

引用格式: 葛畅, 张宇, 周紫君, 等. 强降雨时期高速公路运行监测指标体系构建研究 [J]. 标准科学, 2026 (3): 112-116.  
GE Chang, ZHANG Yu, ZHOU Zijun, et al. Research on the Construction of Monitoring Index System for Highways Operation during Heavy Rainfall Period [J]. Standard Science, 2026 (3):112-116.

## 强降雨时期高速公路运行监测指标体系构建研究

葛畅 张宇\* 周紫君 王晶

(交通运输部科学研究院)

**摘要:** 【目的】针对强降雨频发对高速公路运行造成的基础设施损毁、通行受阻等一系列影响,有必要构建一套科学的运行监测指标体系,以提升强降雨条件下高速公路运行监测和应急响应能力。【方法】重点分析强降雨对高速公路运行的影响及要素,明确指标体系构建原则和思路。【结果】建立了一套涵盖气象水文、路面状况、基础设施、交通流、突发事件与应急管理等多维度的运行监测指标体系。同时,提出高速公路运行监测后续研究与工作开展对策建议。【结论】研究成果可为提升强降雨下的运行监测与应急管理效能提供依据,支撑交通运输系统韧性提升与可持续运行。

**关键词:** 强降雨; 高速公路; 运行监测; 指标体系

DOI编码: 10.3969/j.issn.1674-5698.2026.03.014

### Research on the Construction of Monitoring Index System for Highways Operation during Heavy Rainfall Period

GE Chang ZHANG Yu\* ZHOU Zijun WANG Jing

(China Academy of Transportation Sciences)

**Abstract:** [Objective] In response to the series of impacts caused by frequent heavy rainfall on the operation of highways, such as infrastructure damage and traffic obstruction, it is necessary to establish a scientific operation monitoring index system to enhance the monitoring and emergency response capabilities of highways under heavy rainfall conditions. [Methods] This paper focuses on analyzing the impact and factors of heavy rainfall on the operation of highways, and clarifies the principles and ideas for constructing an indicator system. [Results] A set of operational monitoring indicators covering dimensions such as meteorology, hydrology, road conditions, infrastructure, traffic flow, emergencies, and emergency management has been established. Suggestions for follow-up research and work on highway operation monitoring are also proposed. [Conclusion] The research results can provide a basis for improving the operational monitoring and emergency management efficiency under heavy rainfall, supporting the resilience and sustainable operation of transportation systems.

**Keywords:** heavy rainfall; highways; operation monitoring; index system

**基金项目:** 本文受中央级公益性科研院所基本科研业务费项目“交通运输典型场景应急监测预警分级标准研究”(项目编号: 20250406)资助。

**作者简介:** 葛畅, 硕士, 研究实习员, 研究方向为交通运输标准化。

张宇, 通信作者, 硕士, 研究员, 研究方向为交通运输标准化。

周紫君, 硕士, 副研究员, 研究方向为交通运输标准化。

王晶, 硕士, 经济师, 研究方向为交通运输标准化。

## 0 引言

强降雨天气对高速公路安全可靠运行造成一定影响,近年来发生了多起由强降雨导致的高速公路灾难性事故。2024年5月,广东梅大高速因持续性降雨引发严重塌方灾害,导致23辆车掉落,造成52人死亡,30人受伤<sup>[1]</sup>。调查报告表明,这是一起因长时间持续性降水与多种因素叠加耦合作用导致的特别重大人员伤亡的塌方灾害。此外,河南郑州“7·20”特大暴雨引发高速公路损毁、隧道淹水倒灌等事故,造成近400人死亡失踪<sup>[2]</sup>;陕西柞水丹宁高速桥梁垮塌造成25辆车坠河,62人死亡失踪<sup>[3]</sup>;四川雅康高速公路隧间桥梁垮塌造成1人受伤、5人失联。这一系列事故表明,强降雨已成为高速公路安全运行面临的风险之一。为提升强降雨时期高速公路的安全韧性,亟须构建一套科学统一的运行监测指标体系,推动高速公路风险防控从被动响应向主动精细管理转变。

