

基于夜间灯光数据的黄河流域能源消费 碳排放时空演变多尺度分析

吕倩¹ 刘海滨²¹

(1. 北京信息科技大学 信息管理学院, 中国 北京 100192;

2. 中国矿业大学 (北京) 管理学院, 中国 北京 100083)

【摘要】: 采用四步法对 DMSP-OLS 和 NPP-VIIRS 夜间灯光数据进行融合校正, 得到 1995—2016 年黄河流域长时间序列夜间灯光数据集, 结合省级能源消费统计碳排放数据, 构建黄河流域多尺度碳排放估算模型。利用构建的估算模型和探索性空间数据分析方法从省级、市级、县级和栅格级对黄河流域能源消费碳排放进行时空演变特征分析。结果表明: ①融合校正模型拟合优度为 0.8354, 满足精度要求; 多尺度碳排放估算模型拟合优度达到 0.8482, 精度检验平均相对误差为 17.25%, 估算模型有效。②碳排放量呈现出显著连片扩张趋势; 碳排放量较高省份为内蒙古、山西和河南; 较高城市主要分布在山东、陕西和内蒙古。高碳县域基本维持在四川广元和内江, 山西太原的清徐县, 内蒙古的乌审旗和准格尔旗, 山东枣庄、济宁和济南。③碳排放具有显著的空间正相关性; 省级尺度全局相关性增长幅度最大; 省级碳排放仅有甘肃呈现出 LL 集聚格局; 城市聚集态势由内蒙古和山东的高碳聚集区以及甘肃和青海的低碳聚集区引起; 县域聚集态势由高碳聚集区和低碳聚集区引起。

【关键词】: 黄河流域 碳排放 夜间灯光数据 探索性空间数据分析

【中图分类号】: F206 **【文献标志码】:** A **【文章编号】:** 1000-8462 (2020) 12-0012-10

为应对全球气候变化, 我国政府在巴黎气候会议上承诺到 2030 年, 单位 GDP 碳排放相比 2005 年下降 60%~65%^[1-2], 并提出碳排放尽早达峰的总体目标。我们依靠能源进行粗放式发展的地区面临着巨大的挑战, 且不同区域面临着差异化的减排要求。而将生态保护和高质量发展作为我国重大国家战略的黄河流域, 也承受了巨大的减排压力。黄河流域是我国重要的生态屏障、经济地带、能源化工基地、粮食生产基地^[3-4], 对于我国总体实现生态保护、经济社会发展和生态文明建设具有重要意义。区域内省份经济发展方式差异巨大、能源资源禀赋各有不同、经济发展与环境保护矛盾十分突出, 因此黄河流域如何实现绿色低碳发展、转变经济发展方式、改善能源消费结构应是实现全流域高质量发展的题中之义。对黄河流域碳排放进行时空演变特征的总体把握, 从多尺度分析其碳排放空间结构的差异性, 从而制定精准化减排政策对于实现全流域生态优先和绿色低碳发展具有重要的理论意义和示范应用价值。

对于碳排放时空演变特征的研究, 越来越多的学者尝试使用夜间灯光数据进行碳排放多尺度估算研究^[5], 并已取得良好的估

作者简介: 吕倩 (1986-), 女, 河北石家庄人, 博士, 讲师。主要研究方向为大数据管理与应用、气候变化。

E-mail:lvqian@bistu.edu.cn。

刘海滨 (1969-), 男, 吉林公主岭人, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向为资源与环境可持续发展。

E-mail:hbliu@cumtb.edu.cn。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2009QG10)

算效果。Elvidge 等首先确定 DMSP-OLS 数据可以用于与人口和能源有关的温室气体排放的空间分配^[6];Do11 等结合统计数据,建立了全球首个 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 分辨率的碳排放网格^[7];苏泳娴等以 DMSP-OLS 数据为基础,从多尺度视角进行碳排放分析,表明中国碳排放总量持续增长^[8];Shi 等构建面板模型证明中国 DMSP-OLS 数据与统计碳排放之间存在正向线性相关^[9];Meng 等提出一种基于 NPP-VIIRS 夜间灯光数据表明山东半岛已成为一个新的碳减排热点区域^[10];Cui 等采用 2012—2016 年 NPP-VIIRS 夜间灯光数据估算华北地区地级市集中供热碳排放,指出北京、天津、石家庄和青岛碳排放量最多^[11]。结合两类灯光数据的优势,近年来有学者将关注的重点放在了 DMSP-OLS 数据和 NPP-VIIRS 数据的比较分析上来。Zhang 等表明 DMSP-OLS 数据在所有空间尺度相比 NPP-VIIRS 数据估算效果更好^[12];Zhao 等则认为 NPP-VIIRS 数据在估算城市居民碳排放上效果更好^[13]。很显然,两种夜间灯光数据在不同尺度、不同领域碳排放估算方面各有优势。鉴于此,Zhao 等构建了 DMSP-OLS 数据和 NPP-VIIRS 数据校正融合后的灯光数据集,并证明了其应用于碳排放估算的有效性^[14]。具体到黄河流域,目前关于黄河流域碳排放时空演变特征的研究多集中在黄河下游地区和黄河中下游地区^[15],晋陕蒙等能源富集区域^[16-17],以及按中部区划对山西和河南进行研究^[18],按东部区划对山东进行分析^[19]。总体来看,将黄河流域作为一个整体进行全流域碳排放时空演变特征分析的相关研究较少,而考虑到市级和县级统计数据的难以获取性,从多尺度进行研究则更为稀缺,对全流域精准化制定碳减排目标的落实和保护生态实现绿色低碳发展具有很大的制约性。

