

宽叶香蒲表面流人工湿地脱氮除磷效果研究^{*}

谭洪新¹ 周琪² 杨殿海²

(1. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要 以运行A/O工艺的生化反应器出水为处理对象,在中试规模上研究了宽叶香蒲表面流人工湿地的脱氮除磷效果及影响因素。结果表明,在工况条件下,COD去除率为43.2%,COD面积负荷去除率为4.79 g/(m²·d),COD面积负荷去除率常数为0.18 m/d,SS、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N的去除率分别为41.2%、9.4%、3.4%,TN去除率为11.8%,TN面积负荷去除率为1.36 g/(m²·d),TN面积负荷去除率常数为0.04 m/d,TP去除率为30.1%,TP面积负荷去除率为0.29 g/(m²·d),TP面积负荷去除率常数为0.13 m/d;在工况条件下,COD去除率为18.7%,COD面积负荷去除率为1.19 g/(m²·d),COD面积负荷去除率常数为0.06 m/d,SS、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N的去除率分别为31.6%、29.8%、65.0%、29.2%,TN去除率为31.4%,TN面积负荷去除率为2.33 g/(m²·d),TN面积负荷去除率常数为0.12 m/d,TP去除率为29.4%,TP面积负荷去除率为0.22 g/(m²·d),TP面积负荷去除率常数为0.11 m/d。在COD面积负荷去除率、TN面积负荷去除率、TP面积负荷去除率分别为4.90~9.80、2.76~8.83、0.57~1.39 g/(m²·d),水力停留时间(HRT)为0.4~1.1 d条件下,随HRT、水温、(NO₂⁻-N+NO₃⁻-N)/TN的增加,表面流人工湿地的TN面积负荷去除率线性增加。

关键词 表面流人工湿地 生化反应器 脱氮除磷 宽叶香蒲

Removal of nitrogen and phosphorus by free water surface constructed wetland planted with *Typha latifolia* Tan Hongxin¹, Zhou Qi², Yang Dianhai². (1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306; 2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: Free water surface constructed wetland planted with *Typha latifolia* was employed to treat effluent from biochemical reactor under A/O process. The removal efficiency of nitrogen and phosphorus of the wetland system were investigated. The treatment effects of the free water surface constructed wetland under two conditions were presented in the paper. The effect of hydraulic retention time (HRT), water temperature and content of oxidation state nitrogen on total nitrogen (TN) area loading removal rate was studied. When COD area loading rate was 4.90-9.80 g/(m²·d), TN area loading rate was 2.76-8.83 g/(m²·d), TP area loading rate was 0.57-1.39 g/(m²·d), hydraulic retention time was 0.4-1.1 d, TN area loading removal rate was linearly increased with increasing of HRT, water temperature and (NO₂⁻-N + NO₃⁻-N)/TN ratio. The different mechanisms and favorable conditions for treatment of different types of wastewater by wetland system were discussed in the final.

Keywords: free water surface constructed wetland; biochemical reactor; nitrogen and phosphorus removal; *Typha latifolia*

表面流人工湿地类似于天然湿地系统,是将污水有控制地投配到土壤/植物/微生物复合生态系统中,并使土壤经常处于饱和状态,污水在沿一定方向流动过程中,在耐湿植物和土壤相互作用下得到充分净化的处理系统。该处理系统的工艺目标包括:

直接处理污水;对经人工或其他工艺处理后的污水进行再处置或深度处理;利用污水营造湿地自然保护区,为野生群落提供有价值的生态栖息地,为生物多样性研究提供场地^[1]。表面流人工湿地系统主要通过植物吸收/收获、硝化/反硝化、氨气挥发、离子交换等途径脱氮。污水沿一定方向流动过

