

# Review of Design Flood Estimation Methods for Cascade Reservoirs\*

Tianyuan Li, Shenglian Guo, Yanqing Li, Zhangjun Liu

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan  
Email: tyli1986@sina.com

Received: Feb. 3<sup>rd</sup>, 2012; revised: Feb. 25<sup>th</sup>, 2012; accepted: Mar. 5<sup>th</sup>, 2012

**Abstract:** The construction of upstream reservoirs will certainly change the flood characteristics and affect the design floods in the downstream river. As a result, the reservoir operation and regional composition of upstream and inter-basin inflows should be considered when estimating design flood in the downstream controlled sections. The equivalent frequency and typical year synthesis are the most frequently used regional composition analysis methods in China, the research advancement of design flood estimation methods for cascade reservoirs are summarized and reviewed. New approaches of design flood derivation for cascade reservoir are also discussed by assessing the advantage and disadvantage of these methods. The research directions of design flood for cascade reservoir are also suggested.

**Keywords:** Cascade Reservoir; Design Flood; Regional Composition; Research Advance

## 梯级水库设计洪水方法及研究进展\*

李天元, 郭生练, 李妍清, 刘章君

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉  
Email: tyli1986@sina.com

收稿日期: 2012年2月3日; 修回日期: 2012年2月25日; 录用日期: 2012年3月5日

**摘要:** 流域上游修建水库后将改变下游河道的洪水特性, 直接影响下游断面的设计洪水, 因此应该考虑上游水库的调洪影响及设计断面以上各部分洪水的地区组成。针对我国目前主要采用同频率组成法和典型年组成法来拟定设计洪水地区组成的现状, 综述梯级水库设计洪水的研究进展, 分析现有方法的优缺点, 探讨推求梯级水库设计洪水的新途径, 并提出进一步开展研究工作的建议。

**关键词:** 梯级水库; 设计洪水; 地区组成; 研究进展

### 1. 引言

我国目前已建成各类水库 8.6 万多座, 其中大型水库 482 座, 中型水库 3000 座<sup>[1]</sup>。我国的大多数水库并非单独存在, 而是处于梯级水库群中, 牵一发则动全身。在梯级开发的流域中修建一个新工程或改变一

项防洪措施, 将会对梯级水库群系统产生较大的影响。梯级水库建成后, 河流洪水的特性和地区组成发生了变化, 尤其是当上游有具有调节能力的水库时, 洪水的时空分布发生了很大的变化。在进行工程本身的防洪安全设计时, 如果工程上游有调蓄作用较大的已建成或近期即将建设的梯级水库或水库群, 则应考虑这些水库的调洪作用和对下游设计断面设计洪水的影响。如果设计工程本身就是有调洪能力的水库工程, 并且承担下游防护对象的防洪任务, 那么, 为了

\*基金项目: 国家自然科学基金(51079100)和水利部公益性行业科研专项(200901001)。

作者简介: 李天元(1986-), 男, 湖北黄冈人, 博士研究生, 主要从事水文分析与计算方面的研究。

研究设计工程对下游防护对象的防洪效益, 也需要推求防护对象控制断面受上游设计工程调洪影响后的设计洪水<sup>[2,3]</sup>。

然而, 水库的调洪作用改变了下游设计断面天然洪水的洪峰流量、时段洪量及洪水过程线形状, 从而改变了设计断面洪水的概率分布。为了推求设计断面的设计洪水, 最直接的方法是将实测洪水流量资料按水库的调洪规则逐年进行模拟调洪, 推求出设计断面的洪水过程线, 从中统计出受水库调洪影响后设计断面洪水的特征值系列。然而, 根据受水库调洪影响后的洪水系列进行频率计算将会遇到实际困难, 一方面, 这种系列难以用任何已知的频率曲线线型来适配, 以达到外延的目的; 另一方面, 根据这个系列点绘的经验频率点据也难以用一条光滑的曲线来拟合, 其外延趋势是不确定的。特别是有些水库的下泄流量, 在某一频率的洪水上下发生突变, 经验频率曲线即使外延幅度不大, 都可能有很大误差。因此, 在实际应用中, 都是寻求在一定概化条件下的近似计算方法。本文综述分析梯级水库设计洪水的研究方法和进展。

