

厌氧折流板反应器的研究进展

杨颖波, 王连俊

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘 要:介绍了厌氧折流板反应器的基本原理、主要工艺性能、回流对 ABR 工艺运行效果的影响,阐述了国内外有关 ABR 的研究和应用现状。ABR 工艺具有结构简单、能耗低、运行管理方便等显著特点,在水力条件、对微生物的截留和去除能力及微生物种群分布方面,亦具有其独特的优越性,ABR 作为高效的厌氧生物处理技术,与好氧生物处理技术相结合的 A/O 工艺,已得到国际广泛的关注,具有广阔的推广应用前景。

关键词:厌氧折流板反应器;颗粒污泥;微生物种群;推流;回流

中图分类号:X703.3

文献标识码:A

文章编号:1004-695X(2004)01-0059-05

Advances of Research on Anaerobic Baffled Reactor

YANG Yin-bo, WANG Lian-jun

(School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract:The main theory and performance of anaerobic baffled reactor is introduced and the influence of circumfluence on the operation of ABR is expounded. It has notable advantages such as simple structure, low energy consumption, convenient operation and management. It also has unique superiority on hydraulic condition, the microbe intercepted and removal capacity, the distributing of population of microbe. As a novel and highly effective anaerobic biological treatment technology, the combination of ABR and aerobic biological treatment technology (the A/O technology) has been concerned in the whole world, and has promising application future.

Key words:Anaerobic baffled reactor; Particulate sludge; Population of microbe; Plug-flow; Circumfluence

厌氧折流板反应器 (Anaerobic Baffled Reactor, ABR) 是美国 McCarty 和 Bachmann 等人于 1982 年,在总结了各种第二代厌氧反应器处理工艺性能的基础上,开发和研制的一种新型高效厌氧污水生物处理技术。ABR 工艺的一个突出特点是设置了上下折流板,而在水流方向形成依次串联的隔室,从而使其中的微生物种群沿水流方向的不同隔室,实现产酸和产甲烷相的分离,在单个反应器中达到两相或多相运行。研究表明,两相工艺中产酸菌和产甲烷菌的活性要比单相运行时高出 4 倍,并可使不同的微生物种群在各自适宜的条件下生存,从而便于有效管理,提高处理效果,利于能源的利用。

1 ABR 工艺的基本原理

ABR 使用一系列垂直安装的折流板,使被处理的废水在反应器内沿折流板作上下流动,在水流和产气的搅拌作用下,进水中的底物与微生物充分接触而得以降解去除,处理流程如图 1 所示。

现在使用的 ABR 多采用上向流室加宽、下向流室变窄的结构形式,由于上向流室中水流的上升

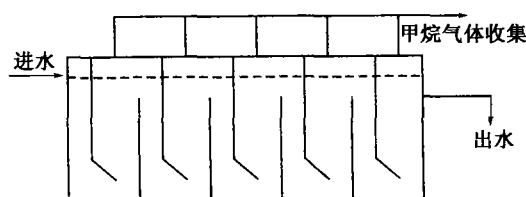


图 1 ABR 处理流程

流速较小,可使大量微生物固体被截留在上向流室内;并在上向流室的进水一侧,折流板的下部设置了一个约为 45° 的转角,以避免水流进入该室时产生冲击,起到缓冲水流和均匀布水的作用,从而利于对微生物固体的有效截留,利于微生物生长并保证处理效果。ABR 是一种复杂混合型水力流态,且更接近于推流式反应器,在 ABR 中,各个反应室中的微生物相是随流程逐级递变的,递变的规律与底物降解过程协调一致,从而确保相应的微生物相拥有最佳的工作活性。

