

ABR 反应器结构对水力特性的影响

胡细全^{1,2}, 刘大银³, 蔡鹤生¹

1. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

2. 黄石高等专科学校环境与化学工程系, 湖北黄石 435002

3. 武汉化工学院环境工程系, 湖北武汉 430073

摘要: ABR 反应器的结构决定了反应器的流态, 从而控制着可能达到的处理效率. 为进行反应器结构优化设计, 首次研究了 ABR 的下、上向流室宽度比、折流板底端距底板距离和折流板折角等结构参数与 ABR 水力特性之间的关系. 厌氧折流板反应器 ABR 的典型结构由一系列相同结构单元串联组成. 反应器的水力特性可通过研究单个单元的水力特性推知. 采用停留时间分布 RTD (residence time distribution) 方法研究了反应器各结构参数的变化对一个 5.25 L 的 ABR 单元清水水力特性的影响. 结果表明: ABR 的死区较小, 远低于其他厌氧生物反应器; 流态接近理想推流式; 下、上向流室宽度比不宜过小, 最佳值为 1:3; 折流板底端距底板距离与死区在本试验所取范围内 (1~5 cm) 成正比关系; 折流板折角以 50° 左右为佳.

关键词: ABR; 结构; 水力特性; 死区.

中图分类号: X143

文章编号: 1000-2383(2004)03-0369-06

收稿日期: 2003-09-29

Influence of Structure on Hydrodynamic Characteristics of Anaerobic Baffled Reactor

HU Xi-quan^{1,2}, LIU Da-yin³, CAI He-sheng¹

1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Department of Environmental and Chemical Engineering, Huangshi Polytechnic College, Huangshi 435002, China

3. Department of Environmental Engineering, Wuhan Institute of Chemical Technology, Wuhan 430073, China

Abstract: To provide guidance for the structure design of anaerobic baffled reactor (ABR), a study has been carried out on the influence of structure parameters such as the ratio of width of downflow chamber to upflow chamber, the distance of baffle to bottom, and the value of the angle of baffle on the hydrodynamic characteristics of the ABR. Anaerobic baffled reactor's typical structure is composed of a series of identical units. The reactor's hydrodynamic characteristics can be deduced from the characteristics of a single ABR unit. This paper presents residence time distribution studies on the influence of structure on a 5.25 L clean ABR unit. The results show that the fraction of dead space is lower compared to other type anaerobic reactors, and the type of flow in the ABR tends towards plug-flow. The data indicate that the optimal value of the ratio of width of downflow chamber to upflow chamber is 1:3; the distance of baffle to bottom and dead space is in direct proportion to the range of this study (1-5 cm); and the optimal value of the angle of baffle is about 50°.

Key words: anaerobic baffled reactor (ABR); structure; hydrodynamic characteristics; dead space.

ABR 反应器是 McCarty 等提出的一种新型高效的废水厌氧处理生物反应器 (Bachmann *et al.*, 1983), 通过反应器内折流板的加入, 将反应器分隔成若干个相对独立的格室, 将产酸相与产甲烷相分离开来, 在单一反应器内实现了多段分相 (SMPA) 的思想, 代表了现代厌氧生物处理发展的方向 (Let-

tinga *et al.*, 1997; 王建龙等, 2000; 赵立军等, 2001). ABR 反应器内的流体动力学特性和混合程度强烈地影响着基质和微生物的接触程度, 控制着物质传输, 因而水力特性是反应器性能的一个重要方面. 反应器的水力流态及其优劣可用容积有效利用率或反应器的死区容积分数 (V_d/V) 及扩散或混合程度(一般以分散数 D/uL 或其倒数 Peclet 准数)来描述. Grobicki and Stuckey (1992) 通过对 ABR 的水力停留时间分布函数的研究, 发现 ABR 的死区远低于其他厌氧生物反应器. 其死区分为水力死区和生物死区, 水力死区随 HRT 的下降和格室数的增多而上升, 生物死区随 HRT 下降而下降. 郭静等 (1997) 研究了运行状态下 HRT 和产气量对 ABR 水力特性的影响, 认为是影响混合效果和死区的重要因素. 但 ABR 结构如折角等对 ABR 水力特性的影响没有研究. 本文重点研究了 ABR 结构对清水水力特性的影响, 以期为反应器结构设计找到依据.

