

# 秦巴山区交通优势度与区域发展强度空间耦合研究

敬 博<sup>1,2</sup>, 朱依平<sup>1</sup>, 祁 航<sup>1</sup>, 闫 芳<sup>2</sup>, 牛俊靖<sup>1</sup>

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

**摘要:** 采用交通优势度模型、熵权 TOPSIS 法和耦合协调度模型对秦巴山区交通优势度与区域发展强度的空间协同关系进行探讨, 分析地形对其耦合关系的影响, 旨在揭示山区交通建设与区域发展水平的空间耦合规律。主要结论: (1) 秦巴山区交通优势度呈“东高西低、北高南低”的空间态势, 区域发展强度在低值区集聚特征显著; 交通优势度与区域发展强度呈正相关关系, 交通对发展的影响具有“门槛”效应, 区域整体仍处于交通建设与区域发展的低水平均衡阶段。(2) 秦巴山区交通优势度与区域发展强度协同水平在空间上均呈现“外围高、内部低”的格局; 交通设施类型和等级对区域发展贡献度存在差异, 省道和铁路溢出效应最显著。(3) 地形条件是影响协同水平的核心因素, 其协调度随地形高程和起伏度的增大而降低, 非常态规律则由于复杂地形区交通建设高适应性和城镇发展高敏感性所致。

**关键词:** 交通优势度; 区域发展强度; 耦合协调度; 地形因素; 秦巴山区

中图分类号: TU984.191

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)06-0865-11

## Study on spatial coupling of traffic superiority and regional development intensity in Qinba mountains

JING Bo<sup>1,2</sup>, ZHU Yiping<sup>1</sup>, QI Hang<sup>1</sup>, YAN Fang<sup>2</sup>, NIU Junqing<sup>1</sup>

(1. Xi'an Jianda Institute of Urban Planning & Design, Co., Ltd., Xi'an 710055, China;

2. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The spatial synergy level of traffic superiority and regional development intensity in Qinba Mountains is discussed by using Traffic superiority model, Entropy TOPSIS method and Coupling coordination degree model, and then the effects of terrain factors on their interaction are analyzed, aiming to reveal the spatial coupling law between transportation infrastructure and regional development level in mountainous areas. The main conclusions are as follows: (1) The traffic superiority in Qinba Mountains presents a spatial trend of “high in the east and low in the west, high in the north and low in the south” and the regional development intensity has significant agglomeration characteristics in the low value area. There is a positive correlation between traffic superiority and regional development intensity, and the impact of transportation on development has a “threshold” effect. The region as a whole is still in the low-level equilibrium stage of traffic construction and regional development. (2) The coordination level of traffic superiority and regional development intensity in Qinba mountain area both show a pattern of “high in the periphery and low in the interior” in space. The types and levels of transportation facilities have different contributions to regional development, and the spillover effects of provincial roads and railways are the most significant. (3) Terrain condition is the core factor affecting the coordination level, and its coordination degree decreases with the increase of terrain elevation and undulation. The abnormal law is caused by the high adaptability of traffic construction in complex terrain areas and the high sensitivity of urban development.

**Key words:** traffic superiority; regional development intensity; coupling coordination degree; terrain factors; Qinba mountain area

收稿日期: 2023-04-19

修回日期: 2024-11-19

基金项目: 中国工程院重大咨询课题(2017-ZD-02); 西安建筑科技大学创新发展联合基金项目(20240056)

第一作者: 敬 博(1984—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 硕士生导师, 主要从事为城市规划与经济地理学研究. E-mail: jingbo @xauat.edu.cn

通信作者: 牛俊靖(1985—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事为城市规划与产业经济研究. E-mail: 420762406@qq.com

交通运输与社会经济发展具有密切联系,交通网络通过空间运输联系支撑区域经济社会发展<sup>[1-2]</sup>,交通运输和设施投资对经济增长具有空间溢出效应<sup>[3]</sup>,刺激地方和区域经济发展<sup>[4]</sup>,有效提升土地利用效率、带动制造业、旅游业和农村经济发展。国内相关研究指出,交通发展与区域发展上存在空间协同性和互动性,区域交通带动城市扩张与土地开发,城市土地利用形态决定交通生成和组织模式<sup>[5]</sup>,城市轨道交通能有效链接郊区与市区,促使土地利用结构集约紧凑化<sup>[6]</sup>,快速交通的“时间-空间收敛”效应和“组织-空间协同”效应能加速旅游经济要素流的聚集和规模效应<sup>[7]</sup>,道路交通等级阶段对农村发展具有传导效应<sup>[8]</sup>,交通门户建设与门户经济协调水平也呈现区域内外差异状态<sup>[9]</sup>。

区域发展强度是一定区域人口、社会、经济活动的总体规模以及对资源环境的利用程度。由于交通设施可有效促进生产要素流动,提升区域投资建设水平,从而加深对资源环境的作用强度,因此,区域发展强度指标也必然与交通条件优劣产生强烈关联。目前国内研究主要采用土地利用强度、城市建设强度、资源利用强度、污染排放强度等指标表征区域发展强度水平,内容涉及发展强度的定量评价<sup>[10]</sup>、空间格局<sup>[11]</sup>、时空演化与驱动力<sup>[12]</sup>、与资源环境承载的协调关系<sup>[13]</sup>、建设强度的管控与规划决策<sup>[14]</sup>等方面,但多以人口、土地或房屋建设等单项要素为对象,综合性、集成性、多要素区域发展强度评价及其与交通协同性研究较为少见。

交通与区域发展空间协同性研究需要交通优劣程度评价,早期研究多采用交通可达性表征交通优劣程度<sup>[15-16]</sup>,反映的是借助某种交通方式达到某地的容易程度,后期研究则认为区域交通条件应反映交通设施支撑经济社会活动的水平和状态<sup>[17]</sup>,由此综合交通优势测度及其与经济社会发展耦合研究逐渐受到关注。相较于交通可达性的城市微观研究应用趋势,交通优势度成为宏观层面评价区域交通条件优劣的主要指标。目前交通优势度及其与区域发展相互关系研究主要集中在发达平原地区,涉及复杂地形山区研究相对较少。对山区而言,交通与区域发展的作用机理是否与平原一致,交通方式对区域发展溢出效应强弱有无差异,传统方法在山区的适用程度情况如何,

此类问题值得深入研究思考。基于此,本文以秦巴山区为研究对象,采用交通优势度模型、熵权TOPSIS法和耦合协调度模型对山区交通优势度与区域发展强度的空间协同关系及其机制进行探讨,重点分析地形因素对其相互作用关系的影响,旨在揭示山区交通建设与区域发展的空间关联规律,为优化我国山地区域发展布局提供科学指导。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 研究区概况

秦巴山区指秦岭、巴山山脉的核心山脉腹地地区,总面积约为30万平方公里,区域内地势起伏较大。截止2022年,区域公路网里程超过22万公里,其中国省干线公路占比超10%,铁路网密度为124 km/万平方公里,民用机场15个,初步形成了“三横四纵”的交通运输主通道。秦巴山区地域广阔,人口众多,经济落后,是我国14个集中连片特困区中涉及省份最多、贫困人口最多的区域。

