



气候变化和人类活动 对白龙江流域径流的影响研究

牛最荣 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

气候变化和人类活动 对白龙江流域径流的影响研究

牛最荣 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书系统分析了白龙江流域气温、降水、蒸发、径流等水文气象因子的变化,以及人类活动的代表性因子——水电站开发建设对径流的影响。采用数理统计、趋势检验等方法,分析了流域水文气象要素的年际、年代、年内变化规律。采用数字模型分析方法建立了白云以上等四个干流区段,以及岷江等三个典型小流域的气候水文模型,量化分析了气候变化与人类活动对白龙江流域径流的影响程度。本书可以对认识并尽可能减少气候变化和人类活动对河流的影响,恢复和保护河流的正常功能和水生态环境起到一定的指导作用。

本书可供从事水文水资源、水利水电及相关领域教学、研究、管理和监测的教师、专业技术人员和学生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

气候变化和人类活动对白龙江流域径流的影响研究 / 牛最荣著. — 北京:中国水利水电出版社, 2018. 12
ISBN 978-7-5170-7160-0

I. ①气… II. ①牛… III. ①气候变化—影响—河川径流—研究—甘肃②人类活动影响—河川径流—研究—甘肃 IV. ①P344.242

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第272994号

书 名	气候变化和人类活动对白龙江流域径流的影响研究 QIHOU BIANHUA HE RENLEI HUODONG DUI BAILONG JIANG LIUYU JINGLIU DE YINGXIANG YANJIU
作 者	牛最荣 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 (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	北京市合众伟业印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 9.25印张 152千字
版 次	2018年12月第1版 2018年12月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	36.00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

径流是降水降落到地表后在地表各种因素综合作用下形成的水流。随着人口数量的增长和生活水平的提高以及经济社会的发展，水资源的有限性和人类对其需求的无限增长之间的矛盾日益加剧，水资源问题成了很多地区、很多行业发展的制约性因素。20世纪70年代以来，我国对水资源的时空分布规律及其供需平衡研究的重视程度逐渐提高。近几十年来，全球气候变暖和人类活动对河川径流也造成了一定的影响。就径流而言，这些影响有正面的、也有负面的。这些活动总体上改变了径流形成的下垫面条件，有的活动改变了径流形成的空间机理、对径流形成过程造成改变；有的活动改变了原有的产流条件、对径流量造成改变；有的活动增加或减少了当地的径流量，有的活动可以增加或减少下游的径流量，还有的活动可能以上几种情况兼而有之，等等。这些活动直接改变的是径流和水生态，也间接影响生态环境发生改变。人们关注生态就不能不关注径流，关注水资源就不能不关注径流，径流量的改变是引起生态变化的重要原因，径流量的减少是水资源量减少的直接原因。在当前情况下，气候因素与人类活动两大因素交织叠加，共同对河川径流产生作用，引起了径流资料系列的改变。所以，为了加强生态环境保护、解决水资源供需矛盾，研究气候变化和人类活动背景下的径流变化问题显得十分紧迫。

白龙江流域位于青藏高原到四川盆地的过渡地带，也是南北方气候过渡带。该流域有干旱半干旱地区，也有湿润半湿润地区；有人类活动明显对河川径流产生较大影响的地区，也有人人类活动对河川径流影响不大的地区。因此，选择这一地区研究气候变化和人类活动对径

流的影响具有良好的代表性。研究任务于2015年年底提出，撰写研究提纲，2016年开始收集资料，整个研究与编写工作主要在2016年下半年至2017年完成，2018年对书稿进行修改完善。全书由甘肃农业大学牛最荣撰写，甘肃省水文水资源局教授级高工陈学林在提纲拟订、资料分析、修改完善等方面做了大量工作，甘肃省水利厅高级工程师李育鸿、甘肃省水文水资源局高级工程师王毓森、高级工程师张德栋、工程师吴彦昭参加了相关研究工作，教授级高工黄维东、教授级高工赵清、高级工程师李忠泰、高级工程师郭西峰、高级工程师陈凯、工程师段建忠、王巧娟、王钰峰、马春梅、聂文晶等参加了资料收集、图表绘制等工作；甘肃农业大学齐广平教授、贾生海教授、张芮教授和武雪同学，在编辑出版过程中给予了大力支持与帮助，在此一并表示衷心的感谢！

