

# 大清河河口水体自净能力实验

谭 夔<sup>1,2</sup>, 陈求稳<sup>1,\*</sup>, 毛劲乔<sup>1</sup>, 李伟峰<sup>1</sup>

(1. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085 ; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049 )

**摘要** 滇池是我国最大的高原湖泊, 因污染负荷的大量输入, 近年来已经急剧富营养化, 水华现象日益严重。大清河是流入滇池的主要支流之一, 也是入湖污染负荷的重要通道, 研究大清河河口水环境变化特征和自净能力对于控制入湖污染负荷具有重要意义。采用现场原位实验和室内模拟实验相结合的方法, 测定了大清河河口水体物理、化学和生物净化过程的相关参数, 研究了大清河河口水体的自净能力。该研究成果为建立河口水质模型提供了必要的参数, 并为河口水环境治理提供依据。

**关键词** 滇池; 水体自净; 水质模型参数

文章编号: 1000-0933 (2007) 11-4736-07 中图分类号: Q143 文献标识码: A

## The self-purification capacity of the outlet of Daqinghe River : experiment

TAN Kui<sup>1,2</sup>, CHEN Qiu-Wen<sup>1,\*</sup>, MAO Jin-Qiao<sup>1</sup>, LI Wei-Feng<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

2 Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100049

*Acta Ecologica Sinica* 2007 27 (11) 4736 ~ 4742.

**Abstract** : Dianchi, the largest plateau lakes in China, has been seriously polluted due to heavy inputs of waste loads from the watershed. The lake becomes highly eutropic and algal blooms often take place in recent years. The Daqinghe River is a major tributary of Dianchi, which carries the wastes into the lake. It is therefore important to investigate the water quality dynamics and self-purification capacity of the outlet of Daqinghe River, so that efficiently control the wastes entering into the lake. This paper presents the analyses of physical, chemical and biological processes of self-purification through field observations and laboratory experiments. The study results can provide the parameters to the three-dimensional water quality model that is developed dedicatedly for this area and is to be presented in another paper about modelling. In addition, they can support the design of the aquatic environment restoration programs.

**Key Words** : Dianchi ; self-purification ability ; water quality model parameters

水体自净是指水体受到污染后, 由于物理、化学、生物等因素的作用, 使污染物的浓度和毒性逐渐降低, 经过一段时间, 恢复到受污染以前状态的自然过程。按净化机理, 水体自净分为物理自净、化学自净和生物化学自净。由于水体自净过程复杂, 受多种因素影响, 加之实验和监测条件的局限性, 研究水体自净是一个非常复杂的课题, 因此目前大都是针对水体自净规律的某一方面进行研究<sup>[1~5]</sup>。

大清河是昆明主城区盘龙江以东主要的排污河道, 同时也是重要的行洪河道, 最终流入滇池。由于生活

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2005AA6010100401)

收稿日期: 2007-04-11 ; 修订日期: 2007-09-30

作者简介: 谭夔 (1983 ~ ) 男, 湖南人, 硕士生, 主要从事水环境管理和水质模型研究。E-mail: tankui05@mails.gucas.ac.cn

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qchen@rcees.ac.cn

**Foundation item** : The project was financially supported by National "863" Program, China (No. 2005AA6010100401)

**Received date** 2007-04-11 ; **Accepted date** 2007-09-30

**Biography** : TAN Kui, Master candidate, mainly engaged in water management and water quality modelling. E-mail: tankui05@mails.gucas.ac.cn

污水和城市面源的影响,大清河水质污染严重,长期处于黑臭状态。在河流入湖处,两侧的浅滩湿地被围垦,河道狭窄且严重淤塞,同时受滇池水力顶托的影响,河口处流速缓慢。因此综合治理大清河水环境,修复河口生态系统是滇池治理的关键内容之一。但是文献研究表明在滇池各入湖河口尚未进行过水体自净机制研究,过去所采用的一些参数多为经验值或者文献中的参考值,也没有建立成熟的水质模型。

