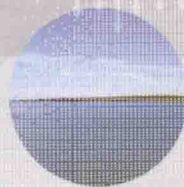


呼伦湖水量动态

演化特征及水文数值模拟研究

Hydrological Numerical Modelling & Dynamic Evolution
Characteristics of Hulun Lake Water Volume

李畅游 孙标 张生 贾克力 著



科学出版社

呼伦湖水量动态演化特征及 水文数值模拟研究

Hydrological Numerical Modelling & Dynamic Evolution
Characteristics of Hulun Lake Water Volume

李畅游 孙 标 张 生 贾克力 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以北方第一大湖呼伦湖及其流域为研究对象,全书共分为7章,主要包括:绪论,呼伦湖概况及流域水系特征研究,基于小波理论的流域水文序列随机分析,基于混沌理论的流域水文序列预测分析,湖面演化及多波段水深反演研究,基于 TIN 模型的湖泊水量动态演化研究,呼伦湖流域水文数值模拟。

本书可供资源、地理、环境等相关专业的研究生、本科生及从事相应专业的科研、教学和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

呼伦湖水量动态演化特征及水文数值模拟研究/李畅游等著. —北京:科学出版社, 2016.12

ISBN 978-7-03-050974-1

I. ①呼… II. ①李… III. ①呼伦湖-含水量-动态平衡-研究 ②呼伦湖-水文模拟-研究 IV. ①P344.226

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 287092 号

责任编辑:何雯雯 王希挺/责任校对:刘凤英

责任印制:李 冬/封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京科信印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年12月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016年12月第一次印刷 印张:14 1/2

字数:330 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



作者介绍

李畅游 内蒙古农业大学教授，博士生导师。现任中国高等教育学会常务理事、内蒙古水利学会副理事长、教育部高等学校水利类专业教学指导委员会副主任、中国水利教育协会高等教育分会副理事长、中国农业工程学会副理事长、《农业环境科学学报》编委。

多年来一直从事水环境系统规划及管理、水资源最优化配置教学和科研工作。先后主持和参加了 40 余项国家和省部级重大科研项目，其中主持国家自然科学基金项目 7 项（含重点项目 1 项），国际合作项目 3 项。1993 年获“内蒙古自治区优秀青年知识分子”荣誉称号，1994 年被自治区授予“优秀科技工作者”荣誉称号，1996 年获“内蒙古自治区有突出贡献的中青年专家”荣誉称号，2012 年获国务院特殊津贴。1995 年获国家科技进步三等奖，2001 年与 2009 年分别获国家级教学成果二等奖，2013 年获内蒙古自治区教学成果一等奖，2013 年获内蒙古自然科学二等奖。发表论文 180 余篇，其中 30 余篇被 SCI 或 EI 收录，拥有国家专利 5 项，以第一作者撰写出版专著 3 部。

孙 标 内蒙古农业大学助理研究员，博士。近年来主要从事湖泊湿地水环境、水生态与 3S 技术应用研究。主持国家自然科学基金项目 1 项，高等学校博士学科点专项科研基金项目 1 项，内蒙古自然科学基金项目 1 项，内蒙古农业大学校级优秀青年基金项目 1 项；参加国家自然科学基金项目 9 项（含重点项目 1 项），国际合作项目 2 项，其他省部级科研项目 10 余项。2013 年获得内蒙古自然科学二等奖。发表论文 20 余篇，其中 5 篇被 SCI 收录，参与撰写专著 3 部。

张 生 现任内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院院长，教授，博士生导师，硕士毕业于以色列本古里昂大学水资源利用专业，博士毕业于英国谢菲尔德大学水环境科学与工程专业。近年来主要从事水环境保护与修复的研究。先后主持国家自然科学基金项目 2 项，水利部公益性行业科研专项 1 项，其他省部级科研项目 3 项；参加国家自然科学基金项目 3 项（含重点项目 1 项），国际合作项目 2 项，其他省部级科研项目 10 余项。2015 年入选内蒙古“草原英才”高层次人才，2009 年先后获内蒙古自治区教学成果一等奖和二等奖，2013 年获内蒙古自治区教学成果一等奖。发表论文 70 余篇，其中 6 篇被 SCI 收录，拥有国家专利 2 项，参与撰写专著 1 部。

贾克力 内蒙古农业大学教授，硕士生导师，毕业于爱尔兰国立高威大学水文专业。近年来主要从事流域水文模拟的研究。主持国家自然科学基金项目 2 项，其他省部级科研项目 5 项；参加国家自然科学基金项目 4 项，国际合作项目 2 项，其他省部级科研项目 10 余项。发表论文 30 余篇，其中 4 篇被 SCI 收录，参与撰写专著 1 部。

前 言

我国湖泊数量众多,分布广泛,就像一颗颗璀璨的明珠,镶嵌在祖国的大地上。在气候变化和人类活动的双重作用下,一些湖泊出现了水位持续下降、集水面积和蓄水量不断减小的现象,有的湖泊甚至完全干涸。

