Open Journal of Transportation Technologies 交通技术, 2026, 15(6), 743-756
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ojtt
https://doi.org/10.12677/ojtt.2026.156064

Hans汉斯

# 基于CRITIC-TOPSIS的智能网联车辆城市道路感知与运行适配性评价

**何剑东**

西华大学汽车与交通学院，四川 成都

收稿日期：2026年9月21日；录用日期：2026年10月27日；发布日期：2026年11月6日

## 摘　要

**为评价城市道路对智能网联车辆感知与运行的适配程度，从道路基础与交通组织、道路感知环境和交通运行状态3个方面构建17项评价指标，采用CRITIC-TOPSIS模型对成都市锦江区20个典型路段进行评价。结果表明，交通标线清晰度、行人及非机动车影响和交通信号灯情况权重较高；样本综合贴近度为0.340~0.717，红星路一至二段跨线桥适配水平最高，净居寺路和龙舟路相对较低。敏感性分析表明，关键指标权重扰动±20%时道路排序总体稳定。研究可为城市道路环境优化及智能网联车辆运行条件改善提供参考。**

## 关键词

**智能网联车辆，城市道路，道路适配性，CRITIC，TOPSIS**

# Evaluation of Urban Road Perception and Operational Adaptability for Intelligent Connected Vehicles Based on CRITIC-TOPSIS

**Jiandong He**

School of Automobile and Transportation, Xihua University, Chengdu Sichuan

Received: September 21, 2026; accepted: October 27, 2026; published: November 6, 2026

## Abstract

**To evaluate the adaptability of urban roads to the perception and operation of intelligent connected vehicles (ICVs), 17 evaluation indicators are constructed from three dimensions: road infrastructure**

文章引用: 何剑东. 基于 CRITIC-TOPSIS 的智能网联车辆城市道路感知与运行适配性评价[J]. 交通技术, 2026, 15(6): 743-756. DOI: 10.12677/ojtt.2026.156064

**and traffic organization, road perception environment, and traffic operation status. The CRITIC-TOPSIS model is adopted to assess 20 typical road segments in Jinjiang District, Chengdu. The results show that the clarity of traffic markings, the impact of pedestrians and non-motor vehicles, and the condition of traffic signals have relatively high weights. The comprehensive closeness degrees of the samples range from 0.340 to 0.717; the overpass of Section 1~2 of Hongxing Road has the highest adaptation level, while Jingjusi Road and Longzhou Road have relatively low levels. The sensitivity analysis indicates that the ranking of road segments remains generally stable when the weights of key indicators are perturbed by ±20%. This study can provide a reference for optimizing the urban road environment and improving the operation conditions of intelligent connected vehicles.**

## Keywords

**Intelligent Connected Vehicles, Urban Roads, Road Adaptability, CRITIC, TOPSIS**

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

## 1. 引言

随着智能感知、人工智能及车联网技术的发展，智能网联汽车逐步由封闭场地测试向开放道路示范应用拓展。车辆主要依靠摄像头、毫米波雷达、激光雷达等设备获取道路边界、交通标志标线及周边交通参与者信息，并通过多源信息融合实现环境识别与行驶决策。《智能网联汽车道路测试与示范应用管理规范（试行）》提出，道路测试车辆应明确自动驾驶功能对应的设计运行条件及其与测试道路交通要素之间的匹配关系[1]。因此，道路环境对智能网联车辆感知与运行的适配程度已成为开放道路应用中需要关注的重要问题。

国内外学者围绕智能网联车辆道路基础设施需求及道路适应性开展了相关研究。Liu 等和 Rana 等[2] [3]从交通标志标线、道路几何、通信设施及基础设施维护等方面总结了智能网联车辆的道路基础设施需求；Manivasakan 等和 Mihalj 等[4] [5]进一步对自动驾驶车辆道路基础设施配置及道路环境影响因素进行了分析。Tengilimoglu 等[6] [7]从高等级自动驾驶需求出发，对道路基础设施条件及道路准备度进行了量化研究。国内研究则主要围绕车路云协同体系及智能网联汽车测试评价展开，有学者[8]提出了智能网联汽车云控系统架构。总体而言，已有研究为智能网联车辆道路适应性评价提供了基础，但现有研究较多关注道路设施配置及自动驾驶测试条件，对既有城市道路基础环境与动态交通运行状态的综合评价仍有进一步研究空间。

城市道路交通参与者类型多样、运行状态变化频繁，行人及非机动车干扰、车辆混行、路侧停车和交通拥堵等因素均可能增加智能网联车辆的环境感知与运行决策难度。基于此，本文从道路环境和交通运行两个方面构建城市道路感知与运行适配性评价指标体系，并以成都市锦江区 10 条典型道路为研究对象，采用 CRITIC 法确定指标客观权重[9]，结合 TOPSIS 法计算道路综合贴近度[10]，对不同道路感知与运行适配水平进行比较，为城市道路环境优化及智能网联车辆运行条件改善提供参考。

## 2. 城市道路感知与运行适配性影响分析

智能网联车辆的安全稳定运行依赖于对道路边界、交通控制信息、交通参与者及道路状态的持续感知与准确识别。道路环境作为车辆感知与决策的重要外部条件，其空间结构和设施配置会直接影响车辆

获取信息的完整性与可靠性。其中，道路视距、车道宽度、交叉口形式、道路出入口等空间条件决定了车辆可利用的运行空间及有效感知范围，道路几何条件越复杂，车辆在目标识别、路径判断及轨迹规划过程中所需处理的信息量越大。同时，交通标志、标线、信号灯及交叉口渠化等设施承担着道路规则、通行方向和控制信息的表达功能，其设置是否规范、信息是否清晰，将直接影响车辆对道路结构及交通控制状态的识别与判断。因此，道路基础条件不仅关系到车辆物理通行空间，也构成智能网联车辆进行环境理解和运行决策的重要信息基础。

