

中国三峡水库对上下游地区降水影响的概率研究*

Probabilistic Study on Influence of Three Gorges Reservoir in China on Precipitation of Its Upstream and Downstream Regions

严少敏¹ 吴光^{1,2,*}

YAN Shao-min¹, WU Guang^{1,2}

(1. 广西科学院国家非粮生物质能源工程技术研究中心, 广西南宁 530007; 2. 深圳市追梦科技咨询有限公司, 广东深圳 518054)

(1. National Engineering Research Center for Non-food Biorefinery, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China; 2. DreamSciTech Consulting, Shenzhen, Guangdong, 518054, China)

摘要: 根据 35 座世界最大体积水库上下游 224 个地区建坝前后的年降水量和月降水量, 分析探讨中国三峡水库对其周边地区降水模式的影响。结果表明, 这些大水库对其周边地区降水模式的影响是: 增加平均年降水量尤其是在下游地区, 不影响平均月降水量, 增加最小降水量, 减少最大降水量。大水库有助于其周边地区抵抗极端降水。在最佳状况下, 三峡水库能够抵消最大降水和最小降水的不良影响, 有 17/35 的机率增加上下游地区的年降水量, 有可能使最小降水量增加 10% ~ 120%, 将最大降水量减少 20%; 在最差状况下, 三峡水库有可能加强最大降水量和最小降水量的不良影响, 有 3/35 的机率减少上下游地区的年降水量, 2/27 的机率减少下游地区的年降水量, 可以使下游地区的最小降水量降低 20%。

关键词: 降水 水库 周边地区 三峡水库

中图分类号: P426.6 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2012)02-0129-05

Abstract: The precipitations in 35 world largest volume reservoirs were analyzed in order to find out their precipitation patterns. The precipitation patterns were obtained from the analyses of the annual and monthly precipitations of 224 upstream and downstream regions around the 35 reservoirs between predam and postdam periods. The results show that those reservoirs have increased the average annual precipitation especially in downstream regions, no influence on the average monthly precipitation, increased the minimal precipitation, and decreased the maximal precipitation. This study reveals huge advantage of world largest reservoirs for their surrounding regions because they can help to resist to the extreme precipitations, which provides probabilistic evidence to explore possible impacts of the Three Gorges Reservoir on the precipitation patterns of its surrounding areas. At the best scenario, the Three Gorges Reservoir would have 17/35 chances to increase the annual precipitations in its both upstream and downstream regions, the chance to increase the minimal precipitation to 120% from 10%, and the chance to decrease the maximal precipitation up to 20%. At the worst scenario, the Three Gorges Reservoir would have 3/35 chances to decrease the annual precipitations in both upstream and downstream regions and 2/27 chances to decrease the annual precipitations in downstream regions, and the

chance to decrease the minimal precipitation up to 20% in downstream regions.

Key words: precipitation, reservoirs, surrounding location, Three Gorges Reservoir

收稿日期: 2012-02-07

修回日期: 2012-03-26

作者简介: 严少敏(1958-), 女, 博士, 研究员, 主要从事计算变异学和模型研究。

* 广西自然科学基金项目(10-046-06, 2010GXNSFF013003, 11-031-11) 资助。

** 通讯作者: E-mail: hongguanglishibahao@yahoo.com。

大型水坝有许多作用, 包括水力发电、饮用供水、

灌溉供水、防洪、改善环境等等。但是,大型水库也会带来出乎意料的不利影响。通常很难确定不可预测和突发性事件是否由于水库本身还是其它未知因素引起。三峡大坝设在中国湖北,是世界上装机容量最大的水电站(20300kW)。目前三峡水库在世界上最大体积水库的排名为第29位,其标称容量为 39.3km^3 。建设三峡水库的项目通过了严格考核,其对环境的影响也进行了仔细评估^[1]。事实上,三峡水库作为一个非常大的不确定因素已成为科学和传媒讨论的焦点。其中一个严肃的问题涉及到2011年春季中国长江下游地区出现的极为严重的干旱是否由于三峡水库引起的对环境的不可预见性和突发性影响。因为这些受影响地区的水流量是在三峡大坝的控制下。因此三峡水库的建立是否改变其上下游地区的降水模式备受关注。2011年春季的干旱是五十多年来最严重的,这使如何区分这次干旱是极端天气的影响还是三峡水库的影响变得更加复杂。

