

火山岩填料曝气生物滤池内 循环强化脱氮试验研究

郝晓地 魏 丽 仇付国

(北京建筑工程学院可持续环境生物技术研发中心, 北京 100044)

摘 要 试验表明,被粉碎的火山岩是一种较好的曝气生物滤池填料。出水内循环虽然对 COD、SS 以及浊度没有太大影响,甚至因试验期间低温限制使得硝化效果改善并不明显,但内循环可以显著提高曝气生物滤池反硝化(脱氮)效果。在内循环比为 150% 时,硝化过程中产生的 NO_3^- 几乎均能被反硝化完全去除,只是由于试验时的低温限制了硝化效率使 TN 去除效率提高幅度受到限制,从无内循环时的 43.8% 仅仅被提高到 69.1%。DO 值沿填料层高度呈山谷型分布(谷底位于填料层 50 cm 处)规律揭示,DO 谷底是反硝化的拐点,也是反硝化与硝化的分界点。

关键词 曝气生物滤池 内循环 强化脱氮 反硝化 火山岩 溶解氧(DO)

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2009)02-0239-07

Experimental study on enhancing nitrogen removal by effluent recirculation in a BAF reactor with crushed lava packed as carriers

Hao Xiaodi Wei Li Qiu Fuguo

(The R & D Center for Sustainable Environmental Biotechnology, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044)

Abstract It was demonstrated in a pilot experiment that crushed lava was good carriers in an up-flow biological aerated filter (UBAF). The removal efficiencies of COD, SS, and turbidity were not affected by effluent recirculation, and moreover the efficiency of nitrification was not enhanced too much due to the effect of low temperature during the experiment, but the removal efficiency of total nitrogen (TN) was indeed enhanced by effluent recirculation. Up to effluent recirculation at $R = 150\%$, NO_3^- converted from nitrification could be fully removed by denitrification. Due to limited nitrification at low temperatures, however, the removal efficiency of TN was enhanced at a limited extent (from 43.8% at $R = 0$ to 69.1% at $R = 150\%$). The valley-type DO profile along the bed height (the DO valley at 50 cm) revealed that the DO valley was a turning point for denitrification and also was a boundary of nitrification and denitrification.

Key words BAFs; effluent recirculation; enhancing nitrogen removal; denitrification; crushed lava; DO

作为一种新型生物膜处理技术,曝气生物滤池(BAFs)将污水生物处理与深层过滤集于一身,充分体现了现代污水处理工艺的特点。同时,BAFs 的其他一些优点,如,占地面积小、出水水质好、基建投资省、运行灵活、管理方便、抗冲击能力强等,使其不仅开始应用于污水处理,甚至在微污染给水水源预处理中也得到了应用^[1-4]。曝气生物滤池的这些特点使其在建筑中水处理(即,小中水)中亦显示出较大的优势。

前期对以陶粒为填料的曝气生物滤池用于灰水处理的一般性能研究表明,曝气生物滤池(BAF)对灰水水质成分中 COD、 NH_4^+ 、浊度、SS 等具有良好的处理效果,去除率分别可达 88.4%、93.7%、91.6%

和 94.2%,但是,对总氮(TN)的去除率不高,平均仅为 54.5%。通过出水循环强化脱氮性能技术措施,陶粒曝气生物滤池脱氮效果明显提高,至最佳内循环比(100%)时,TN 去除效率从无内循环时的 54.5% 提高到了 82.4%,增幅达 51.2%^[5,6]。

曝气生物滤池中填料选择从理论上说对其净化效果有一定影响。从应用角度看,填料选择直接影

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划重点项目(2006BAJ01B03-02);北京市属市管高等学校人才强教计划资助项目(BJE10016200611)

收稿日期:2008-04-24; 修订日期:2008-08-28

作者简介:郝晓地(1960~),男,教授,工学博士,主要从事可持续环境生物技术研究工作。E-mail:haoxiaodi@bucea.edu.cn

响其处理效果和运行成本。为了能获得一种净化效果好、购置成本低、持久耐用的填料,使用上述曝气生物滤池反应器,选择粉碎后的天然火山岩作为填料,采用出水内循环方式对火山岩填料曝气池脱氮效果进行了系统试验研究。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置与填料

