

水文随机模拟进展

王文圣^{1,2}, 金菊良³, 李跃清¹

(11 中国气象局成都高原气象研究所, 四川 成都 610072; 21 四川大学水利水电工程学院, 四川 成都 610065;
31 合肥工业大学土建学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 综述了近20年来水文随机模拟的新进展, 包括三方面: 1 随机水文模型改进和创新; ° 水文随机模拟应用研究新进展; » 水文随机模拟认识新进展。并指出了今后的研究重点: 1 对水文过程的重要物理特性和统计特性作深入的分析; ° 加强非参数模型和非线性模型的研究; » 加强流域系统随机模型的研究; ¼ 加强建立模型时如何综合利用多种信息的研究; ½ 加强模型的各种检验和合理分析。

关键词: 随机模拟; 随机模型; 非参数模型; 进展

中图分类号: P3331.6; G3531.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-6791(2007)0520-762-08

1 水文随机模拟

水文系统受气候和人类活动影响, 呈现出非常复杂的行为特征。在现有社会、经济和技术条件下, 对水文系统进行真实的物理实验以揭示其结构和功能, 显然是十分困难的。由于系统的复杂性, 目前还不能用准确的数理方程描述并求解。要了解水文系统各组成间的相互关系, 预测水资源开发方案可能产生的效果及对生态的影响, 分析系统的发展趋势, 当前可行的一类方法就是水文随机模拟。所谓水文随机模拟^[1], 指根据水文系统观测资料的统计特性和随机变化规律, 建立能预估系统未来水文情势的随机模型, 由模型通过统计试验获得大量的模拟序列, 再进行水文系统分析计算, 解决系统的规划、设计、运行与管理问题的方法。水文随机模拟成为认识、设计和管理复杂水文系统的主要方式之一, 一直是水文科学研究的热点。

正是水文系统的复杂性, 水文随机模拟法在该领域得到了大量的研究和广泛的应用。水文随机模拟技术最早可追溯到20世纪20年代末 Sudler, 但直到1961年 Britta 将马尔柯夫模型用于年径流模拟和1962年 Thomas、Fiering 将季节性马尔柯夫模型用于月径流随机模拟时, 标志着水文随机模拟技术的形成。我国从20世纪70年代末开始以成都科技大学(四川大学)、河海大学为代表开展了大量的水文随机模拟研究工作, 形成了以随机理论为基础的水文学新分支))) 随机水文学, 其代表作为1988年成都科技大学出版社出版的5随机水文学⁶。

从20世纪60年代开始, 国内外在干旱重演、梯级水电站优化调度、水环境容量评价、水库防洪安全设计、水文风险分析等方面对水文随机模拟进行了大量的研究和应用, 取得了显著的进展^[1]。本文就目前研究进展加以简要总结。

2 随机水文模型的进展

水文随机模拟技术的关键是建立合理可靠的随机水文模型。就目前成熟的、应用较多的随机模型而言, 可归纳为3类: 回归类模型、解集类模型和具有物理基础类模型。为了探讨更合适的随机模型, 水文工作者展开了以下几方面的工作。

收稿日期: 20021225; 修订日期: 200603215

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50779042, 70771035, 50739002)

作者简介: 王文圣(1970-), 男, 四川宣汉人, 副教授, 博士, 主要从事水文水资源水环境系统分析。

E2mail: wangws70@sina.com

211 常用随机模型的改进和发展

长江水利委员会等单位^[2]在对洪水资料进行对数指数变换后建立了多维平稳自回归模型和混合回归模型,对自回归模型进行了改进。进而对长江流域8个站区、历时180d洪水过程进行随机模拟,取得了满意的成果。袁宏源等^[3]提出混合回归疏系数模型,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。朱琰等^[4]提出了线性扰动模型。该模型有两部分组成:一是表征水文序列的确定部分的季节模型,一是描述水文序列中短期随机变化的扰动部分。将模型应用于洪水随机模拟证明是相当成功的。邓育仁等^[5]对间断雨量序列有雨、无雨状态的交替规律沿用马尔科夫转移概率描述。无雨转到有雨时,有雨序列用某指定概率分布刻画;有雨转到有雨时,若相关,由相依随机模型表征,反之,后一个雨量序列用某指定概率分布刻画。邓慧萍等^[6]在现有随机模型基础上,通过分析月径流与日径流量的统计关系,提出了按月径流大小分组建立的日流量随机模拟模型并用于气候变化研究。该模型包含了更多的气候变化对日尺度水文时间的影响信息。王文圣等^[7]考虑到日流量过程自相关结构在年内各分期内(汛前过渡期、汛期、汛后过渡期、枯期)是相对平稳的,因而提出了一种分期平稳自回归模型。该模型兼顾了现行平稳和非平稳自回归模型的优点,结构简单,参数合适,适用性强。袁宏源等^[8]考虑年、月径流分类的模糊性建立了多站径流随机模拟的模糊自回归模型。

