

项目合同编号：25-05K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：气象-工程融合的高速公路极端降雨灾害靶区精准识别与分
级预警技术

承担单位：西安建筑科技大学

项目负责人：雷斌

通讯邮编、地址：西安市碑林区雁塔路中段 13 号（710055）

传真、电话：029-82202540

起止年限：2025 年 12 月 至 2028 年 12 月

陕西省交通运输厅制

一、项目主要研究内容

1. 主要研究内容

专题一、面向高速公路抗灾提升需求的极端降雨气象表征

(1) 极端降雨气象特征及高强降雨区域识别技术

采用降雨量、降雨频率、降雨历时、峰值时间等指标反映极端降雨气象特征；采用 Sen's 斜率和 Mann-Kendall 检验，分析极端降雨事件的时间变化规律、突变点和周期性等；基于 ANUSPLIN 软件及薄板样条函数，研究极端降雨的空间分布及变化趋势；基于 CMIP6 全球气候模拟数据，对 EC-Earth3 模式在 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 三种情景下的降雨数据进行预测，形成未来极端降雨高发区域和高强度区域的识别技术。

(2) 极端降雨下流域汇流与大尺度水流流速分析技术

基于填洼 DEM 数据，计算水流方向与汇流累积量，并以 100 km^2 作为流域最小集水面积阈值，将研究区划分为大小不等的流域；建立栅格模式下汇流模型，在稳定水源供给条件下生成流域前期水环境，将小时降水数据叠加到前期水环境中进行 GPU 汇流演算，形成流域径流汇流和大尺度水流流速分析技术，并验证该分析技术的精度与适用性。

(3) 极端降雨下的入渗深度与土壤含水量快速预测方法

选择影响降雨入渗深度和土壤含水量的主要因子，包括降雨总量、降雨历史、降雨强度、植被覆盖度、坡度、土壤类型、传导率、入渗率等，基于主成分分析将具有信息交叉的变量进行筛选，将主

成分变量作为 BP 神经网络的特征输入值，开展一维降雨入渗试验，建立入渗深度和土壤含水量快速预测方法；引入极端降雨事件前后观测试验，获取不同土层深度土壤含水量的变化情况，利用 Kostiaikov 模型，明确实测数据与模拟数据的函数关系，借此进一步完善所构建的快速预测方法。

专题二、桥梁轻量化易扩展防洪监测及分级预警技术

（1）桥梁轻量化易扩展防洪监测系统设计

针对极端降雨条件下桥梁下部结构抗灾能力提升需求，设计桥梁轻量化防洪监测系统架构，考虑后续系统升级扩展需求，系统架构设计时预设后续软硬件扩展接口；在设备感知层采用水文监测仪、加速度传感器、拉线式传感器、倾角仪及桥下视频监测仪，采用 4G 或 5G 无线传输手段实现边缘数据传输。

（2）极端降雨下河床水流汇聚及水流力快速分析方法

根据局部极端降雨气象数据，考虑陕南、陕北地区典型的河床断面类型及河道纵向走势，采用降雨-径流模型模拟河床水流汇聚过程，分析短周期内的水文特征变化规律。以降雨强度、河道特征、桥墩构形为外部变量，针对不同桥墩布置形式，研究水深、流速、漂流物等影响下的短时水流力演变分析方法。

（3）极端水流力作用下桥梁下部结构响应规律及阈值设定方法

采用力学解析及有限元方法，研究含漂流物的极端水流力对桥梁下部结构的作用效应，分析水流力大小、桥墩几何构型等对桥墩振动频率、墩梁相对位移、墩身倾斜度的影响规律。通过考虑结构

临近失效状态非线性行为的反演分析，确定桥梁下部结构失效时的极端水流力，建立给定极端水流力下的极端水文参数反演方法。

采用红色、黄色、蓝色三个级别构建分级预警技术，根据极端水文参数反演方法，确定各级预警的水文参数阈值；在监测系统软件端研究基于加速度幅频转换的基频偏差分级预警阈值，针对墩身倾角及墩梁相对位移，联合结构内力分析与历史数据统计，形成变形变位分级预警阈值分析方法。

通过在依托工程中安装轻量化防洪监测系统，实现研究成果落地应用，并反哺优化研究成果。

专题三、极端降雨下路基灾害靶区锁定及监测预警技术

(1) 极端降雨条件下路基边坡稳定性及致灾路径

调研陕西省高速公路路基填土类型，研究路基填土类型、含水量对路基土物理力学性质的影响规律，建立针对陕西省的路基土强度模型；考虑不同历时的强降雨模式，采用非饱和渗流分析方法，研究建立降雨期、停雨期入渗深度及路基土含水量快速分析技术；采用 Geo-studio 建立三维应力-渗流-变形耦合的路基边坡计算模型，分析不同路基高度、边坡坡度、路基土类型、降雨强度、降雨时长、土体饱和度对边坡水平位移和安全系数的影响规律；开展室内模型试验，研究不同工况下的边坡稳定性，明确极端降雨下陕西省典型高速公路路基的致灾路径。

(2) 考虑线路降雨特征的路基灾害靶区锁定技术

以公路设计参数、地形地质为基础，确定沿线降雨特征，实现

全线不同路段路基边坡汇水区域和汇水量快速分析；联合地表径流量和路基稳定性分析，建立全线路基稳定安全系数动态模型，获取不同极端降雨条件下全线路基稳定安全系数时空动态信息，构建线路级路基灾害靶区锁定技术。

（3）极端降雨下路基灾害靶区风险评定及监测预警技术

基于（2）中提出的路基灾害靶区锁定技术，进一步建立极端降雨条件下路基灾害靶区风险评定方法；根据灾害靶区特征及风险初评结果，提出极端降雨下高速公路路基稳定性监测技术，自动化采集侧向位移量、沉降量、路基湿度等关键指标，引入阈值分析，形成基于关键指标监测的预警技术，开展示范应用。

2. 技术关键

本项目的技术关键包括：（1）极端降雨范围的区域识别；（2）流域汇流与大尺度水流流速分析；（3）降雨径流汇流过程中入渗深度及土壤含水量分析；（4）桥梁防洪监测技术；（5）防洪监测预警阈值设定技术；（6）路基灾害靶区锁定技术；（7）灾害靶区风险评定及监测预警。

3. 依托工程（依托工作）

（1）延延高速

位于陕北黄土沟壑地区，双向四车道高速公路，全场 115.5km，2015 年 10 月建成通车，设计时速为 80km/h 和 100km/h 两种。路基宽度 25.5m，沿线桥梁 378 座，其中涉水桥梁 65 座，近年来汛期河道水位、河道过水状态正常，未出现百年一遇洪水。沿线半填半挖

段落 131 处，高边坡段落 112 处，临崖临水段落 15 处，软基段落 15 处。

(2) 西商高速

全长 119.0 公里，2012 年 8 月建成通车，沿线地形包括秦岭沟谷段、黄土台塬地区等，地质条件复杂。沿线桥梁 428 座，其中涉水桥梁 97 座，涉水桥梁日常河流流速较慢、水量较小，汛期雨季河水流量较大。沿线半填半挖 20 处、高边坡 22 处、填路基 43 处。

(3) 541 国道岚皋花里至八仙公路改扩建工程

路线全长 37.329 公里，全线桥梁工程共包含 28 座桥梁，其中新建桥梁 18 座，旧桥加固 10 座，路基工程包括挖方约 118.4 万立方米，填方约 23.4 万立方米，项目总预算投资 5.7 亿元，计划 2027 年建成通车。

上述依托工程的建设、运营管理单位，同时是本项目的参与单位，能够为本项目研究内容的开展、成果落地应用提供人员、设备、场地等支撑。具体包括研究成果应用过程中的现场勘察、目标结构物优选、设备安装调试、应用效果跟踪等。

二、考核指标

1.预期目标

(1) 针对公路设施抗灾能力提升分析需求,实现陕西地区极端降雨天气的气象指标量化表征;

(2) 实现极端降雨条件下的桥梁防洪监测及分级预警;

(3) 实现极端降雨条件下的线路高风险靶区快速锁定及监测预警。

2.主要技术经济指标(具体的技术经济参数)

相比传统的监测预警技术,本项目研究成果能够达成对象重点化、设备轻量化的目标,单体桥梁的监测预警可节省成本约 20%,单个线路可节省监测预警成本约 30%。

3.经济和社会效益

近年来,高速公路基础设施在极端降雨天气下的灾害事件频发,造成了大量的经济损失,并已成为社会公众关注的焦点问题之一。本项目整合气象学价值数据、工程结构灾害防控技术,拟在提升极端降雨下高速公路抗灾能力的同时,通过有效识别灾害靶区,降低运营成本投入,能够有效防止公路灾害的发生,避免人员伤亡,具有显著的经济和社会效益。

4.成果提供形式

(1) 研究报告:研究总报告 1 份、专题报告 3 份;

(2) 示范应用工程案例 2 个。

(3) 知识产权:申请并受理软件著作权 6 项,申请并受理发明

专利 3 项，知识产权归甲方所有；

（4）在中文核心及以上期刊发表论文，3 篇及以上。

4. 其他考核指标

（1）媒体宣传报道不少于 3 次；

（2）开展技术交流不少于 1 次。

三、项目年度计划内容及考核目标

年度	计划内容及考核目标（每栏限 125 字）
2026	<p>第 1 季度：进一步完善研究技术路线及研究大纲，确定调研方案。</p> <p>第 2 季度：调研陕西省典型高速公路，收集设计资料，确定路基土类型。</p> <p>第 3 季度：建立陕西省极端降雨指标数据库，识别历史及未来时期极端降雨的高发区域；</p> <p>第 4 季度：开展路基土的物理与力学性质试验。</p> <p>申请软件著作权 3 项，申请发明专利 2 项。</p>
2027	<p>第 1 季度：对接气象表征研究成果，研究极端降雨条件下的水流汇聚及水流力快速分析方法；</p> <p>第 2 季度：划分陕西省降雨汇流单元，模拟并验证极端降雨条件的水流深度与流速；</p> <p>第 3 季度：研究极端降雨下路基边坡稳定性及致灾路径。</p> <p>第 4 季度：研究极端水流力下桥梁下部结构响应规律，反演临近失效状态下的极端水文参数；</p> <p>申请软件著作权 3 项，申请发明专利 1 项，发表论文 2 篇。</p>

2028	<p>第 1 季度：研究高速公路路基灾害靶区锁定技术。</p> <p>第 2 季度：设计桥梁防洪监测系统，研究分级预警阈值设定方法，在依托工程中开展示范应用；</p> <p>第 3 季度：研究路基灾害靶区风险评定及监测预警技术，在依托工程中开展示范应用；</p> <p>第 4 季度：撰写研究报告，筹备项目验收。</p> <p>发表论文 1 篇。</p>
------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

四、项目经费

项目总经费：	97.0 万元
交通运输厅补助：	48.5 万元
自筹资金：	48.5 万元

经费支出预算表

科 目	总经费 (单位：万元)	厅补经费 (单位：万元)
(一) 直接费用	80.0	40.0
1. 设备费	20.0	5.0
(1) 购置设备费	15.0	0.0
(2) 试制设备费	0.0	0.0
(3) 设备改造与租赁费	0.0	5.0
2. 业务费	46.0	28.0
(4) 材料支出	12.0	8.0
(5) 测试化验实验加工支出	14.0	7.0
(6) 燃料及动力支出	3.0	2.0
(7) 差旅支出	8.0	5.0
(8) 会议支出	0.0	0.0
(9) 国际合作与交流支出	0.0	0.0
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/ 印刷支出	9.0	6.0
(11) 其他支出	0.0	0.0
3. 劳务费	14.0	7.0
(12) 劳务性支出	10.0	5.0
(13) 咨询专家支出	4.0	2.0
(二) 间接费用	17.0	8.5
4. 管理费	8.0	4.0
5. 绩效支出	9.0	4.5
合 计	97.0	48.5

五、项目绩效目标

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	知识产权	1.专利授权数（项）	3
		（1）授权发明专利	3
		（2）实用新型	0
		（3）外观设计	0
		2.软件著作权授权数（项）	6
		3.发表论文（篇）	3
		（1）其中 SCI 索引收录数	0
		（2）其中 EI 索引收录数	0
		（3）其他	3
		4.著作（部）	0
		5.制订标准数（项）	1
		（1）国际标准	0
		（2）国家标准	0
		（3）行业标准	0
		（4）地方标准	0
		（5）企业标准	0
		（6）科技报告	1

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
	其他成果	1.填补技术空白数	2
		(1) 国际	0
		(2) 国家	0
		(3) 省级	2
		2.获奖项数	0
		(1) 国家奖项	0
		(2) 部、省奖项	0
		(3) 地市级奖项	0
		3.其他科技成果产出	2
		(1) 新工艺（或新方法模式）	0
		(2) 新产品（含农业新品种）	0
		(3) 新材料	0
		(4) 新装备（装置）	0
		(5) 平台/基地/示范点	2
		(6) 中试线	0
		(7) 生产线	0
产出类指标	其他成果	4. 研究开发情况	
		(1) 小试	否

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
		(2) 中试（样品样机）	否
		(3) 小批量	否
		(4) 规模化生产	否
	人才引育	1. 引进高层次人才	0
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	0
		2. 培养高层次人才	3
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	3
		3. 培训从事技术创新服务人员（人次）	0
		4. 是否设立科研助理岗位	否
	产业化情况	1. 开放共享仪器设备数（台/套/只等）	0
		2. 科研仪器设备利用率（%）	0
		3. 孵化科技型企业（个）	0
		4. 转化科技成果（个）	0