收稿日期:2003-07-22;修订日期:2003-08-04

作者简介:杨颖波(1974—),女,黑龙江呼兰县人,在读硕士研究生,主攻环境工程、水处理等研究工作。

2 ABR 的主要工艺性能

2.1 良好的水力条件

反应器的水力条件是影响处理效果的重要因素。ABR 中的死区容积分数要比其它类型的厌氧反应器低得多,亦即 ABR 的容积利用率是很高的。D.C.Stuckey 等的研究表明,ABR 的 V_d/V (V : 反应器的容积, V_d : 死区容积) 值仅为 7% ~ 20%, 平均值为 9.8%^[1], 厌氧滤池和传统消化池的 V_d/V 值分别为 50% ~ 93%^[2] 和 82%^[3], 均远高于 ABR 的 V_d/V 值。究其原因在于 ABR 相当于把一个反应器内的污泥分配到了多个隔室的反应小区内, 假若反应器的分隔数为 n , 则每个隔室内的污泥量为反应器内污泥总量的 $1/n$, 因此, 强化了污泥与被处理污水的接触和混合程度, 从而提高了反应器的容积利用率。

此外, 随 ABR 中进水量的增加, 即水力停留时间的缩短, 各隔室内的返混程度将提高 ($D/\mu L$ 值增高), 而 V_d/V 值的变化幅度却并不大^[4]。从整个 ABR 来看, 反应器内的折流板阻挡了各隔室间的返混作用, 强化了各隔室的混合作用, 因而, ABR 内的水力流态是局部为 CSTR 流态、整体为 PF 流态的一种复杂水力流态型反应器。随着反应器内分隔数的增加, 整个反应器的流态则趋于推流式。从反应动力学的角度, 这种完全混合与推流相结合的复合型流态, 十分利于保证反应器的容积利用率, 提高处理效果及促进运行的稳定性, 是一种极佳的流态形式。

2.2 ABR 的水解酸化作用

废水经 ABR 处理后, 其 BOD_5/COD 值明显提高, 当进水 BOD_5/COD 较低时, 效果更为显著, BOD_5/COD 的提高反映了 ABR 良好的水解酸化作用。沈耀良等在进行 ABR 处理垃圾渗滤混合废水的研究中发现, 如进水 BOD_5/COD 为 0.665 时, 出水达 0.68, 进水 BOD_5/COD 为 0.2 ~ 0.3 时, 出水可提高至 0.4 ~ 0.6^[5]。傅嘉媛等人关于 ABRF 的研究结果也表明, ABRF 系统的第一格中, 主要进行水解酸化反应, 废水的可生化性平均提高 18%, 最大可提高 25%^[6]。鞠宇平的试验也得出了同样的结论, 经 ABR 以后, BOD_5/COD 可提高 0.17。而且温度对水解酸化处理效果并没有明显的影响, 在常温 (13 ~ 27 °C) 下均可保持良好的处理效果^[7]。COD 容积负荷对水解酸化有一定的影响, 不宜过高也不宜过低, 控制在 3.32 ~ 6.80 kg/(m³·d), 可取得较好的水解酸化效果^[8]。

ABR 对出水 BOD_5/COD 的改善, 无疑可促进后续好氧处理的效果和运行稳定性。

2.3 稳定的生物固体截留能力

ABR 能在高负荷条件下有效地截留活性微生物固体, 这主要表现在它对进水中高浓度的悬浮固体 (SS) 具有很强的适应性和处理效能。反应器内折流板的阻挡作用及折流板间距的合理设置, 有利于活性污泥与被处理废水间的良好混合接触, 也为污泥的截留和沉降创造了一个良好的条件。郭静等人对人工合成葡萄糖废水的处理研究结果表明, 由于反应器内折流板良好的阻滞作用, 污泥浓度可达 79 g/L 以上。

