基于时变混合分布模型的非一致性洪水频率分析方法

闫磊　熊立华　著







中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

基于时变混合分布模型的非一致性洪水频率分析方法

闫磊　熊立华　著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn
·北京·

内 容 提 要

准确地估计洪水极值事件所服从的概率分布，并合理地推求设计洪水值对水利工程的规划设计以及运行管理等工作具有重要意义。然而，受到全球气候变化与人类活动的双重影响，传统的基于一致性假设的洪水频率分析理论已不再适用。本书在综述一致性和非一致性洪水频率分析研究进展的基础上，重点阐述了基于时变混合分布模型的非一致性洪水频率分析理论与方法。本书主要内容包括：采用单一分布模型的非一致性洪水频率分析方法；洪水类型划分方法；基于洪水类型划分的时变混合分布模型；非一致性设计洪水值的推求方法。

本书适合水文水资源领域的科研工作者、工程师、研究生和教师参考阅读。

图书在版编目（CIP）数据

基于时变混合分布模型的非一致性洪水频率分析方法/闫磊，熊立华著. -- 北京 : 中国水利水电出版社，2020.10

ISBN 978-7-5170-9084-7

Ⅰ. ①基… Ⅱ. ①闫… ②熊… Ⅲ. ①洪水－水文分析－分析方法 Ⅳ. ①P333.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第213323号

书　　名	**基于时变混合分布模型的非一致性洪水频率分析方法** JIYU SHIBIAN HUNHE FENBU MOXING DE FEIYIZHIXING HONGSHUI PINLÜ FENXI FANGFA
作　　者	闫磊　熊立华　著
出版发行	中国水利水电出版社 （北京市海淀区玉渊潭南路1号D座　100038） 网址：www.waterpub.com.cn E-mail：sales@waterpub.com.cn 电话：（010）68367658（营销中心）
经　　售	北京科水图书销售中心（零售） 电话：（010）88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排　　版	中国水利水电出版社微机排版中心
印　　刷	清淞永业（天津）印刷有限公司
规　　格	170mm×240mm　16开本 10印张 196千字
版　　次	2020年10月第1版　2020年10月第1次印刷
定　　价	**56.00**元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前　言

准确地估计洪水极值事件所服从的概率分布，并合理地推求设计洪水值对水利工程的规划设计以及运行管理等工作具有重要意义。在传统的洪水频率分析中，洪水样本应当满足一致性假设，即独立同分布假设。独立同分布假设认为洪水样本序列来自于同一个洪水总体，并据此认为整个洪水样本序列服从同一个单一概率分布。然而，许多研究表明，由于不同的气象条件（如雷暴、台风、热带气旋和融雪等）、土地利用类型和流域特征变化（如渠道特征和土壤含水量等）等因素的共同作用，形成洪水事件的源头和机制存在着差异，导致洪水样本序列可能源于多个洪水总体。因此，不考虑洪水形成机制差异及其背后物理过程的传统的时不变单一概率分布，在很多情况下并不能很好地拟合洪水样本序列，导致洪水频率分析结果失真，进而影响水利工程的规划设计及流域水资源管理与配置。此外，受到全球气候变化与人类活动的双重影响，传统的基于一致性假设的洪水频率分析理论已不再适用。

基于上述背景，本书针对变化环境下的非一致性洪水频率分析开展深入研究。考虑不同洪水形成机制对洪水频率分析的影响，开展基于混合分布模型的非一致性洪水频率分析研究，揭示了变化环境下洪水事件的物理过程和时空演变规律，并提出了一套适用于变化环境的非一致性洪水设计方法，可为水利工程的规划设计和运行管理等工作提供理论依据。

本书主要研究成果包括以下几点：

（1）基于单一分布模型的非一致性洪水频率分析。基于位置、尺度和形状的广义可加模型（Generalized Additive Models for Location，Scale and Shape，GAMLSS），采用社会经济协变量（人口）和气象协

变量（降雨）构建非一致性洪水概率分布模型。

(2) 基于洪水时间尺度的洪水类型划分。基于季节性分析方法对洪水类型进行识别，采用洪水时间尺度（Flood Timescale，FT）指标表征不同的洪水形成机制，并据此合理地划分洪水子序列。

