

高速公路路面小修保养费用影响因素量化分析

史小丽¹, 李玉环¹, 张 明¹, 张 平²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西省交通建设集团公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 为提高高速公路路面小修保养费用决策水平, 采用阶层回归分析方法, 进行小修保养费用影响因素量化研究。通过定性分析将影响因素界定为地区因素、通车年限、特大桥梁比例、长与特长隧道比例和交通因素, 其中交通因素分为 5 种情况; 通过对变量进行预处理, 基于 16 条高速公路的历史数据进行量化研究。结果表明, 在控制地区变量的条件下, 各区组对模型的整体解释力均较显著, 其中通车年限的增量解释力和在各区组的统计意义最为显著; 同等条件下特大桥梁比例的标准化回归系数(β 系数)远大于长与特长隧道比例的 β 系数, AADT(annual average daily traffic)和重车流量区组的 β 系数较其他交通因素区组的数值大。因此, 路面资产小修保养费用受到地区因素、通车年限、大于 1 000 m 的桥梁比例、AADT 和重车流量的影响。

关键词: 道路工程; 路面资产; 小修保养费用; 阶层回归分析; 影响因素

中图分类号: U418.2

文献标志码: A

Quantitative Analysis of Influencing Factors on Pavement Routine Maintenance Cost of Expressway

SHI Xiaoli¹, LI Yuhuan¹, ZHANG Ming¹, ZHANG Ping²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2. Shaanxi Provincial Communication Construction, Xi'an 710075, China)

Abstract: In order to improve the decision level of pavement routine maintenance expenditure of expressway, hierarchical regression analysis method was used to quantify the influencing factors of routine maintenance cost. The influencing factors were defined as regional factors, ages, extra-large bridges ratio, long and extra-long tunnel ratio, and traffic factors which were divided into five cases. The quantitative research was carried out based on the historic data of 16 highway pavement assets after the variables were pretreated. The results show that the overall explanatory

power of each group to the model is remarkable under the condition of controlling regional variables; the incremental explanatory power and the statistical significance in each group of the age are the most remarkable; the normalized regression coefficient (β coefficient) of the extra bridge ratio is larger than the long and extra-long tunnel ratio under the same conditions; and the β coefficient of the AADT (annual average daily traffic) and heavy traffic flow are greater than other traffic groups. Thus, the calculation of pavement assets routine maintenance cost is affected by regional factors, the age, the extra bridges ratio, AADT and heavy traffic flow.

Key words: road engineering; pavement assets; routine maintenance costs; hierarchical regression analysis; influencing factors

研究者在开展公路养护费用模型研究时, 通常都会考虑各种影响因素, 这些影响因素分为 4 种类型: 第 1 类是直接研究得出养护费用区间, 不体现具体的影响因素, 如 Burningham^[1] 和 Ola^[2]. 第 2 类是将道路日常养护费用与路面性能建立联系, 文献[3] 得出了道路年度小修保养费用与路面服务性能指数 (PSI) 的回归方程, Lu^[4] 总结得出了年度小修保养费用与道路平整度 (IRI) 的回归方程. 第 3 类是将小修保养费用与道路所处的自然环境、交通环境、技术状况、路龄等因素建立联系, 这种研究思路的成果较多: Hagood^[5] 采用回归分析方法得出美国内华达州 5 种路面小修保养方案的总造价、人工费、材料费、机械使用费和工时消耗线性模型, 其模型的自变量包括路段长度、地区、路龄、海拔高度、气候、气温、累计当量轴载、上一年度的费用大小等因素; Gibby 等^[6] 将美国加利福尼亚州的路面养护费用影响因素归纳为重车的年平均日交通量、客车的年平均日交通量、路龄、气温、是否有路肩、是否有桥梁、所在地

收稿日期: 2018-10-26

基金项目: 陕西省交通运输厅科技项目(16-34k); 中央高校基本科研业务费专项资金(300102218112)

第一作者: 史小丽(1979—), 女, 副教授, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为公路基础设施资产管理. E-mail: glxl@gl.chd.edu.cn

区等,得出了该州每公里养护费用的非线性回归模型;Volovski等^[7]分析印第安那州的路面大修养护费用时考虑了路龄、年平均日交通量(AADT)、年平均降雨量、路段长度、车道数、路面性质(新建或重建路面)等因素;Sebaaly等^[8]则针对每一种路面处治方案建立养护造价模型;邱兆文等^[9]构建了高速公路养护维修率的指标体系,考虑了平均日交通量、年均日重车辆、小修保养工程量、专项养护工程量等6个计算变量。第4类是在研究道路小修保养费用时,既考虑路面使用性能因素又考虑道路技术状况因素;巫从亮^[10]研究得出了浙江省高速公路沥青路面年度日常养护费用与PQI(pavement maintenance quality index)、交通量、货车比例、运营年限的数量关系;阮樾^[11]将沥青路面小修养护工程中破损维修工程量影响因素归纳为路面工程质量等级、路面宽度、路面厚度、路面使用性能指数、折算后的公路使用年限、全年平均日交通流量、全年平均日重车流量、年平均降雨量、年平均温差因素。