本研究针对滇池入湖河口水环境治理的需求和存在的问题,通过实验重点分析河口水体中污染物的迁移转化行为,确定相关的反应系数,建立河口三维水质数值模型,根据模拟结果分析河口水体的自净能力,为水环境治理方案提供一定的参考依据。本文主要介绍研究的第一部分,即采用现场原位实验和室内模拟实验相结合的方法,确定与水体自净过程相关的参数。

1 研究区域及监测点布设

研究区域从大清河桥至入湖口,全长 700m,如图 1 所示。河段上游 300m 是人工整治过的顺直河道,断面为规则的梯形,岸边坡度为 10%,平均水深为 3m,平均水面宽为 34m。下游河段左侧为竖直的混凝土堤岸,岸边有大片的淤积滩,右侧为土埂,水面呈喇叭口形状迅速扩宽,平均水深 4.4m。根据研究需要,在河段上分别布设了大清河桥、大清河中间断面和大清河河口 3 个水文和水质监测断面,中间断面位于距大清河桥 300m 处,如图 1 所示。3 个断面都进行水质监测,但在水文方面,大清河桥断面监测水位和流速(流量),大清河河口断面监测水位,从而为水质模型计算提供边界条件。

2 材料和方法

水体的自净能力主要体现在水体中有机污染物的降解、N 和 P 等营养元素的转化、颗粒态污染物的沉积以及沉积物中污染物的吸附和释放效应等方面<sup>[6~8]</sup>。可以使用水体的复氧系数、 $COD_{Cr}$ 降解系数、 $BOD_5$ 降解系数、氨化系数、硝化系数、反硝化系数、颗粒物的沉降速率、沉积物耗氧速率、沉积物中磷释放速率和吸附速率等水质参数来定量表征水体的自净过程<sup>[9,10]</sup>。

2.1 原位实验

2.1.1 水文监测

每天分上午、中午和下午 3 次,在大清河桥处对大清河水位、流向、流速、水温和透明度进行观测。此外,通过水文的自动监测装置,得到雨量和水位的数据。水位数据和雨量数据都是每 5min 自动记录 1 次,雨量计翻斗精度为 0.5mm。

2.1.2 水质监测

在大清河河口区的 3 个监测断面进行水质监测。由于水面宽达 34m 左右,每个断面上分别监测西岸、东岸和中间水体 3 个测点。监测的基本水质指标包括悬浮质(SS)、生物耗氧量(BOD)、化学耗氧量( $COD_{Cr}$ )、溶解氧(DO)、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮( $NH_4$ )、硝氮( $NO_3$ )、亚硝氮( $NO_2$ )和磷酸盐<sup>[11]</sup>。监测频率为 7 d 一次,降雨期间增加监测次数。此外,围绕一次完整的降雨过程,按间隔 2 h 进行了水文和水质监测。

