

基于 DEMATEL-ISM 模型的生态道路 综合评价指标筛选

曾小清¹, 贺俊翔¹, 陆 阳², 冯栋梁², 王奕曾¹

(1.同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海市 201804; 2.上海市市政工程建设发展有限公司,上海市 200025)

摘 要:为满足广大人民对美好出行环境的需求,积极响应党和国家对于绿色生态规划的号召,旨在筛选出精炼出最符合最符合生态道路建设的指标,为生态道路标准的构建打下坚实基础。通过通过听取多位经验丰富的专家的意见,构建丰富全面的指标库,并通过 DEMATEL-ISM 模型筛选出最重要和符合要求的关键性指标。该研究不仅为生态道路标准建设打下基础,同时填补了该领域研究的空白。

关键词:生态道路;DEMATEL-ISM;综合评价指标

中图分类号: U412.37

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)10-0192-06

0 引 言

近年来,随着我国人民物质生活需求逐步被满足,人们对精神文化需求同样不断提出更高的要求,其中最常被提起的就是对良好的居住环境的需求。同时,党和国家也将绿色生态规划为我国城市建设的主要发展方向,并分别于十八大和十八届三中全会提出“推进绿色发展、循环发展、低碳发展”和“建设美丽中国”的构想,于十九大报告强调“生态文明、生态建设、生态保护”,其中“生态”二字在报告正文中更是共计出现 42 次。由此可见,生态文明建设已经发展成为我国重要的国家发展战略。

交通领域的生态文明建设进程同样至关重要。交通运输部^[1]在 2017 年印发的《推进交通运输生态文明建设实施方案》中对交通运输生态文明建设的总体要求、目标及基本原则进行了阐述,并从四个方向出发提出并制定了 15 项重点任务和 3 项保障措施来推进交通运输行业的生态文明建设。在交通运输行业的生态文明建设推进过程中,生态道路是其中必不可少的一部分,也是实现城市道路可持续发展的必然选择。

综上所述,建立合理生态道路指标体系有重要

的意义。一方面符合居民对美好生活的向往,另一方面填补从业人员在该领域研究的空白。本文通过征集多位专家的意见,总结了 4 个大项 69 个小项的标准库,并使用 DEMATEL-ISM 模型进行选择,筛选出最符合要求的一系列标准。

1 基本方法

1.1 DEMATEL-ISM 模型的介绍

决策试验和评估实验法 DEMATEL^[2-11](Decision Making Trial And Evaluation Laboratory)是由日内瓦研究中心 Battelle 协会在 1972 年提出的一种面向复杂系统因素分析的算法,并于世界范围被广泛使用。该算法是一种使用图论与矩阵工具对系统要素进行分析的方法。本文使用这种方法能够充分利用专家的经验 and 知识来处理生态道路生命周期中资源、社会、环境等因素组成的复杂的系统问题,能够对生态道路的相互影响关系做出科学性研究。但 DEMATEL 算法不能划分生态道路评价指标的结构层次,也不能识别评价指标体系中的基础性指标,因此需要引入 ISM 模型弥补上述的不足。

解释结构模型 ISM^[12-25](Interpretative Structural Modeling Method)是 J.N.Warfield 在 A.F.Osborne 于 1939 年提出的“集体思考(brainstorming)”的基础上发展而来的一种阶层构造化的方法。此方法先把作为分析对象的系统拆分成多个子系统,然后分析因素与因素间的二元影响关系,通过布尔逻辑运算得出系统的逻辑结构,得到简洁的层次化结构的有向拓扑图。

收稿日期: 2022-08-17

基金项目: 上海市科学技术委员会项目(19DZ1204200, 20DZ1202900); 上海市住房和城乡建设管理委员会项目(JS-KY18R022-7)

