

文章编号: 1008-2786-(2020)5-740-11

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000551

山地城市轨道交通中心型站点影响区立体紧凑度研究

王泽林^{1,2}, 何 媛¹, 何 艳¹, 周君正¹, 袁 红^{1*}

(1. 西南交通大学 建筑与设计学院, 成都 611756; 2. 皇家墨尔本理工大学 建筑与城市学院, 墨尔本 VIC 3001)

摘 要: 山地城市受复杂的地形条件制约, 空间资源相对匮乏, 在中国城市以公共交通为导向的建设策略推动下, 紧凑度研究对山城轨道中心型站点影响区的城市空间结构优化和集约式发展具有重要意义。目前万有引力紧凑度法仅能计算站域的平面紧凑性, 本文分析了国内外山城地形起伏度与站点影响区建筑间距、建筑密度、路网结构之间的属性作用机制, 建立了山城轨道中心型站点影响区立体紧凑性测度模型; 基于日本东京站、香港中环站, 重庆沙坪坝站等 11 个相关站点的紧凑度研究; 总结山城轨道中心型站点影响区建筑间距临界值模型, 量化山地紧凑城市的空间属性; 以重庆沙坪坝站和贵阳喷水池站为例, 从经济性和高效性两方面建立山城中心型站点影响区立体紧凑度测度指标体系, 探索其影响机制。研究发现: 站点影响区的紧凑度与用地功能的多样性呈正相关; 过高的建筑密度虽然可以增强站域连通性, 但会限制站域空间的组合方式; 山城区域平均坡度越大, 道路网络异质性概率越高, 所得到的区域紧凑度两极化愈重。本文突破了以往依靠平面数据计算城市紧凑度的局限性, 为山地城市立体紧凑度量化研究提供了测度方法, 也为站点区域空间立体化、紧凑化发展提供了有力的技术支撑。

关键词: 山地城市; 紧凑城市; 轨道中心型站点影响区; 万有引力测度法; 立体紧凑度模型; 地形起伏度; 建筑间距临界值

中图分类号: TU984.18; TU984.2

文献标志码: A

伴随着我国城镇化的快速发展, 城市蔓延现象给社会经济发展带来的消极影响已被广泛证实^[1]。紧凑城市理念始于 20 世纪 70 年代, 欧洲共同体委员会(CEC)在《欧洲城市环境绿皮书》中强调“通过高密度的城市形态、功能混合、发展公共交通, 提高市民的生活效率与质量”^[2]。纽曼^[3](Neuman)认为紧凑城市是阻止城市蔓延的有效模式, 其提倡多功能性质的城市设施与环境之间相互协作, 在有限的空间中创造更多的可能。作为城市可持续发展的

一种途径, 紧凑城市的内涵不断丰富, 在不同的定义及概念框架上, 形成了多样化的综合测度指标^[4]。国内学者认为紧凑城市的发展策略是对绿色环境的保护、较低的能源消耗水平、公共服务设施有更好的可达性、效率化的生活水平及鼓励步行与自行车的使用等^[5]。

TOD 理论(Transit-Oriented Development)作为公共交通引导城市空间发展的模式, 由新城市主义代表人物彼得·卡尔索普^[6](Peter Calthorpe)提出,

收稿日期(Received date): 2020-07-04; **改回日期**(Accepted date): 2020-10-12

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目: 山城轨道影响区地下空间立体紧凑设计理论研究——基于大数据及 3D GIS 技术(51678486)。[National Natural Science Foundation of China(51678486)]

作者简介(Biography): 王泽林(1991-), 男, 贵州贵阳人, 硕士, 主要研究方向: 城市设计与规划、智慧城市、轨道站点区域城市设计。[WANG Zelin(1991-), male, born in Guiyang, Guizhou province, Master, research on urban design and planning, smart city, the urban design of affected area of railway station] E-mail: 1961810788@qq.com

*** 通讯作者**(Corresponding author): 袁红(1982-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 紧凑城市、地下空间规划与设计、轨道站点区域立体化城市设计。[YUAN Hong(1982-), female, Ph. D., associate professor, specialized in compact city, smart city, underground space planning and design, the urban design of affected area of railway station] E-mail: yuanyuqing0106@foxmail.com

其目的是控制城市的无序蔓延。TOD 将轨道站点及环绕在其周围的公共空间与设施组成一个布局紧凑、功能混合、倡导公交出行的城市区域^[7]。大量研究证明,城市紧凑度与 TOD 的建设息息相关^[8-9]。轨道中心型轨道站点影响区是城市矛盾最突出的区域,作为城市空间重要的组成部分,其紧凑度水平已成为城市空间生活效率化的衡量标准之一^[10]。城市需要重点发展公共交通,促进车站周边据点式复合功能的开发^[11]。伯顿^[12] (Burton) 主张利用轨道节点调节城市土地混合功能,缓解社会隔离。站域空间的紧凑形态影响了轨道系统分担城市的总出行比例^[13]。

我国约 41.67% 的陆地面积是山地^[14],山地城市建设用地的供需矛盾十分突出^[15]。山地城市的立体紧凑性,对山城的可持续性发展起着推动作用,是促进城市精明增长的重要条件^[16]。目前国内外对城市紧凑度的研究主要集中在二维的测度模型及量化指标,山地城市的紧凑度量化表征受此局限,所得出的结论大多基于二维框架上的推导和演算^[17]。与平原城市相比,山地城市的竖向空间发展与测度研究具有重要意义^[18]。中国大部分土地面积为山地,山地城市的紧凑型发展对中国紧张的土地资源利用起到缓冲作用^[19]。目前城市区域紧凑度研究多以定性研究为主^[1],侧重于提出城市设计策略、空间效能优化和空间形态特征研究,当前国内外对山地城市轨道交通站点区域立体紧凑度的定量研究较为匮乏,尤其缺乏在不同高差关系的城市基面上紧凑度的评价指标及影响因素值域的研究。本文聚焦我国典型的山地城市——重庆和贵阳,利用高清地图 (Bigemap) 导出城市目标中心型站点影响区的应用程序编程接口 (Application Programming Interface, API) 矢量数据。通过完善阮宣廷 (Nguyen XuanThinh, 越南) 提出的紧凑度万有引力测度法 (Universal Gravity Measurement) 公式^[20],构建山地城市轨道交通站点影响区紧凑度测度模型,并基于山城不同地形起伏度条件下城市中心型站点影响区的立体紧凑度计算,提出山城目标区域建筑间距临界值的测算法则。本研究可以缓解我国空间供需矛盾等问题,为山地城市轨道交通站点的集约式发展与可持续性建设提供技术与思路的支持。