总体来看,目前黄河流域全流域碳排放时空演变特征研究较少,特别是市级、县级乃至栅格级等精细化尺度研究更为缺乏,不能很好体现碳排放的空间特性,为精准减排区域的确定和政策的制定、落实带来较大的困难。而长时间序列夜间灯光数据集应用于大跨度、多尺度能源消费碳排放估算具有一定的创新性和可行性,对于精准化减排区域的确定具有巨大优势。由此本文结合黄河流域特点,对 DMSP-OLS 数据和 NPP-VIIRS 数据进行校正融合,构建长时间序列夜间灯光数据集,进而构建多尺度碳排放估算模型,系统分析 1995—2016 年黄河流域多尺度碳排放时空演变特征,为提供区域碳排放政策的针对性和可操作性奠定基础,为实现黄河流域生态优先、绿色低碳发展和高质量发展提供理论和应用基础。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区域

黄河是中华民族的母亲河,黄河流域是中国“一带一路”倡议的重要经济廊道,也是覆盖东、中和西部省区的重要经济纽带,在国家经济社会发展和生态保护方面具有重要地位。黄河流域包括青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南和山东等 9 省区,共包含 115 个地级市和 963 个县域。该区域矿产资源丰富,是我国重要的能源工业和基础工业基地,黄河流域生态保护和高质量发展事关中华民族伟大复兴,如何实现绿色低碳发展是实现高质量发展的重要基础。本文以黄河流域为视角,对 DMSP-OLS 和 NPP-VIIRS 夜间灯光数据进行校正融合,构建长时间序列夜间灯光数据集,并结合能源消费统计碳排放数据构建碳排放估算模型,最后进行碳排放时空演变特征分析。

1.2 夜间灯光数据来源

非辐射定标 DMSP-OLS 夜间稳定灯光数据和 NPP-VIIRS 夜间灯光数据均来源于美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的美国国家地理数据中心(National Geophysical Data Center,NGDC)官方网站。

(1)DMSP-OLS 数据预处理。首先进行 1992—2013 年 DMSP-OLS 数据的影像重投影、重采样与裁剪,得出中国行政边界范围的灯光数据;其次进行影像间的相互校正,选取经济社会发展相对稳定的黑龙江省鸡西市作为不变目标区域,选取 F162007 年数据作为参考数据集,将其他年份与之构建二次回归模型;再次进行年内融合校正,旨在解决夜间灯光影像不同卫星之间不统一的问题;最后进行时间序列校正,基本假设为夜间灯光处于不断扩散和增强的状态,时间序列校正要保证较早影像 DN 值小于较后影像 DN 值,而对于在部分影像中存在缺失的不稳定像元,将其 DN 值替代为 0。通过上述校正过程,得到中国 1992—2013 年校正后的 DMSP-OLS 夜间灯光数据。

(2)NPP-VIIRS数据预处理。首先进行2012—2016年NPP-VIIRS数据的影像年度合成、重投影、重采样与裁剪,实现与DMSP-OLS数据空间分辨率的匹配;其次对不变区域进行稳定性校正及异常值剔除,以2016年合成数据的稳定亮元区域为不变区域,对2012—2016年数据做稳定性校正;最后进行时间序列校正,要保证较早影像DN值小于较后影像DN值,而对于在部分影像中存在缺失的不稳定像元,将其DN值替代为0。通过上述一系列的数据校正过程,可以得到中国2012—2016年校正后的NPP-VIIRS夜间灯光数据集。

(3)DMSP-OLS数据和NPP-VIIRS数据融合校正。

第一步,对DMSP-OLS和NPP-VIIRS县域尺度2012和2013年数据分别进行统计,得到两类灯光数据集。

第二步,建立2012、2013年DMSP-OLS与NPP-VIIRS两种数据源县域尺度的回归关系。两种数据集回归的各项参数及拟合优度见表1。

表1 2012和2013年DMSP-OLS与NPP-VIIRS拟合参数值

模型	拟合函数	a	b	c	d	e	R ²
(1)	$f(x)=ax+b$	5.2948	2415.9	—	—	—	0.7701
(2)	$f(x)=ax^2+bx+c$	0.00003	2.6539	4726.5	—	—	0.8354
(3)	$f(x)=ae^{bx}$	4067.3	0.00009	—	—	—	0.0336
(4)	$f(x)=ax^b$	62.695	0.6738	—	—	—	0.2847

可以发现,模型(2)的拟合优度为0.8354,高于其他模型,因此选择模型(2)作为两个数据集的拟合方程。因此校正公式如下所示:

$$f(x)=0.00003x^2+2.6539x+4726.5 \tag{1}$$

式中: $f(x)$ 为DMSP-OLS夜间灯光数据2012—2013年度数据; x 为NPP-VIIRS夜间灯光数据2012—2013年度数据。

第三步,利用所建立的回归方程对2014—2016年NPP-VIIRS数据进行DMSP-OLS尺度时间序列连续性校正,2014、2015和2016年NPP-VIIRS数据与2013年NPP-VIIRS数据的线性拟合精度见表2。

表2 2014—2016年NPP-VIIRS拟合参数

年份	拟合函数	a	R ²
2014	$f(x)=ax$	1.0600	0.9993
2015	$f(x)=ax$	1.2636	0.9942
2016	$f(x)=ax$	1.3272	0.9881

