

基于模糊层次分析的高速公路零碳服务区评价

张新洁, 马思思

(内蒙古科技大学 土木工程学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要:对高速公路服务区运营现状进行调查,明确零碳服务区的概念,分析其实现“零碳”的关键技术。并从建筑低碳、可再生能源与节能环保措施、碳排放与环境监测措施、管理措施、经济性 5 个方面构建高速公路零碳服务区评价体系,使用层次分析法和模糊综合评价法建立高速公路零碳服务区模糊综合评价模型。最后,利用综合评价模型对天津南服务区进行评价,结果表明该服务区为 B 级零碳服务区。

关键词:高速公路服务区;零碳运营;层次分析法;模糊综合评价法

中图分类号:U417.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)03-0083-07

在应对全球变暖和实现“双碳”目标的背景下,交通运输业遇到了前所未有的挑战,这意味着必须将绿色低碳发展理念融入交通运输业的发展中去,以此来推动公路的绿色发展^[1]。而设立在公路沿线的,为司乘人员提供休息、餐饮、住宿等服务的高速公路服务区就是一个巨大的突破口。目前存在的主要问题是围护结构保温性能差、绿色化水平低等,这使得服务区在运营阶段的能耗和碳排放量是整个生命周期中最高的,造成了大量的能源浪费。因此,要重点关注高速公路服务区运营阶段如何实现“零碳”,以此来推动高速公路以及整个交通运输行业的绿色化发展。

高速公路服务区的绿色建设是实现“零碳”目标的起步阶段,服务区“零碳”目标的实现应当在满足驾乘人员出行需求的基础上,起到促进交通运输行业可持续发展的作用。《高速公路绿色服务区建设指南》(DB34/T 3272—2018)中对服务区建设特点和运营特点进行了分析,也对绿色服务区的建设方法和技术关键点进行了讨论^[2]。很多学者也从服务区的设计要点进行分析,主要分析了如何从节能优化、清洁能源利用、节水系统等方面实现绿色服务区的建设^[3-5]。除了对服务区绿色建设的研究,学者们还从不同角度出发对其评价体系进行了研究,主要是从选址和土地利用、建筑的节能、水资源的利用、室外环境、清洁能源利用、污水和垃圾处理等

方面选取评价指标来评估高速公路绿色服务区的绿色水平^[6-7]。

由此可见,过去许多研究的关注点在于服务区的绿色建设和绿色评价,而对于高速公路服务区运营期间零碳目标的实现,以及如何将服务区建设成为零碳服务区缺少关注。这对零碳服务区的发展有一定的阻碍作用。因此,本文从零碳运营的角度对高速公路服务区展开研究,通过借鉴低碳建筑、绿色服务区等建设要点和评价体系,对服务区如何实现零碳目标的关键技术进行总结。同时在遵循高速公路零碳服务区评价指标选择原则的前提下构建评价体系,助力高速公路服务区运营阶段零碳目标的实现。

1 高速公路零碳服务区的概念及建设要点

1.1 零碳服务的概念

零碳服务区是指在规划设计时融入“碳中和”的设计理念,建设时选用绿色建筑材料,采取低碳建造措施,最大限度开发清洁能源。服务区中主体建筑的能耗水平应当符合现行近零能耗建筑的技术标准中的规定。运营期间服务区内实现能源消费全部依靠服务区自身产生的可再生能源提供,能够达到相对零碳。

1.2 高速公路服务区实现“零碳”的关键技术

运营期间实现零碳排放,除了要控制高速公路服务区碳排放外,还应当加大碳吸收。最主要的是

收稿日期:2022-09-01

基金项目:内蒙古自治区高等学校科学研究项目(重点项目)(NJZZ21023)。

作者简介:张新洁(1986—),女,内蒙古包头人,内蒙古科技大学土木工程学院,讲师,博士,研究方向为交通行为分析与建模、交通安全与环境等。

控制碳源,从建筑和能源等方面进行节能减排,对建筑进行低碳化改造,使用可再生能源系统,倡导低碳出行。其次是加大服务区的碳吸收,对服务区的林业碳汇进行提升,对景观进行改造。同时还要利用智慧管控系统,对服务区内使用的各类能源数据进行智能监测和智慧管控。

