DOI:10.3880/j.issn.1004–6933.2016.02.018

台州市核心区生态补水最佳流量研究

陈 玥[1],侯道平[2],陈 星[1],张其成[1],庞晓飞[3]

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098; 2. 台州市市区水环境整治促进中心,浙江 台州 318000;
3. 临沂市水务集团有限公司,山东 临沂 276000)

摘要:为改善台州城区水生态环境,确定对台州城区生态补水的规模,应用 MIKE 11 水环境模型软件建立河网水量水质耦合模型,研究河网水动力变化对水质改善的影响,对模型进行率定、验证,并预测 8 种不同工况条件引水后的水质状况,以水环境质量改善后降低的污水处理费用作为经济效益指标,以泵站运行费用作为成本指标,计算引水流量与工程净效益之间的定量关系,最后分析得到最佳引水流量,旨在为确定、优化台州市区生态补水流量、治理城市水污染问题提供决策依据。

关键词:生态补水;水量水质模型;最佳引水流量;效益分析;台州市

中图分类号:X832 **文献标志码**:A **文章编号**:1004–6933(2016)02–0087–05

Optimal flow of ecological water supplement in core area of Taizhou City

CHEN Yue[1], HOU Daoping[2], CHEN Xing[1], ZHANG Qicheng[1], PANG Xiaofei[3]

(1. *College of Hydrology and Water Resources*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*;
2. *Promotion Center for Taizhou City Water Environment Treatment*, *Taizhou* 318000, *China*;
3. *Linyi Water Group Co. Ltd.*, *Linyi* 276000, *China*)

Abstract: In order to improve the water ecological environment of Taizhou urban area, and determine the scale of ecological water supplement in the area, the water environment MIKE 11 software was used to establish a river water quantity and quality coupling model to study the influence of hydrodynamic change on water quality improvement. And then the model was calibrated and verified. The situation of water quality after water diversion of eight kinds of different working conditions was predicted. Taking the reduced wastewater treatment costs after the quality of water was improved as the economic benefits indicators, and pump operating costs as the cost index, the quantitative relationship between the flow of water diversion and the net benefit of the project was calculated, and the optimal flow of water diversion was obtained. The aim of this study is to provide a scientific basis for determining and optimizing ecological water supplement and the control of water pollution in Taizhou urban area.

Key words: ecological water supplement; water quantity and quality model; optimal flow of water diversion; benefits analysis; Taizhou City

河网地区的经济、社会、文化均发展较快,水污染问题极其突出,水生态系统遭受严重破坏[1]。为解决城市水环境问题,采取"清水、活水"方法,即通过生态补水来降低水体中污染物浓度并增强水动力条件,从而改善地区水环境的方法,被很多国家采纳,且效果显著。美国的 Green 湖、Snake 湖等均通过生态补水使水质得到了改善[2];1979 年,荷兰采用了相似的方法治理了 Veluwe 湖[3]。近些年,我国也有不少采用该方法有效治理水污染的典范。加强河湖连通是新形势下的一种治水方案。以水生态环境修复与保护为主的河湖水系连通,需保障生态环境用水,修复河湖和区域的生态环境,重点提高水资源和水环境承载能力[4]。2002 年,为实现太湖流域水环境综合治理,组织了"引江济太"工程;同年,还实施了长江对南四湖的应急生态补水工程;2004 年,为拯救干涸的白洋淀,通过"引岳济淀"工程使

作者简介:陈玥(1992—),女,硕士研究生,研究方向为生态水利。E-mail:2504784595@qq.com
通信作者:陈星,讲师,博士。E-mail:chenxing@hhu.edu.cn

白洋淀水环境生态系统得以恢复[5-6]。但是,目前该方面的研究内容侧重于补水后水体水质改善的效果评价[7-8],且研究对象大多为湖泊,而引水流量与水环境改善效益的量化关系以及最佳引水流量的确定是该领域有待深入探讨的问题之一[9]。本文基于 MIKE 11 的水量水质数学模型模拟不同的引水流量工况对台州城区水质的改善情况,以水质改善降低的污水处理费用作为经济效益指标,以泵站运行费用作为成本指标,定量计算引水流量与净效益之间的关系,试图解决生态补水工程中具有最佳经济效益的引水流量问题。研究区水系属山丘平原河网水系,相互贯通,并且受人工闸坝调控,水动力条件复杂。该地区既受上游来水影响,又受本地污染源影响,水体污染严重,体现了我国东部地区城市水动力、水质污染特点。本研究旨在为类似地区水量调控和水污染治理提供参考和借鉴。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

