

崇明

生态岛

碳源碳汇

核算研究报告

2012/6/8

联合国环境规划署—同济大学
环境与可持续发展学院



IESD SKL
OF POLLUTION CONTROL AND RESOURCE REUSE

致 谢

感谢联合国环境规划署（UNEP）区域合作司司长西本伴子女士、UNEP 特别顾问王之佳先生、UNEP 生态司专家 David Osborn 先生、UNEP 环境政策司教育培训部主任 Mahesh Pradham 先生、法国交通科学与技术研究院（IFSTTAR）的 Anne Vntura 研究员、美国科罗拉多大学丹佛分校的 Anu Ramaswami 教授、英国 Tyndall Climate Center 的副主任 Kevin Anderson 教授、上海市环境科学研究院的黄沈发副院长、华东师范大学王开运教授、上海市水务规划设计研究院徐贵泉副院长、复旦大学刘燕教授、上海交通大学何义亮教授提出的宝贵意见。感谢崇明县科委顾松兰主任、张旭日副主任在项目调研与实施过程中的支持和帮助。

感谢同济大学的陆雍森教授、蒋大和教授、诸大建教授、牛冬杰副教授、徐冉副教授、张冰如副教授、王洪涛博士和张静博士提出的宝贵意见。同时感谢同济大学环境科学与工程学院康涛、付琳、张丽萍等同学在资料收集和整理方面的辛勤劳动。感谢上海市统计局和崇明县科委、崇明县发改委、崇明县水务局、崇明县环保局等职能部门的工作人员在统计数据方面给予的支持和帮助。

研究团队

项目总指导

李风亭 教授 博士

项目负责人

郭 茹 副教授 博士

核心研究人员

张 静 博士

李青青、石准、武佼佼、岳龙、夏冰斌、曹晓静、曹柏静、朱茜

联系方式

如果您对于本报告有任何意见、建议和评论，欢迎发至 ruguo@tongji.edu.cn。

摘要

气候变化已成为世界各国政府和民众的广泛共识，以限制温室气体排放为核心的气候谈判成为各国的关注焦点。崇明是上海市 21 世纪的重要发展战略空间，面临生态环境保护和社会经济发展的双重挑战。崇明的远期定位是世界级生态岛，低碳发展成为其实现这一宏伟蓝图的重要方式和路径。2010 年，崇明成为以低碳为主题的国家可持续发展实验区，同时也成为中国科技部、联合国环境规划署和上海市的合作示范区。可持续碳管理是崇明世界级生态岛建设的重要内容之一，但目前尚未形成统一公认的碳源碳汇核算方法。摸清碳源碳汇家底，不仅对崇明县可持续碳管理具有重要意义，也可以为中国广大县级地区的低碳转型提供实证案例。

本课题以崇明为研究对象，针对低碳经济背景下的农村可持续发展，建立了适用于崇明生态岛碳源碳汇核算的集成方法体系。其中，碳源的核算对象包括了 CO_2 和 CH_4 ，核算部门分为能源活动和非能源活动两类；碳汇的核算对象为 CO_2 ，核算类型包括林地、农田和湿地生态系统。研究运用地理信息系统（Geographic Information System, GIS）技术和遥感（Remote Sensing, RS）技术分析了崇明县各乡镇的碳源碳汇时空特征和演化规律；利用对数平均迪式指数（Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI）分解模型识别了影响碳排放变化的主要因素；基于核算结果，开发设计了基于 ArcGIS 和 SQL Server 的崇明碳源碳汇信息系统，提供了碳管理信息平台。

碳源核算结果表明：2000 年到 2009 年，崇明县碳排放量总体呈增长态势，碳排放量从 270.97 万 t（ CO_2 当量，下同）上升到 590.54 万 t，年均增长率为 9.04%；无论从累积碳排放量和年度碳排放量来看， CO_2 都是崇明县最主要的温室气体，2000-2009 年其累积排放量占累积排放总量的 77.99%，2009 年这一比例高达 83.14%。工业部门导致的能源碳排放是最大的碳源部门，所占比重由 2000 年的 22.60% 持续增长至 2009 年的 38.93%。从空间分布来看，2009 年崇明县主要的碳源分布在长兴乡、城桥镇和陈家镇，分别占崇明县碳排放的 14.94%、8.81% 和 8.78%。2000 年到 2009 年，碳排放增长最快的为建设镇、城桥镇和新村乡。LMDI 分析结果表明，2001 年到 2009 年间，产业结构效应抑制了崇明县的碳排放增长，而经济产出效应和碳排放强度效应则促进了崇明县的碳排放增长。

