引用格式:寇世浩,姚尧,郑泓,等.基于路网数据和复杂图论的中国城市交通布局评价[J].地球信息科学学报,2021,23(5):812-824. [ Kou S H, Yao Y, Zheng H, et al. Delineating China's urban traffic layout by integrating complex graph theory and road network data[J]. Journal of Geo-information Science, 2021,23(5):812-824. ] **DOI:**10.12082/dqxxkx.2021.200340

## 基于路网数据和复杂图论的中国城市交通布局评价

寇世浩1,姚 尧1,3\*,郑 泓2,周剑锋1,张嘉琪1,任书良1,王瑞凡1,关庆锋1

- 1. 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院,武汉 430078; 2. 中国科学院空天信息研究院,苏州 215123;
- 3. 阿里巴巴集团,杭州 311121

# Delineating China's Urban Traffic Layout by Integrating Complex Graph Theory and Road Network Data

KOU Shihao<sup>1</sup>, YAO Yao<sup>1,3\*</sup>, ZHENG Hong<sup>2</sup>, ZHOU Jianfeng<sup>1</sup>, ZHANG Jiaqi<sup>1</sup>, REN Shuliang<sup>1</sup>, WANG Ruifan<sup>1</sup>, GUAN Qingfeng<sup>1</sup>

1. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China; 2. Institute of Aerospace Information, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China; 3. Alibaba Group, Hangzhou 311121, China

Abstract: The rapid development of urbanization has promoted China's urban road network's continuous expansion and growth. The urban road network is a dynamic, open, and self-organized spatial complex network, which constitutes a city's structural framework. The study on urban road networks' structural characteristics can provide a significant application value for road network planning and urban construction. In the related studies of the structural characteristics of urban road networks, few scholars have paid attention to the whole urban road network structure from the perspective of road alignment in China. Besides, recent studies lack an overall evaluation on the road network of major cities in China. In this paper, 49 cities, including the first- and second-tier and first-tier new cities in China, are selected as study areas and the urban road network data in February 2020 are taken as experimental data. Firstly, we use the graph theory and rose diagrams to visualize the road network's directional characteristics in 49 cities. The complex structure of the urban road network is qualitatively analyzed. Then, we select five road network indicators including the maximum ratio R, the road primacy degree S, the ratio over threshold T, the orientation- order  $\varphi$ , and the road network density  $\delta$ . Based on the five indicators, cluster analysis is carried out for the road networks of 49 cities in this paper. And the characteristics of the spatial distribution of urban road network in China are explored. The results show that the north-south and east-west roads are the main alignment of urban roads in China. Because of the influence of terrain, some cities

收稿日期:2020-07-01;修回日期:2020-10-26.

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFB2102903);国家自然科学基金项目(41801306、41671408、41901332);武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室开放基金项目(18S01);湖北省自然科学基金项目(2017CFA041)。[Foundational items: National Key Research and Development Program of China, No.2019YFB2102903; National Natural Science Foundation of China, No.41801306, 41671408, 41901332; Open Fund of State Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, No.18S01; Natural Science Fund of Hubei Province, No.2017CFA041.]

作者简介: 寇世浩(1996—),男,河南漯河人,硕士生,主要从事城市道路网分布特征和路网演变分析研究。 E-mail: sikoushao@163.com

<sup>\*</sup>通讯作者:姚 尧(1987—),男,广东梅州人,副教授,研究方向为空间大数据和城市计算。E-mail: yaoy@cug.edu.cn

plan routes along the direction, which is favorable to traffic and resident's living. Based on the clustering of road network indicators, four types of the urban road network are obtained, including cross orthogonal type, cross to windmill type, windmill to arc type, and mixed complex type. There are significant differences among four types of the urban road network in directional characteristics highlighted in complexity and order. In view of the spatial distribution of road network types, road networks of cross orthogonal type and cross to windmill type are mainly distributed in China's inland areas. In contrast, road networks of the windmill to arc type and mixed complex type are mainly distributed in coastal areas. This paper explores the current traffic layout in major cities in China by analyzing the characteristics of road network's distribution in the first- and second-tier and first-tier new cities in China. This study can provide a reference for road planning and optimization of road network layout in new urban districts.

**Key words:** urbanization; urban road network; graph theory; rose diagrams; cluster analysis; complexity of road network; road direction; traffic layout

\*Corresponding author: YAO Yao, E-mail:yaoy@cug.edu.cn

摘要:城市化的快速发展推动了我国城市道路网的不断扩张和发展。城市道路网是一个动态、开放、自组织的空间复杂网络,构成了城市的结构框架,研究城市道路网的结构特征对路网规划和城市建设有着重要的应用价值。在国内城市道路网络结构特征的相关研究中,很少有学者基于道路走向的视角对整个城市路网结构进行研究,也缺少对全国主要城市路网的整体性评价。本文选取我国一、二线及新一线49个城市作为研究区和2020年2月的城市道路网作为实验数据,首先采用图论和玫瑰图的方法对49个城市的道路网方向特征进行可视化,定性分析城市路网的复杂结构,然后基于最值比 R、道路首位度 S、过阈值比 T、走向顺序φ和路网密度δ等5个路网指标对49个城市的道路网进行聚类分析,从而探究我国城市路网的分布特征。结果表明,我国城市主要以南北和东西走向为城市道路的主导向,部分城市因地形的影响沿着有利于城市交通和居民生活的方向规划道路;基于路网指标的聚类得到了十字正交型、十字状向风车状扩散型、风车状向圆弧四角星扩散型和混合复杂型等4类城市道路网类型,这4类城市路网在方向分布特征上具有显著差异,突出表现在有序性和复杂性;从路网类型的空间分布来看,十字正交型和十字状向风车状扩散型路网大多分布在我国的内陆地区,而风车状向圆弧四角星扩散型和混合复杂型路网则大多分布在沿海地区。本文主要通过分析我国一、二线及新一线城市道路网的分布特征,探究了我国主要城市交通路网的布局现状,能够为城市新区道路规划和路网布局优化提供参考依据。

