

文章编号:1671-8879(2016)03-0007-06

# 陕西省连阴雨诱发公路崩塌类灾害 区域危险性评价

齐洪亮, 田伟平, 李家春

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘要:**针对连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险性评价,基于区域影响因素叠加理论,建立了连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险性评价模型。从诱发因素、地形地貌因素、地质因素和其他因素 4 个方面,选择区域年平均连阴雨次数、区域地形坡度、区域地表破碎程度、区域岩土体性质和区域植被特征作为特征指标,建立了连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险性评价指标。利用 GIS(地理信息系统)完成了陕西省连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险性评价,并将陕西省连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险性分为 5 个等级。针对陕西省境内的国道和省道,完成了陕西省连阴雨诱发干线公路崩塌类灾害区域危险性评价,给出了陕西省连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险性特征分布。研究表明:G210、G108、G316、S310、S207、S308、S309、S210 等部分路段的危险度指数为极严重危险,应引起相关部门的重视。

**关键词:**道路工程;连阴雨;崩塌;危险评价;GIS

**中图分类号:**U411 **文献标志码:**A

## Regional risk evaluation of highway collapse induced by continuous rain in Shaanxi Province

QI Hong-liang, TIAN Wei-ping, LI Jia-chun

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University,  
Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** Aiming at the regional risk evaluation of highway collapse induced by continuous rain, regional risk evaluation models were established based on the superposition theory of regional impact factors. From four main factors such as inducing conditions, topography, geology and other factors, annual average times of continuous rain, terrain slope, density of surface cutting, soil types and vegetation coverage were selected as evaluation indicators. Regional risk evaluation of highway collapse induced by continuous rain in Shaanxi Province was finished by GIS, and the risks were divided into five grades according to disaster characteristics in Shaanxi Province. Finally, regional risk distribution of trunk-highway collapse induced by continuous rain in Shaanxi Province was revealed based on the evaluation. The results show that risk grade of

收稿日期:2015-03-10

基金项目:交通运输部西部交通建设科技项目(2006 318 000 07);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821161014);中交股份科技研发项目(2011-ZJKJ-094)

作者简介:齐洪亮(1982-),男,陕西宝鸡人,讲师,工学博士,E-mail:qihongl@126.com。

portions of G210, G108, G316, S310, S207, S308, S309 and S210 are extremely severe, which should attract the attention of the related departments. 4 tabs, 2 figs, 20 refs.

**Key words:** road engineering; continuous rain; collapse; risk evaluation; GIS

## 0 引言

降雨是诱发各类气象地质灾害的主要因素之一,不同类型的降雨对不同气象地质灾害的诱发和影响作用差异很大。连阴雨是一种常见的降雨类型,其具有持续时间长、过程降雨量大等特点,对崩塌类灾害的发生具有显著的诱发和加速作用。连阴雨指连续3~5 d以上的阴雨天气现象(中间可以有短暂的日照时间)。不同地区对连阴雨有不同的定义,只有当降雨持续时间、日降雨及过程降雨量达到一定值才称为连阴雨。陕西省对连阴雨的定义是指观测站连续4 d及以上日降水量大于等于0.1 mm,且观测站过程降水量大于20 mm的降水天气,观测站连续2 d小于0.1 mm降水,则认为连阴雨天气结束。连阴雨天气的日降水量可以是小雨、中雨,也可以是大雨或暴雨。2014年9月7日至17日,恰逢“白露”节气,陕西省迎来了一次较强的秋淋天气,出现大范围持续性阴雨天气,特别是关中和陕南大部地区阴雨持续日数达10 d以上。各地降水分布不均,其中陕北北部20~60 mm,陕北南部、关中60~200 mm,陕南大部150~360 mm,11个县市区出现暴雨。持续降雨导致全省多条国道及省道发生气象地质灾害。据养护管理部门统计,连阴雨期间全省8条国道和24条省道共发生各类气象地质灾害2 375处,其中崩塌类(崩塌、落石及碎落)灾害1 258处,占灾害总数的52.97%;滑坡及泥石流灾害1 117处,占灾害总数的47.03%;安康和汉中两市灾害尤为严重。国道G108 K1434+800胡李沟处塌方量1 000 m<sup>3</sup>多,致使交通完全中断,国道G210山区段部分路段交通完全中断,造成了巨大的经济损失和十分不良的社会影响。

