

第 1 章 水文学的体系

1.1 水文科学的分支

1.1.1 水文学的概念

1. 水文学的定义

水是人类赖以生存、社会进步和经济发展最为重要的资源之一。水文学是人类长期与水旱灾害作斗争的生产活动中，通过观察和探索各种水文现象和变化规律，逐渐形成和发展起来的学科。水文学一词，英语表示为“Hydrology”、法语表示为“Hydrologie”、德语表示为“Hydrologie”、西班牙语表示为“Hidrologia”、俄语表示为“ГИДРОЛОГИЯ”，这些词是从希腊拉丁文中“Hydro”作词头演变而来，其意为“水的知识”（黄伟纶）。16~17 世纪出现了英语“Hydrology”和法语“Hydrologie”词。18 世纪末、19 世纪初，“Hydrology”和以“Hydro”作为词头的词，如“Hydrography”（水文地理学）、“Hydrometry”（水文测验学）、“Hydrostatic”（静水力学）等词被广泛使用。1762 年，Wallerius 首次将“Hydrology”一词用于“精确研究土壤含水量”。1796 年，Hutton 对“Hydrology”进行了解释，即“用于实验和阐述普通水的自然现象与特性，为自然科学史的一部分”。1895 年，Westm Gaz 认为“Hydrology”的全部科学是基于对降雨的研究。20 世纪以后，“Hydrology”被解释为“用于研究地表水的特性、规律及其分布等的科学”；还面临着侵蚀、干旱、污染等课题”。1922 年，“国际科学水文协会—IASH”正式成立。1971 年，“国际科学水文协会—IASH”改名为“国际水文科学协会—IAHS”。“Hydrology”正式被确定为“研究自然水体”的科学名词。水体是指自然界中以一定形态存在的水的总称。如江河、湖泊、冰川、沼泽、海洋、地下水和大气中的水汽。

美国国家科学研究委员会通过回顾水文学的发展，提出水文学是研究地球上各种水体的发生、循环、分布，水的化学和物理性质以及水对环境的作用、水与生命体的关系等科学，研究范畴包含了水在地球上的整个生命过程。中国水利百科全书将水文学定义为：研究地球水圈的存在与运动的科学，主要研究地球上水的形成、循环、时空分布，化学和物理性质以及水与环境的相互关系，为人类战胜洪水与干旱、充分合理开发和利用水资源，不断改善生存和发展的环境条件提供科学依据。我国工程水文学教科书中则定义为：水文学研究各种水体的存在、循环和分布，物理与化学特性，以及水体对环境的影响和作用，包括对生物特别是对人类的影响。

2. 水文学的研究对象

水文学是地球物理科学中一门独立的学科。地球是由岩石圈、水圈、大气圈和生物圈组成的。在各个自然圈层，各种水体均通过蒸发、水汽输送、降水、地面和地下径流等水文要素相互联系、相互转化和更新，形成一个巨大的水循环动态系统。由于太阳能和大气

运动的驱动，水圈中的各种水体通过水面、陆面和植物茎叶面的蒸发或散发，形成水汽，进入大气圈，依靠气流运动进行水汽输送。在一定条件下，大气圈中的水汽凝结形成降水；降落到地球表面的雨水，一部分渗入地下，一部分形成地面径流，沿江河流动回归大海，一部分被蒸发和散发重新逸散到大气圈；渗入地下的水，或者成为土壤水，再经蒸发和散发逸散又回到大气圈；或者以地下水形式排入江河、湖泊，再汇入到海洋。

因此，水文学是研究水循环各个环节以及与其有关的科学问题，其核心内容是水循环研究。由于大规模的人类活动干扰了自然界的水循环过程，因而，水资源的开发利用和人类活动对水环境的反馈效应研究，也已经成为现代水文学研究的重要内容。水文学研究的对象包括降水、蒸发、入渗、地下水、河川径流以及溶解物、悬浮物在水流中输送等问题。研究范围包括大气水、海洋水、陆地表面水和地下水；水圈同大气圈、岩石圈和生物圈等地球自然圈层的相互关系；水量和水质问题；水情的瞬息动态变化规律；全球水的生命史以及未来的变化趋势等。

1.1.2 水文学的主要分支学科

水文学涉及气象学、地质学、地理学、植物生态学、数学、物理学、化学等学科。水文学最早主要研究河流、湖泊、沼泽、冰川和积雪，以后扩展到地下水、大气水和海洋水。目前，根据分类依据的不同，水文学有以下几种分类方法（芮孝芳）。

1.按照地球圈层分类

广义上，按照地球圈层（水体所处的空间位置），水文学可分为水文气象学、地表水文学和地下水文学。按照地球表面分布情况，又可分为海洋水文学和陆地水文学。

（1）水文气象学 研究水圈和大气圈的相互关系，包括大气中水文循环和水量平衡，以蒸发、凝结、降水为主要方式与下垫面的水分交换，暴雨和干旱发生和发展的规律等。

（2）海洋水文学 主要研究海水的物理性质和化学成分，海水运动和各种现象的发生、发展规律等。

（3）地下水文学 主要研究地下水的形成、分布和运动规律及其物理化学性质，地下水资源的评价和开发利用以及对环境的效应等。

（4）陆地水文学 研究大陆表面上的各种水体及其水文现象的形成过程与运动变化规律。按照研究水体的不同，又可分为河川水文学、湖泊水文学，沼泽水文学、冰川水文学和河口海岸水文学。

1) 河川水文学 也称河流水文学，研究河流水文现象及河流资源利用。河流水文现象主要包括河流的补给、径流形成和变化规律、河流的水温和冰情、河流泥沙运动和河床演变、河水的化学成分、河流与环境的关系等。

2) 湖泊水文学 主要研究湖泊（包括水库）中的水量变化和运动，湖水的物理特性和化学成分、湖泊沉积、湖泊富营养化和生态系统等湖泊水文现象以及湖泊资源的利用等问题。

3) 沼泽水文学 研究沼泽水的物理化学性质、沼泽径流、沼泽对河流和湖泊的补给和沼泽改良等。

4) 冰川水文学 主要研究冰川的分布、形成和运动，冰川融水径流的形成过程及其时空分布，冰川突发性洪水的形成机制和预测，冰川水资源的利用以及全球气候变化对冰

川的影响等。

5) 河口海岸水文学 研究入海河口和海岸带水文现象的基本规律、河口和海岸带的利用及其灾害防治。河口和海岸带的水文现象主要包括河口洪水波传播与扩散、潮波传播与变形、河口过滤器效应、泥沙运动等。