可以发现,3个拟合方程的拟合优度分别为0.9993、0.9942、0.9881,模型估算精度良好。

第四步，依据公式（1）对 2014—2016 年 DMSP-OLS 尺度数据进行时间序列校正。最终得到 DMSP-OLS 尺度下的 1992—2016 年夜间灯光数据集。融合后的夜间灯光数据集 DN 总值如图 1 所示，1992—2016 年校正后夜间灯光数据集整体精确度良好。

最后裁剪得出黄河流域融合校正后 DMSP-OLS 尺度夜间灯光数据集。

1.3 统计数据来源

黄河流域各省的能源消费数据来源于《中国能源统计年鉴》（1996—2017 年）中的终端能源消费平衡表；能源折算标准煤系数来自于《中国能源统计年鉴 2017》；碳排放因子数据来自于《中国能源统计年鉴》及《2006 年国家温室气体排放清单指南》。具体排放系数见表 3。

表 3 燃料消耗碳排放系数

能源种类	原煤	洗精煤	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	液化石油气	天然气	焦炉煤气	炼厂干气
折算标准煤系数	0.7143	0.9000	0.9714	1.4286	1.4714	1.4714	1.4571	1.4286	1.7143	1.1-1.33	0.5714-0.6143	1.5714
碳排放系数	0.7559	0.7559	0.8550	0.5857	0.5538	0.5714	0.5921	0.6185	0.5042	0.4483	0.3548	0.4602

1.4 研究方法

(1)碳排放估算模型构建及精度检验。基于能源消耗法测算 1995—2016 年黄河流域碳排放量，计算公式如下：

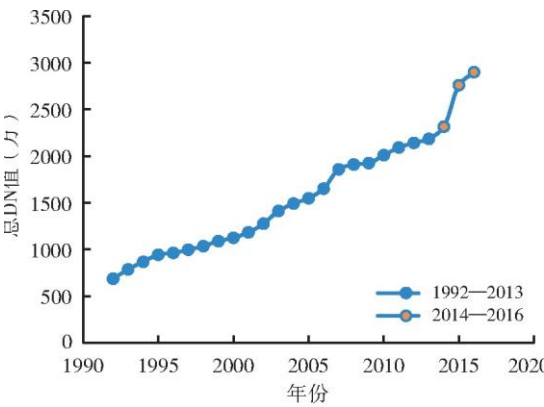


图 1 1992—2016 年校正后夜间灯光数据集 DN 总值

$$A = \frac{44}{12} \sum_{i=1}^{12} K_i E_i$$

(2)

式中：A 为碳排放量（万 t）； E_i 为能源 i 消费量，按标准煤计（万 t）。进一步，碳排放估算模型假设条件为 DN 值与碳排放存在线性相关性，DN 值越大，碳排放量越大，且省级、市级和县域尺度上存在与像元尺度上一致的相关关系。估算模型如下：

$$E_i = aDN_i + b \tag{3}$$

式中： E_i 为估算的 i 像元碳排放量； DN_i 为 i 像元的 DN 值；a、b 为回归参数。使用夜间灯光数据和碳排放统计数据构建碳排放估算模型，估算结果如图 2。

由图 2 可见，夜间灯光数据 DN 总值和能源消费碳排放统计值具有较好的线性相关性，拟合优度达到 0.8482。拟合公式如下所示：

$$NC_c = 0.0188D_c + 1257.4 \tag{4}$$

式中： NC_c 表示 c 省份的碳排放量； D_c 表示 c 省份的 DN 值。

因此碳排放估算模型的假设前提是成立的，二者之间存在正向线性相关，可以使用校正后的夜间灯光数据集估算能源消费碳排放量。为确保碳排放估计值的可靠性，进一步进行估算结果的精度检验。将估算结果与统计碳排放量进行比较，可以发现平均相对误差为 17.25%，选取 1995、2000、2005、2010 和 2016 年相对误差见表 4。平均而言，50%以上的省份估算误差小于 25%，满足估算精度要求，可以为黄河流域多尺度碳排放时空演变特征提供可靠数据基础。

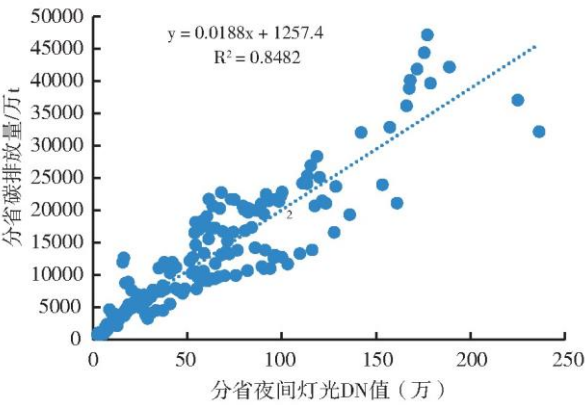


图 2 统计碳排放量与夜间灯光 DN 值线性拟合

表 4 碳排放估算模型相对误差 (%)

省市地区	1995	2000	2005	2010	2016
内蒙古自治区	5.38	7.18	-30.33	-25.03	-10.20
山东省	59.70	76.04	-12.77	-19.89	42.02
河南省	19.20	41.35	-6.00	-14.82	49.19
四川省	-64.94	-19.78	-13.88	-33.76	-1.85

