



# 气候变化下金沙江流域水资源与风险 综合管理项目（一期）

## 简要报告



二零一八年五月



## 中瑞合作项目团队

### 中瑞合作项目联合指导执行委员会



**中华人民共和国水利部**  
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China



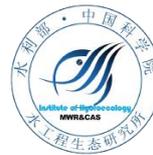
Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

**Swiss Agency for Development  
and Cooperation SDC**

## 中方项目执行团队



CWRC



BICST



CRSRI



BOH



CISPDR

## 瑞方项目执行团队



## 致谢

谨向协助我们完成此报告的所有人士表达我们最深切的谢意。该项目由下列瑞士和中国团队执行并提供支持。

### 中方项目团队

管晶、周竹林（长江水利委员会国际合作与科技局）

陈进、许继军、潘登、袁喆、洪晓峰、林玉茹、庄超、许斌、余洪悦、周研来（长江水利委员会长江科学院）

黄艳、陈永生、何晓聪、侯丽娜、严凌志、唐兵（长江水利委员会长江勘测规划设计研究院）

杨文发、陈力、张方伟、张晶、秦昊、陈喻彬（长江水利委员会水文局）

乔焯、陈晓娟、张鹏、杨志（水利部中国科学院水工程生态研究所）

王国庆、刘翠善、金君良、鲍振鑫（南京水利科学研究所）

何元庆、王世金（中国科学院寒区旱区环境与工程研究所）

### 瑞方项目团队

Juerg ELSENER 、 Christian WILLI 、 FU Rao 、 Martin RAUBER 、 Peter LOCHER、  
Quirin OBERPRILLER、 Christina WILLI、 Niels HOLTHAUSEN、 Denise FUSSEN、 Barla  
VIELI（EBP 公司）

Christoph HAEMMIG、 Luzia FISCHER（Geotest 公司）

Michael BAUMGARTNER（MFB 咨询公司）

Frédéric JORDAN、 Mathieu OREILLER（hydrique.ch 公司）

Javier GARCIA、 Javier FLUIXA（Crealp 公司）



## 目 录

1	项目概况.....	1
1.1	项目由来.....	1
1.2	研究区概况.....	3
1.2.1	自然地理及社会经济 .....	3
1.2.2	研究区域选择 .....	7
1.2.3	具体研究区域 .....	9
1.3	项目组织管理形式.....	9
2	项目目标.....	11
2.1	金沙江项目合作协议.....	11
2.2	项目一期目标（2015-2017年） .....	11
3	技术路线.....	13
4	研究内容.....	15
4.1	气象水文历史演变规律识别及未来气候变化趋势分析.....	15
4.1.1	气象水文演变特征 .....	15
4.1.2	未来气候变化趋势 .....	18
4.2	冰川积雪动态监测技术及融雪径流模拟研究.....	20
4.2.1	玉龙雪山冰川地面观测站 .....	20
4.2.2	基于遥感影像的金沙江上游地区融雪径流模拟研究 .....	23
4.3	多时间尺度径流预报模型技术研究.....	25
4.3.1	金沙江流域 RS 模型构建及效果评价 .....	25
4.3.2	金沙江流域气象预报及效果评价 .....	26
4.3.3	金沙江流域径流预报及效果评价 .....	27
4.4	金沙江流域未来气候变化综合影响评估.....	30
4.4.1	气候变化对水力发电量的影响 .....	30
4.4.2	气候变化对适宜种植面积的影响 .....	31
4.4.3	气候变化丽江市供需水影响 .....	32
4.4.4	气候变化对水生态的影响 .....	35
4.4.5	气候变化对洪旱事件的影响 .....	38
4.5	金沙江流域应对气候变化适应性措施.....	43



4.5.1	国内外适应气候变化的经验 .....	43
4.5.2	丽江市供需水适应性对策措施 .....	45
4.5.3	金沙江中下游防洪抗旱应对措施 .....	46
4.5.4	金沙江流域应对气候变化综合措施 .....	48
5	结论与建议 .....	51
5.1	主要结论 .....	51
5.2	建议 .....	53
6	亮点与展望 .....	55
6.1	本项目亮点 .....	55
6.2	展望 .....	56
7	附件：项目产出对技术和管理水平的影响 .....	57



## 图目录

图 1 金沙江项目合作协议.....	2
图 2 金沙江流域地理位置.....	4
图 3 金沙江典型河段.....	4
图 4 金沙江流域多年平均降水和气温.....	5
图 5 屏山站 1950-2011 年径流量.....	5
图 6 金沙江流域 2010 年 GDP 密度和人口密度空间分布图.....	6
图 7 金沙江流域主要水电站.....	6
图 8 金沙江项目研究具体区域.....	7
图 9 项目组织结构及职责.....	10
图 10 项目技术路线.....	13
图 11 金沙江流域 1961 至 2010 年降水和气温变化趋势空间分布.....	16
图 12 直门达、石鼓、攀枝花、华弹和屏山站年均径流量变化.....	16
图 13 金沙江流域最长连续无雨日和最大场次降水量变化.....	17
图 14 金沙江流域自然灾害事件查询系统平台.....	17
图 15 多套气候变化情景下气温和降水变化中位数.....	18
图 16 未来气候变化影响下径流变化.....	19
图 17 玉龙雪山冰川地面观测站位置.....	20
图 18 玉龙雪山冰川地面观测站主要部件.....	21
图 19 玉龙雪山地面观测站数据共享网站.....	21
图 20 风速, 风向和气压监测数据.....	22
图 21 气温和降水监测数据.....	22
图 22 冰川监测影像.....	22
图 23 基于 MOD10A2 的积雪覆盖率变化 (2006 年和 2009 年).....	23
图 24 SRM 模型参数敏感性分析结果.....	24
图 25 2006 年径流模拟值与实测值.....	24
图 26 金沙江流域 RS 模型构建.....	25
图 27 金沙江流域 RS 模型模拟值与实测值.....	26
图 28 气象预报格点/水资源二级区.....	26
图 29 CFS 和 ECMWF 降水预报误差空间分布 (6 月和 7 月).....	27
图 30 HMFm 模型与长江委 SQL 数据库关联图系及系统界面.....	28
图 31 HMFm 模型的应用.....	28
图 32 径流预报模式.....	28
图 33 关键断面径流预报效果评价.....	28
图 34 主要水库来水预报效果评价.....	29
图 35 气候变化对水电站发电量的影响.....	31
图 36 气候变化对水电站溢流量的影响.....	31
图 37 适宜种植区界定方法.....	32
图 38 未来气候变化背景下适宜种植指数变化.....	32
图 39 气候变化对农业需水的影响.....	33
图 40 气候变化对生活、工业、旅游业和河道外生态需水的影响.....	34
图 41 气候变化对河道内生态需水的影响.....	34
图 42 气候变化背景下三堆子站径流量和水温.....	36



图 43 气候变化情景下可利用栖息地面积比较.....	37
图 44 圆口铜鱼亲鱼和幼鱼在不同情景下可利用栖息地面积.....	38
图 45 气候变化影响下十年一遇 3 日最大洪水变化.....	39
图 46 气候变化影响下山洪易发区极端降水变化.....	39
图 47 气候变化影响下气象干旱持续时间和强度变化.....	40
图 48 气候变化影响下十年一遇最小 7 日流量变化.....	40
图 49 气候变化影响下农业干旱频率和强度变化.....	41
图 50 考虑或不考虑 CO <sub>2</sub> 肥料效应条件下作物生育期内缺水量变化.....	42
图 51 城区适应性措施评分网状图* .....	46
图 52 农业区适应性措施评分网状图* .....	46

## 表目录

表 1 项目一期主要成果与产出目标.....	12
表 2 本项目优选的未来气候变化情景.....	18
表 3 降水预报产品基本信息.....	27
表 4 丽江市各行业和各地区缺水量.....	35
表 5 中国水资源领域应对气候变化的适应性对策.....	43
表 6 国外水资源领域预防气候变化的对策调研.....	44
表 7 防洪措施集.....	47
表 8 抗旱措施集.....	48



# 1 项目概况

## 1.1 项目由来

气候变化是人类社会当前面临的重大而紧迫的全球性问题，已经成为国际社会关注的热点。气候变化所导致的气温升高、海平面上升、极端天气与气候事件增加，对自然生态系统和人类生存环境已经产生了越来越严重的影响。仅仅在 2017 年，飓风“哈维”、“艾尔玛”和“玛丽亚”肆虐美洲，造成重大生命和财产损失，数百万人的正常生活陷入停顿。在孟加拉国、印度和尼泊尔，洪灾创下历史新高，造成 1200 多人死亡，4000 多万人生活受到影响。据政府间气候变化专门委员会 IPCC 发布的研究报告表明，受全球气候变化影响，未来极端洪涝和干旱灾害风险有不断增加的趋势。中国是一个水资源短缺国家，人均水资源量只有 2200m<sup>3</sup>，不到世界平均水平的一半，且水资源的时空分布不均，近期洪水与干旱事件较为频繁，未来气候变化可能会给中国水资源管理带来严峻的挑战。

2009 年 4 月，中国水利部与瑞士联邦环境、交通、能源和信息部签署了《中华人民共和国水利部与瑞士联邦环境、交通、能源和信息部合作协议》，在此合作协议框架下，中瑞双方前期开展了多个项目的水利科技合作。例如新疆自治区的冰川监测、汉江洪水风险评估等项目，取得了令人满意的合作成果。为进一步加强中瑞双方水利合作，2013 瑞士向中国提交了《中瑞水资源综合管理与防灾减灾合作建议书》，以期双方合作开展气候变化背景下的涉及自然灾害防治与水管理的风险综合管理研究。

在应对气候变化引发的水资源安全问题和水旱灾害等方面，瑞士及欧盟等国家近些年提出了一些新的风险综合管理方法、预测预警技术和适应性对策措施。引进和借鉴瑞方的风险综合管理方法、融雪径流模拟技术，以及水资源风险综合管理和未来气候情景分析的先进经验，有助于增强中国对未来气候变化的预估水平，以及深入了解气候变化可能产生的各方面影响，有针对性的采取应对措施及组织预案，从而提高流域/区域应对气候变化的能力。除了提供先进的水文预报技术和综合风险管理方法外，瑞士在制定及实施应对极端干旱事件的应急预案、工程措施和风险管理对策等方面有着丰富的经验，可以与中方共享，共同提高。

长江流域水资源相对较为充沛，是我国水资源配置的战略水源地，是流域乃



## 中瑞合作金沙江项目



至中国经济社会可持续发展的重要依托。长江流域位于季风气候区，降水时空分布不均、水资源系统脆弱性较大，且容易出现洪水和干旱灾害。就位于长江上游的金沙江流域而言，近些年来出现的持续干旱已经给当地的经济社会带来了严重影响和巨大损失。目前该地区对气候变化影响认识还不足，相关的水资源综合管理和水旱灾害预测预警能力等方面还较为薄弱。因此开展气候变化下金沙江流域水资源与风险综合管理，具有重要的研究和应用意义。

基于此，2014年中瑞双方专家共同提出了一个新的合作项目“气候变化下金沙江流域水资源与风险综合管理”（简称“金沙江项目”），并于2014年2月在武汉召开了金沙江项目的启动会议，先期签订了中瑞合作气候变化下水资源与风险管理项目启动阶段合同书。2014年5月12日在瑞士，中国水利部与瑞士发展合作署及瑞士联邦环境署正式签署了关于气候变化背景下金沙江流域水资源和风险管理合作协议。



图 1 金沙江项目合作协议

经过中瑞双方专家为期一年的前期工作，共同拟定了中瑞合作金沙江项目的研究目标、研究内容、主要成果、组织管理形式、经费预算及任务合作分工等。此次中瑞双方合作主要目的是通过共同发挥双方的优势，将瑞士在气候变化影响分析和风险管理经验与中方在水利工程规划和流域综合管理经验相结合，以提升长江流域应对气候变化的管理水平并发挥示范作用。2015年3月27日武汉，在中国水利部和瑞士发展合作署有关官员的共同见证下，以长江科学院为代表的中方专家组与以 EBP 公司为代表的瑞士专家组，共同签订了中瑞合作金沙江项目一期合同书。



图 2 金沙江项目启动会

## 1.2 研究区概况

### 1.2.1 自然地理及社会经济

#### (1) 地理位置

金沙江流域位于中国长江上游，因江中沙土呈黄色得名。金沙江的发源地（即长江的发源地）为青海省唐古拉山主峰各拉丹冬雪山，正为源沱沱河。金沙江从沱沱河源头至宜宾市干流河长 3364km，流域面积 47.32 万  $\text{km}^2$ ，约占长江流域面积 26%。年平均流量  $4750\text{m}^3/\text{s}$ ，以降水补给为主，地下水和冰雪融水补给为辅。

直门达水文站以上为河源地区，直门达到云南丽江市石鼓镇为金沙江上段，上段河长约 965km，落差 1720m，平均坡降 1.78‰。从石鼓镇至四川省新市镇为

金沙江中段，河长约 1220 km。从新市镇至宜宾市区岷江口为金沙江下段，河长约 106 km。

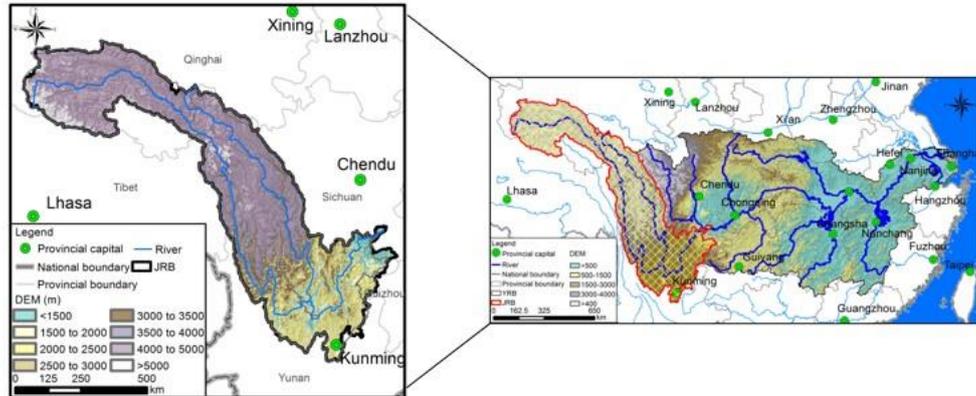


图 2 金沙江流域地理位置



图 3 金沙江典型河段

## (2) 降水 and 气温

金沙江流域多年平均年降水量约 710mm：下段（新市镇-宜宾）河段两侧山地年降水量约为 900-1300mm，相应径流深为 500-900mm；中上段属高山峡谷区，降水和径流垂直分布明显，两岸山地年降水量为 600-800mm，径流深为 400-700mm。直门达以上的河源地区年降水量不足 200mm。降水主要集中在 6-10 月份，约占全年降水的 75-85%。气温的空间分布特征与降水类似，总体趋势是由上游向下游、由西北向东南递增。上游多年平均气温在 0°C 以下，中游多年平均气温在 5°C 左右，下游区域多年平均气温在 10°C 以上（图 4）。

## (3) 径流

金沙江降雨径流主要来源于石鼓以下及其支流雅砻江。石鼓以上多年平均年径流量为 424 亿 m<sup>3</sup>，屏山站多年平均年径流量为 1428 亿 m<sup>3</sup>（图 5），约占长江

宜昌以上总径流量的 1/3。金沙江实测年最大径流量：屏山站为 1952 亿  $m^3$ （1954 年），石鼓站为 546 亿  $m^3$ （1964 年）。实测年最小径流量：屏山站 1065 亿  $m^3$ （1942 年），石鼓站 29 亿  $m^3$ （1959 年）。

金沙江洪水是由融雪（冰）洪水和暴雨洪水形成，以暴雨洪水为主。暴雨主要产生于金沙江中下游地区。洪水一般发生在 6 月下旬至 10 月中旬，尤以 7-9 月最为集中。一次洪水持续时间最短的约 10 天左右，最长的达 30 天左右，多年平均 15 天洪量约占 60 天洪量的 1/3，60 天洪量超过汛期洪量的一半。金沙江中下游干流调查历史洪水均以 1924 年为最大，重现期相当于 60-120 年一遇，屏山站推算最大洪峰流量达 36900  $m^3/s$ 。

金沙江的枯水期从 11 月至次年 5 月，枯季径流量约占年径流总量的 25%（屏山站），最枯的 2-4 月仅占年径流总量的 7% 左右。枯季径流变化平缓，较为稳定。根据实测资料，近 60 年来以 1942 年、1959 年最枯。屏山站 1942 年 11 月至 1943 年 5 月径流总量为 288 亿  $m^3$ ，1959 年 11 月至 1960 年 5 月径流总量为 296 亿  $m^3$ 。屏山站实测最小流量为 1060  $m^3/s$ （1982 年 3 月 22 日），石鼓站为 310  $m^3/s$ （1960 年 1 月 30 日）。

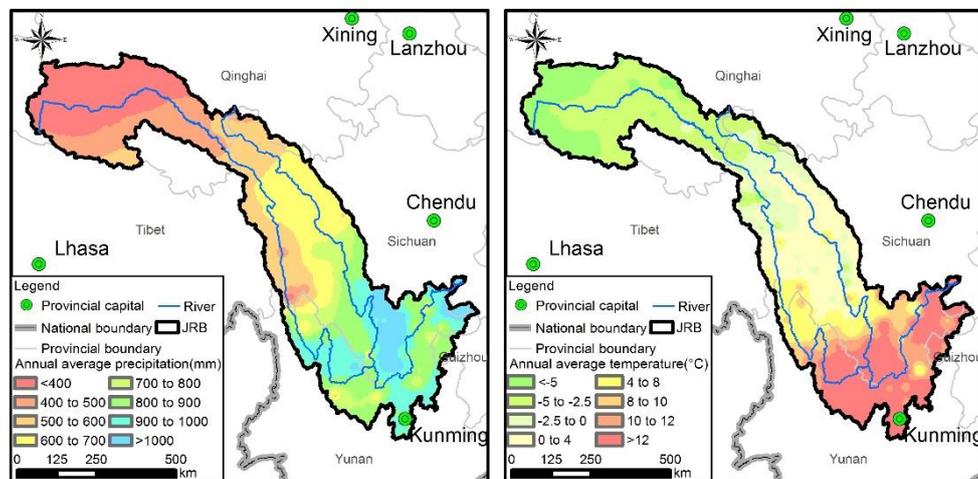


图 4 金沙江流域多年平均降水和气温

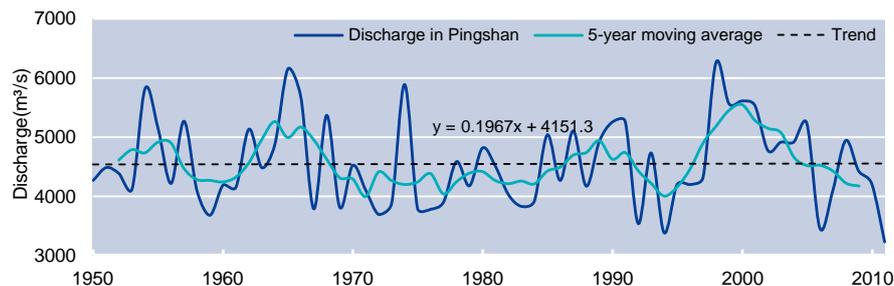


图 5 屏山站 1950-2011 年径流量

#### (4) 流域经济社会

2010 年金沙江流域总人口约为 2372 万人，其中四川省约 659 万人，云南省约 1377 万人，贵州省约 84 万人，青海省和西藏自治区人口较少。流域地广人稀，平均人口密度约为 50 人/km<sup>2</sup>，人口密度呈由西向东，由北向南逐渐增加的趋势。2010 年全流域地区生产总值约为 4157 亿元，人均地区生产总值为 17527 元。

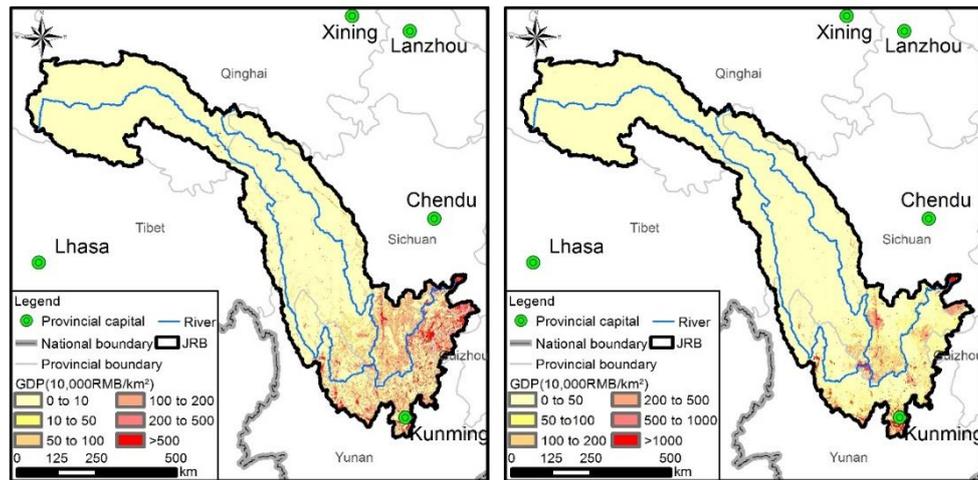


图 6 金沙江流域 2010 年 GDP 密度和人口密度空间分布图

#### (5) 水利工程

金沙江坡陡流急，水量丰沛且稳定，落差大且集中。金沙江拥有丰富的水能资源，其蕴藏量达 1.124 亿 KW，约占全国的 16.7%，可开发水能资源达 9000 万 KW，其水能资源的富集程度堪称世界之最。金沙江是中国具有重要战略地位的最大水电基地，干支流已建和在建的大型水电站二十余座。



溪洛渡水电站大坝

向家坝水电站

图 7 金沙江流域主要水电站

溪洛渡水电站位于金沙江下游干流上，是一座以发电为主，兼有防洪、拦沙和改善下游航运条件等巨大综合效益的工程。溪洛渡电站装机容量 1380 万 KW，

拦河坝为混凝土双曲拱坝，坝顶高程 610m，最大坝高 278m；左右两岸布置地下厂房，各安装 9 台单机容量为 70 万 KW 的水轮发电机组，年发电量为 571-640 亿 KW·h。溪洛渡水库正常蓄水位为 600m，死水位为 540m，水库总容量为 126.7 亿 m<sup>3</sup>，调节库容为 64.6 亿 m<sup>3</sup>。工程于 2005 年底开工，2013 年首批机组投产发电。

向家坝水电站位于金沙江下游干流上，下距水富城区 1.5km、宜宾市区 33km。电站整体规模仅次于三峡、溪洛渡，为我国第三大水电工程。电站设计左、右岸各安装当今世界最大单机容量 80 万 KW 混流式水轮发电机组 4 台，总装机容量 640 万 KW，多年平均发电量达 307.47 亿 KW·h。工程于 2006 年正式开工，2008 年截流，2012 年首批机组发电，2015 年建设完工。

## 1.2.2 研究区域选择

鉴于金沙江流域在中国水资源管理中的重要地位以及其对气候变化敏感的特征，本项目按照“点-线-面”相结合的方式，选择金沙江流域、关键河段和典型城市作为研究区（图 8），开展气候变化影响及对策措施研究。具体缘由如下：

