

湖北省道路网络中心性与土地利用景观格局关系分析^{*1}

银超慧¹ 郅昱³ 刘艳芳^{1, 2*} 张翔晖¹

(1. 武汉大学资源与环境科学学院, 湖北武汉 430079;

2. 武汉大学教育部地理信息系统重点实验室, 湖北武汉 430079;

3. 法国格勒诺布尔城市规划院城市规划与国际合作专业)

【摘要】:深入理解道路网络与土地利用之间的关系有助于开展可持续的土地利用与道路网络规划。引入多中心性评价模型, 对临近中心性、中介中心性、直线中心性 3 个指标, 运用 UNA 对湖北省道路网络中心性进行测度; 选取景观百分比, 香农多样性指数, 平均斑块大小, 平均形状指数 4 个景观格局指数计算土地利用景观格局特征, 并通过斯皮尔曼相关方法对两者之间的关系进行探讨。结果表明: (1) 湖北省道路网络中心性格局和空间特征各异, 整体上东高西低, 临近中心性呈现条带状分布, 中介中心性呈孔隙状分布, 直线中心性呈片状分布; (2) 景观层面上, 土地利用景观破碎化和多样化对直线中心性最为敏感, 而临近中心性与中介中心性与景观格局指数关系相对复杂; (3) 在类型层面上, 道路网络中心性与各类土地利用景观格局相关性各异, 其中高中心性区域对林地表现为鲜明的排斥和破碎化效应, 而对建设用地表现为强烈的吸引和空间集聚现象。该研究以道路网络中心性视角探讨道路网络与土地利用景观格局之间的关系, 为区域空间形态和构成及其相关影响因素提供了新的视角。

【关键词】:道路网络; 中心性; 土地利用景观格局; 多中心评价模型; 湖北省

【中图分类号】:F301.2 **【文献标识码】:**A **【文章编号】:**1004-8227(2017)09-1388-09

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201709011

道路作为区域间联系的纽带, 对区域土地利用景观格局的形成和演变起着至关重要的作用, 随着 GIS 技术的发展, 区域土地利用及道路景观生态成为研究的热点^[1~3], 定量研究道路与区域土地利用景观格局之间的关系意义重大。相关的研究主要集中在道路对土地利用变化和生态环境的影响上^[4~7], 即道路景观效应分析^[8, 9]。现有文献通常选用景观格局指数来定量描述土

¹ 收稿日期:2016-12-02; 修回日期:2017-05-05

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项项目(201511001) [Special Fund of Ministry of Land and Resource of China in the Public Interest(201511001)]

作者简介:银超慧(1992~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为土地利用规划、评价及土地资源可持续发展。E-mail:chaohuiyin@163.com

*通讯作者 E-mail:yfliu610@163.com

地利用结构和空间格局^[10]，结合道路密度^[11, 12]、道路链接度^[13]等指标来分析两者之间的关系。而相关研究中采用环度、线点率等指标来测度道路网络结构只能以行政区为统计单元，不能表现道路网络的空间拓扑结构，运用道路密度来测度时，又往往忽略了道路线在网络中的功能和作用^[14]。道路对土地利用景观格局的影响是具有空间异质性的，不同职能等级的道路在景观中产生的廊道效应不同^[11, 15]。因此，选用合适的方法和指标来测度道路空间结构以及对土地利用景观结构产生的影响尤为重要。

随着社会科学的发展，道路被抽象成网络中的节点和线段^[16]，多中心评价模型(Multiple Centrality Assessment, MCA)被广泛用于道路网络的研究中^[17, 18]。近年来，城市地理、城市规划以及经济地理相关领域的学者们积极开展道路网络中心性与城市社会经济活动空间分布^[19, 20]以及道路网络中心性与土地利用强度^[21, 22]方面的研究，并取得了丰富的成果，包括从点度中心性和中介中心性两方面测度并确定交通要点^[23]，基于道路网络中心性对轨道交通应急救援站的选址进行研究^[24]，探讨道路网络中心性与第三产业^[25]、商业网点^[26]的关系，以及在医院可达性评价中的应用^[27]。而从道路网络中心性角度去分析区域道路与土地利用景观格局之间关系的研究还不多见^[28]。

道路网络具有十分明显的层级性，较高的车流量和人流量往往集中在少数几条重要的连接线上^[14]，这种等级结构不仅影响着地理区位要素的空间分布，并能够引起社会经济活动等空间中的集聚与扩散，从而导致承载这些地理要素和社会经济活动的土地利用性质发生变化，产生区域土地利用景观的空间分异。区域或城市的中心一般位于道路网络的中心，随着道路网络的演变而发生改变^[29]。因此，道路网络中心性指标不仅考虑了道路的拓扑结构，并结合空间位置测度出区域道路网络的层级性与功能差异特征，识别出路网中某些重要的道路线，从而掌握区域内道路网络综合可达性的空间分布特征，刻画出道路网络中心性的空间异质性^[30]。分析道路网络中心性与土地利用景观格局之间的关系，有助于认识不同层级结构的道路对土地利用类型和结构的作用和影响有哪些不同，为因地制宜地指导道路建设以及土地利用有积极意义。



