

零碳转型战略下的 超高层建筑可持续发展 发展路径探索

以上海中心为例





应对气候变化的全球治理在进行时，而目前全球建筑部门的零碳转型进程还落后于2050年前达到碳中和的要求。城市超高层建筑的碳排放特性和减排路径尤其引人关注。本文将探讨城市超高层建筑全生命周期碳减排的转型路径，包括建筑运营范围内降低碳排放强度的解决方案、在能源电气化变革背景下的措施策划，以及如何提升全价值链的可持续性等话题。此外，我们将以上海中心及其他超高层建筑为典型案例，回顾和展望超高层建筑低碳可持续发展的过去和未来。最后，我们将讨论城市超高层建筑在社会领域的可持续影响。

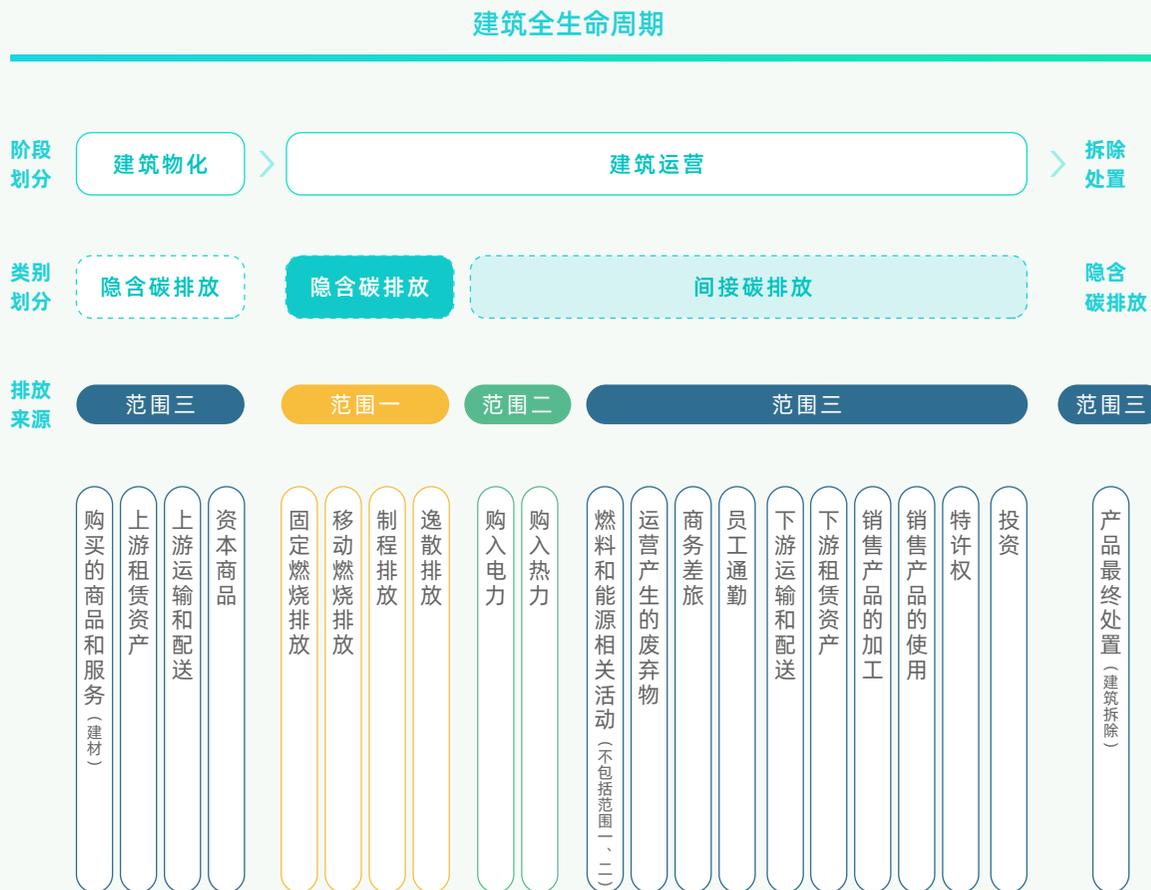
01 引言：城市超高层建筑的零碳转型挑战

应对气候变化的全球治理在进行时，而目前全球建筑部门的零碳转型进程仍然落后于联合国“2050年净零排放”的要求。在中国，面向“3060”双碳目标，建筑行业的零碳转型挑战同样严峻。2020年全国建筑全过程碳排放总量占全国碳排放50.9%^[1]，共计为50.8亿tCO₂e（二氧化碳当量）。