### 1.2 数据来源

交通路网及机场点位数据于2020年4月3日从91位图助手(<http://www.91weitu.com/index.htm>)下载获取;高程数据为90 m分辨率SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)数据;建设用地占国土面积比重数据于2020年4月10日由中国科学院资源环境科学数据中心的Landsat TM/ETM遥感影像解译数据计算获取;其他人口、经济、国土面积数据来源于中国县域统计年鉴、各省统计年鉴、各县统计公报等,数据时间为2018~2022年。

### 1.3 交通优势度评价模型

#### 1.3.1 基础交通优势度

交通优势度是基于定量方法并以对比视角判断评价区域交通优劣程度和等级标准的一种综合性指标<sup>[18]</sup>,参考相关研究构建基础交通优势度评价体系<sup>[17,19]</sup>,见表1。其中交通设施网络密度按照公路设计时速标准将高速、国道、省道的权重关系设定为2、4/3和1;重要交通设施影响度选择铁路、高速和机场作为重要交通设施,机场选择研究区内13座已建干支线机场;区位优势度将研究区地级以上城市的中心城市影响力作为重要考量因素,考虑到行政区划边界的影响,城市和交通设施选择扩展至研究区边界50 km范围以内。

表 1 秦巴山区交通优势度评价指标体系  
Tab. 1 Evaluation Index System for Traffic Advantage in Qinba Mountain Area

目标层	指标层	类型	标准	赋值	权重
交通设施网络密度	公路网密度	高速	时速 120 km/h	2.0	0.25
		国道	时速 80 km/h	4/3	
		省道	时速 60 km/h	1.0	
		县乡道	时速 40 km/h	2/3	
	铁路网密度	——	——	——	0.1
交通设施影响度	铁路技术等级	铁路线网	30 km 以内	1.5	0.1
			60 km 以内	1.0	
			其他	0	
	机场技术等级	机场区位	30 km 以内	1.0	0.2
			100 km 以内	0.5	
			其他	0	
	高速公路技术等级	高速公路线网	拥有高速公路	1.5	0.2
			30 km 以内	1	
			60 km 以内	0.5	
			其他	0	
区位优势度	第一等级	西安	0~100 km	3.0	0.15
			100~300 km	2.5	
			300~500 km	2.0	
			500~700 km	1.5	
			700~1 000 km	1.0	
			>1 000 km	0	
			0~100 km	2.5	
			100~300 km	2.0	
			300~500 km	1.5	
			500~700 km	1.0	
	第二等级	洛阳、襄阳、南阳	700~1 000 km	0.5	
			>1 000 km	0	
			0~100 km	2.0	
			100~300 km	1.5	
			300~500 km	1.0	
	第三等级	其他城市	500~700 km	0.5	
			700~1 000 km	0.25	
			>1 000 km	0	

注: 交通设施影响度指标的标准一栏数据指各区县行政中心与交通设施间的最小空间距离, 区位优势度指标的标准一栏指各区县与中心城市的最短陆路交通距离; 表中其他城市包括研究区边界 50 km 范围内九处地级市。

1.3.2 基于地形修正的交通优势度模型

研究区地形变化较大, 交通时空距离具有明显差异, 因此需采用坡度( $P_i$ )、地形起伏度( $R_i$ )、地表粗糙度( $Q_i$ )对基础交通优势度进行修正。其中如公式(1)所示, 坡度和地形起伏度代表地形变化幅度对交通真实时空距离带来的直接影响; 如公式(2)所示, 地表粗糙度反映地面凹凸不平程度, 运用熵值法对坡度( $P_i$ )、地形起伏度( $R_i$ )、

地表粗糙度( $Q_i$ )等地形修正指数进行加权赋值, 得到基于地形修正的交通优势度指数模型, 如公式(3)所示。

$$R_i = \{ [H_{\max} - H_{\min}] \times [1 - A_i / S_i] \} / 500 \quad (1)$$

式中:  $R_i$  代表地形起伏度,  $H_{\max}$  和  $H_{\min}$  分别为最大高程值和最小高程值;  $A_i$  为评价单元内平地(即  $H_{\max} - H_{\min} \leq 30$  m)面积;  $S_i$  为评价单元面积; 将 500 m 视为 1 个中国基准山体高度。

$$Q_i = 1 / \cos(P_i \times 3.141\,592\,6 / 180) \quad (2)$$

式中:  $Q_i$  代表地表粗糙度;  $P_i$  代表平均坡度。

$$T'_i = f_i \times T_i = (w_{P_i} \times P_i + w_{R_i} \times R_i + w_{Q_i} \times Q_i) \times T_i \quad (3)$$

式中,  $T'_i$  代表修正后的交通优势度,  $f_i$  代表地形修正指数;  $T_i$  代表基础交通优势度,  $w_{P_i}$ ,  $w_{R_i}$ ,  $w_{Q_i}$  为修正指数中坡度、地形起伏度、地表粗糙度所占权重。  $>0$  且  $\leq 100$  km。

1.4 基于熵权 TOPSIS 法的区域发展强度评价

1.4.1 区域发展强度评价体系

区域发展强度涉及人口、经济和土地开发等多方面。参考相关研究构建反映经济发展、人口发展和土地建设三要素的区域发展强度评价体系。经济发展强度用人均 GDP(万元/人)和经济密度(万元/km<sup>2</sup>)表示, 人口发展强度用人口密度(人/km<sup>2</sup>)和城镇化率表示, 土地开发强度用建设用地占比表示。

1.4.2 熵权 TOPSIS 法

熵权 TOPSIS 法是对传统 TOPSIS 法的改进, 是根据有限个评价对象与理想化目标的接近程度进行相对优劣评价排序的方法, 过程表达如下。

①对原始数据进行标准化处理, 如公式(4)所示。

$$Y_{ij} = (X_{ij} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad (4)$$

式中:  $Y_{ij}$ 、 $X_{ij}$ 、 $X_{j\max}$  和  $X_{j\min}$  分别为标准化值、原始值、最大值和最小值。

②采用熵值法确定指标权重  $W_j$ , 如公式(5)所示。

$$W_j = (1 - E_j) / \sum_{j=1}^n (1 - E_j) \quad (5)$$

式中: 评价指标  $j$  的熵值权重  $E_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln(P_{ij})$ ,  $P_{ij} = Y_{ij} / \sum_{i=1}^m Y_{ij}$ ,  $k = 1 / \ln(n)$ 。

③获得加权标准化矩阵, 如公式(6)所示。

$$Q = (q_{ij})_{m \times n} = (Y_{ij} \times W_j)_{m \times n} \quad (6)$$

④确定有限方案中的正负理想解, 如公式(7)、(8)所示。

$$q^+ = \{\max Q_{ij} \mid j=1, 2, \dots, n\} = \{Q_1^+, Q_2^+, \dots, Q_n^+\} \quad (7)$$

$$q^- = \{\min Q_{ij} \mid j=1, 2, \dots, n\} = \{Q_1^-, Q_2^-, \dots, Q_n^-\} \quad (8)$$