程中,随有机氮的氨化、硝化和反硝化,氮素转化频率增加,TN被去除。若进水已被充分硝化,在有机物(主要来自植物腐烂所释放的溶解性有机碳)供应充足的情况下,可提高反硝化脱氮效率^[2,3]。在除磷方面,可通过沉降作用、植物根茎捕获、生物膜吸附等途径去除^[4]。为实现运行A/O工艺的生化反应器出水(简称A/O工艺出水)的深度净化,笔者将A/O工艺出水引入宽叶香蒲表面流人工湿地系统中进行深度脱氮除磷,为人工湿地深度净化工艺设计和优化提供参考。

第一作者:谭洪新,男,1968年生,博士,教授,主要从事设施渔业和生态工程方面的研究。

^{*}国家科技支撑计划项目(No. 2006BAD03B06);上海市重点学科建设项目(No. S30701)。

1 材料与方

1.1 试验装置

A/O工艺出水通过配水管路进入表面流人工湿地,经处理后排湖。图1为表面流人工湿地结构示意图。表面流人工湿地(长×宽×高=14.5 m×2.6 m×1.0 m)四周及底部为混凝土结构,总有效面积为37.7 m²,素土(天然沉积形成的土,没有掺杂石灰、河流带来的砂石)填充高度为0.5 m,覆盖塘泥0.2 m。2004年2月30日,种植宽叶香蒲(*Typha latifolia*),行距及株距均为30 cm。

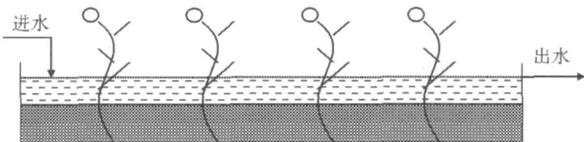


图1 表面流人工湿地结构示意图

Fig.1 The structural schematic diagram of free water surface constructed wetland

1.2 运行工况

2004年3~4月,A/O工艺出水按试验流量通过配水管路进入表面流人工湿地,人工湿地运行期间,水位控制在0.2 m左右。此时,A/O工艺出水氮素以NH₄⁺-N和有机氮为主,以12 m³/d进水流量将A/O工艺出水配送到表面流人工湿地系统,水力停留时间(HRT)为0.6 d(工况)。

2004年9~10月,前端运行A/O工艺的生化反应器已处于稳态运行阶段,A/O工艺出水氮素以NO₃⁻-N为主。在此期间,以12 m³/d进水流量将A/O工艺出水配送到表面流人工湿地系统,HRT为0.6 d(工况)。

1.3 监测分析方法

水质指标均按照标准测试方法进行^[5]。

1.4 性能评估指标

采用一级推流动力学模型模拟沿湿地长轴方向污染物浓度的指数削减情况,即污染物降解和 HRT

满足式(1)或式(2)。

$$c_e = c_0 \cdot \exp(-K_v x) \quad (1)$$

$$c_e/c_0 = \exp(-k/R) \quad (2)$$

式中:c₀、c_e分别为进、出水中污染物的质量浓度,mg/L;K_v为容积负荷去除率常数,d⁻¹;x为HRT,d;k为污染物的面积负荷去除率常数,m/d;R为水力面积负荷率,m/d。

污染物去除率按式(3)计算。

$$= (c_0 - c_e)/c_0 \times 100\% \quad (3)$$

污染物的面积负荷去除率按式(4)计算。

$$= (c_0 - c_e)Q/A \quad (4)$$

式中:为污染物的面积负荷去除率,g/(m²·d);Q为进水流量,m³/d;A为湿地面积,m²。

2 结果与分析

2.1 工况 条件下,表面流人工湿地中碳、氮、磷的迁移转化及净化效率

工况 运行期间,水温在11.4~24.0 ,DO在6.7~10.3 mg/L,pH在7.2~8.0。表1为工况 条件下,表面流人工湿地的处理效果。由表1可知,在表面流人工湿地运行初期,对COD、SS、TP具有较高的去除能力,去除率分别为43.2%、41.2%、30.1%。而对TN的去除率较低,仅为11.8%。图2为工况 条件下,表面流人工湿地进水与出水中NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N和TN质量浓度的变化曲线。从图2可知,在2004年3~4月,由于表面流人工湿地的生物净化功能正在形成中,脱氮效率不高,但从4月开始,表面流人工湿地出水中NO₂⁻-N浓度增加迅速,表明亚硝化细菌对NH₄⁺-N的转化功能开始形成。