由于折流板良好的滞留微生物的能力、污泥良好的沉降性能及 ABR 中微生物环境具有良好的生物级配, ABR 对冲击负荷的适应性很强。孙剑辉等的试验很好地证明了这一点, 当 HRT 由 40 h 逐渐降为 18 h、进水浓度由 3.68 g/L 逐步升为 6.56 g/L 的过程中, 出水水质未出现较大的波动, COD 去除率保持在 75% 以上, 有机去除负荷随 OLR 的增加不断上升^[9], 表现出 ABR 对冲击负荷的稳定性。戴友芝等的研究也指出, ABR 在处理 COD 为 1.1 ~ 1.2 g/L (含五氯酚钠 < 8 mg/L) 的有毒废水时, 运行稳定, 出水的 COD 在 80 mg/L 以下, PCP - Na 在 0.2 mg/L 以下^[10]; 当 PCP - Na 冲击浓度约 17.5 mg/L, HRT 为 1 d 时, 反应器后段 COD 去除率在第 6 天可基本恢复到冲击前水平, 整个系统活性恢复约需 4 周^[11], 后面反应室的去除效果对前面反应室有补偿作用, 保证了出水水质。因此 ABR 法对于处理流量和浓度变化较大的工业废水有很好的应用前景。

2.4 易于形成颗粒污泥

目前, 为提高污水生物处理工艺的处理效果及处理能力, 正在不断地研究和开发微生物固定化处理技术。颗粒污泥的形成与废水水质、运行条件及 ABR 的构造等因素有关。Boopathy 的研究发现, 在初始负荷为 0.97 kg/(kg·d), 上升流速小于 0.46 m/h 的条件下启动 ABR, 1 个月后, 每一反应室都出现了粒径为 0.5 mm 的颗粒污泥, 3 个月后颗粒污泥长大至 3.5 mm 左右^[12]。ABR 处理豆制品废水试验, 采用低负荷高去除率启动方式, 驯化和培养颗粒化活性污泥, COD 负荷范围在 0.72 ~ 1.97 g/(L·d)。经过五十多天, 反应器内形成大量密实、亮黑色的颗粒污泥, COD 去除率和废水产气率都很高^[13]。在用 ABR 处理含 PCP - Na 的有毒

废水时,戴友芝等人也发现,当反应器运行三个月后,第 1、2、3 个月时开始出现颗粒污泥;约 4 个月后,污泥颗粒化程度增加,前面隔室颗粒污泥较多,后面隔室则较少。其主要原因是各室 COD 负荷不同,在后面隔室中菌体生长所需营养物质少,污泥增长速度慢,不利于形成颗粒污泥^[18]。

在进行厌氧折流板反应器处理垃圾渗滤混合废水的研究时,沈耀良认为,渗滤液中含有较高的碱度及其它碱金属离子,有利于污泥的颗粒化。当反应器运行至 COD 容积负荷为 $4.71 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时,各隔室中形成外观由灰白色至灰黑色、粒径大小不等($0.5 \sim 5 \text{ mm}$)的棒状及球状颗粒污泥。分析表明,颗粒污泥具有良好的沉降性能,其 SVI 为 $7.5 \sim 14.2 \text{ mL/g}$ ^[5]。第一隔室的颗粒污泥较轻,呈灰色;第三隔室的颗粒污泥则沉降性能良好,呈深灰色。运行过程中观察到第一隔室中的污泥大部分处于悬浮态,泥水混合液较为粘稠,而以后各隔室中的污泥则在底部形成稠密的污泥层。

