

doi: 10.6046/zrzyyg.2021379

引用格式: 邢梓涵, 李晓燕, 石振宇, 等. 辽中南城市群城市扩张及其碳排放效应[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(4): 272-279. (Xing Z H, Li X Y, Shi Z Y, et al. Urban expansion and carbon emission effect of the urban agglomeration in south-central Liaoning Province[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(4): 272-279.)

辽中南城市群城市扩张及其碳排放效应

邢梓涵^{1,2}, 李晓燕¹, 石振宇¹, 古丽娜尔·索尔达汗¹, 吴海涛³

(1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室, 长春 130102; 3. 内蒙古自治区拐子湖气象站, 阿拉善 735408)

摘要: 利用夜间灯光遥感数据分析 2000—2016 年间辽中南城市群的城市扩张现象, 基于碳排放数据尝试从空间上对城市扩张与碳排放关系进行量化研究, 分析辽中南城市群的城市扩张时空差异, 并对城市扩张指数和碳排放量进行脱钩分析。研究表明: 辽中南城市群的年平均扩张速率从 3.93% 增长到 5.48%, 扩张强度从 0.211 增长到 0.525; 2000—2016 年间, 全区碳排放总量从 636.94 亿 t 增加到 1 772.46 亿 t, 年平均碳排放速率是从 7.02% 增加到 18.96% 又减少至 0.96%, 经历了一个从快到慢的过程, 地均碳排放量呈现增长趋势, 但各市变化差异较大; 辽中南城市群的城市扩张促进了碳排放量增加, 但同时存在脱钩现象, 其脱钩状态从以扩张负脱钩为主转向以弱脱钩为主, 到 2016 年, 研究区已有 80% 的城市处于脱钩状态。研究结果对未来城市规划和节能减排政策的制订具有重要意义。

关键词: 夜间灯光影像; 城市扩张; 碳排放; 辽中南城市群

中图分类号: TP 79; TU 984; F 299.2 **文献标志码:** A

文章编号: 2097-034X(2022)04-0272-08

0 引言

随着城市化进程的加快, 城市群作为一种全新的区域性空间组织形式出现^[1-3], 带来一系列环境问题, 热岛效应凸显^[4-5]、大气污染加重^[6-7]、水环境恶化^[8-10]等情况频发。在发展城市群经济时, 资源高度集中、产业高度集聚、人口快速膨胀、交通运输频繁等特征明显, 然而时常出现过度开发自然资源、低效利用能源、重工业高排放等现象^[11], 碳排放问题日趋严重。

碳排放加剧了全球气候变暖, 导致极端情况频发, 不仅降低自然生态系统的自我调节能力, 而且威胁人类的生存^[12]。作为一个碳排放量大国, 碳排放问题已引起高度重视, 减排成为了中国的重要任务之一, 而碳排放量时空差异的掌握是减排策略实施、加快城市群低碳发展、最终实现“双碳”目标的首要任务。

2018 年, 国务院办公厅明确提出, 要创建区域中心城市推动城市群发展、城市群促进区域发展的

新模式, 推动区域一体化发展趋势^[13]。从 20 世纪 50 年代起, 在工业化的大力发展下, 辽中南地区形成了以沈阳和大连为中心的中部城市密集圈, 逐步演变成以 5 条交通干道为发展轴线的城镇布局体系, 大大提升了城市化水平。东北老工业基地振兴政策的发布及执行, 使辽中南城市群 (urban agglomeration in south-central Liaoning, UASCL) 成为东北经济未来发展的核心区域之一。随着国家经济的发展, 以城市群为基础的发展模式成为主要发展模式。UASCL 的经济发展主要依赖于第二产业, 消耗大量煤炭、石油等一次能源, 以重工业为主的发展模式, 带来不可小觑的碳排放问题。李欣欣^[14]对 UASCL 城市扩张及其特征进行了研究, 但对城市扩张和碳排放耦合研究尚不多见^[15-16]。

本研究基于夜间灯光遥感数据提取 2000—2016 年 UASCL 的建成区, 分析 UASCL 的城市扩张现象; 基于中国多尺度排放清单模型所得到的碳排放数据, 分析 UASCL 碳排放时空差异, 并对城市扩张指数和碳排放量进行脱钩分析。研究结果可为 UASCL 未来发展和规划中节能减排政策的制定提

收稿日期: 2021-11-10; 修订日期: 2022-02-28

基金项目: 吉林省科技发展计划项目“吉林省中部玉米带城市化进程对耕层有机碳储量的影响”(编号: 20200201048JC)和“湿地遥感创新团队”(编号: 20200301014RQ)共同资助。

第一作者: 邢梓涵(1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事土地信息系统研究。Email: xingzh20@mails.jlu.edu.cn。