(3) 基于时不变混合分布模型的非一致性洪水频率分析。在传统的混合分布模型（Traditional Two - component Mixture Distributions，TCMD - T）基础上，通过洪水时间尺度指标对洪水类型进行划分，构建基于洪水时间尺度的混合分布模型（FT - based Two - component Mixture Distributions，TCMD - F），增强 TCMD - T 模型的物理意义和模拟精度。

(4) 基于时变混合分布模型的非一致性洪水频率分析。在 TCMD - T 模型的基础上，提出一种能够同时考虑统计参数和分布线型变化的时变混合分布模型（Time - varying Two - component Mixture Distribution，TTMD)。采用社会经济协变量（人口）和气象协变量（降雨）描述权重系数和统计参数的时变特征。采用结合了模拟退火算法和极大似然算法的元启发式极大似然算法（Meta - heuristic Maximum Likelihood，MHML）来估计 TTMD 模型的参数。

(5) 非一致性设计洪水值推求。为解决基于时变概率分布模型的非一致性设计值推求问题，提出了一种能够考虑工程设计年限的非一致性水文设计方法——设计年限平均值法（Average Design Life Level，ADLL），并和期望超过次数法（Expected Number of Exceedances，ENE)、设计年限水平法（Design Life Level，DLL）及等可靠度法（Equivalent Reliability，ER）进行比较。

本书是在国家自然科学基金青年基金项目“基于洪水类型划分的非一致性洪水频率分析计算方法研究”（51909053)、国家杰出青年科学基金项目（51525902)、河北省自然科学基金青年基金项目（E2019402076)、水资源与水电工程科学国家重点实验室开放研究基金（2019SWG02)、河北省高等学校科技术研究项目（QN2019132）共同资助下完成的，作者在此表示深深的谢意。

全书由闫磊、熊立华撰写，在课题的研究和撰写过程中，得到了挪威奥斯陆大学许崇育教授和于坤霞、杜涛、江聪、熊斌等人的大力支持，并参考了他们的部分研究成果（见参考文献），在此一并表示感谢！

由于作者水平有限，加上时间仓促，书中难免出现不足之处，欢迎读者和有关专家批评指正。

作者

2020 年 6 月

目　录

前言

1　绪论 …… 1

1.1　研究背景及意义 …… 1

1.2　国内外研究进展 …… 3

1.2.1　一致性水文频率分析研究进展 …… 3

1.2.2　非一致性水文频率分析研究进展 …… 6

1.2.3　非一致性水文设计方法研究进展 …… 11

1.3　主要内容与技术路线 …… 14

2　基于单一分布模型的非一致性洪水频率分析 …… 16

2.1　年最大洪水序列的非一致性诊断 …… 16

2.1.1　趋势检验 …… 17

2.1.2　Pettitt 变点检验法 …… 20

2.2　基于时变单一分布模型的洪水频率分析 …… 20

2.3　模型评价准则及拟合优度检验 …… 22

2.3.1　模型评价准则 …… 22

2.3.2　模型拟合优度检验指标 …… 23

2.4　应用研究 …… 25

2.4.1　研究区和数据 …… 25

2.4.2　洪水序列非一致性诊断 …… 31

2.4.3　基于时变单一分布模型的洪水频率分析 …… 33

2.5　本章小结 …… 48

3　洪水类型划分 …… 50

3.1　基于季节性分析的洪水类型识别 …… 50

3.2　基于洪水时间尺度的洪水类型划分 …… 53

3.2.1　以洪水时间尺度作为不同洪水形成机制的指标 …… 53

3.2.2　基于降解后日径流的洪水时间尺度的计算 …… 54

3.2.3　不同洪水形成机制的划分 …… 56

3.3 应用研究 …… 57
3.3.1 研究区和数据 …… 57
3.3.2 年最大洪水序列的季节性分析 …… 60
3.3.3 洪水类型划分 …… 63
3.4 本章小结 …… 68

