

（一）项目背景

按照《全国山洪灾害防治项目实施方案（2024—2025 年）》《内蒙古自治区 2025 年度山洪灾害防治项目建设及运维工作要求》《内蒙古自治区山洪灾害防治项目 2024-2025 实施方案》《内蒙古自治区山洪灾害防治 2025 年度建设项目实施方案》的相关要求，2025 年内蒙古自治区山洪灾害防治项目建设任务为基础数据梳理整理、L2 级地理空间数据建设、算法建设（试点小流域感知建设、预警阈值复核和动态调整应用、降雨异常识别模型和降雨数据融合模型、开发完善水文水动力学等模型）、小流域四预成果集成。

（二）服务内容

第一包：基础数据梳理整理、L2 级地理空间数据建设

1. 基础数据梳理整理

梳理集成基础数据范围为 2021 年—2023 年补充调查评价 585 个重点集镇调查评价成果、18 个重点城镇补充调查成果、76 个危险区动态管理清单成果的电子数据、文字报告以及成果报表，具体内容如下：

（一） 电子数据

1、水文气象资料收集

暴雨参数资料、历年水文站流量及统计参数资料、暴雨洪水资料、测站基本信息、小流域设计暴雨洪水计算方法及相应参数取值、水文资料收集整理报告

2、小流域基本信息

小流域名称、小流域内城集镇、村落、重要经济活动区、旅游景区等。

3、社会经济调查数据

4、涉水工程补充调查数据

5、历史山洪灾害调查数据

6、山洪灾害威胁区域调查数据

7、山洪灾害监测预警设施核查数据

8、沿河村落现场详查数据

9、照片数据

每一个跨沟道路和桥涵、沟滩占地对象，提供上、下游照片（在沿河/ 沟道两岸集中成片防治对象区域内，或只提供沿河/沟道阻水最严重构建物的相应照片）。

（二） 文字报告

纸质版和电子版，旗县级。

（三） 成果报表

表 1 山洪灾害调查最终提交成果

序号	类别	包含项
1	报告	山洪灾害调查报告
2		历史山洪灾害调查报告（水文部门提供）
3		历史洪水调查报告
4	图件	山洪灾害防治监测预警设备分布图
5		防治区人口分布图
6		危险区图，转移路线和临时安置点图
7		涉水工程位置图（包括水库、水闸、堤防、塘坝、路涵、桥梁）
8		需工程治理山洪沟及保护村落分布图
9		沿河村落居民住房、重要城（集）镇住房位置图
10	表单	防治区基本情况现场调查成果汇总表
11		河道断面测量和居民户宅基高程测量成果
12		水文气象资料收集整理工作报告及数据表（水文部门提供）

2. L2 级地理空间数据建设

内蒙古自治区呼伦贝尔市扎兰屯市卧牛河小流域范围内的河道航飞约 170km²，城集镇的三维建模用面积估算约 4km²。具体分布如下图所示：

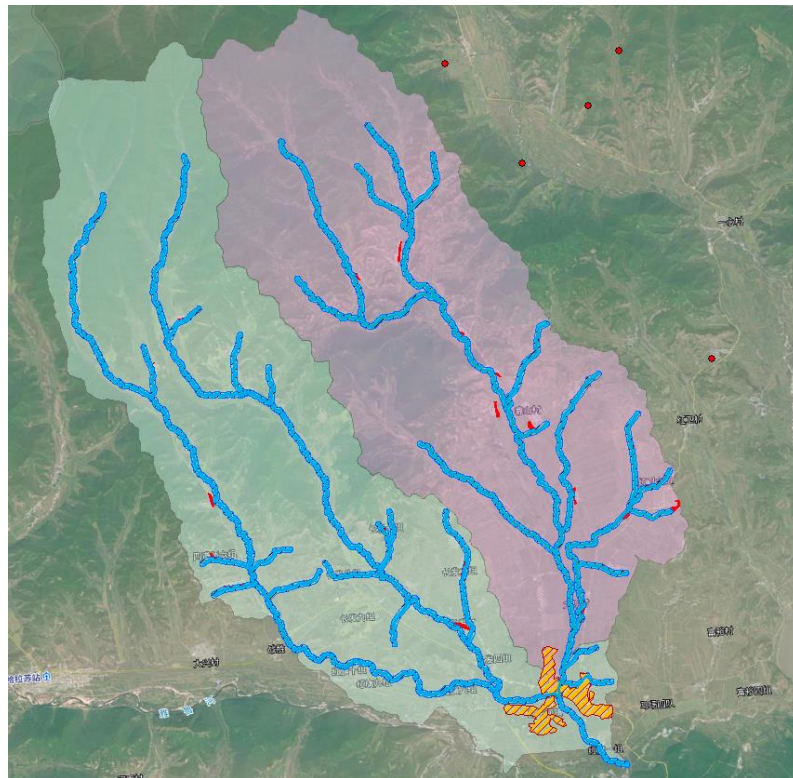


图 1. 2025 年航飞范围及卧牛镇倾斜摄影建设范围

2.1 卧牛河 DOM DEM 数据生成、处理

利用倾斜航飞的成果进行 DOM、DEM 生产，用面积估算约 170km²；城集镇的三维建模用面积估算约 4km²。

L2 级包括山洪灾害防御重点区域的 DEM 数据，重点区域 DOM 和倾斜摄影影像/激光点云等数据，重要集镇所在沟道的断面数据以及风险隐患影响调查分析。

用途：其中 DEM 数据，重点区域 DOM 和倾斜摄影用于构建可视化场景，DEM 和断面数据用于水动力模型构建及水文模型优化分析。

1、DEM 数据

本次建设 1 个试点流域 2.5m 分辨率 DEM 数据（实际范围及位置待后续现场考察最终确定，初步计划小流域试点小流域内河道及河道左右岸各外扩 500m）；

2、重点区域 DOM

本次建设 1 个试点流域重点防洪区域范围 10cm 分辨率 DOM 数据（实际范围及位置待后续现场考察最终确定，初步计划小流域试点小流域内河道及河道左右岸各外扩 500m）；

