

附件 3:

福建省地方标准《低碳城市评价技术导则》 编制说明

(征求意见稿)

《低碳城市评价技术导则》标准编制组

2025 年 12 月

目 录

1 编制背景	1
2 编制原则与过程	5
3 编制依据	9
4 主要内容说明	19
5 标准应用实例	31
6 福建省不同类型城市低碳建设差异及其提升路径	53
7 实施标准的措施建议	93
8 主要参考资料	94

1 编制背景

1.1 任务来源

全球气候变化是人类当前面临的重大环境问题，关系到经济、环境、社会是否可持续发展，也是人类必须做出回应的最复杂的挑战之一。城市是能耗高强度地区和二氧化碳排放关键源，产生二氧化碳排放量占全球排放量70%以上。随着中国城市化进程的持续推进，2024年我国城镇化率已达67%，到2050年预计将超过80%。城市快速扩张带来的能源需求与碳排放激增问题已成为我国应对气候变化与可持续发展的严峻挑战。因此，低碳城市建设是城市应对资源环境压力、提高能源供应保障安全和减少“碳排放”的基本前提和必要条件。

2020年9月，中国在第75届联合国大会一般性辩论中提出的双碳目标及碳达峰阶段后中国2035年国家自主贡献目标为我国应对全球气候变化和“十五五”“十六五”绿色低碳转型明确了主要目标和方向，推动了我国构建高效的国家级减碳系统。城市是全球推动气候变化行动的关键，标准是实现双碳目标的重要技术支撑。低碳城市作为减碳工程的重要子系统，需要通过当前多样化的标准进行统一，实现低碳城市与国家大系统的互联互通。

2021年福建省政府工作报告提出，制定实施二氧化碳排放达峰行动方案，因地制宜制定实施各地碳达峰行动方案，支持厦门、南平等地率先达峰，并连续三年均提出要推进和深化低碳城市、低碳工业园

区、低碳社区试点的工作要求。2022年厦门于省内率先开展了工业园区、社区、低碳景区等3个低碳示范区评价技术规范标准化工作，并于2024年6月发布系列标准，但在福建城市尺度低碳试点评价等方面，关键标准仍缺失。为进一步完善福建省城市尺度碳达峰碳中和的配套标准，持续提升制度供给能力和治理效能，根据福建省市场监督管理局发布的《福建省市场监督管理局关于印发2024年第二批福建省地方标准制修订计划项目的通知》（闽市监标准〔2024〕280号），计划制定推荐性福建省地方标准《低碳城市评价技术导则》，归口单位为福建省生态环境厅。

1.2 目的和意义

为落实碳达峰碳中和目标，我国将应对气候变化作为国家战略，纳入生态文明建设整体布局和经济社会发展全局，加强顶层设计。构建实施碳达峰碳中和“1+N”政策体系，印发《中共中央国务院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》和《2030年前碳达峰行动方案》，明确时间表、路线图。2025年，我国首次提出覆盖全经济范围、包括所有温室气体的绝对量减排目标，提出碳达峰阶段后全经济范围、全温室气体净排放下降等一揽子应对气候变化目标，系统性构建了涵盖能源和产业转型、政策工具创新等多维度指标的行动纲领，标志着我国迈入了更加系统全面的低碳韧性发展新征程。自巴黎气候峰会开始，联合国气候变化大会以《国家温室气体排放清单指南》为基础，建立了针对各国减排实施情况的监督执

行机制，该清单从生产端对碳排放来源进行划分，是国家层面“双碳”战略的衡量标尺，应成为低碳城市标准构建的底层架构。然而，目前城市尺度温室气体排放指标监测仍存在缺乏高精度标物和多场景量值传递体系，低碳城市评价指标缺乏多维度系统性、核算计量和校验手段较单一等问题。

为贯彻落实习近平总书记对福建工作的重要讲话精神，深入贯彻落实党中央、国务院关于碳达峰碳中和决策部署，福建省于2022年印发了《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实施意见》，设定了明确的双碳目标；并根据省碳达峰碳中和“1+N”政策体系编制工作要求，陆续出台实施了节能减排、工业领域、城乡建设、减污降碳协同增效、普惠机制等分领域分行业实施方案和保障方案；通过印发实施《福建省碳达峰试点建设方案》并公布了5个碳达峰试点城市，在碳达峰碳中和工作中不断先行先试，福建积累了有益经验，形成了较为完善的低碳发展政策框架。但在城市尺度低碳试点评价等方面，仍存在标准缺失等问题。福建省各地市在经济发展、人口规模、功能定位、资源禀赋、地理区位等方面各具特色，由于不同类型城市低碳建设存在差异，发展路径亦不尽相同，通过研究“双碳”战略目标下低碳城市的界定、评价、核查、监督等多环节的评价机制，建立标准化的评价方法体系，规范城市温室气体源汇测量、空间计量与核查、低碳城市综合评价指标核算的方法及其数据要求，真正实现城市尺度低碳建设的可测量、可比较、可重复，形成低碳城市

评价智能化、业务化核算能力，可为福建省碳达峰试点政策落地及推广、推动各地市进一步落实国家“双碳”目标提供有效支撑。

低碳城市评价技术导则参考国家标准《GB/T 41152-2021 城市和社区可持续发展 低碳发展水平评价导则》、国务院印发《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》、《福建省碳达峰试点建设方案》中碳达峰试点城市建设参考指标、《深化生态省建设 打造美丽福建行动纲要（2021—2035年）》中美丽福建建设指标体系的相关建设要求编制，以“双碳”为目标，以市级低碳城市发展水平为评价对象，对国家核算方法进行改进，突出福建特色，结合空间信息技术测算指标，进一步提高低碳城市评价的效率和精度，提高低碳城市评价标准的落地性与可操作性，其他以行政区为单元的评价也可以参照执行，具有很强的实践指导意义。

1.3 起草单位

标准的主要起草单位包括中国科学院城市环境研究所、厦门市环境科学研究院、创昕数智（厦门）能源科技有限公司、厦门是能环保科技有限公司。

1.4 主要起草人

石龙宇、高莉洁、林剑艺、黄屋、许杰龙、刘艳英、王敏锋、王碧文、王炜彬、朱国宏。

2 编制原则与过程

2.1 编制原则

按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》的要求和规定，确定标准的组成要素。

制定本标准主要遵循以下原则：

- (1) 坚持科学性和规范性；
- (2) 保证先进性和实用性；
- (3) 符合国家的相关政策；
- (4) 与相关的标准接轨；
- (5) 考虑我市低碳城市评价内外部评价的情况和需求。

2.2 标准编制技术路线图

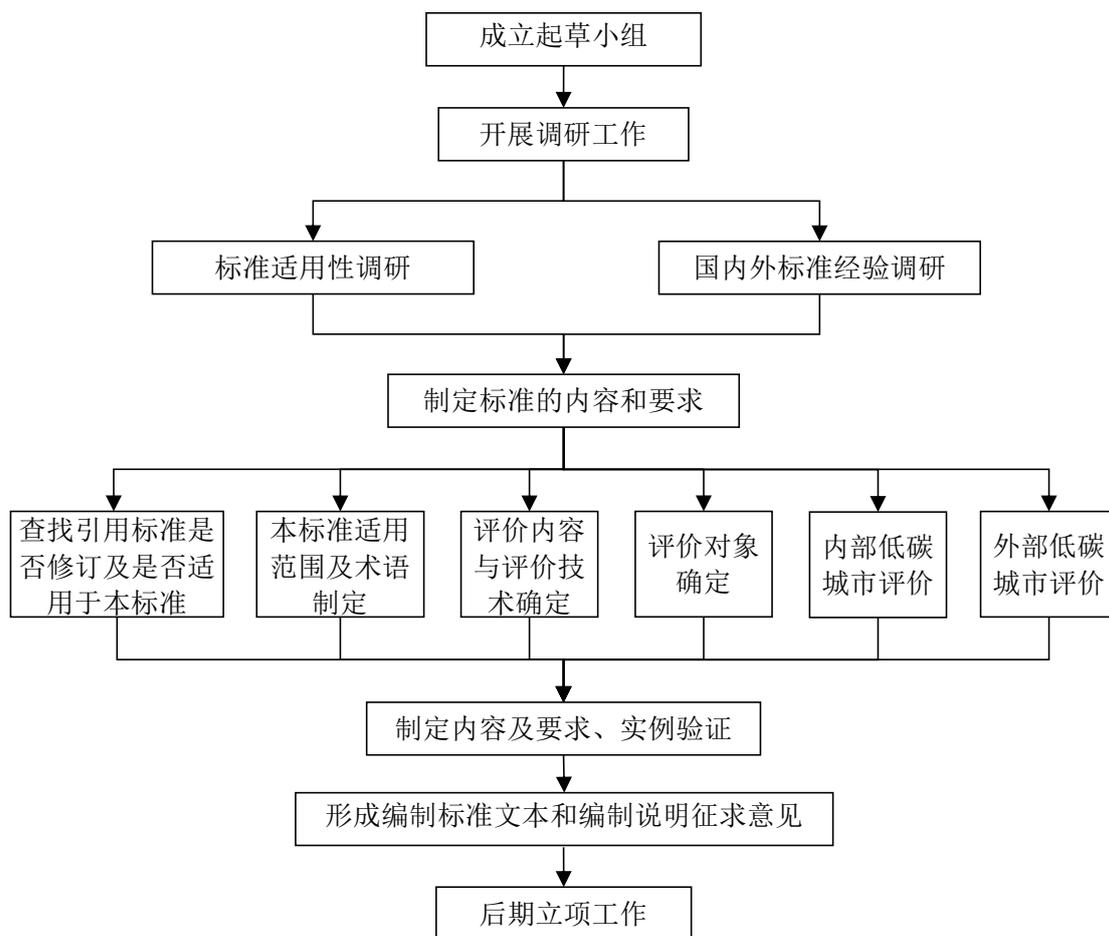


图 1 标准编制技术路线

2.3 标准编制过程

标准起草从2024年4月开始，可以分为4个阶段：

2.3.1 成立标准起草小组

2024年4月，成立标准起草小组，厘清标准编制思路，确定标准的主题、原则与目标。

2.3.2 标准调研

2024年4月—2024年5月，开展标准适用性和国内外标准经验调研，梳理国内外现有低碳城市评价指标或规范文件的主要内容与核心指标。

2.3.3 体系搭建

2024年5月—2024年6月，撰写标准草案，基于标准编制原则，基于国内外已有低碳城市评价指标或相关标准规范的指标，参考《GB/T 41152-2021 城市和社区可持续发展 低碳发展水平评价导则》的指标体系、国务院印发《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》、《福建省碳达峰试点建设方案》、《深化生态省建设 打造美丽福建行动纲要（2021—2035年）》相关建设要求，以小组讨论会的形式整合信息资料，采用频度统计法、理论分析法和专家咨询法设置、筛选指标，搭建低碳城市评价框架体系，结合福建省省情、各个城市不同资源禀赋、城市不同低碳发展阶段现状及空间信息技术，确定福建省低碳城市评价指标，丰富低碳城市评价指标核算和校验手段，形成《低碳城市评价技术导则》工作组讨论稿。以党中央或政府颁布的通知、条例、权威机构已出台标准、指南、法律文件作为支撑基石，完成草案编制说明。

2.3.4 标准立项阶段

（1）标准立项阶段

2024年6月，提出福建省地方标准制修订项目申报书，于11月获准标准立项。

（2）验证标准应用性

2024年11月-2025年10月，依据前期低碳城市评价框架体系，开展标准应用性研究。收集相关国家政策、标准规范、统计年鉴、相关文献等信息与数据，内容涉及评价指标数据、城市分类方法、达峰判断等方面。基于福建省各地市不同的资源禀赋、人口规模、地理区位、主导产业等对各地市进行城市分类，利用经验反馈和对比分析的方式，进行不同类型城市标准验证，从而提出城市未来双碳发展路径。

通过多种调研方式收集意见，分析合理性和适用性等，验证标准是否符合实际需求。在验证过程中，深入探究城市类型对城市低碳发展水平的影响，进而识别影响低碳城市建设中的关键问题，并将验证中发现的问题和思考反馈回去，为理论研究的优化、标准体系的优化以及后续关键标准的改进提供参考。

（3）论证研讨

2025年11月-2025年12月，在收集及分析整理相关资料的基础上，标准起草工作组按标准立项计划要求修改并编写了标准草案。随后形成福建省地方标准工作组讨论稿，组织召开多次工作研讨会，邀请相关领域专家，针对本标准的适用性进行探讨。

2.3.5 征集意见阶段

2025年12月-2026年1月，完成标准和编制说明征求意见稿（1个月），工作组发布征求意见的函件，向有关部门和专家公开征求意见，对征求意见的结果进行汇总和整理。在充分征求了相关各方意见后对标准征求意见稿进行修改，形成标准送审稿、相应编制说明、意见汇总处理表等。

2.3.6 标准审定并报批

2026年1月-2月，工作组按照福建省地方标准评审的程序和规定，提交标准送审稿，正式发函通知相关专家和代表，行业归口部门福建省生态环境厅组织召开专家评审会，省市场监督管理局组织召开标准审查会。根据审查会意见进行稿件的修改完善，形成标准报批稿、标准编制说明和审查意见汇总处理表等，完成标准审定并报批。

3 编制依据

3.1 相关概念、内涵及发展

低碳发展（Low Carbon Development）是低能耗、低污染、低排放的发展模式控制碳排放量、保证经济发展的质量和数量是低碳发展的基本要求。低碳发展模式是解决城市发展和碳排放问题的主要手段。向低碳经济转型的过程就是低碳发展的过程，具有阶段性特征，目标是低碳高增长，强调的是发展模式（潘家华等，2010）。

低碳经济(Low Carbon Economy)是指在可持续发展理念指导下,通过技术和制度创新、产业转型和消费模式转变、低碳和无碳能源开发、植树造林和森林管理等多种手段,尽可能降低二氧化碳排放,达到经济社会发展与保护全球气候双赢的经济社会发展模式(方时姣,2010)。

低碳城市是指经济发展以低碳为发展模式及方向,市民以低碳生活为理念和行为特征,政府公务管理以低碳社会为建设标本和蓝图的城市。低碳城市(Low Carbon City)的理念来源于低碳经济。2003年,英国在《我们未来的能源——创建低碳经济》的白皮书中指出,低碳经济,即通过更少的资源消耗和环境污染获得更多的经济产出,并提高生活质量、发展先进技术,从而提供更多的就业机会。世界自然基金会(World Wide Fund for Nature or World Wildlife Fund, 简称WWF)指出低碳城市内涵:“低碳城市”是指城市在经济高速发展的前提下,保持能源消耗和二氧化碳排放处于较低的水平。

不同国家和地区的低碳城市建设思路因地理、文化、经济等因素的不同存在一定差异。其中,英国作为较早的先行者,推动了低碳城市项目(Low Carbon Cities Program, LCCP)。2007年,日本推出《东京气候变化战略—低碳东京十年计划的基本政策》,旨在构建“东京模式”的低碳城市。欧盟委员会在2000年即已启动了欧洲首个气候变化方案(ECCP),领导了针对城市尺度开展的行动主要有2008年开始的市长盟约(Covenant of Mayors)、市长适应倡议、欧洲绿色资

产奖（European Green Capital Awards, EGCA）、URBACT 2014-2020网络等，较为经典的有“哥本哈根模式”、德国的城市能源转型政策、瑞典生态城市等。美国在城市低碳发展方面主要采取了推广可再生能源、改善交通方式、推广绿色建筑等措施。例如，加州的太阳能产业、纽约市的自行车道建设、波特兰市的绿色建筑政策等。2009年，中国台湾地区行政部门通过第三次全台能源会议，提出了构建“低碳家园”的愿望和具体日程，旨在通过逐步发展“低碳示范社区”、“低碳城市”及“低碳生活圈”，达到低碳家园与永续社会的愿景。

作为世界最大的碳排放国，中国一直致力于碳减排，并以先进的理念制定了许多规划：2008年12月，保定市政府公布了《关于建设低碳城市的意见（试行）》，制定了《保定市低碳城市发展规划纲要（2008-2020年）（草案）》。这是中国首个以政府文件形式提出的促进低碳城市发展的文件。2014年出台了《国家应对气候变化规划（2014-2020）》。同时，在国家层面上制定控碳目标，并且碳减排目标逐渐随着发展需求变化而变化。2011年，我国在《“十二五”控制温室气体排放工作方案》中第一次提出单位国内生产总值CO₂排放下降17%的约束性目标。2016年《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》提出，中国将在2030年左右达到碳排放的峰值，并鼓励有条件的地区在2020年先达到峰值的主要目标。2020年9月22日，在第75届联合国大会一般性辩论上，中国向全世界宣布将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，CO₂排放力

争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。为实现这一目标，控制碳排放可以分为“控增量”和“减存量”。由于当前碳捕集技术尚在发展过程中，实现碳捕集成本过高，在2030年碳达峰之前，通过碳捕集方式减存量可能性不大，主要通过严控增量方式平缓碳排放曲线。对增量的控制主要通过能源供给端使用清洁能源和消费端提高能效来实现，而提高能效的方式又包括电气化改造，建立碳交易市场和交通运输方式的转型等。

3.2 低碳城市评价指标体系

3.2.1 国外低碳城市评价指标体系

为了评价城镇化所带来的人口及环境等问题，一些发达国家和地区纷纷提出符合本国国情的低碳城市评价指标体系（表1）。国外具有代表性的相关标准及报告有：美国“生态低碳城市评价指标工具”、马来西亚“低碳城市评价指标LCCI”、德国“基于DPSIR模型的低碳城市评价指标体系”、联合国可持续发展委员会“低碳城市评价指标体系”、经济合作与发展组织“低碳城市评价指标体系”。

表 1 国外低碳城市评价指标体系汇总

名称/机构	总指标	分项指标
美国“生态低碳城市评价工具 ELITE”	能源与气候	二氧化碳强度、能源强度、建筑能耗、可再生清洁能源、交通能源、能源与气候变化政策
	水质量、可用性和处理	所有部门总能源/碳的分配、能源安全、工业能源、用水强度、水质量、废水处理价格、水承载力、取水、水政策成就
	空气质量	PM ₁₀ 浓度、NO _x 浓度和总排放、多种空气污染物浓度指数、超过

名称/机构	总指标	分项指标
		空气质量基准、SO ₂ 浓度和排放、O ₃ 浓度和排放
	废物	废物产生强度、废物处理回收、从垃圾填埋场转移废物处理、全部按比例处理、废物处理、垃圾填埋处置、废物收集率
	交通	运输设施和基础设施、模态、交通选择便利性、航空运输
	经济健康	就业机会、绿色或创新领域、生活成本、GDP与收入、债务节省和投资水平、政府融资、具有环境管理体系的企业、资源生产力
	土地利用与城市形态	公共绿色空间、人口密度、生物多样性、保护地、建成区林业、政策、生态足迹、农业用地
	人口统计学和社会健康	健康、教育、公众、非政府组织和学术参与、审美、市领导的共同努力、风险与犯罪、公平、噪声
	经济	城市化率、人均国内生产总值、第三产业占国内生产总值的比重、碳生产率
	能量模式	可再生能源比例、能源利用、能量强度
	技术	创意产业就业、绿色与建筑项目活动的共享
马来西亚“低碳城市评价指标 LCCI”	社会生活	公共绿地比例、人均公共绿地、人口密度
	碳与环境	人均二氧化碳排放量、二氧化氮排放量/人均二氧化氮排放量、每日二氧化硫水平、每日暂停的特定物质水平
	城市无障碍	人均公交车、人均铁路长度、人均汽车
	废物	人均废水产生量、人均固体废物产生量、收集并妥善处理的废物比例、废水处理比例、回收比例
德国“基于DPSIR模型的低碳城市评价指标体系”	影响	为气候改变做的准备
	状态	提升水供应、提高空气质量、增加树、森林和绿地空间、保护生态系统
	压力	设定温室气体减排目标、计算温室气体清单
	驱动力	建筑基础设施、提升当地农业、减少家庭消费、改善低能耗建筑、

