

序

甘肃省舟曲县素有“藏乡江南”的美誉，但是因其地处青藏高原巴颜喀拉地块的东缘，地震活动活跃、地质构造发育、地层岩体破碎，是我国地质灾害最为发育的地区之一。2010年8月8日，舟曲县发生了震惊全国的舟曲特大山洪泥石流灾害，造成重大的人员伤亡和经济财产损失。灾害发生后，我参加了舟曲三眼峪泥石流的应急抢险工作，也深感开展白龙江流域地质灾害风险评价与防控研究工作的紧迫性。我欣喜地看到，王立朝博士等所著的《舟曲重大地质灾害风险评价与防控技术研究》在这个背景下即将付梓问世。

该专著以舟曲地质灾害控制因素之一的易滑地质结构为切入点，融合当前国际最前沿的研究理论、调查技术和试验测试方法，系统构建了“成灾机理—监测预警—风险评价—防控技术”的完整成果体系。专著紧扣舟曲大型地质灾害与活动断裂的空间耦合关系，揭示了活动断裂对大型地质灾害的控制作用与机理，提出和划分了舟曲典型易滑地质结构类型，为舟曲大型地质灾害的成灾机理和风险防控奠定了理论基础。综合运用光学遥感卫星、长时序 InSAR、无人机航测、机载 LiDAR 和地面核查等手段，形成了一套空-天-地一体化的地质灾害调查识别体系与技术方法，精准识别了各种类型易滑地质结构的大型地质灾害；提出了流域大型地质灾害的风险评估方法，为区域内大型地质灾害的监测预警和风险防控提供了技术支撑；利用大型物理模拟和数值模拟等手段，揭示了大型地质灾害的链式动力学特征，研发了以主动消能为核心，以新型拦挡和排导技术为辅助的刚柔相结合链式灾害综合防治手段；基于大型模型和现场原位实验揭示了活动断裂带大型流塑状滑坡成灾模式和机理，有针对性地研发了兼具抗滑与排水功能的特大型滑坡排水抗滑桩，形成了特大型地质灾害工程治理的技术方法体系。

该专著凝结了王立朝等团队成员十余载深耕舟曲地质灾害防治的心血与智慧。在此，我非常高兴为该书题序，相信该书建立的理论方法和技术手段不仅可为白龙江流域地质灾害防治提供关键支撑，而且可为类似地区地质灾害的防灾减灾提供借鉴。

中国工程院院士



2026年6月6日

前 言

甘肃省舟曲县地处青藏高原东缘，位于西秦岭西翼与岷山山脉交汇地区，为典型的高山峡谷地貌，地质构造活跃，活动断裂发育，地质环境脆弱，高位远程地质灾害多发频发，是我国地质灾害危害最严重的地区之一。2010年8月7日，舟曲县城东北部山区突降特大暴雨，引发三眼峪、罗家峪等四条沟系特大高位远程泥石流灾害，泥石流长约5km，平均宽度约为300m，平均厚度约为5m，总体积约为750万 m^3 ，流经区域被夷为平地，共造成约1765人伤亡，直接经济损失达33亿元。2018年以来，舟曲又连续发生了“7·12”江顶崖滑坡、“8·10”牙豁口滑坡、2021年立节北山滑坡和果耶磨里滑坡等特大型滑坡灾害，以及武坪泥石流、铁坝河泥石流等特大型泥石流灾害。舟曲为特大型地质灾害的研究提供了天然场地，在舟曲开展特大型地质灾害的成灾机理、早期识别与防治技术研究，对该领域的研究具有重要的理论价值，同时可以为舟曲乃至整个西北地区的地质灾害防治提供理论与技术支撑。

本书研究的主要内容包括：

(1) 舟曲控滑构造与大型滑坡时空演化规律研究。通过收集资料、现场调查，厘清舟曲主干活动断裂及分支断裂、次级断裂的时空展布规律；查明舟曲大型地质灾害及隐患点的分布，分析大型地质灾害与活动断裂的空间耦合关系，研究活动断裂对地质灾害发育的控制作用与机理。通过收集资料、现场调查，总结舟曲典型易滑地质结构，并建立各类易滑结构的地质力学模型，包括地质构造、地形地貌、地层岩性组合及工程性质、水文地质、人类工程活动等；并对整个舟曲县进行易滑地质结构分区。综合运用光学卫星遥感、合成孔径雷达干涉测量（interferometric synthetic aperture radar, InSAR）、无人机航测、机载激光雷达（light detection and ranging, LiDAR）和地面核查等空-天-地一体化地质灾害隐患识别技术方法，精准识别各易滑地质结构区内的大型地质灾害。分析舟曲地质灾害的孕灾条件，在此基础上评价舟曲地质灾害的易发性；分析舟曲地质灾害的触发条件及发生概率，利用经验公式分析地质灾害隐患点的运动速率和致灾范围，评价舟曲地质灾害的危险性；查明威胁对象的分布，评价它们的易损性。在上述结果的基础上，对舟曲地质灾害的风险进行评价。利用 InSAR 技术监测的隐患点位移变形特征和易滑地质结构灾害类型以及动力学模式，结合隐患点的地质条件，进行隐患点的动力学分析，预测其运移速度、距离等动力学参数。选取典型易滑地质结构中的典型地质灾害类型，开展降水诱发失稳破坏机理研究。

(2) 流域型地质灾害风险评估与综合整治方法示范研究。以舟曲铁坝沟泥石流为对象，开展流域型地质灾害的链式动力学机理、风险评估、综合整治方法和保险模型研究，通过收集资料、InSAR 监测、遥感调查、无人机航测、现场调查和室内岩土测试，获取铁坝沟泥石流的工程地质条件，包括地质构造、地形地貌、地层岩性及工程性质、物源分布、支沟泥石流的发育分布规律，结合降水和历史暴发情况，查明铁坝沟泥石流的成灾模式。基于光学遥感、InSAR、机载 LiDAR 和无人机航测等高分辨率遥感数据，开展铁坝沟孕灾环