2.5 微生物种群的分佈

挡板在反应器内构成几个独立的隔室,所以能在每个隔室内驯化培养与该隔室环境条件相适应的微生物群落,形成良好的种群配合和良好的沿程分布,避免了不同种群间生态幅的过多重复^[14],从而确保相应的微生物相拥有最佳的工作活性,实现在一个反应器内完成一体化的两相或多相处理。例如,在位于反应器前端的隔室中,主要以水解和产酸菌为主,而在较后的隔室中则以甲烷菌为主。随隔室的推移,由甲烷八叠球菌为优势种群逐渐向甲烷丝状菌属、异养甲烷菌和脱硫弧菌属等转变^[15]。有关研究表明,底物浓度较高时,甲烷八叠球菌的生长速度比甲烷丝状菌属快一倍;而在低底物浓度时,情形则相反。而且从颗粒污泥的切片电镜照片可以判断,在以葡萄糖为基质时,发酵产酸菌多在颗粒污泥表层,产甲烷菌则在内部,形成良好的有机质分解链,这种结构与基质降解途径的要求是一致的^[7]。这种微生物种群的逐室递变,使优势种群得以良好地生长,这与有机底物在各司其职的微生物种群作用下的逐步降解和转化过程相一致,表明基质的浓度和种类是反应器中微生物组成与分布的重要影响因素。

3 回流对 ABR 工艺处理效果的影响

Chynoweth 等研究发现,回流 20% 出水,甲烷产量上升了 30%^[16]。此外,回流可以解决反应器池

首因产生较多挥发酸引起的 pH 降低给后续隔室所带来的问题,在 Tjandra 等人应用 ABR 工艺处理棕榈油厂废水的研究中同样发现,当回流大于 15% 时,不需加碱,系统 pH 值即可保持在 6.8 以上^[17]。回流还可以稀释进水中的有毒有害物质,降低微生物对基质的不适应程度,并可在处理某些含高蛋白质废水时抑制丝状菌的生长。

然而不适当的回流会增加生物的流失,影响反应器的水力条件,增加死区容积。Nachaiyasit 的研究表明,当回流比增加到 2 时,死区体积增大一倍,达到了 40%,而回流比达到 4 时,导致了突发性严重的污泥流失问题^[18]。并且,回流引起的混合,导致反应器向单相状态转变,破坏产酸菌和产甲烷菌各自的良好运行环境及其相互协同作用功能,部分丧失了产酸相和产甲烷相分区的优点。Bachmann 等研究发现,当有回流时,产甲烷菌在反应器内的分布是均匀的,并由于回流而使位于反应器后端隔室中的诸如 *Methanosateta* 等产甲烷菌进入高基质浓度、高 H_2 分压及低 pH 的酸性不利环境,及产酸菌同时向基质浓度较低而得不到足够底物的反应器末端隔室的转移而影响处理效果^[19]。Nachaiyasit 也发现回流比增大时,反应器的产气量和甲烷含量均有下降。因此在应用 ABR 工艺时,应慎重考虑是否需要回流。

4 ABR 的工艺研究及应用现状

目前,有关 ABR 工艺的研究正在不断深入之中,主要方向为 ABR 工艺的优化及其在有机(尤其是高浓度)废水处理中的效果。此外,ABR 对低浓度有机废水处理的效果已逐渐引起重视。

折流板厌氧生物接触反应池(ABRF,即 HABR)的独特设计,使它在高浓度废水处理中具有很好的前景。Boopathy 等人对用 HABR 处理高浓度制糖废水进行了研究,并将其投入实际应用^[20]。反应器由三个隔室和一个沉淀池组成,在前两个隔室的顶部设置了一层 10 cm 厚的塑料填料($\phi 38 \text{ mm}$ 的鲍尔环),在第三个隔室的上部设置了定型波纹板填料。这个反应器可成功地在 COD 容积负荷为 $20 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时处理高浓度的复杂糖浆废水,其 COD 去除率可达 77%,而且表现出很好的污泥截留性能,污泥颗粒化速度快。傅嘉媛等人中试用的 ABRF 由 5 格组成,第 1 格比其他 4 格宽,主要控制在水解酸化阶段,HRT 为 $1.8 \sim 5.3 \text{ h}$,后 4 格内置针状聚乙烯弹性填料,ABRF 对 SS 的截留和去除能

力强,平均 SS 去除率可达 73.4%,最高可达 93%^[6]。张林生等的研究也表明,在 ABR 中装载聚酯纺粘长丝布填料,可有效控制污泥流失现象,水解酸化效果也有所提高^[8]。

