

低溶氧生物膜反应器对城郊低浓度混合污水进入湿地前的预处理*

王磊^{1,2}, 李文朝¹, 柯凡¹, 潘继征¹

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 采用低溶氧生物膜反应器对滇池北岸村镇混合污水进行预处理, 旨在去除难以自然沉淀的固体污染物, 便于后续湿地深度净化. 以小试规模在现场自然条件下进行了 12 个月的连续动态模拟实验, 结果表明, 水力负荷 $3\text{--}12\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 、气水比为 $1:1\text{--}2:1$ 、DO 浓度基本维持在 $0.1\text{--}2.0\text{mg/L}$ 时, 生物膜反应器对污水中有机物能够有效去除, 进水 COD 负荷低于 $0.58\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 的情况下, 去除率可稳定在 60% 以上. 低溶氧条件下生物膜脱落缓慢, 膜厚度达到 $800\mu\text{m}$, 增强了对进水 SS 的拦截、吸附作用, SS 平均去除率达到了 90.7%. 实验发现低溶氧条件下系统对氮、磷仍具有一定的去除效果. 降低曝气量后运行能耗明显减小, 以 4000t/d 的处理规模计算, 运行费用在 $0.05\text{--}0.1$ 元/t, 尽管混合污水中 COD、SS 浓度波动范围大, 但反应器出水及生物膜的生长都能保持相对稳定, 为后续湿地系统的稳定运行提供了保障, 试验为滇池流域城郊水污染控制提供了新的技术途径与应用参考.

关键词: 低溶氧; 生物膜反应器; 低浓度; 城郊混合污水

Treatment of low concentration mixed wastewater in the suburb using low dissolved oxygen biofilm reactor

WANG Lei^{1,2}, LI Wenchao¹, KE Fan¹ & PAN Jizheng¹

(1: *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China*)

(2: *Graduated School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China*)

Abstract: Low dissolved oxygen biofilm reactor was used to treat the mixed wastewater in a village in north bank of Lake Dianchi. The purpose of the operation was to remove the solid waste, which was difficult to settle down naturally, so forth to facilitate the next step of wetland purification. A field experiment was undertaken for 12 months in nature conditions. The result showed that when the hydraulic loading rates between 3 and $12\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, Air/Water ratio between 1:1 and 2:1, DO was controlled between 0.1 and 2.0mg/L , the reactor could remove the organic matter efficiently. When the loading rates of COD under $0.58\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$, removal rates were above 60%. Low dissolved oxygen slowed the desquamation of biofilm and its thickness was reached to $800\mu\text{m}$. Process of obstruction and adsorption was enhanced for SS removal and the average removal rate was 90.7%. The experiment found that there was still some removal effect of nitrogen and phosphorous in low dissolved oxygen in the reactor. Energy cost was significantly reduced by decreasing aeration. At the flux of 4000t/d , the calculated treatment expense was $0.05\text{--}0.1\text{RMB/t}$. Although the concentration of COD and SS of mixed wastewater was greatly fluctuated, the outflow quality and biofilm growth was relatively stable. It's suitable for further stable disposal and the treatment of suburb low concentration mixed wastewater. It provided a new technical for wastewater control in suburb area of Dianchi basin.

Keywords: Low oxygen; biofilm reactor; low concentration; suburb mixed wastewater

滇池是我国污染较为严重的高原浅水湖泊, 随着经济的发展, 湖岸带城郊地区污水量不断增加, 其主

* 国家 863 项目(2005AA60101004, 2006AA06Z325)资助. 2007-11-19 收稿; 2008-04-10 收修改稿. 王磊, 男, 1980 年生, 博士研究生; E-mail: wantonio@tom.com

要由居民生活污水、农灌污水及降雨径流组成, 这些污水在村落河沟中汇集混合, 通过入湖河流流进湖泊, 成为滇池的重要污染源。与一般生活污水相比, 城郊混合污水浓度相对偏低, 加上污水来源分散, 传统的管网收集—污水厂处理的方法成本高, 不易推广。相比而言, 利用湖滨带地形条件, 建造人工湿地系统进行水质净化是一种经济有效的办法, 但混合污水中悬浮物浓度高, 大部分为有机颗粒物且不易沉降, 长期高负荷处理会产生湿地堵塞, 处理效率下降的问题, 因此需要寻找一种能够对原水进行低能耗、高效率处理并适合与湿地系统相结合的工艺, 为解决滇池沿岸带水污染问题提供新的途径。