在考虑水文序列偏态分布特性方面也作了一定的改进。金菊良^[9]提出了各种边际分布的季节性一阶自回归模型(SAR(1))并尝试暴雨随机模拟,取得了较好的成果。丁晶等^[10]探讨了中国四大江河(长江、黄河、松花江、西江)月径流时、空变化特性,研究表明SAR(1)加上随机项的偏态变换可用来表征月径流的时序变化,主站模型可用来表征月径流的空间变化。李爱玲^[11]建立了考虑年径流偏态特性的3站平稳AR(1)模型并获得了满意的应用效果。

李彦兴等^[12]提出了洪水特征值随机模拟的模糊典型解集模型。Meheotra R^[13]用空间解集模型把平均降雨量随机分解成点降雨量并与频率分析法、相关法对比,结果表明前者最优。相关解集模型存在模型参数太多和自相关结构不一致问题。为减少参数,开展了相关研究。文献[14, 15]提出了压缩式解集模型,其思路是忽略一些不必要刻画的协方差结构以减少参数。Koutsoyiannis D^[16]建立了动态解集模型(DDM)并应用于短时段降雨解集,1992年又对DDM模型进行深入研究并随机模拟了多站降雨和径流。该模型包括两个独立框架:基于连续相依模型(如PAR(1)模型)的矩确定过程和分离过程。连续相依模型参数即为DDM模型参数,故参数数目大大减少了。文献[17, 18]就研究了这种逐步式解集模型,基本思路是逐步将总量分解成两部分:当前分量和余下待分配的总量,直至所需要的各分量。比如,年径流分解月径流,先将年径流分解成1月径流和余下11个月径流之和,再将后者分解成2月径流和余下10个月径流之和,依次类推,可得各月径流模拟值。Koutsoyiannis D^[19]提出了基于准确修正的简单解集模型,该模型简单,参数少,能保持总量、分量各种统计特性。为解决自相关结构不一致问题,文献[16, 19]通过直接或间接使用PAR(1)模型克服了这一问题。

具有物理意义的随机模型研究进展不大。1990年清华大学对散粒噪声模型进行了改进且用于宜昌站洪水随机模拟^[20]。缪韧^[21]应用伊藤型随机微分方程作工具,建立了具有水文物理参数的日流量随机模型。由于水文系统受气候、地形、地貌、植被和人文等因素影响,是十分复杂的非线性的开放的巨系统。考虑水文形成规律,赋予参数一定物理意义,是一个比较困难的工作。

212 非线性随机模型

传统的随机模型一般都是线性的。水文系统是非线性系统。近10年来,非线性时间序列分析成为热门课题,并建立了一些非线性随机模型。

文献[22]将非线性门限自回归模型引入日流量过程随机模拟。门限自回归模型结构简单、概念清楚,可反映日流量在时序上的非线性性。根据金沙江流域屏山站观测资料建立了日流量随机模拟的门限自回归模型。实用性检验结果表明,该模型能很好地表征日流量在时序上的随机变化特性。

袁鹏等^[23]将双线性模型首次引入随机水文学中并用于洪水期(5月1日~10月31日)日流量随机模拟。文

中介绍了模型的结构和参数估计方法。实例分析表明双线性模型是可行的。

文献[24]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,且比自回归模型优。文献[25]提出了一个基于水量平衡和非线性水库的水文模拟神经网络。该网络参数具有明显的物理意义,且克服了 BP 网络在水文模拟上的缺陷,初步试用获得了较好结果。文献[26]也提出了基于 ANN 的日流量序列随机模拟模型,其思路是:水文序列的确定成分由 ANN 模型描述,其随机成分由一般随机模型描述,两者组合就可以进行水文序列随机模拟。该模型适合于单变量和多变量水文序列的模拟。实例分析表明是可行的。

