

碳中和导向下的城市设计实践*

——以中新天津生态城临海新城生态岛为例

匡晓明 陈 君 徐 进 王睿珺

提 要 从城区碳排放特征和评估方法入手,基于能源需求侧节能减排目标提出建筑和交通等主要碳排放部门的关键驱动因子及其城市设计减碳方法,基于能源供给侧开源增效目标提出增加可再生能源承载空间和促进负荷平准化的功能混合等设计策略。以中新天津生态城临海新城生态岛为例,量化评估规划设计的减碳贡献度以及城区碳中和目标实现的可能性及实现路径。研究显示,在现有经济技术条件下要实现运营阶段在地碳中和目标具有相当难度,需审慎设定减碳目标。

关键词 碳中和;碳排放评估;城市设计;节能减排;开源增效;临海新城生态岛

中图分类号 TU984 文献标志码 A
DOI 10.16361/j.upf.202206015
文章编号 1000-3363(2022)06-0110-09

作者简介

匡晓明,同济大学建筑与城市规划学院,高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室,副教授,上海同济城市规划设计研究院有限公司城市设计研究院常务副院长,城市空间与生态规划研究中心主任,

kuangxiaoming@tongji.edu.cn

陈 君,上海同济城市规划设计研究院有限公司,城市空间与生态规划研究中心执行副主任,高级工程师

徐 进,上海同济城市规划设计研究院有限公司,城市空间与生态规划研究中心主任助理,工程师

王睿珺,上海同济城市规划设计研究院有限公司,城市空间与生态规划研究中心,工程师

Urban Design Under the Guidance of Carbon Neutrality: The Case of Eco-Island in Linhai New Town, Sino-Singapore Tianjin Eco-City

KUANG Xiaoming, CHEN Jun, XU Jin, WANG Ruijun

Abstract: The paper first examines the characteristics of urban carbon emission and the assessment methods. On the energy demand side, in order to achieve the goal of energy conservation and emission reduction objectives, the study proposes methods of carbon reduction through urban design in a few key emission sectors such as buildings and transportation. On the energy supply side, in order to provide more renewable energy and improve the efficiency of the energy system, the paper proposes to increase serviceable spaces of renewable energy by supporting mixed land-use to achieve load balance. Taking Linhai New Town Eco-Island, Sino-Singapore Tianjin Eco-city as an example, the study quantitatively evaluates the contribution of urban design to carbon reduction and the difficulties and possible paths to achieve carbon neutrality goals in urban areas. The results show that it is quite difficult to meet the carbon neutrality target in the operational stage under the existing economic and technological conditions; therefore, it is necessary to set the carbon reduction target prudently.

Keywords: carbon neutrality; carbon emission assessment; urban design; energy conservation and the reduction of emissions; open energy source and improve energy efficiency; Eco-island in Linhai New Town

为应对全球气候变化,中国政府承诺力争于2030年前后达到二氧化碳排放量峰值,努力争取2060年前实现碳中和。碳中和是指通过平衡CO₂的排放与CO₂的清除(通常通过碳补偿)实现净零CO₂排放^[1]。碳中和计划是一个雄心勃勃且任重道远的目标,不仅涉及居民生活、工业、建筑和交通等重点领域的节能减排,还涉及能源结构调整中提高非碳能源(如风能、光能、水能、地热能和核能等)的占比,以及提升陆地及海洋生态系统碳汇以及碳捕获和封存技术(CCS)发展等系统性问题^[2-3]。

如何实现碳中和目标已成为当前城市规划研究中的热点问题^[4]。诸多学者^[4-9]已经开展了一系列研究,针对不同空间尺度,从概念内涵、目标指标、规划实施等多方面开展有益探索。国家的碳达峰、碳中和目标需要分解传导并落实到各个运行实体当中。城市是人为温室气体排放的主角,其运行过程中排放的温室气体占全球总量的75%左右^①,

*上海市科委科技支撑碳达峰与碳中和专项“‘双碳’背景下超大城市环境动态规划设计研究及示范”(项目编号:22dz1207800)

因此以城市为主体实现碳中和将具有更为广泛的实践意义。美国学者Carter、Condon、Glaeser和Kahn等基于大量数据,对全球多个城市碳排放量的差异进行了实证分析,提出城市土地利用和空间形态的差异将对碳排放量产生显著的影响^[10]。巴西学者Magalhaes等^[11]认为城市形态影响了城市的能源消费模式,城市空间结构和街区结构、大小、密度,以及土地利用模式、交通模式等均影响了城市的碳足迹。城市形态及建成环境通过影响城市能源和资源的使用方式与效率进而深刻影响了城市碳排放,使得规划设计对城市形态与建成环境的干预在实现“双碳”目标的过程中亦扮演了相当重要的角色。但量化评估规划设计减碳贡献度以及碳中和目标实现可能性的相关研究仍然较为缺乏^[12-13]。

本文拟回答,通过碳排放评估方法和关键驱动因子剖析,基于能源需求侧建筑和交通部门节能减排以及能源供给侧开源增效的城市设计策略,对空间形态进行优化并对建设活动进行导控,在经济技术可行的情况下,城区在运营阶段能够多大程度上实现“碳中和”目标,通过中新天津生态城临海新城生态岛城市设计的实证案例,基于规划设计方案优化和建设行为导控,综合评估城市片区在运营阶段实现“碳中和”目标上的可行性,为我国城区尺度“碳中和”规划以及“双碳”目标下的规划建设行动提供有益的参考。

1 城区碳排放评估范畴和部门

1.1 城区碳排放评估范畴

全球地方环境理事会规定的城市温室气体排放分为3个范畴:范畴一是指城市运营的直接排放源头,如城区内建筑和交通耗能;范畴二是指为城市运营购买引入的电力、热力等能源间接排放;范畴三是指为城市运营带来的其他间接排放,如城市边界外的航空、水运等等^[14]。本文关注的是城市城区按照某一规划设计及相关决策发展成型后的碳排放水平如何,能在多大程度上达到“碳中和”目标,因此范畴一是本文的主要评估对象。