图1 湖北省路网数据集

Fig. 1 Road Network in Hubei Province

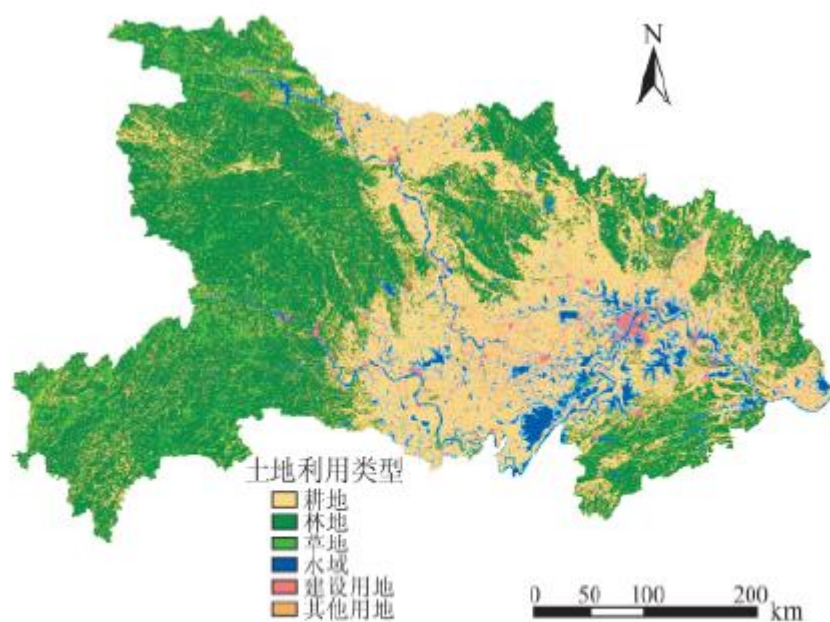


图 2 湖北省土地利用现状
Fig. 2 Land Use in Hubei Province

综上所述, 本文研究意义明确: (1) 运用多中心评价模型, 使道路与土地利用之间关系不再局限于单一数值指标的测度, 而是将其空间性及地理性考虑进来; (2) 从道路网络中心性视角研究道路与土地利用景观格局之间的关联关系, 为测度道路网络空间特征和两者关系的认识提供了新的视角; (3) 为指导宏观尺度区域交通与土地利用规划及可持续发展提供更为科学有效的决策依据。

1 研究区与数据

湖北省, 简称“鄂”, 位于中国中部偏南、长江中游。其地理坐标是 $29^{\circ} 05' \sim 33^{\circ} 20' N$, $108^{\circ} 21' \sim 116^{\circ} 07' E$ 。地辖 1 个副省级市、11 个地级市、1 个自治州、3 个直管市、1 个林区。湖北省地理位置优越, 是承东启西、连南接北的交通枢纽。

本文所用道路网络数据集来源于 Open Street Map (OSM) 网站, 主要包括国道, 省道及县道。前期数据处理包括检查道路网络的拓扑关系, 并构建网络数据集。土地利用数据来源于 30m 遥感影像解译。为研究方便, 土地利用类型分为耕地, 林地, 草地, 建设用地, 水域和其他用地 6 类。

2 研究方法

2.1 多中心评价模型

本研究以多中心性评价模型 (Multiple Centrality Analysis, MCA) 为基础, 以 Arc GIS 软件为平台, 运用城市网络分析工具 (Urban Network Analysis, UNA) 测度湖北省道路网络中心性。多中心评价模型是将道路线抽象为网络的边, 将道路交叉点或端点作为连接边的节点, 然后沿着实际网络路径计算节点间距离, 进而测度道路网络中心性。本文选取标准化后的临近中心性 (Closeness Centrality), 中介中心性 (Betweenness Centrality), 直线中心性 (Straightness Centrality) 3 个指标对湖北省道路网络中心性进行测度。

(1) 临近中心性(Closeness Centrality)

在网络分析中，临近中心性是用给定节点到所有节点的最短道路网络距离和大小来衡量，反映该节点在网络中的相对可达性大小，临近中心性值越大，表示该节点在整个网路中的相对可达性较高。

$$Closeness(i)_{norm}^r = \frac{\sum_{j \in G - \{i\}, d(i, j) \leq r} j}{\sum_{j \in G - \{i\}, d(i, j) \leq r} d(i, j) \times j} \quad (1)$$

式中:r 是计算临近中心性时的搜索半径; Closeness(i)_{norm}^r 是节点 i 在搜索半径为 r 时标准化后的临近中心性值; d(i, j) 是网络集 G 中节点 i 和节点 j 的最短路径; G - {i} 是网络集中 G 去除节点 i 的子集。

(2) 中介中心性(Betweenness Centrality)

中介中心性，指网络中任意两个节点的最短路径中经过该点的数量比例之和，衡量点的中介作用，反映该节点在网络中的中转和衔接功能。中介中心性越高表示节点在网络流传递过程中的作用越重要，且经过该点的网络流的比例也越高，在整个网络中起到桥梁或枢纽转换作用也就越明显。

$$Betweenness(i)_{norm}^r = \frac{\sum_{j, k \in G - \{i\}, d(i, j) \leq r} \left[\frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}} \times j \right]}{\sum_{j \in G - \{i\}, d(i, j) \leq r} (j - 1) \sum_{j \in G - \{i\}, d(i, j) \leq r} j} \quad (2)$$