名称/机构	总指标	分项指标
		混合土地利用、高密度发展、整合交通和土地利用、改善非机动车交通、发展公共交通系统、清洁的能源运输形式、减少输电损失、使用可再生能源、提高能源利用效率、产业升级、改善绿色经济和就业
联合国可持续发展委员会“低碳城市评价指标体系”	社会 环境 经济 制度	营养状况、贫穷、死亡率、卫生、教育水平、饮用水、人口变化、居住条件 农业、气候变化、城市化、森林、水质、水量、物种 财政状况、贸易、物资消耗、经济发展、能源利用、交通运输 国际合作、信息获取、灾害防治、战略实施
经济合作与发展组织“低碳城市评价指标体系”	核心环境指标 部门指标 环境核算类指标	社会影响、环境压力、环境状况 经济与政策、部门与环境 自然资源核算、环境费用支出、自然资源利用强度、污染控制支出

3.2.2 国内低碳城市评价指标体系

在国内，官方、团体组织及个人对低碳城市评价指标体系开展了广泛的研究。中国社会科学院城市发展与环境研究所率先于2008年进行了中国低碳城市评价指标体系研究。从低碳产出、低碳消费、低碳资源和低碳政策四个维度组选择指标构建低碳城市评价指标体系，并应用于一些城市的低碳发展规划研究中。2010年，中国社会科学院又发布了一套衡量城市低碳水平的新标准体系。新标准与旧指标体系的四个维度相比，将低碳产出变为了低碳生产力，其它三个维度保持不变，共12个相对指标。2010年6月，中日两国能源部长在日本福井召开的亚太经济合作组织（Asia-Pacific Economic Cooperation，简称

APEC) 第九届能源部长会上联合推出了APEC低碳示范城镇项目, 并确定天津于家堡金融区为首例APEC低碳示范城镇。2010年和2011年, 我国领导人在出席APEC领导人峰会时, 两次提出积极发展低碳示范城镇项目的倡议。全国低碳经济媒体联盟于2011年研制出一套低碳城市评价体系, 包括10个一级指标: 城市低碳发展规划指标、新能源与可再生能源、媒体传播指标、城市绿地覆盖率指标、低碳产品应用率、低碳出行指标、城市空气质量、城市低碳建筑指标、公众满意度和支持率、城市直接减碳指标、一票否决指标。世界银行于2012年提出了符合中国国情的低碳城市评价指标体系, 由碳排放、能源、绿色建筑、可持续交通和智能的城市形态5个方面组成 (Baeumler et al., 2012)。中国标准化研究院资源与环境标准化研究所在《2009-2020年中国低碳生态城市发展战略目标》中制定了低碳生态城市发展的经济、社会、环境三个总指标和9个子指标, 旨在通过低碳建设, 降低对气候的影响。2012年, 国家能源局向APEC第20届领导人峰会提交《APEC低碳示范城镇项目—中国发展报告》, 报告综合运用低碳城镇发展的六条主要实现途径: 低碳产业、低碳布局、低碳能源、低碳建筑、低碳交通和资源再生。2012年, 北京师范大学开发了包括57个具体指标的中国绿色发展指数, 用以评估中国30个省100个城市的低碳发展水平。2014年, 中国能源集团研发了城市低碳发展政策选择工具, 通过评估工业、公共和商用建筑、民用建筑等部门的温室气体和甲烷排放情况, 从而为城市减少温室气体的排放提供决策支撑 (周枕戈, 2018)。2018

年，江苏省颁布了《低碳城市评价指标体系》，由低碳经济、低碳能源、低碳社会、生态环境和低碳管理5个方面组成，这是国内首个低碳城市评价指标地方标准。2022年，台湾地区台北市颁布了《台北市净零排放管理自治条例》，以消除温室气体排放、增加绿能零碳电力、减少非必要耗电、推广绿运输与电动运具、减少废弃物产生、增加树木碳汇、提升抗炎复原能力、推动自然保育永续发展为八大核心项目，全面启动气候调适及净零排放工作。

现行的国家标准《GB/T 41152-2021城市可持续发展 低碳发展水平评价导则》提供了碳排放、直接影响、间接影响及管理类4个层面的城市低碳发展水平评价指标体系（表2）。

表 2 国家标准《城市低碳发展水平评价指标》

类别	一级指标	二级指标	单位	指标属性
碳排放量类	碳排放量	碳排放总量	万 t	-
		人均碳排放量	t/人	-
		碳排放强度	t/万元	-
直接影响类	能源	节能电器普及率	%	+
		清洁能源使用率	%	+
		再生资源循环利用率	%	+
		非化石能源占一次能源消费比重	%	+
		能源利用效率	%	+
建筑和交通		单位地区生产总值能耗	tec/万元	-
		节能建筑比例	%	+
		清洁能源公共车辆比例	%	+

类别	一级指标	二级指标	单位	指标属性
间接影响类		绿色交通出行比例	%	+
		道路网密度	km/km ²	-
	环境	土地开发强度	%	-
		生态用地比例	%	+
		建成区绿化覆盖率	%	+
		人均绿地面积	m ²	+
		污水处理率	%	+
		再生水利用率	%	+
		垃圾循环利用百分比	%	+
	经济	空气质量优良天数比率	%	+
		第三产业增加值占地区生产总值比重	%	+
		节能环保产业增加值占地区生产总值比重	%	+
	社会	人均用水量	t	-
		人均用电量	kwh	-
低碳意识普及率		%	+	
技术研发	碳捕获与封存比例	%	+	
管理类	政策法规	政府采购节能环保产品和环境标志产品所占比例	%	+
		生态环保投资占财政收入比例	%	+

注：“+”表示正向指标，“-”表示负向指标。

3.3 与现行法律法规、标准的关系

从低碳城市评价相关标准化工作方面，当前已有ISO37120:2018 城市可持续发展——城市服务和生活品质指标、ISO/TR37121:2017 城市可持续发展——现有城市可持续发展评价指标的回顾、

ISO37122:2019城市可持续发展——智慧城市指标、ISO/FDIS37123及城市可持续发展——城市恢复力指标等围绕城市评价的国际标准，以及面向城市双碳目标的ISO标准“低碳城市最佳案例”成功立项，台湾修订温室气体排放绩效标准（EPS）以提高气候变化监管质量，与福建省制定两岸光伏产业（太阳能光伏）共通标准，以促进清洁能源产业技术通用标准化。

目前我国现有低碳城市评价标准包括国家标准和地区标准。以现行的我国大陆标准《GB/T 41152-2021 城市和社区可持续发展 低碳发展水平评价导则》为例，现有国家标准最大程度的解释了全国范围内城市尺度低碳发展水平评价标准，尽可能兼顾到各类城市的低碳建设需求，然而，各地市的经济社会发展水平和城镇化发展水平等方面明显不同，城市的产业结构、社会基础、自然状况、基础设施和管理水平等方面存在较大的差异，对各省城市的低碳建设特别是“双碳”目标的指导作用有所局限。如，江苏省既可以参考国家标准，也可以根据已有的地方标准《DB32/T 3490-2018 低碳城市评价指标体系》开展低碳城市建设与评价。江苏省地方标准选取了适应本地需求的低碳经济、低碳能源、低碳社会、生态环境、低碳管理等指标，用以保证低碳城市建设标准在江苏的高效落实。

基于上述情况，低碳城市评价技术导则在借鉴各类标准的基础上，制定与“双碳”战略与低碳城市试点目标相适应的，符合福建省各城市当地社会、经济和环境特点的低碳城市评价标准。

4 主要内容说明

4.1 标准框架结构

根据《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写规则》(GB/T 1.1-2020)，本标准内容包括：范围、规范性引用文件、术语和定义、评价准则与评价指标、评价流程、附录等。

4.2 标准适用范围

本标准规定了低碳城市评价的术语和定义、评价指标、计算方法；并阐述了低碳城市评价的对象和流程。

本标准适用于福建省城市之间（外部评价）横向比较或者城市自身（内部评价）不同年度间纵向比较，通过衡量低碳城市发展状况，客观反映低碳城市建设与发展进程，从而发现存在的薄弱环节，为推进城市低碳转型提供科学指导。

4.3 规范性引用文件

本标准引用了一系列对于本文件的应用必不可少的文件。

4.4 术语和定义

本标准规定了低碳城市评价导则所涉及的有关术语及定义。根据本标准的技术内容，给出了低碳城市、再生资源、绿色出行、城市道路网密度、绿色建筑、城市建成区、湿地、碳源、碳汇、碳储量、低碳城市发展指数、基准值共12个术语，并进行了定义或解释。术语

均来自于我国现有的标准或公开出版物，并考虑本标准实际运用情况做了调整。

4.5 评价内容与低碳城市评价技术概述

本标准旨在指导城市评价其在低碳城市发展方面的绩效。本标准以可持续性为通用原则，低碳为城市建设发展的指导准则。所有指标应以年度为基础。低碳城市评价指标包括碳排放量类、直接影响类、间接影响类以及管理类：

(1) 碳排放量类指标，用于综合评价城市的低碳城市发展整体水平；

(2) 直接影响类指标，用于从城市内部不同部门的角度，分析和识别直接影响低碳城市发展水平的要素，包括能源、基础设施等指标；

(3) 间接影响类指标，用于分析和识别间接影响低碳城市建设水平的要素，包括环境、经济、社会等指标，考虑碳源、汇、碳储量，绿色经济、低碳意识等方面；

(4) 管理类指标，用于分析和评价低碳城市建设发展技术以及制定低碳城市发展政策和规划的水平，包括技术研发、政策法规等指标。

具体指标如表3，指标计算方法参见附表A。

表 3 低碳城市评价指标

类别	一级指标	二级指标	单位	指标属性
碳排放量类	碳排放量	二氧化碳排放总量	t	负向
		人均碳排放量	t/人	负向
		单位 GDP 二氧化碳排放量	t/万元	负向
		单位工业增加值二氧化碳排放量	t/万元	负向
直接影响类	能源资源	清洁能源使用率	%	正向
		再生资源循环利用率	%	正向
		非化石能源消费占比	%	正向
		单位 GDP 能耗	tce/万元	负向
		电能占终端用能的比重	%	正向
	建筑和交通	新建建筑中星级绿色建筑占比	%	正向
		新能源汽车保有量	辆	正向
		绿色出行比例	%	正向
		万人公共车辆拥有量	标台/万人	正向
		道路网密度	km/km ²	负向
间接影响类	环境	土地开发强度	%	负向
		生态用地比例	%	正向
		人均绿地面积	m ²	正向
		森林覆盖率	%	正向
		湿地面积占比	%	正向
		污水处理率	%	正向
		再生水利用率	%	正向
		生活垃圾资源化利用率	%	正向
		生活垃圾无害化处理率	%	正向
		城市空气质量优良天数比率	%	正向
	经济	第三产业增加值占单位 GDP 比重	%	正向

类别	一级指标	二级指标	单位	指标属性
		节能环保产业产值年均增长率	%	正向
		战略性新兴产业增加值占比	%	正向
	社会	人均用水量	t/人·年	负向
		人均用电量	kWh/人·年	负向
		低碳意识普及率	%	正向
	技术研发	绿色低碳技术与试验发展经费投入	万元	正向
管理类	政策支持	政府采购节能环保产品和环境标志产品所占比例	%	正向
	能力建设	发展规划	定性	正向
		示范试点	定性	正向
		统计与核算体系	定性	正向
		监测、报告与核查制度	定性	正向
		碳排放管理平台	定性	正向
		交流合作	定性	正向

低碳城市评价指标分类结构仅用于展示低碳城市发展水平的相关领域，没有层次意义。个别的指标是依据指标的数据可得性和结果可比性选择的，以便于进一步分析。解释特定结果时，对跨类别指标的结果分析十分重要；关注某一项指标会导致结果的失真或不全面。

4.6 评价对象

低碳城市评价根据用户和目的的不同，可划分为两类：

(1) 内部评价，用户为城市内部的管理者，目的是确定碳排放是否满足其所设定的目标；

(2) 外部评价，用户为城市应对气候变化管理部门，目的是比较不同城市间的低碳城市发展水平及其分布情况。

4.7 内部低碳城市评价方法

4.7.1 总则

城市通过选择低碳城市评价指标，制定碳排放管理基准，定期对内部低碳城市发展进行评价，以确定低碳城市的发展水平和改进方向。

4.7.2 评价指标选择

城市在选择和确定内部低碳城市评价指标时，宜考虑下列因素：

(1) 评价信息的使用者（城市应对气候变化管理者或部门碳排放管理人员）；

(2) 低碳城市评价的目的（识别城市整体低碳城市发展水平或部门低碳城市发展水平）；

(3) 指标的适用性、完整性和可操作性；

(4) 所需数据的数量、质量和可获取性。

4.7.3 评价指标调整

城市宜定期评价所选择的低碳城市评价指标，以确保指标的科学性、代性和整体性。在发生下列情况时，宜对低碳城市评价指标进行更新：

(1) 城市功能调整；

(2) 应对气候变化目标调整；

(3) 法律、法规、标准和其他要求变化。

4.7.4 数据采集

- (1) 城市宜定期地、系统地收集低碳城市评价指标的原始数据；
- (2) 城市宜保证内部低碳城市评价指标数据的可靠性，确保获得数据满足评价的质量要求；
- (3) 城市可获得低碳城市评价指标原始数据的途径如下：
 - 1) 统计数据；
 - 2) 监测和测量；
 - 3) 报告和文件；
 - 4) 碳排放审计报告；
 - 5) 科学研究；
 - 6) 其他相关资料调研。

4.7.5 指标基准值确定

- (1) 城市宜制定内部低碳城市评价指标基准值，作为追踪、比较低碳城市发展水平的基点。
- (2) 城市在制定内部低碳城市评价指标基准值时，可以采用的方法如下：
 - 1) 选择某一年作为基准年。选择的依据是该年度碳排放情况体现了城市当前的实际情况，各部门低碳城市建设正常，没有发生重大事故，碳排放结构合理，碳排放清单和统计数据齐全、真实可靠，具有典型性和代表性；

2) 将城市前 3-5 年的低碳城市发展情况进行汇总, 了解低碳城市发展的变化情况, 以年的平均水平作为内部低碳城市评价指标的基准值;

3) 参照法律、法规、相关发展规划和考核办法;

4) 对标同类可比的平均值或先进值;

5) 建立模型, 进行科学预测和估算。

4.7.6 低碳城市发展指数计算

(1) 城市可通过比较内部低碳城市评价指标实际值和相应指标基准值来计算指标评价值, 进而评价内部低碳城市发展水平及其变化, 以确定是否达到设定目标以及改进低碳城市发展的措施是否有效。

(2) 评价指标的评价值可按式①和式②提供的方法计算:

$$\text{正向指标: } B_{\text{内}i} = \frac{A_i - S_{\text{内}i}}{S_{\text{内}i}} \quad \text{①}$$

$$\text{负项指标: } B_{\text{内}i} = \frac{S_{\text{内}i} - A_i}{S_{\text{内}i}} \quad \text{②}$$

式中:

$B_{\text{内}i}$ ——内部评价中第 i 项低碳城市评价指标评价值;

A_i ——报告期内, 第 i 项低碳城市评价指标实际值;

$S_{\text{内}i}$ ——内部评价中第 i 项低碳城市评价指标基准值。

(3) 城市按式③计算低碳城市发展指数:

$$SI_{\text{内}i} = \sum_{i=1}^m B_{\text{内}i} \times W_{\text{内}i} \quad \text{③}$$

式中:

$SI_{内}$ ——内部评价中低碳城市发展指数；

$B_{内i}$ ——内部评价中第 i 项低碳城市评价指标评价值；

$W_{内i}$ ——内部评价中第 i 项低碳城市评价指标权重；

m ——低碳城市评价指标的数量。

(4) 内部低碳城市评价指标的权重可采用平均权重法确定，即每项绩效指标的权重都相等，且都等于评价指标数量的倒数。也可采用层次分析法、专家咨询法、相关系数法等方法确定。

4.7.7 结果运用

(1) 通过对直接影响类、间接影响类和管理类指标与选定基准的比较分析，可以识别低碳城市建设和管理中存在问题，找出碳减排潜力和方向。

(2) 通过对连续不同评价期的低碳城市评价综合指标值的比较，可以分析城市内部低碳城市发展的变化及趋势，识别低碳城市建设发展管理的有效性，以持续改进低碳城市发展水平。

(3) 低碳城市发展水平的判定

内部低碳城市发展指数是低碳城市发展水平与低碳城市发展水平基准的偏离程度，体现了低碳城市发展水平的高低：

$SI_{内}=0$ 低碳城市发展水平与基准相当；

$SI_{内}<0$ 低碳城市发展水平低于基准，数值越小低碳城市发展水平越低；

$SI_{内} > 0$ 低碳城市发展水平高于基准，数值越大低碳城市发展水平越高。

4.8 外部低碳城市评价方法

4.8.1 总则

宜根据城市的类型、评价需要和实际情况选择适宜的指标，按照城市类型、规模以及所处气候分区对城市进行分类、分级和分组，进行评价和比较。

4.8.2 城市的分类、分级和分组

(1) 宜根据城市的性质和功能将其划分为工业城市、旅游城市、综合城市等类型。

(2) 同一类型的城市应根据规模进行分级，分级方法如下：

- 1) 小城市，城区常住人口 50 万以下的城市；
- 2) 中等城市，城区常住人口 50 万以上、100 万以下的城市；
- 3) 大城市，城区常住人口 100 万以上、500 万以下的城市；
- 4) 特大城市，城区常住人口 500 万以上、1000 万以下的城市；
- 5) 超大城市，城区常住人口 1000 万以上的城市。

(3) 同一类型、同一级别的城市，根据 GB 50176-93 中规定的气候区划进行分组，具体见表 4。

表 4 城市分组

组别	气候分区	涉及区域	分区主要指标
----	------	------	--------

严寒组	严寒地区	辽宁、吉林、黑龙江、内蒙古、新疆	最冷月平均温度 $\leq -10^{\circ}\text{C}$
寒冷组	寒冷地区	北京、天津、河北、山西、山东、河南、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏	最冷月平均温度 $-10^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$
夏热冬冷组	夏热冬冷地区	上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、贵州、四川	最冷月平均温度 $0^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$ ，最热月平均温度 $25^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$
夏热冬暖组	夏热冬暖地区	福建、广东、广西、海南、香港、澳门、台湾	最冷月平均温度 $> -10^{\circ}\text{C}$ ，最热月平均温度 $25^{\circ}\text{C}\sim 29^{\circ}\text{C}$
温和组	温和地区	云南	最冷月平均温度 $0^{\circ}\text{C}\sim 13^{\circ}\text{C}$ ，最热月平均温度 $18^{\circ}\text{C}\sim 25^{\circ}\text{C}$