境、致灾条件调查,查明泥石流物源分布;利用经验公式、室内模型试验和数值模拟,揭示不同降雨工况下铁坝沟泥石流链式灾害的动力学过程和机理,根据获取铁坝沟泥石流动力学特征和动力学参数;并根据所获取的铁坝沟泥石流的动力学参数,对铁坝沟流域进行动力学分区;开展易发性、危险性和易损性评价,进行强震区高位泥石流堵溃效应下的风险评价与区划,建立强震区高位泥石流的风险评价流程;提出强震区高位泥石流灾害的综合整治技术,建立复合型地质灾害综合整治与国土空间开发利用相融合的模式;进行高位远程地质灾害综合防控技术集成优化研究;开展舟曲典型高位地质灾害精细调查,查明灾害体结构特征,进行灾害体风险评估,运用数值模拟等手段分析灾害的成灾模式和动力学特征,开展以主动消能为核心、以新型排导和拦挡技术为辅助的刚柔相结合的综合防治工程研究。选取舟曲典型高位地质灾害,在前期地质测绘工作的基础上,以1:1万比例尺地形图为手图,开展重大高位远程地质灾害精细调查,以查明灾害体基本信息、结构特征、变形趋势和成灾模式等,建立地质体三维可视化模型,并开展地质灾害风险评估。以地质灾害精细调查成果为基础,针对高位地质灾害的动力学特征、链动特征等开展数值仿真试验,分析获取高位灾害从失稳、势动转化到堆积的动力学全过程,提取运动全过程中的速度、加速度、能量等关键动力学参数及变化趋势,建立甘肃省高位地质灾害动力学分析评价方法,并提取防治技术要点,为防治工程的设计研究提供基础依据。针对典型高位地质灾害以及现有高位灾害防治工程,通过现场调研、数值模拟、大型物理模型试验等多种手段,查明现有高位灾害防治工程运行情况,总结防治结构优缺点和适用性,从抗冲击性能、能量吸收与转化方式、破坏失效机理等方面提出防治工程关键设计参数,优化、改进现有防治工程、研发新型防治技术,最终形成一套以主动消能为核心,以拦挡、排导为辅助的高位远程地质灾害综合防控技术。

(3) 特大型滑坡排水抗滑新型技术示范研究。通过现场调查、渗流-应力多场数值模拟分析、排水抗滑新型结构渗流与滑坡抗力物理模拟试验、新型排水抗滑桩现场原位试验等方法研究特大型滑坡排水抗滑新型理论、设计方法、施工方法和监测技术。开展排水抗滑新型结构与泄流,以及桩结构受力数值模拟规律研究。开展兼具抗滑与排水功能的新型治理结构类型和施工方法总结,包括排水抗滑桩、排水隧洞、非开挖施工等;开展新型排水抗滑结构选型设计研究,包括圆形小口径排水抗滑桩、圆形预应力排水抗滑桩等选型设计比较;开展新型排水抗滑桩设计力学机理研究,主要考虑桩壁导流、桩内集水汇流及桩外集中泄流等渗透特性的排水抗滑桩渗流、受力变形协同计算机理;开展新型排水抗滑桩数值模拟技术、相似物理试验规律分析研究,对上述优选排水抗滑桩型式进行渗流、泄流试验,同时确定排水抗滑桩结构特征参数。

本书共分为12章,前言由王立朝、刘明学负责编写;第1章地质环境条件由张永军、石鹏卿、周小龙负责编写;第2章舟曲地质灾害发育分布特征由丛凯、代宝峰、李瑞冬、朱赛楠负责编写;第3章基于易灾地质结构的空-天-地一体化精准识别研究由石鹏卿、郭富赞、王立朝负责编写;第4章典型地质灾害监测预警方法技术研究由李瑞冬、丛凯、代宝峰负责编写;第5章活动断裂控制型大型滑坡变形破坏机理研究由张明、窦晓东、杨龙、刘涛负责编写;第6章牙豁口特大滑坡流塑状运移动力学机理由张明、杨龙、王官贺、何清、袁家明负责编写;第7章果耶断裂控制型特大滑坡失稳机理与排水抗滑技术由王文沛、

殷保国负责编写；第 8 章立节高位远程滑坡成灾机理及防控工程由崔学良、高敬轩负责编写；第 9 章铁坝沟超大型泥石流发育特征与风险防控由刘明学、朱赛楠、王立朝、王玲强负责编写；第 10 章三眼峪特大高位滑坡型泥石流动力学特征与综合防控工程由张楠、高敬轩负责编写；第 11 章舟曲地质灾害防治与国土空间规划由王立朝、张永军、刘明学负责编写；第 12 章结论与建议由王立朝、张永军、刘明学负责编写。甘肃舟曲重大地质灾害风险评价及综合防控技术研究工作从 2021 年 8 月开始，至 2024 年 7 月结束，历时三年时间。从立项论证、野外调查，到试验测试、综合研究的整个过程，得到了甘肃省自然资源厅、舟曲县人民政府、舟曲县自然资源局、甘肃省地质环境监测院（甘肃省地质环境研究所、甘肃省自然资源厅地质灾害防治技术指导中心）、中国地质环境监测院（自然资源部地质灾害技术指导中心）、兰州大学、西北民族大学各级领导及专家的大力支持和指导，在此一并感谢！

著 者

2026 年 5 月

目 录

序

前言

第 1 章	地质环境条件	1
1.1	概述	1
1.2	自然地理	2
1.3	地层岩性与工程地质岩组	10
1.4	地质构造与地震	19
第 2 章	舟曲地质灾害发育分布特征	25
2.1	概述	25
2.2	地质灾害类型	25
2.3	地质灾害发育规律	34
2.4	地质灾害分布特征	36
2.5	地质灾害危害特征	38
2.6	小结	45
第 3 章	基于易灾地质结构的空-天-地一体化精准识别研究	46
3.1	概述	46
3.2	空-天-地一体化地质灾害早期识别研究现状	47
3.3	白龙江流域空-天-地一体化地质灾害精准识别技术	51
3.4	基于易灾地质结构的重大地质灾害精准识别研究	65
3.5	小结	72
第 4 章	典型地质灾害监测预警方法技术研究	73
4.1	概述	73
4.2	地质灾害监测方法	73
4.3	立节北山滑坡预警阈值研究	75
4.4	甘家沟泥石流预警实例	86
4.5	小结	99
第 5 章	活动断裂控制型大型滑坡变形破坏机理研究	101
5.1	概述	101

