

夜间灯光遥感揭示21世纪以来中国西北部地区城市化演化格局与过程

刘少阳^{1,2}, 陈佐旗^{3,4}, 施开放⁵, 吴宾^{1,2}, 魏冶⁶, 王丛笑^{1,2},
黎夏^{1,2}, 吴健平^{1,2}, 余柏菡^{1,2}

1. 华东师范大学 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241;
2. 华东师范大学 地理科学学院, 上海 200241;
3. 福州大学 空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福州 350116;
4. 福州大学 数字中国研究院(福建), 福州 350116;
5. 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715;
6. 东北师范大学 地理科学学院, 长春 130024

摘要: 新疆维吾尔自治区(以下简称“新疆”)作为中国西部战略屏障和向西开放的重要窗口, 评估其城市化发展状况对于全国改革发展大局和“一带一路”发展战略具有重要意义。相较于传统研究, 夜间灯光遥感已被证明能够对人类活动强度和地区综合发展水平进行更客观、空间尺度更灵活、覆盖范围更广的监测。因此, 本文利用2000年—2020年长时序夜间灯光遥感数据, 采用标准差椭圆、时间序列分解以及夜间灯光发展指数等方法, 从空间格局与时序演化上综合分析了21世纪以来新疆城市化进程。结果显示, 2000年—2020年新疆城市化发展整体呈现向西南方向扩张的趋势, 南疆地区发展速度强劲; 21世纪以来新疆城市化演化过程可分为缓慢发展期(2007年之前)、波动增长期(2008年—2014年)和加速上升期(2015年之后)3个阶段; 新疆城镇地区及大部分地市的经济社会发展愈趋均衡, 而乡村地区仍处于快速发展的差异化阶段。总体而言, 21世纪以来新疆城市化进程处于快速且均衡发展的状态。

关键词: 夜间灯光遥感, 城市化演化, 时间序列分解, 夜间灯光发展指数, 新疆维吾尔自治区

中图分类号: P2

引用格式: 刘少阳, 陈佐旗, 施开放, 吴宾, 魏冶, 王丛笑, 黎夏, 吴健平, 余柏菡. 2024. 夜间灯光遥感揭示21世纪以来中国西北部地区城市化演化格局与过程. 遥感学报, 28(6): 1497–1514

Liu S Y, Chen Z Q, Shi K F, Wu B, Wei Y, Wang C X, Li X, Wu J P and Yu B L. 2024. Nighttime light remote sensing reveals the pattern and process of urbanization evolution in northwest China since the 21st century. National Remote Sensing Bulletin, 28(6): 1497–1514 [DOI: 10.11834/jrs.20221858]

1 引言

新疆维吾尔自治区(以下简称“新疆”)地处中国最西部, 是中国向西开放的重要窗口和西北边疆的战略屏障, 作为丝绸之路经济带上的重要交通枢纽, 具有独特的区位优势(国家发展改革委员会等, 2015)。新疆城市社会经济的稳定发展不仅仅是中国区域发展问题, 也是关系到中华民族

核心利益的战略问题(刘炳炳和曹之然, 2013)。21世纪以来, “西部大开发”政策、“西气东输”工程、“对口援疆”工作以及“一带一路”倡议等的提出和实施, 为新疆城市与经济发展提供了良好的机遇和环境, 人口城市化率由2000年的33.82%大幅提高到2020年的56.53%(国家统计局2000, 2020 (<https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2021/indexch.htm> [2021-12-31]))。新疆城市化进程快速发展,

收稿日期: 2021-12-31; 预印本: 2022-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 42371332, 41871331, 41801343, 42001357); 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室主任基金(编号: KLGIS2021C01); 中央高校基本科研业务费专项

第一作者简介: 刘少阳, 研究方向为夜间灯光遥感及其在城市研究中的应用。E-mail: syliu@stu.ecnu.edu.cn

通信作者简介: 余柏菡, 研究方向为夜间灯光遥感、城市遥感。E-mail: blyu@geo.ecnu.edu.cn

区域经济结构和城市发展模式也发生着巨大变化。但新疆城市化发展受到资源禀赋、区域政策、社会秩序等多种因素(汪存华等, 2013; Li等, 2020)的影响, 其经济水平与全国其他地区相比仍存在差距(蒙永胜等, 2013)。因此, 在“百年未有之大变局”背景下(张宇燕, 2019), 全面认识新疆城市化发展演化过程, 总结过去20余年的发展规律和发展经验, 对于未来新疆新型城镇化建设和中国经济社会全面协调发展具有极其重要的现实意义。

传统研究利用统计数据从不同方面评价了新疆城市化水平。张军民等(2012)从人口、经济、社会、土地4个方面设计了一套综合评价指标体系, 结果表明21世纪初新疆城市化处于初级阶段, 综合发展水平明显滞后。吕宾和张小雷(2002)和韦亚平(2007)选用GDP、产业比重等指标, 分析了新疆城市化水平及其与经济发展的关系, 认为新疆城市化与经济发展协调性仍需进一步优化。与此同时, 针对新疆区域经济差异与发展均衡性问题, 大部分研究使用了人均GDP等经济指标, 发现近年来新疆区域经济总体差异和南北疆区域内差异不断扩大(肖艳秋等, 2012; 刘世薇和张平宇, 2012; 程文明, 2016; 李豫新等, 2020)。这些研究使用统计资料较好地归纳了新疆城市化水平, 但统计数据存在更新不及时、无法反映统计单元内的空间细节、统计口径不一致、人为误差等问题(Cao等, 2014; 岳希明等, 2004)。为克服这些不足, 许多学者采用各类日间可见光遥感影像研究了新疆地区土地覆盖变化(陈曦等, 2020)、城市扩展动态特征(茹克亚·萨吾提和阿里木江·卡斯木, 2015; 阿里木江·卡斯木等, 2013)以及城市化空间格局演变(唐兵, 2013)等, 结果显示新疆城市化呈现复杂多样的空间格局和扩张模式。然而, 传统遥感数据仅能反映新疆城市化的物理属性, 尚无法对城市发展中的社会经济属性进行有效观测(余柏菡等, 2021)。从地理学的视角来看, 城市化进程往往伴随着物理空间扩张和社会经济增长的同步发生(王桂新, 2013; 陈明星等, 2009; Ma等, 2012; 马廷, 2019), 具有综合性、复杂性的特点(陈明星, 2015; Friedmann, 2006)。因此, 评估城市化进程需要综合考虑城市的物理空间特征和社会经济属性。

夜间灯光遥感影像能够捕捉到夜间地球表面的灯光信息(Croft, 1978), 这些灯光主要来源于人造光源, 可以直观显示夜间人类活动的范围和强度,

从而反映社会经济发展水平(余柏菡等, 2021), 夜间灯光遥感在评估区域城市经济社会发展中具有独特优势。夜间灯光遥感影像已被广泛应用于监测城市空间范围(何春阳等, 2006)、城市内部结构(Chen等, 2017)、城市群发展(Yu等, 2014)等多尺度城市空间特征, 以及估算GDP(Elvidge等, 1997)、人口分布(Elvidge等, 1997)、碳排放(Shi等, 2016a)、电力消耗(Shi等, 2016b)、贫困度(Elvidge等, 2009)等社会经济指标。同时, 已有部分学者利用夜间灯光遥感数据开展了新疆城市化发展水平的研究。Ju等(2016)和Wang等(2017)使用美国军事气象卫星计划的线性扫描业务系统DMSP-OLS (Defense Meteorological Satellite Program-Operational Linescan System)的夜间灯光数据, 分析了20世纪90年代末至21世纪初乌鲁木齐市等新疆主要城市的空间扩张过程, 发现其城市化呈现两阶段式的扩展模式。乔雪伟(2019)选取了4期DMSP-OLS数据, 研究了新疆10个城市的空间格局变化, 发现DMSP-OLS数据能够准确提取新疆城市建成区面积, 并且不同区域内城市扩张方式存在差异。图尔荪阿依·如孜等(2020)和Li等(2020)则结合了DMSP-OLS数据和新一代的美国国家极轨业务环境卫星系统可见光红外成像辐射仪NPP-VIIRS (National Polar-Orbiting Partnership-Visible Infrared Imaging Radiometer Suite)夜间灯光数据产品两种数据, 分析了较长时段的新疆城市空间变化。除了分析新疆城市分布格局和扩张方式外, 夜间灯光遥感也被成功用于新疆人口分布、农民收入等社会经济发展状况研究中(高倩和阿里木江·卡斯木, 2017; 解海群等, 2016; 范小晶等, 2019)。此外, 区域内均衡协调发展一直是影响新疆社会可持续发展的重点议题, 衡量新疆城市化发展的差异和均衡性十分必要(刘世薇和张平宇, 2012; 李豫新等, 2020)。Xu等(2015)和Zhou等(2015)采用夜间灯光发展指数NLDI (Night Light Development Index)(Elvidge等, 2012)在省级和地级市尺度计算了中国的区域发展均衡性, 证明了NLDI能够很好地评价公共服务和社会经济发展的不平等程度, 可以揭示地区公共服务和基础设施建设的差异。因此, NLDI指数同样能够对新疆的区域均衡性进行多尺度的衡量(彭博等, 2021)。总体而言, 夜间灯光遥感数据已具备了分析城市化演化过程和社会经济发展水平的能力, 但目前仍需拓展和丰富研究的广度和深度, 尤其是探索其空间格局和长时序演化过程, 以更全

面地认识新疆城市化进程和社会发展均衡性问题。

21世纪以来新疆城市化发展经历了复杂的发展阶段和模式(刘世薇和张平宇, 2012; 韩春鲜等, 2010)。从2000年西部大开发实施后, 新疆先后经历了2010年新一轮“对口援疆”、2015年“一带一路”倡议等一系列对疆政策的建设开发, 在现阶段2020年“全面建成小康社会”的时代背景下, 亟需开展长时间序列的分析研究, 来认识和归纳新疆城市化的演化过程与规律。因此, 为了满足长时序评估需求, 本文拟采用Chen等(2021)研制的2000年—2020年全球500 m分辨率“类NPP-VIIRS”夜间灯光数据集(NPP-VIIRS-like NTL Data), 以确保长时序研究中夜间灯光亮度信息的一致性, 从而更准确地反映新疆城市化的时空演化过程以及社会发展均衡性。

综上, 本文基于长时序的夜间灯光遥感数据, 采用空间统计和时间序列分析等方法, 全面分析21世纪以来新疆维吾尔自治区夜间灯光的空间分布格局和时间变化趋势, 从而深入认识新疆城市化发展的格局和过程, 识别和总结新疆城市化发展阶段, 并探讨新疆发展的均衡性与差异, 为新疆进一步打造丝绸之路经济带核心区、推进“新型城镇化建设”以及实现全国全面协调发展提供有价值的参考。

2 数据与方法

2.1 研究区域

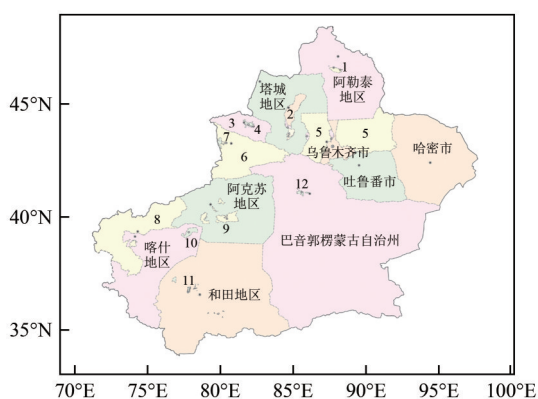
新疆维吾尔自治区位于中国西北边陲, 周边与蒙古、哈萨克斯坦等8个国家接壤, 是丝绸之路的重要通道。新疆下辖4个地级市、5个地区、5个自治州和9个自治区直辖县级市(图1(a)), 可分

为北疆(乌鲁木齐市、北屯市、克拉玛依市等)、南疆(阿克苏地区、喀什地区、图木舒克市等)和东疆(哈密市和吐鲁番市)3个区域。2000年—2020年, 新疆总人口1925万人增长到2585万人, 同期人均GDP由7372元/人增长到53593元/人(国家统计局, 2000, 2020 (<https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2021/indexch.htm>[2021-12-31]))。

