

文章编号: 1671-6612 (2025) 06-930-07

# 建环专业“双碳”知识谱系构建与教学实践

庄兆意 张 蕾 房馨玮 崔 萍

(山东建筑大学 济南 250101)

**【摘要】** 在全球气候治理与“双碳”目标驱动下,暖通空调行业作为建筑能耗核心领域亟需深化低碳转型。为强化建环专业学生对“双碳”概念、碳核算、低碳技术及市场机制等知识的系统认知,构建了“基础理论-碳排放管理-技术应用-政策机制”四维知识谱系,推动“双碳”目标与建环专业教育的深度融合。通过模块化教学、案例实践、技术仿真与碳交易市场模拟,培养兼具理论素养与实践能力的复合型人才。提出“双碳”人才培养需要打破学科壁垒,促进产学研协同,通过动态更新教学内容与创新教学方法,助力教育链与产业链衔接,为行业低碳转型提供人才保障与技术支撑。

**【关键词】** 双碳目标; 产学研协同; 知识谱系; 低碳技术

中图分类号 G642.0 文献标志码 A

## "Dual Carbon" Knowledge System Development and Pedagogical Implementation in Building Environment & Energy Engineering

Zhuang Zhaoyi Zhang Lei Fang Xinwei Cui Ping

(Shandong Jianzhu University, Jinan, 250101)

**【Abstract】** Driven by global climate governance and the "Dual Carbon" goals, the HVAC industry, as a core sector of building energy consumption, urgently needs to accelerate its low-carbon transition. To enhance building environment and energy-related students' systematic understanding of "Dual Carbon" concepts, carbon accounting, low-carbon technologies, and market mechanisms, this study constructs a four-dimensional knowledge framework encompassing "basic theory-carbon emission management-technological application-policy mechanisms," promoting deep integration between Dual Carbon objectives and professional education. Through modular teaching, case-based practices, technical simulations, and carbon trading market simulations, this approach cultivates interdisciplinary talents with both theoretical expertise and practical capabilities. The paper emphasizes that cultivating Dual Carbon professionals requires breaking disciplinary barriers and fostering industry-academia-research collaboration. By dynamically updating teaching content and innovating pedagogical methods, it facilitates the connection between educational chains and industrial ecosystems, providing talent support and technical guarantees for industrial low-carbon transformation.

**【Keywords】** Dual carbon goals; Industry-academia-research Collaboration; Knowledge framework; low-carbon technologies

基金项目: 山东省本科高校人工智能赋能重点领域教学改革“111计划”项目(D2024008):“智慧能源,低碳冷暖”山东省建筑环境与能源应用工程专业高质量发展共同体建设;山东省高等教育学会高等教育研究专项本科重点课题:基于“双碳知识谱系-课程讲碳理念”的建环专业“双碳”人才培养模式研究与实践;山东建筑大学本科教改项目:“构建双碳知识谱系,贯穿课程讲碳理念”的建环专业课程体系改革与实践

作者(通讯作者)简介:庄兆意(1982.11-),男,博士,副教授, E-mail: hit6421@126.com

收稿日期: 2025-05-14

## 0 引言

当前全球气候变化问题日益紧迫, 我国提出“碳达峰”“碳中和”(“双碳”)目标, 力争2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和, 已成为推动绿色转型的核心战略<sup>[1]</sup>。建筑运行碳排放占全国能源相关碳排放总量的21.7%, 其中暖通空调系统作为能耗主力, 通常消耗建筑60%以上能源, 是节能降碳的关键领域<sup>[2]</sup>。因此急需培养既懂理论知识又有实践能力的新型人才。

然而, 当前建环专业的教学内容与实际行业需求存在脱节, 政策导向与技术应用之间的协同性亦有待加强。针对这种情况, 我们需要为暖通空调专业建立完整的“双碳”知识体系。这项工作不仅关系到应对气候变化的技术需求, 更是让教育体系与产业发展紧密结合的重要举措。本研究聚焦暖通空

