

文章编号: 0559- 9342( 2007) 07- 0071- 05

# 分期设计洪水研究进展和评价

方 彬, 郭生练, 刘 攀, 肖 义

( 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

关键词: 分期设计洪水; 研究进展; 评价

摘 要: 采用分期设计洪水是实现洪水资源化的主要方式之一。综述归纳了汛期分期和取样方法的优缺点, 总结了分期设计洪水方法研究的最新进展, 讨论了现行方法存在的技术问题, 并进行比较评价; 探讨了分期汛限水位优化设计等问题, 展望了分期设计洪水的研究前景。

Advance and Assessment of Seasonal Design Flood Methods  
Fang Bin, Guo Shenglian, Liu Pan, Xiao Yi  
(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University,  
Wuhan Hubei 430072)

Key Words: seasonal design flood; research advance; assessment

Abstract: Seasonal design flood is an important manner in floodwater resources utilization. In the paper, the identification of flood seasonality and the sampling methods were reviewed and summarized. The recent research advance of seasonal design flood methods and the technical problems of present practice were discussed and assessed. Some issues of deriving optimal seasonal flood control water level and further research perspectives were discussed and suggested.

中图分类号: TV122                      文献标识码: A

洪水资源化或者洪水资源利用通过合理配置洪水资源, 在保障防洪安全的同时, 努力增加水资源的有效供给, 维系良好生态, 为全面建设小康社会提供有力的防洪抗旱支撑<sup>[1]</sup>。依赖科技进步, 优化水库防洪调度规则以充分发挥水库的防洪、兴利作用, 实现洪水资源的安全利用, 对缓解流域水资源危机、改善流域生态环境具有重大的理论与实践意义<sup>[2, 3]</sup>。SL 44- 93 《水利水电工程设计洪水计算规范》第 3.4 条规定: “当汛期洪水成因随气候变化特征显著时, 应根据水库运行调度需要, 分析计算分期设计洪水。”所谓分期设计洪水是指 1 年中某个时段所拟定的设计洪水。计算分期设计洪水的方法是在分析流域洪水季节性规律的基础上, 按照设计和管理要求, 把整个年划分为若干个分期, 然后在分期的时段内选择, 进行频率计算<sup>[4]</sup>。

## 1 汛期分期和取样方法

### 1.1 汛期分期方法

分期的划定是计算分期设计洪水的基础。为了合理划定分期, 应对设计流域洪水季节性变化规律进行深入的分析<sup>[5]</sup>。由于“汛期”变化规律有确定性、随机性、过渡性的特征, 在汛期分期实践中, 需要采用多种方法进行计算、比较, 经综合分析方可得到合理、可行的汛期分期方案。现有的分期方法主要包括成因分析法<sup>[6]</sup>、数理统计法<sup>[7]</sup>、模糊分析法<sup>[8]</sup>、分形分析

法<sup>[9]</sup>、变点分析法<sup>[10]</sup>、系统聚类法<sup>[11]</sup>、矢量统计法<sup>[12- 14]</sup>以及相对频率法<sup>[12- 14]</sup>等( 详见表 1)。

### 1.2 取样方法

根据确定的分期规则, 研究分期内洪水随机特性和分布规律, 寻求较合理的取样方法。目前, 研究较多的抽样方法主要有年最大洪水、分期年最大洪水、分期最大洪水、超定量取样和武鹏林方法<sup>[15]</sup>( 见表 2)。

取样一般有不跨期和适当跨期两种<sup>[6]</sup>。按不跨期选择时, 当一次洪水过程位于两个分期时, 视其洪峰流量或时段洪量的主要部分位于何期, 就作为该期的样本, 不作重复选择; 按跨期选择时, 跨期的幅度一般不宜超过 5~10 d。不跨期取样的计算成果, 可以提前或错后应用; 跨期取样的结果, 则不应跨期使用。