关键词:城市化;城市道路网;图论;玫瑰图;聚类分析;路网复杂性;道路走向;交通布局

## 1 引言

城市道路网是居民生活和城市交通活动的重要载体,是整个城市交通活动得以发挥的物质基础[1-2]。作为城市景观中的人工廊道,路网是城市空间扩张的内在因素,是促进城市发展的总框架[3]。城市化过程的快速推进,促进了城市道路网的飞速扩张和交通运输效率的巨大提升,同时也引致了一些城市问题,如交通拥堵、交通立体化和部分道路利用效率低等[4]。要解决上述矛盾,很大程度上依赖于对道路网自身组织结构与运输功能的深入理解[5-6]。对城市道路网络结构进行研究不仅有助于解释道路网络的拓扑结构,更能深入了解城市的组织方式及空间结构分布并为城市规划提供理论性指导[7-8]。

城市中不同功能区的分布组合在空间上的具

体表征和城市中各种要素的空间位置关系共同构成了城市空间结构<sup>[9]</sup>。早期,城市空间结构的研究方法多以数量统计方法为主,偏重于单独的定性描述或定量分析,缺乏与地理学空间分析方法的结合<sup>[10]</sup>。城市道路网是组成城市结构的重要部分,其发展和完善可以推进城市空间结构的发展和演变。网络能够合理描述和表达城市之间的复杂互动形式和结构,将网络形式的城市路网引入到城市结构的研究中成为学者们的研究新视角<sup>[11-13]</sup>。关于城市道路网的研究,多数学者采用图论、空间句法、分形理论和相关评价指标分析的方法<sup>[14-16]</sup>。近些年在路网结构方面的研究也在不断完善,如曾映敏等基于分形理论研究了道路网在多空间尺度下的结构分形特征<sup>[17]</sup>;王庆国等基于复杂网络理论的相关定量分析指标,研究了武汉市路网的层次结构特征<sup>[18]</sup>。

在城市空间秩序的研究中,玫瑰图的兴起解决

了城市复杂路网的方向表达问题,它可以直观明了地可视化城市道路的方向分布,量化城市路网的离散性、无序性等特征[19]。玫瑰图是表示二维方向数据频率分布的图形方法,善于表达方向性数据[20],而且易于构造和理解[21]。国外学者 Mohajeri 和Gudmundsson等[19,22]将玫瑰图结合到城市街道的熵度量中,研究海岸线对沿海城市街道网络的影响以及城市街道网络的几何演变; Boeing<sup>[23]</sup>通过玫瑰图的方法显示街道空间顺序和熵,进而研究城市空间秩序。另外,OpenStreetMap是自发地理信息平台中极具代表性的项目,具有数据丰富、覆盖度广、免费获取、更新速度快等特点。近几年,学者们利用OpenStreetMap成功开展了大量的研究<sup>[24-26]</sup>,并且在城市道路研究中得到应用<sup>[24,27]</sup>。

城市道路网本身具有方向性,由不同的道路向量组成<sup>[22]</sup>。不同走向的道路是造成路网复杂的主要因素,地形地势和城市需求等因素的限制也使得不同城市的路网分布特征不尽相同<sup>[28]</sup>。从道路的走向角度对城市路网进行研究,可以探究城市整体路网在方向上的分布特征和复杂程度。一些国外学者从街道的走向出发,利用方向熵来定量地评估城市街道的内部结构特征,发现城市街道网络的熵会随着街道的加密和扩展而增大,对街道网络的熵进行研究对于量化街道网络的几何特征和演化有明显的帮助<sup>[19,23]</sup>。

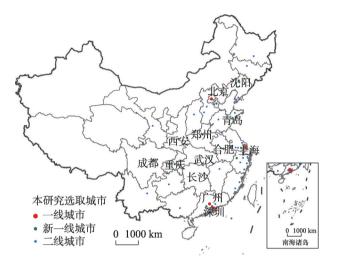
在国内城市道路网络的结构特征研究中,很少有学者从道路走向的视角对城市路网结构进行研究,这些研究多以单个城市尺度进行道路网的研究,缺少对全国主要城市路网的整体性评价。本研究将玫瑰图的方法应用到国内城市路网中,直观地展示出我国一、二线及新一线城市道路网的方向分布特征,并定性分析城市路网的复杂结构。然后通过路网指标的聚类效果研究国内主要城市路网的差异性和分布特征,以量化城市路网复杂的几何特性,探究我国主要城市的交通布局。

## 2 研究区概况和数据来源

#### 2.1 研究区概况

考虑到城市在人口、综合实力、经济活跃度等方面的实际情况,一、二线城市往往是交通枢纽性城市,在中国城市中更具活力和代表性[29]。本文采用2020年第一财经发布的城市排行[30],共选取了49

个研究城市,其中一线城市(4个)为北京、上海、广州和深圳,新一线(15个)为成都、重庆、杭州、武汉、西安、天津、苏州、南京、郑州、长沙、东莞、沈阳、青岛、合肥和佛山,二线城市(30个)为宁波、昆明、福州、无锡、厦门、济南、大连、哈尔滨、温州、石家庄、泉州、南宁、长春、南昌、贵阳、金华、常州、惠州、嘉兴、南通、徐州、太原、珠海、中山、保定、兰州、台州、绍兴、烟台和廊坊。具体分布如图1所示。



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2020)4632号的标准地图制作,底图无修改。

图 1 本研究选取一、二线及新一线城市的地理分布 Fig. 1 Geographical distribution map of the first and secondtier and first-tier new cities in China selected in this study

#### 2.2 数据和预处理

本文所用到的主要数据为城市路网数据,数据来源于 OpenStreetMap (OSM) 官网 (www.openstreetmap.org)。OSM 数据库存储了一个巨大的环境空间数据集,其中包含了非常丰富的元数据,覆盖了世界上的主要城市。本研究共获取我国49个一、二线及新一线城市的OSM路网数据,实验使用全部的道路网数据,获取时间为2020年2月20日。获取的OSM路网数据为shp矢量数据格式,投影坐标系为WGS\_1984\_Mercator坐标系。

OSM道路数据具有较好的完整性,但是初始数据较为粗糙<sup>[31]</sup>,为提高路网数据的质量和实验结果的精确程度,需要进行数据的预处理:检查数据的一致性,排除重叠的道路和无效的数据;将双线路转化为单线路,将复杂道路网转换为简单的图结构;对道路网进行拓扑检查,删除孤立道路,保证路网连通性。本研究的实验数据为经过实验预处理后具有拓扑关系的道路数据。

### 3 研究方法

#### 3.1 路网指标

本文选取了最值比R、道路首位度S、过阈值比T、走向顺序 $\varphi$ 和路网密度 $\delta$ 等5个属性作为路网指标,它们主要反映道路网在长度和方向上的分布特征。

