



让我们共同打造气候中和的未来
Building a climate-neutral future together

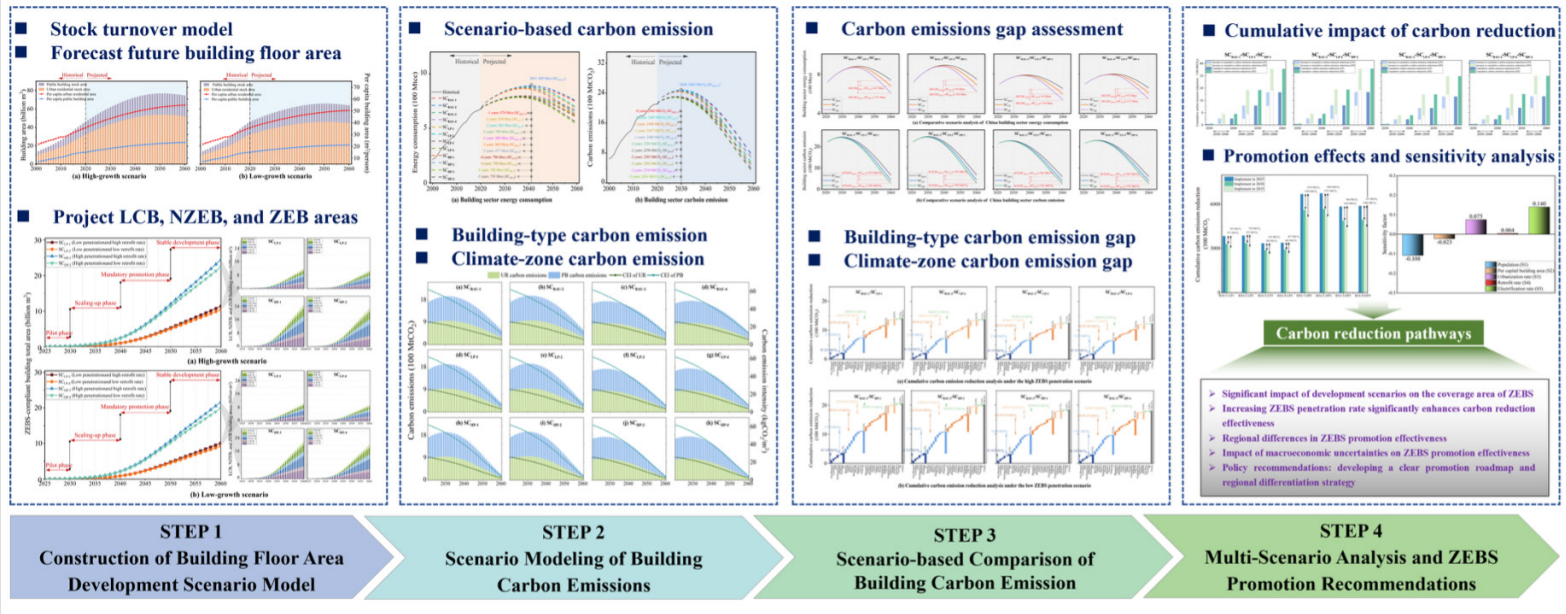
中瑞零碳建筑项目

技术报告

自上而下建模分析国家零碳建筑标准实施对排放的影响

中文版

Top-down modelling of emissions impacts of national ZEB standard implementation



2025年10月



让我们共同打造气候中和的未来
Building a climate-neutral future together

本报告系在中瑞零碳建筑项目框架下编制。该项目由瑞士发展与合作署资助，并与中华人民共和国住房和城乡建设部合作实施，旨在推动国际合作与交流

作者：

Weiguang Cai, Chongqing University, wgcai@cqu.edu.cn

Zhicheng Wu, Chongqing University, wuzhicheng@stu.cqu.edu.cn

Shicong Zhang, China Academy of Building Research, zhangshicong01@126.com

Xinyan Yang, China Academy of Building Research, yangxinyan915@126.com

本报告的内容及由此得出的结论，作者承担全部责任。

资金接收方：

Chongqing University

No.174 Shazhengjie, Shapingba, Chongqing, 400044, China

<https://www.cqu.edu.cn/>

引用格式：

Cai, W., Wu, Z., Zhang, S., Yang, X. (2025). Top-down modelling of emissions impacts of national ZEB standard implementation. Sino-Swiss Zero Emissions Building Project Research Report. Intep-Skat: Zurich

中瑞零碳建筑项目是由瑞士发展与合作署资助，并与中华人民共和国住房和城乡建设部合作开展的国际合作项目。该项目旨在通过分享瑞士在可持续及零碳建筑领域的先进经验，推动减少温室气体排放，助力中国建筑行业实现碳中和发展。

项目实施团队：

瑞士茵态 (intep) 综合规划咨询有限公司

瑞士Skat咨询公司

中国建筑科学研究院

微信公众号：

SinoSwissZEB



网站：

zeb-china.org



自上而下建模分析国家零碳建筑标准实施对排放的影响

Top-down modelling of emissions impacts of national ZEB standard implementation

摘要

在中国“双碳”战略目标下，作为主要碳排放源的建筑部门亟需一条清晰的深度脱碳路径。零排放建筑标准（ZEBS）被视为关键解决方案，但其在全国范围大规模推广的碳减排效果及其对建筑部门碳中和路径的影响尚不明确。为填补研究空白，本研究构建了一个融合建筑存量动态演进与多情景分析的自上而下模型。该模型在气候区、建筑类型和时间三个时空维度上，系统模拟了不同发展路径下的碳排放演变趋势与减排潜力。研究主要结论如下：

- 1) **提升 ZEBS 渗透率显著提升减排效果**：全国建筑领域的碳排放不同情景下呈现“先升后降”的趋势，碳排放峰值在 2027-2030 年间达到 2281-2483 MtCO₂，较能耗达峰时间提前约 8-10 年。到 2060 年，碳排放总量在高渗透率（HP）情景下降至 273-689 MtCO₂，减排幅度达到 79%-87%。至 2060 年，“高渗透率”情景相较 BAU 情景的碳减排潜力约为 63%，相比“低渗透率”情景，可额外提高约 25%。这表明推广力度与减排效果之间存在明显的正向关系。
- 2) **ZEBS 推广效果的区域差异**：在气候区层面，高能耗的北方采暖地区通过 ZEBS 推广实现的减排潜力尤为突出，严寒区（SC）和寒冷区（C）的碳排放分别下降 67.6%-90.7%和 86.5%，而温和区（W）和夏热冬暖区（HSWW）的降幅则相对较低，分别为 85.5%和 81.7%。
- 3) **不同推广速度与强度对累计减碳影响显著**：随着时间的推移，高渗透情景（HP）的减排优势日益明显。到 2060 年，LP 情景累计减排量为 21.3 亿 tCO₂，而 HP 情景累计减排量为 36.5 亿 tCO₂，差距扩大至约 1.7 倍。在推广速度方面，提前实施可带来显著效益，特别是在高推广情景下，提前 10 年推进可额外累计减碳 1.406-1.598 亿 tCO₂。
- 4) **宏观不确定性因素的影响**：未来人口规模、电气化率等不确定性因素，将显著影响 ZEBS 的最终推广效果和减排量。因此，在政策制定和推广规划中，需要充分考虑这些不确定因素。

基于研究结论，未来政策应聚焦于制定清晰的国家级推广路线图，并实施因地制宜的区域性差异化策略，为实现建筑部门的系统性减排与高质量发展提供科学依据和决策支持。研究成果不仅全面分析了 ZEBS 的推广效果，还为国家和地方政府制定建筑部门碳中和路径提供了关键的量化数据支持。这些成果为决策者科学评估不同减排路径的潜力和风险，并制定精确的行动计划提供了坚实的依据。

Contents

Contents	2
1 Introduction	3
1.1. Background.....	3
1.2. Purpose of the study	3
1.3. Objectives of the study	4
2 Approach and data	5
2.1. Analysis framework and model method	5
2.1.1. Building area estimation model construction	5
2.1.2. Building carbon emission scenario modeling	6
2.1.3. Carbon emission difference assessment and target setting	7
2.2. Scenario design and parameter setting	7
2.2.1. Building area development scenario design and parameter setting	8
2.2.2. Building carbon emission scenario design and parameter setting	9
2.2.3. Data sources	10
3 Result analysis.....	10
3.1. Building area development scenario analysis.....	10
3.1.1. Building area development projections through 2060	10
3.1.2. Building area development projections compliant with ZEBS standards to 2060	12
3.2. Carbon emission scenario analysis	14
3.2.1. Analysis of energy consumption and carbon emissions in the national building sector.....	14
3.2.2. Analysis of energy consumption and carbon emissions at the climate zone level.....	16
3.2.3. Analysis of energy consumption and carbon emissions by building type	16
3.3. Carbon emission difference assessment.....	19
3.3.1. Scenario-based comparison of national building energy consumption and carbon emission	19
3.3.2. Scenario-based comparison of urban residential and public building energy consumption and carbon emission	20
4 Discussion.....	23
4.1. Analysis of the impact of cumulative carbon reduction under different scenarios	23
4.2. Impact of different timing of ZEBS promotion on cumulative carbon emissions reductions	24
4.3. Multi-scenario sensitivity analysis	25
5 Conclusions and policy implications	26
5.1. Main conclusions	26
5.2. Policy implications	27
6 References	27

1 Introduction

1.1. Background

气候变化已成为全球共同面临的严峻挑战⁰，《巴黎协定》已将低碳发展提出作为核心应对战略⁰。在此背景下，作为最大的能源消耗终端，建筑部门的环境影响尤为突出，其影响贯穿于能源消耗、温室气体排放、材料开采与废弃物产生的全过程⁰。数据显示，全球建筑领域的碳排放量占总排放量的近40%，占终端能源消耗的36%。若当前的能源使用与排放强度不变，至2050年，建筑行业的碳排放份额预计将增至50%⁰。对于中国这样处于快速城市化进程中的国家，该问题尤为突出⁰。最新数据显示，2022年中国建筑行业的碳排放总量高达51.3亿吨CO₂，占全国能源相关碳排放的48.3%。其中，建筑运行阶段的碳排放较2021年增加0.6亿吨，增幅为2.7%，近五年年均增速达3.0%⁰。中国已确立“双碳”战略目标，并承诺到2035年实现温室气体净排放峰值基础上降低7%至10%⁰。这一系列雄心勃勃的目标，正面临着来自建筑领域的巨大压力。随着新建建筑规模的持续扩张和生活水平的提高，建筑行业的能源消耗与碳排放若得不到有效遏制，将成为实现国家气候承诺的重大阻碍⁰。

政府间气候变化专门委员会（IPCC）指出，建筑能效标准是应对能源与环境挑战的最有效政策之一⁰。在这一共识下，全球范围内正陆续制定和更新更高标准的建筑规范，从被动式房屋⁰、近零能耗建筑⁰到零能耗建筑⁰。中国新颁布的《近零能耗建筑技术标准》（GB/T 51350-2019）与《建筑碳排放计算标准》（GB/T 51366-2019）也为实现“双碳”目标提供了技术依据⁰⁰。这些标准使得现代建筑的能源效率提升到新的水平，未来建筑能效标准的演进将聚焦于三大核心方向：一是通过技术创新和优化用户行为来提升能源效率；二是通过推动建筑电气化以减少对化石燃料的依赖；三是加速能源供应系统的脱碳进程并推广可再生能源的广泛应用⁰。零排放建筑（ZEB）概念的提出为实现上述目标提供了系统性的解决方案⁰。ZEB的核心优势在于，其产生的可再生能源足以补偿建筑在材料、施工、运营及拆除回收等全生命周期内的温室气体排放，这被视为建筑部门实现脱碳的最有效途径⁰。ZEB的实施路径不仅涵盖建筑技术的创新与电气化，更要求能源供应系统全面脱碳，特别是大规模应用可再生能源⁰⁰。发展低碳或零碳建筑（ZEB）已成为全球应对气候变化的必然趋势，其被公认为是驱动全球能源系统变革的核心路径⁰。许多国家已将ZEB纳入长期发展规划⁰。欧盟在其最新修订的《建筑能源性能指令》（EPBD, EU/2024/1275）中，已将新建建筑的标准从“近零能耗”提升至更为严格的“零排放”⁰。美国则在“联邦可持续发展计划”中提出，到2045年实现联邦建筑的净零排放⁰。中国也大力提倡零碳技术和战略，《“十三五”控制温室气体排放工作方案》中提出，推动净零碳排放项目的发展，力争到2020年建设50个示范项目。未来，随着相关政策的进一步落实和技术的不断进步，ZEB将在全球范围内将得到更广泛应用。

1.2. Purpose of the study

近年来，国内外学者关于零排放建筑（ZEB）的研究已从早期主要集中于技术实现路径（如超低能耗围护结构⁰、高效用能系统⁰及可再生能源一体化⁰），扩展到了一个更为综合的框架。该框架同样重视全生命周期的环境影响⁰、经济可行性与成本优化⁰、政策法规与市场推广⁰等多个维度。正是这种研究视角的扩展，即从孤立的技术问题转向涉及政策、经济与全生命周期的复杂系统问题，

使得传统的、聚焦于“单体建筑”的分析方法显现出其内在的局限。零排放建筑标准（ZEBS）的长期效果并非孤立技术的简单叠加，而是由整个建筑存量在新陈代谢（即新建、改造与拆除）过程中的动态演化所决定的⁰。因此，构建能够模拟建筑存量长期动态演进的能源模型，被认为是评估未来能源政策有效性的关键方法论前提⁰。然而，尽管学术界已认识到这一方法论的重要性，但实际研究中，分析尺度大多仍局限于单体建筑或小规模案例，采用的是相对静态的评估方法。这种微观视角虽然能够精细地评估具体技术和项目，却无法揭示 ZEBS 在全国或区域范围内、在长周期内大规模推广所带来的宏观、动态和系统性的影响。因此，如何运用完善的建筑存量能源模型，系统地量化未来 ZEBS 政策在多种发展情景下的总体减排潜力与综合效应，仍是一个有待深入探索的重要研究领域。

为填补上述研究空白，本研究旨在从宏观层面系统评估 ZEBS 在多种发展情景下对建筑存量运行碳排放的长期影响。核心方法是构建一个综合性的建筑存量动态演进与碳排放情景分析模型。该模型将耦合建筑面积发展模型构建、碳排放情景建模和减排潜力与差异评估三个模块，从而实现以下目标：

- **模拟未来建筑存量（包括新建与既有）在不同零碳发展路径下的动态演变**，并精细化考虑建筑类型、区域气候和时间序列的差异。
- **量化评估 ZEBS 在不同政策力度与实施节奏的情景下，对建筑存量整体碳排放的减缓潜力**，并识别关键影响因素。
- **揭示 ZEBS 实施的阶段性减排效益**，通过对比不同情景下的碳排放轨迹，为制定兼具雄心与可行性的中长期政策路线图提供科学、量化的决策依据。

1.3. Objectives of the study

中国已开始逐步完善零碳标准并推动示范项目的实施，但其大规模推广及对建筑碳排放减排效果的量化评估仍需进一步研究。本研究的核心目标是采用自上而下的方法，构建一个建筑存量动态演进模型，以系统性地评估中国零排放建筑标准（ZEBS）的宏观减排潜力，并为制定科学的实施路径提供决策依据。为实现这一总体目标，本研究设定了以下三个层层递进的具体目标：

- **构建建筑存量动态演进模型：** 建立一个能够精细化反映新建、改造与拆除动态的建筑存量模型，以预测在不同社会经济发展情景下，未来中国建筑面积的规模与结构。
- **模拟多情景碳排放演化趋势：** 在上述存量模型的基础上，耦合不同的 ZEBS 实施路径与既有建筑改造策略，以模拟并对比未来建筑部门在多重情景下的碳排放演进轨迹。
- **量化评估减排潜力与效益：** 通过对不同情景下碳排放轨迹的深度对比分析，精准量化 ZEBS 的总体减排潜力、阶段性效益及其关键驱动因素。

2 Approach and data

为系统评估中国零排放建筑标准（ZEBS）的碳减排潜力，本研究构建了一个融合自上而下逻辑的建筑存量动态演进模型。该模型的核心特征在于其多维度的精细化设置：在空间维度上，模型以覆盖 30 个省级行政区的数据为基础，将分析尺度聚合至中国五大气候区，以精准捕捉区域间建筑发展与能效特征的差异；在建筑类型上，模型区分了城市居住建筑和公共建筑，并运用动态的存量周转模型模拟其新建、改造与拆除的生命周期；在时间维度上，模型以 2000-2020 年为历史基准期进行校准，并将预测期设定为 2021-2060 年，以精准对接国家“双碳”战略的中长期目标。Fig. 1 展示了模型的研究框架，方法部分围绕三个核心任务展开：T1-建筑存量情景预测。聚焦于构建一个能够模拟新建与既有建筑改造的零碳发展情景模型，预测未来建筑存量的规模与结构演变；T2-碳排放情景模拟。基于 T1 预测的建筑存量情景，结合不同的 ZEBS 实施路径，预测建筑部门在多重发展情景下的碳排放演进；T3-减排潜力和差异评估。通过对比 T2 模拟的多情景碳排放结果，系统地量化 ZEBS 大规模推广所能实现的减排效益和贡献。

