

林漫华, 张婉娜, 郑荣宝, 赵克飞, 钟琪, 林丽洁. 2023. 广州市绿色建筑的时空演变及影响因素分析. 热带地理, 43 (9): 1823-1834.

Lin Manhua, Zhang Wanna, Zheng Rongbao, Zhao Kefei, Zhong Qi, and Lin Lijie. 2023. Spatiotemporal Variations and Driving Force of Green Buildings in Guangzhou, China. *Tropical Geography*, 43 (9): 1823-1834.

广州市绿色建筑的时空演变及影响因素分析

林漫华, 张婉娜, 郑荣宝, 赵克飞, 钟琪, 林丽洁

(广东工业大学 管理学院, 广州 510520)

摘要:绿色建筑作为一种节能减排的新型建筑,其发展有助于缓解资源短缺和环境恶化压力,推动国家实现“碳达峰、碳中和”目标。“双碳”目标驱动下,探究城市绿色建筑的时空演变规律,对推动绿色建筑相关标准制定和政策实施具有重要意义。文章以广州市为例,使用2008—2021年获得绿色建筑标识和认证的项目数据,定量分析城市绿色建筑的时空分异特征。同时结合宏观社会经济统计数据,利用地理探测器进一步探究影响广州城市绿色建筑发展的主要因素。结果表明:1)时间上,绿色建筑数量和面积增长率呈现先上升后下降的趋势,该趋势表现出明显的政策导向性。2)空间上,各城际间的绿色建筑数量、面积均存在显著差异;不同城区的绿色建筑类型结构不同,办公、居住和其他公共建筑占比较大。中心城区绿色建筑等级分异度大、级别复杂;等级高值区主要分布在天河区、增城区和黄埔区;等级低值区主要分布在从化区、番禺区和南沙区等。3)绿色建筑空间分布特征变化明显:分布重心先北移后南移;分布范围呈波动扩大趋势;分布方向渐呈西北—东南格局;分布形态的方向性增强。4)资源因素是影响绿色建筑空间分布的首要因素,其次是经济因素和市场因素,最后是环境因素。

关键词:绿色建筑;绿色建筑等级;地理探测器;广州市

中图分类号: TU201.5; TU984.113

文献标志码: A

文章编号: 1001-5221(2023)09-1823-12

DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003737

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

在经济社会不断发展的过程中,能源危机和环境问题是亟需解决的全球性问题,中国亦不例外。中国是世界上最大的能源消费国,在工业、交通和建筑等领域消耗大量能源(张所续等,2019)。由于建筑从施工到投入使用均需消耗大量能源,建筑领域的能源消耗量在总能源消耗量中的比重,随社会经济发展和生活质量提高而不断上升,绿色、节能成为未来建筑发展的新趋势。绿色建筑作为一种节能减排的新型建筑,其在建筑全生命周期内能最大限度地节约资源、减少污染和保护环境,因此,研究和推广绿色建筑对应对中国的能源和环境问题具有重要意义。

目前关于绿色建筑的研究主要集中在3个方面。

首先,是绿色建筑的定义(张建国等,2012)与评价的标准(Ding et al., 2018; 郑振尧, 2021)。绿色建筑的定义随其发展历程和所处地区而变化,国内外尚无统一定义。现有研究主要针对绿色建筑的定义和评价体系进行比较分析,旨在加深对绿色建筑概念内涵的理解,同时推动和完善绿色建筑评价体系。在世界范围内存在诸多绿色建筑评价体系,包括美国的LEED、中国的《绿色建筑标准》、英国的BREEAM、加拿大的GBTOOL和日本的CASBEE等。其中,美国的LEED在全球有较高的认可度,是很多国家拟定当地绿色建筑评价标准的参考对象(Zuo et al., 2014)。中国的《绿色建筑标准》(以下简称《绿标》)是在国外建筑标准基础上根据中国

收稿日期: 2022-07-19; **修回日期:** 2022-12-05

基金项目:国家自然科学基金项目“粤港澳大湾区多模式人才流动格局及对区域协同创新的影响”(42001148);广东省自然科学基金“华南地区城市扩张对人类体感温度及极值的影响研究”(2019A1515011025);广州市基础与应用基础研究项目“基于人才流动网络模型的粤港澳大湾区城市创新能力预测研究”(202102020661)

作者简介: 林漫华(1997—),女,广东潮州人,硕士,研究方向为住房与城市管理, (E-mail) lin_manhua@qq.com;

通信作者: 林丽洁(1989—),女,副教授,博士,主要研究方向为人口、城市与区域发展、城市化及其影响, (E-mail) lin.lijie@gdut.edu.cn。

国情拟定。相比LEED,《绿标》的一些评价标准更符合中国对建筑的要求,目前这2个标准均在中国广泛应用(施建刚等,2014;Zou,2019)。其次,绿色建筑在设计和运营管理环节根据不同的建筑类型和不同地域产生变化,以实现节约能源资源,减少排放污染(Wei et al., 2019)。研究者多比较不同技术的优缺点(Ade et al., 2019; Li et al., 2020; 李宏军等, 2020; 陈烨, 2021)、着眼运营管理问题寻求解决对策(刘戈等, 2016, 2022; 薛梦, 2017)。再次,衡量绿色建筑的成本(朱昭等, 2018)和效益(Eichholtz et al., 2013; 何玥儿等, 2018; Zhang et al., 2018)是研究者关注的重难点,常用方法包括生命周期评估(LCA)、绿色建筑评级体系(GBRSs)(Sartori et al., 2021)和模糊决策试验(Yadegaridehkordi et al., 2020)。这些研究有助于加深对绿色建筑价值的认识,推动绿色建筑的发展。

随着绿色建筑项目的大规模开发和投入使用,绿色建筑的时空分布和驱动因素引起广泛关注(仇保兴等, 2017; Zhou et al., 2020; Gao et al., 2020; Ke et al., 2021)。一些学者指出地理位置、地方财政收入和房地产投资对绿色建筑数量预测有重要作用(Song et al., 2021),用水效率和能源效率对绿色建筑具有重要的驱动作用(Assylbekov et al., 2021)。此外,有研究发现政府激励政策、房地产市场机制、经济发展水平、文化教育水平对绿色建筑发展具有重要影响(Shi et al., 2014; Olubunmi et al., 2016; Zou et al., 2017; Agyekum et al., 2020; 尹静等, 2021)。

因研究视角、评价指标选取、研究区及研究尺度的不同,现有研究关于影响中国城市绿色建筑时空分异的关键因素并未达成共识,仍存在以下问题:1)现有研究多以全国、区域、省域的宏观、中观研究尺度为主,城市尺度的研究相对缺乏(叶祖达, 2012; 徐峰等, 2018; 王婧, 2019);2)仅以获得“绿标”认证的建筑为研究对象,而忽略了获得其他标准认证的绿色建筑,如本研究涉及的LEED;3)忽视了绿色等级和地产类型在城市绿色建筑时空演变过程中表现出的差异特征;4)绿色

建筑的驱动机制尚未得到充分理解。

因此,本研究基于城市尺度,以广州市获得“绿标”和LEED认证的绿色建筑为研究对象,分别从数量、面积、等级和类型4个角度系统地分析城市绿色建筑发展的时空差异,并量化分析市场、经济、环境和资源等要素对城市绿色建筑时空分异造成的影响。以期合理规划城市绿色建筑布局、深化城市绿色建筑发展提供数据支撑和政策制定依据。

1 研究区概况、数据与方法

1.1 研究区概况

广州市位于广东省东南部,是广东省省会,国家中心城市,国际商贸中心和综合交通枢纽。2021年,广州市常住人口1 881.06万人,GDP总量为28 231.97亿元,位居全国第四(广州市统计局, 2022)。广州现有白云区、从化区、番禺区、海珠区、花都区、黄埔区、荔湾区、南沙区、天河区、越秀区和增城区共11个行政区,总面积7 434.4 km²。截至2021年,广州市获得绿色建筑标签(包括LEED和《绿标》)的项目达到1 235个,建筑总面积为11 504.22万m²^①,是中国绿色建筑发展竞争力指数十强城市之一。作为中国的一线城市,广州市经济活动发达,建筑业总产值高,建筑能耗高于全国平均水平,发展绿色建筑对于城市可持续发展具有重要意义(李叶红等, 2020)。同时作为中国绿色建筑发展的领先城市,探究以广州市为代表的城市绿色建筑发展及其影响因素具有重要意义^②。

1.2 数据来源

以广州市1 235个建筑项目作为研究对象,广州绿色建筑的项目名称、项目类型、评定星级、建筑面积和地址信息来源于广州市绿色建筑地图和广东省绿色建筑信息平台等网站^③,利用能源空间管理与运用研究技术平台(ESMART),通过地址解析功能将研究对象地址信息转换为空间数据,使用其“人工核验坐标”功能进行人工校对,得到准确的广州市绿色建筑的坐标数据,作为空间分析的基础数据^④。地理探测器分析中,宏观社会经济数据来源于广州市统计局、广州市水务局、广州市生态

① 数据来源:广州市绿色建筑地图. <http://183.62.245.166:8001/home/mainindex>.