213 非参数随机模型

上述随机模型都是对水文序列的概率分布(正态分布、P2III 型分布)和相依形式(线性或非线性)作了适当简化和假定的,因而有其自身的缺陷。为此,提出了非参数随机模型途径。非参数模型避免了序列相依结构和概率密度函数形式的人为假定,取得了令人满意的模拟效果。

对独立时间序列非参数模拟,主要有 Bootstrap(自展法)和 Jackknife(刀切法)两种方法,文献[27]构造了非参数贝叶斯模拟方法,该法用于独立同分布序列模拟研究,取得了有价值的结果。

对相依水文序列的随机模拟最近 10 年取得了较大的进展。Lall U 等^[28]提出非参数最近邻抽样模型并首次将它用于水文相依时间序列随机模拟。为了说明这种方法的有效性,作者使用三个实例作了验证:以 AR(1) 和 SETAR(1) 分别为总体生成 100 个容量为 500 的样本,根据样本由非参数最近邻抽样模型抽样,统计试验表明该法能保持总体的线性或非线性相依结构,统计特性也保持得很好;将该法用于 Webber River 的月径流模拟并与 AR(1) 模型模拟结果对比发现非参数最近邻抽样模型效果好,并能优良地保持分布的偏态和多峰形态。但该文最大缺点是对已知序列的重复抽样,没有实现合理的内插和外延。为此,袁鹏等^[29]提出了最近邻抽样扰动模型。在对水文序列随机模拟时进行了扰动,因此实现合理的内插和外延。该模型结构简单、方便实用。单站和多站洪水随机模拟表明建议模型是优越的。

Lall U 等^[30]构造了核密度估计干、湿长度(以日为单位,有雨与无雨的间隔长度)随机模型并用于单站日降雨量的模拟,通过与传统的干、湿长度模型对比表明核密度估计模型是优良的。Sharma A 等^[31]建议了非参数一阶马尔柯夫模型(NP(1)),作者使用该模型分别对 AR(1) 和 SETAR(1) 模拟的序列进行统计试验,结果表明 NP(1) 能逼近资料的真实分布,能保持总体的线性或非线性相依关系,且统计特性保持良好;同时将 NP(1) 用于 Beaver River 月径流模拟并与 AR(1) 模型模拟结果对比,表明 NP(1) 优于 AR(1),并且实现了合理的内插和外延,但该文的工作局限于单变量一阶情况。Rajagopalan B 等^[32]构造了以高斯函数为核的多变量一阶核密度估计模型,并对 Salt Lake City 五种气候因子进行模拟研究。Monte Carlo 试验表明这种非参数统计方法用于多变量相依时间序列模拟是成功的。

王文圣等^[33]基于核密度估计理论构造了单变量多阶非参数随机模型。将该模型用于金沙江流域屏山站日流量过程随机模拟,实用性分析表明是适合的。文献[34]将文献[33]建议的模型用于年径流过程随机模拟,并与平稳 AR(2) 模型对比,结果表明非参数模型是优越的。曾勇红等^[35]将一阶非参数模型用于月径流随机模拟并同 AR 模型进行了对比,表明前者在保持非线性、多峰形态方面优于后者。王文圣等^[36]提出了多变量非参数随机模型,以金沙江流域屏山站和宜宾-屏山区间两站日流量过程同时随机模拟为例进行了应用。模型能优良地保持日流量过程的各种统计特性。

Tarboton D G^[37]基于核密度估计建立了一种新型非参数解集模型,并以墨西哥 San Juan River 80 年月径流资料为例进行随机模拟研究,同参数解集模型模拟结果对比表明非参数解集模型能良好地保持径流序列的各种统计特性。王文圣等^[38]将非参数解集模型用于月径流随机模拟中,获得较好地结果。袁鹏等^[39]将非参数解集模型在汛期日径流随机模拟中加以了应用。

214 基于小波分析的随机模型

20 世纪 80 年代初兴起的小波分析(Wavelet Analysis)具有时频多分辨功能,能充分挖掘水文序列中的信息。

近10年来,小波分析在水文学中获得了较好的应用,其中基于小波分析的随机模型就是一部分内容。

王文圣等^[40]利用 A TrouS 算法将日流量过程分解成几个小波系数序列和一个尺度系数序列,即小波变换序列,根据水文时间序列显示的主周期将小波变换序列分解成若干段,经无条件随机抽样,获得无数组合,再由小波逆变换得到模拟日流量过程。以金沙江屏山站日流量为例,研究表明该途径是可行的。