通信作者: 李晓燕(1975-), 女, 教授, 主要从事资源遥感与土地信息系统研究。Email: lxyan@jlu.edu.cn。

供数据基础,对区域经济可持续发展具有重要的指导意义。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

研究区位于辽宁省中南部,以沈阳市和大连市为核心,包括鞍山市、抚顺市、本溪市、营口市、辽阳市、铁岭市、丹东市、盘锦市 10 个城市。该区域地跨 E121° ~ 126°, N38° ~ 43°, 濒临渤海和黄海,属温带季风性气候,西部为辽河平原,东部为低山丘陵。土地总面积约 $9.62 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占辽宁省总面积的 65.7%。研究区是中国重要的重工业基地,同时也是东北地区对外开放的重要门户和陆海交通走廊。

1.2 数据源

夜间灯光数据来源于 NOAA/NGDC 网站 (<https://ngdc.noaa.gov>), 2000 年、2005 年和 2010 年采用 DMSP/OLS 夜间灯光影像,分辨率为 30", 2016 年采用 VCMFG 类型的 NPP/VIIRS 夜间灯光影像,分辨率为 15"。此外,收集了 2013 年同期 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 影像,用于不同传感器数据的校正。研究区建成区面积数据来源于《建设统计年鉴》。碳排放数据采用由清华大学负责研制的中国多尺度排放清单模型(multi-resolution emission inventory for China, MEIC),分辨率为 0.25°。

1.3 数据预处理

1.3.1 夜间灯光数据预处理

在全球夜间灯光数据的基础上,利用研究区行政边界数据进行掩模处理,提取 2000 年、2005 年、2010 年和 2016 年 4 期夜间灯光影像,转换为 Asia Lambert Conformal Conic 投影,以减少由于影像网格形变带来的影响,提高建成区提取的准确性。依据曹子阳等^[17]和李雪萍等^[18]的研究成果,选取 F16 2007 年鹤岗市作为标定数据,分别进行影像的校正处理。

1.3.2 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 影像同化处理

由于 DMSP/OLS 数据与 NPP/VIIRS 数据在分辨率、传感器敏感程度和光谱响应方式上有所不同,而且 DMSP/OLS 数据存在天花板效应,所以借鉴已有研究^[19],选择 2013 年同期 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 数据进行同化处理。利用阈值为 0 ~ 50 的 DMSP/OLS 数据进行掩模,提取 2013 年的 NPP/VIIRS 数据,分别统计 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 的数据均值,建立两者之间的关系模型(图 1),根据模型对 2016 年的 NPP/VIIRS 影像进行了同化,使不同传感器的数据具有更好的可比性。

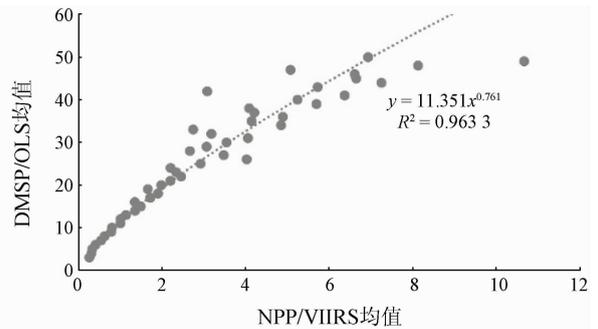


图 1 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 影像数据同化关系

Fig. 1 Assimilation diagram of DMSP/OLS and NPP/VIIRS data

1.3.3 碳排放数据处理

MEIC 监测固定燃烧源、工艺过程源、移动源、溶剂使用源、农业源和废弃物处理源等 6 类人为排放源,利用 ArcGIS 软件栅格计算器将所有分量进行加和处理,得到 2010 年和 2016 年碳排放总量数据。

对 2010 年的碳排放数据和夜间灯光数据进行相关性分析(图 2),由图 2 可知碳排放和夜间灯光指数之间呈线性正相关,利用 SPSS Statistics 软件进行显著性检验,在 $p = 0.001$ 水平上碳排放和夜间灯光指数显著相关。

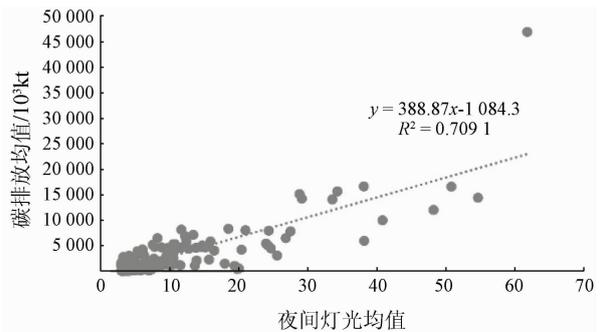


图 2 2010 年碳排放数据和夜间灯光数据拟合关系

Fig. 2 Fitting diagram of carbon emission data and nighttime light index in 2010

由于 MEIC 未提供 2000 年和 2005 年的碳排放数据,基于夜间灯光指数和碳排放数据的相关模型,对 2000 年和 2005 年的空间碳排放数据进行反演,得到 2000 年和 2005 年的碳排放空间数据,进而统计得到 UASCL 的碳排放总量。

