

文章编号:1000-582X(2008)10-1169-05

风车草泡板型浮岛在污染河水中的脱氮试验

罗固源, 吴松, 肖华, 韩金奎, 许晓毅, 郑剑锋

(重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘要:介绍了泡板型浮岛在污染河水中的脱氮试验。实验表明浮岛植物的脱氮效能依次为: 风车草>香根草>菖蒲。研究了去除负荷与覆盖率及进水负荷之间关系, 结果表明以 30% 覆盖率为分界点, 去除负荷与覆盖率之间的关系有明显的变化; 去除负荷与进水负荷之间满足二次函数关系。最后得出了实验条件下的最适宜的覆盖率和进水负荷。

关键词:浮岛; 去除负荷; 脱氮; 风车草

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

Analysis of *Cyperus alternifolius* foam floating islands on nitrogen removal in polluted rivers

LUO Gu-yuan, WU Song, XIAO Hua, HAN Jin-kui, XU Xiao-yi, ZHENG Jian-feng

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: We conducted a nitrogen removal test using floating islands in polluted rivers. The results show the nitrogen removal efficiency of *Cyperus alternifolius* exceeds that of *Vetiveria zizanioides* which in turn is greater than *flagleaf*. The relationship among removal loading, coverage rate and inflow loading was studied. The boundary of coverage rate was 30%. There was a significant change in the relationship between removal loading and coverage rate. The relationship between removal loading and inflow loading follows a quadratic function. The appropriate coverage rate and inflow loading were found based on this test.

Key words: floating islands; removal loading; nitrogen removal; *Cyperus alternifolius*

人工浮岛的雏形产生于 20 世纪 50 年代, 20 世纪 70 年代前, 国外利用水生高等植物净化污水, 常常选用一般的水生杂草, 净化效果不甚理想。20 世纪 80 年代以后, 一些国家对人工浮岛技术进行了较为深入的研究, 在浮岛载体、植物种类、污染物负荷等关键因素上取得突破, 获得了非常好的治理效果。中国从 20 世纪 80 年代起也对人工浮岛技术开展了一些有意义的研究, 推广了一系列示范工程, 如在太湖五里湖、北京什刹海等污染水体的治理中, 人工浮

岛技术都显现出良好的效果。人工浮岛由于其投资少、运行费用低、不单独占用土地、不产生二次污染且有一定景观效果等特点, 得到越来越广泛的应用。

风车草 (*Cyperus alternifolius*) 属多年生草本植物, 由于其生物量大、根系发达、对氮磷吸收效果较好, 被广泛应用于污染水体的治理^[1-2]。目前, 大部分研究主要从植物的角度考察风车草对氮磷的吸收能力^[1,3], 有关风车草脱氮能力与其主要影响因素的关系鲜有报道。试验将风车草等植物应用于泡板

收稿日期: 2008-06-10

基金项目: 重庆市科技攻关计划资助项目 (CSTC, 2006AB7020)

作者简介: 罗固源 (1944-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事水污染控制理论与技术的研究,

(E-mail) gyluo@cqu.edu.cn。

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

型浮岛,考察其对污染河水的脱氮效果,并进一步研究了去除负荷与进水负荷、覆盖率(人工浮岛面积与水面面积的比值)等影响因素的关系,找出试验条件下风车草浮岛适宜的覆盖率和进水负荷,为风车草泡板型浮岛治理污染水体提供依据和参考。

1 试验装置和方法

1.1 试验装置

试验基地位于重庆市江津区朱杨镇,临江河下游,毗邻临江河河口。试验水池建于临江河畔,污染河水自上游引入水池。试验分别设计风车草、香根草、菖蒲植物浮岛各1个,进行植物筛选试验。进行覆盖率实验时,每种覆盖率单独设计一个浮岛,并设一空白水池进行对比分析。单个试验水池尺寸为 $2.7\text{ m} \times 2.3\text{ m} \times 1.0\text{ m}$,水深 0.8 m (如图1所示)。浮板采用聚苯乙烯发泡板(长 2.0 m ,宽 1.0 m ,厚 5 cm),在板上均匀打孔栽种植物,密度为 $16\text{ 株}/\text{m}^2$,每株 $2\sim 4$ 个分蘖,栽种时用中泡海绵将植株固定于孔内。风车草和香根草种苗从重庆市环境科学研究院试验场地移栽,菖蒲为当地植物。