## 1 强降雨时期高速公路运行监测重点指标分析

### 1.1 气象水文监测指标

强降雨事件对高速公路运行构成的威胁具有显著的时空差异性,其关键监测指标需依据灾害机制进行针对性识别。梅大高速塌方事故源于多轮强降水过程,降水异常偏多,连续14天持续强降水。因此,考虑持续降雨时间和累计降雨量等指标作为反映持续性降雨情况的指标。柞水桥梁垮塌事件是由连日暴雨和当日强降水共同作用,引发山洪与流域性洪水所致。这警示我们,监测体系既要关注强降雨累积效应,也应关注短时降雨情况,引入最大小时降雨量、3小时最大降雨量等指标。此外,强降雨天气常伴随雨雾等低能见度气象,显著缩短可视距离、增加跟车风险,因此需将能见度纳入监测指标体系。郑州“7·20”特大暴雨作为极端复合型事件,由特大暴雨与2个台风输送水汽叠加形成极端降水,并导致12条主要河流发生超警戒

水位洪水。该事件表明,仅依靠气象指标不足以全面捕捉风险,需要进一步引入流域面雨量、河道水位、河道流量等水文相关指标。

### 1.2 路面状况监测指标

包茂高速曾因强降雨导致路面湿滑,引发大型车辆侧翻及多车连环追尾事故,这凸显了气象与路面状况耦合作用下的风险演化。在强降雨气象条件下,高速公路路面性能显著退化,构成运行安全的威胁因素。具体来说,持续性降水导致路表面积水,大幅降低轮胎与路面间的附着系数,易诱发车辆失控;若叠加低温的因素,积水将凝结成薄冰层,进一步削弱路面抗滑性能。因此,应建立与路面状况相关的运行监测指标体系,重点关注指标包括路面积水深度、积水路段长度、路面湿滑程度、路面温度、是否积冰积雪等内容。

### 1.3 基础设施监测指标

梅大高速与柞水事故分别揭示了强降雨下路堤边坡与桥梁结构的不同灾变机理:梅大高速事故源于持续强降水引发路堤底部及基底软化,最终导致路堤边坡整体失稳;柞水事故源于墩前壅塞与漂流物堆积,大幅增加桥墩所受水流及漂浮物推力,造成桥墩桩基超载倾覆。这些案例表明,高速公路基础设施不仅是主要的承灾对象,更是风险演化与链式反应的关键环节。因此,有必要将基础设施监测指标纳入强降雨时期高速公路运行监测指标体系。对于路堤边坡区段,应重点监测边坡位移、边坡沉降、路基位移、路基沉降及路基含水率等指标,以有效捕捉路堤边坡的状态变化。对于桥隧等大型结构物,则应系统引入长大桥隧结构监测报警信息<sup>[4]</sup>,包括桥墩位移、沉降、倾斜、应变应力、索力及疲劳损伤等结构状态指标,并加强对漂流物撞击等外部致灾事件的实时监测。

### 1.4 交通流监测指标

交通流状态与强降雨高速公路运行风险密切相关,应纳入运行监测指标体系。梅大高速塌方事故发生于劳动节假期,其间车流量较平时突增,这一不利因素加大了灾害后果的严重程度。G15沈海高速江苏段曾因强降雨期间货车流量较高,后

方重型车辆在低能见度与湿滑路面条件下制动不及,引发大规模连环追尾。这表明,交通流状态的动态变化会对强降雨时期高速公路运行及灾害后果产生直接影响<sup>[5]</sup>。因此,需对交通流相关的情况进行系统监测,具体指标包括断面交通量、货车流量、平均速度、路段饱和度、车流密度,以及拥堵长度、拥堵持续时间和拥堵路段数量等。

