

绪 论

1.1 背景介绍

长江是我国的第一大河流,长江流域地理条件优越,自然资源丰富,开发潜力巨大,是我国社会经济最发达的地区之一,在我国国民经济和社会发展中具有重要的战略地位。但是,长期以来,由于自然和人为原因,长江上游流域内尚存在生态环境失调、水土流失严重等问题,严重阻碍着当地经济的发展,也影响着中下游广大平原地区的长治久安。保护和合理利用长江上游地区水土资源,防止水土流失,维护良好生态环境,是治理开发长江的一项重要内容,也是维护健康长江、加快流域经济可持续发展的有效途径。

长江干流宜昌以上为上游,长 4 504 km,流域面积约 100 万 km²,占全流域面积的 55%。宜宾以上干流大多属峡谷河段,长 3 464 km,落差约 5 100 m,约占干流总落差的 95%,汇入的主要支流有北岸的雅砻江。宜宾至宜昌段长约 1 040 km,沿江丘陵与阶地互间,汇入的主要支流包括北岸的岷江、嘉陵江和南岸的乌江。奉节以下为雄伟的三峡河段,两岸悬崖峭壁,江面狭窄。上游主要产沙区为金沙江和嘉陵江,占宜昌站多年平均输沙量的 80.72%。输沙量的年际变化与径流的年际变化类似,具有大水多沙、小水少沙特性。1954 年全流域大洪水,宜昌站年输沙量 7.54 亿 t,为历年之最。自 20 世纪 80 年代三峡生态屏障区启动“退耕还林”工程以来,植被覆盖率大幅增加。与此同时,三峡年均入库(寸滩+武隆)输沙量由 1956—1990 年的 4.91 亿 t 减少到 1991—2018 年的 1.07 亿 t,减少幅度达 78.2%,三峡入库泥沙呈锐减趋势。大量研究证实,气候变化和人类活动是长江上游区域水沙过程的主要驱动因素。气候因子的变化直接影响地表水文循环和地表输沙过程,导致了水沙资源空间分布的改变(Li et al., 2016); 人类活动通过直接或间接地取用、调配水资源或通过改变区域土地利用和地表覆被条件,影响流域内降雨分布、下渗和蒸发、侵蚀—搬运—沉积等产汇流和产输沙过程。

IPCC 第六次评估报告(AR6)表明,全球平均地表温度将在 21 世纪中叶持续上升,全球降水增加,其变化呈现显著空间差异,特别是中纬度大部分陆地极端降水事件的强度及频率极可能加大。新中国成立以来,我国开展了大规模的水土流失治理和生态环境建设工程,如

“退耕还林”工程、三北防护林工程、天然林资源保护工程等,改变了下垫面条件。截至2012年,我国已建成大中小型水库97 543座,总库容82 551 777万 m^3 ,其中大型水库683座。众多大中型水利工程建设,直接改变了水沙资源的分布。在气候变化和人类活动的综合影响下,长江上游水沙环境发生持续变化。建设长江流域生态屏障区是生态文明建设的迫切需要,特别是长江上游生态脆弱区的生态环境建设,对中下游的发展乃至全国生态安全至关重要。

在我国极端水文事件增加、人类活动日益加剧的背景下,长江上游流域的水资源消耗不断增大,水土流失治理、水利工程建设等活动日益频繁,长江上游金沙江、岷江、嘉陵江等流域的水沙条件发生了显著变化,使得长江上游水沙资源矛盾日渐严峻,生态环境恶化和资源短缺严重制约着我国经济、社会发展。在这一研究背景下,本书将针对长江上游重点产沙区的水沙条件变化特征及驱动因素,以及水沙要素对气象和非气象因素的响应等科学问题进行研究,以期对长江流域生态水文环境的健康发展、长江经济带生态文明建设提供科学支持。

1.2 水沙序列变化特征的定量描述

人类活动一方面改变下垫面水文特征,另一方面影响产水产沙的时空分配过程,进而影响下垫面性质;自然因素通过降水、气温、蒸发等因素,进而影响河川径流和产沙过程(陈真,2019)。从而可以确定,水沙关系变化是流域多种自然因素和人为因素综合作用的反映,水沙变化研究为河流水文循环和河道泥沙沉积提供了重要参考(李朝月等,2020),且一直是流域泥沙侵蚀动力学等领域的热点。为此,许多学者展开了诸多研究。以下研究从多角度出发,针对水沙序列基本特征、水沙关系及相关进展、水沙变化驱动因素等几个方面开展分析。

