

基于多项罗吉特模型的路网形态判别

王雪松, 游世凯

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 以 718 个交通分析小区作为研究对象, 根据路网形态特征将其分成 5 类, 并分别计算每个小区路网的 6 种定量指标. 研究表明, 网状指数、断头路比例和四肢交叉口比例三个指标对不同路网形态下均具有较好的筛选性. 最后, 基于上述指标建立了量化判断路网形态的多项罗吉特模型, 实例验证结果表明, 该模型的准确性达到 88.4%, 相较于人工判断提高了 3.0%. 提供了一种量化判别路网形态的方法, 为研究路网形态对交通的影响提供了帮助.

关键词: 路网形态; 交通分析小区; 多项罗吉特模型; 网状指数; 四肢交叉口比例; 断头路比例

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

Street Patterns Distinction Based on Logit Model

WANG Xuesong, YOU Shikai

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In this study, 718 traffic analysis zones were classified into 5 groups according to the features of the network. Then, 6 quantitative indexes of different road networks were calculated. It was concluded that Meshedness, proportion of cul-de-sacs and proportion of four-leg intersection were the best measure to distinguish and describe various street patterns. At last, the multinomial logit model was developed based on the above-mentioned indices to quantitatively distinguish street patterns, and the accuracy of the model was proved to be 88.4%, which was 3.2% higher than that of the visual inspection. This paper offers an approach to quantitatively distinguish street patterns, which can be used to study the relationship between street patterns and traffic performance.

Key words: street patterns; traffic analysis zone; multinomial Logit model; meshedness; proportion of four-leg intersection; proportion of cul-de-sacs

路网形态指路网的图形、形态特征. 它影响着道路系统的连通性、效率等^[1]. 研究者根据路网的图形特征, 对微观层面路网形态进行分类, 如方格网、平行曲线等. 最初的判断方式是通过人工观察判断的, 这种判断方式工作量大且误差大. 近年来, 随着拓扑学和图论的发展, 中心度、网状指数等指标开始运用于量化分析路网结构. 定量指标分为几何指标和拓扑指标. 已有研究虽然比较一些拓扑指标对不同路网形态的区分情况^[2-3], 但是不同的路网形态可能有相同的拓扑指标值, 因此单一拓扑指标也就难以全面分析定量指标与路网形态之间的关系.

本文首先介绍微观层面路网形态的分类, 然后通过分析几何指标、拓扑指标与路网形态分类之间的关系, 选择筛选性较好的指标, 提出建立基于多项罗吉特模型的路网形态判别法, 最后通过对美国希尔斯堡(Hillsborough)县的实例分析, 验证了路网形态判别法的可靠性, 为研究路网形态对交通安全、交通流和交通环境的影响提供帮助.

1 研究综述

道路网络形态经历了从古代的格栅式布局到 20 世纪开始流行的非连续性的曲线型街道网^[4]. Southworth 等人将路网形态分为 5 类: 方格网(grid iron)、间断平行(fragmented parallel)、平行曲线(warped parallel)、圈形与棒棒糖型(loops 和 lollipops)、棒棒糖型(lollipops on a stick)^[5], 这种方法被大多数学者所接受, Rifaat 等^[6]和 Wang 等^[2]在此基础上分别补充了混合型和离散型两种路网形态.

以往研究通常是通过人工观察判断路网形态^[6-8], 这种判断方式繁琐且主观性强. 随着拓扑学和图论的发展, 研究者从不同角度提出多种定量指标来描述复杂路网, 主要有几何指标和拓扑指标, 见

收稿日期: 2013-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(51008230), 教育部新世纪人才支持计划(NCET-11-0387)

第一作者: 王雪松(1977—), 男, 工学博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为交通安全、交通规划、交通信息化.

