

# 道路基础设施管养标准图谱体系

蔡文渊<sup>1</sup>, 刘成龙<sup>1,2</sup>, 吴荻非<sup>1</sup>, 高紫月<sup>1</sup>, 杜豫川<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海城市基础设施更新工程技术研究中心, 上海 200032)

**摘要:** 为提升道路基础设施管养标准体系的一致性和完整性, 探究了对道路基础设施管养影响较大的重要标准并分析了标准体系的时间、地域特色。建立道路基础设施管养标准规范的引用网络, 使用度中心性、半局部中心性、PageRank 算法估复杂网络中关键节点的重要性, 并引入逼近理想解排序 (TOPSIS) 法进行综合评估, 从标准引用网络中挖掘出具有重要性、代表性、权威性的标准规范。此外, 使用基于词云的词频统计方法分析了不同时间段内标准和 3 个不同地理分区地方标准的主题热点, 得到养护技术、养护对象的特点。通过道路管养标准图谱梳理了道路基础设施管养标准的关联与脉络, 为完善标准体系提供了重要参考。

**关键词:** 交通工程; 道路基础设施管养; 标准图谱; 复杂网络分析; 重要节点

中图分类号: U418.1

文献标志码: A

## Standards Graph System of Road Infrastructure Maintenance and Management

CAI Wenyuan<sup>1</sup>, LIU Chenglong<sup>1,2</sup>, WU Difei<sup>1</sup>, GAO Ziyue<sup>1</sup>, DU Yuchuan<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Urban Infrastructure Renewal, Shanghai 200032, China)

**Abstract:** To improve the consistency and integrality of the road infrastructure maintenance and management standard system, crucial standards which have an essential effect on infrastructure industry are explored and temporal and regional characteristics of the standard system are analyzed in this paper. After establishing a standard graph of road infrastructure maintenance and management, an importance analysis on key nodes in the

complex network is made to find the important, representative and authoritative standards by using the degree centrality, semi-local centrality and PageRank algorithm. And the technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) is introduced for comprehensive evaluation. In addition, a word cloud-based frequency statistics method is used to analyze the hotspots of standard topics in different time periods and three different geographical zones, acquiring characteristics on maintenance objects and technologies. By establishing a road maintenance management standard graph, the correlation and context of road infrastructure maintenance and management standards are sorted out, providing an important reference for the improvement of the standard system.

**Keywords:** traffic engineering; road infrastructure maintenance and management; standard graph; complex network analysis; key nodes

道路基础设施是交通领域覆盖范围最广的基础设施, 也是道路交通体系的重要组成部分, 强化道路基础设施管养对交通强国战略的实现具有重要意义。标准是道路基础设施管养行业重要的指导文件, 建立完善的道路基础设施管养标准体系是道路基础设施管养工作推进和行业规范发展的重要基础。现行的道路基础设施管养相关规范有二百多本, 但在应用过程中, 各标准之间存在技术和指标上的差异, 导致道路基础设施的管养工作推进存在一些矛盾。道路基础设施管养标准的等级和类型多样, 制定标准的单位、时间、地区也各有不同; 许多标准会进行周期性修订, 而各标准的修订周期并不固定, 导致有引用

收稿日期: 2022-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(52372305); 中央高校基本科研业务费专项资金(22120230311); 上海市科技创新行动计划(23QB1404900)

第一作者: 蔡文渊, 博士生, 主要研究方向为智慧基础设施性能预测与养护决策。

E-mail: wenyuan4@tongji.edu.cn

通信作者: 杜豫川, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为智能交通系统与基础设施数字化。

E-mail: ycd@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

关系的标准间做不到同步修订,产生指标与技术上的差异。因此,明晰标准体系的优先级、重要性、强制关系是有必要的。建立标准引用网络并通过相应的分析方法可以找到网络中的关键节点,将其作为标准体系的基础,对整个行业的规范起到奠基作用。把握核心标准的内容和修订思路对指导道路基础设施管养工作开展具有重要意义,研究核心标准的趋势可以为标准体系的完善提供方向<sup>[1]</sup>。引用此类核心标准的其他标准根据应用场景和地域特色再进行扩展和因地制宜的发展,反映不同等级的道路和所在区域的地理特征对道路基础设施管养的不同要求。此外,道路基础设施管养的标准体系是一个不断发展、优化的体系,对新技术、新设备、新场景进行规范,对已淘汰以及较少使用的旧技术进行删减和取缔。因此,从时间、地域视角对标准体系中的标准主题进行分析,探索行业发展趋势和未来技术定位。

标准体系的研究在近年来逐渐受到重视。标准体系中核心标准的挖掘对标准体系的完善与更新十分重要。刘媛媛<sup>[1]</sup>研究了多个行业的国家标准引用网络,发现标准更新缓慢的问题在各个领域的标准体系中都存在,但强制性国家标准更新不及时导致的问题会更加严重。目前对标准体系中重要标准的研究仍较为缺乏,只有少数领域有对标准体系的深入研究,如郝志刚等<sup>[2]</sup>对食品安全相关的国家标准引用网络进行了研究,分析了食品安全行业标准引用网络中的重要标准。在道路基础设施管养领域中,对标准体系的研究仍是空白。

在一般复杂网络中,节点都具有异质性,关键节点对网络的影响力和非关键节点之间存在巨大差异。标准引用网络也具有一般网络的类似性质,处于核心位置标准的修订会对网络中其他标准产生影响,因此掌握标准网络中的关键节点从而在标准修订时保证一致性至关重要。重要标准可以在建立标准引用网络的基础上使用复杂网络的分析方法来研究。任延旭<sup>[3]</sup>使用网络分析理论对美国科学公共图书馆(PLoS)引用数据进行研究,挖掘出引用网络中的核心出版商。在复杂网络中评价节点常用的重要性标<sup>[4]</sup>,如度中心性、介数中心性、半局部中心性、PageRank方法等,都可以应用于标准引用网络<sup>[4-5]</sup>。

