

三峡工程建成后枯水期运行的气候风险研究*

张建敏 黄朝迎

(国家气候中心,北京 100081)

吴金栋

(中国气象科学研究院,北京 100081)

提 要

通过蒙特卡罗试验,探讨了三峡工程建成后枯水期运行风险的评估方法。以 GCM 模拟试验结果为未来气候情景,随机模拟了三峡地区在该气候情景下枯水期月降水量分布;建立了三峡地区月径流-降水模型和三峡水库调度模型;初步分析了长江三峡工程建成后在当前气候背景和可能未来气候情景下的运行风险。结果表明,三峡水库的运行对气候变化反应敏感,春季和冬季的发电风险有明显改变。

关键词:气候变化 蒙特卡罗试验 水库调度 风险分析

引 言

长江三峡工程是一项举世瞩目的巨大工程,建成后将发挥长江上游航运、中下游防洪以及华东、华中地区电力供应等重要作用。三峡工程在正式施工之前,专家们已经进行过基于当前基准气候背景的可行性论证。然而研究表明,本世纪以来的气候变暖已经使一些地区温度和降水的时空分布以及暴雨、洪涝、干旱等极端气候事件的频率、强度等发生了变化。因此,研究三峡地区未来气候变化及其对三峡工程建成后的影响,对于整个长江流域的防洪、航运和发电等都具有十分重要的意义。

作者采用风险分析方法,通过辨识风险源、确定和计算风险指标等研究三峡工程建成后的运行对气候变化的敏感性和可能面临的风险,以期对气候变化对三峡工程运行的影响研究提供新的思路,并为水库调度者制定减小风险和损失的调度规划提供参考。

1 资料和方法

文中着重讨论三峡工程建成后在枯水期(10月至次年4月)的运行情况。该时段内一般气温较低,蒸发较小,其对径流的影响不明显,因此这里仅讨论降水的影响。降水量资料取自三峡地区1951~1998年20个均匀分布的气象站逐月降水资料(站点分布图略)。水文资料取自宜昌站1882~1979年逐月径流量和1951~1979年逐月水位资料。

* 由国家“九五”重中之重科技项目“我国短期气候预测系统的研究”96-908-03-03 专题资助。
2000-01-20 收到,2000-04-19 收到修改稿。

此外,还包括华中地区 1986 ~ 1994 年月用电量资料和三峡水库的水位、库容和发电能力等资料。未来气候情景来自于两个有降水量输出的全球环流模式 NCAR 和 DKRZ OPYC $2 \times \text{CO}_2$ 的平衡试验结果^[1],输出量时间尺度为季,空间尺度分别为 $5^\circ \times 5^\circ$ 和 $5.6^\circ \times 5.6^\circ$ 。为提高气候情景的可靠性,文中取二者的复合情景。在此情景下,三峡地区秋季降水量较 $1 \times \text{CO}_2$ 增加 4.35%,冬季降水量减少 5.50%,春季降水量增加 22.83%,并且假设各月降水量均值变化与季均值变化幅度相同。

影响水库运行的因素有人为因素和自然因素,前者决定于工程管理者选择何种调度模型对径流进行分配,后者则主要是由入库径流的随机性造成。作者首先建立水库调度模型,并以设定的径流量变化情景进行模型敏感性试验。然后利用蒙特卡罗方法,随机生成三峡地区未来气候情景下的月降水量序列并输入调度模型,随机模拟水库的运行,并对模型输出的运行效益指标进行风险分析,其过程可以用图 1 表示。

