

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2013.02.015

生物生态集成技术去除村镇生活污水 TP 研究

李金中,李学菊

(天津市水利科学研究院,天津 300061)

摘要:采用物理沉降、固定化微生物、太阳能增氧和人工湿地等多项技术优化集成方法,构建 1 个功能一体化、景观园艺化、自然生态化的链式生物生态净化系统,并在天津市蓟县刘相营村建成污水日处理能力为 4 000 m³ 的示范工程。通过示范工程近 1 a 的监测表明:在进水 TP 浓度较高且波动较大的不利条件下,集成工艺对 TP 的去除率达到 95.4%~99.6%,而对 COD 和 TN 的去除率可分别达到 84.53%~96.74% 和 88.03%~97.98%,生物生态净化系统出水可稳定达到地表水Ⅳ类水质标准,而且管理维护方便,能耗小,处理成本低于 0.15 元/m³。

关键词:生活污水;物理沉降;固定化微生物;人工湿地;集成技术

中图分类号:X171.1 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2013)02-0071-05

A biological and ecological integration technology for removing TP from rural domestic sewage

LI Jinzhong, LI Xueju

(Tianjin Hydraulic Research Institute, Tianjin 300061, China)

Abstract: A bio-ecological chain purification system, which integrates and optimizes physical settlement, immobilized microorganisms, aeration by solar energy, and artificial wetlands, was constructed in this study. A demonstration project, with a treatment capacity of 4 000 m³/d, was constructed in the Liuxiangying Village of Jixian County, in Tianjin. The monitoring results over nearly one year show that, despite of the unstable and high concentration of pollutants at the inlet, this technology can remove 95.4% to 99.6% of TP, 84.53% to 96.74% of COD, and 88.03% to 97.98% of TN. The water quality at the outlet reached grade IV of the surface water standards. The technology meets the requirements of simple and convenient maintenance, low investment, and low energy consumption. The operation cost was less than 0.15 yuan per cubic meter.

Key words: domestic sewage; physical settlement; immobilized microorganism; artificial wetland; integration technology

近年来,农村人口的快速增长和农村城镇化建设速度的加快,使农村水资源和水生态环境面临着越来越大的压力^[1-2]。由于水资源严重短缺,农业大量引污灌溉,河流水体污染严重,水质恶化;而且农村人口居住分散,地域面积广,排水系统及生活污水净化系统不完善,生活污水未经处理直接排放,严重污染了环境。

农村生活污水处理技术的研发在我国尚属起步和探索阶段,主要有厌氧沼气池技术、土地渗滤技术、固定化微生物技术、人工湿地技术。厌氧沼气池技术将污水处理与生物质能源回用有机结合,实现了污水资源化^[3],但出水仍难以达到国家排放标准的要求。土壤渗滤系统具有处理效果好、投资低的优点^[4],但也存在占地面积大、冬季不能运行、长期

基金项目:天津市科技支撑计划重点项目(12ZCZDSF01300);水利部公益性行业科研专项(201101060);农业科技示范推广项目(201101034)

作者简介:李金中(1970—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事水环境治理与水生态修复研究工作。E-mail:ljz@tjhri.com

运行易堵塞等不足。固定化微生物技术具有微生物密度高、产物易分离、处理设备小型化等特点^[5-7],但其技术的主要缺点是对 N、P 去除效果较差,出水与地表水水质标准仍有一定的差距。人工湿地具有负荷率高、占地面积小、效果可靠、耐受冲击负荷等优点^[8-13],但在处理生活污水时必须采取有效措施或预处理方法防止污染物对湿地内部的堵塞。综上所述,现有污水处理技术用于农村生活污水处理,在运行和管理方面尚存在诸多问题^[14-15],难以适应农村生活污水处理的要求。

鉴于此,笔者针对农村生活污水水质特征、排放特点和处理要求,将物理沉降、固定化微生物、太阳能增氧和人工湿地等多项技术优化集成,构建出一个链式生物生态净化系统,实现对村镇生活污水的高效低耗处理,并在天津蓟县刘相营村建立了示范工程,通过对示范工程近 1a 的监测,分析该净化系统对生活污水中 TP 的去除效果。