提前或错后取样的基本论点认为, 硬性地按固定时段分期取样, 破坏了水文规律; 认为根据气候变化特性, 在某时段前后 1 个月内的水文现象都可以发生在该时段内, 所以应适

收稿日期: 2007- 02- 09  
基金项目: 国家自然科学基金项目( 50609017); 国家防汛办公室资助项目, 水资源与水电工程国家重点实验室开放基金( 2006B022)  
作者简介: 方彬( 1981—), 女, 福建福州人, 博士研究生, 从事水文水资源规划设计研究。

表 1 汛期分期方法

划分方法	说 明		特 点
成因分析	根据防洪安全和兴利蓄水要求、河道及水库工程状态,利用水文气象和统计规律分析流域“汛期”或“主汛期”的确切涵义		优点: 结果比较合理, 有较高的可靠性而被普遍采用 缺点: 需要对成灾天气进行大量的分析, 尤其对于大流域, 成灾天气有很多组合方式, 因而工作量大, 同时分期有一定的主观性, 也难于将汛期分到较细的时段(如日)
数理统计法	利用实测历史流量(雨量)资料, 选择统计指标, 分析指标在年内(或汛期)的变化规律, 最后通过数理统计理论得出汛期的变化规律		优点: 简单实用 缺点: 在分析过程中, 对是不是洪水这一临界值带有一定的主观性; 同时也很难将汛期划分得较细
模糊分析法	采用模糊集理论, 使用融成因分析、数理统计、模糊统计为一体的模糊集合综合分析法对水库的汛期划分进行研究		优点: 考虑了汛期在时间上的模糊性, 在理论上有了较大的发展, 具有先进性 缺点: 分析结果对所选用的指标阈值比较敏感, 而指标阈值在取值上任意性较大; 同时该方法主要用于主汛期划分, 对于有多个分期要求则尚嫌不足
分形分析法	洪峰散点序列在一定尺度范围内表现出了自相似性, 认为洪峰散点序列是一种分形, 用分维作指标划分洪水分期		优点: 比较客观, 受经验和人为影响较小 缺点: 分析计算的工作量较大。如何判断对象是分形, 至今仍是一个需要进一步讨论的问题
变点分析法	基于统计理论, 用于检测时间序列突变, 同时可以进行假设检验的划分时间序列的方法		优点: 结论合理, 划分汛期可精确到日, 并且在一定程度上更为客观、可靠 缺点: 需较长的实测径流、雨量资料
系统聚类法	选用描述流域降雨洪水等特性的多个因子, 计算论域元素之间的相似系数以构成模糊相似矩阵, 通过系统聚类分析进行汛期分期		优点: 避免了采用单因子进行分析带来的片面性, 更具合理性 缺点: 该方法对于汛期分期这样具有时序分布的样本聚类问题, 仍具有一定的局限性, 可能会产生将非连时序的时段归为一类的不合理现象
矢量统计法	把每场洪水的发生日期看作一个矢量, 根据各个矢量之间的方向相似性来判断分割点, 即作为汛期分期点		优点: 比较直观, 结论合理, 划分汛期可精确到日 缺点: 其应用具有一定的限制性, 对相似矢量聚集的情况比较适用, 而对于相同矢量累计的情况则分期效果不明显
相对频率法	根据实际需要与应用方便, 按照月(或旬)统计时段内发生洪水的频率, 通过分析整个时段内发生频率的变化特征, 得到汛期的分期方式		优点: 比较直观 缺点: 分期划分比较粗略, 只能精确到旬

