

doi: 10.6046/zrzyyg.2022222

引用格式: 赵安周,张向蕊,相恺政,等. 基于夜间灯光和统计数据的黄土高原城镇化水平时空格局分析[J]. 自然资源遥感, 2023,35(3):253–263. (Zhao A Z,Zhang X R,Xiang K Z,et al. Analyzing the spatio-temporal evolution patterns of urbanization in the Loess Plateau based on night light data and statistical data[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2023,35(3):253–263.)

# 基于夜间灯光和统计数据的黄土高原 城镇化水平时空格局分析

赵安周<sup>1,2</sup>, 张向蕊<sup>1</sup>, 相恺政<sup>1</sup>, 刘宪锋<sup>3</sup>, 张靓涵<sup>1</sup>

(1. 河北工程大学矿业与测绘工程学院,邯郸 056038; 2. 河北工程大学水生态文明及社会治理研究中心,邯郸 056038; 3. 陕西师范大学地理科学与旅游学院,西安 710119)

**摘要:** 城镇化水平时空演变研究对城市空间结构优化有重要意义。通过对 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 夜间灯光遥感数据的饱和校正和一致性校正,构建了 2000—2019 年黄土高原夜间灯光遥感数据集,计算了黄土高原不同空间尺度的综合夜间灯光指数(compound night light index,CNLI),并利用二分模型提取了黄土高原建成区面积,在此基础上,利用标准差椭圆等方法分析了其空间演变格局。结果表明:①基于夜间灯光指数构建的黄土高原 CNLI 与统计数据构建的城镇化综合发展水平指数(urbanization development index,UDI)及各分指标的相关系数均较高;②2000—2019 年整个黄土高原及 5 个城市群 CNLI 值均呈现显著上升趋势,空间上呈从东南向西北递减的趋势;③基于二分模型提取的黄土高原建成区绝对误差和相对误差的均值分别为 2.45 km<sup>2</sup>和 3.72%;④黄土高原建成区重心在 2000—2019 年期间呈现向东南方向移动的趋势,标准差椭圆的覆盖面积表现为显著下降的趋势( $slope = 0.0107 \text{ km}^2/a, p < 0.01$ ),方位角的值由北偏东 83.33°变为 88.37°。研究结果可为黄土高原及生态脆弱区城镇化时空格局研究提供数据支持和方法借鉴。

**关键词:** 夜间灯光数据; 城镇化; CNLI; UDI; 时空演变; 黄土高原

**中图法分类号:** TP 79; F 129.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)03-0253-11

## 0 引言

城镇化是指随着社会经济的发展和产业结构的变迁,人类生产方式从以农业为主的方式转化为以工业和服务业为主的城市社会过程<sup>[1-2]</sup>。随着经济的快速发展,中国城镇化率在 2019 年已超过 60%<sup>[3]</sup>。快速的城镇化进程不仅会导致耕地减少、大气和水体污染以及城市热岛效应等生态环境问题<sup>[4]</sup>,同时也会引发城市内部发展失调等问题<sup>[5-6]</sup>。因此,开展城镇化的时空演变格局研究对城市的可持续发展具有重要的科学价值。

传统的城镇化时空格局演变分析主要基于统计类数据,该类数据可以从省、市和县等空间尺度评价各地区城镇化演变进程,但无法从像元等更精细尺度刻画城镇化的进程<sup>[7]</sup>。随着空间信息技术的发展,利用遥感数据提取的城市不透水表面数据被广泛应用在城镇化的研究中<sup>[8]</sup>,该类数据可以从像元

尺度上刻画城镇化的进程,但对城市区域的定义仅依靠地表覆盖中的不透水表面数据,已有研究表明该类数据无法真实反映城市实际功能和活力水平<sup>[9]</sup>。夜间灯光数据已被证明与人类活动和社会经济发展密切相关,可以从格网单元尺度上反映人类活动的剧烈程度<sup>[10-11]</sup>。目前已有诸多学者采用 DMSP/OLS (defense meteorological satellite program/operational linescan system) 和 NPP/VIIRS (national polar-orbiting partnership's/visible infrared imaging radiometer suite) 等夜间灯光数据对城市发展<sup>[12]</sup>、区域能源消耗<sup>[13]</sup>、人口密度<sup>[14]</sup>等进行了分析。考虑到 DMSP/OLS 数据(1992—2013 年)和 NPP/VIIRS 数据(2012 年至今)时空尺度的不一致性,也有学者基于多种模型对 2 种数据进行整合,将其应用到长时间序列的城镇化研究中。Zhang 等<sup>[15]</sup>利用指数模型构建了 1995—2015 年中国 21 个城市群的夜间灯光遥感数据,认为西部和北部的城市扩张速率低于东部和南部;许正森等<sup>[5]</sup>利用对数模型整合了长三

收稿日期: 2022-05-26; 修订日期: 2022-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目“黄土高原城镇化-生态环境互馈机制及动态模拟”(编号: 42171212)资助。

第一作者: 赵安周(1985-),男,博士,副教授,主要从事城市扩张对生态环境影响等方面的研究。Email: zhaoanzhou@hebeu.edu.cn。

角城市群的 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 数据,认为该城市群重心稳定在太湖沿岸附近,城市群分布的方向性减弱。

黄土高原是构建国家“两屏三带”生态安全格局和落实黄河流域高质量发展的主体区域<sup>[16]</sup>。自西部大开发战略实施以来,该地区城镇化取得了显著的发展。虽然已有研究基于统计数据、城市不透水表面数据以及夜间灯光遥感数据等分析了黄土高原城镇化时空演变<sup>[16-17]</sup>,但是缺乏从城市群和城市等不同尺度分析其城镇化进程的时空演变,结合统计数据和夜间灯光遥感数据估算该地区城镇化时空演变略显不足。

基于此,本文通过二次多项式以及过饱和校正等多种方法对 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 数据进行一致性校正,构建 2000—2019 年黄土高原长时间序列的稳定夜间灯光遥感数据集,计算黄土高原不同空间尺度的综合夜间灯光指数(compound night light index,CNLI),同时利用统计数据构建的城镇化综合发展水平指数(urbanization development index,UDI)对其进行验证。在此基础上,利用二分模型提取黄土高原城市建成区面积,分析其空间格局演变,以期为该地区城市群管理、规划及黄河流域生态保护和高质量发展提供参考。

1 研究区及其数据源

1.1 研究区概况

黄土高原(N33°39′~41°17′,E100°52′~114°31′)地处中国中北部,面积达 6.49×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>,平均海拔在 83~5 010 m 之间,是中国四大高原之一(图 1)<sup>[18]</sup>。气候类型属于温带大陆性季风气候,多年平

均降雨量在 200~750 mm 之间,平均气温在 4.3~14.3℃ 之间,主要植被类型包括草地、耕地和林地<sup>[19]</sup>。作为东西部经济发展的重要桥梁和国家生态安全屏障的重要载体,该地区城镇化水平得到快速发展,目前已经形成了一个区域级城市群(关中平原城市群)和 4 个地区性城市群(晋中城市群、呼榆包鄂城市群、宁夏沿黄城市群和兰西城市群)<sup>[20]</sup>。