2.2 工况 条件下,表面流人工湿地中碳、氮、磷的迁移转化及净化效率

工况 运行期间,水温在22.0~27.0 ,DO在0.9~1.8 mg/L,pH在6.9~7.3。表2为工况

表1 工况 条件下表面流人工湿地的处理效果¹⁾

Table 1 Treatment effect of free water surface constructed wetland working condition

指标	进水质量浓度 / (mg·L ⁻¹)	出水质量浓度 / (mg·L ⁻¹)	去除率/ %	面积负荷去除率 / (g·m ⁻² ·d ⁻¹)	面积负荷去除率常数 / (m·d ⁻¹)
COD	35.2 ±9.5	20.0 ±5.9	43.2	4.79	0.18
SS	34 ±4	20 ±5	41.2		
NH ₄ ⁺ -N	27.98 ±2.93	25.35 ±4.04	9.4		
NO ₂ ⁻ -N	0.04 ±0.04	0.17 ±0.15	-325.0		
NO ₃ ⁻ -N	0.29 ±0.22	0.28 ±0.21	3.4		
TN	36.10 ±7.58	31.84 ±7.24	11.8	1.36	0.04
TP	2.99 ±0.74	2.09 ±0.68	30.1	0.29	0.13

注:1)各项指标进、出水质量浓度为平均值±标准差,去除率、面积负荷去除率和面积负荷去除率常数以平均值计算,本研究只讨论COD、TN、TP的面积负荷去除率及其常数,表2同。