2 研究方法

2.1 城市扩张

采用城市年平均扩张速率和扩张强度表征城市扩张特征。城市年平均扩张速率是指在一定时间范围内城市建成区面积的年平均增长率^[20],其计算公式为:

$$A = [(A_{i,t+n} - A_{i,t})/nA_{i,t}] \times 100\% \quad (1)$$

式中: A 为城市的年平均扩张速率; $A_{i,t+n}$ 和 $A_{i,t}$ 分别为空间单元 i 内第 $t+n$ 年建成区面积和第 t 年建成区面积; n 为研究时段。

城市扩张强度是指一定研究时段内城市扩张面积占所有土地面积的比例,可以反映不同研究时期各个城市扩张的强弱情况,其计算公式为:

$$I = [(A_{i,t+n} - A_{i,t})/nT_{Ai}] \times 100 \quad (2)$$

式中: I 为城市扩张强度; T_{Ai} 为空间单元 i 的建成区总面积。

2.2 碳排放

采用城市年平均碳排放速率和地均碳排放强度表征碳排放特征。年平均碳排放速率反映了在一定时间范围内研究区域内的年平均碳排放增长率^[21],其计算公式为:

$$C = [(C_{i,t+n} - C_{i,t})/nC_{i,t}] \times 100\% \quad (3)$$

式中: C 为城市的年平均碳排放速率; $C_{i,t+n}$ 和 $C_{i,t}$ 分别为空间单元 i 内第 $t+n$ 年碳排放总量和第 t 年碳排放总量。

地均碳排放强度表示单位土地面积的碳排放量,能直观地说明各市的碳排放情况,其计算公式为:

$$N = C_{i,t}/T_{Ai} \quad (4)$$

式中 N 为地均碳排放量。

2.3 城市扩张与碳排放关系

协同扩张指数是用于分析系统之间或系统内部事物不同要素之间协调关系的定量分析方法。研究借鉴协同扩张指数研究城市扩张与其碳排放之间的协调关系。其计算公式为:

$$Q = \sqrt{(\alpha A + \beta C) \left\{ \frac{AC}{[(A + C)/2]^2} \right\}^m} \quad (5)$$

式中: Q 为城市扩张与碳排放的协同扩张指数; m 为调节系数(m 通常取大于 2 的实数,这里取 3); α 和 β 分别为待定权重,借鉴王志远等^[22]的研究,认为城市扩张与碳排放同等重要,因此 $\alpha = \beta = 0.5$ 。

脱钩理论的实质是经济增长与资源消耗不同步。本研究借鉴 Tapio 提出的交通运输量增长与经济发展的脱钩状态分析模型,计算各城市碳排放与城市扩张之间的脱钩指数^[23]。其计算公式为:

$$D = \frac{(C_{i,t+n} - C_{i,t})/C_{i,t}}{(A_{i,t+n} - A_{i,t})/A_{i,t}} \quad (6)$$

式中 D 为脱钩指数。

3 结果与分析

3.1 城市扩张分析

基于经验阈值法,提取 2000 年、2005 年、2010 年、2016 年共 4 个时期的建成区空间范围,2000—2016 年建成区空间分布如图 3 所示。

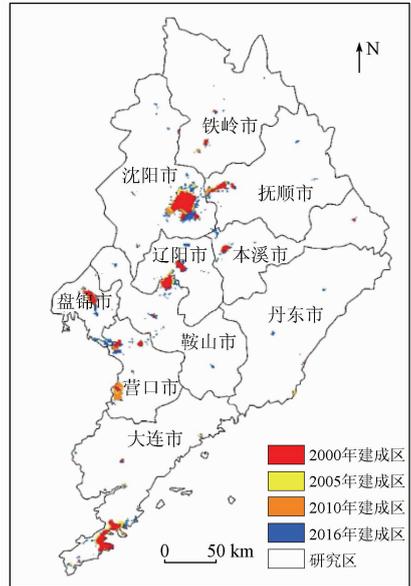


图 3 UASCL 2000—2016 年建成区空间分布
Fig. 3 Expansion process of built-up area in UASCL from 2000 to 2016

2000—2016 年间 UASCL 城市扩张速率和扩张强度如表 1 所示。从表 1 可知,2000—2016 年间 UASCL 整体上年平均扩张速率和扩张强度呈持续增长趋势:年平均扩张速率从 3.93% 增长至 4.90% 又增加到 5.48%,扩张强度从 0.211 增长至 0.314 又增加到 0.525。2000—2005 年间,本溪市作为著名的“煤铁之都”,资源丰富,发展迅速,年平均扩张速率高达 12.24%,沈阳市由于铁西新区的成立得