⑤计算各评价对象与正负理想解的欧式距离, 如公式(9)所示。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (q_{ij}^+ - q_{ij})^2}; D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (q_{ij}^- - q_{ij})^2} \quad (9)$$

计算相对贴近度  $C_i$ 。即  $C_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-)$ 。式中:  $0 \leq C_i \leq 1$ ,  $C_i$  值越大表明评价对象越优, 反之越低。

### 1.5 耦合协调度模型辨析与选用

耦合协调度模型主要用于研究单系统内部要素或多系统要素间的相互作用和正负反馈循环机制<sup>[20]</sup>, 以发现其协调程度和相互影响规律, 但不少耦合协调度模型公式存在低估、高估耦合度或不符合耦合度数理意义的问题, 本文采用数学方法予以验证。

相关文献研究主要分为两系统和三系统, 本文重点讨论两系统公式。目前两系统模型主要有式(10)、(11)、(12)三种, 其他都是在此基础上的变形, 结合 matlab 软件中的数据模拟功能对以下公式进行分析(表 2)。

表 2 常用耦合协调度公式汇总

Tab. 2 Summary of commonly used coupling coordination formula

耦合协调度公式	参考文献
$C = \sqrt{\frac{f(x) \times f(y)}{(f(x) + f(y))^2}}$	(10) <sup>[13]</sup>
$C = \left\{ \frac{f(x) \times f(y)}{[(f(x) + f(y))/2]^2} \right\}^2$	(11) <sup>[21]</sup>
$C = 2 \left\{ \frac{f(x) \times f(y)}{[f(x) + f(y)]^2} \right\}^{1/2}$	(12) <sup>[22]</sup>

公式(10)推导可转换为:  $C = \frac{\sqrt{f(x) \times f(y)}}{f(x) + f(y)}$

由于  $f(x) + f(y) \geq 2 \sqrt{f(x) \times f(y)}$ , 因此,  $C$  取值范围在  $[0, 1/2]$  之间。由于最大值不超过  $1/2$ , 因此会出现低估耦合度的问题, 所以相关研究结果不成立。

将公式(11)、(12)在 matlab 中进行  $f(x)$ ,  $f(y)$  两变量不同取值的结果模拟, 发现结果均在  $[0, 1]$ (图 1(a)和(b)), 符合耦合度相关理论, 但是两者存在一定差异。

公式(11)结果分布相对均质, 即当  $f(x)$ ,

$f(y)$  为  $[0, 1]$ ,  $C$  值随着  $f(x)$ ,  $f(y)$  的增减呈均匀程度的增减(图 1(a)), 如当  $f(x)=0.1$  定值时,  $C$  值随着  $f(y)$  值的增大均速减小, 同时  $C$  值处于  $[0, 1]$  的区间范围内, 符合耦合度随两系统差距增大均匀减小的数理意义; 而公式(12)结果分异明显, 若当  $f(x)$ ,  $f(y)$  其中任意值大于 0.1 时,  $C$  值都大于 0.5,  $C$  值只有当  $f(x)$ ,  $f(y)$  远小于 0.05, 逐渐接近 0 时才开始缓慢减小到  $[0, 0.4]$ , 且减大幅度很慢, 这意味着只有当两系统综合指数极小时, 耦合度才处于比较低的状态。当  $f(x)=0.1$  定值时,  $C$  值随着  $y$  值的增大缓慢减小, 直到  $f(y)=0.9$ ,  $C$  值还能达到 0.7 的高耦合水平(图 1(b)), 严重不符合耦合度的数理意义, 存在高估耦合度的可能。

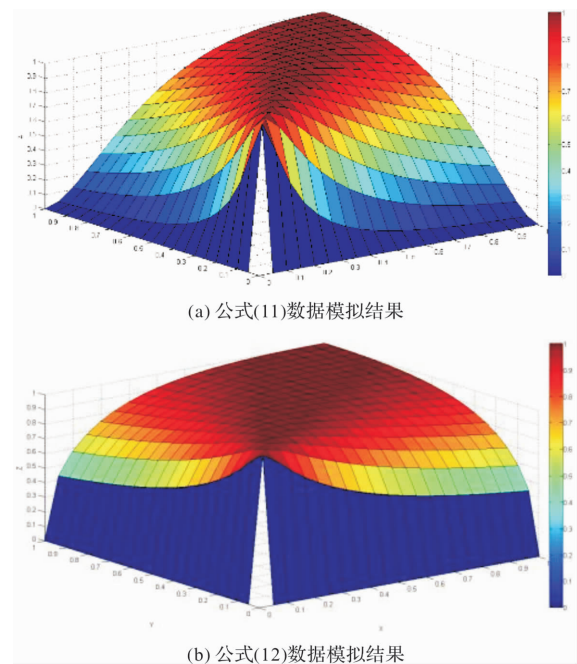


图 1 matlab 中两模型公式模拟结果对比图

Fig. 1 Comparison of simulation results between two model formulas in Matlab

基于以上分析, 本文选用公式(11)作为交通优势度与区域发展强度协同研究的模型方法。

$$C = \left\{ \frac{f(x) \times f(y)}{[(f(x) + f(y))/2]^2} \right\}^2 \quad (11)$$

式中:  $T = \alpha f(x) + \beta f(y)$ ,  $D = \sqrt{C \times T}$ 。其中  $C$  代表系统耦合度,  $f(x)$ ,  $f(y)$  分别代表交通优势度和区域发展强度。  $D$  为协调度,  $C$  为耦合度,  $T$  为两系统的综合协调指数。  $\alpha$ 、 $\beta$  为权重系数。参考相关研究确定协调水平状态分级, 即当  $D \in (0, 0.19]$  时为失调状态, 当  $D \in (0.2, 0.39]$  时为濒临失调,  $D \in (0.4, 0.59]$  低度协调,  $D \in (0.6, 0.79]$  时为中度协调,  $D \in (0.8, 1]$  时为高度协调。

## 1.6 OLS 模型与 GWR 模型

采用 OLS 全局回归模型——最小二乘法(ordinary least square, OLS)和局部回归模型——地理加权法(Geographical Weighted Regression, GWR)进行影响因素和机制分析。

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_n \beta_n(u_i, v_i)x_{in} + \varepsilon_i \quad (13)$$

式中:  $(u_i, v_i)$  为第  $i$  个样本点的地理坐标;  $\beta_0(u_i, v_i)$  为常数项的位置函数;  $n$  为自变量个数;  $x_{in}$  为第  $i$  个样本点第  $n$  个自变量的值;  $\beta_n(u_i, v_i)$  为自变量系数的位置函数;  $\varepsilon_i$  为随机误差。