2.1.3 颗粒物沉降速度的测定

将两个直径为 5cm 的圆筒形容器作为颗粒物收集器,装满蒸馏水后,置于大清河桥断面的水底,24h 后将采样器从河底取出来,抽滤收集器中的水样。

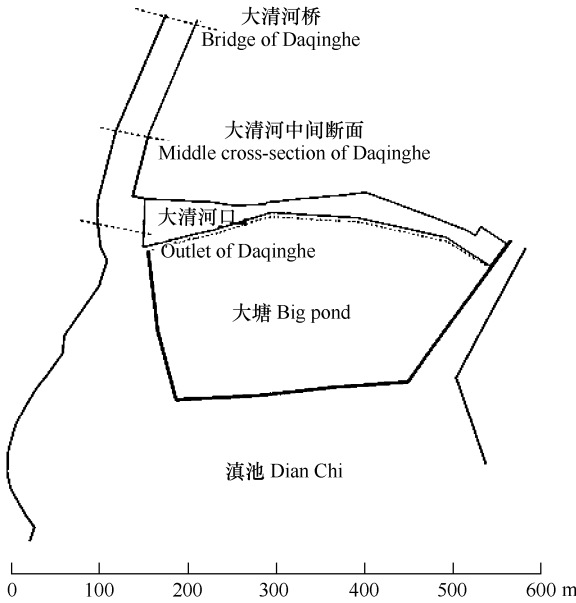


图 1 研究区域和监测断面

Fig. 1 Study area and cross-sections of monitoring station

2.2 室内模拟实验

2.2.1 硝化系数的测定

取大清河桥断面的水样 ,加入硫酸铵 ,使铵离子的浓度在 200 mg/L 左右 ,每天测定 1 次溶液中铵离子的浓度 ,持续到第 5 天。

2.2.2 反硝化系数的测定

取大清河桥断面的水样 ,加入硝酸钾 ,使硝酸根离子的浓度在 10 mg/L 左右 ,每天测定 1 次溶液中硝酸根离子的浓度 ,持续到第 5 天。

2.2.3 沉积物的磷释放速率的测定

在 3 个监测断面上分别取表层底泥样和上覆水样 ,室内各称取底泥样 5.00g 于 250ml 的锥形瓶中 ,加入 100ml 过滤后的上覆水样 ,在室温条件下敞口蔽光培养 ,间歇性扰动上覆水 ,于 3、6、9、12、24、36、48h 时测定磷酸盐浓度。

2.2.4 沉积物的磷吸附速率的测定

用磷酸二氢钾和样点上覆水配制吸附水样 ,使磷酸盐浓度在 1.5mg/L 左右。各取 3 个断面的底泥样 5.00g 于 250ml 的锥形瓶中 ,加入 100ml 吸附水样 ,在室温条件下敞口蔽光培养 ,间歇性扰动上覆水 ,于 1、2、3、4、8、12、24h 时测定磷酸盐浓度。

2.2.5 沉积物的磷吸附容量的测定

选取 1.5、1.1、0.8mg/L 3 个浓度梯度的吸附水样 ,取大清河桥断面的底泥样 ,进行磷的吸附实验。

3 实验结果

3.1 大清河水质监测结果

根据 2006 年 6 月至 2007 年 6 月的序列监测结果 ,得到大清河河口基本的水文、水质状况 (表 1 ,表 2 )。

3.2 大清河自净能力分析

3.2.1 物理自净能力

物理自净是指污染物在水体中通过混合、稀释、扩散、挥发、沉淀等作用 ,使水体得到一定程度净化的过程。物理自净能力的强弱取决于污染物自身的物理性质和水体的水文条件。大清河在没有降雨的时候 ,基本处于静止甚至倒流状态 ,有缓慢流速的时候 ,也仅在 0.01 ~ 0.03m/s 之间 ,因而平均流速仅为 0.007m/s ,水动力条件差 ,作用弱 ,水体中的污染物不易于迁移和扩散 ,这是导致大清河河口区水体污染严重的重要原因之一。只有在降雨的时候 ,为了泄洪 ,大清河桥上游 1km 处的截污闸门才会开启 ,大清河河口区水体的流速会增加到 0.1m/s 以上 ,此时水动力作用较强 ,水体的物理自净能力明显提高。

表 1 大清河水文监测数据 (平均值 ± 标准差 )  
Table 1 Hydrological monitoring data of Daqinghe (Mean ± SD )

参数 Parameter	符号 Symbol	数值 Value
水位 Water level (cm )	h	57.02 ± 13.45
水温 Water temperature (℃ )	T	18.86 ± 4.48
流速 Velocity of flow (m/s )	u	0.0075 ± 0.0851
透明度 Transparence (cm )	SD	20.15 ± 9.09

