

文章编号:1004-4574(2012)03-0224-06

## 山区沿河公路水毁危险性评价方法的研究

马保成<sup>1,2</sup>, 田伟平<sup>2</sup>, 李家春<sup>2</sup>

(1. 西安科技大学, 陕西 西安 710054; 2. 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:**为了预测评价山区沿河公路水毁灾害,通过理论分析和专家系统调查,阐明了沿河公路水毁危险性的含义,确定了其主要危险因子(洪水流量、水位、流速)和次要危险因子(洪水持续时间、河流形态)。运用灰色系统的关联度方法,根据关联序确定了各危险因子的权重;在因子等级划分的基础上,提出了沿河公路水毁危险性指数的计算方法,并在工程中得到了应用。研究成果可供沿河公路水毁易发段危险性点及整个路段的评价参考。

**关键词:**公路工程;山区沿河公路;水毁危险性指数;危险性评价;灰色系统

**中图分类号:**U418.5<sup>+</sup>4

**文献标志码:**A

### Assessment of flood-damage hazard of highway along river in mountainous areas

MA Baocheng<sup>1,2</sup>, TIAN Weiping<sup>2</sup>, LI Jiachun<sup>2</sup>

(1. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** In order to predict and assess the flood-damage hazard of highways along river in mountainous areas, this paper first explores the meaning of flood-damage hazard of highway along river, and then figure out three major hazard factors (flood flow, water level and flow velocity) and two minor factors (duration of flood, river morphology) based on theoretical analysis and expert system survey, and then determined the weights of these hazard factors in terms of their correlative sequence with the method of grey system correlation degree. With grading hazard factors, the calculation formula of flood-damage hazard index were established and applied to engineering projects. The research result may give a reference to application in both section and whole line assessment of flood-damage hazard of highway along river.

**Key words:** highway engineering; highway along river in mountainous areas; flood-damage hazard index; hazard assessment; grey system

由于种种原因,我国公路水毁损失总体呈上升趋势。以暴雨及洪水为主要致灾因子的汛期公路水毁,常常造成公路交通设施不同程度的损毁,影响了交通的安全与畅通。特别是在山区,气候、水文、地质以及地形地貌等因素复杂多变,暴雨和山洪频发,对山区公路的安全构成了严重威胁。山区公路沿溪线较多,暴雨和洪水造成的沿河公路水毁占很大比例。如何合理准确地预测评价山区沿河公路水毁灾害,为决策提供科学依据,是公路水毁减灾防灾中的一个难点。

收稿日期:2010-06-13; 修回日期:2011-05-21

基金项目:西部交通建设科技项目(200631800007);西部交通建设科技项目(200131881234)

作者简介:马保成(1982-),男,博士,主要从事公路防灾减灾方面研究。E-mail:mbc\_2002@163.com

国内外对于泥石流的危险性预测与评价,已进行了大量的研究工作<sup>[1]</sup>;对于洪水灾害的评价研究多集中于区域性洪水灾害的风险分析和评价<sup>[2]</sup>;在公路水毁灾害(包括小桥涵、排水系统和沿河公路水毁)方面,抗洪能力(易损性)评价研究较多<sup>[3-11]</sup>,而对于沿河公路水毁环境区划及危险性评价,虽然也进行了一些理论上的探索<sup>[9-13]</sup>,但还有待于进一步研究。

如何用科学的方法使沿河公路洪水危险性评价更趋合理,最终为制定安全经济的防治措施提供依据,是本文研究的重点。

## 1 沿河公路水毁危险性的含义

危险性(hazard)是指不利事件(风险)发生的可能性(概率)。危险性分析主要研究风险威胁区域可能遭受风险影响的频度和强度。

就山区沿河公路水毁灾害而言,危险性是指水毁灾害系统中孕灾环境、致灾因子的各种自然属性的外在表征;危险性评价是确定山区沿河公路遭到洪水危害的可能性大小的过程,其结果是一个频率概念,取值范围在 $[0,1]$ 闭区间内。对于一段沿河公路来说,该值表征了路域范围内的路产遭到洪水损害的可能性大小,是山区河流洪水的固有特性,多用于灾前评估。

## 2 沿河公路水毁危险因子分析

### 2.1 沿河公路水毁危险因子分析的原则

形态各异的沿河公路水毁是公路与河道泥沙、洪水相互作用的结果,成因复杂、影响因素多。作为水毁的主要致灾因子,暴雨洪水又是降雨和降雨覆盖范围内的下垫面条件复杂作用的结果。因此,在危险性分析中,首先要按照一定的原则对危险因子进行分析、筛选。