4.8.3 评价指标选择

一般宜选择能够直接反映低碳城市发展水平的指标，如碳排放类指标：

- (1) 二氧化碳排放总量；
- (2) 单位 GDP 碳排放量；
- (3) 人均碳排放量。

4.8.4 评价指标调整

评价指标调整的主要缘由与内部低碳城市评价一致。

4.8.5 数据采集

数据采集的主要注意事项及步骤与内部低碳城市评价一致。

4.8.6 指标基准确定

(1) 宜分别对不同类型、级别、组别的城市确定低碳城市评价指标的基准值。

(2) 外部城市低碳城市评价指标的基准值可采用取平均值的方法计算，见式④：

$$S_{\text{外}i} = \frac{\sum_{j=1}^n A_{ij}}{n} \quad \text{④}$$

式中：

$S_{\text{外}i}$ ——外部评价中某一类型、级别、组别城市的第 i 项低碳城市评价指标的基准值；

A_{ij} ——第 j 个参评城市第 i 项低碳城市评价指标的实际值；

n ——外部评价中参评城市的数量。

4.8.7 低碳城市发展指数计算

(1) 外部低碳城市评价指标的评价值可按式⑤和⑥计算。

$$\text{正向指标: } B_{\text{外}ij} = \frac{A_{ij} - S_{\text{外}i}}{A_{i\text{max}} - A_{i\text{min}}} \quad \text{⑤}$$

$$\text{负向指标: } B_{\text{外}ij} = \frac{S_{\text{外}i} - A_{ij}}{A_{i\text{max}} - A_{i\text{min}}} \quad \text{⑥}$$

式中：

$B_{\text{外}ij}$ ——外部评价中第 j 个参评城市第 i 项低碳城市评价指标评价

值；

$S_{\text{外}i}$ ——外部评价中某一类型、级别、组别城市的第 i 项低碳城市评价指标基准值；

A_{ij} ——第 j 个参评城市第 i 项低碳城市评价指标实际值；

$A_{i\text{max}}$ ——第 i 项低碳城市评价指标实际值中的最大值；

$A_{i\text{min}}$ ——第 i 项低碳城市评价指标实际值中的最小值；

(2) 城市按式⑦计算低碳城市发展指数：

$$SI_{外j} = \sum_{i=1}^m B_{外ij} \times W_{外i} \quad \text{⑦}$$

式中：

$SI_{外j}$ ——外部评价中某一类型、级别、组别第j个参评城市低碳城市发展指数；

$B_{外ij}$ ——外部评价中第j个参评城市第i项低碳城市评价指标评价
值；

$W_{外i}$ ——外部评价中第i项低碳城市评价指标的权重；

m ——低碳城市评价指标的数量。

(3) 外部低碳城市评价指标的权重可采用平均权重法计算，即每项指标的权重都相等，且都等于指标数量的倒数。也可采用相关系数法、层次分析法、专家咨询法等方法确定。

4.8.8 结果运用

通过对不同类型、级别和组别城市的低碳城市发展指数进行比较、分析和排序，可以掌握城市的低碳城市建设发展管理程度、水平及其碳排放分布情况，从而促进对标同类、实现城市的整体低碳城市建设发展管理能力的提高。

外部低碳城市发展指数反映了低碳城市发展水平与同类可比平均水平的偏离程度。通过对同类可比城市外部低碳城市发展指数由小到大的排序，可判定城市低碳城市发展水平的高低：

$SI_{外j}=0$ 表示第 j 个城市的低碳城市发展水平为同类可比的平均水平；

$SI_{外j} > 0$ 表示第 j 个城市的低碳城市发展水平高于同类可比的平均水平，数值越大低碳城市发展水平越高；

$SI_{外j} < 0$ 表示第 j 个城市的低碳城市发展水平低于同类可比的平均水平，数值越小低碳城市发展水平越低。

5 标准应用实例

本标准的低碳城市评价指标综合考虑了指标代表性和数据可获取性，具有普适性和广泛适用性，同时，标准的验证根据案例区特点，灵活选取增减相应的指标，以符合实际状况。

5.1 内部低碳城市评价

5.1.1 实例对象

选取福州、厦门、莆田、三明、漳州、泉州、南平、龙岩、宁德 9 个设区市作为内部低碳城市评价实例。

5.1.2 评价指标选择

基于《福建省碳达峰试点建设方案》、《深化生态省建设打造美丽福建行动纲要（2021-2035年）》和已有数据情况，选取6项一级指标和20项二级指标来反映城市内部低碳建设情况。鉴于国家发展和改革委员会于2010年首次启动国家五省八市低碳试点工作，而福建省厦门市成为五省八市低碳试点之一，因此，选择2010年作为基准年，通

过与2015、2020年的低碳发展情况比较，评价各设区市内部低碳城市发展水平及其变化，如表5-1、5-2。

表 5-1 福建省各设区市低碳城市评价结果（福州、厦门、莆田、三明）

一级指标	二级指标	指标属性	单位	福州			厦门			莆田			三明		
				2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
碳排放量	1	-	万 t	1509.47	1774.66	1668.48	760.44	822.26	796.61	1031.98	1256.60	1162.22	1547.34	2243.88	2661.43
	2	-	t/人	2.12	2.28	2.01	2.15	1.81	1.54	3.71	4.15	3.62	6.18	8.94	10.69
	3	-	t/万元	0.48	0.32	0.17	0.37	0.24	0.12	1.21	0.76	0.44	1.59	1.31	0.98
	4	-	t/万元	1.34	0.95	0.66	0.88	0.60	0.42	2.55	1.70	1.06	3.75	3.21	2.60
能源	5	-	tce/万元	0.64	0.46	0.42	0.57	0.44	0.37	0.64	0.47	0.43	1.75	0.80	0.63
	6	+	%	0.19	0.22	0.23	0.18	0.19	0.21	0.14	0.19	0.23	0.10	0.16	0.17
建筑和交通	7	+	辆	27.34	29.85	29.44	22.48	25.41	21.35	4.07	9.49	8.69	13.69	12.61	16.54
	8	+	km/km ²	5.00	4.83	8.36	5.27	5.76	10.04	2.74	9.78	8.63	1.27	7.74	8.55
环境	9	+	%	0.23	0.13	0.16	0.15	0.20	0.23	0.03	0.05	0.04	0.02	0.03	0.03
	10	+	%	0.11	0.04	0.03	0.20	0.19	0.04	0.01	-	-	0.03	0.04	0.04
	11	+	m ² /人	27.80	25.83	31.67	46.34	40.19	45.69	10.64	10.39	18.71	27.64	22.95	27.78
	12	+	%	54.90	55.60	58.36	42.80	40.33	41.72	58.00	59.80	60.17	76.80	75.89	78.73

表 5-1 福建省各设区市低碳城市评价结果（福州、厦门、莆田、三明）（续）

一级指标	二级指标	指标属性	单位	福州			厦门			莆田			三明		
				2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
环境	13	+	%	0.17	0.37	0.05	0.22	0.20	0.07	-	-	0.05	-	-	0.00
	14	+	%	87.10	89.98	96.88	90.10	93.62	100.00	86.71	85.00	96.74	81.04	86.01	95.28
	15	+	%	0.007*	0.001	0.301	0.004	0.003	0.221	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	16	+	%	100.00	100.00	100.00	96.93	100.00	100.00	100.00	99.15	100.00	96.19	98.52	100.00
	17	+	%	96.40	95.30	99.50	97.50	99.18	99.70	97.80	97.50	95.90	90.10	98.60	100.00
经济	18	+	%	0.46	0.51	0.56	0.49	0.60	0.60	0.34	0.39	0.44	0.33	0.32	0.36
社会	19	-	t/人·年	85.47	103.60	102.52	89.68	89.71	93.07	31.73	47.43	42.86	184.34	53.73	49.40
	20	-	kW·h/人·年	3209.67	2964.52	6217.84	4389.6	4705.86	5462.86	2235.8	2802.67	4473.78	8759.12	7026.13	6659.14

二级指标编号说明：1、二氧化碳排放总量；2、人均碳排放量；3、单位 GDP 二氧化碳排放量；4、单位工业增加值二氧化碳排放；5、单位 GDP 能耗；6、电能占终端用能的比重；7、万人公共车辆拥有量；8、道路网密度；9、土地开发强度；10、生态用地比例；11、人均绿地面积；12、森林覆盖率；13、湿地面积占比；14、污水处理率；15、再生水利用率；16、生活垃圾无害化处理率；17、空气质量优良天数比率；18、第三产业增加值占单位 GDP 比重；19、人均用水量；20、人均用电量；*由于福州 2010 年再生水利用率数据缺失，以 2011 年数据代替。“+”表示正向指标，“-”表示负向指标。

表 5-2 福建省各设区市低碳城市评价结果（泉州、漳州、南平、龙岩、宁德）

一级指标	二级指标	指标属性	单位	泉州		漳州		南平			龙岩			宁德				
				2010	2015	2010	2015	2020	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
碳排放量	1	-	万 t	3192.76	4489.90	4784.16	1005.53	1482.45	1413.67	824.86	745.89	704.66	2886.47	3418.02	4147.77	1176.77	1466.12	842.10
	2	-	t/人	3.93	5.23	5.44	2.09	2.96	2.79	3.12	2.78	2.63	11.28	12.75	15.19	4.17	4.87	2.67
	3	-	t/万元	0.90	0.73	0.47	0.70	0.54	0.31	1.13	0.56	0.35	2.91	1.97	1.44	1.59	0.99	0.32
	4	-	t/万元	1.63	1.29	0.93	1.76	1.17	0.88	3.38	1.77	1.34	6.44	5.67	4.81	4.50	2.10	0.77
能源	5	-	tce/万元	0.78	0.60	0.48	0.64	0.45	0.43	1.18	0.78	0.58	1.18	0.68	0.54	0.53	0.52	0.50
	6	+	%	0.17	0.17	0.19	0.17	0.22	0.23	0.14	0.15	0.18	0.12	0.17	0.19	0.25	0.33	0.36
建筑和交通	7	+	辆	18.28	21.17	20.48	17.30	7.56	7.80	9.47	12.87	15.21	10.07	7.74	8.41	12.39	17.63	4.34
	8	+	km/km ²	0.92	4.30	7.39	3.16	5.42	7.45	1.48	7.78	7.26	1.78	7.37	8.35	1.43	6.37	8.11
环境	9	+	%	0.11	0.18	0.26	0.13	0.16	0.19	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03
	10	+	%	0.03	0.02	0.04	0.00	0.00	0.01	-	0.07	0.07	0.33	0.02	0.03	0.10	0.08	0.05
	11	+	m ² /人	41.51	51.86	56.06	29.07	12.49	13.43	19.53	14.91	25.04	22.95	17.21	27.14	16.17	19.96	28.69
	12	+	%	58.70	58.70	58.70	59.74	63.58	64.78	71.14	76.46	78.89	73.10	77.91	79.30	64.80	66.99	69.98

表 5-2 福建省各设区市低碳城市评价结果（泉州、漳州、南平、龙岩、宁德）（续）

一级指标	二级指标	指标属性	单位	泉州		漳州		南平			龙岩			宁德				
				2010	2015	2010	2015	2020	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
	13	+	%	0.09	-	0.02	0.20	0.11	0.02	-	-	0.00	-	-	0.00	0.12	-	0.03
环境	14	+	%	86.00	90.58	97.50	88.00	90.21	96.31	82.68	87.45	98.29	90.03	89.61	95.75	73.83	87.32	94.47
	15	+	%	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00
	16	+	%	100.00	98.68	100.00	99.34	99.69	100.00	100.00	97.01	100.00	99.64	99.58	100.00	-	96.47	100.00
	17	+	%	99.20	98.90	97.50	99.59	98.90	98.40	99.20	97.00	100.00	96.70	98.60	99.70	97.78	96.20	99.20
经济	18	+	%	0.36	0.36	0.41	0.37	0.38	0.44	0.36	0.39	0.46	0.34	0.40	0.45	0.39	0.34	0.37
社会	19	-	t/人·年	97.89	78.35	103.49	60.12	25.81	37.53	54.22	46.69	49.90	74.31	75.51	63.93	43.54	42.74	88.10
	20	-	kW·h/ 人·年	4901.56	5061	5861.8	3945.27	2981.49	5081.27	7330.13	5493.94	4348.12	5262.23	3672.82	5041.82	1880.32	2802.3	6904.4 4

5.1.3 数据来源

为设计规范城市温室气体源汇测量、空间计量与核查、低碳城市综合评价指标核算方法及其数据要求的低碳城市评价体系，内部低碳城市评价所使用的数据主要有九个设区市2010、2015、2020年碳排放总量、能源与资源、建筑与交通、环境、经济与社会相关数据，计算方法与来源见表6。其中，基础统计数据存在部分年份缺失，以临近年份数据代替。

表 6 指标数据来源

二级指标	数据来源
二氧化碳排放总量	MEIC 数据
人均碳排放量	MEIC 数据、《福建省统计年鉴》常住人口数据
单位 GDP 二氧化碳排放量	MEIC 数据、《福建省统计年鉴》GDP 总量数据
单位工业增加值二氧化碳排放量	MEIC 数据、《龙岩市统计年鉴》全省及各设区市工业增加值数据
单位 GDP 能耗	《福建省统计年鉴》
电能占终端用能的比重	《福建省统计年鉴》单位 GDP 电耗、单位 GDP 能耗
万人公共车辆拥有量	《福建省统计年鉴》年末运营公交车辆数、市辖区常住人口数据
道路网密度	《中国城市建设统计年鉴》
土地开发强度	《中国城市建设统计年鉴》城市建设用地面积、《中国城市统计年鉴》行政区城市辖区统计面积
生态用地比例	各地市国民经济和社会发展统计公报、福州市环境状况公报、厦门经济特区年鉴、莆田市环境保护与生态建设专项规划、漳州统计年鉴、南平市环境质量公报-自然保护区面积
人均绿地面积	《中国城市统计年鉴》市辖区绿地面积、《福建省统计年鉴》市辖区常住人口数据
森林覆盖率	《国民经济和社会发展统计公报》（福州、莆田、三明、龙岩、宁德）、政府工作报告（厦门）、漳州统计年鉴、南平市环境保护与生态建设专项规划
湿地面积占比	第二次全国湿地资源调查统计湿地面积、厦门市“十四五”海洋生态环境保护 形势与任务研究报告、漳州统计年鉴、各地市第三次国土调查主要数据-行政区域统计面积
污水处理率	《中国城市建设统计年鉴》
再生水利用率	《中国城市建设统计年鉴》

生活垃圾无害化处理率	《中国城市建设统计年鉴》
空气质量优良天数比率	各地市《国民经济和社会发展统计公报》
第三产业增加值占单位 GDP 比重	《中国城市统计年鉴》地区生产总值构成
人均用水量	《中国城市建设统计年鉴》供水总量、《福建省统计年鉴》市辖区常住人口数据
人均用电量	《中国城市统计年鉴》全社会用电量、《福建省统计年鉴》市辖区常住人口数据

5.1.4 评价指标基准值确定

本验证以2010年为基准年，因此，指标的基准值为2010年指标值。通过指标变化了解福建省九个设区市2015、2020年低碳城市发展水平的变化情况。

5.1.5 低碳城市发展指数计算

(1) 评价值计算

计算各项低碳城市评价指标的评价值，如表7。

表 7 福建省各设区市各项低碳城市评价指标评价值

指标	福州		厦门		莆田		三明		泉州		漳州		南平		龙岩		宁德	
	2015	2020	2015	2020	2015	2020	2015	2020	2015	2020	2015	2020	2015	2020	2015	2020	2015	2020
1	-0.176	-0.105	-0.081	-0.048	-0.218	-0.126	-0.450	-0.720	-0.406	-0.498	-0.474	-0.406	0.096	0.146	-0.184	-0.437	-0.081	-0.048
2	-0.072	0.055	0.159	0.286	-0.117	0.025	-0.446	-0.729	-0.332	-0.386	-0.415	-0.336	0.107	0.157	-0.131	-0.347	0.159	0.286
3	0.346	0.655	0.357	0.662	0.375	0.638	0.175	0.379	0.183	0.474	0.238	0.558	0.508	0.690	0.325	0.504	0.357	0.662
4	0.294	0.508	0.314	0.521	0.332	0.583	0.143	0.306	0.209	0.426	0.337	0.501	0.478	0.605	0.120	0.253	0.314	0.521
5	0.286	0.347	0.232	0.348	0.273	0.328	0.542	0.639	0.222	0.383	0.299	0.322	0.345	0.512	0.426	0.547	0.232	0.348
6	0.123	0.192	0.092	0.189	0.365	0.648	0.624	0.748	-0.036	0.107	0.314	0.377	0.071	0.307	0.353	0.518	0.092	0.189
7	0.092	0.077	0.130	-0.050	1.330	1.132	-0.238	-0.172	0.159	0.121	-0.563	-0.549	0.359	0.606	-0.231	-0.164	0.423	-0.650
8	-0.034	0.672	0.093	0.904	2.567	2.147	5.084	5.722	3.685	7.056	0.716	1.357	4.246	3.895	3.143	3.697	0.093	0.904
9	-0.407	-0.311	0.379	0.582	1.090	0.689	0.243	0.318	0.718	1.505	0.292	0.493	0.478	-0.154	0.451	0.034	0.379	0.582
10	-0.617	-0.720	-0.027	-0.776	-	-	0.065	0.068	-0.110	0.530	0.000	0.638	-	-	-0.925	-0.922	-0.027	-0.776
11	-0.071	0.139	-0.133	-0.014	-0.024	0.759	-0.170	0.005	0.249	0.351	-0.570	-0.538	-0.237	0.282	-0.250	0.183	-0.133	-0.014
12	0.013	0.063	-0.058	-0.025	0.031	0.037	-0.012	0.025	0.000	0.000	0.064	0.084	0.075	0.109	0.066	0.085	-0.058	-0.025
13	1.153	-0.726	-0.105	-0.685	-	-	-	-	-	-	-0.446	-0.908	-	-	-	-	-0.105	-0.685
14	0.033	0.112	0.039	0.110	-0.020	0.116	0.061	0.176	0.053	0.134	0.025	0.094	0.058	0.189	-0.005	0.064	0.039	0.110
15	-0.860	40.349	-0.257	48.912	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.257	48.912
16	0.000	0.000	0.032	0.032	-0.008	0.000	0.024	0.040	-0.013	0.000	0.004	0.007	-0.030	0.000	-0.001	0.004	0.032	0.032
17	-0.011	0.032	0.017	0.023	-0.003	-0.019	0.094	0.110	-0.003	-0.017	-0.007	-0.012	-0.022	0.008	0.020	0.031	0.017	0.023
18	0.097	0.217	0.229	0.222	0.159	0.303	-0.031	0.089	0.010	0.124	0.045	0.195	0.063	0.261	0.198	0.330	0.229	0.222
19	-0.212	-0.199	0.000	-0.038	-0.495	-0.351	0.709	0.732	0.200	-0.057	0.571	0.376	0.139	0.080	-0.016	0.140	0.000	-0.038
20	0.076	-0.937	-0.072	-0.245	-0.254	-1.001	0.198	0.240	-0.033	-0.196	0.244	-0.288	0.250	0.407	0.302	0.042	-0.072	-0.245

(2) 指标权重确定

本验证采用的指标权重确定为变异系数法。变异系数法，是一种相对客观的方法，能较好地弥补上述方法在确定权重方面的主观性。它能充分利用各项指标本身所包含的信息，以其离散程度的归一化处理来确定其权重。计算步骤及公式如表8所示，计算结果如表9所示。

表 8 变异系数法应用的基本步骤

步骤	公式	参数说明
(1) 求各指标的标准差	$S_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2}$	W_i 为第 <i>i</i> 种指标的权重， V_i 为第 <i>i</i> 种指标的标准差除以均值所得值， n 为 <i>i</i> 种指标的数量； S_i 为第 <i>i</i> 种指标的标准差； \bar{X} 为第 <i>i</i> 种指标的样本均值。
(2) 计算各指标的标准差与均值的比值	$V_i = \frac{S_i}{\bar{X}}$	
(3) 确定各指标的权重	$W_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}$	