流域内人类活动的形式和特点很多样也很复杂，引起气候变化的原因更为复杂多样。由于受条件限制，本书只选择最主要的也是最具有代表性的气候因子和人类活动因子进行了分析研究。尽管我们在气候变化和人类活动对径流的影响方面从事长期的观测和研究，但是因这一科学问题涉及面广、不确定性多、综合性强，有不少科学和实践问题还在探索之中，另外限于作者水平，本书难免存在不足和疏漏之处，敬请读者朋友不吝指正。

作者

2018年6月

前言

第 1 章 概论	1
1.1 研究目的和意义	1
1.2 国内外研究进展	2
1.3 拟解决的关键科学问题	6
第 2 章 研究区概况	8
2.1 流域概况	8
2.2 地形地貌	9
2.3 气象条件	10
2.4 河流水系	11
2.5 水文特征	12
2.6 水能资源及开发利用	13
2.7 典型小流域	14
第 3 章 基础资料及技术路线	20
3.1 基础资料	20
3.2 研究方法与技术路线	24
第 4 章 气象要素演变规律	30
4.1 气温	30
4.2 降水	36
4.3 水面蒸发量	46
4.4 小结	49
第 5 章 径流演变规律	52
5.1 径流监测情况	52
5.2 年内变化	52
5.3 年际变化	53

5.4	趋势变化	54
5.5	突变分析	56
5.6	季节变化	60
5.7	不同年代径流量变化分析	62
5.8	未来年径流变化趋势预测	63
5.9	小结	66
第6章	径流对气候变化的响应研究	68
6.1	建立水文数学模型	68
6.2	模拟结果及分析	69
6.3	小结	99
第7章	径流对流域梯级水电开发的响应研究	102
7.1	白龙江流域水电开发概况	102
7.2	径流对梯级水电开发的响应	105
7.3	小结	124
第8章	径流对气候变化和人类活动的响应研究	125
8.1	模型建立	125
8.2	模型分析	128
8.3	小结	130
第9章	其他研究方法探析	132
9.1	气象水文要素变率法	132
9.2	降雨径流双累积曲线法	133
9.3	径流系数法	134
第10章	结论与展望	136
10.1	结论	136
10.2	展望	139
	参考文献	141

第 1 章 概 论

1.1 研究目的和意义

径流变化是气候变化与人类活动多因素综合作用的结果。认识和研究气候变化、水文过程以及人类活动对径流的影响是今后重要的科学课题。探索全球变化背景下的水变化,着重关注气候变化对水文过程的影响,着重关注下垫面条件改变等人类活动对水循环规律的影响,把水问题纳入全球变化的整体自然科学框架下开展深入探索和研究,是水文水资源工作者义不容辞的职责。选择典型流域,研究气候变化、人类活动对水文过程的影响,揭示水循环在全球变化中的作用,对于推动人类保护自然、超越自然的进程,具有十分重要的现实意义和深远的历史意义。

白龙江是长江二级支流,嘉陵江一级支流,流经甘肃省甘南藏族自治州和陇南市,是甘肃省水资源相对丰富的区域之一。2014年,白龙江引水工程被列入国家确定的172项重大水利工程项目之一,是继引洮供水工程之后甘肃省提出的又一项对全省经济社会发展具有重要支撑作用的重大战略工程。工程规划自长江流域甘南藏族自治州迭部县境内的白龙江干流上取水,通过自流引水向黄河流域的天水、平凉和庆阳等地区输水。实施该工程不仅可促进甘肃省长江、黄河与内陆河三大流域水系连通,实现甘肃省水资源统一调配和供需平衡,解决制约甘肃省庆阳平凉革命老区、陇南贫困地区以及天水市发展用水瓶颈问题,同时也是甘肃省建设生态文明、推进脱贫攻坚、实现维护发展广大人民根本利益的扶贫工程、民心工程。

