

# 温度对 ASBBR 处理榨菜废水及微生物种群的影响

温宇惠, 林子源, 王佳乐, 张永胜, 何磊, 周健  
(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:** 以超高盐(以 NaCl 计为 70 g/L)榨菜废水为研究对象,通过中试考察温度对 ASBBR 反应器处理效能及微生物种群的影响。结果表明,季节温度变化对系统去除 COD 的效能影响显著。当负荷为  $3 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  时,反应器在夏季( $26 \sim 39^\circ\text{C}$ )、秋季( $13 \sim 25^\circ\text{C}$ )、冬季( $3 \sim 12^\circ\text{C}$ )的 COD 平均去除率分别为 89.43%、78.51%、66.35%。PCR-DGGE 分析结果表明,超高盐榨菜废水处理系统的微生物种群与接种污泥相比发生了显著变化;温度对系统微生物种群结构及优势微生物种群影响显著,微生物种群丰富度呈现出夏季>秋季>冬季的规律,夏季与秋季、冬季的微生物种群相似性分别为 49.6%、45.2%;根据 16S rDNA V3 区测序结果,系统优势微生物种群主要为厌氧嗜盐菌,温度对有机物降解优势微生物功能菌属影响显著,夏季系统中主要有 *Marinobacterium*、*Lutaonella*、*Cellulophaga*、*Arcobacter*、*Methanobacterium*, 冬季系统主要有 *Marinobacterium*、*Arcobacter*、*Methanobacterium*。

**关键词:** 超高盐榨菜废水; ASBBR; 中试; 微生物种群; 温度

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2018)09-0020-06

## Effect of Temperature on Performance and Microbial Population of Pilot-scale ASBBR Treating Hypersaline Mustard Tuber Wastewater

WEN Yu-hui, LIN Zi-yuan, WANG Jia-le, ZHANG Yong-sheng, HE Lei,  
ZHOU Jian

(Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>,  
Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** Using 70 g/L NaCl pickle mustard wastewater as influent, pilot-scale anaerobic sequencing batch biofilm reactor (ASBBR) was conducted over 300 days to study the effect of seasonal change on performance and microbial community structure. Results showed that the temperature variation had a significant influence on the COD removal efficiency. When the organic loading rate was  $3 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ , the COD removal efficiencies of ASBBR were 89.43%, 78.51% and 66.35% respectively at summer, autumn and winter. The results of PCR-DGGE showed that the microbial population of hypersaline wastewater biological treatment system changed remarkably from seed sludge, and the temperature had a huge impact on microbial composition. The microbial population richness decreased with the seasonal change from summer to winter, dominant bacterium showed seasonal differences. The Dice coefficients of summer with autumn and winter were 49.6% and 45.2%. The results of 16S rDNA V3 region sequen-

cing technology indicated that the anaerobic halophilic bacteria were the dominant microbial populations in the saline wastewater treatment system. In summer, the predominant pollutant-degrading halophilic bacteria belonged to *Marinobacterium*, *Lutaonella*, *Cellulophaga*, *Arcobacter* and *Methanobacterium*. In winter, the predominant species belonged to *Marinobacterium*, *Arcobacter* and *Methanobacterium*.

**Key words:** hypersaline mustard tuber wastewater; ASBBR; pilot-scale test; microbial population; temperature

榨菜生产过程中会产生大量超高盐度的高浓度有机废水,若未经有效处理就排放,将对水环境造成严重威胁<sup>[1]</sup>。由于榨菜废水中含有大量的无机盐会对常规微生物产生抑制<sup>[2]</sup>,因而常规生物工艺无法实现高效的处理,若采用除盐预处理后再进行生物处理,则存在投资和运行成本高、运行管理复杂的问题<sup>[3]</sup>。

