

喀斯特地区桥梁空间分布格局及其影响因素研究

何鑫 钟九生 王雨露 林双双¹

(贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025)

【摘要】: 为揭示喀斯特地区桥梁的空间分布规律及影响因素, 以贵州省为例, 运用变异系数法、核密度估计、相关分析等方法, 借助 ArcGIS、SPSS 软件, 分析了贵州省桥梁空间分布、规模、形态特征, 探索桥梁布局类型, 自然、社会、经济因素对桥梁空间布局的影响。结果表明: (1) 根据泰森多边形分析, 贵州省桥梁空间分布 CV 值为 148.20%, 属集群分布, 各地区 CV 值均大于临界值 64%, 桥梁空间聚集类型亦属于集群分布; (2) 贵州省桥梁分布较为密集, 平均密度为 0.017 个/km², 最大核密度值为 0.24 个/km²; (3) 桥梁的空间分布受自然、社会、经济因素的综合影响, 更倾向分布于“坡度低、高程低、地形起伏度低”的地形条件, 河流里程对桥梁空间分布有着显著性影响。

【关键词】: 喀斯特地区 桥梁 空间分布 影响因素 贵州省

【中图分类号】: P902 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1003-6563(2022)01-0087-07

0 引言

桥梁随着经济发展而迅速发展, 经过数十年的努力, 中国的桥梁工程在建筑规模和技术方面均处于世界前列, 近几年来我国对高速公路以及铁路的建设力度和建设规模的逐步加大, 各省和地区的高速公路施工城建工作量也连年增长。桥梁结构是公路、铁路的重要组成部分, 其空间布局特征受多重因素直接影响。喀斯特地区具有地形地貌复杂、地形起伏较大、地表破碎等特点, 在自然、社会经济因素的限制下, 桥梁的建设更加困难。因此, 通过探讨喀斯特地区桥梁的空间分布状况和在不同影响因素的分布情况, 可以深入认识桥梁空间分布的规律性和基本性知识。

有关于桥梁的研究大多集中在桥梁设计^[1,2,3]、桥梁施工技术^[4,5]、质量控制^[6,7]等, 而对桥梁的空间分布和影响因素尚未有学者研究。桥梁的形成和空间分布反映了其区域和自然地理条件、经济和社会地理条件和历史的发展, 在研究桥梁的空间结构分布时, 诸如空间结构分布密度和空间结构离散度等重要指标都是直接反映一个地区桥梁的形成和桥梁之间相互关系的一份非常重要的指标, 也是分析和评估空间位置和空间相互作用的重要工具^[8]。因此, 在研究桥梁空间分布格局时, 运用多种方法可以更好地描述桥梁空间分布的基本规律, 对于反映贵州省桥梁的区域差异具有一定的现实意义。

贵州省喀斯特分布广泛, 在复杂的地形地貌背景下, 研究桥梁的空间分布和影响因素具有一定的独特性和代表性。本文以贵州省为研究区域, 运用平均最近指数法、核密度估计、相关分析等方法对桥梁的空间分布格局进行探究, 并对桥梁空间分布的相关影响因素进行分析, 讨论了不同影响因素下桥梁的分布状态和相对重要性, 分析了桥梁空间分布的规律, 以期对喀斯特地区桥梁的建设和合理规划布局提供科学依据。

作者简介: 何鑫 (1997-), 男 (苗族), 贵州遵义人, 硕士研究生, 主要从事地理信息系统与遥感工作。钟九生 (1984-), 江西兴国人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事 GIS 开发和遥感工作。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41661081); 贵州省科技计划项目: 黔科合平台人才 ([2017]5726-56)

1 数据源及分析方法

1.1 研究区概况

研究区域位于中国西南部，东西长约 595 公里，南北相距约 509 公里。研究区域的经度为 $103^{\circ} 36' \sim 109^{\circ} 35'$ 、纬度为北纬 $24^{\circ} 37' \sim 29^{\circ} 13'$ ，地处亚热带高原地区，喀斯特地貌分布广泛，类型复杂多样，包括高原山地、丘陵和盆地，平均海拔在 1100 m 左右。境内自西向东地势降低，地形起伏度较大，各级河流众多，流域面积较大，水系发达。由于受喀斯特地貌的影响，桥梁的空间分布有着独特的地域性和空间特征。