E-mail: wangxs@tongji.edu.cn

表 1. 几何指标是利用路网的基本几何属性对路网进行定量描述,如路网密度^[9]、交叉口比例等。拓扑指标主要有连通性(connectivity)、聚类系数(clustering)、中心度(centrality)等;连通性用于描述路网中任意两个出行起点之间的路径直接程度和可选路径数量^[7];聚类系数用来衡量网络中顶点的聚集程度;中心度可以展现路网中重要的节点和道路,如介数中心度可以反映城市道路网骨架、城市中心、城市的发展模式等^[10]。这些定量指标都一定程度反映了路网特征,少数研究者开始考虑运用定量指标描述路网形态。Zhang 等发现相比于点度中心度、

介数中心度、邻近中心度,介数中心度对不同路网形态有较好的区分度^[3];Wang 等比较了邻近中心度、介数中心度、网状指数之后发现网状指数是区分度最好的指标,并且得出不同路网形态的网状指数分布区间^[2]。虽然这些研究探究了定量指标判断路网形态的方法,并且选出了一种拓扑指标来区分不同路网形态,但是几何指标、拓扑指标都是描述路网形态的主要指标,单独从某一个角度采用单一指标来判断路网形态是不完整的。为了量化判断路网形态,需要从两类指标中各选取指标建立模型综合判断路网形态。

表 1 道路网定量指标分类

Tab. 1 The classification of quantitative indices of road network

分类	指标
几何指标	宏观层面 微观层面
	四肢交叉口比例、街道密度、街道长度、断头路比例、街区密度 道路宽度、交叉口角度
拓扑指标	连通性
	中心性
	聚类系数
	被连接节点比例、路段节点比例、伽马指标、树形或者环形 点度中心度、邻近中心度、介数中心度、效率、直达中心度、信息中心度 聚类系数、K-聚类系数、网状指数

交通分析小区(traffic analysis zone, TAZ)是交通研究的基础划分单元,包括基本的交通运行特征、人口经济社会特征、地理信息。交通分析小区的选取方式决定了它可以反映交通行为、交通流量、交通模式选择等信息。分析路网结构的目的在于深入理解不同路网,更在于比较不同路网形态的影响,从而选择出一种更合适的路网。交通分析小区在比较不同路网形态、分析路网安全性^[11]等方面有较好的效果,因此本文采用交通分析小区作为分析路网形态的基本单元。

2 路网形态分类

本文基于美国佛罗里达州希尔斯堡县(Hillsborough County)的数据进行分析,其 718 个交通分析小区的划分方法来自于佛罗里达州地理数据资料库(Florida Geographic Data Library, FGDL),交通分析小区内部道路的数据来自于美国国家统计局(TIGER)。最初,采用 Southworth 等^[5]的方法,将路网形态划分为 5 类:方格网、间断平行、平行曲线、圈形与棒棒糖型、棒棒糖型。但是在确定每个交通分析小区路网形态的时候发现有些小区路网包含两种或两种以上类型,而有些小区内部道路非常分散且不连续。因此,将这两种情况的路网形态分别归为混合型和离散型。另一方面,间断平行和平行曲线由于较为相似,归为平行曲线;圈形与棒棒糖型和棒棒糖型也较为相似,归为尽端环形与棒棒糖

型。最终,本文将 Hillsborough 县的路网形态归为 5 类:方格网(Grid)、平行曲线(Warped Parallel)、混合型(Mixed)、尽端环形与棒棒糖型(Loops 和 Lollipops)、离散型(Sparse),见表 2。

表 2 路网形态

Tab. 2 Street patterns

路网形态	特征	典型例子
方格网	良好的连通性 垂直的四肢交叉口 平行直线	
平行曲线	局部出现平行直线或者 平行曲线 较多的三肢交叉口	
混合型	含有两种或以上基本类型路网	
尽端环形与棒棒糖型	树状分支并且以死胡同为树杈 较多的三叉路口 干道旁边有许多小环路 道路连续性较低	
离散型	路网结构分散、不连续、数量少	