3、倾斜摄影数据加工处理

本次建设试点流域出口的卧牛河镇面积约 5km²，分辨率为 2.5cm，倾斜摄影数据加工处理。（实际数量及位置待后续现场考察最终确定）。

序号	建设内容	范围	精度要求	备注
1	DOM	170km ²	10cm	
2	DEM	170km ²	2.5m	
3	倾斜摄影数据处理	4km ²	2.5cm	

第二包：试点小流域感知建设、简化洪水淹没范围与水深分析模型、水动力学模型构建、三维数字化场景模型、小流域四预成果集成

1. 试点小流域感知建设

根据 2025 年试点小流域的建设情况，针对卧牛河小流域左支出口及右支出口补充建设自动水位雨量一体站各 1 个，共计 2 个。用于后期试点小流域开展

水动力模型及水文模型优化提供实时监测数据，同时提升该小流域内的监测站网密度。

1.1 布设原则

根据山洪灾害风险隐患调查成果，对受山洪灾害威胁严重的防治区的周边河道上游岸坡、河道亲水空间等上游岸坡、蓄水建筑物排洪设施下游河道岸坡、主流支流汇合或河道束窄可能导致水位陡升的部位、易受拥堵的桥梁上游河道岸坡、漫水桥头、穿城沟道、人口密集区上游布设雨量水位一体监测站。

1.2 建设数量与位置

根据 2025 年度山洪灾害防治项目试点小流域的建设任务需求，小流域内补充新建雨量水位一体站合计 2 处（拟定流域内红色图标）。具体如下图所示：

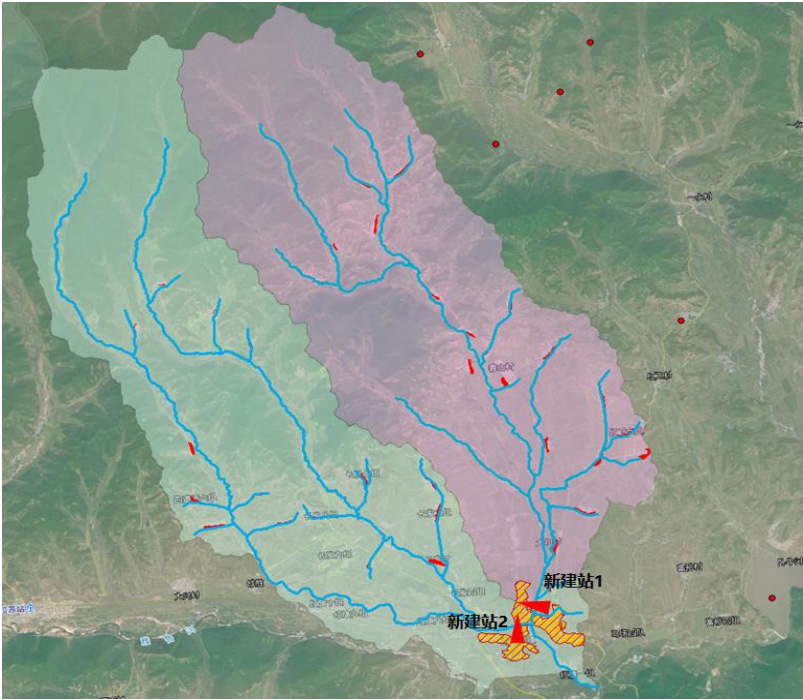


图 1. 卧牛河小流域新建雨量水位一体站分布图

声光电自动水位雨量一体站		
1	翻斗式雨量计	承水口径：Φ200+0.6mm 外刃口角度 40～45°，测量降水强度：≤4mm/min 在 8mm/min 可以工作，分辨力：0.2mm（6.28ml），误差：±2%（室内静态测试，雨强为 2mm/min），输出信号：单干

		式舌簧管通断，工作温度：0~60℃，贮存温度：-40℃~60℃，开关容量：DC，V≤12V，I≤500mA
2	平板雷达水位计	<p>工作频率：24GHz；测量范围：0~30M；测量精度：±3mm（0~30M）；显示分辨率：1mm；仪表启动时间：<40S；仪表采样速率：1—2 / S；功耗：Max. 12mA（RS-485 接口输出/12V.DC）；供电电压：6~26V.DC（标准值：12V.DC）；过程温度：-40~+80℃；相对湿度：≤95%；防护等级：IP67（铝外壳）；RS-485 接口输出方式/MODBUS 通讯功能；数字通讯界面：MODBUS 协议；安装方式：不锈钢蝶形角度可调节支架；符合国家水利行业标准：SL/T243-1999 水位计通用技术条件和 GB/T27993-2011 水位测量仪器通用技术条件。</p>
3	主控单元（含遥测终端机）	(1) 工作电压：DC9~24V
		(2) 静态值守功耗：≤10mA
		(3) 符合 SL 651-2014《水文监测数据通信规约》
		(4) 工作温度：-10℃~55℃
		(5) 工作湿度：≤95%(40℃)
		<p>(6) 平均无故障工作时间（MTBF）：≥50000h</p> <p>(7) RTU 具有远程固件升级功能，远程修改参数功能；支持一站多发功能；符合《水文监测数据通信规约》SL651-2014 和《水资源监测数据传输规约》SL/T 427-2021；要求无雨小时报，有雨至少 5 分钟 1 报；具备数据显示屏，可显示设置参数等各种信息；支持现地和远程设置；支持现地和远程查询；保存数据应不少于 10000 个参数；能和中心站数据交互，接收执行中心站的指令；实时时钟校准，实时时钟与系统时钟误差不超过±1s/d；可支持多种通信方式（GPRS/北斗），可具有多信道自动切换功能；具有定时自报、查询一应答功能；可 24h 实时保持在线，掉线时，在设置时间内可以恢复上线；静态值守功耗：≤2mA@12VDC；≤</p>