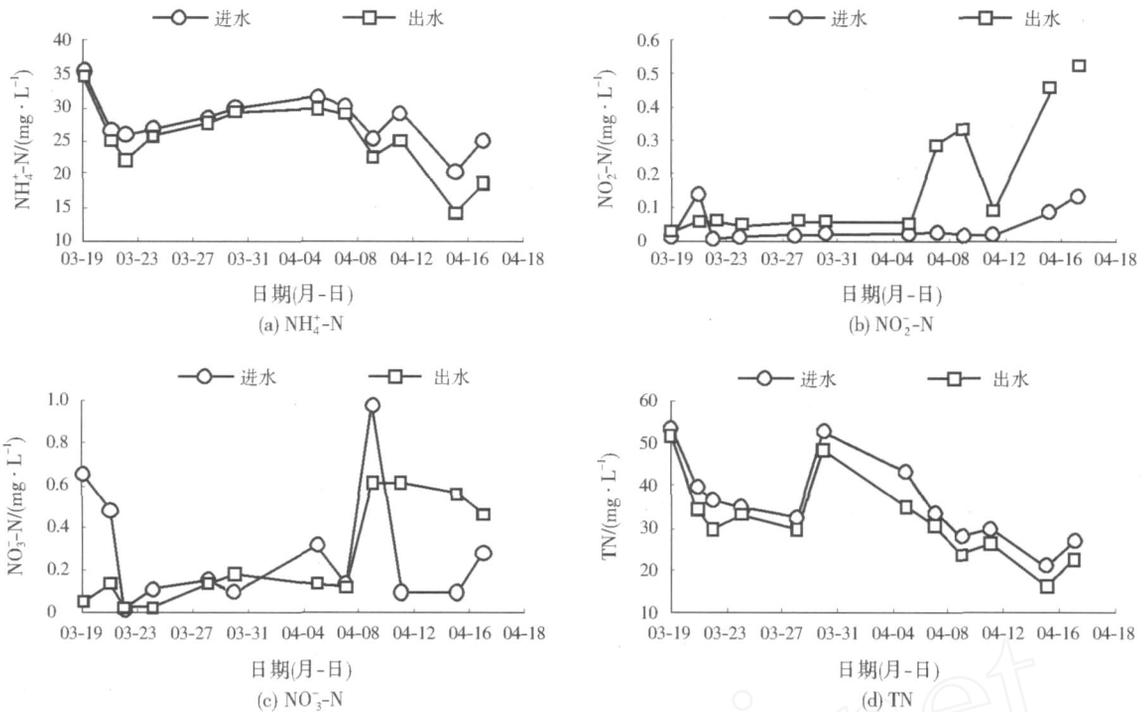


图2 工况条件下表面流人工湿地进水与出水中NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N和TN质量浓度的变化曲线
 Fig. 2 Variations of nitrogen species concentration in free water surface constructed wetland under working condition

表2 工况条件下表面流人工湿地的处理效果

Table 2 Treatment effect of free water surface constructed wetland under working condition

指标	进水质量浓度 / (mg · L ⁻¹)	出水质量浓度 / (mg · L ⁻¹)	去除率/ %	面积负荷去除率 / (g · m ⁻² · d ⁻¹)	面积负荷去除率常数 / (m · d ⁻¹)
COD	20.3 ±2.3	16.5 ±1.8	18.7	1.19	0.06
SS	19 ±3	13 ±3	31.6		
NH ₄ ⁺ -N	16.25 ±2.80	11.41 ±1.83	29.8		
NO ₂ ⁻ -N	0.80 ±0.27	0.28 ±0.17	65.0		
NO ₃ ⁻ -N	5.34 ±1.21	3.78 ±1.16	29.2		
TN	23.35 ±2.35	16.02 ±1.32	31.4	2.33	0.12
TP	2.31 ±0.39	1.63 ±0.37	29.4	0.22	0.11

条件下,表面流人工湿地的处理效果。比较表1和表2可知,当表面流人工湿地稳态运行时,由于进水COD较低,COD去除率仅为18.7%;TN去除率显著增加,达到31.4%;TP去除率变化不大。图3为工况条件下,表面流人工湿地进水与出水中NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N和TN质量浓度的变化曲线。从图3可知,表面流人工湿地对NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N和TN的去除率趋于稳定,出水TN变动较小。

2.3 影响表面流人工湿地脱氮效果的主要因素

2004年5~8月,前端运行A/O工艺的生化反应器处于稳态运行阶段。在COD面积负荷去除率、TN面积负荷去除率、TP面积负荷去除率分别为4.90~9.80、2.76~8.83、0.57~1.39 g/(m²·d),HRT为0.4~1.1 d条件下,研究了各因素对表面流人工湿地脱氮效果的影响。

图4是表面流人工湿地的HRT与TN面积负荷去除率的关系。由图4可见,HRT与TN面积负荷去除率呈线性正相关,即随HRT的增加,TN面积负荷去除率线性增加。两者关系式为 $y = 0.418 2x + 1.364 8$ ($R^2 = 0.657 0$)。

图5是表面流人工湿地的水温与TN面积负荷去除率的关系。由图5可见,水温对TN面积负荷去除率有显著影响,随水温的升高,TN面积负荷去除率线性增加。两者关系式为 $y = 0.104 0x - 0.521 1$ ($R^2 = 0.813 8$)。

图6是(NO₂⁻-N + NO₃⁻-N)/TN与TN面积负荷去除率的关系。用(NO₂⁻-N + NO₃⁻-N)/TN表示氮素组分的变动情况。图6表明,氮素组分变化对TN面积负荷去除率有显著影响,随(NO₂⁻-N + NO₃⁻-N)/TN的增加,TN面积负荷去除率线性增加。两者关系式为 $y = 2.265 9x - 0.276 3$ ($R^2 =$

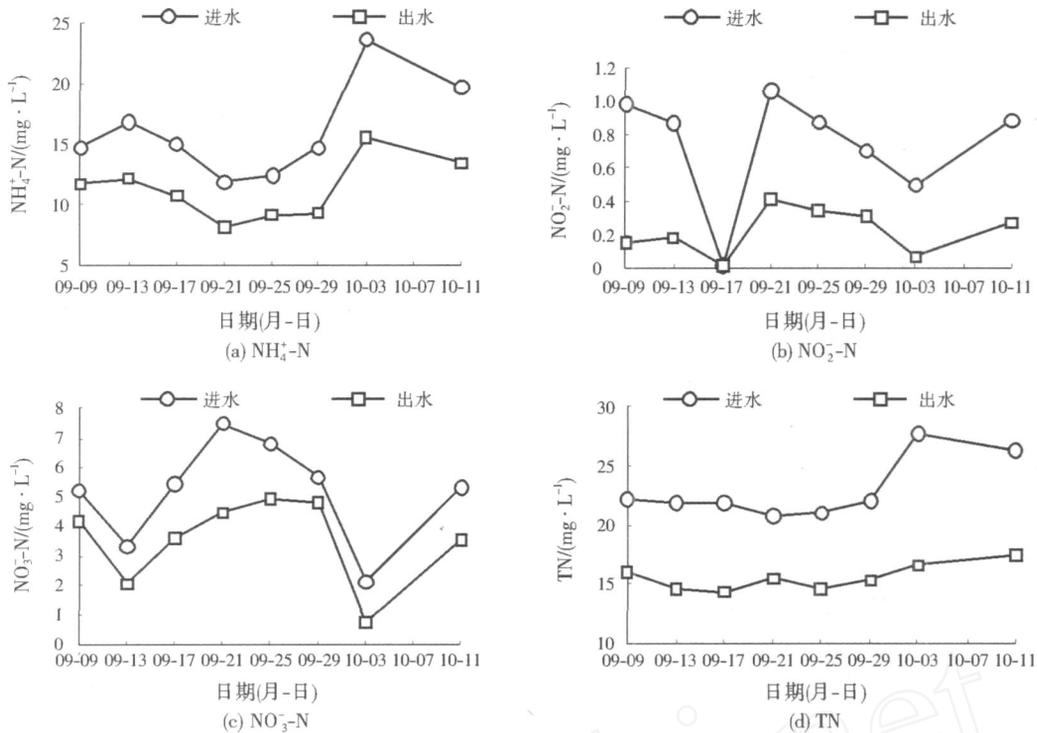


图3 工况条件下表面流人工湿地进水与出水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和TN质量浓度的变化曲线

Fig. 3 Variations of nitrogen species concentration in free water surface constructed wetland under working condition

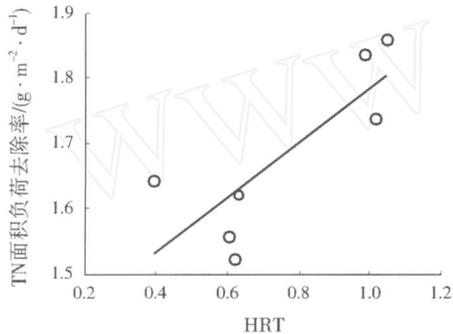


图4 表面流人工湿地的HRT与TN面积负荷去除率的关系

Fig. 4 Relationships between hydraulic retention time and TN area loading removal rate