② <http://www.chinagbc.org.cn/?c=show&id=584>

③ 数据来源:广州市绿色建筑地图. <http://183.62.245.166:8001/home/mainindex>; 广东省绿色建筑信息平台. <http://www.gdgb.org.cn/ProjectsList.aspx>

④ 能源空间管理与运用研究技术平台. <http://egis.olmap.cn/entUpload/egis/login/>

环境局^⑤、中国科学院资源环境科学与数据中心（徐新良，2017）和中国碳核算数据库^⑥等网站。

1.3 绿色建筑等级划分

由中华人民共和国住房和城乡建设部颁布的《绿标》，注重居住和公共建筑的全寿命周期内资源节约与环境保护的性能，对其设计和运行进行评价，评价等级共分为3级，由低到高分别是一星级、二星级、三星级^⑦。美国LEED认证体系，是由美国绿色建筑委员会建立并推行的绿色建筑认证体系，LEED认证根据项目总体评价得分，分为4个等级：认证级、银级、金级、铂金级（王静等，2017）。《绿标》和LEED认证的标准框架和条款内容存在一定相似度，通常绿色建筑一星级对标LEED认证级和LEED银级，二星级对标LEED金级，以此类推。鉴于LEED评价体系较完善，且在节约能源方面要求更高（Geng et al., 2012; Wu et al., 2016），本文结合2个评价体系对广州市绿色建筑等级进行划分并赋值（表1），应用于绿色建筑等级时空演变分析。

表1 广州市绿色建筑等级划分

Table 1 Classification of green buildings rating in Guangzhou

绿色建筑标准及等级	赋值	广州市绿色建筑项目数量/个
LEED 认证级	1	4
绿标一星级	2	781
LEED 银级	3	12
绿标二星级	4	337
LEED 金级	5	32
绿标三星级	6	67
LEED 铂金级	7	10

1.4 研究方法

1.4.1 标准差椭圆 标准差椭圆模型是测量区域差异与分析要素分布特征的重要方法（Lefever, 1926）。标准差椭圆的重心表示要素空间分布的相对位置，方位角反映分布的主趋势方向，长轴与短轴长度为标准距离，分别表示要素在主趋势方向上与在次要方向上的离散程度（赵璐等，2014）。

椭圆的圆心计算公式：

$$SDE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (1)$$

$$SDE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}{n}} \quad (2)$$

式中： x_i 与 y_i 是第 i 个子区域的坐标（ $\bar{X}$, $\bar{Y}$ ）表示区域的重心； n 为子区域总数。

最后，计算方位角 θ ，公式为：

$$\tan\theta = \frac{A+B}{C} \quad (3)$$

$$A = \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2 \quad (4)$$

$$B = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2\right) + 4\left(\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i\right)^2} \quad (5)$$

$$C = 2 \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i \quad (6)$$

式中： $\tilde{x}_i$ 与 $\tilde{y}_i$ 是第 i 个子区域坐标与重心的偏差； θ 为椭圆长轴与正北方向夹角。

椭圆长、短轴长度计算公式：

$$\sigma_x = \sqrt{2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}_i \cos\theta - \tilde{y}_i \sin\theta)^2}{n}} \quad (7)$$

$$\sigma_y = \sqrt{2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{y}_i \cos\theta + \tilde{x}_i \sin\theta)^2}{n}} \quad (8)$$

1.4.2 地理探测器 地理探测器是研究空间分异及其驱动因素的重要工具，既可以探测数值型数据，也可以探测定性数据，且对数据要求较少。相比方差分析，该方法既包含方差分析，又比方差分析适用面更加广泛，并且物理定义明确。相比传统的线性回归分析模型，该方法不受线性假设约束，适用性更强（王劲峰等，2017）。本文利用地理探测器中的因子探测和交互作用探测分析广州市绿色建筑发展的影响因素。

1) 因子探测 用于探测影响因子 X 对绿色建筑空间分异的解释力度，其表达式为：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (9)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (10)$$

$$SST = N \sigma^2 \quad (11)$$

式中： q 表示因子解释力，值域为[0, 1]， q 值越接

⑤ 数据来源：广州市统计局. <http://sthjj.gz.gov.cn/>；广州市水务局. <http://swj.gz.gov.cn/>；广州市生态环境局. <http://sthjj.gz.gov.cn/>

⑥ 数据来源：中国碳核算数据库. <https://www.ceads.net.cn/>

⑦ 数据来源：住房和城乡建设部关于发布国家标准《绿色建筑评价标准》的公告（mohurd.gov.cn）

近1说明因子解释力越大; L 代表影响因子 X 的分类数; h 为解释变量或被解释变量的分层或分类; N_h 和 N 分别为类 h 的研究单元数和全区单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是和类 h 的方差和全区 Y 值的方差; SSW 和 SST 分别为同类别方差之和及全区总方差。

2)交互作用探测 交互作用探测用于检验影响因子间的交互效果。具体地,是将2个单因子分别作用于 Y 时的 q 值与2个单因子交互作用时的 q 值进行比较,判断2个单因子交互作用时是否会增加或减弱对绿色建筑空间分异的解释力度,或2个单因子的影响作用是否相互独立。

3)指标说明 以广州市的171个街道作为研究的最小空间单元。在地理探测器中,因变量 Y 为每个街道单元所含的总体绿色建筑数量及不同类型绿色建筑数量(办公、商业和居住)。

为探究广州市绿色建筑发展的影响因素,通过分析现有绿色建筑相关文献,结合研究区的实际情况,考虑数据的可获取性和完整性,从市场、经济、环境、资源4个维度共选取8个变量(表2)。

表2 绿色建筑空间差异影响因素的指标选取及说明

Table 2 Variables of driving force in developing green buildings

因素	指标	指标解释
市场	人口密度(X_1)	总人口/土地面积,反映绿色建筑市场需求
	房地产投资额占固定资产投资额比重(X_2)	反映房地产开发投资情况
经济	GDP(X_3)	反映地区经济实力
	人均可支配收入(X_4)	反映地区经济活力
环境	碳排放密度(X_5)	碳排放量/土地面积,反映环境危害程度
	PM _{2.5} 质量浓度(X_6)	反映空气污染程度
资源	用电量密度(X_7)	用电量/土地面积,反映电量消耗情况
	人均用水量(X_8)	用水量/总人口,反映水资源消耗情况

①市场因素选取人口密度、房地产投资额占固定资产投资额比重2个指标。人口密度是影响房地产市场需求的重要因素,人口密度越大,房地产市场需求越大(刘甲炎等,2013),对绿色建筑的需求亦相应增大。同时,房地产投资是影响房地产市场开发程度的重要因素,房地产投资额占固定资产投资额比重越大,说明房地产行业的开发投资情况越好,有助于促进绿色建筑投资。