5.2	坪定-化马断裂带大型滑坡发育特征	102
5.3	牙豁口滑坡基本特征及失稳破坏模式	103
5.4	牙豁口滑坡地下水渗流场特征	110
5.5	牙豁口滑坡稳定性数值模拟研究	121
5.6	小结	129
第 6 章	牙豁口特大滑坡流塑状运移动力学机理	130
6.1	概述	130
6.2	滑带土剪切强度变化规律	131
6.3	滑体土蠕变本构方程	137
6.4	牙豁口滑坡动力学数值模拟	149
6.5	小结	156
第 7 章	果耶断裂控制型特大滑坡失稳机理与排水抗滑技术	158
7.1	概述	158
7.2	果耶特大滑坡失稳与运动机理	159
7.3	特大滑坡排水抗滑新型技术	174
7.4	新型排水抗滑结构施工方法研究	183
7.5	小结	185
第 8 章	立节高位远程滑坡成灾机理及防控工程	187
8.1	概述	187
8.2	立节高位远程滑坡变形特征	190
8.3	立节高位远程滑坡失稳机理研究	199
8.4	立节高位远程滑坡链动过程与风险防控研究	200
8.5	高位远程地质灾害新型防治技术研发	205
8.6	小结	212
第 9 章	铁坝沟超大型泥石流发育特征与风险防控	213
9.1	概述	213
9.2	铁坝沟泥石流地质环境条件	213
9.3	铁坝沟泥石流成灾模式	218
9.4	铁坝沟泥石流动力学风险评价	224
9.5	铁坝沟流域地质灾害风险防控	239
9.6	小结	241
第 10 章	三眼峪特大高位滑坡型泥石流动力学特征与综合防控工程	243

10.1	概述	243
10.2	三眼峪特大高位泥石流灾害发育特征	245
10.3	三眼峪特大高位泥石流全过程动力学特征研究	253
10.4	三眼峪特大高位泥石流综合防控技术研究	263
10.5	小结	270
第 11 章	舟曲地质灾害防治与国土空间规划	272
11.1	概述	272
11.2	地灾防治历史与体系	273
11.3	地质灾害防治措施	275
11.4	国土空间规划与资源环境保护	279
第 12 章	结论与建议	282
12.1	结论	282
12.2	建议	284
参考文献		285

第1章 地质环境条件

1.1 概 述

舟曲县地处甘肃省甘南藏族自治州东南部,地理坐标介于东经 $103^{\circ}51'$ ~ $104^{\circ}45'$,北纬 $33^{\circ}13'$ ~ $34^{\circ}01'$ 之间。该县地理位置独特,地处青藏高原东北缘、黄土高原西南麓与四川盆地西北缘三大地貌单元的过渡区域,行政区域跨越川、甘、陕三省。全县总面积为 3010km^2 ,EW 向跨度达 107km ,SN 向最宽处为 89km 。其所处位置是我国第二阶梯向第一阶梯急剧过渡的地带,同时也是西秦岭造山带与松潘-甘孜褶皱系的交汇地带,主要断裂包含白龙江深大断裂(活动速率为 $1.2\sim 2.0\text{mm/a}$)、岷江断裂(右旋走滑速率为 1.5mm/a)和坪定-化马逆冲断裂系,构成了“三纵两横”的构造网络。新构造运动非常强烈,地壳的垂直隆升速率达到 $4.5\sim 6.2\text{mm/a}$,水平挤压应变率为 $1.2\times 10^{-8}\text{a}^{-1}$ 。该区域特殊的地质构造,使得舟曲县成为全球范围内典型的大陆内部造山带地质灾害研究的重点区域。

在地势方面,舟曲县呈现西北高东南低态势,海拔在 $1173\sim 4504\text{m}$ (极值差为 3331m),平均地形梯度为 24% ,这使其成为我国地形陡变最为剧烈的区域之一。舟曲县高山峡谷地貌所占比例高达 87.5% ,发育有白龙江、拱坝河、博峪河三条深切河谷(谷深达 $800\sim 1200\text{m}$,谷坡倾角达 $35^{\circ}\sim 55^{\circ}$)。该区域第四纪冰川遗迹也较为显著,现有冰斗 38 处、刃脊 21 条,冰碛物的最大厚度可达 85m 。

舟曲县泥石流灾害较为严重,灾害密度达 0.48 处/ km^2 ,是全国平均值的 6.2 倍,活动性的沟谷数量达 237 条。例如,2010 年发生的“8·8”特大山洪泥石流事件,其最大流量达 $2000\text{m}^3/\text{s}$;固体物质总量达 180 万 m^3 ;物源十分丰富,松散堆积体储量达 5.8 亿 m^3 ;单位面积物源量达 1.93 万 m^3/km^2 。地形势能方面,平均沟床比降为 158% ,最大单沟落差达 1880m ;降雨触发方面,临界雨强为 $15\sim 20\text{mm/h}$ (低于全国均值 30%)。已识别的滑坡体有 428 处(体积大于 1 万 m^3 者占 65%),崩塌有 157 处,典型滑坡如锁儿头滑坡群(体积达 2.1 亿 m^3 ,年均位移达 12cm)和江顶崖崩塌体(单块落石的体积大于 24m^3)。志留系千枚岩抗剪强度在 $18\sim 24\text{kPa}$,软化系数在 $0.32\sim 0.45$ 。

在致灾因子耦合机制方面,首先是构造-地貌协同,在断裂带 1km 的缓冲区内集中发育了 83% 的大型滑坡,如坪定-化马断裂带沿线的滑坡密度达 0.72 处/ km ;地震效应方面,2008 年汶川地震诱发了新生灾害点 237 处,使得岩体动弹性模量下降 $30\%\sim 50\%$ 。其次是气候-岩土响应,年均降水量达 434mm ,其中 94.9% 的降水集中在雨季,最大 1 小时雨强达 77.3mm (2010 年);暴雨入渗使残坡积土的饱和度大于 85% ,基质吸力下降 90% 。最后由于人类活动的影响,坡地垦殖率达 37% ,原始地形的改造度为 41% ,道路开挖形成了 42% 的人工高陡边坡(坡度大于 45°)。

1.2 自然地理

1.2.1 气象与水文特征

1.2.1.1 气象

1. 立体气候格局

舟曲县位于青藏高原东缘与秦巴山地的过渡地带,作为北亚热带向暖温带过渡的生态敏感区域,既受到地形影响,又受到东亚季风与高原季风的复合作用,同时由于该区域海拔存在 2850m 的巨大差异,这种地形与季风的协同效应,造就了全球罕见的山地垂直气候体系。在这种独特的体系下,呈现出鲜明的垂直气候分异特征。在河谷暖湿带(海拔为 1100~1500m),气候温暖湿润,年均温维持在 14.5~16℃,≥10℃积温在 4000~4500℃,1 月均温为 3.5~5℃,7 月均温为 22~24℃,年降水量达 500~650mm。气候条件滋养了典型的亚热带湿润气候区,使得常绿阔叶林生态系统能够生长,同时也为特色农业种植提供了良好的基础。