不同区域气候变化产生的结果并不相同,气候各要素的变化也不尽相同,对于生态环境以及经济社会的影响差别也很大。研究白龙江流域特别是典型区域的气候变化,对于揭示长江上游区域的气候与全球气温升高的关系,揭示河川径流对气候变化的响应程度,结合气候变化与流域内梯级水电站开发的相互作用,研究区域气候变化、人类活动、径流三者之间的



关系,深入探索内在的规律性变化具有重要的意义。同时,鉴于白龙江干流径流量持续减少的态势,开展对白龙江流域内气候变化、流域内人类活动尤其梯级水电站开发对径流的影响研究具有重要意义。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 气候变化对水文过程影响的相关研究

2008年4月8日,政府间气候变化委员会在布达佩斯正式通过气候变化和水(Climate Change and Water)的技术报告。该报告由来自20个国家的27名主要作者和9名主要贡献作者共同撰写完成,建立在2007年出版的IPCC3个工作组第四次评估报告的基础上,吸纳2007年发表的最新研究成果。该报告基于系统、可靠的观测以及运用包括模式和模型等多种技术手段进行计算与深入分析,重点评估目前和未来与水有关的气候变化影响,包括重点部门和区域差异、减缓气候变化和水问题、政策和维持发展的潜在联系、认识的差距以及对未来研究的建议。从这个报告和其他一系列的研究可以看出,气候变化对水文过程的降水分布、局地暴雨、河川径流、冰川冻土、土壤含水量、地下水位、陆面蒸发等多个方面都产生了深刻的影响,并且在不同的区域有着全然不同的结果。

1.2.1.1 降水量

从全球的宏观范围来看,降水有空间的和年际的变化,20世纪降水在北半球高纬度大部分陆地区域增加,而在 $10^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 自20世纪70年代以来降水减少。有些地区1900—2005年的降水存在长期趋势,在北美和南美东部、欧洲北部、亚洲北部和中部,降水量显著增加;在萨赫勒、地中海、非洲南部、亚洲南部部分地区降水量减少。亚洲一些地区在年降水增加的背景下降雨强度增加,干旱的日数增加。

从局部区域来看,我国西北地区夏季降水自20世纪80年代以来,除沙漠盆地外,均呈较明显的增加趋势。由于初夏青藏高原地面加热场异常偏强,使6月西北大部地区降水偏多,7—8月黄河上游、渭河流域降水偏多,西北地区的西部、北部少雨。从1998年开始,河西走廊的祁连山脉西侧降水有明显增加的趋势。我国西南区域强降水事件增加,21世纪以来发生了两次大范围的冰冻雨雪天气,是20世纪后半叶没有发生过的;



东南地区降水偏少事件也频频发生；西部一些草地类型消失，夏季更为干旱，增加了作物灌溉压力。北欧冬季降水增加，地中海地区降水减少。

可能强降水事件的发生频率在大部分陆地区域已经增加，这可能与大气中的水汽增加有关，并且与观测到的全球变暖是一致的。1961—2003年，全球海平面上升的平均速率为1.8mm/a，1993—2003年，该平均速率增加，约为3.1mm/a。全球海水的增暖引起海水膨胀，造成海平面上升，当然也与冰川和冰盖的大范围减少使海平面上升有关。

1.2.1.2 河川径流

河川径流随着气候的变化而变化，其与降水的关系最为密切。气候变化引起河川径流变化的因素除了降水外，气温变化也是重要因素。研究表明，北半球雪盖和山地冰川更多地融化，致使其水储藏量明显减少。在许多由冰川和积雪供水的河流中，径流量和早春最大溢流量增加。山区的人居环境遭受因冰川融化所致的冰湖溃决洪水的风险加大。在多年冻土区，土地的不稳定状态增大，山区出现岩崩。总体上来说，冰冻圈的变化是对气候变暖、冰雪物质减少的响应。

