

黄金柏 温佳伟 王斌 著

流域水文过程数值解析

——以黄土高原北部六道沟流域为例



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

黄金柏 温佳伟 王斌 著

流域水文过程数值解析

——以黄土高原北部六道沟流域为例



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书以黄土高原北部的六道沟流域为研究区,从揭示流域水文过程的角度出发,基于观测的水文、气象数据以及模型计算结果,以数值解析的方法对试验流域的降雨特征、产流机制、径流特点及径流系数,蒸散发与水分有效性的季节性变化,地下水变动特点及作物根系吸水特性,年水平衡及月水收支,淤地坝对水文过程的影响等一系列水文要素及水文过程进行了研究。

本书可供从事水文水资源、水土保持、工程水文学以及相关专业研究领域的科技人员,高等学校教师及研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

流域水文过程数值解析 : 以黄土高原北部六道沟流域为例 / 黄金柏, 温佳伟, 王斌著. — 北京 : 中国水利水电出版社, 2013.3

ISBN 978-7-5170-0726-5

I. ①流… II. ①黄… ②温… ③王… III. ①黄土高原—流域—陆面过程—水文计算—计算方法—神木县
IV. ①P339

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第063538号

书 名	流域水文过程数值解析 ——以黄土高原北部六道沟流域为例
作 者	黄金柏 温佳伟 王斌 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 (发行部)
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	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	175mm×245mm 16开本 10.5印张 206千字
版 次	2013年3月第1版 2013年3月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	29.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

水是生命之源，是人类赖以生存和发展的物质基础，也是生态环境的控制因素之一。我国是一个干旱缺水严重的国家。我国的淡水资源总量为 $2.8 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，占全球淡水资源的 6%，居世界第 4 位。但是，我国的人均水资源量只有 $2.3 \times 10^3 \text{m}^3$ ，仅为世界平均水平的 1/4，是全球人均水资源最贫乏的国家之一。在某些地区，水资源缺乏对农业和国民经济的稳定发展以及环境、人类的健康都产生了严重的影响。

由于水文循环的无限性，人们以为水资源是“取之不尽，用之不竭”，常常忽视了对水资源的节约使用和保护。随着人口的增加和经济的发展，人类对水资源开采程度和破坏程度不断加剧，水文循环受到严重的扰动，水资源自然循环的途径和通量也正在发生改变，其可再生能力也遭到不同程度的影响，从而导致一系列水资源、水环境问题，如水资源短缺、河道断流、水质污染等现象。水资源问题已成为世界关注的焦点之一。

我国的干旱、半干旱地区的总面积约占全国总面积的一半。黄土高原是一个广阔的半干旱区，气候变化与人类不合理的生产活动导致黄土高原地区环境破坏和生态退化问题日益严峻。特别是处于黄土高原北部的水蚀风蚀交错地区，严酷的气候条件和人为因素的影响，导致该地区生态环境极其脆弱，加之近年来气候不断变暖，使该地区沙漠化风险加剧。如何防止土地沙漠化已成为黄土高原地区一个重要的研究课题。

流域作为基本的水文单元，是水资源研究、利用和管理的对象。流域水资源不仅是基础性自然资源，也是国家资源安全体系中最重要和最核心的安全问题。水科学研究的发展，对水文科学提出了新的挑战，即如何在流域、区域尺度下更全面地认识水文循环和水量平衡各分量之间的变化和转化关系及其与生态和环境之间的相互作用，以及对气候变化和人类活动的响应和反馈，是流域、区域水文学需要研究的重点问题。

本书以中日合作科研项目“中国内陆部沙漠化防止及其开发利用”(课题的主持单位:中国科学院水利部水土保持研究所,日本文部科学省学术振兴会国际支援机构据点大学,2001~2010年)第一课题组的研究开展为契机,以黄土高原北部六道沟流域为研究区,从流域尺度上对水文过程及水平衡问题进行了研究,希望为黄土高原北部地区开展水资源问题的深入研究提供基础数据,希望为以流域位单元开展水文水资源领域的研究提供方法上的借鉴,也希望本书中提及的有些研究方法和思路能为广大水科学研究领域的学者起到参考作用。