#### 2.1.1 分主次原则

沿河公路水毁的影响因素涉及区域地质、地形地貌、气象、水文、沿河公路与河流之间的关系、防护设施等方面。其危险性是由众多危险因子综合判定得到,应将具有重要影响或直接关系的因素纳入危险性分析中。危险因子有主次之分,在危险性判定中起主导作用的因子为主要危险因子,起辅助作用的是次要危险因子。例如,山区河道洪水是直接作用于沿河公路的水力因素,河道洪水参数的变化规律可以反映降雨、地形、地貌、植被、岩土性质、河流参数等影响因子的综合作用,则洪水参数可以看作主要影响因子(即分析指标)。

#### 2.1.2 分层次原则

危险性评价的目标是评价水毁发生的可能性大小、可能的规模和范围,为破坏损失评价和风险评价及水毁防治提供依据。

在分析水毁灾害影响因素及作用特点的基础上,将对水毁具有直接影响的因子作为分析指标;将反映区域自然环境和社会经济条件的指标作为背景指标。这样,沿河公路水毁危险性分析的指标层次可以分为背景指标、分析指标及目标指标。河道洪水参数是分析指标,影响河道洪水形成的降雨、地形、地貌、植被等因素是背景指标。

描述河道洪水变化的参数主要有流量、水位、流速,洪水流量的大小常采用频率表示,水位决定承灾体是否受到洪水作用,而流速反映水流对承灾体冲刷与冲击的作用强度;从水流作用效果方面考虑,主要有洪水持续时间、河流形态、河床质等参数。

### 2.2 危险因子的专家系统调查与分析

为了从多角度分析沿河公路水毁危险性影响因子的作用特征,专门对多年从事水毁治理工作的工程技术人员进行了水毁危险性影响因子的问卷调查,调查表涉及到沿河公路的主要水毁类型、洪水流量、洪水位、流速、河流形态(平面形态、断面特征等)和河床质等,共回收调查表30份。专家系统调查意见汇总及调查结果见表1和表2。

表 1 沿河公路水毁专家系统调查意见汇总表

Table 1 Summary of experts' questionnaire for flood-damage of highway along rivers

内容	被调查人员的看法
主要水毁类型	由汛期强降雨引发的洪水造成的水毁占绝大部分。路基水毁的原因主要是:基础冲刷淘空、边坡冲刷、水流冲击导致挡土墙倒塌;路面水毁的原因主要是:路面高程偏低、洪水位过高引起水漫路面;上边坡排水系统不完善使坡面水流在路面上漫流,冲刷路面
洪水流量	山区洪水突发性强,洪水流量与降雨强度对应。流量越大,造成的损失越大,大流量持续的时间越长,危害越大
洪水位	对于山区河流,流量越大,水位越高;水位与沿河公路高程的相对位置与河流形态有关。峡谷河段水位上升明显,容易威胁到路基及路基防护构造物;开阔河段水位上升较为和缓,最高水位受河滩地形影响较大。洪水位淹没范围内的路基才会出现不同类型的水毁,线位较高的沿河公路路基因洪水而发生水毁的频率很低
流 速	河底比降大的河段,水流速度大,水流冲刷、冲击作用强烈。因山区河流洪水水面比降变化大,会造成局部河段水流速度过大且剧烈波动,有时水流速度超过 15~20 m/s
河流形态与水毁多发位置	峡谷段河流的河床多为基岩或大漂石,沿河公路水毁多表现为水流冲击和滚石的撞击,或水位过高漫上路面;开阔河段的河床质多为卵石夹沙,沿河公路水毁多表现为路基坡脚冲刷和路基边坡坡面冲刷。在平面形态上,沿河公路水毁多发部位主要有:河湾凹岸及河湾出口附近凹岸一侧顺直段;河流断面压缩段及附近上游;因地形引起的水流斜冲、顶冲点及附近下游

表 2 沿河公路水毁危险性影响因子调查结果

Table 2 Investigation results of hazard factors on flood-damage of highway along rivers

人·项

影响因子	流量	水位	流速	洪水持续 时间	河流 形态	河床质	合计	补充其它影响因子
影响大	27	23	24	9	10	7	100	①公路等级偏低,排水与防护工程不够完善(17人); ②资金不足,水毁工程修复率低,防护工程存在隐患(21人); ③然或人为因素造成河床形态变化,对沿河公路带来不利影响(9人)
影响较大	3	5	4	14	13	9	48	
影响较小		1	2	6	5	13	27	
说不清楚		1		1	2	1	5	

