城市减碳三大领域的路径规划

仇保兴

提　要　城市是人为温室气体排放的主要来源，占人为温室气体排放总量的75%，解铃仍须系铃人，城市减碳发展是应对气候变化的“牛鼻子”。以城市为主体实施“双碳”战略，可将其划分为工业、碳汇与农业农村、建筑、交通、废弃物处理（市政）五大模块，其中城市交通、建筑、市政与废弃物处理三领域对任一城市而言都具有共性，以此为基础开展城市间人均碳排放的公平竞赛，将有助于“双碳”目标的实现。

关键词　“双碳”目标；绿色低碳；绿色建筑

中图分类号　TU984　文献标志码　A
DOI　10.16361/j.upf.202205006
文章编号　1000-3363(2022)05-0037-08

Path Planning in Three Areas of Urban Carbon Reduction

QIU Baoxing

Abstract: Cities are the main source of anthropogenic greenhouse gas emissions, accounting for 75% of the earth's total. The problem should be addressed from its source and carbon reduction in the urban area is the key to tackling the issue of climate change. To implement the strategy of "peak carbon and carbon neutrality", city should play the leading role. The efforts should be made in five areas: the industrial sector, carbon sinks and rural agriculture, construction, transportation, and waste disposal (municipal), of which the last three are relevant for every city. Based on such an understanding, the paper argues that fair competition among cities to reduce per capita carbon emissions will help China achieve its peak carbon and carbon neutrality goals.

Keywords: peak carbon and carbon neutrality goals; green and low-carbon; green construction

过去40年我国顺利实现了全球最大规模的城镇化，但在发展过程中也出现了资源高消耗、能源高消耗、污染排放及碳排放高等一系列问题[1]。在习近平生态文明思想的指导下，走绿色低碳的发展道路是中国城镇化的必然选择，因此，一个合格的碳中和路线图应该具备五大特征，即安全韧性、成本趋降性、灰绿系统兼容性、进口替代性和市场主体动员性（图1）。第一，“没有安全一切为零”，城市减碳过程中间所采用的技术必须是安全韧性的。第二，该路线图采用的技术是可复制、可推广的，要有成本趋降性。第三是灰色系统与绿色系统的兼容性。如纯粹煤发电逐渐向掺加氨、甲醇或其他清洁能源的过渡，过程中煤的占比越来越低，逐步实现灰色系统向绿色系统的转换。第四是进口替代性。中国是最大的石油进口国，也是全世界最大的天然气进口国，“双碳”战略需要把能源过度依赖进口的问题解决。第五是市场主体动员性。以城市作为“双碳”主体，可引发市民和企业等社会、市场主体主动减碳。如果一个碳中和的路线图同时满足这5个特征就是一个理想的路线图。

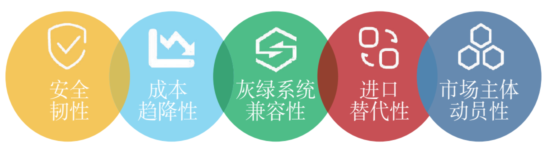

图1　理想碳中和路线图五大特征
Fig.1　Five characteristics of an ideal roadmap toward carbon neutrality

作者简介
仇保兴，经济学/工学博士，国际欧亚科学院院士，住房和城乡建设部原副部长，中国城市科学研究会理事长，lucas_qiu333@vip.126.com

1 城市为主体的“双碳”战略

1.1 “双碳”战略的实施优势

城市规划建设是实施降碳战略的主要载体，所以以城市为主体实施碳达峰、碳中和战略具有以下四点优势。

第一，城市减碳发展是应对气候变化的“牛鼻子”[2]。城市本身就是人为温室气体排放的主角，经联合国组织全球专家调查证实，由城市排出的人为CO_2气体和其他温室气体占总的人为温室气体排放的75%。中国有句古话，解铃还须系铃人，所以，实现“双碳”目标的关键就在于城市。

第二，中国的城市管理体系利于统筹布局“能源供给（碳源）”“能源消费（碳源）”和“碳吸收（碳汇）”。我国城市与西方国家城市有明显的区别，西方城市所管辖的区域一般仅为城市建成区，而我国的城市管辖范围囊括了各种空间管理单元，包括城镇、农村和原野[3]。例如，我国某城市的建成区为100 km^2，但是它的管辖范围有可能是1万—2万km^2，在这个管辖范围内，可以因地制宜部署碳汇、可再生能源以及能源消费和生产。

第三，城市间的GDP竞争可转向GDP增长与减碳双轨竞争。改革开放40年来，我国能够取得繁荣发展的重要原因是城市之间的GDP竞争，竞争的过程本身即是一个学习的过程。“十四五”时期，城市之间的竞争方式由原来只关注GDP增长转向GDP增长与减碳的双轨竞争。如图2所示，我国长三角地区的城市已经开始了什么时候达峰、什么时候碳中和的友谊竞赛[4]。在这个竞赛的过程中，不同城市之间又相互学习，会形成很强的创新动力。