1.2 数据来源

1) 夜间灯光数据。1992—2013 年的 DMSP/OLS 稳定夜间灯光年值数据产品和 2012—2019 年的 NPP/VIIRS 平均月值灯光辐射数据产品皆来源于美国国家海洋和大气管理局的国家地球物理数据中心(<https://www.ngdc.noaa.gov/ngdc.html>),前者的空间分辨率约为 1 km×1 km,辐射分辨率为 6 bit,像元值是指未经过星上辐射定标的相对亮度值,代表夜间灯光强度,该数据消除了闪电和渔船灯光等短暂灯光的影响,但其不同序列影像数据之间不具有可比性;后者空间分辨率为 500 m×500 m,辐射分辨率为 12 bit,像元值是经过辐射定标后的绝对亮度值,其不同时段的影像数据间具有可比性,但该数据未消除火光、渔船灯光等短暂灯光的影响<sup>[11, 21-22]</sup>。

2) 统计数据。借鉴国内外相关研究<sup>[23-24]</sup>,遵循科学性、动态性以及代表性的原则,构建黄土高原 UDI 评价指标体系(表 1)。各指标数据主要来源于各省统计年鉴及国民经济和社会发展统计公报。

表 1 黄土高原 UDI 体系

Tab.1 UDI system of the Loess Plateau

| 准则层          | 权重    | 指标层        | 单位                | 属性 | 权重    |
|--------------|-------|------------|-------------------|----|-------|
| 人 口 城<br>镇 化 | 0.172 | 城镇人口占比     | %                 | +  | 0.043 |
|              |       | 人口密度       | 人/km <sup>2</sup> | +  | 0.098 |
|              |       | 非农就业人员占比   | %                 | +  | 0.031 |
| 经 济 城<br>镇 化 | 0.268 | 非农产业产值占比   | %                 | +  | 0.084 |
|              |       | 人均公共预算收入   | 万元                | +  | 0.104 |
|              |       | 人均 GDP     | 元/人               | +  | 0.080 |
| 空 间 城<br>镇 化 | 0.258 | 建成区面积      | km <sup>2</sup>   | +  | 0.042 |
|              |       | 人均绿地面积     | m <sup>2</sup> /人 | +  | 0.118 |
|              |       | 人均道路面积     | m <sup>2</sup> /人 | +  | 0.098 |
| 社 会 城<br>镇 化 | 0.302 | 每万人医疗卫生床位数 | 张/万人              | +  | 0.114 |
|              |       | 人均商品销售总额   | 元/人               | +  | 0.134 |
|              |       | 每万人高校学生数量  | 人/万人              | +  | 0.054 |

1.3 数据预处理

由于不同传感器的夜间灯光数据各参数之间存在差异,需进行联合匹配校正<sup>[5, 15-16, 25]</sup>,具体步骤如下:①数据重投影和空间分辨率校正,为消除数据

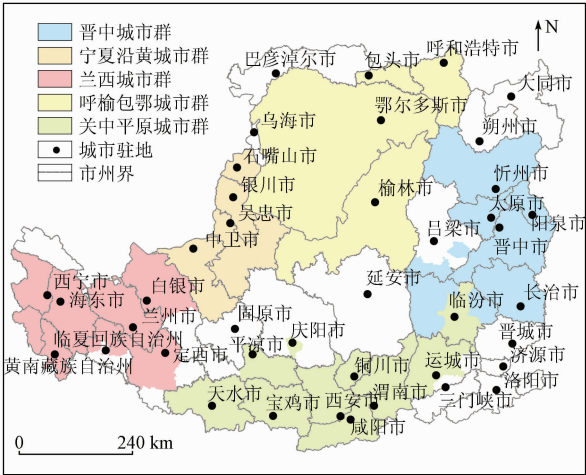


图 1 黄土高原地市及城市群范围示意图

Fig.1 Geographical location of cities and urban agglomerations in the Loess Plateau

的变形,将 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 数据转换为 Krasovsky\_1940\_Albers 投影,同时将 2 种数据重采样为 1 km × 1 km。②饱和校正,以经过饱和校正和辐射校正的 F16\_2006 数据为参考影像,采用不变目标区域法对每年 DMSP/OLS 影像进行线性、指数、对数和二次多项式拟合,经对比,二次多项式拟合效果最好(表 2),因此本文选取二次多项式建立校正模型,即

$$DN_{(i,j)} = \begin{cases} 0 & DN_{(i+1,j)} = 0 \\ DN_{(i-1,j)} & DN_{(i+1,j)} > 0 \text{ \& } DN_{(i-1,j)} > DN_{(i,j)} \\ DN_{(i,j)} & \text{其他} \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $DN_{(i-1,j)}$ ,  $DN_{(i,j)}$  和  $DN_{(i+1,j)}$  分别为第  $i-1$ ,  $i$  和  $i+1$  年影像中的第  $j$  个像元值。同时,为保持影像原来的值域,将 DN 值大于 63 的像元都赋值为 63。⑤异常值校正,以 0.3 为阈值去除 NPP/VIIRS 数据中的微小灯光<sup>[26]</sup>,同时以每期影像中西安市城区影像最大 DN 值为阈值,过滤掉偶然出现的异常极大值<sup>[9]</sup>。⑥DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 联合校正,对 2013 年 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 这 2 种数据之间的关系进行模拟(表 2),选取最优的拟合函数二次多项式模型对 2014—2019 年的 NPP/VIIRS 数据进行校正,进而实现 2 种数据的一致性和可比性。⑦年际间再校正,由于校正后不同年份之间像元存在不连续的现象,进行年际间再校正,从而得到 2000—2019 年黄土高原长时间序列经过校正的夜间灯光数据集。

表 2 2013 年黄土高原 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 数据拟合结果

Tab.2 Fitting results of DMSP/OLS and NPP/VIIRS in 2013

| 函数类型  | 模型表达式                                    | $R^2$   |
|-------|------------------------------------------|---------|
| 线性函数  | $y = 0.121\ 1x - 1.193\ 4$               | 0.709 5 |
| 指数函数  | $y = 0.213\ 2e^{0.054\ 8x}$              | 0.756 9 |
| 对数函数  | $y = 2.372\ 3\ln x - 5.480\ 7$           | 0.441 1 |
| 二次多项式 | $y = 0.001\ 9x^2 - 0.018\ 2x + 0.410\ 7$ | 0.853 6 |

2 研究方法

2.1 CNLI 计算

CNLI 指某一地区灯光面积占比(light area percentage, LAP)与平均灯光强度(mean light index, MLI)的乘积。该指数可以反映社会发展进程和人类活动的剧烈程度,其具体计算公式为<sup>[27]</sup>:

$$CNLI = LAP \cdot MLI, \quad (3)$$

$$DN_{cal} = aDN^2 + bDN + c, \quad (1)$$

式中:  $a$  和  $b$  分别为二次多项式的回归系数;  $c$  为常数项;  $DN_{cal}$  和  $DN$  分别为校正后和校正前的 DMSP/OLS 影像的 DN 值。③年内融合和校正,由于部分年份存在多个传感器并存现象,对不同传感器的影像进行平均值合成。④年际校正,经过饱和校正和年内融合后,不同年份之间仍存在像元不可比问题,故采用年际校正函数进行校正,即

$$LAP = \frac{Area_{light}}{Area}, \quad (4)$$

$$MLI = \frac{\sum_{h=1}^{63} DN_h N_h}{63 \sum_{h=1}^{63} N_h}, \quad (5)$$

式中:  $Area_{light}$  和  $Area$  分别为灯光区域面积和研究区域的总面积;  $DN_h$  为第  $h$  个灰度级所对应的像元值;  $N_h$  为灰度级为  $h$  的像元数量。

