

鄱阳湖水文情势变化研究

© 张奇 等 著



科学出版社

鄱阳湖水文情势变化研究

张 奇 等 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

受气候变化,特别是人类活动的强烈影响,长江中游通江湖泊鄱阳湖水文情势近 10 多年来发生了巨大的变化。本书就鄱阳湖及其流域的基本属性和 2000 年以来新的水情问题进行阐述(第 1 章和第 2 章);基于地面站点长序列气象水文观测数据,对鄱阳湖及其流域气象水文要素的变化特征进行分析(第 3 章和第 4 章);发展了鄱阳湖及其流域的水文水动力模拟方法(第 5 章),并运用模型对湖泊干旱和洪水等极端水文事件的成因进行解析(第 6 章和第 7 章);本书还就湿地植被分布及水文变化对湿地植被水分利用的影响进行了模拟研究(第 8 章和第 9 章);运用气候水文模型,预估未来气候变化影响下流域产水的变化及湖泊水量的可能变化态势(第 10 章);本书的第 11 章是对全书的总结和进一步研究的展望。

本书内容涉及气候学、水文学、湖泊水动力学、湿地生态水文学等,可作为高等院校本科生、研究生和科研人员的参考书目使用。

审图号:赣 S(2018)056 号

图书在版编目(CIP)数据

鄱阳湖水文情势变化研究 / 张奇等著. —北京:科学出版社, 2018.6

ISBN 978-7-03-057957-7

I. ①鄱… II. ①张… III. ①鄱阳湖-水文情势-研究 IV. ①P344.256

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 131408 号

责任编辑:王腾飞 沈 旭 冯 钊 / 责任校对:杨聪敏

责任印制:张克忠 / 封面设计:许 瑞

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>

三河市春园印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018 年 6 月第一次印刷 印张:13

字数:309 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

长江中下游是我国最发达的地区之一，人口密度大，城镇化程度高。社会经济的快速发展使河湖水资源的开发强度日益增大，同时，伴随着水质下降和水生态恶化等问题的产生，严重制约了区域的可持续发展。鄱阳湖是长江中游的淡水湖泊，至今仍保持着与长江的自然连通，是为数不多的典型的通江湖泊之一，在调节长江洪水、维持长江中下游水资源供水等方面具有不可替代的作用。鄱阳湖湿地面积巨大，是候鸟等珍稀动物的重要栖息地，已被列入了国际重要湿地名录。鄱阳湖的湖泊水域和洲滩湿地共同组成了鄱阳湖独特的湖泊湿地生态系统，在湿润区具有典型性。因此，鄱阳湖是中国生态系统研究网络的代表性生态系统，也是“国际地圈生物圈计划”和全球生命湖泊研究网络的重要研究区。受气候变化和人类活动的影响，鄱阳湖的水文情势正发生着巨大的变化。尤其是 2000 年以来，受流域和湖区强人类活动的干扰和长江上游大型水利工程（如三峡水利工程）的影响，鄱阳湖与流域和长江的水文关系发生了改变，引起鄱阳湖水量平衡关系的变化，表现为湖泊枯水期水位持续偏低、枯水期提前、汛后水位消退加速等干旱化现象，给湖区生产生活带来了巨大的挑战。同时，鄱阳湖洪水频发，严重威胁湖区人民的生命和财产安全。21 世纪以来鄱阳湖水情的巨大变化及其引发的一系列生态和环境问题引起了政府、学术界和民众的高度重视和普遍关注。因此，迫切需要认识鄱阳湖水情变化的影响因子、驱动机制及未来发展趋势，以便采取合理的调控措施，来减缓气候变化带来的影响，科学管理湖泊资源的人为开发，维护鄱阳湖水量和水生态安全，保障区域社会经济的发展。

国家科学技术部于 2012 年启动了国家重点基础研究发展计划（973 计划）“长江中游通江湖泊江湖关系演变及环境生态效应与调控”（项目编号：2012CB417000）。该项目以长江中游及洞庭湖和鄱阳湖为研究区，重点就江湖关系的历史演变、江湖关系变化对两湖水文情势、水环境和水生态的影响、江湖关系的优化调控等方面开展研究。项目由中国科学院南京地理与湖泊研究所主持，分六个课题实施，于 2016 年结题。《鄱阳湖水文情势变化研究》一书的内容来源于由中国科学院南京地理与湖泊研究所张奇研究员主持的第三课题“江湖水情与极端水文事件对江湖关系变化的响应”（课题编号：2012CB417003）的相关研究成果。该书重点总结归纳了鄱阳湖干旱和洪水等极端水文事件对江湖关系变化的响应等核心研究成果。围绕鄱阳湖水文水动力过程和湖泊水量平衡关系，就流域气候水文过程、长江径流过程、湖盆变化等对鄱阳湖水情的影响机制开展了深入的研究，重点阐明了 2000 年以来鄱阳湖水情变化的驱动机制，辨析了不同时间尺度上的主控因子，解释了鄱阳湖极端水文事件的成因，评估了三峡工程运行、湖区人类活动、流域气候变化等的影响程度，对客观认识鄱阳湖干旱和洪水发生机制均具有重要的参考价值。该书还就鄱阳湖湿地植物时空演变与水文的关系及鄱阳湖水情变化对湿地水分循环的可能影响进行了阐述，揭示了鄱阳湖洲滩湿地地下水埋深对植物耗水的影响，对认识湿润区地下水与湿地植物的

