

高效功能陶粒生物滤池处理农村生活污水研究

童晶晶¹, 籍国东¹, 周游¹, 谢崇宝²

(1. 北京大学环境工程系 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871; 2. 中国灌溉排水发展中心, 北京 100054)

摘要 利用粉煤灰、锯末和铁矿石等废弃物, 经造粒和高温烧结, 自行开发了两种高效功能陶粒, 并将其与沸石以“砖墙”式嵌套填充, 构筑了高效功能陶粒生物滤池。采用该生物滤池, 研究对农村生活污水(COD 200 mg·L⁻¹, NH₃-N 20 mg·L⁻¹, TP 4.0 mg·L⁻¹)的深度脱氮除磷作用。结果表明, 高效功能陶粒具有表面粗糙, 比表面积大, 机械强度高, 耐酸碱性能好和无重金属溶出等优点。该生物滤池上下部分别形成好氧区和厌氧区, 从而达到深度脱氮除磷效果。在水力停留时间(HRT)为 2.15~5.73 h, 水力负荷为 2.8~7.5 m³·m⁻²·d⁻¹ 时, 两个生物滤池对氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)和化学需氧量(COD)均具有很好的去除效果, 两个功能陶粒生物滤池的去除率分别达到 83.6%~98.3%、89.1%~99.7%和 84.4%~95.2%, 优于普通生物滤池。

关键词 高效功能陶粒; 生物滤池; 农村生活污水; 脱氮除磷

中图分类号: X703.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2009)09-1924-08

A High Efficient Multi-Function Ceramic Bio-filter for Treating Rural Domestic Sewage

TONG Jing-jing¹, JI Guo-dong¹, ZHOU You¹, XIE Chong-bao²

(1. The Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, Department of Environmental Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 2. China Irrigation and Drainage Development Center, Beijing 100054, China)

Abstract A high efficient multi-function ceramic bio-filter (MFCB) was used to treat rural domestic sewage with concentrations of COD 200 mg·L⁻¹, NH₃-N 20 mg·L⁻¹, and TP 4.0 mg·L⁻¹. Two kinds of Multi-Function Ceramic (MFC) made by our experiment consist of fly ashes, sawdust, iron ores, and other solid wastes. They were granulated and sintered during high temperatures, and then filled into the MFCB with zeolite together as the style of “brick-wall”. This MFCB with the sort of “brick-wall” has three advantages, one for making water distribution uniformity in the bio-filter, second for increasing the contacting time between domestic sewage and MFC, and the last for reducing water current short-circuit and areas of dead-zone in the bio-filter. Furthermore, the MFCB were divided into an upper aerobic zone and a lower anaerobic zone by aeration tubes in the middle of the bio-filter to obtain a deep removal of nitrogen and phosphorus. Our results indicate that high removal efficiencies were obtained by this bio-filter: 83.6%~98.3% for NH₃-N, 84.4%~95.2% for COD, and 89.1%~99.7% for TP with the hydraulic retention time (HRT) of 2.15~5.73 h and the hydraulic loading of 2.8~7.5 m³·m⁻²·d⁻¹. In addition, it also has the following four advantages: (1) easy to immobilize biofilm with a roughened surface; (2) improving pollutant removal efficiencies with high Brunauer-Enmet-Teller (BET) of 11.890 2 m²·g⁻¹ and the special structures of abundant mesopores and micropores; (3) high pH resistance and mechanical strength; (4) less or no heavy metals dissolution. Thus, compared to other bio-filters, this MFCB can apply widely in treatment of rural domestic sewage with relative low construction cost and easy to operation and management.

Keywords high effective multi-function ceramic; bio-filter; rural domestic sewage; nitrogen and phosphorus removal

随着农村社会经济发展和人民生活水平的提高, 农村的生态环境污染, 尤其是生活污水污染问题日益

受到人们的关注。含有大量氮磷营养元素的农村生活污水未经有效处理直接排入地表水环境, 不仅对农村饮用水水源地构成严重威胁, 同时也影响了农村水环境和农产品质量, 危害农民的生存发展, 因而急需开发经济高效的实用处理技术。近年来, 针对不同国家和地区农村生活污水的各自特点, 研究者先后开发了稳定塘、人工湿地、土壤渗滤、蚯蚓床和“FILTER”等^[1-4]

收稿日期: 2009-01-21

基金项目: 国家“十一五”科技支撑课题(2006BAD01B08) 水利部公益性基础科研项目(200801048)

作者简介: 童晶晶(1983—), 女, 湖北人, 硕士研究生, 研究方向为水污染控制理论与技术。E-mail: tongjingjing@iee.pku.edu.cn

通讯作者: 籍国东 E-mail: jiguodong@iee.pku.edu.cn

多种生态技术,这些技术不仅具有运行成本低和便于管理的特点,而且在有机物去除方面也各具优势,从而受到普遍青睐,然而这些技术都存在使用寿命短、占地面积大、氮磷去除效率低等缺点^[5-7],很难在氮磷排放要求高的地区推广应用。

