

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2017.06.12

## 低温下硝化型曝气生物滤池的快速启动

南彦斌<sup>1</sup>, 彭永臻<sup>2</sup>, 王凯旋<sup>1</sup>, 赵庆<sup>1</sup>, 刘宏<sup>1</sup>, 王瑾<sup>1</sup>, 陈永志<sup>1</sup>

(1. 兰州交通大学 环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 北京工业大学  
城镇污水深度处理与资源化利用技术国家工程实验室, 北京 100124)

**摘要:** 为了提高我国北方地区冬季污水处理设施的生物脱氮效能, 本文采用人工配水, 探究低温条件下硝化型 BAF 的快速启动过程。结果表明: 在 10 ~ 16℃ 条件下, 进水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 COD 浓度分别控制在 103.16 和 60.00 mg/L, 采用接种挂膜法与自然挂膜法相结合的方式, 运行至 25 d 时, 出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 COD 的浓度分别降为 36.17 和 6.66 mg/L, 去除率分别高达 62.74% 和 87.30%,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度达到 60.23 mg/L。采用的硝化型 BAF 具有良好的硝化性能。至硝化型 BAF 启动成功, 填料表面生物膜由浅褐色黏性薄膜变为较厚的黄褐色生物膜。

**关键词:** 硝化型 BAF; 低温; 高氨氮; 活性生物填料; 快速启动;

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2017)06-0069-05

## Rapid start – up of nitrification biological aeration filter at low temperature

NAN Yanbin<sup>1</sup>, PENG Yongzhen<sup>2</sup>, WANG Kaixuan<sup>1</sup>, ZHAO Qing<sup>1</sup>,  
LIU Hong<sup>1</sup>, WANG Jin<sup>1</sup>, CHEN Yongzhi<sup>1</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;  
2. National Engineering Laboratory of Urban Sewage Advanced Treatment and Resource Utilization Technology,  
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** The rapid start – up of nitrification biological aeration filter (BAF) at low temperature was explored by using artificial water distribution to improve the efficiency of the biological nitrogen removal of wastewater treatment facilities in winter of northern China. The results showed that the influent concentrations of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and COD were 103.16 mg/L and 60 mg/L, respectively, under the condition of 10 ~ 16℃, and the inoculation biofilm method combined with natural biofilm method was adopted. The results showed that the effluent concentrations of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and COD decreased to 36.17 mg/L and 6.66 mg/L, respectively, and the removal rates were 62.74% and 87.30%, the concentration of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  reached to 60.23 mg/L when the system ran to the 25<sup>th</sup> day. The nitrifying performance was well in nitrification BAF. The light brown sticky film became thickened fulvous biofilm on the surface of filler when the nitrification BAF was started up successfully.

**Key words:** nitrification BAF; low temperature; high ammonia nitrogen; active biological fillers; rapid start – up

硝化和反硝化是实现生物脱氮的两个重要过程<sup>[1]</sup>, 硝化过程由自养型硝化菌完成, 是影响生物脱氮的关键步骤<sup>[2]</sup>, 而硝化菌活性又受温度的制约<sup>[3-4]</sup>。曝气生物滤池 (Biological Aerated Filter, BAF) 是近年来在普通生物滤池基础上开发的污水处理新工艺, 通过生长在反应器内填料上生物膜的

氧化分解、填料的吸附截留及生物膜内部的反硝化作用, 实现污染物的高效去除, 具有占地少、工艺简单、抗冲击负荷能力强、出水水质好等优点<sup>[5-6]</sup>。杨庆等<sup>[7]</sup>在常温条件下, 研究高氨氮废水短程硝化 – 厌氧氨氧化 BAF 工艺的启动发现, 采用闷曝 – 连续运行结合的接种挂膜方式, 可成功实现短程硝化 –

收稿日期: 2017-06-14; 修回日期: 2017-08-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51668033); 甘肃省高等学校特色专业 (101004); 兰州交通大学教改重点项目; 大学生科技创新项目 (DXS-KJ CX-2016-012)

作者简介: 南彦斌 (1991-), 男, 甘肃定西人, 硕士研究生, 主要研究污水脱氮除磷。

通讯作者: 陈永志 (1969-), 男, 河南开封人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水污染控制工程理论及技术。

