

饮用水生物强化过滤处理效能及其影响因子研究述评

夏琼琼¹ 陈 卫¹ 罗 彬²

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098 ; 2. 南京市城北水厂, 江苏 南京 210038)

摘要 :概述了饮用水生物强化过滤工艺的研究进展,讨论了该工艺对污染物的去除效果及其影响因子,描述了滤层中贫营养微生物膜的特性,提出了有待进一步研究的问题.分析认为:生物活性滤池可有效地降低微污染水体中的浊度,并对有机物、氨氮、铁、锰等污染物质有较好的去除效果.滤料介质、空床接触时间、反冲洗水质和反冲洗方式等是主要影响因素.滤层中贫营养微生物生理生态特性、物化与生化的协同作用等有待深入研究.

关键词 :饮用水;生物强化过滤;影响因子

中图分类号 :TU991.2 文献标识码 :A 文章编号 :1000-198X(2006)01-0041-05

生物强化过滤是针对微污染源水有机污染特征,对常规给水处理的过滤环节进行强化的净水工艺.生物强化过滤的主要工艺形式可以是原有的滤池,也可以是生物滤池.进水中的污染物与滤池滤料接触产生的物化和生化作用,可使水中的氨氮、亚硝酸盐氮和有机物得到有效去除.对水厂原有过滤工艺进行强化的生物强化过滤,无需增加处理构筑物,因此受到广泛关注.滤池滤料通常为活性炭、无烟煤、陶粒、石英砂等,其中石英砂与活性炭、石英砂与无烟煤组合形成双层滤料滤池的形式较多.为了区别于污水生物滤池,故称之为生物活性滤池.在西欧,该工艺已在生产实践中得到应用.近些年来,随着地面水环境的恶化和水质标准的提高,美国、中国等也相继对其进行了较多的研究和探索.本文在分析国内外最新研究成果的基础上,重点讨论了生物强化过滤对污染物的去除效果及其影响因子,并指出了有待进一步研究的问题.

1 强化过滤对污染物的去除效能

1.1 去除有机物

国外普遍选择总有机碳(TOC)、可生物降解溶解性有机碳(BDOC)、溶解性有机碳(DOC)、可生物同化有机碳(AOC)等微污染有机物指标作为过滤效果评价指标.研究表明^[1-2]:生物活性滤池对 TOC 的去除率为 5% ~ 75%,对 DOC 的去除率为 13% ~ 41%,对 BDOC 和 AOC 的去除率达 90% 以上.由活性炭(煤制)、石英砂组成的生物活性滤池对 AOC 和 BDOC 的去除率分别高达 84.2% 和 70%.

生物活性滤池对消毒副产物前体物(DBPs)也有较理想的去除效果. Miltner^[3]指出,生物滤池对三卤甲烷前体物 THMsFP 和卤乙酸前体物 HAAsFP 的去除率分别达到了 40% 和 75%,大大减少了这些致突变性的有机化合物.研究结果表明^[4-5],通过生物活性滤池后,出水致突变性可降低 1/3 左右.

1.2 去除氨氮

从西欧国家生物活性滤池的运行情况可以看出,强化过滤对氨氮有很好的去除效果(表 1).值得注意的是,生物活性滤池在较低温度时仍有较好的去除效果.当原

表 1 生物活性滤池对氨氮的去除效果^[6]

Table 1 Effect of NH₃-N removal by biological active filter

地点	规模	进水 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率/ %
Choisy-le-Ro[法]	中试	0.08 ~ 0.68	66
Choisy-le-Ro[法]	水厂	0.50	100
Merry-sur-Oise[法]	水厂	0.34	100
Muelheim[德]	水厂	1.00	100
美意大利诺州	水厂	1.30	50
南京城北水厂陶粒柱	中试	0.06 ~ 0.14	90

收稿日期 2005-06-28
基金项目 江苏省环保科技计划资助项目(2003082)
作者简介 夏琼琼(1981 —),女,江苏泗洪人,博士研究生,主要从事水处理理论与技术研究.

