

史海金, 吴文恒, 李研, 等. 基于夜间灯光影像数据的黄河流域中心城市建成区空间扩展及动力因子分析[J]. 中国沙漠, 2021, 41(6): 235–248.

# 基于夜间灯光影像数据的黄河流域中心城市 建成区空间扩展及动力因子分析

史海金<sup>a</sup>, 吴文恒<sup>ab</sup>, 李研<sup>a</sup>, 刘金凤<sup>a</sup>, 万赞<sup>a</sup>

(西北大学 a. 城市与环境学院 / b. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西 西安 710127)

**摘要:** 研究黄河流域建成区扩展特征有助于透视用地开发效果和践行中心城市高质量发展规划。基于1992、1997、2002、2007、2012、2018年6期夜间灯光影像与统计数据, 提取建成区范围, 采用扩展强度指数、紧凑度指数、协调发展系数与灰色关联分析, 探究1992—2018年黄河流域8个中心城市扩展的时空格局、质量及动力因子。结果表明: (1) 黄河流域中心城市建成区面积分化明显, 中下游城市扩展规模和强度大, 扩展形态呈紧凑度普遍下降趋势。(2) 夜间灯光影像数据刻画的西安建成区综合水平高、西宁水平低, 银川综合发展快、兰州慢; 除西宁、呼和浩特与太原外, 其他中心城市平均夜间灯光指数在1997—2018年呈下降趋势, 反映城市扩展水平降低。(3) 中心城市人口—土地协调发展系数均呈波动下降趋势, 除呼和浩特、太原和济南外, 人口—土地由基本协调型向土地过快扩展型转变; 中心城市经济—土地协调发展系数呈波动下降趋势, 经济年均增长率降低, 建成区面积年均扩展率增加, 基本由经济过快增长型向经济—土地协调发展型转变。(4) 中心城市空间扩展主要受经济发展(地区生产总值)影响; 从中心城市整体看, 全时段(1996—2018年)行政力(固定资产投资)和内源力(人口规模)影响作用较大, 分时段(1996—2002年、2002—2012年与2012—2018年)行政力影响系数亦较高, 市场力(社会消费品零售总额)与外向力(实际利用外资额)影响作用程度随时间增加明显。新时期黄河流域中心城市空间扩展应注重内部提质增效, 提高建设用地利用效率, 促进城市高质量发展。

**关键词:** 建成区空间扩展; 夜间灯光影像; 中心城市; 动力因子; 灰色关联分析; 黄河流域

文章编号: 1000-694X(2021)06-235-14

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00126

中图分类号: F291.1

文献标志码: A

## 0 引言

1990年以来, 中国城市化进程加快, 城市经济和人口快速增长, 建成区面积不断扩大, 并有持续扩展趋势<sup>[1-3]</sup>。过去数十年中国城市发展出现冒进式的土地开发<sup>[4]</sup>、土地利用效益低下、“摊大饼”式蔓延的态势<sup>[5]</sup>, 诸多问题显现, 需要控制城市蔓延对土地的低效利用, 树立新型城镇化、精明增长、紧凑城市、智慧城市、生态城市概念, 通过对城市开发边界、城乡建设用地扩展边界等概念的探索与应用<sup>[6-7]</sup>, 实行土地集约利用<sup>[8]</sup>, 应对城镇建设用地快速扩张和有序蔓延带来的人居环境和社会问题<sup>[6]</sup>。

因此, 研究城市扩展的时空演变态势, 对于认识城市发展变化、衡量扩展水平具有指示作用<sup>[9]</sup>。

目前城市扩展的研究主要有4个方面。一是城市扩展的时空格局。基于长时间序列的统计、遥感影像等数据, 采用数理分析、GIS技术等方法探究城市建成区时空扩展特征, 利用形状指数、紧凑度指数反映城市空间形态变化, 研究涉及城市群<sup>[9-11]</sup>、省域<sup>[12-13]</sup>和城市<sup>[2, 14-15]</sup>等不同尺度。二是城市扩展质量的优化调控。运用人口、经济与土地的协调发展系数判断城市用地扩展质量<sup>[10]</sup>, 从生态适宜性的视角对城市用地扩展进行优化和调控<sup>[16]</sup>。三是城市

收稿日期: 2021-07-14; 改回日期: 2021-09-25

资助项目: 教育部人文社会科学研究规划基金项目(18YJA840013); 陕西省社会科学基金项目(2016D022); 西北大学人文地理与城乡规划国家一流本科专业建设点项目(2020-2022)

作者简介: 史海金(1997—), 男, 山西平遥人, 硕士研究生, 研究方向为区域发展。E-mail: 2276419503@qq.com

通信作者: 吴文恒(E-mail: wuwh@nwu.edu.cn)

扩展的机制。从社会、经济、政策、制度等方面,采用多维驱动力模型,揭示城市扩展动力机制<sup>[17-19]</sup>。四是城市增长边界研究。利用元胞自动机等学习模型,设定多情景模式,进行城市用地空间增长模拟,划定城市增长边界<sup>[20-21]</sup>,为城市发展规划提供重要参考依据。

城市扩展的研究成果颇丰,但仍存在以下不足。从数据来源看,传统统计数据缺乏空间信息,高分辨率遥感影像数据量大、处理步骤繁琐、难度较高,且多用以解译不同土地利用类型,无法直观反映城市发展活力与扩展水平。从研究对象看,现有城市扩展研究多集中在城市个案和城市群整体研究,对于多个城市的比较分析相对较少。近年来,夜间灯光影像时间跨度长,通过统计数据法确定灯光阈值可以较为准确地提取建成区范围<sup>[9,11-13]</sup>,反映城市实际功能和活力而较多地应用于城市空间扩展研究<sup>[15,22-24]</sup>,亦为研究非行政边界区域的综合发展水平提供了数据支持。

2019年9月,黄河流域生态保护和高质量发展战略被提出,强调推动沿黄地区中心城市及城市群高质量发展,对中国区域协调发展、经济格局的重塑具有重要意义<sup>[25]</sup>。黄河流域高质量发展离不开中心城市带动及其整个战略功能的发挥<sup>[26]</sup>,同时中心城市作为黄河流域各都市圈的核心,具有重要的辐射带动作用。

鉴于此,本文利用DMSP/OLS和NPP/VIIRS夜

间灯光影像数据以及统计数据,运用GIS和数理分析相结合的方法,分析1992—2018年黄河流域中心城市空间扩展特征与动力因子。其中,空间扩展特征包括扩展规模、强度与形态3个维度刻画的扩展时空格局特征,以及城市综合发展水平、扩展水平和人-土地、经济-土地协调发展程度刻画的扩展质量特征;扩展动力因子主要基于经济发展、市场力、行政力、外源力与内源力5个维度,采用灰色关联分析法进行探究。研究对于深入认识黄河流域城市用地变化特征,有序调控城市用地空间,引导流域高质量发展具有重要意义。

## 1 研究区与数据处理

### 1.1 研究区概况

黄河自西向东流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东9个省区,跨越东、中、西三大地区,流域上游(西宁、兰州、银川与呼和浩特)、中游(西安与太原)、下游(郑州与济南)共形成8个中心城市和相应的都市圈(图1)。到2018年,中心城市行政区总面积80 400 km<sup>2</sup>,常住人口4 352万人,占全国总人口3.10%,GDP 3.91万亿元,占全国GDP的4.25%。其中,郑州GDP和常住人口在8个中心城市中最高,分别为1.01万亿元和1 013.6万人,西宁GDP最低(0.13万亿元),银川常住人口最少(225.06万人),中心城市在社会、经济等方面差异