上向流曝气生物滤池(UBAF)试验装置结构如图1所示。UBAF反应器为圆柱形有机玻璃池体:外径250 mm,内径230 mm,柱高1.9 m;从下到上分区为:配水区100 mm,曝气区200 mm,承托区100 mm,填料区1 000 mm和清水区500 mm,各部分之间用法兰连接。

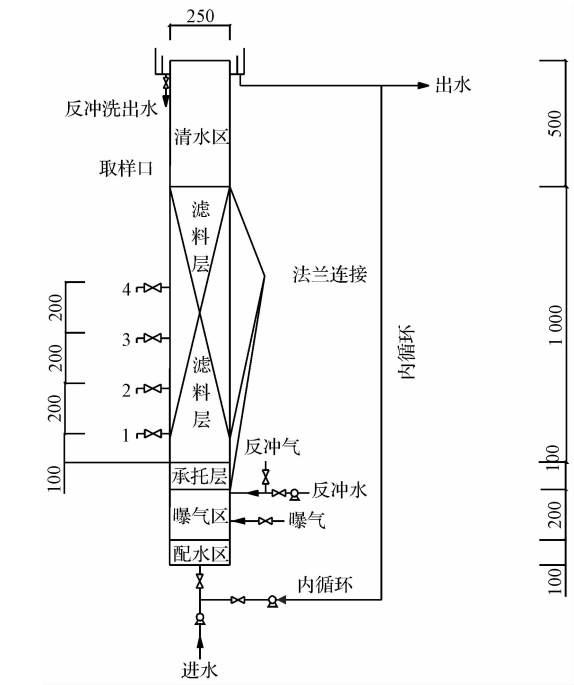


图1 UBAF试验装置结构及流程

Fig.1 Structure and flow-sheet of the UBAF experimental set-up

曝气区固定安装一盘式膜曝气装置。进水和内循环水均由底部进水,采用帕斯菲达计量泵控制。底部反冲洗系统采用气/气+水/水联合方式反冲洗滤料,历时15~20 min;反冲洗周期为3~5 d,视出水质情况而定;反冲洗水采用华乐士管道泵运行。

本试验选用火山岩作为填料。火山岩填料是经过选矿、破碎、筛分、研磨等一系列工艺加工而成的

粒状填料,其主要成分为硅、铝、钙、钠、镁、钛、锰、铁、镍、钴和钼等几十种矿物质和微量元素。火山岩填料表观为不规则颗粒,颜色为红黑褐色,多孔质轻。选用的破碎火山岩填料物理参数见表1。

表1 火山岩填料物理参数

Table 1 Physical parameters of crushed lava

性能指标单位	火山岩填料
容重(kg/m^3)	740
比重	1:1.27
含水率(%)	0.9~1.0
堆积密度(kg/m^3)	820
空隙率(%)	58
孔隙率(%)	46
挂膜时间(h)	27
松散系数	1:1.25
比表面积(m^2/kg)	11.29
抗压强度(MPa)	5.08
抗剪切强度(MPa)	3.96
磨擦损耗率(%)	<1
盐酸可溶率(%)	<1.2
溶出物	不含对人体有害元素

1.2 进水、负荷及运行参数

试验进水按前期试验中测得的灰水水质成分人工配制而成。由于人工配水中加入的化学药剂缺乏微生物生成所需的微量营养成分,所以在配水中加一定量的微量元素,以满足微生物增长需要。配水水质所需药剂及产生的水质成分见表2。试验进水量控制在为20 L/h,进水有机物、氨氮负荷等运行参数见表3。

表2 人工配水药剂与水质成分

Table 2 Added chemicals and quality of synthetic grey water

项 目	药 剂	数 值
COD(mg/L)	无水乙酸钠 CH_3COONa	200~300
NH_4^+ ($\text{mg N}/\text{L}$)	氯化铵 NH_4Cl	15~22
TN($\text{mg N}/\text{L}$)	氯化铵 NH_4Cl	15~22
TP($\text{mg P}/\text{L}$)	磷酸二氢钾 KH_2PO_4	3
SS(mg/L)		12~55
浊度(NTU)		6~140
微量元素(mg/L)	EDTA	3
	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.45
	H_3BO_3	0.05
	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.01
	KI	0.05
	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.04
	$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.02
	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.04
	$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.05