调行业, 围绕“双碳”目标构建了四维实施体系, 旨在指导建环专业本科课程(特别是面向大三、大四的高年级课程)的改革与内容整合。本文从基础理论、碳排放控制、技术革新和政策机制四个层面展开系统分析, 从理论到实践, 由浅入深的帮助学生构建“双碳”知识谱系, 把低碳理念贯穿到教育教学各个环节, 为暖通空调行业转型提供有力的人才保障。

## 1 “双碳”知识谱系的构建

为实现“双碳”目标与建环专业教育的深度融合, 本文从“基础理论-碳排放管理-技术应用-政策机制”四维框架出发, 构建系统性知识谱系。四维协同形成“理论-实践”闭环, 为培养复合型人才、助力行业低碳转型提供结构化支撑。



图1 四维框架的“双碳”知识谱系

Fig.1 The four-dimensional knowledge framework for dual carbon goals

### 1.1 基础理论层

#### 1.1.1 “双碳”的内涵

为应对全球气候问题, 中国2020年提出“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”战略, 正式将低碳能源转型上升为国家顶层设计。“碳达峰”是指化石燃料使用导致的CO<sub>2</sub>的排放量达到峰值后将持续下降的“拐点”。但并非指的是简单的总量“封顶”, 而是通过产业结构调整, 清洁能源发展和节能减排技术创新等手段, 推动碳排放强度的相对峰值, 并将会持续下降。“碳中和”是指化石燃料的使用及土地利用变化导致的碳排放量, 通过生态系统中的碳汇及创新技术吸收利用转化来抵消人为的碳排放, 实现“净零碳排放”, 强调“排放=吸收”的动态平衡。

#### 1.1.2 碳计量与碳监测

碳计量可以通过排放因子法和质量平衡法等来计量人类工业活动中向地球直接和间接排放的CO<sub>2</sub>, 建筑碳排放计量主要还是依靠建立健全有关碳排放计算的标准。我国正加速构建“双碳”计量体系, 通过制定国家规范、建立碳计量基准与量值传递网络、强化碳测量设备校准, 确保碳排放数据精准可靠。碳监测目前可以两种方法进行, 一是根据化石燃料的消耗量乘以排放因子得到; 二是根据现场监测法, 对排放物的浓度和碳排放量等进行连续监测和实时传输计算。

### 1.2 碳排放管理与实践层

#### 1.2.1 建筑碳排放计算核算基础

笔者参与了山东省《建筑碳排放计算核算标

准》(下面简称为山东《碳核标》)的编写,根据该标准可以课堂展示碳排放核算边界、碳排放因子设定与碳排放计算公式。

### (1) 建筑碳排放边界

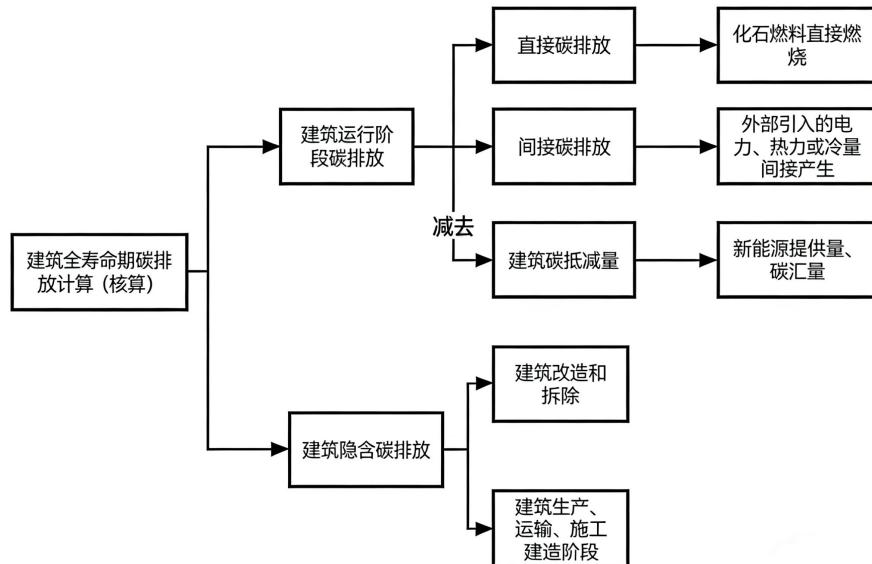


图2 建筑全寿命期碳排放计算(核算)

