

---

# 湖泊流域水文学研究现状与挑战

张奇<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 南京地理与湖泊研究所, 中国科学院

流域地理学重点实验室, 江苏 南京 210008;

2. 河海大学 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098)

**【摘要】:** 湖泊蕴含丰富的淡水资源, 是区域发展的重要支撑。气候变化和人类活动加剧全球水资源时空分布差异, 伴随越发频繁的湖泊洪水和干旱问题, 影响区域经济社会用水安全和湖泊生态系统健康。湖泊流域是一个相对独立完整的地理单元, 具有明确的水文边界, 因此, 一直以来是水文研究的理想区域。针对 21 世纪以来湖泊流域新呈现的水文问题, 基于文献调研, 结合长江中游鄱阳湖流域案例, 重点就流域水文极值与湖泊洪旱、湖泊水文对流域植被变化的响应、湖泊流域系统水文水动力集成模拟、湖泊流域水平衡演变及未来变化趋势预测等若干水文问题的研究现状和问题进行阐述, 提出未来拟着重研究的若干主题。研究可望丰富流域水文学和湖泊水文学内容, 对相关学科未来发展提供参考。

**【关键词】:** 湖泊流域 水文学研究 鄱阳湖流域 综述

**【中图分类号】:** P343.3 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)07-1559-15

湖泊是陆地水圈的重要组成, 在全球尺度水分循环、水量调控和物质能量平衡方面起着关键的作用。全球湖泊数量巨大, 面积大于  $0.1\text{km}^2$  的自然湖泊数量为 142 万个, 总面积和总容积分别为  $2.67 \times 10^6\text{km}^2$  和  $181.9 \times 10^3\text{km}^3$ <sup>[1]</sup>。我国湖泊集中分布在长江中下游平原和青藏高原。调查表明, 全国面积大于  $1\text{km}^2$  的天然湖泊 2693 个, 总面积  $81414.6\text{km}^2$ <sup>[2]</sup>。

湖泊流域是指湖泊水体及其集水流域所构成的区域。湖泊流域一般由多个河流子流域组成, 这些河流子流域的边界(分水岭)即为湖泊流域的水文边界。湖泊接纳来自流域的水与物质输入, 是湖泊水量和物质平衡的主要输入源。由于湖泊流域是一个相对独立的自然地理单元, 具有明确的水文边界, 是开展水与物质平衡分析, 回答湖泊水文对流域环境变化响应的理想区域, 因此, 湖泊流域通常是水文及相关学科的研究对象。

进入 21 世纪以来, 人类活动强度正以超过以往任何历史时期的速率增大<sup>[3]</sup>, 且人类活动对河湖及流域水循环的影响程度在某些区域(比如亚洲)甚至已与自然因素的影响程度相当。受气候变化和人类活动的强烈影响, 全球范围内的地表水体(包括自然湖泊和人工水库)正发生着巨大的变化。比如, 全球永久地表水体在 1984~2015 年消失了约  $90000\text{km}^2$ , 同时形成了新的水体  $184000\text{km}^2$ <sup>[4]</sup>。水面的增加除了气候因素外, 多半是由于水库的蓄水。而 70% 的水面减少主要发生在中东和中亚, 并与气候干旱、河流分流、建坝和无序取水有关<sup>[4,5]</sup>。我国不同区域湖泊也发生巨大的变化。受人类活动相对较小而受气候变化敏感的青藏高原

---

**作者简介:** 张奇(1966~), 男, 研究员, 主要研究方向为湖泊流域水文学. E-mail: qzhang@niglas.ac.cn

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2019YFC0409002); 国家自然科学基金项目(41877166)

湖泊, 进入 21 世纪以来, 湖泊水位和面积呈加速增长趋势<sup>[6]</sup>; 而人类活动相对较强的长江中下游洪泛平原淡水湖群, 在 2000~2011 年却呈净减小, 累积减小面积 7.4% (849km<sup>2</sup>)<sup>[7]</sup>。湖泊水体的萎缩不仅威胁水量安全, 还引起湖泊水环境和水生态的恶化<sup>[8]</sup>, 严重影响社会经济的可持续发展。

湖泊本身的水量变化主要由于其流域的水文循环过程发生变化引起, 因此, 以湖泊及其流域为完整的对象加以研究, 能更好识别湖泊水量平衡变化的机制。湖泊流域水文学研究的核心科学问题是流域水分时空传输与湖泊响应及反馈。难点是需要构建普适性方程描述湖泊流域水分在不同介质中运动的动力过程及相应的参数化方法。大气、地表、地下过程同步高频观测数据的缺乏制约数学模型的建立和验证。可喜的是, 当今大尺度高频空对地观测技术的快速发展获取了前所未有的地表数据<sup>[9]</sup>, 丰富了研究湖泊流域水文过程的基础数据, 且使无资料地区的研究成为可能。本文对湖泊流域若干水文问题的研究进展进行总结和归纳, 并就新问题及研究方法的新动向进行阐述。本文有望对湖泊水文学与流域水文学的融合、探讨湖泊流域研究新思路、发展新一代湖泊流域模型有指导作用。

## 1 湖泊流域水文研究现状

湖泊流域水文过程是以湖泊及其流域为对象, 研究自然因素变化和人类活动影响下, 湖泊流域的产汇流过程及湖泊水量平衡、研究湖泊流域水文极值演变及洪旱灾害、研究湖泊流域水力联系变化及水沙效应等。湖泊流域水文过程的研究与流域水文和湖泊水文研究的主要差异应体现在, 以湖泊及其流域为整体, 注重流域对湖泊的作用及湖泊对流域的反馈。长期以来, 流域水文过程和湖泊水文过程都开展了大量的研究, 本文不再做重点叙述, 而就 21 世纪以来, 以湖泊流域为对象的若干新水文问题的研究进行阐述。

### 1.1 湖泊流域水文极值

水文极值一般指水文变量(流量、水位、流速、波浪)在某个时段内出现的极大值或极小值, 与考虑的时间尺度有关, 不同的时间段对应不同的极值。水文极值的研究对揭示水文过程的长期演变规律及洪水、干旱的发生机制有重要指示意义。近 20 多年来, 极端气候水文事件在全球频发, 越发严重的干旱和洪水在多个湖泊流域均有报道, 导致严重经济损失, 也引起了学术界对水文极值演变及发生机制的关注和兴趣。

过去几十年里东非遭遇大范围高强度的干旱现象。由于缺少现场水文观测数据和区域大尺度水文模型, 东非大湖流域径流和湖泊水文变化研究受到了较大的制约。近期, Hassan 等<sup>[10]</sup>采用卫星对地观测数据和全球水文模型对东非大裂谷(the Great Rift Valley of East Africa)的三大湖泊, 维多利亚湖(Lake Victoria)、坦噶尼喀湖(Lake Tanganyika)和马拉维湖(Lake Malawi)开展了径流和水量储蓄变化研究。研究发现, 2003~2006 年, 以上三大湖泊的水位都呈显著下降。这与 GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)数据显示的全流域总储水量 TWS(Total Water Storage)变化是一致的。有趣的是, 维多利亚湖和马拉维湖流域的总储水量受两个湖本身的地表水储量支配, 而坦噶尼喀湖流域的总储水量则受地表水和流域土壤水分的共同支配。Onyutha 等<sup>[11]</sup>选择东非维多利亚湖流域的 24 个子流域开展径流极值研究, 通过建立流量-持续时间-频率关系式(discharge-duration-frequency relationship)获得水文极值的分布特征, 并运用参数区域化和不确定性分析解决了资料缺乏的问题, 从而对整个维多利亚湖流域的洪水遭遇规律和特征有了更为全面的认识。

针对长江中下游湖泊流域, 国内学者就流域洪峰流量和枯水流量的变化与洪、旱演变及其与气候变化的关系开展了深入的研究。比如, 鄱阳湖流域洪峰流量表现出显著的区域差异, 而枯水流量自 20 世纪 50 年代以来呈明显的上升趋势, 且鄱阳湖发生洪旱灾害与江湖水文关系有关<sup>[12, 13]</sup>。气候变化导致洞庭湖流域、鄱阳湖流域、太湖流域降水季节性分布不均, 导致洪水和干旱并存, 并呈周期性频发或引发特大洪水<sup>[14~24]</sup>。就人类活动对水文干旱的影响, Zhang 等<sup>[25]</sup>采用统计方法和水文模型研究了长江中游洞庭湖流域、丹江口水库流域和鄱阳湖流域三大湖库流域 1960 年以来水文干旱演变中各环境因子的影响程度, 发现人类活动自 80 年代后期以来对水文干旱有显著的放大作用。未来气候变化可能出现降雨年内季节性分异更加明显, 导致该区域汛期洪水

