

## 水文水资源

文章编号: 1006-0081(2016)08-0008-03

# 基于 IPCC 最新气候模型的 赞比西河流域未来水力发电评估

[澳大利亚] H. 克林 等

**摘要:** 目前, 南非赞比西河流域已建有几座大型水电站, 规划中还将建设更多的水电站。然而, 气候变化直接威胁到这些工程建设经济可行性。基于一系列最新的气候变化预测, 对赞比西河流域现有及新建的大型水电站未来的发电情况进行了评估。

**关键词:** 气候变化; 变化预测; 水电资源开发; 影响预测; 赞比西河流域; 南部非洲

**中图法分类号:** P467

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.15974/j.cnki.slsdkb.2016.08.002

南部非洲的赞比西河流域(1 400 万 km<sup>2</sup>) 覆盖 8 个国家, 流域范围内已建有卡里巴(Krība, 1 470 MW) 水电站、卡奥拉巴萨(Cahora Bassa, 2 075 MW) 水电站、卡富埃峡(Kafue Gorge, 990 MW) 水电站等主要大型水电站。这些已建电站以及在建的新水电站都有着巨大的扩容潜力, 同时还有几个水电工程正在规划中。

气候变化可能对未来水力发电产生相当大的影响。温度升高导致蒸发量增大, 更重要的是, 降雨量可能发生变化并影响入库流量。非洲部分地区未来的降雨量可能会增加(如非洲中部), 而非洲南部的降雨量预计将减小。这将严重影响到赞比西河新水电站投资的经济可行性。目前, 已有少量相关研究, 定量模拟了气候变化对赞比西河某些水电站的影响。尽管非洲大陆气候模型在不断更新和发展, 但气候预测结果还存在有较大的不确定性。

本文根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的第 5 次评估报告中最新的全球气候模型(GCM)的预测, 对赞比西河流域已建和规划中的大型水电站未来受气候变化的影响进行了评估。这是首次利用最新预测结果对赞比西河进行的评估。为了定量评估气候变化的影响, 采用了赞比西河决策支持系统进

行分析。该系统是最先进的水资源规划工具, 同时耦合了降雨-径流模型与水库调度模型。

## 1 赞比西河决策支持系统

赞比西河决策支持系统是一个基于网络的、交互式的规划工具, 可分析赞比西河及其主要支流流量受气候变化与水资源开发的影响。图 1 为系统主界面。选定某种气候情景(降雨、温度)和水资源开发情景(水库、调度规则、灌溉取水), 对 20 世纪中期到 21 世纪末期间的径流进行月尺度模拟研究。赞比西河决策支持系统将 27 个子流域的降雨和温度数据作为模型的输入条件, 模拟了径流产流情况, 并考虑了土壤含水量、蒸散发量以及地表径流和基流的径流分割等影响因素。通过将沿河网的径流量进行汇总来计算断面流量, 并逐一向下游河段演算。接着, 根据洪泛区的运用和水库运行情况对流量进行修正。之前有学者对模型及其验证方法进行了详细描述。

运用赞比西河决策支持系统, 可查询河网中任何位置的流量。用户可增加新的水库或对已建水库的特性(调度规则、水力发电特征等)进行修改或编辑, 并能以图表形式来表现模拟结果。