式中:Betweenness(i)_{norm}^r 是节点 i 在搜索半径为 r 时标准化后的中介中心性值; n_{jk}(i) 是节点 j 经过节点 i 到节点 k 之间的最短路径数量; n_{jk} 是节点 j 和节点 k 之间最短路径的数量。

(3) 直线中心性(Straightness Centrality)

直线中心性是用给定节点到所有网络节点的欧氏距离与实际网络距离的比值和来表示，衡量节点与其他节点的通达效率。其基本原理是当两个节点间的网络距离接近二者的欧式距离时，他们的交流沟通越容易实现。

$$Straightness(i)_{norm}^r = \frac{\sum_{j \in G - \{i\}, d(i, j) \leq r} \left[\frac{d^{Eucl}(i, j)}{d(i, j)} \times j \right]}{\sum_{j \in G - \{i\}, d(i, j) \leq r} j} \quad (3)$$

式中: $Straightness(i)^r_{norm}$ 是节点 i 在搜索半径为 r 时标准化后的直线中心性值; $d^{Euc1}(i, j)$ 是节点 i 和节点 j 之间的欧式距离。

2.2 景观格局分析方法

土地利用结构和空间格局的形成是由自然、经济、社会、文化以及技术等多方面因素共同作用形成的。量化研究土地利用空间格局通常采用景观格局指数的度量方法^[31, 32], 本文选取景观百分比(Percantage of Landscape, PLAND), 香农多样性指数(Shannon' s Diversity Index, SHDI), 平均斑块大小(Mean Patch Size, MPS), 平均形状指数(Mean Shape Index, MSI)来刻画土地利用景观格局。其中景观百分比和香农多样性指数用来刻画土地利用构成, 平均斑块大小和平均形状指数共同反映土地利用的空间形态特征。计算公式如下所示:

PLAND 表征某地类的面积百分比。

$$PLAND = PL_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} \times 100 \quad (4)$$

式中: A 为土地景观总体面积; n 为斑块的数量; a_{ij} 为某一土地类型 i 的斑块面积。该指标运用在类型水平。

SHDI 表征景观的多样性,

$$SHDI = - \sum_{i=1}^m (PL_i \times \ln PL_i) \quad (5)$$

式中: m 是土地覆被类型的数量; PL_i 是某一土地类型的面积百分比。该指标运用在景观水平。

MPS 表征某一土地覆被类型的平均斑块百分比, 用 P_i 表示

$$MPS = P_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n} \quad (6)$$

式中: n 为斑块的数量; a_{ij} 为某一土地类型 i 的斑块面积。该指标运用在景观和类型水平。

$$MSI = S_i = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{l_{ij}}{2\sqrt{(\pi \times a_{ij})}}}{n} \quad (7)$$

式中: n 为斑块的数量; a_{ij} 为某一土地类型 i 的斑块面积; l_{ij} 为某一土地类型 i 的斑块周长。该指标运用在景观和类型水平。

2.3 核密度估计法

核密度估计(Kernel Density Estimate, KDE)是一种空间平滑操作,可用于分析某要素在其领域范围内的密度,要素可以是线要素,也可以是点要素^[33]。正如 Tobler 所提出的地理学第一定律^[34],即“地理事物或属性在空间分布上互为相关,距离越近相互联系越紧密,存在集聚(Clustering)、随机(Random)、规则(Regularity)分布”。核密度估计不仅强调了道路本身的影响,而且有效地考虑了距离的影响,将研究区范围内道路网络中心性及道路密度进行综合考虑。

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh^d} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (8)$$

式中:函数 K 为核函数; h 为阈值; n 为阈值范围内点的数量; d 为数据的维数。例如,当 $d=2$ 时,一个常见的核密度方程可以定义为:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh^2\pi} \sum_{i=1}^n \left[1 - \frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{h^2} \right]^2 \quad (9)$$

式中: $(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2$ 为 (x_i, y_i) 和 (x, y) 之间的离差。

2.4 相关性分析

通过核密度估计法得到道路网络中心性的空间分布图。为分析道路网络中心性与土地利用景观格局之间的关系,运用自然断点法对道路网络中心性图进行分级,中心性值越大对应等级越高。分别计算每一级别的景观格局指数,运用斯皮尔曼等级相关方法(Spearman's Correlation Coefficient for Ranked Data)进行相关性分析。斯皮尔曼等级相关法主要用于解决称名数据和顺序数据相关的问题。适用于两列变量,而且具有等级变量性质具有线性关系的资料。

3 结果与分析

3.1 湖北省道路网络中心性空间格局

运用多中心评价模型计算得到湖北省道路网络的节点中心性值,将节点的中心性值赋给其连接的道路线,每条道路线的中心性值等于其两端节点中心性值的加和平均值。然后对得到的湖北省道路网络中心性做核密度插值,不同的核密度搜索半径形成不同的平滑效果,搜索半径较小,中心性值集中在道路线附近,搜索半径过大,空间异质性效果不明显。通过设置不同的搜索半径,本文取 20000m 作搜索半径。

