

# COVID-19疫情初期美国城市夜间灯光 时空变化分析

许刚<sup>1</sup>, 王传立<sup>2</sup>, 孟庆祥<sup>2</sup>, 修田雨<sup>3</sup>, 李熙<sup>3</sup>

1. 武汉大学 资源与环境科学学院, 武汉 430079;

2. 武汉大学 遥感信息工程学院, 武汉 430079;

3. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079

**摘要:** 为应对 COVID-19 疫情而采取的非药物干预措施显著改变了城市社会经济活动, 但其变化特征和时空模式仍不明确。本研究以美国 20 个大城市为例, 获取 NPP-VIIRS 月度合成数据分析 2020 年 2—4 月 COVID-19 疫情初期城市夜光亮度变化的空间格局、衰减特征和用地类型差异。结果表明, 疫情防控措施导致美国城市夜光亮度普遍变暗, 平均降低 5%—8%。夜光变化呈现明显“中心—边缘”空间结构特征, 夜光降低幅度随到城市中心距离增加而减小。不同用地类型夜光变化幅度存在差异, 纽约居住用地和航空设施用地夜光亮度降低幅度最明显, 分别下降 12% 和 11%。芝加哥各类用地夜光亮度普遍下降 20% 左右, 除体育设施用地外, 其他各类用地夜光亮度一个月后有所恢复。夜光遥感有效反映了城市社会经济活动变化, 在监测评估突发事件社会影响方面具有重要应用。

**关键词:** 夜光遥感, 新冠疫情, NPP-VIIRS, 时空变化, 美国

**引用格式:** 许刚, 王传立, 孟庆祥, 修田雨, 李熙. 2022. COVID-19 疫情初期美国城市夜间灯光时空变化分析. 遥感学报, 26(9): 1777-1788

Xu G, Wang C L, Meng Q X, Xiu T Y and Li X. 2022. Spatio-temporal variations of night-time lights at early stages of the COVID-19 epidemic in the United States. National Remote Sensing Bulletin, 26(9): 1777-1788 [DOI: 10.11834/jrs.20221645]

## 1 引言

自 2019 年底, 新冠肺炎 (COVID-19) 疫情席卷全球并仍在继续蔓延。疫情暴发初期, 在没有药物和疫苗情况下, 各国政府不得不采取限制出行、减少接触等非药物干预措施以控制 COVID-19 疫情 (裴韬等, 2021; 周成虎等, 2020)。一系列非药物干预措施有效抑制了疫情传播 (Jia 等, 2020; Tian 等, 2020; Xu 等, 2022), 也显著改变了城市居民日常生活和社会生产活动, 对自然和社会经济系统均产生了较大的影响 (Bustamante-Calabria 等, 2021; Diffenbaugh 等, 2020; Jechow 和 Hölker, 2020; Straka 等, 2020; Zheng 等, 2021)。遥感以其覆盖范围广、重访周期短、经济成本低的突出优势被广泛应用于监测并评估 COVID-19 疫

情对自然和社会的影响 (陶金花等, 2020)。

夜光遥感 (Night-Time Light remote sensing) 通过获取地表夜间灯光亮度辐射值, 可以反映夜间人类社会经济活动强度 (Elvidge 等, 1997; Li 等, 2013, 2022; 李德仁和李熙, 2015; 江威等, 2017; Zhao 等, 2020)。夜光遥感已被广泛用于城市建成区提取、城市扩张分析、城市发展水平评估、人口和 GDP 估算、灾害和武装冲突应急监测等领域 (Levin 等, 2020; 陈佐旗, 2017; 刘冰洁等, 2021; Bennett 和 Smith, 2017; 舒松等, 2011; 余柏菴等, 2021)。COVID-19 疫情发生后, 众多学者探索使用夜光遥感评估疫情对城市社会经济发展的影响, 并为疫情防控和复工复产提出指导性意见 (Shao 等, 2021); 大量的研究采用夜间灯光数据分析了 COVID-19 疫情的广泛影响 (Lan 等,

收稿日期: 2021-10-22; 预印本: 2022-01-23

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2019YFE0126800); 国家自然科学基金 (编号: 42101460); 湖北珞珈实验室开放基金

第一作者简介: 许刚, 研究方向为城市化与复杂城市系统分析。E-mail: xugang@whu.edu.cn

通信作者简介: 孟庆祥, 研究方向为地理信息建模和时空数据挖掘。E-mail: mqx@whu.edu.cn

2021; Small 和 Sousa, 2021; Meng 等, 2021)。总体来说, 全球范围都观察到了封城后城市夜间灯光不同程度的减弱 (Rowe 等, 2021; Xu 等, 2021)。中国 2020 年初在全国范围采取出行管控措施, 导致 82% 人口居住区的灯光变暗; 而印度封城导致 87% 人口居住区灯光变暗 (Elvidge 等, 2020; Ghosh 等, 2020)。COVID-19 疫情流行期间, 非洲 75% 的自然保护区 (旅游经济区) 夜间灯光强度下降 (Anand 和 Kim, 2021)。夜间灯光数据还用于评估受疫情影响后的城市恢复情况 (Beyer 等, 2021; Yin 等, 2021)。武汉解封之后, 尽管夜间灯光强度有所恢复, 但仍低于疫情前正常水平 (Shao 等, 2021)。

受封城等措施影响, COVID-19 疫情期间城市夜间灯光亮度减弱已成共识, 但城市内部夜间灯光变化的时空特征仍不清楚; 特别是, 不同类型城市用地夜间灯光亮度变化是否存在差异还不明确。本研究以美国 20 个主要城市为研究对象, 使用预处理后的 NPP-VIIRS 月度合成夜光影像分析 COVID-19 疫情期间夜间灯光时空变化。本研究采用圈层分析法揭示了夜间灯光变化的“中心—边缘”空间结构特征, 并且分析了不同类型城市用地的夜间灯光变化差异。

## 2 数据和方法

### 2.1 研究区概况

本文研究对象为美国 20 个主要城市 (图 1)。美国于 2020 年 3 月中旬暴发第一轮 COVID-19 疫情。各州从 2020 年 3 月中下旬开始相继颁布居家令, 限制城市居民出行, 取消聚集性公共活动; 但政策执行时间和严格程度存在较大差异。本研究选择美国大城市为研究对象主要是考虑到大城市人口密度更高, 社会交互更频繁, 因此更容易

受传染病影响 (Rocha 等, 2015)。样本城市居家令执行时间和严格程度不同, 有利于研究夜光亮度变化差异。样本城市空间分布广泛, 城市规模具有差异, 样本具有典型性、代表性。

### 2.2 研究时间段选择

美国 20 个城市 2020 年 3 月 1 日—4 月 30 日 COVID-19 累计确诊病例时间变化如图 2 所示 (数据来源: <https://usafacts.org/>[2021-10-22])。从 2020 年 3 月中旬开始, 20 个样本城市 COVID-19 确诊病例迅速增加。特别地, 纽约在 3 月底已有超过 7 万确诊病例, 远超其他城市 (图 2(a)); 芝加哥、费城、洛杉矶、底特律、华盛顿特区和迈阿密 6 个城市的确诊病例增长迅速, 在 4 月底已达到 2—5 万 (图 2(b)); 亚特兰大、丹佛、西雅图、休斯顿、旧金山和达拉斯 6 个城市确诊病例在 4 月底达到 1 万左右 (图 2(c)); 其余 7 个城市的确诊病例增长速度相对平缓, 4 月底确诊病例仅有 3000 左右 (图 2(d))。