山地冰川和冰帽等融化加强，融化季节延长，导致江河径流和流量峰值增加。随着几个陡峭山脉（包括喜马拉雅山脉、安第斯山脉和阿尔卑斯山脉）的冰川从突出的小冰期冰碛退缩而形成冰川湖，这些湖泊很有可能引起冰川湖洪水的暴发，因为埋藏冰的解冻威胁着小冰期冰碛的稳定。由于积雪范围在时空上均有减少，过去65年间北美洲和欧亚大陆北部地区春季江河流量高峰发生时间提前了1~2周。高可信度证据表明，许多地区的湖泊和河流变暖，对其热力结构和水质产生影响，藻类和浮游生物增加。

南北半球的多年冻土减少，山地冰川和积雪总体都已退缩。自1900年以来，北半球冬季冻土的最大面积减少了约7%，春季减少高达15%。观测证据表明，20世纪70年代以来，一些海洋上强热带气旋活动增加。河川径流减少、极端缺水年份增多的地区有非洲北部，地中海地区，中东，近东南亚，中国北部，澳大利亚、美国、墨西哥三国的部分地区，巴西东北部，以及南美西海岸。这与降水减少、干旱增加、冰川收缩、水污染等有密切联系。

拉丁美洲地区在过去30年受到了与气候相关的影响，一些与恩索（ENSO，厄尔尼诺与南方涛动的合称）事件相联系，如极端气候造成洪涝、



干旱、滑坡等,可用水资源紧张,降水在南部增加明显,海平面平均每年上升2~3mm,热带地区的高山冰川减少等。在亚洲一些地区年降水增加的背景下降雨强度增加,干旱的日数增加,冰川快速退缩,冻土融化。过去几十年许多地方水稻、玉米和小麦减产,草场退化。预计气候变化将使河流系统的流量在季节上和总量上都减少,致使海水入侵。

1.2.1.3 蒸发量

从理论上讲,降水增多是蒸发量增加的响应。全球气温升高可能增加了海面的水汽蒸发,当然也增大了陆面蒸发和冰雪蒸发的动量。目前还看不到专项的研究报告证明全球气温升高对蒸发影响的具体成果。从北方干旱半干旱地区的监测数据来看,气温与蒸发有着较好的相关关系,这主要是因为降水日数减少、气温升高必然引起蒸发的增加。

蒸发能力增强迫使一些干旱、半干旱和半湿润地区,如澳大利亚、美国西部和加拿大南部以及萨赫勒地区更多地发生了历时多年、更大的干旱。20世纪50年代中期以来,欧亚大陆大部、非洲北部、加拿大和阿拉斯加干旱明显。20世纪70年代以来全球很干旱(干旱指数PDSI小于-3.0)的陆地区域从占全球的12%增加到30%。干旱已变得更为常见,尤其是在热带和副热带,观测到强度更强、持续时间更长的干旱。一些地区温度增加、降水减少,干旱化更为严重。

20世纪后期,我国北方干旱有逐渐加重的趋势,缺水矛盾日益突出,干旱范围逐步扩大,持续时间也由单年、单季、单月向连年、连季、连月增长,农作物受灾面积和粮食产量损失加大。华北地区发生干旱的频次与范围加大。华东地区最严重的干旱年份大都与梅雨期特别短、梅雨量特别少有关,导致高温干旱加重。西北地区自小冰期的19世纪至20世纪80年代中后期,气候期上处于向暖干化发展的趋势。

1.2.2 水电梯级开发对水文效应研究进展

水电开发主要是对河流形态环境条件的改变,环境条件改变引起的水文变化最初只具定性概念。1863年,G.P.马什发表的《人与自然》一书,记述了森林对水文变化的影响。国际水文十年(IHD,1965—1974年)期间,将人类活动对水循环影响和代表性、实验性流域研究列为主要研究任务之一。1975年,联合国教科文组织(UNESCO)在国际水文计划(IHP)