2.按照研究对象分类

按研究对象划分分支学科,主要有河流水文学、湖泊水文学、沼泽水文学、冰川水文学、雪水文学、水文气象学、地下水水文学、区域水文学和海洋水文学等。

(1) 雪水文学 主要研究积雪的数量和分布、融雪过程、融雪水对河流和湖泊的补给、融雪洪水的形成和预报。有时把雪水文学和冰川水文学合称为雪冰水文学。

(2) 区域水文学 主要研究某些特定地区的水文现象,如河口水文、坡地水文、平原水文、岩溶地区水文、干旱地区水文现象等。

3.按照基础理论与应用分类

按照基础理论与应用分类,水文学可以分为水文学原理和应用水文学。

(1) 水文学原理 也称理论水文学。研究自然界水文循环、溶质运移机理,水圈与地球其他圈层的相互关系。主要研究内容包括:不同尺度下水文循环机理,土壤水分运动机理,蒸散发机理和流域蒸散发计算,地表水、地下水运动规律,流域产流、产沙、汇流机理,水质与生态系统环境问题以及水文循环中的溶质运移机理。

(2) 应用水文学 运用水文学和有关学科的理论和方法,研究各种实际水文问题的解决途径和方法,为水利、农业、林业、国土整治规划、电力、交通、城市发展和环境保护等工程建设提供水文设计数据和水文预报服务。20世纪50年代后,应用水文学不断发展学科自身的理论和方法,紧密联系工程实际,开拓了水资源利用、人类活动的水文效应等新的研究领域,形成了工程水文学、农业水文学、森林水文学、都市水文学和医疗水文学等分支学科。

4.按照研究方法分类

按照研究方法分类,水文学可以分为土壤动力水文学、系统水文学、确定性水文学、水文统计学、随机水文学、灰色系统水文学、模糊水文学、地理水文学、实验水文学、同位素水文学、遥感水文学和数字水文学等。

(1) 土壤动力水文学 土壤动力水文学是水文科学与土壤学相结合的一门学科,是理论水文学的一个重要分支,它是物理学理论为依据,以土壤水能态为基础,研究土壤水发生、现象、性质、循环和分布,土壤水下渗、蒸散、植物吸收、运动和平衡等各种水文过程的机制与动力学特性,土壤水与人类活动和生态环境之间的相互关系。

(2) 系统水文学 也称水文系统理论和方法(Hydrological System Theory & Approach),是借助于系统理论及方法来研究流域、河段或区域水文过程的学科。将流域、河段或区域作为一个水文系统,用系统方法研究其输入、输出和系统运行间的关系,并建立相应的数学模型。

(3) 确定性水文学 研究确定性水文过程的学科。

(4) 水文统计学 也称统计水文学。研究纯随机水文过程的学科。

(5) 随机水文学 是随机过程理论和时间序列分析技术引入水文学中逐渐形成的一门学科。

(6) 灰色系统水文学 是我国最早由武汉大学(原武汉水利电力大学)夏军教授提出,基于灰色系统理论来研究水文过程模拟、预测和水文风险等问题的学科。其特征是针对水文信息资料不完全的特性,从水文原理和水文系统分析角度,研究水文现象的不确定性,具有独创性的水文灰色系统模拟、灰色预测、灰色统计和灰色规划等新方法。主要包括灰色系统水文学基础和灰色水文学的方法论及应用两个相互联系的部分。

(7) 模糊水文学 是我国大连理工大学陈守煜教授提出的研究模糊随机系统理论分析体系与方法的新型水文学科,并在汛期的划分、设计年径流及其年内分配的确定、月径流随机模拟、多年径流过程的周期分析、水文计算的模糊优化适线等方面取得了大量的研究成果。

(8) 地理水文学 水文学可以归纳为地理学、地球物理学与工程学三个研究方向。水文学早期研究主要为地理研究和工程研究。近代则出现了地球物理方向,主要偏重于数理范畴。现代水文学的研究中,三种方向并存发展。

水文学的地理研究方向,称为“水文地理学”(Hydrography)。由于该词的涵义容易被人们误解为注重区域水文现象的描述,而忽视其学科的理论基础研究,难以有效地利用地理学原理指导水文学的研究工作。后来,经中国地理学会水文专业委员会多次讨论,建议改用“地理水文学”(Geographical Hydrology)一词。地理水文学同时隶属于地理学和水文学的分支科学。

1981年,苏联学者 A.安基波夫首次提出了“地理水文学”,他在“水文研究的地理学观点”一文中以景观学地理系统学说为核心详细地阐述了水文研究的地理学途径。我国著名的地理水文学家郭敬辉等认为,水文地理学主要以自然地理学原理与现代自然地理学的新思想(包括水热平衡、景观地球化学、生物地理群落研究的新成就,以及地理系统分析的新概念)为基础,同时吸取地质学相邻学科(包括地质学、气象学、地貌学、土壤学、地植物学及人文地理学等)的基本知识和技术方法,对各种水文现象和水文过程开展研究。

地理水文研究具有宏观性、综合性及区域性三大特点。相对于工程水文研究来说,地理水文研究更侧重于研究水体运动变化规律和总体演化趋势以及与其他自然地理因素之间相互影响的综合研究。地理水文学的研究内容包括:水、环境与人类社会发展的相互关系;水循环系统与水量平衡、区域水文、特殊水体的水文(岩溶、冰川、河口、干旱区等)、环境水文、水资源水文、比较水文,以及新技术的应用。

(9) 实验水文学 实验水文学是研究和利用实验途径对水文现象和水文过程进行探索、寻求解答的水文学分支学科(顾慰祖,陆家驹,唐海行等, 2003)。其方法和目标是通过水文现象观测和控制试验、实验,包括模拟或重演水文现象从定性、定量到定解,分析水文现象和水文过程的状态、成因,阐明其变化规律和内在联系,并将结果外延到应用水文学之中。实验水文学领域处在自然界圈层的界面上,涉及水圈、大气圈、岩石(土壤)圈、生物圈之间的各种关系,因而需要借助于各种近代科学技术手段。

(10) 同位素水文学 同位素水文学是 20 世纪 50 年代发展起来的一门学科,它主要利用同位素技术解决水文学中一些关键问题。在水文实验、地下水运动研究中,应用核技术,逐渐形成同位素水文学。