2.2 UDI 计算

为消除指标之间数量级差异及量纲差异,采用极值法对原始数据进行标准化处理,在此基础上,利用熵值法确定准则层和指标层权重(表 1)<sup>[28]</sup>,进而计算黄土高原各年份的 UDI,其计算公式为:

$$UDI_i = \sum_{k=1}^n [\omega_k X_{(i,k)}], \quad (6)$$

式中:  $UDI_i$  为黄土高原第  $i$  年的城镇化发展指数;  $\omega_k$  为第  $k$  个指标所占权重;  $X_{(i,k)}$  为第  $i$  年第  $k$  个指标进行标准化后的值;  $n$  为指标个数。

2.3 建成区提取和精度评价

采用二分模型对建成区进行提取,该方法计算简单且精度较高,已被广泛应用在城市建成区提取中<sup>[5,29]</sup>。其基本思想是根据设定的建成区面积参数,将数据分割为 2 部分,动态调整阈值并计算夜间灯光遥感数据提取的建成区面积与统计数据面积之间的误差,直至迭代至最小,则该值可认为是该年提取该城市建成区的最优阈值。同时使用绝对误差  $AE$  和相对误差  $RE$  来评价建成区提取的精度<sup>[5]</sup>,即

$$AE = Area_{statistics} - Area_{light}, \quad (7)$$

$$RE = \frac{Area_{light} - Area_{statistics}}{Area_{statistics}} \times 100\%, \quad (8)$$

式中  $Area_{statistics}$  为统计年鉴数据提取的城市建成区

面积。

2.4 城镇空间扩张强度

城镇空间扩张强度可以从一定程度上反映城市扩展的强弱和快慢,适用于不同城市及区域之间的比较,具体计算公式为<sup>[9,30]</sup>:

$$UI = \frac{UA_{j+i} - UA_i}{UA_i} \frac{1}{T} \times 100 \quad , \quad (9)$$

式中:  $UI$  为城镇空间扩张强度;  $UA_i$  和  $UA_{j+i}$  分别为第  $i$  和  $j+i$  年城市建成区的面积;  $T$  为研究时间跨度。

2.5 标准差椭圆

标准差椭圆可以直观分析城镇空间扩张形态。椭圆重心可以代表整个地区城市建成区分布重心;椭圆面积可以表征城市的集中或分散;方位角可以分析整个地区城市扩张的主驱动力方向。椭圆重心、面积和方位角的计算公式分别为<sup>[9,30-31]</sup>:

$$\tan\theta = \frac{(\sum_{m=1}^M \tilde{x}_m^2 - \sum_{m=1}^M \tilde{y}_m^2) + \sqrt{(\sum_{m=1}^M \tilde{x}_m^2 - \sum_{m=1}^M \tilde{y}_m^2)^2 + 4(\sum_{m=1}^M \tilde{x}_m \tilde{y}_m)^2}}{2 \sum_{m=1}^M \tilde{x}_m \tilde{y}_m} \quad , \quad (13)$$

$$\sigma_x = \sqrt{2 \frac{\sum_{m=1}^M (\tilde{x}_m \cos\theta - \tilde{y}_m \sin\theta)^2}{M}} \quad , \quad \sigma_y = \sqrt{2 \frac{\sum_{m=1}^M (\tilde{x}_m \sin\theta + \tilde{y}_m \cos\theta)^2}{M}} \quad , \quad (14)$$

式中:  $\theta$  为标准差椭圆的方位角,以正北方向顺时针旋转为正;  $\tilde{x}_m$  和  $\tilde{y}_m$  分别为  $x_m$  和  $y_m$  同  $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  之差;  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  分别为  $x$  轴和  $y$  轴的标准差。

2.6 相关分析

利用 Pearson 相关系数计算 2000—2019 年黄土高原 UDI 与 CNLI 的相关性,计算公式为<sup>[30]</sup>:

$$r = \frac{\sum_{l=1}^L (x_l - \bar{x}_1)(y_l - \bar{y}_1)}{\sqrt{\sum_{l=1}^L (x_l - \bar{x}_1)^2 \sum_{l=1}^L (y_l - \bar{y}_1)^2}} \quad , \quad (15)$$

式中:  $r$  为相关系数;  $x_l$  和  $y_l$  分别为 2000—2019 年 UDI 和 CNLI 的值,  $\bar{x}_1$  和  $\bar{y}_1$  分别表示 UDI 和 CNLI 的均值;  $L$  为样本数目。

3 结果与分析

3.1 相关性分析

图 2 显示了 2000—2019 年黄土高原 CNLI 与 UDI 的相关系数。整体来看,二者相关性较高,其值高达 0.887 3( $p < 0.01$ );从黄土高原 CNLI 与人口、经济、空间和社会城镇化的相关系数来看,其相关系

$$\bar{X} = \frac{\sum_{m=1}^M \omega_m x_m}{\sum_{m=1}^M \omega_m} \quad , \quad \bar{Y} = \frac{\sum_{m=1}^M \omega_m y_m}{\sum_{m=1}^M \omega_m} \quad , \quad (10)$$

式中:  $x_m$  和  $y_m$  分别为第  $m$  个要素的位置坐标;  $\omega_m$  为第  $m$  个要素的权重;  $\bar{X}$  和  $\bar{Y}$  分别为标准化椭圆的重心坐标;  $M$  为总像元数。

$$SDE_x = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^M (x_m - \bar{x})^2}{M}} \quad , \quad SDE_y = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^M (y_m - \bar{y})^2}{M}} \quad , \quad (11)$$

$$S = (\frac{x}{SDE_x})^2 + (\frac{y}{SDE_y})^2 \quad , \quad (12)$$

式中:  $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  分别为  $x_m$  和  $y_m$  的算数平均中心;  $SDE_x$  和  $SDE_y$  分别为标准化椭圆的长轴和短轴;  $S$  为标准差椭圆的面积。

数的值均在 0.80 以上,分别达到 0.840 7、0.852 6、0.879 6 和 0.836 2。以上结果表明本文构建的 CNLI 可以较好反映黄土高原城镇化水平,可以用于后续分析。

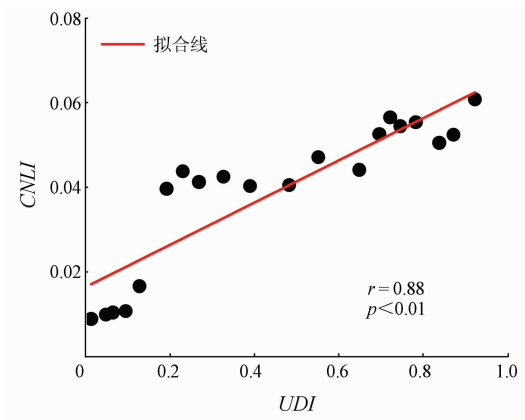


图 2 2000—2019 年黄土高原 UDI 与 CNLI 散点图  
Fig.2 Scatter plot between UDI and CNLI in the Loess Plateau from 2000 to 2019

3.2 CNLI 时空演变趋势

2000—2019 年整个黄土高原及 5 个城市群 CNLI 时间变化如图 3 所示。由图 3 可知,2000—2019 年期间,黄土高原的 CNLI 呈波动上升的趋势,

其值由 2000 年的 0.008 9 增加至 2019 年的 0.060 9, 年增加速率为 0.002 7( $p<0.01$ ) (图 3(a))。从各个城市群来看,其 CNLI 值均表现为波动上升的趋