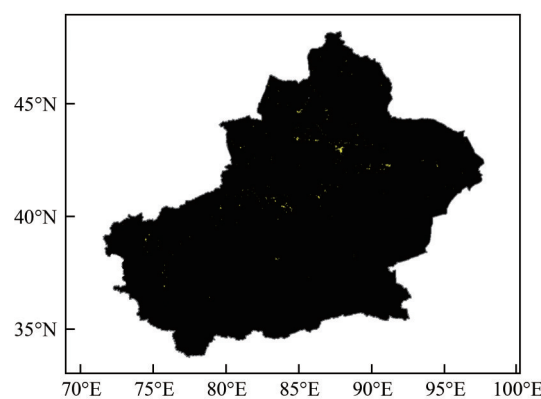
2.2 数据

(1) 夜间灯光数据。本文所用夜间灯光遥感数据为Chen等(2021)生产的2000年—2020年全球500 m分辨率的“类NPP-VIIRS”夜间灯光数据集(NPP-VIIRS-like NTL Data), 如图1(b)—(d)所示。该数据集是基于自编码器的跨传感器(DMSP-OLS和NPP-VIIRS)夜间灯光数据校正结果, 不仅扩展了两种原始夜间灯光遥感数据的时序长度, 并且具有较高的时序一致性与数据质量(像元尺度验证精度: $R^2=0.87$), 是长时序大范围的城市化过程监测研究的有效数据支撑。

(2) 其他辅助数据。新疆维吾尔自治区、地市行政边界数据来源于国家基础地理信息数据库; 新疆乡镇街道行政边界数据来源于天地图(<https://www.tianditu.gov.cn/>[2021-12-31]); LandScan人口数据下载自美国能源部橡树岭国家实验室(<https://landscan.ornl.gov/>[2021-12-31]); 主要交通线数据下载自OpenStreetMap地图网站(<https://www.openstreetmap.org/>[2021-12-31]); 新疆及各地市人口数量、城市化率、建成区面积和GDP数据摘录自《中国统计年鉴》、《新疆统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》、《新疆维吾尔自治区国民经济和社会发展统计公报》等。



(a) 新疆维吾尔自治区行政区划



(b) 2000年新疆维吾尔自治区夜间灯光强度

(a) Administrative divisions of Xinjiang Uygur Autonomous Region (b) Intensity of NTL in Xinjiang Uygur Autonomous Region in 2000

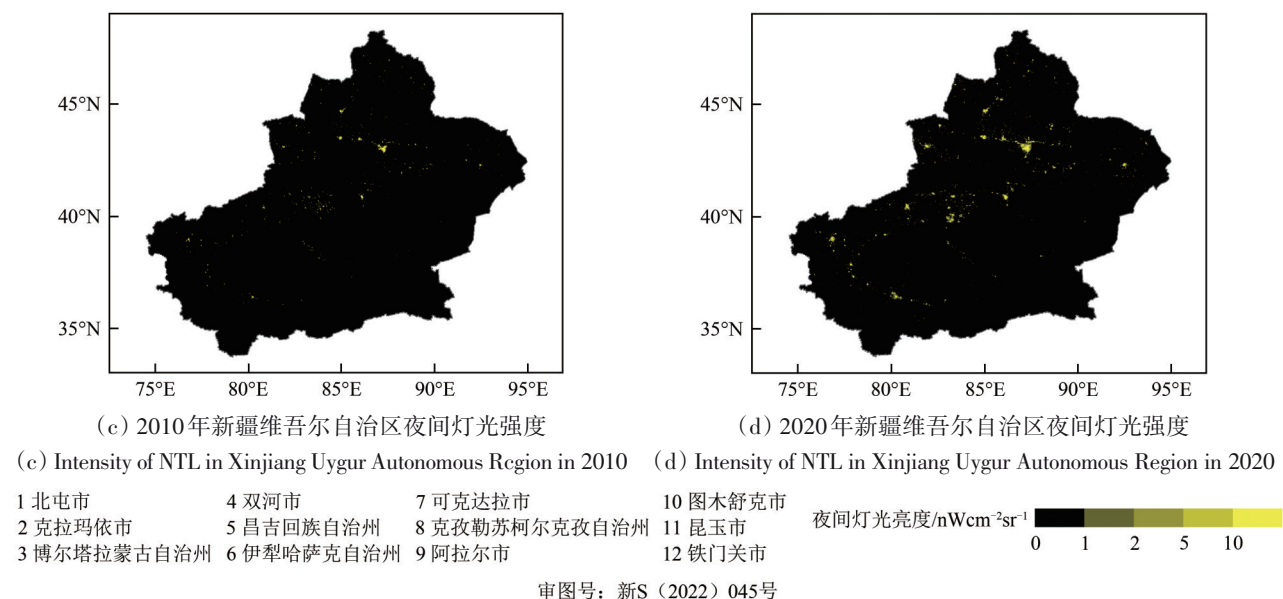


图1 新疆维吾尔自治区区位及2000年、2010年、2020年“类NPP-VIIRS”夜间灯光遥感影像

Fig. 1 The Location and the “NPP-VIIRS-like” nighttime light images in 2000, 2010, and 2020 of Xinjiang Uygur Autonomous Region

2.3 方法

(1) 空间格局分析。使用标准差椭圆 SDE (Standard Deviation Ellipse) 和莫兰指数 (Moran's I) 方法来分析地区夜间灯光的空间分布格局以及空间自相关性。标准差椭圆是空间分析中的经典方法, 已被广泛应用于分析区域发展和经济空间格局 (赵璐和赵作权, 2014; 李德仁等, 2017) 等研究。标准差椭圆能够准确反映地理要素空间分布的整体特征, 描述地理要素的中心位置、离散

程度、方向趋势, 揭示地理要素的空间格局及演化过程。标准差椭圆参数包括椭圆重心坐标、方位角、长短轴长度、椭圆大小等。其中, 椭圆重心表示数据的中心位置, 长半轴表示数据分布的方向, 椭圆大小则反映了要素的分布范围和集中程度。

标准差椭圆重心 ($\bar{X}_w$, $\bar{Y}_w$) 为

$$\bar{X}_w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad \bar{Y}_w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

方位角 α 为

$$\tan \alpha = \frac{(\sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{y}_i^2) + \sqrt{(\sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{y}_i^2)^2 + 4 \sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{x}_i \tilde{y}_i}}{2 \sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{x}_i \tilde{y}_i} \quad (2)$$

x 轴标准差 σ_x 和 y 轴标准差 σ_y 为

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \tilde{x}_i \cos \alpha - w_i \tilde{y}_i \sin \alpha)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}} \quad (3)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \tilde{x}_i \sin \alpha - w_i \tilde{y}_i \cos \alpha)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}} \quad (4)$$

式中, (x_i, y_i) 表示研究对象的空间位置; w_i 为权重; $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ 为各研究对象位置到重心 $(\bar{X}_w, \bar{Y}_w)$ 的坐标偏差。

全局莫兰指数 (Global Moran's I) 可以描述区

域单元属性值的整体分布情况, 反映区域内相似属性的聚集程度 (Sokal 和 Oden, 1978):

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (5)$$

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (6)$$

式中, n 为样本数; X_i 或 X_j 为区域 i 或 j 的属性值; $\bar{X}$ 为平均值; W_{ij} 为空间权重矩阵, 本文基于邻接标准定义空间权重, 相邻为 1, 不相邻为 0; I 为莫兰指数, 值域为 $[-1, 1]$, 大于 0 表示正相关, 小于 0 则为负相关, 绝对值越大则空间相关性越大,

趋于 0 表示空间呈随机分布。
使用标准化统计量 Z ，来检验各个研究对象是否存在空间自相关关系：

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{VAR}(I)}} \tag{7}$$

式中， $E(I)$ 为期望值， $\text{VAR}(I)$ 为方差。表 1 为 Z 值得分与相应的相关性水平。

表 1 全局莫兰指数 Z 值得分与相关性水平			
Table 1 Global Moran's I and correlation level			
Z 值得分	< -1.65	-1.65 — 1.65	> 1.65
相关性	存在负的空间自相关	空间自相关不明显，呈随机分布	存在正的空间自相关

(2) 时间趋势分析。在分析夜间灯光的时间变化过程时，使用到了夜间灯光总量和基于局部加权回归的时间序列分解方法。
夜间灯光总量 (NTL)。统计逐地区夜间灯光亮度总值，用于描述地区人类活动强度和社会经济的总体水平。计算公式如下：

$$\text{NTL} = \sum_{i=1}^n x_i \tag{8}$$

式中，NTL 为区域夜间灯光总量， x_i 是第 i 个像元的亮度值， n 是区域像元总数。

基于局部加权回归的时间序列分解方法 STL (Seasonal-Trend decomposition procedure based on Loess) (Cleveland 和 Cleveland, 1990)。STL 是一种用于分解时间序列的最常用且鲁棒的方法，STL 可以将原始的时间序列数据分解为趋势项、周期项和随机波动项，其中趋势项指示了时间序列数据较为稳定的长期发展趋势，周期项显示数据长期变化中的周期性及周期内的走势，随机波动项是原始序列减去趋势项和周期项后的剩余部分。原理公式如下：

$$y_t = T_t + S_t + R_t \tag{9}$$

式中， y_t 是原始时间序列数据， T_t 、 S_t 和 R_t 分别代表趋势项、周期项和随机波动项。需要说明的是，STL 方法需要事先设置一个关键参数——每个周期内观测点的数量，即时间序列的周期长度。已有学者采用不同的分析方法界定了新疆经济波动周期，都显示出新疆经济主要存在长度为 6 年左右的周期波动 (张学斐, 2017; 常浩娟和何伦志, 2013)，因此，本文将该参数设置为 6。

(3) 发展均衡性分析。本文使用“夜间灯光发展指数 NLDI (Night Light Development Index)”来探讨新疆地区社会发展的差异和均衡性。

Elvidge 等 (2012) 类比传统经济学中的基尼系数，将洛伦兹曲线中的收入累计百分比纵轴变成夜间灯光亮度累计百分比，构造了夜间灯光发展指数 (NLDI) (图 2)。夜间灯光主要来源于基础设施照明 (Kuechly 等, 2012)，NLDI 在形式上计算的是夜间公共照明分配的平等程度，而公平良好的公共照明反映了区域较高质量的社会公共服务水平 (李德仁 等, 2017)。因此，可以认为该指数是对人口分布与社会发展水平空间一致性的衡量，能够有效评价公共服务水平和社会经济发展的不平等程度 (Xu 等, 2015; Zhou 等, 2015; Elvidge 等, 2012)。NLDI 计算原理如图 2 所示，等于夜间灯光洛伦兹曲线和绝对均衡线 (图 2 对角线) 之间的面积 (图 2 中 A 区域) 与绝对均衡线在 $[0, 100\%]$ 上积分面积 (图 2 中 A、B 区域之和) 的比值。需要说明的是，NLDI 取值范围为 $[0, 1]$ ，NLDI 值越小，表示夜间灯光与人口分布在空间上趋于一致，即当地公共基础设施条件与人口分布相匹配，基础设施建设更加合理，地区社会发展越均衡。

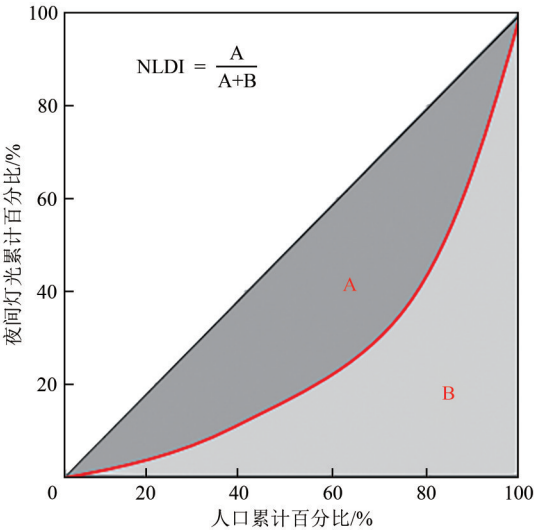


图 2 夜间灯光发展指数 (NLDI) 与空间洛伦兹曲线
Fig. 2 The Night Light Development Index and spatial Lorenz curve

3 结果与分析

3.1 新疆城市化空间格局

从空间分布来看，新疆地区不仅变得越来越亮，灯光分布范围也越来越广 (图 1)。2000 年，新疆地区夜间灯光集中于乌鲁木齐市，其他地区夜间灯光亮度较低，北部准噶尔盆地和南部塔里木盆地等沙

漠无人区夜间灯光较为暗淡（图1（b））。2010年，新疆夜间灯光亮度有所增加，出现了更多零星的灯光亮点（图1（c））。到2020年，新疆全域夜间灯光亮度明显增大，其中，乌鲁木齐市夜间灯光范围大幅扩张，逐渐与其西边的昌吉回族自治州市区连成一片，新疆中部和南部的灯光亮点发展为更大的斑块，夜间灯光的亮度和范围均大幅增加（图1（d））。