陕西省	6.34	103.33	18.98	13.81	51.97
甘肃省	-23.39	-7.74	-4.38	8.72	41.28
青海省	110.06	109.49	143.80	52.09	26.84
宁夏回族自治区	152.87	28.40	13.27	10.28	-1.79
山西省	7.71	15.18	-4.19	-12.64	15.83
高精度占比	55.56	44.44	77.78	66.67	44.44

(2)全局空间自相关。全局空间自相关用于探究碳排放的整体空间关联程度及其显著性。选用 Global Moran's I 检验黄河流域碳排放整体空间属性。空间权重选取基于地理距离的权重矩阵，具体计算公式如下：

$$I = \frac{S \sum_{k=1}^S \sum_{p=1}^S W_{kp} (x_k - \bar{x})(x_p - \bar{x})}{\left(\sum_{k=1}^S \sum_{p=1}^S W_{kp} \right) \sum_{k=1}^S (x_k - \bar{x})^2} \quad (5)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^S x_k \quad (6)$$

$$\begin{cases} W_{kp} = \frac{1}{d_{kp}}, k \neq p \\ W_{kp} = 0, k = p \end{cases} \quad (7)$$

式中： x_k 表示 k 地区碳排放量； x_p 表示 p 地区碳排放量；S 表示地区数量；W 为空间权重矩阵； d_{kp} 表示通过经纬度计算的地区之间的地表距离。I 的取值范围为[-1, 1]。I 越接近 1，表明空间正相关显著，越接近-1，表明空间负相关显著。当 Global Moran's I 接近期望值 $E(I) = -1/(n-1)$ 时，观测值才是相互对立，且在空间上随机分布。采用如下公式对 Global Moran's I 结果进行统计检验：

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{Var(I)}} \quad (8)$$

式中： $Var(I)$ 表示 Global Moran's I 的方差，当 $Z(I)$ 大于正态分布函数在 0.05 水平下的临界值 1.96，则认为 Global Moran's I 结果是显著的。

(3)局部空间自相关。空间自相关水平存在空间异质性，即不同局部地区，其空间相关性的程度不同。因此局部空间自相关可以描述局部空间异质性，识别碳排放空间分布规律。局部 Moran's I_c 指数用以衡量研究区域观测值与周边区域的集聚程度。计算公式如下：

$$I_c = \sum_j w_{jp} z_j z_p \quad (9)$$

式中： I_c 表示局部 Moran' s I_c 指数； z_k 和 z_p 为区域 k 和 p 标准化后的观测值； w_{kp} 为标准化后的空间权重，其中 $\sum_{p=1}^n w_{kp} = 1$ 。进一步通过局部 Moran' s I_c 指数区分局部集聚模式，包括 H-H 集聚（若 I_c 显著为正且 z_k 大于 0，高观测值地区被高观测值地区包围）；L-L 集聚（若 I_c 显著为正且 z_k 小于 0，低观测值地区被低观测值地区包围）；L-H 集聚（若 I_c 显著为负且 z_k 小于 0，低观测值地区被高观测值地区包围）和 H-L 集聚（若 I_c 显著为负且 z_k 大于 0，高观测值地区被低观测值地区包围）。

2 结果与讨论

2.1 栅格尺度碳排放时空演变特征

1995—2016 年黄河流域能源消费碳排放量时空演变规律显著。(1)1995—2016 年，该区域碳排放总量持续增长，且高碳排放地区呈现出显著连片扩张趋势。(2) 山东、山西、河南和四川碳排放扩张最为显著，呈现由点状分布扩张为线状布局，且呈现向外扩散态势。

2.2 行政区划尺度碳排放时空演变特征

2.2.1 省级尺度

1995 年碳排放量最高省份包括山东和四川，较高省份为山西和河南，最低省份为宁夏和青海；2005 年碳排放量最高省份调整为山东；2010 年碳排放量最高省份仍然为山东，较高省份减少为河南，最低省份仍为宁夏和青海；2016 年碳排放量较高省份调整为内蒙古、山西和河南，最低省份则减少为青海。由此可见黄河流域中煤炭资源大省和工业大省是节能减排的重点省份。而低碳区域一直为西部地区的宁夏和青海，这些区域资源禀赋较差，经济较为落后，能源消费相对较少，因此能源消费碳排放放在黄河流域各省中处于低位，如图 4。