第四，以城市为主体谋划碳中和，制定实施方案和实施路线图，形成从下而上“生成”的碳中和体系与从上而下“构成”的行业碳中和体系互补协同，这样互补的结果是一种高度韧性的体系，具有很强的抗干扰性，此外，这个体系需要与国际对接。2014年国际上已经制定了城市温室气体核算标准，但是这个国际标准是世界资源研究所（WRI）、C40城市气候领袖群（C40）等组织负责制定的。受到当时技术的限制，这个国际核算标准存在诸多问题，例如固定碳源分类比较杂乱、供给侧与消费侧不分、企业的责任与市民的行为减碳未区分等，无法适应产能与消费能在建筑中间的组合。

1.2 战略实施的五大板块

基于上述分析，实施城市为主体的“双碳”战略可以分成五个板块（图3）。第一个板块是建筑，因为所有的城市都是由建筑组成的；第二个板块是交通，包括城市内部和城市外部交通；第三个板块是废弃物处理和市政；第四个板块是工业；第五个板块是碳汇与农业农村。在这个五个板块中，工业、碳汇与农业农村在许多城市不一样，例如大西北戈壁滩上的城市没有农业农村板块，而在消费发达的地区，如旅游业发达的城市也可能没有发达的工业。但是所有的城市都有建筑、交通、废弃物处理和市政，这三个板块是具有共性的，各个城市之间可以参照对比进而开展人均的碳排放公平竞争。

随着现代科技的快速发展，节能新技术快速迭代发展，能效越来越高，成本越来越低（图4），这对实现碳中和来说是重要的技术支撑。例如，从传统的建筑保温转向辐射能的节约，从集中能源利用转向分布式的能源产生，等等。其中相较于传统的节能技术成本，可再生能源技术的成本反而下降得更快，以太阳能光伏发电为代表的可再生能源，在过去的10年中技术成本已经连续下降了82%。除此以外，风能和海上风能的成本也下降了40%以上，而且这些技术的成本还会继续下降，这对实现理想碳中和路线图起到了重要作用。

碳价格机制分为碳交易和碳税，由图5可见，如果采取碳价格机制，无论是碳交易还是碳税都具有高度可靠性。例如，交易1 t碳或者排放1 t碳后，通过碳税可以有效调节碳排放，同时采取公平的竞争机制，包括建筑运用光伏风电等，可以有效提高收益和可靠性。如果采取强制命令手段，例如拉闸关电等，则不确定性和收益均较差，因此应当尽量避免采取各种强制措施。如果采取传统碳封存的方法，即将CO_2提炼到高浓

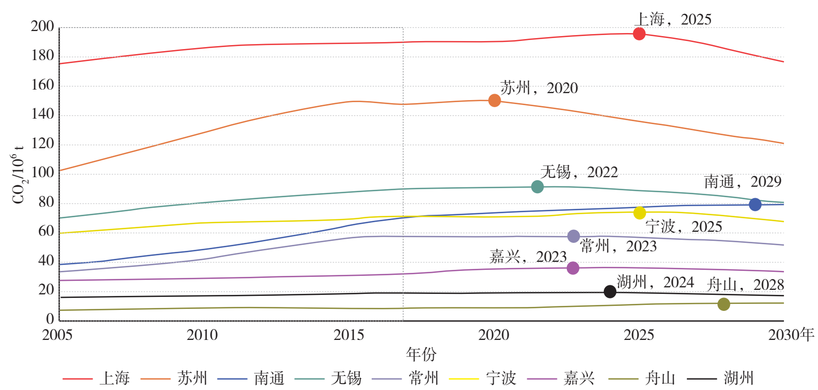

图2 都市圈各市碳排放峰值推演示意图

Fig.2 Illustration of carbon emission deduction for cities in the metropolitan area

资料来源：《中国碳核算数据库》,《长三角地区碳源碳汇的多尺度时空格局演变研究》，各市统计年鉴

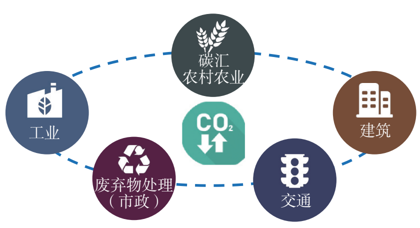

图3 城市碳中和的五板块图

Fig.3 A Five-plate map of urban carbon neutrality

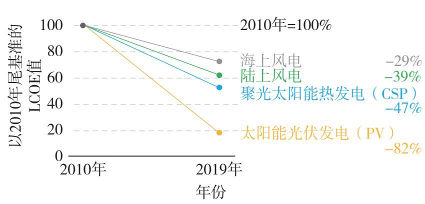

图4 2010—2019年代表性可再生能源发电技术成本趋势图

Fig.4 Trend of cost in electricity generation from representative renewable sources of energy (2010-2019)