1 材料与方法

生物生态净化系统由沉砂过滤池、固定化微生物滤池、太阳能增氧池和人工湿地 4 个功能单元组成,在空间布局上采用串联方式连接:沉砂过滤池位于系统的最前端,固定化微生物滤池安排在物化预处理区下游,太阳能增氧池位于微生物强化区下游,人工湿地安排在系统的最末端。污水依次流经沉砂过滤池、固定化微生物池、太阳能增氧池和人工湿地,4 个功能单元既保持在空间上的相对独立性,功能上又相互联系、互为补充、形成一体化、功能化、园艺景观化、自然生态化的生物通道,既充分发挥各单项技术的优势,又形成了优势互补,发挥多技术的协同净化的作用。

沉砂拦污池由 3 个相互连通的密封沉淀池组成,夹带泥沙、漂浮物及粪便的生活污水由第 1 池依此顺流至第 3 池。第 1 池主要截留粗颗粒泥沙、漂浮物及含虫卵较多的粪便,松散的粪块因发酵膨胀而浮升,与污水中漂浮物一起漂浮截留于池体上部,比重大的泥沙在重力作用下沉于池底,寄生虫比重也大也自然沉降于池底。第 2 池起进一步沉淀分离作用,与第 1 池相比,第 2 池的漂浮物和淤泥数量减少,废水处于比较静止状态,有利于细小悬浮颗粒物的继续分离。第 3 池主要起储存清液的作用。经前 2 池处理后的废水进入第 3 池,基本上已经不含寄生虫卵和漂浮物及悬浮物,达到了固液分离的要求,中层清液进入下一级处理单元。

固定化微生物池是装有填料的生物反应器,在滤料表面有以生物膜形态生长的微生物群体,在滤

料空隙中则截留了大量悬浮生长的微生物,废水通过滤料层时,通过厌氧微生物将高分子有机物降解为低分子有机物、有机氮降解为无机氮、有机磷降解为无机磷等,以提高后续湿地处理系统对污染物的去除效率。同时固定化微生物池的厌氧环境将蛋白性有机物发酵分解成氨,具有杀灭寄生虫卵及病菌的作用。

生活污水经固定化微生物池处理后,水中溶解氧浓度进一步降低,处于严重亏氧状态,不利于后续湿地处理系统中好氧微生物的分解。太阳能增氧池的主要作用是以太阳能为动力,通过人工措施增加污水中溶解氧浓度,为后续湿地处理工艺中好氧微生物提供氧源。太阳能增氧装置主要构件包括太阳能板、蓄电池、曝气机及与之连接的曝气管,太阳能板连接蓄电池,蓄电池连接曝气机,曝气机连接伸入水中的曝气管。

人工湿地结构采用波式流人工湿地,其处理单元由人工基质、水生植物和附着在基质及植物根区的微生物组成,是一种独特的“基质-植物-微生物”生态系统。在该系统中,植物扎根于基质床的表层,植物根系和填料为微生物提供附着的载体^[16],同时植物根系为微生物提供氧源,在靠近根区的填料层形成好氧区,而在远离根区的填料层形成厌氧或兼氧区,水体以波浪式流经填料表层和底层时,反复经过好氧、厌氧以及硝化和反硝化的过程,从而实现对有机污染物和氮磷的高效去除^[17-19]。与自然湿地相比,波式流人工湿地在相同面积条件下处理能力大幅度提高,能够克服天然湿地比较脆弱的缺点,具有负荷率高、占地面积小、效果可靠、耐冲击负荷等优点,而且水流在填料表层以下流动,不易滋生蚊蝇。湿地表面可种植水质净化能力强、景观效果好的水生植物,在净化水质的同时,起到良好的景观效果。

2 示范工程

示范工程位于天津市蓟县穿芳峪乡刘相营村,收水范围包括刘相营、大辛庄、小辛庄、姚白庄等 4 个村庄,汇水区面积 2.25 km²,人口 4 010 人。污水处理规模为 4 000 m³/d,主要包括生活污水、分散养殖废水和初期雨水。示范工程于 2009 年 12 月开始建设,2010 年 9 月 26 日开始进行水质监测。共设置了 5 个监测点,其中沉砂拦污池进水口(1 号)、沉砂拦污池出水口(2 号)、固定化微生物池出水口(3 号)、太阳能增氧池出水口(4 号)、人工湿地出水口(5 号)各设一个监测点。工艺流程及监测点设置见图 1。