4 基于洪水类型划分的时变混合分布模型 …… 70
4.1 时不变混合分布模型 …… 70
4.2 时变混合分布模型 …… 72
4.3 混合分布模型参数估计方法 …… 74
4.3.1 TCMD-T 时不变模型的参数估计方法 …… 74
4.3.2 TCMD-F 时不变模型的参数估计方法 …… 76
4.3.3 TTMD 时变模型的参数估计方法 …… 76
4.4 模型拟合优度检验及选取准则 …… 77
4.4.1 模型选取准则 …… 77
4.4.2 模型拟合优度检验 …… 79
4.5 应用研究 …… 79
4.5.1 研究区和数据 …… 79
4.5.2 基于时不变混合分布模型的洪水频率分析 …… 79
4.5.3 基于时变混合分布模型的洪水频率分析 …… 88
4.6 本章小结 …… 97

5 非一致性设计洪水值推求 …… 99
5.1 基于时不变概率分布模型的水文设计方法 …… 99
5.2 基于时变概率分布模型的水文设计方法 …… 100
5.2.1 基于期望超过次数的设计洪水值推求 …… 101
5.2.2 基于期望等待时间的设计洪水值推求 …… 102
5.2.3 基于设计年限水平的设计洪水值推求 …… 103
5.2.4 基于等可靠度的设计洪水值推求 …… 108
5.2.5 基于设计年限平均值的设计洪水值推求 …… 109
5.3 非一致性水文设计方法理论分析与比较 …… 110
5.4 未来降雨和人口协变量的预估 …… 111
5.4.1 未来降雨的预估 …… 112
5.4.2 未来人口的预估 …… 113
5.5 设计洪水值的不确定性分析 …… 113
5.5.1 TCMD-T 模型设计值的不确定性分析 …… 114

5.5.2 TCMD-F模型设计值的不确定性分析 …… 115
5.5.3 时变概率分布模型非一致性设计值的不确定性分析 …… 116
5.6 应用研究 …… 117
5.6.1 研究区和数据 …… 117
5.6.2 基于时不变混合分布模型的设计值推求 …… 119
5.6.3 未来年超过概率计算 …… 120
5.6.4 基于时变单一分布模型的设计方法比较分析 …… 123
5.6.5 基于时变混合分布模型的设计值推求 …… 128
5.7 本章小结 …… 129

6 结论与展望 …… 131
6.1 主要研究结论 …… 131
6.2 研究展望 …… 133

参考文献 …… 135

1 绪　论

1.1 研究背景及意义

人类的发展史就是一部和自然灾害的斗争史。在众多的自然灾害中，又以洪涝灾害的影响最为重要，造成的社会影响最广、伤亡人数最多、经济损失最大。20世纪90年代洪涝灾害事件占我国所有自然灾害事件的比例高达62%。根据水利部国家防汛抗旱总指挥部的定义，洪涝灾害指的是由于降雨、融雪、冰凌、溃坝等因素所导致的江河洪水、渍涝、山洪、滑坡等，及其引发的次生灾害（国家防汛抗旱总指挥部，2017）。我国独特的地形、地质条件以及季风气候的影响，决定了降雨具有在年内时空分布不均、年际波动较大的特点，加之我国人口众多，洪涝灾害风险较大的土地不断地被开发利用，导致我国自古以来便是一个洪涝灾害事件频发的国家（夏军等，2016；张建云等，2007）。据不完全统计，自公元前206年至1949年新中国成立，我国发生较大的洪涝灾害事件1000余次（国家防汛抗旱总指挥部，2007），我国约有40%的人口、35%的耕地及70%的工业、农业生产活动饱受洪涝灾害事件的威胁，这给我国社会经济的可持续发展造成了严重不利影响（王浩，2010）。新中国成立以来，我国历届政府都高度重视防洪减灾工作，经过60多年的不懈努力，已经取得了巨大的成效。但是由于气候变化的影响，极端天气灾害事件频发，加之我国城镇化进程不断加速，世界级超大城市群不断发展，防洪安全保障等级不断越高，区域防洪形势依然严峻（陈雷，2010；夏军等，2016；张建云等，2008）。据水利部统计数据，1990—2016年，我国年平均受灾面积971.514万hm^2，年平均因灾死亡人数4212人，房屋倒塌182.69万间，年平均直接经济损失1481.62亿元，约占同期GDP的1%～3%（国家防汛抗旱总指挥部，2017）。因此，兴利除害、防灾减灾对保障国民经济健康可持续发展有着重要的现实意义。