国内外诸多学者在气象地质灾害危险性评价方面展开了大量研究,取得了十分丰硕的研究成果<sup>[1-5]</sup>。随着计算机和GIS(地理信息系统)技术的发展,区域灾害危险性评价取得了大量研究成果<sup>[6-10]</sup>,为区域减灾防灾等提供了参考。针对公路自然灾害,齐洪亮对公路地质灾害危险性、易损性及风险的评价理论与方法开展了系统的研究<sup>[11]</sup>;还利用GIS技术,对陕西省干线公路路基水毁灾害的区域危险性评价进行了研究;马保成对公路水毁灾害

危险性的识别及评价方法开展了系统的研究<sup>[13]</sup>;王福恒以陕西省为研究区域,利用GIS技术开展了区域公路边坡灾害评价与预测研究<sup>[14]</sup>;杨天亮以地理信息系统(GIS)为研究平台,建立了陕南公路地质灾害数据库,并进行了危险性评价等<sup>[15]</sup>。在已有的研究成果中,降雨因素与各类灾害发生的相关性得到了广大学者的认可,已经被广泛地用于灾害的危险性评价之中。但是,目前的研究成果主要针对暴雨等具有突发性、区域性、群发性、同时性等特点降雨,针对连阴雨诱发公路崩塌类灾害危险性评价的研究成果鲜有报道。相关研究表明,崩塌类灾害的发生与连阴雨的相关系数达0.81<sup>[16]</sup>。为此,本文开展陕西省连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险性评价研究,为区域路网规划、应急抢险及各级政府部门决策等提供科学依据。

## 1 公路灾害类型划分

通过对现有研究成果和资料的分析归纳,按照公路自然灾害的发生机理、主要影响因素及其对灾害诱发作用的大小,公路自然灾害可以分为地质灾害(或者气象-地质灾害)和气象灾害两大类。公路地质灾害(或者气象-地质灾害)是指由地质作用、降雨等气象因素或人类工程活动导致周围地质环境条件恶化而引发的公路灾害。其中,地质条件是决定灾害发生与否的根本原因,气象因素对灾害的发生具有一定的诱发和加速作用。按照形成机理,典型的地质灾害(或者气象-地质灾害)主要有:地震、崩塌类(崩塌、落石、碎落)、滑坡类(滑坡、坍塌、滑塌、滑移)、泥石流和塌陷等。本文选择公路工程中最常见的崩塌类灾害作为研究对象。

## 2 连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险性评价模型

### 2.1 公路崩塌类灾害区域危险性评价模型

采用危险度指数 $P$ 反映区域崩塌类灾害发生的可能性大小。利用区域影响因素叠加理论,建立公路崩塌类灾害区域危险性评价模型

$$P = \sum_{i=1}^n R_i W_i \quad (1)$$

式中: $R_i$ 为第 $i$ 个危险性评价指标的影响度; $W_i$ 为

第  $i$  个危险性评价指标的权重系数;  $n$  为危险性评价指标个数。

## 2.2 公路崩塌类灾害危险性影响因素及评价指标

影响公路崩塌类灾害危险性影响因素很多,按各类因素对崩塌类灾害危险性的影响机理,可以将其分为诱发因素、地形地貌因素、地质因素和其他因素 4 类。

通过各类影响因素与崩塌类灾害危险性相关分析和研究,选择连阴雨作为诱发因素的特征指标、地形坡度和地表破碎程度作为地形地貌因素的特征指标、区域岩土体性质作为地质因素的特征指标、区域植被特征作为其他因素的特征指标。陕西省连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险性评价指标见表 1。

表 1 陕西省连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险性评价指标

Tab. 1 Risk assessment indexes of highway collapse induced by continuous rain in Shaanxi Province

| 主要影响因素 | 评价指标   | 特征指标       |
|--------|--------|------------|
| 气候因素   | 连阴雨    | 区域年平均连阴雨次数 |
| 地形地貌因素 | 地形坡度   | 区域地面平均坡度   |
|        | 地表破碎程度 | 区域地表切割密度   |
| 地质因素   | 岩土体性质  | 区域岩土体类型    |
| 其他因素   | 区域植被特征 | 区域植被覆盖度    |