对于标准在时间和地域上具有不同主题的趋势分析方法,Gatti等<sup>[6]</sup>使用狄利克雷分配(LDA)的概念开发了一个主题分析模型,并揭示了运筹学和管理科学领域期刊主题的时间动态;Sun等<sup>[7]</sup>使用LDA方法量化交通领域期刊在不同国家/地区和时

间之间的主题差异,建立动态模型来明确量化有关特定主题随时间的演变。除此之外,许多词频统计方法也在主题分析中得到应用,如表达文字段趋势性的词云分析等,常被用于文献、期刊、标准的主题趋势研究<sup>[8]</sup>。以上方法通过统计学手段和特定的分析方法将文字性资料与时间、地域特征相结合,探究行业技术和主题发展趋势以及特定时间、特定地域的特征。

建立标准引用网络,选取多指标对引用网络中的重要节点(重要标准)进行探索,全面评估重要标准的影响力,有利于保障行业标准体系的全面性和一致性。采用统计学方法分析道路基础设施管养行业的标准主题热点在时间和地域上的特点及发展趋势,为标准体系的完善和均衡发展提供一些思路。

## 1 图谱构建

### 1.1 标准分类和分级

为了对整个标准体系有层次、有重点地进行分析,标准体系基本结构按照层级和标准类型进行划分,共分为6级和6种技术类型。

标准体系层级按照国家规定的标准分级方法划分为5级,另增加政策法规<sup>[9]</sup>,共分为6级,分别是政策法规、国家标准、地方标准、行业标准、团体标准和企业标准。政策法规和国家标准具有强制性,是所有标准的基础,其他标准的条例均符合政策法规和国家标准的标准的要求方可施行。

根据公路工程业标准分类,结合相关行业知识和行业标准收集情况,道路基础设施管养相关的标准被分为养护设备(管理)标准、养护技术标准、养护施工标准、养护造价标准、养护管理标准和检测评价标准共6种技术类型。

### 1.2 图谱结构

建立的道路基础设施管养标准图谱(引用网络)中每个节点对应一本标准,节点名称为对应标准出版全名,网络的边为引用参考的标准对应的节点指向被引用参考的标准对应的节点。以从每个标准的“引用标准名录”章节提取的参考标准、标准总则内标明的制定依据和在标准正文内容中提到的参考标准为参考引用,建立标准图谱。

道路基础设施管养标准图谱为有向网络,共有263个节点和466条边,通过VOSviewer软件进行可视化,形成如图1所示的标准图谱。标准图谱中节点间的连线代表引用参考关系,节点的大小代表节