（以2010年为基准的LCOE值）

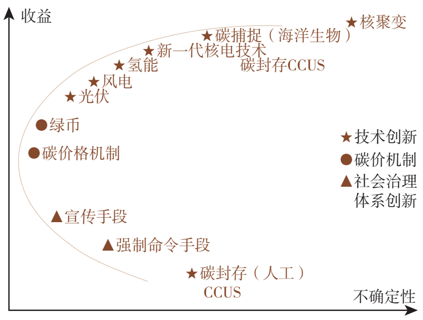

图5　不同政策和技术的受益及不确定性图

Fig.5　Benefits and uncertainties of different policies and technologies

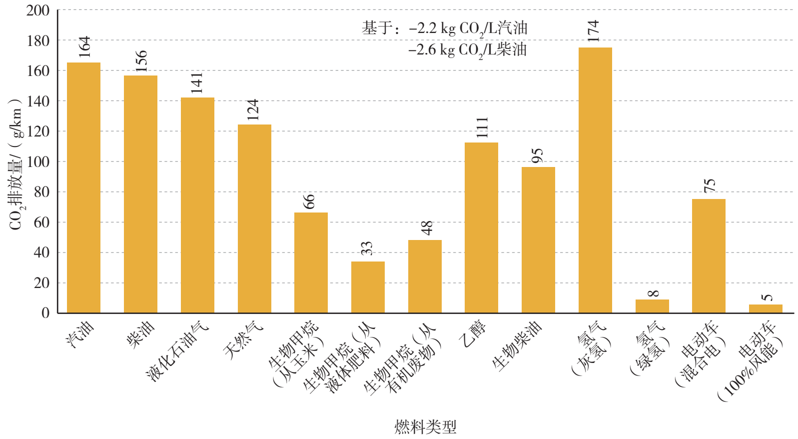

图6　使用不同燃料的乘坐车的温室气体排放量比较图

Fig.6　Comparison of greenhouse gas emissions from ride-hailing vehicles using different fuels

资料来源：德国DENA

度后压缩冷冻为液体，再运输到较远的封存地，通过几千米深井封存，这个过程消耗的能源可能高于封存本身，实施成本很高，可见这项政策存在高度不确定性且性价比低。但是，如果采取通过海洋生物贝壳、珊瑚进行自然碳封存，效益可能会大大提高。因此，无论是技术还是政策方面，都应该通过创新创业来促使碳达峰、碳中和战略的顺利实现。

2　城市交通领域

2.1　不同燃料的碳排放

交通是人类历史上一个巨大的变革，城市交通不同燃料的选择对碳排放强度影响显著。首先看氢能源，来源于煤或天然气的氢气被称为灰氢，用灰氢来做燃料，无论是汽车还是机械，排出的CO_2气体实际上明显高于直接使用汽油、柴油。来源于可再生能源的氢气称为绿氢，而来自化石能源的氢气所产生的碳排放量是它的30倍左右。因此，从图6可以看出，无论是氢还是生物、柴油、乙醇、甲醇，燃料的“出生”不同，碳含量相差悬殊，产生的碳排放量不同。因此，选择可再生能源或从废弃物中提炼出来的燃料用作城市汽车的能源，将大大降低城市碳排放量。

2.2　不同交通工具的碳排放

如图7所示，城市内部所有交通工具可以采用三大参数进行排位[5]。第一个是碳排放量，即图7中上方的气球，该气球越大污染排放越高。第二个是$PM_{2.5}$的排放，$PM_{2.5}$也可以用图中黑色气球代表，所以这个黑色气球既代表碳排放量又代表$PM_{2.5}$的排放。第三是图中下方脚印，代表这个交通工具的人均占地面积，脚印越小占地面积越小。由此可以看出，步行、自行车、电动自行车，包括三种公交（巴士、地铁、火车），人均占地面积较小，且碳排放和$PM_{2.5}$排放较小[6]。电动汽车占地面积虽然较大，但是如果使用了绿电，那么排放量基本为零。第四位的摩托车不仅碳排放量较大，其$PM_{2.5}$的排放远高于电动汽车，是一种高排放的交通工具。所以，城市中应减少或禁止摩托车的使用，而非低排放的电动汽车或电动自行车。同时，即使电动汽车的能源来自煤发电，它排出的CO_2也比燃烧汽油、柴油要低20%，且电动车的$PM_{2.5}$排放基本为零，所以大力发展电动车有利于实现“双碳”战略。目前，国际上已经认识到电动车将逐步取代燃油车（表1），例如挪威，2025年将禁止销售内燃机车、燃油车，其他国家基本在2035年以前停止销售燃油车。我们国家也正在制定相应方案，预计更早实现电动车的全面替代。

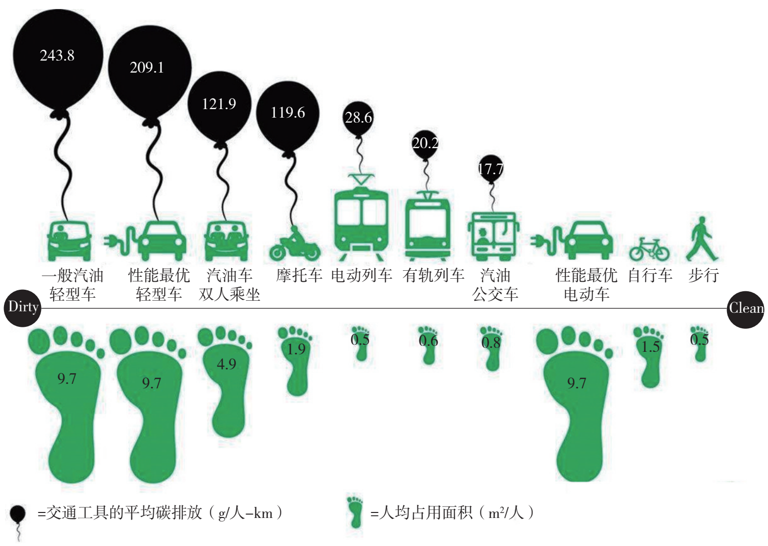

图7　各种交通平均碳排放与人均占地面积比较图

Fig.7　Comparison of average carbon emission and floor area of various modes of transportation

