

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2014.01.018

污水处理厂生命周期评价及不同工艺污水处理系统的环境影响比较分析

黄希望, 罗小勇, 李 轶, 王大伟

(河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要:对某 A2/O 工艺城市污水处理厂施工建造和运营维护阶段所造成的环境影响进行生命周期评价,并以绿色税收为参考指标概算各环境影响指标造成的经济负担,同时对采用不同污水处理方式的污水处理厂的生命周期评价结果进行比较。结果表明:A2/O 工艺城市污水处理厂生命周期内造成的环境影响主要来自运营维护阶段的能量消耗,对水体富营养化的影响较大;相对于某湿地污水处理系统,A2/O 工艺城市污水处理厂对非生物资源消耗较大,但在大气酸化、光化学氧化以及全球变暖等方面的影响较小;相对于五阶段 Bardenpho 工艺,A2/O 工艺对水体富营养化具有较大影响,但在非生物资源消耗、全球变暖、光化学氧化、大气酸化等方面影响较小。

关键词:污水处理厂;生命周期评价;污水处理系统;环境影响

中图分类号:X820.3 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2014)01-0090-05

Life cycle assessment of a wastewater treatment plant and comparison analysis of environmental impacts of different wastewater treatment systems

HUANG Xiwang, LUO Xiaoyong, LI Yi, WANG Dawei
(College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A life cycle assessment was conducted to study the environmental impacts of a wastewater treatment plant during its construction and operation using the A2/O process. The environmental impacts in terms of green taxes were represented to estimate their economic burden. Life cycle assessment results of different wastewater treatment plants using different wastewater treatment processes were compared. It was shown that the electricity consumption during the operation stage contributed most to the environmental impacts of the wastewater treatment plant, and that the plant had a great impact on eutrophication of water bodies. Compared with the wastewater treatment system of a wetland, the wastewater treatment plant using the A2/O process showed greater depletion of abiotic resources, but less impact on acidification, photochemical oxidation, and global warming. In comparison with the five-stage Bardenpho process, the A2/O process had a greater impact on eutrophication of water bodies, but less impact on abiotic resources depletion, global warming, photochemical oxidation, and acidification.

Key words: wastewater treatment plant; life cycle assessment; wastewater treatment system; environmental impact

随着人口的增长和工农业的飞速发展,世界各国都面临着日益严重的水资源短缺问题。对城市污水进行处理有利于解决水资源短缺问题,也有利于减少污水造成的环境影响。传统上选择污水处理方

法时主要考虑经济和技术方面的要求^[1]。但随着气候变化、能源危机以及其他一系列环境问题的产生,污水处理厂越来越重视自身的可持续发展^[2],选择污水处理系统的考虑因素也变得更加复杂,在

基金项目:国家自然科学基金(51009050);国家水体污染控制与治理重大科技专项(2012ZX7506-002-02)
作者简介:黄希望(1989—),男,硕士研究生,研究方向为生命周期评价理论。E-mail:740834624@qq.com
通信作者:李轶,教授。E-mail:envly@hhu.edu.cn

考虑经济和技术的基础上,不同污水处理系统对环境造成的影响被考虑进来^[3]。污水处理对环境的贡献是可观的。相对于物理处理污水和化学处理污水,生物处理污水是降解减排有机物的最节能、最经济的方法。但同时也应该看到,对电能、药剂等污水进行处理会引起新一轮的环境影响。采用生命周期评价理论能够对污水处理系统造成的环境影响进行深入的评价分析。

生命周期评价(life cycle assessment, LCA)是对一个产品系统在整个生命周期内的输入和输出的环境影响进行评估,环境影响评价周期为“从摇篮到坟墓”^[4],即从原材料的开采到产品的最终处置。生命周期评价过程包括目标和范围的确定、清单分析、影响评价以及结果解释等4个阶段。目前,生命周期评价广泛应用于污水处理领域,如用于比较传统污水处理工艺与纳米过滤处理^[5]、反渗透处理^[6]之间的不同,但对影响企业选择合适污水处理工艺的因素的研究并不深入、透彻。

笔者利用生命周期评价理论分析某采用 A2/O 工艺的传统污水处理厂对环境的影响,并与某湿地污水系统和五阶段 Bardenpho 工艺的生命周期评价结果进行比较,旨在为今后不同区域环境、技术条件以及经济状况等条件下进行环境友好型污水处理工艺的选择提供依据。