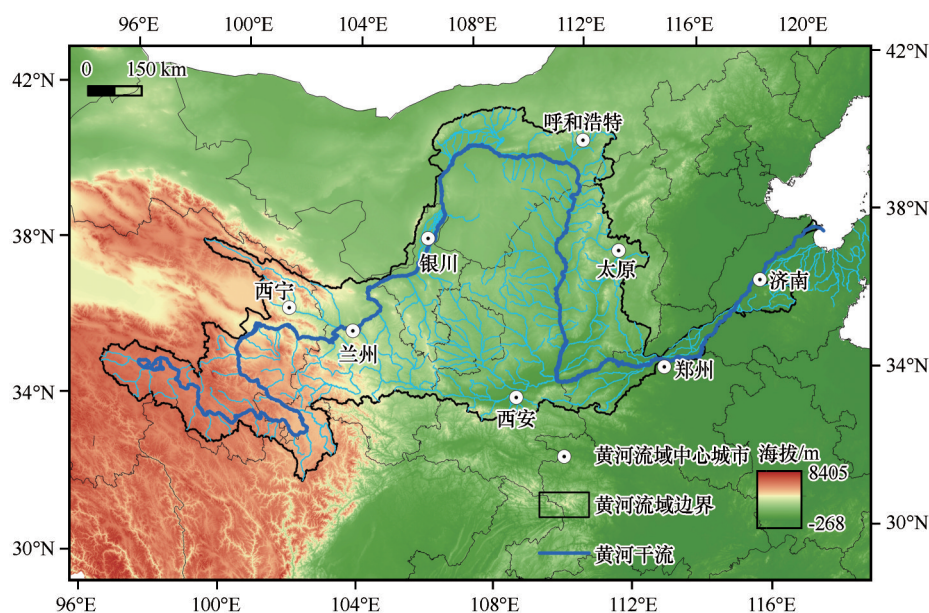


图1 黄河流域中心城市

Fig.1 Distribution of central cities in the Yellow River Basin

显著。流域中心城市是省域的政治、经济中心,黄河流域高质量发展的引擎和核心,对区域发展有较强的辐射带动作用,具有探究城市建成区空间扩展的典型性与代表性。

## 1.2 数据来源

研究所用影像数据为DMSP/OLS (Version4)和NPP/VIIRS夜间灯光影像数据。前者包括6个DMSP卫星F10(1992—1994年)、F12(1994—1999年)、F14(1997—2003年)、F15(2000—2007年)、F16(2004—2009年)、F18(2010—2013年)获取的1992—2013年共22年34期影像,像元灰度值范围为0—63,分辨率约1 km。后者为2012—2018年7年7期数据,分辨率约500 m。以上影像数据均来源于美国国家地理信息中心网站(<https://ngdc.noaa.gov/eog/>)。

各城市建成区面积数据来源于《中国城市统计年鉴》(1993—2019年)、中经网统计数据库与中国经济和社会统计数据库,行政边界数据从国家基础地理信息中心获取,社会经济数据来源于1997—2019年各省统计年鉴、城市统计年鉴及统计公报。

## 1.3 数据处理

### 1.3.1 DMSP/OLS多传感器影像像元值校正

将影像投影坐标系转换为兰伯特等面积投影,影像分辨率重采样为1 km。校正步骤包括:①由于传感器自身的特性导致DMSP影像出现像元值(DN)过饱和现象,即DN值达到63后不再升高,应用不变区域法对影像进行相互校正和饱和校正;②为充分利用多个传感器获取同一年的影像数据,并解决相互校正后影像数据集的不连续问题,进行同一年份不同传感器影像校正;③校正影像间像元异常波动问题<sup>[27]</sup>。

### 1.3.2 NPP/VIIRS影像像元值校正

NPP/VIIRS夜间灯光影像数据为月合成产品,没有去除火光、油气燃烧、火山喷发和背景噪声<sup>[28]</sup>。采取以下步骤进行处理:①将月合成产品中DN值小于0的像元DN值设置为0;②使用ArcGIS 10.2低通滤波工具消除极高灰度值<sup>[29]</sup>;③取所有月份影像DN值的平均值代表全年平均灯光亮度值<sup>[30]</sup>;④投影转换为兰伯特等面积投影,分辨率设置为1 km。

DMSP/OLS与NPP/VIIRS共有年份为2012年。

因此,以地级行政区域为校正单元,DMSP/OLS影像数据为参考对象,NPP/VIIRS影像数据为校正对象,构建了2012年DMSP/OLS与NPP/VIIRS影像数据地级行政区域像元均值的回归方程<sup>[31]</sup>,发现幂函数拟合的效果较好,拟合公式为 $y=16.04x^{0.57}-0.82$ , $R^2$ 为0.87。利用得到的拟合公式重新拟合2013—2018年NPP/VIIRS数据,获得连续的时间序列数据集。

## 2 研究方法

### 2.1 城市建成区提取方法

由政府发布的统计数据可以较为准确地反映城市建成区真实面积,所以利用统计数据法获得黄河流域中心城市建成区范围。步骤为:①设定一个初始灯光阈值并逐步提高或降低,统计该城市市辖区范围内夜间灯光影像数据大于等于设定灯光阈值像元的总面积。②当像元总面积与统计数据中的城市建成区面积相差最小时即为真实灯光阈值。③根据确定的灯光阈值提取得到中心城市6个年份市辖区的建成区范围。

### 2.2 扩展强度指数

引入扩展强度指数(UII)对城市扩展的程度进行定量化比较,反映城市扩展的强弱快慢,使得不同时期的城市扩展速度具有可比性。计算公式为:

$$UII = \frac{(UA_{n+i} - UA_i)}{nUA_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $UA_{n+i}$ 和 $UA_i$ 分别是 $n+i$ 年和 $i$ 年的城市建成区面积; $n$ 代表年份。

### 2.3 紧凑度指数

城市外围轮廓形态的紧凑度是反映城市空间形态的一个重要指标,取值范围0—1,城市紧凑度指数值越大,说明形状越紧凑和规整。计算公式为:

$$BCI = 2\sqrt{\pi A}/P \quad (2)$$

式中: $BCI$ 为城市紧凑度指数; $P$ 、 $A$ 分别为城市建成区斑块的周长与面积。

### 2.4 城市发展水平指标

使用区域夜间灯光指数与平均夜间灯光指数,反映灯光强度的动态变化,比较不同时期同一城市发展水平以及同一时期不同城市的发展水平<sup>[12]</sup>。



计算公式为:

$$T = \sum_{i=1}^n D_i \quad (3)$$

$$A = \frac{T}{n} \quad (4)$$

式中:  $D_i$  为每个栅格端元的像元值;  $n$  为区域内栅格总数;  $T$  表示区域夜间灯光指数, 反映城市综合发展水平;  $A$  表示平均夜间灯光指数, 反映城市扩展水平。

## 2.5 城市用地与人口、GDP协调发展程度

从城市用地扩展视角来看, 高质量的城市用地扩展是经济、人口与城市用地扩展协调发展的过程。因此, 分别构建人口-土地、经济-土地协调发展系数, 分析城市用地扩展质量<sup>[10]</sup>。

### 2.5.1 人口-土地协调发展系数

基于目标年和基准年城市建成区人口密度的相对变化分析城市用地扩展的人口-土地协调程度, 公式为<sup>[32]</sup>:

$$R_p = \frac{POP_b}{POP_a} \quad (5)$$

式中:  $R_p$  为人口-土地协调发展系数;  $POP_b$  为目标年城市建成区人口密度;  $POP_a$  为基准年城市建成区人口密度。根据人口-土地协调发展系数划分为人口过快增长型 ( $R_p > 1.3$ )、人口-土地基本协调型 ( $0.9 < R_p \leq 1.3$ ) 与土地过快扩展型 ( $0 < R_p \leq 0.9$ ) 3 种类型。

### 2.5.2 经济-土地协调发展系数

根据某一时间段城市经济年均增长率与建成区面积年均扩展率的比值大小刻画经济-土地协调发展程度, 公式为<sup>[32]</sup>:

$$R_e = \frac{\sqrt[n]{GDP_b/GDP_a} - 1}{\sqrt[n]{Land_b/Land_a} - 1} \quad (6)$$

式中:  $R_e$  为经济-土地协调发展系数;  $GDP_a$ 、 $GDP_b$  分别为基准年、目标年城市 GDP;  $Land_a$ 、 $Land_b$  分别为基准年、目标年城市建成区面积;  $n$  为研究间隔年份。根据经济-土地协调发展系数划分为土地过快扩展型 ( $0 \leq R_e < 1$ )、经济-土地协调发展型 ( $1 \leq R_e < 5$ ) 和经济过快增长型 ( $R_e \geq 5$ )<sup>[10]</sup>。

## 2.6 灰色关联分析

城市空间扩展受社会、经济、市场、政策、投资等因素影响。结合相关文献<sup>[2, 15, 18, 33-34]</sup>, 将城市空间扩展的动力因子归结为经济发展、行政力、市场力、