中山温凉带(海拔为 1500~2500m)有其独特的气候特征。由于气温垂直递减率约为 0.58℃/100m,年均温降至 8~12℃,霜期较长,长达 150 天左右,年降水量为 650~900mm。针阔混交林生态系统发育,形成了独特的生态景观。

高山寒湿带(海拔大于 2500m)呈现出不同的气候特征。年均温低于 6℃,≥10℃积温不足 1500℃,冬季积雪期超过 100 天,年降水量达 900~1100mm。该区域高山草甸与暗针叶林带成为主要景观,展现出高寒地区的独特生态风貌。

舟曲县水热组合特征较为明显。年平均气温为 12.9℃,年最高气温与最低气温差值达 21.5℃,≥10℃活动积温达到 3800 小时。以上数据表明该地能够满足花椒、核桃等经济作物的生长需求。水热组合在季节分布上极不均衡,呈现出显著的季节性失衡。干湿季降水量比例达到 16.7:1(5~9 月降水占全年的 82%,11 月至次年 3 月降水仅占 4.9%),集中指数为 0.68,远超同纬度其他地区。这种集中降水模式对当地的水资源利用和农业生产有一定的影响。

2. 季风型降水系统的时空分异

1) 空间异质性

经向差异:舟曲县不同流域之间的降水存在明显的经向差异。西南拱坝河流域年降水量为 900mm,而东北白龙江流域年降水量仅为 650mm,相差 38.5%,地理梯度达到 11mm/km。这种降水径向差异对当地的水资源和生态系统分布格局有重要影响。

垂直倒置:在垂直海拔方面,舟曲县存在独特的降水分布特征。在海拔 1500~1800m 的过渡带,年降水量减少至 540~640mm;在海拔 2800m 的高山区,年降水量达 1100mm,形成了“河谷-山地-高山”降水三级跳现象。这种垂直倒置的降水分布对当地不同海拔生境的生态系统类型分布和演化有重要意义。

局地增幅:在舟曲县的一些重点区域,如三眼峪等,受地形抬升的影响,在相同的天

气系统影响下, 这些区域的降雨量级成倍增加, 是局地暴雨和地质灾害发生的潜在因素。

2) 时间集中性

年内分配: 舟曲县降水主要集中在4~10月, 该时期降水量占全年的94.9%, 6月峰值更是达到32%, 6~8月暴雨概率高达76%。2010年8月7日, 最大日降水量达77.3mm。这种集中性降水对当地的农业生产、防洪减灾以及水资源管理等有极大的挑战。

年际演变: 在近50年的时间里, 舟曲县的降水量呈现每10年减小12mm的趋势, 但极端降水的频率增加了27%, 而且1小时雨强从20世纪90年代的22.1mm上升至21世纪10年代的30.3mm。这种降水趋势和年际演变对当地的生态环境和人类社会的稳定发展产生了持续的压力。

3. 气候-地质耦合灾害机制

根据相关研究资料表明, 不同类型的地质灾害在特定的气象条件触发下更容易发生。其中, 触发滑坡的降水阈值为24小时降水量大于80mm并且1小时雨强超过20mm, 而激发泥石流的降雨阈值则是1小时雨强 $\geq 30\text{mm}$ 或者24小时降水量 $\geq 100\text{mm}$ 。在24小时降水量超过50mm或者1小时雨强 $\geq 25\text{mm}$ 的情况下, 灾害发生的风险概率会增加3.8倍。

当出现强降雨(1小时雨强大于25mm)时, 会对地表和地下的各种地质要素产生显著影响。当径流系数达到0.75时, 降雨中大部分的水分会快速流入水系, 从而增加河流的流量和流速。同时, 当松散堆积物的饱和度会超过85%时, 松散土体更容易被水流冲刷带走, 增加了地质灾害的风险。对于泥质板岩, 当含水率达到18%时, 其抗剪强度会下降50%, 连续降雨5天会使土体强度下降40%~60%。暴雨期间, 潜水埋深也会发生变化, 从正常的4m骤降至0.5m, 孔隙水压力系数从0.3上升至0.8, 这些变化都会使岩土体的力学性质发生改变, 从而更容易发生地质灾害。例如, 2010年发生的“8·8”山洪泥石流事件, 东山乡1小时内77.3mm的降雨诱发了总量达180万 m^3 的物质输移, 洪峰流量达到200 m^3/s ; 2009年发生的江顶崖滑坡事件, 累计降水量达287mm致使28万 m^3 的岩体发生滑动, 位移速率从0.5mm/d提升至35mm/d。1981年白龙江流域的强降雨触发了62处滑坡。2017年巴藏乡的暴雨引发了24 m^3 的落石崩塌。这些实例都充分说明了极端降雨天气对舟曲县地质灾害暴发的巨大触发和推动作用。

4. 气候变化背景下的风险演进

据相关研究数据, 1961~2020年期间舟曲县的增温率达到0.32 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 这一增温速率高于全国均值。与此同时, 年降水总量虽然有所减少, 但极端降水日的数量却以0.8d/10a的速度增加, 旱涝急转发生的概率增加了25%。1小时雨强突破成灾阈值, 引发灾害的概率增加了21%。

这种气候变化还对灾害发生机制产生深远影响, 如临界条件发生弱化, 在相同降水条件下, 滑坡发生的概率提升了40%, 这使得原本安全区域或低风险区域面临更大的灾害威胁。同时, 链式效应也得到强化, 复合型灾害发生的概率从20世纪50年代的15%上升到35%, 这表明多种灾害相继或同时发生的风险增加。并且, 新生地质灾害隐患也在增加, 近10年新发现的47处地质灾害点中有80%与极端降雨事件相关, 同时地震叠加效应也在加剧灾害风险, 像汶川地震使得舟曲处在VIII度烈度区的比例占38%, 进一步导致岩体松动, 加快了灾害的发育进程。

该地区独特的气候系统通过三大机制塑造了灾害环境：首先，2850m 的垂直高差形成了显著的水热梯度差（年均温差达 10°C 、降水量差达 560mm），这种大尺度的气候差异增加了地质灾害的潜在触发点；其次，季风降水的时空集聚现象显著（94.9%降水集中在七个月），使得地表过程稳定性变差，易出现局部地区的集中致灾过程；再者，人类工程活动对地形的改变（地形改变率 41%）与气候变化协同放大风险，这更加剧了地质灾害的严重程度和复杂程度。在灾害防治体系中，需要重点关注地形增幅区临界雨量阈值会随着环境变化而动态改变、岩土体力学参数会随着降雨历时的非线性衰减，以及“暖湿化+地震扰动”这种新型致灾模式带来的潜在威胁。