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
效果类指标	经济效益	1. 新增产值（万元）	0
		2. 新增销售（万元）	0
		3. 新增出口创汇（万美元）	0
		4. 新增利润（万元）	0
	社会效益	1. 新增税收（万元）	0
		2. 新增就业人数	0
		3. 就业培训（人次）	0
		4. 带动农民增收（万元）	0
		5. 培训和指导科技服务（人次）	0
		6. 新增产业带动情况	0
		7. 技术集成示范（项）	0
		8. 建立示范基地（亩数）	0
		9. 节约资源能源	0
		10. 环保效益	0
其他需要说明的情况			

六、承担单位或研究人员分工

雷斌，西安建筑科技大学，项目负责人，负责整个项目的理论指导、试验指导、分工安排。

李盟，陕西交控延延分公司，专题二、专题三应用研究。

张建光，陕西交控西商分公司，专题二、专题三应用研究。

李文斌，陕西省安康公路管理局，专题三研究。

王晓威，西安建筑科技大学，专题三研究。

康志荣，陕西交控延延分公司，专题二应用研究。

范克虎，陕西交控西商分公司，专题三应用研究。

朱林超，陕西省安康公路管理局，专题二研究。

袁阳光，西安建筑科技大学，专题二研究。

申连平，陕西交控延延分公司，专题二应用研究。

高勇卿，陕西交控西商分公司，专题三应用研究。

孟德康，陕西省安康公路管理局，专题三应用研究。

梁晓燕，西安建筑科技大学，专题一研究。

李强生，陕西交控西商分公司，专题二应用研究。

程占阳，陕西交控西商分公司，专题二应用研究。

张欣蓉，西安建筑科技大学，专题一研究。

七、项目参加人员表

项目承担单位：西安建筑科技大学						
参与单位（排序）：陕西交控延分公司、陕西交控西商分公司、陕西省安康公路管理局						
项目负责人						
序号	姓名	出生年月	工作单位	职称/职务	专业	在项目中担任具体工作
1	雷斌	1978.11	西安建筑科技大学	教授/副院长	道路工程	统筹协调，研究内容制定及推进
主要研究人员						
2	李盟	男	陕西交控延分公司	副高级	道路工程（路线）	专题二、专题三应用研究
3	张道光	男	陕西交控西商分公司	副高级	桥梁工程	专题二、专题三应用研究
4	李文斌	男	陕西省安康公路管理局	正高级	道路与铁道工程	专题三研究
5	王晓威	男	西安建筑科技大学	副高级	道路工程（路基）	专题三研究

6	康志荣	男	陕西交控延分公司	副高级	桥梁工程	专题二应用研究	康志荣
7	范克虎	男	陕西交控西商分公司	副高级	道路工程（路基）	专题三应用研究	范克虎
8	朱林超	男	陕西省安康公路管理局	副高级	交通工程	专题二研究	朱林超
9	袁阳光	男	西安建筑科技大学	副高级	桥梁工程	专题二研究	袁阳光
10	申连平	男	陕西交控延分公司	副高级	桥梁工程	专题二应用研究	申连平
11	高勇卿	男	陕西交控西商分公司	副高级	道路工程（路基）	专题三应用研究	高勇卿
12	孟德康	男	陕西省安康公路管理局	中级	土木工程	专题三应用研究	孟德康
13	梁晓燕	女	西安建筑科技大学	中级	气象学	专题一研究	梁晓燕
14	李强生	男	陕西交控西商分公司	副高级	桥梁工程	专题二应用研究	李强生
15	程占阳	男	陕西交控西商分公司	中级	桥梁工程	专题二应用研究	程占阳
16	张欣蓉	女	西安建筑科技大学	中级	气象学	专题一研究	张欣蓉

八、信息表

项目合同编号		25-05K		密级		/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部			
项目名称		气象-工程融合的高速公路极端降雨灾害靶区精准识别与分级预警技术									
项目实施所在地		陕西		起止年限		2025 年 12 月至 2028 年 12 月					
总 经 费		97.0 万元		厅 拨		48.5 万元					
第一 承担 单位	单位名称	西安建筑科技大学									
	所在地	陕西省西安市碑林区					代码	610103			
	通讯地址	陕西省西安市碑林区雁塔路中段 13 号					邮编	710055			
	单位性质	(1) 1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其他					代码	10703			
参与 单位	序号	单 位 名 称									
	1	陕西交控延延分公司									
	2	陕西交控西商分公司									
	3	陕西省安康公路管理局									
项目负责人		姓 名	雷斌		性别 (1) 1.男 2.女		出生年份		1978		
		学 历	(1) 1.研究生 2.大学 3.大专 4.中专 5.其他								
		职 称	(1) 1.高级 2.中级 3.初级 4.其他								
		联系电话	13009202171		电子邮箱		leibin@xauat.edu.cn				
项目联系人		姓名	袁阳光			性别		男			
		联系电话	18161810164			电子邮箱		yuanyg31@163.com			
项目组人数		16	高 级	12	中 级	4	初 级	0	其 他	0	
主要研究内容 (100 字以内)		项目面向极端降雨下公路抗灾能力提升及灾害预警需求,提出面向抗灾提升需求的极端降雨表征技术,建立桥梁轻量化防洪监测技术及分级预警技术,形成极端降雨下的灾害靶区锁定及分级技术。									
成果属性		A	A: 新技术 B: 新工艺 C: 新材料 D: 新产品 E: 软科学 F: 装备 G: 其他								
成果形式		AD	A: 专著、论文 B: 样机、样品 C: 试验工程、产品 D: 示范工程 E: 产品 F: 其他								

九、共同条款

合同各方应共同遵守《陕西省交通运输厅科研项目管理办法》。

1.合同执行过程中，乙方如需修改合同某项条款，应向甲方提出变更内容及理由的申请报告，经甲方审核同意后实施。未接到正式批准以前，双方仍须按原合同条款履行，否则后果由自行修改条款的一方负责。

2.乙方因任何主观或客观原因（如：与大纲评审内容有出入，挪用经费、技术措施或某种条件不落实等）致使计划无法执行而要求解除合同的，需取得甲方书面同意且应视不同情况，部分或全部退还所拨经费；出现上述情况的，甲方有权单方解除本合同且视不同情况要求乙方部分或全部退还所拨经费。

3.乙方的厅补助经费及自筹经费应按国省有关科研经费使用范围开支。

4.项目执行过程中，甲方提出变更合同有关内容时，要与乙方协商达成书面协议。

5.项目完成后，乙方必须按要求向甲方提交一套真实、完整、详细的技术资料及样机，并提出项目验收申请报告，由甲方审查后组织验收。

6.合同正本一式拾份，甲方单位伍份，承担单位伍份。

7.本合同经双方签章后生效，规定内容执行完毕后自然失效。

十、合同签约各方

合同甲方：

负责人：（签字）

联系人：（签字）

电 话：029-88869067



合同乙方：（承担单位）

单位负责人：（签字）

项目负责人：（签字）

电 话：029-82202540



财务负责人：（签字）



账 户 名：西安建筑科技大学

开户银行：工行西安雁塔路支行

账 号：3700023009026400639

陕西交通科研项目科研诚信 承诺书

项目承担单位及项目负责人承诺在科研项目实施过程中，遵守科学道德和科研诚信要求，严格执行《陕西省交通运输厅科研项目管理办法》的规定和科研项目合同书约定，保证所提交材料的真实性，确保自筹经费全额到位、专款专用。如违背以上承诺，愿意承担相关责任，并同意主管部门将相关失信信息记入公共信用信息系统。

项目承担单位：西安建筑科技大学

项目负责人：



2025年 12月 17日

项目编号: 25-05K

2025年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称: 气象-工程融合的高速公路极端降雨灾
害靶区精准识别与分级预警技术

申请单位: (盖章) 西安建筑科技大学

联系人: 雷斌

电 话: 13709202171

陕西省交通运输厅制

2025 年 12 月

目 录

一、 项目研究的背景和必要性	1
二、 前期科研及工作基础	3
三、 实施方案	19
四、 项目承担单位及参加单位概况	33
五、 项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件	35
六、 项目经费估算及资金筹措情况	38
七、 项目绩效指标	39
八、 预期目标、成果提供形式及经济社会效益	41
九、 其它需要说明的问题	42
十、 申请单位意见	42

应用技术、信息化类及软科学类

编写主要内容

一、项目研究的背景和必要性

提出的背景、研究目的、项目概括、市场需求前景或推广应用领域，达到的技术水平及在国民经济发展中的作用等。

随着全球气候变化的加剧，极端天气事件发生的频率和强度不断增加。广东梅大高速高填方路堤坍塌(图 1)、陕西丹宁高速桥梁垮塌(图 2)均造成了重大生命财产损失，极端降雨天气下的高速公路基础设施安全性已成为行业的关注焦点。2018 至 2024 年间，陕西省共发生数百起因极端降雨引发的高速公路灾害事件，交通运输部连续发布相关文件，要求提高公路基础设施的防灾抗灾能力，极端降雨下的高速公路抗灾能力提升需求及灾害预警需求愈加迫切。



图 1 梅大高速高填方路堤坍塌

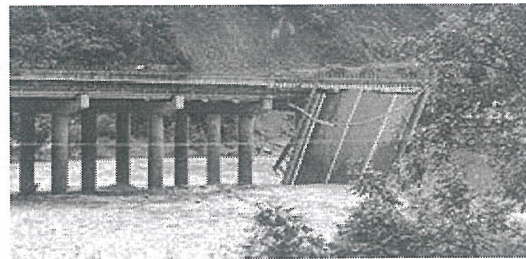


图 2 丹宁高速桥梁垮塌

陕西省位于我国西部内陆，北部为黄土高原、中部为关中平原、南部为秦巴山区，地形地质条件及气候条件复杂。自上世纪末，陕西省出现暴雨增多、强度增强的现象。尤其秦巴山区，年平均降雨量可达 800~1700 mm。极端降雨对高速公路的影响主要体现在：(1) 强降雨通过地面径流、渗流等途径进入路基，导致路基失稳滑坡；(2) 强

降雨在河道内汇聚后使水深、流速显著提高，对桥梁下部结构产生更强的水流力及冲刷作用，可能导致桥梁下部结构垮塌。

针对极端降雨天气下高速公路抗灾能力提升的刚性需求，现有研究存在以下问题：（1）气象学与工程学关注点及核心数据维度不同，导致大量气象学价值数据无法充分应用，极端降雨天气下高速公路设施失效风险研究缺乏有效的气象环境数据作为支撑；（2）有关桥梁健康监测的研究主要关注上部结构，对下部结构及极端降雨条件下的水流冲刷问题关注较少；（3）现有部分公路设计对极端降雨考虑不足，且未充分考虑线形、气象、地形地质差异对公路渗流、汇流的影响，及其对路基稳定性的影响，导致依据现有评价方法，无法准确找到公路灾害靶区，进而无法实施精准灾害监测与预警。

本项目拟开展基于极端降雨气象表征的高速公路抗灾预警技术研究，首先，针对陕西省具体情况，表征极端降雨气象学特征，建立极端降雨下的径流汇流模型，由此打通气象学研究成果与高速公路抗灾分析需求之间的壁垒。其次，针对极端降雨天气对桥梁下部结构的影响，研究桥梁轻量化防洪监测技术，建立分级预警技术。最后，建立全域高速公路在不同极端降雨条件下的灾害靶区分级，并实施精准监测与预警。

作为对交通运输部及陕西省行业需求的直接响应，本项目研究的开展及研究成果的应用，可显著提高极端降雨天气下的高速公路基础设施防灾、抗灾能力。具体研究意义包括：（1）打通气象学与工程学的学科壁垒，实现学科交叉融合以及价值数据的跨尺度流转应用；（2）

通过桥梁轻量化防洪监测系统的研究及应用,形成引领示范效应;(3)建立不同降雨条件下陕西高速公路路基灾害靶区确定方法,对实现精准、高效的路基监测预警技术具有重要应用价值。

二、前期科研及工作基础

1.对项目领域国内外(省内外)研究现状,研究水平和发展趋势的分析和评价(应进行查新分析,主要分析本项目的技术领域发展状况和水平,有那些技术尚未解决,需要这次攻克的技术难点)

(1) 极端降雨天气情景模拟及气象表征

近年来,在全球气候变暖的背景下,许多极端天气气候事件发生的频率、强度和持续时间明显增多^[1-3]。尤其是极端降雨导致的洪涝、泥石流、地面坍塌等次生灾害事件,给社会经济发展和人民生命财产安全带来严重危害。研究发现,20世纪70年代以来,中纬度地区的强降水事件普遍增多^[4],使得诸如暴雨、洪灾等自然灾害更具威胁性。在中国,极端降水的变化具有显著的区域性差异,西北大部分地区极端降水事件显著增加^[5]。陕西省位于我国西部内陆地区,从北向南依次发育有陕北黄土高原、关中平原及陕南秦巴山地三种不同的地貌类型,气候变化格局复杂,气象灾害频发。近60年极端降水呈显著增加的趋势^[6]。其中陕北地区以大雨、暴雨日数增加为主;陕南地区以强降水量和特强降水量增加为主。目前关于该区域极端降水的研究主要集中在天气尺度事件的机理及变化特征上,缺乏对不同地区极端降水的变化差异及未来变化趋势的预测和预估研究。预估研究陕西省极端降雨未来变化的时空格局,可为该地区科学应对极端气候变化和提

高防灾减灾能力提供科学依据。

由于极端降雨的局地性、突发性和活动规律多变等特点,对其预测及模拟仍然是学界难题。目前,关于极端降雨的预测及模拟技术,世界气候研究计划(World Climate Research Program, WCRP)所开发的耦合模式比较计划 CMIP6 是目前系列计划中模型情景最多、实验数据模拟量最庞大的版本^[7]。它使用共享社会经济路径(shared socioeconomic pathways, SSPs)和典型浓度路径(representative concentration pathways, RCPs)矩阵框架,涵盖了人口、经济、生态、资源、制度因素等未来的社会和经济变化,以及各种减缓、适应和应对气候变化的措施等,被广泛应用于全球和地区的气候变化研究、极端天气和气候事件研究、气候变化的不确定性研究以及气候政策和决策支持等多个领域^[8-10]。

