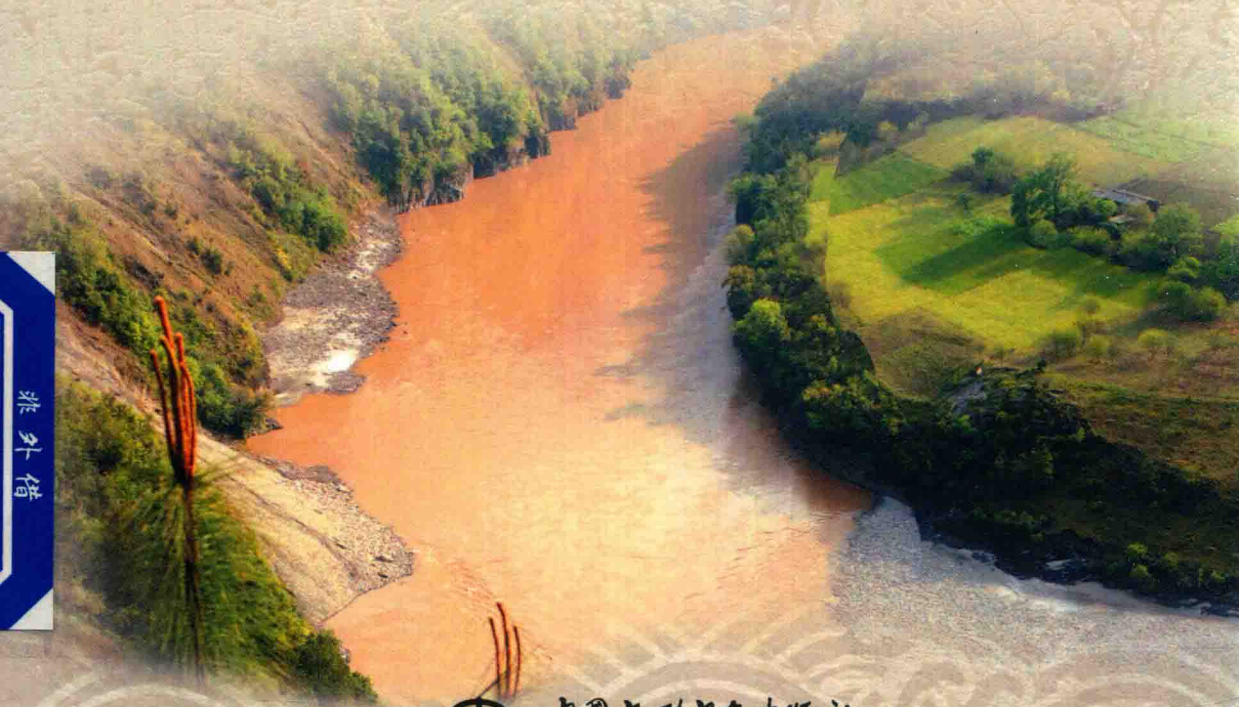
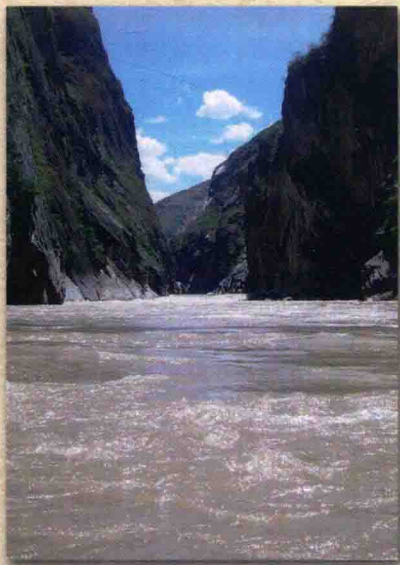


怒江流域

水文水资源研究

刘新有 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

怒江流域

水文水资源研究

刘新有 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书结合怒江流域独特的气候与自然地理背景,系统研究了怒江流域气候及水沙基本特征、分异规律及变化趋势,并构建了怒江流域分布式水文模型,分别对土地利用情景与气候变化情景进行了模拟。主要包括:怒江流域气候及水沙时空分异特征,怒江流域基流分割及其时空分异特征,怒江流域中上游枯季径流对气候变化的响应,怒江流域水文模型构建,怒江流域降水变化及其土壤侵蚀响应,怒江流域土地利用与气候变化的水沙响应情景模拟。

本书可供水文水资源、水利规划与管理、水利工程、环境管理等相关行业的科技人员、管理人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

怒江流域水文水资源研究 / 刘新有著. — 北京 :
中国水利水电出版社, 2017.5
ISBN 978-7-5170-5443-6

I. ①怒… II. ①刘… III. ①怒江—流域—水资源—
研究 IV. ①TV21

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第095983号

书 名	怒江流域水文水资源研究
作 者	NU JIANG LIUYU SHUIWEN SHUIZHIYUAN YANJIU
出版发行	刘新有 著 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	虎彩印艺股份有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 8.75印张 172千字
版 次	2017年5月第1版 2017年5月第1次印刷
印 数	001—600册
定 价	40.00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

