构建湿地堵塞问题的研究

付贵萍, 吴振斌*, 张晟, 成水平, 贺锋
(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, 武汉 430072, E-mail: fuguiping@sina.com)

摘要: 研究了复合垂直流构建湿地(IVCW)中与填料堵塞相关的填料粒径、渗透性能、有机质含量等因素的变化. 经过颗粒分析得知填料粒径在 2~5mm 间, 运用自制的砂样管对填料进行原位采样, 渗透试验结果表明 IVCW 填料层的渗透系数随填料深度的增加而增加. IVCW 填料各层中, 渗透系数最小值存在于表层以下 15~30cm 处. IVCW 系统运行 52 个月后, 仅填料表面至 15cm 深处有少量有机质存在, 15cm 深度以下有机质含量极少, 表明 IVCW 系统运行稳定, 未出现堵塞现象. 文中通过分析填料堵塞的影响因素提出相应的预防措施和对策.

关键词: 复合垂直流构建湿地(IVCW); 堵塞; 渗透系数; 有机质
中图分类号: X144 文献标识码: B 文章编号: 0250-3301(2004)03-0144-06

Studies on Clogging of the Constructed Wetland

FU Gui-ping, WU Zhen-bin, ZHANG Sheng, CHENG Shui-ping, HE Feng
(State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072. E-mail: fuguiping@sina.com)

Abstract: The parameters of substrate related to clogging, such as the grain size, the filtration rate and organic substance in the substrate, were investigated in the integrated vertical-flow constructed wetland (IVCW). The substrate of IVCW was collected by a specific sampling tube in situ and the infiltration experiment showed that the filtration rate of substrate increased with the depth of substrate and the minimum filtration rate existed 15~30cm below the surface of substrate. The amount of organic substances in upper 15cm layer of the substrate was limited and even less in deeper layer after fifty two-month running, and this revealed that IVCW was operating steadily and no clogging was observed. Considering the factors related to clogging, the strategy to prevent and recover the clogging phenomenon was put forward.

Key words: integrated vertical-flow constructed wetland (IVCW); clogging; filtration rate; organic substance

堵塞是在所有高负荷污水过滤系统中常见的自然效应, 人工湿地实际上也是个过滤器, 如果设计不当或管理不善易出现堵塞现象. 湿地中堵塞层的形成是有机固体物在填料内部颗粒间隙的沉积、填料间隙间生物量生长和分解以及填料本身所含物质的化学沉淀反应等产生的[1~4]. 堵塞过程通常可分为过滤速度迅速下降、滤速缓慢下降的平衡状态、过滤装置持续淹水并转为厌氧状态 3 个阶段[5,6]. 当填料堵塞和发生持续淹水时, 净化效率将显著下降. 目前研究认为可能影响填料的因素有填料粒径、有机负荷、温度、悬浮物浓度、污水投配状况等, 但由于试验条件的差异, 各文献报道的结果有很大的不同.

复合垂直流构建湿地(IVCW)是一种新型的具有较强净化功能的湿地系统[7], 为掌握 IVCW 在长期运行过程中是否存在堵塞现象, 本文将研究与填料堵塞相关的填料粒径、填料的渗透性能、填料间隙中有机质的变化等, 探寻 IVCW 系统中填料的堵塞机制, 为 IVCW 系统的长期、稳定运行提供参数和依据, 以防止构建湿地系统中堵塞现象的发生, 有利于人工湿地在污水处理实践中合理和有效的使用.

1 材料与方法

1.1 复合垂直流构建湿地(IVCW)系统

由面积均为 81 m^2(9m × 9m)、深为 1.2m 的 A、B 2 池组成, 2 池底部连通, 池中填有砂、砾石等填料, A 池填料表面设布水管, B 池填料表面设集水管, 剖面如图 1 所示. 图中箭头为水流方向, 由于系统独特的结构使水流形成了 A 池下行流, B 池上行流的复合水流过程. 在前期小试规模试验的基础上, 于 1998 年建成本系统并维持终年运行.

1.2 原水水质

IVCW 所处理的污水源于武汉东湖湖汊的富营养化水体. 其水质状况见表 1.

