

# 超大型城市“双碳”发展经验与路径： 以深圳为例\*

蔡中华 晏琦 范伟军

(清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518060)

**[摘要]** 力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和,是我国为应对全球气候变化而做出的郑重承诺。作为现代文明的象征,超大型城市承载着巨大的人口和经济活动。由于庞大的能源消耗,超大型城市的低碳转型一直是实现碳中和目标的主要阵地和关键领域。深圳市是一个人口超过1700万的超大城市,面临着巨大的能源依赖和碳排放压力。作为全国首批低碳试点城市之一,深圳在碳中和的探索和实践取得了显著成就,其可持续发展战略成为全国的范例。通过完善政策引导,积极布局绿色产业结构,并推进可再生能源的利用,深圳率先达到了碳达峰,展示出了大城市应对气候变化的积极态度和勇于担当的决心。然而深圳市的碳中和问题也昭示着大城市普遍面临的共性挑战,尤其是达到碳达峰的阶段性目标后,深圳这类超大城市下一步的碳中和工作应集中在碳固定方面。国际控制碳汇增量的一般途径包括林业碳汇、海洋碳汇、碳捕获利用与封存技术以及农业土壤碳汇。确定超大城市的碳固定路径,需要全面考虑生态条件、技术可行性、经济成本、社会接受度和环境影响等多方面因素。为完成最终的碳中和目标,深圳应继续坚持绿色转型与生态固碳并举,精细控制碳排放,推动前沿技术创新应用,以更有效地适应不断加剧的气候挑战。

**[关键词]** 碳达峰 绿色产业 生态碳汇 固碳路径 土壤碳汇

**[中图分类号]** F205; F206 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 2096-983X(2024)03-0055-10

## 一、引言

全球气候变暖引起的生态失衡已经对人类社会经济产生广泛影响,应对全球变暖的挑战成为当今世界面临的最重要任务之一。2015年,在联合国气候变化框架公约第21次缔约方大会上,各国达成《巴黎协定》,要求各国制定

和提交自愿性国家自主贡献目标(减排承诺),即制定减排措施并实现温室气体净零排放目标。截至2021年6月,巴黎协定成员国已提交164项自主贡献目标,覆盖了2019年全球排放量的93.1%。该协定为国家城市提供了共同框架,推动共同行动,促进可持续发展。在紧迫的全球气候挑战下,中国于2020年提出“2030年前

收稿日期:2023-08-23;修回日期:2023-12-16

\*基金项目:深圳市哲学社会科学规划课题“‘双碳’目标下深圳建设绿色城市研究”(SZ2022B043)

作者简介:蔡中华,教授,博士研究生导师,主要从事生态文明建设及生态修复研究;晏琦,博士研究生,主要从事生态环境治理方向研究;范伟军,博士研究生,主要从事城市发展政策研究。

碳达峰、2060年前碳中和”的宏伟目标。碳达峰是指在2030年前将温室气体排放达到峰值，之后不再增加；碳中和是指在2060年前通过增加温室气体汇来抵消排放，实现净零排放<sup>[1]</sup>。这两目标需要不同的路径，碳达峰要实现经济增长与碳排放脱钩，而碳中和要实现平衡净零排放。

由于不同国家和城市之间的经济水平、能源结构和发展需求存在巨大差异，每个国家和城市都必须根据自身情况制定和实施适合的减排措施。其中，人口超千万的超大型城市的碳中和问题一直是“双碳工程”的难点，原因包括多方面：首先，超大型城市拥有复杂的基础设施和能源系统，对城市系统的改造和转型需要长长期规划、大规模投资和技术创新。其次，城市的发展依赖化石燃料，而转向可再生能源需要解决能源供应的稳定性和可靠性问题。此外，交通和运输也构成一大挑战，解决交通拥堵和减少交通碳排放需要全面的规划和可持续交通模式的推广。克服这些难点需要综合性的解决方案，为了应对这些挑战，一些地区已经采取了积极的行动。例如，法国巴黎通过优化区域物流中心规划，降低产业链和运输链上游的能源消耗，从而降低城市的单位供应能耗。丹麦政府开发了一款碳计算器来预测和计算哥本哈根的碳排放情况，未来的工作重点将放在能源消耗、能源生产和绿色交通领域<sup>[2]</sup>。

作为全球最大的温室气体排放国之一，中国的碳中和事业面临着巨大的挑战和机遇。特别是对于国内的超大型城市而言，碳中和路径的制定需要综合考虑经济发展、社会稳定和环境保护等多重因素。深圳作为国内首批低碳试点城市之一，绿色低碳发展观一直是深圳市的重要发展理念。在2021年5月15日深圳市第七届人民代表大会上，深圳市市长覃伟中就提出“作为先行示范区，深圳要以先行示范的标准形成低消耗、少排放、能循环、可持续的绿色低碳发展方式，走出一条高密度超大型城市绿色低碳的高品质发展路径”。针对此目标，深圳按照

“先达峰后中和”的策略，开展了一系列“提质增效”改进工程，并在碳中和领域取得丰硕成果。深圳的综合碳减排策略不仅为其他城市寻找低碳发展方案提供了帮助，同时其碳中和发展经验也为其他大型城市的绿色转型提供了目标与技术清单。