## 2 结果分析

### 2.1 交通优势度评价

采用 SPSS 描述性统计法制作交通优势度频率统计直方图(图 2),发现频率分布偏度值为  $-0.382$ ,呈左偏态分布,峰度值为  $-0.363$ ,呈平缓峰态,比较接近正太分布状态,说明秦巴山区各区县交通优势度主要在中等偏上水平聚集,全距为  $0.8504$  则说明最大值与最小值的差距较大。对交通优势度进行分级后发现,最低( $0.004850 \sim 0.242945$ )、较低( $0.242946 \sim 0.405945$ )、中等( $0.405946 \sim 0.544584$ )、较高( $0.544585 \sim 0.671456$ )和最高( $0.671457 \sim 0.855248$ )5 个等级的区县数量占比分别为  $17.6\%$ 、 $18.5\%$ 、 $26.1\%$ 、 $26.1\%$ 和  $11.8\%$ ,说明交通优势度主要在  $0.5 \sim 0.7$  区间聚集。

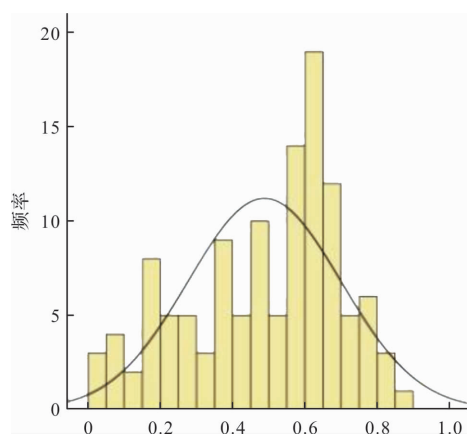


图 2 交通优势度评价结果频率统计直方图

Fig. 2 Frequency histogram of traffic advantage evaluation results

从空间分布看,交通优势度不均匀圈层式分异特征明显,呈“东高西低、北高南低”格局,见图 3。优势度较高区在秦岭北麓、川渝北部丘陵区 and 东部山地平原交错带呈连片式分布,在汉江、嘉陵江与丹江沿线呈“点-轴”式分布,地级城

市中心区成为中部重要节点。其中秦岭北麓和东部山地平原交错带靠近经济发达、交通干线密集的关中、豫东和江汉平原,临近陇海铁路、G30-连霍高速、G55-二广高速、G59-呼北高速等高等级交通干线,且周边分布有 5 座机场,是人口和产业密集区和基础设施高支撑区,因此交通优势度最大;而汉江、嘉陵江和丹江沿线依托河谷地形条件和制造业、旅游业快速发展,成为串联关中、长江中游城镇群的重要经济走廊,区内布设 G7011 十天高速、G5-京昆高速、G65-包茂高速、G40-沪陕高速等高等级交通干线,优势度也相对较高。交通优势度较低区主要位于地形复杂的秦岭西部、大巴山东部,由于交通建设难度较大,网络化程度低,一直以来都是区域交通洼地,也反映出地形条件对交通设施建设的约束,而交通条件差导致相对落后的经济发展和财政收入又限制了交通设施建设的进一步投入。此外,交通优势度差异也与区位条件紧密相关,山区区县由于距离大中城市较远,区位优势 and 交通优势很难凸显。

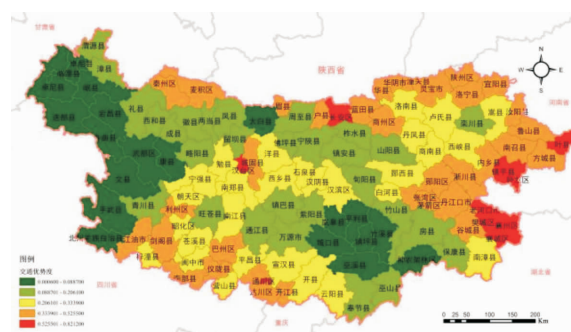


图 3 交通优势度空间格局分布图

Fig. 3 Distribution map of transportation advantage spatial pattern

### 2.2 区域发展强度评价

熵权 TOPSIS 法评价结果显示,秦巴山区区域发展强度水平整体较低,90%以上区县强度值不到 0.3,强度值超过 0.5 的区县只有 2 个。利用 ArcGIS 的 Jenks 自然间断法将各区县发展强度分为 5 类,区域发展强度越高,区县数量与占比越少,其中Ⅳ类强度( $0.145173 \sim 0.319665$ )区县占比为  $14.3\%$ ,Ⅴ类强度( $0.319666 \sim 0.804021$ )区县占比为  $8.40\%$ 。采用 SPSS 描述性统计法制作区域发展强度频率统计直方图,见图 4,发现偏度值为  $2.228$ ,呈右偏态分布,峰度值为  $5.068$ ,呈尖峰分布,说明区域发展强度也存在低值区集聚的显著特征。



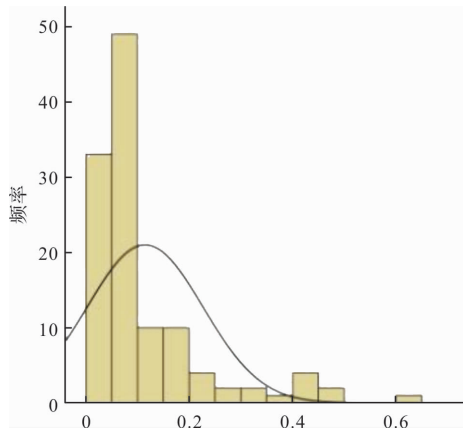


图4 区域发展强度频率统计图

Fig. 4 Statistical chart of regional development intensity frequency

区域发展强度的空间分布呈现“东高西低，外围高、内部低”的不均衡特征，空间分异明显(图5)。高值区主要位于秦岭北麓、东部山地平原交错带以及川北丘陵山区。该区地形条件适宜开发和人口聚集，受益于关中、成渝和中原城镇群的涓滴效应和辐射带动，区域呈明显较高强度开发状态；而秦岭南麓、巴山北麓和西部山区发展强度较低(绝大多数低于0.05)，是由于该区生态敏感，海拔高、地形起伏度大，自然保护区众多，因而人类活动强度低，特别是与青藏高原临近的甘南、川西地区基本处于研究区发展强度的最低区域。值得注意的是，从分维度贡献率来看，外围地区的土地强度对区域发展强度贡献率相对较高，人口强度贡献率略低于经济和土地强度，说明存在一定程度的土地过度开发问题，人地关系有待优化。