从表 1 和表 2 中可以看出,大多数被调查专家(占 80% 以上)认为流量、水位、流速等因素对沿河公路水毁具有较大的影响,这也与沿河公路水毁的现场调查观测资料和室内试验资料相对应<sup>[14-16]</sup>。通常山区河流洪水持续时间较短,暴涨暴落,最大流量和最小流量相差悬殊,而造成水毁时一般在洪峰流量时或退水期;山区河流的河底比降较大,多呈阶梯状,洪水水面比降也较大,使得洪水流速大且波动剧烈,水流对沿河公路路基的冲刷与冲击作用,都十分强烈。

对于洪水持续时间,多数被调查者认为它对沿河公路水毁危险性有较大的影响,这与山区公路水毁主要发生在汛期、汛期多集中性强度较大的降雨、洪水持续时间从几小时到几天等特点有关,特别是许多被调查专家认为短历时暴雨引起的洪水,更具危险性。

对于河流特征,被调查专家主要从河流断面形态、平面形态及河床质等方面进行判断或提出自己的意见,特别是从对公路水毁易发生的位置,来判断河流形态对沿河公路水毁危险性的影响大小。显然,如果沿河公路所在河段为顺直河段,断面形状规则,水流顺畅,则沿河公路路基受到水流作用而损坏的可能性将大大降低;若河段为弯曲河段(特别是比降较大的急弯河段)、断面形状剧烈变化、水流湍急紊乱,则沿河公路路基水毁的发生频率会增大。但是,沿河公路水毁发生的最重要、最活跃的因素是水流,河流形态只是加剧或减轻了水流对沿河公路路基的破坏作用。河床质的作用大小,常常是与其它影响因素综合作用而表现出来,不同河床质的河段,水毁的类型、水流形态不同。

另外,被调查人员还补充了对沿河公路水毁危险性有影响的因子。

根据专家系统调查,将各危险因子按影响作用的大小排序,即:洪水流量 > 水位、流速 > 河流形态 > 洪水持续时间 > 河床质,而流量与水位、流速是相关的;若将河床质的影响放在流速因子中考虑,则可得出主要危险因子为:洪水流量、水位、流速;次要危险因子为:河流形态、洪水持续时间。

### 2.3 沿河公路水毁的主要影响因素作用特点

不同级别(频率)的洪水,对沿河公路路基的影响不同,一般情况下,流量越大,造成的不利影响越大。

洪水水位反映了洪水淹没范围,与流量密切相关,在一定水深范围内,位于河湾凹岸的路基坡脚的冲刷深度,随着水深的增加而增大。

洪水流速反映水流的冲刷强度和冲击能力。对于沙卵石质河床,水流速度越大,路基坡脚处冲刷深度也越大。

河流形态改变水流的边界条件,导致水流对路基的不利作用,加剧了水毁的强度和规模,如:河湾凹岸的冲刷、河流断面受到压缩产生的上游壅水淹没和压缩断面的集中冲刷、地形变化引起水流方向改变而导致对路基的顶冲或斜冲等。

山区河流洪水大多是由汛期强度较大的集中降雨造成的,秦巴山区河流汛期洪水持续时间一般为十几个小时至几天,但由于洪水过程线变化较为复杂,对公路水毁的影响难以作出明确判断<sup>[9]</sup>,一般来说,洪水持续时间越长,对沿河公路造成的威胁越大。

### 3 沿河公路洪水危险性评价方法

#### 3.1 危险等级的划分和危险性指标的确定

沿河公路水毁各危险因子的取值范围变幅很大,需要对其进行一定处理,才可能得到统一的等级和标准。危险等级一般可用极高、较高、中等、低、极低等描述,考虑到极高和极低所占比例较少、洪水灾害具有正偏态的特点,采用 30%、40% 和 30% 对称不等分间隔的 4 级分割法来划分水毁灾害危险因子的等级(将等级低和等级极低合并,认为其等级为低),并赋予定值。各危险因子等级划分及其赋值见表 3。

表 3 沿河公路水毁危险因子等级及其赋值

Table 3 Grades and value assignment of hazard factors on flood-damage of highway along rivers