在这之中，城市超高层建筑面临的机遇与挑战尤其引人关注。面对现代城市愈发有限的资源，超高层建筑以极高的土地利用率为城市建设提供了在垂直维度的高速发展与效率提升。同时，作为城市经济发展中心的地标，超高层建筑的绿色与低碳发展也显露着城市整体可持续发展的进程。

然而，垂直维度上的突出发展也为超高层建筑全生命周期的绿色低碳带来了突出的问题与挑战。建筑的全生命周期评估（Building Life Cycle Assessment）^[2]强调建筑从新建、运营到拆除这一全过程资源的优化，从而最大程度地降低建筑能耗与碳排放。依据国际标准，建筑全生命周期碳排放可分为隐含碳排放、直接碳排放与间接碳排放三类。其中，隐含碳排放属于建材生产和建筑施工阶段，即建筑建造的物化阶段所带来的碳排放；而建筑直接和间接碳排放，则指建筑在运营阶段所带来的碳排放，其根据ISO14064-1:2018以及温室气体核算体系（GHG Protocol），可分为范围一、二、三三类排放边界（见图1）。

► 图 1. 建筑全生命周期碳排放类别辨析



来源：妙盈研究院

由于建筑高度的显著增加，超高层建筑更容易发生“高碳锁定”效应：建筑需要更多高能耗的原材料支撑建造，还需要更大量的能耗保障运营。研究显示，在建筑建造范围，超高层建筑建筑工程的单位面积碳排放量达0.402 tCO₂e/m²，约为多层建筑的1.5倍^[3]；而超高层建筑材料使用的单位面积碳排放量达0.294 tCO₂e/m²，约为多层建筑的1.3倍。在建筑运营阶段，2021年美国纽约市数据显示，40层及以上的办公建筑比低层数建筑有着显著更高的建筑运行能耗强度和碳排放强度（见图2）。因此，面对建筑全生命周期下的高碳排放强度，城市超高层建筑的零碳转型挑战更为严峻。

► 图 2. 纽约办公建筑平均运行能耗和碳排放强度与总楼层数的关系（2021年度数据）



来源：纽约城市规划部（NYC DCP）^[4]，妙盈研究院

在此背景下，本文将探索在零碳转型战略下的超高层建筑可持续发展路径，并结合上海中心及多个其他典型案例，回顾和展望城市超高层建筑可持续发展的过去和未来。



来源：iStock

02 全生命周期全价值链碳减排为中心的转型路径探索

建筑运营范围内的节能与碳减排

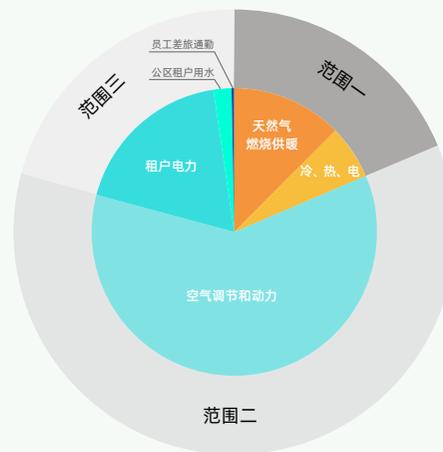
当下，全球城市超高层建筑建设进程已开始放缓，而中国在国家发改委发布“限高令”后已迎来五百米以上超高层建筑的存量时代。根据Oldfield对英国伦敦一栋四十层高楼在其50年生命周期中的碳足迹研究，该高层建筑的运营阶段的碳排放占总体碳排放量的67%，超出其总隐含碳排放的2倍之多^[5]。因此，面对大量落成多年的超高层建筑，如何在其全生命周期里最长的建筑运营阶段实现碳排放的降低，将会是现存城市超高层建筑可持续发展的重点所在。

