

基于“分形网络”的黄土高原沟壑区城镇路网适宜模式研究

田达睿¹, 周庆华²

(1. 西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建大城市规划设计研究院, 陕西 西安 710055)

摘要:以榆林高新区现代城镇道路系统和米脂古城传统街巷系统作为研究案例,借助分形理论中的关联维数测度方法,对两套城镇路网系统进行分形绩效评价和比较,并通过路径构成的等级性、连接的复杂性、组织逻辑等要素的比较分析,揭示现代城镇路网与传统城镇街巷的分形差异,总结影响其分形特征的因素和空间内涵,由此提出既延续传统路径分形基因、又满足现代交通需求的黄土高原地区道路网的适宜模式与建设策略。

关键词:分形网络;黄土高原沟壑区;路网适宜模式

中图分类号: TU984

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)04-0523-07

Study on the suitable model of urban road system in the loess plateau from the perspective of fractal path

TIAN Darui¹, ZHOU Qinghua²

(1. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Institute of Urban Planning and Design XAUAT, Xi'an 710055, China)

Abstract: Road system as an important part of city is the frame of urban space and is directly related to the development of the urban structure. This paper takes the modern road system of Yulin new area and the traditional road system of Mizhi as examples, and calculates the correlation dimensions of the two road systems and reveals their differences on aspect of the fractal characteristics. In addition, it sums up several factors which influence the fractal characteristics of road system, such as hierarchy, complexity, logic and so on. Finally, the paper puts forward the suitable model of urban road system in the loess plateau which absorbs the fractal gene of traditional road system and satisfies the needs of modern traffic.

Key words: fractal path; gully region of loess plateau; suitable model of urban road system

分形理论是非线性科学的三大支柱之一^[1],主要应用于复杂系统研究。根据该理论,分形体是大自然的优化结构,其能最有效地占据空间^[2];当道路系统达到较优的分形形态时,则能形成高效地空间网络,改善城镇道路交通体系。

20 世纪的城市规划在人口与汽车骤增的影响下往往追求反分形的空间模式,导致城市路径系统的传统特色与分形效益逐渐减少^[3]。黄土高原地区城镇的道路系统建设情况相似:当地城镇路网模式的突变使传统街道系统的连接性等优势丧失,导致人们选择步行、自行车等非机动车出行的可能性也随之降低,出行便捷性受到极大影响;此外,城市道路上的公共生活与交往功能也在不断减弱,越来越多的汽车占据了街道空间。在分形视

角与分维模型的客观评价下,现代城镇路网与传统城镇路网具有怎样的绩效差异、并受哪些形态因素影响,基于此如何建构适宜于复杂地形地貌区的现代分形路网成为本文的研究重点。

1 研究对象及现状概况

陕北黄土高原地区的城镇既有传统的街巷网络模式也有现代化的道路系统模式。本文选取位于陕北黄土高原无定河河谷的榆林高新区和米脂古城核心区两套道路网系统作为比较研究对象:前者代表现代城镇路网系统,后者代表陕北传统街巷系统(如图 1~2)。

1.1 榆林高新区切片案例路网组成

榆林高新区切片案例的路网系统分为城市主

收稿日期: 2016-04-18

修改稿日期: 2017-07-10

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(51408476); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2014JM2-5075, 2014JM2-5065); 西安建筑科技大学人才科技基金(RC1629)

第一作者: 田达睿(1984—), 男, 博士, 讲师, 主要从事可持续人居环境规划与设计。E-mail: tatary-tdr@163.com



图1 榆林高新区切片案例范围

Fig. 1 Studying range of Yulin high-tech zone

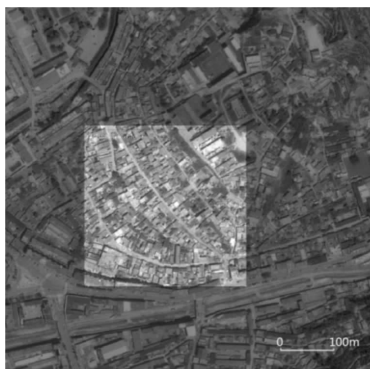


图2 米脂古城切片案例范围

Fig. 2 Studying range of Mizhi ancient town

干道、城市次干道、城市支路以及小区道路四个层级。城市干道以双向四车道或六车道为主,其中明珠大道道路红线宽度100 m,朝阳路和榆溪大道红线宽度70 m,宽阔的城市干道对城市空间分割明显;城市次干道包括北东环路和明珠环路,承担着对城市主干道交通的补充;城市支路则十分稀少,小区之间大多通过围墙相隔而非通过支路相连;小区内的道路因其封闭管理的特点而对城市交通影响有限(如图3)。