点重要性的高低。节点的重要性越高,节点越大,重要性综合评估值的计算在3.3节中进行介绍。

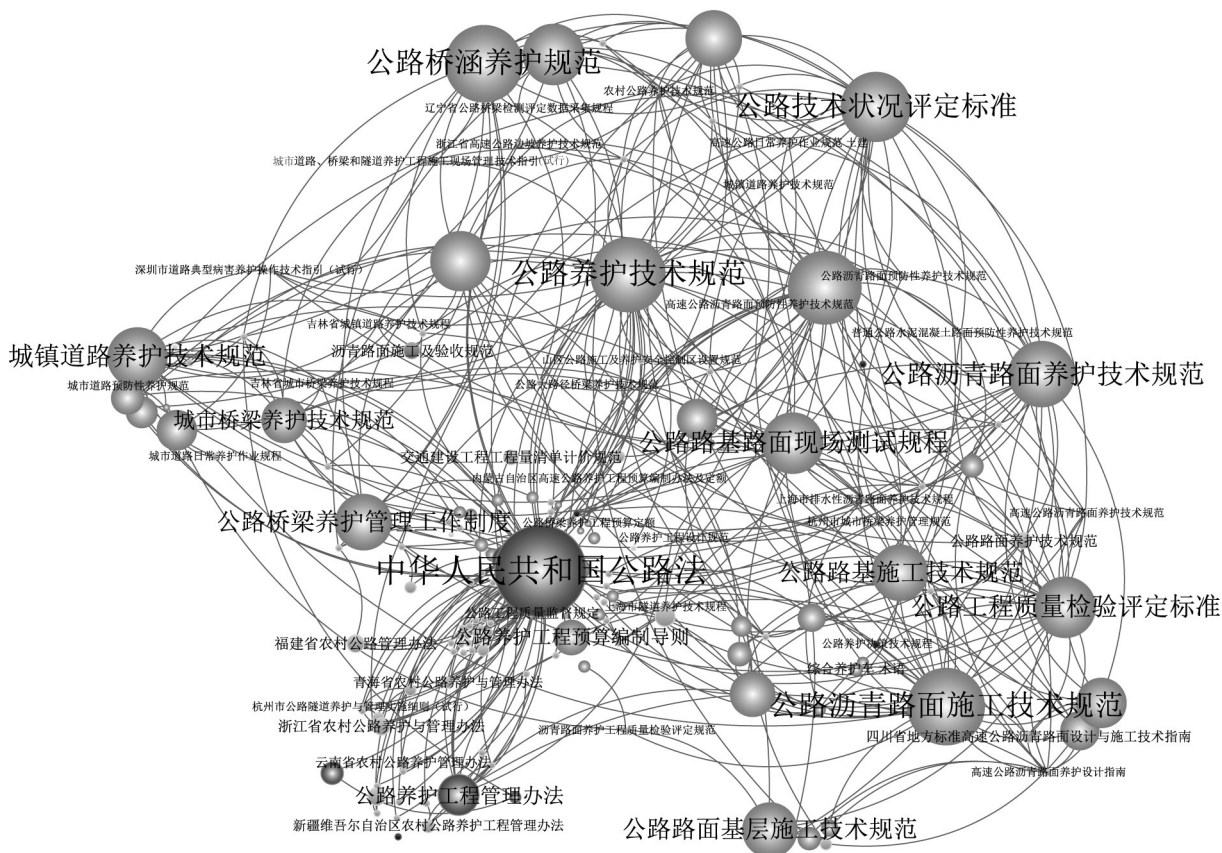


图1 道路基础设施管养标准引用网络

**Fig.1 Infrastructure maintenance and management standard citation network**

## 2 指标选择

评价指标的侧重点各不相同。基于邻接节点的评价指标,如度中心性和半局部中心性,主要通过计算节点的局部信息对重要性进行评估;基于网络路径(边)的算法,如介数中心性、Katz中心性等,评估的是节点在传播路径上的位置;基于节点位置的算法,如K-shell算法,评估的是节点在网络全局结构中的位置;基于特征向量的算法,如PageRank<sup>[10]</sup>、连杆结构分析随机(SALSA)方法等,在计算节点的度的基础上,也会考虑邻接节点的重要程度;还有一些新兴算法,如基于多属性融合和基于网络拓扑变化的算法,可以对更复杂综合的网络和节点进行评估<sup>[11]</sup>。复杂网络中节点重要性可以通过节点对邻接节点和网络全局的影响力、节点所处位置或者其他因素的综合表达,在标准引用网络中应予以考虑<sup>[12]</sup>。

考虑到标准引用网络中路径和位置对标准的重要性影响不大,更注重标准间的关系和标准的影响

力,因此共选取了3个复杂网络中的节点重要性指标,即度中心性、半局部中心性和PageRank值来评估标准图谱中标准的重要性。度中心性主要评估节点与邻接节点的关联程度,半局部中心性可以评估节点对局部的影响力,PageRank算法可以评估节点在整个网络中的影响力。3个指标包含了不同信息,各有侧重点,因此引入逼近理想解排序(TOPSIS)法结合3个指标对标准节点进行综合评估<sup>[13]</sup>。

### 2.1 度中心性

度中心性被定义为一个节点上的链接数,即一个节点具有的关系数。在有向网络中,通常定义2个独立的度中心性度量,即入度和出度<sup>[14]</sup>。由于本研究中节点间的关系都是单向的,而被参考可以表现标准的重要性,故选取入度中心性进行研究,入度是指向该节点的链接数。入度中心性  $C_a$  的计算式如下所示:

$$C_a = \frac{K_a}{g-1} \quad (1)$$

式中: $K_a$ 为节点 $a$ 链入的节点数量; $g$ 为网络中节点

的总数。入度中心性在本研究中代表图谱中标准被其他标准参考的程度,入度中心性越大,被参考得越多,在标准体系中的重要性越高。

## 2.2 半局部中心性

度中心性方法比较简单,但是体现的节点关联性很有限,而介数中心性和紧密中心性的计算复杂度太高,不适合于大尺度网络,因此Dong等<sup>[5]</sup>提出了半局部中心性(semi-local centrality)概念。在度中心性的基础上,基于半局部信息定义节点重要性,获得比度中心性更多的信息,同时算法的时间复杂度小。半局部中心性可以表征节点四阶的影响力。

首先,定义 $D(o)$ 为节点 $o$ 的二阶邻度,其值等于从 $o$ 出发,通过2条边可到达的邻接节点数目;然后,定义 $Q(y)$ 为三阶邻度, $Q(y)=\sum_{o \in \Gamma(y)} D(o)$ ,其中 $\Gamma(y)$ 表示节点 $y$ 的一阶邻接节点集合;最后,由节点 $x$ 定义半局部中心性 $C_{SL}(x)$ 。 $C_{SL}(x)$ 计算式如下所示:

$$C_{SL}(x)=\sum_{y \in \Gamma(x)} Q(y) \quad (2)$$

半局部中心性可以评估标准对参考其制定的标准及向下三级的影响力,标准的半局部中心性越大,在图谱局部范围内(相关性较高的专业和细分领域之中和之间)的影响越广。

## 2.3 PageRank算法

PageRank算法是谷歌在20世纪90年代为评估网页的重要性而提出的一种算法,可以基于网页图计算网页的排名<sup>[14]</sup>。PageRank算法中,网页的重要性基于“子”网页的重要性<sup>[15]</sup>,即一个页面的重要性由所有链向它的页面重要性决定,一个页面的网页排名(PageRank)值是由所有链向它的页面的重要性经过递归算法得到的。PageRank算法可以在网络中准确定位节点的重要程度,具有全局性。

令 $u$ 代表网页, $F_u$ 为 $u$ 链向的所有网页的集合, $B_u$ 为链向 $u$ 的所有网页的集合, $N_u=|F_u|$ 为 $u$ 中所有链接的数量, $c$ 为正则化参数,则 $u$ 的PageRank值为 $R(u)$ <sup>[16]</sup>。为了克服可能存在2个或多个网页互相链向而孤立与其他网页导致循环一直累积,最后不能收敛的问题,引入了衰减因子即排名源 $E(u)$ ,避免等级沉没。引入衰减因子后得到 $R'(u)$ ,计算式如下所示:

$$R'(u)=c \sum_{v \in B_u} \frac{R(v)}{N_v} + cE(u) \quad (3)$$

PageRank算法覆盖了对行业内标准的影响,可

以评估标准在整个标准图谱中的影响力和重要性。

## 2.4 TOPSIS法

TOPSIS法是根据有限个评价对象与理想化目标的接近程度进行排序的一种多准则决策方法,可以根据预先指定的不同指标综合比较一组备选方案。TOPSIS法通过确定每个指标的权重、标准化每个指标的分数并计算每个备选方案与理想备选方案之间的几何距离来比较一组备选方案。TOPSIS法假设指标是单调递增或递减的<sup>[17-18]</sup>,需要归一化,因为在多标准问题中参数通常具有不协调的维度<sup>[13,19]</sup>。TOPSIS法允许在指标之间进行权衡,其中一个指标的差结果可以被另一标准的好结果否定。