在河流上修建大坝、水库等水利防洪工程是区域防洪减灾的主要手段和重要组成部分。而如何合理地计算设计洪水值是水利防洪工程规划设计中所要解决的首要问题（郭生练，2005）。我国《水利水电工程设计洪水计算规范》（SL 44—2006）规定，采用洪水频率分析的方法来推求设计洪水值。即将洪水事件看作随机现象，用统计的原理和方法来估计各种洪水特征值（比如洪

峰流量、不同时段洪量等）所服从的概率分布和频率曲线，并据此推求不同设计标准下的设计洪水值。需要指出的是，传统的洪水频率分析主要基于以下基本假设：①所使用的原始洪水资料满足一致性假设，即在洪水资料观测期及未来待建水利工程的设计年限内，生成洪水样本序列的环境因子（比如气候条件、土地利用类型、河道状况等）保持不变；②洪水序列中的各个洪水样本满足独立同分布假设，即各样本之间相互独立且来自于同一个概率分布。

然而，自19世纪工业革命以来，全球工业化和城镇化加速发展，伴随着化石燃料能耗的增加，大气中以CO_2为代表的温室气体排放量持续增加，温室效应愈发强烈，导致全球性的气候变暖，这一结论已经为国内外学术界广泛地接受。联合国政府间气候变化专业委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC）先后于1990年、1996年、2001年、2007年以及2013年发布了五次针对全球气候变化的权威评估报告。其中最新发布的第五次评估报告（IPCC AR5）第一工作组报告指出（IPCC，2013），全球气候变暖确信无疑。1880—2012年间，全球海洋和陆地的表面温度平均升高了0.85℃（不同数据集90%置信区间为0.65～1.06℃）。气候变暖将加速水循环过程，改变区域降水量与蒸发量，进而影响洪水、枯水等极值事件发生的频率、强度以及时空分布（熊立华等，2017）。除气候变化外，水利工程与水土保持工程的建设、农业灌溉、河道整治、城镇化、工业用水、生活用水等众多人类活动对流域下垫面的影响也变得越来越突出，显著地改变了天然条件下流域的产汇流特性。正如国际水文科学协会2013—2022年十年计划“Panta Rhei－Everything Flows”指出的那样，全球气候和水文系统正经历着明显的变化。在气候变化和人类活动的影响下，水文序列的一致性遭到破坏，全球范围内许多水文变量已经表现出非一致性（Khaliq等，2006；Milly等，2008；Milly等，2015；Montanari等，2013；Salas等，2014；Villarini等，2009；Xiong等，2019；冯平等，2015；顾西辉等，2014；梁忠民等，2011；史黎翔等，2016；唐亦汉等，2015；谢平等，2005；谢平等，2017；熊立华等，2015；闫磊等，2014）。因此，基于一致性假设的传统水文频率分析理论与方法在变化环境下遭受挑战，继续采用一致性水文频率分析方法得到的设计成果可能会增加水利工程的运行管理风险（设计标准过低）或者增加工程的造价（设计标准过高）。

此外，传统洪水频率分析中的独立同分布假设认为洪水样本序列来自于同一个洪水总体，并据此认为整个洪水样本序列服从同一个单一概率分布[如皮尔逊Ⅲ型（P－Ⅲ）分布、gamma分布、lognormal分布、广义极值分布等]。然而，许多研究表明，由于不同的气象条件（如雷暴、台风、热带

气旋和融雪等）、土地利用类型和流域特征变化（如渠道特征和土壤含水量等）等因素的共同作用，形成洪水事件的源头和机制存在着差异，导致洪水样本序列可能源于多个洪水总体（Alila 等，2002；Fischer 等，2016；Rossi 等，1984；Singh 等，1972；Singh 等，2005；Smith 等，2011；Woo 等，1984；成静清等，2010；冯平等，2013；梁忠民等，2011；唐亦汉等，2016；王军等，2017）。因此，不考虑洪水形成机制差异及其背后物理过程的传统的时不变单一概率分布，在很多情况下并不能很好地拟合洪水样本序列，会降低频率曲线的拟合效果，导致洪水频率分析结果失真，进而影响水利工程的规划设计及流域水资源管理与配置。