上述文献的研究特点是:①对公路养护费用的分析具有明显的区域性特点,研究者分析问题过程中都以某一特定的地区为研究对象,如文献^[5-8];②研究方法中大多采用回归分析的方法,但回归的模型各不相同,有线性模型,也有非线性模型;回归模型的因变量大多是日常养护费用,也有将日常养护工程量作为因变量的,如文献^[11]。③回归模型中自变量的数量和内容各不相同,反映出不同时期不同学者考虑的影响因素各不相同,特别是交通因素,有AADT(annual average daily traffic)、ESAL(equivalent single axle load)、重车的AADT、重车的比例等,但都是直接选择某一因素,并未给出选择某一因素的依据。④当不考虑任何自变量,直接给出小修保养费用区间时,该区间的范围较宽,如美国高速公路经济需求分析系统(HERS-ST)计算出道路单位长度每车道日常养护费用的平均值为285美元~7 830美元;Ola等^[2]得出了道路的年度小修保养费用标准为:有铺装的双车道农村主干道为870美元·km⁻¹~1 730美元·km⁻¹、有铺装的四车道主干道为1 682美元·km⁻¹~6 743美元·km⁻¹、没有铺装的双车道主干道为703美元·km⁻¹~1 407美元·km⁻¹,很显然该费用区间实质上是考虑了各种因素影响的。⑤当自变量为道路使用性能时,其养护费用的测算会受到技术状况评定时间的影响,进而影响费用测算的准确性。根据陕西省小修保养工程量清单历史数据资料,路面小修工程的具

体项目包括:沥青混凝土路面裂缝维修、沥青混凝土路面坑槽维修、水泥混凝土路面裂缝维修、水泥混凝土路面断面板修补、水泥混凝土路面表面处治、拦水带修补以及路缘石维修。路面日常养护工程具体项目包括:路面保洁、沿线设施保洁以及OGFC(open graded friction course)透水路面清洗。因此,本文将路面小修保养费用影响因素界定为目前研究中较多采用的第3种类型,即道路所处的自然环境、交通环境、技术状况、路龄等因素,并进行量化影响因素研究,基于实际数据经过回归分析最终得到路面小修保养费用的实际影响因素。

定量化分析是建立在定性分析基础上的。首先对影响高速公路小修保养费用的因素进行定性分类整理,界定研究的边界条件和变量的类型,并据此选择多元阶层回归分析方法进行定量化分析。再进行多元阶层回归分析中变量的预处理,涉及因变量中路面规模大小和价格因素的影响、类别变量的虚拟化、自变量区组的进入顺序确定。然后对多元阶层分析结果的参数进行分析,包括 β 系数、 R^2 等。再依托陕西省交通建设集团管理的16条高速公路路面历史小修保养费用数据,确定该资产的影响因素并进行讨论分析。

1 影响因素的定性分析

高速公路路面小修保养费用受到养护管理水平、使用年限、交通量、桥梁隧道长度比例、气候、气温等因素的影响^[12],研究中需首先对这些因素进行定性分析,再选择合理的方法进行定量分析。

1.1 定位特定服务供给水平的必要性

在中国现代养护工程管理体系中,针对同一条高速公路,各种养护类型是相互影响的:日常养护的费用投入和实施质量会影响到预防性养护的时机,预防性养护的实施效果又会影响到大中修的时间,是否及时预防性养护和大中修则会影响日常养护的费用支出。为保持高速公路的运营服务水平,高速公路运营公司对公路各资产的性能指标规定了最低可接受水平,本文将此水平定义为养护服务供给水平,不同的养护服务供给水平体现的养护费用投入多少是不同的。因此研究中需设定好养护服务供给水平这一边界条件,确保对一组具有相同养护服务水平的高速公路资产进行研究才具有实际应用价值。

1.2 细化交通量因素指标

交通量因素可以通过AADT、重车流量、标准轴

载的当量轴次、标准轴载的累计当量轴次来表现^[13-17]. 文献中不同学者在研究中采用的交通量因素指标是不同的: Gibby 等^[6]的日常养护费用模型中包括重车的 AADT 和客车的 AADT 2 个交通量指标; Volovski 等^[7]的日常养护费用模型中包括 AADT、ESAL 和重车数量; 文献^[9, 11]则考虑了年平均日交通量和年均日重车量 2 个指标; 文献^[10]考虑的交通量指标是交通量和货车比例. 上述学者的研究中并未提出使用该交通量指标的依据, 但都是基于交通因素指标会直接影响到小修保养的工程量的大小, 进而影响其人工费、材料费、机械使用费等, 从而影响小修保养费用的总投入大小. 本文将交通量因素分为 AADT(指标 1)、AADT 及重车日流量(指标 2)、AADT 及重车比例(指标 3)、ESAL(指标 4)、累计 ESAL(指标 5) 5 种情况, 通过定量化分析确定合适的交通量因素指标.