外向力和内源力 5 个方面。其中, 经济发展对城市空间扩展的推动力量表现为地区生产总值、工业总产值、第三产业增加值等; 行政力主要指政府对城市空间扩展的助推力量, 表现为固定资产投资、产业布局引导、基础设施建设等; 市场力指市场对区域生产要素进行有效配置, 表现为社会消费品零售总额等; 外向力指全球化背景下外商投资成为推动城市空间扩展的重要力量, 表现为实际利用外资额等; 内源力指城市人口增加成为城市空间扩展的重要内部因素, 表现为人口规模等。本文采用 1996—2018 年黄河流域中心城市的地区生产总值、固定资产投资、社会消费品零售总额、实际利用外资额、人口规模等 5 个指标, 分别代表经济发展、行政力、市场力、外向力和内源力对建成区扩展的影响作用。

灰色关联法主要分析系统中各因素间的关联程度, 认为刻画因素的变量所表示曲线的集合形状越接近, 它们之间关联程度越大<sup>[35]</sup>。由于社会、经济、市场、政策、投资对城市建成区扩展影响是一个复杂的系统问题, 既有已知因子, 还有许多未知因子, 灰色系统理论和方法对这类问题较为有效。

灰色关联法需要确定分析数据序列, 选择一个参考数列  $X_0 = \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n)\}$  和  $m$  个比较数列  $X_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ 。参考数列与比较数列的关联度越高, 关系越紧密。文中参考数列为城市建成区面积 ( $X_0$ ), 比较数列为经济发展 ( $X_1$ )、行政力 ( $X_2$ )、市场力 ( $X_3$ )、外向力 ( $X_4$ ) 与内源力 ( $X_5$ )。对原始数据  $Z$  值标准化处理后, 基本步骤如下<sup>[36-37]</sup>:

### (1) 计算关联系数

定义 1:  $k_{0(n-1)} = x_{0(n)} - x_{0(n-1)}$ , 序列  $K_0 = (k_{0(1)}, k_{0(2)}, \dots, k_{0(n-1)})$ ,  $K_0$  为参考序列各个对应时段的斜率所组成的序列, 称  $\delta(X_0)$  为  $K_0$  的变异系数。公式如下:

$$\overline{K_0} = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} k_{0(j)} \quad (7)$$

$$S_0 = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{j=1}^{n-1} (k_{0(j)} - \overline{K_0})^2} \quad (8)$$

$$\delta(X_0) = \frac{S_0}{\overline{K_0}} \quad (9)$$

定义 2:  $k_{i(n-1)} = x_{i(n)} - x_{i(n-1)}$ , 序列  $K_i = (k_{i(1)}, k_{i(2)}, \dots, k_{i(n-1)})$ ,  $K_i$  为比较序列各个对应时段的斜率所组成的序列,  $K_{0i} = K(X_0/X_i) = (k_{01}/k_{i1}, k_{02}/k_{i2}, \dots, k_{0(n-1)}/k_{i(n-1)})$ , 表示  $X_0$  和  $X_i$  各对应时段的斜率比值所组成的

序列,称 $\varepsilon(X_0/X_i)$ 为 $K_{0i}$ 的广义变异系数。公式如下:

$$\overline{K_{0i}} = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} \frac{k_{0(j)}}{k_{ij}} \quad (10)$$

$$S_{0i} = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{j=1}^{n-1} \left( \frac{k_{0j}}{k_{ij}} - 1 \right)^2} \quad (11)$$

$$\varepsilon(X_0/X_i) = \frac{S_{0i}}{\overline{K_{0i}}} \quad (12)$$

(2) 计算关联度 $\gamma(X_0, X_i)$

$$\gamma(X_0, X_i) = \begin{cases} \frac{1 + |\delta(X_0)|}{1 + |\delta(X_0)| + |\varepsilon(X_0/X_i)|}, & \overline{K_{0i}} \geq 0 \\ -\frac{1 + |\delta(X_0)|}{1 + |\delta(X_0)| + |\varepsilon(X_0/X_i)|}, & \overline{K_{0i}} < 0 \end{cases} \quad (13)$$

本文将研究时段分为总进程(1996—2018年)及1996—2002年、2002—2012年、2012—2018年3个阶段,将研究对象分为整体与城市2个区域尺度。用灰色关联法分析中心城市空间扩展的动力因子,关联度越高,表示影响因子对建成区扩展的影响作用越大。同时从定性角度分析区位条件与政策引导对城市扩展的影响作用。

### 3 结果与分析

#### 3.1 城市建成区提取结果

1992—2018年黄河流域不同时期中心城市建成区扩展的规模、幅度、方向和形态具有差异性(图2)。

#### 3.2 城市建成区扩展时空格局

##### 3.2.1 扩展规模与扩展强度

建成区面积扩展分化明显。1992年,黄河流域中心城市建成区面积划分为2个层级,处于100 km<sup>2</sup>以下的3个城市为银川、西宁与呼和浩特,100—200 km<sup>2</sup>的城市有郑州、济南、西安、兰州和太原,流域中心城市面积差距相对较小。2018年,城市建成区面积分化成5个层级:低于100 km<sup>2</sup>的城市西宁,200—300 km<sup>2</sup>的银川和呼和浩特,300—400 km<sup>2</sup>的太原和兰州,500—600 km<sup>2</sup>的济南和郑州,700 km<sup>2</sup>以上的西安(表1)。流域上游城市与中下游城市(西安、郑州、济南)面积扩展差距明显。

由于区位条件限制、工业发展滞后、生态保护战略等影响,高原城市西宁经济发展水平低,1992—2018年建成区规模变化最小,27年间扩展43 km<sup>2</sup>。1992年太原、兰州、西安建成区面积分别为168 km<sup>2</sup>、163 km<sup>2</sup>和148 km<sup>2</sup>,得益于“一五”计划、“二五”计划和“三线”建设时期工业布局与城市规划等方面影响<sup>[38]</sup>,土地城市化规模大,2018年面积分别为340 km<sup>2</sup>、331 km<sup>2</sup>和702 km<sup>2</sup>,分化明显。中原城市郑州为中部地区重要城市、国家交通枢纽,建成区面积由1992年的100 km<sup>2</sup>增长至2018年544 km<sup>2</sup>,扩展规模较大。济南受惠于改革开放和东部沿海地区率先发展战略,土地面积由110 km<sup>2</sup>增长到524 km<sup>2</sup>。整体看,流域中游的西部地区经济中心西安拓展规模最大(554 km<sup>2</sup>),下游的平原城市、综合交通枢纽城市郑州扩展规模次之(444 km<sup>2</sup>),上游的高原城市西宁扩展规模最小(43 km<sup>2</sup>)。

中下游城市扩展强度大,上游扩展强度小。1992—2018年,中下游城市中,太原扩展强度指数为3.94%,郑州扩展强度指数达到17.08%,济南、西安均为14.40%;上游城市西宁扩展强度指数为3.18%,兰州、呼和浩特分别为3.96%与9.49%,银川达到14.74%。中下游城市扩展强度大,上游普遍较小。

城市建成区扩展强度分时段具有差异性。流域中下游城市受惠于较好的区位条件、资源优势以及工业化进程推进加快、区域发展战略实施等因素,在1992—2007年扩展强度呈大幅增加趋势;2007—2012年扩展强度趋缓,2012—2018年除太原外,其余中下游城市扩展强度指数较上一时段有明显增加,尤以西安为最(表2)。流域上游城市西宁不同时段扩展强度较为平缓,兰州在2012—2018年、银川2002—2007年、呼和浩特1997—2002年的扩展强度指数相对较大。整体上,上游城市阶段扩展特征不明显。

##### 3.2.2 扩展形态

中心城市建成区紧凑度指数随时间普遍下降。

1992年8个中心城市的紧凑度指数介于0.44—0.77(表3),紧凑度指数最小的是兰州(0.44),最大的是郑州(0.77);2018年紧凑度指数介于0.31—0.60,紧凑度指数最小和最大的城市分别为西宁(0.31)和呼和浩特(0.60),西宁建成区形状不规则度最高。整体看,8个中心城市的紧凑度指数平均值由1992年的0.56下降为2018年0.43,说明27年