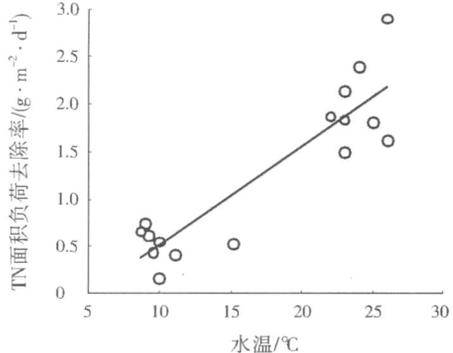


图5 表面流人工湿地的水温与TN面积负荷去除率的关系

Fig. 5 Relationships between water temperature and TN area loading removal rate

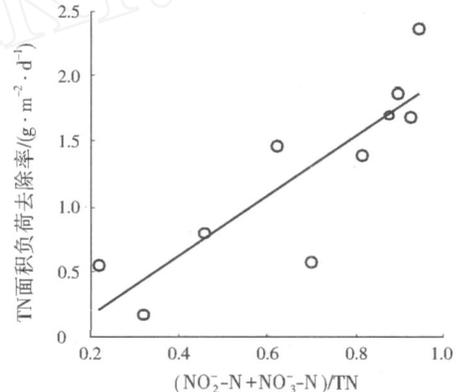


图6 $(\text{NO}_2^-\text{-N} + \text{NO}_3^-\text{-N})/\text{TN}$ 与TN面积负荷去除率的关系

Fig. 6 Relationships between $(\text{NO}_2^-\text{-N} + \text{NO}_3^-\text{-N})/\text{TN}$ and TN area loading removal rate

0.739 4)。即当氮负荷以氧化态($\text{NO}_3^-\text{-N}$)为主时, TN去除率相应增加。

3 讨论

以还原态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、有机氮)质量浓度较高(一般在15~20 mg/L),而氧化态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)质量浓度较低(<5 mg/L)的城市污水为处理对象的湿地系统,氮的降解过程包括有机氮的矿化、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的硝化、氧化态氮的反硝化。要提高湿地脱氮效果,关键在改善其供氧条件,保证还原态氮较高的氧化率。一般来说,要实现还原态氮较高的氧化率需较长的HRT^[6]。本研究中,表面流人工湿地系统在工况运行期间,主要完成生物膜自然挂膜和植物生长,形成生物净化功能,从2004年4月开始,表面流

人工湿地出水中 NO_2^- -N浓度增加迅速,表明亚硝化细菌对 NH_4^+ -N的转化功能开始形成。

以氧化态氮为处理对象的人工湿地系统,改善其反硝化效率需满足2个因素: 填料中存在缺氧环境(氧化还原电位 < 300 mV); 植物生长为反硝化提供碳源,这可促进反硝化进程。在人工湿地运行过程中,采取适当措施可提高脱氮效率。例如,人为升高人工湿地的 BOD/NO_3^- -N(如添加秸秆等),氮去除率会大幅提高,可从30%提高到80%~90%;当 BOD/NO_3^- -N达到2.3时,反硝化速率达到最大^[7-9]。本研究中,由于前端运行A/O工艺的生化反应器出水 COD/TN 已相当低(低于1.4),人工湿地系统只能靠植物根系释放的有机碳和植物落叶分解所产生的有机碳提供硝化所需碳源,严重影响人工湿地 TN 去除率, C/N 成为人工湿地脱氮的主要生态限制因子。随人工湿地系统运行年数的增加,成炭植物腐殖化速率增加,成炭植物对人工湿地系统中溶解有机碳贡献率也增加。成炭植物的腐殖化可向人工湿地系统补充溶解有机碳,这为反硝化作用提供了碳源^[10]。

4 结论

以A/O工艺出水为处理对象,在中试规模上研究了宽叶香蒲表面流人工湿地的脱氮除磷效果及影响因素。结果表明,表面流人工湿地在运行初期,对 COD 、 SS 、 TP 具有较高的去除能力,对 TN 的去除能力较低。当表面流人工湿地稳态运行时,对 TN 的去除能力显著提高, TP 去除率变化不大。随 HRT 、水温、 $(\text{NO}_2^-$ -N + NO_3^- -N)/ TN 的增加, TN 面积负荷去除率线性增加。考虑 $(\text{NO}_2^-$ -N + NO_3^- -N)/ TN 对脱氮性能的影响,建议A/O工艺出水中氧化态氮浓度较高时再引入表面流人工湿地,以提高脱氮效果。

参考文献:

- [1] 孙铁珩,周启星,张凯松. 污水生态处理技术体系及应用[J]. 水资源保护,2002,13(3):6-9.
- [2] BACHAND P A M, HORNE A J. Denitrification in constructed free-water surface wetlands: . Very high nitrate removal rates in a macrocosm study[J]. Ecological Engineering,2000,14(1/2):9-15.
- [3] COMIN F A, ROMERO J A, ASTORGA V, et al. Nitrogen removal and cycling in restored wetlands used as filters of nutrients for agricultural runoff[J]. Water Science and Technology,1997,35(5):255-261.
- [4] DRIZO A, FROST C A, GRACE J, et al. Physico-chemical screening of phosphate removing substrates for use in constructed wetland systems[J]. Wat. Res.,1999,33(17):3595-

- 3602.
- [5] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [6] GERKE S, BAKER L A, XU Y. Nitrogen transformations in a wetland receiving lagoon effluent: sequential model and implications for water reuse[J]. Wat. Res.,2001,35(16):3857-3866.
- [7] BAKER L A. Design considerations and applications for wetland treatment of high-nitrate waters[J]. Water Science and Technology,1998,38(1):389-395.
- [8] INGERSOLL T L, BAKER L A. Nitrate removal in wetland microcosms[J]. Wat. Res.,1998,32(3):677-684.
- [9] GREEN M, FRIEDLER E, RUSKOL Y, et al. Investigation of alternative method for nitrification in constructed wetlands[J]. Water Science and Technology,1997,35(5):63-70.
- [10] 白燕,王升忠. 成炭植物腐殖化速率的研究[J]. 东北师范大学学报:自然科学版,1997,29(4):94-98.

责任编辑:陈泽军 (修改稿收到日期:2009-01-08)

(上接第10页)

定,在环境污染控制领域有重要意义。

参考文献:

- [1] 程晨,陈振楼,毕春娟,等. 中国地表饮用水水源地有机类内分泌干扰物污染现状分析[J]. 环境污染与防治,2007,29(6):446-450.
- [2] AXISA B, NA YLOR A R, BELL P R F, et al. Simple and reliable method of doxycycline determination in human plasma and biological tissues[J]. Journal of Chromatography B,2000,744(2):359-365.
- [4] 黄春保,慈云祥,常文保. 镉-铈-强力霉素-曲通 X-100 协同荧光增敏体系研究[J]. 分析化学,2002,30(6):680-683.
- [5] 胡乃梁,赵一兵,王冬媛. 同步荧光法同时测定强力霉素和土霉素[J]. 分析测试学报,1996,15(5):77-80.
- [6] 江虹,胡小莉,刘绍璞. 钐与四环素类抗生素的显色反应及其分析应用[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,2002,27(6):913-917.
- [7] CHOMA I, GRENDA D, MAL INOWSKA I, et al. Determination of flumequine and doxycycline in milk by a simple thin-layer chromatographic method[J]. Journal of Chromatography B,1999,734(1):7-14.
- [8] 张兰,林子庵,谢增鸿. 毛细管电泳法用于水产品中五种抗生素的同时测定[J]. 分析测试技术与仪器,2004,10(1):18-23.
- [9] GIL C E, VAN SCHEPDAEL A, ROETS E, et al. Analysis of doxycycline by capillary electrophoresis method development and validation[J]. Journal of Chromatography A,2000,895(1/2):43-49.
- [10] 曾桂熊,龙启才,黄民. 微生物法测定血浆中多西环素的方法学研究[J]. 中国药房,2001,12(8):480-481.
- [11] 张兰威,陈一,韩雪. 双水相萃取法从风干香肠中分离提取蛋白酶[J]. 分析化学,2008,36(7):900-904.
- [12] 席艳丽,董慧茹. 溶剂浮选-气相色谱/质谱法测定蔬菜中氨基甲酸酯类农药残留[J]. 化学通报,2008(7):553-556.
- [13] 何燧源. 环境污染分析检测[M]. 北京:化学工业出版社,2001:135.
- [14] 曾昭琼,李景宁. 有机化学(上)[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
- [15] DEAN J A, LANGE S. Handbook of chemistry[M]. New York:McGraw-Hill Book Company,1973.
- [16] 张祥林,康衡. 配位化学[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1986:291-298.

责任编辑:贺锋萍 (修改稿收到日期:2008-12-16)