监测频率为每周取样 1 次,TP 分析方法采用过硫酸钾消解—钼锑抗分光光度法,仪器为 UV-

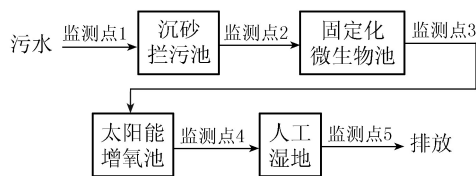


图1 工艺流程及监测点设置示意图

7504c 紫外分光光度计(上海生产)。

根据各监测点污染物浓度,分别计算各处理单元对 TP 的去除率以及整个处理工艺对 TP 的去除率。去除率的计算公式为

$$P = \frac{\rho_{\text{进水}} - \rho_{\text{出水}}}{\rho_{\text{进水}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: P 为 TP 去除率,%; $\rho_{\text{进水}}$ 、 $\rho_{\text{出水}}$ 分别为进、出水口处的 TP 质量浓度,mg/L。

3 结果与分析

各处理单元出水 TP 质量浓度变化如图 2 所示。

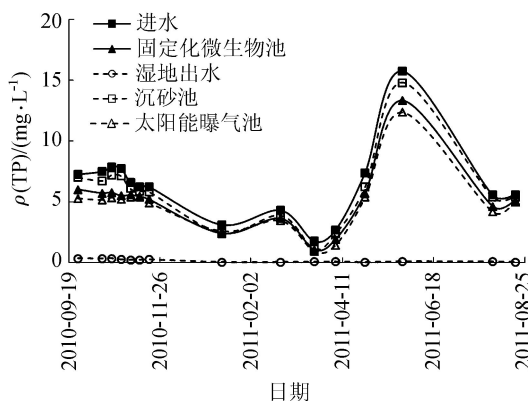


图2 各处理单元进、出水 TP 质量浓度变化

由图 2 可以看出,示范工程的进水 TP 质量浓度较高且变化幅度较大,在 1.74 ~ 15.72 mg/L 之间波动。2011 年 6 月 18 日 TP 质量浓度较高的主要原因是取样前该区域有小强度降雨,积蓄在村内坑洼内的粪便浸泡水随雨水进入村内沟渠中,并随之进入污水处理示范工程,而粪便浸泡水中 TP 质量浓度极高,造成该时间段内进水沟渠中 TP 质量浓度较高。示范工程出水 TP 质量浓度相对低,且水质较为稳定,说明集成工艺系统对生活污水中磷具有较高的去除效果,系统最终出水稳定在 0.04 ~ 0.24 mg/L 之间,稳定达到地表水Ⅳ类水质标准。

从 TP 浓度的沿程变化趋势来看,在湿地内 TP 质量浓度的下降幅度大,而在沉砂拦污池、固定化微生物池和太阳能曝气池中 TP 质量浓度虽然有不同程度的下降,但下降幅度相对较小,说明对 TP 起最终去除作用的主要是湿地单元,而其他单元对 TP 的去除主要是起辅助作用。沉砂池、固定化微生物池和太阳能曝气池虽然对 TP 的最终去除量较小,

但在系统中所起的作用也是不可或缺的。沉砂池内 TP 质量浓度略有降低,其主要原因是 P 吸附于悬浮颗粒上,说明沉砂拦污池除具有固液分离作用外,对 TP 也有一定的去除效果。

而固定化微生物池主要是利用兼氧、厌氧性微生物对水体中 P 进行不完全分解,这种不完全降解对提高后续湿地单元对污水中的 P 去除是极其有利和必要的。固定化微生物池中小部分 P 通过微生物积累、沉降作用得以去除,因此表现出该单元内 TP 质量浓度仍有小幅度下降。