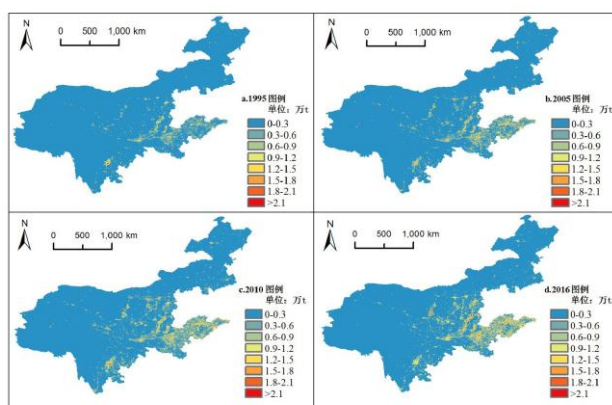


图 3 栅格尺度碳排放演变特征（1995、2005、2010、2016 年）

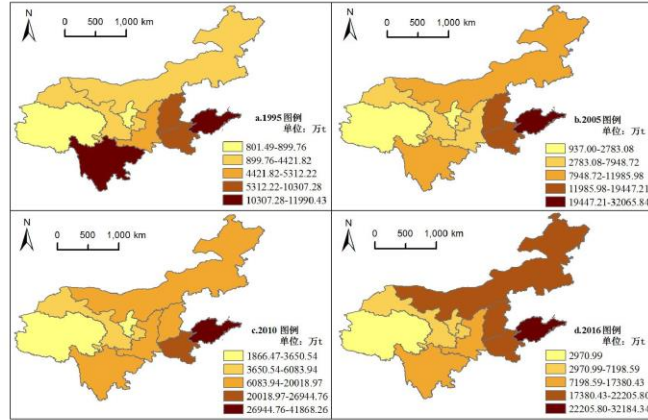


图 4 省级尺度碳排放演变特征（1995、2005、2010、2016 年）

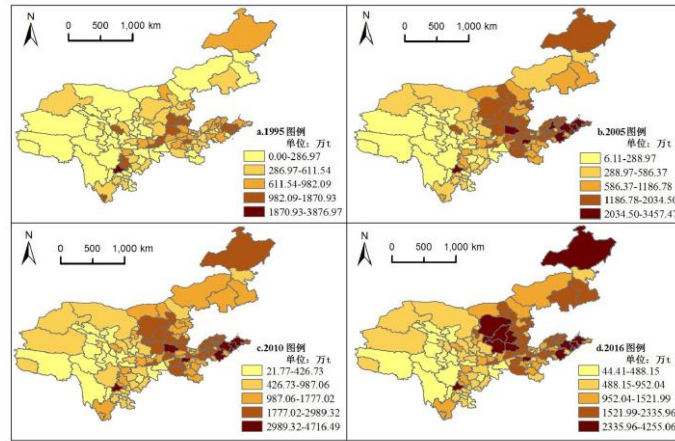


图 5 市级尺度碳排放演变特征（1995、2005、2010、2016 年）

2.2.2 市级尺度

1995 年碳排放最高城市为成都，高碳地区主要分布在山东、四川和山西等地区；2005 年高碳地区呈现迅猛扩张趋势，碳排放最高城市为临沂、济南、青岛、潍坊、烟台、郑州、成都、临汾；2010 年则减少了济南市；2016 年在原有基础上进一步呈扩张趋势，分别为鄂尔多斯、呼伦贝尔、临沂、青岛、潍坊、烟台、郑州、成都、延安、临汾、吕梁、榆林，主要分布在山东、陕西和内蒙古。可以发现黄河流域精准减排城市呈现总体北移趋势。相比省级尺度中高碳省份为内蒙古、山西和河南，高碳城市分布除与省级尺度具有一致性的同时，因不同城市能源消费特征也具有省级内部的差异性，如图 5。

2.2.3 县级尺度

从县级尺度看，1995 年高碳县域主要集中在四川广元、攀枝花和内江的市中区，山西太原市的清徐县，山东枣庄、济宁和济南的市中区。2005 年高碳县域则呈现明显扩大趋势，主要表现为山东高碳区域的扩张，主要分布在四川广元和内江的市中区，山西太原的清徐县，山东枣庄、济宁和济南的市中区，山东即墨市、寿光市和东营区。2010 年高碳地区分别增加了四川双流县，内蒙古的乌审旗和准格尔旗，山东平度市。2016 年高碳县域基本维持在四川广元和内江的市中区，山西太原的清徐县，内蒙古

的乌审旗和准格尔旗，山东枣庄、济宁和济南的市中区，呈现高碳区域稳定态势。因此精准减排县域主要集中在这些区域。总体来看高碳县域在省级和市级尺度宏观定位的基础上，存在一定程度的内部差异性，多尺度研究可以为精准减排定位提供有效参考，如图 6。

2.3 空间相关性分析

(1)全局空间相关性。计算黄河流域多尺度碳排放的 Global Moran’ sI 指数以及相应的 Z 值和 P 值，相关结果见表 5。

1995—2016 年黄河流域不同尺度碳排放的 Global Moran’ sI 指数均为正值。省级尺度数值从 0.2509 增长为 0.5534；市级尺度数值从 0.1246 增长为 0.3088；县级尺度数值从 0.1554 增长为 0.2359。省级尺度除 1995 年外 Z 值均大于 1.96, P 值均在 5% 水平上显著，通过了显著性检验。由此表明黄河流域多尺度碳排放具有显著的空间正相关性。

整体而言，三种尺度下全局 Moran’ sI 指数都呈现出不同程度的增长态势，整体而言省级尺度全局相关性增长幅度最大，其次为市级尺度，再次为县级尺度。省级和市级尺度的全局空间相关性最大，是模拟碳排放的有效行政单元；县级尺度同样具有显著空间相关性，可以为快速、有效测度碳排放演变规律、制定精准化减排政策提供有效参考。从变化趋势来看，三个尺度的全局 Moran’ sI 指数演变曲线形状不尽相同，表明不同尺度的区域碳排放具有差异现象，分析结果会因尺度的差异而出现较大的差别，因此在制定碳减排政策时需要考虑不同尺度下碳排放演变格局的差异性。