上述3种指标分别对标准的参考关系、细分领域影响力和行业影响力进行评估,不同指标具有不同的侧重,但也各有局限性。采用TOPSIS法对3种指标进行综合打分,对标准在图谱中的重要性进行评估,弥补单一指标的片面性。

## 3 评价分析

### 3.1 标准时间分析

对除了政策法规之外所有道路基础设施管养标准的最新版本的出版时间进行统计分析。本研究将时间分割为2005年前、2005年—2010年、2011年—2015年和2015年后4个时间段,按照标准类型进行分类,如图2所示。

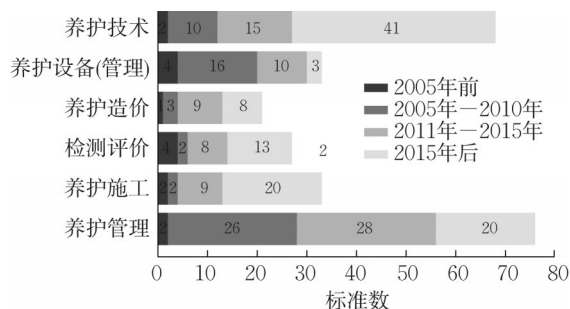


图2 标准出版/最新修订时间分析

Fig.2 Latest publication or revision time analysis of standards

从图1可以看出,约50%及以上的养护技术、检测评价和养护施工标准最新版本都在2015年后,说明养护技术、养护施工类型的标准出版、修订较为及时,相关技术发展较为迅速。养护设备(管理)和养护管理标准在2015年后出版的标准仅占同类标准的9%和26%,说明这2类标准更新较为缓慢。

3.2 标准主题时间地域分析

3.2.1 标准主题时间趋势分析

为探究整个行业的发展趋势和关注重点,对除了政策法规外的所有标准进行主题划分和时间趋势分析。将所有标准名称进行分词和聚类后<sup>[20]</sup>,以行业相关技术、科学为先验知识,对具有相似含义的词汇进行合并,共提炼出 20 个主题,如表 1 所示。

表 1 标准中 20 个词汇主题及其频次  
Tab.1 Twenty themes of standard's names and their frequencies

序号	主题	频次	序号	主题	频次
1	农村公路	50	11	预算编制、工程预算、工程量	15
2	城市道路、城镇道路	19	12	维修	12
3	高速公路	28	13	大中修	4
4	桥梁	27	14	小修	2
5	隧道	6	15	机械设备	22
6	沥青路面	33	16	预防性养护	8
7	混凝土	16	17	改性沥青	2
8	施工	55	18	再生	5
9	评定、验收	21	19	智能化、自动化	4
10	管理办法	46	20	标准化	2

时间划分方法与 3.1 节中相同,将时间分割为 2005 年前、2005 年—2010 年、2011 年—2015 年和 2015 年后 4 个时间段,对不同主题在相应时间段内出版或进行最新修订的标准数量进行统计与趋势分析,结果如图 3 所示。比较主要类型的道路基础设施,即农村公路、城镇道路、高速公路、桥梁和隧道。从图 3 可以看出:2015 年后,高速公路相关标准较之前出版和修订的明显增加,而农村公路相关标准的出版和修订不如 2005 年—2015 年间频繁;城市道路相关标准在 2010 年后才逐渐出现,但总数量较农村公路和高速公路少;桥梁和隧道相关标准的数量近年来逐渐增加,桥梁标准的数量远大于隧道。管理

办法也就是养护管理类型的标准在 2011 年—2015 年间出台较多,在 2015 年后逐渐减少,可能是养护管理类型标准对技术更新的需求不高,大多沿用之前的标准。在其他主题中,机械设备相关的标准总数较多且均为国家标准,更新较慢,多在 2010 年前出台;预防性养护,智能化、自动化,标准化相关标准在不断增加,说明新兴技术成熟后正逐渐走向规范化。

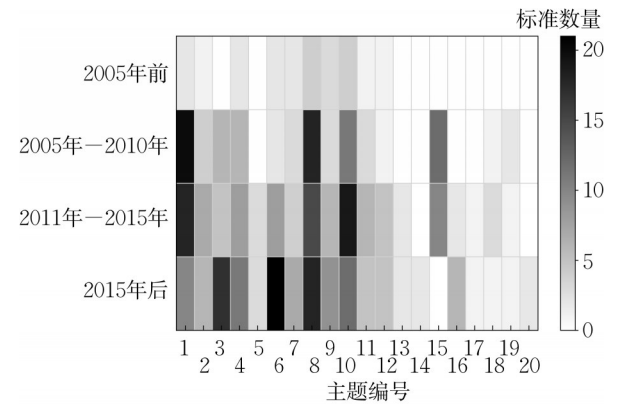


图 3 不同主题标准出版时间热力图  
Fig.3 Heat map of standards' publication time with different themes

3.2.2 标准主题地域差异分析

(1) 地方标准分区词频

由于道路基础设施的建设与当地的地貌特征联系十分紧密,因此对所有的地方标准进行地理分区分析。根据地理、文化、气候特点将出台了道路基础设施管养地方标准的所有省区市分为北方地区,东南、中部地区和西部地区 3 个分区,分区情况如表 2 所示。对每个分区的地方标准进行词频统计<sup>[21]</sup>,观察不同地理分区的省份地方标准的技术、对象、类型等方面的差异。