衡彤等^[41]将小波分析与随机理论结合提出了基于小波变换的组合随机模型。以屏山站年径流过程为例建立了基于小波变换的组合随机模型并进行随机模拟研究,模型实用性分析表明是可行的。

王文圣等^[42]将小波分析与改进的非参数解集模型结合提出了基于小波分析的改进的非参数模型并应用于月径流随机模拟中,取得了较好的成果。

3 水文随机模拟应用的进展

随着水文学家对水文系统认识的提高,水文随机模拟技术的应用范围不断拓宽,而且取得了一些新的进展。主要体现在以下几方面。

3.1 在防洪安全设计方面

水库防洪安全设计现行方法的适用性是有条件的。水文随机模拟技术在一定程度上可克服现行方法的缺点。文献[43]对二滩水电站入库洪水建立 SAR(1)模型,由模型模拟出大量洪水过程线,根据调洪准则调洪演算得到坝前年最高水位系列,点绘坝前年最高水位频率曲线;从频率曲线上可推求相应于设计标准的防洪特征水位,尝试进行了水库防洪安全设计。同时对设计洪水过程线法的适用性作了初步探讨,指出其适用性是有条件的。文献[44]对威远河兴隆站洪水用 SAR(1)模型随机模拟并用于水库防洪安全设计,进一步探讨了现行法的适用性。文献[45]对紫坪铺水电站入库洪水建立 SAR(1)模型并用于水电站防洪安全设计,再次验证了现行设计洪水过程线法确定的工程实际防洪安全标准具有很大的不确定性,常出现高于或低于指定标准。统计试验表明影响偏离的主要因素为时段洪量设计值的抽样误差和典型洪水过程线的形状。

卢承志等^[46]用多站典型解集模型模拟水库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。

陈元芳^[47]在设定总体洪水随机模型(SAR(1))的前提下,对随机模拟法及传统方法推求设计防洪库容优劣作了初步对比研究。所考虑评价标准是设计防洪库容估计的不偏性及有效性,水库调洪方式采用削平头法,传统方法在推求设计洪水过程线时考虑了同频率及同倍比两种放大法。计算结果初步表明,在模型形式正确的情况下,随机模拟法比传统方法能提高设计防洪库容的计算精度。

3.1.2 在风险分析方面

水问题抑制了水资源、经济和社会的可持续发展。水问题导致的风险有多大需要特别关心。随机模拟技术较适合于风险分析。Adeoge A J^[48]用 AR(1)模型模拟径流序列,然后对水库库容的可靠性进行评价。文献[49]用 ARMA(p, q)模型拟合季节性洪水序列并应用于洪水风险性分析,取得了可靠的成果。

李霞^[50]以发电量为风险变量,并假定为正态分布,建立随机模型。采用随机模拟技术尝试了紫坪铺水电站经济评价的风险分析,效果较好。熊明^[51]对三峡7个站区洪水建立随机模型并进行随机模拟,获得坝前水文序列,从而探讨了三峡水库的防洪风险问题。证明了三峡工程采用1981、1982和1954年典型设计洪水推求防洪特征水位是偏安全的,最后指出洪水随机模拟技术是可行而有效的。史世平等^[52]利用水文随机模拟方法生成年径流的长系列,以年径流软划分聚类方法确定其月分配,得到月径流系列。根据生成的月径流系列分析Kunene河的供水风险。刘新立^[53]探讨了随机过程中的马尔科夫链以及随机模拟技术在水灾风险管理中的应用。实例表明应用马尔科夫链可以评估未来某个时间单位中水灾的损失风险,在此基础上应用随机模拟技术评估未来若

干个时间单位中水灾的总损失风险。

313 在水利工程规划、调度和经济评价方面

文献[3]将随机模拟与水库群优化运行结合起来,得到比传统方法更优的调度效果。文献[11]建立了多站典型解集模型,对黄河上游3站区月径流进行了随机模拟研究并用于水电站群兴利随机优化调度模型中。

方红远^[54]将随机模拟法在水库规划研究中加以应用。对入库径流序列建立随机模型,由模拟序列获得若干个有效库容值及相应的水库运行策略,进一步验证结果的合理性。李爱玲^[55]实测径流系列,作为来水总体的一个样本,用其分析计算出的水电站水库多年运行指标(如多年平均电能、保证率等)是具有抽样误差的。现尝试应用径流随机模拟理论和方法,研究水电站水库群多年运行电能指标的抽样误差,并以黄河上游梯级水电站水库群为例进行了实例计算,分析了计算成果。