降雨是径流产生的主要因素,降雨的时空分配决定了径流的季节性变化和区域性特征,降雨量大小直接与洪水或干旱密切相关^[11]。强度大且持续时间长的极端降雨事件往往会导致径流增加,从而引发洪水、泥石流等自然灾害。目前,关于河流流域径流变化的研究缺乏考虑极端降雨对径流变化影响的研究,主要以经验模型和长期观测为主。SWAT (Soil and Water Assessment Tool)模型以水文响应单元为最小水文模拟单元,由站点的气象资料驱动,进行流域水文过程模拟,在气候变化水文响应的研究中应用较多^[12-13]。如 Jha 等^[14]应用 SWAT 模型,研究了密西西比河上游流域河川流量对气候变化的敏感性。Franczyk 等^[15]应用 SWAT 模型模拟了一个小的 Oregon 流域气候变化

情景下径流深度的变化。Piniewski 等^[16]比较了全球尺度的水文模型 (WaterGAP) 和 SWAT 模型在模拟气候变化对河川径流影响时的效果, 结果发现, 在流域尺度上, 考虑月径流量极端值的变化时, 流域尺度的水文模型更有优势。杨满根和陈星通过构建淮河流域中上游 SWAT 模型, 研究了气候变化对淮河流域中上游汛期极端流量的影响^[17]。但是 SWAT 模型在国内外各流域的应用也偏重于流域平均水文状况对气候变化的响应, 对流域极端流量对气候变化的响应关注不够, 尤其是对不同量级和年内分布降水情景相应径流过程的研究较少。揭示极端降水对流域径流的影响, 以期能为明确极端降水变化引起的水文效应和流域洪涝灾害的防范提供理论依据与数据支撑。

2.2 桥梁防洪监测及预警技术

桥梁健康监测技术可以追溯到 20 世纪中期, 最初主要依赖于人工检测和简单的仪器测量。随着传感技术、信息技术和计算机技术的发展, 桥梁健康监测技术逐渐向自动化、智能化方向发展^[18-19]。截至目前, 桥梁健康监测技术的研究已经深度覆盖了高性能传感器、高效数据传输、系统集成, 以及基于智能算法和大数据的健康监测价值信息挖掘^[20-21]。

最初的健康监测系统主要应用于大跨桥梁或地标性桥梁结构。近年来, 受中小跨径桥梁失效事件频发的刺激, 中小跨径桥梁健康监测技术不断发展完善, 并以集群化、轻量化为典型特征^[22-25]。但截至目前, 桥梁健康监测技术及系统集成的工作重点为上部结构, 且对极端天气的考虑较少。

尽管如此，也有少数学者对桥梁下部结构监测方法开展了研究，但主要集中于基础冲刷问题。例如杜杰贵等^[26]总结了基础冲刷监测方法的研究进展情况，该研究中指出，后续应通过持续研究，提升监测技术在极端水沙环境下的适用性。宋刚等^[27]总结了现阶段桥梁基础冲刷监测中常用的技术，包括声纳技术、磁测技术、光纤光栅技术、动力识别技术等。针对洪水灾害，何明星等^[28]探讨了桥梁下部结构监测系统的构建思路及临时防护手段。

可见，有关极端降雨下的桥梁下部结构监测技术研究较少，研究成果难以形成体系。极端降雨天气对桥梁结构的影响最终可归结为水文特征变化导致的水流力变化，但现阶段，极端降雨下的河床水流汇聚及水流力变化、极端水流力对桥梁下部结构的效应特征等研究仍比较少见，难以对桥梁下部结构监测系统的搭建形成有效支撑。

对桥梁开展物理指标监测并获取监测数据并不是健康监测工作的最终目的，只有通过合理设定阈值、实现极端服役状态分级预警，将监测数据转变为能够支撑养护决策的知识或者信息，才能够发挥健康监测系统本身应有的价值。

近期，部分学者依托中小跨径桥梁健康监测系统，研究了监测预警关键技术，而其中的关键，仍是监测数据预警阈值的分析方法。耿江玮等提出了基于校验系数的桥梁健康监测预警阈值设定方法，校验系数定义为一段时间监测数据的极值与理论分析结构极值的比值，但其中不同预警水平的校验系数阈值条件需要人为确定^[29]。郝龙等^[30]基于北斗系统研发了桥梁变形监测技术，在其中的预警阈值设定时赋

予用户较大的权力，即根据桥梁构件在不利荷载下的响应值进行设置，并通过实时监测值与预警阈值的对比结果划分预警等级。徐文城等^[31]在其研究中明确指出基于结构设计值确定预警阈值在某些情况下并不适用，并提出了基于历史监测数据统计结果的阈值确定方法。Ni 等^[32]在基于长期监测数据评估桥梁伸缩缝服役性能时，采用贝叶斯方法分析了用于状态评估的伸缩缝伸缩量预警阈值。综合现有研究，国内外尚未在健康监测阈值分析及预警技术方面形成系统性成果，尤其是桥梁下部结构防洪监测预警技术。

2.3 路基边坡稳定性及风险评估预警技术

降雨是导致公路发生灾害的重要因素^[33]，极端暴雨会导致路基边坡失稳，严重影响人民生命安全和出行效率^[34]。影响路基稳定性的因素包括降雨强度、降雨历时、路基土类型、边坡设计参数等^[35]，上述因素具有很强的不确定性，对路基边坡稳定性准确判断仍较为困难^[36]。据统计，自 20 世纪以来，极端天气出现的次数日益增加，由极端暴雨直接触发的大型灾害性路基边坡失稳超过 50%^[37]。对于路基边坡稳定性分析，目前已有较多研究成果。在国外，路基边坡稳定性的研究主要集中在路基边坡稳定性机理、分析方法和监测技术以及路基边坡稳定性与环境、气候等因素的关系^[38-42]。而在国内，路基边坡稳定性研究成果主要集中在分析方法、评价指标和监测技术等方面。

传统的边坡稳定性评价方法分为两大类：定性评价法与定量评价法。黄昌乾等^[43]根据量化程度将边坡稳定性评价分为定性分析法、定量分析法、非确定性分析法、物理模型法和现场监测分析法等 5 类。

程东幸等^[44]将边坡的稳定性评价方法分为安全系数法、阈值法、相关性分析法和模拟试验法等 4 类。通过强度折减有限元法对公路路基边坡的稳定性进行分析,验证了路基边坡在施工和运营期间的稳定性^[45]。考虑降雨的影响,基于非饱和渗流理论,研究降雨对路基边坡浅层滑动面稳定性的影响,以及降雨期和停雨期渗透系数和孔隙水压力的变化^[46]。罗建林^[47]基于 Geo-studio 数值模拟以及极限平衡法中的简化 Bishop 法对露天采场凝灰岩质路基边坡进行了稳定性研究,得到了不同路基横断面的安全系数。农明科^[48]基于 Midas/GTS 软件建立路基三维模型,分析强降雨前后路基边坡的稳定性。降雨历时和强度的增加会导致路基边坡安全系数的下降,预应力锚索能提高路基边坡稳定性,高路基边坡的安全系数随锚杆长度的增加而提高,但超过一定长度后增幅不大。

通过边坡监测技术及时预见边坡的危险因素,对边坡风险等级进行评估,并建立边坡预警系统是有效防治边坡灾害的重要手段。在边坡风险评估方面,指标体系法和专家评估法两种量化评估方法可用于路基稳定性的风险评估,成立由专门技术人员或专家组成的评估小组,根据评估范围选出评估对象,并进行实地调查,用专家评估法打分或指标体系法打分,风险按照等级进行划分^[49],同时利用先进的决策方法,如模糊评判^[50]、神经网络法^[51],可以在一定程度上削弱由于人员主观因素造成的误差,并且可以采用数值模拟手段对稳定状态进行分析模拟^[52],进一步验证评估的可靠性。同时,还有许多学者通过风险评估系统和模型来开展风险评估,Xu 等^[53]提出了高速公路软土

路基健康状况评价系统,采用层次分析法构建各水平指标的判断矩阵,并计算各指标的权重。吴忠广^[54]构建了总体风险评估模型,基于蒙特卡洛随机抽样技术,运用K-S检验方法^[55]对指标权重总体分布进行有效检验,在给定置信区间下划分总体风险等级。徐敬业等人^[56]提出了低路堤路基服役状态评估方法,运用模糊综合评价法和物元分析方法分析建设期结构质量易损性、运营期路基危险性及养护维修修正值,得出低路堤路基综合风险度。灾害风险评估技术可应用于风险预警^[57],针对不同评估目的,整合、分析相关空间数据,进而建立具有较强可靠性和针对性的评价模型^[58]。层次分析法(AHP)是灾害风险评估体系中一种可直观应用专家经验的决策方法^[59],Deng^[60]等提出了一种高速铁路路基动态服役性能快速智能评估的创新方法,可快速获得路基动态服役性能的评估指标。Zhang^[61]建立滑坡安全系数与表面监测位移的关系,从而通过表面位移量的变化进行阶段式预警,并制定相应的预防措施。

从上可以看出,现有路基边坡稳定性评价及风险评估中,未充分考虑线形、气象、地形地质差异对公路渗流、汇流的影响,陕西省地形地质和气象条件差异显著,依据现有评价方法,无法准确找到公路灾害靶区,进而无法实施精准灾害监测与预警。

2.项目前期科研及现有工作条件(项目的支撑条件,过去相关研究的工作基础,获奖情况,现有的试验手段(设施、设备)、研究人员情况及协作条件等)

(1) 现有技术装备条件

西安建筑科技大学拥有西部绿色建筑国家重点实验室(结构中心)、教育部结构工程与抗震重点实验室、陕西省结构与抗震重点实验室、陕西省城市公共交通空间综合规划与开发工程研究中心、陕西省城市基础设施数字化工程技术研究中心、西部装配式建筑工业化陕西省 2011 协同创新中心等教学科研平台等。陕西交控延延分公司、陕西交控西商分公司长期负责延延高速与西商高速的运营管理工作,配备有大量道路、桥梁养护技术装配与充足的养护技术人员。

以上参与单位的技术装备条件能够为本项目的开展提供充足的支撑。

(2) 基于水文模拟模型的径流深度研究

团队成员前期使用 SWAT、InVEST 等水文模拟模型,建立了格网尺度径流深度的快速、精准识别方法。依托陕西省吴起县的地域特征,研究了不同坡沟系统的产流量、产沙量、径流流速、径流阻力、径流剪切力、径流功率、单位径流功率等。相关研究成果已经发表在了《Ecological Indicators》等期刊,具体研究工作如图 3。

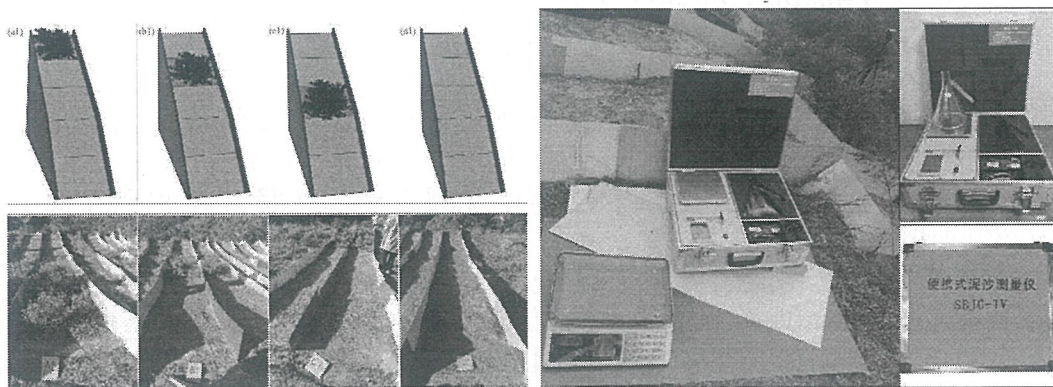


图 3 基于水文模型的径流深度研究

(3) 陕西省近 60 年极端降雨的时空变化特征研究

团队成员前期根据陕西省历年极端降雨数据，研究了陕西省近 60 年来的极端降雨时空变化特征，研究发现全省暴雨日数和强降水量总体呈增加趋势，特别是 90 年中期之后，增加趋势尤为明显。从空间分布特征来看，陕南地区的增长趋势和幅度显著高于省内其他区域。研究成果如图 4 所示。