表 2 地理分区  
Tab.2 Geographical divisions for provinces

分区	省份
北方地区	黑龙江省、吉林省、辽宁省、内蒙古自治区、北京市、天津市、山西省、河北省
东南、中部地区	山东省、河南省、湖北省、湖南省、江苏省、浙江省、安徽省、上海市、江西省、福建省、广东省、海南省、广西壮族自治区
西部地区	新疆维吾尔自治区、青海省、甘肃省、陕西省、宁夏回族自治区、西藏自治区、四川省、重庆市、云南省、贵州省

(2) 标准养护对象分析

各地理分区的地方标准对不同养护对象的关注各不相同。对标准词频中的关键词农村公路、高速公路、城市道路和桥梁进行统计,图 4 是对不同地理分区的统计结果。

图 4a 展示了东南、中部地区不同养护对象的词

频占比。结果表明,农村公路、高速公路、城市道路相关标准比例约为 2.2:1.2:1.0。相比其他地区,桥梁相关标准的占比很高,高速公路、城市道路相关标准占比较高,农村公路的占比较低,但由于东南、中部地区的地方标准总量较其他 2 个地区大,因此农村公路相关标准的总数并不少于其他地理分区。东



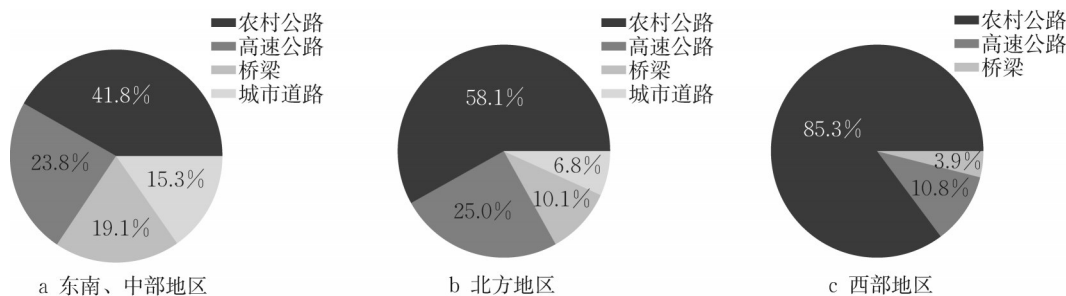


图 4 各地区地方标准对象分析

Fig.4 Standard object analysis in different areas

南、中部地区经济发展状况较好,城市化程度高,高速公路和城市道路的里程数相对较多,出台的相应标准较多;道路基础设施建设完善,管养工作起步相对较早,对各级道路管养工作的标准出台较为重视。此外,该地理分区的河湖众多,水系发达,因此桥梁养护相关标准占比较高。

图 4b 展示了北方地区不同养护对象的词频占比。结果表明,北方地区的农村公路养护相关标准较多,高速公路、桥梁、城市道路养护相关标准少于东南、中部地区,但也具有一定数量,只是对部分细分领域没有涉及。北方地区总体地势平坦,河湖较少,面向桥梁养护的相关标准较少。

图 4c 展示了西部地区不同养护对象的词频占比。结果表明,西部地区以农村公路养护管理为主,占据所有地方标准的 85.2%,桥梁、高速公路相关地方标准占比很低,并且没有城市道路相关地方标准。这可能是由于西部地区的道路以农村公路为主,很多省份及县市都出台了具有当地特色的农村公路管理手册,根据当地的养护需求制定地方标准。

### (3) 特色技术分析

根据词频统计结果,各地理分区的标准关注的新技术也具有地域特色。地方标准统计结果表明:北方地区较为重视预防性养护,多省份出台了预防性养护

标准;东南、中部地区的地方标准种类多样,覆盖面广,涉及的技术十分广泛,出台了信息化、自动化、改性沥青等多种养护新技术的相关规范;西部地区根据当地的特色出台了一些具有地域性特色技术的养护规范,如内蒙古地方标准《盐渍土地区公路养护维修技术规范》、青海地方标准《公路大跨径桥梁养护技术规范》等,对当地特有的地貌特征有针对性地出台了养护标准。

### 3.3 重要节点综合评价

分析节点在标准图谱中的重要性,研究对整个道路基础设施管养标准体系影响较大的标准,可对此后的标准修订和标准撰写提供参考。以下采用 2 节中提到的 4 种方法对图谱中的节点进行分析。

#### 3.3.1 节点的度中心性

本研究中标标准图谱是有向图,故仅计算入度中心性,即评估标准被参考引用的指标。度中心性能较好地体现节点本身的重要性。表 3 为度中心性排名前 10 的标准。从表 3 可以看出,前 5 名的标准《中华人民共和国公路法》<sup>[22]</sup>《公路养护技术规范》<sup>[23]</sup>《公路养护安全作业规程》<sup>[24]</sup>《公路沥青路面施工技术规范》<sup>[25]</sup>《公路技术状况评定标准》<sup>[26]</sup>被引用概率都接近或超过 10%,《中华人民共和国公路法》更是高达 19.5%。节点在图谱中具有很高的度中心性,意味着这些标准在标准体系中非常重要。

表 3 度中心性排名前 10 的标准

Tab.3 Top 10 standards of degree centrality

标准	度中心性/%	排名	标准	度中心性/%	排名
《中华人民共和国公路法》 <sup>[22]</sup>	19.5	1	《公路工程质量检验评定标准》 <sup>[27]</sup>	7.6	6
《公路养护技术规范》 <sup>[23]</sup>	14.9	2	《公路沥青路面养护技术规范》 <sup>[28]</sup>	6.9	7
《公路养护安全作业规程》 <sup>[24]</sup>	12.6	3	《城镇道路养护技术规范》 <sup>[29]</sup>	6.8	8
《公路沥青路面施工技术规范》 <sup>[25]</sup>	11.8	4	《公路桥涵养护规范》 <sup>[30]</sup>	6.5	9
《公路技术状况评定标准》 <sup>[26]</sup>	9.5	5	《公路水泥混凝土路面养护技术规范》 <sup>[31]</sup>	4.6	10