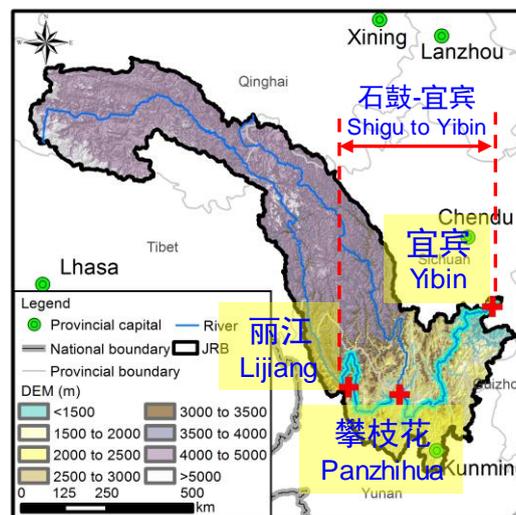


图 8 金沙江项目研究具体区域

### (1) 选择金沙江流域作为研究对象的缘由

①金沙江流域气候多变且差异性大，对全球气候变化较为敏感。金沙江流域位于青藏高原及其东部边缘，上游河源地区的沱沱河位于海拔高度超过 5000m 以上的高寒气候区，年平均气温只有 -4.2℃，存在大量的冰川和冻土；而下游出口的宜宾市海拔高度只有 500m 左右，属亚热带气候，年平均气温为 18℃。



②金沙江流域降雨时空分布不均，易受全球气候变化影响。金沙江上游河源地区的年均降水量只有 200mm 左右，而金沙江下游的年均降水量能够达到 1200mm。

③金沙江流域生态环境脆弱，是中国重要的生态环境敏感和脆弱区，尤其是上游及河源地区的高寒生态系统易受气候变化影响。

④近年来金沙江流域水资源问题凸显，尤其是中下游地区干旱灾害频繁，严重影响了当地的社会经济发展和生态安全，下游局部山区还存在山洪灾害威胁。

⑤近期金沙江流域受到的人类活动影响越来越大，中下游干流及其支流已建及在建多个梯级水电站。

⑥金沙江流域所在的青藏高原，并誉为世界第三极，是长江、黄河、怒江、澜沧江、雅鲁藏布江、恒河、印度河等众多河流的发源地。本项目选择金沙江流域作为研究区域，其研究成果将对其他流域具有示范作用。

## (2) 选择丽江作为研究对象的缘由

为深入研究气候变化对经济社会的影响，项目选择位于金沙江中游的丽江市作为示范地区。位于云南省西部的丽江市，是中国历史文化名城之一，是世界文化遗产、世界自然遗产和世界记忆遗产的“三遗产城市”。丽江坝区涉及丽江市古城区 4 个街道办事处、3 个乡镇和玉龙县的 5 个乡镇。2013 年，丽江坝区总人口 20.24 万人，城镇人口 16.97 万人，农村人口 3.27 万人。丽江市是世界著名的旅游城市，每年来访的游客人数超过 2000 万。

根据丽江气象站资料统计，多年平均降水量为 972mm，多年平均气温为 12.6°C。丽江坝区人口密集、水资源条件相对匮乏，属于水资源比较紧缺的地区。丽江坝区（丽江城区所在片区）多年平均水资源总量为 1.6 亿  $m^3$ ，人均占有水资源量为 838 $m^3$ ，仅为云南省人均水资源量的 18%左右，属重度缺水地区。2010 年以来，受到气候变化和人类活动的影响，丽江坝区遭遇连年干旱，加上区域经济社会发展加快，用水总量增大，丽江坝出现了水资源短缺、黑龙潭泉群断流、河网水系萎缩等水危机现象，引起了国内外社会各界的高度关注。

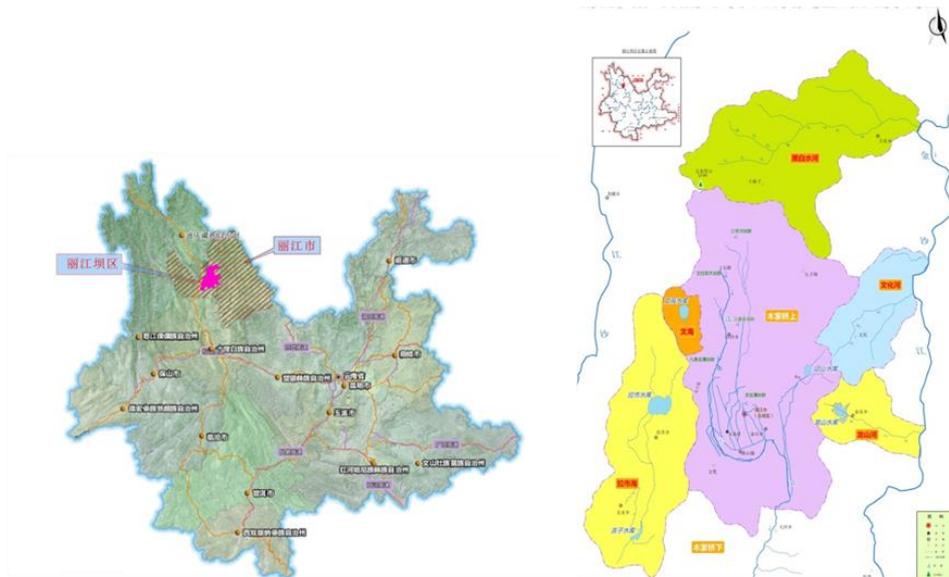


图 9 云南省丽江市行政区划和水系图

### 1.2.3 具体研究区域

根据金沙江项目的总体安排和研究内容，项目研究区域分为三个尺度：

(1) 针对金沙江整个流域（面积为 47.32 万  $\text{km}^2$ ），主要研究气候变化情景及流域气象水文要素变化趋势；

(2) 针对丽江市地区（面积为 2.06 万  $\text{km}^2$ ），主要研究气候变化对当地水资源影响及其对策措施，并在其玉龙雪山上布设可视化监控仪器，观测冰川和积雪变化；

(3) 针对金沙江中下游干流（石鼓至宜宾河段，长约 1100km），以攀枝花市和宜宾市为典型城市，研究气候变化对城市防洪抗旱的影响及其应对措施，同时研究气候变化对金沙江中下游干流河流水生态（指标性鱼类）影响。

### 1.3 项目组织管理形式

项目组织主要包括指导委员会、项目领导小组、项目实施管理单位和项目实施单位，各组织的职责如图 9 所示，中国和瑞士团队在项目组织层面上密切合作，共同推进该项目的开展。

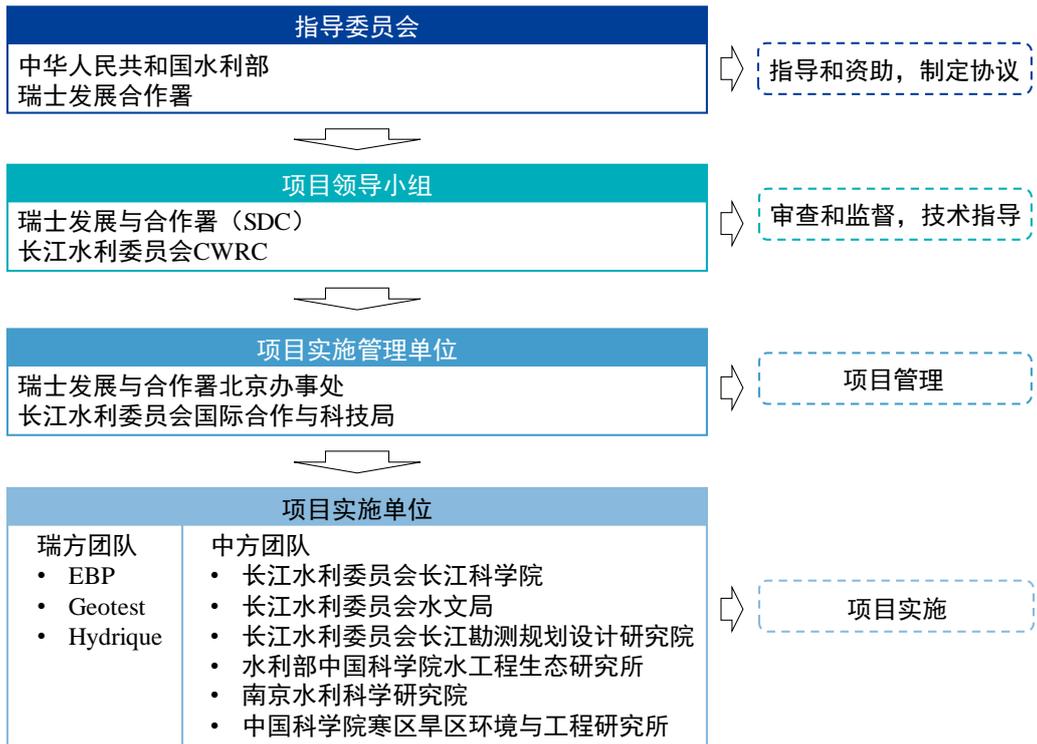


图 9 项目组织结构及职责



## 2 项目目标

### 2.1 项目合作协议

面向金沙江流域水安全保障和应对气候变化的重大需求,按照双方专家的建议,中国水利部与瑞士发展合作署及瑞士联邦环境署协商拟定了金沙江项目合作协议。该协议拟定以提高气候变化和社会经济发展背景下金沙江流域水资源综合管理水平为长期目标,以期今后为国家应对气候变化宏观政策制定、环境外交与气候谈判、保障国家粮食、水资源以及生态安全、促进社会经济可持续发展提供可借鉴的技术和经验,包括:

- 明晰气候变化及社会经济发展对金沙江流域水循环及水资源管理的影响,其相关研究方法和成果能推广应用于其他流域;
- 研发山区及冰雪区水文气象预报技术及模型,为金沙江流域水资源常态和极值态的管理提供技术支撑;
- 借鉴其他国家应对气候变化的经验,发展适合金沙江流域的水资源及风险管理战略;
- 提高长江水利委员会适应气候变化及社会经济发展的能力;
- 研发气候变化影响评价技术,完善并制定金沙江流域水资源及风险管理适应性措施;
- 为长江流域以及中国其他江河流域提供水资源及风险综合管理案例示范;
- 为中国和瑞士等国家制定气候变化和社会经济发展背景下适应性措施提供科学支撑和经验借鉴。

### 2.2 项目一期目标 (2015-2017 年)

按照中瑞双方签订的项目一期合同要求,计划在 2015-2017 年开展的研究目标主要集中在四个方面: 1) 认识金沙江流域气象水文情势、提升金沙江流域的气象水文预报水平; 2) 识别未来气候变化对金沙江流域供水及极端水旱灾害事件影响; 3) 提出未来气候变化条件下金沙江流域综合管理适应性对策措施; 4) 搭建中瑞双方在水资源综合管理以及气候变化适应性对策方面信息的交流与共享平台。项目一期的预期成果与产出目标,具体见表 1 所示。



表 1 项目一期主要成果与产出目标

成果一	认识金沙江流域气象水文情势、提升金沙江流域的气象水文预报水平
产出 1.1	识别历史上洪旱灾害事件的特征
产出 1.2	整编和分析 50 年的金沙江流域水文气象数据
产出 1.3	提高玉龙雪山监控能力
产出 1.4	试点地区的水域生态系统概览
产出 1.5	开发短-中-长期水文气象预报模型 HMFMM
产出 1.6	试点区域供需水现状及未来趋势分析
成果二	识别未来气候变化对金沙江流域供水及极端水旱灾害事件影响
产出 2.1	确定和选择合适的全球气候模式和 IPCC 排放情景
产出 2.2	生成气候变化方案
产出 2.3	气候变化影响评估准备
产出 2.4	未来气候变化对径流和供水的影响及不确定性分析
产出 2.5	气候变化对洪旱灾害事件的影响及不确定性分析
产出 2.6	分析气候变化对水域生态系统的影响及不确定性
产出 2.7	评估产出 2.4-2.6 对利益相关方的影响
成果三	提出未来气候变化条件下金沙江流域综合管理适应性对策措施
产出 3.1	收集和分析多山地区适应气候变化的国际经验
产出 3.2	试点地区应对气候变化的供需水工程与非工程策略和措施分析
产出 3.3	防洪和抗旱的应对策略和措施分析
产出 3.4	基于风险评估和成本效益分析的金沙江流域水资源综合管理策略评估与整合
成果四	搭建中瑞双方在水资源综合管理以及气候变化适应性对策方面信息的交流与共享平台
产出 4.1	组织和参加培训团
产出 4.2	组织和参加国际研讨会
产出 4.3	发表和出版成果、宣传和交流网站制作
产出 4.4	搭建金沙江流域科学考察的平台

### 3 技术路线

鉴于金沙江流域气候条件的复杂性、自然地理环境的特殊性以及水资源问题的严峻性，为满足气候变化和社会经济发展背景下的水资源综合管理需求，本项目融合水文学、水资源学、气象学等多学科理论与技术的新进展，以原型观测、数值模拟与现代地理信息技术为关键支撑，按照“资料收集与监测能力建设-模型构建与实践应用-历史规律与未来趋势分析-影响评估与特征识别-对策制定与评价”的总体思路予以开展（图 10）。

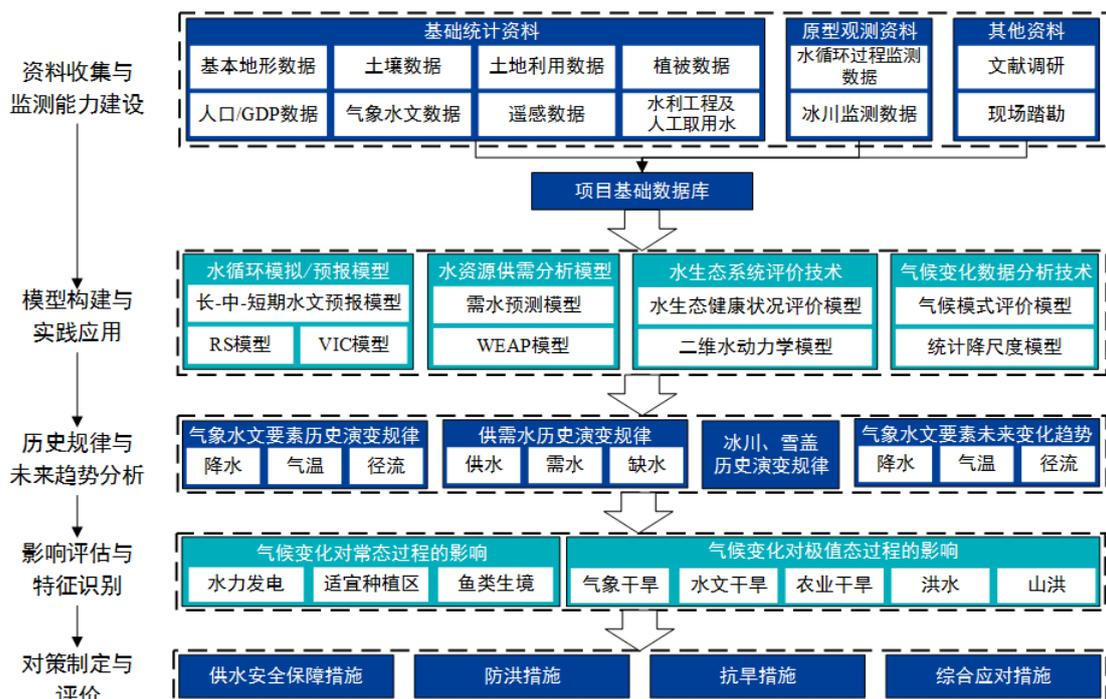


图 10 项目技术路线

(1) 资料收集与监测能力建设：以原型站网观测（水文、气象、生态环境监测等）为主，包含遥感观测、基础地理信息、社会经济要素统计、文献资料查询和实地调查踏勘等手段在内的多尺度、多维度、多源数据的采集；经多方案比选，确定冰川地面站布设位置与监测要素，实时动态采集冰川变化信息。在此基础上，采用信息处理和融合技术实现多源基础信息的有效前处理，为后续工作提供数据支撑。

(2) 模型构建与实践应用：针对气候变化对气象水文要素影响评估的需求，构建 RS 模型、VIC 模型和长-中-短期水文预报模型；针对气候变化对水资源供需关系影响评估的需求，构建需水预测模型和 WEAP 模型；针对气候变化对水



生生态环境影响评估的需求，构建水生态健康状况评价模型和一维-二维水动力学模型；针对降低气候变化评估结果不确定性的需求，构建气候模式评价模型和统计降尺度模型。通过构建并校验上述模型，为气候变化及其影响评估提供技术支撑。

(3) 历史规律与未来趋势分析：基于历史观测数据及所构建的模型，识别金沙江流域降水、气温、径流等关键水循环要素的历史演变规律；评价极端水文事件（最长连续无雨日、最大连续降水量）的特征及变化；分析丽江市供需水关系及缺水量的变化；基于遥感资料和观测数据，分析冰川及雪盖面积的变化特征；评价多套气候模式对于历史气象水文要素的模拟效果，经筛选和订正后集成相对最优模式下的气候变化模拟/预估数据集，并驱动所构建的水文模型，分析未来气候变化背景下，金沙江流域关键水循环要素（降水、气温、径流等）可能的变化趋势。

(4) 影响评估与特征识别：评估未来气候情景下的水循环过程变化对极端水文事件（干旱、洪涝）、水力发电、农业生产、供需水关系、生态系统等方面的可能影响程度与范围，为综合应对措施的制定提供科学依据。

(5) 对策制定与评价：基于未来气候变化影响分析结果，通过对供水安全保障措施、防洪措施、抗旱措施等进行评价，在此基础上，形成金沙江流域综合应对措施。

## 4 研究内容

### 4.1 气象水文历史演变规律识别及未来气候变化趋势分析

以增温为主要特征的气候变化将加速大气环流和水文循环过程，导致全球不同尺度水资源的重新分配，进而影响生态环境和人类社会的经济发展。为满足未来社会经济发展与水安全保障需求，首先需要科学认识和掌握气象水文演变规律及未来变化趋势特征。

本项目基于金沙江流域 45 个气象站和 5 个水文站逐日观测资料，结合自主研发的 HydroAnalysis 软件包，识别近 50 年来金沙江流域降水、气温和径流等关键水循环要素的空间格局和时间演变特征；同时，基于多套气候模式预估成果，经模式比选和统计订正后，分析未来 2021-2050 年和 2070-2099 年的降水和气温的变化趋势，并结合水文模型，评价未来气候变化背景下的径流变化特征。主要包括两个方面的研究内容：（1）近 50 年气象水文演变特征（Output 1.2）；（2）未来气候变化趋势（Output 2.1, 2.2&2.3）。

#### 4.1.1 近 50 年气象水文演变特征

##### （1）气象水文演变规律

分析全球变暖背景下区域气象水文要素的演变规律是认识气候变化、实现水资源开发利用及管理的重要基础性工作。本项目利用金沙江流域及周边共计 45 个气象站点逐日降水和气温数据，采用时间序列分析技术，识别近 50 年来金沙江流域关键气象要素的演变特征，其结果表明：1) 近 50 年来，金沙江流域年降水量总体变化不大，呈现出略微的增加趋势，其中，上游地区降水量普遍增加，下游地区则是普遍减少；2) 温度增长趋势显著，1961 至 2010 年期间，气温增加速率为  $0.2^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ，近 10 年来多年平均气温相对于 2000 年以前上升约  $1.0^{\circ}\text{C}$ ，其中，上游地区增温速率较快（图 11）。

径流变化趋势的分析选用直门达站、石鼓站、攀枝花站、华弹站和屏山站，各站径流量均呈现出一定程度的增加趋势，但仅华弹站的增加趋势通过了显著性检验（图 12）。除气候变化影响外，上游地区水利工程建设、人工取用水加剧等，均会对天然径流的节律和总量造成影响。

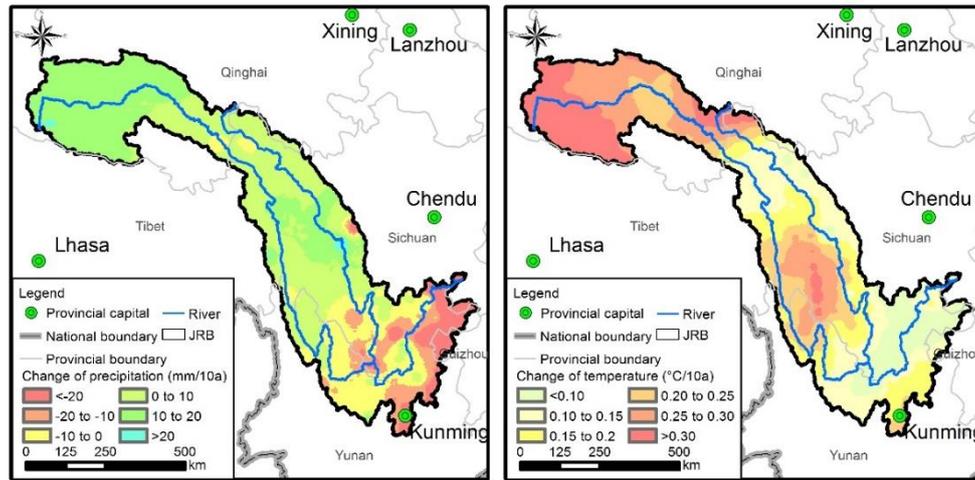


图 11 金沙江流域 1961 至 2010 年降水 and 气温变化趋势空间分布

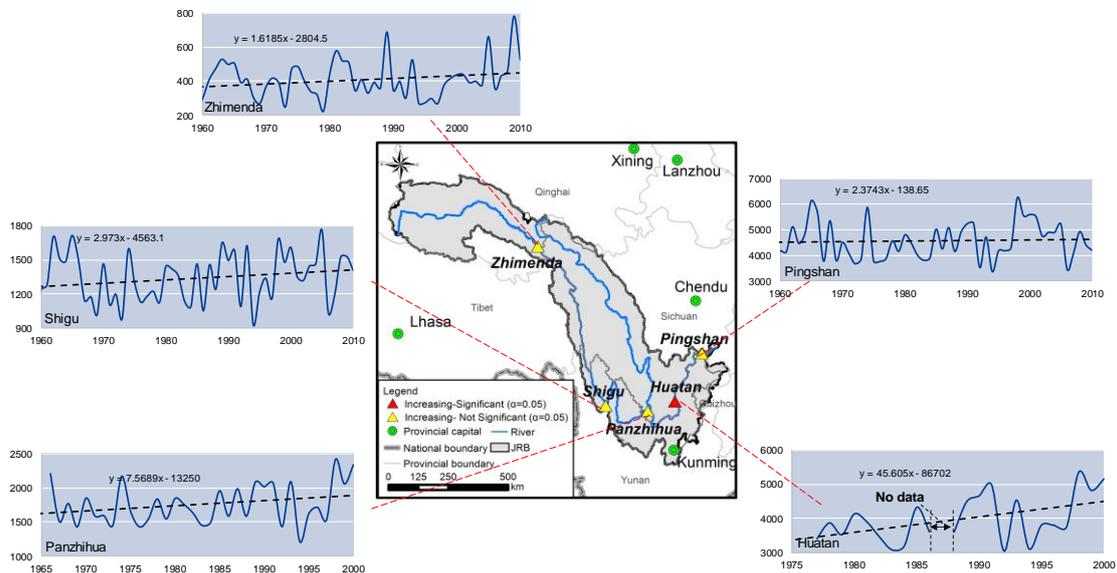


图 12 直门达、石鼓、攀枝花、华弹和屏山站年均径流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) 变化

本项目基于实测降水数据,对最长连续无雨日和最大场次降水量两个极端降水指标的近 50 年的变化趋势进行了分析,其结果表明:最长连续无雨日和最大场次降水量整体变化不大,其中,最长连续无雨日普遍呈现出减少的态势,中上游地区近 50 年最长连续无雨日减小率在  $3\text{d}/10\text{a}$  以上,仅下游部分地区呈现略微增加的态势;最大场次降水量在下游地区普遍呈现出减少的趋势,但中上游地区则是以增加趋势为主,但整体变化不大,全流域大部分地区最大场次降水量变化率不超过  $\pm 2.5\text{mm}/10\text{a}$  (图 13)。