降水与许多因素相关,确定性和不确定性的因素均会不同程度地影响降水量^[2,3],有资料表明大型水坝可以改变极端降水模式^[4]。可以通过比较建坝前后水库周边地区的降水模式得出的结论来回答上述这些问题,但是这个方法对新近建成的三峡水库是行不通的,因为还没有足够的数据进行此类比较。在此背景下,比较世界上最大的水库建坝前后周边地区的降水变化是非常有益的。本研究通过分析世界上35座最大体积水库建坝前后周边地区的降水模式来探讨三峡水库对降水模式的可能的影响。

1 材料和方法

2011年维基百科记载了45座世界上最大的水库,其标称容量范围 $29 \sim 108.6\text{km}^3$ ^[5]。因为每座水库的大小不同,在大坝的不同距离分别选取水库的上下游地区,确定选定地点的经纬度^[6],然后根据经纬度在“g55wld0098.dat”(Version 1.0)数据库获得降水数据^[7]。此数据库记录了从1901年到1998年每隔 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 经纬度格的月降水量^[8],再计算其相应的年降水量。

在这些世界上最大的水库中,美国的胡佛水坝是最早的,建成于1936年,而中国的三峡大坝是最新的一座,于2009年完成。因为“g55wld0098.dat”(Version 1.0)数据库只有1901年到1998年的降水数据,因此在1992年之前建成的35座大水库被列入统计分析,其中4座位于亚洲,6座位于非洲,10座位于俄罗斯,10座位于北美,5座位于南美。共选取224个地区,包括97个上游地区和120个下游地区,分别

比较上下游等周边地区建坝前后的年降水量和月降水量。

2 结果与分析

2.1 平均年降水量

有关这35座世界上最大体积水库的224个周边地区的降水量,建坝前平均有67年降水数据(介于35年到91年之间),建坝后平均有31年降水数据(介于7年到63年之间)。对于所有周边地区,平均年降水量建坝前为 $(658 \pm 442)\text{mm}$,建坝后为 $(685 \pm 485)\text{mm}$,它们的差别具有统计学意义($P=0.020$),表明大坝的建立提高了水库上下游地区的平均年降水量。这个结果与Hossain的观测结果^[4]是一致的,他的分析显示建坝后的降雨频率为建坝前的两倍。

接下来比较上游地区和下游地区的建坝前后的降水量。97个上游地区建坝前后的平均年降水量分别为 $(740 \pm 493)\text{mm}$ 和 $(748 \pm 509)\text{mm}$,无统计差异($P=0.511$),表明大水库未对其上游地区的平均年降水量造成显著影响。这一结果与实际观察相似,即在2011年春季三峡水库上游地区没有严重的干旱。120个下游地区建坝前后的平均年降水量分别为 $(687 \pm 488)\text{mm}$ 和 $(719 \pm 538)\text{mm}$,差异非常显著($P=0.045$),表明大水库增加了其下游地区的平均年降水量。而这个结果不能解释2011年春季三峡水库下游地区的严重干旱,因为大水库一般是增加其下游地区的平均年降水量。一个合理的解释是极端天气可能会抵消三峡水库对其下游地区降水的积极作用。即或三峡水库上游地区的天气并非很不同于下游地区的天气,水库中的水可能会抵消天气对上游地区的负面影响。

由于不同水库降水量变化各不相同,因此使用变化百分比而不是绝对的降水量进行比较。图1表明35座水库的年降水量几乎都增加了。与建坝前的平均年降水量相比,建坝后上游地区的平均年降水量在25座水库中有12座发生显著变化,包括4座下降,8座增加(图1a);建坝后下游地区的平均年降水量在27座水库中有12座发生显著变化,包括2座下降,10座增加(图1b);建坝后周边地区的平均年降水量在35座水库中有20座发生显著变化,包括3座下降,17座增加(图1c)。说明这些大坝的建立影响了水库周边地区的平均年降水量。但是,我们不能确定三峡水库的影响属于哪种类型。因此,仅从概率角度分析,三峡水库下游地区的平均年降水量有 $15/27$ 的机率不变, $2/27$ 的机率减少, $10/27$ 可能性增加。