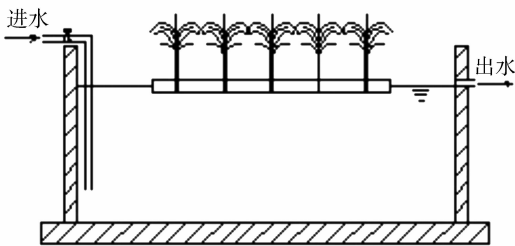


图1 试验装置示意图

1.2 试验方法

浮岛于2007年3月28日建成并运行40 d后开始取样,每隔3 d测试水质数据,每隔10 d测量植物株高和根长变化。具体试验安排如下:

1) 植物筛选。采用风车草、香根草和菖蒲3种植物浮岛,在相同进水负荷 $0.26\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、相同覆盖率(30%)条件下,考察植物种类对脱氮效果的影响,筛选合适的脱氮植物。

2) 覆盖率试验。分别设置10%、20%、30%、45%和60%几种覆盖率,并设置一空白池作对比,采用试验(1)选出的浮岛植物(风车草)以及相同的进水负荷 $0.26\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,研究覆盖率对浮岛脱氮效果的影响。

3) 处理负荷的试验。通过调节进水水量控制进水负荷,考察在不同负荷下的总氮去除效果,研究去除负荷随进水负荷变化的关系。

1.3 试验水质

试验用水采用临江河河水,临江河流经重庆永川、江津两区,流域内人口稠密、工农业发达,污水排放量大,其污染源主要是永川、江津两区排放的工业废水、生活污水及沿途农业面源污染水体,河水水质属GB3838—2002《地表水环境质量标准》中劣V类,为重度污染河流。试验期间其水质如表1所示。

指标	TN	NH ₃	DO
范围	26.1~42.0	20.8~33.6	0.9~1.4

1.4 仪器与方法

水体中总氮采用哈希公司DR/2800型便携式分光光度计和DRB200消解器测试,DO测试使用哈希公司sensION6型便携式溶氧仪。

2 试验结果与分析

2.1 植物生长情况

试验于2007年3月28日栽种植物,移栽时采用带根的风车草、香根草和菖蒲,截去茎的中上部,保留约15 cm左右。试验期间,植物高度和根长随时间变化如图2所示,4月下旬植物开始发芽分蘖,成活率分别达到95%、91%和94%。进入5、6月份,植物生长迅速,特别是6月中旬到7月中旬,这段时间是植物生长最迅速的时候,3种植物高度变化为 $2.1\text{ cm}/\text{d}$ 、 $2\text{ cm}/\text{d}$ 和 $1.8\text{ cm}/\text{d}$,根长变化为 $1\text{ cm}/\text{d}$ 、 $0.7\text{ cm}/\text{d}$ 、 $0.4\text{ cm}/\text{d}$ 。到7月下旬的时候,植物成熟,高度和根长不再显著变化。

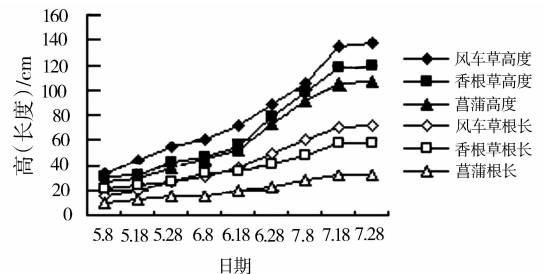


图2 植物株高、根长变化图

3种植物在浮岛中经过近4个月的生长,株高、根长和生物量如表2所示。3种指标都是风车草最高,菖蒲最低,几种植物的种间差异显著,在相同覆盖率的情况下,风车草的平均生物量达 $2744\text{ g}/\text{m}^2$,是香根草和菖蒲的1.5倍以上。