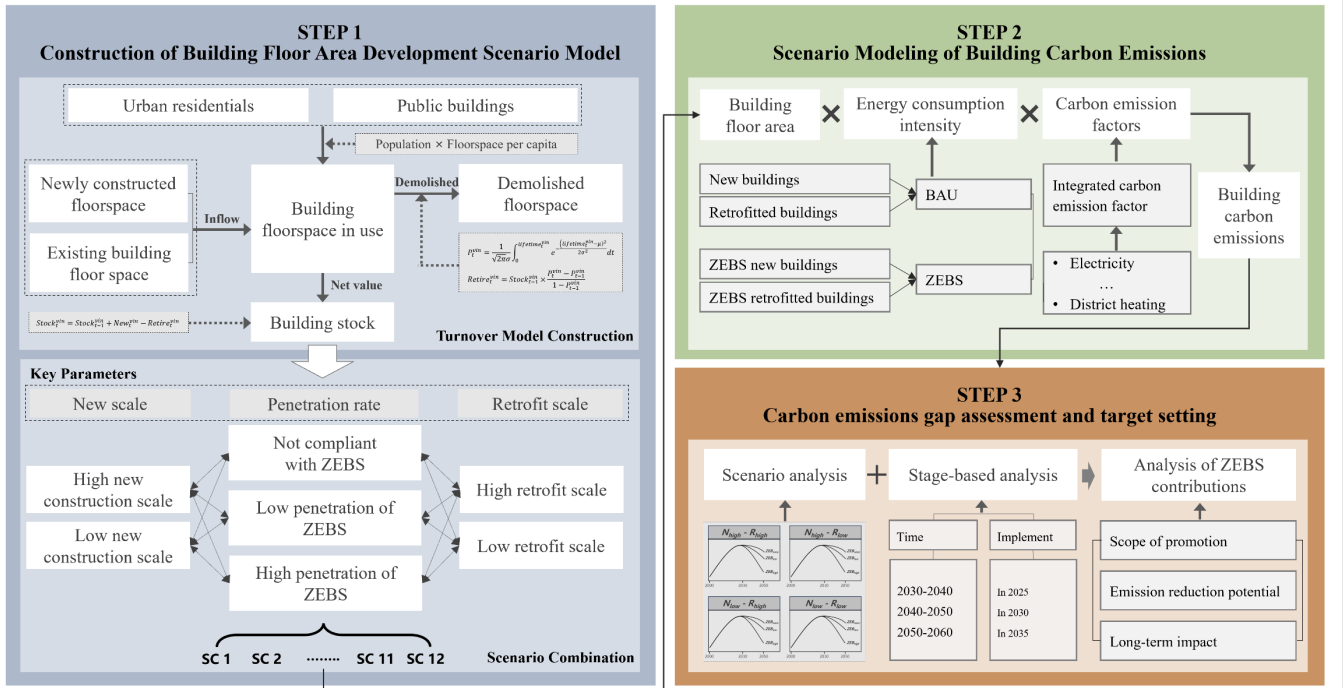


Fig. 1 Framework of the calculation model.

2.1. Analysis framework and model method

2.1.1. Building area estimation model construction

为预测 2021-2060 年间建筑面积的动态演进，本研究在团队已有建筑存量模型的基础上进行了改进与应用⁰。该模型的核心在于耦合新建、拆除与改造的动态过程，以预测不同情景下建筑存量的结构性变化，并为后续碳排放测算提供基础数据。模型的校准数据来源于《中国建筑业统计年鉴》和《中国城乡建设统计年鉴》，其存量随时间变化的动态周转过程按 Eq.(1)和 Eq.(2)定义：

$$Stock_{t,i}^{vin} = Stock_{t-1,i}^{vin} + New_{t,i}^{vin} - Retire_{t,i}^{vin} \quad (1)$$

$$Stock_{t,i}^{vin} = A_{t,i}^{vin} \times P_{t,i}^{vin} \quad (2)$$

其中, $Stock_t^{vin}$ 表示第 t 年第 i 类建筑在建成年代 vin 对应的建筑存量面积; New_t^{vin} 表示第 t 年第 i 类建筑在建成年代 vin 对应的新建建筑面积; $Retire_t^{vin}$ 表示第 t 年第 i 类建筑在建成年代 vin 对应的拆除建筑面积; $A_{t,i}^{vin}$ 表示第 t 年第 i 类建筑在建成年代 vin 的人均建筑面积, $P_{t,i}^{vin}$ 表示第 t 年第 i 类建筑在建成年代 vin 的人口规模。

在本研究中, 建筑物一旦达到其使用寿命即被视为拆除, 因此建筑的“拆除面积”实质上是指退出建筑存量系统的面积。参考 Müller 0 和 Huo et al. 0 的方法, 建筑寿命被视为一个服从正态分布的随机变量, 给定年份 t 和年代 vin 的拆除的正态分布概率 P_t^{vin} 按 Eq.(3) 和 Eq.(4) 计算:

$$P_{t,i}^{vin} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^{lifetime_{t,i}^{vin}} e^{-\frac{(lifetime_{t,i}^{vin}-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (3)$$

$$Retire_{t,i}^{vin} = Stock_{t-1,i}^{vin} \times \frac{P_{t,i}^{vin} - P_{t-1,i}^{vin}}{1 - P_{t-1,i}^{vin}} \quad (4)$$

其中, μ 表示建筑的平均寿命; σ 为标准差, 设定为 $\mu/3$; $P_{t,i}^{vin}$ 与 $P_{t-1,i}^{vin}$ 分别为年份 t 和 $t-1$ 第 i 类建筑的累积拆除概率, 表示建筑生命周期中自然退役的进程; $Retire_{t,i}^{vin}$ 表示年份 t 第 i 类建筑被拆除的建筑面积。鉴于不同类型建筑在设计寿命与实际使用年限上存在差异, 本研究假设非节能建筑、节能建筑 (指在设计阶段已满足建筑节能规范要求的建筑)、高性能建筑 (如超低能耗、低碳和零碳建筑等) 的平均寿命分别为 30 年、40 年、和 50 年。

2.1.2. Building carbon emission scenario modeling

为量化各情景下的建筑碳减排潜力, 本研究构建了一个自下而上的运营碳排放核算模型, 其基本框架为“建筑面积 $\times$ 能耗强度 $\times$ 综合碳排放因子”。该模型通过逐年追踪 2021-2060 年间城镇居住与公共建筑的新建、改造与存量演化, 并结合不同情景下的 ZEBS 渗透率水平, 动态计算其运营阶段的碳排放总量。建筑运营阶段的总碳排放量按 Eq.(5) 计算:

$$CE_{i,t} = [FA_{i,t}^{ren} \times EUI_{i,t}^{ren} + FA_{i,t}^{unren} \times EUI_{i,t}^{unren} + FA_{i,t}^{new} \times EUI_{i,t}^{new} + FA_{i,t}^{zebs} \times EUI_{i,t}^{zebs}] \times \delta_{i,t} \quad (5)$$

其中, $FA_{i,t}^{ren}$ 、 $FA_{i,t}^{unren}$ 、 $FA_{i,t}^{new}$ 、 $FA_{i,t}^{zebs}$ 分别表示第 i 类建筑 (城镇居住或公共建筑) 在 t 年的已改造、未改造、新建和符合 ZEBS 的建筑面积; EUI 为相应的单位建筑能耗强度。

本研究对建筑能耗强度的推算, 综合考虑了建筑能效标准、年代效应及区域气候差异。推算过程首先以不节能建筑为基准, 依据各时期节能设计标准 (30%、50%、65% 等) 的相对节能率, 来标定不同能效等级建筑的单位面积能耗。在此基础上, 通过耦合建筑存量的“年代谱”与“能效谱”, 模型得以动态模拟整体建筑平均能耗强度从历史到未来的演变趋势。为确保推算的准确性, 模型结果进一步利用中国建筑节能协会 (CABEE) 的官方数据进行了基准校准, 并结合最新研究对区域气候差异进行了修正。对于符合零排放标准 (ZEBS) 的新增建筑, 其能耗强度则直接依据标准规定的最低等效能耗限值进行设定。

考虑到建筑运行阶段能源消费结构的多样性, 碳排放因子采用综合加权算法进行确定。综合碳排放因子 $\delta_{i,t}$ 由煤炭、石油、天然气和电力四类能源的占比及其各自碳排放系数共同决定, 计算按 Eq.(6) 和 Eq.(7):

$$\delta_{i,t} = Pro_{c,i,t} \times \delta_1 + Pro_{o,i,t} \times \delta_2 + Pro_{n,i,t} \times \delta_3 + Pro_{e,i,t} \times \delta_4 \quad (6)$$

$$\delta_4 = (1 - Pro_{ce,t}) \times \frac{\delta_1}{PGE_t} \quad (7)$$

其中, $\delta_{i,t}$ 表示第 i 类建筑在年份 t 的综合碳排放因子; $Pro_{c,i,t}$ 、 $Pro_{o,i,t}$ 、 $Pro_{n,i,t}$ 、 $Pro_{e,i,t}$ 分别为煤炭、石油、天然气和电力在该建筑终端能源消费中的占比; δ_1 、 δ_2 、 δ_3 分别表示煤炭、石油、天然气的碳排放系数; δ_4 为电力碳排放系数, 需结合清洁能源发电占比与发电效率进行修正; $Pro_{ce,t}$ 为清洁能源 (包括水电、风电、光伏、核能等) 发电占比; PGE_t 为发电效率 (表示单位一次能源转换为电能的效率)。

2.1.3. Carbon emission difference assessment

为系统评估不同建筑类型与 ZEBS 推广情景下的碳排放差异, 本研究首先设定了一个基准情景 (BAU) 作为参照基线, 该情景模拟了在无额外 ZEBS 政策干预、仅依靠常规能效提升下的建筑碳排放路径。在此基础上, 进一步构建了代表渐进式推广的“低渗透率 (LP)”情景和代表跨越式推广的“高渗透率 (HP)”情景。模型在模拟不同情景的碳排放趋势时, 综合考虑了建筑类型、能效水平、新建与改造状态及能源结构变化等关键变量。各情景的累计碳排放量及其差异计算按 Eq.(8) 和 Eq.(9):

$$CE_{s,t} = \sum_i \sum_{k \in \{ren, unren, new, zeb\}} FA_{s,i,t}^{(k)} \times EUI_{s,i,t}^{(k)} \times \delta_{s,i,t} \quad (8)$$

$$Cum\Delta CE_s(t_0, T) = \sum_{t=t_0}^T \Delta CE_{s,t} = \sum_{t=t_0}^T (CE_{BAU,t} - CE_{s,t}) \quad (9)$$

其中, $FA_{s,i,t}^{(k)}$ 为情景 s 下, 第 i 类在年 t 的第 k 类 (已改造/未改造/新建/ZEBS) 面积; $Cum\Delta CE_s(t_0, T)$ 表示从基准年份 t_0 到目标年份 T 下, 情景 s 的累计减排量; $\Delta CE_{s,t}$ 表示情景 s 在年份 t 的年度减排量; $CE_{BAU,t}$ 表示 BAU 情景下, 年份 t 的碳排放量。 $CE_{s,t}$ 表示 LP/HP 情景下, 年份 t 的实际碳排放量。

2.2. Scenario design and parameter setting

在完成历史数据校准与存量动态建模的基础上, 本研究对 2021-2060 年的未来情景模拟主要围绕两大层面和五大关键政策变量展开: 在建筑面积演化层面, 重点关注新建规模、既有建筑改造强度及 ZEBS 渗透率的影响。在碳排放强度层面, 则重点关注单位面积能耗强度与能源系统碳排放因子的演变。最终的情景差异评估将综合建筑类型和气候区的异质性, 系统分析不同 ZEBS 推广路径对建筑碳排放峰值时点、峰值规模、累计减排潜力及其对实现碳中和目标的贡献的影响。Fig. 3 给出了部分参数在不同情景下的设定值。

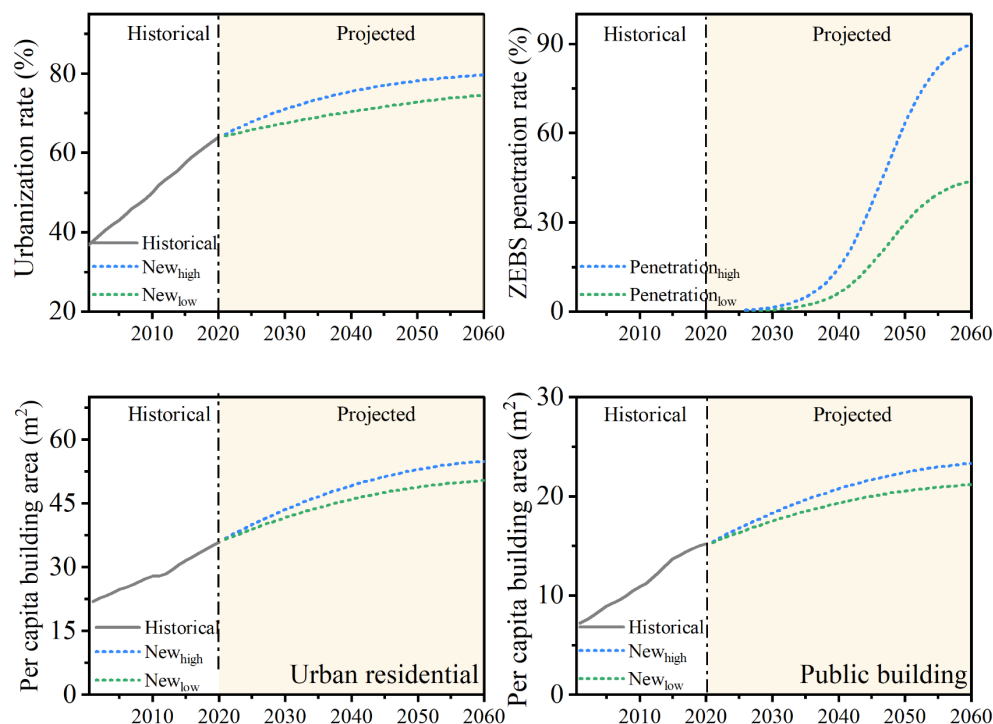


Fig. 2 Key parameter settings.

2.2.1. Building area development scenario design and parameter setting

(1) 新建规模

为捕捉未来建筑需求的不确定性，本研究构建了“高新建规模”与“低新建规模”两种情景。Table 1 显示了高、低增长情景下城镇化率和人均建筑面积水平设置，这些情景的参数设定综合参考了官方统计数据与权威学术预测。在城市化率方面，考虑到 Yu 等人预测 2065 年将达到 77%⁰，而 Tan 等人预测 2050 年即达 80%⁰，本研究设定至 2060 年，“高/低”情景的城市化率分别为 80% 和 75%。在人均公共建筑面积方面，基于住建部预测 2050 年将达到 22.3 平方米的基准情景，本研究假设“高/低”情景下该数值分别为 23 平方米和 21 平方米。在人均城镇居住建筑面积方面，本研究的设定综合了三大依据：一是国家统计局记录的历史增长趋势⁰；二是住建部发布的、已超 40 平方米的现状数据；三是清华大学建筑节能研究中心指出的发达国家 40-70 平方米的更高水平⁰。基于此，本研究假设至 2060 年，“高/低”情景下的人均城镇居住建筑面积将分别达到 55 平方米和 50 平方米。

Table 1 Urbanization rate and per capita building area settings under high and low growth scenarios.