表 2 大清河水质指标  
Table 2 Water quality data of Daqinghe

水质指标 Water quality parameters	大清河桥 Daqinghe Bridge	大清河中间断面 Middle cross-section	大清河口 Daqinghe Outlet
溶解氧 DO (mg/L )	2.20 ± 2.93	1.64 ± 2.31	4.60 ± 2.73
五日生化需氧量 BOD <sub>5</sub> (mg/L )	44.42 ± 22.98	39.88 ± 25.23	21.58 ± 12.47
化学需氧量 COD <sub>Cr</sub> (mg/L )	118.33 ± 44.56	124.31 ± 80.45	115.55 ± 53.51
总氮 TN (mg/L )	24.76 ± 9.07	21.90 ± 9.37	14.87 ± 8.09
氨氮 Ammonium (mg/L )	17.61 ± 10.04	14.63 ± 9.36	7.22 ± 5.88
亚硝氮 Nitrite (mg/L )	0.060 ± 0.121	0.058 ± 0.100	0.172 ± 0.118
硝氮 Nitrate (mg/L )	0.123 ± 0.106	0.139 ± 0.173	0.363 ± 0.188
总磷 TP (mg/L )	1.14 ± 0.58	1.21 ± 0.79	1.16 ± 1.33
磷酸盐 Phosphate (mg/L )	0.66 ± 0.41	0.52 ± 0.40	0.08 ± 0.05

3.2.2 化学自净能力

化学自净是指水体中的污染物质通过氧化、还原、中和、吸附、凝聚等反应 ,使其浓度降低的过程。影响这种自净能力的因素有污染物质的形态和化学性质、水体的温度、氧化还原电位、酸碱度等。水体中化学自净能力的强弱 ,主要从以下 3 个方面反映出来。

一是反映在 DO 的含量水平上<sup>[12]</sup>。在化学自净过程中 ,作为水体氧化剂的 DO ,其含量高低能够衡量水体自净能力的强弱 ,因为 DO 的含量不仅直接影响水生生物的新陈代谢和生长 ,还直接影响水体中有机物的分解速率及物质循环。若水体中的 DO 含量高 ,既对水生生物的繁殖生长起促进作用 ,又能加快有机物的分解速度 ,使生态系中的物质循环 ,尤其是氮的循环达到最佳循环效果 ,提高水体的自净能力。大清河河口区水体中的 DO 含量极低 ,因而水体中有机物的氧化分解速度缓慢 ,有机物的大量积累 ,河口区水环境质量下降 ,直接影响水生生物的繁殖和生长。

二是反映在有机污染物的氧化分解能力上<sup>[13~15]</sup>。COD 是反映水体有机污染程度的一个重要指标 ,其含量的高低能够体现水体质量的好坏。大清河河口区水体中的 COD 和 BOD<sub>5</sub> 含量高 ,一方面表明该水体的有机污染比较严重 ,另一方面则表明该水体自净能力较差 ,缺乏将复杂组分的有机物分解成简单组分无机化合物的环境功能。

三是反映在营养盐的形态转化和消减程度上<sup>[16]</sup>。在化学自净过程中 ,三态无机氮的含量变化能够反映水体自净能力的强弱。这是因为工业废水和生活污水中含有大量的含氮有机物 ,在水体溶解氧充分的条件下 ,好氧细菌能把有机物彻底分解成二氧化碳、水及硝酸盐等稳定性化合物。但若水体中含氮有机物过量时 ,水体没有能力把全部有机氮转化为硝酸盐 ,而只能转化到某一阶段 ,如氨或亚硝酸盐。因此硝酸盐、亚硝酸盐和氨氮的含量及比例能够很好体现水体的自净能力。大清河河口区水体中氨氮的含量很高 ,但是亚硝酸盐和硝酸盐含量很低 ,说明大清河河口区水体的污染负荷已经远远超出了其自净能力。另外 ,沉积物向上覆水体释放大量有机物 ,也是导致该水域氨氮含量始终维持较高含量的直接原因。

3.2.3 生物自净能力

生物自净是指进入水体的污染物 ,经过水生生物降解和吸收作用 ,使其浓度降低或转变为无害物质的过程。生物净化过程进行的快慢和程度与污染物的性质和数量、(微 )生物种类及水体温度、供氧状况等条件有关。大清河河口区水体污染严重 ,水体中 DO 含量很低 ,而且氨化作用较强 ,微生物生长繁殖受到抑制 ,水体中微生物仅以氨化细菌等兼性细菌或厌氧细菌为主。河道两侧几乎都是人工硬化堤岸 ,且水体富营养化严重 ,高等水生植物的繁殖和生长困难 ,河口区水生生物的种类和数量均很少。

3.3 大清河水质自净过程定量描述

3.3.1 有机质降解和氮的转化

对于水体中的 BOD 和 COD 降解以及氨化、硝化和反硝化过程 ,一般认为符合一级反应动力学 ,如公式(1)所示。

$$K = \frac{\ln C_0 / C_t}{t} \tag{1}$$

式中 ,C<sub>0</sub> 为初始浓度 ,C<sub>t</sub> 为 t 时刻浓度 ,t 为自净时间。因此 BOD 和 COD 降解系数以及氨化系数、硝化系数和反硝化系数可以按照斜率法要求作 ln (C<sub>0</sub>/C<sub>t</sub> )-t 图求得<sup>[17]</sup>。

以上的图 2 和图 3 是按照斜率法求解硝化系数和反硝化系数 ,分别为 0.0178 和 0.0034 ,相关系数分别为 0.9896 和 0.9826。

3.3.2 颗粒物的沉降速率

对于颗粒物的沉降速率 ,可以采用公式(2)计算得到。

$$K = \frac{w_1 - w_2}{C \cdot S \cdot t} \tag{2}$$

$w_1$ 为抽滤前滤膜的质量  $\mu w_2$ 为抽滤后滤膜的质量  $C$  为 SS 的平均浓度  $S$  为收集器的采样面积  $t$  为收集沉降物的时间。根据大清河实验数据 得出河口水体中颗粒物的平均沉降速率为 4.79 m/d。

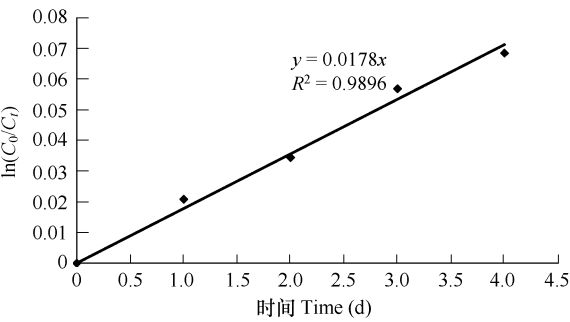


图 2 硝化反应的  $\ln (C_0/C_t)-t$   
Fig. 2  $\ln (C_0/C_t)-t$  of nitrification reaction

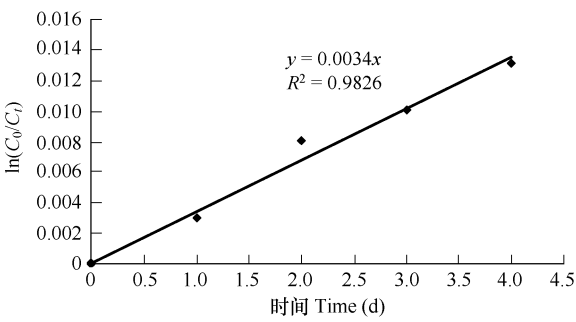


图 3 反硝化反应的  $\ln (C_0/C_t)-t$   
Fig. 3  $\ln (C_0/C_t)-t$  of denitrification reaction

3.3.3 沉积物的磷释放和吸附速率

沉积物中磷的释放速率和吸附速率采用公式 (3) 计算得到 [18]。

$$K = \frac{[ (V (C_n - C_0) ) + \sum_{i=1}^n V_j (C_{i+1} - C_a ) ]}{w \cdot t}$$

(3)