1.3 设置地区因素归一化气候环境因素

高速公路路面运营过程中, 受到海拔、气温、降雨雪量等气候和环境因素的影响非常显著^[9, 11, 18-19]. 将这些自然环境因素归一化为地区因素变量, 即位于同一地区的路面资产其所处的气温差、降水量、海拔等相同, 研究中将位于同一气候区域的路面资产作为一组分析对象.

1.4 使用年限

由于各高速公路项目通车年度不同, 分析中将不同通车年度转换为通车年数, 用“路龄”来表示, 并将同一地区通车年数相同的数据作为一组样本数据. 对于路面来说, 随着通车年限的增长, 各种病害相继出现, 路面的性能开始下降, 性能的下降则会导致路面小修保养费用的增加.

1.5 特大桥梁比例和长与特长隧道比例

特大桥梁比例和长与特长隧道比例分别指的是一条高速公路中所有大于 1 000 m 的特大桥梁总长度和所有大于 1 000 m 的长与特长隧道总长度占路线总长度的百分数.

文献^[20]桥面铺装与普通铺装层表面由于其结构及所处的地理环境不同(桥面铺装位于悬空的钢筋混凝土梁上, 而一般路面铺装层在坚实的路基上), 从而出现破损的类型和损坏程度完全不同, 这一差异在特大桥面上表现得比较突出: 特大桥面的使用性能比一般路面的使用性能低, 且下降幅度更快一些, 反映出特大桥面的破损出现得更早、更快些. 中、短隧道路面的使用性能与一般路面的使用性能表现出相同的变化趋势; 而长隧道路面的使用性能比一

般路面的使用性能低, 且下降幅度更快一些, 反映出长隧道路面的破损出现得更早、更快; 隧道内沥青路面受环境因素的影响比水泥路面更敏感.

因此将特大桥梁比例和长与特长隧道比例作为路面资产小修保养费用的主要影响因素.

1.6 路段划分

以中国陕西省的高速公路为分析对象, 根据该省对高速公路的管理体制, 每一条高速公路由特定的分公司负责具体的运营管理工作, 养护费用计划的制定也是以各条高速公路为单位进行的, 并且分析中需要各公路运营分公司的历史费用数据, 故以各分公司管理的一条高速公路为一个路段作为具体分析对象. 由于各分公司的养护管理水平受到总公司养护政策的影响, 且各分公司由总公司统一管辖, 因此各分公司的养护服务供给水平是相同的.

2 研究方法的选择

2.1 多元阶层回归分析方法的适用性

多元回归分析可用于预测型回归, 也可用于解释型回归^[21]. 预测型回归用于对因变量的趋势进行预测, 解释型回归主要是研究变量之间的相互关系, 解释型回归满足本文分析问题的需求. 另外, 由于研究的影响因素既有连续型变量, 如使用年限、交通量、桥梁比例、隧道比例, 也有类别变量, 如地区因素, 所以当多元回归分析中有类别变量的存在, 多元回归分析需要采用阶层回归分析^[22]. 多元回归分析中的阶层回归分析既满足了对多个影响因素进行分析的要求, 同时也可以利用数学工具针对各个影响因素对各资产日常养护的影响程度进行判断.

2.2 变量的预处理

分析中将各条高速公路每年投入的路面小修保养费用总额作为因变量(被解释变量), 这一费用总额包括在同一养护服务供给水平这一边界条件约束下, 实施日常保养和各项小修工程的费用之和. 分析中自变量包括交通量、地区因素、通车年限、桥梁比例和隧道比例, 其中地区因素是类别变量, 其他几个因素是连续型变量. 由于小修保养费用投入受到路面资产规模大小和实施年度的影响, 且基于线性关系假设的多元回归分析要求模型中的自变量是连续变量^[21], 此外还需考虑因变量数据本身数学分布的偏态性影响. 通过表 1 对因变量和自变量进行预处理, 以满足数据分析的要求.