以运营控制权设定组织边界，上海中心的碳排放主要包括范围一内的固定燃烧排放、移动燃烧排放和散逸排放，范围二内购入电力的间接排放，和范围三内建筑用水服务、商务差旅、员工通勤、以及下游租赁资产的其他间接排放。从排放类别来看，范围一的直接排放最低，仅占排放总量的19%，范围二则占排放总量高达60%，而范围三占比为21%（见图3）。从排放细则来看，购入电力的间接排放贡献了总排放量的60%；燃气锅炉和三联供系统的天然气燃烧排放占比超18%；最后范围三中租户的电力消耗约占总排放量的19%。

数据显示，上海中心碳排放主要来源于外购电力的间接排放，因此，建筑运营范围内的碳减排解决方案首先应围绕其电力消耗的降低和效率的提升来开展。这也正是超高层建筑的挑战：由于负荷相对复杂，输能距离长、空间大且滞后明显，超高层建筑的能源管理需要积极的提前预测和判断。为解决这一能源管理难点，上海中心建立了基于大数据技术的超高层建筑节能精细化管理信息平台，监控超高层用能、机组运行特性，对调度与控制策略、产能与输能进行优化，为楼宇的安全健康运营、精准化管控、节能效率提升、运营成本节约等方面提供数据与策略方面的技术支撑。

另一方面，作为集商务、办公、酒店、商业、观光等多种业态的综合体建筑，上海中心的耗电系统设施高度集中服务于建筑采暖通风与空调，需为建筑使用者提供适宜的室内环境状态。因此，实施主动、高敏捷性和智能的电气系统节能策略是关键。上海中心通过毫秒（ms）级的信息反馈，可以在不影响租户舒适度的前提下精准把握供能时间，神经网络算法等大数据模型的加入使上海中心管理者可以及时发现能源使用异常情况快速干预，通过适当提高设备运行频率减少设备开启台数、逐步替换改造耗能大的末端设备等节能调试措施。这些措施共计实现了6.13%的年总能耗降低，碳减排量达到约5000吨。