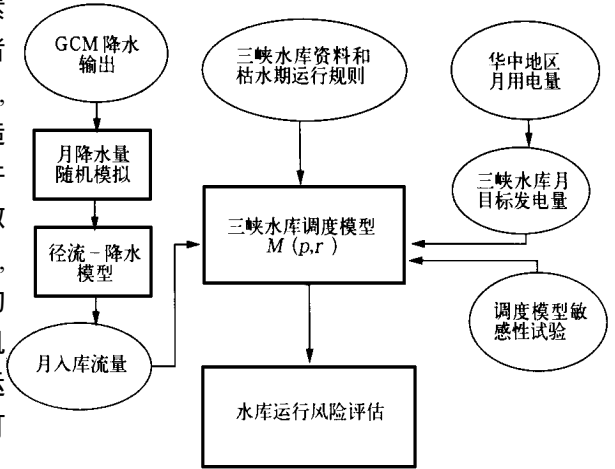


图 1 三峡工程建成后运行风险的分析流程

三峡工程建成后枯水期的运行原则是:汛期末 10 月份,水库开始蓄水,库水位逐步升高至正常蓄水位 175 m;12 月至次年 4 月底,水库尽量维持较高水位,水电站按电网调峰要求运行,入库流量低于电站保证出力要求时动用调节库容,降低水位,但 4 月末以前水库库水位最低不能低于 155 m,以保证上游航道的必要航深。根据枯水期水库的运行规则以及水库水位和库容等资料建立水库调度模型 $M(p, r)$,其输入为水库月目标发电量 $p(\text{kW} \cdot \text{h})$ 和水库月入流量 $r(\text{m}^3)$ 。其中 p 由华中地区月用电量比例和三峡水库预期年发电量得到(限于资料,假设华东地区月用电量比例与华中地区相同), r 由随机模拟的月降水量和月径流-降水量模型得到。模型输出为水库月发电量 $(\text{kW} \cdot \text{h})$ 、月弃水量 (m^3) 和月末水位 (m) 。

2 径流-降水模型

这里的径流指的是地表径流。三峡地区的长江干流包括嘉陵江、岷江、沱江、乌江和赤水共 5 条主要支流,地理地貌和气候复杂,建立精确的水文模型有一定困难。作者经计算发现,三峡地区枯水期月平均降水量和宜昌站出口断面月径流量有较好的线性关系(三峡水库位于宜昌站上游 40 km,文中用宜昌站出口断面流量近似代表水库的入流量),因此建立径流和降水的统计模型是切实可行的。利用三峡地区各支流流域和主流流域均匀分布的 20 个气象站 1951 ~ 1998 年的月平均降水量计算得到三峡地区月平均降水量,结合宜昌站相应时段径流量资料,分别建立各月的径流-降水模型。该模型具有明显的季

节差异,而同一季节内各月差异较小,以下为枯水期各季代表月份的月径流-降水量统计模型:

10月(秋季): R1 = 125.5 P1 + 6522.9 r = 0.77, r0.01 = 0.275 (1)

1月(冬季): R2 = 29.621 P2 + 3966.7 r = 0.22, r0.05 = 0.211 (2)

4月(春季): R3 = 72.85 P3 + 926.05 r = 0.89, r0.01 = 0.275 (3)

式中 R1, R2 和 R3 分别为宜昌站 10 月 1 月和 4 月径流量(m³/s), P1, P2 和 P3 为相应的三峡地区月平均降水量(mm)。模型在不同显著水平上均通过显著性检验,其中春季和秋季各月优于冬季各月。

3 月降水量的随机模拟

风险分析是对某一事件或随机变量总体平均状况的一种描述,而并非对某一特定时刻或值的估计,因此往往需要较大的样本容量。若将月降水量作为随机变量,则现有的资料十分有限。因此我们利用蒙特卡罗方法随机模拟生成了具有较大样本容量的逐月降水量序列。蒙特卡罗方法是将统计抽样方法用于数值计算或系统过程模拟的一种随机模拟方法。一般应根据问题需要确定随机变量 X,构造其分布的概率模型,然后选择一种恰当的均匀分布的随机数产生方法和适合该模型分布的抽样方法,利用计算机产生相应随机数序列,从而求得问题的解。

3.1 当前气候和未来气候情景下月降水量的概率分布拟合

Gamma(α, β) 分布能比较好地拟合月降水量分布[2],其概率密度函数 fk(x) 和分布函数 Fk(x) 为:

fk(x) = (βk^α / Γ(αk)) x^(αk-1) e^-βkx (4)

Fk(x) = ∫0^x fk(x) dx (5)

式中 αk 是形状参数, βk 是尺度参数, k = 1, 2, ... 7, 分别表示 10, 11 ... 4 月。作者用 Γ(α, β) 分布拟合了三峡地区各月平均降水量分布, 并进行 KopmoroB 检验[3], 结果见表 1。