全书共分9章,第1章介绍了研究的背景、研究的意义以及国内外同一研究领域的研究现状和发展趋势分析。第2章介绍了试验流域的基本情况以及水文、气象观测的方法。第3章利用观测的降雨数据,对降雨的主要特征因子如雨强、降雨历时及降雨量进行了分析。第4章以对观测水文数据的综合分析,揭示了试验流域的产流机制以及降雨主要因子与径流系数的关系,概括了径流的主要特征。第5章按次序主要介绍了:①基于GIS技术结合运动波理论基础方程式开发分布式流域降雨—径流数值模型的一般方法;②基于实际调查构建试验流域水文地质模型的过程;③以试验流域为对象,开发分布式降雨—径流数值模型的过程,包括河网构建、算法建立、参数率定、数值模拟以及模型效率检验;④基于对模型计算结果的分析准确地推求了2005~2009年试验流域的径流系数,以及近似地推求了试验流域所在地区的多年平均径流系数。第6章主要介绍了利用观测的气象数据,以彭曼—蒙蒂斯公式(Penman-Monteith method)计算试验流域草地蒸散发(ET),以彭曼公式(Penman method)计算试验流域参考作物的蒸散发(ET_0)以及水分有效性参数[草地蒸散发与参考作物蒸散发的比值 $m_a(ET/ET_0)$]的季节性变化特征。第7章以对观测地下水数据的分析,概括了试验流域地下水位的短期、长期变动特性,以对气象数据和地下水位数据的综合分析,揭示了作物(灌木)根系吸水的特点以及与气象因子(太阳辐射量和温度)的关系。第8章基于对观测的水文、气象数据以及降雨—径流数值计算结果的综合分析,推求了年水平衡与月水收支的各水文要

素的值,建立了试验流域年水平衡与月水收支的结果索引。第9章以淤地坝系统为例,开发了区域性水文循环数值计算模型,基于对淤地坝系统2006年数值计算结果的分析,概括了淤地坝系统对流域水文过程再分布的影响。

在本书的撰写过程中,参阅和借鉴了大量学术论文及相关学科的专业书籍,在此向各位作者表示诚挚的谢意。本书作者衷心地感谢中国科学院水利部水土保持研究所张兴昌研究员、李世清研究员、郑纪勇博士、樊军博士等人在黄土高原六道沟流域开展实际调查和水文、气象观测过程中给予的长期热心的支持和帮助;感谢日本鸟取大学大学院工学研究科桧谷治教授、梶川勇树博士,鸟取大学干旱地研究中心安田裕博士、木村玲二博士在于本书所述有关的科研工作开展过程中给予的指导、合作及帮助;感谢东北农业大学水利与建筑学院付强教授等人在本书编写过程中提供的有益的建议和热心的支持。

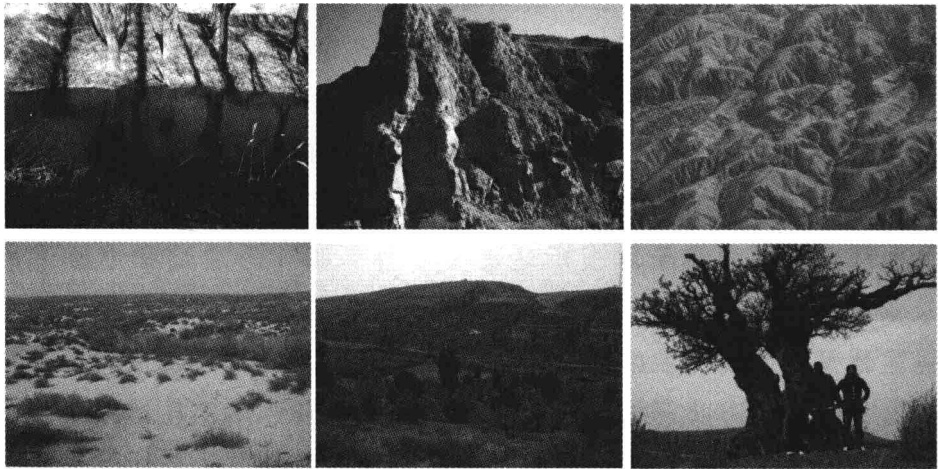
本书编者感谢以下基金项目对本书有关科研活动开展过程中以及本书出版过程中的联合资助。①中日合作项目“中国内陆部沙漠化防止及其开发利用”项目基金(基金提供单位:中国科学院水利部水土保持研究所、日本文部科学省学术振兴会国际支援机构);②中国博士后科学基金海外学人项目(中国博士后编号:87328);③国家自然科学基金项目“耦合融雪的分布式流域降雨—径流过程数值模型的研究”(No. 41271046);④黑龙江省博士后科研启动项目“流域水文循环数值解析方法的研究及应用”(黑龙江省博士后编号:LRB10-170);⑤黑龙江省教育厅海外学人科研项目“黑龙江省西部半干旱区降雨—径流数值解析方法的研究”(No. 1251H017);⑥东北农业大学科学技术基金项目“流域地表径流数值解析方法的开发与应用”(No. 115-180152)。