进水中各项指标均高于国家地表水质量标准中

收稿日期: 2003-08-20; 修订日期: 2003-09-16
基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(39925007); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-SW-102); 中科院水生生物研究所学科前沿课题(2002); 淡水生态与生物技术国家重点实验室课题(2002FB11)
作者简介: 付贵萍(1970~), 女, 博士, 副研究员, 主要从事环境工程与生物净化等研究.
* 通讯作者

Ⅴ类水标准值,属于污染水.全年中水力负荷(HLR)按冬、春、夏、秋季依次选择 0.2、0.4、0.8、1.0 $m^3/(m^2 \cdot d)$ 4 个水平,系统采取间歇进水方式,即每天所处理的污水分数次均匀投配到湿地系统中(见表 2),且每次进水时间为 6 ~ 10 min.试验以 1 年为 1 个周期共持续 5 年.

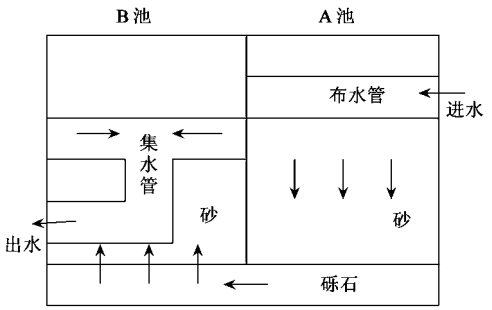

图 1　复合垂直流湿地系统(IVCW)示意图

Fig.1　Diagram of the integrated vertical flow constructed wetland (IVCW)

表 1　IVCW系统进水水质状况(平均值)[1] / $mg \cdot L^{-1}$

Table 1　Water quality of influent in IVCW (mean) / $mg \cdot L^{-1}$

指标	进水	指标	进水
电导/ $\mu S \cdot cm^{-1}$	345(40)	NH_4^+-N	8.10(9.90)
电位/ mV	-7.3(32.9)	NO_3^--N	0.074(0.037)
pH	7.1(1.1)	NO_2^--N	0.584(1.281)
DO	0.9(0.6)	TP	0.436(0.036)
COD_{Cr}	62.41(14.74)	IP	0.224(0.140)
BOD_5	12.37(7.62)	细菌 $\times 10^7$/ ind$\cdot L^{-1}$	130
TSS	13.49(6.79)	TC $\times 10^5$/ MPN$\cdot L^{-1}$	12.0(4.2)
KN	15.50(23.41)	FC $\times 10^5$/ MPN$\cdot L^{-1}$	12.0(4.2)

1) 括号内数值为标准差.

表 2　IVCW系统全年的水力负荷与相应的运行阶段

Table 2　The hydraulic loading schedule of inflow for the IVCW

阶段	季节	水力负荷 / $m^3 \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}$	每日进水次数	每次进水量 / L	每日总水量 / L
Ⅰ	冬	0.2	3	10800	32 400
Ⅱ	春	0.4	4	16200	64 800
Ⅲ	夏	0.8	6	21600	129 600
Ⅳ	秋	1.0	6	27000	162 000

1.3　填料颗粒大小分析

根据填料的颗粒大小与级配情况,采用筛析法进行颗粒大小分析[8],并按照下列公式计算小于某颗粒直径的砂的质量分数:

$$X = \frac{m_A}{m_B} d_x$$

式中,X:小于某颗粒直径的砂质量分数,%;m_A:小于某颗粒直径的砂质量,g;m_B:筛分分析时所取试样质量,g;d_x:粒径小于 2 mm 的总砂质量分数,%.

另外,填料的均质程度采用不均匀系数度量,不均匀系数可根据填料的颗粒大小算得[9],计算公式为:

$$U = d_{60} / d_{10}$$

其中,U:不均匀系数(无量纲);d_{60}、d_{10}:分别为颗粒含量少于 60 %、10 %的粒径,mm.