相互作用机制具有重要的价值。针对未来气候变化的影响,模拟预测了鄱阳湖水量的可能变化趋势,为湖泊水资源的合理开发和长江-湖泊-流域的综合管理提供了重要依据。该书重点归纳了数学模型的研发及应用,主要包括流域地表径流-地下水耦合的分布式水文模型、湖泊水动力模型和湿地生态水文模型,涵盖了鄱阳湖流域-湿地-湖泊系统的水文与水动力过程。这些模型的研发及其联合使用发展了大型通江洪泛型湖泊的生态水文和水动力耦合模拟方法,为其他类似河湖水系统的模拟提供了重要借鉴。

鄱阳湖由于其重要地位及其河-湖-江复杂多变的水文连通性,长期以来一直是学术界的研究热点。论文计量分析显示,自2000年以来,以鄱阳湖为主题的SCI研究论文每年的发文量呈逐年上升的趋势,特别是2010~2016年每年以45%的增长率递增,显示了其持续增长的热度。该书以鄱阳湖水文为主题对最新的研究成果进行了系统的总结,反映了近期关注的热点问题,是对已有文献的重要补充。书中翔实的数据、综合的研究方法和主要结论为后续研究提供了重要基础。

中国科学院南京地理与湖泊研究所依据中国科学院“一三五”战略部署,将长江中游河湖水系及流域作为长期的研究基地。近年来,依托中国生态系统研究网络鄱阳湖湖泊湿地观测研究站和中国科学院流域地理学重点实验室等平台,取得了丰硕的成果。该书的出版对丰富相关研究积累、进一步推动流域地理学研究具有积极的作用。希望该书对长期关注长江中游湖泊研究的读者有所帮助。



2017年12月15日

前 言

鄱阳湖位于长江中游,是我国第一大淡水湖泊。汛期湖泊面积为 3000km^2 ,蓄水量可达 149.6亿 m^3 ,水质优良,是我国宝贵的淡水资源。在鄱阳湖枯水期,随着水位的下降,湖泊面积缩小为不足 1000km^2 ,形似河流。湖泊水面积的季节性变化形成了大面积的洲滩湿地,这些洲滩湿地受洪水水位上涨淹没和水位消退出露这一自然节律的作用,孕育了丰富的湿地植物,也是众多珍稀动物的栖息地。鄱阳湖生态系统由水域和洲滩湿地组成,两者相互作用、相互依存,生态系统完整而独特,是一个具有全球意义的生态宝库,已被列入了国际重要湿地名录。鄱阳湖至今仍保持着与长江的自然连通,在长江中下游洪泛平原湖群中具有典型性和代表性。

鄱阳湖来水主要是流域径流和湖面直接降水,而水面蒸发、湿地植物耗水和向长江排泄则是其主要的水量损失途径。鄱阳湖流域面积巨大,由赣江、抚河、信江、饶河和修水五个子流域组成,面积为 16.2万 km^2 。流域海拔空间变化大,范围由山区的 2200m 变化到湖区的 30m 。流域城镇化程度不高,森林和灌木面积占流域总面积 71% ,农作物种植面积占 25% ,其余少量为草地、城市和水体。鄱阳湖流域为亚热带气候,降水量丰沛,多年平均年降水量为 1654mm ,其中 55% 的降雨发生在 $3\sim 6$ 月。年均潜在蒸散发量为 1049mm ,其中 $5\sim 9$ 月为蒸散发量最大的季节。

自 2000 年以来,鄱阳湖水文情势发生了显著变化。长序列多年平均观测数据显示,2000~2010 年湖泊水位总体低于 1953~2010 年的平均值,其中 10 月、11 月下降最为明显。而 1990~2000 年由于受洪水影响,湖泊水位总体高于多年平均值,其中 7 月和 8 月最为明显。2000 年后湖泊趋于干旱的特征对湖泊用水和水环境水生态带来了一定的影响。同时,鄱阳湖湖区仍然洪水多发,可谓洪旱并存。受气候变化和人类活动的影响,洪旱等极端水文事件越加频发,且两极分异趋势越发严重。鄱阳湖水情的变化,尤其是 2000 年的趋枯特征以及由此引发的水环境水生态恶化现象,引起了公众、政府和学术界的关注和重视。国家科学技术部于 2012 年立项启动的国家重点基础研究发展计划(973 计划)“长江中游通江湖泊江湖关系演变及环境生态效应与调控”(项目编号:2012CB417000),以长江中游及洞庭湖和鄱阳湖为研究区,重点研究江湖关系的演变、江湖关系变化对两湖水文情势、水环境和水生态的影响机理、江湖关系的优化调控等。项目分六个课题实施,于 2016 年结题。本书的内容主要依据中国科学院南京地理与湖泊研究所张奇研究员主持的第三课题“江湖水情与极端水文事件对江湖关系变化的响应”(课题编号:2012CB417003)的相关研究成果。本书的部分内容还来自于国家自然科学基金项目“季节性受淹湖泊洲滩湿地水文与植物相互作用机制研究”(项目编号:41371062)和江西省重大生态安全问题监控协同创新专项研发“鄱阳湖湖泊流域水文过程与湖泊水量变化的模拟研究”(专项任务编号:JXS-EW-10)的相关研究成果。本书的主要内容包括鄱阳湖流域气象水文要素的

