

城市空间形态影响碳排放吗？ ——基于全国 110 个地级市数据的分析

陈珍启¹, 林雄斌^{1,2}, 李莉¹, 李贵才^{1,2}

(1. 北京大学深圳研究生院 城市规划与设计学院, 广东 深圳 518055;

2. 北京大学 城市与环境学院, 北京 100871)

摘要: 全球气候变化对城市节能减排和低碳发展提出新的要求和挑战, 其中重塑城市空间形态及其内部联系成为降低碳排放的重要空间策略。目前城市形态与能源使用、碳排放之间关系的研究集中于交通及家庭能源消耗等维度, 在城市综合尺度上的研究相对有限。因此, 建立城市层面交通、土地利用等形态结构特征与碳排放之间的关系对理解城市碳排放的影响因素和制定低碳减排措施非常有益。文章首先收集2009年全国110个地级以上非工业城市的能源消耗数据测算人均碳排放强度, 进而引入城市空间格局、土地利用和城市交通结构变量综合表征城市形态, 利用回归模型检验城市形态对碳排放的影响程度, 最后提出“空间—土地—交通”综合系统的低碳发展框架, 以降低城市碳排放水平。

关键词: 碳排放; 城市空间形态; 交通与土地利用

中图分类号: X22; F062.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4407(2016)10-022-05

Does Urban Spatial Morphology Affect Carbon Emission?: A Study Based on 110 Prefectural Cities

CHEN Zhenqi¹, LIN Xiongbin^{1,2}, LI Li¹, LI Guicai^{1,2}

(1. School of Urban Planning and Design, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen Guangdong 518055, China;

2. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Global climate change has brought a new challenge for energy saving, carbon emission reduction as well as low-carbon development. Reshaping the urban spatial morphology and its inner texture has become a significant strategy for carbon emission reduction. Currently, the studies mainly focus on the relationship between urban morphology and household in-home and transportation energy use and emission. The study at the city level is limited. This study aims to establish the relationship between a city's general carbon emission and its spatial morphology characteristics which would help us understand the factors that affect a city's carbon emission and thus facilitate policy proposal for carbon emission reduction and low-carbon development. We first calculate the per capita carbon emissions in these cities in 2009 using energy-consumption related data; then the per capita carbon emission is regressed on urban land use and transport-related explanatory variables and spatial pattern index, to find out whether urban morphology affect carbon emission and how. Finally, strategies from the perspective of urban morphology, which include space, land use and transportation factors, for climate change reduction in the cities are given accordingly.

Key words: carbon emissions; urban morphology; transportation and land use

1 引言

越来越多的研究表明人类活动所排放的温室气体对全球气候产生重要影响。作为人口、产业高度聚集的城市区域, 其碳排放构成全球碳排放的主要来源。城市碳排放通常指的是包含城市产业等相关要素在运行过程中产生的 CO₂ 排放总量^[1]。根据估算, 城市区域大约消耗世界 67% 的能源, 并产生 71% 的二氧化碳^[2]。因此, 如何降低城市碳排放、促进低碳城市发展, 成为各国政府及学界关注的焦点。随着人口经济社会的不断发展, 我国已成为世界上的碳排放

大国之一, 2013 年全球 CO₂ 排放总量 361 亿吨, 我国 CO₂ 排放总量高达 100 亿吨, 约占全球排放总量的 1/3^[3]。发达国家主要通过采取税费、信贷或建筑标准等措施控制城市碳排放。作为目前碳排放规模更高和减排压力更大的发展中国家, 我国的节能减排措施受到更多关注。侯建等提出对于中国来说, 推进节能技术的发展、生产节能产品和促进经济发展模式低碳化是一个长期有效的机制^[4]。郭茹等提出“转变经济发展模式, 优化能源结构、提升科技过程及发展低碳经济”等策略^[5]。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41271177)

作者简介: 陈珍启(1991 ~), 女, 硕士生, 研究方向为城市与区域规划; 李莉(1980 ~), 女, 博士, 讲师, 研究方向为资源与环境管理、区域经济、经济地理等。

