

水土保持措施水沙效应 模拟及结构优化研究

SHUITU BAOCHI CUOSHI SHUISHA XIAOYING
MONI JI JIEGOU YOUHUA YANJIU

陈卫宾 宋海印 张运凤 编著

水土保持



黄河水利出版社

水土保持措施水沙效应模拟及 结构优化研究

陈卫宾 宋海印 张运凤 编著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书在分析以往研究成果的基础上,通过耦合分布式水文模型(GTOPMODEL)及改进的修正通用土壤流失方程(RUSLE)构建了分布式水沙模型,并利用遗传算法对模型参数优化进行了研究,在此基础上对农艺耕作措施、生物措施及工程措施等不同水土保持措施的水沙效应进行了模拟计算,并利用实测资料对计算结果的合理性进行了分析。根据不同水土保持措施水沙效应,构建了水土保持措施结构优化模型,并利用人工智能算法对模型进行了求解。

图书在版编目(CIP)数据

水土保持措施水沙效应模拟及结构优化研究/陈卫
宾,宋海印,张运凤编著. —郑州:黄河水利出版社,
2017.5

ISBN 978 - 7 - 5509 - 1760 - 6

I. ①水… II. ①陈…②宋…③张… III. ①水土
保持 - 研究 IV. ①S157.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 102746 号

组稿编辑:王志宽 电话:0371 - 66024331 E-mail:wangzhikuan83@126.com

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南新华印刷集团有限公司

开本:890 mm × 1 240 mm 1/32

印张:5.25

字数:172 千字

印数:1—1 000

版次:2017 年 5 月第 1 版

印次:2017 年 5 月第 1 次印刷

定价:25.00 元

前 言

水土保持措施的水沙效应一直是水土保持工作者研究的热点,目前我国水土保持措施水沙效应的研究从方法上讲主要以坡面观测为主,从研究区域上讲主要集中在黄河流域,利用分布式水沙耦合模型对水土保持措施的水沙效应进行模拟的研究成果少而且主要在黄河流域。由于研究经费、时间、地理条件等多方面因素的限制,传统的集对比分析方法及时间序列方法难以有效地分析出不同水土保持措施对流域产流产沙的影响,同时长系列水文资料的观测与收集比较困难。

在这种背景下,作者在南方红壤水土流失区对水土保持措施水沙效应模拟及结构优化开展了部分研究工作。随着计算机技术的不断发展及 3S(GIS、RS、GPS)等先进技术的广泛应用,人们对水土流失规律的认识不断深入,土壤侵蚀预报模型已经由传统的统计模型、具有一定物理基础的集总式概念模型发展到了以分布式水文模型与分布式产沙模型相耦合的分布式水沙耦合模型研究阶段。在以往研究成果的基础上本书主要进行了以下几个方面的研究:

(1)适合于水土保持措施水沙效应模拟的分布式水文模型研究。本书在半分布式水文模型 TOPMODEL 的基础上,将植被因子和土壤因子引入到地形指数的计算中,通过归一化植被指数与叶面积指数之间的统计模型对植被冠层截留量进行了分布式计算,建立逐网格产汇流模型,构建了分布式水文模型 GTOPMODEL,模型能够对下垫面变化做出响应。

(2)分布式产沙模型及其与分布式水文模型的有机耦合研究。本书通过引入常规化差异植被指数 $NDVI$ 和作物管理与植被覆盖因子 C 值的关系模型,对修正通用土壤流失方程中各因子进行了分布式计算,将分布式水文模型的产流结果作为修正通用土壤流失方程中径流因子值,实现了分布式水文模型与分布产沙模型的有机耦合,构建了分布式

水沙耦合模型。

(3)水沙耦合模型参数率定方法研究。本书将动态种群不对称交叉遗传算法和实数编码加速遗传算法相结合构建了动态种群不对称交叉加速遗传算法,数值试验显示该算法优于原实数编码加速遗传算法,将该算法应用于本书构建的水沙耦合模型的参数率定中,率定时确定性系数达到了 0.94,预报时确定性系数达到了 0.88,取得了较好的效果。