	Population (billion people)	High-growth scenario			Low-growth scenario		
		Urbanization rate (%)	Per capita building area (m ² /person)		Urbanization rate (%)	Per capita building area (m ² /person)	
			UR	PB		UR	PB
2020	1.41	64%	36	15	64%	36	15
2030	1.40	71%	44	18	68%	42	18
2040	1.37	76%	49	21	70%	46	19
2050	1.30	78%	53	22	73%	49	21
2060	1.19	80%	55	23	75%	50	21

(2) 改造规模

针对既有建筑改造，本研究同样构建了反映不同政策力度的“高改造规模”与“低改造规模”两种情景。参数的设定充分考虑了中国当前改造率普遍偏低的现实。根据《建筑节能与绿色建筑发展“十三五”规划》，十三五期间的年均改造面积仅占建筑总量的 0.2%⁰。同时，多项研究亦证实，

中国当前不足 0.5%的改造率远低于发达国家 1.0%-1.5%的水平 0。基于上述背景，本研究设定“高/低”改造规模情景的年改造率分别为 0.4%和 0.2%。在模型中，改造将优先针对非节能建筑展开，并确保其达到现行能效标准，直至低能效建筑存量被逐步更新。

(3) ZEBS 渗透率

针对零排放建筑标准（ZEBS）的推广，本研究设计了三种差异化的发展情景：“不执行 ZEBS”、“低渗透率”与“高渗透率”。“不执行 ZEBS”情景作为基准（BAU），假设至 2060 年不设立强制性零碳目标，建筑能效仅维持现有标准。“高渗透率”情景则模拟了在强有力的政策推动与技术成熟条件下的跨越式发展，其雄心水平参考了《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》中对超低/近零能耗建筑的推广目标。“低渗透率”情景则更为保守，模拟了受成本与技术限制下的渐进式推广。考虑到任何新技术的推广都普遍遵循“初期缓慢-中期加速-后期饱和”的规律，本研究认为简单的线性增长无法准确刻画 ZEBS 的渗透过程。因此，本研究采用 S 型（Logistic）曲线来模拟 ZEBS 渗透率随时间的变化，以更真实地反映其在技术成熟和政策推动下的加速增长及长期饱和的趋势。其数学表达 Eq.(10)如下：

$$P_t = \frac{P_{max}}{1 + e^{-k(t-t_0)}}$$

(10)

其中， P_t 为第 t 年渗透率； P_{max} 为最高渗透率； k 为增长速率参数，可根据期望的中期增长速度设定； t_0 为曲线中点年份，即渗透率约为最大值的一半年份。为体现不同地区的技术发展能力、政策激励强度和市场接受度差异，研究在渗透率公式中对三个关键参数进行区域差异化设置：最大渗透率 P_{max} 表示各地区的推广上限；增长速率 k 反映技术和政策推动力度；曲线中点年份 t_0 表示各地区渗透率加速的起始年份。通过调整这些参数，可以得到不同地区 ZEBS 渗透率的增长曲线。Table 2 显示了不同地区 and 不同 ZEBS 渗透率水平设置。

Table 2 Settings for different regions and ZEBS penetration levels.

	ZEBS penetration rate (%)					
	Low			High		
	Developed	Moderately developed	Less developed	Developed	Moderately developed	Less developed
2020	-	-	-	-	-	-
2030	0.9%	0.5%	0.3%	2.3%	1.3%	0.8%
2040	9.1%	5.7%	3.8%	21.8%	13.8%	8.6%
2050	36.6%	29.9%	22.5%	76.2%	63.2%	50.6%
2060	48.5%	45.7%	37.6%	95.7%	89.5%	84.6%

Developed regions: Beijing, Shanghai, Tianjin, Chongqing, Jiangsu, Zhejiang, Fujian, Guangdong, Sichuan.

Moderately developed regions: Hubei, Hunan, Henan, Anhui, Jiangxi, Shaanxi, Liaoning, Hainan, Shanxi, Hebei, Shandong, Heilongjiang, Jilin.

Less developed regions: Yunnan, Guizhou, Guangxi, Gansu, Qinghai, Ningxia, Xinjiang, Nei Mongol

2.2.2. Building carbon emission scenario design and parameter setting

(1) 能效提升情景（BAU）

在基准情景（BAU）中，建筑部门的碳排放被设定为延续当前发展路径的趋势。在该情景下，建筑单位面积能耗（EUI）的下降主要由现行节能标准的周期性更新所驱动，本研究假设建筑设计标准每 15 年进行一次迭代升级，并结合中国建筑节能协会（CABEE）的历史数据进行校准。同时，能源结构的演变反映了国家低碳转型与终端电气化战略的长期影响：随着国家“十三五”以来低碳

能源转型和终端电气化战略的推进，煤炭和石油消费将逐步清零，天然气消费呈现“先升后降”趋势，而清洁电力在终端用能中的比重则不断提高。

(2) ZEBS 推广情景

在 ZEBS 推广情景中，建筑部门的脱碳被模拟为一个分阶段的、加速的转型过程。该过程始于示范阶段，历经规模化与强制推广，最终进入稳定推进。这一动态演进将驱动高能效建筑市场的内部升级，即从低碳建筑（LCB）逐步过渡到更高标准的近零排放（NZEB）与零排放建筑（ZEB）。研究还设定了若干关键时间节点（如 2025、2030 年和 2035 年），用于评估不同阶段 ZEBS 推广的实施进展与效果。

2.2.3.Data sources

数据来源的可靠性和准确性是确保分析结果有效性的重要基础。研究中社会经济历史数据和建筑存量周转模型的支撑数据来源于《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》；2021-2060 年的人口预测数据在 Zhang et al.的研究基础上 0，即共享社会经济路径情景 SSP2（保持历史发展特征的“一切照旧”情景），进行分省人口预测模拟。全国及各省建筑能源消耗和碳排放的历史数据来自重庆大学研究团队与中国建筑节能协会联合建设的中国建筑能耗与排放数据库（CBEED）。

3 Result analysis

3.1. Building area development scenario analysis

3.1.1.Building area development projections through 2060

(1) 全国层面

本节呈现了在不同新建规模情景下，中国建筑面积至 2060 年的演化预测（Fig. 3 及 Table 3）。结果表明，尽管两种情景下建筑总面积均持续增长，但其增长的规模与速度存在显著差异。在“高新建规模”情景下，城镇居住与公共建筑面积预计将在 2060 年分别达到 522 亿和 222 亿平方米，较 2020 年分别净增 200 亿和 85 亿平方米，年均增长率均为 1.2%。相比之下，“低新建规模”情景的扩张则更为平缓，届时城镇居住与公共建筑面积将分别达到 449 亿和 189 亿平方米，年均增长率降至 0.8%。这一趋势也体现在人均建筑面积上。至 2060 年，“高新建规模”情景下的人均居住与公共建筑面积将较 2020 年分别增加 19.0 和 8.1 平方米；而在“低新建规模”情景下，增幅则分别为 14.5 和 6.0 平方米。受政策影响，“十三五”期间（2016-2020 年）在国家大力推动城镇化进程和绿色建筑发展政策的支持下，新建建筑规模急剧增长。然而，进入“十五五”期间（2025-2030 年），随着政策目标逐步实现和市场的逐渐饱和，建筑新建的增长速度开始放缓，建筑存量的增长也趋于稳定。

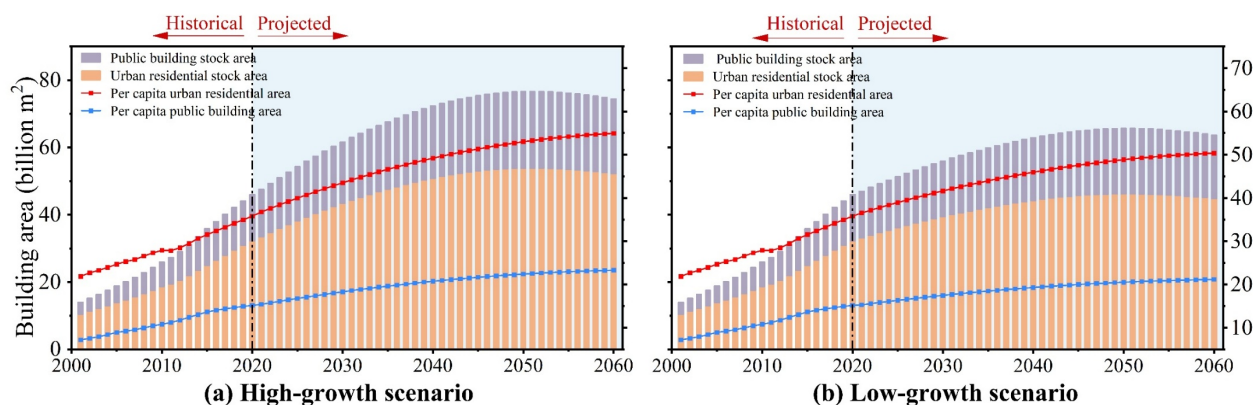


Fig. 3 Forecast of building area changes under high and low new construction scale scenarios.

Table 3 Statistical analysis of urban residential and public building areas under high and low growth scenarios.

	High-growth scenario			Low-growth scenario		
	UR	PB	Total	UR	PB	Total
2020	32.29	13.71	68.52	32.29	13.71	68.52
2030	43.39	18.26	81.96	39.44	16.57	77.20
2040	50.86	21.46	90.46	44.27	18.62	82.39
2050	53.85	22.78	92.77	46.22	19.43	83.13
2060	52.24	22.17	88.53	44.86	18.86	78.92

(2) 省级层面

Fig. 5 展示了不同新建规模情景下，各省份建筑面积至 2060 年的预测结果，显示出明显的区域差异。在所有情景中，广东省的建筑面积均为全国最高，在“高新建规模”情景下预计达到 4.7 亿平方米，约占全国总量的 9.0%。青海省的建筑面积则为全国最低，约占总量的 0.4%。从总体格局来看，东部沿海省份的建筑存量规模较大且增长较快，而西部及人口稀少地区的增长则相对缓慢。

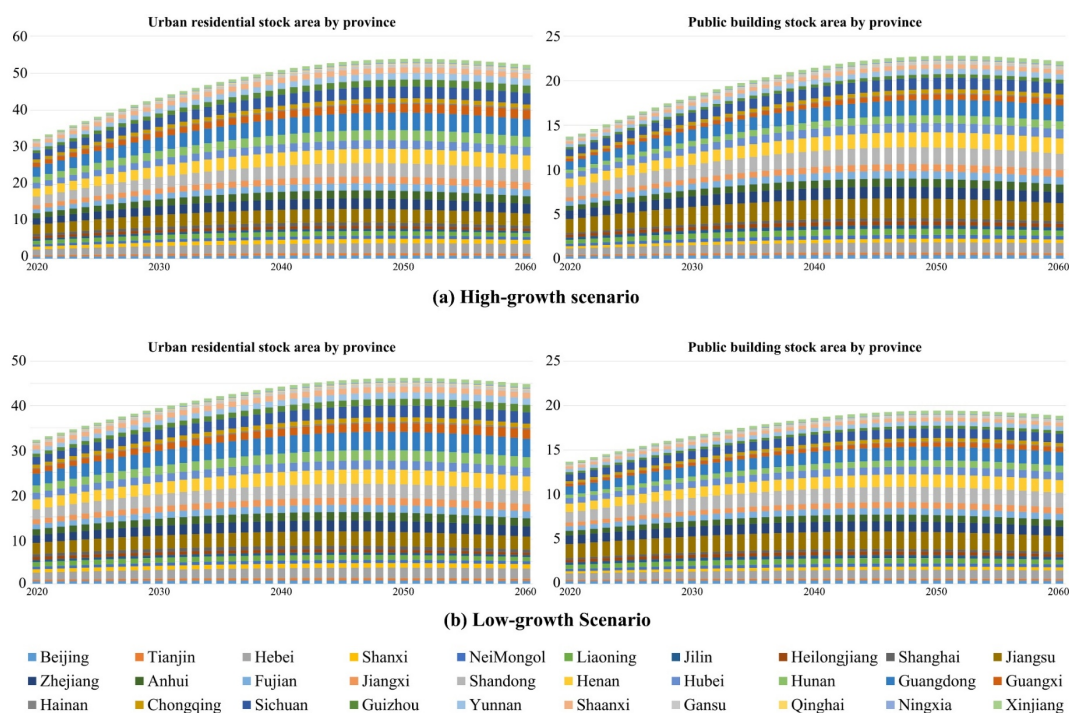


Fig. 4 Predicted building area for each province under high and low new construction scale scenarios.

3.1.2. Building area development projections compliant with ZEBS to 2060

为方便后续的情景分析，本研究对 12 个组合情景的符号定义如下： SC_{BAU-1} 表示 BAU 情景下，高新建规模与高改造率组合的情形； SC_{BAU-2} 表示高新建规模与低改造率组合； SC_{BAU-3} 表示低新建规模与高改造率组合； SC_{BAU-4} 表示低新建规模与低改造率组合。类似地，低 ZEBS 渗透率情景（LP-1~LP-4）和高 ZEBS 渗透率情景（HP-1~HP-4）也分别对应不同的新建规模与改造率组合。

(1) 全国层面

Fig. 5 与 Table 4 揭示了符合 ZEBS 标准建筑面积的未来演进路径。在时间维度上，所有推广情景均呈现出典型的 S 型增长特征，即经历初期缓慢的示范阶段，随后进入加速的规模化与强制推广阶段，最终在 25 年后达到高位稳定。在情景差异上，推广力度直接决定了最终的覆盖规模。至 2060 年，在 SC_{LP} 下， SC_{LP-1} 、 SC_{LP-2} 、 SC_{LP-3} 和 SC_{LP-4} 中符合 ZEBS 的建筑面积分别为 114、104、101 和 92 亿平方米。而在 SC_{HP} 下， SC_{HP-1} 、 SC_{HP-2} 、 SC_{HP-3} 和 SC_{HP-4} 中符合 ZEBS 的建筑面积则分别大幅提升至 244、224、216 和 199 亿平方米。这些差异清晰地表明，新建规模和改造强度对零碳建筑的推广效果具有决定性影响，其中“高新建+高改造”组合（ SC_{LP-1}/SC_{HP-1} ）能够实现最大的 ZEBS 覆盖面积，而“低新建+低改造”组合（ SC_{LP-4}/SC_{HP-4} ）的覆盖面积最少。此外，分析结果还表明 LCB 面积在初期稳步增长而后增速趋缓，而 NZEB 和 ZEB 面积则在强制推广和稳定发展阶段迅速增加。

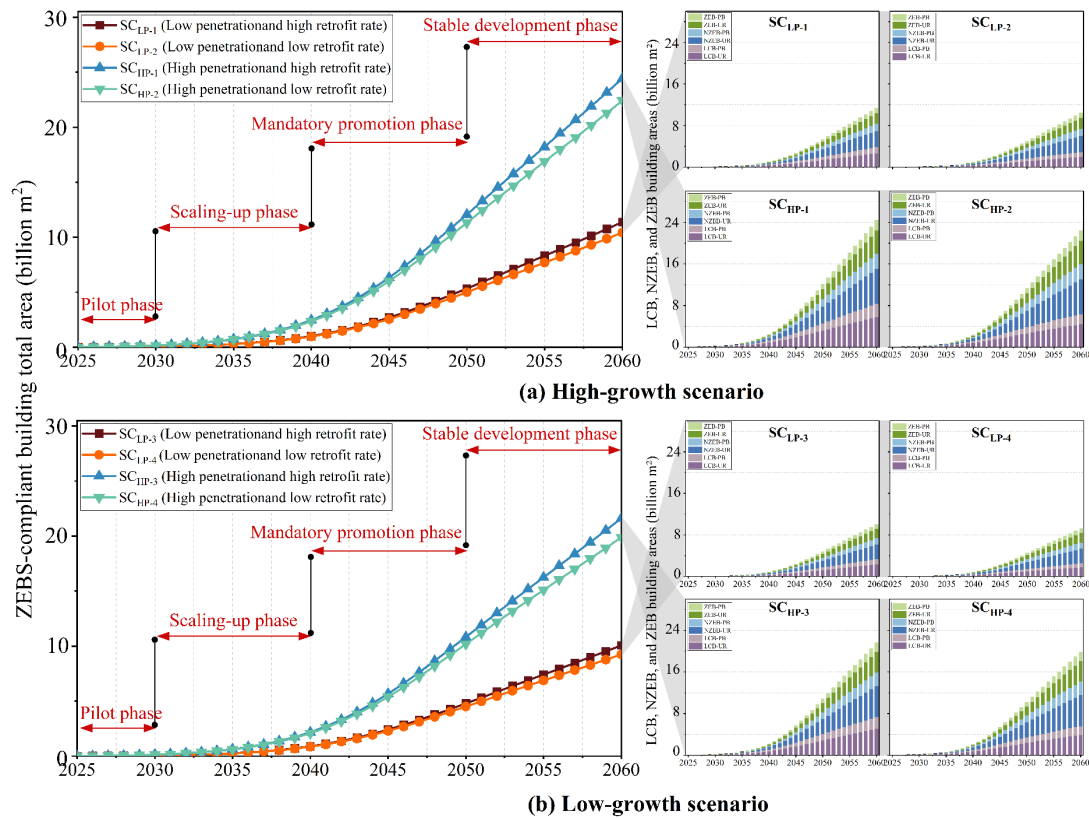


Fig. 5 Projections of the changes in the areas of LCB, NZEB, and ZEB nationwide in different years.

Table 4 Statistics of the areas of LCB, NZEB, and ZEB nationwide in different years.