呼伦湖是中国第五大湖,北方第一大湖,又称“达赉湖”,水域辽阔,素有“草原明珠”的美誉,地处呼伦贝尔草原腹地,呼伦贝尔草原以水草丰美而著称,是我国优质的天然牧场和重要的畜牧业生产基地。呼伦湖是全球范围内寒冷干旱地区极为罕见的具有生物多样性和生态多功能的自然湖泊湿地生态系统,是水鸟迁徙的重要天然驿站。呼伦湖及周边草原于1990年被划定为自治区级保护区,1992年被批准为国家级自然保护区,2002年1月被联合国列入国际重要湿地名录,2002年11月被联合国教科文组织人与生物圈计划吸收为世界生物圈保护网络成员。它与呼伦贝尔草原及大兴安岭森林共同构筑了我国北方重要的生态屏障,对维护地区生物多样性,以及保护我国北方乃至华北地区的生态安全,促进经济社会可持续发展发挥着不可替代的重要作用。呼伦湖近年来由于气候变化和河流来水量的减少,湖泊水量变化剧烈,水文循环发生变化,并由此引发其他各类生态环境问题,如生物多样性减少,芦苇沼泽和苔草沼泽演替为盐生植被和沙生植被,周边草场退化,畜牧业生产力降低等。对呼伦湖的水文过程进行研究具有重要的科学与现实意义。

本书以呼伦湖及其流域为研究对象,首先根据收集到的长序列资料对该湖泊的气候及水系特征做了分析,利用DEM明确了呼伦湖流域的分布范围。基于小波理论和混沌理论对呼伦湖的主要入湖河流克鲁伦河和乌尔逊河的水文时间序列做了分析,明确了该流域的水文周期规律。其次,基于3S技术分析研究了呼伦湖近年来的湖面变化情况,并利用实测水深和遥感影像建立了多波段水深反演模型,精确地反演了呼伦湖的湖底地形分布情况,在此基础上利用湖底三维模型进行不同水位情况下湖泊的多年水量平衡分析,明确了呼伦湖水量动态演化的成因。最后,结合区域地下水的补给研究,利用HydroGeoSphere模型进行了呼伦湖流域水文数值模拟,并模拟预测了未来气候条件下的流域水文动态变化情况,为呼伦湖的保护与修复提供了重要的研究基础。

内蒙古农业大学河湖湿地水环境保护与修复团队从2007年开始,一直对呼伦湖进行着水文、水环境方面的连续监测,凡是到呼伦湖做过试验的团队成員都对这片土地有着深厚的感情,它有一种无法用言语形容的魅力,令人神往。本书为团队近十多年来关

于呼伦湖水循环的理论、方法、成果的系统总结,是湖泊湿地水资源与水环境重要的研究积累,凝聚了团队科研人员的智慧与见解。笔者希望通过本书的出版,为呼伦湖的保护尽绵薄之力,可以有更多的人去关注呼伦湖、关注内蒙古、关注草原生态。水是生命之源,没有了水,一切将不复存在。

全书由内蒙古农业大学李畅游教授和孙标助理研究员设计,由李畅游教授、张生教授、贾克力教授及孙标助理研究员共同执笔。全书共7章,第1章由李畅游、孙标撰写,第2章由史小红、孙标、赵胜男撰写,第3章由李畅游、张生、贾克力撰写,第4章由张生、贾克力、赵胜男撰写,第5章由李畅游、史小红、孙标撰写,第6章由孙标撰写,第7章由史小红、孙标、赵胜男撰写。初稿完成之后李畅游教授、张生教授、贾克力教授及孙标助理研究员又进行了若干轮的统稿和修订。王志杰、黄健、计亚丽、樊才睿、高宏斌、梁丽娥、朱永华、王静洁、王旭阳、韩知明等团队成员在资料的收集、整理和后期的校稿工作中付出了辛勤的劳动。

特别要感谢科学出版社的何雯雯老师,在本书出版过程中的大力支持和多方面的修改意见,才能使本书更为完善。笔者对所有为本书出版作出贡献的同事和朋友们致以衷心的感谢。

本书由内蒙古农业大学优秀青年科学基金(2014XYQ-10)、国家自然科学基金重点项目(51339002)、教育部“创新团队发展计划”(IRT13069)、国家自然科学基金(51409288、51669022、51669021、51569019、51509133、51269016)、高等学校博士学科点专项科研基金(20131515120005)和内蒙古产业创新团队项目联合资助。

本书内容涉及水文、空间信息、计算机、地理信息、数学等学科和领域,由于作者水平有限,在撰写的过程中难以全面把握多学科的交叉知识,书中错误及不足之处在所难免。诚恳希望同行和读者批评指正,提出宝贵意见。

作者

2016年10月

于内蒙古农业大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 水文时间序列研究的主要进展	2
1.3 水文模型研究的主要进展	5
1.4 气候预测模型研究的主要进展	9
1.5 呼伦湖现有研究的主要进展	11
参考文献	14
第 2 章 呼伦湖概况及流域水系特征研究	18
2.1 地理位置及其形态概况	18
2.2 湖泊的形成与周边地貌概况	19
2.3 区域气候特征	20
2.4 呼伦湖水系特征	26
2.5 基于 DEM 的呼伦湖流域特征研究	29
2.6 结论与讨论	40
参考文献	40
第 3 章 基于小波理论的流域水文序列随机分析	42
3.1 呼伦湖流域水文序列复杂性分析	42
3.2 小波分析在水文系统多时间尺度分析中的应用	58
3.3 结论与讨论	70
参考文献	71
第 4 章 基于混沌理论的流域水文序列预测分析	72
4.1 基于混沌理论的水文时间序列预测研究	72
4.2 基于最小二乘支持向量机的混沌时间序列预测研究	84
4.3 基于 ARIMA 模型的流域水文序列预测研究	108
4.4 结论与讨论	119
参考文献	120
第 5 章 湖面演化及多波段水深反演研究	123
5.1 呼伦湖湖面演化遥感解译研究	123
5.2 多波段遥感水深反演模型研究	136