(4)水土保持措施水沙效应模拟研究。以江西省修河流域水土流失严重的杨树坪站以上部分为研究区域,利用本书构建的分布式水沙耦合模型对水土保持措施实施后的水沙过程进行了模拟,通过对比措施实施前后水沙过程的变化得到了各措施水沙效应定量指标值。与江西省水土保持科技园区的试验观测资料做对比,对模拟结果做了合理性分析。

(5)流域水土保持措施多目标优化配置研究。构建了基于径流调控的水土保持措施多目标优化配置模型,根据研究区域降雨特点将主汛期径流量与其他月份径流量比值最小作为优化模型目标之一,把水土保持措施对径流的调控作用耦合在水土保持措施的优化配置模型当中,利用多目标遗传算法进行了求解。

成果主要创新点如下:

(1)在 TOPMODEL 基础上,建立了分布式水文模型 GTOPMODEL。模型将植被因子及土壤因子加入到地形指数的计算当中;由原来的等流时带汇流方式,改为网格汇流;通过 *NDVI* 与叶面积指数的统计关系模型,实现了植被冠层降雨截留的分布式计算。改进后的模型能够反映下垫面变化对径流过程的影响。

(2)在 AVSWAT 2000 河道泥沙演进模型的基础上,将河道中的泥沙输出与径流输出同比例的假定进行了改进,根据泥沙进入河道的先后顺序依次输出,最后通过叠加得到河道断面日泥沙输出量。对研究区域的应用表明,模型参数率定时确定性系数由 0.83 提高到了 0.89,改进后的模型计算精度得到了提高。

(3)将动态种群不对称交叉遗传算法与实数编码加速遗传算法相

结合,提出了动态种群不对称交叉加速遗传算法。数值试验表明,改进后的算法从最优解的精度和寻找到最优解的概率两方面都比实数编码加速遗传算法有所提高,显示了算法的良好性能,将算法应用于水沙耦合模型的参数率定,取得了较好的效果。

(4)构建了基于径流调控的水土保持措施多目标优化配置模型。根据研究区域降水特点将主汛期径流量与其他月份径流量比值最小作为优化模型目标之一,把水土保持措施对径流的调控作用耦合在水土保持措施的优化配置模型当中,在实现保水保土目的的同时最大限度地发挥水土保持措施对流域径流的调控作用。

水土保持措施水沙效应模拟是一个非常复杂的过程,本书在前人研究成果的基础上构建了分布式水沙耦合模拟模型,在水土流失严重的修河流域杨树坪站以上区域对5种具体的水土保持措施的水沙效应进行了模拟,得到了各措施水沙效应的定量指标值,以此为基础构建了基于径流调控的水土保持措施多目标优化配置模型。

本书由陈卫宾、宋海印、张运凤共同执笔,并由陈卫宾负责全书统稿,具体分工如下:陈卫宾编写第1、2章,宋海印编写第3、4、6章,张运凤编写第5、7章。

由于作者水平及时间有限,疏漏之处在所难免,恳请各位专家批评指正。

作 者
2016 年 11 月

目 录

前 言

第1章 绪 论	(1)
1.1 研究背景及意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(3)
1.3 主要研究内容及技术路线	(18)
第2章 基于地形和栅格的分布式水文模型	(21)
2.1 基于数字高程模型的流域信息提取	(21)
2.2 基于栅格和地形的分布式水文模型构建	(32)
2.3 模型主要参数	(47)
2.4 本章小结	(48)
第3章 分布式产沙模拟模型	(49)
3.1 坡面产沙模型的建立	(49)
3.2 通用土壤流失方程中各因子的确定	(52)
3.3 坡面汇沙及河道泥沙演进模型	(58)
3.4 本章小结	(63)
第4章 水沙耦合模型参数率定	(65)
4.1 算法简介	(66)
4.2 耦合模型参数率定研究	(71)
4.3 本章小结	(79)
第5章 流域水土保持措施水沙效应模拟	(81)
5.1 水土保持主要措施对水文水资源过程影响的定性分析	(81)
5.2 研究区域概况	(83)
5.3 河网及子流域生成	(95)
5.4 不同水土保持措施水沙效应模拟及结果分析	(100)