作者简介: 曾小清(1969—),女,博士,教授,博士生导师,从事轨道交通控制与安全研究工作。

DEMATEL 和 ISM 都是适用于关键和复杂情况下的分析和决策,将两者结合可以更加科学地做出决策,相互补充对方的不足。DEMATEL 用于确定因素间的相互作用关系,并有助于 ISM 将各个因素间的因果组织架构可视化的呈现。ISM 则用于将复杂的评价对象系统拆分为多个简单的子系统。

1.2 DEMATEL-ISM 理论步骤

在这一小节中,DEMATEL-ISM 方法的详细理论步骤将被按照顺序依次展示。

(1) 建立初始直接影响矩阵 A 。本文邀请了 14 名专业领域的学者对生态道路评价统一模块的 m 个指标间的相互影响关系进行了打分(0~4 分制,0 分代表无影响,1 分代表弱的影响,2 分代表一般影响,3 分代表强的影响,4 分代表很强的影响),共回收了 14 份有效数据,并将所有指标的集合设为 G 。为使回收数据更加科学合理,将 14 份数据进行了平均计算,最终得到了生态道路评价的初始直接影响矩阵 $A=[a_{ij}]_{m \times m}$,其中 a_{ij} 代表指标 i 对指标 j 的影响程度。

(2) 计算规范化直接影响矩阵 N 。首先将初始直接影响矩阵 A 规范化,分别计算初始直接影响矩阵的各行和与各列和,对比找出最大值并将该值记为,然后将初始直接影响矩阵 A 除以这个最大值之后得到的矩阵即为规范化直接影响矩阵 N ,数学表达式如下:

$$N = \frac{A}{S} \quad (1)$$

$$S = \max \left[\max_{1 \leq i \leq m} \sum_{j=1}^m a_{ij}, \max_{1 \leq j \leq m} \sum_{i=1}^m a_{ij} \right] \quad (2)$$

(3) 计算综合影响矩阵 T 。规范化直接影响矩阵 N 表示了各评价指标之间的直接影响关系,但在实际问题中还需要考虑相互之间的间接影响与相互影响关系。综合影响矩阵表示各因素对系统最终综合影响水平,其计算公式如下:

$$T = N(1-N)^{-1} \quad (3)$$

式中: I 为单位矩阵。

(4) 确定中心度和原因度。首先分别计算矩阵 T 各行 r_i 和以及各列和 c_i ,其中 r_i 为对应指标对其他指标的直接影响与间接影响的总和,即为影响度; c_i 为对应指标 i 受其他指标影响程度的总和,即为被影响度。故中心度 e_i 和 f_i 原因度的计算公式如下:

$$e_i = r_i - c_i \quad (4)$$

$$f_i = r_i + c_i \quad (5)$$

其中,中心度 e_i 越大,说明该指标在指标体系中

处于越重要的位置及其所起到的作用也就越大;当原因度 f_i 大于 0 时,说明该指标对其他指标影响力大于受到的影响,故称为原因指标。当原因度 f_i 小于 0 时,说明该指标对其他指标影响力小于受到的影响,故称为结果指标。

(5) 计算整体影响矩阵 H 。整体影响矩阵的计算公式如下:

$$H = T + I \quad (6)$$

式中: I 为单位矩阵。

(6) 建立可达矩阵 D 。可达矩阵 D 的建立与阈值 λ 的大小有关,而阈值 λ 可通过计算综合影响矩阵 T 所有元素的平均值来得到。当整体影响矩阵 H 中的元素 h_{ij} 大于阈值时,则将相应的 d_{ij} 判定为 1,反之判定为 0,故可达矩阵中的 0 和 1 可理解为是否可达的关系,其计算公式如下:

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, h_{ij} > \lambda \\ 0, h_{ij} < \lambda \end{cases} \quad (7)$$

(7) 进行区域分解。 $R(g_i)$ 为可达矩阵 D 中第行为 1 对应的指标关系,即为指标 g_i 所能到达的其他指标; $A(g_i)$ 为可达矩阵中第 i 列为 1 对应的指标关系,即为可以到达指标 g_i 的其他指标。设 $T(g_i) = \{g_i \in G | R(g_i) \cap A(g_i) = A(g_i)\}$,其中 $T(g_i)$ 是最始发出层的指标集。