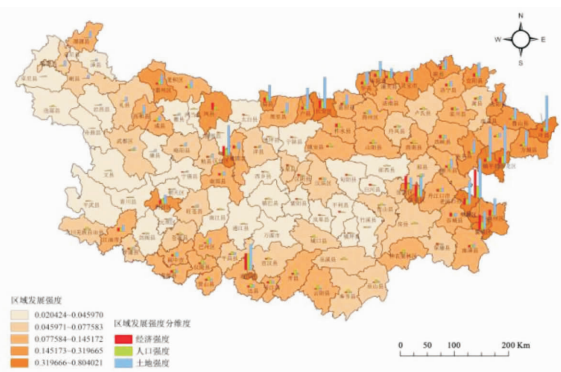


图5 区域发展强度空间格局分布图

Fig. 5 Spatial pattern distribution map of regional development intensity

## 2.3 交通优势度与区域发展强度空间耦合协同研究

### 2.3.1 空间协同与集聚特征

绘制交通优势度与区域发展强度关系变化图，

发现两者呈正相关，相关系数  $R^2$  为 0.604 1，但相关性具有明显的分界点(图6)。当交通优势度小于 0.55 时，区域发展强度随交通优势度增大而同步提升，但提升幅度并不明显，多在 0.1 以下聚集，当交通优势度超过 0.55 时，发展强度随交通优势度升高而迅速提升，这说明对秦巴山区而言，交通优势度较低时对区域发展强度影响作用有限，地区大多处于低发展强度状态；当交通条件突破一定门槛后，会对区域发展强度带来深刻影响，交通设施支撑和保障水平将直接决定区域发展整体水平高低。

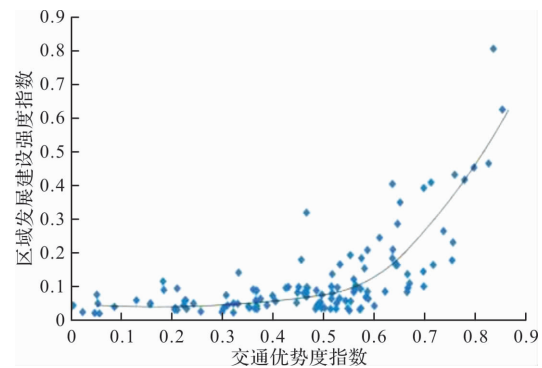


图6 交通优势度与区域发展强度关系图

Fig. 6 Relationship between transportation advantage and regional development intensity

以平均值为分界线划分高低区间象限，形成组合关系类型区发现，高交通优势-高发展强度区(HT-HI)、高交通优势-低发展强度区(HT-LI)、低交通优势-高发展强度区(LT-HI)、低交通优势-低发展强度区(LT-LI)数量占比分别为 25.2%、32.8%、1.7%、40.3%，同时发现以下特征：① HT-HI 区主要位于外围的秦岭北麓和东部山区平原交错带，良好的交通条件有效提升了该区域人口、产业的集聚程度和发展水平，交通和区域发展高度协调；② HT-LI 区主要位于京昆、包茂和沪陕高速沿线，随国家交通网络的快速建立和高等级公路建设，该交通优势度提升明显，但由于地处山区腹地，发展建设条件较差，区域发展滞后于交通改善；③ LT-HI 区只有周至和凤县两个区县，近年来依托旅游产业快速发展，区域发展水平明显提高，但由于缺少高等级交通干线，与周边大中城市联系不够紧密，交通建设仍滞后于区域发展；④ LT-LI 区域范围较大大，基本覆盖甘南、川西、秦岭、伏牛山以及神农架林区等复杂山区，落后的交通建设与区域低水平发展同时存在(图7)。



图 7 交通优势度与区域发展强度空间集聚

Fig. 7 Transportation advantage and regional development intensity spatial agglomeration

2.3.2 交通优势度与区域发展强度空间耦合研究

借助模型得到交通优势度与区域发展强度的耦合协调度评价结果: 总体耦合度为 0.375, 低于均值的区县占比为 61.3%, 耦合度大于 0.7 的区县占比只有 18.5%, 耦合程度偏低, 说明交通对区域发展强度存在一定影响, 但由于空间差异导致整体影响作用有限. 耦合度空间差异较大, 呈现“外围高、内部低”的空间格局(图 8).

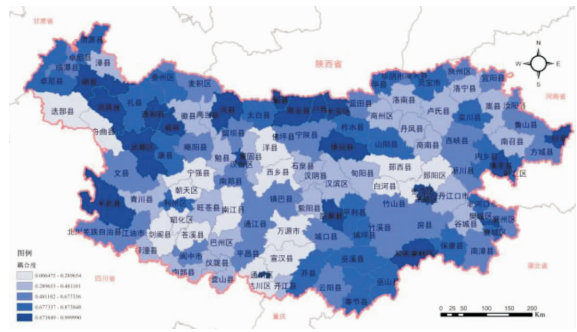


图 8 交通优势度与区域发展强度空间耦合度示意

Fig. 8 Schematic diagram of spatial coupling between transportation advantage and regional development intensity

耦合度高值区一般为交通条件和区域发展的两极地区(HT-HI 区); 随空间由外向内递进, 交通与区域发展耦合度呈衰减状态. 而协调度相比耦合度而言有所提高, 空间分布与耦合度类似, 在局部地区存在差异, 主要是甘南、川西以及湖北的高山地区交通建设与区域发展的协同程度反而较高(图 9); 协同性研究分析结果说明秦巴山区交通建设与区域强度发展的空间协同整体处于中等偏下、内外分异的格局状态.

2.4 交通因素对区域发展强度的影响差异与机制

理论上, 不同类型和级别的交通建设对区域发展强度溢出效应具有空间差异, 构建空间回归模型对其影响程度进行分析. 在 SPSS 平台下构建 OLS 模型, 发现国道网密度、省道网密度和铁路

网密度在 0.05 的置信水平下显著且模型拟合程度较好( $R^2=0.785$ )(表 3), 可进入最终回归模型, 而高速网密度、县乡道密度、交通设施影响度对区域发展强度的影响程度不显著( $Sig$  值大于 0.05); 继续将以上三项指标代入 GWR 模型对 OLS 进行优化, 核函数选用 ADAPTIVE (自适应法), 带宽选择 AIC(最小信息准则)法, 使其模型拟合程度明显提升( $R^2=0.924$ ).

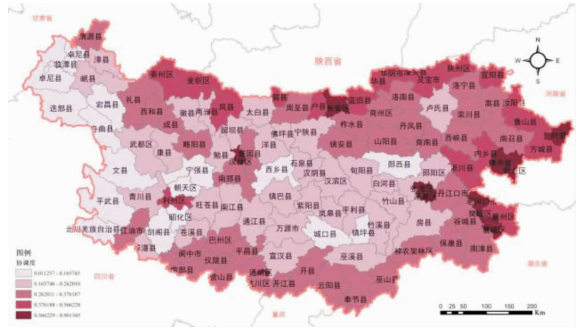


图 9 交通优势度与区域发展强度空间协调度

Fig. 9 The spatial coordination between transportation advantage and regional development intensity

表 3 OLS 与 GWR 模型参数比对

Tab. 3 Comparison of OLS and GWR model parameters

	OLS	GWR
$R^2$	0.785	0.744
$R^2$ Adjusted	0.779	0.659
F	139.577	-
Sig	0.000	0.05
AICc	-	-301.924

注: OLS 为最小二乘法回归模型, GWR 为地理加权回归模型(自适应法); 因变量为区域发展强度, 自变量为: 国道网密度、省道网密度和铁路网密度.