1.2.1 水沙序列的基本特征

径流是水循环的主要环节,是水量平衡的基本要素,径流量是陆地上最重要的水文要素之一。对河流来说,径流是塑造河床的动力,径流大小、持续时间等要素决定了水沙两相流的造床动力特征(张为,2006)。流域地表物质的剥蚀、搬运和输移是地形地貌发育的基本过程(付艳玲,2011)。对河流来说,泥沙是改变河床形态的物质基础,沙量的多少、颗粒的粗细影响着河床变形的方向,输沙量的大小和变化对河流系统的功能发挥具有重要意义。

流域的水沙动态变化特征可以从趋势性、阶段性、周期性等多方面展开研究。趋势性方面,张信宝等(2002)基于嘉陵江和金沙江的输沙量、径流量建立了双累积曲线,分析其径流泥沙的变化趋势以及变化原因;许全喜等(2008)针对嘉陵江流域的水沙变化特点及变化趋势进行分析,运用了典型调查与分析研究相结合的方法,并且首次对各影响因素对于研究流域输沙量减少的贡献率进行了定量分割,这对预测三峡水库入库输沙量的变化趋势具有重要意义;戴明龙等(2009)以嘉陵江流域为典型河流,运用双累积曲线法从水沙地区组成、含沙量、来沙系数、各流量级含沙量和水沙年内变化等方面研究了其水沙过程的变化,并从降雨量、水利工程、水土保持措施和河道采砂等方面分析了变化原因,在研究该流域水沙时间

序列和水沙地区组成的变化方面有一定突破。阶段性方面,王小军等(2009)以皇甫川流域为例,采用双累积曲线法、滑动平均法、Mann-Kendall 趋势检验法,对流域水沙量进行了统计分析并对皇甫站的水沙变化趋势进行了研究以及阶段性划分,发现该流域径流和泥沙呈下降趋势,这表明水土保持是水沙衰减的主要影响因素;高鹏等(2010)根据嘉陵江流域的水沙数据资料,采用历时曲线法和双累积曲线法等分析方法进行研究,发现其输沙量明显减少,从而分析得出水沙变化趋势和发生显著变化的突变年,并且得出人类活动对减水减沙的贡献率,进一步探讨了嘉陵江流域水沙变化的驱动因素。周期性方面,吴创收等(2014)基于多年的径流量、输沙量数据,针对珠江入海水沙的变化开展趋势性和阶段性分析,并采用小波分析法开展周期性分析,得出径流量、输沙量的年代际周期和年际周期;郭文献等(2019)根据嘉陵江流域的径流泥沙数据资料,除运用 Mann-Kendall 趋势检验法、双累积曲线法对该流域水沙的趋势性和突变性变化进行了分析以外,还运用小波分析法得出水沙的周期性变化规律,得出水库拦沙等人类活动为流域年输沙量显著减少的主要原因,在该流域的水沙通量演变规律的研究方面有所进展。

集中度最初被用来描述不同强度降水过程的非均匀分配特征(周亮广,2015),集中度越大,年内分配越集中。这种用于气象领域的年内分配指数后被引入到河流径流泥沙的年内分配规律分析中来,应用于不同的流域中(Zhang et al.,2003;刘新有,2015)。这样,集中度就反映了年内径流量、输沙量的非均匀分配特征,可用来分析径流、输沙年内变化规律;但一般基于月径流量、输沙量,很少基于日尺度来研究年内的径流量、输沙量集中分布情况。降水集中度曾被定义为 CI(concentration index),可以用来表征日降水量对于总降水的贡献程度(Martin-Vide,2004)。本书将集中度 CI 用于日尺度的年内径流量、输沙量的集中分布情况。

1.2.2 水沙关系及其研究进展

水沙关系是反映河流径流量和输沙量匹配关系的指标,不同水沙关系的河流有不同的泥沙沉积特征,而研究水沙关系对于揭示河流的泥沙时空变化规律和来源,分析河流的泥沙沉积特征和河道整治措施均有重要作用(赵玉等,2014)。

从长时期序列的角度看,流量(Q)与悬沙浓度(S)的幂指数关系用来反映流域产沙特征及河流输沙特性(Asselman,2000),该水沙关系曲线的表示形式为: $S = aQ^b$ (a 为系数, b 为幂指数)。Hu 等(2011)运用水沙关系曲线对长江流域的洪峰特征及其水沙关系的时空变化进行了详细分析,发现人类活动因素的增加(特别是三峡大坝)改变了长江流域的水沙过程,成为长江泥沙进入大海的主要因素;刘彦等(2016)则以三江源区为研究区,运用双累积曲线法、Mann-Kendall 趋势和突变检验以及评级曲线(即水沙关系曲线)等方法,分析该河流的水沙关系,也更好地揭示了水流挟沙能力在不同空间下的差异。