用于生活污水脱氮除磷的功能填料主要分为单一型、复合型、混合型。单一型填料主要是传统的粒状填料,如砂、碎石、矿渣、碎钢渣、焦炭、陶瓷、无烟煤等,虽然价格低廉,但普遍存在着诸如形状不规则、比表面积小和机械强度低等缺点,而玻璃钢或塑料填料普遍存在着表面光滑、生物膜附着力差和易老化等缺点;活性炭的比表面虽然远远高于其他材质颗粒,但价格昂贵,且脱膜与再生复杂,成本也很高^[8];复合型填料主要是指将两种或多种单一型填料在功能和粒径上进行搭配使用,如将炉渣与沸石、陶粒与炉渣搭配实用,COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率可分别达到 80% 和 70%^[9-10];混合型填料主要是指几种介质混合成型,主要以功能陶粒为主,但是针对高效脱氮除磷的功能陶粒往往价格昂贵,而经济型的功能陶粒又很少具有高效脱氮除磷功能^[11]。

曝气生物滤池是一种能够实现对生活污水高效脱氮除磷深度处理的技术,具有有机物容积负荷高、水力负荷大、水力停留时间短、所需基建投资少、能耗及运行成本低等优点,但是其易堵塞和运行周期短等缺点,限制了其在生活污水脱氮除磷中的推广应用^[9-10,12]。

针对现有功能陶粒和生物滤池存在的问题,结合农村生活污水的实际情况,利用工农业废弃物自行研制高效功能陶粒,构筑了新型高效多功能生物滤池,它具有如下优点:(1)强化了均匀布水;(2)增加了污水与填料的接触时间,也避免了出现水流短路和死区等现象;(3)延长系统堵塞时间,即延长了系统的使用寿命。本文利用高效功能生物滤池对农村生活污水进行深度脱氮除磷处理,研究了其处理效果及影响因素。

1 材料与方法

1.1 功能陶粒与生物滤池

功能陶粒是由粉煤灰、锯末和铁矿石等废弃物按

一定的比例混合并加入适量的水制成直径为 8~10 mm 的球状颗粒,并将该颗粒在 1 050 °C 下烧结制得。烧制后陶粒呈铁灰色,外表粗糙,断面内孔大小均匀。根据原料的不同组成比例,功能陶粒分为两种,其具体组成见表 1。

将 1 号和 2 号两种高效功能陶粒与沸石以“砖墙”式嵌套填充,构筑高效功能陶粒生物滤池(图 1)。两种功能陶粒填充方式完全相同:单个滤池的规格为 100 mm(长)×80 mm(宽)×1 600 mm(高),有效容积为 9.6 L,通气管置于中部,距离底部 700 mm,使滤池上部和下部分别形成好氧区和厌氧区,以促进氮磷的转化。滤池内部陶粒的“砖墙式”尺寸如图 1 所示,灰色部分为功能陶粒层,填充粒径为 8~10 mm 的自制功能陶粒,其余白色部分为过滤层,填充粒径为 2 mm 的天然斜发沸石。采用流量 LMI MILTONROY P+04-718N1 型进水流量泵从滤池上部连续进水,底部连续出水。曝气装置为海利 ACO-328。

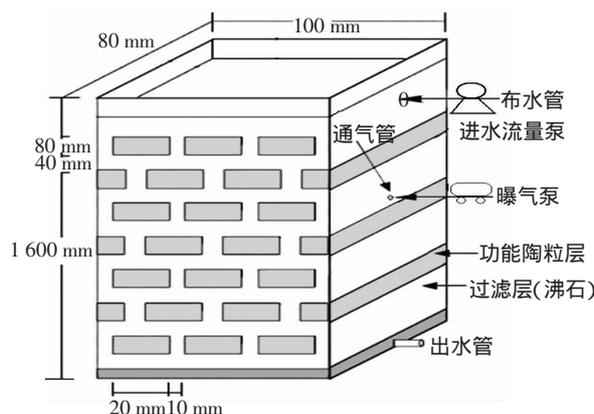


图 1 功能陶粒生物滤池示意图

Figure 1 Schematic diagram of experimental apparatus

1.2 污水和微生物

试验采用葡萄糖、 NH_4Cl 、 KH_2PO_4 等配水来模拟农村生活污水水质,其组成和浓度如表 2 所示。接种高效微生物为美国 BIOSYSTEM 公司的复合微生物菌剂 B350^[13],内含 28 种微生物及纤维酶、淀粉酶、脂肪酶和水解酶,含微生物为 $(30\sim 50)\times 10^8$ 个· g^{-1} 。将配好的营养液与高效菌按一定比例($3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)投加

表 1 功能陶粒的组成

Table 1 The composition of Multi-Function Ceramic(MFC)

编号	天然斜发沸石/180~200 目	粉煤灰电厂炉膛灰/≤325 目	粘土/180~200 目	锯末/20~40 目	功能制剂/180~200 目	酸钙/≤400 目
1	25%	36%	10%	25%	4%	20%
2	15%	46%	10%	25%	4%	20%

表2 人工合成污水的水质

Table 2 The water quality of synthetic sewage

成分	浓度/mg·L ⁻¹	成分	浓度/mg·L ⁻¹
COD(C ₆ H ₁₂ O ₆ -C)	200	CaCl ₂	23
NH ₄ ⁺ -N(NH ₄ Cl)	20	FeCl ₃ ·7H ₂ O	3
PO ₄ ³⁻ -P(KH ₂ PO ₄)	4	NaHCO ₃	12
MgSO ₄ ·7H ₂ O	100		