表 2 陕西省连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险性评价指标等级划分及影响度赋值

Tab. 2 Grades of evaluation indicators and values of influencing factors of risk assessment indexes of highway collapse induced by continuous rain in Shaanxi Province

| 评价指标                          | 微度影响  | 轻度影响      | 中度影响      | 严重影响      | 极严重影响  |
|-------------------------------|-------|-----------|-----------|-----------|--------|
| 年平均连阴雨次数/次                    | <2    | 2~3       | 3~4       | 4~5       | >5     |
| 地面平均坡度/(°)                    | <10   | 10~15     | 15~25     | 25~45     | >45    |
| 地表切割密度/(km·km <sup>-2</sup> ) | <0.10 | 0.10~0.30 | 0.30~0.55 | 0.55~0.80 | >0.80  |
| 岩土类型                          | 硬岩    | 砾类土及软岩    | 粘性土       | 砂类土       | 黄土、粉性土 |
| 植被覆盖度/%                       | >80   | 50~80     | 20~50     | 5~20      | 0~5    |
| 影响度值                          | 1     | 3         | 5         | 7         | 10     |

表 3 陕西省连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险性评价指标权重系数

Tab. 3 Weight coefficient of risk assessment indexes of highway collapse induced by continuous rain in Shaanxi Province

| 因子 | 年平均连阴雨次数 | 地面平均坡度 | 地表切割密度 | 岩土类型 | 植被覆盖度 | 合计  |
|----|----------|--------|--------|------|-------|-----|
| 权重 | 0.3      | 0.2    | 0.2    | 0.2  | 0.1   | 1.0 |

## 3.3 陕西省连阴雨诱发公路崩塌类灾害危险度指数计算结果及分布规律

陕西省区域年平均连阴雨次数资料来源于《陕西灾害性天气气候图集(1961~2006)》。区域地面平均坡度利用陕西省 1:25 万数字高程模型计算获得。地表切割密度用单位地表面积上的沟谷线总长度表征。陕西省岩土体类型数据通过矢量化《陕西省工程地质图》获得。植被覆盖程度分析数据来源于《陕西省植被覆盖度图》。上述各特征指标的计算及成图均利用 GIS 的空间分析模块来完成。

## 3 陕西省连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险性评价

根据评价模型,首先确定各评价指标的影响度指数和权重系数,在此基础上利用 GIS 完成陕西省连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险度指数计算。

### 3.1 各评价指标的影响度

影响度用来体现某一要素的不同级别对目标值影响程度的大小。影响度大小可以通过对影响因素进行等级划分和等级标度来实现,其中,影响因素等级划分是关键。综合考虑公路工程的实际情况,参考专家意见,并借鉴相关研究成果<sup>[17-20]</sup>,建立陕西省连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险性评价指标的等级划分及影响度赋值,见表 2。

### 3.2 各评价指标的权重系数

不同指标对灾害危险性大小的影响是不同的,可用权重系数来反映。某一因素的权重表示该因素在整个因素体系中的重要程度。权重对计算结果的准确性、真实性和有效性至关重要。本文采用专家评分法,通过选择相关部门的多位具有高级职称和有多年实践经验的专家进行评分,确定因子的权重,见表 3。

根据评价模型、按照表 2、表 3,利用 GIS 完成了陕西省连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险度指数分析计算,计算结果及分布规律见下图 1。

由图 1 可见,陕西省连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险度指数分布具有明显的区域性特征:陕南地区的宁陕、略阳、镇巴、紫阳、岚皋、镇坪、商南及留坝等区域,陕北榆林市中东部、延安等部分区域,韩城市部分区域,宝鸡市麟游县、千阳县及陇县等区域的危险度指数较大;关中平原、汉中盆地及榆林西北部的毛乌素沙漠地区危险度指数相对最小;其余

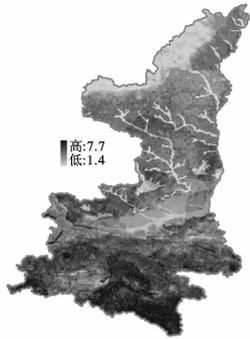


图1 陕西省连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险度指数

Fig. 1 Regional risk of highway collapse induced by continuous rain in Shaanxi Province