从图3可以看到，新疆地区夜间灯光斑块（灯光亮度值大于 $1\text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ ）主要分布在交通干线的节点或沿线附近，在交通线交汇节点处，夜间灯光斑块更大更亮，所属城市的规模也更大，例如乌鲁木齐市、库尔勒市、喀什市等城市。这意味着新疆城镇夜间灯光的分布和演化与交通干线具有密切关系，交通基础设施的规划建设对于新疆夜间灯光亮度和经济增长贡献显著（王伯礼和

张小雷，2010）。2000年新疆交通运输线路（铁路和所有等级公路）总里程数为36895 km，到2019年达201157 km，增长了5.45倍，与同期新疆夜间灯光总量增长倍数（5.30倍）一致。20世纪50年代动工建设的兰新铁路曾是新疆通往内地的唯一铁路线，兰新铁路的建成通车，推动了乌鲁木齐市、哈密市、吐鲁番市等沿线城镇的工业化进程，也便利了人口的流动与聚集，成为新疆城镇发展的重要推力（Dietzel等，2005；黄达远，2006）。2014年，与现有兰新铁路并行的兰新高铁（兰新客运专线）建成，客货运力显著提高，极大提升了新疆物流水平和沿线城镇经济发展水平。2014年底兰新高铁通车后至2020年，沿线地区夜间灯光增长速度远大于21世纪前15年，近5年的年平均增量是前15年的1.5倍。

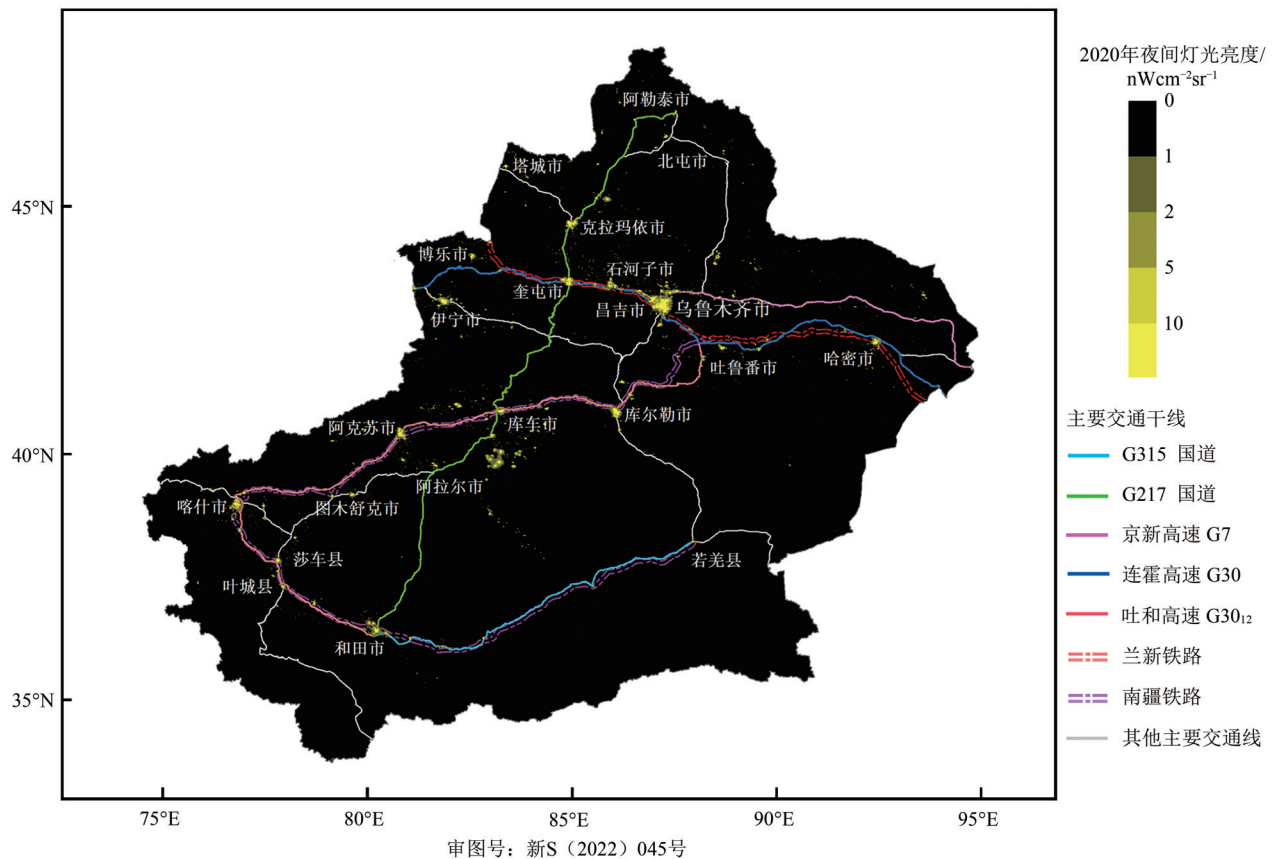


图3 2020年新疆维吾尔自治区主要交通线与夜间灯光分布

Fig. 3 The main traffic lines and the distribution of nighttime light in Xinjiang Uygur Autonomous Region in 2020

新疆夜间灯光亮度标准差椭圆（图4）显示，2000年—2020年新疆夜间灯光均呈现“东北—西南”方向的空间分布格局。东北方向椭圆形状变化不大，北疆和东疆地区夜间灯光亮度增长较为稳定，而在西南方向椭圆边界大幅扩张，且椭圆

重心也向西南方向逐渐偏移，同时，南疆9个地市夜间灯光亮度的增长幅度（7.62倍）大于同期北疆和东疆的增长幅度（4.41倍），表明南疆地区夜间灯光亮度增长势头强劲，南疆地区城市化和社会经济水平呈现加速增长的态势。新疆南疆地区

城镇化和工业化发展长期受到自然环境等方面的制约和阻碍，但随着近年来中央和地方政府针对南疆地区施行“对口支援”和“扶贫专项规划”等措施，南疆各地市的产业结构转型和扶贫脱贫工作得到大力推进，特别是“一带一路”倡议提出以来，极大地加强了南疆各地市与周边国家的互联互通，拓展了南北疆协调发展的空间，使得

南疆地区城市化发展速度显著提升。2015 年“一带一路”倡议实施后，南疆地区夜间灯光亮度年平均增长率达 15.03%，比北疆和东疆高出了 7.60%。此外，新疆夜间灯光标准差椭圆的分布范围由 2000 年的 308746.07 km² 增大到 2020 年的 435989.45 km²，空间分布范围逐渐扩张，表明边缘地区的夜间灯光亮度快速增长，边境小城镇城市化进程加快。

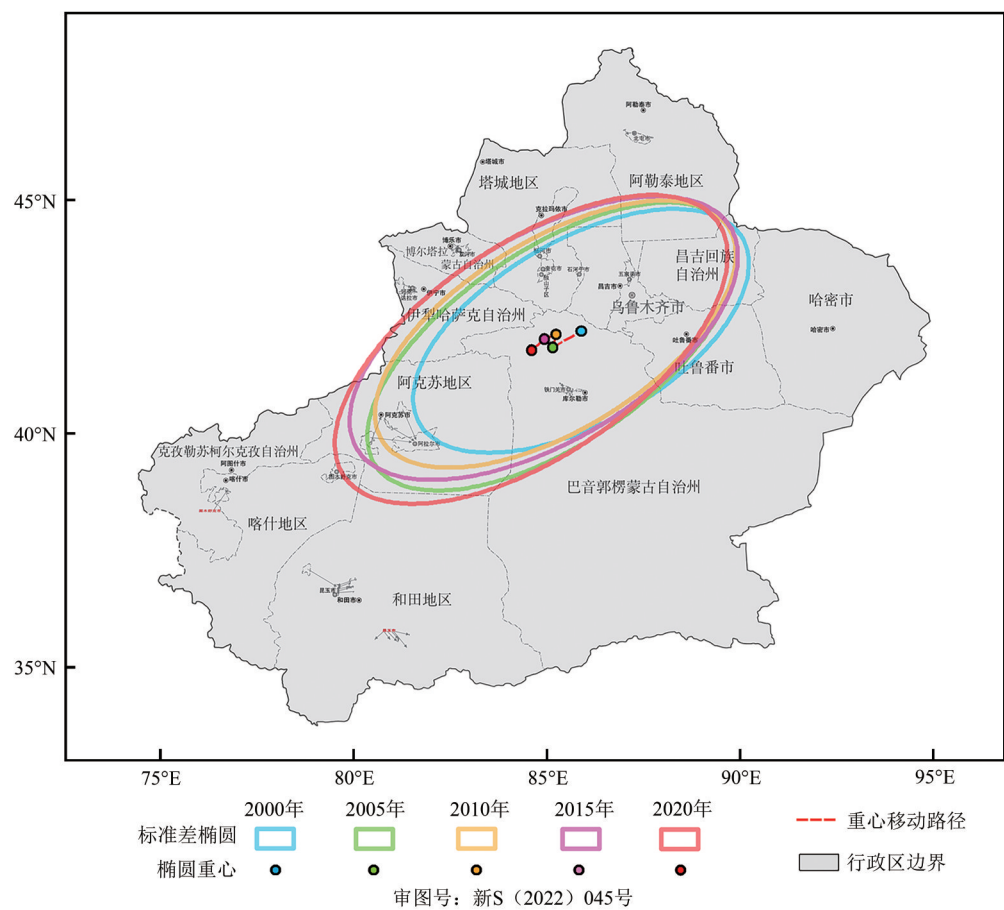


图 4 新疆维吾尔自治区夜间灯光标准差椭圆及其重心变化

Fig. 4 The Standard Deviation Ellipse (SDE) of nighttime light in Xinjiang Uygur Autonomous Region and its center

新疆地区莫兰指数 (Global Moran’s I) 自 2000 年—2020 年的 Z 得分在 -1.65—1.65 (表 2)，均没有通过显著性检验，表明新疆 23 个地市的夜间灯光亮度没有明显的空间自相关性。新疆地区地广人稀，绿洲、荒漠等独特的自然环境为人类聚落和城镇提供形成和发展空间，也制约了聚落发展的空间格局，使得新疆各地市城镇空间分布差异较大 (李松霞, 2016; 林金萍 等, 2020)。矿藏资源、民族组成、社会政策等也同样影响着新疆城镇发展的空间格局 (李松霞, 2016)，使其最终呈现出图 3 所示的沿交通干线的零散分布。同时，零散的城镇分布格局，进一步导致新疆各地市经

济联系趋弱、经济发展落后 (李松霞和张军民, 2016; 宋耀辉和王宁, 2019)，发展水平高的地对周围地区的集聚和辐射作用有限 (刘佳斌, 2015)，而进一步推进交通基础设施建设，能一定程度上增强新疆各城镇间的物质、信息和经济交流，促进城镇协同发展。

表 2 新疆维吾尔自治区夜间灯光亮度莫兰指数

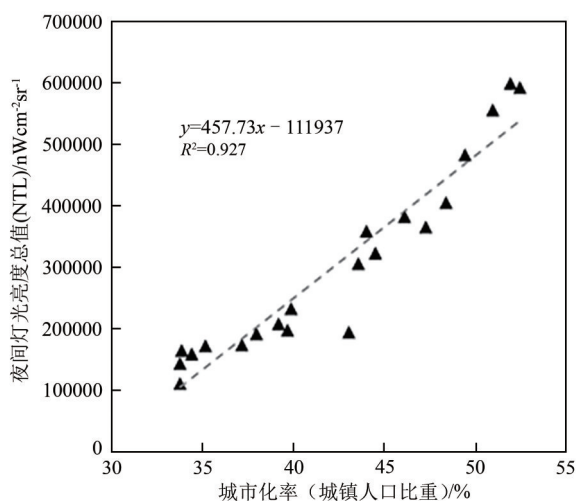
Table 2 Global Moran’s I of nighttime light intensity in Xinjiang Uygur Autonomous Region

参数	年份/年				
	2000	2005	2010	2015	2020
莫兰指数	-0.024	-0.178	-0.139	-0.181	-0.248
Z 得分	0.147	-0.872	-0.733	-0.853	-1.225