表 1 2000—2016 年间 UASCL 城市扩张速率和扩张强度
Tab. 1 Urban expansion rate and intensity index of UASCL during 2000—2016

城市	2000—2005 年		2005—2010 年		2010—2016 年	
	速率/%	强度	速率/%	强度	速率/%	强度
沈阳市	7.43	0.130	6.58	0.158	7.12	0.227
大连市	1.20	0.021	11.74	0.219	1.74	0.052
鞍山市	0.30	0.004	2.50	0.037	2.40	0.040
抚顺市	1.61	0.016	1.49	0.016	1.15	0.013
本溪市	12.24	0.097	0.19	0.002	0.31	0.004
营口市	9.83	0.107	2.50	0.041	15.49	0.284
辽阳市	3.16	0.051	2.27	0.042	0.85	0.018
铁岭市	4.00	0.011	0.95	0.003	4.17	0.014
丹东市	0.40	0.001	0.78	0.003	8.18	0.028
盘锦市	2.04	0.024	2.22	0.029	9.17	0.135
UASCL	3.93	0.211	4.90	0.314	5.48	0.525

到进一步发展,扩张强度为 0.130; 2005—2010 年间,由于“五点一线”沿海开放战略的提出,大连市快速发展,其年平均增长速率高达 11.74%,扩张强度达 0.219,发展最为迅猛,而本溪市作为典型资源枯竭型城市,在同一时期城市发展缓慢,扩张速率和扩张强度仅分别为 0.19% 和 0.002; 2010—2016 年间,营口市随着县域经济战略的发布和辽东湾新区的快速发展,年平均扩张速率达到了 15.49%,扩张强度增长至 0.284。

3.2 碳排放时空差异

2000—2016 年间, UASCL 碳排放总量分别为 636.94 亿 t、860.6 亿 t、1 676.33 亿 t 和 1 772.46 亿 t, 2000—2010 年间速率从 7.02% 增加到 18.96%, 2010—2016 年减少至 0.96%, 年平均碳排放速率经历了一个先增加后减少的过程(图 4)。这主要是由于辽宁省积极响应国家节能减排的号召,采取调整能源结构、提高能源利用效率、应用绿色低碳技术等措施,节能减排取得了初步成效。2000—2005 年间,国家设立了丹东边境合作区,使得丹东市快速发展,碳排放量增速飞快,其年平均碳排放速率为 17.33%。大连市积极建设东北亚国际航运中心,带动整个东北亚地区经济协同发展,扩大和深化区港联动试点,使得大连市快速发展,同时也大大增加了碳排放量,年平均碳排放速率为 13.58%。2005—2010 年间,辽宁省大力发展以石化等为重点的临港工业,重点推进 12 大产业集群,导致 UASCL 的能源消耗量突增,从而使得碳排放量大幅度增加,沈阳市、抚顺市、铁岭市、本溪市和鞍山市碳排放的增速都大于 20%, 在发展经济的同时,碳排放量也快速增加。2010—2016 年间,由于产业结构的调整和节能减排政策的实施,碳排放速率增加减缓,鞍山市、营口市和辽阳市出现碳排放负增长。

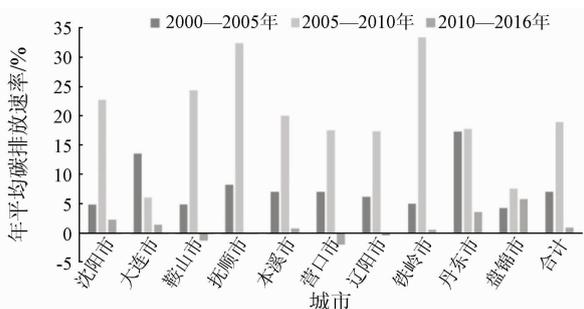


图 4 UASCL 各城市年平均碳排放速率
Fig. 4 Average annual carbon emission rate of cites in UASCL

UASCL 地均碳排放量如表 2 所示。从表 2 可知, UASCL 的地均碳排放量整体上呈现出明显的增长态势,由 2000 年的 726.67 t/km² 上升到 2016 年

的 2 158.61 t/km²。2000—2016 年间 UASCL 各市区单位土地面积的地均碳排放量差异显著。除 2010 年外,盘锦市的地均碳排放量均高于其他城市。盘锦市碳排放总量不大,但是由于区域面积较小,所以导致地均碳排放量高。而沈阳市作为省会城市,人口多,交通网密集,发展较快,碳排放总量高,虽然区域面积大,但地均碳排放量居高不下,2016 年达到了 4 624.62 t/km²。2000—2016 年间丹东市地均碳排放量均居各市最低,2016 年地均碳排放量最高时仅为 448.74 t/km²,碳排放量控制较好。

表 2 UASCL 地均碳排放量

Tab. 2 Carbon emission of per unit land in UASCL (t/km²)