基于上述研究背景，在变化环境下，考虑不同洪水形成机制对洪水频率分析的影响，开展非一致性洪水频率分析研究，并推求非一致性设计洪水值，有助于更加深入地认识变化环境下洪水事件的物理过程和时空演化规律，可以为水利工程的规划设计和运行管理等工作提供理论依据，因而具有重要的科学意义及应用价值。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 一致性水文频率分析研究进展

一致性水文频率分析是指基于过去实测的水文资料来估计水文序列所服从的概率分布，并推求其出现频率（或重现期）和水文设计值之间的定量关系，主要包括 3 个环节：取样方法的选择、频率分布线型的选取、及频率分布参数的估计（郭生练等，2016；熊立华等，2018）。

1. 取样方法

目前常用的样本选取方法主要有两种：年最大值（annual maxima，AM）取样法和超定量（peak over threshold，POT）取样法。年最大值取样法是指按照独立性原则，从水文序列中每年各选取一个最大值构成样本序列。年最大值取样法是我国设计洪水计算规范规定使用的取样方法（SL 44—2006），在工程实践中得到了广泛的应用。然而，采用 AM 取样法进行取样，得到的水文序列的长度等于实测资料的长度，一般都不长（30～50 年），此时若能在实测资料之外，充分利用历史洪水或者古洪水调查资料将极大地提高资料的代表性，有助于提高频率分析计算的精度。此外，在大洪水年份，某些年内第二大、第三大洪水的量级甚至可能超过其他年份的最大洪水，而 AM 取样法无疑会舍弃年内的其他大洪水，降低频率分析结果的合理性。POT 取样法也称作部分历时序列

(Partial Duration Series，PDS) 取样法，是指将每年超过某一阈值的样本挑选出来共同构成样本序列的取样方法。相较于 AM 取样法，POT 取样法能够充分利用实测资料，扩大样本容量，既能反映洪水事件的量级又能反映洪水过程，物理意义更加明确（叶长青等，2013a)。在洪水频率分析中，通常认为超定量事件年发生次数为随机变量，并假设其服从泊松分布、二项分布或者负二项分布(张丽娟等，2013)。此外，通常采用广义帕累托分布拟合超定量事件的量级。POT 取样法的关键和难点在于阈值的选择，但目前尚无统一的标准，这可能是限制 POT 取样法应用的主要原因。

2. 概率分布线型

按照一定取样方法得到样本序列之后，我们便可以确定序列中各样本的经验频率并且绘制经验频率曲线。但是当需要推求稀遇水文设计值时，经验频率曲线无法进行有效的外延估计（金光炎，1999)。因此，需要由样本序列来估计水文变量所服从的总体分布。理论上讲，水文变量所服从的概率分布是未知的。在实际应用中，为使设计过程规范化，许多国家都基于本地长期的水文序列经验点据拟合情况，选择能够较好地拟合多数水文序列的分布线型作为规定线型(郭生练，2005；叶守泽等，2007)。比如美国和加拿大推荐采用对数皮尔逊Ⅲ型分布作为洪水分布线型；爱尔兰、法国和英国等欧洲国家则推荐采用广义极值分布（Generalized Extreme Value Distribution，GEV) 作为洪水分布线型；日本则推荐采用两/三参数对数正态分布作为洪水分布线型。国内学者基于我国大量的水文序列分析计算结果，发现皮尔逊Ⅲ型分布在拟合我国大多数河流的水文序列时均能取得令人满意的效果。因此，我国现行规范《水利水电工程水文计算规范》(SL/T 278—2020) 和《水利水电工程设计洪水计算规范》(SL 44—2006) 均规定 P-Ⅲ分布为我国水文序列所服从的分布线型，如遇特殊情况，经过分析论证后也可采用其他线型。国内学者在实践中发现两参数的 lognormal 分布、两参数的 gamma 分布、GEV 分布等分布对我国许多流域的水文序列也能得到令人满意的拟合效果（杜涛，2016；江聪，2017；叶长青等，2013b；于坤霞，2014)。需要强调的是，虽然不同分布线型在有实测资料范围内频率分析成果一般相差不大，然而在外延到百年一遇、千年一遇等稀遇重现期时，频率分析成果往往差别较大，故在实际应用中应慎重选择频率分布线型(郭生练等，2016；金光炎，1999)。