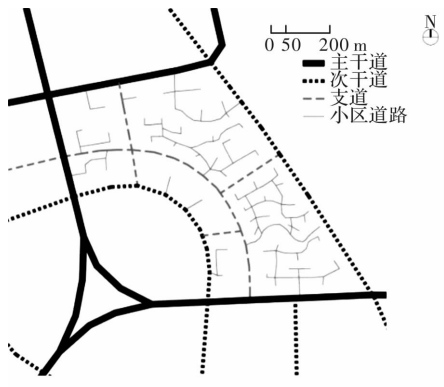


图3 榆林高新区切片案例的道路系统

Fig. 3 Road system of Yulin high-tech zone case

1.2 米脂古城切片案例路网组成

米脂古城路网主要包括街与巷两种形式,其

主要街巷格局形成于明代。本研究切片案例以西街和北街为骨架,从主街交叉口向西、北放射延伸。商铺、民居都紧紧围绕街道布置,沿街店铺林立、尺度宜人。巷道大多分布于街道两侧,尺度狭小、以步行为主,且走向顺应地形利于排水。米脂古城的道路系统是典型的传统街巷相互嵌套的网络状模式^[4],细密的街巷纹理有利于划分形式多变的院落、整合复杂的街坊邻里(如图4)。

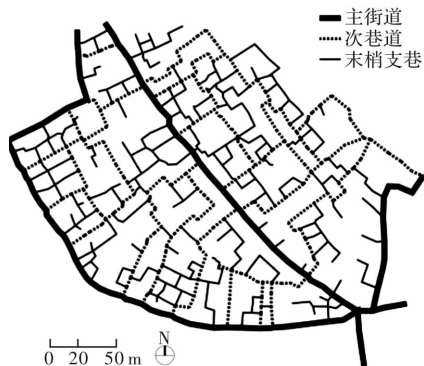


图4 米脂古城切片案例的道路系统

Fig. 4 Road system of Mizhi ancient town case

2 研究案例的路径分形特征对比

2.1 关联维数模型的空间内涵

分形理论中有若干种空间测度模型,其中“关联维数”旨在基于路径网络研究要素之间的连接关系,其为揭示城市道路系统的分布特征与空间效益提供了有效方法。该模型定义如下:假定区域内存在若干空间节点(如城镇点),任意两点间存在一个空间距离 d_{ij} ,当用一组等差序列 r 作为尺度度量集合 d_{ij} 时,每个等级 r 下对应着一定数量的距离 d_{ij} ,测算出的数量用 $C(r)$ 表示。 $C(r)$ 随着 r 的变化而变化,若存在式(1),则可判定分形关系成立^[4]。

$$C(r) \propto r^{-D} \quad (1)$$

式中: r 为等差序列尺度; $C(r)$ 为尺度 r 所对应的点对数; D 为关联维数。

首先,本研究以关联维数模型中的拟合优度值和维数值作为判定路网系统的依据之一。拟合优度是判定道路网络是否达到分形状态的重要依据,该值越接近于1分形特征越明显;关联维数 D 是反映要素之间联系强度和分布均衡性的指标:该值越小,区域内的要素分布越集聚,该值越大,区域内的要素分布越均匀、联系越均衡。另外,在模型计算中如果将每组点对的直线空间距离 d_{ij} 改为基于道路网络的实际距离 d'_{ij} ,则可得到更贴近现实城市交通情况的空间关联维数 D' 。

其次,“牛鸦维数比”是评价道路系统空间分布绩效的另一重要指标。牛鸦维数比是基于直线距离测算的关联维数 D 与基于实际路网距离测算的关联维数 D' 的比值,该值可直接反映道路系统与交通节点的连通性。牛鸦维数比介于 $0 \sim 1$ 之间:数值越小,说明道路系统在节点之间的连通性越差,各要素间的关联度和连接效率越低;反之,则说明道路网络的连通性越好,要素间的连接效率越高,趋向于直线式连通。

2.2 数据提取与计算

本研究案例以城市片区为尺度,因此以建筑出入口作为居民出行的交通起讫点,包括住宅、单位、公共设施等建筑,起讫点与道路路径相连接。将矢量化的起讫点与路径网络(如图5~6)分别导入 ArcGIS 中,先计算任意两个起讫点之间的直线距离、再计算依托现实路网任意两个起讫点之间的路径距离,最后基于这些距离数据得出相应城镇路网的关联维数。

