

稳定塘藻类生长规律及其影响的中试研究

徐康宁, 汪诚文, 刘巍, 刘翔, 王玉珏

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要:在兰州构建了自然型稳定塘(自然塘)和人工型稳定塘(人工塘)的中试系统,研究了两种稳定塘中藻类生长状况及藻类生长对稳定塘污染物去除功能的影响。相比于自然塘,人工塘增加了折流式导流墙且悬挂了无纺布载体。结果表明,增设导流墙使得人工塘中水流速度比自然塘增加了 2.4 倍,这抑制了人工塘中藻类的生长繁殖。自然塘中藻类比人工塘中藻类生长更为旺盛,叶绿素 a 峰值分别出现在 3 月和 4 月,为 $279.44 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $115.65 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。藻类光合作用使得稳定塘出水 DO 和 pH 都明显高于进水,自然塘藻类生长更为旺盛,因此出水与人工塘出水相比具有更高的 DO 和 pH。更高的 pH 使得自然塘具有更好的氨氮和总磷去除率,分别为 56%和 19%。

关键词:稳定塘;藻;叶绿素 a

中图分类号:X703.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2009)07-1473-05

Pilot Scale Study on the Growth of the Algae in Stabilization Ponds

XU Kang-ning, WANG Cheng-wen, LIU Wei, LIU Xiang, WANG Yu-jue

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The growth of algae was studied in a pilot scale natural stabilization pond (NSP) and artificial stabilization pond (ASP). The ASP was equipped with guide walls and non-woven cloth carrier. The flow rate in the ASP was 2.4 times higher than that in the NSP because of the guide walls. It was found that the higher flow rate inhibited the algae growth in the ASP. The chlorophyll-a level in the NSP was consistently higher than that in the ASP during the study period. The peak value of chlorophyll a in NSP appeared in March and reached $279.44 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, while in ASP the peak value appeared in April and reached $115.65 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. The pH and the DO were increased in the NSP and ASP due to the metabolism of algae when compared with the influent. Due to the better growth of algae, the NSP generally had higher levels of pH and DO than did the ASP. Also, the NSP had a higher level of ammonia and total phosphorus removal efficiency due to the higher pH, which were 56% and 19% respectively.

Keywords: stabilization pond; algae; chlorophyll a

稳定塘技术具有投资少、运行简单、无需污泥处理、能实现污水资源化等优点,尤其适合在人少地广且贫瘠的农村地区应用。我国在 1950 年开始研究稳定塘技术^[1],目前已被应用于各类不同水体的水质净化,包括城市生活污水^[1-2]、工业污水^[1,3-4]、农村生活污水^[1,5-6]等。

藻类在稳定塘中对污染物的去除有着很重要的作用,藻类生长状况的优劣成为稳定塘技术能否成功应用的一个重要因素。同时,在稳定塘技术的研究与

应用中,学者们提出了一些强化措施以改善稳定塘的运行状况,如设置导流墙、加入载体等^[7]。无疑,实施强化措施对藻类生长也会有影响。为此在兰州贫瘠的丘陵地区建立稳定塘中试系统,以期认知藻类生长规律及其生长的影响因素,了解强化措施对藻类生长的影响,研究藻类对稳定塘功能的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料

在同一场地内构建自然塘和人工塘。稳定塘进水来自炼油污水处理厂和化工污水处理厂的二级出水,设计水量共计为 $300 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。进水经过均质配水池,采用多级阶梯式跌水曝气方式进入稳定塘。

收稿日期:2008-11-03

作者简介:徐康宁(1983—),男,山东泰安人,在读博士研究生,主要从事水污染治理和水环境保护。E-mail: xkn02@mails.thu.edu.cn

通讯作者:汪诚文 wangcw@tsinghua.edu.cn

自然塘是模拟自然条件下的稳定塘,由 3 级塘串联组成。人工塘则是模拟增加强化措施之后的稳定塘,塘内设置折流式导流墙分隔出 3 级,第 1 级和第 3 级塘内增加悬挂载体(无纺布材质,垂直水流方向)。稳定塘系统见图 1,各塘尺寸及水力参数详见表 1。