1)可再生能源利用系统。高速公路服务区占地面积大,可以利用空置场地多,如屋顶、车位、边坡等位置。因此,在可再生能源的建设和利用方面服务区具有很大的优势。根据当地的气候条件和服务区的车流量等情况来选择适合的可再生能源系统。

2)建筑低碳化改造。降低建筑碳排放量的主要方式是建筑进行低碳改造,从根源上减少能源的消耗。在进行建筑的节能改造时,要遵循“被动优先减少需求、主动优化提高能效”的理念,通过对建筑围护结构保温、建筑外遮阳技术、自然通风改造、电器节能改造等关键部位进行节能改造,让建筑在减少能耗使用的同时保证室内的舒适度。

3)林业碳汇提升。服务区具有发展植物碳汇、减少碳排放量的潜力,这主要是因为它远离市区和占地面积大。服务区因其所处位置及地形地貌不同,各类植物的碳汇能力表现各不相同。在服务区的林业碳汇提升工程中,应当根据服务区的特点来选择适当的植物,以此来增加服务区的绿地覆盖率,加大碳吸收。除此之外还应当注重服务区景观与周围环境的融合度,提升其景观效果。

4)智慧运维系统。智慧运维系统主要是通过物联网、5G、人工智能等技术进行组合,实现智慧化、集中化、一体化的综合管理相关设施和设备。智慧运维系统主要是对人员、停车场、能源能耗、安防、设备、运营等情况进行动态监测,基于监测到的数据,对服务区内所有的能耗进行综合、全面的精细化管理,及时发现服务区内用能设备的异常,通过优化设备操作流程和提高人员管理效率,实现服务区持续节能的目标。

2 高速公路零碳服务区评价体系

2.1 构建原则

遵循以下原则来制定高速公路零碳服务区评价体系:①要符合高速公路服务区的发展现状和趋势,在零碳服务区的发展中发挥关键作用;②突出高速公路服务区运营期的特点和关于碳排放评价的相关指标,尽量选择可量化的碳排放指标,并客观反映出该服务区碳排放;③将评价对象高速公路服务区当作整体,选取一些典型的、具有代表性的指标,也要避免不同指标内容之间的相似性,以此来全面反映评价对象的水平。

2.2 高速公路零碳服务区碳排放核算模型

针对服务区运营阶段 CO₂ 的排放量进行核算,需要明确计算范围,分析运营期间的碳排放源。高速公路零碳服务区 CO₂ 排放计算范围如图 1 所示,数据获取方式见表 1。碳排放计算范围应包括服务区内建筑及配套设施在运营期间使用煤炭、石油、天然气等化石燃料燃烧活动,以及因使用外购的电力和热力等所产生的 CO₂ 排放量和可再生能源的减碳量。其中,建筑的碳排放量计算范围包括照明、制冷、制热、炊事等服务活动产生的碳排放量;配套设施的碳排放量计算范围主要包括路灯照明、卫生间照明、车辆维修站、加油站、加气站及充电桩等服务设施产生的碳排放量。

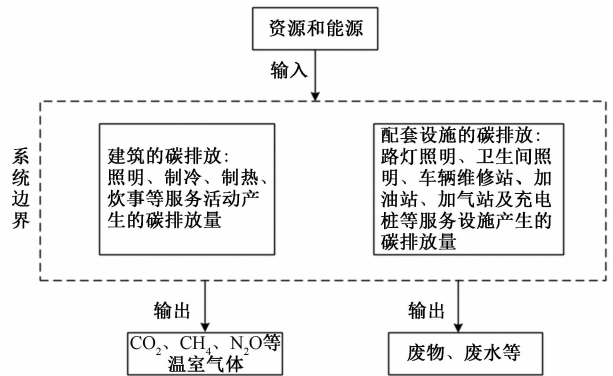


图 1 高速公路零碳服务区 CO₂ 排放核算边界

表 1 碳排放统计核算内容及数据获取方式

核算内容	数据内容	数据获取方式
电力	运营期间建筑和其他服务设施的外购电力	电网公司电表读数或数据账单
热力	运营期间外购热力	能源账单或台账数据
服务区内绿地	收集绿地数据	项目建设资料建设或遥感数据
可再生能源系统发电量	采取的可再生能源系统的发电量	电表读数