1 实验方法与装置

ABR 是一种多个格室重复结构的反应器, 图 1 为典型的 ABR 结构. 不同的 ABR 格室数不同 (2, 3, 4...), 但每一格室的结构相同, 因此每个格室可看作一个单元, ABR 由若干个相同的单元串联组成. ABR 的水力特性可由研究单个格室得出 (许保玖和龙腾锐, 2000).

不同的研究者使用的 ABR 长、宽、高、格室数等都不同, 为便于研究, 对于格室数不同的 ABR, 均只考虑单个格室; 采用归一化, 以长度为 1 个单位, 根据现有文献, 对其结构参数进行了统计 (表 1, 2).

为使研究具有代表性, 取中间值, 即长: 宽: 高 = 1: 1.5: 3.5.

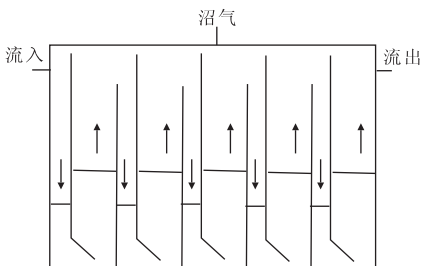


图 1 ABR 的典型结构示意图

Fig. 1 Sketch of typical ABR structure

表 1 ABR 单元宽度分布 (以长为单位 1)

Table 1 Distribution of width of ABR units

宽	<1.0	1.0~1.2	1.2~1.4	1.4~1.6	1.6~1.8	>1.8
分布	1	2	2	4	1	2
参考文献	①	②	③	④	⑤	⑥

①据买文宁等 (2002); ②据 Fox and Venkatasubbiah (1996); 许玉东等 (2002); ③据邱波等 (2000); Uyanik *et al.* (2002); ④据 Setiadi *et al.* (1996); 贺嵩郁等 (2002); 孙剑辉等 (2002); Vossoughi *et al.* (2003); ⑤据 Faisal and Hajime (2001); ⑥据 Ramaraj (1998); 戴友芝等 (2000).

表 2 ABR 单元高度分布 (以长为单位 1)

Table 2 Distribution of height of ABR units

高	<1	1~2	2~3	3~4	4~5	>5
分布	1	1	2	5	1	2
参考文献	①	②	③	④	⑤	⑥

①据买文宁等 (2002); ②据邱波等 (2000); ③据 Fox and Venkatasubbiah (1996); 许玉东等 (2002); ④据 Setiadi *et al.* (1996); Faisal and Hajime (2001); 孙剑辉等 (2002); Uyanik *et al.* (2002); Vossoughi *et al.* (2003); ⑤据戴友芝等 (2000); ⑥据 Ramaraj (1998); 贺嵩郁等 (2002).

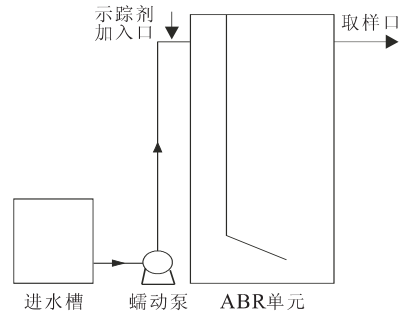


图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Experimental set-up

图 2 为本试验装置示意图. ABR 单元由有机玻璃板制成, 长为 100, 宽为 150, 高为 370, 有效容积 5.25 L. 折流板为活动部件, 可在反应器内上下及左右移动, 以此调节下、上向流室宽度比和折流板底端距底板距离. 制作不同折角的折流板以研究折角对水力特性的影响. 布水方式为侧壁中心进水, 出水口设在中间, 高均为 350. 蠕动泵 (河北兰格恒流泵有限公司, 型号 BT00-100M) 进水, 流量在整个试验过程中恒定为 46 mL/min, 水力停留时间 (T_h) 为 1.9 h. 采用脉冲响应法, 示踪剂为 NaCl, 于进水口处加入, 每隔一定时间取样, 取样口设在出水口. 测定方法为硝酸根滴定法 (国家环境保护局, 1997).