		10mA@12VDC；可通过按键和其他无线方式设备参数；GPRS/CDMA/4G 模块，可以同时进行短信和网络数据的收发；能够同时与 6 个服务器进行数据通信；支持蓄电池电压、信号强度、SIM 卡号等运维参数上报；支持远程查询设备在线状态（8）预警发布操作 APP 能够实现与自治区平台接口对接，能够使用自治区平台录入文字，并进行现地语音播报功能。
4	太阳能板及支架	不低于 400W，单晶硅，密封性强、抗冲击性能好，带安装支架，便于安装的太阳能组件，正常工作寿命不小于 10 年，免维护，组件采用阳极氧化铝边框，坚固耐用且有效防止腐蚀
5	蓄电池	400ah，使用温度：-50-40 度，如果不满足-50 度，冬天将电池收回，电池组件易于拆装，电解质：采用胶体电解质，环保要求：电池配方中不含对环境有污染和不易回收的镉物质，无泄漏。
6	一体化机箱	尺寸 500mm×600mm×350mm（H×W×D，可依据具体情况调整大小），箱体防护等级为 IP54，防雨防尘防盗；设备箱内附可拆卸安装板，遥测终端、蓄电池等设备安装在设备箱里面
7	太阳能充电控制器	2/24V 自动识别或自定义控制器工作电压，采用温度补偿充电控制算法，系统自动调整充放电参数，光伏阵列短路保护、蓄电池过充保护、负载短路保护等，具有 485 通讯接口，支持太阳能板、蓄电池、负载的电压电流状态上报
8	信号避雷及电源避雷	信号避雷：SMA 接口、黄铜，特性阻抗 50 欧姆，电压保护水平 1.4，传输特性 0-2.5Ghz，响应时间≤1ns，
		驻波比≤1.2VSWR，损耗≤0.2db 电源避雷：Un：12v；In：20kA；Imax：40kA；Uc：15V
9	立杆、横臂安装支架	立杆直径 165mm，高度 5000mm，厚度 6mm，横臂直径 90mm，长度 4000mm—6000mm，厚度 4mm，太阳能支架尺寸 500mm×550mm，高斜拉管 40×2.5mm 现场确定，操作平台 800×800mm
10	防雷接地	设备接地体采用 4×40mm 扁铁，埋设深度不低于 1500mm，并和避雷针焊接一体；水平接地体间距和垂直接地体间距均应大于

		5000mm；避雷埋地段应加入长效降阻剂（如草木灰、木炭等），然后填土夯实， 接地电阻 $<10\ \Omega$
11	高程引测	根据测验河段地形情况，需从国家水准点引测本站水准点高程。最终提交时要转换成 85 黄海高程
12	通讯卡	满足数据传输流量使用的 4g 通讯卡

（3）一体监测站预警站必须通过国家权威部门或水利部机构评测（测试），达到合格以上先进的参数指标。

2. 简化洪水淹没范围与水深分析模型

2.1 建设范围

针对 2025 年 56 个小流域的外业测量数据进行小流域内危险区、宅基地高程点、分析简易淹没范围。

2.2 分析思路

基于每组测量的横纵断面数据，根据各横断面与纵断面交点，计算交点离纵断面起点距离，对每个横断面按距离进行顺序编号。根据控制断面 5 个频率水位和控制断面测量数据，计算控制断面 5 个频率水位液面距离左岸距离和 5 个频率对应流量。根据断面直接的高程和距离，计算断面斜率，查询断面测量记录的糙率，依据液体流量守恒定律，通过曼宁公式计算上下游断面 5 个频率对应的水位，根据水位计算液面距离左岸距离。

2.3 断面选取

断面选取主要包含横断面选取及纵断面选取，数据来源本年度盟市小流域治理单元的断面测量数据。

2.4 控制断面高程数据处理

明确对洪水淹没分析起关键作用的控制断面，如河流狭窄处、易发生漫堤地段等。无需对全流域所有可能的断面进行测量，集中精力获取这些重点区域的高程数据，减少数据采集工作量。例如，在一条较长的河流中，确定几个历史上频繁发生洪水漫溢的地段作为控制断面，优先采用这些断面的高程数据。

2.5 简易淹没结果/效果

根据五年一遇、十年一遇、二十年一遇、五十年一遇、百年一遇、成灾水位五个频率进行简易淹没分析，并形成淹没效果。

3. 水动力学模型构建

3.1 建模范围

本次水动力模型构建范围为卧牛河小流域试点小流域。

3.2 一维水动力模型

一维水动力模型主要用于洪水预报及水库联合调度、河渠灌溉系统的设计调度，以及河口风暴潮的研究，具有计算稳定、精度高、可靠性强等特点，能方便灵活地复杂河网水流、模拟闸门、水泵等各类水工建筑物的运营调度，尤其适合应用于水工建筑物众多、控制调度复杂的情况。

3.3 二维水动力模型

二维水动力模型基于对圣维南方程组的求解，通过设定的分析范围、上下游边界条件及下垫面条件，对特定洪水的淹没过程进行模拟，输出洪水的演进过程及流速流态、淹没范围、淹没水深、淹没历时等指标。二维地表水动力模型采用精细化建模方式，充分利用高精度地形数据，采用米级甚至亚米级的结构或非结构网格，要求模型引擎具备高效处理上千万甚至亿级网格的能力。

3.4 一二维耦合模型

利用一二维耦合模型耦合一维模型和二维地表模型进行计算。通过对它们的耦合能够拓展模拟环境，发挥各自优势的同时，形成互补。根据不同的组合和链接设置，一二维耦合模型可以应用于不同的模拟情境。

