引文格式：张立宪,方留杨,李晓燕,等. 基于公里路段的公路自然灾害风险评估方法研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(8):18-22. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.08.004

基于公里路段的公路自然灾害风险评估方法研究

张立宪[1]，方留杨[2]，李晓燕[1]，苏　舟[3]，姜　男[4]，徐爱华[1]
（1. 云南省公路路政管理总队（云南省综合交通发展中心），云南 昆明　650031；2. 云南省交通规划设计研究院股份有限公司，云南 昆明 650200；3. 云南省交通科学研究院有限公司，云南 昆明 650011；4. 云南省公路科学技术研究院，云南 昆明 650051）

摘　要：为充分发挥公路承灾体普查成果在公路自然灾害监测和防治、公路灾毁保险等方面的支撑作用，基于自然灾害综合风险公路承灾体普查数据及历史灾毁数据等成果，结合气象、高边坡等影响因素，构建了公路自然灾害风险评估指标体系。以 1 km 为单位划分路网数据得到公路自然灾害风险评估单元；利用 AHP+熵权+Topsis 模型相结合的方法计算各公里路段风险指数，进而将路段自然灾害风险划分为高风险（Ⅰ级）、较高风险（Ⅱ级）、一般风险（Ⅲ级）、低风险（Ⅳ级）4 个等级。以云南某区域公路网进行验证，结果表明，Ⅰ至Ⅳ级风险路段分别为 62、149、634、1 898 个，Ⅰ级和Ⅱ级风险路段主要分布在普通国省道，Ⅳ级风险路段主要分布在农村公路。

关键词：交通安全；公路承灾体普查；灾害风险评估；公里路段；AHP+熵权+Topsis
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）08-0018-05

Research on Highway Natural Disaster Risk Assessment Method Based on Kilometer Road Sections

ZHANG Lixian[1], FANG Liuyang[2], LI Xiaoyan[1], SU Zhou[3], JIANG Nan[4], XU Aihua[1]
(1. Yunnan Provincial Highway Administration Corps (Yunnan Comprehensive Transportation Development Center), Kunming 650031, China;
2. Broadvision Engineering Consultants, Kunming 650200, China;
3. Yunnan Transportation Research Institute Co., Ltd., Kunming 650011, China;
4. Yunnan Science & Technology Research Institute of Highway, Kunming 650051, China)

Abstract: In order to fully leverage the supporting role of survey results of highway disaster bearing bodies in natural disaster monitoring and prevention, highway disaster insurance, and other aspects, based on the survey data of highway disaster bearing bodies and historical disaster damage data, combined with meteorological, high slope and other influence factors, we constructed a highway natural disaster risk assessment index system. We divided the road network data into natural disaster risk assessment units based on 1 km, used the combination method of AHP, entropy weight and Topsis model to calculate the risk index of each kilometer section, and divided the natural disaster risk of section into high risk (Level I), higher risk (Level II), general risk (Level III), and low risk (Level IV) four levels. We verified this method by a regional highway network in Yunnan Province. The results show that there are 62, 149, 634, and 1 898 risk sections from Level I to Level IV, respectively. Level I and Level II risk sections are mainly distributed on ordinary national and provincial roads, while Level IV risk sections are mainly distributed on rural roads.

Key words: traffic safety, highway disaster bearing body census, disaster risk assessment, kilometer section, AHP+entropy weight+Topsis

2020 年 5 月，国务院办公厅印发《关于开展第一次全国自然灾害综合风险普查的通知》，启动全国自然灾害风险普查工作。交通运输部根据《第一次全国自然灾害综合风险普查总体方案》，组织编制《自然灾害综合风险公路水路承灾体普查实施方案》和《自然灾害综合风险公路承灾体普查技术指南》，对开展公路承灾体普查提供根本遵循和指导[1]。目前，全国公路承灾体普查工作已完成成果汇交，为进一步拓展普查成果应用，有必要基于普查成果和公路历史灾毁等数据开展公路自然灾害风险区划和评估。

公路自然灾害风险区划和评估是依据全国公路自然灾害承灾体普查等数据成果，通过量化计算评估公路自然灾害综合风险水平，并对其空间范围进行等级和区域划分的过程。公路作为典型的线状要素，具有线状分布特点和行政区划特征。因此，从区划的尺度看，公路自然灾害风险评估可分为基于行政区划和基