假设存在 $g_k, g_i \in T(g_i)$ 。当 $R(g_k) \cap R(g_i) = \phi$ 时,说明存在两个互相无法到达的区域,并且这两个区域分别从指标 g_k, g_i 出发;当 $R(g_k) \cap R(g_i) \neq \phi$ 时,说明这整个区域都是可以相互到达的。

(8) 进行层级分解。与区域分解类似,令 $S(g_i) = \{g_i \in G | R(g_i) \cap A(g_i) = R(g_i)\}$,则 $S(g_i)$ 为最终接受层的指标集。找出 $S(g_i)$ 后,从原指标集 G_1 中去掉 S_1 中的指标,构成新的指标集 G_2 ,即 $G_2 = G_1 - S_1$ 。重复以上步骤,直到找不到新的 $S(g_i)$,至此结束。

(9) 进行指标筛选。首先,互相无法到达的区域内指标需要单独选取。指标来自不同区域说明指标类型互相不包含,相互之间差异性较大,每个区域指标需要选择一个以上的指标。

第二步,选择来自最始发出层的指标。因为通过最始发出层的指标可以推理出(到达)其他指标,其具有代表性。而且最始发出层中任意两个指标之间没有影响关系。

第三步,选择部分最终到达层指标。最始发出层指标不可以完全代替最终到达层指标,最终到达层指标是整个评价指标体系的精髓的提炼,相比与最

始发出层指标,其所包含的信息经过了进一步的拓展。最后,根据专家意见对上述步骤筛选出的指标进行改动。经过 DEMETAL-ISM 模型以及上述三条原则的筛选可以获得大部分合理的指标,但生态道路本身具有特殊性,所以应在筛选完成前询问专家意见,根据意见对其进行补充与调整。

2 算例分析

2.1 生态道路评价指标库的建立

通过采用文献研究法,利用国内外较为权威的文献检索工具收集相关文献 45 篇,并对文献中提出的指标进行整理与归纳形成较为庞大的指标库^[26-45]。在采用系统分析法详尽分析生态道路本身系统层次特点的同时结合生态道路的定义与目标、生态道路评价指标体系的目标与范围,将生态道路评价指标库内的指标分为 5 大类共计 113 个指标:资源节约类、生态环保类、品质建设类、智慧管理类、服务人文类。使用调研研究法以及频度分析法等方法对上文搭建的生态道路指标库内的指标进行初步筛选,同时注意整理评价内容相近的指标,选取重要指标、合并评价内容相近的指标、剔除不重要的指标,最后余下 69 个指标(见表 1)。

上述通过初筛得到的含有 69 项指标的生态道路评价体系虽内容较为丰富,但因指标过多,评价工作会较为繁琐,有违可操作性原则,故引入 DEMATEL-ISM 数理模型对其进行进一步的指标筛选工作。

2.2 计算实例

初步搭建的生态道路评价指标体系涵盖 69 项指标,较好地满足了全面性的原则,但也因为指标数量大而影响指标体系在实际工作中的实用性,因此必须对 69 项指标进行筛选,并确保筛选后的指标独立性强,内涵丰富。

