

# 湖泊流域系统水文水动力联合模拟研究进展综述

李云良<sup>1</sup>, 张 奇<sup>1\*</sup>, 姚 静<sup>1</sup>, 李梦凡<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 流域地理学重点实验室, 江苏 南京 210008;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 湖泊流域水文水动力联合模拟对综合管理湖泊流域水资源具有重要的理论和实践意义。通过水文水动力联合模拟研究进展的综述, 可深入了解湖泊流域联合模型发展和演变过程, 把握国际研究主流趋势和前沿手段。传统湖泊流域联合模拟方法主要通过流域水文模型结合湖泊水量平衡模型来计算湖泊流域水均衡组分, 但水量平衡方法仅是对湖泊过程的一般性描述, 难以切实反映水位空间差异显著的湖泊系统有着显著的水动力特性。基于流域水文模型与湖泊水动力模型的联合系统克服了大尺度湖泊流域系统难以切实描述和完整模拟的难点, 在湖泊流域系统水资源管理与调控中发挥了重要作用。系统概述了国内外不同尺度湖泊流域系统水文水动力联合模拟研究, 归纳总结了基于外部耦合、内部耦合与全耦合技术的联合模型的优势和不足。从学科发展趋势和应用需求的角度出发, 概述了湖泊流域系统联合模拟的难点和今后发展趋势。

**关键词:** 水文模型; 水动力模型; 湖泊流域系统; 联合模型; 耦合技术

**中图分类号:** P343.3    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1004-8227(2015)02-0263-08

**DOI:** 10.11870/cjlyzyyhj201502012

流域与湖泊通常视为地表系统最为重要的两大主体单元。流域扮演了各种水和污染物排放收集者的角色, 而湖泊则扮演了接受者身份<sup>[1]</sup>。流域是湖泊的“源”, 湖泊是流域的“汇”, 湖泊水、沙及各种营养物质和污染物主要来源于流域。对于湖泊系统而言, 其往往与周围流域地表和地下径流有着密切水力联系, 流域入湖径流组分及其所携带的物质成分均会引起湖泊水文和水环境要素产生不同程度的响应。传统湖泊流域水资源管理往往将流域与湖泊过程分离开来或将两者作为一体加以简单考虑, 这样的高度简化不仅无法描述系统间的响应关系, 也使得模型在反映关键物理过程方面大打折扣。湖泊与流域作为一个共同体存在于自然界中有着不可分割的相互作用、相互影响关系, 应将湖泊与流域作为一个整体加以模拟与分析, 为湖泊流域水资源综合管理提供更加可靠的依据。

对于大尺度湖泊流域系统, 传统原位观测往往受经费预算、时间和技术条件所限, 经常局限于特定

时间和特定区域的点或剖面观测, 难以具有代表性。虽然遥感手段具有方便、快速的特点使其能够捕捉湖泊流域一些关键要素的空间信息, 但受天气状况和精度等因素限制, 时间上不具有连续性, 也不具备实时捕捉能力。统计模型物理基础薄弱, 无法体现复杂系统的高度非线性响应, 预测能力也略显不足。近年来, 流域水文模型和湖泊水动力模型得到迅速发展和成功应用, 模型已成为国际上对湖泊流域模拟研究的前沿手段。水文模型主要用于流域过程模拟, 水动力模型主要用于河道或大型水体(例如, 湖泊、海湾等)2-D 或 3-D 水动力模拟。尽管如此, 流域模型往往不具备湖泊水动力模拟能力, 而水动力模型通常不考虑流域水文过程变化, 单方面流域或水动力模拟无法切实刻画湖泊流域间复杂的响应关系。

考虑到湖泊流域固有的相互作用关系, 在深入认识湖泊流域联合模拟研究必要性和重要性的基础上, 本文旨在通过国内外不同尺度湖泊流域水文水

收稿日期: 2013-12-11; 修回日期: 2014-02-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2012CB417003), 中国科学院南京地理与湖泊研究所“一三五”战略发展规划重点项目“长江中游两湖水量变化关键过程与集成模拟研究”和国家自然科学基金项目(41301023)联合资助

作者简介: 李云良(1983~), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事湖泊流域系统水文水动力过程联合模拟研究。E-mail: lylzw04150311@163.com

\* 通讯作者 E-mail: qzhang@mail.com

动力联合模拟研究进展,归纳总结联合模拟方法的优缺点,在具体应用时可供借鉴。尽管已有较多综述性文章关于单方面水文模型或水动力模型研究进展,但与湖泊流域水文水动力联合模拟相关的研究工作和参考文献确实较少,尤其是这方面研究在湖泊广泛分布的中国湖泊流域上也更为少见。本文首次系统论述了湖泊流域系统水文水动力联合模拟研究进展,期望能够为广大学者在今后湖泊流域联合模拟研究中提供模型选择和联合模拟思路。