3.2 新疆城市化演化过程

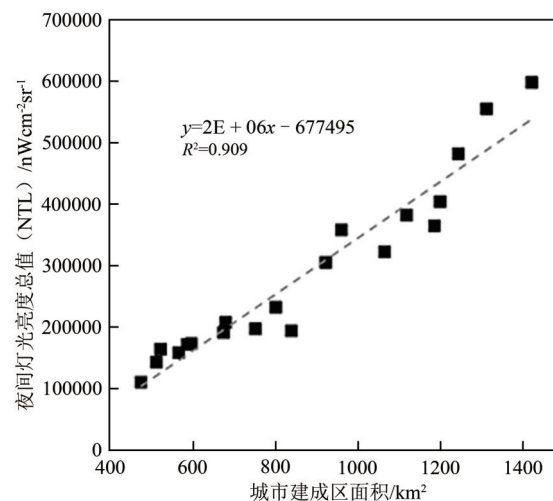
新疆夜间灯光亮度与城市化率和城市建成区面积存在显著的正相关关系, 决定系数 R^2 分别为 0.93 和 0.91 (图 5), 这说明了伴随着新疆城市化

率的提升和城市建成区面积的增加, 其夜间灯光亮度也会随之增长。换言之, 夜间灯光亮度的变化趋势能够直观反映新疆城市化过程中城市建成区的扩张以及人类活动强度与经济发展水平的提升。



(a) 夜间灯光亮度与城市化率的关系

(a) Relationship between NTL intensity and urbanization rate



(b) 夜间灯光亮度与建成区面积的关系

(b) Relationship between NTL intensity and built-up area

图 5 2000 年—2020 年新疆维吾尔自治区夜间灯光亮度总值与城市建成区和城市化率的关系

Fig. 5 The relationship between the NTL in Xinjiang Uygur Autonomous Region and the urban built-up area and urbanization rate

(1) 新疆夜间灯光总量时序变化。新疆及各地区夜间灯光亮度大幅增长, 夜间灯光总量由 2000 年的 $111655.05 \text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 增加到 2020 年的 $592134.50 \text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$, 增长了 5.30 倍 (图 6)。需要说明的是, 由于受到新冠肺炎疫情的影响 (曾冰, 2021), 新疆夜间灯光总量曲线在 2019 年—2020 年间存在小幅下降, 但在整体上依然保持着持续增长的态势。

2000 年—2020 年新疆 23 个地市夜间灯光总量增长幅度各异, 按照夜间灯光总量大小和增长趋势大体可分为 3 类 (图 6)。第 1 类是乌鲁木齐市, 其夜间灯光总量远大于新疆其他地市, 占全疆的 1/4 左右。乌鲁木齐作为新疆唯一的特大城市, 一直是全疆政治、经济、文化和交通中心 (董雯等, 2011), 其社会经济的稳步增长带动着全疆区域发展水平的提升。第 2 类在 21 世纪初期夜间灯光总量较低, 但增长量较大, 2000 年—2020 年平均增长量达 $47065.26 \text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$, 占新疆灯光总增量的 58.77%, 包括了北疆 3 个地区 (昌吉回族自治州、伊犁哈萨克自治州、克拉玛依市) 和南疆 3 个地区 (阿克苏地区、喀什地区、巴音郭楞蒙古自治州)。其中阿克苏地区夜间灯光增长量最大, 由

2000 年的 $8780.84 \text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 增长到了 2020 年的 $101183.51 \text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$, 2016 年后增长速度显著加快, 2016 年—2020 年近 5 年的夜间灯光增长量是前 16 年总增长量的 1.46 倍, 发展势头强劲。阿克苏地区地处南疆中心, 依靠油气资源和棉花产业优势, 借助“一带一路”战略和“中巴经济走廊”的发展机遇, 着力打造南疆最大商贸物流中心, 地区经济得到快速发展。第 3 类夜间灯光总量较低且增量较小, 但平均增加幅度超 47 倍, 主要包括图木舒克市等 9 个直辖县级市和其余 5 个地市。因行政区面积较小, 直辖县级市的夜间灯光总量较低, 但增长幅度远大于其他地市, 其中图木舒克市 (317.83 倍)、昆玉市 (134.68 倍) 和铁门关市 (101.33 倍) 增长幅度最大。2016 年—2018 年, 图木舒克市唐王城机场开工建设并正式通航, 带动了图木舒克市经济总量大幅增长, 2019 年图木舒克市 GDP 总量 (174.89 亿元) 较 2004 年 (8.34 亿元) 增长近 21 倍。而昆玉市和铁门关市则是依靠绿洲农业和交通设施的大力开发建设, 以及直辖县级市的改制设立, 促进了两市人口和城镇面积快速增加。吐鲁番市增长幅度最小, 增长倍数仅为 1.05 倍。吐鲁番市地处四面环山的盆地, 热量丰

富但气候干旱少雨，且多大风，特殊的地形和气候条件使得吐鲁番市人口增长较为缓慢，2000年—

2020 年人口增长 1.26 倍，略低于同期全疆总人口增长幅度（1.34 倍）。

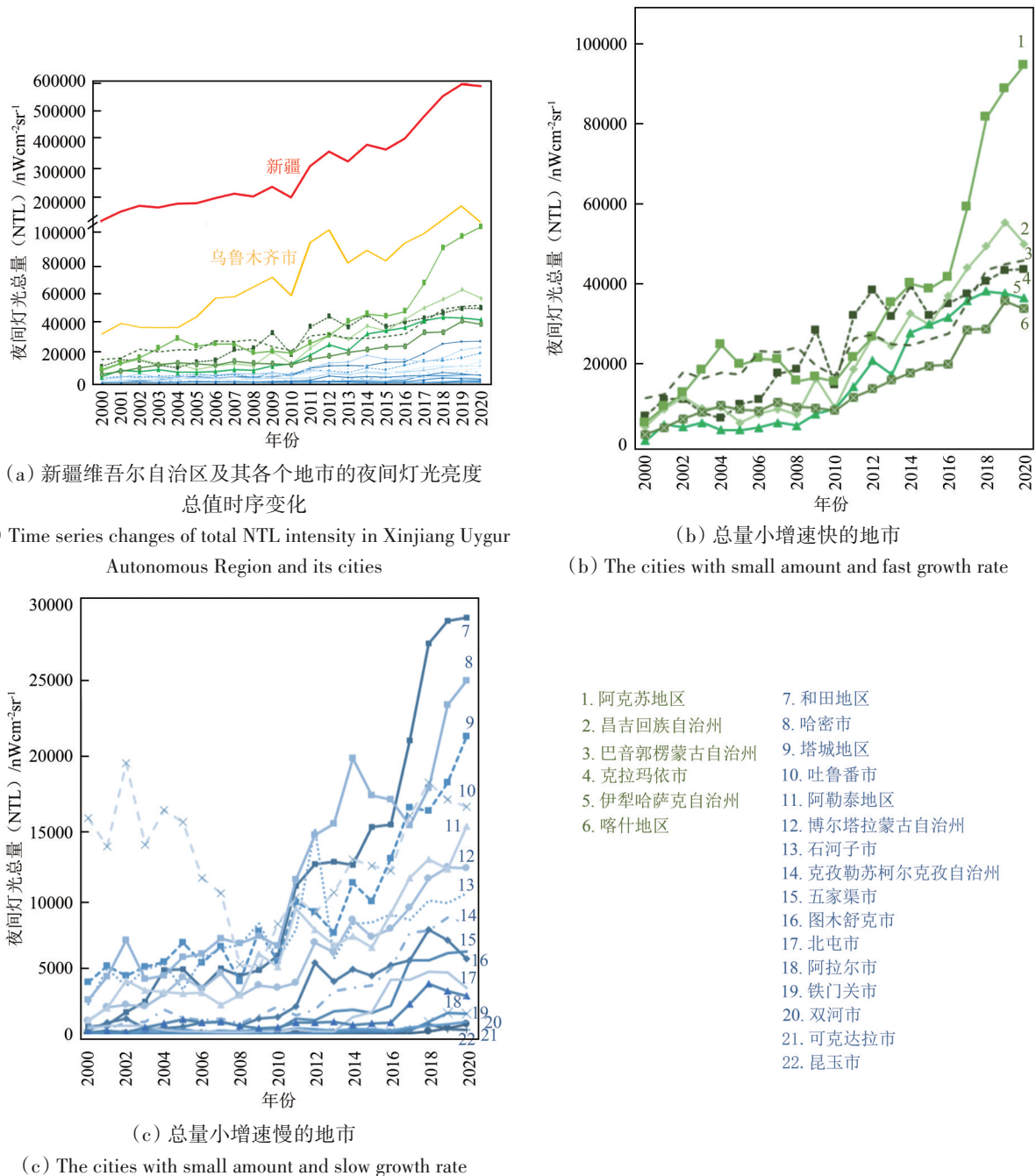


图6 2000年—2020年新疆维吾尔自治区(红线)及各地市夜间灯光总量(根据夜间灯光总量大小将新疆维吾尔自治区23个地市分为3个聚类,黄线:总量大增速快,绿线:总量小增速快、蓝线:总量小增速慢)

Fig. 6 The total amount of nighttime light (NTL) in Xinjiang Uygur Autonomous Region from 2000 to 2020 (Red line) (The 23 cities in Xinjiang Uygur Autonomous Region are divided into three clusters according to the total amount of NTL: yellow line: large amount and fast growth rate; green line: small amount and fast growth rate; and blue line: small amount and slow growth rate)

(2) 新疆城市化演化过程与阶段。通过STL方法对夜间灯光总量的时序进行分解,发现在排除周期成分和不规则干扰因素(随机波动项)之后,新疆地区夜间灯光总量持续上升,但不同时期上

升速率有所不同,按照变化速率可将新疆城市化过程划分为3个阶段:1) 2007年之前的缓慢发展期,2) 2008年—2014年的波动增长期以及3) 2015年之后的加速上升期(图7)。

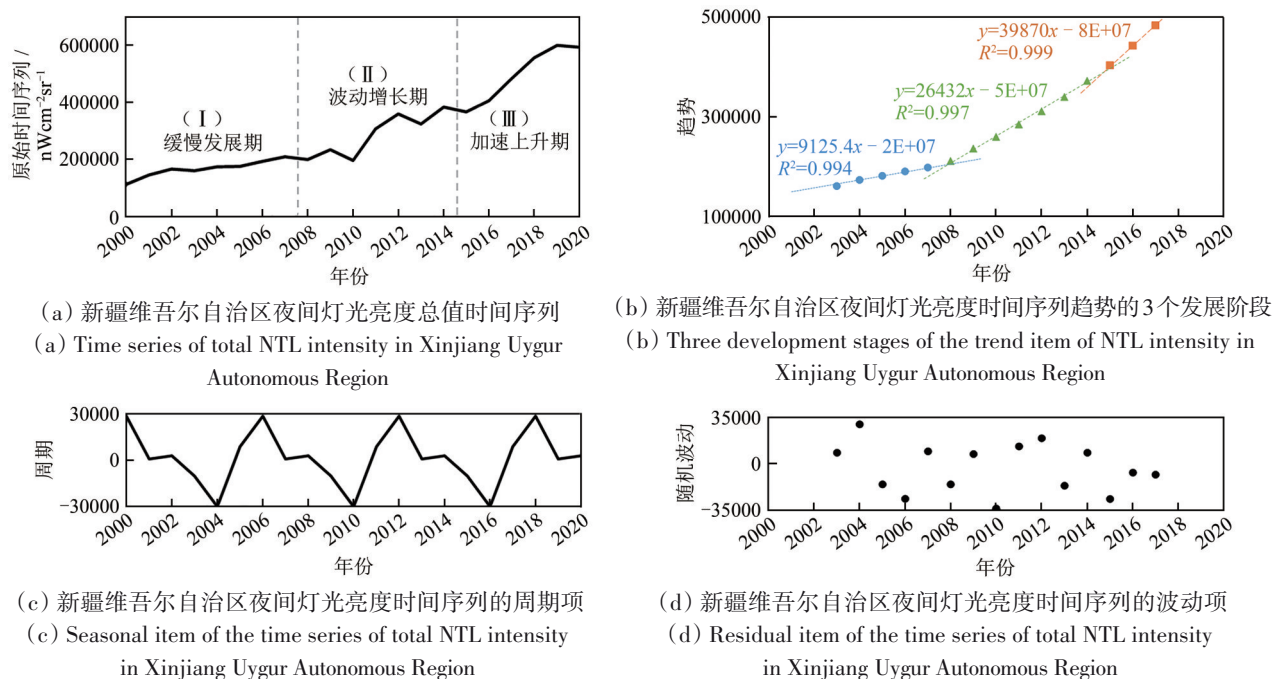


图7 新疆维吾尔自治区夜间灯光亮度增长趋势的3个发展阶段

Fig. 7 Three development stages of the trend of nighttime lights in Xinjiang Uygur Autonomous Region