中制定了一系列研究课题和活动，并于1980年6月在赫尔辛基举行了人类活动对水情影响与代表性、实验性流域学术会议。1991年，美国水文科学国家委员会提出水文科学研究的五大问题中最受关注的是人类活动对水文效应的影响。在国际水文计划Ⅲ（1984—1989年）和Ⅳ（1990—1994年）期间，水文效应的研究与水利工程环境影响评价结合得更紧密，水文形势的改变对于生态环境的影响是大坝建设对生态环境的重要影响，任何地区水资源系统的合理开发、利用规划和管理，水文效应均是很重要的问题。与国际水文计划交叉的计划环境、生命和政策水文学（HELP）计划、国际实验和网络数据水流情势（FRIEND）计划以及与国际水文计划有联系的相关计划国际洪水行动计划（IFI）、国际泥沙行动计划（ISI）在水资源系统研究中，人类活动对水文情势的影响已成为主要的研究课题。目前，基于流域水文模型分析人类活动对流域水资源和洪水的影响是近代水文学发展的一个重要成就，随着分布式流域水文模型的不断成熟和普遍使用，这种分析研究人类活动对水资源和洪水影响的方法，将会越来越受到重视。

河流不仅具有供水发电、航运等经济功能，而且具有调节气候、改善生态环境等生态功能，对人类生存和发展意义重大。目前研究最多的是人类活动对河流健康的影响问题，维持河流健康生命的理念行动，在我国水利界得到了广泛的响应和认同，并引入水资源管理的实践。黄河水利委员会提出了“维持黄河健康生命”的目标，长江水利委员会提出了“维持健康长江，促进人水和谐”的治江新方略等，美国、澳大利亚、英国、南非等国家从20世纪90年代起已经展开了相关研究，并提出了对应的管理计划，对河流健康进行监测和评价。开发水电实际上相当于直接从水流中提取能量，过多开发利用水电必将导致其下游水流的动能降低，对冲积性河床来说，可能使水流冲刷河床和输送泥沙的能力降低，进而导致泥沙淤积、河床萎缩。水电站建设通过闸坝调度对河流实行径流调节，造成水文过程的均一化，也会降低洪水脉冲效应。维持河流健康生命的理念已经对中国江河治理的健康发展起到积极的促进作用，而且已在“十一五”水利发展规划中得到全面体现。2006年我国启动了财政部专项项目“全球江河泥沙信息管理数据库”，由中国水利水电科学研究院、长江科学院、黄河水利科学研究院、清华大学及武汉大学等多家科研单位和大专院校组成专项课题组，开展国家自然科学基金重大项目课题“长江水沙变化趋势与水利工程建设对河流健康的影响”“黄河水沙变化趋势与水利工程建设对黄河健康生



命的影响”“国外典型河流水沙变化趋势的研究”“国外典型水利工程建设对河流健康影响的研究”等的研究，主要目标是通过研究全球水沙变化趋势与水利工程对河流的影响，促进世界水文学科研究的发展，更好地处理人类活动与自然的和谐相处，为合理开发水能资源和保护生态环境提供技术支持。

1.3 拟解决的关键科学问题

气候变化研究的核心是气温、降水、辐射的趋势性变化及其引起的生态、水文和极端事件等问题。气候变化对水文过程的影响重点是针对降水分布、局地暴雨、河川径流、冰川冻土、土壤含水量、地下水位、陆面蒸发等方面的分析，其中气候变化对河川径流影响的研究是重点也是最复杂的内容。从目前的研究成果和技术方法来看，首先是气候变化直接产生了降水的剧烈波动或持续性变化，由此引起了径流的响应，这种响应在流域水文模型的研究中比较成熟也能够比较准确地模拟；但是，仍然不能解决气候变化的程度差异问题、气候条件不变情况下的差异问题，以及这种差异引起的径流变化的成分和不同气候因子的作用；也没有解决气候变化引起的降雨径流关系变化中哪些是正常的降水变化引起的波动，哪些是气候变化引起的不可逆转的趋势性流域变化。其次，是研究中仍然很少涉及气温变化在降雨径流关系中的作用，更没有看到辐射或辐射能对土壤湿度以及流域蒸发能力的影响和作用程度。