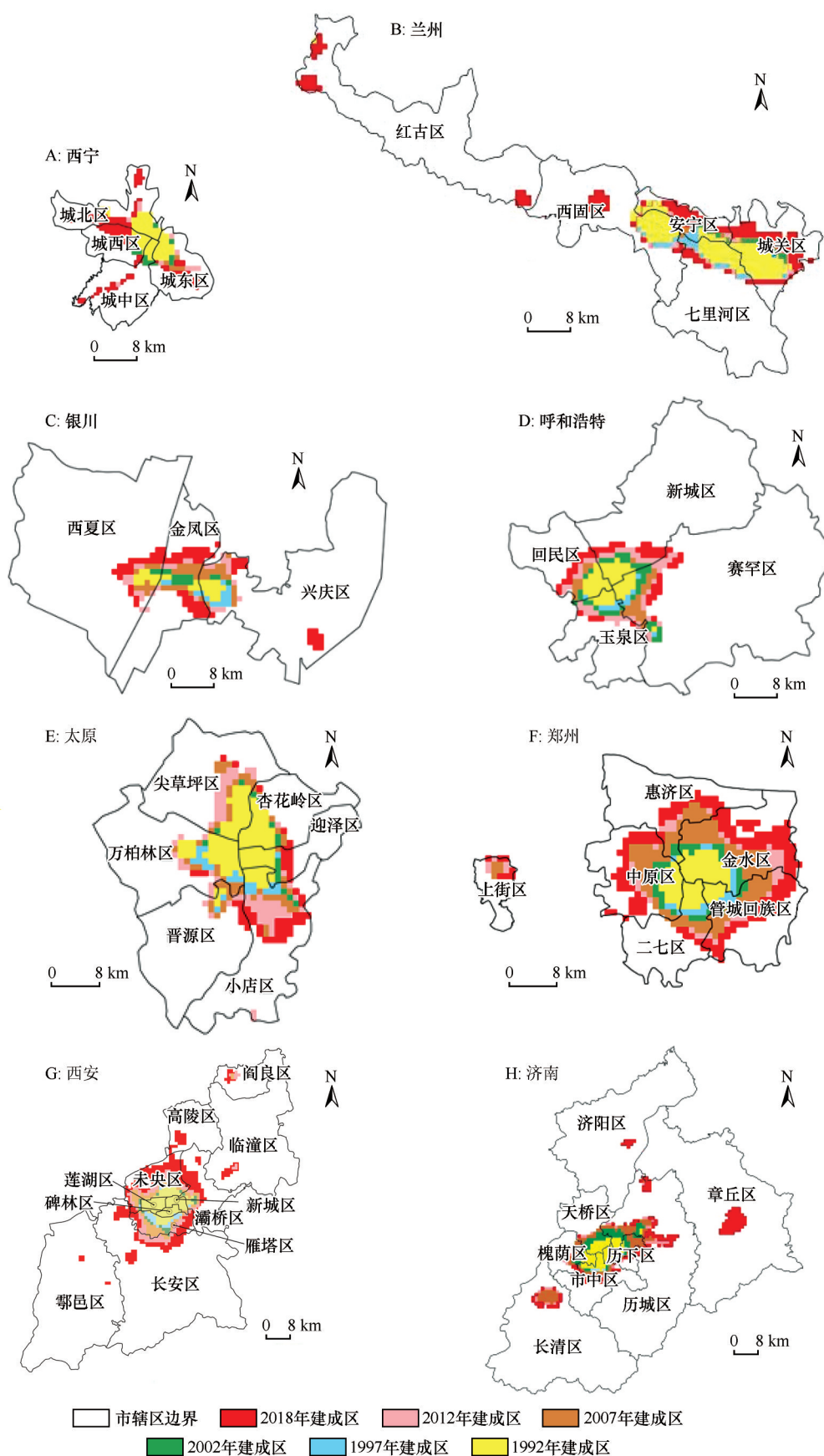


图2 1992—2018年中心城市建成区空间扩展

Fig.2 Spatial expansion of built-up areas in central cities from 1992 to 2018

表 1 1992—2018 年中心城市建成区面积(单位:km<sup>2</sup>)

Table 1 Built-up area of central cities from 1992 to 2018 (unit: km<sup>2</sup>)

城市	1992 年	1997 年	2002 年	2007 年	2012 年	2018 年	1992—2018 年扩张
西宁	52	60	61	65	75	95	43
兰州	163	163	180	183	199	331	168
银川	42	46	60	107	135	203	161
呼和浩特	75	78	120	150	210	260	185
太原	168	168	177	238	310	340	172
西安	148	162	187	268	375	702	554
郑州	100	116	156	321	373	544	444
济南	110	115	190	315	363	524	414

表 2 1992—2018 年中心城市建成区扩展强度指数(单位:%)

Table 2 Expansion intensity index of built-up areas in central cities from 1992 to 2018 (unit: %)

城市	1992—1997 年	1997—2002 年	2002—2007 年	2007—2012 年	2012—2018 年
西宁	3.08	0.33	1.31	3.08	4.44
兰州	0.00	2.09	0.33	1.75	11.06
银川	1.90	6.09	15.67	5.23	8.40
呼和浩特	0.80	10.77	5.00	8.00	3.97
太原	0.00	1.07	6.89	6.05	1.61
西安	1.89	3.09	8.66	7.99	14.53
郑州	3.20	6.90	21.15	3.24	7.64
济南	0.91	13.04	13.16	3.05	7.39

表 3 1992—2018 年中心城市紧凑度

Table 3 The change of compactness index in central cities from 1992 to 2018

年份	西宁	兰州	银川	呼和浩特	太原	西安	郑州	济南
1992 年	0.61	0.44	0.51	0.55	0.45	0.56	0.77	0.58
2018 年	0.31	0.38	0.44	0.60	0.53	0.35	0.47	0.33
变化量	-0.30	-0.06	-0.07	0.05	0.08	-0.21	-0.30	-0.25

间中心城市建成区紧凑度普遍降低,呈不规则蔓延;1992 年紧凑度指数标准差与 2018 年一致(0.10),城市个体间差异基本保持不变。分城市看,除呼和浩特、太原外,其余中心城市紧凑度指数均呈下降趋势,下降最快的是郑州和西宁。

中心城市建成区以沿地形扩展和圈层扩展为主要模式。目前城市扩展模式被国内学者广泛接受的 4 种模式为圈层扩展、跳跃(飞地)型扩展、内部填充扩展、沿交通干线或地形扩展<sup>[39-40]</sup>。选用 1992 年和 2018 年 2 个年份提取的城市建成区轮廓数据,借用等扇分析法,绘制雷达图,以明晰各中心城市建成区扩展方向和幅度。西宁、兰州、太

原、济南的城市建成区呈现明显的条带状,属于沿地形扩展模式。具体来看,西宁因地处湟水谷地,周围是高大山脉,城市沿河谷发展,总体上向西北、西南、东南方向扩展;兰州地处黄河河谷,为“南北两山夹一川”的城市发展形态,建成区呈东西带状分布;太原东西北三面环山,城市建设扩展的空间有限,主体沿小店区向南扩展;济南南靠泰山山脉,北临黄河,城市建成区以东北、西南向扩展为主。银川、呼和浩特、西安、郑州均处于平原地区,城市建成区扩展呈较为规则的圈层拓展(图 3)。总之,中心城市建成区扩展模式深受地形条件因素的影响。