表9 福建省各设区市低碳城市评价指标权重计算结果

指标	福州		厦门		莆田		三明		泉州		漳州		南平		龙岩		宁德	
	2015	2020	2015	2020	2015	2020	2015	2020	2015	2020	2015	2020	2015	2020	2015	2020	2015	2020
1	0.028	0.011	0.027	0.005	0.037	0.017	0.061	0.073	0.085	0.064	0.062	0.039	0.020	0.024	0.027	0.053	0.045	0.032
2	0.012	0.006	0.059	0.038	0.021	0.004	0.061	0.074	0.071	0.052	0.056	0.033	0.023	0.026	0.020	0.043	0.032	0.042
3	0.074	0.110	0.148	0.114	0.087	0.134	0.032	0.065	0.051	0.100	0.044	0.089	0.136	0.162	0.063	0.099	0.097	0.128
4	0.061	0.077	0.127	0.081	0.076	0.118	0.026	0.050	0.059	0.087	0.066	0.077	0.125	0.133	0.021	0.042	0.150	0.136
5	0.059	0.047	0.089	0.049	0.060	0.056	0.124	0.130	0.063	0.076	0.057	0.044	0.083	0.106	0.088	0.110	0.005	0.006
6	0.021	0.020	0.030	0.020	0.059	0.070	0.079	0.075	0.009	0.016	0.044	0.036	0.014	0.041	0.049	0.060	0.057	0.036
7	0.016	0.008	0.042	0.006	0.151	0.103	0.045	0.026	0.037	0.018	0.127	0.087	0.061	0.071	0.043	0.026	0.072	0.093
8	0.006	0.057	0.030	0.072	0.213	0.148	0.239	0.205	0.325	0.251	0.085	0.093	0.272	0.203	0.199	0.190	0.261	0.135
9	0.090	0.041	0.109	0.052	0.134	0.073	0.036	0.038	0.133	0.138	0.041	0.046	0.077	0.026	0.060	0.005	0.033	0.059
10	0.157	0.127	0.009	0.146	-	-	0.010	0.009	0.029	0.068	0.000	0.056	-	-	0.280	0.251	0.050	0.065
11	0.013	0.015	0.048	0.002	0.005	0.079	0.031	0.001	0.056	0.048	0.129	0.085	0.054	0.038	0.047	0.025	0.043	0.054
12	0.002	0.007	0.020	0.003	0.006	0.005	0.002	0.003	0.000	0.000	0.010	0.009	0.014	0.016	0.010	0.012	0.007	0.007
13	0.129	0.129	0.038	0.120	-	-	-	-	-	-	0.093	0.191	-	-	-	-	-	-
14	0.006	0.012	0.013	0.012	0.004	0.016	0.010	0.022	0.013	0.020	0.004	0.010	0.011	0.026	0.001	0.009	0.034	0.024
15	0.260	0.215	0.100	0.222	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	0.000	0.000	0.011	0.004	0.002	0.000	0.004	0.005	0.003	0.000	0.001	0.001	0.006	0.000	0.000	0.001	-	-
17	0.002	0.004	0.006	0.003	0.001	0.003	0.015	0.014	0.001	0.003	0.001	0.001	0.004	0.001	0.003	0.004	0.003	0.001
18	0.016	0.022	0.070	0.023	0.028	0.038	0.005	0.012	0.002	0.019	0.007	0.020	0.012	0.035	0.029	0.041	0.026	0.004
19	0.034	0.020	0.000	0.004	0.075	0.043	0.183	0.160	0.056	0.009	0.129	0.053	0.030	0.013	0.003	0.022	0.004	0.065
20	0.014	0.072	0.024	0.025	0.043	0.095	0.037	0.038	0.008	0.029	0.045	0.029	0.057	0.078	0.058	0.006	0.081	0.110

(3) 低碳城市发展指数计算

计算出福建省各设区市2015、2020年低碳城市发展指数 ($SI_{内}$)，如表10所示。

表 10 福建省各设区市低碳城市发展指数

城市	2015 年发展指数	2020 年发展指数
福州	-0.1493	8.6466
厦门	0.1505	10.8835
莆田	0.9359	0.6630
三明	1.4198	1.3855
泉州	1.2987	2.0987
漳州	-0.0167	0.0234
南平	1.3831	1.1561
龙岩	0.4652	0.6050
宁德	1.0188	0.5334

5.1.6 结果运用

根据表8数据显示，相比较2010年，福建省各设区市在2015、2020年两个时间节点的低碳城市发展指数整体呈积极态势。除福州市、漳州市2015年指数略低于0.1之外，其余城市在2015年均超过0.1，反映出大部分地区低碳城市建设已具备一定基础并持续向好发展。至2020年，所有城市低碳发展指数均为正值，进一步表明福建省低碳城市发展取得实质性成效。

从各市发展情况来看，福州市、厦门市相较于2010年，十年间发展速度迅猛，尤其2015-2020年，在2020年两市低碳城市指数分别达到8.6466、10.8835，远高于其他城市，由表5、表6可看出再生水利用

率的提高对其高评价值做出显著贡献，显示其突出的低碳建设成效；泉州市由1.2987提升至2.0987，进步显著。三明、南平两市虽略有回落，但仍维持在较高水平；莆田、宁德有小幅下降，但指数仍为正值，整体趋势稳定。龙岩市保持正向增长，发展态势良好；漳州市作为2015年未达到0.1的城市，在2020年实现小幅上升，由表5、6可知，主要原因为生活垃圾无害化处理率、空气质量优良天数比率处于相对较低水平。总体来看，福建省各设区市低碳发展水平普遍提升，低碳城市建设稳步推进。

5.1.7 定性指标分析

2010年，厦门被国家发展改革委确定为首批“国家五省八市低碳城市试点”城市之一，依据试点任务要求，同步开展并落实“制定低碳城市试点工作实施方案、编制低碳发展规划及发展目标、建立温室气体统计与核算体系、完善监测-报告-核查制度、健全碳排放管理机制与交流示范”等工作部署，还未开展“示范试点”与“碳排放管理平台”相关工作，而其他地区在当期未被纳入国家城市试点。

2010-2015年期间，在试点方面，城市与园区示范同步推进。其中，2012年南平市被省发改委确定为第二批国家低碳试点城市，按照要求系统开展了低碳发展规划编制、低碳产业体系构建、温室气体排放统计管理体系建立等工作，并积极倡导低碳绿色生活方式和消费模式。在园区试点方面，长泰经济开发区于2014年入列首批国家低碳工业园区试点，重点推进传统产业转型升级，大力培育高端装备、新能

源等战略性新兴产业，并建立低碳监测体系。2015年，三明生态新城被列入低碳城（镇）试点，在城（镇）规划和建设新模式，低碳技术研发应用，城（镇）低碳运营管理机制及低碳发展国际合作平台方面开展了积极探索。在温室气体清单编制方面，省级层面以《福建省应对气候变化规划（2014-2020年）》为统领，多部门联合印发了《福建省适应气候变化方案》，将温室气体清单与统计核算、监测报告与核查（MRV）及评估工作纳入统一部署。各地市据此推进相关工作：厦门作为国家首批低碳试点城市，于2012年率先编制城市碳排放清单，完成了2005-2010年碳排放清单编制，同步实行重点用能单位名录管理制度；莆田于2015年试行温室气体排放报告制度，要求首批28家综合能源消费总量达5000吨标准煤的企事业单位按年度报告其二氧化碳、甲烷等六种温室气体的排放数据。这一时期，福建省初步形成了“发展规划-示范试点-统计核算-MRV-管理平台-交流合作”的地方低碳发展框架，由点带面推动各市低碳能力建设。但各市碳排放管理平台普遍缺失，能力建设仍较多依赖行政推动。

2015-2020年，国家与省级试点进一步深化。2017年，福建省出台《福建省林业碳汇交易试点方案》，在南平、三明、龙岩、福州、泉州、漳州、宁德等地组织开展了省级林业碳汇项目试点，探索“市场化减排+生态碳汇”的协同支撑机制；同年，三明被列入第三批国家低碳城市试点，印发实施低碳发展规划，完成温室气体清单编制工作，重点推动碳数据管理机制建设和森林碳汇补偿机制探索。在碳市

场建设方面，福建省于2016年发布并于2020年修订《福建省碳排放权交易管理暂行办法》，明确了省、市两级生态环境部门的监管职责，建立了企业配额管理及“报告—核查—配额清缴”的MRV闭环管理体系，明确要求各设区市对石化、化工、建材、钢铁、有色、造纸、电力、航空、陶瓷等9个重点排放行业的企业开展碳排放报告与核查工作。至2020年，全省纳入碳排放配额管理的各地市重点排放单位共284家（不包括纳入全国碳市场的发电行业企业），应清缴碳排放配额总量12608.6120万吨，全省纳管企业完成配额清缴、履约率100%，表明各市在统计核算、MRV与执法监管等能力建设方面已实现常态化、全覆盖。但此时期，福建省低碳城市建设仍存在平台化、智能化工作亟待开展，以及国际合作交流相对有限等问题，有待在未来工作中进一步深化和完善。

5.2 外部低碳城市评价（一）

5.2.1 实例对象

参考4.8.2节关于城市分类、分级与分组的标准，选外部低碳城市评价的实例对象。鉴于福建省内城市数量有限，在同类标准下样本较少，难以支撑有效的评价与比较分析，为此将实例对象的选取范围扩展至省外与福建省同处夏热冬暖气候区的其他省、自治区及地区包括广东、广西、海南、香港、澳门与台湾，从中选取省会/首府城市（广州、南宁、海口、台北）及香港作为评价、比较对象。最终，共确定14个城市作为外部低碳城市评价的实例对象，详见表11。

表 11 外部低碳城市评价实例对象

编号	城市
1	福州
2	厦门
3	莆田
4	三明
5	泉州
6	漳州
7	南平
8	龙岩
9	宁德
10	广州
11	南宁
12	海口
13	香港
14	台北

5.2.2 评价指标选择

结合目前已有数据状况，采用主要指标法即选取人均二氧化碳排放量，对14个城市的低碳城市发展水平进行了评价排名。

5.2.3 数据来源

为对所选取的实例对象进行人均碳排放量的评估与比较，评估框架所需要的主要数据有碳排放总量数据及常住人口数据，详见表12。

表 12 数据来源

数据类型	空间分辨率	来源
碳排放总量	地级市	MEIC 数据库、《台北市 2050 净零行动白皮书》、《台北市温室气体管制执行方案》
常住人口	地级市	各城市统计年鉴

5.2.4 评价指标基准值确定

依据采集到的14个城市2010、2015、2020年的人均碳排放数据(表13)，计算评价指标基准值，2010年的指标基准值为4.13吨，2015年的指标基准值为4.59吨，2020年的指标基准值为4.46吨。

表 13 14 个城市人均碳排放 (t/人)

编号	城市	2010 年	2015 年	2020 年
1	福州	2.12	2.28	2.01
2	厦门	2.15	1.81	1.54
3	莆田	3.71	4.15	3.62
4	三明	6.18	8.94	10.69
5	泉州	3.93	5.23	5.44
6	漳州	2.09	2.96	2.79
7	南平	3.12	2.78	2.63
8	龙岩	11.28	12.75	15.19
9	宁德	4.17	4.87	2.67
10	广州	7.15	5.41	4.63
11	南宁	3.09	3.91	3.62
12	海口	2.74	3.73	2.29
13	香港	1.32	0.99	0.97
14	台北	4.76	4.47	4.38

5.2.5 结果运用

人均碳排放与基准比较结果如表14所示。2010年14个城市人均碳排放高于基准的有5个城市，低于基准的有9个城市；2015年14个城市人均碳排放高于基准的有5个城市，低于基准的有9个城市；2020年14个城市人均碳排放高于基准的有4个城市，低于基准的有10个城市。其中，福州、厦门、莆田、漳州、南平、南宁、海口、香港等8个城市在2010、2015、2020年的人均碳排放均低于基准值；三明、龙岩、

广州等3个城市在2010、2015、2020年的人均碳排放均高于基准值，相对较高；泉州在2010年的人均碳排放低于基准值，在2015、2020年转变为高于基准值，人均碳排放增加显著；宁德在2010、2015年的人均碳排放高于基准值，2020年低于基准值，下降趋势较显著；台北在2010年的人均碳排放高于基准值，在2015、2020年转变为低于基准值，人均碳排放下降显著。

表 14 人均碳排放与基准比较结果

年份	高于基准值	低于基准值
2010	三明、龙岩、宁德、广州、台北	福州、厦门、莆田、泉州、漳州、南平、南宁、海口、香港
2015	三明、泉州、龙岩、宁德、广州	福州、厦门、莆田、漳州、南平、南宁、海口、香港、台北
2020	三明、泉州、龙岩、广州	福州、厦门、莆田、漳州、南平、宁德、南宁、海口、香港、台北

5.3 外部低碳城市评价（二）

5.3.1 实例对象

本研究提出的低碳城市评价技术不仅适用于福建省内部城市，对于福建省外乃至境外的城市也有一定适用性，因此，本研究选取了与福建省气候条件、地理位置相近的台湾省台北市，作为外部低碳城市评价实例之一。

台北市隶属中国台湾地区，与福建省隔海相望，属于亚热带季风气候。近年来，台北市低碳城市的建设及推广取得了较为显著的成果。2021年，台北市提出净零排放路径，规划未来30年深度减碳蓝图，并

制定《台北市2050净零行动白皮书》，计划在未来30年从智慧零碳建筑、绿运输低碳交通、全循环零废弃等三大路径推动住商、运输及废弃物部门减碳工作，努力在2030年减碳40%（较2005年）、2040年减碳65%，2050年达到净零排放目标。

5.3.2 评价指标选择

为利于与福建省各地市比较，选择2010年为基准年，通过与2015、2020年台北市的低碳城市发展情况比较，评价2010-2020年台北市内部低碳城市发展水平及其变化。基于台北市已有数据情况，选取了5项一级指标和13项二级指标。评价选取整套指标反映城市碳排放量、直接影响类、间接影响类的低碳建设情况，评价结果如表15所示。

表 15 台北市低碳城市评价结果

类别	一级指标	二级指标	指标属性	单位	2010	2015	2020
碳排放量类	碳排放量	二氧化碳排放总量	-	万 t	1245.8	1208.53	1138.81
		人均碳排放量	-	t/人	4.76	4.47	4.38
		单位 GDP 二氧化碳排放量	-	t/万元	1.03	9.48	8.19
直接影响类	建筑和交通	道路网密度	-	km/km ²	11.88	12.47	10.88
		绿色交通出行比例	+	%	57.1	58	60
间接影响类		土地开发强度	-	%	35.20	35.39	35.49
		人均绿地面积	+	m ²	45.96	44.88	49.02
	环境	污水处理率	+	%	61.2	68.68	72.87
		城市空气质量优良天数比率	+	%	53	61	68
	经济	第三产业增加值占地区生产总值比重	+	%	97.48	98.73	99
社会	人均用水量	-	t/人	345	330	338	
	人均用电量	-	Kw·h/人	6330	5980	6140	

5.3.3 数据来源

台北市2010-2020年相关数据来源于台湾统计资料、文献和相关部门的网站，其中，温室气体排放数据来自《台北市2050净零行动白皮书2.0》、《台北市温室气体管制执行方案》等。

5.3.4 评价指标基准值确定

本验证以2010年为基准年，因此，指标的基准值为2010年台北市指标值。通过指标变化了解台北市2015、2020年的低碳城市发展的变化情况。计算台北市各项低碳城市评价指标的评价值，结果如表16。

表 16 台北市各项低碳城市评价指标的评价值

指标名称	2015年评价值	2020年评价值
二氧化碳排放总量	0.0299	0.0859
人均碳排放量	0.0609	0.0798
单位GDP二氧化碳排放量	0.0783	0.2036
道路网密度	0.0498	-0.0839
绿色交通出行比例	0.0158	0.0508
土地开发强度	0.0054	0.0080
人均绿地面积	-0.0235	0.0666
污水处理率	0.1224	0.1908
城市空气质量优良天数比率	0.1509	0.2830
第三产业增加值占地区生产总值比重	0.0128	0.0155
人均用水量	0.0435	0.0203
人均用电量	0.0553	0.0300

(2) 指标权重确定

本验证采用的指标权重确定方法同5.1.5低碳城市发展指数计算方法中的变异系数法。计算结果如表17所示。

表 17 台北市低碳城市评价指标权重计算结果

指标名称	2015 年权重	2020 年权重
二氧化碳排放总量	0.0476	0.0818
人均碳排放量	0.0985	0.0758
单位 GDP 二氧化碳排放量	0.1277	0.2066
道路网密度	0.0762	0.0798
绿色交通出行比例	0.0245	0.0451
土地开发强度	0.0085	0.0073
人均绿地面积	0.0373	0.0587
污水处理率	0.1808	0.1587
城市空气质量优良天数比率	0.2201	0.2259
第三产业增加值占地区生产总值比重	0.0199	0.014
人均用水量	0.0697	0.0187
人均用电量	0.0892	0.0278

(3) 低碳城市发展指数计算

计算出台北市 2015 年低碳城市发展指数：

$$SI_{内} = 0.0843$$

计算出台北市 2020 年低碳城市发展指数：

$$SI_{内} = 0.1503$$

5.3.5 结果运用

由 $SI_{内} > 0.1$ 可知，台北市2015、2020年低碳城市发展指数高于基准年低碳城市发展指数，表明台北市低碳城市发展逐渐向好并趋于平缓，低碳城市建设起到一定成效且维持在较高水平。

以2010年为基准年，比较福建省九个设区市及台北市2015、2020年低碳城市发展水平（表18）。分析结果表明，在2015、2020年两个时间节点，福建省多数设区市的低碳城市发展指数显著高于台北市。

其中福州市、厦门市、泉州市2020年发展指数分别达到8.6466、10.8835和2.0987，分别为同期台北市的57.5倍、72.4倍和13.9倍。其他如三明、南平、莆田、宁德等市的发展指数也明显高于台北市。表明福建省各设区市低碳城市发展速度相较台北市更为迅猛。

表 18 福建省各设区市与台北市低碳城市发展水平比较

城市	2015 年低碳城市发展指数	2020 年低碳城市发展指数
福州	-0.1493	8.6466
厦门	0.1505	10.8835
莆田	0.9359	0.6630
三明	1.4198	1.3855
泉州	1.2987	2.0987
漳州	-0.0167	0.0234
南平	1.3831	1.1561
龙岩	0.4652	0.6050
宁德	1.0188	0.5334
台北市	0.0843	0.1503

5.3.6 定性指标分析

2010年，福建省低碳能力建设以国家低碳城市试点政策为主要亮点。厦门作为国家五省八市试点之一，开展了低碳发展规划制定和温室气体统计核算体系建设，但在示范试点、MRV制度、碳排放管理平台等方面仍未开展。其他地市则更为滞后。台北市在此时已构建了较为成熟的低碳城市纲领；在统计与核算与MRV方面，构建起覆盖主要排放源的数据管理系统，且碳排放管理平台实现了对城市排放的常态化监测。同时，并通过广泛的交流合作引入了国际先进经验。

2010-2015年，通过增加国家低碳城市试点和省级规划，福建着力补齐基础能力短板。厦门的统计核算与MRV体系趋于稳定；南平在发展规划和示范试点上开始布局；莆田则尝试了企业级的统计与核算。然而，福建省内各地市碳排放管理平台仍普遍缺失，能力建设依赖行政推动。台北市碳排放管理平台已升级为集成化的智慧管理工具，实现了数据可视化与决策支持；在交流合作上，频繁参与国际城市网络，引进相关技术并更新低碳理念。