厌氧氨氧化自养脱氮。杨婧雯等<sup>[8]</sup>探讨了低温条件下采用生活污水启动 BAF 的方法,结果表明,低温环境下 BAF 的挂膜启动时间较长,但不影响挂膜质量,27 d 启动完成。李文文等<sup>[9]</sup>用生活污水在水温为 5~15℃时,连续进水 33 d 后 BAF 挂膜启动成功。王建华等<sup>[10]</sup>发现常温条件下不含有机物的废水对快速启动硝化型 BAF 有利。

以上研究大多集中于环境因素或水源对 BAF 的挂膜启动影响,但是关于低温条件下,以硝化菌为优势菌种的硝化型 BAF 的快速启动鲜有报道。本文采用接种挂膜法与自然挂膜法相结合的复合挂膜法,考察低温下硝化型 BAF 的快速启动特性,以期为我国北方地区冬季硝化型 BAF 的快速启动提供技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

硝化型 BAF 由有机玻璃柱焊接而成(见图 1),滤池内径 100 mm,总高度 3 000 mm,滤层厚度 2 000 mm,底部布有进水管、反冲洗进水管及曝气管,有效容积约 20 L,滤柱底部设有 200 mm 鹅卵石的承托层,承托层以上 100 mm 处装有细孔沙芯曝气头,由空气压缩机提供曝气,曝气头以上每隔 400 mm 设一个取样孔。原水由蠕动泵从水箱打入进水管,以上行流方式运行。滤池内填充硝化型活性生物填料,填充率 75%。

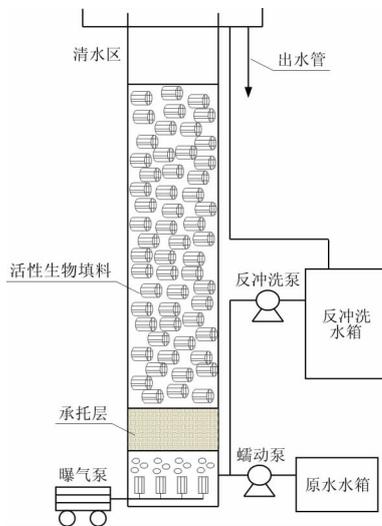


图 1 硝化型 BAF 装置图

### 1.2 填料特性

填料是 BAF 的核心部分,填料的选择及其物理化学特性对微生物的生长繁殖以及传质效率都有着

重要的影响<sup>[11-12]</sup>。此外,填料具有不同的生物膜生长特性,不仅影响硝化效果,而且关系到滤池本身的基建费用及运行成本<sup>[13]</sup>。常见陶粒、沸石、活性炭等 BAF 填料的挂膜效果不佳<sup>[14]</sup>。本文采用某公司生产的新型活性生物填料,其特性见表 1。

表 1 活性生物填料特性

比重	堆积个数/ (个·cm <sup>-3</sup> )	有效表面积/ (m <sup>2</sup> ·m <sup>-3</sup> )	孔隙率/ %	粒径/ mm
>0.96	365400	>500	>95	10

### 1.3 试验用水水质及检测方法

为在硝化型 BAF 中发生硝化反应,不应使异养菌以及其他菌种过多生长,故本文采用 COD 浓度较低、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度较高的人工模拟废水,其水质情况及微量元素组成见表 2。水样经滤纸过滤后根据 APHA 标准方法<sup>[15]</sup>测定 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, pH 值、DO 和温度采用 Multi3420 - WTW 测定,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的积累率按孙洪伟等<sup>[16]</sup>的计算方法确定。

表 2 试验用水水质和微量元素溶液组成

微量元素 溶液组成	浓度/ (g·L <sup>-1</sup> )	进水水质	浓度/ (g·L <sup>-1</sup> )	均值/ (mg·L <sup>-1</sup> )
FeCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.03	COD	52.45~67.73	60
MgSO <sub>4</sub>	0.09	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	83.77~107.84	103.16
CuSO <sub>4</sub>	0.01	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	0.08~0.46	0.24
MnCl <sub>2</sub>	0.24	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0.33~3.12	1.98
NiCl <sub>2</sub>	0.06	pH 值	7.2~7.4	7.3
KI	0.06			
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	0.06			