(1)最值比 R。即道路长度的最大值和最小值之比。考虑到城市某方向不存在道路的情况,为避免道路长度最小值为 0 导致最值比 R 无意义,需对不存在道路的方向进行数据处理,使得最值比 R 能够从整体评价城市道路在不同方向上的长度变化情况。基于数字图像处理的方法,对数据进行 2%线性拉伸<sup>[32]</sup>。经过线性变换后的道路长度数据 g(x)的表达式如下:

$$g(x) = a' + \frac{b' - a'}{b - a} (f(x) - a) \tag{1}$$

式中: f(x)为原始数据,范围为[a,b],经线性拉伸后 g(x)的范围为[a',b'],且 a'=0.02 b,b'=0.98 b,a 和 b 为 道路长度的最小值和最大值。本文使用的最值比 R 即为线性拉伸处理后的道路长度最大值与最小值的比值。

(2)道路首位度 S。城市首位度是研究城市之间相互关系、衡量城市规模合理性的理论概念,已成为分析城市群发展及其内部分工的重要工具[<sup>33]</sup>。仿照城市经济地理学中的城市首位度概念,本文提出了"道路首位度"。该指标用于突出道路走向的集中程度,反映城市路网的复杂性程度,本文将其值设定为不同方向道路的最长与次长之比,计算公式如下:

$$S = \frac{P_1}{P_2} \tag{2}$$

式中:S为道路首位度数值; $P_1$ 、 $P_2$ 分别表示不同方向道路最长和次长长度。

(3)过阈值比 T。为了使结果数据分布更加均匀,通过对数据分布情况进行分析,实验选取一个比值作为比例系数,选择道路最大长度的这一比值作为阈值 T。然后对大于这一阈值的数据进行计数并统计其占比作为该项指标数值。该项数值越大则表示当前区域内各方向上道路的长度数值相对平均,计算公式如下:

$$T = \frac{countif(x > T_v)}{n} \times 100\%$$
 (3)

式中: T 为过阈值比指标: T 为道路长度的阈值;

x为道路的长度:n为道路的总数。

(4)走向顺序 $\varphi$ 。走向顺序是 Geoff Boeing 在城市空间秩序研究中提出的计算指标,用于量化城市街道网络遵循单个网络排序的程度<sup>[23]</sup>。走向顺序 $\varphi$ 的数值越大表明一个城市道路越"有序",趋于0则表明"无序性"较强。该指标由香农熵数值计算而来,香农熵的计算公式如下:

$$H_0 = -\sum_{i=1}^{n} P(O_i) \ln(P(O_i))$$
 (4)

式中:用 $H_0$ 表示道路走向分布的香农熵; $P(O_i)$ 表示不同走向道路出现的频率。

根据香农熵计算走向顺序φ的公式如下:

$$\varphi = 1 - \left(\frac{H_o - H_g}{H_{\text{max}} - H_g}\right)^2 \tag{5}$$

式中: $\varphi$ 为走向顺序指标; $H_s$ 为香农熵在理想状态下的最小值; $H_{max}$ 为香农熵的最大值。

(5)路网密度 $\delta$ 。路网密度是城市路网规划的重要指标,是城市道路总长度与城市面积之比[34]。道路网密度是对道路长度与用地面积间发展关系的限定,它从长度上描述了不同城市规模应有的道路发展水平。本文使用的OSM数据包含了丰富的城市道路,实验计算的道路总长度较大,因此与规范性的城市路网密度数值不尽相同,具体称该指标为OSM路网密度 $\delta$ ,计算公式如下

$$\delta = \frac{\sum x}{E} \tag{6}$$

式中: $\delta$ 为城市的路网密度; $\sum x$ 为城市全部道路的总和/km;F为城市的面积/km²。

#### 3.2 图论及玫瑰图的计算

图论是离散数学的一个重要分支,在网络分析方面发挥了重要的作用,可以应用于道路网的分析研究中[35-36]。经过处理后的OSM 道路网络被抽象为带权重的有向图,表示为G = (V,E,W)。道路的起点、终点以及互通的道路交点组成了节点V,连接节点之间的道路为边E,道路的实际长度表示为每条边的权重W。边的方向由OSM数据中的"单行道"属性来决定,若该属性表明道路为单行道,则只会考虑道路的方向,否则道路2个方向都加入道路网络进行计算。为高效存储数据,研究采用邻接链表的形式对网络的拓扑结构进行存储和引用。

本研究引入玫瑰图表示城市路网的方向分布 特征,玫瑰图的条带方向表示道路的方位,条带长度 表示道路与这些方位的相对频率。玫瑰图方位角 的计算分带以正东方向开始,沿顺时针和逆时针方向各展开二分之一分带作为第一个区间。此后在逆时针方向上以一个分带作为一个统计区间,对每个方向道路长度进行统计。城市道路长度和方向计算中采用 Vincenty 的逆公式对两点之间的测地线距离和方位角度进行计算[37]。

#### 3.3 基于路网指标的聚类模型

为了科学的研究城市道路网在方向上的分布规律,探究国内一、二线及新一线城市在路网分布上的相似及差异,本文采用了方便快速的K-Means聚类分析的方法。

K-Means 算法是一种迭代的聚类分析算法,最终得到的聚类结果是将N个数据对象划分至K个不相交的簇中,使得每个样本点都属于距离其最近的聚类中心[ $^{18}$ ]。该算法的基本思想为:首先确定分类数K,从N个数据对象中随机初始化K个聚类中心;对于剩下的对象,计算其与K个聚类中心的距离,分别将其分配给与其距离最近的类簇;然后再计算每个类簇新的聚类中心,即该类簇中所有对象的均值;不断重复,直到达到最大迭代次数或聚类中心的数值不再改变。一般采用簇内误差平方总和E作为标准测度函数[ $^{19}$ ],其定义如下:

$$E = \sum_{i=1}^{K} \sum_{X \in C_i} \left| X - \overline{X_i} \right|^2 \tag{7}$$