采用厌氧生物工艺处理高浓度有机废水,具有处理效能高、运行成本低、可资源化利用等优势,而嗜盐菌的发现也为超高盐度废水的厌氧生物处理提供了可能。Rovirosa 等利用厌氧固定床反应器处理盐度为 15 g/L(以 NaCl 计,下同)的综合废水,在温度为 26.7 °C、HRT 为 24 h 时,COD 去除率达到 72%<sup>[4]</sup>;Mendez 等利用厌氧滤池处理盐度为 13 g/L 的工业废水,在负荷为 9 和 24 kgCOD/(m<sup>3</sup>·d)的条件下,系统对 COD 的去除率分别为 73% 和 64%<sup>[5]</sup>;Riffat 等考察了分别接种嗜盐菌和混合菌的厌氧生物滤池对盐度为 35 g/L 的含盐废水的处理效能,在温度为 30 °C、负荷为 6.0 kgCOD/(m<sup>3</sup>·d)时,接种嗜盐菌的反应器可保持稳定去除效能,而接种混合菌的反应器处理效能下降<sup>[6]</sup>,但目前对于超高盐度(70 g/L)的高浓度有机废水处理鲜有报道。

笔者以超高盐榨菜腌制废水为研究对象,采用中试规模厌氧序批式生物膜反应器(ASBBR),考察季节温度变化对系统的处理效能及微生物种群的影响,并利用 PCR-DGGE 及 16S rDNA V3 区测序技术,探究不同季节系统的微生物种群变化及优势功能菌属,为超高盐榨菜废水的处理提供技术支持。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验装置

试验装置如图 1 所示。ASBBR 反应器有效容积为 5.88 m<sup>3</sup>,长×宽×高为 2.1 m×1.4 m×2.0 m,反应器内设球形组合填料,由上部进水,于底部出水及排泥,顶部设有气体排出口及收集设施。

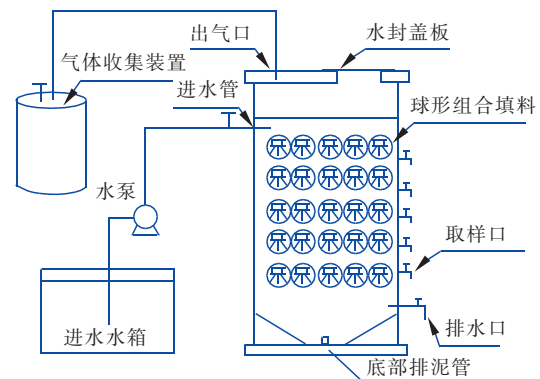


图 1 试验装置

Fig.1 Schematic diagram of pilot-scale ASBBR

### 1.2 试验水质

试验用水是由某榨菜厂的榨菜腌制废水和综合废水配制而成,试验水质见表 1。

表 1 试验水质

Tab.1 Quality of wastewater in experiment

项目	盐度/ (g·L <sup>-1</sup> )	pH 值	COD/ (mg·L <sup>-1</sup> )	BOD <sub>5</sub> / (mg·L <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/ (mg·L <sup>-1</sup> )
范围	65~75	5~6	7 950~8 550	4 000~5 000	36~46
均值	70	5.5	8 250	4 500	41

### 1.3 试验方法

采用阶段试验,考察季节温度变化对 ASBBR 处理效能和微生物种群的影响。在夏季(25~38 °C)、春秋季节(13~25 °C)和冬季(<13 °C)时,控制反应器有机负荷为 3 kgCOD/(m<sup>3</sup>·d),测试 COD、VFA、碱度、pH 值等水质指标;同时,采集不同季节系统生物样品进行 PCR-DGGE 及 16S rDNA V3 区测序分析,探究不同温度下系统微生物种群的变化规律。

## 2 结果及讨论

### 2.1 温度对 ASBBR 处理效能的影响

季节温度变化对 ASBBR 系统去除效能的影响如图 2 所示。反应器在夏季启动,随着运行时间的增加,COD 去除率逐渐提高。反应器运行 53 d 后,COD 的去除率稳定达到 80% 以上,成功构建出超高盐榨菜废水 ASBBR 处理系统。