台州市椒江区地处东南沿海,位于温黄平原,为典型河网水系地区。河流水系总体呈“四横九纵”经纬格局,“四横”自北向南依次为东西走向的高闸浦、洪家场浦、鲍浦、长浦,“九纵”自西往东依次为南北走向的永宁河、葭芷泾、三才泾、一条河、二条河、三条河、五条河、八条河、九条河。随着经济的快速发展,大量工业废水和生活污水等外源污染输入,加之河道长期滞留,水污染问题日趋严重。从椒江区 9 个水质监测断面的监测数据分析,近 5 年椒江区劣Ⅴ类水体占 50% 以上,主要污染物质为 NH_3-N、TP。随着浙江省“五水共治”工作的推进,城区作为“治污水”工作的重点区域,台州市政府划定西至永宁河,东至机场路,南至东海大道,北至椒江堤塘为台州市核心区,面积约 20km^2,拟通过生态补水和城区活水工程来改善城区水生态环境。引水调控方案为引长潭水库的清洁水源,经由江南渠道、中干渠至西江水系,通过东官河经永宁河注入椒江城区,通过海门河入江城河、葭芷泾、三才泾,对台州市核心区进行生态补水。涉及的河道主要有东官河、永宁河、海门河、江城河、葭芷泾、三才泾,引水建筑物包括永宁河上的 0 号船坝,葭芷泾上 3 号橡胶坝,三才泾上 4 号橡胶坝,海门河上 5 号橡胶坝,以及其他临时堵坝。具体情况见图 1。

1.2　模型

1.2.1　水量、水质模型的建立

本文采用 MIKE11 HD 模块建立水动力模型,基本原理为圣维南方程组(式(1)),采用“双扫”法进行数值计算,采用六点中心隐式差分格式。

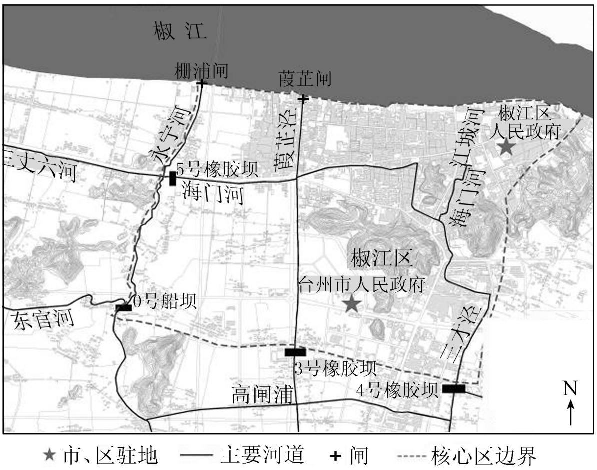

图 1　椒江区核心区水系及水利工程分布

$$\begin{cases}\dfrac{\partial A}{\partial t}+\dfrac{\partial Q}{\partial x}=q\\[2ex]\dfrac{\partial Q}{\partial t}+\dfrac{\partial}{\partial x}\left(\dfrac{Q^2}{A}\right)+gA\dfrac{\partial h}{\partial x}+g\dfrac{Q\mid Q\mid}{C^2AR}=0\end{cases}\tag{1}$$

式中:A 为过流断面面积;t 为时间;Q 为流量;x 为距离坐标;q 为旁侧入流的流量;h 为水位;C 为谢才系数;R 为水力半径;g 为重力加速度。

利用 HD 模块模拟的水动力条件,通过 MIKE11 AD 模块模拟水体中污染物对流扩散过程,应用对流扩散方程进行计算。采用一维模型进行模拟,其基本方程为

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+u\frac{\partial\rho}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left(E_x\frac{\partial\rho}{\partial x}\right)-K\rho\tag{2}$$