2 实验数据处理

为对所有试验进行比较, 试验数据经过归一化处理, 即引入无因次浓度 C 和无因次归一化时间 θ

$$C = \rho / C_0, \theta = t / T_h.$$

式中, C_0 . 示踪剂初始浓度 (mg/L); T_h . 水力停留时间 (min).

绘出 $C-\theta$ 曲线, 根据 Levenspiel 模型计算出死区和分散数 D/uL , 公式如下

$$\frac{V_d}{V} = 1 - \nu_a \cdot \mu_a.$$

式中, V_d . 反应器死区 (L); V . 反应器有效容积 (L); ν_a . θ 为 2 时, 示踪剂流出量占注入量的比值; μ_a . $C-\theta$ 曲线的平均值.

方差

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^2 (x - \mu_a)^2 \cdot f(x) \cdot dx}{\int_0^2 f(x) \cdot dx}.$$

根据扩散模型 (Levenspiel, 1974), 分散数 D/uL 由下式计算

$$\sigma^2 = 2(D/uL) - 2(D/uL)^2 \cdot (1 - e^{-uL/D})$$

计算机编程采用 MatLAB 6.5.

3 实验结果与讨论

3.1 下、上向流室宽度比对水力特性的影响

通常来说, ABR 各个格室的上向流室是等宽的, 各个格室的下向流室也是等宽的, 许多文献中下、上向流室的宽度比一般在 1:1~1:4 范围内, 但没有说明确定该比值的依据是什么. 本文对这一比值进行了研究, 试验过程中折流板折角为 45° , 底端距底板距离为 2 cm. 研究发现, 随着下、上向流室宽度比值的逐渐下降, 死区有一个缓慢下降、然后上升的过程, 最佳值在 1:3 附近, 此时测得的水力死区为 7.77% (图 3).

水力死区倾向于发生在堰下和拐角处, 形成停滞不动的涡流. 在下、上向流室宽度比值较大时, 下向流室中由于流速较小, 对水力死区作出了一定的贡献. 随着比值的逐渐下降, 下向流室流速加快, 水力死区因而得以减少. 但比值继续下降, 上向流速大幅下降, 导致在上向流室拐角等处产生较严重的死角, 从而使水力死区迅速升高. 由图 4 可以看出, 由

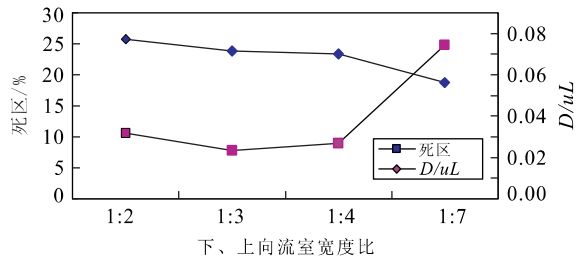


图 3 下、上向流室宽度比对反应器水力特性的影响
Fig. 3 Influence of ratio of width of downflow chamber to upflow chamber on hydrodynamic characteristics of ABR

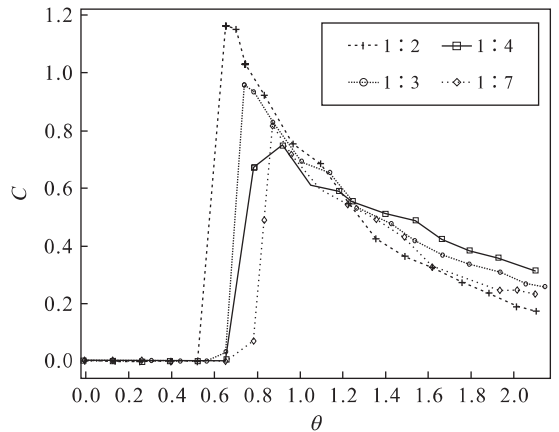


图 4 不同下、上向流室宽度比的 $C-\theta$ 曲线
Fig. 4 $C-\theta$ curves of various ratios of width of downflow chamber to upflow chamber

于上向流室流速大幅下降, 在 1:7 时出水示踪剂浓度峰值出现时间明显后移.

Stuckey 等得出传统厌氧消化池 (CSTR) 的死区可高达 82%, Young and Young (1988) 在研究一个上流式厌氧滤池时测得的死区为 50%~93%. 可以看出, ABR 的水力死区远小于这些厌氧生物反应器.