势,增加速率最大的为关中平原城市群,其年增速为 0.003 2( $p<0.01$ ); 兰西城市群得 CNLI 年增速最小,其值仅为 0.0020( $p<0.01$ ) (图 3(b))。

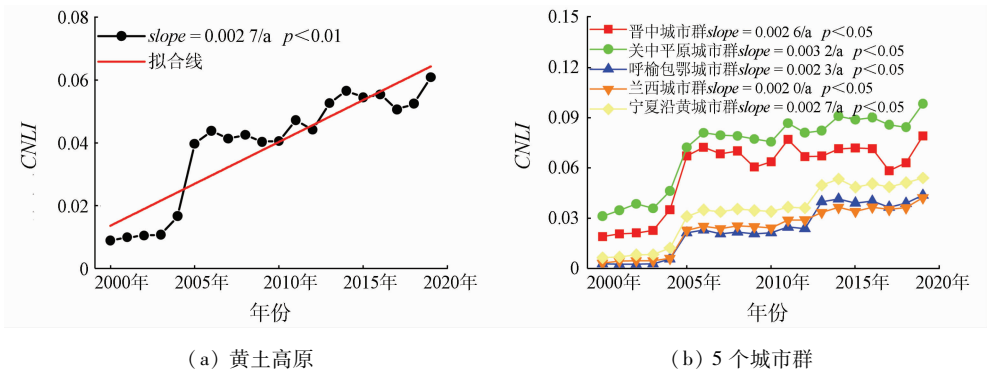


图 3 2000—2019 年黄土高原及 5 个城市群 CNLI 值变化

Fig. 3 Changes of the CNLI in Loess Plateau and five urban agglomerations from 2000 to 2019

图 4 显示了 2000—2019 年黄土高原夜间灯光强度和 CNLI 值的空间分布。总体来看,黄土高原夜间灯光强度呈现从东南向西北减小的趋势。2000 年夜间灯光强度高值区 ( $DN>20$ ) 主要位于黄土高原东南部的太原和西安等地 (图 4(a)); 到 2010 年,夜间灯光强度高值区开始向西北方向的呼和浩特、大同和银川等地扩张 (图 4(b)); 到 2019 年,夜间灯光强度高值区在黄土高原东南部及省会(首府)城市附近持续扩展,中部地区的夜间灯光强度高值区也有了实质性提升 (图 4(c))。从城市尺度来看,黄土高原 CNLI 值呈现从东南向西北递减的趋势,高值区主要分布在省会城市及其附近区域。2000 年,除东南部的太原和西安等少数城市的

CNLI 值高于 0.04 外,其他城市均小于 0.02,表明黄土高原城镇化发展水平较低 (图 4(d)); 到 2010 年,东南部的西安、洛阳和太原、北部的包头和呼和浩特以及西北部的银川等地的 CNLI 值快速上升,其值均超过了 0.08,西安、洛阳和太原和包头的 CNLI 值甚至超过了 0.10,逐步形成了以西安为中心的关中平原城市群、以太原为中心的晋中城市群、以呼和浩特和包头为中心的呼榆包鄂城市群以及以银川为中心的宁夏沿黄城市群 (图 4(e)); 到 2019 年,CNLI 值大于 0.10 的城市在西安及其附近城市连片出现,西部的兰州和西宁的 CNLI 值也超过 0.06 (图 4(f))。

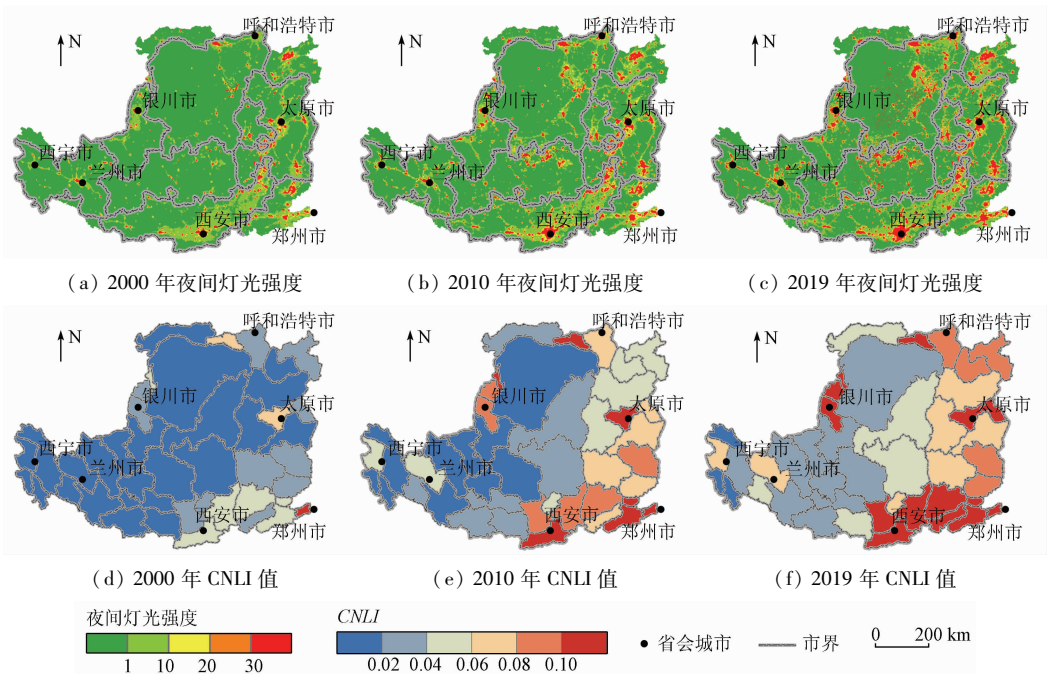


图 4 2000—2019 年黄土高原夜间灯光指数 DN 值及其 CNLI 的空间分布

Fig. 4 Spatial pattern and change of lighting image and CNLI in the Loess Plateau from 2000 to 2019

3.3 黄土高原城市建成区提取结果

为进一步分析黄土高原城镇空间格局演变,本文提取了 2000—2019 年黄土高原 40 个地级市城市建成区面积,并进一步计算了其绝对误差和相对误差(图 5)。从图 5 中可以看出,所有城市建成区提取的绝对误差均值为 2.45 km<sup>2</sup>,其中 29 座城市的绝对误差低于 3 km<sup>2</sup>;从相对误差来看,所有城市建成区提取的相对误差均值为 3.72%,其中有 35 座城

市的相对误差低于 10%。总体来看,基于二分模型提取的建成区面积与统计的面积较为接近,但由于夜间灯光遥感数据饱和和校正和背景噪声去除存在一定误差会使城市建成区内的 DN 值变化相对较小,城市建成区像元与城市绿地、水体等非建成区像元区分效果较差,因此西安和银川等城市的建成区提取面积绝对误差偏大<sup>[5]</sup>。