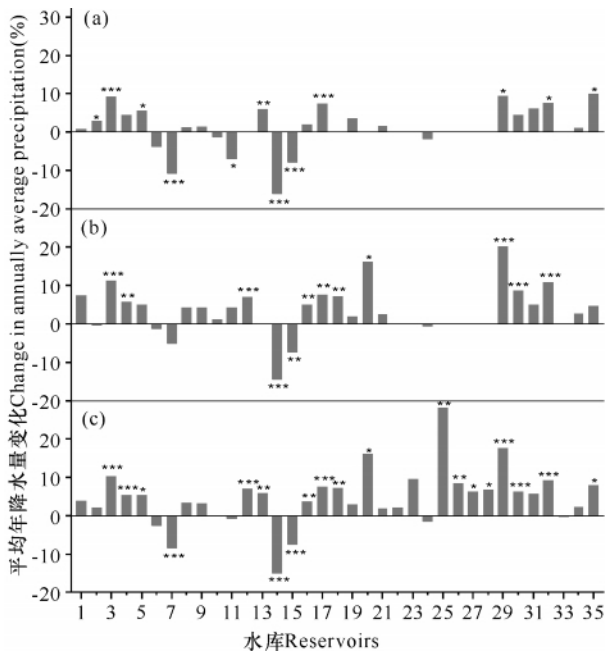


图1 35座世界最大水库的97个上游地区(a)、120个下游地区(b)和224个周边地区(c)在建坝前后年平均降水量的变化

Fig. 1 Comparison of annually average precipitations between predam and postdam periods in 97 upstream locations (a), 120 downstream locations (b) and 224 surrounding locations of 35 world largest reservoirs

* : $P < 0.05$, ** : $P < 0.01$, *** : $P < 0.001$.

2.2 平均月降水量

实际上2011年6月的大雨结束了春季沿长江下游地区的严重干旱,提示月降水量的分析同样具有重要的意义。从表1结果可以看出,大部分水库没有显著地影响月降水量。这一结果提示,2011年春季长江下游地区的严重干旱很可能是由于极端天气的影响造成的。

从图2结果可以总结得出,大水库有增加月平均降水量的趋势,因为增加月降水量的水库数明显多于减少月降水量的水库数。水库上游地区平均月降水量的增加主要发生在4月和11月,水库下游地区平均月降水量的增加主要发生在4月和8月,就所有水库周边地区而言,平均月降水量的增加主要出现在4月。这一结果与2011年春季长江下游地区发生的严重干旱不一致,因为6月的大雨给该地区带来了洪涝;鉴于长江流域1~5月一般很少下雨,我们尚无法排除三峡水库不属于减少月平均降水量的少数水库。

2.3 最小及最大降水量

三峡水库下游地区的严重干旱和洪涝灾害表明分析最小降水量和最大降水量模式的重要性。最小降水量的增加和最大降水量的减少几乎出现在全年的各个月份中,此现象在水库的所有周边地区及上下

表1 1~12月平均月降水量有显著变化和无显著变化的水库数

Table 1 Number of reservoirs with either significant or insignificant changes in average monthly precipitations from January to December

月份 Month	降水量有显著变化 Significant change in precipitations			降水量无显著变化 Insignificant change in precipitations		
	全部地区 All	上游地区 Up-stream	下游地区 Down-stream	全部地区 All	上游地区 Up-stream	下游地区 Down-stream
Jan	15	8	11	20	17	16
Feb	20	9	12	15	16	15
Mar	14	8	12	21	17	15
Apr	13	11	14	22	14	13
May	10	10	7	25	15	20
Jun	15	6	9	20	19	18
Jul	13	4	8	22	21	19
Aug	14	11	9	21	14	18
Sep	15	4	7	20	21	20
Oct	11	7	9	24	18	18
Nov	15	10	13	20	15	14
Dec	20	4	9	15	21	18

月降水量有显著变化的水库数与月降水量无显著变化的水库数之间的差异在全部地区、上游地区和下游地区均非常显著 ($P \leq 0.001$)。Remarkable differences were found in the numbers of reservoirs between having significant and insignificant changes in monthly precipitations in all locations, in upstream locations, and in downstream locations ($P \leq 0.001$) respectively.