水温度为 7~9℃,氨氮的质量浓度为 0.57~1.24 mg/L 时,颗粒状活性炭(GAC)和石英砂组成的生物活性滤池对氨氮的去除率高达 83%以上^[3].其主要原因是生物活性滤池具有进水有机物浓度低、溶解氧充足、附着生长的硝化自养细菌世代时间较长等良好的硝化作用条件,硝化反应较为充分.

1.3 去除铁和锰

强化过滤对铁和锰有较好的去除效果.在滤池中,铁和锰被铁锰细菌氧化成难溶性物质后被过滤除去.对普通滤池和生物活性滤池去除铁、锰的效果比较发现^[7],生物活性滤池对铁、锰的去除率分别超过 96%和 92%,均比普通滤池高约 60%,出水铁、锰保持痕量水平.生物强化过滤除铁还具有较快的启动速率,铁细菌能迅速地接种于滤料上.

1.4 去除浊度和细菌

过滤处理的主要目的不仅仅是去除悬浮物、胶体以及附着其上的病原微生物,还在于强化后续消毒工艺的处理效果.生物活性滤池的生物絮凝和生物降解作用可强化除浊效果,生物滤池出水平均浊度可达 0.15 NTU 以下^[8].南京城北水厂 V 型滤池的均质滤料上生物膜的生化作用明显,出水水质稳定,平均浊度在 0.1 NTU 以下.进水水质与操作工况相同时,陶粒滤柱和石英砂滤柱试验的出水平均浊度分别为 0.75 NTU 和 0.26 NTU.有关试验^[4]表明,生物滤池出水悬浮微粒浓度略高于常规砂滤池.这可能是因设计、改造或运行条件控制不当,生物滤池中微生物产生的生物颗粒穿透滤层所致.这也是生物活性滤池运行中必须注意的问题.强化过滤在提高除浊效果的同时必定强化了除菌能力.经过消毒,出水的细菌学指标均可满足现行《生活饮用水卫生标准》的要求.

2 强化过滤的影响因素分析

2.1 滤料介质

滤料表面的物理化学性质如比表面积、孔隙率、电荷和表面张力等都影响微生物的附着与富集,进而影响强化过滤对污染物的去除效果.

在生物活性滤池中,最常用的滤料组合形式是 GAC-砂、无烟煤-砂.GAC 和无烟煤都作为生物滤料,截留微生物,但二者的效果有很大的差异.其中 GAC 为吸附型滤料,而无烟煤为非吸附型滤料.这两种滤料组合的生物活性滤池对污染物的去除效果见表 2.结果表明^[8],GAC-砂滤池表面平均生物量 W(单位滤料所包含的磷脂量)约为 260 nmol/g,而无烟煤-砂滤池表面平均生物量仅为 64.8 nmol/g.可见,GAC 更有利于微生物的附着,可使 GAC-砂滤池具有较好的出水水质.GAC-砂滤池对微污染有机物的去除效果优于无烟煤-砂滤池,尤其对生物稳定性较差的有机物质的去除效果更明显.另外,GAC 还可以吸收、去除对生物降解有抑制性的化学物质,吸收、截留可被较慢降解的化合物,以维持其吸附微生物的连续更新^[4].

除上述常用滤料以外,还有多种多功能活性滤料.如人工合成氧化铝滤料、沸石、陶粒等天然活性载体,以及在传统滤料基础上附加一层改性剂(活性氧化剂)形成的各种改性滤料等.试验表明,这些新型滤料被用于强化过滤时,会产生良好的净水效果.高效、经济的新型滤料作为传统滤料的代替物,有较好的应用前景,但其物化性能、生化特性以及应用运行工况还有待进一步研究.

2.2 空床接触时间

空床接触时间(EBCT)即滤层厚度与滤速(或水力负荷)的比值,是滤池设计和运行的关键参数.它直接影响着强化过滤对有机物的去除效果.一般情况下,接触时间越长,微生物氧化分解有机物就越充分.研究表明^[4,5]:当 EBCT 在一定范围内增大时,滤池对 TOC、BDOC 和 AOC 等有机物的去除效果也随之增加;当 EBCT 增到一定数值后,去除效果增加缓慢.因为接触时间增长,投资也会增加,所以过长的接触时间并不合适.

