

基于环境友好视角的中国最优城市规模研究

——来自 DMSP/OLS 夜间灯光数据的经验证据

项本武, 张亚丽

摘要: 利用 DMSP/OLS 全球夜间灯光数据和能源消费量之间的定量关系及能源消耗碳排放系数, 核算出中国地级及以上城市的人均碳排放量。在此基础上, 构建城市人均碳排放决定的动态面板模型, 使用 GMM 估计方法检验了城市人口密度对城市人均二氧化碳排放的影响。研究发现, 城市人口密度与人均碳排放呈 U 型关系, 基于人均碳排放最小化的原则, 中国城市最优人口密度为 1.41 万人/平方公里, 我国 70% 左右的地级及以上城市的实际人口密度低于其最优人口密度, 从而表明, 我国大部分城市实际人口规模低于其最优水平。为推进环境友好的新型城镇化, 对城市规模和密度的控制应考虑不同城市的环境承载力差异, 避免基于城市现有等级设定统一标准, 对现有人口规模超过最优规模的城市加大控制力度, 对低于最优人口规模的城市应该充分发挥其人口吸纳潜力; 同时, 优化城市内部空间结构, 促进城市内部不同区域间的人口均衡分布, 形成合理的总体人口密度, 从而有利于中国城市人均碳排放的减少。

关键词: 人均碳排放; 环境友好; 最优城市规模

中图分类号: F299.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0169(2017)03-0074-11

DOI:10.16493/j.cnki.42-1627/c.2017.03.024

一、引言

改革开放以来, 中国城镇化取得了令人瞩目的成就, 中国城镇化率从 1978 年的 17.92% 提高到 2014 年的 54.77%, 年均增长率约为 9.8%。伴随着中国城镇化的较快发展, 城市蔓延及粗放发展问题也越来越严重, 中国城市总体人口密度从 1981 年的 1.93 万人/平方公里下降到 2014 年的 0.89 万人/平方公里。与此同时, 中国的环境问题也变得越来越严重, 1978 年中国人均二氧化碳排放为 1.17 公吨, 2013 年则达到了 7.52 公吨。这些总体数据之间的关系引致我们关心如下问题, 中国城市人口规模及密度对人均碳排放水平是否产生了重要影响? 若答案为是, 那么, 什么样的城市规模是环境友好的? 换言之, 基于环境友好的视角, 什么样的城市规模是最优的? 这正是本文想讨论的问题。然而, 已有文献大多基于城市规模净收益最大化原则, 以人均产出最大化、人均公共服务成本最小化等为目标函数来测度城市最优规模, 基于环境友好原则, 以人均碳排放最小化为目标函数来探讨中国城市最优规模的研究相对稀缺。

基金项目: 国家社科基金一般项目“新型城市化视野下的产城融合实现机制研究”(15BJL095); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NECT-11-0747)

作者简介: 项本武, 经济学博士, 中南财经政法大学经济学院教授、博士生导师(湖北 武汉 430073); 张亚丽, 华中科技大学经济学院博士研究生(湖北 武汉 430074)

近年来,围绕究竟以大城市发展为主还是以中小城镇发展为主,学者们争论激烈,迄今为止尚没有达成共识。我们认为,城镇化发展道路争论背后的深层次问题在于如何准确判断中国城市的最优规模。对城市规模的控制如果能够考虑不同城市环境承载力的差异,而非仅仅基于城市现有人口规模设定统一标准,将有助于推动环境友好的新型城镇化建设。本文将基于人均碳排放决定模型,利用我国城市面板数据估计城市人口密度对城市人均碳排放的影响,根据模型估计参数估算基于人均碳排放最小化原则的城市最优人口密度,进一步,结合城市建成区面积数据估算出中国城市最优规模,从而为当前关于中国城镇化发展道路的讨论提供一个新的视角。

二、文献综述

城市最优规模作为城市经济学的一个重要主题,引起了大量学者的关注。在早期,学者们偏重从理论上探讨最优城市规模的存在性,这些研究表明,规模经济与规模不经济的共同作用、离心力与向心力的权衡决定了城市最优规模,当城市达到最优规模时,其居民效用实现了最大化^{[1](P1285-1311)}。然而,Tisdell发现,在现实世界中,居民偏好可能在享受大城市生活优势与忍受诸多城市病之间权衡替代,并且在不同福利水平的城市间迁移,从而可能使得某些城市规模超过社会最优,而另一些城市则不能达到最优^[2]。因此,对最优城市规模的实证研究成为近期学者们的研究热点。

基于不同的目标函数和偏好函数,学者们对城市最优规模进行了大量定量研究。Yezer等通过估计城市聚集经济的边际收益及居民迁入的边际成本,发现美国城市只有超过250万人才是有效率的^[3]。Kanemoto等基于总量生产函数的估计,计算了日本17个标准就业都市区的庇古税,并与这些都市区的土地价值进行比较,发现东京人口实际规模大于其最优规模^[4]。Zheng使用剩余函数(总支出收入与总支出之差)最大化方法,估算出2000年日本都市区最优人口规模为1800万,东京都市区实际人口规模明显太大^[5]。Kim等基于动态递归跨区域可计算一般均衡模型,估计了人口增长对产出及消费者价格的影响,发现首尔都市区人口超过了其最优规模^[6]。近年来,国内学者对于中国城市规模也进行了实证检验。王小鲁等基于城市规模收益函数与总外部成本函数的估算,发现中国城市在100万~1000万人之间有正的净规模收益,在100万~400万人之间净规模收益最大^[7]。李秀敏等同样使用净规模收益最大化的标准,认为中国城市最优规模为270万人^[8]。张应武基于经济增长率对城市人口的回归,认为我国城市最优规模为500万人左右^[9]。傅红春等基于居民幸福感与城市规模关系的估计,发现我国最优城市规模在500万~780万人之间^[10]。