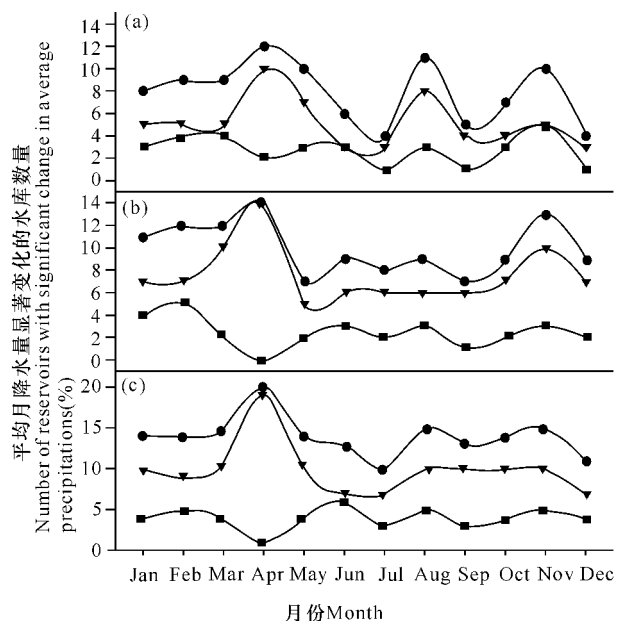


图2 1~12月月平均降水量发生显著变化的水库数

Fig. 2 Number of reservoirs with significant change in average monthly precipitations from January to December

(a) 上游地区, $P = 0.004$; (b) 下游地区, $P < 0.001$; (c) 全部地区, $P < 0.001$. —●—: 全部, —▼—: 增加, —■—: 减少。

(a) Upstream locations, $P = 0.004$; (b) Downstream locations, $P < 0.001$; (c) All locations, $P < 0.001$. —●—: Total, —▼—: Increase, —■—: Decrease.

游地区均是如此(图3)。这一结果展示了大水库在减轻干旱和洪涝方面的巨大作用。然而,大水库的这种积极作用并未在2011年春季三峡水库下游地区显示,这使我们再次考虑三峡水库可能出现的最坏情况,因为最小降水量在3月达到最低水平(图3b中零线下的唯一黑柱),旱情加重,这与2011年春季三峡水库下游地区的干旱相一致。

2.4 短期及长期降水量

另一个重要的问题是,大水库对其周边地区的降水是否会有不同于长期效应的短期影响。这个问题涉及水库周围环境的演化。为了探讨这个问题,我们将建坝后的降水按5年的时间间隔分组,分析降水量随时间的变化。图4的结果表明,建坝后不同时间段的降水量无显著差异($P > 0.05$)。因此,建坝后水库周边地区的短期和长期降水的一般模式是:(1)最小年降水量增加,(2)最大年降水量减少,(3)平均年降水量不变。这种模式在任意5年的时间段和任何地区均是如此。这进一步支持了图3的结果。

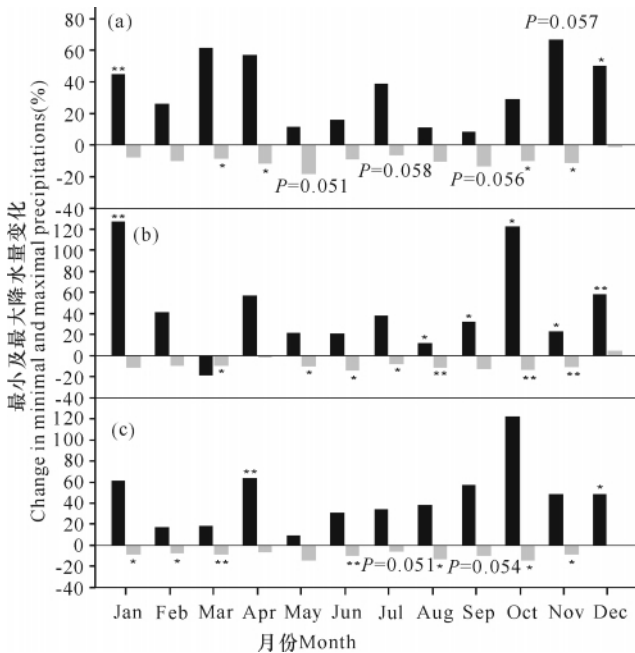


图3 1~12月最大降水量和最小降水量变化比较

Fig. 3 Comparison of changes in minimum and maximum precipitations from January to December

* : $P < 0.05$, ** : $P < 0.01$. (a) 上游地区 25 座水库, (b) 下游地区 27 座水库 (c) 全部地区 35 座水库。

(a) Upstream locations 25 reservoirs (b) Downstream locations 27 reservoirs (c) All locations 35 reservoirs.