### 1.4 BAF 快速启动策略

文中试验在水温 10~16℃条件下进行,接近硝化菌生长温度下限<sup>[17]</sup>。为加快启动速度并形成稳定生物膜,综合接种污泥法和自然挂膜法的特点,采用接种污泥法与自然挂膜法相结合的复合挂膜法,且用逐渐增加进水流量到设计流量的方法以加快 BAF 的启动<sup>[18]</sup>。接种污泥取自兰州市七里河污水处理厂,具有良好的脱氮性能,SVI 值为 28%。

试验过程中,首先将接种污泥与试验用水以 3:1 比例通过蠕动泵进入 BAF;随后,用曝气泵曝气 4 h,并通过转子流量计控制流速以保证装置内 DO 在 6~8 mg/L,确保刚接触试验水质的优势菌种得以生长;停止曝气后静置 4 h,让污泥与活性生物填料充分接触,使微生物在填料表面附着;最后将泥水

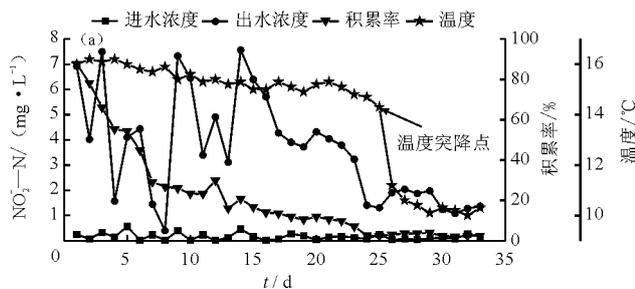
混合物排掉,完成一个周期。每天运行 2 个周期,共 5 d。5 d 后进水流量从 1.5 L/h 逐渐增加到 7.5 L/h 的设计值。

通常认为好氧异养菌主要去除 COD,硝化菌通过硝化作用和微生物的增殖去除  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 。通过分析 BAF 对 COD 和  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除情况可判定挂膜是否完成、系统是否成功启动。硝化菌生长代谢缓慢、世代周期长且对温度变化敏感,本文以  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除率达到稳定作为系统启动成功的标志。

## 2 结果与讨论

### 2.1 对 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的去除性能

启动过程中,进、出水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度及去除效果见图 2。刚开始, $\text{NH}_4^+-\text{N}$  进水为 107.72 mg/L,出水为 104.77 mg/L,去除率仅为 2.74%。这是因为,此时的反应器处于运行初期,硝化菌生物量少,增殖速度较慢,尚未发生硝化反应,同时,接种污泥还未适应高氨氮水质,硝化菌活性受到抑制。随着时间的推移,硝化菌逐渐适应原水水质,并缓慢增长,表现为系统运行 5 d 后, $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除率逐渐升高。第 7 d 时,由于进水流量增大导致氨氮负荷增加,同时,尚未牢固附着于填料表面的生物膜被冲刷下来,导致生物量减少<sup>[19]</sup>, $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除率有所下降。第 8~25 d,进水流量从 2.1L/h 逐渐增加至 7.1L/h,出水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度从 102.99 mg/L 降至 36.17 mg/L,去除率从 8.17% 升高至 62.74%,说明在这段时间内,硝化菌生长良好并成为优势菌种,硝化效果逐渐上升。硝化菌对温度变化很敏感,低温条件对硝化菌活性影响较大,导致硝化效果差<sup>[17,20]</sup>,系统运行第 25 d,温度突然从 14.3°C 下降至 11.2°C,出水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  为 49.77mg/L,去除率下降至 48.42%。第 28 d 后去除率逐升高并最终稳定



在 65% ,此时可认为挂膜成功。

### 2.2 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 和 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 积累率的变化情况