水沙环路曲线又称径流—悬移质泥沙环路,即在洪水场次事件下,流域的径流量、输沙量之间存在一定的峰值滞后现象。因此,该曲线是水沙关系的重要研究手段,也是一种有效探讨泥沙输移动态变化的方法(李永山等,2019),用于解释泥沙输移过程在时空方面的联系和泥沙供给在时空方面的来源(Aich V,2014)。Fan 等(2012)以黄河上游的宁夏—内蒙古河段为研究区,运用 Pettitt 检验法将水沙时间序列进行阶段性划分,并运用水沙关系曲线探究了该河段水沙关系的时空变化,还分析了不同洪水事件中水沙关系的径流—悬移质泥

沙环路特征(即水沙环路曲线); Yang 等(2018)基于美国密西西比州古德温流域的水沙数据以及土壤、降水、地形地貌等因素,分析了水沙环路曲线产生的原因以及类型,并得出每种类型的产生原因;黎铭等(2019)针对黄河皇甫川流域的水沙关系展开分析,以长时期的逐日径流量、输沙量数据为基础,采用双累积曲线法进行趋势分析和突变分析,并对洪水场次下的径流—悬移质泥沙环路进行探究分析,极大地丰富了水沙关系在机理分析和定量分析方面的应用。

1.3 流域水沙变化驱动机制

1.3.1 流域水沙变化驱动因素

近几十年来,流域内的人类活动日益增强、气候变化日益显著,人类活动和气候变化对全球水文循环产生了重要影响,使得众多河流的径流量、输沙量发生了急剧的时空变化,是水沙关系变化的主要驱动因素。从全球的角度看,Syvitski 等(2000)以全世界 57 条河流的水文站数据为基础,根据流域面积、径流量、输沙量等 15 个流域特性的物理量,研究并分析了影响各流域水沙变化的主要因子和关系,包括人类活动因素和气候因素。从全国的角度看,田清(2016)基于黄河、长江和珠江等三大流域降水量、径流量、输沙量的月数据,采用多种数学统计方法,分析了人类活动和气候变化对三大河流水沙变化的影响,发现人类活动因素(如退耕还林、水库建设、土地利用等)造成了三大河流输沙量的显著下降,气候变化主要对长江、珠江的径流量产生影响。从长江流域的角度看,师长兴(2008)采用 DEM、降雨、土地利用、土壤类型等影响侵蚀产沙的因子。从定量分析的角度出发,分析长江上游侵蚀输沙的尺度效应,加深了对于流域产沙一般规律的认识。从涪江流域的角度看,涪江流域作为嘉陵江右岸的最大支流,在水沙关系这一领域的研究较为有限,相关研究主要集中在水文径流、气候变化、人类活动(王渺林等,2006;蔡元刚,2007;王国庆,2012;王勇,2014)和土壤侵蚀(景可,2010)等方面。

量化人类活动因素和气候变化对水沙变化的影响程度主要依靠贡献率这一概念,而贡献率的分析方法有多种,总体而言有三类。(1)野外试验法:以成因分析法(姚文艺,2016)(又称水保法)为例,首先确定单项水保措施在不同单位面积上径流小区的减水减沙量,进行尺度转换后推广到流域面上,得到分项水保措施减水减沙量,逐项相加,并考虑流域产沙在河道运行中的冲淤变化和人类活动新增水土流失等因素,得到流域面上水利水保综合治理的减水减沙量,进而分析各项措施对水沙变化的贡献率,这一方法的计算结果接近真实,但数据收集周期长、耗费大量人力物力。因而,受研究区选取、数据监测、研究经费等限制,对比流域法通常用于研究小流域土壤—植被—大气相互作用机制,以及人为管理干预背景下的水沙响应过程。(2)统计分析方法:应用数学统计的方法评估流域水沙过程对气象要素、下垫面、流域属性等因素的响应,在全球普遍使用。常用的数学统计方法主要包括双累积曲线法、流量历时曲线法、多元回归模型及基于 Budyko 假设的弹性系数法。Gao et al. (2017)使用双累积曲线进行中国黄河中游归因分析,计算得到人为活动干预对 1991—2008 年径流变化贡献为 78.5%。Shen et al. (2017)使用基于 Budyko 假设的弹性系数法对中国 224 个流域的径流变化进行归因分析。(3)模型模拟法:基于物理过程的分布式、半分布式水沙模