到滤池中。

1.3 运行方式

模拟农村生活污水的 pH 值控制在 6.5~7.5 之间,进水溶解氧为 8.0 mg·L⁻¹,生物滤池不进行反冲洗,工作温度为 20~25 ℃。

启动过程分为挂膜和驯化两个阶段,两阶段均采用营养液培养微生物,营养液配比为 COD:N:P=100:5:1,浓度分别为 COD 400 mg·L⁻¹,N 20 mg·L⁻¹,P 4.0 mg·L⁻¹。

首先对系统进行 3 d 的闷曝,使微生物固定在陶粒表面及孔隙中,然后完全替换掉营养液,继续闷曝 3 d,此后每天都替换一部分营养液持续 4 d,挂膜阶段结束后进入驯化阶段。驯化初期为了促进陶粒表面生物的生长,采用 0.9 m³·m⁻²·d⁻¹ 的低水力负荷运行 3 d,此时微生物生长情况较为稳定,再将水力负荷提高到 2.7 m³·m⁻²·d⁻¹,3 d 后滤池对 COD 的去除率达到 40%,认为滤池启动成功。

启动成功后,滤池进水改为人工合成污水(COD 200 mg·L⁻¹,NH₃-N 20 mg·L⁻¹,TP 4.0 mg·L⁻¹)将水力停留时间依次调整为 5.73、4.3、3.44、2.87、2.15 h,考察功能陶粒生物滤池的脱氮除磷效果,各阶段进水流量和运行时间见表 3。

表3 进水流量、水力停留时间及水力负荷

Table 3 Influent flow, HRT and hydraulic load

运行时间/d	进水流/L·d ⁻¹	水力停留时间/h	水力负荷/m ³ ·m ⁻² ·d ⁻¹
0~9	22.5	5.73	2.8
10~19	30	4.30	3.75
20~29	37.5	3.44	4.69
30~39	45	2.87	5.63
40~49	60	2.15	7.5

表4 功能陶粒的技术参数

Table 4 Technological parameters of Multi-Function Ceramic(MFC)

编号	粒径/mm	实密度/g·cm ⁻³	填充比/%	比表面积 BET/m ² ·g ⁻¹	孔容积/cm ³ ·g ⁻¹	强度损失率/%
1	8~10	1.417 7	44	11.890 2	0.005 503	4.86
2	8~10	1.505 6	44	6.561 1	0.026 467	3.04

1.4 分析方法

COD、NH₃-N、TP 的测试均采用标准方法^[14],仪器型号为 UV754N 紫外分光光度计和 722S 分光光度计,pH、DO 分别采用 HANNA 201 和 YSI 550 A 分析。功能陶粒浸出液中重金属离子铜、锌、铅、镉采用国家标准测试^[15],仪器为德国 Analytik Jena AG 火焰/石墨炉原子吸收分析仪。

2 结果与讨论

2.1 功能陶粒的性能

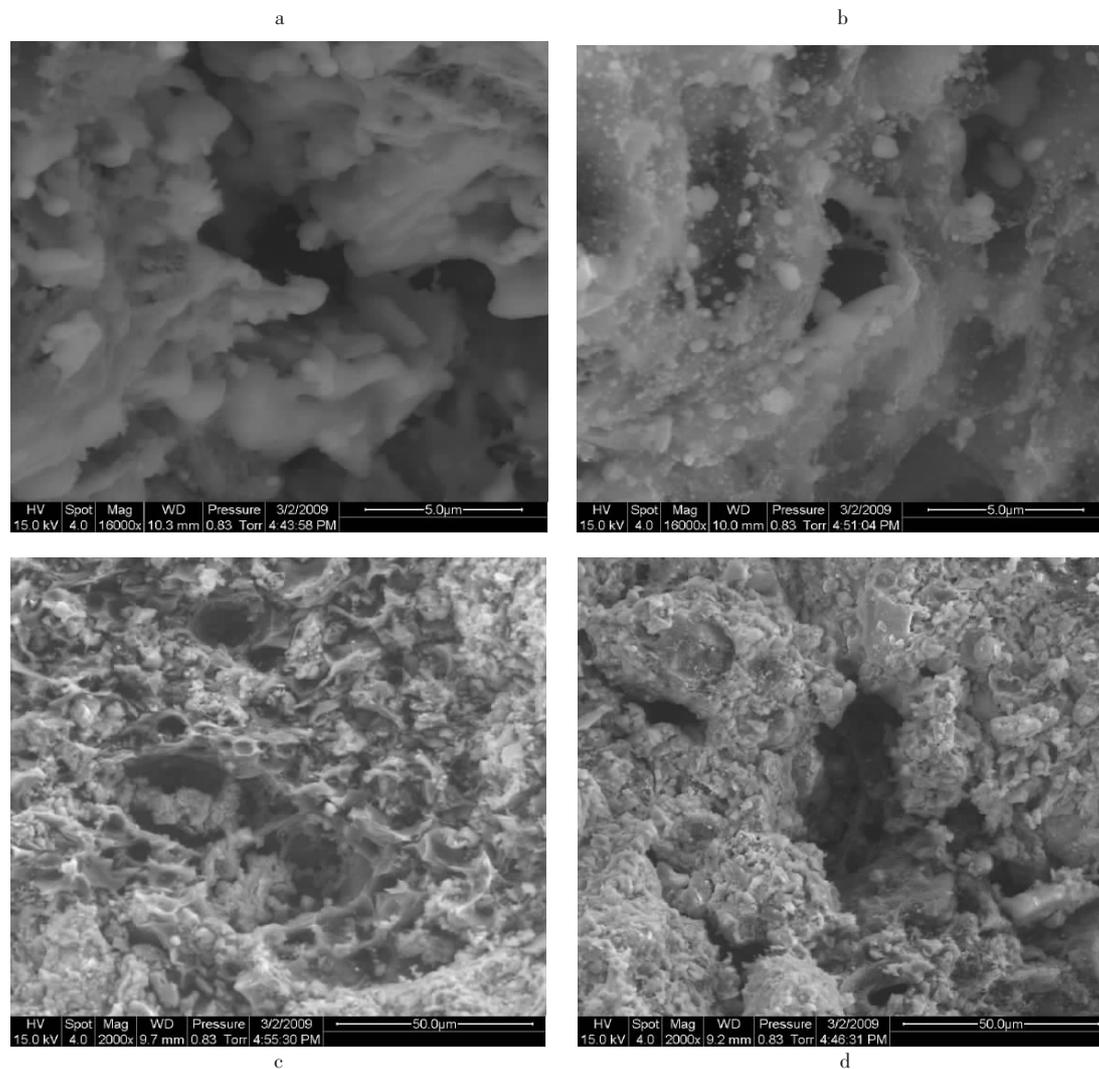
由 1、2 号功能陶粒表面及内部孔隙的扫描电镜图(图 2)图可以看出,陶粒中含有大量的孔隙,而且中孔和微孔(图 3)占主要部分,而陶粒对污染物的吸附,以及固定化微生物主要都在中孔和微孔内。