► 图 3. 上海中心2021年温室气体排放情况



来源：妙盈研究院

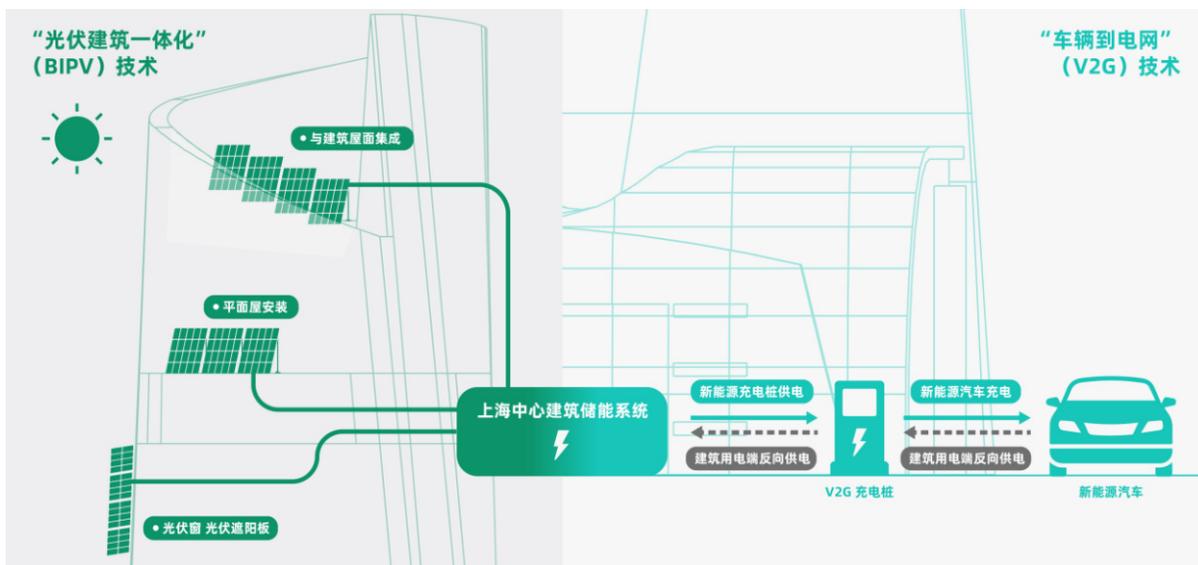
在能源电气化变革背景下的措施策划

碳中和的能源发展趋势强调的不仅是终端能耗的降低，更是在于供给侧一次能源的零碳化，以及可再生能源的大量应用^[6]。这一转型正与中国的电力市场化改革的进程相互呼应，能源系统成本将更直接地显现在电价和电价的日间波动性中，以价格信号引导电力消费方的转变^[7]。

因此，随着能源供给侧的电力脱碳与零碳化的推进，超高层建筑应关注于与新型电力系统的协同交互。首先，应进一步提升电气化水平，例如可以替代传统化石能源锅炉以及化石燃料的解决方案。其次，面向以可再生能源为主体的新型电力系统，超高层建筑应与电力供应进行双向响应，组成能够灵活调节的“柔性负荷”，在城市尺度协同供给侧和需求侧，以全社会成本最低的方式解决电力不平衡，对于零碳建筑和零碳电力的实现具有重要作用。

包括“光伏建筑一体化”（BIPV）和“车辆到电网”（V2G）的技术显现了在超高层建筑上的应用潜力和优势，能够将光伏组件与建筑本身以及电动车充电桩集成，增设建筑光伏电量的储能系统，从而提升建筑的分布式能源利用率。这些解决方案正有赖于技术本身和商业模式的进一步完善，以得到大规模应用；而随着整体能源供给侧的电力零碳化发展，上海中心可随之推动提升绿色电力的采购，从而最大程度地实现建筑电力排放因子的下降，并推动建筑整体的零碳转型（见图4）。