5.5	水土保持措施对降雨径流影响的试验研究	(106)
5.6	模拟结果与试验结果对比分析	(125)
5.7	本章小结	(126)
第6章	水土保持措施优化配置研究	(128)
6.1	水土保持措施选择与配置的基本原则	(128)
6.2	水土保持措施优化配置模型建立	(129)
6.3	基于交互式多目标遗传算法的求解模型	(132)
6.4	研究区域水土保持措施优化配置	(142)
6.5	本章小结	(145)
第7章	结论与展望	(147)
7.1	结 论	(147)
7.2	展 望	(150)
参考文献		(151)

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及意义

我国是世界上水土流失严重的国家之一,全国水土流失面积达 356 万 km^2 , 占国土面积的 37%, 每年流失的土壤总量达 50 亿 t, 其中长江流域年土壤流失总量 24 亿 t, 黄河流域黄土高原地区每年进入黄河的泥沙 16 亿 $\text{t}^{[1]}$ 。严重的水土流失, 不仅导致生态失衡, 而且还加剧了水资源危机。一是森林植被稀少, 坡地土层变薄, 甚至基岩裸露, 坡地水源涵养能力减弱, 洪水暴涨暴落。二是大量泥沙下泄, 淤积江、河、湖、库, 影响了水利设施调蓄功能, 降低了天然河道泄洪能力, 加剧了下游的洪涝灾害。三是造成水资源污染, 水土流失成为面源污染的主要载体。据任海^[2]研究, 水土流失所导致的面源污染和污染物的载体, 成为影响密云水库水质的重要污染源之一。四是影响水资源的有效利用, 加剧了干旱对工农业生产带来的危害。在水土流失较为严重的流域, 为了减轻泥沙淤积造成的库容损失, 部分水库不得不采用蓄清排浑的方式运行, 使大量宝贵的水资源随着泥沙下泄。黄河下游每年需用 200 亿 m^3 左右的水冲沙入海, 用来降低河床^[3], 防止河床进一步抬高。

我国的水资源具有以下几方面特点:

(1) 总量较大, 水资源年平均总量为 2.8 万亿 m^3 , 居世界第六位。但是, 人均和亩均占有量小, 按照 1997 年数据, 中国水资源人均占有量只有 2 220 m^3 , 约为世界人均占有量的 1/4, 居世界第 88 位, 水资源耕地亩均占有量只有 1 770 m^3 , 约为世界耕地亩均占有量的 3/4。

(2) 水资源的时空分布很不均匀, 这是中国水资源的第二个基本

特点。在空间分布上,水资源与人口和耕地的地区分布不相适应。一般而言,若以秦岭为界,则南方水多地少,而北方水少地多。南方水资源总量约占全国的 80%,但是人口只占全国的 55%,耕地只占全国的 36%;北方水资源总量不到全国的 20%,而人口却占全国的 43%,耕地占全国的 58%。同时,在时间分布上,降水量及河川径流量的季度变化和年际变化都很大。受季风影响水资源的时间分布极不均衡。我国降水时间分配上呈现明显的雨热同期,基本上是夏秋多、冬春少。总体表现为降水量越少的地区,年内集中程度越高。北方地区汛期径流量占年径流量的比例一般为 70%~80%,其中海河区、黄河区部分地区超过了 80%,西北诸河区部分地区可达 90%。南方地区多年平均连续最大 4 个月径流量占全年的 60%~70%。不但容易形成春旱夏涝,而且水资源量中大约有 $\frac{2}{3}$ 是洪水径流量,不利于水资源的开发利用。

我国水资源可持续利用实践的发展,要求水资源安全利用和管理研究必须与相应的生态环境问题相结合,生态环境安全与水资源可持续发展理念在水资源领域的运用和发展,是一个复杂体系,也是丰富和拓展水资源合理配置理论与实践的需要。