收稿日期: 2016-04-20

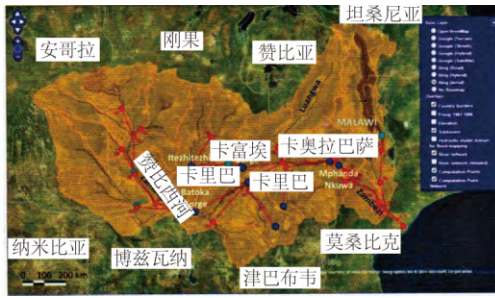


图1 赞比西河决策支持系统主界面

## 2 气候模型预测

南非开普敦大学(University of Cape Town)的气候系统分析团队(CSAG)给出了非洲未来的气候预测数据。按照非洲大陆几百个站点的尺度,利用自组织映射网络(Self-Organizing Maps, SOM)对国际耦合模式比较计划气候模型(CMIP5)所使用的GCM数据(IPCC也采用该数据)进行降尺度处理,该数据发布在气候信息平台(CIP)上,选取的是RCP4.5排放情景的数据,代表着未来温室气体按“中-低”程度排放。将各站点的气候变化信号进行区划,用增量模型构建了赞比西河27个子流域未来降雨和温度数据时间系列。总共使用了11个气候模型的数据,得到了11个赞比西河的气候预测结果,并输入到赞比西河决策支持系统中。这样的11个气候模型数据(情景)集,能够评估预测结果的不确定性。本文重点是研究近期(2021~2050年)模拟结果,并以1961~1990年的模拟结果作为模型基准,与未来长期(2071~2100年)的情况进行比较。

所有气候预测(包括1961~1990年)都基于世界银行“适度发展”情景,以充分考虑未来灌溉用水的影响。

## 3 模拟结果

图2为从气候条件输入到降雨径流模拟再到发电模拟的工作流程。图中温度与降雨采用上游流域的面平均值表示,流量是指卡里巴水库年均出流流量。发电量是考虑了未来(从1470 MW)扩容到2340 MW时的卡里巴发电站的发电量模拟值。大多数气候模型预测未来气候变暖的量级(2021~2050年间气温升高约1.7℃,2071~2100年间升高约2.5℃)是相当一致的(与1961~1990年相比)。尽管2021~2050年间降雨量有下降趋势,而且2071~2100年间下降趋势更加明显,但总体上,降雨量预测数据较为分散。降雨量预测结果的不确定

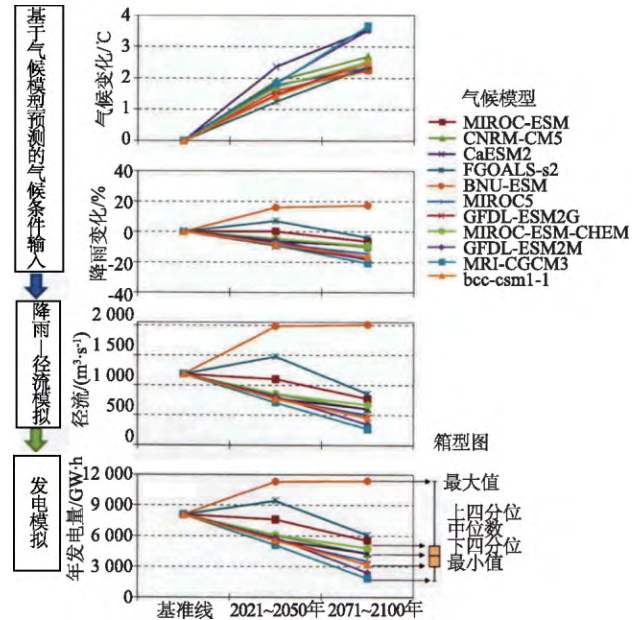


图2 卡里巴水电站流量及发电量模拟流程

性直接导致未来流量值的离散化,因此水电站发电量预测范围也相当大(见图2)。箱形图统计了11种气候情景的降雨量预测结果,用11个预测值的中位数、上四分位、下四分位以及最大值、最小值表示其统计特征(见图4中右下方)。

可以通过11种气候情景的预测值中位数来预测未来气候径流条件(见表1)。模拟显示,赞比西河与卡富埃河近期(2021~2050年)年径流降幅可能超过25%,而卢安瓜(Luangwa)河、希雷(Shire)河的下降幅度不到10%(与1961~1990年比较)。赞比西河三角洲的预测结果均出现下降。长期(2071~2100年)预测中,流量的大幅度下降更加明显,除卢安瓜河外(下降约17%),其他河流所有预测结果都出现了40%~55%的下降幅度。这将使赞比西河流域水资源管理面临极其复杂的局面。

流量模拟结果呈现大幅下降的主要原因是模型径流对降雨变化的高度敏感性,由于赞比西河流域的水平衡是属于水限制系统(相对于能量限制系统而言),径流量对气候变暖(影响蒸散发)的敏感性相对较低。