4. 三维数字化场景模型

针对试点小流域的重点城镇及小流域构建三维数字化场景模型，支撑山洪四预中预演的可视化业务开展。

4.1 建模范围

本项目三维数字化场景建模主要基于自治区现有的三维模型引擎构建，依托采集的卧牛河镇的倾斜摄影进行三维建模。

4.2 卧牛镇三维数字化场景

（1）数据预处理

主要包括影像筛选整理、畸变校正、影像增强等工作

（2）三维模型构建

利用空三加密、密集点云生成、三角网构建与模型生成等相关工作构建三维模型。

（3）导入 CISUM 优化整合

通过数据导入、模型优化及地形与水利设施整合等工作，完善场景内容。

（5）场景效果与交互设置

完善光照与场景效果，实现各类交互功能。

（6）渲染输出与应用

通过相关渲染输出最后成果，并进行相关应用拓展。

5. 小流域四预成果集成

2025 年小流域“四预”能力建设主要在 2024 年建设的山洪灾害“四预”业务平台的基础上进行本年度相关建设成果集成，主要包含基础数据梳理成果可视化、动态预警指标和动态调整可视化、L2 级地理空间数据可视化、分钟级预报界面可视化、试点小流域预演集成、简化洪水淹没范围与水深分析集成、试点水库防洪预演集成。

5.1 基础数据梳理成果可视化

根据 2022 年到 2024 年补充调查评价的整理成果，进行成果可视化展示相关工作。

5.1.1 报表可视化

能够将调查成果以报表的形式展示。

5.1.2 地图可视化

通过 GIS 技术，在地图上展示山洪灾害风险隐患的空间分布。

5.1.3 可视化展示

除了地图和报表，还可以采用柱状图、折线图、饼图等多种可视化方式展示调查成果。

5.2 动态预警指标和动态调整可视化

5.2.1 调整依据可视化

水雨情变化，受灾实际情况。

5.2.2 调整过程可视化

指标计算与复核，模型优化与更新。

5.2.3 调整结果可视化

预警区域调整，预警阈值更新。

5.3 L2 级地理空间数据可视化

5.3.1 二维地图可视化

采用分级统计图法，如根据小流域内不同区域的山洪灾害风险等级，用不同颜色填充各个区域，直观展示风险的空间分布差异。

5.3.2 三维可视化

针对试点小流域 L2 级数据底板，进行地形三维可视化，利用 DEM 数据构建小流域的三维地形模型，添加纹理和光照效果，增强真实感，更直观地展示地形起伏和地貌特征。

5.3.3 时空动态可视化

针对试点小流域预演功能制作时间序列动画，例如展示小流域在一次山洪灾害过程中的降雨变化、洪水水位变化以及淹没范围的动态变化等，以直观地呈现灾害的发展过程。

5.4 临近预报界面可视化

临近预报界面可视化主要包近 2 小时临灾预警成果集成可视化及分钟级预报成果集成可视化。

5.4.1 降水信息总览

当前降水强度。临近 2 小时累计降水量预估。

5.4.2 降水趋势图表

包含时间轴、降水量曲线、预警阈值线等相关信息。

5.4.3 区域降水详情

地图联动：当用户在左侧地图上点击某个区域时，右侧区域降水详情板块立即显示该区域的逐分钟降水预报信息，降水强度等级标识等相关内容。

5.5 试点小流域预演集成

5.5.1 预演数据集成

主要集成水文模拟数据、淹没范围模拟数据、灾害损失评估数据、实时监测数据等各类信息。

5.5.2 成果集成可视化

利用地理信息系统（GIS）技术，在平台上能够同时展示水文模拟结果（如流量、水位变化曲线）、淹没范围模拟结果（以地图形式展示不同时段淹没区域）、灾害损失评估结果（以图表和地图相结合的方式展示各类损失的分布情况）以及实时监测数据（如实时降雨、水位数据的动态显示）。

5.6 简化洪水淹没范围与水深分析集成

将简化洪水淹没范围与水深分析的成果集成到山洪灾害监测预警平台，实现本次 56 个小流域的简化淹没分析的成果展示与淹没效果的可视化。利用简化模型计算洪水淹没范围和水深，为预警发布提供更准确的依据，为山洪灾害监测预警、人员转移安置等决策提供科学支持。

第三包：预警阈值复核和动态调整应用、水文模型集群完善和参数率定

1 预警阈值复核和动态调整应用

针对 2024 年自治区各盟市旗县山洪灾害真实情况，对出现山洪灾害的盟市、旗县开展预警阈值复核和动态调整应工作。主要包含山洪案例数据收集、检验预警指标准确性、预警信息准确性、转移建议合理性分析。

1.1 建设范围

针对 2024 年自治区各盟市旗县山洪灾害真实情况，对 2024 年真实出现山洪灾害的盟市、旗县开展预警阈值复核和动态调整应工作。

1.2 山洪案例数据收集

全面收集 2024 年各盟市发生山洪灾害的详细数据，例如 2024 年 7 月 25—27 日，内蒙古兴安盟发生局地强降雨，科尔沁右翼前旗满族屯满族乡上游突降暴雨，三岔和桃合木降雨量分别达到 170.95 毫米、154.6 毫米，26 日东大炮弹沟突发山洪，导致 X914 线（原 S303 线）K9+963 处涵洞被冲毁，一辆轿车坠落水中，造成 1 人获救，1 人失联。类似这样的案例，要详细记录灾害发生的时间、地点、降雨量、受灾范围、人员伤亡和财产损失等信息，为后续分析提供充足的数据支持。

1.3 检验实时动态预警指标准确性

将收集到的山洪案例数据与现有的预警指标进行对比分析。通过对比不同地区在相似降雨条件下是否发出预警以及实际是否发生山洪灾害，判断预警指

标是否合理。例如在一些降雨强度和时长达到预警指标的地区，却并未发生山洪灾害，或者发生了山洪灾害但预警指标未触发，需要深入分析原因，结合 2024 年实际情况，考虑地形地貌、土壤类型、植被覆盖等因素对山洪发生的影响，重新评估预警指标的科学性和准确性。