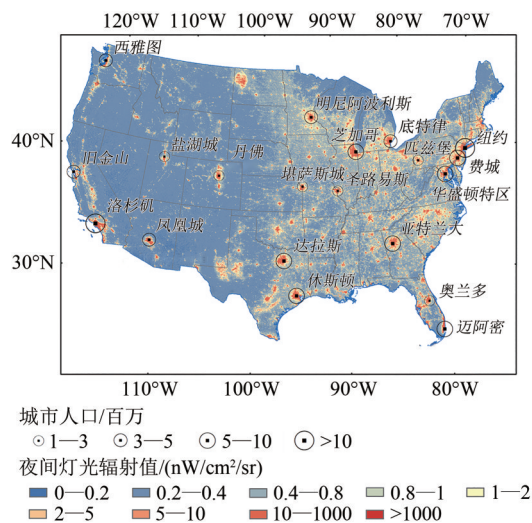
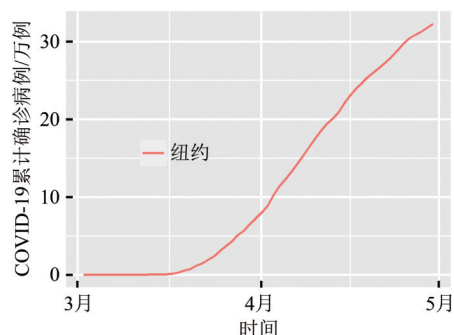
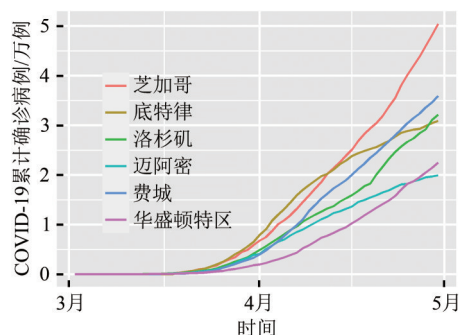


图 1 美国 20 个样本城市及 2019 年夜间灯光辐射值年均值空间分布

Fig. 1 Spatial distributions of 20 sample cities and annual averaged radiance of night-time lights in 2019 in the United States



(a) 纽约  
(a) New York



(b) 芝加哥等  
(b) Chicago, etc.

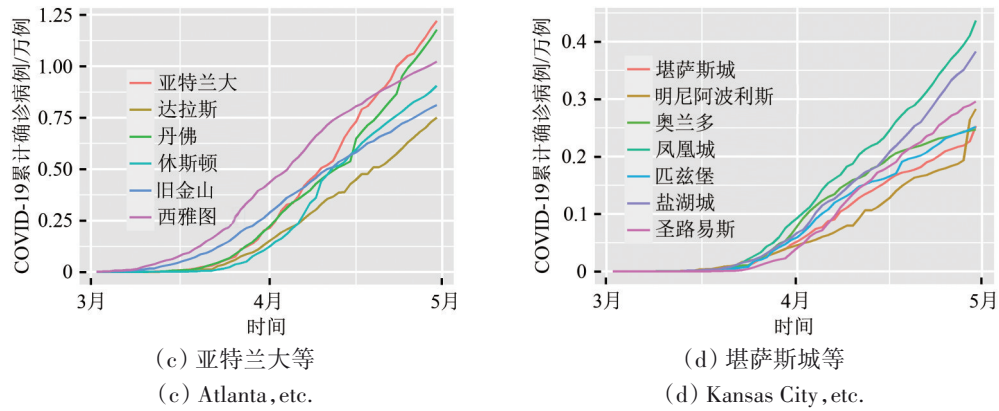


图2 美国20个城市2020年3月1日—4月30日 COVID-19 累计确诊病例时间变化

Fig. 2 Temporal variations of accumulated COVID-19 cases from March 1 to April 30, 2020 in 20 cities in the United States

随着各城市 COVID-19 确诊病例从3月中旬开始迅速增加, 各城市在3月中下旬陆续颁布居家令。根据当地政府规定和新闻报道汇总整理各城市居家令执行日期(表1)。多个城市集中在2020年3月23日、24日执行居家令, 各城市相继执行第一轮居家令的周期为两周。部分城市强制民众待在家中, 也有城市仅仅鼓励民众保持社交距离。

表1 各城市居家令执行日期

Table 1 Implementation date of stay at home order in each city in the United States

城市	人口/万*	居家令 执行日期	居家令执行当日累计 确诊病例/人
亚特兰大	579	3月24日	554
芝加哥	951	3月21日	718
达拉斯	723	3月23日	303
丹佛	285	3月24日	577
底特律	430	3月24日	1589
休斯顿	677	3月23日	124
堪萨斯城	210	3月24日	108
洛杉矶	1331	3月19日	328
迈阿密	607	3月24日	750
明尼阿波利斯	403	3月27日	274
纽约	2015	3月22日	14751
奥兰多	244	3月26日	230
费城	607	3月23日	530
凤凰城	466	3月31日	850
匹兹堡	234	3月23日	69
盐湖城	119	3月27日	318
旧金山	468	3月19日	730
西雅图	380	3月23日	1845
圣路易斯	281	3月23日	25
华盛顿特区	613	3月30日	1586

注: \*人口数据来自于美国国家统计局(<https://www.census.gov/> [2021-10-22])。

本研究还获取了20个样本城市2020年2月15日—4月30日谷歌人口移动指数(<https://www.google.com/covid19/mobility/> [2021-10-22]), 共

有6个类型(图3), 人口移动数据进行了7日平滑处理。2020年3月中下旬陆续执行居家令以后, 美国各城市人口移动指数快速明显下降, 说明居家令等公共防疫政策显著影响了城市居民社会活动(图3)。2020年4月及以后, 各城市谷歌人口移动指数没有再明显下降, 说明居家令等政策影响城市社会经济活动主要发生在3月下旬和4月初。综合样本城市 COVID-19 疫情时间变化(图2)和谷歌人口移动指数时间变化(图3), 本研究重点分析样本城市2020年3月和4月夜间灯光相对于2020年2月发生的时空变化, 兼顾与2019年3月和4月的同期对比分析。

### 2.3 夜间灯光数据及预处理

本研究获取了20个样本城市2020年2月、3月和4月, 2019年3月、4月夜间灯光月度合成产品数据 <https://eogdata.mines.edu/nighttime-light/monthly/V10> [2021-10-22]。该月度产品是根据 Suomi NPP 卫星 VIIRS DNB 日值影像合成而来, 辐射强度单位为  $nW/cm^2/sr$ 。尽管 NPP-VIIRS 月度合成数据已经对云覆盖像元等做了辐射校正, 但仍存在不稳定光源和杂散光等背景噪声的干扰(Chen 等, 2021)。本研究首先移除大面积水体覆盖区域的灯光数值(Xie 等, 2019)。参考已有研究并结合预实验结果, 本研究确定夜间灯光辐射值10为阈值以区分城市和乡村(Shi 等, 2014; 汪韬阳等, 2018); 同时将大于500的辐射值设置为500, 以剔除辐射值过高的异常值。最终保留样本城市一定范围内辐射值处于10—500的栅格单元, 空间统计得到夜光辐射值均值并计算变化幅度。本研究还针对辐射值最低阈值取5, 最高阈值取1000, 进行了阈值敏感性测试, 结果显示不同阈值没有影响主要结论和发现。

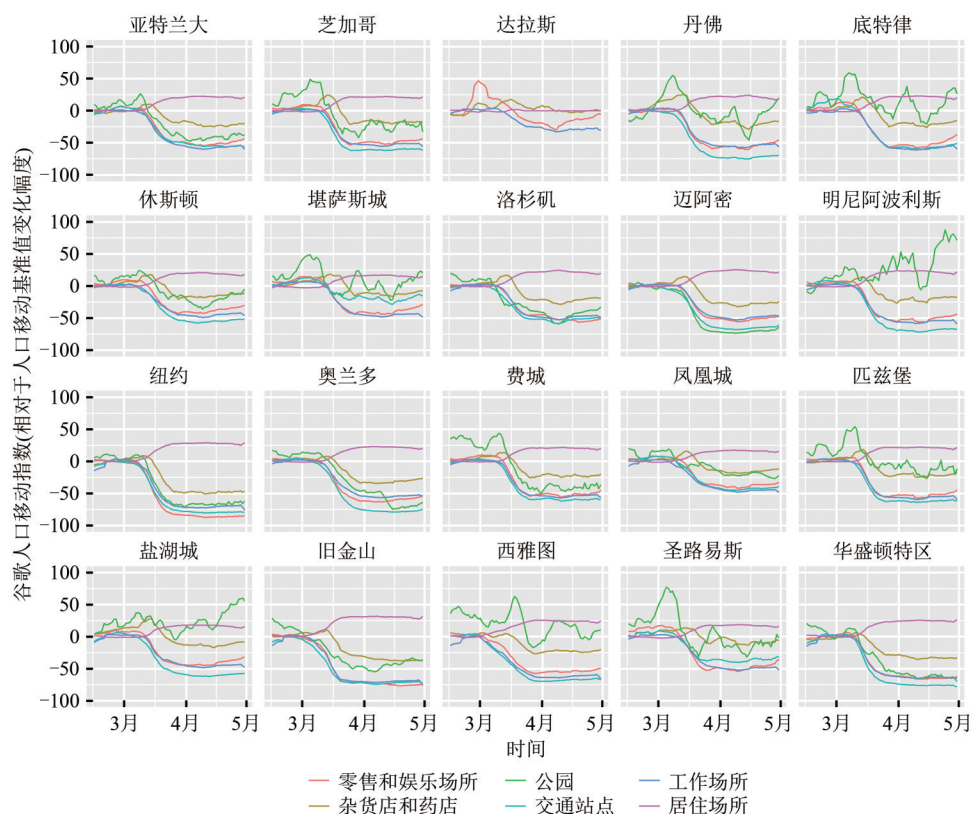


图3 美国20个城市2020年2月15日—4月30日谷歌人口移动指数时间变化图

Fig. 3 Temporal variations of Google mobility index of 20 cities from February 15 to April 30, 2020 in the United States