式中:E为簇内误差平方总和;C为聚类得到的第i个簇;K为簇的总数; $\overline{X}$ 为簇C的平均值。

## 4 结果和分析

#### 4.1 城市道路走向分析

在计算过阈值比*T*过程中,为了增大指标数值的区分度,需要选取一个合适的比例系数。实验以

0.05 为间隔在[0.1, 0.5]区间内选取一系列数值作为 比值,通过各实验计算的结果对比,当选取这一比 值为0.3时,过阈值比T的数值能够比较均匀的分布 在0~1之间,数值区分度较好。因此,最终选取0.3 为比例系数,取道路最大长度的十分之三作为该指 标计算的阈值 T,,使过阈值比 T能够反映在不同方 向上道路长度在某个范围内的集中程度,该指标数 值分布结果如图2所示。过阈值比T均匀分布保证 了指标数据良好的区分度,同时也是为了提高该指 标在聚类分析中的聚类效果。在计算走向顺序 φ时, 当一个城市的道路网处于最理想状态时, 城市 路网为十字正交网络,所有道路的比例相等,此时, 香农熵的最小值 Hg 为 1.386[23]。当一个道路网完全 均匀的分布于所有条带时,香农熵取得最大值 $H_{max}$ 为4.276,根据香农熵的计算公式可知其最大值与 条带数n有关。

2021年

为了更直观地展示出研究城市各个指标的数值分布情况,将最值比R、首位度S、过阈值比T、走向顺序 $\varphi$ 和路网密度 $\delta$ 按从大到小进行排序,如图3所示。可以看出,这些指标数值在各个城市的分布度较好,较为均匀地分布在最值之间,下降幅度较为相似。尤其是最值比R和走向顺序 $\varphi$ ,2个指标的最值都分布在郑州和东莞。除了个别偏大指标的最值都分布在郑州和东莞。除了个别偏大指标的城市外,75%的研究城市路网指标数值位于指标最大值一半以下。在我国总体的道路规划下,这些城市道路网的指标差异较小,本研究计算的路网指标具有合理性。

玫瑰图的计算可以使用5°分带、10°分带、15°分带或者更大的分带,考虑到国内道路网的复杂性<sup>[40]</sup>,需要细化玫瑰图的计算方向,同时,更小的分带可以保证过阈值比*T*数值的区分度,因此,本研究的玫瑰图采用了5°分带,其条带数*n*为72。玫瑰图的可

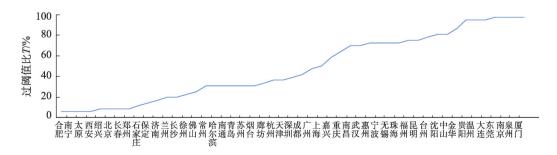


图2 比例系数为0.3时过阈值比T的数值分布

Fig. 2 The numerical distribution of the threshold value ratio T when the scale factor is 0.3

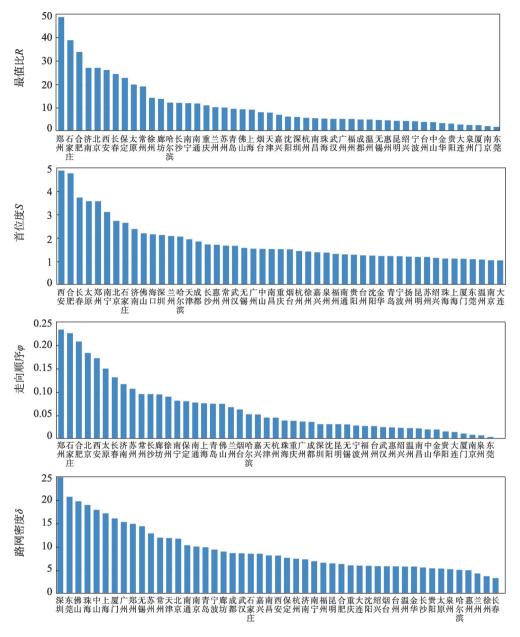


图 3 研究城市 4 个路网指标的数值分布

Fig. 3 The numerical distribution diagram of 4 road network indicators in the case study cities

视化结果如图 4 所示。49 个城市的路网玫瑰图按 走向顺序 $\varphi$ 的降序排列, $\varphi$ 值依次降低,表明城市的 无序性增强。

为了结合到路网指标的定量描述,图 5 展示了 北京、长沙、珠海的城市玫瑰图和路网指标值。根 据图 4 中玫瑰图中分布,可以大致推断出城市道路 的方向趋势。郑州、北京、西安等城市的玫瑰图为 简单的正交网格,整体呈十字正交型,如图 5 所示的 北京玫瑰图。这些城市的走向顺序φ通常在 0.13 以 上,最值比较大,而过阈值比和路网密度较小,具有 整齐的道路顺序。该类城市大多地处广阔平原地 区,城市道路中存在显著的正交网络,且城市道路以正南北和正东西方向为主导向,其类型成因主要与历史的城市规划有关。长沙、扬州、广州等城市的路网玫瑰图在整体上呈现风车状,如图 5 所示的长沙玫瑰图,它们存在一定的正交网络,但不如前者明显。这些城市的过阈值比通常处于 15%和50%之间,意味着其他方向上的道路出现的频率有所增大。随着过阈值比T、路网密度 $\delta$ 的增加以及走向顺序 $\varphi$ 的变小,城市道路网无序性增强,城市玫瑰图呈现出这种不规则的形状,而图 5 中珠海玫瑰图形状只是其中一种。

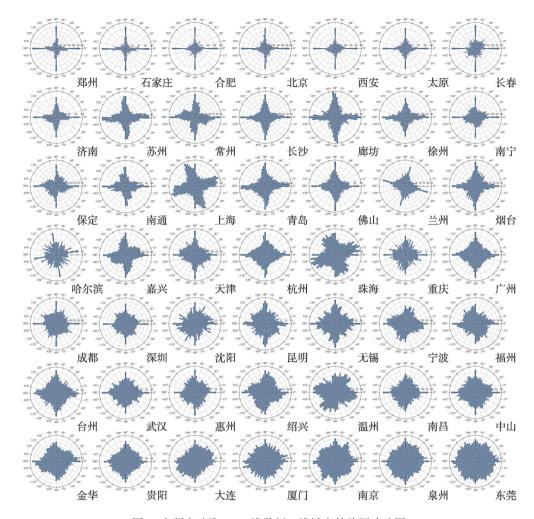


图4 本研究选取一、二线及新一线城市的路网玫瑰图

Fig. 4 Rose diagrams of road network in the first and second-tier and first-tier new cities selected in this study