1.2.1.2 水文

舟曲县河流属于长江流域嘉陵江水系，形成了“三千多支”的水网体系。主要包括以下主要河流。

1. 白龙江水系

白龙江作为嘉陵江上游的一级支流，自西北向东南纵向贯穿县域，其干流长度为 70.7km，自然落差达 420m。白龙江源于西倾山与岷山构造带的郎木寺冰川区，源头海拔高达 3820m，其年径流量中冰川融水占比达到 23%。

在径流特征方面，白龙江多年平均径流量为 20.55 亿 m^3 。该河的径流量极值变化明显，极端流量变异系数达到 0.87（最大流量为 $7405\text{m}^3/\text{s}$ ，最小流量为 $15.25\text{m}^3/\text{s}$ ）。在 2016 年，白龙江发生特大洪水时，这种流量的极值变化就得到了充分体现。

白龙江的含沙量在不同时段差异显著，受降水与下垫面等因素的影响，其枯水期年均含沙量平均为 $12\text{kg}/\text{m}^3$ ，而汛期峰值含沙量可达 $156\text{kg}/\text{m}^3$ 。在断面平均流速方面，其数值稳定在 $1.2\sim 3.41\text{m}/\text{s}$ ，而在 2005 年的特大洪水期间，白龙江的洪峰传播速率达到 $4.8\text{km}/\text{h}$ 。

以 10 年一遇和 50 年一遇的洪水标准来看，白龙江的流量分别达到 $2860\text{m}^3/\text{s}$ 和 $6720\text{m}^3/\text{s}$ ，洪水期强大的水流冲击力为白龙江及周边的泥沙输移和山体稳定带来了不稳定因素。

2. 拱坝河水系

拱坝河是白龙江的一级支流，位于舟曲县中部区域，自东向西流动，干流长度为 80km，落差高达 1710m。相比于区域均值 0.48 的径流系数，拱坝河的径流系数为 0.554，流量变幅达到 11.9（最大流量为 $29.2\text{m}^3/\text{s}$ ，最小流量为 $2.45\text{m}^3/\text{s}$ ）。其年基流指数为 0.68，表明地下水补给功能良好。

在泥沙方面，拱坝河年均输沙量达 12.3 万 t。其悬移质中值粒径（ d_{50} ）为 0.032mm，床砂质 d_{50} 为 18.6mm。这些数据体现了拱坝河在输沙过程中可能涉及的不同物质粒度和输沙能力的一种反映。

3. 博峪河水系

博峪河位于舟曲县的西南部，其水系发源于森林覆盖率达到 82% 的集水区，这形成了显著的“绿水库”效应，其径流占年径流量的比重高达 75%。博峪河的溶解氧含量在 $8.2\sim 9.6\text{mg}/\text{L}$ ，达到 I 类水质标准。

博峪河纵比降为 50.1‰，河床狭窄且深切，发育出典型的“V”形峡谷地貌，沿河谷

的阶地序列保存较为完整,从 T1 至 T4 阶地,阶地间的相对高差在 5~38m,这些特征反映了当地的地貌演化特征和水系发育过程。

根据该区域有关地表水与地质灾害耦合机制的研究资料显示,河流水动力条件对地质灾害有显著的诱发和放大效应。例如,当河流流速超过 1.5m/s 时,河流侧蚀速率可达 0.3~0.8m/a,曲瓦乡边坡因白龙江的侧蚀作用每年后退约 1.2m。

此外,白龙江与博峪河流域的部分区域,由于支沟宽深比从 3:1 压缩至 1.5:1,水流的剪应力增加 200%,这种变化可能导致滑坡堵沟,从而形成壅水高度达 8~15m。在洪水期间,推移质输移量占年总量的 89%,如 2016 年立节镇滑坡前缘因河流冲刷导致约 4.2 万 m³ 的物质被冲蚀带走。

同时,河水对岩土体具有溶蚀、膨胀影响。当河水的 pH 在 7.8~8.4 时,其对钙质胶结的岩体有溶蚀作用,溶蚀率为 0.15mm/a,而泥岩在遇水后会发生膨胀,膨胀率在 2.7%~4.3%,这些物理变化使得岩土体的结构面强度降低,影响山体稳定性,如坡脚浸泡在水中 72 小时后,岩体的软化系数降至 0.45~0.62,暴雨时节,孔隙水压力梯度可达到 0.35MPa/m。

另外,河流附近的裂隙在地表水冲刷、渗透作用下,节理水系渗透系数增大两个数量级(从 10⁻⁷cm/s 至 10⁻⁵cm/s)。2018 年,南峪乡滑坡复活事件与河水倒灌入渗过程直接关联紧密,由于江顶崖滑坡-白龙江相互作用过程,2008~2010 年白龙江河道西移约 23m,侵蚀搬运的泥沙量为 7.8 万 m³,白龙江的侧蚀作用导致滑坡坡脚抗滑段强度减弱,滑坡体的安全系数从 1.15 降至 0.93。在这一过程中,地基渗透性发生变化,孔隙水应力等物理参数随地下水位的波动而发生改变,如暴雨期间,地下水位上升速度加快,达到每小时 0.8m。例如,在锁儿头滑坡群-拱坝河作用过程中,12 处滑坡沿着河岸呈带状分布,滑坡密度为 0.8 处/km²,其中 85%的滑坡后缘高程和洪水位高程之差小于 15m,这意味着当接近河流水位时,白龙江水动力条件变化引起的渗流、冲刷等作用极易触发滑坡。在这一过程中,河道的年平均下切速率为 1.2m/1000a,形成的临空面高度从 42m 至 65m 不等,2014 年当地的洪水导致四处滑坡同时启动。

这种水系格局通过三种不同的机制加剧了地质灾害风险。首先,河流的持续侵蚀作用,形成了坡高平均坡度 42°的陡坡面,为地质灾害提供了有利的地形条件,当岩土体受到外力破坏后,这种高陡的坡形容易使得山体发生坍塌;其次,完整的水文循环系统在径流、下渗等过程中改变了岩土体的物理力学参数,如弹性模量在雨水长期的渗透和下切作用下下降了 30%~50%;最后,洪水与滑坡之间存在着复杂反馈机制,形成了灾害链式反应。例如,在暴雨之后,地表径流激增,一方面会加剧滑坡启动,另一方面滑坡体对河道的阻碍、冲填作用会改变水流速度和方向,进而诱发新的滑坡。