## 1 湖泊流域联合模拟传统方法

传统湖泊流域联合模拟方法主要是通过流域水文模型结合湖泊水量平衡模型来计算流域的河道径流过程以及湖泊水均衡组分<sup>[2~7]</sup>。尽管水文模型结合水量平衡方法对流域水文过程刻画得较为详细,但水量平衡方法只是对湖泊特性的一般性描述和认识<sup>[4]</sup>,且通常具有较粗的时间分辨率(月尺度或年尺度),也无法描述湖泊关键水文要素的空间特征和显著的水动力过程。尽管目前已存在较多综合性水文模型且考虑了简单的湖泊过程<sup>[8]</sup>,但对于一些大型湖泊系统而言,因其往往呈现出复杂的水动力特性,这些综合性水文模型尚显能力不足,难以适应现代湖泊更为精细的模拟需求。

总而言之,在传统的联合模拟研究中,湖泊水量平衡方法可能更加适用于一些小型湖泊或内陆封闭性湖泊,因这类湖泊主要受降雨和温度等气象要素主控,其与周围水体的水力联系要相对简单,湖泊水位的时空变化要相对稳定。对于大型湖泊系统,其通常受外部多因子主控,水力联系十分复杂,加之湖泊水位具有显著空间差异性,基于湖泊空间平面假定的水量平衡方法的适用性问题需加以考虑。

## 2 湖泊流域联合模拟新方法

基于湖泊流域水文水动力过程联合模拟模型,可作为一种有效的模拟工具去定量研究湖泊-流域相互作用。联合模拟能够增强模型使用灵活性和结果模拟精度,不仅能获得系统内各组分的详细信息以及如实刻画系统子物理过程,还能反映系统与外部的相互作用以及系统对这些作用的响应和反馈<sup>[9]</sup>。水文水动力联合模型已在国内外不同复杂程度、不同尺度的湖泊流域取得广泛应用。不同模型之间的连接或耦合技术主要分为外部耦合(Exter-

nal Coupling or Loose Coupling)、内部耦合(Internal Coupling)和全耦合技术(Full Coupling)<sup>[10~13]</sup>。

### 2.1 外部耦合技术

外部耦合技术,即将一个模型的输出结果作为另一个模型的输入条件,通常被视为一种最有效、最简单的方法去实现不同模型的联合,进而完成对复杂湖泊流域系统的切实完整模拟<sup>[11,14,15]</sup>。表 1 列出了基于外部耦合技术的不同联合模型在国内外不同复杂程度的湖泊流域上的应用案例。例如,Chauvelon 等<sup>[14]</sup>采用水文-水动力联合模型模拟地中海 Rhone 湖泊流域系统,基于概念性的集总式水文模型 GR3 用来模拟上游流域的径流输出,将其作为 2-D 湖泊水动力模型 RMA2 的输入条件,该联合系统进一步用来探求复杂水系统内部的水量交换以及盐分平衡。Carter 等<sup>[15]</sup>指出:为了真实模拟复杂水动力过程的河流或地表水体,水动力模型通常需要连接流域水文模型来获取流量输入条件。他们建立一个完整的联合模拟系统来进行美国 Sacramento 河流流域的水文水动力过程模拟。该系统主要包括流域水文模型 LSPC 和水动力模型 EFDC,并采用输入-输出的连接方式将 LSPC 模型模拟的 17 个子流域的流量来驱动 EFDC 水动力模型,该联合模型在流量的模拟上取得理想的率定与验证效果,为流域决策和管理等方面提供重要的科学参考。Lian 等<sup>[16]</sup>联合水文模型 HSPF 和水力学模型 UNET 模拟美国 Illions 流域,将 HSPF 模型的径流输出作为 UNET 模型的输入。结果表明,在流域河道径流的模拟效果上,联合模型 HSPF-UNET 的模拟精度要高于单独使用 HSPF 模型。Xu 等<sup>[9]</sup>连接 6 个 HSPF 水文模型和两个 CE-QUAL-W2 水动力模型用来模拟美国 Occoquan 流域与其内部两个主要水库之间的水量交换关系。该多个模型之间的连接主要由流域水文模型的径流输出来驱动水库模型,而水库模型输出结果进一步用来驱动下游流域的水文模型,为进一步揭示土地利用变化对水动力和水质的影响奠定了基础。Inoue 等<sup>[17]</sup>联合高精度的水文-水动力模型来模拟美国密西西比河口三角洲湿地系统中的水文循环及其子湖泊系统的水动力过程。将流域模型的输出径流作为 2-D 深度平均水动力模型的输入条件,成功将两种不同类型的模型耦合起来。类似的模拟研究工作还有 Taner 等<sup>[18]</sup>,其采用气候模式 GCM 驱动流域水文模型 HSPF,水文模拟结果驱动湖泊模型 UFILS4 和 AQUATOX,该联合模型应用于纽约 Onondaga 湖泊,以此分析