董胜等^[56]提出应用水文随机模拟法产生洪水系列,以防洪工程使用期为一个时间单位,考虑资金的时间价值,对工程的减灾损失进行了计算,得到了防洪效益的概率分布模式,为防洪工程经济决策评价打下了基础。随机模拟法克服了实际资料序列短的不足,计算防洪效益更加符合客观实际。

314 在其它方面

文献[9]提出了各种边际分布的SAR(1)并尝试暴雨随机模拟。黄平等^[57]根据随机理论推导了一个描述污染带变化的概率模型,用随机模拟法求其数值解,实例表明随机模拟法能反映浓度可能变化范围。丁晶等^[58]在大量实测年径流量资料的基础上,分析了作为水文干旱定量指标负轮长的统计变化特性,并以哈尔滨和陕县站为例,以随机模拟途径探讨了严重干旱出现可能性的定量估计方法。朱廷举等^[59]采用多站季节性随机径流模型生成序列人工径流,利用模糊聚类分析方法对人工径流序列中的枯水年份进行了识别,最后以黄河中游测站为例,通过对径流序列中不同长度连续枯水段出现情况的统计分析确定了几种条件下严重水文干旱的发生概率和重现期。尹雄锐等^[60]采用随机模拟方法分析海河流域多年持续干旱特征。尹正杰等^[61]提出了一个含有趋势分量、季节分量、随机分量的时间序列模型,并用来模拟灌区灌溉需水量。温季等^[62]将随机模拟技术用于作物灌溉管理中,研究表明随机模拟方法具有较强的普适性。王文圣等^[63]建立了满意的年、月输沙量随机模型。

4 水文随机模拟认识的进展

随着水文随机模拟在水科学领域广泛应用,水文学家对水文随机模拟本质和科学作用的认识得到了全面提升。主要表现为:模拟序列的本质问题、模拟序列中的特异值问题和随机模型可靠性问题。

模拟序列来自于随机模型。当序列足够长时,模拟序列就等同于随机模型。当随机模型可作为研究对象的总体,那么模拟序列就可以来表征未来可能出现各种时序和数量的变化,特别是可能出现各种极端恶劣组合情况,无疑有助于在水资源系统的规划和运转管理决策时对可能出现的不利情况作出更全面的考虑。因此模拟序列也可称为估算序列。模拟序列与实测序列的区别何在呢?当随机模型仅利用了实测序列的信息,那么模拟序列的信息量没有变化,它仅仅利用实测序列含有的信息进行时序的外推,其代表性不变。当随机模型利用了实测序列之外其它信息,那么模拟序列的信息量得到了大量的增加,其代表性就高于实测序列。后者往往是常采用的形式。所以,模拟序列不是所谓的/假造序列0。

由随机模型模拟出大量的模拟序列,其中可能出现个别的特异值,例如负流量、数值非常大的流量(经分析不可能出现)。随机模型中的独立随机项一般用正态分布或 $P20$ 型分布来表征其统计特性。这些分布都是无上限,当模拟序列数量很大时,可能出现个别/离奇0的特大值。这并不违背统计规律。问题的症结是能否用上端无限的分布曲线。这和下面的情况十分类似。误差尽管不会无穷大,但正态分布仍然为大家公认用来表示误差的分布。上端无限分布的应用导致模拟序列中出现/离奇0的特大值。又如在做洪水频率曲线分析时,当频率取非常大时,得到的洪水也非常大。因此关键在于在分析计算时,是否采用特大值和以大量模拟序列为基础的水资源系统规划设计成果受个别/离奇0特大值的影响有多大。事实上对于后者,影响是微小的,因为设

计成果是取用某种估计量的平均值和分位数, 而平均值和分位数这些统计量主要取决于数量很大的模拟序列本身。这一点正好和处理实测序列的情况形成鲜明的对照。实测序列只有几十年, 在这样一个短序列中加入一个特大值举足轻重。相反, 在大量模拟序列中可能出现负值。如在模拟大量序列中出现的负值较少, 其存在不影响实际应用; 如出现负值较多, 则该随机模型必须进行修正或更换。