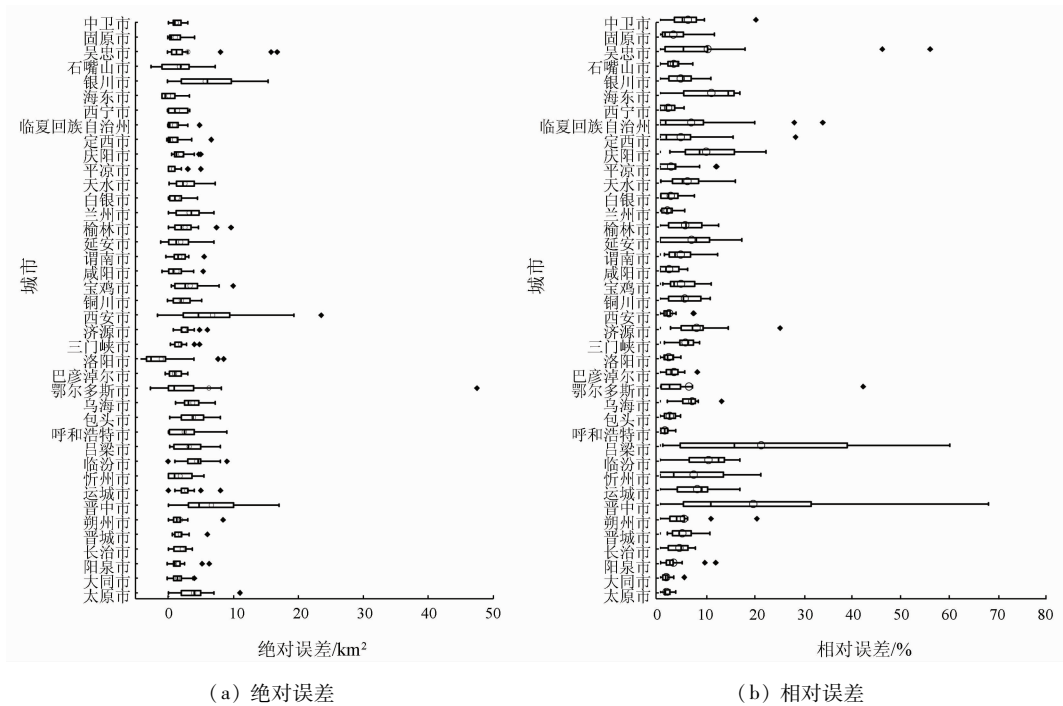


图 5 2000—2019 年黄土高原各城市建成区提取的绝对误差和相对误差

3.4 城镇空间格局分析

3.4.1 城镇空间扩展强度

考虑到城镇扩展强度及空间形态变化是城镇化的主要标志,对黄土高原建成区扩展强度及空间形态变化进行了分析。图 6 显示了 2000—2019 年黄

土高原建成区空间扩张态势。整体而言,2000—2019 年黄土高原建成区扩张强度呈快速增加的趋势,其值为 7.42%;分时间段来看,2000—2010 年和 2010—2019 年的城镇扩张强度分别为 6.27% 和 4.69%,前一阶段的值高于后一阶段(表 3)。

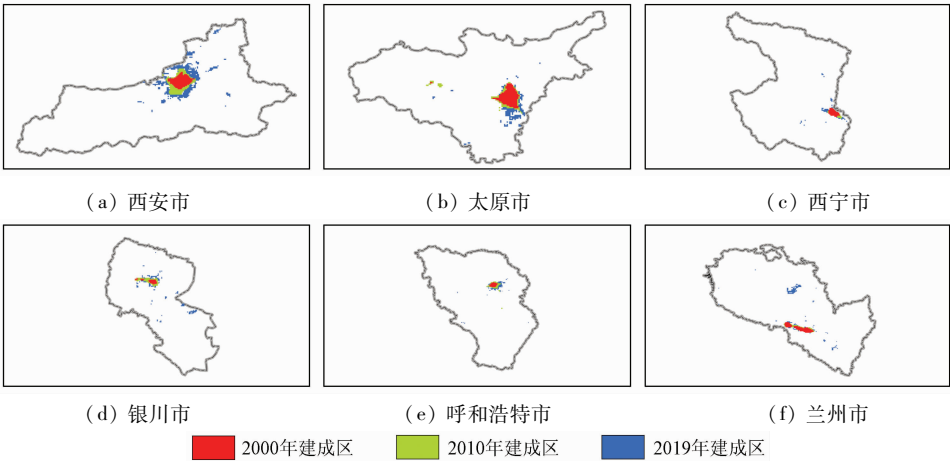
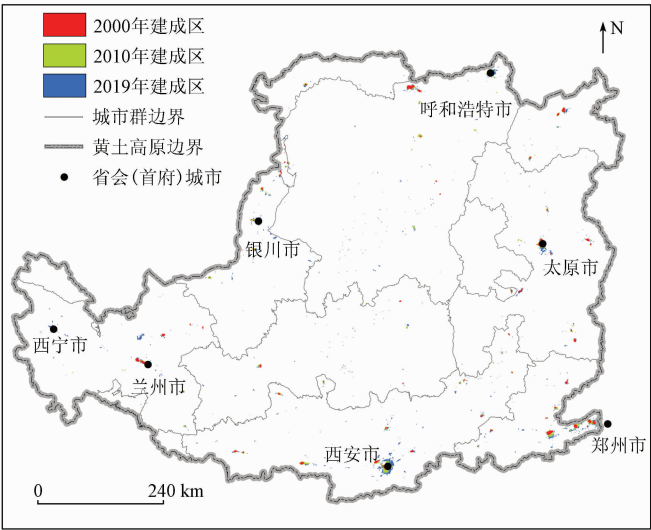


图 6-1 2000—2019 年黄土高原及省会(首府)城市城镇建成区空间扩张态势

Fig. 6-1 Urban expansion of the Loess Plateau and six provincial capitals from 2000 to 2019



(g) 黄土高原

图 6-2 2000—2019 年黄土高原及省会(首府)城市城镇建成区空间扩张态势

Fig. 6-2 Urban expansion of the Loess Plateau and six provincial capitals from 2000 to 2019

表 3 不同阶段整个黄土高原和 5 个城市群及省会(首府)建成区扩展强度值

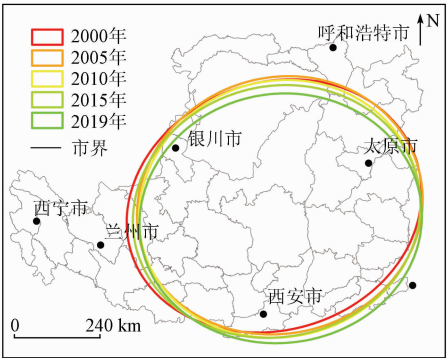
Tab.3 Urban expansion intensity in the whole Loess Plateau, five urban agglomerations and six provincial capitals during 2000—2010, 2010—2019 and 2000—2019 (%)

| 区域      | 2000—2010 年 | 2010—2019 年 | 2000—2019 年 |
|---------|-------------|-------------|-------------|
| 黄土高原    | 6.27        | 4.69        | 7.42        |
| 关中平原城市群 | 7.02        | 5.84        | 9.03        |
| 晋中城市群   | 3.33        | 4.07        | 4.61        |
| 呼榆包鄂城市群 | 8.01        | 3.33        | 7.53        |
| 宁夏沿黄城市群 | 13.81       | 3.30        | 11.76       |
| 兰西城市群   | 2.47        | 4.98        | 4.52        |
| 西安      | 7.74        | 10.54       | 14.02       |
| 太原      | 3.71        | 3.65        | 4.61        |
| 呼和浩特    | 9.42        | 5.44        | 10.71       |
| 银川      | 13.27       | 6.59        | 15.40       |
| 兰州      | 2.77        | 6.24        | 5.60        |
| 西宁      | 1.34        | 4.00        | 3.03        |