时空演变、鄱阳湖低枯水位演变及发生机制、鄱阳湖洪水演变及发生机制、鄱阳湖湿地植物空间分布及其与水文要素的关系及鄱阳湖水情未来变化趋势预测等。全书尽可能系统地反映目前关注的关于鄱阳湖水文的热点问题，并提出明确的结论。本书发展了湖泊与流域的水文水动力联合模拟方法，体现了统计计算、遥感反演、模型模拟的有机结合，对相关大湖流域的研究具有重要的参考价值。本书成果得到中国科学院流域地理学重点实验室和中国科学院鄱阳湖湖泊湿地观测研究站的支持；得到了挪威奥斯陆大学许崇育院士、南京大学许有鹏教授、河海大学李致家教授和陈喜教授、中国科学院南京地理与湖泊研究所杨桂山研究员和王苏民研究员等众多同事、同行的指导。在此，一并表示衷心感谢。

本书由序、前言和十一个章节组成。前言由张奇撰写；第1章由张奇、李相虎、李云良撰写；第2章由谭志强、许秀丽、张小琳撰写；第3章由张丹、叶许春撰写；第4章由李梦凡、李云良撰写；第5章由李云良、姚静撰写；第6章由姚静、张奇、郭华撰写；第7章由李相虎、叶许春撰写；第8章由谭志强撰写；第9章由许秀丽、林欢撰写；第10章由李云良撰写；第11章由姜三元、张丹、张奇撰写；张奇负责全书的构思和最终审核。

希望本书对长期从事鄱阳湖研究的同行有所借鉴。需要指出的是，本书只限于张奇课题组的研究，内容的疏漏和不足之处，恳请读者指正。

张 奇

2017年12月15日

目 录

序	
前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 鄱阳湖水问题	1
1.2 国内外研究进展	4
1.2.1 湖泊水文情势变化主要影响因素	4
1.2.2 湖泊系统水文情势变化研究方法	5
1.2.3 鄱阳湖水文情势变化及影响因素研究	9
1.3 小结	10
参考文献	10
第 2 章 鄱阳湖及其流域概况	15
2.1 引言	15
2.2 流域基本特征	15
2.2.1 地质地貌	15
2.2.2 气候水文	16
2.2.3 社会经济	18
2.3 湖区基本水情	20
2.3.1 湖泊水位	20
2.3.2 湖泊水面积	22
2.3.3 湖流	23
2.4 湿地生态水文	26
2.4.1 湿地水文	26
2.4.2 湿地土壤	28
2.4.3 湿地植被	30
2.5 小结	32
参考文献	33
第 3 章 鄱阳湖流域气象水文要素时空变化	34
3.1 引言	34
3.2 鄱阳湖流域气象因子变化	34
3.3 鄱阳湖流域蒸发及影响因素	36
3.3.1 蒸发皿蒸发量	37
3.3.2 蒸发皿蒸发量变化影响因素	38

3.3.3 湖泊水体对蒸发皿蒸发量的影响	41
3.4 鄱阳湖流域径流量变化与影响因素	42
3.4.1 “五河”径流量	42
3.4.2 径流量变化影响因素的经验判别	44
3.4.3 径流对气候变化和人类活动响应的区分	45
3.5 小结	48
参考文献	49
第4章 鄱阳湖水情要素变化特征	50
4.1 引言	50
4.2 鄱阳湖水位变化特征	50
4.2.1 水位周期性分析	53
4.2.2 水位突变检验	55
4.3 鄱阳湖水面积变化特征	56
4.3.1 水面积周期性分析	59
4.3.2 水面积突变检验	60
4.4 2000年以来鄱阳湖水文情势变化特征	61
4.4.1 水位分析	61
4.4.2 水面积分析	68
4.5 小结	70
第5章 鄱阳湖湖泊流域水文水动力模拟	72
5.1 引言	72
5.2 水文水动力联合模拟基本思路	72
5.3 水文水动力数学模型	73
5.3.1 流域分布式水文模型构建	73
5.3.2 未控区间入湖径流模型	76
5.3.3 湖泊水动力模型构建	77
5.4 模型率定与验证	80
5.4.1 率定方法与参数	80
5.4.2 率定与验证结果	82
5.5 模拟结果分析	87
5.5.1 湖泊水位	87
5.5.2 流速场	89
5.5.3 换水周期	92
5.5.4 长江的倒灌效应	94
5.6 小结	97
参考文献	98

第 6 章 鄱阳湖低枯水位演变及发生机制	100
6.1 引言	100
6.2 鄱阳湖低水位演变趋势	100
6.2.1 鄱阳湖低水位年际变化趋势	100
6.2.2 鄱阳湖低水位季节变化趋势	101
6.3 流域和长江对鄱阳湖低枯水位的影响	103
6.3.1 三峡水库运行对长江干流径流的影响	103
6.3.2 长江和流域“五河”对 2000 年来鄱阳湖低枯水位的影响	107
6.3.3 鄱阳湖典型年枯水事件成因辨析	107
6.4 湖盆地形变化对鄱阳湖低枯水位的影响	112
6.4.1 近 30 年鄱阳湖地形变化特点	113
6.4.2 基于不同年代地形的水动力模型构建	114
6.4.3 地形变化对水位和流量的影响	115
6.5 小结	120
参考文献	121
第 7 章 鄱阳湖洪水演变及发生机制	122
7.1 引言	122
7.2 鄱阳湖洪水演变及影响因素	122
7.2.1 鄱阳湖高洪水位年内分布	122
7.2.2 鄱阳湖洪水特征年际变化	124
7.2.3 鄱阳湖洪水特征年代际变化	127
7.2.4 鄱阳湖洪水的影响因素	130
7.3 流域“五河”和长江对鄱阳湖洪水影响的模拟	135
7.3.1 模拟情景构建	135
7.3.2 对鄱阳湖丰水期不同月份水位的影响	136
7.3.3 对鄱阳湖丰水期水位空间分布的影响	139
7.3.4 对鄱阳湖高洪水位持续时间的影响	141
7.4 小结	142
参考文献	142
第 8 章 鄱阳湖湿地植被空间分布与演变	144
8.1 引言	144
8.2 主要地物类型	144
8.3 优势植物群落空间分布的高程特征	147
8.3.1 优势植物群落的主要分布高程	147
8.3.2 优势植物群落分布高程的空间差异	149
8.4 优势植物群落空间分布的水位特征	151
8.5 湿地植被演变特征及其对水位波动的响应	155