核算碳排放量的重要参数是各类能源的碳排放因子,它将各类能源使用 and 其所排放的温室气体

建立了联系,是零碳服务区评价时进行零碳认定的重要基础数据。在进行碳排放核算时,采用排放因

子法来计算各种能源所产生的碳排放量的总和,涉及到的能源消费种类包括电力、煤炭、天然气、汽油、柴油等。其碳汇系数见表 2。

表 2 碳排放系数和碳汇固碳系数

能源消耗品种	活动数据单位	排放类型	排放系数/固碳系数	备注
电力	万 kW·h	间接排放	8.843 tCO ₂ /(kW·h)	参考不同地区的电网排放因子
煤炭(无烟煤)	t	直接排放	1.924 tCO ₂ /t	按《温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》计算
天然气	万 m ³	直接排放	21.62 tCO ₂ /m ³	
汽油	t	直接排放	3.04 tCO ₂ /t	
柴油	t	直接排放	3.15 tCO ₂ /t	
热力	GJ	间接排放	0.11 tCO ₂ /GJ	参考相关方案中的规定
碳汇	hm ²	碳吸收	14.5 tCO ₂ /hm ²	

2.3 高速公路零碳服务区的评价程序

零碳服务区的评价程序主要包括零碳认定和零碳服务区等级评定。零碳认定为控制项,结果为达标或不达标,是为了考察参与评定服务区的碳排放情况;服务区等级为评分项,结果为分值,目的是判断零碳服务区在运营期间的建筑能耗、可再生能源利用、管理措施、经济性等方面的综合表现情况。

2.3.1 零碳认定

服务区的碳排放量能够直接反映服务区零碳水平,因此,将零碳认定作为评价零碳服务区控制项。当服务区物理边界范围内的碳排放量小于等于零时,认定结果为达标;当碳排放量大于零,则认定结果为不达标,不达标的服务区不能参与后续零碳服务区等级评定。

2.3.2 零碳服务区等级评定

零碳服务区等级评定工作是对零碳认定中达标的服务区进行评价,并根据分数来判断零碳服务区所属的等级,这样能够直观准确地反映零碳服务区运营期间建筑能耗、可再生能源利用、管理措施、

经济性等方面的情况。

评价总分为 100 分,开展评价时采用综合评价的方法,参考《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378—2019)中对评价结果的表述方式^[8],评价等级划分见表 3,其中,A、B、C 级零碳服务区表示在建筑低碳、可再生能源利用、经济性等方面综合表现较好、建设质量较高的零碳服务区,被评价的服务区具体存在哪些问题,需要根据各个指标的评价得分具体分析,这 3 类服务区可以成为其他零碳服务区建设的参考对象;D 级零碳服务区表示被评价的服务区满足零碳服务区的基本条件,但其是在可再生能源利用或经济性等方面存在较大问题、在管理措施上不完善的零碳服务区,这类服务区在零碳建设方面还有较大的改进潜力;E 级零碳服务区表示普通服务区,即被评价的服务区虽然满足服务区零碳认定的基本条件,但其在建筑低碳建设、可再生能源的合理利用等多方面存在较大的问题,该水平的服务区需要对各项服务设施和管理措施进行升级后再次进行评价,达到相应的分数要求后方可被认定为零碳服务区。

表 3 零碳服务区评价的等级划分

评价结果	A 级零碳服务区	B 级零碳服务区	C 级零碳服务区	D 级零碳服务区	E 级零碳服务区
指标取值	(90,100]	(80,90]	(70,80]	(60,70]	(0,60]