等级描述	低	中等	较高	极高
赋值 $G$	0	0.3	0.7	1.0
洪水流量	$\leq 0.3Q_s$	$0.3 \sim 0.7Q_s$	$0.7 \sim 1.0Q_s$	$\geq 1.0Q_s$
水位	低于路基坡脚	低于路基高 1/3	低于路基顶面	高于路基顶面
流速	小于路基坡脚处泥沙的起动流速	①小于 $V_c$ ; ②小于坡面上碎石或岩屑的起动流速 $v_c = KV_c$	①等于或略大于 $v_c = KV_c$ ; ②略大于 $V_c$	①大于 $v_c = KV_c$ ; ②大于 $V_c$
河流形态	①河段顺直、河底纵坡变化很小; ②河道中无局部突变地形	①弯曲河段, $r/B \geq 4.0, \theta \leq 45^\circ$ ; ②顺直河段断面的压缩比 $(B - B_c)/B \leq 15\%$ ; ③河底纵坡变化较小, $\Delta H \leq 1.0\text{m}$ ; ④河床局部地形未引起明显的水流顶冲或斜冲	①弯曲河段, $r/B = 2.0 \sim 4.0, \theta = 45^\circ \sim 90^\circ$ ; ② $(B - B_c)/B = 15\% \sim 30\%$ ; ③河底纵坡变化较大, $\Delta H \leq 2.5\text{m}$ ; ④水流顶冲或斜冲比较明显(斜流方向与路基交角为 $15^\circ \sim 45^\circ$ )	①弯曲河段, $r/B \leq 2.0, \theta \geq 90^\circ$ ; ② $(B - B_c)/B \geq 30\%$ ; ③河底纵坡变化较大, $\Delta H \geq 2.5\text{m}$ ; ④斜流方向与路基交角 $\geq 45^\circ$
洪水持续时间	< 12h	12 ~ 24h	24h 至 3d	> 3d

注:  $Q_s$  为设计洪水流量;  $V_c$  为坡脚处卵石或较大块石的起动流速;  $K$  为块石在斜坡上起动的修正系数,可查阅相关手册;  $r$  为河流弯道中线半径;  $B$  为河宽;  $\theta$  为河流弯道中心角;  $B_c$  为顺直河段压缩断面的河宽;  $\Delta H$  为河底纵向跌坎高度。

由灰色系统中的关联度分析方法可知,若是由关联度大小排列而得到的关联序,只要有确定的母序列和子序列,样本数等于或大于 5 个,则母序列和子序列之间的关联序就保持不变。根据关联度的这一特性和各危险因子的平均关联度,可以排出其关联序为:洪水流量 = 水位 = 流速 > 河流形态 > 洪水持续时间。

从平均关联度最小的次要危险因子开始,给定其起始权数(取 1),以此为公差,依次呈等差级数向关联度增大的方向递增次要危险因子的权数;为突出主、次要危险因子的差别,主要危险因子的权数以最大的次要危险因子的权数为基数,以 2 为公比,呈几何级数继续递增。则可得到各危险因子的权数和权重(表 4),5 个危险因子的权重之和等于 1。

表 4 危险因子的权数和权重

Table 4 Weighting number and weights of hazard factors

危险因子	洪水持续时间	河流形态	流速	水位	洪水流量
权数	1	2	4	4	4
权重	0.067	0.133	0.266	0.266	0.266

#### 3.2 沿河公路水毁危险性指数的判定

为了进行沿河公路水毁危险性评价,首先需要将受洪水影响的路段,划分为若干一定长度的区段(点单

元),通过对沿河公路点单元的水毁危险性评价,了解整个路段中可能发生水毁的最危险位置;再通过水毁点的分布和危险性大小,评价整个路段的水毁危险性大小。

为反映沿河公路水毁的特征、影响因子的作用形式以及具体路段的实际情况,建议从山区沿河公路与河流的相对位置、河道洪水的变化等方面考虑,参照下述原则划分点单元:(1)路线位于明显河湾的凹岸或凸岸的路段,为一个点单元;(2)路线位于连续河湾时,若弯道之间的直线过渡段较长(直线过渡段长度 > 2B),则弯曲段和直线段各为一个点单元;若直线段较短或直接为 S 型河湾,则作为一个点单元;(3)路线连续沿顺直河段,且河槽宽度变化不大的路段,为一个点单元。另外,若河床形态有明显变化(如:局部地形引起河道压缩、河床比降有明显变化等)的路段,也可作为一个点单元。