和枯水期干旱风险进一步加剧<sup>[26]</sup>,给湖泊流域的水量安全及其调控带来巨大挑战。

目前对水文极值及效应的研究取得了一定的进展。较为一致的认识包括:气候是洪水和干旱等水文极值发生的主导因子,人类活动起着辅助的作用;同一个区域洪水和干旱并存,且在同一年内可能发生旱涝急转。然而,目前对水文极值在短时间尺度上的认识还远远不足。气候变化往往在较大的时间尺度上(比如年际尺度或年代际)引起干湿交替,当时间序列足够长时,可以分析数据样本的干湿交替周期,认识自然因子的周期性变化。但在短时间尺度上(比如季节尺度或月尺度),水文极值的发生机制就显得更为复杂,原因是除自然因素外的其它因素,包括水系连通、土地覆被、闸坝调控等的水文效应更有可能在短时间尺度上被放大而对水文极值的发生产生巨大作用。这些问题的认识尚有待开展深入的研究,特别是应从快速变化环境下水文过程的产汇流机制、洪水演进及遭遇规律、干旱时空传递等方面开展基本规律的研究,从机理上认识水文极值的发生条件与阈值。应加强研究流域水文极值的时空传输机制及流域和湖泊水文极值的非一致性现象与物理成因。

## 1.2 土地覆被对湖泊流域水文过程的影响

土地覆被(Land Cover)是随遥感技术发展而出现的概念,主要指地表不同类型植物覆盖物,是土地的一个自然属性。人类活动很大程度上改变着土地利用和土地覆被,对水文过程和物质输移及湖泊水质产生深远的影响。美国大湖流域土地利用和土地覆被变化的定量表征显示,1992~2001年,超过38%的湖岸带湿地因土地开发而丧失,主要发生在湖岸10km的范围内,但以距湖岸1km为主<sup>[27]</sup>;土地覆被变化引起的水文过程改变进一步影响流域污染物的输出通量,对湖滨水体的水质带来巨大风险,威胁水质安全和人体健康<sup>[28]</sup>;近期报道的全球变绿(Greening)或变灰(Browning)趋势更是引发了覆被变化与碳循环相互作用及反馈机制的广泛兴趣和讨论<sup>[29~32]</sup>。

### 1.2.1 植物冠层水文

目前就覆被变化水文效应的研究主要集中在植物冠层对大气降水拦截与蒸发以及相应流域尺度水量平衡的改变,主要包括森林、农田、湿地草洲等生态系统。Vaca等<sup>[33]</sup>对55年成熟森林的原位观测发现,植物冠层的截留占总降水的38%。他们还就不同密度森林进行对比研究,发现树木密度(Tree Density)和叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)40%的减少,只引起冠层蓄水能力(Canopy Storage Capacity)20%的下降<sup>[33]</sup>;对加拿大红橡树(redoak)、北美白松(eastern whitepine)和东方铁杉(eastern hemlock trees)森林的研究揭示了大气降水在冠层截留、穿透降水(throughfall)和树干茎流(stemflow)之间的分配规律以及这种分配如何进一步影响土壤水分及其同位素组成<sup>[34]</sup>;Fang等<sup>[35]</sup>研究半干旱区三种典型灌木群落在相对于干旱和相对湿润年份冠层蒸腾(canopy transpiration)及其影响因素,发现气象因子主要影响日蒸腾,而月蒸腾在干旱和湿润年份都主要与土壤水分相关;Kozii等<sup>[36]</sup>基于30年的数据研究了针叶林对降雪的拦截,发现研究时段内植物冠层覆盖(canopy cover)并没有明显变化,但降雪的截留却增加了20%。该降雪截留的增加主要与冬季的日天气情况有关,比如,在低于-3℃条件下的降水量直接影响截留的雪量。对植物冠层截留和水分损失的认识有助于理性管理干旱和半干旱区农作物的节水灌溉。基于实验和数学模型研究草本植物对降雨和喷灌的截留,得出最大截留量为0.29~1.26mm,并与LAI和灌溉强度呈非线性正相关关系<sup>[37]</sup>;Zheng等<sup>[38]</sup>发现半干旱区玉米中穿透降雨、树干茎流和推算的冠层截留分别占总降雨的65.2%、22.3%和12.5%。相比于森林系统和农作物,湿地生态系统的冠层水文过程研究还相对较少。近期的一项研究是以河滨带自然湿地生态系统为对象,基于实测的最大冠层蓄水量(maximum canopy storage)建立了湿地植物群落的冠层截留模型,反演了45年的数据,表明湿地植物生态系统的截留量占降水的13%,在研究湿地水文过程中应充分考虑湿地植物冠层的影响<sup>[39]</sup>。关于植物冠层的降水截留计算,基本上是基于水量平衡原理,并引入最大截留量的概念<sup>[39]</sup>。还有的研究与LAI进行关联<sup>[35]</sup>,由于在流域尺度上获取LAI已相对成熟,这个方法具有一定的实用性。表1列举了近期报道的植物冠层截留蓄水的常用计算公式。

表1 几种常用的计算植物冠层截留的公式

文献	计算公式	说明
----	------	----

[37]	$I = I_m \times (1 - e^{-kt})$ ( $0 < I < I_m$ )	I-某时间段的冠层截留量(mm); $I_m$ -最大截留量(mm); k-经验参数(-); t-时间段(h); $I_m$ 和k可由实验数据计算得到
[35]	$I = a + b \times P + c \times e^{(-LAI)}$ $I = a + b \times P + c \times \ln(P)/P$	P-降水量(mm); LAI-叶面积指数(-); a, b, c-经验参数(-)
[38]	$I = P - T - S$	T-穿透流(mm); S-树干径流(mm)
[36]	$SIL = (1 - SWE_f / SWE_o)$	SIL-snow interception loss, 降雪截留量(mm); $SWE_f$ -snow water equivalent, 临近森林(forest)雪水当量(mm); $SWE_o$ -开阔无遮挡地(open)雪水当量(mm)
[39]	$I_{day} = I_{max}$ , 当 $(P - ET_0) > I_{max}$ $I_{day} = P - ET_0$ , 当 $(P - ET_0) < I_{max}$	$I_{day}$ -日截留量(mm); $I_{max}$ -最大截留量(mm); $ET_0$ -潜在蒸散发(mm)

### 1.2.2 植物根系水文

植物根系产生的水文效应对流域水文过程的影响复杂且重要。根系通过改变土壤颗粒结构或改变土壤空隙的连通性而影响土壤水力属性<sup>[40,41]</sup>。目前较为常用的测试植物根系影响的方法为室内控制实验, 得出不同作物在不同生长期的根系效应<sup>[42~44]</sup>。已有研究显示, 土壤饱和和渗透系数( $K_s$ )受根系直径的影响较为显著, 比如, 直径大于2mm的粗根更容易产生土壤大空隙而可能使饱和和渗透系数增加一个数量级<sup>[41]</sup>。但不同类型的植物、不同生长期、不同土壤类型的影响程度差异较大<sup>[45,46]</sup>。表2列举了近期一些研究中报道的根系对土壤饱和和渗透系数的影响。

表2 根系密度对土壤饱和和渗透系数( $K_s$ )的影响

文献	植被	土壤	生长期	根系密度	$K_s$ 相对于裸土的变化幅度(%)
[47]	香根草	粉砂粘土	143d301d302d317d	7.14 (kg/m <sup>3</sup> ) 7.99 (kg/m <sup>3</sup> ) 5.6 (kg/m <sup>3</sup> ) 6.5 (kg/m <sup>3</sup> )	-78%-77% 197% 420%
		粘质砂土	177d222d303d60d	8.69 (kg/m <sup>3</sup> ) 5.85 (kg/m <sup>3</sup> ) 5.49 (kg/m <sup>3</sup> ) 5.71 (kg/m <sup>3</sup> )	64% 0.5%-36%-93%
[48]	羊茅黑麦草	粉砂土	2周 4周 6周 8周	0.82 (cm/cm <sup>3</sup> ) 2.19 (cm/cm <sup>3</sup> ) 5.64 (cm/cm <sup>3</sup> ) 7.14 (cm/cm <sup>3</sup> )	0% 184% 254% 511%
	柳树	粉砂土	2周 4周 6周 8周	2.42 (cm/cm <sup>3</sup> ) 3.0 (cm/cm <sup>3</sup> ) 4.46 (cm/cm <sup>3</sup> ) 5.33 (cm/cm <sup>3</sup> )	113% 361% 705% 1085%
[49]	灰桤木	壤砂土	4个月 4个月 4个月 8个月	0.063 (cm/cm <sup>3</sup> ) 0.077 (cm/cm <sup>3</sup> ) 0.11 (cm/cm <sup>3</sup> ) 0.264 (cm/cm <sup>3</sup> )	408.5% 978.3% 242.6%-56%
[50]	黑麦, 黑麦草, 野豌豆混合	粉砂粘土	4个月	3.31 (cm/cm <sup>3</sup> )	48.2%
	亚麻	粉砂	4个月	11.02 (cm/cm <sup>3</sup> )	61%