本章将以指标数量为 15 的“生态环保”作为算例,使用 DEMATEL-ISM 模型进行指标筛选工作。

首先邀请专家按照德菲尔法的要求对生态环保分类下的 15 项二级指标间影响力的大小进行打分,将问卷调查的结果进行整理得到初始直接影响矩阵 A (见表 2)。

利用式(1)以及初始直接影响矩阵 A 建立规范化直接影响矩阵 N (见表 3)。

基于式(2)、式(3)以及规范化直接影响矩阵 N 建立综合影响矩阵 T (见表 4)。

表 1 初步筛选后的生态道路评价指标体系

指标分类	指标名称		
资源节约	土地资源占用	土地资源节约	取弃土场合理布置
	土地利用效率	土石方填挖平衡措施	废弃方利用率
	旧路资源利用	耕地保护与复垦土管理	道路空间合理性
	永临结合	排蓄水工程	雨水综合利用
	废水处理	节水措施	可循环材料利用
	旧路面材料再生	废渣与废旧材料循环利用	科学材料管理制度
	就地取材	材料储存	节能措施
生态保护	节能效果	可再生能源	拌合楼节能改造
	节能管理机制		
	社会环境保护	生物栖息地保护	生态连接性保护
	表土保护与生态修复	植被保护与修复	水体保护
	土地保护	水土保持	大气污染
品质建设	扬尘控制	声污染防治	光污染防治
	危险品管理	热岛效应防治	环保管理制度与资金
	长寿命路面	功能性路面	线形设计连续性
	路堤平均高度	路堑平均高度	桥隧比
智慧管理	桥隧品质	质量管理	标准化施工组织与管理
	管理信息化	全寿命周期管理	BIM 技术的应用
	预防性养护		
	智能交通系统应用	安全设施的布设与维护	安全评估
服务人文	信号控制效果	交通拥堵系数	交通安全指数
	交通管理制度	交通投资协调系数	年平均日交通量
	社会生态交通支持程度		
	信息化服务水平	慢行交通	公众满意度
	景观设计	宣传推广	生态环保培训

利用综合影响矩阵算出其各行和以及各列和,随后利用式(4)、式(5)计算中心度和原因度,可以绘制各指标的中心度和原因度分布图(见图 1)。再利用式(6)建立整体影响矩阵(见表 5)。

利用整体影响矩阵 H 和式(7)算出可达矩阵(见表 6),阈值 λ 由计算综合影响矩阵 T 所有元素的均值得到。

根据区域划分原则,得到生态环保指标可达到与可接受分布表(见表 7)。易得不存在互不连通区域。

4 结论

在前文的基础上,同理对其他四个方面的指标

表 2 初始直接影响矩阵 A

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	1.8	2	2	1.8	2.4	2.6	2.4	2.8	2.4	2.6	2.8	2.8	2.6	3.6
2	2.2	0	3.2	2.4	3.2	2	2.6	2.4	2.4	2.6	2.8	2.8	2.2	2	3.4
3	2.2	3.2	0	3.6	3.4	2.4	3	2.6	2.2	3	2.2	2	2.4	2.4	2.8
4	2.4	2.2	3.2	0	2.8	2.6	3.2	2.8	1.6	2.8	1	1.2	2.6	2.2	3
5	2.4	2.8	3.2	3	0	2.4	3	3.6	2.8	3	1.8	1	2.6	2.2	3
6	2.2	2	2.6	2.6	2.2	0	2.4	2.6	1.6	1.8	1.2	0.6	2.2	1.6	2.6
7	2.8	1.8	2	3	2.6	2.6	0	2.8	1.6	2.4	1.2	1	2.8	1.4	2.4
8	2.4	2	2	3	3.2	3.2	2.6	0	1.6	2.4	0.8	0.6	2.6	1.4	3
9	2.8	2.2	2.6	0.6	3	2	2.2	2	0	3.6	0.6	0.8	2.8	2	2.8
10	2.6	2	2.4	1	2.8	1.8	2	1.6	3.6	0	0.8	0.6	2.6	1.4	2.4
11	2.2	2.2	2.2	0.8	2.2	1.2	2	0.8	0.8	2	0	1	2.2	0.6	3
12	2	2.2	2.4	0.8	1.2	0.8	1	0.8	0.6	1.4	1	0	2.6	0.6	3.2
13	2	1.8	1.6	2.2	1.6	1.6	1.8	1.2	2.2	2.8	0.8	0.6	0	0.8	2.6
14	2.6	1.6	2.4	2	2.2	2.6	1.4	0.8	1.2	2.6	0.6	0.8	2.8	0	3
15	3	2.2	2.6	2.8	2.8	2.6	2.4	2.8	2.6	2.8	2.6	2.4	3.4	2.4	0