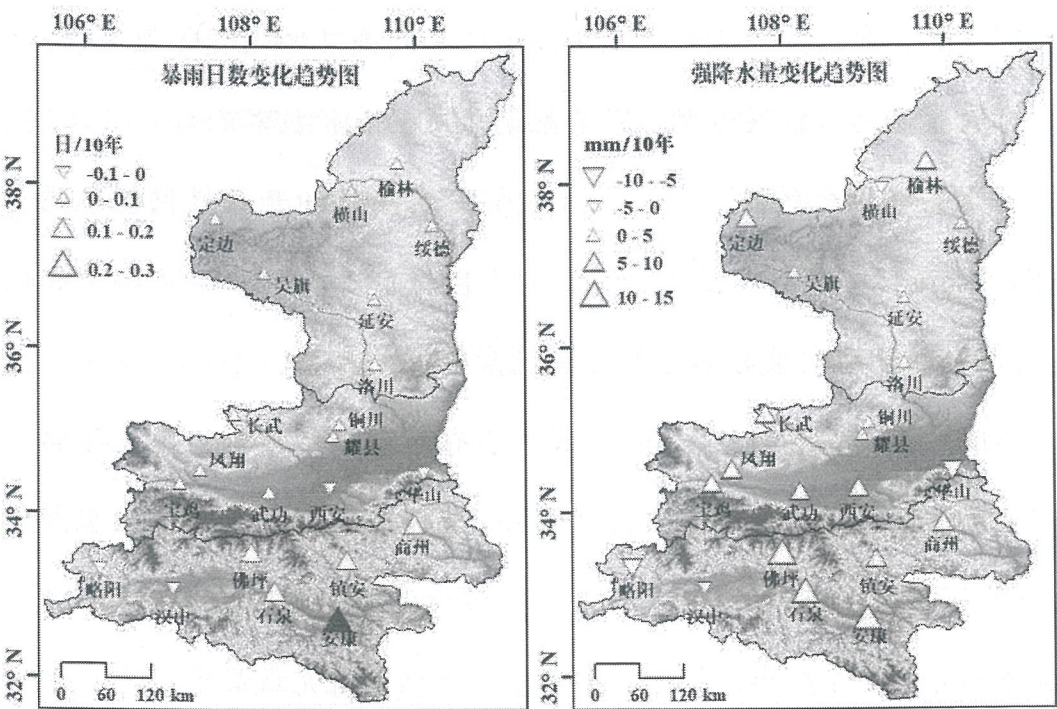


图 4 陕西省近 60 年来极端降雨时空变化特征研究

(4) 公路基础设施监测预警相关研究

针对公路基础设施安全保障及监测预警需求，项目组成员前期已经基于轻量化监测理念，设计了轻量化监测系统，并将其应用于了日兰高速某高速公路桥梁，并基于其挠度监测数据，实现了基础设施安全性的实时安全评估及安全预警，相关研究成果已发表至了《土木工程学报》等期刊，轻量化监测系统的具体应用如图 5 所示。

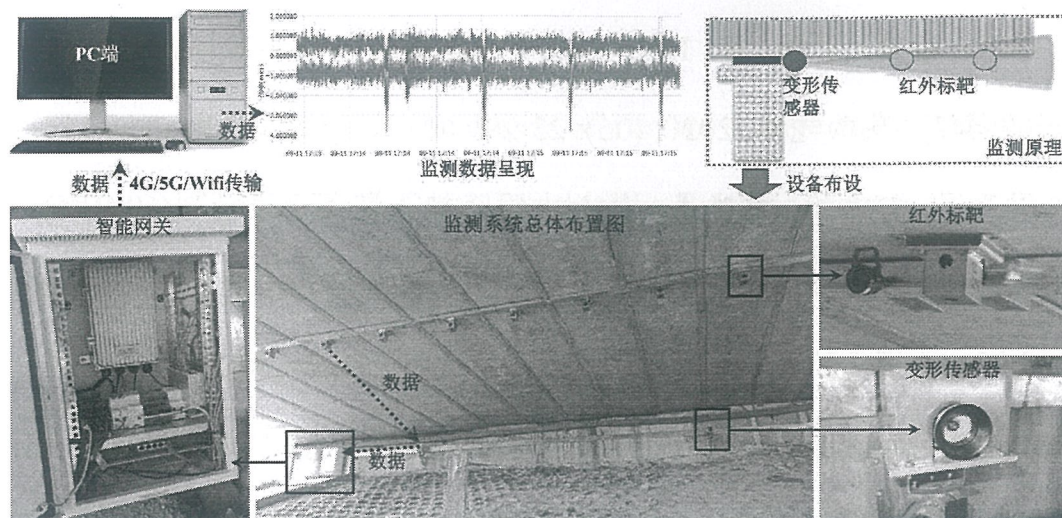


图 5 公路基础设施轻量化监测系统设计及应用

3.参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] Karmalkar A V, Bradley R S. Consequences of Global Warming of 1.5 °C and 2 °C for Regional Temperature and Precipitation Changes in the Contiguous United States[J]. PLoS ONE, 2017, 12: e0168697.
- [3] Blöschl G, Hall, J, Viglione, A, et al. Changing climate both increases and decreases European river floods[J]. Nature, 2019, 573: 108-111.
- [4] Zhang W, Zhou T, Wu P. Anthropogenic amplification of precipitation variability over the past century[J]. Science, 2024, 385: 427-432.
- [5] Song M, Pei, Y, Zhang, S, et al. Simulation Performance and Case Study of Extreme Events in Northwest China Using the BCC-CSM2 Model. Remote Sensing. 2022, 14: 4922.

- [6] 李凤, 李毅, 于强, 等. 1961—2019 年陕西省极端旱涝事件的时空演变规律[J]. 陕西气象, 2020, (06): 23-29.
- [7] 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(05): 445-456.
- [8] 古再丽努尔·亚森, 张京朋, 赵天保. CMIP6 多模式对 21 世纪中亚极端降水未来变化预估[J]. 气候与环境研究, 2023, 28(3): 286-302.
- [9] 张粟瑜, 岑思弦, 赖欣, 等. 基于 CMIP6 多模式集合对长江上游地区暴雨的预估研究[J]. 高原气象, 2024, 43(03): 667-682.
- [10] Jiang J, Zhou T, Chen X, et al. Future changes in precipitation over Central Asia based on CMIP6 projections[J]. Environmental Research Letters, 2020, 15(5): 054009.
- [11] 高爽, 遆超普, 汤水荣, 等. 长江流域径流模拟及其对极端降雨的响应[J]. 环境科学, 2023, 44(09): 4853-4862.
- [12] Neitsch S, Arnold J, Kiniry J, et al. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406, Texas: Texas Water Resources Institute, 2011.
- [13] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, 等. 应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响. 生态学报, 2014, 34(6): 1559-1567.
- [14] Jha M, Arnold J, Gassman P, et al. Climate change sensitivity assessment on upper Mississippi River basin streamflows using SWAT[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2006, 42(4): 1023-1037.

997-1015.

[15] Franczyk J, Chang H. The effects of climate change and urbanization on the runoff of the Rock Creek basin in the Portland metropolitan area, Oregon, USA[J]. Hydrological Processes, 2009, 23(6): 805-815.

[16] Piniewski M, Voss F, Bärlund I, et al. Effect of modelling scale on the assessment of climate change impact on river runoff[J]. Hydrological Sciences Journal, 2013, 58(4): 737-754.

[17] 杨满根, 陈星. 气候变化对淮河流域中上游汛期极端流量影响的 SWAT 模拟[J]. 生态学报, 2017, 37(23): 8107-8116.

[18] Yi T, Huang H, Li H. Development of sensor validation methodologies for structural health monitoring: A comprehensive review[J]. Measurement, 2017, 109: 200-214.

[19] 李惠, 周文松, 欧进萍, 等. 大型桥梁结构智能健康监测系统集成技术研究[J]. 土木工程学报, 2006, (02): 46-52.

[20] Gordan M, Sabbagh Y, Ghaedi K, et al. State-of-the-art review on advancements of data mining in structural health monitoring[J]. Measurement, 2022, 193: 110939.

[21] Xu D, Xu X, Forde M, et al. Concrete and steel bridge structural health monitoring-insight into choices for machine learning applications[J]. Construction and Building Materials, 2023, 402: 132596.

[22] 伊廷华, 郑旭, 杨东辉, 等. 中小跨径桥梁结构健康监测系统轻量化设计方法[J]. 振动工程学报, 2023, 36(02): 458-466.

- [23] 徐文城, 高艳滨, 王凯, 等. 中小跨径桥梁监测预警关键技术研究[J]. 公路, 2024, 69(05): 177-182.
- [24] 王腾义, 李丹, 张建. 桥梁结构轻量化健康监测思路与技术研发[J/OL]. 土木工程学报, 1-18[2024-09-13].
- [25] 魏斌, 许肇峰, 吴益林, 等. 路网级桥梁集群监测系统建设关键技术及实践[J]. 广东公路交通, 2024, 50(01): 62-65+71.
- [26] 杜杰贵, 毋浩杰, 康源. 桥梁基础冲刷监测方法研究进展[J]. 自动化与仪器仪表, 2022, (06):1-6+12.
- [27] 宋刚, 梁杨, 黄建云. 桥梁基础冲刷监测技术综述[J]. 工程技术研究, 2021, 6(06): 104-105.
- [28] 何明星, 宗成思, 李庆海. 桥梁防洪监测系统建设及临时防护手段探索[J]. 上海建设科技, 2023, (04): 9-12.
- [29] 耿江玮, 雷君霞. 基于“校验系数”的桥梁健康监测预警阈值设定研究[J]. 中国标准化, 2018, (24): 88-89.
- [30] 郝龙, 邵慧, 姜丹. 北斗系统桥梁变形监测和预警研究[J]. 交通科技与管理, 2023, 4(18): 7-9.
- [31] 徐文城, 高艳滨, 王凯, 等. 中小跨径桥梁监测预警关键技术研究[J]. 公路, 2024, 69(05): 177-182.
- [32] Ni Y, Wang Y, Zhang C. Bayesian approach for condition assessment and damage alarm of bridge expansion joints using long-term structural health monitoring data[J]. Engineering Structures, 2020, 212:110520.
- [33] 王钰轲, 薛玉洁, 宋迎宾, 等. 强降雨致洪因素下渗流对高速公

路路基稳定性的影响[J]. 河南科学, 2024, 42(01): 137-146.

[34] 李亮, 刘兴旺, 赵炼恒, 等. 降雨入渗对路基稳定性影响因素分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2007(02): 19-23.

[35] 周克元, 周志刚. 降雨入渗条件下土坡的稳定性分析及防治措施[J]. 公路与汽运, 2007(06): 97-99.

[36] 李望涛. 降雨对路基工程施工质量的影响[J]. 交通标准化, 2008(07): 65-67.

[37] 李侠. 降雨渗流作用对路基含水量影响分析[J]. 公路与汽运, 2010(04): 114-116.

[38] Choi C, Young E. Observed Long-term Water Content Change in Concrete Track Roadbed by Rainfall[J]. Journal of Korean Geosynthetics Society, 2015, 14(4): 35-43.

[39] Fan S, Song Z, Zhang Y, et al. Case Study of the Effect of Rainfall Infiltration on a Tunnel Underlying the Roadbed Slope with Weak Inter-Layer[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(5): 1607-1619.

[40] Wang J, Fan, H, Jia Y, et al. Spatial variation characteristics and influencing factors of sediment connectivity in the black soil region of northeast China[J]. Geoderma, 2024, 446:116895.

[41] Jia C, Sun B, Yu, X, et al. Analysis of Runoff and Sediment Losses from a Sloped Roadbed under Variable Rainfall Intensities and Vegetation Conditions[J]. Sustainability, 2020, 12(5):2077.

- [42] Song X, Li H. Analysis of Rainfall Infiltration Stability of High Liquid Limit Red Clay Roadbed in Africa[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, 2022: 8222075.
- [43] 程东幸, 刘大安, 丁恩保, 等. 边坡稳定性研究及其发展思路[J]. 工程地质学报, 2004, 12: 252-256.
- [44] 黄昌乾, 丁恩保. 边坡工程常用稳定性分析方法[J]. 水电站设计, 1999, 15(1): 53-58.
- [45] 靳静, 于远亮. 高速公路路基边坡的稳定性分析研究[J]. 科技通报, 2016, 32(02): 193-196.
- [46] 王一兆, 隋耀华. 降雨入渗对路基边坡浅层稳定性的影响[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(04): 122-125.
- [47] 罗建林, 田鑫, 钟文, 等. 基于 Geo-Slope 的凝灰岩岩质路基边坡稳定性分析[J]. 化工矿物与加工, 2020, 49 (12): 9-13+18.
- [48] 农明科. 路基高路基边坡稳定性分析及防护措施研究[J]. 西部交通科技, 2021, (10): 8-11+33.
- [49] 娄峰, 何勇, 刘恒权, 等. 公路桥梁施工总体安全风险评估方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(11): 159-163.
- [50] 何忠明, 邓喜, 胡庆国. 基于模糊综合评判的路堑高边坡施工安全风险评估[J]. 公路与汽运, 2016, (04): 284-286.
- [51] 叶咸, 李亚军, 李果, 等. 智能算法在高速公路路堑高边坡工程施工安全总体风险评估中的应用研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, 13(01): 91-94.

- [52] 林俊勇, 汪益敏, 王兆阳. 高速公路路堑高边坡施工安全风险控制研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(03): 186-192.
- [53] Xu J, Wang Y, Yan C, et al. Lifecycle health monitoring and assessment system of soft soil subgrade for expressways in China[J]. Journal of cleaner production, 2019, 235: 138-145.
- [54] 吴忠广, 王海燕, 陶连金, 等. 高速公路高边坡施工安全总体风险评估方法[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(12): 124-129.
- [55] 南波. 基于K-S检验法的雪荷载统计分析[J]. 兰州理工大学学报, 2012, 38(01): 115-119.
- [56] 徐敬业, 徐林荣, 张亮亮. 高速公路低路堤路基服役状态风险评估[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(04): 36-43.
- [57] 刘敬东. 降雨诱发路基病害预报预警研究[J]. 公路, 2017, 62(12): 263-269.
- [58] 王福恒. 基于GIS的区域公路边坡灾害评价与预测研究[D]. 长安大学, 2011.
- [59] 扈海波, 王迎春, 熊亚军. 基于层次分析模型的北京雷电灾害风险评估[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(01): 104-109.
- [60] Deng Z, Xie K, Wang W, et al. A new method of rapid-intelligent assessment for the dynamic service performance in high-speed railway subgrade[J]. International Journal of Rail Transportation, 2024: 1-28.
- [61] 张勇慧, 李红旭, 盛谦, 等. 基于表面位移的公路滑坡监测预警研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3671-3677.