Fig.2 Carbon emissions calculation (accounting) for the entire life cycle of buildings

### (2) 碳排放因子

碳排放量的计算与核算方法模型主要有3种,分别是排放因子法、质量平衡法和实测法,而建筑领域广泛采用排放因子法。采用排放因子法的关键在于碳排放活动水平数据和碳排放因子的确定,即公式为:

$$\text{GHG排放量} = \text{活动数据(AD)} * \text{排放因子(EF)} \quad (1)$$

式中: GHG排放量为温室气体排放量,这里特指CO<sub>2</sub>排放量; 活动数据(AD)为计算某建筑使用环节利用的能源单位时间消耗量,如供暖通风与空调第某类能源年消耗量(能源单位/a); 碳排放因子为表征建筑单位活动水平数据产生的碳排放量的系数。碳排放因子是量化单位建筑活动碳排放的核心参数,其取值因建筑全寿命期各阶段特性差异呈现“非标准化、难以复制重现”的特征,也会随着技术、政策等要求定期更新。

#### 1.2.2 建筑运行阶段碳排放计算

暖通空调领域直接影响建筑运行碳排放,涵盖暖通、供水、炊事等系统能源消耗,山东《碳核标》为提升数据精度,将非供暖空调动力用电、炊事能

山东《碳核标》将建筑碳排放分为建筑运行碳排放(直接碳排放与间接碳排放)和建筑隐含碳排放,最后计算建筑全寿命期碳排放需要减去建筑碳抵减量后得到最终值。

耗等纳入核算。掌握运行阶段碳排公式,可指导学生针对性优化设备能效,减少暖通系统能源浪费,支撑建筑“双碳”目标实现。

建筑运行阶段应对直接碳排放量和间接碳排放量分别进行计算。

$$C_{\text{zj}} = C_{\text{hvaczj}} + C_{\text{wzj}} + C_{\text{kg}} \quad (2)$$

$$C_{\text{jj}} = C_{\text{hvacjj}} + C_{\text{wjj}} + C_{\text{ke}} + C_{\text{le}} \quad (3)$$

式中:  $C_{\text{zj}}$  为建筑运行直接碳排放量, tCO<sub>2</sub>e/a;  $C_{\text{hvaczj}}$  为供暖通风与空调直接碳排放量, tCO<sub>2</sub>e/a;  $C_{\text{wzj}}$  为生活热水直接碳排放量, tCO<sub>2</sub>e/a;  $C_{\text{kg}}$  为建筑炊事用气碳排放量, tCO<sub>2</sub>e/a;  $C_{\text{jj}}$  为建筑运行间接碳排放量, tCO<sub>2</sub>e/a;  $C_{\text{hvacjj}}$  为供暖通风与空调间接碳排放量, tCO<sub>2</sub>e/a;  $C_{\text{wjj}}$  为生活热水间接碳排放量, tCO<sub>2</sub>e/a;  $C_{\text{ke}}$  为全电厨房炊事用电碳排放量, tCO<sub>2</sub>e/a;  $C_{\text{le}}$  为照明插座与电梯碳排放量, tCO<sub>2</sub>e/a。

### 1.3 技术应用层

技术应用层是双碳知识谱系的核心实践环节,聚焦于将理论转化为可操作的低碳技术,助力暖通空调领域实现高效降碳,以下列举了部分关键技术与碳排放量计算。

### 1.3.1 相变储能技术

相变储能技术主要是依靠相变材料(PCM)来实现的, PCM具有在吸热或放热时能保持温度稳定的特性, 可用于调节建筑内部温度环境以提升能源效率。当室内温度升高时, PCM能够通过吸收空气中的多余热量, 在温度下降时释放存储的热量, 来帮助维持恒温环境<sup>[3]</sup>。例如, 如张云峰团队<sup>[4]</sup>研发的含石蜡基PCMs的微胶囊复合涂料可吸收或释放热量, 维持室内恒温环境, 减少温度波动。推广PCM技术能降低建筑对空调、暖气的依赖, 减少化石能源消耗及碳排放, 助力实现“双碳”目标。