20个样本城市2020年3月夜间灯光亮度空间分布如图4所示。本研究从OpenStreetMap (<https://www.openstreetmap.org/> [2021-10-22]) 获取城市路网数据, 结合夜光亮度值和路网形态, 确定夜光辐射值高值区域和城市路网放射性中心为城市中心。美国各城市核心区域轮廓清晰, 内陆城市灯光高值区域沿主要路网呈现放射状; 沿海、沿湖城市由于受自然条件限制, 呈条带状和半放射状。样本城市夜光亮度差异较为明显, 纽约、芝加哥夜光强度显著高于其他城市。

#### 2.4 城市用地类型

城市用地按照承载功能可以细分为不同用地类型, 包括居住用地、商业用地、工业用地等。不同类型城市用地的社会经济活动不同, 受疫情影响也存在差异 (Jiang 等, 2021)。本研究以纽约和芝加哥为例, 从OpenStreetMap网站 (<https://www.openstreetmap.org/> [2021-10-22]) 获取两个城市的“兴趣区域”AOI (Area of Interest)。根据AOI数据的属性标签划分城市用地类型 (表2)。合并后的土地利用类型包括居住用地、商业用地、工业用地、体育设施用地、航空设施用地、公共

设施用地共6种类型。这些数据经过筛选、清洗、合并等处理后, 居住用地等类型仍存在大量的小面积图斑, 需对其进行多边形的聚合操作。NPP-VIIRS影像空间分辨率为15", 在赤道处约为500 m。本研究将多边形聚合的阈值设置为200 m, 使相距200 m内的多边形区域生长、合并。航空设施用地占地范围较大, 本研究仅对其余5种用地类型做聚合处理。聚合操作可以有效减少图斑个数, 简化多边形, 有利于栅格统计分析, 提高数据处理效率。

### 3 结果与分析

#### 3.1 夜光亮度时空分布特征

以纽约为例, 夜光亮度变化空间统计分析过程如图5所示。纽约2019年3月、2020年2月和2020年3月夜光亮度空间分布分别如图5 (a)—5 (c) 所示, 城市中心一定范围内地区的夜光亮度明显高于郊区, 纽约中央公园由于植被较多, 夜光亮度明显低于周边其他地区; 对月度合成数据进行栅格相减运算得到月度合成数据的差值影像 (图5 (d)—5 (f)); 图5 (d) 的差值影像反映出纽约城区夜光亮度明显下降, 尤其是曼哈顿区北

部的布朗克斯区和西部的哈德逊县,下降最为明显。相对于2020年2月,2020年3月纽约东北部

的布朗克斯区夜光亮度降低;2020年4月纽约东部大面积区域夜光亮度下降明显。

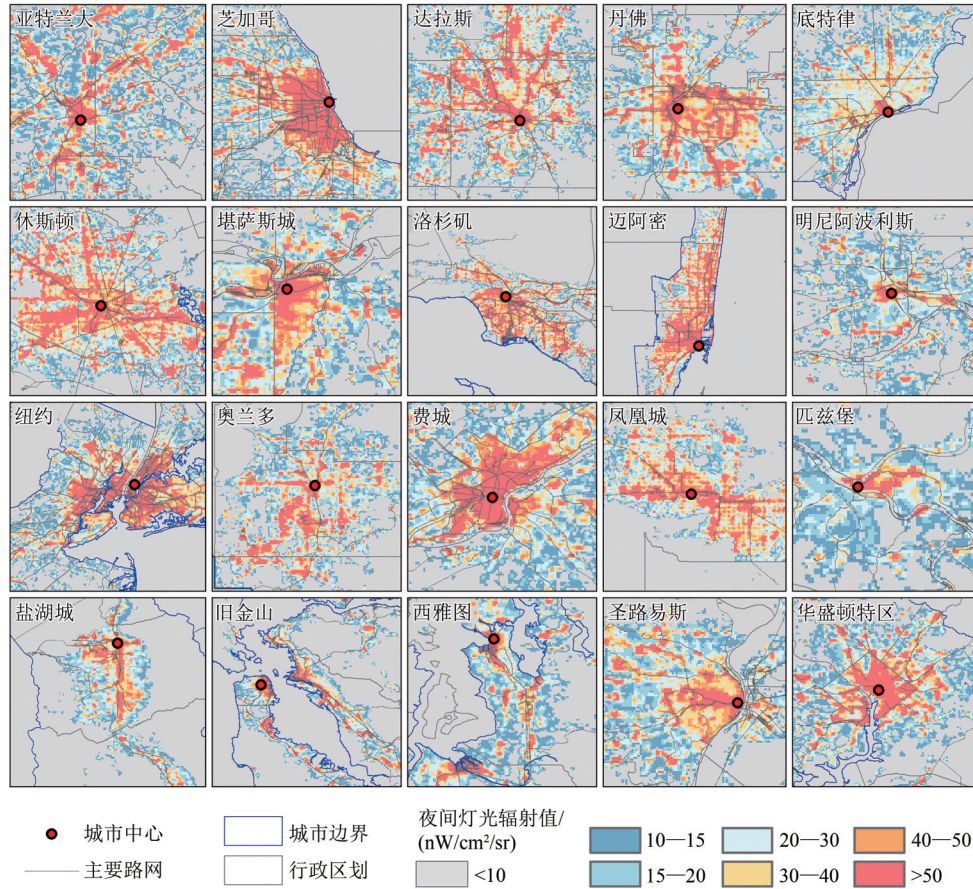


图4 美国20个城市2020年3月夜间灯光辐射值空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of radiance of night-time lights of March, 2020 in 20 cities in the United States

表2 城市用地类型及其属性说明

Table 2 Descriptions of urban land use types and their attributes

城市用地类型	属性标签
居住用地	住宅、公寓、半独立住宅、居住区等
商业用地	超市、便利店、服装店、百货公司、零售店等
工业用地	机械、生产制造工业区
体育设施用地	球场、公园、操场、游泳池、体育中心等
航空设施用地	飞机和直升机的停机坪、机库、机场等
公共设施用地	公园、学校、教堂、加油站、图书馆、消防站等

按照图5所示方法,生成每个城市夜光亮度变化差值影像。本研究通过疫情前后对比和往年同期对比综合分析20个城市夜光亮度受到疫情的影响(图6和表3)。图6显示“居家令”政策执行后以及和往年同期相比,各城市夜光亮度普遍变暗,说明应对COVID-19疫情的公共防疫措施显著减少了城市社会经济活动。20个城市2020年3月、4月夜光亮度比2月平均分别下降8%和5%(表3)。4月夜光亮度下降幅度偏小,说明4月夜光亮度有