表 2 成熟植物的株高、根长和生物量

植物	株高/cm	根长/cm	生物量/(g·m ²)	样本数/个
风车草	135±15	70±9	2 744±125	32
香根草	118±10	57±8	1 710±96	32
菖蒲	105±12	32±6	1 652±101	32

注:表中数据为均值±标准差

2.2 3种植物脱氮效果比较

3种植物浮岛的脱氮效果见表 3。从表 3 可知,在 TN 进水平均浓度为 30.2 mg/L 条件下,风车草、香根草和菖蒲浮岛对 TN 平均去除率分别达到 45.6%、38.9%、36.1%。

表 3 植物的脱氮效果 mg/L

指标	植物的脱氮效果			样本数/个	
	风车草	香根草	菖蒲		
TN	进水	30.2±4.5	30.2±4.5	30.2±4.5	20
	出水	16.4±1.9	18.4±2.7	19.3±2.4	20

注:表中数据除样本数外均为均值±标准差。

几种植物浮岛中,风车草浮岛脱氮效果最好,香根草次之,菖蒲相对较差。经分析认为:试验期间,风车草生长速度最快,生物量大于香根草和菖蒲,在相同生长周期内,生物量一般是香根草和菖蒲的 1.5 倍以上,为了提供生长所需要的氮元素,必然更多的吸收水体中的氮。植物的根系对污染物的吸附和吸收作用是浮岛技术处理污染水体的重要途径,风车草根系发达,根须多,根长可达到 60~80 cm,是香根草和菖蒲根长的 1.2~2 倍,在浮岛中形成类似于网状的结构,有利于水体中污染物的沉降。同时,植物根系发达则向水中转移输送氧气的能力强,易于形成好氧-厌氧的微环境^[4-8],也为微生物提供良好的栖息载体,有利于硝化和反硝化细菌的附着生长,可以为微生物的硝化/反硝化脱氮提供有利条件。试验结果表明,3种植物脱氮能力的高低依次为:风车草>香根草>菖蒲。

2.3 覆盖率对脱氮效果的影响

不同覆盖下 TN 去除负荷及水体中溶解氧浓度见图 3,从图 3 可以看出,溶解氧浓度在覆盖率为 0 的时候最大,达到 2.1 mg/L,在覆盖率较低的时候,覆盖率的增加对溶解氧浓度影响较小,这时随着覆盖率的上升,溶解氧浓度降低的幅度较小。当覆盖率超过 30% 的时候,浮岛内溶解氧受覆盖率的影响较大,溶解氧下降十分明显,覆盖率达到 60% 时,溶解氧浓度降至 0.8 mg/L。

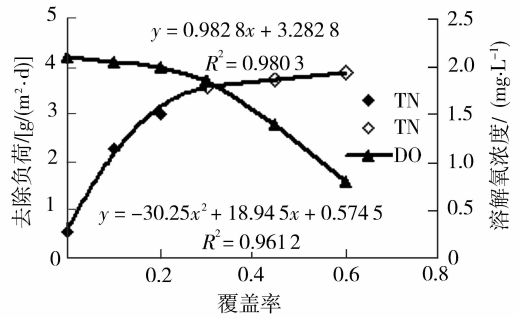


图 3 不同覆盖率下的去除负荷及溶解氧

去除负荷随覆盖率的变化在覆盖率为 30% 前后具有比较明显的差异,以覆盖率 30% 为分界点对两者进行分段拟合。当覆盖率在 30% 以下时,去除负荷与覆盖率之间呈 $y = -30.25x^2 + 18.945x + 0.5745$ 关系,而当覆盖率超过 30% 的时候,去除负荷与覆盖率之间基本成线性关系,其数学模式为 $y = 0.9828x + 3.2828$,两式中 x 均表示覆盖率, y 均表示去除负荷。