1 研究方法

1.1 基于万有引力测度法公式的立体紧凑度测度模型演化

1.1.1 城市二维平面紧凑度测算法及属性

通过建立城市空间的土地利用空间数据库,对城市的人口密度、城市核心价值、用地密度和土地类型等 11 项物理属性指标进行定义分析,总结出城市中心区是影响紧凑城市空间结构最重要的区域。万有引力的工作原理是通过建立区域内任意两个有效的建筑地理斑块 (Nolli Plan), 分别将目标区域内斑块两两连接得到各自作用力,将作用力集合并计算出引力平均值,即为目标区域的紧凑度。通过将目标区域城市地图像素化 (Pixelate), 形成由等同大小方格组成的网格结构,每一格可看作是城市地图上的“栅格细胞” (Raster Cell)。由栅格细胞形成的建筑地理斑块 i 和 j ($i = 1(1)N - 1, j = i + 1(1)N$), 其闭合区域面积分别为 Z_i 与 Z_j (约等于建筑 i 和建筑 j 的建筑底面积), 由重力定律计算两者的作用力, $A(i, j)$ 代表两个建筑之间的作用力,公式如下:

$$A(i, j) = \frac{1}{c} \cdot \frac{Z_i \cdot Z_j}{d^2(i, j)} \quad (1)$$

式中, Z_i 与 Z_j 为 i 和 j 的建筑底面积乘积值 (m^2); $d(i, j)$ 为光栅单元 (ROP, 由地图像素化处理形成的网络单元而成) i 与 j 各细胞中心之间的欧几里得 (Euclidean) 距离 (以下简称建筑间距) (m); c 为常数。

通过集合算法 $\sum A(i, j)$ 求和区域内所有作用力 A , 得到目标区域紧凑度 T , 公式如下:

$$T = \frac{\sum A(i, j)}{N(N-1)/2} \quad (2)$$

式中, $\sum A(i, j)$ 为目标区域内所有作用力 A 的集合; N 为目标区域内的建筑数量 (个)。

1.1.2 山城的轨道中心型站点影响区立体紧凑度测度模型

在山地城市环境中,需考虑城市基面的地形起伏度 (Relief Amplitude), 该量化指标可衡量地貌形态、归纳地理特征。根据国内外目前对于该指标的测度研究,城市的地形起伏度可由 6 种计算方法得到^[21]。对于重庆、贵阳这类包含横断山区的城市而

言,局地标准差算法所得结果误差值最小^[22]。通过目前 ArcGIS 技术,数字高程模型 (DEM) 数据运算而得的结果可作为城市紧凑度测度模型基础信息,其中平均坡度 (Mean Slope) 是描述地表形态的主要因子,由垂直和水平方向衡量地表的倾斜程度,是高度变化函数的最大化比率^[23]。地表上每一个点都有坡度,公式如下:

$$\text{Slope} = \arccos\left(\frac{\vec{z} \cdot \vec{n}}{|\vec{z}| \cdot |\vec{n}|}\right) \quad (3)$$

式中, Slope 为地表微分单元的法矢量 (\vec{n} 与 z 轴的夹角) ($^\circ$); z 是某点与地表曲面函数 $z=f(x,y)$ 在南北与东西向的高程变化函数。

在实际测算过程中,公式如下:

$$\text{Slope} = \arctan \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \times 180/\pi \quad (4)$$

式中, f_x 为 x 方向高程变化率; f_y 为 y 方向高程变化率。

为了方便计算,在提取平均坡度时,设置每个栅格细胞为地表倾斜测量单元,通过水平与垂直的夹角来衡量地形的倾斜程度,从而反映出地形起伏度的形态特征。公式如下:

$$\overline{\text{Slope}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{Slope}_i \quad (5)$$

式中, $\overline{\text{Slope}}$ 为平均坡度值 ($^\circ$); N 代表栅格细胞数量 (个); Slope_i (其中 $i=1,2,3,4,\dots,N$) 为每个栅格细胞的坡度值 ($^\circ$)。

万有引力公式中,两块斑块之间作用力 $A(i,j)$ 的距离为 d 值,本文通过 d 的倾斜度将二维的空间结构作用力改变为包含垂直分力作用力下的结果值 (图 1),由平均坡度值 Slope 与 d 值换算而得 $A(i,j)$ 公式如下:

$$\overline{A_{\text{Slope}}}(i,j) = \frac{1}{c} \cdot \frac{Z_i \cdot Z_j}{\left(\frac{d}{\cos \text{Slope}}\right)^2(i,j)} \quad (6)$$

式中, $\overline{A_{\text{Slope}}}$ 为山城轨道中心型站点影响区中两个斑块间的 A 值作用力; $\left(\frac{d}{\cos \text{Slope}}\right)^2(i,j)$ 为山城轨道中心型站点影响区中两个建筑间的直接间距 (m); c 为常数 (地图像素化后,栅格细胞面积为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$,故 $c=1$)。

在计算山城中心型站点影响区立体紧凑度时,公式如下:

$$T_{\text{Slope}} = \frac{\sum \overline{A_{\text{Slope}}}(i,j)}{N(N-1)/2} \quad (7)$$

式中, T_{Slope} 为山城轨道中心型站点影响区的紧凑度; N 为目标区域内建筑数量 (个)。

沙坪坝站作为典型的山城中心型轨道站点,其地形起伏度与坡度对站域紧凑度影响明显 (图 1)。 $\angle A$ 为三角形 ABC 的直角, BC 为本次研究的立体紧凑度建筑作用力间距 $\frac{d}{\cos \text{Slope}}$,由山地坡度所形成的间距直线偏移角度为 $\angle C$, AC 为原万有引力公式中作用力的平面二维建筑单元间距 d 。依据公式 (6), BC 为 $\overline{A_{\text{Slope}}}(i,j)$, AC 为 $A(i,j)$ 。并由公式 (7) 计算目标区域中 A 值作用力的集合 $\sum \overline{A_{\text{Slope}}}(i,j)$ (图 2),由于数据量庞大,为了提高图示理解性,只提取了沙坪坝站影响区范围内 160 个建筑点,其中被选建筑底面积均为 900 m^2 及以上。