1 研究方法

1.1 确定评价目标和范围

某城市污水处理厂采用 A2/O 处理工艺,利用 V 型砂滤进行污水深度处理,污水微絮凝处理和污泥处理分别使用混凝剂 PAC 和絮凝剂 PAM,设计出水水质为一级 A。该污水处理厂于 2003 年投入使用,设计寿命 50 年,设计流量 10 万 m³/d。对该污水处理厂进行生命周期评价的目标是评价该污水处理厂在其生命周期内(由于没有相关数据,报废拆除阶段除外)所造成的环境影响。将功能单元定义为处理 10 万 m³/d 的污水 50 年,出水水质达一级 A。污水处理厂生命周期评价的研究范围包括污水处理厂施工建造和运营维护 2 个阶段,见图 1。

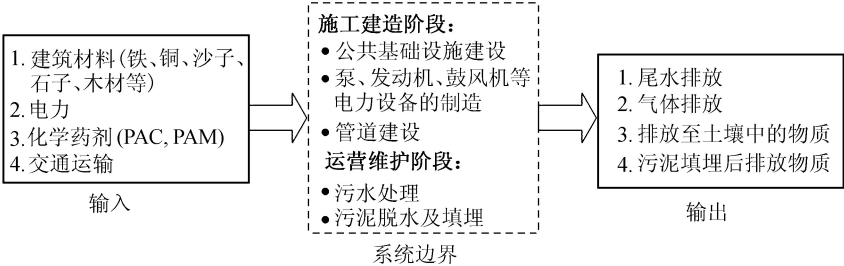


图 1 污水处理厂生命周期评价范围的界定

1.2 列出生命周期评价分析清单

生命周期评价的目标和范围确定之后,要列出生命周期评价的分析清单。本研究列出了污水处理系统输入和输出中的主要材料和能源消耗情况,见表 1。污水处理厂生命周期评价分析过程中的主要假设及相关数据参考如下:①电能:假定污水处理厂消耗的电能均为火电,火力发电过程中造成的环境影响见参考文献[7-9]。②材料:材料清单分析使用 ELCD 数据库^[10],水泥生产过程参考 Lei 等^[11]的研究,金属管道生产过程见参考文献[12]。③污泥中的重金属:污泥中重金属浓度数据来自 Wang 等^[13]关于市政及工业污水处理厂中污泥重金属浓度的研究。④交通运输:假定污水处理中使用的混凝剂 PAC 和絮凝剂 PAM 来自距污水处理厂 60 km 的工厂,污水处理厂距污泥填埋场 48 km。运输过程见参考文献[14]。⑤污水处理厂运营:甲烷排放量的计算按照 Wang 等^[13]研究中污水处理厂采用 A2/O 工艺的甲烷排放因子来进行。

表 1 污水处理厂生命周期评价主要物质分析清单(2010 年平均数据)

输入		数值	输出		数值	
进水指标	BOD ₅ (kg/d)	11 000	出水指标	BOD ₅ (kg/d)	550	
	COD(kg/d)	19 700		COD(kg/d)	11 300	
	SS(kg/d)	7 300		SS(kg/d)	900	
	NH ₃ -N(kg/d)	2 260		NH ₃ -N(kg/d)	90	
	TN(kg/d)	3 500		TN(kg/d)	1 200	
	TP(kg/d)	400		TP(kg/d)	110	
	pH	7 ~ 8		pH	6 ~ 7	
能源消耗	处理单位污水	0. 22	日污泥产量(kg)			26 000
	耗电(kW · h/m ³)	79. 2				
	日耗电量(10 ⁶ kJ/d)	2 500				
	PAC 用量(kg/d)	26				
PAM 用量(kg/d)		26				
建筑材料	水泥(t)	15 000	污泥向土壤排放的污染物	P(g/d)	275 600	
	铸铁管(t)	250		K(g/d)	189 800	
				Cd(mg/d)	10 880	
	钢材(t)	3100		Cr(mg/d)	316 800	
				Cu(mg/d)	979 200	
	木材(t)	120		Pb(mg/d)	60 800	
				Ni(mg/d)	140 800	
		Zn(mg/d)	3 347 200			

2 结果和讨论

2.1 污水处理厂对环境影响的生命周期评价

2.1.1 特征化结果分析

笔者依据荷兰生命周期评价手册中的特征化因子对污水处理厂的环境影响进行评价,结果见表 2 和图 2。污水处理厂造成的环境影响主要来自其运营维护阶段的电力消耗(非生物资源消耗 91.0%,全球变暖 94.9%,光化学氧化 88.8%,大气酸化 78.9%)。这主要是因为污水处理厂在生命周期内消耗了大量的火电,且煤的消耗和二氧化硫的排放都很大。污泥的处理处置是陆地生态毒性的主要来源(占 47.9%),其次是直接电力消耗(38.2%)和建筑材料制造(13.8%)。由图 2 可知,污水处理厂在运营维护阶段造成的环境影响最大。

表 2 污水处理厂环境影响特征化结果 kg					
环境影响内容	当量物质	环境影响值 ^①			总计
		施工建造阶段	运营维护阶段	交通运输阶段	
非生物资源消耗(ADP)	Sb	1.76×10 ⁵	1.72×10 ⁶	1.81×10 ⁴	1.91×10 ⁶
全球变暖(GWP)	CO ₂	1.86×10 ⁷	5.24×10 ⁸	2.25×10 ⁶	5.45×10 ⁸
陆地生态毒性(TETP)	1,4-DCB	1.11×10 ⁵	6.93×10 ⁵	—	8.04×10 ⁵
光化学氧化(PHO)	C ₂ H ₄	4.09×10 ³	9.34×10 ⁴	7.75×10 ³	1.05×10 ⁵
大气酸化(AP)	SO ₂	4.76×10 ⁴	2.41×10 ⁶	6.11×10 ⁴	2.52×10 ⁶
富营养化(EP)	PO ₄ ³⁻	4.78×10 ³	2.00×10 ⁷	9.21×10 ³	2.00×10 ⁷

注:①指 50 年的环境影响值。

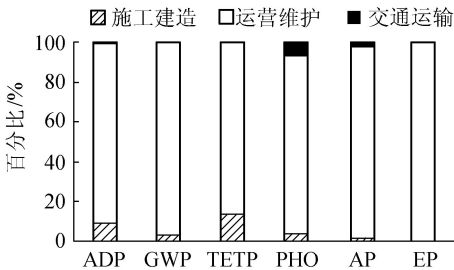


图 2 污水处理厂不同阶段对环境影响所占比例

2.1.2 归一化处理结果分析

为比较各环境影响指标的重要性,对特征化结果进行归一化处理(将特征化结果除以归一化因子的值)。各环境影响指标的归一化因子数值及归一化结果见表 3。由于在我国缺少相关的污染物排放数据,归一化处理的结果不包括陆地生态毒性。结果表明,尽管污水处理厂对氮具有较好的去除效果,富营养化仍是污水处理厂生命周期内造成的主要环境影响,这主要是由于污水处理厂具有较长的生命周期(50 年),尽管出水中导致富营养化的污染物质量浓度较低,但是这种污染物的排放量是巨大的。结合特

征化结果可知,提高能源利用效率(或减少能源使用)和出水水质均有利于减少污水处理厂造成的环境影响,但这两者之间的平衡需要决策者把握。

表 3 各环境影响指标归一化因子数值^[15]及归一化结果

环境影响内容	当量物质	归一化因子数值/(kg·a ⁻¹)	参考源	归一化结果	比例/%
非生物资源消耗	Sb	1.82×10 ¹²	全球,2000 年	2.28×10 ⁻⁶	2.015
全球变暖	CO ₂	1.13×10 ¹³	全球,2000 年	8.79×10 ⁻⁶	7.767
光化学氧化	C ₂ H ₄	7.37×10 ⁸	全球,1990 年	2.51×10 ⁻⁵	22.179
大气酸化	SO ₂	4.50×10 ¹⁰	中国,2005 年	1.19×10 ⁻⁹	0.001
富营养化	PO ₄ ³⁻	5.17×10 ⁹	中国,2005 年	7.70×10 ⁻⁵	68.039

注:比例为各环境影响指标归一化结果占环境影响总归一化结果的百分比。

2.1.3 绿色税收结果分析

为使污水处理厂对环境的影响具有更为直观的经济体现,以绿色税收为指标来体现污水处理厂生命周期内所造成的环境影响。各环境影响的权重因子值依据我国临时天然资源征费条例中的资源税率进行计算^[16],计算结果见表 4。

