

基于水电比拟方法的山东南四湖上级湖流场研究*

汪嘉宁 吕红民 江文胜

(中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室 青岛 266100)

提要 利用水电比拟方法模拟了南四湖流场结构。同时,基于 HAMSOM 模式,对其流场进行了数值模拟,所得结果与水电比拟结果一致,两者平均相关系数在 0.94 以上,表明水电比拟实验技术路线可行,流场基本结构准确。该方法适用于低流速大流场的模拟。流场结构分析表明,湖区流速在汛期为 cm/s 量级,非汛期仅为 mm/s 量级。其中,在南阳湖北部和独山湖东北部存在低流速区,在独山湖、南阳湖连接区域和二级坝附近区域存在高流速区。本文中作者还研究了该湖的污染扩散状况,低流速区水质相对较好,高流速区水质相对较差,为制定改善水质的方案提供了科学依据。

关键词 水电比拟,数值模拟,HAMSOM,南四湖上级湖,流场

中图分类号 P731

自 20 世纪 80 年代以来,随着经济的迅速发展,工业、农业和生活污水的排放逐年增加,南四湖湖水水质日益恶化。南四湖作为南水北调东线工程流经的重要湖泊,如何治污已经成为了亟待解决的难题。为了研究如何降低污染改善水质,科学评价并优化降污排污方案,需要对湖泊的流场进行全面了解,这就需要寻找一种切实可行的流场研究方法(Wrobel, 1995; Gupta *et al*, 1999; Scheren *et al*, 2000; 刘晓辉等, 2010)。由于南四湖大部分地区的流速很小,一般无法应用常规的流速仪进行准确测量,因此本文采用水电比拟方法进行流场研究,同时对流场进行数值模拟,与水电比拟结果进行参照对比。

1 南四湖概况

南四湖地处山东、江苏两省交界地区,位于北纬 $34^{\circ}27'—35^{\circ}20'$,东经 $116^{\circ}34'—117^{\circ}21'$,是微山湖、昭阳湖、独山湖和南阳湖四个由南向北相连而成湖泊的总称,呈 NNW—SSE 向延伸。南四湖最大湖面面积为 1266 km^2 ,占山东省淡水水域总面积的 45%,是山东省重要的水源地,我国北方最大、全国第六大淡水湖泊。湖面南北长 126 km,东西宽 5—25 km。

南四湖的湖腰二级坝枢纽工程将其分成上级湖

和下级湖。二级坝建在昭阳湖最狭处,二级坝闸上为上级湖,包括南阳湖、独山湖及昭阳湖的部分区域,湖面面积为 602 km^2 。南四湖湖内平均水深约为 2 m,为典型的平原浅水型湖泊,具有防洪、灌溉、供水、养殖、通航及旅游等多种功能(罗辉等, 2005; 武周虎等, 2006)。

由于南四湖汇集了苏鲁豫皖四省 36 个县市区 的来水,流域内工业企业 3000 多个,使得湖水污染严重。整个水体以有机污染为主,其主要污染物质为高锰酸盐指数、挥发酚、氨氮、总磷等(张祖陆等, 1999; 李吉学, 2001; 罗辉等, 2005; 陈磊等, 2007)。

2 流场的研究方法

2.1 水电比拟实验

水电比拟是根据流体的有势运动与电流流动两种不同的物理现象服从于同一数学模型建立的,通过在等厚均电阻率导电层中的电场来模拟理想流体平面无旋流动流场。该方法非常适合于内陆湖泊低流速大流场的模拟研究,但实验成果还不多见,且尚无文献采用其他方法对其进行参照对比。徐学军等(2000)利用水电比拟研究了武汉东湖的流场,获得了东湖流场的流网图。毛根海等(2005)研究了多进出水