针对希尔斯堡县 718 个交通分析小区的路网,

三位熟悉路网形态分类的交通规划专业的研究人员对其路网形态进行了判断,图 1 显示了路网形态人工判断的结果。从左边的饼图中可以看出,将希尔斯堡县的路网形态分成这 5 种类型是较为合理的,只有 4.3% 的交通分析小区的路网形态是三位研究人员判断完全不相同的,但是人工判断的方法误差较大,只有 55.2% 的交通分析小区的路网形态是三位研究人员判断完全相同的。从右边的饼图中可以看出,在三位研究人员判断完全相同的路网中,尽端环形与棒棒糖型路网所占比例最大,有 59.5%,而离散型路网所占比例最少,只有 5.1%。

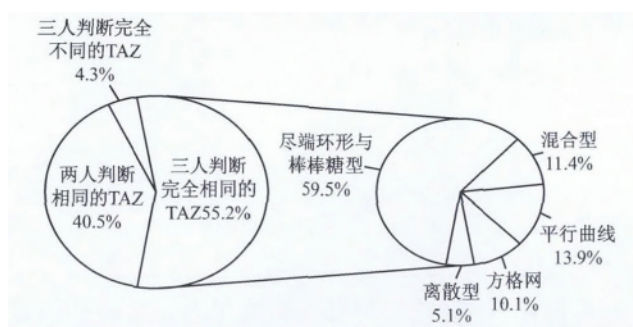


图 1 不同路网形态人工判断结果

Fig. 1 Statistical results about artificial judgment of street patterns

从判断结果可以看出,人工判断的方法误差较大,这是因为路网形态的分类是通过语言和图像对其特征进行描述而定义的,它是建立在人工判断的基础之上,每一个交通分析小区没有客观标准可以对照。对于不同的路网形态,每个人的理解会有所偏差,都会根据自己的理解去判断路网形态的分类,这就导致了判断结果是有差别的。此外,一个分析单元里的路网是复杂的,人工判断是无法细微地比较出它们的区别的。因此,本文的研究目的是寻找定量判断路网形态的方法,解决人工判断工作量大且不一致性高的缺点。

针对 31 个三位研究人员判断都不相同的交通分析小区,经过进一步检验,发现它们路网形态确实不易确定。在 292 个两位研究人员判断相同的交通分析小区中,两两之间判断相同的数量见表 3。可以看出分布不是完全均衡,但是也不存在某两位研究人员判别几乎完全相同的情形。因此,取两位研究人员判别相同的结果作为标准进行建模,似乎不妥。所以,为了尽可能减少人工判断的误差,提高后文分析的可靠度,下文计算分析的基础为三位研究人员判断相同的 395 个交通分析小区的路网。

表 3 两位研究人员判断相同的交通分析小区

Tab. 3 TAZ with the same judgment from two of the three researchers

	第 1、第 3 研究人员判断相同	第 1、第 2 研究人员判断相同	第 2、第 3 研究人员判断相同
TAZ 数量/个	189	33	70
判断相同数量占总数的百分数/%	65	11	24

3 路网定量指标

定量指标由几何指标和拓扑指标构成,下面分别介绍两种指标的选取、计算与分析过程。其中,在计算定量指标的时候主要采用平均分配的方式处理边界点和边界线分配问题,即边界上的点与道路的权重在相邻交通分析小区中平均分配。例如一个交叉口位于 4 个小区边界上,则将这个交叉口平均分配给 4 个交通分析小区,每个交通分析小区各分配 0.25 个交叉口。

3.1 几何指标

从表 2 各类路网形态的典型例子中可以看出,不同类型路网形态的断头路比例、三肢交叉口比例、四肢交叉口比例这三种几何指标具有不同的特征。例如,离散型路网、尽端环形与棒棒糖型的断头路比例较高,平行曲线的三肢交叉口比例较高,方格网的