式中:ρ 为污染物质量浓度;t 为时间;u 为河流平均流速;x 为距离坐标;E_x 为对流扩散系数;K 为污染物一级衰减系数。

1.2.2　河网概化

在掌握椒江河网水文资料的基础上,遵循与实际河网输水能力、调蓄能力等保持一致的原则[10],以东官河、永宁河、海门河、葭芷泾、三才泾、高闸浦为骨干河道进行概化。概化河网见图 2。

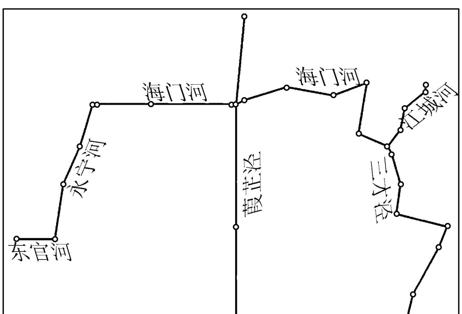

图 2　核心区河道概化

1.2.3　模型率定

以 2012 年 1 月 9—13 日台州市原型调水实验数据为实测值。原型调水从长潭水库开闸放水,经

由江南渠道、中干渠至西江水系,通过东官河经永宁河进入椒江城区,通过闸坝调度对核心区进行补水,共设有10个监测断面,具体见图3。水文监测因子包括流量、流速、水位,水质监测因子包括COD、NH_3-N、TN、TP,水文监测每小时1次,水质监测每6h1次。结果表明计算流量和水质均与实测值拟合较好,流量相对误差最大10.3%;选取COD和NH_3-N为代表污染物,水质相对误差小于15%,说明模型参数选取合理,可用于描述该地区的水动力和水质变化过程。其中重点监测断面的流量和水质率定验证结果见图4。

2 引水效果评价

笔者逐步增加引水流量,模拟不同引水流量下的水质情况,进行引水效果评价。结果表明:当流量未达到10 m^3/s时,水质改善效果显著;流量达到10 m^3/s时,水质改善趋势减缓。为保持流量、水质关系的完整性,流量模拟至16 m^3/s。

通过综合水质标识指数评价法来分析8种不同引水流量下水质改善效果,再计算效益和成本。水环境质量改善后具有诸多效益,本文选取降低污水处理费作为可量化指标来进行评估,以调水过程中泵站运行成本作为成本指标,确定引水流量和净效益的定量关系,进一步分析经济效益最大化时的引水流量。