人工湿地对 P 的去除途径主要有 3 种方式:①植物吸收作用,P 是植物体生长所需的重要营养元素,植物通过根系吸收水体中的 P,并通过同化作用转化为自身的营养物质,最终通过植物的收割将 P 带出水体^[20-21];②物理化学作用,人工湿地填料中含有大量的 Ca、Fe、Al 等矿物成分,这些元素在微生物分解下逐步释放,并与 P 结合形成 Ca-P、Fe-P 和 Al-P 沉淀,通过物理沉淀作用将 P 从水体中去除^[22];③通过微生物作用,P 是组成微生物细胞膜的重要组成部分,微生物繁殖过程中利用水体中的 P 进行增殖,最终以淤泥形式进行沉积^[23-25]。从湿地内部 TP 的变化来看,对 TP 降低最大的是湿地前部。

示范工程各处理单元对 TP 去除率的变化见图 3。

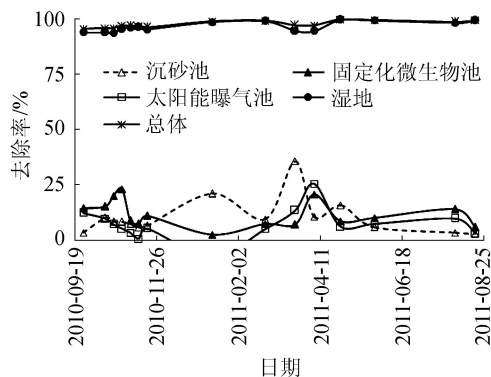


图3 各处理单元 TP 去除率的变化

由图 3 可以看出,示范工程对 TP 的总去除率达到 95.4% ~ 99.59%。各单元对 TP 的去除率中以湿地单元最大,达到 93.63% ~ 99.44%,太阳能曝气单元对 TP 的去除率达到 0.55% ~ 25.4%,固定化微生物池对 TP 的去除率达到 2.46% ~ 23.07%,沉砂拦污池对 TP 的去除率达到 2.88% ~ 35.63%。

此外,根据对 COD 和 TP 浓度同步监测结果表明,集成工艺对 COD 的去除率可达到 84.53% ~ 96.74%,对 TN 的去除率达到 88.03% ~ 97.98%。示范工程利用地势差形成自流,利用太阳能增氧,污水处理过程中不需消耗电能。水处理规模为 4 000

m³/d,冬季可正常运行,处理成本低于0.15元/m³,主要为设备折旧和植物维护费用。

4 结 论

通过示范工程1a的水质监测,可以得出以下结论:

- a. 生物生态集成技术在生活污水处理应用中具有投资与运行费用低、处理效果好、TP去除能力强、景观效果好、运行维护管理方便等诸多优点。
- b. 生物生态集成技术对TP具有极好的去除效果,去除率达到95.4%~99.59%,出水TP浓度达到地表水Ⅳ类水质标准,截污减排效果明显。

参考文献:

[1] 梁祝,倪晋仁.农村生活污水处理技术与政策选择[J].中国地质大学学报:社会科学版,2007,7(3):18-22. (LIANG Zhu, NI Jinren. Treatment technologies and approaches for rural domestic sewage[J]. Journal of China University of Geosciences:Social Sciences Edition, 2007,7(3):18-22. (in Chinese))

[2] 曹群,余佳荣.农村污水处理技术综述[J].环境科学与管理,2009,34(3):118-121. (CAO Qun, SHE Jiarong. Treatment technologies for rural domestic sewage[J]. Environmental Science and Management, 2009,34(3):118-121. (in Chinese))

[3] 田娇,王玉军,梁小萌,等.农村污水处理技术现状及发展前景[J].环境科学与管理,2010,35(5)83-85,142. (TIAN Jiao, WANG Yujun. LIANG Xiaomeng, et al. The treatment technology situation and development prospects for the rural sewage[J]. Environmental Science and Management,2010,35(5):83-85. (in Chinese))

[4] 苏东辉,郑正,王勇,等.农村生活污水处理技术探讨[J].环境科学与技术,2005,28(1):81. (SU Donghui, ZHENG Zheng, WANG Yong, et al. Discuccion on treatment technology of rural domestic wastewater[J]. Environmental Science and Technology,2005,28(1):81. (in Chinese))