表 1 枯水期月平均降水量 Γ(α, β) 分布拟合的 KopmoroB 检验 (n = 48)

Table with 2 rows and 8 columns: 月份 (10, 11, 12, 1, 2, 3, 4) and Dn (0.126, 0.092, 0.082, 0.077, 0.102, 0.074, 0.081)

对于给定显著水平 α = 0.05, KopmoroB 检验统计量 D48,0.05 = 0.19221, 均大于表中各月 Dn 值。即使对于 α = 0.2, D48,0.2 = 0.15139, 表中各月 Dn 值也均小于 D48,0.2, 说明文中拟合的月降水量理论分布与实际频率分布差异较小, 可以通过假设检验。以 2 月份为例(图 2), 可以看出拟合效果较好。

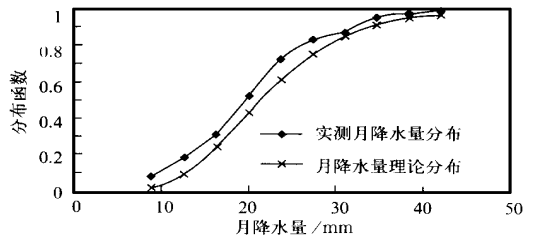


图 2 Γ(α, β) 分布拟合的月降水量分布与实测分布比较(2 月)

如前所述,风险分析需要大容量的样本,而文中的 GCM 降水量输出是其平衡试验结果,因此需要通过随机模拟方法生成未来月降水量序列。研究发现^[4],月降水量均值与 $\Gamma(\alpha, \beta)$ 分布的参数有密切关系。作者利用二者的统计关系得到了未来气候情景下的逐月降水量分布参数,结果见表 2。

表 2 未来气候情景下三峡地区月平均降水量 $\Gamma(\alpha, \beta)$ 分布拟合参数

月份	10	11	12	1	2	3	4
均值	90.1	44.6	17.6	16.1	21.0	50.9	164.6
α	14.92	10.27	6.28	6.00	6.90	11.03	14.02
β	0.17	0.23	0.36	0.37	0.33	0.22	0.17

3.2 随机数发生器

为对变量进行随机抽样,必须首先选择和检验随机数发生器。文中选择混合同余随机数发生器,其原理可以表示为:

$$\begin{cases} x_n = (\lambda_n x_{n-1} + c) \pmod{M} \\ r_n = x_n / M \end{cases} \quad (n=1, 2, \dots) \quad (6)$$

其中 $x = a \pmod{M}$ 表示 x 是 a 被 M 除的余数,初值(又称种子) x_0 、乘子 λ 、增量 c 和模 M 均为非负整数参数, r_n 是 $(0, 1)$ 区间的随机数。通过试验,确定其各项参数,并分别进行参数检验、均匀性和独立性以及无连贯性检验^[5],下文给出具体检验结果。产生的随机数序列样本容量 $n=500$,信度 $\alpha=0.05$:

(1) 参数检验

文中选择的混合同余随机数发生器产生的随机数序列均值为 $\bar{r}=0.514$,子样方差 $s^2=0.0759$,统计量 $|u_1| = \sqrt{12n} |\bar{r} - \frac{1}{2}| = 0.002$ 小于 $u_{0.025} = 1.96$,统计量 $|u_2| = \sqrt{180n} |s^2 - \frac{1}{12}| = 0.001$ 小于 $u_{0.025} = 1.96$,因此不能拒绝均匀分布参数假设,该随机数发生器产生的随机数序列参数与均匀分布参数一致。

(2) 均匀性检验

产生的随机数序列的 Pearson 检验统计量 $\chi^2 = 26.88$ 小于 $\chi_{0.05}^2(19) = 30.14$, $\sqrt{n} D_n = 0.54$ 小于 1.35 ,不能拒绝均匀性假设,随机数序列的分布是均匀的。

(3) 独立性检验

生成的随机数序列前后相距 $j=10$ 的子样相关系数见表 3。

表 3 混合同余法产生的随机数序列相关系数

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\hat{\rho}_j$	0.019	0.073	0.045	0.024	0.066	0.028	-0.009	-0.053	0.078	-0.085