1.2 城区碳排放评估部门

城市和城区的温室气体清单内容差异较大^[15],通过整理多个城市及城区的温室气体清单,识别出城区尺度的综合碳排放评估关键部门主要包括建筑、交通和绿地(表1)。

2 基于碳排放评估的规划设计减碳方法

以城区为尺度建立碳排放评估的方法,厘清碳排放与物质空间特征的因果关系,明确碳排放的关键驱动因子,并对规划设计进行优化,形成以碳中和为导向的城市设计方法。本文所述城区主要以居住建筑和公共建筑为主,因此暂不考虑工业生产所产生的碳排放。

2.1 城区综合碳排放评估方法

建筑运行和交通出行过程中使用能源而产生的碳排放约占城区总排放量的80%以上。供水、废弃物处理等分类所占比例较小,可以采用较为简单的评估方法^[15]。

城区的碳汇主要来自绿地植被吸收,绿地面积和种植类型密切相关。可再生能源可以作为建筑和交通部门的替代能源使用,对碳排放起到抵消的作用。

综上,城区综合碳排放计量公式为:

$$C=C_b+C_t+C_w-C_g-C_e \quad (\text{式1})$$

式中: C_b 为建筑部门碳排放量; C_t 为交通部门碳排放量; C_w 为供水、废弃物处理等过程中的碳排放量; C_g 为绿地部门碳汇量; C_e 为可再生能源碳抵消量。

2.2 城区运营阶段碳中和的关键点

实现城区碳中和的关键是运营,城区仍可以使用常规能源和化石燃料,但需在一年运营周期内,通过碳汇和碳清除措施所减去的碳排放大于或等于运

行产生的碳排放。考虑到绿地碳汇量占总体碳排放量的比例极低,要实行城区运营阶段碳中和,不仅要在需求侧尽可能地节能减排,降低碳排放总量,还要在供给侧提高可再生能源使用总量,提高能源系统效率。

2.3 基于需求侧节能减排的规划设计减碳路径

笔者在崇明陈家镇^[16]和临港低碳示范园区^[17]中对低碳生态规划管控体系的相关方法进行了探索,但尚未涉及碳排放评估的相关内容。本小节基于碳排放评估方法,从能源需求侧节能减排视角,探讨如何通过城市设计方法降低建筑部门和交通部门的能源需求。

2.3.1 促进建筑部门节能减排的方法

(1) 建筑部门碳排放量评估

针对不同建筑类型的用能强度和能耗结构,选取与其对应的单位面积能耗标准,计算出建筑运营过程的碳排放量(式2)。

$$C_b=\sum S_i \times E_i \times F_i \quad (\text{式2})$$

式中, C_b 为建筑碳排放量; S_i 为某类建筑面积; E_i 为单位建筑面积能耗(电力、采暖等); F_i 为碳排放系数。

(2) 建筑部门减碳原理与路径

建筑能源消耗中采暖和制冷等调节热舒适性方面的能耗占比最大,且与外部物理环境有较大关联。规划设计以“对获取环境舒适性用能活动的空间干预”为切入点^[18],通过风、热环境优化两个方面来实现建筑减碳(图1)。

风环境优化:城市设计需要基于场地气候条件和调节需求因地制宜进行局地微风环境优化。如:通过构建通风廊道、优化街道方向、利用局部地形风等方式促进夏季通风;通过降低街道连续性、上风向布局高层建筑和优化建筑群组布局等阻挡冬季寒风渗透。

表1 国内外多个城区的温室气体清单

Tab.1 List of greenhouse gases of several urban districts in China and overseas

项目名称	新建建筑	既有建筑	交通	工业	水资源	废弃物	道路设施	绿色空间
澳大利亚悉尼市南布朗加鲁项目	●		●					●
加拿大多伦多市唐河口项目	●		●	●	●	●		●
上海市世博园区后续发展碳排放评估	●	●	●	●	●	●		●
北京市中关村丰台科技园温室气体排放清单		●	●	●	●	●	●	●

资料来源:作者根据参考文献[15]整理

热环境优化：热环境优化的主导目标可以根据不同气候区域在制冷和制热方面的能耗占比来确定。制冷需求大的地区可以通过增加街道高宽比、建筑密度等减少日间太阳辐射吸收，同时构建通风廊道、引入绿化水体降温，共同促进夏季热岛效应降低。制热需求大的地区则可以通过降低街道高宽比、优化建筑群组布局及适宜的建筑密度实现。

2.3.2 促进交通部门节能减排的方法

(1) 交通部门碳排放量评估

交通部门碳排放量与交通行为和交通工具用能相关。根据居民出行方式，确定各类交通方式的出行距离和单位里程碳排放因子，计算交通板块的碳排放量（式3）。

$$C_t = \sum N \times P_i \times T_i \times M_i \quad (\text{式3})$$

式中： C_t 为交通碳排放量； N 为居民出行总量； P_i 为第 i 种交通方式的分担率； T_i 为第 i 种交通方式的人均出行距离； M_i 为第 i 种交通方式每人每公里碳排放量。

(2) 交通减碳的原理与路径

通过城市设计方法促进交通部门节能减排主要以缩短出行距离和引导出行方式两种路径来实现（图2）。

通过提高居住区附近的公服和商业娱乐设施等密度，构建小街密路的整体格局可提高可达性，缩短出行距离。

通过优先发展公交体系、慢行系统道路和路网密度等道路优化策略，减少私人机动车出行比例；通过提高公交站点覆盖率和公交线路密度，提高公交出行比例。

2.4 基于供给侧开源增效的规划设计减碳方法

城市能源供给侧的结构和效率很大程度上影响了能源系统的碳排放。通过优化能源供应结构，尽可能因地制宜地使用可再生能源资源；通过能源系统整体优化将多个产能和用能对象统筹考虑，依托能源互联网技术，构建集中与分布协同的区域能源系统，提高能源综合利用效率。这往往需要城市规划师与能源规划师之间进行协作，从可负担性、可靠性和可持续性^[1]等方面进行综合考量。