去除不同的有机物所需要的接触时间不同.一般,去除易生物降解有机物(如臭氧氧化副产物和 AOC)要比去除慢速降解有机物(如加氯消毒副产物前体物)需要的接触时间长.水温、反冲洗、滤料种类等因素也会

表 2 稳定状态下活性滤池对污染物去除率^[8]

Table 2 Pollutant removal rate of biological active filter in steady state

污染物	去除率/%	
	无烟煤-砂滤池	GAC-砂滤池
TOC	16	29
AOC-NOX	39	51
THMFP	23	40
TOXFP	28	52

注:(a)AOC-NOX——用螺旋菌菌株 NOX 作为生物鉴定菌株测定 AOC;THMFP——三卤甲烷生成势;TOXFP——总有机卤化物生成势.(b)无烟煤-砂滤池中无烟煤和砂层高度分别为 51 cm、25 cm;GAC-砂滤池中 GAC 和砂层高度分别为 66 cm、10 cm;无烟煤、GAC 和砂的有效粒径分别为 1.02 mm、0.64 mm、0.44 mm.

影响有机物的去除与 EBCT 的关系,将这些影响因素控制在合适的范围内,根据去除的对象和出水水质的要求确定最佳的接触时间,就能够有效地利用强化过滤的处理效能.实际应用中,接触时间不宜超过30 min^[4],常取 10 ~ 15 min.

2.3 反冲洗水质与反冲洗方式

反冲洗对生物活性滤池的影响主要是可造成生物量的损失,进而影响污染物的去除效果.单独用水反冲洗,粒子间的摩擦和碰撞有限,对滤池的生物量和生物活性的影响不大.研究表明,即使使用气反冲洗生物滤池,也不会造成其生物量的大量损失,因为微生物与滤料的黏附力比非生物粒子大^[4].但是挂膜初期,微生物附着力较弱,空气反冲洗会产生负面影响.尽管反冲洗后对亚硝酸盐和有机物的去除作用变化不大,但对氨氮几乎丧失去除效果^[9],所以滤池运行初期应单独用水反冲洗.运行至滤料挂膜成熟后,可用气水联合反冲洗.不过,仍需控制气冲洗强度和时间.气冲洗强度一般不超过 20 L/(s·m²),冲洗时间一般不超过 3 min.

反冲洗水水质对滤料上生物膜及微生物的生长也有一定影响.乔铁军等^[10]研究了加氯(余氯的质量浓度为 1 mg/L)反冲洗对 GAC-砂滤池中生物活性的影响.结果表明,余氯会使硝化自养细菌的降解能力大大降低.Wang 等^[11]发现:当反冲洗水中余氯的质量浓度为 1 mg/L 时,冲洗期间滤池顶部生物量平均损失了 22%;随着反冲洗水的排除,氯的影响也逐渐减弱,并且在下一个周期开始时,生物量又恢复到冲洗前的水平.余氯对有机物降解效果的影响和有机物的种类有关.易降解有机物的去除受到的影响较小,难降解有机物的去除受到的影响较大,尤其是在水温较低的情况下.因此,加氯反冲洗时,需控制余氯含量,并采用短时间、高强度的冲洗方式.从工艺运行的安全性考虑,应尽量不采用加氯反冲洗方式.

2.4 温度

温度较高时,微生物的生化反应速率快,传质效率高,有利于污染物的去除.Daniel 等^[4]发现,水温为 9 ~ 15℃时,无烟煤-砂滤池对醛类的去除率比水温 15 ~ 25℃时低.研究表明,在较低温度时,生物活性滤池对有机物仍有较好的去除效果,即温度对污染物的去除影响不大.只有当滤池处于不利运行工况(如加氯反冲洗、有机物难降解、滤料吸附性能差、不能为微生物提供良好的生长条件等)时,温度影响才较为明显^[12].