近年来，关于人类活动对径流影响的研究越来越多，主要表现在区域水资源开发利用、土地利用/覆被变化、梯级水电站开发对径流的影响几个方面，研究重点仍然是径流组分的变化、空间分布的变化、频率分布的变化以及极端事件的变化，对此分布式水文模型和 TOPMODLE 模型都已经给出了较好的模拟研究方法。

白龙江流域地处长江流域上游，大陆腹地，属于内陆性气候。受复杂的地形地貌影响，流域内气候差异较大。根据农业气候区划，流域内有北亚热带、暖温带、温带、寒温带及少数高山寒带区等；自然环境复杂，生态条件多样，自然资源丰富；同时存在着两种迥然不同的产流机理，即蓄满产流和超渗产流。流域下垫面条件变化引起部分区域的产流方式的变化，这就使得分布式模型在应用性能上出现较大的误差甚至是错误。因此，研



究人类活动如何引起局部区域产流机理变化、径流如何变化及其变化幅度成为重要问题，在白龙江流域相对水资源开发利用程度不高、土地资源有限、水能资源比较丰富，梯级水电站开发对径流的影响显得尤为突出。

气候变化和梯级水电站开发对径流同时产生影响，这就形成了更加复杂的问题。综合分析，主要存在四个方面的可能性：

一是由于气候变化引起气温升高、降水偏少、蒸发增大现象。

二是由于气候变化引起气温升高、降水偏多、蒸发减小现象。

三是由于梯级水电站的开发对河流水位、径流形成的影响。

四是由于气候变化和梯级水电站开发共同影响而引起气温升高、径流减少。

从这四个方面来看，气温升高是普遍一致的气候变化特征，梯级水电站开发是白龙江流域人类社会活动的主要特征。如何甄别气候变化和梯级水电站开发的作用及其影响程度，如何将降水变化、气温变化、梯级水电站开发对径流的影响分离出来是需要解决的难题，并且将产流机理区分开并采用不同的模型分析计算是重要的技术方法。

综合上述几方面的问题，本书选取白龙江干流舟曲以上区间、舟曲—武都区间、武都—碧口区间、上游的岷江宕昌水文站以上小流域、中游拱坝河黄鹿坝水文站以上小流域、下游白水江文县水文站以上小流域作为重点对象，进行气候变化和梯级水电站开发对径流影响的分析研究，努力解决以下几个关键的科学问题：

- (1) 白龙江流域气温、降水和蒸发变化趋势及其特征。
- (2) 白龙江干流及其主要支流径流变化趋势及其特征。
- (3) 白龙江流域气候变化对径流的影响，建立数学模型模拟径流过程。
- (4) 白龙江干流区间梯级水电站开发对径流的影响。
- (5) 建立数学模型分析气候变化和人类活动对白龙江流域径流的影响。

第2章 研究区概况

2.1 流域概况

白龙江发源于川、甘、青交界处西倾山东侧郭尔莽梁北麓的甘肃省碌曲县郎木寺附近，曲折东南流经四川省若尔盖县、甘肃省迭部县、舟曲县、武都区，复进入四川省，经青川、昭化汇入嘉陵江。白龙江流域地处甘肃省东南部，东经 $102^{\circ}30' \sim 105^{\circ}40'$ ，北纬 $32^{\circ}20' \sim 34^{\circ}10'$ ，呈西北—东南走向的狭长梭形，东北部和西北部隔着西秦岭，分别与西汉水流域和洮河流域接壤，西部以岷山为界，连接四川省岷江流域，南部则以摩天岭和四川涪江流域为邻，流域面积 32850km^2 ，跨甘肃省迭部、舟曲、武都、文县和四川省九寨沟、青川、昭化，在甘肃省境内面积为 27391km^2 ，占流域总面积的 83%。白龙江干流全长 576km，其中甘肃省境内 475km，占 82.5%；河源高程 4072m，河口高程 465m，落差达 3607m。