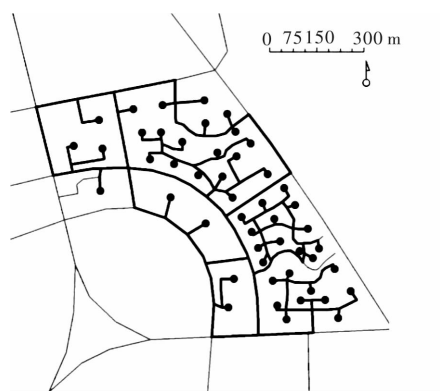


图5 榆林高新区切片案例点、线数据图

Fig. 5 Vector data of Yulin high-tech zone case

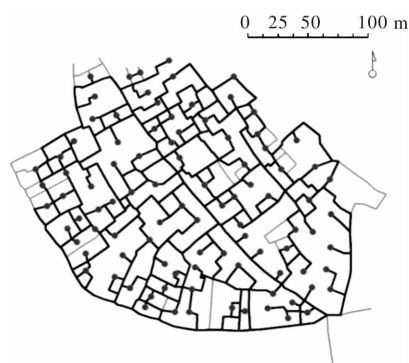


图6 米脂古城切片案例点、线数据图

Fig. 6 Vector data of Mizhi ancient town case

2.3 空间关联维数对比

首先,空间关联维数的拟合优度 R^2 大小是判定研究对象分形特征明显与否的重要指标。依据直线空间距离测算,榆林案例道路系统的关联维数的拟合优度 R^2 为 0.892,米脂案例街巷系统的关

联维数的拟合优度 R^2 为 0.955(如图7~8);依据实际路径测算,榆林案例的拟合优度 R^2 为 0.945,米脂案例的拟合优度 R^2 为 0.949(如图9~10)。米脂古城街区巷系统的分维拟合优度均大于榆林高新区道路系统的分维拟合优度,可见,米脂古城路网系统比榆林高新区道路系统具有更明显的分形特征。

其次,牛鸦维数比可以反映交通起讫点与路径网络的耦合程度与实际效率。依据直线空间距离测算,榆林案例道路系统的关联维数为 1.322,米脂案例街巷系统的关联维数为 1.492(如图7~8);依据实际路径测算,榆林案例的关联维数为 1.587;米脂案例的关联维数为 1.609(如图9~10)。进而求算各案例的牛鸦维数比:榆林道路系统为 0.833,米脂街巷系统为 0.928。后者高于前者,说明米脂案例街巷网络的分布与直线空间距离的耦合性比榆林案例更高,若基于实际的路网系统,米脂古城街巷网络的通达性强于榆林高新区、居住点之间的联系比榆林高新区更便捷。总体而言,米脂案例路径系统的分形绩效优于榆林案例的路径系统。

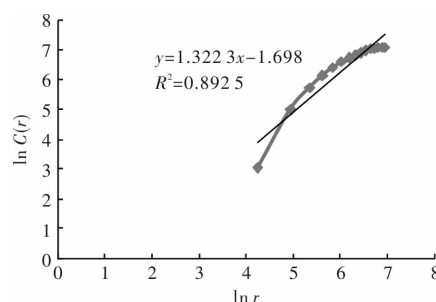


图7 榆林新区关联维数(按直线距离计算)

Fig. 7 Correlation dimension by linear distance of Yulin

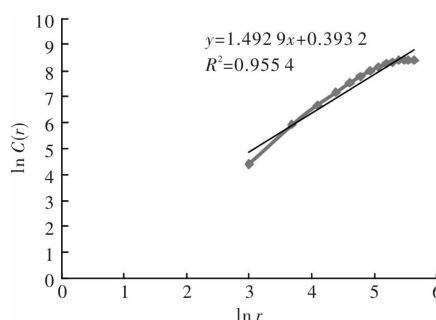


图8 米脂古城关联维数(按直线距离计算)

Fig. 8 Correlation dimension by linear distance of Mizhi

3 路径分形特征的影响因素分析

通过对比古城与新区两套路网的等级、网络形态、组织逻辑等内容,揭示道路系统的分形空间内涵,并探寻影响路径分形特征的因素。

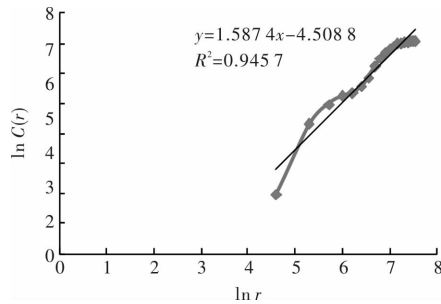


图9 榆林新区关联维数(按实际路径计算)

Fig. 9 Correlation dimension by real distance of Yulin

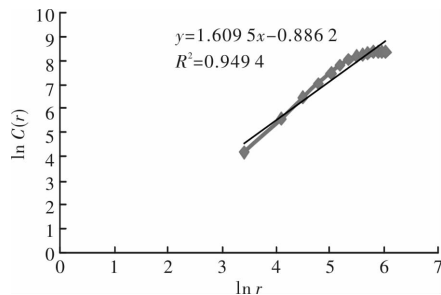


图10 米脂古城关联维数(按实际路径计算)