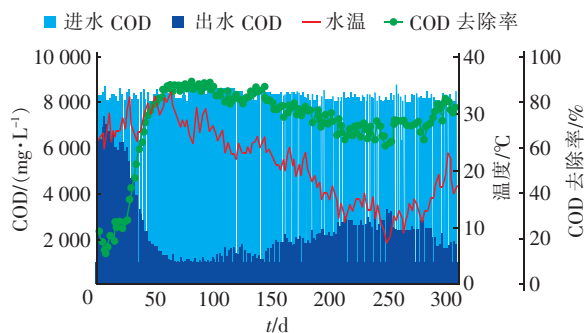


图2 ASBBR 反应器进、出水 COD 的逐日变化

Fig.2 COD change of bioreactor in different seasons

由图2可知,温度对反应器去除有机物的效能影响显著。随着温度降低,反应器对COD的去除率下降。ASBBR反应器在夏季、春秋季节和冬季的出水平均COD浓度分别为933、1 800和2 776 mg/L,平均去除率分别为89.43%、78.51%和66.35%。分析认为,由于温度可以通过影响细菌体内酶活性而控制其增殖代谢速率,是影响微生物活性的重要因素<sup>[7]</sup>,温度越高,微生物繁殖速率越快,对有机物的降解能力越强,嗜盐菌表现出相同的特征。根据系统微生物种群研究结果可知,在夏季系统中厌氧嗜盐菌为优势种群,微生物活性和种群多样性均较高,故系统在夏季时表现出较高的处理效能;随着秋、冬季温度的下降,系统中的微生物种群多样性降低,系统处理效能下降;随着春季气温回暖,系统的处理效能得以恢复。试验期间反应器VFA、pH值、碱度(以 $\text{CaCO}_3$ 计)的逐日变化情况见图3。

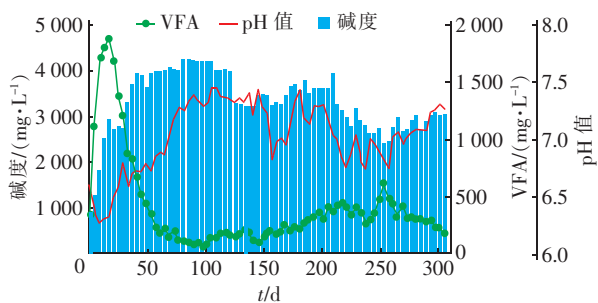


图3 ASBBR 反应器出水 VFA、pH 值、碱度的逐日变化

Fig.3 Change of VFA, pH and alkalinity of bioreactor in different seasons

由图3可知,在夏季、春秋季节和冬季,反应器中VFA分别为76~102、92~190、275~429 mg/L, pH值分别为7.43~7.49、7.32~7.55、6.74~7.08,碱度分别为4 090~4 250、3 280~3 670、2 650~3 070 mg/L。VFA、pH值、碱度是反映厌氧反应器运行状

况的重要参数,试验结果表明,在夏秋季反应器的pH值皆在产甲烷菌适宜的pH值范围(6.8~7.5)之内<sup>[8]</sup>,且其碱度稳定在2 600 mg/L以上,可保证反应器具有一定的缓冲能力;同时,反应器内部的VFA低于250 mg/L,表明未发生VFA积累,产甲烷菌的生长环境较适宜,有利于反应器保持良好的处理效能。相比较而言,在冬季低温条件下,厌氧反应器碱度较低,出水VFA较高,说明低温影响了产甲烷菌的活性,使系统处理效率降低。

## 2.2 温度对ASBBR系统微生物种群的影响

对不同季节温度下反应器中的生物样品进行PCR-DGGE测试,结果见图4,泳道0~3分别代表接种污泥、夏季、春秋季节和冬季的生物样品,并采用BIO-RAD QUANTITY ONE 4.6.2软件对DGGE图谱进行统计分析,量化各泳道间的相似程度,讨论不同季节温度条件下,系统中微生物群落的相关性。