1.4 核查气象预警信息准确性

对预警发布的信息内容进行核查，包括预警发布的时间、范围、灾害等级等是否准确无误。以 2024 年 8 月 18 日 16 时，内蒙古自治区水利厅与内蒙古自治区气象局联合发布的橙色山洪灾害气象预警为例，检查其预警预计的 08 月 18 日 20 时至 08 月 19 日 20 时，兴安盟扎赉特旗、科尔沁右翼前旗等地区的预警信息是否及时传达给当地民众和相关部门，是否存在预警范围偏差或者预警时间滞后的情况。

1.5 转移安置合理性分析

结合 2024 年自治区山洪灾害发生时的实际转移情况，评估转移建议是否合理。分析转移路线是否安全、便捷，转移安置点是否能够满足受灾群众的基本生活需求。例如在某地区山洪灾害发生时，由于转移路线规划不合理，导致部分群众转移困难，或者转移安置点过于拥挤、物资短缺等问题，都需要在分析中找出，并提出改进措施，以确保未来转移建议更加科学合理，切实保障人民群众的生命安全。

2. 水文模型集群完善

针对近 3 年 2022 年、2023 年、2024 新水文资料对自治区水文模型集群进行率定完善，洪水预报工作是根据实时雨情信息、多源气象预报信息、水文等资料，通过构建的实时连续模拟的水文模型，使用经过模型率定完成的方案，对小流域水位、流量过程进行预报，实现自治区小流域暴雨洪水预报，并以文字、表格或图形的形式输出预报结果。

在以往项目建设中，内蒙古自治区已开展水文模型构建建设，构建了分布式水文模型计算引擎，开发了山丘区洪水模拟、预报及预报预警模块。进行洪水预报前，现有洪水预报模型需进行模型率定工作，以提高模型预报成果的可靠性和精度。同时，为提高成果的可视化效果，本次开发淹没分析模块，对淹

没区淹没范围、水深等相关水要素进行分析计算，分析成果通过叠加工作底图进行展示。

内蒙古自治区山洪灾害监测预报预警平台一期已完成水文模型分区构建、水文模型计算引擎开发。本期主要进行模型率定及淹没分析模块开发。其中，模型率定工作从内容上分为数据处理、预报方案编制和参数率定三个阶段，这三个阶段涵盖了模型率定的全部工作内容。

（1）数据处理阶段的工作内容主要包括基础资料收集整理、历史资料的分析处理等。

（2）预报方案编制阶段的工作内容主要包括预报模型选择、方案定义（预报方案的类型、输入、预报方案的输出等）、模型选择、参数确定、特征值设置（预热期、预见期等）。

（3）参数率定阶段的工作内容主要包括参数输入、模型计算、参数优化、成果汇总等。参数率定的方法分为人工试算率定和自动优选率定两种。在实际操作过程中两者需结合使用。

2.1 建设范围

内蒙古自治区 20 个水文模型集群，率定数据时间范围为 2022 年—2024 年数据。

2.2 数据处理

数据处理主要是在一期工程基础地理数据、水文气象监测数据、小流域基础属性数据、山洪灾害调查评价成果数据收集整理的基础上，补充收集并整理历史降雨洪水摘录资料、山洪灾害调查评价成果断面资料、地形资料、自治区河湖划界成果资料，为模型率定及成果展示提供数据基础。主要包含对 2022 年—2024 年历史降雨洪水数据处理及断面数据处理更新。

2.3 小流域预报方案构建

小流域预报方案构建是在小流域分区模型构建的基础上，以山洪灾害防治区为对象，依据不同流域面积、不同传播时间和不同资料条件的小流域条件，编制模型选择、参数设置、特征值设置的预报方案。成果形成预报方案数据库。主要包括预报方案定义、预报模型选择、模型参数确定、特征值确定。

2.4 模型参数率定

进行水文预报前，需对构建的水文模型进行参数率定，使得模拟的径流过程与实测径流过程达到最佳程度的拟合。本次建设提供参数人工率定及自动率定两种方式。本次使用近3年次洪资料进行模型参数率定，对参数的灵敏性、合理性、可靠性、系统稳定性进行必要的分析和试验。

模型参数率定的基本流程如下图所示，首先选择需要率定的场次洪水过程，根据所构建的流域水文模型选择需要率定的模型参数，并构建不同的参数方案，驱动水文模型进行模拟计算，将模拟流量过程与实测过程进行对比，并根据模型评价指标评估模拟效果，确定最优参数，选择验证期的场次洪水过程进行模型模拟效果的检验，同样计算模型的评价指标，对模型模拟效果进行综合评估，从而确定模型的最优参数。

第四包：降雨异常识别模型和降雨数据融合模型

1. 降雨异常识别模型和降雨数据融合模型

基于现有的模型基础开展结合卫星资源数据、当地雷达测雨数据、开展临近2小时逐分钟精细化预报，结合雨量站实测降雨进行面雨量修正，提升短临预报精度，主要工作包含数据接入、卫星资源收集共享、降雨融合模型构建、面雨量修正、分钟级预报。

1.1 建设范围

本次建设范围为内蒙古自治区全区范围，结合具体场次预报数据进行相关任务建设。

1.2 数据接入

1.2.1 数据来源确定

气象站数据：与内蒙古自治区各气象站建立稳定的数据传输通道，实时获取包括降雨量、降雨强度、降雨时长等基础数据。这些气象站分布广泛，能够提供较为全面的区域降雨信息。

水文监测站数据：水文监测站除了监测水位、流量等信息外，其周边的降雨数据对于山洪灾害预警也十分关键。接入这些数据，可以从不同角度了解降雨对河流水文状况的影响。

卫星遥感数据：卫星遥感能够获取大面积的降雨信息，尤其是对于一些地形复杂、气象站覆盖不足的地区。通过专业的数据接收设备和软件，接入卫星遥感降雨数据，补充地面监测数据的局限性。