综上所述,一方面我国面临着严峻的干旱缺水、洪涝灾害等水问题,而仅仅依靠大规模兴建新的水利工程来彻底解决这些水问题,无论是从经济、社会,还是生态环境方面来说,都是不科学的。另一方面森林过度砍伐、放牧和耕地开垦等导致的大面积水土流失和生态环境恶化,加剧了水资源缺乏和时空分布不均衡与日益增长的水资源需求之间的矛盾。因此,在水土流失地区,以流域为单元,进行水土保持水沙效应模拟及综合调控模型研究既是解决我国用水和需水之间矛盾的需要,也是我国水资源可持续利用和发展实践的需要。在这种背景下,本书以水土流失比较严重的南方红壤侵蚀区——修河流域为研究区域,进行基于分布式水沙耦合模型的水土保持措施减水减沙效应模拟及水土保持措施结构优化研究。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 分布式水文模型研究现状

1.2.1.1 国外分布式水文模型研究进展

自 1969 年 Freeze 和 Harlan^[4]第一次提出了关于分布式物理模型的概念,分布式模型开始得到快速发展。1986 年,英国、法国和丹麦的科学家联合研制了 Systeme Hydrologique Europeen (SHE) 模型^[5-6]。该模型主要的水文物理过程主要采用质量、能量或动量守恒的偏微分方程的差分形式来描述,当然也采用了一些经过独立试验研究得来的经验关系。该模型以欧洲的流域水文过程为框架,综合考虑降水、蒸散发、植物截流、坡面和河网汇流、土壤非饱和流与饱和流、融雪径流、地表径流、土壤对地下水的补给、地下水的流动交换等水文过程,该模型的参数都有一定的物理意义,并可以通过观测或从资料分析中得到。但模型没有考虑土壤表层的快速壤中流。该模型多应用在欧洲,在其他地区应用比较少。该模型是第一个真正的或者说具有代表性的分布式水文物理模型。从 SHE 模型开始,人们先后研制建立了一些分布式水文模型,SHE 模型现在也出现了很多不同版本,比如 MIKESHE 模型、SHETRAN 模型等^[6-7]。近几十年来,国外涌现出了许多分布式或半分布式流域水文模型,例如 DHSVM 模型^[8-9]、TOPKAPI 模型^[10]、SLURP 模型^[11]等。

1975 年,Hewlett 和 Troenale 提出了森林流域的变源面积模拟模型。在该模型中,地下径流被分层模拟,在坡面上的地表径流被分块模拟。此后,Engman 和 Rogowski 提出了一个能够明确说明径流参数空间变化的径流模拟方法,方法中利用了局部产流面积的概念。1979 年,Beven 和 Kirbby 提出了以变源产流为基础的 Topography based hydrological MODEL (TOPMODEL)^[12]。该模型基于 DEM 推求地形指数,并利用地形指数来反映地形空间变化对流域水文循环过程的影响,模型的参数具有物理意义,能用于无资料流域的产汇流计算。但

TOPMODEL并未考虑降水、蒸发、植被、土壤等因素的空间分布对流域产汇流的影响,因此它不是严格意义上的分布式水文模型。

Institute of Hydrology Distributed Model (IHDM) 是 1980 年英国的 Morris 提出的起步较早的分布式水文物理模型^[13-14]。Beven 等(1987)和 Calver(1988,1995)对 IHDM 进行了改进。1985 年,美国农业部农业研究中心的 Alonso 和 Decoursey 考虑到土地利用与管理将会影响到一个小流域的水文循环与化学循环,设计了 SWAM (Small Watershed Model)^[11]。在美国,一个比较典型的分布式模型是由美国工程师兵团所研制的 CAS-2D 模型^[15];ANSWERS 模型(Beasley 等,1980;Silburn 和 Connolly,1995;Connolly 等,1997)来源于 Huggins 和 Monke(1968)研制的第一个基于网格的分布式模型,该模型只考虑超渗产流机制,利用 Green-Ampt 下渗方程计算每个网格单元上的超渗雨量;Bronstert 和 Plate(1997)提出的基于网格的三维 HILLFLOW 模型应用模糊规则方法来求解 Richards 方程。