### 1.5 突发事件与应急管理监测指标

在强降雨场景下,高速公路运行监测指标体系不仅关注气象、水文等致灾因子,同样关注灾害演化过程中的事件后果与应急资源状态,主要包括突发事件和应急管理2个维度的指标<sup>[6]</sup>。突发事件相关指标主要监测突发安全事件的特征与影响范围,包括事故频次、异常驾驶行为数量、车道封闭情况、服务区/收费站关停状态、发布预警信息数量等信息;应急管理相关指标反映应急处置能力的保障水平,涵盖应急储备物资情况、抢险装备可用状态、应急人员数量与部署状态等指标。

## 2 强降雨时期高速公路运行监测指标体系构建

### 2.1 指标体系构建原则及思路

#### 2.1.1 系统性原则

指标体系应涵盖强降雨时期高速公路运行监测的所有重点场景;同时兼顾各级监测的数据联动与业务协同,确保数据指标一致协调。

#### 2.1.2 适用性原则

指标体系构建以实际应用需求为导向,有效支撑“平急结合”的应用场景,满足日常和强降雨时期运行监测的衔接需求;考虑不同地区的地理与经济发展特点,确保指标体系的普适性。

#### 2.1.3 可操作性原则

指标设定明确可量化,且在现有技术水平下可获取,数据来源稳定可靠。指标体系的设计与运行监测实际工作相协调,与现行的监测规范、数据标准及业务系统相兼容。

#### 2.1.4 科学性原则

指标数据来源真实可靠,指标选取科学合理,以科学理论和实践经验为支撑;整个指标体系的逻辑关联清晰、层次完整可靠。

按照平急结合、突出重点,动静结合、多源融合的思路,进行强降雨时期高速公路运行监测指标体系的构建。运行监测指标体系构建研究兼顾平时监测与急时监测的转换衔接,满足日常有序运行监测与重点时期精准高效监测的需要;同时结合强降雨时期高速公路运行特点,覆盖监测的关键点。

### 2.2 指标选取与体系构建

结合运行监测指标体系构建原则及思路,本研究对前述重点指标进行了具体化筛选与确认。依据系统性原则,将各指标类别细化分解为可直接观测或计算的参数项(如将“累计降雨量”细化为“24小时累计降雨量”“过程累计降雨量”等);依据可操作性原则逐一确认各项指标在现有技术条件下的数据可得性,剔除难以实时监测的理想化指标(删除基础设施疲劳损伤程度、异常驾驶行为数量等指标);依据科学性原则,结合既有文献与领域知识,筛选已被广泛验证且与强降雨灾害影响明确相关的指标(如采用“路面摩擦系数”对“路面湿滑程度”进行量化);基于适用性原则,筛选出与强降雨期间安全监测及应急决策紧密相关的指标,排除其他低关联度的长期性能和统计类指标参数(删除事故频次等指标)。通过这一系列的逐层筛选,最终形成了兼具科学性与实用性的核心指标集合,为运行监测体系的集成构建奠定基础。

本研究构建的强降雨时期高速公路运行监测指标体系涉及气象水文、路面状况、基础设施、交通流、突发事件与应急管理5个维度,共计33项指标。指标体系具体设置见表1。

气象水文监测指标表征强降雨事件的强度、持续性与空间分布,共涵盖7项指标。其中,持续降雨时间为降雨事件从开始到结束的总时长;过程累计降雨量为强降雨事件从开始到当前的总降雨量;最大小时降雨强度为1小时内最大降雨量;河道水位为河流某断面的水面高度;河道流量为单

位时间内通过河流某断面的水体体积。气象水文监测指标主要通过布设于路侧及桥梁的自动气象站、雷达测雨设备、能见度仪、水位计与流速计等固定传感设备实时获取<sup>[7]</sup>。

路面状况监测指标反映强降雨影响下道路表面的物理状态与行车安全条件,共涵盖4项指标。其中,积水路段长度为出现积水的道路连续长度。路面状况监测指标可借助光学传感器、红外温度传感器及视频AI识别系统等进行监测获取。