通过研究天然水中 C、H、O 等同位素,探讨天然水循环过程中遇到的各种水文学问题的学科。同时,同位素测定精度高,通过测定同位素组成,可研究和追踪水的运动和循

环。同位素水文学研究有助于水文过程研究的定量化和微观化，如水质点运移，追踪降水时土壤中水分运动，研究降水入渗机理及降水入渗率。同位素方法必须与常规的水文学、水化学方法配合使用，才能获得最佳效果。

(11) 遥感水文学 在水文调查和水文预报中，研究遥感技术的应用，逐渐形成遥感水文学。

(12) 数字水文学 数字化是信息革命时代最具代表性的特征。数字化技术正在对人类的生产和生活产生极其深刻的影响，它对水文学来说，不仅使水文信息的采集、传输、储存、处理和显示方法发生了根本性的改变，而且也使揭示和探索水文规律的手段发生了巨大变化，从而导致了数字水文学的创立。数字水文学定义为：基于数字化技术描述水文现象时空变化，探索、揭示水文规律的水文学分支学科。

5.按照水文学主要采用的实验研究方法分类

按照水文学主要采用的实验研究方法分类，水文学可以分为水文测验学、水文调查、水文实验三个分支学科。

(1) 水文测验学 研究如何正确、经济、迅速地测定各种水文要素的数量及其在时间和空间上的变化，主要包括站网布设、测验方法和资料整编方法的研究，测量仪器的研制和资料存储、检索、传送系统的研究。

(2) 水文调查 是水文科学的野外勘测和考察部分，旨在对水体形态和数量、集水面积内的自然地理条件等作出科学的分析和评价。在中国，历史大暴雨、历史大洪水和枯水的调查是水文调查的重要内容。

(3) 水文实验 旨在通过野外和室内实验，揭示水文循环过程各环节中水的运动、变化规律，如水向土中下渗的规律，土壤水的运动规律、径流形成规律、土壤和水面蒸发的规律，以及人类活动的水文效应等。

6.按照应用范围分类

按照应用范围分类，水文学可以分为工程水文学、农业水文学、森林水文学、城市水文学、环境水文学、生态水文学等分支学科，其中以工程水文学发展最为迅速。

(1) 工程水文学 研究水文学原理应用于工程实践，为水利工程或其他有关工程等的规划、设计、施工和运行提供水文依据。研究内容包括水文计算、水利计算、水文预报等。

(2) 农业水文学 研究土壤—植物—大气连续体系统中水文现象的基本规律，为农业合理用水、节水和灌溉提供科学依据，涉及的水文现象包括降水—地表水—土壤水—地下水的相互转化、溶质运移等。

(3) 森林水文学 研究森林水文效应、保水作用以及水上流失的防治。森林水文效应主要包括森林对降水、蒸发和径流形成的影响。

(4) 城市水文学 研究城市化水文效应，为城市给排水和防洪工程建设以及生态环境质量改善提供水文依据。城市化水文效应主要包括“雨岛效应”和“热岛效应”、城市化对径流形成的影响等问题。

(5) 生态水文学 研究区域生态系统和区域水文科学的交叉领域，其核心内容是揭示不同环境条件下植物与水的相互作用机理，探索各种植被的生态水文作用。研究一定时空尺度上生态过程与水文过程耦合演进规律及其成因，探求协调的生态水文模式，应用可

持续水资源管理的实践科学。

(6) 环境水文学 研究水环境本底特征、水体自净机理及其与水文要素关系，水环境影响评价和保护，以及受损生态水文系统的重建与修复技术等。

1.2 水文学简史

水文学经历了一个由萌芽到成熟、由定性到定量、由经验到理论的发展过程。同自然科学的许多学科相似，人们还难以找出公认的里程碑，把水文科学的历史进程划分成若干明确的阶段。根据水文学发展的足迹，大体划分为以下 4 个阶段。

1.2.1 萌芽时期（远古至约公元 1400 年）

这一时期的基本特点是：人们已经认识到水文观测对治水工程的重要性，开始进行原始的水文观测和原始的水文知识积累，为人们生活和生产提供重要的水文资料。

尼罗河、幼发拉底河、恒河和黄河在这一时期都曾进行过原始的水文观测。中国和埃及是世界上进行水位观测最早的国家。约公元前 22 世纪，中国传说中的大禹治水，以“随山刊木”（立木于河中），观测河水涨落。此后，战国时李冰设于都江堰的“石人”，隋代的石刻水则，宋代的水则碑等，都表明了水位观测的不断进步。公元前 400 年，印度开始了最早的雨量观测。公元前 221~公元前 207 年，中国秦代已开始有呈报雨量的制度。公元 1 247 年，出现了较科学的雨量器和雨深计算方法，并开始用“竹笼验雪”来计算平地降雪深度。明代刘天和在治理黄河过程中，已采用手制“乘沙量水器”测定河水中泥沙的数量。公元前 239 年的《吕氏春秋》中写道：“云气西行云云然，冬夏不辍；水泉东流，日夜不休，上不竭，下不满，小为大，重为轻，国道也。”提出了朴素的水文循环概念。公元约 6 世纪初的《水经注》记述了当时中国境内 1 252 条河流的概况，成为水文地理考察的先驱。

1.2.2 奠基时期（约 1400~1900 年）

这一时期的基本特点是：水文仪器出现，并有了显著的发展，为水文科学发展成为独立的学科奠定了基础，使水文观测进入定量观测阶段。观测项目主要包括流量、流速、蒸发、降水等。水文现象由定性发展到定量描述，标志着水文学基本理论初步形成。这些科学理论的创立，为水文科学在河道水流、蒸发、地下水运动、径流形成和水文循环等领域的发展奠定了理论基础，表明人类对水文现象的认识已由萌芽时期那种肤浅零星的知识，发展到了比较深刻系统的知识。同时也表明，人类对地球上水的运动、变化规律的探索，已发展到以大量观测事实为基础，进行假说、演绎和推理，进而建立各种理论体系。

1663 年雷恩和胡克创制了翻斗式自记雨量计，1687 年哈雷创制了测量水面蒸发量的蒸发器，1870 年埃利斯发明旋桨式流速仪，1885 年普赖斯发明旋杯式流速仪。这些近代水文仪器使流量、流速、蒸发、降水的观测达到了相当的精度，各种水文站也开始陆续出现。1746 年，中国在黄河老坝口设立了全国第一个正规水位站，开始观测水位和报讯。1674 年佩罗提出了水量平衡的概念，成为水文科学最基本的原理之一。1738 年伯努利提出水流能量方程，1775 年谢才提出明渠均匀流公式，1802 年道尔顿建立了研究水面蒸发的道尔