研究气候变化对湖泊流域水文水资源的影响和贡献。

在流域水文模拟上,上述案例多采用基于概念性的水文方法或传统的集总式水文模型。然而,分布式水文模型能充分反映流域下垫面属性特征的高度变异性,能够更加切实描述流域真实特性,且分布式水文模型有足够能力去模拟流域复杂水系的入湖径流变化,因而备受广大学者青睐。Dargahi 等<sup>[19]</sup>将分布式水文模型 SWAT 的径流输出作为一个完全具有物理机制的水动力模型 GEMSS 的输入条件,将流域水文与湖泊水动力过程联合起来并在 Tana 湖泊流域取得成功例证,分布式水文模型可靠的径流模拟为基于联合模型深入揭示湖泊水动力特性做出巨大贡献。近期,一个大尺度流域分布式水文模型 WATLAC 应用于鄱阳湖五大子流域的降

雨-径流模拟,该流域五河径流输出作为鄱阳湖水动力模型 MIKE 21 的输入条件,以此来计算湖泊水动力过程对流域入湖径流变化的响应<sup>[20~22]</sup>。结果表明,该湖泊流域系统水文水动力联合模型能够理想再现鄱阳湖水位时空变化以及复杂流场特征。

上述这些典型案例均将湖泊(水库)与流域作为整体来加以考虑并且采用外部耦合模拟技术,总体思想是将流域水文模型的径流输出作为湖泊水动力模型的输入条件(边界条件)。这里仅对一些较为典型的案例加以详细阐述,其它相关研究请参照表 1<sup>[10~13,23~49]</sup>,限于篇幅不一列举。总而言之,外部耦合技术的主要优点为:(1)无需修改模型代码、保持模型组分的独立完整性;(2)每个模型组分均有足够能力去模拟系统内部详细的物理过程;(3)输入-输

表 1 国内外湖泊流域系统水文水动力外部耦合模拟研究进展(主要按年代先后排序)

Tab. 1 Research on the Integrated Hydrological and Hydrodynamic Models for Lake-catchment System Using External Coupling Technique

联合模型组分(简称)	研究区/面积	参考文献
HSPF+FEQ	美国 Salt Creek 流域/298 km <sup>2</sup>	Ishii et al., 1998
MIKE 11+MIKE 21	爱尔兰 Cork 河港流域/325 km <sup>2</sup>	McGrath et al., 2003
GR3+RMA2	地中海 Rhone 湖泊流域/1 012 km <sup>2</sup>	Chauvelon et al., 2003
WatFlood+AGNPS+Telemac-2D+SUBIEF-SedSim	加拿大 Seymour 湖泊流域/未获取	Lam et al., 2004
HEC-HMS+HEC-RAS	美国 San Antonio 流域/10 155 km <sup>2</sup>	Knebl et al., 2005
PDM+KW	欧洲 Demer 河流流域/2 275 km <sup>2</sup>	Tate and Cauwenberghs, 2005
LSPC+EFDC	美国 Sacramento 流域/72 283 km <sup>2</sup>	Carter et al., 2005
WATFLOOD+ONE-D	加拿大 PAD 湖泊流域/293 000 km <sup>2</sup>	Pietroniro et al., 2006
HSPF+UNET	美国 Illions 流域/75 156 km <sup>2</sup>	Lian et al., 2007,2010
6 个 HSPF+2 个 CE-QUAL-W2	美国 Occoquan 湖泊流域/1 515 km <sup>2</sup>	Xu et al., 2007
水文模型(单位线方法)+2D 水动力模型	美国 Barataria 流域/6 300 km <sup>2</sup>	Inoue et al., 2008
SWAT+CE-Qual-W2	美国 Cedar Creek 流域/5 244 km <sup>2</sup>	Debele et al., 2008
HSPF+EFDC+ADH	美国 Mobile 流域/未获取	Alarcon et al., 2008
WaSh+RMA	美国 Loxahatchee 流域/544 km <sup>2</sup>	Hu and Wan, 2008
WetSpa+HEC-RAS	越南 Huong 流域/2 830 km <sup>2</sup>	Mai, 2009
SWAT+CE-Qual-W2	美国 Waco 湖泊流域/10 340 km <sup>2</sup>	White et al., 2010
PCRaster+Comsol	印度 Vembanad 湖泊-海岸流域/未获取	Paul and Cvetkovic, 2010
GSSHA+CE-Qual-W2	美国 Eau Galle 湖泊流域/2 km <sup>2</sup>	Salah, 2010
MIKE11-NAM+MIKE11-HD	辽宁太子河流域/13 883 km <sup>2</sup>	杨 洵等, 2010
MIKE11-NAM+MIKE11-HD	马来西亚 Kuala Lumpur 流域/约 1 357 km <sup>2</sup>	Al et al., 2011
HL-RDHM+ADCIRC	美国东南部海岸流域/未获取	Van et al., 2011; Tromble et al., 2012
SWAT+GEMSS	埃塞俄比亚 Tana 湖泊-流域/3 000~3 600 km <sup>2</sup>	Setegn, 2012; Dargahi and Setegn, 2011
GCM+HSPF+UFILS4+AQUATOX	纽约 Onondaga 湖泊/12 km <sup>2</sup>	Taner et al., 2011
PDM+SCS+KW	马来西亚 Kelantan 流域/13 170 km <sup>2</sup>	Pradhan and Youssef, 2011
SWAT+ISIS	泰国 Loei 流域/4 322 km <sup>2</sup>	Wangpimoo and Pongput, 2011
SFWM+CH3D	美国海岸-湿地流域系统/46 800 km <sup>2</sup>	Obeyskera, 2011
HSPF+ECOMSED	印尼 Semarang 海岸流域/211 km <sup>2</sup>	Prasetyo and Yamashita, 2011
HBV+SYNHYP+SOBEK	德国 Saar 河流流域/7 363 km <sup>2</sup>	SKM, 2011
RR+水力学模型	美国 Illions 流域/2 025 km <sup>2</sup>	Lerat et al., 2012
MGB-IPH+HEC-RAS	南美 Paraguay 流域/600 000 km <sup>2</sup>	Bravo et al., 2012
HL-RDHM+HEC-RAS	美国 Tar 河流流域/358 km <sup>2</sup>	Abshire, 2012
SWAT+EFDC+WREM	加拿大 Assiniboia 流域/49.6 km <sup>2</sup>	Zhang et al., 2012
WATLAC+MIKE 21	中国鄱阳湖湖泊流域/162 200 km <sup>2</sup>	Li et al., 2012, 2013; 李云良等, 2013