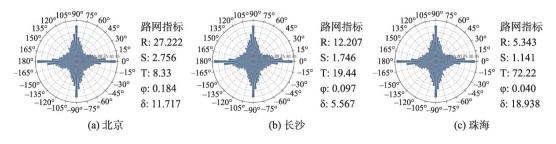


图 5 典型城市玫瑰图和路网指标值

Fig. 5 Typical cities' rose diagrams and road network index values

可以发现,一些城市的主要道路方向并非是南北和东西走向,如上海、兰州、珠海、温州等城市。从图5中珠海玫瑰图与北京、长沙玫瑰图的对比可以看出,以正北方向为基准,珠海的主干道路向西北方向偏移。这些非南北和非东西走向的城市往往受到地理因素的限制,如上海的道路规划受黄浦江流向的影响,兰州的道路规划受到西北地区地形地势的影响,这使得城市的交通规划选择了有利于

交通运输和居民生活的方向作为主方向干道。从图3的OSM路网密度数值结果来看,深圳、珠海、上海、厦门等沿海城市的路网密度δ均处于15以上,如图4中珠海的路网密度δ为18.938,这些城市具有面积小但路网丰富的特征,其城市玫瑰图大多较为复杂。

此外,武汉、南京、沈阳等城市因城市规模大、 存在多个中心,它们的走向顺序分别为0.025、 0.011、0.032,较小的走向顺序意味着路网存在着较大的复杂性和无序性,这也导致以城市整体视角观之呈现的复杂。

综上,处于平原地区的城市多以正交网络为主,山区及沿海城市由于受到地形因素的影响,城市道路规划不得不因地制宜,选择有利于城市交通和居民生活的方向建设道路,从而形成了混乱和复杂的路网。

#### 4.2 基于路网指标的聚类分析

数据归一化是一种无量纲处理手段,是进行统计分析的必要步骤<sup>[41]</sup>。为了消除量纲以及变量自身变异大小和数值大小的影响,本研究在进行聚类之前先将原始指标数据归一化,使指标数据均处于同一数量级。本研究使用的是最值法归一化,转换函数如下:

$$X^* = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \tag{7}$$

式中: X为归一化后的数值大小;  $X_{max}$ 为样本数据的最大值;  $X_{min}$ 为样本数据的最小值。

通过路网玫瑰图定性的分析,可以看出全国城市路网在走向上的分布规律。为了对城市路网指标有一个定量的客观准确的分析,本文采用K-Means聚类对城市道路网进行研究。本文基于路网的4种典型基本形式,即方格式、环形放射式、混合式、自由式[42],同时参考评价聚类效果好坏的轮廓系数[43],最终选取聚类数 K值为4,然后对49个城市归一化后的路网指标进行聚类,进而分析城市道路分布的相似及差异。

表 1 是 49 个城市的路网指标的聚类中心结果。可以看出过阈值比T和走向顺序 $\varphi$ 在聚类效果上存在着明显的反比关系。结合走向顺序 $\varphi$ 的内涵可知, $\varphi$ 值越小意味着无序性越大,该区域内各方向上道路的长度数值则相对平均,T值也就越大。可

#### 表1 基于路网指标的一、二线及新一线城市 的 K-means 聚类中心结果

Tab. 1 Cluster center results of the K-means in in the first and second-tier and first-tier new cities based on road network indicators

类别	最值比R	首位度S	过阈值比T	走向顺序φ	路网密度δ
1	0.627	0.692	0.022	0.795	0.233
2	0.218	0.175	0.217	0.303	0.213
3	0.074	0.117	0.643	0.139	0.698
4	0.062	0.072	0.813	0.090	0.162

见,聚类结果符合城市路网的实际情况。除了路网 密度 $\delta$ ,类别3和类别4在各个指标上的聚类中心差 异较小,使得两类城市具有一定相似性。

通过K-means聚类将49个一、二线及新一线城市分为了4类, Ⅰ类城市为7个, Ⅱ类城市为17个, Ⅲ类城市为9个, Ⅳ类城市为16个。聚类结果如表2所示。

#### 表 2 本研究选取的一、二线及新一线城市 的路网指标聚类结果

Tab. 2 Clustering results of road network indicators in the first and second-tier and first-tier new cities selected in this study

类别	城市			
I	郑州、北京、石家庄、西安、合肥、太原、长春			
II	苏州、常州、天津、南通、青岛、成都、保定、廊坊、杭州 济南、绍兴、长沙、烟台、兰州、徐州、哈尔滨、南宁			
${\rm I\hspace{1em}I}$	深圳、东莞、佛山、珠海、上海、中山、厦门、广州、无锡			
IV	南京、宁波、武汉、嘉兴、南昌、福州、台州、金华、大连沈阳、温州、贵阳、泉州、惠州、昆明、重庆			

为了具体分析聚类后4类城市的主要路网特征,本文分别选取代表性城市北京、常州、珠海和贵阳的部分典型道路网作为4种分类的代表,如图6所示,并且在图中展示了典型玫瑰图以及各类城市路网指标的均值和标准差。根据城市路网的显著特征和城市玫瑰图的分布特征,分别将4类城市路网类型命名为十字正交型、十字状向风车状扩散型、风车状向圆弧四角星扩散型和混合复杂型。为了更直观地分析各种路网类型在我国分布的空间特征,本文将聚类结果进行了可视化,如图7所示。

I类城市的道路网为十字正交型或者接近十字正交型网络,如图6中的北京道路网,基本上呈南北与东西分布,多为正交网格,整齐有序。这类城市走向顺序φ的均值为0.187,道路整齐有序,但主导干道以外方向上的道路较少,这也导致过阈值比较小,其均值为7.539。 I 类城市的道路网为十字正交型,从图7中可以发现,大多十字正交型路网位于平原地区及北方,城市道路中存在显著的正交网络,其城市规划道路有序性强。

结合 II 类城市中常州的道路网分布,城市中其他方向上的道路有所增多,但是仍然存在一定程度的正交网络。这些城市的玫瑰图大多类似于前文提过的风车状玫瑰图,走向顺序φ和过阈值比 T的均值分别变为了 0.074 和 25.490。 II 类城市的道路网为十字状向风车状扩散型,它们在正交网络有序