统计量 $|\hat{\rho}_j \sqrt{n-j}| \approx |\hat{\rho}_j| \times 22.3606$ 小于 $u_{0.025} = 1.96$,因此不能拒绝独立性假设,认为生成的随机数相互独立。

(4) 无连贯性检验

采用正负连检验方法,总连数 l 的期望 $E(l)$ 和方差 $D(l)$ 分别为 $\frac{n}{2} + 1$ 和 $\frac{(n-1)}{4}$,

据此构造正态统计量和 χ^2 统计量按照上述相同原理进行检验, $|u| = 1.653$ 小于 $u_{0.025} = 1.96$, $\chi^2 = 10.8$ 小于 $\chi_{0.05}^2(5) = 11.071$, 不能拒绝无连贯性假设, 生成的随机数序列没有连贯性。

值得指出的是, 虽然建立的随机数发生器可以通过上述检验, 但是由于统计检验方法的局限性, 其产生的随机数序列仍可能有某种不理想的统计特性。

3.3 月降水量的抽样方法

由均匀分布的随机数, 通过适当变换可以产生任意给定分布的随机数序列。为避免片面性, 作者选择了 Naylor 近似法和复合抽样法两种抽样方法。经试验, 两者的模拟效果比较接近, 因此任意选择前者作为抽样方法, 对三峡地区平均逐月降水量进行抽样, 结果表明大部分月份抽样结果与实测值比较接近(表 4)。

表 4 月降水量随机抽样值与实测值统计特征对比

月份		10	11	12	1	2	3	4
均值	I	86	43	19	17	22	41	85
	II	89	47	18	16	24	39	80
标准差	I	20	16	7	6	8	12	23
	II	22	19	7	7	9	12	22
变异系数	I	0.23	0.37	0.37	0.37	0.36	0.29	0.27
	II	0.25	0.41	0.38	0.42	0.36	0.29	0.28

注: I 表示实测值, II 表示随机抽样值。

根据相同原理, 依照未来气候情景下的逐月降水量概率分布模型进行抽样, 生成未来气候情景下枯水期各月降水量序列。

4 三峡工程建成后的运行效益风险分析

风险 R 是指未来行为决策和客观条件变化的不确定性以及由此产生的后果^[6],

$$R = f(D, S) \quad (7)$$

其中 f 为风险函数, D 为人们的决策集合, S 为客观条件的状态集合。决策集合由人们自由选择, 状态集合则包括两个方面: 一是事件发生的概率, 二是事件引发的后果。风险分析是包括风险辨识、风险估算和风险评价与对策的方法。定量的风险分析必须首先估计可能造成损失的事件即风险事件出现的概率, 然后确定事件造成的可能后果, 最后确定期望损失。

文中随机模拟生成了未来气候情景下三峡地区月降水量序列(100 个样本), 通过建立的月径流量-降水量模型, 计算得到月径流量和入库流量, 以此输入水库调度模型, 随机模拟水库运行, 得到月实际发电量 G_{rk} , 月目标发电完成率 r_k 和月发电损失率 s_k 等水库运行效益指标。在此基础上, 对水库运行效益进行了风险分析。

4.1 枯水期水库运行风险因素分析

影响水库调度的因素有人为因素和自然因素, 本文着重讨论后者, 即由异常气候事件等自然因素造成的自然风险^[7]。就水库调度而言, 入库径流的随机性是构成水库运行效益风险最重要的自然因素。根据水库不同时段的管理目标, 径流的改变可以产生不同的

事件,如枯水期降水偏少可能使入库径流减少,水库蓄水减少,因蓄水量少于最低库容而发生缺水事件的风险随之增加;而汛期降水偏少可能使防洪风险减小,入流超过水库最高水位而产生的弃水事件相应减少等。

三峡水库枯水期的主要任务是保证上游的航运,兼顾发电。当入库径流减少时,为保证水库水位不低于 155 m,必须减少出流量,则发电出力所需的出流量随之减少,发电量与电网需求量发生供需矛盾。因此,枯水期三峡水库运行的风险事件是降水量减少,引起的事故是发电量减少。电站电机不能全额出力也是资源的浪费和损失。因此水库发电量不能达到目标发电量是枯水期运行的主要风险事故。