按河道性状和流域特点，白龙江划分为上、中、下游三段：①上游段从发源地至舟曲县城，河长 228km，属高原峡谷段，区间有达拉沟、多儿沟、腊子沟等支流汇入，平均河宽 100m，平均比降 11‰，植被覆盖好，蒸发量小，河道穿行峡谷，为侵蚀下切河槽；②中游段从舟曲县城至蒿子店，河长 157km，纵坡较大，支沟众多，泥石流发育，河道流向受山体走向影响，侧蚀力强，流速降低，固体径流沉积造成淤积段，区间有岷江、拱坝河、洋汤河汇入，平均河宽 250~300m，平均比降 3.1‰；③下游段蒿子店至交汇河口段，河长 150km，区间有白水江及其他支流汇入，平均河宽 300m，平均比降 2‰，该段植被较好，气候温热，降雨充沛。

白龙江流域地处青藏高原和四川盆地的过渡区。迭部以上水量很小，迭部至两河口属高山峡谷区，河流比降大，水流湍急，两岸森林茂密，有优良的水电站地址。两河口至武都段河谷开阔，水流平缓，两岸耕地多，植被差，泥石流多发，是白龙江泥沙的主要来源地带。武都以下至临江，是比较开阔的峡谷区。临江以下到碧口，又转入高山峡谷区，地形险峻，