一定程度恢复,但仍没有恢复到正常水平。

根据2020年3月、4月与2月相比的夜光亮度均值变化幅度(表3),将20个样本城市分为4类:(1)夜光亮度下降超过10%的城市:芝加哥、达拉斯、丹佛、底特律、明尼阿波利斯、圣路易斯,共计6个城市。底特律、明尼阿波利斯3月和4月夜光亮度均大幅下降。其中,明尼阿波利斯2020年3月夜光亮度相对于2月下降超过40%。(2)夜光亮度下降5%—10%的城市:休斯顿、堪萨斯城、洛杉矶、奥兰多、费城、盐湖城、旧金山,共计7个城市。夜光亮度降低的区域集中在距离城市中心一定范围内,或是放射状路网周边区域。(3)夜光亮度下降0—5%的城市:亚特兰大、匹兹堡、凤凰城、华盛顿特区,共计4个城市。亚特兰大和匹兹堡2020年3月的夜光亮度相比2020年2月略微降低,但是相比2019年3月却明显大幅下降。(4)夜光亮度变化不明或略微增加的城市:迈阿密、纽约、西雅图,共计3个城市。

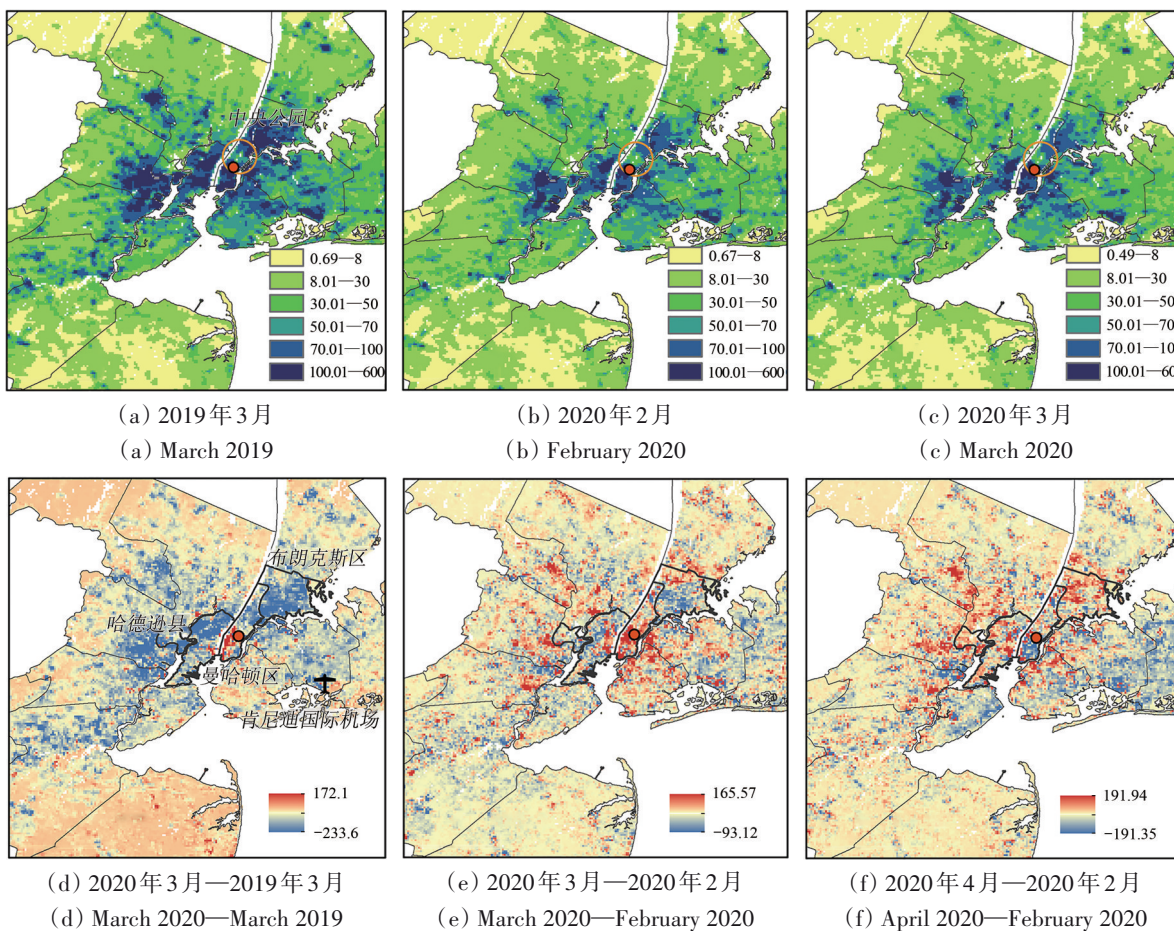
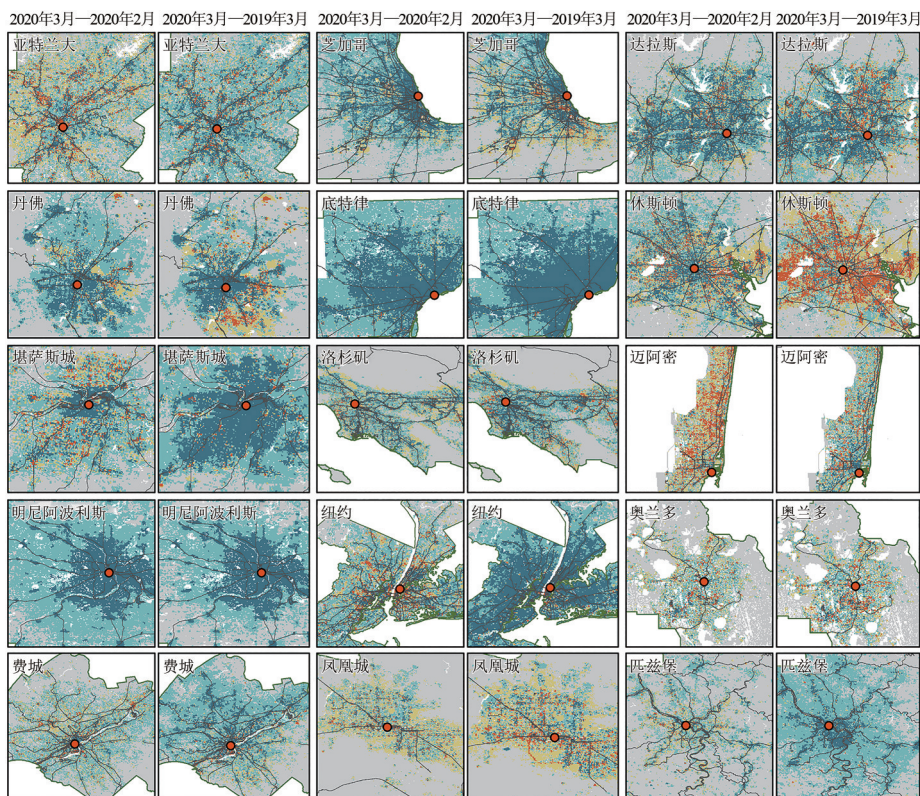


图5 纽约地区夜间灯光辐射值及其变化的空间差异(单位:nW/cm<sup>2</sup>/sr)

Fig. 5 Spatial distributions of radiance of night-time lights (NTL) and their changes over time in New York (unit: nW/cm<sup>2</sup>/sr)



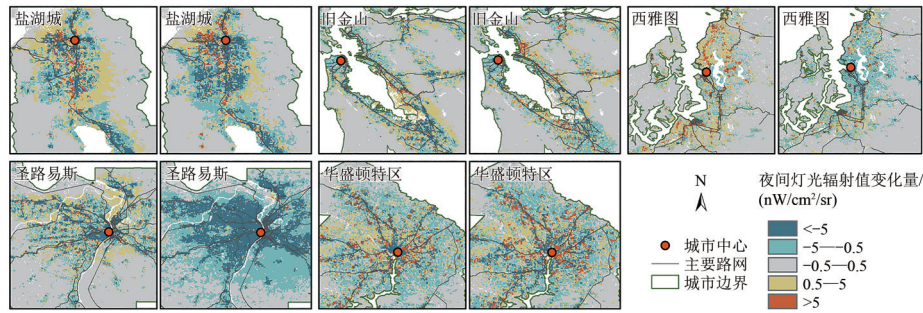


图6 美国20个城市2020年3月分别与2020年2月和2019年3月相比夜间灯光辐射值变化量的空间分布

Fig. 6 Spatial changes of radiance of Night-Time Lights (NTL) in March, 2020 compared with February, 2020 and March, 2019 in 20 cities in the United States

表3 样本城市不同月份夜间灯光辐射值及其变化百分比

Table 3 Radiance of Night-Time Lights (NTL) and its percentage changes in different months in sample cities in the United States