5.3 结论与讨论	151
参考文献	151
第 6 章 基于 TIN 模型的湖泊水量动态演化研究	153
6.1 呼伦湖湖盆三维模型分析	153
6.2 多年水量平衡分析及演化规律研究	156
6.3 呼伦湖保护的对策与建议	163
6.4 结论与讨论	164
参考文献	164
第 7 章 呼伦湖流域水文数值模拟	165
7.1 HydroGeoSphere 模型	165
7.2 基于 HydroGeoSphere 的地表水-地下水耦合模拟	173
7.3 未来气候下流域水文特征预测	196
7.4 结论与讨论	211
参考文献	212
附录	214

第1章 绪 论

1.1 研究背景

淡水资源是一切生物赖以生存的重要物质基础和生命有机体的重要组成部分,是生物进化过程中不可缺少的物质流和能量流。具有独特功能的湖泊是维系人与自然和谐发展的重要纽带。湖泊被誉为“地球之肾”(杨永兴,2002),具有调节河川径流、发展灌溉、提供工业和饮用的水源、繁衍水生生物、沟通航运,改善区域生态环境以及开发矿产等多种功能,在国民经济的发展中发挥着重要作用。同时,湖泊及其流域是人类赖以生存的重要场所,湖泊本身对全球变化响应敏感,在人与自然这一复杂的巨大系统中,湖泊是地球表层系统各圈层相互作用的联结点,是陆地水圈的重要组成部分,与生物圈、大气圈、岩石圈等关系密切,具有调节区域气候、记录区域环境变化、维持区域生态系统平衡和繁衍生物多样性的特殊功能。

我国湖泊数量众多,分布广泛,就像一颗颗璀璨的明珠,镶嵌在祖国的大地上。根据科技部“十一五”期间进行的《中国湖泊水质、水量与生物资源调查》,我国目前现有面积 1km^2 以上的天然湖泊 2693 个,总面积约 8.1万 km^2 (马荣华等,2011)。目前我国湖泊萎缩退化形势严峻。在气候变化和人类活动的双重作用下,一些湖泊出现了水位持续下降、集水面积和蓄水量不断减小的现象,有的湖泊甚至完全干涸。据报告,中国近 50 年来消失的湖泊共计 243 个。其中,新疆消失的湖泊 62 个,位居榜首;内蒙古紧随其后,消失 59 个;湖北排第三,消失 55 个;江苏排第四,消失 11 个;江西、安徽排第五,各消失 10 个。湖泊萎缩的现象不仅发生在中国,位于非洲中部,被喀麦隆、乍得、尼日尔和尼日利亚四国环绕的乍得湖曾是世界最大的湖泊之一,但由于气候变化、人口增长等因素,乍得湖的面积在不到 40 年的时间里已经缩小了 90%。

内蒙古大部分地区都属于干旱半干旱地区,当地的湖泊水资源对于维持区域环境生态的协调可持续发展具有毋庸置疑的关键作用。内蒙古湖泊分布构成一个北东—南西向的湖群带,主要分布在年降水量 $200\sim 400\text{mm}$ 的呼伦贝尔高原、西辽河平原、锡林郭勒高原、乌兰察布高原和丘陵区、河套平原和鄂尔多斯高原等广大地区(李畅游和孙标,2013)。它们所处位置远离海洋,降水少,气候干旱,水蚀作用微弱。在全球气候逐渐变暖大背景下,随着人类活动对湖泊的影响日渐加深,内蒙古的湖泊由于其特殊的地理位置及气候特征将在水量、水质及周边流域生态环境等方面迎接更为严峻的考验。

呼伦湖是中国第五大湖,北方第一大湖,又称“达赉湖”,水域辽阔,素有“草原明珠”的美誉,地处呼伦贝尔草原腹地,呼伦贝尔草原以水草丰美而著称,是我国优质的天然牧场和重要的畜牧业生产基地(王志杰等,2012)。呼伦湖是全球范围内寒冷干

旱地区极为罕见的具有生物多样性和生态多功能的自然湖泊湿地生态系统,是水鸟迁徙的重要天然驿站,区内共有鸟类 18 目 52 科 317 种,其中国家一级重点保护鸟类有 9 种、国家二级重点保护鸟类有 43 种。区内共有哺乳动物 6 目 13 科 35 种,两栖爬行类 1 目 2 科 2 种,野生植物 74 科 653 种;水体中共有鱼类 30 种。呼伦湖及周边草原于 1990 年被划定为自治区级保护区,1992 年被批准为国家级自然保护区,2002 年 1 月被联合国列入国际重要湿地名录,2002 年 11 月被联合国教科文组织人与生物圈计划吸收为世界生物圈保护网络成员。它与呼伦贝尔草原及大兴安岭森林共同构筑了我国北方重要的生态屏障,对维护地区生物多样性,及保护我国北方乃至华北地区的生态安全,促进经济社会可持续发展发挥着不可替代的重要作用。

呼伦湖近年来由于气候变化和河流来水量的减少,湖泊水量变化剧烈,水文循环发生变化,并由此引发其他各类生态环境问题(孙标,2010),如生物多样性减少,芦苇沼泽和苔草沼泽演替为盐生植被和沙生植被,周边草场退化,畜牧业生产力降低等。因此,对呼伦湖及周边流域的水文过程进行研究,分析湖泊水量减少的直接及间接原因,对水量的动态变化进行模拟预测。以期为政府水资源管理的决策提供一定的科学支撑,同时也是对干旱半干旱区同类型湖泊相关研究的经验积攒,具有重要的科学与现实意义。