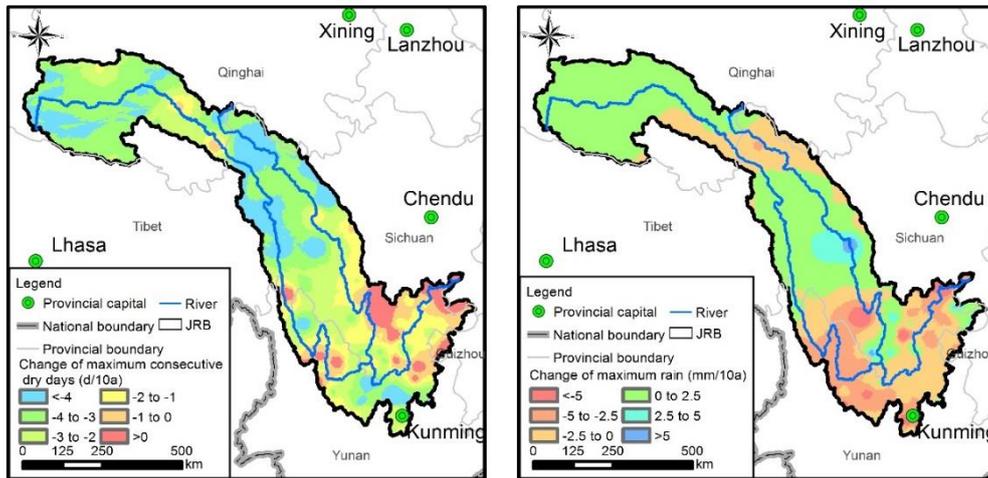


图 13 金沙江流域最长连续无雨日和最大场次降水量变化

## (2) 自然灾害事件查询系统平台

本项目构建了金沙江流域自然灾害事件查询系统平台，搜集了约 60 次自然灾害事件（洪涝，干旱，泥石流、山体滑坡等）的相关数据和信息。通过该系统平台，可以查询历史洪水和干旱等自然灾害事件的基本情况，包括受灾地区、灾害持续时间、时空分布特征、损失等（图 14）。

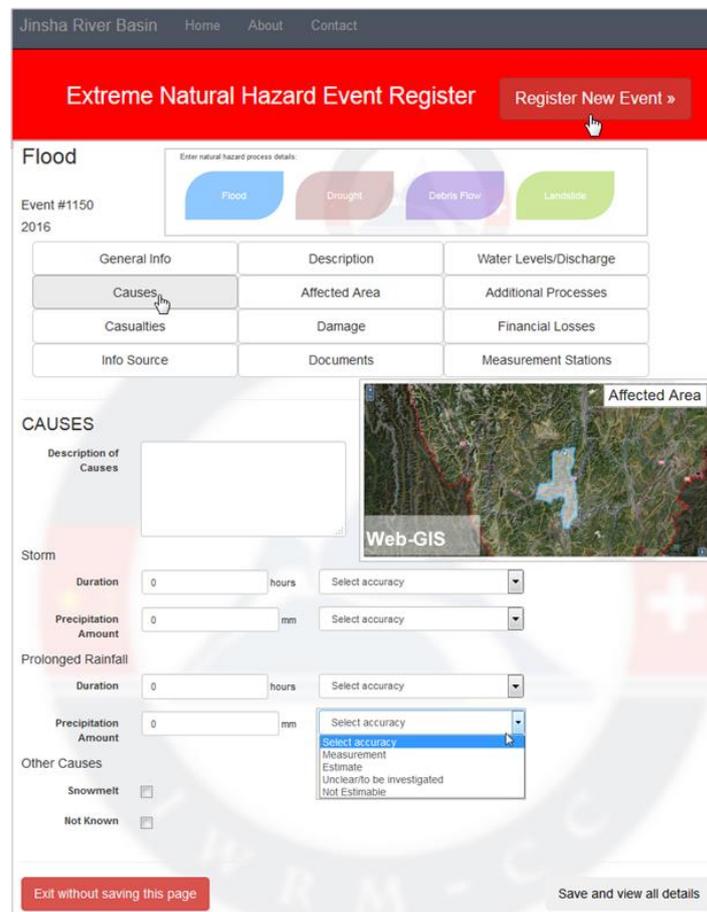


图 14 金沙江流域自然灾害事件查询系统平台

### 4.1.2 未来气候变化趋势

分析未来气候变化背景下气象水文要素变化趋势可为气候变化影响评估和政府部门制定决策提供依据，本项目选取不同排放情景和全球气候模式，利用降尺度后的气候模型预估数据，分析未来金沙江流域降水和气温变化趋势；同时，结合水文模型，评估未来气候变化对径流的影响。

#### (1) 气候模式优选及降尺度处理

本项目基于历史气象要素模拟效果和不确定性分析，评估与本项目相关的全球气候模式及排放情景，选择适用于金沙江流域的模式和排放情景，最终确定 24 种未来气候变化情景（表 2）；并采用 Delta 法和 LARS-WG 天气发生器对金沙江流域气候模式输出结果进行降尺度处理。

表 2 本项目优选的未来气候变化情景

GCM	Set 1: Near future		Set 2: Far future	Set 3: Far future
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
ACCESS1-3			FF45-7	
BNU-ESM			FF45-5	FF85-5
CCSM4		NF-6		FF85-6
FGOALS-g2		NF-1	FF45-1	FF85-1
FIO-ESM	NF-7			FF85-7
GFDL-ESM2G	NF-8		FF45-8	
GISS-E2-H				FF85-8
HadGEM2-ES		NF-2	FF45-2	FF85-2
IPSL-CM5A-LR		NF-5	FF45-6	
IPSL-CM5B-LR		NF-3	FF45-3	FF85-3
MIROC5		NF-4	FF45-4	FF85-4

#### (2) 未来气象要素变化趋势

未来气候变化分析结果表明：①近期（2021-2050 年）金沙江流域气温将升高约 1-2°C；远期（2070-2099 年）将升高约 2.5-4.0°C；中上游地区气温在非汛期上升幅度比在汛期的上升幅度大。此外，上游地区气温上升幅度比中下游地区温度上升幅度大。②近期汛期降水以增加为主，非汛期降水以减小为主，但其变幅均不超过±5%；远期汛期降水增加 5-6%，非汛期降水变化不大。降水变化较为明显的地区位于金沙江上游（图 15）。

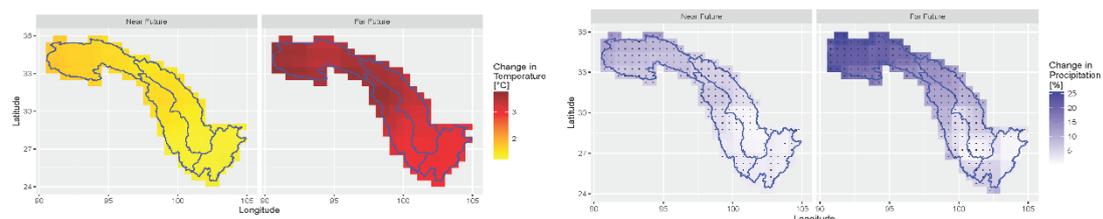


图 15 多套气候变化情景下气温和降水变化中位数

### (3) 未来径流变化趋势

利用降尺度后的气象要素预估数据驱动水文模型，对未来气候变化背景下金沙江流域径流过程进行分析，其结果表明：①在近期，大部分干流水文站的径流量呈现出增加的趋势，干流上所有站点径流量平均增加 2.4%，但支流上的水文站径流量变化存在较大不确定性；②在远期，金沙江流域大部分站点径流量变化趋势并不一致，但干流站点整体上以增加趋势为主，其径流量平均增加 5.2%。

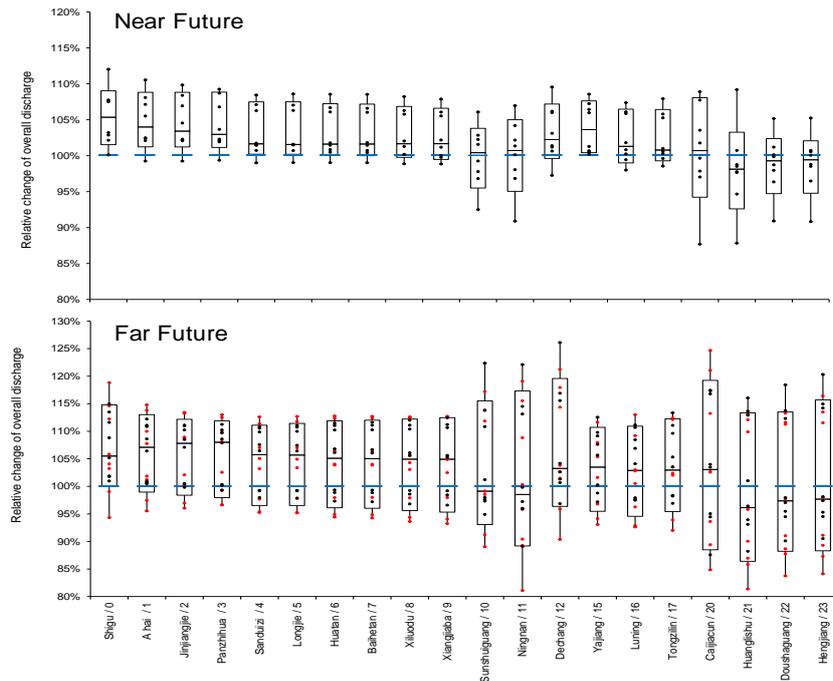


图 16 未来气候变化影响下径流变化

### 小 结

基于历史数据和气候模式结果，识别了近 50 年金沙江流域气象水文要素演变规律，评估了未来 80 年的变化趋势：

① 在历史时段，流域内年降水略微增加，最长连续无雨日普遍呈现出减少的趋势，最大场次降水量在下游地区普遍呈现出减少的趋势，但中上游地区则是以增加趋势为主，气温增加明显，径流量变化不大；

② 未来中上游地区的年降水量增加明显，而下游地区变化不大，气温显著增加，径流变化不确定性较大，但干流上以增加趋势为主。

本项目所识别的历史气象水文变化特征是评价未来气候变化的参考，所分析的未来气象要素过程是后续评价气候变化影响的基础。

## 4.2 冰川积雪动态监测技术及融雪径流模拟研究

受气候变化影响，在金沙江流域冰雪变化引起的水文效应、环境效应、资源效应、生态效应、灾害效应和社会效应日趋显著，对未来生态与环境安全和社会经济等将产生广泛和深刻的影响。实时动态监测冰川变化，识别融雪径流对气候变化的响应是冰川融水补给区气候变化影响研究的关键。

本项目以玉龙雪山为例，开展冰川积雪动态监测技术研究。该雪山位于金沙江中游，是中国冰雪覆盖地区最南端的冰川，对气候变化敏感，具有很强的代表性；同时，本项目以长江源区为例，开展融雪径流模拟研究。主要内容分两个方面：（1）玉龙雪山冰川地面观测站建设，包括方案比选、设备安装、数据共享平台建设等方面（Output 1.3a）；（2）基于遥感影像和融雪径流模型的金沙江上游地区融雪径流模拟，包括积雪面积反演、模型参数敏感性分析、融雪径流模拟效果评价等方面（Output 1.3b）。

### 4.2.1 玉龙雪山冰川地面观测站

为实时监测冰川变化和地面气象情况，为冰川物质平衡模拟、冰川运动分析以及气候变化认知提供数据，本项目通过方案比选，选址白水河1号冰川处建设冰川地面观测站，可为研究气候及冰川变化提供连续观测数据，同时，也可为预测冰川灾害提供依据。

#### （1）地面观测站及数据共享平台建设

观测站位于海拔高度4600m的白水河1号冰川处（图17），于2016年9月安装完成。可实时监测温度、降水、湿度、风速、风向、冰川影像等数据，并能将其显示在门户网站上。自动冰川监测站的运行，可以大幅减少人工测量工作量，提高监测效率（图19）。

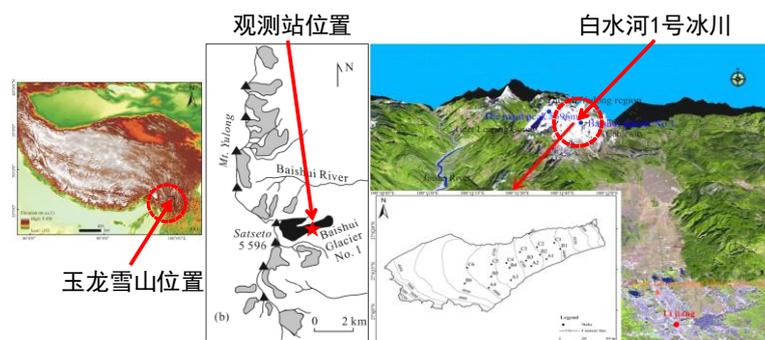


图 17 玉龙雪山冰川地面观测站位置



图 18 玉龙雪山冰川地面观测站主要部件\*

\*注：避雷针 (a)、气象站 (b)、GSM 天线 (c)、卫星天线 (d)、冰川上部照相机 (e1)、冰川中部照相机 (e2)、冰川下部照相机 (e3)、太阳能板 (f)、数据记录箱 (g)、三脚架 (h)

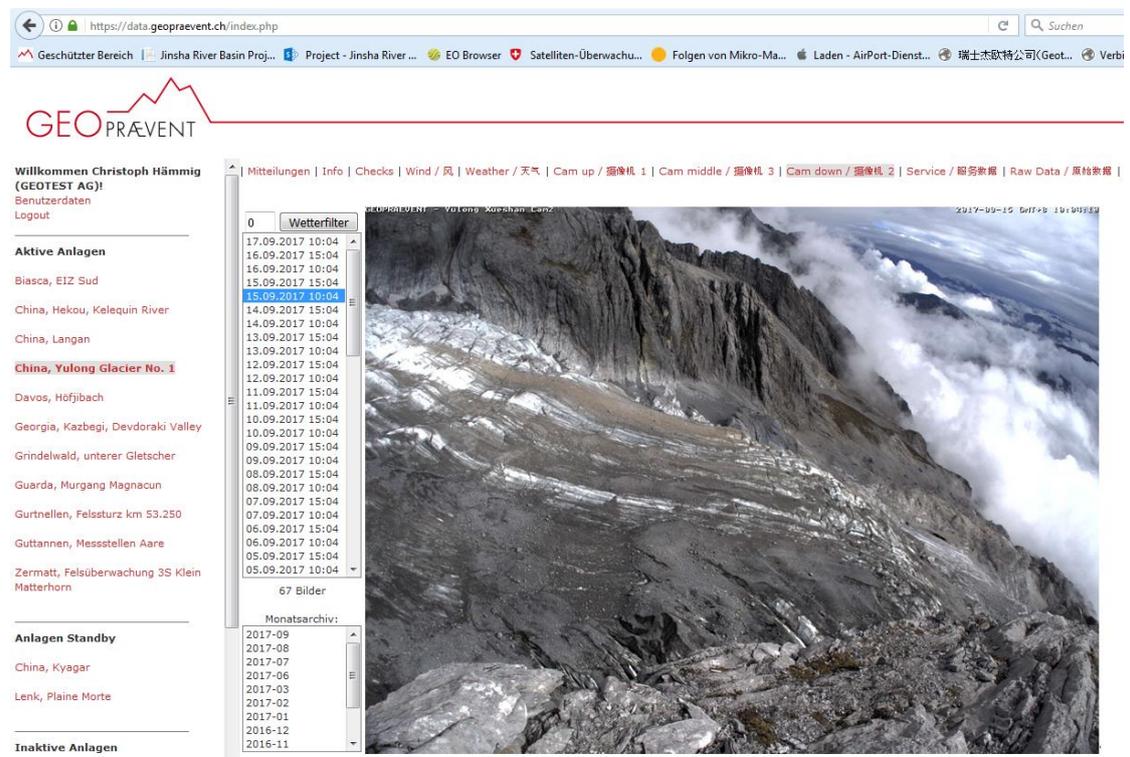


图 19 玉龙雪山地面观测站数据共享网站

## (2) 2016-2017 年期间监测数据

2016年9月至2017年9月期间，部分时段内观测站设备故障，经维护和维修后正常运行。试运行期间，观测站对当地气象信息和冰川影像资料进行了自动采集（图 20 至图 22），其中，冰川运动可通过自然特征的时间变化和位移（例如裂隙，沉积物覆盖物等）来识别。

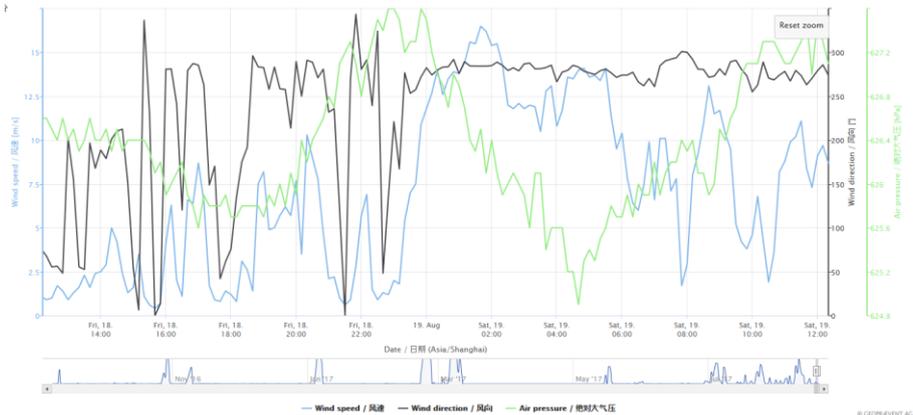


图 20 风速，风向和气压监测数据

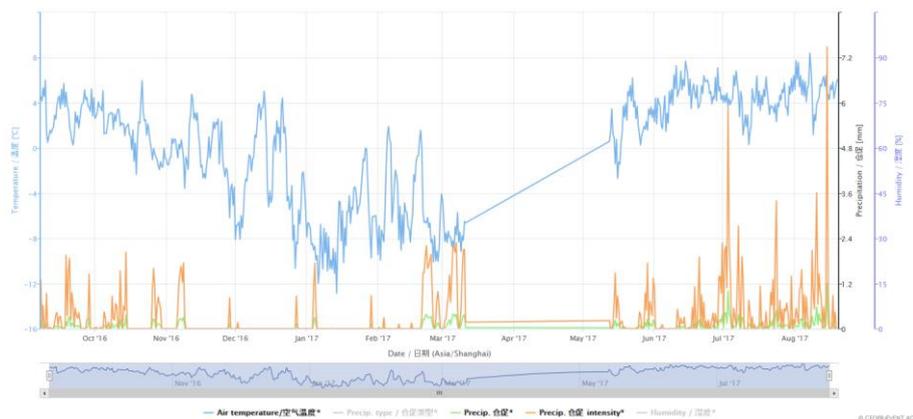


图 21 气温和降水监测数据



图 22 冰川监测影像\*

\*注：通过冰川上部石块（红圈处）移动距离，判断冰川运动状况，即在 11 个月期间，移动近 30m

## 4.2.2 基于遥感影像的金沙江上游地区融雪径流模拟研究

准确的融雪径流模拟对于识别气候变化影响，解决灌溉、防洪和水力发电等方面的水资源管理问题至关重要。本项目以位于青藏高原三江源地区的长江源为研究区（面积约为 137,827 km<sup>2</sup>），基于 MODIS 卫星数据、气象水文数据、数字高程模型、地理信息系统构建融雪径流模型（snowmelt runoff model, SRM），以期定量评估冰川河流融雪径流对气候变化的响应提供模型工具。

### (1) 积雪面积遥感反演

本研究应用 MODIS 单日积雪产品（MOD10A1）和 8 日合成最大积雪产品（MOD10A2）反演典型年长江源区积雪面积变化。其结果表明：长江源区降雪非均匀分布；季节性降雪通常出现在融雪季节开始和结束时，短期积雪只有几厘米厚，融化较快；MODIS 8 日合成的积雪产品相对于实际值略偏高，从而导致径流模拟值偏大，因此，本项目中推荐使用基于处理的 MODIS 单日积雪产品作为后续融雪径流模型的驱动数据（图 23）。

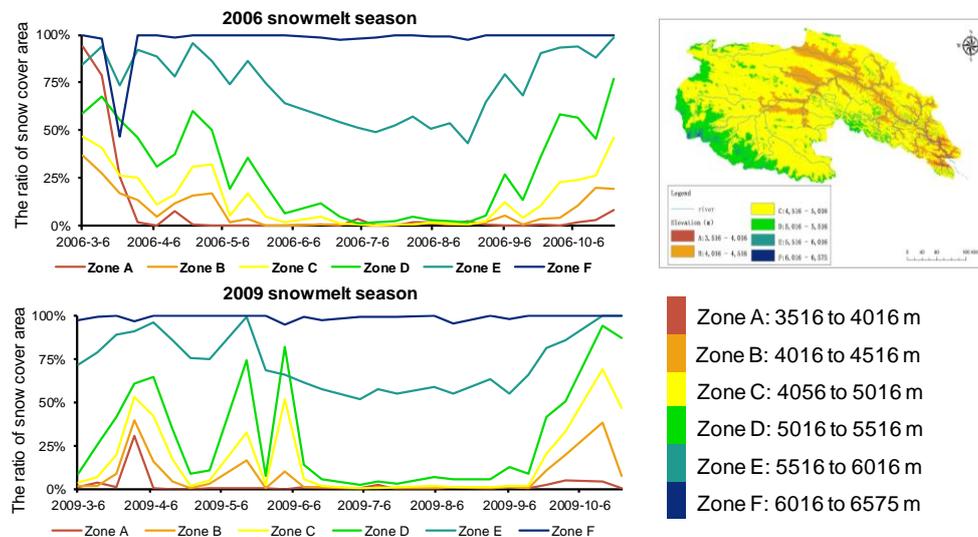


图 23 基于 MOD10A2 的积雪覆盖率变化（2006 年和 2009 年）

### (2) 参数敏感性分析

SRM 模型中，需要率定的参数主要有温度直减率 ( $\gamma$ )、临界温度 ( $T_{crit}$ )、度日因子 ( $a$ )、流域时滞 ( $L$ )、融雪径流系数 ( $C_s$ )、降雨径流系数 ( $C_R$ )、降雨贡献面积 ( $RCA$ )、退水系数 ( $k$ )。除参数  $RCA$  外，其余参数敏感性分析结果如图 24 所示：径流模拟对参数退水系数 ( $k$ ) 和降雨径流系数 ( $C_R$ ) 较为敏感。

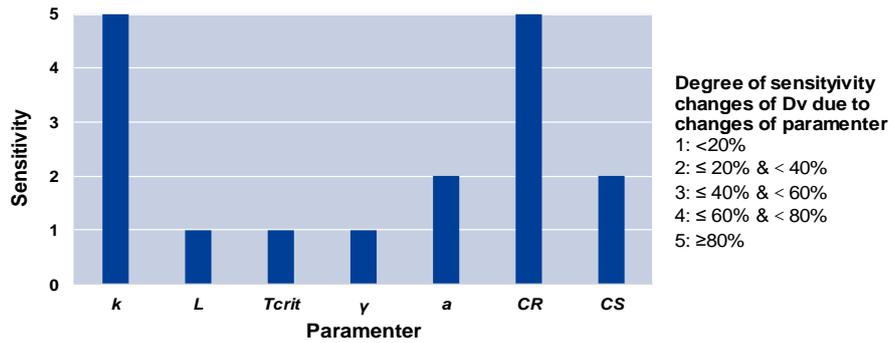


图 24 SRM 模型参数敏感性分析结果

### (3) 模型模拟效果评价

SRM 模型在 2006 年份径流模拟值与实测值对比如图 25 所示，模型评价结果如图 25 所示。其结果表明：模拟值与实测值的确定性系数 0.86，相对误差为 -7.3%，尽管峰值模拟效果较差，但整体上能反映年内径流的变化过程。