2.4.1 可再生能源碳抵消量评估

太阳能、风能、地热能和生物质能等可再生能源替代相应的常规能源，根

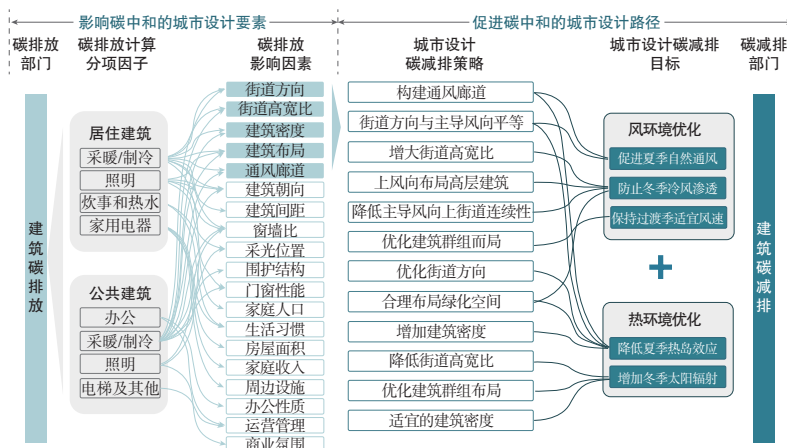


图1 城市设计促进建筑部门碳减排路径

Fig.1 Carbon emission reduction paths in the building sector

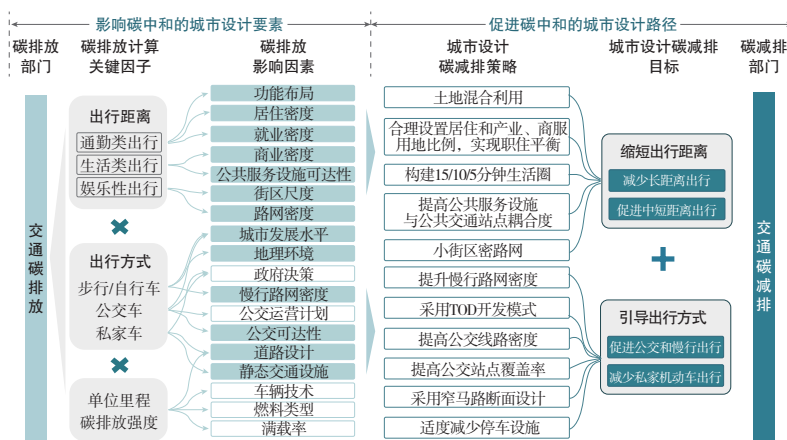


图2 规划设计促进交通部门碳减排路径

Fig.2 Carbon emission reduction paths in the transportation sector

据各类常规能源的碳排放因子分别计算可再生能源的碳抵消量（式4）。

$$C_e = \sum E_i \times F_i \quad (\text{式4})$$

式中： C_e 为可再生能源碳抵消量； E_i 为某类可再生能源的替代能源量， F_i 为替代能源的碳排放系数。

2.4.2 城市设计策略

(1) 开源——为可再生能源利用提供承载空间

分析评估城区太阳能（光电/光热）、风能、生物质能、地热能（深层/浅层/地表水）等可再生能源的可利用总量，结合经济技术可行性，对可再生能源技术应用情景进行分析。由于可再生能源的分布式、低能量密度与间歇性等特征，需要占用大量的空间来进行能源的捕捉和储存，因此城区空间形态设计应充分考虑可再生能源设施布局的可行性。例如，建筑群体布局要考虑前排建筑对后

排建筑的屋顶及立面的遮挡，采用南向单坡或者平屋顶等，尤其应加强建筑立面光伏设施一体化设计（图3）。场地布局要给热泵系统地埋管的敷设留足空间。此外还要考虑到平抑用能曲线的储能设施的空间布局要求。

(2) 增效——功能混合促进负荷平准化

由于不同功能建筑用能的持续时间和负荷差异而形成的负荷波动容易造成能源设施容量冗余、输送能耗增加等问题。在能源站服务单元内将日间用能较多的商业、办公及公共建筑与夜间用能较多的住宅建筑按照一定的比例进行混合，提高整个区域的负荷互补性，达到消减峰值负荷作用。研究表明，在北方供暖地区居住、商务和商业的建筑规模配比为0.6、0.1和0.3^[20]，在上海地区住宅、酒店、商业办公的建筑规模配比为

0.6 : 0.25 : 0.15^[21], 其冷热电负荷平准化为综合较优。

3 中新天津生态城临海新城生态岛碳中和导向城市设计探索

3.1 生态岛项目基本概况

生态岛(原钻石岛)是中新天津生态城重要功能板块——临海新城的九大岛屿之一,位于临海新城西北侧区域,总用地面积1.4 km²(图4),作为中新天津生态城“生态城市升级版”的示范先导区(图5),以运行阶段碳中和为导向,打造生态低碳、高效复合、活力宜居的功能区域,探索生态城未来实践的新示范。

3.2 促进建筑部门减碳的规划设计策略

城市设计应综合考虑四季的气候变化,在城区和建筑群组两个层面通过营造舒适的风热环境减少碳排放。

3.2.1 城区层面

在城区层面,主要通过对街道朝向、绿化空间及高层建筑布局进行气候适应性设计尝试,并以各季节主导风向的最大概率风速作为输入值进行风热环境模拟实证(图6)。

冬季:主导风向北偏西45°,将与主导风向平行的街道形态尽量短或曲折,减缓寒风进入,沿岛西北侧规划防护林带并布置高层建筑。利用计算流体力学软件进行模拟,人行区平均风速由4.00 m/s的输入值减小为2.51 m/s。

夏季:主导风向东偏南22.5°,将中央绿带与东南角街道方向设计为与夏季主导风向平行,将自然冷风引入城区内部。经模拟,人行区平均风速由2.20 m/s提升为3.75 m/s,热岛效应控制在1℃以内。

春秋季:主导风向南偏西45°且风速偏大,为减缓风速,将主要街道朝向设置在主导风向两侧45°—75°范围内,并通过小街区密路网的布局形式,降低穿越街区的风速。经模拟,人行区平均风速由3.50 m/s降低为2.25 m/s。

