

# 面向低碳生活的县域城镇空间结构优化研究

□ 张 赫, 于丁一, 王 睿, 冷 红, 贾 卓

[摘要] 城镇空间结构对生活碳排放的影响已得到普遍认同, 但该影响在碳排放量高、覆盖面积广的县域层级的探讨较少, 且缺乏相应的规划策略。文章在县域尺度上将定性理论框架与定量分析相结合, 分析县域城镇空间结构 3 个维度对生活碳排放的影响, 推导出 4 个低碳空间结构优化策略: ①在考虑经济技术因素时, 县域城镇建设用地形态结构及规模结构要素仍对生活碳排放影响显著, 可考虑将其纳入国土空间开发适宜性评价体系中; ②规划可参照较优规模结构, 即总用地规模低于 200 km<sup>2</sup> 的多中心结构, 制定差异化的规模结构管控标准; ③城乡居民点布局可权衡紧凑形态和多中心结构之间潜在的最低碳模式, 考虑培育“多中心、组团式”的空间结构; ④城镇开发边界可尽量划定为较规整的近圆形状。

[关键词] 空间结构; 生活碳排放; 县域; 规划策略

[文章编号] 1006-0022(2020)24-0012-09 [中图分类号] TU981 [文献标识码] A

[引文格式] 张赫, 于丁一, 王睿, 等. 面向低碳生活的县域城镇空间结构优化研究 [J]. 规划师, 2020(24): 12-20.

## Strategies on County Spatial Structure Planning under the Guidance of Household CO<sub>2</sub> Emission Reduction/Zhang He, Yu Dingyi, Wang Rui, Leng Hong, Jia Zhuo

**[Abstract]** The impact of urban spatial structure on CO<sub>2</sub> emissions has been generally recognized, but the impact is less discussed at the county level and there is a lack of correspondent low-carbon planning strategy. In view of counties with high carbon emissions and wide coverage area, the paper combined qualitative theoretical framework and quantitative analysis, studied the impact of three dimensions of spatial structure on the household carbon emissions and derived low-carbon spatial structure optimization strategy at the county level: 1) The comprehensive influence of county form and scale structure is more significant, and it can be incorporated in the evaluation indicators; 2) The planning can draw on the better scale structure conclusion, that is, the multi-center structure with a land size of 200 km<sup>2</sup> and formulate differentiated scale structure control standards; 3) The potential most low-carbon mode between compact form and multi-center structure should be balanced against in the layout of residential area, and "multi-center, cluster arrangement" spatial structure can be considered; 4) The boundary of urban development should better be delineated as well-shaped if possible.

**[Key words]** Spatial structure, Household CO<sub>2</sub> emissions, County, Urban planning strategy

近年来, 县域快速的工业化、城镇化进程加速了土地的扩张和能源消耗, 造成了温室气体排放的巨大压力。2015 年, 县域碳排放量约占全国碳排放量的 60%<sup>①</sup>, 县域成为我国碳排放的主要制造地区。同时, 县域这一行政层级已有 2 000 多年的发展历史, 覆盖着我国 88% 的国土面积, 至今仍是我国的基本行政单元和最大生态

本底, 这昭示着县域对我国发展机制有着极强的适应性, 将县域作为低碳规划治理单元无疑更有利于全面布局低碳规划工作, 高效实现控碳减排目标。

城镇空间结构是城镇建设的骨架、空间要素布局的基础, 已被证实可以通过影响居民的出行方式和住宅能耗来影响生活碳排放<sup>[1]</sup>。与城市不同, 县域整体发展

[基金项目] 国家重点研发计划项目 (2018YFC0704701)

[作者简介] 张 赫, 天津大学建筑学院城乡规划系副教授, 博士生导师。

于丁一, 天津大学建筑学院城乡规划系硕士研究生。

王 睿, 通讯作者, 天津大学建筑学院城乡规划系助理研究员。

冷 红, 哈尔滨工业大学建筑学院城乡规划系教授, 博士生导师。

贾 卓, 兰州大学资源环境学院讲师, 硕士生导师。

水平较低，在空间开发阶段和技术水平方面有其特殊性，城市低碳研究的理论和实践方法可能并不适用于县域。因此，在县域层面探究空间结构对居民生活碳排放的影响，进而推导出低碳县域空间结构优化的意义重大。

## 1 国内外研究进展

空间结构与居民生活碳排放之间的关系研究目前主要针对大中型城市。国外学者主要探讨城市的规模、密度、形状、多中心性（多样性）4方面特征对碳排放产生的影响<sup>[2-5]</sup>，注重应用逐步回归法、IPAT及其拓展模型、SEM模型等定量方法综合分析多类型指标，并且普遍认为小规模、高密度、形态紧凑及非多中心的城市空间模式更有利于低碳发展<sup>[6-8]</sup>，如Yasuyo Makidoa等人通过对50个中小城市数据的逐步回归分析，发现分散程度较小、形状规则的城市和单中心、高密度城市的人均碳排放水平更低<sup>[8]</sup>；也有学者深入思辨了多类空间结构特征影响的重合性、影响关系在不同类型城市中的差异等问题<sup>[9-10]</sup>，如Mingshu Wang认为，多中心城市结构的低碳效用可能并不利于小规模城市的低碳发展。

国内学者则主要关注城市规模结构、形态结构和土地利用结构的低碳特征，将定性对比与相关分析、回归分析、曲线模拟和DEA模型等定量分析方法相结合<sup>[11-13]</sup>，多数研究结论与国外一致，即规模小、形态紧凑和土地功能混合多样的城镇空间是低碳的<sup>[14-17]</sup>，如仇保兴发现紧凑、多样化的城镇空间有助于城市低碳发展；一些学者也通过对特定地区空间结构对碳排放的影响关系分析得出了体现地区差异的、更为详尽的研究结论<sup>[18-19]</sup>，如柴志贤认为对于中国不同地理区域的城市而言，密度效应、发展水平对碳排放的影响模式是不同的。