2015-2020年，福建省发布《碳排放权交易管理暂行办法》，在各地市构建了重点行业的碳排放统计与核算和MRV制度。同时，三明在示范试点（低碳城镇）和碳数据管理上形成特色，而南平、龙岩通过林业碳汇项目丰富了统计核算的内涵。但平台化、智能化程度仍不足，交流合作多限于国内。台北市低碳城市发展能力逐步形成“智慧化”与“社会化”，其管理平台实现了精准管控与公众参与；交流合作开始聚焦于前沿技术与社会治理。

6 福建省不同类型城市低碳建设差异及其提升路径

为科学推进城市低碳建设工作，有必要对城市进行分类、分级与分组，并结合应用实例成果，开展福建省不同类型城市低碳建设情况的差异分析与比较，从而提出针对性的提升路径。为此，本研究系统梳理了福建省低碳城市建设的现状，参照4.8.2分类方法构建了省内城市分类体系，在整合内外部低碳城市评价结果的基础上，解析了不同类型低碳城市的差异特征，进而提出针对不同类型城市的低碳发展路

径与政策建议，以期为福建省碳达峰试点政策的落地实施与推广、推动各地市进一步落实国家“双碳”目标提供有效支撑。

6.1 福建省低碳城市建设现状

福建省以建设首个国家生态文明先行示范区为契机，作为首批国家生态文明试验区，始终坚持绿色低碳发展导向，锚定“双碳”目标，全面落实碳达峰碳中和战略。全省双碳工作呈现“试点先行—制度完善—重点行业突破—增强碳汇—推动转型”的总体思路，构建起以“城市—园区—社区”多层次试点为牵引、以重点行业和重大工程为载体、以碳市场和要素市场为支撑、以碳汇能力提升为保障的协同推进格局，双碳工作进入全面实施阶段。

6.1.1 试点建设进展

依照国家部署，福建广泛开展碳达峰碳中和相关试点示范创建工作，形成了“国家试点引领—省级统筹推进—地市分类探索—典型经验推广”的总体格局。国家试点层面，2010年，厦门市作为首批国家“五省八市”低碳城市试点城市，率先在全省探索低碳社区、低碳园区和近零碳排放示范区建设，为全省提供了“厦门样板”。2017年，三明市入选第三批国家低碳城市试点，依托良好生态本底，发展林业碳票和气候投融资，探索产业转型与绿色金融融合路径。2023年，厦门、三明获评国家低碳城市试点优良城市，全国首个海洋领域国家基础科学中心在厦门启动，实施全国首宗渔业碳汇交易、农田碳汇交易和首张蓝色碳票，林业碳汇交易规模居全国前列。2025年，南平市及

莆田高新区被列入第二批国家碳达峰试点，重点在林业碳汇、无废城市等领域先行先试。此外，2019年，南平市光泽县率先开展国家首批“无废城市”建设试点；2022年，福州市、莆田市入选了国家“十四五”时期“无废城市”建设试点，通过持续推进固体废物源头减量和资源化利用，有效推动减污降碳，协同实现双碳目标。2022年，龙岩市、南平市、三明市等3个设区市成功入选全国林业碳汇试点市（县），围绕森林生态系统碳汇能力巩固提升的重点领域、关键环节开展试点探索。同时，福建省、厦门市于2025年入选国家绿色外债业务试点，鼓励非金融企业将跨境融资资金用于绿色或低碳转型项目。

省、市地方试点层面，自2021年起，福建省连续三年在政府工作报告中提出支持厦门、南平率先达峰，以点带面推动低碳城市、园区、社区建设。2022年，省财政选取城乡建设绿色低碳片区开展试点，支持泉州惠安、莆田湄洲岛、宁德东桥等区域探索可复制经验。2023年，省工信厅印发《福建省工业领域碳达峰实施方案》，提出到2025年建成150家绿色低碳工厂、15个绿色低碳园区，2030年前实现工业碳排放达峰。2024年，省政府进一步出台《福建省碳达峰试点建设方案》，同年公布了首批5个碳达峰试点城市，包括安溪县、顺昌县、将乐县、莆田市湄洲岛国家旅游度假区、平潭综合实验区。其中，湄洲岛加快建设零碳示范区，入选“零碳岛屿”标准试点，打造绿色低碳能源体系和生态旅游样板。平潭推动建设“零碳国际旅游岛”，通过发展海上风电、海洋森林碳汇等清洁能源和生态项目，形成碳达峰

试点“平潭样板”。同时，在碳市场试点工作方面，2016年中共中央、国务院印发《国家生态文明试验区（福建）实施方案》，其中明确提出支持福建省深化碳排放权交易试点，开展林业碳汇交易试点。福建碳市场于年底建成并启动交易，成为国内第八个试点区域碳市场之一，实现与全国碳排放权交易市场的对接。

各地市积极探索低碳发展特色路径。厦门持续走在全省前列，2021年率先发布低碳社区、园区、景区等五项验收规范，并打造全省首个近零碳排放示范区，形成可复制的低碳路径。福州在绿色制造与清洁能源方面成效突出，推动再生纤维研发和绿色工厂建设，打造零碳智能工厂；2017年即依托其丰富海上风力资源，建设海上风电产业园，并于2024年下线全球最大26兆瓦级海上风力发电机组，标志着福建在新能源装备制造和清洁能源供给领域实现重大突破；开展海水无淡化制氢中试和核电安全供能项目，强化低碳能源保障；2021年率先颁发全国首张蓝色碳票，2022年落地全国首宗海洋渔业碳汇交易，探索“渔业执法+蓝碳修复”模式，实施全国首例渔业生态环境损害蓝碳赔偿案，积累可推广经验。三明于2019年底在全国率先探索林票1.0集体林权制度改革试点，2021年进一步推出全国首张林业碳票，对符合条件的林业碳汇量签发林业碳票，为全国林业碳汇市场化发展提供可复制、可推广的“三明经验”。南平立足资源禀赋，2018年首创“森林生态银行”，于2023年获批成立国家碳计量中心（福建），研发碳监测技术，入选第二批国家碳达峰试点名单，2025年顺昌法院“碳执

行”案例入选最高法院典型案例，“碳汇+”“碳能智联”服务试点、绿色金融等工作走在全省乃至全国前列，同时建立“双碳”人才库和能力建设中心，形成智力与平台支撑。泉州注重推动产业绿色转型，以数字赋能、金融创新和生态价值转化协同推进绿色高质量发展，重点鞋服产业率先推广绿色制造与智能工艺，茶产业领域加快数字化与生态化布局，同时，2025年8月，全省首笔茶园碳汇质押贷款在安溪落地，实现生态资产金融化，助力农业与产业绿色价值转化。龙岩在林业碳汇和绿色矿山建设方面走在前列，2021年首创林业碳汇保险和金融区块链平台，累计发放贷款超10亿元；2022年起创新“碳汇+生态司法”机制，推动林地纳入碳汇开发，年交易量突破50万吨，并出台全国首个水土保持碳汇赔偿机制，实现司法与生态修复有机结合；积极推进废弃矿山修复，打造生态公园；同时，培育新材料等战略性新兴产业集群，推动高耗能行业能效提升。宁德在储能产业和近零碳实践上引领全国，依托2019年正式授牌的国家级工程研究中心，带动产业链企业集聚，形成全闭环产业体系；2023年创新探索“红色碳汇+区块链”模式，2024年布局零碳生产与生活场景，建设智能超充站、微电网和零碳乡村示范项目，规划打造近零碳试点工程。

6.1.2 统筹推进重点领域转型

近年来，福建坚持以碳达峰碳中和为引领，根据省碳达峰碳中和“1+N”政策体系编制工作要求，陆续出台并推行了节能减排、工业领域、城乡建设、减污降碳协同增效、普惠机制等分领域分行业实施

方案和保障方案，统筹推进重点领域和重点行业绿色低碳转型。其中，2022年6月，省政府印发《福建省“十四五”节能减排综合工作实施方案》，全面部署钢铁、有色金属、建材、石化化工等重点行业节能降碳改造升级，推动经济社会绿色发展。2023年7月，省工信厅、省发改委、省生态环境厅联合印发《福建省工业领域碳达峰实施方案》，明确到2030年前实现工业领域碳达峰，突出优化产业结构、强化能效约束、加快能源清洁转型等重点任务。2024年3月，建材、钢铁、有色金属、石化化工等分行业碳达峰实施方案相继出台，其中，《建材行业碳达峰实施方案》以水泥行业作为降碳重点领域，推动能效提升与原料循环利用，钢铁、有色金属行业则加快形成绿色低碳生产体系，石化化工行业通过结构优化和技术创新实现全产业链低碳化发展。钢铁行业和有色金属行业碳达峰实施方案则明确到2025年，全省钢铁行业能效标杆水平以上产能占比超过30%，电炉钢产能占比达到20%以上，有色行业逐步形成绿色低碳发展模式。《石化化工行业碳达峰实施方案》提出以产业结构优化和能源结构转型为核心抓手，以“减油增化、炼化一体化”为导向，加快“两基地一专区”建设，通过技术创新和绿色制造推动全产业链的低碳化发展。

除了节能减排和工业领域外，福建省在城乡绿色低碳发展方面取得显著成效。2022年，省财政厅启动城乡建设绿色低碳试点，建设10个试点片区，推进高星级绿色建筑和超低能耗建筑建设、既有建筑节能改造、建筑光伏装机及碳排放监测平台建设。其中，莆田市湄洲岛

既有建筑绿色化改造项目入选住房和城乡建设部城市更新典型案例。2023年3月，省住房和城乡建设厅、省发展和改革委员会联合印发《福建省城乡建设领域碳达峰实施方案》，围绕建设绿色低碳城市、打造绿色低碳县城和乡村等方面提出具体任务与目标。2025年，省财政厅再次下达补助资金，重点支持泉州惠安、莆田湄洲岛、宁德东桥等地开展绿色低碳试点建设，资金主要用于高星级绿色建筑和超低能耗建筑建设、既有建筑节能改造及碳排放监测体系完善。截至目前，全省累计推广绿色建筑面积超过1亿平方米，城乡绿色低碳发展水平持续提升。

福建省在城乡绿色低碳建设持续推进的同时，不断完善减污降碳协同机制。2022年7月，省生态环境厅等六部门联合印发《福建省减污降碳协同增效实施方案》，在工业、交通、城乡建设、农业、林业等重点领域系统部署协同降碳任务，推动全链条减排增效。同年9月，省农业农村厅等部门联合印发《福建省农业农村减排固碳实施方案》，明确优化能耗结构、发展生态养殖、推行绿色种植、强化农田建设等重点举措，提出到2025年基本形成农业农村减排固碳与粮食安全、乡村振兴统筹融合的工作格局。2024年12月，省生态环境厅印发《福建省碳普惠体系建设工作方案》，通过系统性制度设计，建立碳普惠数字化管理与应用机制，促进全民参与绿色低碳生活。通过“1+N”政策体系的持续推进，福建重点领域和重点行业低碳转型步伐不断加快，为实现碳达峰、碳中和目标奠定了坚实基础。

6.1.3 碳汇工作成效

福建“八山一水一分田”，具备林业碳汇高质量发展的天然禀赋和巨大潜力。2016年，依托福建碳排放权交易市场建设，福建率先将林业碳汇纳入制度化建设，探索确权、核算和交易机制，作为三大交易标的之一的福建林业碳汇（FFCER）成功上线并交易；2017年顺昌县推出了全国首个林业碳票，实现森林资源资产化，为全省提供“顺昌经验”。2020年，福建碳市场累计成交量突破千万吨，林业碳汇交易量位居全国前列；2021年完成全国首单国际核证碳减排标准林业碳汇交易，推动与国际市场接轨。农业碳汇方面，2022年，全国首例农业碳汇交易落地厦门；2023年，全省首例国际核证碳减排标准（VCS）农业堆肥类减排项目落地福州，南平、三明等地创新“碳汇贷”、“碳汇质押贷款”等金融产品，拓展碳汇价值转化渠道。2024年，碳汇项目被纳入全省碳达峰试点建设方案，城乡绿色低碳片区与林业碳汇协同推进。

作为海洋大省，福建省在渔业碳汇基础研究、增汇关键技术、交易平台建设、场景应用等蓝碳领域也开展了积极探索。2021年，全国首个海洋碳汇交易服务平台（依托厦门产权交易中心）在厦门成立，完成了首宗海洋碳汇交易“泉州洛阳江红树林生态修复项目”。2022年，省级层面启动蓝碳机制研究，探索海洋牧场与碳汇结合路径，逐步开展了连江全国首宗海洋渔业碳汇交易、福州全国首例以海洋渔业蓝碳赔偿渔业生态环境损害案件、莆田全国首例双壳贝类海洋渔业碳

汇交易、全国首场通过海洋碳汇实现零碳排放的大型展会、发放全国首张海洋渔业碳票等创新工作。2023年以来，积极推动发布首个省级海洋碳汇方法学《福建省红树林修复碳汇项目方法学》，通过推进实施福建省渔业碳汇评估领域首个地方标准《DB35 / T 2238—2024养殖海带碳汇评估技术规程》。促进全国首宗“沉积碳—惰性碳”海洋渔业碳汇交易落地福州，开发完成全国首例跨国海藻碳汇，全省首笔海洋渔业碳汇质押贷款落地漳州，全省首单牡蛎碳汇保险落地诏安，福建进一步拓展了养殖海带碳汇潜力测算、藻类碳汇评估与认证及渔业市场交易金融等实践。2024年11月，平潭综合实验区发布“岚碳”生态产品，探索绿碳与蓝碳结合的碳汇模式，拓展碳汇在市场化 and 旅游产业中的应用场景，标志着福建在海洋碳汇多元化应用和价值转化上迈出新的步伐。

6.1.4 制度与市场建设

近年来，福建进一步通过推进市场化机制建设、健全法规规章标准和统计监测体系、积极发展绿色金融等逐步完善双碳政策机制与市场建设。在市场化机制建设方面，2016年底，福建建成并启动全国第八个碳排放权交易试点市场，率先构建起以《福建省碳排放权交易管理暂行办法》为核心、“1+1+7”配套细则为支撑的制度体系，明确碳市场的核心制度、运行规则、分配方法，全面对接全国碳市场总体思路。2020年，省级层面结合气候变化新形势对相关政策制度进行修订，推动交易主体多元化和交易手段市场化，进一步增强制度适应性

和灵活性。在标准化体系和统计监测体系构建方面，省市场监管局、省发展改革委、省工业和信息化厅等九部门于2023年联合印发《福建省建立健全碳达峰碳中和标准计量体系实施方案》，同年12月，我国第四个国家碳计量中心（福建）落地南平，进一步推动碳计量体系建设，完善福建省碳排放监测、核算和验证体系，为市场运行碳交易和碳中和目标实现提供统一的技术标准和科学数据支撑。同时，福建也逐步健全碳汇方法学。2023年5月，《福建省修复红树林碳汇项目方法学》在福建省生态环境厅完成备案并纳入福建省林业碳汇项目机制（FFCER），该方法学通过制定科学有效的红树林碳汇核算方法，为福建省红树林修复项目开发和实施提供了技术保障。2025年3月，《DB35 / T 2238—2024养殖海带碳汇评估技术规程》作为福建省渔业碳汇评估领域的第一个地方标准正式实施，为准确衡量福建省养殖海带碳汇潜力提供技术保障。

在绿色金融改革方面，2020年10月以来，福建省积极推进三明、南平省级绿色金融改革试验区建设，支持厦门申创国家级绿色金融改革试验区。其中，三明市着力推进传统产业绿色改造、特色现代农业、文旅康养、绿色低碳城市建设，到2025年力争绿色融资余额突破500亿元以上，打造全国首个净零碳排放城市示范；南平市立足国家低碳城市试点，推动绿色信贷、绿色债券、绿色基金、碳金融等产品体系完善，到2025年绿色融资余额突破300亿元；同时，省级财政支持三明、南平省级绿色金融改革试验区积极开展碳排放权交易试点，实现

生态价值转换。2023年11月，泉州落地了全省农信系统首单绿色金融债券，资金拟投向光伏发电、污水处理等清洁能源产业、基础设施绿色升级等绿色产业领域，为绿色高质量发展再添动力。

6.2 省内城市分类

城市碳排放水平受多重因素的综合影响，因此不同类型城市的低碳建设路径亦需要差异化。随着城市规模的扩大，人均家庭碳排放可能上升（Kumar & Sen, 2025）。与此同时，自然地理环境会显著影响碳排放政策的减排效果，而地理区位因素（如海岸带、内陆盆地等）与碳排放和空气污染的空间分布也存在显著关联（Tu et al., 2024）。不同行业在碳排放责任分配、减排路径选择以及产业链绿色协同方面具有差异化作用（Huo et al., 2022; Xu et al., 2024; Xiao et al., 2025; Tsao & Vu, 2018; Liu et al., 2024）。此外，城市的资源禀赋类型也会显著影响碳排放水平，资源依赖型城市因能源开采和高耗能产业集聚而呈现更高碳排放强度（Wang et al., 2025）。由此，参考4.8.2分类方法，具体可从人口规模、地理区位与功能定位、主导产业、资源类型进行福建省内城市分类，从而理解低碳城市发展的关键影响因素。

6.2.1 按城市人口规模划分分类

依据《国务院关于调整城市规模划分标准的通知》（国发〔2014〕51号）的划分标准，以城区常住人口为统计口径，采用第七次全国人口普查数据中的福建省九个设区市2020年末城区常住人口数据，对福建各设区市进行城市规模划分，得到分类结果如下：

表19 福建各设区市人口规模分类

城市规模类别	城市名称	城区常住人口 (万人)
I型大城市 (300万-500万人)	厦门市	436.38
	福州市	353.58
II型大城市 (100万-300万人)	莆田市	138.25
	泉州市	135.40
中等城市 (50万-100万人)	漳州市	76.51
	龙岩市	73.36
I型小城市 (20万-50万人)	南平市	45.59
	宁德市	39.07
	三明市	36.15

6.2.2 按地理区位与功能定位分类

福建省地貌特征为“八山一水一分田”，整体山地面积广阔，平原和农田资源有限。在九个设区市中，依据地理区位可分为沿海与内陆两类：沿海城市包括福州、厦门、泉州、漳州、莆田和宁德，这些地区濒临东海和台湾海峡，拥有突出的海洋区位优势，便于开展对外贸易和港口物流，同时依托港口、航运和开放政策，第二、第三产业基础雄厚，是福建省经济增长的核心区域。相比之下，南平、三明和龙岩则属于内陆城市，位于闽西北和闽西南的山区。该类区域山地比例高，淡水资源丰富，但农业用地有限，更适合依托林业、水资源和生态环境，发展绿色产业、生态农业以及能源开发。

6.2.3 按主导产业划分

依据区位熵 (Location Quotient, LQ) 方法，并参考Haggett (1965) 在《Locational Analysis in Human Geography》中提出的区位分析思想，以及张可云、石敏俊 (2004) 在《区位熵在产业集聚与城市主导产业

划分中的应用研究》中的研究成果，本研究采用2024年福建省九个设区市的三次产业增加值数据（来源：各地市国民经济和社会发展统计公报），对各设区市进行了区位熵计算，结果如表20所示。

表20 福建各设区市三次产业区位熵比较

指标	福州	厦门	莆田	三明	泉州	漳州	南平	龙岩	宁德
第一产业 区位熵	0.8910	0.0537	0.7762	2.2539	0.3531	1.7789	3.3013	1.6807	1.8695
第二产业 区位熵	0.8410	0.8562	1.0927	0.9950	1.2089	1.0513	0.7714	0.9283	1.2224
第三产业 区位熵	1.1441	1.2241	0.9477	0.8652	0.8979	0.8711	0.9351	0.9841	0.7188