项目来源：云南省科技厅科技计划资助项目（202301AT070262）；云南省高层次人才培养支持计划资助项目（YNWR-QNBJ-2020-031）。
第一作者简介：张立宪（1985—），硕士研究生，高级工程师，研究方向为交通运输地理信息系统应用，E-mail：guge1141@aliyun.com。

于路段的评估方法。

现有公路自然灾害风险评估主要集中在2个维度：一是基于单影响因素的公路灾害区划[2-9]；二是公路沿线自然灾害分布特征分析和应用[10-11]。本文在现有研究基础上，以更加精细的公里路段为单元，基于公路承灾体普查成果、公路历史灾毁数据、高边坡分布数据、气象数据，构建融合多因素的公路自然灾害风险区划评估指标体系，综合利用AHP、熵权法、Topsis模型相结合的方法实现公路自然灾害风险区划和评估，可为公路管养部门开展日常养护管理、灾害预警和应急处置以及系统性的公路灾害综合风险防治、公路保险等提供指导。

1　公路自然灾害承灾体普查

1.1　主要内容

公路自然灾害承灾体普查是自然灾害综合风险普查的重要组成部分，主要通过现场采集或资料收集等方式，获取公路沿线崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷与沉陷、水毁等5类可能影响公路正常运行的自然灾害风险点所在的路线、灾害历史特征、现状特征、视频图片等信息，并同步开展公路沿线高边坡点位信息采集。

1.2　公路承灾体风险评估

在公路承灾体普查基础上，以灾害发生频次、灾害历史危害程度、灾害处置情况、灾害发育程度、公路重要性等为评估指标，采用指标体系法计算各类灾害风险点风险指数，进而实现风险分级。各类灾害风险点风险评估指标权重如表1所示[1]。

表1　灾害风险点风险评估指标权重系数

灾害类型	评估指标				
	灾害发生频次（A_1）	灾害历史危害程度（A_2）	灾害处置情况（A_3）	灾害发育程度（A_4）	公路重要性（A_5）
崩塌	0.11	0.28	0.05	0.36	0.20
滑坡	0.05	0.28	0.11	0.36	0.20
泥石流	0.11	0.36	0.05	0.28	0.20
塌陷与沉陷	0.11	0.28	0.05	0.36	0.20
水毁	0.05	0.36	0.11	0.28	0.20

根据表1的指标权重，利用加权求和法计算风险点的风险指数CRI，如式（1）所示。

$$\mathrm{CRI}=\sum_{i=1}^{5}A_i\gamma_i \tag{1}$$

式中，γ_i为表1中各指标对应的权重；A_i为第i个指标的分值，除灾害处置情况指标外，按由低到高依次划分为4级，各级分值依次为25、50、75、100。以公路重要性指标为例，指标分级及其对应的分值如表2所示。

表2　公路重要性指标分值

评估指标	分级	分值
公路重要性	四级公路及以下	25
	三级公路和国省道四级公路	50
	二级公路和国省道三级公路	75
	高速公路及一级公路	100

根据灾害风险点风险指数CRI，按表3的分级标准实现灾害风险点风险分级。

表3　风险分级标准

风险分级	风险指数（CRI）
一级（重大）	CRI＞83
二级（较大）	62＜CRI≤83
三级（一般）	48＜CRI≤62
四级（低）	CRI≤48

2　风险区划评估因子

2.1　公路承灾体普查风险因子

公路承灾体普查风险因子体现各类自然灾害对公路交通设施的潜在影响，即常见的滑坡、崩塌等自然灾害引起的公路灾害损失程度及其发生的可能性。公路承灾体普查风险因子来源于自然灾害风险公路承灾体普查采集的风险点信息，根据风险等级将一级风险点、二级风险点、三级风险点和四级风险点分别作为风险区划评估因子。

2.2　灾毁因子

灾毁因子来源于公路灾毁信息系统的灾毁点信息，体现历史灾情对公路交通设施的继发性和延续性影响，按灾毁等级将一级灾毁点、二级灾毁点、三级灾毁点、四级灾毁点分别作为风险区划评估因子。

2.3　高边坡风险因子

公路沿线高边坡分为路基边坡和路堑边坡两类。高边坡的稳定性易受地层、岩层产状、人工活动、地下水等因素影响，路段沿线高边坡的数量在一定程度上影响车辆和人员安全[12-13]。故选取路段沿线高边坡数量指标作为公路路段自然灾害风险区划评估因子。