空间结构对生活碳排放的影响已得到普遍认同，但对我国县域层级的相关

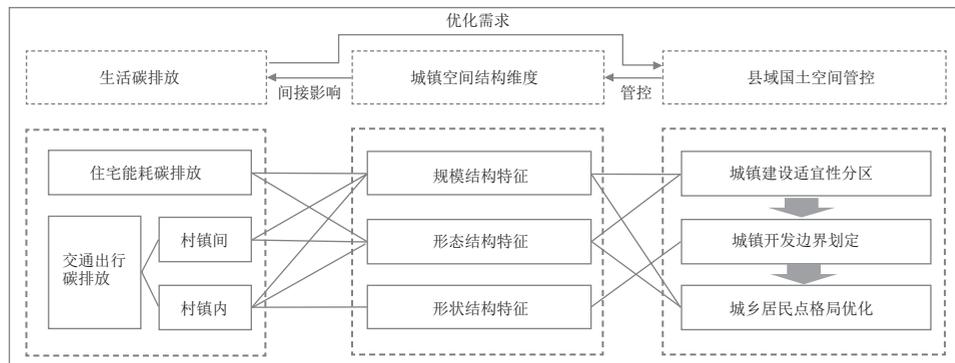


图1 “县域城镇空间结构—国土空间规划—生活碳排放”关联框架

表1 县域城镇空间结构指标选取

特征	指标	描述	规划是否可控	指标描述适用性	既有文献引用率	是否适合选取
规模结构类	总面积 (CA)	建成区面积	√	√	46.7%	√
	总周长 (TE)	建成区周长			13.3%	
	斑块数 (NP)	建成区斑块数量	√	√	13.3%	
	优势度 (LPI)	县城区占县域建设用地面积比重	√	√	46.7%	√
形态结构类	斑块密度 (PD)	每 100 hm <sup>2</sup> 建成区斑块数	√	√	46.7%	√
	边缘密度 (ED)	单位面积建成区周长			40.0%	
	聚集指数 (AI)	建成区聚集程度	√	√	60.0%	√
	隔离/邻近指数	建成区之间隔离或邻近状况			20.0%	
形状结构类	周长面积比 (PARA)	建成区周长面积比			13.3%	
	形状指数 (SI)	建成区与相同面积的圆或正方形之间的偏离程度	√		13.3%	
	面积加权的形状指数 (AWMSI)	考虑每个斑块面积的形状指数	√	√	33.3%	√
	面积—周长分维度 (PAFRAC)	建成区形状复杂度			20.0%	
	半径维数 (CIRCLE)	比较建成区与其外接圆	√	√	33.3%	√
	延长性指数	建成区形状延长程度			26.7%	

研究极少，所得结论也难以推导出规划策略。此外，既有研究并未形成普适的低碳空间结构结论，研究中所选样本城市的数量、区位和规模等基本条件不同所得分析结果也有所不同，可见低碳的空间结构特征并不能一概而论，县域低碳城镇空间结构则更需要进行针对性的探讨。

为探究面向低碳生活的县域空间结构的规划策略，一方面，我们定性搭建了体现县域生活碳排放、规划内容、空间结构之间作用关系的理论框架，梳理规划通过调整空间结构实现减排的逻辑

关系；另一方面，定量分析了县域空间结构对生活碳排放的影响；最后，结合理论框架找寻规划手段，结合定量分析结论梳理规划导向，归纳了县域低碳空间结构的规划策略。

## 2 “县域城镇空间结构—国土空间规划—生活碳排放”的理论框架

目前，城市空间结构 (Urban Spatial Structure) 尚未形成统一的含义和研究框架。城市规划领域中，Webber 和 Bourne 界定城市空间结构为城市要素的

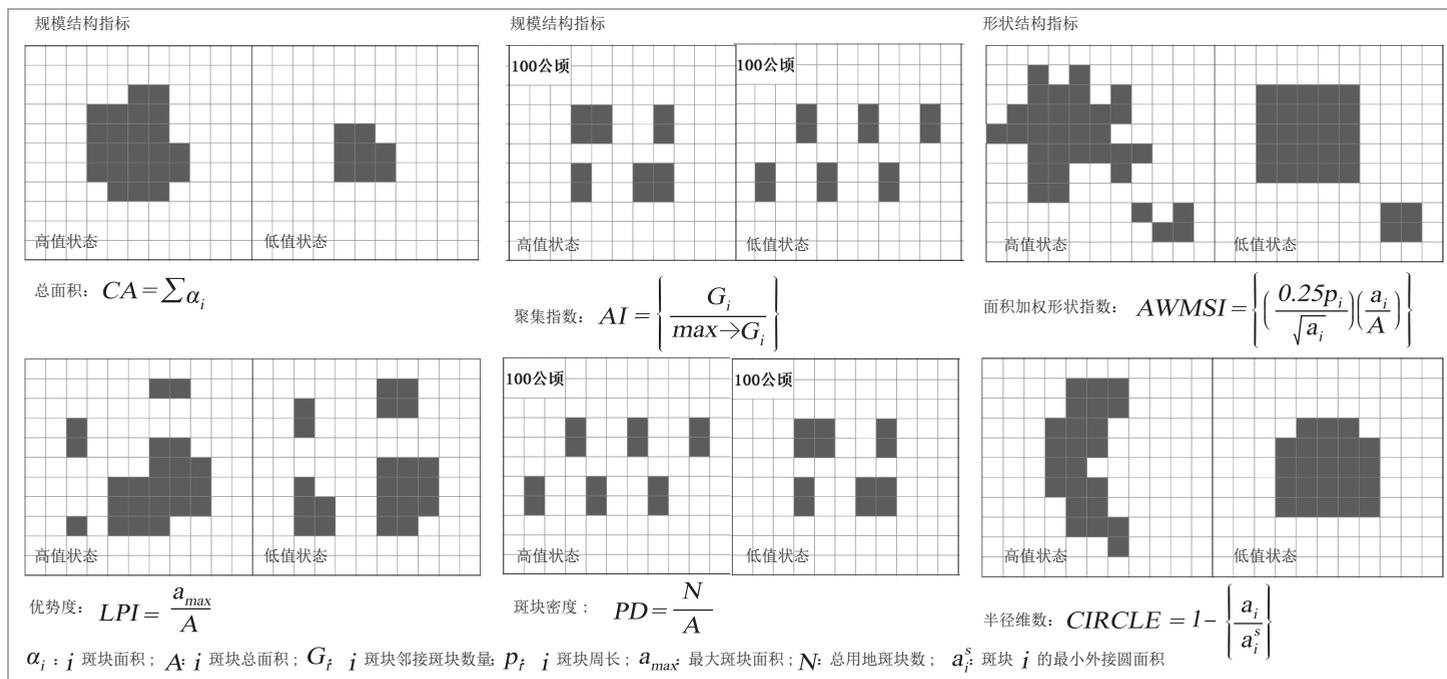


图 2 所选空间结构指标含义的图示表达及计算公式

空间分布模式和相互作用形式<sup>[20-21]</sup>。此后，一些学者根据中心地理论、空间布局理论等，从定性角度探讨了“中心—腹地结构”等空间结构类型，但无法测度的定性特征不适用于大样本实证分析；在定量研究中，一些学者基于空间扩散理论测度人口密度、城区半径和用地规模 3 项空间结构特征<sup>[22-23]</sup>。近年来，“空间度量”理论 (Spatial metric) 也广泛应用于城市空间结构测度中<sup>[24-26]</sup>，颜文涛等人将有环境绩效的空间度量指标归纳为规模、形态和用地类型 3 类。由此可见，既有研究中可度量的空间结构要素可归纳为规模结构 (反映数量与比例)、形态结构 (反映密度和集聚度)、形状结构 (反映边界形状) 和用地结构 (反映用地混合度)。其中，用地结构虽然可度量，但对数据量要求较高，多用于小样本地区对比分析，因此本文研究只探讨其余 3 个维度。