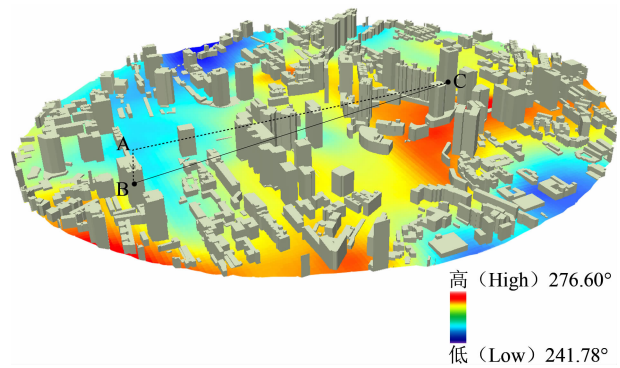


图 1 重庆沙坪坝站影响区 (800 m 半径)

山地立体紧凑度可视化 3D 模型

Fig. 1 A visual 3D model of three-dimensional mountain compactness in the affected area (800 m in radius) of Shapingba Station in Chongqing, China

通过 ArcGIS 中导出的目标区域坡度值,从红到蓝依次坡度递减 (图 1),最高度数达到 276° ^[1]。从公式 (6) 看出,当目标区域内地形的平均坡度 Slope 越大时,其 $|\cos \text{Slope}|$ 值越小^[2],所以 $\left(\frac{d}{\cos \text{Slope}}\right)^2(i,j)$ 越大,则栅格细胞 i,j 间的作用力 $\overline{A_{\text{Slope}}}(i,j)$ 越小,若目标站点影响区范围内的建筑数量 N 为定值,则区域紧凑度 T_{Slope} 越小,反之越大。由公式 (7) 可看出,区域范围内的紧凑度同时也受建筑数量 N 所影响,当目标区域内建筑数量 N 过高时,即使平均坡度 Slope 较高,区域紧凑度依然会较低, Slope 与 T_{Slope} 将会呈现正比关系,但无论正比或是反比,紧凑度结果均处于极端 (过高或过低) 数值。此结果与

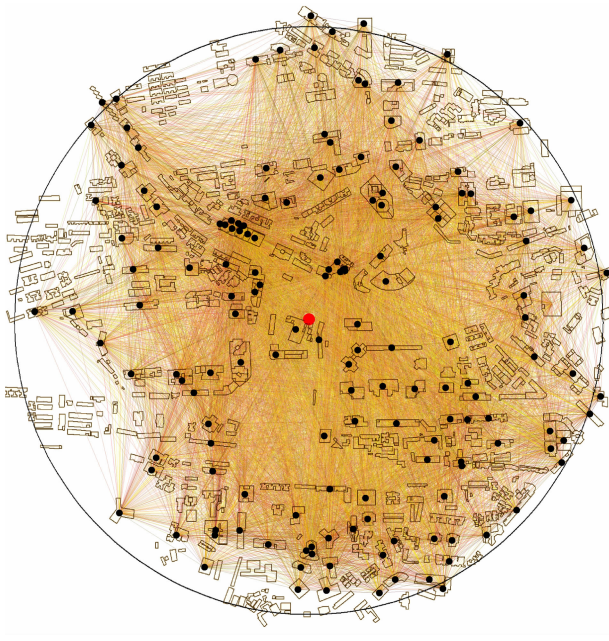


图 2 重庆沙坪坝站影响区(800 m 半径)
紧凑度作用力值连接线

Fig. 2 Connection line of compactness force A value in the affected area (800 m in radius) of Shapingba Station of Chongqing, China

众多紧凑城市研究者在由山形地貌条件下对城市紧凑度所产生的异质性结论相一致^[24-25],即山城紧凑度 T_{Slope} 普遍与其它地形较为平缓的城市区域相比分布两极化严重(图 3)。

当平原城市和坡度较缓的区域进行平均坡度计

算时,所得结果值会与山地城市截然不同,并且文中沙坪坝站的紧凑值在合理范围内,这与所得结果吻合,即平均坡度较低的区域紧凑度 T_{Slope} 两极化偏弱。其次,不论平原城市或山地城市,都会有坡度较高和较低的区域,本文为了研究山地城市不同地段的地貌条件,全面地整理了山地城市的各类轨道中心型站点影响区紧凑度(表 1)。

表 1 城市轨道交通中心型站点影响区范围内紧凑度

Tab. 1 Calculated values of compactness in the site-affected area of urban rail central stations

目标站点影响区	A 值作用力数量	平均坡度/(°)	紧凑度
大坪站	920046	5.58	348.53
贵阳北京路站	488566	3.29	492.81
贵阳国际会议中心站	20100	4.03	110.62
观音桥站	1017451	5.13	887.09
香港中环站	1048576	6.62	528.37
较场口站	1112589	8.74	946.84
临江门站	1016025	7.90	334.04
东京站	709836	1.26	696.05
南坪站	350703	4.02	378.71
沙坪坝站	513591	3.20	697.61
两路口站	613278	8.22	897.36
贵阳喷水池站	486591	6.56	806.53
杨家坪站	421821	3.64	833.79