2.4　气象因子

对研究区域内近3 a公里格网日均降雨量、气温、能见度、风速等气象数据进行均值计算，并与公里路段进行空间连接，得到公里路段年均降雨量、气温、能见度和风速4个气象因子。公里路段自然灾害风险评估指标体系如图1所示。

3　风险评估方法

3.1　公里路段划分

根据公路线性分布特点，沿公路里程桩号递增的方向，以1 km为划分标准，采用等距断点分割法对公

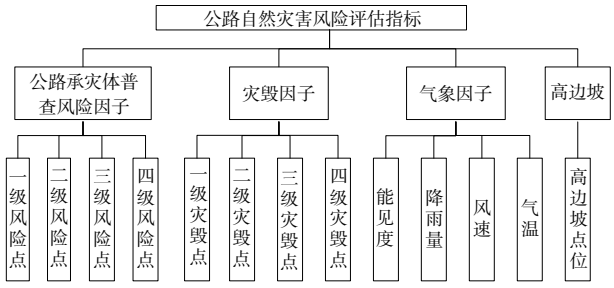


图1 公路自然灾害风险评估指标体系

路矢量数据进行剖分，得到公路自然灾害风险区划评价单元。

3.2 模型构建

依次利用AHP将公路承灾体普查风险因子、灾毁因子、气象因子下的二级指标整合为3个一级指标，然后结合高边坡点位指标，得到灾普因子（*ZP*）、灾毁因子（*ZH*）、气象因子（*QX*）、高边坡因子（*BP*）4个一级指标。利用熵权法对4个一级指标赋权后，再基于熵权的Topsis模型计算路段自然灾害风险指数，进而实现路段风险区划和评估。

3.2.1 AHP-熵权法确定权重

1）基于AHP简化评估因子。AHP是以一种标度客观量化人的主观判断的系统分析和决策方法，主要包括确定各指标相对重要性、构造判断矩阵、矩阵归一化处理、计算判断矩阵特征值和一致性检验等步骤[14-15]。以公路承灾体普查风险因子为例，构建以一级风险点、二级风险点、三级风险点和四级风险点为评价指标的重要性度量判断矩阵 $\boldsymbol{R}$，如式（2）所示。

通过计算，判断矩阵相对一致性比例 CR = 0.005，通过一致性检验，得到一级至四级风险点指标权重向量为 $\boldsymbol{W}$ =[0.483，0.272，0.157，0.088]。

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}1 & 2 & 3 & 5\\ 1/2 & 1 & 2 & 3\\ 1/3 & 1/2 & 1 & 2\\ 1/5 & 1/3 & 1/2 & 1\end{bmatrix} \tag{2}$$

用权重向量 $\boldsymbol{W}$ 乘以标准化后的公路承灾体普查风险因子，得到综合4个风险点指标的灾普因子 ZP，计算方法如式（3）所示。

$$ZP=\sum_{i=1}^{4}ZP_iW_i \tag{3}$$

式中，ZP_i 和 W_i 分别为标准化后风险点指标值和权重。

以同样的计算方法，分别将灾毁因子、气象因子所属的二级指标简化为新指标 ZH 和 QX。自此，将除高边坡点位外的12个二级指标简化为 ZP、ZH、QX2个一级指标。因高边坡一级指标下只有1个高边坡点位数量二级指标，故直接将其作为一级指标。

2）熵权法确定指标权重。熵权法是一种不受人为因素影响的客观权重赋值方法，具有较强的实用性[16]。根据各区划指标信息熵的大小，确定每个指标的熵权。若某个指标信息熵越小，则表明其变异程度越大，蕴含的信息量越大，指标的权重也就越大。构建以风险区划路段数量 m 和简化后风险区划评估指标 n 的矩阵 $\boldsymbol{B}$，$\boldsymbol{B}=(b_{ij})_{m\times n}$。