县域城镇空间结构、国土空间规划和生活碳排放之间存在着一定的关联机制。一方面，规划对空间结构以上 3 个维度均具备有效的调控作用：县域国土空间开发适宜性评价根据一系列评价指

标 (用地紧凑度等) 判断适宜建设区，评价指标的选取及判定标准对城镇形态结构构成调控作用，评价结果在一定程度上约束了规模结构；依据“双评价”裁剪的剩余城镇空间，规划进一步通过城镇开发边界划定，尤其是集中建设区划定来管控县域城镇空间的形状结构；在开发边界内进一步编制的城乡居民点格局优化方案，则主要通过镇村体系规划管控县域城镇空间规模结构，通过村庄布点等规划管控形态结构。

另一方面，县域城镇空间结构通过影响住宅能耗和交通出行两个方面间接影响生活碳排放：城镇空间规模结构、形态结构更多是通过影响热岛效应、能源输配效率等影响居民的住宅能耗碳排放<sup>[27]</sup>；县域城镇空间的规模结构、形态结构和形状结构 3 个维度共同影响居民的出行频率、出行距离及采取的出行方式等出行特征，从而影响居民的交通出行碳排放<sup>[28-30]</sup>。

基于所述关联机制，搭建描述县域生活碳排放、城镇空间结构和国土空间规划之间逐层制约关系的理论框架 (图 1)，该框架既描述了三者之间的作用关系，也

反映出了居民生活减排约束下的县域国土空间规划可能存在的优化需求。

为便于归纳面向低碳生活的县域城镇空间结构的优化方向，参考既有研究结论，针对县域空间结构对碳排放的影响提出 4 个假设：①县域城镇空间结构对生活碳排放存在显著影响；②低碳约束下县域城镇空间存在较优的规模结构格局；③紧凑、集约的形态结构有利于生活减排；④规整的用地边界形状有利于生活减排。下文拟通过实证分析验证上述假设。

### 3 研究方法

#### 3.1 空间结构指标选取与计量

研究借鉴国外城市空间结构研究中广泛应用的“空间度量”指标体系，以实现空间结构指标的定量测度。将“空间度量”体系主要指标按照县域城镇空间结构特征 3 个维度进行整理<sup>[31]</sup>。在每维度要素中依据 3 个原则选取用于实证研究的指标：一是保证指标在城市空间结构测度研究中的认同度，所选取的指标在参考的 10 篇国外文献和 5 篇

国内文献<sup>[2, 13, 19-23, 31, 34-40]</sup>中引用率应高于30%；二是县域层级空间结构描述的适用性，选择既参考了一些既有文献推荐的指标<sup>[32-33]</sup>，也结合县域的特殊性，考虑指标对县域空间结构描述的准确性，如选择基于面积加权的形状指数(AWMSI)可以避免因小规模、零散建设用地斑块的形状指数而造成的整体偏差；三是国土空间规划的可控性，其可依据规划对县域城镇空间结构的约束内容来判断。县域城镇空间结构指标的选取如表1所示。

最终共有符合3个原则的6项指标被用以描述县域城镇空间结构特征，每个维度下正好包含2项指标，每项指标的描述内容、计算公式及含义的图示如图2所示：规模结构指标为总面积(CA)和优势度(LPI)，分别描述了县域城镇规模和县城区首位度；形态结构指标为斑块密度(PD)和聚集指数(AI)，分别描述了固定面积中的用地斑块密度和集聚度；形状结构指标为面积加权的形状指数(AWMSI)和半径维数(CIRCLE)，分别描述了用地斑块形状的规整度和狭长程度。

### 3.2 县域生活碳排放估算

受到空间结构影响的生活碳排放包括住宅碳排放和交通碳排放两部分，采用2006年《IPCC国家温室气体排放清单指南》中推荐的排放因子法，通过能源终端消费量估算县域生活碳排放量。居民住宅能耗碳排放主要来自电力、燃气和热力消费，可通过以上能源消费量数据进行估算<sup>②</sup>；由于县域居民交通燃料消耗数据不完整，则可通过民用机动车保有量折算交通能源消耗<sup>[41-42]</sup>。因此县域居民生活碳排放计算公式为：

$$HCE = C_{house} + C_{traffic} \quad \text{公式①}$$

式中： $HCE$ 为县域居民生活碳排放总量， $C_{house}$ 与 $C_{traffic}$ 分别为住宅碳排放量和交通碳排放量。

采用2006年《IPCC国家温室气体排放清单指南》中推荐的排放因子法，通过能源终端消费量估算县域生活碳排放

量。居民住宅能耗碳排放主要来自电力、燃气和热力消费，可通过居民煤气、天然气、液化石油气、蒸汽、热水、用电量6类能源消费数据估算<sup>②</sup>，公式为：

$$C_{house} = \sum_{i=1}^6 F_i \times NVI_i \times EF_i \quad \text{公式②}$$

式中： $F_i$ 为县域居民对6类能源的消费量； $NVI_i$ 为6类能源发热值， $EF_i$ 为6类能源碳排放因子。

县域居民交通燃料消耗数据不完整，可通过民用机动车保有量折算交通能源消耗<sup>[41-42]</sup>，公式为：

$$C_{traffic} = PVC \times AAM \times AFC \times NVI_7 \times EF_7 \quad \text{公式③}$$

式中： $PVC$ 为民用汽车保有量， $AAM$ 为年平均行驶里程， $AFC$ 为平均油耗， $NVI_7$ 与 $EF_7$ 分别为汽油发热值和碳排放因子。