型在计算水文过程和量化驱动因素的贡献率方面具有较强的优势,并在此基础上体现了水文系统的时空异质性,已在世界许多地区得到广泛应用。Hayashi et al. (2015)利用 HSPF 模型研究了植被恢复对嘉陵江流域径流减少的影响。Marhaento et al. (2017)应用 SWAT 模型进行热带流域径流变化归因分析,并证实了土地利用及覆被条件对径流变化影响的主导作用。受研究区研究尺度、监测设备、数据来源等限制,对比流域法的开展受到一定限制,数学方法与水沙模型法在我国流域水沙过程研究中得到运用。

1.3.2 流域水沙模型研究

1.3.2.1 流域水沙模型的发展

自 17 世纪末建立了水文循环和流域水量平衡的基本概念后,流域对暴雨的响应(即产汇流问题)就成为水文学的一个主要研究课题。自 19 世纪末建立流域水文模型概念以来,先后出现了 SSARR 模型(1958)、Stanford 模型(1959)、新安江模型、Sacramento 模型、Tank 模型、HEC-1 模型、SCS 模型及 API 连续演算水文模型等,这些模型根据流域的平均降雨过程和评价状态参数推求出口断面径流过程,被称为集总式模型。1969 年,Freeze 和 Harlan 发表了一篇名为《一个具有物理基础数值模拟的水文响应模型的蓝图》的文章,被认为是分布式水文模型的开端。直到 20 世纪 80 年代以后,计算机、地理信息系统和遥感等相关技术的提高才使得分布式水文模型有了长足发展。至今,水文模型共经历了 5 个发展阶段(袁作新,1988; Singh,2002; 贾仰文,2005),见表 1-1。

表 1-1 水文模型的发展阶段

Table 1-1 Development stage of hydrological model

阶段划分	模型发展	关注的重点问题	相关的支撑技术
1950 年以前	水文基本概念和理论的确立	水运动的基本规律	简易的观测技术
1950—1960 年	水文要素过程的模型化	降雨径流关系	计算机、现代观测技术和概率统计学
1960—1980 年	流域水文模型的开发	流域水文循环过程	数值计算、计算机和信息技术
1980—2000 年	分布式水文模型的开发	水文响应时空变异性	遥感、数字高程和地理信息系统
2000 年至今	与其他专业模型耦合应用 的开发	水与岩石圈、生物圈和大气 圈的耦合效应	大型计算、网络、虚拟仿真 和数字流域

土壤侵蚀与水文循环过程、气象条件密切相关,多数用以模拟土壤侵蚀的模型与水文模型密切相关,这也是由其侵蚀特性所决定的。因此,土壤侵蚀模型是伴随水文模型的发展而发展的。土壤侵蚀的定量研究最早可以追溯到 1877 年德国土壤学家 Ewald Wollny(Meyer L D,1984)的研究,此后一个多世纪以来,随着对土壤基本侵蚀规律认识的不断深入和发展,取得了丰硕的成果。按照其发展历程,可分为 3 个阶段,即经验统计模型阶段、具有侵蚀机理的概念模型阶段、与 GIS 和 RS 技术手段相结合的各类土壤侵蚀模型阶段。参考论文(金鑫,2007)及相关文献对这 3 个阶段模型的特点进行总结,见表 1-2。

表 1-2 泥沙侵蚀模型的发展阶段

Table 1-2 Development stage of sediment erosion model

阶段划分	模型发展	关注问题	类型及方法	代表模型
1960 年以前	泥沙侵蚀概念确立	侵蚀量的确定	经验模型—侵蚀量与简单因子的关系	1917 年 Millier-1936Bennett; 1940 年 A W Zingg-1941 年 D Smith; 1947 年 Musgrave-1965 年 ULSE (郑粉莉, 2004)
20 世纪 60—80 年代	产沙/输沙的物理机理研究	注重侵蚀过程	物理模型—用质量守恒和动量方程描述降雨侵蚀—坡面产沙—泥沙输移等物理过程	1967 年 Negev-1969 年 Meyer; 1972 年 Foster 和 Meyer; 20 世纪 80 年代后, 美国的 WEEP/EPIC, 欧洲的 EUROSEM, 荷兰的 LISM, 澳大利亚的 GUEST
1990 年至今	时空各异性及与其他专业模型耦合应用的开发	土壤与下垫面条件、生物体和气象的耦合效应	基于地理信息系 统的水蚀预报模 型—GIS/RS 技 术, 网络开发, 虚 拟仿真技术和数 字流域	1996 年的 LISEM 模型; 1998 年的 WEPP 模型和 PILLGRDW 模型; 1999 年的 RUSLE 模型; 2002 年的 SHESED 模型等