从图 3 可以看出,随着覆盖率的增加,TN 去除负荷的上升呈先快后慢的趋势,覆盖率较低时,去除负荷随覆盖率的增加迅速上升,当覆盖率大于 30% 时,去除负荷与覆盖率之间呈一条平缓的直线,去除负荷上升缓慢。这是因为:当覆盖率小于 30% 时,浮岛内溶解氧充分,此时脱氮的主要影响因素为植物的数量,覆盖率增加,植物吸收的氮增加,同时植物生长营造了适合于微生物生长的环境,使得浮岛内硝化/反硝化反应能够顺利的进行,且由于植物的存在,浮岛内吸附、沉淀的效果增强,所以去除负荷上升显著。而当覆盖率超过 30% 时,覆盖率的增加对提高去除负荷的贡献十分有限,去除负荷增加缓慢。此时,浮岛内溶解氧浓度下降明显,导致植物根系附近的溶解氧浓度偏低,根系附近发生硝化/反硝化作用脱氮的能力减弱。此时,由于植物增多,吸附及吸收水体中总氮的能力增强,植物吸收去除的总氮有所增加,但由于植物吸收在脱氮中占的比例很小,而硝化/反硝化反应对脱氮的贡献很大^[9-12],植物吸收所增加的去负荷被因硝化/反硝化反应脱氮能力减弱而降低的去负荷抵消一部分,因而导致总的去除负荷增加量很小,在这种情况下,依靠覆盖率的增加来提高浮岛的去负荷是不可取的。所以,风车草泡板型浮岛采用 30% 的覆盖率是较为经济的,也可以取得较好的脱氮效果。

2.4 进水负荷对去除负荷的影响

进水负荷是影响浮岛脱氮效果的关键因素之一,试验通过改变进水水量来调节进水负荷,试验共

采用了10种TN进水负荷,在同一进水负荷下至少测试3次数据,考察进水负荷对去除负荷的影响,不同进水负荷下的去除负荷如图4所示。

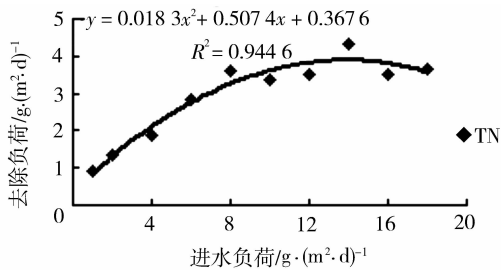


图4 去除负荷与进水负荷的关系

采用多项式对进水负荷与去除负荷之间的关系进行拟合,结果如图4所示,得出进水负荷对去除负荷影响的数学模式为 $y = -0.018 3x^2 + 0.507 4x + 0.367 6$,其中 y 表示去除负荷, x 表示进水负荷。从图4可知,进水负荷低于 $10 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,TN 的去除负荷随着进水负荷的上升而上升,且上升幅度较大,当TN的进水负荷在 $10 \sim 14 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,去除负荷较高且维持在比较恒定的水平,基本不随进水负荷的变化而改变,当TN进水负荷超过 $14 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,去除负荷随着进水负荷的上升有下降的趋势。其原因是进水负荷较低时,随着进水负荷的增加,停留时间有一定下降,但依然能够保证浮岛内各种脱氮反应顺利进行所需时间,同时由于反应物TN浓度增加,各种脱氮反应可以很好的发生,去除负荷上升明显。当进水负荷超过 $14 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,进水负荷的增加导致水力负荷上升,停留时间明显下降,污染物沉淀和接触时间下降,植物根系吸附水体中微小颗粒的难度增加,不利于植物对营养物质的吸收,也不利于硝化/反硝化反应的完全进行,此时的停留时间已不能再保证浮岛内各种脱氮反应的顺利进行,且TN浓度过大可能抑制一些脱氮反应^[13-15],去除负荷反而有所下降。而当进水负荷在 $10 \sim 14 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,TN在浮岛中停留的时间长,且作为反应物它的浓度较大,可以使脱氮的各种反应很好的发生,故此时的去除负荷较高。因此,在试验条件下,进水TN负荷在 $10 \sim 14 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 之间,TN可以取得较好的去除效果。