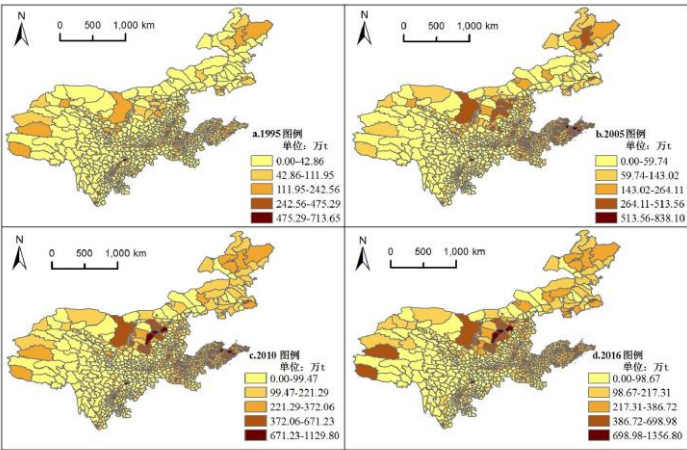


图 6 县级尺度碳排放演变特征（1995、2005、2010、2016 年）

表 5 全局相关性分析结果

		1995	2005	2010	2016
省级	Moran I	0.2509	0.4688	0.4848	0.5534
	z	1.3107	2.4282	2.4006	2.4830
	p	0.1899	0.0151	0.0163	0.0130
市级	Moran I	0.1246	0.4441	0.4064	0.3088
	z	3.1212	9.7935	8.9792	6.8660
	p	0.0018	0.0000	0.0000	0.0000
	Moran I	0.1554	0.3122	0.2896	0.2359

县级	z	15.9173	31.6565	29.4000	24.0290
	p	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

(2)局部空间相关性。计算 2016 年省级碳排放的局部 Moran' sI_c 指数, 显著性空间类型以正相关为主, 仅有甘肃呈现出 LL 集聚格局, 甘肃对其周边的宁夏、青海等省份具有溢出效应, 表明该区域为低碳排放集聚区域。该区域位于我国西部地区, 经济发展较为落后, 城镇化水平低下, 能源消费较少, 因而该区域是黄河流域的低碳排放区。

从市级尺度来看, 2016 年共 21.73%的城市呈现出显著性集聚态势(表 6)。其中属于 HH 型和 LL 型的城市分别为 11 和 12 个, 占显著性类型总数的 92%;HL 型和 LH 型的城市分别为 1 和 1 个, 占显著性类型总数的 8%。结果表明, 市级尺度碳排放的显著性空间类型以正相关为主, 集聚态势由内蒙古和山东的高碳集聚区以及甘肃和青海的低碳集聚区引起。而四川成都本身碳排放较高, 处在低碳集聚区周边, 对其具有正向溢出效应; 山东莱芜本身碳排放较低, 处于高碳集聚区周边, 受到山东高碳城市的溢出影响。可以发现相比省级尺度, 市级碳排放更强的空间异质性和区域集聚特征, 可以确定内蒙古和山东的高碳集聚城市群为精准减排区域。

从县级尺度来看, 2016 年共 24.92%的县域呈现出显著性集聚态势(图 7)。其中属于 HH 型和 LL 型的县域分别为 112 和 115 个, 占显著性类型总数的 94.58%;HL 型和 LH 型的县域分别为 6 和 7 个, 占显著性类型总数的 5.42%。结果表明, 县级尺度碳排放的显著性空间类型以正相关为主, 集聚态势由高碳集聚区以及低碳集聚区引起。其中 HH 型主要分布在内蒙古、山东、陕西、宁夏和山西大部分县域, 呈现高碳县域三足鼎立集聚态势; LH 型则主要分布在内蒙古的新巴尔虎左旗和乌达区、山东的嘉祥县、长岛县、陕西的佳县、山西的偏关县和大同市城区, 呈现点状分散分布在 HH 型周边, 其本身碳排放较低但受高碳地区正向溢出效应影响。LL 型主要分布在四川、陕西、甘肃和青海大部分县域, 以及宁夏的隆德县, 整体分布在黄河流域的下部。HL 型主要分布在四川的西昌市、陕西的长安区和新城区、青海的湟中县, 点状分布在 LL 型周边, 其本身碳排放较高, 对低碳集聚具有一定溢出效应。总体来看, 县级尺度相比市级尺度具有更强的空间异质性和区域集聚特征, 可以确定内蒙古、山东、陕西、宁夏和山西的高碳集聚县域为精准减排区域。

比较三种尺度下黄河流域碳排放局部自相关结果可知, 三种尺度下地区碳排放均存在空间异质性特征。其中县级尺度具有更为显著的异质性, 在省级和市级尺度的宏观定位下, 可以更有针对性、更精准定位高碳集聚县域和县域整体时空格局。

2.4 讨论

结果分析表明, 本文构建的长时间序列夜间灯光数据集满足精度要求, 是黄河流域多尺度碳排放估算模型构建的有效数据来源, 为解决因能源统计数据缺失而导致的精细化尺度碳排放估算困难提供了有效的新方法。估算结果表明二者具有显著的正向相关性, 这与众多学者的研究结论相符^[9,13,20-21]。但考虑到精细化尺度如大部分市级和县级数据的缺失, 在市级和县级估算模型的精度有待进一步检验, 这与 Zhao 等^[14]研究结果一致。

表 6 市级局域 LISA 集聚格局

省份	HH	HL	LH	LL
内蒙古	鄂尔多斯、呼和浩特			
山东	临沂、青岛、潍坊、烟台、延安、临汾、晋中、吕梁、榆林		莱芜	
四川		成都		
甘肃				陇南、甘南藏族自治州、定西、临夏回族自治州、