		粘土			
--	--	----	--	--	--

### 1.2.3 湖泊流域覆被水文过程研究

目前关于植物根系-土壤系统水文过程研究多半仅基于实验室或原位田间尺度,流域尺度的研究还很有限。近期的一个报道是对美国大陆 139 个森林覆被流域树木的根系吸水(Root Water Uptake)进行反演计算。结果表明,森林根系吸水显著影响流域水循环,由于不同类型森林的根系深度不一样,其耗水机制也不尽相同,浅根森林系统对土壤干旱更为敏感<sup>[51]</sup>;另一项研究则以亚马孙流域为对象,探讨植物根系水力再分配对陆地碳通量的影响。结果表明,相对于湿润季,根系水力再分配作用在干旱季作用明显,下层土壤水向上层传输通量最大可达 0.3mm/d,使深层土壤水被根系利用,有助于缓解干旱季土壤水分亏缺对植被的胁迫<sup>[52]</sup>。

就湖泊流域而言,主要应关注流域覆被变化引起的降水分割和径流组分分配的变化,而导致流域出口断面的合成径流过程发生显著变化。流域径流往往是湖泊水量的主要来源,流域径流过程的变化将在月、日时间尺度上影响湖泊水文,对季节性水文变化明显的湖泊而言,考虑流域覆被水文过程就显得尤为重要。在全球气候变化和干旱趋势背景下,研究不同类型森林根系的耗水策略,对寻求变化环境下的森林恢复模式和流域覆被管理对湖泊水文节律的影响具有重要意义。

### 1.3 湖泊流域水文过程模拟

水文过程模拟是一个经典的工作,已开展了大量的研究,发展了集总式模型(Lumped Hydrological Model)和分布式模型(Distributed Hydrological Model)。前者大多采用经验参数,对水文过程做黑箱处理,内部过程被简化,注重输入与输出的关系,比如,LASCAM<sup>[53]</sup>;后者将流域分割成一系列计算单元,比如SWAT<sup>[54]</sup>采用的水文响应单元(Hydrological Response Unit)、MODHMS<sup>[55,56]</sup>采用的网格(Grid)。这种空间离散较为真实地处理了流域下垫面和驱动条件的非均匀性,使不同类型下垫面的产汇流机制在模型参数中得以充分反映。

水文模型在反演湖泊水文历史变化、定量区分人类活动和自然要素对湖泊流域水循环的影响、预测未来变化趋势等方面得到广泛的应用。由于湖泊流域尺度巨大,水系结构复杂,在湖泊流域的模拟中,需要将流域产汇流过程、湖泊水文过程及其与流域地表、地下水量交换等过程进行耦合,这给模型的模拟能力提出新的要求。针对湖泊流域的一体化模型尚报道不多。Zhang等<sup>[57]</sup>以抚仙湖流域为对象,研发了湖泊流域水文模型。该模型的特点有:(1)针对湖泊流域内多个具有独立出口断面的河流子流域的混合汇流算法。湖泊流域往往有多条入湖河流,每条河流具有各自的出口断面,即入湖河口。各河流子流域之间还可能存在无明显汇流路径的坡地,产生坡面漫流。针对这样的流域水系特点,模型中建立了混合汇流算法,针对河流汇流,以入湖口为起点,进行河流网格的上溯汇流计算,完成河流及主要支流的汇流计算。针对坡地,采用“8方向法”计算汇流路径。两套算法基于DEM和网格单元属性混合进行,直至完成全流域内河流和坡面汇流路径的描述;(2)多种洪水演进算法。大尺度湖泊流域高程落差大,山区河道和平原河道洪水演进规律差异大。为解决这个问题,模型提供了马斯京根法(MuskingumMethod)、变蓄量法(Variable Storage Method)和指数法(Exponent Method)等3种计算方法,前两种适用于河道洪水,而指数法可较好计算坡面洪水过程;(3)湖泊与流域水量交换及湖泊水量平衡模拟。湖泊流域水文过程模拟需要考虑湖泊水体与流域之间的水交换及湖泊水量平衡,地表水交换由河-湖水力模拟解决。湖泊与地下水交换模拟由移植的MODFLOW<sup>[58]</sup>中地表-地下水交换模块实现。湖泊水量平衡模型考虑了各输入项和输出项,并结合湖泊库容曲线获得湖泊水位模拟值。该模型在抚仙湖流域的应用有效分辨了入湖水量的来源与组分,弥补了观测数据的不足,增进了对该湖泊流域水文过程的认识。该模型<sup>[57]</sup>在鄱阳湖流域开展了应用研究,并与湖泊水动力模型联合,搭建了湖泊流域的水文-水动力联合模型,以流域观测径流和湖泊观测水位对模型进行了验证<sup>[59]</sup>。该模型初步实现了湖泊与流域的一体化模拟,为评估湖泊水量对流域气候变化和流域下垫面变化的响应提供了定量化模拟工具<sup>[26]</sup>。

相似的工作还有以半干旱区洪泛湖泊湿地为对象,采用水动力模型模拟湿地生态系统的淹水过程和水流路径,结合水量平

衡模型计算湖泊的水量变化<sup>[60]</sup>。运用 SWAT 模型构建了洞庭湖流域的分布式水文模型, 该模型包括了无径流站控制的下游区域和平原圩垸区, 实现了洞庭湖流域水文过程的模拟<sup>[61]</sup>。Dessie 等<sup>[62]</sup>则采样概念性流域水文模型和湖泊水量平衡模型分析了塔纳湖(Lake Tana)水分平衡关系。这些工作尝试了湖泊流域水文的一体化模拟, 取得了积极的进展。前期工作对一些关键过程的刻画还存在明显不足, 比如, 流域不同类型植物系统对水循环的影响、湖泊水陆过渡带水文过程的模拟等, 需要进一步细化模型, 提升模拟能力。

#### 1.4 湖泊流域水平衡关系及其演变

水平衡关系指湖泊流域水量收支关系。降水是最主要的补给来源, 而蒸散发、人为取水和向外流域水系的排泄是主要支出项。变化环境下, 湖泊流域水平衡关系处于动态变化中。在长时间序列上看, 其水平衡关系往往在多年均值附近的一定变幅内波动。如果平衡关系发生异常变化, 则其中一个或多个组分可能已严重偏离了多年平均状态值, 持续性的偏干或偏湿现象将出现。

代表性工作包括对塔纳湖(Lake Tana)水量平衡的研究<sup>[62]</sup>。塔纳湖位于非洲, 流域面积 15077km<sup>2</sup>, 其中湖泊水面积 3077km<sup>2</sup>, 是埃塞俄比亚最大的淡水湖泊。该湖泊接纳流域 40 余条河流的径流补给, 调蓄后排泄入其南部的青尼罗河(Blue Nile)。塔纳湖具有大面积洪泛区域, 高水位时淹没, 低水位时出露, 表现出典型的季节性洪泛特征。在现场观测数据的基础上, 结合水文模型对各水量组分进行计算, 得出了塔纳湖流域的水量平衡关系。该研究显示约 6%的河流入湖径流在流经洪泛区时损失掉, 量化了湖泊洪泛区在整个湖泊流域水量平衡关系中的贡献; 相似的工作还包括洞里萨湖(Tonle SapLake)的水量平衡分析<sup>[63]</sup>。洞里萨湖位于柬埔寨, 流域面积 85790km<sup>2</sup>, 永久水体面积约 2400km<sup>2</sup>, 是东南亚最大的淡水湖泊。该湖泊接纳来自流域的径流, 并与湄公河(Mekong River)发生水量交换。湖泊水位的波动形成了最大为 10800km<sup>2</sup>的洪泛区, 湖泊-洪泛区-河流之间的作用关系复杂。该研究显示年入湖水量中的 50%以上来自于湄公河干流, 意味着湄公河干流径流的改变将对洞里萨湖水平衡和湖泊水位带来显著影响。

值得提及的还有关于贝加尔湖流域径流变化稳态性分析的一项最新研究<sup>[64]</sup>。贝加尔湖流域面积巨大, 流域几乎包括了所有土地类型和特征。研究其流域径流变化对认识该湖泊流域水平衡的演变具有重要意义。该研究中采用了 34 个径流站点, 分布于 19 条河流。这些径流站点观测序列时长最短为 4 年, 最长为 64 年。统计分析显示, 贝加尔湖流域径流空间变异巨大, 流域内各河流子流域年径流深从 28 到 502mm 不等, 平均值为 135mm。总体而言, 贝加尔湖流域总的入湖年径流量符合稳态序列特征。但是由于流域面积巨大, 各子流域所在区域的气候特征和下垫面特征差异大, 呈现出偏干和偏湿的巨大空间差异。

全球变化引起的河湖水量平衡关系的变化直接导致全球各地频发的干旱和洪水等水文事件。目前就极端水文事件的成因分析开展了相当多的研究<sup>[22, 25, 65]</sup>。其中, 有针对较短时间尺度的年或月, 也有针对较大时间尺度的年际变化。研究大多回答了极端水文事件发生的自然因素或人为影响的贡献程度。在分辨自然和人为因素的影响时, 通常基于观测径流变幅是自然和人为因素引起的径流变化的线性关系这一假定。首先计算自然因素变化引起的径流量相对变化, 观测值变幅中除去这部分自然因素引起的增量, 剩余部分即认为是人为因素引起的径流变化。这种计算实际上是间接估算了人为因素对径流的影响, 可能存在一定的局限性。由人类活动导致的水系结构变化也将直接引起河湖水量平衡关系的改变, 比如, 湖盆形态变化造成湖泊蓄泄关系的改变而引起湖泊水位的下降<sup>[66]</sup>。今后研究中应注重人为因素的考虑, 将自然与人文进行耦合, 将有望从物理机制上解释湖泊流域水循环演变的人类活动影响, 有助于更为全面揭示人类活动对湖泊流域水文过程的作用机理。