#### 3.3.2 节点的半局部中心性

半局部中心性可以评估节点的邻接节点和次邻接节点数量,比度中心性包含更多的信息,可以覆盖节点的四阶“影响力”。表 4 为半局部中心性排名前 10 的标准。从表 4 可以看出,通过半局部中心性评

估得到的重要节点排名和度中心性得到的结果有较大区别,其中《公路桥涵养护规范》的半局部中心性远超其他标准。半局部中心性较高的标准意味着在图谱中与其他标准的参考引用关系较为紧密,此类标准的修订对标准体系有着很大的影响。

表 4 半局部中心性排名前 10 的标准  
Tab.4 Top 10 standards of semi-local centrality

标准	半局部中心性	排名	标准	半局部中心性	排名
《公路桥涵养护规范》 <sup>[30]</sup>	189	1	《公路沥青路面养护技术规范》 <sup>[28]</sup>	102	6
《公路桥梁技术状况评定标准》 <sup>[32]</sup>	122	2	《公路水泥混凝土路面养护技术规范》 <sup>[31]</sup>	101	7
《公路沥青路面施工技术规范》 <sup>[25]</sup>	115	3	《公路桥梁养护管理工作制度》 <sup>[34]</sup>	101	7
《公路技术状况评定标准》 <sup>[26]</sup>	113	4	《公路路基施工技术规范》 <sup>[35]</sup>	98	9
《公路路基路面现场测试规程》 <sup>[33]</sup>	107	5	《公路路面基层施工技术规范》 <sup>[36]</sup>	96	10

3.3.3 节点的PageRank值

PageRank 值是评估节点相关性和重要性的指标。与一般的中心性不同,PageRank 算法采用递归算法重复计算各节点的 PageRank 值,直到 PageRank 值收敛。该算法具有全局性,可表征整个图谱的相互影响关系。

表 5 为 PageRank 值排名前 10 的标准。从表 5 看出,《中华人民共和国公路法》的 PageRank 值远超其他标准,是排名第 2 的《公路沥青路面施工技术规范》的 3 倍;第 2 名~第 10 名标准间的 PageRank 值差距逐渐减小,意味着这些标准间的重要性趋于相同。

表 5 PageRank 值排名前 10 的标准  
Tab.5 Top 10 standards of PageRank value

标准	PageRank 值	排名	标准	PageRank 值	排名
《中华人民共和国公路法》 <sup>[22]</sup>	0.090	1	《公路养护安全作业规程》 <sup>[24]</sup>	0.026	6
《公路沥青路面施工技术规范》 <sup>[25]</sup>	0.030	2	《公路沥青路面养护技术规范》 <sup>[28]</sup>	0.021	7
《公路养护技术规范》 <sup>[23]</sup>	0.029	3	《公路技术状况评定标准》 <sup>[26]</sup>	0.019	8
《城镇道路养护技术规范》 <sup>[29]</sup>	0.028	4	《公路路基路面现场测试规程》 <sup>[33]</sup>	0.016	9
《公路桥涵养护规范》 <sup>[30]</sup>	0.026	5	《公路工程质量检验评定标准》 <sup>[27]</sup>	0.015	10

3.3.4 节点综合评价

对于标准图谱中的节点<sup>[12]</sup>,只靠单一指标判断重要性是片面的。度中心性只能反映节点的局部特征;半局部中心性比度中心性包含更多信息,但对于有向且有较多离散节点的网络存在信息遗漏的问题;PageRank 值考虑了网络的全局拓扑特性,具有随机性,排序可能不唯一。因此,要依据多指标对节点进行综合评价,将综合评价指标较高的节点判断为重要节点。采用 TOPSIS 法,对前述 3 种节点重要性进行综合判断。

将 263 本标准作为备选方案,3 种节点重要性评价方法作为指标, $i$  代表标准(即备选方案)的序号, $j$  代表重要性指标的序号, $x_{ij}$  代表第  $i$  本标准的第  $j$  个重要性指标,从而形成一个  $263 \times 3$  的矩阵  $(x_{ij})_{263 \times 3}$ ,然后经过归一化形成矩阵  $R=(r_{ij})_{m \times n}$ ,其中归一化指标  $r_{ij}$  计算式如下所示:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m x_{kj}^2}}, i=1,2,\cdots,m, j=1,2,\cdots,n \quad (4)$$

对各指标赋予同样的权重,赋权后的矩阵  $T$  与

矩阵  $R$  具有相同的值, $T$  中的数值  $t_{ij}=r_{ij}$ , $t_{ij}$  表示经过归一化和赋权后第  $i$  本标准的第  $j$  个重要性指标。

首先,选取最优方案和最差方案。 $t_{bj}$  是矩阵  $T$  中指标  $j$  的最大值,最优方案为指标的最大值的集合; $t_{wj}$  为矩阵  $T$  中指标  $j$  的最小值,最差方案为指标的最小值的集合。然后,计算标准  $i$  的指标集合与最优和最差方案的距离,其中标准  $i$  与最差方案的距离

为  $d_{iw} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_{wj})^2}$ ,  $i=1,2,\cdots,m$ ,与最优方案

的距离为  $d_{ib} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_{bj})^2}$ ,  $i=1,2,\cdots,m$ 。最