## 二、国际超大城市的“双碳”路径与增汇途径

### (一) 国际超大城市“双碳”工作的主要目标

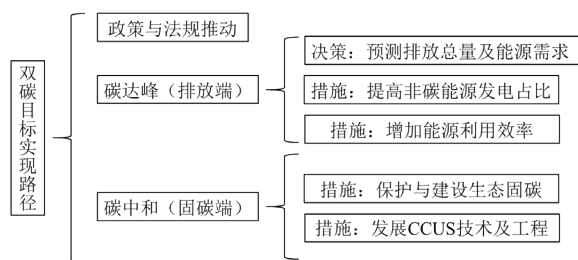


图1 超大城市“双碳”目标实现路径图

超大城市“双碳工作”必须囊括温室气体的两个端口（见图1）：排放端与固碳端。排放端是某一国家或地区向大气释放温室气体的端口，主要来源于工业生产、电力、建筑以及交通等与人民生活息息相关的产业排放。其调控目标是通过能源替代或者技术创新和产业升级等路径完成排放端的非碳化或者低碳化，从而实现经济发展与碳排放的脱钩。而固碳端是指将大气温室气体通过碳捕获、碳存储和碳封存等路径，将大气二氧化碳长期封存起来，最终实现“净零排放”。尽管对这两端口的调控与规划都是为了“双碳”目标的实现，但是二者的具体目标与技术需求不尽相同。排放端主要通过提高非碳能源发电比（用风、光、水、核等非碳能源替代煤、油、气），采用技术创新、清洁生产和循环经济等手段降低单位GDP能耗，或通过产业升级，以先进制造业替代传统制造业，以第三产业取代第二产业，实现产能提质增效<sup>[3]</sup>。本文重点论述超大城市固碳端的工作建设思路。

超大城市碳汇增量控制的基本目标是城市

通过保护生态环境和布设绿色基础设施等方法，使一定时间内吸收二氧化碳的量超过排放的量，从而在碳平衡上实现净零排放甚至净吸收。从总量上看，国际超大城市的碳排放量基本在千万吨级别，例如纽约市的碳排放总量大概为5100万吨二氧化碳当量，伦敦市为3000万吨左右<sup>[4]</sup>。根据中国碳核算数据库，2019年北京市总排放量大约为8800万吨，上海排放约1亿9千万吨。面对如此巨量的碳排放，首先，超大城市碳汇增量模式必须结合生态系统固碳，以产生足够大的规模。其次，城市需要建立有效的碳汇监测和评估体系，实时了解碳汇的变化情况，为制定和调整碳汇增量控制措施提供科学依据。除此之外，超大城市的碳汇增量控制路径也应遵循绿色发展和可持续发展方针，例如生态系统的保护和恢复，绿色产业的发展以及城市的可持续规划等，应实现碳汇增长与经济发展、环境保护协同发展的良性循环。

固碳端的调控重点是封存因人类发展不得不排放的温室气体，目前只能通过生态系统固碳及人工碳捕获(CCUS)来实现。这种框架

是一种综合的、全局性的方法，需要在能源、工业、农业、林业等多个领域采取行动。值得注意的是，“双碳”目标需要统筹发展，若将碳达峰与碳中和发展路径割裂，那么碳达峰的有些路径很可能对碳中和带来负面的影响，这些努力很有可能会阻碍最终净零排放的目标达成。例如比尔盖茨在《气候经济与人类未来》中提到把燃煤电厂改成燃气电厂就是一个“碳达峰”陷阱，这种做法虽然在短期内确实减少了一定的碳排放，但成本难以回收，且长期碳排放依旧很高<sup>[5]</sup>。因此政策制定者需要着眼长期目标，在排放端与固碳端实现突破，从而一步步实现接近净零排放的目标。已有大量国内外学者及团队对碳汇的形成路径进行了探索与评估，主要分为两类<sup>[6-9]</sup>：碳捕捉、储存以及利用技术(capture, storage, and utilization, CCSU)与生态固碳路径。表1展示了CCUS与生态固碳路径各自的特点。使用增碳汇技术时，应考虑城市或地区自身的实际情况，考虑每种方式的可持续和效益。综合利用不同技术可以提高整体的碳吸收能力，并增加应对多样化环境下的适应性。

表1 不同固碳路径的特点与比较

碳汇路径	CCUS (碳捕获利用与储存)	生态固碳路径		
		林业碳汇	海洋碳汇	土壤及农业碳汇
定义	通过捕获二氧化碳并将其永久地储存在地下或其他储存设施中，以减少大气中的排放量。	指通过植树造林、森林管理等方式增加森林面积和增强森林的碳吸收能力。	指利用海洋生态系统吸收和储存大气中的二氧化碳。	指通过农业和土壤管理实践，增加土壤有机质含量，以吸收和储存二氧化碳。
关键特点	捕获和储存二氧化碳，防止其释放到大气中。	增加森林覆盖面积和增强森林的碳吸收能力。	利用海洋生态系统吸收和储存二氧化碳。	通过农业和土壤管理措施增加土壤的碳储存。
应用领域	工业排放、发电厂等二氧化碳源。	林业和森林管理。	海洋生态系统，如海草、珊瑚礁等。	农田、畜牧业、有机农业等农业领域。
可能的贡献	有效减少工业和能源行业的碳排放。	增加碳汇容量，改善森林生态系统。	增加海洋生态系统的碳吸收能力。	提高土壤质量，增加土壤碳储存。
需要注意的问题	技术成熟度和成本、储存安全等问题。	森林管理和保护的可持续性、土地利用竞争等问题。	海洋生态系统的脆弱性和保护问题。	农业实践的可行性和可持续性、土地使用的竞争等问题。