3.2.2 建筑组团层面

北方传统建筑利用围合方式遮挡寒风,但会影响东西侧部分日照。本次城市设计对围合式建筑布局进行优化,降低南侧建筑高度,增加南侧和东侧的建筑开口,使建筑能接受更多太阳辐射;

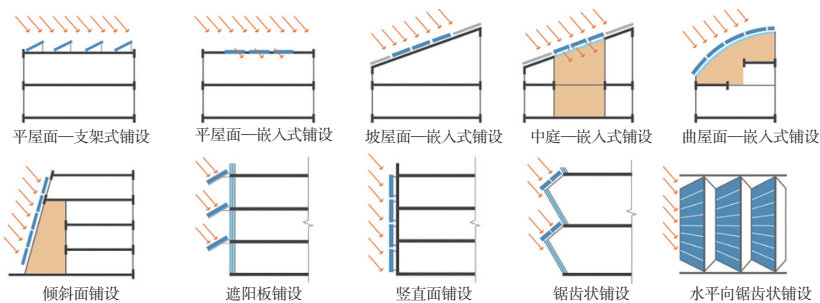


图3 建筑与太阳能板一体化设计

Fig.3 Integrated design with architecture and the solar panels
资料来源:作者根据参考文献[19]资料改绘



图4 生态岛城市设计总平面图

Fig.4 Urban design layout of the Eco-Island

资料均来自上海同济城市规划设计研究院有限公司.中新天津生态城临海新城钻石岛屿城市设计,2020.

同时适度增加西侧建筑高度,且裙房不设开口,阻挡冬季寒风,减少热辐射带来的热损失(图7)。利用英国卡迪夫大学 HTB2 软件平台插件 Virtual Village,对3种布局进行能耗模拟对比,在相同外围围护结构条件下,优化围合式布局,单位建筑面积的 CO₂ 排放为 64.17 kg/m²,比行列式布局降低 37%,比围合式布局降低 12%。

3.3 促进交通部门减碳的规划设计策略

3.3.1 降低居民交通需求

采用提高功能混合度和提升公服设施可达性等策略以降低居民交通需求。

通过绿廊划分3个组团,组团内部强调复合活力功能布局,中心区域结合交通枢纽,布局创新办公、商业娱乐、



图5 生态岛鸟瞰效果图

Fig.5 Aerial-view rendering of the Eco-Island
资料均来自上海同济城市规划设计研究院有限公司.中新天津生态城临海新城钻石岛屿城市设计,2020.

文化休闲、展览展示、生活服务和基础教育等多元复合功能,使交通枢纽周边300 m范围功能混合度达到60%。构建均衡布局的两个层级公共服务体系,提升全岛公共服务设施可达性。按照10分钟和5分钟生活圈分别设置了1个社区中心

和3个社区服务站,实现300 m范围内有公服设施居住区比例 $\geq 90\%$,减少居民出行距离。

3.3.2 引导居民绿色出行

通过提高路网密度、优化路网结构、提供P+R换乘设施、提升慢行路网密度和实行停车需求管理等策略,降低居民的机动车出行比例。

规划根据外环疏解车行交通、内部引导慢行优先原则进行路网设计,沿岛外环路为车行疏解道路,设置3处P+R停车设施,对进入岛内的机动车辆截流。内部采用小街密路布局,设置无人驾驶公交环线,并在城市智轨站点设置一处零换乘交通中心(图8)。

实行停车需求管理,划定3个停车分区,采用机动车停车位紧缩的方式,由外围向内圈停车位数量逐级递减,外围住宅区停车位按100%、公共建筑按70%、内圈核心区按50%配置,总停车位减少30%。

通过跨越海天道的高线花园,联通南北绿带打造星型绿廊,形成连续立体步行空间体系(图9),300 m范围内可达人行绿廊的用地占总面积95%。星型绿廊和环岛绿带共同构筑岛内网状慢行系统,使专用慢行路网密度达到 6.1 km/km^2 。

3.4 促进能源系统碳抵消的规划设计策略

3.4.1 多元可再生能源利用

生态岛所在的天津市不仅具有良好的太阳能开发潜力,还有丰富稳定的地热能 and 海洋能(如潮汐能、波浪能等)。考虑场地周边国家一级重点保护野生鸟类栖息地,暂不考虑风能的利用。综合考虑经济技术可行性,将太阳能、地热能作为生态岛的主要可再生能源,波浪能、潮汐能和潮流能等海洋能可作为补充。

3.4.2 构建多能互补分布式能源系统

生态岛的能源系统应是一个多能互补的分布式能源系统^[22]。首先,通过多种可再生能源、清洁能源的能源梯级利用系统使低品位的能源能够得到较好的利用。其次,电力和热能均分布式生产,电力由城区集中供应,热能以建筑组群为单位集中供能,尽量缩短热力管道的输送距离以减少运输过程能耗。运用能

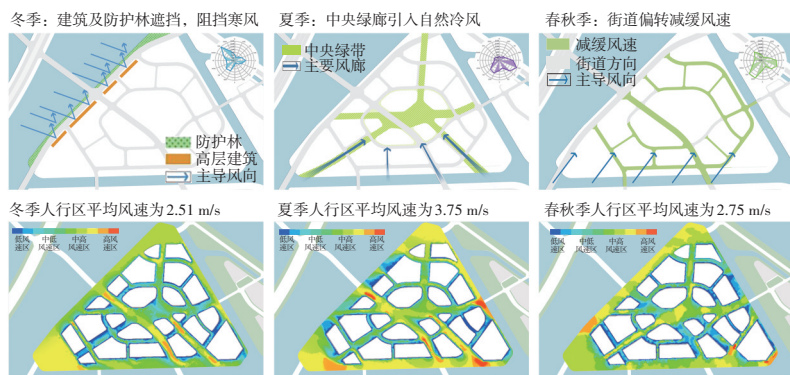


图6 风环境优化策略及模拟

Fig.6 Optimization strategy and simulation of the wind environment

资料均来自上海同济城市规划设计研究院有限公司.中新天津生态城临海新城钻石岛屿城市设计,2020.