上述研究大多基于城市具有单一最优规模的假设,然而,Richardson否定了单一最优规模的观点,认为城市最优规模因功能和结构不同而异,对城市服务的需求决定着城市的最低“门槛规模”^[11]。Henderson基于城市规模经济和通勤成本构建的一般均衡模型表明,行业结构不同的城市具有不同的最优规模^[12]。Capello等进一步发现,城市最优规模不仅取决于其自身的功能特征,而且还取决于其在国家城市体系中的空间分布^[13]。Au等用人均真实产出对城市规模的回归结果表明,随着中国城市产业结构的变化,其最优规模也不同,当制造业与服务业增加值之比为1时,最优人口规模为250万人左右,而该比值为0.6时,最优人口规模为290万~380万人,因此,中国60%左右的城市规模太小^[14]。苏红键等基于人均产出最大化视角,利用中国地级以上城市面板数据估计城市生产函数模型发现,中国最优城市人口密度为1.30万人/平方公里^[15]。柯善咨等发现,随着中国城市规模的扩大,其人均产出率呈现倒U型变化,城市规模增大的边际收益随产业结构向服务业转变而增加,我国大部分地级市的实际规模仍小于最优规模^[16]。

随着城市环境问题越来越突出,有的学者开始探讨城市规模及结构与对城市碳排放的影响。

Glaeser 等研究发现, 随着城市规模的扩大, 城市蔓延降低了人口密度, 增加了人们在居住地和工作地点之间的距离从而增加了汽车的使用, 进而增加了碳排放^{[17](P2481-2527)}。Kahn 对美国家庭汽油消费的研究发现, 代表性家庭的汽油消费在人口密度高的城市较低, 在人口密度低的城市较高^[18]。Muniz 等对欧洲的研究得到了相似结论, 在 1986—1996 年之间, 西班牙巴塞罗那都市区平均通勤距离增加了 45%, 汽车通勤比重上升了 62%, 导致人均碳排放成倍增长^[19]。Norman 等对加拿大多伦多建筑排放的案例研究表明, 人口密度低的城市郊区的温室气体排放更高, 其人均排放水平是人口密度高的城市中心区的 2.0~2.5 倍^[20]。王桂新等基于中国 283 个城市的研究表明, 特大型城市更加适合低碳城市化进程^[21]。Ishii 等对日本相关城市的研究^[22]和柴志贤对中国 30 个省会城市^[23]的研究均表明, 城市人口密度和人均碳排放水平之间呈 U 型关系。

近年来, 美国军事气象卫星 Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) 搭载的 Operational Linescan System (OLS) 传感器获取的夜间灯光数据受到了学者的广泛关注。该夜间灯光数据产品具有获取容易、能够探测低强度灯光等优点。Elvidge 等发现灯光面积与电力能源消费量间存在线性关系^[24], Amaral 等也认为灯光亮度与电力能源消费量呈线性相关^[25], 李通等利用夜间灯光数据模拟了中国大陆县域的电力能源消费^[26], 吴健生等认为, DMSP/OLS 探测到的灯光不仅来源于电力消耗所产生的灯光, 同时还包括一些其他能源消耗所产生的灯光, 因此, 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据和能源统计数据之间的定量关联, 核算出中国分地市的能源消费总量^[27]。

总体来看, 已有城市最优规模研究在两个方面存在如下缺陷: 一是大多数研究基于城市具有单一最优规模的假定, 没有考虑建成区面积的差异对城市最优规模的影响; 二是绝大多数研究主要基于城市规模净经济收益最大化视角, 基于环境友好视角的研究尤其不足。针对这些问题, 本文边际贡献在于: 首先, 基于人均碳排放最小化原则, 为城市最优规模的研究提供一个新的分析视角; 其次, 充分考虑建成区面积差异对城市最优规模的影响, 突破了单一最优规模的假定; 最后, 本文采用全球夜间灯光数据 (DMSP/OLS) 和能源消费之间的数量关系, 核算出样本城市人均碳排放量, 数据更为客观可靠。

三、实证研究设计

本文在总结国内外相关研究文献的基础上, 对现有模型进行扩展和完善, 基于人均二氧化碳决定模型检验城市人口密度对城市人均二氧化碳的影响, 并使用人均二氧化碳排放最小化的标准, 测度最优城市人口密度, 在此基础上, 推导出城市最优人口规模。

(一) 计量模型的设定

早期关于环境问题的研究文献大多使用 Ehrlich 等发展的 IPAT 模型, 该模型一般形式为: $I = P * A * T$, 其中, I 表示对环境的影响 (Environmental Impact), P 表示人口因素 (Population)、 A 表示财富因素 (Affluence)、 T 表示技术因素 (Technology)^[28]。该模型以其直观简洁在早期得到广泛运用, 然而, 却存在两个主要问题: 一方面, 该模型作为核算恒等式并不适于假设检验, 另一方面, 该模型存在单位弹性的强假定, 意味着各因素对环境的影响比例严格不变。为此, Dietz 等放松了单位弹性的假定, 并引入了随机扰动项, 得到一般意义的 STIRPAT (Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology) 模型^[29], 其基于面板数据的一般形式为:

$$I_{it} = \alpha_i P_{it}^\beta A_{it}^\gamma T_{it}^\delta e_{it} \quad (1)$$

其中, i 表示横截面单元, t 表示时期, α_i 表示横截面固定效应, e 表示随机扰动项。对式 (1) 取自然对数, 得到线性模型设定, 当所有变量取对数形式后, 其估计系数被视作弹性:

$$\ln I_{it} = \alpha_i + \beta \ln P_{it} + \gamma \ln A_{it} + \delta \ln T_{it} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