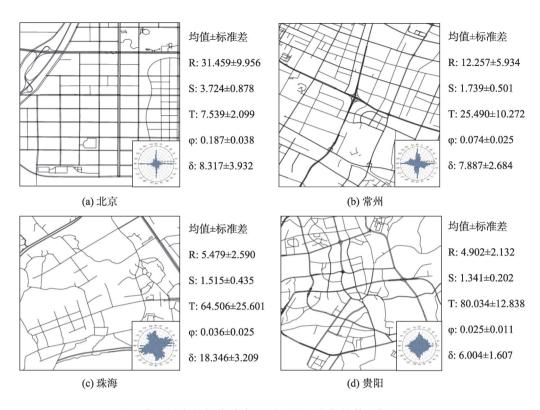
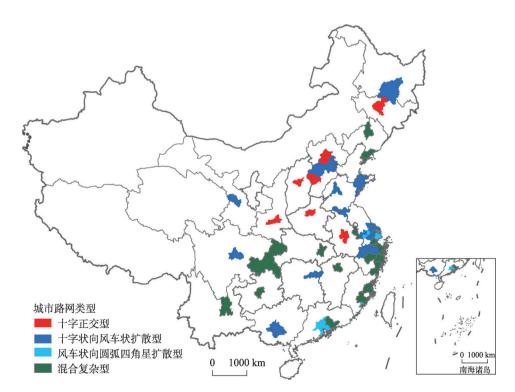


图 6 典型城市的部分道路网、玫瑰图及指标均值和标准差

Fig. 6 Part of road network, rose diagrams, index mean and standard deviation of typical cities



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4632号的标准地图制作,底图无修改。 图 7 本研究选取的一、二线及新一线城市的路网类型地理分布可视化

Fig. 7 Visualization of geographical distribution of road network types in the first and second-tier and first-tier new cities selected in this study

的前提下适当增加其他方向的道路,降低了道路网的旅行距离,从而保证城市道路网的通畅有序[44]。

从Ⅲ类城市中珠海的道路网分布可以发现,其正交网络变少,交叉道路的角度变大。Ⅲ类城市路网的走向顺序φ均值变为0.036,比之Ⅰ类城市的0.187有较大的降幅,城市道路的无序性变得更强,路网也更加复杂。Ⅲ类城市的道路网为风车状向圆弧四角星扩散型,最长中轴线因存在城市环线和正交网络不一致导致城市整体道路偏向于复杂,玫瑰图的圆弧或四角星边界变得明显。

IV类城市的道路网是最为复杂和无序的,因地势起伏等地理因素导致其城市道路规模形态较为复杂,为混合复杂型。如图5的贵阳路网,整体错综复杂,复杂性和无序性较大。这类城市的过阈值比T均值达到了80.034,意味着IV类城市各方向上道路的长度数值相对平均。可以发现,大部分Ⅲ类城市为沿海城市,这种沿海地形使得城市道路规划受到影响。

从图 6 中路网指标的标准差可以看出,相比于 I 类城市和 II 类城市, III 类城市和 IV 类城市各个路 网指标的标准差较小,意味着 III 类城市和 IV 类城市路网特征的离散程度较低,城市路网在方向分布上 具有更大的相似性。从图 7 中可以发现,十字正交型和十字状向风车状扩散型路网大多分布在内陆地区,而风车状向圆弧四角星扩散型和混合复杂型路网大多分布在沿海地区。

#### 4.3 讨论

本文首先采用玫瑰图对我国一、二线及新一线城市道路网的方向分布特征进行可视化,定性地评价了城市路网的复杂结构。然后基于路网指标对城市进行聚类分析,结果得到4类城市,其中 I 类城市的道路网主要为十字正交型,较为整齐有序; II 类城市的道路网保留了传统的十字正交型网络,但适当完善了其他方向的道路网,增加了城市路网的通达性; III 类城市的道路网正交网络变少,交叉道路的角度变大,无序性变大; IV 类城市由于其他各个方向上的道路过多的增加,造成了城市道路网具有较大的无序性和复杂性。可以发现,同类型的路网在城市道路结构上和空间分布特征上都具有一定相似性,而非同类型的路网在城市道路结构上和空间分布特征上则差异较大,地形是造成这些差异的主要因素。

在路网指标聚类研究中发现,结果得到的 II 类城市最多,该类城市的十字状向风车状扩散型路网往往具有较好的有序性和较低的复杂性,城市道路较为通畅。十字状向风车状扩散型路网在保证城市道路网有序性的基础下,适当地增加和完善了非城市主导方向上的道路,使得城市道路相对其他类型路网更为通畅。这一发现能够为城市道路规划和路网布局优化提供参考性依据,尤其是为新区建设中的道路规划提供辅助性指导,以主导方向道路建设为主、非主导方向道路建设为辅,保证城市道路的有序性。

考虑到 OpenStreet Map 具有数据量丰富和覆盖度广的特点以及后续城市道路网演变的相关研究,本研究使用了 OSM 路网数据,当然其他道路网的数据源也可以进行本研究。道路方向是城市发展的见证和城市结构的体现,城市道路网的结构和分布不仅仅与城市的地形有关,还与各个城市的自然条件、经济条件和建设水平等密切相关,各个城市的道路网也呈现出不同的特征。本文主要针对全国性尺度进行路网的方向特征评价,没有更加细化地对地理环境和地形特征等因素进行划分研究,未来会考虑将路网结构和地形特征、经济水平等进行结合研究,以探究路网结构和地形、经济水平等之间的关系。

## 5 结论和展望

本文将玫瑰图的方法应用到国内49个一、二线及新一线城市的道路网分布特征研究中,量化了这些城市道路的密集程度和整体的有序程度。在城市玫瑰图统计分析的基础上,本文基于最值比R、道路首位度S、过阈值比T、走向顺序 $\varphi$ 和路网密度 $\delta$ 等5个路网指标,通过对我国一、二线及新一线城市路网进行聚类研究,从道路走向的角度探索了这些城市道路网的差异性和分布特征,从而进行我国城市交通布局的评价。本文主要结论如下:

- (1)城市的路网玫瑰图越接近十字正交型,道路有序性越强。我国城市主要以南北和东西走向为城市道路的主导向,但也有部分城市因地形地势的影响沿着有利于城市交通和居民生活的方向规划道路。
- (2)基于5个路网指标的聚类得到了十字正交型、十字状向风车状扩散型、风车状向圆弧四角星