► 图 4. 上海中心能源脱碳转型示意图



来源：妙盈研究院

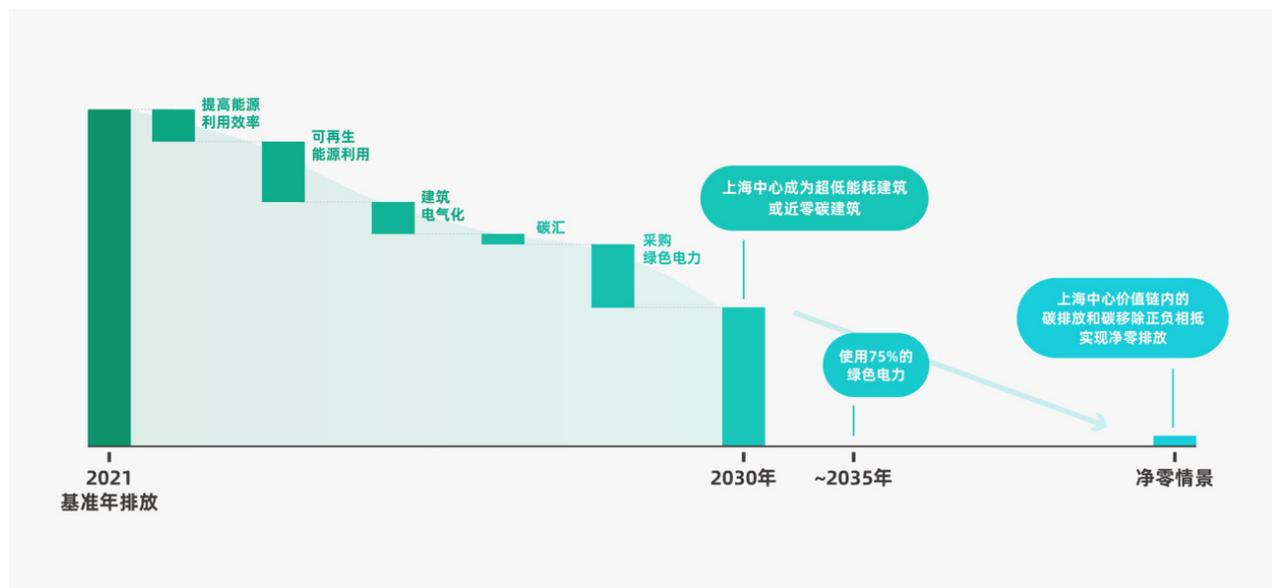
提升建筑全价值链的可持续性

在自身运营范围内的能耗降低与碳减排之外，作为服务于上百家商业、办公、娱乐等企业的超百层综合体建筑，实现理想的零碳转型，离不开上海中心对建筑全价值链碳减排的关注。这意味着在上海中心的带动下，推动所有建筑利益相关者的减碳与脱碳行动，强调建筑作为一个生态系统的可持续性。

价值链的共同脱碳首先应关注于建筑的上游环节，即选择可持续的供应商，并在建筑日常运营工作中，优先与可持续材料、流程和物流的供应商合作，采购节能高效的设备，构建可持续价值链。其次，上海中心应对建筑的下游环节进行可持续的管理和运营。这包括对基于自然解决方案的探索，即全面增加室内外绿化覆盖率，从而增加碳汇并在建筑本地实现碳排放的直接抵消；以及对每一位建筑使用者绿色工作与生活方式的倡导，引导员工建立绿色工作规范和鼓励绿色出行，制定低碳环保主题活动，并发起上海中心低碳倡议，积极推动所有租户加入倡议、履行低碳承诺。

若以2050年为目标达到净零碳（Net-Zero）设定转型路径，基于以上三方面的综合解决方案，到2030年，上海中心将能够实现碳排放水平的大幅削减，成为超低能耗建筑（Ultra-low Energy Building）乃至近零碳建筑（Nearly-Zero Carbon Building）。在这之后的20年中，通过大幅提高绿电使用比例和应用碳移除手段，上海中心的碳排放将降低至目前水平的0.01%，达成建筑净零的转型目标（见图5）。

► 图 5. 上海中心净零转型路线图



来源：妙盈研究院

03 超高层建筑可持续发展实践 回顾与展望

可持续设计与建造奠定建筑低碳基础

目前，许多超高层建筑在设计之初就意识到了“高碳锁定”效应，并积累了大量可持续设计与建造的实践经验，以降低建筑隐含碳排放，并为运营阶段的碳减排和节能打下基础。以上海中心为例，大厦在设计与建造阶段就围绕包括建筑外形设计、幕墙节能、非传统水源利用等“九大技术体系”进行了可持续创新^[9]。例如，为尽可能减少超高层建筑在建造结构与材料上的投入与隐含碳排放，上海中心对其“旋转”的外形进行了多轮空气动力学优化，降低了约24%的建筑风荷载^[9]。广州珠江城大厦同样作为最节能超高层建筑的经典案例，直接在结构设计中利用其立面上的风洞来减轻风压、减少结构建造并创造风力发电调节。

其次，面对超高层建筑无可避免的玻璃幕墙结构，上海中心也创新地通过双层玻璃幕墙体系和交错式构造型式^[10]，不仅使两层幕墙之间形成热缓冲从而降低建筑空调能耗需求，并且降低了对环境的光污染影响。被CTBUH授予最佳高层建筑荣誉的圣戈班总部大厦（The Saint-Gobain Tower），更是采用了其先进的动态玻璃调光智能技术，通过预测性日光算法，准确调节玻璃幕墙色调以达最佳条件，大大减少建筑对人工照明和能源支出的需求^[11]。

► 图 6. 上海中心设计阶段进行的风洞试验



来源：上海中心

► 图 7. 上海中心独特的双层幕墙体系



来源：上海中心

超高层建筑可持续发展的未来展望

在关注设计与建造的可持续资源利用和碳减排技术之外，面向未来的超高层建筑更多开始探索“再生建筑”的概念，即将建筑自身转变为对自然环境有益的资源，帮助自然系统的修复以实现真正的零碳转型。前瞻性的实践大多始于对建筑微气候的关注，例如上海中心就通过 33% 的地面绿化、38% 的屋顶绿化以及室内中庭和复层绿化来营造良好的室内外微气候环境^[12]。