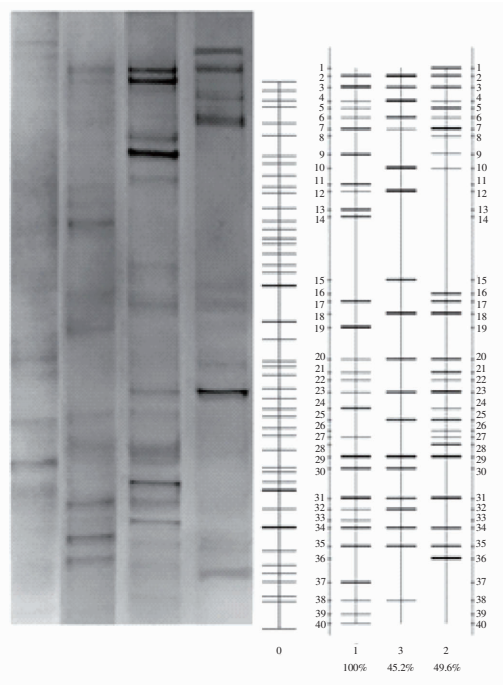


图4 不同季节温度下生物样品的DGGE图谱

Fig.4 DGGE profiles of 16S rDNA fragments from ASBBR under different seasons

由图4可知,与代表接种污泥的泳道0相比,代表夏季、春秋季节、冬季的泳道1、2、3中的条带数显著减少,并伴随新的条带出现,且各条带的明暗程度发生了较大变化,表明构建成功的超高盐榨菜废水ASBBR处理系统中微生物种群结构发生了显著改变。分析认为,在70 g/L盐度环境中,系统中的微



生物种群主要是嗜盐厌氧微生物,接种污泥中多数微生物因无法适应高盐度而逐渐被淘汰,榨菜废水中携带的嗜盐微生物作为系统新的接种种源,则在高盐环境中逐渐竞争成为优势种群。

泳道 1、2、3 的条带数目分别为 30、27、19 条,夏季条带数量多,微生物种群丰富,处理能力强;随着温度下降,条带数量减少,表明系统中微生物种群的数量减少,处理能力下降;冬季温度最低,条带数最少,系统中的微生物种类和数量最少,其处理效果最差。并且,夏季和秋季的生物样品中微生物种群结构相似性为 49.6%,与冬季的相似性为 45.2%,秋

季和冬季细菌种群结构相似性为 53.2%。分析认为,ASBBR 反应器中微生物种群在不同季节发生了较大变化,且由夏季变为秋季时对微生物种群的影响大于秋冬季节演替的。

将各个季节 ASBBR 反应器生物样品 PCR - DGGE 图谱中的特异性条带 Band 2、Band 9、Band 10、Band 13、Band 14、Band 18、Band 19、Band 23、Band 31 进行了割胶回收、扩增、克隆和 V3 区测序,克隆所测序列长度大约为 195 bp,通过 NCBI 进行 BLAST 查找比对,选取与所测序列同源性较高的微生物种属进行分析,结果见表 2。

表 2 不同季节 ASBBR 生物样品 16S rDNA V3 区测序结果

Tab.2 Sequences of DGGE fragments from ASBBR in different seasons

项 目	参考序列	物种名	同源性/%	菌种类型	丰度随温度降低变化	种群分类(门水平)	有机物去除途径
Band 13	NR_044451.1	<i>Lutaonella thermophilus</i>	100	嗜盐菌	降低	<i>Bacteroidetes</i>	水解酸化
Band 19	NR_044549.1	<i>Arcobacter mytili</i>	100	嗜盐菌	降低	<i>Proteobacteria</i>	兼性异养菌
Band 23	NR_025748.1	<i>Maribacter sedimenticola</i>	99	嗜盐菌	增加	<i>Bacteroidetes</i>	异养菌
Band 31	NR_042895.1	<i>Methanobacterium aarhusense</i>	99	嗜盐菌	降低	<i>Euryarchaeota</i>	产甲烷
Band 2	NR_044016.1	<i>Marinobacterium litorale</i>	97	嗜盐菌	增加	<i>Proteobacteria</i>	兼性厌氧异养菌
Band 10	NR_025906.1	<i>Arcobacter nitrofigilis</i>	96	嗜盐菌	增加	<i>Proteobacteria</i>	反硝化
Band 14	NR_044502.1	<i>Cellulophaga tyrosinoxydans</i>	96	嗜盐菌	降低	<i>Bacteroidetes</i>	降解纤维素
Band 18	NR_024802.1	<i>Sulfurovum lithotrophicum</i>	95	嗜盐菌	增加	<i>Proteobacteria</i>	自养脱硫反硝化
Band 9	NR_028910.1	<i>Pelospira glutarica</i>	93	耐盐菌	降低	<i>Firmicutes</i>	厌氧发酵菌