表1 变量预处理过程

Tab.1 Variable pretreatment process

处理对象	预处理方法	预处理目的
因变量	根据车道数和路程进行单位化处理	消除资产规模影响
	用价格指数 ^[22] 折算为2015年度费用值	消除不同年度工、料、机价格因素影响
	取对数	消除因变量数学分布的偏态性
自变量	类别变量虚拟化	将类别变量转换为连续变量

2.3 自变量区组的分类及进入顺序的确定

将自变量分为4组:表示地区因素的地区变量为一组,表示时间因素的通车年限为一组,表示某高速公路固有属性的特大桥和长与特长隧道比例为一组,交通因素为一组。

阶层回归分析的一项重要工作是决定自变量的阶层关系与进入顺序,需要从理论或现象的合理性来考量,不能任意为之^[21]。通常第1个区组的变量不受其他任何解释变量的影响,后续区组变量在前面区组变量投入后再进入模型,使得前面区组变量的差异可以最先获得控制,同组变量间可存在一定的相关性。由于地区变量发生于最先,作为第1个区组;通车年限因为地区变量的影响而有个别差异,将其视为第2个区组,在地区变量投入后再进入模型,使得地区变量的差异可以最先获得控制;特大桥和长与特长隧道比例会受地区变量的影响,将其作为第3个区组;由于交通量指标可能因地区变量的影响(如地区经济发展、人口规模等)、通车年限的增加以及特大桥和长与特长隧道比例而有个别差异,所以将各交通量指标作为第4个区组。

需要注意的是:对于指标1、指标2、指标3、指标4和指标5,阶层回归分析时每次只能输入一种指标。因为这5种指标都是经过公式换算得出的,如果在一次回归分析中同时输入3种指标,则会导致回归模型出现共线性问题。

3 模型的建立与分析

3.1 多元阶层回归模型与分析指标

多元阶层回归模型如式(1)所示。

$$\lg C_{it} = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 \quad (1)$$

式中: C_{it} 为第*i*条公路路面资产第*t*年的每车道每千米小修保养费用,元; x_1 为地区因素变量(陕北地区、关中地区、陕南地区); x_2 为通车年限; x_3 为交通量

(分别为指标1~指标5); x_4 为大于1 000 m桥梁比例; x_5 为大于1 000 m隧道比例; a 为截距项; b_j 为回归系数,表示对应的自变量 x_j 对于因变量 $\lg C_{it}$ 的解释程度,由于系数 b_j 是一个带有单位的非标准化统计量,虽然可以反映自变量 x_j 对因变量 $\lg C_{it}$ 影响的数量,但是由于各个 b_j 单位不同,根据 b_j 大小断定各个自变量的重要程度是不具备说服力的,不能作相对比较。如果要对回归系数 b_j 进行比较,更直观地得到各个自变量对于因变量的解释程度大小,可对式(1)中的所有变量计算其标准分数(z 得分)而将其标准化,此时 a 消失,式(1)将变化为式(2),此式能很直观地判断每一个自变量对因变量的解释程度大小^[23]。

$$Z_{\lg C_{it}} = \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \beta_3 z_3 + \beta_4 z_4 + \beta_5 z_5 \quad (2)$$

式中: β_j ($j=1,2,3,4,5$)为标准化回归系数,简称 β 系数。

$$\beta_j = b_j \frac{S_{x_j}}{S_{\lg C_{it}}} \quad (3)$$

式中: S_{x_j} 为第*j*个自变量 x_j 的标准差; $S_{\lg C_{it}}$ 为取对数之后的因变量 $\lg C_{it}$ 的标准差。

3.2 分析内容及判断是否影响因素的标准

回归分析的目的是探究自变量对因变量的解释程度,故分析结果中先报告模型的整体解释力 R^2 ,并配合 F 检验的检验数据,说明模型解释力的统计意义。在阶层回归分析过程中,当某个变量先于其他变量进入区组参与回归分析时,在后续变量的添加过程中,该变量在区组中主要起控制变量的作用; ΔR^2 表示在控制了前一组变量影响下,该区组能够额外“贡献”的解释力。当 ΔR^2 较大且 Δp 达到统计意义时($\Delta p < 0.05$),则认为区组的加入能够有效提升模型的解释力。

再重点研究标准化系数表,表中每个自变量都有一个对应的 β 系数以及显著性检验结果。回归系数的标准化能够使各个自变量以及因变量的单位统一,减少因为单位不同而造成的误差,使结果更精确。 β 系数的 t 检验绝对值越大, p 值就越小, p 值代表 t 检验的显著性,在统计学上, $p < 0.05$ 一般被认为是系数检验显著,表明自变量可以有效预测因变量的变异,做出这个结论有5%的可能会犯错误,即有95%的把握结论正确。

回归分析结果的系数表中, β 系数有正有负,其正负表示某一自变量提高1倍的标准差会使因变量上升或下降 β 绝对值倍的标准差;某一自变量的 β 绝对值越大,表明该自变量对因变量的影响越大。故阶