基础设施监测指标表征边坡、路基、桥梁、隧道等构造物的结构安全与稳定性,共涵盖4项指标。其中,位移指标为基础设施水平方向的移动量;沉降指标为基础设施竖直方向的下沉量;应力与应变指标是对结构物受力及受力后形变量的监测。基础设施监测主要依托传感器等自动化设备组成的结构健康监测系统<sup>[8]</sup>。

交通流监测指标反映高速公路运行状态与效率,共涵盖7项指标。其中,断面交通量为单位时间内通过道路断面的车辆数;路段饱和度为交通流量与通行能力的比值;车流密度为单位长度路段上的车辆数;拥堵路段为时速40 km/h以下,拥堵1 000 m以上的路段。交通流监测信息主要通过门架、微波雷达、交通监控平台等方式获取<sup>[9]</sup>。

突发事件与应急管理监测指标反映事件后果的严重程度与应急响应资源的保障水平<sup>[10-11]</sup>,共涵盖11项指标。其中,车道封闭相关指标是主动管控采取封闭的相关情况;阻断路段相关指标是因强降雨及其引发的山体滑坡、泥石流等次生灾害引起的通行中断路段情况;预警响应时间为从监测到风险到发布预警信息的时间;应急储备物资装备完备率为数量充足且功能完好的物资装备类别项数与预案规定类别项数的比例。突发事件与应急管理监测指标数据通过视频AI识别等自动化手段与人工上报相结合的方式获取。

### 3 结论与建议

本研究聚焦于强降雨这一极端气象条件,系

表1 强降雨时期高速公路运行监测指标体系

序号	指标类别	指标项
1	气象水文	持续降雨时间
2		24小时累计降雨量
3		过程累计降雨量
4		最大小时降雨强度
5		能见度
6		河道水位
7		河道流量
8	路面状况	路面积水深度
9		积水路段长度
10		路面温度
11		路面摩擦系数
12	基础设施	构造物位移
13		构造物沉降
14		构造物应力
15		构造物应变
16	交通流	断面交通量
17		货车流量
18		平均速度
19		路段饱和度
20		车流密度
21		拥堵路段长度
22		拥堵路段数量
23	突发事件与应急管理	车道封闭长度
24		车道封闭开始时间
25		车道封闭持续时间
26		阻断路段数量
27		阻断路段恢复数量
28		服务区关停数量
29		收费站关停数量
30		发布预警信息数量
31		预警响应时间
32		应急人员数量
33		应急储备物资装备完备率

统分析了其对高速公路运行的多重影响和作用机理。在此基础上,构建了一套涵盖气象水文、路面状况、基础设施、交通流、突发事件与应急管理五大维度的运行监测指标体系。该体系旨在实现对强降雨环境下高速公路运行状态的全方位、多角

度、实时化感知,为从被动应对转向主动预警与精准管控提供理论依据与方法支撑。

为将本研究的理论成果转化为实际应用效能,考虑到我国南北东西地域在气候特征、交通运行及经济模式上的客观差异,进一步提升高速公路在极端天气下的韧性与安全水平,研究提出以下建议:

一是进一步加强强降雨时期高速公路运行监测体系的建设,凝练形成行业标准,促进科学高效地开展强降雨等极端恶劣天气下的高速公路运行监测工作。

二是强化关键基础设施的监测能力建设,应重点加大高清视频、高精度传感器、高灵敏度雷达等先进监测设备在边坡、桥隧、低洼路段等重点隐患区域的布设密度与广度,增强监测数据的可获得

性和准确性<sup>[12]</sup>。

三是加强集数据采集、分析、预警、决策支持于一体的高速公路运行路网综合监测平台建设,实现自动实时获取多源监测数据,并对异常情况提早识别并及时预警,为科学研判风险提供决策辅助支撑。

本研究是对强降雨这一特定场景下高速公路运行监测的初步探索。未来,研究范围可进一步拓展至低温冰冻雨雪、大雾、台风等其他典型极端恶劣天气,构建更为普适与完备的高速公路运行监测指标体系<sup>[13]</sup>。通过研究各类极端天气下高速公路的运行响应特性,不断完善监测预警与应急响应机制,为全面提升高速公路的运行安全与服务水平奠定坚实的基础。