表 3 规范化直接影响矩阵 N

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0.00	0.04	0.05	0.05	0.04	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.07	0.07	0.06	0.09
2	0.05	0.00	0.08	0.06	0.08	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.05	0.05	0.08
3	0.05	0.08	0.00	0.09	0.08	0.06	0.07	0.06	0.05	0.07	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07
4	0.06	0.05	0.08	0.00	0.07	0.06	0.08	0.07	0.04	0.07	0.02	0.03	0.06	0.05	0.07
5	0.06	0.07	0.08	0.07	0.00	0.06	0.07	0.09	0.07	0.07	0.04	0.02	0.06	0.05	0.07
6	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.00	0.06	0.06	0.04	0.04	0.03	0.01	0.05	0.04	0.06
7	0.07	0.04	0.05	0.07	0.06	0.06	0.00	0.07	0.04	0.06	0.03	0.02	0.07	0.03	0.06
8	0.06	0.05	0.05	0.07	0.08	0.08	0.06	0.00	0.04	0.06	0.02	0.01	0.06	0.03	0.07
9	0.07	0.05	0.06	0.01	0.07	0.05	0.05	0.05	0.00	0.09	0.01	0.02	0.07	0.05	0.07
10	0.06	0.05	0.06	0.02	0.07	0.04	0.05	0.04	0.09	0.00	0.02	0.01	0.06	0.03	0.06
11	0.05	0.05	0.05	0.02	0.05	0.03	0.05	0.02	0.02	0.05	0.00	0.02	0.05	0.01	0.07
12	0.05	0.05	0.06	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	0.00	0.06	0.01	0.08
13	0.05	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.05	0.07	0.02	0.01	0.00	0.02	0.06
14	0.06	0.04	0.06	0.05	0.05	0.06	0.03	0.02	0.03	0.06	0.01	0.02	0.07	0.00	0.07
15	0.07	0.05	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06	0.08	0.06	0.00

表 4 综合影响矩阵 T

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0.19	0.21	0.24	0.22	0.24	0.23	0.25	0.23	0.23	0.26	0.18	0.17	0.27	0.20	0.31
2	0.26	0.18	0.28	0.24	0.29	0.23	0.26	0.24	0.23	0.28	0.19	0.18	0.27	0.20	0.32
3	0.27	0.26	0.22	0.28	0.30	0.25	0.28	0.25	0.24	0.30	0.18	0.17	0.29	0.21	0.32
4	0.25	0.22	0.27	0.18	0.27	0.24	0.26	0.24	0.21	0.27	0.15	0.14	0.27	0.19	0.30
5	0.27	0.25	0.29	0.26	0.22	0.25	0.28	0.27	0.25	0.29	0.17	0.14	0.29	0.21	0.32
6	0.22	0.19	0.23	0.21	0.22	0.15	0.22	0.21	0.18	0.22	0.13	0.11	0.23	0.16	0.25
7	0.24	0.20	0.22	0.23	0.24	0.22	0.17	0.22	0.19	0.24	0.14	0.12	0.25	0.16	0.26
8	0.24	0.21	0.23	0.24	0.26	0.24	0.24	0.17	0.19	0.25	0.13	0.12	0.25	0.17	0.28
9	0.24	0.21	0.24	0.18	0.25	0.21	0.22	0.21	0.15	0.27	0.12	0.12	0.25	0.18	0.27
10	0.22	0.19	0.22	0.17	0.23	0.19	0.20	0.19	0.22	0.17	0.12	0.11	0.23	0.15	0.25
11	0.19	0.17	0.19	0.15	0.19	0.15	0.18	0.14	0.14	0.19	0.09	0.10	0.20	0.12	0.23
12	0.17	0.16	0.18	0.13	0.16	0.13	0.14	0.13	0.12	0.16	0.10	0.07	0.19	0.10	0.22
13	0.19	0.17	0.18	0.18	0.18	0.17	0.18	0.16	0.17	0.21	0.11	0.09	0.15	0.12	0.22
14	0.22	0.18	0.21	0.19	0.21	0.20	0.18	0.16	0.17	0.23	0.11	0.11	0.23	0.12	0.25
15	0.28	0.24	0.27	0.26	0.28	0.25	0.26	0.25	0.24	0.29	0.19	0.17	0.30	0.21	0.25