表 2 分期设计洪水抽样方法

取样	数据总数	说 明	特 点
年最大洪水	n	年最大洪水系列 $X$	优点: 样本相互独立, 且与其发生的频率和重现期紧密结合在一起, 直观明了 缺点: 它只反映极值的统计规律, 而不能描述过程
分期年最大洪水	n	每一分期内的年最大洪水系列 $X_s$	优点: 样本相互独立, 且与其发生的频率和重现期紧密结合在一起, 直观明了 缺点: 每分期的数据个数较少, 不利于频率分析
分期最大洪水	ns	每一分期内的最大洪水系列 $X_i$	优点: 水库基于分期最大洪水取样计算分期设计洪水。每分期有 n 个数据, 有益于频率分析 缺点: 在分期内采用最大值抽样方法可能会得到一些并不大的所谓“最大洪水”
超定量洪水	ns	每一分期内超过某一设定门限值的洪水系列 $X_i$	优点: 扩大了信息量。将更多的合理的洪水考虑为样本, 其分布模型具有更多的物理相关性, 因而能更完整、更灵活地反映整个汛期洪水演变规律 缺点: 门限值的选择和样本的独立性问题
武鹏林方法		汛期中每日为起点的各时段洪量	优点: 扩大了信息量, 能反映整个汛期洪水循时程演变规律, 描述洪水循时程变化的概率分布, 能计算出每日为起点各时段流量的设计值 缺点: 计算量较大

注: 资料年数 n, 分期个数  $s$ 。

当扩大时段的取样时间。扩大的天数应视气候变化和水文特性而定。扩大的结果, 必然使统计的均值加大,  $C_v$  值减小<sup>[16]</sup>。在取样方法中, 也有允许移用邻月特大值的。一般地, 经过气候特性分析, 将少水月份发生的大洪水移用于相邻多水月份问题不大, 但对移用重现期的处理尚需分析研究<sup>[17]</sup>。

Cunderlik 等<sup>[13]</sup>在采用矢量统计法和相对频率法划分洪水分期时, 评价了年最大、超定量取样方法在汛期划分中的性能, 认为在各种估计方法、洪水季节性类型和样本长度的情况下, 超定量取样都优于年最大取样, 前者能提供更多的洪水信息。

## 2 分期设计洪水方法

分期设计洪水应满足两个条件: 要符合防洪设计标准; 能反映洪水的季节性变化规律。国家防洪标准<sup>[18]</sup>规定: 水库防洪安全标准以年为重现期单位, 用频率  $P$  表示为  $P=1/T$ , 反映的是年内设计值被超过的概率。年最大设计洪水对各分期都采用年最大样本设计值, 因此不能反映洪水的季节性变化规律<sup>[19]</sup>, 而且导致水库常处于超标准安全状态, 无法充分发挥水库的综合效益。下面以 2 个分期为例讨论现行的分期设计洪水方法。

### 2.1 现行方法

现行分期设计洪水方法基于分期最大值系列。美国、前苏联和我国强调基于水文气象和统计特征, 按不同产生机制分类洪水<sup>[20-22]</sup>。前苏联和我国假定分期最大洪水  $X_1$ 、 $X_2$  相互独立, 建议根据概率可加性原理, 将分期最大洪水频率分布  $p_1(x)$ 、 $p_2(x)$  综合成年最大洪水频率分布

$$p(X) = p_1(X_1) + p_2(X_2) - p_1(X_1) p_2(X_2) \quad (1)$$

式中,  $p(x)$  为年最大洪水的分布;  $p_1(x)$ 、 $p_2(x)$  分别为第 1、2 分期最大洪水的分布。

Waylen 和 Wood<sup>[23]</sup>提出若洪水由 2 个独立的机制产生, 并用分布  $F_1$ 、 $F_2$  描述其特征, 则年最大洪水分布

$$F(x) = F_1(x) F_2(x) \quad (2)$$

式中,  $x$  为任意正实数,  $F_1(x)$ 、 $F_2(x)$  分别为第 1、2 分期最大洪水的分布, 其值介于 0~1 之间, 所以有  $F(x) = \min\{F_1(x), F_2(x)\}$ 。换言之, 在概率图上, 年最大洪水频率曲线必定位于各分期最大洪水频率曲线之上。