1.2 水文时间序列研究的主要进展

1.2.1 小波理论方面

1980 年,法国工程师 Morlet 在分析地震资料时提出了小波分析(子波分析)。它是继傅里叶分析以后,纯粹数学与应用数学殊途同归的又一范例,素有“数学显微镜”的美称,是纯粹数学家和应用数学家、工程师各自独立发现的,并经过他们的共同努力而得以迅速发展。在随后的 20 多年里,小波分析成为国际研究热点。Kumar 和 Georgiou (1993)将小波分析引入水文中来,小波分析在水文科学中已经取得了一定的研究成果,主要表现在水文多时间尺度分析、水文时间序列变化特性分析、水文预测预报和随机模拟方面。模式识别、地震勘探、大气科学以及许多非线性科学领域内取得了大量的研究成果。Kumar 等(1993)在评述 WT 基础上,运用正交小波(Haar 小波)还研究了空间降水的尺度和振荡特征。研究表明空间降水存在标度的自相似性和时间尺度的多种成分。Venckp 和 Georgiou(1996)等用小波包理论对降水时间序列进行小波分解,识别其时间-频率尺度,进而进行能量分解,为分析降水形成机制开辟新途径。邓自旺等(1997)根据 Morlet 小波交还系数的模、位相和实部分析了西安市近 50 年月降水量多时间尺度结构。赵永龙等(1998)基于小波分析、混沌和人工神经网络构造了混沌小波网络模型,用该模型对金沙江屏山站汛期日流量序列进行了长期预测,文中还与多元线性回归模型作了比较,研究表明混沌小波神经网络模型是优越的。杨辉和宋亚山(1999)通过 Morlet 小波变换分析了华北地区的水资源各分量的时间-频率的多层次结构和突变特征。李贤彬等(1999)基于人工神经网络与小波耦合,提出了基于小波变换序列的人工神经网络

组合预测模型。首先,对水文序列进行小波变换;再利用人工神经网络模型对小波变换系数进行多尺度组合预测;最后对预测重构得原始水文序列预测。孙力等(2000)用小波变换法分析了中国东北地区夏季降水异常情况。金龙等(2000)通过人工神经网络模型结合小波分析的优点,提出了多步预测小波神经网络模型,并应用到大气中。王文圣等(2002, 2003)以长江宜昌站近百年年平均流量水文序列为基础,利用 Marr 小波和 Morlet 小波对水文序列进行变换,进行多时间尺度特性分析。结果表明周期性变化复杂,长度和强弱在不同时段表现不同。运用 Morlet 小波变换分析长江宜昌站年最大洪峰流量序列多时间尺度特征和周期性变化。蒋晓辉等(2003)基于小波分析方法对黄河中上游天然径流序列进行分析,得出河川径流多时间尺度变化规律。桑燕芳等(2009, 2013)为准确有效地识别和分离水文时间序列中的噪声成分,应用信息熵理论并结合小波消噪概念,建立了小波系数阈值优选熵准则和水文序列消噪新方法,并对水文时间序列的方法进展情况做了研究。徐淑琴等(2015)以黑龙江省虎林市 858 农场区为例,采用小波变换 A Trous 算法,分析模拟该区 1999~2014 年降雨量,结果与实际测量值接近。小波分析具有很大潜力,在水文学的应用中发挥了重要作用,小波理论与水文学结合,不但拓宽了其本身应用范围,而且推动了小波理论的发展。

1.2.2 混沌相关理论方面

混沌理论的主导思想是:宇宙本身就是处于混沌状态的,在其中某一部分中似乎并无关联的事件间的冲突,可能导致宇宙的另一部分产生不可预测的后果。混沌理论具有以下几种特性:随机性、敏感性、分维性、普遍性、标度律。水文学于 20 世纪 80 年代开始引入混沌理论,近十年来有着突飞猛进的发展。将混沌理论应用于水文学的研究中,必须首先解决三个关键性的问题:水文时间序列的相空间重构、水文时间序列的混沌特性识别以及水文混沌时间序列的预测方法。混沌时间序列的预测是混沌理论的一个重要分支和研究热点,它不仅可以用来确定动力模型,还可以用于检测模型和进行混沌特性的识别,被广泛应用于各个学科领域。

自然界中许多现象表现为非随机却貌似随机的特征,即混沌特性(曹鸿兴, 2003)。水文水资源系统是一个复杂的非线性系统,具有产生混沌的基本条件:对初始条件的敏感性和内在随机性(丁晶等, 1995)。复杂动力系统理论指出,单变量时间序列不只是系统的简单输出,而且包括了系统所有其他变量的过去信息,同时也蕴含大量关于系统未来演化的信息(李荣峰等, 2006)。因此,分析水文序列的混沌特性,可以了解和掌握水文水资源系统的混沌特性。应用混沌理论解决水文分析和模拟等问题时,需要解决 3 个关键问题:水文系统混沌特性识别或性质判断、重建水文系统相空间结构、水文系统混沌动力学模拟预报(冯国章和李佩成, 1997)。国外, Hense (1987) 最早将混沌动力学方法引入水文学领域,开辟了水文学应用的先河,之后有一系列的研究成果(Liu et al., 1998; Ng et al., 2007; Sogoyomi et al., 1996)。国内,丁晶(1992)最先论述了将混沌