1.2 数据来源

桥梁和旅游景点数据由 Python 语言获取，DEM 数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>)，空间分辨率为 30 m，高程、坡度数据通过 DEM 数据计算得到，行政区界线、道路数据来源于地理国情数据，地区生产总值、第三产业增加值、常住人口、户籍人口、河流里程、公路里程数据来源于《2019 贵州省统计年鉴》。

1.3 研究方法

1.3.1 Voronoi 图

常规 Voronoi 图定义为：假设平面上的离散发生点 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ ，其中任意两点都不在一个位置上，而且任意的四个点不能一起在一个圆的线上，则任意一个点 P_i 的 Voronoi 图可以定义为^[9]：

$$T_i = \{x; d(x, P_i) < d(x, P_j) \mid P_i, P_j \in s, P_i \neq P_j\} \quad (1)$$

式中， d 为欧式距离， x 表示集合 T_i 中的元素。 T_i 是一个凸多边形，而且在一定的特别情况下泰森多边形可以是一个无边无界的凸多边形^[11]。Voronoi 图是对平面的一种剖分，在任意的一个凸 Voronoi 多边形中，任意一个内点到这个凸多边形的发生点 P_i 的距离都小于这个点到其他任何发生点 P_j 的距离，这些发生点也叫 Voronoi 图的质心或发生元。不同点集的 Voronoi 图可以分为均匀分布点集、随机分布点集和集群分布点集^[11]。

1.3.2 变异系数

变异系数 CV 值是泰森多边形面积 (A_i) 的标准差 σ 和各个多边形平均值 μ 的比值^[12]。

$$c_v = \left\{ \frac{\sigma}{\mu} \right\}$$
$$\text{其中, } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \mu)^2}{n - 1}}, \mu = \frac{\sum A_i}{n} \quad (2)$$

变异系数可以用来表示空间现象的相对变化程度。当桥梁点状要素的空间分布的类型为均匀分布时，泰森多边形面积的可变性较小，CV 值就比较低；当空间分布的类型为集群分布时，在集群内的 Voronoi 多边形面积比较小，而在各个点状要素间的

Voronoi 多边形面积相对来说是比较大的, CV 值就比较高^[13]。Duyckaerts 提出了 3 个建议值^[14]:当 CV 值小于 33%时, 该点群为均匀分布; 当 CV 值介于 33%和 64%之间时, 该点集为随机分布; 当 CV 值大于 64%时, 该点集为集群分布^[15,16]。

1.3.3 核密度估计

核密度估计方法在概率论中用来估计未知的密度函数, 属于非参数检验方法之一, 其中核密度值可以表示密度的大小, 可用于观测桥梁在各个区域分布的密集情况。其原理是以某个地区的某座桥梁作为参考点, 用数学函数计算出各桥梁质心点到参考位置的值的距离, 根据这个距离值在其周围创建出来一个比较平滑的圆形表面。距离这个参考点比较近的桥梁, 它的权重值就比较大。其计算公式为:

$$f(x,y) = \frac{1}{nh^2} = \sum_{i=1}^n k\left(\frac{d_i}{h}\right) \quad (3)$$

式中, $f(x, y)$ 为位于 (x, x) 位置的密度估计值, n 为桥梁数量, h 为带宽, d_i 为 (x, x) 位置与第 i 个观测位置的距离, $k(d)$ 为核函数^[17]。

2 结果与分析

2.1 桥梁空间分布特征

贵州省桥梁合计 3040 座, 如图 1 所示, 桥梁在规模上存在显著的差异, 每个地区的桥梁数量与自然、社会经济因素互为因果。随着近年来贵州社会经济的发展, 处于西部高原山地的贵州, 目前已经实现了县县通高速, 在贵州独特的地质地貌条件下, 桥梁成为公路的重要组成部分^[18]。从分布状态上看, 贵州省桥梁整体密度比较大, 在黔东南州桥梁带状分布比较明显, 在贵阳市境内, 桥梁的分布呈团状分布比较明显, 分布集中。从数量上看, 遵义市桥梁数量最多, 占桥梁总数的 18.45%, 相反, 安顺市桥梁数量最少, 占桥梁总数的 4.67%, 这与安顺地势密切相关, 安顺是贵州最平的城市, 其市区北、东北、西南为平坦的坝区, 并向西北、西南、东北延至普定、镇宁、平坝, 为贵州最平缓的一片区域。从形状上看, 部分桥梁呈带状分布, 且与高速公路成一致性, 这是由于贵州地形复杂, 高速公路多建桥或打隧道, 因此桥梁带状分布多与高速路方向一致。