四肢交叉口比例较高。此外,这三个指标易于获取且普遍用于各类路网分析中。因此,接下来将分析这三个几何指标与路网形态分类的关系。

各类节点总数为各种交叉口数以及断头路数之和。断头路比例指断头路数量占各类节点总数的百分比,三肢交叉口比例指三肢交叉口数量占各类节点总数的比例,四肢交叉口比例指四肢交叉口数量占各类节点总数的比例。不同路网形态的三种几何指标的箱型图如图 2 所示。

在几何指标中,断头路比例和四肢交叉口比例对不同路网形态筛选性较好。从断头路比例来看(图 2a),它随着路网形态从方格网转变到离散型而升高,并且混合型、平行曲线、方格网的分布较为集中;从三肢交叉口比例来看(图 2b),方格网的三肢交叉口比例较少,其他 4 种路网形态的三肢交叉口比例差不多;从四肢交叉口比例来看(图 2c),它随着路网形态从方格网转变到离散型而降低,并且离散型和

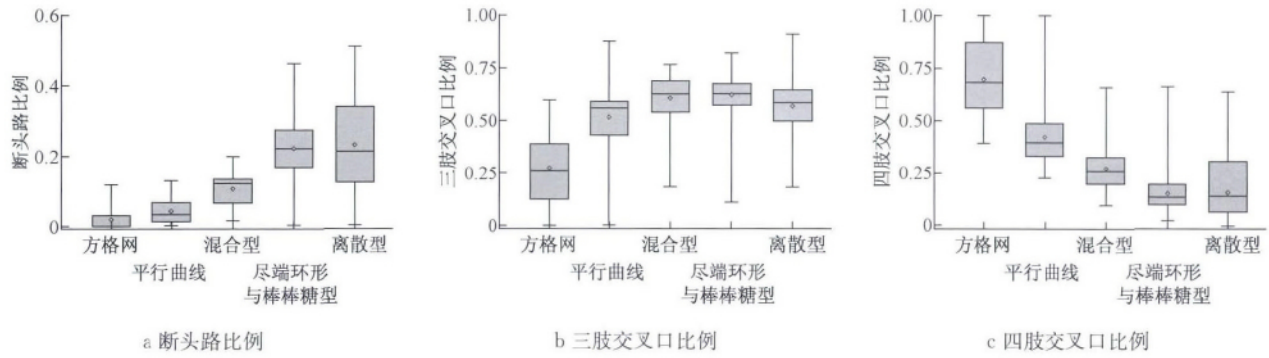


图2 三种几何指标比较

Fig.2 The comparison of three geometric indices

尽端环形与棒棒糖型的四肢交叉口比例分布范围较为相似,但尽端环形与棒棒糖型要更加集中一些。

3.2 拓扑指标

根据前人的分析^[2-3],拓扑指标中选取邻近中心度、介数中心度和网状指数三个指标进行分析。

在计算拓扑指标之前,需要对路网进行简化,舍弃不需要分析的数据,使计算更加简明方便。路网的简化抽象方法主要有两种:原始法和对偶法。本文利用原始法将路网抽象成拓扑结构,将路网中的节点抽象为拓扑图中的顶点,将路段抽象成拓扑图中的边。

邻近中心度(closeness centrality, C_i^C)考察了顶点同其他顶点间的联系密切程度。对于网络中任意一个顶点 i ,邻近中心度定义如下^[12]:

$$C_i^C = (N-1) / \sum_{j \in N, j \neq i} d_{ij} \quad (1)$$

式中: d_{ij} 是顶点 i 和顶点 j 间最短路径长度,如果忽略路段长度,该最短路径为顶点 i 与顶点 j 间所有路径中路段最少的一条; N 为网络中顶点总数。邻近中心度是利用 ArcMAP 9.3 和 UCINET 软件,通过计算各个交通分析小区内路网的邻接矩阵,从而得到。