1994 年,Jeff Arnold 为美国农业部(USDA)农业研发中心(ARS)开发了 SWAT 模型(Soil and Water Assessment Tool)^[16-21]。SWAT 模型是一个具有很强物理机制、长时段的流域水文模型。它能够利用 GIS 和 RS 提供的空间信息,模拟流域中多种不同水文物理过程。模型可采用多种方法将流域离散化(一般基于 DEM),能够响应降水、蒸发等气候因素和下垫面因素的空间变化以及人类活动对流域水文循环的影响,但是该模型对资料要求比较严格,所以在我国大的流域应用并不多。此外,THALES 模型(Grayson,1995)是一个基于矢量高程数据的分布参数模型,与 TOPOG 模型相似。此外,USGS 模型(Dawdy 等,1970,1978)、WATFLOOD 模型(Kouwen 等,1993,2000)、SLURP 模型(Kite,1995)、PRM 模型(Leavesley 等,1990)^[22-24]等都属于分布式水文模型的范畴。

1.2.1.2 国内分布式水文模型研究进展

国内分布式水文模型发展较晚。1995 年,沈晓东等^[16]提出了一种在 GIS 支持下的动态分布式降雨径流流域模型;1997 年,李兰等^[17]提出了基于分布式模型的水文动态分布参数反演算法和分布式实时校

正技术,并将其研制成 LL - I、LL - II、LL - III 分布式水文模型。

2000 年以后是我国分布式水文模型迅速发展的时期。2000 年,熊立华等提出一种基于 DEM 的分布式流域水文模型,该模型详细描述了网格单元的截留、蒸散发、下渗、地表径流等水文物理过程,在每一个网格上用地形高程来建立地表径流之间的关系。该模型应用于美国缅因州 BMW 流域检验模型的结构和精度,效果比概念性模型略有提高^[18]。2000 年,郭生练等建立了一个基于 DEM 的分布式流域水文物理模型,用来模拟小流域的降雨径流时空变化过程。任立良等也进行了流域数字水文模型(分布式新安江模型)研究,并基于 DEM 考虑流域空间的变异性,建立数字高程流域水系模型^[19]。

此后,清华大学杨大文等应用分布式水文模型(GBHM)于黄河流域研究水资源的定量化评估^[20];中国水利水电科学研究院贾仰文、王浩等应用分布式水文模型(WEP)于黄河流域研究水资源演变规律和黑河流域水资源调配^[21];中国科学院大气物理所谢正辉研究员改进了 VIC 分布式水文模型,开展了区域气候模式与陆面模式的耦合研究^[22];2002 年,夏军^[23]建立了基于 DEM 的分布式变增益水文模型(DTVGM)。此外,王中根,刘昌明等都对分布式水文模型做过相应的研究^[25-30]。以上分布式水文模型都是具有一定物理基础的分布参数水文模型,由于水文过程的复杂性、下垫面的多变性以及人类对水文过程的认识程度的限制,目前还无法构建一个完全描述实际水文物理过程的严格意义上的分布式水文模型,因此可以说目前所说的分布式水文模型中分布的概念都是相对于集总式水文模型的集总的概念而言的。

1.2.2 水土保持措施减水减沙效应研究进展

1.2.2.1 水土保持措施减水效应研究

目前,国内对水土保持措施对流域径流影响的研究中,以坡面试验观测进行对比分析为主,主要有集水区对比分析和时间序列对比分析两种。集水区对比分析即通过选择两个集水面积、河道比降、地貌、植被、土壤和气候等因素基本一致的相邻区域,一个采取水土保持措施一

个不采取水土保持措施,然后同时进行降水和径流等要素的观测。时间序列对比分析法是指用同一流域相同水文站长期观测资料,通过分析实施水土保持措施前后水文要素的变化,研究水土保持措施对流域径流的影响。除对比分析方法外,也有人用模拟分析的方法进行了相关的研究。

模拟分析法主要包括成因分析法、经验模型法及机理模型法三种。

①成因分析法也叫水保法,是根据径流形成及其影响因素的关系,分析计算各项措施对径流的影响。②经验模型就是通过对实测水沙资料的统计分析,建立降雨径流、降雨输沙或径流输沙之间的一个或若干个量的相关关系,并利用这些相关关系计算某一时期治理流域在天然状态下的产流产沙量,与同一时期实测径流泥沙量相比,求得水土保持减水减沙效益的方法,也称水文法。③机理模型主要分为集总式模型和分布式模型两种。