## 2. 梯级水库防洪设计的类型

梯级水库的设计洪水计算, 一般都要涉及到推求受上游水库调蓄影响后的设计洪水。由上、下两个水库组成的梯级水库是最常见的, 具有一定的代表性, 多级水库可以看成是两级水库的各种组合。对于两级串联的水库, 组合情况可以归纳为三种类型: 1) 两串联水库均不承担下游防护对象的防洪任务, 如图 1(a) 所示, 在进行 B 水库的防洪设计时, 只需要推求 B 受

A 水库调洪影响后的设计洪水; 2) 两串联水库下游有防洪对象, 如图 1(b) 所示, 需要推求 C 断面受上游 B、A 两水库调洪综合影响后的设计洪水; 3) 两串联水库之间有防洪对象, 如图 1(c) 所示, 如果 A、B 两库单独运行, 则情况与单库无异; 如果 A、B 两库实行联合调度, 则在推求 C 断面设计洪水时, 不仅要拟定 C 断面以上的洪水地区组成, 还需要拟定 C 断面以下区间  $Y_2$  的相应组成。

## 3. 梯级水库设计洪水方法及研究进展

王国安认为梯级水库设计洪水的计算, 从暴雨上说, 是要解决暴雨的地区分布即空间组合问题, 并提出用“同频率”概念控制法和典型年法推求梯级水库的 PMP; 从洪水来说, 是要解决洪水地区组成问题<sup>[4]</sup>。我国在 1964 年提出的设计洪水计算规范草案及 1979 年颁发的《水利水电工程设计洪水计算规范 SDJ22-79 (试行)》<sup>[5]</sup>中, 都提出了采用同频率组合法和典型年组合法两种基本方法来拟定设计洪水的地区组成。近半个世纪以来, 随着流域水库的逐步梯级化, 为了探讨更适合梯级水库的洪水地区组成方法, 水文工作者开展了大量的研究工作。

### 3.1. 地区组成法的改进和发展

对于梯级水库, 由于上游工程的调洪补偿作用, 往往使得地区组成的方式多样化、复杂化。王锐琛等<sup>[6]</sup>就曾对黄河上游当时已建梯级水库刘家峡、盐锅峡、八盘峡、青铜峡的地区组成进行了深入探讨, 采用逐级同频率、逐级典型年和同频率与典型年相结合等

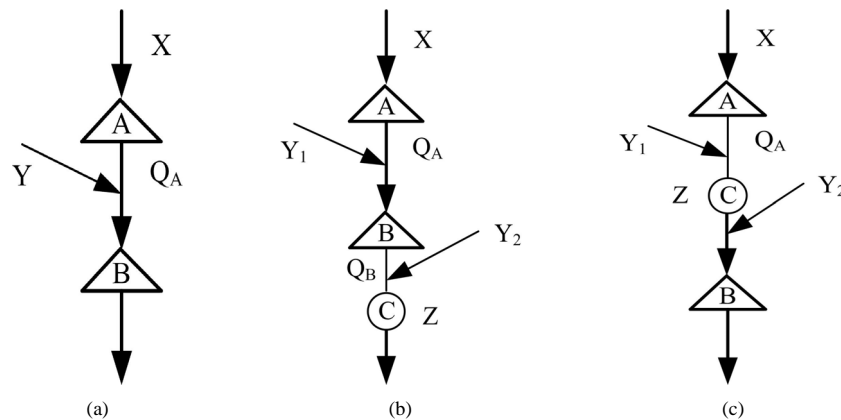


Figure 1. Sketch map of cascade reservoir combination: (a) Unresponse for the flood concrete of the latter reservoir; (b) Response for the flood concrete of the latter reservoir; (c) A flood plain within the two reservoir

图 1. 梯级水库组合示意图: (a) 两级水库不承担下游防洪; (b) 两级水库承担下游防洪; (c) 两库之间有防洪区

多种方法分别加以分析,并率先提出了梯级水库自下而上逐级分析的方法。郭荣文等<sup>[7]</sup>在龙溪河梯级水库的地区组成复核计算中推广了逐级典型年和逐级同频率的分析方法。曾宪仕等<sup>[8]</sup>介绍了梯级水库群设计洪水计算同频率地区组成法中相应洪水的一种再分配方法,即典型过程节点分配法,并将其运用到某流域梯级水库群设计洪水计算中,结果表明该方法较好地解决了同频率地区组成法中相应洪水的再分配问题,丰富了同频率地区组成的计算方法。谢蕾<sup>[9]</sup>为解决在水文计算中,遇上下游控制节点间距离较长,当上游洪水坦化变形明显时,采用现行的同频率组成法,会出现不合理结果的问题,提出了直接利用上下游断面实测资料分析洪水的坦化衰减,再将上游来水系列扣除衰减影响,然后用同频率地区组成法进行计算,并以头屯河流域为例进行了验证,结果表明,加入洪水衰减项对同频率地区组成法进行改进是合理可行的。