表 3 进水负荷及工艺参数		
Table 3 Influent loadings and process parameters		
工艺参数	试验值	文献参考值 ^[4]
流量(L/h)	20	-
空塔水力停留时间(h)	2.1	1~4
水力负荷/滤速(m/h)	0.96	1~10
进水有机物负荷 (kg COD/(m ³ 填料·d))	3.6	6~10
进水 NH ₄ ⁺ -N 负荷 (kg N/(m ³ 填料·d))	0.24	0.2~1
气/水比	7:1	-
出水口溶解氧(mg/L)	7~8	>6
内循环比 R(%)	0~150	-
温度(℃)	12~22	-

1.3 水质分析项目与方法

试验中水质检测指标有:COD、NH₄⁺、NO₃⁻、TN、DO、SS 和浊度等。水质分析项目根据标准方法实施^[7],具体分析指标及所采用的分析方法见表 4。同步进行水质分析的水样为进、出水水样及图 1 所示的 4 个取样口中的水样。其中,对取样口中 DO 的监测依靠在取样口安装的倒置塑料矿泉水瓶实施。

表 4 水质分析项目与方法	
Table 4 Analytical subjects and methods of water quality	
检测水质指标	分析方法
COD	重铬酸钾氧化法
TN	过硫酸钾氧化 紫外分光光度法
NH ₄ ⁺	纳氏试剂光度法
NO ₃ ⁻	紫外分光光度法
SS	103~105℃烘干的总残渣
浊度	便携式浊度计法
DO 及温度	YSI700 溶氧仪

2 结果与讨论

浊度与 SS 是出水水质的物理性指标,浊度或 SS 太高会影响水质感观性能,不利于中水回用。因此,增加内循环后需首先在宏观上考察出水中浊度与 SS 的变化。试验结果显示(图 2),出水浊度及 SS 值基本上不受内循环的影响,与在无内循环工况下一样,出水浊度仍然能保持在 5 NTU 以下,同时,出水 SS 值也均低于 10 mg/L 水平。这表明,进 waters

力负荷的增加并不会导致填料上生物膜脱落。为此,试验结果分析中将重点讨论内循环对 N 与 COD 去除的影响与作用机理。

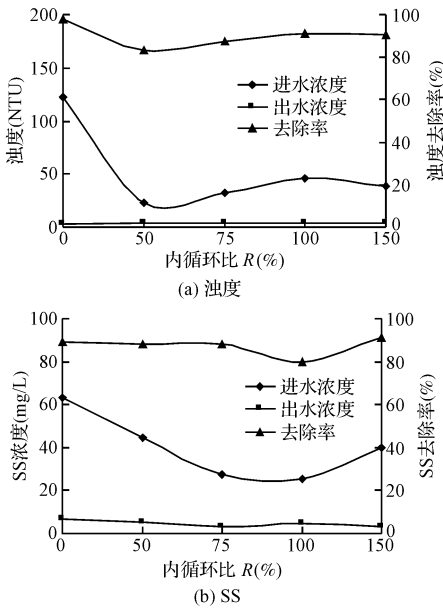


图 2 内循环对浊度与 SS 去除效果的影响
Fig. 2 Effects of effluent recirculation on removal efficiencies of turbidity and SS

2.1 内循环对 COD 及 NH₄⁺ 去除效果的影响

以火山岩为填料的曝气生物滤池对污水中 COD 有较好的处理效果,在无内循环工况下,COD 平均去除率为 86.7%,最大去除率达到 91.8%,出水 COD 浓度平均为 28.5 mg/L(图 3a)。这说明,异养细菌在火山岩填料中的聚集量足以降解进水负荷中的 COD。进言之,火山岩填料对生物膜的亲和作用与附着力较强,增加内循环后并没有引起生物膜的大量脱落,以至于 COD 去除效果没有受到影响。