8.5.1 湿地植被演变特征 155

8.5.2 植被面积变化对水位波动的响应 158

8.6 小结 159

参考文献 160

第 9 章 鄱阳湖湿地典型植被群落界面水分传输过程 162

9.1 引言 162

9.2 地下水-土壤-植被-大气系统水分传输过程 162

9.2.1 数学模型的构建 162

9.2.2 模型的率定和验证 166

9.2.3 GSPA 系统界面水分运移 168

9.3 植物群落生态需水的情景模拟 174

9.3.1 地下水位变化 174

9.3.2 降水量变化 176

9.3.3 气温变化 177

9.4 小结 178

参考文献 179

第 10 章 鄱阳湖水文情势未来变化趋势预估 180

10.1 引言 180

10.2 气候-水文模式与校验 180

10.2.1 气候变化研究方案 180

10.2.2 气候数据偏差校正 181

10.2.3 水文模型验证 182

10.2.4 水位预测模型 184

10.3 流域径流未来变化趋势 186

10.3.1 降水和气温变化 186

10.3.2 流域“五河”入湖径流变化 187

10.4 湖泊水位变化 190

10.5 小结 191

参考文献 191

第 11 章 结语与展望 193

11.1 结语 193

11.2 展望 196

第1章 绪 论

1.1 鄱阳湖水问题

长江是中国第一大河，世界第三大河。它不仅是中华文明的发源地之一，也是当代中国经济社会发展的重要命脉。长江干流自西而东横贯中国中部，数百条支流辐辏南北，流域面积达 180 万 km²，约占中国陆地总面积的 19%，加之备受世界瞩目的三峡水库的建设与运行，使长江流域水问题受到了全世界的高度关注。而长江中下游地区水系特别发育，支流众多，河网发达，河湖关系典型且复杂（《中国河湖大典》编纂委员会，2010）。同时，该地区湖泊密布，湖泊总面积可达 15200km²，约占全国湖泊总面积的 1/5。历史上这些湖泊均与长江自然连通，形成了自然的江、河、湖复合生态系统（杨桂山等，2009，2011）。我国最大的两个淡水湖泊鄱阳湖和洞庭湖即位于此，至今仍保持着与长江自然相通的状态（图 1-1）。