三、实施方案

1. 拟解决的关键问题（指对项目成果水平起决定作用的技术难点，或研究中能形成较强竞争力，具有自主知识产权的创新技术）

本项目拟解决的关键问题包括：

- (1) 极端降雨范围的区域识别；
- (2) 流域汇流与大尺度水流流速分析；
- (3) 降雨径流汇流过程中入渗深度及土壤含水量分析；
- (4) 桥梁防洪监测技术；
- (5) 防洪监测预警阈值设定技术；
- (6) 路基灾害靶区锁定技术；
- (7) 灾害靶区风险评定及监测预警。

2. 主要研究内容及实施方案（根据研究目的和考核目标合理地分解确定研究专题，突出重点，各专题研究内容要具体，避免交叉重复）

本项目主要研究内容包括三个专题，具体内容如下：

专题一、面向高速公路抗灾提升需求的极端降雨气象表征

(1) 极端降雨气象特征及高强降雨区域识别技术

采用降雨量、降雨频率、降雨历时、峰值时间等指标反映极端降雨气象特征；采用 Sen's 斜率和 Mann-Kendall 检验，分析极端降雨事件的时间变化规律、突变点和周期性等；基于 ANUSPLIN 软件及薄板样条函数，研究极端降雨的空间分布及变化趋势；基于 CMIP6 全球气候模拟数据，对 EC-Earth3 模式在 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5

三种情景下的降雨数据进行预测，形成未来极端降雨高发区域和高强度区域的识别技术。具体技术路线如图 6 所示。

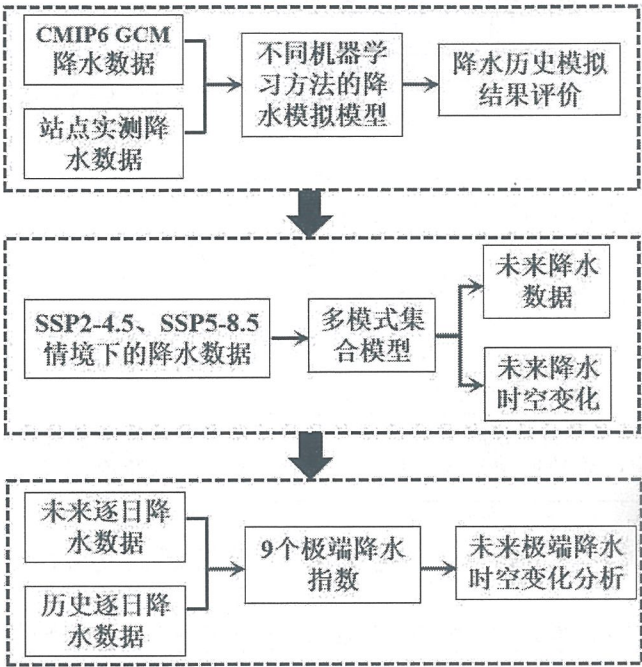


图 6 极端降雨气象特征与未来极端降雨的预测评估技术路线

(2) 极端降雨下流域汇流与大尺度水流流速分析技术

基于填洼 DEM 数据，计算水流方向与汇流累积量，并以 100 km^2 作为流域最小集水面积阈值，将研究区划分为大小不等的流域；建立栅格模式下汇流模型，在稳定水源供给条件下生成流域前期水环境，将小时降水数据叠加到前期水环境中进行 GPU 汇流演算，形成流域径流汇流和大尺度水流流速分析技术，并验证该分析技术的精度与适用性。具体技术路线如图 7 所示。

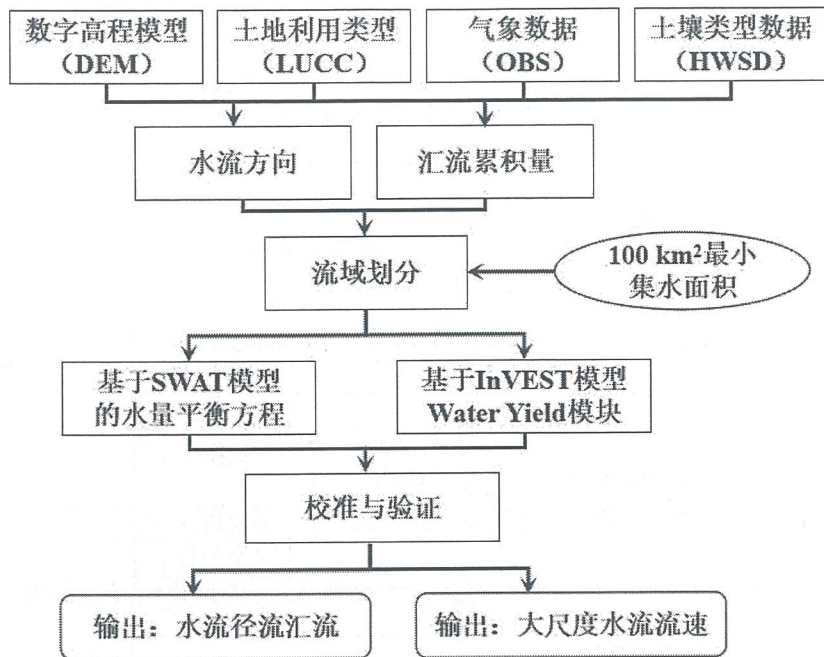


图 7 极端降雨下流域汇流与大尺度水流流速分析技术路线

(3) 极端降雨下的入渗深度与土壤含水量快速预测方法

选择影响降雨入渗深度和土壤含水量的主要因子，包括降雨总量、降雨历史、降雨强度、植被覆盖度、坡度、土壤类型、传导率、入渗率等，基于主成分分析将具有信息交叉的变量进行筛选，将主成分变量作为 BP 神经网络的特征输入值，开展一维降雨入渗试验，建立入渗深度和土壤含水量快速预测方法；引入极端降雨事件前后观测试验，获取不同土层深度土壤含水量的变化情况，利用 Kostiakov 模型，明确实测数据与模拟数据的函数关系，借此进一步完善所构建的快速预测方法。具体技术路线如图 8 所示。

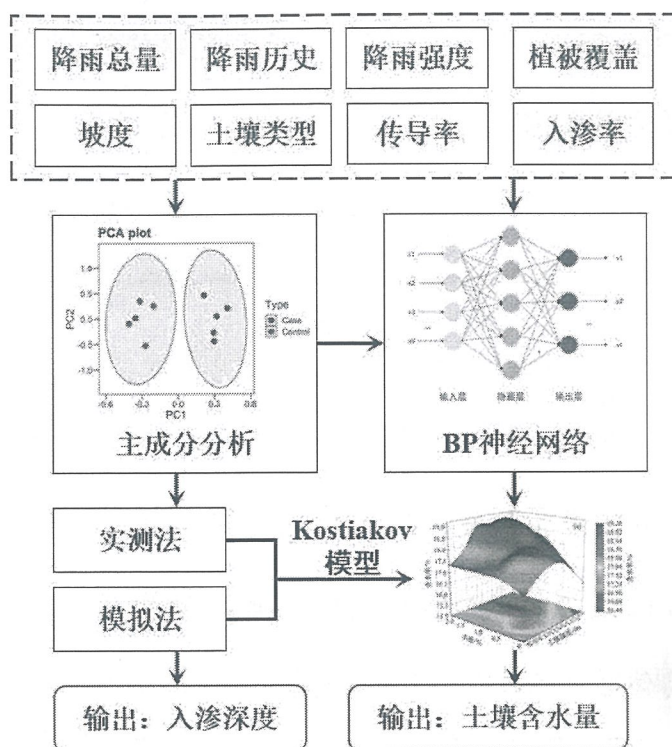


图 8 极端降雨入渗深度与土壤含水量预测技术路线

专题二、桥梁轻量化易扩展防洪监测及分级预警技术

(1) 极端降雨下河床水流汇聚及水流力快速分析方法

调研陕南秦巴山区、陕北黄土高原河道形态，提取典型桥位河床特征，明确深泓线洪水比降取值范围、洪水比降等参数。根据极端降雨条件下流域汇流、土壤入渗等气象学表征成果，优化典型桥位条件下的降雨-径流、汇流模型，实现极端降雨条件下河床内短时极值流量预测。

以降雨强度、河床几何特征为外部变量，借助谢才-曼宁公式实现极端降雨条件下河床流量所对应的平均流速分析，并细化沿水深方向的垂流速分布。考虑桥墩构形、漂流物影响等，研究极端水流力分析方法，极端暴雨条件下的桥墩水流力主要考虑河床水流对桥墩的侧向作用力，包括静水压力、平均动压力、脉动压力等，静水压力的

计算按照阿基米德定律计算，并采用帕斯卡定律修正，平均动压力、脉动压力的计算方法拟采用：

$$\overline{p}_{\text{动}} = C_p r \frac{v^2}{2} \quad (1)$$

$$p' = dr \frac{v^2}{2} \quad (2)$$

其中， $\overline{p}_{\text{动}}$ 为平均动压力， C_p 为压力系数， r 为水的密度， v 为水的平均流速， d 为脉动系数。根据以上分析，进一步考虑墩身阻水面积及可能出现的大型漂流物，形成极端降雨条件下墩身水流力的快速分析方法。具体技术路线如图 9 所示。

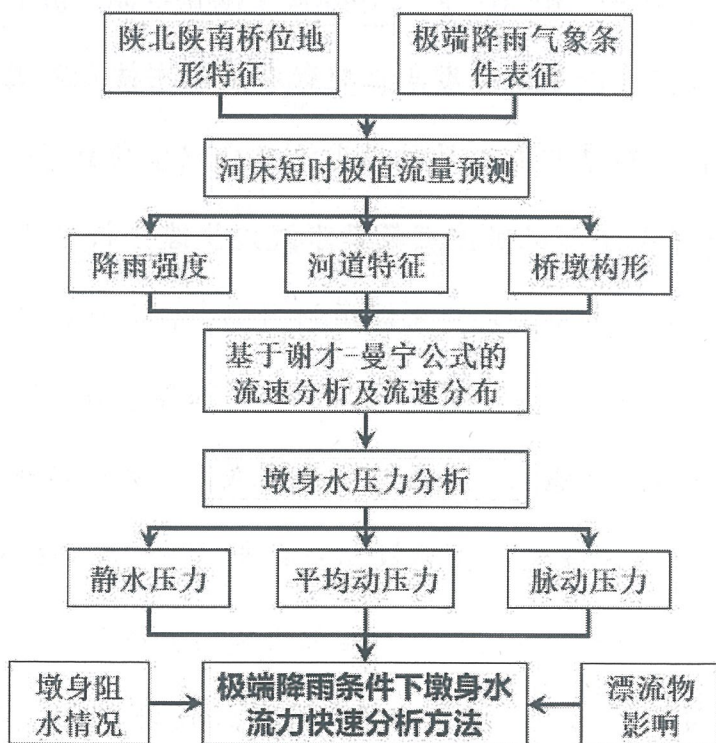


图 9 极端降雨下河床水流汇聚及水流力快速分析技术路线

(2) 极端水流力作用下桥梁下部结构响应规律

极端降雨条件下对桥墩物理力学性能的影响主要考虑两项：1) 因墩身浸水产生的附加质量效应，对桥墩自振频率产生影响，当自振

频率明显下降时, 结构可能临近破坏状态; 2) 因较大的侧向力作用, 桥墩在下部基础及上部结构的约束下, 产生较为明显的墩身倾角, 可能对应于墩身强度破坏或体系失稳破坏。

首先, 采用 FSI 开展河床水流与墩身的流固耦合模拟, 研究附加质量效应对墩身自振频率的影响, 以垂直流速分布、墩身浸水深度为变量, 研究墩身自振频率随两大变量的影响。其次, 采用 ANSYS Fluent 开展圆柱体或钝体截面绕流模拟, 以获取墩身压力分布、阻力时程, 其中, 采用雷诺时均 N-S 方程为流体控制方程, 湍流模型选择 Transition SST, 在获取墩身压力分布、阻力时程的基础上, 在二维平面内优化极端水流力分析结果, 并根据墩身受力特点, 提取用于有限元模拟的典型受力模式。最后, 采用 ABAQUS 开展墩身受力精细化有限元模拟, 其中下部桩基近似处理为固定约束, 上部主梁的约束作用以水平摩擦力和竖向压力模拟, 研究在不同河道水文条件下, 墩身倾角的变化。

在实现上述分析的基础上, 根据桥梁下部结构力学及几何特征, 明确临界静动力状态, 即墩身失效对应的临界振动频率、墩身破坏或失稳时的临界倾角, 由临界振动频率、临界倾角, 反演所对应的极端水文参数。具体技术路线如图 10。