怒江-萨尔温江是纵贯我国西南和中南半岛的全球最典型的南北向国际大河，其在中国境内称为怒江。怒江流域面积为 13.67 万 km^2 ，其中干流河长 2013km，流域面积为 12.48 万 km^2 ，地势北高南低，呈南北狭长形，地形起伏巨大，相对高差达 6000 余 m。在纵向岭谷地形和季风气候的交互作用下，怒江流域气候的区域差异十分明显，“立体气候”特点突出，变化复杂。从上游到下游依次分布有亚寒带至北热带的各种气候带，年平均气温南北相差悬殊，水文过程独特，生态系统多样，对全球气候变化和人类活动的响应极其敏感和复杂。独特的峡谷地形和气候条件使怒江流域成为我国西南与南亚极为重要的生态廊道和全球生物多样性保护的重要区域，具有重要的生态价值。

怒江是目前西南纵向岭谷区唯一不受干流水电工程影响的大河，是研究气候变化与水文过程交互影响的理想场所。流域水文过程变化受气候变化、自然地理条件及人类活动的综合影响，影响因子和相互作用的驱动机制复杂。地统计方法通过对现象的时空数据统计分析来发现其内在规律，并作出一定精确程度的判断和预测，在自然科学、工程技术、管理科学及人文社会科学中得到越来越广泛的应用，但由于缺乏明确的物理意义，无法更加深入地揭示流域水文过程变化的因果关系和形成机制。分布式水文模型物理意义明确，能够揭示和定量描述当前水文过程变化与其影响因子的相互关系，也能通过对土地利用和气候变化等预设情境的模拟，预估其变化对流域水文过程的影响。将地统计方法与分布式水文模型结合起来，不仅能够全面定量描述流

域水文特征及其变化规律，还能够深刻揭示流域水文过程变化的驱动机制，有利于多层次多角度地发现问题和解释问题，为解决问题提供依据。本书通过地统计方法揭示怒江流域气候特征、水沙分异规律以及两者之间的关系，通过水文模拟揭示流域水沙变化的驱动机制，可直接服务于流域水资源合理利用与管理、涉水工程建设、跨境生态安全和能源安全等重大需求，具有突出的时效性、紧迫性和重要性。

本书共分9章。第1章阐述了怒江流域气候与水文水资源研究的背景与意义，总结了国内外研究进展；第2章梳理了怒江流域概况；第3章开展了怒江流域气候时空分异特征及气候要素之间的关系研究；第4章开展了怒江流域水沙时空分异规律及基于复权马尔可夫链的水沙短期预测研究，并对纵向岭谷区的怒江、澜沧江、红河径流年际变化及年内分配进行了对比分析；第5章利用数字滤波法进行了怒江流域基流分割，并对其基流时空分异特征进行了分析；第6章开展了怒江流域中上游枯季径流特征及其对气候变化的响应研究；第7章构建了怒江流域数据库与SWAT模型，并对模型进行了率定与验证；第8章对怒江流域土壤侵蚀进行了模拟，并对流域土壤侵蚀对降水的响应进行了分析；第9章对设置的不同土地利用情景和气候变化情景分别进行了径流和输沙模拟。

本书是在作者博士论文的基础上补充修改而成的，并得到了何大明教授的精心指导。其中，第3章主要由樊辉撰写，第6章主要由罗贤撰写，谢飞帆参与了SWAT模型构建，王杰、罗贤在基础数据上提供了无私帮助，胡金明、冯彦、柳江、傅开道、陆颖、李运刚对本书的修改提出了宝贵意见，在此深表谢意。

本书的出版得到了国家自然科学基金（U1202232）“怒江与澜沧江流域水文过程及其驱动机制研究”及云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室的资助。由于所能获得的基础数据和作者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请广大专家、读者批评指正。

作者

2017年2月

目录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究进展	3
第 2 章 怒江流域概况	9
2.1 地形地貌	9
2.2 气候与水文	10
2.3 河流水系	11
2.4 土壤植被	12
2.5 社会经济	13
第 3 章 怒江流域气候时空分异特征	14
3.1 资料与方法	14
3.2 气温与降水的区域差异特征	16
3.3 气温与降水变化特征及突变分析	20
3.4 讨论	23
3.5 小结	24
第 4 章 怒江流域水沙时空分异特征	26
4.1 资料与方法	26
4.2 流域水沙时空分异特征分析	30
4.3 基于复权马尔可夫链的怒江水沙短期预测	43
4.4 河流径流对比分析	48

4.5 小结	52
第5章 怒江流域基流分割及其时空分异特征	55
5.1 基流分割方法	55
5.2 怒江流域基流时空分异特征	58
5.3 小结	65
第6章 怒江流域中上游枯季径流对气候变化的响应	67
6.1 数据来源站点选取	68
6.2 怒江流域中上游降水及径流的时空分布规律	68
6.3 怒江流域中上游枯季气候变化	69
6.4 怒江流域中上游枯季径流量变化特征	71
6.5 小结	75
第7章 怒江流域水文模型构建	76
7.1 水文模型的比选	76
7.2 流域数据库构建	78
7.3 模型参数敏感性分析	89
7.4 模型的参数率定与验证	91
7.5 小结	101
第8章 怒江流域降水变化及其土壤侵蚀响应	102
8.1 怒江流域云南段降水变化分析	102
8.2 土壤侵蚀变化及其对降水的响应	106
8.3 小结	111
第9章 怒江流域土地利用与气候变化的水沙响应情景模拟	113
9.1 流域土地利用与气候变化情景设计	113
9.2 流域土地利用变化情景的水文模拟	115
9.3 流域气候变化情景的水文模拟	119
9.4 小结	123
参考文献	125

第 1 章

绪论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

从不同尺度探讨全球变化和人类活动影响下的水循环及与之相关的资源与环境问题,已成为 21 世纪水科学研究的热点和前沿 (Immerzeel 和 Bierkens, 2010; Vorosmarty 等, 2000, 2010)。为此,有关国际组织实施了一系列国际水科学计划 (如 IHP、WCRP、IGBP、GWSP 等),将全球变化和人类活动对区域水循环与水安全的影响列为其重点研究内容。《国家中长期科学和技术发展规划纲要 (2006—2020 年)》在面向国家重大战略需求的基础研究“全球变化与区域响应”中,也将“大尺度水文循环对全球变化的响应以及全球变化对区域水资源的影响”列为重点研究内容之一。怒江流域处于我国西南的纵向岭谷区,水能资源蕴藏量极大,生物物种丰富,是国家级水电能源建设基地和极为重要的基因宝库 (何大明, 2005)。同时,受独特的气候条件和地形影响,其生态系统脆弱,对气候变化和人类活动的响应极其敏感。揭示纵向岭谷区环境系统与水循环过程成为了该区域生态屏障建设与水资源可持续利用迫切需要解决的问题。

怒江-萨尔温江是纵贯中国西南和中南半岛的全球最典型的南北向国际大河,中国境内部分称为怒江。在金沙江、澜沧江等西南大河进行大规模梯级水电开发之后,怒江的水电资源开发及生态影响再次成为关注的热点。云南省境内怒江干流水能资源理论蕴藏量达 1815 万 kW,经济可开发量达 1797 万 kW,目前水能资源开发率仅约 2% (冯彦等, 2008)。但由于怒江处于断裂带和“三江并流”世界自然遗产保护区,怒江水电开发自 2003 年以来就广受争议。反对方的观点是怒江具有全世界独一无二的生物多样性,中国需要一条原生态的河流,且怒江不具备建坝的地质条件;支持方则认为,怒江 13 级水电开发每年可为全国创造价值 300 多亿元,既能改变当地的贫穷状态,又能减少我国对化石能源的依赖 (汪永晨, 2011)。在近年国家能源需求增加和减少温室气体排放的双重压力下,广受争议的怒江大规模水电梯级开发前期工作在“十二五”期间开始启动,但直

至“十三五”期间,水电梯级开发工程建设仍未启动。如何在进行大规模梯级水电开发的同时兼顾流域土地科学利用和生态保护也成为社会各界关注的焦点。

怒江流域在纵向岭谷地形和西南季风的影响下,气候类型、水文特征和生态系统独特,区域分异明显。上游西藏段为高寒山区,河谷宽阔,河流补给以冰雪融水为主,植被以草甸为主;中下游云南段为高山峡谷区,立体气候显著,河流补给以降水为主,水文过程变化复杂,植被类型和生态系统多样。径流与输沙时空分异是流域气候变化与人类活动综合作用的结果,也是流域生态环境变化的集中反映。因此,厘清怒江流域水沙时空分异特征及其驱动机制,是科学进行大规模梯级水电开发,发挥最大综合效益的基础,也是流域资源开发利用和生态保护科学决策的依据。

1.1.2 研究意义

国际河流的水文过程变化的资源环境效应及跨境影响等,因涉及国家主权而更为复杂和敏感(何大明等,2007),受到广泛关注,一直是国际研究的热点(Stahl K, 2005)。怒江-萨尔温江纵贯我国西南及中南半岛,是全球最典型的南北向发育的国际大河。其独特的地理环境、丰富的自然资源、突出的生物多样性和频发的山地灾害等都具世界性意义;在纵向岭谷地形和季风气候的交互作用下,其水文过程独特,对全球变化的响应强烈、复杂。近 40 年来,随着国家对西南国际河流生态环境和水电基地建设的高度重视,开展了一系列相关研究,特别是金沙江、澜沧江等纵向岭谷区河流研究取得了较好的进展。但由于该区域气候变化复杂,生态环境脆弱,加之水电开发等人类活动的影响,水文过程变得尤为复杂,仍然存在许多需要进一步深入研究的课题。怒江流域更是因地处边陲、通行困难、灾害多发,社会经济严重滞后,基础研究极为薄弱,其流域尺度的水沙分异特征及其驱动机制研究仍为空白。

本书利用怒江流域长系列水文观测记录,结合野外综合考察,利用小波分析、集中度与集中期、Mann-Kendall 检验、R/S 分析等方法,对流域水沙的变化周期、年内分配、突变及未来变化趋势进行分析,揭示流域气候与水文水资源分异规律及两者之间的关系;利用数字滤波方法,对流域基流进行分割,并对流域基流特征进行分析;在建立怒江流域云南段空间数据库和属性数据库的基础上,构建流域 SWAT 分布式水文模型,分析流域土壤侵蚀变化及其与降水的关系,并对不同土地利用和气候变化情景下的流域径流和输沙响应进行模拟。在怒江大规模水电开发前夕,进行这些抢救性的基础研究,将从整体上填补怒江流域水沙分异规律及其驱动机制研究的空白,不仅丰富和发展了高原山地纵向大河水沙对气候变化和人类活动的响应研究,还直接服务于流域水资源管理、涉水工程建设、跨境生态安全、能源安全和环境外交等重大需求,具有突出的时效性、紧迫性和重要性。

1.2 国内外研究进展

河流水文过程是气候变化与人类活动的集中体现。20 世纪初期以来,世界上许多河流在气候变化、土地利用/覆盖变化以及大坝建设的影响下,径流和输沙发生了较大的变化,引起了世界各国专家学者的广泛关注。本书从气候变化对水文过程的影响研究、土地利用/覆盖变化对河流输沙的影响研究、水文模型研究和怒江流域相关研究 4 个方面对国内外研究进行总结归纳。

1.2.1 气候变化对水文过程的影响研究

气候变化是水文循环的主要驱动力之一,对整个水文过程影响深刻。全球气候变化下的水文循环研究已成为 21 世纪水科学研究的热点(夏军等,2002)。许多国际重大研究计划都把水文过程对全球变化的响应研究列为重要研究领域(张建云等,2007)。气候变化影响研究起步于 20 世纪 70 年代后期,在世界气象组织(WMO)、联合国环境规划署(UNEP)、国际水文科学协会(IAHS)等国际组织促进下,先后开展并实施了世界气候影响研究计划(WCIP)、全球能量水循环试验(GEWEX)等项目的研究。1977 年,美国国家研究协会(UNSA)组织会议讨论了气候变化对供水的影响。1985 年,世界气象组织发表了气候变化对水文水资源影响的综述报告,之后又发表了水文水资源系统对气候变化的敏感性分析报告。1987 年,国际水文科学协会在第十九届国际大地测量与国际地球物理联合会(IUGG)中举办了“气候变化和气候波动对水文水资源的影响”专题学术讨论会。1988 年,联合国环境规划署及世界气象组织共同组建政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC),其任务是为政府决策者提供气候变化的科学基础,以使决策者认识人类对气候系统造成的危险并采取对策。1990 年以来,IPCC 先后于 1990 年、1996 年、2001 年和 2007 年对全球气候变化进行了四次评估,汇总了全球气候变化的影响、适应性、脆弱性和阈值等方面的最新研究成果。

我国对水文水资源的全球气候变化响应研究起步较晚,但发展很快。从“八五”期间开始,以气候变化对水文水资源的影响为主题,开展了一系列研究,如“八五”科技攻关项目“气候变化对水文水资源的影响及适应对策研究”,“九五”科技攻关项目“气候异常对我国水资源及水分循环影响的评估模型研究”,“十五”科技攻关项目“气候异常对我国淡水资源的影响阈值及综合评价”等。1999 年以来,国家重点基础研究发展计划(“973 计划”)资源环境领域先后立项了“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”“全球变暖背景下东亚能量和水分循环变异及其对我国极端气候的影响”“青藏高原环境变化及其对全球变化的响应与适应对策”“气候变化对我国东部季风区陆地水循环与水资源安全的影响

及适应对策”和“纵向岭谷区生态系统变化与西南跨境生态安全”等。

在气候要素中,降水是径流的主要来源,也是导致土壤侵蚀的原动力。降水对径流的影响机理相对简单,而对土壤侵蚀的影响较为复杂,因此降水对土壤侵蚀的影响成为了研究重点。降水量、降水强度及降水历时等降水特征与产沙密切相关(Zheng M G 等, 2007; 许炯心, 2004; 王兆印等, 2003)。戴仕宝等(2007)对近 50 年来中国主要河流入海泥沙变化进行了研究,认为降水量的减少是导致北方河流输沙减少的原因之一。许炯心(2003)的研究表明,自 20 世纪 70 年代以来,黄河入海泥沙通量表现出明显减少的趋势,且入海泥沙通量对于上、中游不同的水沙来源区降水变化的响应方式不同,多沙细沙区降水的减少对于黄河入海泥沙通量的影响最大。高旭彪等(2008)通过建立泥沙与降水的关系,得出降水变化对入黄河泥沙的影响量相当于泥沙总变化量的 30%~60%。陈月红等(2009)以次降雨径流产沙为主要研究对象,模拟黄土高原吕二沟流域不同降雨强度及不同土地利用情况下降雨量-径流量、径流量-输沙量的相互关系数学表达式,表明在同一土地利用情况下,场降雨量和场径流量之间存在指数函数相关关系,场径流量和场产沙量之间存在幂函数相关关系。查小春等(2002)通过对分别位于秦岭南北的汉江和渭河不同时期泥沙含量的比较,认为秦岭山脉南北水文气候环境对全球变化的响应存在一定的区域性。任敬等(2007)采用相关分析与 Granger 因果检验证明,20 世纪 60 年代与 90 年代的区域气候变化是红河泥沙变化的主要原因,而 20 世纪 70 年代与 80 年代流域内的人类活动对红河泥沙变化的影响比气候变化更明显。李子君等(2008)基于降水-产沙统计模型,定量评估了降水变化及人类活动对密云水库入库泥沙量的影响。Zuo Xue J 等(2011)研究表明,季风气候变化是引起湄公河近 50 年来泥沙变化的主要原因之一。气候变化除直接对泥沙产生影响外,还对泥沙中的营养盐输送造成影响(Duan S W 等, 2008; 李新艳等, 2009)。

1.2.2 土地利用/覆盖变化对河流输沙的影响研究

土地资源是人类赖以生存和发展的重要物质基础。土地利用/覆盖变化(LUCC)直接体现和反映了人类活动的影响水平,也是引起全球变化的主要原因(唐华俊等, 2009)。流域生态系统中包含了诸多影响土壤侵蚀和河流输沙的因素,其中土地利用/覆被变化是十分重要的方面(Carroll C 等, 2000; Verstraeten G 等, 2003)。因此,通过调整土地利用格局,可以起到提高流域生态系统保土保沙能力,进而提高其减轻水库泥沙淤积服务能力(Sanchez L A 等, 2002)。近年来,土地利用变化、人类活动干扰、水土流失治理、泥沙控制和大坝建设导致世界许多河流的泥沙量发生了显著变化(Des E Walling, 2008)。其中,土壤侵蚀加剧是导致河流输沙增加的主要原因(田海涛等, 2006)。土地利用/覆盖变化与全球气候变化的共同作用,是局部、区域或全球水文过程变化的

主要原因(刘新卫, 2004; 余钟波, 2008)。20世纪50—90年代, 研究重点是探讨自然因素对于河流输送颗粒态物质通量的影响; 20世纪末至21世纪初, 除重视自然因素外, 还特别关注人类活动对于河流输送物质通量及其未来趋势变化的影响(李新艳等, 2009)。研究表明, 较长时间尺度上, 气候变化对水文水资源的影响更加明显, 但短期内, 土地利用/覆被变化是水文变化的主要驱动要素之一(李昌峰, 2002), 且土地利用/覆盖变化等人类活动施加的影响越来越大(李新艳等, 2009)。近半个世纪以来, 世界人口急剧增长, 人类对粮食、住房和基础设施的需求急剧增加, 从而导致土地利用/覆盖急剧变化、水土流失加剧和泥沙增加, 这种现象在许多发展中国家和欠发达地区尤为突出。土地利用/覆被变化水文效应的研究是目前乃至未来几十年的一个热点问题和前沿领域(De Fries R, 2004; 李丽娟, 2007)。由于土地利用/覆被变化对水文过程的影响直接导致流域生态环境及社会经济等变化, 因此如何采取有效方法揭示土地利用/覆被变化对流域水文过程的影响, 是目前亟待解决的问题(刘贤赵等, 2005; 王根绪, 2005)。国内外学者以土地利用/覆盖变化研究为中心, 结合气候变化、社会经济活动及生态系统变化展开了许多有益的综合研究(王中根, 2003)。

中国是一个多沙国家, 国内学者对我国一些重要河流, 特别是多沙河流开展了大量研究。研究表明, 黄河中游的粗泥沙主要来源于河龙区间(河口镇至龙门)以及泾、洛、渭等几条支流, 粗沙来源区与多沙来源区基本一致, 形成所谓的多沙粗沙区; 在黄河泥沙控制中, 水土保持措施(梯、林、草、坝等)起到了很好的减洪减沙作用, 人工林区与无林或少林区相比, 减沙效益高达78%~96%(朱金兆等, 2004)。高旭彪等(2008)通过建立泥沙与降水的关系, 得出降水以外的其他因素对入黄河泥沙的影响量占总变化量的40%~70%, 且其作用具有越来越显著的趋势。在影响流域产沙量诸多因素中, 植被的影响是最重要的, 其次是地面物质(卢金发等, 2003); 因此, 以植树造林和水土保持为中心的生态建设对防治水土流失起了重大作用(李子君等, 2008)。松花江流域河流泥沙及其对人类活动的响应特征研究表明, 流域输沙量负荷的变化与流域内重大历史事件、国家政策等人为活动的变化密切相关(李林育, 2009)。二滩水库集水区不同结构类型土地利用/覆被情景对保沙能力所产生的影响模拟表明, 保沙能力林地>草地>裸地>农用地, 农用地保沙能力最弱, 是最为主要的产沙源(吴楠等, 2009)。山西省吉县蔡家川流域1985—2003年9个径流小区的降雨产流产沙的定位观测分析表明, 坡面自然更新的次生林比人工刺槐林具有更好的涵养水源和保持水土功能, 场降雨产流量和产沙量分别减少65%~82%和23%~92%(张晓明等, 2005); 少林流域暴雨径流输沙量是多林流域的3~6倍, 且前者暴雨径流输沙过程线的变化比后者剧烈得多(张晓明等, 2006)。土地利用/覆盖变化除对产沙量产生影响外, 还对泥沙输移比产

生影响 (蔡强国等, 2004)。

1.2.3 水文模型研究

水文模型作为评价气候及土地利用等对水文过程影响的重要工具, 一直以来受到水文科学界的高度关注, 利用水文模型进行气候变化下的河流水沙模拟已成为重要发展方向 (Fu G B 等, 2007; Benedikt N 等, 2007; 王国庆等, 2006)。与径流相比, 土壤侵蚀和泥沙输移的自然过程非常复杂, 其精确模拟一直是水文科学界非常重要且颇具有挑战性的任务。欧美国家泥沙模拟研究开展较早且发展迅速 (Einstein H A 等, 1954; Lin Q, 2010)。自 1914 年 Gilbert 提出第一个输沙方程以来, 已研究开发了很多河流输沙模型, 早期的输沙模型有的只考虑总输沙量而不区分推移质和悬移质, 有的将推移质和悬移质分开计算, 其中总输沙量方程最为常用 (Acharya Anu, 2011)。大多数早期的模型假设泥沙总量在每个计算节点上瞬间平衡, 这种模型被称为平衡或饱和的泥沙输移建模方法。然而, 由于水体的流动性, 泥沙输移很少处在一个平衡状态, 局部平衡的假设不符合实际, 因此, 作为一个更逼真的技术, 非均衡输沙建模在近几十年快速发展起来。这种方法放弃局部平衡假设, 并解决了推移质和悬移质输沙的实际输移问题, 能够更好地描述输沙的时间和空间滞后性 (Wu Weiming, 2010)。因此, 运用非均衡输沙规律, 可以增加对水流泥沙输移规律的认识, 为已有数学模型和实体模型完善提供基础 (董年虎等, 2011)。

20 世纪 60 年代以来, 随着社会需求及信息技术的发展, 人们对水文过程认识和研究的不断深化, 水文模型经历了从“黑箱子”模型、概念性模型到物理性模型, 从集总式模型到分布式模型的发展过程 (刘登峰等, 2007)。集总式水文模型的框架主要是建立在流域水文过程的概念性理解之上。在过去相当长的一个阶段里, 因为计算能力和观测数据的限制, 人们应用集总式的方法描述水文过程, 发展了大量集总式水文模型, 如 USLE 模型、HEC-1 模型、新安江模型、WRAP 模型、WEAP 模型、日本的水箱模型等 (赵串串等, 2007)。分布式流域水文模型最显著的特点是与 DEM 结合, 将流域分成很多小单元, 充分考虑水文参数和过程的空间异质性, 与自然界中下垫面的复杂性和降水时空分布不均匀性导致的流域产汇流高度非线性特征相符, 因而所揭示的水文循环过程更接近客观实际, 是水文模型发展的必然趋势 (Sivapalan M 等, 2003; 贾仰文等, 2005; 刘昌明等, 2006; 徐宗学, 2010)。20 世纪 90 年代前后, 在全球变化对水文循环影响等研究需求的推动下, 涌现了一批分布式水文模型, 如 TOP-MODEL (Top Graphy Based Hydrological Model)、SHE、DHSVM (Distributed Hydrology Soil Vegetation Model)、VIC (Variable Infiltration Capacity)、SWAT (Soil and Water Assessment Tool)、HMS (Hydrologic Model System) 等, 并在实际问题中得到了广泛应用 (徐宗学, 2010)。

1.2.4 怒江流域相关研究

高原与山地是受全球变化影响强烈和敏感的地区(李文华, 2002), 其研究颇受关注。近年来, 中国西南的纵向岭谷区因地理环境独特、生物多样性突出、水资源和水能资源丰富, 以及国家水电能源基地建设的重大需求, 逐步开展了多方面的基础性研究, 但由于种种原因, 有关怒江流域的研究相对滞后, 研究基础薄弱。从已有的相关研究来看, 怒江流域基础研究主要集中在气候变化、土地利用及其对水文过程的影响方面, 但成果较为零散, 缺乏全流域尺度的研究。

相关研究表明, 近 40 年怒江流域年平均气温以 $0.26^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率显著升高, 年降水量以 $21.0\text{mm}/10\text{a}$ 的速率显著增加, 且随着纬度的增加和海拔的上升, 年平均气温升温幅度加大, 年降水量增幅也增大(杜军等, 2009); 怒江流域年太阳总辐射量 1981—1997 年呈明显下降趋势, 为 $-161.1\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{a})$, 1997 年之后以 $111.3\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{a})$ 的速度上升, 低云量是怒江流域太阳总辐射量变化的主要影响因子, 且与太阳总辐射量存在明显的负相关关系(石磊等, 2010)。1998—2008 年的区域植被指数与气象因子主要呈指数关系, 生长季内各月的 NDVI 变化与气温、降水、日照呈同期与滞后相关关系(袁雷等, 2010); 近 45 年来怒江流域出境的河川径流量表现出增加的趋势, 径流量变化与东亚和南亚季风环流系统活动的变化相关(尤卫红等, 2007)。

作为人类活动的主要表现, 土地利用及其关联效应也是怒江流域研究的主要方向。基于遥感数据的水土流失监测分析表明, 云南怒江流域云南段水土流失面积占总面积的 55.75%, 且以轻度、中度和强度为主, 极强度和剧烈很少, 不到总面积的 5%。从 20 世纪 80 年代至 21 世纪初, 怒江流域西藏源头区域气候变化造成了高寒草地的退化(Gao Qingzhu, 2010), 怒江流域云南段水土流失强度减轻面积大于加重面积, 流域水土流失状况出现好转(王艳芳等, 2009)。但退耕还林后, 怒江流域部分小流域人均耕地减少, 人地矛盾突出, 粮食压力大, 农户生计问题急需解决(赵筱青等, 2008)。同时, 怒江流域林地景观结构发生了明显的退化, 有林地景观由破碎化趋势转为退化趋势, 灌木林和疏林地景观由集聚化特征转为破碎化趋势。从空间格局来看, 变化的空间差异性很大, 贡山、泸水、保山等地林地景观变化集中且非常剧烈(邹秀萍等, 2006)。其中, 暖温性灌丛及灌草丛和暖温性针叶林的缀块数量最多, 破碎化程度较高(刘韬, 2009); 流域森林植被保护和恢复并没有取得预期效果(Horst Weyerhaeuser 等, 2005)。流域中段典型地区(福贡县)有林地面积 1986—2004 年呈持续减少趋势, 灌木林面积、荒草地面积、耕地面积、滩涂面积和城镇面积则是持续增加, 斑块数持续增加, 景观破碎化趋势明显, 人为干扰是导致该区景观格局发生变化的主要驱动因子(杨华等, 2008)。初步研究表明, 由于怒江流域地处纵向

岭谷区核心地带,其岭谷地形的“通道-阻隔”作用对地表生态水文过程的影响最为明显(周长海等,2006),在干流河谷区的生态格局及其资源环境效应与季风驱动下的水汽通道作用影响直接关联;流域的生态变化主要受自然因素的控制(冯彦等,2008),但人类活动对土地利用和景观结构的干扰逐渐加强(邹秀萍等,2005)。在河道演变方面,西南山地非冲积性河流同样遵循河相关系理论,从西部的怒江到中部的澜沧江,再到东部的金沙江,其河相关系的年际变化幅度逐渐减小,与它们受到构造抬升的影响减弱相适应(王随继等,2009)。

由于怒江流域地质特殊性和生态的脆弱性,2003年起围绕怒江水电开发的生态影响问题,引起了社会各界的广泛关注。有研究认为,云南省“三江”流域拟建、在建的水电工程可能造成水库诱发地震是一个值得高度重视的问题(杨晶琼等,2008)。此外,怒江流域梯级开发将改变原有河流的生态系统,对流域的生态环境产生重大影响,应以流域的生态环境可承受程度作为临界阈值以控制怒江的生态环境累积效应(钟华平等,2008),同时考虑不同影响因素条件下的健康流量阈值(耿雷华等,2008)。社会经济方面,由于怒江水电移民与生态、人口、土地、文化等方面存在不同属性的关联(包广静,2010),应妥善处理。因此,解决怒江水电开发问题的关键,应该是在可持续发展的原则下,寻找经济发展与生态保护之间的相对平衡点(董哲仁,2006)。

第 2 章

怒江流域概况

2.1 地形地貌

怒江-萨尔温江发源于青藏高原的唐古拉山南麓的吉热拍格,流经西藏那曲、昌都地区进入云南,向南流经怒江州与保山市,于德宏傣族景颇族自治州潞西市向西南方向流入缅甸后改称萨尔温江,最后注入印度洋的安达曼海。怒江-萨尔温江中国段称为怒江,地处东经 $91^{\circ}10' \sim 100^{\circ}15'$ 、北纬 $23^{\circ}5' \sim 32^{\circ}48'$,流域面积为 13.67 万 km^2 。其中,干流河长 2013km ,流域面积为 12.48 万 km^2 ,地势北高南低,呈南北狭长形。怒江源头北隔唐古拉山与长江源头相邻,东以他念他翁山-怒山为分水岭与澜沧江相邻,西和西南以念青唐古拉山-高黎贡山为分水岭与雅鲁藏布江和伊洛瓦底江相邻。流域地质构造以南北向断裂为主,山高坡陡,河谷深切,深大断裂发育,断层纵横交错,岩体破碎,风化作用强烈。怒江流域云南段地貌单元位于纵向岭谷区,六库以下河谷逐渐变宽,为上紧下疏的帚状地形,左岸的碧罗雪山延至保山市隆阳区,右岸的高黎贡山于龙陵县为丘陵盆地所代替。整个流域地表起伏大、地质地貌复杂。