式(1)(2)数学意义相同, 但是我国工程师和水文学家们更熟悉式(1)的形式。

### 2.2 存在的问题

现行方法得到的 2 个分期的设计值一般都小于年最大洪水设计值, 所以当采用该分期设计洪水作为分期汛限水位确定的依据时, 会降低水库的防洪标准。为避免这种现象的发生, 我国规范与设计手册中都将主汛期设计洪水值强制等于年最大值设计洪水值<sup>[4-5, 24]</sup>。但年内主汛期不发生超标准的洪水, 并不能保证其他分期也不会发生超标准的洪水。因此, 这种处理方法仍然不能确保分期设计洪水达到指定的防洪标准。

叶秉如<sup>[25]</sup>指出: (现行) 分期洪水和分级防洪限制水位的处理方法, 带有一定的经验性, 因为在洪水分期出现时, 总的防洪破坏概率究竟为多少, 是否恰好满足所需的防洪设计标准, 此法并未明确答复。丁晶等<sup>[26]</sup>指出: 现行分期设计洪水方法采用分期最大洪水选样, 根据这种洪水系列计算出的洪水频率本质上不同于全年最大洪水系列推求出的洪水频率。前者是指洪水事件在某一分期发生的可能性, 后者是指洪水事件在 1 年内(包括所有分期)发生的可能性。两者从水库防洪安全来看存在本质区别。分期洪水的重现期一般较年洪水重现期长。

王善序<sup>[27]</sup>针对现行分期设计洪水方法, 讨论了分期最大洪水频率与重现期关系。经论证分析和实际计算后得出:

采用分期洪水频率等于重现期  $T$  倒数的假定是错误的, 由此计算得出的  $T$  年一遇分期设计洪水一般系统偏小, 实际是  $T/(K+1)$  年一遇的。真正的  $T$  年一遇的分期设计洪水与  $T$  年一遇全年最大洪水是相等的。他指出: 现时的分期设计洪水计算技术仍存在严重错误, 通过它来提高水库兴利效益, 是在冒降低水库防洪标准的风险。

## 3 分期设计洪水研究进展

对现行方法的改进和完善, 应重点解决分期设计洪水的统计选样, 年最大洪水与分期最大洪水的对比分析, 分期最大洪水频率与年最大洪水频率不一致问题等。在此基础上, 确定分期设计洪水过程。以下介绍的是满足防洪标准的各种分期设计洪水方法。

### 3.1 基于分期年最大洪水系列的方法

Singh<sup>[28]</sup>提出了年最大洪水的混合分布

$$p(X) = a p_1(X_{S1}) + (1-a) p_2(X_{S2}) \quad (3)$$

式中,  $X$  为年最大洪水系列(非正态分布时, 取其对数);  $X_{S1}$ 、 $X_{S2}$  为分期年最大洪水系列;  $p_1(x)$ 、 $p_2(x)$  分别是均值为  $\mu_1$ 、 $\mu_2$ , 方差为  $\sigma_1^2$ 、 $\sigma_2^2$  的正态分布;  $a$ 、 $1-a$  为权重。

从实测年最大洪水系列中估计  $(\mu_1, \mu_2, \sigma_1^2, \sigma_2^2, a)$  等参数。Singh<sup>[28]</sup>通过非线性算法在 5 个约束条件下, 最小化目标函数  $\sum |z_i|$ , 得到这 5 个参数值。其中

$$z = f(p_m, p) \quad (4)$$

式中,  $p_m = (m-0.38)/(l+0.24)$  为观测点据的经验频率;  $m$  为洪水系列的排序号,  $l$  为样本长度。

Singh<sup>[28]</sup>在分析了日本、前苏联、波兰、捷克斯洛伐克、意大利和美国共 6 个年洪水系列后, 表示混合分布方法能产生可信的洪水估计。实际上, Singh 的估计方法是一个适线过程。