Fig. 10 Correlation dimension by real distance of Mizhi

3.1 路径构成的等级性

道路系统的等级特征可通过不同层级的道路长度或密度指标来反映。本研究采用道路密度即单位用地面积内各等级道路的长度作为比较路网等级差异的重要数据,该指标可使两个规模尺度不同的路网系统具有可比性。先计算榆林案例和米脂案例各路网等级的长度,再分别与各案例用地面积相除得到各等级道路密度指标(如图11)。

通过对比可知:一方面,从绝对值而言,米脂古城各道路等级中的路网密度均远高于榆林高新区案例;另一方面,从等级变化趋势而言,米脂古城案例的路网密度从干道到支路,等级越低、密度越高,呈明显递增趋势;而榆林高新区案例的路网密度从干道到支路增长缓慢,缺乏等级差异。(如图11)

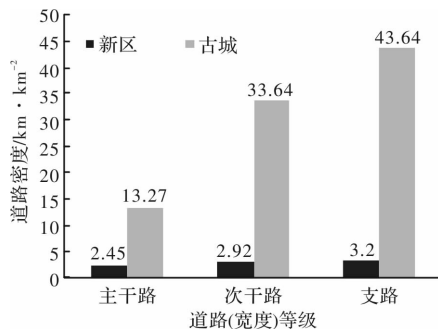


图11 新区与古城道路网等级密度

Fig. 11 Road network density of new area and ancient area

首先,城镇中的主干道往往承担着长距离的通行功能,要求其结构明确、快速畅通,配置的数量则不宜太多。米脂案例中东、西、北三条街道是贯穿全城的主要交通廊道^[5],人车混行,古城交通主要通过主街与外围城市道路相通,避免古城内密集的支路系统干扰城市干道交通。

其次,次干道主要承接主干交通的分流和支路交通的汇流,要求其能快速集散和疏导,因此其数量配置应远高于主干道。米脂案例中巷道密布,其大多与街道垂直并向街坊内部渗透。相反,在榆林案例的道路系统中,作为中间层级的次干道数量和密度明显不足,道路层级的断裂不仅加剧了城市空间的孤岛化和割裂化,且大幅增加了主干道的交通负担。

最后,支路是城市交通网络的基础和末梢,并承载着丰富的公共生活与活动。米脂古城街巷系统中分布着密集的步行巷道,它们贯穿街坊、连接着外部的街道和内部院落,奠定了古城分形街巷网络的基础。相反,榆林案例中的很多支路被小区私有道路所取代,城市地块中的末梢连通极为有限,从而弱化了路网的分形特性。

综上,影响城市道路分形特征的重要因素之一就是道路层级建构的连续性和相应等级要素数量的逐级递增性,^[4]且各层级要素具有不同的功能侧重。新区道路系统呈现出非分形特征的原因之一在于,以小汽车优先的城市主干道被过于推崇,而以慢行交通为主、且尺度宜人、充满活力的中低层级道路被忽视。

3.2 路径连接的复杂性

分形是一种跨尺度层级的复杂连通结构^[3],因此路径复杂性对道路网络的分布效率具有重要影响。其可通过道路交叉口密度与间距、连接性指数等指标反映,并由此揭示影响两套路网分形特性差异的复杂性因素。

首先,道路交叉口密度与交叉口间距能反映街道网络的细密度^[6],二者互为反比关系。交叉点密度越高、间距越小,道路的网络肌理就越细密,因为交叉口代表多条道路汇聚于此。在米脂古城和榆林高新区两套路网中随机截取200 m见方区域进行比较,经测算:前者200 m×200 m的范围内交叉口数量为148个,交叉口平均间距为15 m;后者200 m×200 m的范围内交叉口数量仅为3个,交叉口平均间距为300 m。(如图12)可见,米脂古城路网系统的交叉口数量远高于榆林高新区案例,密度相差50倍左右。