层回归分析结果讨论中,针对 β 系数的绝对值大小进行分析。

结合实际情况综合考虑所有模型的回归分析结果,对于某一自变量是否作为小修保养费用的主要影响因素考虑如下:① 当 $\beta > 0.30$ 且 p 值具有统计意义时,则该解释变量作为主要影响因素;② 当 $\beta > 0.30$ 但 p 值不具备统计意义时,由于 β 系数数值较大,没有达到统计意义的原因可能是样本数据过少,但不能忽略变量包含的实务意义,即也认为该解释变量是主要影响因素;③ 当 β 系数在 0.20 左右时,需要从实务意义对该解释变量重要性进行判断,如果该变量实务意义较大,则认为该解释变量可作为主要影响因素;如果该解释变量实务意义较小,则不认为该解释变量可作为主要影响因素。

4 模型结果分析与讨论

以陕西省交通建设集团管理的 16 条高速公路为分析对象,这 16 条高速公路中通车年限最长的是 15 年,最短的是 3 年。根据陕西省的地域特点,将这 16 条高速公路划分为陕北、关中和陕南 3 个区域,即研究的自变量中地区因素为 3 个。研究对象的桥梁均为钢筋混凝土梁桥,路面结构均为沥青混凝土路面,保证了研究基准的统一。研究过程中搜集了该 16 条高速公路各运营年度的数据资料,表 2 列出了各路段基本信息,表中路面使用性能指数(PQI)反映了各路段的路面养护服务供给水平。将路面小修保养费用支出经过价格指数调整、归一化和取自然对数后做为因变量,按 2.3 节设计的自变量区组分类及进入顺序进行阶层回归分析。表 3 所示为阶层回归分析结果,图 1 为相应的标准化回归系数。

第 1 个区组地区变量对模型的整体解释力不显著,区组 2、区组 3 和区组 4 对模型的整体解释力均较显著,但其中仅通车年限的增量具有统计意义($\Delta R^2 = 0.206, \Delta p = 0$),表明通车年限对路面小修保养费用具有显著影响。

在区组 2 中,2 个地区因素指标和通车年限指标 3 个自变量对模型的整体解释力较显著,并且各自变量均具有统计意义,反映地区因素和通车年限均需作为路面资产使用状况的影响因素;路面材料在车轮磨损以及不同地区自然环境的影响下会逐步老化,从而造成路面裂缝、坑槽等病害的增多,而这一现象会随着通车年限的增加表现得更加明显。

在区组 3 中,大于 1 000 m 桥梁比例和隧道比例

表 2 各路段基本情况

Tab. 2 Basic information of each section			
路段名称	小修保养费用/元	通车年限	PQI
机场高速	211 260	1	100.00
	564 175	2	100.00
	494 920	3	97.27
	267 479	4	97.98
	280 455	5	97.79
	289 726	6	97.65
绕南高速	325 039	7	97.83
	1 168 139	8	98.07
	1 224 366	9	98.03
西长高速	130 911	3	95.88
	96 543	4	95.42
	119 778	5	95.18
	264 048	6	94.62
	551 314	7	94.56
	3 547 098	8	95.55
靖王高速	675 464	2	99.44
	627 506	3	98.78
	688 097	4	95.16
	828 600	5	93.60
	808 362	6	94.17
	3 044 214	7	93.94
	3 010 615	8	89.51
	2 223 859	9	92.01
神府高速	2 435 935	10	92.22
	2 262 949	11	91.50
	834 746	1	
	966 959	2	94.05
吴靖高速	1 377 638	3	94.46
	1 331 527	4	94.46
	6 795	1	98.81
	101 145	2	95.19
	130 009	3	93.78
	1 376 076	5	93.64
	3 946 748	6	94.11
延志吴高速	8 480 506	7	94.02
	3 903 063	8	93.97
	284 928	2	
榆绥高速	1 070 811	3	96.44
	1 795 200	2	
商界高速	1 632 000	3	97.05
	744 387	3	
	2 396 684	4	
	3 000 900	5	
	3 936 244	6	
商漫高速	6 568 590	7	
	345 006	1	97.72
	1 303 329	2	94.78
	1 306 497	3	95.78
	1 462 640	4	95.39
	2 434 665	5	95.80
	2 372 419	6	95.79
西商高速	1 924 194	7	99.74
	4 279 962	2	96.80
	2 149 595	3	93.47
	3 192 996	4	91.89