地区组成法在计算上比较简便,易于掌握,但是其设计结果是否对防洪偏不利常常难以判断,对于复杂的梯级水库防洪设计也只能采取简单的逐级同频率或与典型年同频率耦合,方法较为单一,且成果的人为性大<sup>[10]</sup>。1993年和2006年,水利部结合有关部门的研究成果,对《水利水电工程设计洪水计算规范SDJ22-79(试行)》进行了两次修改,推荐在有条件的情况下,采用频率组合法或者随机模拟法推求受上游水库调蓄影响的设计洪水<sup>[3,11]</sup>。

### 3.2. 频率组合法

频率组合法从数理统计原理出发,以上游水库断面及区间天然洪水的概率曲线为基础,研究各分区洪水的各种可能情况,计算各种组合情况下水库的调洪对下游水库洪水的影响,从而推求出下游水库受上游水库调洪后的洪水频率曲线<sup>[10,12]</sup>。

对于具有复杂调洪规则的梯级水库,王锐琛等<sup>[10]</sup>率先提出采用离散求和法推求下游防洪断面最大流量的概率分布,该法不必简化调度函数,已编入水利水电工程设计洪水规范<sup>[11]</sup>中。何长宽<sup>[13]</sup>将频率组合法扩展应用到并联水库,推导出了并联水库下游洪峰流量概率分布的数学表达式,并应用此方法分析了滦河流域潘家口、桃林口两座水库建成后滦县站洪峰流量

的概率分布,探讨了此法的可行性。傅湘等<sup>[14]</sup>在洪水风险分析的基础上,以洪水遭遇组合规律为分析对象,运用概率组合法估算了水库下游防洪区的洪灾风险率,以判断当地防洪措施的实际防洪能力。杨建青<sup>[15]</sup>对频率组合法做了分析,指出用该法计算梯级水库的组合变量及其出现的频率时,均将可能给出偏小的结果,从而难以满足生产建设的实际需要,并提出水文随机变量频率组合的方法。

频率组合法研究各分区洪水的各种可能情况,能够较好地反映上游水库对不同概率洪水的调洪效应及其对下游水库的影响。其中离散求和法相对直观,计算简单,不必对水库的调洪规则作简化。但其对频率曲线的精度要求较高<sup>[16]</sup>,而且受联合分布函数的限制,需要对变量进行独立性处理,数据转换过程中难免出现信息失真<sup>[17]</sup>。因此,频率组合法自提出以来,虽广泛应用于各流域梯级水库设计洪水的计算,但理论上仍没有大的突破。

### 3.3. 随机模拟法

随机模拟法的关键是建立合理可靠的随机水文模型,目前较为成熟的随机模型包括回归类模型、解集类模型和具有物理基础类模型<sup>[18]</sup>。在推求水库洪水地区组成时,通常会涉及几个水文过程(比如上游入库与区间入流的径流过程),因而又出现了多变量的随机模型,其中应用最多的包括回归类和解集类模型。

回归类模型是基于日流量或者更短时段的流量在时间和空间上的各种相依关系而建立的,模型对随着季节变化而变化的统计特性通过截口的标准化予以消除,而偏态特性则是通过对原始序列或者纯随机项进行各种转换来考虑的。例如,熊明<sup>[19]</sup>采用对数指数变换后的多维平稳自回归模型模拟长江上游梯级水库的日洪水过程,证实了其合理性。袁宏源等<sup>[20]</sup>提出混合回归系数模型,克服了回归模型和自回归模型的不足,以模型模拟序列为输入进行水库群优化运行,结果优于传统方法。金菊良<sup>[21]</sup>将多站随机模拟技术应用于黄河干流的地区组成分析中,推导出了多站峰量同时模拟的随机模型,同时验证了该模型是可行有效的。王达雨等<sup>[22]</sup>建立多维自回归随机模型来随机模拟龙滩水电站的入库设计洪水,结果表明该模型是可行的。