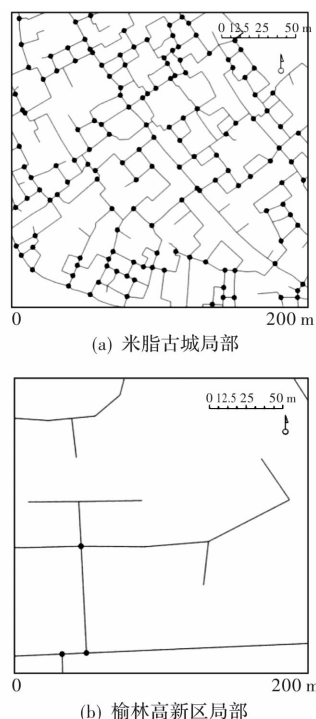


图 12 路网交叉口对比

Fig. 12 Comparison of road intersection

具体而言,米脂古城案例密集的交叉口源于细密紧致的街巷纹理,街道与巷道、巷道与巷道大多以T形相交,虽连接但不完全贯通(如图12(a)).相反,在榆林案例中,城市道路、建筑尺度巨大,道路系统因缺少支路而路网稀疏,交叉口数量也随之骤减,城市中难以形成舒适、安全、连贯的慢行网络体系,从而限制了步行与自行车的交通出行(如图12(b)).

其次,道路系统的复杂度还与任意两个交叉点之间的路径数量相关,可通过连接性指数反映.连接性指数是片区内道路交叉点之间的路径连接数与交叉点数量的比值^[7],该指标可反映等量交通节点之间路径连接的多样性和复杂性.如果路网的连接性指数较高,那么该道路系统便具有高冗余度的复杂性,即随机切断两点之间的某些路径,系统依靠路网的其他连接仍可运行和联系.

很明显,米脂古城路网系统的连接性指数远高于榆林高新区的路网.米脂古城的路径与节点十分丰富,数量极其密集,节点之间随机排列都能形成许多有效可行的路径组合;此外,历史城镇中的社会活动节点(如公园、街角广场、商铺等)大多临近街巷网络的交叉口,人类活动节点与路径节点的高度耦合使得城镇中的空间节点具有多个连接方向,两点之间往往形成多重联系.相反,榆林高新区案例的道路系统则由于道路拓宽、封闭大街区、支路不足等原因造成两点之间的连接

路径稀少、连通性极其有限.

可见,传统城镇的街巷系统具有明显的连通特征和多样性,城镇内广场、学校、社区中心等公共空间节点可通过分形路径直接贯通,方便生产生活.现代城镇的道路系统则取消了大量中间和末梢层级的连通,从而增加了交叉口间距、减少了路径连接的数量,街道场所逐渐丧失活力、道路拥堵却仍未解决.

3.3 路径组织的逻辑性

为了更清晰地揭示城市道路系统线性空间要素相互嵌套的规律和特征,需要进一步挖掘隐藏在道路网络形态背后的路径组织逻辑,通过抽象的结构关系直观反映两套路网系统的分形差异.经过对米脂和榆林两个路网案例的图形研究与形态模拟,分别抽象出叶脉状结构和树形结构两类路径组织模式.

榆林高新区案例的路网组织呈现出明显的树形特征.在该路网结构中,一条高等级的城市干道分支出一条或多条次级道路,次级道路再进一步衍生出更低层级的小区支路、组团入户路等.在这一看似严谨的层级结构中,较低等级的路径往往采用尽端形式,连接点稀缺,每一个末梢交通起点只能通过唯一的路径逐级向上行进才能与其它节点单元联系,由此形成了结构极度简化、联系却十分不便的道路系统(如图13(a)).

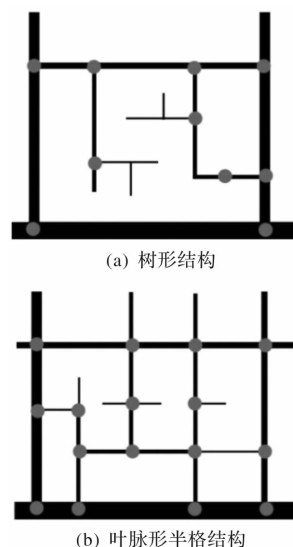


图 13 路网组织模式

Fig. 13 Mode pattern of road system

米脂古城案例的路网组织则呈现出典型的叶脉状特征.在该街巷结构中,主街道分支出大量巷道,这些巷道走向各异、曲折幽深,但大多数相互贯通形成通达的街巷体系;有些巷道衍生出连通街坊的末梢支路,进一步加强了地区的连通

性。在这复杂密布的路径结构中,最高等级的街道可能也是分离的,但中间等级的巷道则完全贯通,支路末梢则既有分离又有连通,从而使街坊邻里之间在不跨越干道或交叉口的情况下即可相通(如图13(b))。

从生成逻辑而言,树形结构是一种“一生多”的组织模式,子级要素有且只有一个母级要素对应,从而导致同一层级的要素是相互分离的,从低等级要素到另一低等级要素无法直接联系,需要返回母级甚至更高层级才行。叶脉状在数学上是典型的半格结构,即子级要素与母级要素之间是“多对多”的组织模式,这样次级要素之间就不再是单一路径连通、且不需要返回母级要素。总之,相对树状结构而言,半格结构在中间与末梢尺度层级具有更加丰富的连通性,进而揭示了传统街巷网络与现代城镇路网在分形绩效上差异较大的另一原因。