表3 路面资产阶层回归分析结果

Tab.3 Regression analysis results of pavement assets

模型中的变量	区组 1	区组 2	区组 3	区组 4 ①	区组 4 ②	区组 4 ③	区组 4 ④	区组 4 ⑤
1 陕北	(-0.284, -1.772,0.082)	(-0.335, -2.338,0.023)	(-0.185, -1.234,0.223)	(-0.201, -1.1,0.277)	(-0.234, -1.267,0.211)	(-0.396, -1.974,0.054)	(-0.148, -0.927,0.359)	(-0.190, -1.179,0.244)
1 关中	(-0.318, -1.98,0.053)	(-0.406, -2.81,0.007)	(-0.391, -2.464,0.017)	(-0.401, -2.307,0.025)	(-0.348, -1.939,0.059)	(-0.302, -1.7724,0.091)	(-0.348, -2.033,0.048)	(-0.396, -2.318,0.025)
2 通车年限		(0.460, 3.84,0)	(0.641, 4.645,0)	(0.615, 4.601,0)	(0.581, 4.248,0)	(0.561, 4.244,0)	(0.598, 4.425,0)	(0.618, 4.355,0)
3 >1 000 m 桥梁比例			(0.309, 2.149,0.037)	(0.306, 2.102,0.041)	(0.267, 1.784,0.081)	(0.300, 2.123,0.039)	(0.310, 2.145,0.037)	(0.309, 2.127,0.039)
3 >1 000 m 隧道比例			(0.128, 0.904,0.370)	(0.121, 0.801,0.427)	(0.124, 0.823,0.415)	(0.172, 1.161,0.251)	(0.146, 1.011,0.317)	(0.126, 0.874,0.386)
自变量 AADT				(-0.022, -0.152,0.880)	(-0.32, -1.071,0.290)	(-0.031, -0.222,0.825)		
重车流量					(0.324, 1.135,0.262)			
4 重车比例						(0.347, 2.051,0.046)		
ESAL							(0.089, 0.700,0.487)	
累计 ESAL								(-0.011, -0.080,0.936)
模型摘要 R^2	0.081	0.287	0.367	0.367	0.384	0.419	0.374	0.367
调整的 R^2	0.045	0.245	0.303	0.288	0.293	0.333	0.295	0.288
p	0.112	0.001	0	0.001	0.001	0	0.001	0.001
ΔR^2	0.081	0.206	0.080	0	0.170	0.052	0.006	0
Δp	0.112	0	0.054	0.88	0.054	0.132	0.487	0.936