顿公式，1856年达西提出了描述孔隙介质中地下水运动的达西定律，1851年摩尔凡尼提出了汇流、径流系数概念和计算最大流量的著名推理公式。19世纪末，专门水文研究机构开始出现，一些国家开始出版水文年鉴。弗里西著的《河流水文测验方法》、福雷尔著的《日内瓦湖湖泊志》、马略特著的《水的运动》等水文学专著陆续出版。这些著作总结了当时水文观测和理论研究的成就，为水文科学作为一门近代科学奠定了基础。

1.2.3 应用水文学兴起时期（约 1900~1950 年）

进入 20 世纪以来，特别是第一次世界大战以后，防洪、灌溉、交通工程和农业、林业及城市建设等向水文科学提出了许多新的研究课题，促使了水文科学体系的理论化和系统化发展，水文科学的应用特色逐渐表现出来。其特点是水文观测理论体系进一步成熟，应用水文学进一步发展，水文学理论体系逐步形成。最重要的进展表现在应用水文学的兴起。

1914~1924 年，黑曾、福斯特等人把概率论、数理统计的理论和方法系统地引入了水文科学，使水文变量（如洪峰和洪量）和它出现的几率联系起来，为预估工程未来水文情势提供了途径。1932~1938 年，谢尔曼、霍顿、麦卡锡、斯奈德等人在产流和汇流计算方面取得开拓性进展，为根据降雨推算洪水开辟了道路。随后，克拉克、林斯雷等人丰富和发展了单位线、多个水文变量联合分析和径流调节的理论。在此期间，形成了世界范围内的国家水文站网系统，这些成就为应用水文学的兴起，在理论上、方法上和资料条件方面奠定了基础，并率先形成了工程水文学。接着，农业水文学、森林水文学、都市水文学也相继兴起。1949 年，林斯雷和柯勒、保罗赫斯合著《应用水文学》，同年，姜斯敦和克勒斯合著的《应用水文学原理》、美国土木工程师学会编著的《水文学手册》等应用水文学专著陆续问世，总结了这一时期的成就，标志着应用水文学的诞生。应用水文学成为近代水文科学体系中最富有生气的分支学科。

1.2.4 现代水文学（20 世纪 50 年代以来）

20 世纪 50 年代以来，人类改造自然的能力迅速增强，随着社会经济和科学技术的迅速发展，人与水的关系发展到了兴利除害的新阶段。这个新阶段赋予水文科学新的特色：引进计算机技术和遥感遥测技术，一些新理论、新方法和边缘学科不断交叉、渗透，产生了许多新的分支学科，研究方法趋于综合，重点开展水资源及人类活动水文效应的研究。

1.3 水文现象的基本特点与研究方法

1.3.1 水文现象的基本特点

1. 周期性

由于地球的自转和公转，昼夜、四季，海陆分布以及一定的大气环境，季风区域等，使水文现象在时程变化上具有一定的周期性。例如，河流存在汛期和枯季，而且每年交替出现和变化。潮汐随着月球周期的变化而表现出明显的日变化过程，气温和受控制于气温的水文情势（如冰雪水源河流）也具有日周期变化。

2. 随机性

随机性是指水文现象在时程变化上的不重复性，即水文现象本身确定（如流量 $500 \text{ m}^3/\text{s}$ ），而表现在现象出现与否上的不确定性。如河流不同年份的流量过程不会完全一致。同一地区的河流，由于大气环境的差异，汛期和枯季出现的时间和水量在各年份都不可能完全重复。

3. 模糊性

模糊性是指水文现象概念本身没有明确的外延，由于概念外延的模糊而造成划分上的非确定性，即水文现象概念本身的不确定性。事实上，汛期与非汛期是不能以其某一个时刻来划分的，如年径流的“丰”、“枯”，水体质量的“清洁”与“污染”，洪水、大洪水与特大洪水，流域自然地理条件的“相似”与“相异”，湿润地区、半干旱地区与干旱地区，水汽供应充分与不充分等，都找不到明确的界线。

4 灰色性

灰色系统理论是我国邓聚龙教授提出，20世纪80年代后期新兴发展起来的一门学科。灰色系统是指部分信息已知、部分信息未知或非确定的系统，即信息不完全的系统。根据这一理论，水文现象由于信息量不充分而出现的不确定性，称为灰色性，如有限年代的降水量、径流量、洪水、灌水量记录等，未知信息部分，如未来年代的降水量、径流量、灌水量，丰枯、洪水、干旱的出现时间以及水环境的前景变化等。

5. 复杂性

水文系统是一个复杂的非线性系统。研究表明，具有对初始条件的敏感性和内在随机性，即产生混沌的基本条件。在同一水文系统（流域），不同的初始条件会产生完全不同的水文过程。因此，预测（报）与实际之间总是存在一定差距或误差，造成这种现象的原因是：除预测（报）技术与方法本身存在不足外，还可能与受水文系统内在随机性和对初始条件的敏感性的影响有关。另外，水文系统又是一个远离平衡态的开放系统，遵循混沌有序 新的混沌 新的有序……的自然演化基本规律。根据耗散结构理论、协同学等非平衡系统的理论，远离平衡态的开放水文系统的平衡和有序是有条件的、相对的，而非平衡和无序则是无条件的、绝对的。水文系统正是在平衡和非平衡、稳定和不稳定、有序和无序等的对立统一中进行演化。

6. 相似性

由于流域所处的地理位置、气候和地理条件的相似，使水文现象在一定程度上具有一定的相似性，也称具有地带性。如湿润地区河流，其水量充沛，年内分配较为均匀；干旱地区大多数河流水量不足，年内分配不均匀。

7. 特殊性

不同流域虽然地理位置、气候和地理条件相似，但是，由于下垫面条件差异，使得这些流域产生不同的水文规律。如，在同一地区，山区河流与平原河流，其洪水运动规律有较大的差异；岩溶地区与非岩溶地区、地下水源丰富河流与地下水源贫乏河流，其水文动态规律有很大差异。