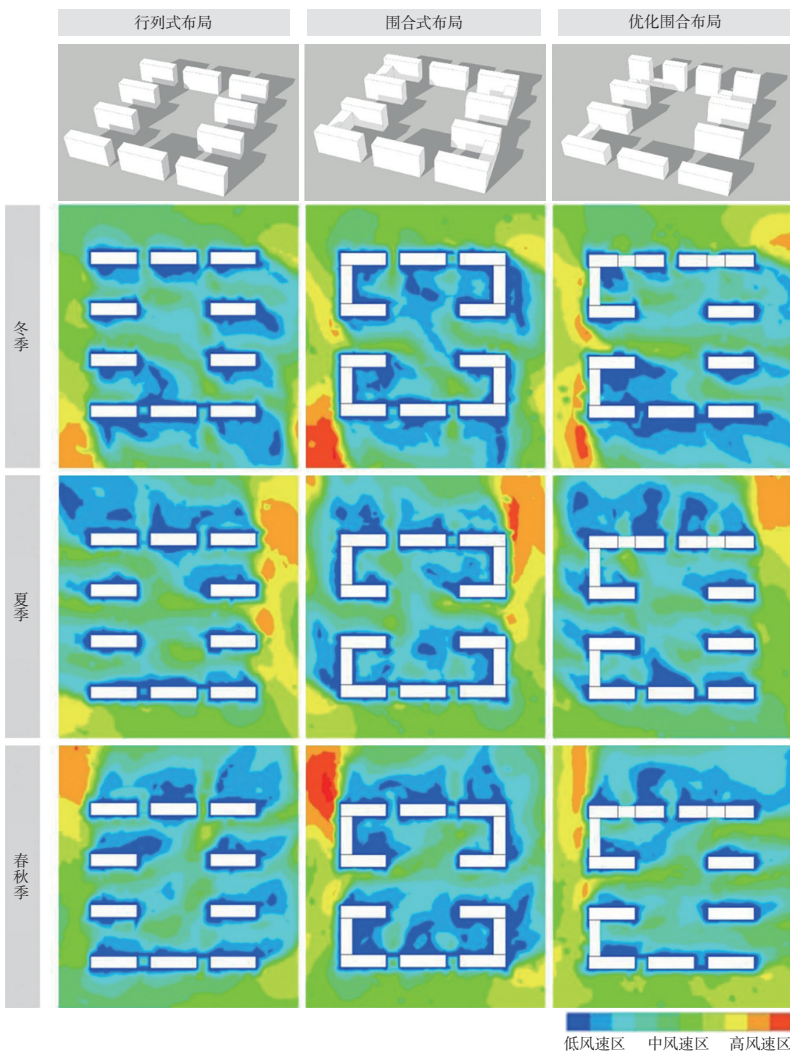


图7 不同建筑组群平面布局及其风环境模拟

Fig.7 Layout of different building groups & simulation of the wind environment

资料均来自上海同济城市规划设计研究院有限公司.中新天津生态城临海新城钻石岛屿城市设计,2020.

源配伍法^[23]对生态岛建筑功能配比进行适当调整,综合考虑开发效益,确定居住、商业和商务的建筑配比为0.53:

0.28:0.19,以平衡能耗峰谷,提高能源使用效率。

生态岛能源系统分为两个层级。第



图8 生态岛公交优先的交通体系

Fig.8 Public transport as the priority in the transportation system

资料均来自上海同济城市规划设计研究院有限公司.中新天津生态城临海新城钻石岛屿城市设计, 2020.

一层是多能互补的能源管理中心,以气、热、冷、电能源网络作为基础构架,能源中心供应热、电能等,并对全岛能源进行适时调峰和部分能源储存。第二层是3个分布式能源站,主要考虑采用就近供应模式,包含光伏发电、地源热泵等分布式能源,在使用过程中先保证分布式能源的就近全发全用(图10)。可再生能源碳抵消量评估在4.4节中具体展开。

4 生态岛碳排放评估与碳中和目标实现

生态岛以商务办公和居住生活功能为主,无工业部门耗能;城区尺度较小,水资源和废弃物处理主要依靠区域基础设施供给,且占比较低,暂不计入生态岛碳排放量。因此,岛内碳排放评估主要来自建筑和交通能耗,碳清除量来自绿地碳汇和可再生能源的碳抵消。各项系数取值均采用理想设计值进行测算,并将其折算为标准煤后再转化为 CO_2 排放量。当然,生态岛是否能够达到碳中和不能仅仅依靠设计计算值,还需要运行过程中的实测数据予以验证。

4.1 建筑部门碳排放评估

建筑面积总量是影响生态岛内建筑能耗总量的关键因素,开发强度越小能耗总量越低,但过低的开发强度既不符合国家相关政策要求,也不利于城区整体开发效益。经政府管理部门、城市规划师与能源规划师的反复核算,确定以中等开发强度为主,居住用地容积率控制在1.2—1.6,商业用地容积率为2.0—2.5,公共服务类用地容积率为0.8—1.2。



图9 主要慢行路网布局

Fig.9 The non-motorized transport system

资料均来自上海同济城市规划设计研究院有限公司.中新天津生态城临海新城钻石岛屿城市设计, 2020.



图10 生态岛能源系统布局图

Fig.10 The Energy system of the Eco-Island

资料均来自上海同济城市规划设计研究院有限公司.中新天津生态城临海新城钻石岛屿城市设计, 2020.