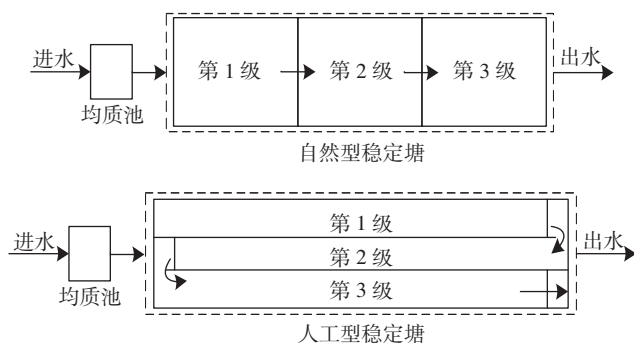


图 1 稳定塘系统示意图

Figure 1 Schematic diagram of the stabilization pond systems

表 1 稳定塘尺寸及水力参数

Table 1 Parameters of the stabilization ponds

项目	平面尺寸/m	有效水深/m	进水流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	停留时间/d
自然塘	22×99	1.6	150	23.2
人工塘	19.5×99	1.6	150	20.7

1.2 煮沸试验

取稳定塘水样,煮沸释放 O_2 。比较煮沸前后的 DO 差异,判断还原性物质是否影响 DO 测定。

1.3 烧杯复氧试验

取稳定塘水样密封避光保存并每隔 12 h 测定其 DO ($<30 \text{ lx}$),同时取稳定塘水样在见光条件下 ($20\,000 \sim 50\,000 \text{ lx}$) 做对比试验。由此判断藻类复氧作用。

1.4 红黏土试验

取 1 L 烧杯,取稳定塘进水和红黏土,体积比为 2:1,避光保存,检测 pH,由此判断红黏土对 pH 的影响。

1.5 分析方法

叶绿素是藻类的重要组成成分,通过测定叶绿素 a 含量能够反映藻类生长状况^[8]。

气温、大气压、光照强度和空气相对湿度等气象条件参数,分别在每天的 8:00 和 14:00 采用便携式气象监测站仪器分析;pH、DO 的测定频率为 1 次· d^{-1} ,采用便携式多参数水质检测仪测定;COD 和氨氮的测定频率为每周 2 次,分别采用重铬酸钾法和纳氏试剂光度法;TP 和叶绿素 a 的测定频率为每周 1 次,分别采用钼锑抗分光光度法和乙醇提取分光光度法。

2 结果

2006 年 11 月中旬稳定塘系统进水,2006 年 12 月中旬进行水质分析。调试运行不久即进入冬季结冰期,2007 年春季回暖进行调整后恢复正常运行,此后的 3 月至 8 月为稳定运行期。

2.1 藻类生长

叶绿素 a 的结果如图 2 所示。自然塘分别在 3 月中旬和 8 月初出现藻类生长高峰期,叶绿素 a 的最高浓度为 $279.44 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,最低浓度低于检测限。人工塘则是在 4 月和 5 月分别出现藻类生长高峰期,叶绿素 a 的最高浓度为 $115.65 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,最低浓度低于检测限。