1.3.2.2 流域水沙模型中的技术支撑

(1) 地理信息系统与遥感技术

在 Freeze 和 Harlan 于 1969 年提出分布式水文模型概念之后的十多年间, 由于计算机能力、空间数据采集等限制, 分布式水文模型一直处于休眠时期。直至 20 世纪 80 年代以后, 随着计算机技术、地理信息技术 (GIS) 和遥感技术 (RS) 的发展, 尤其是数字高程模型 DEM 在水文模拟中的应用, 才给流域水文模拟的研究方法带来了创新, 分布式水文模型得以长足发展。

RS 是一种宏观的信息采集与处理技术, 作为一种重要的信息源, 具有应用范围广、采集时间短、信息量大、成本低的优点, 且栅格式的遥感数据与分布式流域水文模型的数据格式一致, 可方便地进行交替使用。利用地球同步卫星以及最新的 MODIS, 可获得大面积的地质、地貌、地形、植被、土壤等下垫面信息, 利用遥感微波技术还可以估算云中水汽含量、蒸散发估算值及土壤含水量等信息, 通过间接转化来获得一些传统水文方法不能直接观测的信息, 为建立描述时空变异性、多参数、多变量的分布式水文模型提供技术支撑。目前, 该技术已经在计算蒸散发、土壤湿度 (杨胜天等, 2003)、植被覆盖、土地利用、土壤类型等各个方面得到有效应用 (周贵云等, 2000)。

GIS 可实现对空间数据的收集、存储、操作、管理、更新、分析显示等一系列过程, 为遥感数据的解译、分析、处理以及比较模型参数的时空变化提供了良好的技术环境和支持。例如, 通过 GIS 可以从数字地形模型 DTM、数字高程模型 DEM 中提取地形、坡度等下垫面信息以及水系、河网、子流域等流域信息, 并实现不同数据的可视化结合、数据转换, 为分布式模型提供平台。GIS 与水文模型结合的主要形式有: GIS 中嵌入水文分析模块、水文模型软件中嵌入部分 GIS 工具以及相互耦合的嵌套形式 (刘凤莲, 2005)。

GIS 和 RS 技术的飞速发展,为分布式水文及泥沙模型的长足进步提供了技术保障和可靠前提,与 GIS、RS 技术的结合亦是目前分布式模型的发展趋势。例如,20 世纪 70 年代基于日降雨水文模型(chemicals, runoff, and erosion from agriculture management system, CREAMS)发展起来的水蚀预测模型(water erosion project, WEPP)在 1991 年从坡面侵蚀模型扩展为流域的侵蚀模型,并且于 2004 年开发了基于 ArcView 界面的 GEOWEEP(张玉斌,2004),充分利用了 GIS 技术。唐莉华(2002)建立了小流域产汇流及产输沙模型,与 GIS 技术结合,实现了计算结果的可视化。

(2) 雷达测雨技术

确切的降水空间分布是分布式水文模型及泥沙模拟发挥优势的先决条件。虽然传统的雨量站测雨是目前应用最广也被认为是最为可靠的数据来源,但是当流域观测站点稀少或受山地气候控制时,很难体现出流域降雨空间分布的复杂多变性。降雨空间信息的不足性引起分布式水文泥沙模型模拟的不确定性,是阻碍其发展的重要因素。20 世纪 40 年代末发展起来的雷达估测降雨具有提供复杂多变的降雨空间分布信息、流域或区域的面雨量以及实时跟踪暴雨中心走向和暴雨空间变化的能力,越来越多地得到学者的重视,并逐步在水文领域得到推广和广泛应用(Latif Kalin 2006; Zhang Xuesong et al,2010)。

但是,由于技术本身的复杂性和各种原因,雷达估测降雨存在一定程度上的误差,特别是大范围降雨时,尚不能满足水文应用的要求(杨扬等,2000)。因此,在采集雷达数据时需采取提高测量精度的措施,在使用数据时需对其进行修正。此外,增加信息亦可改善降雨分析结果,如可将由卫星资料提供的潜在可降雨云分布信息(Schultz,2000)与雷达及雨量站点的降雨资料相结合。

1.3.2.3 流域水沙模型的信息环境

纵观水文及泥沙模型的发展阶段可以看出,与早期的概念化或模型化的集总式模型相比较,分布式模型最大的优势是可利用日益丰富的空间信息源(见图 1-1),并且可以充分考虑各种水文响应影响因素的空间分布。一般来说,流域分布式模型将研究区域划分为足够多的不嵌套水文计算单元(栅格、不规则三角网、水文相似单元、水文响应单元、子流域等),