2.4 高速公路零碳服务区评价体系

通过使用频度调查法来对高速公路零碳服务区进行指标的筛选,以现行的绿色建筑和绿色服务区评价标准和规范为前提,从服务区运营期的特点和服务区的发展现状出发,遵循评价原则,使用正确的评价方法,借鉴国际上认可度较高的(近)零碳建筑、(近)零碳示范区等评价体系,同时参照各类评价标准和学者的相关研究,建立评价体系(图 2)。该评价体系包括建筑低碳、可再生能源与节能环保

措施、碳排放与环境监测措施、管理措施、经济性等指标。

3 高速公路零碳服务区综合评价模型

3.1 基于 AHP 确定评价指标的权重

层次分析法(AHP)在实践中,对于一些数学模型无法解决的问题,可以起到很好的作用,可以对定性和定量相结合的系统进行分析。运用该方法需要进行判断矩阵的构建、指标相对权重的计算和矩阵一致性的判断等步骤^[9]。

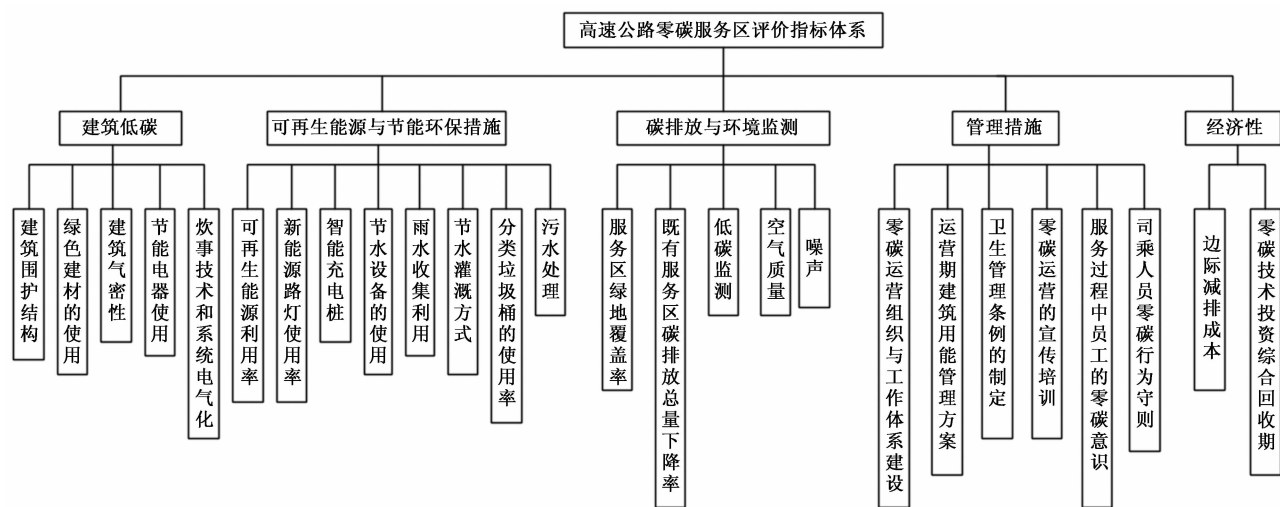


图 2 高速公路零碳服务区评价指标体系

对评价体系进行分析和研究时选择层次分析法主要是因为评价体系中存在定性指标较多和样本数据获取较难的指标^[10]。为了保证计算结果的精确性,选取层次分析法软件 yaahp 进行计算。该软件的使用步骤主要包括:①在该软件中录入所构建的评价体系,形成层次结构模型,录入后的结果

如图 3 所示;②将专家学者的调查问卷结果输入到该软件中,输入结果如图 4 所示;③使用该软件进行计算,得到指标权重的计算结果,如图 5 所示;④对一致性进行检验,并计算判断矩阵的 CI、RI 值,最终得到评价体系的指标权重,见表 4。