式中  $V$  为上覆水体积  $C_n, C_0, C_{i-1}$  为第  $n$  次 初始和  $i-1$  次采样时磷酸根离子浓度  $C_a$  为添加水样中的磷酸根离子浓度  $V_j$  为每次的采样体积  $\mu$  为沉积物的湿重  $t$  为释放时间。

大清河桥和中间断面的表层沉积物在 9h 时 释放达到峰值 而大清河口的表层沉积物在 6h 时 释放达到峰值 此后 磷的释放强度呈现下降趋势 直至 24h 时 沉积物中磷向水体的释放过程和水体中的磷向沉积物上的吸附过程达到了新的动态平衡。在 24h 和 48h 间的静止期 释放曲线几乎保持水平 (见图 4)。

大清河沉积物的扰动吸附实验结果表明 磷酸盐浓度在实验开始后的 1h 内迅速降低 此后有小幅度的波动 4h 后基本趋于稳定。这说明在模拟扰动条件下 大清河沉积物的磷吸附行为发生了明显变化 打破了沉积物—水界面原来的动态平衡 (见图 5)。

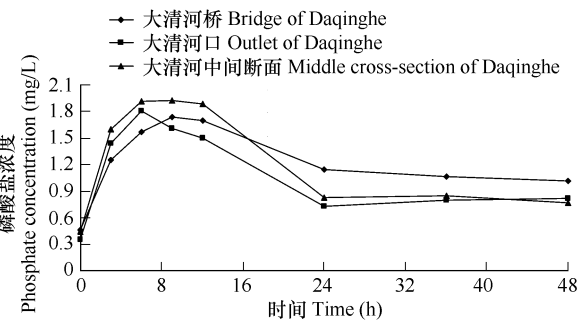


图 4 大清河沉积物磷释放曲线  
Fig. 4 Desorption curve of phosphate in Daqinghe sediment

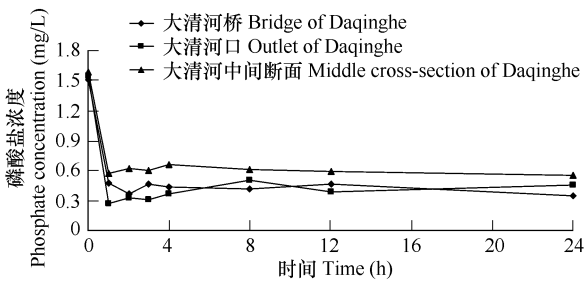


图 5 大清河沉积物磷吸附曲线  
Fig. 5 Adsorption curve of phosphate in Daqinghe sediment

3.3.4 沉积物的磷吸附容量

沉积物的磷吸附容量采用公式 (4) 计算：

$$Q = \frac{(C_0 - C_t) \cdot V}{w}$$

(4)

式中  $C_0$  为上覆水样磷酸盐初始浓度,  $C_t$  为模拟扰动 24h 后水样磷酸盐浓度,  $V$  为水样体积,  $\mu w$  为沉积物的湿重。根据实验分析, 得到大清河河口区沉积物的吸附容量, 见表 3。

表 3 不同污染负荷条件下沉积物磷的吸附容量

Table 3 Adsorption capacity of phosphate in Daqinghe sediment under different loading

初始磷浓度 Phosphate at first (mg/L)	结束磷浓度 Phosphate in the end (mg/L)	吸附容量 QAdsorption capability (mg/g)
1.509	0.350	0.023
1.061	0.292	0.015
0.788	0.253	0.011