理论用于洪水分析的可能性,探索了洪水系统的混沌识别和预测方法,并指出洪水过程可能存在混沌特性。目前混沌理论在水文学领域的应用主要是对水文系统的混沌特性进行定量分析。傅军(1994)探讨了洪水的混沌特性,并总结了目前的模拟预报模型,主要有局域线性模型、局域非线性模型和全域非线性模型等;丁晶等(1995)采用相空间多点相似法对金沙江屏山站日流量进行了模拟预测;权先璋等(1999)对葛洲坝和隔河岩电站不同的径流序列分别应用局部预测方法和全局预测方法进行了预测,对降雨-径流时间序列进行了混沌分析和预报;周寅康等(1999a, 1999b, 2000; Zhou et al., 2002)对淮河流域洪涝变化序列的混沌特征、耗散性及可预报时间进行了研究,依据混沌理论和微分方程反演建模原理,建立了三维二阶微分方程组来描述淮河洪涝序列的混沌动力系统。这些混沌分析方法都基于统计理论。之后,丁晶等(2002)又探索了通过分析系统的动力行为及演变机制进行预测的方法,并尝试利用水文观测资料反演水文动力模型进行水文预测,结果表明反演水文动力模型是一条可行的建模新途径;丁涛等(2004)利用混沌理论对水文序列区间预测方法进行了研究;李荣峰等(2006)建立了基于相空间重构的水文自记忆预测模型,林振山(1993)基于混沌理论研究了长期预报的相空间理论和技术途径等。盖兆梅(2009)将其他优化算法与混沌优化算法相结合,建立了一些新的模型,并将之应用于三江平原水文水资源领域。李新杰(2013)引入 0-1 混沌测试二元方法、递归图分析理论、顺模式递归图理论和复杂网络理论,与混沌理论相结合,对长江流域和美国部分河流的径流时间序列混沌特征的时间和空间尺度问题进行了定性的描述和定量的分析。刘祖涵(2014)引入分形理论、混沌理论、复杂网络理论等并结合 GIS 技术对塔里木河流域的气候-水文过程的复杂性与非线性特征进行了系统的定性分析与定量分析。

支持向量机(support vector machines, SVM)于 20 世纪 90 年代由 Vapnik 提出,它是数据挖掘中的一项新技术,是借助最优化方法解决机器学习问题的一个新工具。基于 LS-SVM 模型的混沌时间序列预测是一个新的研究热点,LS-SVM 预测模型只注重预测信息的功能,不注重预测模型的形式。有的研究者研究了 LS-SVM 模型的混沌时间序列多步预测(江田汉和束炯, 2006),有的将 LS-SVM 的混沌时间序列预测模型应用于径流、降雨、凌汛等水文系统(黄如国和芮孝芳, 2004; 李亚伟等, 2006; 罗芳琼等, 2011),随着研究的发展,LS-SVM 的混沌时间序列预测模型将会有更广阔的应用前景。从 20 世纪 80 年代末开始,RBF 神经网络模型就被应用于混沌时间序列的预测中,相对于传统的线性预测方法,RBF 神经网络不仅可以实现混沌时间序列的全局预测,而且还可以实现其局域预测(郭兰平等, 2011)。20 世纪 70 年代,美国统计学家 Box 和 Jenkins 的著作《Time Series Analysis》的问世,标志着时间序列的分析成为一个完整的理论体系。同时,Box 和 Jenkins 在《Time Analysis: Forecasting and Control》一书中提出了用 ARIMA 模型来分析时间序列资料,并对其时间序列进行预报和控制的方法。时间序列分析模型是系统理论模型的一个重要分支,于 20 世纪 80 年代引入水文分析领域。ARIMA 模型应用的是一种概率统计的方法,将水文时间序列作为随机过程进行分析(狄源硕, 2015)。

1.3 水文模型研究的主要进展

近年来,不同学者已经建立了多种水文模型,并在水文预报、水文计算和径流模拟等领域得到广泛应用。用于估算气候变化影响的水文模型,目前主要有四种,即统计回归模型、水量平衡模型、概念性水文模型以及分布式物理模型,发展的趋势是从集总式的概念性模型向分布式水文模型发展。

1.3.1 水量平衡模型方面

水量平衡是全面研究某一地区在一定时间段内水资源的补给量、储存量和消耗量之间数量转化关系的平衡计算,理论基础是质量守恒原理,最早于 20 世纪 40~50 年代发展起来的。到 20 世纪末,为了满足生态研究、干旱分析、气候变化以及人类活动影响评价等不同目的,研究者相继提出许多不同结构和假设的水量平衡模型。在过去的 30 年里,水量平衡模型的理论和应用水平进一步得到了提升。