介数中心度(Betweenness Centrality, C_i^B)是通过计算某顶点位于其他任意两顶点最短路径的概率以确定该顶点的重要性,其定义如下^[12]:

$$C_i^B = \frac{1}{(N-1)(N-2)} \sum_{j, k \in N, j \neq k \neq i} \frac{n(j, i, k)}{n_{jk}} \quad (2)$$

式中: n_{jk} 是节点 j 与节点 k 中间的最短路径数量; $n_{jk}(i)$ 是节点 j 与节点 k 之间包含了节点 i 的最短路径数量。 C_i^B 的取值范围为 $[0, 1]$, 取 1 表示图中所有节点间的最短路径都必须通过节点 i , 取 0 表示没有节点间的最短路径通过节点 i 。介数中心度的计算方法与邻近中心度的方法相同。

网状指数(meshedness, M)通过计算网络中三

角形圈型结构数量同该网络中所有顶点对应的完备平面图中三角形圈型结构数量的比来反映网络的群聚性^[13]。所谓平面图,指网络可以在平面上展示且网络中的边仅在顶点处交叉。对于一个由 K 条边、 N 个顶点组成的网络 G ,网状指数计算如下:

$$M = \frac{F}{F_{\max}} = \frac{K - N + 1}{2N - 5} \quad (3)$$

如果 $M=0$,则该网络是树状网络(tree structure);

如果 $M=1$,则该网络是完备平面图(complete planar graph)。

不同路网形态的三种拓扑指标的箱型图如图 3 所示,从中可以看出,在拓扑指标中,网状指数对路网形态的筛选性最好,指标值随着路网形态从离散型到方格网而增大(图 3c)。从网状指数的定义可以看出,网状指数越大,说明路网通达性越好,交叉口联系紧密,道路四通八达。因而从路网形态的定量指标分布图可以看出,从方格网到平行曲线到尽端环形与棒棒糖型再到离散型,路网通达性逐渐降低。

从上述分析中可以看出,断头路比例、四肢交叉口比例和网状指数都与路网形态类型有着密切关系,且能较好地地区分不同路网形态。但是,单一指标无法完整描述路网形态特征。例如,拓扑指标中的网状指数反映了路网的通达性,其计算的本质即为节点与路段比值,而几何指标中的各类节点比例反映了在节点与路段比值相同的情况下路网的布局情况。如图 4 所示的两个路网,虽然它们的网状指数相同的(表 4),但左图为方格网状,节点均匀分布,右图为山峰状,路段都连接在一条主路上,主路与支路的连通性是有所差异的。可见,几何指标、拓扑指标从不同角度描述路网形态,为了量化判断路网形态,需要利用断头路比例、四肢交叉口比例和网状指数综合建立模型判断路网形态。