碳汇核算结果表明：2005 年到 2009 年，崇明碳汇总量不断增长，2009 年碳汇总量达到 407.5 万 t，其中林地碳汇量增长最快。遥感解译分析结果表明，1999 年到 2008 年，崇明林地面积不断增加；2003 年到 2009 年的均一化植被指数（Normalized differential vegetation index, NDVI）整体呈上升趋势，反映了这一时期崇明地区植被生态系统碳汇量的增长趋势。空间分析结果表明，2000 年到 2009 年，崇明各乡镇中，绿华镇碳汇增长速率最高；各乡镇中唯有陈家镇碳汇增长为负。2009 年庙镇碳汇量最大，新村乡最低。1999 年到 2008 年，崇明地区林地面积大幅度增长，反映出崇明岛生态建设过程对植树造林的重视；由于滩涂围垦和经济开发，崇明陆域面积和建设用地面积也有了明显增长。

从碳平衡分析结果来看，2005-2007年，崇明县碳中和系数逐年上升，但2008出现下降，2009年又有所回升。2008年碳中和系数的下降与工业碳源的大幅度增长有关。虽然碳中和系数没有超过1，但相比于上海市其他区域，崇明县的碳中性程度处于较高水平，表明了崇明在低碳建设和发展方面的卓有成效。空间分析结果显示，总体呈现西北优于东南的态势。其中绿华镇的碳中和系数最高，各年都超过1，说明该镇在低碳发展方面处于领先水平。

最后，研究从碳源控制、碳汇建设和碳平衡推进等方面提出了针对崇明县碳管理的政策建议。重点工作包括通过产业升级转型来降低能源活动相关的碳排放，继续重视林业碳汇建设工作及加强湿地碳汇保护，定期更新发布碳平衡时空评价结果等。研究可为崇明生态岛建设和发展提供碳预警信号，并为中国类似区域提供碳源碳汇核算的实证案例。

目录

| | |
|------------------------|----|
| 第 1 章 前言 | 1 |
| 1.1 研究背景和意义..... | 1 |
| 1.1.1 背景..... | 4 |
| 1.1.2 国内外研究进展..... | 9 |
| 1.2 研究区概况..... | 16 |
| 1.2.1 行政区划..... | 17 |
| 1.2.2 社会和经济..... | 18 |
| 1.2.3 基础设施..... | 18 |
| 1.2.4 低碳发展相关政策..... | 19 |
| 1.3 研究目的、内容和方法..... | 20 |
| 1.3.1 研究目的..... | 20 |
| 1.3.2 研究内容..... | 21 |
| 1.3.3 研究方法..... | 21 |
| 1.3.4 研究范围和核算对象..... | 22 |
| 1.3.4.1 研究时空范围..... | 22 |
| 1.3.4.2 核算对象范围..... | 22 |
| 1.3.5 技术路线..... | 23 |
| 1.4 创新点..... | 25 |
| 第 2 章 碳源碳汇核算方法..... | 27 |
| 2.1 碳源核算方法和数据..... | 27 |
| 2.1.1 能源活动..... | 27 |
| 2.1.2 非能源活动..... | 27 |
| 2.1.3 碳源总量..... | 27 |
| 2.2 碳汇核算方法和数据..... | 27 |
| 2.2.1 林地..... | 27 |
| 2.2.2 农田..... | 27 |
| 2.2.3 湿地..... | 27 |
| 2.2.4 碳汇总量..... | 27 |
| 第 3 章 碳源碳汇核算结果与分析..... | 28 |
| 3.1 碳源核算结果..... | 28 |
| 3.1.1 能源活动..... | 28 |
| 3.1.2 非能源活动..... | 31 |
| 3.1.3 碳源总量..... | 32 |
| 3.2 碳汇核算结果..... | 35 |
| 3.2.1 林地..... | 35 |
| 3.2.2 农田..... | 38 |
| 3.2.3 湿地..... | 40 |
| 3.2.4 碳汇总量..... | 42 |
| 3.3 核算结果的不确定性..... | 46 |