* 国家自然科学基金海洋学人才基地基金项目, J0630539、J0730530 号。汪嘉宁, E-mail: wjnouc@gmail.com

收稿日期: 2010-02-10, 收修改稿日期: 2010-09-17

口湖泊的流场, 较好地处理了多进出水口的难题, 对西湖流场进行了研究, 提出了改善湖水流动状态的引水降污方案。

南四湖湖底较平缓, 水域面积与水深相比极其广阔, 湖水可近似看作平面流动, 且流速很低、速度梯度小, 可忽略黏性作用。因此, 作者将上级湖流场近似看作理想流体平面无旋流动, 采用水电比拟进行模拟研究。

2.1.1 实验原理 水电比拟的实验原理是电场和流场密度分量方程、连续性方程、无旋运动条件方程和拉普拉斯方程的一致性(详细实验原理参见王凤聪, 1995)。对于低流速且边界条件比较复杂的流动现象, 要获得速度势或流函数的解析解一般是非常困难的。对于此类流动现象, 若采用对应电场的电学模拟, 电场测量要比流场的直接测量简单得多, 实验结果也具有较高的测量精度。因此可以采用等厚均电阻率导电层中的电场来模拟理想流体平面无旋流动流场, 且不用考虑模拟的动力学相似问题, 保证湖泊模型相似、流量和电量大小成比例即可(徐学军等, 2000; 毛根海等, 2005; 朱仁庆等, 2005)。

2.1.2 实验模型 本实验模型比例约为 1 : 70000, 建立在内衬坐标刻度的平板玻璃上(模拟不透水的湖底), 下设用于固定的钢铁支架, 尺寸为 70 cm × 80 cm。采用良好电绝缘性又易于成型的工业橡皮泥, 依上级湖的边界形状蜿蜒围成湖岸边界和二级坝。

进出水口以固定于湖岸模型对应处的石墨棒模拟。对于这样的多进出水口湖泊, 需要在各进出水口处串联一个可变电阻, 实验电路如图 1 所示。通过调节可变电阻值, 各支路电流强度的比例关系与实际流场中各进出水口已知流量的比例关系就保持一致, 即建立了流场的水电比拟实验模型。

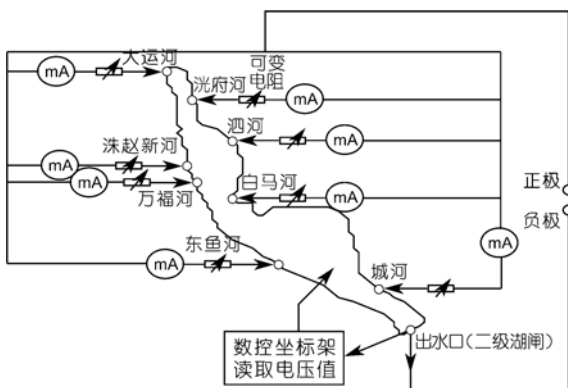


图 1 南四湖上级湖流场水电比拟实验电路示意图

Fig.1 Circuit diagram of electro-hydrodynamic analogue for upper Nansi Lake flow field

实验模型中进水口包括 8 条河流, 分别是东鱼河、万福河、洙赵新河、大运河、洸府河、泗河、白马河和城河。出水口是二级湖闸。本实验数据采用济宁水文水资源勘测局测量的 2007 年 1—12 月上述河流、闸口的月平均流量。

2.1.3 实验测量方法 实验采用 12V 的直流电, 为防止测量过程中极化现象的干扰, 采用石墨棒作为电极, 导电液选择质量分数为 2% 的盐水。实验模拟区域有 783 个测点, 测点间距 1 cm, 代表了实际的 0.7 km。采用三维数控坐标架程控方式进行测量, 坐标架(步进精度为 1 mm)在电脑的控制下, 根据程序和事先输入的边界数据, 对测量区域进行逐点扫描, 并利用高精度的数据自动采集装置(精度为 1/4000)测量实验点的电压信号, 同步输入计算机, 记录在文件上。测量完毕后, 根据各测点的坐标及电位值进行插值, 绘制出电场等位线(即流场的等势线)、电压降矢量图(即流场的矢量图, 图 4)和流速大小分布图。