4.2 风险指标

风险的定量描述有概率形式、损失期望值形式和风险曲线等^[8]。文中分别定义月发电风险指数 I_k 、月发电量期望 L_k 和月发电损失率期望 P_k 3 个风险指标。假设月目标发电量为 G_{pk} ,月实际发电量为 G_{rk} ,则月目标发电量完成率 r_k 为:

$$r_k = \frac{G_{rk}}{G_{pk}} \times 100\% \quad (8)$$

相应地定义月发电损失率为:

$$s_k = 100\% - r_k \quad (9)$$

设 $F(r_k)$ 为 r_k 的分布函数,定义月发电风险指数 I_k 为:

$$I_k = F(0.5) \quad (10)$$

即 I_k 是月目标发电量完成率小于 50% 的累积概率,是概率形式的风险定量描述。为结合风险事故引起的损失强度及其发生频率来描述发电风险,文中定义月发电量期望 L_k 为:

$$L_k = \frac{G_{pk}}{100} \times \int_0^{100} f(r_k) dr_k \quad (11)$$

相应的月发电损失率期望 P_k 为

$$P_k = \int_0^{100} f(s_k) ds_k \quad (12)$$

k 的意义同式(4), $f(r_k)$ 和 $f(s_k)$ 分别表示 r_k 和 s_k 的概率密度函数。

4.3 风险评估

根据上述分析方法和资料,计算得到三峡工程建成后枯水期运行风险指标(表 5 和图 3、图 4)。

表 5 三峡水库枯水期运行风险指标

月份		10	11	12	1	2	3	4
月发电风险指数 I_k	A	0.01	0.02	0.08	0.22	0.90	0.76	0.18
	B	0.00	0.01	0.09	0.43	0.88	0.72	0.06
月发电量期望值 $L_k(10^8 \text{ k W} \cdot \text{h})$	A	70.9	69.2	66.0	50.6	27.0	31.6	46.1
	B	71.0	70.6	63.0	37.3	28.8	31.8	54.3
月发电损失率期望值 $P_k(\%)$	A	1.7	2.9	8.5	22.1	56.0	54.1	33.0
	B	0.5	0.2	11.8	42.0	52.0	53.9	23.2

注:A表示基准气候,B表示未来气候情景。

从表 5 和图 3、图 4 可以看出,所选择的 3 个风险指标有一致的结果。在当前气候背景下,秋季(10、11 月)由于降水充足,径流量大,月发电量均可以达到 $7 \times 10^9 \text{ k W} \cdot \text{h}$ 以上,

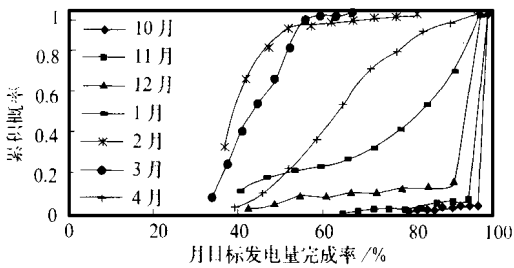


图3 基准气候背景下三峡水库发电风险曲线

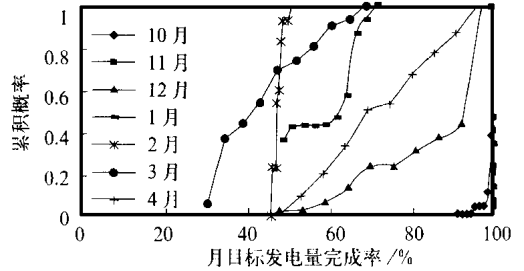


图4 未来气候情景下三峡水库发电风险曲线

基本可以完成月发电量目标,发电损失率期望不足3%,基本无发电风险;而冬季(12月、1月和2月),特别是1、2月份,是发电风险较大的季节,其中2月份发电风险最大,风险指数为90%,即有90%的年份月发电量不能达到目标发电量的一半,月发电量期望值只有 $2.7 \times 10^9 \text{ kW}\cdot\text{h}$,发电损失率期望值为56%;春季(3、4月)开始,降水增加,发电风险逐渐减小,但3月份风险仍然较大,风险指数仅低于2月,为0.76,月发电损失率期望值仍然超过50%。在 $2 \times \text{CO}_2$ 情景下,从10月开始至次年4月各月发电风险的时间变化是基本相同的,即秋季无发电风险,冬季风险较大,春季开始发电量增加,风险减小。发电风险与当前气候背景下相比,秋季降水增加,仍然无发电风险;冬季由于降水减少,12月和1月发电量较当前气候背景下减小,风险进一步增大,冬末2月份发电量虽有增加,但风险仍然较大,风险指数高达88%,月发电损失期望值为52%;而春季则由于降水显著增加,发电量也随之增加,风险逐步减小,至4月份风险指数只有0.06,发电损失率期望也只有23.2%,即说明大部分年份可以完成目标发电量的70%以上。