3.4 路径与节点的耦合性

道路系统与城市中各个活动节点在空间上是否搭配协调对城镇运行的综合效率具有重要影响^[8]。城镇路网的等级性、复杂性以及组织模式决定了道路网络的分形特性与绩效,但路网毕竟只是路径的空间载体,其必须与功能节点即交通发生的起讫点高度耦合,才能发挥分形网络的优势、激发城市活力。

在米脂古城案例中,高密度、复杂的街巷网络直接连接了功能多样的空间节点,这些节点往往位于或临近路径系统中的交叉点或枢纽,从而使商铺、公园、学校等各类公共服务与居住空间互通、易达。此外,米脂古城中的街巷空间不仅承担着交通职能,而且是人们日常公共活动、交流集会的市民场所,功能的多样性从节点延伸到路径中。

榆林高新区案例中的现代路网与功能节点的耦合度则不高。受功能分区的影响,功能相似的空间节点如居住或商业分别在各自大尺度街区内集聚,规模庞大,形成功能单一的巨型节点。在大尺度的功能区内,其内部的交通连接需求很少,支路系统也就非常稀少,即便增加大量的连接路径也会因缺少功能刺激而缺乏活力、形同虚设。

综上所述,城市分形路网系统是否能够充分发挥其空间效益的关键在于城市多元功能的混合以及复合功能与复杂网络的匹配。分形网络中的被连接节点应具有功能上的多样性,从而在城镇不同功能节点之间构建多层次、积极的连接。

4 黄土高原现代分形路网的适宜策略

以米脂案例为代表的传统街巷网络达到了较为高效的分形分布状态,但古城本质是以步行为主的历史街区,其道路系统形式无法完全适应现代化交通需求。因此,陕北黄土高原现代城镇道路空间布局不应简单地从形式上模仿历史街巷,而应结合传统街巷分形网络的内在组织逻辑与复杂性本质,构建适宜于当前城市交通需求的现代分形路网模式。

4.1 多样化交通导向下重构道路等级与分工

城市道路设计车速的定位对城市路网和城市形态的发展具有很大的导向性^[9]。在大多数平原城镇中,快速通行的理念促使笔直宽阔的城市干道不断替代末梢支路,导致城市尺度扩张、功能布局分散,驾车出行不可避免地成为人们的首选。如果陕北地区的城镇效仿平原城镇的交通导向与道路组织模式,其也将不得不面临小汽车交通的困境与尴尬。

因此,在地形复杂的陕北黄土高原丘陵沟壑区,中小规模的城镇不宜过于追求快速的道路网络,而应在适宜速度的交通导向下构建等级有序、分工明确、数量适宜的道路系统。道路等级由高到低、数量由少到多、功能由单一到多元,形成等级分布合理的金字塔模式^[4]。首先,快速干道因开口限制和巨大的路幅宽度而消除了大量本应富有活力的交叉口节点、冲击了传统城市的空间肌理,所以应尽量控制该等级道路的建设数量。其次,黄土高原城镇的组团化空间特征较为明显,各功能组团之间需要较强的联动和沟通,因此构建一定数量、以中等设计速度为主的次干道十分必要,其将有利于稳定道路系统结构。最后,在地形地貌较为复杂的黄土高原地区,组团或片区内应以慢行交通为支撑,尤其在丘陵坡地,步行化的垂直交通连接有助于网络化的连通,所以在组团中应鼓励构建密集的、功能多样的慢行交通网络。

4.2 以叶脉状构型加强路网复杂度与连通性

在黄土高原中、小城镇的道路交通组织中,公共交通和非机动车交通应成为居民中、短距离出行的重要支撑,依据米脂古城案例的经验,道路系统的多重连接和末梢贯通是形成慢行分形网络的必要条件。

首先,应在城镇组团内尤其是核心区提升路网密度、增加城市支路的数量,交叉口间距不宜超过150 m,从而以肌理紧密的道路网络取代稀疏

的大马路模式。其次,路网组织应形成连通性强的叶脉模式,使不同层级的道路尽量相互连通,从而在任意两个交通起讫点之间都存在多种路径选择和交通方式选择,展示出交通网络的可达性、便捷性以及尺度之间连接的自由性^[10],尤其是以步行和自行车交通为主的路径应连续且不被高等级的城市干道阻断。最后,应重视城市支路的复合功能与多样活动,通过保留或恢复街道生活激发道路空间活力,将街巷生活、场所活动融入分形的网络布局中。