### 1.3.2 碳捕集、利用与封存技术

碳捕集、利用与封存(CCUS)技术是应对气候变化、实现碳中和的关键手段。碳捕集主要通过燃烧前、中、后三种方式从工业排放或大气中捕获二氧化碳, 其中燃烧后技术较成熟但能耗较高。捕集的二氧化碳可通过罐车、管道或船舶运输, 再与可再生能源结合转化为合成气、甲烷、甲醇等高附加值产品; 封存则指将无法利用的二氧化碳安全封存于地下或海底<sup>[5,6]</sup>。目前全球已有多个示范项目将二氧化碳转化为能源或材料, 但仍面临成本高、催化剂效率低及标准缺失等问题。未来需加快技术研发、建立标准并加强政策支持, 以加速CCUS大规模应用<sup>[7]</sup>。

### 1.3.3 太阳能耦合空气源热泵技术

禽畜养殖棚热负荷高且呈周期性变化, 波动幅度较大, 对供暖系统可靠性和稳定性要求更高。在供暖季太阳能保证率超过50%的情况下, 将太阳能集热系统与空气源热泵结合辅以相变蓄热, 可以减少热泵系统供热负担。相变蓄热箱的存在减少了空气源热泵的供热份额和开启时间, 提高了热泵的蒸发温度和运行能效, 缓冲了太阳辐射变化对系统运行的影响。相较于较单一空气源热泵系统能耗降低了37%, 可以减少畜牧业中的人为碳排放<sup>[8]</sup>。

### 1.3.4 能源调控技术

目前, 新能源与储能技术发展迅速, 但要更进一步节约能源, 减少碳排放, 则需要根据电网的承载能力和用户的用能特点来聚合调控。例如, 张伟等人<sup>[9]</sup>, 提出了一种考虑温控负荷聚合调控的新能源-储能联合规划方法, 旨在提升配电网承载能力并降低碳排放。研究通过建立温控负荷的热力学模

型, 分析其与储能的协同作用对电网潮流均衡的影响, 验证结果表明, 协同运行储能与温控负荷能有效均衡电网潮流分布, 使新能源渗透率提高4.62%, 同时减少碳排放, 为新型电力系统低碳规划提供了技术支撑, 符合“双碳”的总体目标。

## 1.4 政策管理层

政策管理层是“双碳”目标实现的制度保障, 知识和技术能够进入市场, 还需要通过政策工具引导, 以下是部分重要政策解读。

### 1.4.1 碳交易与市场机制

#### (1) 碳交易

碳交易本质是由于在排放总量控制的前提下, 包括二氧化碳在内的温室气体排放权成为一种稀缺资源, 从而具备了商品属性。生态环境部2020年出台《碳排放权交易管理办法(试行)》, 明确国家配额综合考虑各种因素制定分配方案, 以免费分配为主、根据国家有关要求适时实行有偿分配。2021年全国碳市场正式运行, 山东首批控排企业占比15.3%居各省之首, 通过配额盈余可交易, 超出配额进行处罚, 以激励试点企业主动减少碳排放, 低成本实现减排目标, 效果显著<sup>[10]</sup>。

#### (2) 碳市场

《全国碳市场发展报告(2024)》指出, 2021年全国强制碳市场运行后, 2024年全国温室气体自愿减排交易市场(即自愿碳市场)启动, 形成“双碳”双轨政策。强制碳市场管控重点排放单位, 自愿碳市场激励全民参与, 两者独立但通过配额抵销机制衔接。强制碳市场已建立数据核算、配额交易与监管体系, 自愿碳市场仍在完善。碳交易机制驱动企业研发节能技术以获取配额盈余, 同时倒逼高耗能企业转型或淘汰, 促进良性竞争循环, 推动行业低碳转型<sup>[11]</sup>。