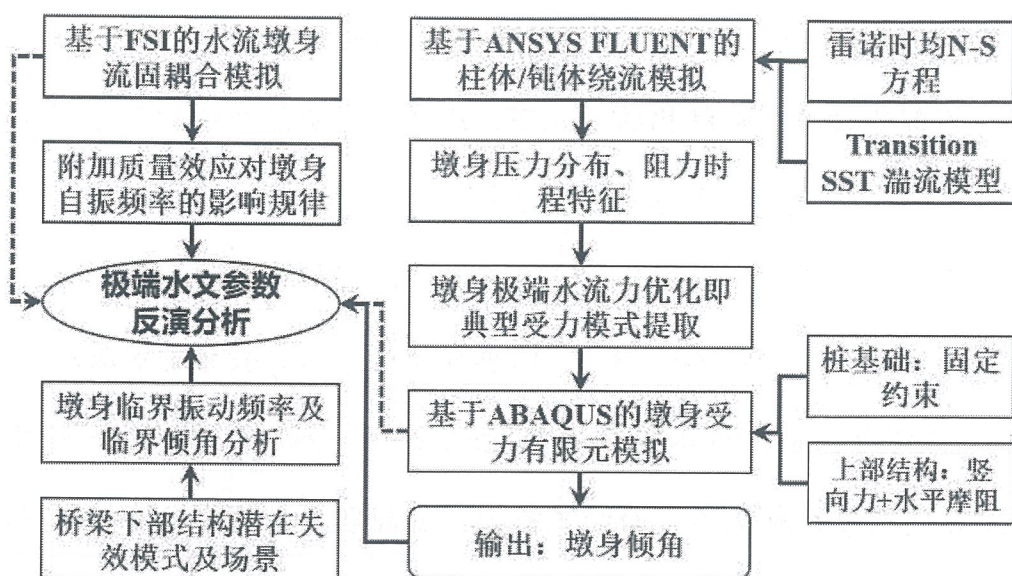


图 10 桥墩响应规律及极端水文参数反演技术路线

(3) 桥梁轻量化易扩展防洪监测系统设计及分级预警应用

针对极端降雨条件下桥梁下部结构抗灾能力提升需求，设计面向极端降雨场景的桥梁防洪监测系统，系统设计原则包括：1) 从成本控制出发的轻量化原则，尽可能降低硬件设备投入；2) 考虑到系统后续升级加持的易扩展原则，系统架构设计时预留后续软硬件扩展接口。

在前端感知层，所采用的硬件设备主要包括：用于水文参数监测的流速流量监测仪，墩身倾角及加速度传感器，用于数据传输与通讯的低功耗通讯网关。在完成水文及桥梁下部结构数据采集、传输、接收的基础上，开展基于水文参数、桥墩相应参数的桥梁防洪安全分级预警。预警信息包括红色、黄色、蓝色三级预警，基于反演得到的极端水文参数、墩身临界倾角、墩身临界振动频率等，科学设定三级预警阈值，预警信息包括水文参数预警、桥墩响应预警两大类，两类预警信息串联设置，任何一类预警信息的出现均出发后续联动机制。

在本项目执行过程中，选择延延高速、西商高速的典型桥位作为依托工程，在依托工程中安装轻量化防洪监测系统，实现研究成果落地应用，并反哺优化研究成果。具体技术路线如图 11 所示。

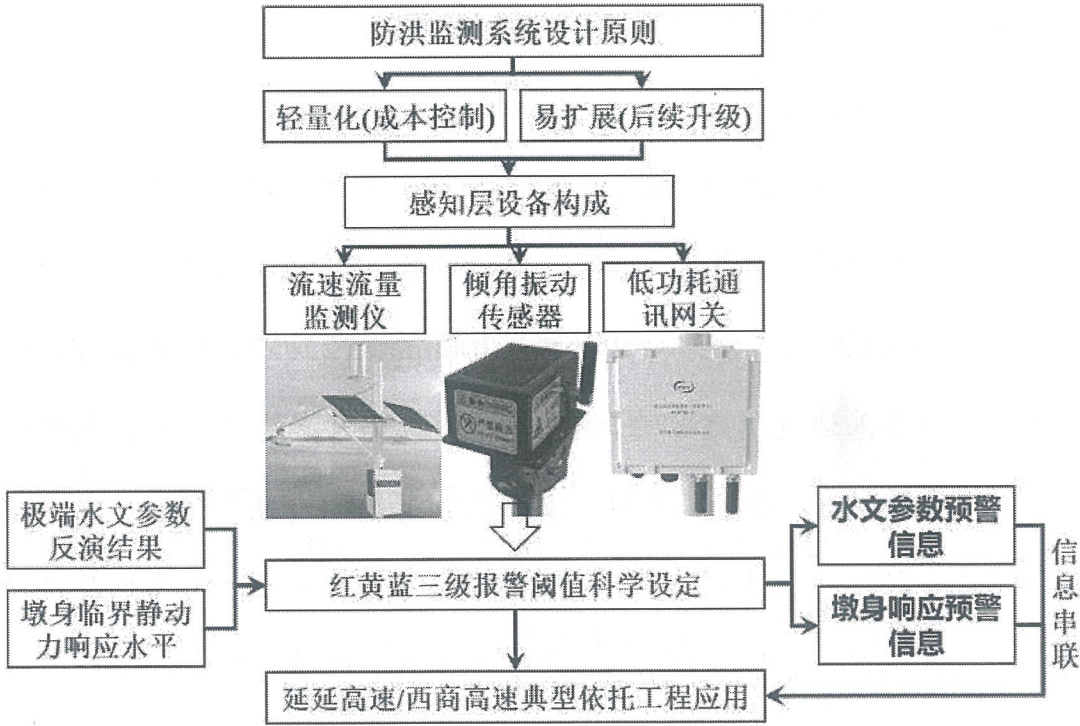


图 11 桥梁防洪监测系统设计及分级预警实施路线

专题三、极端降雨下路基灾害靶区锁定及监测预警技术

(1) 极端降雨条件下路基边坡稳定性及致灾路径

陕西地域狭长，根据地理区域不同，分别调研陕北、关中、陕南典型高速公路，确定用于陕西省高速公路的路基土类型，包括黄土、黏土、膨胀土、土石混合土等，采用室内试验确定路基土含水率等物理性质。利用三轴压缩试验评价路基土的强度特性，获得内摩擦角（ ϕ ）、黏聚力（ c ）等力学参数，研究含水率变化对路基土强度特性的影响规律，建立陕西省典型路基土的强度模型。

$$\tau = f(c(w), \phi(w))$$

考虑不同历时的强降雨模式（短时强降雨、长历时降雨、间歇性降雨），采用非饱和渗流分析方法，以及利用 Geo-studio 建立路基边坡模型，分析降雨全过程（降雨期、停雨期）的入渗过程和路基内部渗流场的变化，确定入渗深度及路基土含水率。

进一步，采用 Geo-studio 建立不同的路基边坡模型，研究路基边坡在不同降雨工况下的稳定性，分析不同路基高度、边坡类型、路基土类型、降雨时间（2h、6h、12h、18h、24h、36h、48h、60h）、降雨强度（50 mm/d、100mm/d、150mm/d、200mm/d、250mm/d、300m/d）、水位高度对路基边坡稳定性的影响规律，建立路基边坡稳定系数与降雨时间、降雨强度、水位高度的相关关系。开展室内模型试验，结合室内试验和数值模拟结果，明确不同工况下，降雨特征、路基性质及参数与路基变形、滑移等灾害模式的关联机制，明确极端降雨下路基的致灾路径。具体技术路线如图 12 所示。

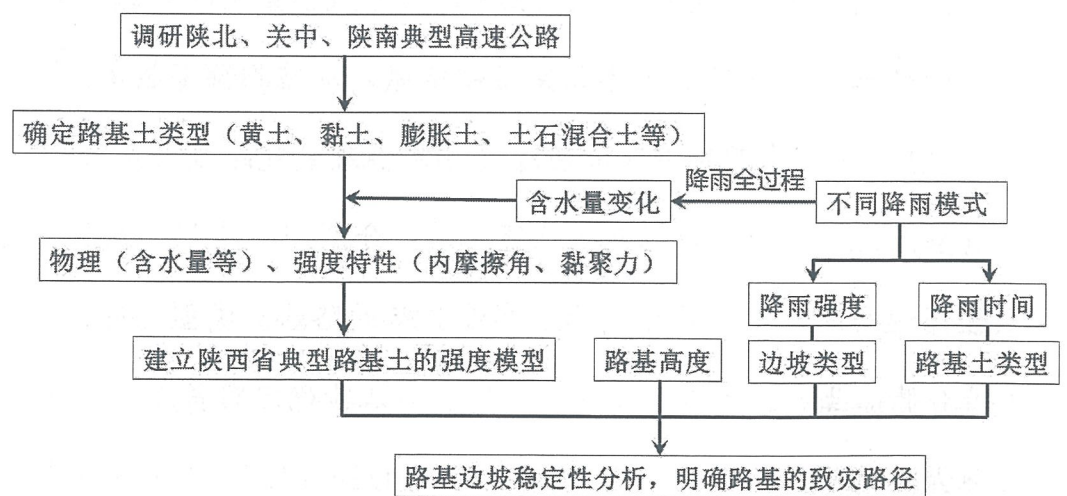


图 12 路基边坡稳定性及致灾路径实施路线

(2) 考虑线路降雨特征的路基灾害靶区锁定技术

以不同地区典型公路路基形式为研究对象，基于线形、地形地质

设计资料，以及专题一的研究成果，确定路基沿线汇水量、汇水面积、水位高度的变化，建立线路级公路降雨特征表征技术。

考虑不同的降雨工况，以及不同地区典型的边坡形式、路基土类型、路基高度等因素，以线路级降雨特征为边界条件，根据（1）中的路基边坡稳定性分析技术，以汇水-渗流-含水量-强度参数-边坡稳定性为研究主线，分析路基形式及设计参数、降雨特征对边坡稳定系数的影响，获得不同极端降雨条件下线路级路基边坡稳定系数的动态模型，进而锁定线路级的路基灾害靶区，形成不同降雨工况下的线路级灾害靶区锁定技术。具体技术路线如图 13 所示。

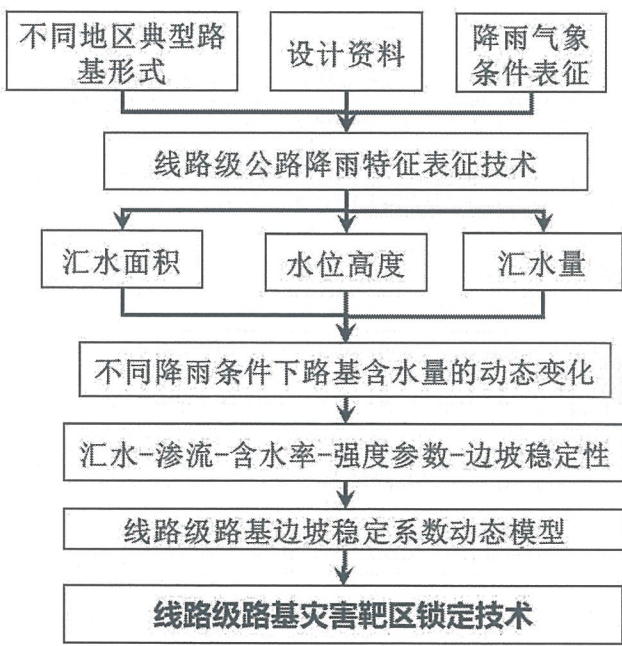


图 13 路基灾害靶区锁定技术实施路线

(3) 极端降雨下路基灾害靶区风险评定及监测预警技术

基于路基灾害靶区锁定技术，以危险性、易损性和暴露度为核心指标，构建以“危险性×易损性×暴露度”为核心的风险矩阵，对锁定的靶区进行风险等级划分（如红、橙、黄、蓝四级），结合 GIS 地

不同路段的风险等级，确定不同降雨特征下高风险灾害靶区，提升监测效率，降低监测成本。

在此基础上，利用测斜仪、GNSS 基准站、张力仪等设备，对灾害靶区的侧向位移量、沉降量、含水率等核心指标进行监测，建立监测指标体系，并依据靶区风险等级、地质条件及路基结构特点，优化监测断面和测点布置方案。比如：高风险靶区加密布设，重点监测潜在滑动面和关键受力部位。

基于历史监测数据、数值模拟反演、理论计算及规范要求，结合专家经验，分预警等级（如关注、警戒、警报、紧急）确定各关键指标（如位移速率、累计位移、含水率）的动态预警阈值，并基于深度学习的方法，对阈值进行优化。最后，选择 1-2 条典型公路路基，利用降雨特征表征、灾害靶区锁定技术、灾害靶区评估技术，确定监测断面，并开展监测预警技术的示范应用。具体技术路线如图 14 所示。

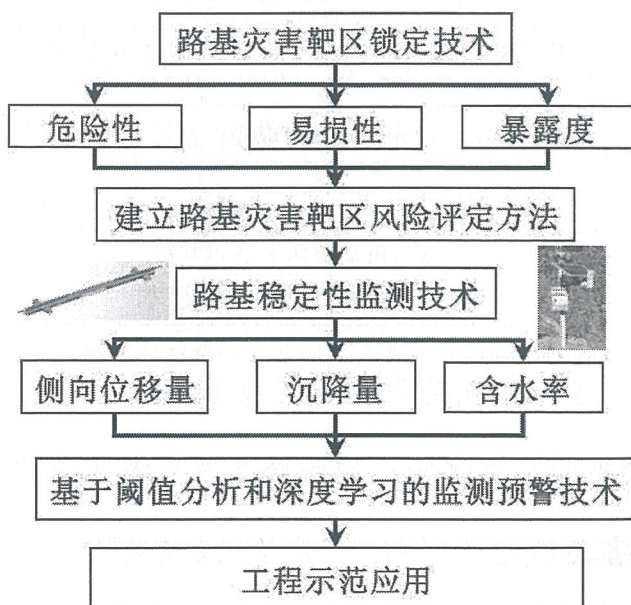


图 14 路基灾害靶区风险评定及监测预警技术实施路线

3. 技术路线（包括研究技术方案和 workflows 两部分。研究技术方案：应清楚表达拟运用的理论和方法，如调查研究，要表述调查的对象、范围、数量和调查材料（数据），取得的方法及手段；室内外试验，要拟定出试验的种类、规模、数量及相应的方案；理论研究与分析，要提出分析依据的理论和拟采用的分析方法，明确有否创新或改进的内容，要做到思路清晰，技术可行，能全面包括研究全过程的各个环节；研究 workflows 反映各项研究工作之间的顺序和相互关系，可用树状框图表达）