### 3.3 实证分析方法

由于难以获取全部县域的数据，且需保证定量分析的准确性和普适性，拟通过分层抽样法选取县域样本。实证分析过程如下：①对全国县域进行分层抽样并获取

样本数据；②通过双变量相关分析建立空间结构指标与生活碳排放的相关关系，并通过曲线估计、局部加权回归做进一步验证。③结合传统IPAT模型建立描述空间结构指标对碳排放综合影响的多个回归模型，比较多指标的综合影响力。

根据kaya恒等式<sup>③</sup>，采用人口规模、发展阶段两个要素分层抽样。人口规模分层方法依据2014年《关于调整城市规划标准的通知》；发展阶段分层方法采用我国第七个五年计划时期提出的东、中、西3大经济区划分方法。截至2015年末，我国县级行政单位共1929个，按照分层抽样方法逐层随机抽取3%的样本，共得到60个县域样本(表2)。

### 3.4 数据来源与变量描述

县域民用机动车保有量数据来源于各县2015年《国民经济与社会发展统计公报》；居民生活的燃气、热力与电力能源消耗量数据来源于《中国县城建设统计年鉴(2016)》；社会经济数据来源于《中国县(市)社会经济统计

表2 样本选取结果

经济区	人口规模	样本数	人口规模	样本数	小计
东部	0~20万	2	20~50万	7	20
	50~100万	8	100万以上	3	
中部	0~20万	5	20~50万	9	22
	50~100万	7	100万以上	0	
西部	0~20万	5	20~50万	7	18
	50~100万	4	100万以上	1	
合计					60

表3 变量描述性统计

变量	均值	最大值	最小值	标准差
面积指数 CA(hm <sup>2</sup> )	14 033.77	35 437.95	3 317.76	7 478.29
优势度 LPI (%)	3.69	24.09	0.20	4.39
聚集指数 AI (%)	84.41	92.48	73.34	4.73
斑块密度 NP(个/平方千米)	0.03	0.08	0.01	0.02
面积加权形状指数 AWMSI	6.43	19.39	2.00	3.35
半径维数 CIRCLE	0.427 660	0.670 9	0.137 8	0.126 192 6
生活碳排放量(万吨)	48.67	233.04	5.90	39.39

表4 县域空间结构指标与生活碳排放双变量相关分析结果

		CA	LPI	PD	AI	AWMSI	CIRCLE	HCE
CA	Pearson 相关性	1.000	0.037	0.334*	-0.035	0.189	0.109	0.463**
	Sig. (双侧)	—	0.781	0	0.793	0.148	0.407	0
LPI	Pearson 相关性	0.037	1.000	0.311*	0.548**	0.701**	0.634**	0.388**
	Sig. (双侧)	0.781	—	0.015	0	0	0	0.002
PD	Pearson 相关性	0.334*	0.311*	1.000	-0.131	0.102	0.207	0.292*
	Sig. (双侧)	0	0.015	—	0.317	0.436	0.113	0.024
AI	Pearson 相关性	-0.035	0.548**	-0.131	1.000	0.565**	0.700**	0.503**
	Sig. (双侧)	0.793	0	0.317	—	0	0	0
AWMSI	Pearson 相关性	0.189	0.701**	0.102	0.565**	1.000	0.728**	0.417**
	Sig. (双侧)	0.148	0	0.436	0	—	0	0.001
CIRCLE	Pearson 相关性	0.109	0.634**	0.207	0.700**	0.728**	1.000	0.404**
	Sig. (双侧)	0.407	0	0.113	0	0	—	0.001
HCE	Pearson 相关性	0.463**	0.388**	0.292*	0.503**	0.417**	0.404**	1.000
	Sig. (双侧)	0	0.002	0.024	0	0.001	0.001	—

注: \*\*. 在 0.01 级别 (双尾), 相关性显著。\*. 在 0.05 级别 (双尾), 相关性显著。

表 5 双变量最优拟合结果

维度	指标	最优拟合结果	R2	F	Sig.
规模结构	CA	“N”型曲线	0.377	11.288	0.000
	LPI	线性	0.287	23.301	0.000
形态结构	PD	线性	0.085	5.399	0.024
	AI	“U”型曲线	0.362	16.136	0.000
形状结构	AWMSI	线性	0.353	31.589	0.000
	CIRCLE	增长曲线	0.318	27.067	0.000

年鉴(2016)》。空间度量指标数据应用 Fragstats4.2 软件计算得到,生活碳排放量依据公式(1)、公式(2)、公式(3)估算,变量描述性统计如表3所示。

## 4 县域空间结构对生活碳排放的影响分析

### 4.1 单指标影响分析

县域空间结构6个指标和生活碳排放(表中简称为“HCE”)的双变量相关分析结果如表4所示,可以推断:①一般认为成对自变量指标的 Pearson 相关性超过0.8时,自变量之间存在高度相关关系<sup>[43]</sup>,表4中成对空间结构指标的 Pearson 相关性均满足条件,故所选指标无需做进一步排除;②县域城镇空间结

构指标体系中的所有指标均与生活碳排放存在显著相关关系,其中,斑块密度(PD)指标在0.05级别显著正相关,其余5个指标均在0.01级别显著正相关。

由于双变量散点图显示部分指标与碳排放之间可能存在非线性相关,为了探讨更准确地相关关系,我们进一步采用了曲线估计模型进行分析,将6对双变量多种曲线拟合的显著性系数(sig.)、判定系数(R2)、检验值(F)3项参数进行综合比较,6对双变量的最优拟合结果如表5所示。同时,对6对双变量进行局部加权回归(LOESS),以更好地判断指标的影响趋势,最优拟合曲线及LOESS曲线如图3所示。

在规模结构维度中,面积指数(CA)指标的拟合结果为三次函数“N”型曲线,

因此存在最优规模,这与一些学者针对人口规模开展的研究结论相似<sup>[44-45]</sup>。根据“CA-HCE”曲线,建设用地开发可分为扩张、优化和蔓延3个阶段,且多数县域处于扩张或优化阶段:扩张阶段即城乡建设初期,建设用地扩张伴随着人口的快速增长,居民生活能源消费方式较粗放,生活碳排放随之增长;优化阶段即当建设用地规模高于100km<sup>2</sup>时,随着设施建设逐渐完备,建成区扩张对碳排放开始有了较弱的逆向影响,至200km<sup>2</sup>左右时出现较优规模;蔓延阶段即当面积指数高于200km<sup>2</sup>时,交通效率低下等问题的涌现导致碳排放增加。优势度(LPI)指标的拟合结果为线性正相关,这与城乡规划倡导的多中心发展理念相契合,随着县城区建设用地面积比例的增加,县域形成的单中心空间结构降低了居民通勤、获取设施的出行效率,增加了设施的建筑能耗。因此假设②得到验证,县域建设用地规模约200km<sup>2</sup>时的多中心结构可能为较优规模结构。