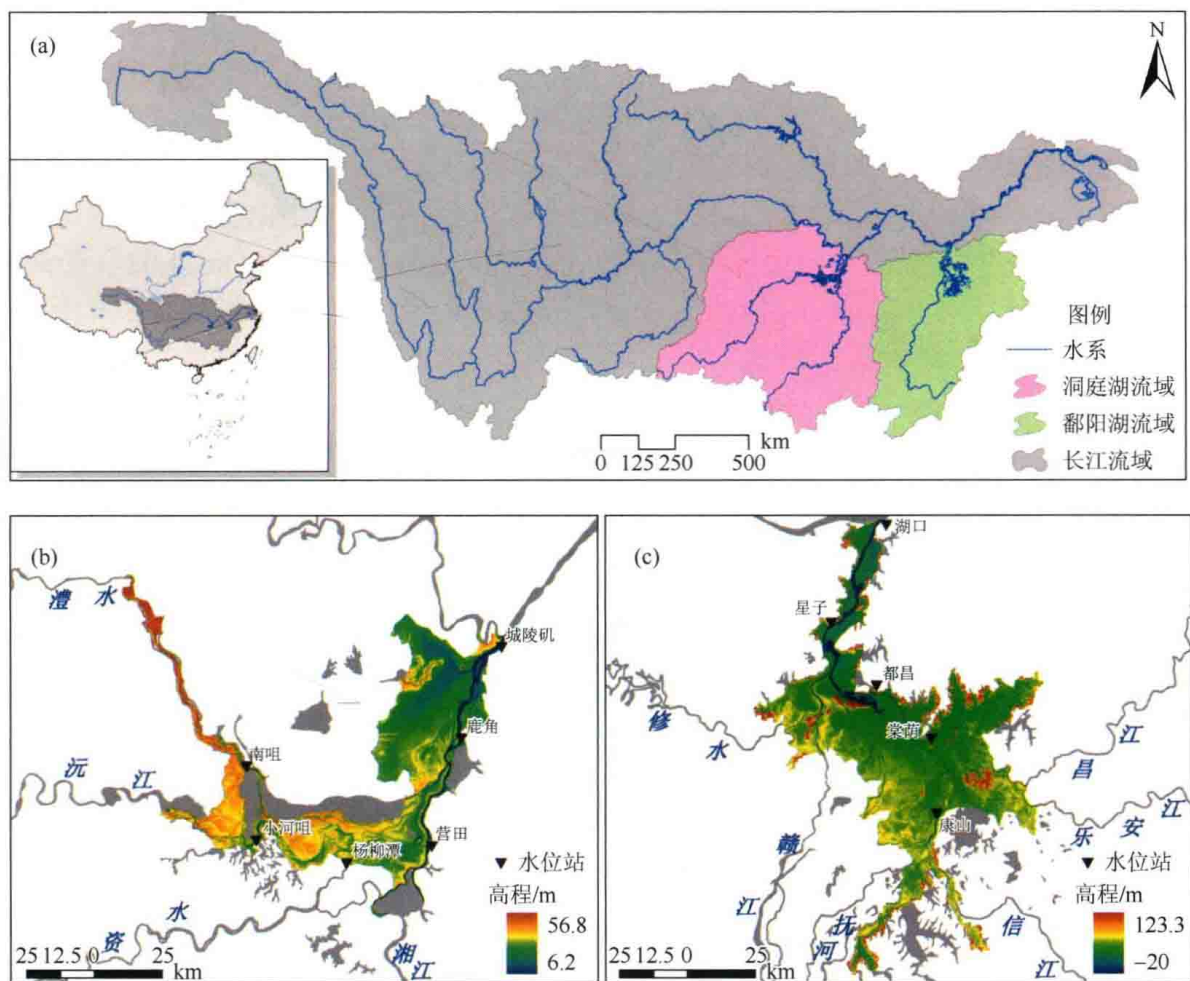


图 1-1 长江中下游地区两个大型通江湖泊分布示意图

鄱阳湖是我国第一大淡水湖泊，它承纳赣江、抚河、信江、饶河、修水（简称流域“五河”）及环湖区间来水，经湖盆调蓄后由湖口北注长江，形成了完整的鄱阳湖水系（图 1-2）。鄱阳湖流域面积为 16.2 万 km²，约占长江流域总面积的 9%，年均径流量是长江流域年均径流量的 16.3%，每年注入长江的水量超过黄河、海河、淮河的径流总量，承担着保障长江中下游水安全和生态安全的重要使命（胡振鹏，2009；郭华等，2012）。鄱阳湖是一个季节性吞吐型湖泊，其水情变化受流域“五河”与长江的双重影响，水位年内变幅巨大，为 9.79~15.36m，而年际间差异更大，最高水位和最低水位差可达 16.68m（崔奕波和李钟杰，2005；揭二龙等，2007）。水位的这种巨大变幅，形成了鄱阳湖“洪水一片，枯水一线”的独特景观（朱海虹和张本，1997）。

