

生物活性炭滤池中微生物生态特性研究

刘建广¹, 张春阳², 张晓健³, 王占生³

(1 山东建筑大学 市政与环境工程学院, 山东 济南 250101; 2 山东建筑大学 热能学院, 山东 济南 250101; 3 清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084)

摘 要: 以微污染河水为原水进行了饮用水常规处理/生物活性炭滤池组合工艺试验, 分别利用生物脂磷法和比耗氧速率法测定了生物活性炭滤池内的生物量和生物活性。结果表明, 生物活性炭滤层中的生物量及生物活性沿水流方向逐渐减小, 其中异养菌在滤层中不同高度处的生物量差异较小, 硝化菌生物量沿滤层高度变化较大, 沿水流方向急剧减小, 这些变化均与滤层水中的可生物降解有机物及氮氮的基质营养水平有关。在进水氨氮与 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度均较高的运行条件下, 生物活性炭滤池的硝化反应完全, 在滤层中硝酸菌对 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的转化能力 (以 N 计) 大于亚硝酸菌对氨氮的转化能力, 出水无 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累; 当进水氨氮浓度较高时, 硝化菌对溶解氧 (DO) 具有竞争优势, 影响异养菌对有机物的去除。

关键词: 饮用水; 生物活性炭; 生物膜; 硝化

中图分类号: TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2009)19-0051-04

Study on Ecological Characteristics of Microorganisms in Biological Activated Carbon Filter

LIU Jian-guang¹, ZHANG Chun-yang², ZHANG Xiao-jian³, WANG Zhan-sheng³

(1 School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2 School of Thermal Energy Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 3 Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract The combined process of conventional drinking water treatment technology and biological activated carbon filter was used to treat micro-polluted river water. The biomass and microbial activity in biological activated carbon filter were measured by the phospholipid analysis and the specific oxygen uptake rate. The results show that the biomass and microbial activity in the media layers decline along the direction of water flow. The biomass of heterotrophic bacteria is similar in each layer, the biomass of the nitrifying bacteria is different depending on the layer, and rapidly declines along the direction of water flow. The changes are related to biodegradable organic matters and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration in the water. When the influent $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_2^- - \text{N}$ concentrations are high, the nitrification in biological activated carbon filter is complete. The transformation capacity of nitrifying bacteria for $\text{NO}_2^- - \text{N}$ is higher than that of nitrosobacteria for $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in the media layers. $\text{NO}_2^- - \text{N}$ does not accumulate in the effluent of

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07422-004)

biological activated carbon filter When the influent $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration is high the removal of organic matters by heterotrophic bacteria is affected because dissolved oxygen in water is consumed by nitrifying bacteria

Key words drinking water biological activated carbon; biofilm; nitrification

生物活性炭滤池是饮用水深度处理最有效的工艺之一,能有效去除有机物、氨氮及亚硝酸盐,从而可提高出厂水的生物稳定性、减少氯消毒副产物的生成量及致突变性^[1]。当活性炭对有机物吸附饱和后,则由生物降解作用来去除污染物,其运行效果直接影响到出水水质,因此研究活性炭滤层中生物膜的微生物生态分布对滤池的稳定运行非常重要。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

试验在某水厂内进行,原水取自该水厂的取水口,处理水量为 $24 \text{ m}^3/\text{d}$ 。试验流程为:原水→混凝沉淀→砂滤池→臭氧→生物活性炭滤池→出水。其中活性炭滤池由有机玻璃制成,规格为 $\text{O}400 \text{ mm} \times 4\,000 \text{ mm}$,活性炭层高度为 $2\,000 \text{ mm}$,柱壁上设多个取样孔,滤池底部设气、水反冲洗装置,采取上进水、下出水运行方式,正常滤速为 8 m/h 。活性炭规格为 $8 \text{ 目} \times 16 \text{ 目}$,为煤质柱状炭(直径为 $\text{O}1.5 \text{ mm}$)。活性炭滤池装置见图 1。