3.1.1 临近中心性空间格局

湖北省道路网络临近中心性整体上呈现西南偏低,东北较高的格局(图 3)。其中高值区表现为“点—轴”式分布,主要集中在“武汉 1+8 城市圈”区域,如武汉市、黄冈市、鄂州市等连片区。具体来看,湖北省道路网络中心性空间格局表现为“西北

—东南”与“东北—西南”两条带状交叉的“十”字型突出分布。“西北—东南”方向上，以十堰市张湾区，襄阳市老河口市，樊城区，枣阳市，随州市曾都区，孝感市安陆市和云梦县，武汉市的东西湖区，鄂州市的华容区和鄂城区以及黄石市的武穴市黄梅县形成条带状分布；“东北—西南”方向上，黄冈市的麻城市，团凤县和黄州区，鄂州市鄂城区和梁子湖区，黄石市大冶市，以及咸宁市的咸安区，崇阳县和通城县形成条带，道路网络临近中心性较高。而在潜江市，荆州市的沙市区，宜昌市夷陵区，西陵区，兴山县，以及恩施土家族苗族自治州的宜恩县也形成了道路网络临近中心性的次高值区域。临近中心性表示道路网络的综合可达性情况，高值区表示道路节点密集，路网结构完备。

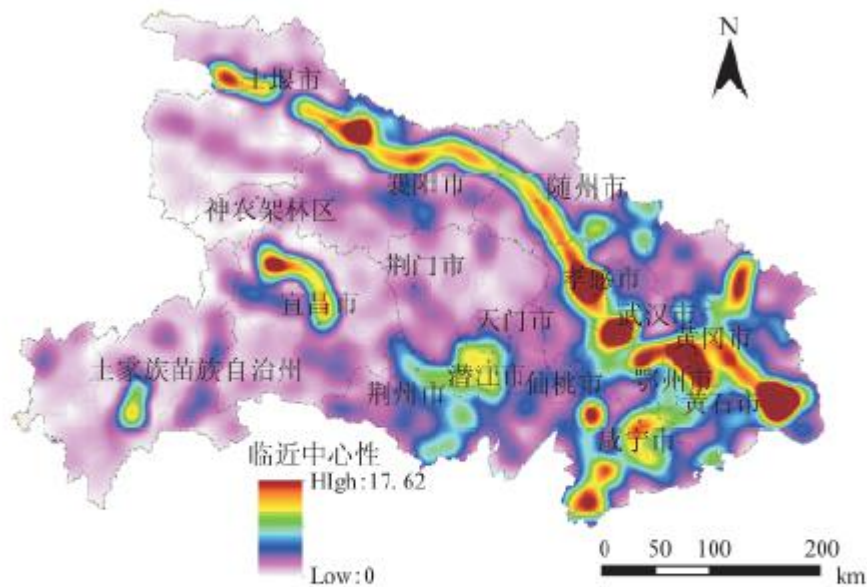


图 3 湖北省临近中心性图

Fig. 3 Map of Closeness Centrality in Hubei Province

3.1.2 中介中心性空间格局

从图 4 中可以看出，湖北省道路网络中介中心性整体上呈现东部大面积区域及西部边缘区较高的空间格局。其中高值区多表现为不规则孔隙状分布，主要集中在“武汉 1+8 城市圈”部分区域，如黄冈市、黄石市、武汉市、仙桃市和仙桃市，以及恩施土家族苗族自治州西南条带区域，以及十堰市中西部区域。而道路网络中心性低值区主要集中在湖北省西部，如十堰市，神农架林区以及恩施土家族苗族自治州。道路网络中介中心性越高，说明该节点在网络中的中转和衔接能力较强，也就是说，道路网络中心性高值区在整个湖北省道路网络中的枢纽作用较大，从分析结果来看，湖北省道路网络中介中心性高值区域多分布于中部及东部，这些区域是湖北省道路网络的中枢区域，承载着相对较多的人流量，车流量及物流量。