#### 1.5 湖泊流域水文过程对未来气候变化的响应

气候变化是导致湖泊水量变化最为直接的原因。这方面的研究通常采用全球气候模式预测的未来几十年不同温室气体排放强度的气候情景, 降尺度后驱动水文模型计算特定气候情景下的流域产水量及其时空分布<sup>[26, 67, 68]</sup>。

典型的研究为气候变化对北美五大湖地区的影响<sup>[67]</sup>。该研究以五大湖地区和芝加哥城市为研究区，重点研究气候变化对自然生态系统、水资源、能源、基础设施和人类健康的影响。研究显示，相对于低温温室气体排放，高温温室气体排放将引起蒸发的高增加。就径流而言，只有伊利诺斯河(Illinois River)等少数河流在未来一个世纪内呈现增大的洪峰值，增大洪水风险。在高温温室气体排放情景下，随着气温的增加，冰盖将逐渐消退，总体上湖泊的水位在本世纪末将下降。该研究把大城市扩展对水资源的需求与气候变化对水资源的影响进行了关联研究，为局部尺度和区域尺度的气候变化应对和调控策略提供科学支撑，值得其它湖泊流域水文研究借鉴。

相对于气候变化对湖泊水量的影响研究，湖泊水体对大气和区域气候的反馈机制研究就显得较少。近期的一项研究是关于非洲大湖 AGL(the African Great Lakes)对区域气候的影响<sup>[69]</sup>。该研究主要运用了气候模式下的小尺度模拟模型联盟 COSMO-CLM(The Consortium for Small-Scale Model in Climate Mode), 耦合淡水湖泊模型 Flake(the Freshwater Lake Model) 和公共陆面模式 CLM(Community Land Model) 获取 7km 空间分辨率的 1999~2008 数据。模拟表明，4 个主要的非洲大湖显著影响降水量，湖泊的存在几乎使年降水量增加一倍，但这样的效应只限于湖泊水面范围，在湖泊水面边界外，这样的影响效应几乎没有。此外，湖泊水体对近地面的气温有一定的降低作用。大型湖泊水体与大气之间的热量交换引发近地面大气的对流扩散循环，一般来说，湖泊白天吸收太阳辐射，起到一定的降温作用；夜晚湖泊水体释放热量，对近地环境有一定的增温作用。

目前存在的主要问题是气候模式和水文模型都带有较大的不确定性，气候模式输出结果的偏差可能在水文模型中被进一步放大，对模拟结果带来显著的影响。常规的弥补方法是采用一组模型进行集合化模拟以减小不确定性。比如，Prudhomme 等在预估气候变化对水文干旱的模拟中，采用了 7 个全球影响模型(Global Impact Models, GIMs)开展集合化模拟，驱动这些 GIMs 的气候变化情景数据又来自 5 个全球气候模型(Global Climate Models, GCMs)。由于模型原理和结构的不同，即便是相同的驱动条件，模型输出结果也不尽相同，文章对驱动数据的不确定性和 GIMs 输出结果的不确定性进行了详细的讨论，使预测结果更为可信<sup>[70]</sup>。Li 等<sup>[26]</sup>则对区域气候模式(Regional Climate Models, RCMs)输出数据中存在的系统偏差进行了纠正，采用的方法是等距累积分布函数(the Equidistant Cumulative Distribution Function, EDCDF), 纠偏后的气候数据再用于驱动水文模型，避免气候数据的误差传递到流域水文模型中，并有可能被进一步放大。

## 2 鄱阳湖湖泊流域研究

鄱阳湖是我国面积最大的淡水湖泊，位于长江中游，与长江保持着自然的水力连通，是典型的通江湖泊。21 世纪以来，鄱阳湖水文情势呈现显著的变化，主要表现在枯水期湖泊水位异常低枯，超过了历史同期水平<sup>[71]</sup>，湖泊萎缩严重，对湖泊生态和环境带来巨大威胁<sup>[8]</sup>。尽管鄱阳湖本身就是一个季节性湖泊，“高水似湖，低水似河”，是其本来应有的特征。但枯水期异常的低水位，还是引起了各方的关注，争论的焦点在于湖泊水量减少究竟是流域入湖水量减少还是湖泊向长江排泄水量的增多。本文以鄱阳湖及其流域为对象，重点就江-湖-流域的相互作用、鄱阳湖流域水文模型原理、模型建立与应用等问题的研究进展进行阐述，以期对湖泊流域水文学研究提供具体的案例。

### 2.1 流域-鄱阳湖-长江水文系统

流域-鄱阳湖-长江水文系统可概化为图 1(a)所示。湖泊接受流域的径流，调蓄后排入长江。视长江水位和鄱阳湖北部湖区水位的落差，长江在特定时段对鄱阳湖有一定的倒灌补水作用<sup>[72]</sup>。鄱阳湖流域地处亚热带湿润季风气候区，多年平均年降水量 1654mm, 其中 55% 出现在 3~6 月。年平均气温 17.6℃, 夏季 6~8 月平均 27.3℃, 冬季 12 月~次年 2 月平均 7.1℃。年潜在蒸散发 1049mm, 高值出现在 5~9 月<sup>[73]</sup>(图 1(b))。

鄱阳湖水位受流域入湖径流和长江的顶托作用<sup>[72, 73]</sup>而呈现出强季节性变化(图 1(c))。其主要特征是湖泊水位在鄱阳湖流域主汛期(4~6 月)期间快速上涨，该时段湖泊水位主要受流域来水的影响。湖泊水位在长江汛期时(7~8 月)到达最高值。湖泊水位的消退一般出现在 9 月份之后，随着长江流量的下降而快速下降，即长江来水是其水位下降的主控因子<sup>[74, 75]</sup>。流域径流过程、

长江径流过程及两者径流过程的遭遇时间差形成了鄱阳湖水位的自然节律。两者中任何条件的变化都会改变鄱阳湖水位的季节性节律，比如三峡工程蓄水运行后，长江干流年内径流过程的改变导致鄱阳湖水位年内发生变化(图 1(c))<sup>[76,77]</sup>。

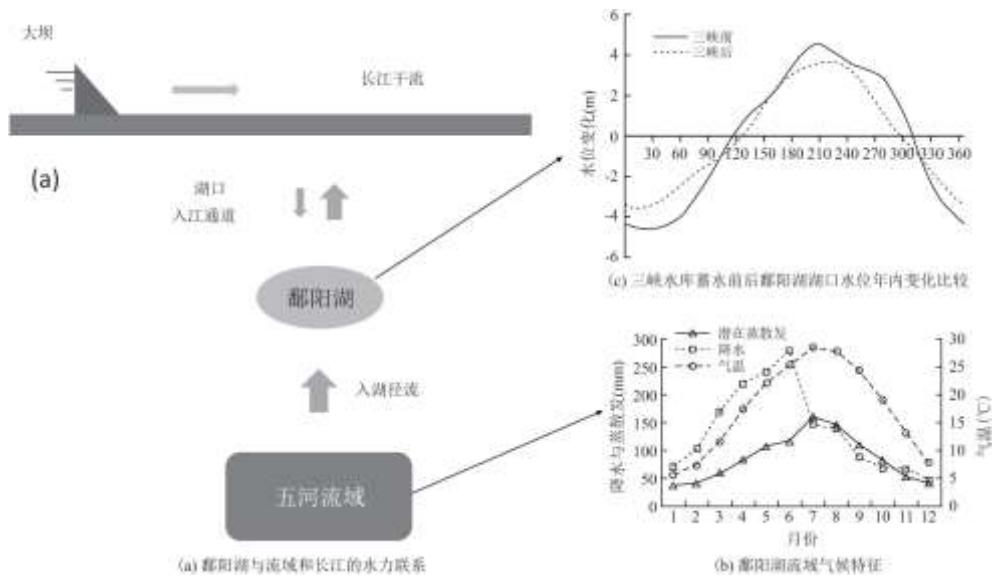


图 1 流域-鄱阳湖-长江水系统概念图

实测数据显示，鄱阳湖湖泊水位与流域流量存在逆时针绳套(迟滞)关系(图 2)。该水位-流量关系代表着大型洪泛湖泊流域独特的水文特征，即湖泊水位的年内变化受流域入湖径流(阶段 1)和下游江河水位的影响(阶段 2 和 3)。鄱阳湖水文的迟滞效应主要与流域入湖径流与长江径流的洪峰遭遇有关，但面积巨大的洪泛区及湿地植物在整个湖泊水量的调蓄中也起着关键的作用，是湖泊非线性水文变化的主要影响因素之一<sup>[78,75]</sup>。