本书是以数值解析的方法对流域水文过程研究的一次大胆尝试,流域水文过程数值解析涉及水文学、气象学、土壤学、生态学、社会学等多门学科的知识,需要研究的内容有很多。由于作者的科研水平和能力所限,以及基础数据积累相对不足,本书仅对所选试验流域的水文过程和水文循环的研究进行了一些探索,书中所提观点、研究思路和研究方

法的不足之处在所难免，敬请同行专家和广大读者多提宝贵意见，我们将在今后的科研工作中加以改进。

著者

2012 年 7 月



目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 研究的背景	1
1.2 研究的意义	3
1.3 国内外研究现状及发展动态分析	6
参考文献	11
第2章 研究区概况及野外观测	18
2.1 研究区概况	18
2.2 野外观测	21
参考文献	24
第3章 降雨特征分析	26
3.1 绪论	26
3.2 材料和方法	27
3.3 结果及讨论	27
3.4 结论	37
参考文献	37
第4章 产流机制及地表径流的主要特征	40
4.1 绪论	40
4.2 不规则断面流量计算	42
4.3 产流机制	46
4.4 降雨强度与产流的关系	48
4.5 结论	54
参考文献	55
第5章 降雨—径流数值模型	57
5.1 绪论	57
5.2 河网构建	59
5.3 水文地质模型	65

5.4 数值计算方法	66
5.5 数值计算	78
5.6 总结	82
参考文献	82
第6章 蒸散发及水分有效性	85
6.1 绪论	85
6.2 蒸散发计算	87
6.3 水分有效性	95
6.4 结论	97
参考文献	97
第7章 地下水变动特性	100
7.1 绪论	100
7.2 地下水变动特性	101
7.3 植物的吸水特性	108
7.4 小结	111
参考文献	112
第8章 年水平衡及月水收支	114
8.1 绪论	114
8.2 年水平衡分析	115
8.3 月水收支分析	121
8.4 小结	130
参考文献	130
第9章 区域性水文循环——黄土高原淤地坝系统对水资源再分布的影响	132
9.1 绪论	132
9.2 沟壑—淤地坝区域地形	133
9.3 淤地坝系统概况	134
9.4 淤地坝系统水收支数值计算模型	136
9.5 数值计算	146
9.6 淤地坝系统对水文要素再分布的影响	153
9.7 小结	155
参考文献	155
相关论文	159

第1章 绪 论

1.1 研究的背景

水是人类社会赖以生存和发展不可替代的资源，是人类社会可持续发展的基本条件之一^[1]。据水文地理学家的估算，地球上的水资源总量约 $1.38 \times 10^9 \text{ km}^3$ ，其中 97% 是海水，淡水只占 2.5%，而且淡水资源绝大部分为极地冰雪冰川和地下水，适宜人类利用的仅为 0.01%。20 世纪 50 年代以后，全球人口急剧增长，工业发展迅速。一方面，人类对水资源的需求量以惊人的速度扩大；另一方面，日益严重的水污染蚕食大量的可利用水资源。水资源短缺和水环境恶化已经成为全球性问题^[2]。联合国 1997 年对全球淡水资源的综合评估中预测：到 2025 年，世界三分之二的人口将生活在有水资源压力下的国家^[3]。全球日益增长的人口需要粮食生产不断增加，而粮食生产量的增加将导致很多国家和地区缺水程度加剧^[4]。日益增加的温室气体浓度会影响到河流的流量以及地下水的补给，从而引起缺水并因此影响缺水条件下生存的人的数量及分布^[5]。气候变化将影响降雨、蒸发的模式，并间接地影响各地的可用水资源，河流的流量以及季节性可利用水资源的供应^[6]。水资源是全球变化和全球化的一个组成部分，水资源与其他的生态及社会系统相互依存的关系存在所有的空间尺度^[7]。

中国水资源系统对气候变化的承受能力十分脆弱^[8,9]。多数河流的径流对大气降水变化非常敏感。同时由于我国人口众多，经济发展迅速，耗水量不断增加，许多地区面临着水资源短缺问题；基础设施的建设和社会经济的快速发展也使洪水、干旱造成的经济损失日益增大^[10]。未来的气候将继续变化，自然的年际、年代际气候波动永无停息。人类活动引起的全球气候变化也必须考虑^[11-13]。伴随气候平均态的变化，极端气候事件如强降水和干旱事件的频率可能发生变化。未来全球气候变化可能改变大气降水的空间分布和时间变异特性，改变水资源空间配置状态，加剧中国部分流域的水资源供给压力^[14,15]，直接影响到水资源稀缺地区的可持续发展。