## (二) 国际超大城市碳汇增量控制的一般路径

### 1. 林业碳汇：40年吸收4吨

绿色植物通过光合作用固碳是最广为人知

的“减碳”方式。林业碳汇也由此而来，树木通过树叶的气孔吸收大气中的二氧化碳，并将其转化为植物体内的有机碳。理论上，通过植树造林等活动，人类可以固定大量CO<sub>2</sub>。然而，树

木对碳的存储并不是如我们设想的那么高,光合作用捕获碳并不能完全转化为树干茎身的增长,光合作用捕获的碳一部分因自身的呼吸作用释放至大气中。另外据报道森林每年都要凋落大量的树枝树杈,这些树枝树杈被微生物分解,很快还会释放到空气中<sup>[10]</sup>。研究表明,陆地植被所捕获的50%的碳都会以凋落物的形式(叶片及残枝)回归地表,并被微生物分解释放二氧化碳。因此,对于自然林的保护只能减少土地与植物碳释放的量,是“减排”的一部分,不能成为“碳汇”的增量。人工造林被认为是一种有效的碳汇手段,然而,其实际碳吸收潜力未如预期。比尔·盖茨在其《气候经济与人类未来》中提供了一个有益的经验法则<sup>[5]</sup>:尽管树木种类不同,但一棵树大约需要40年时间才能吸收4吨二氧化碳。为吸收一个普通美国居民一生中排放的温室气体,大约需要50英亩的森林。对于拥有千万人口的国际超大城市来说,需要种植大约5亿英亩(30.35亿亩)的人工林才能吸收城市的碳排放。同时,这些树木必须得到保护并持续管理至少40年以上,这对于超大城市而言几乎不切实际。尽管如此,林业碳汇作为一项应对气候变化的策略仍然具有积极作用,因此我们应该考虑将其与其他碳固定技术相结合使用。

## 2. 海洋碳汇:地球上最大碳汇

海洋中大约储存了380000亿吨碳,是大气碳储量的43倍,是陆地碳储量的9.5倍。其中表层海水以无机碳酸盐的形式吸收和存储大约9000亿吨碳,是调控大气中的温室气体浓度的重要推手<sup>[11]</sup>。总体来看,海水碳库整体性质稳定,但碳储量受多因素调控,人工操控难度大,预期碳汇增量较小。目前海洋碳汇研究较多的是沿海植被系统,也称“海洋蓝碳”,包括海草床、红树林和盐沼等。这些系统中存在复杂的物理与生物结构(根系、茂密植被、海草系统中的多叶树冠),够高效捕获来自内部(植物光合作用)和外部(河流和海洋来源的沉积物)的相关有机碳,形成“蓝碳”碳库。据估计沿海植被

系统每年每平米可捕获18至1793克碳,而成熟的森林土壤每年每平米仅可捕获至0.7至13.1克碳<sup>[12]</sup>。虽然目前地球上红树林、海草床和盐沼的面积比陆地森林小得多,但它们对长期固碳的总贡献与森林生态系统类型的碳汇相当。

然而,全球沿海植被生态系统正在遭受严重的破坏,威胁到它们作为长期碳汇发挥作用的能力。由于沿海的富营养化、开垦以及养殖活动,在过去几十年中,大约三分之一的红树林、海草和盐沼地区已经消失<sup>[11]</sup>。同时人类活动加速了沿海植被系统中沉积物扰动和暴露,使得有机质溶解流失,导致封存的二氧化碳又重新释放到大气中去。例如,马来西亚的红树林已经在过去千年里积累了大量的碳,但由于养殖池塘的改造,使得每公顷沉积物释放了大约750吨二氧化碳,大约是该森林的碳封存速率的50倍<sup>[13]</sup>。总的来看,越来越多的证据表明植被沿海生态系统的碳固存价值以及其对生态系统保护的重要意义,各国也意识到需要采取行动防止“蓝碳”进一步退化和损失。

## 3. 碳捕捉、储存及利用技术:推进传统行业深度脱碳

碳捕捉、储存及利用技术(capture, storage, and utilization, CCSU)是一项专为燃煤火电以及水泥、钢铁等难减排行业“量身定制”的工程技术。此技术的目标是提供工业碳固定的实施方案,以减轻环境影响,并允许人类继续使用化石能源,直到清洁可再生能源完全满足人类需求。CCUS主要过程包括捕捉、运输和储存以及利用CO<sub>2</sub>。例如,利用胺基洗涤溶剂可以从烟气中捕获二氧化碳,捕获后的二氧化碳需要被安全、高效地运输到储存地点<sup>[6]</sup>。运输方式通常包括管道输送、船运和公路运输等。这些二氧化碳需要通过石油或天然气技术储存在地下地层或其他适当的储存介质中,大部分储层的深度在1000米以下或者在海底,以防止其释放到大气中。另一部分捕获的二氧化碳也可用作化学合成品的原料,例如碳酸酯和醇类化合物<sup>[14]</sup>。近年来,CCUS设施的开发和部署步伐在