1. 集水区对比分析研究

邵云在辽西对人工沙棘林水土保持效益的研究表明^[31],1985~1986年12次降水观测中,5~7年生沙棘林未产生径流,较对照荒坡年均减少径流 $40\,388.9\text{ m}^3/\text{km}^2$,减少泥沙 $1\,001.8\text{ t}/\text{km}^2$ 。秦永胜、余新晓等^[32]利用流域对比法研究了北京密云水库森林对地表径流的影响,研究表明刺槐人工林对地表径流的削减率为 $10.63\%\sim 83.04\%$ 。左长清、马良^[33]在江西德安县水土保持实验站对不同的下垫面小区进行了观测,观测结果表明裸露小区年产流系数是其他水土保持措施小区平均产流系数的1.7倍。集水区对比分析法是目前较为普遍的研究方法,但实际运用中确会遇到很多困难和缺点。首先是选择两个完全相同的集水区是不现实的,其次集水区对比研究的方法在应用上会给研究增加很大的人力、物力和财力负担。

2. 时间序列对比分析研究

朱岐武、樊万辉等^[34]对皇甫川流域进行了研究,研究表明20世纪80年代、90年代梯田、坝地使该流域径流减少量分别为 18.3% 、 16.1% 及 34.8% 、 36.57% 。但是这种分析方法受到其他因素的影响较为严重,在不同的时间段进行观测,观测结果的差异不仅仅是水土保

持措施的影响,还有降水等其他因素的影响。如何将这些因素的影响剔除从而比较精确地计算出水土保持措施的影响是有一定难度的。

3. 成因分析法

刘斌、冉大川等^[35]在北洛河流域运用成因分析法进行了水土保持措施减水减沙作用分析,研究表明 1970 ~ 1979 年最多减少洪水量达到 25.6%。但是运用成因分析法在进行空间转换(由径流小区得到的指标运用到大流域甚至整个流域)时,就会暴露该方法不能分析水文过程的缺陷。由径流小区分析的径流仅仅是地表径流的变化,实际上采取水土保持措施以后改变了降水在地表的分配过程,有一部分降水渗入地下形成地下径流,而成因分析法不能分析措施空间配置对地下径流的影响。

4. 经验模型法

降雨产流的统计模型属于经验模型,其建立主要依靠概率统计理论和方法,因此也称为统计模型。最早的降水径流量关系经验模型可以追溯到 17 世纪法国学者 Perrault 和 Marriotte 在塞纳河流域建立的经验关系式^[36],从降水到河川径流的形成是一个非常复杂的物理过程,当我们无须对其过程进行深究,目的主要是探究这一过程的输入与输出即降水与径流之间的数量关系时,应用经验模型在实践上都是可行的。

用经验模型法研究水土保持对径流影响的工作步骤是:首先确定水土流失综合治理对径流量明显发生作用的临界年份,然后把流域降水径流量按年序分为影响前和影响后两个时段。再利用影响前的降水量和径流量资料,通过概率统计方法建立未治理时期(或未发生显著影响时期)降水产流经验模型,并以该模型作为“天然”降水产流模型。将治理后时段的降水条件代入模型中,求得相当于“天然”条件下的产流量。比较实测径流量与模拟计算的“天然”产流量,即可求得综合治理对河川径流量的影响。显然,这种方法的重点在于建立“治理前”降水产流经验模型。由于人们对降水产流规律认识的差异,建立了不同类型的降水产流经验模型,主要包括以降水量为主的流域降水径流模型和以降雨强度为主的流域降水径流模型两种。