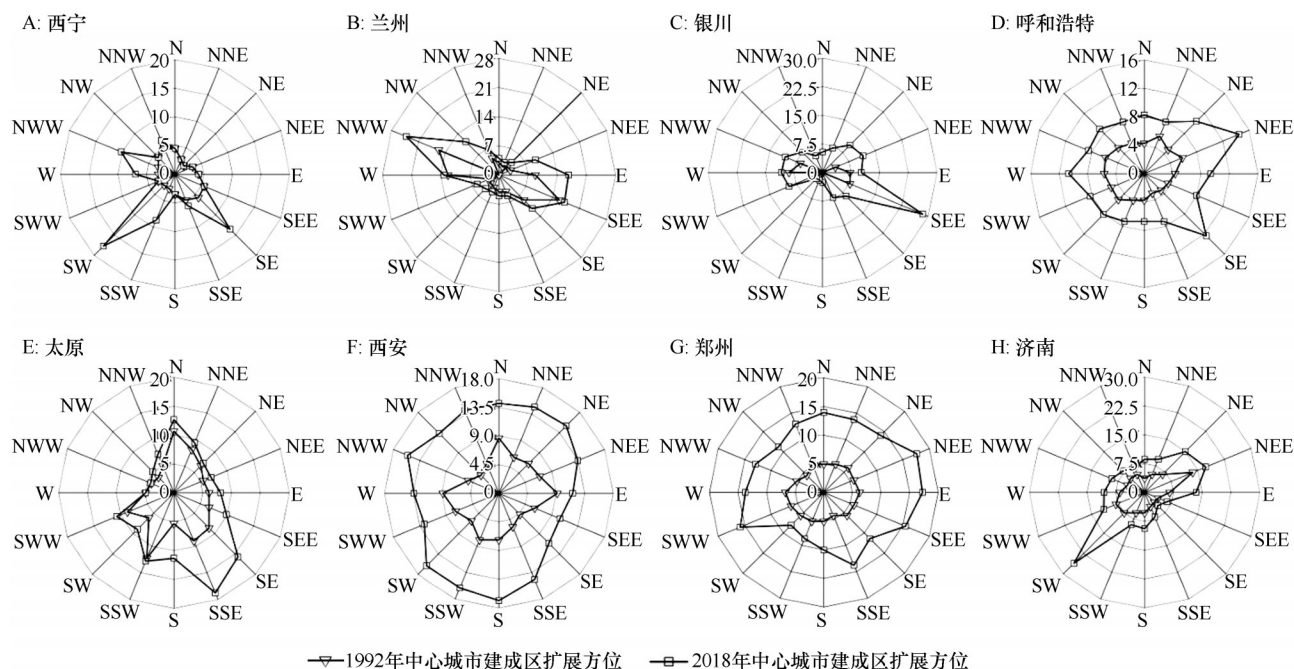


图3 1992—2018年中心城市用地扩展方位图

Fig.3 Azimuth diagrams of land expansion in central cities from 1992 to 2018

### 3.3 城市用地扩展质量

城市用地扩展质量与建成区发展水平、人口、经济等因素相关。用建成区区域夜间灯光指数、平均夜间灯光指数衡量城市综合发展水平和扩展水平,用城市建成区人口密度变化衡量城市用地扩展与人口增长的协调发展程度,用城市GDP年均增长率与建成区面积年均扩展率两者比值衡量城市用地扩展与经济增长的协调发展程度。

#### 3.3.1 城市建成区发展水平演变

夜间灯光影像具有分析、估算人口分布潜力的作用<sup>[41]</sup>,同时影像的灯光辐射亮度值与GDP、GRP (Gross Regional Product)具有高相关性<sup>[42]</sup>。由于统计资料数据无法准确刻画出城市建成区的发展水平,因此以中心城市建成区的区域夜间灯光指数、平均夜间灯光指数代表城市综合发展水平和扩展水平。

中心城市建成区综合发展水平明显提升。从1992年中心城市建成区的区域夜间灯光指数来看,太原建成区区域夜间灯光指数最大,综合发展水平高,银川区域夜间灯光指数值最小,综合发展水平低。2018年,西安建成区的区域夜间灯光指数最大,西宁最小,后者综合发展水平明显低于其他城市。1992—2018年,8个中心城市建成区的区域夜间灯光指数均有明显增加,以西安增加量最多

(8 349),但各中心城市间的差距明显增大,发展不平衡特征突出,银川区域夜间灯光指数年均增长率最快(7.03%),兰州增长率最慢(2.71%),说明银川发展速度相对较快,兰州发展速度缓慢(图4A)。

多数城市建成区扩展水平呈降低趋势。从平均夜间灯光指数来看,兰州、银川、西安、郑州与济南建成区的平均夜间灯光指数在1992—1997年趋于上升,1997—2018年呈下降趋势。一般由于建成区范围内发展水平不均衡,城市扩展区域发展水平不足,导致扩展水平降低。西宁建成区平均夜间灯光指数在1992—2018年呈增加趋势,说明城市扩展水平较高。太原与呼和浩特建成区的平均夜间灯光指数呈1992—1997年上升、1997—2012年下降、2012—2018年又上升的波动变化趋势(图4B)。

#### 3.3.2 城市用地扩展与人口增长的协调发展程度

由表4可知,不同时期的中心城市人口-土地协调程度呈现出明显的差异性。1992—2007年,黄河流域中心城市 $R_p$ 与全国城市 $R_p$ 变化趋势相反,呈波动下降趋势,由人口-土地基本协调型( $0.9 < R_p \leq 1.3$ )向土地过快扩展型( $0 < R_p \leq 0.9$ )转变,其中流域中上游城市协调发展系数降幅较小,人口-土地协调程度较高,下游城市降幅明显,人口-土地协调程度相对较低。2007—2012年,中心城市 $R_p$ 普遍上升,人口城镇化效果凸显,与全国的城市 $R_p$ 变化一致,该时期中心城市人口-土地协调程度较高,除呼和浩



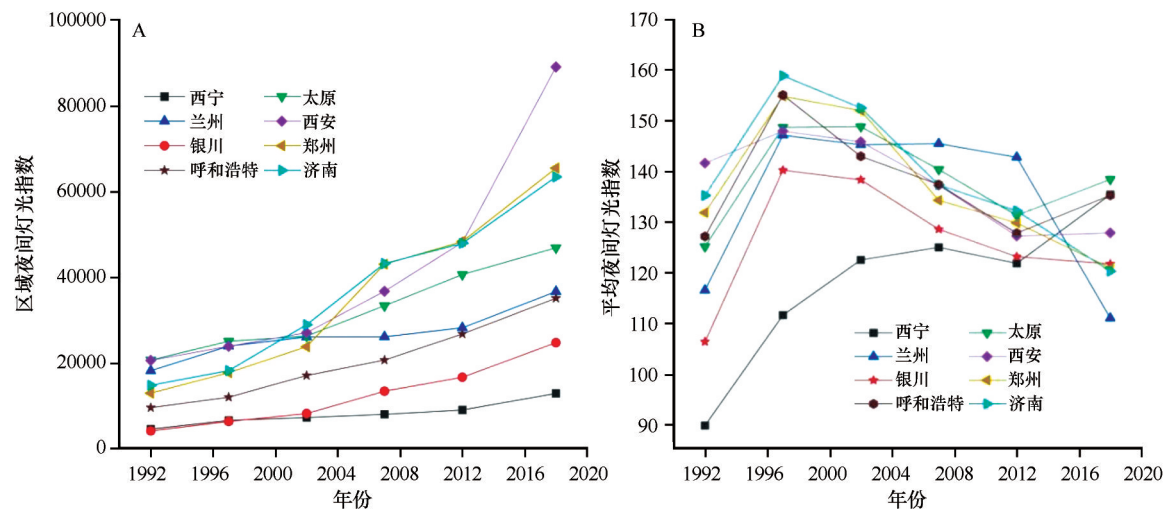


图4 1992—2018年中心城市区域夜间灯光指数与平均夜间灯光指数

Fig.4 Total night-time light index and average night-time light index in central cities from 1992 to 2018

表 4 1992—2018 年中心城市用地与人口增长、经济增长协调发展系数

Table 4 Coordinated development coefficient of urban land use, population growth and economic growth in central cities from 1992 to 2018

城市	$R_p$					$R_e$				
	1992—	1997—	2002—	2007—	2012—	1992—	1997—	2002—	2007—	2012—
	1997年	2002年	2007年	2012年	2018年	1997年	2002年	2007年	2012年	2018年
西宁	0.90	1.68	0.85	0.95	0.88	4.18	36.51	17.88	7.17	2.28
兰州	1.11	1.01	1.07	1.16	0.61	/	5.20	40.08	9.58	1.01
银川	1.04	0.93	0.70	1.22	0.73	11.94	1.74	2.03	4.25	1.40
呼和浩特	1.05	0.72	0.84	0.76	0.91	22.44	2.32	5.86	2.55	1.29
太原	1.11	1.05	0.84	0.96	0.95	/	7.21	4.10	2.51	6.01
西安	1.21	1.15	0.77	0.85	0.64	13.13	4.23	1.63	3.23	1.27
郑州	0.98	0.88	0.55	1.42	0.81	10.78	1.95	1.18	7.33	2.08
济南	1.03	0.78	0.65	1.00	0.95	31.64	1.34	1.50	4.59	1.94
全国	0.53	1.10	0.83	0.84	0.95	3.13	0.84	3.05	3.07	2.11