除相对稳定的道路基础条件外，城市道路交通运行环境还具有较强的动态性和不确定性。行人、非机动车、混合交通流及路侧停车等因素会不断改变车辆周边交通场景，增加目标检测、行为预测和冲突判断的难度。特别是在高饱和交通流条件下，车辆间距缩小、交通参与者数量增加，容易造成感知目标密集和决策空间受限。与此同时，夜间照明不足、路侧绿化或停放车辆形成的视觉遮挡，以及道路施工、临时占道等情况，也可能导致局部环境信息缺失或道路通行条件发生变化。由此可见，智能网联车辆在城市道路中的运行适配性并非由单一因素决定，而是道路基础环境与动态交通运行状态共同作用的结果。基于此，本文从道路基础与交通组织、道路感知环境和交通运行状态三个方面进一步构建城市道路感知与运行适配性评价指标体系。

## 3. 城市道路感知与运行适配性评价指标体系

### 3.1. 指标体系构建与筛选

城市道路对智能网联车辆的适配程度既受到道路空间及交通组织条件影响，也与车辆获取道路交通信息的难易程度以及实际交通运行状态密切相关。为提高评价指标与智能网联车辆运行需求之间的对应性，本文采用文献研究、规范梳理与实地调查相结合的方式构建初始指标体系。

首先，根据智能网联车辆道路基础设施需求、道路准备度及自动驾驶运行环境等相关研究，对道路几何条件、交通组织设施、交通控制信息及交通运行状态等影响因素进行归纳；同时结合智能网联汽车道路测试相关管理规范，重点考虑交通标志标线识别、信号灯识别、行人及非机动车避让、交叉口通行等典型自动驾驶功能对道路环境提出的要求。其次，结合研究区域道路实际情况开展现场调查，通过道路设施记录、交通组织调查、交通运行状态观测及影像资料整理等方式获取基础数据，并建立候选评价指标集。

在候选指标筛选过程中，主要遵循相关性、可量化性、代表性及数据完整性原则。相关性要求指标能够反映道路条件对智能网联车辆感知或运行过程的影响；可量化性要求指标能够通过实测值、比例或等级评分进行表征；代表性要求尽量避免评价含义相近的指标重复设置；数据完整性则要求所选指标能够在不同样本道路间获得统一、可比较的数据。最终形成 3 个一级指标和 17 个二级指标组成的城市道路感知与运行适配性评价指标体系。

### 3.2. 评价指标确定及量化方法

道路环境指标主要反映智能网联车辆运行过程中相对稳定的外部条件。其中，车道宽度、单向车道数及车道类型影响车辆可利用的运行空间；机非分离类型、专用车道及路边停车位等反映不同交通流之间的组织关系；限速标志、限速信息及交叉口类型则体现道路交通控制及场景复杂程度。

交通运行指标主要用于描述道路实际运行过程中动态交通环境的复杂性。不同车型混行会增加车辆目标识别和行为预测难度，行人与非机动车的不规则行为以及占道停车可能对车辆感知范围和运行轨迹产生干扰。为保证不同类型指标之间具有可比性，本文根据现场调查结果对原始数据进行统一编码，并采用 1~5 级评分方式进行量化。总体上，评分越高表示道路环境越复杂或对智能网联车辆感知、决策及

运行越不利，因此各指标均作为负向指标进行处理。具体指标体系如表 1 所示。

**Table 1.** Evaluation index system for urban road perception and operational adaptability
**表 1.** 城市道路感知与运行适配性评价指标体系

| 一级指标 | | 二级指标 | | 属性 |
|---|---|---|---|---|
| 道路基础与交通组织 | B1 | 车道宽度 | C1 | 负向 |
| | | 单向车道数 | C2 | 负向 |
| | | 机非分离类型 | C3 | 负向 |
| | | 专用车道设置 | C4 | 负向 |
| | | 路边停车位 | C5 | 负向 |
| | | 限速标志设置情况 | C6 | 负向 |
| | | 限速信息 | C7 | 负向 |
| | | 车道类型 | C8 | 负向 |
| | | 交叉路口类型 | C9 | 负向 |
| 道路感知环境 | B2 | 交通信号灯情况 | C10 | 负向 |
| | | 路段视野 | C11 | 负向 |
| | | 交通标线清晰度 | C12 | 负向 |
| 交通运行状态 | B3 | 道路车流组成 | C13 | 负向 |
| | | 行人及非机动车影响 | C14 | 负向 |
| | | 占道停车情况 | C15 | 负向 |
| | | 交通拥堵状态 | C16 | 负向 |
| | | 安全风险度 | C17 | 负向 |

为减少定性判断带来的差异，本文依据现场调查数据及道路实际状态对各指标进行等级量化。连续型指标依据其实际取值区间转换为相应等级，类别型指标依据设施配置及交通运行状态进行赋值。所有指标统一采用 1~5 分评分体系，其中 1 分表示道路条件相对简单或对智能网联车辆运行较为有利，5 分表示道路条件复杂或对车辆感知与运行的不利影响较明显。因此，17 项指标在综合评价中均按负向指标处理，并通过标准化转换为统一的正向评价值，为后续 CRITIC 客观赋权及 TOPSIS 综合评价提供数据基础。为控制正文篇幅，各指标完整定义及评分标准见附录。

从智能网联车辆功能需求来看，道路感知环境指标与车辆环境感知模块具有直接联系。其中，交通标志及交通标线为视觉感知系统提供道路规则和车道边界信息，交通信号灯影响车辆对交叉口通行状态的识别，路段视野则影响摄像头、毫米波雷达等车载传感器对前方目标的有效感知范围。交通运行状态指标主要作用于车辆目标识别、轨迹预测及行为决策过程，尤其是行人及非机动车干扰、占道停车和拥堵环境会增加车辆周边场景的不确定性。因此，所构建指标体系能够从道路基础条件、感知信息质量及动态交通环境三个方面反映道路对智能网联车辆运行的适配程度。

## 4. CRITIC-TOPSIS 综合评价模型构建

为实现不同城市道路感知与运行适配水平的综合量化，本文采用 CRITIC 法确定评价指标客观权重，并结合 TOPSIS 法对道路样本进行综合评价。CRITIC 法能够同时考虑指标的离散程度及指标间相关关系，

降低单一主观赋权对评价结果的影响；TOPSIS 法则通过比较各评价对象与正、负理想解之间的距离，对道路综合适配水平进行排序。基于二者构建 CRITIC-TOPSIS 综合评价模型，流程如图 1 所示。