对于点单元水毁危险性,利用危险因子的等级及赋值(表 3),结合其权重(表 4),采用沿河公路水毁的危险性指数 R 判定其危险性大小,计算公式为

$$R = 0.266G_1 + 0.266G_2 + 0.266G_3 + 0.133G_4 + 0.067G_5. \tag{1}$$

式中:R 为沿河公路的水毁危险性指数(0 ≤ R ≤ 1.0);G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub>, G<sub>3</sub>, G<sub>4</sub>, G<sub>5</sub> 分别为洪水流量、洪水水位、洪水流速、河流形态、洪水持续时间的赋值。

### 4 沿河公路洪水危险性评价方法的应用

沿河公路洪水危险性评价是对洪水致灾能力的评价,可作为公路水毁防治规划和工程设计的依据。基于多年的水毁现场调查资料,建议在实践中用 R 对沿河公路水毁进行危险性评价时,沿河公路点单元的水毁危险性指数及危险性等级、灾害特征以及对策如表 5 所示。

表 5 点单元的危险性指数及危险性等级、灾害特征以及对策  
Table 5 Hazard index, hazard grades, disaster characteristics at flood-damage assessing units and their prevention and control strategies

R	危险性等级	灾害特征	灾情预测	对策
R ≥ 0.8	极严重	各危险因子取值均很大,组合后的危险程度高,极易造成路基或防护工程严重损坏	可能造成严重水毁	以防为主、治为辅,应及时采取综合防治措施,提高路基抵御洪水灾害的能力
R = 0.6 ~ 0.8	严重	各危险因子取值比较大,个别因子取值很大,组合后的危险程度较高,易造成路基或防护工程的局部损坏	可能造成较严重水毁,尤其是路基或防护工程的局部损坏	采取防治结合的方式,加强预测和预警工作,在汛期前采取合理的防治措施,消除水毁隐患
R = 0.35 ~ 0.6	中等	个别危险因子的取值较大,组合后的危险程度不高,可能会造成路基或防护工程等局部轻度损坏,采取工程预防措施易于控制	较少造成较严重的水毁,可能发生承灾体的局部轻度损坏	以治为主、防为辅,对存在的水毁隐患和防护缺陷,采取适当措施进行治理,加强巡查,及时发现
R ≤ 0.35	轻微	各危险因子的取值较小,组合后的危险程度较低,发生轻微损坏的可能性存在	一般情况下不会造成较严重的水毁	以防为主、治为辅,加强巡查,及时发现对公路安全造成不利影响的因素并解决

整个路段中 R 达到极严重、严重等级的点单元数量,反映路段总体上的水毁危险程度,这样的点单元越多,说明在发生较大级别洪水时该路段出现严重水毁的可能性越大;平均单位长度路段上 R 达到极严重、严重等级的点单元数量,反映该路段 R 达到极严重、严重等级的密度,可以用平均每 10km 达到极严重、严重等级的点单元数量来表示,其值越大,说明整个路段上达到极严重和严重等级的点单元分布越密集,可能发生水毁的程度越严重。

### 5 结论

沿河公路水毁灾害危险性评价在山区公路建设、养护管理过程中具有重要的作用。

(1)本文在明确了沿河公路水毁危险性的含义的基础上,通过理论分析、现场调查和专家系统调查,总

结归纳出沿河公路水毁危险因子。其中,主要危险因子为:洪水流量、水位、流速;次要危险因子为:河流形态、洪水持续时间。

(2)在沿河公路水毁危险因子等级划分的基础上,基于灰色系统关联度分析,确定了危险因子的权重,进而提出了沿河公路水毁危险性指数的计算方法。

(3)工程应用表明,本文研究成果可用于具体的沿河公路水毁易发段危险性点评价乃至整个路段危险性线评价的分析判断。依此进一步作公路易损性评价,可为公路水毁灾害的风险评价及防治提供依据。