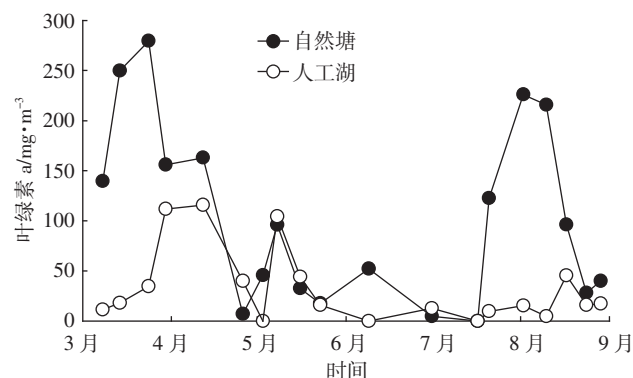


图 2 稳定塘中叶绿素 a 的时间变化曲线

Figure 2 Time-wise variation of the chlorophyll a in the stabilization ponds

2.2 气象条件

气温、大气压、光照强度和相对湿度等如图 3 所示。3 月至 8 月期间,气温整体呈现上升趋势,大气压在夏秋季节偏低,光照强度在 3 月较低,之后基本持平,相对湿度则变化较大,没有显著规律性。

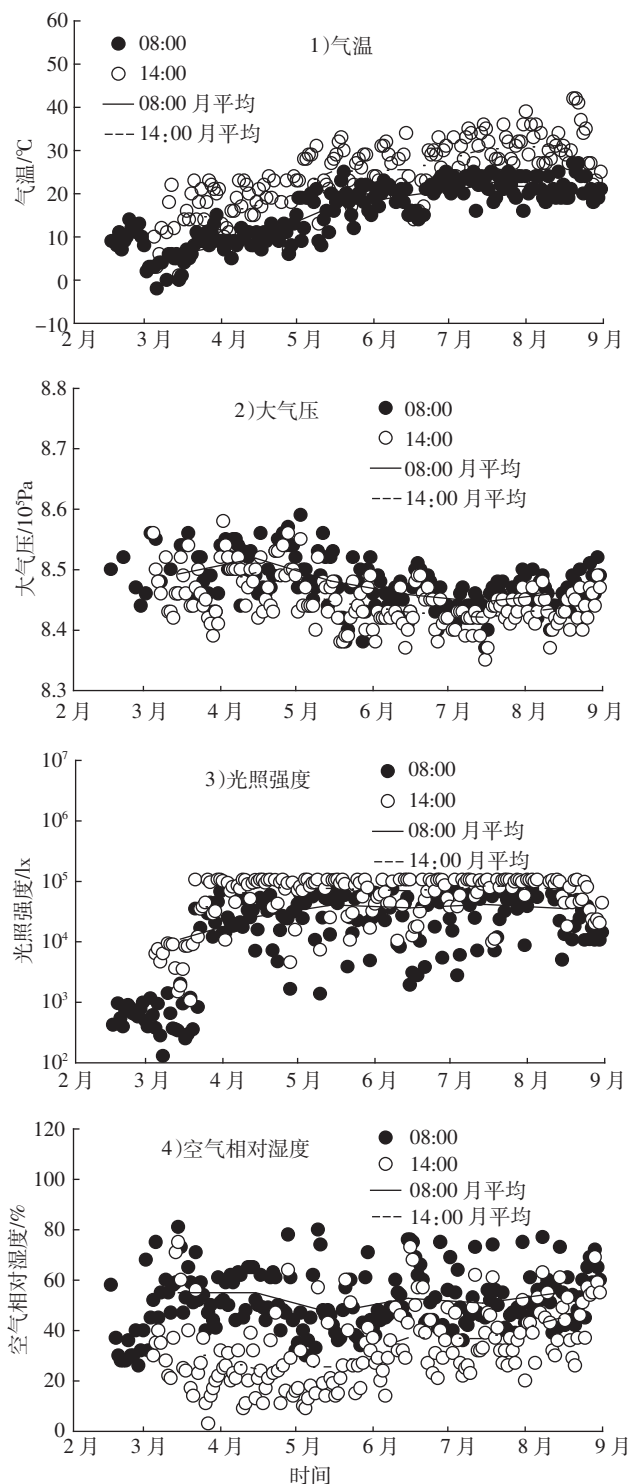
2.3 氮磷水平

氮磷是藻类生长的重要营养物质,尤其氨氮是藻类生长的最主要氮源^[9]。稳定塘进水、自然塘出水和人工塘出水中氨氮和 TP 浓度见表 2。

2.4 稳定塘中 DO 变化

稳定塘 DO 浓度见图 4。稳定塘进水、自然塘出水和人工塘出水 DO 平均值如表 2 所示。两种稳定塘都在 3 月、4 月出现 DO 较高值,此外,自然塘在 7 月中旬以后 DO 维持较高水平。