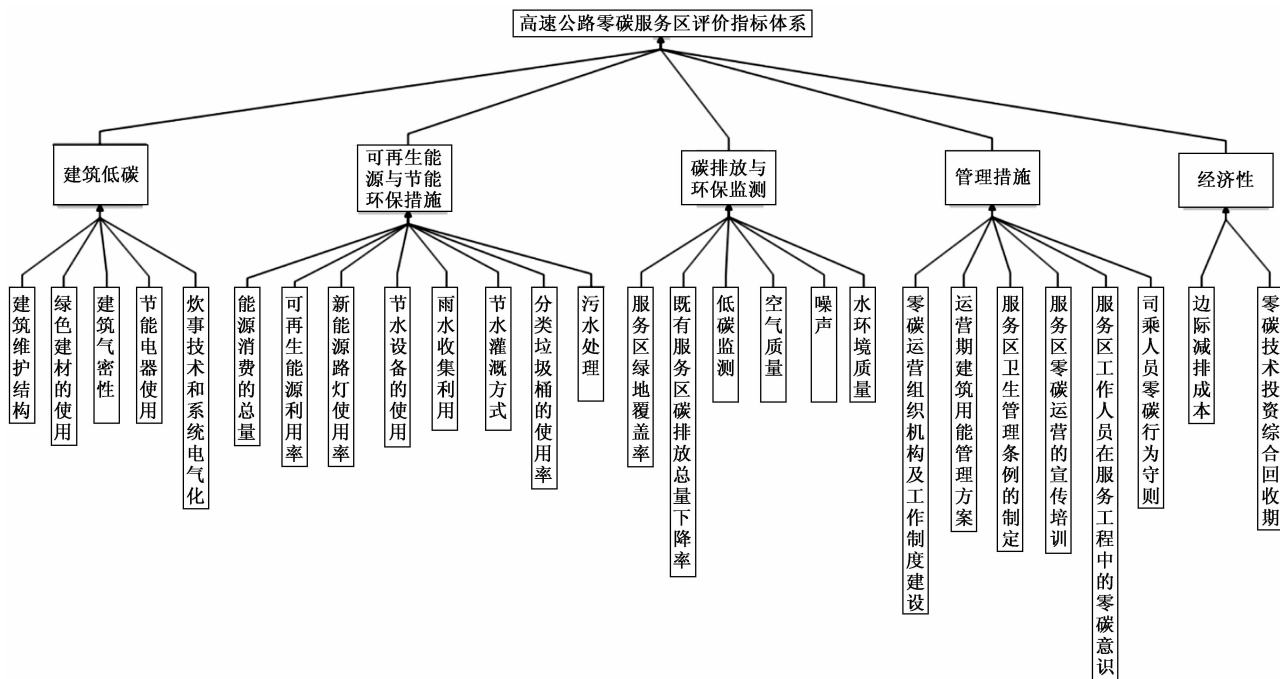


图 3 录入后的层次结构图

3.2 高速公路零碳服务区模糊层次综合评价模型

评价体系中的一些指标具有一定的不确定性,没有绝对的肯定和否定,在构建高速公路零碳服务区评价模型时选择的模糊综合评价法正是一种基

于模糊数学而产生的,用于定量分析具有一定模糊性的对象的综合评价方法^[11]。

3.2.1 建立评价因素集

根据构建的评级体系,所得模糊综合评价因素

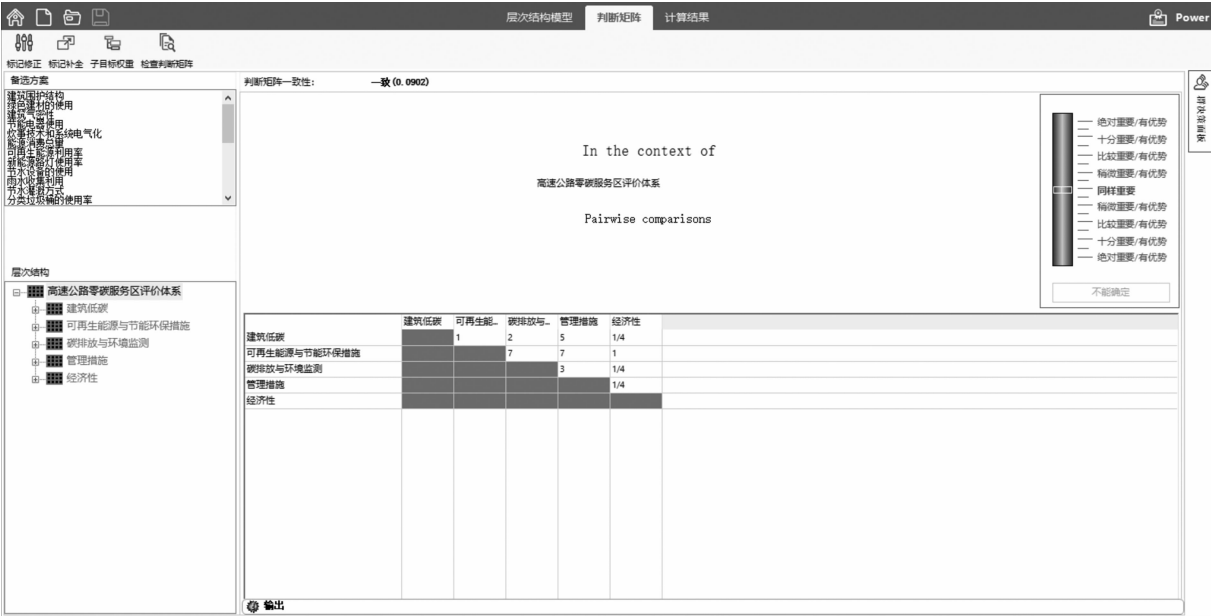


图 4 专家问卷调查结果汇总



图 5 计算结果

集如下：

$$U = (B_1, B_2, B_3, B_4, B_5) \tag{1}$$

$$B_1 = (C_1, C_2, C_3, C_4, C_5) \tag{2}$$

$$B_2 = (C_6, C_7, C_8, C_9, C_{10}, C_{11}, C_{12}, C_{13}) \tag{3}$$

$$B_3 = (C_{14}, C_{15}, C_{16}, C_{17}, C_{18}) \tag{4}$$

$$B_4 = (C_{19}, C_{20}, C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{24}) \tag{5}$$

$$B_5 = (C_{25}, C_{26}) \tag{6}$$

3.2.2 确定评语集

用 M 表示评语集,评语等级量化向量用 N 表示。将评价等级划分为 X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 。组成

等级集 $M = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5\}$, 分别对应 A 级、B 级、C 级、D 级、E 级, 对应分值评判标准集 $N = (100, 90, 80, 70, 60)$ 。

3.2.3 创建隶属度向量矩阵 R

在进行评价结果时,用隶属度 r_{ij} 来表示,每个指标指定的隶属度向量形成矩阵 R 。