2.2 数值模拟实验

数值模拟的主要目的是与水电比拟进行参照对比, 以期验证水电比拟结果的准确性和进一步探讨上级湖流场的基本情况。数值模拟采用由德国汉堡大学开发的 Hamburg Shelf Ocean Model (HAMSOM)。该模式首先由 Backhaus(1985)应用于北海, 取得了良好的模拟结果。此后, 许多人发展了该模式, 并将其应用于世界上多个水域 (Pohlmann, 1996; Jiang *et al.*, 2000), 均取得了满意的结果, 表明该模式具有很强的适用性。

2.3 计算说明

依据数值模拟参照对比的主要作用, 其参数设置与水电比拟基本保持一致。数值模式的经向和纬向网格的分辨率均取 0.5' 的精度, 网格数为 72 × 65。模拟上级湖 34°43'—35°19'N, 116°35'—117°30'E 的范围。计算时间为 2007 年 1 月 1 日到 2007 年 12 月 31 日, 时间步长取 30 min。南四湖为典型的平原浅水湖泊, 水深取 2 m, 垂向取 1 层, 这样各物理量在 z 方向上没有变化, 将三维模型转化为二维, 与水电比拟原理保持一致。南四湖为内陆湖泊, 不存在开边界问题, 且不考虑温度、盐度、潮汐和风的影响。进水口流量跟水电比拟相同, 水电比拟要求进水总流量等于出水总流量, 因此将出水口流量设为进水总流量。陆地河流入湖口走向依实际情况设置。不考虑科氏力作用, 因为水电比拟是模拟理想流体平面无旋流动流场, 而科氏力作用将产生有旋运动。综上, 流场主

要依靠水体质量守恒和水位梯度来驱动。

3 结果分析

3.1 水电比拟和数值模拟结果对比

图 2—图 4 为 2007 年 9 月上级湖水电比拟和数值模拟流场等势线等水位线、流矢量和流速大小对比图。图 2 等势线等水位线密集处表示水流势的梯度大,即流速大;反之则小。图 4 中流矢量长短表示流速大小。图 3 中区域颜色越接近红色,流速越大,越接近蓝色,流速越小。此外,只有图 4 中数值模拟流速矢量图代表实际值,其他图注大小均为归一化相对值。

可以看出,水电比拟和数值模拟所得流场等势线与水位线的分布、流场的走势以及流速大小的分布基本上是一致的;在河流的入湖口、出湖口处均表现出等势线、等水位线和流矢量比较密集,且入湖、出湖流量越大越密集;根据流速分布图(图 4)得出的高低流速区分布,两者的结论一致,两者所得等势线等水

位线均和边界基本垂直,流矢量均和边界基本平行,这和流体的运动性质相符。

图 5 所示为 2007 年 1—12 月水电比拟电势值与数值模拟水位值间相关性系数的值。可以看出,两者的平均相关性系数在 0.94 以上,具有良好的相关关系。

结果的比较分析表明,水电比拟方法理论成熟,本实验技术路线可行,准确模拟出了流场的基本走势,反映出流场的基本情况,为低流速大流场的模拟测量提供了一种切实可行的方法。该方法借助三维数控坐标架程控方式逐点扫描,利用高精度的自动采集装置进行数据的实时采集、处理和分析,提高了测量的自动化水平和精度,实现了水电比拟实验技术的突破。水电比拟在实验室就可进行,节省了大量的人力物力,使用灵活,具有很好的重复性,可随意改变水域形状或进出水口的位置和流量等,条件易于控制,不存在边界条件的选取问题,不会因边界问题影响测量结果的精度等。水电比拟方法具有的优越性,