结果不难看出, 影响秦巴山区区域发展的交通建设因素主要是国道、省道和铁路的覆盖水平, 交通技术等级质量和区位优势因其在山区异质性不显著, 对区域发展影响作用有限. 交通设施由于类型和等级差异导致其在强化山地区域间物流、信息流交换的可介入性存在差异, 因而在对区域发展的贡献度上也有所不同, 总体呈现省道(0.374)>铁路(0.259)≥国道(0.235)的特征(表 4), 而高速公路由于建设时间较晚在发挥提升区域发展水平方面具有滞后性, 在当前秦巴山区发展中的积极作用尚不明显. 山区地形复杂性和低连通性造成高等级的公路网络化程度低, 长期依赖省道和铁路实现资源和产品的转换, 且因其严格的生态保护要求, 使得省道在对外联通和生态

旅游资源的串联上具有明显优势和外部性;铁路则由于自身的高运力和稳定性,在山区发展尤其是“三线建设”期对工业发展的高度支持,使其对区域发展的综合影响程度较高;而县乡道尽管在助力中小城市培育特别是带动乡村发展方面具有作用,但由于山区整体发展水平较低、低等级公路建设相对均衡,且物流信息沟通高度依赖对外交通的转换,因此在交通网络不尽完善的秦巴山区,其带动区域整体发展的作用不够显著。

表4 交通优势度与区域发展强度相关性分析

Tab. 4 Correlation analysis between transportation advantage and regional development intensity

	OLS			GWR
	B	Std Error	Sig.	Average Coefficient
常量	-0.033	0.012	0.002	
国道网密度	0.320	0.043	0.000	0.235
省道网密度	0.434	0.043	0.000	0.374
铁路网密度	0.286	0.052	0.002	0.259

## 2.5 地形因素对交通与区域发展空间耦合的影响

前文研究可见,秦巴山区交通优势度与区域发展强度呈正相关的紧密联系,但协调程度存在空间差异。为进一步探讨空间差异成因,重点分析山区核心要素——地形对其两者关系的影响作用。借助 AICGIS 统计功能制作不同海拔和起伏度分区的交通优势度与区域发展强度协调度等级水平图,发现随海拔和起伏度升高,交通优势度与区域发展强度的协同水平不断下降(图10),当海拔小于500 m,协调度均值较高,达到低度协调状态,说明交通条件在低海拔区对区域发展的支撑作用相对明显;当海拔为500~2 500 m时,交通建设与区域发展关系已濒临失调,交通条件对区域发展的支撑作用逐渐变弱;当海拔大于2 500 m时,则两者完全处于失调状态,这还是由于高海拔区的低发展适宜性导致即使高等级道路建设至此也未有效改善区域弱经济和低强度的基本态;制作区县单元交通优势度和区域发展强度均值随海拔与地形起伏度变化图(图11、图12)可以看出,秦巴山区交通优势度和区域发展强度空间协同性不高的原因除了两者随地形起伏变化的程度曲率具有差异外(交通与地形协同性高于发展强度),也与两者在地形复杂地区(高海拔、高起伏地区)的指数总体较低有关,可见地形因素对于秦巴山区交通与区域发展空间协同水平具有深刻影响。

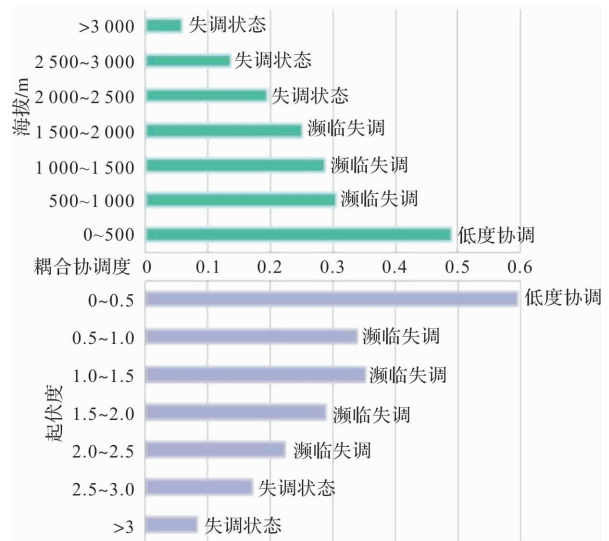


图10 交通优势度与区域发展强度协同水平地形分级图

Fig. 10 Terrain classification map of the synergy level between transportation advantage and regional development intensity

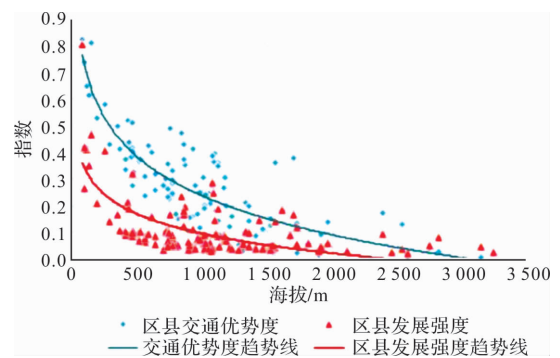


图11 海拔与交通优势度、区域发展强度关系图

Fig. 11 Diagram of the relationship between altitude, transportation advantage, and regional development intensity

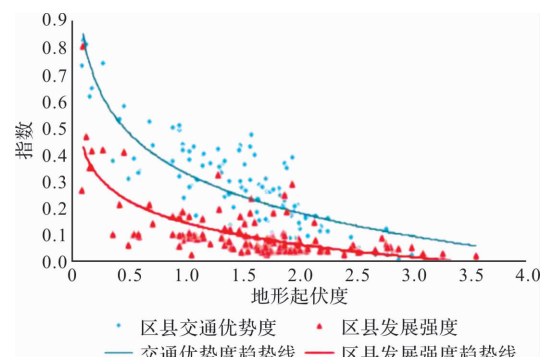


图12 地形起伏度与交通优势度、区域发展强度关系图

Fig. 12 Diagram of the relationship between terrain undulation, transportation advantage, and regional development intensity

研究表明,人口、经济等要素随地形变化而快速分异,海拔越低、地形越平坦的区域,自然环境越宜人,土地生产力越大,越适宜于组织生产生活;而海拔越高、起伏度越大的区域,温度、氧气含量越低、地质越不稳定且易发地质灾害,



土地改造难度也更大,以农林产业为主的经济结构对人口和经济集聚的吸引力有限,因而发展建设强度越低<sup>[23]</sup>,但超过一定海拔和起伏度阈值后,山地区域发展强度空间分异不明显,因而低海拔平坦区的区域发展对地形的敏感程度要明显大于中高海拔起伏地区。交通建设尽管也受地形影响,在空间上具有低地指向性,但因其建设的线性和低占地特征,在部分地形复杂区仍具有较高适应性,加上地处众多国家级城镇群之间,高等级区域交通联系的需求强烈,仍然会出现山区腹地所处复杂地形区交通优势度超前于区域发展强度的情况,导致空间协同性水平总体不高。