理想推流式反应器的分散数 $D/uL=0$, 而理想完全混合式反应器的分散数 $D/uL=\infty$. 本试验得出的分散数 D/uL 值均很小, 在 0.08 以下, 说明流态在理想推流式与理想完全混合式之间, 接近理想推流.

3.2 折流板底端距底板距离对水力特性的影响

在折流板折角为 45° , 下、上向流室宽度比为 1:4 时试验了折流板底端距底板距离对死区的影响. 试验结果见图 5, 可以看出, 水力死区与折流板底端距底板距离成正比关系, 随距离的增大而增大. 当距离增大时, 流经折流板底部的流速放缓, 导致拐

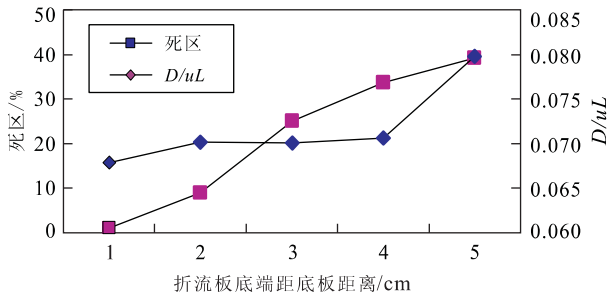


图 5 折流板底端距底板距离对水力特性的影响关系

Fig. 5 Influence of distance of baffle to bottom on hydrodynamic characteristics of ABR

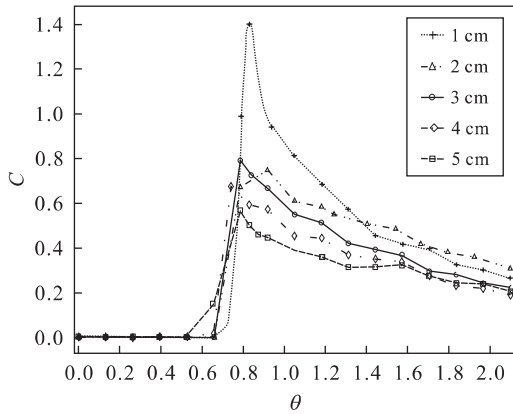


图 6 不同折流板底端距底板距离的 C-θ 曲线

Fig. 6 C-θ curves of various distances of baffle to bottom

角等处死角区域的增大,死区的增大是一个合理的结果。

C-θ 曲线明显显示了随距离增加曲线逐渐下移的趋势.由死区的计算公式也可知,死区与 C-θ 曲线的均值有关,图 6 也反映了这一趋势。

由图 5 可见,当距离过大时分散数上升较快,反映了此时反应器趋向于完全混合式.在距离不大时分散数 D/uL 变化不大,在 0.07 左右.当距离低于 2 cm 时分散数下降加快,表明此时反应器趋近理想推流式,图 6 中距离为 1 cm 时 C-θ 曲线波峰为一锐峰,明显表现了理想推流式反应器对脉冲输入的输出为脉冲输出的特点。

3.3 折流板折角对水力特性的影响

折流板的折角是 ABR 反应器的一个重要结构参数.为研究不同折角对水力特性的影响,制作了一系列不同折角的折流板进行研究.本部分试验均保持下、上向流室宽度比为 1 : 4,折流板底端距底板距离为 2 cm.实验结果见图 7,相应 C-θ 曲线见图 8.由图 7,8 可见,随折角的增大,死区先迅速下降,