未来流量预测表明,水电站发电量会受到不利影响(见表2)。然而,每座水电站都有着自身的特征,因此影响程度也有所差异。例如,规划中的巴托卡峡电站,其规模相对较小,水库不能蓄存较多的洪水,这意味着溢洪道需用来频繁泄洪。如果入流减少,超溢的洪水水量也会减少,受气候变化而减少的发电量不会很大。此外,卡里巴水电站水库较大,溢洪道泄流损失的发电量较少,因此入流减少将直接

导致进入水轮机的流量减小,从而使发电量减小。而且,由于卡里巴水库水面大(5 500 km<sup>2</sup>),气候变暖会导致其蒸发量进一步加大。

以上主要是针对 11 种气候预测结果中位数进行讨论。如果考虑所有气候情景,预测结果将存在不确定性。5 个主要流域未来流量箱形图的最大值与最小值之间的范围相当大,这种差异性可能受极端值的影响。需要重点关注图 2 中“箱体”的情况。2071~2100 年的预测结果表明,赞比西河上游四分位距相对较小,流量差异预计为 50%~70%(与 1961~1990 年比较)。此外,希雷河四分位距是赞比西河上游的 2 倍,说明预测结果的不确定性较大。

表 1 赞比西河及其主要支流近期长期气候与流量模拟变化

研究对象	所在流域面积/km <sup>2</sup>	温度/℃		年降雨变化/%		模拟年龄流变化/%	
		2021~2050 年	2071~2100 年	2021~2050 年	2071~2100 年	2021~2050 年	2071~2100 年
赞比西河上游 (有维多利亚瀑布)	519 399	1.8	+2.6	-6.7	-10.3	-28.4	-40.9
卡富埃河 (建有卡富埃峡电站)	152 737	1.7	2.5	-3.1	-7.9	-22.9	-44.6
卢安瓜河	142 048	1.6	2.4	-0.2	-4.8	-4.8	-16.7
希雷河	151 537	1.5	2.3	+0.7	-7.3	-9.0	-54.3
赞比西河三角洲地带	1 372 935	1.7	2.4	-4.1	-9.9	-18.0	-44.6

注:上游年均变化是相对与基准模拟值而言。

表 2 水电站模拟结果

水电站	容量/ MW	年发电量/GW·h			年负荷率/%		
		基准	2021~2050 年	2071~2100 年	基准	2021~2050 年	2071~2100 年
巴托卡峡(Batoka)	1 600	8 942	7 812	7161	64	56	51
卡里巴	2 340	8 063	5 803	4 252	39	28	21
伊泰济-泰济(Itezhi-Tezhi)	120	676	628	571	64	60	54
卡富埃峡	990	6 103	5 372	4 460	70	62	51
卡奥拉巴萨	3 275	17 603	14 523	11 418	61	51	40
姆潘达恩库瓦(Mphanda Nkuwa)	1 500	9 926	8 585	7 015	75	65	53

注:基准模拟结果是根据 1961~1990 年的气候观测数据进行模拟获得的。近期模拟结果是 11 个气候预测情景的模拟结果中位数。现有电站装机容量包括规划中未来扩容量。规划新建的水电站,装机容量有可能变化。已建电站(卡里巴、卡奥拉巴萨、伊泰济-泰济)装机容量包括规划中未来扩容量。巴托卡峡、姆潘达恩库瓦是规划新建的水电站,装机容量有可能改变。

## 4 结 论

本文采用了最新的气候模型预测评估未来赞比西河及其主要支流水电站的发电量。这是首次利用最新预测结果对赞比西河进行评估。应用这套气候情景预测系列模型,能够对未来发电量的变化范围进行合理评估。

利用赞比西河决策支持系统进行水文模拟,可快速评估各已建和拟建的水电站。结果显示,未来径流量及发电量可能大幅度减少。赞比西河流域的

2071~2100 年希雷河的流量最少可能下降 25%,而最大可能将下降 75%。

分析水电站发电量预测结果时,也要有类似的考虑,如卡里巴电站 2021~2050 年发电量将增加 70%~85%(与 1961~1990 年比较)。在最乐观的气候预测情景下,卡里巴电站发电量将增加 140%。实际上对所有水电站来说,在最乐观的气候预测情景下,无论是近期(2021~2050 年)还是长期(2071~2100 年)情形,其发电量都会增加。然而,如果考虑到所有气候预测结果的分散性,这一情况将不可能发生。11 种气候预测情景的预测结果表明,气候变化将对赞比西河流域水力发电量产生负面影响。