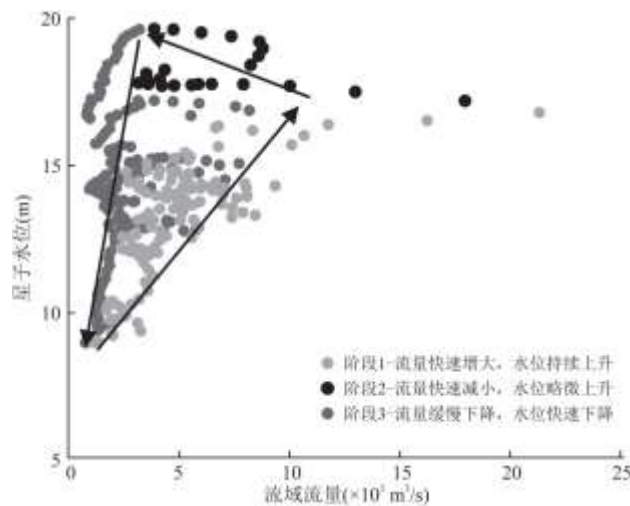


图 2 以 1990 全年实测日数据表示的入湖流量-湖泊水位的非线性关系

注：阶段 1 为 1 月 10 日~6 月 15 日，阶段 2 为 6 月 16 日~7 月 9 日，阶段 3 为 7 月 10 日~次年 1 月 9 日。数据展示了明显的逆时针迟滞效应，湖泊水位与流域流量不是简单的线性对应关系，水位还与流量的变化历史(路径)有关。

## 2.2 鄱阳湖湖泊流域水文模型构建

鄱阳湖湖泊流域面积大，气候条件空间变异显著，高程、土地利用类型、覆被、土壤、地表水体等下垫面信息呈现高度的空间异质性，流域下游未控区域和洪泛区面积巨大且与湖泊水量交换明显。为此，作者研发的模型原理和特色包括：(1) 分布式参数化。一方面，模型参数以分布式为适，以灵活有效地离散下垫面的空间异质性。另一方面，应避免过参数化，减小过度自由度可能引起的模型不确定性。模型参数主要包括不同类型地表的糙率、土壤孔隙度和田间持水量、地下含水层饱和和渗透系数和给水度、覆被 LAI 和根系最大深度。LAI 用于计算植被冠层的截留，根系深度用于计算蒸散发量在土壤包气带和下层饱和地下水之间的分配；(2) 地表径流-地下水的实时耦合。平原区地下水埋深浅，与地表水之间水量交换显著，加之鄱阳湖洪泛区面积巨大，水量的补排作用对湖泊水量平衡的贡献不容忽视。模型采用基于网格的地表径流与地下水耦合以有效模拟湖泊平原区的水文过程。模型采用实时耦合技术，对每一个时间步长，分别计算地表水与地下水的水量交换，此水量计入网格单元的地表水和地下水的水量动态平衡中。之后，再进行下一个时间步长的计算；(3) 湖泊水文及其与流域的实时耦合。鄱阳湖水文模型视模拟目的不同植入了 3 个不同时间尺度的模型，分别为年尺度、月尺度和日尺度。年尺度模型基于水量平衡原理，计算年出入湖水量和湖泊蓄水量变化。月尺度模型基于统计学关系建立湖泊水位与流域气温、降水等要素的关系，可提供月湖泊水位和水量变化。日尺度模型基于水动力学原理，可计算逐日水位、流速，但计算耗时大；也可选择计算量相对较小的湖泊调蓄函数来模拟出湖流量和水位。鄱阳湖水文模型与流域水文模型进行了实时的耦合计算，即当前时间步长的湖泊水位作为计算条件反馈给流域水文模型，经迭代计算，更新下一个时间步长的水交换量，再计算新的湖泊水位；(4) 高计算效率。由于研究区面积大，分布式模型的离散网格数量巨大，需要考虑模型的计算效率，以满足千年尺度的预测模拟。模型构架如图 3 示。其中，模型模拟的垂向分层包括植物层、地表层、土壤层和地下含水层。驱动条件为降水、蒸散发和人类活动用水。主要的动力过程为：植物冠层水平衡(Van)、地表产汇流与水平衡(Run)、土壤水分平衡(Set)和饱和地下水运动(Gas)。各动力过程输出的状态变量如右侧栏所示。各动力过程中涉及的主要参数及量纲列举在左二栏。各过程之间的耦合由状态变量实现：地表产流与土壤水分之间的耦合由土壤含水量(Sc)和土壤侧向流(Lf)实现；地下水与土壤水分过程和地表水流过程由地下水补给量(Rg)、地下水位(Hg)和基流(Bf)联结；人类耗水(Uc)主要指对地表水和地下水的开采使用；地面降水(Pg)由大气降水(Pa)减去冠层截留获得；蒸散发(Et)作用于地表和植物层。更详细模型原理、参数设置和模型验证参阅相关文献<sup>[57,79,80]</sup>。

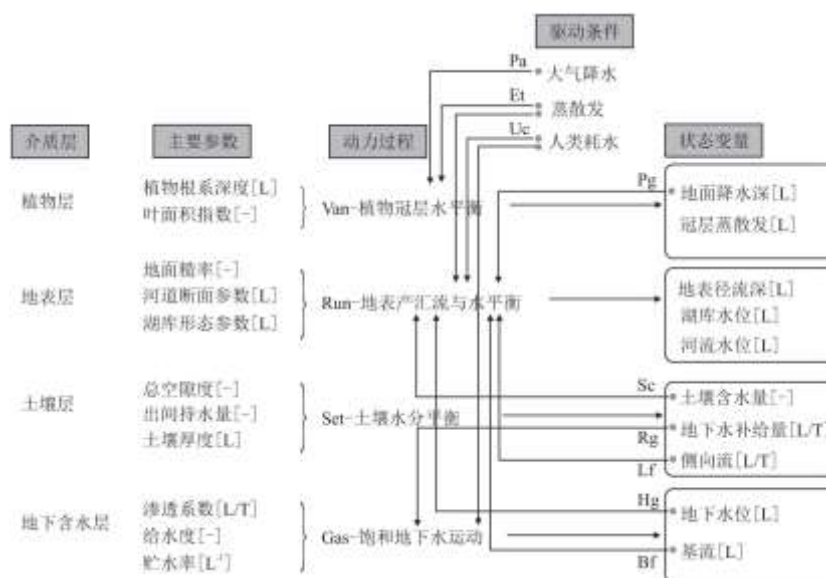


图 3 湖泊流域水文模型概念架构

## 2.3 鄱阳湖模型的应用研究

运用上述模型,对2000年以来鄱阳湖出现的干枯现象做了情景模拟分析,目的是区分流域“五河”径流和长江径流对鄱阳湖水位年内变化的影响程度。模型中对鄱阳湖5个子流域最下游水文控制站以下的25082km<sup>2</sup>未控区域<sup>[73]</sup>进行了地表-地下水耦合模拟,相比于简单的径流系数法估算产流量,模型更真实模拟了该未控区域地下水动态变化及其与湖泊的补排关系,使湖泊总体水量平衡及入湖径流的季节性分配的模拟精度都有所提高(图4)。模拟揭示湖泊水位的上涨期主要受流域入湖径流的影响,而湖泊水位的消退期主要受长江径流的影响,湖泊的高水位受流域径流和长江水位的共同影响<sup>[73]</sup>。该模拟结果从量的角度展示了长江-湖泊-流域的相互作用,特别是,就长江对鄱阳湖拉空作用有了新的认识。模型显示,长江对鄱阳湖拉空作用的影响范围可达湖泊上游100km处<sup>[73]</sup>。意味着,鄱阳湖流域和长江径流的季节性变化都会造成鄱阳湖水位自然节律的改变。而鄱阳湖流域和长江上游水利工程的建设往往对径流有季节性的调蓄<sup>[74,77]</sup>,从而改变鄱阳湖水位原本的季节性波动规律,诱发季节性极端水文事件的出现。

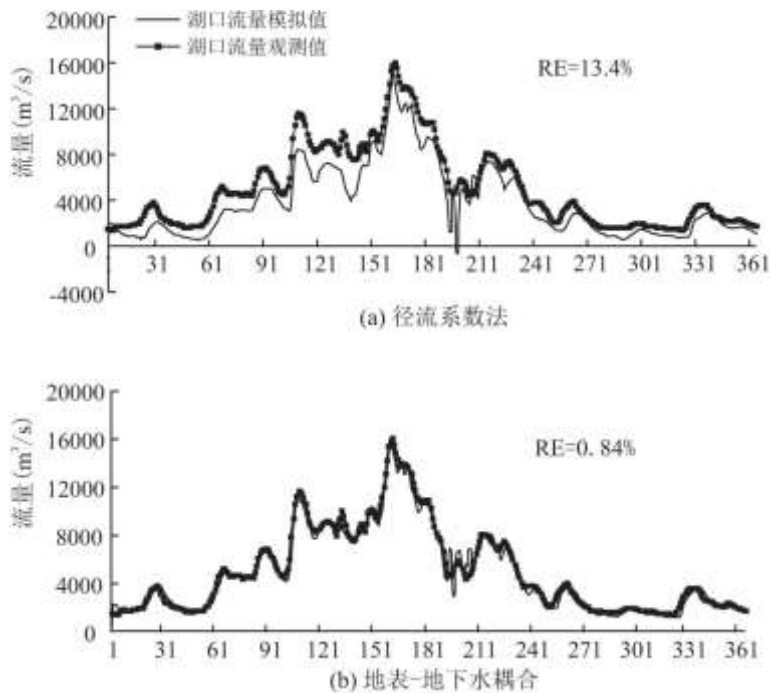


图4 鄱阳湖流域未控区地表-地下水耦合模拟显著提高了出湖流量的模拟精度(RE为相对误差)