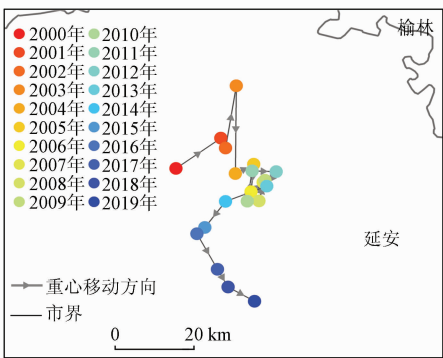
从不同的城市群来看,2000—2019 年宁夏沿黄城市群和关中平原城市群的城镇空间扩展强度值较高,分别为 11.76% 和 9.03%,兰西城市群和晋中城市群的值较低,仅为 4.52% 和 4.61%;分阶段来看,2000—2010 年关中平原城市群、呼榆包鄂城市群和宁夏沿黄城市群的城镇空间扩展强度明显高于 2010—2019 年,晋中城市群和兰西城市群呈相反的态势(表 3)。从省会(首府)城市来看,2000—2019 年银川和西安的城镇扩张强度值较大,分别达到 15.40% 和 14.02%,西宁的城镇扩张强度值最低,仅为 3.03%;分阶段来看,2010—2019 年西安、兰州和西宁的城镇扩张强度的值高于 2000—2010 年,而银川和呼和浩特呈现相反的态势(图 6 和表 3)。

3.4.2 建成区空间演变趋势

图 7 显示了 2000—2019 年黄土高原城市建成区扩张的标准差椭圆及重心的移动轨迹。从图 7 中可以看出,黄土高原建成区标准差椭圆大致呈东—



(a) 标准差椭圆



(b) 标准差椭圆重心

图 7-1 2000—2019 年黄土高原建成区面积标准差椭圆重心、覆盖面积及方位角变化趋势

Fig. 7-1 Spatio-temporal dynamics of standard deviation ellipse elements, centroid migration route, areal change trend and azimuth change from 2000 to 2019

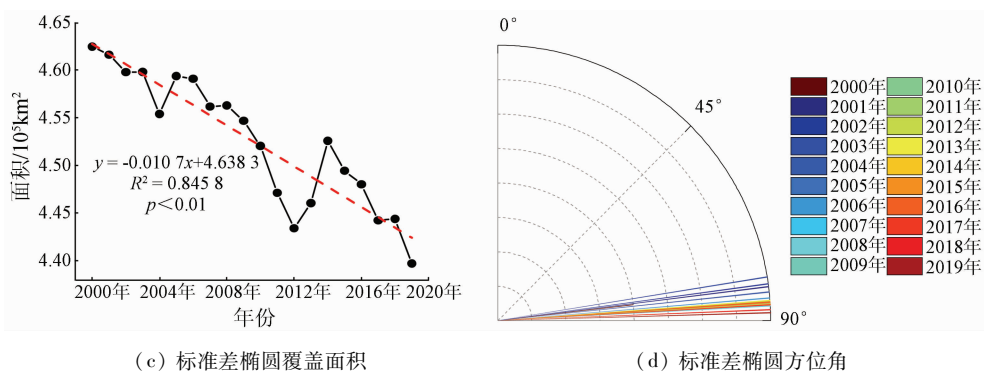


图 7-2 2000—2019 年黄土高原建成区面积标准差椭圆重心、覆盖面积及方位角变化趋势

Fig. 7-2 Spatio-temporal dynamics of standard deviation ellipse elements, centroid migration route, areal change trend and azimuth change from 2000 to 2019

西走向,其重心在 2000—2019 年期间呈现向东南方向移动的趋势,由 2000 年的(109°26′16″E,36°57′1″N)移动至 2019 年的(109°36′57″E,36°38′6″N),表明该地区东南部的建成区扩张强度领先于西北部(图 7(a)—(b))。从标准差椭圆的覆盖面积来看,其值由 2000 年的  $4.62 \times 10^5 \text{ km}^2$  下降为 2019 年的  $4.40 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,年下降速率为  $0.0107 \text{ km}^2$  ( $p < 0.01$ ),表明黄土高原建成区扩张呈逐渐集中的态势(图 7(c))。从标准差椭圆的方位角来看,其值由北偏东  $83.33^\circ$  变化为  $88.37^\circ$ ,进一步表明黄土高原建成区整体呈现向东南方向集中扩张的态势(图 7(d))。

4 讨论

作为落实黄河流域高质量发展的主体区域,黄土高原城镇化建设一方面会改变地表下垫面性质,引发区域植被破坏等生态环境问题,另一方面则会促进社会经济的发展,累计诸多资金和技术等用于生态的治理和修复,提高区域的生态承载力<sup>[28]</sup>。相比于遥感影像提取的城市不透水表面数据,夜间灯光遥感数据与人类活动和社会经济密切相关,可以更加准确反映城市区域的人类活动<sup>[5, 19]</sup>。目前,已有诸多学者利用 DMSP/OLS 或 NPP/VIIRS 夜间灯光数据对我国省、市、县等多个空间尺度的城镇化水平进行了评估,认为灯光强度与城镇化水平具有较好的相关性<sup>[32-33]</sup>。在构建的 2000—2019 年黄土高原长时间序列的夜间灯光遥感数据的基础上,本文进一步分析了 CNLI 的时空演变及城市建成区的时空格局,相比与以往的研究,本文采用统计数据进一步验证了 CNLI 在黄土高原的适用性,陈晋等<sup>[27]</sup>认为基于夜间灯光指数构建的 CNLI 同复合城镇化指标具有显著相关性。本文从黄土高原整体、城市群及城市等不同尺度分析了其时空演变,研究结果可为长时间序列的城镇化研究提供数据和方法支撑。

宋永永等<sup>[16]</sup>构建了 1992—2015 年黄土高原夜间灯光数据,认为黄土高原城镇化空间扩展显著,但该研究并未从多空间尺度分析其城镇化时空演变;周亮等<sup>[17]</sup>认为 1980—2019 年期间黄土高原城镇扩张迅速,但该研究仅基于遥感提取的建设用地面积。本文的研究结果表明黄土高原 CNLI 值呈现从东南向西北递减的趋势,表明黄土高原城镇化水平空间分布不均,整体呈现东南高、西北低的规律,基本符合黄土高原城镇化水平的实际情况。主要原因是由于东南部的关中平原城市群是该区域唯一的区域级城市群,其人口密度和城镇密度都是 5 个城市群中最大的,城镇化发展水平最高<sup>[20]</sup>,研究结果同 Song 等<sup>[7]</sup>的研究结果类似。从建成区的时空演变格局来看,城镇扩张强度呈明显的阶段性,2010—2019 年期间的扩张强度小于 2000—2010 年,在呼榆包鄂城市群和宁夏沿黄城市群尤为突出,主要是由于资源的推动、政策引导以及行政区划的调整等<sup>[7, 34]</sup>,研究结果同史海金等<sup>[35]</sup>的研究结果类似。此外,城镇扩展强度也会受到地形、交通和社会经济等其他因素的影响。李俊峰等<sup>[33]</sup>认为兰州市的城镇扩张强度受到河谷地形的限制;季顺伟等<sup>[36]</sup>认为城镇扩张强度受公共财政支出和固定资产投入等社会经济的影响。从建成区扩张方向来看,黄土高原建成区整体呈现向东南方向集中扩张的态势,主要是由于西安、太原等黄土高原核心城市建成区扩张对标准差椭圆重心的拉动作用,建成区空间集聚性趋于增强,这与赵雪雁等<sup>[24]</sup>得出的结论一致。