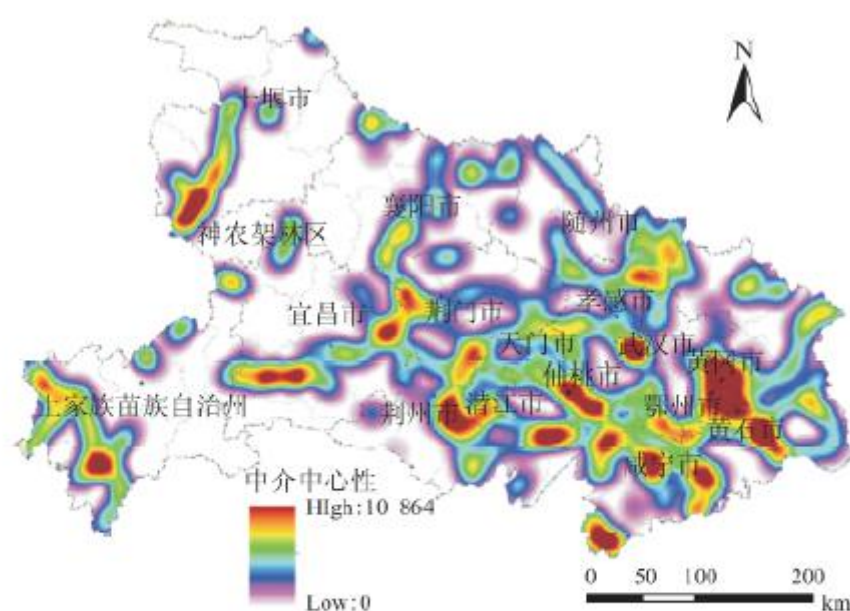
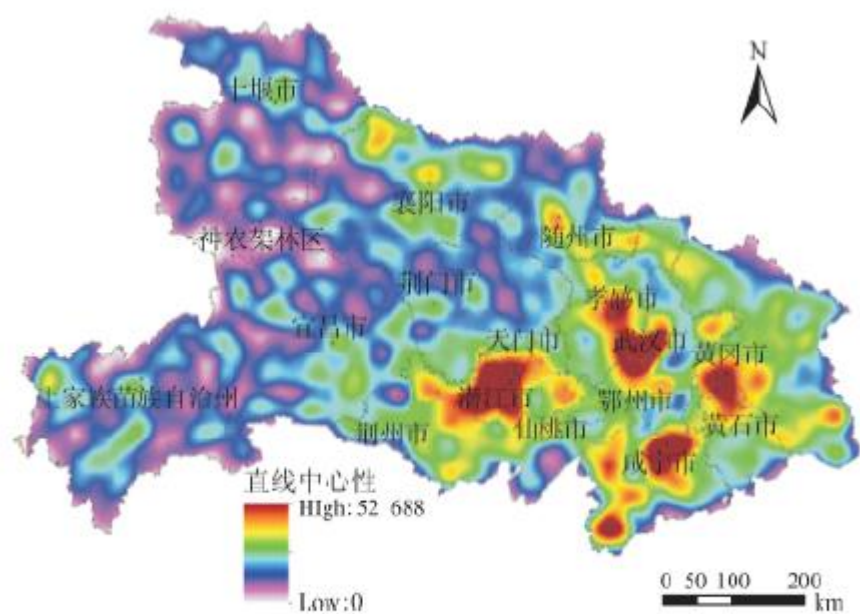


图 4 湖北省中介中心性图

Fig. 4 Map of Betweenness Centrality in Hubei Province

3. 1. 3 直线中心性空间格局

湖北省道路网络直线中心性空间分布呈现东高西低的格局，且东部高值区呈现四核集聚，大面积连片分布；而西部低值区呈现较为均匀片状分布(图 5)。东部高值区主要包括武汉市、孝感市、黄冈市、黄石市、鄂州市、咸宁市、天门市、仙桃市、潜江市和荆州市大部分区域，并且形成了以孝感市云梦县区域，武汉市东西湖区域，鄂州市鄂城区，黄冈市黄州区，咸宁市咸安区以及潜江市为直线中心性高值核心区域，呈圈层向外递减。西部低值区以襄阳市的樊城区，老河口市，枣阳市，以及恩施土家族苗族自治州的利川市道路网络直线中心性相对较高，其他县市区均较低。道路网络直线中心性越高，说明道路节点与其他节点的通过大效率较高，也就是说该区域的道路连接线接近两者之间的欧氏距离，交流沟通更容易进行。从分析结果来看，湖北省道路网络直线中心性较高的区域主要集中于湖北省东部，这些区域道路的连通度较高，路网密度较大，且路网较为规则，道路连接的网络距离与欧氏距离相近，而湖北省西部大面积区域呈现了较低的直线中心性，这与该区域的路网结构有很大的关系，湖北省西部地形复杂，多为山区及丘陵。路网连通度较东部平原区较差，区域内道路受地形影响较大，道路线的网络距离与欧氏距离差别较大，直线中心性较差。



3.2 道路网络中心性与土地利用景观格局相关性分析

在景观层面上,运用斯皮尔曼等级相关法来分析道路网络中心性与土地利用景观格局之间的关系。如表 1 所示,整体上看,直线中心性与景观格局指数表现出较强的相关性,而临近中心性和中介中心性与景观格局指数的相关关系较为复杂。具体来说,平均斑块大小表示景观的破碎化程度,与各中心性指标均呈现负相关,尤其是临近中心性与直线中心性,说明景观破碎化对临近中心性和直线中心性非常敏感,临近中心性和直线中心性越高的区域土地利用景观破碎化程度越高;而中介中心性则对景观破碎化程度影响较小。平均形状指数表示斑块形状的规则程度,直线中心性与之具有较高的正相关,而临近中心性与之相关性较弱,中介中心性与之不相关,表明直线中心性越高的区域土地利用斑块越规则。而香农多样性指数表示土地利用景观类型的多样化程度,与 3 个中心性指标均表现为较强的正相关,这意味着位置的中心化程度与景观多样性有很大的关系,道路网络中心性越高的区域,土地利用景观越丰富多样。总体而言,区域位置的中心化程度对土地利用景观的破碎化程度以及土地利用景观的多样性有着重要的影响和驱动。