1.3.2 水文现象的研究方法

水文学研究是通过水文定位观测、实验研究和水文调查等手段，获取大量的实测资料，

根据水文现象的基本特性进行综合分析，最后，获得水文现象的变化规律。其特点是：通过已经获得的短暂实测水文资料（通常最多仅有 100 余年的实测系列）把各种水文现象作为一个整体，并把它们同大气圈、岩石圈、生物圈及人类活动对它的影响结合起来，进行水文过程和水文规律的研究，并进一步预测或预估水文情势的未来状况，从而直接为人类生活和生产服务。

水文研究方向可分为物理方向和地理方向。物理方向研究水文现象的物理机制规律，而地理方向研究水文现象的地理分布规律。具体的方法如下。

1.传统的水文学研究方法

主要有成因分析法、数理统计法和地理综合法三种。三种方法分别针对水文现象基本特点的一个侧面，因此，实际研究中，三种方法同时使用，相辅相成，互为补充。

(1) 成因分析法 以物理学原理为基础，根据水文站网，获取实验资料，研究水文现象的形成、演变过程，通过建立水文现象要素与其影响因素间的定性和定量关系，揭示水文现象成因及其各因素之间的内在联系。确定性水文模型研究属于此类方法。

(2) 数理统计法 以概率理论为基础，根据实测资料，运用数理统计方法，获得水文现象特征值的统计规律，或对主要水文现象与其影响因素之间进行相关分析，求出其经验关系。随机水文模型研究属于此类方法。

(3) 地理综合法 根据气候要素和地理景观要素的地区分布特点，求出各测站水文要素的分类地区特征值，建立地区经验公式，绘制各种特征值等值线图，分析水文现象的地区特征，揭示水文现象的地区分布规律。

2.新技术、新理论与方法的应用

吸收其他学科的最新研究成果，利用新技术、新理论与方法研究水文现象。如遥感技术、核技术、随机分析方法、模糊分析、灰色分析、非线性科学理论等，促进了水文学的发展。

1.4 现代水文学的特点

现代水文学处在一个正在发展的阶段，目前，它还没有形成一个公认的体系。根据近年水文学的发展和部分学者的总结成果，与传统水文学相比，现代水文学具有以下特点（左其亭，叶守泽，夏军）。

1.4.1 水文信息获取与处理技术

研究高新技术来获取区域、大尺度范围的水文信息。包括：计算机技术、“3S”技术、水文示踪技术和研究常规水文仪器观测的自动化等。

1.4.2 水文尺度问题

研究不同尺度的水文规律和它们之间的转换问题。

1.4.3 水资源管理的水文基础研究

大气—土壤—植被之间的水循环关系，全球气候变化对陆地水文过程的影响，水文水环境的相互作用与转化关系，水资源开发的效应问题，生态需水规律，水形态转化过程中

污染形成与水质转化机理，水文极值（洪水和干旱）以及预测、减灾，冰盖河流水文学。

1.4.4 水文复杂性和不确定性研究

研究水文现象的不确定性（随机性、模糊性、灰色性）。采用系统论、非线性理论探索 and 解释水文现象复杂性的机制和原因。

1.4.5 可持续水资源的规划与管理

可持续水资源管理有 3 个基本目标，它们是环境的完整性(Environmental integrity)、经济效率(Economic efficiency)和平衡(Equity)。这里所说的可持续的水资源系统管理，除了考虑水量的变化分配管理外还要求考虑水质水环境问题，亦即水量，水质并重，具有环境的完整性；要求水资源的利用从长远的观点看具有最佳经济效率；为了处理好追求经济效益与环境保护之间的矛盾，要求水资源可持续发展，平衡便成为一个重要的目标。

1.5 随机水文学

随机水文学是从随机性角度研究水文现象随机变化规律的科学。以下引用丁晶、刘权授主编的《随机水文学》，概括介绍其基本方法。

1.5.1 随机水文学的概念与基本方法

由于水文现象受众多因素的影响，水文过程呈现出随机性，称为随机水文过程。即出现结果不止一个，事先无法确定出现何种结果。随机水文序列则是与随机水文过程对应的离散过程。

1.随机水文学的主要任务

(1) 在全面随机分析的基础上，对随机水文序列建立反映水文现象主要变化特性的随机模型。主要有自回归模型、滑动平均模型和自回归滑动平均模型。

(2) 根据建立的模型，可模拟大量水文序列和统计预测，以满足水利工程规划、设计、运行及各种研究的需要。

2.随机水文学的基本方法

(1) 应用实测水文序列建立具体反映时间（年、月、洪水）过程与空间（一个或多个工程地点）过程的水文随机模型。

(2) 应用所建立的随机模型模拟一个或多个工程地点未来可能出现的各种水文序列（模拟序列）。

(3) 应用大量的模拟序列，可适应工程需要进行径流调节或洪水调节，得到水利指标的频率分布曲线或特征值，供设计之用。

3.随机水文学的特点

随机水文学方法与现行水文计算法相比，具有以下特点。

(1) 以时间模型、空间模型和时空模型表征水文现象的统计变化体系。

(2) 随机水文学提供建立随机模型，能够模拟大量的洪水序列，根据工程体系，进行径流调节或洪水调节，得到相应的大量水利指标序列、水利指标的频率分布曲线或特征值供设计之用。

(3) 大量的模拟序列表征着未来水文现象可能出现的各种情况。

4. 随机水文学的应用

随机水文模型和随机模拟的应用主要包括水文水利计算、水文预报和水文测验等。

1.5.2 随机过程的基本知识

随机过程理论与方法是随机水文学的基本理论和方法。

1. 随机过程概念

在相同的试验条件下，独立地重复多次随机试验，每一次试验结果是某种函数，其函数形式各次不同，且事先无法确定，称这族时间的函数为随机函数。在上述试验中，族中的每一个函数称为随机函数的样本函数或一个现实。随机函数就是所有现实或样本函数的集合。当随机函数时间连续地取有限区间内的值时，称为随机过程。当随机函数随时间取离散值时，称为随机序列。

2. 随机过程的分布函数

随机过程在任意一时刻的状态是随机变量，因此，可以利用随机变量的统计描述方法来描述随机过程的统计特性。

设 $X(t)$ 为随机过程，其 n 维分布函数和 n 维概率密度为

$$F_n(x_1, x_2, \dots, x_n; t_1, t_2, \dots, t_n) = P[X(t_1) \leq x_1, X(t_2) \leq x_2, \dots, X(t_n) \leq x_n] \quad (1-1)$$

$$f_n(x_1, x_2, \dots, x_n; t_1, t_2, \dots, t_n) = \frac{\partial F_n(x_1, x_2, \dots, x_n; t_1, t_2, \dots, t_n)}{\partial x_1 \partial x_2 \dots \partial x_n} \quad (1-2)$$