城市	夜间灯光辐射值平均值/(nW/cm <sup>2</sup> /sr)					夜间灯光辐射值变化百分比/%	
	2019-03	2019-04	2020-02	2020-03	2020-04	3月降幅*	4月降幅*
亚特兰大	29.43	27.30	28.15	27.44	28.00	-2.50	-0.51
芝加哥	35.60	38.83	37.29	31.68	34.43	-15.04	-7.67
达拉斯	35.01	34.60	37.49	32.14	35.06	-14.28	-6.50
丹佛	36.58	29.82	36.33	31.95	31.96	-12.06	-12.01
底特律	39.39	29.67	34.79	25.55	29.94	-26.56	-13.94
休斯顿	32.09	37.71	39.26	36.08	38.39	-8.10	-2.21
堪萨斯城	38.28	32.45	32.31	30.41	31.17	-5.89	-3.54
洛杉矶	40.32	37.51	40.51	37.93	39.98	-6.38	-1.30
迈阿密	45.84	42.94	42.90	45.11	41.55	5.15	-3.14
明尼阿波利斯	41.60	23.81	38.33	22.50	27.60	-41.29	-28.00
纽约	39.98	34.01	34.09	34.18	33.50	0.28	-1.74
奥兰多	30.00	29.46	29.85	29.79	27.26	-0.20	-8.69
费城	28.88	25.97	27.48	27.40	25.95	-0.30	-5.59
凤凰城	33.09	31.93	33.19	32.54	32.64	-1.95	-1.66
匹兹堡	24.07	23.01	21.80	20.80	22.36	-4.58	2.60
盐湖城	31.20	30.23	30.93	28.30	29.82	-8.52	-3.60
旧金山	27.98	28.11	29.66	27.70	29.35	-6.62	-1.05
西雅图**	25.40	25.78	23.73	24.88	—	4.82	—
圣路易斯	36.06	28.43	29.48	26.14	29.14	-11.33	-1.15
华盛顿特区	32.58	31.31	33.21	32.62	32.31	-1.78	-2.73

注: \*3月降幅=((2020-03)-(2020-02))/(2020-02)×100%, 4月降幅=((2020-04)-(2020-02))/(2020-02)×100%。

\*\*西雅图2020年4月夜光产品数据缺失,未统计。

### 3.2 夜光亮度空间衰减特征

以城市中心为圆心, 建立10个1 km间隔的等间距多环缓冲区, 分别统计每个圈层内的平均夜光亮度。2020年2—4月各城市不同圈层内平均夜光辐射值到城市中心距离的空间衰减特征如图7所示。整体来看, 各城市夜间灯光亮度先迅速下降, 然后缓缓衰减。城市中心是社会经济活动高度集聚区, 夜光亮度普遍高于周边地区。空间上, 城市中心3 km内夜光亮度下降幅度最大, 说明城市中心区社会经济活动减弱最显著。芝加哥、底特律、休斯顿、匹兹堡、盐湖城等城市的中心区域

夜光亮度下降明显。明尼阿波利斯各圈层内夜光亮度都明显下降。多数城市2020年4月各圈层内夜光亮度均值介于2月和3月之间, 表明4月份夜光亮度相对于3月份已经有所恢复。

各城市不同圈层2020年3月和4月夜间灯光辐射值相对于2月变化幅度如图8所示。图8显示, 大多数城市(旧金山等11个城市)3月份不同圈层内夜光辐射值均下降, 特别是明尼阿波利斯3月份城市中心10 km内不同圈层夜光辐射值下降幅度接近60%。从时间变化来看, 4月份夜光降幅整体低于3月降幅, 显示城市夜间灯光有所恢复。

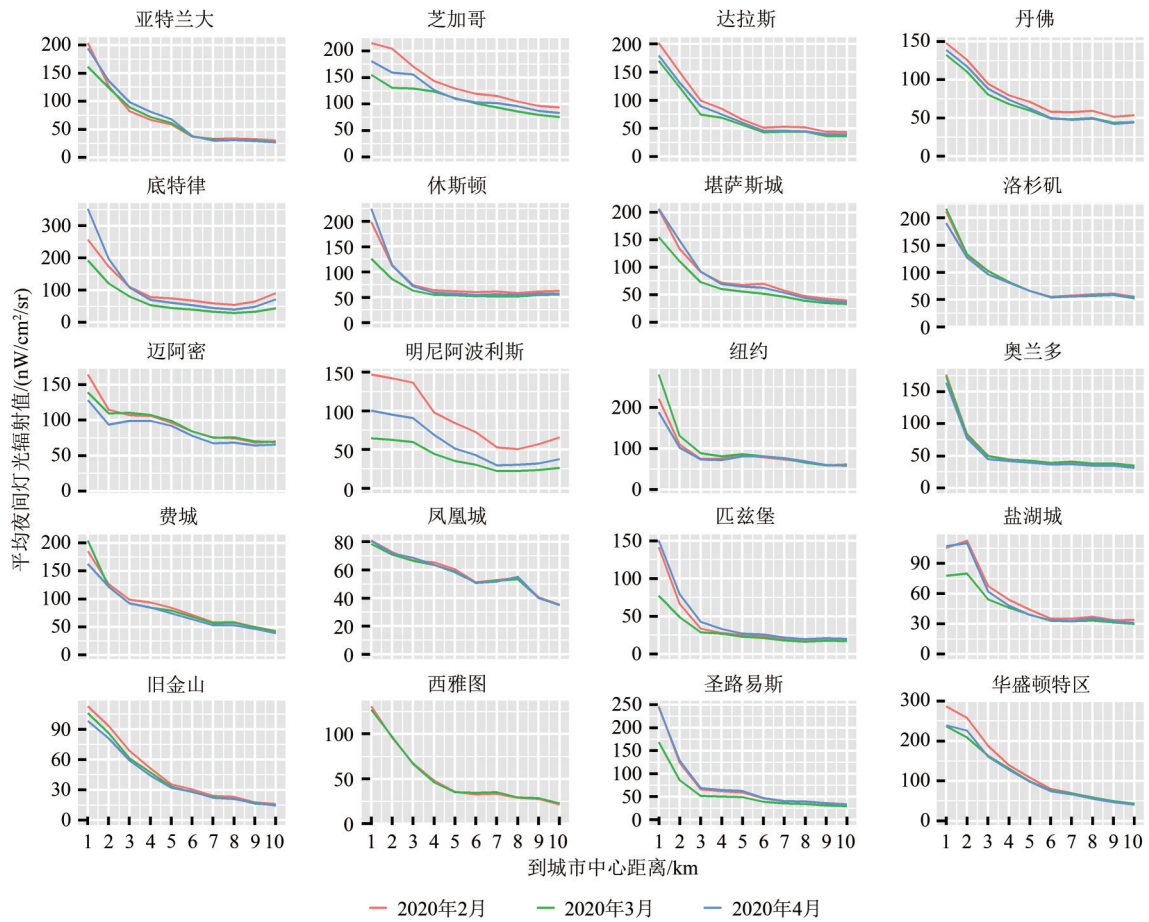


图7 美国20个城市夜间灯光辐射值随到城市中心距离的空间衰减曲线

Fig. 7 The distance decay of radiance of night-time lights (NTR) to the city center in 20 cities in the United States

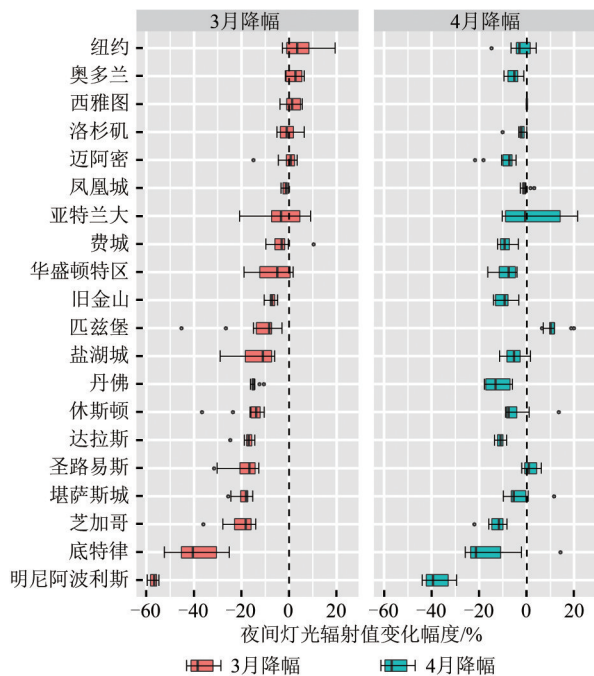


图8 美国20个城市不同圈层夜间灯光辐射值变化幅度箱线图

Fig. 8 Boxplots of percent changes of radiance of Night-Time Lights (NTR) in concentric-rings in 20 cities in the United States