$$R = \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1j} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{i1} & r_{i2} & \cdots & r_{ij} \end{pmatrix} \tag{7}$$

表 4 评价指标权重

目标层	准则层	权重	指标层	权重
高速公路零碳服务区评价体系	建筑低碳 B_1	0.184 4	建筑围护结构 C_1	0.311 7
			绿色建材的使用 C_2	0.210 5
			建筑气密性 C_3	0.270 7
			节能电器使用 C_4	0.106 9
			炊事技术和系统电气化 C_5	0.100 2
	可再生能源与节能环保措施 B_2	0.328	可再生能源利用 C_6	0.470 6
			新能源路灯使用率 C_7	0.182 8
			智能充电桩 C_8	0.111 8
			节水设备的使用 C_9	0.044 7
			雨水收集利用 C_{10}	0.053 6
			节水灌溉方式 C_{11}	0.044 7
			分类垃圾桶的使用率 C_{12}	0.047
			污水处理 C_{13}	0.044 7
	碳排放与环境监测 B_3	0.083 1	服务区绿地覆盖率 C_{14}	0.390 8
			既有服务区碳排放总量下降率 C_{15}	0.390 8
			低碳监测 C_{16}	0.121 3
			空气质量 C_{17}	0.060 8
			噪声 C_{18}	0.036 4
	管理措施 B_4	0.045 7	零碳运营组织与工作体系建设 C_{19}	0.244 2
			运营期建筑用能管理方案 C_{20}	0.244 2
			卫生管理条例的制定 C_{21}	0.053 7
			零碳运营的宣传培训 C_{22}	0.082 7
			服务过程中员工的零碳意识 C_{23}	0.072 6
			司乘人员零碳行为守则 C_{24}	0.302 7
	经济性 B_5	0.358 9	边际减排成本 C_{25}	0.5
			零碳技术投资综合回收期 C_{26}	0.5