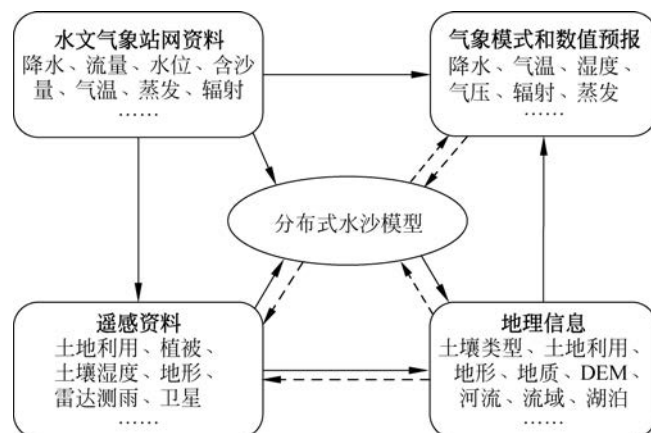


图 1-1 流域水沙模型的信息环境(郝振纯,2010)

Fig. 1-1 Information environment of watershed sediment model

作为各种空间信息(数值天气预报、地理信息、遥感、雷达及全球气候模型(global climate model,GCM)等)的基本输入单元,可方便地考虑地形地貌、土地利用、土壤地质、水系分布等下垫面条件变化对水文及水资源的影响。分布式模型以其结构优势,可与气象气候及雷达降雨估测模型耦合,研究气候空间变化对水文循环的影响;同时,可采用点数据源,充分考虑降雨、蒸发、太阳辐射等因素在时间尺度上对流域水环境的影响(郝振纯,2010)。

水文计算单元的获取通过流域离散实现,一般通过 DEM(digital elevation model)提供的栅格坡度、坡向及拓扑关系等地表形态信息来确定。基于 DEM 的流域离散方法主要有网格(grid)法、山坡(hill)法、子流域(sub-basin)法及其组合等(王中根等,2003)。网格法基于 DEM 进行网格的划分,但受计算机物理内存的限制,仅适用于一些高精度(10 m×10 m)小尺度或粗精度(1 km×1 km)大尺度的模型。MIKE SHE 是这类模型中的典型代表。山坡法将分布式模型化为多个矩形坡面,作为最小计算单元,根据山坡水文学原理进行产流计算,而后基于等流时线的概念进行汇流演算。GBHM 模型(Yang Dawen et al,2000)采用了山坡法。SWAT(Arnold et al,1997)模型和 HEC-HMS 模型采用自然子流域的方法进行流域离散,可方便快速实现河网提取和子流域划分。SWAT 将水文响应单元作为自然子流域的最小计算单元,而 HEC-HMS 则将各水文影响因素在自然子流域中求取平均。此外,刘家宏等(2005)采用 TOPAZ(topographic parameterization)工具划分 DEM 得到子流域,每个子流域包括一条河段及源(source)、左(left)和右(right)三个坡面,以此作为“元流域”(meta basin)进行产流模拟,本书所采用的分布式水沙模型 BPPC 即采用此种方法。这样,在根据 DEM 所划分的水文计算单元上建立水文模型,根据地理信息、遥感、雷达、植被、土壤、地质、水文、气象等各种空间信息,综合考虑并合理优化模型的物理参数,从而建立适宜的流域分布式模型。

1.3.2.4 流域水沙模型的应用现状

(1) 国外主要的分布式水沙模型

20 世纪 30 年代的 Horton 经验方程、Green-Ampt 物理方程以及 50 年代的 USLE 方程,是国外的水土保持模型的基础,为分布式土壤侵蚀预报模型的研究提供了基本的计算方法。