模型还模拟了未来气候情景下流域的产水量。先将全球气候模式对未来气候变化的预测结果进行降尺度和偏差校正,再驱动水文模型,由水文模型输出未来情景的径流量。结果显示,未来20年(至2035年)流域径流在冬季呈明显减小趋势,减小幅度最大可达20%,这主要与冬季降雨减少相关。夏季流域径流增加趋势较为明显,最大增幅可达16%<sup>[26]</sup>。未来气候条件下,鄱阳湖丰水期水位更高、枯水期水位更低的两极分异现象将可能更为突出。

### 3 展望

全球气候变化引发的极端气候水文事件呈频发态势,全球大湖、大河流域水旱灾害时有发生。城市化、经济社会的快速发展和粮食安全保障等都对水资源的开发利用提出了新的挑战。维持人类生存和发展及其与水资源的协调关系是全球面临的重大问题。应该承认,我们对河湖系统水资源演变规律的认识和变化趋势的预测能力仍然有限。一方面,我们应该注重建立长期观测。原位观测数据是反映河湖系统变化的最基本信息源,也是发展定量模拟的基础;另一方面,应加强模型研究,发展新一代河湖-流域系统模型,提升模拟能力,适应快速变化环境下河湖复合系统响应的模拟需求。就湖泊流域水文研究而言,建议重点关注如下问题。

### 3.1 植被与水文的相互作用

气候变化和人类活动都会对植被系统带来潜在的影响,而且这种影响在全球尺度<sup>[36]</sup>或区域尺度<sup>[81]</sup>都已被明显观测到。植被的变化直接影响水分在地表、土壤和地下介质中的分配,从而改变径流组分及相应介质中水分的传输滞留时间,对流域出口断面合成径流过程和湖泊水量的季节性变化节律带来影响。在干旱或半干旱气候区,植被的恢复可能加大降水的损耗和增加土壤及地下水的蒸散发而加重区域的水分亏缺,引发土壤干旱<sup>[81]</sup>。在水分充足的湿润地区,增温效应可能显著增大地上生物量而改变降雨的下渗过程和地表汇流而影响洪水过程,包括洪峰流量和洪峰出现时间。由于湖泊水量的变化很大程度上与流域径流有关,有必要就植被变化(包括冠层、干茎水文和根系水文)对水循环和湖泊流域水平衡的影响机理开展深入的研究,解释流域植被变化对湖泊洪水或干旱等极端水文事件的影响程度和作用途径,科学指导流域植被恢复策略与容量。

### 3.2 人类活动对湖泊流域洪水和干旱的影响机制

全球范围湖泊流域洪水和干旱呈频发和加剧趋势。湖泊周边往往人口密集,工农业生产发达,大面积长时间的干旱对农业造成巨大损失,严重威胁粮食安全。相对于洪涝,干旱的成因较为复杂,认识的程度也相对有限。目前认为,气候是干旱的主要诱发因素,而人类活动是次要因素<sup>[25,82,83]</sup>。但干旱发生机理尚没有完全阐释清楚。特别是,人类活动对干旱发生的作用机理尚有待进一步深入研究。

人类活动对水资源的影响是显著而深远的,且在不同时空尺度不同气候区域上都有所显现。尽管在全球尺度上人类耗水占的比重量小,但在某些特定的流域或区域(比如亚洲),人类的耗水与全球气候变暖的影响程度是同一个数量级,甚至超过气候变异的影响<sup>[84]</sup>。人类活动耗水和对河湖水文循环及水量平衡的影响方式主要包括:工农业用水、跨流域调水、改变河湖水系结构。农业灌溉通常以作物耗水、漫流和地下渗透等方式损失水量。随着全球气温的上升,未来农业灌溉用水及水量短缺将越发严重,该问题尤其以亚洲为重<sup>[84]</sup>;跨流域调水则通常因调取地表水而直接改变供水流域和受水流域的水均衡。跨流域调水还会引起输水沿程的水量损失和水质污染;闸坝等水利工程建设、河流的人工改道、湖泊围垦、河沙开采等则通过改变水系结构而影响河湖水力过程和水量平衡。人工水库引起的水面积增加可能增大水面蒸发而引起水量损失。闸坝建设严重阻隔河湖连通而引起水力过程的变化。人为采砂则改变河湖断面形态而导致水位-流量关系和泄水能力的变化。所有这些表明,人类活动在不同时间和空间尺度上影响着河湖流域水文、水力过程,未来可能呈越发严重的态势。针对未来气候异常和局部区域的趋势性严重干旱,水资源短缺问题及其应对策略将成为全人类共同面临的重大问题。应加强人类活动定量表征的研究,强化人文与自然要素的耦合,提出新的动力本构关系,建立新一代湖泊流域水文模型,预估河湖水资源量的变化,评估经济社会用水和生态需水安全,应对全球变化,保障湖泊流域水量安全。

### 3.3 湖泊流域集成模拟

全球气候变化叠加人类活动将显著加剧区域和全球的水资源短缺,全球气候模式(GCMs)和全球水文模式(Global Hydrological Models, GHMs)对气候变化下的全球水资源量做了预估。模拟显示,与人口自然增长影响相比,全球气温上升 2℃ 将增加 15% 的全球人口面临水资源的减少和另增 40% 人口面临严重水短缺<sup>[85]</sup>。基于未来气候变化的重大影响,我国水资源时空分布的差异将可能进一步加剧。水资源的严重短缺将极大制约社会经济的发展,影响社会稳定和国家安全。在全球气候和水文模式框架下,加强研究我国重点大河、大湖流域水资源模型,在较高时空分辨率上预估未来水资源的变化,制定应对方略。

将湖泊及其流域作为一个整体,以水为主线,耦合物质和生态等过程,发展湖泊流域集成模拟方法,是流域水文学和湖泊水文学研究的重要内容<sup>[86]</sup>。集成模拟的基本思路是充分考虑流域高程的垂向梯度变化,就流域上、中、下游的自然过程和人类活动进行参数化,建立主体功能明确的不同子模块,在整个流域上加以集成。这种方法的主要优势在于对流域不同生态服务功能的区域进行详细的个性化模块刻画,通过流域水系进行关联,从而清晰完整反映流域水与物质和能量在不同地理单元间的传递及其通量的沿程变化。目前在湖泊流域集成模拟中,未见考虑湖泊水体对局部气候的反馈机制,这方面的工作由于缺乏实测

数据验证而面临困难，已有的研究不多<sup>[69]</sup>。今后应拓展相关研究，将湖泊流域水文模型、陆面模式和区域气候模式进行关联和耦合，发展湖泊水体对区域水循环反馈机制的模拟方法，提升湖泊流域整体水文过程和水资源演变的模拟能力。

图 5 表示湖库流域上游山区、中游水库、下游平原、河口湿地、湖库水体等不同地理单元的生态梯度变化，应分别研究覆被变化的水文效应、水库水沙过程、平原区地表-地下汇流过程、湿地水力学过程和湖泊水文水动力过程等，并将湖泊水体的反馈机制耦合到区域气候模式中，以获得水体对流域降水和气温的影响。

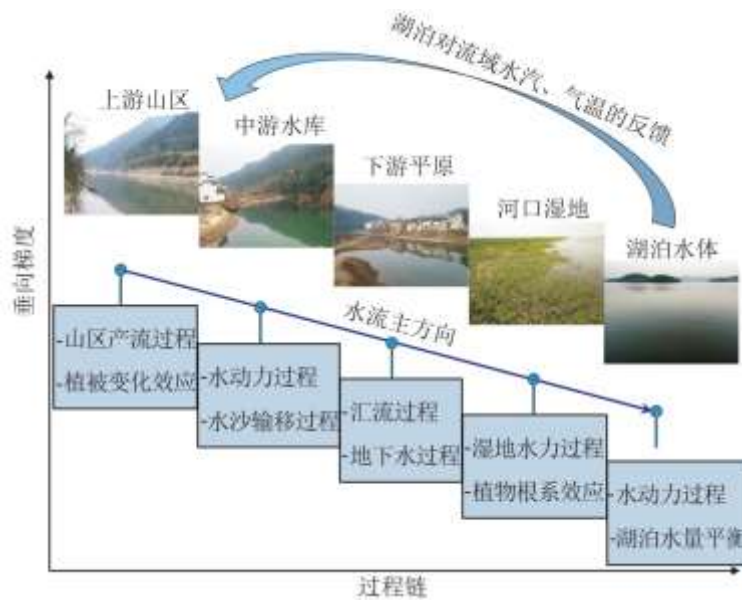


图 5 湖库流域集成模拟概念框架

## 4 结论

本文基于文献调研，结合实际案例研究，就湖泊流域水文研究中的水文极值、土地覆被对水文过程的影响、湖泊流域水文过程集成模拟、湖泊流域水平衡关系及其演变、湖泊流域水文过程对未来气候变化的响应等的研究现状进行阐述。尽管流域水文研究已相当成熟，但就目前气候变化和强烈人类活动影响下，河湖系统出现的一些新现象新问题尚缺乏有说服力的解释。这缘于我们对该系统的认识还不全面，对某些关键过程缺乏深入的研究。本文认为，湖泊流域在区域尺度上具有代表性和典型性，以其为对象，开展水文研究，对指导区域水资源管理，印证和反馈全球尺度水资源演变格局具有重大意义。