解集类模型的特点是能同时保持总量(例如年径流)和分量(例如月径流)的统计特性及协方差结构,模型模拟的基本途径是先模拟出总量,然后分解成分量。丁晶<sup>[23]</sup>利用相关解集模型模拟多站洪水过程,并探讨了该模型在设计洪水地区组成中的适用性,应用结果表明,这些序列既可表征洪水在时间上的各种可能的变化过程,亦可表征洪水在地区上各种可能的组合情况。Koutsoyiannis<sup>[24]</sup>提出了基于准确修正的简单解集模型来模拟多站径流,该模型简单,参数少,能保持总量、分量各种统计特性。卢承志等<sup>[25]</sup>用多站典型解集模型模拟水库群的入库洪水过程,并提出一种新的模型参数估计方法(多站权重模型适线法),以湖南省某大流域水库群防洪库容的设计为例,建立了求解防洪、发电相结合的水库群防洪库容优化模型,通过论证和检验,表明随机模拟技术在水库群的防洪库容分配方面优于现行的设计洪水地区组成和常规调度方法。袁鹏等<sup>[26]</sup>首次将非参数解集模型应用于金沙江流域日径流随机模拟,避开了传统解集模型在变量相依结构和概率密度函数形式上的假定,研究结果表明该模型是有效的。

除了以上两种模型之外,近些年来还出现了一些新的多站随机模拟模型。朱琰等<sup>[27]</sup>提出了线性扰动模型进行多站洪水的随机模拟,该模型包括两个组成部分:一个是季节模型,用来表征水文序列的确定部分;另一个是扰动部分,用来描述水文序列当中的短期随机变化特性。Raman<sup>[28]</sup>创造性地将人工神经网络模型(ANN)用于印度多水库入库月径流序列随机模拟,并与多变量自回归模型进行了对比,研究表明 ANN 模型适合于水文随机模拟,且优于自回归模型。袁鹏等<sup>[29]</sup>提出了非参数扰动最近邻自展模型用于单站和多站洪水序列的随机模拟,模拟时先对水文序列进行扰动,这样就实现了对已知序列的合理内插和外延,研究表明,最近邻抽样扰动模型具有优越性,模型结构简单,方便易用。吕孙云等<sup>[30]</sup>通过将 BP 网络与随机模拟技术结合起来,克服了随机模拟中由于参数模型自身所具有的不稳定等缺点,采用自适应算法解决 BP 网络存在的局部极小等问题,将该模拟技术应用于澜沧江中下游区域的洪水地区组成,取得了较好的结果。

洪水随机模拟法通过大量模拟各区的洪水过程线,考虑各个部分的各种组成,用足够长的洪水过程直接做调洪计算,不必考虑复杂的组成遭遇问题,使

问题变得易于解决和处理<sup>[10]</sup>。随着水库数目的增加,地区组成会变得越来越复杂,多站洪水模拟将成为不可替代的有效方法。

### 3.4. JC 法

JC 法是一次二阶矩的改进方法,常用于分析工程结构可靠度,发展至今,该理论本身已比较完善,并被广泛使用于许多领域的风险及可靠度计算,如大坝的水力设计、水库泄洪的安全设计等<sup>[31,32]</sup>。

目前,也有学者尝试用 JC 法推求设计洪水的地区组成,从风险角度拟定一种不利的地区组成。谢小平等<sup>[16]</sup>将结构可靠度计算中的 JC 法引入,用于上游有水库调节的设计洪水地区组成的分析和计算,并结合典型洪水过程推求了设计断面的洪水过程线。应用结果表明,该方法在求解洪水最不利地区组成的同时计算断面设计洪水的风险,不但能较好地考虑水库及区间对下游设计断面洪水的影响,而且弥补了现有方法不能计算设计洪水风险的不足,开辟了一条研究设计洪水地区组成的新途径。黄灵芝等<sup>[33]</sup>将 JC 法的应用扩充到梯级水库,以黄河上游龙羊峡、刘家峡梯级联合调洪为例,从理论上寻求对梯级水库安全造成很大威胁的最不利分配形式,分析水库调洪后对下游兰州断面的影响,丰富了现行设计洪水地区组成分析的内容及方法。陈炯宏等<sup>[34]</sup>将 JC 理论应用到清江流域梯级水库的洪水地区组成中,得出水布垭隔河岩两库联调比隔河岩单独运行的削峰作用更显著,联调的洪水风险也小于隔河岩单独承担防洪任务时的洪水风险,提高了下游的防洪标准,可以减轻荆江河段洪水的威胁。原文林等<sup>[35]</sup>为解决一定防洪标准下梯级水库下游洪水的最不利地区组成中的水量分配和防洪安全问题,提出了利用 JC 法进行梯级水库洪水地区组成洪量分配及风险分析,并以黄河上游承担兰州市防洪功能的刘家峡、龙羊峡两水库进行了实例计算,结果表明,JC 法计算成果属于安全设计。