②经济因素选取GDP、人均可支配收入2个指标。GDP反映一个地区经济发展水平,经济实力强的地区往往更有能力为绿色建筑技术的研发创新和建造推广提供资金和人才支持,绿色建筑发展的可

能性更大(孙燕铭等,2021)。人均可支配收入反映的是经济活力,一个地区经济活力越强,绿色产品的消费能力也越高(王婧,2019)。

③环境因素选取碳排放密度、PM_{2.5}质量浓度2个指标。建造绿色建筑的目的之一是减少排放污染,保护环境。在“双碳”背景下,减少碳排放量有助于应对气候变化风险(徐政,2021);降低PM_{2.5}质量浓度需要全社会的共同参与(张继宏等,2017)。因此,在碳排放量大或PM_{2.5}质量浓度高的地方发展绿色建筑具有更为广阔的前景。

④资源因素选取用电量密度、人均用水量2个指标。绿色建筑具有节水节电的功能,节约电力资源和水资源能创造更高的经济效益和环境效益(李明等,2017)。因此,水电资源消耗大的地区绿色建筑发展需求更显著。

由于在地理探测器使用过程中自变量需为类型量,而本文所使用的原始数据均为行政区级别的数值量,因此,在获得近5年各个行政区指标值后,取其均值作为变量值,利用ArcGIS中的克里金插值法对各变量值进行插值,然后通过自然断点法将各变量值进行离散化处理,并通过值提取至点的方法赋值至每个街道,作为街道级别的变量值 X ,代表该街道的市场、经济、环境和资源状况。

2 广州市绿色建筑时空演变格局

2.1 绿色建筑时间变化分析

2013年,随着国家发改委和住建部联合发布的《绿色建筑行动方案》文件出台,推行绿色建筑上升为国家层面的战略(叶凌等,2016)。此后各地政府应该文件的要求制定符合地方发展状况的绿色建筑推广政策,广东省、江苏省、北京市等多个地方对不同建筑类型的新建绿色建筑面积占新建建筑面积比例做出强制性要求,极大地推动了中国城市绿色建筑的发展。广州市的绿色建筑增长也反映出这一政策性的影响,2008—2021年,城市绿色建筑项目数量整体呈增长趋势,建筑项目数量从2008年的1个增长到2021年的1 235个,但增速波动向下,增长率在2010年出现急剧上升,并于2013年达到最大峰值后波动下降(图1)。同样地,广州市绿色建筑面积增长率以2013年为分界点划分为2个阶段:绿色建筑发展初级阶段(2008—2012年)和城市绿色建筑发展稳定阶段(2013—2021年)。2013年建筑面积增长率达到峰值,这是广州市绿色建筑发展最快的时期,建筑面积增长率激增至2012

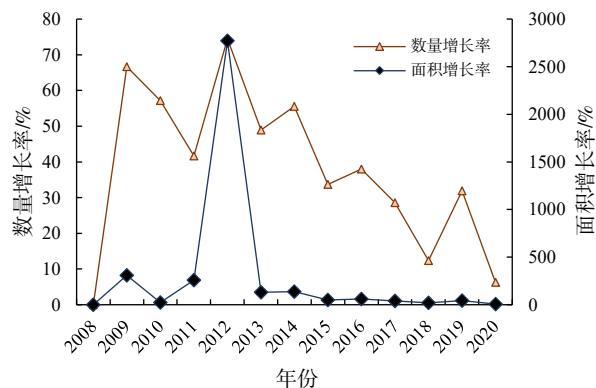


图1 2008—2021年广州绿色建筑数量
增长率及面积增长率

Fig.1 Growth rate of number and construction area of
green buildings in Guangzhou during 2008-2021

年的27倍，此后增长率逐步放缓，绿色建筑面积发展进入稳定低增长轨道。

2.2 绿色建筑空间差异分析

2.2.1 绿色建筑数量 2008—2021年广州市各区绿色建筑项目数量如图2所示，广州市第一个绿色建筑位于天河区，2008—2011年除天河区、越秀区出现少量绿色建筑外，其他区在2013年才陆续出现绿色建筑，这一年开始各区绿色建筑规模出现明显差异。这说明广州市大部分行政区绿色建筑起步晚，各区绿色建筑项目数量发展不平衡。值得注意的是，南沙区虽起步晚，但发展迅速，自2013年起，其绿色建筑规模一直位于前列；2017年4月南沙区政府发布《广州市南沙区人民政府办公室关于印发广州市南沙区绿色建筑与建筑节能工作指导意见的

通知》，该通知要求到2020年新建民用建筑100%推行绿色建筑，到2020年末高星级绿色建筑的比例达到30%，并制定严格的责任考核和完善的激励扶持机制（广州市南沙区人民政府办公室，2017）。该文件发布后，南沙区绿色建筑的数量从2017年的55个翻倍为2018年114个，位于各区之首；此后，南沙区绿色建筑数量一直领先于广州市其他行政区。

2.2.2 绿色建筑面积 截至2021年，广州市各区绿色建筑平均面积为1 045.84万 m^2 ，各区之间和内部的绿色建筑面积均存在显著的差异。如图3所示，南沙区的绿色建筑面积最大，占广州市绿色建筑总面积的22.82%，其绿色建筑面积变异系数最小，为0.34，说明该区内部不同绿色建筑项目之间的建筑面积差异较小。而海珠区绿色建筑面积占比不到10%，其绿色建筑面积变异系数最大，为1.51，说明该区内部不同绿色建筑项目之间的建筑面积差异较大。越秀区、从化区面积最小，两区面积之和仅占总面积的2.79%。

2.2.3 绿色建筑类型 除面积和数量外，各区绿色建筑的类型同样存在差异（图4）。根据各区绿色建筑的类型结构，将广州市11个区划分为3个类型：办公主导型、居住主导型和其他公共建筑主导型。越秀区、天河区和海珠区属于办公主导型，办公类绿色建筑占比分别为40%、38.46%、30.43%，均高于其他类型绿色建筑；荔湾区、南沙区、从化区和黄埔区属于居住主导型，其中荔湾区和南沙区的居住类绿色建筑占比均超过50%；增城区、花都区、白云区和番禺区属于其他公共建筑主导型，其中增城区的其他公共建筑类绿色建筑占比接近50%。

2.2.4 绿色建筑等级 根据绿色建筑等级划分标准，对广州市内所包含的绿色建筑进行等级划分，得到广州市绿色建筑等值线图（图5）。

1) 绿色建筑等级空间分异度

等值线的疏密程度体现绿色建筑等级的分异情况，等值线越稀疏代表绿色建筑等级分异度越小，等值线越密集表示绿色建筑等级分异度越大。由图5-a可知，广州市越秀区、海珠区和天河区的交界处等值线较为密集，增城区、黄埔区和南沙区部分区域等值线也较为密集，