以降水量为主的流域降水径流模型主要有线性模型和幂函数模型两种。这类模型是黄土高原目前应用最为广泛的模型。实践证明,线性回归模型表示年径流量与降水量之间的关系效果较好^[37]。建立和应用合理回归模型的关键是自变量指标的选择。在水利部水沙二期基金项目中,研究者分别建立了河口—龙门区间 21 条一级支流降水径流模型,在这些模型中,降水量指标主要有年降水量、典型月降水量、典型时段降水量(如最大 7 d、最大 10 d、最大 30 d)、有效降水量(大于某一临界降水量的累积降水量)等,但主要因素是年降水量或汛期降水量^[38]。径流量大小还受前期降水量的影响,因此在建立降水产流模型时,应该考虑下垫面湿润程度对产流的影响^[39]。由于降水空间分布的不均匀性,建立黄土高原降水产流模型时如何确定流域面平均雨量仍是一个值得研究的问题。除常用的泰森多边形法、算术平均法外,还有人根据雨强—历时曲线来计算面平均降水量^[40]。有人认为,次降水径流主要与降雨强度、降水量和前期土壤含水量等因素有关。通过分析降水、入渗、产流的物理过程,发现只有当降雨强度超过土壤入渗速率时才可能产生径流^[41],在建立降水产流模型时可以忽略不产流时段的降水,因而提出“有效雨强”和“有效雨量”的概念。把产流历时内的雨量和平均雨强称为有效雨量和有效雨强,从而形成了以有效雨量及有效雨强为自变量的降水产流模型。分析表明:在降水开始和结束时,小于 0.2 mm/min 雨强的降雨不产流,故这两部分降水对产流的作用可以忽略,仅取中间时段内的雨强作为有效雨强。降水量小于 9 mm 时也不产流或产流量很少,故也不予统计。因此,在统计暴雨资料时要遵循两个原则:①次暴雨量 ≥ 9 mm;②去掉降水开始和结束时小于 0.2 mm/min 的低强度降雨,取中间的部分计算有效降水量和有效雨强。王向东^[42]对皇甫川的研究也建立了类似结构降水产流的模型。

总体而言,基于有效雨量和有效雨强的降水产流模型较为科学合理,应用效果也好。但计算烦琐,模型不便推广。有效雨强和有效雨量的确定方法和指标值很不一致,仍有待进一步深入研究。

年径流量不仅与汛期雨量有关,而且还与非汛期降水量及降水的集中程度有关。因此,张经之^[43]提出了反映年内降水分布特征的流域

降水产流模型。该模型由于考虑了年内不同时期降水对径流的影响差异,将汛期降水和非汛期降水对产流的影响分开处理,概念明确,所采用的资料也容易获得,模型便于推广。

徐雨清^[44]利用遥感和地理信息系统提取集水区边界、水系网络、集水区地形特征(坡度、坡向、植被指数、降水等)指标,建立了黄河支流祖厉河及苑川河流域的平均降水径流模型。

经验模型是以实测资料和概率统计方法建立起来的,模型结构相对简单,使用方便并且也能达到一定的精度,在生产和实践中得到了广泛应用。但这类模型的不足之处在于:

(1)缺乏物理基础,外延效果差,不便于模型在不同流域或地区间的移用。

(2)仅给出最终结果,并不能模拟水土保持对降水产流过程的影响。

(3)目前都是假设临界年份(如1970年)前时段为未治理时期即认为此时段水土保持措施影响为零来建立降水产流经验模型,但这一时期水土流失的治理是存在的。

(4)不能分离水土保持措施对降水产流量的影响。因此,需要探讨更加科学、合理地充分反映水土保持措施作用的流域降水产流模型。

5. 机理模型法

现代水科学研究更为迫切地需要与数学、计算机科学、信息科学等的融合。流域水文、遥感及核示踪等新的测定技术和GIS数据管理技术的应用和计算机运算能力的提高,极大地推动了水科学研究从点到面、从定性到定量、从单一到综合的发展,并使大中尺度的水文生态过程模拟研究成为现实。尽管对某一水文事件或水文要素的模拟研究已有近百年的历史,但一般认为最早的流域水文模型是1967年开发的Stanford模型^[45,47]。因此,流域水文模拟是研究水文过程的一种新技术。水文模拟是通过把一些经验规律加以物理解释,用简化的数学公式表达出来,再把各个水文过程综合起来,形成全流域水量平衡计算系统即模型,然后通过计算机模拟运算来实现水文过程的模拟输出。相对于经验模型,流域水文物理模型描述了从降雨到径流的形成过程,因