本次测算根据《近零能耗建筑技术标准》(GB/T 51350—2019)中的相关要求,假定岛内的建筑均按照近零能耗建筑及以上标准进行建造,以此确定其建筑单位面积能耗标准,匡算得出规划情景下岛内建筑年运行总能耗为6312万kWh,经换算建筑部门运行年碳排放总量2.16万t(表2)。城市形态优化能够对建筑部门能耗产生积极正面的影响,但如何定量测度其对负荷和能耗降低的贡献程度是一个难题。本次规划中通过风热环境优化、建筑群体组合布局和绿化植被微气候调节等方面可实现建筑间接节能5%—10%,本次取5%,可得岛内建筑部门运行年碳排放总量为2.052万t,相较于常规情景的2.82万t减碳27.2%。

4.2 交通部门碳排放评估

基于前文所述的城市交通碳排放模型对生态岛的交通碳排放进行评估。居民出行总量参考《中新天津生态城绿色交通系统规划研究》和《天津市2017年居民出行调查》报告,并根据方案中的土地利用情况进行计算,得出全岛日均出行总量。根据《天津市绿色交通运输“十四五”发展规划》要求,2025年天津市中心城区绿色出行比例达到75%。在考虑前述城市设计方案中引导居民绿色出行的多项优化设计策略的基础上,参考中新天津生态城相关出行数据,预测生态岛绿色出行比例达到85%,其中公交出行比例30%(表3)。根据生态岛的城市设计方案中的道路长度,并结合居民短距离出行研究,确定各类出行方式的出行距离。按照生态岛内所有汽车中50%为新能源汽车进行计算,生态岛年均交通碳排放总量为0.47万t,相较于常规情景减碳50.4%。

4.3 绿地碳汇评估

生态岛规划公园绿地用地面积47hm²、防护绿地用地面积4hm²,其他各类用地的附属绿地面积59hm²。规划通过植林率指标控制提高绿地空间中对碳汇吸收帮助最大的乔木种植比例。其中,乔木、灌木及草坪比例及其碳清除因子参考天津市数据^②。经计算,岛内年均绿地空间碳清除总量为0.16万t(表4)。

表2 建筑部门运营阶段年碳排放量匡算

Tab.2 Calculations of annual carbon emissions in the building sector at the operational stage

建筑类型	常规情景单位面积能耗限额/(kWh/m ² ·a)	规划情景单位面积能耗限额/(kWh/m ² ·a)	建筑面积/万m ²	常规情景年碳排放量/万t	规划情景年碳排放量/万t
居住建筑	供暖年耗热量	21.0	47.29	0.27	0.19
	供冷年耗冷量	28.0	47.29	0.36	0.26
	照明、生活热水、电梯系统等能耗	36.4	47.29	0.47	0.34
合计				1.10	0.79
建筑类型	常规情景单位面积能耗限额/(kWh/m ² ·a)	规划情景单位面积能耗限额/(kWh/m ² ·a)	建筑面积/万m ²	常规情景年碳排放量/万t	规划情景年碳排放量/万t
公共建筑	商务建筑	90.8	17.52	0.55	0.43
	商业建筑	129.7	25.03	1.12	0.89
	科教文卫建筑	95.6	1.75	0.06	0.05
合计				1.72	1.37
总计				2.82	2.16

资料来源:常规情景单位面积能耗分别取自《天津市居住建筑节能设计标准》(DB 29-1-2004)、《公共建筑节能设计标准》(GB 50189—2015),规划情景单位面积能耗限额取自《近零能耗建筑技术标准》(GB/T 51350—2019)

表3 生态岛规划情景各类出行方式比例和平均出行距离

Tab.3 Proportion of different travel modes and respective average travel distance

出行方式	步行	自行车	公交车	私家车
岛内交通	出行方式比例/%	40	35	15
	平均出行距离/km	1.4	2.9	1.8
岛外交通	出行方式比例/%	23	12	45
	平均出行距离/km	1.4	2.9	8.3
出行方式总比例/%		31	24	30

资料来源:出行方式比例及距离参考《中新天津生态城绿色交通系统规划研究》《天津市2017年居民出行调查报告》

表4 生态岛各类绿地碳量

Tab.4 Carbon emissions of different types of green spaces in the Eco-Island

绿地分类	绿地面积/ hm ²	植林 地率/%	乔木碳汇因子/ (t/hm ²)	灌木碳汇因子/ (t/hm ²)	草坪碳汇量/ (t/hm ²)	碳清除总量/ 万 t
公园绿地	46.74	60	12.93	12.21	1.61	0.07
附属绿地	63.10	50				0.08
总计						0.16

4.4 可再生能源碳抵消评估

在充分挖掘节能减排规划技术潜力的基础上,要达到在地碳中和的关键在于使用足够多的可再生能源。考虑经济技术可行性,优先利用屋顶太阳能、堤岸太阳能和浅层地热能。中新天津生态城在绿地上架设太阳能光伏已有试点,但对景观以及植被等的影响还有待评估。建筑立面太阳能光伏以及潮汐能、潮流能和波浪能等海洋发电技术正在试验推进中,可作为备选。

4.4.1 屋顶太阳能光伏碳抵消评估

建筑屋面的太阳能发电量评估的各项参数包括用地面积、建筑密度,各类用地性质的屋顶光伏利用系数和各类建筑的屋顶光伏安装系数,以及天津地区

的单位面积面辐照量、组件转换效率和系统能效比等^③。经计算,生态岛建筑屋面可敷设面积为11.9万m²,年供能总量为1514万kWh,碳抵消量为0.516万t。

4.4.2 堤岸太阳能光伏碳抵消评估

生态岛所在水域为人工控制,水面高程较为稳定,可沿生态岛堤岸南侧及东侧分别布置光伏板矩阵,形成小型的光伏发电中心。经测算,堤岸可敷设面积为3.4万m²,年供能总量为508.4万kWh,碳抵消量为0.173万t。

4.4.3 地热能碳抵消评估

采用浅层地源热泵对生态岛进行供热供冷,按照基本满足岛内建筑冷热需求进行供需匹配。地埋管按照5m间距布局在公共绿地地下空间,总打孔数约

为5300个,打孔深度100—120 m,单井产能按 $5\text{ kW}^{(4)(24)}$ 估算,地源热泵系统的年均碳抵消量为0.867万t。

综上若采用常规可再生能源利用方案,其碳抵消量为1.556万t。

4.5 生态岛碳排放评估与碳中和目标实现

要在城区内实现碳中和是一项艰巨的任务。综合上文计算可得,生态岛以建筑和交通部门为主的碳排放量为2.522万t,绿地部门碳汇及采用常规可再生能源利用情景下碳抵消量总和为1.715万t,占碳排放的68.0%。