王善序<sup>[29]</sup>提出采用分期年最大洪水取样估算分期设计洪水, 建立了年最大洪水与分期年最大洪水的关系式

$$p(X) = p_1(X_{S1}) p(A_1) + p_2(X_{S2}) p(A_2) \quad (5)$$

式中,  $p(A_1)$ 、 $p(A_2)$  分别为年最大值发生在第 1、2 分期的概率;  $p_1(x|A_1)$ 、 $p_2(x|A_2)$  分别为发生在第 1、2 分期的年最大洪水的分布, 即条件分布。

上述两种分期设计洪水估计方法仍是基于年最大值系列的, 所以能够满足防洪标准的要求; 又因为是对各分期分别进行取样, 因此亦能够反映洪水的季节性规律。Thomas 等<sup>[30]</sup>指出该方法对于独立或非独立的分期洪水分布均有效。Singh 等<sup>[31]</sup>指出该方法通过分期使得样本满足同分布特征, 因而较年最大值法更合理。但是, 该方法在取样中(包括分期取样)仅取年最大值, 可能导致非主汛期的分期抽取到的样本容量很少, 最终导致该分期频率分析结果不可靠; 且与我国现行的分期设计洪水取样方法(分期最大值法)有所不同。

### 3.2 基于分期最大洪水系列的联合分布

Durrans 等<sup>[32]</sup>提出了一类近似、实用但理论上不精确的方法来联合季节、年洪水分布。他们描述了两种建模方法, 其中一种假设各分期的最大洪水系列都服从对数  $P$ - 分布, 然后从中推导出年洪水分布(分期-年方法), 另一种假设年最大洪水、各分期(其中一个分期除外)的最大洪水都服从对数

P- 分布,然后从中推导出剩下的那个分期的洪水分布(组合方法)。但是 Durrans 等<sup>[32]</sup>只给出了各分期相互独立情形下的参数估计、协调方法;并未给出各分期间存在一定的关系(由于洪水的随机特征,各分期洪水往往存在一定的关系的)的很好的解决办法。

肖义,等<sup>[33]</sup>采用 Gumbel Archimedean Copula<sup>[34]</sup>函数来描述两个分期洪水的相关性结构,根据 Sklar s 定理,得到  $x_1$  和  $x_2$  边缘分布为 P- 型分布的联合分布  $F(x_1, x_2)$ :

$$F(x_1, x_2)=\exp\{- [(-\ln F_1(x_1)) +(-\ln F_2(x_2))]^\eta\} \quad 1 \quad (6)$$

式中,  $F_1(x_1)$ 、 $F_2(x_2)$ 为第 1、2 分期最大洪水的边缘分布,  $\eta$  为参数。

基于分期洪水联合分布,肖义等<sup>[33]</sup>计算了分期洪水值组合的年发生频率。其结果表明,根据现行模式计算的分期设计值均小于或等于年最大设计值,达不到规定的防洪标准,并且在现行模式下分期个数越多,实际的防洪标准越低。与年最大值设计相比,基于联合分布的分期设计洪水模式通过小幅度地提高主汛期设计值,使得在非主汛期设计值明显降低的情况下,仍能保证分期设计洪水达到防洪标准,为分期设计洪水计算提供了一条新的途径。

3.3 基于超定量系列的时变模型

采用超定量方法抽样,建立相应的能描述洪水季节性变化规律的概率模型,能比较全面地反映洪水演变规律。有些学者对 POT 系列季节性分期模型做了深入研究<sup>[35]</sup>。但是 POT 系列季节性分期模型存在以下几个问题<sup>[36]</sup>: 有的河流汛期季节性并不十分明显; 以季节为单位进行分期在反映洪水规律方面仍然过于粗糙。对应于同一防洪标准,汛期不同时间的设计洪水应是不相同的、是时变的<sup>[37]</sup>。

为了克服季节性分期模型存在的缺陷, North<sup>[38]</sup>, Konecny 和 Nachtbel<sup>[39]</sup>提出了时变模型的概念。即,以年为周期,泊松分布中的  $\lambda$  和指数函数中的  $\lambda$  每时每刻发生变化。参数的这种变化可借助一定数目的谐波来描述。