研究技术方案

本项目研究技术路线如图 15 所示。

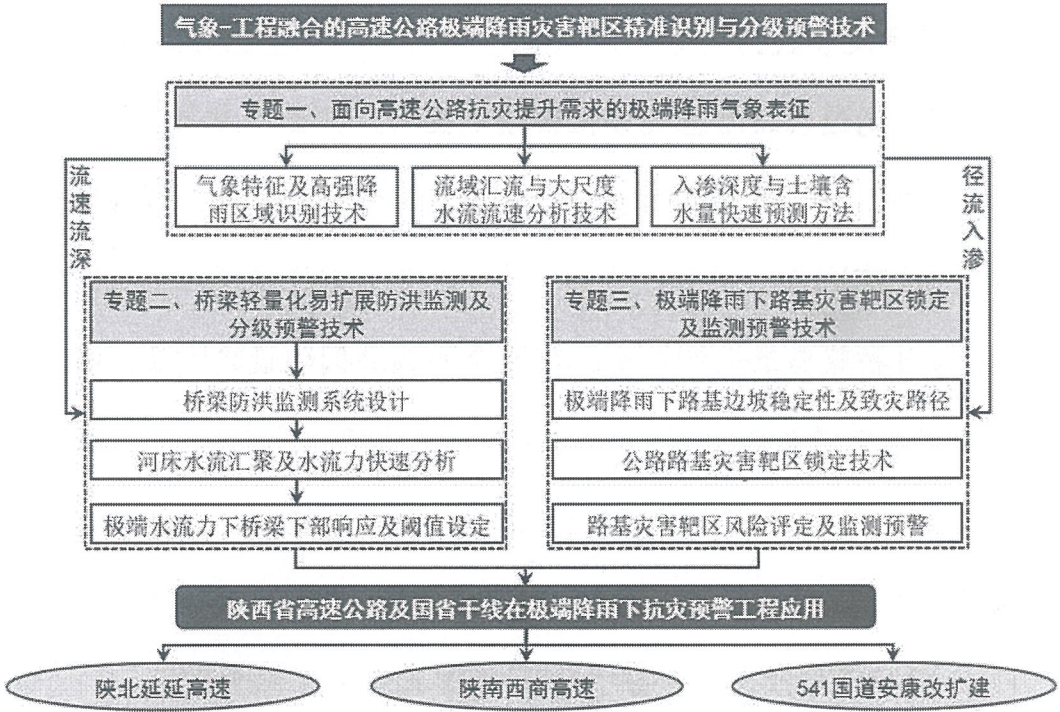


图 15 研究总体技术路线

工作流程

本项目研究起止日期为 2025 年 12 月~2028 年 12 月，总计完成

期限为 3 年，具体工作流程如下：

- (1) 文献调研，进一步完善研究技术路线及研究大纲；
 - (2) 建立陕西省极端降雨指标数据库，识别历史及未来时期极端降雨的高发区域；
 - (3) 对接气象表征研究成果，研究极端降雨条件下的水流汇聚及水流力快速分析方法；
 - (4) 研究极端降雨下路基边坡稳定性及致灾路径。
 - (5) 划分陕西省降雨汇流单元，模拟并验证极端降雨条件的水流深度与流速；
 - (6) 研究极端水流力下桥梁下部结构响应规律，反演临近失效状态下的极端水文参数；
 - (7) 研究高速公路路基灾害靶区锁定技术。
 - (8) 筛选影响降雨入渗深度和土壤含水量的关键变量，构建降雨入渗的快速预测方法；
 - (9) 设计桥梁防洪监测系统，研究分级预警阈值设定方法，在依托工程中开展示范应用；
 - (10) 研究路基灾害靶区风险评定及监测预警技术，在依托工程中开展示范应用；
 - (11) 撰写研究报告，筹备项目验收。
4. 后续技术改造或基本建设计划的衔接（项目研究的成果提出的技术或理论可供实际对象应用的推测，在一定程度上反映成果的成熟性和市场需求情况）

近年来，高速公路基础设施在极端降雨天气下的灾害事件频发，造成了大量的经济损失，并已成为社会公众关注的焦点问题之一。本项目整合气象学价值数据、工程结构灾害防控技术，拟在提升极端降雨下高速公路抗灾能力的同时，通过有效识别灾害靶区，降低运营成本投入，能够有效防止公路灾害的发生，避免人员伤亡，具有显著的经济和社会效益。

5. 有关技术经济指标（叙述项目取得的成果中研究开发的技术、产品具体的技术经济指标（如适用条件、单位耗材、单位造价等）以及性能指标（如技术参数、精度等）。定性描述与定量相结合，以定量为主）

主要技术指标：

- (1) 考虑陕西省气象区划的极端降雨区域识别技术；
- (2) 极端降雨下的流域汇流与大尺度水流流速分析技术；
- (3) 极端降雨下的入渗深度与土壤含水量快速预测方法；
- (4) 针对极端降雨的桥梁轻量化易扩展防洪监测技术；
- (5) 基于临界状态反演的极端流深流速分析及预警阈值设定方法；
- (6) 极端降雨下线路级路基灾害靶区分析锁定技术；
- (7) 极端降雨下路级灾害靶区风险评定及监测预警技术。

主要经济指标：

研究成果的推广应用可直接支撑极端降雨天气下高速公路危险路段及桥梁的无人化值守实现及异常状态信息自动化捕获，相比传统

的监测预警技术，本项目研究成果能够达成对象重点化、设备轻量化的目标，单体桥梁的监测预警可节省成本约 20%，单个线路可节省监测预警成本约 30%。

四、项目承担单位及参加单位概况

1. 单位概况

西安建筑科技大学是国务院首批批准有权授予博士、硕士和学士学位的单位。拥有原国家重点学科 3 个（结构工程、环境工程、建筑设计及其理论），连续两轮入选陕西省国家"双一流"培育高校，建筑学入选陕西省国家"双一流"培育学科。学校现有博士点 13 个，其中，一级学科博士学位授权点 10 个、博士专业学位授权点 3 个，博士后流动站 8 个；硕士点 46 个，其中，一级学科硕士学位授权点 27 个，硕士专业学位授权点 19 个。学校拥有绿色建筑全国重点实验室 1 个，国家国际科技合作基地 1 个、国家级智库 1 个、国家级成果研究推广中心 1 个、国家地方联合工程研究中心 2 个、省部共建协同创新中心 1 个、国家技术转移示范机构 1 个、科学家精神教育基地 2 个、国家级实验教学示范中心/虚拟仿真实验教学中心 5 个，甲级资质设计研究院 3 个。

2. 技术力量及人员构成

姓 名	单 位	性别	年龄	技术 职称	专业	在项目中担任 具体工作
雷斌	西安建筑科技大学	男	1978-11-19	正高级	道路工程 (路线)	统筹协调，研究 内容制定及推 进

李盟	陕西交控延延分公司	男	1973-08-20	副高级	道路工程 (路线)	专题二、专题三 应用研究
张建光	陕西交控西商分公司	男	1972-08-02	副高级	桥梁工程	专题二、专题三 应用研究
李文斌	陕西省安康公路 管理局	男	1976-09-06	正高级	道路与铁 道工程	专题三研究
王晓威	西安建筑科技大 学	男	1990-03-25	副高级	道路工程 (路基)	专题三研究
康志荣	陕西交控延延分公司	男	1983-09-26	副高级	桥梁工程	专题二应用研 究
范克虎	陕西交控西商分公司	男	1970-12-25	副高级	道路工程 (路基)	专题三应用研 究
朱林超	陕西省安康公路 管理局	男	1982-10-15	副高级	交通工程	专题二研究
袁阳光	西安建筑科技大 学	男	1991-06-01	副高级	桥梁工程	专题二研究
申连平	陕西交控延延分公司	男	1989-01-07	副高级	桥梁工程	专题二应用研 究
高勇卿	陕西交控西商分公司	男	1986-01-05	副高级	道路工程 (路基)	专题三应用研 究
孟德康	陕西省安康公路 管理局	男	1996-08-11	中级	土木工程	专题三应用研 究
梁晓燕	西安建筑科技大 学	女	1989-05-14	中级	气象学	专题一研究
李强生	陕西交控西商分公司	男	1983-10-01	副高级	桥梁工程	专题二应用研 究

程占阳	陕西交控西商分公司	男	1990-01-05	中级	桥梁工程	专题二应用研究
张欣蓉	西安建筑科技大学	女	1995-06-25	中级	气象学	专题一研究

3. 各自承担的主要工作

西安建筑科技大学及其研发人员主要负责本项目各个研究内容的研发工作，包括考虑气象区划的极端降雨区域识别、大尺度水流流速分析、土壤含水量快速预测、桥梁防洪监测预警、路基灾害靶区分析锁定及监测预警等。陕西交控延延分公司、陕西交控西商分公司、安康公路管理局及相关参与人员主要负责本项目研究成果的应用、依托工程案例的建设等工作。

4. 项目主要负责人情况

雷斌，西安建筑科技大学城市发展与现代交通学院副院长，教授，博导，主持纵横向科研项目 10 余项，发表高水平论文 10 余篇，参编地方标准 3 项。主要从事高速公路路线、基础设施运维安全保障、韧性提升等相关研究工作。

五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件

1. 依托工程（工作）概况

根据本项研究目标、具体研究内容以及成果落地应用需求，选择三个依托工程：

1) 延延高速

位于陕北黄土沟壑地区，双向四车道高速公路，全场 115.5km，2015 年 10 月建成通车，设计时速为 80km/h 和 100km/h 两种。路基

宽度 25.5m，沿线桥梁 378 座，其中涉水桥梁 65 座，近年来汛期河道水位、河道过水状态正常，未出现百年一遇洪水。沿线半填半挖段落 131 处，高边坡段落 112 处，临崖临水段落 15 处，软基段落 15 处。

2) 西商高速

全长 119.0 公里，2012 年 8 月建成通车，沿线地形包括秦岭沟谷段、黄土台塬地区等，地质条件复杂。沿线桥梁 428 座，其中涉水桥梁 97 座，涉水桥梁日常河流流速较慢、水量较小，汛期雨季河水流速较大。沿线半填半挖 20 处、高边坡 22 处、填路基 43 处。

3) 541 国道岚皋花里至八仙公路改扩建工程

路线全长 37.329 公里，全线桥梁工程共包含 28 座桥梁，其中新建桥梁 18 座，旧桥加固 10 座，路基工程包括挖方约 118.4 万立方米，填方约 23.4 万立方米，项目总预算投资 5.7 亿元，计划 2027 年建成通车。

上述依托工程的建设、运营管理单位，同时是本项目的参与单位，能够为本项目研究内容的开展、成果落地应用提供人员、设备、场地等支撑。具体包括研究成果应用过程中的现场勘察、目标结构物优选、设备安装调试、应用效果跟踪等。

本项目在依托工程所依托的实际工作为：极端降雨天气下桥梁、路基的抗灾能力提升及风险预警工作。

2. 投资来源

本项目的投资来源包括两部分：(1) 厅拨经费，48.50 万元，用于支撑本项目的基础研究任务；(2) 参与单位工程配套经费，主要来源

是年度养护经费分年度划拨，国省干线改造项目的科研经费配套，用于支撑本项目研究成果在依托工程项目的落地应用。

3. 工程进度与项目科研进度的配合

(1) 与延延高速、西商高速沿线桥梁运营养护的配合方面，通过与相关参与人员的沟通，将本项目研究计划与依托工程项目的年度养护计划相配合；

(2) 与安康 541 国道项目进展的配合方面，在本项目大纲评审完成后，积极与该国道改造工程项目开展科研对接，为本项目的顺利实施打好基础。

4. 组织管理形式

(1) 在项目开始之处，应成立三个不同的研究小组，包括气象组、桥梁结构组、路基组，明确三个研究小组的任务分工，建立任务协作机制；

(2) 在研究方案细化实施阶段，应进一步优化任务实施次序，避免不同任务之间互为前置的情况；

(3) 制定项目实施的里程碑节点，并根据情况建立进度超前、进度滞后的奖惩措施；

(4) 在依托工程管理部门，通过团队内部协商，建立成果落地应用的保障机制及应用效果追踪观测机制，提前打通问题反馈渠道。

六、项目经费估算及资金筹措情况

对经费估算及资金筹措情况说明，提供所需经费测算说明。

经费投入（万元）		经费支出（万元）			
科 目	估算数	科 目	总经费	厅补经费	其他经费
省交通运输厅补助	48.5	合 计	97.0	48.5	
工程配套研究经费	48.5	1.设备费	20.0	5.0	
单位自筹		（1）购置设备费	15.0	0.0	
其他经费		（2）设备改造与租赁费	0.0	0.0	
		2.业务费	46.0	28.0	
		（1）材料费	12.0	8.0	
		（2）测试化验实验加工费	14.0	7.0	
		（3）燃料动力费	3.0	2.0	
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	8.0	5.0	
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	9.0	6.0	
		（6）其他费用	0.0	0.0	
		3.劳务费	14.0	7.0	
		（1）专家咨询费	4.0	2.0	
		（2）聘用人员劳务费	10.0	5.0	
		（3）其他劳务费	0.0	0.0	
		（二）间接费用	17.0	8.5	
		4.管理费	8.0	4.0	
		5.绩效支出	9.0	4.5	

七、项目绩效指标

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	知识产权	1、专利授权数（项）	3
		（1）授权发明专利	3
		（2）实用新型	0
		（3）外观设计	0
		2、软件著作权授权数（项）	6
		3、发表论文（篇）	3
		（1）其中 SCI 索引收录数	0
		（2）其中 EI 索引收录数	0
		（3）其它	3
		4、著作（部）	0
		5、制订标准数（项）	1
		（1）国际标准	0
		（2）国家标准	0
		（3）行业标准	0
		（4）地方标准	0
		（5）企业标准	0
		（6）科技报告	1
	其他成果	1、填补技术空白数	2
		（1）国际	0
		（2）国家	0
		（3）省级	2
		2、获奖项数	0
		（1）国家奖项	0
		（2）部、省奖项	0
		（3）地市级奖项	0
		3、其他科技成果产出	2
		（1）新工艺（或新方法模式）	0
		（2）新产品（含农业新品种）	0
		（3）新材料	0
		（4）新装备（装置）	0
		（5）平台/基地/示范点	2
		（6）中试线	0
		（7）生产线	0