为体现贵州省桥梁在不同等级河流上的分布情况, 根据贵州省 1、2 级河流的实际情况, 设置一级河流 100 m 缓冲区, 2 级河流 30 m 缓冲区, 叠加分析得到不同等级河流上的桥梁分布情况, 如图 2 所示。其中, 一级河流上桥梁分布数为 131, 二级河流上桥梁分布数为 147。

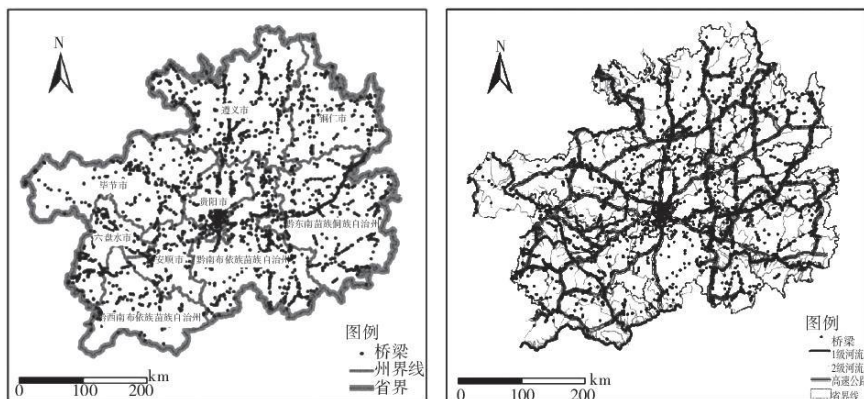


图 1 贵州省桥梁空间分布现状图

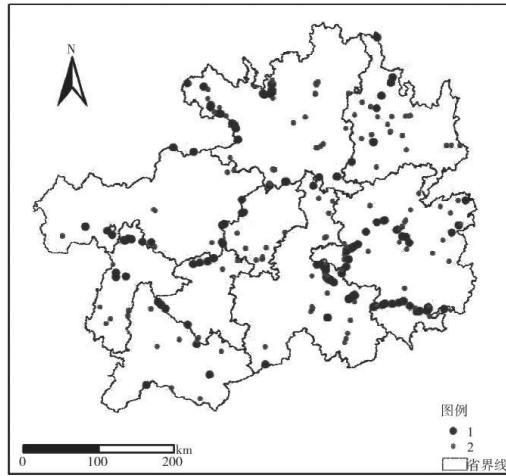


图 2 不同河流等级桥梁分布图

2.2 桥梁空间聚集特征

采用 ArcGIS 的泰森多边形法, 根据 Duyckaerts 提出的划分依据对贵州省桥梁的空间分布类型进行分析, 得到空间分布类型(表 1)及贵州省桥梁泰森多边形图(图 3)。结果显示, 全省范围来看, 贵州省桥梁呈现明显的集聚状态, 变异系数 CV 值为 148.20%, 聚集程度高, 全省的斑块与正方形相差较大, 这是因为地形地貌复杂, 境内山地丘陵多, 岩溶分布范围广泛, 喀斯特地貌分布广、面积大, 河流众多, 交通线建设难度较大等因素的影响。分区域来看, 贵州省九个市州的桥梁空间分布均属于集群分布。其中, 毕节市集群分布最为显著, 变异系数的值达到 151.02%, 黔南州相比于其他地区其桥梁数量仅次于遵义市, 变异系数的值为 117.44%, 聚集程度比较高, 但在贵州省的各个地区中变异系数是最小的。遵义市桥梁数量最多, 变异系数的值达到 143.61%, 仅次于毕节市和贵阳市, 安顺市桥梁数量最少, 但聚集程度较高, 变异系数 CV 值为 136.11%。