### 1.4.2 政策解读

为了促进“双碳”理念进入课堂, 了解国家的政策方案, 就是了解建立教育新型体系的大方向, 本部分主要围绕政策对于暖通空调领域的要求做出的解读。

#### (1) 《十四个五年规划和二〇三五年远景目标》

政策明确了“能源配置优化、利用效率提升”要求, 推动暖通空调教育强化“双碳”知识体系, 在专业课程中系统性融入能源效率与碳排放关联

分析,支撑技术创新。强调新能源、绿色环保等战略性新兴产业与生产要素协同,这对暖通空调领域的教育提出了新的要求,需要加快“双碳”进入课堂,加速大数据、区块链、氢能、储能等前沿科技变革,推进传统与新型基础设施的建设,加快打造系统完备、绿色安全的智能现代化基础设施体系。可以发展第三方大数据平台,建立碳排放计算平台,并在此基础上耦合各种模型,增加对碳排放的边缘化计算,为“中和”碳排放制定针对性措施做出贡献。

### (2) 《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》

文件表示,将绿色低碳纳入国民教育体系,在暖通空调领域,需要强化学生全对国家低碳发展目标及行业发展趋势的认知,引导学生践行低碳实践,推动与能源有关的各产业朝着低碳高效的方向

发展。需要重点发展可再生能源(如太阳能、地热能等)与节能技术(如污水源热泵、建筑光伏等),推动建筑用能结构优化。同时,强调跨学科技术融合,让学生为未来投身行业发展做好各类知识储备。

### (3) 《高等学校碳中和科技创新行动计划》

为做好碳达峰、碳中和工作提供科技支撑和人才保障,就要求在暖通空调领域教育方面,高校应加强与多学科的融合,推动碳中和相关交叉学科与专业建设。这就需要推动暖通与人工智能、互联网深度融合,培养智能化系统优化能力。

上述三大政策文件均强调,实现“双碳”目标亟需打破学科壁垒,构建交叉融合的教育体系,系统性培养兼具低碳理念、数字技能与产业视野的复合型人才,支撑新型能源体系与绿色产业生态建设。

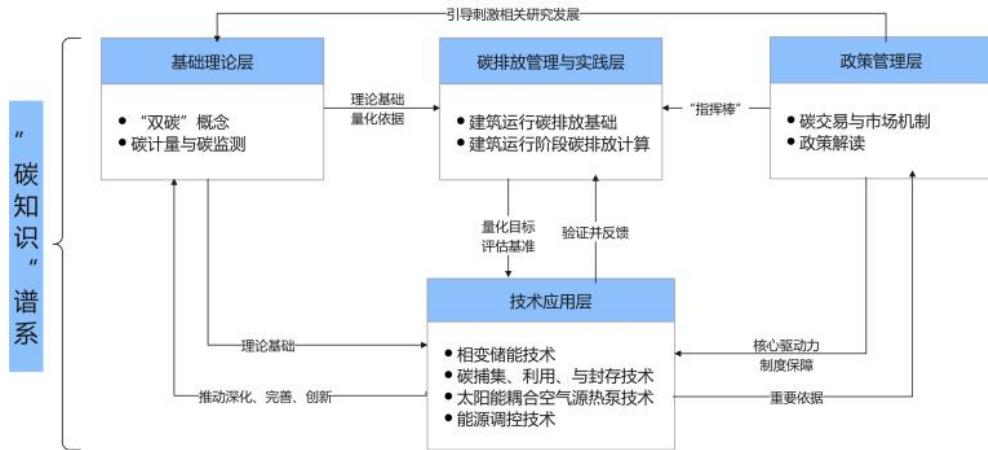


图3 “双碳”知识谱系四维动态知识闭环框架

Fig.3 Four-dimensional dynamic closed-loop knowledge framework for "dual carbon" goals

#### 1.5 各层之间关系

图1所示的四维知识谱系并非孤立模块的简单叠加,而是通过紧密的相互作用形成动态闭环(见图3),共同支撑“双碳”目标的系统性实现。

(1) 基础理论层是根基:该层奠定的“双碳”概念内涵、碳计量原理与监测方法是整个知识体系的科学基础。它为碳排放管理层提供了核算依据,为技术应用层指明了原理和量化了目标,同时也是理解政策管理层中市场、制度安排的知识前提。

(2) 碳排放管理层是桥梁:该层承上启下,将基础理论转化为具体的核算标准与实践方法。一方面将基础理论层的计量方法应用于建筑领域的具体核算;另一方面为技术应用层的低碳技术提供