1) 缓慢发展期。改革开放初期,新疆仍是以农业为主的社会发展初级阶段,城市化进程缓慢。2000年西部大开发实施后,新疆依靠资源优势进入了粗放型的资源开发时期。此时新疆工业化处于初期阶段(甘昶春和聂春霞,2013),农业现代化也起步发展,但农业机械化水平低,农业生产技术和经营管理经验不足(艾洪娟和蒋和平,2017),社会经济发展较慢。因此,在2007年之前,新疆夜间灯光总量较低且增速平缓,这与甘昶春和聂春霞(2013)、艾洪娟和蒋和平(2017)和李松霞(2016)的研究结论一致。

2) 波动增长期。2008年—2014年,新疆夜间灯光总量增长趋势明显加快,增长速度(趋势斜率)接近第一阶段的3倍(图7(b))。“西气东输”二线工程的开工与建成,使新疆地区的资源优势有效转化为了经济优势,极大地带动了当地基础设施建设,同步配合民生改善政策,新疆城市化发展速度和发展质量得到大幅提升(李松霞,2016)。同时,2007年—2014年,针对棉花产业先后制定实施了“农业保险”、“棉花良种推广”和“棉花价格补贴”等一系列惠农政策,棉花等农产品生产率和商品化逐步达到较高水平。农业现代化快速发展的同时,机械化和工业化水平也显著提高(艾洪娟和蒋和平,2017),工业化由初期过渡到中期(秦放鸣和孙庆刚,2011)。但在此期

间,受极端天气气候事件和突发暴力事件的影响,新疆夜间灯光的增长变化出现较大的起伏波动,将在后文结合随机波动项进行详细讨论。

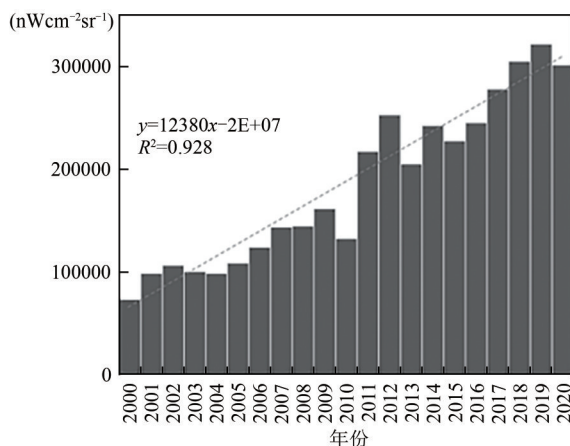
3) 加速上升期。2015年以后,新疆夜间灯光总量增长速度相较于第二阶段提升愈50%，“一带一路”倡议是此阶段夜间灯光快速增长的主要驱动力之一。2015年“一带一路”倡议的提出,为新疆地区区域发展带来了新的机遇和动力,交通基础设施建设得到进一步推进,对内对外的交通运输大通道逐步完善。截至2019年底,全疆所有地市实现高速公路连通,所有乡镇、建制村通硬化路。同时,19个国家级对外开放口岸极大地促进了新疆进出口贸易、边境(跨境)旅游、边民互市贸易等外向型经济的发展,使新疆城市化发展速度再上一个台阶。

(3) 新疆城市化发展波动因素。除了探索新疆城市化发展趋势及其驱动因素外,本文发现随机波动项(图7(d))中的关键时间节点与政策扶持、极端气候事件和突发暴力事件有明显关联。政策扶持对新疆城市化发展均为正面影响。例如,“西气东输”一线工程顺利竣工的时间点(2003年)与2003年和2004年随机波动项的激增时间点相吻合,而2010年提出的新一轮“对口援疆”以及2011年布局的“天山北坡经济带”,则进一步推动了2011年—2012年的城市化发展。反之,极端气

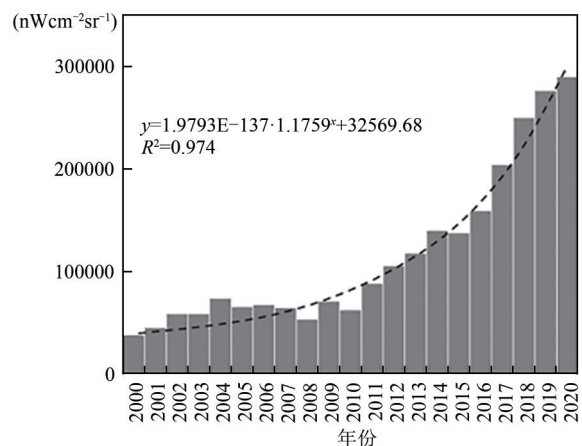
候事件和突发暴力事件往往会阻碍和延缓新疆城市化进程。例如，2010年北疆地区出现的暴雪、寒潮等极端天气给乌鲁木齐市、昌吉回族自治区、阿勒泰地区等的农牧业、交通和人民生活财产带来了极大危害，其影响程度历史罕见（赵俊荣，2011；赵俊荣等，2013），仅年初雪灾就造成近60万人受灾，上百个村镇道路中断（赵俊荣，2011）。另外，突发暴力事件对新疆城市化建设的影响范围更广，恢复时间也更长。2009年和2014年乌鲁木齐发生的暴力事件，对当地公共基础设施造成了严重破坏，使得乌鲁木齐市及其邻近的昌吉回族自治区的夜间灯光亮度在其后一年的时间里（2010年和2015年）出现了大幅度降低（图6），甚至在全疆范围内出现了随机波动项（图7（d））的极低值点（2010年和2015年）。这主要是因为遭到破坏的公共基础设施和公众外出安全感的恢复需要较长时间，因此在其后一年时间的夜间灯光总量仍呈现大幅降低。

根据国家统计局《统计上划分城乡的规定》（https://www.stats.gov.cn/sj/tjbz/gjtjbz/202302/t20230213_1902742.html [2021-12-31]）和《统计用区划和城乡划分代码》（<https://www.stats.gov.cn/sj/tjbz/qhdm/> [2021-12-31]）），将新疆所有乡、镇、街道划分为了“城镇”地区和“乡村”地区两类，

发现2000年—2020年新疆城镇地区夜间灯光总量增长了4.10倍，而乡村地区增长了7.60倍，乡村地区的增长幅度远超城镇地区（图8）。该结果与相关统计数据一致，2020年农村居民人均可支配收入较2000年增长了8.69倍，大于同期城镇居民人均可支配收入增长幅度（6.17倍）。从图8可以看出，新疆城镇地区夜间灯光总量大体呈线性增长的趋势，在2010年—2015年存在较大波动，该波动规律与前文分析的极端事件相一致。而在乡村地区，夜间灯光总量呈指数型增长。21世纪初期，乡村地区城市化起点低、集镇规模小、公共服务能力不足等问题严重制约了乡村地区的城市化发展，也阻碍了广大农牧民市民化的进程（闫海龙，2014），因此乡村地区夜间灯光亮度在2010年前增长缓慢。随着农业技术进步和农地集约化的大力发展，依托“新型城镇化”、“乡村振兴”等发展战略，新疆乡村地区生产生活空间得到显著优化，乡村基础设施逐步完善，农牧民生活水平快速提升，乡村地区夜间灯光亮度呈现大幅增长。此外，在极端事件影响下，乡村地区的夜间灯光总量几乎不存在波动情况，这说明极端事件对城镇地区的影响程度大于乡村地区。简言之，新疆乡村地区的非线性快速发展模式，使得新疆城乡发展差距逐渐缩小，进一步促进了新疆城乡协调均衡发展。



(a) 新疆维吾尔自治区城市地区夜间灯光亮度变化
(a) Changes of NTL intensity in cities of Xinjiang Uygur Autonomous Region



(b) 新疆维吾尔自治区乡村地区夜间灯光亮度变化
(b) Changes of NTL intensity in villages of Xinjiang Uygur Autonomous Region

图8 新疆维吾尔自治区城镇和乡村夜间灯光总量的变化

Fig. 8 Changes of NTL in cities and villages of Xinjiang Uygur Autonomous Region

3.3 新疆城市化发展均衡性

从新疆全域来看，2000年新疆 NLDI 为 0.75，

此后20年洛伦兹曲线逐渐向“均衡分布线”靠近（图9），到2019年新疆 NLDI 降至 0.48，甚至低于

同年中国平均水平 (0.51), 同时, 在 23 个地市中, 有 20 个地市的 NLDI 有所降低 (图 10)。结果说明 21 世纪以来新疆夜间灯光分布整体上呈现出均衡化的趋势。

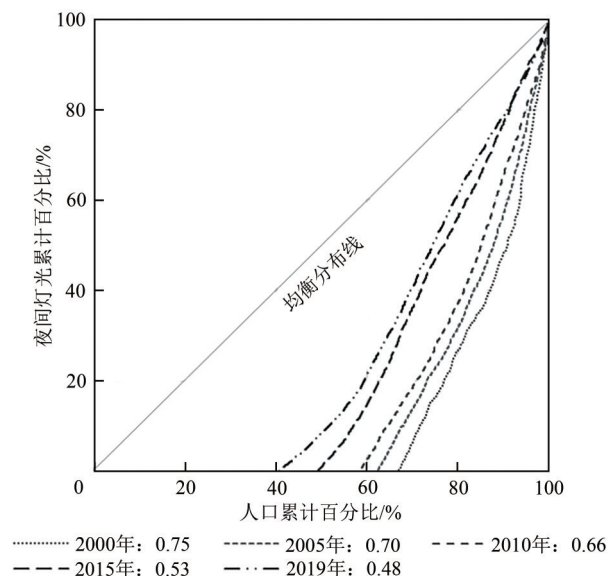


图9 新疆维吾尔自治区夜间灯光洛伦兹曲线及夜间灯光发展指数

Fig. 9 The Lorenz curve and NLDI in Xinjiang Uygur Autonomous Region

图 10 和表 3 显示了 2000 年—2019 年新疆各地市 NLDI 值, 北疆、东疆、南疆整体以及大部分地市 NLDI 均有降低, 社会发展均呈现均衡化趋势, 并且, 近十年 (2010 年—2019 年) 降低幅度大于 21 世纪初十年 (2000 年—2010 年), 社会发展均衡化趋势显著加快。2000 年, 在新疆 23 个地市中, 石河子市、克拉玛依市和乌鲁木齐市 NLDI 较低, 3 地市分别依靠早期的军垦开发、油气资源和交通区位优势, 城市化建设起步较高, 2000 年城市化率分别达 50.64%、98.91%、83.53%, 远高于新疆其他地市。同期图木舒克市、铁门关市、可克达拉市和昆玉市 NLDI 较高, 此类自治区直辖区县级市设立时间较晚, 最早的图木舒克市设立于 2002 年, 其他 3 市分别设立于 2012 年、2015 年和 2016 年, 城市化发展起步较晚, 基础设施建设尚不完善。到 2019 年, 新疆地区 23 个地市中 20 个地市的 NLDI 降低, 其中北屯市降幅最大。北屯市总人口自 2011 年设市到 2019 年增长了 1.46 倍, 而夜间灯光总量增长了 7.35 倍, 表明当地公共基础设施建设快速推进, 社会经济快速增长, 城市化发展迅速。2019 年石河子市、克拉玛依市、阿勒

泰地区 NLDI 较 2000 年均有所增加。其中, 石河子市和阿勒泰地区 21 世纪初夜间灯光较为集中在市区, 而随着城市化扩张和乡村地区的快速发展, 周边村镇人口大幅增加, 但配套的村镇公共基础设施建设有待加强; 2006 年, 克拉玛依机场正式通航, 机场附近夜间灯光亮度迅速增加, 但机场远离市区, 周围实际居民较少, 局部基础设施分布与人口分布不一致。

2000 年—2019 年, 新疆城镇和乡村 NLDI 呈现不同的变化趋势, 城镇地区 NLDI 大幅降低, 而乡村地区 NLDI 有所上升。这意味着在快速城市化进程中, 新疆地区间和城乡间城市化发展在发展起点和发展模式上存在一定的差异。如前文所述, NLDI 与公共基础设施和公共服务密切相关, 反映了城市化过程中社会发展的均衡性。21 世纪初, 新疆城市化处于起步阶段, 发展相对落后, 2000 年城镇人口比重 (城市化率) 仅为 33.75%。即使在城镇地区, 所有城市建成区面积仅占城镇地区总面积的 0.64%, 绝大部分人口生活在基础设施不够完善的郊区, 社会发展差异较大。乡村地区夜间灯光亮度普遍较低, 社会发展落后存在普遍性, 因此相对城镇地区而言差异性较小, NLDI 小于城镇地区。随着新疆地区社会经济和交通基础设施的快速发展, 城镇地区 NLDI 大幅降低。而乡村地区 NLDI 有所增长, 发展差异性增大, 夜间灯光亮度的演化呈现出城市化进程中的“先扩散后聚集”模式 (Dietzel 等, 2005), 乡村地区的城市化进程仍处于“S 型”曲线 (Northam, 1979) 的加速发展阶段。