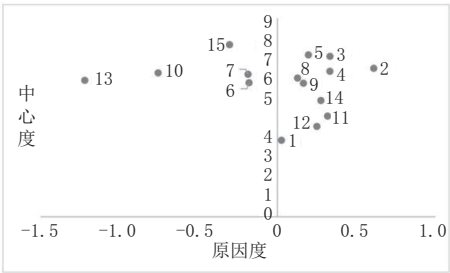


图 1 生态环保初筛指标中心度和原因度分布图

也通过上述步骤进行筛选,选出最具有代表性的指标,最终结果整理如下(见表 8),作为生态道路综合评价指标体系的构成。

5 结 语

本文基于调研研究法收集国内外与生态道路评价相关的文献资料并形成生态道路评价指标库,将指标库内指标的评价内容拆解并结合频度分析法初

表 5 整体影响矩阵

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1.19	0.21	0.24	0.22	0.24	0.23	0.25	0.23	0.23	0.26	0.18	0.17	0.27	0.20	0.31
2	0.26	1.18	0.28	0.24	0.29	0.23	0.26	0.24	0.23	0.28	0.19	0.18	0.27	0.20	0.32
3	0.27	0.26	1.22	0.28	0.30	0.25	0.28	0.25	0.24	0.30	0.18	0.17	0.29	0.21	0.32
4	0.25	0.22	0.27	1.18	0.27	0.24	0.26	0.24	0.21	0.27	0.15	0.14	0.27	0.19	0.30
5	0.27	0.25	0.29	0.26	1.22	0.25	0.28	0.27	0.25	0.29	0.17	0.14	0.29	0.21	0.32
6	0.22	0.19	0.23	0.21	0.22	1.15	0.22	0.21	0.18	0.22	0.13	0.11	0.23	0.16	0.25
7	0.24	0.20	0.22	0.23	0.24	0.22	1.17	0.22	0.19	0.24	0.14	0.12	0.25	0.16	0.26
8	0.24	0.21	0.23	0.24	0.26	0.24	0.24	1.17	0.19	0.25	0.13	0.12	0.25	0.17	0.28
9	0.24	0.21	0.24	0.18	0.25	0.21	0.22	0.21	1.15	0.27	0.12	0.12	0.25	0.18	0.27
10	0.22	0.19	0.22	0.17	0.23	0.19	0.20	0.19	0.22	1.17	0.12	0.11	0.23	0.15	0.25
11	0.19	0.17	0.19	0.15	0.19	0.15	0.18	0.14	0.14	0.19	1.09	0.10	0.20	0.12	0.23
12	0.17	0.16	0.18	0.13	0.16	0.13	0.14	0.13	0.12	0.16	0.10	1.07	0.19	0.10	0.22
13	0.19	0.17	0.18	0.18	0.18	0.17	0.18	0.16	0.17	0.21	0.11	0.09	1.15	0.12	0.22
14	0.22	0.18	0.21	0.19	0.21	0.20	0.18	0.16	0.17	0.23	0.11	0.11	0.23	1.12	0.25
15	0.28	0.24	0.27	0.26	0.28	0.25	0.26	0.25	0.24	0.29	0.19	0.17	0.30	0.21	1.25