资料来源：网络

3　城市建筑领域

3.1　建筑用能和碳排放

城市建筑的碳排放有两个重要指标。

一是建筑全生命周期碳排放量。我国建筑全生命周期碳排放约占全社会排放量的一半。国际能源署出台的《2020年全球建筑和建造业状况报告》显示，2019年住宅建筑、非住宅（公共建筑）运营和建筑建造业占了整个碳排放总量的38%左右。但是经过长期的研究，我国建筑全生命周期碳排放占碳排放总量的48%以上（图8）。相比之下，我国城市建筑的碳排放高于国际水平的10%，这是因为世界其他国家的建筑大部分由木材建成，木材是碳中性的建筑材料，但是我国85%以上的建筑由钢筋水泥建成，钢筋水泥建成的建筑在全生命周期中，建材所占的碳排发量达到60%以上。所以，我国建筑全生命周期碳排放量巨大与使用的建材密切相关，如果能够实现建筑减排，这将对整个社会的减排产生50%左右的贡献。二是不同类型建筑运行相关的CO_2排放状况（图9）。城市建筑尤其是公共建筑，包括学校、医院、办公楼、商场等，虽然建筑总量占比不大（只有134亿m^2），但是每平方米所排放的CO_2量却是高的，每年排出CO_2达到48 kg/m^2。如果参照日本的水平，这些建筑能够减少一半的碳排放量，可以节约出3亿t CO_2。另外，我国北方建筑的供暖每年排放CO_2 36 kg/m^2，远高于国际水平。如果参考发展中国家波兰，该国所有建筑的供热计量由按照平方米计价转变为用多少热付多少钱，这项变革减少了1/3的CO_2排放。所以，我国北方供暖如果学习波兰模式，可以节约出大约2.5亿t CO_2。此外，城镇住宅和农村住宅一样，现在都面临着生活水平提高而空调使用量增加的问题。

3.2 绿色建筑与节能趋势

3.2.1 气候适应性建筑

绿色建筑有一个非常重要的特征，就是“气候适应性”（图10），即建筑的能源系统和围护结构能够随着气候季节性的变化而自行调节，使建筑的用能模式发生适应性变化[8]。例如夏天可以利用空调系统把部分的热量储存在地底下，使土壤成为一个热储存器，到冬天的时候又把这些热量取出来用于取暖，这样能够实现冬天取暖和夏天制冷在地下的平衡。这样的一座建筑，就是一座气候

表1 各国燃油车禁售时间表及新能源汽车发展目标[7]

Tab.1 The timetable for the ban on the sale of fossil fuel vehicles in various countries and the goals of developing new energy vehicles

国家	禁售年份	禁售说明	发展目标	目标文件
中国			到2025年新能源汽车新车销量占比达到25%	《新能源汽车发展规划（2021—2035年）》征求意见稿
日本	2050	新一代汽车振兴中心：“2050新一代汽车计划”，实现“零排放”	到2030年，电动力（EV+PHEV）占比20%—30%	《汽车产业战略2014》
美国			加州：2025年150万辆、15%市场份额；2030年430万辆	
欧盟	2035		到2030年，EV+PHEV车型占比达到35%	2019年4月欧盟议会发布的2019/631号文件
德国			2030年在注册至少700万辆电动汽车	《2030气候规划》
英国	2040	2017年英国政府 *Air Quality Plan for Nitrogen Dioxide*（NO_2）*in UK*	2030年，电动乘用车销量占比达到50%—70%	*The Road to Zero*
法国	2040	2017年 *Plan Climate*：1 *Planet*，1 *Paln*		
荷兰	2030	*Coalition Agreement* 2017：*Truse in the Future*		
葡萄牙	2040	2018年葡萄牙政府关于交通脱碳声明		
挪威	2025	*National Transport Plan* 2018—2029		