已有部分研究使用人均 GDP 等统计资料探讨了新疆区域经济差异与发展均衡性的变化, 均得出近年新疆社会经济总体差异和南北疆区域内差异不断扩大的结论 (肖艳秋 等, 2012; 刘世薇和张平宇, 2012; 程文明, 2016; 李豫新 等, 2020), 而本文采用夜间灯光发展指数显示, 新疆总体及大部分区域和地市均呈现均衡化的发展趋势, 差异减小。这是由于夜间灯光发展指数不仅仅是对收入分配和经济水平的简单度量, 而是综合刻画了区域人口与夜间灯光在空间分布上的一致程度。新疆夜间灯光发展指数的降低, 说明了新疆各地区内公共基础设施建设的快速完善和公共服务的平等享有, 也更客观地反映出新疆社会经济逐步迈向区域全面协调发展。

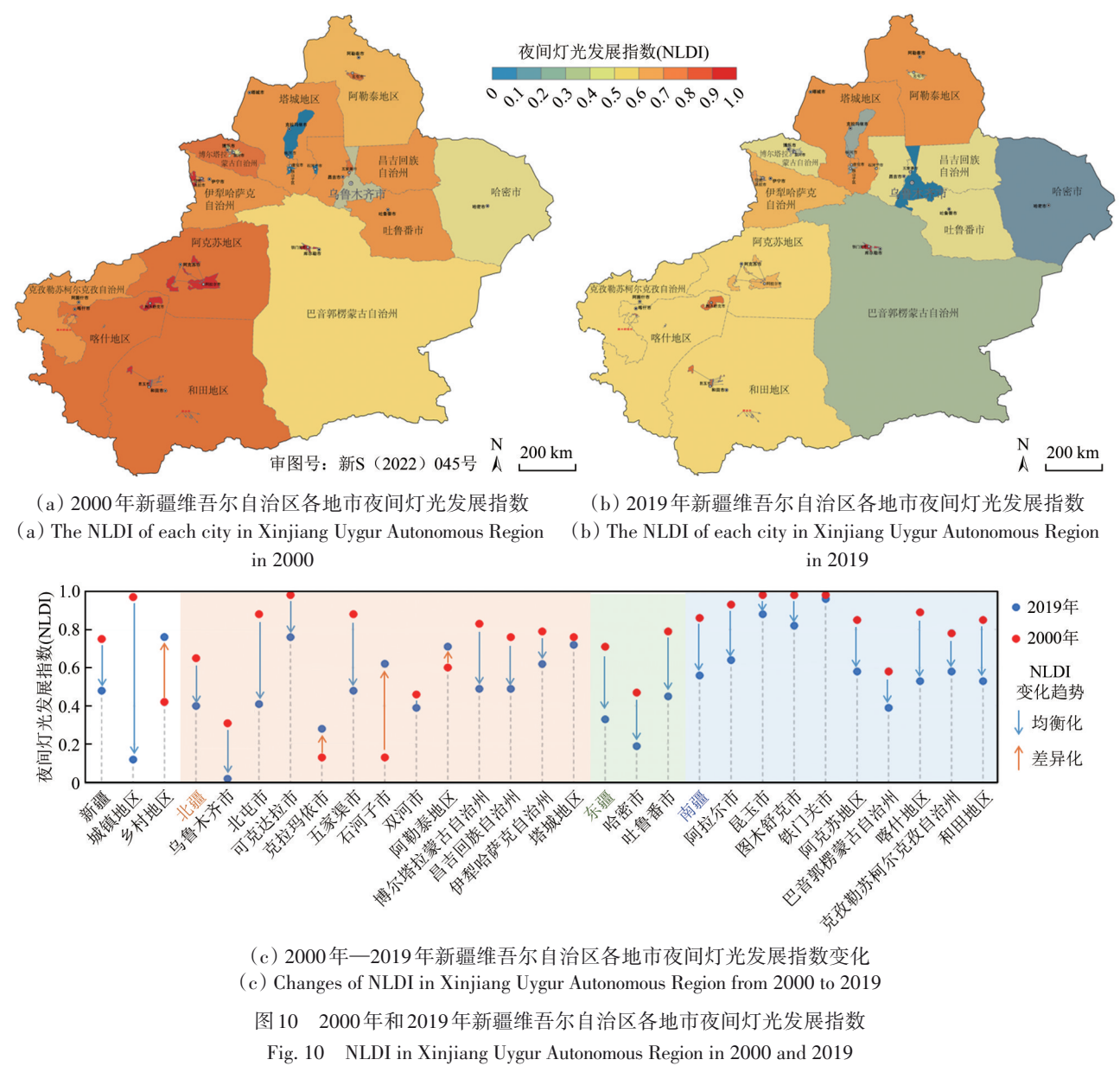


表 3 新疆维吾尔自治区各地市夜间灯光发展指数
Table 3 NLDI in Xinjiang Uygur Autonomous Region

地区	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2019 年
新疆维吾尔自治区	0.75	0.71	0.68	0.57	0.48
城镇地区	0.97	0.88	0.73	0.43	0.12
乡村地区	0.42	0.49	0.56	0.66	0.76
北疆	0.65	0.60	0.55	0.42	0.40
乌鲁木齐市	0.31	0.21	0.09	0.03	0.02
北屯市	0.88	0.59	0.61	0.60	0.41
可克达拉市	0.98	0.98	0.98	0.94	0.76
克拉玛依市	0.13	0.27	0.45	0.11	0.28
五家渠市	0.88	0.56	0.59	0.59	0.48
石河子市	0.13	0.54	0.40	0.52	0.62
双河市	0.46	0.73	0.83	0.60	0.39
阿勒泰地区	0.60	0.81	0.68	0.71	0.71
博尔塔拉蒙古自治州	0.83	0.77	0.72	0.63	0.49
昌吉回族自治州	0.76	0.71	0.68	0.57	0.49

续表

地区	2000年	2005年	2010年	2015年	2019年
伊犁哈萨克自治州	0.79	0.76	0.75	0.66	0.62
塔城地区	0.76	0.85	0.82	0.79	0.72
东疆	0.71	0.63	0.57	0.42	0.33
哈密市	0.47	0.49	0.54	0.18	0.19
吐鲁番市	0.79	0.76	0.63	0.61	0.45
南疆	0.86	0.81	0.77	0.64	0.56
阿拉尔市	0.93	0.95	0.84	0.76	0.64
昆玉市	0.98	0.98	0.98	0.98	0.88
图木舒克市	0.98	0.91	0.98	0.92	0.82
铁门关市	0.98	0.98	0.87	0.93	0.96
阿克苏地区	0.85	0.77	0.76	0.62	0.58
巴音郭楞蒙古自治州	0.58	0.71	0.67	0.48	0.39
喀什地区	0.89	0.81	0.77	0.65	0.53
克孜勒苏柯尔克孜自治州	0.78	0.78	0.88	0.68	0.58
和田地区	0.85	0.78	0.74	0.63	0.53

5 结 论

当前，中国正经历着快速的城市化过程（Gu等，2017），地区经济结构、社会生活方式等发生了巨大变化，新疆维吾尔自治区作为中国重要的西部战略屏障和向西开放的重要窗口，其城市化的可持续发展一直以来都备受关注。基于夜间灯光遥感影像数据，本文采用了时间序列分解、空间标准差椭圆和夜间灯光发展指数等方法，从时间变化趋势、空间分布格局和社会发展均衡性3个维度，全面分析和讨论了21世纪以来新疆地区夜间灯光的演化过程，得出以下结论：

（1）2000年—2020年，新疆维吾尔自治区各地区夜间灯光总量呈不同程度的增长，在空间格局上，北疆和东疆城市化发展平稳，而南疆地区发展迅速，呈现由东北方向向西南方向移动和扩张的趋势。但各地市的夜间灯光亮度不存在明显的空间相关性。交通线路的规划建设是新疆城市化空间扩张的重要推动力之一。在交通干线节点及沿线附近的城市或地区，其城市化水平远高于周边其他地区。

（2）20年来，新疆夜间灯光总量增长了5.30倍，且呈加速增长的趋势。新疆乡村地区夜间灯光亮度增长了7.60倍，大于城镇地区的增长幅度（4.10倍）。新疆城市化发展过程可以划分为3个发展阶段：缓慢发展期（2007年之前）、波动增长期（2008年—2014年）、加速上升期（2015年之后）。政策扶持以及工农业发展转型使新疆城市化发展

从缓慢发展期过渡到波动增长期，波动增长期的增长速率是缓慢发展期的近3倍，但同时也受到各类极端事件的干扰。加速上升期增长速率相较于波动增长期又提升超过50%，2015年“一带一路”倡议的实施是新疆城市化发展进入加速上升期的主要推动力之一。

（3）2000年—2019年，新疆大部分地区夜间灯光发展指数有所降低，新疆全域以及大部分地市人口与基础设施建设分布逾趋合理，社会发展呈现出均衡化发展的趋势。但相较于城镇地区，新疆乡村地区的均衡性较弱。这是由于新疆乡村地区城市化发展起点较低，当前仍处在快速发展阶段，城市化正经历“由点到面”的过程，从而乡村地区当前的社会发展均衡性呈现出降低的态势。

总体而言，21世纪以来新疆城市化进程呈现快速且均衡发展的状态。根据本文分析结果可以看到，今后新疆城市化发展建设仍需把握住政策机遇，继续发挥自身资源和区位优势，进一步加大基础设施建设力度，同时，应统筹布局新疆乡村地区发展蓝图，切实推动新疆乡村地区的全面发展和城乡融合发展。

参考文献(References)

Ai H J and Jiang H P. 2017. Evaluation of modern agricultural development stage based on entropy value method in Xinjiang. Jiangsu Agricultural Sciences, 45(18): 318-321 (艾洪娟, 蒋和平. 2017. 基于熵值法的新疆现代农业发展阶段评价. 江苏农业科学, 45(18): 318-321) [DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2017.18.079]