干旱是对人类社会影响最严重的气候灾害之一^[16]，是全球气候变化过程中，区域水资源配置与经济社会发展需求不均衡而造成的水分亏缺。而近年来，全球气候暖干化趋势和社会经济的发展加剧了区域水资源配置的矛盾，使得干旱问题更加

突出^[17]。干旱地约占世界陆地面积的二分之一。干旱地最重要的环境问题是土地沙漠化^[18]。联合国环境计划 (United Nations Environmental Programme, UNEP) 和新千年生态系统评价 [Millennium Ecosystem Assessment: MA, MA (2005)] 利用干旱度指数 (Aridity Index: AI) 对干旱地进行了定义和划分, 干旱度指数是某地区的年降雨量与潜在蒸散发量之比。极干旱地的干旱度指数小于 0.05, 干旱地的干旱度指数为 0.05~0.20, 半干旱地的干旱度指数为 0.20~0.50, 半干旱半湿润地区为 0.50~0.65^[19]。

中国黄土高原地区是指太行山以西、日月山—贺兰山以东、秦岭以北、阴山以南的地区, 包括山西、陕西、甘肃、内蒙古、青海和河南的部分地区 (面积: $6.268 \times 10^5 \text{ km}^2$; 东经 $110^\circ \sim 115^\circ$, 北纬: $34^\circ \sim 40^\circ$) 是世界上水土流失最严重的地区之一, 其水土流失面积超过总面积的 60%^[20-22]。黄土高原是华夏文明的发祥地, 是我国半湿润气候区向半干旱和干旱气候区的过渡带, 这里既是气候变化的敏感区, 又是环境脆弱区。该区域是雨养农业区, 农牧业生产对气候条件的依赖性很强。在全球气候变化条件下, 开展黄土高原地区区域适应研究势在必行。在全球增温的背景下, 黄土高原增温现象明显。同时, 干旱化趋势也逐渐增强^[23,24]。黄土高原深入我国大陆内部, 距海较远, 大陆性季风气候特征明显。冬季寒冷干燥, 雨雪稀少; 夏季炎热潮湿, 雨水较多, 大部分属于干旱半干旱地区。干燥度由东南向西北逐渐增高^[25]。同时黄土高原西北部临近大陆干旱气候区, 受到沙漠化的严重威胁, 其土地沙化问题在世界范围内也被广泛地关注^[26-28]。黄土高原的年降雨量为 300~650mm 并且从东南向西北方向逐渐减少, 超过 60% 的降雨集中在雨季并多以暴雨形式发生。随着全球气候变暖, 黄土高原地区沙漠化风险逐渐升高^[29-31]。

黄土高原的生态环境历来是人们关注的焦点。距今 2000 年以来, 黄土高原的生态环境在人类的直接参与下, 发生了根本性变化。总的状况是, 人类活动所引起的自然环境变化与自然地理要素自身固有的变化相互叠加、相互影响, 使得人类历史时期自然环境之影响因素、作用机理及变化结果变得更为复杂, 而且具有一些明显不同于地质时期的特性^[32]。这些自然条件和社会条件中的某一些要素发生变化都可能引起区域环境条件的变化。自然条件来自两个方面, 一是自然界本身有关要素的变化; 另一种是受人类经济活动影响导致周围自然条件变化。无论是自然还是社会要素变化引起周围环境的变化都可能产生两种后果: 一种使环境变得越来越好, 另一种使环境恶化, 黄土高原生态环境变化的总趋势属于后一种情况。近几年, 沙尘暴的频繁肆虐、水土流失的加剧、降雨量的不断减少、再次引发了人们对黄土高原生态环境恶化的深刻思考^[33]。随着我国西部开发战略的实施, 改善黄土高原地区生态环境已成为亟待解决的问题^[34]。