情景模拟的结果表明：整体而言，融雪对总径流的贡献有限相对较小，约为 10%，但其贡献率的大小亦在垂向差异性，即高海拔地区的融雪贡献率要高于低海拔地区（最高区域贡献率为 49.72%，最低区域仅为 1.97%）。

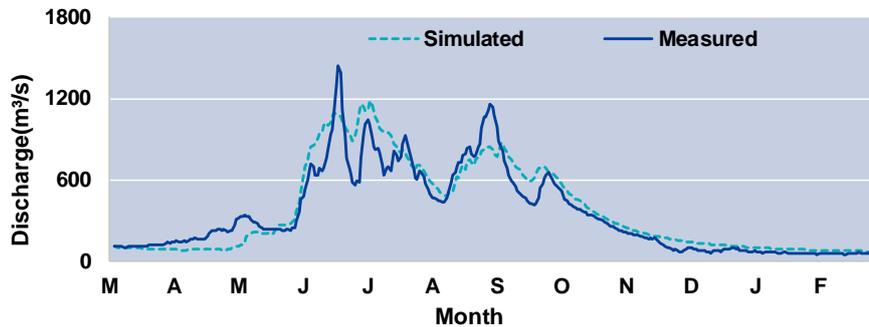


图 25 2006 年径流模拟值与实测值

## 小 结

本项目在玉龙雪山建立冰川地面观测站，并构建了长江源区融雪径流模型，识别了积雪变化及其对径流的影响：

- ① 所建立的冰川观测站可实时动态监测现场气象条件及冰川变化；
- ② 长江源区降雪非均匀分布；季节性降雪通常出现在融雪季节开始和结束时，短期积雪只有几厘米厚，融化较快；融雪对总径流的贡献有相对较小，但高海拔地区的融雪贡献率要高于低海拔地区。

本项目所建立的冰川观测站可为气候变化影响认识、冰雪灾害预警提供基础数据支撑；所构建的融雪径流模型可为冰川融雪区对气候变化的响应研究和水资源管理提供技术支撑。

### 4.3 多时间尺度径流预报模型技术研究

准确的径流预报是提高金沙江流域应对气候变化能力的重要手段。金沙江干支流上目前已修建多个大型水库，主要用于发电、防洪、灌溉和航行等。大规模水库群联合优化调度是最大化发电效益、防洪效益、供水效益和生态效益的关键，但该项工作必须依赖可靠的流域水文预报成果。因此，本项目以 RS3.0 模型为基础，结合气象预报成果，构建金沙江水文预报模型（HMFM, hydro-meteorological forecast model），以实现长-中-短期不同时间尺度的水文滚动预报，并对径流模拟以及气象水文预报效果进行评价。

#### 4.3.1 金沙江流域 RS 模型构建及效果评价

本项目以 RS3.0 模型为水文预报的基础模型，对金沙江流域融雪、冰川融化、植被截留、土壤入渗、地表径流、河道汇流、水库调度等过程进行模拟。建模过程中，将金沙江流域划分为 53 个子流域，分区进一步划分为 1146 个产流单元，模型历史输入数据源于 388 个雨量站，73 个水文站和 11 座水库的实测数据，其他在建或规划的水库建成后，可直接集成于本模型中（图 26）。对比主要水文站 2010-2015 年期间的模拟值与实测值可知，模型平均 Nash-Sutcliffe 系数在 0.80 左右，模型能较好地模拟金沙江流域的径流过程（图 27），可用于水文预报及后续的气候变化影响分析。

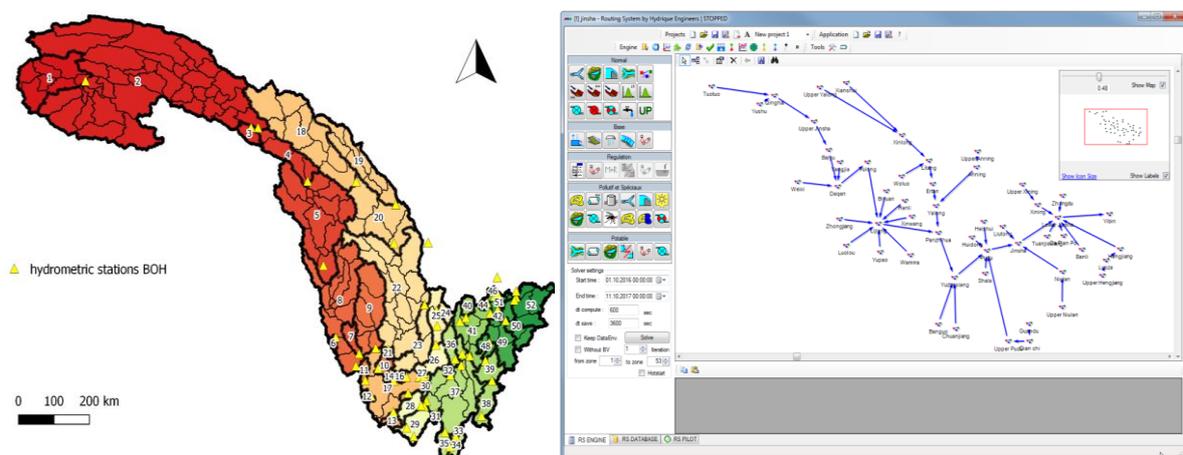


图 26 金沙江流域 RS 模型构建

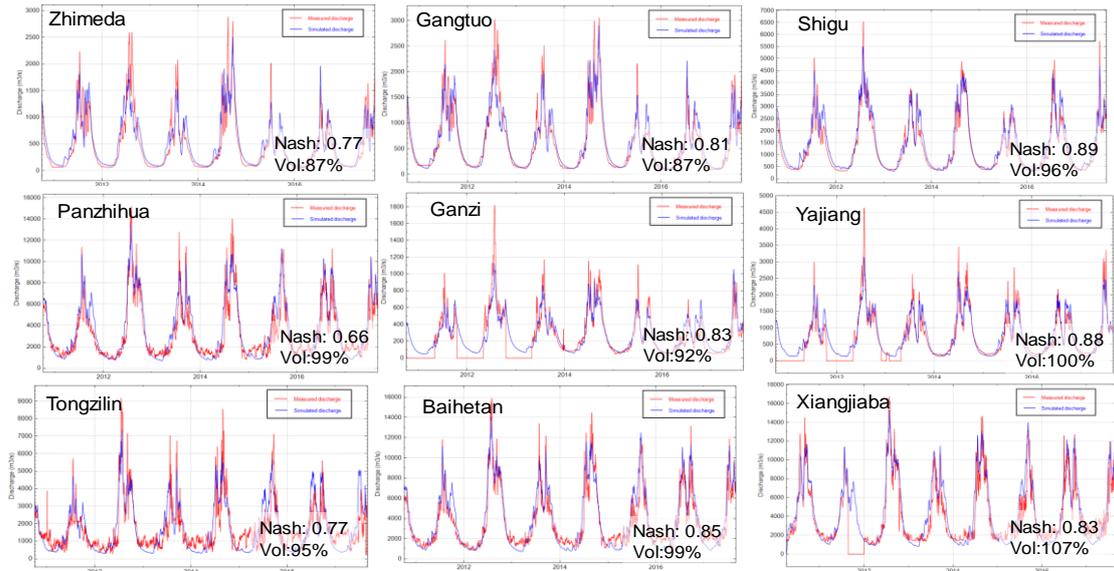


图 27 金沙江流域 RS 模型模拟值与实测值

### 4.3.2 金沙江流域气象预报及效果评价

气象预报结果源于长江委水文局预报降水预报产品、ECMWF 降水预报产品（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts）和 CFS 降水预报产品（Climate Forecast System）。各类预报产品涉及到的水资源区或格点位置如图 28 所示，其基本信息如表 3 所示。

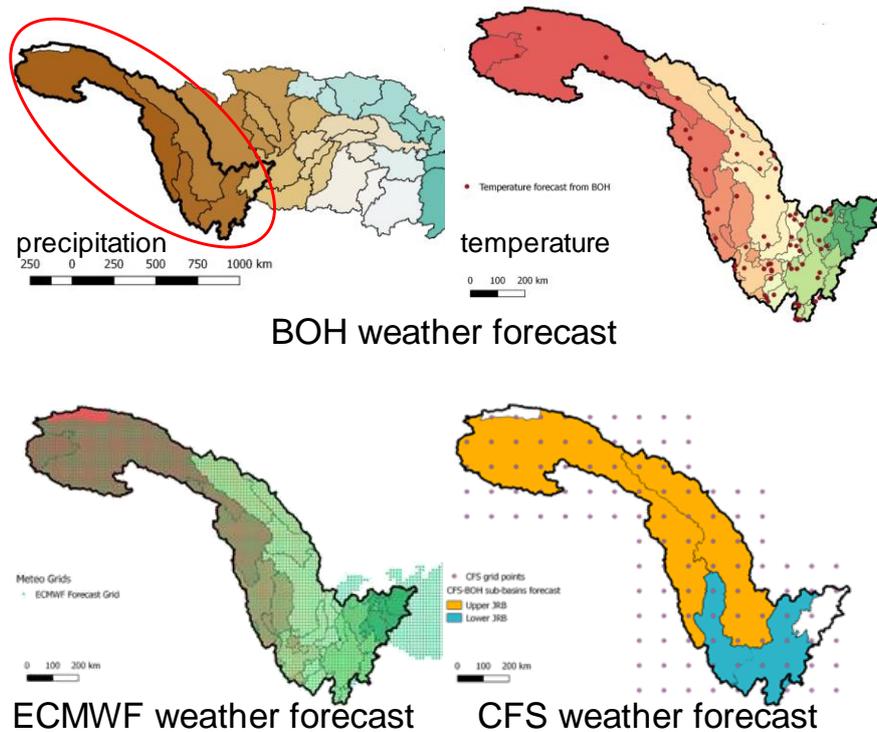


图 28 气象预报格点/水资源二级区

表 3 降水预报产品基本信息

预报产品来源	预报要素	预见期	时间尺度	空间尺度	驱动 RS 模型所用选用数据
长江委水文局	降水	7 天	1 天	水资源二级区	3 天
ECMWF	降水	10 天	3 小时	0.125°×0.125°， 约 12km×12km	10 天
CFS	降水	30 天	3 小时	0.937°×0.944°， 约 95km×95km	30 天

基于降水预报产品，本项目评价了 2007-2015 年期间，ECMWF 和 CFS 降水预报产品的精度（图 29），其结果表明：由于 ECMWF 预测降水产品的预见期短，其预报精度较 CFS 高；但两者与多年实测值相比，均存在一定程度的偏差，是径流预报不确定性的主要来源。

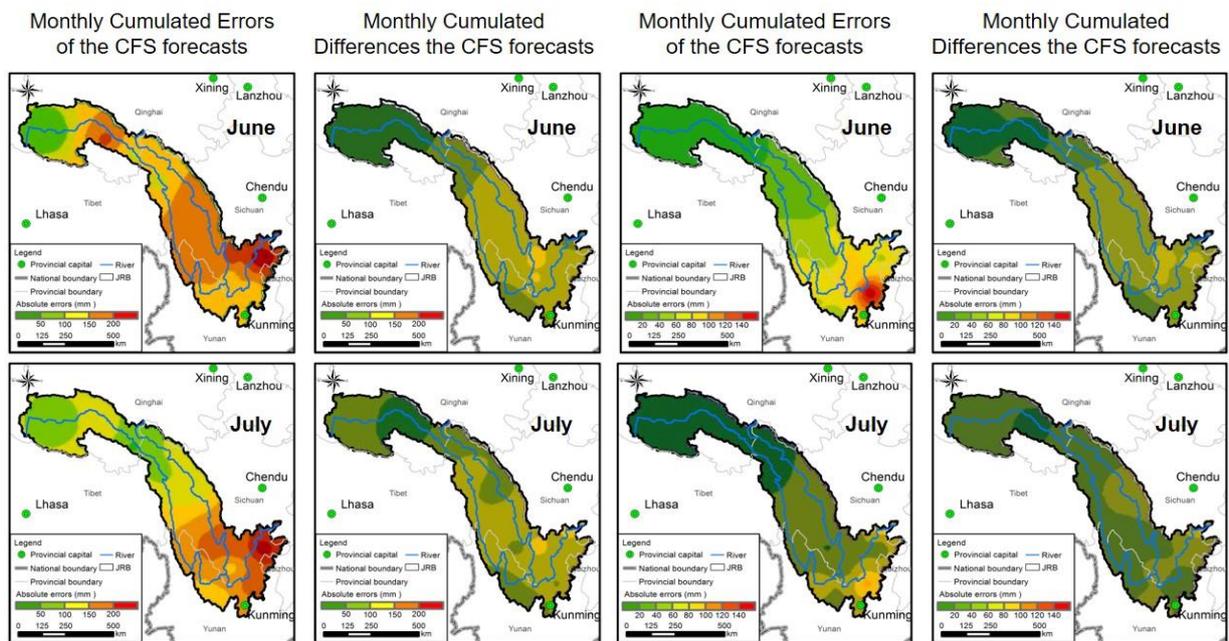


图 29 CFS 和 ECMWF 降水预报误差空间分布（6 月和 7 月）

### 4.3.3 金沙江流域径流预报及效果评价

集成金沙江流域 RS 模型与气象预报产品等数据库，形成 HMFM 模型及其系统平台（图 30）。可预报不同尺度（3 天、10 天和 30 天）的径流，同时可用以模拟未来（2021-2050 年和 2070-2099 年）气候变化下的径流过程（图 31）。

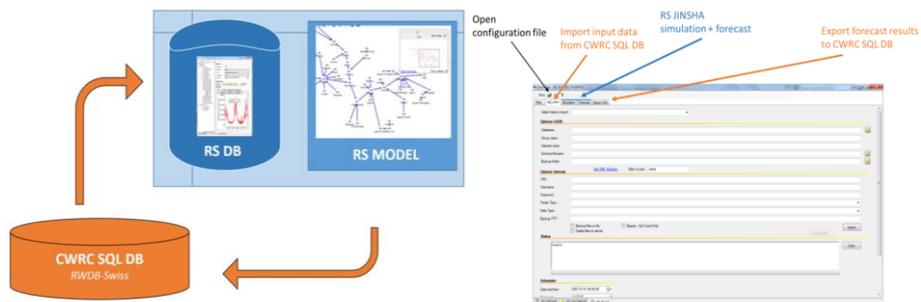


图 30 HMFM 模型与长江委 SQL 数据库关联图系及系统界面

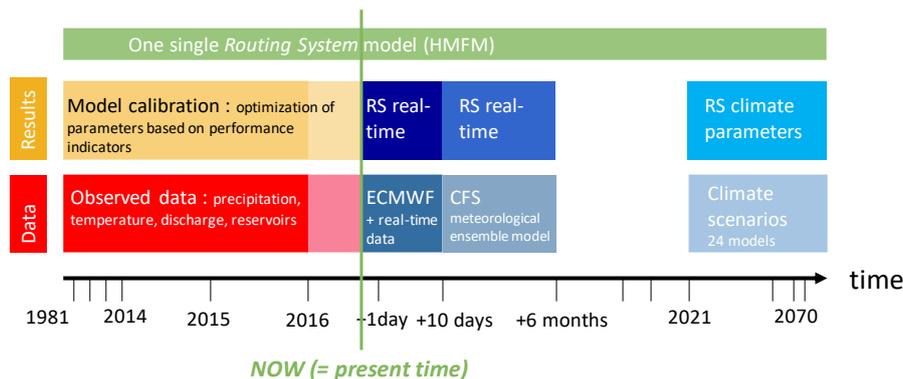


图 31 HMFM 模型的应用

利用所构建的 HMFM 模型对不同预见期下的径流进行预报（图 32），并对预报精度进行评价，其结果表明：所构建的模型在金沙江流域关键断面直门达、石鼓和雅江等站点应用效果较好，径流预报精度较高，尤其是对 1~5 天预见期内的径流，其预报结果可为下游大型水库的调度提供重要依据（图 33 和图 34）。

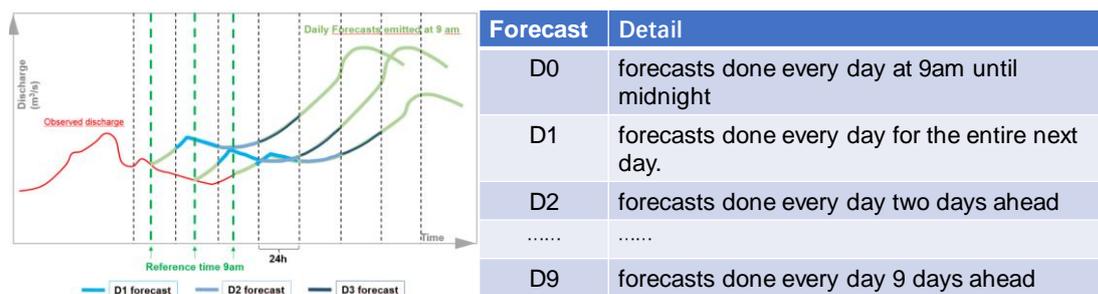


图 32 径流预报模式

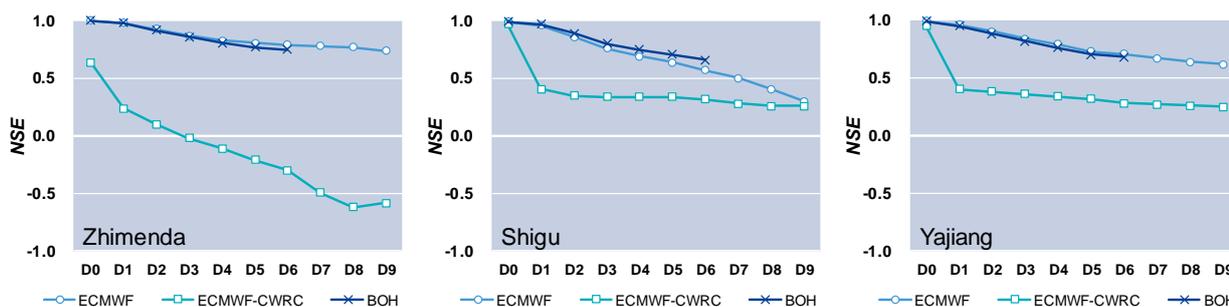


图 33 关键断面径流预报效果评价

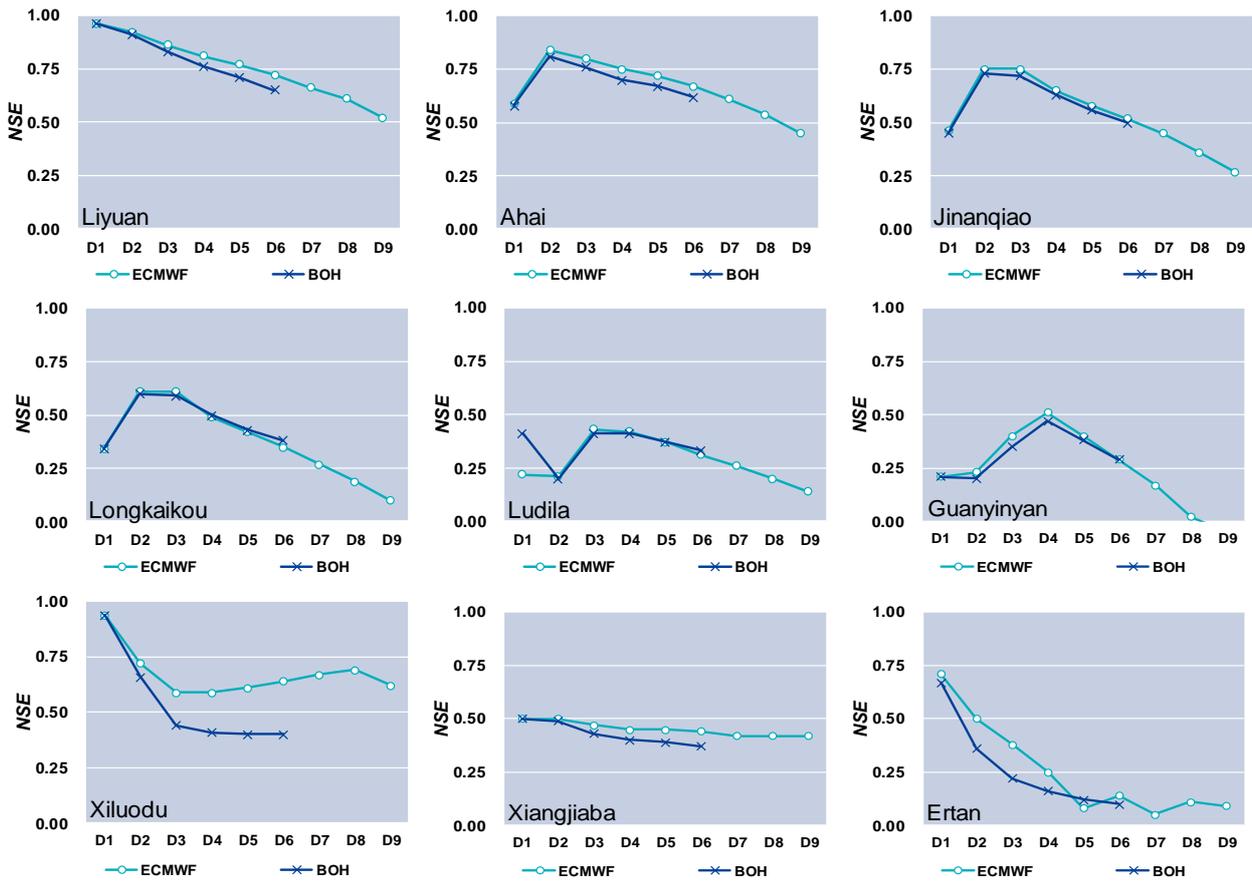


图 34 主要水库来水预报效果评价

## 小 结

本项目研发了面向金沙江流域的 RS 半分布式水文模型，能较好地适用于金沙江流域复杂气候条件下水文预报。该模型采用数据流控制技术，能自动耦合不同预见期降雨预报信息，通过自适应技术，自动修正预报初始状态，定时在线实现金沙江流域的短期、中期、长期来水预报。该气象水文预报模型系统现已纳入长江洪水预报系统，可为长江防汛抗旱工作提供有力的技术支撑。



## 4.4 金沙江流域未来气候变化综合影响评估

全球气候变暖将通过影响降雨、蒸发、径流、土壤湿度等改变全球水文循环的现状，引起水资源在时间和空间上的重新分配，从而对生活、生产和生态造成影响。研究气候变化背景下社会经济或资源环境的响应，评估未来可能的发展状况，对区域水资源规划管理、开发利用，以及提出缓解不利影响的适应性对策具有重要的理论意义和现实意义。

本项目基于优选及降尺度后的气候变化情景数据集，模拟并评估常态和极值态未来的变化特征。其中，常态分析主要包括评估气候变化对水力发电（Output 2.3）、适宜种植区范围、供需水关系（Output 2.4）、鱼类生境的影响（Output 2.6）；极值态分析主要包括评估气候变化对洪旱事件的影响（Output 2.5），以期防范和应对气候变化科学决策的制定提供依据。

### 4.4.1 气候变化对水力发电量的影响

本项目基于 RS 模型模拟不同气候变化情景下的水文情势及其对控制性水库水力发电的影响，其结果表明：①未来气候变化影响下，金沙江平均流量增加，因而大部分水电站发电量呈现出增加的态势，近期发电量平均增加 1.3%，远期发电量平均增加 2.6%（图 35）；②水电站溢流量的增加幅度要大于入流量，水力发电量的增加与入流量的增加并不匹配，主要是因为受发电能力的限制，尽管汛期流量有所增加，但按照当前水电站的发电能力，难以充分将水能转为电能（图 36）。