指标	平均斑块大小	平均形状指数	香农多样性指数
临近中心性	-0.988**	0.685 *	0.903 **
中介中心性	-0.685 *	0.418	0.976 **
直线中心性	-1.000**	0.903 **	0.988**

3.2.2 类型层面道路网络中心性与土地利用关系分析

湖北省土地利用类型多样, 每种地类在空间中呈现出不同的结构与景观特征。因此, 对湖北省不同土地利用类型与道路网络中心性之间的关系分别进行讨论。从表 2 及续表可以看出, 不同道路网络中心性指标与不同土地利用类型景观格局相关性各异。耕地与各中心性指标相关性较弱, 多半呈不相关, 说明区域中心化程度对耕地利用的景观格局影响不大, 这与耕地主要受自然因素与政府行为干涉有关。林地与临近中心性和直线中心性均表现为较强的负相关, 而中介中心性与景观百分比和平均形状指数也有较强的关联关系, 说明林地的景观格局对道路网络中心性极为敏感, 具有较高中心性的区域, 林地数量分布较少, 且破碎化程度严重, 用地类型比较单一, 也就是说中心化程度对林地表现为强烈的排斥作用。草地分布及空间格局对直线中心性表现为强烈的正相关, 说明直线中心性高的区域草地面积多, 比较连片, 形状也较为规整。建设用地对临近中心性和直线中心性均表现为强烈的正相关, 说明区域道路网络中心性越高的区域, 人类活动强度越高, 建设用地面积比例越大, 形状越规整连片, 也就是中心化程度对建设用地表现为强烈的吸引作用。水域与中介中心性相关性较高, 这与自然因素关系密切, 中介中心性高的道路线在道路网络中担任着桥梁和中转的作用, 水域分布的道路担任着连接由水域隔开的区域, 因此水域的景观格局对中介中心性较为敏感。而其他用地与道路网络中心性基本不相关。整体来看, 临近中心性表示网络中可达性较好的区域, 一般位于道路网络密集的区域, 而直线中心性表示是道路节点之间的直线距离与路网距离的比值, 道路形状越规则, 直线中心性越高, 这些区域往往分布着大面积的城市或城镇用地, 对林地等生态用地表现为强烈的空间排斥和破碎化效应, 而对建设用地则表现为强烈的吸引和集聚作用。

表 2 类型层面上湖北省道路网络中心性与景观格局指数相关性

指	临近中心性	耕地			林地			草地		
		中介中心性	直线中心性	临近中心性	中介中心性	直线中心性	临近中心性	中介中心性	直线中心性	临近中心性
景观百分比	0.248	0.103	0.576	-0.770 **	-0.879 **	-0.988 **	0.915**	0.818**	0.927 **	
平均斑块大小	0.285	0.224	0.503	-0.770 **	-0.491	-0.976 **	0.418	0.018	0.758 *	
平均形状指数	0.455	0.673 *	0.733 *	-0.636*	-0.697 *	-0.952 **	0.624	-0.139	0.782 **	
指标	临近中心性	建设用地			水域			其他用地		
		中介中心性	直线中心性	临近中心性	中介中心性	直线中心性	临近中心性	中介中心性	直线中心性	临近中心性
景观百分比	0.988 **	0.818**	1.000**	0.588	0.976 **	1.000**	0.758 *	0.806**	-0.042	
平均斑块大小	0.976 **	0.236	0.988**	0.139	0.842 **	-0.042	-0.006	0.091	0.176	
平均形状指数	0.988 **	0.576	1.000**	0.297	0.867 **	0.903 **	-0.215	0.200	-0.153	

注: * 表示在 0.05 水平(双侧) 上显著相关;**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关.

4 结论与讨论

本文运用多中心评价模型对湖北省道路网络中心性进行测度, 并分析其与不同用地景观类型之间的关系。可以得出以下结论:

(1)湖北省道路网络中心性呈现不同的空间格局和特征, 基本上均呈现为东高西低的空间分布。临近中心性高值区呈“点轴式”分布; 中介中心性高值区多为不规则孔隙状分布; 直线中心性空间上表现为大面积连片分布。

(2)景观层面上, 临近中心性和直线中心性与土地利用景观格局表现为较强的相关性, 而临近中心性与土地利用景观格局的关系相对复杂。总体来说, 区域位置的中心化程度对土地利用景观的破碎化程度以及土地利用景观的多样性有着重要的影响和驱动。

(3)类型层面上, 道路网络中心性与各类土地利用景观格局相关性各异。耕地受道路网络中心性影响较小; 林地分布和景观格局对道路网络中心性极为敏感, 表现为较强烈的排斥作用, 中心化程度高的区域, 林地数量分布较少, 且破碎化程度严重, 用地类型比较单一; 而中心化区域对建设用地则表现为强烈的吸引和集聚作用, 道路网络中心性高值区建设用地面积比例大, 形状规则连片; 草地和水域分布及空间格局分别对直线中心性和中介中心性较为敏感。