ABR 作为高效的厌氧生物处理技术,与好氧生物处理技术相结合的 A/O 工艺,可以取得更好的废水处理效果。Lettinga 等指出,由于厌氧处理反应器中存在一定数量的“喜氧”甲烷菌,这些甲烷菌可在有氧的条件下保持良好的活性,而同时由于污泥床的阻隔作用,可保持污泥床的良好厌氧环境,因而对于具有分段特性的 ABR 而言,有可能将好氧组合到该反应器之中,这对诸如煤加工废水、石油工业废水及纺织废水的处理,具有良好的应用价值^[21]。胡小兵进行厌氧折流反应器+好氧处理豆腐生产废水的试验研究表明,厌氧条件为 35℃时,COD 和 TKN 总去除率分别达到了 97.9%和 97.4%,出水可达一级排放标准^[22]。在处理电泳涂膜废水的研究中,鞠宇平等人采用 ABR-SBR 工艺也取得了良好的处理效果,当进水 COD 为 1.3~1.5 g/L、ABR 反应时间为 5 h、SBR 反应时间为 4 h 时,对 COD 和 PO₄-P 的去除率均可达 92%以上^[7]。

ABR 工艺在实际废水处理工程中的应用尚不多见,但已有处理工业废水和小规模城市污水的实例。表 1 列出了人口不到 2 500 人的美国哥伦比亚市 Tenjo 镇污水处理厂采用 ABR 处理生活污水的实际运行数据。实际应用表明,与 UASB 工艺和传统活性污泥处理工艺相比,ABR 工艺所需的投资分别为它们的 80%和 20%。

表 1 Tenjo 镇污水处理厂 ABR 处理生活污水的运行数据

主要指标	设计值
BOD ₅ 有机负荷/[kg·(m ³ ·d) ⁻¹]	0.85
进水 BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	314
出水 BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	~100
BOD ₅ 去除率/%	~70

较高浓度的毛毯废水因含染料量较多,生化性能较差,处理难度较大,许玉东等采用混凝沉淀-厌氧折流板反应池-两极好氧生化工艺进行处理,ABR 池主要进行水解酸化作用,毛毯废水中的阳离子染料在微生物脱氢酶和水解酶等酶系统的作用下,侧链、发色基团断裂,芳基环开裂,形成脂肪酸和其他代谢产物后可被微生物进一步降解。毛毯废水中还含有一定浓度的表面活性剂,可先被高浓度的生物污泥吸附截留,再在混合菌群作用下降

解。废水经 ABR 池水解酸化后,BOD₅/COD_{cr} 的比值由 0.28~0.33 提高到 0.40~0.42,生化性能有所改善,色度去除率达 60%~70%^[23]。

程凯英等人应用 ABR-SBR 组合工艺处理食品调味料废水,稳定运行一个多月以来,出水各项指标均达到《污水综合排放标准》(GB8978—1996)中的一级标准,见表 2^[24]

表 2 废水处理单元运行效果

项 目	pH 值	ρ(SS)/(mg·L ⁻¹)	ρ(BOD ₅)/(mg·L ⁻¹)	ρ(COD _{cr})/(mg·L ⁻¹)	色度/倍
原水	6~9	480	612	2 815	200
ABR 出水	7	50	480	1 022	50
SBR 出水	7	25	18	85	20
一级标准	6~9	70	30	100	50

5 展 望

Lettinga 教授在展望未来厌氧反应器的发展方向时,提出了极富挑战性的新工艺,分阶段多相厌氧反应器技术(SMPA)的概念,理论思路如下:

(1)在各级分隔的单体中培养出合适的厌氧细菌群落,以适应相应的底物组分及环境因子(pH 值,H₂分压值等);

(2)防止在各个单体中独立发展形成的污泥互相混合;

(3)各个单体内的产气互相隔开;

(4)工艺流程更接近于推流式,系统因而拥有更高的去除率,出水水质更好。

可以发现 ABR 几乎完美地实现了该工艺的思路要点,ABR 工艺的适用范围很广泛,对于各种含抑制性化合物的化工废水也具有较高的降解效能,具有良好的研究开发价值和推广应用前景。

[参考文献]

[1] GROBICKI,Stuckey D C. Hydrodynamic Characteristic of the Anaerobic of the Anaerobic Baffled Reactor[J]. Water Res, 1992,26(3): 371~378.