- Cao X, Wang J M, Chen J and Shi F. 2014. Spatialization of electricity consumption of China using saturation-corrected DMSP-OLS data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 28: 193-200 [DOI: 10.1016/j.jag.2013.12.004]
- Chang H J and He L Z. 2013. Analysis on economic growth fluctuation of Xinjiang Province. *Science and Technology Management Research*, 33(5): 90-95, 108 (常浩娟, 何伦志. 2013. 新疆经济增长波动分析. *科技管理研究*, 33(5): 90-95, 108) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-7695.2013.05.021]
- Chen M X. 2015. Research progress and scientific issues in the field of urbanization. *Geographical Research*, 34(4): 614-630 (陈明星. 2015. 城市化领域的研究进展和科学问题. *地理研究*, 34(4): 614-630) [DOI: 10.11821/dljy201504002]
- Chen M X, Lu D D and Zhang H. 2009. Comprehensive evaluation and the driving factors of China's urbanization. *Acta Geographica Sinica*, 64(4): 387-398 (陈明星, 陆大道, 张华. 2009. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析. *地理学报*, 64(4): 387-398) [DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2009.04.001]
- Chen X, Chang C, Bao A M, Wu S X and Luo G P. 2020. Spatial pattern and characteristics of land cover change in Xinjiang since past 40 years of the economic reform and opening up. *Arid Land Geography*, 43(1): 1-11 (陈曦, 常存, 包安明, 吴世新, 罗格平. 2020. 改革开放40年来新疆土地覆被变化的空间格局与特征. *干旱区地理*, 43(1): 1-11) [DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2020.01.01]
- Chen Z Q, Yu B L, Song W, Liu H X, Wu Q S, Shi K F and Wu J P. 2017. A new approach for detecting urban centers and their spatial structure with nighttime light remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(11): 6305-6319 [DOI: 10.1109/TGRS.2017.2725917]
- Chen Z Q, Yu B L, Yang C S, Zhou Y Y, Yao S J, Qian X J, Wang C X, Wu B and Wu J P. 2021. An extended time series (2000-2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration. *Earth System Science Data*, 13(3): 889-906 [DOI: 10.5194/essd-13-889-2021]
- Cheng W M. 2016. Research on Regional Economic Disparity and Coordinated Development in Xinjiang Under the Background of "New Normal". Urumqi: Xinjiang Normal University (程文明. 2016. “新常态”背景下的新疆区域经济差异及协调发展研究. 乌鲁木齐: 新疆师范大学)
- Cleveland R B and Cleveland W S. 1990. STL: a seasonal-trend decomposition procedure based on Loess. *Journal of Official Statistics*, 6(1): 3-33
- Croft T A. 1978. Nighttime images of the earth from space. *Scientific American*, 239(1): 86-98 [DOI: 10.1038/scientificamerican0778-86]
- Dietzel C, Herold M, Hemphill J J and Clarke K C. 2005. Spatio-temporal dynamics in California's central valley: empirical links to urban theory. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(2): 175-195 [DOI: 10.1080/13658810410001713407]
- Dong W, Yang Y and Zhou Y S. 2011. Land use changes and evaluation of land use efficiency in an arid oasis city: a case of Urumqi, China. *Arid Land Geography*, 34(4): 679-685 (董雯, 杨宇, 周艳时. 2011. 干旱区绿洲城市土地利用效益研究——以乌鲁木齐为例. *干旱区地理*, 34(4): 679-685) [doi: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2011.04.018]
- Elvidge C D, Baugh K E, Anderson S J, Sutton P C and Ghosh T. 2012. The night light development index (NLDI): a spatially explicit measure of human development from satellite data. *Social Geography*, 7(1): 23-35 [DOI: 10.5194/sg-7-23-2012]
- Elvidge C D, Baugh K E, Kihn E A, Kroehl H W, Davis E R and Davis C W. 1997. Relation between satellite observed visible-near infrared emissions, population, economic activity and electric power consumption. *International Journal of Remote Sensing*, 18(6): 1373-1379 [DOI: 10.1080/014311697218485]
- Elvidge C D, Sutton P C, Ghosh T, Tuttle B T, Baugh K E, Bhaduri B and Bright E. 2009. A global poverty map derived from satellite data. *Computers and Geosciences*, 35(8): 1652-1660 [DOI: 10.1016/j.cageo.2009.01.009]
- Fan X J, Zhang Y F and Cheng Z Z. 2019. Research on energy consumption of Xinjiang based on DMSP/OLS night light data from 1992 to 2013. *Remote Sensing for Land and Resources*, 31(1): 212-219 (范小晶, 张永福, 程珍珍. 2019. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据的新疆1992—2013年能源消费研究. *国土资源遥感*, 31(1): 212-219) [DOI: 10.6046/gtzyyg.2019.01.28]
- Friedmann J. 2006. Four theses in the study of China's urbanization. *International Journal of Urban and Regional Research*, 30(2): 440-451 [DOI: 10.1111/j.1468-2427.2006.00671.x]
- Gan C C and Nie C X. 2013. An analysis of development stages of regional economy in Xinjiang. *Commercial Research*, 55(4): 40-47 (甘昶春, 聂春霞. 2013. 新疆区域经济发展阶段分析. *商业研究*, 04: 40-47) [DOI: 10.13902/j.cnki.syyj.2013.04.020]
- Gao Q and Kasimu A. 2017. Modeling the population spatial distribution of Tianshan north-slope urban agglomeration based on DMSP/OLS night lighting data. *Northwest Population Journal*, 38(3): 113-120 (高倩, 阿里木江·卡斯木. 2017. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据的天山北坡城市群人口分布空间模拟. *西北人口*, 38(3): 113-120) [DOI: 10.15884/j.cnki.issn.1007-0672.2017.03.016]
- Gu C L, Hu L Q and Cook I G. 2017. China's urbanization in 1949-2015: processes and driving forces. *Chinese Geographical Science*, 27(6): 847-859 [DOI: 10.1007/s11769-017-0911-9]
- Han C X, Ma Y F and Luo H. 2010. Economic spatial evolution and its mechanism in Xinjiang. *Arid Land Geography*, 33(3): 449-455 (韩春鲜, 马耀峰, 罗辉. 2010. 新疆区域经济发展空间差异与演变机制分析. *干旱区地理*, 33(3): 449-455) [DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2010.03.021]
- He C Y, Shi P J, Li J G, Chen J, Pan Y Z, Li J, Zhuo L and Toshiaki I. 2006. Reconstruction of spatial process of urbanization in mainland China in 1990s based on DMSP/OLS nighttime light data and statistical data. *Chinese Science Bulletin*, 51(7): 856-861 (何春阳, 史培军, 李景刚, 陈晋, 潘耀忠, 李京, 卓莉, 一之瀬俊明. 2006. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据和统计数据的中国大陆20世纪90年代城市化空间过程重建研究. *科学通报*, 51(7): 856-861) [DOI: 10.1360/972004-300]
- Huang D Y. 2006. On railway and the town construction in Xinjiang. *China's Borderland History and Geography Studies*, 16(1): 89-96 (黄达远. 2006. 论铁路与新疆的城镇发展. *中国边疆史地研究*, 16(1): 89-96) [DOI: 10.3969/j.issn.1002-6800.2006.01.010]
- Ju C Y, Zhou X and He Q. 2016. On the application of a concentric zone model (CZM) for classifying and extracting urban boundaries using night-time stable light data in Urumqi of Xinjiang, Chi-

- na. *Remote Sensing Letters*, 7(11): 1033-1042 [DOI: 10.1080/2150704X.2016.1209312]
- Kasimu A, Tang B and Gulikezi T. 2013. Analysis of the spatial-temporal dynamic changes of urban expansion in oasis of Xinjiang based on RS and GIS. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 35(4): 1056-1064 (阿里木江·卡斯木, 唐兵, 古丽克孜·吐拉克. 2013. 基于遥感和GIS的新疆绿洲城市扩展时空动态变化分析. *冰川冻土*, 35(4): 1056-1064) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0118]
- Kuechly H U, Kyba C C M, Ruhtz T, Lindemann C, Wolter C, Fischer J and Hölker F. 2012. Aerial survey and spatial analysis of sources of light pollution in Berlin, Germany. *Remote Sensing of Environment*, 126: 39-50 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.08.008]
- Li D R, Yu H R and Li X. 2017. The spatial-temporal pattern analysis of city development in countries along the Belt and Road Initiative based on nighttime light data. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 42(6): 711-720 (李德仁, 余涵若, 李熙. 2017. 基于夜光遥感影像的“一带一路”沿线国家城市发展时空格局分析. *武汉大学学报(信息科学版)*, 42(6): 711-720) [DOI: 10.13203/j.whugis.20170100]
- Li S X. 2016. Research on Spatio-Temporal Differentiation of Urbanization Development Quality in Xinjiang. Shihezi: Shihezi University (李松霞. 2016. 新疆城市化发展质量时空分异规律研究. 石河子: 石河子大学)
- Li S X and Zhang J M. 2016. Evaluation on spatial association between cities along the Silk Road. *Urban Problems*, (5): 20-26 (李松霞, 张军民. 2016. 新疆丝绸之路沿线城市空间关联性测度. *城市问题*, (5): 20-26) [DOI: 10.13239/j.bjsshkxy.cswt.160503]
- Li X P, Yang X D and Gong L. 2020. Evaluating the influencing factors of urbanization in the Xinjiang Uygur Autonomous Region over the past 27 years based on VIIRS-DNB and DMSP/OLS nightlight imageries. *PLoS One*, 15(7): e0235903 [DOI: 10.1371/journal.pone.0235903]
- Li Y X, Chen K and Cheng X J. 2020. Analysis on the spatial pattern and causes of regional economic differences in Xinjiang: evidence from population activity and residents' happiness. *Journal of Shihezi University (Philosophy and Social Sciences)*, 34(1): 16-23 (李豫新, 陈琨, 程谢君. 2020. 新疆区域经济差异空间格局及成因探析——来自人口活跃度、居民幸福感的证据. *石河子大学学报(哲学社会科学版)*, 34(1): 16-23) [DOI: 10.13880/j.cnki.cn65-1210/c.20200113.012]
- Lin J P, Lei J, Wu S X, Yang Z and Li J G. 2020. Spatial pattern and influencing factors of oasis rural settlements in Xinjiang, China. *Geographical Research*, 39(5): 1182-119 (林金萍, 雷军, 吴世新, 杨振, 李建刚. 2020. 新疆绿洲乡村聚落空间分布特征及其影响因素. *地理研究*, 39(5): 1182-1199) [DOI: 10.11821/dlyj.20190368]
- Liu B B and Cao Z R. 2013. Strategic position of Xinjiang in China and in China's opening to the west. *Research of Agricultural Modernization*, 34(6): 659-663 (刘炳炳, 曹之然. 2013. 论新疆在中国发展战略和向西开放中的重要地位. *农业现代化研究*, 34(6): 659-663)
- Liu J B. 2015. Regional Space Economic Ties Research of Xinjiang Cities. Urumqi: Xinjiang University of Finance and Economics (刘佳斌. 2015. 新疆地州市区域空间经济联系研究. 乌鲁木齐: 新疆财经大学)
- Liu S W and Zhang P Y. 2012. Regional economic disparities analysis of Xinjiang from 1989 to 2010. *Economic Geography*, 32(9): 26-31 (刘世薇, 张平宇. 2012. 1989—2010年新疆经济发展差异的区域分析. *经济地理*, 32(9): 26-31) [DOI: 10.15957/j.cnki.jjdl.2012.09.006]
- Lu B and Zhang X L. 2002. Study on coordination of urbanization and economic development in Xinjiang. *Arid Land Geography*, 25(2): 189-192 (吕宾, 张小雷. 2002. 新疆城市化与经济发展协调性分析. *干旱区地理*, 25(2): 189-192) [DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2002.02.018]
- Ma T. 2019. Spatiotemporal characteristics of urbanization in China from the perspective of remotely sensed big data of nighttime light. *Journal of Geo-information Science*, 21(1): 59-67 (马廷. 2019. 夜光遥感大数据视角下的中国城市化时空特征. *地球信息科学学报*, 21(1): 59-67) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2019.180361]
- Ma T, Zhou C H, Pei T, Haynie S and Fan J F. 2012. Quantitative estimation of urbanization dynamics using time series of DMSP/OLS nighttime light data: a comparative case study from China's cities. *Remote Sensing of Environment*, 124: 99-107 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.04.018]
- Meng Y S, Li L and Xia X G. 2013. Study on the coordinated development of new industrialization, agricultural and animal husbandry modernization and new urbanization in Xinjiang. *Social Sciences in Xinjiang*, (6): 45-51 (蒙永胜, 李琳, 夏修国. 2013. 新疆新型工业化、农牧业现代化与新型城镇化协调发展研究. *新疆社会科学*, (6): 45-51) [doi: 10.3969/j.issn.1009-5330.2013.06.008]
- National Development and Reform Commission, Ministry of Foreign Affairs of the People's Republic of China, Ministry of Commerce of the People's Republic of China. 2015-03-29(04). Vision and actions on jointly building silk road economic belt and 21st-century maritime silk road. *People's Daily* (国家发展改革委, 外交部, 商务部. 2015-03-29(04). 推动共建丝绸之路经济带和21世纪海上丝绸之路的愿景与行动. *人民日报*)
- Northam R M. 1979. *Urban Geography*. New York: Wiley.
- Peng B, Zhang Q, Liu L C and Sun W J. 2022. Estimating dynamics of development balance in Xinjiang autonomous region: evidence from the nighttime lighting dataset. *Science of Surveying and Mapping*, 47(1): 133-141. (彭博, 张倩, 刘立程, 孙文洁. 2022. 夜间灯光视角下的新疆发展均衡性动态研究. *测绘科学*, 47(1): 133-141)
- Qiao X W. 2019. Research on Temporal and Spatial Pattern Changes of Xinjiang Cities Based on DMSP/OLS Nighttime Light Data. Hohhot: Xinjiang University (乔雪伟. 2019. 基于夜间灯光数据的新疆城市时空格局变化研究. 呼和浩特: 新疆大学)
- Qin F M and Sun Q F. 2011. General assessment of industrialization in Xinjiang. *Journal of Xinjiang Normal University (Social Sciences)*, 32(1): 8-16 (秦放鸣, 孙庆刚. 2011. 新疆工业化进程综合评价. *新疆师范大学学报(哲学社会科学版)*, 32(1): 8-16) [DOI: 10.14100/j.cnki.65-1039/g4.2011.01.014]
- Ruzi T, Kasimu A, Gao P W and Zhao M C. 2020. Study on the spatio-temporal changes of Xinjiang urban expansion based on DMSP/OLS and NPP/VIIRS data. *Journal of China Agricultural University*, 25(9): 156-165 (图尔荪阿依·如孜, 阿里木江·卡斯木, 高鹏文, 赵孟辰. 2020. 基于DMSP/OLS和NPP/VIIRS数据的新疆城市扩展时空变化研究. *中国农业大学学报*, 25(9): 156-165) [DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2020.09.16]
- Sawuti R and Kasimu A. 2015. Spatio-temporal dynamic characteris-