由于水文过程的极端复杂性, 观测资料往往较短, 所选择的随机模型未必能完全反映实际水文过程的特性, 即模型与原型之间可能存在着一定的差异。这种差异不仅表现在模型结构与原型可能有差异, 而且模型参数的估计也会存在着一定的误差。这就是随机模型可靠性问题。应用研究表明, 只要模型结构合理、参数估计方法比较稳健, 则建立的随机模型是可靠的。

随着认识的提高和方法的成熟, 我国在制定的水利水电工程设计洪水计算规范^[64]和水文计算规范^[65]时也正式列入了随机模拟方法。这标志着水文随机模拟方法进入了实用阶段。

5 水文随机模拟展望

水文随机模拟在建模、应用和认识等方面取得了大量研究成果, 并不断得到了认可和采纳^[64,65]。为了完善和推广水文随机模拟法, 今后应进一步加强以下几方面的工作:

(1) 对水文过程的重要物理特性和统计特性作深入的分析。只有这样, 才能将模型建立在水文过程固有特性的基础上, 才能将模型中的参数和过程的特性联系起来, 从而提高参数估计的可靠性。

(2) 加强非参数模型和非线性模型的研究。水文现象是非线性的, 简单的线性假定和特定的概率分布假定都是不合时宜的。只有这样, 水文随机模型才是可靠的。

(3) 加强流域系统随机模型的研究, 即将流域作为一个随机系统, 由雨量(暴雨)模拟序列随机转换成洪水序列。这样的随机模拟较传统的频率计算方法可以考虑更多的随机水文因素及其相互关系, 也是当前研究稀遇洪水现象的有效方法。

(4) 加强建立模型时如何综合利用多种信息的研究。在这方面, 地区信息的利用最为有效。将地区信息和单站观测序列的信息合理地结合起来研究显得十分迫切。

(5) 加强模型的各种检验和合理分析, 使水文模拟过程反映水文现象的真实特性, 而不是虚假的特性, 以提高模型的适用性。

参考文献:

- [1] 丁 晶, 邓育仁. 随机水文学[M]1 成都: 成都科技大学出版社, 1988.
- [2] 水利部长江水利委员会水文局, 河海大学, 成都科技大学1 三峡工程洪水随机模拟研究[R]1/ 七五0 国家重点科技攻关报告, 1990.
- [3] 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]1 水电能源科学, 1994, 12(4): 230- 236.
- [4] 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]1 河海大学学报, 1994, 22(1): 13- 19.
- [5] 邓育仁, 丁 晶1 间断雨量序列随机模拟的研究[J]1 成都科技大学学报, 1994, (5): 7- 11.
- [6] 邓慧萍, 张 翼. 可用于气候变化研究的日流量随机模拟方法探讨[J]1 地理学报, 1996, 51(增刊): 150- 159.
- [7] 王文圣, 丁 晶, 邓育仁. 日流量过程随机模拟模型的探讨[J]1 四川联合大学学报(工程科学版), 1997, 1(4): 41- 48.
- [8] 袁宏源, 罗洋涛. 多站径流的模糊随机生成模型[J]1 武汉水利电力大学学报, 1997, 30(2): 59- 62.
- [9] 金菊良. 暴雨洪水流域系统随机模拟研究[D]1 成都: 成都科技大学, 1992.
- [10] 丁 晶, 邓育仁, 金菊良. 中国四大河月径流随机变化特性的探讨[J]1 四川水力发电, 1993, 12(4): 36- 43.
- [11] 李爱玲. 黄河上游梯级水电站群兴利随机优化调度模型[D]1 南京: 河海大学, 1995.
- [12] 李彦兴, 王亚铭, 吴林波, 等. 模糊随机模拟法在设计洪水计算中的应用[J]1 黑龙江水专学报, 1996, (3): 19- 25.
- [13] Meheeta R, Singh R D1 Spatial disaggregation of rainfall data[J]1 Hydrological Sciences Journal des Sciences Hydrologiques, 1998, 43(1):

97- 101.