扩散型和混合复杂型4类城市道路网类型,这4类城市路网在方向分布特征上具有显著差异,突出表现在有序性和复杂性。

(3)从路网类型的空间分布来看,十字正交型和十字状向风车状扩散型路网大多分布在我国的内陆地区,而风车状向圆弧四角星扩散型和混合复杂型路网则大多分布在沿海地区,形成这样的空间分布和我国各个城市的地形地势以及历史规划是密切相关的。

由于OSM路网数据的丰富性,在今后的城市 道路研究中应该考虑进行道路层次的量化处理,提 高路网指标计算精度以得到更严谨的研究结果。 本文研究城市路网时对地形的影响没有进行定量 的分析,未来会考虑将城市路网结构和地形特征、 经济水平等进行结合研究。在未来的研究中将会 考虑结合多时相的路网数据,以本研究为基础在时 空尺度上对城市道路的发展演变进行分析,以揭示 城市道路网和城市结构的演变规律,提出城市道路 规划可能的优化方向。同时,未来研究将对全国城 市的道路数据进行聚类,探究全国城市道路走向的 空间自相关性,分析聚类结果在我国的空间分布特 征,从而研究我国城市道路走向的空间分布布局。

#### 参考文献(References):

- [1] 李德仁,李清泉,杨必胜,等. 3S 技术与智能交通[J].武汉大学学报(信息科学版),2008,3(4):331-336. [ Li D R, Li Q Q, Yang B S, et al. Techniques of GIS, GPS and RS for the development of intelligent transportation[J]. Geomatics and Information Science of Wunan University, 2008,3 (4):331-336.]
- [2] 石飞,王炜.城市路网结构分析[J].城市规划,2007,31(8): 68-73. [ Shi F, Wang W. Analysis of urban road network structure[J]. City Planning Review, 2007,31(8):68-73. ]
- [3] Hong Y, Yao Y. Hierarchical community detection and functional area identification with OSM roads and complex graph theory[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2019,33(8):1569-1587.
- [4] 郭继孚,刘莹,余柳.对中国大城市交通拥堵问题的认识 [J].城市交通,2011,9(2):8-14. [ Guo J F, Liu Y, Yu L. Traffic congestion in large metropolitan area in China[J]. Urban transport of China, 2011,9(2):8-14. ]
- [5] Xie F, Levinson D. Measuring the structure of road networks[J]. Geographical Analysis, 2007,39(3):336-356.
- [6] 吴凡,石飞,肖沛余,等.城市路网布局结构对公共交通出 行的影响[J].南京工业大学学报(自然科学版),2019,41

- (4):520-528. [Wu F, Shi F, Xiao P Y, et al. The influence of urban road network layout structure on public transportation[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science), 2019,41(4):520-528.]
- [7] Tian Z, Jia L, Dong H, et al. Analysis of urban road traffic network based on complex network[J]. Procedia Engineering, 2016,137(1):537-546.
- [8] 王法辉,刘瑜,王姣娥.交通网络与城市结构研究——理 论框架与中美两国实证案例[J].地理科学进展,2014,33 (10):1289-1299. [Wang F H, Liu Y, Wang J E. Transport networks, intraurban structure and system of cities: a Sino-US comparative perspective[J]. Advances in Earth Sciences, 2014,33(10):1289-1299.
- [9] 顾朝,林甄峰,张京祥.集聚与扩散——城市空间结构新论[M].南京:东南大学出版社,2000. [Gu Z, Lin Z F, Zhang J X. Agglomeration and diffusion: A new discussion on urban spatial structure[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2000. ]
- [10] 周春山,叶昌东.中国城市空间结构研究评述[J].地理科学进展,2013,32(7):1030-1038. [ Zhou C S, Ye C D. Progress on studies of urban spatial structure in China[J]. Advances in Earth Sciences, 2013,32(7):1030-1038. ]
- [11] 钟业喜,陆玉麒.基于铁路网络的中国城市等级体系与分布格局[J]. 地理研究,2011,30(5):785-794. [ Zhong Y X, Lu Y L. Hierarchical structure and distribution pattern of Chinese urban system based on railway network[J]. Geographical Research, 2011,30(5):785-794.]
- [12] 宋琼,谢志祥,李同昇,等.长江中游城市群城市网络空间 结构研究[J].地域研究与开发,2017,36(3):59-65. [ Song Q, Xie Z X, Li T S, et al. Study on spatial structure of urban network in urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Areal Research and Development, 2017,36(3):59-65. ]
- [13] 胡国建,陈传明,金星星,等.中国城市体系网络化研究[J]. 地理学报,2019,74(4):681-693. [ Hu G J, Chen C M, Jin X X, et al. Research progress of networking of urban systems in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(4): 681-693.]
- [14] 梁宇,郑新奇,白书建.利用空间句法模型研究京津冀路 网的通达性[J].测绘通报,2016(10):101-105. [ Liang Y, Zheng X Q, Bai S J. The accessibility research of jing-jin-ji road network using space syntax model[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2016(10):101-105.]
- [15] 李沛权,曹小曙.广佛都市圈公路网络通达性及其空间格局[J].经济地理,2011,31(3):371-378. [ Li P Q, Cao X S. The road network accessibility and spatial pattern of Guangzhou-Foshan metropolitan area[J]. Economic Geography, 2011,31(3):371-378. ]