水量平衡计算在湖泊水量问题的研究中也有着广泛的应用。Calder 等(1995)利用水量平衡模型研究土地利用类型的改变对于湖泊水位的影响。Crapper 等(1996)基于水量平衡模型预测了湖泊水位的变化。Yin 和 Nicholson(1998)通过计算 Victoria 湖的收入项及支出项,发现存在着 19mm 的差距,通过敏感性分析得出,此差距远小于蒸发计算输入项云量因子所造成的误差,强调获得全面的云量数据,并且在水量平衡计算中使用湖面降雨量。Gebreegziabher(2004)结合湖泊及流域土壤水量平衡模型探索 Awassa 湖泊水位变化的原因,结果显示过去 25 年的气候变化及土地利用的改变共同作用导致了流域径流的增加及湖泊水位的变化。Gibson 等(2006)利用日水量平衡模型估计 Great Slave 湖水位波动的幅度及频率,确定湖泊水量的来源及损失,同时确定湖泊水位变化的主要原因是气候变化所致。Amo-Boateng(2010)通过对 Bosumtwi 湖的水平衡计算,得出湖面降雨是湖泊的主要输入项,降雨的持续减少,蒸发的不断增加是造成湖泊水位下降的主要原因。Kumambala 和 Ervine(2010)研究气候变化对于湖泊水位的影响。Soja 等(2013)分析了气候因子变化下的奥地利东部草原型湖泊 Neusiedl 的水量平衡情况。Gibson 等(2016)利用稳定同位素技术对加拿大阿尔伯塔省的五十个湖泊进行了水量平衡分析。

湖泊水量平衡在我国也具有广泛的应用。秦伯强和施雅风(1992)通过分析青海湖流域内的各项水文因子特征及湖泊水量平衡,分析湖泊水位下降原因。秦伯强(1993)通过湖泊水量平衡计算阐述湖泊水位的变化原因,同时,分析了湖盆的物理性状与湖泊气候变化响应的关系。邓兆仁(1990)根据多次调查的实测资料与长期观测资料,分析研究了咸宁地区湖泊水量资源时空变化规律,计算了湖泊水量平衡。黄群和姜加虎(1999)根据近几十年来岱海的湖区气候、湖泊集水域的入湖径流特征分析,以及湖泊水量平衡计算,分辨人为及自然因素对湖泊水位变化的贡献。刘吉峰等(2008)模拟了青海湖近几十年水位变化过程,预估了未来 30 年青海湖湖泊水文变化情景。朱立平等

(2010)从气象要素和水量平衡两方面对西藏纳木错 1971~2004 年湖泊面积变化原因进行了探讨,结果显示气候变暖引起的冰川融水增加是引起近年湖面扩张的主要原因。孟万忠等(2011)根据 1919~1970 年汾河流域近 50 年器测的水文、气象资料,应用水量平衡的方法,对两千年来不同的历史时段,太湖盆地湖泊水量平衡进行了估算,结果表明,入湖径流量是太湖盆地湖泊存亡的决定性因素。王义民等(2011)根据湖泊水量平衡原理,对乌梁素海的生态补水量进行了计算。黄智华等(2011)通过水位还原计算,反演了乌伦古湖天然情形下的水位变化。金章东等(2013)利用高分辨率的河水化学、(次)降水量和径流量等数据,探讨了 2005 年以来青海湖湖水的来源和水位持续回升的原因。结果表明,1959 年以来青海湖水位的变化与降水量和径流量紧密相关,青海湖水位持续回升是全球增暖情形下区域降雨模式的改变、降水量和径流量增加,以及流域植被生态改善的综合效应。张国庆等(2013)利用 ICESat 和 Landsat 数据对中国最大的 10 个湖泊 2003~2009 年的高程、面积和体积变化进行了研究,结果表明青藏高原地区色林错、纳木错、青海湖和中国东北的兴凯湖显示出湖面高程增加,中国北部干旱和半干旱地区的博斯腾湖和呼伦湖表现了湖面高程与面积的下降,长江中下游地区的洞庭湖、鄱阳湖、太湖和洪泽湖湖面高程与面积则呈现出明显的季节变化,但总的变化趋势不明显。伊丽努尔·阿力甫江(2015)分析了博斯腾湖水位变化规律及其影响因素,建立博斯腾湖水量平衡的系统动力学模型,进行水量平衡分析、敏感度分析、情景分析以及博斯腾湖水量平衡的优化调控研究。水量平衡模型简单实用,被广泛应用于水资源管理,特别是水库规划设计和运行调度、流域中长期水文模拟、水资源供需分析以及气候变化对大尺度区域水资源影响评估等方面。

1.3.2 地表水-地下水耦合模型方面

Smith 和 Woolisher(1971)建立了坡面流、河道、截留损失及渗透损失的解析解耦合模型,Senarath 等(2000)提出了二维坡面流模型计算蒸散发损失,并用解析解法计算渗透损失。Pinder 和 Sauer(1971)、Govindaraju 和 Kavvas(1991)、Singh 和 Bhallamudi(1998)、探索了地表水、坡面流及河道之间的关系,以便确定流域对此的综合响应。虽然,耦合解求解困难,且可信程度差,但是 VanderKwaak 和 Loague(2001)仍然提出了一种完全隐含式的地表水、地下水耦合模型。Liang 和 Lettenmaier(1999)将一维动态的地下水参数作为地表水模型中水面深度的函数,实现地下水与地表水模型的耦合,Gunduz 和 Aral(2003)将一维的地表渠系水流与三维的非稳定变饱和地下水模型进行耦合,Kollet 和 Maxwell(2006)提出了一种不基于假想界面交换通量的方法,将地表水模块作地下水模块的上部边界条件,实现两者耦合。

国内地下水、地表水耦合模型发展较晚,但是速度很快。蒋业放和鲁静(1994)建立了含水层水流模型及河流水量均衡模型,模型运转结果表明,所建模型能正确模拟地表水与地下水相互转换过程。易云华等(1995)论述水文地质条件对河流-含水层相互作用的影响,建立河水与地下水的耦合系统模拟模型,并做实际应用。李致家和谢悦波