近年来，非参数统计法的发展为水文频率分析提供了新的途径。相较于传统的基于参数统计法的水文频率分析方法，非参数密度估计法不需要预先假设水文序列服从的分布线型，直接由实测水文序列推求水文设计值，可以避开困扰研究人员多年的参数统计方法中分布线型选择的难题，在将来具有较大的应用潜力（王文圣等，1999)。现有的非参数密度估计方法主要有核估计法、

Rosenblatt 法、直方图法等。然而，非参数方法的理论还不够完善，非参数方法在水文频率分析中的应用还处于起步阶段，仍有许多问题有待进一步的研究，比如核函数和带宽的选择标准，如何在密度估计中充分考虑地区信息以及历史洪水，如何解决频率曲线的外延等问题（董洁等，2004）。

3. 概率分布的参数估计

在确定水文序列服从的分布线型后，便需要结合实测序列估计所选定频率分布的统计参数。我国《水利水电工程水文计算规范》和《水利水电工程设计洪水计算规范》中规定采用适线法估计 P-Ⅲ分布的参数。适线法主要包括两大类，即经验适线法与优化适线法。经验适线法通过目估调整参数使频率曲线和经验点据拟合最好，虽操作简单，但非常依赖研究人员的实践经验，包含有较大的主观性（郭生练等，2016）。优化适线法则依据水文序列的误差规律，选取一定的适线准则作为目标函数，求解与经验点据拟合最优的频率曲线的统计参数。离差平方和最小准则、相对离差平方和最小准则以及离差绝对值和最小准则是目前最为常用的适线准则。

除适线法外，目前常用的参数估计方法有极大似然法（Maximum Likelihood Estimation，MLE）、矩法、权函数法、概率权重矩法（Probability Weighted Moments，PWM）和线性矩法（L-Moments）等（郭生练，2005；郭生练等，2016；叶守泽等，2007）。极大似然法依据所选分布的概率密度函数得到相应的似然函数，并以似然函数取最大值为目标函数，估计出概率分布的统计参数。极大似然法求解的难易程度与所选分布函数形式有关，一般很难通过解析法直接得到频率分布的参数估计值，往往需要借助优化算法来进行求解（Coles，2001；郭生练等，2016）。矩法是最简单的参数估计方法，但是其对高阶矩参数，如偏态系数（coefficient of skewness，C_s）的估计会有较大的抽样误差。为了减小 C_s 估计的抽样误差，马秀峰（1984）提出采用权函数法来估计 P-Ⅲ分布中的 C_s 参数。该方法通过给定正态概率密度函数作为权函数，增加均值附近的权重，减少两端部分的权重，提高了 C_s 参数的估计精度。在此基础上，刘光文（1990）提出了双权函数法，通过给定第二权函数来提高对变差系数（coefficient of variation，C_v）的估计精度。梁忠民等（2001）在单权函数法的理论框架下，通过联解两个超越方程同时解决了 P-Ⅲ分布中 C_v 和 C_s 参数的估计问题，结果表明改进后的方法计算简单、性能优良。梁忠民等（2014）对双权函数法进行了改进，将传统双权函数法的二阶加权中心矩估计降低为一阶加权中心矩估计。Greenwood 等（1979）首次提出概率权重矩法，并应用于逆函数分布存在显式表达式的参数估计。在此基础上，针对我国实际情况，宋德敦等（1988）将概率权重矩法推广到 P-Ⅲ分布的参数估计中。通过对概率权重矩进行线性组合，Hosking（1990）首次提出了线性矩法。概率权重矩和线性矩都是

样本次序统计量的组合，相较于常规矩法，仅涉及一阶样本矩的计算，计算结果更加稳健（郭生练，2005）。特别地，线性矩因其容易理解、计算方便的特点，成为当前国内外公认有效的参数估计方法。自 Sonuga（1972）首次将最大熵原理应用到频率分布的参数估计中以来，国内外学者积极地开展了相关的研究（赵明哲等，2017），并证明了该方法具有较高的计算精度和良好的统计特性。近年来，元启发式最优算法在频率分布的参数估计领域得到了越来越多的应用。康玲等（2003）、王占海等（2009）、刘力等（2009）分别将遗传模拟退火算法、遗传算法、粒子群算法与适线法相结合，取得了较好的计算效果。桑燕芳等（2009）通过将模拟退火遗传算法与极大似然法结合，提出了一种改进的极大似然法，该方法求解简单且不受分布线型的约束，其计算效果与基于最大熵原理的参数估计方法效果相当。