减排目标设定与效果量化评估的依据;同时,其核算结果也是政策管理层制定规则的数据基础。

(3) 技术应用层是核心实践:该层聚焦于将理论知识与管理工具转化为实际的低碳解决方案。基于基础理论层和碳排放管理层的指导,应用具体低碳技术实现减排目标。其技术应用的成效反馈至碳排放管理层以验证和修正核算方法,其技术成熟度与成本效益则为政策管理层的技术推广、调整市场机制政策制定提供关键支撑。

(4) 政策管理层是顶层驱动与保障:该层为整个知识体系的落地应用提供制度环境和驱动力。通过碳交易、政策法规等工具,直接规范和驱动碳排放管理层的核算要求与技术应用层的技术研发、

推广与应用方向;同时,政策目标也间接引导基础理论层的研究方向;且政策效果最终通过技术应用层的实践和碳排放管理层的数据得到反馈和评估。

理解并强化这四个维度间的内在关联,是教学改革的关键。教学设计需打破传统课程壁垒,在传授各层知识点的同时,着重引导学生认识“理论指导实践、实践反馈理论”“管理量化目标、技术实现目标”“政策驱动创新、创新支撑政策”的动态循环逻辑。通过案例串联各层教学、项目驱动学生深入学习等,让学生在实践中体验四维互动的完整链条,培养其系统性思维和解决复杂“双碳”问题的综合能力。

## 2 “双碳”目标的教学实践

为实现“双碳”目标与建环专业教育的深度融合,需从四大层级重构课程体系:基础理论层、碳排放管理与实践层、技术应用层、政策管理层,构建“理论-实践-创新-政策”四维闭环教学模式。该教学模式的有效实施依赖于对现有建环专业核心课程的改革与整合,主要面向具备一定专业基础的高年级本科生,也就是大三、大四的学生。

### 2.1 基础理论层: 理解“双碳”核心概念

在建环专业课程中,基础理论层的融入需通过模块化教学实现“双碳”概念的全面渗透。首先,在基础课程中,如《建筑环境学》等中应增设“双碳”“科学基础”专题,大概3-4课时,结合《巴黎协定》与我国“双碳”目标的政策背景,通过全球气候变暖的动力学模型引入“双碳”目标的科学依据,结合中国碳排放现状,分析建筑领域在能源消耗中的占比及其减碳潜力。在《建筑节能新技术》等课程中引入碳计量与碳监测模型,设置实践课程,让学生小组去实时监测某房间的空调、照明等设备的能耗数据,结合碳排放因子计算实时排放量。让学生不仅能掌握碳排放核算的逻辑,还能直观感知“双碳”目标的紧迫性与实践意义,这样在建环专业的基础课程中将基础理论层和碳排放管理与实践层进行串联,建立专业基础支撑。

### 2.2 碳排放管理与实践层: 培养计算能力

在碳排放管理实践层,课程需聚焦碳排放核算与优化技术的实操能力培养,在课程中嵌入山东《碳核标》的核算框架,详细讲解建筑全寿命期碳排放边界划分。在《建筑节能新技术》《暖通空调

系统设计》等课程中,课程需聚焦碳排放核算与优化技术的实操能力培养,可以通过案例教学来解析碳排放与气候变化的关系,探讨电力碳排放因子的动态调整逻辑,通过区域电网能源结构案例分析,使学生理解“因地制宜”精准核算的重要性;可要求学生对老旧教学楼使用专业软件(如EnergyPlus等)模拟建筑运行能耗,提出涵盖设备升级、可再生能源利用、智能调控的改造方案,并撰写技术经济性报告。此过程不仅锻炼学生的跨学科协作能力,还能推动校园实际减排,形成“学以致用”的正向循环。