测定两种功能陶粒的相关技术参数见表 4。可知 1 号功能陶粒其比表面积明显优于 2 号,密度也略轻于 2 号,但强度较 2 号略有降低。其主要原因是两者沸石和粉煤灰含量的差异,利用火焰/石墨炉原子吸收分析仪测定功能陶粒浸出液中重金属离子的含量,结果显示铜、锌、铅、镉、铬等含量均低于检出值,无法检出,说明功能陶粒中重金属溶出量极低。

2.2 HRT 对 COD 的影响

在进水成分、浓度和运行条件不变的情况下,改变 HRT,研究两个功能陶粒生物滤池对 COD 去除率的影响,结果如图 4 和图 5 所示。

两个滤池对 COD 均有很好的处理效果,在 HRT 由 5.73 h 减少至 2.15 h 的过程中,1 号功能陶粒生物滤池对 COD 的去除率由 93.9%减少到 86.6%,下降了 7.3%,2 号功能陶粒生物滤池对 COD 的去除率由 90.3%减少到 86.0%,下降了 4.3%。可见,比表面积较大的 1 号功能陶粒对 COD 去除效果的影响主要发生在低水力负荷(2.8 m³·m⁻²·d⁻¹)和较长水力停留时间(5.73 h)的情况下,水力停留时间越长其优势越明显,但是在高水力负荷(7.5 m³·m⁻²·d⁻¹)和较短水力停留时间(2.15 h)的情况下,两者的差异并不显著。这可能是因为:一方面 1 号功能陶粒的比表面积和孔隙率都显著大于 2 号功能陶粒,比面积和孔隙率越大,污染



a :1 号功能陶粒表面 b :1 号功能陶粒内部 c :2 号功能陶粒表面 d :2 号功能陶粒内部

图 2 功能陶粒扫描电镜图

Figure 2 Multi-Function Ceramic of scanning electron microscope (SEM) photographs

物的吸附容量越大,功能陶粒对 COD 的去除效果越好;另一方面水力负荷越小,功能陶粒吸附作用占 COD 去除率的比例越大,水力负荷越大,微生物降解作用占 COD 去除率的比例越大。当水力负荷增加到 $7.5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,吸附作用对 COD 的去除作用的影响已非常有限。

2.3 HRT 对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 降解的影响

保持进水成分、浓度和运行条件不变,改变 HRT,研究两个功能陶粒生物滤池对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 降解的影响,结果如图 6 和图 7 所示。

两个滤池均对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 有很好的处理效果。在 HRT 由 5.73 h 减少至 2.15 h 的过程中,1 号功能陶粒生物滤池对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率由 96.8% 减少到 86.4%,

下降了 10.4%。2 号功能陶粒生物滤池对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率由 96.7% 减少到 86.3%,同样下降了 10.4%,两者的去除率及其变化趋势均无显著差异。可见,无论在水力负荷较低 ($2.8 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) 还是较高 ($7.5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) 时,功能陶粒的吸附作用对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率的影响均不显著。另外,即使在水力停留时间仅为 2.15 h 的情况下,功能陶粒生物滤池的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率的平均值也高于 86.3%,而普通曝气生物滤池如炉渣-沸石、陶粒-炉渣生物滤池^[9-10]对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的平均去除率分别仅为 70%、69%。这主要是因为功能陶粒良好的微环境,以及生物滤池的“砖墙”式嵌套填充方式更有利于硝化细菌生长,可以形成生物活性更高的生物膜。同时该滤池的独特结构与曝气管的位置,使滤池上部形成