在煮沸试验中,煮沸前 DO 为 $6.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,煮沸后 $\text{DO} < 0.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。静态复氧试验结果见图 5。稳定塘水样初始 DO 为 $10.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 避光水样 DO 逐渐



1)气温, 2)大气压, 3)光照强度, 4)空气相对湿度

1)Temperature, 2)Atmospheric pressure, 3)Light intensity,

4)Air relative humidity

图 3 气象条件变化曲线

Figure 3 Climate parameters

减少, 108 h 后减少 58%; 见光水样 DO 变化不大, 108 h 后减少 11%。

表 2 稳定塘水质参数

Table 2 Water quality of the stabilization ponds

项目	DO/mg·L ⁻¹	pH	COD/mg·L ⁻¹	氨氮/mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹
进水	3.15±0.59	7.37±0.22	85.4±14.6	3.62±0.46	3.62±2.08
自然塘	7.53±2.42	9.67±0.39	71.1±9.3	2.84±0.40	1.58±0.94
人工塘	5.39±2.27	8.85±0.50	69.7±10.4	3.35±0.50	2.93±2.06

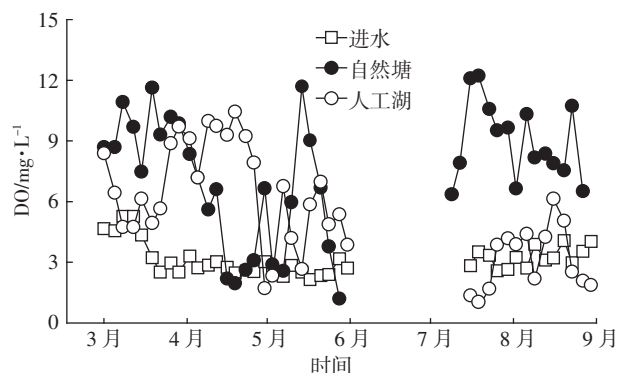


图 4 稳定塘中 DO 浓度

Figure 4 Time-wise variation of DO in the stabilization ponds

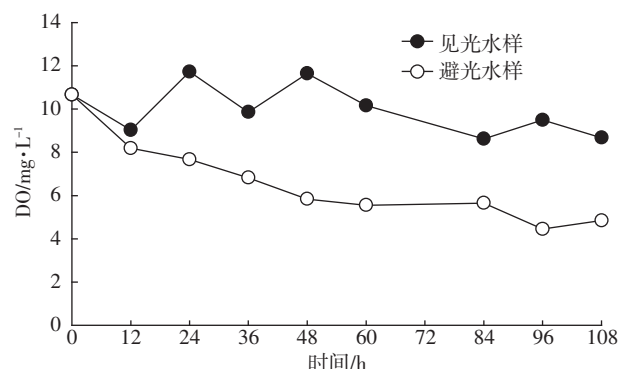


图 5 烧杯复氧试验中 DO 时间变化曲线

Figure 5 Variation of DO in a bench scale experiment of water oxygen restoration

2.5 稳定塘中 pH 变化

稳定塘中 pH 值见图 6。稳定塘进水、自然塘出水和人工塘出水 pH 平均值如表 2 所示。

在红黏土试验中, 水样初始 pH 为 7.40, 避光保存 5 d 后 pH 为 7.38。同时, 沿水流方向检测人工塘中 pH 变化见图 7。进水 pH 为 7.62, 沿水流方向 pH 整体呈现上升趋势, 最终出水 pH 升至 10.72。