1.2.2 非一致性水文频率分析研究进展

水文频率分析的基本前提是水文样本序列满足独立同分布假定（Independent and Identically Distributed，IID），其中同分布假定是指水文样本序列在过去、现在和未来均服从于同一个概率分布，即样本序列应具有一致性。然而，在变化环境下，这一假设愈发难以满足，全球范围内许多水文变量已经表现出非一致性，这给传统的水文频率分析带来了巨大挑战（Milly 等，2008；Milly 等，2015；梁忠民等，2011；熊立华等，2017；熊立华等，2018；Yan 等，2017a）。变化环境下的非一致性水文频率分析已成为当前国内外水文领域的研究热点。梁忠民等（2011）综述了当前非一致性水文频率分析的难点和热点，熊立华等（2018）针对洪水、枯水以及年径流序列，深入探讨了当前非一致性水文概率分布估计理论与方法。非一致性水文频率计算方法研究主要包括以下 5 个方面。

1. 基于还原/还现方法的非一致性水文频率分析

在国内，非一致性水文频率分析最常采用的是基于还原/还现的方法。具体做法主要分为两个步骤：①首先通过一定的手段对非一致性水文样本序列进行修正，将其处理为满足一致性的水文序列；②采用传统的一致性水文频率分析方法对修正后的水文样本序列进行频率分析。其基本假定为：变点前的外部环境状态是近似天然的状态，而变点后的外部环境则为受到气候变化与人类活动影响的状态。“还原”是将变异点之后的序列修正到变异点之前的状态，而“还现”则是将变异点之前的状态修正到变异点之后的状态（梁忠民等，2011）。理论上讲，研究人员可以通过调查流域内的取用水数据对流域内的实测径流资料进行还原或者还现，以期得到近似天然状态下的径流资料。

然而在实际应用中，水文调查的工作量非常庞大（例如灌溉引水量、水库水面蒸发量、下渗损失量等）且精度有限（陆中央，2000）。为此，研究人员提出采用水文模拟法进行还原/还现计算。该方法的基本思路是在对径流资料进行变点分析的基础上，通过水文模型或者降雨-径流相关图等方法，在变异点前后分别建立起降雨-径流关系，从而实现对径流序列的还原/还现。陆中央（2000）以横山岭水库控制流域为例，通过建立年降雨量-年径流量相关图对水库年径流序列进行还现。王忠静等（2003）指出传统的水文还原方法存在“还原失真”与“还原失效”的现象并推荐采用分布式水文模型进行水文序列的还原修正。王国庆等（2008）以三川河流域为例，采用 SIMHYD 水文模型模拟了研究流域 20 世纪 70 年代后的天然径流过程，定量评估了气候变化和人类活动对流域径流的影响。水文模拟法具有一定的物理基础，但是需要指出的是，水文模拟法的一个潜在的假设是水文序列存在突变并且变点前后水文序列满足一致性，而实际上水文序列可能是逐渐变化的。总体来说，还原/还现计算可以实现非一致性水文序列向过去某一时期或者当前时期的修正，但是却无法反映未来某个时期的变化情况。