应重点关注植被与水文的相互作用、人类活动对湖泊流域洪水和干旱的影响机制、湖泊流域集成模拟等问题。植被水文效应及水资源约束的研究有助于解释全球和区域覆被变化对水资源的影响，对于旱和半干旱地区的植被恢复及河湖地表水体扩张或萎缩的解释具有指导意义；全球范围人类活动的影响强度和影响范围越加强烈，已接近或超过气候变化的影响程度。同时，全球湖泊流域洪水、干旱等极端事件频发。已有的研究认为，人类活动在一定程度上加剧了水文极端事件的严重程度和持续时间。应进一步注重流域尺度人类活动与自然过程的耦合，揭示人类活动在湖泊极端水文事件发生中的影响机理；应加强湖泊流域一体化集成模拟的研发，体现从山区流域到湖泊水体生态梯度的变化，考虑湖泊水体的反馈机制，集成各功能模块，提升对湖泊流域水量变化的预测能力，应对全球变化，保障湖泊流域水资源安全。

## 参考文献:

- 
- [1] MESSAGER M L, LEHNER B, GRILL G, et al. 2016. Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach[J]. *Nature Communications*, 2016, 7:13603, DOI:10.1038/ncomms13603.
- [2] 马荣华, 杨桂山, 段洪涛, 等. 2011. 中国湖泊的数量、面积与空间分布[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(3):394-401.
- [3] WAGENER T, SIVAPALAN M, TROCH P A, et al. The future of hydrology: An evolving science for a changing world[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46, W05301, DOI:10.1029/2009WR008906.
- [4] PEKEL J F, COTTAM A, GORELICK N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes[J]. *Nature*, 2016, 540:418-422.
- [5] LIU H, CHEN Y, YE Z, et al. Recent lake area changes in Central Asia[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9:16277.
- [6] SONG C, HUANG B, RICHARDS K, et al. Accelerated lake expansion on the Tibetan Plateau in the 2000s: Induced by glacial melting or other processes?[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50:3170-3186, doi:10.1002/2013WR014724.
- [7] WANG J, SHENG Y, TONG T S D. Monitoring decadal lake dynamics across the Yangtze Basin downstream of Three Gorges Dam[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152:251-269.
- [8] YANG G, ZHANG Q, WAN R, et al. Lake hydrology, water quality and ecology impacts of altered river-lake interactions: Advances in research on the middle Yangtze river[J]. *Hydrology Research*, 2016, 47(S1):1-7.
- [9] YAMAZAKI D, TRIGG M A, IKESHIMA D. Development of a global ~90 m water body map using multi-temporal Landsat images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 171:337-351.
- [10] HASSAN A A, JIN S. Lake level change and total water discharge in East Africa Rift Valley from satellite-based observations[J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 117:79-90.
- [11] ONYUTHA C, WILLEMS P. Uncertainties in flow-duration-frequency relationships of high and low flow extremes in Lake Victoria Basin[J]. *Water*, 2013, 5:1561-1579.
- [12] 郭华, 姜彤. 鄱阳湖流域洪峰流量和枯水流量变化趋势分析[J]. *自然灾害学报*, 2008, 17(3):75-80.
- [13] 郭华, Hu Qi, 张奇, 等. 鄱阳湖流域水文变化特征成因及早涝规律[J]. *地理学报*, 2012, 67(5):699-709.
- [14] 胡振鹏, 林玉茹. 气候变化对鄱阳湖流域干旱灾害影响及其对策. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(7):897-904.
- [15] 王怀清, 殷剑敏, 孔萍, 等. 鄱阳湖流域千年旱涝变化特点及 R/S 分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(7):1214-1220.
- [16] 唐国华, 胡振鹏. 气候变化背景下鄱阳湖流域历史水旱灾害变化特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(8):1274-1283.
- [17] 尚程鹏, 章新平, 张新主, 等. 洞庭湖流域近 54 a 来冬季降水及其异常环流特征分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(8):1284-1294.

- 
- [18]黎焱隆,章新平,尚程鹏.洞庭湖流域夏季降水特征及早涝年份大气环流分析[J].气象研究与应用,2018,39(1):1-5,23.
- [19]王磊之,胡庆芳,王银堂,等.太湖流域2016年、1991年大洪水对比分析[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(6):471-478.
- [20]LI X,ZHANG Q,XU C Y,et al.The changing patterns of floods in Poyang Lake,China:Characteristics and explanations[J].Natural Hazards,2015,76(1):651-666.
- [21]LI X,YAO J,LI Y,et al.A modeling study of the influences of Yangtze River and local catchment on the development of floods in Poyang Lake,China[J].Hydrology Research,2016,47(S1):102-119.
- [22]LI X,ZHANG Q,HU Q,et al.Lake flooding sensitivity to the relative timing of peak flows between upstream and downstream waterways:A case study of Poyang Lake,China[J].Hydrological Processes,2017,31:4217-4228.
- [23]YE X,LI X,XU C Y,et al.Similarity,difference and correlation of meteorological and hydrological drought indices in a humid climate region-The Poyang Lake catchment in China[J].Hydrology Research,2016,47(6):1211-1223.
- [24]ZHANG Q,SUN P,CHEN X,et al.Hydrological extremes in the Poyang Lake basin,China:Changing properties,causes and impacts[J].Hydrological Processes,2011,25:3121-3130.
- [25]ZHANG D,ZHANG Q,QIU J,et al.Intensification of hydrological drought due to human activity in the middle reaches of the Yangtze River,China[J].Science of the Total Environment,2018,637-638:1432-1442.
- [26]LI Y,TAO H,YAO J,et al.Application of a distributed catchment model to investigate hydrological impacts of climate change within Poyang Lake catchment (China)[J].Hydrology Research,2016,47(S1):120-135.
- [27]WOLTER P T,JOHNSTON C A,NIEMI G J.Land use land cover change in the U.S.Great Lakes Basin 1992 to 2001[J].Journal of Great Lakes Research,2006,32(3):607-628.
- [28]NEVERS M B,BYAPPANAHALLI M N,EDGE T A,et al.Beach science in the Great Lakes [J].Journal of Great Lakes Research,2014,40:1-14.
- [29]CHEN C,PARK T,WANG X,et al.China and India lead in greening of the world through land-use management[J].Nature Sustainability,2019,2:122-129.
- [30]DE JONG R,VERBESSELT J,SCHAEPMAN M E,et al.Trend changes in global greening and browning:contribution of short-term trends to longer-term change[J].Global Change Biology,2012,18:642-655.
- [31]PAN N,FENG X,FU B,et al.Increasing global vegetation browning hidden in overall vegetation greening:Insights from time-varying trends[J].Remote Sensing of Environment,2018,214:59-72.
- [32]ZHU Z,PIAO S,RANGA B,et al.Greening of the Earth and its drivers[J].Nature Climate Change,2016,6:791-795.

- 
- [33] VACA C C, van der TOLC, GHIMIRE C P. The influence of long-term changes in canopy structure on rainfall interception loss: A case study in Speulderbos, the Netherlands[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22: 3701-3719.
- [34] SNELGROVE J R, BUTTLE J M, TETZLAFF D. Importance of rainfall partitioning in a northern mixed forest canopy for soil water isotopic signatures in ecohydrological studies[J]. *Hydrological Processes*, 2019, 1-19. doi:10.1002/hyp.13584.
- [35] FANG W, LU N, LIU J, et al. Canopy transpiration and stand water balance between two contrasting hydrological years in three typical shrub communities on the semiarid Loess Plateau of China[J]. *Ecohydrology*, 2019, 12:e2064.
- [36] KOZII N, LAUDON H, OTTOSSON-LOFVENIUS M, et al. Increasing water losses from snow captured in the canopy of boreal forests: A case study using a 30 year data set[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31:3558-3567.
- [37] JIAO J, SU D, HAN L, et al. A Rainfall interception model for alfalfa canopy under simulated sprinkler irrigation[J]. *Water*, 2016, 8:585, doi:10.3390/w812058.
- [38] ZHENG J, FAN J, ZHANG F, et al. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss by maize canopy on the semi-arid Loess Plateau of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 195:25-36.
- [39] CIEZKOWSKI W, BEREZOWSKI T, KLENIEWSKA M, et al. Modelling wetland growing season rainfall interception losses based on maximum canopy storage measurements[J]. *Water*, 2018, 10, 41; doi:10.3390/w10010041.
- [40] BACQ-LABREUIL A, CRAWFORD J, MOONEY S J, et al. Effects of cropping systems upon the three-dimensional architecture of soil systems are modulated by texture[J]. *Geoderma*, 2018, 332:73-83.
- [41] SCHOLL P, LEITNER D, KAMMERER G, et al. Root induced changes of effective 1D hydraulic properties in a soil column[J]. *Plant Soil*, 2014, 381(1-2):193-213.
- [42] CARMINATI A, MORADI A B, VETTERLEIN D, et al. Dynamics of soil water content in the rhizosphere[J]. *Plant and Soil*, 2010, 332(1-2):163-176.
- [43] CHEN R, HUANG J W, CHEN Z K, et al. Effect of root density of wheat and okra on hydraulic properties of an unsaturated compacted loam[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 70:493-506.
- [44] SONG L, LI J H, ZHOU T, et al. Experimental study on unsaturated hydraulic properties of vegetated soil[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 103:207-216.
- [45] LEUNG A K, GARG A, Ng C W W. Effects of plant roots on soil-water retention and induced suction in vegetated soil[J]. *Engineering Geology*, 2015, 193:183-197.
- [46] WU G L, YANG Z, CUI Z, et al. Mixed artificial grasslands with more roots improved mine soil infiltration capacity[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 535:54-60.