- [16] 沈惊宏,陆玉麒,兰小机.基于分形理论的公路交通网络与区域经济发展关系的研究[J].地理科学,2012,32(6): 658-665. [ Shen J H, Lu Y L, Lan X J. Relationship between the road network and regional economic development based on the fractal theory[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012,32(6):658-665. ]
- [17] 曾映敏,张红,陆权,等.多空间尺度道路网结构分形特征分析 [J]. 地理信息世界,2018,25(5):35-40. [Zeng Y, Zhang M, Lu Q, et al. Structure fractal analysis of road network on multi-geospatial scales[J]. Geomatics World, 2018,25(5):35-40.]
- [18] 王庆国,张昆仑.复杂网络理论的武汉市路网结构特征 [J].测绘科学,2019,44(4):66-71. [Wang Q G, Zhang K L. Research on the structure characteristics of Wuhan road network based on complex network theory[J]. Science of Surveying and Mapping, 2019,44(4):66-71.]
- [19] Gudmundsson A, Mohajeri N. Entropy and order in urban street networks[J]. Scientific Reports, 2013,3(1):1-8.
- [20] Fisher N I. Statistical analysis of circular data[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [21] Nemec W. The shape of the rose[J]. Sedimentary Geology, 1988,59(1-2):149-152.
- [22] Mohajeri N, French J, Gudmundsson A. Entropy measures of street-network dispersion: Analysis of coastal cities in Brazil and Britain[J]. Entropy, 2013,15(12):3340-3360.
- [23] Boeing G. Urban spatial order: street network orientation, configuration, and entropy[J]. Applied Network Science, 2019,4(1):1-19.
- [24] 刘波,时雨,刘雪朝,等.开放式街道地图在城市发展水平分析中的应用[J].测绘科学,2019,44(7):141-146. [Liu B, Shi Y, Liu X C, et al. Application of OpenStreetMap in city development level analysis[J]. Science of Surveying and Mapping, 2019,44(7):141-146.]
- [25] 郝怀旭,万太礼,罗年学.利用OpenStreetMap 数据进行高空间分辨率遥感影像分类[J].测绘通报,2019,10(7):69-72. [ Hao H, Wan T, Luo N. High-resolution remote sensing image classification using OpenStreetMap data[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019,10(7):69-72.]
- [26] 张宇,王琦,吴文周,等.点状地名信息的加权泰森多边形检索法[J].测绘学报,2017,46(11):1919-1926. [ Zhang Y, Wang Q, Wu W Z, et al. A weighted voronoi diagrambased retrieval approach for point-like toponym information[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017,46(11): 1919-1926.]
- [27] 田晶,武晓环,林镠鹏,等.城市道路网的度相关性及其与 网络鲁棒性的关系研究[J].武汉大学学报·信息科学版, 2016,41(5):672-678. [ Tain J, Wu X H, Lin L P, et al. De-

- gree correlation of urban street networks and its relationship with network robustness[J]. Geomatics and Information Science of Wunan University, 2016,41(5):672-678.
- [28] 赵玲,邓敏,王佳,等.基于复杂网络理论的城市路网结构特性分析[J].地理与地理信息科学,2010,26(5):11-15. [ Zaho L, Deng M, Wang J, et al. Structural property analysis of urban street networks based on complex network theory[J]. Geography and Geo-information Science, 2010, 26(5):11-15. ]
- [29] 黄杉,武前波,崔万珍.国内外城市综合体的发展特征与 类型模式[J].经济地理,2013,33(4):1-8. [ Hunag S, Wu Q B, Cui W Z. Development features and types of urban complex in the world[J]. Economic Geography, 2013,33 (4):1-8. ]
- [30] 张巧英.基于 DMSP/OLS 灯光数据的新一线城市空间扩展研究[J].测绘地理信息,2015,40(1):72-75. [ Zhang Q Y. Spatial expansion of new first-tier cities using the DMSP/OLS nighttime light images[J]. Journal of Geomatics, 2015,40(1):72-75. ]
- [31] 王艳东,殷寒露,吴胜,等.OpenStreetMap路网数据的几何精度评价[J].测绘与空间地理信息,2019,42(2):1-3. [Wang Y D, Yin H L, Wu S, et al. Geometric accuracy evaluation of OpenStreetMap road network data[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2019,42(2):1-3.]
- [32] 张正豪,冯伍法,王涛,等.一种改进的基于暗原色先验信息的航空遥感图像去雾方法[J].测绘科学技术学报, 2018,35(2):182-186. [ Zhang Z H, Feng W F, Wang T, et al. An improved aerial remote sensing image defogging method based on dark channel prior information[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2018,35(2): 182-186.1
- [33] 雷仲敏,康俊杰.城市首位度评价:理论框架与实证分析 [J].城市发展研究,2010,17(4):33-38. [Lei Z M, Kang J J. Evaluation theory of urban primacy: theoretical framework and empirical analysis[J]. Urban Studies, 2010,17 (4):33-38.]
- [34] 刘锐,胡伟平,王红亮,等.基于核密度估计的广佛都市区路网演变分析[J].地理科学,2011,31(1):81-86. [Liu R, Hu W P, Wang H L, et al. the road network evolution of guangzhou-foshan metropolitan area based on kernel density estimation[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011,31 (1):81-86.]
- [35] 周亮,陆锋,张恒才.基于动态中介中心性的城市道路网实时分层方法[J].地球信息科学学报,2012,14(3):292-298. [ Zhou L, Lu F, Zhang H C. Time-dependent road network hierarchy based on dynamic betweenness centrality[J]. Journal of Geo-information Science, 2012,14(3): 292-298.]

- [36] Jiang B, Harrie L. Selection of streets from a network using self-organizing maps[J]. Transactions in GIS, 2004,8 (3):335-350.
- [37] Vincenty T. Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations[J]. Survey Review, 1975,23(176):88-93.
- [38] 周爱武,于亚飞.K-Means 聚类算法的研究[J].计算机技术与发展,2011,21(2):62-65. [ Zhou A W, Yu Y F. The research about clustering algorithm of K-Means[J]. Computer Technology and Development, 2011,21(2):62-65.]
- [39] Han J, Pei J, Kamber M. Data mining: Concepts and techniques[M]. Amsterdam: Elsevier, 2011.
- [40] 刘承良,段德忠,余瑞林,等.武汉城市圈城乡道路网结构演化及复杂性研究[J]. 地理科学,2014,34(4):401-410. [Liu C L, Duan D Z, Yu R L, et al. Topological structure evolution and complexity of urban-rural road network in wuhan metropolitan area[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014,34(4):401-410.]

- [41] 肖汉光,蔡从中.特征向量的归一化比较性研究[J].计算机工程与应用,2009,45(22):117-119. [ Xiao H G, Cai C Z. Comparison study of normalization of feature vector [J]. Computer Engineering and Applications, 2009,45(22): 117-119. ]
- [42] 王思忠.浅谈城市路网规划布局设计[J].现代城市研究, 2003(S2):10-13. [Wang S S. Overall arrangement and design of urban road network[J]. Modern Urban Research, 2003(S2):10-13.]
- [43] Zhou H B, Gao J T. Automatic method for determining cluster number based on silhouette coefficient[J]. Advanced Materials Research, 2014,951(10):227-230.
- [44] Wang S, Yu D, Kwan M P, et al. The impacts of road network density on motor vehicle travel: An empirical study of Chinese cities based on network theory[J]. Transportation Research Part A Policy & Practice, 2020,132(12): 144-156.