2.6 污染物处理效果

稳定塘进水、自然塘出水和人工塘出水的 COD 见表 2, 去除率分别为 17% 和 18%。自然塘和人工塘对氨氮的去除率分别为 21% 和 7%, 对 TP 的去除率分别为 56% 和 19%。两种稳定塘对 COD 的去除效果相差不大, 而自然塘对氨氮和 TP 具有更好的去除效果。

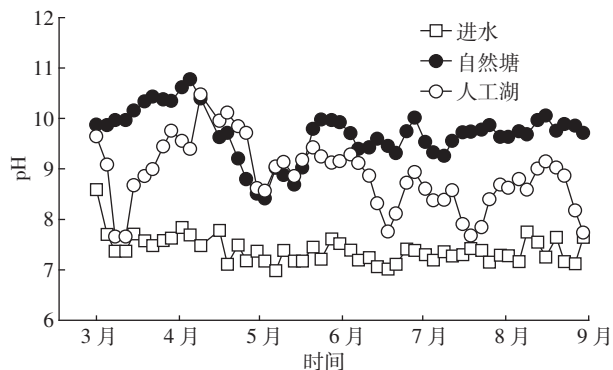


图 6 稳定塘中 pH 值

Figure 6 Time-wise variation of pH in the stabilization ponds

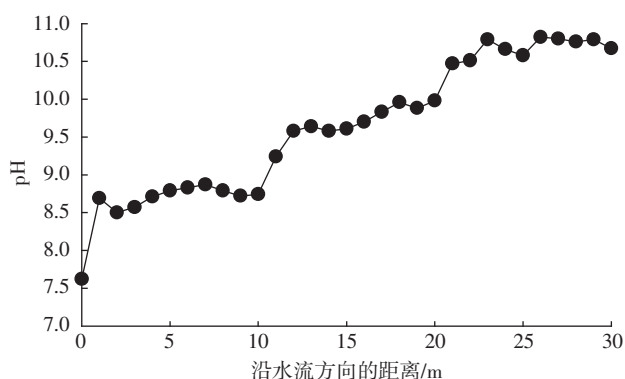


图 7 人工塘沿水流方向 pH 变化

Figure 7 Variation of pH along the flow in ASP

3 讨论

3.1 藻类生长的影响因素

兰州地区海拔 1 520 m, 春季回温较早, 3 月至 4 月, 太阳光照增强, 14:00 光照强度由约 10 000 lx 突增至 80 000 lx, 气温回升, 14:00 气温由 6 ℃增至 15 ℃, 导致水温升至 10~15 ℃, 有利于藻类大量繁殖, 自然塘和人工塘都达到第一个藻类生长高峰期。温度直接影响藻类的生长和繁殖^[8], 光照强度对藻类的光合作用也具有重要影响, 但是很显然, 3 月至 8 月, 气温、大气压、光照强度和空气相对湿度跟藻类生长状况之间没有显著相关性。

叶绿素 a 的检测结果表明, 自然塘中叶绿素 a 要高于人工塘, 藻类生长更为旺盛。两种稳定塘都处于同一种气象条件下, 这表明气象条件并非造成这一差异的原因。两种类型的稳定塘是同一种进水, 氮磷营养水平相同, 同时自然塘中的氮磷浓度要低于人工塘, 分析发现, 氨氮或者 TP 浓度与叶绿素 a 没有显著相关性, 因此氮或者磷的浓度也不是造成藻类生长差异的原因。

两种稳定塘的不同主要是强化措施在人工塘的应用, 包括在塘内设置折流式导流墙和悬挂无纺布。悬挂无纺布可以提供微生物的固定载体, 从而促进微生物生长, 这对藻类生长的影响不大。在塘内设置折流式导流墙不但改变了水流方向, 更重要的是使得塘内水体流速加快。计算可得, 自然塘中流速为 $4.93 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 人工塘中流速为 $1.67 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。导流墙的设置使得人工塘中的流速约是自然塘的 3.4 倍, 从而抑制了藻类的生长繁殖, 对大宁河回水区河段的藻类浓度与流速的研究也得出了类似结论^[10]。