资料来源：IEA，各政府官网

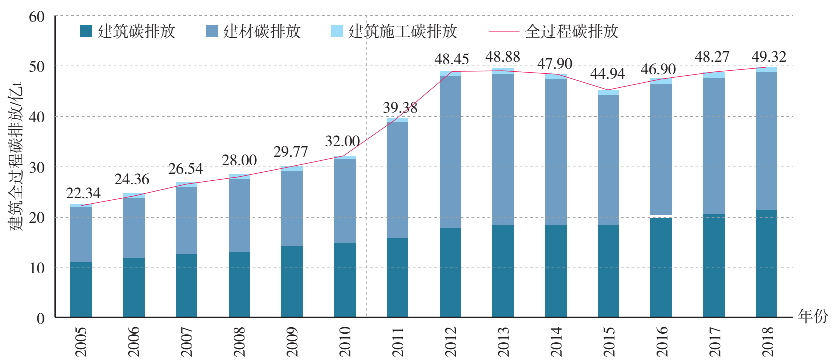

图8 2005—2018年全国建筑全过程碳排放变动趋势

Fig.8 Trend of whole-process carbon emissions in China from 2005 to 2018

资料来源：中国建筑能耗研究报告（2020）

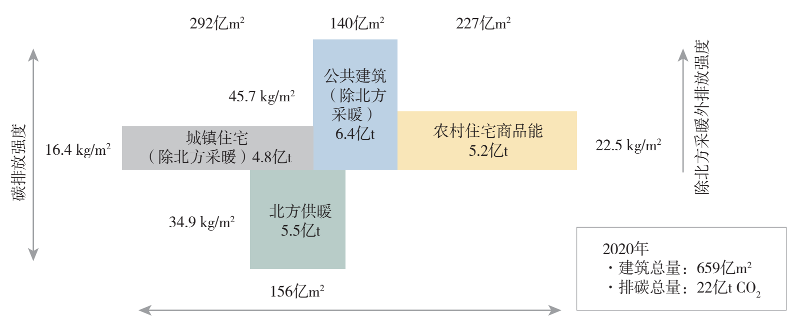

图9 建筑运行相关CO_2排放状况（2020年）

Fig.9 CO_2 emissions related to building operation (2020)

资料来源：中国建筑节能年度发展研究报告2022（公共建筑专题）

适应性建筑，而不是一个恒温、恒湿、全封闭的建筑。它就像鸟儿换羽毛一样，可以季节性地把窗子打开，使空气更净、能效更高。

3.2.2　正能建筑

建筑发展的另一个阶段就是正能建筑，也就是在建筑的顶部和表皮利用太阳能光伏板转化电能，使这个建筑产生的电能高于它消耗的电能。图11是位于德国弗莱堡的正能建筑。弗莱堡的纬度相当于我国的哈尔滨，弗莱堡建筑都能实现正能，可想而知我国各地实际上都可以建成正能建筑。正能建筑有多种形式（图12），例如在建筑屋顶和表皮装太阳能光伏板和屋顶装风力发电装置，与建筑的结构进行匹配，将建筑顶部结构设置为朝阳面斜坡，根据实验测得这一结构变化可额外获得30%的太阳能，而且这个结构如果产生风压，风速也会提高50%。由于风能发电量与风速的3次方成正比，在设计建筑结构时，只需做一些适当的变化就可以提升风能的发电量1倍以上。

3.2.3　社区“微能源”

现代能源的储存模式将从传统的集中式、大型化、中心控制转向为分布式、小型化与建筑紧密结合。按我国在2030年实现“碳达峰”的计划，新型电力系统可再生能源的应用比率要达到总能源的30%以上，到2060年“碳中和”可再生能源的发电比例将超过80%。可再生能源在电网中比例不断提升过程中，由于大量应用风能、太阳能等这些波动性很大的可再生能源，因此需要大量的储

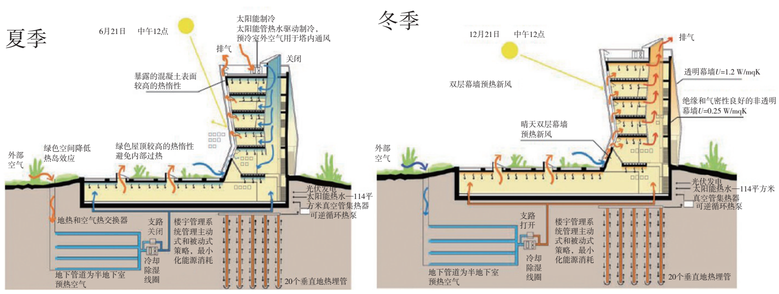

图10　绿色建筑——气候适应性建筑示意图

Fig.10　Green buildings-schematic diagram of climate-resilient buildings

能设备来进行均衡。但如果通过建筑结构的变革，使建筑与分布式的储能装置相结合，这不仅能解决建筑自身能源储存的问题，更能为构建一个安全的城市电网作出巨大贡献，且在技术上也都是成熟可实施的。又例如太阳能光伏可与柔性直流技术更好地匹配，从而使建筑太阳能光伏发电的效率和可靠性进一步得到提升。

从目前的趋势来看，在2030年时我国可能会有1亿辆电动车，目前每辆电动车的储电能力平均是60—70 kWh，这就意味着有60亿—70亿 kWh电能可瞬间储存在电动车内，这样巨量的储电能力若能与可再生能源合理调配就能使电网得到稳定运行。例如通过利用社区的分布式能源微电网以及电动车储能组成“微能源系统”：在电网处于用电峰谷的时候，使所有社区停放的电动汽车进行自动低价充电；当电网处于用电峰顶时，可以借用电动车所储的电按峰谷差价出售给电网一部分电力。这既能对电网用能进行调节，又能为电动车主带来利润。如果外部突发停电，社区也可以借助各家各户的电动车电能作为临时能源供应。如此一来，这样的居民小区实际上就是一个发电单位，也是一个韧性很强的虚拟电厂。更重要的是，比起传统的抽水和大型电池蓄能，这种分布式的社区微电网在储能成本、韧性安全保障能力方面都有显著的优势（图13）。

3.2.4　建筑的“综合碳汇”

建筑发展的高级阶段还可以在建筑的顶部或建筑内部进行鱼菜共生体系建设，可大大提高综合碳汇。图14是荷兰的一个研究所，该研究所在旧建筑顶部添加了一个“玻璃顶”，在这个“玻璃顶”里边每年可以生产出20 t鱼和40 t菜，而实际上它可以生产出100 t菜，另外的60 t是菜帮子、菜叶子、菜根子等，用做鱼的饲料，鱼的排泄物又做成菜的肥料，形成了一个高效循环系统，其单位面积产量达到我国大田的50倍。这里面主要运用了计算机控制和LED灯两