在形态结构维度中,聚集指数(AI)指标的拟合结果为“U”型曲线,这与一些大中城市尺度研究得出的正向影响结论不同<sup>[46]</sup>。由于县域建设水平较低,当聚集指数小于30时,零散建设用地的逐渐集聚可使居民的生活能源效率有所提高,进而逆向作用于生活碳排放,而多数城市已越过聚集指数较低的状态,即聚集指数高于30时,用地斑块蔓延相接,规模扩张导致生活碳排放增长。事实上,多数县域也已处于正向影响阶段。斑块密度(PD)指标对碳排放存在较为平缓的正向线性相关关系,即分散的、倾向于不连续的跨越式发展更易造成高碳排放,这与城市尺度研究一致<sup>[4, 35]</sup>,指标值高于0.4时该正向影响趋于不显著。因此,假设③仅在聚集指数高于30时且斑块密度低于0.4时成立。

在形状结构维度中,形状指数(AWMSI)的拟合结果为线性相关,这与 Satoshi Ishii 针对大城市的研究结果相同。

事实上, 复杂的建设用地形状往往出现在城镇发展初期<sup>[39]</sup>, 这可能导致建筑供热、供电等能源管网及交通设施被迫采用相对低效的铺设方式, 增加了生活碳排放。相对而言, 半径维数(CIRCLE)对生活碳排放的影响程度更高, 狭长的用地开发模式更不利于节能减排。因此假设④成立, 趋于圆形的、规整的用地开发模式更有利于实现县域低碳发展。

#### 4.2 指标综合影响分析

除了受城镇空间的影响外, 县域碳排放的变化必然还受到一系列社会经济因素的影响。Commoner B所提出的经典IPAT模型即阐释了人口、财富与环境压力的关系, 公式如下:

$$I = P \times A \times T \quad \text{公式④}$$

式中:  $I$  为环境压力,  $P$  为人口规模,  $A$  为富裕度, 可以人均GDP衡量;  $T$  为单位生产总值带来的环境压力, 可以单位GDP碳排放量衡量。

为了进一步理解城镇空间结构因素对生活碳排放的综合影响, 拟基于IPAT模型, 采用县域社会经济发展数据和碳排放效率数据等估算一系列回归模型。通过逐步合并空间结构的3个维度扩展IPAT模型, 得到4个回归模型(这里称为模型I至模型IV), 通过多模型对比(表6), 可以明确县域城镇空间结构存在对生活碳排放的综合影响, 进一步判断在社会经济发展水平等主要因素的影响下, 对生活碳排放影响最大的县域空间结构的维度, 以及空间结构对碳排放的综合影响程度和影响方向。

模型I表示当回归模型只考虑社会经济和能效因素的影响时, 传统IPAT模型变量均对生活碳排放量有着显著的正向影响。模型II中形态结构解释变量的加入使得回归模型对县域样本碳排放的解释程度由54.6%增至约70.0%, 这在县域层面印证了Ewing和Rong的既有研究结论, 且形态结构指标回归系数高于人口规模指标回归系数。模型III中纳入

了形状结构变量, 发现当考虑指标综合影响时, AWMSI指标对碳排放的影响更为主要, CIRCLE指标对碳排放有负向影响但并不显著, 这与Mingshu Wang等在城市尺度的研究结论不尽相同, 此时模型可以解释72.1%的碳排放量。模型IV中增加了规模结构变量, 此时模型可以解释为78.3%的县域样本碳排放, 社会经济因素对碳排放的影响系数有所降低, 形态结构指标影响系数提升; 规模结构指标对碳排放存在显著的综合影响, 但县城区规模首位度指标的影响方向为负向。虽然这与县城区规模首位度单指标影响分析结果相反, 但与Veneri等人

的研究达成一致, 表明在紧凑形态和多中心结构之间存在潜在的最优权衡。此外, 对比模型IV中各维度指标的影响系数和显著性可以发现, 县域空间形态结构与规模结构要素对生活碳排放的影响高于形状结构, 应给予其更高的优先性和关注度。

总体上看, 纳入空间结构指标的回归模型显著性水平有明显提升, 即在考虑传统社会经济影响因素时, 县域城镇空间结构对生活碳排放仍存在显著的综合影响, 假设①成立, 且这与一些城市层级的研究结论一致<sup>[46]</sup>, 即在城市层级的研究结论一致。