温度变化对氨氮的去除影响也不大.在溶解氧充足的情况下,在较大的温度范围内,强化过滤对氨氮仍能保持较高的去除率,因为化能自养硝化细菌中亚硝化杆菌(*Nitrosomonas*)和亚硝化球菌(*Nitrosococcus*)均适合于在 2 ~ 40℃的环境中生长,硝化杆菌(*Nitrobacter*)也适合于在 5 ~ 40℃的环境中生长.由 Monod 方程 $\mu = \mu_{\max} S / (K_S + S)$ 其中, μ 为细菌生长速率, $\mu_{\max}$ 为细菌最大生长速率, K_S 为饱和常数, S 为基质浓度)可以看出,温度下降时, $\mu_{\max}$ 是减小的,而 K_S 也随温度下降而下降^[6](表 3),其结果仍可以使硝化细菌对氨氮的利用率维持在一定水平上.

2.5 溶解氧

微污染水的有机物、氨氮、亚硝酸盐的浓度较低,耗氧量不大.但如果水中溶解氧缺乏,污染物的去除效果就会受到影响.

硝化反应对溶解氧有较高的要求.硝化细菌要获得足够的能量,就需氧化大量的氨氮或亚硝酸氮.环境中溶解氧浓度的大小会极大地影响硝化反应的速率及硝化细菌的生长速率.溶解氧质量浓度(α DO)和硝化细菌生长速率 μ 之间的关系可表示为 $\mu = \mu_{\max} \alpha(\text{DO}) / (K_O + \alpha(\text{DO}))$.当环境中的溶解氧质量浓度升高时,硝化速率亦相应增加.

从理论上讲,硝化 1 g 氮需要耗氧 4.57 g.当反应器中溶解氧低于此要求时,溶解氧成为硝化反应的限制因素.但是,由于传质过程的限制,如果水中主体溶解氧质量浓度仅满足化学当量所需时,微生物对氧的利用将受到限制.所以,为使反应器对氨氮持有较高的去除率,一般保持出水溶解氧的质量浓度为 2 ~ 4 mg/L 比较适宜.若滤池进水氨氮浓度较高,或者溶解氧不足,可考虑表面曝气或滤料浅层曝气.

2.6 原水水质

原水的可生化性直接影响生物活性滤池对有机物的处理效果.将原水进行臭氧预氧化处理,可以将某些

表 3 硝化过程的参数值(亚硝化杆菌)^[6]

Table 3 Parameters for nitrification process		
温度/ ℃	$\mu_{\max}$ / d ⁻¹	$K_S(\text{NH}_3\text{-N})$ / (mg·L ⁻¹)
5	0.34	0.15
10	0.45	0.30
15	0.61	0.62
20	0.81	1.30
25	1.10	2.70

难以生化降解的有机物分解或转化为易降解的有机物,从而提高原水的可生化降解水平.研究表明,强化过滤设置在臭氧预氧化后,可以提高有机物的去除率^[13-14]

微污染水中微生物的生长和新陈代谢受到基质的限制.一般认为有机物是最主要的限制因子.但目前的研究结果表明,在微污染水的生物处理中,磷元素和碳元素同样会对微生物的生长与代谢产生限制因子的作用.通过外加磷源的方法,可以提高生物滤池对有机物的去除率.只要将加磷量控制在一定范围内,就不会造成磷酸盐污染^[15-16].

3 微生物及其膜特征

3.1 贫营养微生物

在生物强化过滤工艺中,附着于滤料上的微生物属贫营养型微生物.由于原水的有机物浓度比较低,微生物在这种条件下生存,会呈现出比较特殊的生理特性.贫营养微生物的比表面积很大,这有利于它们与有机物的充分接触.有些微生物细胞生长出的细胞柄或丝状物,附着于表面并伸展,这种结构形式可以使微生物在更大的范围内吸收营养.贫营养微生物具有较低的比生长速率和半饱和系数,它使得微生物对于水中的微量有机物具有很大的亲和力,从而保证了微生物细胞在低营养环境下也能够有效地利用其中的有机物.