生物膜处理工艺对污水浓度适应范围广, 抗冲击负荷强, 且运行和管理简便^[1], 符合城郊混合污水水质与水量特点, 但传统生物膜反应器内曝气量大、运行费用较高, 而降低曝气量进行低溶氧运行能够有效降低能耗, 更适合与人工湿地系统结合在经济条件相对滞后的城郊地区推广。目前对于低溶氧反应器的研究多限于活性污泥系统中的高浓度氨氮废水的脱氮处理, Hanaki K 等^[2]发现溶氧在 0.5mg/L 时, 好氧细菌的呼吸速率并不受影响, Ciudad^[3]、Wyffels^[4]通过限制溶氧供应实现了对亚硝化反应的精确控制。但对于低溶氧条件下生物膜反应器的运行特性与处理规律研究较少, 笔者以降低污水处理能耗为目的, 利用低溶氧生物膜反应器对昆明市滇池北岸城郊地区混合污水进行处理, 探索其在低溶氧条件下对污染物去除的效率与规律, 并与现场其他工程工艺进行对比总结, 寻找适合与湿地系统相结合, 能够在滇池湖岸带城郊地区推广应用的水质净化工艺。

1 试验材料与方法

1.1 实验装置与材料

实验模型为玻璃材质的立方体容器, 长宽高分别为 1m×1m×1.2m, 有效容积 1m³, 内部平均分为 4 格, 前三格装填了 YDT 弹性立体填料, 装填率 70%, 第四格为沉淀区(图 1), 污水从第一格外侧底部进入, 从另一侧上部小孔进入第二格, 再同样以对角线路径进入第三格, 最后从第四格沉淀出水。前三格每格布设 4 个砂结曝气头微量曝气。

1.2 试验水质

试验用水为昆明市滇池北岸福保村一带的混合污水, 其主要由三部分污水组成, 一部分为村庄生活污水, 另一部分为附近一座旅游文化景点外排污水, 其余主要为附近农田区的降雨径流, 这些污水在村落间的河沟中汇集混合, 污水污染物浓度见表 1。

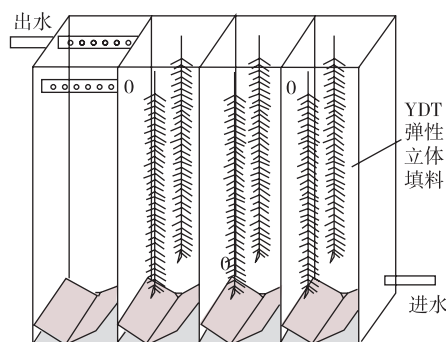


图 1 生物膜反应器模型结构示意图
Fig.1 Sketch map of configuration of the biofilm reactor

表 1 混合污水污染物浓度

Tab.1 The mixed wastewater characteristics

指标	pH	SS(mg/L)	DO(mg/L)	COD _{Cr} (mg/L)	氨氮(mg/L)
浓度	7.65±0.16	63.0±109.4	0.0±0.0	80.1±54.6	7.72±4.72
指标	NO ₂ ⁻ -N(mg/L)	NO ₃ ⁻ -N(mg/L)	TN(mg/L)	TP(mg/L)	PO ₄ ³⁻ -P(mg/L)
浓度	0.03±0.08	0.155±0.163	9.91±5.51	0.701±0.328	0.391±0.257

1.3 运行方式与实验方法

实验用水由水泵从河沟中直接抽入反应器, 模型从 2006 年 10 月运行到 2007 年 9 月, 历时一年, 常规运行时进水量控制在 4–6m³/d, 进行不同负荷对比实验时进水量控制在 3–12m³/d, 反应器内第一格 DO 浓度控制在 0.1–0.7mg/L, 第二格 0.5–1.2mg/L, 第三格 1.0–2.0mg/L, 启动过程采用自然挂膜, 微量曝气条件下无底泥上翻, 整个系统完全依靠生物膜对污水进行降解。另外试验与现场的曝气增氧和絮

凝沉淀工艺进行了效果对比研究. 所有水质指标的监测均采用国家标准方法^[5], 生物膜厚度采用显微镜对焦法测量^[6].