表 1 贵州省桥梁 Voronoi 图计算结果表

地区名称	桥梁数量	平均值	标准差	CV 值/%	分布类型
贵州省	3040	57.96	85.90	148.20	集群
安顺市	142	68.03	92.60	136.11	集群
毕节市	282	95.16	143.72	151.02	集群
贵阳市	339	22.48	32.78	145.79	集群
六盘水市	257	40.21	55.24	137.37	集群
黔东南州	513	56.31	75.92	134.83	集群
黔南州	514	54.52	64.02	117.44	集群
黔西南州	182	87.75	122.86	140.01	集群

铜仁市	250	73.09	87.49	119.69	集群
遵义市	561	54.56	78.35	143.61	集群

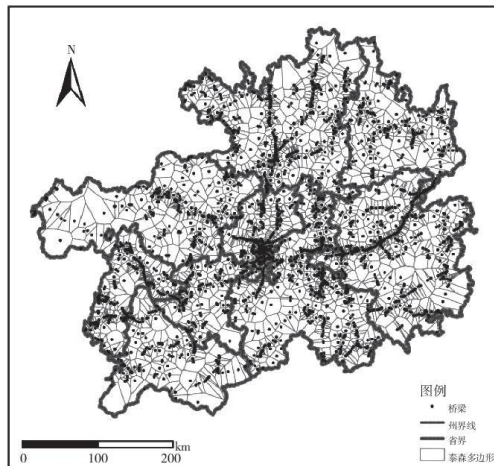


图3 贵州省桥梁 Voronoi 图

2.3 桥梁空间密度特征

利用 ArcGIS10.2 借助 Kernel Density 模块对贵州省桥梁进行核密度分析，搜索半径参数的值越大，生成的栅格就越平滑更通用，而输出像元大小则与出图的分辨率相关，根据经验，最终把搜索半径设置为 20 km，分析结果如图 4 所示。结果表明，桥梁平均密度为 0.017 个/km²，总体密度较大，最大核密度值为 0.24 个/km²。贵州省的桥梁分布表现出一定的非均衡性，贵阳市桥梁密度分布较大，尤其在贵阳市城区桥梁分布状态呈现出团状分布尤为明显，在贵阳市郊区桥梁密度分布性相对稀疏，自市中心向边缘呈现出递减的特点，表现出“周疏中密”的格局。在黔东南州桥梁密度带状分布非常明显，主要原因是该部分地区是沪昆高速的经过地，且地形起伏度较大，因此桥梁分布密集。在毕节市地区，除中心城区所在地以外，其余地区桥梁密度相对较低。

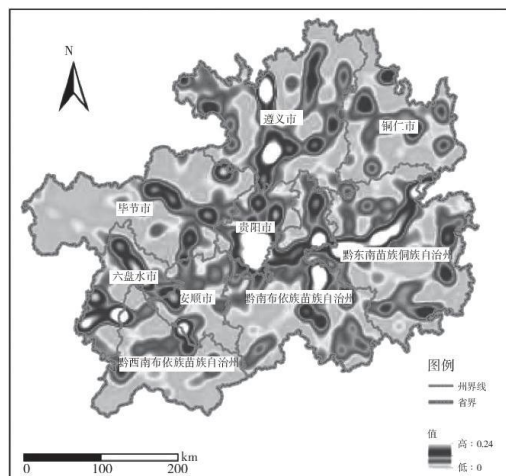


图4 贵州省桥梁核密度分析图

3 空间分布格局影响因素分析

桥梁空间的布局涉及到方方面面,不同的因素对桥梁的布局有着不同程度的影响。除此之外,桥梁修建的位置还会直接或者间接的影响到附近人民的生活状况以及外出情况。因此,在桥梁位置的确定过程中不仅要充分考虑各个因素的影响,而且要确定各个因素的相对重要性,根据这些情况选择较为合适的位置,只有这样才能使桥梁发挥出最大的经济效益^[19]。