后,将  $d_{iw}$  和  $d_{ib}$  与最坏方案的相似度  $s_{iw}$  作为评价参考值,表达式如下所示:

$$s_{iw} = \frac{d_{iw}}{d_{iw} + d_{ib}}, 0 \leq s_{iw} \leq 1, i=1,2,\cdots,m \quad (5)$$

将  $s_{iw}$  排序,数值越大,与最坏方案的相似度越低,即为评价较高的方案,其对应的标准重要性越高。用 TOPSIS 法综合评价得到的重要性排名前 10 的标准如表 6 所示。

表 6 综合评价排名前 10 的标准  
Tab.6 Top 10 standards of comprehensive evaluation

标准	综合评价	排名	标准	综合评价	排名
《中华人民共和国公路法》 <sup>[22]</sup>	0.655 638	1	《公路技术状况评定标准》 <sup>[26]</sup>	0.381 565	6
《公路沥青路面施工技术规范》 <sup>[25]</sup>	0.467 273	2	《公路沥青路面养护技术规范》 <sup>[28]</sup>	0.336 692	7
《公路桥涵养护规范》 <sup>[30]</sup>	0.461 813	3	《公路桥梁技术状况评定标准》 <sup>[32]</sup>	0.297 248	8
《公路养护技术规范》 <sup>[23]</sup>	0.432 630	4	《公路工程质量检验评定标准》 <sup>[27]</sup>	0.294 854	9
《公路养护安全作业规程》 <sup>[24]</sup>	0.422 553	5	《公路路基路面现场测试规程》 <sup>[33]</sup>	0.289 783	10

TOPSIS法得到的重要标准及其排名和用单一指标得到的结果间存在一定的差异,说明节点的度中心、半局部中心性和PageRank值各包含了独有的网络节点信息,通过综合评价方法得到的节点重要性结果更加全面。

## 4 结论

(1) 通过遍历所有标准间的参考关系建立标准图谱,找到图谱中重要性指标最高的10个节点,即体系中最重要10本标准。此结果可为标准制定和修订提供参考,对重要性较高标准的修订引起重视,提升标准体系的权威性和统一性。

(2) 对所有相关标准进行主题分类和时间分析,挖掘不同时间段道路基础设施管养行业的技术特点,并分析近年来养护技术发展和行业关注的重点。城市道路和高速公路的标准在不断更新与出版,反映出国内整体的城市化趋势;养护管理和机械设备相关的标准更新较慢,此类标准对技术更新的需求不高;新兴技术如预防性养护、智能化相关标准开始出现,说明新技术逐渐走向规范化。

(3) 按照地貌特征对地方标准进行了地理分区并对分区内地方标准进行词频分析,解析了不同地理分区的省份出台的地方标准的特色和技术特点。与东南、中部地区相比,北方地区和西部地区出台的标准主要为农村公路相关地方标准,对高速公路、城市道路的重视程度较低,这可能是由于农村公路在此地区道路体系中占比较高。

未来可对历史修订版本进一步分析,与同时代的政策、行业发展状态进行交叉对比,探究标准的修订与更新特点。

### 作者贡献声明:

蔡文渊:完成分析算法并进行实验,撰写论文。

刘成龙:完成部分论文内容,并指导论文修改。

吴获非:分析标准数据。

高紫月:收集标准数据,并进行预处理。

杜豫川:提供论文的撰写思路,并指导论文修改。

### 参考文献:

- [1] 刘媛媛. 强制性国家标准引用网络研究[D]. 武汉: 中南财经政法大学, 2020.  
LIU Yuanyuan. Research on mandatory national standard citation network: taking ICS 65, 27, 43 as example [D]. Wuhan: Zhongnan University of Economics and Law, 2020.
- [2] 郝志刚, 秦丽. 基于多属性综合评价的食品安全标准引用网络重要节点发现方法[J]. 计算机应用, 2022, 42(4): 1178.  
HAO Zhigang, QIN Li. Method for discovering important nodes in food safety standard reference network based on multi-attribute comprehensive evaluation [J]. Journal of Computer Applications, 2022, 42(4): 1178.
- [3] 任延旭. 基于引用网络的科学数据评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.  
REN Yanxu. Research on scientific data evaluation based on citation network: taking PLoS reference data as an example [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [4] 姚静, 赵彤洲. 复杂社会网络节点重要性研究[J]. 计算机与数字工程, 2016, 44(1): 80.  
YAO Jing, ZHAO Tongzhou. Node importance in complex social network [J]. Computer & Digital Engineering, 2016, 44(1): 80.
- [5] DONG J, YE F, CHEN W, *et al.* Identifying influential nodes in complex networks via semi-local centrality [C]//2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). Piscataway: IEEE, 2018: 1-5.
- [6] GATTI C J, BROOKS J D, NURRE S G. A historical analysis of the field of OR/MS using topic models [J/OL]. [2022-05-20]. arXiv:1510.05154.
- [7] SUN L, YIN Y. Discovering themes and trends in transportation research using modeling [J]. Transportation Research, Part C: Emerging Technologies, 2017, 77: 49.
- [8] CUI W, WU Y, LIU S, *et al.* Context preserving dynamic word cloud visualization [C]//2010 IEEE Pacific Visualization Symposium. Piscataway: IEEE, 2010: 121-128.
- [9] 甘藏春, 田世宏. 《中华人民共和国标准化法》释义 [J]. 中国标准化, 2018(7): 28.  
GAN Cangchun, TIAN Sshihong. Interpretations of the Standardization Law of the People's Republic of China [J]. China Standardization, 2018(7): 28.
- [10] WOLFE A W. Social network analysis: methods and applications [J]. American Ethnologist, 1997, 24(1): 219.
- [11] 郭程远, 陈鸿昶, 王庚润, 等. 复杂网络节点重要性排序算法及应用综述 [J]. 信息工程大学学报, 2021, 22(3): 313.  
GUO Chengyuan, CHEN Hongchang, WANG Gengrun, *et al.* Node importance ranking based on complex network [J]. Journal of Information Engineering University, 2021, 22(3): 313.
- [12] 刘建国, 任卓明, 郭强, 等. 复杂网络中节点重要性排序的研究进展 [J]. 物理学报, 2013, 62(17): 178901.  
LIU Jianguo, REN Zhuoming, GUO Qiang, *et al.* Node importance ranking of complex networks [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(17): 178901.
- [13] HUANG I B, KEISLER J, LINKOV I. Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: ten years of applications and trends [J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(19): 3578.
- [14] BRIN S, PAGE L. The anatomy of a large-scale hypertextual web search engine [J]. Computer Networks and ISDN Systems, 1998, 30(1/7): 107.