Low ZEBS Penetration Rate																
LP-1				LP-2				LP-3				LP-4				
LCB	NZEB	ZEB	Total	LCB	NZEB	ZEB	Total	LCB	NZEB	ZEB	Total	LCB	NZEB	ZEB	Total	

2030	50	10	5	66	48	10	5	63	42	8	4	55	40	8	4	53
2040	528	315	170	1013	484	315	170	969	464	280	151	895	426	280	151	856
2050	2024	2076	1237	5337	1692	2076	1237	5004	1794	1876	1119	4789	1507	1876	1119	4502
2060	3868	4513	2995	11376	2915	4513	2995	10424	3391	4014	2660	10065	2571	4014	2660	9245
High ZEBS Penetration Rate																
	HP-1				HP-2				HP-3				HP-4			
	LCB	NZEB	ZEB	Total	LCB	NZEB	ZEB	Total	LCB	NZEB	ZEB	Total	LCB	NZEB	ZEB	Total
2030	125	25	13	163	119	25	13	157	105	21	11	137	100	21	11	131
2040	1284	763	410	2457	1177	763	410	2350	1129	678	364	2171	1036	678	364	2078
2050	4617	4671	2777	12065	3873	4671	2777	11321	4091	4221	2511	10823	3450	4221	2511	10182
2060	8380	9666	6378	24424	6374	9666	6378	22418	7349	8600	5664	21614	5624	8600	5664	19889

Million m²

(2) 气候区层面

Fig. 6 与 Table 5 展示了五个气候区中 LCB、NZEB 和 ZEB 建筑面积的预测结果，显示出各区域间存在明显差异。夏热冬冷区的各类高效建筑面积最高。在高渗透率情景下，该区域 LCB、NZEB 和 ZEB 的面积分别为 39、43 和 29 亿平方米；在低渗透率情景下，分别为 18、21 和 14 亿平方米。高寒气候区的各类高效建筑面积最低。在高渗透率情景下，该区域 LCB、NZEB 和 ZEB 的面积分别为 4、6 和 4 亿平方米；在低渗透率情景下，分别为 3、3 和 2 亿平方米。

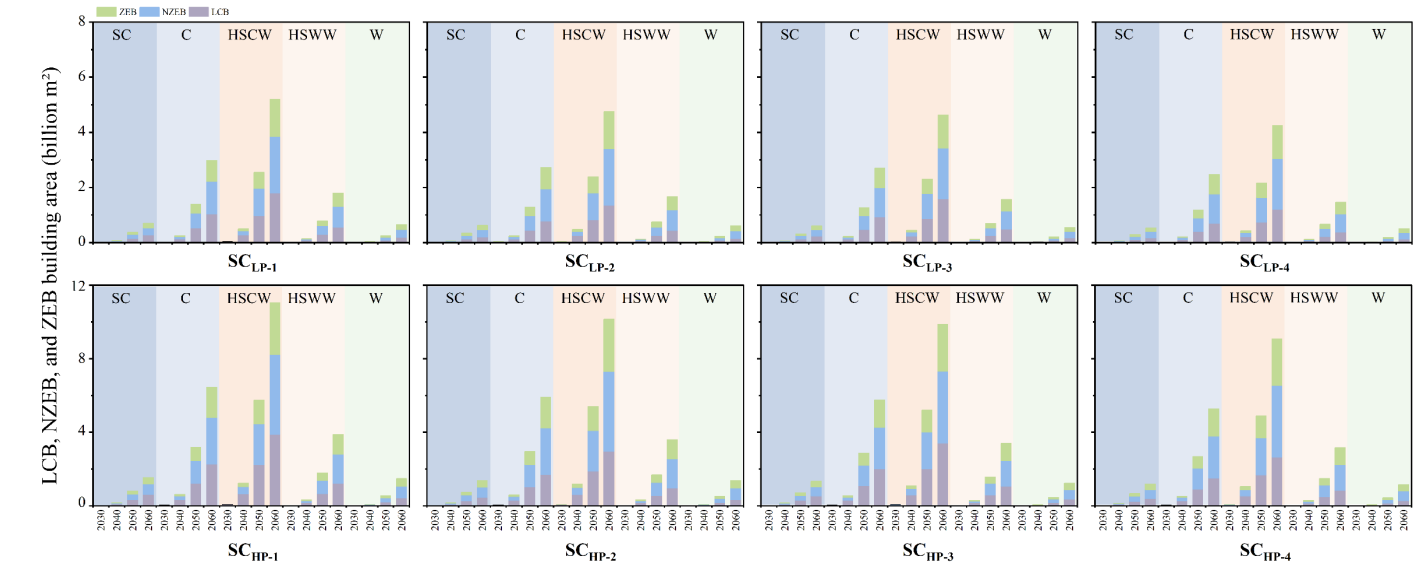


Fig. 6 Forecast of the area changes of LCB, NZEB, and ZEB across the five climate zones.

Table 5 Area statistics of LCB, NZEB, and ZEB across the five climate zones.

Low ZEBS Penetration Rate													
		LP-1			LP-2			LP-3			LP-4		
		LCB	NZEB	ZEB	LCB	NZEB	ZEB	LCB	NZEB	ZEB	LCB	NZEB	ZEB
SC	2030	3.6	0.7	0.4	3.4	0.7	0.4	3.1	0.6	0.3	2.9	0.6	0.3
	2040	38.1	22.5	12.1	34.8	22.5	12.1	33.6	20.0	10.8	30.7	20.0	10.8
	2050	150.9	138.8	82.4	122.5	138.8	82.4	125.6	119.1	70.7	103.0	119.1	70.7
	2060	275.9	257.9	168.9	198.5	257.9	168.9	239.4	222.7	145.2	172.8	222.7	145.2
C	2030	12.7	3.2	5.5	23.3	4.0	3.0	10.6	2.1	1.1	10.0	2.1	1.1
	2040	133.3	80.1	44.6	125.2	80.2	43.5	118.3	71.6	38.5	108.5	71.6	38.5
	2050	526.5	537.1	320.8	438.2	537.1	320.4	473.1	495.0	295.5	396.1	495.0	295.5
	2060	1036.3	1173.4	779.6	771.6	1173.4	779.5	922.6	1068.1	708.5	692.1	1068.1	708.5
HSCW	2030	25.8	5.2	2.6	24.5	5.2	2.6	21.7	4.3	2.2	20.5	4.3	2.2
	2040	264.8	157.1	84.4	242.4	157.1	84.4	233.7	140.2	75.4	214.1	140.2	75.4
	2050	976.1	984.7	585.9	815.6	984.7	585.9	870.8	899.1	535.3	732.1	899.1	535.3

	2060	1794.7	2046.6	1351.2	1356.8	2046.6	1351.2	1584.3	1837.7	1210.9	1205.8	1837.7	1210.9
HSWW	2030	6.9	1.4	0.7	6.6	1.4	0.7	6.0	1.2	0.6	5.7	1.2	0.6
	2040	73.1	44.2	23.8	67.3	44.2	23.8	64.2	38.9	20.9	59.1	38.9	20.9
	2050	289.3	315.3	188.5	245.4	315.3	188.5	254.1	279.0	166.8	216.1	279.0	166.8
	2060	558.5	741.8	496.5	432.7	741.8	496.5	487.3	652.1	436.2	378.7	652.1	436.2
W	2030	1.4	0.3	0.1	1.4	0.3	0.1	1.1	0.2	0.1	1.1	0.2	0.1
	2040	17.6	11.0	5.9	16.3	11.0	5.9	14.5	9.1	4.9	13.4	9.1	4.9
	2050	84.5	99.3	59.8	72.0	99.3	59.8	70.4	83.8	50.5	60.1	83.8	50.5
	2060	190.6	278.1	189.3	146.9	278.1	189.3	157.5	233.5	158.9	122.1	233.5	158.9
High ZEBS Penetration Rate													
		HP-1			HP-2			HP-3			HP-4		
		LCB	NZEB	ZEB	LCB	NZEB	ZEB	LCB	NZEB	ZEB	LCB	NZEB	ZEB
SC	2030	8.8	1.8	0.9	8.3	1.8	0.9	7.4	1.5	0.7	7.0	1.5	0.7
	2040	91.6	53.9	29.0	83.6	53.9	29.0	80.9	48.0	25.8	73.9	48.0	25.8
	2050	325.8	302.7	179.4	267.1	302.7	179.4	287.5	270.6	160.3	236.7	270.6	160.3
	2060	604.2	568.3	370.6	439.4	568.3	370.6	524.5	491.2	319.0	382.8	491.2	319.0
C	2030	31.3	6.3	3.2	29.8	6.3	3.2	26.3	5.3	2.6	24.9	5.3	2.6
	2040	327.5	195.6	105.1	300.3	195.6	105.1	288.2	174.0	93.6	264.5	174.0	93.6
	2050	1216.7	1226.6	729.9	1016.0	1226.6	729.9	1082.2	1117.9	665.6	909.5	1117.9	665.6
	2060	2260.1	2532.5	1671.0	1700.0	2532.5	1671.0	1990.7	2277.5	1500.4	1508.2	2277.5	1500.4
HSCW	2030	64.6	12.9	6.5	61.4	12.9	6.5	54.2	10.8	5.4	51.3	10.8	5.4
	2040	648.5	382.9	205.8	593.7	382.9	205.8	572.1	341.6	183.7	524.3	341.6	183.7
	2050	2228.0	2213.1	1313.0	1869.5	2213.1	1313.0	1987.0	2019.8	1199.0	1677.3	2019.8	1199.0
	2060	3870.3	4343.6	2846.8	2956.1	4343.6	2846.8	3418.8	3903.4	2553.5	2628.6	3903.4	2553.5
HSWW	2030	17.1	3.5	1.7	16.3	3.5	1.7	14.8	3.0	1.5	14.0	3.0	1.5
	2040	176.6	106.2	57.1	162.5	106.2	57.1	155.2	93.6	50.3	142.7	93.6	50.3
	2050	656.1	705.2	420.6	558.1	705.2	420.6	576.3	624.0	372.2	491.5	624.0	372.2
	2060	1216.2	1596.1	1063.7	948.3	1596.1	1063.7	1060.9	1402.5	934.0	830.0	1402.5	934.0
W	2030	3.3	0.7	0.3	3.1	0.7	0.3	2.5	0.5	0.3	2.4	0.5	0.3
	2040	39.6	24.8	13.4	36.6	24.8	13.4	32.6	20.6	11.1	30.1	20.6	11.1
	2050	190.2	223.4	134.5	161.9	223.4	134.5	158.3	188.6	113.6	135.3	188.6	113.6
	2060	428.8	625.6	425.9	330.5	625.6	425.9	354.5	525.3	357.5	274.6	525.3	357.5

Million m²

3.2. Carbon emission scenario analysis

3.2.1. Analysis of energy consumption and carbon emissions in the national building sector

本节呈现了 12 种情景下，全国建筑部门（包含农村建筑）至 2060 年的能源消耗与碳排放预测结果（Fig. 7、Fig. 8、Table 6 和 Table 7）。总体而言，所有情景下的能源消耗与碳排放均呈现“先升后降”的趋势，但其峰值水平、达峰时间及长期路径因情景设定的不同而存在显著差异。在能源消耗方面，各情景在 2025 年的能耗预测值介于 738 至 783 Mtce 之间，其差异主要反映了不同新建与改造规模的组合。能耗预计在 2040 年前后达到峰值，其中 BAU 情景的峰值最高且最晚（788-889 Mtce，2038-2041 年），而 HP 情景的峰值则最低且最早（782-877 Mtce，2036-2038 年）。与 2020 年基准年相比，尽管所有情景在 2030 年的能耗均有所增长（14%-24%），但至 2060 年，HP 与 LP 情景下的能耗则转为下降 0%-10%，而部分 BAU 情景仍有 4%-19% 的增长。

在碳排放方面，受能源结构持续优化的驱动，碳排放的达峰时间（2027-2030 年）远早于能源消耗（约 2040 年）。各情景的碳排放预计在 2027-2030 年间达到峰值（2281-2483 MtCO₂），比能耗达峰提前了约 8-10 年。达峰后，排放量迅速下降，至 2060 年降至 273-689 MtCO₂ 的范围。与 2020 年基准年相比，2030 年的排放量同样有所上升（7%-18%），但到 2060 年则实现了 79%-87% 的深度减排，

尤其在 HP 情景下，居住与公共建筑的降幅分别高达 86%和 87%。结果清晰地表明，“低新建规模”与“高改造强度”的组合，再辅以“高 ZEBS 渗透率”（如 HP-3 情景），是实现建筑部门碳排放尽早达峰和深度脱碳的最有效路径。相反，“高新建、低改造”的组合（如 BAU-2 情景）在能耗与排放控制方面的表现则最不理想。

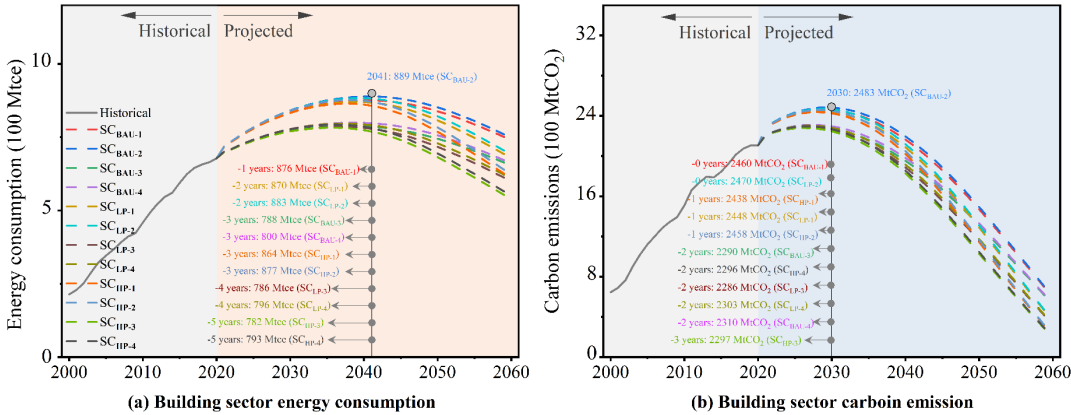


Fig. 7 Comparative analysis of the overall trends in energy consumption and carbon emissions across 12 scenarios at the national level.

Table 6 Energy consumption and carbon emissions statistics at the national level for 2025, peak carbon emission year, and 2060 under 12 scenarios.

	BAU-1	BAU-2	BAU-3	BAU-4	LP-1	LP-2	LP-3	LP-4	HP-1	HP-2	HP-3	HP-4
Building sector energy consumption												
2025	779	783	738	742	779	783	738	742	779	783	738	742
Peak value	876	889	788	799	870	883	786	796	864	877	782	793
Peak time	2040	2041	2038	2038	2039	2039	2037	2037	2038	2038	2036	2036
2060	740	748	654	661	679	689	600	609	608	622	538	550
Building sector carbon emission												
2025	2393	2405	2271	2283	2390	2402	2268	2280	2388	2401	2267	2279
Peak value	2460	2483	2293	2310	2447	2469	2285	2302	2440	2460	2281	2298
Peak time	2030	2030	2028	2028	2029	2030	2028	2028	2029	2029	2027	2028
2060	681	689	605	612	448	455	402	408	298	304	273	278

MtCO2

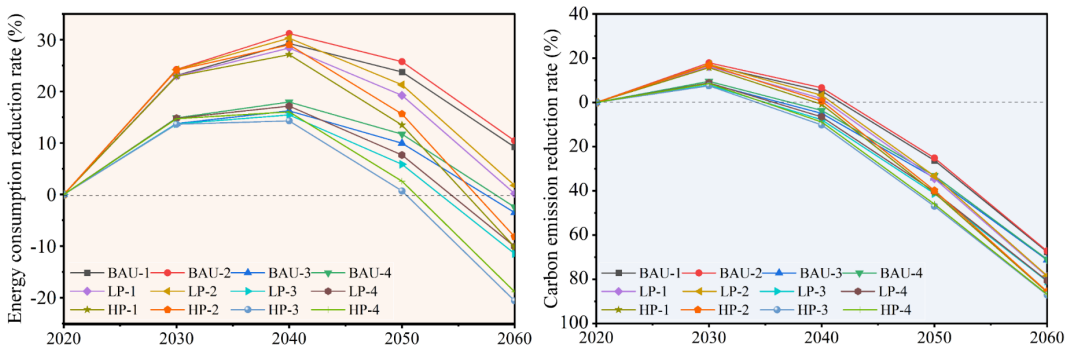


Fig. 8 Changes in energy consumption and carbon emissions in the building sector relative to 2020 under different scenarios at key years.

Table 7 Energy consumption and carbon emissions statistics at the national level for 2025, peak carbon emission year, and 2060 under 12 scenarios.