3.1 地形地貌因素

研究区域属于中国西部的喀斯特山区,全省地貌类型有山地、丘陵和盆地,喀斯特地貌的发育非常典型。独特的喀斯特地貌占贵州省国土总面积的 61.9%^[20,21],喀斯特地区分布范围广,形态类型齐全,各个地区之间差异比较明显,这无疑又加大了桥梁建设的难度,对桥梁空间分布的模式有着极大的影响。本研究通过对贵州省的 DEM 数据分别提取高程、坡度、地形起伏度数据,具体讨论其对桥梁空间分布的影响,采用自然间断点分级法将高程(200.00~781.18、781.19~1209.41、1209.42~1647.84、1647.85~2065.88、2065.89~2800.00)、坡度(0~4.3、4.31~12.33、12.34~20.64、20.65~30.39、30.4~73.11)、地形起伏度(0~1.87、1.88~56.62、56.63~96.73、96.74~148.64、148.65~601.65)分为 5 个级别,接着通过 ArcGIS 空间叠加分析得出贵州省桥梁在不同高程、坡度、地形起伏度等级内的分布情况(图 5、图 6)。

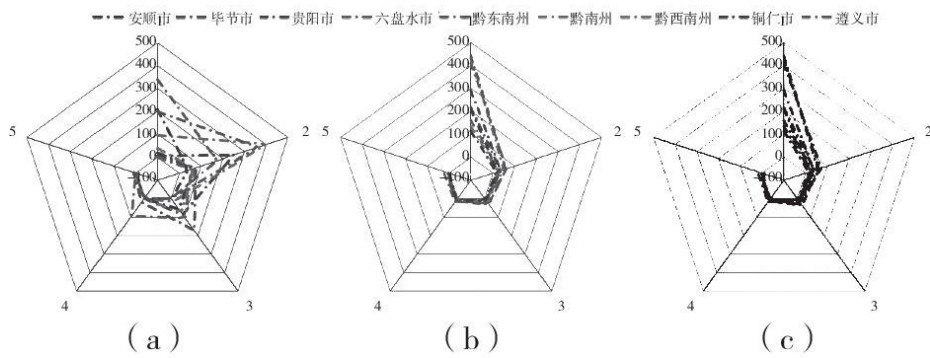


图 5 不同高程(a)、坡度(b)、地形起伏度(c) 等级下桥梁分布雷达图

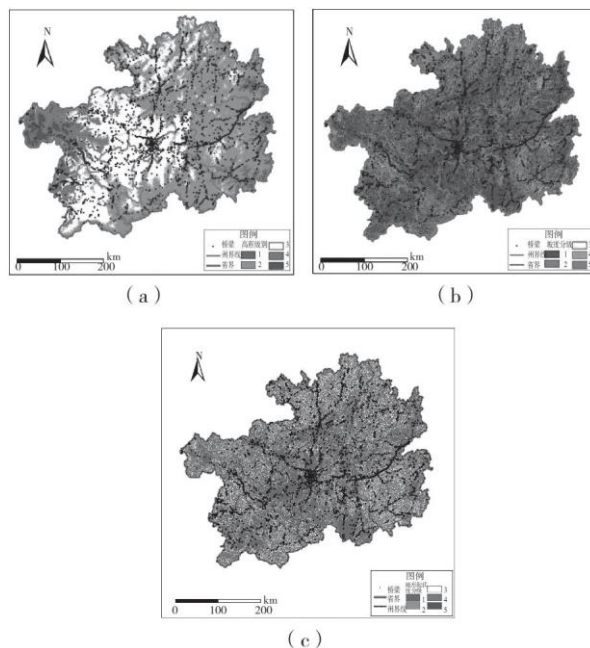


图 6 不同高程(a)、坡度(b)、地形起伏度(c) 等级下桥梁分布情况图

从高程上看,贵州省总体高度呈现出西高东低的一种趋势,桥梁总体分布在海拔200~1209.41 m之间,占比79%,海拔1209.41 m后,随着级别的增加桥梁总体数量呈现逐渐减少的趋势。在一级高程内黔东南州桥梁数量最多,二级高程内黔南州最多。黔东南州和遵义市桥梁分布在1209.41 m即高程等级2级内,安顺市、贵阳市、铜仁市、黔南州桥梁分布在1647.84 m即高程等级3级内,毕节市、六盘水市、黔西南州桥梁分布在2065.88 m即高程等级4级内。

从坡度上看,贵州省桥梁主要分布在4.3度坡度分级一级内,占比79%,其中遵义市数量最多,黔东南次之,安顺市最少。随着坡度的增加,桥梁数量呈现下降的趋势。在坡度30.4度以上即坡度分级5级内仍然分布有少量的桥梁,占比2%,其中六盘水市数量最多。