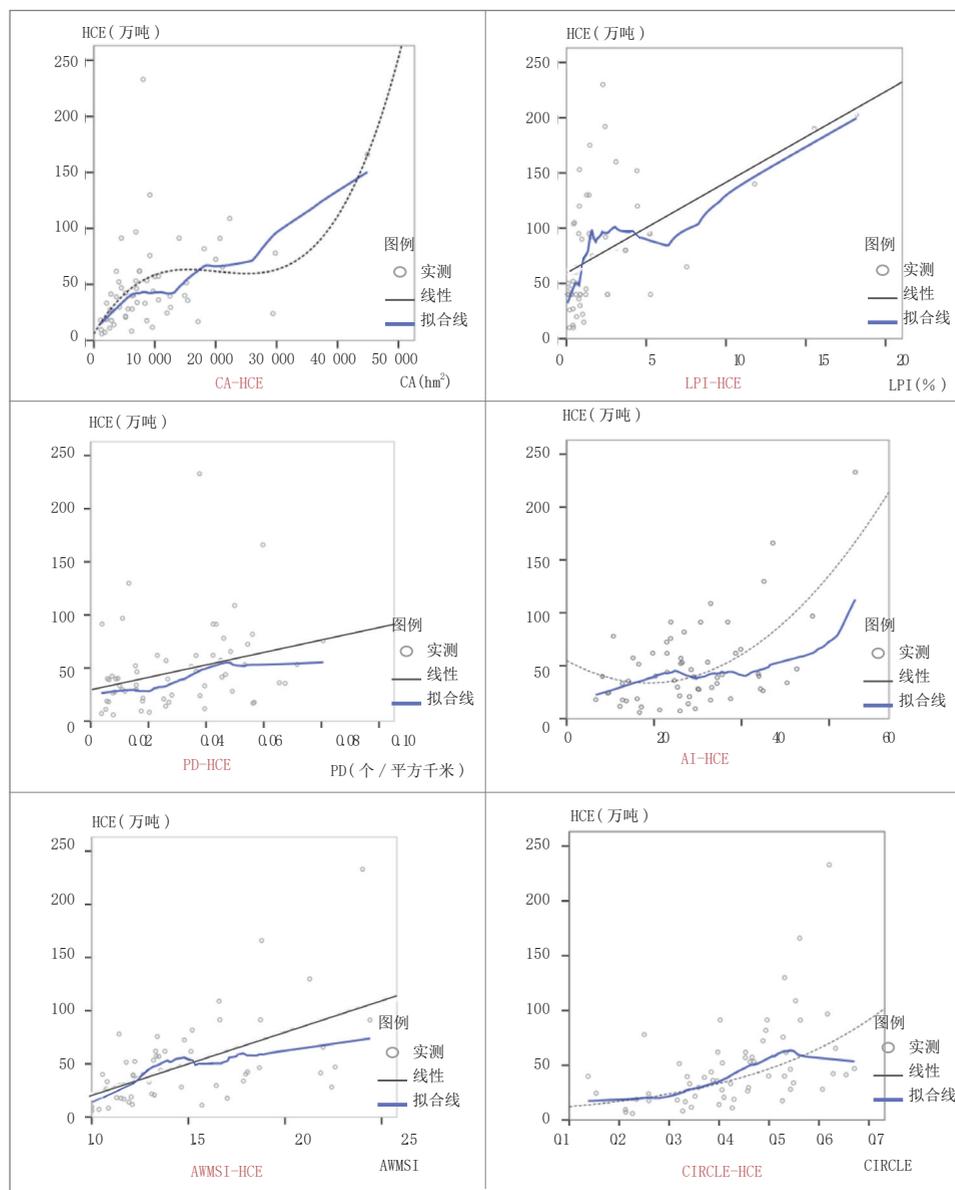


图3 双变量最优拟合曲线及局部加权回归曲线

表 6 扩展空间结构变量的 IPAT 回归模型

指标	模型 I	模型 II	模型 III	模型 IV
传统 IPAT 模型变量				
人口规模	0.415 (0.000***)	0.297 (0.001***)	0.286 (0.004***)	0.207 (0.027**)
人均 GDP	0.734 (0.000***)	0.570 (0.000***)	0.501 (0.000***)	0.317 (0.008***)
万元 GDP 碳排放量	0.431 (0.000***)	0.356 (0.000***)	0.342 (0.000***)	0.359 (0.000***)
形态结构变量				
AI		0.314 (0.003***)	0.376 (0.004***)	0.478 (0.000***)
PD		0.337 (0.000***)	0.366 (0.000***)	0.391 (0.000***)
形状结构变量				
AWMSI			0.263 (0.085*)	0.341 (0.028**)
CIRCLE			-0.268 (0.102)	-0.238 (0.120)
规模结构变量				
CA				0.116 (0.079*)
LPI				-0.234 (0.016**)
R2	0.546	0.700	0.721	0.783

注：\*\*\* 显著性水平为 0.001；\*\* 0.05；\* 0.1。

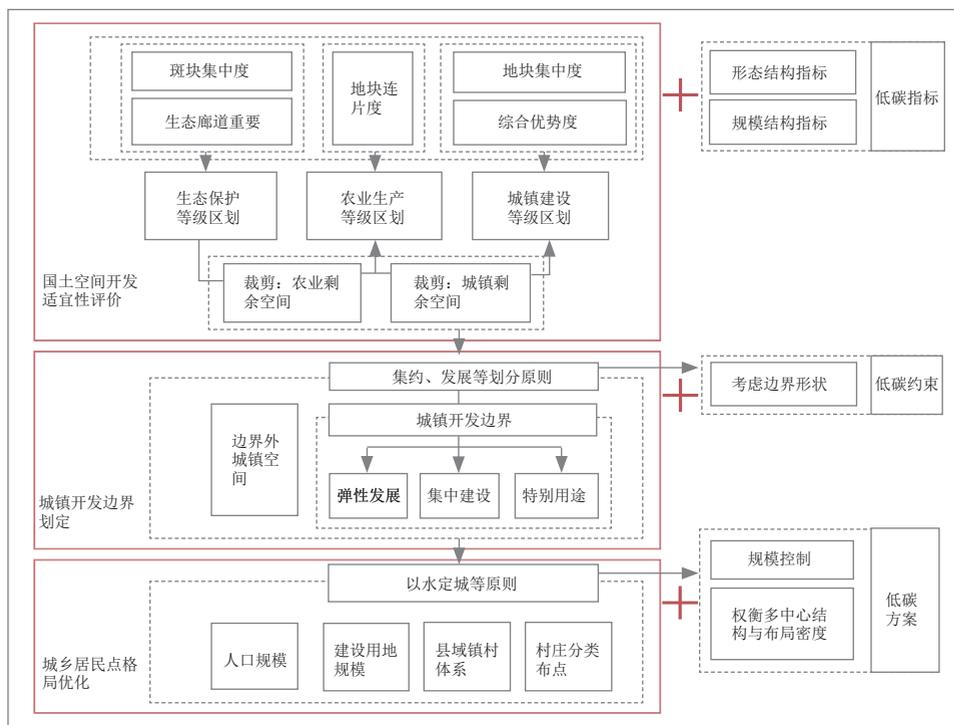


图 4 面向低碳生活的县域空间结构规划优化

## 5 面向低碳生活的县域空间结构优化策略

根据前文搭建的理论框架，针对面向低碳生活的县域国土空间规划的 3 个过程提出优化策略（图 4），且重点考虑用地斑块集聚度、县城区规模首位度等高影响系数指标的低碳优化。

首先，可将城镇空间规模结构、形态结构维度的部分指标（如用地斑块集聚度指标、县城区规模首位度指标等）纳入县域国土空间开发适宜性评价体系中，形成低碳约束下的城镇建设等级区划。在该评价过程中，通常考虑地块集中度、综合优势度等评价指标，判断集中连片的用地斑块为适宜建设区，以帮助地区

形成高集中度的形态结构，这符合用地斑块密度（PD）的低碳优化方向，然而用地高度集聚不一定有助于县域低碳发展，当县域用地斑块聚集指数（AI）小于 30 时应提倡集聚，而当该指数高于 30 时则需结合县城区规模首位度情况综合判断是否应考虑多中心发展。因此，将部分指标纳入县域国土空间开发适宜性评价体系可以帮助县域形成低碳空间结构基础。