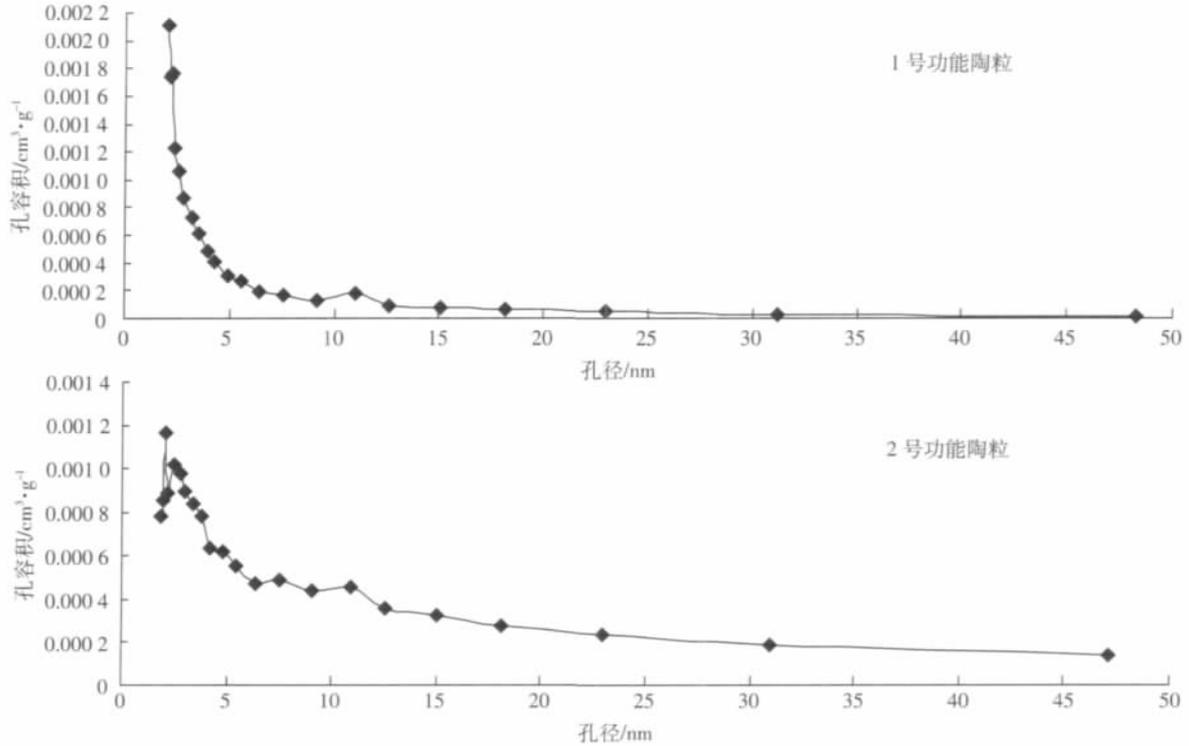


图3 功能陶粒孔径分布图

Figure 3 Multi-Function Ceramic of aperture distribution map

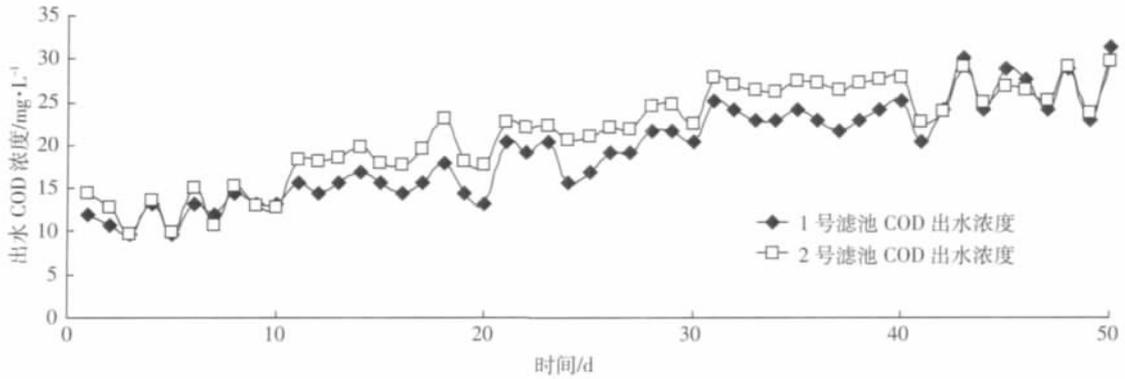


图4 功能陶粒生物滤池的出水 COD 浓度

Figure 4 COD of effluent in NO.1 and NO.2 MFCB

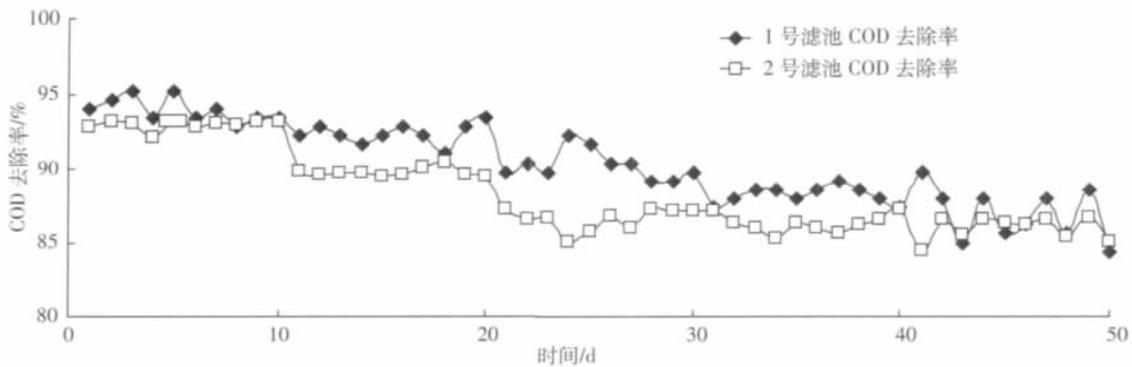


图5 功能陶粒生物滤池对 COD 去除率

Figure 5 COD removal efficiency in NO.1 and NO.2 MFCB