5 小结与讨论

作者根据全球环流模式模拟的 $2 \times \text{CO}_2$ 下三峡地区降水量变化,采用蒙特卡罗方法随机生成了该地区未来气候情景下枯水期月降水量序列,并通过建立三峡工程建成后的运行模型,用风险分析方法初步探讨了三峡工程建成后的运行对气候变化的敏感性和可能响应。

(1) 在基准气候下,枯水期的10、11月份入库流量可以满足电站发电需要,完成月发电量 $7.1 \times 10^9 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 的目标,同时保证库水位不低于155 m;冬季12月至次年2月由于降水减少,入库流量不能满足水电站发电出力需要,发电风险增加,2月份有90%的年份将不能完成目标发电量的一半。春季降水增多,入库和出库流量增大,水电站发电量增加,风险减小。

(2) 在 $2 \times \text{CO}_2$ 下,枯水期各月发电风险的时间变化基本不变。各月发电风险与当前气候背景下相比,冬季由于降水减少,1月和2月发电不足的风险进一步加大;春季降水增加,各月发电量也有所增加,特别是从4月开始,发电风险有明显减小。

(3) 减小三峡水库运行风险的方法,除应用优化的调度模型以减少人为失误外,还应建立长江流域水库调度网,通过系统调节减小三峡水库枯水期发电不足的风险。

(4) 水库的调度以及径流和降水的关系是十分复杂的问题,同时关于未来气候的模拟,特别是降水的模拟还不十分可靠,文中的一些结果仍有待进一步修正。

参 考 文 献

- 1 赵宗慈,丁一汇,李晓东,等.海气耦合模式在东亚地区的可靠性评估.应用气象学报,1995,6(增刊):9~18.
- 2 么枕生,丁裕国.气候统计.北京:气象出版社,1990.161~186.
- 3 吴翊,李永乐,胡庆军.应用数理统计.长沙:国防科技大学出版社,1995.112~120.
- 4 Geng S, Penning De Vires F W T, et al. Analysis and simulation of weather variables, part I, rain and wind in Wargeningen. Simulations Reports, CABO-TT, 1985. No. 4.
- 5 高祖新,尹勤.实用统计计算.南京:南京大学出版社,1996.89~140.
- 6 杜鹃,李世奎.农业气象灾害风险分析初探.地理学报,1998,55(3):201~203.
- 7 Zhang Jianmin, Li Shikui. Risk analysis and decision of staple crops yield in China. In: Beijing Normal University, ed. Risk Research and Management in Asian Perspective. Beijing: International Academic Publishers, 1998. 142~149.
- 8 Petak, W J, Aitkisson A A. 自然灾害风险评价与减灾政策. 向立云,程晓陶,金泰来等译.北京:地震出版社,1993. 263.

CLIMATIC RISK ANALYSIS OF THE THREE GORGES PROJECT OPERATION IN DRY SEASON

Zhang Jianmin Huang Chaoying

(National Climate Center, Beijing 100081)

Wu Jindong

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

Monte Carlo experiment is adapted to analyze the risks of the Three Gorges Reservoir operation in dry seasons. Monthly precipitation derived from general circulation models in the Three Gorges area is generated stochastically to produce the distribution under the future climate scenarios. In addition, a statistical runoff rainfall model as well as a reservoir management model is set up. The risks of the Three Gorges Project operation under the present and the future climate scenarios are thus assessed. The result indicates that the operation of the Three Gorges Project is very sensitive to climate change, and the risks of electrical power supplying by the Three Gorges Reservoir in spring and winter will change obviously.

Key words: Climate change Monte Carlo experiment Reservoir management Risk analysis