表 6 可达矩阵 D

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1
6	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1
7	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1
8	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1
9	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1
10	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
14	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1

步筛选指标形成生态道路评级体系的雏形。利用 DEMATEL-ISM 模型分析经过初筛的生态道路评级体系中各指标间的相互影响关系和层次结构,根据模型计算结果进一步筛选指标,形成包含五大类、36 项具体指标的生态道路综合评价指标体系。

参考文献:

[1] 交通运输部.推进交通运输生态文明建设实施方案[R].2017.
[2] 宋娜,周旭瑶,唐亦博,等.基于 DEMATEL-ISM-MICMAC 法的康
养旅游资源评价指标体系研究[J].生态经济,2020,36(5):128-134.

[3] 蒋沐含.基于 DEMATEL-ISM 的 A 公司铁路冷链运输风险评估[D].
兰州:兰州交通大学,2020.
[4] 郭彤,陈怀志,姜剑,等.基于 DEMATEL-ISM 的高速公路隧道施工
进度影响因素分析[J].工程经济,2019,29(12):21-23.
[5] 刘桂权,彭福淋.基于 DEMATEL-ISM 的隧道施工塌方事故影响因
素分析[J].现代商贸工业,2020,41(30):154-155.
[6] 李军华,王晓帅,张善杰.基于 DEMATEL-ISM 模型的产业技术影
响因素分析——以智慧港口为例[J].情报探索,2020(6):54-61.
[7] 蔡永自,郭丽平,徐建军.基于 DEMATEL-ISM 模型的居民屋顶
光伏设备安装意愿的影响因素研究[J].数学的实践与认识,2020,
50(1):27-36.

表 7 生态环保指标可达到与可接受分布表

g_i	$R(g_i)$	$A(g_i)$	$T(g_i)$
1	1-10、13、15	1-10、14、15	
2	1-10、13、15	1-5、15	1-5、15
3	1-10、13-15	1-10、14、15	1-10、14、15
4	1-8、10、13、15	1-8、15	1-8、15
5	1-10、13、15	1-10、14、15	
6	1、3-8、10、13、15	1-8、15	
7	1、3-8、10、13、15	1-9、15	
8	1、3-8、10、13、15	1-8、15	
9	1、3、5、7、9、10、13、15	1-3、5、9、10、15	
10	1、3、5、9、10、13、15	1-10、13-15	
11	11、15	11	11
12	12、15	12	12
13	10、13、15	1-10、13-15	
14	1、3、5、10、13、14、15	3、14	3、14
15	1-10、13、15	1-15	

表 8 生态道路综合评价指标体系

分类	编号	指标名称	量纲
资源节约	A1	土地资源占用	%
	A2	道路空间合理性	m
	A3	排蓄水工程	%
	A4	可循环材料利用	%
	A5	节能措施	定性
	A6	可再生能源	%
	A7	节能管理机制	定性
生态环保	B1	社会环境保护	%
	B2	生物栖息地保护	%
	B3	生态连接性保护	km
	B4	植被保护	%
	B5	水体保护	TLI
	B6	大气污染防治	API
	B7	声污染防治	dB
	B8	光污染防治	定性
	B9	危险品管理	定性
	B10	热岛效应防治	摄氏度
	B11	环保管理制度与资金	%
品质建设	C1	长寿命路面	%
	C2	功能性路面	%
	C3	线形设计连续性	km/h
	C4	桥隧品质	定性
	C5	标准化施工组织与管理	定性
	C6	管理信息化	定性
	C7	BIM 技术的应用	定性
	C8	预防性养护	定性
智慧管理	D1	智能交通系统应用	定性
	D2	安全设施的布设与维护	定性
	D3	交通拥堵指数	—
	D4	交通安全指数	数量 /km
	D5	交通管理制度	定性
	D6	交通投资协调系数	%
服务人文	E1	公众满意度	%
	E2	景观设计	定性
	E3	宣传推广	定性
	E4	生态环保培训	定性

[8] 张学睦,闫淑军,姚庆国.基于 DEMATEL 方法和 ISM 模型的煤矿安全管理评价体系研究[J].煤炭经济研究,2011,31(6):82-85.