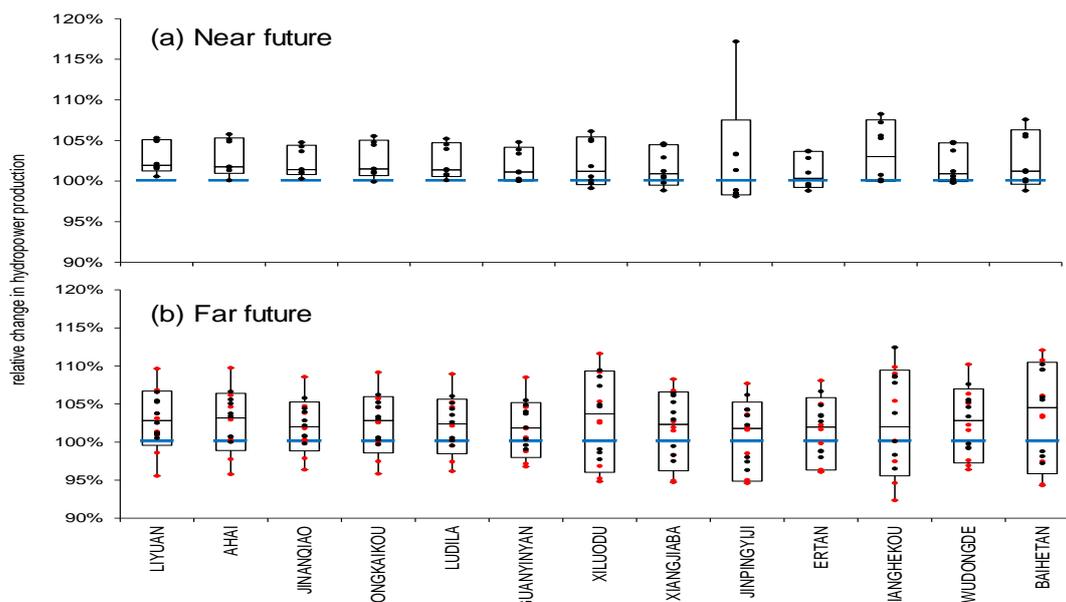


图 35 气候变化对水电站发电量的影响

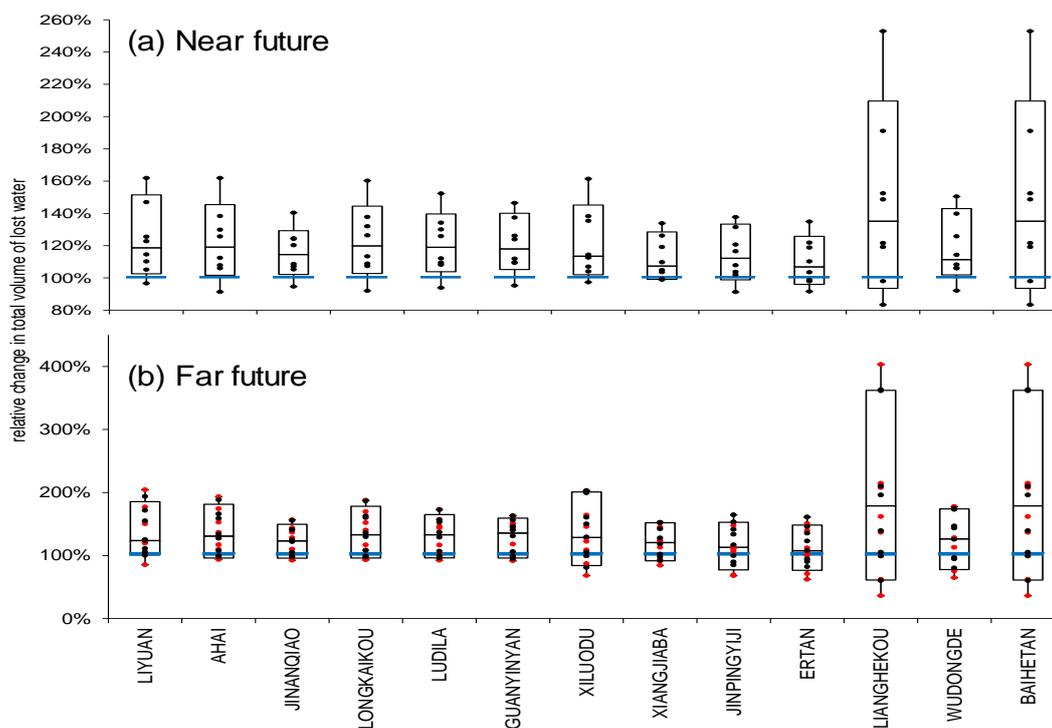


图 36 气候变化对水电站溢流量的影响

#### 4.4.2 气候变化对适宜种植面积的影响

气候变化背景下水资源时空格局的改变和温度的升高会导致区域农业水热资源异于以往。明晰气候变化对金沙江流域适宜种植区的影响可为农作物的合理布局提供科学参考。

本项目依据生育期内降水和积温，定义适宜生长指数（图 37），并基于未来气候变化情景下降水和气温条件以及作物特性，分析了不同气候变化情景下主要种植作物（稻米、玉米、小麦、薯类和烟叶）的适宜种植范围，其结果表明：在以增温为主要特征的气候变化背景下，主要农作物适宜种植面积有所增加，种植区在横向上呈现出北移的态势，在纵向上向更高海拔处迁移（图 38）。

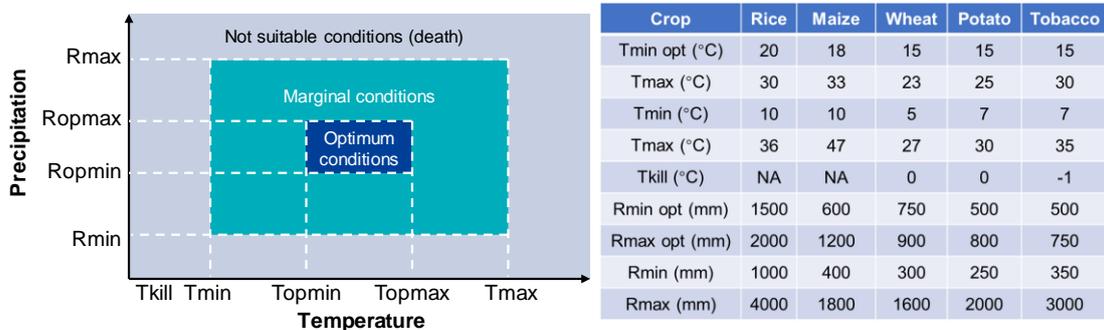


图 37 适宜种植区界定方法

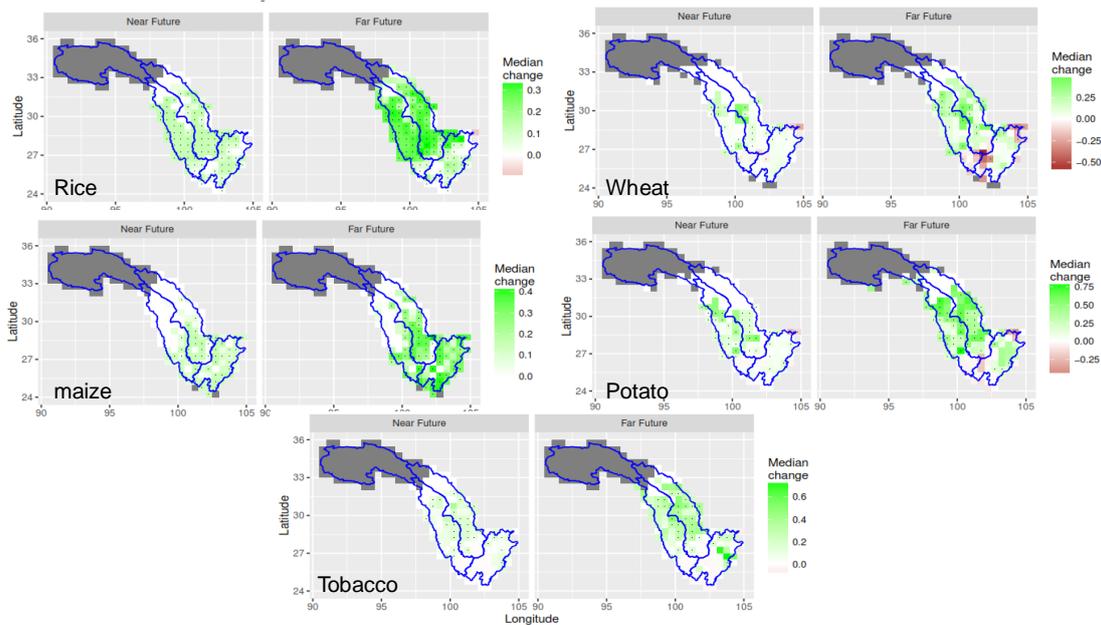


图 38 未来气候变化背景下适宜种植指数变化

#### 4.4.3 气候变化丽江市供需水影响

##### (1) 气候变化对农业需水的影响

气候变化对农业需水的影响主要体现在两个方面：一方面，气象要素变化会对参考腾发量造成影响，从而改变作物需水量；另一方面，增温导致作物生育期开始、结束时间及持续时间发生改变，从而改变作物需水的时间节律。本项目在考虑气候对典型农作物物候期影响的基础上，采用水量平衡法，评估气候变化对

作物净灌溉需水量的影响。其结果表明：①丽江市典型农作物净灌溉需水量在近期平均增加 3%左右，在远期平均增加 7%左右；② 相对于其他地区，永胜县和宁蒗县对气候变化较为敏感（图 39）。

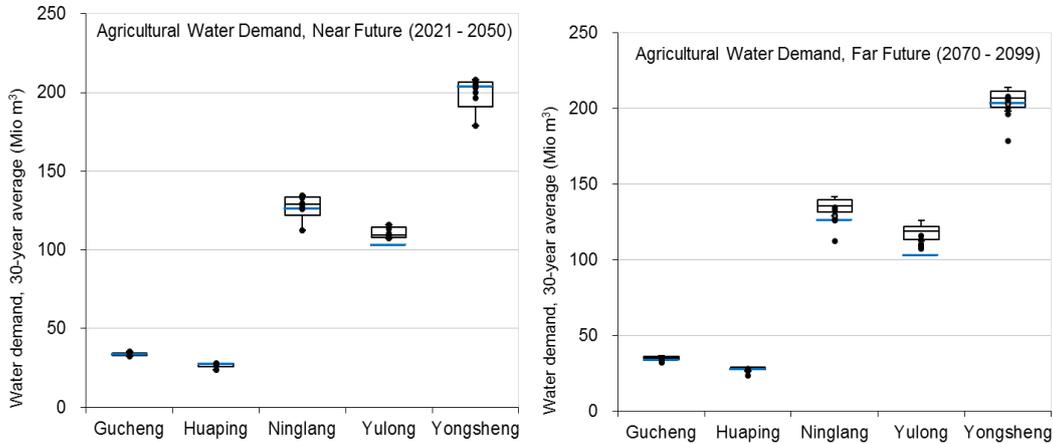


图 39 气候变化对农业需水的影响

## (2) 社会经济发展对生活、工业、旅游和生态需水的影响

本项目在对人口、工业、旅游等行业发展规划及用水效率进行预测的基础上，采用“规模×定额”的方式，对各行业需水进行预测。其结果表明：①在城市化进程加剧和用水定额提高双重影响下，丽江市生活需水量会明显增加，其中主城区和玉龙县生活用水量会增加 2 倍；③ 随着区域经济的发展，一般工业需水量会呈现出增加的态势，但其占比在所有行业中仍为最低，近期煤炭需水量将大幅下降，到本世纪中叶，预计煤炭储量将耗尽；④ 旅游行业需水量在近 15 年会增长 2 倍；⑤河道外生态需水将持续增加，且在农村地区增加更为明显，河道内生态需水在汛期增加幅度较大，在远期尤为明显；⑥受气候变化及社会经济发展影响，丽江市总需水量在近期和远期会分别增加 14%和 20%（图 40 和图 41）。

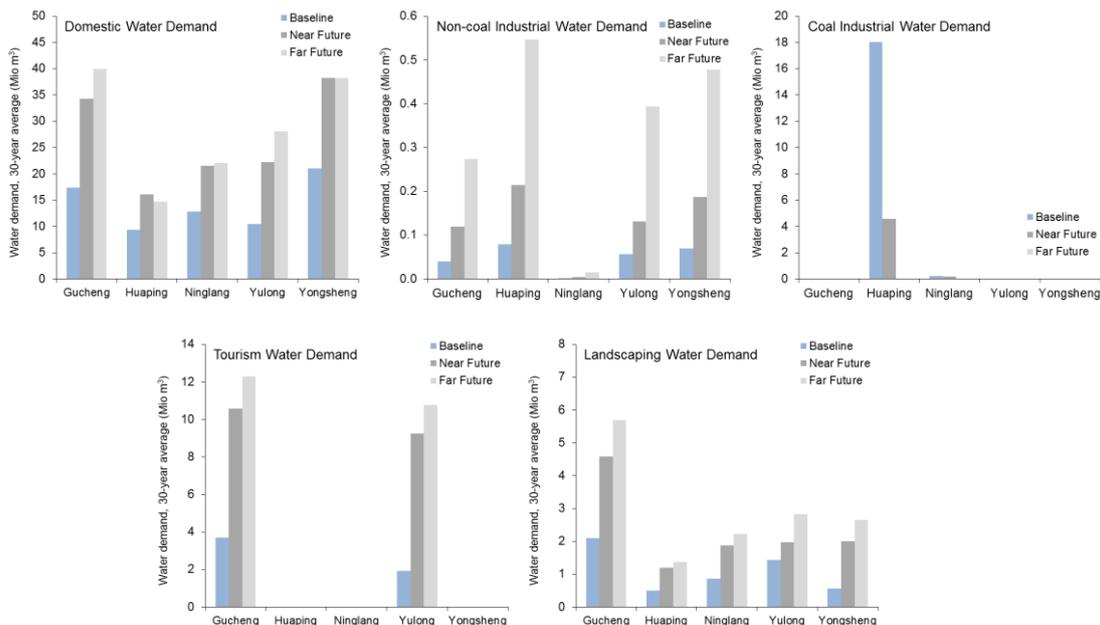


图 40 气候变化对生活、工业、旅游业和河道外生态需水的影响

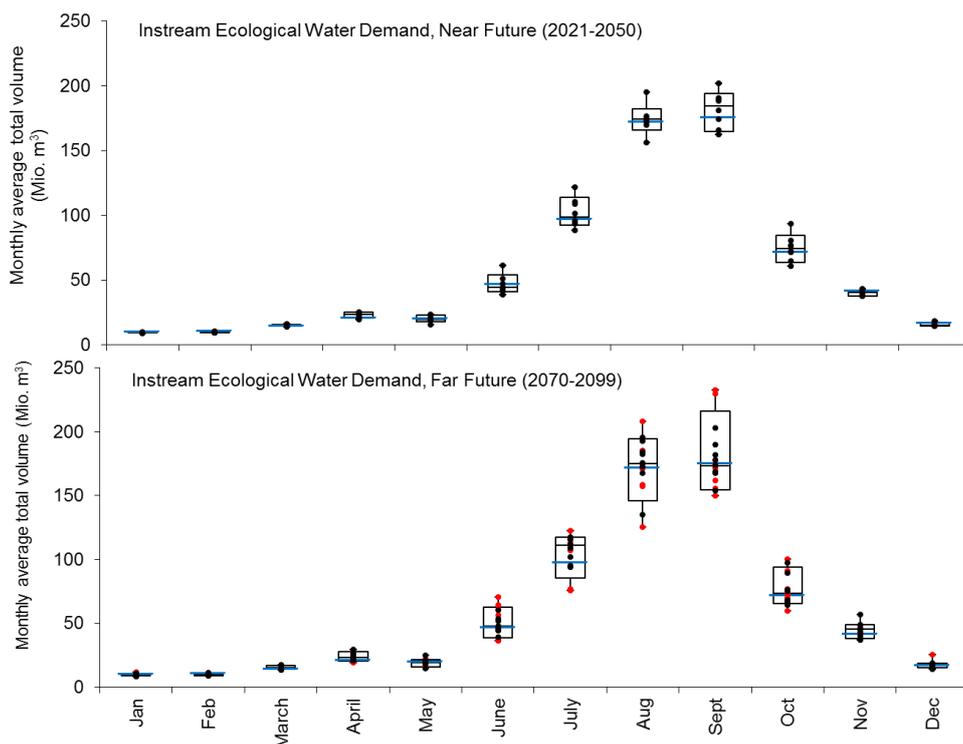


图 41 气候变化对河道内生态需水的影响

### (3) 气候变化及社会经济发展对丽江市各行业缺水量的影响

本项目考虑了丽江市 64 处入流节点、58 处供水节点和 271 处需水节点，建立了丽江市水资源评价和规划模型（WEAP 模型），模拟并评价现状及未来气候变化及社会经济发展对丽江市水资源供需关系的影响，其结果表明：①丽江市总



缺水量在近期和远期分别为 1.09 亿 m<sup>3</sup>和 1.28 亿 m<sup>3</sup> (多情景的中位数), 相对于基准期分别增加了 22.1%和 44.2%;②从区域上看, 缺水量较大的地区为永胜县, 其缺水量占丽江市总缺水量的 51.1% (近期) 和 47.7% (远期), 其次为宁蒗县和玉龙县, 近期缺水量约占总缺水量的 20%, 远期缺水量约占 27%; ③从行业上看, 农业缺水量占比最大, 占总缺水量的 84.9% (近期) 和 81.3% (远期), 生活缺水量其次, 占缺水量的 13.9% (近期) 和 16.0% (远期) (表 4)。

表 4 丽江市各行业和各地区缺水量 (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>) \*

Period	Industry	Gucheng	Huaping	Ninglang	Yulong	Yongsheng	Lijiang
Baseline	Agriculture	0.1	2.8	19.37	22.78	41.01	<b>86.06</b>
	Domestic	0	0	0.11	0.04	2.74	<b>2.89</b>
	Tourism	0	0	0	0	0	<b>0</b>
	Coal industry	0	0	0	0	0	<b>0</b>
	Non-coal industry	0	0	0	0	0	<b>0</b>
	Landscaping	0	0	0	0	0.08	<b>0.08</b>
	<b>Total</b>	<b>0.1</b>	<b>2.8</b>	<b>19.48</b>	<b>22.82</b>	<b>43.83</b>	<b>89.03</b>
Near Future	Agriculture	0.42	2.81	20.65	27.67	40.78	<b>92.33</b>
	Domestic	0.54	0.01	0.2	0.38	14.01	<b>15.14</b>
	Tourism	0.27	0	0	0.21	0	<b>0.48</b>
	Coal industry	0	0.02	0	0	0	<b>0.02</b>
	Non-coal industry	0	0	0	0	0	<b>0</b>
	Landscaping	0.02	0	0.02	0	0.73	<b>0.77</b>
	<b>Total</b>	<b>1.25</b>	<b>2.84</b>	<b>20.87</b>	<b>28.26</b>	<b>55.52</b>	<b>108.74</b>
Far Future	Agriculture	0.87	3.32	23.06	33.22	43.97	<b>104.44</b>
	Domestic	2.19	0.01	0.11	1.99	16.19	<b>20.49</b>
	Tourism	1.19	0	0	1.04	0	<b>2.23</b>
	Coal industry	0	0	0	0	0	<b>0</b>
	Non-coal industry	0.02	0	0	0	0	<b>0.02</b>
	Landscaping	0.07	0	0.01	0.01	1.12	<b>1.21</b>
	<b>Total</b>	<b>4.34</b>	<b>3.33</b>	<b>23.18</b>	<b>36.26</b>	<b>61.28</b>	<b>128.39</b>

\*注: 表中数值为多情景下的中位数

#### 4.4.4 气候变化对水生态的影响

气候变化引起的河道水流节律和水温的改变将会对水生生态系统造成一定影响, 尤其影响鱼类重要栖息地、繁殖等生命活动。识别鱼类栖息地、鱼类繁殖对气候变化的响应可为水生态保护措施的制定提供重要依据。本项目构建了攀枝花段一-二维水动力学模型和敏感鱼类栖息地模型, 考虑不同气候变化条件和水电影响, 模拟不同情景下敏感鱼类栖息地变化, 分析评价气候变化和水电站建设运行对鱼类栖息地适宜性和鱼类繁殖的影响, 具体如下:

##### (1) 未来气候变化情景下的断面流量和水温变化

三堆子站径流量在 FF45-3 和 FF45-7 情景下, 呈现出增加的态势, 但在 FF85-

7 情景下则呈现出减少态势,8 月至 9 月中旬径流量在 FF85-7 和 FF45-7 情景下,呈现出增加的态势,但在 FF45-3 情景下则呈现出减少态势;若考虑水电站影响,所有气候变化情景下,2 月至 6 月的流量增加,而 6 月至 9 月则减少。②若不考虑水电站影响,在 FF85-7, FF45-3 和 FF45-7 情景下,平均水温上升幅度分别为 1.92°C, 1.09°C 和 1.61°C,若考虑水电站影响,9 月至翌年 2 月水温升高,但在 3 月至 5 月则下降(图 42)。

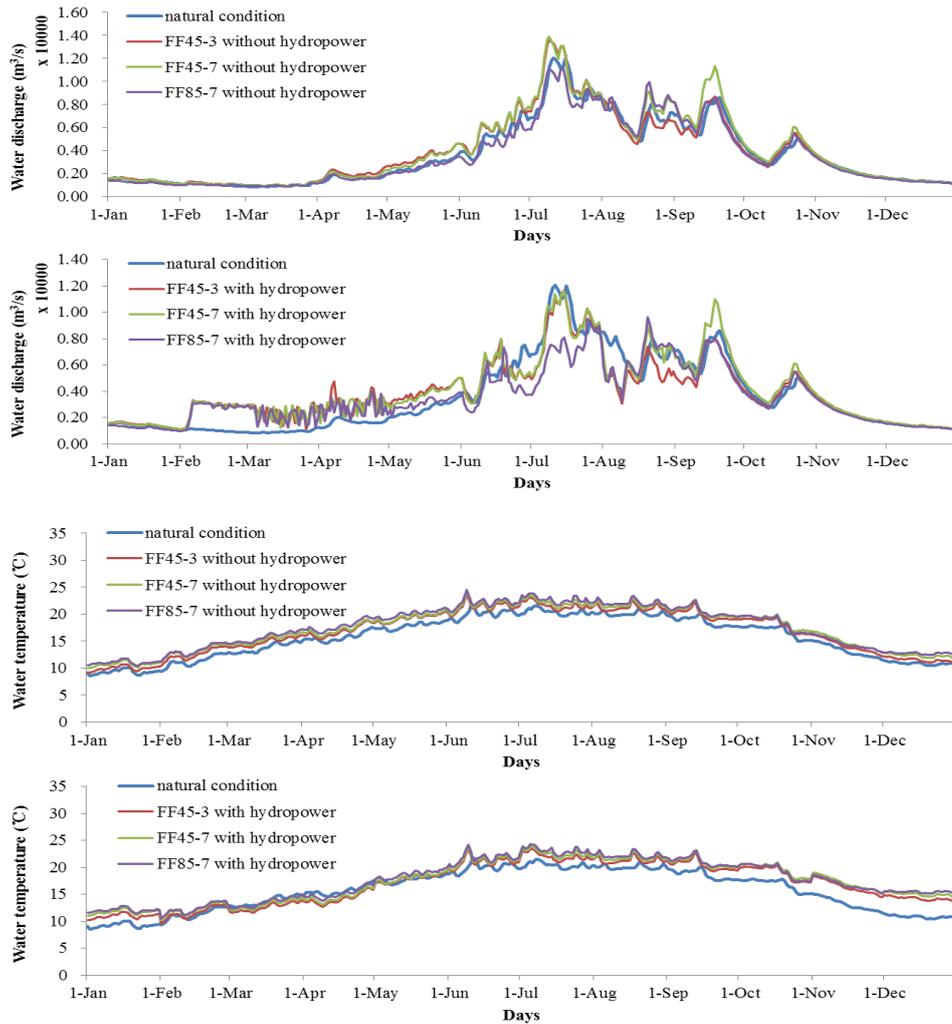


图 42 气候变化背景下三堆子站径流量和水温\*

\*注: FF45-3、FF45-7 和 FF85-7 分别代表气候变化影响下河道汛期流量变化最小、中等和最大的三种情景。

## (2) 气候变化对鱼类栖息地影响

本项目以攀枝花江段作为试验区,建立了一维-二维耦合的水动力学模型,同时,建立了 2 种敏感鱼类(圆口铜鱼、中华金沙鳅)在幼鱼和亲鱼生活史阶段的栖息地偏好曲线,构建了 2 种鱼类在 2 个生活史阶段对流速、水深和水温偏好的模糊规则,形成栖息地偏好模糊逻辑集。在此基础上,结合攀枝花江段的水动