20 世纪 80 年代,分布式水沙模型不断成熟并完善起来。1979 年,Beven 提出的 TOPMODEL 模型基于数字地形推求地形指数,可用以描述下垫面条件对流域水文的影响。由英国水文研究所、法国 SOGREAH 咨询公司和丹麦水力学研究所联合开发的 SHE (system hydrologique european)模型,是一个典型的分布式水沙侵蚀模型,适用于模拟大中流域水流及泥沙运动的空间分布。与 SHE 模型同期出现的是由美国农业部农业研究局与明尼苏达污染物防治局联合开发的面向事件的分布式参数模型(agriculture non-point source,AGNPS)(Young R A,1989),其水文模块采用 SCS 径流曲线计算径流总量,侵蚀模块采用改进的土壤流失方程 RUSLE 计算流域土壤侵蚀量。20 世纪 90 年代以来,随着“3S”技术在分布式水文模型中的逐渐应用,AGNPS 被改进为能模拟连续降雨事件的 AGNPS2001 模型,标志着流域土壤侵蚀的研究由纯粹的数学问题转变为系统决策的工具。ANSWERS(area nonpoint source watershed environment response simulation)模型由 Beasley 和 Huggins(Beasley D B,1980)提出,属分布式次暴雨土壤侵蚀物理成因模型,用于评估小流域土地利用和管理措施的变化对土壤侵蚀造成的影响及其空间变化。土壤侵蚀量采用 USLE 计算,流域离散采用网格法,但模型中并未考虑沟蚀作用和地下水引起的入流

和出流等因素对侵蚀产沙模拟精度的影响。牛志明将 ANSWER 模型应用于三峡库区小流域侵蚀产沙、地表径流以及不同土地利用类型水沙分布状况的模拟中,模拟精度较高,但对于陡坡林地的模拟误差大,说明 ANSWER 尚不能有效适用于我国的复杂地形(牛志明,2001)。EUROSEM(european soil erosion model)模型是一种基于过程的次暴雨动力学模型,可用于坡面和沟道单元,区分雨滴溅蚀、沟间侵蚀和细沟侵蚀,区分坡面土壤侵蚀和不平衡输沙过程,并可提供水沙过程的细节描述。SWAT(soil and water assessment tool)模型由美国农业部农业研究中心于1993年开发,与GIS集成,可预测在大流域复杂多变的土壤类型、土地利用方式和管理措施条件下,土地管理对水分、泥沙和化学物质的长期影响,适用于大众流域,在世界范围内应用广泛。国内学者杨桂莲(2003)等基于SWAT模型与数字滤波技术对河南洛河流域径流中的基流进行估算和比较;刘昌明(2003)等对黄河河源地区的流域进行了水文模拟,流域面积达到42.8万 km^2 ,为目前国内之最;李硕(2004)等在遥感和GIS的支持下,对SWAT模型的空间离散化和空间参数化进行了深入研究,并成功地将其应用到江西潦水河流域的径流和泥沙的模拟。在大尺度流域应用SWAT模型时应注意,SWAT模型采用以日为单位的时间步长,可进行长时间序列计算,但不适合对单一洪水过程的详细计算。

值得一提的是,流域侵蚀产输沙模拟更多地注重机理研究,如土壤剥离及泥沙空间运移过程,计算公式具有较强的物理意义,且注重建模的合理性。VanderKwaak(1999,2001)的InHM就是一个强调动力学机理的水文模型,用2D网格模拟地表水,而用3D网格模拟土壤水和地下水。后经学者(Heppner,2006;Ran,2007)加入泥沙模块,可在2D网格上计算土壤侵蚀和不平衡输沙过程。Jain(2005)等建立了基于栅格单元的分布式降雨—径流—土壤侵蚀模型,将具有实际物理意义的雨滴溅蚀和水流侵蚀计算公式作为泥沙运动方程的源汇项。

(2) 国内主要的分布式水沙模型

蔡强国和刘纪根(2003)、蔡强国和袁再健(2006)、张瑜英(2006)等曾先后对国内的分布式土壤侵蚀模型进行了总结和评述。汤立群(1996)建立了能反映黄土高原区垂直分带性规律的泥沙演进模型;符素华(2001)等建立了一个流域尺度的、以次暴雨为基础的与GIS相结合的分布式模型;祁伟(2004)等建立了基于场次暴雨的小流域侵蚀产沙分布式数学模型。这些模型以网格或流域要素为基础,能反映不同地貌特征、下垫面条件及水土保持措施下的径流和侵蚀产沙过程,显示了流域空间差异对径流产沙影响的优越性,但是不考虑土壤侵蚀和泥沙输移的具体过程,且对地域的针对性很强。