1.2.2 地形地貌特征

舟曲县处在青藏高原东缘构造前锋带,这一位置恰好位于西秦岭造山带与岷山逆冲推覆体系的复合部位。其独特的地貌格局自晚新生代以来,始终受制于青藏高原的阶段性隆升过程。在这一漫长地质历史时期,区域构造活动异常活跃,塑造了典型的构造-侵蚀山地景观,形成了极具特色的“三山夹两江”地貌格局。

北部雄伟的叠山山脉,其主峰雷古山海拔高达 4154m;中部的过渡山系连接南北两侧

山脉；南部的岷山山脉，主峰青山梁海拔高达 4504m。三大山脉呈 NW-SE 向平行展布。白龙江、拱坝河深切谷地构成了主要的侵蚀廊道。

县域地势呈现出独特的三级阶梯式跌落特征。自西北的 4504m 极高山向东南的 1173m 河谷区过渡，垂直向高差达 3331m，形成了我国罕见的地形梯度带，其平均比降高达 24%。这种巨大的地形高差，为地质灾害的发育提供了能量势差条件，成为地质灾害潜在的“温床”。

1.2.2.1 侵蚀堆积河谷地貌

该地貌单元在县域面积中所占比例虽仅为 9.3%，但记录着第四纪以来构造隆升-气候旋回紧密耦合的漫长历程。

1. 河谷形态特征

平面格局：以白龙江（干流比降达 87%）、拱坝河（比降达 21.4%）、博峪河（比降达 50.1%）为主干的河流，相互交织形成了三级树状水系。支沟密布，密度高达 $3.2\text{km}/\text{km}^2$ 。主河道曲率指数为 1.68，发育出独特的嵌入式曲流，局部河段曲流颈宽度甚至不足 500m。

剖面特征：主谷呈现出不对称的“U”形槽谷形态，谷宽为 80~400m，谷坡倾角为 $35^\circ\sim 55^\circ$ ，反映了不同地质时期地壳运动的影响。支沟则呈现出典型的“V”形峡谷，宽深比为 0.3~0.7，局部形成奇特的箱型谷地。

阶地系统：T1 阶地高出河漫滩 2~5m，砂砾层厚度为 8~15m；T2 阶地高出 T1 阶地 8~10m，含有独特的钙质胶结砾石层；而高阶地（T3~T5），残留阶坎高差在 30~80m，发育红土型古土壤。

2. 堆积体特征

冲洪积扇：主要分布于支沟出口处，面积大小不一，为 $0.2\sim 3.5\text{km}^2$ ；纵向坡度变化为 $5^\circ\sim 15^\circ$ ，物质组成呈现出明显的相变特征；从扇顶的粗砾（ $d_{50}=120\sim 250\text{mm}$ ），到扇中的卵石（ $d_{50}=40\sim 80\text{mm}$ ），再到扇缘的砂质透镜体。

泥石流堆积：早期（Qp₃）为胶结砾石层，厚度在 10~25m；中期（Qh₁）为混杂堆积；现代（Qh₂）为松散碎屑，最大单层厚度达到 8.6m。

1.2.2.2 侵蚀构造山地系统

该地貌单元占县域面积的 87.7%，在县域地形中占据主导地位，根据地形特征进一步划分为两个亚类：

1. 侵蚀构造高山（>3500m）

侵蚀构造高山主要沿着叠山-岷山主脊展布，面积占比高达 62.4%。地形起伏度极大，超过 $1200\text{m}/\text{km}^2$ ，山坡平均坡度为 42° ，在阳坡处，坡度更是可达 $55^\circ\sim 60^\circ$ 。在该地形条件下，冰缘地貌发育良好，现存冰斗多达 38 处、刃脊 21 条、角峰 14 座。

广泛出露志留系千枚岩，它们构成叠瓦状逆冲岩片，片理倾向为 $320^\circ\angle 45^\circ$ ，展现出独特的构造变形特征。同时，三叠系板岩夹薄层灰岩中发育着 NEE 向共轭节理系。

2. 侵蚀构造中山（2000~3500m）

侵蚀构造中山主要分布于主山脉与河谷的过渡带，形成了一种独特的阶梯状后退的坡折地貌。从坡形来看，可细分为上、中、下三段，上段为基岩裸露区，在长期的风化作用

和构造应力影响下,发育了大量张开度在 5~30cm 的卸荷裂隙;中段有 2~8m 厚的残坡积层,其中含崩塌巨砾,体积大于 $1 \times 10 \text{m}^3$ 的巨砾占 35%;下段由于冲沟发育,切割密度高达 4.2km/km^2 ,沟头年均溯源侵蚀速率在 0.8~1.5m,使得地形不断发生变化。

该地貌系统通过三种重要机制影响着灾害发育,其一,阶梯状地形产生级联式势能传递,一旦某一区域的能量平衡被打破,就可能引发一系列的地质灾害;其二,构造软弱面(如片理、节理)构成了优势滑动面,为山体的滑动提供了潜在的路径;其三,坡形转折部位(凸形坡占比为 57%)导致应力高度集中,增加了山体失稳的可能性。遥感解译结果显示,86%的历史滑坡发生在坡向 $120^\circ \sim 210^\circ$ 的日照优势面,这充分印证了干湿循环对岩体风化的加剧作用,而风化的岩体又是地质灾害的重要物质基础,进一步增加了灾害发生的风险。

1.2.3 生态环境特征

舟曲县生态系统呈现出典型的山地垂直地带性分异规律,这种分异特征与生物多样性格局紧密相连,共同受到“地形-气候-人类活动”三元耦合机制的精细调控,进而形成脆弱性显著的过渡带生态系统。通过遥感解译与实地调查深入研究发现,县域生态系统服务功能存在着显著的空间异质性,其归一化植被指数(normalized differential vegetation index, NDVI)在 0.12~0.87 剧烈波动,反映出人类活动与自然演替之间错综复杂的博弈过程。