## 参考文献:

- [1] 刘希林. 我国泥石流危险度评价研究:回顾与展望[J]. 自然灾害学报,2002,11(4):1-8.  
LIU Xilin. Debris flow hazard assessment in China: a review and perspective [J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(4):1-8. (in Chinese)
- [2] 黄大鹏,刘闯,彭顺风. 洪灾风险评价与区划研究进展[J]. 地理科学进展,2007,26(4):11-22.  
HUANG Dapeng, LIU Chuang, PENG Shunfeng. Progress on assessment and regionalization of flood risk [J]. Progress in Geography, 2007, 26(4):11-22. (in Chinese)
- [3] 蒋焕章. 关于根治公路水毁之我见[J]. 中国公路学报,1993,6(增刊1):110-112.  
JIANG Huanzhang. My view on treatment to highway flood - damage [J]. China Journal of Highway and Transport, 1993, 6(S1):110-112. (in Chinese)
- [4] 曾继平. 公路抗洪能力评定等级与水毁防治初探[J]. 华东公路,1997(2):10-13.  
ZENG Jiping. Anti - flood capacity grades and approaches to prevention and treatment measures against flood - damage for highway [J]. East China Highway, 1997 (2):10-13. (in Chinese)
- [5] 肖盛燮,凌天清,陈世民,等. 公路与桥梁抗洪分析[M]. 北京:人民交通出版社,1999:1-8.  
XIAO Shengxie, LING Tianqing, CHEN Shimin, et al. Analysis About Anti - Flood Capacity For Highway And Bridge - culvert [M]. Beijing: China Communication Press, 1999:1-8. (in Chinese)
- [6] 王亚玲,田伟平. 小桥涵抗水灾综合评价指标[J]. 长安大学学报:自然科学版,2005,25(5):51-53.  
WANG Yaling, TIAN Weiping. Anti - disaster comprehensive evaluation index of bridge and culvert [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(5):51-53. (in Chinese)
- [7] 崔伯恩,凌建明,赵鸿铎,等. 沿河公路抗水毁能力评价方法研究[J]. 公路交通科技,2006,23(9):6-9.  
CUI Boen, LING Jianming, ZHAO Hongduo, et al. Evaluation method study on capability of river - side roads against water damage [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(9):6-9. (in Chinese)
- [8] 刘伟,田伟平. 模糊综合评价法在山区小桥涵抗水灾能力评价中的应用[J]. 北方交通,2008(5):178-180.  
LIU Wei, TIAN Weiping. Application of fuzzy synthetic estimating method in estimation of flood - resistance of small bridge culvert in mountain area [J]. Northern Communications, 2008(5):178-180. (in Chinese)
- [9] 黄先刚. 秦岭山区沿河公路水毁因素分析与评价研究[D]. 西安:长安大学,2005.  
HUANG Xiangang. Analysis About Anti - Flood Influencing Factors And Evaluation Method Study On Highway Along River In Qinling Mountain Area [D]. Xi'an: Chang'an University, 2005. (in Chinese)
- [10] 沈波,艾翠玲. 山区公路排水系统抗水灾评价指标[J]. 长安大学学报:自然科学版,2008,28(4):11-16.  
SHEN Bo, AI Cuiling. Evaluation indices of anti - flood for mountain highway drainage system [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(4):11-16. (in Chinese)
- [11] 李家春,董卫卫,崔娥,等. 山区公路水灾害评价体系框架的研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2009,28(2):259-263.  
LI Jiachun, DONG Weiwei, CUI E, et al. Study on framework of evaluation system of water hazard in mountainous highway [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Sciences, 2009, 28(2):259-263. (in Chinese)
- [12] 程尊兰,耿学勇,党超,等. 川藏公路 G317 线路水毁危险度分段研究[J]. 灾害学,2006,21(4):18-23.  
CHENG Zunlan, GENG Xueyong, DANG Chao, et al. Risk degree of water damages along the highway G317 in Tibet [J]. Journal of Catastrophology, 2006, 21(4):18-23. (in Chinese)
- [13] 凌建明,官盛飞,崔伯恩. 重庆市公路水毁环境区划指标的研究[J]. 水土保持通报,2008,28(3):141-147.  
LING Jianming, GUAN Shengfei, CUI Boen. Indicators for highway flood hazard environmental regionalization in Chongqing City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(3):141-147. (in Chinese)
- [14] 田伟平,李惠萍,高冬光. 弯道环流与沿河路基冲刷试验研究[J]. 重庆交通学院学报,2002,21(3):94-97.  
TIAN Weiping, LI Huiping, GAO Dongguang. The experiments of the circulation flow and subgrade scour in bend channel [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2002, 21(3):94-97. (in Chinese)
- [15] 田伟平,李惠萍,高冬光. 沿河路基冲刷机理与冲刷深度[J]. 长安大学学报:自然科学版,2002,22(4):39-42.  
TIAN Weiping, LI Huiping, GAO Dongguang. Scour depth and mechanism of highway subgrade along river [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(4):39-42. (in Chinese)
- [16] 李细伟. 沿河公路路基水毁机理及试验研究[D]. 西安:长安大学,2005.  
LI Xiwei. Mechanism Of Roadbed Flood Damage Along The River And Experimental Research [D]. Xi'an: Chang'an University, 2005. (in Chinese)