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	其他成果	4、研究开发情况	
		(1) 小试	否
		(2) 中试（样品样机）	否
		(3) 小批量	否
		(4) 规模化生产	否
	人才引进	1、引进高层次人才	0
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	0
		2、培养高层次人才	3
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	3
		3、培训从事技术创新服务人员（人次）	0
		4、是否设立科研助理岗位	否
	产业化情况	1、开放共享仪器设备数（台/套/只等）	0
		2、科研仪器设备利用率（%）	0
		3、孵化科技型企业（个）	0
		4、转化科技成果（个）	0
效果类指标	经济效益	1、新增产值（万元）	0
		2、新增销售（万元）	0
		3、新增出口创汇（万美元）	0
		4、新增利润（万元）	0
	社会效益	1、新增税收（万元）	0
		2、新增就业人数	0
		3、就业培训（人次）	0
		4、带动农民增收（万元）	0
		5、培训和指导科技服务（人次）	0
		6、新增产业带动情况	0
		7、技术集成示范（项）	0
		8、建立示范基地（亩数）	0
		9、节约资源能源	0
		10、环保效益	0
其他需要说明的情况			

八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益

1.项目预期目标（项目的考核目标）

(1) 针对公路设施抗灾能力提升分析需求，实现陕西地区极端降雨天气的气象指标量化表征；

(2) 实现极端降雨条件下的桥梁防洪监测及分级预警；

(3) 实现极端降雨条件下的线路高风险靶区快速锁定及监测预警。

2.提交的研究成果及其形式

(1) 研究报告：研究总报告 1 份、专题报告 3 份；

(2) 示范应用工程案例 2 个。

(3) 知识产权：申请并受理软件著作权 6 项，申请并受理发明专利 3 项，知识产权归甲方所有；

(4) 在中文核心及以上期刊发表论文，3 篇及以上。

3.经济、社会、环境效益分析

近年来，高速公路基础设施在极端降雨天气下的灾害事件频发，造成了大量的经济损失，并已成为社会公众关注的焦点问题之一。本项目整合气象学价值数据、工程结构灾害防控技术，拟在提升极端降雨下高速公路抗灾能力的同时，通过有效识别灾害靶区，降低运营成本投入，能够有效防止公路灾害的发生，避免人员伤亡，具有显著的经济和社会效益。

相比传统的监测预警技术，本项目研究成果能够达成对象重点化、设备轻量化的目标，单体桥梁的监测预警可节省成本约 20%，单

个线路可节省监测预警成本约 30%。

九、其它需要说明的问题

无。

十、申请单位意见



单位负责人：（签字）



年 月 日



办证处
收费成本约 20%

气象-工程融合的高速公路极端降雨灾害 靶区精准识别与分级预警技术

大纲评审意见

2025年12月5日，陕西省交通运输厅在西安主持召开“气象-工程融合的高速公路极端降雨灾害靶区精准识别与分级预警技术”（项目编号：25-05K）项目大纲评审会。与会专家（名单附后）听取了项目组的汇报，审阅了项目研究大纲，经质询讨论，形成如下评审意见：

一、项目针对极端降雨条件下公路抗灾能力提升的刚性需求，开展极端降雨气象表征、桥梁轻量化易扩展防洪监测及分级预警技术、路基灾害靶区锁定及监测预警技术研究，对提升公路灾害监测预警水平，提高公路抗灾能力，具有现实意义。

二、研究内容全面，研究目标明确，技术路线可行。

三、研究人员组成基本合理，前期研究基础扎实，试验设备齐全，依托工程落实，经费预算符合要求，具备开展研究工作的条件。

四、预期成果覆盖研究目标。

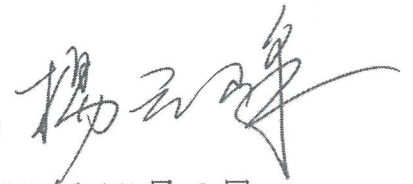
与会专家一致同意该项目研究大纲通过评审。

建议：1.进一步优化研究人员构成。

2.桥梁防洪监测增加漂流物的影响因素。

3.进一步明确考核指标。

主任委员：



2025年12月5日

专家审查意见表

项目名称	气象-工程融合的高速公路极端降雨灾害靶区精准识别与分级预警技术				
专家姓名	杨云峰	职务/职称	教授	专业	交通规划
专家单位	陕西交通职业技术学院		联系电话	17795956688	

极端降雨径流造成高速公路受损严重。该课题拟在研究极端降雨表征基础上，融合气象学与高速公路抗灾分析之需求，聚焦桥深下部结构物防洪问题，研究轻量化防洪监测技术并建立分级预警技术方法；同时针对高速公路路基易受雨致灾特点，研究灾害靶区精准识别方法，提出高效监测预警技术，对提高公路灾害监测预警水平，提升公路抗灾能力具有重要现实意义。拟定的研究大纲合理可行，同意通过审查。

建议：1. 优化研究人员构成，适当增加气象部门专家；2. 识别灾害靶区的精度应科学界定，既要经济合理，又能真正用于支撑防灾要求；3. 合理利用气象历史数据，科学确定有关指标阈值，为预警分级及响应分级确定提供有效依据。

评审专家(签字):

杨云峰

2025 年 12 月 5 日

(本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸)

专家审查意见表

项目名称	气象-工程融合的高速公路极端降雨灾害靶区精准识别与分级预警技术				
专家姓名	石伟伟	职务/职称	正高工	专业	桥梁工程
专家单位	西安公路研究院有限公司			联系电话	1371912660

评审意见

该项目针对极端降水条件下对路基及结构物的影响进行研究,已积累一定的科研基础,技术路线合理。

1. 临界振动频率阈值的设定;
2. 极端降雨下路基灾变靶区识别界定及监测预警技术研究内容中“危险性、易损性和暴露度”确定方法;
3. 流域汇流与地形、地质密切相关;
4. 钻洞查勘、定站、定库等代表地域水文特点。

评审专家(签字): 石伟伟

2025年11月5日

(本意见入档,应填写工整,纸面不敷,可另加纸)

专家审查意见表

项目名称	气象-工程融合的高速公路极端降雨灾害靶区精准识别与分级预警技术				
专家姓名	罗平平	职务/职称	教授	专业	气象学
专家单位	长安大学			联系电话	13787181281

评审意见

工项目的整体目标和立项背景具有非常重要的科学和社会的意义，项目的思路和技术路线清晰合理可行，研究和监测方案基本可行，建议可以支持立项。

建议可以针对以下几点进一步细化：

1. 建议针对桥梁的水文模型可以考虑结合河道的水动力学分析和模型特别是河流漂浮物的情况要结合分析。
2. 建议可以利用各级气象监测的数据和自身的监测设备进行结合分析，确保气象与道路的监测与预警的精准耦合。
3. 结合项目的实际情况来细化研究内容和考核目标。

评审专家（签字）：罗平平

2025 年 12 月 5 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	气象-工程融合的高速公路极端降雨灾害靶区精准识别与分级预警技术				
专家姓名	王松根	职务/职称	研究员	专业	公路工程
专家单位	山东省交通厅			联系电话	13488700091

评审意见

本项目针对极端降雨天气下高速公路抗灾能力提升的刚性需求，开展“气象-工程融合的高速公路极端降雨灾害靶区精准识别与分级预警技术”项目研究，很有必要。

提交的研究报告内容全面，技术路线可行。

同意该研究报告通过评审。

建议：

1. 进一步梳理研究内容与课题之间的关联度。
2. 桥梁防洪监测及预警应增加漂流物及对桥梁防洪影响的内容。
3. 进一步完善主要经济指标和项目实施考核指标。

评审专家（签字）：

王松根

2015年12月5日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	气象-工程融合的高速公路极端降雨灾害靶区精准识别与分级预警技术				
专家姓名	钱越	职务/职称	副主任/正高	专业	智能交通
专家单位	部公路院智能中心			联系电话	13681372282

评审意见

总体意见:

1. 课题特与气象、工程相结合研究,当前有必要有新意。
2. 研究从基础设施延伸至上游气象、水文等影响因素,值得探讨。
3. 承担单位有气象组、桥梁组、路政组,团队组成合理。
4. 技术路线清晰,合理。

建议:

1. 利用全球气候模拟数据,其颗粒度有多大,最小尺度与路工程相匹配考虑。
2. 靶区之损害研究与破坏域值之影响研究都很重要,可分段实施。
3. 成果“3项授权发明专利”从时间上考虑其可行性。

评审专家(签字): 钱越

2025 年 12 月 5 日

(本意见入档,应填写工整,纸面不敷,可另加纸)

专家意见处理表

项目名称：气象-工程融合的高速公路极端降雨灾害靶区精准识别与分级预警技术 （项目编号： 25-05K）

序号	姓名	建议内容	处理意见 (逐条回应, 详细说明修改情况)
1	杨云峰	<div>1. 识别灾害靶区的精度应科学界定，既要经济合理，又能真正用于支撑放在要求。</div> <div>2. 优化研究人员构成，适当增加气象部门专家。</div> <div>3. 合理利用气象历史数据，科学确定有关指标阈值，为预警分级及响应等级确定提供有效依据。</div>	<p>回复 1：路基灾害靶区精度根据公路路基形式的变化而确定，根据路基横断面形式的不同，以及降雨特征的差异，将公路分割成不同的段落，并在每个段落内选择典型路基横断面形式作为分析对象，依次确定靶区的精度。</p> <p>回复 2：在项目顾问专家中拟增补一位气象部门专家。</p> <p>回复 3：在后续研究过程中，将增加历史气象数据的统计分析，并结合机器学习方法，对关键预警指标进行阈值科学测算与分级论证，为预警响应提供量化依据。</p>
2	石雄伟	<div>1. 在桥墩上下部约束不变的情况下，振动频率一般不变，建议预警的时候弱化该指标。</div> <div>2. 极端降雨下路基灾害靶区风险评定中，危险性、易损性和暴露度的确定方法。</div> <div>3. 重点调查商洛、宝鸡、安康等代表性地域的水文特点。</div>	<p>回复 1：采纳专家意见，后续将以变形指标为主开展灾害预警，动力特性只作为参考指标。</p> <p>回复 2：危险性、易损性和暴露度的确定依据路基的材料、施工质量、历史养护数据、历史破损数据、路基高度、破坏后的危险程度、重要程度等确定。</p>





			<p>回复 3: 采纳专家意见, 后续将重点调查商洛、宝鸡、安康地区。</p>
3	罗平平	<p>1. 建议可以利用各级气象监测的数据和自身的监测设备进行结合分析, 确保气象与道路的监测与预警的精准耦合。</p> <p>2. 建议针对桥梁的水文模型可以考虑结合河道的水动力学分析模型。</p>	<p>回复 1: 未来将整合公路沿线的气象站监测数据与项目自建的监测数据, 构建融合分析数据集, 通过数据同化技术实现公里级高精度分析, 以确保气象条件与道路状态精准匹配。</p> <p>回复 2: 为更精确模拟复杂河道地形下的水流行, 将引入二维水动力学模型 (如 HEC-RAS 2D、MIKE 21), 模拟洪水演进过程, 获取桥位处流速、流向、水深时空分布, 提高流量与流速预测精度。</p>
4	王松根	<p>1. 在桥梁防洪监测的时候, 要注意关注洪水汇流后对下游桥梁的影响。</p> <p>2. 防洪监测时要注意考虑漂流物的影响。</p>	<p>回复 1: 采纳专家意见, 后续工程应用时, 将根据情况, 必要的情况下将下游桥梁纳入案例分析范畴。</p> <p>回复 2: 采纳专家意见, 已经在实施方案中增加了视频监控与漂流物识别。</p>
5	钱越	<p>1. 利用全球气候模拟数据, 其颗粒度有多大? 最小尺度与公路工程的匹配考虑。</p> <p>2. 靶区的确定, 依靠的是降雨或暴雨的汇流、渗流来确定? 还是需要结构分析后确定?</p>	<p>回复 1: 本研究拟采用的是 CMIP6 数据, 在重点区域可提供 14 公里—25 公里的高分辨率数据。后续我们将通过动力或统计降尺度方法, 将数据进一步处理到更精细的尺度, 以确保其空间精度适用于</p>

		<p>极端降水的精细化模拟。</p> <p>回复 2：根据气象条件确定公路沿线的降雨特征，并以此作为基础条件，分析降雨特征对路基边坡稳定性的影响，基于边坡稳定性系数确定灾害靶区，因此，靶区的确定依据为降雨对结构安全性的影响。</p>
--	--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

项目负责人（签字）： 黎

气象-工程融合的高速公路极端降雨灾害靶区精准识别与分级预警技术(项目编号: 25-05K)

大纲评审专家委员会名单

序号	评审会 职务	姓 名	工作单位	所学专业	从事专业	职称/ 职务	签 名
1	主任委员	杨云峰	陕西交通职业技术学院	交通运输规划 与管理	交通运输规划 与管理	三级教授 / 正高级	
2	委员	石雄伟	西安公路研究院 有限公司	桥梁工程	桥梁	正高工	
3	委员	罗平平	长安大学	环境工程	水文学	三级教授	
4	委员	王松根	山东省公路局	公路工程	公路工程	研究员	
5	委员	钱越	交通运输部公路科学 研究院智能中心	交通工程	智能交通	正高工	