2 结果与分析

2.1 污染物去除效率与规律

2.1.1 COD 的去除 试验通过调整进水流量来研究反应器在不同负荷下的去除效率与规律, 从表2可以看出, 进水 COD 负荷低于 $0.58\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 时, 总去除率保持在 60% 以上, 系统运行稳定, 出水浓度随负荷的增加略有提高, 对分格监测发现, COD 的去除主要发生在第一格, 虽然 DO 浓度低于 $0.5\text{mg}/\text{L}$, 但平均去除率达到了 40% 以上, 其中通过生物膜对悬浮有机物的拦截、吸附而去除的 COD 约占 15% 左右, 可溶性有机物的生物降解约占 25%, 在第二、三格内溶解氧有所上升, COD 去除率约为 20%. 当进水负荷大于 $0.74\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 时, 出水浓度迅速增加, 去除率明显下降, 说明系统达到了最大负荷. 通过对比看出, 反应器的进水负荷控制在 $0.3\text{--}0.6\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 时较为经济高效.

在生物膜系统内, 一般认为物质在液相及生物膜相的传递过程将影响各种反应速率^[7], 当系统处理低浓度污水时, 浓度梯度的减小会使污染物向膜内的扩散速率降低, 微生物在较高溶氧条件下会因为底物缺乏进入内源呼吸阶段, 从而造成微生物量的减少. 由 COD 去除效率实验可以看出, 低溶氧运行可以使反应器在一定的负荷范围内达到稳定状态, 说明此时溶氧的供给与污染物扩散利用速率达到了平衡, 因此生物膜反应器可以针对进水 COD 浓度的大小来调整所需供氧量, 低溶氧环境更适合低 COD 浓度污水的处理.

表 2 不同进水负荷下分格反应器中 COD 去除规律

Tab.2 COD removal in different loading rates

进水流量 (m^3/d)	停留时间 (h)	COD 进水负荷 ($\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$)	进水 COD 浓度 (mg/L)	第一格			第二格			第三格		
				COD 浓度 (mg/L)	COD 去除率 (%)	DO 浓度 (mg/L)	COD 浓度 (mg/L)	COD 去除率 (%)	DO 浓度 (mg/L)	COD 浓度 (mg/L)	COD 去除率 (%)	DO 浓度 (mg/L)
3.0	8.0	0.18	60.3	31.3	48.1	0.5	18.0	70.1	1.2	16.0	73.5	2.1
3.8	6.3	0.19	49.5	30.5	38.4	0.4	19.0	61.6	1.2	19.0	61.6	1.9
4.6	5.2	0.38	82.4	37.8	54.1	0.2	27.5	66.6	1.0	27.5	66.6	1.5
7.9	3.0	0.58	73.0	37.7	48.4	0.3	25.2	65.5	1.1	22.6	69.0	1.4
10.8	2.2	0.74	68.9	45.8	33.5	0.2	39.5	42.7	0.7	31.0	55.0	1.2
12.0	2.0	0.95	79.3	54.5	31.3	0.1	50.5	36.3	0.5	46.8	41.0	1.0

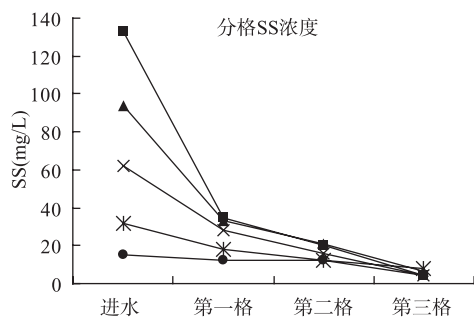


图 2 不同进水浓度下反应器分格内 SS 变化
Fig.2 Concentration of SS in each unit under different loadings

2.1.2 SS 的去除 城郊混合污水中 SS 浓度波动较大, 有降雨的情况下, 降雨径流会携带大量颗粒态污染物进入污水中, SS 最高值可达到 $200\text{--}300\text{mg}/\text{L}$, 这些颗粒态悬浮物大部分为可溶性有机污染物, 在反应器中的沉积量较少, 通过对原水及反应器不同分格内 SS 的分析发现 (图 2), SS 出水浓度与进水浓度之间没有直接的对应关系, 大部分悬浮物都在第一格被去除, 通过第二、三格的处理后出水 SS 浓度均较为稳定. 常规运行时系统对 SS 的平均去除率达到了 90.7%, 在传统生物膜反应器中膜厚度一般在 $400\mu\text{m}$ 以下^[8-9], 对悬浮物的拦截、吸附面积小, 且大功率曝气下不利于悬浮物的沉淀; 而在本试验中, 限量曝气使气体对生物膜的剪切冲刷作用减小, 生物膜脱落速度变慢, 厚度逐渐累计可达到 $800\mu\text{m}$, 大

大增加了对悬浮物的拦截、吸附面积,从而提高了SS的去除效率.因此低溶氧条件下的生物膜特性更有利于城郊混合污水SS的去除.