水是生态环境的重要组成部分，也是制约黄土高原生态、经济、社会发展的重要限制因子^[35]。黄土高原复杂多变的地形条件与干旱缺水，给植树种草带来很大难度。长期以来，该地区有效防护植被只占国土面积的 5.6%，水土流失难以控制。生态环境建设的成败在于解决好水的问题。无论是基本农田实现稳产高产，还是调整农村产业结构，发展经济林果、畜牧业、退耕还草（林），最终都涉及水的问题。增加植被覆盖被认为是抵抗土地沙化的有效手段，而可利用水资源是实现植被恢复的必要条件^[36]。黄土高原水资源受降雨量的影响决定了黄土高原的水资源整体不足，故必须采取相应措施，如改良土壤结构、增加植被覆盖率，实现对天然降水性质的改变，使更多的地表水资源为植物和土壤所含蓄，促进降水、地表水和地下水资源的良性循环和相互转化，增加补给量^[37]。水，成为制约黄土高原植被恢复的关键自然因素^[38]。

1.2 研究 的 意义

1.2.1 为黄土高原水蚀风蚀交错区水资源承载力的评估提供基础数据

水资源承载力是指在区域社会、经济和环境可持续发展前提下，根据一定的经济技术水平和社会生产条件，水资源天然产出量的允许开发水量维持的人口、社会经济发展能力^[39-41]。它是一个具有自然—社会双重属性的概念，既反映了水资源系统满足社会经济系统的能力，也与社会经济系统开发自然水资源系统的深度有关，涉及到社会、经济、技术和生态；具有动态性、地区性、相对极限性和模糊性等特点^[42-44]。目前，国外大多将水资源承载力纳入可持续发展理论中^[45,46]，国内研究主要集中在城市水资源承载力和区（流）域水资源承载力两个方面^[47,48]。对区域性水资源农业、生态承载力的研究已成为水科学研究领域的一个热点^[49-51]。国务院在 2012 年 2 月 16 日发布的《关于实行最严格水资源管理制度的意见（国发〔2012〕3 号）》中明确规定：“要严格规划管理和水资源论证”，“开发利用水资源，应当符合主体功能区的要求，按照流域和区域统一制定规划，充分发挥水资源的多种功能和综合效益”。

对黄土高原土壤侵蚀区域特征的研究表明，强烈的土壤侵蚀不是发生在年降雨量最多的水蚀地区，而是发生在年降雨量为 400mm 左右的水蚀风蚀交错地区。黄土高原水蚀风蚀交错带位于北纬 $35^{\circ}20' \sim 40^{\circ}10'$ ，东经 $103^{\circ}33' \sim 113^{\circ}53'$ ，海拔 700 ~ 2955m。其范围大致自水蚀地区北部的神池、灵武、兴县、绥德、吴旗、庆阳、固原、定西、东乡一线以北，到风蚀地区长城沿线以南一带。本区属半干旱草原地带，年降水量为 250~450mm，气候变化剧烈，植被稀疏，地形和产沙地层复杂，风沙地貌和流水侵蚀地貌交错分布，水蚀、风蚀发展强烈，且全年交替进行，相互

促进,形成了水蚀风蚀交错的特殊地区,加之人为不合理的开垦和放牧,致使生态环境极为脆弱^[52,53]。尤其是处于陕西、山西和内蒙古的三角地带,由于长期受到水蚀风蚀交错侵蚀的影响,成为黄土高原生态环境退化严重,土地沙漠化风险性最高的地区之一^[54]。

增加植被是抵抗土地荒漠化的有效手段,而可利用水资源是保证植被增加的一个必要条件。在季节性水资源相对缺乏的黄土高原水蚀风蚀交错区,如何实现对可利用水资源的准确评估已成为一个亟待解决的课题^[55]。准确评估流域的承载力依赖于对流域可利用水资源的准确推求,传统的水文学在以流域为单元的水资源评估中存在很大的弊端:一是过度依赖长期积累的水文资料,而在很多经济不发达地区或水文观测开展较晚的地区,水文资料常存在阶段性缺失;二是由于相对落后的观测设备及观测手段所限,水文资料过于粗略,可靠性较差,以这样水文资料根本无法实现对流域水资源准确地评估。近年来,基于流域的物理基础,应用描述水文过程的数学方程式开发数值计算模型,从而实现对流域水资源的准确推求,已经成为国内外水文学者及水科学研究领域的科研共识和致力的课题^[56-58]。本书以具有黄土高原水蚀风蚀交错区典型气象和水文特征的流域为研究区,研究各水文要素如降雨、径流、地下水位变动、蒸散发以及土壤水分有效性年变化过程及主要特征,为该地区以流域为单元评估水资源承载力提供基础数据。