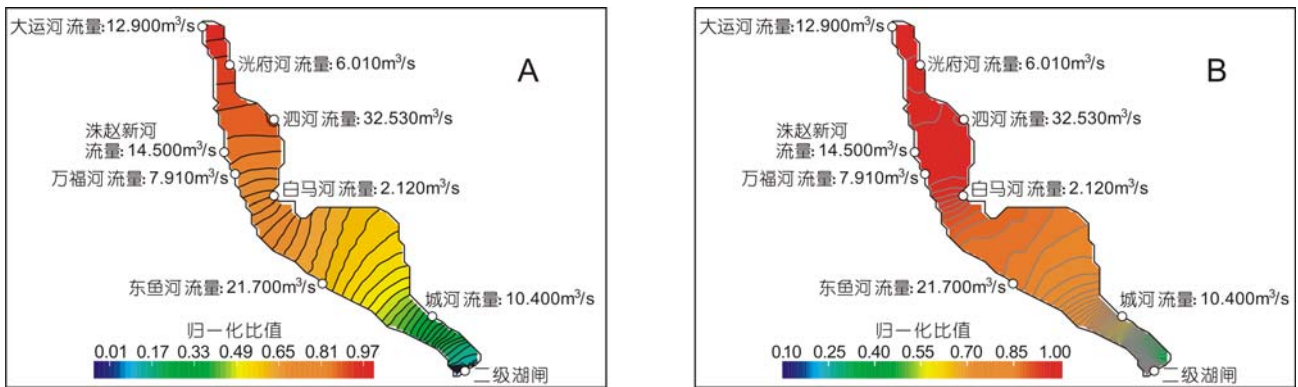


图 2 2007 年 9 月南四湖上级湖水电比拟流场等势线(A)和数值模拟流场等水位线(B)对比图

Fig.2 Equipotential line of flow field in upper Nansi Lake that obtained by electro-hydrodynamic analogue (A) and numerical simulation (B) in September 2007

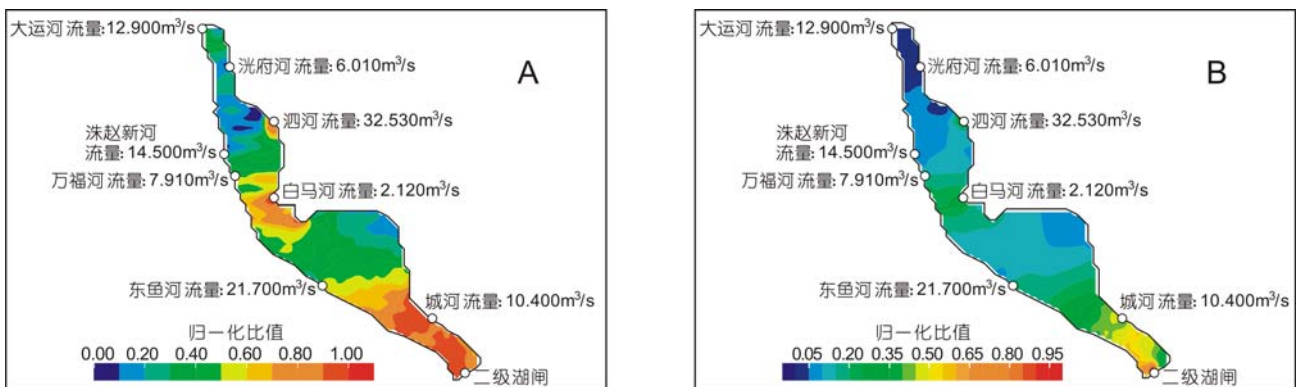


图 3 2007 年 9 月南四湖上级湖水电比拟(A)和数值模拟(B)流速大小分布对比图

Fig.3 Velocity in upper Nansi Lake that obtained by electro-hydrodynamic analogue (A) and numerical simulation (B) in September 2007