从本文的研究结果可知, 道路网络中心性与土地利用景观格局之间确实存在关联关系, 也就是说不仅道路本身可以对区域土地利用景观格局造成影响, 道路的中心性特征(网络层级结构特征)对土地利用景观格局作用强烈。因此, 在区域土地利用宏观规划和道路布局时, 应充分考虑两者之间的关系, 如在道路网络中心性高值区附近是否存在生态脆弱区或生态保护区等, 对于在这些对人类活动敏感, 抗干扰能力弱的区域要加强保护, 减少周边环境的道路密度, 调整道路布局。此外, 道路网络中心性与不同类型土地利用景观的关联性也不同, 表明道路网络中心性对不同类型土地利用景观的影响程度不同, 建议在土地利用结构优化时, 考虑在道路网络中心性高值区, 尽量布置对道路网络中心性具有吸引和集聚作用的土地利用类型。

参考文献:

[1] PATARASUK R, BINFORD M W. Longitudinal analysis of the road network development and land-cover change in Lop Buri province, Thailand, 1989 — 2006 [J]. Applied Geography, 2012, 32(2) : 228—239.

[2] 张景华, 封志明, 姜鲁光, 等. 道路干扰对澜沧江流域景观格局的影响 [J]. 自然资源学报, 2013, 28(6) : 969—980.

【ZHANG J H, FENG Z M, JIANG L G, et al. Effect of Road Disturbance on Landscape Pattern in the Lancang River Valley [J]. Journal of Natural Resource, 2013, 28(6) : 969—980.】

[3] 张镜铨, 刘林山, 摆万奇, 等. 青藏公路对区域土地利用和景观格局的影响——以格尔木至唐古拉山段为例 [J]. 地理学报, 2002, 57(3) : 253—266.

【ZHANG J L, LIU L S, BAI W Q, et al. Impact of Qinghai-Xizang Highway on Land Use and Landscape Pattern Change: from Golmud to Tanggulashan Pass [J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(3) : 253—266.】

[4] HAWBAKER T J, RADELOFF V C, HAMMER R B, et al. Road Density and Landscape Pattern in Relation to Housing Density, and Ownership, Land Cover, and Soils [J]. Landscape Ecology, 2005, 20(5) : 609—625.

[5] TINKER D B, RESOR C A C, BEAUVAIS G P, et al. Watershed analysis of forest fragmentation by clearcuts and roads in a Wyoming forest [J]. Landscape Ecology, 1998, 13(3) : 149—165.

[6] 杨新军, 石育中, 王子侨. 道路建设对秦岭山区社会—生态系统的影响——一个社区恢复力的视角 [J]. 地理学报, 2015, 70(8) : 1313—1326.

【YANG X J, SHI Y Z, WANG Z Q. Exploring the impacts of road construction on a local social-ecological system

in Qinling mountainous area: A resilience perspective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(8) : 1313—1326.】

[7] 郑钰, 李晓文, 崔保山. 云南纵向岭谷区道路网络对生态系统影响的阈值分析[J]. *生态学报*, 2009, 29(11) : 5823—5831.

【ZHENG Y, LI X W, CUI B S. The influential threshold of road network impacts on the ecosystem in longitudinal rangeorge region of Yunnan Province, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*. 2009, 29(11) : 5823—5831. 】

[8] 毛蒋兴, 闫小培, 何邕健, 等. 快速城市化背景下开放式交通系统对土地利用空间格局的影响[J]. *资源科学*, 2008, 30(12) : 1880—1889.

【MAO J X, YAN XI P, HE Y J, et al. Impacts of open transport system on changes in land use spatial distribution under rapid Urbanization in Shenzhen City [J]. *Resources Science*, 2008, 30(12) : 1880—1889. 】

[9] MCGARIGAL K, ROMME W H, CRIST M, et al. Cumulative effects of roads and logging on landscape structure in the San Juan Mountains, Colorado (USA) . [J]. *Landscape Ecology*, 2001, 16(4) : 327—349.

[10] NAGENDRA H, MUNROE D K, SOUTHWORTH J. From pattern to process: landscape fragmentation and the analysis of land use /land cover change [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2004, 101(2—3) : 111—115.

[11] CAI X J , WU Z F, CHENG J. Using kernel density estimation to assess the spatial pattern of road density and its impact on landscape fragmentation [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2013, 27(2) : 222—230.

[12] SAUNDERS S C, MO R M, CHEN J, et al. Effects of roads on landscape structure within nested ecological units of the Northern Great Lakes Region, USA [J]. *Biological Conservation*, 2002, 103(2) : 209—225.

[13] 易浪, 潘登. 不同等级道路网络对常宁市景观格局生态效应的影响 [J]. *湖南林业科技*, 2016, 43(2) : 81—86.

【YI L, PAN D. Ecological effects of different grade road network on landscape in Changning City [J]. *Hunan Forestry Science & Technology*, 2016, 43(2) : 81—86. 】

[14] 李清泉, 曾喆, 杨必胜, 等. 城市道路网络的中介中心性分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2010, 35(1) : 37—41.