2.1.3 系统中氮、磷的去除与转化 系统中氨氮的浓度变化与进水COD负荷密切相关,由图3可以看出,进水负荷低于 $0.14\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 时分格内硝化作用明显,氨氮去除率约为33%,随着进水负荷的增加,以有机物降解为主的异养菌群在氧的利用上占据绝对优势,硝化菌群受到抑制,硝化量逐步沿分格减少,而有机氮的氨化并未受到影响,氨氮的浓度积累沿分格逐步提高.

常规运行时系统对TN的平均去除率为24.1%(表3),每月排出系统的污泥约150L,其中含N量约占系统进水TN负荷的1%左右,在出水中硝态氮与亚硝态氮的浓度都相对较低,且两种形态氮的增量小于被氧化的氨氮及有机氮的量,这说明系统TN的去除主要依靠同步硝化与反硝化作用(SND)^[10-12],在低溶氧条件下,生物膜的更新与脱落变慢,膜的厚度大大增加,这使得内部的厌氧区域也随之扩大,反硝化效率提高,因此尽管系统处于供氧条件下,但反硝化作用可以与硝化作用同时进行.

在出水中亚硝酸盐的平均浓度有明显增加(图4),反应器运行到第28d时,系统出现了大量亚硝酸盐积累现象,出水亚硝酸盐浓度最高达到 $4\text{mg}/\text{L}$,说明在生物膜培养初期,低溶氧条件下硝化菌的生长会受到一定抑制,而亚硝化菌受到的影响较小,这与低溶氧条件下的活性污泥系统中亚硝酸盐积累现象相似,但2周后亚硝酸盐积累现象消失,系统硝化产物主要为硝酸盐,随着反应器的运行两种产物的浓度都又逐步降低,同时氨氮去除率也随之略有下降,说明异养菌的增殖以及溶氧的竞争劣势使硝化细菌的生长受到抑制,硝化效率有所下降,另一方面系统反硝化效率提高使生成的硝态氮与亚硝态氮能够及时得到去除.因此如何更合理的设置反应器分隔,优化异养菌与硝化细菌的空间分布,既能提高硝化效率,又不失去SND所需的环境,进而提高TN去除率还值得进一步研究.

表3 进出水中不同形态氮平均浓度及去除率
Tab.3 Concentration and removal rates of nitrogen in inflow and outflow

项目	进水浓度(mg/L)	出水浓度(mg/L)	去除率(%)
TN	9.91	7.52	24.1
NH ₃ -N	7.72	5.55	28.0
NO ₂ ⁻ -N	0.03	0.44	-
NO ₃ ⁻ -N	0.16	0.98	-
TP	0.70	0.60	15.0
PO ₄ ³⁻ -P	0.39	0.47	-

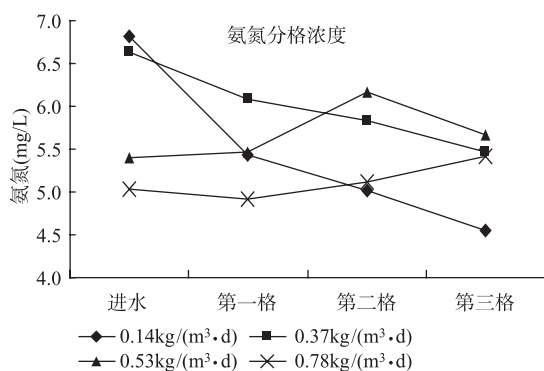


图3 不同COD进水负荷下反应器分格内氨氮浓度
Fig.3 Concentration of NH₃-N in each unit under different loading rates of COD