王善序<sup>[37]</sup>建立了以带时畸参数的泊松标值过程和指数函数分布来模拟河流汛期洪水时变过程的模型,并指出经时间离散计算的汛期时段设计洪水能全面地反映汛期洪水时变规律,又满足防洪标准,具有良好的推广和应用前景。对任意整数  $m \geq 0$ ,带时畸强度的泊松标值过程和指数函数分布可表达为

$$P_r(N_{t,t+s}=m)=[r(t+s)-r(t)]^m \exp\{-[r(t+s)-r(t)]\}/m! \quad (7)$$
$$F_r(y)=1- \exp\{-y/b(t)\} \quad (8)$$

式中,  $N_{t,t+s}$  为在时段  $(r, t+s)$  内事件发生次数增量;  $r(t)$  为累积强度,表示在  $(0, t)$  时段内事件的计数;  $b(t)$  为尺度参数,是发生在第  $t$  时刻洪水超定量  $y$  的数学期望,它是时间的函数。

方彬<sup>[40]</sup>用带时畸参数泊松标值过程作为描述汛期洪水时变规律的概率模型:以泊松分布描述洪水事件的发生次数,分别以指数分布、Generalized Pareto 分布描述超定量洪水系列,分析比较不同线型的分期设计洪水;并建议综合两种分布推求分期设计洪水,使其结果更加合理。

武鹏林等<sup>[19]</sup>利用随机水文学基本原理,通过统计汛期中每日为起点的最大来水量,研究洪水循时程的变化规律,计

算洪水循时程变化的概率分布,并据此求出循时程变化的汛限水位。杜丽惠<sup>[41]</sup>在此基础上,进一步探讨了新型的、动态的汛限水位控制方法,并以此方法对密云水库汛限水位进行了计算分析。

4 分期汛限水位优化设计

汛限水位是水库在汛期允许兴利蓄水的上限水位,在防洪中具有法定地位,是协调水库防洪、兴利的关键参数,直接影响水库效益发挥<sup>[42]</sup>。因此,汛限水位设计是水库洪水资源化中的关键问题。

我国现行分期汛限水位由分期设计洪水过程线调洪演算得出,但对于给定的防洪标准,分期设计洪水具有不惟一性。刘攀,等<sup>[43]</sup>提出采用独立、保守组合两种频率不等式,由分期频率估计年频率。设汛期分为  $s$  个分期,当各分期发生的风险是相互独立事件,由全概率公式可得独立组合

$$p(B_1 \cup B_2 \cup \dots \cup B_s)=\sum_{i=1}^s p(B_i)-\sum_{1 \leq i < j \leq s} p(B_i)p(B_j)+\sum_{1 \leq i < j < k \leq s} p(B_i)p(B_j)p(B_k) \\ - \dots +(-1)^{s+1}p(B_1)p(B_2) \dots p(B_s) \quad (9)$$

当各分期发生的风险不是相互独立事件,可得保守组合

$$p(B_1 \cup B_2 \cup \dots \cup B_s) \leq \sum_{i=1}^s p(B_i), i=1, \dots, s \quad (10)$$

式中,  $p(B_i)$  为第  $i$  分期发生超过防洪安全标准事件的概率。

从式(9)(10)可以看出,各分期防洪频率  $p(B_i)$  存在多种组合方式,使得年防洪标准  $p(B_1 \cup B_2 \cup \dots \cup B_s)$  不降低,而以不同组合方法管理运行水库可能得到不同的兴利效益。因此,分期汛限水位可以进行优化设计,实现洪水资源利用率的最大化。如图 1 所示,满足年防洪标准的分期汛限水位方案有无数种;相对原单一汛限水位,最优分期汛限水位方案在主汛期降低较少的水位运行,可获得一定的防洪效益,有利于其他分期汛限水位的抬高。这样,在不降低防洪标准的前提下,可从整体上提高水库汛期的兴利效益。