滤料生物膜上生物种类丰富,主要生物相为细菌及菌胶团、藻类、原生动物和后生动物.丝状菌是生物滤池中占绝对优势的细菌,因为其形态更符合在贫营养环境中生长.镜检结果表明,挂膜成熟后的滤料表面被丝状菌形成的复杂网状结构覆盖.丝状菌在滤料表面生长,为杆菌和球菌类似微生物的生长支撑起了骨架,使生物膜具有稳定的空间结构.骨架上的杆菌、球菌等大量微生物形成了各种菌胶团,它们与丝状菌一起构成了生物膜的主体.

生物膜中的微型动物包括原生动物、后生动物等,种类十分丰富^[17].微型动物大多附着于生物膜上,以取食生物滤池中的游离细菌、藻类和有机碎屑等获得营养.但是贫营养环境中细菌类等微生物的生长受营养的限制而较慢,所以微型动物可能会取食生物膜.而且微量动物如果大量繁殖,覆盖生物膜,会使生物膜与有机营养的有效接触面积减少,使生物膜脱落.因此,控制系统中生物相的平衡十分重要^[18].

3.2 生物膜特征

与污水处理系统相比,生物强化过滤工艺中形成的生物膜要薄得多.主要原因是环境中营养物质缺乏,生物量的积累受到了限制.虽然生物膜生物量少,但是传质性能较好,可以使膜内细胞也能获得充分的基质和氧,因此能较好地发挥微生物的代谢降解作用.

生物膜的另一个重要特征是生物量和生物活性沿滤层深度的变化不同.沿进水方向上层滤料到滤料底层,生物膜厚度依次变薄,生物量逐渐减少,生物活性也逐渐下降.图 1^[19]和图 2^[20]是 GAC-砂生物活性滤池中的生物量 W 和生物活性 R (单位质量的微生物在单位时间内所利用的溶解氧量)随滤层深度的变化情况.从图中可以看出:生物量和生物活性沿滤层总体上呈下降趋势,底层生物量约为顶层的 30%,而且活性很低,最底部几乎完全丧失活性.这显然与滤池采用下向流形式以及基质由上而下不断被生物膜氧化分解降低有关.

4 存在问题

生物强化过滤水处理工艺还处在不断完善和应用发展中.虽然国内对其进行了较多的研究,但由于原水水质差异较大、工艺条件和运行操作的控制有一定的难度,所以应用于生产实际的很少,大多数仍处于试验研究阶段.该工艺仍有许多技术难题(如出水最大 BOM(可生物降解有机物质)浓度与滤池最佳反冲洗标准、滤池运行的最优化控制以及工艺长期运行的稳定性保证等)未解决.因此,需对该工艺中所包含的一些物化、生化及其协同作用过程做更深入的研究.研究内容包括:生物膜对难降解或慢

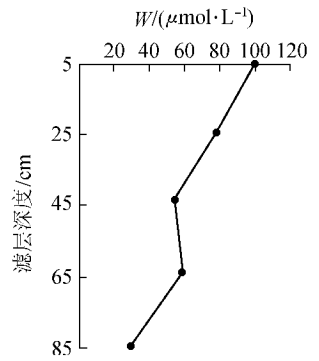


图 1 生物量分布
Fig.1 Biomass distribution along depth of filter

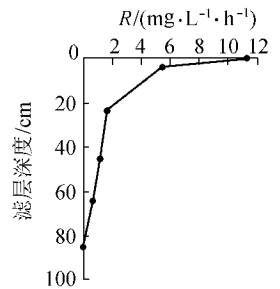


图 2 生物活性分布
Fig.2 Bioactivity distribution along depth of filter

性降解的痕量有机物的去除机理与条件, BOM 的种类与数量对生物膜降解的影响, 非生物颗粒对污染物降解可能产生的影响, 微生物产物的形成条件、因素及其影响, 生物滤池内微生物的生长因素(基质浓度、环境因素、水力条件)研究等。此外, 由于目前还没有较合适的数学模型可用于生物滤池的实际设计与控制, 所以模型研究也是一个重要的课题。该问题的解决还有待于研究方法的改进。

参考文献:

- [1] RECHARD G S. Secondary utilization of trace organic[J]. AWWA ,1983 ,75(9) :463-469.
- [2] 余健, 曾光明, 何元春, 等. 湘江微污染饮用水源生物过滤试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2003 ,30(2) :73-77.
- [3] MILTNER R J, SHUKAIRY H M, SUMMERS R S, et al. Disinfection by-product formation and control by ozonation and biotreatment[J]. AWWA ,1991 ,83(11) :53-55.
- [4] DANIEL U, PETER M H, STEPHEN D J, et al. Biological filtration for BOM and particle removal :a critical review[J]. AWWA ,1997 ,89(12) :83-98.
- [5] LECHEVALIER M W, WILLIAM C B, PAUL S, et al. Evaluating the performance of biologically active rapid filters[J]. AWWA ,1992 ,84(4) :137-146.
- [6] 许保玖. 给水处理理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000 :51-54.
- [7] 李德生, 黄晓东, 王占生. 微污染源水净化新工艺——生物强化过滤研究[J]. 中国给水排水, 2000 ,16(10) :18-20.
- [8] WANG J Z, SUMMERS R S, MILTNER R J. Biofiltration performance :part1 ,relationship to biomass[J]. AWWA ,1995 ,87(12) :55-63.
- [9] 黄晓东, 李德生, 王占生, 等. 生物活性滤池强化过滤的影响因素研究[J]. 中国给水排水, 2003 ,19(5) :67-69.
- [10] 乔铁军, 张晓健. 反冲洗对生物活性滤池中生物活性的影响试验[J]. 中国给水排水, 2003 ,29(13) :77-80.
- [11] WANG J Z, SUMMERS R S, MILTNER R J. Biofiltration performance :part 2 ,effect of backwashing[J]. AWWA ,1995 ,87(12) :64-73.
- [12] LIU X B, HUCKS P M, SLAWBIN R M. Factors affecting drinking water biofiltration[J]. AWWA ,2002 ,94(12) :90-100.
- [13] 陈超, 胡文容, 张群. O₃ 预氧化-生物活性滤池直接过滤工艺处理黄河微污染原水[J]. 净水技术, 2004 ,23(1) :10-12.
- [14] 邹伟国, 江宏文, 沈裘昌, 等. 普通快滤池改成生物滤池的试验研究[J]. 中国给水排水, 2003 ,19(13) :98-100.
- [15] 桑军强, 李灵芝, 张锡辉, 等. 外加磷提高生物预处理效果的试验研究[J]. 环境科学, 2003 ,24(5) :81-85.
- [16] 于鑫, 张晓健, 王占生. 外加磷源提高饮用水生物滤池对有机物的去除效率研究[J]. 给水排水, 2003 ,29(1) :13-16.
- [17] 胡文容, 陈超. 新型生物活性滤池的净水效能及生物相特征[J]. 中国给水排水, 2003 ,19(4) :12-14.
- [18] 夏北成. 环境污染物生物降解[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002 :154-158.
- [19] 乔铁军, 张晓健. 原位基质摄取速率法检测微生物活性[J]. 中国给水排水, 2002 ,18(7) :80-82.
- [20] 于鑫, 张晓健, 王占生. 饮用水生物处理中生物量的脂磷法测定[J]. 给水排水, 2002 ,28(5) :1-5.

A review of some advances in research of effect and influencing factors of enhanced biological filtration for drinking water treatment

XIA Qiong-qiong¹, CHEN Wei¹, LUO Bin²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. Nanjing North City Water Plant, Nanjing 210038, China)

Abstract The pollutant removal effect of the enhanced biological filtration technique and its influencing factors were discussed, and the characteristics of oligotrophic microbe film in filters were described. Some problems for further study were put forward. It is demonstrated that the enhanced biological filtration can effectively reduce the turbidity of micro-polluted water body and is of good effect in removal of organism, ammonia nitrogen, iron, manganese and other pollutants, and that the filter media, empty bed contact time, and backwashing, et al. are the main influencing factors. It is pointed out that the physiological and ecological characteristics of oligotrophic microbes and the coaction of physical-chemical and biochemical processes need further investigation.

Key words drinking water; enhanced biological filtration; influencing factor