Martinez 等将城市化率引进模型 (2), 成为探讨城市化与碳排放关系的经典模型^[30]:

$$\ln I_{it} = \alpha_i + \beta \ln P_{it} + \gamma \ln A_{it} + \delta \ln T_{it} + f \ln U_{it} + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

其中, I 为碳排放量, P 为人口规模、 A 为财富水平、 T 为碳排放效率, U 为城市化率, 可见, 模型 (3) 是在传统 IPAT 模型的基础上增加了城市化率这一解释变量, 从而适合于对国别与区域碳排放总量决定因素的研究。由于本文主要关注城市规模对城市人均二氧化碳排放水平的影响, 并基于人均碳排放最小化的视角, 推导城市最优规模, 因此, 本文对模型 (3) 作出如下扩展和改善: 第一, 使用城市人均二氧化碳排放取代国别或区域碳排放总量作为因变量。第二, 使用城市规模取代城市化率, 从而有助于从城市微观层面深化碳排放的研究。城市规模包含人口规模和建成区规模, 为了综合考虑二者对城市人均二氧化碳排放的影响, 一个合理的方法是同时考虑人口数量和建成区面积两个因素, 因此, 使用城市人口密度 (PD) 作为城市规模的代理变量, 城市人口密度主要通过交通运输排放及建筑物温室气体排放等途径影响城市人均碳排放。为了捕获城市人口密度对碳排放可能存在的非线性效应, 本文将该变量的二次项连同一次项一起引入模型。第三, 本文在基准模型的基础上引入相关控制变量, 以控制城市产业结构、城市公共交通、城市绿地面积等因素对城市人均二氧化碳排放的影响。此外, 本文进一步引入滞后一期的二氧化碳排放量作为解释变量, 以控制人均二氧化碳排放的路径依赖效应。为此, 构建如下动态面板数据模型:

$$\ln I_{it} = \alpha \ln I_{i,t-1} + \beta_1 \ln PD_{it} + \beta_2 (\ln PD_{it})^2 + \beta_3 \ln A_{it} + \beta_4 \ln T_{it} + \sum_j \gamma_j X_{ijt} + u_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

其中, i 表示城市, t 表示年份; I 表示人均二氧化碳排放量; PD 表示与人口相关的因素, 用人口密度 (单位建成区面积的城区人口数) 作为代理变量; A 表示与财富相关的因素, 用人均 GDP 作为代理变量; T 表示与技术相关的因素, 用碳排放效率 (单位碳排放产生的 GDP) 作为代理变量。 u_i 为城市不随时间变化的个体效应, v_t 为时间效应, ε_{it} 为随机误差项。 X 为控制变量, 基于数据可得性, 我们引入如下控制变量: 一是城市产业结构 (S), 用第二产业的 GDP 占比代理, 由于相对于其他产业, 第二产业消耗更多能源, 从而产生更多排放, 不同规模和性质的城市, 其产业结构存在差异, 如以第三产业为主导的特大城市, 其二产占比可能低于中小城市, 引入该变量可控制源于产业结构差异导致的城市人均碳排放差异; 二是城市公共交通状况 (B), 用每万人拥有的公共汽车数量代理, 由于公共汽车是私人小汽车的替代通勤工具, 城市中若有更多居民使用公共交通, 就会相对减少私家小汽车的使用, 而小汽车使用是城市碳排放的重要来源之一, 引入该变量可控制源于交通方式的差异导致的城市人均碳排放差异; 三是城市绿地面积 (GR), 用建成区人均绿地面积代理, 由于绿地面积有助于减少碳排放, 引入该变量可控制源于城市建设特征的差异导致的城市人均碳排放差异。

(二) 数据来源与处理

1. 城市人均二氧化碳排放量 (I)。由于中国绝大部分城市能源消耗统计数据缺失, 因此, 无法通过能源消耗量及其碳排放系数核算出城市的碳排放量。最近发展起来的使用 DMSP/OLS 夜间灯光数据模拟计算城市能源消费量的方法, 为我们核算城市碳排放量提供了可行的方案。相对于其他统计数据而言, 全球夜间灯光数据显得更加客观, 最大限度地消除了人为因素^[31]。为此, 参照吴健生等 (2014), 本文利用《中国能源统计年鉴》提供的省级能源消费量数据, 建立基于 DMSP/OLS 稳定夜间灯光时间序列的能源消费模拟模型:

$$E_{it} = k_t DN_{it} \quad (5)$$

其中, E_{it} 为 t 年 i 省的能源消费量的统计值; k_t 为 t 年的系数; DN_{it} 为 t 年 i 省的所有栅格灯光灰度值之和。采取这一不含截距的线性模型, 主要是考虑到降尺度模型反演的精度问题。在利用省级稳定灯光数据和能源消费数据获得两变量之间的定量关系的基础上, 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据区分建设用地与非建设用地, 利用 ArcGIS 表面分析工具, 识别出城市建成区边界, 然后计算各城市