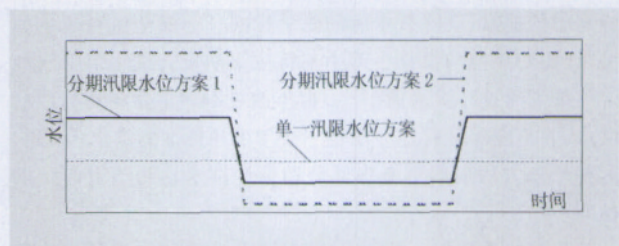


图 1 不同的分期汛限水位方案具有相同的年防洪标准

5 展望

分期洪水计算方法还存在一些问题,为此提出了进一步研究和探讨的建议:

- (1) 不完整资料的参数估计问题。历史洪水发生时间(分期)不能确定、分期资料部分缺失等情形下的分期设计洪水的参数估计问题。
- (2) 研究多元联合分布。寻求可以描述分期设计洪水的多元联合分布线型或方法,以及相应的参数估计方法,用以协调、保持分期设计洪水与年设计洪水的统一性。

(3) 推导异分布样本的绘点位置公式。此项研究目前较少见于文献, 但它对验证年最大洪水与分期最大洪水的关系、评价分期设计洪水方法的性能具有重要作用。

### 参考文献:

- [1] 程殿龙, 尚全民, 万海斌, 等. 以科学精神和积极态度对待洪水资源化[J]. 中国水利, 2004, (15): 25-27.
- [2] 胡四一, 高波, 王忠静. 海河流域洪水资源安全利用——水库汛限水位的确定与运用[J]. 中国水利, 2002, (10): 105-108.
- [3] 高波, 王银堂, 胡四一. 水库汛限水位调整与运用[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 326-333.
- [4] 李玮, 郭生练, 刘攀, 等. 水库汛限水位动态控制方法研究及其应用[J]. 水力发电, 2006, 32(3): 8-12.
- [5] 水利部长江水利委员会水文局, 水利部南京水文水资源研究所. 水利水电工程设计洪水计算手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001: 105-109.
- [6] 史良如, 陈继东. 利用水文气象和统计规律对海河流域中南部水库汛期控制运用的研究[J]. 水文, 1996, 16(6): 52-56.
- [7] 麻荣永. 百色水库洪水规律分析及其分期设计洪水推求[J]. 红水河, 1992, 11(2): 14-17.
- [8] 陈守煜. 从研究汛期描述水文系统模糊集分析的方法论[J]. 水科学进展, 1995, 6(2): 133-138.
- [9] 侯玉, 吴伯贤, 郑国权. 分形理论用于洪水分期的初步探讨[J]. 水科学进展, 1999, 10(2): 140-143.
- [10] 刘攀, 郭生练, 王才君, 等. 三峡水库汛期分期的变点分析方法研究[J]. 水文, 2005, 25(1): 18-23.
- [11] 高波, 刘克林, 王银堂, 等. 系统聚类法在水库汛期分期中的应用[J]. 水利水电技术, 2005, 35(6): 1-5.
- [12] Cunderlik J M., Ouada T. B. M. J., Bobée B. On the Objective Identification of Flood Seasons [J]. Water Resources Research, 2004a, 40, W01520, doi:10.1029/2003WR002295.
- [13] Cunderlik J M., Ouada T B M J, Bobée B. Determination of flood seasonality from hydrological records [J]. Hydrological Sciences Journal, 2004b, 49(3): 511-526.
- [14] 喻婷, 郭生练, 刘攀, 等. 汛期分期方法应用比较研究[A]. 全国第三届水问题研究学术研讨会论文集[C]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005, 11: 259-264.
- [15] 武鹏林, 晋华. 汛期洪水循时程变化规律研究与应用[J]. 太原理工大学学报, 1999, 30(1): 104-107.
- [16] 占润进. 福建省洪水的季节性和分期设计洪水的分析计算[J]. 水电站设计, 2003, 19(2): 1-6.
- [17] 姜其贵, 曹永强, 李培蕾. 水文资料的计算与复核研究[J]. 水力发电, 2005, 31(1): 15-18.
- [18] 国家技术监督局, 建设部. 中华人民共和国国家标准《防洪标准》GB50201—94[S]. 北京: 中国计划出版社, 1994.
- [19] McCuen R H, Beighley R E. Seasonal flow frequency analysis[J]. Journal of Hydrology, 2003, 279: 43-56.
- [20] US Water Resources Council (USWRC). Guidelines for determining flow frequency[S]. Bulletin 17B, Washington, DC, 1981.
- [21] USSR National Hydrology Institute (USSRNHI). Manual for determining hydrologic design characteristics (in Russian) [S]. Moscow, Soviet Union, 1984.