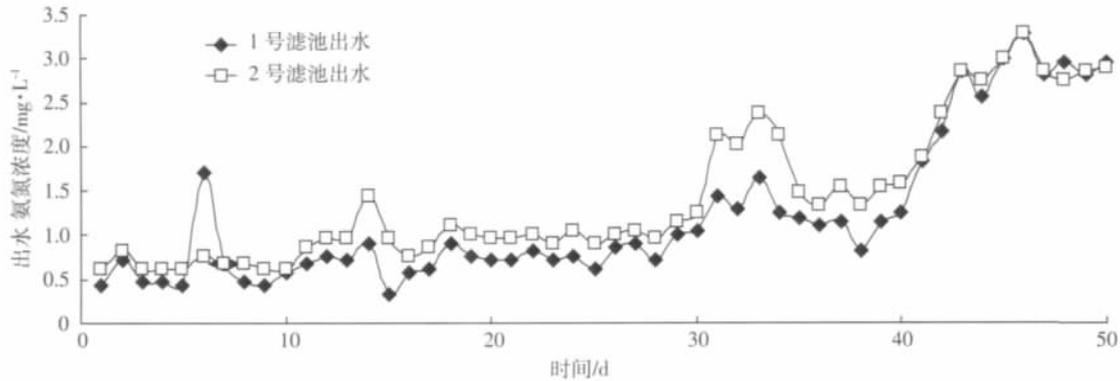


图 6 功能陶粒生物滤池的出水氨氮浓度

Figure 6 NH₃-N of effluent in NO.1 and NO.2 MFCB

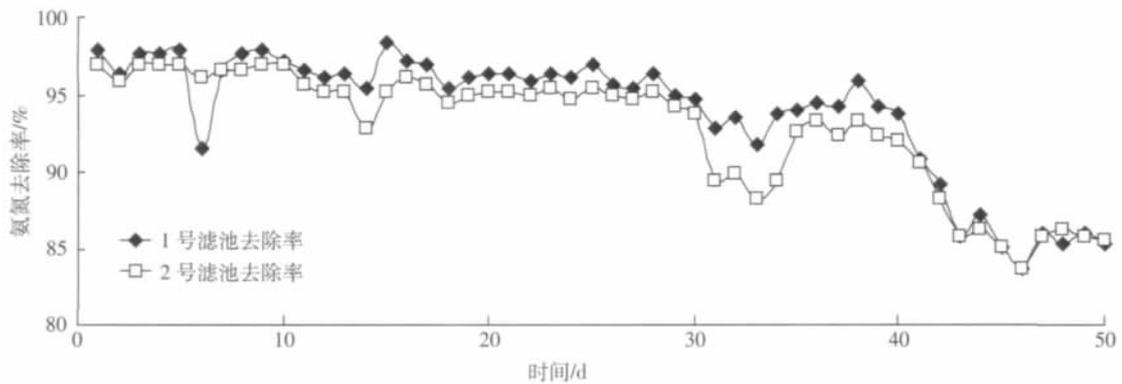


图 7 功能陶粒生物滤池对氨氮去除率

Figure 7 NH₃-N removal efficiency in NO.1 and NO.2 MFCB

好氧区,下部形成厌氧区,分别优选出硝化细菌和反硝化细菌。进水中的 NH₃-N 首先在硝化细菌的硝化作用下转化为 NO₃⁻,然后在反硝化细菌的反硝化作用下转化为 N₂,从而将 NH₃-N 去除。滤池上部区域有足够氧气,DO 为 4.3~6.8 mg·L⁻¹,保证了其好氧环境,使硝化细菌成为生物膜内的优势菌。