3. 随机过程的数字特征

随机过程的主要数字特征有数学期望函数、方差函数和相关函数等。

(1) 数学期望函数 $m_x(t)$ (均值函数) 表示随机过程的所有样本函数在时刻 t 的平均值。

$$m_x(t) = E[X(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x, t) dt \quad (1-3)$$

(2) 方差函数 $DX(t)$ 描述了随机过程对于数学期望 $m_x(t)$ 的偏离程度。

$$DX(t) = E[X(t) - m_x(t)]^2 = \int_{-\infty}^{\infty} [x(t) - m_x(t)]^2 f(x) dx \quad (1-4)$$

方差函数的平方根 $\sqrt{DX(t)}$ 称为随机过程的标准差函数，即 $\sigma_x(t) = \sqrt{DX(t)}$ 。

(3) 自协方差函数 $COV(t_1, t_2)$ (协方差函数) 刻画了随机过程在时刻 t_1 与 t_2 的统计关系。

$$\begin{aligned} COV(t_1, t_2) &= E\{[X(t_1) - m_x(t_1)][X(t_2) - m_x(t_2)]\} \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [x_1 - m(t_1)][x_2 - m(t_2)] f_2(x_1, x_2; t_1, t_2) dx_1 dx_2 \end{aligned} \quad (1-5)$$

(4) 自相关函数 $\rho(t_1, t_2)$ 也称标准化协方差函数，简称相关函数。自相关函数刻画

了随机过程在时刻 t_1 与 t_2 的统计关系。

$$\rho(t_1, t_2) = \frac{COV(t_1, t_2)}{\sigma(t_1)\sigma(t_2)} \quad (1-6)$$

4. 平稳随机过程

一个随机过程 $X(t)$ ，对于任意 n 和 k ，其 n 维分布函数满足： $F_n(x_1, x_2, \dots, x_n; t_1, t_2, \dots, t_n) = F_n(x_1, x_2, \dots, x_n; t_k, t_{k+1}, \dots, t_{k+n})$ ，则称 $X(t)$ 为平稳随机过程，否则称为非平稳随机过程。

(1) 平稳随机过程的数字特征

1) 数学期望

$$E[X(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x_1 f(x_1, t_1) dx_1 = \int_{-\infty}^{\infty} x_2 f(x_2, t_2) dx_2 = m_x (\text{常数}) \quad (1-7)$$

表明平稳随机过程的所有样本函数都在水平直线 $m_x(t) = m_x$ 周围波动。

2) 方差

$$D[X(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} (x_1 - m_x) f(x_1) dx_1 = \sigma_x^2 (\text{常数}) \quad (1-8)$$

表明平稳随机过程的所有样本函数在水平直线 $m_x(t) = m_x$ 周围波动的偏离程度。

3) 协方差函数和自相关函数

协方差函数

$$COV[t_1, t_2] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x_1 - m_x)(x_2 - m_x) f_2(x_1, x_2, \tau) dx_1 dx_2 = COV(\tau) \quad (1-9)$$

自相关函数

$$\rho(t_1, t_2) = \rho(\tau) \quad (1-10)$$

表明平稳随机过程的协方差函数和自相关函数只与时间间隔 $\tau = t_2 - t_1$ 有关。

(2) 平稳随机过程的分类

若随机过程 $X(t)$ 满足 $F_n(x_1, x_2, \dots, x_n; t_1, t_2, \dots, t_n) = F_n(x_1, x_2, \dots, x_n; t_k, t_{k+1}, \dots, t_{k+n})$ 则称 $X(t)$ 为严平稳过程或狭义平稳过程、强平稳过程、高阶平稳过程。若均值和协方差平稳，则 $X(t)$ 称为广义平稳过程或弱平稳过程、二阶平稳过程。

平稳随机过程的统计特性与所选取的时间起点无关，即统计特性不随时间的推移而变化。这种现象的解释是：若产生随机过程的主要物理条件在时间进程中没有变化，则该随机过程的统计特性也不会随时间而变化。

5. 平稳随机过程各态历经性

平稳随机过程的一个相当长的样本资料可以用来分析计算随机过程的统计特性，这样的随机过程称为具备各态历经性（遍历性）或各态历过程。可以理解为随机过程的各样本函数都同样经历了随机过程的各种可能状态，因此，任何一个样本函数都可以估计随机过程的统计特性。

实际过程中，论证平稳过程的各态历经性是先假设具体的平稳过程具有各态历经性，

然后检验这个假设是否成立。

1.5.3 水文序列分析和随机模拟技术

1. 水文序列及其组成

一般认为水文序列： $X(t)=$ 趋势项 $A(t)$ + 周期项 $P(t)$ + 突变项 $B(t)$ + 随机项 $R(t)$ 。

(1) 趋势项 表示水文现象因水文或气象因素而引起的季节性趋势或多年变化趋势。如年内的降水量、流量的季节性变化趋势。年平均气温的逐年递增或递减趋势。常用的趋势成分检验方法有 Kendall 的秩次相关检验、线性趋势的回归检验。

(2) 周期项 水文序列分离趋势项 $A(t)$ 后，可将剩余序列 $X(t)-A(t)$ 进行周期项分析。常用的方法有傅立叶级数法和方差分析法。

(3) 突变项 是表示水文现象受到外部突变影响而形成的。如河流跨坝对洪水的影响。对于水文序列，只有在个别年份才能碰到明显的突变项。常采用水文学和水力学原理来估算。但在降雨序列中，一般不含有突变项。

(4) 随机项 水文序列分离趋势、周期和突变项后，剩下的便是随机项成分。即 $X(t)-A(t)-P(t)-B(t)$ 为随机成分。随机项 $R(t)$ 可分为相依成分 $S(t)$ 和纯随机项 $N(t)$ 。即： $R(t)=S(t)+N(t)$ 。对于相依成分可用自回归模型、滑动平均模型和自回归滑动平均模型来模拟。纯随机项可用概率模型来模拟，它是水文序列模拟的基础。

2. 自相关分析和互相关分析

自相关分析主要计算序列自相关系数 γ_k ，用来研究水文序列自身的线性相依性和随时移增加而变化的特性，同时用来检验水文序列的独立性。

$$\gamma_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (X_t - \bar{X})(X_{k+t} - \bar{X})}{\sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X})^2} \quad (1-11)$$