	BAU-1	BAU-2	BAU-3	BAU-4	LP-1	LP-2	LP-3	LP-4	HP-1	HP-2	HP-3	HP-4
Building sector energy consumption												
2020	677	677	677	677	677	677	677	677	677	677	677	677
2030	834	842	771	778	833	841	770	778	833	841	770	777

2060	740	748	654	661	679	689	600	609	608	622	538	550
Energy consumption reduction rate (compare to 2020)												
2020	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2030	23%	24%	14%	15%	23%	24%	14%	15%	23%	24%	14%	15%
2060	9%	10%	-4%	-2%	0%	2%	-11%	-10%	-10%	-8%	-21%	-19%
Building sector carbon emission												
2020	2106	2106	2106	2106	2106	2106	2106	2106	2106	2106	2106	2106
2030	2460	2483	2284	2305	2446	2469	2271	2292	2437	2459	2263	2284
2060	681	689	605	612	448	455	402	408	298	304	273	278
Carbon emission reduction rate (compare to 2020)												
2020	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2030	17%	18%	8%	9%	16%	17%	8%	9%	16%	17%	7%	8%
2060	-68%	-67%	-71%	-71%	-79%	-78%	-81%	-81%	-86%	-86%	-87%	-87%

3.2.2. Analysis of energy consumption and carbon emissions at the climate zone level

在气候区层面，各区域的建筑能耗和碳排放演变呈现出**明显的区域差异**（Table 8）。寒冷区（C）和夏热冬冷区（HSCW）是最大的能耗源与碳排放源，其次是严寒区（SC）。虽然所有情景均预测到2060年各区的能耗和排放量将普遍下降，但下降的幅度因ZEBS的推广力度而异。以寒冷区（C）为例，2060年能耗在BAU情景下介于216-247 Mtce之间，而在HP情景下则降至178-206 Mtce；2060年**碳排放**在BAU情景下介于274-313 MtCO₂之间，而在HP情景下则大幅降至106-118 MtCO₂。从减排潜力来看，不同气候区的降幅存在差异。严寒区（SC）展现出最大的减排潜力，其碳排放下降幅度介于67.6%（BAU-2）至90.7%（HP-3）之间。寒冷区（C）和夏热冬冷区（HSCW）的降幅也十分显著，最高可分别达到86.5%和86.8%。相比之下，夏热冬暖区（HSWW）和温和区（W）的最高降幅则略低，分别为81.7%和85.5%。这一结果表明，在高能耗的北方采暖地区，通过ZEBS推广实现的减排效果尤为突出。

Table 8 Predicted building energy consumption and carbon emissions in 2060 for different climate zones under various scenarios.

	BAU-1	BAU-2	BAU-3	BAU-4	LP-1	LP-2	LP-3	LP-4	HP-1	HP-2	HP-3	HP-4
Energy consumption (Mtce)												
SC	132	134	115	116	122	125	106	108	109	113	95	98
C	244	247	216	219	224	229	198	202	201	206	178	182
HSCW	233	236	207	209	215	220	191	194	195	198	173	176
HSWW	95	95	84	85	85	87	75	76	73	75	65	66
W	35	36	31	31	33	34	29	29	30	30	26	27
Carbon emission (MtCO₂)												
SC	144	146	125	127	73	74	64	65	47	49	42	43
C	309	313	274	278	199	202	178	181	115	118	106	108
HSCW	167	169	149	151	122	124	110	112	89	91	81	82
HSWW	45	46	42	42	40	41	38	38	35	35	33	33
W	16	16	14	14	14	14	12	12	12	12	11	11

3.2.3. Analysis of energy consumption and carbon emissions by building type

Fig. 9 与 Table 9 展示了城镇居住（UR）与公共建筑（PB）在12种情景下的能耗与能耗强度演变。结果表明，两类建筑的能源消耗均呈现“先升后降”的特征，且随着情景从BAU向LP、HP优化，其能耗峰值水平显著下降，达峰时间也明显提前。城镇居住建筑在BAU情景下，其能耗约在2040-2041年达到峰值（4.0-4.1 亿吨标准煤）。在LP情景下，峰值提前至2037-2039年，规模降至3.5-4.0 亿吨。HP情景的效果最为显著，峰值进一步提前至2036-2038年（3.5-3.9 亿吨），较BAU情

景下降约 15%。至 2060 年，HP 情景下的能耗强度（EUI）可降至 5.1-5.3 kgce/m²，相较 2020 年能效提升约 45%。公共建筑的演变也遵循类似规律，但其达峰时间普遍晚于城镇居住建筑。在 BAU 情景下，其能耗峰值出现在 2048-2049 年（约 3.4 亿吨标准煤）。在 HP 情景下，峰值时间可大幅提前至 2039-2041 年，提前约 8-10 年，峰值规模也降至 2.8-3.3 亿吨。至 2060 年，HP 情景下的 EUI 可降至 11.2-11.7 kgce/m²，相较 2020 年能效提升约 35%。总体而言，城镇居住建筑能耗在各情景下均显著低于公共建筑，但公共建筑的能耗强度始终处于较高水平。随着 ZEBS 标准的全面实施与节能改造力度的增强，不仅有效降低了建筑部门整体能耗峰值水平，还使峰值时间显著提前。

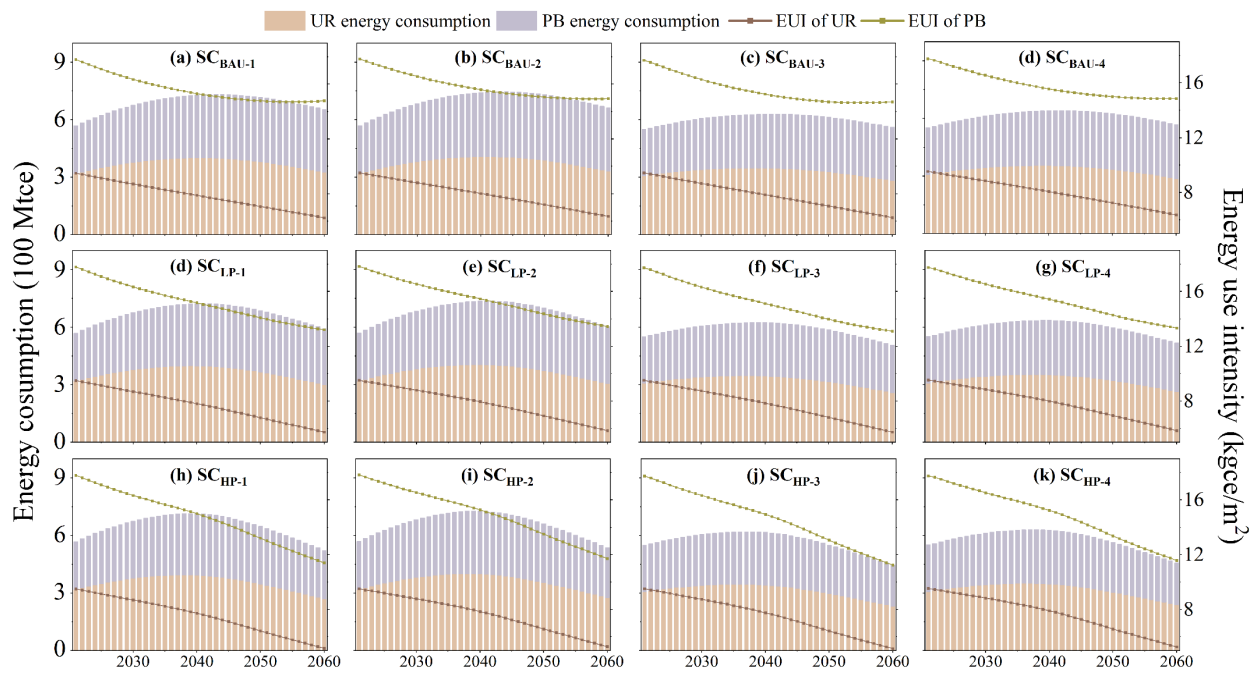


Fig. 9 Predicted energy consumption and energy intensity of urban residential and public buildings under different scenarios.

Table 9 Predicted energy consumption and peak time of urban residential and public buildings in key years under different scenarios.

	UR		PB		UR		PB		UR		PB		UR		PB	
	EC	EUI	EC	EUI	EC	EUI	EC	EUI	EC	EUI	EC	EUI	EC	EUI	EC	EUI
	BAU-1				BAU-2				BAU-3				BAU-4			
2020	3.1	9.5	2.5	18.0	3.1	9.5	2.5	18.0	3.1	9.5	2.5	18.0	3.1	9.5	2.5	18.0
2030	3.8	8.7	3.0	16.4	3.8	8.8	3.0	16.6	3.4	8.8	2.7	16.3	3.4	8.8	2.7	16.6
Peak	4.0	7.9	3.4	14.8	4.1	7.9	3.4	15.1	3.5	8.1	2.9	15.1	3.5	8.1	2.9	15.1
Peak time	2040		2049		2041		2048		2038		2048		2039		2048	
2060	3.3	6.2	3.3	14.8	3.3	6.3	3.3	14.9	2.8	6.3	2.8	14.7	2.9	6.4	2.8	14.9
	LP-1				LP-2				LP-3				LP-4			
2030	3.8	8.7	3.0	16.3	3.8	8.8	3.0	16.6	3.4	8.7	2.7	16.3	3.4	8.8	2.7	16.5
Peak	4.0	7.9	3.3	14.9	4.0	8.0	3.3	15.0	3.5	8.1	2.8	14.9	3.5	8.3	2.9	15.2
Peak time	2039		2043		2039		2044		2037		2042		2037		2042	
2060	3.0	5.7	2.9	13.2	3.1	5.8	3.0	13.4	2.6	5.7	2.5	13.1	2.6	5.8	2.5	13.3
	HP-1				HP-2				HP-3				HP-4			
2030	3.8	8.7	3.0	16.3	3.8	8.8	3.0	16.5	3.4	8.7	2.7	16.3	3.4	8.8	2.7	16.5
Peak	3.9	7.9	3.2	14.8	4.0	8.1	3.3	15.1	3.5	8.2	2.8	15.1	3.5	8.3	2.8	15.4
Peak time	2038		2041		2038		2041		2036		2039		2036		2039	
2060	2.7	5.2	2.5	11.4	2.8	5.3	2.6	11.7	2.3	5.1	2.1	11.2	2.4	5.3	2.2	11.6

Fig. 10 和 Table 10 展示了不同情景下城镇居住建筑与公共建筑碳排放总量与碳排放强度的变化趋势。整体来看，两类建筑的碳排放均呈现“先升后降”的变化规律，且碳排放峰值普遍早于能源消耗

峰值。在基准情景（BAU）下，2020 年城镇居住建筑的能耗为 8.3 亿吨标准煤，碳排放强度为 25.7 kgCO₂/m²。到 2030 年，建筑能耗和碳排放强度均有明显增长，能耗达到 9.6 亿吨标准煤，碳排放强度为 22.2 kgCO₂/m²，碳排放峰值出现在 2031–2032 年。到 2060 年，城镇居住建筑的碳排放降至 3.1 亿吨，减排幅度达到 65%，碳排放强度降至 6.0–6.1 kgCO₂/m²。在低渗透率情景（LP）下，随着清洁能源比例的提升和建筑改造力度的增加，碳排放峰值提前至 2027–2031 年，峰值为 8.6–9.7 亿吨 CO₂。到 2060 年，碳排放降至 1.7–2.0 亿吨 CO₂，减排幅度达到 78%。在高渗透率情景（HP）下，随着 ZEBS 标准的推广和能源低碳化转型，碳排放峰值提前至 2030 年，碳排放降至 1.0–1.2 亿吨 CO₂，到 2060 年，减排幅度达到 85%–90%。公共建筑方面，在基准情景（BAU）下，2020 年公共建筑的能耗为 8.5 亿吨标准煤，碳排放强度为 62.1 kgCO₂/m²。到 2030 年，能耗和碳排放强度明显增长，碳排放强度为 53.3 kgCO₂/m²，碳排放峰值出现在 2031–2032 年。到 2060 年，公共建筑的碳排放降至 2.7 亿吨，减排幅度为 70%，碳排放强度降至 13.1–13.2 kgCO₂/m²。在低渗透率情景（LP）下，公共建筑的碳排放峰值出现在 2028–2031 年间，达到 8.7–9.9 亿吨 CO₂。到 2060 年，碳排放降至 1.5–1.8 亿吨 CO₂，减排幅度达到 85%。在高渗透率情景（HP）下，随着 ZEBS 标准的推广，公共建筑的碳排放峰值提前至 2031 年，碳排放降至 0.8–1.0 亿吨 CO₂，减排幅度达到 85%–90%。总体来看，无论是城镇居住建筑还是公共建筑，碳排放的峰值时间普遍较能源消耗峰值提前约 5–10 年，这一趋势主要得益于能源结构的低碳化和可再生能源比重的提升。同时，随着 ZEBS 标准的广泛实施和既有建筑深度改造的不断推进，全国建筑领域的碳排放总量和碳排放强度持续下降，这显著加速了建筑行业从“碳达峰”向“碳中和”目标的转型进程。

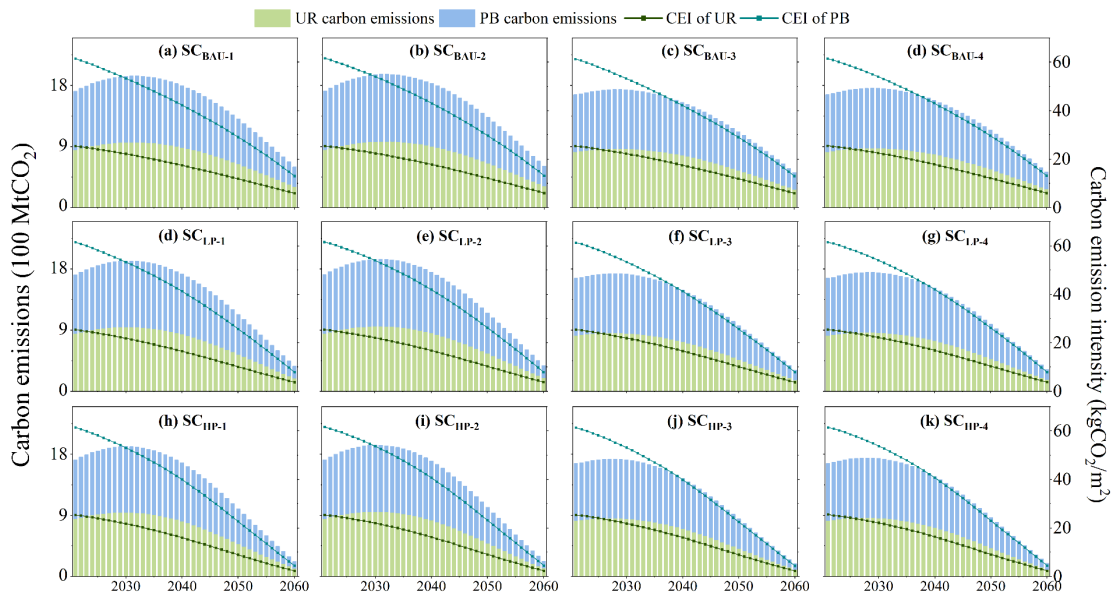


Fig. 10 Predicted carbon emissions and carbon intensity of urban residential and public buildings under different scenarios.

Table 10 Predicted carbon emissions and peak time of urban residential and public buildings in key years under different scenarios.

	UR		PB		UR		PB		UR		PB		UR		PB	
	CE	CEI	CE	CEI	CE	CEI	CE	CEI	CE	CEI	CE	CEI	CE	CEI	CE	CEI
	BAU-1				BAU-2				BAU-3				BAU-4			
2020	8.3	25.7	8.5	62.1	8.3	25.7	8.5	62.1	8.3	25.7	8.5	62.1	8.3	25.7	8.5	62.1
2030	9.6	22.2	9.7	53.3	9.7	22.4	9.9	53.9	8.7	22.3	8.7	53.4	8.8	22.6	8.8	54.0
Peak	9.6	21.8	9.7	52.3	9.8	21.6	9.9	52.0	8.7	22.7	8.7	55.0	8.8	23.0	8.8	55.0

Peak time	2031		2031		2032		2032		2029		2028		2029		2029	
2060	3.1	6.0	2.9	13.1	3.2	6.1	2.9	13.2	2.7	6.0	2.5	13.1	2.8	6.1	2.5	13.2
	LP-1				LP-2				LP-3				LP-4			
2030	9.5	21.9	9.7	53.3	9.6	22.1	9.9	53.9	8.5	22.0	8.7	53.4	8.6	22.2	8.8	54.0
Peak	9.5	21.9	9.7	52.2	9.6	21.7	9.9	52.9	8.6	23.3	8.7	55.4	8.7	23.1	8.8	55.0
Peak time	2030		2031		2031		2031		2027		2028		2028		2029	
2060	2.0	3.7	1.7	7.9	2.0	3.8	1.8	8.0	1.7	3.8	1.5	7.8	1.7	3.8	1.5	8.0
	HP-1				HP-2				HP-3				HP-4			
2030	9.4	21.8	9.7	53.0	9.5	22.0	9.8	53.7	8.5	21.9	8.7	53.1	8.6	22.1	8.8	53.8
Peak	9.4	21.8	9.7	53.0	9.5	22.0	9.8	52.6	8.6	23.3	8.7	55.3	8.7	23.0	8.8	55.8
Peak time	2030		2030		2030		2031		2027		2028		2028		2028	
2060	1.2	2.3	1.0	4.5	1.2	2.4	1.0	4.6	1.0	2.3	0.8	4.4	1.1	2.4	0.9	4.6