[5] 王新,李培军,宋守志,等.固定化微生物技术在环境工程中的应用研究进展[J].环境污染与防治,2005,27(7):535-537. (WANG Xin, Li Peijun, SONG Shouzhi, et al. Overview on immobilized microorganism technique in environmental engineering[J]. Environmental Pollution and Control, 2005,27(7):535-537. (in Chinese))

[6] 张尊举,李磊,张一婷,等.两级曝气生物滤池用于生活污水中的处理与研究[J].环境科学与管理,2009,34(10):101-103,112. (ZHANG Zunju, LI Lei, ZHANG Yiting, et al. Treatment of the domestic wastewater by two stage biological aerated filter[J]. Environmental Science and Management, 2009,34(3):101-103,112. (in

Chinese))

[7] 郑俊,吴浩汀.曝气生物滤池工艺的理论与应用[M].北京:化学工业出版社,2005:65.

[8] 刘学功,李金中,李学菊.人工湿地填料结构对水质净化效果影响研究[J],海河水利,2008(4):40-42. (LIU Xuegong, LI Jinzhong, LI Xueju. Study on water purification of different stuffing structure for constructed wetlands[J]. Haihe River Water Conservancy, 2008(4):40-42. (in Chinese))

[9] KESKINKAN O, GOKSU M Z L, YUCEER A, et al. Comparison of the adsorption capabilities of myriophyllum spicatum and ceratophyllum demersum for zinc, copper and lead[J]. Engineering in Life Sciences, 2007,7(2):192-196.

[10] HONG Y, HU H Y. Effects of the aquatic extract of arundo donax L. (giant reed) on the growth of freshwater algae[J]. Allelopathy Journal, 2007,20(2):315-325.

[11] SHALTOUT K H, GALAL T M, EL-KOMI T M. Evaluation of the nutrient status of some hydrophytes in the water courses of Nile Delta, Egypt[J]. Journal of Botany, 2009:1-11.

[12] ZHANG X B, LIU P, YANG Y S, et al. Phytoremediation of urban wastewater by model wetlands with ornamental hydrophytes[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007,19(8):902-909.

[13] 汤显强,李金中,李学菊,等.人工湿地不同填料去污性能比较[J].水处理技术,2007,33(5):45-48. (TANG Xianqiang, LI Jinzhong, LI Xueju, et al. Comparison between performance of pollutant removal by different packings in constructed wetland[J]. Techonlogy of Water Treatment, 2007,33(5):45-48. (in Chinese))

[14] 何安吉,黄勇.农村生活污水处理技术研究进展及改进设想[J].环境科技,2010,23(3):68-71,75. (HE Anji, HUANG Yong. Research progress and improvement of rural wastewater treatment technology[J]. Environmental Science and Technology, 2010,23(3):68-71,75. (in Chinese))

[15] 徐光来,袁新田.人工湿地植物的作用与影响因素[J].河北农业科学,2008,12(2):63-64. (XU Guanglai, YUAN Xintian. Functions and influencing factors of macrophytes in constructed wetland[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2008,12(2):63-64. (in Chinese))

[16] 李宝宏,曹文平.人工湿地植物在污水处理系统中的作用探讨[J].环境科学与管理,2007,32(9):65-67. (LI Baohong, CAO Wenping. Plants funct ion of constructed wet lands in sewage treatm ent system[J]. Environmental Science and Management, 2007,32(9):65-67. (in Chinese))

[17] 崔玉波,董婵,赵立辉,等.人工湿地填料吸附氮磷性能研究[J].吉林建筑工程学院学报,2006,23(2):7-8.

(CUI Yubo, DONG Chan, ZHAO Lihui, et al. The performance study on adsorption of the filled material in constructed wetland[J]. Journal of Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, 2006, 23 (2): 7-8. (in Chinese))

[18] STEER D, FRASTER L, BODDY J, et al. Efficiency of small constructed wetland for subsurface treatment of single family domestic effluent [J]. Ecological Engineering, 2002 (18): 429-440.

