

碳减排目标下中国省域城市建设用地 空间配置响应研究

钟顺昌¹, 汪文竹¹, 闫程莉²

(1. 山西财经大学资源型经济转型发展研究院, 太原 030006;

2. 山西财经大学财政与公共经济学院, 太原 030006)

摘要: 建设用地利用变化是引起碳源/汇变化的重要原因, 如何优化省域城市建设用地空间配置以驱动碳减排, 是双碳战略背景下一个重要课题。用首位城市占比和赫芬达尔指数等表征省域城市建设用地空间配置集中度, 以地均碳排放量表征碳排放水平, 基于2000—2020年中国省级面板数据, 借助双向固定效应模型等检验省域城市建设用地空间配置集中度对碳排放的影响机制。结果表明: (1) 省域城市建设用地空间集中配置具有显著的碳减排效应; (2) 分功能用地来看, 工业、居住和服务用地空间集中配置也均能抑制碳排放, 就作用强度来看, 工业和服务用地较大, 而居住用地略小; (3) 能源效率是省域城市建设用地及各功能用地空间集中配置影响碳排放的重要机制; (4) 各功能用地空间集中配置的耦合协同将通过增强能源效率而对碳减排产生倍增效应。

关键词: 碳排放; 建设用地; 空间配置; 能源效率; 集中度

二氧化碳(CO₂)排放成为当今人类社会可持续发展面临的重要威胁, 是亟待解决的重要问题。中国生态文明建设进入了以降碳为重点战略方向的关键时期。数据显示, 1990—2019年间中国年度碳排放量增长将近4倍^[1]。2020年9月, 习近平主席明确提出“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和”(简称“双碳”)。《中国落实国家自主贡献目标进展报告(2022年)》中指出, 中国实施积极应对气候变化国家战略, 经初步核算, 2021年中国碳排放强度比2020年降低3.8%, 比2005年累计下降50.8%, 但根据国际能源署(IEA)发布的报告显示, 中国CO₂排放量仍占全球总量的33%左右。因此, 推进碳减排任重道远。

土地作为人类经济活动的空间载体和人类赖以生存和发展的物质基础, 土地利用与覆被(LULC)变化是影响陆地系统碳循环过程、引起碳源/汇变化的重要原因^[2,3]。土地利用是仅次于化石燃料的第二大碳源, 对碳排放的贡献达到14%, 其利用与配置方式无疑对碳排放产生重要影响^[4-8]。具体而言, 土地利用变化对碳排放既具有直接影响, 也存在间接影响^[9], 前者通过改变区域碳储量、土壤呼吸速率影响区域自然碳过程, 后者基于土地的承载功能影响区域人为碳过程^[10,11]。就土地资源配置与碳排放有关的研究主要集中在以下几方面: (1) 部分文献基于LULC框架, 通过静态与横向比较研究发现建设

收稿日期: 2022-12-26; 修订日期: 2023-04-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(71804099, 72204151, 72274114); 教育部人文社会科学基金项目(18YJC790236)

作者简介: 钟顺昌(1985-), 男, 陕西汉中, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为区域空间组织结构、环境经济与区域可持续发展。E-mail: zsc2014@126.com

用地对碳排放的贡献高达96%以上^[8,12]，且其他土地利用类型向建设用地转变，表现出显著的碳排放效应^[13-15]，因此，建设用地的碳源主体地位明显^[4,16]。(2)在此基础上，一部分文献聚焦于建设用地规模扩张的碳排放效应。有研究发现建设用地规模与碳排放规模呈现正相关关系^[17]，而且在不同的研究区域均发现建设用地规模与碳排放强度呈倒“U”型关系^[18-20]，遵循环境库兹涅茨曲线(EKC)假说；另一部分文献探讨了建设用地集约利用度^[21-23]或开发强度^[24]对碳排放规模、碳排放强度和碳排放效率的影响，并发现提高城市建设用地集约利用水平有助于产生碳减排效应，关中城市群内建设用地利用集约度与碳排放强度呈现“И”型关系；此外，还有一部分文献关注碳排放约束下的建设用地效率变化^[25]和规模扩张趋势^[26]等。(3)建设用地各功能用地具有不同的碳排放表现，其中工业用地是第一大碳排放源^[27]，研究表明工业用地供应的规模、方式和价格及其利用方式等对工业能源碳排放的影响也存在差异^[28,29]。

综上，在学界建设用地作为重要的碳源已达成共识，并从建设用地利用规模及利用强度等角度分析建设用地与碳排放的关系，而就特定区域内部建设用地空间优化配置视角下的碳排放效应问题尚未引起足够的重视。现有文献更多地是从城市内部用地空间形态^[30]、各功能用地空间布局(土地利用功能混合)^[31,32]、建设用地利用强度^[33]等方面进行了有益探索。而省域内部城市建设用地空间配置(即城市建设用地及其不同功能用地在省域不同城市间的配置，下同)及其空间结构的碳减排效应，尚未引起学术界的关注。中国省域城市建设用地空间配置这一客观事实，有其特定的制度和体制机制背景。因粮食安全及18亿耕地红线约束，在最严格的耕地保护制度下，建设用地资源具有明显的稀缺性，政府主导着建设用地资源配置，并具体通过建设用地年度计划管理得以实现。对建设用地年度计划管理的本质是政府“自上而下”运用公权力对土地开发权进行配置，并在实践中形成了从中央到地方的层级式建设用地指标分配方式^[34]。当建设用地指标由中央政府划拨到省级政府后，在省域内部，各地级市政府出于GDP政绩和发展导向的考虑，为“地”而争，因省域内各城市竞争能力的差异，最终表现为城市建设用地及其各功能用地规模呈不同程度的等级结构或不平衡分布特征(图1)^①。因此，建设用地空间配置反映的是以建设用地资源为对象的规模分布结构(集中度/等级性)问题。一方面，基于“结构—行为—绩效”的逻辑范式，建设用地的空间配置将引导城市间的分工协作，进而影响着生产、生活等人类活动所引起的能源消耗，从而影响省域整体的碳排放水平；另一方面，建设用地空间配置的规模等级结构特征，揭示了建设用地资源的空间集聚性，基于集聚的节能减排理论^[35,36]，建设用地空间集中配置将对整个省域二氧化碳产生减排效应。

基于此，本文将实证研究中国省域城市建设用地空间集中配置的碳排放效应，探索

① 图1揭示了代表性省域建设用地及不同功能用地的位序规模幂律分布。幂律是揭示客体分布不均衡的一个重要工具，在数学上Zipf定律等是常见的幂函数： $S(R)=a \times R^{-q}$ ，其中， a 与 q 都是 >0 的常数，且称 q 为齐普夫(Zipf)指数。 $S(R)$ 是规模位序为 R 的建设用地(不同功能用地)规模，其中， a 、 R 和 $S(R)$ 是已知，且 $a=S(1)$ ，对幂函数两边取对数，然后通过最小二乘估计方法，可以得到参数 q 值。 q 越大，省域内建设用地及不同功能用地空间配置的集中度将越高。借助该方法，可以得到各省历年建设用地及不同功能用地空间分布的齐普夫指数 q 。在此基础上可得到全国省域平均的建设用地的齐普夫指数 $q=0.925$ ，以及分功能用地的工业、居住和服务用地的齐普夫指数1.223、0.919和0.973，与此同时，图中的 a 即为全国省域首位城市建设用地(不同功能用地)规模最大值的平均值。图中原始数据来自历年《中国城市建设统计年鉴》。

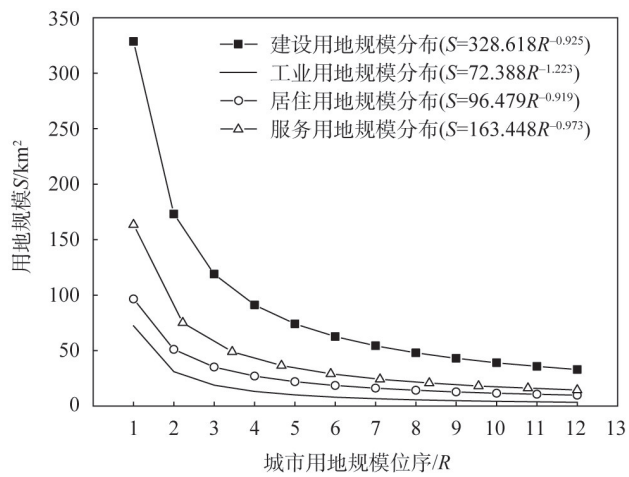


图1 中国代表性省域城市建设用地及其各功能用地空间配置格局

Fig. 1 Spatial allocation pattern of urban construction land and its functional land in representative provinces in China

碳减排目标下最优的城市建设用地空间配置模式与格局。事实上，国家“十四五”规划纲要明确提出，要立足资源环境承载能力，发挥各地区比较优势，促进各类要素合理流动和高效集聚，推动形成主体功能明显、优势互补、高质量发展的国土空间开发保护新格局。而优化建设用地空间配置，是优化国土空间开发保护格局的重要手段，也是国土空间治理的基本内容，与此同时，国土空间治理的一个重要目标就是为了解决中国不同发展阶段最为紧迫的资源瓶颈和环境破坏问题^[37]。本文一方面基于多学科视角丰富了资源配置的生态环境效应理论。资源稀缺是经济学研究的一个永恒主体，如何优化资源配置和充分利用稀缺资源以实现生态环境效应最大化是环境经济学领域一个重大课题，区域经济学领域的空间集聚理论为资源稀缺背景下的“资源空间集中配置”概念的提出提供了支撑，那么，建设用地资源空间集中配置能否产生碳减排效应？本文有助于丰富资源配置的生态环境效应理论。另一方面在实践层面为省级政府通过土地资源空间优化配置降低碳排放提供科学依据。省级政府在城市建设用地空间配置过程中处于相对主导地位，有着较大的自主决策权，优化建设用地资源的空间配置是省级政府常见的宏观调控手段，在“双碳”背景下，该研究将为省级政府基于碳减排目标的建设用地指标在城市间的合理配置和优化省域国土空间开发格局提供决策参考。

1 分析框架与理论机制

经济的高速增长离不开资源的大量投入，同时又因为资源的不合理利用方式带来生态环境问题，资源合理配置是改善生态环境问题的根本出路^[38]。从环境经济学的视角看，碳减排是一个涉及经济发展方式的问题^[39,40]，不同的经济发展方式，决定了不同的碳减排绩效。资源稀缺是经济学研究的逻辑起点与出发点，而资源配置是经济学的核心问题，在碳减排目标下探讨经济发展方式，离不开对资源稀缺及资源配置的关注。经济活动的空间性使得资源空间配置成为空间经济学研究的重要主题，资源稀缺引致下的资源空间集聚或空间集中配置问题贯穿于空间经济学研究的始终^[41]。对于由不同规模城市构

成的省域而言，城市建设用地资源稀缺引致下的空间集聚性是省域城市建设用地空间配置的本质特征，而且城市建设用地空间配置是空间分工得以实现的前提条件，因此，优化城市建设用地空间配置是省域转变经济发展方式的重要内容之一，加强省域城市建设用地空间集中配置将对减碳排产生重要的影响（图2）。

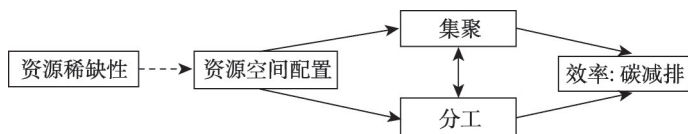


图2 建设用地资源空间配置影响碳减排的分析框架

Fig. 2 Analysis framework of the impact of spatial allocation of construction land resources on carbon emission reduction

（1）建设用地空间集中配置缓解污染避难所效应，形成碳减排效应。在省域内，城市政府环境规制强度存在策略性互动，经济发展条件较差的城市地区更有可能在招商引资的过程中牺牲生态环境，在环境规制异质性的作用下，能耗较高的污染企业往往会由经济发展条件较好的城市向经济发展条件较弱的城市转移^[42,43]。而建设用地资源规模禀赋具有异质性，即建设用地资源配置在经济发展条件较好的城市与较弱的城市之间呈明显的位序规模分布，使得经济发展条件较弱的城市建设用地资源相对紧缺，将在一定程度上缓解这种污染避难所效应，倒逼高耗能企业推进技术进步，降低能源消耗，进而减少碳排放。（2）建设用地空间集中配置形成紧凑型的区域空间结构，产生碳减排效应。建设用地空间集中配置遵循主体功能区原则，建设用地资源将在城市化地区集中配置，在农产品主产区、生态功能区减量化配置，其结果：一方面，避免非城市化地区因大面积建设用地开发而导致的土地利用碳排放；另一方面，城市化空间布局结构更加集约、紧凑，形成集约型城镇化发展模式，进而降低碳排放。具体来讲，集约型城镇化空间发展模式，一方面，引致居民空间集聚，将增加居民的公共交通需求^[44,45]，减少私人交通；另一方面，引致企业空间集聚，而企业间通过正式和非正式接触，产生节能减排的知识溢出；同时，居民和企业的空间集聚也将同步降低政府对生态环境治理的边际成本。然而，建设用地空间集中配置对省域整体碳减排绩效的影响具有边界效应。其原因在于，当建设用地空间配置过度集中，将弱化城市间的功能分工与互补性，经济活动将过度集聚，必将诱发碳排放。即建设用地空间配置作为空间分工的基础，根据分工理论，空间分工受到市场边界的限制，建设用地过度集中配置，依附于此的非农经济活动的拥挤效应占主导，由此产生更多的能源消耗，造成省域整体更多的碳排放，使得集聚的碳减排效应失灵。

假说1：省域建设用地空间集中配置对碳排放的影响呈“U”型关系。

建设用地主要承载居民居住功能、企业生产功能以及服务于居民生活和企业生产的服务功能。从城市基本功能与非基本功能的视角看，一般而言，居住和服务功能是非基本功能，而生产功能是基本功能。建设用地分配到城市后，各城市政府基于所在城市的发展目标和功能定位，将建设用地分配到不同的功能用途，由此形成省域不同功能用途的差异化空间集中配置格局（图1）。具体来看：（1）居住功能是城市的非基本功能，省域内各城市都存在吸纳非农人口居住这一非基本功能，其空间集中配置程度最低。（2）服务功能作为众多城市的另一非基本功能，服务于本地企业生产和居民生活，随着经济的发展，服务

功能不断提高,但从整个区域的分工演进来看,大城市的服务业不断发展,其在省域中的服务半径将延伸至附近的中小城市,服务(尤其是生产性服务)功能将成为大城市的基本功能,服务业将成为大城市发展的后续主要动力,因而大城市对服务用地的需求相对较大,进而在整个省域内服务用地呈现相对集中的空间分布。(3)对于绝大多数城市而言,工业化是城市化与经济增长的主要动力,工业生产是各城市的基本功能,作为工业生产功能载体的工业用地在推动地方工业经济增长方面发挥了主导作用,与承载基本功能的居住和服务用地相比,工业用地具有更明显的专业化性质。与此同时,提高城市经济增长是地方政府的重要任务,也是政绩考核和政府政治晋升竞争的重要内容,而这种竞争的背后是以招商引资为目标、以工业用地资源为牵引的竞争,这必将导致整个省域工业用地空间集中配置低于最优的空间集中配置状态。此外,因用地性质不同,各功能用地单位碳排放量各异,与此同时,相似的空间配置集中度,但不同功能用地空间集中规模各异,进而可能对碳排放的作用强度不同。因此,不同功能用地空间集中配置对碳排放产生不同的影响。

假说2:建设用地各功能用地的空间集中配置对碳排放的影响具有异质性。

城市建设用地资源的稀缺。一方面,城市层面的建设用地各功能用地配置规模存在明显的相互影响,呈现明显的此消彼长关系。具体来看,在建设用地规模一定和地价双轨制的情况下,城市政府为了推动地方经济发展,在服务业发展存在人口规模等门槛的情况下,率先将通过压缩居住或服务用地供应面积,而提高工业用地供应面积,以此作为工业招商引资的筹码^[46,47]。因此,城市是各功能用地相互耦合而形成的一个系统。另一方面,对于不同规模城市构成的省域,则是各功能用地空间配置的耦合协同而形成的复合系统。基于耦合协同的基本理论,不同功能用地的空间集中配置的耦合协同将对碳减排产生增力。

假说3:建设用地各功能用地空间集中配置的耦合协同将强化对碳排放的作用。

建设用地适度空间集中配置将通过能源效率影响碳排放。一方面建设用地空间集聚引导非农经济活动集聚,经济集聚具有典型的技术溢出和知识溢出效应,通过这一系列正外部性,有助于提高能源效率^[48-50]。另一方面在当前能源结构因技术限制而难以进行根本性调整的背景下,提高能源效率被证明是一条抑制碳排放的有效途径^[51,52]。事实上能源作为生产投入要素之一,其效率的提升对降低能源消费量具有重要意义。当单位能源产出越多,在满足社会需求的既定总产出下节约更多能源,由此降低碳排放,反之增加碳排放。因此,提升能源效率是实现节能减排的关键一环^[53]。

假说4:省域建设用地空间集中配置通过能源效率而影响碳排放。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 模型设定

2.1.1 省域城市建设用地空间配置集中度对碳排放的影响

通过上述理论分析,省域城市建设用地及其不同功能用地(简称“建设用地”)空间配置集中度与碳排放存在潜在的非线性关系,基于此,构建如式(1)的计量模型:

$$\text{CO}_{2it} = \alpha_0 + \alpha_1 S_{it} + \alpha_2 S_{it}^2 + \sum_{k=1}^m \phi_k X_{kit} + \mu_i + \tau_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中： i 和 t 分别表示省份和年份（年）； CO_2 表示碳排放水平（百万 t/km^2 ）； S 表征省域建设用地空间配置集中程度，在基准回归中用首位城市占比（ pro ）表示，在稳健性检验中用赫芬达尔指数（ hhi ）表示； X_k 为第 k 个控制变量； μ_i 与 τ_t 分别为个体固定效应及时间固定效应； ε_{it} 为随机扰动项； α_0 为截距项； α_1 、 α_2 、 ϕ_k 分别为建设用地空间配置集中度一次项、二次项、控制变量的系数。

2.1.2 建设用地空间集中配置影响碳排放的机制检验

根据假说4，能源效率是建设用地空间集中配置影响碳排放的重要传导机制，参考江艇^[54]与吴敏等^[55]的机制检验方法，构建如式（2）的计量模型，检验建设用地空间配置集中度对能源效率（ ee ）的影响。

$$ee_{it} = b_0 + b_1 S_{it} + \sum_{j=1}^n \theta_j X_{jit} + \mu_i + \tau_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

式中： b_0 为截距项； b_1 和 θ_j 分别表示集中度和控制变量的系数； n 为控制变量个数（个）。

2.2 变量说明

被解释变量：碳排放水平。为消除不同省域城市建设用地规模异质性的影响，用单位省域城市建设用地面积的二氧化碳排放量来表征。其中，碳排放量用各类能源消耗量与其对应的碳排放折算系数乘积加总来度量。

核心解释变量：省域城市建设用地及不同功能用地（简称“建设用地”）空间配置集中度，该变量本质上揭示的是省域内城市间在建设用地资源配置方面的地位关系不对等和数量规模不均衡的程度。可采用首位城市占比与赫芬达尔指数等方法度量省域建设用地空间配置集中度，其值越大，则其集中度越高^[48]，具体测算方法如下：

（1）首位城市占比（ pro ）。测算方法如式（3），取值介于0~1之间，该比例越高，表明省域建设用地指标越倾向于在首位城市集中。式中： $Area_{iRt}$ 表示建设用地规模位序为 R 的地级城市建成区面积（ km^2 ）； n 表示 i 省域的地级城市数（个）。其数据来源为历年《中国城市建设统计年鉴》。其中，居住与工业用地面积即该统计年鉴中直接公布的数据，而服务用地面积即建设用地面积减去居住用地面积与工业用地面积的剩余。此外，《中国城市建设统计年鉴》公布的用地数据存在缺失和异常的情况，本文对差值进行了补齐，对异常值进行了校正。

$$pro_{it} = \frac{Area_{i1t}}{\sum_{R=1}^n Area_{iRt}} \quad (3)$$

（2）赫芬达尔指数（ hhi ）。为了验证结论的稳健性，本文也将通过赫芬达尔指数识别省域建设用地空间配置集中程度，相对首位城市占比，该指数是用所有城市的建设用地资源份额的平方和来表示，该值对规模较大城市的资源配置份额反映比较敏感，而对众多小城市的资源配置份额小幅度的变化反映很小。该指数越高，表明建设用地的空间垄断程度越高。测算方法如式（4），其值介于0~1之间。式中： $Area_{it}$ 表示建设用地的总规模大小，变量原始数据来源及其他符号的含义同首位城市占比。

$$hhi_{it} = \sum_{R=1}^n \left(\frac{Area_{iRt}}{Area_{it}} \right)^2 \quad (4)$$

中介变量。能源效率（ ee ）以单位能耗所产生的实际GDP来衡量，即实际GDP与能

源消费总量的比值,其中各类能源消耗均根据标准煤折算系数统一折算计总,该变量的原始数据来自历年《中国能源统计年鉴》和《中国统计年鉴》。

控制变量。一方面,就碳排放涉及到的控制变量如下:①产业结构(*is*),采用第二产业产值占当年GDP的比值进行表征;②外商直接投资(*fdi*),以当年汇率换算为人民币的外商直接投资与GDP的比值表示;③人口密度(*pd*),以单位建设用地面积的人口数表征;④能源消费结构(*es*),借鉴柳亚琴等^[56]的方法以能源消费结构低碳化指数进行表征;⑤经济发展水平(*djgdp*),以单位建设用地实际GDP来表征;⑥环境规制强度(*er*),以每百元工业增加值的工业污染治理完成投资额表示;⑦重化工业水平(*zhgy*),用重化工业从业人数占工业从业人数的份额表示。其中,重化工业门类选择参照马丽梅等^[57]的研究成果。⑧投资强度(*tzqd*),以单位建设用地固定资产投资额表示,其中,由于2018年开始各省的固定资产投资额数据不再公布,2017年后的数据根据固定资产投资增长率得出。另一方面,在能源效率的决定因素模型中,除了建设用地空间集中配置这一核心解释变量外,控制变量不仅包括上面提到的产业结构、外商直接投资、人口密度、能源消费结构、环境规制等外,还包含建设用地规模(*lnsum*),针对该变量,本文用省域建设用地面积对数表示,数据主要来源于《中国统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国工业统计年鉴》和《中国环境统计年鉴》。

2.3 样本选取和变量统计量

本文实证研究采用中国省级层面的面板数据。由于考察包含不同规模城市的省域建设用地空间配置集中度,考虑到数据的可获得性,样本截面不包含直辖市以及地级城市数目较少的海南、新疆、西藏和青海等省(自治区)以及中国香港、澳门和台湾,最终研究对象为中国23个省级行政区。样本的时间序列起止年份为2000—2020年,除环境规制强度外其余控制变量以及核心解释变量滞后一期。综上,样本观测值为483(23个/年×21年)个。此外,测度年度省域建设用地空间配置集中度涉及到23个省域273个城市,省域城市个数分布如图3,各变量的描述性统计如表1所示。

3 结果分析

3.1 特征事实

图4揭示了中国23个省域城市建设用地空间配置集中度(首位城市占比)和碳排放

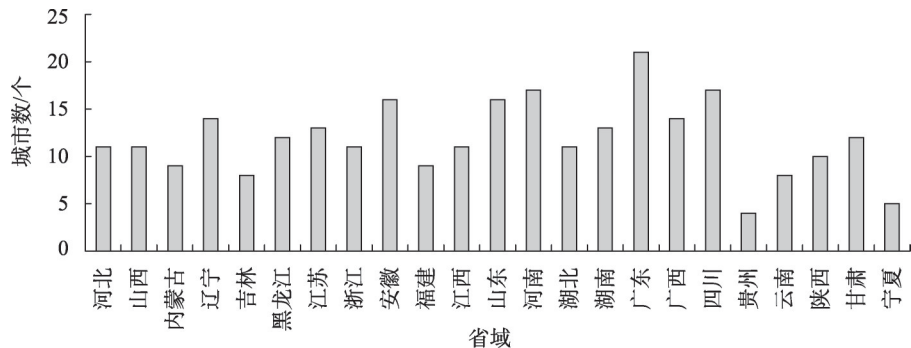


图3 省域地级市数量分布
Fig. 3 Distribution of prefecture-level cities in China

表1 变量描述性统计
Table 1 Descriptive statistics of variables

变量	变量含义	观测值/个	均值	标准差	最小值	最大值
CO ₂	碳排放/(百万 t/km ²)	483	0.360	0.216	0.041	1.162
ee	能源效率/(亿元/万 tce)	483	0.852	0.413	0.174	2.108
pro	建设用地首位城市占比	483	0.321	0.126	0.134	0.721
pro_i	工业用地首位城市占比	483	0.342	0.151	0.119	0.773
pro_r	居住用地首位城市占比	483	0.312	0.138	0.120	0.748
pro_s	服务用地首位城市占比	483	0.336	0.126	0.130	0.778
hhi	建设用地赫芬达尔指数	483	0.182	0.095	0.077	0.541
hhi_i	工业用地赫芬达尔指数	483	0.207	0.118	0.076	0.612
hhi_r	居住用地赫芬达尔指数	483	0.179	0.106	0.074	0.577
hhi_s	服务用地赫芬达尔指数	483	0.191	0.099	0.079	0.619
djgdp	地均实际GDP/(亿元/km ²)	483	8.951	3.880	1.882	21.659
pd	人口密度/(十万人/km ²)	483	0.571	0.340	0.159	2.171
er	环境规制强度	483	0.815	0.584	0.244	3.839
fdi	外商直接投资	483	0.020	0.017	0.000	0.114
is	产业结构	483	0.471	0.060	0.246	0.615
es	能源消费结构低碳化指数	483	5.374	0.317	4.844	6.748
zhgy	重化工业占比	483	0.438	0.173	0.115	0.827
tzqd	投资强度/(亿元/km ²)	483	6.030	4.128	0.770	19.434
lnsum	建设用地规模对数/km ²	483	6.827	0.701	4.650	8.659

水平的时序演化特征及两者的动态演化关系。

就省域城市建设用地空间配置集中度与碳排放的时序变化来看，集中度随着时间的推移呈现四种变化趋势：（1）呈现倒“U”型变化，如河北、江苏、广西和贵州等；（2）呈现“U”型变化，如福建、陕西、甘肃和宁夏等；（3）波动性上升，如吉林、山东、黑龙江和河南等；（4）波动性下降，如内蒙古、山西、广东和云南等。而碳排放的时序演化在多数省域呈现倒“U”型变化趋势，如河北、吉林、江苏、浙江、山东、安徽、河南、湖北、湖南、广东、广西、四川、贵州、云南和甘肃等，且多数省域的拐点年份在2010年前后；而在山西、内蒙古、陕西和黑龙江等呈现“N”型变化。

就城市建设用地空间配置集中度与碳排放的动态演化关系来看，在不同地区及不同阶段存在差异。如山西、内蒙古、甘肃、山东、广东和陕西等省域在整个研究期内两者呈现明显的反向协同关系；而一部分省域在一定的时段呈现明显的反向协同变化，如吉林（2011—2020年）、福建（2007—2020年）、安徽（2016—2020年）、江西（2013—2020年）、浙江（2015—2020年）、河南（2015—2020年）、湖北（2000—2006年/2010—2020年）、湖南（2000—2009年/2015—2020年）、广西（2000—2005年/2016—2020年）、四川（2012—2020年）、宁夏（2008—2015年）和云南（2000—2005年）。其中，吉林、安徽、河南、湖南和四川等省域有着相似的变化规律，即当建设用地空间配置集中度达到一定水平后，碳排放水平将趋于下降；而在黑龙江、辽宁、江苏和安徽等省域两者呈现正向协同演进的趋势。

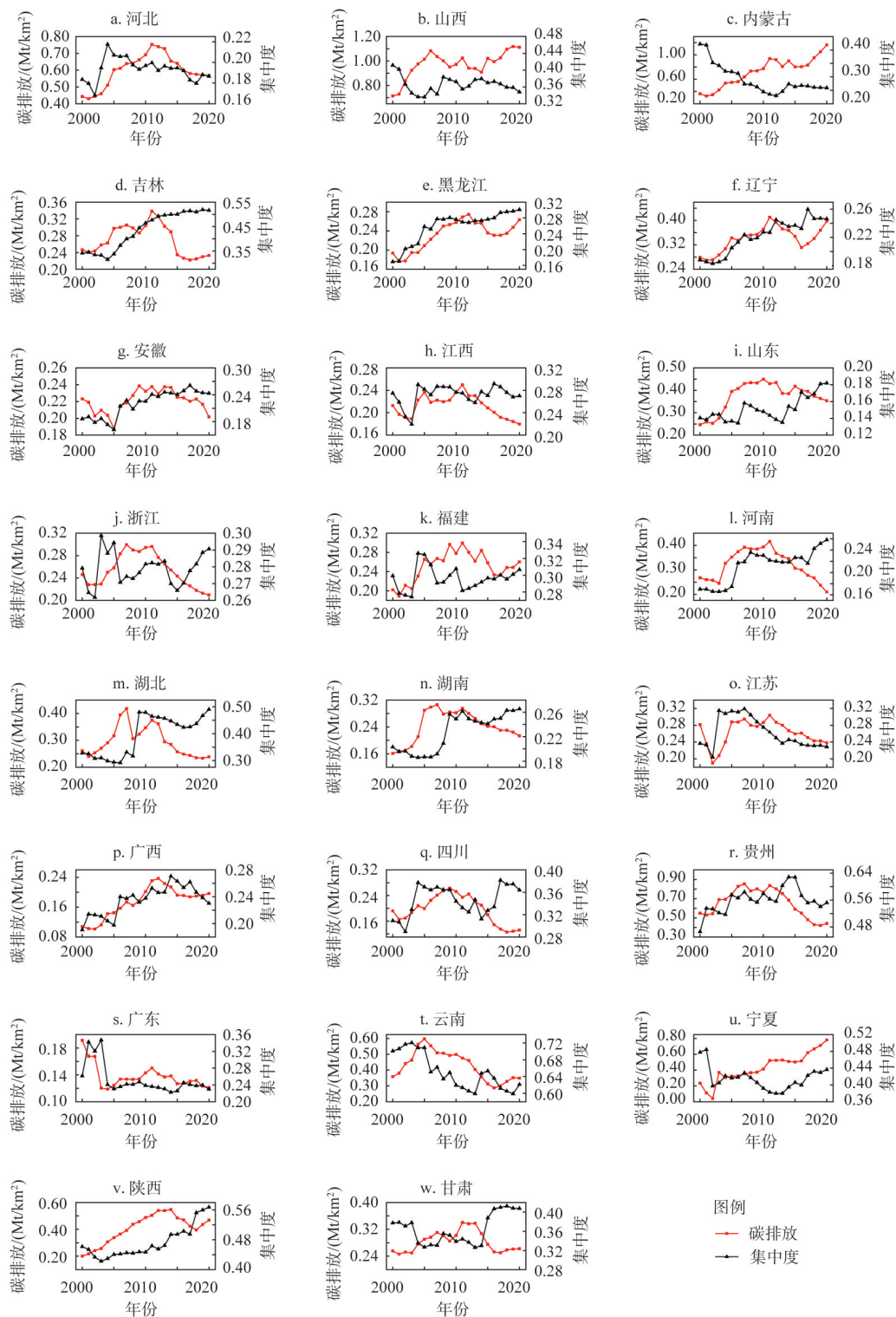


图4 2000—2020年中国23省域建设用地空间配置集中度与碳排放水平的协同演进

Fig. 4 The spatial allocation concentration of construction land and the coordinated evolution with carbon emission level in China's 23 provincial-level regions from 2000 to 2020

表2 各省碳排放水平与建设用地及各功能用地空间配置集中度的年均值排序及K-均值聚类

Table 2 Annual average ranking and K-means clustering of carbon emission level and spatial allocation concentration of construction land and functional land in each provincial-level region

碳排放	聚类	建设用地	聚类	工业用地	聚类	居住用地	聚类	服务用地	聚类
广东(0.138)	1	山东(0.151)	1	山东(0.151)	1	山东(0.140)	1	山东(0.156)	1
广西(0.173)	1	河北(0.193)	1	河南(0.152)	1	河南(0.180)	1	河北(0.207)	1
四川(0.196)	1	河南(0.212)	1	湖南(0.173)	1	安徽(0.205)	1	河南(0.231)	1
江西(0.214)	1	安徽(0.221)	1	安徽(0.199)	1	河北(0.209)	1	安徽(0.233)	1
安徽(0.220)	1	辽宁(0.222)	1	辽宁(0.210)	1	黑龙江(0.215)	1	湖南(0.242)	1
黑龙江(0.232)	1	湖南(0.228)	1	江苏(0.238)	2	辽宁(0.227)	1	辽宁(0.249)	1
湖南(0.243)	2	广西(0.235)	1	河北(0.261)	2	湖南(0.237)	1	广东(0.251)	1
福建(0.251)	2	广东(0.252)	2	广西(0.261)	2	广东(0.238)	1	广西(0.260)	1
浙江(0.254)	2	黑龙江(0.258)	2	江西(0.273)	2	江苏(0.249)	2	黑龙江(0.268)	1
江苏(0.262)	2	江苏(0.263)	2	广东(0.278)	2	浙江(0.250)	2	江苏(0.283)	2
吉林(0.270)	2	江西(0.272)	2	浙江(0.279)	2	江西(0.254)	2	江西(0.285)	2
甘肃(0.283)	2	浙江(0.279)	2	黑龙江(0.283)	2	广西(0.255)	2	内蒙(0.300)	2
湖北(0.295)	2	内蒙古(0.291)	2	四川(0.337)	3	内蒙古(0.256)	2	浙江(0.308)	2
河南(0.320)	2	福建(0.296)	2	福建(0.341)	3	山西(0.269)	2	四川(0.325)	2
辽宁(0.341)	3	四川(0.346)	3	甘肃(0.350)	3	福建(0.301)	2	福建(0.330)	2
山东(0.374)	3	甘肃(0.364)	3	内蒙古(0.402)	3	甘肃(0.339)	2	甘肃(0.375)	2
陕西(0.405)	3	山西(0.370)	3	湖北(0.440)	3	四川(0.348)	2	山西(0.375)	2
云南(0.428)	3	湖北(0.394)	3	吉林(0.444)	3	吉林(0.389)	2	湖北(0.433)	3
宁夏(0.433)	3	宁夏(0.416)	3	山西(0.475)	4	宁夏(0.451)	3	宁夏(0.449)	3
河北(0.597)	4	吉林(0.435)	3	陕西(0.505)	4	湖北(0.455)	3	陕西(0.471)	3
贵州(0.656)	4	陕西(0.473)	3	宁夏(0.518)	4	陕西(0.460)	3	吉林(0.496)	3
内蒙古(0.722)	4	贵州(0.559)	4	贵州(0.565)	4	贵州(0.534)	3	贵州(0.565)	3
山西(0.977)	4	云南(0.653)	4	云南(0.724)	4	云南(0.708)	3	云南(0.645)	3

表2报告了中国23个省域碳排放与建设用地及其各功能用地空间集聚年度均值排序及K-均值聚类。(1)碳排放水平可分为四个梯队。其中,按照碳排放水平由小到大排序和分类,处于碳排放第一梯队的省域有广东、广西、四川、江西、安徽和黑龙江;处于第四梯队的有河北、贵州、内蒙古和山西。

(2)建设用地空间配置集中度也可分为四个梯队。其中,集中度低的省域有山东、河北、河南、安徽、辽宁、湖南和广西,较高的省域有云南、贵州、陕西、吉林、宁夏、湖北和山西等。就三类用地来看,工业用地空间集聚在省域间方差最大,可分为四类,按照年度均值由小到大排序,第一梯队有山东、河南、湖南、安徽和辽宁,即工业用地在省域内呈现相对分散化配置。处于第四梯队的有山西、陕西、宁夏、贵州和云南,工业用地在省域内呈现明显的集中化配置格局。而居住用地和服务用地空间集聚在省域间方差较小,其空间集聚程度可分为三个梯队。其中,除广西外,居住用地与服务用地的聚类较为一致;山东、河南、安徽、河北、黑龙江、辽宁、湖南和广东均处于第一梯队,宁夏、湖北、陕西、贵州和云南处于第三梯队。

(3)以相邻截面碳排放年度均值大小比较为基准,与其对应的城市建设用地及不同

功能用地空间配置集中度年度均值大小比较的关系来看,在广东—广西、四川—江西、江西—安徽、黑龙江—湖南、福建—浙江、浙江—江苏、吉林—甘肃、湖北—河南、辽宁—山东、云南—宁夏、宁夏—河北和贵州—内蒙古等12组截面中碳排放大小关系与其对应的城市建设用地及其分功能的工业用地、居住用地(除了广东—广西以及黑龙江—湖南这两组外)和服务用地(除了广东—广西这一组外)空间配置集中度大小关系呈现反向变化,其分别占到55%(12/22)、55%(12/22)、45%(10/22)和50%(11/22)。然而,在统计上城市建设用地及其不同功能用地空间集聚与碳排放之间是否显著存在这种关系,需通过计量模型进一步实证检验。

3.2 建设用地空间集中配置对碳排放的影响

3.2.1 建设用地整体

基于Hausman检验,本文宜采用双向固定效应模型(下同)。表3报告了省域建设用地空间集中配置(*pro*)对碳排放影响的估计结果。列(1)显示建设用地首位城市占比表征的空间配置集中度与碳排放在1%水平上显著呈负相关,表明加强建设用地空间集中配置有助于降低碳排放;考虑到集中度的非线性效应,在列(1)的基础上,进一步将建设用地空间配置集中度的二次项(*sq_pro*)纳入模型,列(2)显示,建设用地空间配置集中度与碳排放在1%的水平上呈显著的“U”型关系,且其拐点值为0.483。初步表明,建设用地空间集中配置对碳减排存在边界效应,即建设用地空间配置适度集中有助于降低碳排放,但建设用地空间集中配置超过该拐点值将诱发碳排放。然而,以上分析未考虑其他控制变量,进而可能引起估计结果偏误。基于此,在列(1)的基础上加入其他控制变量,列(3)显示,建设用地空间配置集中度的符号仍在1%水平显著为负,表明省域建设用地集中配置的碳减排效应是成立的。进一步考察建设用地空间配置集中度对碳减排的边界效应,在列(3)的基础上加入首位城

表3 建设用地空间配置集中度对碳排放的影响				
Table 3 The impact of spatial allocation of concentration of construction land on carbon emissions				
变量	(1) CO ₂	(2) CO ₂	(3) CO ₂	(4) CO ₂
<i>pro</i>	-0.43*** (0.10)	-2.05*** (0.33)	-0.54*** (0.08)	-1.13*** (0.28)
<i>sq_pro</i>		2.12*** (0.41)		0.76** (0.34)
<i>djgdp</i>			0.01*** (0.00)	0.01*** (0.00)
<i>pd</i>			0.24*** (0.03)	0.23*** (0.03)
<i>er</i>			-0.01 (0.01)	-0.00 (0.01)
<i>fdi</i>			0.10*** (0.03)	0.12*** (0.03)
<i>is</i>			0.78*** (0.10)	0.75*** (0.10)
<i>es</i>			-0.07*** (0.02)	-0.06*** (0.02)
<i>zgyh</i>			0.77*** (0.07)	0.74*** (0.07)
<i>tzqd</i>			-0.01*** (0.00)	-0.01*** (0.00)
<i>_cons</i>	0.41*** (0.03)	0.67*** (0.06)	-0.23 (0.14)	-0.10 (0.15)
时间/个体	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>N</i> /个	483	483	483	483
<i>R</i> ²	0.31	0.35	0.63	0.64
Hausman	6.53**	6.55**	17.30**	17.62**

注: *、**、***分别表示在10%、5%、1%的水平下显著。括号为标准误,下同。

市占比的二次项 (sq_pro)。列(4)结果显示：建设用地空间配置集中度一次项仍然在1%的水平上显著为负，二次项符号在5%的水平上显著为正，表明建设用地空间集中配置与碳排放之间呈“U”型的非线性关系，且其拐点值为0.749。然而，根据表1报告的基本统计量，建设用地空间配置集中度取值范围[0.134, 0.721]。这表明，在研究期内，以首位城市占比表征的建设用地空间配置集中度均位于拐点左侧，建设用地资源空间集中配置尚未产生碳排放效应，换言之，就碳减排目标而言，当前建设用地资源集中配置是适宜的，两者以线性负相关关系为主。综上所述：研究期内建设用地空间集中配置的碳减排效应占主导地位。

结合中国发展实践，通过图2可以看出不同区域典型省份建设用地空间配置与碳排放呈现明显的反向变化规律，而且在同一区域不同省份间这种反向变化呈现不同的特点。首先，就东部省域来看，如福建在2007—2020年间建设用地空间配置集中度不断提高的同时，碳排放水平不断下降；山东建设用地空间配置集中度则呈现“U”型变化，而碳排放呈倒“U”型变化。此外，通过表2的静态比较来看，山东和河北的建设用地空间配置集中度均很低，分别位于倒数第1位和第2位，而其碳排放水平则相对偏高，分别位于第8位和第4位。与此同时，就经济发展水平较为相近的省域江苏、浙江和福建而言，其碳排放格局呈现“江苏>浙江>福建”的格局，但建设用地空间配置集中度呈现“江苏<浙江<福建”的反向变化。其次，在中部地区，如湖北2000年—2007年碳排放水平持续上升，建设用地空间配置集中度存在持续走低的态势；而在2012年—2020年碳排放水平持续降低，建设用地空间配置集中度持续增强。其背后的政策逻辑是随着2004年促进中部地区崛起的重大战略的提出，党中央把湖北作为促进中部地区崛起的重要战略支点。2010年国家批复武汉城市总体规划（2010—2020年），明确武汉为中部地区中心城市。因此，使得2011年以后武汉在湖北得到大力发展，建设用地资源不断向武汉倾斜，使得武汉在湖北的城市首位度不断提高。与此同时，在中部崛起战略背景下，安徽、湖南、河南和江西等也不断加强省域中心城市（省府）建设，与此相伴随的是，省域整体碳排放也呈现不断下降的趋势。但值得一提的是，同处于中部地区的山西，2013—2020年城市建设用地空间配置集中度不断下降，即城市建设用地资源并没有向中心城市太原集聚，而在这一阶段，整个省域碳排放水平持续走高。最后，就西部来看，如内蒙古的建设用地空间配置集中度不断下降的同时，其碳排放水平不断提高；甘肃的建设用地空间配置集中度呈现“U”型变化，而对应的碳排放水平则呈现倒“U”型变化；陕西在某一阶段建设用地空间配置集中度逐步走低的情况下，碳排放持续提高，反之亦然。静态比较来看，在经济发展条件较为相似的云南和贵州，前者的城市建设用地空间配置集中度大于后者；与此同时，前者的碳排放水平低于后者。综上所述，城市建设用地空间集中配置将有助于降低碳排放水平。

3.2.2 各功能用地

进一步检验建设用地各功能用地之工业、商服和居住用地对碳排放影响的异质性。表4表明以首位城市占比为基准的各功能用地空间集中配置的估计结果。首先，在不控制其他变量的情况下，列(1)、列(4)和列(7)显示，三类用地空间集中配置的符号均至少在5%的水平上显著为负，初步表明各功能用地空间集中配置同建设用地整体一样有助于

表4 各功能用地空间配置集中度对碳排放的影响

Table 4 The impact of spatial allocation concentration of different types of functional land on carbon emissions

变量	工业用地			居住用地			服务用地		
	(1) CO ₂	(2) CO ₂	(3) CO ₂	(4) CO ₂	(5) CO ₂	(6) CO ₂	(7) CO ₂	(8) CO ₂	(9) CO ₂
<i>pro_i</i>	-0.17** (0.08)	-0.18*** (0.06)	0.21 (0.22)						
<i>sq_pro_i</i>			-0.51* (0.27)						
<i>pro_r</i>				-0.22*** (0.08)	-0.20*** (0.07)	-0.14 (0.24)			
<i>sq_pro_r</i>						-0.08 (0.30)			
<i>pro_s</i>							-0.22** (0.09)	-0.31*** (0.07)	-0.72*** (0.23)
<i>sq_pro_s</i>									0.48* (0.26)
控制变量	No	Yes	Yes	No	Yes	Yes	No	Yes	Yes
<i>_cons</i>	0.33*** (0.03)	-0.39*** (0.15)	-0.45*** (0.15)	0.35*** (0.03)	-0.32** (0.15)	-0.33** (0.15)	0.35*** (0.03)	-0.30** (0.15)	-0.20 (0.16)
时间/个体	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>R</i> ²	0.29	0.60	0.60	0.29	0.60	0.60	0.29	0.61	0.61

注：限于版面，相关控制变量的估计结果未予以报告，下同。

降低碳排放。其次，列(2)、列(5)和列(8)将其他变量纳入模型，结果显示，三类用地空间集中配置均在1%的水平上显著地抑制了碳排放，说明控制其他变量与否，三类功能用地空间集中配置均具有显著的碳减排效应。就影响强度来看，工业与居住用地差异不大，服务用地作用最大，但小于建设用地整体空间配置集中度。原因是，一方面服务用地规模在一定程度上反映的是服务业发展，服务用地将推动产业结构服务化，进而能够带来较大的碳减排效应；另一方面，基于集聚的节能减排理论，就空间配置集中度横向比较来看，工业用地>服务用地>建设用地整体>居住用地，而集中度揭示的是规模分布的相对均衡性问题，但就集中度背后的首位城市集聚规模来看，建设用地整体>服务用地>居住用地>工业用地。因此，尽管工业用地集中度最高，但首位城市集聚规模较小，尽管服务用地空间集中度要略低于工业用地，但首位城市集聚规模较大，综上使得服务用地具有更好、更高水平和质量的集聚能力，进而相对于工业和居住用地空间集中配置能产生更大的节能减排效果。换言之，尽管工业用地空间配置集中度高，但集聚规模小，是一种相对较低水平的空间集中。同理，尽管建设用地整体空间配置集中度小于服务用地，但从集中度背后的绝对规模来看，建设用地整体的规模较服务用地要大，更能带来较大的集聚节能减排效果。

(3) 进一步考虑各功能用地空间集中配置对碳减排的边界效应，将各功能用地空间集中配置的二次项纳入模型，列(3)、列(6)和列(9)呈现了其估计结果。其中，工业用地空间集中配置的一次项(*pro_i*)为正，但不显著；而二次项(*sq_pro_i*)为负，且在

10%的水平上显著。结合列(2)则说明,加强工业用地集中配置有助于降低碳排放,反之,将在一定程度上诱发碳排放,整体来看,工业用地空间集中配置仅与碳排放存在线性为负的关系。居住用地空间集中配置的一次项(pro_r)和其二次项(sq_pro_r)均不显著,结合列(5),表明居住用地空间集中配置对碳排放仅存在线性关系。服务用地空间配置集中度的一次项(pro_s)在1%水平上显著为负,二次项(sq_pro_s)在10%水平上显著为正,其拐点值为0.755,在研究期内仅云南个别年份超过拐点值,其余省份皆位于拐点左侧,即服务用地空间配置集中度与碳排放主要存在线性负相关关系。综上所述说明,与建设用地整体一样,三类功能用地空间集中配置碳减排效应占主导地位。因此,假说2得到验证。

3.2.3 各功能用地空间集中配置的协同对碳排放的影响

根据假说3,即建设用地各功能用地空间集中配置的交互会强化对碳排放的作用。基于此,表5报告了这一假说检验。其中,列(1)~列(3)为两两功能用地空间集中配置的交互,列(4)为三类用地空间集中配置的交互。可以看出,无论是两两用地空间集中配置的交互项,还是三类用地空间集中配置的交互项,其符号均在1%的水平上显著为负,且其对碳排放的影响系数的绝对值较表4列(2)、列(5)和列(8)的居住用地、工业用地和服务用地空间集中配置的系数绝对值要大,表明三类用地空间集中配置的耦合协同将对碳减排的作用强度产生倍增效应。就交互作用的内部比较而言,工业用地和居住用地的交互作用要小于工业用地与服务用地以及服务用地与居住用地,这进一步说明服务用地在三类用地空间集中配置的碳减排效应中占据重要地位。因此,假说2和假说3成立。

3.3 建设用地及其各功能用地空间集中配置影响碳排放的机制分析

根据假说4,建设用地空间集中配置通过提高能源利用效率而降低碳排放。验证能源效率作为建设用地空间集中配置影响碳排放的中介变量,关键在于证实两点:第一,建设用地空间集中配置提高能源效率;第二,能源利用效率提升推动碳排放降低。对于第二点,有大量文献研究已证实两者为负相关关系,其原因显而易见,提高能源使用效率,将会减少能源消费总量,进而将减少二氧化碳排放^[58-60]。而对于第一点的验证是本节的重点。

表6显示了建设用地及其各功能用地空间集中配置对能源效率影响的估计结果。列(1)显示:以首位城市占比表征的建设用地集中配置与能源效率在1%水平上显著正相关,即建设用地资源在省内集中配置有助于推动能源效率的提升,并进一步促进碳减

表5 各功能用地空间集中配置的交互对碳排放的影响
Table 5 The impact of the interaction of centralized spatial allocation of different types of functional land on carbon emissions

变量	(1) CO ₂	(2) CO ₂	(3) CO ₂	(4) CO ₂
$pro_i \times pro_r$	-0.32*** (0.09)			
$pro_r \times pro_s$		-0.37*** (0.09)		
$pro_i \times pro_s$			-0.35*** (0.09)	
$pro_i \times pro_s \times pro_r$				-0.44*** (0.13)
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes
时间/个体	Yes	Yes	Yes	Yes
$_cons$	-0.37*** (0.15)	-0.35** (0.15)	-0.39*** (0.15)	-0.40*** (0.15)
R ²	0.60	0.61	0.61	0.60

表6 建设用地空间集中配置影响碳排放的作用机制								
Table 6 The mechanism of centralized spatial allocation of construction land affecting carbon emissions								
变量	(1) <i>ee</i>	(2) <i>ee</i>	(3) <i>ee</i>	(4) <i>ee</i>	(5) <i>ee</i>	(6) <i>ee</i>	(7) <i>ee</i>	(8) <i>ee</i>
<i>pro</i>	0.92*** (0.16)							
<i>pro_i</i>		0.39*** (0.12)						
<i>pro_r</i>			0.28** (0.13)					
<i>pro_s</i>				0.41*** (0.14)				
<i>pro_i</i> × <i>pro_r</i>					0.49*** (0.18)			
<i>pro_r</i> × <i>pro_s</i>						0.56*** (0.18)		
<i>pro_i</i> × <i>pro_s</i>							0.59*** (0.17)	
<i>pro_i</i> × <i>pro_s</i> × <i>pro_r</i>								0.75*** (0.25)
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>_cons</i>	-0.43 (0.50)	0.36 (0.49)	0.21 (0.51)	-0.02 (0.52)	0.28 (0.50)	0.10 (0.51)	0.16 (0.50)	0.23 (0.50)
时间/个体	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>R</i> ²	0.85	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84

排。就各功能用地来看，列(2)、列(3)和列(4)分别报告了工业用地、居住用地和服务用地空间集中配置对能源效率影响的估计结果。可以看出，工业、居住和服务用地空间集中配置的符号分别在1%、5%和1%的水平上显著为正，就影响强度来看，工业用地和服务用地的作用强度相近，而居住用地空间集中配置的作用最低。其原因是，在能源消耗方面，作为工业生产活动载体的工业用地占据主导地位，作为生产生活服务业的服务用地次之，而作为居民生活的居住用地的能源消耗最低，且居住用地空间配置集中度较低。因此，居住用地空间集中配置对能源效率的影响较小，而工业用地空间集中配置将会带来明显的能源效率的提升。列(5)~列(7)为各功能用地空间集中配置两两交互，而列(8)为三类用地空间集中配置的交互，可以看出，其至少在1%的水平上显著提高了能源效率，且影响系数较列(2)~列(4)各功能建设用地空间集中配置的影响系数明显提高，说明各功能用地空间集中配置的耦合协同将对能源效率的提高产生倍增效应，这与表4各功能用地空间集中配置的交互对碳排放的影响有着相似的规律。至此，假说4得到验证。

3.4 稳健性检验

在上述实证检验中，核心解释变量省域城市建设用地空间配置集中度是采用首位城市占比来进行衡量的，为保证实证结果的稳健性，本文将其替换为以赫芬达尔指数(*hhi*)来表征集中度，对影响效应和作用机制进行稳健性检验。

表7显示了基于赫芬达尔指数(*hhi*)表征的建设用地空间配置对碳排放的影响机制

的稳健性结果：（1）在不考虑其他变量的情况下，列（1）显示，建设用地空间集中配置在1%的水平上显著为负；列（2）显示，建设用地空间集中配置在1%的水平上呈“U”型变化，这与表3列（1）和列（2）的结论一致，其拐点为0.367。（2）在控制其他变量的情况下，列（3）显示，建设用地空间集中配置在1%的水平上显著为负；列（4）显示，建设用地空间集中配置在1%的水平上呈“U”型变化，其拐点值为0.466，对比研究期内各省建设用地空间集中配置的赫芬达尔指数（*hhi*），仅云南省部分年份（2000—2005年、2009年）突破拐点，其余省份仍位于拐点左侧。因此，结合前两点的分析表明，当前建设用地空间集中配置的碳减排效应占据主导地位，这与表3的结论是一致的。（3）列（5）进一步考察建设用地空间集中配置的碳减排效应之能源效率（*ee*）传导机制，可以看出建设用地空间配置集中度的系数在1%水平上显著为正，说明建设用地空间集中配置能够通过提高能源效率降低碳排放。因此，假说1和假说4的结论稳健。

表8报告了建设用地分功能用地空间集中配置对碳排放影响机制的稳健性检验。

表7 稳健性检验：建设用地整体
Table 7 Robustness test: Overall construction land

变量	(1) CO ₂	(2) CO ₂	(3) CO ₂	(4) CO ₂	(5) <i>ee</i>
<i>hhi</i>	-0.73*** (0.14)	-3.72*** (0.38)	-0.77*** (0.11)	-2.04*** (0.33)	1.43*** (0.21)
<i>sq_hhi</i>		5.07*** (0.61)		2.19*** (0.53)	
控制变量	No	No	Yes	Yes	Yes
时间/个体	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>_cons</i>	0.41*** (0.03)	0.73*** (0.05)	-0.23 (0.14)	0.01 (0.15)	-0.40 (0.49)
<i>R</i> ²	0.32	0.42	0.64	0.65	0.85

表8 稳健性检验：分功能用地
Table 8 Robustness test: Land for different functions

变量	工业用地			居住用地			服务用地		
	(1) CO ₂	(2) CO ₂	(3) <i>ee</i>	(4) CO ₂	(5) CO ₂	(6) <i>ee</i>	(7) CO ₂	(8) CO ₂	(9) <i>ee</i>
<i>hhi_i</i>	-0.49*** (0.09)	-0.32 (0.26)	0.86*** (0.18)						
<i>sq_hhi_i</i>		-0.30 (0.41)							
<i>hhi_r</i>				-0.42*** (0.10)	-0.35 (0.29)	0.73*** (0.18)			
<i>sq_hhi_r</i>					-0.13 (0.51)				
<i>hhi_s</i>							-0.44*** (0.09)	-1.75*** (0.26)	0.82*** (0.16)
<i>sq_hhi_s</i>								1.95*** (0.37)	
时间/个体	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>_cons</i>	-0.32** (0.15)	-0.34** (0.15)	-0.28 (0.27)	-0.27* (0.15)	-0.28* (0.15)	-0.30 (0.27)	-0.29** (0.15)	0.01 (0.15)	-0.29 (0.27)
<i>R</i> ²	0.62	0.62	0.84	0.61	0.61	0.84	0.62	0.64	0.84

(1) 列(1)、列(4)和列(7)报告了各功能用地空间集中配置与碳排放的线性关系。其估计结果显示,三类用地空间集中配置均在1%的水平上具有显著的碳减排效应,与表4有所不同的是,影响强度在三类用地的大小顺序略有变化,可能的原因是赫芬达尔指数更能全面揭示空间配置集中度。(2) 列(2)、列(5)和列(8)报告了各功能用地的空间集中配置与碳排放的非线性关系。可以看出,仅服务用地空间集中配置对碳排放存在非线性影响,且其拐点值为0.449,仅云南(2000—2007年,2009年)、贵州(2013—2016年)和宁夏(2001年)等部分年份跨越这一拐点,因此,服务用地空间集中配置与碳排放的关系,同其他两种功能用地一样,以负向线性关系占主导。(3) 列(3)、列(6)和列(9)为各功能用地空间集中配置对能源效率的影响,揭示各功能用地空间集中配置的碳减排效应之传导机制。结果显示,各功能用地空间集中配置的符号至少在1%的水平上显著为正,即各功能用地空间集中配置将通过提升能源效率而产生碳减排效应。就各功能用地空间集中配置对能源效率的影响强度来看,居住用地略小,也进而使得居住用地空间集中配置对碳减排的作用强度略小于其他两类用地。因此,假说2和假说4的结论整体稳健。

表9为各功能用地空间集中配置的交互对碳排放的影响,以及能源效率中介机制的检验。无论是两两交互,还是三类用地空间集中配置的交互,在揭示碳排放驱动因素的列(1)、列(3)、列(5)和列(7)中,其符号均在1%的水平上显著为负,而在揭示能源效率中介机制的列(2)、列(4)、列(6)和列(8)中,其符号均在在1%的水平上显著为正,表明各功能用地空间集中配置的协同将通过提高能源效率降低碳排放水平。而且比较表8,各功能用地空间集中配置协同对碳减排及其中介变量能源效率的提升效应明显高于各功能用地。因此,假说3和假说4的结论稳健。

表9 稳健性检验:分功能用地交互
Table 9 Robustness test: Functional land interaction

变量	(1) CO ₂	(2) <i>ee</i>	(3) CO ₂	(4) <i>ee</i>	(5) CO ₂	(6) <i>ee</i>	(7) CO ₂	(8) <i>ee</i>
<i>hhi_i×hhi_r</i>	-0.92*** (0.18)	1.47*** (0.34)						
<i>hhi_s×hhi_r</i>			-0.66*** (0.17)	1.36*** (0.32)				
<i>hhi_i×hhi_s</i>					-0.60*** (0.14)	1.26*** (0.27)		
<i>hhi_s×hhi_i×hhi_r</i>							-0.86*** (0.28)	1.92*** (0.54)
时间/个体	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>_cons</i>	-0.34** (0.15)	0.12 (0.49)	-0.37** (0.15)	0.04 (0.50)	-0.40*** (0.15)	0.08 (0.49)	-0.42*** (0.15)	0.23 (0.50)
<i>R</i> ²	0.62	0.84	0.61	0.84	0.61	0.84	0.60	0.84

4 结论与建议

建设土地利用变化是引起碳源/汇变化的重要原因,如何优化中国省域城市建设用地

空间配置以驱动碳减排,是双碳战略背景下一个重要课题。因此,本文以2000—2020年中国23个省域为研究对象,采取双向固定效应模型检验省域城市建设用地空间集中配置对碳排放水平的影响,并进一步检验了能源效率这一作用路径,得到以下结论:(1)省域城市建设用地空间集中配置与碳排放呈“U”型关系,但在研究期内,城市建设用地空间集中配置的碳减排效应占据主导地位。(2)城市建设用地各功能用地空间集中配置对碳排放的影响具有异质性,其中工业与居住用地空间集中配置与碳排放呈线性负相关关系,而服务用地空间集中配置与碳排放呈“U”关系,但碳减排效应占主导,整体来看,工业和服务用地空间集中配置的碳减排效应相对较大。(3)能源效率是建设用地及各功能用地空间集中配置影响碳排放的重要机制。(4)各功能用地空间集中配置的耦合协同将进一步通过增强能源效率而对碳减排产生倍增效应。基于此,本文得到如下建议:

(1)以主体功能区战略为牵引,建构以碳减排为目标的省域建设用地空间集中配置格局。顺应降碳为战略重点的生态文明建设新要求,省域政府要充分重视土地资源在碳减排方面的作用,统筹构建基于低碳导向的省域土地资源空间组织体系,优化省域国土空间开发保护格局。立足资源环境承载能力,发挥各城市的比较优势,充分发掘各地的资源禀赋等,构建新时代的生态文明建设空间开发保护新秩序。坚持资源空间集聚的基本战略与科学划定“三区三线”,加强以省域中心城市为主导的城市化地区重点开发与优化开发,支持建设用地向这类地区集中,增强其高效集聚经济和人口的能力,发挥其在区域节能减排的主导作用;而对于粮食主产区和生态脆弱地区要限制开发与禁止开发,要减量化供应建设用地,以保护基本农田和生态空间。

(2)强化省域各城市的功能定位与功能分工,引领建设用地各功能用地空间集中配置,发挥三类用地空间集中配置协同对碳减排的倍增效应。建设用地内部存在“生产—居住—服务”三种功能,城市功能的复合性意味着城市内部可承担“生产—居住—服务”功能。但随着分工的深化,服务功能与生产功能将发生一定的空间分离,大城市需要充分发挥服务功能(尤其是生产性服务功能)方面的比较优势,适度加强其服务用地供给,以此通过推动产业结构升级增强碳减排能力;次级中心城市强化其工业生产功能,加强工业用地向省域次级中心城市集聚,增强工业用地空间集聚的节能减排效应。

(3)发挥好政府调控与市场机制在城市建设用地及各功能用地空间配置中的作用。建设用地配置方式可分为两类:一是自上而下的“初次分配”过程;二是基于市场手段的建设用地指标跨城市交易的“二次分配”过程。打造“有为政府”,积极发挥其在建设用地指标配置上的作用,支持建设用地资源向中心城市集聚,促进国土空间开发利用方式与碳减排目标之间的协同。同时,建立区内协调机制,一方面,支持生态功能区人口逐步有序向城市化地区转移落户,减轻生态功能区的生态环境压力和提高城市化地区的资源环境综合承载力;另一方面,针对建设用地空间配置集中度较高的省份,省级政府要推动省域次中心城市建设,支持建设用地指标向次级中心城市倾斜,提高区域协调发展能力,缓解中心城市拥挤效应,进而促进碳减排。构建“有效市场”,探索建立建设用地指标跨区域交易机制,充分发挥其在建设用地资源空间配置方面的二次分配地位,增强建设用地及各类用地在城市间的“流动”,确保建设用地及其各功能用地在省域内形成合理的空间集聚,以此增强空间功能分工,形成碳减排效应。

参考文献(References):

- [1] 牟瑛, 张贤明, 陈欢, 等. 我国多年来温室气体排放情况及对策研究. 河南科技, 2021, 40(9): 128-130. [MU Y, ZHANG X M, CHEN H, et al. Research on China's greenhouse gas emission situation and countermeasures over the years. Henan Science and Technology, 2021, 40(9): 128-130.]
- [2] 赵荣钦, 黄贤金, 郎文聚, 等. 碳达峰碳中和目标下自然资源管理领域的关键问题. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1123-1136. [ZHAO R Q, HUANG X J, YUN W J, et al. Key issues in natural resource management under carbon emission peak and carbon neutrality targets. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1123-1136.]
- [3] 王天福, 龚直文, 邓元杰. 基于土地利用变化的陕西省植被碳汇提质增效优先区识别. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1214-1232. [WANG T F, GONG Z W, DENG Y J. Identification of priority areas for improving quality and efficiency of vegetation carbon sinks in Shaanxi province based on land use change. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1214-1232.]
- [4] 丁明磊, 杨晓娜, 赵荣钦, 等. 碳中和目标下的国土空间格局优化: 理论框架与实践策略. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1137-1147. [DING M L, YANG X N, ZHAO R Q, et al. Optimization of territorial space pattern under the goal of carbon neutrality: Theoretical framework and practical strategy. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1137-1147.]
- [5] 易丹, 欧名豪, 郭杰, 等. 土地利用碳排放及低碳优化研究进展与趋势展望. 资源科学, 2022, 44(8): 1545-1559. [YI D, OU M H, GUO J, et al. Progress and prospect of research on land use carbon emissions and low-carbon optimization. Resources Science, 2022, 44(8): 1545-1559.]
- [6] 张苗, 吴萌. 土地利用对碳排放影响的作用机制和传导路径分析: 基于结构方程模型的实证检验. 中国土地科学, 2022, 36(3): 96-103. [ZHANG M, WU M. Analysis on the mechanism and transmission path of the impact of land use on carbon emissions: Empirical test based on structural equation model. China Land Science, 2022, 36(3): 96-103.]
- [7] 游和远, 吴次芳. 土地利用的碳排放效率及其低碳优化: 基于能源消耗的视角. 自然资源学报, 2010, 25(11): 1875-1886. [YOU H Y, WU C F. Carbon emission efficiency and low carbon optimization of land use: Based on the perspective of energy consumption. Journal of Natural Resources, 2010, 25(11): 1875-1886.]
- [8] 李颖, 黄贤金, 甄峰. 江苏省区域不同土地利用方式的碳排放效应分析. 农业工程学报, 2008, 24(s2): 102-107. [LI Y, HUANG X J, ZHEN F. Effects of land use patterns on carbon emission in Jiangsu province. Transactions of the CSAE, 2008, 24(s2): 102-107.]
- [9] 曲福田, 卢娜, 冯淑怡. 土地利用变化对碳排放的影响. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(10): 76-83. [QU F T, LU N, FENG S Y. Effects of land use change on carbon emissions. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(10): 76-83.]
- [10] 黄贤金, 张秀英, 卢学鹤, 等. 面向碳中和的中国低碳国土开发利用. 自然资源学报, 2021, 36(12): 2995-3006. [HUANG X J, ZHANG X Y, LU X H, et al. Land development and utilization for carbon neutralization. Journal of Natural Resources, 2021, 36(12): 2995-3006.]
- [11] 赵荣钦, 黄贤金, 刘英, 等. 区域系统碳循环的土地调控机理及政策框架研究. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(5): 51-56. [ZHAO R Q, HUANG X J, LIU Y, et al. Mechanism and policy framework for land regulation of carbon cycle of regional system. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(5): 51-56.]
- [12] 刘海猛, 石培基, 王录仓, 等. 低碳目标导向的兰州市土地利用结构优化研究. 中国土地科学, 2012, 26(6): 55-61. [LIU H M, SHI P J, WANG L C, et al. Optimizing land use structure for low carbon target: A case study in Lanzhou of Gansu province. China Land Sciences, 2012, 26(6): 55-61.]
- [13] LIN Q, ZHANG L, QIU B, et al. Spatiotemporal analysis of land use patterns on carbon emissions in China. Land, 2021, 10(2): 141, <https://doi.org/10.3390/land10020141>.
- [14] 邓祥征, 蒋思坚, 李星, 等. 区域土地利用影响地表CO₂浓度异质性特征的动力学机制. 地理学报, 2022, 77(4): 936-946. [DENG X Z, JIANG S J, LI X, et al. Dynamics of regional land uses affecting spatial heterogeneity of surface CO₂ concentration. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(4): 936-946.]
- [15] 张海, 赖力, 黄贤金, 等. 中国区域土地利用类型转变的碳排放强度研究. 资源科学, 2013, 35(4): 792-799. [ZHANG M, LAI L, HUANG X J, et al. The carbon emission intensity of land use conversion in different regions of China. Resources Science, 2013, 35(4): 792-799.]

- [16] 杨庆媛. 土地利用变化与碳循环. 中国土地科学, 2010, 24(10): 7-12. [YANG Q Y. Land use change and carbon cycle. China Land Science, 2010, 24(10): 7-12.]
- [17] 杜官印. 建设用地对碳排放的影响关系研究. 中国土地科学, 2010, 24(5): 32-36. [DU G Y. Research on influences of construction land on carbon emission. China Land Science, 2010, 24(5): 32-36.]
- [18] 张润森, 濮励杰, 文继群, 等. 建设用地扩张与碳排放效应的库兹涅茨曲线假说及验证. 自然资源学报, 2012, 27(5): 723-733. [ZHANG R S, PU L J, WEN J Q, et al. Hypothesis and validation on the Kuznets Curve of construction land expansion and carbon emission effect. Journal of Natural Resources, 2012, 27(5): 723-733.]
- [19] 袁凯华, 甘臣林, 杨慧琳, 等. 建设用地扩张与碳排放增长的EKC验证及特征分解研究: 以武汉市为例. 中国土地科学, 2019, 33(1): 56-64. [YUAN K H, GAN C L, YANG H L, et al. Validation of the EKC and characteristics decomposition between construction land expansion and carbon emission: A case study of Wuhan city. China Land Science, 2019, 33(1): 56-64.]
- [20] 杨欣, 谢向向. 武汉市建设用地扩张与碳排放效应的库兹涅茨曲线分析. 华中农业大学学报: 社会科学版, 2020, 40(4): 158-165, 181-182. [YANG X, XIE X X. Kuznets Curve empirical analysis of Wuhan construction land expansion and carbon emission effect. Journal of Huazhong Agricultural University: Social Sciences Edition, 2020, 20(4): 158-165, 181-182.]
- [21] 袁凯华, 梅昀, 陈银蓉, 等. 中国建设用地集约利用与碳排放效率的时空演变与影响机制. 资源科学, 2017, 39(10): 1882-1895. [YUAN K H, MEI Y, CHEN Y R, et al. Temporal and spatial evolution and influencing mechanism of construction land intensive utilization on carbon emissions efficiency in China. Resources Science, 2017, 39(10): 1882-1895.]
- [22] 许恒周, 郭玉燕, 陈宗祥. 土地市场发育、城市土地集约利用与碳排放的关系: 基于中国省际面板数据的实证分析. 中国土地科学, 2013, 27(9): 26-29. [XU H Z, GUO Y Y, CHEN Z X. The relationship between land market development, urban land intensive use and carbon emission: An empirical study based on provincial panel data in China. China Land Sciences, 2013, 27(9): 26-29.]
- [23] 周璟茹, 赵华甫, 吴金华. 关中城市群土地集约利用与碳排放关系演化特征研究. 中国土地科学, 2017, 31(11): 55-61, 72. [ZHOU J R, ZHAO H F, WU J H. Study on relationship and evolution characteristics of intensive land-use and carbon emission of Guanzhong Urban Agglomeration. China Land Science, 2017, 31(11): 55-61, 72.]
- [24] 张苗, 甘臣林, 陈银蓉, 等. 中国城市建设用地开发强度的碳排放效率分析与低碳优化. 资源科学, 2016, 38(2): 265-275. [ZHANG M, GAN C L, CHEN Y R, et al. Carbon emission efficiency and optimization of low carbon for construction land development intensity in China according to provincial panel data. Resources Science, 2016, 38(2): 265-275.]
- [25] 李国煜, 王嘉怡, 曹宇, 等. 碳排放约束下的福建省城镇建设土地利用效率动态变化与影响因素. 中国土地科学, 2020, 34(4): 69-77. [LI G Y, WANG J Y, CAO Y, et al. Dynamic changes and influencing factors of urban construction land use efficiency under carbon emission constraint in Fujian province. China Land Science, 2020, 34(4): 69-77.]
- [26] 於冉, 黄贤金. 碳排放峰值控制下的建设用地扩展规模研究. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(7): 66-72. [YU R, HUANG X J. Research on the expansion scale of construction land under the restriction of carbon emission peak. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(7): 66-72.]
- [27] 王亮. 基于灰色关联的盐城市城市建设用地碳排放协调发展研究. 水土保持研究, 2015, 22(2): 253-257. [WANG L. Research for coordinative development about carbon emission from construction land in Yancheng city based on grey correlation method. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(2): 253-257.]
- [28] 陈前利, 马贤磊, 石晓平, 等. 工业用地供应行为影响工业能源碳排放吗: 基于供应规模、方式与价格三维度分析. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(12): 57-67. [CHEN Q L, MA X L, SHI X P, et al. Does the supply of industrial land affect industrial energy carbon emissions: Based on the analysis of supply scale, method and price. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(12): 57-67.]
- [29] 孙艺璇, 程钰, 张含朔. 城市工业土地集约利用对碳排放效率的影响研究: 以中国15个副省级城市为例. 长江流域资源与环境, 2020, 29(8): 1703-1712. [SUN Y X, CHENG Y, ZHANG H S. Study on the impact of intensive use of urban industrial land on carbon emission efficiency in China's 15 sub-provincial cities. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(8): 1703-1712.]

- [30] 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. 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. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(17): 6302-6313.]
- [31] 陈建伟. 中国城市低碳化发展的路径选择: 重庆个案. 改革, 2016, (3): 74-83. [CHEN J W. Path selection for the development of low carbon in China: Case of Chongqing. *Reform*, 2016, (3): 74-83.]
- [32] 潘海啸, 汤葐, 吴锦瑜, 等. 中国“低碳城市”的空间规划策略. 城市规划学刊, 2008, (6): 57-64. [PAN H X, TANG Y, WU J Y, et al. Spatial planning strategy for "low carbon cities" in China. *Urban Planning Forum*, 2008, (6): 57-64.]
- [33] 汪晗, 吴静兰, 张安录, 等. 土地利用强度碳排放效应分析: 以广西南宁为例. 生态经济, 2016, 32(9): 42-46, 99. [WANG H, WU J L, ZHANG A L, et al. Analysis of the effects of land use intensity on carbon emissions: A case study of Nanning city, Guangxi Zhuang Autonomous Region. *Ecological Economy*, 2016, 32(9): 42-46, 99.]
- [34] 申明锐, 杨帆, 唐爽, 等. 项目全流程视角下土地供给的内在逻辑与调控策略. 城市规划学刊, 2022, (5): 51-58. [SHEN M Y, YANG F, TANG S, et al. Framing China's land supply mechanism from the perspective of whole project chain. *Urban Planning Forum*, 2022, (5): 51-58.]
- [35] 邵帅, 张可, 豆建民. 经济集聚的节能减排效应: 理论与中国经验. 管理世界, 2019, (1): 36-60, 226. [SHAO S, ZHANG K, DOU J M. Effects of economic agglomeration on energy saving and emission reduction: Theory and empirical evidence from China. *Journal of Management World*, 2019, (1): 36-60, 226.]
- [36] 任晓松, 刘宇佳, 赵国浩. 经济集聚对碳排放强度的影响及传导机制. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(4): 95-106. [REN X S, LIU Y J, ZHAO G H. The impact and transmission mechanism of economic agglomeration on carbon intensity. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(4): 95-106.]
- [37] 朱从谋, 王珂, 张晶, 等. 国土空间治理内涵及实现路径: 基于“要素—结构—功能—价值”视角. 中国土地科学, 2022, 36(2): 10-18. [ZHU C M, WANG K, ZHANG J, et al. The connotation and realization path of territorial space governance from the perspective of "elements-structure-function-value". *China Land Science*, 2022, 36(2): 10-18.]
- [38] 喻文益. 资源有效配置是解决中国环境保护问题的根本出路. 复旦学报: 社会科学版, 1993, (6): 33-37. [YU W Y. Effective allocation of resources is an essential way to solve our environmental problems. *Fudan Journal: Social Sciences Edition*, 1993, (6): 33-37.]
- [39] 蔡昉, 都阳, 王美艳. 经济发展方式转变与节能减排内在动力. 经济研究, 2008, (6): 4-11, 36. [CAI F, DU Y, WANG M Y. The political economy of emission in China: Will a low carbon growth be incentive compatible in next decade and beyond?. *Economic Research Journal*, 2008, (6): 4-11, 36.]
- [40] 张友国. 经济发展方式变化对中国碳排放强度的影响. 经济研究, 2010, (4): 120-133. [ZHANG Y G. Economic development pattern change impact on China's carbon intensity. *Economic Research Journal*, 2010, (4): 120-133.]
- [41] 梁琦. 分工、集聚与增长. 北京: 商务印书馆, 2009: 1-52. [LIANG Q. *Division of Labor, Agglomeration and Growth*. Beijing: Commercial Press, 2009: 1-52.]
- [42] 张云辉, 郝时雨. 收入差距与经济集聚对碳排放影响的时空分析. 软科学, 2022, 36(3): 62-67, 82. [ZHANG Y H, HAO S Y. Spatiotemporal analysis of the impact of income gap and economic agglomeration on carbon emissions. *Soft Science*, 2022, 36(3): 62-67, 82.]
- [43] 沈坤荣, 金刚, 方娴. 环境规制引起了污染就近转移吗?. 经济研究, 2017, (5): 44-59. [SHEN K R, JIN G, FANG X. Does environmental regulation cause pollution to transfer nearby?. *Economic Research Journal*, 2017, (5): 44-59.]
- [44] BORREGO C, MARTINS H, TCHEPEL O, et al. How urban structure can affect city sustainability from an air quality perspective. *Environmental Modelling & Software*, 2006, 21(4): 461-467.
- [45] 杨子江, 张剑锋, 冯长春. 区域城市空间结构与交通污染理论探讨. 城市发展研究, 2015, 22(5): 71-76, 97. [YANG Z J, ZHANG J F, FENG C C. Theoretical discussion on regional urban spatial structure and transport pollution. *Urban Development Studies*, 2015, 22(5): 71-76, 97.]
- [46] 皮亚彬, 李超. 地区竞争、土地供给结构与中国城市住房价格. 财贸经济, 2020, 41(5): 116-130. [PI Y B, LI C. Regional competition, land supply structure and urban housing price in China. *Finance & Trade Economics*, 2020, 41(5): 116-130.]
- [47] 刘新智, 周韩梅. 土地资源配置如何影响城市经济效率: 基于中国286个地级以上城市工业数据的实证检验. 中国

- 土地科学, 2022, 36(9): 49-58. [LIU X Z, ZHOU H M. How does land resource allocation affect urban economic efficiency: An empirical test based on industrial data of 286 cities above prefecture level in China. *China Land Science*, 2022, 36(9): 49-58.]
- [48] 钟顺昌. 中国省域城市建设用地规模分布对能源效率的影响. *中国土地科学*, 2021, 35(3): 58-68. [ZHONG S C. The impact of urban construction land scale distribution on energy efficiency in China's provincial level. *China Land Science*, 2021, 35(3): 58-68.]
- [49] 师博, 沈坤荣. 政府干预、经济集聚与能源效率. *管理世界*, 2013, (10): 6-18, 187. [SHI B, SHEN K R. The government intervention, the economic agglomeration and the energy efficiency. *Journal of Management World*, 2013, (10): 6-18, 187.]
- [50] 韩峰, 冯萍, 阳立高. 中国城市的空间集聚效应与工业能源效率. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(5): 72-79. [HAN F, FENG P, YANG L G. Spatial agglomeration effects of China's cities and industrial energy efficiency. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(5): 72-79.]
- [51] WENG Y Y, ZHANG X L. The role of energy efficiency improvement and energy substitution in achieving China's carbon intensity target. *Energy Procedia*, 2017, 142(12): 2786-2790.
- [52] NIBEDITA B, IRFAN M. The role of energy efficiency and energy diversity in reducing carbon emissions: Empirical evidence on the long-run trade-off or synergy in emerging economies. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(40): 56938-56954.
- [53] 李国璋, 江金荣, 周彩云. 全要素能源效率与环境污染关系研究. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(4): 50-56. [LI G Z, JIANG J R, ZHOU C Y. Relations between total factor energy efficiency and environmental pollution. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(4): 50-56.]
- [54] 江艇. 因果推断经验研究中的中介效应与调节效应. *中国工业经济*, 2022, (5): 100-120. [JIANG T. Mediating effects and moderating effects in causal inference. *China Industrial Economics*, 2022, (5): 100-120.]
- [55] 吴敏, 曹婧, 毛捷. 地方公共债务与企业全要素生产率: 效应与机制. *经济研究*, 2022, (1): 107-121. [WU M, CAO J, MAO J. Local public debt and enterprise total factor productivity: Effect and mechanism. *Economic Research Journal*, 2022, (1): 107-121.]
- [56] 柳亚琴, 孙薇, 朱治双. 碳市场对能源结构低碳转型的影响及作用路径. *中国环境科学*, 2022, 42(9): 4369-4379. [LIU Y Q, SUN W, ZHU Z S. The impact of carbon market on the low-carbon transition of energy mix and its action path. *China Environmental Science*, 2022, 42(9): 4369-4379.]
- [57] 马丽梅, 张晓. 中国雾霾污染的空间效应及经济、能源结构影响. *中国工业经济*, 2014, 32(4): 19-31. [MA L M, ZHANG X. The spatial effect of China's haze pollution and the impact from economic change and energy structure. *China Industrial Economic*, 2014, 32(4): 19-31.]
- [58] 查冬兰, 周德群, 孙元. 为什么能源效率与碳排放同步增长: 基于回弹效应的解释. *系统工程*, 2013, 31(10): 105-111. [ZHA D L, ZHOU D Q, SUN Y. Why do the energy efficiency on reduction and carbon emission increase simultaneously: From the perspective of rebound effect. *Systems Engineering*, 2013, 31(10): 105-111.]
- [59] 徐胜, 司登奎. 结构转型、能源效率对低碳经济的异质性影响: 基于省际数据的面板协整分析. *软科学*, 2014, 28(7): 6-10, 39. [XU S, SI D K. The heterogeneity effect on low-carbon economy between structural transformation and energy efficient: An empirical panel cointegration analysis of provincial data. *Soft Science*, 2014, 28(7): 6-10, 39.]
- [60] ÖZBUĞDAY F C, ERBAS B C. How effective are energy efficiency and renewable energy in curbing CO₂ emissions in the long run? A heterogeneous panel data analysis. *Energy*, 2015, 6: 82-98.

Research on the response of spatial allocation of urban construction land in China's provinces under the goal of carbon emission reduction

ZHONG Shun-chang¹, WANG Wen-zhu¹, YAN Cheng-li²

(1. Institute of Resource-based Economic Transformation Development, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, China; 2. Department of Finance and Public Economy, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, China)

Abstract: The change of construction land use is an important reason for the change of carbon source/sink. How to optimize the spatial allocation of urban construction land in China's provincial-level regions to drive carbon emission reduction is an important topic under the background of the dual carbon strategy. In this paper, the proportion of the first city and Herfindahl index are used to measure the concentration degree of spatial allocation of construction land, and the carbon emission level is characterized by the carbon emissions per unit of construction land area. Based on China's provincial panel data from 2000 to 2020, this paper uses two-way fixed effect model to test the impact mechanism of the concentration of spatial allocation of construction land on carbon emissions. The results show that: (1) The centralized spatial allocation of urban construction land in provinces has significant carbon emission reduction effect. (2) From the perspective of functional land, the centralized spatial allocation of industrial, residential, and service land can reduce carbon emissions. From the perspective of action intensity, industrial and service land is larger, while residential land is slightly smaller. (3) Energy efficiency is an important mechanism for the centralized spatial allocation of provincial urban construction land and its functional land to affect carbon emissions. (4) The coupling and coordination of the centralized spatial allocation of various types of functional land will have a multiplier effect on carbon emission reduction by enhancing energy efficiency.

Keywords: carbon emissions; construction land; spatial allocation; energy efficiency; concentration