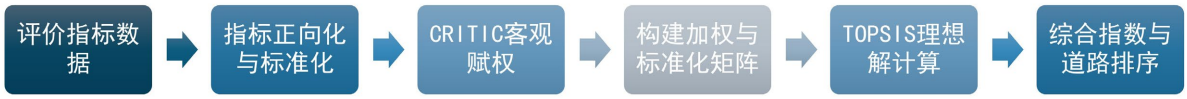



**Figure 1.** CRITIC-TOPSIS evaluation framework
**图 1.** CRITIC_TOPSIS 评价流程

### 4.1. 评价指标标准化处理

设评价对象数量为 $m$，评价指标数量为 $n$，由各道路样本指标数据构成原始评价矩阵：

$$X = \left(x_{ij}\right)_{m\times n} \tag{1}$$

式中，$x_{ij}$ 表示第 $i$ 个道路样本第 $j$ 项指标的原始取值。

本文 17 项评价指标均采用道路环境复杂程度或交通运行不利程度评分，指标值越大表示相应道路条件越复杂、适配状态越不利。为消除不同指标取值范围的影响，并统一评价方向，采用逆向极差标准化方法：

$$z_{ij} = \frac{\max\limits_{i} x_{ij} - x_{ij}}{\max\limits_{i} x_{ij} - \min\limits_{i} x_{ij}} \tag{2}$$

式中，$x_j^{\max}$ 和 $x_j^{\min}$ 分别为第 $j$ 项指标的最大值和最小值。标准化后 $z_{ij} \in [0\,|\,1]$，其值越大表示道路在该指标上的适配状态越优。

对于不同评价对象取值完全一致的指标，由于其不具备样本区分能力，为避免标准化过程中分母为 0，令该指标标准化值为 0，并在后续 CRITIC 赋权中将其权重设为 0。

标准化评价矩阵为：

$$Z = \left(z_{ij}\right)_{m\times n} \tag{3}$$

### 4.2. CRITIC 指标权重确定

CRITIC 法从指标的对比强度和冲突性两个方面衡量指标所包含的有效信息，并据此确定指标客观权重。其中，对比强度通过指标标准差表征，冲突性通过指标间相关关系进行衡量。

对于第 $j$ 项评价指标，其标准化数据均值为：

$$\overline{z}_j = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} z_{ij} \tag{4}$$

相应标准差为：

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left(z_{ij} - \overline{z}_j\right)^2} \tag{5}$$

指标标准差反映不同评价对象在该指标上的离散程度，可用于表征指标对评价对象的区分能力。

为进一步衡量不同指标之间的信息相关程度，采用 Pearson 相关系数计算指标 $j$ 与指标 $k$ 之间的相关关系：

$$r_{jk}=\frac{\sum_{i=1}^{m}\left(z_{ij}-\bar{z}_j\right)\left(z_{ik}-\bar{z}_k\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m}\left(z_{ij}-\bar{z}_j\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{m}\left(z_{ik}-\bar{z}_k\right)^2}} \tag{6}$$

在此基础上，第 $j$ 项指标与其余指标之间的冲突性表示为：

$$R_j=\sum_{k=1}^{n}\left(1-r_{jk}\right) \tag{7}$$

综合指标的对比强度与冲突性，可得到第 $j$ 项指标的信息量：

$$C_j=\sigma_j R_j=\sigma_j\sum_{k=1}^{n}\left(1-r_{jk}\right) \tag{8}$$

进一步对各指标信息量进行归一化处理，得到 CRITIC 客观权重：

$$w_j=\frac{C_j}{\sum_{j=1}^{n}C_j} \tag{9}$$

其中：

$$\sum_{j=1}^{n}w_j=1 \tag{10}$$

通过上述计算可获得各评价指标的客观权重，并据此反映各指标在道路感知与运行适配性综合评价中的相对作用程度。

### 4.3. TOPSIS 综合评价模型

在 CRITIC 权重基础上，将各指标权重与标准化指标值进行耦合，构建加权标准化评价矩阵：

$$V=\left(v_{ij}\right)_{m\times n} \tag{11}$$

其中：

$$v_{ij}=w_j z_{ij} \tag{12}$$

经指标正向化处理后，各评价指标取值越大均表示道路适配状况越优。因此，正理想解和负理想解分别表示为：

$$V^{+}=\left(v_1^{+},v_2^{+},\cdots,v_n^{+}\right) \tag{13}$$

$$v_j^{+}=\max_{1\le i\le m}\left(v_{ij}\right) \tag{14}$$

$$V^{-}=\left(v_1^{-},v_2^{-},\cdots,v_n^{-}\right) \tag{15}$$

$$v_j^{-}=\min_{1\le i\le m}\left(v_{ij}\right) \tag{16}$$

采用欧氏距离分别计算各道路样本与正、负理想解之间的距离。第 $i$ 个道路样本与正理想解之间的距离为：

$$D_i^{+}=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(v_{ij}-v_j^{+}\right)^2} \tag{17}$$

与负理想解之间的距离为：

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(v_{ij} - v_j^-\right)^2} \tag{18}$$

根据正、负理想解距离计算第 $i$ 个道路样本的相对贴近度：

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \tag{19}$$

式中，$S_i$ 为道路感知与运行适配性综合评价值，且 $0 \le S_i \le 1$。$S_i$ 越大，表明评价对象与正理想解的接近程度越高，即道路对智能网联车辆环境感知、交通信息识别及运行决策的综合支持水平越高。依据各道路样本的 $S_i$ 值，可实现不同道路感知与运行适配水平的综合比较与排序。

### 4.4. 综合评价模型

基于上述计算过程，本文形成由“指标标准化-CRITIC 客观赋权-TOPSIS 综合评价”构成的城市道路感知与运行适配性评价模型。首先对原始指标数据进行正向化及无量纲化处理，在统一指标评价方向的基础上，利用 CRITIC 法确定各指标客观权重；随后通过 TOPSIS 法计算各评价对象与正、负理想解之间的距离，并以相对贴近度作为道路综合适配水平的量化表征。由此实现多维评价指标向单一综合评价值的转换，为后续案例道路适配水平分析提供模型基础。