- [15] HAVELIWALA T. Efficient computation of PageRank [R]. Stanford: Stanford University, 1999.
- [16] PAGE L, BRIN S, MOTWANI R, *et al.* The PageRank citation ranking: bringing order to the web [R]. Stanford: Stanford InfoLab, 1998.
- [17] ASSARI A, MAHESH T M, ASSARI E. Role of public participation in sustainability of historical city: usage of TOPSIS method [J]. *Indian Journal of Science and Technology*, 2012, 5(3): 2289.
- [18] YOON K P, HWANG C L. Multiple attribute decision making: an introduction [M]. Thousand Oaks: Sage Publications, 1995.
- [19] ZAVADSKAS E K, ZAKAREVICIUS A, ANTUCHEVICIENE J. Evaluation of ranking accuracy in multi-criteria decisions[J]. *Informatica*, 2006, 17(4): 601.
- [20] BLEI D M. Probabilistic models [J]. *Communications of the ACM*, 2012, 55(4): 77.
- [21] HEIMERL F, LOHMANN S, LANGE S, *et al.* Word cloud explorer: text analytics based on word clouds[C]//47th Hawaii International Conference on System Sciences. Piscataway: IEEE, 2014: 1833-1842.
- [22] 中华人民共和国全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国公路法[S]. 北京: 中国民主法制出版社, 2017. Standing Committee of the National People's Congress of the People's Republic of China. Highway law of the People's Republic of China [S]. Beijing: China Democratic and Legal Publishing House, 2017.
- [23] 浙江省公路管理局. 公路养护技术规范: JTG H10—2009 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2009. Zhejiang Highway Management Bureau. Technical specification of maintenance for highway: JTG H10—2009 [S]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [24] 交通运输部公路科学研究院. 公路养护安全作业规程: JTG H30—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004. Research Institute of Highway, Ministry of Transport. Safety work rules for highway maintenance: JTG H30—2004 [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [25] 交通运输部公路科学研究院. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004. Research Institute of Highway, Ministry of Transport. Technical specifications for construction of highway asphalt pavements: JTG F40—2004 [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [26] 交通运输部公路科学研究院. 公路技术状况评定标准: JTG H20—2007[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007. Research Institute of Highway, Ministry of Transport. Highway performance assessment standards: JTG H20—2007 [S]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [27] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程质量检验评定标准: JTG F80—2017[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017. Research Institute of Highway, Ministry of Transport. Inspection and evaluation quality standards for highway engineering: JTG F80—2017 [S]. Beijing: China Communications Press, 2017.
- [28] 交通运输部公路科学研究院. 公路沥青路面养护技术规范: JTG 5142—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019. Research Institute of Highway, Ministry of Transport. Technical specifications for maintenance of highway asphalt pavement: JTG 5142—2019 [S]. Beijing: China Communications Press, 2019.
- [29] 北京市政路桥管理养护集团有限公司. 城镇道路养护技术规范: CJJ 36—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. Beijing Municipal Road and Bridge Management and Maintenance Group Co., Ltd. Technical code of maintenance for urban road: CJJ 36—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [30] 陕西省公路局. 公路桥涵养护规范: JTG H11—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004. Shanxi Provincial Highway Bureau. Code for maintenance of highway bridges and culvers: JTG H11—2004 [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [31] 江苏省交通厅公路局. 公路水泥混凝土路面养护技术规范: JTJ 073.1—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001. Highway Bureau, Department of Transport of Jiangsu Province. Technical specifications for cement concrete pavement maintenance for highway: JTJ 073.1—2001 [S]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [32] 交通运输部公路科学研究院. 公路桥梁技术状况评定标准: JTG/T H21—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011. Research Institute of Highway, Ministry of Transport. Standards for technical condition evaluation of highway bridges: JTG/T H21—2011 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [33] 交通运输部公路科学研究院. 公路路基路面现场测试规程: JTG 3450—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019. Research Institute of Highway, Ministry of Transport. Field test methods of highway subgrade and pavement: JTG 3450—2019[S]. Beijing: China Communications Press, 2019.
- [34] 交通运输部工程管理局. 公路桥梁养护管理工作制度: 交公路发[2007]336号[R]. 北京: 交通运输部工程管理局, 2007. Department of Engineering Management, Ministry of Transport. Highway bridge maintenance and management system: traffic highway (2007) No. 336 [S]. Beijing: Department of Engineering Management, Ministry of Transport, 2007.
- [35] 中交第三公路工程局有限公司. 公路路基施工技术规范: JTG 3610—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019. CCCC Third Highway Engineering Co., Ltd. Technical specifications for construction of highway subgrades: JTG 3610—2019[S]. Beijing: China Communications Press, 2019.
- [36] 交通运输部公路科学研究院. 公路路面基层施工技术规范: JTJ 034—2000[S]. 北京: 人民交通出版社, 2000. Research Institute of Highway, Ministry of Transport. Technical specifications for construction of highway roadbases: JTJ 034—2000 [S]. Beijing: China Communications Press, 2000.