出连接方法最容易将不同功能的模型进行联合。但外部耦合技术实际上为一种比较松散的耦合方式(单向驱动),无法描述一些关键物理过程之间的反馈机制。

2.2 内部耦合技术

内部耦合指的是模型间共享边界条件、内部数据与参数信息,模型采用独立求解的方式,且模型共享信息在迭代求解进程中不断被更新替代<sup>[12,16]</sup>。

尽管近年来基于内部耦合技术来实现不同模型之间的联合模拟得到较快发展,并且内部耦合技术考虑到模型状态变量之间的相互联系,并将其纳入到模型方程求解过程中进行数值计算。但总体而言,基于内部耦合技术来实现模型之间的联合模拟研究相对较少(见表 2)。主要原因是基于内部耦合技术的边界信息或其它模型信息共享,必须建立在水文学者或水动力学者对不同模型原理和结构有着深入了解的基础上,专业知识背景的限制给内部耦合模型技术的实现带来较大困难和挑战。Beighley 等<sup>[50]</sup>采用流域水量平衡模型 WBM 与河道水力学

模型来研究 Amazon 河流流域水量变化。其中,WBM 模型给水力学模型提供了重要的输入条件,主要包括 WBM 计算的深层土壤水渗漏补给量以及地表产水量,这些输入变量最终以源汇项形式耦合到水力学方程中,进而通过交换通量来实现模型间的内部耦合。Paiva 等<sup>[51]</sup>采用分布式水文模型 MGB-IPH 联合基于圣维南方程组的水动力模型 IPH-IV 来分析 Amazon 河流流域洪水变化。MGB-IPH 模型主要为 IPH-IV 水动力模型提供河流横断面信息,从而实现基于水动力模型的河道洪峰流量和水位计算。详细模型耦合过程以及相似研究可进一步参考相关文献<sup>[52~55]</sup>。

总而言之,目前基于内部耦合技术的联合模拟研究主要集中在流域水文过程与河道径流过程联合模拟,主要是因为这些相对独立的模型组分之间本身就存在着密切水力联系,在联合模拟中必须将两者耦合起来方能切实可靠得描述系统特征。对于以湖泊与流域为主体的复杂系统结构,这种基于内部耦合技术的应用较少。

表 2 国内外湖泊流域系统水文水动力内部耦合模拟研究进展(主要按年代先后排序)

Tab. 2 Research on the Integrated Hydrological and Hydrodynamic Models for Lake-catchment System Using Internal Coupling Technique

联合模型组分(简称)	研究区/面积	参考文献
WBM+河道水力学模型	亚马逊河流域/约 6 000 000 km <sup>2</sup>	Beighley et al., 2009
MGB-IPH+IPH-IV	亚马逊河流域/370 000 km <sup>2</sup>	Paiva et al., 2011
tRIBS+OFM	美国 Peacheater Creek 流域/64 km <sup>2</sup>	Kim et al., 2012
MGB-IPH+IPH-IV	亚马逊河子流域/约 2 222 km <sup>2</sup>	Paiva et al., 2013a,b,c