1.4　填料孔隙率

孔隙率是填料中孔隙体积与填料的总体积之比[9].IVCW系统中的砂质由于处理污水而截留了大量污染物,孔隙体积较天然状态下有所减少,因而将该砂质在天然状态下的孔隙率作为总孔隙率 n,在湿地中实际具有的孔隙率称为有效孔隙率 n_e,计算公式分别为:

$$n = V_0 / V_T$$

$$n_e = V_e / V_T$$

式中,V_0:填料在天然状态下的孔隙体积,m^3;V_T:填料总体积,m^3;V_e:填料在湿地实际具有的孔隙体积,m^3.以上参数可通过水量平衡测算得到,V_T 较易获得,V_0 为填料天然状态下能容纳水的总体积,V_e 为湿地填料实际能容纳水的体积.

1.5　渗透试验

参照文献中的方法[8].由于文献中是将试样采回至实验室中测定,适用于塑性较好的土样,本试验要测试的砂样呈颗粒状且较松散,移出湿地后难以保持原有性状,于是运用自制的砂样管渗透仪在现场对湿地原位填料进行渗透系数测定.

(1)砂样管渗透装置　砂样管:为有机玻璃管,直径 4cm,管高有 30、70、100cm 等不同规格,便于采集不同深度的砂样.管身有刻度,最小分度值为 1cm,管底扎有金属网.渗透仪装置见图 2.

(2)渗透系数测定　在湿地现场用砂样管垂直

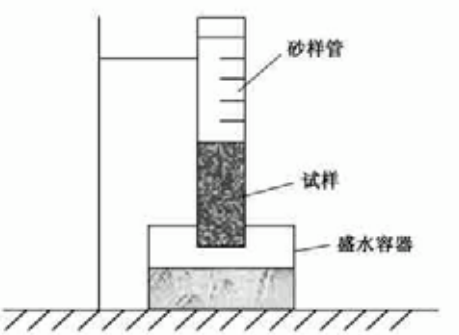

图 2　渗透仪装置示意图

Fig.2　The diagram of the apparatus for infiltration rate

向下取不同深处的砂样,将砂样饱和,再将砂样管固定在支架上,自砂样管上端缓慢注水,记录管中水位下降的时间,根据下式计算渗透系数:

$$K_t = \frac{L}{t} f\left|\frac{S}{h}\right|$$

K_t:渗透系数(cm/s);L:式样高度(cm);t:管中水面自基准 0 点降至预定标记处所需的时间(s);S:在 t 内水面下降的距离,试验中采用 5cm;h:开始的水头(cm);$f(S/h)$:S/h 的函数值,见土工试验规程[8].

1.6 有机质试验

采用重铬酸钾容量法,先现场采集不同填料深度的原位砂样,自然风干后通过 0.15mm 筛并称取适当量,缓慢加入重铬酸钾标准溶液,再放入油浴锅内,控制温度在 170 ~ 180 ℃间,试样煮沸 5 min 后,取出冷却,用硫酸亚铁标准溶液滴定,并按下式计算有机质含量:

$$O_m = \frac{c(Fe^{2+})\{V'(Fe^{2+}) - V(Fe^{2+})\} \times 0.003 \times 1.724 \times (1 + 0.01w) \cdot 100}{m_s}$$

式中,O_m:有机质含量(%);$c(Fe^{2+})$:硫酸亚铁标准溶液浓度(mol/L);$V'(Fe^{2+})$:空白滴定硫酸亚铁用量(mL);$V(Fe^{2+})$:试样测定所需硫酸亚铁用量(mL);w:试样风干含水量(%);m_s:风干试样(g).

2 结果与分析

2.1 填料级配分析

通过对填料颗粒粒径分析可得 IVCW 填料颗粒大小分配曲线如图 3 所示,表明大多数砂粒直径在 2 ~ 5mm 间,更细小的砂粒所占比例不大,IVCW 系统采用了比通常碎石床填料粒径(5 ~ 20mm)较小的细砂以期取得更好的过滤效果.然而,应该看到,尽管较小的粒径为微生物提供了更多的附着表面,但是由于毛细管作用使填料固着更多水分,而且湿地长期运行后填料会截留大量污染物,使有效孔隙率降低,导致填料的堵塞.如何综合考虑良好的出水水质和预防填料的堵塞两方面的影响选择合适的填料粒径有待进一步研究.