城市	2000 年	2005 年	2010 年	2016 年
沈阳市	1 479.65	1 837.11	3 928.22	4 624.62
大连市	862.73	1 448.51	1 887.75	2 338.81
鞍山市	787.66	980.50	2 175.83	2 062.23
抚顺市	370.42	523.64	1 371.91	1 413.79
本溪市	384.31	519.37	1 039.84	1 145.87
营口市	1 048.05	1 416.70	2 657.47	2 337.02
辽阳市	1 310.74	1 718.48	3 210.05	3 155.16
铁岭市	438.96	549.20	1 466.07	1 638.23
丹东市	94.14	175.72	331.78	448.74
盘锦市	1 723.93	2 093.86	2 889.49	4 991.46
UASCL	726.67	981.84	1 912.51	2 158.61

3.3 城市扩张的碳排放效应分析

将 2000 年建成区的范围作为城市区,将 2016 年与 2000 年相比的城市扩展区作为城市发展区,通过掩模提取碳排放数据,得到 2000—2016 年城市区和城市发展区的碳排放总量(表 3)和碳排放速率(图 5)。

表 3 城市区和城市发展区的碳排放总量

Tab. 3 Total carbon emissions in developed and developing urban areas (亿 t)

区域	2000 年	2005 年	2010 年	2016 年
城市区	154.06	154.45	227.66	245.16
城市发展区	40.23	65.79	101.69	104.53

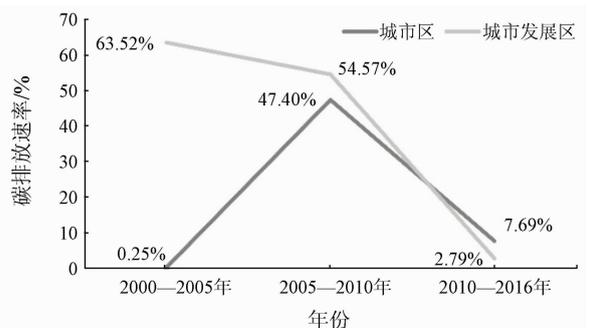


图 5 城市区和城市发展区的碳排放速率
Fig. 5 Carbon emission rates in developed and developing urban areas

城市区的碳排放总量比城市发展区的碳排放总量大了一倍以上,无论是城市区还是城市发展区,碳排放总量逐年增加。城市区碳排放速率呈“慢-快-慢”趋势,而城市发展区的碳排放速率呈逐步减缓的趋势。可以看出在2000—2010年间,城市发展区的碳排放速率快于城市区,表明城市发展区在一个高速发展的同时,导致碳排放量快速增加,当城市发展区逐步发展为城市区时,即2010—2016年间,其碳排放增加速率出现大幅度的减缓。

以上分析表明城市扩张与碳排放处于协同扩张的状态。为了进一步探究两者之间的协同关系,本研究借鉴协同扩张指数计算城市扩张指数与碳排放之间的协同扩张指数(表4)。

表4 2000—2016年间UASCL城市扩张与碳排放量协同扩张指数

Tab. 4 Cooperative expansion index of urban expansion and carbon emission in UASCL during 2000—2016

时间段	扩张速率/%	年平均碳排放速率/%	协同扩张指数
2000—2005年	3.93	7.02	0.21
2005—2010年	4.90	18.96	0.18
2010—2016年	5.48	0.96	0.06
2000—2016年	6.12	11.14	0.26

2000—2016年间,UASCL城市扩张与碳排放之间的协同扩张系数为0.26。其中2000—2005年间的协同扩张指数为0.21,城市扩张与碳排放的协同扩张关系较强,反映了UASCL的城市扩张与碳排放处于同向增长、协同扩张的趋势,城市扩张促进了碳排放量;2005—2010年间其协同作用有所降低,协同指数为0.18,2010—2016年间城市扩张和碳排放的协同关系较弱,其数值仅为0.06。由于各阶段基数年份数据相差较大,2000—2016年间总的协同扩张指数高于各个时间分段的指数,表明了碳排放过程研究的重要性。UASCL虽然各时间段内城市扩张与碳排放之间协同扩张指数有强有弱,但整体上城市扩张促进碳排放量增加的效应显著。

城市扩张和碳排放协同效应明显,但区域差异性显著。研究选取Tapio脱钩模型计算UASCL各城市碳排放与城市扩张之间的脱钩指数。强脱钩为最佳脱钩状态,即城市扩张的同时,对环境的污染随之减少;强负脱钩为最差脱钩状态,此时城市扩张与环境污染呈负相关,城市收缩而环境进一步恶化,其余状态介于二者之间。扩张负脱钩是指在本来发展较慢的情况下,碳排放增加的速度快于城市扩张的速度,增长连结是指城市扩张与碳排放量仍处于不脱钩状态。UASCL各市脱钩状态如图6所示。