(1998)通过河道四周地下水流与河道水流的交换量将河道水流一维不稳定流有限差分的迭代方程与地下水的有限元数值法耦合起来,计算结果表明,模型的设计是合理的。蒋业放和张兴有(1999)提出了河流-含水层相互作用的水力耦合模型,应用结果表明模型能够较准确的模拟河流-地下水系统的水量平衡与动态变化过程。潘世兵等(2002)将地表水与地下水转化量计算模型统与三维地下水数值模型完全耦合,能够预测在有人工干预条件下,地表水与地下水转化量的变化趋势。谢新民等(2002)提出一种基于“四水”转化水文模型和地下水数学模拟模型的二元耦合模型,应用到实践中,取得了较好的效果。武强等(2005)提出了地表河网与地下水流耦合模拟算法,可用于地表水与地下水转化关系较密切地区的水资源综合评价中。胡立堂等(2007)归纳了国内外地表水和地下水相互作用定量计算的基本方法,评述了国内外主要的集成模型并对其进行了分类;并基于水动力学基础建立了地表水和地下水集成模型,计算结果符合实际。邓洁、魏加华建立了一维明渠流和三维非稳定地下水耦合控制方程,并应用在美国佛罗里达南部地区(胡立堂,2008)。刘路广和崔远来(2012)通过改进 SWAT 模型的稻田及早作物水分循环、蒸发蒸腾量和渠系渗漏计算等模块,建立了灌区地表水分布式模拟模型;以 SWAT 模型中的水文响应单元(HRU)和 MODFLOW 模型中的有限差分网格(cells)作为基本交换单元,将改进 SWAT 模型的地下水补给量计算值加载到 MODFLOW 模型的地下水补给模块,实现了灌区地表水-地下水分布式模拟模型的耦合。王喜华(2015)针对三江平原超采地下水大力发展灌溉农业,地表水利用率不高,导致地下水位持续下降以及湿地退化等资源与生态环境问题,建立地下水-地表水联合模拟模型,对不同的水资源开发方案进行模拟分析,确定合理的地下水-地表水联合调控方案。

1) 耦合模型分类及存在的问题

根据不同的标准,耦合模型有着不同的分类。根据研究对象的侧重点,耦合模型可分为地表水模型包容地下水模块型、地下水模型包容地表水模块型、地表水和地下水模型双向兼容型。根据地表水和地下水模型的耦合计算方法可分为分离型、相关分析型、线性入渗/排泄型、线性水库型和达西定律型五类。根据模型耦合方式的不同,可分为松散耦合型、半松散耦合型和紧密耦合型,也可分为边界条件型、交换量型、水文分割型。按模型的求解方法分类,可分为水均衡法模型、解析模型、数值模型(王蕊等,2008;曾献奎,2009)。

现有的地表水-地下水耦合模型存在以下几方面的问题:一些耦合模型在耦合机制的处理上存在过多的假设或简化,造成耦合模型失真;一些耦合模型仅是针对某个地区或者某个特定问题,不具有普遍适用性;多数耦合模型对数据种类及数量要求高,存在一些缺乏物理意义的参数,参数的率定和运行耗时较大,对计算机要求高;多数模型用大小固定不变矩形网格刻画流域各水文系统特征,不能充分反映河岸及地势变化剧烈地区的水文特征。

2) 典型模型介绍

SWATMOD 模型耦合了美国农业部农业研究局开发的半分布式水文学模型 SWAT 和美国地质调差局开发的 MODFLOW 模型。SWATMOD 模型将从陆地水文学角度建立

的概念性水文模型和从水文地质学角度建立的地下水动力学模型相结合,能够更充分地利用水文气象和水文地质资料,而且耦合模型可以在两类模型中取长补短(赵振国等, 2012),如: SWAT 本身含有对地下水的描述,但并不能较准确反映河流与含水层之间的相互关系以及地下水抽水井的分布,用 MODFLOW 取代 SWAT 地下水模块,就能很好地解决这些问题。SWAT 也能为 MODFLOW 提供更加准确的蒸散发、入渗补给量等的空间分布信息。

MODBRNCH 模型是 Swain 在 1994 年提出的,它耦合了一维明渠不稳定地表水模型 BRANCH 和三维地下水流模型 MODFLOW,对河流-含水层相互作用的模拟功能比 MODFLOW 更完善。此外,MODBRNCH 中地表水和地下水模拟的时间尺度可以不一致,地下水的时间尺度可以是地表水时间尺度的好几倍,这样可适当减少需要收集的数据量(胡立堂, 2008)。

MIKE-SHE 系列模型是在 SHE 模型的基础上发展起来的,是一个综合性的、确定性的且具有物理意义的分布式水文模型。它能够模拟陆地水文循环中几乎所有主要的水文过程,包括水流运动、水质和泥沙输移,可以解决与地表水和地下水相关的资源 and 环境问题。MIKE-SHE 模型采取较严格的水动力学瞬变微分方程描述水文过程,具有很好的物理基础,但需要大量精确的参数和数据,因此建立和率定模型非常耗时,而且需要很深的专业知识,使模型在推广中面临很多困难。此外,因为对土壤水流采取了一维垂直流的简化,它不太适用于求解坡面坡度过大的水流模拟(Sandu and Virsta, 2015)。