- 
- [47] JOTISANKASA A, SIRIRATTANACHAT T. Effects of grass roots on soil-water retention curve and permeability function[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(11):1612-1622.
- [48] LEUNG A K, BOLDRIN D, LIANG T, et al. Plant age effects on soil infiltration rate during early plant establishment[J]. Geotechnique, 2017, 68(7):646-652.
- [49] VERGANI C, GRAF F. Soil permeability, aggregate stability and root growth: A pot experiment from a soil bioengineering perspective[J]. Ecohydrology, 2016, 9(5):830-842.
- [50] YU Y, LOISKANDL W, KAUL H P, et al. Estimation of runoff mitigation by morphologically different cover crop root systems[J]. Journal of Hydrology, 2016, 538:667-676.
- [51] KNIGHTON J, SINGH K, EVARISTO J. Understanding catchment-scale forest root water uptake strategies across the continental United States through inverse ecohydrological modeling[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47, e2019GL085937.
- [52] 王媛媛, 贾炳浩, 谢正辉. 根系水力再分配对陆地碳水循环的影响——以亚马孙流域为例[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(2):456-467.
- [53] VINEY N R, SIVAPALAN M. LASCAM: The large scale catchment model, User Manual, version 2[R]. Centre for Water Research, University of Western Australia, 2000.
- [54] NEITSCH S L, ARNOLD J G, KINIRY J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation, version 2000[R]. Texas Water Resources Institute, College Station, Texas, TWRI Report TR-191, 2002.
- [55] HydroGeoLogic. MODHMS: A comprehensive MODFLOW-based hydrologic modeling system, Version 1.1, code documentation and user's guide[R]. HydroGeoLogic Inc., Herndon, VA, 2000.
- [56] PANDAY S, HUYAKORN P S. A fully coupled physically-based spatially-distributed model for evaluating surface/subsurface flow[J]. Advances in Water Resources, 2004, 27:361-382.
- [57] ZHANG Q, WERNER A D. Integrated surface-subsurface modeling of Fuxianhu Lake catchment, Southwest China[J]. Water Resources Management, 2009, 23:2189-2204.
- [58] HARBAUGH A W. MODFLOW-2005, the U.S. geological survey modular ground-water model—the ground-water flow process[R]. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16, 2005.
- [59] LI Y, ZHANG Q, YAO J, et al. Hydrodynamic and hydrological modeling of the Poyang Lake catchment system in China[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(3):607-616.
- [60] RAYBURG S, THOMS M. A coupled hydraulic-hydrologic modelling approach to deriving a water balance model for a complex floodplain wetland system[J]. Hydrology Research, 2009, 40(4):364-379.

- 
- [61]孙占东, 黄群, Lotz Tom. 洞庭湖流域分布式水文模型[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(8):1299-1304.
- [62]DESSIR M, VERHOEST N E C, PAUWELS V R N. Water balance of a lake with floodplain buffering:Lake Tana, Blue Nile Basin, Ethiopia [J]. Journal of Hydrology, 2015, 522:174-186.
- [63]KUMMU M, TES S, YIN S, et al. 2014. Water balance analysis for the Tonle Sap Lake-floodplain system [J]. Hydrological Processes, 2014, 28:1722-1733.
- [64]DOBROVOL' SKII S G. Year-to-Year and Many-Year River Runoff Variations in Baikal Drainage Basin[J]. Water Resources, 2017, 44(3):347-358.
- [65]吉红霞, 吴桂平, 刘元波. 极端干旱事件中洞庭湖水面变化过程及成因[J]. 湖泊科学, 2016, 28(1):207-216.
- [66]YAO J, ZHANG Q, YE X, et al. Quantifying the impact of bathymetric changes on the hydrological regimes in a large floodplain lake:Poyang Lake[J]. Journal of Hydrology, 2018, 561:711-723.
- [67]WUEBBLES D J, HAYHOE K, PARZEN J. Introduction:Assessing the effects of climate change on Chicago and the Great Lakes [J]. Journal of Great Lakes Research, 2010, 36:1-6.
- [68]YE X, 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.
- [69]THIERY W, DAVIN E L, PANITZ H J, et al. The impact of the african great lakes on the Regional Climate[J]. Journal of Climate, 2015, 28, 4061-4085.
- [70]PRUDHOMME C, GIUNTOLI I, ROBINSON E L, et al. Hydrological droughts in the 21st century, hot spots and uncertainties from a global multimodel ensemble experiment[J]. PNAS, 2014, 111(9), 3262-3267.
- [71]YE X, LI Y, LI X, et al. Factors influencing water level changes in China' s largest freshwater lake, Poyang Lake, in the past 50 years[J], Water International, 2014.
- [72]LI Y, ZHANG Q, WERNER A D, et al. The influence of river-to-lake backflow on the hydrodynamics of a large floodplain-lake system (Poyang Lake, China) [J]. Hydrological Processes, 2017, 31, 117-132.
- [73]ZHANG Q, YE X, WERNER A D, et a. An investigation of enhanced recessions in Poyang Lake:Comparison of Yangtze River and local catchment impacts[J]. Journal of Hydrology, 2014, 517:425-434.
- [74]GUO H, HU Q, ZHANG Q, et al. Effects of the Three Gorges Dam on Yangtze River flow and river interaction with Poyang Lake, China:2003-2008[J]. Journal of Hydrology, 2012, 416-417:19-27.
- [75]ZHANG X L, ZHANG Q, WERNER A D, et al. Characteristics and causal factors of hysteresis in the hydrodynamics of a large floodplain system:Poyang Lake (China) [J]. Journal of Hydrology, 2017, 553:574-583.

- 
- [76]韩剑桥, 孙昭华, 杨云平. 三峡水库运行后长江中游洪、枯水位变化特征[J]. 湖泊科学, 2017, 29(5):1217-1226.
- [77]ZHANG Q, LI L, WANG Y G, et al. Has the Three-Gorges dam made the Poyang lake wetlands wetter and drier?[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39, L20402, 7 PP., doi:10.1029/2012GL053431.
- [78]ZHANG Q, WERNER A D. Hysteretic relationships in inundation dynamics for a large lake-floodplain system[J]. Journal of Hydrology, 2015, 527:160-171.
- [79]LI X, ZHANG Q, XU C Y. Suitability of the TRMM satellite rainfalls in driving a distributed hydrological model for water balance computations in Xinjiang catchment, Poyang lake basin[J]. Journal of Hydrology, 2012, 426-427:28-38.
- [80]ZHANG Q, LI L J. Development and application of an integrated surface runoff and groundwater flow model for a catchment of Lake Taihu watershed, China[J]. Quaternary International, 2009, 208(1-2):102-108.
- [81]TONG X, BRANDT M, YUE Y, et al. Forest management in southern China generates short term extensive carbon sequestration[J]. Nature Communications, 2020, 11:129. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13798-8>.
- [82]LIU Y, WU G, ZHAO X. Recent declines in China's largest freshwater lake: trend or regime shift?[J]. Environmental Research Letters, 2013, 8, 014010, 9pp.
- [83]ZHANG D, ZHANG Q, WERNER A D, et al. GRACE-based hydrological drought evaluation of the Yangtze River Basin, China[J]. Journal of Hydrometeorology, 2016, 17:811-828.
- [84]HADDELAND I, HEINKE J, BIEMANS H, et al. Global water resources affected by human interventions and climate change[J]. PNAS, 2014, 111(9), 3251-3256.
- [85]SCHEWE J, HEINKE J, GERTEN D, et al. Multimodel assessment of water scarcity under climate change[J]. PNAS, 2014, 111(9), 3245-3250.
- [86]张奇, 刘元波, 姚静, 等. 我国湖泊水文学研究进展与展望[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5):1360-1379.