## 5. 实例分析

### 5.1. 研究区域与数据来源

为验证所构建评价模型的适用性，本文选取成都市锦江区典型城市道路作为研究对象。研究数据由研究团队在道路测试环境调查过程中通过现场踏勘、道路设施记录、交通运行观测及相关资料整理获得，主要包括道路空间与交通组织、交通控制设施、道路感知环境以及交通运行状态等信息。

在样本选择过程中，综合考虑道路等级、道路结构形式、交通运行状态及数据完整性，在原调查道路中选取 20 个具有代表性的路段进行评价。对于部分特殊道路形态中不存在相应交通设施或运行场景的指标，原始调查数据以 0 表示该项不适用，其含义为该因素在对应路段中不形成额外不利影响，其余指标按照第三章所述量化规则赋值，动态交通指标采用调查期现场观测形成的综合评价结果。

### 5.2. CRITIC 权重计算及分析

依据先前建立的 CRITIC 客观赋权模型，对 20 个样本路段的 17 项评价指标进行正向化及标准化处理，并计算各指标标准差、相关系数、冲突性及信息量，最终得到各评价指标的客观权重。结果表明，扩大样本范围后 17 项指标均具有一定离散性，未出现因样本取值完全一致导致的零权重情况，具体结果见表 2。

由表 2 可知，不同指标的客观权重存在一定差异。其中，C12 交通标线清晰度权重最高，为 0.086；C14 行人及非机动车影响次之，为 0.081；C10 交通信号灯情况和 C6 限速标志设置情况的权重分别为 0.075 和 0.073。说明在本次 20 个样本路段中，交通标线、交通控制信息以及慢行交通干扰具有较强的样本区分能力，对道路感知与运行适配水平的综合评价提供了较多有效信息，指标权重及累计贡献率如图 2 所示。

相较于单纯道路几何条件，交通标线、信号控制以及行人和非机动车等因素与智能网联车辆的环境感知和行为决策联系更加直接。交通标线清晰程度会影响车道边界识别与横向定位，信号控制信息影响

车辆对交叉口通行状态的判断，而行人与非机动车的不规则运动则会增加目标检测和轨迹预测的不确定性。因此，CRITIC 客观赋权结果与智能网联车辆在城市复杂交通环境中的实际运行需求具有一定一致性。

**Table 2.** Indicator weights calculated using the CRITIC method
**表 2.** CRITIC 法指标权重计算结果

| 指标 | 权重 | 指标 | 权重 |
|---|---|---|---|
| C1 | 0.043 | C10 | 0.075 |
| C2 | 0.068 | C11 | 0.057 |
| C3 | 0.056 | C12 | 0.086 |
| C4 | 0.057 | C13 | 0.066 |
| C5 | 0.066 | C14 | 0.081 |
| C6 | 0.073 | C15 | 0.050 |
| C7 | 0.047 | C16 | 0.056 |
| C8 | 0.033 | C17 | 0.053 |
| C9 | 0.032 | | |

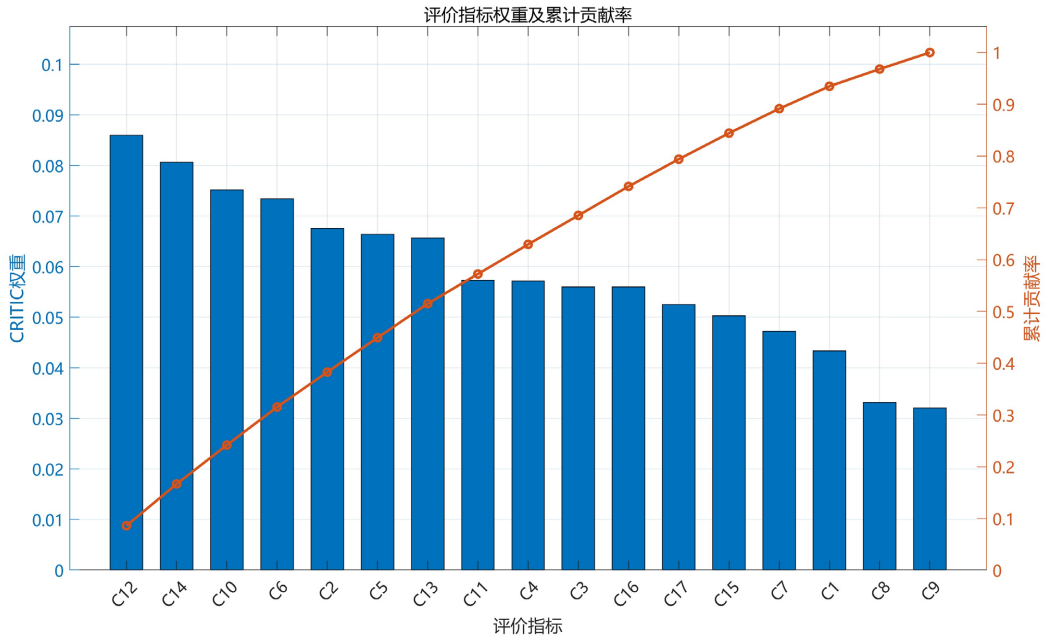



**Figure 2.** Indicator weights and cumulative contribution rate
**图 2.** 评价指标权重及累计贡献率

## 5.3. TOPSIS 综合评价及适配等级划分

在 CRITIC 权重基础上构建加权标准化矩阵，并采用 TOPSIS 法计算 20 条道路与正、负理想解之间的欧氏距离，得到各样本道路的相对贴近度 $S_i$。计算结果如表 3 所示。

为增强评价结果的可解释性，结合 TOPSIS 贴近度取值范围及本研究样本分布，将道路感知与运行适配水平划分为 3 个相对等级：当 $S_i < 0.4$ 时为“较低适配”；当 $0.4 \le S_i < 0.6$ 时为“中等适配”；当 $S_i \ge 0.6$ 时为“较高适配”。