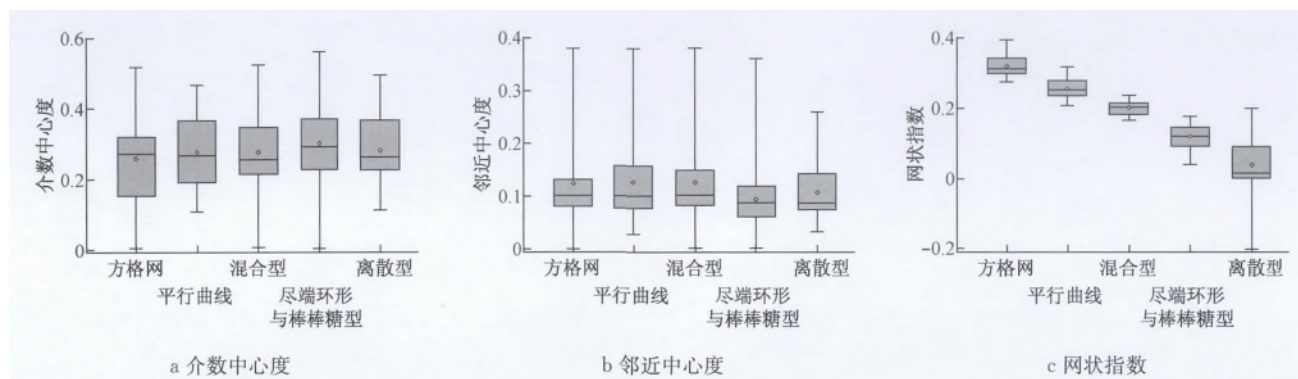


图 3 三种拓扑指标比较

Fig. 3 The comparison of three topological indices

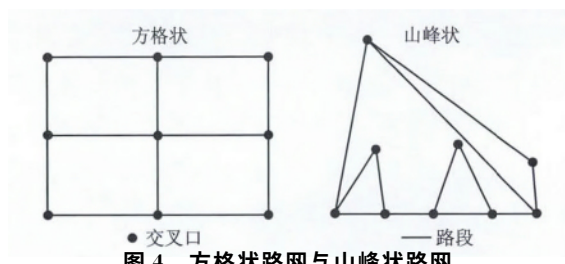


图 4 Grid-like road network and mountain-like road network

表 4 方格状路网和山峰状路网的各类指标

Tab. 4 The indices of grid-like road network and mountain-like road network

指标	方格状	山峰状	两者比较
网状指数	0.307	0.307	相同
断头路比例	0	0	相同
三岔交叉口比例	0.444	0.667	不同
四肢交叉口比例	0.111	0	不同

4 路网形态量化判断法

选取网状指数、断头路比例和四肢交叉口比例

表 5 多项罗吉特模型拟合检验:以方格网为参考

Tab. 5 Multinomial logit regression estimates: comparison with Grid

	平行曲线	混合型	尽端环形与棒棒糖型	离散型
常数项	27.825 1(6.881 7)**	50.500 7(9.258 9)**	91.994 1(14.484 8)**	96.005 2(14.630 6)**
网状指数	-85.149 5(23.043 1)**	-183.8(35.753 9)**	-433.3(75.870 8)**	-513.8(78.141 1)**
断头路比例	18.652 4(13.544 2)	43.081 7(16.807 0)*	51.086 1(19.296 1)**	40.670 6(19.918 6)*
四肢交叉口比例	-6.456 8(2.653 4)*	-15.322 5(4.984 4)**	-12.740 7(6.957 2)	-14.290 4(8.336 8)
似然比检验	804.129 0**			
Score 检验	480.615 8**			
Wald 检验	70.505 5**			

注:括号里是标准差;“*”表示显著性水平 P 值小于 0.05;“**”表示 P 值小于 0.01.

通过多项罗吉特模型拟合检验,可以分别解释变量的显著性.从表 5 可以看出模型中各参数估计的结果也比较显著,各参数的显著性检验 P 值均较小,基本小于 0.05. 各个变量的具体分析如下:

(1) 网状指数

网状指数的系数都为负值,说明当其他变量不变的情况下,随着网状指数的增大,路网形态趋于方格网的可能性越来越大,这与图 3 中所得出方格网

这三个对 5 类路网形态有较好区分度的定量指标,建立模型量化判断路网形态.模型中因变量是路网形态(1-方格网,2-平行曲线,3-混合型,4-尽端环形与棒棒糖型,5-离散型),它分为对等的 5 类,而多项罗吉特模型(multinomial Logistic model)对多个对等类别有较好的拟合效果,因此利用上述指标建立多项罗吉特模型量化判断路网形态.第 i 个交通分析小区路网是第 j 种路网形态的概率(P_{ij})为

$$P_{ij} = \Pr(U_{ij} > U_{ik}) \quad (4)$$

式中: $k \neq j, j=1, 2, 3, 4, 5$. U_{ij} 是第 i 个交通分析小区路网为第 j 种路网形态的最大效用,其公式为

$$U_{ij} = \beta_j X_{ij} + \epsilon_{ij} \quad (5)$$

式中: β_j 为各个可观测效用项系数; X_{ij} 为第 i 个交通分析小区可观测效用项; ϵ_{ij} 为随即误差项.假设 ϵ_{ij} 与 X_{ij} 相互独立,且 ϵ_{ij} 服从耿贝尔(Gumbel)分布,则多项罗吉特模型的选择概率公式为

$$P_{ij} = \exp(\beta_j X_{ij}) / \sum (\beta_j X_{ij}) \quad (6)$$

β_j 可以通过极大似然比理论估计.利用 SAS 软件 Logistic 程序建模分析所得结果见表 5.