2.4 HRT 对 TP 的影响

保持进水成分、浓度和运行条件不变,改变 HRT,研究两个功能陶粒生物滤池对 TP 的去除效果,结果如图 8 和图 9 所示。

两个滤池对 TP 均有很好的去除效果,在 HRT 由 5.73 h 减少至 2.15 h 的过程中,1 号功能陶粒生物滤池对 TP 的去除率由 99.7% 减少到 90.9%,下降了 8.8%。2 号功能陶粒生物滤池对 TP 的去除率由 99.4% 减少到 90.2%,同样下降了 9.2%,两者的去除率及其变化趋势均无显著差异。可见,在水力负荷较低(2.8 m³·m⁻²·d⁻¹)和较高(7.5 m³·m⁻²·d⁻¹)时,功能陶粒组成的差异对 TP 去除率的影响不显著。这是因为,TP 的去除不仅取决于功能陶粒的吸附作用,更重

要的是聚磷菌的好氧聚磷和厌氧释磷作用。同时在水力停留时间仅为 2.15 h 的情况下,功能陶粒生物滤池的 TP 的去除率的平均值也高于 90.2%,而普通曝气生物滤池如炉渣-沸石、陶粒-炉渣生物滤池^[9-10]对 TP 的平均去除率分别仅为 21.4%、22%。这可能是因为功能陶粒大量的中孔和中微孔使其具备良好的吸附性能,可以吸附大量的磷,以及生物滤池的“砖墙”式嵌套填充方式增加了滤池内部的生物量,更有利于聚磷菌的生长。而且该滤池的独特结构与曝气管位置,在滤池的上部形成好氧区,下部形成厌氧区,进水中的磷首先在好氧区被聚磷菌过量吸收,然后在厌氧区又被释放出来,被污泥和脱落的生物膜吸附。

3 结论

由粉煤灰、锯末和铁矿石等废弃物组成,并按不同比例混合后经造粒和高温烧结制成的两种功能陶粒,它们不仅具有原料经济易得、外表粗糙、断面内孔大小均匀、比表面积大、硬度大和耐酸碱性能好的特