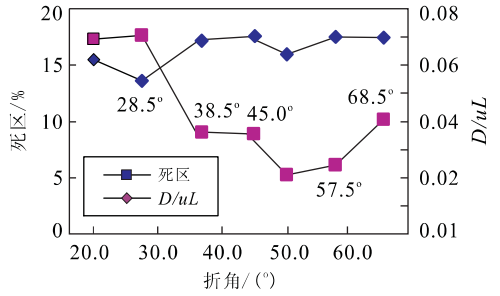


图 7 折流板折角对反应器水力特性的影响

Fig. 7 Influence of angle of baffle on hydrodynamic characteristics of ABR

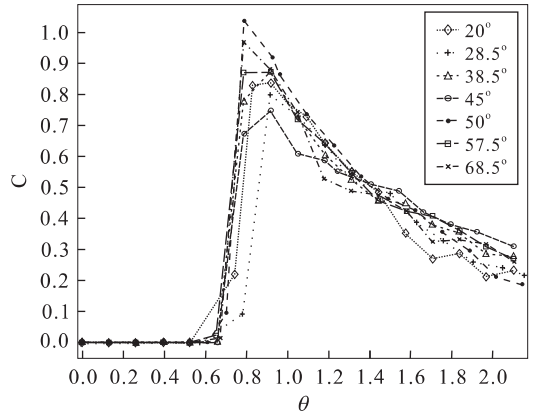


图 8 折流板不同折角的 C-θ 曲线

Fig. 8 C-θ curves of various angles of baffle

再缓慢上升,最佳值在 50°左右.分散数与折流板的折角关系不大,在折角较小时,其值较低。

4 结论

- (1) ABR 的水力死区较小,远低于厌氧滤池等其他厌氧生物反应器;
- (2) ABR 的分散数 D/uL 在 0.05~0.08 之间,流态介于理想完全混合式与理想推流式之间,接近理想推流式;
- (3) 水力死区随下、上向流室宽度比的减小先缓慢减小,后迅速增大,最佳值为 1 : 3;
- (4) 水力死区与折流板底端距底板距离在本试验范围之内成正比关系,随距离增大而增大.但在 ABR 结构设计时尚需考虑其他因素如流动阻力,进水中夹带的固体杂物等可能造成的堵塞等;
- (5) 随折流板折角的增大水力死区先迅速下降,再缓慢上升,最佳值在 50°附近。

References

Bachmann, A., Beard, V. L., McCarty, P. L., 1983. Compari-

- son of fixed film reactors with a modified sludge blanket reactor. *Pollut. Technol. Rev.*, 10: 382—402.
- China Bureau of Environmental Protection, 1997. Water and wastewater monitor and analysis method. 3rd Edition. China Environmental Science Press, Beijing (in Chinese).
- Dai, Y. Z., Shi, H. C., Ji, J. P., et al., 2000. A study on the biodegradation of toxic organic substance and sludge characteristics in anaerobic baffled reactor. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 20(3): 284—289 (in Chinese with English abstract).
- Faisal, M., Hajime, U., 2001. Kinetic analysis of palm oil mill wastewater treatment by a modified anaerobic baffled reactor. *Biochemical Engineering Journal*, 9: 25—31.
- Fox, P., Venkatasubbiah, V., 1996. Coupled anaerobic/aerobic treatment of high-sulphate wastewater with sulphate reduction and biological sulphide oxidation. *Wat. Sci. Technol.*, 34(5—6): 359—366.
- Grobicki, A., Stuckey, D. C., 1992. Hydrodynamic characteristics of the anaerobic baffled reactor. *Wat. Res.*, 26(3): 371—378.
- Guo, J., Li, Q. X., Ma, H. N., et al., 1997. Preliminary studies on performances and hydrodynamic characteristics of ABR. *China Water & Wastewater*, 13(4): 17—20 (in Chinese with English abstract).
- He, S. F., Yi, C. Y., Dai, Y. Z., 2002. Research on anaerobic baffled reactor in treating organic phosphorous pesticide wastewater. *Industrial Water & Wastewater*, 33(4): 26—28 (in Chinese with English abstract).
- Lettinga, G., Field, J., Van, J., 1997. Advanced anaerobic wastewater treatment in the near future. *Wat. Sci. & Tech.*, 35(10): 5—12.
- Levenspiel, O., 1974. Chemical reaction engineering. 2nd Edition. Wiley, New York.
- Mai, W. N., Yang, M., Zeng, L. B., 2002. Design and operation of antibiotics wastewater treatment. *Water & Wastewater Engineering*, 28(4): 42—45 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, B., Guo, J., Shao, M., et al., 2000. Startup of ABR to treat pharmacy wastewater. *China Water & Wastewater*, 16(8): 42—44.
- Ramaraj, B., 1998. Biological treatment of swine waste using anaerobic baffled reactors. *Bioresource Technology*, 64: 1—6 (in Chinese with English abstract).
- Setiadi, T., Husaini, Djajadiningat, A., 1996. Palm oil mill effluent treatment by anaerobic baffled reactors; Recycle effects and biokinetic parameters. *Water Sci. & Tech.*, 34(11): 59—66.
- Sun, J. H., Zhang, B., Peng, Y. H., 2002. A study on corn-stalk fibrous pulp wastewater treatment with anaerobic baffled reactor. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 3(9): 83—85 (in Chinese with English abstract).
- Uyanik, S., Sallis, P. J., Anderson, G. K., 2002. The effect of polymer addition on granulation in an anaerobic baffled reactor (ABR). Part I: Process performance. *Water Research*, 36: 933—943.
- Vossoughi, M., Shakeri, M., Alemzadeh, I., 2003. Performance of anaerobic baffled reactor treating synthetic wastewater influenced by decreasing COD/SO₄²⁻ ratios. *Chemical Engineering & Processing*, 42(10): 811—816.
- Wang, J. L., Han, Y. J., Qian, Y., 2000. Research advances in anaerobic baffled reactor (ABR). *Chin. J. Appl. Environ. Biol.*, 6(5): 490—498 (in Chinese with English abstract).
- Xu, B. J., Long, T. R., 2000. Contemporary principals of water and wastewater treatment. 2nd Edition. Higher Education Press, Beijing (in Chinese).
- Xu, Y. D., Chen, W. H., Jiang, Z. Q., 2002. Treatment of blanket wastewater by using two-stage aerobic biochemical process with coagulating precipitation and anaerobic baffled tank. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 3(5): 28—30 (in Chinese with English abstract).
- Young, H. W., Young, J. C., 1988. Hydraulic characteristics of upflow anaerobic filters. *J. Envir. Engin.*, 114: 621—638.
- Zhao, L. J., Teng, D. Y., Liu, J. L., et al., 2001. Technology summary and research advances in anaerobic treatment of wastewater. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2(5): 58—66 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 国家环境保护局, 1997. 水和废水监测分析方法. 第三版. 北京: 中国环境科学出版社.
- 戴友芝, 施汉昌, 冀静平, 等, 2000. 厌氧折流板反应器处理有毒废水及其污泥特性的研究. *环境科学学报*, 20(3): 284—289.
- 郭静, 李清雪, 马华年, 等, 1997. ABR 反应器的性能及水力特性研究. *中国给水排水*, 13(4): 17—20.
- 贺高郁, 易辰俞, 戴友芝, 2002. 厌氧折流板反应器处理有机