全球范围内持续加快。截至2019年,全球共有51个大型CCUS设施(年捕获量超100万吨),其多半集中在北美地区。而中国尚未完成百万吨级别的CCUS项目,目前捕获能力最大的是山东胜利油田40万吨CCUS项目<sup>[15]</sup>。市场上尚未出现针对小型工业的CCUS技术或者项目。

目前CCUS技术还存在一些挑战和限制:首先CCUS技术的建设和运营成本较高,一台400兆瓦发电站部署一套90%捕获率的CCUS装置,大约需要7000万美元。除此之外,捕捉、运输和储存的成本大约分别是300、1和60元人民币每吨<sup>[16]</sup>。虽然从长期来看,随着技术升级和商业化推进,CCUS的成本有望逐渐降低,但从中短期来看,CCUS技术的成本仍会是其推广的主要限制因素。其次,二氧化碳的储存及利用仍有很多安全性问题尚未克服。不同项目的利用率、存储方式差异很大。储层的复杂性、盖层气密性以及孔隙度和渗透率是实施中不确定性的来源,二氧化碳的注入也可能产生巨大的风险并诱发地震活动<sup>[17]</sup>。因此必须评估与地质封存潜在相关的风险和后果。最后,CCUS项目的健康环境风险尚未得到完全的评估。CCUS装置的部署通常涉及大型设施的建设,例如长输管道和CO<sub>2</sub>注入井的建造,与其他大型能源系统一样,其可能会对当地的生态环境、居民生活产生一定影响并形成潜在的生态风险。这些潜在风险不仅增加了成本,还影响了公众对CCUS的看法和接受度,从而延迟或阻止CCUS在某些地区的部署。由于我国现阶段仍无法完全实现清洁能源的全面支持,CCUS是我们实现双碳目标的重要工具。尽管该技术在部署上仍存在众多挑战,但我们还需要继续进行CCUS相关的研究和开发工作,最重要的是提高效率和降低成本。

#### 4. 农业及土壤碳汇:助力农业生产的碳汇

土壤是陆地系统中最大的碳库,经评估,地表1米深的土壤层就储存了大约15050亿吨碳,是所有生物体储存碳的2.68倍<sup>[18]</sup>。这部分碳以动植物残体、微生物生物量及其产物碳、

以及矿物碳的混合形式存在于土壤里。影响土壤碳库因素有很多,包括内源性和外源性。前者主要是土壤的固有特性和剖面特征,后者包括自然(如淋滤、水流冲刷)和人为扰动(土地开发及利用等)。农业是与之相关最紧密的产业,但由于不合理的耕种模式,例如氮肥的过量使用及频繁翻耕,导致土壤微生物呼吸速率加快,农业生产通常引起土壤碳库损失及温室气体排放,如二氧化碳和一氧化二氮。据估计,人类传统耕作农业使全球土壤碳减少了1160亿吨碳<sup>[19]</sup>。根据中国气候变化第三次国家信息通报统计,2010我国农业活动共排放8.28亿吨二氧化碳当量,是除工业与能源活动外排放最多的一项,占当年全国排放的7.85%。

为了改变农业生产的碳源属性,科学家尝试通过增高农田碳汇储量以抵消碳排放,甚至形成碳汇。提升农田土壤碳库主要通过增加碳输入来实现。增加碳输入可以通过外源添加和作物内源分泌(植物根系分泌物)的方式实现,外源添加的物质主要是农业废弃物(如动物粪便、秸秆及植物凋落物)<sup>[20]</sup>。这些废弃物原本是污染源,通过堆肥发酵等方式,这类生物质废弃物中丰富的营养元素可被植株吸收,还能提高土壤中腐殖质的含量,改善土壤的性能。另外,一些作物能通过根系分泌物释放有机物质到土壤中,包括根黏液、根系组织残渣和微生物代谢物等<sup>[21]</sup>。这些有机物质在土壤中降解和转化的过程中可以增加土壤碳含量。农业增汇一般不会选择有机碳饱和的土壤,多半是退化或枯竭的土壤。例如在美国密西西比州,自然土地由于耕种转化导致大量有机碳流失,然而在持续添加有机肥后,土壤质地与结构被改良,大量养分被土壤颗粒包裹,土壤碳含量增加30%左右<sup>[22]</sup>。有机肥的输入使得土壤碳库恢复速率超过侵蚀速率,形成稳定碳封存。更重要的是,有机碳的添加形成了一种“正反馈”,肥沃的土地促进作物光合作用,从而增加了植株向土壤输送的碳含量。意大利及西班牙的有机农业案例可以证明通过作物覆盖

的方式不仅能增加土壤有机碳含量,提高土壤的肥力和持水能力,还可以促进农业的可持续发展,减少农业对化肥和农药的依赖<sup>[23]</sup>。另一种农业碳汇的方法是往土壤中添加高稳定性的“生物炭”——一种由有机物质经过高温热解而制成的碳质物质。与所有其他类型的碳输入相比,生物炭添加不会显著增加微生物活性,并且生物炭引起的土壤碳库增加不受土壤容量的限制<sup>[24]</sup>。