3 结论

1)在相同的进水负荷和覆盖率条件下,几种植物脱氮的效果依次为:风车草>香根草>菖蒲。

2)对于风车草泡板型浮岛,当其覆盖率在30%

以下时,去除负荷随覆盖率的增加显著上升;而当覆盖率超过30%时,覆盖率增加对提高去除负荷的贡献十分有限,去除负荷随覆盖率上升缓慢。30%是风车草浮岛比较合适的覆盖率。

3)风车草泡板型浮岛的进水负荷与去除负荷之间具有明显的相关关系。当TN进水负荷在 $10 \sim 14 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 之间时,去除负荷较高且比较恒定,基本不随着进水负荷变动,TN可以取得较为理想的去除效果。

4)试验所在的临江河中,采用覆盖率为30%的风车草泡板型浮岛,控制进水TN负荷在 $10 \sim 14 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,能够取得较好的脱氮效果。

参考文献:

- [1] 廖新梯,骆世明. 香根草和风车草人工湿地对猪场废水氮磷处理效果的研究[J]. 应用生态学报,2002,13(6): 719-722.
LIAO XIN-DI, LUO SHI-MING. Effects of constructed wetlands on treating with nitrogen and phosphorus in wastewater from hoggerly [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(6): 719-722.
- [2] 张智,林艳,郭蔚华,等. 风车草修复富营养化城市内湖去除氮磷试验研究[J]. 水处理技术,2005,31(3): 76-79.
ZHANG-ZHI, LIN-YAN, GUO WEI-HUA, et al. Renovation of eutrophicated urban inner lake and nitrogen and phosphorus removal with cyperus alternifolius [J]. Technology of Water Treatment, 2005, 31(3): 76-79.
- [3] 靖元孝,陈兆平,杨丹菁. 风车草对生活污水的净化效果及其再人工湿地的应用[J]. 应用与环境生物学报,2002,8(6):614-617.
JING YUAN-XIAO, CHEN ZHAO-PING, YANG DAN-JING. Purifying efficiency of cyperus alternifolius to domestic sewage and its application in constructed wetland [J]. Chinese Journal of Applied Environment Biology, 2002, 8(6): 614-617.
- [4] 张政,付融冰,顾国维,等. 人工湿地脱氮途径及其影响因素分析[J]. 生态环境,2006,15(6):1385-1390.
ZHANG-ZHENG, FU RONG-BING, GU GUO-WEI, et al. Analyse of nitrogen removal pathways and their effect factors in constructed wetland [J]. Ecology and Environment, 2006, 15(6): 1385-1390.
- [5] 杨敦,周琪. 人工湿地脱氮技术的机理和应用[J]. 中国给水排水,2003,19(1):23-24.
YANG-DUN, ZHOU-QI. Mechanism and application of nitrogen removal by constructed wetlands [J]. China Water & Wastewater, 2003, 19(1): 23-24.
- [6] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. 环境科学,1995, 16(3): 83-86.
WU XIAO-LEI. Mechanism of wastewater treatment in constructed wetlands [J]. Environment Science, 1995, 16(3): 83-86.

- [7] SIKORA F J, TONG Z, BEHREND S L L, et al. Ammonium removal in constructed wetlands with recirculating subsurface flow: removal rates and mechanisms[J]. *Water Science Technology*, 1995, 32(3):193-202.
- [8] TANNER C C. Plants for constructed wetland treatment systems—a comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species[J]. *Ecology Engineering*, 1996, 10(7):59-83.
- [9] BREEN P E. A mass balance method for assessing the potential of artificial wetlands for waste water treatment[J]. *Water Resource*, 1991, 24(6):689-697.
- [10] ROGERS K H, BREEN A J, CHICK A J. Nitrogen removal in experimental wetland treatment systems: evidence for the role of aquatic plants[J]. *JWPCF*, 1991, 63(7):934-941.
- [11] GREENWAY M. Nutrient content of wetland plants in constructed wetlands receiving municipal effluent in tropical Australia[J]. *Water Science Technology*, 1997, 35(5):135-142.
- [12] 付融冰,杨海真,顾国维,等. 潜流人工湿地对农村生活污水氮去除的研究[J]. *水处理技术*, 2006, 32(1):18-22.
- FU RONG-BING, YANG HAI-ZHEN, GU GUO-WEI, et al. Nitrogen removal from rural sewage by subsurface horizontal-flow in artificial wetlands[J]. *Technology of Water Treatment*, 2006, 32(1):18-22.
- [13] 聂志丹,年跃刚,李林锋,等. 水力负荷及季节变化对人工湿地处理效率的影响[J]. *给水排水*, 2006, 32(11):28-31.
- NIE ZHI-DAN, NIAN YUE-GANG, LI LIN-FENG, et al. Effect of hydraulic loading and seasonal fluctuation on pollution removal of constructed wetlands[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2006, 32(11):28-31.
- [14] JING S R, LIN Y F, LEE D Y, et al. Nutrient removal from polluted river water by using constructed wetlands[J]. *Bioresource Technology*, 2001, 76:131-135.
- [15] 汪俊三,覃环. 高水力负荷人工湿地处理富营养化湖水[J]. *中国给水排水*, 2005, 21(1):1-4.
- WANG JUN-SAN, QIN-HUAN. Constructed wetland at high hydraulic loading for eutrophic lake water treatment[J]. *China Water & Wastewater*, 2005, 21(1):1-4.