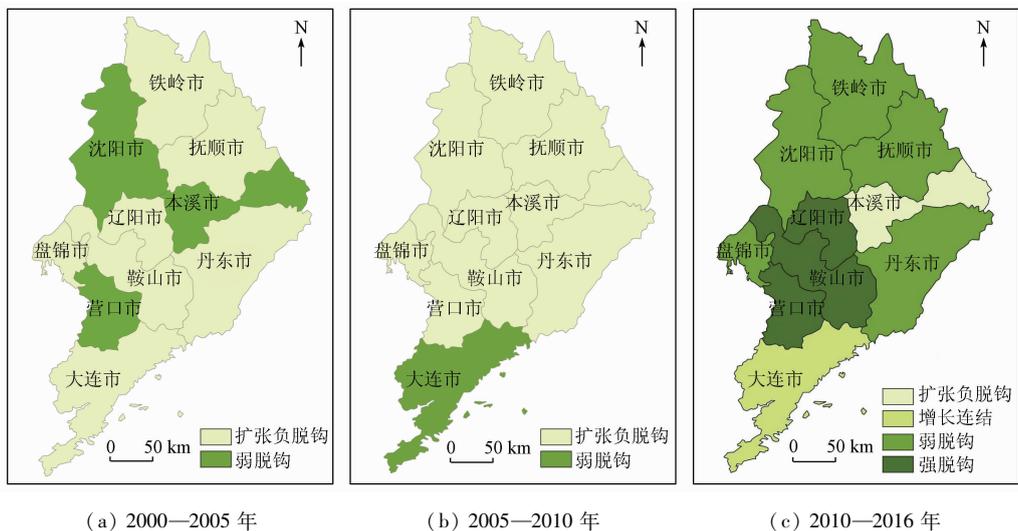


图6 2000—2016年UASCL各市碳排放量与城市扩张脱钩状态

Fig. 6 Decoupling index of carbon emission and built-up area expansion in UASCL during 2000—2016

从图6中可知,2000—2016年间,UASCL的脱钩状态由以扩张负脱钩为主转向以弱脱钩为主,脱钩水平逐渐提高,表明碳排放总量虽然随着城市扩张而增加,但增加幅度有所减小,这种脱钩状态的变化与2003年老工业振兴政策的发布和实施有紧密联系。UASCL的大部分城市经历了较为平稳的脱钩转变,个别城市在某一时期内出现了脱钩状态倒

退的现象。在老工业振兴前期,即2000—2005年间,UASCL大多城市发展刚刚起步,不论是城市扩张还是碳排放量都较小,脱钩状态较差;到老工业振兴中期,即2005—2010年,除大连市外,其他城市均开始进行快速城市扩张,但在发展经济的时候是以牺牲环境为代价,处于粗放型经济增长阶段,导致沈阳市、本溪市和营口市脱钩状态出现倒退现象,

由弱脱钩突变为扩张负脱钩,而大连市作为一个沿海城市,大力发展第三产业,脱钩状态有所提升。大连市在2005—2016年间由弱脱钩倒退为增长连结;到老工业振兴后期,即2010—2016年,各城市发展已较为成熟,国家也愈加重视碳排放问题,辽宁省成为国家低碳经济试点,到2016年,已经有8个城市处于脱钩状态,占UASCL的80%,辽阳市、鞍山市和营口市作为资源枯竭型城市,加快经济转型,率先实现强脱钩,意味着在经济发展的同时也注重环境的保护与改善,实现了城市扩张与碳排放之间关系较为理想的状态。丹东市、盘锦市和铁岭市等以农业为主的城市在老工业振兴后期的发展过程中碳排放速率减缓,已变为弱脱钩,处于相对集约的经济增长阶段。而大连市的脱钩状态出现了较小程度的倒退,这可能与大连市人口规模增加和沿海经济带开发导致碳排放量大量增加有关。

4 结论与讨论

基于DMSP/OLS与NPP/VIIRS夜间灯光数据和MEIC提供的碳排放数据,分析了2000—2016年间研究区的城市扩张、碳排放时空差异及城市扩张的碳排放效应,得到如下主要结论:

1)在2000—2016年间,研究区扩张速度和扩张强度始终处于增长趋势;3个时期中,扩张速度最快的城市分别是本溪市、大连市和营口市,扩张强度最大的城市分别是沈阳市、大连市和营口市。

2)从整体上看,研究区碳排放总量和地均碳排放量都呈现增长趋势,年平均碳排放速率经历了一个先增加后减少的过程,各市变化差异较大,辽阳市、鞍山市和营口市由于节能减排的缘故出现负增长。地均碳排放量最大的城市除2005—2010年为沈阳市以外,均为盘锦市,丹东市一直为研究区中地均碳排放量最小的城市。

3)城市扩张与碳排放之间显著相关,基于增长弹性变化的脱钩分析表明:研究区以扩张负脱钩为主转向以弱脱钩为主,到2016年,已有80%的城市处于脱钩状态,辽阳市、鞍山市和营口市率先实现了强脱钩。研究区的城市扩张促进了碳排放量增加,但同时存在脱钩现象。