互相关分析以互相关系数 $\gamma_k(X, Y)$ 来研究两个水文序列 X_t 、 Y_t 的关系，不仅表示两变量同时刻的关系，而且表示向前或向后时移 k 个时间单位的相互关系。

$$\gamma_k(X, Y) = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (X_t - \bar{X})(Y_{k+t} - \bar{Y})}{\left[\sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X})^2 \sum_{t=1}^n (Y_t - \bar{Y})^2 \right]^{1/2}} \quad (1-12)$$

3. 纯随机序列的随机模拟

纯随机序列的随机模拟常采用统计试验法（蒙特卡洛法）。首先模拟 $[0, 1]$ 区间上均匀分布的纯随机序列（均匀随机数），然后将之转换为其他指定分布的纯随机数。

纯随机序列模拟是随机序列模拟的一个很重要的部分。随机水文序列，需要首先模拟纯随机序列，再依时序将其迭加在其他成分之上，即得模拟水文序列。

(1) 均匀随机数的模拟

由于 $[0, 1]$ 区间上的均匀分布是最简单、最基本的连续分布，所以，通常使用 $[0, 1]$

区间上的均匀分布随机数生成其他指定分布的随机数。其生成方法有：

1) 利用随机数表 查询目前已经制成的随机数表来获得均匀分布随机数。

2) 利用物理随机数发生器 在数字计算机上安装一台物理随机数发生器，把具有随机性质的物理过程变换为随机数。这种方法由于存在较多缺陷，目前，在计算机上一般不使用。

3) 数学方法 是用一定的数学方法，通过计算机模拟均匀随机数，因为它与真正的均匀随机数还存在一定距离，所以称它为伪随机数。目前应用最广的方法有混合同余法和乘同余法。

混合同余法生成随机数的递推同余式为

$$x_{n+1} = \lambda x_n + c \pmod{M} \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1-13)$$

式中 x_0 是初值， λ 为增量， M 为模，而且这些数均为非负整数， c 、 λ 都小于 M 。上述递推同余式表示 x_{n+1} 是 $\lambda x_n + c$ 被 M 整除后的余数，叫作 x_{n+1} 与 $\lambda x_n + c$ 对模 M 同余，则

$u_n = \frac{x_n}{M}$ 为区间 $[0, 1]$ 上的数列。通常取 $c = 0$ ，则： $x_{n+1} = \lambda x_n \pmod{M}$ ， $n = 0, 1, 2, \dots$ 。称

为乘同余法，这是常用的生成随机数的公式。 λ 、 M 的选取与数字计算机的性能有关。上述产生的随机数须进行独立性和均匀性检验。

[例] 取 $x_0 = 1$ ， $\lambda = 7$ ， $M = 10^3$ 。则有：

$$\lambda x_0 = 7 \times 1 = 7; \quad x_1 = 7; \quad u_1 = 7/1\,000 = 0.007;$$

$$\lambda x_1 = 7 \times 7 = 49; \quad x_1 = 49; \quad u_1 = 49/1\,000 = 0.049;$$

$$\lambda x_2 = 7 \times 49 = 343; \quad x_2 = 343; \quad u_2 = 343/1\,000 = 0.343;$$

$$\lambda x_3 = 7 \times 343 = 2401; \quad x_3 = 401; \quad u_3 = 401/1\,000 = 0.401;$$

$$\lambda x_4 = 7 \times 401 = 2\,807; \quad x_4 = 807; \quad u_4 = 807/1\,000 = 0.401.$$

按上述算法依次继续下去。

(2) 服从正态分布的纯随机数模拟

服从正态分布的纯随机数模拟目前常用的方法有变换法和随机数之和法。

1) 变换法

标准正态分布纯随机数的生成公式为

$$\xi_1 = \sqrt{-2 \ln u_1} \cos 2\pi u_2; \quad \xi_2 = \sqrt{-2 \ln u_1} \sin 2\pi u_2 \quad (1-14)$$

式中， ξ_1 、 ξ_2 为相互独立的标准正态分布 $N(0, 1)$ 变量； u_1 、 u_2 为均匀分布随机数。

有了 ξ_i ，可生成正态分布纯随机数 X_i 。

$$X_i = \bar{X} + \sigma \xi_i \quad (1-15)$$

式中， \bar{X} 和 σ 分别为 X_i 序列的均值和方差。

2) 随机数之和法

标准正态分布纯随机数 ξ_i 的生成公式为

$$\xi_t = \sqrt{\frac{12}{n}} \left(\sum_{k=1}^n u_{tk} - \frac{n}{2} \right); \quad t=1,2,\dots \quad (1-16)$$

一般取 $n=12$ 。

(3) 服从对数正态分布的纯随机序列的模拟

假定随机变量 X 为对数正态分布，则随机变量 $Y = \ln(X - a)$ 为正态分布。其模拟步骤为：首先模拟 Y 序列，通过 $X = \exp(Y) + a$ 转换，即可得到 X 序列。在对数正态分布的三

个参数 \bar{X} 、 C_v 和 C_s 已知情况下，其生成公式如下：

$$\eta = \left[\frac{\sqrt{C_s^2 + 4 + C_s}}{2} \right]^{1/3} - \left[\frac{\sqrt{C_s^2 + 4 - C_s}}{2} \right]^{1/3} \quad (1-17)$$

$$a = \bar{X} \left(1 - \frac{C_v}{\eta} \right) \quad (1-18)$$

$$\sigma_Y = \sqrt{\ln(1 + \eta^2)} \quad (1-19)$$

$$\bar{Y} = \ln(\bar{X} - a) - \frac{1}{2} \ln(1 + \eta^2) \quad (1-20)$$

(4) 服从 P-III 分布的纯随机数模拟

通常采用 W-H 变换法，这一方法认为标准正态分布纯随机数 ξ_t 和标准皮尔逊 III 型分布 Φ_t 之间的关系为

$$\Phi_t = \frac{2}{C_s} \left(1 + \frac{C_s \xi_t}{6} - \frac{C_s^2}{36} \right) - \frac{2}{C_s} \quad (1-21)$$

可根据 C_s 得到 Φ_t ，在由已知的 X 和 C_v 利用 $X_t = X + \sigma \Phi_t = X(1 + C_v \Phi_t)$ 模拟皮尔逊 III 型分布的纯随机序列 X_t 。