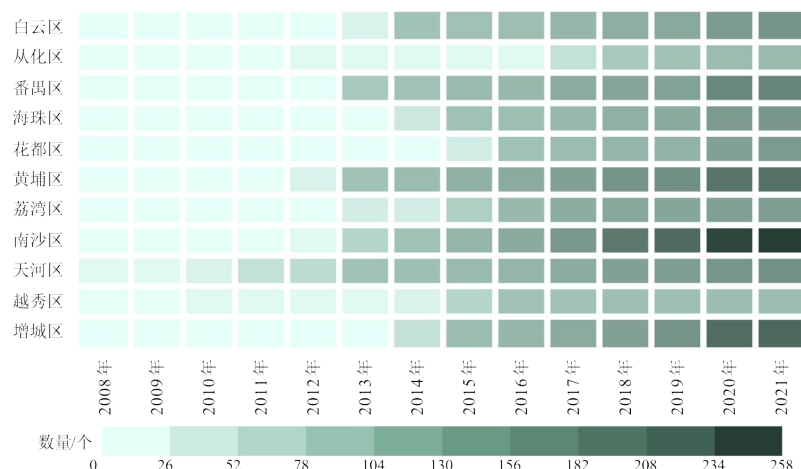


图2 2008—2021年广州市各区绿色建筑项目数量热图

Fig.2 Heatmap of the number of green building in Guangzhou from 2008 to 2021

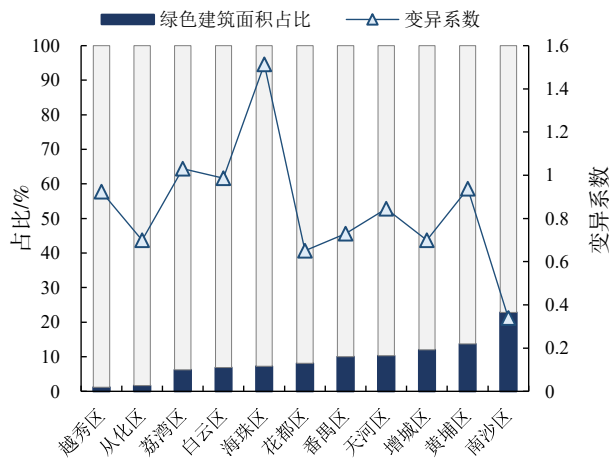


图3 2021年广州市绿色建筑面积占比

Fig.3 Proportion of construction area of green building in Guangzhou in 2021

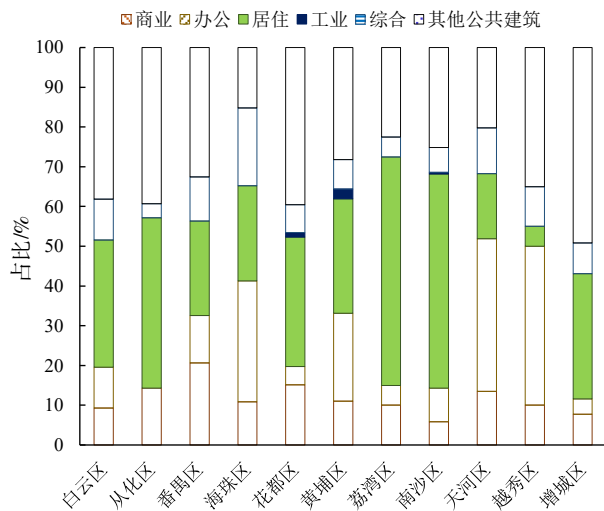


图4 2021年广州市绿色建筑类型占比

Fig.4 Proportion of different types of green building in Guangzhou in 2021

而番禺区、白云区、花都区 and 从化区的等值线较为稀疏, 这说明广州中心城区绿色建筑等级分异度比其他地区大、绿色建筑级别比较复杂。

2) 绿色建筑等级高值区 等值线图中 (见图 5-a) 包含多个等级高值区 (LEED 金级、三星级和 LEED 铂金级), 这些高值区主要集中于天河区、增城区和黄埔区。其中, 天河区位于市中心, 是商业核心区, 绿色建筑等级较高 (图 5-b)。在太古汇附近聚集了 LEED 金级、三星级和 LEED 铂金级建筑共 34 个 (图 5-c)。增城区的高值区位于该区西部, 其中约一半绿色建筑为教学建筑。黄埔区的高值区

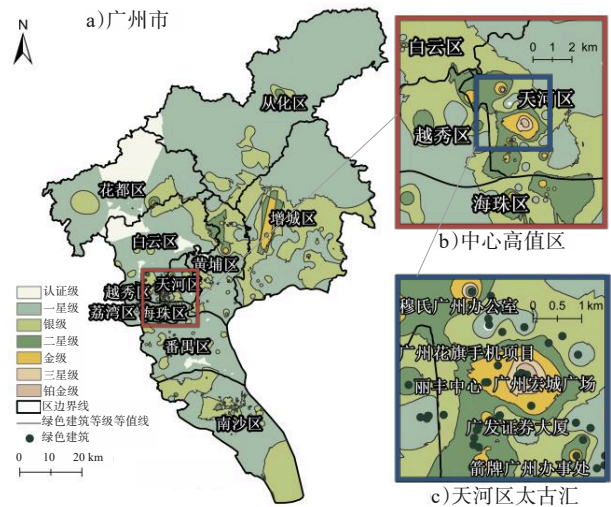


图5 2021年广州绿色建筑等级等值线

Fig.5 Contour map of green buildings rating in Guangzhou in 2021

位于该区北部的中新广州知识城, 其建造过程中采用了大量绿色技术和可再循环新型绿色材料。

3) 绿色建筑等级低值区 等级较低 (LEED 认证级、一星级、LEED 银级和二星级) 的绿色建筑主要分布在远离市中心的从化区、花都区、白云区、番禺区和南沙区 (见图 5-a): 从化区有 28 个绿色建筑, 其中低等级绿色建筑占 96.43%; 花都区有 86 个绿色建筑, 其中低等级绿色建筑占 96.51%; 白云区有 97 个绿色建筑, 其中高等级绿色建筑仅占 3.09%; 番禺区有 126 个绿色建筑, 低等级绿色建筑占 97.62%; 在《广州市南沙区绿色建筑与建筑节能工作指导意见》的推动下, 2017—2021 年南沙区绿色建筑数量在由 92 个增长至 258 个, 低等级绿色建筑共有 253 个, 存在发展快、数量多但等级低的现象。

2.3 绿色建筑空间分布特征变化分析

由上述分析可知, 广州绿色建筑的发展在时间与空间上存在不均衡的特征, 基于标准差椭圆的方法, 进一步分析城市绿色建筑的空间分布方向和分布趋势 (表 3)。

2.3.1 绿色建筑重心 2008—2021 年, 广州绿色建筑空间分布的重心位置不断变化 (图 6)。2013 年前, 广州绿色建筑发展处于初级阶段, 主要集中在越秀区和天河区, 重心先北移后南移: 2008—2010 年, 绿色建筑空间分布的重心在越秀区; 2010—2012 年, 重心向东北移动到天河区。2013 年, 广州南部绿色建筑有了显著发展, 增长速度较快, 相较于 2012 年, 2013 年的重心变化较大, 向南移动到

表3 2008—2021年标准差椭圆参数

Table 3 The parameter values of standard deviation ellipses from 2008 to 2021

年份	标准差椭圆面积/km ²	中心点(x)	中心点(y)	长轴标准差/km	短轴标准差/km	方位角/(°)
2010	12.15	1 042 786.3	2 568 949.4	5.03	0.77	92.74
2011	19.39	1 044 206.8	2 569 098.5	1.66	3.72	89.45
2012	1 606.18	1 052 134.6	2 571 505.2	15.51	3.30	15.92
2013	1 188.88	1 052 979.7	2 563 073.5	24.38	15.53	174.54
2014	1 569.75	1 054 869.8	2 565 136.8	24.54	20.36	170.74
2015	1 666.36	1 056 658.0	2 565 043.0	26.00	20.40	173.03
2016	1 815.82	1 055 869.1	2 565 323.9	26.67	21.67	163.65
2017	1 916.35	1 055 156.2	2 565 315.8	27.99	21.80	160.48
2018	2 024.59	1 055 552.5	2 564 578.2	30.01	21.48	161.84
2019	2 094.96	1 056 457.8	2 564 713.2	30.31	22.00	164.49
2020	2 299.07	1 057 559.3	2 566 091.0	31.31	23.37	169.20
2021	2 321.00	1 057 373.8	2 566 538.8	31.66	23.34	169.17

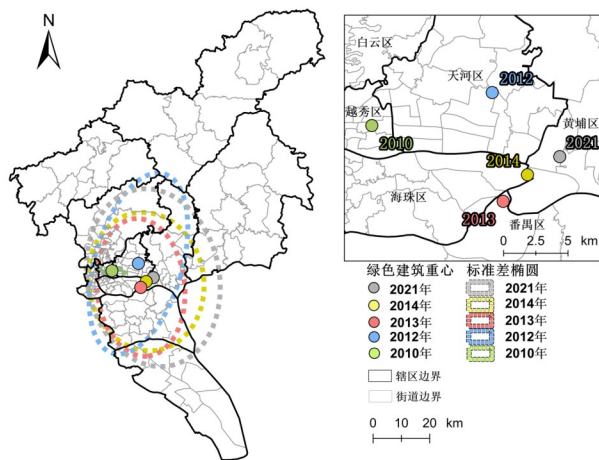


图6 广州绿色建筑标准差椭圆及重心变化

Fig.6 Change of gravity center and standard deviational ellipses of green buildings in Guangzhou