建成区的 DN 值总和, 并代入式 (5) 反演计算出每个城市的模拟能源消费量。在此基础上, 通过能源消费碳排放系数核算出各城市二氧化碳排放量, 进一步, 除以城市常住人口, 得到城市人均二氧化碳排放量, 单位为公吨/人。

2. 城市人口密度 (PD)。利用城市城区常住人口除以城市建成区面积计算得到城市人口密度, 单位为万人/平方公里。《中国城市建设统计年鉴》提供了 2006 年及以后年份的市辖区城区人口和暂住人口, 没有提供 2006 年以前的市辖区城区人口数据, 但提供了市辖区非农业人口, 因此, 2006 年以前的城市常住人口利用非农业人口与暂住人口之和计算得到, 2006 年以后城市常住人口利用城区人口与城区暂住人口之和计算得到。城市建成区面积来源于《中国城市建设统计年鉴》。

3. 城市碳排放效率 (T) 和人均实际 GDP (A)。利用《中国城市统计年鉴》提供的各城市 GDP 总量, 以 2001 年为基期对该数据进行平减处理, 并除以其常住人口得到各城市人均实际 GDP, 单位为万元。城市碳排放效率使用各城市的实际 GDP 除以上述途径得到的各城市碳排放总量得到, 单位为万元/公吨。

4. 其他控制变量。城市第二产业 GDP 占比 (S) 利用《中国城市统计年鉴》提供的第二产业增加值和 GDP 数据计算得到, 二者均以 2001 年为基期对该数据进行平减, 单位为%。每万人拥有公共汽车 (B) 来源于历年《中国城市统计年鉴》, 单位为辆/万人。城市人均绿地面积 (GR) 利用《中国城市统计年鉴》提供的城市绿地面积除以城市常住人口计算得到, 单位为公顷/万人。

剔除缺失数据较多的城市, 对个别缺失数据采用“内插法”进行填补。因此, 基于数据可得性, 本文使用的样本为 2001—2013 年 287 个地级及以上城市构成的非平衡面板数据。表 1 给出各变量描述统计。

表 1 变量描述性统计

| 变量 | 平均值 | 标准差 | 最小值 | 最大值 |
|------|----------|----------|---------|-----------|
| I | 31.337 2 | 24.016 1 | 1.872 2 | 178.939 1 |
| PD | 1.042 3 | 0.550 9 | 0.150 0 | 8.220 0 |
| A | 3.205 5 | 1.926 1 | 0.604 0 | 21.286 2 |
| T | 0.159 8 | 0.149 7 | 0.005 9 | 1.233 5 |
| S | 50.332 5 | 12.603 8 | 14.37 | 91.47 |
| B | 5.906 4 | 3.972 5 | 0.1 | 29.86 |
| GR | 37.498 7 | 24.614 5 | 0.463 8 | 217.877 5 |

四、实证结果与讨论

(一) 模型估计结果

由于动态面板模型固有的内生性, GLS 估计和 LSDV 估计是有偏的和非一致的, 因此我们分别使用差分 GMM 和系统 GMM 对式 (4) 的基本模型设定进行估计, 结果如表 2 所示。

表 2 中模型 (1) 和 (2) 分别为不包含控制变量的差分 GMM 和系统 GMM 估计, 模型 (3) 和模型 (4) 分别为包含控制变量的差分 GMM 和系统 GMM 估计。在四种模型估计中, 我们均使用两阶段稳健估计, 因此过度识别检验使用 Hansen J 统计量替代 Sargan J 统计量, 两种统计量零假设相同, 即过度识别的矩条件对于参数识别是有效的。AR (1) 和 AR (2) 适用于差分 GMM 估计, 但并不适用于系统 GMM 估计, 其零假设为差分方程的残差项无自相关, 由于一阶差分方程的残差预期存在 AR (1), 因此 AR (2) 更为重要, 它将检验水平方程的残差自相关, 若接受 AR (2) 则表明水平方程的残差不存在自相关。从表 2 估计结果来看, 模型 (1) 和模型 (3) 均不拒绝

表 2 模型参数估计结果

| | 模型 (1) 差分 GMM | 模型 (2) 系统 GMM | 模型 (3) 差分 GMM | 模型 (4) 系统 GMM |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| L1lnI | 0.096 7*** (0.009 4) | 0.340 1*** (0.046 5) | 0.244 1*** (0.029 9) | 0.092 1*** (0.009 1) |
| lnPD | -0.119 7*** (0.046 8) | -0.094 2*** (0.024 1) | -0.131 1*** (0.053 5) | -0.113 6*** (0.046 0) |
| (lnPD) ² | 0.411 3*** (0.016 2) | 0.240 7*** (0.012 5) | 0.355 1** (0.028 4) | 0.330 7*** (0.017 7) |
| lnA | 1.153 9*** (0.017 5) | 0.601 6*** (0.062 6) | 0.875 9*** (0.041 9) | 1.142 7*** (0.020 2) |
| lnT | -0.961 4*** (0.025 2) | -0.662 9*** (0.049 6) | -0.834 2*** (0.028 0) | -0.961 8*** (0.027 9) |
| lnS | | | 0.055 4*** (0.014 0) | 0.041 7** (0.019 0) |
| lnB | | | 0.012 1** (0.005 6) | -0.005 5 (0.003 6) |
| lnGR | | | 0.012 9 (0.020 4) | -0.019 5*** (0.009 5) |
| _cons | | -40.926 9 (1.773 4) | | -0.438 8*** (0.180 9) |
| AR (1) | 0.230 0 | | 0.107 0 | |
| AR (2) | 0.019 0 | | 0.063 0 | |
| Hansen 过度识别检验 | 0.156 0 | 0.144 0 | 0.122 0 | 0.932 0 |
| 城市/年份固定效应 | 是 | 是 | 是 | 是 |
| 观测值 | 3 666 | 3 666 | 3 666 | 3 666 |