### 3.3 不同类型城市用地夜光亮度变化差异

纽约和芝加哥是最早受 COVID-19 疫情影响的特大城市，本研究以纽约和芝加哥为例，分析不同类型城市用地夜间灯光变化差异。从 OpenStreetMap 获取数据得到不同类型城市用地空间分布如图 9 (a) 和 9 (c) 所示，不同类型城市用地总面积约占城市研究范围 25%；具体来看，主要是居住用地和体育设施用地，航空设施用地单个图斑面积较大，公共设施用地集中在城市中心，工业用地多沿湖泊、河流和主干道分布。图 9 (b) 和 9 (d) 分别展示了 2020 年 3 月相对于 2 月纽约和芝加哥夜间灯光变化的空间差异。

不同类型城市用地夜光辐射均值及变化幅度如表 4 所示。不同类型城市用地夜光亮度存在明显差异。纽约航空设施用地夜光亮度最高，芝加哥商业用地夜光亮度最高。相同的是，纽约和芝加哥夜光亮度最低的都是体育设施用地，居住用地夜光亮度明显低于商业用地和工业用地。纽约居



住用地夜光亮度下降最明显,与2020年2月相比,3月下降了6%,4月下降约12%;纽约东部和北部广泛分布的居住区夜光亮度普遍下降(图9(a)和9(b))。纽约航空设施用地2020年3月和4月夜光亮度相比2月份分别下降2%和11%。整体上,芝加哥夜光亮度下降幅度大于纽约,且夜光亮度

大幅降低区域集中在城市中心周围(图9(c)和9(d)):2020年3月与2月相比,芝加哥不同类型城市用地夜光亮度普遍下降20%左右,商业用地夜光亮度下降最大;2020年4月与2月相比,除了航空设施用地夜光亮度仅下降3.5%,其他用地类型夜光亮度下降15%左右。

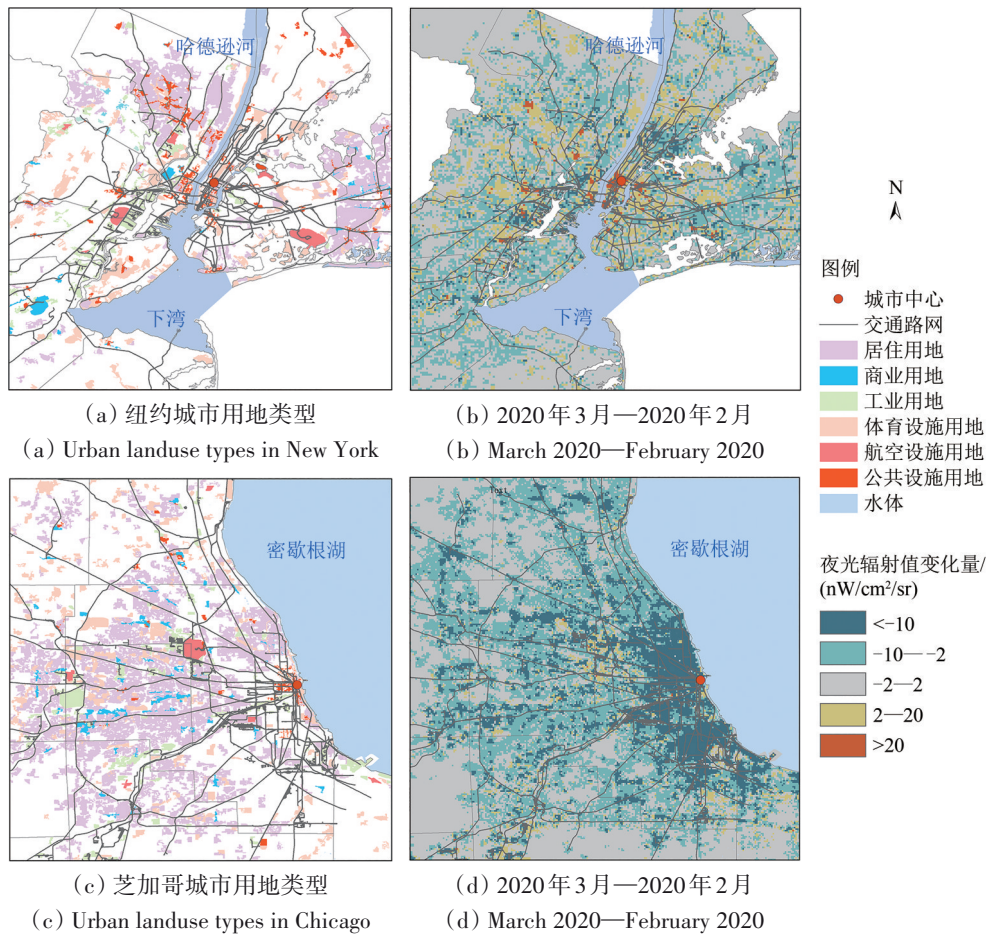


图9 纽约和芝加哥不同类型城市用地和夜间灯光辐射值变化的空间分布

Fig. 9 Spatial distributions of different types of urban land use and spatial changes of radiance of night-time lights (NTL) in New York and Chicago

表4 纽约和芝加哥不同用地类型夜间灯光辐射值变化

Table 4 Changes of radiance of Night-Time Lights (NTL) in different land use types in New York and Chicago

用地类型	纽约						芝加哥					
	面积/km <sup>2</sup>	夜光辐射均值/(nW/cm <sup>2</sup> /sr)			辐射均值变化/%*		面积/km <sup>2</sup>	夜光辐射均值/(nW/cm <sup>2</sup> /sr)			辐射均值变化/%*	
		2020-02	2020-03	2020-04	3月降幅	4月降幅		2020-02	2020-03	2020-04	3月降幅	4月降幅
居住用地	834	27.10	25.43	23.93	-6.16	-11.70	2079	28.35	22.40	24.35	-20.99	-14.11
商业用地	116	49.38	48.52	45.71	-1.74	-7.43	274	61.29	47.03	53.96	-23.27	-11.96
工业用地	212	48.70	47.29	48.18	-2.90	-1.07	422	51.12	40.89	44.66	-20.01	-12.64
体育设施用地	577	22.22	21.07	20.57	-5.18	-7.43	1077	15.14	12.45	12.74	-17.77	-15.85
航空设施用地	35	80.58	78.92	71.95	-2.06	-10.71	51	51.50	43.24	49.72	-16.04	-3.46
公共设施用地	276	47.48	47.27	45.61	-0.44	-3.94	351	49.22	38.47	42.23	-21.84	-14.20

注: \*3月降幅=((2020-03)-(2020-02))/(2020-02)×100%,4月降幅=((2020-04)-(2020-02))/(2020-02)×100%。

## 4 结 论

为防控 COVID-19 疫情，全球普遍采取的封城、居家令等政策显著影响城市居民生产、生活，夜光遥感可以有效捕捉城市社会经济活动变化。受 COVID-19 疫情影响，美国 20 个主要城市 2020 年 3 至 4 月夜光亮度相对于 2 月普遍变暗，平均下降 5%—8%；明尼阿波利斯夜光亮度降幅最大，超过 40%。城市夜光亮度呈现“中心—外围”空间结构特征，城市中心 3 km 内夜光亮度下降最明显。城市放射状主干道路夜光亮度也显著下降。部分城市 4 月份夜光亮度有所恢复，但未及正常水平。不同类型城市用地夜光亮度降幅存在差异，纽约居住用地和航空设施用地夜光亮度降低幅度最明显，分别下降 12% 和 11%。芝加哥不同类型城市用地 3 月份夜光亮度普遍下降 20% 左右，商业用地夜光亮度降幅最大。