由于统计年鉴里该时段的建成区面积未变化,致使计算得到的协调发展指数无穷大,故用“/”表示。“/”表示的中心城市未参与结果分析。

特与西安为土地过快扩展型,郑州为人口过快增长型( $R_p>1.3$ )外,其余城市属于人口-土地基本协调型。2012—2018年,中心城市 $R_p$ 与全国城市的 $R_p$ 变化趋势相反,呈下降趋势,城市人口-土地协调程度降低,除呼和浩特、太原、济南为人口-土地基本协调型外,其他城市属于土地过快扩展型。整体上,中心城市人口-土地协调程度普遍呈现下降-上升-下降的波动变化。

3.3.3 城市用地扩展与经济增长的协调发展程度

1992—2018年,中心城市 $R_e$ 呈波动下降趋势(表4),表示经济年均增长速率降低,建成区面积年

均扩展速率呈增加趋势(图5),基本由经济过快增长型( $R_e\geq 5$ )向经济-土地协调发展型( $1\leq R_e<5$ )转变,反映流域中心城市整体为严格调控建设用地、未出现土地过快增长的发展态势。

各时期城市用地扩展与经济增长的协调特征具有差异性。1992—1997年,除西宁外,其他中心城市经济-土地协调类型属于经济过快增长型,经济年均增长率明显高于建成区面积年均扩展率,以济南表现最为明显(图5)。1997—2018年,银川、呼和浩特、西安、郑州与济南的 $R_e$ 基本处于1—5之间,属于经济-土地协调发展型,与全国保持一致;

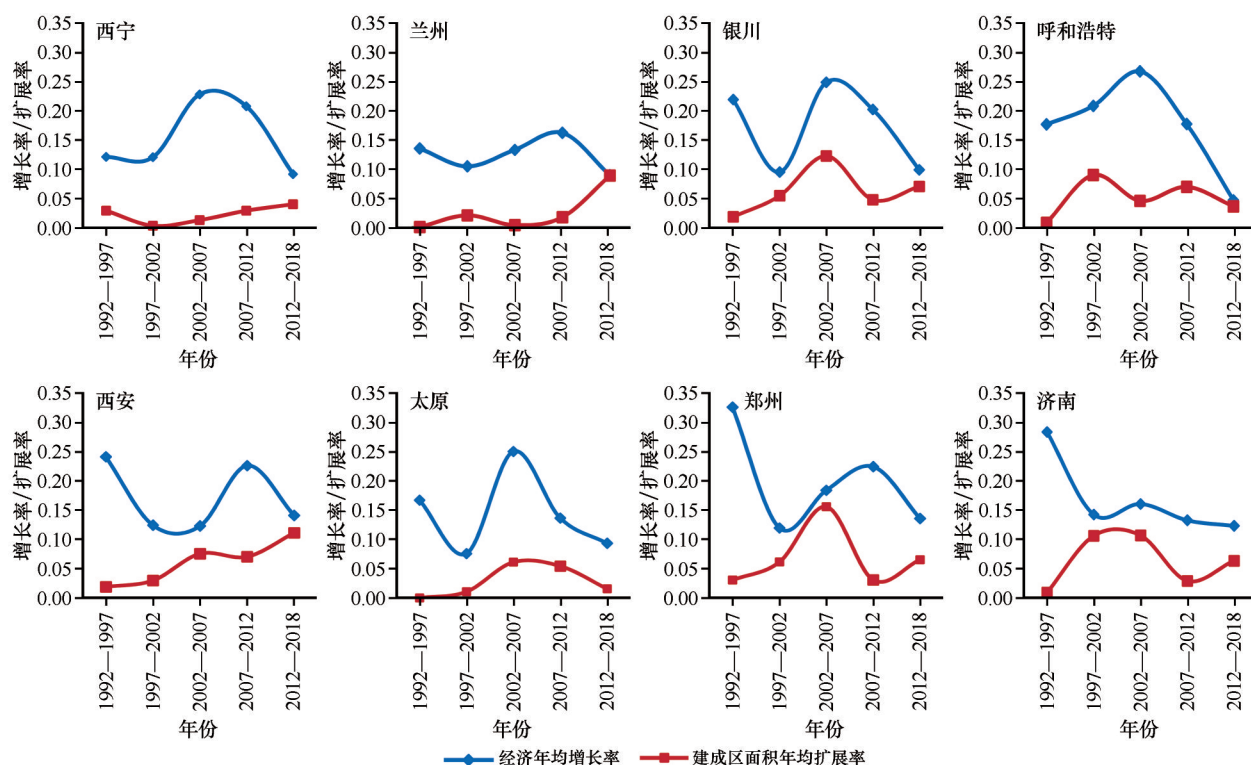


图5 1992—2018年中心城市经济与建成区面积年均增长率

Fig.5 Average annual growth rate of economy and built-up area of central cities from 1992 to 2018

西宁、兰州与太原由经济过快增长型向经济-土地协调发展型转变,经济年均增长率与建成区面积年均扩展率趋近。

### 3.4 城市建成区空间扩展动力因子

#### 3.4.1 经济发展为中心城市建成区扩展的主导因素

从中心城市整体和分城市的总进程(1996—2018年)及1996—2002年、2002—2012年、2012—2018年3个时段来看(表5),经济发展在各动力因子中对城市建成区空间扩展的关联系数基本上处于最高,是推动城市空间扩展的核心动力。经济快速发展带来道路交通蔓延、人口规模增加,以及开发区、工业园区、商品房住宅、办公业与公服设施等大型项目建设,推动城市建成区扩展。

#### 3.4.2 整体看,行政力与内源力对中心城市空间扩展影响作用较大

1996—2018年,行政力对城市空间扩展的影响较高(0.44),内源力次之(0.40),表明政府推动下的资源配置对城市空间扩展具有重要作用,城市人口规模的变化也进一步影响城市扩展;市场力(0.37)与外向力(0.38)对城市空间扩展的影响作用相近。总体上,行政力和内源力对中心城市空间扩展影响

作用较大(表5)。

#### 3.4.3 分时段看,行政力对中心城市空间扩展影响系数较高,市场力与外向力影响作用随时间增加明显

1996—2002年,行政力(0.46)、外向力(0.27)、内源力(0.26)、市场力(0.23)对中心城市空间扩展的影响作用依次减弱,行政力影响作用较高。公共服务资源和重大战略布局在行政力导向下向中心城市集中,带来建成区规模扩大;该时期市场经济优势未充分显现,市场力对城市空间扩展影响作用较低。2002—2012年,各动力因子关联系数较上一阶段呈增加趋势,行政力与市场力影响作用趋同(0.56),市场作用优势逐渐显现,外向力(0.46)影响作用弱于内源力(0.54),外商投资在该阶段对城市空间扩展作用相对较小。2012—2018年,行政力和外向力影响作用较高(0.60),市场力次之(0.54),内源力最小(0.30),随着中西部地区黄河流域中心城市开放度提高,吸引更多外商投资,对城市空间扩展产生重要影响作用。

#### 3.4.4 分城市看,市场力与内源力对部分中心城市空间扩展影响作用明显

1996—2018年,市场力对呼和浩特、太原、西

表 5 1996—2018 年中心城市建成区面积与动力因子间的灰色关联系数矩阵

Table 5 Grey relational coefficient matrix between built-up area and dynamic factors of central cities from 1996 to 2018