2.3 全耦合技术

所谓全耦合,指的是模型控制方程进行联立求解或整体求解。从理论上来说,全耦合技术是最为可靠的模拟方法,但涉及到耦合模型状态变量之间的关系复杂且难以确立、数值求解较为困难等问题,尤其是全耦合技术须考虑模型间(或物理过程)的反馈机制以及需要足够多的边界数据来支撑等,这些因素无疑限制了全耦合技术在联合系统模拟上的广泛应用<sup>[56]</sup>,目前这方面的相关研究甚少(见表 3)。Thompson 等<sup>[57]</sup>联合基于物理机制的流域水文模型 MIKE SHE 和水力学模型 MIKE 11 来模拟英国东南部湿地系统的水文过程。其中,两个模型之间采用紧密的全耦合技术,即动态模拟技术,也就是说,对于每个时间步长,MIKE SHE 和 MIKE 11 模型均实时进行数据交换和迭代计算。MIKE 11 模型将概化河段的水位实时传递给 MIKE SHE 模型,进而 MIKE SHE 模型所计算的坡面汇流和河流一

地下水交换量则以侧向入流的方式传递给 MIKE 11 水动力模型,以此真实刻画坡面与河道洪泛区水流间的相互作用关系。Bell 等<sup>[56]</sup>联合 MIKE 11 NAM、MIKE 11 HD 以及 MIKE 21 HD 模型,将其用于北爱尔兰 Lough Neag 湖泊流域系统联合模拟。这 3 个模型组分采用动态技术被完整的耦合起来,并且该耦合模型除了能够描述流域入湖径流对 Lough 湖泊水位变化的影响作用,还能够切实刻画湖泊水位变化对支流入湖的顶托作用。尽管湖泊回水的顶托作用在大多数湖泊中表现得并不是很显著,但其可能对流域入湖河口三角洲湿地系统有着重要影响作用。不难发现,上述流域与湖泊之间的反馈机制是无法通过外部耦合技术来实现的。这种全耦合的双向动态模拟技术在具有类似结构的湖泊流域模拟中是十分重要的,但全耦合技术的复杂性致使其在大多数联合模型中难以实现。据作者了解,国内外关于全耦合技术的联合模型开发极为少

表 3 国内外湖泊流域系统水文水动力全耦合模拟研究进展(主要按年代先后排序)  
Tab. 3 Research on the Integrated Hydrological and Hydrodynamic Models for  
Lake-catchment System Using Full Coupling Technique

联合模型组分(简称)	研究区/面积	参考文献
MIKE SHE+MIKE 11	英国东南部湿地系统/8.7 km <sup>2</sup>	Thompson et al. , 2004
MIKE 11 NAM+MIKE 11 HD+MIKE 21 HD	北爱尔兰 Lough Neag 湖泊流域系统/5 775 km <sup>2</sup>	Bell et al. , 2005

见,目前较为典型的全耦合模型主要是基于 MIKE 系列的水文水动力模型。

3 存在问题与展望

湖泊流域系统水文水动力过程联合模拟,其难点归纳为以下方面:(1)湖泊流域系统通常尺度较大且结构复杂,这种自身固有特性决定了联合模拟难度。同时,大尺度湖泊流域也面临着数据稀缺和难以获取等现实问题,数据分析和前期准备将会带来巨大工作量;(2)基于不同子模型的联合模拟,涉及到不同模型原理和结构,加之模型用户需要具备不同的专业知识背景,这些均是联合模拟所面临的难点问题;(3)尽管国内外水文和水动力模型发展较快,功能也颇为强大,但水文和水动力模型选择更要具备足够能力或适应性去切实反映复杂的流域水文过程和湖泊水动力过程;(4)水文模型计算分辨率通常为日步长或者月步长,而水动力模型通常能够达到以秒为步长的精细模拟,即使采用外部耦合技术的水文-水动力联合模拟,不同模型间的时间步长匹配问题也是难点之一;(5)多数耦合模型采用手动调参,模型率定和验证难度较大,对计算机性能要求高。

湖泊流域水文水动力过程联合模拟对于有效管理湖泊流域水资源具有重要理论和实践意义。尽管国外已经开展大量湖泊流域水文水动力联合模拟研究且取得了成功应用,据作者了解,水文水动力联合模型在国内的相关研究甚少,或者说起步较晚。目前湖泊流域联合模拟所采用的主要方法是基于水文模型和水动力模型的外部耦合模拟、内部耦合模拟和全耦合模拟,但各种模拟技术都存着一定的缺陷和不足。在具体应用时,应结合特定研究区和研究目的,选择合适的联合模拟方法。作者认为,输入-输出的外部耦合技术具有驱动方法简单、保持模型完整性以及无需改动模型源代码等优势,是湖泊流域系统水文水动力联合模拟的基础和首选方法。由于这种方法通常为水文模型的径流输出作为水动力

模型的输入条件或边界条件,应注重提高流域水文模拟精度,以减少水动力模型输入的不确定性。笔者认为,结合参数全局优化技术的水文水动力联合模型是当前湖泊流域模拟研究亟待解决的关键技术。随着社会经济的发展以及人们对湖泊流域水资源整体观念的加强,基于内部耦合和全耦合联合模型的开发和研制仍是今后发展的必然趋势。

参考文献:

[1] 季振刚. 水动力学和水质——河流、湖泊及河口数值模拟 [M]. 李建平, 冯立成, 译. 北京: 海洋出版社, 2012.