值得注意的是采用夜间灯光遥感数据对城镇化水平进行估算也存在一定的限制和不足。首先,相同城镇化水平的区域由于地理位置、生活方式等不同会导致夜间灯光亮度不同,同时常用的夜间灯光遥感数据(DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS)存在辐射饱和、背景噪声、云层遮蔽以及月光污染等问题,这些问题均会对 CNLI 计算的准确性带来一定影

响<sup>[11, 22]</sup>;其次,对建成区提取结果的精度评价主要依据统计年鉴数据,统计年鉴数据主观性及相关年份的缺失会对结果的准确性造成一定的影响<sup>[29]</sup>。虽然夜间灯光遥感数据衡量城镇化水平并非完全准确,但借助该数据可以克服人为干扰对城镇化发展水平评价的影响,为分析城镇化发展提供了新的研究视角<sup>[10, 21]</sup>。

5 结论

利用 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 数据,本文构建了 2000—2019 年黄土高原夜间灯光遥感数据集,分析了黄土高原 CNLI 以及建成区扩张的时空演变格局,可以得出以下结论:

1) 基于夜间灯光遥感数据构建的黄土高原 CNLI 与统计数据构建的 UDI 及人口城镇化、经济城镇化、空间城镇化和社会城镇化的相关系数均高于 0.80,表明本文所构建的 CNLI 可以较好反映黄土高原的城镇化水平。

2) 2000—2019 年整个黄土高原及 5 个城市群的 CNLI 值均呈显著上升的趋势,关中平原城市群的增速最大,兰西城市群的增速最小;空间上,黄土高原 CNLI 值呈现从东南向西北递减的趋势。

3) 黄土高原建成区提取的绝对误差和相对误差的均值分别为 2.45 km<sup>2</sup> 和 3.72%,其中 29 座城市建成区提取结果的绝对误差低于 3 km<sup>2</sup>; 35 座城市建成区提取结果的相对误差低于 10%。表明该方法提取的建成区精度较高。

4) 黄土高原建成区大致呈东—西走向,其标准差椭圆重心在 2000—2019 年期间呈现向东南方向移动的趋势;标准差椭圆覆盖面积表现为显著下降的趋势,方位角的值由北偏东 83.33°变化为 88.37°。

参考文献 (References):

[1] 樊杰,郭锐. 新型城镇化前置条件与驱动机制的重新认知[J]. 地理研究,2019,38(1):3-12.  
Fan J,Guo R. Re-recognition of precondition and driving mechanism of new-type urbanization[J]. Geographical Research, 2019,38(1):3-12.

[2] Wang Y H,Liu Z F,He C Y,et al. Quantifying urbanization levels on the Tibetan Plateau with high-resolution nighttime light data[J]. Geography and Sustainability,2020,1(3):233-244.

[3] Cai J,Li X P,Liu L J,et al. Coupling and coordinated development of new urbanization and agro-ecological environment in China[J]. Science of the Total Environment,2021,776(1):145837.

[4] Zhou W,Yu W,Qian Y,et al. Beyond city expansion:Multi-scale environmental impacts of urban megaregion formation in China[J]. National Science Review,2022,9:107.

[5] 许正森,徐永明. 整合 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 夜间灯光遥感数据的长江三角洲城市格局时空演化研究[J]. 地球信息科学学报,2021,23(5):837-849.  
Xu Z S,Xu Y M. Study on the spatio-temporal evolution of the Yangtze River Delta urban agglomeration by integrating DMSP/OLS and NPP/VIIRS nighttime light data[J]. Journal of Geo-Information Science,2021,23(5):837-849.

[6] 吴建楠,程绍铂,姚士谋. 中国城市群空间结构研究进展[J]. 现代城市研究,2013,28(12):97-101.  
Wu J N,Cheng S B,Yao S M. Review and prospect of research on spatial structure of China's urban agglomerations[J]. Modern Urban Research,2013,28(12):97-101.

[7] Song Y Y,Ma B B,Dai L H,et al. Spatial-temporal pattern and formation mechanism of county urbanization on the Chinese Loess Plateau[J]. Journal of Mountain Science,2021,18(4):1093-1111.

[8] 赵安周,刘宪锋,裴韬,等. 京津冀地区不透水表面覆盖率的时空演变及其对植被的影响[J]. 地理研究,2021,40(6):1582-1595.  
Zhao A Z,Liu X F,Pei T,et al. Spatiotemporal evolution of impervious surface percentage and its impact on vegetation in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Geographical Research,2021,40(6):1582-1595.

[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.  
Dong H S,Li R J,Li J M,et al. Study on urban spatiotemporal expansion pattern of three first-class urban agglomerations in China derived from integrated DMSP-OLS and NPP-VIIRS nighttime light data[J]. Journal of Geo-Information Science,2020,22(5):1161-1174.

[10] 陈颖彪,郑子豪,吴志峰,等. 夜间灯光遥感数据应用综述和展望[J]. 地理科学进展,2019,38(2):205-223.  
Chen Y B,Zheng Z H,Wu Z F,et al. Review and prospect of application of nighttime light remote sensing data[J]. Progress in Geography,2019,38(2):205-223.

[11] 余柏菴,王丛笑,官文康,等. 夜间灯光遥感与城市问题研究:数据、方法、应用和展望[J]. 遥感学报,2021,25(1):342-364.  
Yu B L,Wang C X,Gong W K,et al. Nighttime light remote sensing and urban studies: Data, methods, applications, and prospects[J]. National Remote Sensing Bulletin,2021,25(1):342-364.

[12] Jiang L G,Liu Y,Wu S,et al. Study on urban spatial pattern based on DMSP/OLS and NPP/VIIRS in Democratic People's Republic of Korea[J]. Remote Sensing,2021,13(23):4879.

[13] 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.  
Du H B,Wei W,Zhang X Y,et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of energy-related carbon emissions in the Yellow River basin: Based on the DMSP/OLS and NPP/VIIRS nighttime light data[J]. Geographical Research,2021,40(7):2051-2065.

[14] Wang Y,Huang C,Zhao M,et al. Mapping the population density in Mainland China using NPP/VIIRS and points-of-interest da-