- [14] Stedinger J R, Vogel R M. Disaggregation procedures for generating serially correlated flow vectors[J]. *Water Resources Research*, 1984, 20(1): 47- 56.
- [15] Oliveira G C, Kelman J, Pereira M V F. A representation of spatial cross correlations in large stochastic seasonal streamflow models[J]. *Water Resources Research*, 1988, 24(5): 781- 785.
- [16] Koutsoyiannis D, Xanthopoulos T I. A dynamic model for short-scale rainfall disaggregation[J]. *Hydrological Science Journal*, 1990, 35(3): 303- 322.
- [17] Santos E G, Salas J D. Stepwise disaggregation scheme for synthetic hydrology[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 1992, 118(5): 765- 784.
- [18] Salas J D. Analysis and modeling of hydrologic time series[A]. in *Handbook of Hydrology*[C]. edited by D I Maidment, Chap 19, New York: McGraw-Hill, 1993.
- [19] Koutsoyiannis D, Manetas A I. Simple disaggregation accurate adjusting procedures[J]. *Water Resources Research*, 1996, 32(7): 2105- 2117.
- [20] 廖松. 散粒噪声模型的改进[R]. 北京: 清华大学, 1990.
- [21] 缪韧, 丁晶. 具有水文物理概念的日径流随机模型[J]. *水利学报*, 1998, (4): 27- 23.
- [22] 王文圣, 袁鹏, 丁晶, 等. 门限自回归模型及其在水文随机模拟中的应用[J]. *四川水力发电*, 2001, 20(增刊): 47- 51.
- [23] 袁鹏, 王正勇. 一种洪水随机模拟的新模型)) 双线性模型[J]. *四川联合大学学报(工程科学版)*, 1996, (6): 91- 96.
- [24] Raman H I. Multivariate modeling of water resources time series using artificial neural network[J]. *Hydrological Sciences Journal des Sciences Hydrologiques*, 1995, 40(2): 145- 163.
- [25] 杨荣富, 丁晶, 刘国东. 具有水文基础的人工神经网络初探[J]. *水利学报*, 1998, (8): 23- 27.
- [26] 王文圣. 非参数随机模型及其在水文水资源随机模拟中的应用[D]. 成都: 四川大学, 1999.
- [27] Fotin V, Bemier J, Bobee B I. Simulation, Bayes and bootstrap in statistical hydrology[J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(3): 439- 448.
- [28] Lall U, Shama A. A nearest neighbor bootstrap for resampling hydrologic time series[J]. *Water Resources Research*, 1996, 32(3): 679- 693.
- [29] 袁鹏, 王文圣, 丁晶. 洪水随机模拟的最近邻抽样扰动模型[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2000, 32(4): 41- 48.
- [30] Lall U, Rajagopalan B, Tarboton D G. A nonparametric wet/ dry spell model for resampling daily precipitation[J]. *Water Resources Research*, 1996, 32(9): 2813- 2823.
- [31] Shama A, Tarboton D G, Lau U I. Stream flow simulation: a nonparametric approach[J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(2): 291- 308.
- [32] Rajagopalan B, Lall U, Tarboton D G. Multivariate nonparametric resampling scheme for generation of daily weather variable[J]. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 1997(11): 65- 93.
- [33] 王文圣, 丁晶, 袁鹏. 单变量核密度估计模型及其在径流随机模拟中的应用[J]. *水科学进展*, 2001, 12(3): 367- 372.
- [34] 王文圣, 马吉让, 向红莲, 等. 一种径流随机模拟的非参数模型[J]. *水利水电技术*, 2002, 33(2): 8- 10.
- [35] 曾勇红, 姜特兵, 李承军. 非参数 Markov 月径流模拟[J]. *人民长江*, 2003, 34(1): 42- 43.
- [36] 王文圣, 丁晶. 多变量核密度估计模型的初步研究[J]. *水利学报*, 2003(2): 9- 14.
- [37] Tarboton D G, Sharma A, Lall U. Disaggregation procedures for stochastic hydrology based on nonparametric density estimation[J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(1): 107- 119.
- [38] 王文圣, 丁晶, 袁鹏. 非参数解集模型及其在水文随机模拟中的应用[J]. *四川水力发电*, 1999, 18(1): 60- 63.
- [39] 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- 15.
- [40] 王文圣, 袁鹏, 丁晶. 小波分析及其在日流量过程随机模拟中的应用[J]. *水利学报*, 2000, (11): 43- 48.
- [41] 衡彤, 王文圣, 李拉丁, 等. 基于小波变换的组合随机模型及其在径流随机模拟中的应用[J]. *水电能源科学*, 2002, 20(1): 15- 17.
- [42] 王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [43] 丁晶, 朱宏江. 对现行设计洪水过程线方法适用性的统计试验研究[J]. *四川水力发电*, 1990(1): 17- 24.
- [44] 丁晶, 胡建清. 威远河兴隆站洪水随机模拟及其应用[J]. *四川水力发电*, 1991(2): 4- 10.
- [45] 丁晶, 邓育仁, 梁棣, 等. 水库防洪安全设计时设计洪水过程线法适用性的探讨[J]. *水科学进展*, 1992, 3(1): 45- 52.