(编辑 陈移峰)

(上接第 1168 页)

- [6] HITOSHI S A. High-speed observation of a cavitating jet in air [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2005, 127(4):1095-1101.
- [7] QIN M, JU D Y, OBA R. Improvement on the process capability of water cavitation peening by aeration [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2006, 200(18/19):5364-5369.
- [8] SUN Z, KANG X Q, WANG X H. Experimental system of cavitation erosion with water-jet [J]. *Materials and Design*, 2005, 26(1):59-63.
- [9] FLINT E B, SUSLICK K S. Temperature of cavitation [J]. *Science*, 1991, 253:1397-1399.
- [10] KALUMUCK K M, CHAHINE G L. The use of cavitation jets to oxidize organic compounds in water [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2000, 122(11):465-470.
- [11] GOGATE P R. Cavitation: an auxiliary technique in wastewater treatment schemes [J]. *Advances in Environmental Research*, 2002, 6(3):335-358.
- [12] HUA I, HOECHMER R H, HOFFMANN M R. Sonolytic hydrolysis of p-nitrophenyl acetate: the role of supercritical water [J]. *Journal of Physical Chemistry*, 1995, 99(8):2335-2342.
- [13] 魏群,高孟理,孙三祥,等. 水力空化降解若丹明 B 的初步试验研究[J]. *湖南城市学院学报*, 2004, 13(3):25-27.
- WEI QUN, GAO MENG-LI, SUN SAN-XIANG, et al. Experimental study of the decomposition of rhodamine B by hydrodynamic cavitation[J]. *Journal of Hunan City University*, 2004, 13(3):25-27.
- [14] 汤红妍. 水中酚类污染物的多能场协同降解研究[D]. 武汉:武汉理工大学硕士学位论文, 2005.
- [15] 赵德明,史惠祥,雷乐成,等. US/H₂O₂ 组合工艺催化降解苯酚水溶液的研究[J]. *浙江大学学报:工学版*, 2004, 38(2):240-243.
- ZHAO DE-MING, SHI HUI-XIANG, LEI LE-CHENG, et al. Degradation of phenol in aqueous solution by US/H₂O₂ combination process[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2004, 38(2):240-243.
- [16] 赵彬斌,王丽. 超声波技术对水中有机污染物的降解[J]. *化学工程师*, 2002(6):21-22.
- ZHAO BIN-BIN, WANG LI. Ultrasonic degradation of organic compound in water [J]. *Chemical Engineer*, 2002(6):21-22.
- [17] 孔黎明,谷和平,吕效平,等. 超声-过氧化氢-氧化铜组合技术催化氧化水中苯酚[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2005, 6(11):62-65.
- KONG NI-MING, GU HE-PING, LV XIAO-PING, et al. Catalytic oxidation of phenol in aqueous solution by the ultrasound-H₂O₂-CuO technology [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control Total Contents of Volume*, 2005, 6(11):62-65.

(编辑 张 苹)