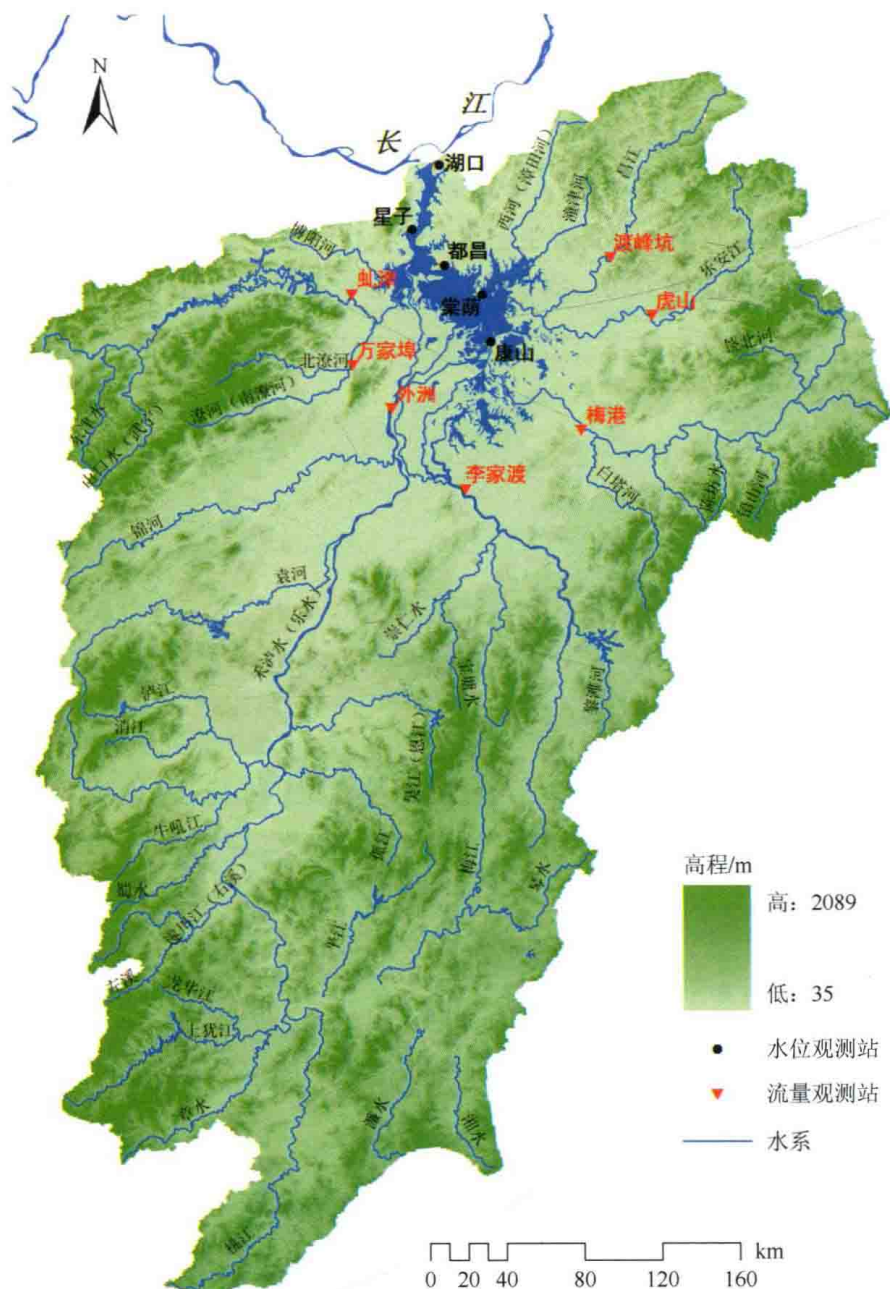


图 1-2 鄱阳湖流域主要水系分布示意图

20 世纪 80 年代以来,鄱阳湖流域社会经济快速发展,大型水利工程建设不断推进,改变了流域的下垫面特性以及鄱阳湖与周围水系的水量交换关系。加之全球升温引起的气候反常,进一步加剧了鄱阳湖流域水量平衡关系的变化(Zhang et al., 2012),使鄱阳湖的极端水情频繁出现,洪旱灾害频发,严重危及湖区人民的生命财产安全,制约着湖区社会经济的发展(闵騫, 2002)。据资料统计,1983 年鄱阳湖洪水湖口水位达 21.71m,超过了 1954 年特大洪水时的 21.68m,滨湖地区 108 座圩堤溃决,427km² 农田被淹没。而至 90 年代,鄱阳湖洪水发生的频率和强度更是显著增加,大的洪涝灾害就有 4 次(1995 年、1996 年、1998 年、1999 年),比历史上任何时段都更为频繁(闵騫, 2002)。其中,1998 年特大洪水湖口实测水位最高达 22.59m,为有记录以来的最高水位,造成沿湖区的湖口、星子、德安等城市严重受淹,138 座圩堤溃决,460km² 耕地被淹没,受灾人口达 60 多万,江西省洪灾直接损失达 376 亿元(朱宏富等, 2002)。同时,鄱阳湖区的干旱灾害也异常严重,1992 年、1996 年该区域都经历了罕见的干旱。进入 21 世纪,鄱阳湖干旱发生的强度和频度都有明显的增加,2003 年、2006 年和 2007 年枯水期都发生了持续枯水事件。2007 年 12 月,湖区内都昌水文站的水位曾连续 20 多天低于历史最低水位,鄱阳湖几近枯竭,导致湖区水草和芦苇大面积枯死,严重危及鄱阳湖湿地的生态安全,造成湖区成千上万居民的用水困难。而 2009 年 2 月 2 日鄱阳湖湖口水位跌破 8.0m,创下有实测水文资料以来历史同期最低水位纪录(刘元波等, 2012)。鄱阳湖的干旱问题已引起了 *Nature* 等国际一流刊物的关注(Lu et al., 2011; Qiu, 2011)。

鄱阳湖的洪水、干旱问题固然主要受区域气候变化的影响,但强烈的人类活动干扰,也进一步加剧了洪旱灾害的严重程度。据《长江保护与发展报告 2011》数据,鄱阳湖因围垦,湖泊面积已由中华人民共和国成立初期的 5200km² 急剧减少到 2933km²,湖泊容积减少了 80 亿 m³。湖泊面积和容积的减少直接导致湖泊洪水调蓄功能下降,在相当程度上引发了江湖洪水位的不断抬升、最高洪水位的不断突破。1998 年长江流域特大洪水之后,国家在以往防洪减灾经验教训的基础上,及时提出了“平垸行洪、退田还湖”等长江流域洪水治理的 32 字方针。据《长江保护与发展报告 2009》统计,1998 年洪水之后,鄱阳湖退还湖面积 880km²,增加蓄洪容积约 49.1 亿 m³。平退工程的实施,对扩大鄱阳湖地区洪水调蓄能力,无疑将起到一定的作用。另外,以三峡工程为核心的水利工程的建设大大提高了长江中下游地区的防洪标准和防洪能力。据模型测算,三峡水库建成运行后,若长江流域再遭遇 1998 年规模的洪水,可使鄱阳湖湖口汛期水位下降 0.37m,湖口最高洪水位削减 0.28m,降至 22.25m,低于保证水位 22.5m。但同时,三峡水库的秋季蓄水,却进一步加剧了鄱阳湖日益严重的秋季干旱问题(Zhang et al., 2012),造成鄱阳湖枯水期提前、枯水期水位降低、持续时间拉长,广大洲滩湿地提前出露、出露面积扩大且时间延长等一系列问题。这也使三峡工程遭遇了更为激烈的利弊之争和广泛的社会舆论质疑。

鄱阳湖水文情势的改变也直接影响了鄱阳湖湿地植被的萌发、存活、生长演替及分布格局。湖泊干旱事件使得湿地植被系统正面临着生态退化、演替速率加快、物种多样性减小等一系列威胁(Han et al., 2015)。已有报道发现,连续的低枯水位已经导致湿生植被旱生化、生产力降低、物种多样性弱化等一系列问题(吴龙华, 2007; 余莉等, 2011)。