JC 法在分配洪量计算的同时,所得的风险或概率值可作为决策者判定其成果可靠性的依据,但是目前国内外在可接受风险方面并无相关参考,这将给决策带来困难;同时,JC 法分析水库下游断面洪水概率时,极限状态方程中干流洪水流量的概率分布必须考虑上游水库的调洪作用,如何表示梯级水库联合调度的调洪函数并简化计算也是今后进一步研究的重点。

### 3.5. 其他新方法

洪水地区组成是带有明显随机性的,最科学地描述这一规律的方法是给出各地区洪水的联合概率分布函数,过去受到多维联合分布确定方法的限制,实际应用中只能寻求特定条件下的近似计算,如以上提到的同频率法和典型年法等。随着联合分布模拟技术的不断发展,尤其是近年来 Copula 函数在水文领域的成功应用<sup>[36]</sup>,使得其推求设计洪水的地区组成成为可能。闫宝伟等<sup>[17]</sup>应用 Copula 函数构造了上游断面与区间洪水的联合分布,提出和推导了两种有代表性的设计洪水地区组成,即条件期望组成和最可能组成。由条件期望地区组成分析了同频率组成所处的水平,应用实例表明,同频率组成保证率偏低,低于期望水平;同时还指出条件期望组成包含了置信区间等信息,为决策人员明晰决策风险提供了依据;推求的最可能组成考虑了地区间洪水的空间相关性,更加符合客观实际,为设计洪水地区组成分析计算提供了一条新的途径。栗飞等<sup>[37]</sup>考虑特大历史洪水资料,对基于 Copula 函数的条件期望地区组成法和最可能地区组成法做出改进,与现存的同频率地区组成法进行比较。并以清江隔河岩水库为例,推荐了隔河岩水库最佳的设计洪水地区组成方案。然而,基于 Copula 函数的设计洪水地区组成仅限于单库的研究,对于梯级水库中设计洪水地区组成尚未涉及。

## 4. 讨论与展望

水库的设计洪水关系到人民的生命财产安全,关系到社会的稳定与经济发展,因而需要受到特别的关注。通过总结目前梯级水库设计洪水的研究进展,分析现有方法的优缺点,提出我国梯级水库设计洪水研究方向的几条建议:

1) 探究适合梯级水库设计洪水的地区组成方式。目前设计洪水规范仍采用常规的地区组成法推求设计洪水,该法虽然简便,但对于复杂的梯级水库防洪设计,组合形式显得单一,且成果的人为因素很大,容易导致组合后洪水频率出现概念模糊等问题。因此,需要深入分析设计断面以上各部分洪水地区组成的规律,以及水库调洪作用对入库与下泄洪水过程线的变形效应和区间洪水组合遭遇状况的影响,探究对防洪偏不利的组合形式。

2) 建立合理、适用的多站洪水随机模拟模型。洪水随机模拟方法关键在于依据洪水过程观测资料,建立反映洪水随机变化特性的模型,其核心问题是如何建立合理、适用的洪水随机模型,模拟洪水过程的实用性检验相当重要。随机模拟法比较灵活,可根据实际情况建立形式丰富的模型,在梯级水库设计洪水方面将具有相当广泛的研究应用空间。

3) 合理概化水库调洪函数。无论是频率组合法还是 JC 法,其理论基础都离不开水库的调洪函数,前者采用离散求和法巧妙的避开了调洪函数的提取问题,但设计成果受概率曲线离散精度的影响较大。因此,如何表示梯级水库联合调度的调洪函数并简化计算,是今后这两种方法亟待解决的问题。