番禺区。而2013—2021年，绿色建筑分布重心由南移动到东北部的黄埔区，这是由于2013年后，位于东北部的增城区、黄埔区等区域的绿色建筑项目数量发展速度加快。

2.3.2 绿色建筑分布范围 2008—2021年，广州绿色建筑标准差椭圆面积呈波动增长趋势（见表3），由2010年的12.15 km²增加到2021年的2 321 km²，覆盖范围明显扩大。2008年在天河区出现第一个绿色建筑；2011年椭圆覆盖范围主要为越秀区和天河区，椭圆的面积为19.39 km²；2012年椭圆覆盖范围变广，除越秀区和天河区外，增加了白云区、黄埔区、海珠区、荔湾区和番禺区。但2013和2014年椭圆面积略有下降，这与新增绿色建筑的分布主要集中在广州市中西部有关。2014—2021年，椭圆的覆盖范围稳步拓宽。

2.3.3 绿色建筑发展方向 2008—2021年，椭圆

呈西北—东南方向的空间格局，方位角先减小后增大（见表3）。2008—2012年，方位角从92.74°变化到15.92°，这是由于2012年从化区、南沙区和黄埔区等广州市较偏远地区的绿色建筑得到发展。2012—2013年，方位角从15.92°变化到174.54°，该时期广州中心城区绿色建筑快速发展；2015—2016年，方位角从173.03°下降到163.65°，该时期白云区、越秀区和花都区等地区绿色建筑增长较快，造成角度偏移；2016年之后，方位角稳定在160°~170°，西北—东南方向格局逐步稳固。

2.3.4 绿色建筑空间形态 2008—2021年，短轴标准差与长轴标准差总体呈增长趋势，表明椭圆的东西方向和南北方向都在扩大（见表3）。在绿色建筑发展的初级阶段（2008—2012年），短轴标准差不断增大，2013年标准差相较于2012年增长了12.23 km，表明广州绿色建筑在2013年有显著的发展；稳定发展阶段（2013—2021年），椭圆的短轴标准差呈稳步增长趋势。相较于短轴标准差，长轴标准差除在2011—2012年有急剧变化外，其余年份稳定增长。这说明广州绿色建筑东西向与南北向都存在扩张趋势，但南北向扩张趋势更明显，说明绿色建筑空间分布形态方向性增强。

3 绿色建筑发展的影响因素

3.1 因子探测分析

通过地理探测器的因子探测方法检测不同因素对总体绿色建筑和不同类型绿色建筑之间的影响，结果如表4所示。

3.1.1 绿色建筑总体因子探测分析 在影响所有类型的绿色建筑空间分布的因子探测分析中，8个自变量的 P 值均 <0.1 ，即在10%的水平上显著，说明8个自变量在一定程度上影响绿色建筑的空间分布。

表4 绿色建筑发展因子探测

Table 4 The factor detector of green buildings

因素	指标	总体			商业			办公			居住		
		q 值	P 值	q 值排序	q 值	P 值	q 值排序	q 值	P 值	q 值排序	q 值	P 值	q 值排序
市场	X_1 Pop	0.160	0.022	4	0.131	0.034	3	0.158	0.007	1	0.144	0.040	6
	X_2 Estate	0.137	0.056	6	0.102	0.170	5	0.049	0.633	5	0.145	0.018	5
经济	X_3 GDP	0.133	0.028	7	0.080	0.245	6	0.089	0.199	2	0.116	0.049	7
	X_4 Income	0.236	0.000	2	0.132	0.049	2	0.023	0.963	8	0.214	0.000	2
环境	X_5 Carbon	0.110	0.091	8	0.061	0.367	8	0.038	0.520	7	0.099	0.122	8
	X_6 PM _{2.5}	0.155	0.020	5	0.072	0.434	7	0.055	0.548	4	0.155	0.012	4
资源	X_7 Elec	0.187	0.000	3	0.122	0.030	4	0.057	0.483	3	0.174	0.002	3
	X_8 Water	0.413	0.000	1	0.154	0.070	1	0.042	0.800	6	0.452	0.000	1

在因子解释力上,人均用水量(Water)>人均可支配收入(Income)>用电量密度(Elec)>人口密度(Pop)>PM_{2.5}质量浓度(PM_{2.5})>房地产投资额占固定资产投资额比重(Estate)>GDP分布(GDP)>碳排放密度(Carbon)。探测结果说明资源因素是影响绿色建筑空间分布的首要因素,其次是经济因素和市场因素,最后是环境因素。建设和运营绿色建筑能带来节水节能效益,追求资源效益驱动绿色建筑的发展;经济因素反映地区经济发展水平,市场因素反映地区建筑的需求和供给状况。经济发展水平和市场因素的差异对绿色建筑的空间分布起重要作用。

3.1.2 各类型绿色建筑因子探测分析 商业绿色建筑的因子探测结果显示,人均用水量、人均可支配收入、人口密度和用电密度对其影响显著。其中,人均用水量的因子解释力最大,说明商业绿色建筑空间分布受人均用水量的影响最大,这是因为首先商业用水相对民用水更贵,是民用水的2倍。商场中用水主要包括清洁用水、餐饮用水、员工用水以及顾客用水,企业顾客越多,用水量越多,所需成本也越大,企业为了降低成本,更希望节水。其次,广州市于2019年出台了《广州市节约用水奖励办法(试行)》(广州市水务局,2019),节水先进单位按年度用水规模奖励1万元/个或者2万元/个,激励企业节约用水。因此人均用水量最能影响商业绿色建筑发展。办公绿色建筑的因子探测结果显示,仅人口密度对其空间分布存在显著影响,这是由于办公类型建筑多位于资本交流频繁的城市中心区位。寸土寸金的城市中心因开发强度大,节地需求突出,办公建筑多为高层,能耗大,这也反映未来办公绿色建筑发展潜力巨大(鲁艳蕊,2020)。居住绿色建筑的因子探测结果显示,在8个因子中,除碳排放密度的P值>0.1外,其他变量的P值均<0.05,说明7个变量均能在一定程度上解释居住绿

色建筑的空间分布。其中,人均用水量和用电量密度的因子解释力分别排第一和第三,说明资源因素是发展居住绿色建筑的最重要影响因素。其可能原因是,相比公共区域,居住建筑的水电费用均需由居住者承担,因此节水节电在居住绿色建筑类型上对居住者而言更具吸引力;人均可支配收入的因子解释力居第二,这是因为人均可支配收入高的地区,对绿色建筑产品的消费能力较大;值得注意的是,PM_{2.5}质量浓度的因子解释力排第四,说明PM_{2.5}质量浓度对于驱动居住绿色建筑发展也具有重要作用,因为PM_{2.5}质量浓度高不利于人类的健康,人们希望通过发展绿色建筑降低空气中的PM_{2.5}质量浓度(Guo et al., 2017)。

3.2 交互作用探测分析

通过地理探测器的交互作用探测方法,检测不同因子在影响总体绿色建筑和不同类型绿色建筑在空间分布上的交互效果(表5)。

表5 交互作用结果

Table 5 The result of the interaction detector

q 值	Pop	Estate	GDP	Income	Carbon	PM _{2.5}	Elec	Water
Pop	0.16							
Estate	0.38 ^b	0.14						
GDP	0.44 ^b	0.51 ^b	0.13					
Income	0.51 ^b	0.48 ^b	0.72 ^b	0.24				
Carbon	0.40 ^b	0.36 ^b	0.42 ^b	0.41 ^b	0.11			
PM _{2.5}	0.45 ^b	0.58 ^b	0.57 ^b	0.40 ^b	0.37 ^b	0.16		
Elec	0.55 ^b	0.42 ^b	0.51 ^b	0.52 ^b	0.26 ^a	0.39 ^b	0.19	
Water	0.58 ^a	0.58 ^b	0.60 ^b	0.72 ^b	0.53 ^a	0.55 ^a	0.65 ^b	0.41