4.3 丘陵沟壑地貌约束下因地制宜选线布网

陕北黄土高原沟壑纵横、地形多变,城镇道路形态难以像平原地区城镇路网一样沿格网状均匀扩展,其布局应尊重并适宜于当地地形和城镇形态。如果忽视沟壑区的自然基底和特殊地貌,则不但要干扰和破坏生态环境,而且需要花费高昂的经济成本才能满足道路工程建设的相关要求。

根据地形差异及其变化情况,设置层级明确的道路体系、选用相对应的路径模式、组成混合多变的路网是构建与自然和谐相融的分形网络的重要途径,也是复杂地貌环境中道路交通合理有序组织的有效策略。例如,从等级而言,在河谷平缓地区可布置城市主干道,使之成为连通组团的快速通廊,安全可行且成本较低;在坡度较大的地区可结合街区或邻里空间多设置次要道路或支路,鼓励利用地形起伏变化营造立体景观道路、发展步行垂直交通,促进多样化的交通末梢循环。再如,从构型而言,在缓坡或平地地段,道路系统形态可规整有序;在复杂地形区,道路型制则应有针对性地借鉴之字式、枝状尽端式或环形螺旋式等诸多不规则路网的特征^[11],城镇分形网络则会呈现出高低起伏、蜿蜒曲折的空间特色以及丰富的景观变化。

5 结论

本文针对陕北黄土高原城镇道路系统分布效率问题,引入“分形网络”的视角与思路,对陕北黄土高原地区城镇路网的适宜模式开展了探索性与创新性的研究,得出如下结论:

(1)以网络关联维数作为城镇道路系统形态分布效率的判定标准,得出了现代与传统两个类型路网的效益差别。传统城镇道路系统具有更优的分形特性,陕北地区新建的现代城镇道路系统则表现出非分形特征与连接的低效性。因此,陕北黄土

高原城镇的道路网络布局不能照搬平原地区大、中城市的规划形式与发展模式,而应结合自身地域特点,因地制宜地进行空间规划与布局。

(2)通过案例比较,寻找城镇路网形态与分形网络特征之间的关联性,分别从路径的等级性、复杂性、耦合性和结构逻辑等方面,总结并揭示了较优分形路网系统的空间影响因素及其优点。传统分形路网因采用了高复杂度和强连接性的叶脉状网络空间组织,不但具有很高的网络通达性、布局紧凑、出行便捷,而且网络路径灵活自由、与自然地形高度契合。新区道路网则因采用了树形空间组织形式,且缺乏合理的等级配置和网络复杂度,加之路径与功能不匹配,导致路网总体交通效率低下、步行出行不便、公共活力缺失等一系列问题。

(3)基于前述分析,从结构、功能、形态、布局等方面提出优化现代城镇路网的关键策略。只有通过构建密集紧凑、层级分明、网状贯通、功能适宜的分形道路系统,并大力发展公共交通、增加非机动车道和绿道,鼓励人们绿色出行,才能不断完善和优化陕北地区城镇道路的建设模式和城镇交通的组织模式。

参考文献 References

- [1] 陈彦光. 自组织与自组织城市[J]. 城市规划, 2003, 27(10): 17-22.
CHEN Yanguang. Self-organization and self-organizing cities[J]. Urban Planning Forum, 2003, 27(10): 17-22.
- [2] 陈彦光. 分形城市与城市规划[J]. 城市规划, 2005, 29(2): 33-40.
CHEN Yanguang. Fractal cities and city planning[J]. City Planning Review, 2005, 29(2): 33-40.
- [3] 塞灵格勒斯 N A. 连接分形的城市[J]. 国际城市规划, 2008, 23(6): 81-92.
SALINGAROS N A. Connecting the fractal city [J]. Urban Planning International, 2008, 23(6): 81-92.
- [4] 田达睿. 基于分形地貌的陕北黄土高原城镇空间形态及其规划方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016: 80-92.
TIAN Darui. Studies on urban form and planning method in loess plateau of northern Shaanxi based on fractal land-form[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2016: 80-92.