区域危险度指数位于二者之间。陕南地区危险度指数较大的区域,除了区域年平均连阴雨次数较多以外,区域地面坡度大、地表破碎,存在大量的临空面,为崩塌类地质灾害的发生提供了必要条件。陕北部分地区虽然区域年平均连阴雨次数较少,但由于区域岩土体以黄土为主,地表破碎、切割密度较大,临空面较多,导致区域公路崩塌类灾害危险度指数较大,在进行区域路网规划及养护过程中应给予足够的重视。关中平原、汉中盆地及榆林西北部的毛乌素沙漠地区,区域地势平坦,临空面较少,区域公路崩塌类灾害危险度指数最小。

### 3.4 陕西省连阴雨诱发干线公路崩塌类灾害区域危险性评价

在各类公路中,高速公路前期投资巨大,公路边坡灾害防治等级高、措施完善,自然灾害对其的影响和破坏很小。国道和省道由于建设年代较早、技术和经济等方面的原因,路线等级较低,公路防灾减灾措施不是很完善,自然灾害的威胁和破坏较大,经济损失巨大。为此,本文主要对陕西省境内国道和省道的崩塌类灾害区域危险性进行评价。

为进一步明确各评价区域的危险性特征,便于采取相应的防治措施,使评价结果更具有指导作用,需对评价结果进行等级划分,以明确相应的危险性等级。根据危险度指数的计算结果,采用统计学方法,按照正态分布特征,并结合陕西省区域崩塌类灾害的特性,将陕西省连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险性分为微度危险I、轻度危险II、中度危险III、严重危险IV和极严重危险V这5个等级,见表4。

陕西省境内的主要国道有8条,主要省道有24条。陕西省连阴雨诱发干线公路崩塌类灾害区域危险性特征见图2。由图可知,G210、G108、G316、S310、S207、S308、S309、S210等部分路段的危险性

表4 陕西省连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险性分级

Tab. 4 Risk grades of highway collapse induced by continuous rain in Shaanxi Province

| 危险性分级 | 微度危险 I | 轻度危险 II | 中度危险 III | 严重危险 IV | 极严重危险 V |
|-------|--------|---------|----------|---------|---------|
| 危险度指数 | <2.0   | 2.0~3.5 | 3.5~4.5  | 4.5~5.5 | >5.5    |



图2 陕西省连阴雨诱发干线公路崩塌类灾害区域危险性特征

Fig. 2 Risk distribution of trunk-highway collapse induced by continuous rain in Shaanxi Province

级别为极严重危险,应引起相关部门的重视。

## 4 结语

(1)基于区域影响因素叠加理论,建立了连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险性评价模型。从诱发因素、地形地貌因素、地质因素和其他因素4个方面,选择连阴雨、地形坡度、地表破碎程度、区域岩土体性质和区域植被特征作为连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险性评价的特征指标。

(2)按照评价模型,建立了陕西省连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险性评价指标等级划分,并确定了各评价指标的权重系数,利用GIS完成了陕西省连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险度指数的分析计算,绘制了陕西省连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险度指数分布图。结果表明,陕南地区的宁陕、略阳、镇巴、紫阳、岚皋、镇坪、商南及留坝等区域连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险度指数最高。

(3)根据危险度指数计算结果,采用统计学方法,按照正态分布特征,并结合陕西省区域崩塌类灾害特性,将陕西省连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险性分为微度危险I、轻度危险II、中度危险III、严重危险IV和极严重危险V这5个等级。

(4)针对陕西省境内的国道和省道,完成了陕西省连阴雨诱发干线公路崩塌类灾害区域危险性评价,给出了陕西省连阴雨诱发干线公路崩塌类灾害区域危险性特征分布规律。结果表明:G210、G108、G316、S310、S207、S308、S309、S210等部分路段的