本研究展示了夜光遥感可以有效监测公共卫生防控措施带来的城市社会经济活动变化，为评估 COVID-19 疫情社会经济影响提供了新视角。当前，COVID-19 疫情仍在全球肆虐、演化，本研究为中国以及其他国家和地区评估疫情防控措施影响提供了参考。事实上，夜光遥感在应对其它突发公共事件时，如洪涝、地震、森林火灾等，也具有重要潜在应用价值。本研究重点分析了受疫情影响导致城市夜光亮度变化的空间差异，未来需要进一步分析夜光亮度变化驱动因素。例如，未来可以结合疫情防控政策严格指数、人口移动指数、电力消耗数据等揭示夜间灯光变化空间差异的原因，指导疫情精准防控，减小社会影响。

## 参考文献 (References)

- Anand A and Kim D H. 2021. Pandemic induced changes in economic activity around African protected areas captured through night-time light data. *Remote Sensing*, 13(2): 314 [DOI: 10.3390/rs13020314]
- Bennett M M and Smith L C. 2017. Advances in using multitemporal night-time lights satellite imagery to detect, estimate, and monitor socioeconomic dynamics. *Remote Sensing of Environment*, 192: 176-197 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.01.005]
- Beyer R C M, Franco-Bedoya S and Galdo V. 2021. Examining the economic impact of COVID-19 in India through daily electricity consumption and nighttime light intensity. *World Development*, 140: 105287 [DOI: 10.1016/j.worlddev.2020.105287]
- Bustamante-Calabria M, Sánchez De Miguel A, Martín-Ruiz S, Ortiz J L, Vilchez J M, Pelegrina A, García A, Zamorano J, Bennie J and Gaston K J. 2021. Effects of the COVID-19 lockdown on urban light emissions: ground and satellite comparison. *Remote Sensing*, 13(2): 258 [DOI: 10.3390/rs13020258]
- Chen Z Q. 2017. A Multiscale Analysis on Urban Area and Spatial Structure based on Nighttime Light Data. Shanghai: East China Normal University (陈佐旗. 2017. 基于多源夜间灯光遥感影像的多尺度城市空间形态结构分析. 上海: 华东师范大学)
- 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]
- Diffenbaugh N S, Field C B, Appel E A, Azevedo I L, Baldocchi D D, Burke M, Burney J A, Ciais P, Davis S J, Fiore A M, Fletcher S M, Hertel T W, Horton D E, Hsiang S M, Jackson R B, Jin X M, Levi M, Lobell D B, Mckinley G A, Moore F C, Montgomery A, Nadeau K C, Pataki D E, Randerson J T, Reichstein M, Schnell J L, Seneviratne S I, Singh D, Steiner A L and Wong-Parodi G. 2020. The COVID-19 lockdowns: a window into the Earth System. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(9): 470-481 [DOI: 10.1038/s43017-020-0079-1]
- 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, Ghosh T, Hsu F C, Zhizhin M and Bazilian M. 2020. The dimming of lights in China during the COVID-19 pandemic. *Remote Sensing*, 12(17): 2851 [DOI: 10.3390/rs12172851]
- Ghosh T, Elvidge C D, Hsu F C, Zhizhin M and Bazilian M. 2020. The dimming of lights in India during the COVID-19 pandemic. *Remote Sensing*, 12(20): 3289 [DOI: 10.3390/rs12203289]
- Jechow A and Hölker F. 2020. Evidence that reduced air and road traffic decreased artificial night-time skyglow during COVID-19 lockdown in Berlin, Germany. *Remote Sensing*, 12(20): 3412 [DOI: 10.3390/rs12203412]
- Jia J S, Lu X, Yuan Y, Xu G, Jia J M and Christakis N A. 2020. Population flow drives spatio-temporal distribution of COVID-19 in China. *Nature*, 582(7812): 389-394 [DOI: 10.1038/s41586-020-2284-y]
- Jiang W, He G J, Peng Y, Wang G Z and Wang M M. 2017. Application potentiality and prospects of nighttime light remote sensing in “the Belt and Road” initiative. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 34(3): 296-303 (江威, 何国金, 彭燕, 王桂周, 王猛猛. 2017. 夜光遥感在“一带一路”战略中的应用潜力展望. 中国科学院大学学报, 34(3): 296-303) [DOI: 10.7523/j.issn.2095-6134.2017.03.004]
- Jiang Y Q, Huang X and Li Z L. 2021. Spatiotemporal patterns of human mobility and its association with land use types during COVID-19 in New York City. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(5): 344 [DOI: 10.3390/ijgi10050344]
- Lan T, Shao G F, Tang L N, Xu Z B, Zhu W and Liu L Y. 2021. Quanti-

- fyng spatiotemporal changes in human activities induced by COVID-19 pandemic using daily nighttime light data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14: 2740-2753 [DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3060038]
- Levin N, Kyba C C M, Zhang Q L, De miguel A S, Román M O, Li X, Portnov B A, Molthan A L, Jechow A, Miller S D, Wang Z S, Shrestha R M and Elvidge C D. 2020. Remote sensing of night lights: a review and an outlook for the future. *Remote Sensing of Environment*, 237: 111443 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111443]
- Li D R and Li X. 2015. An overview on data mining of nighttime light remote sensing. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 44(6): 591-601 (李德仁, 李熙. 2015. 论夜光遥感数据挖掘. *测绘学报*, 44(6): 591-601) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20150149]
- Li X, Xu H N, Chen X L and Li C. 2013. Potential of NPP-VIIRS nighttime light imagery for modeling the regional economy of China. *Remote Sensing*, 5(6): 3057-3081 [DOI: 10.3390/rs5063057]
- Li X Y, Li X, Fan Z Y, Mi L, Kandakji T, Song Z, Li D R and Song X P. 2022. Civil war hinders crop production and threatens food security in Syria. *Nature Food*, 3(1): 38-46 [DOI: 10.1038/s43016-021-00432-4]
- Liu B J, Chen Z Q, Yu B L, Yang C S, Qiu B W and Tu Y. 2021. Kinetic energy assessment and similarity analysis of urban development based on NPP-VIIRS nighttime light remote sensing. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(5): 1187-1200 (刘冰洁, 陈佐旗, 余柏菡, 杨成术, 邱炳文, 涂越. 2021. 夜间灯光遥感对城市发展类动能与相似性评估. *遥感学报*, 25(5): 1187-1200) [DOI: 10.11834/jrs.20210228]
- Meng Y D, Zhu V and Zhu Y. 2021. Co-distribution of light at night (LAN) and COVID-19 incidence in the United States. *BMC Public Health*, 21(1): 1509 [DOI: 10.1186/s12889-021-11500-6]
- Pei T, Wang X, Song C, Liu Y X, Huang Q, Shu H, Chen X, Guo S H and Zhou C H. 2021. Review on spatiotemporal analysis and modeling of COVID-19 pandemic. *Journal of Geo-information Science*, 23(2): 188-210 (裴韬, 王席, 宋辞, 刘亚溪, 黄强, 舒华, 陈晓, 郭思慧, 周成虎. 2021. COVID-19疫情时空分析与建模研究进展. *地球信息科学学报*, 23(2): 188-210) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2021.200434]
- Rocha L E C, Thorson A E and Lambiotte R. 2015. The non-linear health consequences of living in larger cities. *Journal of Urban Health*, 92(5): 785-799 [DOI: 10.1007/s11524-015-9976-x]
- Rowe F, Robinson C and Patias N. 2022. Sensing global changes in the local patterns of energy consumption in cities during the early stages of the COVID-19 pandemic. *Cities*, 129: 103808 [DOI: 10.1016/j.cities.2022.103808]
- Shao Z F, Tang Y, Huang X and Li D R. 2021. Monitoring work resumption of Wuhan in the COVID-19 epidemic using daily nighttime light. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 87(3): 197-206 [DOI: 10.14358/PERS.87.3.197]
- Shi K F, Huang C, Yu B L, Yin B, Huang Y X and Wu J P. 2014. Evaluation of NPP-VIIRS night-time light composite data for extracting built-up urban areas. *Remote Sensing Letters*, 5(4): 358-366 [DOI: 10.1080/2150704X.2014.905728]
- Shu S, Yu B L, Wu J P and Liu H X. 2011. Methods for deriving urban built-up area using night-light data: assessment and application. *Remote Sensing Technology and Application*, 26(2): 169-176 (舒松, 余柏菡, 吴健平, 刘红星. 2011. 基于夜间灯光数据的城市建成区提取方法评价与应用. *遥感技术与应用*, 26(2): 169-176) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2011.2.169]
- Small C and Sousa D. 2021. Spatiotemporal evolution of COVID-19 infection and detection within night light networks: comparative analysis of USA and China. *Applied Network Science*, 6: 10 [DOI: 10.1007/s41109-020-00345-4]
- Straka W, Kondragunta S, Wei Z G, Zhang H, Miller S D and Watts A. 2020. Examining the economic and environmental impacts of COVID-19 using earth observation data. *Remote Sensing*, 13(1): 5 [DOI: 10.3390/rs13010005]
- Tao J H, Fan M, Gu J B and Chen L F. 2020. Satellite observations of the return-to-work over China during the period of COVID-19. *Journal of Remote Sensing*, 24(7): 824-836 (陶金花, 范萌, 顾坚斌, 陈良富. 2020. 新冠病毒疫情期间复工复产卫星遥感监测. *遥感学报*, 24(7): 824-836) [DOI: 10.11834/jrs.20200098]
- Tian H Y, Liu Y H, Li Y D, Wu C H, Chen B, Kraemer M U G, Li B Y, Cai J, Xu B, Yang Q Q, Wang B, Yang P, Cui Y J, Song Y M, Zheng P, Wang Q Y, Bjornstad O N, Yang R F, Grenfell B T, Pybus O G and Dye C. 2020. An investigation of transmission control measures during the first 50 days of the COVID-19 epidemic in China. *Science*, 368(6491): 638-642 [DOI: 10.1126/science.abb6105]
- Wang T Y, Zhang G, Li P R, Li F T and Guo X Y. 2018. Analysis on the driving factors of urban expansion policy based on DMSP/OLS remote sensing image. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 47(11): 1466-1473 (汪韬阳, 张过, 李沛然, 厉芳婷, 郭雪瑶. 2018. 基于DMSP/OLS夜光遥感影像的城市扩张政策驱动因素分析. *测绘学报*, 47(11): 1466-1473) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170353]
- Xie Y H, Weng Q H and Fu P. 2019. Temporal variations of artificial nighttime lights and their implications for urbanization in the conterminous United States, 2013—2017. *Remote Sensing of Environment*, 225: 160-174 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.03.008]
- Xu G, Wang W W, Lu D D, Lu B B, Qin K and Jiao L M. 2022. Geographically varying relationships between population flows from Wuhan and COVID-19 cases in Chinese cities. *Geo-Spatial Information Science*, 25(2): 121-131. [DOI: 10.1080/10095020.2021.1977093]
- Xu G, Xiu T Y, Li X, Liang X L and Jiao L M. 2021. Lockdown induced night-time light dynamics during the COVID-19 epidemic in global megacities. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 102: 102421 [DOI: 10.1016/j.jag.2021.102421]
- Yin R Y, He G J, Jiang W, Peng Y, Zhang Z M, Li M X and Gong C J. 2021. Night-time light imagery reveals China's city activity during the COVID-19 pandemic period in early 2020. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14: 5111-5122 [DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3078237]