■: 最小降水量, ■: 最大降水量. ■: Minimum, ■: Maximum.

3 讨论

本研究通过分析 35 座世界最大水库周围的 224 个地区建坝前后的降水量,总结出大水库对其周边地

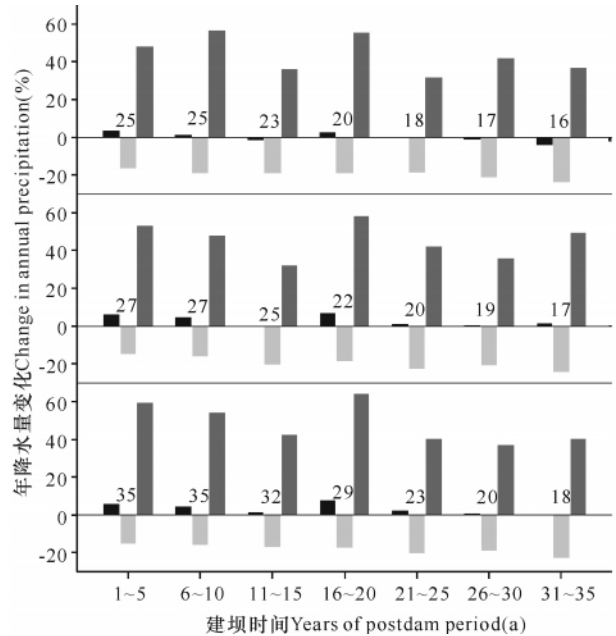


图4 平均年降水量、最大年降水量和最小年降水量在建坝后不同时期的变化 ($P > 0.05$)

Fig. 4 Changes in mean, maximum and minimum annual precipitations in different post-dam periods

图中数字表示参与数据计算的水库数。(a) 上游地区, (b) 下游地区 (c) 全部地区。

The numbers indicate the number of reservoirs from which the data were calculated. (a) Upstream locations (b) Downstream locations (c) All locations.

■: 平均降水量, ■: 最大降水量, ■: 最小降水量. ■: Mean, ■: Maximum, ■: Minimum.

区降水模式的影响有:增加平均年降水量,不影响平均月降水量,增加最小降水量,减少最大降水量。这些结论揭示大水库对调节其周边地区有巨大的作用。通过增加最小降水量和减少最大降水量可以使大水库周边地区更耐受极端降水,因此大型水库的周边地区对气候变化不敏感^[9]。由于人口稠密、工业化程度高,三峡水库对其下游地区降水量的影响更令人关注。目前我们没有理由认为三峡水库周边地区的降水模式与本研究得到的世界其它最大水库的降水模式有显著不同,同时,我们也不能忽视本研究的事实,即一些水库的确减少了其周边地区的降水量。因此,根据 35 座世界最大水库对周边地区降水的影响,可以对三峡水库的最佳状况和最差状况作概率分析。在最佳状况下,三峡水库能够抵消最大降水和最小降水的不利影响,有 17/35 的机率增加上下游地区的年降水量,有可能使最小降水量增加 10%~120%,将最大降水量减少 20%;在最差状况下,三峡水库有可能加强最大降水量和最小降水量的不利影响,有 3/35 的机率减少上下游地区的年降水量,2/27 的机率减少下游地区的年降水量,可以使下游地区的最小降