上游(嘉玉桥以上)地处青藏高原腹地,地势较为开阔,河道海拔 3125m 以上,河源海拔 5200m ,平均坡降为 2.53% 。海拔一般在 $4000 \sim 4500\text{m}$,但山峰高可达 6000m 以上。区内既有常年积雪的险峻雪峰,也有较为平缓的山丘。河源至索曲河口以上,河谷宽阔浅切呈宽 U 形,河道曲折多叉支,沿岸沼泽广泛分布;索曲河口至嘉玉桥段河流下蚀作用显著,开始显现 V 形峡谷,水流湍急,险滩分布。中游(嘉玉桥至泸水)为横断山区,山高谷深,呈深切 $1000 \sim 2000\text{m}$ 的 V 形峡谷。该段位于“三江并流”世界自然遗产保护区西部,为著名的怒江大峡谷,河谷狭窄,沿河阶地极少,河道比降大,险滩连布,水流湍急,是怒江最险峻的河段;谷底一般宽 $100 \sim 150\text{m}$,最宽处为 $150 \sim 300\text{m}$,最窄处仅 $60 \sim 80\text{m}$,水面宽 $80 \sim 120\text{m}$,河床平均坡降约 3% ,最大坡降为 $15\% \sim 20\%$;两岸山脉夹江对峙,山坡陡峻,谷坡达 $35^{\circ} \sim 45^{\circ}$,最大可达 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$;左岸有怒山与碧罗雪山,右岸为延绵的高黎贡山,两岸山脉海拔在 4000m 以上,最高峰梅里雪山海拔达 6740m ,终年积雪,发育有现代冰川;河段内河道单一,险滩连

布,水流湍急。下游(泸水以下)河谷相对开阔,河道海拔520~803m,平均坡降为0.69‰;河道以宽V形与U形谷交替出现,两岸山势降低,海拔一般在2000~3000m,沿河阶地平坦逐渐增多,其中最大的为怒江坝(又名潞江坝),长约50km,宽约10km,但坝子多由一些低矮山丘组成。该段河道比降较小,河床险滩少,水流平缓,但惠通桥至南信河口国界河谷又逐渐缩窄,险滩增多,水流加急。

2.2 气候与水文

怒江流域受地形及大气环流影响,气候的区域差异十分明显,“立体气候”特点突出,变化复杂。从上游到下游依次分布有亚寒带至北热带的各种气候带,年平均气温南北相差悬殊,由北向南呈递增趋势,西藏那曲年平均气温为 -1.9°C ,而云南碧江为 $9\sim 10^{\circ}\text{C}$,泸水为 $14\sim 15^{\circ}\text{C}$,潞西以下为 $21\sim 25^{\circ}\text{C}$ 。上游地处“世界屋脊”青藏高原,气候高寒,冰雪期长;受印度洋季风和西藏高原冷空气的共同影响,干湿季不分明,每年的2—10月为雨季,多阴雨云雾,雨量由南向北递增。中游为亚热带季风气候,受南北气流夹击,干湿季分明,气候复杂多变。同时,由于山高谷深,气候呈明显的垂直变化,高山积雪寒冷,山腰温凉,河谷炎热,形成“一山分四季,十里不同天”的“立体气候”特点。下游属于典型的季风气候区,温暖湿润多雨,主要受西南季风控制,同时又受东南季风影响,暖湿气流不断输入该区域,水汽充沛,降雨集中。

流域内降水地域分异明显,降水总趋势为从西南边缘向东北递减,以西南部迎风坡山区较多,背风坡及河谷地带较少。上游青藏高原地区西南季风较弱,水汽来源不足,年降水量仅400~700mm。中游高山峡谷区降水垂直变化显著,如贡山河谷降水量只有400~500mm,而两岸山坡降水量在600~1000mm以上,全县平均雨量达1638mm。下游西南季风较强,年降水量一般在1500mm以上,但干热河谷区多年平均年降水量仍不足1000mm。如潞江坝干热河谷区,年降水量仅600~700mm。受西南季风进退的影响,流域降水年内分配极不均匀,一般5—10月为雨季,降水量占年降水量的80%以上,11月至次年4月为旱季,降水量不足年降水量的20%。受太阳辐射量、水汽含量、气温、地形等因素综合影响,怒江流域蒸发量呈现出明显的垂直分异规律,河谷地区蒸发量大于山区,总体上呈现出随海拔增加而减小的趋势。根据资料统计,流域内观测到的最大蒸发量发生在六库,年蒸发量在2000mm以上,是年降水量的2倍多;贡山、福贡一带蒸发量较小,年蒸发量在600~800mm;其余地区年蒸发量一般在1000mm左右。从蒸发量年内分配来看,上游最大4个月为5—8月,而怒江中下游六库、保山一带最大4个月为3—6月。