注: a表示交互结果为双因子增强, b表示交互结果为非线性增强。

8个变量交互作用均出现增强现象,其中,用电量密度和碳排放密度的关系为双因子增强;人均用水量与人口密度、碳排放密度、PM_{2.5}质量浓度3者的关系也均为双因子增强;其余变量之间的交互作用均为非线性增强,说明不同变量两两交互的因子解释力大于单独变量的因子解释力。

在交互探测结果中,人均可支配收入和GDP分布、人均可支配收入和人均用水量之间的交互作用最强(因子解释力为0.72);其次是GDP分布和人均用水量(因子解释力为0.60);其余变量之间的交互作用的增强效果均弱于上述3个变量,说明经济因素和资源因素是共同影响绿色建筑发展的最重要因素。

4 结论与讨论

以2008—2021年广州绿色建筑为研究对象,分析绿色建筑的数量、面积、类型和等级的时空分异特征,并探究绿色建筑发展的影响因素,得到如下结论:

1) 广州市绿色建筑发展始于2008年,城市绿色建筑数量和面积的增长率均呈先上升后下降趋势。在发展初期(2008—2012年),广州市绿色建筑数量和面积的增长率波动上升。此后,绿色建筑发展进入稳定阶段(2013—2021年),绿色建筑数量增长率呈下降趋势,绿色建筑面积增长率急剧下降后进入稳定低增长轨道。在时间维度上,广州市绿色建筑的发展趋势表现出明显的政策导向性。

2) 广州市绿色建筑空间差异特征表现为:①大部分城区绿色建筑发展起步晚,城区绿色建筑项目数量发展不平衡;②城区间和城区内绿色建筑面积存在显著差异;③不同城区绿色建筑表现出不同的类型结构特征,办公、居住和其他公共建筑占比较大。广州市绿色建筑等级的空间特征表现为:①中心城区绿色建筑等级分异度较其他城区大、绿色建筑级别复杂;②高等级绿色建筑多集中在天河区、增城区和黄埔区;③绿色建筑等级低值区主要分布在广州市远郊区。另外,从南沙区案例可知,政策因素是城市绿色建筑数量、面积和等级在空间上呈现差异的重要原因。

3) 广州绿色建筑空间分布特征变化表明:①绿色建筑发展重心轨迹呈先北移后南移的趋势;②绿色建筑分布范围波动扩大;③绿色建筑分布呈西北—东南方向格局;④绿色建筑空间分布形态方向性增强。

4) 资源因素是影响广州市绿色建筑空间分布的首要因素,其次是经济因素和市场因素,最后是环境因素。各类型绿色建筑中,影响广州市商业绿色建筑和居住绿色建筑的最重要因子是人均用水量,属于资源因素,而影响办公建筑的最重要因子是人口密度,属于市场因素。

考虑到不同地区的市场、经济、环境和资源要素差异,针对城市绿色建筑数量、面积、类型和等级存在空间分布不均衡等问题,中国城市绿色建筑发展应关注以下问题:

1) 政府应积极发挥政策对城市绿色建筑发展的带动作用。一方面,通过政策引导加快城市绿色建筑项目数量增长,全面推动办公、商业、居住等不同类型绿色建筑的发展,同时注重促进城市之间、城市内部各城区区域间绿色建筑相对均衡发展;另一方面,政府应重视“绿色质量”问题,强化对绿色建筑的监管考核。绿色评价工作不仅停留在项目设计施工环节,更要深入到项目运行和运营过程中。让“绿色”贯穿建筑全生命周期,推动城市绿色建筑高质量发展。

2) 发展绿色建筑有助于节能减排,实现节能减排的目标又进一步推动绿色建筑的发展。因此,建设绿色建筑创新联盟,组建以企业为核心,高校、科研院所深度参与绿色发展的创新联盟,增强绿色技术创新能力,降低绿色建筑建设成本,提高绿色建筑节能减排的效率,让绿色建筑满足市场的多样需求,从而加速绿色建筑产业升级。

3) 良好的市场环境是发展绿色建筑的重要动力。政府可以通过以下措施刺激市场中绿色建筑的供给和需求:依法为使用办公绿色建筑与商业绿色建筑的企业、商户给予税收政策扶持;利用财政补贴或奖励资金,鼓励企业和商户使用超低能耗绿色建筑;鼓励金融机构为购买绿色建筑住房的消费者适当提高贷款额度或适当下调购房贷款利率。

由于数据获得性限制,本研究使用宏观统计数据分析城市绿色建筑的驱动因素,未来可进一步从微观个体层面进一步探讨影响城市绿色建筑发展的关键因素。同时,以广州市为研究区选取的驱动因素指标具有一定的区域适用性,在未来的中国城市绿色建筑研究中,应充分考虑研究区特点对影响因素指标进行适当调整。

参考文献 (References):

- Ade R, and Rehm M. 2019. Buying Limes but Getting Lemons: Cost-Benefit Analysis of Residential Green Buildings-A New Zealand Case Study. *Energy & Buildings*, 186: 284-296.
- Agyekum K, Adinyira E, and Ampratwum G. 2020. Factors Driving the Adoption of Green Certification of Buildings in Ghana. *Smart and Sustainable Built Environment*, 9(4): 595-613.
- Assylbekov D, Nadeem A, Hossain M A, Akhanova G, and Khalfan M. 2021. Factors Influencing Green Building Development in