1.2.2 为保障黄土高原水蚀风蚀交错区农业和生态的可持续发展提供科学支撑

水,作为干旱地区沙漠化防止及其开发利用的控制因子,如何实现对干旱地区季节性水资源准确计算已成为一个重要的研究课题^[59-61]。在黄土高原水蚀风蚀地区进行植被重建,必须考虑侵蚀逆境下的诸多不利因素,例如,干旱、土地和土壤的退化、生态系统的脆弱性等。水是干旱半干旱地区生态系统的限制因素,影响着生态系统功能、结构及其对环境变化的响应和适应,是目前生态学家关注的重要环境因素^[62]。本区年际、年内气候变化剧烈而严酷,降水丰枯悬殊,暴雨、洪水、干旱、沙暴灾害频繁。降水量的年际分配可相差2~7倍,导致季节性水资源相对缺乏。区内神木县年最小降水量108.6mm,年最大降水量819.1mm。水蚀风蚀区内土壤侵蚀全年都在进行,夏秋以水蚀为主,冬春以风蚀为主。年内降水多集中在6~9月,占全年降水量的70%~80%,且多以暴雨形式发生;春季多大风沙暴,年均沙暴日数在4d以上,最长达15d,4月为峰期^[63]。

水资源是制约黄土高原植被恢复的关键自然因素。黄土高原所处地理位置的过渡性、气候变化的剧烈性、地形的复杂性,表现为强烈的生态与环境的脆弱性^[64,65]。土壤水和生长期降水是该区植被用水的主要来源。黄土高原土壤的特殊性、气候和植被的过渡带特性使人们更加重视植被与水资源的相互影响^[66-68]。黄土高原水蚀风蚀交错区的植被退化严重,生态环境极其脆弱,加之季节性水资源严

重缺乏, 导致在该地区实现生态恢复和农业生产的持续性发展极为困难。本书的研究区为具有黄土高原水蚀风蚀交错区典型气候和水文特征的流域, 在研究水文过程发生的基础之上, 对该区年可利用水资源量进行准确评估, 从而, 可为该区科学开发利用水资源、保障农业生产以及实现生态恢复提供基础数据, 对该地区开展土地荒漠化防止的研究具有重大的理论和现实意义。

1.2.3 为实现流域数字化以及发展水文过程数值模型提供借鉴

数字流域是数字地球的一个重要层次, 它以数字地球为背景, 对真实流域及其一切相关信息的数字化重现与分析, 数字流域的诞生已使目前水文模型研究的重点从流域统计模型转到 GIS 与成熟水文模型相结合的分布式水文模型的研究方面^[69-71]。对流域主要水文过程用数值模型描述, 是实现流域数字化的重要组成部分, 开发高精度的降雨—径流数值模型, 不仅可以准确模拟流域降雨—径流这一基本的水文过程, 并且能够推动流域的数字化进程。

传统水文学对流域水资源的评估由于过度依赖水文资料的积累而允许结果存在较大的误差 (一般小于 20%); 迄今为止的分布式流域降雨—径流过程的数值模型, 多是针对某一选定的流域或规模较小的试验区, 普遍存在通用性不强的特点, 很难在不同地区中小流域尺度之间推广应用^[72-74]。

降雨—径流作为流域一个基本的水文过程, 同时包含入渗和蒸散发, 降雨产生的地表径流和雨水入渗是可利用水资源, 但也会产生洪水而引发自然灾害。开发降雨—径流水文过程的数值计算模型, 不但可以评估流域的年径流量, 而且可通过数值计算准确地推求洪水, 为群众的防灾减灾发布可靠的情报, 减少洪灾对人们生命财产安全的威胁。从流域数字化角度来看, 降雨—径流过程作为流域土壤侵蚀以及污染物迁移转化的原动力, 研发高精度的流域降雨—径流过程数值模型, 可为后续的流域土壤侵蚀、输沙以及非点源污染等过程研究搭建基础的模型平台, 这对于以流域尺度研究完整的水文过程以及非点源污染等过程具有重要的促进意义。

综上, 本书以季节性水资源缺乏问题相对突出的具有黄土高原北部水蚀风蚀交错区典型气候及水文特征的流域为依托, 基于实际的气象、水文观测获取基础数据; 基于对研究区地理条件的实际调查构建水文地质模型; 基于 GIS 技术结合运动波理论基础方程式研发降雨—径流数值模型; 通过对观测的水文数据结合降雨—径流数值计算结果的全面分析, 揭示水蚀风蚀交错区降雨—径流、地下水变化, 蒸散发等水文过程及其特征, 进而, 准确分析研究流域的水文循环过程。本书的研究成果, 可为黄土高原水蚀风蚀交错区以流域为单元对水资源开发潜力的准确评估提供实用的方法, 可为该地区水资源可持续利用等重大水资源决策问题提供科学支撑, 可为实现流域数字化以及发展和应用水文过程数值模型提供借鉴。