4) 洪水地区组成是带有明显随机性的,科学地描述这一规律的方法是给出各地区洪水的联合概率分布函数。随着 Copula 函数在多变量水文分析计算领域的成功应用,使得其推求设计洪水的地区组成成为可能。目前 Copula 函数已被成功应用于单库防洪系统的洪水地区组成,并证实它能够有效的避免同频率和典型年法的任意性,也回避了频率组合法需进行变量独立性转化的问题<sup>[17]</sup>。因此,如何应用多维 Copula 函数推求梯级水库设计洪水及地区组成,将是今后研究的重点和方向。

## 参考文献 (References)

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 2007 年中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007.  
National Bureau of Statistic of China. China statistical yearbook 2007. Beijing: China Statistics Press, 2007. (in Chinese)
- [2] 国际灌溉与排水委员会编. 世界防洪环顾[M]. 哈尔滨: 哈尔滨出版社, 1992.  
International Commission on Irrigation and Drainage. Review of worldwide flood control. Harbin: Harbin Publishing House, 1992. (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程设计洪水计算规范[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.  
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Regulation for calculating design flood of water resources and hydropower projects. Beijing: China Water Power Press, 2006. (in Chinese)
- [4] 王国安, 李文家. 水文设计成果合理性评价[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.  
WANG Guo'an, LI Jiawen. Rationality evaluation on design results in hydrology. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2002. (in Chinese)
- [5] 中华人民共和国水利部, 中华人民共和国电力工业部. 水利水电工程设计洪水计算规范(SDJ22-79)(试行)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1980.  
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of