| | |
|------------------------------------|-----------|
| 3.4 碳平衡分析 | 47 |
| 3.4.1 数据来源..... | 47 |
| 3.4.2 结果..... | 47 |
| 3.5 基于 LMDI 的碳源分解分析 | 51 |
| 3.5.1 方法..... | 52 |
| 3.5.2 数据来源..... | 53 |
| 3.5.3 结果..... | 53 |
| 3.6 基于遥感的碳汇分析 | 56 |
| 3.6.1 方法..... | 56 |
| 3.6.2 数据来源..... | 57 |
| 3.6.2 结果..... | 57 |
| 第 4 章 结论与建议 | 60 |
| 4.1 结论 | 60 |
| 4.1.1 碳源核算..... | 60 |
| 4.1.2 碳汇核算..... | 61 |
| 4.1.3 碳平衡分析..... | 61 |
| 4.2 建议 | 62 |
| 4.2.1 碳源控制..... | 62 |
| 4.2.2 碳汇建设..... | 63 |
| 4.2.3 碳平衡推进..... | 64 |
| 附录 1 崇明碳源碳汇信息系统 | 65 |
| 附录 2 基于遥感的崇明土地覆盖/利用监测 | 65 |
| 参考文献..... | 66 |

缩略语表

| | | |
|------|----------------------------------------|-------------|
| AR | Assessment Report | 评估报告 |
| BTA | Border Tax Adjustment | 边境调节税 |
| CARB | The California Air Resources Board | 加州空气资源委员会 |
| CCAR | The California Climate Action Registry | 美国加州气候行动注册处 |
| CCI | Clinton Climate Initiative | 克林顿基金会 |

| | | |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| CCP | Cities for Climate Protection Campaign | 城市气候保护行动 |
| CDM | Clean Development Mechanisms | 清洁发展机制 |
| CM | Covenant of Mayors | 市长盟约 |
| EMEP/CORI NAIR | Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-Range Transmission of Air Pollutants in Europe | 欧盟大气排放数据库 指南 |
| EPA | Environmental Protection Agency(U.S.) | 美国环保署 |
| GCTE | Global Change and Terrestrial Ecosystems | 全球变化与陆地生态 系统 |
| GDP | Gross Domestic Product | 国内生产总值 |
| GIS | Geographic Information System | 地理信息系统 |
| ICLEI | The International Council for Local Environmental Initiatives | 国际地方环境行动理 事会 |
| IEA | International Energy Agency | 国际能源署 |
| IEAP | International Local Government GHG Emissions Analysis Protocol | 国际地方政府温室气 体排放分析议定书 |
| IGBP | International Geosphere-Biosphere program | 国际地圈-生物圈计 划 |
| IHDP-GEC | International Human Dimensions program on Global Environmental Change | 国际全球环境变化人 文因素计划 |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change | 政府间气候变化专门 委员会 |
| KP | Kyoto Protocol | 京都议定书 |
| LGOP | Local Government Operations Protoco | 地方政府操作议定书 |
| LMDI | Logarithmic Mean Divisia Index | 对数平均迪式指数 |
| NDVI | Normalized differential vegetation index | 均一化植被指数 |
| RS | Remote Sensing | 遥感 |
| TCR | The Climate Registry | 气候注册处 |
| UNEP | United Nations Environment Programme | 联合国环境规划署 |
| UNFCCC | United Nations Framework Convention on Climate Change | 联合国气候变化框架 公约 |
| WCRP | World Climate Research Program | 世界气候研究计划 |
| WMO | World Meteorological Organization | 世界气象组织 |
| WRI | World Resource Institute | 世界资源研究所 |
| | International Standard for Determining Greenhouse Gas Emissions for Cities | 国际城市温室气体排 放计算标准 |

第1章 前言

1.1 研究背景和意义

《联合国气候变化框架公约》(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)将气候变化定义为相当长一段时间内,在自然气候变化之外由人类活动直接或间接改变全球大气组成所导致的气候改变。1988年,世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)和联合国环境规划署(United Nations Environment Programme, UNEP)建立了政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)。该组织2007年发布的第四次评估报告指出,从全球平均气温和海温升高,大范围积雪和冰融化,全球平均海平面上升的观测(图1.1)中可以看出气候系统变暖是明显的,这与该组织2001年发布的第三次评估报告^[1]结论相一致。报告显示,1906~2005的百年间全球年平均气温升高了 $0.74 \pm 0.18 \text{ }^{\circ}\text{C}$,其中的一系列排放情景预估未来二十年全球将以每十年升高大约 0.2°C 的速率变暖,预计到21世纪末全球地表温度将升高 $1.1\text{-}6.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[2]。