1.2.2 数据格式适配

格式转换：不同的数据来源可能采用不同的数据格式，如 CSV、XML、JSON 等。需要开发相应的数据格式转换程序，将所有收集到的降雨数据统一转换为模型能够识别的格式。

数据标准化：对数据进行标准化处理，包括统一时间格式、空间坐标系统等。例如，将不同气象站记录的时间统一为北京时间，将不同的地理坐标系统转换为通用的坐标系统，确保数据在空间和时间上的一致性。

1.2.3 数据质量控制

异常值检测：在数据接入过程中，利用统计学方法和数据挖掘技术，检测并剔除异常降雨数据。例如，通过设定合理的降雨量阈值范围，识别出明显超出正常范围的数据点，并进行核实和修正。

数据完整性检查：确保每个时间点和空间位置的降雨数据都完整无缺。对于缺失的数据，根据相邻数据点的关系，采用插值法或其他数据填补方法进行补充。

1.2.4 数据实时传输与更新

建立实时传输机制：利用高速网络和数据传输协议，如 MQTT、HTTP 等，建立从数据来源端到模型端的实时数据传输通道。确保降雨数据能够及时、准确地传输到模型中，为实时预警提供支持。

定时更新数据：除了实时传输，还需要定期对历史降雨数据进行更新，以保证模型训练和预测的准确性。根据实际需求，设定每天、每周或每月的数据更新频率。

1.3 卫星资源收集接入及共享

1 卫星资源获取

明确卫星数据源：气象部门可共享的卫星数据等。这些卫星具备先进的降水探测技术，能提供高精度的降雨数据。

建立数据接收渠道：通过与卫星运营机构签订数据使用协议，获取合法的数据接收权限，确保稳定接收卫星发送的降雨数据。

数据下载与存储：利用专门的数据下载软件，按照设定的时间间隔和数据需求，从卫星数据存储服务器下载降雨数据。将下载的数据存储在高性能的存储设备中，如磁盘阵列，保障数据的安全与可访问性。

2 数据预处理

辐射定标：对卫星原始观测数据进行辐射定标，将卫星传感器测量的辐射亮度值转换为物理上有意义的辐射值。

几何校正：由于卫星在运行过程中存在姿态变化、轨道偏差等因素，会导致获取的降雨数据存在几何变形。通过几何校正算法，借助地面控制点和卫星轨道参数等信息，对数据进行几何纠正，使其符合地理坐标系。

数据融合与镶嵌：如果从多颗卫星获取降雨数据，需要进行数据融合。将不同卫星在同一时间或相近时间对同一区域的观测数据进行合并，消除数据间的差异。对于不同幅宽的卫星数据，进行镶嵌处理，形成完整的区域降雨数据覆盖。

3 数据共享与服务

用户注册与认证：建立用户注册系统，要求用户提供真实的身份信息、单位信息等进行注册。通过认证机制，如密码验证、数字证书等，确保只有合法用户能够访问卫星降雨数据。

数据推送与订阅服务：根据用户的需求，提供数据推送和订阅服务。用户可以订阅特定区域、特定时间的降雨数据，系统在有新数据更新时，自动将数据推送给用户，提高数据的时效性和用户获取数据的便捷性。

1.4 降雨融合模型构建

本次项目需要开发降雨数据融合模型，研究一种适用于区域性的地面、雷达、卫星等多源降水资料融合的方法，同时前期需要收集整理地面监测、雷达监测、卫星数据，进行模型所需数据进行收集整理预处理。包括降雨融合数据收集整理、融合模型构建开发、融合模型结果检验。

关于开发开发降雨融合模型，主要进行数据收集整理、融合模型构建开发、融合模型结果检验等工作，数据收集主要是气象数据接入等数据、同时包

含 WRF、雷达、探空、地面观测、GPS/MET 水汽等数据，通过 GIS 同化等技术，构建融合模型构建（主要包含风分析、地面处理、温度分析、云分析、水汽分析、平衡分析等），从而进行相关格式处理，得到模式初始场数据，将融合后的数据进行相关业务应用。

1.4.1 降雨融合数据收集整理

通常获取的原始资料（包括背景场及各种探测资料）的格式是 ASCII 码、GRIB 码或 NetCDF 格式，但默认的 LAPS 资料融合码一般是一种特殊的 NetCDF 格式，因此在 LAPS 系统融合之前，需要将所得到的各种资料处理成 LAPS 融合模块要求的输入格式。原始资料融合部分主要是处理已转换成所要求的 NetCDF 格式的原始资料以及输出 LAPS 中间数据文件。融合后生成的中间文件分为两种类型，即站点数据为 ASCII 码格式，LAPS 格点资料为 NetCDF 格式。主要开展原始资料格式预处理、资料融合、资料分析三部分内容。

1.4.2 降雨融合模型构建优化

目前确定初始场条件的办法主要有三大类：经验分析同化法、统计资料同化法和变分同化法。前二者更多侧重统计方法，而变分同化方法是在一个或多个大气运动分方程构成的动力约束下，使分析场与观测场误差最小而得到初始场。目前常用的有三维和四维（包括时间）同化，基本思想是根据预报场的观测资料对大气状态给出一个最优的估计，即求一个目标函数的极小值。

本算法模型利用三维变分同化技术在初始时刻同化了多源观测资料如：卫星、雷达等资料信息来改善预报初始场，比如利用观测资料对数值预报模式初始场的大气状态（如温度、湿度、风场等）进行修正，提供 5 个分析变量（相对于模式格点的 u ， v 水平风分量，气压，位温和比湿）。同时，及时利用最新时效的观测信息同化分析获得更新后的初始场及时制作数值预报产品，也能够同时为短时临近预报提供较高可信度的分析场。