3.3. Carbon emission difference assessment

3.3.1. Scenario-based comparison of national building energy consumption and carbon emission

Fig. 11 和 Table 11 展示了不同情景下全国建筑部门能源消耗和碳排放差异对比分析。从全国尺度来看，不同情景下建筑部门能源消耗呈现出显著的分化趋势。随着 ZEBS 标准推广强度与改造力度的提升，能源消耗总量明显下降，节能率（ESR）逐步提高，并且节能潜力在中后期阶段尤为突出。在低推广情景（LP）下，节能效果随时间逐步增强。以 BAU-1 至 BAU-4 对比 SCLP-1 至 SCLP-4 为例，2030 年的节能量范围为 0.3 - 0.4 Mtce，ESR 为 0.1% - 0.1%；2040 年节能量范围为 5.4 - 6.1 Mtce，ESR 为 0.8% - 0.9%；2050 年节能量为 27.4 - 30.9 Mtce，ESR 为 4.2% - 4.5%；2060 年节能量为 51.7 - 61.1 Mtce，ESR 为 9.1% - 9.6%。这表明在中长期阶段，建筑改造与能效提升措施的累积效应显著增强。在高推广情景（HP）**下，节能潜力进一步释放。以 BAU-1 至 BAU-4 对比 SCHP-1 至 SCHP-4 为例，2030 年的节能量范围为 8.1 - 9.7 Mtce，ESR 为 0.1% - 0.1%；2040 年节能量为 13.1 - 14.7 Mtce，ESR 为 2.0% - 2.1%；2050 年节能量为 61.9 - 69.8 Mtce，ESR 为 9.4% - 9.9%；2060 年节能量为 111.2 - 131.2 Mtce，ESR 为 19.0% - 20.6%。与 LP 情景相比，HP 情景在 2060 年的节能总量约为 LP 情景的 2 倍，显示出 ZEBS 标准强制实施及改造加速带来的显著能效收益。

全国建筑部门碳排放方面，不同推广情景下呈现出明显差，ZEBS 标准的推广及改造力度提升对碳排放峰值的降低和达峰时间的提前起到了显著作用。在**低推广情景（LP）下，碳排放累计减少（CERP）随时间逐步增加，节减效果明显增强。以 BAU-1 至 BAU-4 对比 SCLP-1 至 SCLP-4 为例，2030 年的碳减排量范围为 13.0–14.6 MtCO₂，CERP 为 0.8%；2040 年碳减排量为 61.6–71.7 MtCO₂，CERP 为 3.9%–4.0%；2050 年碳减排量为 150.0–173.6 MtCO₂，CERP 为 13.1%–13.4%；2060 年碳减排量为 202.3–234.5 MtCO₂，CERP 为 38.4%–38.9%。可以看出，低推广情景下，中后期碳减排潜力被逐步释放，累计减排量在 2060 年达到全国碳排放的较大比例。在高推广情景（HP）**下，碳减排效果更为显著。以 BAU-1 至 BAU-4 对比 SCHP-1 至 SCHP-4 为例，2030 年的碳减排量范围为 20.9–23.7 MtCO₂，CERP 为 1.2%；2040 年碳减排量为 109.8–127.5 MtCO₂，CERP 为 7.0%–7.1%；2050 年碳减排量为 269.8 - 310.8 MtCO₂，CERP 为 23.4%–24.1%；2060 年碳减排量为 332.0–385.1 MtCO₂，CERP 为 63.3%–63.8%。与 LP 情景相比，HP 情景在 2060 年的减排量约为 LP 情景的 1.6 倍以上，显示了 ZEBS 高强度推广和改造加速对建筑部门碳减排的显著贡献。

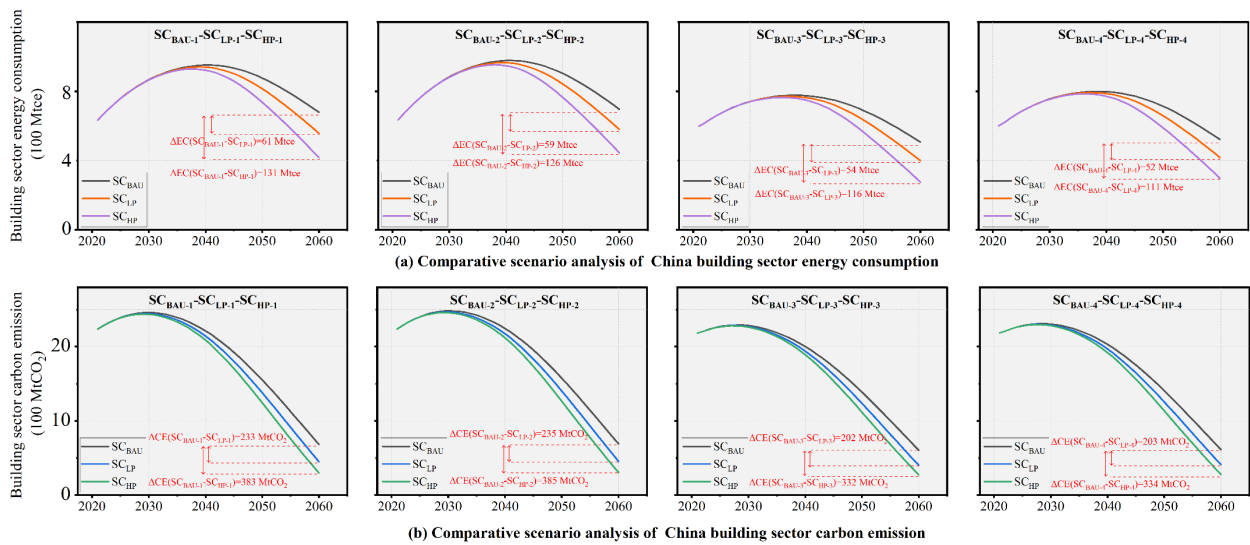


Fig. 11 Comparison and analysis of energy consumption and carbon emissions differences in the national building sector under different scenarios.

Table 11 Comparison of energy consumption and carbon emissions in the national building sector under different scenarios (with ESR and CERP).

Comparison of energy consumption differences (Mtce)					Comparison of carbon emission differences (MtCO ₂)				
	$\Delta SC_{BAU-1}-SC_{LP-1}$	ESR	$\Delta SC_{BAU-1}-SC_{HP-1}$	ESR	$\Delta SC_{BAU-1}-SC_{LP-1}$	CERP	$\Delta SC_{BAU-1}-SC_{HP-1}$	CERP	
2030	0.4	0.1%	1.0	0.1%	14.5	0.8%	23.4	1.2%	
2040	6.1	0.8%	14.7	2.0%	70.6	3.9%	125.8	7.0%	
2050	30.9	4.3%	69.8	9.7%	171.9	13.2%	308.5	23.6%	
2060	61.1	9.3%	131.2	20.1%	233.4	38.7%	382.9	63.5%	
	$\Delta SC_{BAU-2}-SC_{LP-2}$	ESR	$\Delta SC_{BAU-2}-SC_{HP-2}$	ESR	$\Delta SC_{BAU-2}-SC_{LP-2}$	CERP	$\Delta SC_{BAU-2}-SC_{HP-2}$	CERP	
2030	0.4	0.1%	1.0	0.1%	14.6	0.8%	23.7	1.2%	
2040	6.1	0.8%	14.7	2.0%	71.7	3.9%	127.5	7.0%	
2050	30.4	4.2%	68.8	9.4%	173.6	13.1%	310.8	23.4%	
2060	58.6	8.9%	126.1	19.0%	234.5	38.4%	385.1	63.0%	
	$\Delta SC_{BAU-3}-SC_{LP-3}$	ESR	$\Delta SC_{BAU-3}-SC_{HP-3}$	ESR	$\Delta SC_{BAU-3}-SC_{LP-3}$	CERP	$\Delta SC_{BAU-3}-SC_{HP-3}$	CERP	
2030	0.3	0.1%	0.8	0.1%	13.0	0.8%	20.9	1.2%	
2040	5.4	0.9%	13.1	2.1%	61.6	4.0%	109.8	7.1%	
2050	27.8	4.5%	62.8	10.2%	150.0	13.4%	269.8	24.1%	
2060	53.8	9.6%	115.7	20.6%	202.3	38.9%	331.9	63.8%	
	$\Delta SC_{BAU-4}-SC_{LP-4}$	ESR	$\Delta SC_{BAU-4}-SC_{HP-4}$	ESR	$\Delta SC_{BAU-4}-SC_{LP-4}$	CERP	$\Delta SC_{BAU-4}-SC_{HP-4}$	CERP	
2030	0.3	0.1%	0.8	0.1%	13.1	0.8%	21.2	1.2%	
2040	5.4	0.8%	13.1	2.0%	62.6	4.0%	111.3	7.0%	
2050	27.4	4.4%	61.9	9.9%	151.6	13.3%	271.9	23.8%	
2060	51.7	9.1%	111.2	19.6%	203.3	38.5%	333.9	63.3%	

3.3.2.Scenario-based comparison of urban residential and public building energy consumption and carbon emission

Fig. 12 和 Table 12 显示了不同情景下的城镇居住建筑和公共建筑的能源消耗差异对比分析。在低推广情景（LP）下，城镇居住建筑的节能量随时间逐步增加。以 SCBAU-1 至 SCBAU-4 对比 SCLP-1 至 SCLP-4 为例，2030 年节能量约为 0.2 Mtce，节能率（ESR）约为 0.1%；2040 年节能量为 2.9 -

3.2 Mtce, ESR 约为 0.8%；2050 年节能量为 13.4 - 14.9 Mtce, ESR 约为 3.8% - 4.1%；2060 年节能量为 22.8 - 26.3 Mtce, ESR 约为 7.7% - 8.3%。公共建筑的节能效果略高于居住建筑, 2060 年节能量范围为 28.9 - 34.8 Mtce, ESR 为 10.0% - 10.9%。可见, 低推广情景下中后期节能潜力逐步释放, 尤其公共建筑节能效果更为明显。在高推广情景 (HP) 下, 建筑能耗降低幅度显著增加。以 BAU-1 至 BAU-4 对比 SCHP-1 至 SCHP-4 为例, 2030 年城镇居住建筑节能量为 0.5 - 0.5 Mtce, ESR 约为 0.1% - 0.1%；2040 年节能量为 7.1 - 7.9 Mtce, ESR 约为 2.0%；2050 年节能量为 30.4 - 33.8 Mtce, ESR 约为 8.6% - 9.3%；2060 年节能量为 48.9 - 56.3 Mtce, ESR 约为 17.1% - 17.8%。公共建筑在高推广情景下表现更突出, 2060 年节能量范围为 62.3 - 74.9 Mtce, ESR 约为 22.1% - 22.9%。

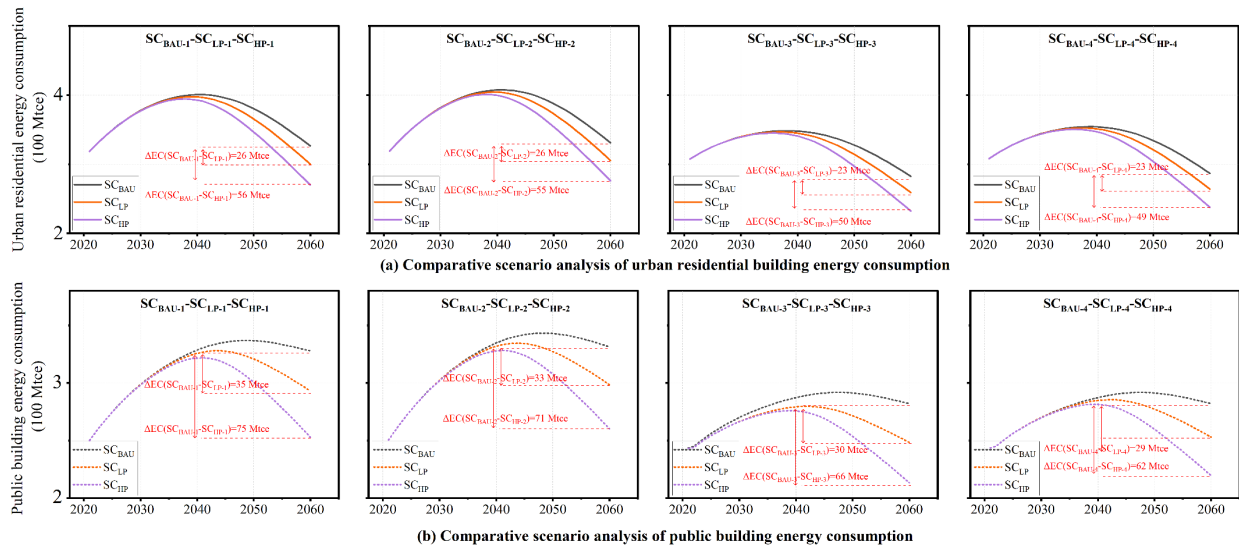


Fig. 12 Comparison and analysis of energy consumption differences between urban residential and public buildings under different scenarios.

Table 12 Comparison of energy consumption differences between urban residential and public buildings under different scenarios (with ESR and CERP).

Urban residential					Public building				
	$\Delta SC_{BAU-1}-SC_{LP-1}$	ESR	$\Delta SC_{BAU-1}-SC_{HP-1}$	ESR	$\Delta SC_{BAU-1}-SC_{LP-1}$	ESR	$\Delta SC_{BAU-1}-SC_{HP-1}$	ESR	
2030	0.2	0.1%	0.5	0.1%	0.2	0.1%	0.4	0.1%	
2040	3.2	0.8%	7.9	2.0%	2.8	0.9%	6.9	2.1%	
2050	14.9	3.9%	33.8	8.9%	16.0	4.7%	36.0	10.7%	
2060	26.3	8.0%	56.3	17.3%	34.8	10.6%	74.9	22.9%	
	$\Delta SC_{BAU-2}-SC_{LP-2}$	ESR	$\Delta SC_{BAU-2}-SC_{HP-2}$	ESR	$\Delta SC_{BAU-2}-SC_{LP-2}$	ESR	$\Delta SC_{BAU-2}-SC_{HP-2}$	ESR	
2030	0.2	0.1%	0.5	0.1%	0.2	0.1%	0.4	0.1%	
2040	3.2	0.8%	7.9	1.9%	2.8	0.8%	6.8	2.0%	
2050	14.8	3.8%	33.5	8.6%	15.6	4.6%	35.3	10.3%	
2060	25.6	7.7%	54.9	16.6%	33.1	10.0%	71.2	21.5%	
	$\Delta SC_{BAU-3}-SC_{LP-3}$	ESR	$\Delta SC_{BAU-3}-SC_{HP-3}$	ESR	$\Delta SC_{BAU-3}-SC_{LP-3}$	ESR	$\Delta SC_{BAU-3}-SC_{HP-3}$	ESR	
2030	0.2	0.1%	0.5	0.1%	0.1	0.1%	0.4	0.1%	
2040	2.9	0.8%	7.1	2.0%	2.5	0.9%	6.0	2.1%	
2050	13.5	4.1%	30.6	9.3%	14.2	5.0%	32.1	11.2%	
2060	23.4	8.3%	50.1	17.8%	30.4	10.9%	65.5	23.5%	
	$\Delta SC_{BAU-4}-SC_{LP-4}$	ESR	$\Delta SC_{BAU-4}-SC_{HP-4}$	ESR	$\Delta SC_{BAU-4}-SC_{LP-4}$	ESR	$\Delta SC_{BAU-4}-SC_{HP-4}$	ESR	
2030	0.2	0.1%	0.5	0.1%	0.1	0.1%	0.4	0.1%	
2040	2.9	0.8%	7.1	2.0%	2.5	0.9%	6.0	2.1%	
2050	13.4	4.0%	30.4	9.1%	14.0	4.8%	31.5	10.8%	
2060	22.8	8.0%	48.9	17.1%	28.9	10.3%	62.3	22.1%	

Mtce

Fig. 13 和 Table 13 展示了不同情景下城镇居住建筑和公共建筑的碳排放差异对比分析。在低推广情景（LP）下，城镇居住建筑的碳减排量随时间逐步增加。以 SCBAU-1 至 SCBAU-4 对比 SCLP-1 至 SCLP-4 为例，2030 年碳减排量范围为 12.9–14.5 MtCO₂，减排率（CERP）约为 1.5%；2040 年碳减排量为 41.5–48.3 MtCO₂，CERP 约为 5.3%–5.4%；2050 年碳减排量为 82.7–96.0 MtCO₂，CERP 约为 14.7%–14.9%；2060 年碳减排量为 102.9–119.2 MtCO₂，CERP 约为 37.4%–37.8%。虽然公共建筑的碳减排量略低于城镇居住建筑，但减排潜力相对较高，2060 年碳减排量范围为 99.4–115.3 MtCO₂，CERP 约为 39.4%–40.1%。在高推广情景（HP）下，建筑碳排放的降低幅度显著增加。以 SCBAU-1 至 SCBAU-4 对比 SCHP-1 至 SCHP-4 为例，2030 年城镇居住建筑的碳减排量范围为 16.8–19.0 MtCO₂，CERP 约为 1.9%；2040 年碳减排量为 66.2–76.8 MtCO₂，CERP 约为 8.5%–8.6%；2050 年碳减排量为 141.0–162.9 MtCO₂，CERP 约为 24.9%–25.5%；2060 年碳减排量为 167.7–194.4 MtCO₂，CERP 约为 61.0%–61.6%。公共建筑在高推广情景下的减排效果更为突出，2060 年碳减排量范围为 164.2–190.7 MtCO₂，CERP 约为 65.1%–65.8%。

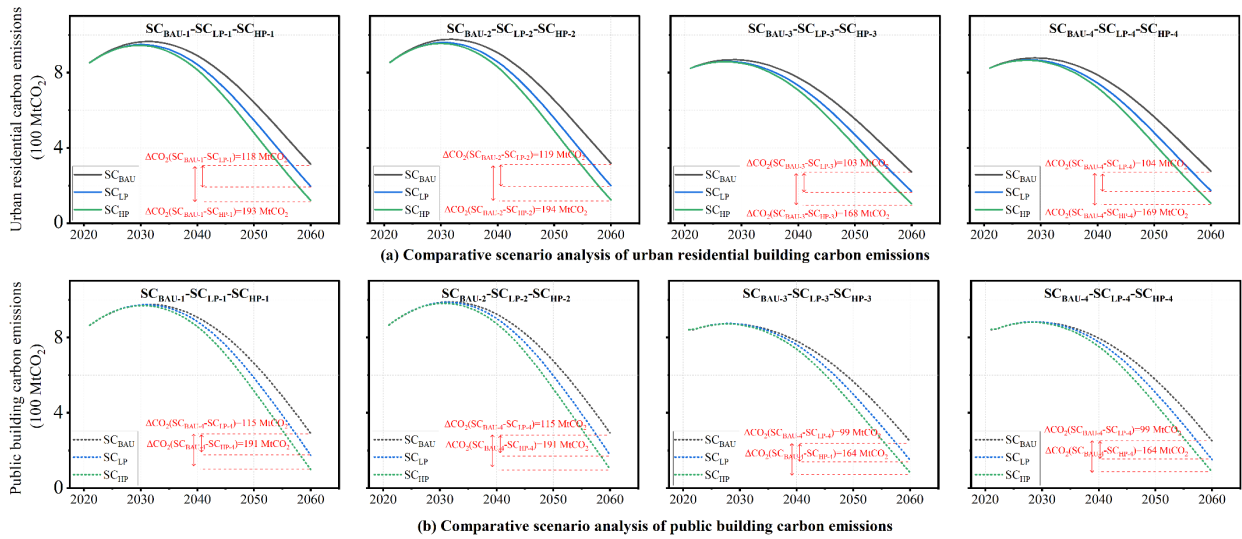


Fig. 13 Comparison and analysis of carbon emission differences between urban residential and public buildings under different scenarios.