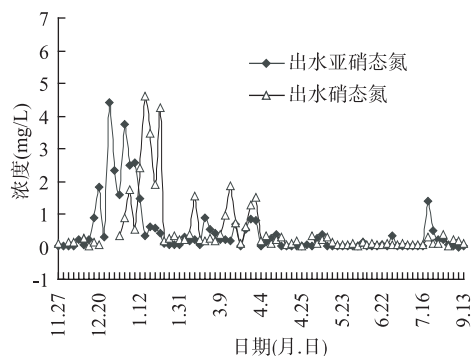


图4 出水亚硝态氮与硝态氮浓度变化
Fig.4 Concentration of nitrite and nitrate in outflow

生物膜系统主要通过底泥外排实现对磷的去除,底泥的形成包括原水中的悬浮污染物的沉淀和生物膜的脱落,从2006年11月底到2007年2月初以及2007年7月份期间,原水中悬浮物含量高,TP平均浓度在1mg/L以上,其他时间原水TP浓度保持在0.4–0.8mg/L,试验发现低溶氧条件下,系统产泥量很小,大部分底泥来源于第一格的悬浮物沉淀,这使得排泥周期变长,底泥中的磷会在厌氧条件下分解释放,出水中溶解性磷酸盐浓度显著上升,在试验后期出现了TP去除率下降的现象,因此在反应器设计中,底部适宜设计成锥形,利于及时将产生的污泥排出,另外第一格底部设计应该与其它分格底部设计有所区分,以适应不同的产泥量。

2.1.4 低溶氧生物膜系统稳定性 传统生物膜工艺多为活性污泥与生物膜共生的生物处理系统,其中的活性污泥容易受到各种环境因素的影响,低溶氧与低浓度污水会改变污泥形态结构与微生物组成,影响污泥沉降性能,导致反应器不能正常运行,而本试验反应器完全依靠生物膜对污染物进行降解,在一年的常规运行中,系统溶氧都控制在2.0mg/L以下,在进水COD、SS波动较大时,出水浓度一直较为稳定,生物膜生长状况良好,与活性污泥相比,生物膜对不同溶氧的适应能力更强,附着生长的生物膜内部微生物种群及分布变化不会对反应器的运行产生影响,生物膜的外观与结构会随着外部环境的变化而改变并逐步趋于稳定,试验说明单一的生物膜系统在低溶氧条件下具有很好的抗冲击负荷能力与良好的运行稳定性。

另外试验中反应器的分格设计也增强了系统对不同污水浓度的适应能力,分格后整个系统承受的冲击负荷主要发生在第一格,第二、三格反应器内水质相对稳定,其中的生物膜生长不会因水质、水量的变动而处于不断的变化中,整个反应器的运行稳定性得到增强,分格设计同时还可以避免一些对环境和营养条件要求不同的细菌混杂生活在相同条件下,不能充分发挥各自对不同污染物的净化效能^[11]。

2.2 不同工艺效果对比

实验将低溶氧生物膜反应器与现场的曝气增氧和混凝沉淀处理工艺进行了对比(表4),三种工艺处理水质与水量均相同。曝气增氧是利用人工曝气改变原水中的溶氧条件,使水中有机物加快分解的一种处理方法,这种方法简单易行,对混合污水中COD、SS有一定的去除效果,但大功率曝气使运行费用较高,不利于在城郊地区大范围推广。混凝沉淀是一种较为成熟的净水工艺,对城郊混合污水的SS、TP有较好的去除效果,但污染物去除效率与投药量直接相关,因此当水质水量波动较大时需要不断调整投药量或者在进水前增加调节池以稳定进水水质,另外药剂残留可能引起二次污染。在低溶氧生物膜处理工艺中,气水比控制在1:1–2:1之间,曝气能耗量大大降低,工程现场处理4000m³/d污水时所需运行成本约为0.05–0.10元/t,系统对COD、SS有较好的去除效果,能够很好的适应混合污水的冲击负荷,但对N、P的去除效率不高。

通过对三种工艺的对比可以看出,对于低浓度城郊混合污水的处理,低溶氧生物膜系统在去除效率与运行成本上优于其它工艺,运行操作简单的特点有利于在城郊地区广泛推广,在实际应用中,可以结合人工湿地、稳定塘等净化系统,进一步提高对污水的脱氮除磷效率。

表4 现场三种处理城郊混合污水的工艺对比
Tab.4 Comparison of three different treatments of suburb mixed wastewater