### 三、深圳碳达峰成效及路径经验

#### (一) 深圳碳达峰的成效比较

在粤港澳大湾区和中国特色社会主义先行示范区“双区”建设的历史机遇下,深圳充分利用先行先试和改革创新的优势,引领城市绿色低碳发展迈向一个全新的时代。根据中国碳核算数据库数据,2019年,深圳市共排放0.44亿吨二氧化碳当量,占全国碳排放的0.45%,而2019年全市GDP产值为26992.3亿元,占全国总产值983751.2亿元的2.74%,单位GDP碳排放量远低于国家平均水平。“十三五”期间深圳全市单位GDP二氧化碳排放累计下降26.85%,超额完成“十三五”约束性考核目标。图2展示了深圳与北京、上海及广州历年来的碳排放数据。很明显,深圳全市碳排放总量显著低于其他三大城市,且2008—2019年深圳人均二氧化碳排放量均低于全国平均水平。2016年以来,深圳单位GDP能耗一直低于0.2吨每万元产值,且逐年下降。深圳2021年GDP能耗仅为0.155吨每万元产值,不到全国平均水平的三分之一。21世纪经济研究院碳中和课题组发布的《中国净零碳城市发展报告(2022)》显示,深圳以低碳排放强度高和发展质量等优势在30个城市净零碳发展水平排行中排名第一。从数据上看,深圳的低碳排放在国内处于领先水平,在国际上也与发达国家水平相当。总体来看,深圳经济增长与碳排放的关联程度在下降、脱钩,现有收入和经济结构、增长动能已经接近达峰临界点,甚

至可能就在此时此刻达峰。

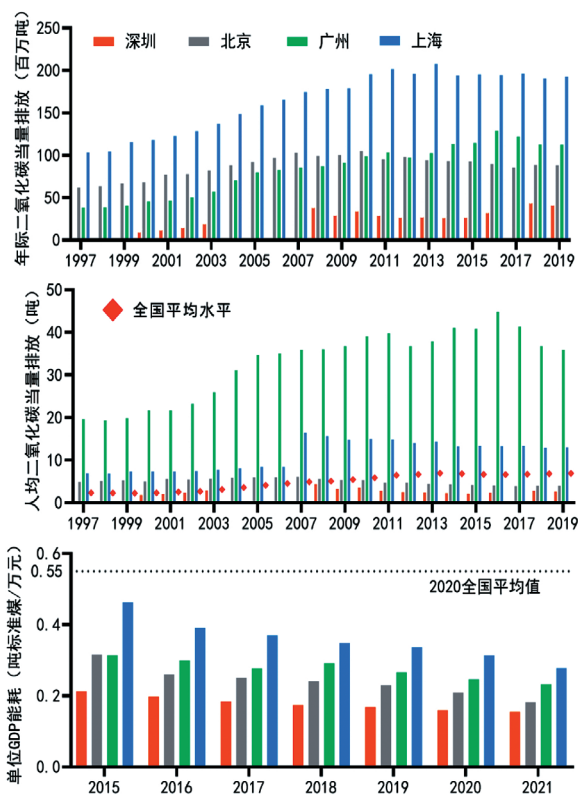


图2 历年来深圳与北京、上海及广州的碳排放情况比较

#### (二) 深圳快速碳达峰的独特路径经验

##### 1. 低碳发展,政策先行

自2010年深圳被列入国家首批“五省八市”低碳城市试点后,深圳市政府逐步明确了绿色低碳发展的指导思想、战略目标及实施路径。表2总结了2010—2022年内深圳的“双碳”政策或文件。这些政策体系设定了具体的“双碳”发展目标和指标,如减少碳排放、提高非化石能源比重、推广绿色建筑等,并涵盖了包括能源、建筑、交通在内的多个领域。深圳的低碳政策体系注重技术创新和绿色产业发展的支持。通过扶持绿色低碳产业和推动碳排放权交易,深圳政府鼓励企业和机构在低碳技术研发、能源节约和环境保护等方面进行创新,推动新技术、新产品和新模式的应用。这些政策体系加强了碳排放的管理和监督机制,包括碳排放量化、报告、核查等要求,有助于确保减排行动得到有效执行和监督,逐步实现最终的“双碳”目标。

## 2. 动态优化产业结构, 构建绿色现代产业体系

早在20世纪末, 深圳就开始进行产业升级, 在全国率先发展高新技术产业。围绕清洁生产 and 循环经济等低碳发展目标, 目前深圳已完成淘汰落后产能, 将高端制造和金融服务等产业作为经济支柱, 构建绿色现代产业体系。从产业结构看(图3), 以服务业为主的第三产业占比在近20年不断增加, 在2009年时突破50%, 在2018年时突破60%<sup>[25]</sup>。尤其是从2019年起, 深圳地区生产总值增量的70%都是由第三产业贡献。相反, 深圳市GDP工业占比在2005年左右达到峰值(50.75%)后就逐年下降, 2015年跌破40%, 2021年工业占比仅为33.77%。值得注意的是, 深圳第三产业中金融行业发展迅速, 2005年其GDP贡献比仅为6%, 而2021年其贡献比已超过15%, 近10年产值平均增速接近20%。在深圳市福田区, 金融机构总部高度聚集, 目前共有银行、证券、基金、保险、期货等金融机构总部110家。同时深圳也是本土创投机构的“总部基地”, 全国三分之一的创投机构在深圳, 其中80%在福田区, 其中包括全国最大的创投机构“深圳创投集团”<sup>[26]</sup>。这些第三产业的经营收益率高, 且不依赖于大量的物质和能源输入, 成为深圳低碳经济的重要支柱。