- China. Regulation for calculating design flood of water resources and hydropower projects. Beijing: China WaterPower Press, 1980. (in Chinese)
- [6] 王锐琛, 孙汉贤, 熊炳烜. 黄河上游梯级水库设计洪水的地区组成. 水文计算经验汇编[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984: 184-195.  
WANG Ruichen, SUN Hanxian and XIONG Bingxuan. Regional design flood composition of cascade reservoirs in the upstream of Yellow River. Experience integration of hydrologic calculation. Beijing: China Water Power Press, 1984: 184-195. (in Chinese)
- [7] 郭荣文. 龙溪河梯级水电站设计洪水地区组成的复核研究[J]. 四川水力发电, 1997, 16(2): 20-23, 43.  
GUO Rongwen. Rechecking of regional design flood composition of Longxi River cascade hydropower plants. Sichuan Water Power, 1997, 16(2): 20-23, 43. (in Chinese)
- [8] 曾宪仕, 王达雨, 张耀宾, 等. 基于典型过程节点的相应洪水再分配法[J]. 水文, 2010, 30(5): 16-18.  
ZENG Xianshi, WANG Dayu, ZHANG Yaobin, et al. Corresponding-flood redistribution based on typical hydrograph node distribution calculation. Journal of China Hydrology, 2010, 30(5): 16-18. (in Chinese)
- [9] 谢蕾. 同频率地区组合法在区间洪水计算中的应用[J]. 新疆农业大学学报, 2010, 33(5): 442-447.  
XIE Lei. Application of method of same frequency area composition in calculating interzone floodwater. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2010, 33(5): 442-447. (in Chinese)
- [10] 王锐琛, 陈源泽, 孙汉贤. 梯级水库下游洪水概率分布的计算方法[J]. 水文, 1990, 1: 1-8.  
WANG Ruichen, CHEN Yuanze and SUN Hanxian. Flood distribution estimation at downstream cascade reservoir. Journal of China Hydrology, 1990, 1: 1-8. (in Chinese)
- [11] 水利部. 水利水电工程设计洪水计算规范(LS44-93)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1993.  
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Regulation for calculating design flood of water resources and hydropower projects (LS44-93). Beijing: China Water Power Press, 1993. (in Chinese)
- [12] 戴明龙, 袁鹏, 吕孙云. 概率组合法在糯扎渡水库洪水地区组成研究中的应用[J]. 东北水利水电, 2003, 21(6): 4-6.  
DAI Minglong, YUAN Peng and LU Sunyun. Application of probabilistic composite method in study of flood zone composition for Nuozadu reservoir. Water Resources & Hydropower of Northeast, 2003, 21(6): 4-6. (in Chinese)
- [13] 何长宽. 用概率组合法确定并联水库下游洪峰流量的概率分布[J]. 水利水电技术, 1998, 29(7): 49-51.  
HE Changkuan. Using probabilistic composite method to derive the probability distribution of flood peak downstream the parallel reservoir. Water Resources and Hydropower Engineering, 1998, 29(7): 49-51. (in Chinese)
- [14] 傅湘, 王丽萍, 纪昌明. 洪水遭遇组合下防洪区的洪灾风险率估算[J]. 水电能源科学, 1999, 17(4): 23-26.  
FU Xiang, WANG Liping and JI Changming. Estimating flood hazard risk rate of flood control region under flood encountering combination. Hydroelectric Energy, 1999, 17(4): 23-26. (in Chinese)
- [15] 杨建青, 朱杰. 关于水文随机变量频率组合方法的初探[J]. 水文, 2008, 28(1): 61-63.  
YANG Jianqing, ZHU Jie. A tentative discussion on the method of calculating frequency composition of hydrologic random variables. Journal of China Hydrology, 2008, 28(1): 61-63. (in Chinese)
- [16] 谢小平, 黄灵芝, 席秋义, 等. 基于 JC 法的设计洪水地区组成研究[J]. 水力发电学报, 2006, 25(6): 125-129.  
XIE Xiaoping, HUANG Lingzhi and XI Qiuyi, et al. Study of flood region composition by JC method. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(6): 125-129. (in Chinese)
- [17] 闫宝伟, 郭生练, 郭靖, 等. 基于 Copula 函数的设计洪水地区组成研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(6): 60-65.  
YAN Baowei, GUO Shenglian, GUO Jing, et al. Regional design flood composition based on Copula function. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(6): 60-65. (in Chinese)
- [18] 王文圣, 金菊良, 李跃清. 水文随机模拟进展[J]. 水科学进展, 2007, 18(5): 768-775.  
WANG Wensheng, JIN Juliang and LI Yueqing. Advances in stochastic simulation of hydrology. Advances in Water Science, 2007, 18(5): 768-775. (in Chinese)
- [19] 熊明. 梯级水库日洪水过程随机模拟研究[J]. 水电能源科学, 1992, 10(3): 207-214.  
XIONG Ming. Research on stochastic simulation of daily flood hydrograph for cascade reservoir systems. Hydroelectric Energy, 1992, 10(3): 207-214. (in Chinese)
- [20] 袁宏源, 罗洋涛, 秦师华, 等. 水库群优化运行的混合回归疏系数模型[J]. 水电能源科学, 1994, 12(4): 230-236.  
YUAN Hongyuan, LUO Yangtao and QIN Shihua, et al. The multi-variable and mixed-regressive time series analysis model for optimal operation of the reservoir. Hydroelectric Energy, 1994, 12(4): 230-236. (in Chinese)
- [21] 金菊良, 潘金锋, 张礼兵. 洪水多站峰量同时模拟的随机模型[J]. 灾害学, 2003, 18(1): 9-14.  
JIN Juliang, PAN Jinfeng and ZHANG Libing. Stochastic model for flood peak discharge and multistation flood volume. Journal of Catastrophology, 2003, 18(1): 9-14. (in Chinese)
- [22] 王达雨, 张耀宾, 李望安等. 龙滩水电站入库洪水随机模拟研究[J]. 水力发电, 2004, 30(6): 65-67.  
WANG Dayu, ZHANG Yaobin, LI Wang'an, et al. Stochastic simulation study on inflow flood of longtan hydropower station. Water Power, 2004, 30(6): 65-67. (in Chinese)
- [23] 丁晶. 解集模型在洪水随机模拟中的应用[J]. 成都科技大学学报, 1986, 4: 141-149.  
DING Jing. The application of a disaggregation model to synthetic flood generation. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1986, 4: 141-149. (in Chinese)
- [24] KOUTSOYIANNIS, D, MANETAS, A. Simple disaggregation accurate adjusting procedures. Water Resources Research, 1996, 32(7): 2105-2117.
- [25] 卢承志, 刘佩康, 金禹春. 随机模拟在水库群防洪库容设计中的应用[J]. 水文, 1998, 3: 24-29.  
LU Chengzhi, LIU Peikang and JIN Yunchun. Application of random simulation in flood control volume design of reservoir group. Journal of China Hydrology, 1998, 3: 24-29. (in Chinese)
- [26] 袁鹏, 王文圣, 丁晶. 非参数解集模型在汛期日径流随机模拟中的应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2000, 32(6): 11-14.  
YUAN Peng, WANG Wensheng and DING Jing. Application of nonparametric disaggregation model for stochastic simulation of daily runoff time series in flood period. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2000, 32(6): 11-14. (in Chinese)
- [27] 朱琰, 崔广柏, 杨王玉. 线性扰动模型在洪水随机模拟中的应用[J]. 河海大学学报, 1994, 22(1): 13-19.  
ZHU Yan, CUI Guangbai, YANG Wangyu. Application of linear perturbation model in flood stochastic sequences simulation. Journal of Hohai University, 1994, 22(1): 13-19. (in Chinese)
- [28] RAMAN H. Multivariate modeling of water resources time series using artificial neural network. Hydrological Sciences Journal, 1995, 40(2): 145-163.
- [29] 袁鹏, 王文圣, 丁晶. 洪水随机模拟的非参数扰动最近邻自展模型[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2000, 32(1): 82-86.  
YUAN Peng, WANG Wensheng and DING Jing. Nonparametric perturbing nearest neighbor bootstrapping model for simulation of flood time series. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2000, 32(1): 82-86. (in Chinese)
- [30] 吕孙云, 陈金凤. 基于 BP 网络的随机模拟技术在区域洪水地区组成分析中的应用[J]. 水利水电快报, 2005, 26(20): 17-22.  
LU Sunyun, CHEN Jinfeng. Application of BP network time-