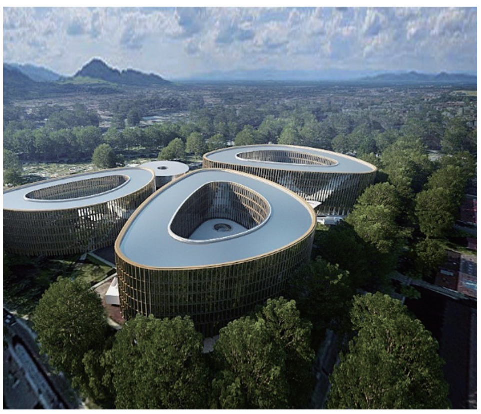

图11　德国弗莱堡市正能建筑

Fig.11　Positive energy building in Freiburg, Germany

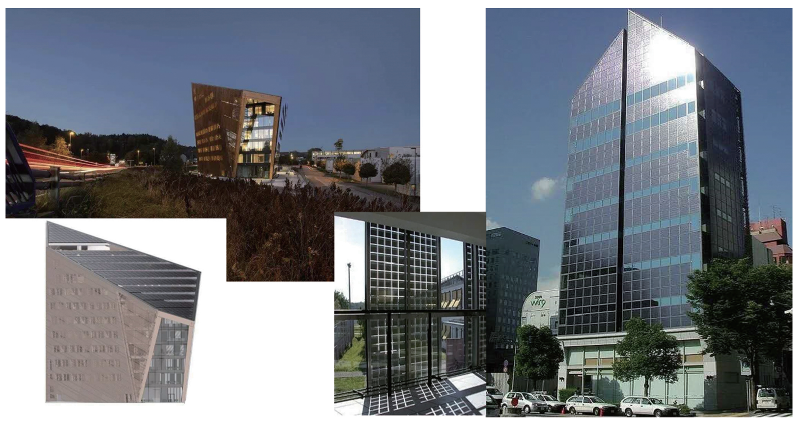

图12　正能建筑的多种形式

Fig.12　Various forms of positive energy architecture

个技术，通过LED灯进行紫外线照射，使植物的光合作用进一步提高，相较平常种在大田里的蔬菜可能是一天日光照射的时候成长7—8 h，但是用了LED灯辅助照明的植物可以24 h生长，大大缩短了生长周期。所以，这类系统如果在社区推广，能够实现社区蛋白质、蔬菜的自我供应，从而明显增强城市的韧性。

3.3 碳负面清单

城市建筑也有负面清单。如图15所示，该建筑是上海汽车南站，全玻璃结构的建筑，在夏天需要比一般建筑多2—3倍的空调用电进行制冷，如果这个建筑搬到哈尔滨去，那就是节能的建筑。因此建筑坐落在什么地方，用什么形式的围护结构很讲究。另外，如果城市低密度的发展，建筑交通能耗就会上升；如果在南方地区推行按面积计价的集中供热，或者滥用“四联供”，就是高碳的。所以，“十四五”规划中央发的文件规定只有北方县城以上城市可以用“四联供”，超高层建筑比一般建筑人均能耗会高出15%以上。此外，住宅和一般性公共建筑滥用中央空调也是高碳的，建议采用分体式空调代替中央空调。

4 废弃物处理和市政领域

4.1 废弃物资源化技术和策略

当前，值得注意的是城市要按照生态系统自组织的原理来重建失去的环节，也就是对废弃物的降解再利用。现代城市为什么和自然严重对立？简言之，在自然界中，生产、消费、降解三个环节是平衡的。自然生态作为一种恒久存在的自组织系统源自这三者之间的均衡，本质上是一种生生不息的循环系统。

城市有非常强大的生产者和消费者，但是缺乏降解者，需要消耗大量能源来人工降解，而传统式人工能源降解会产生大量碳排放。所以，城市应该向大自然学习，进行微循环、材料循环、水循环、垃圾循环等。更重要的就是要建“城市矿山”。城市矿山是指将重要的原材料以建筑和构筑物等形式在城市中有序贮存。经过工业革命300年的掠夺式开采，全球80%以上可工业化利用的矿产资源，已从地下转移到地上，并以“垃圾”的形态堆积在我们周围，总量高达数千亿吨，并还在以每年100亿t的数量增加[9]。只要采取有效的设计、建造、回收模式，工业文明时期累积起来的各种金属材料正成为一座座永不枯竭的“城市矿山”。

北欧一些国家在金属储存方面设置了一条警戒线，该警戒线是以第二次世界大战武器使用的钢材量为标准建立的，当金属以城市矿山形式的储存量到达这一条线时即说明该国的钢材储备达到了国防安全，可以不依赖进口。对国家而言需要有一定的钢铁储备，而钢铁和其他金属材料的储备都可以以“城市矿山”的方式进行。比如，不锈钢或耐候钢建材建造的建筑，其建材在60年甚至100年以后，由于其自身特性，受腐蚀的程