- China Environmental Science, 2014, 34 (9): 2328-2333.
- [11] 李巧霞, 潘纲, 王丹, 等. 太湖十八湾嗅味物质变化规律及除臭方法[J]. 环境工程学报, 2012, 6 (9): 3191-3195.
- LI Qiaoxia, PAN Gang, WANG Dan, et al. Variations and removal methods of odor substances in Shiba Bay of Lake Taihu[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(9): 3191-3195.
- [12] 马晓雁, 高乃云, 李青松, 等. 上海市饮用水中痕量土臭素和二甲基异冰片年变化规律及来源研究[J]. 环境科学, 2008, 29(4): 902-908.
- MA Xiaoyan, GAO Naiyun, LI Qingsong, et al. Source and fluctuation of trace geosmin and 2-MIB in drinking water of shanghai[J]. Environmental Science, 2008, 29(4): 902-908.
- [13] 李赞忠, 白凤荣, 刘进荣, 等. 复合型絮凝剂 PAFC 的合成与应用研究[J]. 工业水处理, 2010, 30 (12): 80-82.
- LI Zanzhong, BAI Fengrong, LIU Jinrong, et al. Synthesis and application of compound flocculant PAFC[J]. Industrial Water Treatment, 2010, 30(12), 80-82.
- [14] 邹有红, 李文兵, 周蓬蓬, 等. 聚合氯化铝铁去除微污染水体中藻类的研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(1): 108-112.
- ZOU Youhong, LI Wenbing, ZHOU Pengpeng, et al. Algae removal in micropollution water with flocculant of polyaluminum ferric chloride[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(1): 108-112.
- [15] 庞雅丽. 高锰酸钾与粉末活性炭联用去除水中嗅味物质[D]. 北京: 北京工业大学, 2011.
- PANG Yali. Study on the use of potassium permanganate in combination with powder activated carbon for the removal of taste and odor in drinking water[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011.
- [16] 翁建中, 徐恒省. 中国常见淡水浮游藻类图谱[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2010: 9-31.
- WENG Jianzhong, XU Hengxing. Chinese common freshwater planktonic algae atlas [M]. Shanghai: Shanghai science and technology press, 2010: 9-31.
- [17] 刘妍娟, 储昭升, 金相灿, 等. 螺旋鱼腥藻土臭素的产生和分布规律[J]. 中国环境科学, 2009, 29 (10): 1082-1085.
- LIU Yanyuan, CHU Zhaosheng, Jin Xiangcan, et al. Geosmin production and distribution of Anabaena sp [J]. China Environmental Science, 2009, 29 (10): 1082-1085.
- [18] 李勇, 张晓健, 陈超. 我国饮用水中嗅味物质及其研究进展[J]. 环境科学, 2009, 30(2): 583-588.
- LI Yong, ZHANG Xiaojian, CHEN Chao. Revive on the tastes and odors compounds in drinking water of China[J]. Environmental Science, 2009, 30 (2): 583-588.

(编辑 桂智刚)

(上接第 529 页)

- [5] 刘军民, 唐伊娟, 郑建栋. 传统聚落人居环境保护的现状、问题及对策研究: 以陕西省米脂窑洞古城为例[J]. 城市发展研究 2015, 22 (9): 12-15.
- LIU Junmin; TANG Yijuan; ZHENG Jiandong. Situation, question and solution on protection of vernacular settlements: cave dwelling in mizhi county as example [J]. Urban Development Studies, 2015, 22 (9): 12-15.
- [6] SALAT Serge. 关于可持续城市化的研究: 城市与形态[M]. 陆阳, 张艳, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- SALAT Serge. Cities and forms: on sustainable urbanism[M]. LU Yang, ZHANG Yan, translation. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [7] 陈延斌, 李永, 王厚军, 等. 基于分形理论的山东省城市体系非线性研究[J]. 资源开发与市场, 2008(10): 881-883.
- CHEN Yanbin, LI Yong, WANG Houjun, et al. Non-linear Study on Urban System in Shandong Province Based on Fractal Theory[J]. Resource Development & Market, 2008(10): 881-883.
- [8] 綦伟琦. 城市设计与自组织的契合[D]. 上海: 同济大学, 2006: 142.
- QI Weiqi. A new method: urban design compatible with self-organization [D]. Shanghai: Tongji University, 2006: 142.
- [9] 王中德, 赵万民. 对西南山地城市公共空间系统复杂性与复杂问题的解析[J]. 中国园林, 2011(8): 58-61.
- WANG Zhongde, ZHAO Wanmin. Analysis of the complexity and complex problems of the public space system in southwest mountainous cities [J]. Chinese Landscape Architecture, 2011(8): 58-61.
- [10] 赵珂, 冯月, 韩贵锋. 基于人地和谐分形的城乡建设用地面积测算[J]. 城市规划, 2011, 35(7): 20-23.
- ZHAO Ke, FENG Yue, HANG Guifeng. Calculating the area of urban-rural construction land based on the human-earth harmonious fractal relations [J]. City Planning Review, 2011, 35(7): 20-23.
- [11] 李云燕. 西南山地城市空间适灾理论与方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014: 45.
- LI Yunyan. Study on theories and methods of urban space adapt to disaster in southwest mountainous cities [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014: 45.

(编辑 桂智刚)