### 3 结论、讨论与建议

#### 3.1 结论

通过对秦巴山区交通优势度与区域发展强度的耦合协调关系进行研究,分析地形对其协同水平的影响机制,并探讨不同交通要素对区域发展强度的影响差异,得到以下结论:

(1)秦巴山区交通优势度呈“东高西低、北高南低”的空间态势,区域发展强度在低值区集聚特征显著,外围地区存在过度开发问题;

(2)秦巴山区交通优势度与区域发展强度呈正相关,交通条件突破一定门槛后,直接决定区域发展水平,“低-低”组合特征区县占比高,处于交通建设与区域发展的低水平均衡阶段;

(3)外围地区地形、城镇发展条件好,交通建设加速了人口经济要素的流动与集聚,带动区域发展的正向效应明显;中部腹地区域发展跟不上快速提升的交通建设导致出现“极差式”失调状态;西部山区复杂地形和恶劣气候环境造成居住和建设适应性较低,导致的交通建设与区域发展“双落后”,呈低水平协调状态;

(4)不同类型和等级交通设施对区域发展贡献度存在差异,省道和铁路具有明显优势和外部性,高速公路和县乡道作用不显著;

(5)地形是影响山区交通与区域发展协同水平的重要因素,协调度随地形海拔和起伏度的增大而降低,部分地区出现非常态规律可能是因为,在复杂地形区交通建设的相对高适应性和城镇发展的高敏感性导致。

#### 3.2 讨论

交通建设是地区发展的重要支撑,山区交通

建设与区域协同发展有着与平原地区类似的规律,也存在特殊地域条件影响下的独特特征。长期以来,各类交通建设在助推秦巴山区发展强度变化的同时,在空间上和协同水平上呈现明显的不平衡状态,越深入山区腹地,发展水平和协同程度越低。山区的空间分散性、环境高依赖性特征,使得高海拔复杂地形区的交通建设水平及其对发展要素的集聚服务能力明显降低,而高覆盖水平的省道和货运能力较强的铁路因其较高的地形适应能力客观上能快速缩小区域内的临近距离,强化要素流、信息流的互通互动,对激活山区资源开发和促进市场融入具有积极作用。

因此,在建设条件受限且处于国家高等级交通网络末端的广大山区,强化适应性交通设施(省道、国道)的覆盖水平及与高等级对外交通(高速、高铁)的衔接可有效提升其综合发展和协同水平。另一方面,高速公路对于山区发展的溢出效应不明显主要源于资源配置的时空错位及其建设的滞后性,其对新时期山区发展的带动作用还有赖进一步的研究观察,山区较高的生态敏感性和严格的生态保护要求使得这一区域未来难以也不应该靠增加人口和加大建设强度来提升其协调发展水平,交通建设应更加偏向注重质量而非规模,通过交通线网及枢纽的精细化布局设计、强化旅游产业适配型交通建设等手段,改善其边缘化发展格局,助推山区内外协同发展。

从研究方法来看,既往交通优势度模型对交通因素“势”的考虑较少,因此需要加入强化中心城市影响力等级予以强化,并可采用适宜精度的坡度、起伏度、粗糙度因子进行修正以增强模型在山区的适用性;同时,国内耦合度模型应用广泛,但存在一定程度的公式、阈值范围误用问题,建议采用耦合协调度模型研究时,采用数学方法对其公式意义予以验证。此外,山区交通建设与区域发展的协同匹配程度在不同阶段会受到发展政策的深度影响,受篇幅限制本文未作进一步分析,也值得在今后研究中深入思考。

#### 3.3 建议

(1)地形要素影响下山区交通建设与区域发展势必长期处于空间不均衡状态,未来应主要强化交通网络与区域发展的整体性和一体化程度,加密高速出入口和铁路站点以增强快速交通的溢出效应,强化秦岭北麓、汉江流域与川北丘陵区

南北纵向网络联系强度,加快西渝、西武、兰渝高速铁路建设进度,强化区域交通大通道建设,发挥核心城市对节点城市的辐射和涓滴效应,提升对旅游康养产业的带动作用;(2)基于秦巴山区国省道带动区域发展的明显特征,以“盘活存量、快慢结合”为原则、“区县国省道全覆盖”为目标,重点打通南部巴山、西部岷山地区的国省道交通瓶颈,尤其增大高品质旅游公路的里程和密度,依托现有交通线路和旅游资源形成大秦岭国家级、沿长江各支流、南水北调旅游交通走廊,实现优势交通无缝衔接、“毛细血管”四通八达的网络交通状态,促进山区内外交通流和经济流的高度循环;(3)针对部分地区尤其是中部腹地交通建设与区域发展显著不协调问题,重点要解决土地资源制约下的发展质量问题,加快区域发展由粗放型向集约型转变,提高建设用地利用效率,尤其是川北、豫西等距离中心城市较远地区应进一步调整产业结构,依托生态资源和军工产业布局发展生物医药、矿产精细加工、高端康养、航空制造等高附加值产业;(4)重视区域交通建设对产业结构调整、土地利用方式转变的引导作用,尤其是强化产业及职能上与外围优势地区的关联与承接,实现资源要素的快速溢出,依据交通与区域发展的现状协同水平,按照保护发展型、提升发展型、优化发展型和疏解发展型四种类型对秦巴山区各区县进行分类空间调整与管控,以促进全区域整体协调发展(图13)。

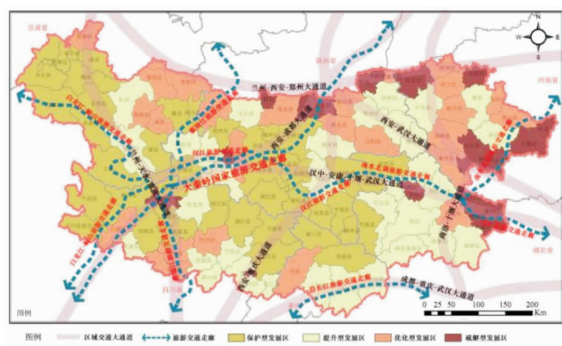


图13 秦巴山区交通与区域发展协同优化建议图

Fig. 13 Suggested diagram for coordinated optimization of transportation and regional development in the Qinba Mountain area

## 参考文献 References

[1] 吴威,梁双波,曹有挥. 流域交通运输地理研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2019(8): 1136-1149.

WU Wei, LIANG Shuangbo, CAO Youhui. Research progress and prospects of river basin transportation geography [J]. Progress in Geography, 2019 (8): 1136-1149.

[2] 周海波. 交通基础设施、产业集聚与区域经济发展:关联性效率分析[D]. 南京: 东南大学, 2017.

ZHOU Haibo. Transportation infrastructure, industrial agglomeration and regional economic development: Correlation and efficiency analysis [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.

