situ methods, the falling head method and constant head method, based on measurement of hydraulic conductivity, are widely used. When a constructed wetland is found to be gradually clogging, tracer testing is often used to develop a flow model because it is relatively simple and intuitive. More recently developed in-situ methods include probe technology, including time domain reflection (TDR), ground penetrating radar (GPR) and nuclear magnetic resonance (NMR), suffers less interference in the interior of the wetland, and prospects are good for developing qualitative and quantitative research on materials causing wetland clogging. microbial fuel cell (MFC) technology, based on the resistance that develops in a wetland is currently an emphasis area. Ex-situ methods, based on substrate porosity and the composition and properties of clogging materials, have great potential for improvement. Emerging biological methods, based primarily on monitoring earthworms and rhizospheric microbes, are also worthy of exploring.

Key words: constructed wetland; clogging; monitoring; in-situ methods; ex-situ methods