气候变化影响是不均匀的,具体取决于各个子流域和植被情况。

尽管预测的未来发电量将大幅度减少,并不意味着水电站会停止发电。相反地,应考虑新的气候预测结果,对规划中水电站的长期经济可行性进行重新评估。不仅要考虑水电站的发电量,还要考虑水库其他潜在效益,这些效益(通过防洪或加大枯季下泄流量)有可能缓解气候变化影响。水电站设计(装机容量、库容等)以及调度规则应该更好适应将来的水库入流情况,从而提高工程的气候适应力。

(下转第 30 页)

地挑选特许权者的问题已不复存在,取而代之的是相对直接的再融资过程,将类似于普通的债券发行或股权出售。

(2) 更大的必然性。合同框架也更为简单,许多交易要求不再列为必备,这样就可以使项目在准备阶段的不确定性降低,使项目按期完成的可信度得以提高。

(3) 最佳开发。在项目优化、设计和建设阶段,国有执行机构保留控制权,可以自由决策,以确保项目开发能够满足最佳的国家长期利益。

(4) 更多的经济租金。这种方式能够降低融资费用,减少项目的建设成本,特别是当项目建设采用单一合同这种更为公共融资者接受的合同形式时。这样就能从项目中获得更多的经济租金。

#### 4 结 语

本文源自作者个人的经验,遇到过太多潜在的、

有市场前景的私营水电项目,有些项目不管开发者如何努力最终都无法完成。有些特许权和项目购买合同谈判,以及涉及设计和建设管理、环保和社会,特别是筹资等尽管各方都比较满意,但往往都被证明是无底洞。

当然,也有一些项目成功地跨越了所有障碍,期待它们为开发者创造合理收益。作为一个行业,私人融资的水电项目并不多。研究认为,其原因是 BOOT 融资模式并不能很好地适用于大而复杂的水电项目,因此,必须要寻求可替代的融资模式。

最后,有必要明确引入私营企业的目的。有人会认为是为了提高效率和更好地利用资源,而在现实中这些优势却难以显示出来。只有使用世界资本市场上巨大的私人资金,才有可能使更多的未被开发的资源得到开发利用,这些开发项目能为国家带来丰厚的利益。

(兰荣蓉 赵秋云 编译)

(上接第 10 页)

可对赞比西河决策支持系统的模拟情景进行改进和更具体化,从中寻求缓解气候变化影响的措施。

针对气候模型的预测结果,下一步应考虑不同的排放情景。进行国际区域气候降尺度试验(CORDEX)研究更重要。这项研究采用高精度气候模型对非洲大陆进行模拟,提高模型预测的可靠性。CORDEX 的首批气候预测成果已于近期公布。

本文对赞比西河的研究表明,先进的水资源规划不能忽略气候变化的影响,而且在任何一项工程的中长期规划中都必须加以考虑。赞比西河研究所采用的数据库与模型工具可推广到其他非洲流域类似的、详细的评估中。

毛红梅 陈欣 译  
(编辑:李 慧)

(上接第 26 页)

(3) 完成 5 个体系的建设:①编制城市洪水风险图,完善预警及指挥系统;②对易发洪水区域的土地以及建筑物等进行统一规划和管理;③建立防汛救灾指挥系统,加强防灾物资储备及抢险队伍建设;④建立洪泛区洪水保险制度<sup>[3]</sup>;⑤开展海绵城市建设,提高水面率,限制地坪,降低径流系数。

参考文献:

[1] 宁波市水利志编纂委员会.宁波市水利志[M].北京:

中华书局,2005.

[2] 宁波市水利水电规划设计研究院.甬江流域防洪治涝规划[R].宁波:宁波市水利水电规划设计研究院,2011.

[3] 浙江省水利水电勘测设计院.宁波市新一轮城市总体规划下城市防洪排涝治理思路及对策研究[R].杭州:浙江省水利水电勘测设计院,2015.

(编辑:唐湘茜)