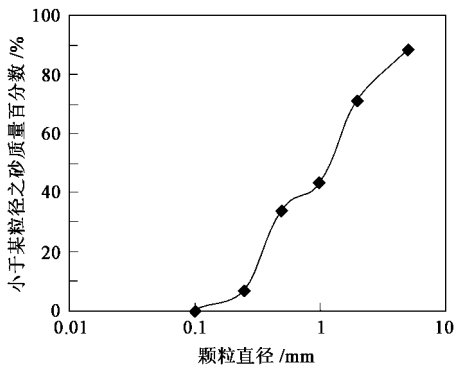

图 3 IVCW填料颗粒大小分配曲线

Fig.3 Grain size distribution curve of the substrate used in IVCW

除填料粒径外,对每层填料还力求均匀,大小颗粒掺杂会减小填料孔隙率,影响水流分布 水力学状态进而影响填料的渗透性能.表 3 为填料的性能参数,一般来说,不均匀系数 U 小于 5 时为均匀填料,可见 IVCW 系统填料基本是均匀的.出于对填料均匀性的考虑,构建湿地在构筑和维护过程中要尽量减少填料的混层或压实.

表 3 IVCW系统填料的性能参数

Table 3 The properties of substrate in IVCW

渗透系数 / m·s⁻¹	总孔隙率	有效孔隙率	粒径 d_{10} / cm	不均匀系数 U
7.03E-4	0.36	0.20	0.25	4.8

2.2 IVCW 渗透性能基本规律

采用自制的砂样管成功采集到了湿地中不同深度的原位砂样,图 4 为 IVCW 系统下行流池(A 池)砂层填料的渗透系数,总体来看,填料深层的渗透系数较上层的渗透系数明显增大,说明深层砂质的渗透性能较上层的好,这是由于上层截留了较多的污染物颗粒,降低了砂质的孔隙率所致.这与 Christoph Platzer 等人的研究结果类似[10].不过值得注意的是,他们的试验结果称填料堵塞层发生于填料表层 15cm 以上,而在本研究中,渗透系数最小的填料层不在最表层,而是存在于表层以下 15 ~ 30cm 处.产生此不同的原因可能是填料的粒径不同,Christoph Platzer 等采用的填料粒径 d_{10} 为 0.095 ~ 0.21,IVCW 系统填料的粒径 d_{10} 较大,为 0.25.填料粒径大,悬浮物穿透的深度增加.另外通过现场对湿地填料断面的实地勘察发现,最表层填料中存在大量的植物根系,而在表层以下 15 ~ 30cm 处植物根系开始逐渐减少,由此可以推断填料表层

中的植物根系起到了水流疏导作用,略微提高了表层填料的渗透系数,加上颗粒物伴随着水流向下流动,使得低渗透性能层下移至 15 ~ 30cm 的亚表层处.

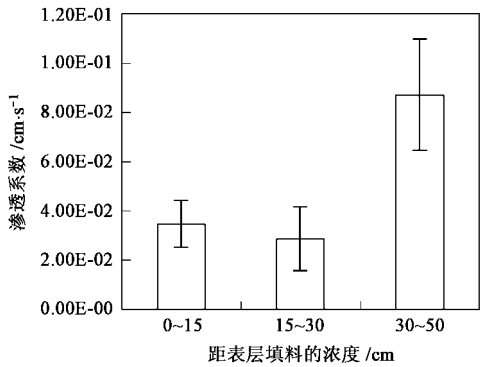

图 4　水力负荷为 0.4 m³/(m²·d)时 IVCW系统下行流池(A池)砂层的渗透系数

Fig.4　The infiltration rate of substrate under 0.4 m³/(m²·d) HLR in down-flow chamber of IVCW

图 5 为 IVCW 系统上行流池(B 池)砂层的渗透系数变化情况,表现为砂层渗透系数随填料深度的增加而增加,这与下行流池的规律类似,然而具体数值有差别,特别是填料亚表层 15 ~ 30cm 处,上行流池的渗透系数大于下行流池,这可能与水流方向有一定的关系.由于水流向下的重力作用,使得下行流池亚表层有细颗粒积累,造成渗透系数减小,而上行流池中水流向上,细颗粒在重力作用下不能很好地上行,它们在上行流池亚表层积累的情形不明显,因此,上行流池亚表层渗透系数比下行流池的要大.可见水流的方向在一定程度上影响了填料的渗透状况.