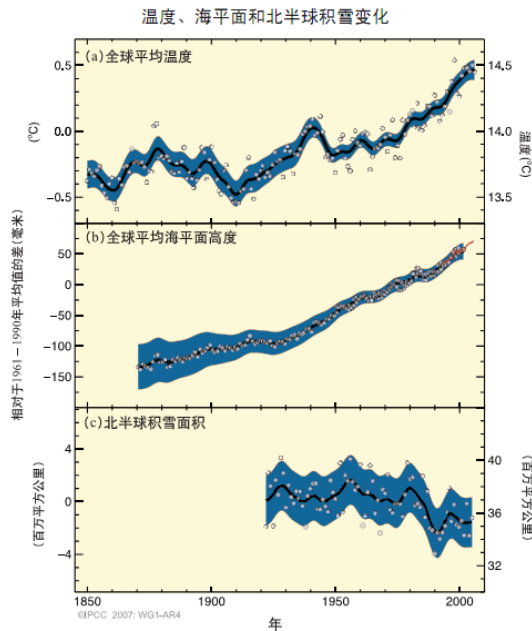


图 1.1 已观测到的(a)全球平均地表温度、(b)分别来自验潮仪(蓝色)和卫星(红色)的全球平均海平面以及(c)3月-4月北半球积雪的变化。所有变化差异均相对于1961年至1990年的相应平均值。各平滑曲线表示十年平均值,各圆点表示年平均值。阴影区为不确定性区间,根据已知的不确定性(a和b)和时间序列(c)综合分析估算得出。
资料来源: IPCC AR4,2007.

从国内研究来看,周天军^[3]、初子莹^[4]、郑景云^[5]等也在积极进行过去千年温度序列的重建研究,较具有国际影响力的是中国科学院地理科学与资源研究所的葛全胜教授研究组。2006年,美国科学院国家科学研究咨询委员会出版的《过去2000年地表温度重建》科学评估报告,引用了中国东部地区过去2000年温度

变化序列作为东亚地区的代表性序列，并评述指出：葛全胜等利用中国历史物候证据、并辅以雪日记载，重建了过去 2000 年的温度变化，证明 950-1300 年及 1925 年以后的温度明显高于长期均值^[6]。2007 年，葛全胜又进一步对已发表的 14 篇中国东部地区过去 500 年地表温度序列的重建曲线进行相关性分析和集束分析，结果显示，具 10 年分辨率的温度序列中，大多数(57/91)相关系数的显著性水平达 99%^[7]。图 1.2 给出了国内东部地区过去 500 年的平均温度曲线。由图 1.2 可知，中国东部的温度自 1500 年起整体呈上升趋势。在最近 50 年，全国年平均地表气温增加 1.1 ℃，增温速率为 0.22 ℃/10a，明显高于全球和北半球同期平均增温速率^[8]。国家气象局近年的实测数据也佐证了这一变暖趋势：2011 年，我国平均降水量为 61 年来最少，全国平均气温偏高，为连续第 15 年偏暖^[9]。