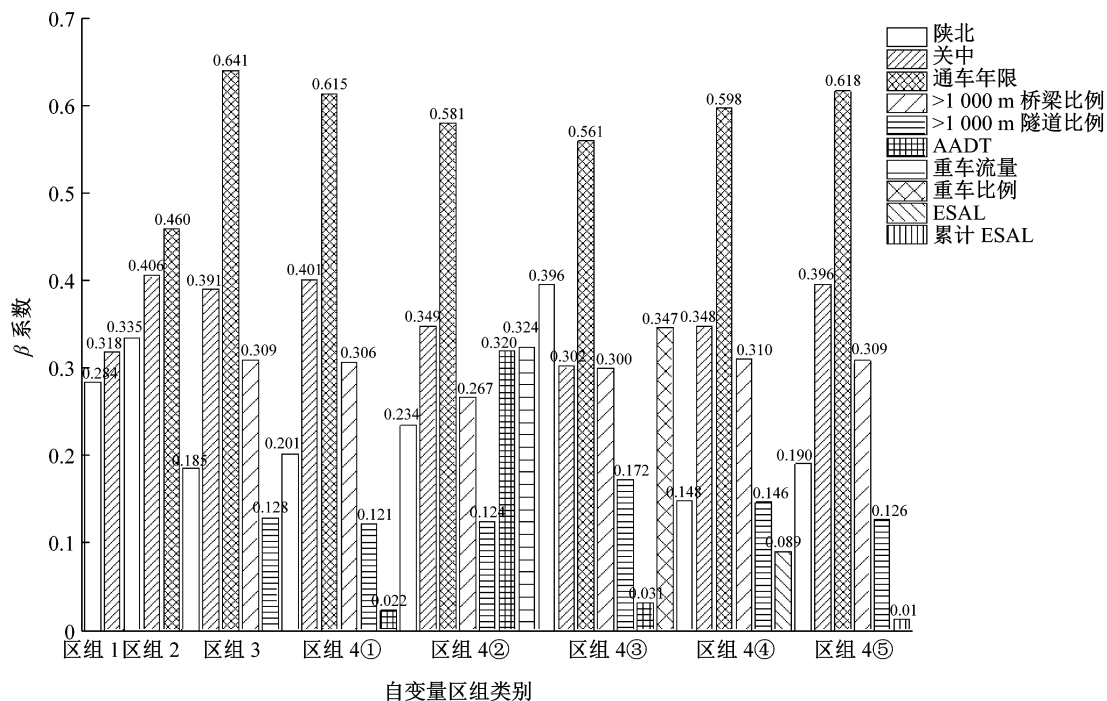
注:括号三个量分别为 β 、 t 、 p 。

图1 路面资产标准化回归系数

Fig.1 Beta coefficient for the pavement assets

指标的加入,提升了模型的解释力;桥梁和隧道部分的路面由于在整个道路中所处的位置不同,因而其病害的产生频率与普通路面有很大差异。当荷载作

用于桥面时,荷载向下传递至桥梁构件,长期荷载作用以及桥梁基础的不均匀沉陷等问题均会导致桥梁主体结构产生一定的变形,变形延伸至桥面,便会引

起桥面的开裂,更严重会演变成桥头跳车问题,加快桥面破损.如图 1 所示,在各个区组中大于 1 000 m 桥梁比例的 β 系数大于隧道比例的 β 系数,说明特大桥梁比例对因变量的贡献大于长与特长隧道比例的贡献,这是由于隧道路面受自然因素影响较小,不像桥梁路面完全暴露在自然环境中,因而桥梁路面需要进行小修的频率相对隧道路面而言也更高.

对于交通量指标,虽然 5 种交通量指标的加入对模型的整体增加解释力没有统计意义(Δp 均大于 0.05),但包括所有自变量的全体模型解释力却具有统计意义(p 值均小于 0.05).按照调整的 R^2 大小进行排序,为:指标 3(AADT 及重车比例)、指标 4(ESAL)、指标 2(AADT 及重车流量)、指标 5(累计 ESAL)、指标 1(AADT),说明由于在实际情况下车辆荷载直接作用于路面,其小修保养费用的支出必须考虑到交通量和交通组成的影响,特别是重车因素的影响.

对于交通量指标,从图 1 中 β 系数估计的结果来看,指标 2(AADT 及重车流量)的 2 个 β 系数均较高,而指标 3(AADT 及重车比例)中重车比例的 β 系数远远大于 AADT 的 β 系数,说明重车因素对路面资产具有非常重要的影响,路面研究中必须将重车因素单独列出.值得注意的是,表 1 显示 AADT 和重车流量、AADT 和重车比例的 β 系数正负号相反,并且 t 检验结果显示的统计意义不显著,主要原因是 AADT 和重车流量具有明显的共线性问题,因此在参数估计时,会有偏误的情形发生.由于重车流量的 β 系数始终大于重车比例 β 的系数,据此将 AADT 和重车流量作为影响路面小修保养费用的交通量指标.

对于通车年限因素,该因素自从进入模型后一直具有显著的统计意义, β 系数最高达 0.641,显示通车年限越长,路面年度养护费用支出越大.

对于地区因素,虽然在区组 1 中统计意义并不显著,但在随后的阶层分析中,关中地区的 β 系数绝对值处于上升趋势,且均达到 0.3 以上,可见地区因素对因变量具有一定的贡献度.

5 结论

高速公路小修保养费用的合理确定是公路资产管理过程中的一个问题.以往针对路面资产小修保养费用模型研究中涉及多个不同的影响因素,对于交通因素指标,不同模型采用的交通指标不尽相同.

为探究路面资产小修保养费用模型,应用阶层回归分析方法进行解释型回归分析,并以陕西省交通集团管理的 16 条高速公路历史养护数据为背景,得出了路面资产小修保养费用解释型回归模型.

在阶层回归分析中,对因变量和自变量的预处理是研究基础.主要涉及对因变量消除资产规模和价格因素的影响后取自然对数、对类别型自变量的虚拟化、自变量区组的分类和进入顺序.研究表明:路面资产的小修保养费用受到地区因素、通车年限、大于 1 000 m 的桥梁比例、AADT 和重车流量的影响.

下一步可进一步分析路面资产的小修保养费用模型,以小修保养费用为因变量,或以小修保养细目的工程量为因变量.当小修保养细目为分析对象时,对影响因素的选择需结合实际情况进行筛选,如拦水带修补和硬路肩修补细目,在桥梁部分并不会出现,实际并不受桥梁比例影响.因此,本研究结论是针对路面资产整体小修保养费用而言的,当应用到具体的小修保养细目时,还需根据实际情况确定.

因结论是根据陕西省的高速公路路面养护数据分析的,其结果是否可直接用于其他省份需谨慎采纳,其他省份可采用本文方法确定合适的影响因素.