启动过程中,在进水  $\text{NO}_2^--\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$  平均浓度分别为 0.24 mg/L 和 1.98 mg/L 的情况下,出水  $\text{NO}_2^--\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度及其积累率的变化见图 3。第 1 d,就出现了  $\text{NO}_2^--\text{N}$  的积累,积累率为 87.55%,而出水  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度较小,原因可能是运行初期,硝化菌生物量少,且进水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度较高,使得氨氧化菌活性较强,而亚硝酸盐氧化菌活性受到抑制,引起  $\text{NO}_2^--\text{N}$  的积累,使得  $\text{NO}_2^--\text{N}$  积累率较高。随着时间的推移,硝化菌在填料上附着生长,活性增强,出水  $\text{NO}_2^--\text{N}$  越来越小,积累率最终稳定在 2%;与此同时,出水  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度逐渐增大,第 25 d 达到了 60.23mg/L,积累率为 97.86%;第 26~30 d,出水  $\text{NO}_2^--\text{N}$  和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  均降低,积累率也下降,这是由于环境温度突然降低,抑制了硝化菌活性,第 31 d 后出水  $\text{NO}_3^--\text{N}$  又慢慢增大,稳定在 53.56mg/L 左右。分析认为,低温虽然降低了硝化菌的增长速率,但仍能在填料上附着生长<sup>[21]</sup>,反应器中的硝化菌逐渐适应寒冷的环境。综上所述,即使是低温季节,该工艺在对高氨氮废水仍表现出良好的抗低温冲击能力,完成硝化过程,为脱氮做好前期准备。

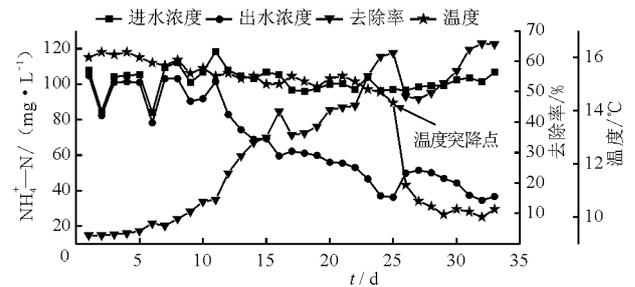


图 2 启动过程中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除效果

### 2.3 对 COD 的去除性能

启动过程中,进、出水 COD 浓度及去除效果见图 4。在进水 COD 平均为 60 mg/L 的运行条件下,

第 1 d 出水 COD 为 15.23 mg/L,去除率为 74.05%,这是因为活性生物填料比表面积大,通过机械截流和污泥的物理吸附作用对污水中的 COD 进行去除。

图 3 启动过程中  $\text{NO}_2^--\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$  积累的变化

第2 d COD 的去除率下降至 27.57%,分析原因主要是悬浮在滤料表面的活性污泥附着强度不够,且污泥吸附达到饱和。第3~10 d,随着时间的推移,出水 COD 浓度从 45.33 mg/L 降至 14.73 mg/L,去除率从 28.29% 升高至 76.7%,原因是好氧异养菌逐渐适应水质并开始大量繁殖,增长速率达到最大。第11~25 d,由于进水 COD 的限制,导致好氧异养菌经过快速生长后达到稳定期,增长速率减慢,出水 COD 浓度从 13.58 mg/L 降至 6.66 mg/L,去除率从 79.21% 缓慢升高为 87.3%。第25 d,虽然温度下降,但 COD 的去除率仍然稳定,这是因为以去除有机物为主的异养菌世代周期短、生长繁殖速度快,且生物膜已经成熟,对温度变化的适应性增强,能在较短时间适应低温并正常生长代谢。

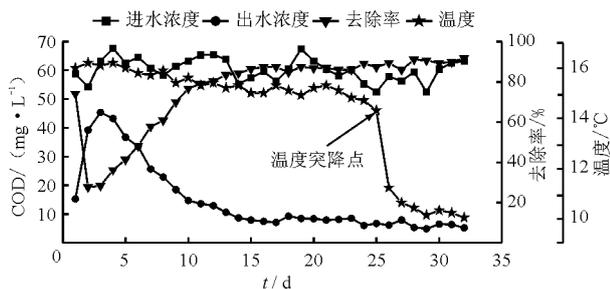


图4 启动过程中 COD 的去除规律

## 2.4 生物膜的生长特征

生物膜由微生物及胞外聚合物组成<sup>[22]</sup>。本文试验中填料上不同阶段生物膜的生长特征见图5。第1~5 d,由于活性生物填料表面有一定阻力,水流和气泡有一定的剪切力,污泥很难在其表面固定附着,使其污泥浓度比本体中浓度高,填料表面以游离细菌为主,微生物的活动较活跃,但肉眼观察不到生物膜;第6~10 d,可以看到填料表面上逐渐附着一层薄薄的黏性物质,颜色变为浅褐色,这是由于初期好氧异养菌在有机物提供养分的情况下,大量增殖,粗糙的填料表面为好氧异养菌的生长提供附着点及栖息空间,同时较大的孔隙率提高了传质效率,便于生物膜的形成;第11~30 d,随着时间的推移,好氧异养菌生物膜的形成为自养硝化菌的繁殖提供载体,自养硝化菌附着在含好氧异养菌生物膜的填料上并快速生长,其后形成黄褐色的生物膜,构成生物膜的菌胶团培育成熟且“聚居”在整个填料上。从 BAF 每天的出水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度随着运行时间而逐渐升高(图3(b))可以看出,这是一层具有硝化作用的生物膜。通过镜检发现,生物膜上有大量指示性生物。这与袁杰等<sup>[23]</sup>在生物砂滤网工艺挂膜实

验中的现象一致。整个填料床形成了微生物种群丰富、结构完整的生物膜系统,表明启动成功。

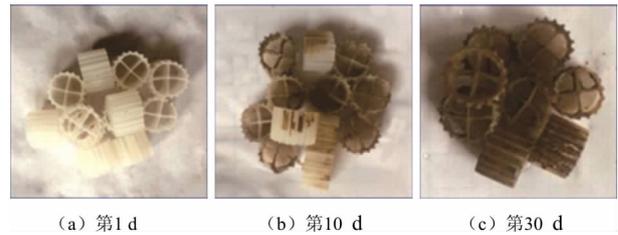


图5 填料上生物膜的生长特征

## 3 结论

(1) 低温下采用人工配水,通过接种挂膜法与自然挂膜法相结合的方式,运行 25 d 后,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 COD 实现较高去除,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  得到较高的积累,具有良好的硝化性能,表明 BAF 成功启动。

(2) 启动过程中,低浓度有机物废水使好氧异养菌在生物填料上快速附着,为自养硝化菌提供载体;同时高浓度氨氮为硝化菌提供底物基质,促进生物膜的形成,使得填料表面由浅褐色黏性薄膜变为较厚的黄褐色生物膜。

## 参考文献:

- [1] 郑林雪,李军,胡家玮,等. 同步硝化反硝化系统中反硝化细菌多样性研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(1): 116-121.
- [2] 何势,顾超超,魏欣,等. 低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响[J]. 环境科学, 2016, 37(4): 1485-1491.
- [3] Shore J L, M'Coy W S, Gunsch C K, et al. Application of a moving bed biofilm reactor for tertiary ammonia treatment in high temperature industrial wastewater [J]. Bioresource Technology, 2012, 112(5): 51-60.
- [4] 董怡君,王淑莹,汪传新,等. 亚硝酸盐氧化菌(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)的富集培养与其污泥特性分析[J]. 中国环境科学, 2013, 33(11): 1978-1983.
- [5] 张晨,李军,刘伟岩,等. 低有机物含量下曝气生物滤池的挂膜启动[J]. 中国给水排水, 2009, 25(13): 10-12.
- [6] Feng Y, Yu Y, Duan Q, et al. The characteristic research of ammonium removal in grain-slag biological aerated filter (BAF) [J]. Desalination, 2010, 263(1-3): 146-150.
- [7] 杨庆,周桐,刘秀红,等. 常温下接种回流污泥实现 BAF 一体化自养脱氮工艺[J]. 化工学报, 2017, 68(5): 2081-2088.
- [8] 杨婧雯,江霜英,刘昭丽. 上向流曝气生物滤池的低温启动试验[J]. 水处理技术, 2011, 37(1): 112-115.
- [9] 李文文,李金城,施钦,等. 接种-连续进水低温启动曝

- 气生物滤池试验[J]. 桂林理工大学学报, 2014, 34(3): 568 - 572.
- [10] 王建华, 陈永志, 彭永臻. 硝化型曝气生物滤池的挂膜与启动[J]. 环境工程学报, 2010, 4(10): 2199 - 2203.
- [11] Mann A T, Mendoza-Espinosa L, Stephenson T. Performance of floating and sunken media biological aerated filters under unsteady state conditions[J]. Water Research, 1999, 33(4): 1108 - 1113.
- [12] Fatihah S F, Donnelly T D. Effect of media volume on mixing of biological aerated filters[J]. Journal of Environmental Engineering & Science, 2008, 7(3): 229 - 236.
- [13] 张森, 彭永臻, 王聪, 等. 三段式硝化型生物接触氧化反应器的启动及特性[J]. 中国环境科学, 2015, 35(1): 101 - 109.
- [14] 余彬, 张杰, 程家迪, 等. 不同填料对曝气生物滤池除污效果的影响[J]. 中国给水排水, 2012, 28(9): 9 - 12 + 16.
- [15] APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater[M]. Washington DC: American Public Health Association, 2007.
- [16] 孙洪伟, 杨庆, 董国日, 等. 游离氨抑制协同过程控制实现渗滤液短程硝化[J]. 中国科学: 化学, 2010, 40(8): 1156 - 1162.
- [17] 朱兆亮, 曹相生, 孟雪征, 等. 上向流好气滤池冬季挂膜启动及运行参数探讨[J]. 环境工程学报, 2009, 3(2): 215 - 218.
- [18] 张杰, 曹相生, 孟雪征, 等. 好气滤池3种挂膜方法的实验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(10): 1216 - 1219.
- [19] 王洪禧, 路文芳, 刘俊良, 等. 接触氧化/BAF工艺处理城市生活污水的挂膜研究[J]. 中国给水排水, 2008, 24(21): 70 - 73.
- [20] Randall C W, Buth D. Nitrite Build - Up in Activated Sludge Resulting from Temperature Effects[J]. Journal, 1984, 56(9): 1039 - 1044.
- [21] 谢曙光, 张晓健, 王占生. 曝气生物滤池的低温挂膜研究[J]. 中国给水排水, 2003, 19(13): 58 - 59.
- [22] 俞汉青, 顾国维. 生物膜反应器挂膜方法的试验研究[J]. 中国给水排水, 1992, 8(3): 13 - 17 + 2 - 3.
- [23] 袁杰, 金腊华, 蔡小琼. 生物砂滤网工艺挂膜实验研究[J]. 生态科学, 2007, 26(6): 531 - 535.

(上接第68页)

- [4] 乔世珊, 田玉龙. 我国不同区域不同发展阶段节水型社会建设的特点[J]. 中国水利, 2005(13): 87 - 89.
- [5] 刘建林, 解建仓, 马斌, 等. 基于AHP - MF模型的用户群节水指标体系研究[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(2): 91 - 96.
- [6] 陈莹, 赵勇, 刘昌明. 节水型社会评价研究[J]. 资源科学, 2004, 26(6): 83 - 89.
- [7] 崔东文, 金波. 基于WDO - PP模型的文山州近10年水资源承载力评价[J]. 水利经济, 2016, 34(6): 43 - 49 + 81.
- [8] 崔东文. 鸡群优化算法投影寻踪旱灾评估模型[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(2): 16 - 23 + 41.
- [9] 崔东文. 文山州近10年水资源利用效率评价SLC - PP模型及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 129 - 136.
- [10] 崔东文. 正弦余弦算法 - 投影寻踪水污染物总量分配模型[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 75 - 81 + 97.
- [11] 龚安, 吕倩, 胡长军, 等. 基于混沌万有引力搜索算法的SVM参数优化及应用[J]. 计算机科学, 2015, 42(4): 240 - 243.
- [12] 王奇琪, 孙根云, 王振杰, 等. 基于斥力的引力搜索算法[J]. 计算机科学, 2015, 42(9): 240 - 245.
- [13] Mittal H, Pal R, Kulhari A, et al. Chaotic Kbest gravitational search algorithm (CKGSA)[C]// International Conference on Contemporary Computing. IEEE, 2017: 1 - 6.
- [14] 饶均辉. GSA - PP模型在区域水资源承载力评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(6): 95 - 100 + 107.
- [15] 刘勇, 马良. 非线性极大极小问题的混沌万有引力搜索算法求解[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(1): 47 - 48 + 56.
- [16] 雷宏军, 刘鑫, 潘红卫, 等. 基于ARPPC模型的灌区水资源可持续利用能力评价[J]. 水力发电学报, 2014, 33(4): 76 - 84.