城市	时段	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	城市	时段	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
中心城市整体	1996—2018 年	0.70	0.44	0.37	0.38	0.40	呼和浩特	2002—2012 年	0.58	0.15	0.12	0.23	0.02
	1996—2002 年	0.70	0.46	0.23	0.27	0.26		2012—2018 年	0.54	0.24	0.33	0.15	0.27
	2002—2012 年	0.65	0.56	0.56	0.46	0.54	太原	1996—2018 年	0.47	0.31	0.32	0.16	0.03
	2012—2018 年	0.60	0.60	0.54	0.60	0.30		1996—2002 年	0.57	0.29	0.29	0.02	0.24
西宁	1996—2018 年	0.34	0.29	0.15	0.01	0.34		2002—2012 年	0.66	0.44	0.44	0.27	0.07
	1996—2002 年	0.54	0.29	0.32	0.37	0.30	西安	2012—2018 年	0.61	0.57	0.55	0.59	0.11
	2002—2012 年	0.66	0.23	0.43	0.26	0.29		1996—2018 年	0.43	0.16	0.43	0.26	0.31
	2012—2018 年	0.24	0.27	0.36	0.28	0.41		1996—2002 年	0.58	0.37	0.29	0.20	0.25
兰州	1996—2018 年	0.37	0.07	0.03	0.02	0.24	郑州	2002—2012 年	0.39	0.51	0.58	0.25	0.32
	1996—2002 年	0.56	0.06	0.12	0.27	0.11		2012—2018 年	0.81	0.61	0.26	0.29	0.34
	2002—2012 年	0.21	0.11	0.16	0.01	0.22		1996—2018 年	0.60	0.01	0.17	0.03	0.34
	2012—2018 年	0.63	0.45	0.21	0.25	0.31	济南	1996—2002 年	0.62	0.37	0.22	0.34	0.59
银川	1996—2018 年	0.56	0.37	0.44	0.20	0.54		2002—2012 年	0.54	0.52	0.33	0.37	0.36
	1996—2002 年	0.62	0.46	0.37	0.29	0.42		2012—2018 年	0.78	0.27	0.38	0.04	0.35
	2002—2012 年	0.53	0.44	0.40	0.26	0.53	呼和浩特	1996—2018 年	0.64	0.36	0.41	0.25	0.07
	2012—2018 年	0.66	0.39	0.38	0.14	0.64		1996—2002 年	0.66	0.41	0.34	0.46	0.35
呼和浩特	1996—2018 年	0.20	0.23	0.17	0.00	0.59		2002—2012 年	0.66	0.43	0.37	0.28	0.02
	1996—2002 年	0.60	0.31	0.29	0.32	0.32		2012—2018 年	0.73	0.51	0.36	0.03	0.49

$X_1$ :经济发展, $X_2$ :行政力, $X_3$ :市场力, $X_4$ :外向力, $X_5$ :内源力。

安、济南,内源力对兰州、西宁、银川与郑州的城市用地扩展影响力较高,仅次于经济发展。可见市场作用对流域中下游城市空间扩展影响较大,人口规模对上游城市空间扩展影响突出。

3.4.5 分城市看,各时段中心城市空间扩展的主要动力因子差异明显

1996—2002 年,行政力对银川、太原与西安,内源力对呼和浩特与郑州,外向力对西宁、兰州与济南影响作用较大;2002—2012 年,行政力对西安、郑州与济南,市场力对西宁、太原,外向力对兰州、呼和浩特,内源力对银川驱动力较高;2012—2018 年,行政力对兰州、西安、济南,市场力对西宁、呼和浩特、郑州,外向力对太原,内源力对银川影响作用较高。随着时间推进,除西安外,市场力对各中心城市空间扩展的影响有所提升,市场作用越来越明显,尤其对兰州、太原、郑州影响作用提升幅度较大;除太原、西安外,外向力对各中心城市空间扩展影响作用减弱(表 5)。

3.4.6 区位条件、政策引导是影响中心城市建成区扩展规模的重要因素

流域下游中心城市济南位于东部地区,为环渤海地区中心城市,地理区位优势明显,在改革开放、东部率先发展、沿海地区经济发展等政策红利驱动下,经济发展水平较高,带来城市建成区扩展规模大;中游中心城市西安地处关中平原,是计划经济时期重点建设的城市,老工业企业众多<sup>[43-44]</sup>,同时也是国家西部地区重要的中心城市和经济中心,随着人口规模增加,开发区建设以及工业化进程加快,城市用地规模不断扩大;上游中心城市西宁、兰州位于西部地区,属于河谷型城市,城镇体系随地形、河流走向布局 and 延伸,受生态环境保护、地形等自然条件的约束,城市建成区规模较小,向外扩展缓慢,而内部强化用地结构与布局调整,建筑高层化趋势明显<sup>[45]</sup>,以促使用地集约化利用。此外,城市实行的行政区划调整(撤县设区)也进一步影响建成区规模。可见,地理区位、政策引导对中心城市



发展规模具有重要作用。

## 4 结论

黄河流域中心城市建成区面积分化明显,中下游城市(西安、郑州、济南)扩展规模和强度大,各时段城市建成区扩展强度具有差异性。建成区扩展形态呈紧凑度普遍下降趋势,西宁紧凑度最低,且降幅最为明显;建成区扩展包括沿地形扩展和圈层拓展2种模式,西宁、兰州、太原、济南属沿地形扩展,银川、呼和浩特、西安、郑州呈较为规则的圈层拓展。

夜间灯光刻画的西安建成区综合发展水平高、西宁水平低,银川综合发展速度快、兰州速度慢;除西宁、太原与呼和浩特外,多数中心城市平均夜间灯光指数在1992—2007年趋于上升,1997—2018年下降,城市扩展水平呈先上升后降低趋势。

1992—2007年,中心城市人口-土地协调发展系数下降,由人口-土地基本协调型向土地过快扩展型转变,其中流域下游城市降幅明显;2007—2012年,协调系数上升,人口城镇化效果明显,人口-土地协调程度较高,除呼和浩特、西安和郑州外,其余中心城市属于人口-土地基本协调型;2012—2018年,协调系数下降,除呼和浩特、太原、济南为人口-土地基本协调型外,其他城市属土地过快扩展型。整体上,中心城市人口-土地协调程度呈下降-上升-下降的波动变化。

1992—2018年,中心城市经济-土地协调发展系数呈波动下降趋势,经济年均增长速率降低,建成区面积年均扩展速率增加,基本由经济过快增长型向经济-土地协调发展型转变;各时期(1992—1997年、1997—2018年)城市用地扩展与经济增长协调性特征具有差异性。

经济发展为中心城市建成区扩展的主导因素。整体看,1996—2018年行政力和内源力对中心城市空间扩展影响作用较大;1996—2002年、2002—2012年与2012—2018年3个时段行政力对中心城市空间扩展影响系数较高,市场力与外向力影响作用增加明显。分城市看,1996—2018年市场力与内源力分别对下游和上游城市作用明显;3个时段各中心城市空间扩展的主要动力因子具有差异性。

城市建成区空间扩展是多因素综合作用的结果,且具有复杂性。选用5种指标分别代表5个不

同维度的动力因子,各维度对城市建成区扩展的解释力较弱,很难完全反映出不同时空尺度下自然、社会、经济、文化、政策等因素对城市空间扩展的影响。因此,建立综合的指标体系,同时结合定性影响因素,如宏观政策、城市规划、区位条件等,深入探究空间扩展的影响因素,厘清作用机理,以指导城市健康发展,将是进一步关注的方向。

## 参考文献:

- [1] Schneider A, Woodcock C E. Compact, dispersed, fragmented, extensive? A comparison of urban growth in twenty-five global cities using remotely sensed data, pattern metrics and census information[J]. Urban Studies, 2008, 45(3): 659-692.
- [2] 谭雪兰, 欧阳巧玲, 江喆, 等. 基于RS/GIS的长沙市城市空间扩展及影响因素[J]. 经济地理, 2017, 37(3): 81-85.
- [3] 朱建华, 戚伟, 修春亮. 中国城市市辖区的空间结构及演化机制[J]. 地理研究, 2019, 38(5): 1003-1015.
- [4] 熊皓, 郑伯红, 贾磊. 驱动力与制约力相互作用下我国城市空间扩张[J]. 经济地理, 2016, 36(1): 82-88.
- [5] 吴一凡, 刘彦随, 李裕瑞. 中国人口与土地城镇化时空耦合特征及驱动机制[J]. 地理学报, 2018, 73(10): 1865-1879.
- [6] 龙瀛, 韩昊英, 毛其智. 利用约束性CA制定城市增长边界[J]. 地理学报, 2009, 64(8): 999-1008.
- [7] 高晓路, 吴丹贤, 周侃, 等. 国土空间规划中城镇空间和城镇开发边界的划定[J]. 地理研究, 2019, 38(10): 2458-2472.
- [8] 张翰超, 宁晓刚, 王浩, 等. 基于高分辨率遥感影像的2000—2015年中国省会城市高精度扩张监测与分析[J]. 地理学报, 2018, 73(12): 2345-2363.
- [9] 董鹤松, 李仁杰, 李建明, 等. 基于DMSP-OLS与NPP-VIIRS整合数据的中国三大城市群城市空间扩展时空格局[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(5): 1161-1174.
- [10] 欧阳晓, 朱翔. 中国城市群城市用地扩张时空动态特征[J]. 地理学报, 2020, 75(3): 571-588.
- [11] 王春杨, 吴国誉, 张超. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据的成渝城市群空间结构研究[J]. 城市发展研究, 2015, 22(11): 20-24.
- [12] 黄先梅, 赵建吉, 孟庆岩, 等. 基于夜间灯光数据的快速城镇化地区城市扩展与重心演变分析: 以河南省为例[J]. 世界地理研究, 2019, 28(1): 79-89.
- [13] 李俊峰, 潘竟虎. 基于夜间灯光的1992—2012年甘肃省城市空间扩展研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(3): 829-835.
- [14] 王成新, 窦旺胜, 程钰, 等. 快速城市化阶段济南城市空间扩展及驱动力研究[J]. 地理科学, 2020, 40(9): 1513-1521.
- [15] 高宁, 盖迎春, 宋晓谕. 基于夜间灯光数据的西安市城市扩张及驱动因素研究[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(1): 207-215.
- [16] 邱从毫, 李阳兵, 冯元嵩. 贵阳市城市土地扩展空间的生态适宜性与优化[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2777-2784.
- [17] 陈明星, 陆大道, 张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析[J]. 地理学报, 2009, 64(4): 387-398.
- [18] 王利伟, 冯长春. 转型期京津冀城市群空间扩展格局及其动