若要实现生态岛运营阶段净零碳排放即运营阶段碳中和的目标,仍有0.807万t碳排放需要通过在地可再生能源生产或者外购绿电的方式进行抵消。经测算,若采用在地可再生能源的方式,需要在建筑立面安装约为7万 m^2 的薄膜光伏设施,以及装机容量在3000 kW左右的潮汐能、波浪能、潮流能等海洋能发电设施才能够实现。无论从技术成熟度、投资回收可行性还是可持续性来说,都具有较大的挑战。

5 结语

城市设计所塑造的城市空间结构和建成环境形态对碳排放有重要影响,在“碳达峰、碳中和”目标背景下,以城区尺度为研究对象,构建碳排放与规划设计之间的逻辑关联,并基于城市设计优化方案对碳排放进行评估,有助于自下而上定量化评估规划设计的减碳贡献以及城区碳中和目标实现的可能性及其路径。本次研究仍有一定的局限性:首先,中新天津生态城临海新城生态岛是相对独立的城区区域,且为新建地区,具有较好的碳排放独立测算条件;其次,本次实践中城市设计优化和碳排放核算主要针对运营阶段核心排碳部门展开,对居民生活使用中碳排放考虑较少;再者,本次研究基于理想情况对能源系统碳抵消进行核算,尚未考虑供能稳定性对系统冗余的要求等,当然经济性亦未纳入本次研究的探讨范畴;此外,本次研究依托蓝图式的理想规划情景进行碳排放评估,尚未基于建筑、交通、能源等各

系统多情景碳排放评估进行深入探讨。未来将在进一步的研究中对以上问题予以深化探索。尽管如此,仍能一窥“碳中和”城区规划建设的路径与挑战,为城区尺度“碳中和”导向规划探索以及双碳目标下的规划建设行动提供参考。

注释

- ① 该数据来源于联合国可持续发展目标。
- ② 绿化设计中乔灌木比例宜为7:3,取值根据《天津市绿地体系规划(2020—2035年)》,乔木碳清除因子为 $12.93\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ 、灌木碳清除因子为 $12.21\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ 、草坪碳清除因子为 $1.61\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$,取值根据论文《天津滨海几种人工植被的碳汇作用研究》。
- ③ 各类用地性质的屋顶光伏利用系数参考论文《碳中和城区的建筑综合能源规划》中的取值,即居住用地0.8、多层公建0.8、高层公建0.85;各类建筑的屋顶光伏安装系数参考论文《碳中和城区的建筑综合能源规划》中的取值,即多层住宅0.6、多层公建0.8、高层公建0.4;单位面积年辐照量来源于中国气象局风能太阳能资源中心发布的《2020年中国风能太阳能资源年景公报》,其中天津市固定式光伏发电量最佳倾斜面年辐照量为 $1400\text{—}1800\text{ kWh}/\text{m}^2$;组件转换效率为15.5%,取值参考华北电力大学硕士论文《单晶硅太阳能电池硅片转换效率提高对并网电能质量的改善》中的取值;系统能效比为0.759,取值参考国家发展和改革委员会宏观经济研究院研究员王斯成论文《关于路线图中“能效比”(PR)指标的建议意见》。
- ④ 地埋孔热泵供热量取值参考论文《碳中和城区的建筑综合能源规划》中关于浅层地热能U型管土壤耦合换热孔的单井产能 $4\text{—}6\text{ kW}$,本文取中间值。

参考文献 (References)

- [1] 龙惟定,梁浩.我国城市建筑碳达峰与碳中和路径探讨[J].暖通空调,2021,51(4):1—17. (LONG Weiding, LIANG Hao. Discussion on paths of carbon peak and carbon neutrality of urban buildings in China [J]. Heating Ventilating and Air Conditioning, 2021, 51(4): 1—17.)
- [2] 丁仲礼.中国碳中和框架路线图研究[J].中国工业和信息化,2021(8):54—61. (DING Zhongli. China carbon neutral framework roadmap research [J]. Chinese Industry and Information Technology, 2021 (8): 54—61.)
- [3] 张立.“碳达峰、碳中和”UP论坛综述[J].城市规划学刊,2021(4):6—9. (ZHANG Li.

Synopsis of the UP forum on peak carbon emission and carbon neutrality [J]. Urban Planning Forum, 2021(4): 6—9.)

- [4] 李晓江,何炯,罗彦,等.粤港澳大湾区碳排放空间特征与碳中和策略[J].城市规划学刊,2022(1):27—34. (LI Xiaojiang, HE Ge, LUO Yan, et al. Spatial characteristics of carbon emissions and carbon neutralization strategies for Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Urban Planning Forum, 2022(1): 27—34.)
- [5] 郑德高,吴浩,林辰辉,等.基于碳核算的城市减碳单元构建与规划技术集成研究[J].城市规划学刊,2021(4):43—50. (ZHENG Degao, WU Hao, LIN Chenhui, et al. The formulation of urban carbon reduction unit and integrated planning methodology based on carbon accounting [J]. Urban Planning Forum, 2021(4): 43—50.)
- [6] 余翔宇,何京洋,朱丹,等.既有社区低碳更新的路径与实践:以上海7个社区为例[J].城市规划学刊,2022(4):111—119. (YU Xiangyu, HE Jingyang, ZHU Dan, et al. Path and practice of low-carbon urban renewal: a case study of seven communities in Shanghai [J]. Urban Planning Forum, 2022(4): 111—119.)
- [7] 叶祖达,刘京,王静懿.建立低碳城市规划实施手段:从城市热岛效应模型分解控规指标[J].城市规划学刊,2010(6):39—45. (YE Zuda, LIU Jing, WANG Jingyi. Developing implementation tools for low carbon urban planning: from models of urban heat island effect to zoning plans [J]. Urban Planning Forum, 2010(6): 39—45.)
- [8] 顾朝林,谭纵波,刘宛,等.气候变化、碳排放与低碳城市规划研究进展[J].城市规划学刊,2009(3):38—45. (GU Chaolin, TAN Zongbo, LIU Wan, et al. A study on climate change, carbon emissions and low-carbon city planning [J]. Urban Planning Forum, 2009(3): 38—45.)
- [9] 张赫,王睿,于丁一,等.基于差异化控碳思路的县级国土空间低碳规划方法探索[J].城市规划学刊,2021(5):58—65. (ZHANG He, WANG Rui, YU Dingyi, et al. Methods of low-carbon territorial spatial planning for county-level jurisdictions based on differentiated CO_2 emission control [J]. Urban Planning Forum, 2021 (5): 58—65.)
- [10] 钱云,贺凯,戴威,等.城市新区控制性详细规划的低碳策略实践:以苏南地区为例[J].国际城市规划,2013,28(2):47—52. (QIAN Yun, HE Kai, DAI Wei, et al. Low-carbon regulatory planning practice for new towns: case studies in south Jiangsu [J]. Urban Planning International, 2013, 28 (2): 47—52.)