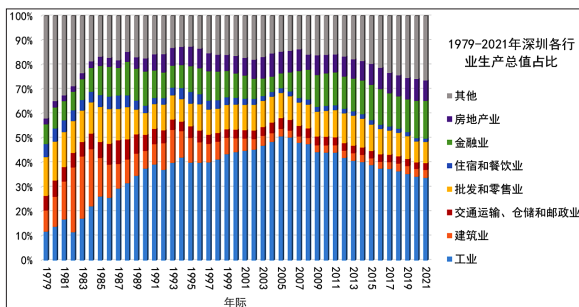


图3 1979-2021深圳各产业生产总值占比图

深圳持续推动工业行业优化升级, 高端产业持续快速发展。其中先进制造业和高技术制造业的优势突出, 占规模以上工业比重分别为72.5%和66.1%。据深圳商报报道, 2020年医疗仪器设备及器械、3D打印设备、民用无人机、化学药品原药、金属切削机床、工业机器人分别增长200.3%、144.8%、111.1%、82.8%、65.4%、

44.1%<sup>[27]</sup>。在这些先进制造业快速增长的背后, 是深圳对创新驱动发展战略的始终坚持。多年来, 深圳充分发挥科技创新对产业升级的积极作用, 通过技术上的创新实现提质增效。统计数据显示, 2022年深圳企业研发投入占全社会研发投入比重高达94.0%; 深圳企业投入基础研究经费占全国企业基础研究经费的47.9%, 连续多年排名居全国首位。如今, 以先进制造业为代表的深圳战略性新兴产业正在形成强劲的低碳发展动能。

## 3. 能源系统低碳化改革, 降低碳排放

为了减少对传统化石能源的依赖, 深圳通过开发清洁能源持续推进电力系统的深度低碳化。液化天然气、核能和进口电力贡献了深圳83%的电力。深圳共有3座核电站(大亚湾、岭澳一期、岭澳二期)和6兆瓦机发电机组在役, 年发电量达到4500万千瓦时。在新开发的电力供应系统中, 深圳还注重发展垃圾发电和热电联产等新兴能源, 实现能源供应的多元化。截至2020年, 深圳的可控发电装机容量达到1274.11万千瓦, 其中清洁能源占比超过60%。新增发电容量中, 水力发电增加了11.5万千瓦, 风力发电增加了197.03万千瓦, 垃圾发电增加了13.10万千瓦, 热电联产项目增加了5万千瓦。随未来技术进一步迭代更新, 深圳的能量供应主体有望转化为可再生能源, 并发挥新能源在电力系统的主导作用。

在交通方面, 深圳是全球最大的电动汽车制造商比亚迪的总部所在地。由于免费车牌的促销政策、市场条件和新能源汽车产业链的完善, 深圳在新能源汽车的发展方面处于领先地位, 并于2009年被选为电动公交试点城市。根据2017年12月公布的统计数据, 深圳已经将巴士车队(16,359辆)全部转为纯电动车型, 超过了其他世界城市的电动公交车数量<sup>[28]</sup>。截至目前, 深圳所有公共汽车和出租车已全部实现电力驱动。电动汽车使用电池驱动电动机, 不像传统燃油车辆产生尾气排放, 大大降低了交通运输产生的温室气体排放。

#### 4. 碳交易市场与低碳试点

深圳率先在全国启动碳市场试点,最早建立国内最完整的碳交易法律制度,为全国碳市场建设提供深圳方案。通过设立碳排放配额和交易机制,碳市场机制激励深圳企业减少温室气体排放量。企业可以根据自身碳排放情况购买或出售碳配额,这种市场机制激励企业采取更多低碳措施,推动绿色技术的应用和创新,从而实现减排目标。在管控单位基数大、覆盖行业多且中小型制造业企业占比高的情况下,深圳碳市场履约率始终保持99%高位水平,2020年度达100%。深圳碳市场现有管控单位706家,覆盖制造业、电力、水务、地铁等31个行业,碳市场履约率始终保持99%高位水平。截至2020年底,深圳碳交易配额总成交量5806万吨,总成交额13.78亿元,市场流动性居全国试点碳市场首位<sup>[29]</sup>。

总的来看,深圳通过制度创新和技术创新在全国诸多超大型城市中率先完成“碳达峰”目标。此路径下,城市达峰之后的平台期会更短,将紧接着进入“双碳”工作的固碳阶段。与碳达峰阶段“提质增效”的发展目标不同,下一阶段的主要目标是通过吸收和储存CO<sub>2</sub>等温室气体来增加碳汇从而抵消自身的碳排放,实现净零排放。