水量降低 20%。然而,这两种情况尚未考虑极端天气的影响。

由于三峡水库的建成时间很短,我们还无法确定其属于最佳状况还是最差状况。2011 年春季长江下游地区的严重干旱,加上极端天气的不利影响给三峡水库属于最佳状况的假设蒙上阴影,因为三峡水库理应缓解极端天气造成的严重干旱。希望本研究有助于三峡库区的管理,要考虑到最坏情况,因为对大水库的管理非常复杂和艰巨,任何风险分析将提示我们要谨记最坏的可能性。这一点很重要,因为对于水库下游地区发生的干旱或洪水,人们习惯于将责任归于水库的设计,而忽略水库的管理。多功能水库的管理实在不是一件容易的事情,其中包括发电、水位控制、环境影响控制、导航等等,只能在实践中不断地完善。

参考文献:

- [1] Tullos D. Assessing the influence of environmental impact assessments on science and policy: an analysis of the Three Gorges project [J]. *J Environ Manage*, 2009, 90: S208 – S223.
- [2] Knutti R, Furrer R, Tebaldi C, et al. Challenges in combining projections from multiple climate models [J]. *J Climate* 2010, 23: 2739–2758.
- [3] Wang H J, Yang Z S, Saito Y, et al. Interannual and season-

al variation of the Huanghe (Yellow River) water discharge over the past 50 years: connections to impacts from ENSO events and dams [J]. *Global Planet Change* 2006, 50: 212–225.

- [4] Hossain F. Empirical relationship between large dams and the alteration in extreme precipitation [J]. *Natural Hazards Rev* 2010, 11: 97–101.
- [5] Wikimedia Foundation Inc. Wikipedia, the free encyclopedia [EB/OL]. 2011. http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_reservoirs_by_volume.
- [6] Willison S. Get Lat Lon [EB/OL]. 2011. <http://www.get-latlon.com>.
- [7] Hulme M, Osborn TJ, Johns TC. Precipitation sensitivity to global warming: comparison of observations with HadCM2 simulations [J]. *Geophys Res Letts*, 1998, 25: 3379–3382.
- [8] ORNL DAAC. Distributed active archive center for biogeochemical dynamics [EB/OL]. 2011. <http://daac.ornl.gov>.
- [9] Eum H I, Simonovic S P. Integrated reservoir management system for adaptation to climate change: the Nakdong river basin in Korea [J]. *Water Res Manag*, 2010, 24: 3397 – 3417.

(责任编辑: 陈小玲, 邓大玉)

珠三角大气复合型污染的健康危害研究获进展

大气 PM_{2.5} (空气动力学直径小于 2.5 μm 的颗粒物) 和臭氧是近年全球关注的健康危害物,并于 2012 年 3 月正式被纳入我国大气环境质量标准体系。发达国家常规大气污染物环境质量的阶段性修订工作,主要依据流行病学调查结果,而我国目前相关研究还极为有限。与此同时,我国大气污染物的来源、人群暴露水平和特征,与西方研究存在较大差异,西方的流行病学研究成果并不适宜用于直接估算我国大气污染对人体健康危害。珠三角地处亚热带,经济发达、人口密集。环境监测数据显示,珠三角地区的大气环境污染已经由原来以煤烟为主的一次污染向臭氧浓度升高、细颗粒污染加剧等大气复合型二次污染转变;与此同时,PM_{2.5} 和臭氧污染近年也在不断加重。臭氧与颗粒物的相互作用,使得大气污染的化学过程及其健康效应变得更为复杂。北京大学大气化学研究的研究人员长期在珠三角地区长期开展区域性大气污染的基础研究工作,为开展区域性污染的健康危害研究奠定了基础。近年来,北京大学大气化学研究的研究人员开始追踪珠三角城市群居民健康与大气污染暴露的关联,系统研究了珠三角地区主要大气污染物暴露的健康危害,以及复合型大气污染的综合健康风险。他们研究发现,在大气光化学反应活跃的珠三角地区,颗粒物、大气光氧化性物臭氧与氮氧化物,以及来自不完全燃烧的一氧化碳,与居民超额死亡风险的增加显著关联。即使在降水较为充沛、臭氧水平总体下降的季节,臭氧暴露也存在显著健康危害。这是我国首次针对包括超大型城市在内的区域性大气污染问题,特别是光氧化性污染物,开展流行病学调查,并在大尺度范围内首次观测到大气光化学污染物暴露的健康风险及其与颗粒物的协同作用。

(据科学网)