- 力机制:基于夜间灯光数据方法[J].地理学报,2016,71(12):2155-2169.
- [19] 欧向军,甄峰,秦永东,等.区域城市化水平综合测度及其理想动力分析:以江苏省为例[J].地理研究,2008,27(5):993-1002.
- [20] 文雅,龚建周,胡银根,等.基于生态安全导向的城市空间扩展模拟与分析[J].地理研究,2017,36(3):518-528.
- [21] 詹云军,朱捷缘,严岩.基于元胞自动机的城市空间动态模拟[J].生态学报,2017,37(14):4864-4872.
- [22] 刘沁萍,杨永春,付冬暇,等.基于DMSP\_OLS灯光数据的1992-2010年中国城市空间扩张研究[J].地理科学,2014,34(2):129-136.
- [23] 杨育丽,马明国,葛伟.夜间灯光影像探究北京市城市发展空间特征[J].遥感信息,2019,34(5):41-50.
- [24] 徐杰佳,臧淑英.哈尔滨城市扩展特征及驱动力分析[J].测绘通报,2019(9):68-72.
- [25] 安树伟,李瑞鹏.黄河流域高质量发展的内涵与推进方略[J].改革,2020(1):76-86.
- [26] 张国兴,苏刘贤.黄河流域中心城市高质量发展评价体系构建与测度[J].生态经济,2020,36(7):37-43.
- [27] 曹子阳,吴志峰,匡耀求,等.DMSP/OLS夜间灯光影像中国区域的校正及应用[J].地球信息科学学报,2015,17(9):1092-1102.
- [28] Wu R, Yang D, Dong J, et al. Regional inequality in China based on NPP-VIIRS night-time light imagery [J]. Remote Sensing, 2018, 10(2): 240.
- [29] 图尔荪阿依·如孜,阿里木江·卡斯木,高鹏文,等.基于DMSP/OLS和NPP/VIIRS数据的新疆城市扩展时空变化研究[J].中国农业大学学报,2020,25(9):156-165.
- [30] 梁丽,边金虎,李爱农,等.中巴经济走廊DMSP/OLS与NPP/VIIRS夜光数据辐射一致性校正[J].遥感学报,2020,24(2):149-160.
- [31] 杜海波,魏伟,张学渊,等.黄河流域能源消费碳排放时空格局演变及影响因素:基于DMSP/OLS与NPP/VIIRS夜间灯光数据[J].地理研究,2021,40(7):2051-2065.
- [32] 许雪爽,包安明,常存,等.新疆重点城市建设用地扩张与土地配置协调性分析[J].经济地理,2017,37(10):92-99.
- [33] 牟凤云,张增祥,迟耀斌,等.基于多源遥感数据的北京市1973-2005年间城市建成区的动态监测与驱动力分析[J].遥感学报,2007,11(2):257-268.
- [34] 王婷婷,王运动,杨强,等.1988年~2014年莆田市城市扩展及其驱动力分析[J].遥感信息,2015,30(6):111-115.
- [35] 刘思峰.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学出版社,1999.
- [36] 曹明霞.灰色关联度模型正负性问题的研究及其改进[J].系统工程与电子技术,2008,30(6):1086-1088.
- [37] 赵鹏军,刘迪.中国小城镇基础设施与社会经济发展的关联分析[J].地理科学进展,2018,37(9):1245-1256.
- [38] 杨保军.城市规划30年回顾与展望[J].城市规划学刊,2010(1):14-23.
- [39] 耿甜伟,毛雅倩,李九全,等.西安城市扩展时空特征及驱动机制[J].经济地理,2019,39(10):62-70.
- [40] 杨荣南,张雪莲.城市空间扩展的模式与动力机制研究[J].地域研究与开发,1997,16(2):1-6.
- [41] Lo C P. Modeling the population of China using DMSP operational line scan system nighttime data [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2001, 67(9): 1037-1048.
- [42] Doll C N, Muller J P, Morley J G. Mapping regional economic activity from night-time light satellite imagery [J]. Ecological Economics, 2006, 57(1): 75-92.
- [43] 吴文恒,黄坤,丁竹慧,等.西安市企业社区分布格局与形成机制[J].地理研究,2019,38(12):3038-3054.
- [44] 吴文恒,等.企业社区空间再生产研究[M].北京:科学出版社,2020.
- [45] 杨永春.中国西部河谷型城市的形成与发展[J].经济地理,1999,19(2):45-50.

## Study on spatial expansion and dynamic factors of built-up area of central cities in the Yellow River Basin based on night-time light data

Shi Haijin<sup>a</sup>, Wu Wenheng<sup>ab</sup>, Li Yan<sup>a</sup>, Liu Jinfeng<sup>a</sup>, Wan Yun<sup>a</sup>

(a. College of Urban and Environmental Sciences / b. Shanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China)

**Abstract:** The study on the expansion characteristics of built-up area of central cities in the Yellow River Basin is helpful to deeply understand the effect of land development and carry out the high-quality development planning of the central cities. Based on the night-time light images and statistical data in 1992, 1997, 2002, 2007, 2012 and 2018, the built-up area is extracted, and the expansion intensity index, compactness index, coordinated development coefficient and grey correlation analysis are used to explore the spatio-temporal pattern, quality and dynamic factors of the expansion of 8 central cities in the Yellow River Basin from 1992 to 2018. The results show that: (1) The built-up area of the central cities in the Yellow River Basin is different obviously, the expansion scale and intensity of cities in the middle and lower reaches are large, and the extended form presents a general downward trend of compactness. (2) The comprehensive level of Xi'an built-up area depicted by night-time light data is high, the level of Xining is low, the comprehensive development speed of Yinchuan is fast, and the speed of Lanzhou is slow. Except Xining, Hohhot and Taiyuan, the average night-time light index of other central cities shows a downward trend from 1997 to 2018, reflecting the decline of urban expansion level. (3) The coordinated development coefficients of population-land in central cities all showed a fluctuating and downward trend, with the exception of Hohhot, Taiyuan and Jinan, and most of them changed from the basic coordination type of population-land to the type of over-rapid expansion of land. The coordinated development coefficient of economy-land in the central cities shows a fluctuating downward trend, the average annual economic growth rate decreases, and the average annual expansion rate of built-up area increases, which basically changes from excessive economic growth to economic-land coordinated development. (4) The spatial expansion of the central cities is mainly affected by economic development. From the perspective of the central cities as a whole, the influence of administrative power and endogenous force is higher in the whole period (1996–2018), the influence coefficient of administrative power is higher in three stages (1996–2002, 2002–2012 and 2012–2018), and the influence degree of market power and export-oriented force increase obviously with time. In future, the central cities in the Yellow River Basin should be concerned about internal quality improvement and efficiency, strengthen the efficiency of construction land use, and promote high-quality urban development.

**Key words:** spatial expansion of built-up area; night-time light images; central cities; power factor; grey relational analysis; Yellow River Basin