注: 括号中数值为两阶段稳健标准误, ***、**、* 分别表示回归系数在 1%、5%、10% 水平显著。AR 检验、Hansen 检验为 p 值。

AR (1) 而拒绝 AR (2), 说明差分后的残差存在一阶自相关, 但不存在二阶自相关, 从而表明在水平方程中残差不存在自相关。模型 (1) — (4) 中的 Hansen 过度识别约束检验均不拒绝原假设, 表明所有工具变量均有效。

表 2 中模型 (1) 和模型 (2) 为人均碳排放对主要解释变量的回归, 模型 (1) 使用差分 GMM 估计, 模型 (2) 使用系统 GMM 估计。两种方法的估计结果表明, 滞后一期的人均碳排放量 (L1lnI) 和当期的人均碳排放量均呈显著的正相关关系, 表明了城市碳排放具有路径依赖及动态惯性特征, 同时也进一步证实了动态模型设定的合理性。城市人口密度变量的一次项 (lnPD) 系数均显著为负, 二次项 (ln (PD)²) 系数均显著为正, 表明城市人口密度对人均碳排放的影响呈 U 型关系, 过高的人口密度和过低的人口密度都会使人均碳排放量上升, 从而存在最优的城市人口密度, 使得人均碳排放量处于较低的水平。人均财富水平 (lnA) 的系数在四种模型设定中均显著为正, 表明人均 GDP 越高, 从生产侧来说, 人均产出越多, 导致人均碳排放越高; 从消费侧来说, 人均消费越高, 导致人均碳排放越高。碳排放效率 (lnT) 的系数在四种模型设定中均显著为负, 表明在其他条件不变的情况下, 单位碳排放所产生的 GDP 越高即碳排放效率越高, 则人均碳排放水平越低。

模型 (3) 和模型 (4) 进一步引入了产业结构、公共交通、人均绿化面积三个控制变量, 同样分别使用差分 GMM 方法和系统 GMM 方法来估计。引入这些控制变量以后, 不管使用哪种估计方法,

人口密度变量的一次项系数仍然显著为负,二次项系数仍然显著为正,再次表明城市人口密度和人均碳排放水平呈 U 型关系。滞后一期的人均碳排放量 ($L1lnI$)、人均财富水平 (lnA) 和碳排放效率 (lnT) 的系数仍然显著,符号与模型 (1) 和模型 (2) 相同,且系数绝对值波动很小。可见,主要解释变量的回归系数比较稳健。以第二产业 GDP 占比测度的产业结构 (lnS) 的系数在两种估计中均显著为正,表明第二产业占比越高,人均碳排放水平越高,其原因在于第二产业的能源消耗水平相对第一产业和第三产业更高。以每万人拥有的公共汽车数量代理的公共交通 (lnB) 系数在差分 GMM 估计中显著为正,在系统 GMM 估计中符号相反但不显著。人均绿地面积 ($lnGR$) 系数在差分 GMM 估计中并不显著,在系统 GMM 估计中显著为负。

总体来看,主要解释变量的回归系数,尤其是我们关注的核心变量人口密度的一次项和二次项系数,在四种模型估计中符号一致且显著,系数绝对值波动很小。控制变量中除产业结构的系数在两种模型估计中符号一致且显著为正外,公共交通和人均绿地面积在两种模型估计中显著性有波动,表明公共交通和人均绿地面积并未对我国城市人均碳排放产生一致的显著的影响。

(二) 稳健性检验

为了进一步检验上节回归结果的稳健性,我们使用两种方法进行。一是改变相关变量的衡量方法,使用各城市的非农产业增加值(第二产业和第三产业增加值之和)比重替代第二产业增加值比重,使用城市人均道路铺装面积替代每万人公共汽车数量重新进行回归分析。二是将样本分为东部、中部、西部三个子样本进行分区域回归。两种方法回归结果显示,各主要变量的回归系数符号一致且显著,系数绝对值仍然波动不大。在控制变量中,城市非农产业增加值比重在两种估计方法中,均显著为正,城市人均道路铺装面积在差分 GMM 估计中显著为负,但在系统 GMM 估计中并不显著。可见,本文主要解释变量的回归系数非常稳健。

(三) 城市最优人口密度的估算

根据式 (4) 的模型设定,利用因变量对自变量城市人口密度求导并令其等于零,即 $\partial lnI / \partial lnPD = \beta_1 + 2\beta_2 lnPD = 0$,我们可以推导出最优城市人口密度。根据表 2 的估计系数,最优人口密度的估算结果如表 3 所示。

表 3 最优人口密度的估算 (万人/平方公里)

| | 模型 (1) | 模型 (2) | 模型 (3) | 模型 (4) |
|-------------|----------|----------|----------|----------|
| 一次项系数 | -0.119 7 | -0.094 2 | -0.131 1 | -0.113 6 |
| 二次项系数 | 0.411 3 | 0.240 7 | 0.355 1 | 0.330 7 |
| $lnPD$ 的最优值 | 0.291 0 | 0.391 3 | 0.369 2 | 0.343 5 |
| 最优人口密度 | 1.337 8 | 1.478 9 | 1.432 2 | 1.409 9 |