【LI Q Q, ZENG Z, YANG B S, et al. Betweenness Centrality Analysis for Urban Road Networks [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(1) : 37—41. 】

[15] 李月辉, 吴志丰, 陈宏伟, 等. 大兴安岭林区道路网络对景观格局的影响 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23(8) : 2087—2092.

【LI Y H, WU Z F, CHEN H W, et al. Impacts of road network on forest landscape pattern in Great Xing’ an Mountains

of Northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(8) : 2087—2092. 】

[16] BATTY M. Network geography: relations, interactions, scaling and spatial processes in GIS [J]. In P. Fisher & D. J. Unwin(Eds.), Re-presenting GIS, 2003, 54(4) : 957—64.

[17] CRUCITTI P, LATORA V, PORTA S. Centrality measures in spatial networks of urban streets [J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2006, 73 (3Pt2) :036125.

[18] CRUCITTI P, LATORA V, PORTA S. Centrality in networks of urban streets. [J]. Chaos, 2006, 16(1) : 015113.

[19] PORTA S, LATORA V, WANG F, et al. Street Centrality and the Location of Economic Activities in Barcelona [J]. Urban Studies, 2012, 49(7) : 1471—1488.

[20] PORTA S, LATORA V, WANG F, et al. Street centrality and densities of retail and services in Bologna, Italy [J]. Environment & Planning B Planning & Design, 2009, 36(3) : 450—465.

[21] LIU Y, WEI X, JIAO L, et al. Relationships between street centrality and land use intensity in Wuhan, China [J]. Journal of Urban Planning & Development, 2016, 142 (1) :05015001.

[22] WANG F, ANTIPOVA A, PORTA S. Street centrality and land use intensity in Baton Rouge, Louisiana[J]. Journal of Transport Geography, 2011, 19(2) : 285—293.

[23] 常树春, 张启义, 王文涛. 交通网络的中心性分析 [J]. 军事交通学院学报, 2011, 13(1) : 4—7.

【CHANG S C, ZHANG Q Y, WANG W T, et al. Analysis of centralities of traffic networks [J]. Journal of Military Transportation University, 2011, 13(1) : 4—7. 】

[24] 李刚. 基于网络中心性的城市轨道交通应急救援站选址研究 [D]. 北京交通大学, 2014.

【LI G. Research on location of urban rail transit emergency rescue stations based on network centrality [D]. Beijing Traffic University, 2014. 】

[25] 陈晨, 程林, 修春亮. 沈阳市中心城区交通网络中心性及其与第三产业经济密度空间分布的关系 [J]. 地理科学进展, 2013, 32(11) : 1612—1621.

【CHEN C, CHENG L, XIU C L. Distribution of centrality of traffic network and its relationship with economic density of tertiary industry in Shenyang [J]. Progress in Geography, 2013, 32(11) : 1612—1621. 】

[26] 陈晨, 王法辉, 修春亮. 长春市商业网点空间分布与交通网络中心性关系研究 [J]. 经济地理, 2013, 33 (10) :40—47.

【CHEN C, WANG F H, XIU C L. The relationship between the spatial distribution of commercial networks and street

centrality in Changchun [J] . Economic Geography, 2013, 33(10) : 40—47. 】

[27] 陈晨, 修春亮. 基于交通网络中心性的长春市大型综合医院空间可达性研究 [J] . 人文地理, 2014(5) : 81—87.

【CHEN C, X L. Spatial accessibility of large general hospitals in Changchun City center based on street network centrality [J] . Human Geography, 2014(5) : 81—87. 】

[28] LIU Y, WANG H, JIAO L, et al. Road centrality and landscape spatial patterns in Wuhan Metropolitan Area, China [J] . Chinese Geographical Science, 2015, 25(4) : 511—522.

[29] NEWMAN P W G, KENWORTHY J R. Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence [J] . Landscape & Urban Planning, 1999, 44(4) : 219—226.

[30] LIU Y, et al. , Relationships between street centrality and land use intensity in Wuhan, China [J] . Journal of Urban Planning& Development, 2016, 142(1) : 05015001.

[31] 傅伯杰, 陈利顶, 王军, 等. 土地利用结构与生态过程 [J] . 第四纪研究, 2003, 23(3) : 247—255.

【FU B J, CHEN L D, WANG J, et al. Land Use structure and ecological process [J] . Quat. Sci. , 2003, 23(3) : 247 —255. 】

[32] 刘世梁, 崔保山, 杨志峰, 等. 道路网络对澜沧江流域典型区土地利用变化的驱动分析 [J] . 环境科学学报, 2006, 26(1) : 162—167.

【LIU SL, CUI B S, YANG Z F, et al. Effects of road on landscape pattern and soil erosion: a case study of Fengqing County, Southwest China [J] . Chinese Journal of Soil Science, 2006, 26(1) : 162—167. 】

[33] TIMOTH E P, NICOLAS L B, EMANUELE S, et al. A network based kernel density estimator applied to barcelona economicactivities [C] // International Conference on Computational Science and Its Applications. Springer Berlin Heidelberg, 2010: 32—45.

[34] TOBLER W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit Region [J] . Economic Geography, 1970, 46(Supp 1) : 234—240.