结果显示：福州和厦门的第三产业区位熵值分别为1.14和1.22，表明服务业在经济结构中占据主导地位，属于服务业主导型城市；泉州、莆田、宁德的第二产业区位熵值均高于1.09，反映其工业和制造业在全省具有比较优势，属于工业主导型城市；三明、漳州、南平、龙岩的第一产业区位熵值均大于1.68，说明农业和林业资源在经济结构中处于突出地位，属于农业/资源主导型城市。

区位熵的计算原理在于，通过比较某产业在特定城市的产值或就业占比与全国（或全省）平均水平，来衡量该产业的相对集中程度。当区位熵大于1，且显著领先于其他产业时，即可判定其为该城市的主导产业。

$$LQ_{ij} = \frac{E_{ij}/E_i}{E_j/E}$$

其中， LQ_{ij} 为第*i*个城市中第*j*个产业的区位熵值， E_{ij} 为城市*i*中第*j*个产业的指标值（产值、就业人数或产业增加值）， E_i 为城市*i*的总产值或总就业， E_j 为全省*j*产业的总产值（增加值）或总就业， E 为全省总产值或总就业。

6.2.4 按资源类型划分

全国资源型城市可持续发展规划（2013—2020年）》提出，资源型城市是以本地区矿产、森林等自然资源开采、加工为主导产业的城市（包括地级市、地区等地级行政区和县级市、县等县级行政区），并根据资源保障能力和可持续发展能力差异，将资源型城市划分为成长型、成熟型、衰退型和再生型四种类型。在福建九个设区市中，南平市、三明市、龙岩市被划分为资源成熟型城市，这类城市的资源开发处于稳定阶段，资源保障能力强，经济社会发展水平较高，是国家能源资源安全保障的核心区。

6.3 福建省不同类型城市低碳建设差异

6.3.1 碳排放现状分析、趋势脱钩变化

（1）碳排放总量

碳排放核算是推动碳减排工作和实现经济绿色转型的基础环节。通过碳核算，能够量化碳排放总量，识别各环节的排放来源，从而明确减排重点与路径，对实现碳达峰碳中和目标以及规范碳排放权交易市场运行具有关键意义。

由于不同机构及官方组织统计口径、核算边界与方法体系上存在差异，其发布的碳排放总量数据通常不一致。MEIC全球碳排放数据库由清华大学团队基于多源数据融合与建模技术构建，已形成覆盖1990-2020年、包含多分辨率经纬度投影网格空间信息的碳排放清单，有益于数据的科学性与横向可比性，较为适于作为长时间序列碳排放数据的核心来源。研究采用ArcGIS软件对上述MEIC网格数据进行融合、投影、裁剪与提取，得到2010-2020年福建省各地市碳排放总量数据，具体结果如图2、图3所示：

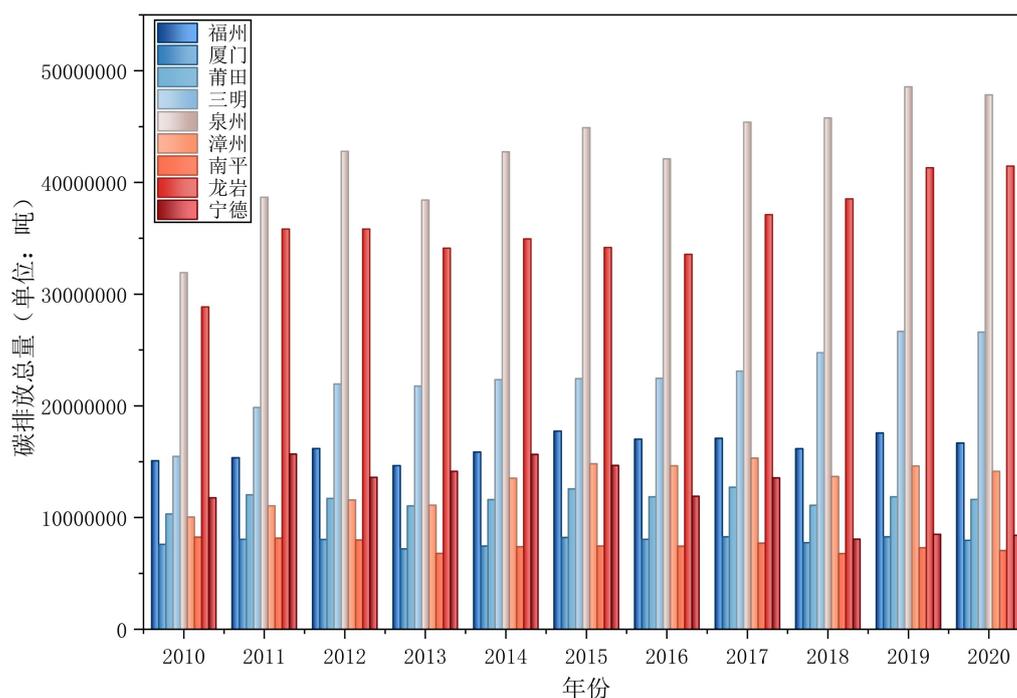


图2 2010-2020年福建各设区市碳排放总量

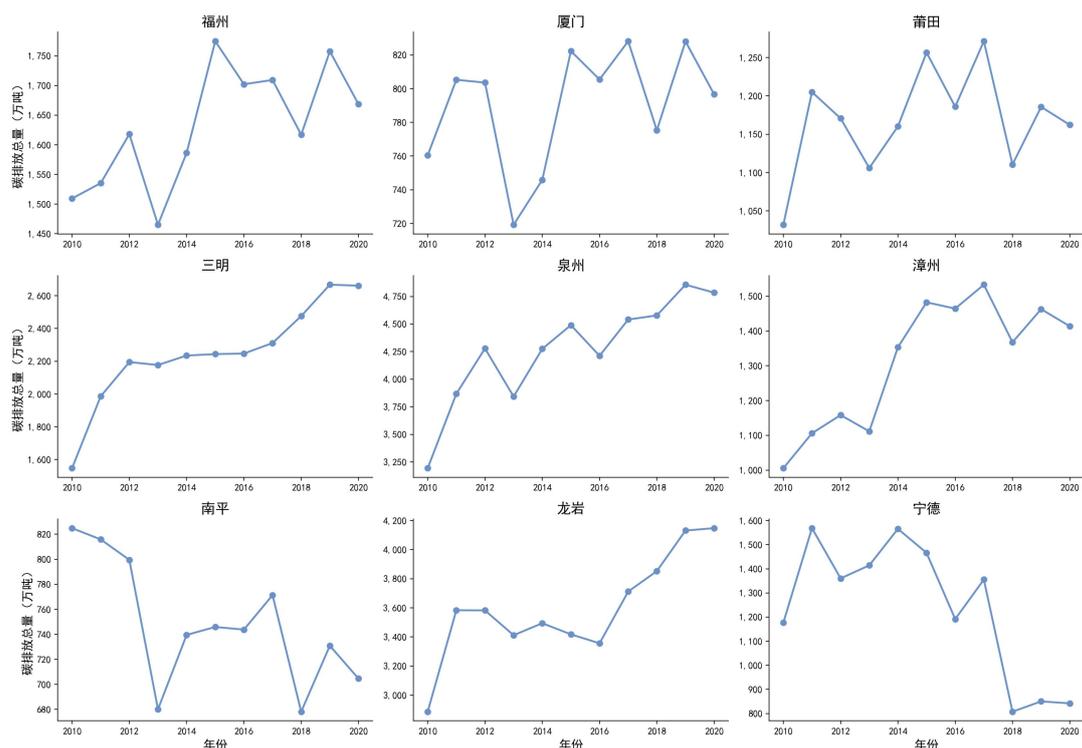


图3 2010-2020年福建各设区市碳排放总量随时间变化走势图

如图2所示，在碳排放快速增长阶段（2010-2017年），全省排放增量主要与石化、机械制造等产业扩张直接相关，尤以泉州最为突出。在平台调整阶段（2018-2020年），受控煤政策及中央生态环保督察制度实施的影响，全省碳排放增速显著放缓。但部分地区对传统工业路径依赖程度较强，碳减排量有限，需继续实施产能置换和清洁生产措施，推广低碳工艺。以宁德为例，依托锂电新能源产业替代传统冶金，碳排放总量由2011年1568.6万吨下降至2020年的842.1万吨(图3)，降幅达46.3%，为全省最显著。在碳达峰方面，由福建各设区市碳排放总量随时间变化走势图可知，福建省各市碳排放总量仍有不规则波动及增长的趋势。

（2）碳排放强度

碳排放强度是指每单位国内生产总值（GDP）二氧化碳排放量。该指标能够全面反映经济发展水平、技术进步程度以及能源利用效率，是衡量低碳发展的核心指标之一。

根据MEIC数据库与《福建省统计年鉴》，2010-2020年福建省各市区碳排放强度指标变化如图4、图5所示。

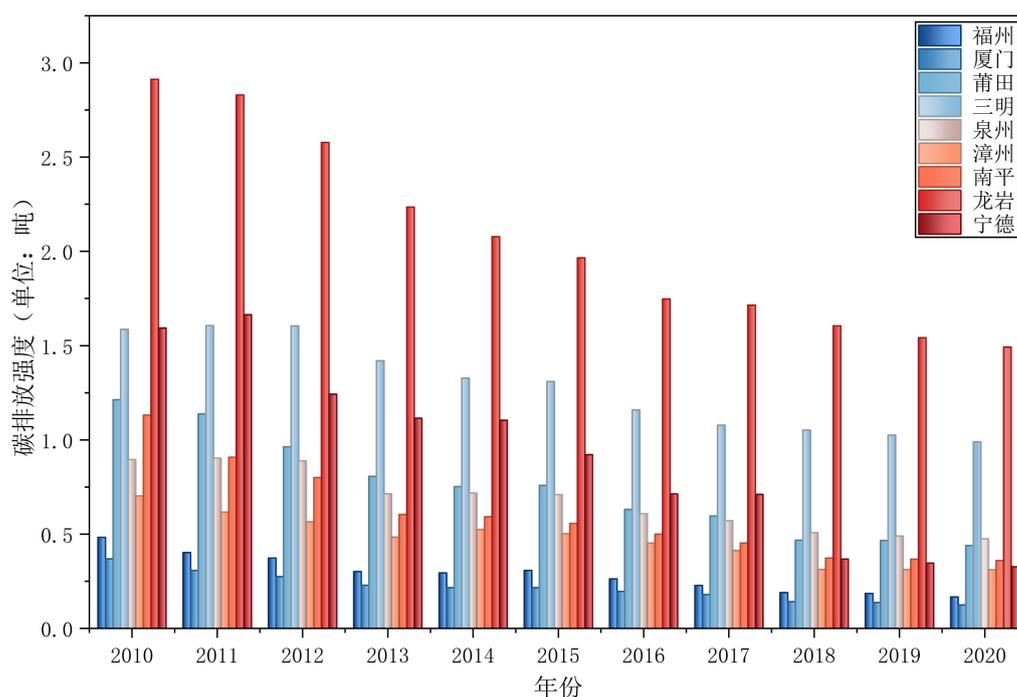


图 4 2010-2020 年福建各设区市碳排放强度

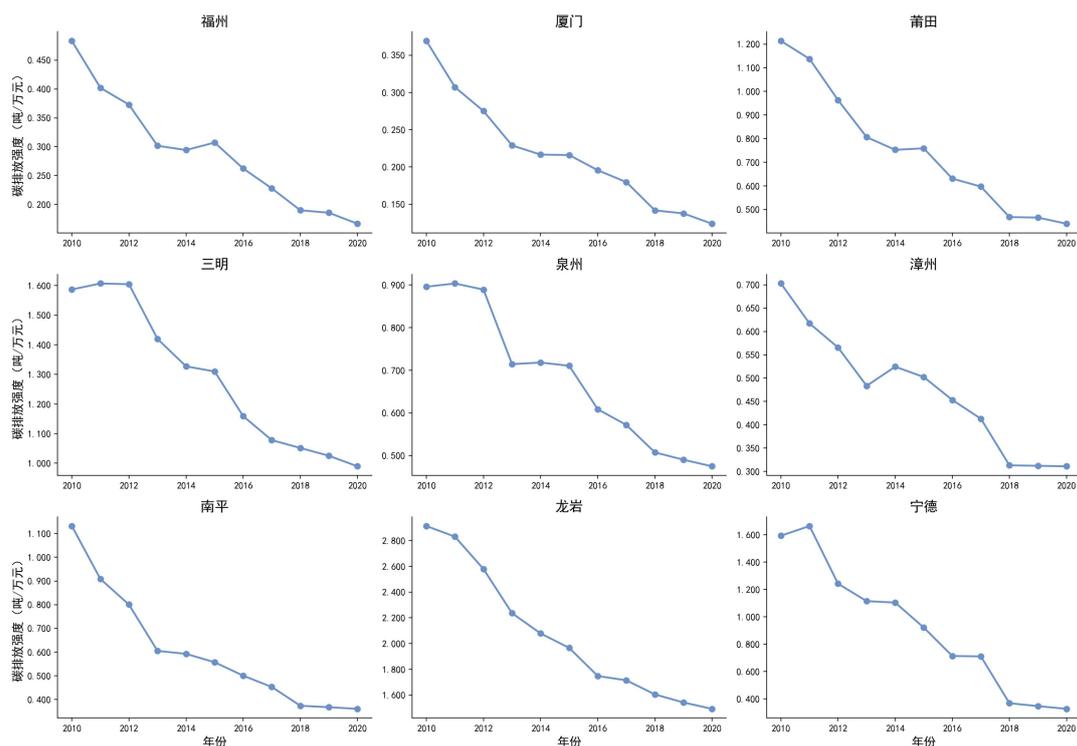


图5 福建各设区市碳排放强度随时间变化走势图

由图5可知，2010-2020年，福建省各设市碳排放强度持续下降，但在产业结构与政策响应的双重作用下，城市间碳排放强度差异明显，如图4所示。其中，福州和厦门作为服务业主导型城市，第三产业占比均超过50%，并依托数字经济和高新技术产业发展，如福州软件和信息技术服务业、物联网产业，厦门半导体产业带动单位GDP能耗持续优化，2020年两市碳排放强度均低于0.17，显著优于省内其他城市。泉州、漳州和南平处于中度调整区，2020年碳排放强度介于0.31-0.47之间，年均降幅保持在6%-8%。其中，泉州在制造业领域，通过“机器换工”降低传统纺织业排放；漳州受益于核电项目投运，2020年核电占能源消费比重达15%；南平市以绿色制造和生态产品价值实现为抓手，2016—2019年单位GDP能耗累计下降20.8%，提前一年完成“十

三五”能耗强度下降20%目标。其余城市如莆田、三明、龙岩、宁德等仍处于高碳排放强度攻坚阶段，初期强度普遍超过1.0，至2020年仍高于0.43。总而言之，于“十五五”期间，福建省实施以强度控制为主、总量控制为辅的碳排放双控制度呈有利态势。

(3) 人均碳排放量

人均碳排放量是指特定地区或国家的二氧化碳排放总量与该地区或国家的人口数之比，表示了人均负担二氧化碳的程度，即每人一年产生的二氧化碳排放量。该指标常用于衡量个体或国民生产方式对环境的贡献。

2010-2020年福建省各市区人均碳排放量指标变化如图6、图7所示。

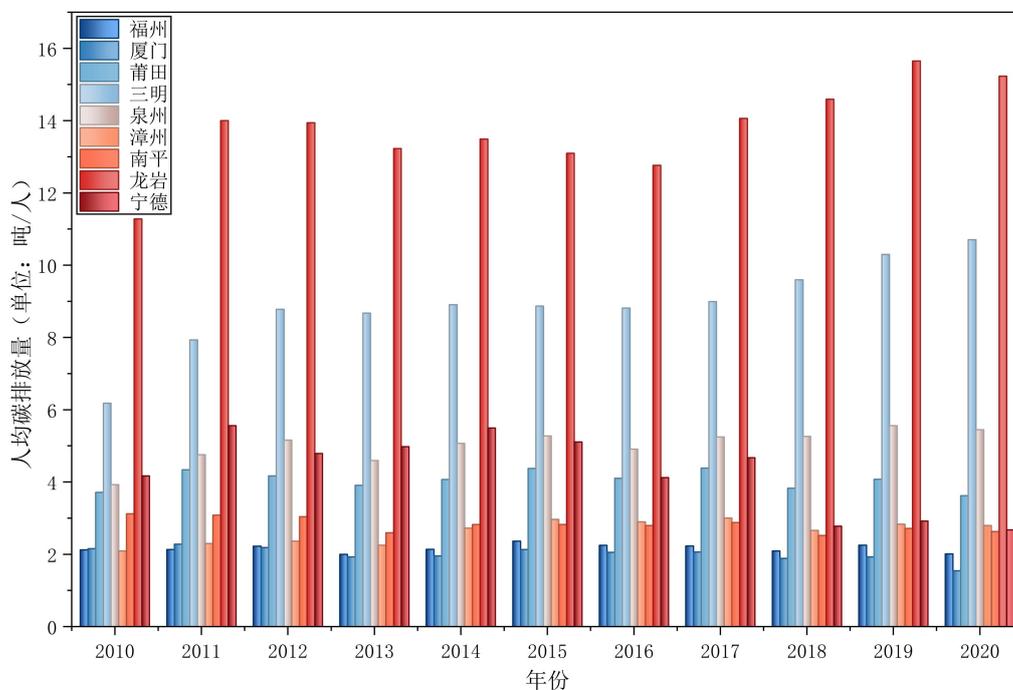


图6 2010-2020年福建各设区市人均碳排放量

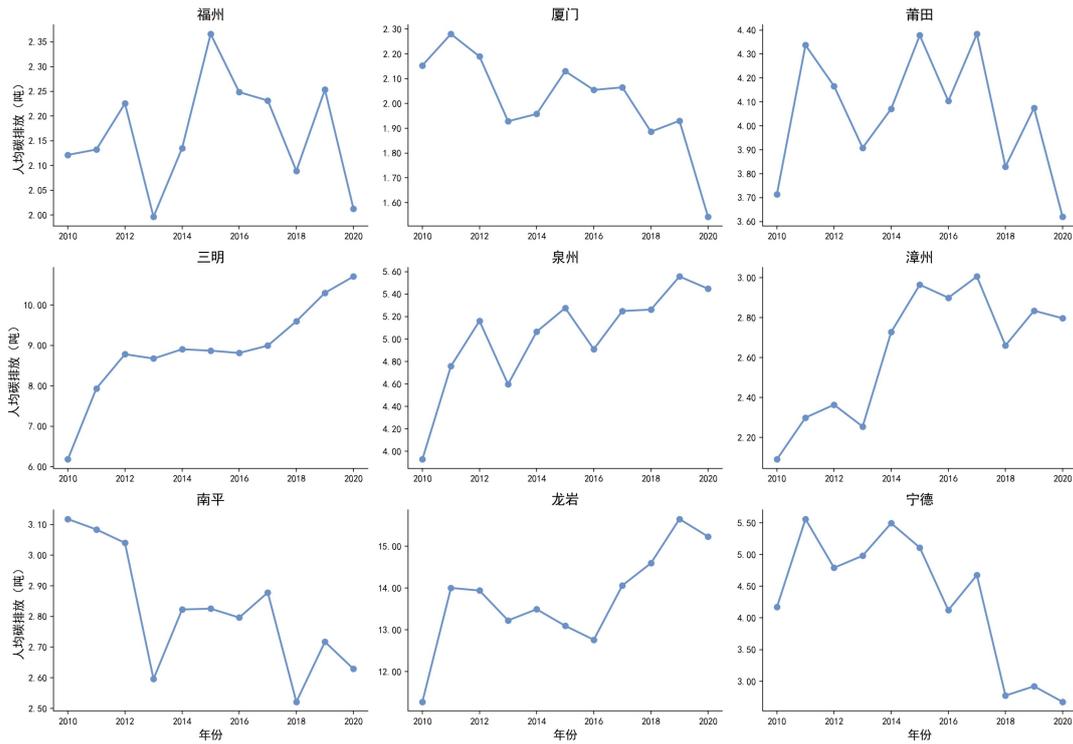


图7 福建各设区市人均碳排放量随时间变化走势图

2020年福建省人均碳排放量为4.85吨/人，略高于当年全球人均碳排放量4.6吨/人，显著低于全国平均水平7.1吨/人，但省内区域差异显著。由图7可以看出厦门、南平、宁德人均碳排放量持续下降，与碳排放强度呈现出的趋势较为一致。龙岩、三明两市构成高排放核心区，十年均值分别为14.62吨/人和9.24吨/人。莆田、泉州两市均值维持在4.0-5.5吨/人之间，排放水平受传统制造业与能源结构制约。宁德市在2018年启动新能源汽车推广和“电动化替代”战略后，碳排放骤降40.6%，充分体现了政策干预的显著成效。

6.3.2 碳排放影响因素

二氧化碳排放量的变化通常受到化石能源的碳排放系数、能源结构、能源强度以及经济结构等因素影响。LMDI方法能够有效消除残

差项，使分解结果更加直观。因此，可采用此方法将二氧化碳排放的影响因素分解为碳排放系数、能源强度、人均GDP以及人口数量四类。

$$C = \frac{C}{En} \times \frac{En}{GDP} \times \frac{GDP}{Pop} \times Pop$$

其中，C表示某地区的碳排放总量，En表示该地区的能源消耗总量，GDP表示该地区的地区生产总值，Pop表示该地区的总人口数量。

依据LMDI乘法分解方法计算，各影响因素对碳排放量的累计贡献率结果如图8所示。贡献率大于0，表明该因素对碳排放具有拉动作用；贡献率小于0，表明该因素对碳排放具有抑制作用。

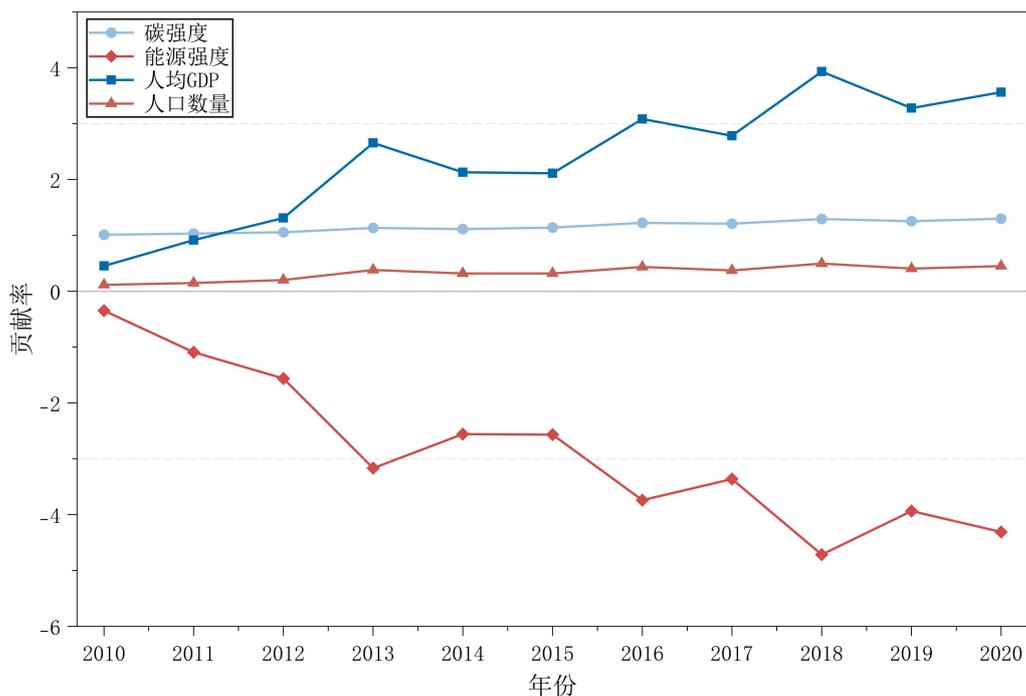


图8 2010-2020年度福建省碳排放量影响因素

以2010年为基准，至2020年福建省碳强度、能源强度、人均GDP、人口数量的累计贡献率依次为129.95%、-431.19%、356.37%和44.87%。

其中，能源强度对碳排放形成显著抑制，碳强度和人均GDP对碳排放具有强烈拉动作用，人口数量则呈现一定的拉动作用。

分析四个驱动因子，其中（1）碳强度表现为正向驱动，数值由2010年的101%上升至2020年的130%，年均增幅2.6%。碳强度持续上升，反映单位能源消耗的碳排放效率下降，对碳排放增长的正向贡献逐年增强。2020年达峰值1.30，反映产业低碳转型进程滞后。（2）能源强度表现为负向驱动，数值由2010年的-35%降至2020年的-431%，抑制作用持续增强。2016年后抑制效应显著加快，年均降幅9.6%，与全省节能技术推广和清洁能源替代政策密切对应。（3）人均GDP表现为正向驱动，数值由2010年的45%上升至2020年的356%，增长近四倍，是碳排放增长的最强驱动力，贡献占比超过50%。2018年数值升至3.93，对应当年福建省GDP增速8.3%，显示经济扩张与碳排放增长之间的高度相关性。（4）人口数量同样表现为正向驱动，数值由2010年的11%上升至2020年的45%，贡献相对较小但稳步增长。人口增加通过消费与能源需求持续推动碳排放，2016年后增速明显加快，与城镇化率提升（2020年达68.3%）保持同步。

总体而言，（1）全省碳排放总量总体趋势表现为“先增后稳”，单位GDP碳排放强度持续下降。三明、龙岩等内陆资源型城市受钢铁、化工等重工业占比较高的产业结构影响，碳排放总量相对较高；厦门、福州等沿海服务业主导城市单位GDP碳排放强度较低；人均碳排放量总体保持平稳并略有回落，市域差异与产业结构、城镇化进程较为一

致；（2）经济增长是碳排放增加的主要驱动力，产业结构与能源结构是造成区域分异的核心要素。随着能源结构优化和政策干预力度的加大，抑制效应逐步增强。

6.3.3 碳达峰分析

碳达峰是指一个地区或行业的二氧化碳排放在经历持续增长后达到历史最高值，并在此之后进入稳定或下降阶段，是实现碳中和目标的重要前提和阶段性节点（Sang and Shen, 2024）。世界资源研究所（WRI）认为，碳排放达峰并不单指碳排放量在某个时间点达到峰值，而是一个动态过程，即碳排放首先进入平台期，并可能在一定范围内波动，然后才进入平稳下降阶段。这一观点强调了达峰过程的渐进性和阶段性，对于理解不同地区达峰路径的差异具有重要意义。准确识别碳达峰的时点与状态，对于科学制定区域碳减排路径、推进分阶段碳治理具有重要意义。现有研究普遍认为，碳达峰的判断应从排放趋势与经济-环境关系两个维度综合进行（Lin et al., 2023; Sang and Shen, 2024; Huo et al., 2024）。

在趋势维度上，Mann - Kendall（MK）趋势检验（Mann, 1945; Kendall, 1975）作为一种非参数统计方法，能够有效识别时间序列的单调变化特征，被世界气象组织推荐用于气候和环境数据的趋势分析，已广泛应用于碳排放峰值识别（Li et al., 2023）。当碳排放时间序列由显著上升趋势转变为无显著趋势或显著下降趋势时，通常可视为该地区已接近或达到排放峰值（Sang and Shen, 2024）。

在经济 - 环境维度上, Tapio脱钩模型 (Tapio, 2005) 被广泛用于刻画经济增长与碳排放变化之间的耦合关系 (Gao et al., 2021)。通过计算脱钩指数, 可判断经济增长与碳排放的同步性与独立性: 当脱钩指数大于1时, 碳排放增长速度超过经济增长, 处于“扩张负脱钩”状态; 指数接近1表明二者同步增长; 指数小于1表明出现初步脱钩, 而指数为负则意味着在经济持续增长的情况下碳排放已进入绝对下降阶段, 具备达峰的经济条件 (Weng et al., 2025; Gao et al., 2021)。近年来, 研究者在识别碳达峰时通常将MK趋势检验与Tapio脱钩分析结合使用, 以判定区域是否达到“真实达峰”“虚假达峰”或“未达峰”状态 (Lin et al., 2023; Sang and Shen, 2024)。

基于上述理论与方法, 选取福建省九个设区市为研究对象, 综合运用MK趋势检验与几何脱钩指数分析, 对2001-2020年各市碳排放的峰值特征与经济 - 环境脱钩状态进行系统评估。其中, MK趋势检验用于识别碳排放时间序列的上升、平台或下降阶段, 几何脱钩指数用于揭示经济增长与碳排放的耦合关系与脱钩特征, 两者结合可实现对城市碳达峰进程的更为准确、动态的识别。相关分析结果见表21与表22。

(1) MK趋势检验

在趋势维度上, Mann-Kendall (MK) 趋势检验作为一种非参数统计方法, 能够有效识别时间序列的单调变化特征, 被世界气象组织

推荐用于气候与环境数据的趋势分析，已广泛应用于碳排放峰值识别（Mann, 1945; Kendall, 1975; Li et al., 2023）。其统计量定义如下：

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$$

其中， $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数，

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{若 } x_j - x_i > 0 \\ 0, & \text{若 } x_j - x_i = 0 \\ -1, & \text{若 } x_j - x_i < 0 \end{cases}$$

x_i 为时间序列在第 i 年的观测值， n 为样本期数。根据 S 的期望与方差，可进一步计算标准化统计量：

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{若 } S > 0 \\ 0, & \text{若 } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{若 } S < 0 \end{cases}$$

其中 $\text{Var}(S)$ 为 S 的方差，通常按：

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5)}{18}$$

进行计算，式中 \sum_t 为存在相同值（平值组）的修正项。

当 $Z > 0$ 且在显著性水平 α 下通过检验时，表示时间序列存在显著上升趋势；当 $Z < 0$ 且显著时，表示存在显著下降趋势；

若 $|Z| \leq Z_{1-\alpha/2}$ ，则认为序列趋势不显著。由此，当碳排放时间序列由显著上升趋势转变为无显著趋势或显著下降趋势时，通常可视为该地区已接近或达到排放峰值（Sang and Shen, 2024）。

（2）经济 - 环境脱钩关系

在经济—环境维度上，Tapio脱钩模型被广泛用于刻画经济增长与碳排放变化之间的耦合关系（Tapio, 2005；Gao et al., 2021）。其核心指标为几何平均脱钩指数（Geometric Decoupling Index），用于衡量碳排放量与经济增长率之间的相对变化关系。其计算公式为：

$$D_{t_0 \rightarrow t} = \frac{(C_t/C_{t_0})^{1/(t-t_0)-1}}{\left(\frac{GDP_t}{GDP_{t_0}}\right)^{1/(t-t_0)-1}}$$

其中， C_t 表示年份 t 的碳排放量， C_{t_0} 为基期碳排放量； GDP_t 和 GDP_{t_0} 分别为年份 t 与基期的地区生产总值。上式反映了研究期内碳排放与经济增长的几何平均增长率之比，能够在多年度尺度上平滑短期波动的影响，更好地刻画经济增长与碳排放变化的长期关系。

当 $D_{t_0 \rightarrow t} > 1$ 时，碳排放增长速度高于经济增长速度，处于“扩张负脱钩”状态；当 $D_{t_0 \rightarrow t} \approx 1$ 时，二者同步增长；当 $0 < D_{t_0 \rightarrow t} < 1$ 时，说明经济增长与碳排放出现“相对脱钩”；而当 $D_{t_0 \rightarrow t} < 0$ 时，表明在经济持续增长的背景下碳排放已实现绝对下降，具备达峰的经济条件（Weng et al., 2025）。

从几何脱钩指数（表22）来看，福建省九个设区市的经济 - 环境关系经历了由“高强度耦合”向“初步脱钩”再到“局部绝对脱钩”的动态演进过程。2001-2005年，宁德与泉州的脱钩指数分别达到2.297和2.226，远高于其他城市，表明碳排放增长速度显著快于经济增长，属于典型的“扩张负脱钩”类型；漳州（2.283）与福州（1.726）等工业基础较强的城市也表现出明显的碳排放快速扩张特征。厦门的指数相对较低（1.236），显示其经济发展与碳排放增长存在一定的同步性与协调性；而三明、南平等市则处于不同程度的偏离状态，整体上仍体现出较强的排放驱动效应。2006-2010年，各市脱钩指数普遍下降，多数城市降至1以下，经济增长与碳排放的关系开始松动，部分城市出现初步脱钩迹象。进入2011 - 2015年，南平、厦门、宁德等市脱钩指数转为负值，碳排放出现绝对下降，表明这些地区在产业结构调整与能源利用效率提升方面已初见成效。2016 - 2020年，这一趋势进一步巩固，宁德、南平、厦门等市的指数持续为负，呈现出稳定的经济增长与碳排放下降并行的格局；福州、漳州等市的指数接近零，基本实现初步脱钩；泉州、龙岩等市则仍处于较低水平的正值阶段，说明其经济发展对碳排放的依赖尚未完全解除。

（3）总体结论

综合MK趋势检验与几何脱钩指数分析结果，福建省九个设区市的碳排放达峰进程呈现明显的阶段性演变与区域差异。2001 - 2005年，所有城市脱钩指数均大于1，碳排放增长速度普遍快于经济增长，

处于“碳排放快速增长”的早期阶段。2006 - 2010年，大多数城市脱钩指数降至1以下，部分城市出现初步脱钩迹象，碳排放增速开始放缓。2011 - 2015年，多个城市（如南平、厦门、宁德、龙岩）脱钩指数转为负值，碳排放出现绝对下降；泉州、漳州、福州等工业基础较强的城市则仍维持正值，但水平较早期大幅下降，表明其排放增长得到初步抑制。2016 - 2020年，宁德、南平、厦门等市脱钩指数持续为负，碳排放已进入下降阶段；泉州、龙岩等市虽指数仍为正，但水平较低，接近平台期；漳州和福州也基本实现初步脱钩。总体来看，福建省九个城市在碳排放达峰进程上已从早期的“普遍高增长”进入到“部分地区达峰、部分地区平台、部分地区持续上升”的分化阶段。其中，宁德、南平、厦门等市已进入碳排放下降通道，达峰态势较为明确；三明、泉州、龙岩等市仍处于排放增长或平台前期，未来达峰压力较大。经济发展仍是碳排放的核心驱动力，但不同城市在产业结构、能源利用和技术创新方面的差异，导致其经济与碳排放的耦合关系存在显著差异。未来，应结合各地产业特征与发展阶段，制定差异化达峰目标与路径，强化重点行业 and 重点区域的减排措施，协同推进全省整体碳排放达峰目标的实现。

表21 福建省设区市碳排放趋势的Mann - Kendall检验结果

城市	Z 值	p 值	趋势
三明	3.904	0.0001	显著上升
南平	-1.757	0.079	无显著趋势
厦门	0.781	0.435	无显著趋势

宁德	-2.733	0.0063	显著下降
泉州	2.928	0.0034	显著上升
漳州	1.952	0.051	无显著趋势
福州	1.561	0.1184	无显著趋势
莆田	0.0	1.0	无显著趋势
龙岩	1.757	0.079	无显著趋势

表22 福建省设区市碳排放—经济增长的几何脱钩指数（2001–2020）

地区	2001-2005	2006-2010	2011-2015	2016-2020
三明	1.455	0.949	0.299	0.630
南平	1.525	0.828	-0.217	-0.264
厦门	1.236	0.418	0.055	-0.038
宁德	2.297	1.145	-0.150	-1.164
泉州	2.226	0.677	0.356	0.461
漳州	2.283	0.682	0.655	-0.177
福州	1.726	0.585	0.341	-0.066
莆田	1.538	0.646	0.090	-0.076
龙岩	1.480	0.387	-0.113	0.772

注：脱钩指数>1 表示碳排放增长快于经济增长；指数<1 表示初步脱钩；指数<0 表示碳排放绝对下降。

6.4 福建省不同类型低碳城市提升路径

6.4.1 低碳城市发展格局与类型化特征

福建省按照国家统一部署，系统推进碳达峰碳中和试点示范工作，构建了“国家试点引领、省级统筹推进、地市分类探索、典型经验推广”的工作格局。自2010年以来，系统推进低碳试点与碳排放管理体

系建设，厦门、三明、南平等地先后获批国家或省级低碳试点，通过规划编制、产业改造和碳清单建设，初步形成城市低碳治理框架；围绕碳达峰碳中和目标，构建“1+N”政策体系，统筹推进工业、城乡建设、农业等重点领域绿色低碳转型，碳汇交易、碳排放权管理体系建设持续深化，实现制度化、常态化推进，绿色金融创新活跃，全省重点排放单位履约率达100%，标志着低碳城市建设进入系统化管理阶段。基于此，全省各设区市依据自身的地理区位、产业结构与资源禀赋，逐步形成差异化的低碳发展路径，呈现出沿海服务型、沿海制造集聚型、海洋与新能源协同型、内陆生态碳汇型等四类空间格局。以下基于内外部低碳城市评价结果与城市分类结果，分析不同类型城市低碳建设的差异演化特征、能效改善水平与未来发展创新格局。

（1）沿海服务型城市：稳态达峰的引领样本

厦门、福州等沿海服务型城市依托区位优势和产业转型基础，率先实现了碳排放的稳态达峰。根据最新评价结果，福州碳排放总量在2010-2020年间由约1509万t上升至1668万t后趋稳，单位GDP碳排放强度由0.48降至0.17 t/万元，人均排放由2.12降至2.01 t/人；厦门同期碳排放总量保持在约760-800万t区间，强度由0.37降至0.12 t/万元，人均排放由2.15降至1.54 t/人，表现出显著的能效提升与结构优化特征。Mann - Kendall (MK) 趋势检验结果显示，两市碳排放序列波动趋稳，无显著上升趋势，已实现从“强耦合增长”向“初步脱钩—稳态达峰”阶段的转变。

在能源利用方面，福州单位GDP能耗由0.64降至0.42 tce/万元，厦门由0.57降至0.37 tce/万元，表明两市能源效率持续提升、清洁化水平不断提高。内部低碳发展指数（ SI_n ）在2010-2020年间稳步上升，其中厦门在建筑节能、绿色出行和城市绿化等方面提升显著，福州则依托海上风电、蓝碳机制与碳汇交易等创新措施，形成了“市场化减排+制度稳控”并重的低碳发展路径。总体来看，沿海服务型城市实现了从能源消费驱动向绿色服务驱动的转变，成为福建省低碳稳态发展的先行样本，为全省“双碳”目标提供了重要的示范引领效应。

（2）沿海制造集聚型城市：产业转型中的减碳承压区

泉州与莆田同属沿海工业型城市，是福建经济增长的传统支柱区域。泉州碳排放总量由约3200万t增至4800万t，MK检验结果趋势显著上升（ $Z=2.93$ ），仍处于“扩张负脱钩”阶段；莆田碳排放维持在1100万t左右（ $Z=0.00$ ），进入“平台期”。泉州单位GDP碳排放强度由0.78降至0.34 t/万元，人均排放约3.8 t/人；莆田强度由0.65降至0.28 t/万元，人均排放约3.1 t/人，显示出明显的能效改善趋势。两市内部低碳指数（ SI_n ）均呈上升态势，反映产业结构正向绿色制造过渡。泉州通过“智造+碳票金融”推动高耗能产业节能改造，莆田则以湄洲岛“零碳岛屿”“无废城市”建设强化绿色治理。总体来看，该组城市正处于“从高碳工业到低碳智造”的关键转折期，是福建工业减碳转型的核心承压带。