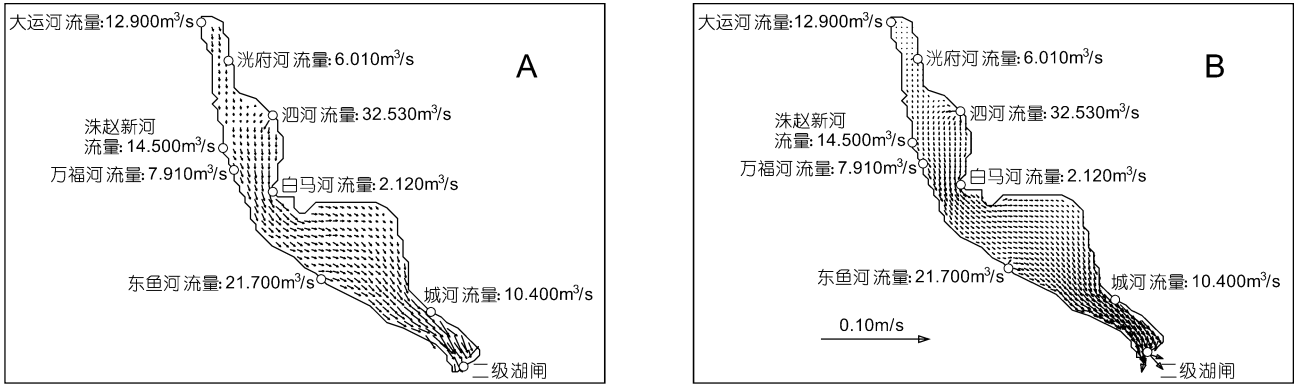


图 4 2007 年 9 月南四湖上级湖水电比拟(A)和数值模拟流场流矢量(B)对比图

Fig.4 Vectorgraph of flow field in upper Nansi Lake that obtained by electro-hydrodynamic analogue (A) and numerical simulation (B) in September 2007

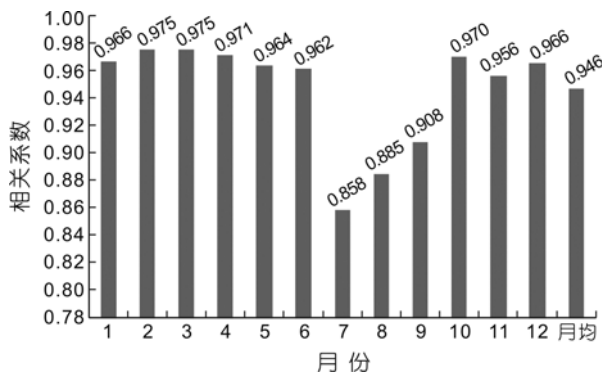


图 5 水电比拟电势值与数值模拟水位值相关性系数图
Fig.5 A correlation coefficient between potential value of electro-hydrodynamic analogue and water level of numerical simulation

可将其用来预测规划水域流场, 论证降污排污方案的可行性, 作为现场调查、数值模拟和常规物理模型实验模拟等的补充验证。

3.2 南四湖上级湖流场的基本状况

水电比拟结果较好地反应了上级湖的流场。通过分析, 初步得出流场的一些基本情况。整体来看, 湖区流速较小, 在汛期(6—9月) 典型值为 cm/s 量级, 非汛期仅为 mm/s 量级, 流动性较差。

在南阳湖最北端, 存在一个低流速区。实际情况是此处只有一条入湖河流大运河, 只有 6—9 月存在径流量, 其他月份基本处于干涸状态, 全年平均流量仅 4.32 m³/s, 因此该区域应是一个低流速区。

在独山湖的东北部同样也存在一个低流速区。实际情况是该处没有入湖河流, 且距主流速区较远, 因此该区域也应是一个低流速区。

在独山湖和南阳湖之间区域存在一个高流速区。实际情况是该处的南北两端东西宽度较大, 而此处

东西宽度却较小, 是一个典型的狭窄水道, 因此该区域应是一个高流速区。

在南四湖上级湖最南端二级坝附近也存在一个高流速区。实际情况是该处是南四湖上级湖唯一的出水口, 所有的出湖流量均经过此处, 而且此处东西宽度较小, 因此该区域也应是一个高流速区。

3.3 南四湖上级湖水质现状和改善方案初步分析

流场的基本情况清楚后, 其水质改善方案就可以进行初步探讨。对比水电比拟得出的流场基本情况, 发现在低流速区水质相对较好, 符合 IV 类水质, 在高流速区水质相对较差, 符合 V 类水质状况(图 6)。