- [22] 中国水利电力部. 水利工程设计洪水计算标准[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1983.
- [23] Waylen P, Woo M K. Prediction of annual floods generated by mixed processes[J]. Water Resources Research, 1982, 18(4): 1283-1286.
- [24] 水利水电规划设计院, 长江流域规划办公室. 水利动能设计手册(防洪分册)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [25] 叶秉如. 水利计算及水资源规划[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [26] 丁晶, 王文圣, 邓育仁. 合理确定水库分期汛限水位的探讨[A]. 全国水文计算进展和展望学术讨论会论文集[C]. 南京: 河海大学出版社, 1998: 501-506.
- [27] 王善序. T年一遇水库汛期分期设计洪水[J]. 水资源研究, 2005, 26(4): 11-13.
- [28] Singh K P. A versatile flood frequency methodology[J]. Water International, 1987, 12(3): 139-145.
- [29] 王善序. 设计洪水与洪水季节性[J]. 水文科技信息, 1994, 11(2): 1-5.
- [30] Thomas W O Jr, Crockett K L, Johnson A. Discussion of techniques for analysis of ice-jam flooding[A]. Proc., Association of State Floodplain Managers[C]. 1998.
- [31] Singh V P, Wang S X, Zhang L. Frequency analysis of nonidentically distributed hydrologic flood data [J]. Journal of Hydrology, 2005, 307: 175-195.
- [32] Durrans S R, Eiffe M A, Thomas Jr W O, et al. Joint seasonal/annual flood frequency analysis [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2003, 8(4): 181-189.
- [33] 肖义, 郭生练, 刘攀, 等. 分期设计洪水频率与防洪关系研究[J]. 水科学进展, 2007, 39(2): 55-60.
- [34] Nelson R B. An introduction to Copulas[M]. Springer, New York, 1999.
- [35] Rasmussen P F, Rosbjerg D. Prediction uncertainty in seasonal partial duration series[J]. Water Resources Research, 1991, 27(11): 2875-2883.
- [36] 郭生练. 设计洪水研究进展与评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [37] 王善序. 论河流汛期时变设计洪水[J]. 水文, 2001(3): 18-20.
- [38] North M. Time-dependent stochastic models of floods[J]. ASCE, Journal of Hydraulic Division, 1980, 106: 649-665.
- [39] Konecny F, Nachtbel H P. Extreme value processes and the evaluation of risk in flood analysis[J]. Apply Mathematics Modeling, 1985(9): 11-15.
- [40] 方彬, 郭生练, 王善序. 河流汛期分期设计洪水频率分析[J]. 人民长江, 2005, 36(11): 37-39.
- [41] 杜丽惠, 曹亮, 廖松, 徐干军, 杜斌. 密云水库动态汛限水位分析[J]. 水力发电学报, 2005, 24(4): 42-46.
- [42] 邱瑞田, 王本德, 周惠成. 水库汛期限制水位控制理念与观念的更新探讨[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 68-72.
- [43] 刘攀, 郭生练, 肖义, 等. 水库分期汛限水位的优化设计研究[J]. 水力发电学报, 2007, 26(3): 5-10.