[19] 应俊辉. 利用人工湿地处理农村生活污水的研究[J]. 安徽农业科学, 2007, 35 (4): 1104-1105. (YING Junhui. A study on constructed wetland for treating the rural domestic sewage[J]. Anhui Agricultural Science, 2007, 35 (4): 1104-1105. (in Chinese))

[20] 蒋跃平, 葛滢, 岳春雷, 等. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献[J]. 生态学报, 2004, 24 (8): 1720-1725. (JIANG Yueping, GE Ying, YUE Chunlei, et al. Nutrient removal role of plants in constructed wetland on sightseeing water [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24 (8): 1720-1725. (in Chinese))

[21] 金卫红, 付融冰, 顾国维. 人工湿地中植物生长特性及其对 TN 和 TP 的吸收[J]. 环境科学研究, 2007, 20 (3): 75-80. (JIN Weihong, FU Rongbing, GU Guowei. Plant growth characteristics and nutrient uptake from eutrophic water in constructed wetlands[J]. Research of Environmental Sciences, 2007, 20 (3): 75-80. (in Chinese))

[22] 梁威, 吴振斌. 人工湿地对污水中氮磷的去除机制研究进展[J]. 环境科学动态, 2000, 12 (3): 32-37. (LIANG Wei, WU Zhenbin. Progress of studies on the mechanisms of removing nitrogen and phosphorus from sewage in constructed wetland[J]. Environmental Science Trends, 2000, 12 (3): 32-37. (in Chinese))

[23] 袁东海, 高士祥, 任全进, 等. 几种挺水植物净化生活污水总氮和总磷效果的研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18 (4): 77-92. (YUAN Donghai, GAO Shixiang, REN Quanjing, et al. Study on purified efficiency of phosphorus and nitrogen from domestic sewage by several macrophytes in vertical flow constructed wetlands[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18 (4): 77-92. (in Chinese))

[24] 徐治国, 何岩, 闫百兴, 等. 湿地植物对外源氮、磷输入的响应研究[J]. 环境科学研究, 2007, 20 (1): 64-68. (XU Zhiguo, HE Yan, YAN Baixing, et al. Response of wetland plants to nitrogen and phosphorus inputs [J]. Research of Environmental Sciences, 2007, 20 (1): 64-68. (in Chinese))

[25] BRIX H. Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants the root zone method[J]. Water Science and Technology, 1987, 19: 107-118.

(收稿日期: 2012-07-05 编辑: 高渭文)

+++++

(上接第 27 页)

[7] SAYIT A P, YAZICIGIL H. Assessment of artificial aquifer recharge potential in the Kucuk Menderes River Basin, Turkey[J]. Hydrogeology Journal, 2012, 20 (4): 755-766.

[8] AL-ASSA' D T A, ABDULLA F A. Artificial groundwater recharge to a semi-arid basin: case study of Mujib aquifer, Jordan[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 60 (4): 845-859.

[9] 李恒太, 石萍, 武海霞. 地下水人工回灌技术综述[J]. 中国国土资源经济, 2008, 21 (3): 41-48. (LI Hengtai, SHI Ping, WU Haixia. Artificial recharge technology of groundwater [J]. Natural Resource Economics of China, 2008, 21 (3): 41-48. (in Chinese))

[10] 耿昕, 黎涛, 田春艳, 等. 河西走廊疏勒河流域地下水动态数值模型研究[R]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2010: 9.

[11] 桑学锋, 张明泉, 王浩, 等. 敦煌盆地地下水数值模拟及可视化与管理[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2007, 43 (3): 18-22. (SANG Xuefeng, ZHANG Mingquan, WANG Hao, et al. Visual simulation and management of groundwater in Dunhuang Basin[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2007, 43 (3): 18-22. (in Chinese))

[12] 黎志恒, 邱蔓. 甘肃敦煌月牙泉地区水文地质与环境地质综合勘查报告[R]. 兰州: 甘肃省地质环境监测院, 2008.

[13] 陈崇希, 林敏. 地下水动力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2006: 13.

[14] 邓惠森. 岩土层垂向渗透系数与径向渗透系数[J]. 工程勘察, 1993 (1): 44-45. (DENG Huisen. The vertical permeability coefficient and radial permeability coefficient of strata [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1993 (1): 44-45. (in Chinese))

(收稿日期: 2012-07-22 编辑: 徐 娟)