[2] YOUNG H W, YOUNG J C. Hydrodynamic Characteristic of Upflow Anaerobic Filters[J]. J Environ Eng, 1988,114(3):621~638.

[3] STHCKEY D C. Anaerobic Digestion in Developing Countries: Advances in Fermentation SCI[R]. London: Meeting at Chelsea Colleges,1983.

[4] 沈耀良,王宝贞.废水生物处理新技术[M].北京:中国环境科学出版社,1999.

[5] 沈耀良,王宝贞,杨铨大,等.厌氧折流板反应器处理垃圾渗滤混合废水[J].中国给水排水,1999,15(5):10~12.

[6] 傅嘉媛,董发开.折流板厌氧生物接触池处理城镇污水(中试)[J].中国给水排水,2003,19(1):17~19.

[7] 鞠宇平,张林生.ABR-SBR 工艺处理电泳涂膜废水[J].中国给水排水,2003,19(2):51~52.

- [8] 张林生, 鞠宇平. 水解酸化 - 序批式活性污泥法 (ABR - SBR) 处理电泳废水的研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(10): 51 - 54.
- [9] 孙剑辉, 张波, 彭云辉. 厌氧折流板反应器处理玉米秆纤维浆粕废水的研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(9): 83 - 85.
- [10] 戴友芝, 施汉昌, 翼静平, 等. 厌氧折流板反应器处理有毒废水及其污泥特性的研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(3): 284.
- [11] 戴友芝, 施汉昌, 钱易. 有毒物冲击负荷对厌氧折流板反应器的影响[J]. 中国环境科学, 2000, 20(1): 40 - 44.
- [12] BOOPATHY R. Pelletization of Biomass in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor (HABR) Treating Acidified Wastewater[J]. Bioresource Technol, 1992, 40: 101 - 107.
- [13] 陈洪斌, 张国政, 高廷耀. 厌氧折流板反应器处理豆制品废水的研究[J]. 中国沼气, 1999, 17(1): 12 - 16.
- [14] 孙剑辉, 张波, 彭云辉. 新型高效生物处理技术——厌氧折流板反应器[J]. 工业水处理, 2002, 22(4): 5 - 8.
- [15] 赵丹, 王承武, 沈耀良, 等. 厌氧折流板反应器 (ABR) 的水动力学及污泥特性[J]. 环境工程, 2001, 19(2): 12 - 15.
- [16] CHYNOWETH D P, SRIVASTRA V J, CONRAD J R. Research Study to Determine the Feasibility of Producing Methane Gas from Sea Kelp[R]. IIT Center, 3424, S. State Street Chicago; Institute of Gas Technology, 1980.
- [17] SETIADI Tjandra, HUSAINI Djajadiningat Asis. Palm Oil Mill Effluent Treatment by Anaerobic Baffled Reactors: Recycle Effects and Biokinetic Parameters[J]. Water Sci & Tech, 1996, 34(11): 59.
- [18] NACHAIYASIT S. The Effect of Process Parameters on Reactor Performance in an Anaerobic Baffled Reactor[D]. Ph DISSERTATION D. London U K; Department of Chemical Engineering, Imperial College, 1995.
- [19] LETTINGA G, FIELD J, VAN J. Advanced Anaerobic Wastewater Treatment in the Near Future[J]. Water Sci & Tech, 1997, 35(10): 5 - 12.
- [20] BOOPATHY R, TILCHE A. Anaerobic Digestion of High Strength Molasses Wastewater Using Hybrid Anaerobic Baffled Reactor[J]. Water Res, 1991, 25(7): 785 - 790.
- [21] 沈耀良. 固定化微生物污水处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [22] 胡小兵. 厌氧折流反应器 + 好氧处理豆腐生产废水的试验研究[J]. 给水排水, 2002, 28(12): 33 - 35.
- [23] 许玉东, 陈维辉, 江智清. 混凝沉淀 - 厌氧折流板反应池 - 两级好氧化工艺处理毛毯废水[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(5): 28 - 30.
- [24] 程凯英, 廖戈, 林励忠. ABR - SBR 组合工艺处理食品调味料废水[J]. 环境工程, 2002, 20(2): 26 - 27.