山势雄伟，植被良好。碧口以下川谷相间，水流平稳。白龙江流域研究区域水系分布见图 2.1。

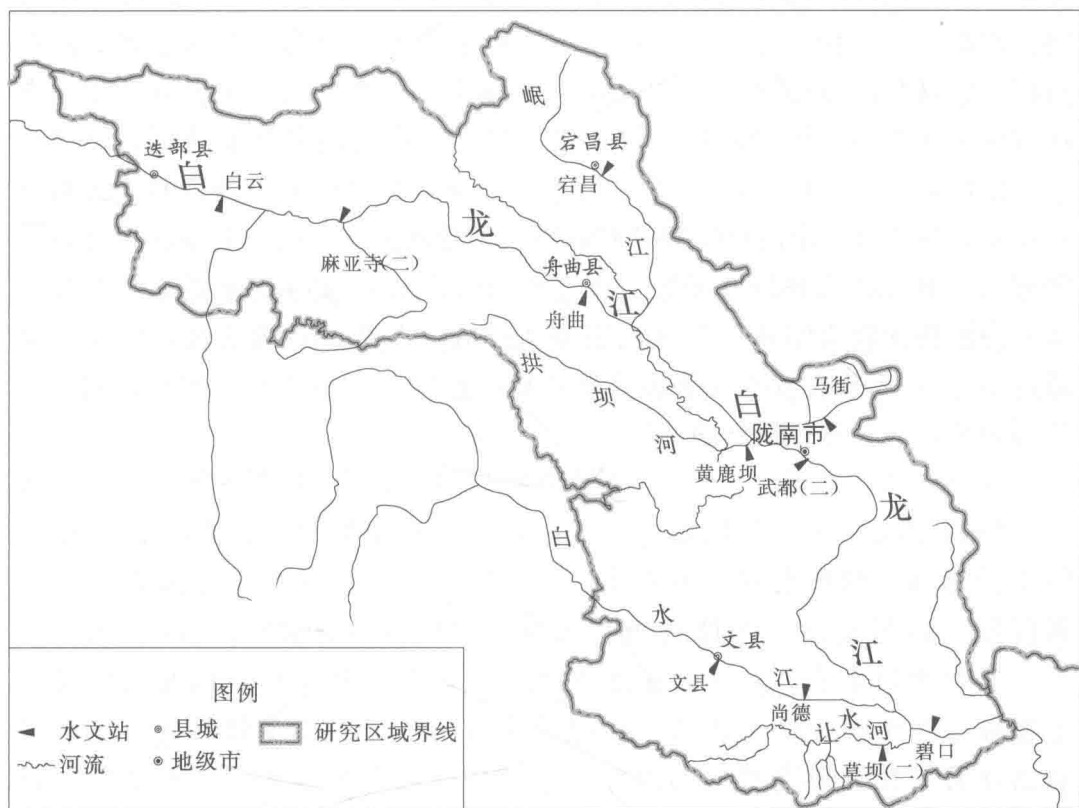


图 2.1 白龙江流域研究区域水系示意图

2.2 地形地貌

白龙江流域流经的大地构造部位主要隶属于秦岭东西构造带及龙门山北东向构造带，近期构造活动显著。区内地势西高东低，两岸山岭海拔为 4000~1100m，相对高差多在 1000m 以上，呈现出山高谷深、峰锐坡陡之景观。峡谷峭壁中，瀑布、急流、栈道遗址多处可见。由于水流的急剧下切，河谷断面多呈 V 形，宽谷、峡谷相间出现，峡谷一般为优良的水力枢纽坝址，宽谷是较好的天然库盆，河床覆盖层深厚，沿河阶地断续发育，两岸物理地质现象显著。流域地层除前古生界外，从古生界至新生界均有分布。由于地处构造单元不同，各时代地层的空间分布与发育特征也有差



异,主要有南秦岭、摩天岭和龙门山分区地层,主要岩性分别有各类千枚岩、板岩、砂岩、灰岩、粉砂岩、页岩、石英闪长岩、黑云母花岗岩、砂砾岩等。流域区域构造分布有三个不同类型的构造体系,从上游至下游分别为武都山字形构造、摩天岭东西向构造带及龙门山北东向构造带。武都“山”字形构造是在秦岭东西构造带的基础上发育起来的,其白龙江中上游河段位于武都山字形构造的西翼,主要构造形态有白龙江复背斜,白龙江断裂带和益哇-舟曲断裂带;摩天岭东西向构造带由摩天岭复背斜、文县复背斜及石坊-临江-岸门口断裂带和青川断裂带组成;龙门山北东向构造带由隆起和拗陷、单式和复式褶皱、压性或扭性断裂以及与其垂直的张性断裂和斜交的扭性断裂组成,白龙江下游河段处于此构造带的北段,展布主要是林庵寺-茶坝断裂带及大茅山倾伏背斜。各构造体系特别是他们之间的分界断裂带,均具有长期活动的特点。

白龙江由于新构造运动的强烈隆起与河流的急剧下切形成了山高谷深、峰锐坡陡的景观。加之构造成因和区域地层特性,以及气候条件等因素的影响,两岸滑坡、泥石流、倾倒地等物理地质现象十分发育,阻塞河道、切断交通、淹埋村镇、毁坏农田的情况时有发生,且规模之大、暴发次数之多、危害程度之严重,在我国均属罕见。白龙江的滑坡主要分布在中游舟曲至外纳区间的沿江两岸,有100多处,其形态特征和活动特性在滑坡类型中较为独特,属推移式和牵引式。其滑动速度较快,但又不是急冲性滑坡。如1983年夏,舟曲县立节乡右岸北山发生滑坡,迫使立节乡政府搬迁;锁儿头、泄溜坡大滑坡(即舟曲大滑坡),曾多次发生堵江,1963年和1981年的滑动分别形成了高17m和22m的堰塞石坝,1991年舟曲县城下游12km的左岸南峪乡滑坡壅高水位20m,造成严重危害。与此同时,白龙江流域泥石流较普遍,主要分布在中游舟曲至临江段。在长约150km的沿江两岸,有泥石流沟上千条,大小沟道无不暴发泥石流,这也是白龙江固体径流的主要来源。倾倒地主要分布在白龙江中下游河段,其厚度一般为10~20m,最大的可达40m以上。

2.3 气象条件

白龙江流域地形变幅较大,气候因素因为地理位置和地势高程的变化,