通讯作者: 李莉 E-mail: lili@pkusz.edu.cn

除了已有研究发现的产业和能源结构对城市碳排放的影响以外,越来越多的研究也关注到了城市空间形态在降低碳排放方面的作用。这里城市空间形态通常被定义为社会经济活动的空间配置,包括空间模式、土地利用方式以及城市交通和基础设施的空间设计^[6]。然而,目前关于城市空间形态与城市能源消耗、碳排放之间关系的研究多集中在交通碳排放、家庭能源消耗等单向维度^[7~9],在城市综合尺度上的研究非常有限。因此,本研究试图进一步验证我国城市空间形态与城市碳排放的关系,并提出基于“空间—土地—交通”综合系统的低碳发展框架,这对降低城市碳排放兼具理论意义与实践价值。

2 城市空间形态与城市碳排放作用机制

已有研究主要从土地利用模式、交通系统结构等方面研究城市空间形态与城市碳排放之间的关系。如 Newman 等发现在小汽车主导的城市,城市密度与土地利用的混合程度是影响城市交通能源消耗的主要因素^[10]。后续的研究也发现城市公共基础设施、人口数量、人均收入、碳税征收、建筑节能以及城市热岛等因素对城市碳排放也有显著影响^[11~16]。尤其是城市空间形态会直接影响人们的出行频率、交通模式等,这些交通行为又进而影响城市碳排放^[17]。一些研究者认为城市规模小、形态紧凑和土地利用集约的空间形态将产生较少的碳排放^[18~19]。如 Christen 等发现城市 50% 以上的碳排放是由城市形态、土地利用混合程度、建筑风格、交通路网和城市绿地影响的^[20]。Kennedy 等发现如果土地利用模式更集约,居民日常的二氧化碳排放量将会更少^[21]。上述研究多是基于交通碳排放或居民碳排放等单项维度,从城市土地利用模式、交通系统结构等层面直接入手,探讨其影响碳排放的机制。这些研究间接证明了城市空间形态对城市碳排放会产生影响,我们可以通过相应城市规划手段和空间组织行为来减少城市碳排放量。少数研究直接探讨城市空间形态与城市碳排放之间的定量关系,研究的结果对于政策制定者制定更加科学有效的低碳城市发展政策措施具有重要意义,然而总体来看相关研究仍显不足。一方面是由于技术手段问题影响了城市碳排放数据及城市空间形态数据的获取,从而影响定量研究;另一方面是对城市空间形态的定量表征尚缺乏统一认识,这也为研究城市空间形态与碳排放之间关系带来障碍。

3 城市空间形态的测度

由于城市空间形态是一个复杂、多元的概念,针对不同的内涵,各研究有不同的指标选取及度量方法,有的研究专注于城市规模、人口、土地等统计数据指标去度量城市空间形态^[14~15];也有一些研究选择城市空间形态的几何指标,如空间格局指标,也称景观格局指标,其可以独

立有效的测度城市社会经济景观^[22~23],也可以用于表征城市空间形态^[24~25],作为测度城市形态的一种微观量化指标^[26~28]。空间格局指标在表征城市空间形态时主要是测度景观格局中斑块的空间形态和模式^[29~30]。然而,空间格局指标很少用在测度与城市能源使用和城市碳排放的关系的研究上,最近一个研究利用空间格局指标测度了珠三角地区的城市形态与碳排放的关系^[31]。