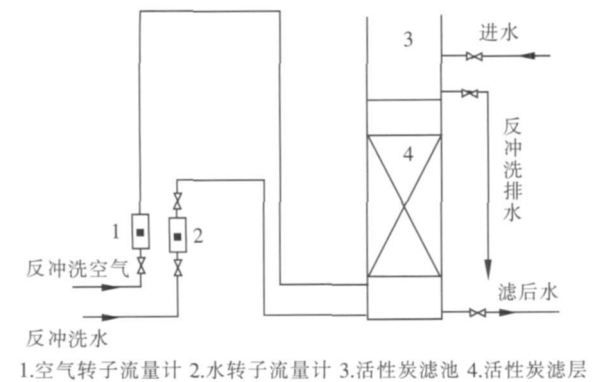


图 1 活性炭滤池试验装置示意
Fig 1 Schematic diagram of BAC filter

1.2 试验方法

采用连续运行方法,炭滤池的反冲洗周期为 30 d 。主要考察生物活性炭滤池的生物量分布及滤层中异养菌与自养菌的生态分布。

主要检测项目有 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$,均按国家标准方法(GB 5750—85)测定;DO 采用便携式溶氧仪(YS1—55)测定,生物量采用脂磷法测

定^[2],生物活性采用比耗氧速率(SOUR)法测定。
2 结果与讨论

试验共进行 15 个月,活性炭滤池运行 90 d 左右对有机物就已吸附饱和,此后对有机物的去除则以生物降解为主,硝化菌的挂膜期为 15 d 左右。

2.1 炭滤层的生物量分布

生物活性炭滤池中水的流动可认为是推流方式,进水端可降解基质含量相对较高,出水端可降解基质含量较低,由于生物膜附着在炭粒上,因此炭层不同高度处的微生物处于不同的营养环境中,为了解炭层不同高度处的生物量,从不同高度处的取样口取生物炭样品,测定单位滤料上活的生物量。

在微生物分析中,生物量的测定主要是直接或间接测定生物膜中的细胞数量或质量、原生质及细胞中的某些组分(如胞外多聚物、总蛋白质、肽聚糖、脂多糖、脂磷等)。其中脂磷是细胞生物膜的主要组分, $90\% \sim 98\%$ 的生物膜脂类以脂磷的形式存在,脂磷在细胞死亡后很快分解,是可以用来表示活菌总数的较为理想的指标,在许多饮用水生物处理的研究中都以脂磷含量来表示生物量^[3]。

生物活性炭滤池中脂磷含量测定结果见图 2。

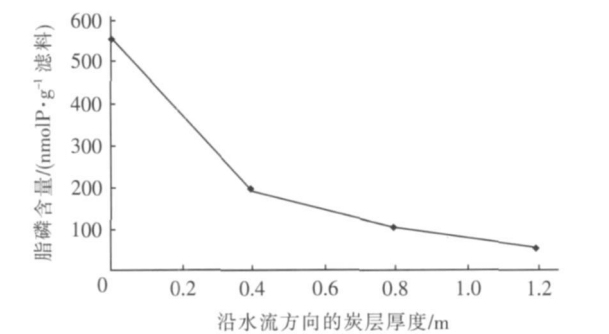


图 2 炭滤层中不同高度处的生物量变化

Fig 2 Change of biomass at different heights of filter layer

从图 2 可以看出,滤层中单位质量滤料上的脂磷含量沿水流方向逐渐减少,说明生物量沿水流方向逐渐降低,这与生物膜所处的营养水平一致。生物活性炭滤池中的生物量主要集中在进水端 0.4 m 的滤层内,这主要与进水水质有关。在 0.4 m 处取水样进行水质检测发现,当进水 DO 与氨氮的比值

> 4.5 时, 水样中的氨氮浓度降至 0.02 mg/L; 当进水 DO 与氨氮的比值 < 4 时, 水样中的 DO 降至 0.2 mg/L 以下。总之, 进水氨氮的硝化反应主要发生在该滤层中, 在 0.4 m 以上的滤层中由于水中严重缺乏营养基质或缺氧而基本不再发生硝化反应。也就是说, 运行中只利用了 0.4 m 厚的滤层, 大部分滤层未发挥生物作用。若采取措施提高进水的 DO 浓度, 则整个滤层的硝化作用还有很大的潜力。

2.2 滤层中微生物的类群分布

生物活性炭滤层中的微生物可分为异养菌(降解有机物)与自养硝化菌(亚硝酸菌和硝酸菌), 这两大类细菌的数量和活性对生物活性炭滤池的运行效果起着决定性作用。由于生物脂磷法测定的是总生物量, 无法将三类细菌分开, 故利用比耗氧速率法分别测定生物膜中异养菌、亚硝酸菌、硝酸菌的生物活性。测定过程中于不同时间分别按顺序投加硝酸菌和亚硝酸菌的选择性生物抑制剂, 试验用抑制剂分别为氯酸钠(NaClO₃)和烯丙基硫脲(ATU)。