2000—2016年间研究区虽然采取大量节能减排措施,但碳排放仍处在高值阶段,未来应节约集约利用土地资源,避免研究区城市用地的无序扩张,实现城市空间紧凑化发展,要增加第三产业的比例,尽可能淘汰一些高污染产业,引进先进技术,提高碳排放效率,加快关键技术的研发,实现碳减排,同时增

加绿化面积,实现碳增汇,从而使研究区尽快实现强脱钩,进入低碳经济阶段。本文尝试对研究区的城市扩张及其碳排放关系进行定量化研究,但碳排放数据分辨率有限,今后可结合不同土地类型及碳排放统计数据在更高精度上进行区域性研究。

参考文献(References):

- [1] Zhang D, Huang Q X, He H Y, et al. Impacts of urban expansion on ecosystem services in the Beijing - Tianjin - Hebei urban agglomeration, China: A scenario analysis based on the shared socioeconomic pathways [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 125: 115 - 130.
- [2] 马学广,唐承辉. 新国家空间理论视角下城市群的国家空间选择性研究[J]. *人文地理*, 2019, 34(2): 105 - 115.
Ma X G, Tang C H. Study on state spatial selectivity of urban agglomeration from the perspective of new state space theory [J]. *Human Geography*, 2019, 34(2): 105 - 115.
- [3] 谷国锋,李 俏,周伊楠. 东北地区城市群经济增长空间关联网络结构演变[J]. *地域研究与开发*, 2020, 39(2): 14 - 19.
Gu G F, Li Q, Zhou Y N. Evolution of economic growth spatial correlation network structure of urban agglomeration in northeast China [J]. *Areal Research and Development*, 2020, 39(2): 14 - 19.
- [4] 沈中健,曾 坚. 1996—2017年闽三角城市群区域热岛时空格局演化分析[J]. *安全与环境学报*, 2020, 20(4): 1567 - 1578.
Shen Z J, Zeng J. Analysis of spatiotemporal patterns and evolution of regional thermal islands in Fujian delta urban agglomeration during decade of 1996—2017 [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2020, 20(4): 1567 - 1578.
- [5] Lin C Y, Chen W C, et al. Numerical study of the impact of urbanization on the precipitation over Taiwan [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42: 2934 - 2947.
- [6] 刘 凯,吴 怡,王晓瑜,等. 中国城市群空间结构对大气污染的影响[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(10): 28 - 35.
Liu K, Wu Y, Wang X Y, et al. Impact of spatial structure of urban agglomerations on air pollution in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(10): 28 - 35.
- [7] 范峻恺,徐建刚. 基于神经网络综合建模的区域城市群发展脆弱性评价——以滇中城市群为例[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(12): 2875 - 2887.
Fan J K, Xu J G. Vulnerability assessment of urban agglomeration based on neural network model: A case study of central Yunnan urban agglomeration [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(12): 2875 - 2887.
- [8] Mvungi A, Hranova R K, Love D J. Impact of home industries on water quality in a tributary of the Marimba River, Harare: Implications for urban water management [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003, 28: 1131 - 1137.
- [9] Chang H J. Spatial and temporal variations of water quality in the Han River and its tributaries [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2005, 161: 267 - 284.
- [10] Yoshimura C O T, Furumai H, Tockner K. Present state of rivers and streams in Japan [J]. *River Research and Applications*, 2005, 21(23): 93 - 112.

[11] 郭岫垚. 辽宁省碳排放效率时空演变及影响因素研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2021.
Guo X Y. Research on spatial-temporal evolution and influencing factors of carbon emission efficiency in Liaoning Province [D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2021.

[12] 武俊奎, 姜惠敏, 王桂新. 城市规模扩张对碳排放的影响机制研究——基于产业集聚的视角[J]. 产经评论, 2012, 7(4): 23-35.
Wu J K, Jiang H M, Wang G X. Study on the effect of urban sprawl on carbon emission: Based on industry agglomeration[J]. Industrial Economic Review, 2012, 7(4): 23-35.

[13] 洪银兴, 王振, 曾刚, 等. 长三角一体化新趋势[J]. 上海经济, 2018(3): 122-148.
Hong Y X, Wang Z, Zeng G, et al. Commentary on the new trend of the integration of the Yangtze River Delta[J]. Shanghai Economy, 2018(3): 122-148.

[14] 李欣欣. 基于夜间灯光数据的辽中南城市群城市空间扩张分析与监测研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2018.
Li X X. The research on characteristics of urban spatial expansion of central and southern Liaoning Province urban agglomeration based on nighttime lights data [D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2018.