由图 4 可知,随着季节温度降低,由夏季更替到冬季,所代表种群丰度变高的条带有 Band 2、Band 10、Band 18、Band 23。Band 2 所代表的细菌与 *Marinobacterium litorale* 菌的同源性最高,在 3 个季节均可检测到该菌属,且冬季的丰度最高。*Marinobacterium litorale* 为兼性厌氧异养菌,在 8 ~ 42 ℃、1% ~ 7.5% 盐度条件下均能生长<sup>[9]</sup>。Band 10 所代表的菌属与 *Arcobacter nitrofigilis* 菌同源,在夏季没有检测到,秋季时占据优势,冬季丰度最高。*Arcobacter nitrofigilis* 菌可在 10 ~ 37 ℃、0.5% ~ 7.5% 盐度环境中生存,具有固氮能力,可将硝态氮转化为亚硝态氮<sup>[10]</sup>。由于进水中含有硝态氮以及 ASBBR 中存在缺氧区域,为反硝化菌去除有机物提供了适宜的环境。Band 18 所代表的菌群与 *Sulfurovum lithotrophicum* 嗜盐菌的同源性仅为 95%,故此处不做讨论。Band 23 与 *Maribacter sedimenticola* 嗜盐菌的同源性最高,在三个季节均检测到,但秋季时丰度最高,夏、冬季的丰度较低。*Maribacter sedimenticola* 为异养菌,可在 4 ~ 33 ℃、10 ~ 60 g/L 盐度环境中生

存,最适合生存温度为 22 ~ 24 ℃,符合 PCR - DGGE 检测结果<sup>[11]</sup>。推测 Band 2、Band 10 和 Band 23 所代表的细菌参与了超高盐废水生物处理系统中有机物的降解。

随着温度降低,Band 9、Band 13、Band 14、Band 19、Band 31 所代表种群丰度变低甚至消失。Band 9 所代表的细菌在夏季时丰度最高,随温度下降丰度降低,冬季时完全消失(同源性低于 95%,此处不做赘述)。Band 13、Band 14 和 Band 19 所代表的菌种分别与 *Lutaonella thermophilus*、*Cellulophaga tyrosinoxydans* 和 *Arcobacter mytili* 嗜盐菌同源性最高,在本系统中仅在夏天出现,秋冬季均未检测到。*Lutaonella thermophilus* 是一株中度嗜热菌,在 25 ~ 55 ℃、20 ~ 60 g/L 盐度条件下生存,具有水解酸化有机物的能力<sup>[12]</sup>。*Cellulophaga tyrosinoxydans* 具有分解纤维素和反硝化能力,可适应 15 ~ 35 ℃、10 ~ 70 g/L 盐度环境<sup>[13]</sup>。*Arcobacter mytili* 为兼性异养菌,好氧及微氧条件下可在 18 ~ 37 ℃环境中生长,但在厌氧条件下仅能适应 30 ℃以上的环境,并可在 20

~40 g/L 盐度下生长<sup>[14]</sup>。本研究在 70 g/L 盐度榨菜废水处理系统中发现了 Band 19 所代表的菌种,分析认为,该细菌在实际污水处理系统中可适应更广的盐度范围。Band 31 所代表的菌种与 *Methanobacterium aarhusense* 嗜盐菌的同源性最高,在不同季节均为优势菌种,但冬季时的丰度较低。*Methanobacterium aarhusense* 严格厌氧,在 5~45℃、高盐度条件下生存,低温条件下微生物产甲烷功能未受抑制,但生长速率缓慢<sup>[15]</sup>。由图 3 可知冬季存在 VFA 积累,说明产甲烷菌活性降低,与 PCR-DGGE 测试结果相符。分析认为,Band 13、Band 14、Band 19 和 Band 31 所代表的细菌参与了有机物的分解。