Table 13 Comparison of carbon emission differences between urban residential and public buildings under different scenarios (with ESR and CERP).

Urban residential			Public building					
	Δ SCBAU-1-SCLP-1	CERP	Δ SCBAU-1-SCHP-1	CERP	Δ SCBAU-1-SCLP-1	CERP	Δ SCBAU-1-SCHP-1	CERP
2030	14.3	1.5%	18.8	1.9%	0.1	0.0%	4.7	0.5%
2040	47.5	5.3%	75.7	8.5%	23.1	2.5%	50.1	5.5%
2050	94.7	14.7%	161.0	25.1%	77.3	11.6%	147.5	22.2%
2060	118.1	37.6%	192.5	61.3%	115.3	39.8%	190.5	65.8%
	Δ SCBAU-2-SCLP-2	CERP	Δ SCBAU-2-SCHP-2	CERP	Δ SCBAU-2-SCLP-2	CERP	Δ SCBAU-2-SCHP-2	CERP
2030	14.5	1.5%	19.0	1.9%	0.1	0.0%	4.7	0.5%
2040	48.3	5.3%	76.8	8.5%	23.4	2.5%	50.6	5.5%
2050	96.0	14.7%	162.9	24.9%	77.6	11.5%	147.9	21.9%
2060	119.2	37.4%	194.4	61.0%	115.3	39.4%	190.7	65.1%
	Δ SCBAU-3-SCLP-3	CERP	Δ SCBAU-3-SCHP-3	CERP	Δ SCBAU-3-SCLP-3	CERP	Δ SCBAU-3-SCHP-3	CERP
2030	12.9	1.5%	16.8	1.9%	0.1	0.0%	4.1	0.5%
2040	41.5	5.4%	66.2	8.6%	20.1	2.6%	43.6	5.6%
2050	82.7	14.9%	141.0	25.5%	67.3	11.9%	128.8	22.8%
2060	102.9	37.8%	167.7	61.6%	99.4	40.1%	164.2	66.2%
	Δ SCBAU-4-SCLP-4	CERP	Δ SCBAU-4-SCHP-4	CERP	Δ SCBAU-4-SCLP-4	CERP	Δ SCBAU-4-SCHP-4	CERP

2030	13.0	1.5%	17.0	1.9%	0.1	0.0%	4.1	0.5%
2040	42.2	5.4%	67.2	8.5%	20.4	2.6%	44.1	5.5%
2050	83.9	14.8%	142.7	25.3%	67.7	11.7%	129.2	22.4%
2060	103.9	37.6%	169.4	61.2%	99.4	39.6%	164.4	65.5%

MtCO₂

4 Discussion

4.1. Analysis of the impact of cumulative carbon reduction under different scenarios

Fig. 14、Fig. 15 和 Table 14 展示了不同情景下不同气候区的累计碳减排量及其占比分析。在低推广情景（LP）下，全国建筑部门累计碳减排量在 2060 年前的范围为 3340–3867 MtCO₂。不同气候区的减排贡献存在明显差异：寒冷区（C）贡献最大，占全国总量的约 44%，累计减排量为 1469–1701 MtCO₂；其次是夏热冬冷区（HSCW），累计减排量为 762–869 MtCO₂，占比约 22.5%–22.8%；严寒区（SC）累计减排量为 934–1097 MtCO₂，占比约 28%；而夏热冬暖区（HSWW）和温和区（W）**的贡献较小，分别为 147–166 MtCO₂（约 4.2%–4.4%）和 30–36 MtCO₂（约 0.9%）。可以看出，在低推广情景下，中北方气候区对全国碳减排的贡献最为显著。在高推广情景（HP）下，全国建筑部门累计碳减排量显著增加，范围为 5837–6740 MtCO₂。各气候区的贡献趋势与低推广情景相似：寒冷区（C）仍然是减排的主力，占比约 46%，累计减排量为 2691–3117 MtCO₂；夏热冬冷区（HSCW）的累计减排量为 1411–1609 MtCO₂，占比约 23.9%–24.2%；严寒区（SC）的累计减排量为 1370–1604 MtCO₂，占比约 23.5%–23.8%；夏热冬暖区（HSWW）和温和区（W）的减排量较低，分别为 296–341 MtCO₂（约 5.0%–5.2%）和 62–76 MtCO₂（约 1.1%）。总体而言，无论是在低推广还是高推广情景下，寒冷区（C）和夏热冬冷区（HSCW）的减排潜力最大，严寒区（SC）也具有较大贡献，而夏热冬暖区（HSWW）和温和区（W）由于建筑能耗基数较低，碳减排量相对有限。

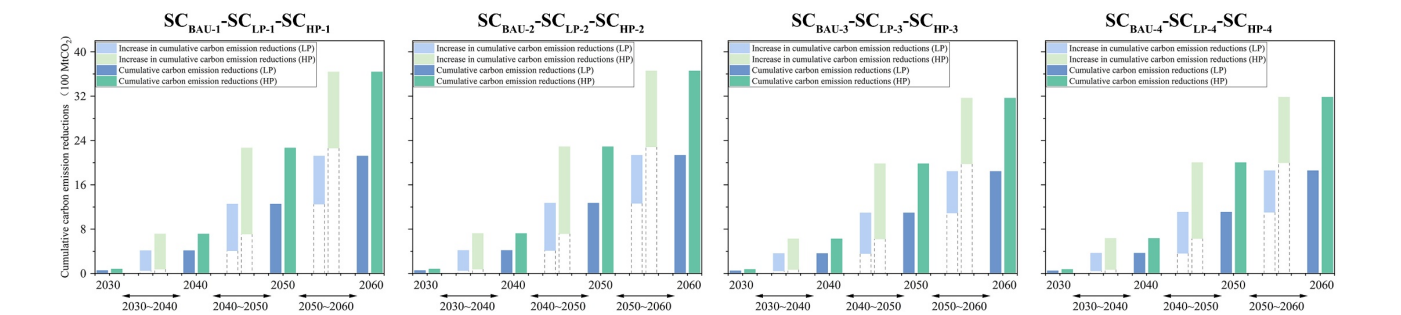


Fig. 14 Comparison of cumulative carbon emissions reductions in the national building sector under different scenarios.

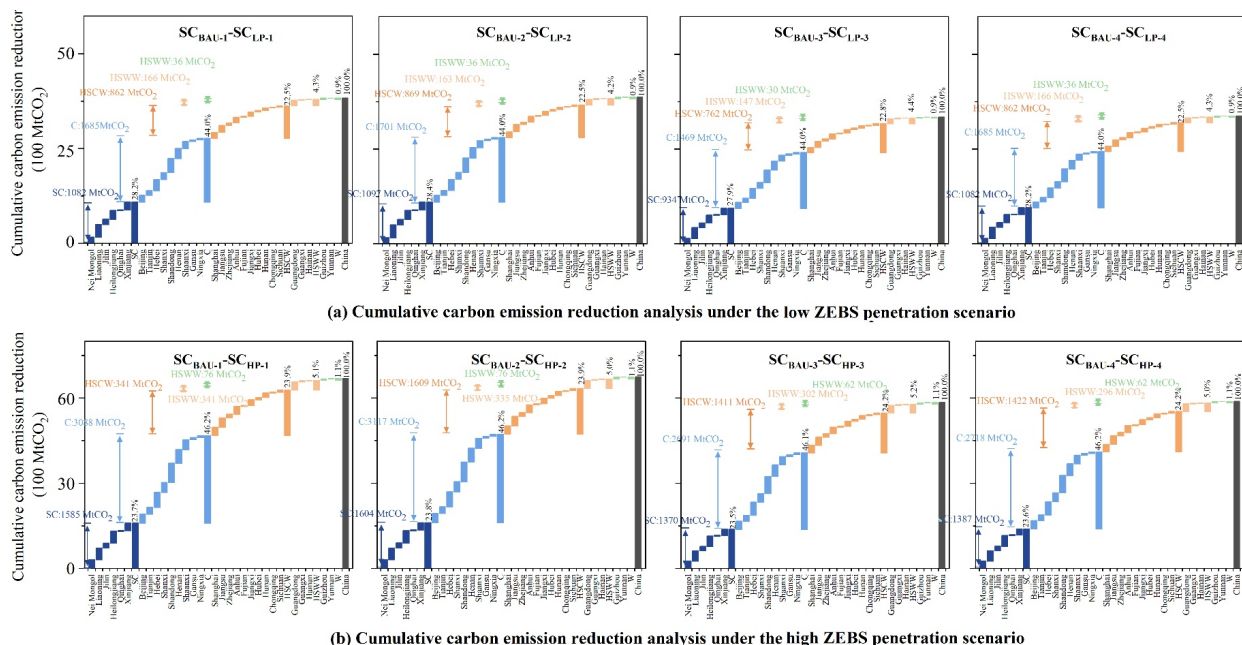


Fig. 15 Comparison of cumulative carbon emissions reductions in different climate zones under different scenarios.

Table 14 Comparison of cumulative carbon emissions reductions in the national building sector and different climate zones under different scenarios.

	Cum-CER	Ratio	Cum-CER	Ratio	Cum-CER	Ratio	Cum-CER	Ratio
	SC _{BAU1} -SC _{LP1}		SC _{BAU2} -SC _{LP2}		SC _{BAU3} -SC _{LP3}		SC _{BAU4} -SC _{LP4}	
China	3832	100.0%	3867	100.0%	3340	100.0%	3832	100.0%
SC	1082	28.2%	1097	28.4%	934	27.9%	1082	28.2%
C	1685	44.0%	1701	44.0%	1469	44.0%	1685	44.0%
HSCW	862	22.5%	869	22.5%	762	22.8%	862	22.5%
HSWW	166	4.3%	163	4.2%	147	4.4%	166	4.3%
W	36	0.9%	36	0.9%	30	0.9%	36	0.9%
	SC _{BAU1} -SC _{HP1}		SC _{BAU2} -SC _{HP2}		SC _{BAU3} -SC _{HP3}		SC _{BAU4} -SC _{HP4}	
China	6688	100.0%	6740	100.0%	5837	100.0%	5884	100.0%
SC	1585	23.7%	1604	23.8%	1370	23.5%	1387	23.6%
C	3088	46.2%	3117	46.2%	2691	46.1%	2718	46.2%
HSCW	1597	23.9%	1609	23.9%	1411	24.2%	1422	24.2%
HSWW	341	5.1%	335	5.0%	302	5.2%	296	5.0%
W	76	1.1%	76	1.1%	62	1.1%	62	1.1%

MtCO₂

4.2. Impact of different timing of ZEBs promotion on cumulative carbon emissions reductions

Fig. 16 和 Table 15 分析不同推广时点的 ZEB 实施对全国建筑部门累计碳减排的影响。在低推广情景 (LP) 下, 如果从 2025 年开始推广, 全国累计碳减排量在 2025 年分别为 3340–3867 MtCO₂ (四种情景差异主要源于不同基准情景假设)。到 2030 年, 累计减排量降至 2866–3345 MtCO₂, 表明前五年推广 ZEBs 可额外减少 474–531 MtCO₂; 到 2035 年进一步下降至 2640–3098 MtCO₂, 累计节约量达 688–782 MtCO₂。这表明早期推广 ZEBs 可以显著提前实现碳减排效果, 前十年减排增量约占 2025 年总减排量的 15%–20%。在高推广情景 (HP) 下, ZEBs 的减排效果更为显著。2025 年的全国累计减排量为 5837–6740 MtCO₂, 到 2030 年减至 4873–5676 MtCO₂, 相当于前五年可额外减少 951–

1079 MtCO₂；到 2035 年累计减排量进一步降至 4409–5168 MtCO₂，前十年的减排增量为 1406–1598 MtCO₂。相比 LP 情景，HP 情景下 ZEBS 推广在早期即产生更高的减排潜力。

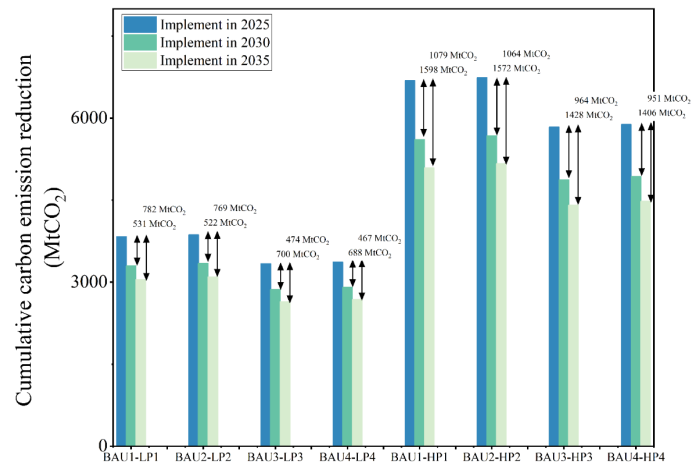


Fig. 16 Impact of different timing of ZEBS promotion on cumulative carbon emissions reductions.

Table 15 Impact of different timing of ZEBS promotion on cumulative carbon emissions reductions.