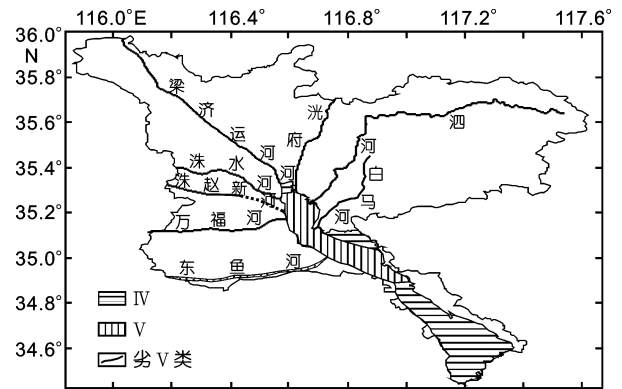


图 6 山东南四湖水质现状图(引自济宁水文水资源勘测局编制的《济宁市水资源调查评价报告》)
Fig.6 Water quality of Nansi Lake in Shandong

在南阳湖最北端的低流速区, 虽然水体交换较慢, 自然净化能力较差, 但只有一条入湖河流大运河, 且全年平均流量小, 排污量自然小, 因此水质相对较好。在独山湖东北部的低流速区, 没有排污河流, 且高流速区的污染湖水较少流入此处, 因此水质也相

对较好。在其他区域,虽然流速较高,水体交换较快,自然净化能力较强,但是有 6 条排污河流直接入湖,且 6 条河流中只有洙赵新河水质为Ⅳ类,东鱼河水质为Ⅴ类,其他河流水质均为劣Ⅴ类,因此水质状况较差。

通过以上的分析,可以看出水电比拟实验得出的高低流速区分布和现实污染状况是相符的,这从实际角度验证了水电比拟实验的可行性。

研究表明,南四湖水水质改善的关键在于控制排污河流的污染物排放,改善入湖河流的水质,如果河流水质提高,上级湖的水质也就会相应提高。

4 结论

经过与数值模拟的参照对比,表明水电比拟模拟湖泊流场,技术路线可行,但水电比拟是在不考虑黏性作用等条件下进行的近似模拟,只能对流场的基本分布和走势进行定性分析,且实验模型存在要求进水总流量等于出水总流量的限制,电场极化、渗透蒸发等问题会影响测量精度,如何精确模拟还有待于进一步研究。

通过对流场结构的分析,清楚了该湖的污染扩散情况,为制定改善水质的方案提供了参考依据。上级湖水水质改善的关键在于控制入湖河流污染物的排放,当入湖河流的水质改善后,可再进一步讨论如何在低流速区采取引水降污方案(Hosoi *et al.*, 1996),提高低流速区水体的流动速度,加快水体交换,增大水体置换区域,使水质进一步提高,形成一个具有自净能力、水质常年保持良好稳定的生态湖泊。

致谢 济宁水文水资源勘测局提供了 2007 年 1—12 月南四湖相关河流、闸口的流量数据,谨致谢忱。

参 考 文 献

王凤聪, 1995. 流体力学水力学实验指导. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 52—56
毛根海, 姚懿伦, 胡云进, 2005. 多进出水口湖泊流场的水电比拟试验. 江南大学学报, 4(6): 626—633