(上接第 5 页)实际上这一天, 上海的 API 已经回落。这种情况的发生也是可以理解的。在受到沙尘暴影响时, 上海的 API 值必然异常偏高, 但并不是所有 API 异常偏高都是沙尘暴带给上海的影响, 有时要归因于本地的气象污染因素。实际上, 2001 - 11 - 22 前后, 北方并未发生沙尘暴, 北方各城市空气质量良好, 偏偏只有上海 API 值异常偏高, 显然, 这完全是由上海本地的污染气象条件造成的。对于这种情况, 模型反应是不准确的: 模型的输入变量是 47 个城市的 API 值, 当北方未发生沙尘暴, 而上海本地污染气象条件恶劣的情况下, 其它城市的 API 平稳, 只有上海 API 变化剧烈, 这就使得上海 API 对输出的影响被放大, 因而预测结果总是追随上海 API 变化趋势, 同时又落后一天。因此可以看出, 此模型对上海由于本地因素造成的 API 异常偏高无法作出预测。

3 结 语

构建的径向基函数神经网络, 应用于预测沙尘暴对上海的影响取得了初步成果。从结果看, 对 API 变化趋势可以作出较好预测, 对由本地污染气象因素造成的 API 异常偏高反应迟缓, 对上海受到北方沙尘暴影响的情况反应灵敏。需要指出的是, 虽然这里研究的对象是上海, 但提出的预测沙尘暴

远距离输送对本地影响的研究思路, 不仅适用于上海, 也可用于其它南方城市, 具有普遍意义。

【参考文献】

- [1] XUHUI Dong, HAO Quan, LI Tanb, et al. Horizontal Transportation and Deposition Volume of Sandstorm in Beijing[A]. Posted at the 8th International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality[C]. Japan. Tsukuba Science City, Mar 11 - 13, 2003.
- [2] 邱新法, 曾燕, 缪启龙. 我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动规律[J]. 地理学报, 2001, 56(3): 316 - 322.
- [3] 秦飞, 秦瑜. 东亚沙尘暴的数值模拟, (1) 模式建立[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1996, 32(3): 384 - 392.
- [4] 孙继明, 肖稳安, 牛生杰, 等. 沙漠地区沙尘天气近地层湍流输送特征分析[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(4): 489 - 495.
- [5] 边肇祺, 张学工, 阎平凡, 等. 模式识别[M]. 第二版. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [6] MARQUES de Sá J P. 模式识别——原理、方法和应用[M]. 吴逸飞. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [7] 陈川. 方向基函数神经网络模型与算法及其在模式识别中的应用[D]. 北京: 中科院半导体研究所, B9680136, 18. 13.
- [8] 罗先香, 杨建强. 径向基函数网络在水环境质量评价分区中的应用[J]. 环境工程, 2002, 18(6): 50 - 52.
- [9] 郭宗楼. 径向基函数网络模型在水质评价中的应用[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2001, 27(3): 335 - 338.
- [10] 孙吉祥. 现代模式识别[M]. 北京: 国防科技大学出版社, 2002.
- [11] 陈念贻. 模式识别优化技术及其应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 1997.