[15] 王雨枫, 曹洪军. 哈长—辽中南城市群扩张时空特征及驱动因素[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(5): 755-760.
Wang Y F, Cao H J. Spatial-temporal characteristics and driving factors for urban agglomeration in Harbin-Changchun and Central-Southern Liaoning Province[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42(5): 755-760.

[16] 任晓燕, 何艳芬, 王宗明. 基于遥感的辽中南城市群建设用地扩张及其占用耕地的时空特征[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(3): 98-105. doi: 10.6046/gtzyyg.2020.03.13.
Ren X Y, He Y F, Wang Z M. Spatial-temporal characteristics of construction land expansion and occupation of cultivated land in urban agglomeration of central and southern Liaoning Province based on remote sensing[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32(3): 98-105. doi: 10.6046/gtzyyg.2020.03.13.

[17] 曹子阳, 吴志峰, 匡耀求, 等. DMSP/OLS 夜间灯光影像中国区域的校正及应用[J]. 地球信息科学, 2015, 17(9): 1092-1102.
Cao Z Y, Wu Z F, Kuang Y Q, et al. Correction of DMSP/OLS night-time light images and its application in China[J]. Journal of Geo-Information Science, 2015, 17(9): 1092-1102.

[18] 李雪萍, 贡璐. DMSP/OLS 和 VIIRS/DNB 夜间灯光影像的校正及拟合[J]. 测绘通报, 2019, 7: 138-146.
Li X P, Gong L. Correction and fitting of night light images of DMSP/OLS and VIIRS/DNB[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019, 7: 138-146.

[19] 杨任飞. 基于 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 整合数据的城市群发育过程研究——以长江经济带主要城市群为例[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
Yang R F. Integrating DMSP/OLS & NPP/VIIRS lighttime light data to the application research of urban agglomeration growth process: A case study of the main urban agglomerations of Yangtze River economic zone[D]. Chongqing: Southwest University, 2018.

[20] 高宁, 盖迎春, 宋晓娟. 基于夜间灯光数据的西安市城市扩张及驱动因素研究[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(1): 207-215.
Gao N, Gai Y C, Song X Y. Study of urban expansion and driving factors in Xi'an City based on nighttime light data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(1): 207-215.

[21] 周嘉, 王钰莹, 刘学荣, 等. 基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究[J]. 地理科学, 2019, 39(12): 1955-1961.
Zhou J, Wang Y X, Liu X R, et al. Spatial temporal differences of carbon emissions and carbon compensation in China based on land use change[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(12): 1955-1961.

[22] 王志远, 廖建军, 陈祖展, 等. 城市用地空间扩张与碳排放的相关效应研究——以长沙市为例[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2013, 27(2): 82-88.
Wang Z Y, Liao J J, Chen Z Z, et al. Study of city land expansion and carbon emission correlation effect: Taking Changsha City as an example[J]. Journal of University of South China (Science and Technology), 2013, 27(2): 82-88.

[23] 舒心, 夏楚瑜, 李艳, 等. 长三角城市群碳排放与城市用地增长及形态的关系[J]. 生态学报, 2018, 38(17): 6302-6313.
Shu X, Xia C Y, Li Y, et al. Relationships between carbon emission, urban growth, and urban forms of urban agglomeration in the Yangtze River Delta[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(17): 6302-6313.

Urban expansion and carbon emission effect of the urban agglomeration in south-central Liaoning Province

XING Zihan^{1,2}, LI Xiaoyan¹, SHI Zhenyu¹, GULINAER · Suoerdahan¹, WU Haitao³

(1. College of Earth Science, Jilin University, Changchun 130061, China; 2. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Science, Changchun 130102, China; 3. Guazi Lake Weather Station of Inner Mongolia Autonomous Region, Alxa 735408, China)

Abstract: In this study, the urban expansion of the urban agglomeration in south-central Liaoning Province from 2000 to 2016 was analyzed using the nighttime light remote sensing data. The spatial relationship between urban

expansion and carbon emission was quantitatively studied based on the carbon emission data. The spatial – temporal differences of carbon emissions in the study area were analyzed. Moreover, decoupling analysis was made targeting urban expansion index and carbon emissions. The results are as follows. The annual average expansion rate of the study area increased from 3.93% to 5.48%, with the expansion intensity increased from 0.211 to 0.525. The total carbon emission in the study area increased from 63.694 billion tons to 177.246 billion tons during 2000—2016. The annual average carbon emission rate increased from 7.02% to 18.96% and then decreased to 0.96%, experiencing a process from fast to slow. The average local carbon emission showed an increasing trend but varied greatly among cities. The urban expansion of the study area contributed to but also decoupled with carbon emission. The decoupling state changed from expansion negative decoupling to weak decoupling. By 2016, 80% of the cities in the study area had been in the decoupling state. The study results have significant implications for formulating future urban planning and energy conservation and emission reduction policies.

Keywords: nighttime light data; urban expansion; carbon emissions; urban agglomeration in south – central Liaoning Province

(责任编辑: 李 瑜)