朱仁庆, 杨松林, 杨大明, 2005. 实验流体力学. 北京: 国防工业出版社, 24—35
刘晓辉, 董礼先, Ralph T Cheng, 2010. 三维正交非结构网格数值模型中物理流场的定义方法与改进. 海洋与湖沼, 41(4): 621—627
李吉学, 2001. 南四湖水环境污染状况及趋势分析. 治淮, 2: 9—10
汪中华, 颜立, 朱庆申等, 2006. 济宁市水资源调查评价报告. 济宁: 济宁水文水资源勘测局, 149—188
张祖陆, 孙庆义, 彭利民等, 1999. 南四湖地区水环境问题探悉. 湖泊科学, 11(1): 86—90
陈 磊, 裴海燕, 解 军, 2007. 改善南四湖水质的关键问题分析. 中国给水排水, 23(20): 6—10
武周虎, 乔海涛, 付莎莎等, 2006. 南水北调东线工程对南四湖环境的影响及对策. 青岛理工大学学报, 27(1): 1—7
罗 辉, 周建仁, 郭 忠, 2005. 南水北调对南四湖水环境影响分析与评估. 河海大学学报(自然科学版), 33(1): 63—67
徐学军, 王 乘, 2000. 武汉东湖流场水电比拟实验研究. 华中理工大学学报, 28(5): 83—85
Backhaus J O, 1985. A three-dimensional model for the simulation of shelf sea dynamics. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, 38(4): 165—187
Gupta Akhilendra B, Jain Renu, Gupta Kapil, 1999. Water quality management for the Talkatora Lake, Jaipur-A case study. Water Science and Technology, 40(2): 29—33
Hosoi Y, Kido Y, Nagira H *et al.*, 1996. Analysis of water pollution and evaluation of purification measures in an urban river basin. Water Science and Technology, 34(12): 33—40
Jiang Wensheng, Thomas Pohlmann, Jurgen Suendermann *et al.*, 2000. A Modelling study of SPM transport in the Bohai Sea. J Marine System, 24(3—4): 175—200
Pohlmann T, 1996. Calculating the development of the thermal vertical stratification in the North Sea with a three-dimensional baroclinic circulation model. Continental Shelf Research, 16(2): 163—194
Scheren P A G M, Zanting H A, Lemmens A M C, 2000. Estimation of water pollution sources in Lake Victoria, East Africa: Application and elaboration of the rapid assessment methodology. Journal of Environmental Management, 58(4): 235—248
Wrobel L C, Latinopoulos P, 1995. Water Pollution III: Modelling, Measuring and Prediction. Southampton: Computational Mechanics Publications, 526

STUDY ON ELECTRO-HYDRODYNAMIC ANALOGUE AND NUMERICAL SIMULATION OF FLOW FIELD IN THE UPPER NANSI LAKE OF SHANDONG

WANG Jia-Ning, LÜ Hong-Min, JIANG Wen-Sheng

(Key Laboratory of Physical Oceanography of Education Ministry, Ocean University of China, Qingdao, 266100)

Abstract A comprehensive understanding of flow field is essential on studying how to reduce pollution and improve water quality in the upper Nansi Lake of Shandong, China. Since the water current velocity is very small in most regions of the lake, it is difficult to obtain data on the flow field by using common instruments. An easy experimental method of electro-hydrodynamic analogue was developed in this paper to simulate the flow field of the upper Nansi Lake. In order to test the accuracy of electro-hydrodynamic analogue result, the numerical simulation of the flow field by HAMSOM model was also carried out to compare the data from both sets of experiments. The result of electro-hydrodynamic analogue was found resemble strongly to those obtained from the numerical simulation, and the averaged correlation coefficient of these two methods is bigger than 0.94. Therefore, the result obtained from electro-hydrodynamic analogue was accurate when simulating the flow field at low velocity. It is found to be a reliable method to study the flow field in lakes and other slack water areas. The results showed that the flow is very weak in the upper Nansi Lake. In non-flood seasons, the velocity is only in millimeter per second, whereas in flood seasons, the velocity is in centimeter per second. Low velocity regions were found in the northern part of Nanyang Lake and the northeastern part of Dushan Lake while high velocity regions were found at the connection part of the Nanyang Lake and the Dushan Lake, and the vicinity of the Erji Dam. The above flow fields have given insight on the dispersion of contaminates in the upper Nansi Lake, and the intensity of the improvement of the water quality can be deduced.

Key words Electro-hydrodynamic analogue, Numerical simulation, HAMSOM, Upper Nansi Lake, Flow field