▶ 图 8. 城市超高层建筑可持续发展的过去与未来展望



上海中心

米兰垂直森林

香港太古绿丝带

雅加达 Peruri 88

来源：GENSLER，STEFANO BOERI ARCHITETTI，ARUP，MVRDV，妙盈研究院

在此基础上，以Stefano Boeri设计的米兰“垂直森林”（Bosco Verticale）为首，更是带动了包括香港零碳商业塔楼“太古绿丝带”、雅加达Peruri 88等多个将森林式景观与建筑深度融合的提案，展望超高层建筑成为“城市森林”甚至是“城市农场”的可持续未来（见图8）。此外，仿生学概念也在未来超高层建筑探索中不断得到实验，这包括向植物和动物的生物结构学习并进行建筑构造，以及融合生物技术来实现建筑自生产和自循环。

04 城市超高层建筑的社会领域 可持续影响

人居环境的健康、舒适与安全

环境可持续议题与社会可持续议题往往是高度相关的，在城市超高层建筑的可持续发展中也是如此。在环境范围内的零碳转型实践，同样意味着其对于社会领域可持续影响的进一步关注。作为当下的“远东第一高楼”，上海中心对可持续外形设计和结构建造的钻研，不仅是为了在日常情况下创造对人体舒适的内部热环境以及对呼吸道健康的内部风环境，更是为了确保在极端天气甚至是自然灾害的情况下，大厦仍然能为公民提供安全稳定的庇护所。此外，超高层建筑近年来对内外部绿化设施的关注，也意味着设计在满足基本功能之上，开始更多地考虑人对自然环境的心理需求、价值追求、审美取向等系统性考量。因此，发展更环境可持续的城市超高层建筑，也代表着创造更以人为本、更重视社会责任的人居环境。

垂直社区的协同与公众教育的增强

对系统思维与视角的强调，还体现在城市超高层建筑对社区性和在地性的重视，即通过垂直社区的协同，增强人与人之间的社会链接并构建更具有包容性的都市文化。这首先包括建筑内部对功能分区的创新规划，从而鼓励建筑内部产生更多交流互动和可持续共享行动，例如上海中心在其内部空中花园增设了公共休憩与健身设施，而新加坡金凯源中心（CapitaSpring）则在塔楼内部设置了与外部连通的公园广场与美食中心^[13]。其次，作为显著地标和都市文化的代表，超高层建筑也开始更多关注于当地社区公民的外部参与，增强可持续公众教育的传播。例如，上海中心每年围绕“地球一小时”和“世界地球日”等环保主题，结合其自有观光和艺术空间，特别设置包括垂直马拉松、环保公益讲座等公共项目，提高社区的直接参与，并带动更多公民了解和体验低碳生活。

► 图 9. 上海中心裙房绿地



来源：上海中心

05 结语

面对依然严峻的零碳转型挑战，本文以上海中心为例，切实探讨了城市超高层建筑以全生命周期全价值链碳减排为中心的可持续发展路径，强调建筑运营范围内降低碳排放强度方案的建立，对能源电气化和脱碳化的措施策划，并确保建筑全价值链可持续性的提升。同时，面向未来，超高层建筑不仅需要在环境范围内探索更适应自然环境系统的再生性实践，还需要关注于社会领域的可持续影响，从而基于零碳转型战略，与当地社区以及所有利益相关者建立信任，为公众共同享有的可持续城市未来创造更好的条件。