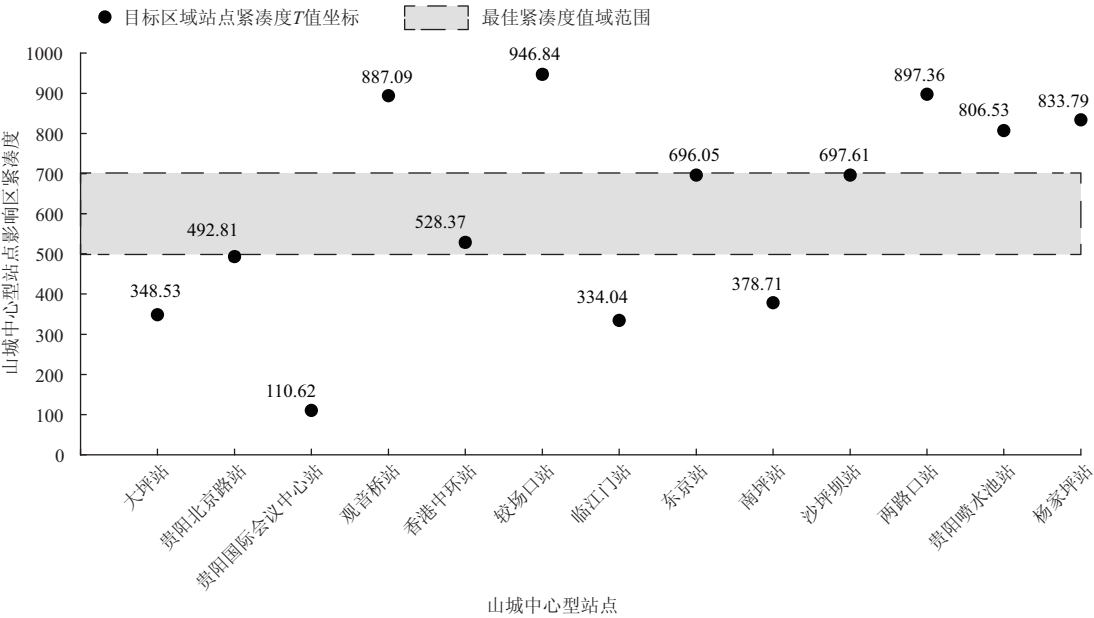


图 3 目标城市轨道交通中心型站点影响区紧凑度散点图

Fig. 3 Scatter plot of the compactness in the site - affected area of the selected urban rail central stations in target cities

1.1.3 紧凑度临界值计算模型

依据此研究结论,假设紧凑城市最佳紧凑度为已知自变量 T ,且 T 等于 T_{Slope} 。根据公式(7),由山城立体紧凑度公式 $\overline{T_{\text{Slope}}}$ 算出目标区域内的相互引力集合 $\Sigma \overline{A_{\text{Slope}}}(i,j)$,再以建筑数量为定量,由公式(6)算出每两个建筑间的平均作用引力 $\overline{A_{\text{Slope}}}(i,j)$,以建筑间距 d 为因变量,山城平均坡度,求得山城目标区域范围内建筑单元个体之间的平均最佳间距值域 d_r ,公式如下:

$$d_r(i,j) = \left| \sqrt{\frac{2 \cdot Zi \cdot Zj_{\max}}{T(N-1) \cdot c} \cdot \cos \overline{\text{Slope}}} \right| \quad (8)$$

式中, $d_r(i,j)$ 为基于平均坡度运算下目标区域内所代表的平均建筑间距绝对值; $Zi \cdot Zj_{\max}$ 为目标区域最大建筑底面积 i 与 j 乘积值(最大建筑底面积有且唯一,另一建筑底面积取其次); N 为目标轨道中心型站点影响区区域建筑数量; T 为原紧凑城市值,设 T 与 T_{Slope} 相同; $\cos \overline{\text{Slope}}(i,j)$ 为平均坡度所成的函数值。

在此方法推导过程中,由于城市目标区域的紧凑度与区域范围内建筑间的紧密程度相关。此次研究的紧凑度临界值由目标区域内建筑密度决定,所以轨道中心型站点影响区范围内建筑个体数量最少状态下,建筑个体间的最大间距距离即为该区域中的临界值。由于 $Zi \cdot Zj$ 与 $d_r(i,j)$ 成正比关系, $Zi \cdot Zj$ 的最大值即为 $d_r(i,j)$ 的临界值。所以根据目标区域内最大(设 i,j) 建筑底面积乘积值 $Zi \cdot Zj_{\max}$,即可求得区域内的建筑间距临界值 $d_r(i,j)$ 。

山城背景下,轨道中心型站点影响区范围内立体建筑间距临界值值域 $d_r[d_r^{\min}, d_r^{\max}]$ 。由此推出区域平均临界距离值域为:

$$d_r[d_r^{\min}, d_r^{\max}] = d_r \left[\left| \sqrt{\frac{2 \cdot Zi \cdot Zj}{T_{\max}(N-1) \cdot c} \cdot \cos \overline{\text{Slope}}} \right|, \left| \sqrt{\frac{2 \cdot Zi \cdot Zj}{T_{\min}(N-1) \cdot c} \cdot \cos \overline{\text{Slope}}} \right| \right] \quad (9)$$

式中, $d_r[d_r^{\min}, d_r^{\max}]$ 为山城目标区域平均临界间距值域; d_r^{\min}, d_r^{\max} 分别为紧凑城市标准条件范围下,建筑间的平均最小间距及最大间距; T_{\min}, T_{\max} 分别为城市标准紧凑度最小值与最大值。

1.1.4 立体紧凑度测度现状评估

通过目标山城轨道中心型站点影响区的平均坡度与城市立体紧凑度的期望值,构成轨道中心型站

点影响区的最佳建筑间距值域,有利于研究国内城市规划的可持续性发展策略。尽管紧凑性的发展可以有效遏制城市空间的无序蔓延,但是在城市的经济推动、社会公平、生态治理、政策实施及建设引导等仍然颇具争议^[26-27]。如部分学者认为紧凑城市对社会公平的推动作用收效甚微^[28];通过设置边界来达到紧凑城市目标是无效的城市管理政策^[29];紧凑度过高的城市可能会加剧城市生态的脆弱性,由于国内紧凑度的适用程度与西方国家具有差异性,中国需要寻找自身的紧凑城市密集度指标^[30]。

1.1.5 立体紧凑度临界值标准

依据上述 $d_r[d_r^{\min}, d_r^{\max}]$ 值域模型,本文定义轨道中心型站点影响区建筑间距在 d_r 范围内即为合理的山城区域建筑间距值。若目标区域平均建筑间距小于该值域说明目标区域过度紧凑。反之,则代表该目标区域紧凑度不够,存在城市扩散式布局现象。

日本网络型紧凑城市发展(始于1970年)迅速,尤其是以 TOD 为导向的城市发展模式^[31]。以日本东京站站点影响区作为研究对象,根据公式(7)计算得出东京站(枢纽型)站点影响区 800 m 半径范围内紧凑度为 696.06。日本东京站之所以能够成为本文的代表性中心型车站,根据国外紧凑城市分析,其车站建筑成功地塑造了 TOD 模式下,在高密度街区内满足各类公共交通间的无缝衔接,除了立体交通的步行系统外,人流可以根据不同的交通设施需求在各楼层、连廊、平台等之间通行。对于山体结构城市而言,高密度堆积的基础设施正需要立体式的空间开发。且东京站站域范围(800 m)巧妙地采用了轨道混合物业,集酒店、办公、商业、交通、停车等功能,将每个开发主体的开发利益与城市整体价值挂钩,鼓励私营开发商积极参与公共空间的营造及运营管理^[32],满足多功能一体化的发展策略。