[2] JONES R N, MCMAHON T A, BOWLER J M. Modelling historical lake levels and recent climate change at three closed lakes, Western Victoria, Australia (c. 1840—1990)[J]. Journal of Hydrology, 2001, 246: 159-180.

[3] LEGESSE D, VALLET-COULOMB C, GASSE F. Analysis of the hydrological response of a tropical terminal lake, Lake Abiyata (Main Ethiopian Rift Valley) to changes in climate and human activities[J]. Hydrological Processes, 2004, 18: 487-504.

[4] KEBEDE S, TRAVI Y, ALEMAYEHU T, et al. Water balance of Lake Tana and its sensitivity to fluctuations in rainfall, Blue Nile basin, Ethiopia[J]. Journal of Hydrology, 2006, 316: 233-247.

[5] TWEED S, LEBLANC M, CARTWRIGHT I. Groundwater-surface water interaction and the impact of a multi-year drought on lakes conditions in South-East Australia[J]. Journal of Hydrology, 2009, 379: 41-53.

[6] YE X C, ZHANG Q, BAI L, et al. A modeling study of catchment discharge to Poyang Lake under future climate in China [J]. Quaternary International, 2011, 244: 221-229.

[7] NIEDDA M, PIRASTRU M. Hydrological processes of a closed catchment-lake system in a semi-arid Mediterranean environment [J]. Hydrological Processes, 2013, 27: 3617-3626.

[8] CROWE A S, SCHWARTZ F W. Simulation of lake-watershed systems I. Description and sensitivity analysis of the model[J]. Journal of Hydrology, 1981, 52: 71-105.

[9] XU Z Y, ADIL N G, GRIZZARD T J. The hydrological calibration and validation of a complex-linked watershed-reservoir model for the Occoquan watershed, Virginia[J]. Journal