	SC _{BAU1-LP1}	SC _{BAU2-LP2}	SC _{BAU3-LP3}	SC _{BAU4-LP4}	SC _{BAU1-HP1}	SC _{BAU2-HP2}	SC _{BAU3-HP3}	SC _{BAU4-HP4}
2025	3832	3867	3340	3372	6688	6740	5837	5884
2030	3301	3345	2866	2905	5609	5676	4873	4934
2035	3049	3098	2640	2684	5090	5168	4409	4478
ΔIT _{2025-IT₂₀₃₀}	531	522	474	467	1079	1064	964	951
ΔIT _{2025-IT₂₀₃₅}	782	769	700	688	1598	1572	1428	1406

MtCO₂

4.3. Multi-scenario sensitivity analysis

本研究采用敏感性分析（Sensitivity Analysis）方法，探讨主要驱动因素变化对全国建筑碳排放总量的影响程度。在分析过程中，保持其他因素不变，仅对单一因素的取值按照设定的变化率进行扰动，通过比较扰动前后碳排放的变化幅度，判断各因素对全国建筑碳排放的敏感程度。若在相同变化率下碳排放量的变化幅度更大，则说明该因素对碳排放影响更显著；反之，则表明其影响较弱。敏感性分析中选取主要外生变量作为关键影响因素，包括人口规模、城镇化率、人均建筑面积、建筑改造率、电气化率和 ZEBS 渗透率等。敏感度（E）的计算 Eq.11 为：

$$E_{x,t} = \frac{\Delta y_t / y_t}{\Delta x_t / x_t} \tag{11}$$

其中， $E_{x,t}$ 表示第 t 年因子 x 对全国建筑部门碳减排量的敏感度； y_t 为因变量，即国建筑部门碳减排量； x_t 为模型因子，即所选关键驱动因素； Δy_t 与 Δx_t 分别表示第 t 年因变量与自变量的波动量。

敏感性分析结果表明（Fig. 17），不同输入因子对全国建筑部门碳减排量的影响存在显著差异。其中，电气化率（S5）是对碳减排潜力影响最大的促进因素，其敏感性系数为+0.140。这表明，在电力系统持续清洁化的前提下，加速建筑终端用能的电气化是提升减排效果的最关键途径。相比之下，人口规模（S1）是最大的抑制因素，敏感性系数为-0.108。这说明由人口增长带来的建筑与能源需求扩张，将对实现减排目标构成最主要的挑战。其他因素的影响程度相对较小。城镇化率（S3）也表现为促进因素，敏感性系数为+0.075。人均建筑面积（S2）则为抑制因素，敏感性系数为-0.023。改造率（S4）的敏感性系数仅为+0.004，表明在本模型中，其对累计减排总量的影响相对较小

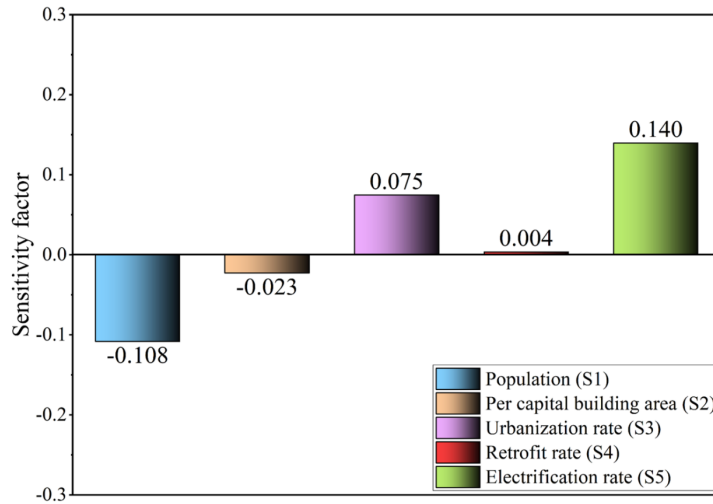


Fig. 17 Results of multi-scenario sensitivity analysis.

5 Conclusions and policy implications

5.1. Main conclusions

本研究从宏观尺度系统性地评估了零排放建筑标准（ZEBS）在中国的推广效果，及其对建筑部门碳中和路径的深远影响。为实现这一目标，本研究构建了一个整合了建筑存量动态演进与多情景分析的综合模型。该模型采用自上而下的方法，覆盖2021-2060年，精细化地模拟了城镇居住与公共建筑在不同发展路径下的新建、改造与存量周转过程。在此基础上，研究的核心工作在于量化了不同 ZEBS 推广情景下的碳排放轨迹与减排潜力，从而为评估其在不同阶段的减排效益提供了坚实的数据基础。本研究的核心贡献在于，首次系统性地量化了不同 ZEBS 推广策略（节奏与力度）对建筑部门脱碳进程的长期影响，其结果为政策制定从战略目标走向具体实施路径提供了关键的数据支撑。研究的主要结论如下：

（1）不同发展情景对 ZEBS 的最终覆盖面积影响显著。在“高渗透率”情景下，符合 ZEBS 标准的建筑面积预计可达到约 199-244 亿平方米，而在“低渗透率”情景下则为约 92-114 亿平方米。这一差异表明，城市建设规模、政策力度和经济发展水平将在未来对零碳建筑的推广起到重要的制约和引导作用。

（2）提升 ZEBS 渗透率能够显著提升减排效果。加强 ZEBS 的推广力度能有效减少建筑能耗和碳排放。至 2060 年，“高渗透率”情景相较 BAU 情景碳减排潜力约为 63%，相比“低渗透率”情景，可额外提高约 25%，表明推广力度和减排效果之间存在明显的正向关系。

（3）ZEBS 的推广效果在不同地区存在明显差异。不同气候区的建筑能耗基数和减排潜力差异较大。寒冷地区的减排贡献最大，占比可达到 46%；而温和地区和低能耗地区的减排潜力相对较小，仅约 1%。这意味着，在制定推广策略时，必须考虑到区域差异，并在各地区采取有针对性的措施。

（4）宏观层面的不确定性因素对 ZEBS 推广效果有较大影响。未来的人口规模、电气化率等不确定因素，会显著影响 ZEBS 的最终推广效果和减排量。因此，在政策制定和推广规划过程中，需要充分考虑这些不确定因素，并建立灵活的动态调整机制。

本研究主要聚焦于零排放建筑标准（ZEBS）在建筑运行阶段的碳排放与减排效果评估，但在一定程度上忽略了建筑全生命周期中的隐含碳及成本因素，这可能影响研究结果的全面性和准确性。首先，研究未将建筑材料生产、运输及施工等环节的隐含碳纳入分析，而这些因素对建筑全生命周期的碳排放和减排潜力可能产生重要影响，因此对碳减排效果的评估存在一定局限性。其次，本研究主要关注 ZEBS 推广的碳减排效果，未考虑单位减排成本和边际成本的变化。虽然 ZEBS 能够显著减少碳排放，但其实施所需的经济成本、不同渗透率情景下的成本差异将直接影响政策的实际可行性。未来研究应结合成本效益分析，进一步探讨 ZEBS 推广过程中成本因素的变化，以帮助决策者做出更加科学的政策选择。

5.2. Policy implications

基于本研究的发现，为加速中国建筑部门的碳中和进程，提出以下两点核心政策启示：

（1）应制定清晰、有雄心的国家级零碳建筑推广路线图与时间表。研究发现，ZEBS 的推广力度是未来建筑部门减排深度的关键驱动力。因此，政策制定者应抓住“十五五”规划的关键窗口期，设定明确的零碳建筑推广面积目标，以此形成示范效应并引导市场投资。更重要的是，应尽快规划并出台新建建筑强制执行零碳标准的时间表。这一举措将为市场提供稳定的长期预期，为供应链的成熟和技术成本的下降奠定基础，是从根本上确保长期减排目标得以实现的关键一步。

（2）必须推行因地制宜、差异化的区域推广策略。本研究揭示了 ZEBS 推广在不同气候区存在巨大的潜力差异，其中北方采暖地区是减排的重点区域。因此，“一刀切”式的推广政策难以奏效。未来的推广策略必须充分考虑各区域独特的气候条件、新建建筑规模、太阳能等可再生能源的禀赋以及经济发展水平。例如，在寒冷和严寒地区，应优先推广超低能耗的围护结构技术；而在太阳能资源丰富的地区，则应大力鼓励光伏建筑一体化（BIPV）的应用。通过制定差异化的技术路径和激励政策，才能在全国范围内实现成本效益最优的减排效果。

6 References

- M. Röck, M.R.M. Saade, M. Balouktsi, F.N. Rasmussen, H. Birgisdottir, R. Frischknecht, G. Habert, T. Lützkendorf, A. Passer, Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation, *ApEn* 258 (2020) 114107.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Adoption of the Paris Agreement. Report No. FCCC/CP/2015/L.9/ Rev.1; 2015.
- M. Ma, X. Ma, W. Cai, W. Cai, Low carbon roadmap of residential building sector in China: Historical mitigation and prospective peak, *ApEn* 273 (2020) 115247.
- International Energy Agency (IEA), Global Status Report for Buildings and Construction 2019 – Analysis, Paris, 2019.
- Y. Wu, J. Shen, X. Zhang, M. Skitmore, W. Lu, The impact of urbanization on carbon emissions in developing

countries: a Chinese study based on the U-Kaya method, *Journal of Cleaner Production* 135 (2016) 589-603.

China Association of Building Energy Efficiency (CABEE), *Research Report on Carbon Emissions in China's Urban and Rural Construction Sector (2024 Edition)*, CABEE, Beijing, 2024.

Xinhua News Agency, "China Announces 2035 Nationally Determined Contribution, Embarking on a New Journey to Address Climate Change," The State Council of the People's Republic of China, September 27, 2025, http://www.gov.cn/zhengce/2025-09/27/content_6977828.htm.

S. Yang, D. Yang, W. Shi, C. Deng, C. Chen, S. Feng, Global evaluation of carbon neutrality and peak carbon dioxide emissions: Current challenges and future outlook, *Environmental Science and Pollution Research* 30(34) (2023) 81725-81744.

R.A. Enker, G.M. Morrison, The potential contribution of building codes to climate change response policies for the built environment, *Energy Efficiency* 13(4) (2020) 789-807.

V. Anand, V.L. Kadiri, C. Putcha, Passive buildings: a state-of-the-art review, *Journal of infrastructure preservation and resilience* 4(1) (2023) 3.

D. Kolokotsa, G. Pignatta, G. Ulpiani, Nearly Zero - Energy and Positive - Energy Buildings: Status and Trends, *Technologies for Integrated Energy Systems and Networks* (2022) 239-273.

L. Belussi, B. Barozzi, A. Bellazzi, L. Danza, A. Devitofrancesco, C. Fanciulli, M. Ghellere, G. Guazzi, I. Meroni, F. Salamone, A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions, *Journal of building engineering* 25 (2019) 100772.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, GB/T 51350-2019, *Technical Standard for Nearly-Zero Energy Building*, MOHURD, Beijing, 2019.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, GB/T 51366-2019, *Standard for Building Carbon Emission Calculation*, MOHURD, Beijing, 2019.

J. Li, B. Shui, A comprehensive analysis of building energy efficiency policies in China: status quo and development perspective, *Journal of Cleaner Production* 90 (2015) 326-344.

S.M. Fufa, R.D. Schlanbusch, K. Sørnes, M.R. Inman, I. Andresen, A Norwegian ZEB definition guideline, SINTEF Academic Press 2016.

Moschetti R, Brattebø H, Sparrevik M. Exploring the pathway from zero-energy to zero-emission building solutions: A case study of a Norwegian office building[J]. *Energy and Buildings*, 2019, 188: 84-97.

N.H. Sandberg, J.S. Næss, H. Brattebø, I. Andresen, A. Gustavsen, Large potentials for energy saving and greenhouse gas emission reductions from large-scale deployment of zero emission building technologies in a national building stock, *Energy Policy* 152 (2021) 112114.

C. Maduta, G. Melica, D. D'Agostino, P. Bertoldi, Towards a decarbonised building stock by 2050: The meaning and the role of zero emission buildings (ZEBs) in Europe, *Energy Strategy Reviews* 44 (2022) 101009.

Pan W, Li K. Clusters and exemplars of buildings towards zero carbon[J]. *Building and Environment*, 2016, 104: 92-101.

Pan W, Ning Y. A socio-technical framework of zero-carbon building policies[J]. *Building research & information*, 2015, 43(1): 94-110.

European Parliament, EPBD recast, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), Off. J. Eur. Union 18 (6) (2010), 2010, L 153/13.
F. Yu, W. Feng, J. Leng, Y. Wang, Y. Bai, Review of the US policies, codes, and standards of zero-carbon buildings, *Buildings* 12(12) (2022) 2060.

Taveres-Cachat E, Grynning S, Thomsen J, et al. Responsive building envelope concepts in zero emission neighborhoods and smart cities-A roadmap to implementation[J]. *Building and Environment*, 2019, 149: 446-457.

Good C, Kristjansdottir T, Wiberg A H, et al. Influence of PV technology and system design on the emission balance of a net zero emission building concept[J]. *Solar Energy*, 2016, 130: 89-100.

Abdous M, Aslani A, Noorollahi Y, et al. Design and analysis of zero-energy and carbon buildings with renewable energy supply and recycled materials[J]. *Energy and Buildings*, 2024, 324: 114922.

Röck M, Saade M R M, Balouktsi M, et al. Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation[J]. *Applied energy*, 2020, 258: 114107.

Liu Y, Xue S, Guo X, et al. Towards the goal of zero-carbon building retrofitting with variant application degrees of low-carbon technologies: Mitigation potential and cost-benefit analysis for a kindergarten in Beijing[J]. *Journal of cleaner production*, 2023, 393: 136316.

Maduta C, Melica G, D'Agostino D, et al. Towards a decarbonised building stock by 2050: The meaning and the role of zero emission buildings (ZEBs) in Europe[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2022, 44: 101009.

Sandberg N H, Næss J S, Brattebø H, et al. Large potentials for energy saving and greenhouse gas emission reductions from large-scale deployment of zero emission building technologies in a national building stock[J]. *Energy Policy*, 2021, 152: 112114.

Huo T, Xu L, Liu B, et al. China's commercial building carbon emissions toward 2060: An integrated dynamic emission assessment model[J]. *Applied Energy*, 2022, 325: 119828.

Huo T, Cai W, Ren H, et al. China's building stock estimation and energy intensity analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 207: 801-813.

D.B. Müller, Stock dynamics for forecasting material flows—Case study for housing in The Netherlands, *Ecol. Econ.* 59(1) (2006) 142-156.

T. Huo, W. Cai, H. Ren, W. Feng, M. Zhu, N. Lang, J. Gao, China's building stock estimation and energy intensity analysis, *Journal of Cleaner Production* 207 (2019) 801-813.

S. Yu, J. Eom, Y. Zhou, M. Evans, L. Clarke, Scenarios of building energy demand for China with a detailed regional representation, *Energy* 67 (2014) 284-297.

X. Tan, H. Lai, B. Gu, Y. Zeng, H. Li, Carbon emission and abatement potential outlook in China's building sector through 2050, *Energy Policy* 118 (2018) 429-439.

National Bureau of Statistics of China, *China Statistical Yearbook 2014 – 2016*, Beijing, 2014 – 2016.

Tsinghua University Building Energy Research Center (THUBERC), *2017 Annual Report on China Building Energy Efficiency*, China Architecture & Building Press, Beijing, 2017.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China (MoHURD), *The 13th Five-Year Plan for Building Energy Conservation and Green Building Development*, Beijing, 2017 (in

Chinese).

N.H. Sandberg, I. Sartori, O. Heidrich, R. Dawson, E. Dascalaki, S. Dimitriou, T. Vimm-r, F. Filippidou, G. Stegnar, M.Š. Zavrl, Dynamic building stock modelling: Application to 11 European countries to support the energy efficiency and retrofit ambitions of the EU, *Energy and Buildings* 132 (2016) 26-38.

Zhang S, Zhao M, Liu Z, et al. City-level population projection for China under different pathways from 2010 to 2100[J]. *Scientific data*, 2023, 10(1): 809.

Zhao X, Ma X, Chen B, et al. Challenges toward carbon neutrality in China: Strategies and countermeasures[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 176: 105959.

Xinhua News Agency, 2025. China Announces 2035 Nationally Determined Contribution, Embarking on a New Journey to Address Climate Change. http://www.gov.cn/zhengce/2025-09/27/content_6977828.htm (accessed Day Month Year).

M. Ma, X. Ma, W. Cai, W. Cai, Low carbon roadmap of residential building sector in China: Historical mitigation and prospective peak, *ApEn* 273 (2020) 115247.

China Association of Building Energy Efficiency (CABEE), 2024. Research Report on Carbon Emissions in China' s Urban and Rural Construction Sector (2024 Edition). CABEE, Beijing.

How do population and land urbanization affect CO₂ emissions under gravity center change? A spatial econometric analysis.

Myint N N, Shafique M, Zhou X, et al. Net zero carbon buildings: A review on recent advances, knowledge gaps and research directions[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2025: e04200.

J. Li, B. Shui, A comprehensive analysis of building energy efficiency policies in China: status quo and development perspective, *Journal of Cleaner Production* 90 (2015) 326-344.

S.M. Fufa, R.D. Schlanbusch, K. Sørnes, M.R. Inman, I. Andresen, A Norwegian ZEB definition guideline, SINTEF Academic Press 2016.

Moschetti R, Brattebø H, Sparrevik M. Exploring the pathway from zero-energy to zero-emission building solutions: A case study of a Norwegian office building[J]. *Energy and Buildings*, 2019, 188: 84-97.

N.H. Sandberg, J.S. Næss, H. Brattebø, I. Andresen, A. Gustavsen, Large potentials for energy saving and greenhouse gas emission reductions from large-scale deployment of zero emission building technologies in a national building stock, *Energy Policy* 152 (2021) 112114.

C. Maduta, G. Melica, D. D'Agostino, P. Bertoldi, Towards a decarbonised building stock by 2050: The meaning and the role of zero emission buildings (ZEBs) in Europe, *Energy Strategy Reviews* 44 (2022) 101009.

Pan W, Li K. Clusters and exemplars of buildings towards zero carbon[J]. *Building and Environment*, 2016,

104: 92-101.

Pan W, Ning Y. A socio-technical framework of zero-carbon building policies[J]. Building research & information, 2015, 43(1): 94-110.

European Parliament, 2010. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32010L0031> (accessed Day Month Year).

Addressing the development gap in net-zero energy buildings: A comparative study of China, India, and the United States.

Mayor of London, 2016. The London Plan March 2016: Policy 5.2 minimising carbon dioxide emissions. <https://www.london.gov.uk/programmes-strategies/planning/london-plan/past-versions-and-alterations-london-plan/london-plan-2016> (accessed Day Month Year).



让我们共同打造气候中和的未来
Building a climate-neutral future together