首先对 $\boldsymbol{B}$ 中每个指标的值进行归一化处理，然后依次计算各个风险区划评估因子的熵值 E_j，最后得到评价指标的权重 W_e。E_j 和 W_e 的方法分别见式（4）、（5）。

$$E_j=-\frac{1}{\ln n}\sum_{j=1}^{n}p_{ij}\ln p_{ij} \tag{4}$$

$$W_e=\frac{(1-E_j)}{\sum_{j=1}^{n}(1-E_j)} \tag{5}$$

式（4）中，$p_{ij}=\dfrac{Z_{ij}}{\sum_{j=1}^{n}Z_{ij}}$。其中，$Z_{ij}$ 为第 i 个一级指标下第 j 个区划路段标准化后的值。因归一化后的矩阵存在0值，为了消除其对式（4）计算的影响，对归一化后的矩阵 $\boldsymbol{B}$ 的所有元素进行非负处理，即 $b_{ij}'=b_{ij}+\varepsilon$，则 $\boldsymbol{B}'=(b_{ij}')_{m\times n}$。为确保 ε 对原始数据的规律不产生影响，$\varepsilon=0.000\,1$。

3.2.2 基于熵权法的Topsis模型

Topsis模型由Hwang C L等于1981年提出，又称优劣解距离法，是解决多目标决策等复杂问题的有力工具。该方法的核心思想是通过判断研究目标与“正理想解”和“负理想解”的距离对评价对象排序，进而对各研究对象的优劣进行评价和判断。

1）计算加权矩阵。将各路段风险区划评价指标的熵权 W_e 与标准化后的风险区划评估指标矩阵 $\boldsymbol{B}'$ 相乘，得到加权矩阵 $\boldsymbol{V}$，如式（6）所示。

$$\boldsymbol{V}=(v_{ij})_{m\times n} \tag{6}$$

2）计算正理想解和负理想解。令 V^+ 表示指标最优的解决方案，即正理想解；V^- 表示指标最差的解决方案，即负理想解，则：

$$V^+=\{\max v_{ij}|j=1,2,\cdots,n\}=\{v_1^+,v_2^+,\cdots,v_n^+\} \tag{7}$$

$$V^-=\{\min v_{ij}|j=1,2,\cdots,n\}=\{v_1^-,v_2^-,\cdots,v_n^-\} \tag{8}$$

3）计算欧氏距离。分别计算各评价路段指标值与正理想解和负理想解的欧氏距离 D^+ 和 D^-，分别如式（9）、（10）所示。

$$D^{+}=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(v_{ij}-v_{j}^{+}\right)^{2}}\ (i=1,2,\cdots,m) \tag{9}$$

$$D^{-}=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(v_{ij}-v_{j}^{-}\right)^{2}}\ (i=1,2,\cdots,m) \tag{10}$$

4）计算评价路段与理想解的接近度 C_i，如式(11)所示。

$$C_i=\frac{D^{-}}{D^{-}+D^{+}}(i=1,2,\cdots,m) \tag{11}$$

式中，C_i 为第 i 个评价路段指标值与最优解的接近程度，其值介于0~1之间，值越大表示路段的综合自然灾害风险越高。

4　实例分析

4.1　研究区概况

以云南某区域公路网进行验证，研究区域内路网按行政等级划分，国道、省道、农村公路占比分别为8%、10.52%、81.48%；按技术等级划分为三级公路、四级公路、五级公路，占比分别为6.76%、9.54%、83.7%。以1 km为单位对路网数据剖分后，得到2 743个风险区划评价路段。

4.2　风险区划

根据式（5）的计算方法，得到 *ZP*、*ZH*、*QX*、*BP* 四个一级评价指标熵权 W_e。然后用 W_e 与标准化后评价指标相乘，分别计算各评价指标的正理想解 V^{+} 和负理想解 V^{-}，结果如表4所示。

表4　各指标熵权及理想解

指标	熵权	正理想解	负理想解
ZP	0.299	0.299	0.000
ZH	0.311	0.311	0.000
QX	0.024	0.024	0.000
BP	0.366	0.366	0.000

在此基础上，计算正理想解距离 D^{+} 和负理想解距离 D^{-} 以及接近度 C_i，结果如表5所示。

表5　路段自然灾害风险评估结果（节选）

路段编号	正理想解距离 D^{+}	负理想解距离 D^{-}	接近度 C_i
1378	0.385	0.247	0.391
1340	0.416	0.229	0.355
1362	0.386	0.188	0.328
1280	0.426	0.161	0.274
1269	0.446	0.155	0.258
1319	0.506	0.084	0.143
1429	0.510	0.082	0.139
1371	0.535	0.065	0.108
2351	0.539	0.059	0.099
2153	0.539	0.055	0.092