- of Hydrology, 2007, 345: 167-183.
- [10] MORITA M, YEN B C. Modeling of conjunctive two-dimensional surface-three-dimensional subsurface flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(2): 184-200.
- [11] BETRIE G D, VAN G A, MOHAMED Y A, et al. Linking SWAT and SOBEK using Open Modeling Interface (OpenMI) for sediment transport simulation in the Blue Nile River basin[J]. Transactions of the Asabe, 2011, 54(5): 1749-1757.
- [12] HASSANZADEN E, ZARGHAMI M, HASSANZADEH Y. Determining the main factors in declining the Urmia Lake level by using System Dynamics Modeling[J]. Water Resources Management, 2011, 26(1): 129-145.
- [13] ABSHIRE K E. Impacts of hydrologic and hydraulic model connection schemes on flood simulation and inundation mapping in the Tar River Basin[D]. Department of Civil and Environmental Engineering, Duke University, America, PhD Thesis, 2012.
- [14] CHAUVELON P, TOUMOUD M G, SANDOZ A. Integrated hydrological modelling of a managed coastal Mediterranean wetland (Rhône delta, France): Initial calibration[J]. Hydrology and Earth System, 2003, 7(1): 123-131.
- [15] CARTER S, DENTON D, SIEVERS M, et al. Hydrologic model development of the Sacramento River Watershed to support TMDL development[J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2005, 29: 1542-1570.
- [16] LIAN Y Q, CHAN I-C, SINGH J, et al. Coupling of hydrologic and hydraulic models for the Illinois River Basin[J]. Journal of Hydrology, 2007, 344: 210-222.
- [17] INOUE M, PARK D, JUSTIC D, et al. A high-resolution integrated hydrology-hydrodynamic model of the Barataria Basin system[J]. Environmental Modelling and Software, 2008, 23(9): 1122-1132.
- [18] TANER M U, CARLETON J N, WELLMAN M. Integrated model projections of climate change impacts on a North American lake[J]. Ecological Modelling, 2011, 222: 3380-3393.
- [19] DARGAHI B, SETEGN S G. Combined 3D hydrodynamic and watershed modeling of Lake Tana, Ethiopia[J]. Journal of Hydrology, 2011, 398: 44-64.
- [20] LI Y L, ZHANG Q, YAO J, et al. An integrated hydrological model for Poyang lake watershed, China[C]. Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE), 2012 2nd International Conference on. IEEE, 2012, 1-4.
- [21] LI Y L, ZHANG Q, YAO J, et al. Hydrodynamic and hydrological modeling of Poyang Lake-catchment system in China[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(3): 607-616.
- [22] 李云良, 张 奇, 姚 静, 等. 鄱阳湖湖泊流域系统水文水动力联合模拟[J]. 湖泊科学, 2013, 25(2): 227-235.
- [23] ISHII A L, CHARLTON T J, ORTEL T W, et al. Operational modeling with dynamic-wave routing, in water resources and the urban environment[C]. American Society of Civil Engineers 25th Annual Conference on Water Resources Planning and Management, Chicago, 1998, 147-152.
- [24] MCGRATH J, BARRY K, O'KANE J P J, et al. High resolution DEM and sea level rise in the centre of Cork Blue City Project[C]. National Hydrology Seminar. IEEE, 2003: 110-118.
- [25] LAM D, LEON L, HAMILTON S, et al. Multi-model integration in a decision support system: A technical user interface approach for watershed and lake management scenarios[J]. Environmental Modelling and Software, 2004, 19: 317-324.
- [26] KNEBL M R, YANG Z L, HUTCHISON K, et al. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: A case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event[J]. Journal of Environmental Management, 2005, 75: 325-336.
- [27] TATE E, CAUWENBERGHS K. An innovative flood forecasting system for the Demer basin: A case study[J]. International Journal of River Basin Management, 2005, 3(4): 1-5.
- [28] PIETRONIRO A, LECONTE R, TOTH B, et al. Modelling climate change impacts in the Peace and Athabasca catchment and delta: III—integrated model assessment[J]. Hydrological Processes, 2006, 20: 4231-4245.
- [29] LIAN Y Q, CHAN I C, XIE H, et al. Improving HSPF modeling accuracy from FTABLES: Case study for the Illinois River Basin[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2010, 15: 642-650.
- [30] DEBELE B, SRINIVASAN R, PARLANGE J Y. Coupling upland watershed and downstream waterbody hydrodynamic and water quality models (SWAT and CE-QUAL-W2) for better water resources management in complex river basins[J]. Environmental Modeling and Assessment, 2008, 13(1): 135-153.
- [31] ALARCON V A, MCANALLY W, WASSON L, et al. Using NEXRAD precipitation data for enriching hydrological and hydrodynamic models in the northern Gulf of Mexico[J]. Computational Methods in Science and Engineering: Advances in Computational Science, 2008, 1148: 646-650.
- [32] HU G, WAN Y. Modeling the hydrology and hydrodynamics in Loxahatchee River and estuary, Florida during hurricanes Frances and Jeanne[C]. Estuarine and Coastal Modeling. IEEE, 2008: 138-149.
- [33] MAI D T. Development of flood prediction models for the Huong and Vu Gia-Thu Bon River Basins in central Vietnam[D]. Free University of Brussels, 2009.
- [34] WHITE J D, PROCHNOW S J, FILSTRUP C T, et al. A combined watershed-water quality modeling analysis of the lake Waco reservoir: 1. Calibration and confirmation of predicted water quality[J]. Lake and Reservoir Management, 2010, 26: 147-158.
- [35] PAUL P, CVETKOVIC V. Integrating hydrological and hydrodynamic models for decision support systems and management of coastal zones and estuaries[M]. Springer Nether-