力学模型，建立了 2 种敏感鱼类幼鱼、亲鱼阶段的栖息地模型，以模拟不同气候变化情景下的适宜栖息地面积，进而识别气候变化对敏感鱼类栖息地的影响。其结果表明：

①在未来气候变化影响下，圆口铜鱼亲鱼和幼鱼的栖息地面积在 5 月、9 月和 10 月呈现出显著增加的态势，若在此基础上考虑水电站影响，产卵期的 5 月份栖息地面积减少到接近自然状态，而在 9 月和 10 月栖息地面积将会进一步增加（图 43）；

②对比不同情景下全年总栖息地可利用面积，可以看出亲鱼和幼鱼的栖息地面积在气候变化影响下都有不同程度的增加，亲鱼栖息地面积增加更明显；气候变化和水电站共同影响下栖息地面积比气候变化无水电站影响下栖息地面积较少，但仍然高于自然状态下栖息地面积。总的来说，水电工程建设将对鱼类栖息地产生不利影响，而未来气候变化会消除这种影响。（图 44）。

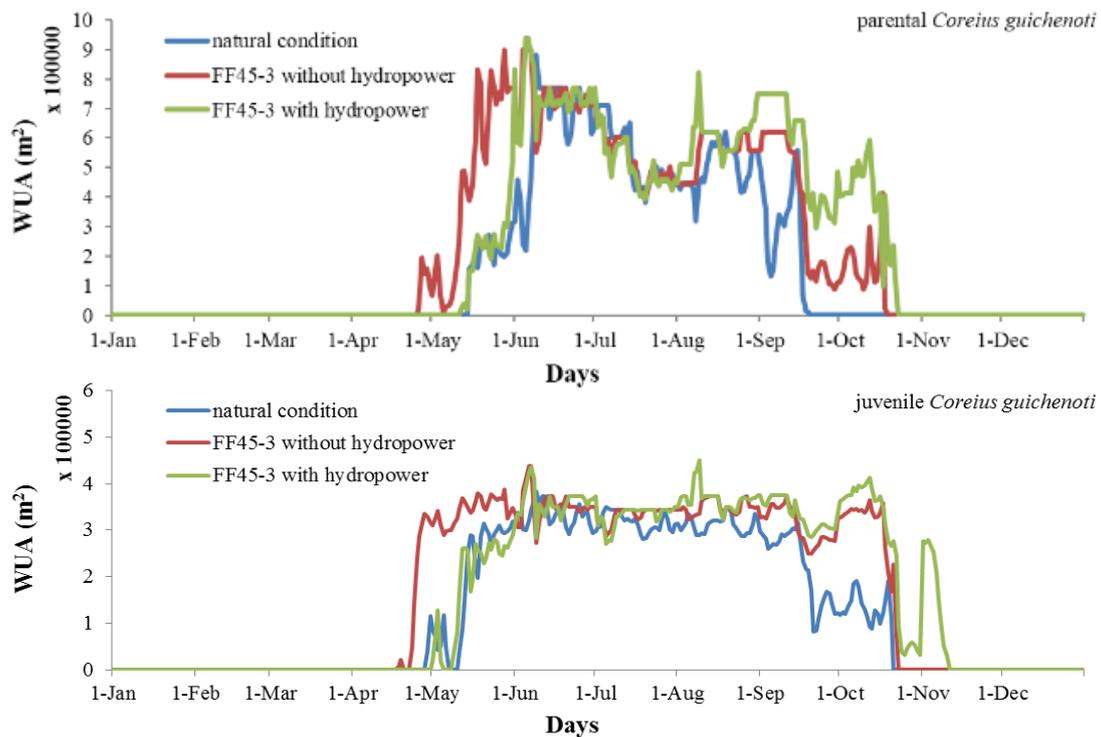


图 43 气候变化情景下可利用栖息地面积比较

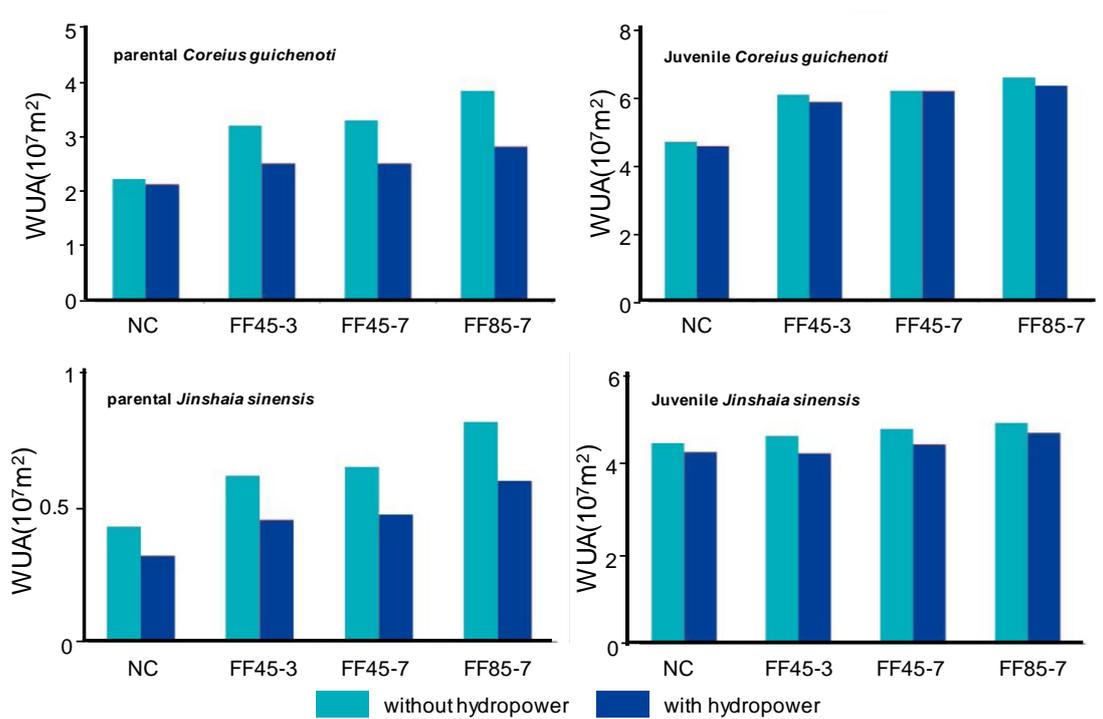


图 44 圆口铜鱼亲鱼和幼鱼在不同情景下可利用栖息地面积

### (3) 气候变化对鱼类繁殖的影响

气候变化导致的水温升高是影响水生态系统的主要因素之一。未来气候变化下，金沙江平均水温将增加 1.6°C。广温性鱼类通常在晚春和夏季产卵，随着水温升高，产卵期很可能将延长。在 2012-2014 年采集到的金沙江中下游 98 种鱼类中，有 73 种广温性鱼类从春季到夏季产卵（甚至到秋季），这意味着气候变化很可能对金沙江这些鱼类的产卵活动产生积极影响。相反，对冷水性鱼类来说，未来水温的显著增加将使产卵期缩短，其产卵行为也将受到影响，因此气候变化将对金沙江采集到的 17 种冷水鱼类产生显著不利影响。其中，由于裂腹鱼亚科和高原鳅属鱼类产卵所需水温较低，以及在该区域分布的特有性，因而对气候变化更为敏感。

#### 4.4.5 气候变化对洪旱事件的影响

在以增温为主要特征的气候变化背景下，水循环速率加快，因而诸如干旱和洪水这类极端水文事件呈现出广发、频发的态势。评估气候变化对未来洪旱事件特征的影响是制定针对性防汛抗旱规划的关键依据。本项目重点分析了未来气候变化情景下洪旱事件规模与格局的变化特征。具体如下：

### (1) 气候变化对洪涝事件的影响

利用未来气候变化情景下日径流模拟结果，分析金沙江中下游干支流极端径流变化，其结果表明：十年一遇最大连续 1 日、3 日和 7 日径流量在近期和远期分别增加 7%和 15%，若不考虑水库调节的作用，其增幅将会更大。

极端降水变化分析结果表明：未来气候变化条件下山洪易发区极端降水 (Q99) 天数将会增加 10-15%，即气候变化会导致山洪风险增加。

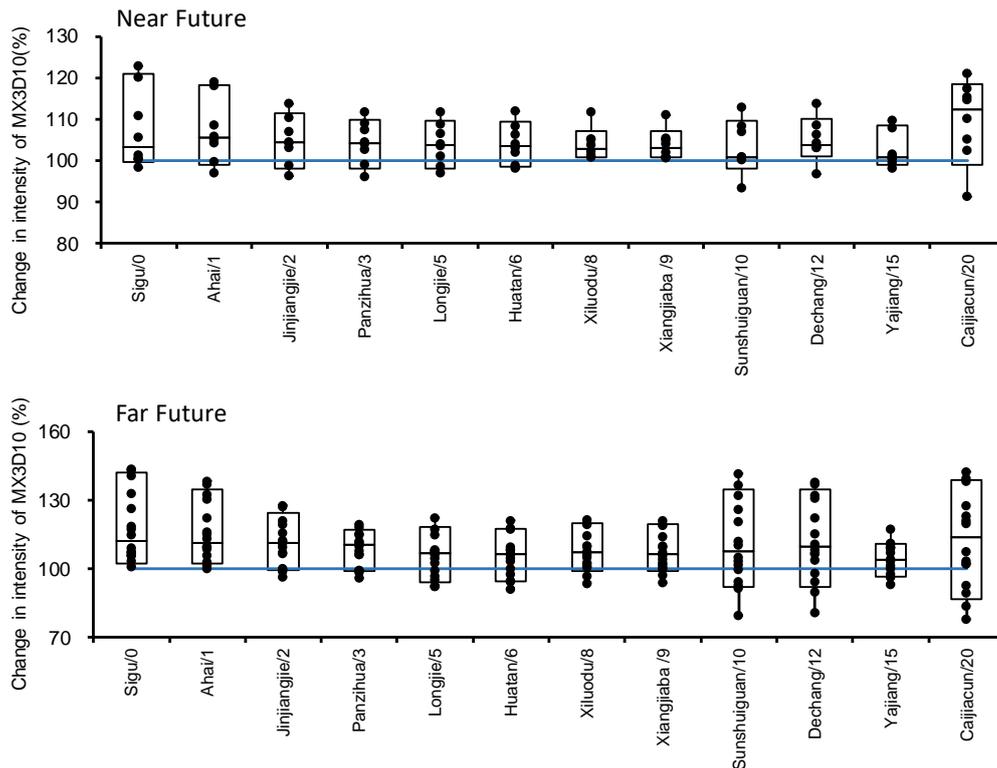


图 45 气候变化影响下十年一遇 3 日最大洪水变化

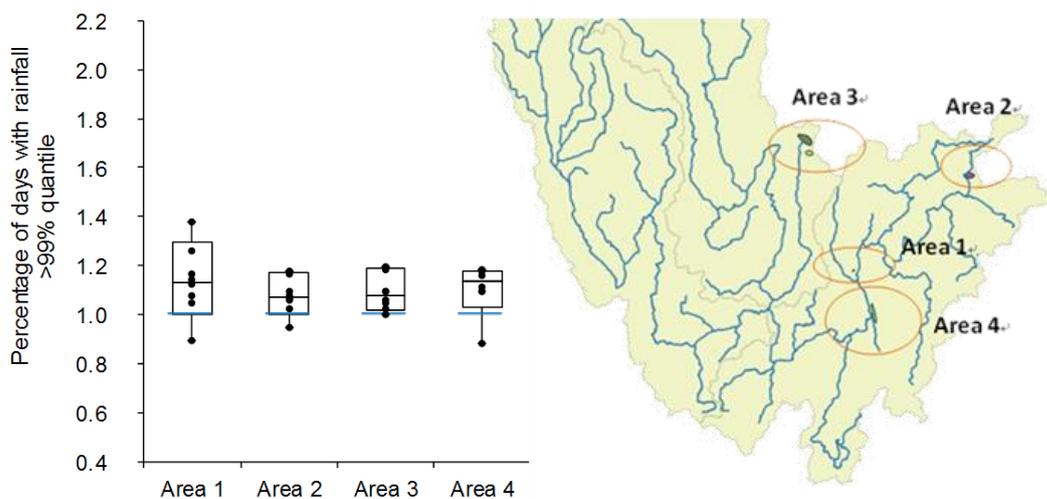


图 46 气候变化影响下山洪易发区极端降水变化

## (2) 气候变化对于干旱事件的影响

对于气象干旱，由于未来降水呈现出一定程度的增加态势，因此，金沙江流域气象干旱持续时间和强度均会减小（图 47）。

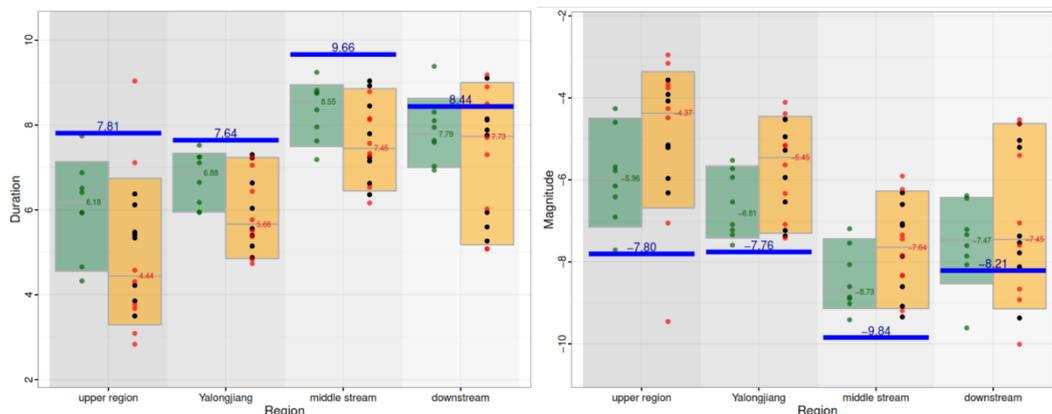


图 47 气候变化影响下气象干旱持续时间和强度变化

对于水文干旱，金沙江干流关键断面 10 年一遇最小 7 日和 30 日流量均呈现出减小的态势，即水文干旱程度会有所加剧，但支流上的变化则表现出较大的不确定性（图 48）。

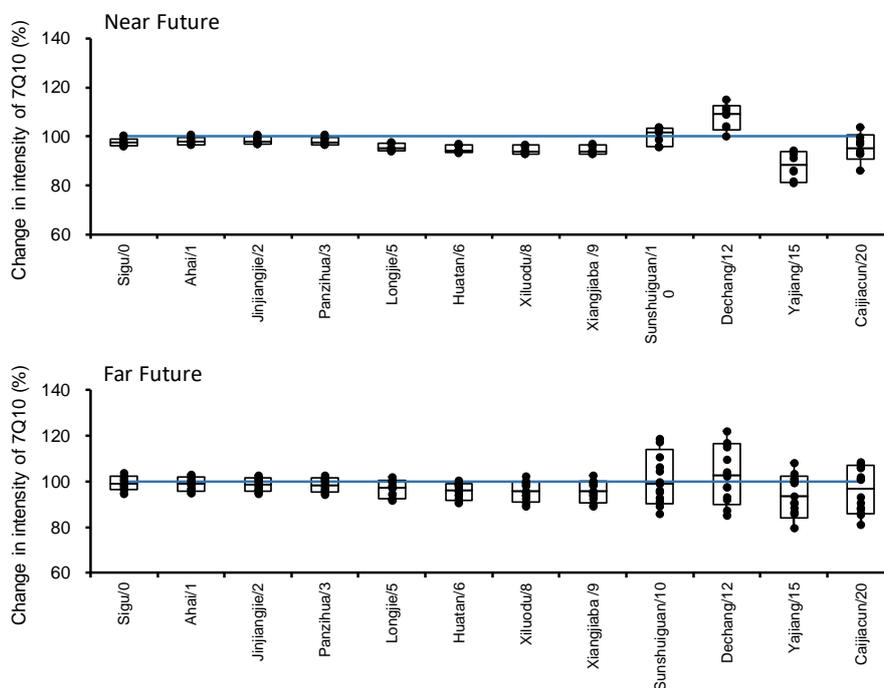


图 48 气候变化影响下十年一遇最小 7 日流量变化

对于农业干旱，在以增温为主要特征的气候变化背景下，农作物需水量会有所增加，但降水量变化不大，因此作物生育期内净灌溉需水量会有所增加，每增

加 10% 的净灌溉需水量会导致干旱频率增加 30-40%，干旱强度增加 10%；受气候变化影响，金沙江中下游地区农业干旱强度和频率呈现出增加的态势，在四川省西北部尤为明显，但若考虑 CO<sub>2</sub> 的肥料效应，干旱强度和频率的将有所减小（图 49 和图 50）。

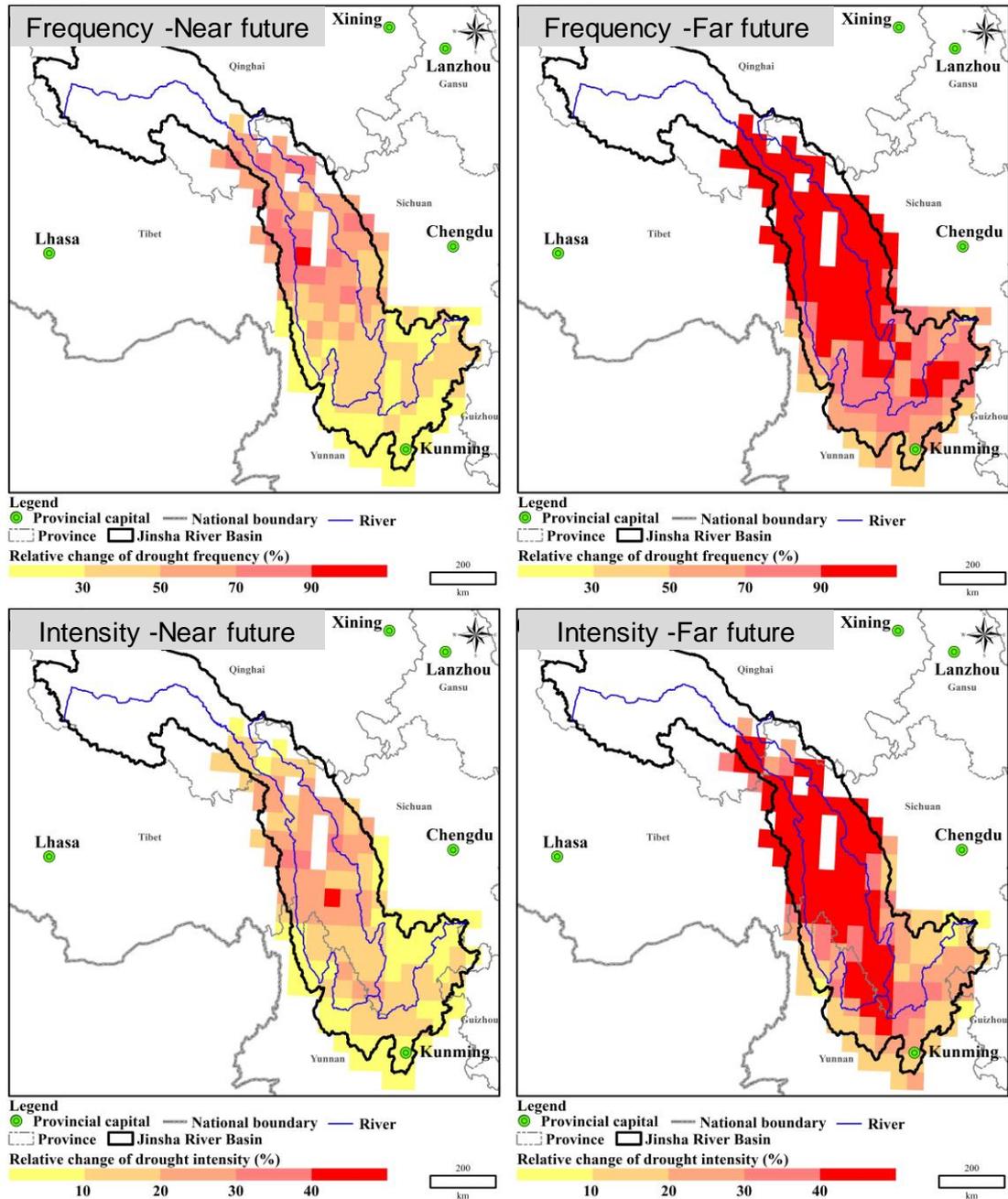


图 49 气候变化影响下农业干旱频率和强度变化

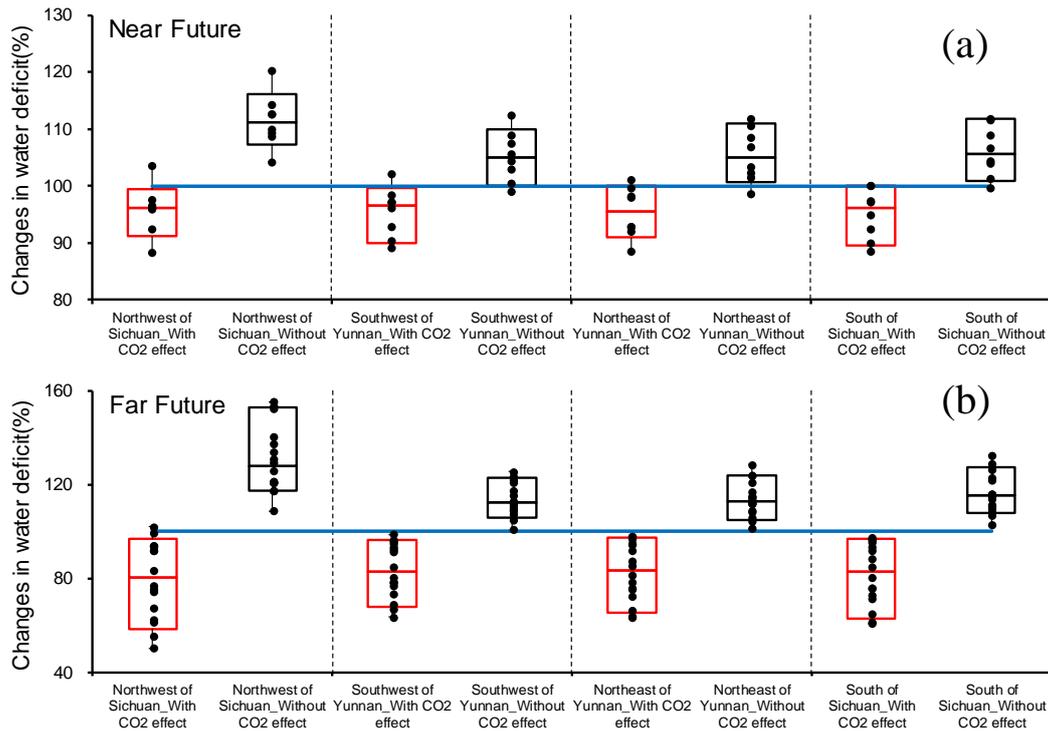


图 50 考虑或不考虑 CO<sub>2</sub> 肥料效应条件下作物生育期内缺水变化

## 小 结

本项目评估了气候变化对水力发电、农业种植区、水生生境和洪旱事件的影响：

① 受气候变化影响，金沙江平均流量增加，大部分水电站发电量呈现出增加的态势；

② 由于气温升高，农作物适宜种植面积有所增加，种植区在横向上呈现出北移的态势，在纵向上向更高海拔处迁移；

③ 受气候变化影响，圆口铜鱼、中华金沙鳅的栖息地面积将增加，而水电站建设将导致他们适宜栖息地萎缩；未来气候变化导致的水温升高将使金沙江中下游 73 种广温性鱼类产卵期延长，而使 17 种冷水性鱼类产卵期缩短；