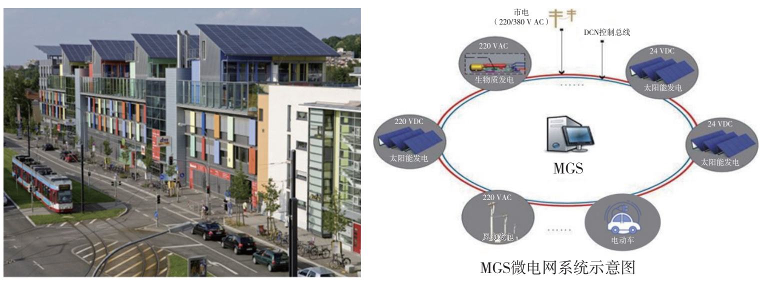

图13 社区“微能源”示意图
Fig.13 Illustration of community "micro energy"

图14 “鱼菜共生”示意图
Fig.14 Illustration of aquaponics

图15 上海火车南站
Fig.15 Shanghai south railway station

度很小，可以有效回收利用，从而大幅度减少钢铁行业碳排放并增强国民经济体系的韧性。

4.2　污水资源多级回用技术和策略

在市政方面，可以采用分散式的污水处理厂，例如集装箱式污水处理厂(图16)。一个集装箱每天可以处理50 t污水，规模大的可以处理300 t，而且是就近收集污水，就地处理，就地循环利用，大大降低了碳排放，节省了许多管道投资。这种污水处理设施第一步的处理效果为1级B，这类尾水不脱磷除氮直接作为绿化用水，还可以省去化肥。如将这类尾水再脱磷除氮处理后能达到1级A，再通过第2个集装箱式反渗透处理后出来的水就可达纯净水标准，这类水可以直接接入自来水管网，并且水质比远距离调水更好，碳排放更少，这样不仅实现了水的内部循环，而且也增强了城市的供水系统韧性。

第2个节水的办法是户内"中水回用"。图17是一种户内中水集成系统，通过这个模块可以将洗脸盆、洗衣机、淋浴产生的废水自动收集储存在一个装置内自动进行过滤消毒，消毒后就成为抽水马桶、拖布池的用水。这套系统可以杜绝部分居民担心由于不放心其他楼层居民的健康状况，减少不愿意使用中水的顾虑，因为这类户内中水回用设施用的是自己一家人的废水。有人曾做过简单的计算，如京津冀及周边约几千万户居民都用上这套建议的"户内中水"，每年约可节约南水北调对北京的实际供水量（每年约6.5亿t）。前者的碳排放显然要比一千多公里调水要低得多。

图16　分散式污水处理厂
Fig.16　Decentralized sewage treatment plant

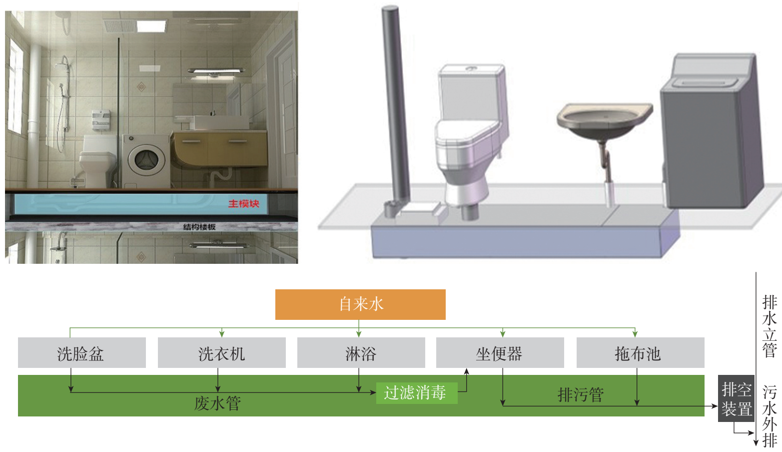

图17　模块化户内中水集成系统
Fig.17　Modular integrated indoor water reclaiming system
资料来源：网络

4.3　城市设计中海绵城市与绿化的综合减碳策略

高级别的海绵城市与低级别的海绵城市工程产生的减碳效益完全是不一样的，城市网络每一个节点采用不同的技术和措施，由此产生的节水、节能和减碳的效益也都有差别，有时越是开发强度高的"大挖大建"项目的综合节能降碳效益反而越不好。

低碳城市设计建设是否成功，有时取决于细节上是否科学合理[10]。笔者在著名生态城市瑞典马尔默生态城考察时，观察到马路旁边的细节，一般的降雨可以由街道地砖缝隙下排吸收，稍微大点的雨量可以流经路旁的小型湿地园由植被土壤吸收下渗，大雨时则借助该湿地园植物的下渗净化作用，使污染物较高的初期污水进入河流前被小型湿地净化，这就避免了像我国很多城市的黑臭河道治理，每到下大雨的时候，前期的治理工作就都白做了，原因就是受到雨洪引发的初期地表水中大量的COD干扰使其重新变成黑臭河道。马尔默市街道边这道利用小型湿地园下渗的细节，使其雨洪中杂质得到缓冲吸收，降低了对自然水系的干扰。这种投资很少、见效很快、景观宜人、可灵活性安排的小项目很值得在我国推广。