3.2 藻类对稳定塘功能的影响

稳定塘中 DO 和 pH 都有明显增加, 尤其藻类生长旺盛期间增加更为明显, 并且自然塘的 DO 和 pH 高于人工塘。

稳定塘 DO 增高, 存在 3 种可能原因: (1) 水体中含有大量的还原性物质, 影响了 DO 的测定; (2) 大气复氧使得 DO 增加; (3) 藻类光合作用释放 O_2 。煮沸试验结果表明, DO 主要是 O_2 贡献, 而不是还原性物质。静态复氧试验中, 见光水样 DO 变化不大, 而避光水样则 DO 明显降低, 同时, 见光水样在白天 DO 微升, 夜晚 DO 微降。这表明, 藻类光合作用复氧是稳定塘 DO 升高的主要原因。

稳定塘水体 pH 升高, 存在 2 种可能原因: (1) 稳定塘红黏土底泥释放碱性物质; (2) 藻类光合作用使 pH 升高。红黏土试验中, 放置 5 d 后, pH 基本没有变化, 可认为红黏土底泥对 pH 影响较小。同时, 如果稳定塘底泥在 pH 变化中起主要作用的话, 则沿水流方向人工塘 pH 应该呈线性增长, 而监测中发现 pH 呈非线性变化, 因此可以排除底泥影响。上述结果表明, 藻类是稳定塘 pH 升高的主要因素。

两种稳定塘对有机污染物具有基本相同的去除效果。虽然藻类光合作用为微生物分解有机污染物的代谢活动提供 O_2 , 有助于对 COD 的去除, 但是藻类吸收 CO_2 的转化也能够贡献 COD。因此, 藻的生长优势并未使得自然塘具有更好的 COD 去除效果。

自然塘对氮磷具有更好的去除效果, 这跟稳定塘中 pH 升高密切相关。pH 升高有助于稳定塘中氨氮的去除。Konig 指出, 在高效藻类塘中, pH 为 9 时, 40% 的氨氮以气态 NH_3 的形态去除; pH 为 10 时, 80% 的氨氮以气态 NH_3 的形态去除^[11]。同时, 稳定塘中的高 pH 值有利于磷的沉淀去除。Doran 等指出, 在去除的磷中, 约 90% 是通过沉淀去除的^[12]。因此, 稳定塘中更为旺盛的藻类生长使得自然塘具有更强的氮

磷去除功能,而折流式导流墙的应用使得稳定塘的氮磷去除功能被削弱。

4 结论

(1)稳定塘藻类的第一个生长高峰期出现在3月至4月,此时光照强度从10 000 lx骤升至80 000 lx,水温在10~15℃之间;自然塘和人工塘叶绿素a最高浓度分别为279.44 mg·m⁻³和115.65 mg·m⁻³,最低浓度都低于检测限。

(2)自然塘比人工塘中的藻类生长旺盛。气象条件和氮磷浓度不是导致这一差异的原因。导流墙的设置使得人工塘中水体的流速约是自然塘的3.4倍,流速增大抑制了藻类的生长繁殖。

(3)与进水相比,稳定塘出水DO和pH都有明显增加,尤其藻类生长旺盛期间增加更为明显,藻类光合作用是导致这一现象的主要因素。自然塘中藻类生长更为旺盛,因此其DO和pH高于人工塘。

(4)更为旺盛的藻类生长使得自然塘具有更强的氮磷去除功能,氨氮和TP去除率分别为56%和19%。导流墙的应用使得人工塘的氮磷去除功能被削弱,氨氮和TP去除率分别为21%和7%。

参考文献:

- [1] 董良德,张民,陆上岭,等.我国氧化塘废水处理的现状简述[J].污染防治技术,1995,8(1):52-56.
DONG Liang-de, ZHANG Min, LU Shang-ling, et al. Actuality statement of oxidation pond wastewater treatment in China[J]. *Pollution Control Technology*, 1995, 8(1):52-56.
- [2] 刘汝鹏,曲莹,于水利.生态稳定塘系统在城市污水处理中的应用[J].水处理技术,2006,32(11):68-69.
LIU Ru-peng, QU Ying, YU Shui-li. Application of ecotypic stabilization pond system in municipal wastewater treatment[J]. *Technology of Water Treatment*, 2006, 32(11):68-69.
- [3] 黄玉瑶,许木启,高玉荣,等.汉沽生物稳定塘净化效果研究[J].应用与环境生物学报,1999,5(4):362-366.
HUANG Yu-yao, XU Mu-qi, GAO Yu-rong, et al. Study on efficiency of Hangu biological stabilization pond[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 1999, 5(4):362-366.
- [4] 刘智晓,祁佩时,丁雷,等.气浮/氧化沟/稳定塘处理亚麻废水[J].中国给水排水,2004,20(9):73-74.
LIU Zhi-xiao, QI Pei-shi, DING Lei, et al. Air-flotation/oxidation ditch/stabilization pond process for treatment of flax retting wastewater [J]. *China Water & Wastewater*, 2004, 20(9):73-74.
- [5] 黄翔峰,池金萍,何少林,等.高效藻类塘处理农村生活污水研究[J].中国给水排水,2006,22(5):35-39.
HUANG Xiang-feng, CHI Jin-ping, HE Shao-lin, et al. Treatment of domestic wastewater with high-rate algal pond in rural areas[J]. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(5):35-39.
- [6] 李旭东,周琪,黄翔峰,等.高效藻类塘系统处理太湖地区农村生活污水[J].水处理技术,2006,32(6):61-64.
LI Xu-dong, ZHOU Qi, HUANG Xiang-feng, et al. Treatment of rural domestical sewage by highly effective algal pond in Taihu area [J]. *Technology of Water Treatment*, 2006, 32(6):61-64.
- [7] 李松,尹海龙,薛红征.稳定塘改进措施研究进展[J].净水技术,2006,25(4):10-13.
LI Song, YIN Hai-long, XUE Hong-zheng. Research progress on the advancement of wastewater stabilization pond[J]. *Water Purification Technology*, 2006, 25(4):10-13.
- [8] 吴洁,钱天鸣,虞左明.西湖叶绿素a周年动态变化及藻类增长潜力试验[J].湖泊科学,2001,13(2):142-147.
WU Jie, QIAN Tian-ming, YU Zuo-ming. The annual fluctuation of chlorophyll-a and the algal growth potential test in West Lake, Hangzhou[J]. *Journal of Lake Science*, 2001, 13(2):142-147.
- [9] 何少林,黄翔峰,乔丽,等.高效藻类塘氮磷去除机理的研究进展[J].环境污染治理技术与设备,2006,7(8):6-11.
HE Shao-lin, HUANG Xiang-feng, QIAO Li, et al. Research progress on the removal mechanisms of nitrogen and phosphate in high rate algal ponds[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2006, 7(8):6-11.
- [10] 黄程,钟成华,邓春光,等.三峡水库蓄水初期大宁河回水区流速与藻类生长关系的初步研究[J].农业环境科学学报,2006,25(2):453-457.
HUANG Cheng, ZHONG Cheng-hua, DENG Chun-guang. Preliminary study on correlation between flow velocity and algae along daning rivers backwater region at sluice initial stages in the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(2):453-457.
- [11] Konig A, Pearson H W, Silva S A. Ammonia toxicity to algal growth in waste stabilization ponds[J]. *Water Science & Technology*, 1987, 19(12):115-122.
- [12] Doran M D, Boyle W C. Phosphorus removal by activated algae[J]. *Water Research*, 1979, 13(8):805-812.