从地形起伏度上看,无论是整个贵州省还是贵州省各个地区,桥梁的数量都表现出随着地形起伏度的增加而逐渐减少,在地形起伏度一级内桥梁数量最多,占总数量的78.78%,其中,遵义市桥梁数量最多,其次为黔南州,安顺市最少;在地形起伏度二级内,贵州省桥梁数量下降到363座,占比11.94%,其中,黔东南州桥梁数量最多,其次为黔南州,安顺市最少;在地形起伏度三级、四级、五级内,桥梁数量仅占桥梁总数量的9.28%,桥梁数量很少。

3.2 社会经济因素

桥梁空间分布的状况还与社会经济因素密切联系在一起,在建设过程中需要灵活的考虑多方面因素的影响。综合考虑数据的准确性、科学性、可获取性,选取地区生产总值、第三产业增加值、常住人口、户籍人口、公路里程、河流里程、旅游景点7个相关指标(表2),利用SPSS工具,经数据标准化处理后与贵州省各地区的桥梁数量进行相关性分析,探讨桥梁空间分布的影响因素。

表 2 影响因素指标选取表

市(州)名称	地区生产总值/亿元	第三产业增加值/亿元	常住人口/万人	户籍人口/万人	公路里程/公里	河流里程/公里	旅游景点/个	桥梁数量/座
贵阳市	4039.60	1495.41	497.14	427.83	10263	4819	1321	339
六盘水市	1265.97	528.78	295.05	353.21	14655	5521	414	257
遵义市	3483.32	1458.66	630.20	819.00	39432	18729	1472	561
安顺市	923.94	474.61	236.36	307.07	13912	6553	417	142
毕节市	1901.36	941.33	671.43	937.76	33088	13152	631	282
铜仁市	1249.16	668.40	318.85	446.38	26051	11379	404	250
黔西南州	1272.80	601.34	288.60	368.81	17869	11587	293	182
黔东南州	1123.04	645.57	355.20	484.73	29760	27751	694	513
黔南州	1518.04	733.12	330.12	426.65	19693	16388	676	514

结果显示(表 3),河流量程与桥梁的空间分布有着显著性的相关性,相关性为 0.734(Sig=0.024)。河流的长度里程是桥梁空间分布的主要内在原因,贵州属于山区城市,全省地貌高原山地居多,地形地貌比较复杂,地表现象突出,河流比较多,且流域面积大,是全国唯一没有平原支撑的省份,复杂的地形地貌和海拔条件使得贵州在交通建设方面的难度大于其他平原地区,而交通的发展间接影响着与外界的联系,直接影响着地区的经济发展,为了克服这一因素的影响,所以需要修建桥梁发展交通。因此,河流与桥梁的空间分布存在着密切的联系。

表 3 相关性分析结果表

影响因素	地区生产总值/亿元	第三产业增加值/亿元	常住人口/万人	户籍人口/万人	公路里程/公里	河流量程/公里	旅游景点/个
皮尔逊相关性	0.397	0.481	0.415	0.391	0.547	0.734*	0.655
Sig(双侧)	0.290	0.190	0.267	0.298	0.128	0.024	0.055

4 结论与讨论

4.1 结论

1) Voronoi 图表明,贵州省桥梁变异系数 CV 值为 148.20%,桥梁分布呈现明显的集聚状态且聚集程度高,但存在明显的空间差异。其中毕节市、贵阳市的 CV 值较高,但桥梁数量却比较居中,黔南州的 CV 值最低,但桥梁数量最多,安顺市桥梁数量最少,但 CV 值比较居中。

2) 由于自然、经济、社会和文化因素的影响,贵州省桥梁数量多、密度大,主要分布在区域州市州驻地和高速公路沿线;高速公路沿线桥梁分布密集在黔东南州表现最为明显,并且在空间上呈现出一定的非均衡性;区域州市驻地桥梁分布密集在贵阳市表现最为明显,最大核密度值为 0.24 个/km²,并且呈现“周疏中密”的格局。

3) 破碎的地形是桥梁分布的重要影响因素,贵州属于山区,独特的喀斯特地貌以及峰丛洼地在很大程度上限制了公路的建设,受制于地形地貌的影响,桥梁的空间分布更倾向分布于“坡度低、高程低、地形起伏度低”的地形条件。其中,坡度和地形起伏度随着分级等级的增加,一致表现为桥梁数量的减少,并且减少速率相差不大;桥梁相对倾向分布于高程低的地形条件,但主要倾向分布于二级坡度。