1.2.3.1 植被系统分异特征

1. 水平分异格局

白龙江流域:植被覆盖率为 32.7%(依据 2020 年 Landsat 数据得出)(图 1.1),形成以灌草丛(覆盖率为 58%)为主导的生态系统,这种生态系统犹如一个生态“短板”,导致生态系统功能受损。其 NDVI 均值仅为 0.35,处于较低水平,同时该区域成为泥石流高频发生区,反映了植被退化与地质灾害之间的紧密联系。

拱坝河流域:保存着较为完整的森林生态系统,乔木林覆盖率达到 61.2%,NDVI 均值为 0.69。此外,其涵养水源能力达 $1200 \text{m}^3/\text{hm}^2$,为区域生态平衡做出了重要贡献。

博峪河流域:原始暗针叶林占比 38%,林冠郁闭度在 0.7~0.9,形成了一个生物多样性热点区,拥有维管植物 1287 种。

2. 垂直带谱结构

基带 (1200~2000m):落叶阔叶林带占据主导地位,优势种为辽东栎+油松混交林,林下更新幼苗密度达 $3.2 \text{株}/\text{m}^2$ 。

中山带 (2000~2800m):针阔混交林带占据主导地位,其中华山松-红桦群落尤为突出,生物量达 $180 \text{t}/\text{hm}^2$ 。

亚高山带 (2800~3500m):云杉-冷杉原始林植被茂密,最大胸径可达 98cm(岷江冷杉),固碳能力达 $4.8 \text{kgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

高山带 (>3500m):高山灌丛草甸崭露头角,优势种为杜鹃-嵩草群落,土壤种子库密度达 $512 \text{粒}/\text{m}^2$ 。

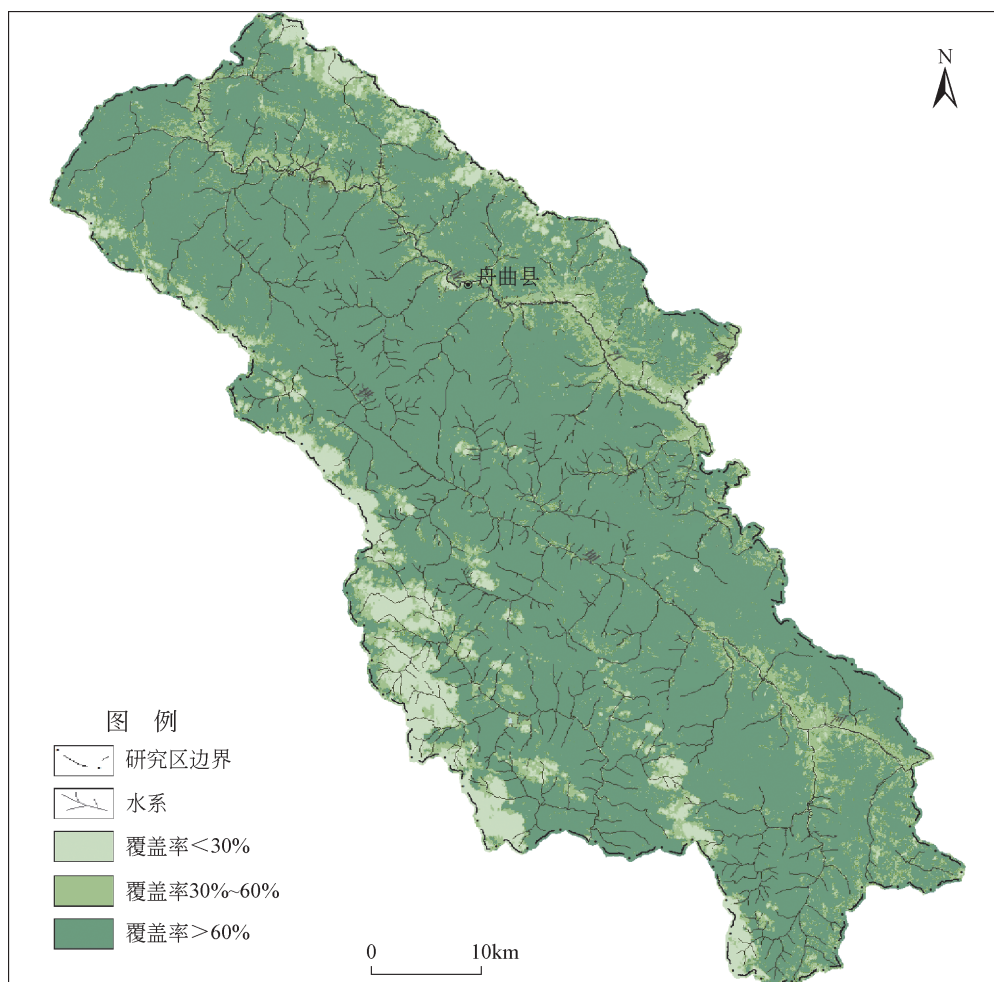


图 1.1 研究区植被覆盖率分区示意图

1.2.3.2 土壤系统演化特征

1. 成土环境分异

气候因子：干燥度指数处于 0.8~1.5，表明该区域处于半湿润-半干旱过渡地带，这种气候条件下，降水相对较少且蒸发旺盛，对土壤的发育产生重要影响。

母质类型：母质类型丰富多样，其中志留系千枚岩占比为 62%、三叠系板岩占比为 28%、冲洪积物占比为 10%，不同的母质类型为土壤质地、肥力等方面提供了不同的基础。

人类干扰：坡耕地垦殖指数较高，达 0.37，这使得人类活动对土壤的影响十分显著。由于人类的开垦活动，导致 A 层土壤年均流失量达 2.3cm，不断侵蚀着土壤的肥力。

2. 土类空间配置

水平分布：插岗乡以南地区，分布着黄棕壤（pH 为 5.2~6.1，有机质含量为 3.8%）、棕壤 [pH 为 6.3~7.0，阳离子交换量（cation exchange capacity, CEC）为 25cmol/kg]。插岗乡以北则以褐土 [pH 为 7.2~8.0，碳酸钙（CaCO₃）含量为 9.3%]、暗棕壤 [pH 为 5.8~

6.5, 碳氮比 (C/N) 为 12.7 为主]。

垂直分带: 海拔小于 1200m 的区域主要为水稻土, 耕作层厚度为 18~25cm, 速效磷含量为 18mg/kg, 适宜水稻等农作物的生长; 海拔在 1200~2500m 范围内, 主要物种是棕壤 (亚层 B 的黏粒含量为 28%, 淀积系数为 1.8); 海拔在 2500~3500m 为暗棕壤 [腐殖质层厚度在 40~60cm, 胡敏酸 (humic acid, HA) /富里酸 (fulvic acid, FA) 为 1.3]; 海拔在 3500m 以上则为亚高山草甸土, 呈现出粗骨性特征, 砾石含量大于 35%。