综合大清河河口区现场原位实验和室内模拟实验的数据, 可以得到大清河河口区水体自净过程的相关参数, 并为河口水质 3 维模型提供必要的参数 (见表 4)。

表 4 大清河河口区水质过程参数值

Table 4 Parameters of water quality processes in Daqinghe estuary

参数 Parameter	符号 Symbol	计算值 Calculated value	推荐值 <sup>[19~21]</sup> Recommend value
水体复氧系数 Water reaeration coefficient ( $d^{-1}$ )	$K_1$	—	0.40
水体 BOD <sub>5</sub> 降解系数 BOD <sub>5</sub> degradation coefficient ( $d^{-1}$ )	$K_2$	0.160	0.2~1.2
COD 降解系数 COD degradation coefficient ( $d^{-1}$ )	$K_3$	0.135	0.16~0.21
颗粒物的沉降速率 Sedimentation velocity (m/d)	$K_4$	4.79	—
沉积物中磷释放速率 Phosphorus release from sediment (mg/(g·d))	$K_5$	0.008	0.02~0.06
沉积物中磷吸附速率 Phosphorus adsorption from sediment (mg/(g·d))	$K_6$	0.023	—
水体氨化系数 Ammonification coefficient ( $d^{-1}$ )	$K_7$	0.127	0.02~0.2
水体硝化系数 Nitrification coefficient ( $d^{-1}$ )	$K_8$	0.018	0.05~0.15
水体反硝化系数 Denitrification coefficient ( $d^{-1}$ )	$K_9$	0.003	0.09

4 结论

大清河河口区水体已经受到严重污染, 其污染负荷已经远远超出了自净能力, 水体自净过程的速率普遍低于文献值。大清河河口水流速度缓慢, 颗粒物的沉降较快, 不利于水体中污染物的扩散和迁移转化。沉积物磷的吸附和解吸附实验结果表明, 在大清河河口区外来污染负荷的输入依然非常严重, 沉积物是磷素的汇。由于大清河河口水体严重氧亏, 沉积物几乎处于完全厌氧环境, 水体中的硝化系数和反硝化系数也明显低于氨化系数。这些研究结果表明在建立大清河河口区水质模型中, 可以适当地简化其硝化过程和反硝化过程。

本研究是在滇池流域进行的第一次比较系统和完整的水体自净能力研究, 可以为进一步分析滇池水环境过程提供参考, 为大清河河口水环境治理方案的制定提供依据, 尤其为河口区水质模型的建立准备参数。关于这些实验参数对温度和季节的敏感性, 将在下一步进行分析和讨论。此外, 由于大清河河口水流条件十分复杂, 经常出现倒流现象, 这增加了水体自净能力实验研究的复杂性和不确定性, 因此建立河口非稳态水质模型十分重要。

References :

[1] Jain S K. Development of integrated sediment rating curves using ANNs. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127 :30—37.

[2] Kleinfeldt S. Application of GIS & science visualization in hydrology simulation Proceedings of the First International Conference of Hydrology & GIS, IAHS Publication, 1993, 211 :540—545.

[3] Mustafa M A, Zhang Y, Jin S. Application of relaxation scheme to wave-propagation simulation in open-channel networks, Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 12 :1125—1133.

[4] Linnik P M, Zubenko I B. Role of bottom sediments in the secondary pollution of aquatic environments by heavymetal compounds. Lakes and Reservoirs :Research and Management. 2000, 5 :11—21.

[5 ] Kideys A E. Fall and rise of the Black Sea ecosystem. *Science*. 2002 ,297 :1482 — 1484.

[6 ] James I D. Modelling pollution dispersion ,the ecosystem and water quality in coastal waters :a review. *Environmental Modelling & Software* 2002 ,17 :363 — 385.

[7 ] Jiang J G ,Shen Y F. Estimation of the natural purification rate of a eutrophic lake after pollutant removal. *Ecological Engineering* ,2006 ,28 :166 — 173.

[8 ] Suzuky M. Role of adsorption in water environment processes. *Water Science and Technology* ,1997 ,35 :1 — 11.

[9 ] Kunio K ,Takehiko H ,Tomiji H. Natural water-purification system observed in a shallow coastal lagoon :Matsukawa-ura ,Japan. *Marine Pollution Bulletin* ,2003 ,47 :148 — 157.