网状指数最大的结论相符合。

(2) 断头路比例

断头路比例的系数都为正值,说明当其他变量不变的情况下,随着断头路比例的增大,路网形态趋于方格网的可能性越来越小,这与图2中所得出方格网断头路比例值最小的结论相符合。

(3) 四肢交叉口比例

四肢交叉口比例的系数都为负值,说明当其他变量不变的情况下,随着四肢交叉口比例增大,路网形态趋于方格网的可能性越来越大,这与图2中所得出方格网四肢交叉口比例最大的结论相符合。

总共718个交通分析小区,31个三位研究人员

判断都不相同的交通分析小区的路网形态无法确定,使用剩下的687个交通分析小区检验模型效果。其中,交通分析小区的路网形态标准以多数人判断结果为根据,例如,有两位研究人员都认为一个交通分析小区的路网形态为离散型,那么其路网形态的标准为离散型。图5a展示了希尔斯堡县路网形态标准图,图5b为针对这687个交通分析小区的路网形态的模型计算结果,两种判断方式结果几乎一样。从图中可以看出路网形态分布呈现一定空间聚集性:市区多为方格网和平行曲线型,郊区多为尽端环形与棒棒糖型路网。

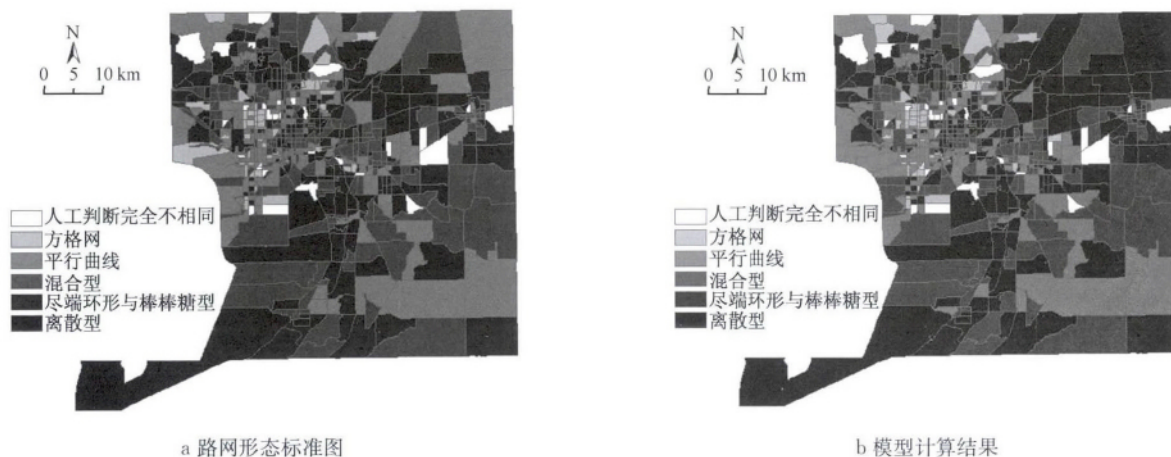


图5 希尔斯堡县路网形态图

Fig. 5 Street patterns in Hillsborough

经上述检验,模型判断准确率为88.4%,三位研究人员人工判断结果准确率的平均值为85.8%(三位研究人员准确率分别为:95.2%、72.5%、89.8%)。相比于人工判断,模型判断准确率提高了3.0%,模型效果良好。虽然在三位研究人员中,第一位研究人员判断准确率高达95.2%,但是不同人员判断的准确率有明显的差异,波动率也较大。这也反映了人工判断的方法会受到研究人员的个人理解、个人经验的影响,易受主观判断干扰。因此,在实际应用中,如果仅仅考虑一个人的判断结果,似乎有所不妥。而模型判别的准确率为88.4%,模型效果良好且稳定。此外,利用所建立的模型,可以方便快捷地大批量判断路网形态。

5 结论

传统的人工判断路网形态方法工作量大且不一致性高,不利于大范围复杂路网研究。另一方面,由于不同路网形态可能有相同的几何指标或拓扑指

标,因此单一定量指标无法完整描述路网形态特征。本文在分析几何指标中的断头路比例、三岔交叉口比例、四肢交叉口比例与拓扑指标中的邻近中心度、介数中心度、网状指数与路网形态的关系之后,发现断头路比例、四肢交叉口比例和网状指数对5类路网形态有较好的区分度。利用这三个定量指标,综合建立基于多项罗吉特模型的路网形态量化判别法。实例分析表明,此方法准确率达到88.4%,相比于人工判断的平均准确率提高了3.0%。本文所建立的方法可以便捷准确地大批量判别路网形态。在大量判断结果基础上,可以对路网形态与交通安全的关系进行研究。

经过筛选,本文只比较了6个定量指标与路网形态间的关系,随着相关科学的发展,会有更多评价路网形态的指标出现,需要进一步研究寻找更加合适的定量指标。此外,人工判断路网形态的时候仍然有4.3%的交通分析小区的路网形态是三位研究人员判断完全不相同的,需要深入分析其原因并且思考是否有更加合适的路网形态划分方法。

参考文献:

- [1] Feng X, Levinson D. Measuring the structure of road networks [J]. *Geographic Analysis*, 2006, 39(3):336.
- [2] Wang X, Jin Y, Tremont P, et al. Macro level model development for safety assessment of road network structures [J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 2012, 2280(1):100.
- [3] Zhang Y, Wang X, Zeng P, et al. Centrality characteristics of traffic analysis zone road network patterns [J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 2011, 2256(1):16.
- [4] 叶彭姚. 城市道路网络结构特性研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- YE Pengyao. Research on structure characteristics of urban road and street network [D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [5] Southworth M, Ben-Joseph E. Streets and the shaping of towns and cities [M]. Washington D C: Island Press, 2003.
- [6] Rifaat S M, Tay R, Barros A. Effect of street pattern on the severity of crashes involving vulnerable road users [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2011, 43(1):276.
- [7] Dill J. Measuring network connectivity for bicycling and walking[C/CD]//Transportation Research Board 83th Annual Meeting. Washington D C: Transportation Research Board, 2004.
- [8] Lovegrove G R, Sun J. Using community-based macrolevel collision prediction models to evaluate safety level of neighborhood road network patterns[C/CD]//Transportation Research Board 89th Annual Meeting. Washington D C: Transportation Research Board, 2010.
- [9] 叶彭姚, 陈小鸿, 崔叙. 城市道路网布局结构对公交线网密度的影响[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(1):51.
- YE Pengyao, CHEN Xiaohong, CUI Xu. Impact on density of public transportation network by urban road network layout [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2012, 40(1):51.
- [10] Porta S, Latora V, Wang F, et al. Street centrality and densities of retail and services in Bologna, Italy [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2009, 36:450.
- [11] Siddiqui C, Abdel-Aty M, Choi K. A comparison of geographical unit-based macro-level safety modeling[C/CD]//Transportation Research Board 91th Annual Meeting. Washington D C: Transportation Research Board, 2012.
- [12] Freeman L C. Centrality in social networks conceptual classification [J]. *Social Networks*, 1978, 1:215.
- [13] Buhl J, Gautrais J, Sole R V, et al. Efficiency and robustness in ant networks of galleries [J]. *The European Physical Journal B*, 2004, 42(1):123.