④ 干流十年一遇最大续 1 日、3 日和 7 日流量以及山洪易发区极端降水天数在未来呈现出增加的态势；

⑤ 由于未来降水会有所增加，气象干旱持续时间和强度均会减小，但干流关键断面十年一遇最小 7 日和 30 日流量均呈现出减小的态势，水文干旱形势会更为严峻；由于未来气温增加明显，导致农作物需水量增加，农业干旱发生强度和频率均会增加。

本项目所识别的气候变化对金沙江流域常态和极值态过程的影响可为水电站运行、管理和规划、农业种植结构调整、水生生态环境保护、极端气象水文事件应对等方面提供科学的参考和依据。

## 4.5 金沙江流域应对气候变化适应性措施

为减少气候变化对金沙江流域水资源各方面的不利影响，全面提高金沙江流域适应气候变化能力，本项目系统梳理流域适应气候变化工程和非工程措施（Output 3.1），针对未来气候变化背景下极端水文事件和水资源供需关系变化特征评估结果，制定防洪、抗旱和供水安全保障等措施（Output 3.2&3.3），并提出金沙江流域应对气候变化综合措施（Output 3.4）。

### 4.5.1 国内外适应气候变化的经验

#### (1) 中国水资源领域应对气候变化措施

中国水资源领域现有适应气候变化的措施主要有：增加资源储备、提高利用效率、完善治理体系、提高安全标准、加强风险管控和加强应急能力等，具体如下如表 5 所示：

表 5 中国水资源领域应对气候变化的适应性对策

措施类型	具体措施	说明
增加资源储备	地面储备	地表水库建设、跨流域调水工程
	地下储备	将深层地下水资源作为战略性储备水资源
	贸易储备	通过贸易的形势最终解决水资源短缺和粮食安全问题
	置换储备	以非传统水资源作为载体，利用不断进步的水处理技术及先进的水资源管理制度来扩大水资源的储备规模。
	固体储备	将冰川作为后备淡水资源储备
	空中储备	开发和调控大气水资源
提高利用效率	合理开发，优化水资源配置	加快重点水利工程，特别是调水、配水工程的建设，加强水资源配置，努力提高在时间和空间上调控水资源的能力。
	推广节水技术，提高用水效率	综合利用工程、技术、经济、法律、行政等手段，促进各部门、各行业节水
	促进节水意识提高，建立节水制度	加强水资源的统一管理、建立健全节水运行机制、引入市场竞争机制
完善治理体系	加强水利基础设施建设	加强工程措施和非工程措施相结合的综合防洪抗旱体系建设
	针对重点问题的对策措施	在粮食安全问题上，恢复和新建一大批农田水利设施以保证粮食安全；在生态环境方面，加快推进水土资源保护与治理
提高安全标准	应针对防洪减灾、供水保障等重点领域的气候变化影响问题，提高防洪标准、供水标准	



加强 风险管控	应对气候变化的风险管理	结合当地具体条件，针对风险因气候变化而改变的可能性与不确定性，制定减缓风险、适应风险、规避风险、转移风险、和适当接受风险的对策
	建立水安全保障风险管理体系	建立气候变化影响的水安全保障风险管理体系，认识和确定气候变化、气候变化影响、适应性技术方法可能存在的风险，并采取科学的应对措施。
加强 应急能力	加强应对洪水灾害的应急能力	建立跨区域、跨部门、跨层级的洪水预警预报、应急决策会商等系统
	加强应对极端干旱的应急能力	根据当前气象水文状况，参照历史干旱情景，编制应急预案

## (2) 国外水资源领域应对气候变化措施

国外水资源领域应对气候变化措施主要从预防和提高抵御能力的对策、应对极端事件的准备、反应和恢复的对策两个方面进行梳理。具体如下：

① 预防气候变化的对策主要是通过减少暴露区，避免气候变化和气候波动对水资源管理的负面影响，其主要是基于不同情景下的风险、脆弱性分布图。提高抵御能力的策略主要是通过增强自然、社会、经济系统的适应气候变化的能力，减少气候变化的影响，具体如表 6 所示。

表 6 国外水资源领域预防气候变化的对策调研

措施类型	具体措施	说明
应对水资源减少和干旱的对策	加强供水基础设施建设	采用提高供水基础设施建设水平的适应措施，优先考虑城市及社区的供水安全
	推广雨水收集技术等非传统水源利用技术	修建雨水收集系统，保障维修，依据极端天气重新确定其设计标准，从而改善干旱区用水短缺
	在供水规划中考虑气候变化影响	在工程规划设计过程中考虑气候变化可能的影响，并在运行中考虑气候变化
	加强需水管理	通过明晰水权，利用水价、补贴激励机制等措施，减少水资源的需求
应对洪水灾害的适应对策	应用抗旱技术	生物抗旱技术、工程抗旱技术、应急灌溉技术、农艺抗旱技术和化学抗旱技术等
	加强防洪工程建设方面的适应措施	建立确保安全的防洪工程，或以超高标准建造水坝
	适当提高防洪工程设计标准和防洪等级	在工程设计考虑未来气候变化的影响，进一步提高流域防洪脆弱区的防洪标准，能有效适应气候变化的致洪压力。
	强调非工程的防洪适应对策	考虑气候变化长期预测的严重不确定性，在防洪策略制定中更倾向与洪水共存的防洪思路
	应对洪水次生灾害的适应措施	加强对区域历史经验的总结、加强次生风险的观测和预报、加强风险管理的规划和资源配置力度、加强区域适应能力建设

② 应对极端气候事件的准备措施的目标是减少极端气候事件对水资源管理的负面影响，其主要是基于不同情景下的风险状况。主要包括：预警体系建设及



信息共享，即利用气象及短期气候预报及预警技术，提高旱涝预报能力和信息化水平，使公众有足够的时间采取措施抵御或躲避旱涝灾害；制定干旱管理规划，包括快速判断干旱形势的指标，提供资源及其脆弱性状况，提供根据优先程度确定干旱影响的脆弱性状况，提出减轻干旱影响的工程和非工程方案，确定实施措施的成本，保障实施的行政管理、利益相关者参与等保障措施等。

#### 4.5.2 丽江市供需水适应性对策措施

丽江市近年来社会经济快速发展，水资源管理面临严峻挑战。本项目系统分析了当地水资源管理面临的挑战，不仅存在需水增加带来的水资源短缺，还面临水质恶化和生态环境退化等问题。农业是受气候变化影响最直接的部门之一，未来可能面临更多与公共供水和生态环境用水的冲突。

丽江已经制定了一套综合措施来解决现状和近期出现的水问题。本项目从成本效益、实施可行性、效益和附带影响三个方面构建评价体系，对涉及评估区域（城区和农业区）的相关规划文件提出的措施以及新的措施开展评估，共有 52 个措施（包括 35 个新的措施，17 个规划或现已有措施）参与评估。指标及分值参见图 51 和图 52。

对于城区试点，推荐措施主要有：优化水库运行方案、增加现有水库库容、优化/管理地下水资源、地下水含水层补给、城区雨水收集、储存和利用、中水回用于非饮用水供水和生态环境用水和关于节水与环境保护的公众意识培养等。对于农业试点区，推荐措施主要有：渠道防渗、优化水库运行方案、优化灌溉制度、优化作物种植操作（包括选种、种植结构、耕作措施）、农业节水奖励等。

结果显示，大多数规划或现有措施属于“灰色设施”如水库、引调水工程、泵站等。鉴于径流的季节差异性有增加的趋势，增加蓄水库容是缓解缺水的有效措施。然而，评估结果显示非工程措施较工程措施适应性表现更佳。以优化水库运行方式为例，与新建水库相比，对现有供水设施的智能化管理具有成本低，效益高优点。建议未来应偏重工程措施与非工程措施相结合的方式，如基础设施智能化管理系统和需水管理措施（例如节水措施、优化作物品种和栽培技术）等措施，可以应用于相关的水资源管理实践中。

此外，建议未来深入开发自然资源适应气候变化的能力（山脉、森林、湖泊、

湿地、地下水等), 这些资源在蓄水以及生态系统保护、修复、旅游开发等方面具有多重效益。

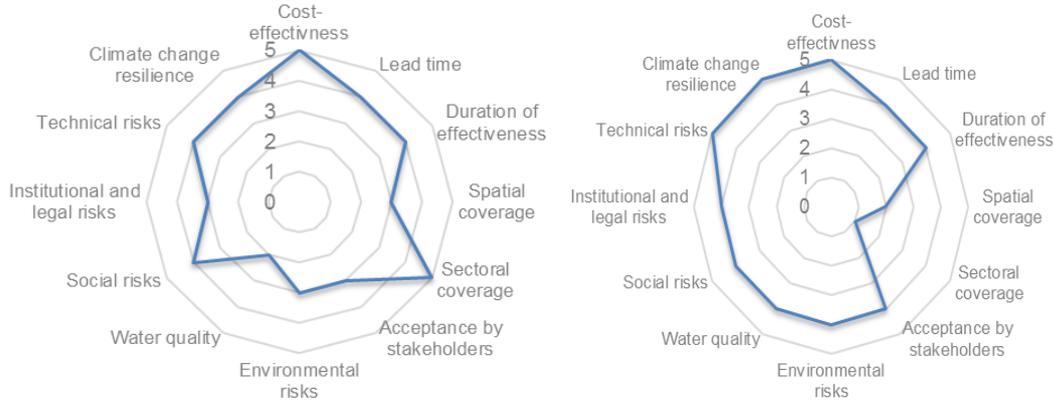


图 51 城区适应性措施评分网状图\*

\*注: 左图: 增加水库现有库容 (4.4 分) 右图: 中水回用为生态景观供水 (4.3 分)

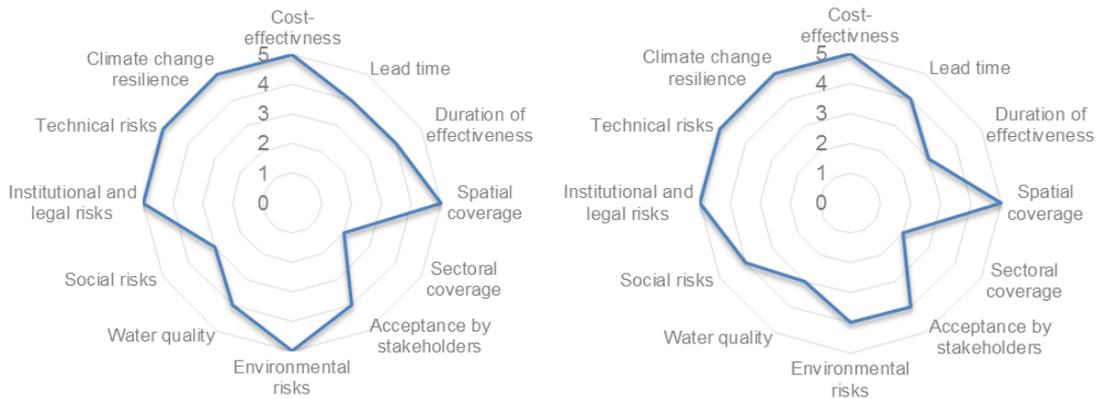


图 52 农业区适应性措施评分网状图\*

\*注: 左图: 渠道防渗 (4.6 分) 右图: 机械耕种替代手工耕作 (4.5 分)

### 4.5.3 金沙江中下游防洪抗旱应对措施

鉴于旱涝灾害是金沙江流域社会经济发展和生态文明建设的关键障碍,也是气候变化和自然灾害应对的“主战场”,本项目针对干旱和洪水两类极端气象水文事件,制定防洪抗旱措施,以期提高研究区应对自然灾害的能力。

#### (1) 防洪应对措施

以金沙江下游宜宾市为例,针对该市防洪工作中的问题和挑战,本项目共制定了 5 项工程措施和 12 项非工程措施(表 7)。综合考虑各种措施的工期、服役期、成本、可行性、有效性和灵活性,优先考虑 6 种措施:提升水文气象监测能



力、提升预报预警能力、水利工程（群）优化调度、洪水风险图绘制及应用、提高公众参与力度和制定应急预案。

表 7 防洪措施集

E = 已有措施 N = 新措施或需要改进的措施		挑战 1 保证宜宾市防洪安全	挑战 2 保证柏溪镇农田区防洪安全	挑战 3 减少山洪灾害损失	挑战 4 保证有效的预警撤离
<b>工程措施</b>	<b>No.</b>				
E 新建或改建水库	F1				
E 河道疏浚	F2				
E 堤防建设	F3				
E 应急抢险工程措施	F4				
E 水土保持工程措施	F5				
<b>非工程措施</b>					
E 完善水文气象监测预报系统	F6				
E 提升应急抢险非工程措施（含预警撤离机制）	F7				
E 水库调度优化	F8				
E 水土保持植物措施	F9				
E 水土保持耕作措施	F10				
N 洪水保险	F11				
E 政府性基金	F12				
N 应急预案	F13				
N 洪水风险图	F14				
E 城市规划	F15				
E 提升利益主体参与度	F16				
E 提升公众对气候变化的关注	F17				

## (2) 抗旱应对措施

以金沙江中游攀枝花市为例，针对该市抗旱工作中的问题和挑战，本项目共制定了 11 项工程措施和 13 项非工程措施（表 9），其中新增的措施中，有近 1/3 是非工程措施。经成本效益分析，推荐 5 项措施优先实施：①建立干旱监测和预报系统、②优化水库调节规则、③干旱风险管理、④制定应急计划、⑤新建污水处理系统和管网系统

表 8 抗旱措施集

适应性措施							
E = 已有措施							
N = 新措施或需要改进的措施							
工程措施	No.	挑战1 确保水源供应以确保粮食储备或减少经济损失	挑战3 保障最低供水需求	挑战4 保障干旱期能源生产	挑战5 保障干旱期生态平衡	挑战6 保障城乡供水水量、水质，降低干旱经济损失	挑战10 保障调水工程供水里
E	灌溉工程（基础设施+规划+政策）	D1					
E	应急抗旱基础设施建设	D2					
E	已有工程改建	D3					
E	已有工程扩建	D4					
E	调水工程线外调蓄水库	D5					
E	新建调水工程	D6					
E	地下水工程	D7					
E	污水处理厂和中水管网建设	D8					
E	再生水利用（非饮用回用）	D9					
N	再生水利用（饮用回用）	D10					
E	生态保护措施（如鱼道等）	D11					
Non-Engineering Measures非工程措施							
E	生态补偿	D12					
N	考虑气候变化情况下最小生态流量的研究与定义	D13					
E	优化水库调度规则	D14					
N	干旱保险	D15					
E	政府性基金	D16					
N	应急预案	D17					
N	应对气候变化的灌溉规划和政策	D18					
N	作物种植调整（长期）	D19					
E	作物种植调整（短期）	D20					
E	干旱监测预警系统	D21					
E	灵活调整用水优先序和水量分配规则	D22					
N	限量配水	D23					
E	水价	D25					
E	替代能源建设应对水电短缺	D26					
E	提升公众对气候变化的意识	D24					

#### 4.5.4 金沙江流域应对气候变化综合措施

本项目针对不同地区提出金沙江流域应对和适应气候变化综合措施，具体措施如下：

##### (1) 加强金沙江流域水资源综合监测体系建设

为应对气候变化所带来的洪涝、干旱等极端事件增加的风险，提高金沙江流域应对突发水旱灾害的能力，需整合提升监测资源，构建综合监测系统。针对金沙江流域气象、水文、干旱、冰川监测网布局合理性及专业化不足、监测系统建



设不健全，大气-水文-生态及其水循环综合观测能力严重不足等问题，需要考虑水循环的整体性及水资源的自然、社会、经济、环境、生态等属性特征，整合不同行业大气水、地表水、土壤水、地下水的监测资源，以 3S、雷达监测、现代通信、计算机网络等现代科学技术为依托，建立空基-天基-地基一体化的大气-水文-生态过程水循环立体监测体系。

### **(2) 加强金沙江流域应对极端事件的预报、预警和应急能力建设**

提高对极端事件预报的准确性和时效性，完善预警预报系统平台建设，提高应急响应和决策支持能力。进一步建立健全气象灾害、洪旱灾害应急启动机制，构建多部门综合应对灾害体系，积极开展科技合作、信息资源共享以及业务预报预测平台的互通互联，建立完善的跨部门联合、上下联动、区域联防的防灾机制和技术架构，建设跨部门防灾减灾综合决策支持平台，全面提高各类灾害的预测、预报和预警能力。加强洪水调度系统、防洪决策支持系统、山洪灾害预警预报系统、气象预警预报系统和防汛会商系统等建设，提高金沙江流域在防灾减灾领域的现代化水平和智能化水平。

### **(3) 加强金沙江上游水源地保护**

采用生态保护和人口转移相结合的方式，进一步保护金沙江上游水源地：一方面推进长江源国家级自然保护区建设，保护现有天然林草地，制止天然林砍伐和天然草地开垦，在严重退化区开展天然草地恢复与治理工程，以生态的方式提高上游地区水源涵养能力；另一方面在有区域优势的地方发展小集镇、小城镇，促进二、三产业和农牧业产业化发展，发挥其吸纳农村牧区剩余劳动力作用，以减少长江源核心地区人为扰动。

### **(4) 优化金沙江流域水资源配置**

受气候变化影响，金沙江流域水资源供需矛盾将会更为突出，因此，在工程方面，需对现有工程更新配套，提高工程供水能力，并根据不同用水户的需求标准和水资源特点，实行优水优供、低水低供，优水优价、低水低价，促进分质供水设施建设和发展。在管理方面，完善和改革水管理体制，建立适应统一管理、科学管理的水法规体系，为实现水资源供需平衡提供保证。

### **(5) 制定流域适应气候变化的社会经济发展综合规划**

在社会经济发展综合规划中，应充分考虑气候变化可能带来的影响。在农业



生产方面，由于未来气候变化下流域内的热量资源逐步增加，应尽量改一熟制为两熟制或两熟制为三熟制，以充分利用增加的热量资源，提高粮食产量。在培育出新品种之前可以推迟原品种的播种期，以降低气候变暖带来的不利影响；在城市防洪除涝方面，由于气候变化背景下极端降水事件呈现出广发和频发的态势，应利用河、湖等自然海绵体，新增调蓄池等人工海绵体，形成蓄泄得当、丰枯互济的城市蓄水型海绵体水网格局，对降雨“化整为零”进行收集和储存，以应对极端降水可能导致的城市内涝问题。

## 小 结

本项目在梳理国内外适应气候变化的经验上，基于金沙江流域未来气候变化影响评估成果，针对下游典型城市，制定了洪水管理、干旱缓解和供需水适应性措施集，同时，提出了全流域不同区域应对气候变化的适应性措施。

① 洪水管理方面的优选措施主要有建设水文气象监测系统、建设预报预警系统、水利工程（群）优化调度、制定洪水风险评估图、提高公众参与力度和制定应急响应方案等；

② 干旱缓解方面的优选措施主要有建立干旱监测和预报系统、优化水库调节规则、干旱风险管理、制定应急计划和新建污水处理系统和管网系统；

③ 城市供需水适应性的优选措施主要有：优化水库运行方案、增加现有水库库容、优化/管理地下水资源、地下水含水层补给、城区雨水收集、储存和利用、中水回用于非饮用水供水和生态环境用水和关于节水与环境保护的公众意识培养等；

④ 农村供需水适应性的优选措施主要有：渠道防渗、优化水库运行方案、优化灌溉制度、优化作物种植操作（包括选种、种植结构、耕作措施）、农业节水奖励等；

⑤ 金沙江流域应对气候变化综合措施主要有：加强金沙江流域水资源综合监测体系建设、加强金沙江流域应对极端事件的预报、预警和应急能力建设、加强金沙江上游水源地保护、优化金沙江流域水资源配置和制定流域适应气候变化的社会经济发展综合规划。

所制定的措施可为全面提高金沙江流域适应气候变化能力提供支撑。



## 5 结论与建议

### 5.1 主要结论

本项目以金沙江流域为研究区，围绕“气候怎样变化？会带来何种影响？应该如何应对？”三大问题，开展了金沙江流域气象水文情势分析、气候变化对供水及极端水旱灾害事件影响评价、综合管理适应性对策措施研究等方面的工作，主要结论如下：

(1) 近 50 年来 (1961-2010 年)，观测显示全流域温度增长趋势显著，近 10 年来多年平均气温相对于 2000 年以前，上升约  $1.0^{\circ}\text{C}$ ，其中，上游源头地区增幅较大；金沙江流域年降水量总体变化不大，呈现出略微增加的趋势，近 10 年来多年平均降水量增幅不超过 2%，但降水变化存在一定的空间差异性，具体表现为上游地区降水量增加，下游地区减少；干流关键水文站径流量均呈现出一定程度的增加趋势，但大部分站点的变化趋势并不显著。

(2) 气候变化情景分析结果表明，未来增温趋势显著，近期和远期气温分别增加约  $1-2^{\circ}\text{C}$  和  $2.5-4.0^{\circ}\text{C}$ ，且上游地区气温上升幅度比中下游地区大；降水的变化则表现出较大的不确定性，降水量总体呈现略微增加的趋势，其中，近期汛期降水以增加为主，非汛期降水以减小为主，但其变幅均不超过  $\pm 5\%$ ；远期汛期降水增加 5-6%，非汛期降水变化不大，降水变化相对较为明显的地区位于金沙江上游。大部分干流水文站的年径流量有增加的趋势，但变化幅度较小，平均增加 5% 左右，支流年径流量的变化在不同情景下差异性较大。

(3) 未来气候变化对金沙江流域水资源系统的影响主要表现为：①在水利发电方面，大部分水电站发电量呈现出增加的态势，但受水电站发电能力的影响，其增幅较小，仅为 2% 左右；②在农业生产方面，未来金沙江流域水热条件向暖湿方向发展，因此，主要农作物适宜种植面积有所增加，种植区会在横向上呈现出北移的态势，在纵向上向更高海拔处迁移；③在丽江市供需水关系方面，丽江市缺水量呈现出较为明显的增加趋势，尤其是在第一产业比重较大的永胜县、宁蒗县和玉龙县地区；④在水生态系统方面：气候变化使目标鱼类栖息地面积增加，广温鱼类物种的产卵期将会延长，冷水鱼类产卵期将缩短；⑤在极端事件方面，干支流极端径流量以及山洪易发区极端降水天数呈现出增加的态势；以气象干旱