根据 C_i 的范围，利用自然断点法将路段自然灾害风险划分为四级，各等级的名称、级别、风险指数（C_i）和图例样式如表6所示。

表6　公路自然灾害风险分级表

风险等级名称	风险级别	接近度 C_i	图样示例
高风险	Ⅰ级	(0.263,0.622]	红色
较高风险	Ⅱ级	(0.101,0.263]	橙色
一般风险	Ⅲ级	(0.025,0.101]	黄色
低风险	Ⅳ级	[0.000,0.025]	蓝色

4.3　结果分析

4.3.1　风险路段空间分布特征

根据表6对2 743个km路段单元进行风险区划，其中，Ⅰ级至Ⅳ级风险路段分别为62、149、634、1 898个，占比分别为2.26%、5.43%、23.11%、69.19%。由此可见，辖区内主要以Ⅳ级风险路段为主。

各路段风险等级及空间分布如图2所示。高风险路段主要集中在研究区域中部；较高风险路段集中于区域中部，呈三叉型分布；一般风险和低风险路段分布不具有显著特征，与区域内路网空间分布大体相当。

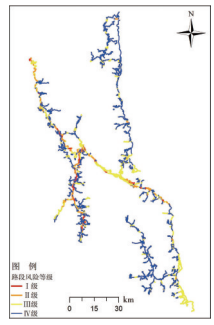


图2　研究区域路段风险等级分布图

4.3.2　风险因子与路段关系分析

对不同风险路段的灾普因子、灾毁因子、高边坡3个因子点位数量进行统计分析，结果如表7所示。从路段风险因子点位数均值和最大值来看，风险等级越高的路段，灾普风险因子、灾毁风险因子、高边坡风险因子点位数量越大。

表7　不同等级路段风险因子点位数量统计表

风险等级	路段数量	*ZP*		*ZH*		*BP*	
		最大值	均值	最大值	均值	最大值	均值
Ⅰ级	62	9	2.226	17	5.210	6	3.194
Ⅱ级	149	8	1.430	9	2.134	3	1.624
Ⅲ级	634	3	0.274	3	0.270	1	1.000
Ⅳ级	1 898	0	0.000	0	0.000	1	1.000

气温、降雨量、能见度、风速4个气象因子标准化后的平均值与路段风险等级关系如图3所示。由图3可知，路段风险等级与气象因子之间没有显著的关系。

4.3.3　路网行政等级与风险等级关系分析

按行政等级和风险等级对路段数进行统计，并对数据进行归一化处理后，得到不同风险等级路段中各

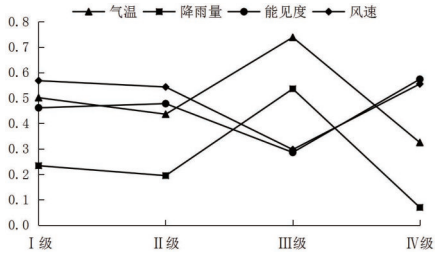


图3 气象因子与路段风险等级关系

行政等级路段比例，如图4所示。

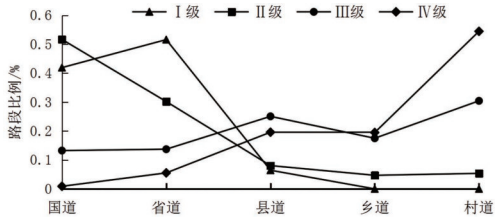


图4 不同风险等级和路段行政等级比例关系

由图4可知，Ⅰ级和Ⅱ级风险路段中，国道和省道所占比例较大，分别达93.55%和81.88%；Ⅰ级风险路段中，乡道和村道占比为0.00%；Ⅱ级风险路段中，乡道占比最低，为4.70%。Ⅲ级风险路段中，县道和村道占比达55.52%，其余3种行政等级路段占比为44.48%；Ⅳ级风险路段主要分布在县道及以下的农村公路，占比达93.57%，其中一半以上分布在村道，占比达54.48%。