#### 参考文献

- [1] 广东省应急管理厅.梅大高速茶阳路段“5·1”塌方灾害调查评估报告[R/OL].(2025-01-22)[2025-10-08].[https://yjgl.gd.gov.cn/gk/zdlyxxgk/sgdcbg/content/post\\_4658975.html](https://yjgl.gd.gov.cn/gk/zdlyxxgk/sgdcbg/content/post_4658975.html).
- [2] 国务院河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查组.河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告[R/OL].(2022-01-21)[2025-10-08].[https://www.baidu.com/link?url=HJQqubxe27E2fMe7-1BuGuS5HLJUvEOJMG4xlz9YA4yimMxwYzuSXo6Wa\\_stxbWfXucAWTd2IjYNrDjQOCZmEY-o9zWAonuElfRGZfP\\_TMycvqIpFLmvtIoeC7WOXEqP&wd=&eqid=a9e51a1d0000075c0000000369080752](https://www.baidu.com/link?url=HJQqubxe27E2fMe7-1BuGuS5HLJUvEOJMG4xlz9YA4yimMxwYzuSXo6Wa_stxbWfXucAWTd2IjYNrDjQOCZmEY-o9zWAonuElfRGZfP_TMycvqIpFLmvtIoeC7WOXEqP&wd=&eqid=a9e51a1d0000075c0000000369080752).
- [3] 陕西商洛“7·19”高速公路桥梁垮塌灾害调查评估组.陕西商洛“7·19”高速公路桥梁垮塌灾害调查评估报告[R/OL].(2025-03-27)[2025-10-08].[https://www.baidu.com/link?url=nsaL77pawrvJ6BDMthp-SFYKhMMeZabsa2eblcHSfGQbWQspYmqcTqvouAiw0vWqQb-NdP4J5Z3zit9vES4V\\_JwLs1aRvNSeGx7L8sBAySOhS3rAvmyySoHCJ\\_Au3j&wd=&eqid=a4d7d14900012cee0000000369080794](https://www.baidu.com/link?url=nsaL77pawrvJ6BDMthp-SFYKhMMeZabsa2eblcHSfGQbWQspYmqcTqvouAiw0vWqQb-NdP4J5Z3zit9vES4V_JwLs1aRvNSeGx7L8sBAySOhS3rAvmyySoHCJ_Au3j&wd=&eqid=a4d7d14900012cee0000000369080794).
- [4] 杨红海.甘肃陇南地区高速公路桥梁基础水毁及防治措施[J].江西建材,2025(3):148-150.
- [5] 温惠英,黄俊达,黄坤火,等.融合短时交通流的高速公路事故影响因素分析[J].华南理工大学学报(自然科学版),2025,53(10):1-13.
- [6] 宋伟伟,王屹虹,亓良,等.冬季恶劣天气条件下的高速公路数字化应急调度管理平台设计[J].交通世界,2025(17):5-8.
- [7] 刘惠兰,张苗苗,温华洋.气象观测类标准评价体系构建[J].标准科学,2023(8):49-52.
- [8] 张佳鹏.高速公路隧道联网运行监测平台研究[J].无线互联科技,2025(5):24-27.
- [9] 张素豪,苏舟,李晓燕,等.交通运输典型数据应用支撑行业发展[J].中国交通信息化,2025(S1):12-14.
- [10] 张宇,王伟,史砚磊.交通运输安全应急标准体系构建研究[J].标准科学,2017(3):44-47.
- [11] 杨文安,龙向阳,黎志梅.突发公共卫生事件下高速公路应急能力影响因素分析[J].工程研究:跨学科视野中的工程,2025,17(4):461-474.
- [12] 黄陈,胡汉桥,罗如意,等.基于多源数据融合的高速公路运行监测与指挥调度平台[J].中国交通信息化,2024(S1):363-365.
- [13] 冯喜媛,涂钢,杨磊,等.地方气象标准体系构成浅析:以吉林省为例[J].标准科学,2024(2):53-58.