从滤层不同高度取活性炭样品测定各种菌的 SOUR, 结果见图 3。

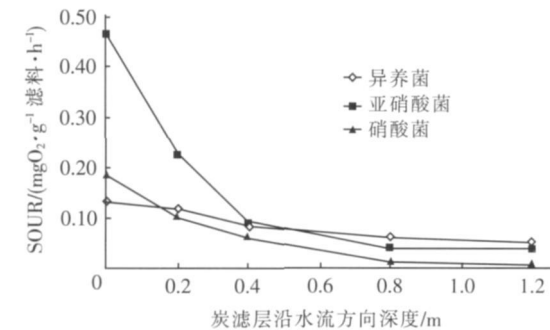


图 3 炭滤层不同高度处三种菌群的 SOUR

Fig 3 SOUR of bacteria at different heights of filter layer

从图 3 可看出, 单位质量滤料的总 SOUR 及各类菌群的 SOUR 沿水流方向不断降低, 其变化趋势与滤层中生物量的变化一致。从 SOUR 来看, 在进水端自养菌占有较大的优势, 亚硝酸菌的 SOUR 最大, 这主要是由于进水中存在较高的氨氮及 DO 浓度, 使硝化菌营养水平较高所致。从图 3 还可看出, 在进水端硝化菌对 DO 的争夺具有优势, 其 SOUR 是异养菌的 7 倍左右, 这是由于在本试验的水质条件下, 可生物降解的有机物含量较低, 氨氮含量相对较高, 电镜观察发现活性炭上的生物膜很薄, 不存在生物膜内外的供氧差异, 加之硝化菌的需氧量较高, 因此硝化菌对 DO 的竞争力大于异养菌。

由于在转化相同质量氮的条件下, 亚硝酸菌氧化氨氮的耗氧量大大高于硝酸菌氧化 NO₂⁻-N 的耗氧量, 通过 SOUR 无法判断两类菌群的生态是否平衡, 因此将亚硝酸菌与硝酸菌的 SOUR 折合成以 N 计的 N 转化速率, 结果见图 4。

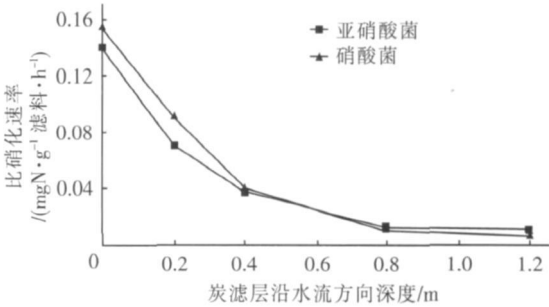


图 4 滤层不同高度处自养菌的比硝化速率

Fig 4 Specific nitrification rate of autotrophic bacteria in filter layer

从图 4 可看出, 在生物活性炭样品中, 硝酸菌对氮的转化能力大于亚硝酸菌(以 N 计)。这是由于试验进水中含有较高浓度的 NO₂⁻-N, 生物膜中的硝酸菌既要亚硝酸菌转化的 NO₂⁻-N 完全氧化, 还要将进水中存在的 NO₂⁻-N 完全氧化成硝酸盐所致。可见, 只要保证足够的溶解氧, 生物炭滤池就能保证稳定的硝化反应, 使亚硝酸菌和硝酸菌处于生态平衡状态, 不会出现 NO₂⁻-N 的积累。

从测定结果看, 滤层下部不发生硝化反应, 但其 SOUR 与生物脂磷并不为零, 仍然有一定的生物活性。这主要有两个原因: 一方面是在滤池的反冲过程中滤料出现乱层, 使部分上层活性炭进入底层所造成的, 即在反冲洗完毕后, 滤层中的生物量发生了重新分配; 另一方面是以生物膜或菌胶团形式存在的微生物对环境具有较强的抗性, 即使较长时间处于严重缺氧和缺乏营养基质的环境中, 仍能保持其生物活性, 一旦环境适宜, 活性立即恢复。

2.3 进水水质对微生物分布的影响

活性炭滤池滤层中的生物量及细菌生态分布受进水条件的影响, 进水中的有机物及氨氮含量较高时, 则滤层中的生物量与生物活性(以 SOUR 表示)也较高。不同进水氨氮浓度下试验装置分别运行约 30 d 从滤层顶部取滤料测定 SOUR, 结果见图 5。

从图 5 可看出, 在进水 COD_{Mn} 为 4~5 mg/L、氨氮浓度差别较大的条件下, 同一位置滤层中的生物量差别很大(主要体现在硝化菌的数量上)。试验

结果还表明,当进水氨氮浓度较高时,硝化菌因营养水平较高而出现大量繁殖,但因其对溶解氧的过多消耗,从而影响了异养菌对基质的降解效果;当进水氨氮长期处于低值时,生物膜中的自养菌数量大大降低,异养菌数量则略有增加。生物量随进水水质的变化,实际上是生物膜与水中基质的营养水平处于一种动态平衡状态。