- Kazakhstan. *Buildings*, 11(12): 634.
- 陈烨. 2021. 基于BIM技术的绿色建筑运营成本测算与应用研究. *建筑经济*, 42 (6): 53-56. [Chen Ye. 2021. Measurement and Application of Green Building Operation Cost Based on BIM Technology. *Construction Economy*, 42(6): 53-56.]
- 仇保兴, 李东红, 吴志强. 2017. 中国绿色建筑空间演化特征研究. *城市发展研究*, 24 (7): 1-10. [Qiu Baoxing, Li Donghong, and Wu Zhiqiang. 2017. Study on the Character of Chinese Green Building Spatial Evolution. *Urban Development Studies*, 24(7): 1-10.]
- Ding Z, Fan Z, Tam V W, Bian Y, Li S, Illankoon I C, and Moon S. 2018. Green Building Evaluation System Implementation. *Building and Environment*, 133: 32-40.
- Eichholtz P, Kok N, and Quigley J M. 2013. The Economics of Green Building. *Review of Economics and Statistics*, 95(1): 50-63.
- Gao Y, Yang G, and Xie Q. 2020. Spatial-Temporal Evolution and Driving Factors of Green Building Development in China. *Sustainability*, 12(7): 2773.
- Geng Y, Dong H, Xue B, and Fu J. 2012. An Overview of Chinese Green Building Standards. *Sustainable Development*, 20(3): 211-221.
- 广州市南沙区人民政府办公室. 2017. 广州市南沙区绿色建筑与建筑节能工作指导意见. (2017-04-01) [2022-03-19]. http://www.gzns.gov.cn/zfxgkml/gznsjjjs-kfqlwlyhbgsgzsqrmzfbgs/zfwj/gfxwj/content/post_5348540.html. [Guangzhou Nansha District People's Government Office. 2017. Guiding Opinions on Green Building and Building Energy Conservation in Nansha District, Guangzhou. (2017-04-01) [2022-03-19]. http://www.gzns.gov.cn/zfxgkml/gznsjjjskfqlw-yhbgsgzsn-sqrmzfbgs/zfwj/gfxwj/content/post_5348540.html.]
- 广州市水务局. 2019. 广州市节约用水奖励办法. (2019-09-05) [2022-03-19]. http://swj.gz.gov.cn/gkmlpt/content/5/5494/post_5494283.html#1039. [Guangzhou Water Authority. 2019. Guangzhou Water Conservation Incentive Measures. (2019-09-05) [2022-03-19]. http://swj.gz.gov.cn/gkmlpt/content/5/5494/post_5494283.html#1039.]
- 广州市统计局. 2022. 2021年广州市国民经济和社会发展统计公报. (2022-03-28) [2023-05-22]. https://www.gz.gov.cn/zwgk/sjfb/tjgb/content/-post_8156569.html. [Guangzhou Statistics Bureau. 2022. Statistical Bulletin of Guangzhou National Economic and Social Development. (2022-03-28) [2023-05-22]. https://www.gz.gov.cn/zwgk/sjfb/tjgb/content/-post_8156569.html.]
- Guo H, Cheng T, Gu X, Wang Y, Chen H, Bao F, Shi S, Xu B, Wang W, Zuo X, Zhang X, and Meng C. 2017. Assessment of PM_{2.5} Concentrations and Exposure Throughout China Using Ground Observations. *Science of the Total Environment*, 601: 1024-1030.
- 何玥儿, 丁勇, 刘猛. 2018. 夏热冬冷地区绿色建筑的节能效益. *土木建筑与环境工程*, 40 (1): 113-121. [He Yue'er, Ding Yong, and Liu Meng. 2018. Analysis of Energy Efficiency of Green Buildings in Hot-Summer and Cold-Winter Zones in China. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 40 (1): 113-121.]
- Ke G, Yongbo Y. 2021. Geographic Distribution and Influencing Factor Analysis of Green Residential Buildings in China. *Sustainability*, 13(21): 12060.
- Lefever D W. 1926. Measuring Geographic Concentration by Means of the Standard Deviational Ellipse. *American Journal of Sociology*, 32(1): 88-94.
- Li J, Wang Q, and Zhou H. 2020. Establishment of Key Performance Indicators for Green Building Operations Monitoring: An Application to China Case Study. *Energies*, 13(4): 976.
- 李宏军, 宋凌, 张颖, 杨建荣, 酒森, 张川, 宫玮. 2020. 适合我国国情的绿色建筑运营后评估标准研究与应用分析. *建筑科学*, 36 (8): 131-136. [Li Hongjun, Song Ling, Zhang Ying, Yang Jianrong, Jiu Miao, Zhang Chuan, and Gong Wei. 2020. Application Analysis of a Suitable Post-Operation Evaluation Standard of Green Building in China. *Building Science*, 36(8): 131-136.]
- 李明, 李干滨. 2017. 基于生态环境效益补偿的绿色建筑激励机制研究. *科技进步与对策*, 34 (9): 136-140. [Li Ming, and Li Ganbin. 2017. Research on Incentive Mechanism of Green Building Based Ecological Environment Benefit Compensation. *Science & Technology Progress and Policy*, 34(9): 136-140.]
- 李叶红, 黄涛, 江向阳, 杨建坤. 2020. 广州市民用建筑能耗总量和强度计算研究与分析. *建筑节能*, 48 (11): 116-123. [Li Yehong, Huang Tao, Jiang Xiangyang, and Yang Jiankun. 2020. Calculation of Total Amount and Intensity of Building Energy Consumption in Guangzhou. *Building Energy Efficiency*, 48(11): 116-123.]
- 刘甲炎, 范子英. 2013. 中国房产税试点的效果评估: 基于合成控制法的研究. *世界经济*, 36 (11): 117-135. [Liu Jiayan, and Fang Ziyin. 2013. Evaluating the Effectiveness of China's Property Tax Pilot: A Study Based on Synthetic Control Method. *World Economy*, 36(11): 117-135.]
- 刘戈, 付英杰. 2022. 碳中和背景下绿色建筑运营管理创新路径与策略研究. *建筑经济*, 43 (4): 98-104. [Liu Ge, and Fu Yingjie. 2022. Research on Innovation Path and Strategy of Green Building Operation Management under the Background of Carbon Neutral. *Construction Economy*, 43(4): 98-104.]
- 刘戈, 刘伟. 2016. 绿色建筑运营管理主体行为进化博弈分析. *建筑经济*, 37 (3): 89-93. [Liu Ge, and Liu Wei. 2016. Evolutionary Game Analysis on the Players' Behavior of Green Building Operation Management. *Construction Economy*, 37(3): 89-93.]
- 鲁艳蕊. 2020. 基于Design Builder模拟的郑州高层办公建筑能耗研究. *山东农业大学学报 (自然科学版)*, 51 (2): 355-359. [Lu Yanrui. 2020. Study on Energy Consumption of High-Rise Office Buildings in Zhengzhou Based on Design Builder Simulation. *Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 51 (2): 355-359.]
- Olubunmi O A, Xia P B, and Skitmore M. 2016. Green Building Incentives: A Review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 59: 1611-1621.
- Sartori T, Drogemuller R, Omrani S, and Lamari F. 2021. A Schematic Framework for Life Cycle Assessment (LCA) and Green Building Rating System (GBRS). *Building Engineering*, 38: 102180.
- Shi Q, Lai X, Xie X, and Zuo J. 2014. Assessment of Green Building