来源：上海中心

参考文献：

- [1] 中国建筑节能协会建筑能耗与碳排放数据专委会. 中国建筑能耗与碳排放研究报告[R]. 重庆, 2022.
- [2] ROLAND BECHMANN, STEFANIE WEIDNER. Reducing the Carbon Emissions of High-Rise Structures from the Very Beginning[J]. CTBUH Journal, 2021(Issue IV).
- [3] 罗智星;杨柳;刘加平;办公建筑物化阶段CO2排放研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(05): 37-43.
- [4] NYC DEPARTMENT OF CITY PLANNING. NYC DCP Open Data | BYTES of the BIG APPLE[EB/OL]//NYC DCP Open Data. (2023). <https://www.nyc.gov/site/planning/data-maps/open-data.page>.
- [5] PHILIP OLDFIELD. 隐含碳排放与高层建筑[J]. 崛起中的亚洲：可持续性摩天大楼城市的时代：多学科背景下的高层建筑与可持续城市发展最新成果汇总——世界高层都市建筑学会第九届全球会议论文集, 2012: 615-623.
- [6] 黄震, 谢晓敏. 碳中和愿景下的能源变革[J/OL]. 中国科学院院刊, 2021, 36(9): 1010-1018. <http://dx.doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.20210812001>.
- [7] 上海市发展和改革委员会. 关于进一步完善我市分时电价机制有关事项的通知[EB/OL]//上海市发展和改革委员会官网政务公开. (2022-12-16). https://fgw.sh.gov.cn/fgw_jg-gl/20221216/e2652e3ab7ee49438d6e82af8880b160.html.
- [8] 范宏武. 从节能环保角度谈超高层建筑的可持续发展——以上海中心大厦为例[J/OL]. 城市建筑, 2016(13): 22-24. <https://doi.org/10.19892/j.cnki.csjz.2016.13.005>.
- [9] 孙峻, 李鹏魁, 梁云. 上海中心大厦公共区域环境运维效果动态评估分析[J]. 绿色建筑, 2021(04 vo 13): 63-65+74.
- [10] 范宏武, 韩继红, 王振华. 上海中心大厦建筑节能方案设计[J]. 绿色建筑, 2011, 3(03): 27-30.
- [11] SAINT-GOBAIN. The Saint-Gobain Tower[EB/OL]//Saint-Gobain. (2023). <https://www.saint-gobain.com/en/saint-gobain-tower>.
- [12] 范宏武. 上海中心大厦生态宜居环境营建理论与实践[J]. 园林, 2021, 38(01): 29-35.
- [13] PAULA PINTOS. CapitaSpring / BIG + Carlo Ratti Associati[EB/OL]//ArchDaily. (2022-10-04). <https://www.archdaily.com/989946/capitaspring-big-plus-carlo-ratti-associati>.

免责声明

在任何情况下，本报告均不构成对任何人的投资建议，本公司也不对任何人因使用本报告所载任何内容所引致的任何损失负任何责任。市场有风险，投资需谨慎。在决定投资前，如有需要，投资者务必向专业人士咨询并谨慎决策。本报告所载内容版权仅为本公司所有，本公司对此保留一切法律权利。未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制、转载或引用。

ESG评级评分免责声明

妙盈科技的ESG评分结果（以下简称“结果”）均基于公共信息，仅供参考。对于我们的结果是否适用于特定目的分析、衍生分析或者结论的有效性，妙盈科技及其任何关联方包括妙盈科技的任何成员均不做任何明示或暗示的预测、保证或陈述。您不得将结果用于任何公司融资目的（包括但不限于与ESG相关的贷款，信贷工具，证券或结构性产品等等）。仅在事先获得妙盈科技书面许可并提及妙盈科技作为来源的情况下，方可使用本产品。您在此同意，在任何情况下，因您对我们结果的依赖而导致的任何未经许可的使用后果，包括但不限于任何交易决定，交易损害或其他损失，妙盈科技均不承担任何义务或责任。

报告作者

潘嘉业	高级研究员	妙盈科技
庄明昱	研究助理	妙盈科技

特约作者

朱文博	高级主管工程师	上海中心大厦建设发展有限公司
崔正君	高级主管工程师	上海中心大厦建设发展有限公司

妙盈科技办公室

上海
上海市浦东新区银城中路501号上海中心大厦1402、1405室 200120

北京
北京市朝阳区光华路5号世纪财富中心西塔908室 100020

深圳
深圳市福田区福华三路鼎和大厦19楼B28室 518000

香港
20/F, The Chelsea, 69 Jervois Street, Sheung Wan, Hong Kong

新加坡
The Work Project, 600 North Bridge Road, Parkview Square,
#10-01, Singapore 188778



妙盈科技微信公众号