3. 土壤退化特征

物理退化: 由于人类活动和自然因素长期影响, 土壤的物理性质发生退化。耕作层容重达 1.52g/cm^3 (而自然土壤容重仅为 1.28g/cm^3), 孔隙度降低了 32%。这不仅影响了土壤的通气性和透水性, 也对植物的生长和根系的发育造成了阻碍。

化学贫瘠: 土壤也出现恶化迹象。全氮含量从自然土壤的 0.35% 降至 0.12%, 速效钾流失率达到 58%。土壤肥力的下降, 使得植物生长所需的养分供应不足, 进一步加剧了生态系统的恶化。

抗蚀脆弱: 在坡地 (大于 25° 坡地) 上, 土壤侵蚀模数高达 $6800\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 土壤可蚀性因子 (K) 为 0.42。这表明土壤在水力等外力作用下极易发生侵蚀, 对生态环境的稳定性构成严重威胁。

1.2.3.3 生态-灾害耦合机制

1. 植被退化效应

水文调节能力衰减: 白龙江流域林草覆盖率每下降 10%, 地表径流系数增加 0.15。这不仅会导致洪水量增加, 而且会使干旱时期的水量更少, 对区域的生态环境造成更大的危害。

根系固土作用减弱: 乔木林根系相较于灌草丛根系, 其抗剪强度高达 28kPa, 比灌草丛 (9kPa) 高三倍。随着植被退化, 乔木林占比减少, 乔木林根系对土壤的加固和保护作用减弱, 容易引发水土流失等灾害。

截留能力降低: 原始林冠层就像一个大自然的“遮阳伞”, 截留率在 31%。当森林遭到破坏, 变为次生林时, 截留率下降至 19%; 变为灌草丛时, 截留率进一步锐减至 7%。这使得降水直接冲击地面, 增加了土壤侵蚀的风险。

2. 土壤退化响应

渗透特性改变: 退化土壤的稳渗速率从正常状态下的 8.2mm/h 急剧降至 2.3mm/h, 雨后地表径流增多, 地下水补充量减少, 生态环境进一步恶化。

抗剪强度衰减: 耕作土壤的内摩擦角从 32° 降至 24° , 黏聚力从 45kPa 降至 18kPa。这使得土壤更容易被水流冲走, 容易引发山体滑坡等地质灾害。

物质迁移加剧: 退化区土壤年均流失厚度为 2.8mm, 是自然林区的 6.5 倍。

该生态系统通过三种途径影响灾害发育: ①植被覆盖率空间异质性导致径流再分配; ②土壤退化形成优势侵蚀面; ③生物地球化学循环失衡加剧岩土体风化。2018 年, 大川镇泥石流事件表明, 当植被覆盖率小于 40% 且土壤厚度小于 30cm 时, 灾害发生概率提升 4.2 倍。生态修复工程需重点重建“乔-灌-草”立体防护体系, 在关键部位形成生物量大于 $80\text{t}/\text{hm}^2$ 的稳定群落。

1.3 地层岩性与工程地质岩组

1.3.1 地层岩性

舟曲县地处秦岭地层分区与松潘-甘孜地层分区的过渡地带,这一特殊地理位置使其地层展布受到 NW—NNW 向构造体系的严格管控,从而呈现出显著的构造分区特征。根据岩性的不同组合方式和所处时代的差异,舟曲县地层可细致划分为前第四系、第四系和侵入岩三大单元。这三大单元不仅在空间分布上独具特点,其工程地质特性更是直接对区域地质灾害的发育模式产生决定性影响。

1.3.1.1 前第四系

1. 古生界

1) 志留系 (S)

空间分布: 志留系呈 NW 向条带状,从县域中部蜿蜒贯穿,其起始位置位于北部的立节镇,经城关镇,最终延伸至巴藏镇。在地质构造中,这一区域构成了白龙江复背斜的核心核部及其两翼部分,展现出独特而又连贯的分布态势。

岩性组合: ①下志留统 (S_1), 岩性主要呈现为中薄-厚层块状灰岩 (单层厚度稳定在 0.5~2m), 此外还夹杂着千枚岩、板岩和粉砂岩。研究发现,灰岩内部发育着密集的劈理 (其间距大致在 5~15cm)。而且这种岩石的抗压强度表现出明显的各向异性。具体而言,垂直层理方向的抗压强度高达 58MPa,而平行层理方向的抗压强度则相对较低,为 23MPa。这种各向异性极大地影响了岩体的力学特性和稳定性,在受到不同方向应力作用时,表现出不同程度的变形和破坏特性。②中-上志留统白龙江群 ($S_{2-3}bl^1$), 两翼岩性呈现出互层组合,其中千枚岩占比为 65%、板岩占比为 25%、变质砂岩占比为 10%。岩石层理清晰,紧密相间,其片理产状为 $320^\circ \angle 50^\circ$ 。经过严格测量,得出其岩体质量指标 (rock quality designation, RQD) 为 15%~35%,表明该区域岩体属于极破碎状态。该岩体结构在受到外力作用或者地质构造运动时,极易容易形成滑坡的滑动面,从而对区域的地质稳定性和安全性构成潜在威胁。

2) 中泥盆统古道岭组 (D_2g)

空间展布: 中泥盆统古道岭组的主体分布在北部的大川镇-坪定镇一带,且在南部插岗乡仅有零星出露。它与下伏的志留系之间呈现出两种接触关系,一种呈不整合接触,这意味着在二者之间存在明显的沉积间断或者其他地质事件;另一种是断层接触,说明该区域内地壳运动曾对这一区域产生过强烈的影响导致地层发生断裂错位。

岩性组合: ①下部,岩性以碳质板岩 [总有机碳 (total organic carbon, TOC) 含量处于 3.2%~5.8%] 为主,同时还夹杂着硅质灰岩透镜体 (透镜体厚度为 20~50cm),在碳质板岩中含有黄铁矿结核 (结核直径为 2~8cm)。这些不同性质的物质相互混合,不仅增加了岩性的复杂性,也为地质研究提供了丰富的样本。②上部,岩性主要为厚层生物碎屑灰岩 (层厚在 1~3m),其表面具有独特的缝合线构造,孔隙度处于 1.2%~3.5%,渗透率为