高水位下降且持续时间缩短使得高位滩地提前出露、淹水时间减少,土壤含水量的降低不能满足植被的生态需水,高位滩地湿地面积破碎化,植被出现明显的矮化和旱化趋势,部分湿生植物被旱生植物所取代成为新的优势种(胡振鹏等,2010)。同时,位于高位滩地的芦苇群落分布面积萎缩,部分低位芦苇滩地被藁草群落所取代,而藁草群落分布面积不断向湖心扩展,挤占沉水植被分布范围(吴建东等,2010),湿地植被的生产力整体下降,其中,藁草群落的生物量下降近 2/3,芦苇-芦荻群落的生物量不足 20 年前的 1/10(吴建东等,2010)。湿地生态系统的退化对候鸟越冬的栖息地和食物来源等也产生了明显的不利影响,同时,也影响到了鱼类的产卵和繁殖,给当地的渔业资源造成了极大的损失,严重制约了湖区经济社会的发展(Kanai et al., 2002; 刘成林等, 2010)。

目前鄱阳湖整体的水环境尚未呈现严重的富营养化情况,但是水质却表现出明显的下降趋势。据水文部门的监测数据,20 世纪 80 年代鄱阳湖水质以 I 类、II 类为主,平均占湖泊总面积的 85%,呈缓慢下降趋势;90 年代仍以 I 类、II 类水为主,平均占 70%,下降趋势有所加快;进入 21 世纪,特别是 2003 年以后, I 类、II 类水只占 50%,而下降趋势急剧增加;到 2006 年后,鄱阳湖水全年优于 III 类的水不到 60%,属于 III 类的约有 20%,劣于 III 类的则逼近 20%。自 2006 年以来鄱阳湖整体上已经呈现出中度营养化的状态,而且近年在部分湖湾已发现有小规模的蓝藻水华出现。

鄱阳湖是一个开放的、江-湖-河相互作用的复杂系统,以资源开发和利用为主的人类活动对该系统的演变起着主导作用。进入 21 世纪后,人类活动的影响更为剧烈,如湖区采砂、污染物排放、三峡工程及上游控制性枢纽工程的建设运行等。强烈的人类活动再叠加气候变化的影响,使鄱阳湖水文情势表现得更为复杂多样,极端干旱事件频发、湖泊萎缩、湖泊水质下降、湿地生态系统结构和功能退化等,这一系列变化引起了国内外科学界和社会舆论的广泛关注,也引起了国家和地方政府的高度重视。而随着长江中游经济带、鄱阳湖生态经济区建设的不断推进和流域开发强度的持续加大,区域气候变化与人类活动叠加对鄱阳湖水文情势和水环境影响的力度也不断增强。因此,迫切需要系统认识人类活动影响下鄱阳湖水文情势变化趋势及其驱动机制,阐明江湖关系改变对鄱阳湖水位、湖泊水量平衡、湖泊水动力场及洲滩湿地生态的影响,揭示洪水和干旱事件关键水文变量对江湖关系改变的响应机制,分辨三峡工程和气候条件对鄱阳湖典型洪、旱灾害的贡献分量,科学解释旱涝事件的成因,提出科学的应对策略,维护鄱阳湖水量和水生态安全,保障区域资源环境与经济社会的协调发展。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 湖泊水文情势变化主要影响因素

湖泊水文情势变化的影响因素可以分为气候变化和人类活动两种因素。近些年来,区分气候变化和人类活动对湖泊水文水资源所带来的影响已成为国际上的一个热门话题,受到了国内外科学和社会各界的高度关注。无论是封闭型还是开放型湖泊系统,湖

泊水位、水面积等要素均是湖泊水文情势对气候变化和人类活动响应的重要指示和表征 (Jones et al., 2001; Lai et al., 2014a)。开展湖泊水文情势变化及其影响因素的研究是深入了解湖泊系统对外部综合环境变化适应能力的重要内容,也是加强对湖泊水情的预警和预防、提高防御和减轻自然灾害能力的重要科学前提。

国内外学者在气候变化和人类活动对湖泊水文情势影响及其贡献区分方面开展了大量的相关研究。目前,关于气候变化对湖泊水文情势影响的研究已相对比较成熟。影响湖泊水文情势的气候因子包括湖区及其流域的降水、气温、蒸发、风速、辐射、湿度等。其中,降水是影响湖泊水文情势的最重要因素,例如,Kebede 等 (2006) 发现塔纳湖水位和湖泊出流量对降雨变化的敏感性要明显高于其他影响因素。气温、蒸发、风速、辐射和湿度等气象要素通过改变湖泊及其流域的蒸发量进而对湖泊水文情势产生影响,如张娜等 (2015) 发现蒸发的显著上升是影响呼伦湖水域面积和水位下降的主要原因。相对于有规律的气候变化,随机的、无序的人类活动对湖泊水文情势的影响较为复杂。影响湖泊水文情势的人类活动包括流域土地利用变化、水库排蓄水、湖泊挖砂、围垦、灌溉等。土地利用和水库排蓄水通过改变入湖径流量从而对湖泊水情产生影响,如 Calder 等 (1995) 指出非洲马拉维湖流域的森林面积下降了 13%,从而使得湖泊水位上升了 1m; 而湖泊挖砂、围垦、灌溉等则直接改变了湖泊的水位和面积,如洞庭湖因围垦使得湖泊面积由中华人民共和国成立初期的 4350km^2 急剧缩小到 2625km^2 (杨桂山等, 2010)。