降雨融合模型由地面资料同化功能、探空资料同化功能、GPS/MET 水汽资料同化功能和雷达资料同化功能的组成。

1.4.3 降雨融合模型结果检验

（1）数据对比分析

与地面实测数据对比：将降雨融合模型输出的结果与地面气象站、水文监测站等实际测量的降雨数据进行比对。选取多个具有代表性的站点，对比相同时间段内的降雨量、降雨强度等参数。例如，针对某场暴雨事件，查看模型预测的降雨量与多个地面站点实测降雨量的差异，计算平均绝对误差、均方根误差等指标，以评估模型在定量降雨估计方面的准确性。

与其他权威模型结果对比：选择其他已被广泛认可的降雨模型的结果作为参考。这些模型可能基于不同的算法或数据来源。通过对比不同模型对同一区域、同一时间段降雨情况的预测，分析本降雨融合模型的优势与不足。例如，比较在复杂地形区域，本模型与另一知名模型对降雨分布的模拟差异，从而判断模型在不同地理条件下的适应性。

（2）时空分布验证

时间序列分析：对降雨融合模型输出的长时间序列降雨数据进行分析。检查模型是否能够准确捕捉降雨的季节性变化、年际变化趋势等。例如，观察多年的月平均降雨量数据，看模型是否能合理反映出当地雨季和旱季的交替，以及降雨量在不同年份间的波动情况。

空间分布检验：评估模型对降雨在空间上的分布模拟是否符合实际情况。利用地理信息系统（GIS）技术，将模型结果以地图形式展示，并与实际的地形地貌、水系分布等信息相结合。例如，在山区，检查模型是否能正确反映出因地形抬升作用导致的迎风坡降雨多、背风坡降雨少的空间分布特征。

（3）极端降雨事件检验

历史极端事件回溯：选取历史上发生的极端降雨事件，如特大暴雨、暴雨洪涝等，利用降雨融合模型对这些事件进行模拟重现。对比模型结果与实际发生的灾害情况，包括受灾范围、洪水淹没区域等。例如，对于一场曾引发严重洪涝灾害的暴雨，查看模型是否能准确预测出降雨强度大且集中的区域，以及这些区域与实际洪涝受灾区域的吻合程度。

极端情况模拟能力评估：通过设置极端降雨条件，如超高降雨量、极短时间内的强降雨等，测试模型在极端情况下的响应和输出结果。分析模型是否能够合理模拟极端降雨事件的发生过程、发展趋势以及可能造成的影响，以评估模型在应对极端天气时的可靠性。

（4）不确定性分析

数据不确定性评估：考虑到降雨融合模型所使用的数据来源多样，存在一定的不确定性。分析不同数据源（如卫星数据、地面监测数据）的误差对模型结果的影响程度。通过数据同化、敏感性分析等方法，量化数据不确定性在模型输出中的传播和累积效应。例如，通过改变卫星数据的误差范围，观察模型预测降雨结果的变化情况，从而了解卫星数据误差对模型的影响。

模型结构不确定性分析：评估降雨融合模型本身的结构和算法可能带来的不确定性。尝试使用不同的模型参数设置、算法组合等，对比模型结果的差异。例如，对于模型中的某些关键参数，采用不同的取值进行多次模拟，分析模型结果的稳定性和敏感性，以确定模型结构的合理性和可靠性。

1.5 面雨量修正

1.5.1 面雨量计算方法分析

常见方法分析：面雨量常见的计算方法有等值线法、数值法（如泰森多边形法、三角形法）、算术平均法等。等值线法通过绘制等雨量线来计算面雨量，能直观反映降雨的空间分布，但绘制过程较为复杂；泰森多边形法根据各雨量站的位置将研究区域划分为多个多边形，以每个多边形内的雨量站数据代表该区域面雨量，计算相对简单，但对站点分布依赖性强；三角形法基于三角形网格进行计算，计算效率较高；算术平均法直接对所有站点雨量数据求平均值，计算简便，但无法考虑站点分布差异和地形影响。

方法选择依据：根据研究区域的特点和数据情况选择合适的计算方法。对于地形平坦、雨量站分布均匀的区域，可采用算术平均法或三角形法；若地形复杂、站点分布不均，等值线法或泰森多边形法可能更合适。例如，在平原地区的小流域，站点分布较为均匀，可优先选择算术平均法计算面雨量；而在山区流域，地形起伏大，站点分布稀疏，利用泰森多边形法结合地形数据进行面雨量计算，能更准确地反映实际降雨情况。

1.5.2 误差分析与修正

误差来源剖析：分析面雨量计算结果与实际降雨情况之间的误差来源。主要包括数据误差，如地面雨量站仪器故障导致的数据偏差、卫星遥感降水数据的固有误差等；计算方法误差，不同计算方法本身存在一定的理论误差，以及

由于地形、下垫面等因素未充分考虑而产生的误差。例如，在山区，地形对降雨的影响显著，若计算面雨量时未考虑地形抬升作用，会导致计算结果与实际情况存在较大偏差。

修正策略制定：针对不同的误差来源制定相应的修正策略。对于数据误差，通过数据质量控制和校验，剔除异常数据，对缺失数据进行合理填补；对于计算方法误差，可采用多种计算方法对比分析，结合地理信息系统（GIS）技术，考虑地形、植被覆盖等因素，对计算结果进行修正。比如，利用地形数据生成数字高程模型（DEM），结合降雨的地形敏感性分析，对基于泰森多边形法计算的面雨量结果进行修正，以提高面雨量计算的准确性。

1.5.3 模型验证与优化

验证指标选取：选取合适的验证指标对修正后的面雨量结果进行验证，常用指标包括平均绝对误差（MAE）、均方根误差（RMSE）、相关系数（R）等。MAE 能反映预测值与真实值之间的平均误差大小；RMSE 不仅考虑了误差的平均大小，还对较大误差给予更大权重；相关系数则衡量预测值与真实值之间的线性相关程度。例如，通过计算修正前后面雨量结果与实际降雨数据的 MAE、RMSE 和 R，对比分析修正效果。