- tics of major cities expansion in Xinjiang in 20 years. *Arid Zone Research*, 32(3): 606-613 (茹克亚·萨吾提, 阿里木江·卡斯木). 2015. 近20a来新疆主要城市扩展时空动态变化特征. *干旱区研究*, 32(3): 606-613 [DOI: 10.13866/j.azr.2015.03.27]
- Shi K F, Chen Y, Yu B L, Xu T B, Chen Z Q, Liu R, Li L Y and Wu J P. 2016a. Modeling spatiotemporal CO₂ (carbon dioxide) emission dynamics in China from DMSP-OLS nighttime stable light data using panel data analysis. *Applied Energy*, 168: 523-533 [DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.11.055]
- Shi K F, Chen Y, Yu B L, Xu T B, Yang C S, Li L Y, Huang C, Chen Z Q, Liu R and Wu J P. 2016b. Detecting spatiotemporal dynamics of global electric power consumption using DMSP-OLS nighttime stable light data. *Applied Energy*, 184: 450-463 [DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.10.032]
- Sokal R R and Oden N L. 1978. Spatial autocorrelation in biology: 1. Methodology. *Biological Journal of the Linnean Society*, 10(2): 199-228 [DOI: 10.1111/j.1095-8312.1978.tb00013.x]
- Song Y H and Wang N. 2019. Study on the city economic relation and regional economic development in northwest Xinjiang. *Economic Forum*, (5): 24-32 (宋耀辉, 王宁). 2019. 新疆西北部城市经济联系与区域经济发展研究. *经济论坛*, (5): 24-32 [doi: 10.3969/j.issn.1003-3580.2019.05.005]
- Tang B. 2013. Spatial and Temporal Evolution of Regional Urbanization Pattern in Xinjiang Based on ESDA. Urumqi: Xinjiang Normal University (唐兵). 2013. 基于ESDA的新疆城市化空间格局演变研究. 乌鲁木齐: 新疆师范大学
- Urban Social and Economic Survey Department of the National Bureau of Statistics. 2000-2020. *China City Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press (国家统计局城市社会经济调查司). 2000-2020. 中国城市统计年鉴. 北京: 中国统计出版社
- Wang B L and Zhang X L. 2010. The contribution of highway traffic infrastructure construction to economic growth in Xinjiang based on I-O and ESDA. *Acta Geographica Sinica*, 65(12): 1522-1533 (王伯礼, 张小雷). 2010. 新疆公路交通基础设施建设对经济增长的贡献分析. *地理学报*, 65(12): 1522-1533
- Wang C H, Hao Y L and Ma Q L. 2013. An analysis of the factors affecting the regional development imbalance between the northern and southern Xinjiang. *Journal of Xinjiang University (Philosophy, Humanities and Social Sciences)*, 41(2): 1-6 (汪存华, 郝玉龙, 马庆林). 2013. 区域发展不平衡的影响因素实证分析——以新疆南北疆为例. *新疆大学学报(哲学·人文社会科学版)*, 41(2): 1-6 [DOI: 10.13568/j.cnki.issn1000-2820.2013.02.026]
- Wang G X. 2013. The basic theory of urbanization and problems and countermeasures of China's urbanization. *Population Research*, 37(6): 43-51 (王桂新). 2013. 城市化基本理论与中国城市化的问题及对策. *人口研究*, 37(6): 43-51
- Wang K, Bai L Y and Feng J Z. 2017. Urbanization process monitoring in Northwest China based on DMSP/OLS nighttime light data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 57(1): 012057 [DOI: 10.1088/1755-1315/57/1/012057]
- Wei Y P. 2007. Study on the relationships between regional economic development and urbanization process in Xinjiang Province, China. *Economic Geography*, 27(4): 553-557 (韦亚平). 2007. 新疆区域经济与城市化协调发展探讨. *经济地理*, 27(4): 553-557
- Xiao Y Q, Yang D G, Zhang X H, Pan W and Tang H. 2012. Spatio-temporal characteristics of regional economic differences in Xinjiang. *Journal of Desert Research*, 32(1): 244-251 (肖艳秋, 杨德刚, 张新焕, 潘伟, 唐宏). 2012. 新疆区域经济差异时空演变特征分析. *中国沙漠*, 32(1): 244-251
- Xie H Q, Wang Z, Huang F J and Zhang Z H. 2016. The interannual variation of rural per capita net income in the three prefectures of south Xinjiang based on noctilucent remote sensing. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 38(3): 819-828 (解海群, 王哲, 黄伟君, 张展赫). 2016. 基于夜光遥感的南疆三地州农民收入年际变化特征. *冰川冻土*, 38(3): 819-828 [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2016.0092]
- Xu H M, Yang H, Xi L T, Li X, Jin H R and Li D R. 2015. Multi-scale measurement of regional inequality in mainland China during 2005-2010 using DMSP/OLS night light imagery and population density grid data. *Sustainability*, 7(10): 13469-13499 [DOI: 10.3390/su71013469]
- Yan H L. 2014. *Exploration and Practice of Xinjiang New Urbanization*. Beijing: Economy and Management Publishing House (闫海龙). 2014. 新疆新型城镇化发展的探索与实践. 北京: 经济管理出版社
- Yu B L, Shu S, Liu H X, Song W, Wu J P, Wang L and Chen Z Q. 2014. Object-based spatial cluster analysis of urban landscape pattern using nighttime light satellite images: a case study of China. *International Journal of Geographical Information Science*, 28(11): 2328-2355 [DOI: 10.1080/13658816.2014.922186]
- Yu B L, Wang C X, Gong W K, Chen Z Q, Shi K F, Wu B, Hong Y C, Li Q X and Wu J P. 2021. Nighttime light remote sensing and urban studies: data, methods, applications, and prospects. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 342-364 (余柏蒴, 王丛笑, 宫文康, 陈佐旗, 施开放, 吴宾, 洪宇辰, 李乔玄, 吴健平). 2021. 夜间灯光遥感与城市问题研究: 数据、方法、应用和展望. *遥感学报*, 25(1): 342-364 [DOI: 10.11834/jrs.20211018]
- Yue X M, Zhang S G and Xu X C. 2004. China's economic growth rate: research and debate. *Economic Herald*, (1): 29-31 (岳希明, 张曙光, 许宪春). 2004. 中国经济增长速度: 研究与争论. *经济导刊*, (1): 29-31 [DOI: 10.3969/j.issn.1004-8669.2004.01.003]
- Zeng B. 2021. Evaluation of China's provincial economic resilience under the impact of COVID-19 epidemic. *Journal of Industrial Technological Economics*, 40(7): 127-133 (曾冰). 2021. 新冠肺炎疫情冲击下中国省域经济韧性发展评价. *工业技术经济*, 40(7): 127-133 [DOI: 10.3969/j.issn.1004-910X.2021.07.016]
- Zhang J M. 2012. The urbanization process and driving forces in Xinjiang. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 26(4): 44-48 (张军民). 2012. 新疆城市化进程及驱动力研究. *干旱区资源与环境*, 26(4): 44-48 [DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2012.04.008]
- Zhang X F. 2017. Analysis of Xinjiang economic cycle fluctuation. *China Finance*, (3): 84-85 (张学斐). 2017. 新疆经济周期波动分析. *中国金融*, (3): 84-85
- Zhang Y Y. 2019. Understanding the "Great Transformations Once in a Century". *International Economic Review*, 5: 9-19, 4 (张宇燕). 2019. 理解百年未有之大变局. *国际经济评论*, 5: 9-19, 4
- Zhao J R. 2011. The characteristics and causation of infrequency continuous warming torrential storm weather in the Xinjiang Altay area. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 25(5): 117-123 (赵俊荣). 2011. 2010年1月新疆北部罕见连续性暖区大暴

- 雪特征及成因分析. 干旱区资源与环境, 25(5): 117-123 [DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2011.05.040]
- Zhao J R, Yang X, Lin X L, Zhang Y H and Guo J Q. 2013. Analyses on multi-scale system configuration and district of a disaster snowstorm. Plateau Meteorology, 32(1): 201-210 (赵俊荣, 杨雪, 蔺喜禄, 张云惠, 郭金强. 2013. 一次致灾大暴雪的多尺度系统配置及落区分析. 高原气象, 32(1): 201-210) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00020]
- Zhao L and Zhao Z Q. 2014. Projecting the spatial variation of economic based on the specific ellipses in China. Scientia Geographica Sinica, 34(8): 979-986 (赵璐, 赵作权. 2014. 基于特征椭圆的中国经济空间分异研究. 地理科学, 34(8): 979-986) [DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2014.08.015]
- Zhou Y K, Ma T, Zhou C H and Xu T. 2015. Nighttime light derived assessment of regional inequality of socioeconomic development in China. Remote Sensing, 7(2): 1242-1262 [DOI: 10.3390/rs70201242]

Nighttime light remote sensing reveals the pattern and process of urbanization evolution in northwest China since the 21st century

LIU Shaoyang^{1,2}, CHEN Zuoqi^{3,4}, SHI Kaifang⁵, WU Bin^{1,2}, WEI Ye⁶, WANG Congxiao^{1,2}, LI Xia^{1,2},
WU Jianping^{1,2}, YU Bailang^{1,2}

1. Key Laboratory of Geographic Information Science (Ministry of Education), East China Normal University, Shanghai 200241, China;
2. School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China;
3. Key Laboratory of Spatial Data Mining and Information Sharing of Ministry of Education, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;
4. Academy of Digital China (Fujian), Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;
5. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;
6. School of Geographical Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

Abstract: Given that Xinjiang Uygur Autonomous Region is a strategic barrier and an important platform of opening up to the western region, assessing its urbanization is critical to promote the national reform strategy and the Belt and Road Initiative. Compared with traditional method, nighttime light (NTL) remote sensing has been proved to be able to monitor human activity intensity and regional comprehensive development level in a more objective, flexible spatial scale and wider coverage. NTL remote sensing data has been able to analyze the urbanization evolution process and the level of social and economic development, but it is still necessary to expand and enrich the breadth and depth of research, especially to explore its spatial pattern and long-term evolution process, so as to more comprehensively understand the urbanization process and social development balance in Xinjiang.

This paper comprehensively analyzes and discusses the evolution process of NTL in Xinjiang since the 21st century from three dimensions: time change trend, spatial distribution pattern and social development equilibrium, using NTL remote sensing data of long time series from 2000 to 2020, time series decomposition, spatial standard deviation ellipse and Night Light Development Index (NLDI).

(1) From 2000 to 2020, the total amount of NTL in all regions of Xinjiang Uygur Autonomous Region increased to varying degrees. In terms of spatial pattern, urbanization in northern and eastern Xinjiang developed steadily, while rapid development in southern Xinjiang. The planning and construction of transportation lines is one of the important driving forces for the spatial expansion of urbanization in Xinjiang. (2) In the past 20 years, the total amount of NTL in Xinjiang has increased by 5.30 times, and the growth trend is accelerating. The NTL intensity in rural areas of Xinjiang increased by 7.60 times, which was larger than that in urban areas (4.10 times). The process of urbanization in Xinjiang can be divided into three stages: slow development (before 2007), volatile growth (from 2008 to 2014), and rapid development (after 2015). Policy support and the transformation of industrial and agricultural development make Xinjiang's urbanization transition from the slow development period to the volatile growth period. The growth rate of the volatile growth period is nearly three times that of the slow development period, but at the same time, it is also disturbed by various extreme events. (3) From 2000 to 2019, the NLDI in most areas of Xinjiang decreased, the distribution of population and infrastructure construction in the whole region and most cities in Xinjiang became more reasonable, and the social development showed a trend of balanced development. However, compared with urban areas, the balance in rural areas of Xinjiang is weaker. This is due to the low starting point of urbanization development in rural areas of Xinjiang, which is still in the stage of rapid development, and urbanization is undergoing a process of "from point to surface", so the current social development balance in rural areas shows a trend of decline. In general, the urbanization process of Xinjiang has been developing rapidly and evenly since the 21st century.

Key words: nighttime light remote sensing, urbanization evolution, time series decomposition, Night Light Development Index, Xinjiang Uygur Autonomous Region

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42371332, 41871331, 41801343, 42001357); Director's Fund of Key Laboratory of Geographic Information Science (Ministry of Education), East China Normal University (No. KLGIS2021C01); Fundamental Research Funds for the Central Universities