1.5.4 线性平稳随机模型

1. 模型形式

(1) 自回归模型 $AR(p)$

$$X_t = \mu + \varphi_1(X_{t-1} - \mu) + \varphi_2(X_{t-2} - \mu) + \dots + \varphi_p(X_{t-p} - \mu) + \varepsilon_t \quad (1-22)$$

上式模型表明，任何一个时刻 t 的数值 X_t 可以表示为过去 p 个时刻数值 X_{t-1} 、 X_{t-2} 、 \dots 、 X_{t-p} 的线性组合加上 t 时刻的随机项 ε_t 。对于 ε_t

$$E\varepsilon_k = 0; \quad D\varepsilon_k = \sigma_a^2; \quad E(\varepsilon_k \varepsilon_j) = 0, \quad (k \neq j) \quad (1-23)$$

式中， p 为模型阶数，取正整数； φ_1 、 φ_2 、 \dots 、 φ_p 为模型参数。

(2) 滑动平均模型 MA(q)

$$X_t = \mu + a_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (1-24)$$

式中, q 为模型阶数, 取正整数; $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ 为模型参数。

上式模型表明, 任何一个时刻 t 的数值 X_t 可以表示为白噪声在 t 和 t 以前 $q+1$ 个时刻数值 $\varepsilon_t, \varepsilon_{t-1}, \varepsilon_{t-2}, \dots, \varepsilon_{t-q}$ 的加权值。

(3) 自回归滑动平均模型 ARMA(p, q)

$$X_t = \mu + \varphi_1(X_{t-1} - \mu) + \varphi_2(X_{t-2} - \mu) + \dots + \varphi_p(X_{t-p} - \mu) + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (1-25)$$

式中, p, q 为模型阶数, 取正整数。

2. 模型性质

(1) 自回归模型 AR(p) 的自相关函数 ρ_k 拖尾, 偏自相关函数 ψ_{kk} 截尾。

ρ_k 拖尾是指随着 k 无限增大, ρ_k 以负指数速度趋于零。即 k 相当大时有 $|\rho_k| < Ce^{-\delta k}$ 。

其中 $C > 0, \delta > 0$, 此时 $\lim_{k \rightarrow \infty} \rho_k = 0$, 它的图像像拖着一条尾巴。

ψ_{kk} 截尾指当 $k > p$ 时, $\psi_{kk} = 0$; 当 $k = p$ 时, $\psi_{kk} \neq 0$ 。

(2) 滑动平均模型 MA(q) 的自相关函数 ρ_k 截尾, 偏自相关函数 ψ_{kk} 拖尾。

(3) 自回归滑动平均模型 ARMA(p, q) 的自相关函数 ρ_k 拖尾, 偏自相关函数 ψ_{kk} 拖尾。

3. 建立线性平稳模型步骤

(1) 模型类型选择和阶数确定 由自相关函数 ρ_k 、偏自相关函数 ψ_{kk} 的拖尾和截尾性来确定模型类型和阶数。但是, 实际中, 由样本推算出的 ρ_k 和 ψ_{kk} 抽样误差较大, 难以直观判断, 所以, 一般采用统计判断。

(2) 参数估计 根据上述确定模型, 计算均值、方差、变差系数、偏态系数、模型参数以及独立随机变量的方差。

(3) 模型形式的进一步识别 上述模型初步识别的方法太粗糙。日本学者赤池 (Akaike) 提出了 ARMA(p, q) 模型 p 和 q 的 AIC 准则。

AIC 准则定量化公式为

$$AIC(p, q) = n \ln(\sigma_\varepsilon^2) + 2(p + q) \quad (1-26)$$

式中, n 为实测序列长度; σ_ε^2 为参差的方差。对于 AR(p) 模型, $p=0$ 。MA(q) 模型, $q=0$ 。使 AIC 达到最小值的模型便认为是可以接受的好模型。

(4) 模型检验 模型检验主要是对模型的随机项 ε_t (a_t) 相互独立项检验。根据上述

建立模型和样本序列 X_t 反推 ε_t 。构造统计量 $Q = n \sum_{k=1}^m \gamma_k^2(\varepsilon)$, n 为实测序列长度, $\gamma_k(\varepsilon)$ 为

随机项 ε_t 的 k 阶自相关函数。给定置信度 α , 根据自由度 $K - p - q$ 查相应的 x_α^2 , 若 $Q \leq x_\alpha^2$, 则 ε_t 相互独立。

(5) 模型的实用性检验 检验上述所建立的模型是否能够反映随机序列的真实特性, 称为模型的实用性检验。其基本方法是通过上述所建立的模型模拟长序列或短序列, 通过模拟序列计算出来的统计参数(均值, 方差, 变差系数, 偏态系数和一阶自相关函数)与实测序列计算出来的参数作比较, 看是否保持一致或接近。

1.5.5 季节性随机模型

上述介绍了平稳模型, 适用于年径流的模拟, 这是因为影响以年为间隔的水文变量的气候因素在一定长的时期内可假定为基本稳定。但一年中影响各月、旬和日径流的气候因素差别较大, 所以一年中不同月、旬和日径流呈现出不同的统计特性, 因此这类序列为非平稳序列, 不能应用上述介绍的平稳模型。在随机水文学中, 把月、旬和日这类非平稳序列模型称作季节性随机模型。

季节性水文序列主要指季径流、月径流、旬径流和日径流序列。下面主要以一阶季节性自回归模型为例。

一阶季节性自回归模型的基本原理是: 首先根据样本序列计算各月(或季)径流参数的估计值, 然后根据选定的分布函数, 最后生成相应的序列。

1. 模型形式

平稳一阶自回归模型形式为

$$X_{t,\tau} = \varphi_{0,\tau} + \varphi_{1,\tau} X_{t,\tau-1} + \varepsilon_{t,\tau}; \quad \tau = 1, 2, \dots, 12 \quad (1-27)$$

式中, t 为年份; $X_{t,\tau}$ 为第 t 年第 τ 月的月径流量; $\varphi_{0,\tau}$ $\varphi_{1,\tau}$ 分别为第 t 年第 τ 月的参数; $\varepsilon_{t,\tau}$ 为第 t 年第 τ 月的独立随机项。

2. 参数估计

(1) 均值

$$\bar{X}_\tau = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_{t,\tau}; \quad \tau = 1, 2, \dots, 12 \quad (1-28)$$

(2) 方差 σ_τ^2

$$\sigma_\tau^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n (X_{t,\tau} - \bar{X}_\tau)^2; \quad \tau = 1, 2, \dots, 12 \quad (1-29)$$