危险度指数为极严重危险,应引起相关部门的重视。

(5)本文研究成果可为区域公路养护管理提供依据,下一步应在此基础上开展区域连阴雨诱发干线公路崩塌灾害预警研究,为区域公路灾害应急及管理提供依据。

## 参考文献:

## References:

- [1] 黄润秋,向喜琼,巨能攀.我国区域地质灾害评价的现状 & 问题[J].地质通报,2004,23(11):1078-1082.  
HUANG Run-qiu, XIANG Xi-qiong, JU Neng-pan. Assessment of China's regional geohazards: present situation and problems [J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(11): 1078-1082. (in Chinese)
- [2] 江鸿彬. GIS 支持下的地质灾害实时动态预测评估系统架构研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(4): 19-23.  
JIANG Hong-bin. Research on the framework of GIS-based real-time dynamic geohazard assessment system [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(4): 19-23. (in Chinese)
- [3] 程凌鹏,杨冰,刘传正.区域地质灾害风险评价研究述评[J].水文地质工程地质,2001,28(3):75-78.  
CHENG Ling-peng, YANG Bing, LIU Chuan-zheng. Review on regional geological disaster risk assessment [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2001, 28(3): 75-78. (in Chinese)
- [4] 高永利,费贤俊,马占琴.基于 AHP-FUZZY 的地质灾害危险性评价研究[J].中国煤炭地质,2009,21(增1):29-31.  
GAO Yong-li, FEI Xian-jun, MA Zhan-qin. A geohazard assessment study based on AHP-FUZZY [J]. Coal Geology of China, 2009, 21(S1): 29-31. (in Chinese)
- [5] 陈玉,蔺启忠,王钦军.区域地质灾害评价模型综述[J].防灾科技学院学报,2010,12(4):42-45.  
CHEN Yu, LIN Qi-zhong, WANG Qin-jun. Summary of regional geological hazard assessment model [J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2010, 12(4): 42-45. (in Chinese)
- [6] 张春山,韩金良,孙炜锋,等.陕西陇县地质灾害危险性分区评价[J].地质通报,2008,27(11):1795-1801.  
ZHANG Chun-shan, HAN Jin-liang, SUN Wei-feng, et al. Assessment of geohazard danger zoning in Longxian County, Shaanxi, China [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(11): 1795-1801. (in Chinese)
- [7] 乔成,欧国强,潘华利,等.泥石流数值模拟方法研究进展[J].地球科学与环境学报,2016,38(1):134-142.  
QIAO Cheng, OU Guo-qiang, PAN Hua-li, et al. Review on numerical modeling methods of debris flow [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2016, 38(1): 134-142. (in Chinese)
- [8] 陈晓利,祈生文,叶洪.基于 GIS 的地震滑坡危险性的模糊综合评价研究[J].北京大学学报:自然科学版,2008,44(3):434-438.  
CHEN Xiao-li, QI Sheng-wen, YE Hong. Fuzzy comprehensive study on seismic landslide hazard based on GIS [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2008, 44(3): 434-438. (in Chinese)
- [9] 章玉全,方显华. SNS 在山区公路边坡地质灾害防护中的应用[J].筑路机械与施工机械化,2011,28(1):55-58.  
ZHANG Yu-quan, FANG Xian-hua. Application of safety netting system in geological disaster protection of side slope in mountainous areas [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(1): 55-58. (in Chinese)
- [10] 张峰,何政伟,杨斌,等.基于 GIS 和神经网络的泥石流危险性评价系统[J].计算机工程,2009,35(3):205-207.  
ZHANG Feng, HE Zheng-wei, YANG Bin, et al. Debris flow hazard assessment system based on GIS and neural network [J]. Computer Engineering, 2009, 35(3): 205-207. (in Chinese)
- [11] 齐洪亮.公路自然灾害评价系统的研究[D].西安:长安大学,2011.  
QI Hong-liang. Study on evaluation system of highway natural disasters [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [12] QI H L, TIAN W P, LI J C. Regional risk evaluation of flood disaster for the trunk-highway in Shaanxi, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12(11): 13861-13870.
- [13] 马保成.公路水毁灾害识别技术研究[D].西安:长安大学,2011.  
MA Bao-cheng. Research on identification technology of highway flood damage [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [14] 王福恒.基于 GIS 的区域公路边坡灾害评价与预测研究[D].西安:长安大学,2011.  
WANG Fu-heng. Research on assessment and prediction of regional highway slope disaster based on GIS [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [15] 杨天亮.基于 GIS 的陕南公路地质灾害数据库建立及