4 数据来源与研究方法

4.1 数据来源

4.1.1 城市碳排放数据

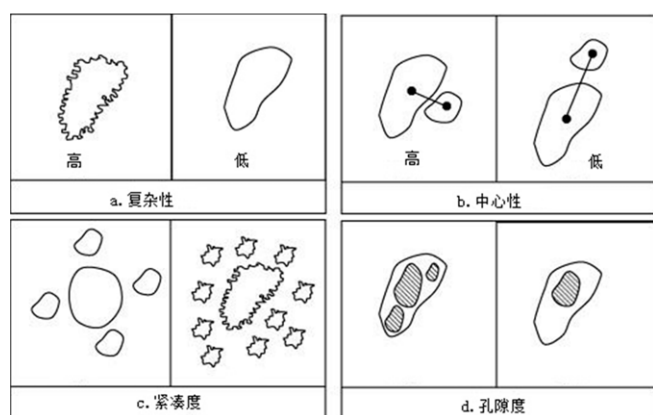
综合国内外的研究来看,在碳排放的测算方法主要有实测法、物料衡算法和排放系数法,其中排放系数法是学术界中较为常用的,也是较为有效的研究方法^[32]。本文中人均碳排放量的数据来源于张旺和邹毓计算的中国 2009 年 GDP 排名前 110 强的地级以上城市(包括市辖区和下辖县市)的城市碳排放量^[33]。其关于各城市二氧化碳排放量的计算是参考《IPCC 国家温室气体排放清单指南 2006》,采用二次能源消费量换算回一次能源消费量的方法。本文研究区样本按照传统的东、中、西三大地带划分,为了控除重工业生产活动对城市碳排放的影响,在样本中剔除了传统高能耗的重工业城市 11 座,剩余样本城市 99 座,其中东部城市 51 座,中部城市 26 座,西部城市 22 座(表 1)。

表1 作为研究对象的样本城市

地区	城市
东部 (51个)	沈阳、大连、石家庄、秦皇岛、邯郸、保定、天津、北京、济南、青岛、淄博、枣庄、烟台、潍坊、济宁、泰安、威海、日照、上海、南京、无锡、徐州、常州、苏州、南通、连云港、扬州、杭州、宁波、温州、嘉兴、湖州、绍兴、台州、福州、厦门、泉州、广州、韶关、深圳、珠海、汕头、佛山、湛江、中山、南宁、柳州、桂林、北海、海口、三亚
中部 (26个)	哈尔滨、牡丹江、长春、呼和浩特、赤峰、太原、阳泉、临汾、合肥、芜湖、马鞍山、南昌、九江、郑州、开封、洛阳、平顶山、安阳、焦作、武汉、宜昌、长沙、株洲、湘潭、岳阳、常德
西部 (22个)	西安、铜川、宝鸡、咸阳、延安、兰州、金昌、银川、石嘴山、西宁、乌鲁木齐、克拉玛依、重庆、成都、攀枝花、泸州、绵阳、宜宾、贵阳、遵义、昆明、曲靖

4.1.2 城市空间形态指标

这里,我们认为城市空间形态相关要素有城市结构、城市空间格局等指标。其中城市结构由土地利用结构、交通系统结构组成,城市空间格局指标由空间形状指数和紧凑度指数等组成(图 1)。土地利用结构这里主要研究建设用地比例和绿地比例对城市碳排放的影响效果。交通系统结构则重点估算私家车、公路里程、客运周转量和轨道交通建设对城市碳排放的影响。形状指数和紧凑度指数根据城市的面积和周长来计算,为了简化研究,本文结合利用 Google Earth 影像图分别计算圆形率和面积—周长的紧凑度。

图1 城市空间格局指标^[34]

计算方式如公式(1)、(2)所示。

$$SHP_i = \frac{4A_i}{P_i * P_i} \quad (1)$$

$$COM_i = \frac{2\sqrt{\pi A_i}}{P_i} \quad (2)$$

其中, SHP_i 和 COM_i 为城市 i 的空间形状指数和紧凑度; A_i 和 P_i 分别为城市 i 的面积和周长, 利用 ArcGIS 进行空间统计和计算。另外考虑到人口和经济规模对城市碳排放的影响, 引入城市规模变量; 考虑到东中西部地区经济、社会、环境及城市建设等方面存在的现实差距, 引入地理区划因素。具体研究变量的类型、名称及含义见表 2。

表2 研究变量的类型、名称和含义

变量类型	变量名称	变量命名与单位
因变量	城市碳排放 (CARBON)	碳排放强度 人均 CO ₂ 排放量 / (吨 / 人)
自变量	1. 城市规模 (SIZE)	城市人口规模 RK : 人口 / 百万; RKR : 人口增长率 / %; $RKMD$: 人口密度 / (人 / km ²) 城市经济规模 $RJJJ$: 人均地区生产总值 / 万元; JJR : 经济增长率 / %; GY : 工业总产值 / 亿元
	2. 地理区划 (LOCATION)	DB : 东部 (0, 1) ZB : 中部 (1, 0) XB : 西部 (0, 0)
	3. 城市结构 (STRUCTURE)	土地利用结构 JS : 建设用地规模 / km ² ; $RJLD$: 人均绿地面积 / m ² ; $JSBL$: 建设用地比例 / %; $LDBL$: 城市绿地比例 / % 交通系统结构 $RJDL$: 人均道路面积 / m ² ; KY : 客运总量 / 亿人; HY : 货运总量 / 亿吨
	4. 城市空间格局 (SHAPE)	空间格局指标 SHP : 形状指数; COM : 紧凑度指数

以上城市碳排放及城市空间形态数据均来自于《中国统计年鉴 2010》《中国城市统计年鉴 2010》《中国城市建设统计年鉴 2010》《中国能源统计年鉴 2010》、各省份统计年鉴 2010、各省份 2009 年国民经济和社会发展统计公报、各城市统计年鉴 2010、各城市 2009 年国民经济和社会发展统计公报等。

4.2 研究方法

在数据收集的基础上, 利用回归模型分析城市空间格局、土地利用和城市交通等城市空间形态要素对城市碳排

放的影响机制, 如公式(3)所示。

$$F(CARBON) = F(SIZE, STRUCTURE, SHAPE, LOCATION) + \varepsilon \quad (3)$$

基于上述理论基础和分析框架, 本文拟提出 4 个假设, 以验证不同要素对城市碳排放的影响机制。

假设 1: 城市规模、城市土地利用和交通结构、城市空间格局均是影响城市碳排放的重要因素, 然而不同类型的要素对城市碳排放的作用方向和影响强度可能会存在差异;

假设 2: 城市规模的增加会导致碳排放增加;

假设 3: 在土地利用系统中, 建设用地规模越大, 城市碳排放越高, 而绿地建设规模能有效减少城市碳排放; 在城市交通系统中, 道路基础设施的增加能显著减少城市碳排放水平;

假设 4: 紧凑型空间格局有利于降低碳排放。

5 “空间—土地—交通”系统与碳排放的关系

运用 SPSS 软件进行多元逐步回归分析, 综合评估了城市规模及城市结构和空间格局等城市形态要素通过土地利用、城市交通等对城市碳排放造成的影响, 结果见表 3。

表3 城市碳排放影响因素的回归分析结果

变量类型	变量名称	变量	系数	变量类型	变量名称	变量	系数
城市规模	人口	$\ln(RK)$	-0.24 (-1.47)**	城市结构	建设用地	$\ln(JS)$	-0.07 (-0.98)
	人口增长率	RKR	-0.02 (-0.21)		建设用地比例	$JSBL$	0.12 (1.63)
	人口密度	$\ln(RKMD)$	-0.09 (-0.98)		人均绿地	$\ln(RJLD)$	0.20 (2.65)
	人均 GDP	$\ln(RJJJ)$	0.52 (3.40)***		绿地比例	$\ln(LDBL)$	0.022 (0.29)**
	经济增长率	JJR	-0.11 (-1.64)		客运总量	$\ln(KY)$	-0.50 (-4.63)***
	工业总产值	$\ln(GY)$	0.16 (0.81)		货运总量	$\ln(HY)$	0.29 (2.81)***
地理区划	东部	DB	-0.28 (-2.41)	F 值	人均道路面积	$\ln(RJDL)$	-0.28 (-3.91)***
	中部	ZB	-0.11 (-1.34)				
城市空间格局	形态指数	SHP	-0.87 (-1.55)	R			0.823
	紧凑度	COM	0.81 (1.44)	R ²			0.677

注: *, ** 和 *** 分别表示在 10%、5% 和 1% 水平上的显著程度。

模型结果表示城市人口规模、人均地区生产总值、城市绿地比例、客运总量、货运总量及人均道路面积等具体变量与城市碳排放之间具有显著关系。其中:(1)城市人口的系数为负, 说明城市碳排放量随着城市人口的增多而减少, 这可能的解释是人口在城市集聚更有利于城市碳排放的集中管理和碳减排规模效益的发挥和提升, 从而使城市碳排放量不增反减。(2)人均地区生产总值与城市碳排放

呈现正相关关系,其原因可能在于人均地区生产总值越高的地区一般能源消耗也较多,产生的碳排放量自然就比较多了。(3)城市绿地比例对城市碳排放有负向作用,即城市绿地比例越高,城市碳排放越少,这主要是因为城市绿地是城市区域中唯一的自然碳汇,对于吸收二氧化碳,减少城市热岛效应有明显的积极作用,正因为如此,增加城市中的绿地面积能够有效减少城市碳排放。(4)对于客运总量的系数为负,这与我们的预期结果存在矛盾,可能的解释是在一定程度上客运总量的上升意味着私家车使用的减少,从而减少了城市碳排放。(5)而货运总量这一变量的系数为正,货运量增多一方面说明城市物资生产较多,能源消耗多,导致城市碳排放增多,另一方面,货运量增多也会增加对货运交通工具的使用,从而增加碳排放。(6)最后人均道路面积与城市碳排放成负相关关系,与预期结果一致,人均道路面积在一定程度上反映了城市交通的便捷程度,及人均道路面积越大即说明城市交通便捷程度越高,减少了人们的出行次数,改变了人们的出行方式,降低了城市的碳排放量。(7)而对于城市空间格局变量如城市形状指数、城市紧凑度指数等,并没有表现出明显相关关系,可能的解释是因为这些变量的影响明显不及经济社会和交通系统对城市碳排放的影响,说明当前城市碳排放主要还是来自于城市生产、交通等领域,亦或是目前的经济生产和能源消耗并未按照城市形态与功能经济布局。

6 结论与建议

6.1 结论

基于上述研究结果,本文给出结论如下:(1)城市结构和城市规模目前是影响城市碳排放的重要因素,然而不同类型的要素对碳排放的作用方向和影响强度存在差异;(2)城市规模如人口规模的扩大、集聚有利于降低城市碳排放水平,而经济规模如人均地区生产总值的增大则会导致城市碳排放增加;(3)在城市土地利用系统中,建设用地规模越大,城市碳排放越高,而绿地的建设则能有效减少城市碳排放水平。在城市交通系统中,道路基础设施的建设能显著降低城市碳排放水平;(4)城市空间格局如城市形状和紧凑度未显示能明显降低城市的碳排放水平。

6.2 建议:“空间—土地—交通”低碳发展框架

低碳约束下的城市空间形态发展已成为当前城市化与气候变化研究最热点的领域之一。城市空间形态发展通过引导土地利用方式调整、公共设施共享效率提升和城市交通体系重构,对城市碳排放产生重要影响。城市空间形态受多种因素影响,很重要的一方面就是城市规划通过限定城市建成区的面积、土地利用类型及布局、交通网的规划等对城市空间形态进行调控。因此,我们要从城市空间形


态角度综合考虑城市建设、城市交通及土地利用等政策和规划的协调发展,建立起“空间—土地—交通”综合框架的低碳城市发展策略,从而控制城市污染、减少城市碳排放^[35~37]。

(1)根据城市人口与城市碳排放成负相关,我们应合理地控制城市人口规模,并不要一味地反对建立“特大城市”,特大城市只要有良好的功能分区,良好的产城互动,在一定程度上是有利于土地的集约化使用,便于城市碳排放的集中管理和发挥出碳减排的规模效益,从而有利于减少城市碳排放。

(2)根据人均国民生产总值与城市碳排放成正相关关系,我们应意识到我们所处的已经是信息时代,产业形态和经济结构要求城市形态、城市结构和布局也要随之调整完善,主要表现在传统的加工业、制造业等“三高—低”(高投入、高能耗、高污染、低效益)产业不可能长期作为城市的主导产业,城市规划和布局不能以此为导向,城市形态要更好地引导低碳经济的发展。