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 (余柏菡, 王丛笑, 宫文康, 陈佐旗, 施开放, 吴宾, 洪宇辰, 李乔玄, 吴建平). 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]

Zhao N Z, Cao G F, Zhang W, Samson E L and Chen Y. 2020. Remote sensing and social sensing for socioeconomic systems: a comparison study between nighttime lights and location-based social media at the 500 m spatial resolution. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 87: 102058 [DOI: 10.1016/j.jag.2020.102058]

Zheng S, Fu Y Y, Sun Y, Zhang C J, Wang Y S and Lichtfouse E. 2021. High resolution mapping of nighttime light and air pollutants during the COVID-19 lockdown in Wuhan. *Environmental Chemistry Letters*, 19(4): 3477-3485 [DOI: 10.1007/s10311-021-01222-x]

Zhou C H, Pei T, Du Y Y, Chen J, Xu J, Wang J E, Zhang G Y, Su F Z, Song C, Yi J W, Ma T, Ge Y, Zhang A and Jiang L L. 2020. Big data analysis on COVID-19 epidemic and suggestions on regional prevention and control policy. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 35(2): 200-203 (周成虎, 裴韬, 杜云艳, 陈洁, 许珺, 王姣娥, 张国义, 苏奋振, 宋辞, 易嘉伟, 马廷, 葛咏, 张岸, 姜莉莉). 2020. 新冠肺炎疫情大数据分析 with 区域防控政策建议. *中国科学院院刊*, 35(2): 200-203 [DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20200209001]

## Spatio-temporal variations of night-time lights at early stages of the COVID-19 epidemic in the United States

XU Gang<sup>1</sup>, WANG Chuanli<sup>2</sup>, MENG Qingxiang<sup>2</sup>, XIU Tianyu<sup>3</sup>, LI Xi<sup>3</sup>

*1. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China;*

*2. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China;*

*3. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China*

**Abstract:** The COVID-19 epidemic swept the world and continues to spread. Without effective medical treatments and vaccine during the early stage of the pandemic, local governments in various countries had to lock down cities and adopt non-pharmaceutical interventions (NPIs), such as the stay-at-home order and social distancing. The NPIs against the COVID-19 epidemic have significantly changed the socio-economic activities in cities. However, the characteristics and patterns of urban socio-economic activities under this influence are still unclear. Given the development of earth observation technologies, large-scale changes in socioeconomic activities can be captured by satellites through remotely sensed Night-Time Lights (NTLs). In this study, we selected 20 major cities in the United States, including Atlanta, Chicago, Dallas, Denver, Detroit, Houston, Kansas City, Los Angeles, Miami, Minneapolis, New York, Orlando, Philadelphia, Phoenix, Pittsburgh, Salt Lake City, San Francisco, Seattle, Saint Louis, Washington D.C., to analyze the spatio-temporal variations of NTLs caused by the lockdown of cities. The first round of the COVID-19 epidemic occurred in the United States in mid-March 2020. Since March 2020, American cities have successively issued stay-at-home orders, but differences in the time and strictness of policy implementation were noted. Large cities have higher population density and intensity of social activities, so they are more susceptible to infectious diseases. The diversity of lockdown dates and the strictness of lockdowns in the cities in the United States are conducive to investigating the spatio-temporal variations of NTL. We acquired monthly averaged NTLs products of February, March, and April 2020, which were from Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Day/Night Band (DNB) onboard the Suomi National Polar-orbiting Platform NPP. We further analyzed the spatial pattern, distance decay, and disparities in land use types of changes in the NTLs. Results show that the NTLs generally dimmed by 5%–8% in U.S. cities because of the lockdown of cities. In six cities, the luminous brightness dropped by more than 10%: Chicago, Dallas, Denver, Detroit, Minneapolis, and St. Louis. Among them, Minneapolis showed the largest decrease in luminous brightness, with a decrease of approximately 40% in March. The spatial change of the NTLs shows an obvious “core-periphery” pattern, indicating that the reduction of the NTLs declined with the distance from the city center, mainly because the central area of the city is a concentrated commercial area. After the closure of the city, commercial activities dropped significantly, resulting in an obvious reduction in NTLs around the city centers. The reduction of the NTLs varied among the diverse urban land use types. In New York, the NTL decreased the most on land for residence and aviation facilities by 12% and 11%, respectively. In Chicago, the NTL generally decreased by 20% in all types of urban land, and NTL recovered after one month of the lockdown of the cities in other urban lands, except the sports facilities land. This study only analyzed the spatio-temporal changes of NTLs. In the future, the results of this study can be combined with multi-source data to explain the driving force of NTL changes. Night-time light remote sensing effectively reflects the urban socio-economic dynamics with an important application in monitoring and assessing the socio-economic impacts of emergencies.

**Key words:** night-time light remote sensing, COVID-19, NPP-VIIRS, spatio-temporal variation, the United States

**Supported by** National Key Research and Development Program of China (No. 2019YFE0126800); National Natural Science Foundation of China (No. 42101460); Open Fund of Hubei Luoqia Laboratory