[3] OZBAY K, OZMEN-ERTEKIN D, BERECHMAN J. Contribution of transportation investments to county output [J]. Transport Policy, 2007, 14(4): 317-329.

[4] BUTTON K, YUAN J. Airfreight transport and economic development: An examination of causality [J]. Urban Studies, 2013, 50(2): 329-340.

[5] 麦地娜·哈尔山, 母睿. 城市交通与土地利用一体化发展评价[J]. 城市规划, 2018, 42(7): 86-92.

MEDINA · H, MU Rui. Evaluation of integrated development of urban transport and land use [J]. City Planning Review, 2018, 42(7): 86-92.

[6] 雷斌, 王丛, 李娜, 等. 城市轨道交通对土地利用的影响研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2023, 55(1): 27-35.

LEI Bin, WANG Cong, LI Na et al. Study on the impact of urban rail transit on land utilization [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2023, 55(1): 27-35.

[7] 郭向阳, 穆学青, 明庆忠, 等. 旅游地快速交通优势度与旅游流强度的空间耦合分析[J]. 地理研究, 2019, 38(5): 1119-1135.

GUO Xiangyang, MU Xueqing, MING Qingzhong, et al. Spatial coupling analysis of rapid transit dominance and tourism flow intensity in tourism destinations [J]. Geographical Research, 2019, 38(5): 1119-1135.

[8] 杨忍, 徐茜, 余昌达. 中国县域交通优势度与农村发展的空间协同性及影响机制解析[J]. 地理科学, 2016, 36(7): 1017-1026.

YANG Ren, XU Qian, YU Changda. Spatial synergy and influencing mechanism between county transportation dominance and rural development in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(7): 1017-1026.

[9] 张琦, 耿娟, 丁昕, 等. 内陆省份交通门户与门户经济联系的协调性[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2023, 55 (1): 1-11.

ZHANG Qi, GENG Juan, DING Xin, et al. Coupling coordination between development of transport gateways and their economic connections in inland provinces [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural

- Science Edition), 2023, 55 (1): 1-11.
- [10] 王金哲, 张光辉, 聂振龙, 等. 滹沱河流域平原区人类活动强度的定量评价[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(10): 41-44.
- WANG Jinzhe, ZHANG Guanghui, NIE Zhenlong, et al. Quantitative evaluation of human activities in the plain area of Hutuo River Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23 (10): 41-44.
- [11] 刘芳, 闫慧敏, 刘纪远, 等. 21 世纪初中国土地利用强度的空间分布格局[J]. 地理学报, 2016, 71(7): 1130-1143.
- LIU Fang, YAN Huimin, LIU Jiyuan, et al. Spatial distribution pattern of land use intensity in China in the early 21st century[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(7): 1130-1143.
- [12] 刘艳军, 于会胜, 刘德刚, 等. 东北地区建设用地开发强度格局演变的空间分异机制[J]. 地理学报, 2018, 73(5): 818-831.
- LIU Yanjun, YU Huisheng, LIU Degang, et al. Spatial differentiation mechanism of development intensity pattern of construction land in Northeast China[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(5): 818-831.
- [13] 段佩利, 刘曙光, 尹鹏, 等. 中国沿海城市开发强度与资源环境承载力时空耦合协调关系[J]. 经济地理, 2018, 38(5): 60-67.
- DUAN Peli, LIU Shuguang, YIN Peng, et al. Spatial and temporal coupling coordination between development intensity and resource and environmental carrying capacity of coastal cities in China[J]. Economic Geography, 2018, 38(5): 60-67.
- [14] 薄力之, 宋小冬. 建设强度的精细化管控——“整体分区”与“地块赋值”方法的融合[J]. 城市发展研究, 2018, 25(9): 82-90.
- BO Lizhi, SONG Xiaodong. Fine control of construction intensity: Integration of “whole zoning” and “plot assignment” methods[J]. Urban Development Studies, 2018, 25(9): 82-90.
- [15] HANSEN W G. How accessibility shapes land-use[J]. Journal of the American Institute of Planners, 1959, 25(2): 73-76.
- [16] MORRIS J M, DUMBLE P L, WIGAN M R. Accessibility indicators for transport planning[J]. Transportation Research Part A, 1978, 13(2): 91-109.
- [17] 金凤君, 王成金, 李秀伟. 中国区域交通优势的甄别方法及应用分析[J]. 地理学报, 2008(8): 787-798.
- JIN Fengjun, WANG Chengjin, LI Xiuwei. Screening methods and application analysis of regional transportation advantages in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2008(8): 787-798.
- [18] 崔学刚, 方创琳, 张蔷. 山东半岛城市群高速交通优势度与土地利用效率的空间关系[J]. 地理学报, 2018, 73(6): 1149-1161.
- CUI Xuegang, FANG Chuanglin, ZHANG Qiang. Spatial relationship between high speed transportation dominance and land use efficiency in Shandong peninsula urban agglomeration[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(6): 1149-1161.
- [19] 程佳佳, 王成金, 刘卫东. 西北地区交通优势度格局及空间分异[J]. 地球科学进展, 2016, 31(2): 192-205.
- CHENG Jiajia, WANG Chengjin, LIU Weidong. Traffic dominance pattern and spatial differentiation in northwest China [J]. Advance in Earth Sciences, 2016, 31(2): 192-205.
- [20] 闵敏, 苗长虹, 胡志强, 等. 基于地形修正的河南省县域交通优势度评价及与经济发展的空间耦合研究[J]. 地域研究与开发, 2018, 37(5): 37-42.
- MIN Min, MIAO Changhong, HU Zhiqiang, et al. Evaluation of county traffic advantage degree based on terrain correction and its spatial coupling with economic development in henan province[J]. Areal Research and Development, 2018, 37(5): 37-42.
- [21] 蔡绍洪, 魏媛. 喀斯特贫困山区低碳经济与环境系统耦合协调发展研究——以贵州省为例[J]. 贵州财经大学学报, 2018(4): 90-98.
- CAI Saohong, WEI Yuan. Coupling and coordinated development of low-carbon economy and environment system in karst poor mountainous areas: A case study of Guizhou Province[J]. Journal of Guizhou University of Finance and Economics, 2018(4): 90-98.
- [22] 张引, 杨庆媛, 闵婕. 重庆市新型城镇化质量与生态环境承载力耦合分析[J]. 地理学报, 2016, 71(5): 817-828.
- ZHANG Yin, YANG Qingyuan, MIN Jie. Coupling analysis of new-type urbanization quality and eco-environmental carrying capacity in Chongqing [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(5): 817-828.
- [23] 敬博, 李同昇, 温伯清, 等. 基于地形因素的秦巴山区人口-经济空间格局及其影响机制研究[J]. 地理科学, 2020, 40(5): 793-803.
- JING Bo, LI Tongsheng, WEN Boqing, et al. Study on the Spatial pattern of population-economy and its influencing mechanism based on topographic factors in Qinling-Ba Mountainous Area[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(5): 793-803.

(编辑 吴海西)