香港以丘陵地形为城市背景,是较典型的山地紧凑城市。从规划原则、步行系统结构及用地混合策略等方面出发,香港城市的空间距离、土地多样性、密度、可达性等是影响轨道站点系统的重要形态因素^[13,33]。从中得到,香港中环站是国内紧凑度较高且合理的轨道中心型站点,研究香港中环站(中心型)站点影响区 800 m 半径范围内紧凑度同样具有代表性意义。

为了量化山城最佳建筑间距值域临界值,本文以东京站与中环站为基准,由以上综述东京站与中环站所得的最佳紧凑度值域范围(图 2)设定中环站站点影响区为紧凑城市条件下的最小半径间距 d_r^{\min} ,东京站站点影响区为紧凑城市条件下的最大半径间距 d_r^{\max} 。从而求得山城建筑平均间距值域临界值域 $d_r[8.5,46.7]$ (单位:m)。依据《城市居住区规划设计标准》GB50180-2018^[34],条式多层住宅建筑之间间距不小于 6 m,所以 $d_r[8.5,46.7]$ 作为此次研究结论之一,其适用范围满足我国相应建设规范要求。

2 山地城市的轨道中心型站点影响区立体紧凑度研究

2.1 研究范围与研究对象选取

本文以重庆沙坪坝站与贵阳喷水池站为研究对象,通过分析山地城市轨道交通中心型站点影响区立体紧凑度,对比两个站点在不同的城市经济性和高效性因素影响下,判断山城的紧缩发展策略是否满足目前中国城市的可持续性发展要求。

2.2 研究对象数据

此次研究以两个山城轨道中心型站点为圆心,800 m 半径作为站点影响区范围^[4]。研究内容包括容积率、建筑密度、商务用地占比、商务街区开放度、土地复合强度、用地功能复合率、步行路网密度、道路交叉密度、车行路网密度及路网效率。通过上述 9 项指标来衡量目标区域内建筑与环境,可以客观的反映出站点影响区发展过程对紧凑度的影响机制(表 2、表 3)。

由表 2、表 3 和公式(7)得到重庆沙坪坝站影响区(800 m)紧凑度为 697.62,由公式(8)得出该区域内平均建筑间距为 25.88 m;贵阳喷水池站影响区紧凑度为 806.53,平均建筑间距为 5.21 m。可看出沙坪坝站处于最佳紧凑度值域范围内,而喷水池站紧凑度远高于最佳紧凑度值域。据本次研究山地城市的最佳 d_r 值域范围为 $d_r[8.5,46.7]$,由此看出,重庆沙坪坝站影响区紧凑度较为合理。

2.3 山城轨道站点影响区的高效性与经济性指标

本文利用中心型站点影响区经济性与高效性影响因素,针对山城轨道中心型站点影响区,研究贵阳

表 2 重庆沙坪坝站点影响区 A 值作用力集合

Tab.2 A value force collection in the site-affected area of Shapingba Station in Chongqing, China

起点建筑序号 (i)	终点建筑序号 (j)	相互作用力 (i↔j)	相互作用力 A 值
1	2	1↔2	205.24
1	3	1↔3	935.30
1	4	1↔4	12543.05
...
237	485	237↔485	5963.46
237	486	237↔486	8902.54
237	487	237↔487	16165.80
237	488	237↔488	4152.69
237	489	237↔489	86957.33
237	490	237↔490	58472.56
...
860	911	860↔911	598412.74
860	912	860↔912	5869.36
860	913	860↔913	13586.98
...
1014	1013	1014↔1013	78523.41

表 3 贵阳喷水池站影响区 A 值作用力集合

Tab.3 A value force collection in the site-affected area of Penshuichi Station in Guiyang, China

起点建筑序号 (i)	终点建筑序号 (j)	相互作用力 (i↔j)	相互作用力 A 值
1	2	1↔2	4825.46
1	3	1↔3	854.68
1	4	1↔4	10252.69
...
189	427	189↔427	582519.08
189	428	189↔428	125827.17
189	429	189↔429	5984.52
189	430	189↔430	98152.15
189	431	189↔431	19561.41
189	432	189↔432	5915.17
...
743	631	743↔631	4985.84
743	632	743↔632	3418.60
743	633	743↔633	56582.49
...
994	993	994↔993	12032.77

喷水池站与重庆沙坪坝站紧凑度的区别,进而发掘出城市区域中影响区域紧凑度的属性因子。指标的构建方式为:容积率与建筑密度探索了建筑密度对轨道中心型站点影响区的影响;商务用地占比、功能复合强度探索了建筑功能的多样性对轨道中心型站点影响区的影响;公共站点覆盖率、步行路网密度、道路交叉密度、车行路网密度及路网效率探索了公共交通网络结构的效率性,并间接地反映步行道路结构的合理性(表4)。

3 结论

(1)山城中心型站点影响区用地高效性与紧凑度的自相关性

从容积率与建筑密度可以看出,在 800 m 区域内喷水池站建筑面积高于沙坪坝站。对比建筑密度数据,喷水池站的平均建筑间距 d_r 低于沙坪坝站,导致其研究范围内城市的公共活动空间局限性高。功能混合度作为衡量城市中心型站点影响区 TOD 经济能力的重要指标,贵阳喷水池站商务用地比率高于沙坪坝站,但功能混合度低于沙坪坝站,故沙坪坝站的建筑功能类别较多,生产与运营效率更完善。虽然建筑密度与用地混合度两者均为 TOD 的重要环境指标,但高聚集度的区域并且用地性质单一会将紧凑度推向极端。由此得到,区域的紧凑度与用地功能的多样性呈正相关。