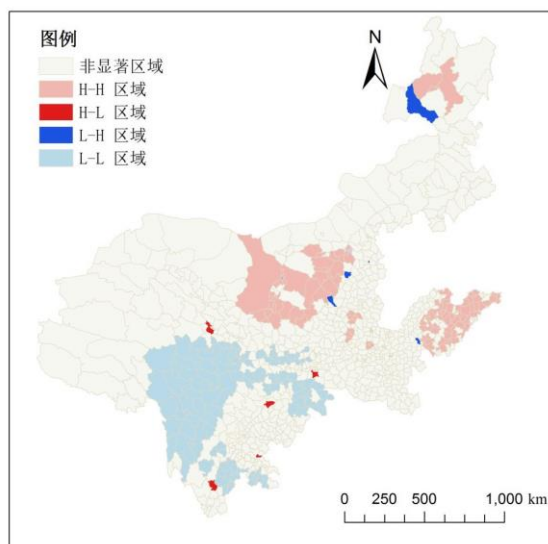


图 7 2016 年县级尺度碳排放局部空间相关性

从研究方法上来看，相比较施开放等^[22]仅考察了应用 DMSP-OLS 数据模拟碳排放，本文结合 DMSP-OLS 数据引入了时效性更好的 NPP-VIIRS 数据来更好模拟碳排放时空演变特征；相比 Zhao 等^[14]从单一县域尺度入手，本文从省、市、县等多尺度视角进行空间扩展性研究，为精准化减排提供依据；相比武娜等^[16]从晋陕蒙区域为研究视角，本文的研究包含了晋陕蒙能源富集区域。从研究内容上来看，山东半岛碳排放处于高位，这与冯宗宪等^[23]研究结论一致；西部的甘肃、青海和宁夏碳排放则为低碳聚集区域，这与黄光球等^[17]研究结论较为一致。山西、陕西、河南、内蒙古则为资源大省，碳排放呈现逐年增长态势，这与武娜等^[16]、刘华军等^[24]研究具有一致的研究结论。由此可见，黄河流域多尺度碳排放存在区域差异性，这种差异性主要是由各地区的资源禀赋、经济发展水平和能源消费强度及结构等因素共同决定。总体来看，本文的研究方法和内容可以为黄河流域节能减排政策的精准制定提供借鉴和参考。

3 结论及政策建议

3.1 结论

(1) 本文在对 1992—2013 年 DMSP-OLS 和 2012—2016 年 NPP-VIIRS 全球夜间灯光数据分别进行校正的基础上，采用四步法对其进行融合校正。融合校正模型拟合优度为 0.8354，满足精度要求。最后得到了黄河流域 1995—2016 年长时间序列夜间灯光数据集。

(2) 依据黄河流域统计的省级尺度能源消费碳排放量，构建了黄河流域多尺度碳排放估算模型。估算结果显示模型的拟合优度达到 0.8482，估算模型有效。进一步精度检验可知平均相对误差为 17.25%，平均而言，50%以上的省份估算误差小于 25%，满足估算精度要求。

(3) 栅格尺度来看, 1995—2016 年黄河流域能源消费碳排放量时空演变规律显著, 呈现出显著连片扩张趋势, 山东、山西、河南和四川碳排放扩张最为显著。省级尺度来看, 2016 年碳排放量较高省份为内蒙古、山西和河南, 最低省份则为青海。由此可见黄河流域中煤炭资源大省和工业大省是节能减排的重点省份。市级尺度来看, 2016 年碳排放较高城市呈现扩张趋势, 主要分布在山东、陕西和内蒙古, 具有省级内部差异性。县级尺度来看, 2016 年高碳县域基本维持在四川广元和内江的市中区; 山西太原的清徐县; 内蒙古的乌审旗和准格尔旗; 山东枣庄、济宁和济南的市中区, 具有省级和市级的内部差异性。

(4) 1995—2016 年黄河流域多尺度碳排放具有显著的空间正相关性。省级尺度全局相关性增长幅度最大, 其次为市级尺度, 再次为县级尺度, 不同尺度的区域碳排放具有差异现象。从省级尺度来看, 省级碳排放仅有甘肃呈现出 LL 集聚格局; 从市级尺度来看, 2016 年共 21.73% 的城市呈现出显著性聚集态势, 其中 HH 型和 LL 型占显著性类型总数的 92%, 聚集态势由内蒙古和山东的高碳聚集区以及甘肃和青海的低碳聚集区引起; 从县级尺度来看, 2016 年共 24.92% 的县域呈现出显著性聚集态势, 其中 HH 型和 LL 型占显著性类型总数的 94.58%, 聚集态势由高碳聚集区和低碳聚集区引起。

3.2 政策建议

(1) 随着全球遥感技术的不断发展和遥感数据的可获取性, 以及本文构建模型的有效性, 黄河流域政府部门应积极构建基于遥感数据和统计数据相结合的“省级—市级—县级—栅格级”多尺度碳排放估算模型, 建立区域信息共享、工作联动机制, 以便为从更为精细化尺度确定精准减排区域提供参考和借鉴。

(2) 考虑到不同尺度下高碳区域呈现聚集态势, 且县级尺度局域更为显著的异质性, 应在内蒙古、山东、陕西、宁夏和山西的高碳聚集区建立联动机制, 确定精准减排区域, 对产业结构和能源消费结构进行同步调整, 改变区域聚集态势。