- sequence models to the regional flood composition. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2005, 26(20): 17-22. (in Chinese)
- [31] 徐祖信, 郭子中. 二滩水电站泄洪消能布置方案可靠度研究[J]. *水利学报*, 1990, 8: 48-52.  
XU Zuxin, GUO Zizhong. Reliability analysis of flood relief scheme of Ertan Project. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1990, 8: 48-52. (in Chinese)
- [32] 杨百银, 王锐琛, 安占刚. 单一水库泄洪风险分析模式和计算方法[J]. *水文*, 1999, 4: 5-12.  
YANG Baiyin, WANG Ruichen and AN Zhanagang. Risk analysis of flood relief of single reservoir. *Journal of China Hydrology*, 1999, 4: 5-12. (in Chinese)
- [33] 黄灵芝, 谢小平, 黄强, 等. 梯级水库设计洪水地区组成研究中的JC法[J]. *自然灾害学报*, 2006, 15(4): 163-167.  
HUANG Lingzhi, XIE Xiaoping, HUANG Qiang, et al. JC method in research on design flood region composition of cascade reservoir. *Journal of Natural Disasters*, 2006, 15(4): 163-167. (in Chinese)
- [34] 陈炯宏, 郭生练, 刘攀, 等. 基于可靠度理论的设计洪水计算方法研究[J]. *人民长江*, 2008, 39(18): 1-3.  
CHEN Jionghong, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Design flood analysis based on reliability theory. *Yangtze River*, 2008, 39(18): 1-3. (in Chinese)
- [35] 原文林, 黄强, 席秋义, 等. JC法在梯级水库防洪安全风险分析中的应用[J]. *人民黄河*, 2011, 33(8): 14-16.  
YUAN Wenlin, HUANG Qiang, XI Qiuyin, et al. Application of JC method on risk analysis of flood control safety of cascade reservoir. *Yellow River*, 2011, 33(8): 14-16. (in Chinese)
- [36] 郭生练, 闫宝伟, 肖义, 等. Copula函数在多变量水文分析计算中的应用及研究进展[J]. *水文*, 2008, 28(3): 1-7.  
GUO Shenglian, YAN Baowei, XIAO Yi, et al. Application of copula function in multivariate hydrological analysis and estimation. *Journal of hydrology*, 2008, 28(3): 1-7. (in Chinese)
- [37] 栗飞, 郭生练, 李天元, 等. 不连续序列的设计洪水地区组成方法研究[J]. *水电能源科学*, 2011, 29(5): 47-49.  
LI Fei, GUO Shenglian, LI Tianyuan, et al. Design flood regional composition methods by considering historical information. *Water Resources and Power*, 2011, 29(5): 47-49. (in Chinese)