其次，可考虑开发边界形状复杂度对低碳发展的影响，尽可能地划定趋于圆形的、规整的县域城镇开发边界。在考虑指标综合影响时，形状结构影响系数及显著性相对较低，且由于城镇开发边界的形状易受地形、自然环境等因素的约束，因此，在县域基本条件允许的前提下，应尽可能保证县域整体形状结构的规整。

最后，可在编制城乡居民点格局优化方案时，将低碳约束下的规模结构和形态结构规划原则纳入考虑范围。一方面，为形成低碳规模结构，既要根据“CA-HCE”曲线制定差异化的县域规模结构管控标准：对于规模地域 100 km<sup>2</sup>、处在城镇开发初期的县域，应结合发展需求弹性控制规模增长；而对于目前规模位于优化阶段而未进入蔓延阶段、处在规模约束关键时期的多数县域，则应将最优规模（即用地规模约 200 km<sup>2</sup>）作为重要的管控标准。也要根据“LPI-HCE”曲线，在镇村体系规划中注重对县城区规模首位度的控制，合理培育“多中心、组团式”的空间格局，目前大部分县域的县城区规模首位度还处于较低水平，因此存在较高的减排潜力。另一方面，为形成低碳形态结构，可根据“AI-HCE”的“U”型曲线考虑编制差异化的形态结构方案：对用地斑块集聚指数小于 30 的低建设密度区应整合零散分布的居民点，强调集聚布局；对于目前集聚指数较高的县域，并不应一味追求集中连片形态。相反地，应避免居民点过度整合，适度分散大规模用地以引导居民低碳生活。

## 6 结语

通过对生活碳排放、县域城镇空间结构和国土空间规划三者关联机制的定性探讨和空间结构对生活碳排放影响的定量分析, 得出了关于低碳县域空间结构规划优化的4项结论: (1) 可以考虑对国土空间开发适宜性评价体系的低碳优化。在考虑社会经济和技术因素影响时, 县域城镇空间形态结构和规模结构对生活碳排放的影响依然显著, 可以考虑将相关指标纳入评价体系, 帮助形成低碳空间开发底图。(2) 县域规模结构方案编制可以考虑采用差异化的低碳管控标准。对于多数县域来说, 总建设用地规模约200 km<sup>2</sup>时的多中心结构可能是低碳生活导向下的最优规模结构。规模结构方案编制时可参照最低碳结构, 为不同城镇开发阶段的县域提出差异化的规模结构管控标准。(3) 结合具体情况权衡低碳的居民点布局方案。与大中城市尺度研究所得结论不同, 县域城镇空间形态结构中的聚集指数和斑块密度都仅在一定区间内正向影响碳排放。低碳县域规划可在布局城乡居民点时权衡紧凑形态和多中心结构之间潜在的最低碳模式, 结合具体情况考虑培育“多中心、组团式”空间结构。(4) 可将低碳理念融入城镇开发边界划定原则。县域城镇空间形状结构对生活碳排放的影响相对较低, 低碳规划可在地形和自然资源等条件允许的情况下尽可能划定规整的、近圆形状的城镇开发边界。

研究尝试以县域为基本低碳规划单元, 梳理了通过国土空间规划调整空间结构来推动县域生活减排的这一逻辑链条, 并结合对县域城镇空间结构与生活碳排放关系的分析结果, 推导了面向低碳生活的县域城镇空间结构优化策略, 在一定程度上对过往研究的理论框架和策略性结论做出了补充。不同空间尺度和发展阶段的地区对低碳规划提出的需求不尽相同, 城市低碳空间结构规划策

略并不完全适用于县域, 而对于处在不同地理区位、发展阶段中的县域, 其低碳优化策略也会有所差异, 因此以上基于全国县域样本得出的普适性策略还有待结合特定情况进一步探讨, 以助力我国县域全面形成低碳可持续的空间结构发展模式。

### [注 释]

- ①中国县域人口、经济规模比例根据《中国县(市)社会经济统计年鉴(2016)》统计所得; 中国县域碳排放总量比例, 根据课题组县域碳排放总量估算方法研究成果计算所得。
- ②既有文献显示, 乡镇供热、炊事用能主要来源于煤炭、秸秆燃烧及沼气, 该用能数据无法准确获取, 固不计入统计。
- ③kaya公式为碳排放量=人口×人均GDP×单位GDP能源消耗量×单位能源消耗产生的碳排放量, 表明人口、财富和能源效率是碳排放主要影响因素。由于本研究根据能源消耗估算碳排放, 能源效率对碳排放的影响被削弱而不作考虑。

### [参考文献]

- [1] 刘锐, 窦建奇. 低碳导向下的紧凑城市[J]. 规划师, 2014(7): 79-83.
- [2] Baur A H, Förster M, Kleinschmit B. The Spatial Dimension of Urban Greenhouse Gas Emissions: Analyzing the Influence of Spatial Structures and LULC Patterns in European Cities[J]. Landscape Ecology, 2015(7): 1195-1205.
- [3] Yanchun Yi, Sisi Ma, Shuang Gao, et al. Urban Size and Carbon Emissions: Evidence from 108 Prefecture Cities in China[C]. Proceedings of 2017 5th SSR International Conference on Cultural Studies, Educational Research and Social Sciences, 2017.
- [4] Wang S, Liu X, Zhou C, et al. Examining the Impacts of Socioeconomic Factors, Urban Form, and Transportation Networks on CO<sub>2</sub> Emissions in China's Megacities [J]. Applied Energy, 2017(185): 189-200.
- [5] Zhao P, Diao J, Li S. The Influence of Urban Structure on Individual Transport

Energy Consumption in China's Growing Cities [J]. Habitat International, 2017(66): 95-105.