[10 ] Roberta V ,Paola M. Self-purification ability of a resurgence stream ,*Chemosphere* ,2003 ,52 :1781 — 1795.

[11 ] State environmental protection administration of China. The monitor and analysis method of water and sewage (the fourth edition ) ,Beijing :China Environmental Science Press ,2002.

[12 ] Luo W S ,Li L H ,He T. Advances and prospects in the research of water reaeration theory and reaeration coefficient ,*Shui Li Xue Bao* ,2003 ,11 :64 — 72.

[13 ] He B M ,Wei M X. The Characteristics of the Bionomical Environment in Qinzhou Bay and the Relationship Between the Characteristics and the Self-purifying Conditions of the Water Body. *Marine Science Bulletin* ,2004 ,23 (4 ) :50 — 53.

[14 ] He B M ,Wei M X. The environmental feature and analysis on character of waterbody self-purification in Fangcheng Bay ,*Marine Environmental Science* ,2006 ,25 :64 — 67.

[15 ] He B M ,Wei M X. A preliminary study of the relationship between the self-purifying ability and the environment factors of Tieshangang Bay ,*Transactions of Oceanology and Limnology* ,2006 ,3 :21 — 26.

[16 ] He B M ,Wei M X. A study on self-purification ability of Beihai Bay ,*Marine Environmental Science* ,2004 ,23 (1 ) :16 — 18.

[17 ] Zhang X Q ,Yang Z F ,Xia X H. An experimental study on nitrification in natural water of the Yellow River ,China ,*Environmental Chemistry* ,2005 ,24 (3 ) :245 — 249.

[18 ] Fan C X ,Zhang L ,Yang L Y. Simulation of internal loadings of nitrogen and phosphorus in a lake. *Oceanologia ET Limnologia Sinica* ,2002 ,33 (4 ) :370 — 378.

[19 ] Daniel L T ,Hank N M. Spatial and temporal hydrodynamic and water quality modeling analysis of a large reservoir on the South Carolina (USA ) coastal plain. *Ecological Modelling* ,1999 ,114 :137 — 173.

[20 ] Eun H N ,Seok S P. A hydrodynamic and water quality modeling study of spatial and temporal patterns of phytoplankton growth in a stratified lake with buoyant incoming flow. *Ecological Modelling* ,2006 ,199 :298 — 314.

[21 ] Karl E L. The effect of complexity on parameter sensitivity and model uncertainty in river water quality modeling. *Ecological Modelling* ,2006 ,190 :72 — 86.

参考文献：

[1 ] 国家环境保护总局 编. 水与废水监测分析方法 (第4版) . 北京：中国环境科学出版社 ,2002.

[2 ] 雒文生 ,李莉红 ,贺涛. 水体大气复氧理论和复氧系数研究进展与展望. *水利学报* ,2003 ,11 :64 ~ 72.

[3 ] 何本茂 ,韦蔓新. 钦州湾的生态环境特征及其水体自净条件的关系分析. *海洋通报* ,2004 ,23 (4 ) :50 ~ 53.

[4 ] 何本茂 ,韦蔓新. 防城湾的环境特征及其水体自净特点分析. *海洋环境科学* ,2006 ,25 :64 ~ 67.

[5 ] 何本茂 ,韦蔓新. 铁山港湾水体自净能力及其与环境因子的关系初探. *海洋湖沼通报* ,2006 ,3 :21 ~ 26.

[6 ] 何本茂 ,韦蔓新. 北海湾水体自净能力的探讨. *海洋环境科学* ,2004 (1 ) ,23 :16 ~ 18.

[7 ] 张学青 ,杨志峰 ,夏星辉. 黄河水体硝化过程的模拟实验研究. *环境化学* ,2005 ,24 (3 ) :245 ~ 249.

[8 ] 范成新 ,张路 ,杨龙元. 湖泊沉积物氮磷内源负荷模拟. *海洋与湖泊* ,2002 ,33 (4 ) :370 ~ 378.