(3) 考虑到黄河流域 9 个省份能源消费碳排放的时空差异性, 应分区域制定差异化的减排政策。山东位于我国东部地区, 其碳排放量在全国均处于高位, 重点减排地区中的枣庄为煤化工和能源基地, 济宁和济南为我国重要的装备制造业基地, 因此减排策略应侧重于产业结构调整, 同时积极培育低碳绿色理念。山西、河南、四川、内蒙、陕西和宁夏则是我国中西部地区主要的能源资源大省, 其中精准减排县域内蒙古的乌审旗是煤炭和天然气主产地, 准格尔旗是我国煤炭开采及煤化工的重要基地; 山西清徐县煤化工产业密集; 四川广元和内江矿产资源储备丰富, 由此能源结构调整和能源利用效率提升是降低该区域碳排放的重要途径。甘肃和青海则应主动承接东部优势产业, 继续保持低碳优势。

参考文献:

[1] 国务院. “十三五”控制温室气体排放工作方案[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-11/04/content_5128619.htm, 2016-10-27.

[2] OSAKI M. 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories:Wetlands Methodological Guidance on Lands with Wet and Drained Soils, and Constructed Wetlands[R]. 2014.

[3] 新华社. 习近平在河南主持召开黄河流域生态保护和高质量发展座谈会[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2019-09/19/content_5431299.htm, 2019-09-19.

[4] 陆大道, 孙东琪. 黄河流域的综合治理与可持续发展[J]. 地理学报, 2019, 74(12): 2 431-2 436.

[5] Liu X, Ou J, Wang S, et al. Estimating spatiotemporal variations of city-level energy-related CO₂ emissions: an improved disaggregating model based on vegetation adjusted nighttime light data[J]. Journal of Cleaner Production

Journal, 2018, 177:101-114.

[6]Elvidge C D, Baugh K E, Kihn E A, et al. Mapping city lights with nighttime data from the DMSP operational linescan system[J]. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1997, 63(6):727-734.

[7]Doll C H, Muller J, Elvidge C D. Night-time imagery as a tool for global mapping of socioeconomic parameters and greenhouse gas emissions[J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2000, 29(3):157-162.

[8]苏泳娴, 陈修治, 叶玉瑶, 等. 基于夜间灯光数据的中国能源消费碳排放特征及机理[J]. 地理学报, 2013, 68(11):1513-1526.

[9]Shi K, Chen Y, Yu B, et al. Modeling spatiotemporal CO₂ (Carbon dioxide) emission dynamics in China from DMSP-OLS nighttime stable light data using panel data analysis[J]. Applied Energy, 2016, 168:523-533.

[10]Meng X, Han J, Huang C. An improved vegetation adjusted nighttime light urban index and its application in quantifying spatiotemporal dynamics of carbon emissions in China[J]. Remote Sensing, 2017, 9(8):1-20.

[11]Cui X, Lei Y, Zhang F, et al. Mapping spatiotemporal variations of CO₂ (carbon dioxide) emissions using nighttime light data in Guangdong Province[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2019, 110:89-98.

[12]Zhang X, Wu J, Peng J, et al. The uncertainty of nighttime light data in estimating Carbon dioxide emissions in China: a comparison between DMSP-OLS and NPP-VIIRS[J]. Remote Sensing, 2017, 9(8):797.

[13]Zhao J, Chen Y, Ji G, et al. Residential carbon dioxide emissions at the urban scale for county-level cities in China: A comparative study of nighttime light data[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 180:198-209.

[14]Zhao J, Ji G, Yue Y, et al. Spatio-temporal dynamics of urban residential CO₂ emissions and their driving forces in China using the integrated two nighttime light datasets[J]. Applied Energy, 2019, 235:612-624.

[15]王喜, 秦耀辰, 鲁丰先, 等. 黄河中下游地区主要省份低碳经济发展水平的时空差异研究[J]. 地理科学进展, 2013, 32(4):505-513.

[16]武娜, 沈镭, 钟帅. 基于夜间灯光数据的晋陕蒙能源消费碳排放时空格局[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(7):1040-1050.

[17]黄光球, 刘富垒. 陕西省能源消费结构对碳排放强度的作用机理研究[J]. 生态经济, 2019, 35(5):36-41.

[18]刘玉珂, 金声甜. 中部六省能源消费碳排放时空演变特征及影响因素[J]. 经济地理, 2019, 39(1):182-191.

[19]刘晓红, 江可申, 魏洁云. 我国经济增长、能源消费、贸易开放度、城镇化和碳排放之间关系——以东部地区为例[J]. 系统工程, 2016, 34(9):81-88.

[20]Elvidge C D, Baugh K E, Kihn E A, et al. Relation between satellite observed visible-near infrared

emissions, population, economic activity and electric power consumption[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(6):1 373-1 379.

[21]Lv Q, Liu H, Wang J, et al. Multiscale analysis on spatiotemporal dynamics of energy consumption CO₂ emissions in China: Utilizing the integrated of DMSP-OLS and NPP-VIIRS nighttime light datasets[J]. Science of The Total Environment, 2020, 703:134394.

[22]施开放. 多尺度视角下的中国碳排放时空格局动态及影响因素研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.

[23]冯宗宪, 高赢. 中国区域碳排放驱动因素、减排贡献及潜力探究[J]. 北京理工大学学报: 社会科学版, 2019, 21(4):13-20.

[24]刘华军, 石印, 雷名雨. 碳源视角下中国碳排放的地区差距及其结构分解[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(8):87-93.