(3)根据绿地面积比例对城市碳排放有负向作用,我们建议在城市建设时应通过多种渠道扩大城市绿地比例,例如城市征地尽可能避免对森林和耕地的占有,组团之间保留水体、农田、林地、湿地等绿色自然隔离地带和生态景观,且可通过设置绿色隔离带(绿林)控制城市“摊大饼”式外延。

(4)根据城市人均道路面积与城市碳排放成负向相关关系,我们建议应加大城市建设的道路网密度,增加可达性。城市道路系统结构是城市形态影响城市碳排放最重要的途径,这里主要说明两点,一是要增加可达性,城市控制性详细规划编制过程中,地块功能分区必须与该地区公共交通的可达性水平结合起来,公共交通可达性高的地块,配备完善的服务性设施,如城市购物中心,并设立多个城市组团,保证每个组团人们生活等日常基本活动能够“步行可达”,保证城市能长期低能耗运转。且城市公共设施的建设必须与公共交通系统结合起来,避免在城市公共交通服务低水平的地区建设城市公共设施。二是城市形态的建设要体现出鼓励发展公共交通,慢行交通。可通过加大公共交通如轨道交通的路网密度。轨道交通不仅对减少城市碳排放有明显的直接作用,且轨道交通的建设对城市空间结构的调整起到十分重要的作用,我们在城市空间规划和交通规划中都必须对此有积极的响应,以充分利用轨道交通引导形成有利于可持续发展的城市的空间结构。同时以良好步行环境为导向的开发建设要优先于以方便小汽车适用为导向的开发建设。高密度,小街区的设计有利于非机动化的交通出行,通过城市设计、交通规划和土地的混合使用继续保持较高

的非机动化出行的比例,对减少二氧化碳温室气体的排放,保持城市生态环境具有十分重要的意义。

致谢:湖南工业大学教师、助理研究员张旺博士提供了中国(110个地级市)城市碳排放数据,推进了本论文的完成,特此致谢。

参考文献:

- [1] Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, et al. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change 2007 [M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [2] IEA. World energy outlook 2008 [R]. IEA, Paris, 2008.
- [3] Olivier J G J, Janssens-Maenhout G, Muntean M, et al. Trends in global CO₂ emissions: 2014 report [R]. Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2014.
- [4] Hou J, Zhang P, Tian Y, et al. Developing low-carbon economy: Actions, challenges and solutions for energy savings in China [J]. Renewable Energy, 2011, 36(11): 3037-3042.
- [5] Guo R, Zhu Q, Cao X, et al. GIS-based carbon balance assessment and its application in Shanghai [J]. American Institute of Physics Conference Series, 2010, 1251(1): 246-251.
- [6] Tsai Y H. Quantifying urban form: Compactness versus 'sprawl' [J]. Urban Studies, 2010, 42(1): 141-161.
- [7] 马静, 柴彦威, 刘志林. 基于居民出行行为的北京市交通碳排放影响机理[J]. 地理学报, 2011(8): 1023~1032.
- [8] 秦波, 戚斌. 城市形态对家庭建筑碳排放的影响——以北京为例[J]. 国际城市规划, 2013(2): 42~46.
- [9] 郑思齐, 霍焱. 低碳城市空间形态: 从私家车出行角度的研究[J]. 世界经济文汇, 2010(6): 50~65.
- [10] Newman P, Kenworthy J R. Cities and automobile dependence: An international sourcebook [J]. Earth, 1989: 388.
- [11] Lee S, Lee B. The influence of urban form on GHG emissions in the U.S. household sector [J]. Energy Policy, 2014, 68(2): 534-549.
- [12] Makido Y, Dhakal S, Yamagata Y. Relationship between urban form and CO₂ emissions: Evidence from fifty Japanese cities [J]. Urban Climate, 2012, 2: 55-67.
- [13] 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, 28(28): 1889-1907.
- [14] Sharifi A, Chiba Y, Okamoto K, et al. Can master planning control and regulate urban growth in Vientiane, Laos? [J]. Landscape & Urban Planning, 2014, 131: 1-13.
- [15] 周春山, 叶昌东. 中国特大城市空间增长特征及其原因分析[J]. 地理学报, 2013(6): 728~738.
- [16] 吴婵丹, 陈昆仑. 国外关于城市化与碳排放关系研究进展[J]. 城市问题, 2014(6): 22~27.
- [17] Cervero R. The transit metropolis: A global inquiry [M]. Washington: Island Press, 1998.
- [18] Anderson W P, Kanaroglou P S, Miller E J. Urban form, energy and the environment: A review of issues, evidence and policy [J]. Urban Studies, 1996, 33(1): 7-35.
- [19] Dhakal S. Urban energy use and carbon emissions from cities in China and policy implications [J]. Energy Policy, 2009, 37(11): 4208-4219.
- [20] Christen A, Coops N C, Crawford B R, et al. Validation of modeled carbon-dioxide emissions from an urban neighborhood with direct eddy-covariance measurements [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(45): 6057-6069.
- [21] Kennedy C, Steinberger J, Gasson B, et al. Greenhouse gas emissions from global cities [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(19): 7297-7302.
- [22] Galster G, Hanson R, Ratcliffe R M, et al. Wrestling sprawl to the ground: Defining and measuring an elusive concept [J]. House Policy Debate, 2001, 12(4): 681-717.
- [23] Holden E, Norland I T. Three challenges for the compact city as a sustainable urban form: Household consumption of energy and transport in eight residential areas in the greater Oslo region [J]. Urban Studies, 2005, 42(12): 2145-2166.
- [24] Geoghegan J, Wainger L A, Bockstael N E. Spatial landscape indices in a hedonic framework: An ecological economics analysis using GIS [J]. Ecological Economics, 1997, 23(3): 251-264.
- [25] Parker D C, Meretsky V. Measuring pattern outcomes in an agent-based model of edge-effect externalities using spatial metrics [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2004, 101(2-3): 233-250.
- [26] Gustafson E J. Quantifying landscape spatial pattern: What is the state of the art? [J]. Ecosystems, 1998, 1(2): 143-156.
- [27] Herold M, Scepan J, Clarke K C. The use of remote sensing and landscape metrics to describe structures and changes in urban land uses [J]. Environment and Planning A, 2002, 34(8): 1443-1458.
- [28] Herold M, Liu X H, Clarke K C. Spatial metrics and image texture for mapping urban land use [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2003, 69(9): 991-1001.
- [29] O'Neill B C, Dalton M, Fuchs R, et al. Global demographic trends and future carbon emissions [J]. Pnas. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Early Edition, 1969, 107(41): 17521-17526.
- [30] McGarigal K S, Cushman S A, Neel M C, et al. FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for categorical maps [EB/OL]. (2015-12-11). https://www.researchgate.net/publication/259011515_FRAGSTATS_Spatial_pattern_analysis_program_for_categorical_maps.
- [31] Chen Y, Li X, Zheng Y, et al. Estimating the relationship between urban forms and energy consumption: A case study in the Pearl River Delta, 2005-2008 [J]. Landscape & Urban Planning, 2011, 102(1): 33-42.
- [32] 谢守红, 王利霞, 邵珠龙. 国内外碳排放研究综述[J]. 干旱区地理, 2014(4): 720~730.
- [33] 张旺, 邹毓. 中国城市碳排放的空间分异与影响因素[J]. 湖南工业大学学报: 社会科学版, 2013(5): 1~6.
- [34] Huang J, Lu X X, Sellers J M. A global comparative analysis of urban form: Applying spatial metrics and remote sensing [J]. Landscape & Urban Planning, 2007, 82(4): 184-197.
- [35] 潘海啸. 面向低碳的城市空间结构——城市交通与土地使用的新模式[J]. 城市发展研究, 2010(1): 40~45.
- [36] 秦波, 邵然. 低碳城市与空间结构优化: 理念、实证与实践[J]. 国际城市规划, 2011(3): 72~77.
- [37] 刘志林, 戴亦欣, 董长贵, 等. 低碳城市理念与国际经验[J]. 城市发展研究, 2009(9): 1~7.

(责任编辑: 张海艳)