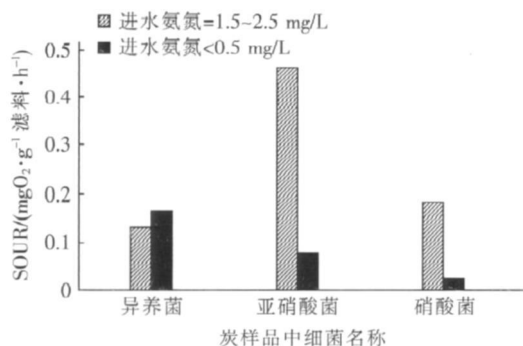


图 5 进水氨氮对滤层中生物种群的影响

Fig 5 Impact of influent ammonia concentration on bacteria species in biofilm

2.4 反冲洗对生物量的影响

为了考察反冲洗前、后生物活性炭滤层中各种细菌的变化,对滤层进水端的表层炭样进行了 SOUR 测定。试验结果发现,反冲洗对滤层中的异养菌、亚硝酸菌及硝酸菌均产生了一定影响,其中亚硝酸菌的损失率最大(21%),异养菌次之(17%),硝酸菌的损失率最小(8%)。滤层中损失的生物活性(生物量)主要是在滤层空隙中截留与生长的以及和滤料结合不牢的微生物,虽然反冲洗造成了少量生物量的损失,但对于整个滤层来说仍然含有较高的生物量,因此在试验进水条件下,反冲洗基本不影响滤池对污染物的去除。

2.5 生物相观察

通过电镜观察发现,活性炭上的生物膜主要生长在活性炭表面的孔洞处,在孔洞深约 50 μm 处也有分散的菌体,而在更深的地方则未发现细菌。活性炭表面的生物膜是不连续的,在孔洞附近的凹陷处有较密的菌胶团,平滑处则是裸露的,呈分散状的细菌个体较少,活性炭表面的生物膜厚度一般不超过 10 μm 。生物膜细菌主要为球菌、杆菌与丝状菌,未发现原生动物及后生动物,细菌个体形状很不规则、大小差别很大,这可能与微生物长期处于贫营养

的“饥饿”状态有关。在细胞表面有较多呈细丝状的分泌物,这有利于细胞对营养基质的摄取。在贫营养环境下,以生物膜或菌胶团形式存在的微生物群落更能适应其生存环境,细胞死亡后的溶出物可被菌胶团内的其他细胞就近利用。

3 结论

① 生物活性炭滤池中的生物量及生物活性沿水流方向逐渐降低,异养菌在不同高度滤层中的生物量差异较小,硝化菌沿滤层高度变化较大,这些变化与滤层中的基质营养水平有关。硝化菌主要分布在滤层的进水段,异养菌在滤层中纵向分布较均匀,因此在滤速一定的条件下,保证一定的滤层高度对 COD_{Mn} 的去除非常重要。

② 滤层进水端生物膜中硝化菌占优势,硝化菌耗氧速率是异养菌的 7 倍左右。DO 浓度是影响生物活性炭滤池稳定运行的关键,当氨氮浓度较高时,硝化菌对 DO 具有竞争优势,从而会影响异养菌对有机物的去除效果。当进水 DO 与氨氮的比值 > 4.5 时,生物活性炭滤池可以稳定运行。在一定的原水水质条件下,在工程中应采取一定措施来保证生物活性炭滤池进水对 DO 的要求。

③ 滤层中亚硝酸菌与硝酸菌对氮的转化能力是平衡的,说明滤层中硝化菌的两个亚群能够保持生态平衡,因此当进水中含有足够的溶解氧时,生物活性炭滤池就能保证硝化反应的稳定进行。通过微生物生态分布分析可看出,反冲洗过程造成的乱层有利于生物量在整个滤层中的重新分布,并利于滤池的稳定运行。

参考文献:

- [1] 陆少鸣,黄海真,方平,等. 臭氧-生物活性炭在给水处理中的应用[J]. 水处理技术, 2006, 32(10): 57-59.
- [2] 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.
- [3] Liu Xibao, Huck P M, Skawson R M. Factors affecting drinking water biofiltration[J]. JAWWA, 2001, 93(12): 90-101.

电话: 13953118255

E-mail: liujg@sdjzu.edu.cn

收稿日期: 2009-04-08