参考文献:

- [1] BURNINGHAM S S N. Why road maintenance is important and how to get it done[EB/OL]. [2018-10-09]. <https://www.docin.com/p-730617257.html>.
- [2] OLA S A, UGIOMOH I A. Cost of road maintenance in developing countries [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 1986; 112 (4): 440.
- [3] AL-MANSOUR A S K. Economic analysis of effectiveness of pavement preventive maintenance [M/OL]. [2018-10-10]. <https://www.researchgate.net/publication/29629992-Economic-analysis-of-effectiveness-of-pavement-preventive-maintenance>.
- [4] LU P T D. Multi-objective pavement-preservation decision making with simulated constraint boundary programming [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2013; 139 (9): 880.
- [5] HAGOOD M. Highway routine maintenance cost estimation for Nevada [D]. Las Vegas: University of Nevada, 2014.
- [6] GIBBY R, KITAMURA R, ZHAO H. Evaluation of truck impacts on pavement maintenance costs [M/OL]. [2018-10-10]. <https://www.researchgate.net/publication/279896206-Evaluation-of-truck-impacts-on-pavement-maintenance-costs>.
- [7] VOLOVSKI M, MURILLO-HOYOS J, SAEED T U, et al. Estimation of routine maintenance expenditures for highway pavement segments: Accounting for heterogeneity using random-effects models [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2017, 143: 1.

- [8] SEBAALY P E, VENUKANTHEN S, SIDDHARTHAN R, *et al.* Development of pavement network optimization system [R]. Washington D C: American Society of Civil Engineers, 1993.
- [9] 邱兆文,冯美军,李玲洁. 高速公路养护经费测算方法研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2010, 27(4): 55.
QIU Zhaowen, FENG Meijun, LI Lingjie. Research on calculation methods of highway maintenance funds [J]. Road Construction Machinery and Construction Mechanization, 2010, 27(4): 55.
- [10] 巫从亮. 基于目标养护周期的高速公路沥青路面养护费用估算模型研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
WU Congliang. Research on estimation model of highway asphalt pavement maintenance cost based on target maintenance cycle [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [11] 阮隼. 公路养护成本预测的智能算法分析研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
RUAN Yue. Research of maintenance amount prediction on the highway with intelligent algorithm [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.
- [12] 石子石, 黄卫, 吉祖勤. 路面养护管理系统软件结构及功能设计[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2001, 31(3): 48.
SHI Zishi, HUANG Wei, JI Zuqin. Software architecture and function design of the pavement maintenance management system. [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2001, 31(3): 48.
- [13] FWA T F, SINHA K C, RIVERSON J D N. Highway routine maintenance programming at network level [J]. Journal of Transportation Engineering, 1988; 114 (5): 539.
- [14] FWA T F, CHAN W T, TAN C Y. Road-maintenance planning using genetic algorithms. II: Analysis [J]. Journal of Transportation Engineering, 1994; 120(5): 710.
- [15] FWA T F, CHAN W T, TAN C Y. Genetic-algorithm programming of road maintenance and rehabilitation [J]. Journal of Transportation Engineering, 1996, 122(3): 246.
- [16] WANG F, ZHANG Z M, MACHEMEHL R B. Decision-making problem for managing pavement maintenance and rehabilitation projects [J]. Transportation Research Record, 2003 (1853): 21.
- [17] JAHANBAKHSH S, GAO L, ZHANG Z. Estimating spatial dependence associated with deterioration process of road network [R]. Washington D C: American Society of Civil Engineers, 2016.
- [18] 滕伟玲, 姚玉玲. 高速公路小修保养工程量的预测模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012; 32(6): 23.
TENG Weiling, YAO Yuling. Expressway minor maintenance amount predication based on neural network [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2012; 32(6): 23.
- [19] 戚云生. 高速公路日常养护工程预算定额及费用标准研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
QI Yunsheng. Study on the budget quota and expenses standard of highway daily maintenance and Engineering [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [20] 史小丽, 张明, 王峰, 等. 基于 PQI 检测数据的一般路面、桥面和隧道路面性能差异性研究[R]. 北京: 中国公路学会, 2017.
SHI Xiaoli, ZHANG Ming, WANG Feng, *et al.* Study of performance differences among general road pavements, bridge decks and tunnel pavements based on PQI testing data. [R]. Beijing: China Highway and Transportation Society, 2017.
- [21] 邱皓政. 量化研究与统计分析[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2013.
QIU Haozheng. Quantitative research and statistical analysis [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2013.
- [22] 陕西省统计局. 陕西省统计年鉴[M]. 陕西: 中国统计出版社, 2015.
Shaanxi Provincial Bureau of Statistics. Shanxi statistical yearbook [M]. Shanxi: China Statistics Press, 2015.
- [23] 杰弗里·M·伍德里奇. 计量经济学导论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2014.
WOOLDRIDGE J M. Introductory econometrics [M]. Beijing: China Renmin University Press, 2014.