3.2.4 确定模糊权向量 W

采用层次分析法得到模糊权向量 W 。

3.2.5 计算模糊评价结果向量

由上述得到的矩阵 R 与集合 W , 计算出模糊评价结果的向量 P 。根据 $P_i = W_i \times R_i$, 计算一级指标的综合向量评价, 从而得出一级指标评价因素集 U 对应的判断矩阵 P 。

$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 R_1 \\ W_2 R_2 \\ W_3 R_3 \\ W_4 R_4 \\ W_5 R_5 \end{bmatrix} \quad (8)$$

即可得到模糊评价结果向量 Z , 即

$$Z = W \times P = (Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5) \quad (9)$$

3.2.6 计算综合评价得分

利用评语等级的量化向量 N , 对评价结果进行分析, 得到各项一级指标项得分 E 和最终综合评分 F 。

$$E = P \times N^T, F = Z \times N^T \quad (10)$$

4 案例分析

津南服务区作为天津的首个零碳服务区, 在可

再生能源利用方面具有很强的代表性, 在空置的屋顶和车棚等场地综合运用了光伏等新能源。该服务区是经过改造成为零碳服务区的, 在这个过程中运用的主要建造技术是绿色低碳, 已经实现了运营过程中的零碳。因此, 以津南服务区为例, 对其零碳水平进行认定。

该公路服务区已经被认定为天津首个零碳服务区, 因此不再对该服务区进行零碳认定, 直接开展服务区零碳排放综合评价。借助网络问卷进行相关问卷调查, 通过对回收问卷的统计, 共计回收 123 份相关专业的专家学者、服务区的工作人员、司乘人员等相关人员的问卷。其中, 相关专家学者 93 份, 服务区工作人员 18 份, 司乘人员 12 份, 利用模糊综合评价模型对评价结果进行表示并对数据进行汇总计算。具体计算分值与结果见表 5。

由表 5 中的数据可得服务区的综合模糊矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} P'B_1 \\ P'B_2 \\ P'B_3 \\ P'B_4 \\ P'B_5 \end{bmatrix} =$$

表 5 一级指标的计算分值与结果

指标	用隶属度表示的评价值	评价得分	评价结果
B_1	$P'B_1 = [0.110\ 1\ 0.347\ 7\ 0.340\ 3\ 0.164\ 8\ 0.037\ 1]$	83.29	良好
B_2	$P'B_2 = [0.253\ 4\ 0.370\ 4\ 0.244\ 6\ 0.108\ 3\ 0.023\ 3]$	87.22	良好
B_3	$P'B_3 = [0.225\ 9\ 0.291\ 6\ 0.267\ 7\ 0.179\ 9\ 0.034\ 9]$	84.95	良好
B_4	$P'B_4 = [0.140\ 9\ 0.208\ 5\ 0.316\ 8\ 0.272\ 3\ 0.061\ 5]$	80.95	良好
B_5	$P'B_5 = [0.231\ 7\ 0.321\ 1\ 0.260\ 2\ 0.174\ 8\ 0.012\ 2]$	85.85	良好

$$\begin{bmatrix} 0.110\ 1\ 0.347\ 7\ 0.340\ 3\ 0.164\ 8\ 0.037\ 1 \\ 0.253\ 4\ 0.370\ 4\ 0.244\ 6\ 0.108\ 3\ 0.023\ 3 \\ 0.225\ 9\ 0.291\ 6\ 0.267\ 7\ 0.179\ 9\ 0.034\ 9 \\ 0.140\ 9\ 0.208\ 5\ 0.316\ 8\ 0.272\ 3\ 0.061\ 5 \\ 0.231\ 7\ 0.321\ 1\ 0.260\ 2\ 0.174\ 8\ 0.012\ 2 \end{bmatrix}。$$