**Table 3.** Comprehensive evaluation results of perception and operational adaptability for different roads
**表 3.** 不同道路感知与运行适配性综合评价结果

| 排名 | 样本路段 | $D_i^+$ | $D_i^-$ | $S_i$ | 适配等级 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 红星路一至二段跨线桥 | 0.085 | 0.215 | 0.717 | 较高适配 |
| 2 | 二环路东四段(高架桥上) | 0.090 | 0.217 | 0.707 | 较高适配 |
| 3 | 红星路二至三段下穿隧道 | 0.096 | 0.214 | 0.689 | 较高适配 |
| 4 | 南三环路一段 | 0.111 | 0.213 | 0.657 | 较高适配 |
| 5 | 南三环路三段 | 0.111 | 0.213 | 0.657 | 较高适配 |
| 6 | 南三环路二段 | 0.111 | 0.213 | 0.657 | 较高适配 |
| 7 | 顺城大街 | 0.109 | 0.197 | 0.643 | 较高适配 |
| 8 | 蜀都大道人民东路 | 0.127 | 0.186 | 0.594 | 中等适配 |
| 9 | 顺江路 | 0.145 | 0.175 | 0.546 | 中等适配 |
| 10 | 人民南路 | 0.152 | 0.174 | 0.533 | 中等适配 |
| 11 | 锦兴路 | 0.149 | 0.168 | 0.531 | 中等适配 |
| 12 | 滨江西路 | 0.156 | 0.171 | 0.522 | 中等适配 |
| 13 | 大业路 | 0.155 | 0.162 | 0.511 | 中等适配 |
| 14 | 上南大街 | 0.156 | 0.161 | 0.508 | 中等适配 |
| 15 | 滨江东路 | 0.160 | 0.157 | 0.496 | 中等适配 |
| 16 | 太升南路 | 0.170 | 0.143 | 0.456 | 中等适配 |
| 17 | 忠烈祠街 | 0.175 | 0.137 | 0.440 | 中等适配 |
| 18 | 滨江中路 | 0.186 | 0.137 | 0.425 | 中等适配 |
| 19 | 净居寺路 | 0.205 | 0.116 | 0.362 | 较低适配 |
| 20 | 龙舟路 | 0.213 | 0.110 | 0.340 | 较低适配 |

综合贴近度分布如图 3 所示。20 个样本路段综合贴近度介于 0.340~0.717 之间。其中，红星路一至二段跨线桥综合贴近度最高，二环路东四段高架桥上路段和红星路二至三段下穿隧道次之；净居寺路和龙舟路综合贴近度相对较低。按照上述等级划分，共有 7 个路段属于较高适配水平，11 个路段属于中等适配水平，2 个路段属于较低适配水平。

## 5.4. 敏感性分析

为检验 CRITIC-TOPSIS 模型评价结果对关键指标权重变化的稳定性，选取权重较高的 C12 交通标线清晰度、C14 行人及非机动车影响和 C10 交通信号灯情况进行敏感性分析。分别将其基准权重调整为原权重的 80%、90%、110%和 120%，其余指标权重按照原有比例重新归一化，并重新计算 TOPSIS 综合贴近度及道路排序。敏感性分析结果见表 4 所示。

由表 4 可知，在关键指标权重变化±20%的条件下，各情景评价排序与基准结果的 Spearman 相关系数均高于 0.97，单个路段最大排名变化不超过 3 位。说明合理范围内的指标权重扰动不会引起整体评价排序发生明显变化，CRITIC-TOPSIS 评价结果具有较好的稳定性。

从不同指标来看，C12 权重降低 20%和 C14 权重增加 20%时排序变化相对较大，但整体相关程度

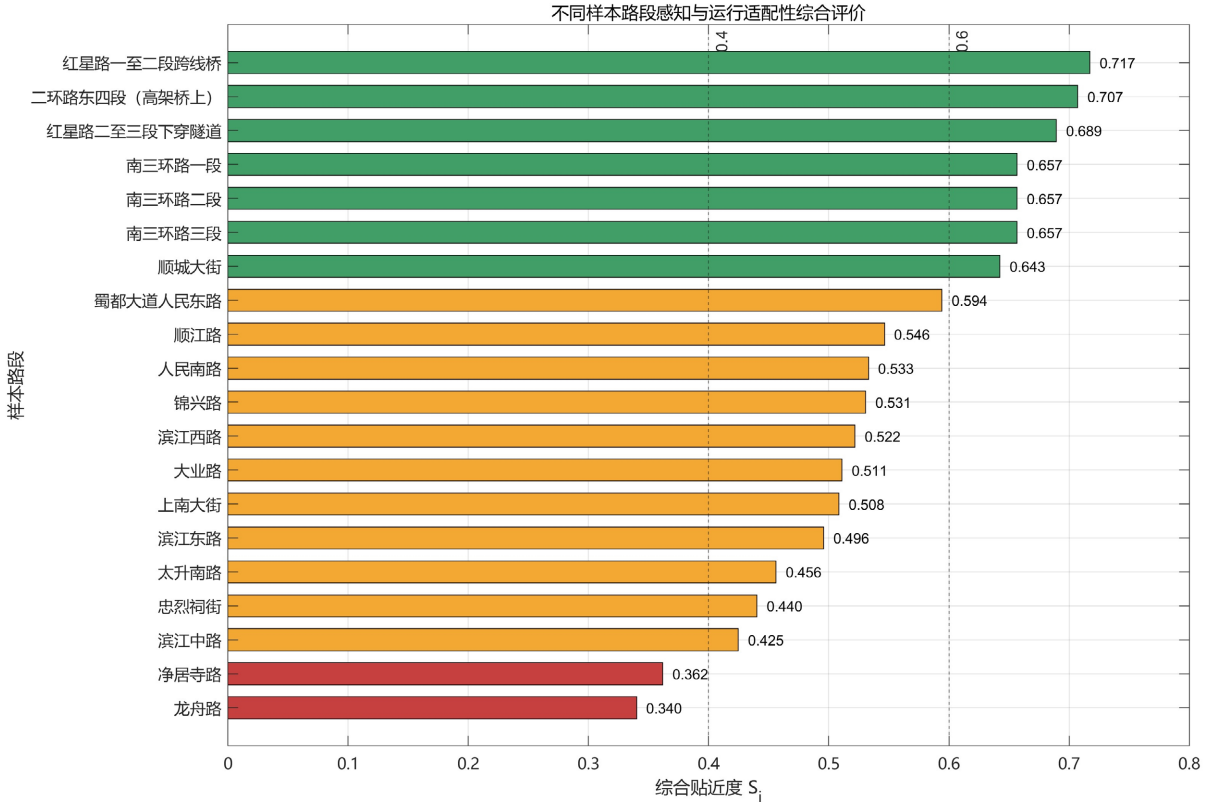



**Figure 3.** Comprehensive adaptability evaluation results of different sample road segments
**图 3.** 不同样本路段综合适配性评价结果

**Table 4.** Model stability under weight perturbation of key indicators
**表 4.** 关键指标权重扰动下的模型稳定性

| 指标 | 权重扰动范围 | 最低 Spearman 相关系数 | 最大排名变化 |
|---|---|---|---|
| C12 交通标线清晰度 | −20%~+20% | 0.974 | 3 |
| C14 行人及非机动车影响 | −20%~+20% | 0.983 | 2 |
| C10 交通信号灯情况 | −20%~+20% | 0.991 | 3 |

仍保持较高水平，说明交通标线清晰度和慢行交通干扰是影响评价结果的重要指标，但不会单独决定道路综合排序。敏感性结果如图 4 所示。

## 5.5. 典型路段差异及 ICV 功能影响分析

为进一步分析不同路段综合评价结果的形成原因，分别选取较高适配水平的红星路一至二段跨线桥和顺城大街，以及较低适配水平的净居寺路和龙舟路作为典型样本。从道路基础与交通组织、道路感知环境及交通运行状态 3 个一级维度计算加权标准化得分，结果如图 5 所示。

红星路一至二段跨线桥在道路基础与交通组织、道路感知环境和交通运行 3 个维度上的相对得分分别约为 0.767、0.869 和 0.822，整体表现较为均衡；顺城大街 3 个维度分别约为 0.718、0.656 和 0.770，同样具有较好的综合适配水平。相比之下，净居寺路在道路基础与交通组织和交通运行维度上的得分分别仅为 0.171 和 0.046，虽然感知环境表现相对较好，但较复杂的交通组织及动态交通干扰降低了其综合贴近度。龙舟路的感知环境与交通运行得分分别约为 0.131 和 0，反映其在道路信息感知及动态交通运行

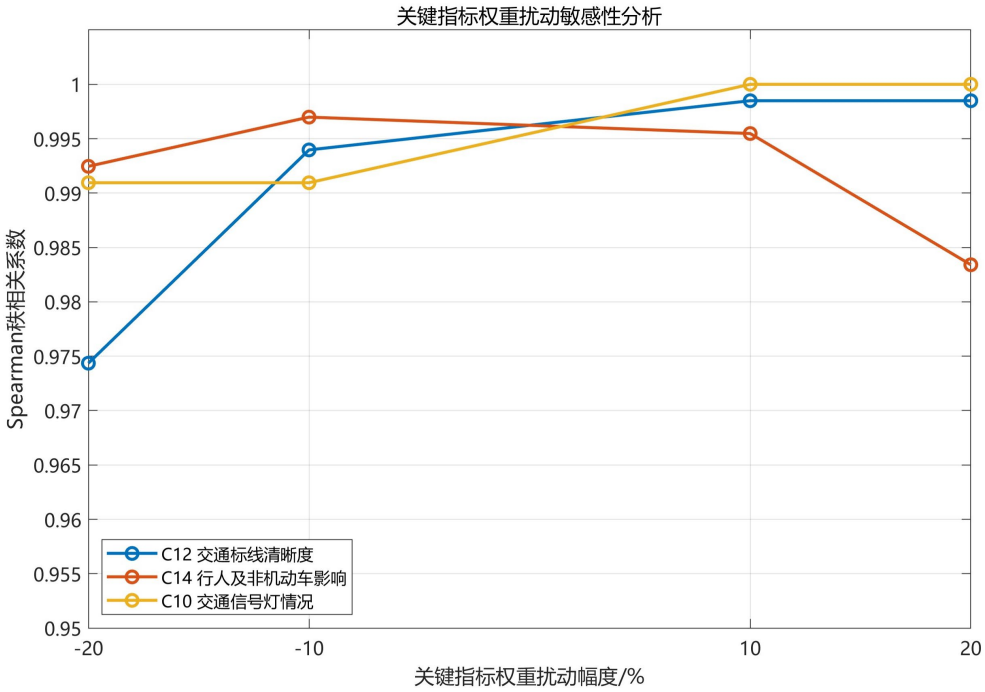



**Figure 4.** Sensitivity analysis of weight perturbations for key indicators
**图 4.** 关键指标权重扰动敏感性分析

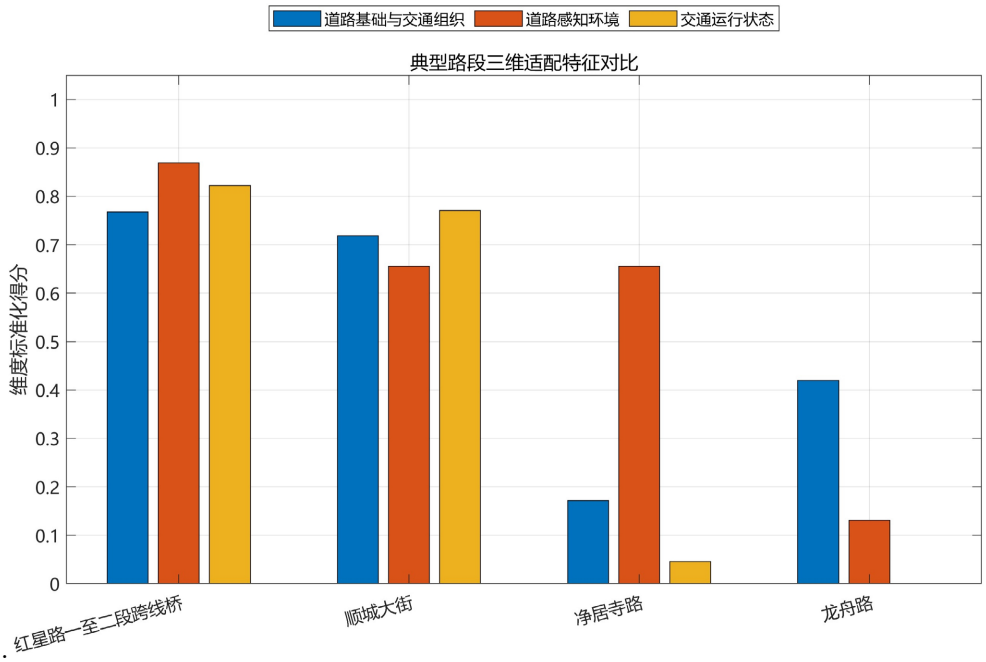



**Figure 5.** Comparison of 3D adaptation characteristics for typical road segments
**图 5.** 典型路段三维适配特征对比

方面存在较明显短板。

从智能网联车辆功能角度看，不同道路因素对车辆感知、决策和控制模块的影响具有差异。交通标线、交通信号灯及路段视野主要作用于车辆感知模块，其信息缺失或识别条件较差可能降低车道线、交

通控制状态及前方目标识别的可靠性；行人及非机动车、占道停车和高密度混合交通则会增加目标轨迹预测的不确定性，从而提高决策模块对冲突判断和路径选择的要求；道路空间及交通组织条件则进一步影响车辆轨迹规划和控制执行。

全指标标准化结果如图 6 所示。热力图表明，不同路段的主要短板并不完全一致。对于感知环境表现较弱的路段，应重点改善交通标志标线清晰度、信号灯可视性以及视距遮挡问题；对于交通运行状态较差的路段，则应加强行人与非机动车组织、占道停车治理及拥堵疏解。通过针对不同 ICV 功能模块实施差异化道路改善，可提高道路环境对智能网联车辆运行的适配程度。

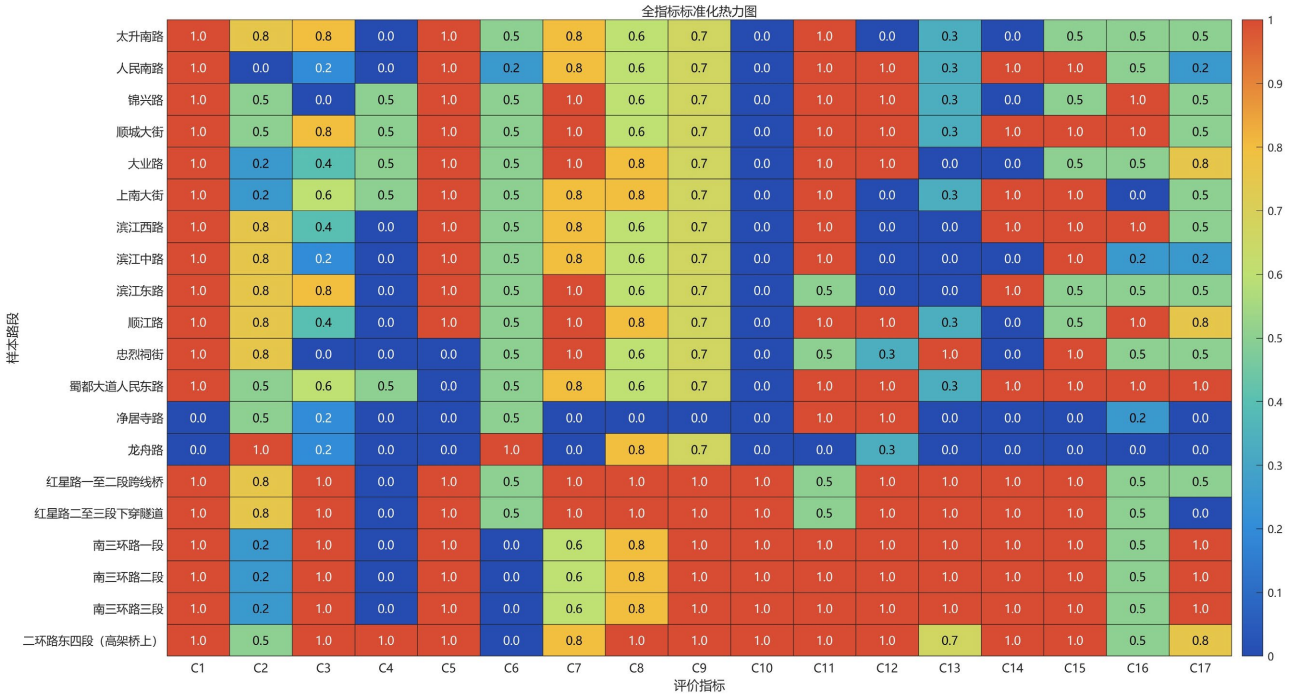



**Figure 6.** Heatmap of Standardized Full Indicators
**图 6.** 全指标标准化热力图

## 6. 结论

本文面向智能网联车辆城市道路感知与运行适配问题，从道路基础与交通组织、道路感知环境和交通运行状态 3 个方面构建了由 17 项指标组成的评价体系，并采用 CRITIC-TOPSIS 方法对成都市锦江区 20 个典型路段进行综合评价。

CRITIC 赋权结果表明，不同指标对样本道路的区分能力存在一定差异，其中交通标线清晰度、行人及非机动车影响、交通信号灯情况和限速标志设置情况具有较高客观权重，表明道路交通信息可识别性以及动态交通参与者干扰是影响智能网联车辆道路适配评价的重要因素。TOPSIS 评价结果显示，20 个样本路段综合贴近度介于 0.340~0.717 之间，其中红星路一至二段跨线桥综合适配水平最高，二环路东四段高架桥上路段和红星路二至三段下穿隧道次之，净居寺路和龙舟路相对较低。不同路段在道路基础条件、感知环境及交通运行状态方面存在不同短板，应根据具体道路特征采取差异化改善措施。

敏感性分析结果表明，在关键指标权重 ±20%的扰动范围内，各评价情景与基准排序的 Spearman 相关系数均高于 0.97，说明模型具有较好的排序稳定性。研究结果表明，道路适配水平不仅受到道路空间及交通组织条件影响，还与交通标线、信号控制、视距条件以及行人和非机动车干扰等因素密切相关。

本文建立的方法能够实现不同城市道路感知与运行适配水平的相对比较，可为道路环境优化及智能网联车辆运行条件改善提供参考。

## 参考文献


[1] 工业和信息化部 公安部 交通运输部 关于印发《智能网联汽车道路测试与示范应用管理规范（试行）》的通知[EB/OL]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/zbys/qcgy/art/2021/art_a24398849c6a4dd290328ab5d1d8af0f.html, 2021-07-27.

[2] Liu, Y., Tight, M., Sun, Q. and Kang, R. (2019) A Systematic Review: Road Infrastructure Requirement for Connected and Autonomous Vehicles (CAVs). *Journal of Physics*: *Conference Series*, **1187**, Article 042073. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1187/4/042073

[3] Rana, M.M. and Hossain, K. (2021) Connected and Autonomous Vehicles and Infrastructures: A Literature Review. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **16**, 264-284. https://doi.org/10.1007/s42947-021-00130-1

[4] Manivasakan, H., Kalra, R., O'Hern, S., Fang, Y., Xi, Y. and Zheng, N. (2021) Infrastructure Requirement for Autonomous Vehicle Integration for Future Urban and Suburban Roads—Current Practice and a Case Study of Melbourne, Australia. *Transportation Research Part A*: *Policy and Practice*, **152**, 36-53. https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.07.012

[5] Mihalj, T., Li, H., Babić, D., Lex, C., Jeudy, M., Zovak, G., *et al*. (2022) Road Infrastructure Challenges Faced by Automated Driving: A Review. *Applied Sciences*, **12**, Article 3477. https://doi.org/10.3390/app12073477

[6] Tengilimoglu, O., Carsten, O. and Wadud, Z. (2023) Infrastructure Requirements for the Safe Operation of Automated Vehicles: Opinions from Experts and Stakeholders. *Transport Policy*, **133**, 209-222. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2023.02.001

[7] Tengilimoglu, O., Carsten, O. and Wadud, Z. (2024) Are Current Roads Ready for Highly Automated Driving? A Conceptual Model for Road Readiness for Avs Applied to the UK City of Leeds. *Transportation Research Part A*: *Policy and Practice*, **186**, Article 104148. https://doi.org/10.1016/j.tra.2024.104148

[8] 智能网联汽车云控系统原理及其典型应用[J]. 汽车安全与节能学报, 2020, 11(3): 261-275.

[9] Diakoulaki, D., Mavrotas, G. and Papayannakis, L. (1995) Determining Objective Weights in Multiple Criteria Problems: The Critic Method. *Computers & Operations Research*, **22**, 763-770. https://doi.org/10.1016/0305-0548(94)00059-h

[10] Hwang, C.L. and Yoon, K. (1981) Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications—A State-of-the-Art Survey. Springer-Verlag.

## 附录. 评价指标量化评分标准

为保证不同道路样本评价结果具有一致性和可比性，本文依据现场调查记录及道路实际运行状态，对各评价指标进行统一量化。除特殊道路形态下指标不适用时记为 0 外，其余指标原则上采用 1~5 分等级评分，评分越高表示相应道路条件越复杂，或对智能网联车辆感知与运行的不利影响越明显。各指标具体评分标准如下。

| 一级指标 | 编号 | 二级指标 | 评分标准 |
|---|---|---|---|
| 道路基础与交通组织 | C1 | 车道宽度 | 1 分：3.75 m；2 分：3.50 m；3 分：3.25 m；4 分：3.00 m；5 分：2.80 m 及以下 |
| | C2 | 单向车道数 | 1 分：1 条；2 分：2 条；3 分：3 条；4 分：4 条；5 分：5 条及以上 |
| | C3 | 机非分离类型 | 1 分：绿化带分隔；2 分：草坪等软质分隔；3 分：防撞护栏或分隔栏杆；4 分：标线分隔；5 分：机非混行 |
| | C4 | 专用车道设置 | 1 分：设置快速公交等独立专用车道；3 分：设置公交或其他划线专用车道；5 分：未设置专用车道 |
| | C5 | 路边停车位 | 1 分：无路侧停车位；5 分：设置路侧停车位 |
| | C6 | 限速标志设置情况 | 1 分：限速标志设置完整且清晰；3 分：部分路段缺失或存在遮挡、污损等情况；5 分：标志缺失严重或识别条件较差 |
| | C7 | 限速信息 | 1 分：限速 ≤40 km/h；2 分：50 km/h；3 分：60 km/h；4 分：70 km/h；5 分：≥80 km/h |
| | C8 | 车道类型 | 潮汐车道、环岛、主辅道转换、掉头出入口、快速路出入口等每出现 1 类计 1 分，最高 5 分；无特殊类型时记 0 |
| | C9 | 交叉路口类型 | 1 分：T 型或 Y 型；2 分：十字型或 X 型；3 分：错位交叉；4 分：五支路交叉；5 分：支路数大于 5 |
| 道路感知环境 | C10 | 交通信号灯情况 | 1 分：交通信号灯覆盖比例 100%；3 分：无信号控制路口比例小于 50%；5 分：无信号控制路口比例达到或超过 50%；无交叉口、指标不适用时记 0 |
| | C11 | 路段视野 | 1 分：视野开阔、无明显静态遮挡；5 分：存在建筑物、绿化、停车车辆或设施等明显遮挡 |
| | C12 | 交通标线清晰度 | 1 分：清晰比例 100%；2 分：75%~<100%；3 分：50%~<75%；4 分：25%~<50%；5 分：0~<25% |
| 交通运行状态 | C13 | 道路车流组成 | 普通乘用车、大客车、大货车、摩托车、电动车等主要交通类型，每出现 1 类计 1 分，最高 5 分 |
| | C14 | 行人及非机动车影响 | 1 分：无明显影响；3 分：受影响机动车道数与机动车道总数之比 ≤1/3；5 分：该比例 > 1/3。出现明显横穿、突然侵入机动车道等情况时按较高等级处理 |
| | C15 | 占道停车情况 | 1 分：无违规占道停车；3 分：受占道影响车道数与机动车道总数之比 ≤ 1/3；5 分：该比例 > 1/3 |
| | C16 | 交通拥堵状态 | 1 分：畅通；3 分：一般拥堵；4 分：中度拥堵；5 分：严重拥堵 |
| | C17 | 安全风险度 | 1 分：无风险；2 分：低风险；3 分：较低风险；4 分：中风险；5 分：高风险 |