2.1 水质评价方法

本文采用综合水质标识指数评价法来判断水质改善状况。综合水质标识指数表示为C,其计算方法为

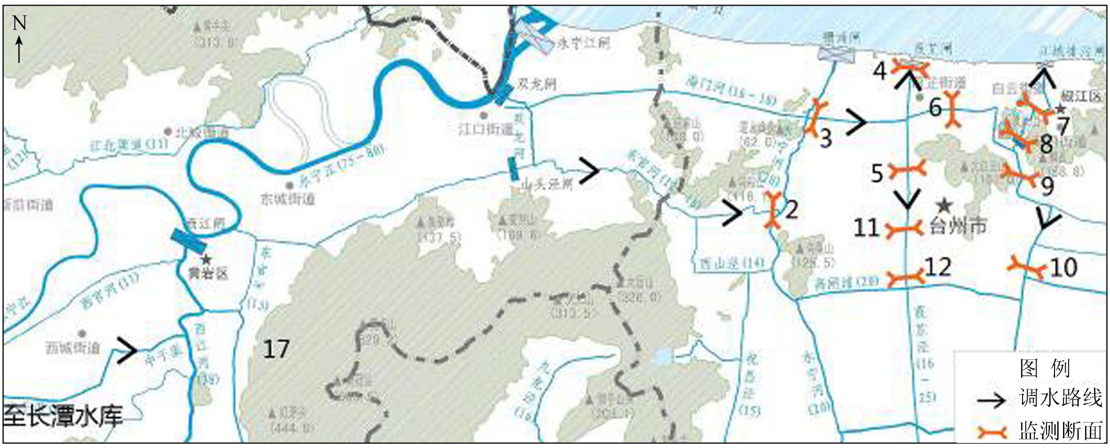

图3 核心区原型调水试验监测断面分布

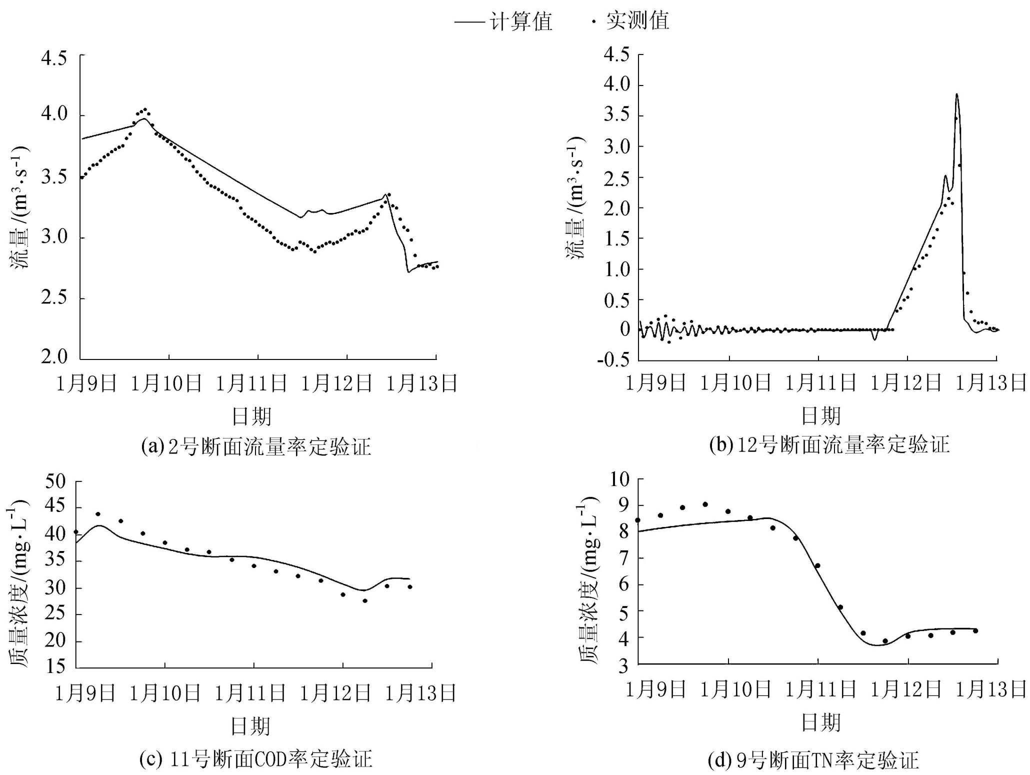

图4 模型计算值与实测值对比

$$C = \frac{1}{m+1}\left(\sum_{i=1}^{m} P_i + \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} P_j\right) \tag{3}$$

式中：P_i 为徐祖信等[11] 提出的单因子水质标识指数，每项指标各占 1 个权重，m 为主要污染物个数；P_j 为非主要单因子水质标识指数，共计 1 个权重，n 为非主要污染物个数。

该方法不仅能够对Ⅰ～Ⅴ类水进行判断，还可对劣Ⅴ类水进行连续划分，具体评判标准见表 1。本文采用 COD、NH_3-N、TP、TN 作为评价单因子，采用单因子评价法计算得到 4 个监测指标的标识数，其中 NH_3-N、TP、TN 为主要污染指标，COD 为非主要污染指标。模型模拟结果显示，引水 3 d 后，各断面污染物基本达到稳定状态，以引水 75 h 后的水中污染物浓度作为评价数据。由于研究区域范围较小，且河道断面较规则，采用 3—12 号断面污染物浓度的平均值，计算得到 8 种不同工况下综合水质标识指数，具体计算结果见表 2。根据计算结果绘制综合水质标识指数变化曲线，见图 5。

表 1　基于综合水质标识指数水质分类

C 值	综合水质类别
(1.0, 2.0]	Ⅰ类
(2.0, 3.0]	Ⅱ类
(3.0, 4.0]	Ⅲ类
(4.0, 5.0]	Ⅳ类
(5.0, 6.0]	Ⅴ类
(6.0, 7.0]	劣Ⅴ类，不黑臭
(7.0, ∞)	劣Ⅴ类，黑臭

表 2　不同工况下综合水质标识指数

流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	COD 水质标识指数	NH_3-N 水质标识指数	TP 水质标识指数	TN 水质标识指数	综合水质标识指数 C
0	4.60	8.74	8.74	11.47	8.44
2	5.31	7.23	7.03	9.55	7.33
4	4.90	7.03	6.52	8.34	6.72
6	4.70	6.22	6.12	7.33	6.12
8	4.40	5.41	5.21	6.42	5.41
10	4.30	4.80	4.70	5.91	4.90
12	4.10	4.60	4.20	5.01	4.50
14	4.10	4.60	4.20	4.70	4.40
16	3.90	4.40	4.20	4.50	4.30

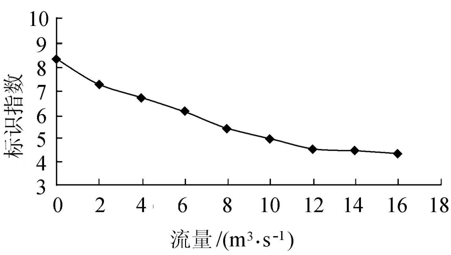

图 5　水质综合标识指数变化曲线

由图 5 可以看出，随着流量的增加水质综合评价标识指数降低速率变小，即水质改善的效果逐渐降低，当流量达到 10 m^3/s，水质可达到水功能区要求。

2.2　经济效益评价

本文利用 MIKE 11 模型计算出的引水后流量和污染物浓度，经济效益指标为减少的污水处理费用，经济效益计算公式为

$$E_m = P(\rho_0 - \rho_1) \tag{4}$$

式中：E_m 为经济效益；ρ_0 为引水前河网中初始污染物量；ρ_1 为引水后污染物量；P 为处理 1 g 污染物的成本，其计算公式为

$$P = P_c / \rho \tag{5}$$

式中：P_c 为单位水价中包含的污染物处理费用；ρ 为污染物质量浓度。

本文选用补水工程运行成本作为成本指标，不考虑生态补水工程的建设成本，由于引水水源为长潭水库汛期的下泄水量，故成本主要为泵站运行费用，通过式(6)进行成本计算：

$$E_y = Q'TP_y \tag{6}$$

式中：E_y 是运行成本；Q' 为引水流量；T 为引水时间；P_y 为泵站运行费用。

根据公式(5)～(6)计算经济效益与运行成本，两者之差为工程净效益，计算公式为

$$E = E_m - E_y \tag{7}$$

计算过程中，选用典型污染物 NH_3-N 作为经济效益计算污染物，核心区引水以 75 h 计算，核心区水体约为 40 万 m^3；台州市的污水处理费用约为 1.03 元/m^3，台州市污水处理厂混合进水水质分析结果显示，污水中 NH_3-N 质量浓度约为 32.5 mg/L；根据目前引水时泵站的运行费用估算泵站污染物处理费用为 0.01 元/m^3。然后可以利用公式(4)～(7)计算得出相关的指标值，具体计算结果见表 3。净效益与引水流量的定量数值关系可表达为 $E = -0.0331Q'^2 + 0.6178Q' + 2.1163$，变化曲线见图 6。

表 3　8 种工况下经济效益、运行成本与净效益

引水流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	降低质量浓度/($mg \cdot L^{-1}$)	削减量/(10^5 g)	经济效益/万元	运行成本/万元	净效益/万元
2	2.95	11.79	3.77	0.54	3.23
4	3.95	15.80	5.06	1.08	3.98
6	4.84	19.36	6.19	1.62	4.57
8	5.75	23.01	7.36	2.16	5.20
10	6.04	24.16	7.73	2.70	5.03
12	6.14	24.56	7.86	3.24	4.62
14	6.17	24.68	7.90	3.78	4.12
16	6.26	25.02	8.01	4.32	3.69

3　结　语

a. 通过对比分析 8 种不同引水流量对核心区

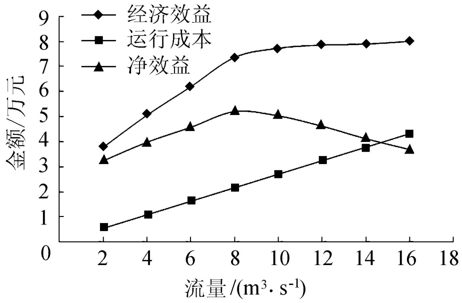

图 6　引水流量与经济效益、运行成本、净效益关系

水质的改善效果,并计算出 8 种工况下的效益和成本,得到流量和净效益之间的定量关系,确定最经济引水流量为 10.24m^3/s,最大净效益约为 4.97 万元,此种工况引水 75h 后污染物质量浓度基本稳定。

b. 水环境质量改善后具有诸多效益,如提升城市品位,吸引旅游和投资,提升土地价值,降低污水处理费用等。由于其他指标难以量化,本文仅选取降低污水处理费用作为经济效益指标,但这样会使效益偏小。

由于资料局限,本文只建立了一维水量水质模型,结果仅供工程建设参考,建议采用二维模型,参考本文评估方法,来计算最佳引水流量和经济效益。

参考文献:

[1] 周怀东,彭文启. 水污染与水环境修复[M]. 北京:化学工业出版社,2005: 196-268.

[2] DIEDERIK T, VAN D M, ROB P, et al. Changes in sediment phosphorus as a result of eutrophication and oligotrophication in Lake Veluw, the Netherlands[J]. Water Research,1998,32(11): 3281-3288.

[3] 秦伯强,许海,董百丽. 富营养化湖泊治理的理论与实践[M]. 北京: 高等教育出版社,2011:238-245.

[4] 窦明,崔国韬,左其亭,等. 河湖水系连通的特征分析[J]. 中国水利, 2011 (16):17-19.(DOU Ming, CUI Guotao,ZUO Qiting, et al. Analysis of the characteristics of the water connectivity[J]. China Water Resources, 2011 (16):17-19.(in Chinese))

[5] 武周虎,张晓波,张芳园. 南四湖入湖重点污染河流筛选与水环境问题分析[J]. 长江流域资源与环境,2011, 20(4):475-481.(WU Zhouhu,ZHANG Xiaobo,ZHANG Fangyuan. Filtration of heavily-polluted inflow rivers of Nansi Lake and water environmental problems analysis [J]. Resources and Environment in Yangtze Basin,2011, 20(4):475-481.(in Chinese))

[6] 杨柳,马克明,白雪,等. 洪河国家级自然保护区最小生态需水量与补水分析[J]. 生态学报,2008,28(9): 4501-4507.(YANG Liu,MA Keming,BAI Xue,et al. The least eological water demand and water supplement for wetland in Honghe National Nature Reserve Area[J]. Acta Ecologica Sinica,2008, 28(9):4501-4507.(in Chinese))

[7] 李大勇,王济干,董增川. 引江调水改善太湖贡湖湾的水环境效应[J]. 水力发电学报,2011,30(5):132-138. (LI Dayong, WANG Jigan, DONG Zengchuan. Study on water environmental effects of Gonghu bay water transfer from Yangtze River [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2011,30(5):132-138.(in Chinese))

[8] 沈爱春. 望虞河引江对太湖的影响研究[J]. 水资源保护,2002,18(1):29-32,38.(SHEN Aichun. Research on the impact which drainage Yangtze River to Wangyu River of Taihu Lake[J]. Water Resources Protection,2002,18 (1):29-32,38.(in Chinese))

[9] 何文学,邹冰,陈冬云,等. 平原河网区调水配水改善水环境方案设计[J]. 中国给水排水,2012,28(17):63-67.(HE Wenxue, ZOU Bing, CHEN Dongyun, et al. Design of water transfer and distribution schemes of river network in plain areas for improving water environment [J]. China Water and Wastewater,2012,28(17):63-67. (in Chinese))

[10] 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,FAN Kongming,et al. Application of MIKE 11 model in water diversion and flushing pollutant of urban river network in Sihong City[J]. Water Resources and Power, 2012, 30 (8):100-103.(in Chinese))

[11] 徐祖信. 我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2005,33(3):321-325.(XU Zuxin. Single factor water quality identification index for environmental quality assemssment of surface water [J]. Journal of Tongji University (Natural Sciences),2005,33(3):321-325(in Chinese))

(收稿日期:2015-07-13　编辑:彭桃英)