HydroGeosphere 软件是由加拿大 Waterloo 大学、Laval 大学和 Hydrogeologic 公司联合研制开发的地下水、地表水耦合模拟软件。HydroGeosphere 软件包括两部分:地下水模块(FRAC3DVS)和地表水模块(MODHMS),它能够全面耦合的模拟赋存于孔隙介质、裂隙介质、双重联系介质中的地下水、地表水的水流运动,溶质运移和热量传递的三维过程。HydroGeosphere 软件通过有限元法或有限差分法求解耦合的数学模型,具有先进的迭代技术和强大的计算功能,能够方便设置合适的时间段以及输出选项,还具有强大的三维可视化功能。HydroGeosphere 软件在饱和、非饱和区域对地表水、地下水进行了完全的耦合,利用有限元对研究区内的水流方程同时求解,有效地提高了模型对整个水文系统的代表性。同时,模型内部还计算流域内每个时间步长、每个节点处地表水、地下水的交换速率。另外,在确定的蒸发区域内,实际的蒸散发过程作为节点土壤水分的函数在每个时间点进行了计算。在同一个模型内耦合蒸散发过程、地表水、地下水水流计算,虽然增加了模型的复杂程度,但是提高了预测结果的可靠程度(Ebel and Loague, 2006),同样也增加了参数识别所需要的观测数据。由于同时使用地表水、地下水的观测数据识别参数,使得参数的范围比较容易控制,并且降低了水量平衡项计算的不确定性,特别是地表水、地下水之间的相互关系(Goderniaux et al., 2009)。

目前,HydroGeoSphere 耦合模型得到了越来越多的重视,但是由于计算过程需要较大的计算机资源,多数的研究主要局限在小流域及短时间尺度上。例如, Sudicky 等(2008)将模型应用到 75km^2 的流域上,有限元网格节点数超过了 600000 个,非稳定流模拟耗时近一个月。Li 等(2008)将 HydroGeoSphere 应用到流域面积为 286km^2 的

Duffins Creek 流域,目的是检验 HydroGeoSphere 模型对于大流域在不均匀降雨下的三维响应过程的模拟能力,其结果表明虽然模型能够重现地表径流的年平均变化过程,但是不能完全捕捉到流量过程变化的细节。另外,在不同年份使用此模型时,需要对蒸发参数进行调整,这也就降低了利用现有模型形式对于未来气候下流域水文过程的模拟能力。Goderniaux 等(2009)利用 HydroGeoSphere 模型模拟 A2 情形下六种区域气候模式下,流域面积为 465km^2 的 Green basin 2010 年到 2100 年地下水的动态变化,这对 HydroGeoSphere 模型应用在时间尺度上是一个新的挑战。结果显示,地表水-地下水耦合模型、空间变化的蒸散发过程及复杂气候变化情形的联合应用,增加了模型的可靠性,同时预测了气候变化对于地下水的影响。Colautti(2010)利用 HydroGeoSphere 模型模拟大气环流模式下 5 个气候情形对面积为 6700km^2 的 Grand River 流域地表水、地下水的影响。Wiebe 等(2015)利用 HydroGeoSphere 模型对芬兰的 Pyhäjärvi 湖进行了水平衡分析计算,评估了地下水所占的比重。

HydroGeoSphere 在我国近些年有所进展。龙玉桥(2008)针对大凌河中游修建白石水库所导致的地下水水位不同程度的下降,个别地区出现了地面沉降以及滨海地区的海水入侵等现象,基于有限元方法的 HydroGeoSphere 软件对建立研究区水循环的概念模型和数学模型进行求解,结合二分法和 ArcGIS 软件得到白石水库的最小下泄流量。曾献奎(2009)综合考虑凌海市大、小凌河扇地内的各种水文及水文地质条件,建立研究区地下水-地表水水流及溶质运移耦合模拟模型,流域面积为 918.564km^2 ,利用 HydroGeoSphere 软件对区内的水流及总氮浓度进行模拟分析及预测。黄勇等(2009)基于 HydroGeoSphere 模型,采用等效连续介质模型和耦合模型来模拟裂隙岩体中的水流和溶质运移规律,并对两种模型的模拟结果进行了对比。模型的预测结果显示,采用耦合模型而不是等效连续介质模型预测的结果与实测数据拟合较好。刘派(2011)将 HydroGeoSphere 模型应用在吉林西部地区,流域面积为 47074.5km^2 ,用时间序列方法对研究区未来 15 年的源汇项进行预报,将预报结果代入到模拟模型中,计算得到 2001 年到 2015 年的地下水水位分布情况。同时,灵敏度分析法计算水文地质参数对模拟模型的影响程度,得到敏感性较大的参数和参数分区。李析男(2011)以河南省陆浑水库的栾川站为例,建立地表水-地下水耦合模型,对伊河流域栾川站进行洪水预报,对洪水期土壤水量的变化进行模拟,探讨不同时刻洪水主要水源形式,如地表径流、壤中流和地下径流。王志杰(2012)应用 HydroGeoSphere 模型对呼伦湖进行了深入的研究。

1.4 气候预测模型研究的主要进展

气候变化情景是建立在一系列科学假设基础之上的,对未来气候状态时间、空间分布形式的合理描述。虽然气候模拟已取得了相当的成就,但存在着不少缺陷。目前还没有一个模式能包括各种气候组成部分以及它们之间存在着种种相互作用。我国短期气候预测的对象主要是月和季尺度的降水量和气温,特别是关系我国国民经济的汛期降水量的预测,一直是我国气象工作者的重要研究课题。近年来,尽管气候动力模式研究取