- [6] Wang M, Madden M, Liu X. Exploring the Relationship between Urban Forms and CO<sub>2</sub> Emissions in 104 Chinese Cities [J]. Journal of Urban Planning and Development, 2017(4): 04017014.
- [7] Lee S, Lee B. The Influence of Urban Form on GHG Emissions in the US Household Sector [J]. Energy Policy, 2014(68): 534-549.
- [8] Makido Y, Dhakal S, Yamagata Y. Relationship between Urban Form and CO<sub>2</sub> Emissions: Evidence from Fifty Japanese Cities [J]. Urban Climate, 2012(2): 55-67.
- [9] Debbage N, Shepherd J M. The Urban Heat Island Effect and City Contiguity [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2015(54): 181-194.
- [10] Zhou W, Huang G, Cadenasso M L. Does Spatial Configuration Matter? Understanding the Effects of Land Cover Pattern on Land Surface Temperature in Urban Landscapes [J]. Landscape and Urban Planning, 2011(1): 54-63.
- [11] 王桂新, 武俊奎. 城市规模与空间结构对碳排放的影响 [J]. 城市发展研究, 2012(3): 89-95, 112.
- [12] 胡杰, 黄经南, 黄瑾, 等. 多中心城市空间结构与家庭碳排放关系研究 [J]. 规划师, 2014(11): 87-92.
- [13] 柴彦威, 肖作鹏, 刘志林. 居民家庭日常出行碳排放的发生机制与调控策略——以北京市为例 [J]. 地理研究, 2012(2): 334-344.
- [14] 仇保兴. 紧凑度与多样性(2.0版)——中国城市可持续发展的两大核心要素 [J]. 城市发展研究, 2012(11): 1-12.
- [15] 王志远, 郑伯红, 陈祖展. 城市空间形状与碳排放强度的相关性研究——基于我国35个城市的分析 [J]. 城市发展研究, 2013(6): 8-15.
- [16] 秦波, 邵然. 低碳城市与空间结构优化: 理念、实证和实践 [J]. 国际城市规划, 2011(3): 72-77.
- [17] 吕斌, 孙婷. 低碳视角下城市空间形态紧凑度研究 [J]. 地理研究, 2013(6): 1057-1067.
- [18] 柴志贤. 密度效应、发展水平与中国城市碳排放 [J]. 经济问题, 2013(3): 25-

- 31.
- [19] 李明峰, 云国梁, 何原荣. 基于城市空间紧凑度与碳排放强度关系分析——以厦门岛为例 [J]. 中南林业科技大学学报 (社会科学版), 2016(6): 10-14.
- [20] Webber M. The Urban Place and Nonplace Urban Realm, in Webber M.M. ET AL. (eds.) *Exploration into Urban Structure* [M]. Philadelphia: University of Pennsylvania Press, 1964.
- [21] Bourne LS. *Internal Structure of the City* [M]. New York: Oxford University Press, 1971.
- [22] 贺艳华, 唐承丽, 周国华, 等. 论乡村聚居空间结构优化模式——RROD模式 [J]. 地理研究, 2014(9): 1716-1727.
- [23] 孙胤社. 城市空间结构的扩散演变: 理论与实证 [J]. 城市规划, 1994(5): 16-20, 64.
- [24] Kotharkar, Rajashree, Pankaj Bahadure, et al. "Measuring Compact Urban Form: A Case of Nagpur City, India." *Sustainability* 6.7 (2014): 4246-4272.
- [25] Yongjiu Feng, Yan Liu. Fractal Dimension as an Indicator for Quantifying the Effects of Changing Spatial Scales on Landscape Metrics [J]. *Ecological Indicators*, 2015: 53.
- [26] 颜文涛, 萧敬豪, 胡海, 等. 城市空间结构的环境绩效: 进展与思考 [J]. 城市规划学刊, 2012(5): 50-59.
- [27] 刘定惠. 城市空间结构对居民通勤行为的影响研究——以成都市和兰州市为例 [J]. 世界地理研究, 2015(4): 78-84, 93.
- [28] Reid Ewing, Fang Rong. The Impact of Urban Form on U.S. Residential Energy Use [J]. *Housing Policy Debate*, 2008(1): 1-30.
- [29] 何舟, 宋杰洁, 孙斌栋. 城市通勤时耗的空间结构影响因素——基于文献的研究与启示 [J]. 城市规划学刊, 2014(1): 65-70.
- [30] Nina Schwarz. *Urban Form Revisited—Selecting Indicators for Characterising European Cities* [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2010(1): 29-47.
- [31] John H. Lowry, Michael B. Lowry. *Comparing Spatial Metrics that Quantify Urban Form* [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2014, 44.
- [32] Herold M, Goldstein N C, Clarke K C. The Spatiotemporal Form of Urban Growth: Measurement, Analysis and Modeling [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013(3): 286-302.
- [33] Justice Nana Inkoom, Susanne Frank, Klaus Greve, et al. Suitability of Different Landscape Metrics for the Assessments of Patchy Landscapes in West Africa [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 85.
- [34] Baur A H, Förster M, Kleinschmit B. The Spatial Dimension of Urban Greenhouse Gas Emissions: Analyzing the Influence of Spatial Structures and LULC Patterns in European Cities [J]. *Landscape Ecology*, 2015(7): 1195-1205.
- [35] Ou J, Liu X, Li X, et al. Quantifying the Relationship between Urban Forms and Carbon Emissions Using Panel Data Analysis [J]. *Landscape Ecology*, 2013(10): 1889-1907.
- [36] Abrantes P, Rocha J, Marques da Costa E, et al. Modelling Urban Form: A Multidimensional Typology of Urban Occupation for Spatial Analysis [J]. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2019(1): 47-65.
- [37] Huang J, Lu X X, Sellers J M. A Global Comparative Analysis of Urban Form: Applying Spatial Metrics and Remote Sensing [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2007(4): 184-197.
- [38] Debbage N, Bereitschaft B, Shepherd J M. Quantifying the Spatiotemporal Trends of Urban Sprawl among Large US Metropolitan Areas via Spatial Metrics [J]. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 2017(3): 317-345.
- [39] Triantakoustantis D, Stathakis D. Examining Urban Sprawl in Europe Using Spatial Metrics [J]. *Geocarto International*, 2015(10): 1092-1112.
- [40] 杨磊, 李贵才, 林姚宇. 影响城市居民碳排放的空间形态要素 [J]. 城市发展研究, 2012(2): 26-31.
- [41] 方晓丽, 骆勇. 城市交通碳排放计算方法比较研究 [J]. 交通节能与环保, 2017(4): 81-83.
- [42] 柴泾哲. 城市交通能耗及碳排放测算研究 [J]. 价值工程, 2015(7): 243-244.
- [43] Marques da Costa E, Rocha J, Rodrigues M. Urban form analysis employing land cover and spatial metrics ——The Case of the Lisbon Metropolitan Area [C]. 5th International Conference Virtual City and Territory, 2009.
- [44] 易艳春, 关卫军, 胡宏昌. 低碳约束下的我国最优城镇规模研究 [J]. 城市发展研究, 2015(5): 31-37, 70.
- [45] 王钦池. 城市规模、城市化率与碳排放关系研究——基于近半世纪161个国家的数据 [J]. 西北人口, 2015(3): 1-5, 12.
- [46] 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(17): 6302-6313.

[收稿日期] 2020-11-03