- Policies - A Fuzzy Impact Matrix Approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36: 203-211.
- 施建刚, 张浩. 2014. 中外绿色建筑标准比较研究. 城市问题, (9): 2-8. [Shi Jiangang, and Zhang Hao. 2014. Comparative Study of Green Building Standards between China and Foreign Countries. *Urban Problems*, (9): 2-8.]
- Song Y, Li C, Zhou L, Huang X, Chen Y, and Zhang H. 2021. Factors Affecting Green Building Development at the Municipal Level: A Cross-Sectional Study in China. *Energy and Buildings*, 231: 110560.
- 孙燕铭, 湛思邈. 2021. 长三角区域绿色技术创新效率的时空演化格局及驱动因素. 地理研究, 40 (10): 2743-2759. [Sun Yanming, and Shen Simiao. 2021. The Spatio-Temporal Evolutionary Pattern and Driving Forces Mechanism of Green Technology Innovation Efficiency in the Yangtze River Delta Region. *Geographical Research*, 40(10): 2743-2759.]
- 王劲峰, 徐成东. 2017. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 72 (1): 116-134. [Wang Jinfeng, and Xu Chengdong. 2017. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 72(1): 116-134.]
- 王婧. 2019. 河南省绿色建筑的发展研究. 智库时代, (1): 234-235. [Wang Jing. 2019. Research on the Development of Green Building in Henan Province. *Think Tank Era*, (1): 234-235.]
- 王静, 郭夏清. 2017. 美国 LEED 绿色建筑评价标准 V4 版本修订的解读与比较. 南方建筑, (5): 104-108. [Wang Jing, and Guo Xiaqing. 2017. Interpretation and Comparison on Revision of LEED V4 Green Building Assessment Criteria. *South Architecture*, (5): 104-108.]
- Wei T, and Chen Y. 2019. Green Building Design Based on BIM and Value Engineering. *Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 11(9): 3699-3706.
- Wu P, Mao C, Wang J, Song Y, and Wang X. 2016. A Decade Review of the Credits Obtained by LEED V2.2 Certified Green Building Projects. *Building and Environment*, 102: 167-178.
- 薛梦. 2017. 我国绿色建筑运营管理中的利益协调机制构建研究. 西安: 西安建筑科技大学. [Xue Meng. 2017. *Research on the Interest Coordination Mechanism of Operational Management of Green Building in Chinese*. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology.]
- 徐峰, 王伟, 周晋, 姚昊翊, 王柏俊. 2018. 湖南省绿色建筑发展状况及技术选用研究. 建筑科学, 34 (6): 65-73. [Xu Feng, Wang Wei, Zhou Jin, Yao Haoyi, and Wang Baijun. 2018. Study on Development Status and Technology Section of Green Buildings in Hunan Province. *Building Science*, 34(6): 65-73.]
- 徐新良. 2017. 中国 GDP 空间分布公里网格数据集. (2017-12-11) [2022-03-20]. 资源环境科学数据注册与出版系统, <http://www.resdc.cn/DOI>. DOI: 10.12078/2017121102. [Xu Xinliang. 2017. China's GDP Spatial Distribution Kilometer Grid Data Set. (2017-12-11) [2022-03-20]. Data Registration and Publishing System of Chinese Academy of Sciences Resources and Environment Science Data Center, <http://www.resdc.cn/DOI>. DOI: 10.12078/2017121102.]
- 徐政, 左晟吉, 丁守海. 2021. 碳达峰、碳中和赋能高质量发展: 内在逻辑与实现路径. 经济学家, (11): 62-71. [Xu Zheng, Zuo Chengji, and Ding Shouhai. 2021. Carbon Peak, Carbon Neutrality Empowers High-Quality Development: Internal Logic and Realization Path. *Economist*, (11): 62-71.]
- Yadegaridehkordi E, Hourmand M, Nilashi M, Alsolami E, Samad S, Mahmoud M, Alarood A A, Zainol A, Majeed H D, and Shuib L. 2020. Assessment of Sustainability Indicators for Green Building Manufacturing Using Fuzzy Multi-Criteria Decision Making Approach. *Cleaner Production*, 277: 122905.
- 叶凌, 程志军. 2016. 我国绿色建筑标准发展现状及展望. 建筑科学, 32 (12): 6-12. [Ye Ling, and Cheng Zhiju. 2016. Overview on Green Building Standards Development. *Building Science*, 32(12): 6-12.]
- 叶祖达. 2012. 中国城市绿色建筑地理分布. 现代城市研究, 27 (9): 42-48. [Ye Zuda. 2012. The Geography of Green Buildings in Chinese Cities. *Modern Urban Research*, 27(9): 42-48.]
- 尹静, 孙艺文, 姜永生. 2021. 中国绿色住宅时空分异特征及其对策研究. 生态经济, 37 (10): 108-114. [Yin Jing, Sun Yiwen, and Jiang Yongsheng. 2021. Spatial-Temporal Differentiation Characteristics and Countermeasures of Green Housing in China. *Ecological Economy*, 37(10): 108-114.]
- Zhang L, Wu J, and Liu H. 2018. Turning Green into Gold: a Review on the Economics of Green Buildings. *Journal of Cleaner Production*, 172: 2234-2245.
- 张继宏, 金荷. 2017. 雾霾对不同技能员工劳动生产率影响的差异性研究——基于 CEES 数据的实证分析. 宏观质量研究, 5 (3): 101-118. [Zhang Jihong, and Jin He. 2017. A Study on the Difference Between the Impacts of Haze on the Labor Productivity among Different Skilled Employees: An Empirical Analysis Based on CEES Data. *Macro-Quality Research*, 5(3): 101-118.]
- 张建国, 谷立静. 2012. 我国绿色建筑发展现状、挑战及政策建议. 中国能源, 34 (12): 19-24. [Zhang Jianguo, and Gu Lijing. 2012. China's Green Building Development Status, Challenges and Policy Recommendations. *Energy of China*, 34(12): 19-24.]
- 张所续, 马伯永. 2019. 世界能源发展趋势与中国能源未来发展方向. 中国国土资源经济, 32 (10): 20-27. [Zhang Suoxu, and Ma Boyong. 2019. Development Trend of World Energy and Future Development Directions of China's Energy. *Natural Resource Economics of China*, 32(10): 20-27.]
- 赵璐, 赵作权. 2014. 基于特征椭圆的中国经济空间分异研究. 地理科学, 34 (8): 8. [Zhao Lu, and Zhao Zuoquan. 2014. Projecting the Spatial Variation of Economic Based on the Specific Ellipses in China on the Specific Ellipses in China. *Scientia Geographica Sinica*, 34(8): 8.]
- Zhou L, Zhou C, Che L, and Wang B. 2020. Spatio-Temporal Evolution and Influencing Factors of Urban Green Development Efficiency in China. *Geographical Sciences*, 30(5): 724-742.
- 郑振尧. 2021. 绿色建筑评价体系的问题与对策研究. 建筑经济, 42 (2): 14-17. [Zheng Zhenyao. 2021. Research on the Problems and Countermeasures of Green Building Evaluation System. *Construction Economy*, 42(2): 14-17.]
- 朱昭, 李艳蓉, 陈辰. 2018. 绿色建筑全生命周期节能增量成本与增

- 量效益分析评价. 建筑经济, 39 (4): 113-116. [Zhu Zhao, Li Yanrong, and Chen Chen. 2018. Analysis and Evaluation of Energy-Saving Incremental Costs and Benefits of Green Building during the Whole Life Cycle. *Construction Economy*, 39(4): 113-116.]
- Zou Y, Zhao W, and Zhong R. 2017. The Spatial Distribution of Green Buildings in China: Regional Imbalance, Economic Fundamentals, and Policy Incentives. *Applied Geography*, 88: 38-47.
- Zou Y. 2019. Certifying Green Buildings in China: LEED Vs. 3-Star. *Cleaner Production*, 208: 880-888.
- Zuo J, and Zhao Z. 2014. Green Building Research-Current Status and Future Agenda: A Review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 30: 271-281.
- 作者贡献声明:**
- 林漫华:**数据收集与分析,技术路线制定及论文撰写;
- 张婉娜:**数据收集与分析,图表制作;
- 郑荣宝:**综述资料收集,提出修改意见;
- 赵克飞:**综述资料收集与技术指导,提出修改意见;
- 钟 琪:**数据收集与分析,图表制作;
- 林丽洁:**论文选题,研究框架制定与技术指导,主要结论撰写与论文修改校对。

Spatiotemporal Variations and Driving Force of Green Buildings in Guangzhou, China

Lin Manhua, Zhang Wanna, Zheng Rongbao, Zhao Kefei, Zhong Qi, and Lin Lijie

(School of Management, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510520, China)

Abstract: Green buildings are characterized by energy saving and emissions reduction. To achieve the goals of peak emissions and carbon neutrality, large-scale development of green buildings contributes to relieving the pressure of resource shortage and environmental degradation. The extant literature on China's green buildings has mainly focused on standards and rating systems. With regard to the rapid growth of green buildings, research has increasingly focused on the development patterns and mainly concentrated on the nationwide or regional scales. It is essential to study the spatial and temporal patterns of green buildings and explore their dynamics in urban China within a particular city. Taking Guangzhou as a case study, this study comprehensively explored the spatial and temporal patterns of green buildings which were awarded the Chinese Green Building Evaluation Standard or LEED certification from 2008 to 2021, and further identified main factors in terms of market, economy, environment, and resources driving such patterns with the aid of ArcGIS spatial analysis and GeoDetector. It was found that: (1) Temporally, the growth of green buildings demonstrates a policy-driven trend of rising first and then descending. (2) Spatially, there are significant differences in green buildings project, construction area, and types in terms of green office, residential, and other public buildings. The green buildings in the city center of Guangzhou have considerable differentiation and complex levels. The high-level green buildings are primarily concentrated in Tianhe, Zengcheng, and Huangpu Districts, while the low-level green buildings are mostly located in Conghua, Panyu, and Nansha Districts. (3) The spatiotemporal patterns of green buildings exhibited the following features: The gravity center of green buildings moved northward and then southward; The range of distribution has continuously expanded. The developing trend in Guangzhou present northwest-southeast direction with gradually enhanced directionality. (4) With regard to the driving forces, resource factors are the primary driving force in the development of green buildings, followed by economic, market, and environmental factors. Specifically, among the three types of green buildings commercial, residential, and office, resource factors are the most important driving force in developing green commercial and residential buildings, while market factors deeply affect the spatial variation of green office buildings. Notably, environmental factors also play a key role in green residential buildings. From the perspective of geography in the spatiotemporal dimension, this study systematically reveals the evolution and determinants of green buildings in China. The findings provide scientific evidence for governmental decision-makers and urban planners in green buildings, new insights into green buildings development and enrich the theoretical framework of green buildings.

Keywords: green buildings; green buildings rating; GeoDetector; Guangzhou