(2)山城轨道中心型站点影响区路网结构对紧凑度的影响机制

过高的建筑密度虽然在一定程度上加强了区域内功能的互动与连通性,但是限制了空间的组合方式。在山城环境下,道路的修建具有挑战性,人行与

车行的空间需要遵循地形形态的变化。道路无法统一大部分尺寸与比例的规范要求,导致建筑的形态受山地影响,房屋呈聚落式堆积,最为典型的例子是喷水池站出现 900 m² 的土地范围内有 4~6 栋建筑,这也是贵阳喷水池站紧凑度过高的主要原因之一。当目标区域内平均坡度越大时,道路网络异质性程度越高,建筑结构的秩序性越弱,所得到的区域紧凑度两极化愈重。我国目前路网结构主要以方格网络道路(Gridiron Pattern)为主^[35],受地形起伏度的影响,山地城市的道路网迂回,与其他地势较为平坦的城市相比,在同一位移距离条件下,山地区域的道路由于坡度因素,道路的长度更长且倾斜度更高,路网效率较低。喷水池站的步行空间杂乱,除了主干道与次干道步行区域以外,不规范的建筑间距所形成的区域空间导致喷水池站的步行道路密度高于沙坪坝站。而沙坪坝站影响区道路符合建设要求的规范,即使沙坪坝站车行道路密度高于喷水池站,但其路网效率依然较好。由此可以看出,规范且合理的路网对于城市区域的紧凑度有积极影响。

(3)山地城市区域平均坡度与建筑密度对紧凑度的两极化影响

在本次研究中,由公式(6)可以看出,目标山城紧凑度受建筑间距直接影响。建筑之间的作用力 A 由于地形起伏度的因素,紧凑度测度方法从二维平面变为以山地环境为背景的立体测度法。山地地形通过平均坡度将建筑间距 d 改变为 $\frac{d}{\cos \text{Slope}}$,并依

据 1.1.2 所述,当目标区域内的建筑数量 N 是定值时,平均坡度 Slope 越大,紧凑度 T 越小,两者呈反比关系。基于表 1 可以看出,部分城市受地形影响,目标区域紧凑度同样出现极端化,且紧凑度与平均坡

表 4 重庆沙坪坝站与贵阳喷水池站站点影响区 9 项影响指标对比

Tab.4 Comparison of 9 impact indicators in the site-affected area of Shapingba Station of Chongqing, China and Fountain Station of Guiyang, China

站点名称	容积率	建筑密度 /%	商务用地 占比/%	功能复合 强度	公交站点 覆盖率/%	步行路网 密度/%	道路交叉密度 /(个·km ⁻¹)	车行路网 密度/%	路网 效率
沙坪坝站	2.75	23.56	11	0.54	2.07	64.43	4.86	41.78	0.05
贵阳喷水池站	5.71	35.16	19	0.18	1.59	71.58	8.06	35.11	0.02

注:(1)商务用地占比中,商务用地面积为商务建筑用地面积,不包含总建筑面积、附属用地面积;(2)功能复合强度中, m 为单个街区中的所有土地功能数量, x 为单个街区内所需要的土地功能数量, N 为街区的数量,其中 $m \leq x$;(3)公交站点覆盖率中,研究对象区域以公交站点为圆心,300 m 为半径(5 分钟步行距离),并且区域重叠部分只计算一次;(4)步行路网密度、道路交叉密度、车行路网密度及路网效率中的道路长度、道路面积等均由 OSM 为基础数据,利用 Grasshopper 中的 ELK 插件生成,从而进行数据统计。

度呈正比关系,如贵阳喷水池站、较场口站、观音桥站及两路口站。究其原因,从公式(7)可以看出,即使Slope越大,建筑之间的作用力越小,由于目标区域地形复杂且崎岖,城市建筑建设难度大,导致建筑数量 N 远低于 $\sum A_{\text{slope}}(i,j)$ 值时,紧凑度 T_{slope} 会出现高于最佳紧凑度值域的情况。即使山城建筑密度较小,也会出现紧凑度极端高值,故山城目标区域紧凑度容易出现两极化现象。

4 讨论

城市形态由扩散式转变为集中式的发展过程中,紧凑城市的理念已经成为城市精明增长的重要条件之一。本文以山城轨道中心型站点影响区为研究对象,建立立体紧凑度测度法,并推导出 $d_r[d_r^{\min}, d_r^{\max}]$ 建筑间距临界值域模型,阐述目标区域内受山地地形起伏度和万有引力紧凑度的运算机制影响下所产生的演变。一方面,本次研究目标站点影响区内所包含的建筑功能繁多,建筑性质的区别导致相应的建筑间距规范不同,以平均建筑间距来定义一个区域的立体紧凑度水平具有分析参考与对比研究价值,而对于实践而言,还需进一步的深化探索。另一方面,轨道站点影响区在山城背景下,应考虑地下空间的开发强度。地下空间与地面基层上所具备的紧凑度理应作为同一量化指标来衡量区域范围内的立体紧凑度。由于本文主要探讨的是如何基于万有引力公式演化出的新模型,从而测量山地立体紧凑度,所以对于城市地下空间的分析仍有待后续研究。

无论在城市还是社区的尺度上,紧凑度研究始终需要考虑人类的社会行为基准。在TOD的城市开发策略中,高密度、多功能的区域形成了众多指标,如经济性指标、高效性指标,下分至公共交通网络结构、步行可达性参数及功能服务半径等。一方面,以城市轨道交通中心型站点影响区为研究对象,本文主要侧重于研究立体紧凑度测度法,从而测量具有坡度特征的山地城市区域紧凑度。针对站点影响区内的社会形态、功能与活动等影响因子,与其他学者所针对站点社会性指标的研究成果相比,此方面探索还有待提高。另一方面,中心型轨道影响区800 m半径的选取符合我国相关领域研究的制定标准,但本次研究领域仅是对轨道影响区的立体紧凑

度测算,并不具备在城市宏观尺度上的研究范围。同时,轨道中心型站点影响区立体紧凑度计算公式中,平均坡度由ArcGIS中的数据属性归类而来,对于山地城市的地形形态而言,区域中不同的地形构造应该具备相应的精确数值,如根据较高地势的山体坡度与低坡度的山体地势条件下,应具备不同的A值作用力集合。在未来的研究中,希望通过学习更多软件技术来分层式分析相应数据源,从而更加精准衡量目标区域立体紧凑度。

综上,本文已初步提出山地城市的立体紧凑度测度法,基于此次研究成果,未来需要探索更多山地紧凑城市的属性因子,拓展研究对象的尺度和范围并提高可实施性,进而完善模型系统与影响机制,为我国山地城市的可持续发展建设提供科学依据。

注释:

1. 在测算坡度值时,山地坡度度数从接触面起点计算,度数呈逆时针旋转而得,且所得 $\cos 276^\circ$ 与 $\cos(360^\circ - 276^\circ)$ 绝对值相同。

2. 根据余弦函数定律,设平均坡度为 θ ,当 $\angle \theta$ 在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 时, θ 越大则 $\cos \theta$ 值越小。由于 $(\frac{d}{\cos \theta})^2$ 一定为正数,即使 θ 大于 180° ,结论依然是 θ 与 $\cos \theta$ 呈反比。故在此处设置 $|\cos \text{Slope}|$ 为绝对值与研究结论不冲突。

3. 本文所制定的中心型站点影响区800 m的半径圆研究范围是依据中国住房和城乡建设部《城市轨道交通沿线地区规划设计导则》针对城市轨道交通站点影响区范围规范所制定^[36]。

参考文献(References)

- [1] EWING R. Is Los Angeles - Style sprawl desirable? [J]. Journal of the American Planning Association, 1997, 63(1), 107 - 126.
- [2] 张文明. 生态文明:城市可持续发展的新功能主义诠释——《欧洲城市环境绿皮书》的启示[J]. 上海城市管理, 2013(2):49 - 54. [ZHANG Wenming. Ecological civilization: new functionalism explanation of sustainable urban management [J]. Shanghai Urban Management, 2013(2):49 - 54]
- [3] NEUMAN M, HULL A. The futures of the city region [J]. Regional Studies, 2009, 43(6):777 - 787.
- [4] YUAN Hong, HE Yuan, ZHOU Junzheng, et al. Research on compactness ratio model of urban underground space and compact development mechanism of rail transit station affected area [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 55(12): 102043.
- [5] 李琳. 欧盟国家的“紧凑”策略:以英国和荷兰为例[J]. 国际城

- 市规划,2008,**23**(6):106-116. [LI Lin. The compact strategy of the EU countries; example from the UK and Netherlands [J]. Urban Planning International, 2008,**23**(6):106-116]
- [6] CALTHORPE P. The next American metropolis: ecology, community, and the American dream [M]. New York: Princeton Architectural Press, 1993: 45-49.
- [7] CERVERO R, BERNICK M. Transit villages in the 21st century [M]. California: McGraw-Hill, 1997: 207-213.
- [8] JACOBSON J, FORSYTH A. Seven American TODs: good practices for urban design in transit-oriented development projects [J]. Journal of Transport and Land Use, 2008, **1**(2), 51-88.
- [9] 马婧, 骆伟. TOD 缔造生态紧凑的城市化发展[J]. 建材世界, 2012, **33**(4): 159-160. [MA Jing, LUO Wei. An ecological development of the compact city created by TOD [J]. The World of Building Materials, 2012, **33**(4): 159-160]
- [10] 潘坤, 袁红, 王智勇, 等. 重庆市中心型轨道站点地区紧凑度研究[J]. 西部人居环境学刊, 2018, **33**(1): 68-77. [PAN Kun, YUAN Hong, WANG Zhiyong, et al. Study on measurement of compactness of central type rail transportation station in Chongqing municipality [J]. Journal of Human Settlements in West China, 2018, **33**(1): 68-77]
- [11] 海道清信, 苏利英. 紧凑型城市的规划与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 156-193. [KAIDO K, SU Liying. City planning & design theory [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011: 156-193]
- [12] BURTON E. Measuring urban compactness in UK towns and cities [J]. Environment & Planning B: Planning & Design, 2002, **29**(2): 219-250.
- [13] 殷子渊, 薛求理. 深港轨道站域空间紧凑度对比研究[J]. 城市规划, 2016, **40**(3): 346-354. [YIN Ziyuan, XUE Qiuli. Comparative research on compactness of metro station areas in Hong Kong and Shen Zhen [J]. City Planning Review, 2016, **40**(3): 346-354]
- [14] 江晓波. 中国山地范围界定的初步意见[J]. 山地学报, 2008, **26**(2): 129-136. [JIANG Xiaobo. Preliminary study on computing the area of mountain regions in China Based on geographic information system [J]. Mountain Research, 2008, **26**(2): 129-136]
- [15] 吕志强, 邓睿, 卿珊珊. 大型山地城市建设用地空间扩展及地形分异[J]. 水土保持研究, 2017, **24**(1): 232-238. [LYU Zhiqiang, DENG Rui, Qing Shanshan. Spatial expansion and topographic differentiation of urban construction land in large mountainous cities [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, **24**(1): 232-238]
- [16] 赵景伟. 紧凑城市形态下地上地下空间整合原则初探[J]. 地下空间与工程学报, 2012, **8**(3): 449-454. [ZHAO Jingwei. An introduction to integration principles of the land and underground spaces in compact city [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, **8**(3): 449-454]
- [17] 董贺轩. 立体城市: 空间营建理论与实践[M]. 南京: 东南大学出版社, 2017: 123-145. [DONG Hexuan. Three-dimensional city: space construction theory and practice [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2017: 123-145]
- [18] 陈力然. 基于紧凑城市理论的山地小城镇新城拓展城市设计研究——以川渝地区为例[D]. 重庆: 重庆大学, 2014: 32-33. [CHEN Liran. Study on the urban design for new town areas of mountainous small towns based on compact city—taking Sichuan and Chongqing areas as an example [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014: 32-33]
- [19] 钱维娜. 基于紧凑模式的山地城市中心区旧城更新城市设计策略与方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011: 36-38. [QIAN Weina. The Tactic research of mountainous city's central regeneration based on the compact mode [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011: 36-38]
- [20] THINH X N, ARLT Günter, HEBER Bernd, et al. Evaluation of urban land-use structures with a view to sustainable development [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2002, **22**(25): 475-492.
- [21] 杜朝正. 基于 ArcGIS 的坡度分析[J]. 资源开发与市场, 2009, **25**(1): 19-20. [DU Chaozheng. Slope analysis based on ArcGIS [J]. Resource Development & Market, 2009, **25**(1): 19-20]
- [22] 蒋好忱, 杨勤科. 基于 DEM 的地形起伏度算法的比较研究[J]. 水土保持通报, 2014, **34**(6): 162-166. [JIANG Haochen, YANG Qinke. Algorithm comparison of relief amplitude based on dynamic effect model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, **34**(6): 162-166]
- [23] 韩富江, 王德刚, 丁维凤, 等. DEM 栅格单元地形异质性的量度指标研究[J]. 地理与地理信息科学, 2010, **26**(4): 11-15. [HAN Fujiang, WANG Degang, DING Weifeng, et al. Research on measuring index of DEM grid terrain heterogeneity [J]. Geography and Geo-Information Science, 2010, **26**(4): 11-15]
- [24] 方创琳, 祁巍锋, 宋吉涛. 中国城市群紧凑度的综合测度分析[J]. 地理学报, 2008, **63**(10): 5-15. [FANG Chuanglin, QI Weifeng, SONG Jitao. Researches on comprehensive measurement of compactness of urban agglomerations in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, **63**(10): 5-15]
- [25] 李琳, 黄昕珮. 基于“紧凑”内涵解读的紧凑度量与评价研究——“紧凑度”概念体系与指标体系的构建[J]. 国际城市规划, 2012, **27**(1): 33-43. [LI Lin, HUANG Xinpei. The research on compactness based on analyzing the meaning of “compact” constructing the system of concepts and indexes for “compactness” [J]. Urban Planning International, 2012, **27**(1): 33-43]
- [26] GORDON P, RICHARDSON W H. Are Compact cities a desirable planning goal? [J]. Journal of the American Planning Association, 1997, **63**(1): 95-106.
- [27] BURTON E. The compact city: just or just compact? a preliminary analysis [J]. Urban Studies, 2000, **37**(11): 1969-2006.