- [11] MAGALHAES F, DURAN M. Low carbon cities: Curitiba and Brasilia[R]. 45th ISO-CARP Congress, 2009.
- [12] 熊健, 卢柯, 姜紫莹, 等. “碳达峰、碳中和”目标下国土空间规划编制研究与思考[J]. 城市规划学刊, 2021(4): 74-80. (XIONG Jian, LU Ke, JIANG Ziyang, et al. Study and thoughts on territorial spatial planning under the goal of “carbon emissions peak and carbon neutrality”[J]. Urban Planning Forum, 2021(4): 74-80.)
- [13] 陈珏, 杜思宏, 李艳霞, 等. 城市形态与城市交通能耗的关联性研究: 进展、共识、难点[J]. 城市规划学刊, 2022(4): 51-57. (CHEN Jue, DU Sihong, LI Yanxia, et al. Correlation between urban form and urban traffic energy consumption: progress, consensus, and difficulties[J]. Urban Planning Forum, 2022(4): 51-57.)
- [14] 李超骥, 曾辉, 宋彦, 等. 城市尺度温室气体清单研究: 国外案例与基于北京和上海的分析[J]. 北京规划建设, 2013(4): 91-96. (LI Chaoxiao, ZENG Hui, SONG Yan, et al. Urban scale greenhouse gas inventories: foreign cases and analysis based on Beijing and Shanghai[J]. Beijing Planning Review, 2013(4): 91-96.)
- [15] 叶祖达, 王静懿. 中国绿色生态城区规划建设[M]. 中国建筑工业出版社, 2015. (YE Zuda, WANG Jingyi. Planning and construction of green and ecological urban areas in China[M]. Construction Science and Technology, 2015.)
- [16] 匡晓明, 陈君. 基于要素管控思路的生态控制方法在控规中的应用研究: 以上海市崇明县陈家镇国际实验生态社区为例[J]. 城市规划学刊, 2015(4): 63-70. (KUANG Xiaoming, CHEN Jun. The application of ecological controlling methods to detailed regulatory planning based on planning element control and management: the case of Chongming Chenjiazhen international ecological community[J]. Urban Planning Forum, 2015(4): 63-70.)
- [17] 匡晓明, 徐进, 陈君. 基于控制性详细规划地块层面的低碳生态管控要素体系建构研究[J]. 城市规划学刊, 2018(5): 64-70. (KUANG Xiaoming, XU Jin, CHEN Jun. Research on low-carbon ecological control indicator system based on plot-level regulatory planning[J]. Urban Planning Forum, 2018(5): 64-70.)
- [18] 邱红, 金广君, 林姚宇. 碳排放评估方法在城市设计中的应用[J]. 规划师, 2011(5): 21-27. (QIU Hong, JIN Guangjun, LIN Yaoyu. Application of carbon dioxide emission audit method in urban design[J]. Planners, 2011(5): 21-27.)
- [19] 徐燊, 李保峰. 光伏建筑的整体造型和细部设计[J]. 建筑学报, 2010(1): 60-63. (XU Shen, LI Baofeng. Holistic shape and detail design for BIPV[J]. Architectural Journal, 2010(1): 60-63.)
- [20] 武亦文. 某区域建筑能源能效提升规划研究[D]. 北京建筑大学, 2018. (WU Yiwen. Study on energy efficiency improvement planning of construction energy in a region[D]. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2018.)
- [21] 任洪波, 徐佩佩, 李琦芬, 等. 基于多元负荷平衡化的区域建筑群混合优化[J]. 暖通空调, 2020(10): 114-119. (REN Hongbo, XU Peipei, LI Qifeng, et al. Mixture optimization of building complexes based on leveling of multiple loads[J]. Heating Ventilating and Air Conditioning, 2020(10): 114-119.)
- [22] 龙惟定, 白玮, 王培培, 等. 净零建筑能耗城区的能源规划方法[J]. 暖通空调, 2018(6): 46-52. (LONG Weiding, BAI Wei, WANG Peipei, et al. Methodology of energy planning for net zero building energy community[J]. Heating Ventilating and Air Conditioning, 2018(6): 46-52.)
- [23] 欧阳恩一, 陈亚斌. 分布式用能模式下的用地混合量化应对[C]//中国城市规划学会, 沈阳市人民政府. 规划60年: 成就与挑战: 2016中国城市规划年会论文集(07城市生态规划), 2016. (OUYANG Enyi, CHEN Yabin. Land use mixed quantitative response under distributed energy use mode[C]//China Urban Planning Society, Shenyang Municipal People's Government. Planning for 60 years, achievements and challenges: proceeding of the 2016 China Urban Planning Annual Conference (07 urban ecological planning), 2016.)
- [24] 龙惟定, 潘毅群, 张改景, 等. 碳中和城区的建筑综合能源规划[J]. 建筑节能(中英文), 2021(8): 25-36. (LONG Weiding, PAN Yiqun, ZHANG Gaijing, et al. The energy planning for buildings in carbon neutral district[J]. Building Energy Efficiency, 2021(8): 25-36.)

修回: 2022-10