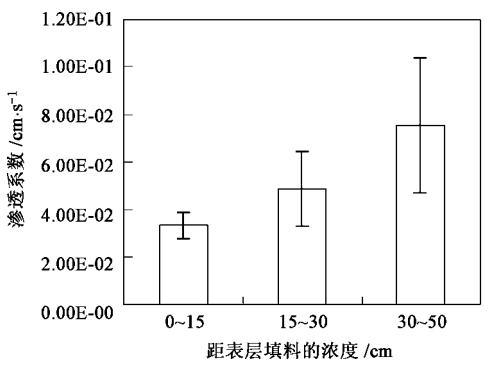

图 5　水力负荷为 0.4 m³/(m²·d)时 IVCW系统上行流池(B池)砂层的渗透系数

Fig.5　The infiltration rate of substrate under 0.4 m³/(m²·d) HLR in up-flow chamber of IVCW

2.3　IVCW 填料的有机质含量

填料中有机质包括呈分解与半分解状的有机残体、简单的有机化合物、酶和腐殖质,既是湿地植物矿质营养和有机营养的源泉(本身含有氮、磷、钾、钙、镁、有机碳、硫和其微量元素,以及各种简单的有机化合物),又是填料中异养型微生物的能源物质,同时也是形成填料结构的重要因素.有机质对填料的环境特性及污染物质的迁移转化和降解起重要作用,因此,填料中有机质就直接影响着填料缓冲性、渗透性、通气状况和填料温度等,对填料是否堵塞起着关键的作用,是一项需掌握的重要指标.表 4 为 IVCW 系统不同深度的砂层有机物含量数据,表明仅填料表面至 15cm 深处有少量有机质存在,15cm 深度以下有机质含量极少,为未检出. Christoph Platzer 等的研究结果也证明湿地表层 0 ~ 12cm 处有机质含量显著,而更深层填料的有机质较少,含量保持恒定[10].

表 4　IVCW填料的有机质含量

Table 4　The content of organic substance in substrate of IVCW

池	深度/cm		
	0 ~ 15	15 ~ 30	30 ~ 50
A	0.26	未检出	未检出
	0.42	未检出	未检出
B	0.21	未检出	未检出
	0.10	未检出	未检出
	0.21	未检出	未检出

对于构建湿地系统,通常认为其填料间隙间由于污水持续地提供营养物质导致生物量生长和分解造成了堵塞[4],为此,需掌握 IVCW 系统填料上层有机质含量随运行时间增加后的变化,如图 6 所示,

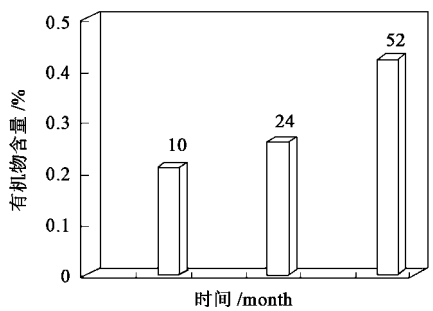

图 6　IVCW系统下行流池 15cm以上填料层有机物含量随月份的变化

Fig.6　The content of organic substance in 15 cm upper layer of substrate changed with months in down-flow chamber of IVCW

下行流池填料上层有机质随着时间的推移确有增加,在系统运行 52 个月后,有机质含量从 0.21 %增

加至 0.42 %,上行流池的情况也与此类似,见图 7,有机质含量从 0.10 %增加至 0.21 %.尽管如此,IVCW系统填料上层有机质含量的数值还是很低的,说明系统运行近 5 年来,填料表层沉积和累积下来的有机质数量有限,系统表现出稳定的分解有机物、促进营养物质循环的特性,未出现填料堵塞的现象.