项目	污染物去除率(%)					气水比或 投药量	运行成本 (元/t)	优点	缺点
	COD	SS	NH ₃ -N	TN	TP				
低溶氧生物膜反应器	50–70	85–95	20–30	20–30	5–15	1:1–2:1	0.05–0.10	能耗低,抗冲击负荷强,产泥量小,去除率稳定	N、P的去除率较低
曝气增氧	40–60	70–80	–5–0	0–5	10–15	10:1–15:1	0.3–0.6	工艺简单,投资省	运行费用高,N、P的去除率较低
混凝沉淀	35–55	65–95	15–25	10–40	40–75	25–100	0.18–0.30	对SS、TP的去除效率高	抗冲击负荷差,产泥量大,有药剂残留

3 结论

(1) 低溶氧条件下反应器完全依靠生物膜系统进行污水处理, 对有机污染物及悬浮物的去除效果显著, 进水 COD 低于 $0.58\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 时, 去除率可稳定在 60% 以上, 生物膜厚度的增加, 使 SS 的去除效率进一步提高, 对于不同 SS 浓度的进水适应性强, 平均去除率达到 90.7%。

(2) 系统中氨氮的硝化效率与进水 COD 负荷密切相关, 低溶氧条件下 TN 的去除主要依靠同步硝化反硝化作用, 对于如何在生物膜系统中利用溶解氧控制氮的亚硝化及硝化过程, 进一步提高脱氮效率还需要进一步研究。

(3) 降低曝气量后能耗明显减小, 以 $4000\text{t}/\text{d}$ 处理量计算, 运行费用约为 $0.05\text{--}0.10$ 元/ t , 反应器对进水 COD、SS 的冲击负荷适应性强, 出水水质与生物膜生长在试验期间能够保持相对稳定。总的来看, 低溶氧生物膜反应器可以有效处理城郊低浓度混合污水, 出水适合采用湿地系统进行深度净化, 进一步提高除磷脱氮能力。整个研究为滇池流域水污染控制提供了新的技术途径与应用参考。

4 参考文献

- [1] 王 怡, 刘 媛, 彭党聪等. 低能耗条件下紊动床生物膜法与活性污泥法的效果比较. 水处理技术, 2007, **33**(10): 18-20.
- [2] Hanaki K, Wantawin C, Ohgaki S. Nitrification at low levels of dissolved oxygen with and without organic loading in a suspended-growth reactor. *Water Research*, 1990, **24**(3): 297-302.
- [3] Ciudad G, González R, Bornhardt C *et al.* Modes of operation and pH control as enhancement factors for partial nitrification with oxygen transport limitation. *Water Research*, 2007, **41**(20): 4621-4629.
- [4] Wyffels S, Stijn WH, Boeckx P *et al.* Modeling and simulation of oxygen-limited partial nitrification in a membrane-assisted bioreactor (MBR). *Biotechnology and Bioengineering*, 2004, **86**(5): 531-542.
- [5] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法(第4版). 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
- [6] 刘 雨, 赵庆良, 郑兴灿. 生物膜法污水处理技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [7] Liu Y. Estimating minimum fixed biomass concentration and active thickness of nitrifying biofilm. *J of Environ Eng ASCE*, 1997, **123**(2): 198-202.
- [8] 冯素萍, 朱 英, 邹晓东. 生物膜厚度影响含酚废水处理效果的研究. 工业水处理, 2004, **24**(6): 23-25.
- [9] 李 今, 马剑敏, 张 征等. 复合垂直流人工湿地中基质生物膜的特性. 长江流域资源与环境, 2006, **15**(1): 54-57.
- [10] 王 磊, 吴 蓓. 同步短程硝化反硝化研究. 水资源保护, 2007, **23**(4): 88-94.
- [11] Grady Jr CPL, Daigger GT, Lim HC. 废水生物处理. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [12] Yoo H, Ahn KH, Lee HJ *et al.* Nitrogen removal from synthetic wastewater by simultaneous nitrification and denitrification(SND) via nitrite in an intermittently-aerated reactor. *Water Research*, 1999, **33**(1): 145-154.
- [13] 童 巍, 朱 伟, 阮爱东. 垂直流人工湿地填料的淤堵机理初探. 湖泊科学, 2007, **19**(1): 25-31.
- [14] 詹德昊, 吴振斌, 徐光来. 复合垂直流构建湿地中有机质积累与基质堵塞. 中国环境科学, 2003, **23**(5): 457-461.