[9] 段宇航,董绍华,宋顶,等.集成 DEMATEL/ISM 的钢厂复杂系统安全影响因素研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2020,42(3):215-220.

[10] 申霞,夏越,杨校毅,等.集成 DEMATEL/ISM 的煤矿工人违章行为影响因素研究[J].中国安全科学学报,2015,25(9):145-151.

[11] 张兆宁,李文雅.终端区管制系统风险因素分析的 DEMATEL-ISM 模型[J].中国安全科学学报,2018,28(10):86-91.

[12] 岳仁田,韩亚雄.航空公司安全风险因素分析的 DEMATEL-ISM 模型研究[J].安全与环境学报,2020,20(6):2091-2097.

[13] 代红梅,秦颖.基于 Delphi-ISM-MICMAC 的装配式混凝土建筑推广制约因素关联性研究[J].北京建筑大学学报,2020,36(3):85-94.

[14] 汪振双,程浩愚,刘景矿,等.基于 Fuzzy-ISM 的建筑垃圾处理 PPP 项目风险因素关系研究[J].工程管理学报,2020,34(5):125-130.

[15] 李诗雅.基于 ISM 的应急管理大数据应用影响因素研究[D].南京:南京邮电大学,2020.

[16] 袁胜军,张新阳,段亚丽.基于 ISM 和 AHP-Entropy 的家庭儿童培训消费决策影响因素研究[J].系统科学学报,2017,25(4):94-100.

[17] 郭婷,吕淑然,丁晓强.基于 ISM 和 AHP 分析的高层建筑施工风险影响因素研究[J].建筑安全,2020,35(5):51-54.

[18] 郑权.基于 ISM 模型的逆向供应链影响因素分析[J].河北企业,2020(11):29-30.

[19] 付莲莲,赵金霞,喻龙敏.基于 ISM 模型的农户参与生猪期货意愿的影响因素分析——以江西省为例[J].金融理论与实践,2021(2):92-101.

[20] 上官子恒,施国庆,吴蓉,等.基于 ISM 与 MICMAC 的引江济淮移民生计脆弱性影响因素分析[J].统计与信息论坛,2019,34(5):94-100.

[21] 朱萌,齐振宏,罗丽娜,等.基于 Probit-ISM 模型的稻农农业技术采用影响因素分析——以湖北省 320 户稻农为例[J].数理统计与管理,2016,35(1):11-23.

[22] 张玥,帅斌,尹德志,等.基于 STAMP-ISM 的铁路危险品运输系统风险-事故分析方法[J].中国安全生产科学技术,2020,16(9):147-153.

[23] 章俊华.规划设计学中的调查分析法(13)——ISM 模型[J].中国园林,2003(8):69-72.

[24] 梅建明,张宽.PPP 项目风险合理分担影响因素的 ISM-MICMAC 研究[J].中南民族大学学报(人文社会科学版),2021,41(1):132-140.

[25] 薛佳敏,任旭.农村污水治理 PPP 项目风险因素分析——基于 ISM-MICMAC 模型[J].中国农村水利水电,2020(1):58-62.

[26] 段正梁,彭振,杨左,等.情理整合视角下旅游者环境责任行为与意愿悖离研究——基于 Logistic-ISM 模型[J].热带地理,2021,41(1):104-113.

[27] 交通运输环境保护标准化技术委员会.JT/T 1199.1-2018 绿色交通设施评估技术要求第 1 部分:绿色公路[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.

[28] 胡添虹,蔡永立,李武陵.崇明生态岛建设生态类指标体系筛选研究[J].安徽农业科学,2011,39(2):885-888.

[29] 张琴.基于可持续发展理念的绿色公路评价研究[D].重庆:重庆交