磷农药废水的研究. 工业用水与废水, 33(4): 26—28.

买文宁, 杨明, 曾令斌, 2002. 抗生素废水处理工程的设计与运行. 给水排水, 28(4): 42—45.

邱波, 郭静, 邵敏, 等, 2000. ABR 反应器处理制药废水的启动运行. 中国给水排水, 16(8): 42—44.

孙剑辉, 张波, 彭云辉, 2002. 厌氧折流板反应器处理玉米秆纤维浆粕废水的研究. 环境污染治理技术与设备, 3(9): 83—85.

王建龙, 韩英健, 钱易, 2000. 折流式厌氧反应器(ABR)的研

究进展. 应用与环境生物学报, 6(5): 490—498.

许保玖, 龙腾锐, 2000. 当代给水与废水处理原理(第二版). 北京: 高等教育出版社.

许玉东, 陈维辉, 江智清, 2002. 混凝沉淀—厌氧折流板反应池—两级好氧生化工艺处理毛毯废水. 环境污染治理技术与设备, 3(5): 28—30.

赵立军, 滕登用, 刘金玲, 等, 2001. 废水厌氧生物处理技术综述与研究进展. 环境污染治理技术与设备, 2(5): 58—66.

《地球科学——中国地质大学学报》

2004 年 第 29 卷 第 4 期 要目预告

应用成藏门限理论评价吐哈盆地前侏罗系油气资源潜力	左胜杰等
准噶尔盆地北东向构造及其油气地质意义	郑孟林等
库车褶皱冲断带天然气成藏体系及有效运移优势通道	杨明慧等
松辽盆地北部埋藏历史对大庆长垣油藏成藏过程的控制	辛仁臣等
排烃门限存在的地质地球化学证据及其应用	庞雄奇等
塔里木盆地塔中低凸起奥陶纪油气成藏体系	刘克奇等