1.3 国内外研究现状及发展动态分析

1.3.1 流域水文循环的研究现状

1.3.1.1 基于水文模型研究流域水循环

本书在对试验流域各水文要素分析的基础上,研究黄土高原水蚀风蚀交错区水文循环过程。在以往的对流域水循环的研究中,很多以开发水文模型来实现。1976年在欧洲首先研制出 SHE 模型^[75],该模型综合考虑了蒸散发、植物截留、坡面和河网汇流,土壤非饱和与饱和状态流,融雪径流,地表和地下水交换等水文过程。近年来,流域水文模型得到了飞速发展^[76,77],具有代表性的如河海大学开发的新安江模型。此外,还有学者将流域水文模型应用于对黄河流域产汇流研究与水循环模拟,取得了很大进展^[78-80]。近年来,随着 GIS 在水文模拟中的广泛应用,基于 GIS 的流域水文模型得到飞速发展。GIS 可以为流域水文模型提供详尽的背景环境描述,利用 GIS 工具能够准确地内插得到空间参数,对于模拟中尺度和大尺度流域的水文过程提供了巨大支持^[81,82]。

传统的,以开发水文模型来研究流域的水循环,常常存在着模型尺寸与流域实际规模上的差异,从而带来了水文学上常见的尺度的问题,即所采用的模型在多大范围,多大程度上可以支持流域的实际情况。而且,在实际研究中,必须估计的水文模型的参数大多十几、甚至几十个,少的也有数个参数需估算,从而带来了研究结果上的不准确性和不可靠性。同传统的水文模拟模型相比,基于 GIS 的水文模型,把数值标高模型 (DEM) 作为一个基本的信息来源,再配以遥感资料作为研究对象,虽很大程度上改变了水文模拟中资料多,难以获得的问题,但就目前而言,基于 GIS 流域水文模型大多有很多参数需要确定,需要进行大量实地调查与监测,当前情况下在很多流域仍难以实现,而且,参数的精度会大大影响 GIS 对流域水循环分析的精度。

1.3.1.2 以流域为单元研究水文循环

以流域为单元进行水循环分析的研究有很多。利用水平衡基础方程式 (1-1) 对流域 (区域) 水文循环的研究是一种常见的方法。

$$\Delta W = P - E - R \quad (1-1)$$

式中: ΔW 为蓄水量变化,其值为地表水、土壤水及地下水蓄水量之和; P 为降雨量; E 为蒸发量; R 为流域出口断面总流出量,包括地表径流和地下径流。

在对流域或水域,或流域的某一区域实际的水循环研究中,研究者针对具体的研究实例开发了不同的用于水平衡分析的公式。Winter (1981) 在提出了如式 (1-

2) 的水平衡方程方程式^[83], 该水平衡方程式是在传统的水文学水平衡方程式的基础上, 依据研究区具体的水流入和流出成分而建立的。Emily 等 (2008) 应用此方程式对密西西比三角洲平原地区的水循环进行了研究^[84]。

$$0 \pm \text{Residual} = P - PET + GW_{in} - GW_{out} + SW_{in} - SW_{out} \pm S \quad (1-2)$$

式中: *Residual* 为剩余水量; *P* 为降雨量; *PET* 为潜在蒸发量; *GW_{in}* 为地下水流入量; *GW_{out}* 为地下水流出量; *SW_{in}* 为地表流入量; *SW_{out}* 为地表流出量; *S* 为蓄水量变化。

Louis, H. Motz. 等 (2001) 对美国佛罗里达州洛利湖的水循环研究中提出了如式 (1-3) 所示的水平衡公式^[85]。

$$\Delta S = (P + I_s + R + I_g) - (E + Q_s + Q_g + L) \quad (1-3)$$

式中: ΔS 为蓄水量变化; *P* 为降雨量; *I_s* 为地表流入量; *I_g* 为地下流入量; *R* 为地表直接入湖量; *E* 为蒸发量; *Q_s* 为地表流出量; *Q_g* 为地下水流出量; *L* 为垂直方向上的渗漏量。

在近年的一些研究中, 在考虑流域实际的用水情况下, 居民的生活用水量也被考虑到水循环当中^[61,86]。在我国, 运用基础的水文学水平衡方程探讨流域水平衡的研究也很多, 如于伟东 (2008)、朱新军等 (2008) 对海河流域的水平衡进行了分析^[87,88]。