### 四、深圳未来推进“双碳”工作面临的主要挑战与路径启示

以深圳为代表的一系列超大型城市是我国最重要的经济引擎之一,其发展范式反映了中国近40年来的经济产业模式。然而,如今碳中和的目标要求城市改变发展模式,使发展与碳排放控制相协调,这对深圳及所有超大型城市来说都是一个巨大的挑战。

#### (一) 深圳推进“双碳策略”面临的主要挑战

首先,带来深圳未来发展目标的转变和调整。深圳推进“双碳策略”面临的首要问题是发展目标的转变。过去,深圳乃至全国都以高

速发展为目标,将利润和效益置于首位,以能源供给为主要动力。然而,面对全球气候变化和环境问题,深圳必须改变发展理念,将“绿色成本”融入经济增长,实现环保、低碳、可持续发展。目前工业GDP仍占深圳全市总产值的40%以上,深圳仍需要继续引导企业进行技术改造和转型升级,推动传统工业向智能制造、高新技术产业和绿色产业的转型。在技术引导层面,深圳应加强对CCUS技术开发的扶持,针对深圳支柱产业(如电子制造)发展相关配套技术,从而降低工业碳排放。此外,能源方面,2021年深圳电热生产供应业的原煤使用量达到753万吨,相较于2020年持续上升,因此,深圳需要进一步完善以新能源为核心的电力系统。当前,发电系统的改革未能全面涵盖用电系统的各项服务,包括调峰、调频、调压、备用等辅助服务,因此需要鼓励需求和负荷侧资源参与整体电力系统的升级。

其次,对深圳的固碳体系建设和生态支撑形成挑战。深圳推进“双碳策略”面临的第二大挑战是缺乏一个完善的碳固定体系或流程。目前尚缺乏一个系统性的碳固定体系,碳中和的实施相对分散,因此需要更好地整合资源和掌握碳固定的有效方法。尤其是,深圳地区的土地资源相对有限,土地利用需要精心规划,以减少不必要的土地开发和生态系统破坏,同时将碳固定的潜力最大化。此外,深圳还需要持续加大对自然生态系统的保护和恢复,特别是对湿地和红树林等敏感生态系统的保护,以保存现有的碳库。

再次,带来深圳新型碳汇农业开发与发展的挑战。深圳需探索基于农业土壤碳汇的新型农业发展模式,通过与周边城市的紧密协作,深圳可以更好地利用区域内的资源,共同推动碳汇农业的发展。深圳在一些领域已经采取了先进的碳减排措施,而周边城市则拥有其他资源和条件,如更多的土地、农业资源或更适宜的气候,这有助于发展碳汇农业。通过合作,深圳可以分享经验和技術,帮助周边城市更快地



实现碳中和目标，同时也能够从周边城市的碳汇农业项目中受益，以填补在碳排放方面的不足之处。这些问题都需要深圳在碳中和路径上积极应对，以推动城市向更加可持续和低碳的未来迈进。

## (二) 深圳“双碳策略”的路径启示

深圳的“碳达峰”经验不仅将深刻影响深圳的未来发展，还将对全球其他超大型城市在实现碳中和目标方面提供深远的启发。具体可概括为以下三点。

第一，以绿色发展推进“双碳目标”实现。继续推动绿色能源与工业产业转型，落实能源消费强度和总量双控制度。实施碳中和目标必然需要采取一些限制性措施，这可能对某些传统高耗能、高排放行业的发展产生一定影响。例如，火力发电和水泥行业等碳密集型产业的总成本会因减排措施的增加而上升。这些行业可能面临技术更新、产业结构调整 and 能源转型等挑战。然而，需要认识到，这些限制性措施是促进绿色经济发展、改善生态环境的必要举措，也是向可持续发展转型的重要一步。

第二，强化生态固碳顶层设计与政策支撑。推动技术研发应用与服务保障。深圳政府在碳中和努力中发挥了积极作用，其政策引导和政府与企业、社会组织之间的多元合作为其他城市提供了成功的治理范本，突显了政府在碳中和过程中的关键作用。深圳政府采取了一系列措施，包括全面的政策和规划制定，确保各个产业部门都能采取有效的碳减排措施。这些政策要灵活适应科技发展的动态变化和经济发展的需求，以确保碳中和目标的实现。此外，政府还鼓励企业和研究机构之间的合作，共享资源和知识，加速科技成果的转化和应用，以促进环保技术更快地投入市场和实际应用。为了支持环保产业的发展，政府提供了相应的补贴和奖励政策，鼓励企业参与生态固碳项目。监管和评估工作也得到了加强，以确保各项生态固碳措施的有效实施，并及时根据实际情况进行政策调整。深圳的政府部门在碳中和努力

中展现了坚定的决心和有效的治理能力，为其他城市提供了可借鉴的经验，指明了碳中和路径的发展方向。

第三，推动生态固碳技术研发与推广应用。深圳拥有十分珍贵的林业及海洋资源，截至2020年深圳市共有森林78054公顷，森林覆盖率达39.1%，其中还有大片的红树林资源。这些系统中储存大量来自陆地或者海洋的碳素。深圳开展了大量生态修复工程，并通过限制或改变环境开发模式，降低森林及海洋碳汇损失。比如，福田深圳湾红树林是处于深圳湾腹地的红树林湿地系统。通过进行生态修复与监测，有效恢复红树林湿地功能，并服务鸟类栖息和城市可持续发展。深圳市制定了合理的土地规划和利用政策，深入优化开发模式，避免了不必要的土地开垦和破坏。深圳应继续采取可持续土地管理方法，例如集约化发展城市绿化，以减少土地开发对生态系统的破坏。