- [28] BRAMLEY G, DEMPSEY N, POWER S, et al. Social sustainability and urban form: evidence from five British cities [J]. *Environment & Planning A*, 2009, **41**(9):2125–2142.
- [29] ANAS A, RHEE H J. When are urban growth boundaries not second – best policies to congestion tolls? [J]. *Journal of Urban Economics*, 2007, **61**(2):263–286.
- [30] 汪思彤, 杨东峰. 紧凑城市的系统检讨[J]. *城市规划学刊*, 2011, **6**: 48–53. [WANG Sitong, YANG Dongfeng. Review on Compact City Studies: a sound strategy towards sustainability? [J]. *Urban Planning Forum*, 2011, **6**:48–53]
- [31] 栾志理. 共享与品质——2018中国城市规划年会论文集[C]. 北京:中国建筑工业出版社, 2018. [LUAN Zhili. Sharing and Quality – Proceedings of 2018 China Urban Planning Annual Conference [C]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018]
- [32] 韩刚, 袁家冬, 王兆博. 国外城市紧凑性研究历程及对我国的启示[J]. *世界地理研究*, 2017, **3**(1): 56–64. [HAN Gang, YUAN Jiadong, WANG Zhaobo. Foreign study on the compact cities and its enlightenments to China [J]. *World Regional Studies*, 2017, **3**(1):56–64]
- [33] 周君正. 城市轨道交通中心型站点地上地下空间紧凑性评价及优化策略[D]. 成都:西南交通大学, 2020:35–44 [ZHOU Junzheng, The research on underground space planning of the urban central type rail transit station domain [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020:35–44]
- [34] GB50180–2018, 城市居住区规划设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2018. [GB50180–2018. Planning and design standards for urban residential areas [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018]
- [35] 陈泳, 何宁. 轨道交通站地区宜步行环境及影响因素分析——上海市12个生活住区的实证研究[J]. *城市规划学刊*, 2012, **11**(6):104–112. [CHEN Yong, HE Ning. Analysis of walkable environment and influential factors in rail transit station areas: case study of 12 neighborhoods in Shanghai [J]. *Urban Planning Forum*, 2012, **11**(6):104–112]
- [36] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通沿线地区规划设计导则(建规函[2015]276号)[R]. 北京:住房和城乡建设部信息中心, 2015. [Ministry of Housing and Urban – Rural Development of the People's Republic of China (MOHURD). Guidelines for planning and design of areas along urban rail transit [R]. Beijing: Information Center of the Ministry of Housing and Urban – Rural Development, 2015]

On the Three-Dimensional Compactness in A Site-Affected Area of Urban Railway Central Station in Mountainous Cities of China

WANG Zelin^{1,2}, HE Yuan¹, HE Yan¹, ZHOU Junzheng¹, YUAN Hong^{1*}

(1. School of Architecture and Design, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. School of Architecture and Urban Design, Royal Melbourne Institute of Technology University, Melbourne VIC 3001, Australia)

Abstract: Mountain cities in China are restricted in development by complex topographical conditions and are relatively scarce in space resources. Driven by the top priority of public transportation-oriented construction in Chinese city administrations, the study of mountain city compactness is of great significance to the optimization of urban spatial structure and the intensive development of city, particularly in the site-affected areas of railway central stations of mountain cities. At present, the popular method of gravitational compactness measurement can only calculate the plane compactness in an affected space of urban railway station. In this research, it introduced a measurement model of three-dimensional compactness in the site-affected area of rail center station of mountain city, after it had analyzed a lots of cases of mountain cities in China and abroad, with focuses on the topographic relief of mountain city, and its interaction with some kinds of attributes of the influence, including building interval, building density, traffic network structure in the site-affected area of a rail station. Based on the compactness study of 11 typical rail transit stations such as Tokyo Station in Japan, Zhonghuan Station in Hong Kong, and Shapingba Station in Chongqing, it built critical value model of building interval in the site-affected area of railway central station in mountain city, and quantified the spatial attributes of compact mountain cities; Taking

Shapingba Station of Chongqing and Fountain Station of Guiyang as examples, an indicator system for measuring the three-dimensional compactness of a site-affected area of the railway central station in mountain city was established from the aspects of economy and efficiency to explore its influence mechanism. The study found that the compactness of the site-affected area was positively related to the diversity of land use functions; Too high building density can enhance the connectivity of the station domain, but it could limit the space combination mode of the station domain. The larger the average slope of the area in a mountain city was, the higher the probability of road network heterogeneity, and the more polarized the resulting localized compactness. This study breaks through the research limitations of relying on plane data to calculate the compactness of cities, and it provides a measurement method for the determination of three-dimensional compactness in mountain cities, and also provides strong technical support for the development of three-dimensional and compact space in a site-affected area of urban rail station in mountain cities.

Key words: mountainous city; compact city; the site-affected areas of railway central stations; gravitational compactness measurement; three-dimensional compactness model; topographic relief; critical value of building interval