4) 对地区生产总值、户籍人口、公路里程、河流量程等 7 个社会经济因素进行相关性分析得出河流量程与桥梁的空间分布有着显著性的相关性。

4.2 讨论

桥梁的空间布局受制于地形、区位、社会经济等各方面因素的综合作用,由于目前在该方面的研究较少,可供参考的资料较少,因此本文存在以下不足:本文探究了高程、坡度以及地形起伏度等宏观方面对桥梁分布的影响,但是桥梁选址还与地质状况如岩性、基岩风化层厚度、生态环境、水文状况等众多因素的影响密切相关。本文浅析了喀斯特地区以贵州省为例的桥梁分布现状,后期将对其他因素进行继续深入量化研究,以期桥梁的选址及分布规律提供科学依据。

参考文献:

-
- [1]唐国汉, 陈朝晖, 龚臻, 等. 川南横断山区高速公路桥梁设计关键技术[J]. 四川建筑, 2021, 41(3):226-228.
- [2]林立华, 罗玮, 谢鹏飞. 厦门第二东通道工程跨海段桥梁结构设计[J]. 公路, 2021, 66(6):200-204.
- [3]柴加兵. 城市高架桥梁单点上跨桥梁方案设计与选型研究[J]. 北方交通, 2021(5):1-4.
- [4]朱维香. 基于BIM的桥梁施工监控技术应用[J]. 山西建筑, 2021, 47(13):109-110.
- [5]郭瑞. 大跨径连续桥梁施工技术分析[J]. 江西建材, 2021(5):184-185.
- [6]黄明明. 桥梁钻孔灌注桩施工质量控制技术探讨[J]. 科学技术创新, 2021(17):117-118.
- [7]杜伟华. 大型桥梁钢箱梁工地现场焊接技术与质量控制措施[J]. 智能城市, 2021, 7(10):143-144.
- [8]申淑娟, 孙毅中, 赵晓琴. 基于GIS的城市空间格局要素研究与表达[J]. 地理信息世界, 2011, 9(1):82-87.
- [9]党国峰, 杨玉霞, 张晖. 基于Voronoi图的居民点空间分布特征研究——以甘肃省为例[J]. 资源开发与市场, 2010, 26(4):302-305.
- [10]张红, 王新生, 余瑞林. 基于Voronoi图的测度点状目标空间分布特征的方法[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2005(3):422-426.
- [11]刘明皓, 李东鸿, 夏保宝. 基于PPA方法的农村居民点空间分布模式研究——以重庆市主城区为例[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2013, 25(4):563-568.
- [12]王有妍. 北镇市农村居民点空间分布特征分析[J]. 科学技术创新, 2018(28):119-120.
- [13]党国锋, 李艳玫. 山区农村居民点的空间格局差异研究——以陇南市文县为例[J]. 中国农学通报, 2017, 33(23):147-156.
- [14]DUYCKAERTS C, GODEFROY G. Voronoi tessellation to study the numerical density and the spatial distribution of neurons[J]. Journal of Chemical Neuroanatomy, 2000, 20(2):83-92.
- [15]刘晓恒, 杨柳. 基于Voronoi图的农村居民点空间分布及整治潜力研究——以威宁县为例[J]. 国土与自然资源研究, 2016(6):46-51.
- [16]李伟芳, 毛菁旭. 城乡一体化背景下上海农村居民点时空变化研究[J]. 上海国土资源, 2018, 39(3):78-82.
- [17]方健, 杨兴柱, 朱琳. 黄山市乡村聚落空间格局特征及其影响因素[J]. 热带地理, 2017, 37(2):277-285.
- [18]薛亚莉. 城市河流水量水质自适应控制模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [19]兰洁. 桥梁检测在养护中的重要作用分析[J]. 黑龙江交通科技, 2017, 40(6):162-163.

[20]蒲文彬. 贵州在生态文明创建过程中的政府生态责任的探究[J]. 生态经济(学术版), 2011(1):83-88.

[21]穆瑾, 赵翠薇. 贵州省可持续发展综合评价[J]. 贵州科学, 2017, 35(2):12-16.