- [46] 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.
- [47] 陈元芳. 随机模拟法与传统方法推求设计防洪库容优劣的初步研究[J] 水科学进展, 2000, 11(1): 64- 69.
- [48] Adeoye A JI. Operational assessment of the reliability of single estimates of reservoir capacity[A]. In: Kundzewicz Z W, Rosbjerg D, S2 monovic S P, et al. (eds). Extreme hydrological events, precipitation, floods and droughts[C]. Iahs publ, 1993, 2131361- 371.
- [49] ISMAIL Bin Atan, Metcalfe A V. Estimation of seasonal flood risk using a two stage transformation[J] Water Resources Research, 1994, 30(7): 2110- 2125.
- [50] 李霞. 水电站经济评价风险分析的随机模拟法初探[J] 四川水力发电, 1994(1): 8- 10.
- [51] 熊明. 三峡水库防洪安全风险分析[J] 水利水电技术, 1999, 30(2): 39- 42.
- [52] 史世平, 郝福良. 随机模拟在水文风险分析中的应用[J] 水利水电工程设计, 2001, 20(3): 18- 20.
- [53] 刘新立. 随机过程与随机模拟在水灾风险管理中的应用研究[J] 经济科学, 2003(1): 114- 119.
- [54] 方红远. 机遇约束模型、随机模拟技术在水库规划研究中的应用[J] 水利学报, 1997(6): 53- 59.
- [55] 李爱玲. 应用径流随机模拟理论研究水电站电能指标的抽样误差[J] 水文, 1997(6): 40- 43.
- [56] 董胜, 刘德辅. 防洪效益的随机模拟[J] 青岛海洋大学学报, 1998, 28(1): 118- 122.
- [57] 黄平, 陈铄成. 河流污染带的随机模拟方法[J] 水文, 1995(3): 8- 11.
- [58] 丁晶, 袁鹏, 杨荣富, 等. 中国主要河流干旱特性的统计分析[J] 地理学报, 1997, 52(4): 374- 381.
- [59] 朱廷举, 胡和平. 基于随机模拟和模糊聚类的水文干旱特性分析[J] 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(8): 103- 106.
- [60] 尹雄锐, 张翔, 王晓妮. 海河流域多年持续干旱特征分析[A] 夏军. 水问题的复杂性研究与进展[C]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [61] 尹正杰, 袁宏源, 崔远来, 等. 灌区灌溉需水量的随机模拟[J] 中国农村水利水电, 2001(11): 19- 22.
- [62] 温季, 郭树龙, 卢闻航. 作物灌溉随机模拟技术研究[J] 人民黄河, 2004, 26(5): 39- 41.
- [63] 王文圣, 丁晶, 邓育仁. 溪洛渡输沙量随机模拟的初步研究[J] 四川水力发电, 1997, 16(1): 19- 23.
- [64] 水利部, 能源部. 水利水电工程设计洪水计算规范[M] 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [65] 水利部. 水利水电工程水文计算规范[M] 北京: 中国水利水电出版社, 2002.

Advances in stochastic simulation of Hydrology^X

WANG Wen2sheng^{1,2}, JIN Ju2liang³, LI Yue2qin¹

(1 Chengdu Institute of Plateau Meteorology, CMA, Chengdu 610072, China;

2 School of Hydraulic Engineering of Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3 School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The new advances in hydrology stochastic simulation are introduced. Those advances are as following: the modification and presentation of stochastic models, and new advances in the application of hydrology stochastic simulation and knowledge of hydrology stochastic simulation. Finally the further study directions are prospected: (1) the physical and statistical characteristics of hydrology time series, (2) the nonparametric stochastic model and the nonlinear stochastic model, (3) the stochastic model based on basin system, (4) the approaches of application of more hydrological information during constructing the stochastic model, and (5) the test and validation of stochastic hydrological model.

Key words: stochastic simulation; stochastic model; nonparametric model; advances

^X The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China(No150779042, 70771035, 50739002)1