指数表示的干旱持续时间和强度均会减小,但以水文干旱指数表示的河流干旱缺水形势将更为严峻,此外未来气温增加明显,导致农作物需水量增加,每增加 10% 的净灌溉需水量会导致农业干旱频率增加 30-40%, 干旱强度增加 10%。

(4) 针对典型城市丽江市供需水日益矛盾的问题, 本项目制定了供需水适应性措施集, 其中, 优化水库运行方案增加现有水库库容、优化/管理地下水资源、地下水含水层补给、城区雨水收集、储存和利用、中水回用于非饮用水供水、中水回用于生态环境用水、节水与环境保护的公众意识培养为城区优选措施, 渠道防渗、优化水库运行方案、优化灌溉制度、优化作物种植操作(包括选种、种植结构、耕作措施)、农业节水奖励为农村优选措施。

(5) 针对典型城市宜宾市的防洪工作中的问题和挑战, 本项目制定了防洪应对的措施集, 其中, 建设水文气象监测系统、建设预报预警系统、水利工程(群)优化调度、洪水风险图制定、提高公众参与力度和制定应急方案等为优先推荐措施。

(6) 针对典型城市攀枝花市的抗旱工作中的问题和挑战, 本项目制定了抗旱应对的措施集, 其中, 建立干旱监测和预报系统、优化水库调节规则、干旱风险管理、制定应急计划、新建污水处理系统和管网系统为优先推荐措施; 此外, 从流域层面, 提出了加强金沙江流域水资源综合监测体系建设、加强金沙江流域应对极端事件的预报、预警和应急能力建设、加强金沙江上游水源地保护、优化金沙江流域水资源配置、制定流域适应气候变化的社会经济发展综合规划等应对气候变化综合措施。

(7) 在白水河 1 号冰川处所建立的冰川地面观测站, 大幅减少了人工测量工作量, 提高了监测效率; 在长江源区建立的融雪径流模型, 模拟确定性系数在 0.85 以上, 可较好的模拟源区融雪径流过程。该模型在长江源区应用的结果表明: 融雪对总径流的贡献有限相对较小, 约为 10%, 但其贡献率的大小亦存在垂向差异性, 即高海拔地区的融雪贡献率要高于低海拔地区, 其中最高区域贡献率约为 50%, 最低区域约为 2%。

(8) 所构建的 HMFm 模型采用数据流控制技术, 能自动耦合不同预见期降雨预报信息, 通过自适应技术, 自动修正预报初始状态, 定时在线实现金沙江流域的短期、中期、长期来水预报。主要断面预报精度在确定性系数一般在 0.8 左



右，水量误差一般不超过 10%，可用于水文预报和气候变化影响分析。

## 5.2 建议

目前金沙江项目一期取得的研究成果，为今后建立金沙江流域水资源及风险管理综合框架，奠定了良好的分析方法、模型工具、技术手段和对策措施。鉴于气候变化影响的复杂性和不确定性，还需在如下方面进一步完善：

(1) 金沙江项目一期中，对金沙江流域洪水和干旱灾害事件进行了统计规律分析，并建立了自然灾害事件查询系统平台；同时构建了金沙江流域气象水文综合预报模型，增强了金沙江流域的极端气象水文事件预报能力。但对突发性山洪灾害的监测预警能力还有所欠缺，有待进一步完善监测站网、确定预警指标和阈值、安装预警响应设施、制定应急预案等。因此，**建议进一步开展金沙江流域的极端气象水文事件（尤其是突发性山洪灾害）监测预警系统研发和机制研究。**

(2) 金沙江项目一期中，分析评估了气候变化对水资源、洪水干旱和水生态等的影响，并研究提出了相应的对策措施，但相关对策措施目前属于技术层面的。对于流域管理和决策者，还需要基于上述技术层面的对策措施，从流域管理、规划和政策层面上，统筹协调并考虑气候变化不确定性带来的风险，制定流域水资源及风险综合管理方案及其配套的政策和制度。因此，**建议进一步研究制定具体的金沙江流域水资源及风险综合管理政策和方案。**

(3) 金沙江项目一期中，以丽江市为例，评估了气候变化对丽江市供需关系的影响，并基于 WEAP 模型，提出了丽江市水资源应对未来变化的适应性方案。考虑到气候变化对城市影响是全方面的，应对气候变化的适应性对策措施也应全方面的融入到城市建设和社会经济发展中，例如为缓解未来气候变化引发的水资源供需关系等，除了已经提出的水资源配置方案以外，还需要研究制定城市的节水型社会建设方案和节水技术的应用对策、非常规水资源及雨洪资源化利用方案，以及海绵城市建设技术等。因此，**建议进一步开展气候变化背景下城市水安全和社会经济发展综合应对方案应用推广研究。**

(4) 金沙江项目一期中，研究了气候变化对水资源的影响规律，并初步开展气候变化对金沙江干流指示性鱼类的影响研究。但还有待针对影响分析结果，研究制定河湖源区的水资源保护方案，以及水生态和水环境的保护方案，增强流



域应对气候变化的能力。因此，建议进一步开展气候变化背景下的河湖水资源和水生态环境保护方案研究。

## 6 亮点与展望

### 6.1 本项目亮点

在中国水利部和瑞士发展合作署及瑞士联邦环境署的大力支持下，中瑞双方专家团队经过三年的辛勤努力和通力合作，项目一期研究达到了预期目标，取得了丰富的成果，主要亮点如下：

(1) 基于历史数据和气候模式，识别了历史金沙江流域气象水文要素演变规律，评估了未来气象要素的变化趋势。其成果有助于深入认识和掌握大河流域的河源区未来气象水文变化特征趋势及水资源时空分布规律，这对于同样起源于青藏高原的其他河流（黄河、怒江、澜沧江、雅鲁藏布江、恒河、印度河等）具有重要的借鉴作用。

(2) 首次实现了玉龙雪山冰川变化的可视化实时监测，构建了基于遥感数据的长江源区融雪径流模型，对加强金沙江流域的冰川监测及水融雪径流能力，进行了十分有益的探索，也为下阶段进一步研究和掌握气候变化对冰川消融和径流变化的影响规律提供了第一手的观测资料。

(3) 构建了适合金沙江流域的短中期水文预报模型，并接入长江水利委员会已有的水文预报系统，丰富了长江水文预报的技术手段，可为金沙江的防汛抗旱提供技术支撑和参考。

(4) 基于未来多种气候变化情景数据，评估了未来气候变化对金沙江流域径流、极端事件、水力发电、作物适宜种植区、典型城市供需水关系、攀枝花江段鱼类栖息地的影响。研究成果可为制定流域适应气候变化的社会经济发展综合规划提供依据，所研发的成套技术也适用于其他流域。

(5) 提出金沙江中下游典型城市供需水、防洪、抗旱等的应对措施，为中下游城市水安全保障提供了路线图；制定了金沙江不同区域和不同领域的应对气候变化适应性措施，为提高流域水资源综合管理水平提供支撑。研究成果可以推广应用于其它的类似城市和流域。

(6) 开展了卓有成效的双方交流和技术培训，开发了知识管理平台，并搭建了良好的中瑞双方国际合作平台。其中，中方通过在瑞士接受多次培训以及瑞士专家到访中国进行交流，来自 7 个部门超过 40 名中方专家和技术人员在不同



层次上提高与气候变化相关科技能力，学习了瑞士先进的工作理念，更新了气候变化、水文预报、水资源综合管理、冰川和遥感监测、水生生态和鱼类栖息地模拟等方面的专业知识，促进了中国项目团队整体能力的提高。

(7) 与云南省水利厅、丽江市政府、青海省水利厅、西藏那曲地区水利局及其他部门进行了多次调研座谈，交流了气候变化影响可能带来的机遇挑战和适应性应对措施。通过调研等形式了解当地政府部门对气候变化影响的直观感受，明确气候变化背景下水资源风险综合管理的要求。另外，还通过项目互动式宣传网站、报纸、论文、图册、调查问卷和会议等多种形式，向有关政府、学术和协会组织、社会公众宣传本项目的研究成果。

(8) 针对典型城市提出的气候变化应对措施，为当地的相关规划制定提供了科学依据。例如，丽江市的《丽江坝区生态水网建设规划》和《丽江市水利发展“十三五”规划》，宜宾市的《宜宾市防洪规划》，均参考了本项目的研究成果。

## 6.2 展望

(1) 期待金沙江项目二期的研究工作尽快开展，进一步夯实研究成果，尤其是在气候变化背景下的极端洪涝和干旱监测技术和预警机制、城市水安全和社会经济发展综合应对方案、河湖水资源和水生态环境保护方案等方面，需要开展研究，为国家制定气候变化和社会经济发展背景下适应性措施提供科学支撑和经验借鉴；另一方面将金沙江项目一期的研究成果转化为规划设计和实施方案，提升金沙江流域水资源及风险管理水平，为其他流域应对气候变化提供示范；

(2) 期待中瑞双方共同努力，围绕“一带一路”和“长江经济带”，积极推广中瑞金沙江项目研究成果，从水资源管理、配置、节约，以及河流湖泊保护，水旱灾害监测、预警、预报和防范等方面，共同开展方案研究和规划设计，为相关国家和地区提供技术咨询。



结果

对技术水平的影响

 1 水文特性与水动力学

金沙江流域大部分地区发生过**严重的自然灾害**，如干旱和洪水，造成了大量人员伤亡和重大经济损失。在部分地区，泥石流和山体滑坡也曾造成严重后果。

尽管难以通过分析历史资料来推断灾害发生频率是否增加，但在灾害管理方面的行动刻不容缓；研究成果可以用于政治层面的交流与沟通。

项目开发的**灾害事件登记平台**有助于开展数据分析和可视化。

为实现数据共享，该平台允许各类用户调用档案和输入数据，并提供浏览历史灾害事件的权限。它为基于历史记录的危害管理奠定了基础，可以增强对灾害过程的理解。

通过与利益相关方共享自然灾害事件数据，风险管理能力得到加强。平台可为决策者进行深入分析历史和当前的灾害事件提供了机会。因此，这种基于网络的平台应结合当地需求进行改进，以便于记录后续事件。还需要对任务和责任进行明确定义。

因为登记名录包含灾害损失，该平台可为灾害损失计算和基于风险的灾害管理提供重要依据。

该平台可用于支撑数据标准化，从而为长江水利委员会对金沙江自然灾害事件统一管理奠定基础。

该平台可协助山洪地质灾害防治工程技术研究中心开展山洪灾害风险评估研究。



结果	对技术水平的影响
历史水文气象特征分析表明，1960年至2014年金沙江流域的气温整体呈上升态势。	该结果与其他全球变暖分析结论一致，再次确认了温度升高趋势和降水的不确定性。
近50年来，降水量没有明显变化，呈微弱上升趋势。	这些结果有助于分析金沙江流域未来气象水文变化特征。它们是未来水资源管理中开展相关研究或规划工作的重要基础信息。
依托项目开发的水文气象数据分析工具HydroAnalysis R-package可以分析气象水文基本统计特征，包括频率、趋势以及旱情等。	HydroAnalysis R-package的开发有助于增强长江水利委员会气象水文分析能力，可以分析近期气温和降水观测值的变化对于旱和洪涝的影响。
冰川地面观测站的成功安装为了解气候变化影响提供了数据支持，通过实时监测，首次实现对玉龙雪山冰川变化的可视化。	关于气候变化对山地水库影响的监测能力得以加强。根据实时更新的天气、冰川和积雪数据，长科院和中科院寒旱所提高了对金沙江气候变化的先决条件以及脆弱性的认识。
	观测站有助于向公众直观展示气候变化的影响，提高公众意识。
融雪径流模型表明，长江源区融雪水对径流的贡献较小。然而，不同海拔和区域的积雪变化可能会对气候产生重大影响。	融雪径流对金沙江径流的贡献量小于预期，降水是金沙江径流的主要来源。这一结论对于金沙江径流预测十分重要。此外，金沙江上游融雪径流对本地径流的重要性尚不明确。



结果

对技术水平的影响

卫星遥感监测是了解积雪和降水时空分布的一种有效手段。如果在长江水利委员会成立遥感信息研究中心，可极大增强遥感数据应用能力。

研究融雪径流贡献量有助于解决如下问题：雪崩、融雪径流引发的局部洪灾以及雪盖过薄导致的缺水等。

明确融雪径流对金沙江上游来水的贡献量有助于在灌溉、防洪和发电等水资源管理问题做出决策。

融雪径流模型有助于提高长江委对上游气象水文的分析能力，借助长系列卫星数据可以分析冰川积雪区对气候变化的响应。

气象水文预报模型（RS模型）适用于金沙江流域，已集成控制性水库，可以在三个时间尺度上实现水文预报。该模型已接入长江委气象水文预报系统，预报系统的适用性得到进一步提高。为了保障预测模型的正常运行，水文局的技术专家关于模型操作和维护的专门培训。

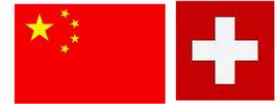
该模型能够支持水文局更好的开展洪水预报，如通过加强洪水应急管理，降低洪灾造成的损失。

水文局未来可以将该模型应用于解决更多的气象水文难题，如在区域层面扩展到整个长江流域，用于解决水库调度中水力发电和灌溉优化，以及用于洪水预警（山洪）或干旱预报等方面。

该模型可以将当前水文气象情势，未来水文状况以及水库运行及其效益综合于一体的工具。因此，该系统的应用扩展到整个长江流域是十分必要的。

模型开发促进了数据集中化，并开启了关于数据可访问性和数据管理政策的对话。

开放数据有助于全球水资源管理，共享数据对于技术进步的重要性已在本项目中得到验证。



结果

对技术水平的影响



2 气候变化情景和影响评估

生成一套下金沙江流域网格尺度近期（2021 - 2050 年）和远期（2070 - 2099 年）气温和降水数据集。

该数据集还可用于其他评估气候变化影响的研究。只有基于大量的气候变化情景设置，才可能评估与气候变化相关的不确定性因素。

金沙江流域未来升温趋势明显，而降水则存在较大不确定性，表现为上游和中游地区年降水量增加，下游地区年降水量的变化存在不确定性。

未来 30-40 年间升温趋势显著，所以，本项目关于升温影响的结论（如在灌溉水源充足时应加强农作物灌溉）也较为可靠。

因为升温不确定性较小，应着重考虑升温造成的影响。

如果供水水源能够满足，那么随着温度升高，作物适宜种植区范围将会显著扩大，将向北以及更高的海拔迁移。

对于受降水或供水水源不足的作物种植区，气候变化影响存在较大不确定性。当降水和灌溉水源趋势更为明朗时，有待开展进一步研究确定。

水资源短缺是丽江市面临的主要挑战之一，未来形势会更加严峻。农业是受到气候变化影响主要行业，生态和生活用水供应也受到影响。

通过调研表格和技术研讨会等形式，丽江当地政府部门已了解气候变化对各行业的影响。水利、农业、住房建筑以及林业等当地管理部门就未来可能面临的挑战对项目成果给予了反馈。

丽江水资源评估与规划模型应用的结果已应用于当地水利发展规划文件。

丽江作为项目示范区域，其主要结论适用于金沙江流域其他条件相仿的地区。长江科学院已熟练掌握这一模型和评估方法，可以进一步推广应用。

金沙江未来水资源量的增加，可以为水资源管理提供更多机遇，如在枯水期留出更多库容以储备灌溉用水。



结果	对技术水平的影响
未来年径流量和汛期径流量将显著增加。而枯期径流量变化趋势存在较大不确定性。	汛期径流量增加，可为新建调水工程或现有蓄水工程扩容提供了可能性
特定重现期的河道洪水和山洪强度将增加。	若未能提出有效的适应性措施，未来河流洪水和山洪灾害强度增加将导致更大的人员伤亡和财产损失。这些发现为管理层增强应对意识奠定了基础。
未来降水量的增加将减低气象干旱的频率、强度和持续时间。由于蒸发量较高将导致枯期水文干旱发生频率增加。农业干旱的频率、强度和持续时间方面的增加存在较大不确定性。	由于未来气候变化风险表现出增加趋势，关于现有安全保障在未来是否仍然适用（如金沙江管理洪水强度加大造成的经济损失）以及剩余的风险是否在可控范围内等问题，各界已展开了讨论。 建议尽快提出新的减灾措施，如扩大保险范围以从而增加抗风险能力抵御能力十分重要。
	气象干旱的减少可以提供更多机会，如关于雨季期降水的增大是否对农业生产有帮助的问题，技术专家已经开始相关讨论。
	通过评估现有和规划调水工程，可以讨论如何扩建或新建此类工程。其他工程规划类似。
	枯水期出现更为频繁和严重的水文干旱会影响调水供水向其他地区供水。
	由于未来水文干旱出现频次和强度的增加，未来枯期引水工程的作用将受到限制。其他工程规划类似。
	升温导致蒸发增大，一方面植物会以更高效的方式进行光合作用，另一方面未来二氧化碳浓度也会上升，到底哪种效应会起主导作用，目前尚不清楚。
	受到气候变化影响和灌溉水源减少的双重作用，农业影响评估存在较大不确定性。进一步开展农业干旱相关研究是十分必要的。



结果

对技术水平的影响

水温升高是影响冷水鱼类栖息地的重要因素。但是，研究表明，由于大坝修建阻碍了鱼类迁移通道，水电站的建设对鱼类栖息地影响更大。

水工程生态所是负责金沙江流域水电站环境影响评估的机构，其技术人员通过本项目接受相关技术培训，例如通过栖息地建模开展气候变化影响评估和水电对鱼类栖息地影响评估。

鱼类栖息地建模在中国的应用具有一定开创性。本项目的开展提升了技术人员在该领域的技术水平，项目所采用的评估方法未来可以应用于水电站环境影响评估以及水生态修复措施制定等方面。

水电站对鱼类栖息地的影响已在示范应用中得到证实，可为下阶段提出有效地恢复措施（如水电站的优化运行）提供了机会。

研究表明。金沙江水生态系统存在较大退化风险，亟需采取相关措施。除了项目承担单位水工程生态所，还应让更多的利益相关方了解并参与进来，可以更好的为生态系统保护采取行动。



结果

对技术水平的影响



3 适应性对策措施

基于适应性策略的框架构建适应气候变化长期策略，包括适应性活动的总体目标、政策和体制框架、能力和意识建设以及具体的适应性措施。

基于国际经验形成的适合中国国情的气候变化适应性策略已基本明确。

在金沙江流域应用国际经验可以让利益相关方了解策略的制定，并了解策略制定的关键环节。

国际经验表明，需要采取综合管理方法以应对不同行业（如水资源管理和农业）之间以及不同行政层面如国家、地区（省）和地方（市）的管理机构，从而避开体制障碍的限制，保障最佳的措施的落实。

对适应目标进行定义以及将其融入现有战略和政策至关重要，这样才能评估和实施实现目标的必要措施。当有关气候变化影响的知识更新时，重新评估这些目标是十分必要的。

关于气候变化影响和适应性措施的能力建设十分重要，负责各类发展规划的部门应像统计人口趋势一样将气候变化纳入日常工作中。

作为专业的规划和工程研究机构，长江科学院受丽江市水务局委托，编制丽江市水利发展规划。长科院部分技术人员已经接受了水资源配置模型的相关培训。



结果

对技术水平的影响

基于项目建立的丽江市水资源优化配置模型，为丽江市水务局全面应对气候变化和社会经济发展带来的挑战提供了有用的基本信息。

该模型和模拟结果对当地的水利发展规划产生了一定影响，如《丽江坝区生态水网建设规划》和《丽江市水利发展十三五规划》的编制在一定程度上参考和应用了模型结果和结论。

长江科学院会计划对当地水务局技术人员开展技术，以期将该模型应用于日常管理工作。

项目组对缓解丽江水资源短缺的 **52** 项适应性措施进行了评估，通过评估包括现有规划文件中的措施以及新的适应性措施，筛选并推荐具有良好效果的措施。

这是首次从气候变化适应性的角度对五年发展规划等水利规划文件开展评估。

该评估方法可以在其他地区的水利规划文件编制工作中加以推广应用。

建议长江科学院和丽江市水务局对优化水库运行方式等一系列措施开展进一步研究。

关于增加管理手段的相关建议，如流域管理规划、地下水保护和开发规划等，将报送给长江水利委员会和丽江地方政府。



结果	对技术水平的影响
<p>通过分析现有减少洪水和干旱风险的措施可知，大部分规划措施是防洪和抗旱工程措施，而监测系统、灾害风险图等非工程措施得到的关注较少。</p>	<p>从水资源综合管理和风险管理角度而言，非工程措施是后续工作的重中之重。</p>
	<p>更加注重规划和组织等非工程措施，不仅可以起到保护作用，还可以在考虑保护措施之前避免和降低风险。</p>
<p>为保护宜宾市未来不受金沙江干流洪水侵袭，需要预留向家坝和溪洛渡水库 80%的防洪库容。由于这一需求不可能实现，需要通过增加宜宾城区堤防高度，以保障宜宾城区段河道能够通过 66,000 m<sup>3</sup>/s 的安全洪量。</p>	<p>通过梯级水库优化调度可以有效调蓄洪水，但是进一步的措施（特别是非工程措施）也是十分必要的，特别是加强基于风险的洪水管理。在该管理体系中，灾害风险图的作用十分显著。</p>
	<p>本项目所采用的现有措施气候变化适应性评估方法，可以推广到其他洪水易发区及防洪系统。</p>
<p>在抗旱方面，因金沙江干流中下游规划建设梯级水库，可以缓解因气候变化引起水文干旱对三个供水工程的影响。</p>	<p>在适应气候变化的调节措施中，特别是通过雨季蓄水补充旱季缺水的措施，水库调节将起到重要作用。</p>
	<p>本项目所采用的现有措施气候变化适应性评估方法，可以推广到其他地区。</p> <p>通过干旱监测、预报系统或风险图等非工程措施可以用于完善现有抗旱体系。</p>



结果	对技术水平的影响
为保障或提高气候变化下应对自然灾害的安全等级，应遵循三大主要原则：	本项目提出了一系列适应性措施来构建基于风险的灾害管理体系，例如干旱监测和预报系统，山洪预报系统，灾害风险图和基于风险的行动方案等，在此类管理体系中，成本效益比是一个重要评估指标。
• 制定应对现有自然灾害的策略，以实现基于风险管理目标和安全等级的灾害风险综合管理；	本项目提出的一般性建议也适用于其他流域和灾害管理项目。
• 扩大现有风险管理和适应性措施选择范围，着重考虑非工程措施比并为措施排序；	本项目采用具体实例说明如何完善金沙江的跨部门和多层次协调机制。
• 制定应对灾害和气候变化的跨部门规划和多层次协调机制。	就水资源综合管理和风险管理而言，今后需着重基于风险的决策和规划措施的成本效益分析。
	规划措施评估中应更加注重成本效益分析，有助于更好地评估经济和生态效益，加强水资源综合管理。



结果

对技术水平的影响



4 知识管理

作为知识管理平台的一部分，项目活动和项目成果得到广泛推广和传播。

知识管理不仅考虑项目实施过程，还通过经验复制和积累其他地区相关知识等方式将其引申到项目之外。

对项目实施过程和对成果质量的把控确保了项目产出的质量和相关性。

通过考察和技术交流，中瑞专家的理念和技术能力得到了提升。

中方合作伙伴将持续推进研究产出的提升和质量改进工作。

中方合作伙伴的系统能力得到提高。

该项目的研究成果包括对水资源管理和气候变化研究方面的深入了解。这些成果在技术层面，以及未来在政策层面，可以作为范例和成功经验供其他地区和流域参考。项目采用的方法以及已开发的模型工具可以推广到其他地区，有助于了解气候变化对其他流域的影响。