此外,许多学者对未来变化环境影响下的湖泊水文情势变化进行了预测。将不同温室气体排放情景下的气候模式输出结果,或者不同变化情景下的土地利用变化数据,与流域水文模型相结合,进而预测未来情景下的水文水资源变化是国际上比较公认和最常用的方法 (Watson et al., 1997)。例如, Nash 和 Gleick (1993) 采用几个 GCM 模式,模拟了科罗拉多河流域的气温和降雨变化,并结合 NWSRFS 水文模型,评估了气候变暖条件下科罗拉多河流域的水文循环情况;李帅等 (2017) 基于 CA-Markov 对宁夏清水河流域 2020 年的土地利用进行了预测,并基于 SWAT 水文模型模拟了径流对未来土地利用变化情景的响应。

总的来说,气候变化长期、缓慢地影响着湖泊水量的趋势变化,尤其是对大湖系统更是如此。而人类活动 (土地利用、水利建设等) 通常在短期内就会对湖泊水情造成剧烈影响,进而导致湖泊水量收支状况发生显著变化。研究二者对湖泊水文情势变化的驱动机制是湖泊水文学领域的重要内容。尽管目前很多研究在一定程度上区分了气候变化和人类活动对湖泊水文情势变化的影响,但大多是根据长期水文观测资料使用统计方法作定性分析或估算,其准确度不高,且难以应用于未来变化环境下的湖泊水文情势评估。另外,对于大型的河湖系统,其水文、水动力、物质输移、生态系统之间相互影响、相互制约,动力过程 and 变化机制极为复杂。在以往分割对象和单一过程研究的基础上,亟须开展以整个河湖系统为对象,着手系统进行诸多过程的多尺度耦合与模拟研究,这是今后相当一段时期内湖泊水文学的核心研究内容,也是未来国际发展的趋势。

1.2.2 湖泊系统水文情势变化研究方法

一般来说,湖泊系统的水文联系较为复杂,而伴随的水环境问题也变化多样。流域与

湖泊通常被视为河湖系统中非常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,通过河流向下游传输,而湖泊则扮演了接受者的角色。流域是湖泊的“源”,湖泊是流域的“汇”,而河流则作为一个重要的传输途径,因此,湖泊水、沙及各种营养物质和污染物均主要来源于流域(季振刚, 2012)。湖泊与流域作为一个共同体存在于自然界中,它们之间有着不可分割的相互依存关系,湖泊往往与周围流域地表和地下径流有着密切的水力联系,流域入湖径流组分及其所挟带的物质成分均会影响湖泊水文水动力以及水文情势的变化。归纳起来,湖泊系统水文情势变化的主要研究手段包括统计学方法、水文水动力模拟与遥感水文等。

1. 统计学方法

统计学方法在湖泊系统水文情势变化的研究中得到了非常广泛的应用。由于湖泊系统水文情势具有随着时间发生变化的特点,因此水文情势时间序列的趋势分析、突变点检验、周期诊断、频率分析等是水文情势研究的重要内容(桑燕芳等, 2013)。湖泊系统水文情势研究制作的统计学方法有以下几种。①常用的趋势分析方法有:气候倾向率、Sen's 趋势度、Mann-Kendall (M-K) 非参数检验方法等。值得注意的是,水文时间序列存在明显的自相关性,若序列中存在正自相关性,则序列变化趋势的显著性会被夸大,因此需要在做趋势分析前进行无趋势白化预处理,以消除自相关性的影响(Yue et al., 2002)。②常用的突变点检验方法有:M-K 变点检验、Pettitt 检验、滑动 t 检验、Rodionov 检验等(Liu et al., 2013)。它用于判断湖泊水情序列是否从一个统计特征急剧变化到另一个统计特征。由于突变理论研究还存在很多的争议,因此在使用时建议采用多种方法进行综合分析和判别,并进行严格的显著性水平检验。③常用的周期诊断方法有小波分析、交叉小波和小波相干谱等(孙鹏等, 2011)。小波分析能够从时域和频域揭示时间序列的局部特征,适合研究具有多时间尺度和非平稳特征的水情序列,而交叉小波和小波相干谱可以进一步探索水情要素之间的响应与反馈特征。④频率分析是研究某随机水情变量出现不同数值可能性的大小,它主要用于湖泊水情极值特征的研究(陈永勤等, 2013)。常用的方法包括用于分析单变量特征的 GEV、Gamma、GP 等分布函数,以及用于研究多变量联合分布特征的形式多样的 Copula 函数。

此外,水位-流量曲线、相似年法、多元回归、敏感性分析等方法被用于定性或定量地研究某一要素对湖泊系统水文情势的影响(Guo et al., 2012; Ye et al., 2013; 程俊翔等, 2017; 何征等, 2015)。比如 Guo 等(2012)采用相似年法分析了三峡水库运行对长江与鄱阳湖水量交换的影响;何征等(2015)采用水位-流量曲线分析了近 30 年洞庭湖季节性水情的变化及其对江湖水量交换变化的响应;程俊翔等(2017)基于多元逐步回归模型分析了 1985 年以来洞庭湖水位时空演变的驱动因素。

总的来说,统计学分析方法为我们认识湖泊系统水文情势的趋势、周期、频率以及其影响因素等提供了有效的途径,但真正从机理上揭示湖泊系统的时空演变特征及其影响因素则需要更加系统性的模型来支撑,这是深入理解变化环境下湖泊系统水循环演变规律和正确预测湖泊水量变化的前提。