数据来源:根据本文估计结果计算得到。

相对于差分 GMM 估计,系统 GMM 估计使用了更多的工具变量,其系数估计更为精确,因此,模型 (2) 和模型 (4) 结果优于模型 (1) 和模型 (3);进一步,相对于模型 (2),模型 (4) 控制了与城市碳排放相关的产业结构、公共交通和城市绿化面积等因素的影响,其结果更加有效,因此我们使用模型 (4) 的估计系数来推导最优城市人口密度结果更为可靠。基于模型 (4) 的估计系数,中国城市最优人口密度为 1.41 万人/平方公里。低于或高于这一人口密度,都会使得人均碳排放水平上升,城市人口密度和人均碳排放呈 U 型关系。

从样本城市总体来看,城市人口密度均值为 1.04 万人/平方公里,远远低于本文估计的最优密度 1.41 万人/平方公里。利用样本城市人口密度,我们分别计算了各年度全国平均城市人口密度,计算结果表明,中国城市人口密度是不断下降的,如 2001 年平均人口密度为 1.56 万人/平方公里,而

2013 年平均人口密度为 0.91 万人/平方公里, 可见, 从动态来看, 中国城市呈低密度扩张的趋势明显。相对于城市人口密度高于最优值的城市数量, 城市人口密度低于最优值的城市数量更多, 并且在样本期间呈不断增加的趋势 (如图 1 所示)。

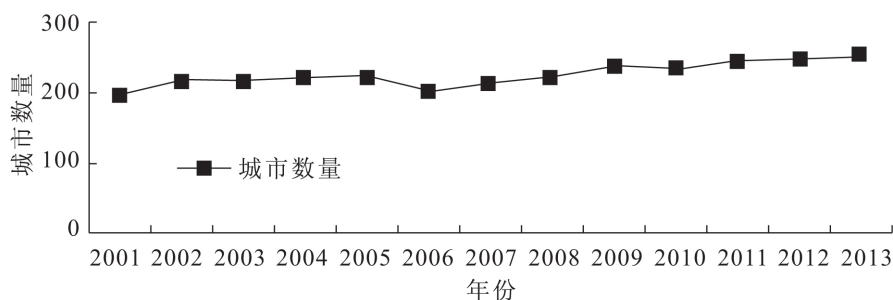


图 1 样本期间低于最优人口密度的城市数量

可见, 大部分中国城市人口密度在不断下降, 这一现象对城市人均二氧化碳排放的影响在于: 一方面, 促使人均通勤距离趋于上升, 小汽车使用在不断增加, 导致城市机动车碳排放的大幅度增加; 另一方面, 促使人均拥有的住宅等建筑物面积趋于上升, 导致建筑物碳排放的大幅度增加, 两种机制均最终传导至人均二氧化碳排放水平的上升。

(四) 最优城市人口规模的确定

考虑到不同城市的建成区面积存在差异, 因此, 不存在一个适合于所有城市的最优城市规模, 每个城市最优规模应该不同。城市最优人口规模采取以下方法确定, 即利用上节估计得到的最优人口密度, 乘以各城市的建成区面积得到相应城市的最优人口规模。由于每个城市的建成区在不同年份存在变动, 因此, 相同城市不同年份的最优人口规模将随着其建成区面积的变动而动态调整。由于本文估计的最优人口密度包含城市的建成区面积信息, 因此, 根据低于最优人口密度的城市数量占比, 可以推断, 我国 70% 城市的实际人口规模低于其最优人口规模。

根据最优人口密度的估计, 我们可以计算出相应城市相应年份的最优人口规模, 并且可以将其与对应的城市实际人口规模进行比较, 以考察二者之间的偏离程度。为此, 使用各城市实际人口与最优人口的差额占最优人口的比例测度各城市实际人口对最优人口的偏离程度, 即二者偏离程度 = (实际人口 - 最优人口) / 最优人口。若该值为正则表明实际人口多于最优人口, 若该值为负则表明实际人口少于最优人口, 该比例绝对值越大表明偏离度越高。以 2013 年四大直辖市情况为例, 北京市建成区面积为 1 306.45 平方公里, 实际人口为 1 825.1 万人, 最优人口规模为 1 842.09 万人, 偏离度为 -0.93%; 天津市建成区面积为 747.26 平方公里, 实际人口为 663.66 万人, 最优人口规模为 1 053.64 万人, 偏离度为 -58.76%; 上海市建成区面积为 998.75 平方公里, 实际人口为 1 364.1 万人, 最优人口规模为 1 408.24 万人, 偏离度为 -0.03%; 重庆市建成区面积为 1 114.92 平方公里, 实际人口为 1 133 万人, 最优人口规模为 1 572.04 万人, 偏离度为 -0.38%。数据表明, 四大直辖市实际人口均低于其最优人口, 其中偏离程度最高的为天津市。

这些特大城市人口规模低于最优规模的原因在于, 伴随建成区面积的大规模扩张, 政府强力的城市人口控制政策并未放松。一般认为, 这些特大城市诸多城市病的主要来源于其人口规模过大, 然而本文研究表明, 如果不考虑其他因素, 仅从环境友好的视角出发, 这些特大城市作为整体尚有人口聚集的空间。当然, 这些城市内部不同区域之间人口密度存在巨大差异, 如 2013 年北京首都功能区、城市功能拓展区、城市发展新区、生态涵养发展区人口密度分别为: 23 942 人/平方公里、8 090 人/平方公里、1 067 人/平方公里、217 人/平方公里, 人口密度梯次递减, 具有明显的单中心结构特征。

其中除首都功能区人口密度高于最优人口密度外,其他区域人口密度远远低于最优人口密度。因此,如果城市结构向多中心转变、人口密度较低的城区转移承接高密度城区的人口,不仅可以缓解中心城区的拥堵等城市病,同时也可以从总体上提升全市建成区总体人口密度,从而有利于人均碳排放的减少,促进环境友好的城市化进程。

与此同时,也有部分城市实际人口规模高于其最优人口规模,如郑州市建成区面积为382.66平方公里,实际人口为586.01万人,最优人口规模为539.55万人,偏离度为7.93%;西宁市建成区面积为85平方公里,实际人口为123.78万人,最优人口规模为119.85万人,偏离度为3.17%。这些城市只有增加建成区面积,才能增加人口吸纳能力,同时将人口密度逐渐调整到最优密度,否则,基于现有建成区面积,应该控制其人口的进一步扩张。

五、结论与政策含义

本文利用DMSP/OLS夜间灯光数据和能源数据之间的定量关系以及能源消耗碳排放系数,核算出样本期间中国地级及以上城市的人均碳排放量。在此基础上,构建城市人均碳排放决定的动态面板模型,利用GMM估计检验了城市人口密度对城市人均二氧化碳排放的影响,据此估算出人均碳排放最小化的最优城市人口密度。研究表明,城市人口密度与人均碳排放呈U型关系,过高或过低的人口密度都将导致人均碳排放上升。基于环境友好的视角,中国城市最优人口密度为1.41万人/平方公里。进一步,利用最优人口密度乘以各城市的建成区面积,可以得到相应年份各城市的最优人口规模,根据估算的最优城市人口规模与城市实际人口规模的比较,本文发现,我国70%左右的地级及以上城市的实际人口低于其最优人口规模。原因在于,在近年来我国城镇化进程中,土地扩张的速度快于人口扩张的速度,大大降低了城市的人口密度,从而推升了人均二氧化碳排放水平。与此同时,也有少数城市实际人口规模超过其最优人口规模,同样没有使其人均二氧化碳排放水平达到最低水平。

与已有研究相比,本文研究结论的不同之处在于:一是大多数已有研究基于城市具有单一最优规模的假定,基本都没有考虑城市建成区面积的差异对城市最优人口规模的影响,本文聚焦于城市最优人口密度,在充分考虑到建成区差异及其动态变化的基础上确定不同城市最优人口规模;二是绝大多数研究主要基于城市规模净经济收益最大化原则确定城市最优规模,本文则以人均碳排放最小化为原则,从而为我国城市最优规模的研究提供了一个基于环境友好的新视角。与本文同样关注城市人口密度相似,苏红键等认为中国最优城市人口密度为1.30万人/平方公里^[15],虽然二者研究结论较近似,但其间的差异在于前者以人均产出最大化为目标函数,其研究视角与本文不同。

基于人均碳排放最小的视角,探讨最优城市人口规模对于推进环境友好的新型城镇化具有重要启示。随着中国城市蔓延的加速,中国大部分城市人口密度不断下降,城市人均碳排放水平不断上升。本文研究表明,中国城市最优人口密度为1.41万人/平方公里,这一结论对城市规模和密度的合理控制提供了重要政策启示。合理的人口规模控制应注意关注城市人口密度而非人口规模总量,因为人口密度能更好地反映城市的环境承载力的差异。基于城市现有规模划定一刀切的人口规模控制标准的管理模式,并不有利于环境友好型新型城镇化建设。本文研究结论的适用性在于,在制定我国城市规模控制标准时,可以基于最优人口密度和城市建成区面积的实际,确定城市最优人口规模。对于实际人口规模高于最优人口规模的城市,应该成为人口规模控制的重点城市;对于实际人口规模低于最优人口规模的城市,应该放松其人口迁入限制,充分发挥其环境承载力及人口吸纳能力。

值得注意的是,本文基于人均碳排放最小化的新视角估算出的最优人口规模,与基于人均产出最大化的视角的其他研究的估算结果存在差异,在实际政策制定方面,如何确定最优和合适的城市人口

规模,需要综合考虑不同视角。同时,考虑到相同城市的建成区面积随着时间而变动,因此,其最优人口规模必然随着建成区面积的变化而动态变化。此外,由于数据限制,本文使用城市建成区整体数据,无法考虑城市内部不同区域之间的人口密度差异。因此,优化城市内部空间结构,实现城市结构从单中心向多中心的转变,可以降低中心城区的人口密度,提高远城区的人口密度,从而促进城市整体的人口密度和人口规模向合理化水平调整。

参考文献

- [1] Tolley, G. J., Cribfield. City size and place as policy issues[A]. E. S. Mills. *Handbook of Regional and Urban Economics II: Urban Economics*[C]. Amsterdam: North-Holland, 1987.
- [2] Tisdell, C. The Theory of Optimal City-Sizes; Elementary speculations about analysis and policy[J]. *Urban Studies*, 1975, (1).
- [3] Yezer, A. M. J., R. S. Goldfarb. An indirect test of efficient city sizes[J]. *Journal of Urban Economics*, 1978, (5).
- [4] Kanemoto, Y., T. Ohakawara, T. Suzuki. Agglomeration economies and a test for optimal city sizes in Japan[J]. *Journal of the Japanese and International Economies*, 1996, (10).
- [5] Zheng, X. P. Measurement of optimal city sizes in Japan; A surplus function approach[J]. *Urban Studies*, 2007, (5-6).
- [6] Kim, E., G. Hewings, K. M. Nam. Optimal urban population size; National vs local economic efficiency[J]. *Urban Studies*, 2014, (2).
- [7] 王小鲁, 夏小林. 优化城市规模, 推动经济增长[J]. *经济研究*, 1999, (9).
- [8] 李秀敏, 刘冰, 黄雄. 中国城市集聚与扩散的转换规模及最优规模研究[J]. *城市发展研究*, 2007, (2).
- [9] 张应武. 基于经济增长视角的中国最优城市规模实证研究[J]. *上海经济研究*, 2009, (5).
- [10] 傅红春, 金俐, 金琳. 幸福框架下的最优城市规模[J]. *城市问题*, 2016, (2).
- [11] Richardson, H. W. Optimality in city size, systems of cities and urban policy; A sceptic's view[J]. *Urban Studies*, 1972, (1).
- [12] Henderson, J. V. The sizes and types of cities[J]. *American Economic Review*, 1974, (4).
- [13] Capello, R., R. Camagni. Beyond optimal city size; An evaluation of alternative urban growth patterns[J]. *Urban Studies*, 2000, (9).
- [14] Au, C. C., J. V. Henderson. Are Chinese cities too small[J]. *Review of Economic Studies*, 2006, (3).
- [15] 苏红键, 魏后凯. 密度效应、最优城市人口密度与集约型城镇化[J]. *中国工业经济*, 2013, (10).
- [16] 柯善咨, 赵曜. 产业结构、城市规模与中国城市生产率[J]. *经济研究*, 2014, (4).
- [17] Glaeser, E. L., M. E. Kahn. Sprawl and urban growth[A]. J. V. Henderson, J.-F. Thisse. *Handbook of Regional and Urban Economics (Vol 4): Cities and Geography*[C]. Amsterdam: North-Holland, 2004.
- [18] Kahn, M. E. *Urban Policy Effects on Carbon Mitigation*[R]. NBER Working Paper, No. 16131, 2010.
- [19] Muniz, I., A. Galindo. Urban form and the ecological footprint of commuting; The case of Barcelona[J]. *Ecological Economics*, 2005, (4).
- [20] Norman, J., L. M. Heather, A. K. Christopher. Comparing high and low residential density; Life-cycle analysis of energy use and greenhouse gas emissions[J]. *Urban Planning and Development*, 2006, (3).
- [21] 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).
- [22] Ishii, S., S. Tabushi, T. Aramaki. Impact of future urban form on the potential to reduce greenhouse gas emissions from residential, commercial and public buildings in Utsunomiya of Japan[J]. *Energy Policy*, 2010, (9).
- [23] 柴志贤. 密集效应、发展水平与中国城市碳排放[J]. *经济问题*, 2013, (3).
- [24] Elvidge, C. D., K. E. Baugh, E. A. Kihn, et al. Relations between satellites observed visible-near infrared emissions, population, economic activity and electric power consumption[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, (6).

- [25] Amaral, S., G. Camaraet, A. Monteiro, et al. Estimating population and energy consumption in Brazilian Amazonia using DMSP night-time satellite data[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2005, (2).
- [26] 李通, 何春阳, 杨洋, 等. 1995—2008 年中国大陆电力消费量时空动态[J]. *地理学报*, 2011, (10).
- [27] 吴健生, 牛妍, 彭建, 等. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的 1995—2009 年中国地级市能源消费动态[J]. *地理研究*, 2014, (4).
- [28] Ehrlich, P. R., J. P. Holdren. Impact of population growth[J]. *Science*, 1971, 171.
- [29] Dietz, T., E. A. Rosa. Effects of population and affluence on CO₂ emission[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1997, (1).
- [30] Martinez, Z. I., M. A. Bengochea, L. R. Momrarea. The impact of population on CO₂ emissions: Evidence from European countries[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2007, (4).
- [31] 徐康宁, 陈丰龙, 刘修岩. 中国经济增长的真实性的检验: 基于全球夜间灯光数据的检验[J]. *经济研究*, 2015, (9).

Optimal City Size from the Perspective of Environmental Friendliness: Based on Empirical Evidence Using DMSP/OLS Nighttime Light Data

XIANG Ben-wu; ZHANG Ya-li

Abstract: By using the quantitative relationship between DMSP/OLS nighttime lights data and energy consumption data and the coefficient of carbon emissions from energy consumption, CO₂ emissions per capita in a prefecture-level city scale from 2001 to 2013 are calculated based on which this paper builds the dynamic panel data model of determination for CO₂ emissions to examines the influence of population density on CO₂ emissions per capita by using GMM. The results suggest that there is a U-shaped relationship between per capita CO₂ emissions and population density in cities, and in the view of minimizing CO₂ emissions per capita, the optimal population density is 14.1 thousand people per square kilometers, and 70% of cities' population density is below its optimal level which means that the population size in the majority of cities below its optimal level. It is recommended that in order to propel environmentally friendly urbanization process, governments should take different policies among cities with different environmental carrying capacity rather than set one standard for all cities, while exercising strict control over population expansion for over-populated cities, governments should make full use of potential for absorbs population in less-populated ones. Meanwhile, optimizing space-structure intra-city and balancing population distribution among different districts in city is necessary to optimize the overall population density in a city level and to reduce CO₂ emissions per capita.

Key words: CO₂ emissions per capita; environmental friendliness; optimal city size

(责任编辑 朱 蓓)