- lands; Management and Sustainable Development of Coastal Zone Environments, 2010: 85-97.
- [36] SALAH A M, NELSON E J, WILLIAMS G P. Tools and algorithms to link horizontal hydrologic and vertical hydrodynamic models and provide a stochastic modeling framework [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2010, 2: 1-14.
- [37] 杨 洵, 梁国华, 周慧成. 基于 MIKE11 的太子河观 覆河段水文水动力模型研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28(11): 84-87.
- [38] AL F A, LAWAL B, BISWAJEET P, et al. Coupling of hydrodynamic modeling and aerial photogrammetry-derived digital surface model for flood simulation scenarios using GIS: Kuala Lumpur flood, Malaysia[J]. Disaster Advances, 2011, 4(4): 20-28.
- [39] VAN C S, KELLEHER K E, HOWARD K, et al. The CFLOW Project: A system for total water level prediction from the summit to the sea[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2011, 92(11): 1427-1442.
- [40] TROMBLE E, KOLAR R, DRESBACK K, et al. River flux boundary considerations in a coupled hydrologic-hydrodynamic modeling system[C]. Estuarine and Coastal Modeling, 2012: 510-527.
- [41] SETEGN S G. Modeling hydrological and hydrodynamic processes in Lake Tana basin, Ethiopia[D]. KTH, TRITALLWR PhD Thesis 1057, 2012.
- [42] PRADHAN B, YOUSSEF A M. A 100-year maximum flood susceptibility mapping using integrated hydrological and hydrodynamic models: Kelantan River Corridor Malaysia[J]. Journal of Flood Risk Management, 2011, 4: 189-202.
- [43] WANGPIMOO W, PONGPUT K. Integrated hydrologic and hydrodynamic model for flood risk assessment in Nam Loei Basin, Thailand[C]. 2011: 117-127.
- [44] OBEYSEKERA J, KUEBLER L, AHMED S, et al. Use of hydrologic and hydrodynamic modeling for ecosystem restoration[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2011, 41(S1): 447-488.
- [45] PRASETYO A, YAMASHITA T. Numerical study on atmospheric, hydrological and coastal circulation in coastal city, Semarang Indonesia[J]. Journal of International Development and cooperation, 2011, 17(2): 159-181.
- [46] SKM. Joint calibration of a hydrologic and hydrodynamic model of the lower Brisbane River[R]. Technical Report, Version 1, 2011, PP 1-104.
- [47] LERAT J, PERRIN C, ANDREASSIAN V, et al. Towards robust methods to couple lumped rainfall-runoff models and hydraulic models: A sensitivity analysis on the Illinois River [J]. Journal of Hydrology, 2012, 418/419: 1-13.
- [48] BRAVO J M, ALLASIA D, PAZ A R, et al. Coupled hydrologic-hydrodynamic modeling of the Upper Paraguay River Basin[J]. Journal of Hydrological Engineering, 2012, 17(5): 635-646.
- [49] ZHANG H, HUANG G H, WANG D, et al. An integrated multi-level watershed-reservoir modeling system for examining hydrological and biogeochemical processes in small prairie watersheds[J]. Water Research, 2012, 46: 1207-1224.
- [50] BEIGHLEY R E, EGGERT K G, DUNNE T, et al. Simulating hydrologic and hydraulic processes throughout the Amazon River Basin[J]. Hydrological Processes, 2009, 23: 1221-1235.
- [51] PAIVA P C D, COLLISCHONN W, TUCCI C E M. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach[J]. Journal of Hydrology, 2011, 406: 170-181.
- [52] PAIVA P C D, BUARQUE D C, COLLISCHONN W, et al. Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin[J]. Water Resources Research, 2013a, 49: 1226-1243.
- [53] PAIVA P C D, COLLISCHONN W, BONNE T, et al. Assimilating in situ and radar altimetry data into a large-scale hydrologic-hydrodynamic model for streamflow forecast in the Amazon[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013b, 10: 2879-2925.
- [54] PAIVA P C D, COLLISCHONN W, BUARQUE D C. Validation of a full hydrodynamic model for large-scale hydrologic modelling in the Amazon[J]. Hydrological Processes, 2013c, 27: 333-346.
- [55] KIM J, WARNOCK A, IVANOV V Y, et al. Coupled modeling of hydrologic and hydrodynamic processes including overland and channel flow[J]. Advances in Water Resources, 2012, 37: 104-126.
- [56] BELL A K, HIGGINSON N, DAWSON S, et al. Understanding and managing hydrological extremes in the Lough Neagh Basin[C]. National Hydrology Seminar, 2005: 77-84.
- [57] THOMPSON J R, SORENSON H R, GAVIN H, et al. Application of the coupled MIKE SHE/MIKE 11 modelling system to a lowland wet grassland in southeast England[J]. Journal of Hydrology, 2004, 293: 151-179.

## ADVANCES IN INTEGRATED HYDROLOGICAL AND HYDRODYNAMIC SIMULATION OF LAKE-CATCHMENT SYSTEM

LI Yun-liang<sup>1</sup>, ZHANG Qi<sup>1</sup>, YAO Jing<sup>1</sup>, LI Meng-fan<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Lake and its drainage catchment are viewed as a community existed in nature, which constitutes essential component of the regional and global water cycles. Integrated simulation of hydrological and hydrodynamic processes is very important for lake catchment water resource planning and management. The review of integrated simulation provides useful information for understanding the model development and model mechanism. It also provides critical insights into the international modeling approaches. Conventional simulation approach mainly combines the catchment hydrological model and lake water balance model, which was used to calculate the catchment hydrological processes and lake water budgets. However, the lake water balance method only can give the general description and this method may not reflect the lake system with significant water gradients and complex hydrodynamic behaviors in space. The integrated model based on the catchment hydrological models and lake hydrodynamic models overcomes the difficulties in complete simulation for the large-scale area. In this paper, we described the advances in integrated hydrological and hydrodynamic simulation for lake-catchment systems in various scales, thus summarized the advantages and deficiencies of the external coupling technique, internal coupling technique and full coupling technique using in the integrated models. In theory, the internal and full coupling techniques are the most reliable methodologies for the integrated simulations, but they usually have many numerical problems. The external coupling technique is the most effective and easiest approach to link different model components, but it is not adequate to represent the feedbacks between models. Overall, the coupling techniques are useful to improve our understanding of integrated hydrological and hydrodynamic models around many counties.

**Key words:** hydrological model; hydrodynamic model; lake-catchment system; integrated model; coupling technique