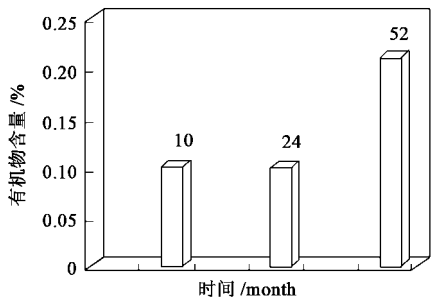

图 7 IVCW系统上行流池 15cm以上填料层有机物含量随月份的变化

Fig.7 The content of organic substance in 15 cm upper layer of substrate changed with months in up-flow chamber of IVCW

3 讨论

3.1 影响填料堵塞的因素

(1)过滤填料粒径 填料粒径的分布决定了孔隙的大小及水力传导能力,显而易见它是影响填料堵塞的主要因素.一些研究者报道了使用粗粒径材料可使系统在发生淹水前接受更高的水力负荷[6],De Vries 发现粗粒径砂中氧气浓度比细砂更易回复到初值[2].本研究中采用砂粒的粒径为 2 ~ 5 mm,试验中未发生填料堵塞现象.

(2)有机负荷 尽管有机负荷作为填料堵塞的主要影响因素已广为接受,但具体的研究结果却存在着差异.有研究认为总有机物浓度比水力负荷更为重要,也就是说,在相同有机物总量和总需氧量情况下,拥有高水力负荷和低有机物浓度的床系统与低水力负荷和高有机物浓度的系统相比,后者更易发生堵塞,已有一些研究证明了这一点[5,6,11].由于一些相对低负荷的系统未出现堵塞,因而在中欧地域气候条件下得到了防止发生堵塞所对应的最高负荷(COD)为 25g/(m^2·d),系统如果采用周期运行的方式则负荷可以更高[8],例如在本研究中最高负荷为 50g/(m^2·d).Siegrist & Boyle 提出有机负荷不能作为堵塞的唯一影响因素[12].他们提出了一个氧消耗总量(由有机物去除与硝化作用构成,以 BOD_{tot}表示)和悬浮物对于过滤速度变化的模型,他们的研究结果与 De Vries 所得结果均表明氧气供应对于填料堵塞有强烈的影响[2].

(3)悬浮物 除了上述因素,悬浮物负荷也是影响堵塞的重要因素之一[11].不能生物降解的悬浮物在连续运行的土壤过滤器中长期累积,这些悬浮物大多数是无机的,可通过测挥发性固体物得到,但相关的研究报道较少.

Bouwer 等推荐进水中悬浮物的最大值为 20 mg/L,负荷相当于 8g/(m^2·d)[13].另有研究报道运用种植植物的土壤过滤器处理地下水时,进水悬浮物范围应控制在 10 ~ 20g/(m^2·d)之间[10].本研究中进水悬浮物的最大负荷为 11g/(m^2·d).

(4)温度 关于温度对填料堵塞的影响情况比较复杂,温度高时会促进生物活动,提高其生长率,这样所造成的结果,一方面导致填充在空隙间有机物的加速分解,另一方面空隙又被填充更多的生物量,究竟哪方面起主导作用目前还存在争议.

(5)污水投配状况 关于污水不同的投配方式对堵塞的作用和影响也有不同的看法.一些研究者认为间歇方式有利于填料好氧作用,从而提高有机负荷的生物降解,控制填料保持好氧状态可以用来调控填料堵塞的过程[2],而 Kristiansen 通过他的试验提出间歇进水导致填料更快地堵塞[5].在本研究中,湿地运行采用间歇进水方式,系统进水时间仅持续 6 ~ 10 min,缩短了填料的淹水时间,有利于湿地填料间歇复氧,实践证明间歇运行方式有利于IVCW湿地系统的正常运行,可有效避免填料堵塞现象的发生.

3.2 构建湿地堵塞问题的对策

针对影响构建湿地填料堵塞的因素,可在湿地的设计与运行中加以考虑以预防堵塞,具体措施包括在湿地工艺的前端增加预处理设施如沉淀池、氧化塘等以减少进入湿地的颗粒物质;在满足湿地的处理要求前提下,采用较粗粒径的填料或采用多层滤料,以此提高填料的穿透深度,增加整个填料层的含污能力;湿地系统采用间歇式运行,对于 IVCW 系统来说,短暂、经常的投配水方式可有效避免填料堵塞;湿地进水应选择合适的水力负荷与有机负荷,科学管理湿地的日常运行,防止湿地超负荷运行等.