以流域为研究对象来探讨水循环问题, 需要大量的水文资料支撑。在实际问题的研究中, 常因为存在两个难以解决的问题而影响对水循环分析的准确性。一是对地表流径流量的准确推求或计算难以实现; 二是由于植被的多样性, 蒸散发的推求结果往往与实际存在较大的误差。

1.3.2 分布式流域水文模型的研究现状及发展动态分析

1.3.2.1 分布式流域水文模型研究概况

本书以构建试验流域的降雨—径流数值模型实现对地表径流的准确推求。有关水文模型研究的历史较长, 水文模型是水文学发展的产物, 现代水文模型出现于水文学兴起的 20 世纪 30 年代^[89]。在 20 世纪 50 年代以前, 水文模拟通常是针对某个水文环节进行的^[72]。在计算机技术被引入到水文学研究领域后, 人们开始把水循环的整体过程作为一个完整的系统来研究, 并在 50 年代后期提出了“流域模型”的概念^[90]。分布式水文模型的概念是由 Freeze 和 Harlan 在 1969 年最初提出的^[75]。其后, 分布式水文模型被不断研究与发展, 有代表性的如欧洲学者在 20 世纪 80 年代初期开发的 SHE 模型 (System Hydrologic European)^[91], 美国农业部农业局开发的 SWAT (Soil and Water Assessment Tool), 不规则三角形节面模型 (Irregular triangular facets)^[92]等, 这些模型被广泛地应用于流域的河网汇流、土

壤水分模拟及计算、融雪径流、地表和地下水交换、流域水文循环等水文过程的研究。

分布式水文模型最基本的特征是根据流域各处气候信息和下垫面特性要素信息的不同,将流域划分为若干个单元,在每一个单元上用一组参数反映其流域特征,具有从机理上考虑降水和下垫面条件空间分布不均匀对流域降雨径流形成影响的功能^[93]。分布式水文模型能够详细地反映出水文要素在时间和空间上的变化^[72],能够在下垫面情况发生变化的条件下进行水文过程的模拟计算,特别是它具有强大的模拟功能,从而能够把单一水量变化的模拟扩展到更加广泛的水文水资源相关问题的模拟中^[94]。

1.3.2.2 分布式水文模型发展动态分析

近年来,随着3S技术(地理信息系统GIS、全球定位系统GPS、卫星遥感技术RS)在水文研究中的不断应用,使分布式水文模型的相关参数多数可利用卫星遥感资料通过空间分析技术确定,因此不需要应用大量的历史资料率定模型参数^[95],特别是GIS技术的应用,迅速地推动了分布式水文模型成为水文领域研究的热点,以流域为单元的水文研究不断发展并在国内外水文研究中受到广泛的重视。

在国外,GIS技术应用于分布式流域水文研究开展的较早,研究事例有很多,涉及的研究领域也很广。如应用实时洪水预测的水文模型(W. Al-Sabhan, et al. 2003)^[96],用于大规模的水平衡分析模型(B. F. Alemaw and T. R. Chaoka, 2003)^[97],用于区域性分布式灌溉用水需求的模型(Sudheer R. Satti and Jennifer M. Jacobs, 2004)^[98],用于降雨—径流过程计算数值模型的研究^[99]等。

在我国,虽然对分布式流域模型的研究开展的较晚,但是发展很快,如以GIS技术结合分布式流域模型概念在水文研究中的应用性研究;万超等(2003)结合GIS技术将分布式流域模型用于潘家口水库面源污染负荷计算的研究^[100];黄金柏等(2008)以GIS技术结合地表径流的连续方程式及运动方程式开发了适用于黄土高原小流域的“降雨—径流”过程数值计算模型^[101];杨菁荟等(2009)论述了SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型应用于水环境非点源污染研究的几个主要方面和国内外研究新进展,分析了国内应用SWAT模型进行水环境非点源污染研究存在的问题^[102];许继军等(2010)利用数字高程、气象水文、土壤植被及土地利用方式等信息,采用分布式水文模型结合PDSI干旱模式原理建立了干旱评估预报模型(GBHM-PDSI)^[103]。基于GIS强大的地理信息功能,可为规模不等的分布式流域提供准确的地理信息,其应用于分布式流域水文的研究,可以得到水文学上更准确的计算、模拟及预测的结果。因此,可以预料在当前及今后的一段时期内,结合GIS的分布式流域模型会被更广泛地应用于流域的水文研究中。