合理布局城市绿地会产生间接而且巨大的综合减碳作用。80%以上的城市内部绿化是通过减缓热岛效应而产生间接的减碳效果。例如，行道树木和小型园林中的乔木能够通过水蒸发和遮阳效应达到明显的环境降温作用。图18分为上下部分，上部分是实景图，下部分是实景红外图，从红外图中可以看到绿树成荫的区域为蓝色，而无树木的区域为红色，红色区域与蓝色区域的夏季温差在北京可以达到8 ℃。在具体设计中，首先，城市设计中需要网格化设计和布局绿地系统；其次，根据地方气候特点，需要结合社区空间结构见缝插针地多种植遮阳效果好而占地小的高大乔木；再次，社区微改造中的微园林设计要采用花草灌乔多层合理搭配的布局；最后，城市设计中可建议采用立体园林建筑等

富含立体绿化的建筑新模式。

需要强调的是，立体园林建筑已成为一种建筑新模式（图19），这种建筑可以使每户人家拥有20—50 m²的菜地花园。只要利用好这些阳台菜园，就能起到四大综合减碳效果：一是减少热岛效应，使夏天的空调使用量有效减少，可以节省30%—55%能源消耗；二是相较于一般建筑，立体园林建筑可使社区绿化率达到150%；三是可充分利用多余的中水和雨水在阳台园地实现水循环利用；四是对厨余垃圾进行简易处理后，这些原本需集中运输处理的厨余垃圾可作为花草菜的肥料实现就地处理利用。

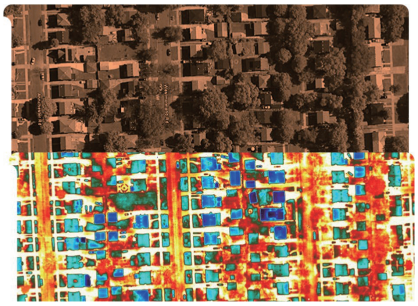

图18　城市同一地区温差示意图

Fig.18　Temperature difference in the same city area

图19　立体园林建筑

Fig.19　Three-dimensional garden architecture

5　结语

总之，实施“双碳”战略是一项系统工程，具有紧迫性、复杂性和艰巨性，“自上而下”的减碳模式与以城市为主体的“自下而上”的减碳模式互补协同，将会使整个能源供应体系有足够的韧性。通过在城市交通、城市建筑、城市废弃物处理和市政3个领域的路径探索，形成公平的人均碳排放竞争，有助于城市内各主体发挥自我能动性，主动地加入到“双碳”战略中。

参考文献（References）

[1] 何珍，吴志强，王紫琪，等. 碳达峰路径与智力城镇化[J]. 城市规划学刊，2021(6): 37−44. (HE Zhen, WU Zhiqiang, WANG Ziqi, et al. The path to the peak carbon and intellectual urbanization[J]. Urban Planning Forum, 2021(6): 37−44.)

[2] 潘海啸，戴慎志，赵燕菁，等. “应对气候变化的城市韧性与空间规划”学术笔谈[J]. 城市规划学刊，2021(5): 1−10. (PAN Haixiao, DAI Shenzhi, ZHAO Yanjing, et al. Academic written discussion on "urban resilience and spatial planning for climate change"[J]. Urban Planning Forum, 2021(5): 1−10.)

[3] 吴志强，刘晓畅，赵刚，等. 空间效益导向替代简单扩张：城市治理关键评价指标[J]. 城市规划学刊，2021(5): 15−22. (WU Zhiqiang, LIU Xiaochang, ZHAO Gang, et al. Spatial benefit orientation instead of simple expansion: key evaluation indicators of urban governance[J]. Urban Planning Forum, 2021(5): 15−22.)

[4] 李晓江，何舸，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 neutrality strategies in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Urban Planning Forum, 2022(1): 27−34.)

[5] 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 Ziying, et al. Research and thinking on the compilation of land and spatial planning under the target of "carbon peak and carbon neutrality"[J]. Urban Planning Forum, 2021(4): 74− 80.)

[6] 杨文越，曹小曙. 居住自选择视角下的广州出行碳排放影响机理[J]. 地理学报，2018, 73(2): 346−361. (YANG Wenyue, CAO Xiaoshu. The impact mechanism of Guangzhou travel carbon emissions from the perspective of residential self-selection [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(2): 346−361.)

[7] 任泽平，连一席，郭双桃. 全球新能源汽车发展报告2020：中国汽车人离汽车强国的梦想从未如此近过[J]. 投资与理财，2020(3): 4. (REN Zeping, LIAN Yixi, GUO Shuangtao. Global new energy vehicle development report 2020: Chinese automakers have never been so close to the dream of becoming a car power[J]. Investment and Finance, 2020(3): 4.)

[8] 韩冬青，顾震弘，吴国栋. 以空间形态为核心的公共建筑气候适应性设计方法研究[J]. 建筑学报，2019(4): 78−84. (HAN Dongqing, GU Zhenhong, WU Guodong. Research on the climate adaptive design method of public buildings with spatial form as the core[J]. Architectural Journal, 2019(4): 78−84.)

[9] 刘向群. 发现“城市矿山”[J]. 中国经济周刊，2009(43): 62. (LIU Xiangqun. Discovering “urban mines” [J]. China Economic Weekly, 2009(43): 62.)

[10] 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): 56−62. (KUANG Xiaoming, XU Jin, CHEN Jun. Research on the construction of low-carbon ecological management and control elements system based on controlled detailed planning plot level[J]. Urban Planning Forum, 2018(5): 56−62.)

修回：2022-09