但是,曝气生物滤池对 NH₄⁺ 的去除效果似乎并不太理想,在无内循环工况下,NH₄⁺ 平均去除率及出水浓度分别为 77.8% 和 2.7 mg/L;而随着内循环比增加,NH₄⁺ 去除率甚至有下降的趋势(图 3b)。导致硝化效率低下的主要原因是试验处于冬季期间,配水采用的自来水水温较低。温度对硝化细菌生长及硝化反应动力学具有较大影响。硝化细菌较适宜在 25~30℃ 之间生长,当温度低于 10℃ 或者高于 30℃ 时硝化作用均会显著降低。图 4 显示了试验期间的水温及各水温下对应的 NH₄⁺ 平均去除率。图 4 显示,无内循环时的平均水温为 22.1℃,而当内循环比增加至 150% 时平均水温已降至 12.3℃,

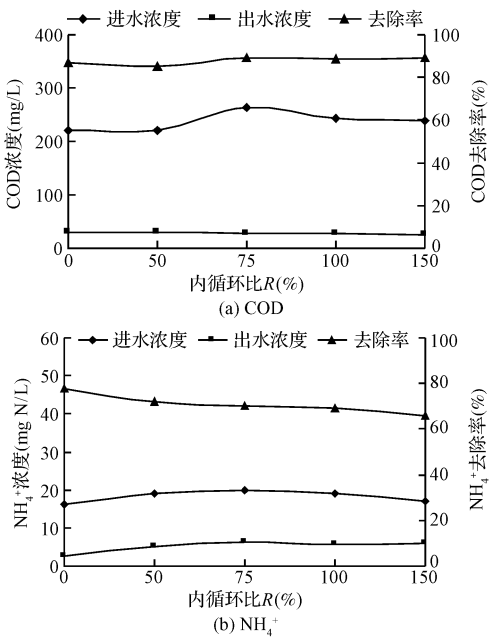


图3 内循环对 COD 及 NH₄⁺ 去除效果的影响

Fig. 3 Effects of effluent recirculation on removal efficiencies of COD and NH₄⁺

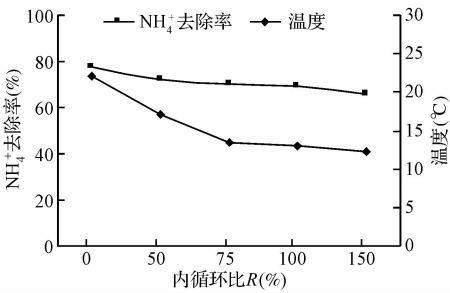


图4 不同循环比下的平均水温与 NH₄⁺ 平均去除率

Fig. 4 Temperature and NH₄⁺ removal

efficiencies at different recirculation ratios

导致 NH₄⁺ 平均去除率降低了 12%。尽管内循环从理论上讲可以增强硝化作用,但低温对硝化细菌活性的影响显然在此时超过了内循环对硝化的强化作用。

2.2 内循环对 TN 去除效果的影响

UBAF 在无内循环情况下对 TN 去除主要是通过生物膜内同步硝化/反硝化作用(SND)完成的。这种 SND 现象因需要有碳源(COD)存在而主要发生于填料层底部,至填料中、上部时 COD 已所剩无几,所以生物膜内层的反硝化作用不会太强,不可能将硝化产生的全部 NO₃⁻ 全部反硝化至 N₂。

显然,通过内循环将上部 SDN 未能全部反硝化

的 NO₃⁻ 输送至 UBAF 底部,借助于进水中相对充足的 COD,通过填料层底部生物膜内的 SND 作用,则有可能达到强化反硝化、提高 TN 去除效率的目的。试验结果验证了这一理论推断,如图 5 所示。图 5 显示,未增加内循环时,UBAF 对 TN 的去除率仅为 43.8%,相应出水 NO₃⁻ 浓度高达 6 mg N/L。当增加内循环后,虽然水温逐渐下降,但 TN 去除效率却稳步提高(图 5a),出水中的 NO₃⁻ 浓度随之降低(图 5b)。至内循环 R = 150% 时,TN 去除率上升至 69.2%。

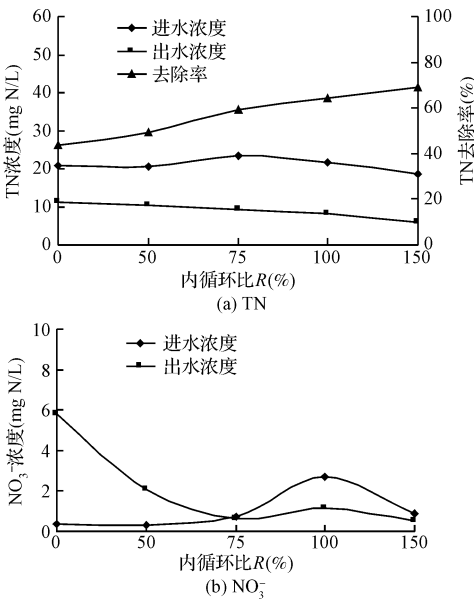


图5 内循环比对 TN 及 NO₃⁻ 去除效果的影响

Fig. 5 Effect of effluent recirculation on removal efficiency of TN and NO₃⁻

如上所述, NH₄⁺ 去除率随内循环比增加出现了因温度引起的不升反降现象,而 TN 去除率却保持了逐渐升高的态势。这是因为温度对硝化细菌活性影响较异养菌要严重得多。图 6 列出了在不同循环工况下 TN 去除率占 NH₄⁺ 去除率的百分比。图 6 表明,随着内循环比的增加,越来越多从硝化转化而来的 NO₃⁻ 被反硝化去除,从无循环时反硝化仅占硝化的 56.3% 增至循环比为 150% 时的 100%。这表明,在内循环比为 150% 时,反硝化作用几乎可以将硝化产生的 NO₃⁻ 全部转化为 N₂。

2.3 不同填料层高度下沿程 COD 与 N 去除规律

在进水由下向上流经 UBAF 填料层过程中,进水中的污染物在不同微生物作用下发生不同的生化反应,如,异养菌对 COD 的耗氧降解、硝化菌对

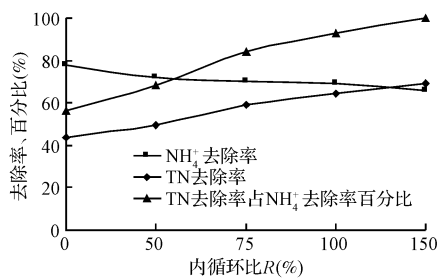


图 6 不同循环比下 TN 占 NH_4^+ 去除率的百分比
Fig. 6 Shares of TN removal in the NH_4^+ removal at different effluent recirculation ratios

NH_4^+ 的氧化以及异养菌对 NO_3^- 的反硝化并降解 COD 等等。所以,研究不同填料层高度下 COD 与 N 的去除规律可以反映出微生物在 UBAF 内的分布情况。以下就试验过程中不同填料层高度下获得的 COD 与 N 的去除效果进行分析。

图 7 列出了 COD 与 NH_4^+ 、 NO_3^- 、TN 3 种形式 N 沿填料层高度的去除率及浓度变化趋势,同时还对比列出了在 3 个循环比 50%、100% 及 150% 工况下 4 种指标沿填料层高度的去除效果。

在无内循环工况下(图 7a),火山岩填料对 NH_4^+ 的去除率在填料层高度 70 cm 以下区域是沿程均匀增加的,但是到了 70 cm 以上区域对 NH_4^+ 去除率变缓。因出水 NH_4^+ 总去除率为 77.8%,所以

填料层高度 70 cm 处的 NH_4^+ 累积去除率已占到出水总 NH_4^+ 去除率的 88.6%,这表明,对 NH_4^+ 的去除起作用的硝化细菌主要分布在火山岩填料 70 cm 以下的范围内。

图 7a 亦显示,无内循环时 COD 与 TN 沿填料不同高度的去除率具有相同的特征,即,填料层高度 50 cm 处为 COD 去除率趋势变化的转折点。在填料层 50 cm 以上区域时,COD 及 TN 的去除率变化均有逐渐变缓的趋势。结合填料高度沿程 NO_3^- 值可以看出,在 50 cm 以上的填料高度时 NO_3^- 值由 2 mg N/L 增加到 6 mg N/L。可见,在填料高度为 50 cm 以下时,硝化作用与反硝化作用同时进行,基本不产生 NO_3^- ;在 50 cm 以上的填料层中反硝化因碳源不足受到抑制,导致出水 NO_3^- 增高。从图 7a 中可以看出,在填料层 50 cm 处的 COD 去除率已达 76.2%,已占总 COD 去除率(86.7%)的 88%。

增加内循环后解决了因 COD 不足而抑制反硝化的问题,对 TN 去除有了明显的强化作用(图 7b、c、d)。从这些图中可以看出,增加内循环后,不同填料层高度下 TN 累积去除率有逐渐增加的趋势。在无内循环时,填料层 50 cm 处 TN 累积去除率仅为 40.2%,已占到总 TN 去除率的 91.7%。而在循环比为 100% 时,在填料层 30 cm 处的 TN 累积去除率已高达 57.7%,占到总 TN 去除率的 89.8%。

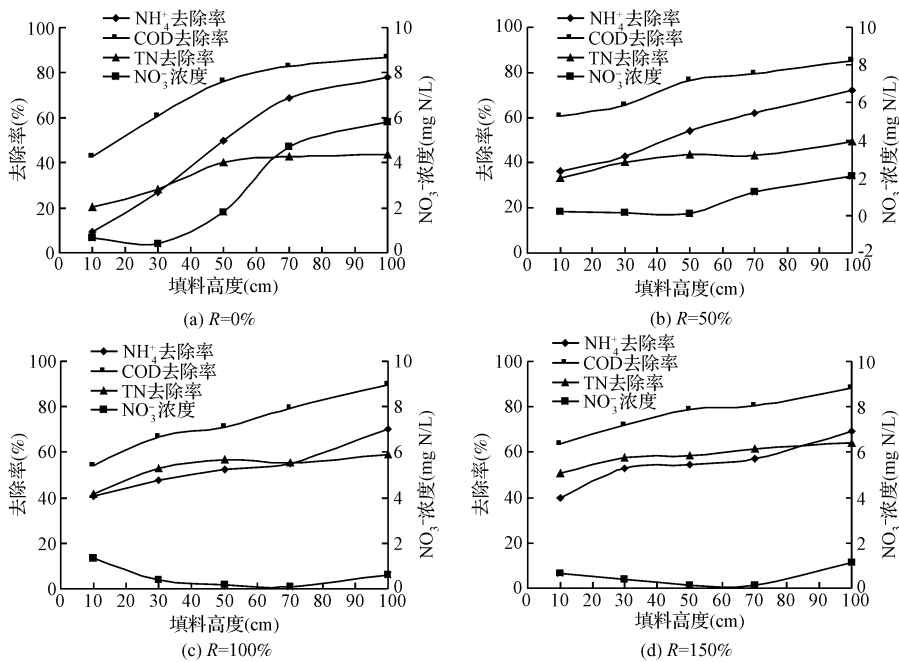


图 7 污染物质沿填料层高度去除率比较
Fig. 7 Pollutant removal along the bed heights

2.4 填料层内部 DO 分布规律及相关反应分析

填料层内溶解氧 (DO) 分布规律是了解 UBAF 处理性能及相关反应的间接参考。为此,本试验不仅监测了出水 DO,而且还监测了填料层不同高度下的 DO。

2.4.1 填料层 DO 分布规律

DO 在测定过程中会有一定程度的波动,所以本试验测定了多组 DO 数据,不同循环比下的多组 DO 分布曲线见图 8。虽然不同填料层高度下 DO 在不同循环比时波动程度较大,但是,各 DO 曲线均表现出近乎一致的变化规律,即,DO 值沿填料层高度逐渐降低,至 50 cm 处左右出现最小值 (谷底),随后开始逐渐上升,直至出水中 DO 达到 6~8 mg/L。形象地说,DO 沿填料层高度呈山谷型形分布,谷底位于填料层高度 50 cm 处。

2.4.2 DO 分布与污染物质去除率的关系

图 9 显示了填料层内部 DO 与污染物质去除率

的关系,从中可以看出在填料层高度 50 cm 以下范围 COD 及 NH_4^+ 去除率升高较快,在 50 cm 以上范围去除率有减缓的趋势。显然,造成 DO 降低的原因是细菌的耗氧作用,包括异养细菌的好氧呼吸作用与 NH_4^+ 硝化作用耗氧。DO 分布亦揭示出,填料层 50 cm 处的确为 TN 累积去除率变化趋势的转折点;此处,因 COD 浓度降低而抑制了反硝化进程。可见,填料层中 50 cm 以下范围内 COD 被迅速降解,说明在填料层内中、下部异养细菌数量较多且分布非常集中;异养细菌对 COD 的好氧降解作用是引起 DO 值不断降低的主要因素,同时 NH_4^+ 硝化作用也起到了消耗部分 DO 的作用。

虽然填料层内中、下部自养细菌数量较多,但从图 9 中的 NH_4^+ 去除率曲线可以看出,在火山岩填料层中、下部硝化反应进行的并不充分,这主要是因为硝化细菌活性因为温度降低而受到抑制。这种被温度抑制的硝化现象在 DO 谷底以上时亦继续出现。

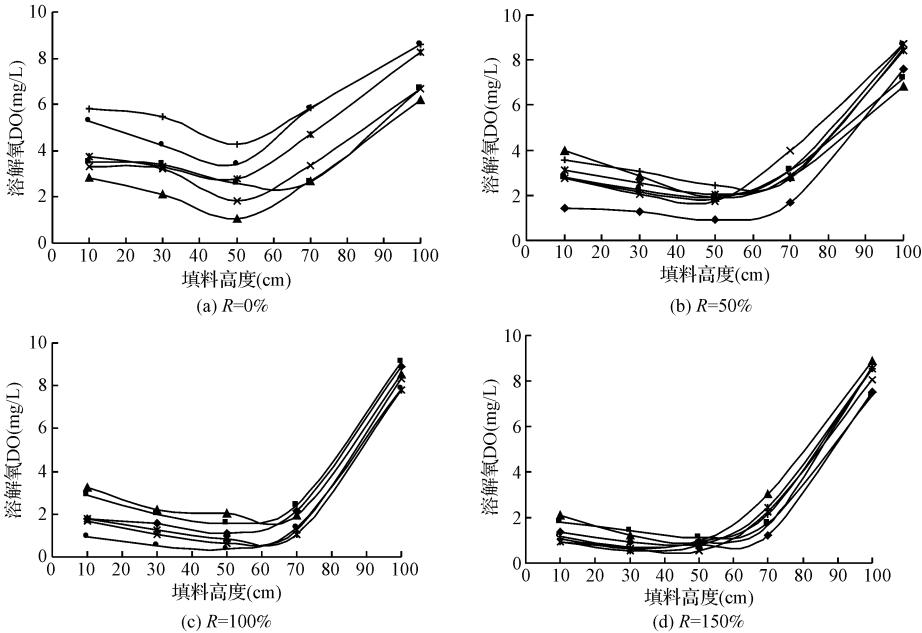


图 8 火山岩填料内部 DO 分布规律
Fig. 8 DO distribution along the bed height

3 结论与建议

在水温为 12~22℃ 的试验范围内,粉碎的火山岩被证明是一种有效的曝气生物滤池填料。内循环对强化曝气生物滤池脱氮性能具有明显的作用。通

过上述分析,可以得出以下结论与建议:

(1) 增加内循环对 COD、SS、浊度等去除效果影响不大。由于试验过程中温度随季节变化逐渐降低,从而抑制了硝化细菌的活性,导致内循环对强化硝化作用效果不明显;

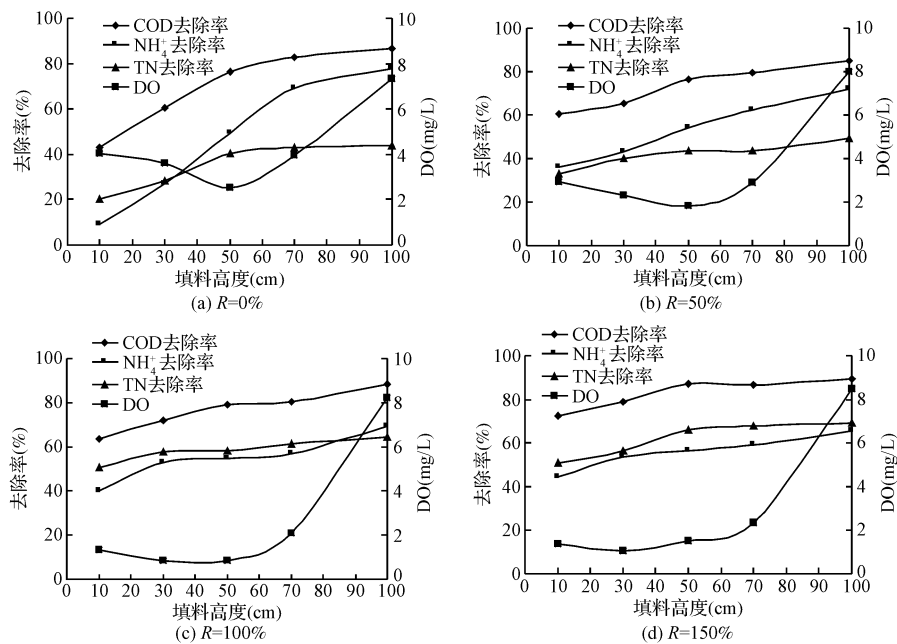


图 9 填料内部 DO 分布与污染物质去除关系
Fig. 9 Relationship between DO distribution and pollutants removal

(2) 增加内循环对 TN 去除有明显强化作用。相对于无内循环时 43.8% 的 TN 去除率,在 50%、75%、100% 和 150% 内循环工况下,TN 平均去除率分别上升至 49.4%、59%、64.2% 和 69.2% ;

(3) 沿填料层不同高度 N 与 COD 去除率结果分析表明,硝化细菌与异养细菌在整个填料层内均有分布,但在填料层 50 cm 以下范围较为集中。内循环对填料层微生物总体分布状况基本没有影响;

(4) 填料层沿程 DO 呈山谷型分布,谷底位于填料层高度 50 cm 处。DO 谷底是反硝化的拐点,也是反硝化与硝化的分界点;

(5) 建议后续试验以真实污水验证,并尽可能在同一温度下考察上述各种现象。

参考文献

[1] Rothe E. , Cornel P. Optimizing design, operation and energy consumption of biological aerated filters (BAF) for ni-

trogen removal of municipal wastewater. *Water Sci. Technol.* , **2004** , 50(6) : 131 ~ 139

[2] Pujol R. , Lemmel H. , Gousailles M. A key point of nitrification in an up flow bio-filtration reactor. *Water Sci. Technol.* , **1998** , 38(3) : 43 ~ 49

[3] Rogalla F. , Payaudeau M. , Sauvegrain P. , *et al.* Reduced hydraulic detention time for complete nutrient removal with innovative biological reactors. *Water Sci. Technol.* , **1991** , 24(10) : 217 ~ 229

[4] 郑俊, 吴浩汀. 曝气生物滤池工艺的理论与应用. 北京: 化学工业出版社, **2005**. 23 ~ 24

[5] 仇付国, 郝晓地, 陈新华. 曝气生物滤池再生处理洗浴废水的中试研究. *环境污染与防治*, **2007** , 29(增刊): 7 ~ 9

[6] 郝晓地, 魏丽, 仇付国. 内循环强化曝气生物滤池脱氮性能试验研究. *中国给水排水* , **2008** , 24(19) : 20 ~ 24

[7] 王心芳, 等. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, **2002**