- 危险性评价研究[D]. 西安:长安大学,2005.
- YANG Tian-liang. Research on database creation and risk assessment for highway geological disasters in Southern Shaanxi based on GIS[D]. Xi'an: Chang'an University,2005. (in Chinese)
- [16] 毛以伟,周月华,陈正洪,等. 降雨因子对湖北省山地灾害影响的分析[J]. 岩土力学,2005,26(10):1657-1662.
- MAO Yi-wei, ZHOU Yue-hua, CHEN Zheng-hong, et al. Analysis of influence of rainfall factors on mountain floods and geological disasters in Hubei Province[J]. Rock and Soil Mechanics,2005,26(10):1657-1662. (in Chinese)
- [17] 李家春,韩敏,郑瑞平. 公路边坡地震灾害区域危险性评价[J]. 公路交通科技,2011,28(6):120-123.
- LI Jia-chun, HAN Min, ZHENG Rui-ping. Regional hazards risk evaluation of slope disaster for highways[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2011,28(6):120-123. (in Chinese)
- [18] 齐洪亮,田伟平,舒延俊. 基于坡面径流强度的中国公路水文区划研究[J]. 公路交通科技,2011,28(3):12-16.
- QI Hong-liang, TIAN Wei-ping, SHU Yan-jun. Research on hydrological regionalization for highway in China based on slope runoff intensity[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2011,28(3):12-16. (in Chinese)
- [19] 齐洪亮,田伟平,舒延俊. 基于河川径流强度的中国公路水文区划研究[J]. 公路交通科技,2011,28(3):55-60.
- QI Hong-liang, TIAN Wei-ping, SHU Yan-jun. Research on hydrological regionalization for highway in China based on river runoff intensity[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2011,28(3):55-60. (in Chinese)
- [20] 齐洪亮,田伟平,舒延俊. 中国公路水文区划指标体系[J]. 长安大学学报:自然科学版,2010,30(2):39-43.
- QI Hong-liang, TIAN Wei-ping, SHU Yan-jun. Index system of hydrological regionalization for highway in China[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2010,30(2):39-43. (in Chinese)
- ~~~~~
- (上接第6页)
- [9] TSAI Y J, LI F, WU Y. A new rutting measurement method using emerging 3D line-laser-imaging system[J]. International Journal of Pavement Research & Technology,2013,6(5):667-672.
- [10] BENNETT C R, WANG H. Harmonising automated rut depth measurements[R]. Sacramento: California Transit Association,2003.
- [11] MALLELA R, WANG H. Harmonising automated rut depth measurements; stage 2[R]. Wellington: Land Transport New Zealand,2006.
- [12] SIMPSON A L. Characterization of transverse profile[J]. Journal of Transportation Research Record,1999(1655):185-191.
- [13] SIMPSON A L, RADA G, VISINTINE B, et al. Improving FHWA's ability to assess highway infrastructure health: development of next generation pavement performance measurements[R]. Washington DC: Federal Highway Administration,2013.
- [14] HUANG Y, COPENHAVER T, HEMPEL P. Texas department of transportation 3D transverse profiling system for high-speed rut measurement[J]. Journal of Infrastructure Systems,2013,19(2):221-230.
- [15] TSAI Y J, WANG Z H, LI F. Assessment of rut depth measurement using emerging 3D continuous laser profiling technology [C]//Transportation Research Board. Transportation Research Board 90th Annual Meeting. Washinton DC: Transportation Research Board,2015:2965-2975.
- [16] SIMPSON A L. Measurement of rutting in asphalt pavements[D]. Austin: The University of Texas at Austin,2001.
- [17] 马荣贵,沙爱民,宋宏勋. 路面车辙多路传感器检测误差分析[J]. 长安大学学报:自然科学版,2007,27(3):34-36.
- MA Rong-gui, SHA Ai-min, SONG Hong-xun. Error analysis in road rut measurement with multi-sensors[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2007,27(3):34-36. (in Chinese)
- [18] JTG E60—2008,公路路基路面现场测试规程[S]. JTG E60—2008, Field test methods of subgrade and pavement for highway engineering[S]. (in Chinese)
- [19] 惠冰. 沥青路面车辙破坏模式识别、多维度指标评价与预测研究[D]. 西安:长安大学,2013.
- HUI Bing. Failure pattern recognition, multi-dimensional indicators evaluation and prediction of rutting in asphalt pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [20] JTG H20—2007,公路技术状况评定标准[S]. JTG H20—2007, Highway performance assessment standards[S]. (in Chinese)