模型优化调整：根据验证结果对降雨融合模型进行优化调整。如果发现某些区域的面雨量修正效果不佳，可进一步分析原因，调整模型参数或改进计算方法。比如，若在验证中发现某一特定地形区域的面雨量计算误差较大，可针对性地增加该区域的地面雨量站数据，或改进地形因素在计算方法中的考虑方式，重新进行面雨量修正和模型验证，直至达到满意的精度要求，不断提升降雨融合模型在面雨量计算和预测方面的性能。

1.6 临近预报

1.6.1 近 2 小时临灾预警

（1）数据接入与预处理

高频数据采集：在近 2 小时的预报周期内，对彩云科技的逐 5 分钟的预报降雨产品数据接入。地面雨量站需确保每分钟都能准确记录降雨量、降雨强度等关键数据；卫星遥感和雷达数据也按照分钟级别的时间间隔进行实时获取，以便及时捕捉降雨的动态变化。

数据快速匹配与校准：采集到的数据存在时间和空间上的差异，需在极短时间内完成时空匹配。利用快速重采样和高效插值算法，将卫星和雷达数据的时间分辨率调整为与地面雨量站一致的每 5 分钟，同时对空间分辨率进行优化，确保不同数据源的数据在时空维度上精准对应。此外，对各类数据进行实时校准，消除仪器误差和系统偏差，为后续的预报提供可靠的数据基础。

（2）模型快速迭代与优化

参数动态调整：基于最新采集和处理的数据，对降雨融合模型的参数进行动态调整。例如，在降水强度变化剧烈时，及时调整模型中与降水强度相关的参数权重，使模型能够更好地适应实时降雨情况。通过不断迭代参数，提升模型对逐小时降水变化的捕捉能力。

算法优化与加速：采用高效的计算算法，提高模型的运行效率，确保在短时间内完成逐小时的降水预报。例如，对模型中的卷积运算、数据融合算法等进行优化，减少计算量和运行时间。同时，利用并行计算技术，充分发挥计算机硬件的性能，进一步加快模型的运算速度。

（3）预报结果实时验证与修正

2 小时验证指标计算：每完成 5 分钟的降水预报，立即计算 5 分钟后的小时预报结果的验证指标，如平均绝对误差（MAE）、均方根误差（RMSE）、相关系数（R）等。将这些指标与设定的阈值进行对比，评估预报结果的准确性。

误差实时修正：根据验证指标计算结果，若发现预报误差超出允许范围，及时分析误差来源。如果是数据误差导致的，对相关数据进行再次校验和修正；若是模型算法问题，则对模型进行局部调整或重新训练。通过实时修正误差，不断提高后续 2 小时降水预报的准确性。

（4）预报结果发布与反馈

及时发布预报信息：将经过验证和修正后的逐小时降水预报结果，通过专业的气象信息发布平台，及时传递给相关部门和公众。发布内容包括未来 2 小时内的预计降雨量、降雨强度变化趋势等信息，为防灾减灾、交通调度、农业生产等提供精准的气象支持。

收集反馈与持续改进：广泛收集用户对降水预报结果的反馈信息，分析预报结果与实际降雨情况的差异。将这些反馈信息作为模型优化的重要依据，不

断改进数据采集、处理方法以及模型算法，持续提升近 2 小时降水预报的精度和可靠性。

1.6.2 分钟级预报

(1) 数据实时更新与预处理

高频数据采集：在近 2 小时的预报周期内，对地面雨量站、卫星遥感以及雷达等多源数据进行高频次采集。地面雨量站需确保每分钟都能准确记录降雨量、降雨强度等关键数据；卫星遥感和雷达数据也按照分钟级别的时间间隔进行实时获取，以便及时捕捉降雨的动态变化。

数据快速匹配与校准：采集到的数据存在时间和空间上的差异，需在极短时间内完成时空匹配。利用快速重采样和高效插值算法，将卫星和雷达数据的时间分辨率调整为与地面雨量站一致的每分钟，同时对空间分辨率进行优化，确保不同数据源的数据在时空维度上精准对应。此外，对各类数据进行实时校准，消除仪器误差和系统偏差，为后续的预报提供可靠的数据基础。

(2) 模型快速迭代与优化

参数动态调整：基于最新采集和处理的数据，对降雨融合模型的参数进行动态调整。例如，在降水强度变化剧烈时，及时调整模型中与降水强度相关的参数权重，使模型能够更好地适应实时降雨情况。通过不断迭代参数，提升模型对逐分钟降水变化的捕捉能力。

算法优化与加速：采用高效的计算算法，提高模型的运行效率，确保在短时间内完成逐分钟的降水预报。例如，对模型中的卷积运算、数据融合算法等进行优化，减少计算量和运行时间。同时，利用并行计算技术，充分发挥计算机硬件的性能，进一步加快模型的运算速度。

(3) 预报结果实时验证与修正

分钟级验证指标计算：每完成一分钟的降水预报，立即计算该分钟预报结果的验证指标，如平均绝对误差（MAE）、均方根误差（RMSE）、相关系数（R）等。将这些指标与设定的阈值进行对比，评估预报结果的准确性。

误差实时修正：根据验证指标计算结果，若发现预报误差超出允许范围，及时分析误差来源。如果是数据误差导致的，对相关数据进行再次校验和修

正；若是模型算法问题，则对模型进行局部调整或重新训练。通过实时修正误差，不断提高后续逐分钟降水预报的准确性。

（4）预报结果发布与反馈

及时发布预报信息：将经过验证和修正后的逐分钟降水预报结果，通过专业的气象信息发布平台，及时传递给相关部门和公众。发布内容包括未来 2 小时内每分钟的预计降雨量、降雨强度变化趋势等信息，为防灾减灾、交通调度、农业生产等提供精准的气象支持。

收集反馈与持续改进：广泛收集用户对降水预报结果的反馈信息，分析预报结果与实际降雨情况的差异。将这些反馈信息作为模型优化的重要依据，不断改进数据采集、处理方法以及模型算法，持续提升近 2 小时逐分钟降水预报的精度和可靠性。