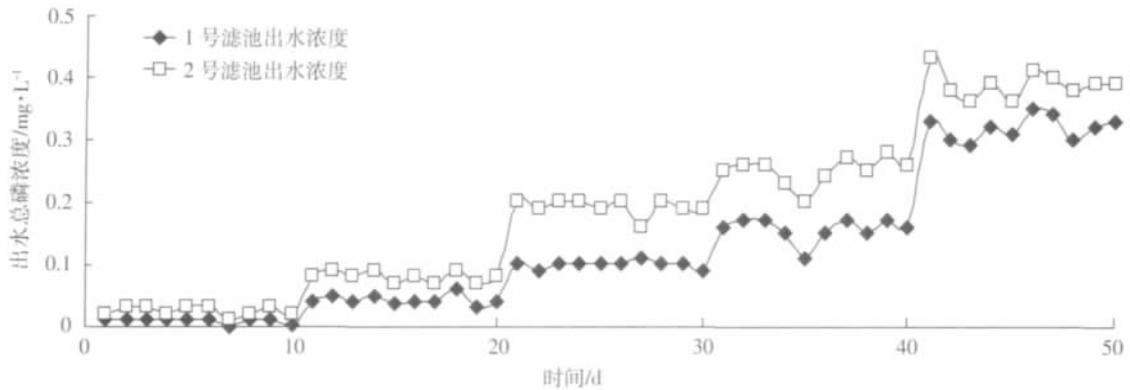


图8 功能陶粒生物滤池的出水总磷浓度
Figure 8 TP of effluent in NO.1 and NO.2 MFCB

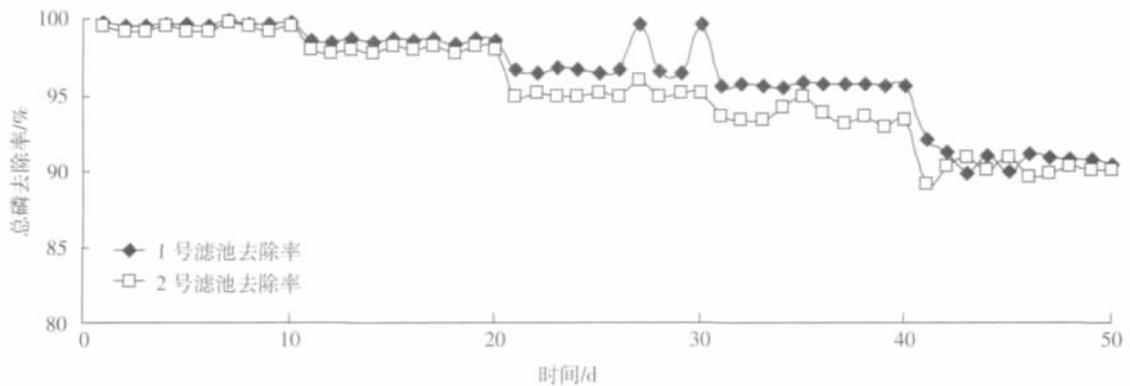


图9 功能陶粒生物滤池对总磷去除率
Figure 9 TP removal efficiency in NO.1 and NO.2 MFCB

点,而且无重金属离子如铜、锌、铅、镉等溶出的优点。

保持进水成分及其浓度不变,随着HRT的变化,1号功能陶粒对COD、NH₃-N和TP的去除效率均优于2号功能陶粒,因为1号陶粒的综合技术参数明显优于2号。“砖墙”式嵌套填充的功能陶粒生物滤池,不仅强化了均匀布水,增加了污水与填料的接触时间,也减少水流短路和死区,延长系统堵塞时间,延长使用期限,同时曝气管设置在滤池中部,使得上部区域与下部区域分别形成好氧区与厌氧区,经驯化后好氧区筛选出好氧硝化细菌和聚磷菌,进行硝化作用与过量聚磷,厌氧区筛选出反硝化细菌和聚磷菌为优势菌种,进行厌氧反硝化和释磷作用。因此,在水力停留时间为2.15~5.73 h的情况下,两个高效功能陶粒生物滤池对氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)和化学需氧量(COD)均具有很好的去除效果,综合去除率分别达到83.6%~98.3%、89.1%~99.7%和84.4%~95.2%,性能优于炉渣-沸石双层填料生物滤池和陶粒-炉渣双层填料生物滤池。该高效功能颗粒生物滤池不仅实现了废

物资源化利用,而且使氮磷处理效率得到极大提高,在农村生活污水的脱氮除磷深度处理领域将会得到广泛应用。

参考文献:

- [1] Scandura J E, Sobsey M D. Viral and bacterial contamination of ground-water from on-site sewage treatment systems[J]. *Water Science and Technology*, 1997, 35(11/12): 141-146.
- [2] James A, Lagro Jr. Designing without nature: unsewered residential development in rural Wisconsin[J]. *Landscape and Urban Planning*, 1996, 35: 1-9.
- [3] Pell M, Nyberg F. Infiltration of wastewater in a newly started pilot sand filter system: I. Reduction of organic matter and phosphorus[J]. *J Environ Qual*, 1989, 18: 452-457.
- [4] Ouazzani N, Boussehaj K, Abbas Y. Reuse of wastewater treatment by infiltration percolation[J]. *Water Science and Technology*, 1996, 33(10/11): 401-408.
- [5] Sun T H, He Y W, Ou Z Q, et al. Treatment of domestic wastewater by an underground capillary seepage system [J]. *Ecological Engineering*, 1998, 11: 111-119.

- [6] 田宁, 杨丽萍, 彭应登. 土壤毛细管渗滤处理生活污水[J]. 中国给水排水, 2000, 16(5) :12-15.
TIAN Ning-ning, YANG Li-ping, PENG Ying-deng. Treatment of domestic wastewater by soil infiltration system[J]. *China Water & Wastewater*, 2000, 16(5) :12-15.
- [7] 张 建, 黄 霞, 刘超翔, 等. 地下渗滤处理村镇生活污水的中试[J]. 环境科学, 2002, 23(6) :57-61.
ZHANG Jian, HUANG Xia, LIU Chao-xiang, et al. Pilot study on sub-surface wastewater infiltration system applied in rural sewage treatment [J]. *Environmental Science*, 2002, 23(6) :57-61.
- [8] 程 丽. 颗粒生物填料除污染性能的应用对比研究[D]. 北京 :中国地质大学, 2006.
CHENG Li. A comparative study of application on the performance of pollutants removal of particular bio-carriers[D]. Beijing :China University of Geosciences, 2006.
- [9] 李绍铭. 炉渣-沸石双层填料生物滤池处理城市污水的试验研究[D]. 甘肃 :兰州理工大学, 2007.
LI Shao-ming. The research of artificial zeolite-coal slag double-layer medium biological aerated filter for municipal wastewater[D]. Gansu : Lanzhou University of Technology, 2007.
- [10] 樊 凯. 陶粒-炉渣双层填料生物滤池处理生活污水的试验研究[D]. 甘肃 :兰州理工大学, 2007.
FAN Kai. The research of ceramic-slag double-layer medium biological aerated filter for pretreatment of sewage[D]. Gansu :Lanzhou University of Technology, 2007.
- [11] 方利国, 张 进, 张应茂. 以废弃固体物为基质的成型吸附剂处理废水的研究[J]. 环境保护科学, 2004, 121(30) :12-14.
FANG Li-guo, ZHANG Jin, ZHANG Ying-mao. Study on treating wastewater with adsorbent forming by solid waste[J]. *Environmental Protection Science*, 2004, 121(30) :12-14.
- [12] 刘 晋. 生物生态组合技术处理农村生活污水研究[D]. 南京 :东南大学, 2006.
LIU Jin. Study on the process combined with bio-ecological technology for rural sewage treatment[D]. Nanjing :Southeast University, 2006.
- [13] 姚 磊, 叶正芳, 倪晋仁. 固定化曝气生物滤池处理污染河水的中试研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(13) :20-23.
YAO Lei, YE Zheng-fang, NI Jin-ren, et al. Pilot-scale study on polluted river water treatment by G-BAY[J]. *China Water & Wastewater*, 2007, 23(13) :20-23.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京 :中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration. Water and exhausted water monitoring analysis method (Fourth Edition)[M]. Beijing :China Environmental Science Press, 2002.
- [15] GB/T15555.2—1995, 固体废物 铜、锌、铅、镉的测定 原子吸收分光光度法[S].
GB/T 15555.2—1995, Solid waste—Determination of copper, zinc, lead, cadmium—Atomic absorption spectrometry[S].