从总体上看，行政等级越高的道路，高风险路段越多；低风险路段主要分布在以县道、乡道和村道为主的农村公路。

4.3.4 路线与风险等级关系分析

根据路网等级与风险等级关系分析可知，普通国道和省道中，Ⅰ级和Ⅱ级风险路段较多。研究区域内共有1条国道（G214）和3条省道（S236、S237、S318），进一步分析4条路线的不同自然灾害风险等级里程，可为路线的灾害风险处置和防控提供科学依据。结果如图5所示。

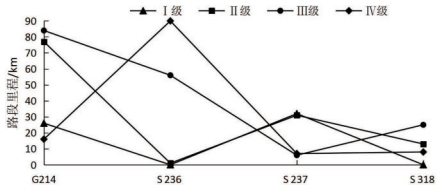


图5 普通国省道风险路段里程统计

由图5可以看出，路线G214中，Ⅲ级风险路段较多，占比为41.38%；Ⅳ级风险路段最少，占比为7.88%；Ⅱ级和Ⅲ级风险路段占比达79.31%；S336无高风险路段，Ⅲ级和Ⅳ级风险路段占绝大部分，占比高达99.32%；S237Ⅱ级以上风险路段较多，占比达82.89%；S318无高风险路段，Ⅱ级和Ⅲ级风险路段占比为82.61%；低风险路段占比为17.39%。

5 结 语

本文通过分析公路灾害风险因素，结合层次分析法、熵权法和Topsis模型，对公路路段进行自然灾害风险区划与评估。结果显示，Ⅰ级和Ⅱ级高风险路段占比较小，主要集中在研究区域中部，且国道、省道高风险路段较多，农村公路低风险路段占比较大。G214国道、S318省道以Ⅱ级和Ⅲ级风险路段为主，S237省道高风险和较高风险路段占比较大。研究结果可为公路管养、应急处置及灾害保险提供科学指导。

参考文献

[1] 交通运输部路网监测与应急处置中心等. 自然灾害综合风险公路承灾体普查技术指南(第一册 数据采集)[M]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2021

[2] 武万里,缑晓辉,刘垚. 基于GIS的高速公路道路结冰风险分析与评价[J]. 华北自然资源,2021,29(2):134-136

[3] 武万里,缑晓辉,刘垚. 基于GIS的路面积雪灾害风险分析与区划研究[J]. 防灾科技学院学报,2021,23(1):87-93

[4] 保广裕,周丹,郑玲,等. 青海省公路沿线强降雪天气灾害风险区划研究[J]. 沙漠与绿洲气象,2019,13(4):109-116

[5] 伍仁杰. 中国内陆地区公路洪灾风险区划研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2020

[6] 余田野,文舸一,王学良,等. 湖北省高速公路雷电活动特征及风险区划研究[J]. 公路,2019,64(3):187-194

[7] 张中杰,张娣,曲晓黎,等. 河北省高速公路路面结冰风险区划研究[J]. 气象科技进展,2022,12(2):69-72

[8] 杜建华,郑虹晖,赵蕾,等. 海南环岛高速强降雨灾害风险分析[J]. 干旱气象,2020,38(4):683-688

[9] 雍佳,王建英,包新宇,等. 宁夏高等级公路强降雨时空分布特征及灾害风险评估[J]. 宁夏工程技术,2023,22(2):109-116

[10] 刘春龙,胡亦鹤,周传武. 浙南山区公路承灾体自然灾害分布特征及防治研究[J]. 公路,2023,68(12):328-336

[11] 李立青,何世阳,孙强. 基于专家系统的公路承灾体地质灾害分级[J]. 公路与汽运,2023,38(6):95-100

[12] 李腾飞,冯明磊,林国涛,等. 水敏性软岩挖方高边坡变形机制及其防治[J]. 公路,2022,67(1):70-73

[13] 赵常青,樊占东,冉黎明,等. 破碎岩土高边坡锚索锚杆框架梁支护施工工艺[J]. 公路,2023,68(5):50-53

[14] 张静,保广裕,刘玮,等. 青海公路沿线暴雨洪涝灾害风险指数特征与模型研究[J]. 干旱区地理,2024,47(1):28-37

[15] 刘若琦,黄志强. 基于AHP-GIS的宜春市生态敏感性评价[J]. 地理空间信息,2024,22(4):54-59

[16] 李峰,孙洁,马莹莹. 熵权法+GIS在公路网国土空间规划评价中的应用研究[J]. 公路工程,2023,48(6):179-183