国内具有典型代表意义的分布式模型多应用于黄土高原丘陵沟壑的多沙粗沙区。许钦和任立良(2007)建立了岔巴沟流域的水沙耦合的分布式模型,该模型具有一定精度,但河道泥沙输移比假设为1,未考虑到沟道泥沙冲淤过程。王光谦建立了流域泥沙动力学模型(王光谦,李铁健,2008),在模型的坡面单元中,在以超渗产流为主的降雨径流模型的基础上建立了基于过程的坡面土壤侵蚀模型;在沟坡区,建立了模拟土体滑坡和崩塌过程的重力侵蚀模型;在沟道区,用一维水沙动力模型完成水沙源区向中下游沟道演进的数学模拟。各子过程以数字流域为平台进行集成。该模型能够显示侵蚀—输运—沉积在流域内的分布情况,反映主要影响因素对流域泥沙过程的作用方式,分析水沙源区的来水来沙条件与干流河道间的水沙响应关系,是一个综合和全面的模型系统。BPCC(basic pollution calculated

center)是清华大学河流研究所王兴奎(张超,2008)等联合开发的流域分布式水沙模型。BPC模型基于DEM建模,采用TOPAZ工具划分子流域,以“坡面+沟道”作为模型基本的计算单元。坡面上,可求解降雨蒸散发、地表径流、穿透雨下渗、壤中流、潜水流出、雨滴溅蚀和细沟侵蚀等产流产沙过程;沟道中,以改进的扩散波方程和悬移质不平衡输沙方程计算水流和泥沙的动态演进。该模型曾应用于长江上游的香溪河流域(张超,2008)和嘉陵江支流李子溪流域的径流过程、泥沙侵蚀及污染物的输移扩散过程,模拟效果令人满意。

1.3.2.5 流域水沙模型研究中的关键问题

虽然分布式水沙模型取得了长足发展,且具有更为广阔的应用前景,但在目前水沙相耦合的分布式模型应用中,尚存在以下关键问题。

(1) 变化环境下的流域水文过程机理与规律

近年来,由于全球气候变化和人类活动加剧,陆地水循环、水资源状况及环境生态等发生了深刻改变,导致了日益恶劣的水危机、水灾害以及水环境等问题。

对于气候变化对水文影响的研究,主要集中在气候变化对水文水资源、需水量以及水文极端事件的影响等。在局部地区,尤其是受外界气候或季风影响较小的山地地区,与气候相关的因素主要包括降雨和温度。降雨是水文模型最主要的驱动力,影响洪水过程、峰值流量、洪水形态分布、径流的年际分布以及土壤剥离、搬移的动态响应过程;温度影响水分在地表的蒸发和植物的蒸腾作用,影响水量平衡,长期作用下还可引起地表覆被的动态变化。

下垫面变化主要体现在地表植被及地质地貌的改变上。下垫面条件主要影响降雨—径流过程、改变产汇流条件、控制土壤侵蚀搬运、影响洪水行洪能力以及污染物输移等方面。其中,植被、水土保持、水利工程及城市化的水文效应等课题已受到了较高的关注。以植被覆盖为例,研究表明,森林可涵养水源、保持水土、减少风沙灾害、调节河川径流,但砍伐森林到底使得径流增加还是减少,至今尚未定论(赵鸿雁,2001;张志强,2001;祝志勇,2001)。而对于产沙量,所得结论基本一致,即森林能大幅度减少产沙、防止土壤侵蚀,减少河流悬移质和推移质的含量。随着计算机和地理信息技术的进一步发展,分布式水文模型将逐步成为评测下垫面条件变化对水文效应影响的重要手段。

对于岷江上游镇江关以上流域,其地貌复杂,生态脆弱,有“沙窝子”这一典型生态恶化现象,受人为活动影响大,近年来水文、泥沙变化趋势较大。下垫面条件的改变和人类活动的影响是造成此种变化的主要因素,但是对二者影响的定量化分析,尚待进一步深入研究。

(2) 水文信息及水力侵蚀产沙过程的空间异质性

由于流域性质在不同的时间和空间尺度上普遍存在很大差异,相对集总式水文模型,分布式模型更能够反映空间异质性对流域水文过程的影响,并能够给出定量化结论,而不是流域状态的平均值,这也是与集总式水文模型的本质性区别。但同时,当用水文信息来描述物理现象的时候,往往采用“点尺度”或“点估计”的概念,而用以描述物理过程的水流运动方程也是“点尺度”的方程。由于水文信息、变量及参数在流域内的空间分布存在着巨大差异,因此在将“点尺度”的信息和概念应用到整个流域的时候,可能会导致信息的误用和物理意义的丢失。

水力侵蚀产沙过程亦存在同样的问题。流域产沙,是指某一流域范围内的侵蚀物质向其出口断面的有效输移过程。这里强调“有效输移”,指的是移动到出口断面的侵蚀物质的数量,而不包括坡面上的雨滴溅蚀或土粒分散及沟道的沉积等。因此,侵蚀不一定伴随产沙。一般来说,某一断面的产沙量即泥沙含量与多种因素有关,包括上游流域坡面的泥沙来