表 4 各环境影响及资源绿色税收权重因子值^[16] kg

类目	当量物质	权重因子值
化石燃料资源	SCE	5.97×10 ⁻⁴
木材		2.70×10 ¹
铁/铝/锰		2.44×10 ⁻³ /2.87×10 ⁻³ /2.87×10 ⁻⁴
全球变暖	CO ₂	3.00×10 ⁻²
水生物毒性	Pb	8.70×10 ⁻¹
水生悬浮颗粒物		2.58×10 ⁻²
光化学烟雾	C ₂ H ₄	3.90×10 ⁻¹
大气酸化	SO ₂	8.32×10 ⁻²
富营养化	NO ₃	2.50×10 ⁻¹

污水处理厂生命周期内对环境的影响产生的绿色税收计算结果为:污水处理厂造成的环境影响总绿色税收消耗约为 5 370 万美元,其中富营养化和全球变暖所占比重最大,绿色税收值分别为 3 350 万美元和 1 640 万美元。排在第 3 位的是悬浮物,为 343 万美元,第 4 和第 5 位分别是大气酸化和木材消耗,分别为 21 万美元和 8.62 万美元;光化学烟雾、化石燃料消耗、矿产资源消耗和水生物毒性,分别为 4.1 万美元、3.21 万美元、0.439 万美元和 17.1 万美元。

2.2 不同污水处理工艺生命周期评价结果比较

2.2.1 A2/O 工艺污水处理厂与湿地处理系统的比较

Duan 等^[17]对某湿地公园污水处理系统(基于自然湿地开发建设的水景观,同时作为人工湿地污水处理系统)进行了生命周期评价研究。笔者将 A2/O 工艺污水处理厂和湿地污水处理系统的生命周期评价结果进行比较,见图 3。由图 3 可见,A2/O 工艺污水处理厂富营养化结果要比湿地系统的小一

些,这是因为 A2/O 工艺污水处理厂出水水质较湿地系统好。但由于 A2/O 工艺污水处理厂在施工建造阶段使用了更多的材料,在运营维护阶段消耗了更多的化学药剂,所以其消耗的非生物资源要比湿地系统多。与 A2/O 工艺污水处理厂相似,湿地系统对环境的影响最大的阶段是运营维护阶段。事实上,A2/O 工艺污水处理厂和湿地系统最重要的差异就在于电力的消耗:污水处理厂消耗的电力为 $0.22\text{ (kW}\cdot\text{h)}/\text{m}^3$,湿地系统消耗的电力为 $0.46\text{ (kW}\cdot\text{h)}/\text{m}^3$ 。在能源使用上的差别导致二者在二氧化硫和氮氧化物排放量上具有差别,这在大气酸化和全球变暖上得到体现。Duan 等^[17]的研究表明,湿地系统造成的光化学氧化主要集中在施工建造阶段,因为钢筋混凝土固化过程中会排放大量二氧化碳和甲烷。

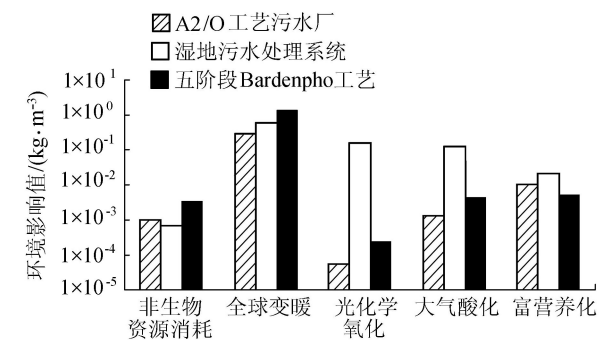


图3 不同污水处理系统处理单位污水造成的环境影响比较

注:非生物资源消耗用 Sb 当量表示;全球变暖用 CO₂ 当量表示;光化学氧化用 C₂H₄ 当量表示;大气酸化用 SO₂ 当量表示;富营养化用 PO₄³⁻ 当量表示。

2.2.2 A2/O 工艺污水处理厂与五阶段 Bardenpho 工艺比较

五阶段 Bardenpho 工艺由 Foley 定义并采用 Biowin 进行模拟^[7],是一种深度脱除磷的污水处理工艺,它建立在 A2/O 工艺之上,构筑物单元为厌氧-缺氧-好氧-缺氧-好氧,出水水质情况见表 5。A2/O 工艺污水处理厂和与五阶段 Bardenpho 工艺处理单位污水所造成的环境影响比较见图 3。

表 5 A2/O 工艺污水处理厂和五阶段 Bardenpho 工艺出水水质比较			
Bardenpho 工艺出水水质比较			mg/L
污水处理系统	ρ(COD)	ρ(TN)	ρ(TP)
A2/O 工艺污水处理厂	113.0	5.5	0.9
五阶段 Bardenpho 工艺	38.7	3.0	1.0

由图 3 可见,污水处理效果越好,其造成的环境影响也就越大,这和 Foley 等^[7]的研究相一致。由于五阶段 Bardenpho 工艺对污水处理效果较好,故水体富营养化较低(当量为 $5.45\times10^{-3}\text{ kg}/\text{m}^3$,而

A2/O 工艺污水处理厂的当量为 $1.09\times10^{-2}\text{ kg}/\text{m}^3$),但是其造成的其他环境影响较大,以全球变暖最为显著。这可能是因为与 A2/O 工艺污水处理厂 $0.22\text{ (kW}\cdot\text{h)}/\text{m}^3$ 的耗能相比,五阶段 Bardenpho 工艺 $0.615\text{ (kW}\cdot\text{h)}/\text{m}^3$ 的能耗较高。

3 结 论

对某 A2/O 工艺污水处理厂生命周期内的环境影响进行了定量研究,结果表明,生命周期内某 A2/O 工艺污水处理厂造成的环境影响主要来自其运营维护阶段的电力消耗,对富营养化和全球变暖具有较大影响。将某 A2/O 工艺污水处理厂生命周期评价结果和其他的污水处理工艺的生命周期评价结果进行比较,结果表明,相对于湿地污水处理系统,A2/O 工艺污水处理厂消耗了更多的非生物资源,但是在大气酸化、光化学氧化以及全球变暖等方面产生的影响较小;相对于五阶段 Bardenpho 工艺,A2/O 工艺污水处理厂对富营养化具有较大的影响,但在非生物资源消耗、全球变暖、光化学氧化以及大气酸化等方面的影响较小。

提高污水处理厂能源利用效率(或减少能源的使用)和提高出水水质均有利于减少污水处理厂造成的环境影响,但事实上,污水处理厂的耗能随着出水水质的提高而增加,二者之间的平衡需要决策者把握,以达到使整个污水处理系统对环境造成的影响最小的目标。

参考文献:

[1] BONTON A, BOUCHARD C, BARBEAU B, et al. Comparative life cycle assessment of water treatment plants [J]. Desalination, 2012,284:42-54.

[2] BEERY M, REPKE J U. Sustainability analysis of different SWRO pre-treatment alternatives [J]. DESALINATION AND WATER TREATMENT, 2010,16 (1/3):218-228.

[3] FINNVEDEN G, HAUSCHILD M Z, EKVALL T, et al. Recent developments in life cycle assessment [J]. J Environ Manage, 2009,91(1):1-21.

[4] JOLLIET O, MARGNI M, CHARLES R, et al. Impact 2002+: a new life cycle impact assessment methodology [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2003,8(6):324-330.

[5] SOMBEKKE H D M, VOORHOEVE D K, HIEMSTRA P. Environmental impact assessment of groundwater treatment with nanofiltration[J]. Desalination, 1997,113 (2/3):293-296.

[6] MOHAPATRA P K, SIEBEL M A, GIJZEN H J, et al. Improving eco-efficiency of Amsterdam water supply: a

- LCA approach[J]. Journal of Water Supply Research and Technology-AQUA, 2002,51(4):217-227.
- [7] FOLEY J, de HAAS D, HARTLEY K, et al. Comprehensive life cycle inventories of alternative wastewater treatment systems[J]. Water Res, 2010,44(5):1654-1666.
- [8] ZHAO Y, WANG S, NIELSEN C P, et al. Establishment of a database of emission factors for atmospheric pollutants from Chinese coal-fired power plants[J]. Atmospheric Environment, 2010,44(12):1515-1523.
- [9] ZHAO Y, WANG S, DUAN L, et al. Primary air pollutant emissions of coal-fired power plants in China: current status and future prediction[J]. Atmospheric Environment, 2008,42(36):8442-8452.
- [10] COMMISSION E, CENTER D J R. Institute for Environment and Sustainability LCA Tools, Services and Data [EB/OL]. [2012-08-12]. <http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasetCategories.vlm>.
- [11] LEI Y, ZHANG Q, NIELSEN C, et al. An inventory of primary air pollutants and CO₂ emissions from cement production in China, 1990—2020[J]. Atmospheric Environment, 2011,45(1):147-154.
- [12] GUO Z C, FU Z X. Current situation of energy consumption and measures taken for energy saving in the iron and steel industry in China[J]. Energy, 2010,35(11):4356-4360.
- [13] WANG C, HU X, CHEN M L, et al. Total concentrations and fractions of Cd, Cr, Pb, Cu, Ni and Zn in sewage sludge from municipal and industrial wastewater treatment plants[J]. J Hazard Mater, 2005,119(1/3):245-249.
- [14] HE K, HUO H, ZHANG Q, et al. Oil consumption and CO₂ emissions in China's road transport: current status, future trends, and policy implications[J]. Energy Policy, 2005,33(12):1499-1507.
- [15] YANG J X, NIELSEN P H. Chinese life cycle impact assessment factors[J]. J Environ Sci (China), 2001,13(2):205-209.
- [16] LI X, ZHU Y, ZHANG Z. An LCA-based environmental impact assessment model for construction processes[J]. Building and Environment, 2010,45(3):766-775.
- [17] DUAN N, LIU X D, DAI J, et al. Evaluating the environmental impacts of an urban wetland park based on emergy accounting and life cycle assessment: a case study in Beijing[J]. Ecological Modelling, 2011,222(2):351-359.

(收稿日期:2013-01-25 编辑:彭桃英)

(上接第 42 页)

参考文献:

- [1] 李梓嘉,董增川,樊孔明,等. MIKE11 模型在泗洪县城城区河网引水冲污工程中的应用[J]. 水电能源科学, 2012,30(8):100-103. (LI Zijia, DONG Zengchuan, FANG Kongming, et al. Application of MIKE11 model in water diversion and flushing pollutants of urban river network in Sihong City[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(8):100-103. (in Chinese))
- [2] 王玉铜,陈才明,曾广恩. 温州市区河道纳潮冲污试验分析[J]. 浙江水利科技, 2009(4):17-19. (WANG Yutong, CHEN Caiming, ZENG Guanggen. Wenzhou City river tidal flush out pollutants test analysis[J]. Zhejiang Water Conservancy Science and Technology, 2009(4):17-19. (in Chinese))
- [3] 李巍,朱杰,陈瑞方,等. 虹口港水系引水冲污方案研究[J]. 水利规划, 1998(3):34-38. (LI Wei, ZHU Jie, CHEN Ruifang. Research on water environmental improvement scheme of water system in Hongkou Port through water diversion[J]. Water Resources Planning, 1998(3):34-38. (in Chinese))
- [4] 薛朝霞,汪翔,阮晓红,等. 引水冲污治理苏州的水环境[J]. 中国给水排水, 2002, 18(10):33-35. (XUE Zhaoxia, WANG Hui, RUAN Xiaohong, et al. Research on water environmental improvement scheme of water system in Suzhou area through water diversion[J]. China's water supply and drainage, 2002, 18(10):33-35. (in Chinese))
- [5] 沈建,陈建标,肖玉兵. 南通市高水系引江调水水质改善分析与方案优化[J]. 人民长江, 2012, 43(10):72-74. (SHEN Jian, CHEN Jianbiao, XIAO Yubin. Analysis on water quality improvement effect of water system in Nantong by water diversion from Yangtze River and scheme optimization[J]. Yangtze River, 2012, 43(10):72-74. (in Chinese))
- [6] 华祖林,顾莉,刘晓东. 调水对改善浅水型湖泊水体的置换率研究[J]. 水资源保护, 2009, 25(1):9-13, 17. (HUA Zhulin, GU Li, LIU Xiaodong. Improving water exchange rate of shallow lakes through water diversion works[J]. Water Resources Protection, 2009, 25(1):9-13, 17. (in Chinese))

(收稿日期:2013-04-09 编辑:高渭文)