结合权重向量 $W = [0.184\ 4\ 0.328\ 0\ 0.083\ 1\ 0.045\ 7\ 0.358\ 9]$, 进行模糊矩阵的复合运算并进行归一化处理, 可得 $Z = W \times P = [0.211\ 8\ 0.305\ 5\ 0.283\ 0\ 0.213\ 2\ 0.047\ 4]$ 。

最终, 服务区的模糊综合评价得分为

$$F = Z' \times N^T = [0.199\ 6\ 0.288\ 0\ 0.266\ 7$$

$$0.201\ 0\ 0.144\ 7] \begin{bmatrix} 100 \\ 90 \\ 80 \\ 70 \\ 60 \end{bmatrix} = 83.97。$$

因此, 津南服务区综合评价结果为 B 级零碳服务区, 这说明该服务区是在各方面综合表现较好、建设质量较高的零碳服务区, 这类服务区可以成为其他零碳服务区建设的参考对象。

参考文献

[1] 张德华. 践行绿色交通 推进公路转型发展:《关于实施绿

色公路建设的指导意见》政策解读[J]. 吉林交通科技, 2016(3):4-6

[2] 高速公路绿色服务区建设指南:DB34/T 3272—2018[S]. 合肥:安徽省市场监督管理局, 2018.

[3] 郑东军, 李炎. 生态·功能·形象:高速公路服务区建筑设计探讨[J]. 工业建筑, 2006.36(7):105-107.

[4] 胡小聪. 高速公路绿色服务区实现途径探析[J]. 西部交通科技, 2018(4):69-71.

[5] 徐亮, 任雪松, 王栋, 等. 高速公路绿色可持续发展服务区建设的探讨研究[J]. 工业安全与环保, 2017, 43(2):77-79.

[6] 钱玉宝, 杨艳刚. 绿色服务区内涵、建设现状研究与展望[J]. 安徽建筑, 2018, 24(2):14-15, 102.

[7] 石振武, 王畅. 基于 BIM-云物元模型的公路绿色服务区预评价[J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37(4):32-38, 51.

[8] 绿色建筑评价标准:GB/T 50378—2019[S]. 北京:中华人民共和国住房和城乡建设部, 2019.

[9] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7):93-100.

[10] 杨瑚, 张霖, 蔡雪玲. 基于 AHP—模糊综合评价法的张掖丹霞旅游品牌效应评价[J]. 河西学院学报, 2022, 38(1):88-96, 111.

[11] 杨宇广. 高速公路绿色服务区评价体系构建研究[D]. 天津:河北工业大学, 2020.

Evaluation of Zero Carbon Service Area of Expressway Based on Analytic Hierarchy Method and Fuzzy Comprehensive Evaluation Method

ZHANG Xinjie, MA Sisi

(School of Civil Engineering, Inner Monglia University of Science and Technology, Baotou Inner Mongolia 014010, China)

Abstract: The operation status of the expressway service area is investigated, the concept of zero-carbon service area is clarified, and the key technologies for realizing “zero carbon” are analyzed. From the five aspects of building low-carbon, renewable energy and energy saving and environmental protection measures, carbon emissions and environmental monitoring measures, management measures, and economy, an evaluation system for the zero-carbon service area of expressways is constructed. Fuzzy comprehensive evaluation model of expressway zero-carbon service area is developed. Finally, the Tianjin Jinnan service area is evaluated using a comprehensive evaluation model, the results show that the service area is a B-level zero-carbon service area.

Keywords: expressway service area; zero-carbon operation; analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation method