

山地城市支路有效间距研究

彭挺, 胡义良, 张敬宇, 李雪
(重庆市交通规划研究院, 重庆 401147)

摘要: 合理控制支路系统的规划指标对于畅通城市交通微循环、完善道路网系统具有重要作用。山地城市道路非直线系数往往较大,且干路沿线交叉口多采用右进右出的控制方式,导致路网容量、转向比例等指标不能客观地反映出出行者到达目的地的便捷程度。针对山地城市支路建设的特点,提出有效间距的概念,构建能够综合反映交叉口转向、路段绕行和小区内部步行时间的道路网连通效率指标,并通过模拟分析得到支路有效间距的最优值。研究表明:支路有效间距宜控制在200 m以内,且最优指标值随着步行速度的增加而单调上升;当支路非直线系数增大时,提高交叉口密度有助于保障道路网络的连通效率。

关键词: 道路网络; 支路有效间距; 连通效率; 山地城市

Effective Spacing Between Local Roadways in Mountainous Cities

Peng Ting, Hu Yiliang, Zhang Jingyu, Li Xue

(Chongqing Transport Planning Institute, Chongqing 401147, China)

Abstract: Reasonable control of planning indicators of local roadway system plays an important role in smoothing the microcirculation of urban traffic and improving roadway network system. In most cases, the nonlinear coefficient of roadways in mountainous cities is relatively large, and the intersections on arterial roadway are mostly subject to the right-in-right-out control modes, which results that the roadway network capacity, ratio of turning and other indicators cannot objectively reflect the convenience for travelers to reach their destination. Based on the characteristics of local roadway construction in mountainous city, this paper puts forward the concept of effective spacing and builds the roadway network connection efficiency indicators which can comprehensively reflect the time of intersection turning, road detouring, and walking inside residential communities. The optimal value of effective spacing between local roadways is obtained through simulation and analysis. The results show that the effective spacing between local roadways should be controlled within 200 meters, and the optimal indicator value monotonously increases with the rising of walking speed. When the nonlinear coefficient of local roadways increases, increased intersection density is conducive to guaranteeing the connectivity efficiency of roadway network.

Keywords: roadway network; effective spacing between local roadways; connectivity efficiency; cities situated in mountains

收稿日期: 2020-02-09

基金项目: 住房和城乡建设部软科学研究项目“开放街区背景下山地城市支路连通效率优化关键问题研究”(2018-R2-014)

作者简介: 彭挺(1987—),男,重庆人,博士,高级工程师,主要研究方向:交通网络规划。

E-mail: pt_2026@sina.cn

0 引言

城市道路网规划存在“小间距、高密度”和“大间距、低密度”两种观念之争^[1]。由于各种原因,中国不少城市更倾向于构建宽而疏的道路网系统。近年来,部分城市的道路交通呈现常态化拥堵的趋势,由

于次干路、支路(以下简称“次支道路”)微循环不畅而导致的出行路径单一、无效绕行距离较远等问题逐渐受到关注。因此,越来越多的专家和学者开始呼吁摒弃“大间距、低密度”的规划理念,但对于道路间距(或道路网密度)的最优指标值还缺乏共识。

关于道路间距(或道路网密度)的理论研

究分为微观和宏观两个层面，且多以干路系统为研究对象。在微观层面，主要从安全、效率等方面研究交叉口之间的最小(或合理)间距，注重局部效益分析。文献[2]研究了平面交叉口间距与交通安全、运行效率之间的关系。文献[3]采用VISSIM软件模拟交叉口间距与交通冲突的关系，并分析前者对路网容量可靠度的影响。文献[4-5]基于交叉口上游和下游功能区长度分析，给出城市道路交叉口角间距的推荐值。文献[6]借助VISSIM仿真软件模拟得到驶出交叉口的车辆达到稳定状态所需的最短距离。文献[7]对平行道路的实际运行状态进行相关性分析，并根据相关道路平行距离的85%分位值确定不同等级道路的合理间距。

在宏观层面，主要围绕道路网密度对建设费用和路网容量等系统效益的影响开展相关研究。文献[8]从公共汽车站布置和信号控制系统效益的角度探讨城市干路的合理密度。文献[9-10]通过理论分析得到转向比例与街区尺度成正比的结论，并基于统计数据验证了城市道路网密度的增加有利于公共交通发展。文献[11-12]以建设费用最小、道路网周转量最大为目标，构建了不同等级道路合理间距的优化模型。文献[13]基于Synchro信号配时软件仿真，发现道路网的总体效率随着路网密度的增加而呈现先上升后下降的趋势。与此同时，文献[14]基于国内外居住区的实例分析，认为应大力提高居住区范围内的道路网密度。

现有研究从不同角度给出了道路间距(或道路网密度)的推荐值，为中国城市道路网的科学规划提供了理论支撑。然而，这些研究仍存在某些不足，主要表现在：1)山地城市道路的非直线系数往往较大，而既有研究未充分考虑路段绕行带来的不利影响，导致研究结果的适用性还有待进一步考证；2)不少城市支路与干路相交时往往采用右进右出的控制方式，而现有研究大多假设交叉口采用平面信号控制；3)微观分析主要以某个路段的局部运行效率为优化目标，忽视了网络的整体运行效率，且很少考虑交叉口红灯等待时间和地块内的步行时间；4)宏观分析往往以路网容量、转向比例等为优化指标，而这些指标有时并不能客观反映出行者到达目的地的便捷程度，这在次支路连通性较差的山地城市显得尤为突出。本文针对山地城市支路系统的结构特点，提出支路有效间距的概念，采用模拟分析方法，以道路网

连通效率最大化为目标，对支路系统的规划控制指标进行优化。

1 山地城市支路有效间距指标选取

山地城市受地形和封闭小区等因素的限制，部分区域的道路非直线系数较大，导致螺旋形、S形次支道路较为普遍，尤其是临河傍山区域。在自由式道路网中，各条道路的非直线系数较大且相互之间转换不便，导致使用者的绕行现象十分严重。若以道路网密度、道路面积率和人均道路面积等与道路实际总长度直接相关的指标来表征道路网的结构特征，则无效绕行反而有助于提高路网评价指标，这与实际情况并不相符。因此，道路网密度、道路面积率和人均道路面积等指标有时无法真实反映网络的结构特征，尤其是道路崎岖的山地城市。

对于规则的方格式道路网而言，道路平均间距与道路网密度呈负相关关系，因此道路网密度与道路平均间距指标往往可以互相替代使用，即

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

式中： D 为道路平均间距/km； S 为道路网密度/($\text{km} \cdot \text{km}^2$)； N 为参数，取值一般为2.0~4.0，与道路网规模有关。

然而针对山地城市，通过道路总长度或道路网密度推算出来的道路平均间距往往并非道路的有效间距。实际上，若部分道路的非直线系数增大，道路网络的连通效率不但不能维持原有状态，反而会有所下降。因此，本文采用道路的平均有效间距指标替代传统的道路网密度指标，并将其定义为规则网络下每条路段实际长度的平均值。由于该指标考虑了道路非直线系数的不利影响，因此更能反映山地城市自由式道路网的结构特征。具体公式为

$$OL = \overline{SL_m} = \overline{\gamma_m L_m}, \quad (2)$$

式中： OL 为道路的平均有效间距/m； SL_m 为道路 m 的实际长度/m； γ_m 为道路 m 的非直线系数； L_m 为道路 m 两端点之间的空间直线距离/m。

2 既有连通效率评价指标

2.1 既有指标解释

1) 连通度。

连通度是与道路网节点数和边数有关的

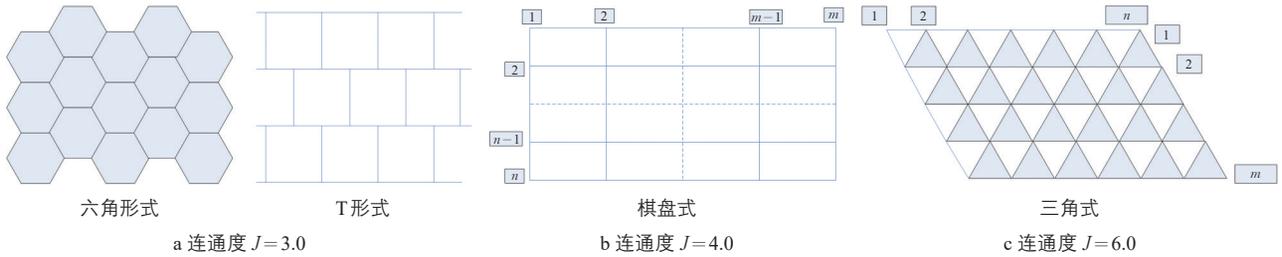


图1 不同连通度下的网络布局形式

Fig.1 Network layout under different connectivity

表1 节点连通指数计算示例

Tab.1 Example for the calculation of node connectivity index

交叉口类型	全转向十字形 平面交叉口	禁止调头十字形 平面交叉口	禁止左转和调头 十字形平面交叉口
交叉口图示			
交叉口 转向数/个	16	12	8
入口数量/ 个	4	4	4
节点连通 指数	4	3	2

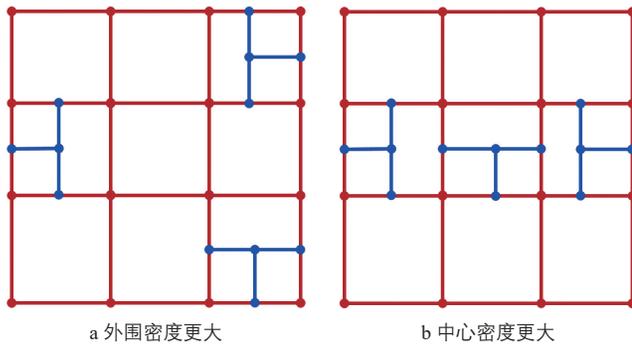


图2 组合形式不同的两个拓扑网络

Fig.2 Two topological networks in different combination forms

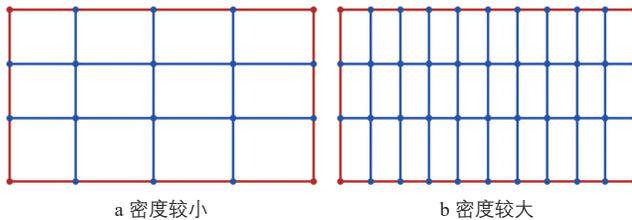


图3 密度不同的两个拓扑网络

Fig.3 Two topological networks with different densities

指标, 也称为 β 指数, 表示网络中每个节点邻接边数量的平均值。该指标用于衡量道路网各节点之间相互联系的难易程度, 连通度越高, 表明各节点之间的联系通道越多, 对应网络的成网率也越高。计算公式为

$$J = \frac{\sum_{i=1}^N m_i}{N} = \frac{2M}{N}, \quad (3)$$

式中: J 为道路网的连通度; m_i 为节点 i 衔接的路段数量/条; N 为道路网总的节点(交叉口)数量/个; M 为道路网总的路段数量/条。

2) γ 指数。

γ 指数是道路网的实际边数与其可能存在的理论最大边数的比值。对于一个连通网络来说, γ 指数一般取值为 $1/3 \sim 1$ 。当 γ 指数取值接近于 $1/3$ 时, 道路网络呈现树状分支形态; 当 γ 指数取值接近于 1 时, 网络中几乎任意节点之间均有边直接相连。计算公式为

$$\gamma = \frac{M}{3N-6}. \quad (4)$$

3) α 指数。

α 指数定义为网络的基回路数(实际边数与支撑树对应边数之差)与可能存在的最大基回路数之比。 α 指数与 γ 指数类似, 侧面反映了节点之间联系通道数量的多寡, 其取值为 $0 \sim 1$ 。当 α 指数取值接近于 0 时, 意味着没有回路, 即网络近似呈现树状结构; 当 α 指数取值接近于 1 时, 网络中各节点对应边数达到最大值。计算公式为

$$\alpha = \frac{M-N+1}{2N-5}. \quad (5)$$

4) 连通指数。

以上三个指标没有考虑交叉口各方向是否均能转向的问题, 适用于以信号控制交叉口和全互通式立体交叉口为主的都市。在普遍采用右进右出控制方式的城市或转向功能不全的交叉口较多的山地城市, 以上指标无法敏感地体现道路网络转换效率的差异。为弥补这一不足, 文献[15]提出了节点连通指数的概念, 并定义为交叉口实际转向数与交叉口入口数的比值, 而整个道路网的连通指数为各节点连通指数的平均值。即

$$K_i = R_i / T_i, \quad (6)$$

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_i, \quad (7)$$

式中： K 为道路网连通指数； K_i 为节点 i 的连通指数； R_i 为节点 i 的实际转向数/个； T_i 为节点 i 的入口数/个。节点连通指数计算示例如表1所示。

2.2 适用性分析

1) 尚缺少指标最优值的相关研究。

上述4项指标与网络整体的运行效率之间均无单调的函数关系。也就是说，节点转换越便捷，并不意味着网络的整体效率越高。如图1所示，当道路网的连通度由3.0或4.0提高到6.0时，道路之间主要表现为多路交叉口，一般认为不利于道路交通组织。也就是说，连通度、 α 指数、 γ 指数和连通指数等并非越高越好。然而，针对这些指标的最优取值问题，目前还缺少相关的理论和实证研究，导致在实践中很难简单地通过指标值的比较得到令人信服的评价结论。

2) 无法反映网络的整体效率。

既有指标忽略了网络中节点和边组合形式之间的差异，均无法体现如图2所示两个拓补网络之间的差别。实际上，图2b所示网络对于人口、就业岗位由外向内趋于集中的区域将更加有利。

当两个网络的组合形式相同、道路间距不同时，既有指标同样无法反映二者差异。如图3所示，当加密道路网时，特定出行的绕行距离、节点的转换次数等均会发生变化，即整个出行链的时间效率将有所提升或下降。因此，既有指标只能间接反映网络中各个节点转换的便捷程度，并不能体现路网整体的运行效率。

3) 无法反映路段的相关信息。

如图4所示，两个节点之间无论是通过笔直的道路相连，还是通过蜿蜒曲折的道路衔接起来，既有指标值均不会发生变化。但就实际使用而言，采用笔直道路相连时，对应的网络连通效率显然更高。

与此同时，交叉口左转、右转和直行的效率各不相同，但既有指标无法体现他们之间的差异。一般情况下，左转、直行相对于右转的效率更低，而信号控制交叉口的右转效率也往往低于右进右出控制的交叉口右转效率。

除此之外，既有指标还难以客观反映最后一公里的步行交通效率，原因在于其并不能以统一标准综合评估路段和节点的运行效率。如图5所示，当道路间距发生变化时，

不仅路段和交叉口的连通效率会受到影响，出行者在小区内部的步行距离(绿色虚线)也会随之改变，对应的步行时间也将直接受到影响。

3 道路网连通效率指标构建

对于出行者而言，起讫点之间最短路径对应的时耗是出行效率的综合体现。无论是交叉口转向不便还是路段绕行较远，抑或小区内部步行距离过长，均能在总出行时间中得以体现。因此，本文在总出行时间的基础上提出连通效率指标的概念，定义其为所有出行者的平均有效速度，计算公式为

$$AS = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N OD_{i \rightarrow j} L_{i \rightarrow j}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N OD_{i \rightarrow j} T_{i \rightarrow j}}, \quad (8)$$

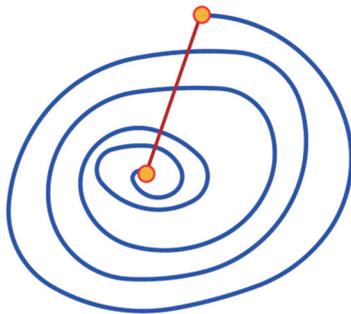


图4 节点之间衔接路段的两种不同形态

Fig.4 Two different forms of connecting roadway segments between nodes

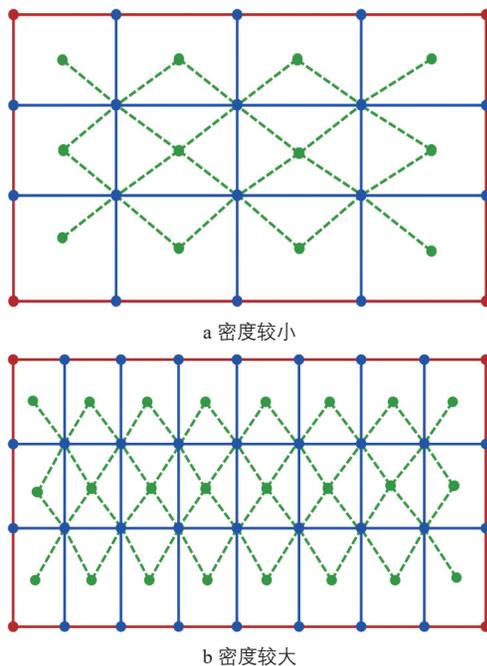


图5 道路间距对地块内步行距离的影响

Fig.5 Impact of roadway spacing on walking distance within a block

式中： AS 为连通效率/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)； $OD_{i\rightarrow j}$ 为节点 i 与节点 j 之间的客流需求量/($\text{人次}\cdot\text{h}^{-1}$)； $L_{i\rightarrow j}$ 为节点 i 与节点 j 之间的直线距离/ km ； $T_{i\rightarrow j}$ 为节点 i 与节点 j 之间最短路径对应的出行时间/ h 。

各路段行程时间与其所承担的交通量密切相关。本文在进行交通分配的基础上，根据道路通行能力、自由流速度等指标，采用

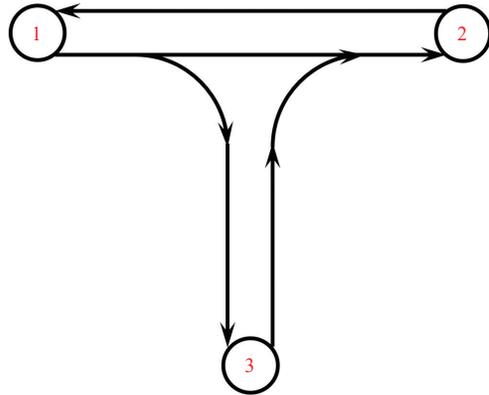


图6 右进右出交叉口转向示意
Fig.6 Right-in-right-out intersection turning

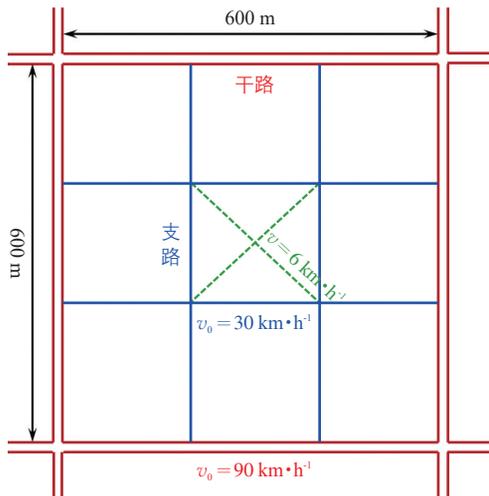


图7 模拟网络示意
Fig.7 Simulated network

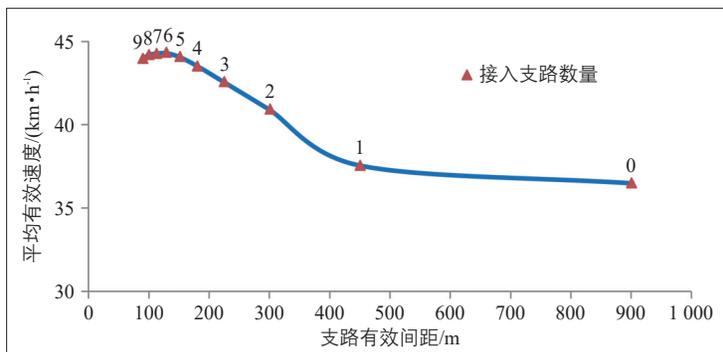


图8 支路有效间距与平均有效速度之间的关系
Fig.8 Relationship between the effective spacing of local roadways and average effective speed

美国联邦公路局路阻函数^[16]修正各条路段的实际行程时间，计算公式为

$$t(q) = t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{q}{c} \right)^\beta \right], \quad (9)$$

式中： $t(q)$ 为流量为 q 时路段的行程时间/ s ； t_0 为路段的自由流行程时间/ s ； q 为分配的路段交通量/($\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}$)； c 为路段通行能力/($\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}$)； α ， β 为参数，一般取 $\alpha=0.15$ ， $\beta=4$ 。

同时，本文在采用 Floyd 最短路径搜索算法的基础上，引入交叉口转向时间矩阵，充分考虑路段交通量对最短出行路径 $T_{i\rightarrow j}$ 的影响。以右进右出的 T 形交叉口为例(见图 6)，假设车辆右转分合流的时间损耗为 5 s，则交叉口转向时间矩阵可表示为：

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & \infty \\ \infty & 5 & 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

4 基于连通效率的支路有效间距指标优化

4.1 基本假设

4.1.1 道路交通组织相关参数

如图 7 所示，本文对模拟网络进行如下假设：

- 1) 研究范围为 $600\text{ m}\times 600\text{ m}$ 的干路围合区域，非直线系数取 1.5，即干路有效间距 900 m；
- 2) 干路与干路相交为信号控制交叉口，支路与干路相交时采用支路右进右出的控制方式。为便于比较分析，假设各条支路之间等距分布；
- 3) 干路、支路对应的自由流速度分别为 $90\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $30\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ；
- 4) 出行者由交通小区几何中心步行至小区出入口，步行速度取 $6\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ，小区出入口位于支路与支路相交的道路交叉口；
- 5) 交叉口左转、直行和右转等待时间分别取 45 s，30 s 和 5 s，干路与支路之间禁止左转，右进右出控制交叉口的干路直行方向等待时间为 0 s。

4.1.2 OD 客流需求

为更真实地模拟实际情况，本文根据道路的分布情况将研究范围划分为若干个交通小区，并假设地块的交通生成量与建筑面积成正比。具体参数为：每个地块的容积率为 3.5，高峰小时出行率为 2.5×10^2 人次/ m^2 建筑面积。

与此同时,假设干路围合区域内各小区之间的出行需求比例为5%,对外出行需求比例为95%,而外围小区之间的出行量设定为一固定值,用以反映过境交通。为便于比较分析,假定各方向的出行需求为均匀分布。

4.2 模拟结果分析

4.2.1 支路有效间距对网络连通效率的影响

在两平行干路之间分别接入0~9条支路,共构建10个模拟网络。采用TransCAD进行交通分配,得到各路段交通量、饱和度及对应的行驶时间。结合各小区之间的OD数据,采用Floyd算法计算任意两个节点之间的出行时间,并得到道路网连通效率指标AS,用平均有效速度表征。

由图8可以看出,当接入6条支路(支路有效间距为129 m)时,平均有效速度上升到最高值,此时道路网连通效率最高。具体而言,支路有效间距对平均有效速度的影响可以分为三个阶段:1)加速上升段,支路加密大幅减少绕行距离和步行时间;2)缓慢上升段,交叉口等待时间使得支路加密的边际效益减少;3)下降段,支路加密使得交叉口等待时间大幅增加。

4.2.2 最优支路有效间距

1) 敏感性分析。

分别调整步行速度、支路非直线系数、干路非直线系数,观察其对平均有效速度的影响(见图9~图11)。90次的模拟结果表明,虽然支路有效间距与平均有效速度之间的关系曲线发生变化,但当接入6条支路(支路间距为129 m)时,对应的道路网连通效率均达到最高值。因此,前文模拟所得结果在一定的参数取值范围内较为稳定,具有一定的可信度。

2) 最优支路有效间距计算。

将干路有效间距分别设置为700 m,1 050 m,1 400 m和1 750 m,并调整接入支路的数量,构建出40个模拟网络。模拟结果表明,最优支路有效间距随干路有效间距的不同而发生变化,且干路有效间距与支路有效间距的比例始终保持为7:1(见图10)。

按175 m的步长增加干路有效间距,并保持干路有效间距与支路有效间距的比例为7:1,基于参数假设,模拟得到对应网络的平均有效速度。通过回归分析可知,平均有效速度与支路有效间距之间近似表现出抛物线的函数关系(见图11)。计算抛物线的极值点,得到最优支路有效间距为171 m,对应

的干路有效间距为1 197 m。考虑非直线系数为1.5,则支路和干路对应的最优直线距离分别为 $171/1.5=114$ m和 $1 197/1.5=798$ m。

4.3 分析与讨论

4.3.1 最优支路有效间距的影响分析

保持干路有效间距与支路有效间距的比例为7:1,分别调整步行速度、支路非直线系数和干路非直线系数,观察其对平均有效

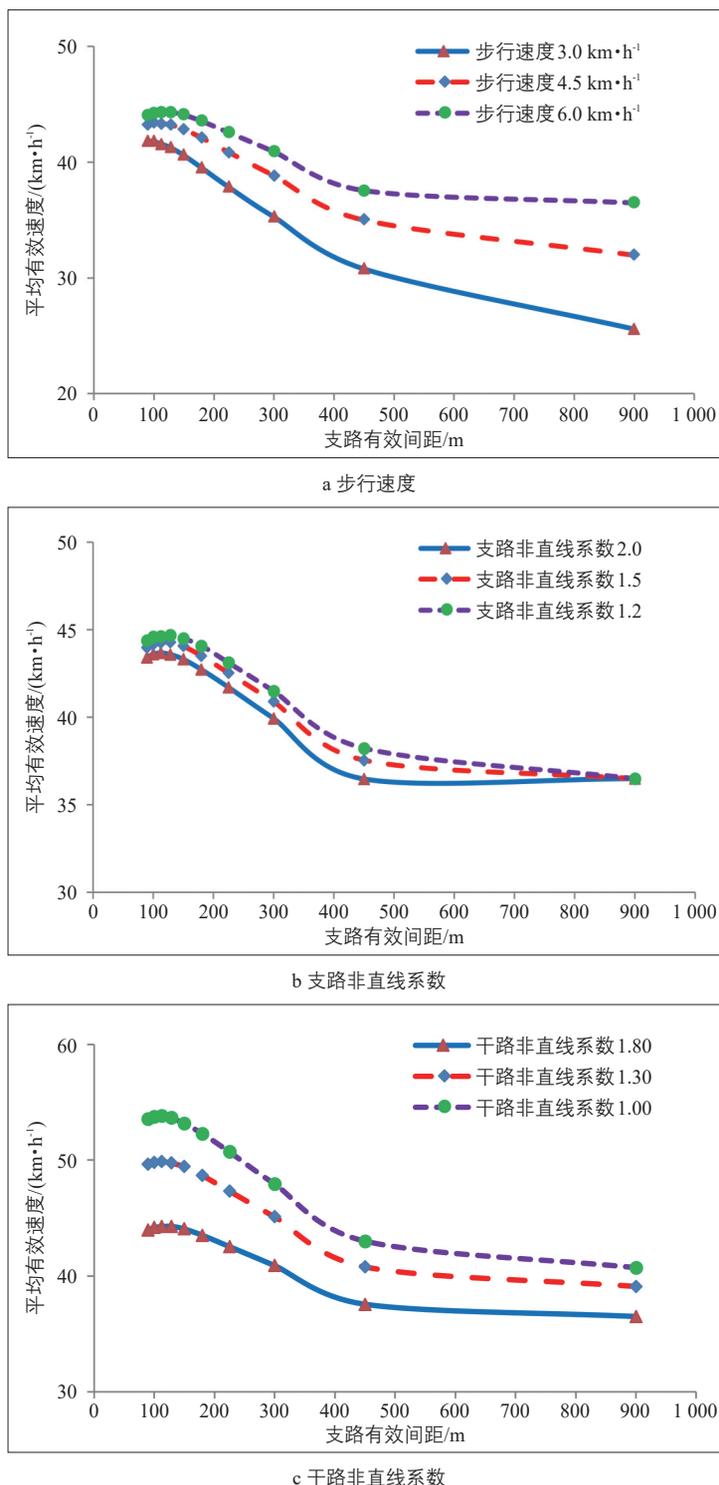


图9 不同参数取值对平均有效速度的影响

Fig.9 Impact of different parameter values on average effective speed

速度的影响(见图12)。63次的模拟结果表明,当改变步行速度和支路非直线系数两个变量值时,平均有效速度与支路有效间距之间的拟合曲线并非平行移动。说明这两个变量对最优支路有效间距的影响较为显著。

为保证所构建的最优支路有效间距与步行速度、支路非直线系数、干路非直线系数之间的函数关系式具有可信度,需要足够数量的样本数据。因此,本文同时调整3个变量的取值,共模拟并计算出27组数据。其中,通过模拟7个具有不同支路有效间距的道路网(干路有效间距与支路有效间距的比例为7:1),绘制平均有效速度指标的变化曲线,在此基础上进行极值分析即可得到一组样本数据。

采用不同组合形式构建最优支路有效间距与步行速度、支路非直线系数、干路非直线系数3个参数之间的函数关系式:

$$OL = 69.211S_1^{0.284} K_2^{0.839} K_3^{0.012} \quad (R^2 = 0.984), \quad (11)$$

$$OL = 107.347 + S_1^{1.814} + K_2^{6.012} + K_3^{1.742} \quad (R^2 = 0.878), \quad (12)$$

$$OL = 52.340e^{(S_1^{0.049} + K_2^{0.518} + K_3^{0.011})} \quad (R^2 = 0.954), \quad (13)$$

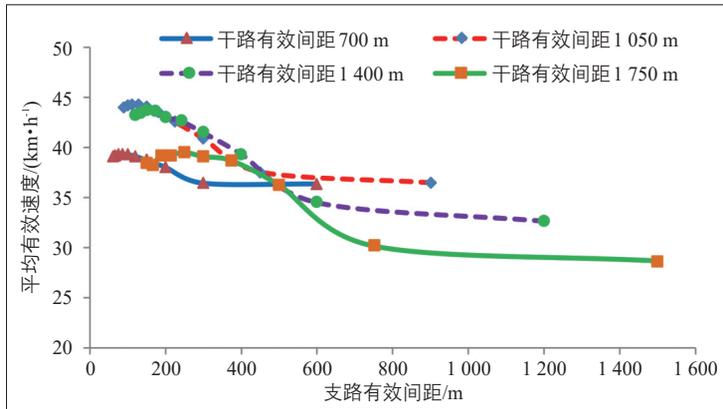


图10 干路间距对平均有效速度的影响
Fig.10 Impact of spacing of local roadways on average effective speed

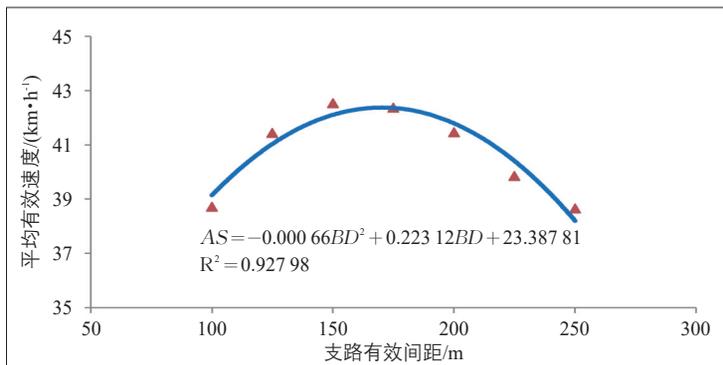


图11 最佳配比条件下支路有效间距对平均有效速度的影响
Fig.11 Impact of effective spacing of local roadways on average effective speed under optimal matching conditions

式中: OL 为最优支路有效间距/m; S_1 为步行速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$); K_2 为支路非直线系数; K_3 为干路非直线系数。

可以看出,公式(11)对应函数结构形式的最小二乘法回归效果最好。对其进行非线性回归估计,如表2所示,干路非直线系数对应的 P 值大于0.05,说明该指标对最优支路有效间距的解释效果并不显著,应予以剔除。

重新回归得到公式(14),并绘制各变量之间的关系图(见图13)。各个解释变量均通过显著性检验(见表2),且模型整体的可决系数 R^2 仍保持为0.984,说明该模型的拟合效果较好。若考虑相关参数的一般取值,本文建议支路有效间距控制在200 m以内,这与“小街区、密路网”的道路网规划要求基本一致。

$$OL = 69.449S_1^{0.284} K_2^{0.839} \quad (R^2 = 0.984). \quad (14)$$

从公式(14)可以看出,最优支路有效间距随步行速度、支路非直线系数的增加而单调上升。其中,支路非直线系数对应参数小于1,说明支路非直线系数增加1倍时,最优支路有效间距增加的倍数将小于1,这意味着对应交叉口之间的空间直线距离减小,即交叉口密度有所提高。

4.3.2 不同地面坡度条件下的最优支路有效间距

在重庆主城区内选取37处无高低起伏变化的步行通道进行实地调查,并通过Google地图获取所调查步行通道起终点的地面高程,测量两点之间的平面距离,以此计算地面的平均坡度。通过记录步行者途经起终点的时间,得到对应的平均步行速度。山地城市步行速度受地形影响较大,且与地面平均坡度呈现负相关关系。采用非线性回归方法,得到如下函数关系式:

$$S_1 = \frac{21.037}{3.227 + 1.062^P} \quad (R^2 = 0.757), \quad (15)$$

式中: P 为地面平均坡度。

与此同时,山地城市支路对应的非直线系数普遍较高,导致两交叉口之间的区间速度有所下降。针对重庆市主城区内滨江、山脚等典型区域,统计各条支路的实际路段长度和对应端点之间的直线距离,构建地面平均坡度与支路非直线系数的函数关系:

$$K_2 = 1.027e^{0.049P} \quad (R^2 = 0.809). \quad (16)$$

根据公式(14)~(16),得到最优支路有效间距与地面平均坡度之间的函数关系:

$$OL = \frac{168.695e^{0.041P}}{(3.227 + 1.062^P)^{0.284}} \quad (17)$$

最优支路有效间距随着地面平均坡度的增加而单调上升(见图14)。以滨江区域为例,假设与江河垂直、平行方向的平均坡度分别为15%和0%,则对应的最优支路有效间距约为150 m。但若考虑支路的非直线系数,道路交叉口之间的直线距离应控制在100 m以内,小于平坡条件下的114 m,这与前文的分析结论一致。

5 结论

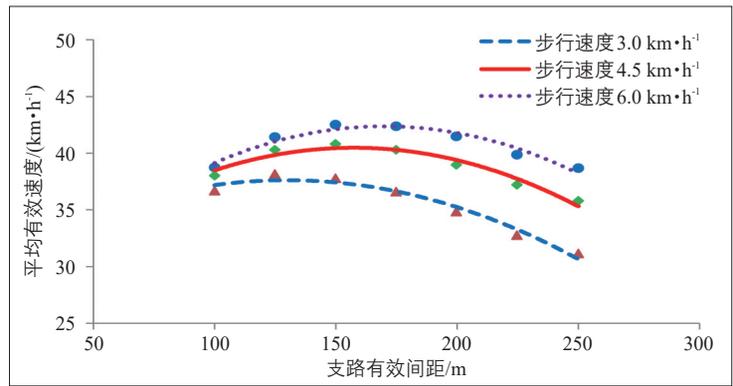
为更加真实地反映山地城市自由式道路网的结构特征,本文提出了支路有效间距的概念,并构建了平均有效速度指标以综合反映道路网络的连通效率。基于模拟分析方法,以连通效率最大化为目标,优化了山地城市支路的规划控制指标。主要结论如下:

1) 支路有效间距较大时,加密支路将大幅减少绕行距离和步行时间,使得道路网连通效率显著提高,但进一步加密支路将明显增加交叉口等待时间,使得支路加密的边际效益减少,道路网连通效率提高的速度有所下降。当支路过密时,交叉口等待时间将大幅增加,道路网连通效率反而会下降。

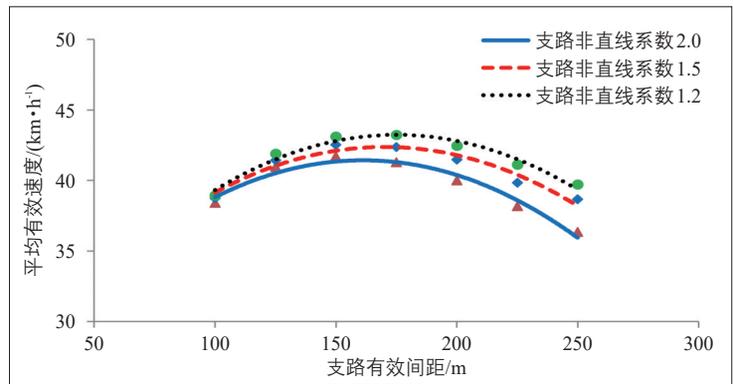
2) 建议推行“小街区、密路网”的道路网规划理念,支路有效间距宜控制在200 m以内,并尽可能保证相邻平行干路之间有5~6条支路衔接。

3) 最优支路有效间距随步行速度、支路非直线系数的增加而单调上升。但当支路路段的绕行增加时,提高交叉口密度有助于保障道路网络的连通效率。

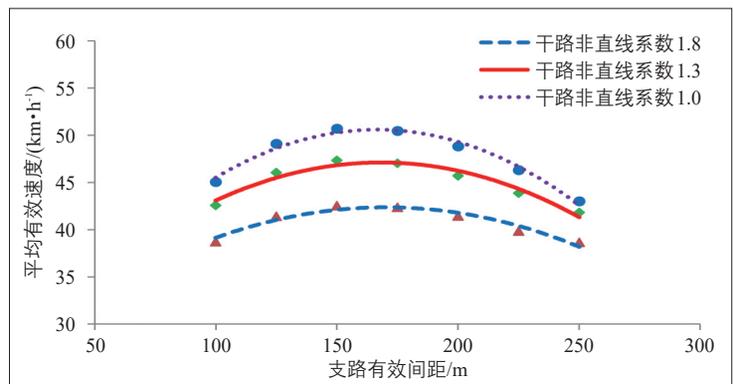
本文暂未讨论外围交通小区之间出行量、交叉口控制方式(如各种形式立体交叉口)和转向时间损耗等对道路网整体连通效率的影响,后续有必要补充相应的敏感性分析,以明确本文研究所得结论的适用范围。与此同时,山地城市受地形条件限制,部分区域的干路分布较为集中,在此基础上新增支路可能导致围合区域内建筑物布置困难并产生大量的畸形或错位交叉口,反而制约道路网络的连通效率。因此,后续还有必要从交通组织角度讨论干路和支路之间的功能差异,进一步深化最优支路有效间距和道路级配的本质内涵。



a 步行速度的影响



b 支路非直线系数的影响



c 干路非直线系数的影响

图12 最佳配比条件下不同参数对平均有效速度的影响

Fig.12 Impact of different parameters on average effective speed under optimal matching conditions

参考文献:

References:

- [1] 蔡军. 关于城市道路合理间距理论推导的讨论[J]. 城市交通, 2006, 4(1): 55-59.
Cai Jun. Discussion on Theory About Reasonable Distance Between Road Intersections[J]. Urban Transport of China, 2006, 4(1): 55-59.
- [2] 毛林锋, 陆键, 项乔君. 平面交叉口间距对道路交通的影响[J]. 交通科技, 2006(5): 71-73.
Mao Linfeng, Lu Jian, Xiang Qiaojun. Influences of Intersection Spacing on Road Traffic

[J]. Transportation Science & Technology, 2006(5): 71-73.

[3] 董红利, 徐良杰, 朱顺应, 等. 基于安全和畅通交叉口合理间距的确定[J]. 交通与计算

机, 2007, 25(6): 56-59.

Dong Hongli, Xu Liangjie, Zhu Shunying, et al. Determination of Reasonable Intersection Spacing Based on Safety and Smoothness[J]. Computer and Communications, 2007, 25(6): 56-59.

表2 最优支路有效间距的非线性回归估计

Tab.2 Nonlinear regression estimates of optimal effective spacing of local roadways

分析阶段	变量	系数	标准差	t 检验值	P 值
修正前	常量	69.210 98	1.985 318	34.861 41	0.000 0
	步行速度	0.284 021	0.013 122	21.644 85	0.000 0
	支路非直线系数	0.839 187	0.027 984	29.987 86	0.000 0
	干路非直线系数	0.012 136	0.023 170	0.523 779	0.605 7
修正后	常量	69.449 38	1.909 945	36.361 98	0.000 0
	步行速度	0.283 961	0.012 912	21.991 37	0.000 0
	支路非直线系数	0.839 369	0.027 538	30.480 20	0.000 0

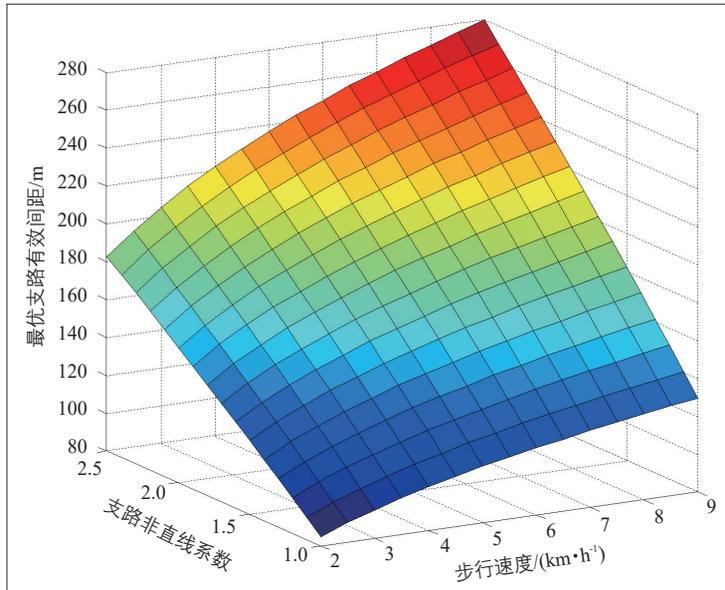


图13 步行速度、支路非直线系数与最优支路有效间距的关系

Fig.13 Relationship between walking speed, nonlinear coefficient of local roadways and optimal effective spacing of local roadways

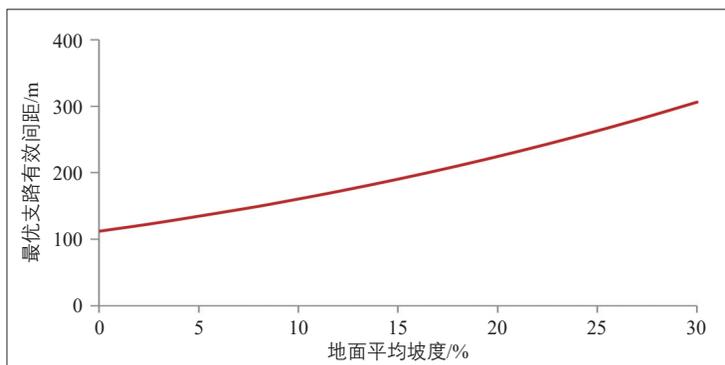


图14 最优支路有效间距与地面平均坡度的关系

Fig.14 Relationship between the optimal effective spacing of local roadways and average ground slope

[4] 卢光明, 过秀成, 周广, 等. 城市道路交叉口合理角间距研究[J]. 道路与安全, 2009, 9(4): 17-20.

Lu Guangming, Guo Xiucheng, Zhou Guang, et al. Research on the Reasonable Corner Clearance in the Urban Street Intersection[J]. Road Traffic & Safety, 2009, 9(4): 17-20.

[5] 卓曦, 施文荣, 施群. 城市干道信控交叉口最小间距计算[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(5): 81-86.

Zhou Xi, Shi Wenrong, Shi Qun. Minimum Spacing Calculation for Signalized Intersections on the Urban Arterial[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014, 14(5): 81-86.

[6] 龙雪琴, 关宏志. 基于仿真的城市道路交叉口最小安全间距研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2012, 36(3): 510-514.

Long Xueqin, Guan Hongzhi. Study on the Minimal Safety Intersection Spacing of City Road Based on Simulation[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2012, 36(3): 510-514.

[7] 王东炜, 李辉, 李岩, 等. 城市道路网络路段状态相关性与道路间距分析[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(1): 101-108.

Wang Dongwei, Li Hui, Li Yan, et al. Analysis of Road Section State Correlation and Road Distance in Urban Road Network[J]. Journal of Traffic & Transportation Engineering, 2017, 17(1): 101-108.

[8] 杨佩昆. 重议城市干道网密度: 对修改《城市道路交通规划设计规范》的建议[J]. 城市交通, 2003, 1(1): 52-54.

Yang Peikun. Discussion on Density of Urban Arterial Street Network[J]. Urban Transport of China, 2003, 1(1): 52-54.

[9] 蔡军. 转向比例与合理干路网密度研究[J]. 城市交通, 2005, 3(4): 54-58.

Cai Jun. Discussion on Ratio of Turning and Density of Urban Arterial Street Network[J]. Urban Transport of China, 2005, 3(4): 54-58.

[10] 蔡军, 路晓东. 路网密度对城市公共汽车交通发展的影响[J]. 城市交通, 2016, 14

- (2): 1-9+58.
Cai Jun, Lu Xiaodong. Impact of Road Network Density on Promoting Bus Traffic Development[J]. Urban Transport of China, 2016, 14(2): 1-9+58.
- [11] 任刚, 张水潮. 基于费用最小化的城市各级道路合理间距模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2008, 38(3): 531-534.
Ren Gang, Zhang Shuichao. Cost-Minimizing-Based Model for Reasonable Spacing of Different Class of Urban Roads[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2008, 38(3): 531-534.
- [12] 陈雷进. 基于供需平衡的高密度开发区域道路网密度研究[J]. 交通标准化, 2010(213): 113-117.
Chen Leijin. Study on the Road Network Density of Urban High Density Developed Regions Based on Supply-Demand Balance [J]. Transport Standardization, 2010(213): 113-117.
- [13] 叶彭姚, 陈小鸿. 基于交通效率的城市最佳路网密度研究[J]. 中国公路学报, 2008, 21(4): 94-98.
Ye Pengyao, Chen Xiaohong. Study of Urban Optimal Density of Road Network Based on Transportation Efficiency[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(4): 94-98.
- [14] 谢英挺. 居住区道路指标与路网模式研究[J]. 规划师, 2008, 24(4): 26-30.
Xie Yingting. Research on the Indexes and Pattern of Residential Area Road Networks [J]. Planners, 2008, 24(4): 26-30.
- [15] 周涛, 但媛, 朱军功. 城市道路网连通性评价指标探析[J]. 城市交通, 2015, 13(1): 60-65.
Zhou Tao, Dan Yuan, Zhu Jungong. Assessment of Urban Roadway Network Connectivity[J]. Urban Transport of China, 2015, 13(1): 60-65.
- [16] 周继彪, 王露, 孟现勇, 等. 道路阻抗函数模型及适用性研究[J]. 交通信息与安全, 2013, 31(2): 14-17.
Zhou Jibiao, Wang Lu, Meng Xianyong, et al. Road Impedance Function Model and Its Applicability[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2013, 31(2): 14-17.

(上接第73页)

- [11] 汤鹏飞, 向京京, 罗静, 等. 基于改进潜能模型的县域小学空间可达性研究: 以湖北省仙桃市为例[J]. 地理科学进展, 2017, 36(6): 697-708.
Tang Pengfei, Xiang Jingjing, Luo Jing, et al. Spatial Accessibility Analysis of Primary Schools at the County Level Based on the Improved Potential Model: A Case Study of Xiantao City, Hubei Province[J]. Progress in Geography, 2017, 36(6): 697-708.
- [12] 张伟强. 基于地理设计的学校分布评估与趋势分析: 以重庆市南川区小学为例[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
Zhang Weiqiang. School Distribution Evaluation and Trend Based on Geographical Design[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [13] 罗蕾. 湖北省仙桃市农村公共医疗服务可达性与均等化研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2015.
Luo Lei. Study on the Accessibility and Equalization of Rural Public Medical Services in the Xiantao County of Hubei Province [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2015.
- [14] 姚焯. 基于可达性与公平性的上海市静安区社区体育设施空间分布特征及优化对策研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
Yao Ye. Study on the Spatial Distribution Characteristics and Optimizing Strategies of Community Sports Facilities in Jing'an District of Shanghai Based on Accessibility and Equity[D]. Shanghai: East China Normal University, 2019.
- [15] 刘楠, 王志恒, 李香颖, 等. 天津市市内六区基础教育资源空间可达性评价[J]. 地理空间信息, 2020, 18(1): 77-80+97.
Liu Nan, Wang Zhiheng, Li Xiangying, et al. Spatial Accessibility Assessment of Basic Education Resource in the Six Districts of Tianjin City[J]. Geospatial Information, 2020, 18(1): 77-80+97.