- ta based on a random forests model[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(21): 3645.
- [15] Zhang B R, Li J, Wang M G, et al. Using DMSP/OLS and NPP/VIIIRS images to analyze the expansion of 21 urban agglomerations in mainland China[J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2021, 147(3): 04021024.
- [16] 宋永永, 薛东前, 马蓓蓓, 等. 黄土高原城镇化过程及其生态环境响应格局[J]. *经济地理*, 2020, 40(6): 174–184.
- Song Y Y, Xue D Q, Ma B B, et al. Urbanization process and its ecological environment response pattern on the Loess Plateau, China[J]. *Economic Geography*, 2020, 40(6): 174–184.
- [17] 周亮, 唐建军, 刘兴科, 等. 黄土高原人口密集区城镇扩张对生境质量的影响——以兰州、西安—咸阳及太原为例[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(1): 261–270.
- Zhou L, Tang J J, Liu X K, et al. Effects of urban expansion on habitat quality in densely populated areas on the Loess Plateau: A case study of Lanzhou, Xi'an – Xianyang and Taiyuan, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(1): 261–270.
- [18] Fu B J, Wang S, Liu Y, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45: 223–243.
- [19] Zhao A Z, Yu Q Y, Wang D L, et al. Spatiotemporal dynamics of ecosystem water use efficiency over the Chinese Loess Plateau base on long – time satellite data[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29: 2298–2310.
- [20] 方创琳. 黄河流域城市群形成发育的空间组织格局与高质量发展[J]. *经济地理*, 2020, 40(6): 1–8.
- Fang C L. Spatial organization pattern and high – quality development of urban agglomeration in the Yellow River basin[J]. *Economic Geography*, 2020, 40(6): 1–8.
- [21] Chen Z, Yu B, Yang C, et al. An extended time series (2000—2018) of global NPP – VIIRS – like nighttime light data from a cross – sensor calibration[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(3): 889–906.
- [22] 孙阳, 刘新, 苏亚聪, 等. 基于夜间灯光数据估算安徽省县级尺度城镇化水平[J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(9): 1837–1847.
- Sun Y, Liu X, Su Y C, et al. County urbanization level estimated from nighttime light data in Anhui Province[J]. *Journal of Geo – Information Science*, 2020, 22(9): 1837–1847.
- [23] 方创琳. 城市群地区城镇化与生态环境耦合机理及规律[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 213–214.
- Fang C L. Coupling mechanism and law of urbanization and ecological environment in urban agglomeration[M]. Beijing: Science Press, 2021: 213–214.
- [24] 赵雪雁, 杜昱璇, 李花, 等. 黄河中游城镇化与生态系统服务耦合关系的时空变化[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(1): 131–147.
- Zhao X Y, Du Y X, Li H, et al. Spatio – temporal changes of the coupling relationship between urbanization and ecosystem services in the Middle Yellow River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(1): 131–147.
- [25] Ma J J, Guo J Y, Ahmad S, et al. Constructing a new inter – calibration method for DMSP – OLS and NPP – VIIRS nighttime light[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(6): 937.
- [26] Zhao M, Zhou Y Y, Li X C, et al. Building a series of consistent night – time light data (1992—2018) in Southeast Asia by integrating DMSP – OLS and NPP – VIIRS[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 58(3): 1843–1856.
- [27] 陈晋, 卓莉, 史培军, 等. 基于 DMSP/OLS 数据的中国城市化过程研究——反映区域城市化水平的灯光指数的构建[J]. *遥感学报*, 2003, 7(3): 168–175, 241.
- Chen J, Zhuo L, Shi P J, et al. The study on urbanization process in China based on DMSP/OLS data; Development of a light index for urbanization level estimation[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(3): 168–175, 241.
- [28] 冯雨雪, 李广东. 青藏高原城镇化与生态环境交互影响关系分析[J]. *地理学报*, 2020, 75(7): 1386–1405.
- Feng Y X, Li G D. Interaction between urbanization and eco – environment in Tibetan Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(7): 1386–1405.
- [29] 江原, 郝媛媛, 黄伟宸. 基于夜间灯光数据的甘青宁城市扩展及其建成区植被变化特征研究[J]. *生态学报*, 2022, 42(10): 3974–3988.
- Jiang Y, Hao Y Y, Huang Y C. Characteristics of urban expansion and vegetation change in built – up areas of Gan – Qing – Ning based on nighttime light data[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(10): 3974–3988.
- [30] Lu C, Li L, Lei Y, et al. Coupling coordination relationship between urban sprawl and urbanization quality in the West Taiwan Strait urban agglomeration, China; Observation and analysis from DMSP/OLS nighttime light imagery and panel data[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(19): 3217.
- [31] 路春燕, 许燕婷, 林晓晴, 等. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的环渤海城市群时空演变研究[J]. *国土资源遥感*, 2019, 31(4): 218–226. doi: 10.6046/gtzyyg. 2019. 04. 28.
- Lu C Y, Xu Y T, Lin X Q, et al. Study of spatio – temporal evolution of the circum – Bohai urban agglomeration based on DMSP/OLS night – time light data[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2019, (31): 218–226. doi: 10.6046/gtzyyg. 2019. 04. 28.
- [32] 卓莉, 史培军, 陈晋, 等. 20 世纪 90 年代中国城市时空变化特征——基于灯光指数 CNLI 方法的探讨[J]. *地理学报*, 2003, 6: 893–902.
- Zhuo L, Shi P J, Chen J, et al. Application of compound night light index derived from DMSP/OLS data to urbanization analysis in China in the 1990s[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 6: 893–902.
- [33] 李俊峰, 潘竞虎. 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.
- Li J F, Pan J H. Spatial expansion of cities at county – level or above in Gansu Province from 1992 to 2012 based on DMSP nighttime light images[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(3): 829–835.
- [34] 布自强, 白林波, 张佳瑜. 基于夜光遥感的宁夏沿黄城市群时空演变[J]. *自然资源遥感*, 2022, 34(1): 169–176. doi: 10.6046/zrzyyg. 2021118.
- Bu Z Q, Bai L B, Zhang J Y. Spatio – temporal evolution of Ningxia urban agglomeration along the Yellow River based on nighttime light remote sensing[J]. *Remote Sensing for Natural Re-*

sources,2022,34(1):169-176. doi:10.6046/zrzyyg.2021118.

[35] 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.

Shi H J,Wu W H,Li Y,et al. 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[J]. Journal of Desert Research,2021,41(6):235-248.

[36] 季顺伟,马仁锋,任丽燕. 2000 年以来宁波城市空间扩展特征及其驱动力分析[J]. 宁波大学学报(理工版),2021,34(2): 96-101.

Ji S W, Ma R F, Ren L Y. Spatial expansion characteristics of Ningbo City and its driving forces since 2000[J]. Journal of Ningbo University (Natural Science and Engineering Edition), 2021, 34(2):96-101.

Analyzing the spatio-temporal evolution patterns of urbanization in the Loess Plateau based on night light data and statistical data

ZHAO Anzhou<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiangrui<sup>1</sup>, XIANG Kaizheng<sup>1</sup>, LIU Xianfeng<sup>3</sup>, ZHANG Jinghan<sup>1</sup>

(1. School of Mining and Geomatics, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Research Center of Water Ecological Civilization and Social Governance of Hebei Province, Hebei University of Engineering, Handan 056038; 3. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** Research on the spatio-temporal evolution of urbanization is significant for optimizing the spatial structure of a city. Through the saturation and consistency correction of DMSP/OLS and NPP/VIIRS data, this study constructed a remote sensing dataset of night light in the Loess Plateau from 2000 to 2019. Then, this study calculated the compound night light index (CNLI) on different spatial scales and extracted the area of built-up areas in the Loess Plateau using a dichotomy method. Furthermore, this study analyzed the spatial evolution patterns using methods such as standard deviational ellipse (SDE). The results are as follows: ① The CNLI calculated from night light data correlated strongly with the urbanization development index (UDI) and various sub-indicators. ② The CNLI values of the Loess Plateau and five urban agglomerations showed significant upward trends during 2000—2019 and spatial downward trends from southeast to northwest. ③ The area of built-up areas in the Loess Plateau extracted using the dichotomy method had mean absolute and relative errors of 2.45 km<sup>2</sup> and 3.72%, respectively. ④ The focus of the built-up areas in the Loess Plateau showed a southeastward shifting trend during 2000—2019, with the SDE-covered area decreasing significantly ( $slope = 0.0107\text{ km}^2/\text{a}$ ;  $p < 0.01$ ) and the azimuth angle changing from northeastern 83.33° to 88.37°. The results of this study can provide data support and a methodological reference for investigating the spatio-temporal patterns of urbanization in the Loess Plateau and other ecologically vulnerable areas.

**Keywords:** night light data; urbanization; CNLI; UDI; spatio-temporal evolution; Loess Plateau

(责任编辑: 陈 理)