16S rDNA V3 区测序结果显示,在不同温度下,都存在具有降解有机物能力的优势菌种。夏季系统中的有机物降解功能菌属主要有 *Marinobacterium*、*Lutaonella*、*Cellulophaga*、*Arcobacter*、*Methanobacterium*,冬季系统中的有机物降解功能菌属主要有 *Marinobacterium*、*Arcobacter*、*Methanobacterium*。对比上述结果可以发现,温度对于 ASBBR 反应器微生物种群结构影响较大,在高温环境下优势菌群多样性高,利于提高反应器的处理效能。夏季 16S rDNA V3 区检测出的菌种包含变形菌门(*Proteobacteria*)、厚壁菌门(*Firmicutes*)、拟杆菌门(*Bacteroidetes*)菌种;而秋、冬季节的优势菌种较为单一,多属于变形菌门(*Marinobacterium litorale*、*Arcobacter nitrofigilis*、*Sulfurovum lithotrophicum*),分析认为,变形菌门类细菌抗温度冲击能力较强。薛俊增等考察了洋山港海域微生物种类及丰度的季节变化,发现该海域微生物总数整体情况为夏季>秋季>冬季,夏季优势类群为变形菌门、拟杆菌门和蓝藻门,秋、冬季优势类群均属于变形菌门。

综上所述,系统检测出的优势微生物菌群均具有较广的耐盐范围,ASBBR 系统的温度和 pH 值对其是适宜的。因此,认为本系统成功富集出以厌氧嗜盐菌为优势种群的有机物降解微生物功能菌属,在不同季节均可有效去除榨菜废水中的有机物。

### 3 结论

① 温度对 ASBBR 处理超高盐榨菜废水的效能影响显著。当负荷为 3 kgCOD/(m<sup>3</sup>·d)时,反应器在夏季、秋季、冬季对 COD 的去除率分别为 89.43%、78.51% 和 66.35%。

② 温度对超高盐榨菜废水处理系统的微生物

种群结构影响显著,系统微生物种群丰富度呈现出夏季>秋季>冬季的规律,优势微生物种群随季节而不同,夏季与秋季、冬季的微生物种群相似性分别为 49.6% 和 45.2%。

③ 16S rDNA V3 区测序结果表明,系统优势微生物种群主要为厌氧嗜盐菌,温度对系统有机物降解优势微生物种群影响显著,夏季的优势功能菌属主要有 *Marinobacterium*、*Lutaonella*、*Cellulophaga*、*Arcobacter*、*Methanobacterium*,多为变形菌门、厚壁菌门、拟杆菌门;冬季的优势功能菌属主要有 *Marinobacterium*、*Arcobacter*、*Methanobacterium*,多为变形菌门菌种。

### 参考文献:

- [1] Lefebvre O, Moletta R. Treatment of organic pollution in industrial saline wastewater: a literature review [J]. Water Res, 2006, 40(20): 3671-3682.
- [2] Zhao Y, Park H D, Park J H, et al. Effect of different salinity adaptation on the performance and microbial community in a sequencing batch reactor [J]. Bioresour Technol, 2016, 216: 808-816.
- [3] Mccutcheon J R, McGinnis R L, Elimelech M. A novel ammonia-carbon dioxide forward (direct) osmosis desalination process [J]. Desalination, 2005, 174(1): 1-11.
- [4] Rovirosa N, Sánchez E, Cruz M, et al. Coliform concentration reduction and related performance evaluation of a down-flow anaerobic fixed bed reactor treating low-strength saline wastewater [J]. Bioresour Technol, 2004, 94(2): 119-127.
- [5] Mendez R, Lema J M, Soto M. Treatment of seafood processing wastewaters in mesophilic and thermophilic anaerobic filters [J]. Water Environ Res, 1995, 67(1): 33-45.
- [6] Riffat R, Krongthamchat K. Anaerobic treatment of high-saline wastewater using halophilic methanogens in laboratory-scale anaerobic filters [J]. Water Environ Res, 2007, 79(2): 191-198.
- [7] Petropoulos E, Dolfing J, Davenport R J, et al. Developing cold-adapted biomass for the anaerobic treatment of domestic wastewater at low temperatures (4, 8 and 15℃) with inocula from cold environments [J]. Water Res, 2017, 112: 100-109.
- [8] Dague R R, Banik G C, Ellis T G. Anaerobic sequencing batch reactor treatment of dilute wastewater at psychro-

- philic temperatures [J]. Water Environ Res, 1998, 70 (2): 155 – 160.
- [9] Kim H, Choo Y J, Song J, et al. *Marinobacterium litorale* sp. nov. in the order *Oceanospirillales* [J]. Int J Syst Evol Microbiol, 2007, 57(7): 1659 – 1662.
- [10] Pati A, Gronow S, Lapidus A, et al. Complete genome sequence of *Arcobacter nitrofigilis* type strain (CI) [J]. Standards in Genomic Sciences, 2010, 2(3): 300 – 308.
- [11] Nedashkovskaya O I, Kim S B, Han S K, et al. *Maribacter* gen. nov., a new member of the family *Flavobacteriaceae*, isolated from marine habitats, containing the species *Maribacter sedimenticola* sp. nov., *Maribacter aquivivus* sp. nov., *Maribacter orientalis* sp. nov. and *Maribacter ulvicola* sp. nov. [J]. Int J Syst Evol Microbiol, 2004, 54(4): 1017 – 1023.
- [12] Arun A B, Chen W M, Lai W A, et al. *Lutaonella thermophila* gen. nov., sp. nov., a moderately thermophilic member of the family *Flavobacteriaceae* isolated from a coastal hot spring [J]. Int J Syst Evol Microbiol, 2009, 59(8): 2069 – 2073.
- [13] Kahng H Y, Chung B S, Lee D H, et al. *Cellulophaga tyrosinoydans* sp. nov., a tyrosinase-producing bacterium isolated from seawater [J]. Int J Syst Evol Microbiol, 2009, 59(4): 654 – 657.
- [14] Collado L, Cleenwerck I, Van T S, et al. *Arcobacter mytili* sp. nov., an indoxyl acetate-hydrolysis-negative bacterium isolated from mussels [J]. Int J Syst Evol Microbiol, 2009, 59(6): 1391 – 1396.
- [15] Shlimon A G, Friedrich M W, Niemann H, et al. *Methanobacterium aarhusense* sp. nov., a novel methanogen isolated from a marine sediment (Aarhus Bay, Denmark) [J]. Int J Syst Evol Microbiol, 2004, 54(3): 759 – 763.



作者简介:温宇惠(1993 – ), 女, 山西太原人, 硕士研究生, 主要研究方向为高盐废水处理。

E – mail: wenyhyh@foxmail. com

收稿日期: 2017 – 12 – 20

(上接第 19 页)

98.

Dai Qianjin, Li Yi, Fang Xianjin. Experimental study on anaerobic digestion of residual sludge in municipal wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(23): 95 – 98 (in Chinese).

- [4] 戴前进, 李艺, 方先金. 污泥厌氧消化工艺设计与运行中值得探讨的问题 [J]. 中国给水排水, 2007, 23(10): 18 – 20.

Dai Qianjin, Li Yi, Fang Xianjin. Discussion on design and operation of sludge anaerobic digestion process [J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(10): 18 – 20 (in Chinese).

- [5] 刘小燕, 宁海文, 杜继稳, 等. 近 56 年来西安市气温突变与致灾效应 [J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(11): 94 – 99.

Liu Xiaoyan, Ning Haiwen, Du Jiwen, et al. Temperature abrupt change and disaster effects in Xi'an City in recent 56 years [J]. Journal of Arid Land Resources and Envi-

ronment, 2009, 23(11): 94 – 99 (in Chinese).



作者简介:王社平(1963 – ), 男, 陕西韩城人, 博士, 正高级工程师, 享受国务院政府特殊津贴专家, 主要从事城镇污水处理及再生利用技术研究。

E – mail: wsp901@vip. sina. com

收稿日期: 2016 – 08 – 20