2. 基于时间序列的分解与合成法的非一致性水文频率分析

基于分解合成法的非一致性水文频率分析方法是由谢平等（2005）提出的。该方法认为非一致性水文序列是由相对一致的随机成分和非一致的确定性成分构成的。具体可分为以下 4 个计算步骤（谢平等，2014）：①首先采用统计分析法或者成因分析法对水文极值序列的确定性成分和随机性成分进行识别和检验，并依据检验结果建立确定性成分与时间协变量的函数关系；②在原极值序列中分离出拟合的确定性成分进而得到随机性成分，即极值序列的还原；③根据第一步中拟合得到的确定性成分的函数关系预测未来某一设计年份的确定性成分，同时由随机性成分生成满足某一概率分布的随机序列；④将第三步中得到的确定性成分与随机序列进行合成，得到未来设计年份的极值序列并对得到的极值序列进行非一致性频率分析。需要指出的是，在建立确定性成分与时间协变量的函数关系时，当前主要考虑确定性成分存在趋势性变异以及跳跃性变异（胡义明等，2017；谢平等，2014）。林洁等（2014）以淮河大坡岭站和鲁台子站为例，采用多种变异诊断方法对研究区年最大洪峰序列进行趋势性及跳跃性诊断，并根据变异诊断结果基于时间序列分解与合成理论对年最大洪峰序列进行非一致性频率分析计算。谢平等（2008、2009）针对分解与合成理论开展了大量的研究并将该理论分别应用于变化环境下基于跳跃分析的水资源评价和基于趋势分析的水资源评价中。胡义明等（2013、2014）开展了对具有趋势性变异以及跳跃性变异的年径流序列进行一致性修正的研究，并比较了设计值的差异。研究发现无论是具有趋势性变异还是跳跃性变异的水文序列，随着设计标准的增

加，基于未修正和修正后的年径流序列得到的设计值之间的差异变得愈加明显。杜涛等（2014）以渭河流域年最大24h降雨序列作为研究实例，提出了一种能够同时考虑极值序列均值和方差变化的分解与合成方法来进行降雨非一致性频率分析。需要指出的是，在进行未来确定性成分的预测时，如果仅仅以时间作为协变量进行未来长期预测，会导致预测结果缺乏物理意义且存在着极大的不确定性。

3. 基于时变矩方法的非一致性水文频率分析

在一致性条件下，水文变量可以用同一个概率分布（分布线型和统计参数均不变）来描述。然而在非一致性条件下，水文变量则不再服从同一个概率分布。此时用来刻画非一致性水文变量的概率分布要么线型不同（时不变混合分布模型），要么统计参数不同。在当前的非一致性洪水频率分析中，时变矩方法（Time Varying Moments，TVM）是应用最为广泛的非一致性水文频率分析方法。其基本思想是假设分布线型是单一且不变的，而统计参数随时间或者物理协变量变化。时变矩法由Strupczewski等（2001）最早提出并应用到Vistula流域以及Polish流域的洪水频率分析中。具体做法是将线性趋势和二次三项式趋势嵌入到洪水极值序列所服从概率分布的一阶矩和二阶矩中来描述洪水极值序列的非一致性，并采用加权最小二乘法（Weighted Least Square，WLS）和极大似然法（MLE）来估计时变概率分布中的统计参数。宋松柏等（2016）基于时变矩法构建了具有时变参数的皮尔逊Ⅲ型分布，并应用其对渭河林家村水文站年径流量序列进行非一致性频率分析。唐亦汉等（2017）基于时变矩法构建了能够考虑位置参数和尺度随时间变化的P-Ⅲ分布，并应用其进行珠江流域洪水及高潮位的非一致性频率分析。吴孝情等（2015）采用POT取样方法，应用时变矩法构建了分布参数随时间变化的广义帕累托分布，并应用其研究了珠江流域非一致性极端降雨的时空变化特征及其背后成因。

Rigby等（2005）提出了位置、尺度和形状的广义可加模型（Generalized Additive Models for Location，Scale and Shape，GAMLSS），该模型可以灵活地模拟多种概率分布的任一统计参数与协变量之间的线性或非线性关系，近年来，该模型在非一致性水文频率分析领域中得到了越来越广泛的应用。熊立华等（2018）系统地总结了GAMLSS模型在水文序列的趋势和变点分析、非一致性洪水以及枯水概率分布估计中的应用。Villarini等（2009）以美国Little Sugar Creek流域的年最大洪水序列为例，基于Gumbel、gamma、lognormal等两参数分布构建时变单一分布模型对其进行非一致性频率分析。江聪等（2012）以长江流域宜昌站年最小月流量序列为例，应用GAMLSS模型研究其一阶矩、二阶矩以及三阶矩的非一致性。Qu等（2020）提出采用基于三次B样条的GAMLSS模型进行非一致性洪水频率分析，并比较了该模型和线性分位数回归