### 2.3 技术应用层: 学习创新技术

在《建筑节能新技术》等课程中,可以设计以“相变储能材料”和“CUSS技术”为案例,结合文献讲解技术原理,并通过仿真软件(如EnergyPlus等)模拟技术应用的节能效果。同时,低碳技术的教学需突破课堂边界,通过学科竞赛和前沿技术研讨激发学生的创新思维。积极组织“零碳校园设计大赛”等实践项目和科研项目,引导学生整合太阳能耦合热泵、地源热泵及智能微电网技术,构建教学楼碳中和能源系统。在《中央空调运行管理》等课程中加入能源调控相关基础知识,增加实践环节,鼓励学生利用Python编写建筑能耗预测模型,或通过物联网(IoT)平台实时监控实验建筑的碳排放数据。通过此实践环节不仅能提升学生的技术应用能力,还能培养应对复杂工程问题的系统思维。

### 2.4 政策管理层: 衔接社会

政策教学需避免枯燥的理论灌输,转而通过角色扮演与情景模拟提升学生的政策应用能力。可开设一门新的课程,设计3-4课时用来讲解目前的碳排放的相关政策,1-2课时通过设计“碳交易市场模拟”环节:将班级分为政府、控排企业、碳交易所等角色,基于真实数据,模拟配额交易、清缴与处罚流程,通过这些流程,学生可直观理解政策对行业行为的引导作用。此外,可组织学生对比国家“双碳”政策文件,解析政策对暖通空调行业的具体要求,并通过“政策沙盘推演”模拟不同减排路径的经济与环境效益。可以设置实践任务,让学生分析某省市碳交易试点成效,提出暖通领域参与碳市场的可行性方案。

### 3 总结

本文构建了“理论-实践-创新-政策”四位一体的知识框架,从基础知识、排放管理、技术应用和政策机制四个方向搭建了双碳知识框架。并明确了该谱系服务于建环专业本科高年级(大三、大四)课程体系改革的定位。

实现“双碳”目标需要教育系统和产业需求紧密结合。建环专业教育需进一步打破学科壁垒,强化产学研协同。在课程体系层面,需要持续优化各相关课程的教学大纲,确保“双碳”知识谱系内容有机嵌入且衔接顺畅,明确各课程在谱系中的定位与贡献。同时需要推动校企合作,搭建碳排放监测与低碳技术研发的实践平台,提升实时性与交互性;同时跟踪关注动态碳市场机制与行业标准更新,将全球碳减排案例与前沿技术成果纳入教学内容,以“双碳知识谱系”为纽带,推动教育链、人才链与产业链的有机衔接,为全球气候治理与绿色低碳转型提供坚实的人才保障与技术支撑。

### 参考文献:

- [1] 朱燕群,何勇,俞自涛,等.新时代“双碳”背景下能动专业“五位一体”实验教学改革与实践[J].高等工程教育研究,2023,(S1):141-144,148.
- [2] 中国建筑节能协会建筑能耗与碳排放数据专委会.中国城乡建设领域碳排放研究报告(2024年版)[R].重庆,2024.
- [3] 王晓风,宋小软,黄崧,等.相变储能材料在建筑节能领域中的研究进展[J].化工新型材料,2024,52(S2):320-325,331.
- [4] 张云峰,张璐,刘鹏,等.纳米  $\text{SiO}_2$  改性石蜡相变微胶囊涂料的制备及性能表征[J].涂料工业,2021,51(1):34-39.
- [5] Ji Y, Xu W, Chen A, et al. Porous carbon materials for enhanced carbon dioxide capture toward post-combustion: Innovative application and future prospects [J]. Materials Today Energy, 2025,47:101746-101746.
- [6] 张真.碳捕集转化一体化技术研究进展[J].热力发电,2025,54(6):28-37.
- [7] 龙妍,李小姗,丁晴,等.碳捕集利用与封存标准研究进展与体系构建思考[J].洁净煤技术,2025,31(3):17-28.
- [8] 车雨晴,陈怡,于涛,等.相变蓄热太阳能热泵系统动态仿真研究[J].节能,2024,43(10):13-16.
- [9] 张伟,罗世刚,滕婕,等.考虑温控负荷聚合调控的新能源-储能联合规划[J].储能科学与技术,2023,12(6):1901-1912.
- [10] 赵沁娜,李航.碳交易试点政策对碳排放强度的影响效应与作用机制[J].世界地理研究,2025,34(1):94-111.
- [11] 白雪.全国碳市场首次扩围推动高排放行业绿色转型[N].中国改革报,2025-03-30(004).