（3）蓝碳引领型城市：海洋生态与低碳经济融合

漳州位于福建南部沿海，属于农业主导型城市，以蓝碳引领为特色。全市碳排放总量约1400万t，MK趋势检验结果显示 $Z=1.95$ ，呈稳定态势；人均碳排放约2.8 t/人，单位GDP碳排放强度下降至0.31 t/万元，已进入“平台期”。漳州依托独特的海洋资源优势 and 港口基础，率先探索“蓝色碳票+渔业碳汇”机制，推动海草床、红树林和盐沼湿地的生态修复，实现海洋碳汇的定量化、资产化与交易化。该省在全省率先建立蓝碳项目核算标准体系，将碳汇成果纳入地方生态补偿与碳市场机制。同时，漳州积极推动核电与海上风电协同发展，构建“蓝碳生态—清洁能源—港口经济”融合模式，实现从“资源开发型”向“生态增汇型”的转变。总体来看，漳州以蓝碳为核心纽带，在全国率先形成海洋生态与低碳经济协同发展的示范样板。

（4）新能源驱动型城市：清洁产业集群的增长极

宁德作为福建北部沿海的新能源产业高地，近年来已成为全省低碳增长的重要引擎。全市碳排放总量约840万t，MK检验结果为 $Z=-2.73$ ，呈显著下降趋势，已实现“绝对脱钩”；人均排放水平由4.9降至2.7 t/人，单位GDP碳排放强度降至0.32 t/万元，表现出高效率、低能耗的产业结构特征。宁德以锂电、储能、海上风电和核能为支柱产业，构建了“清洁能源—高端制造—零碳增长”的全链条体系。在政策层面，宁德大力推进新能源装备制造、储能应用与绿色电力消费联动机制，完善港口岸电设施与新能源船舶推广体系，形成“发电—储能—用能”闭环的绿色产业生态。通过产业集聚与技术创新，宁德成为福建从沿

海制造向清洁能源增长极跃迁的核心支点，为全省构建新型能源体系与绿色制造格局提供了坚实支撑。

(5) 内陆生态碳汇型城市：绿色金融与碳汇机制的制度样本

三明、南平、龙岩同属闽西北生态带，是福建生态文明制度创新的集中展现区。三市碳排放总量在1500-4100万t之间，三明仍处增长期（ $Z=3.90$ ），南平和龙岩已进入“初步至稳定脱钩”阶段。三明和南平单位GDP碳排放强度分别下降至0.46和0.35 t/万元，龙岩降至1.44 t/万元；人均排放差距较大：三明约10.7 t/人，南平2.6 t/人，龙岩约15.2 t/人。三市内部低碳指数（ SI_n ）均保持较高水平，约0.47~1.42，且生态承载能力强、碳汇潜力充足。三明以“林票制度+林业碳票”实现生态资产化，南平建设国家碳计量中心与“森林生态银行”，龙岩探索“绿色矿山+碳汇区块链”协同机制，形成“资源—生态—金融”三元联动，是福建内陆推动低碳治理的制度创新样板。

6.4.2 低碳发展路径与政策建议

(1) 国家层面：战略导向与宏观目标

党的二十大报告明确提出“加快发展方式绿色转型”，将碳达峰、碳中和作为推动高质量发展的关键抓手。在国家“十四五”规划及《“十五五”规划编制工作报告（2025）》中，进一步明确从能耗“双控”向“碳排放总量与强度双控”转型，是新阶段构建绿色低碳体系的核心路径。国家发改委、生态环境部等部门陆续出台《2030年前碳达峰行动方案》《全国碳排放权交易市场建设方案》《推进交通运输减污

降碳协同增效行动方案(2025)》等一系列政策文件,系统部署了2030年实现碳排放达峰、到2060年实现碳中和的阶段性任务与时间表。同时,我国首次提出覆盖全经济范围、包括所有温室气体的绝对量减排目标,不仅对之前2030年目标中相关指标做了进一步提升,也为“十五五”“十六五”绿色低碳转型指明了发展方向。

在总体要求层面,国家“双碳”战略坚持“节能优先、绿色低碳、科技驱动、系统治理”的基本原则,全面推动能源结构、产业结构、交通结构和城乡建设格局的系统性变革。对地方实践而言,国家层面政策不仅提供了方向性的战略引领,也赋予了地方政府在减排制度设计、低碳产业和碳汇市场创新等方面的自主探索空间。福建作为“生态文明先行示范区”和“山海协同发展省份”,被列为全国“双碳”综合改革的重要试点区域之一,在制度创新、碳市场衔接及生态碳汇建设等方面承担了先行先试与形成示范的重要任务。

(2) 福建省层面: 总体目标与路径导向

福建省坚决贯彻国家“双碳”战略部署,构建了以“1+N”政策体系为主线、以山海协同与产业转型为核心的低碳发展格局。2025年,省委、省政府相继印发《关于加快福建经济社会发展全面绿色转型的行动方案》与《关于构建从山顶到海洋的保护治理大格局的意见》,前者明确了“全面、协同、创新、安全”四大转型方向,后者以山海统筹、陆海协同为主线,系统构建全域生态保护与治理体系。

从总体进程看，2010-2020年间，福建省单位GDP碳排放强度下降超过35%，碳排放总量稳中有降，能源利用效率和绿色产业比重显著提升，各设区市内部低碳发展指数（ SI_n ）均呈持续上升趋势，表明全省已从政策导向型阶段逐步转向结构转型阶段。然而，仍面临产业结构偏重、区域发展不均衡、非化石能源比重偏低等挑战，亟待通过分类施策与制度创新加以突破。

未来福建省的低碳发展总体路径应围绕“三个阶段性目标”展开：到2025年，全面完成重点城市碳排放核算与MRV体系建设，沿海试点城市率先形成“稳态达峰”路径，蓝碳与新能源示范项目取得实质进展；到2030年，单位GDP碳排放强度较2020年下降45%以上，更多城市实现达峰并形成绿色产业主导的发展格局；到2035年，基本建成以山海协同碳汇为支撑、低碳产业体系为主体、体制机制创新为保障的现代化绿色经济体系。

省级层面应坚持“替代、提效、减量、循环”的能源转型方向，加快提升非化石能源占比，完善新能源调度和电力市场交易制度；强化财政金融支持，设立低碳发展专项资金，推广碳票质押贷款、绿色债券、碳基金等工具，构建多层次减排投融资体系。科技创新是支撑低碳转型的关键引擎，应依托省内高校与科研机构，建设碳排放与碳汇技术创新平台，推进碳捕集利用与封存（CCUS）、储能、智能电网、绿色制氢、蓝碳修复等前沿领域技术成果转化，全面提升福建在全国绿色科技创新体系中的战略地位。

（3）市级层面：类型化路径与重点任务

在国家与省级“双碳”战略框架下，福建各设区市应立足资源禀赋、产业结构与碳排放特征，构建差异化、互补性的城市低碳发展路径，逐步形成“沿海创新引领、内陆生态支撑、全域协同提升”的总体格局。

1、沿海服务型城市（厦门、福州）

厦门与福州作为福建沿海核心城市，应持续强化“服务业+高端制造业”双轮驱动的低碳体系，巩固稳态达峰优势，探索绿色转型新路径。两地应在产业结构优化、能源利用效率和政策创新等方面发挥引领作用，率先形成“低碳产业—绿色金融—制度创新”三位一体的城市发展模式。

其中，厦门应依托自贸区和经济特区优势，深化“近零碳岛”“低碳园区”与“绿色数据中心”建设，全面落实建筑能效和交通低碳标准。在信息通信、现代服务与数字经济等领域系统推动能耗监测和碳排放管理系统化建设，构建数据驱动的低碳治理体系。积极推广分布式光伏、海上风电与储能系统协同应用，打造绿色能源示范社区和近零碳生活场景。通过智慧能源管理与绿色消费联动，力争在全国率先实现服务业主导型城市从低碳示范向碳中和实践的跨越。

福州应充分发挥“蓝碳+风电”双支撑优势，推动碳汇交易、绿色金融与碳票机制协同发展。依托闽江口和滨海湿地生态系统，完善蓝碳监测、核算与交易体系，构建“生态修复—碳汇增值—金融转化”

循环机制。加快福清核电与海上风电的互补布局，推动清洁能源占比持续提升，形成“生态碳汇+清洁能源”双引擎的低碳能源体系。探索碳资产管理平台建设，推动碳票质押贷款、碳信用融资等创新金融产品落地，拓宽绿色投资渠道。

两地还应在碳排放核算标准化、绿色投资制度化、碳市场衔接国际化等方面先行先试，构建区域碳治理示范体系，通过制度协同与政策联动，推动碳交易、绿色信贷、公共财政形成合力，为福建全省提供可复制、可推广的制度经验。

2、沿海制造集聚型城市（泉州、莆田）

泉州、莆田作为沿海制造业集聚区，应以工业节能改造为主战场，系统推进传统产业能效提升与绿色工艺革新，构建高效、清洁、智能的现代工业体系。聚焦钢铁、建材、石化等高耗能行业，加快推广节能装备与绿色制造技术，推进能效标杆建设与绿色工厂创建，推动企业从能源粗放利用向节能集约发展转变。建立健全碳排放与能耗“双控”考核体系，将其与财政专项资金、项目审批及信贷支持挂钩，形成“以评促改、以奖代补”的政策激励机制，倒逼高耗能行业加快绿色转型步伐。

其中，泉州可深化“智造+碳票金融”模式，依托雄厚的产业链基础与制造业集群优势，推动上下游企业协同减碳。鼓励龙头企业建立碳管理体系和供应链减排数据库，形成产业链碳足迹可追溯机制，并通过碳票质押融资、绿色信贷、碳基金投资等工具，将碳资产转化

为企业竞争力与融资能力的双重优势。应积极培育绿色制造示范园区与低碳供应链示范工程，打造具有国际竞争力的“低碳智造之都”。

莆田应依托湄洲岛“零碳岛屿”与“无废城市”等先行示范项目，完善城市绿色治理体系，推动能源、交通、建筑、固废等重点领域协同减排。构建“源头减量—循环再生—清洁利用”的产业闭环体系，强化城市碳排放监测与信息化管理平台建设，实现碳排放全过程动态管理与精细化调控。探索“城市碳账户”与居民碳积分制度，形成政府、企业、社会多元共治的绿色治理格局。

总体而言，两地是福建工业绿色转型的核心承压区。应以制度引导、技术革新与市场激励三轮驱动，推动高碳产业向低碳智造、绿色制造平稳过渡，构建结构优化、动能转换、协同高效的现代工业新体系，为全省制造业高质量发展注入低碳动能。

3、蓝碳引领型城市（漳州）

漳州应立足海洋生态资源优势，系统构建“蓝碳+绿色渔业+清洁能源”三位一体的发展格局。依托广阔的海岸线与优越的近海生态条件，加快蓝碳资源调查、核算与确权过程，构建覆盖“监测—评估—交易—金融”的蓝碳价值链，为福建在全国率先形成可操作、可复制的蓝碳市场机制提供样板。加快“蓝色碳票”和“渔业碳汇”机制的制度化、市场化进程，建立科学的海洋碳汇核算标准与交易体系，推动红树林、盐沼湿地、海草床等典型生态系统修复工程与碳市场深度对接，培育具备资产化和金融化属性的蓝碳产品。鼓励社会资本参与

蓝碳项目投资，探索“蓝碳资产+绿色信贷”“碳票质押+生态补偿”等创新金融模式。在产业层面，统筹推进现代化海洋牧场建设与近岸生态修复工程，发展兼具减碳、增汇、增收功能的蓝色经济。构建从“渔业捕捞—养殖加工—品牌流通”的绿色渔业全链条，推动核电与海上风电的协同布局，打造“港口岸电—新能源渔港—蓝碳示范区”的海洋综合示范带，推动岸电设施与海上风电场、海洋牧场一体化设计和协同运行，形成“清洁能源驱动—生态系统增汇—产业链增效”的循环发展新模式。同时，积极探索海洋碳汇与清洁能源融合发展的制度创新路径，在蓝碳确权、碳资产管理、碳市场交易等领域率先破题，建立海洋生态价值评估与补偿机制，为全国海洋生态文明建设提供政策参考。

4、新能源驱动型城市（宁德）

宁德应巩固在新能源产业链上的领先优势，构建以“新能源制造—储能应用—绿色消费”为主线的低碳增长极。依托宁德时代等龙头企业的集聚效应，在锂电、储能、风电、核能等重点领域形成全链条协同格局，提升关键环节的本地化率与自主可控水平。在能源体系方面，积极推进清洁能源与智能电网的深度融合，优化区域电力调度与储能体系布局，构建安全、灵活、高效的能源供给网络。持续推动港口岸电系统、新能源船舶、绿色交通等重点领域的示范建设，打造“清洁能源使用场景+绿色交通体系”双支撑模式，带动城市公共服务、产业园区和生活消费的全面低碳化转型。同时，探索建立“源网荷储

一体化”示范区，将清洁能源利用贯穿生产、运输、消费全过程，形成闭环式绿色经济生态。在制度创新层面，推动新能源企业深度参与碳交易市场，探索“碳排放权—发电权—储能权”一体化交易平台建设，完善碳资产评估、绿色信贷、碳票质押融资等机制，为新能源产业提供更加高效、灵活的金融支撑体系。通过产业升级、制度创新与技术突破的协同推进，成为福建省清洁能源高地和绿色制造引擎，率先实现能源结构优化与产业结构高端化的双重跃升，为全省乃至全国提供可复制、可推广的“新能源发展样板”。

5、内陆生态碳汇型城市（三明、南平、龙岩）

三明、南平、龙岩三市应立足生态资源禀赋，强化碳汇机制与绿色金融的双重驱动，探索生态产品价值实现的多元化路径，推动生态资源从“自然资源”向“绿色资本”转化。

三明市重点完善“林票+林业碳票”协同机制，推动森林生态系统的价值量化与市场化流通，建立碳票确权、登记、交易、质押全链条制度，形成生态资产可计量、可评估、可交易的运行体系。

南平市依托国家碳计量中心和现有“一元碳汇”“森林生态银行”等基础，完善森林生态资产管理与碳汇交易运营体系，推动碳汇核算标准化、交易数字化和收益分配机制化，带动集体林权制度改革成果向生态金融转化，促进林农、集体与市场主体形成利益共同体。

龙岩市可探索“绿色矿山+碳汇区块链”协同机制，推动矿山生态修复项目与碳汇交易挂钩，实现碳减排量的实时监测、透明核算和

可追溯管理。通过引入区块链技术提升生态修复项目信用等级，吸引社会资本参与“绿色矿山+碳汇基金”共建，形成生态修复、产业发展与金融创新的良性循环。

此类城市应将碳汇项目统筹纳入国土空间规划和生态补偿体系，明确生态空间的“碳汇红线”和发展边界，促进碳汇核算、交易、补偿一体化。通过制度创新和技术赋能，构建“资源—生态—金融”三元联动模式，形成可复制、可推广的地方性制度样本，为全省乃至全国生态文明体制创新提供福建经验。

7 实施标准的措施建议

建议本标准发布后，在标准的实施范围内组织相关单位进行宣传和培训，在掌握标准内容的基础上贯彻实施，并做好监督检查工作。

主要参考资料

- [1] 方时姣.绿色经济视野下的低碳经济发展新论[J].中国人口·资源与环境, 2010, 20 (04) : 8-11.
- [2] 潘家华, 庄贵阳, 郑艳, 等. 低碳经济的概念辨识及核心要素分析[J]. 国际经济评论, 2010, (4) : 88-101.
- [3] 周枕戈, 庄贵阳, 陈迎.2018. 低碳城市建设评价:理论基础、分析框架与政策启示[J]. 中国人口·资源与环境, 28 (06) : 160-169.
- [4] Bäumler A, Ijjasz V E, Mehndiratta S. 2012. Sustainable Low-Carbon City Development in China[R]. World Bank.
- [5] Gao, C., Ge, H., Lu, Y., Wang, W., & Zhang, Y. (2021) . Decoupling of provincial energy-related CO₂emissions from economic growth in China and its convergence from 1995 to 2017. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126627. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126627>
- [6] Huo T, Cao R, Xia N, et al. Spatial correlation network structure of China's building carbon emissions and its driving factors: A social network analysis method[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 320: 115808.
- [7] Huo, T., Zhou, H., Qiao, Y., Du, Q., & Cai, W. (2024) . Historical carbon peak situation and its driving mechanisms in the commercial building sector in China. *Sustainable Production and Consumption*, 44, 25 - 38. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.11.018>
- [8] Kendall MG (1975) Rank correlation measures. Charles Griffin, London, p 202.
- [9] Kumar S, Sen R. Are larger or denser cities more emission efficient? Exploring the nexus between urban household carbon emission, population size and density[J]. *Applied Energy*, 2025, 377: 124500.
- [10] Li, R., Chen, L., Cai, W., You, K., Li, Z., & Ran, L. (2023) . Historical peak situation of building carbon emissions in different climate regions in China: Causes of differences and peak challenges. *Science of the Total Environment*, 903, 166621. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166621>
- [11] Lin, H., Zhou, Z., Chen, S., & Jiang, P. (2023) . Clustering and assessing carbon peak statuses of typical cities in underdeveloped Western China. *Applied Energy*, 329, 120299.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120299>

[12] Liu J B, Liu B R, Lee C C. Social network analysis of regional transport carbon emissions in China: Based on motif analysis and exponential random graph model[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 954: 176183.

[13] Mann HB (1945) Non-parametric tests against trend. *Econometrica* 13:245 - 259.

[14] Ruan, J., Qin, Z., Qian, S., Li, M., Jia, M., Zhang, L., Zhang, Z., Zhu, S., Jiang, H., Cai, B., Wang, S., & Tang, L. (2024) . A hybrid method for assessing the city emission status toward carbon peak. *Urban Climate*, 55, 101927. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101927>

[15] Sang, M., & Shen, L. (2024) . An international perspective on carbon peaking status between a sample of 154 countries. *Applied Energy*, 369, 123580. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123580>

[16] Tapio, P. (2005) . Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001. *Transport Policy*, 12 (2) , 137 - 151. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2005.01.001>

[17] Tsao Y C, Linh V T. Seaport-dry port network design considering multimodal transport and carbon emissions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 199: 481-492.

[18] Tu W, Rao C, Xiao X, et al. Interactive geographical and temporal weighted regression to explore spatio-temporal characteristics and drivers of carbon emissions[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2024, 36: 103836.

[19] Wang S, Fan J, Feng P, et al. The impact mechanism of the digital economy on the carbon neutrality process in resource-based cities and its contribution to urban SDGs[J]. *Environmental and Sustainability Indicators*, 2025: 100769.

[20] Weng, Z., Xu, M., Li, J., Wu, X., Xie, Y., & Tong, D. (2025) . Carbon decoupling and drivers decomposition under the carbon neutrality target: Evidence from county-level cities in China. *Resources, Conservation & Recycling*, 222, 108465. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108465>

[21] Xiao W, Pei X, Song W, et al. Carbon risk transmission analysis of China's construction industry based on embodied carbon linkage networks[J]. *Energy Reports*, 2025, 13: 5731-5745.

[22] Xu F, Li X, Yang Z, et al. Spatiotemporal characteristics and driving factor analysis of embodied CO2 emissions in China's building sector[J]. Energy Policy, 2024, 188: 114085.