## 参考文献：

- [1] YU G, ZHU J, XU L, et al. Technological approaches to enhance ecosystem carbon sink in China: Nature-based solutions[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 490-501.
- [2] ROGELJ J, DEN ELZEN M, HOHNE N, et al. Paris agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 degrees C[J]. Nature, 2016, 534(7609): 631-639.
- [3] 马新萍. 非化石能源发电装机占比提高到51.9%! 《2023年能源工作指导意见》发布[N]. 中环报, 2023-04-14(9).
- [4] 孙婷. 国际大城市交通碳中和实现路径及启示——以伦敦、纽约和巴黎为例[J]. 规划师, 2022, 38(6): 144-150.
- [5] 比尔盖茨. 气候经济与人类未来[M]. 北京: 中信出版社, 2021: 53.
- [6] ALPER E, YUKSEL O. CO<sub>2</sub> utilization: Developments in conversion processes[J]. Petroleum, 2017(3): 109-126.
- [7] LIU S L, DONG Y H, LIU H, et al. Review of valuation of forest ecosystem services and realization approaches in China[J]. Land, 2023, 12(5): 1102.
- [8] WANG Y, GUO C H, CHEN X J, et al. Carbon peak

- and carbon neutrality in China: Goals, implementation path and prospects[J]. *China Geology*, 2021(4): 720-746.
- [9]WANG J, FENG L, PALMER P I, et al. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data[J]. *Nature*, 2020, 586(783): 720-723.
- [10]谢君毅, 徐侠, 蔡斌, 等. “碳中和”背景下碳输入方式对森林土壤活性氮库及氮循环的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(2): 1-11.
- [11]MCLEOD E, CHMURA G L, BOUILLON S et al. A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO<sub>2</sub>[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(10): 552-560.
- [12]DUARTE C M, MARBÀ N, GACIA E, et al. Seagrass community metabolism: Assessing the carbon sink capacity of seagrass meadows[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24(4): 4032.
- [13]GONNEEA M E, PAYTAN A, HERRERA-SILVEIRA J A. Tracing organic matter sources and carbon burial in mangrove sediments over the past 160 years[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2004, 61(2): 211-227.
- [14]GEORGE M, WEISS R G. Chemically reversible organogels via “latent” gelators. Aliphatic amines with carbon dioxide and their ammonium carbamates[J]. *Langmuir*, 2002, 18(19): 7124-7135.
- [15]赵小令, 肖晋宇, 侯金鸣, 等. 中国二氧化碳捕集利用和封存技术经济性与规模预测[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(3): 657-668.
- [16]GUO J X, HUANG C. Feasible roadmap for CCS retrofit of coal-based power plants to reduce Chinese carbon emissions by 2050[J]. *Applied Energy*, 2020, 259(1): 114112.
- [17]HILLEBRAND M, PFLUGMACHER S, HAHN A. Toxicological risk assessment in CO<sub>2</sub> capture and storage technology[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016, 55(12): 118-143.
- [18]BATJES N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(2): 10-21.
- [19]SANDERMAN J, HENGL T, Fiske G J. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(36): 9575-9580.
- [20]LAL R. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(8): 3285-3301.
- [21]HE W T, GRANT B B, JING Q, et al. Measuring and modeling soil carbon sequestration under diverse cropping systems in the semiarid prairies of western Canada[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 328(15): 129614.
- [22]KIRKELS F, CAMMERAAT L H, KUHN N J. The fate of soil organic carbon upon erosion, transport and deposition in agricultural landscapes —A review of different concepts[J]. *Geomorphology*, 2014, 226(1): 94-105.
- [23]BEGUM K, ZORNOZA R, FARINA R, et al. Modeling soil carbon under diverse cropping systems and farming management in contrasting climatic regions in Europe[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10(1): 819162.
- [24]WANG J Y, XIONG Z Q, KUZYAKOV Y. Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2016, 8(3): 512-523.
- [25]深圳市统计局. 深圳统计年鉴(2022) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [26]卢晓莉. 深圳创投机构数量占全国三分之一[N]. *深圳晚报*, 2012-11-04(7).
- [27]贾婧媛, 甘雄. 2020年深圳地区生产总值27670亿元 2020年增速3.1% [N]. *深圳商报*, 2021-06-18(9).
- [28]ZHOU Y K. Energy sharing and trading on a novel spatiotemporal energy network in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Applied Energy*, 2022, 318(15): 119131.
- [29]窦延文. 2020年度深圳碳排放履约工作顺利完 成 687家碳排放管控单位100%履约[N]. *深圳特区报*. 2021-08-10(11).

【责任编辑 许鲁光】

## Dual Carbon Development Experience and Path of Megacities: A Case Study of Shenzhen

CAI Zhonghua, YAN Qi & FAN Weijun

**Abstract:** Efforts to achieve carbon peak by 2030 and carbon neutrality by 2060 represent China's solemn

(下转第95页)