除了以上预防堵塞的措施外,对于已经严重堵塞的填料层可采取的恢复措施有停床休作和轮作、更换表层砂等手段.停床休作和轮作是指湿地堵塞后,湿地停止运行,让填料床体休作一段时间或轮流使某一个或几个处理单元停止进水,以恢复其处理

能力.有关合适的恢复期有报道认为夏季恢复期是10d,而冬季为20d[13].

4　结论

在运用IVCW系统处理富营养化湖泊水体的过程中,为掌握填料是否存在堵塞现象,本文研究了与填料堵塞相关的填料粒径、渗透性能、有机质含量等参数随IVCW系统运行的动态变化,所得结果如下:

(1) 运用自制的砂样管成功地实现了对IVCW填料的原位采样,渗透试验结果表明IVCW系统填料层的渗透系数随填料深度的增加而增加.IVCW填料各层中,渗透系数最小的位置不是在表层,而是存在于表层以下15~30cm处.

(2)IVCW系统中仅填料表面至15cm深处有少量有机质存在,15cm深度以下有机质含量甚微.表层有机质随系统运行时间的增加会有所增加,在系统运行52个月后,下行流池中表层有机质含量从0.21%增加至0.42%,上行流池从0.10%增加至0.21%,说明系统运行近五年来,填料表层沉积和累积下来的有机质数量有限.

(3)IVCW系统主要过滤层采用2~5mm粒径的砂砾,进水的最高有机负荷(COD)为50g/(m^2·d)、悬浮物的最大负荷为11g/(m^2·d),同时采取间歇投配水方式,系统运行5年来未出现堵塞现象.

致谢:衷心感谢深圳地质局金亚兵博士在试验中给予的指导和帮助,同时对周巧红,梁威,詹德昊,赵文玉,陈德强,陶菁,刘保元,谭渝云,夏宜铮,况琪军,邓家齐,詹发萃和庄德辉等老师在工作中给予的大力支持和协助表示诚挚的谢意.

参考文献:

[1] Ellis K V, Aydin M E. Penetration of solids and biological activity into slow sand filters[J]. Water Research, 1995, **29**:1333~1341.

[2] De Vries J. Soil filtration of wastewater effluent and the mechanism of pore clogging[J]. J. Water Pollution Control Fed., 1972, **44**:565~573.

[3] Thomas R E, Schwarta W A, Bendixen T W. Soil chemical changes and infiltration rate reduction under sewage spreading [J]. Soil Sci.Soc.Am.Proc.,1966, **30**:641~646.

[4] Avnimelech Y, Nevo Z. Biological clogging of sands[J]. Soil Science, 1964, **98**:222~226.

[5] Kristiansen R. Sand filter trenches for purification of septic tank effluent: Part1: The clogging mechanism and soil physical environment[J]. Journal Environ.Qual.,1981, **10**(3):353~364.

[6] Jones J H, Taylor G S. Septic tank effluent percolation through sands under laboratory conditions[J]. Soil Sci., 1965, **99**:301~309.

[7] 付贵萍, 吴振斌, 任明迅, 等. 复合垂直流构建湿地反应动力学与水流流态的研究[J]. 中国环境科学, 2001, **21**(6):535~539.

[8] 中华人民共和国水利电力部.土工试验规程SD128-84[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.45~47.

[9] 高拯民,李宪法主编.城市污水土地处理利用设计手册[M]. 北京:中国标准出版社,1990.107.

[10] Christoph Platzer, Klaus Mauch. Soil clogging in vertical flow reed beds mechanisms, parameters, consequences and solution [J]. Wat.Sci.Tech.,1997, **35**:175~181.

[11] Siegrist R L. Soil clogging during subsurface wastewater infiltration as affected by effluent composition and loading rate[J]. J. Environ.Qual., 1987, **16**(2):181~187.

[12] Siegrist R L, Boyle, W C. Wastewater induced Soil clogging development[J]. J.Envir.Eng.,1987, **113**(3):550~566.

[13] Bouwer H, Rice R C, Lance J C, Gilbert R G. Rapid-infiltration research at Flushing Meadous project, Arizona[J]. Journal Water Pollution Control Federation, 1980, **52**:2457~2469.