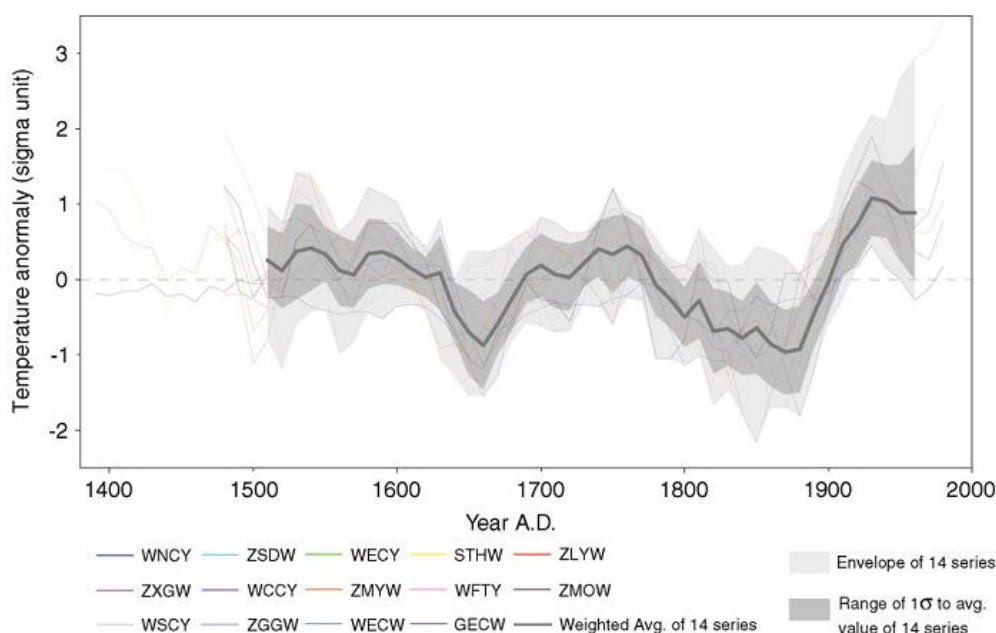


图 1.2 中国东部地区过去 500 年地表温度趋势

资料来源 Quansheng Ge, Jingyun Zheng 等,2008

IPCC 自 1990 年发布第一次评估报告到 2007 年发表第四次评估报告以来的 17 年间，研究不断加深对人类活动引起近百年气候变化的认识，它主要提供了三个方面的证据：1、温室气体自工业化时代以来(1750 年以后)迅速增加；2、近百年地表和对流层温度以及海洋温度明显增加的观测事实；3、根据气候模式对过去 100 年气候变化的模拟。研究表明，近百年气候变暖由自然的气候波动和人类活动共同造成，但最近 50 年大部分气候变化主要由人类活动造成^[10](图 1.3)。IPCC 第四次评估报告指出，人为导致的温室气体浓度增加“很有可能”(90%以上的可信度)是导致气候变暖的主要原因^{[11][12]}。

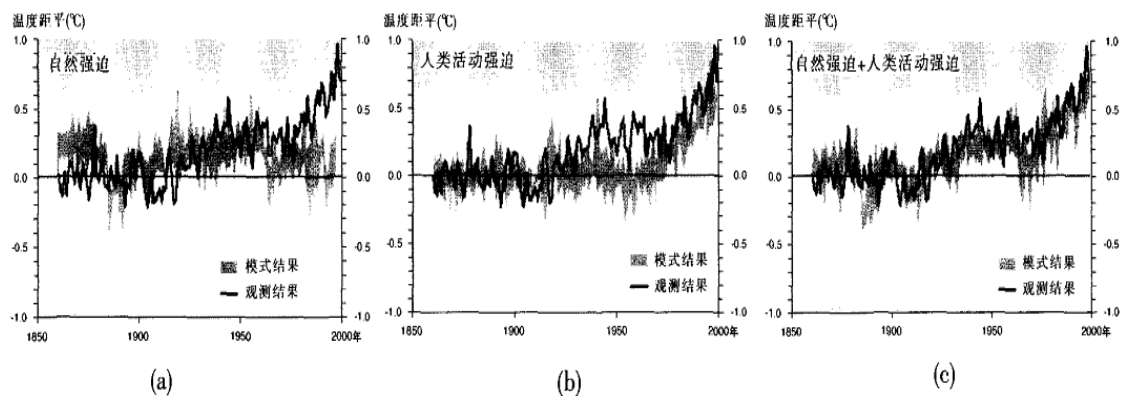


图 1.3 观测的大陆与全球尺度地表温度与使用自然和人为强迫的气候模式模拟结果的对比。(a) 只包括自然强迫即太阳活动和火山活动 (b) 只包括人类产生的强迫, 即温室气体和硫化物气溶胶 (c) 包括上述自然和人类活动强迫的共同作用。

资料来源: Hughton J^[13], 2001

以全球变暖为特征的气候变化将会对自然生态和人类生存环境造成显著的影响。主要有以下几个方面:

对各系统和行业的影响。生态系统的适应弹性被超过。如果全球平均温度增幅超过 1.5 °C-2.5 °C, 目前所评估的 20%–30% 的动植物物种可能面临增大的灭绝风险(中等可信度)。存在粮食减产导致饥荒的风险, 海平面上升带来洪涝之害, 位于海岸带和江河泛洪平原的地区以及贫穷地区最易受到影响。预估数百万人的健康状况将受到影响, 其原因如下, 营养不良增加; 因极端天气事件导致死亡、疾病和伤害增加; 腹泻疾病增加; 由于与气候变化相关的地面臭氧浓度增加, 心肺疾病的发病率上升; 以及某些传染病的空间分布发生改变。预估更频繁和更严重的洪水和干旱将对可持续发展产生不利影响。温度升高将进一步影响淡水湖泊和河流的物理、化学和生物学特性, 并对许多淡水物种、群落成分和水质主要产生不利影响。在海岸带地区, 由于地下水盐碱化加重, 海平面上升将加剧水资源的紧缺。

对各区域的影响。在非洲, 到 2020 年, 预估有 7500 万到 2.5 亿人口会因为气候变化而面临加剧的缺水压力。在亚洲, 到 21 世纪 50 年代, 预估在中亚、南亚、东亚和东南亚地区, 特别是在大的江河流域可用淡水会减少。在澳大利亚和新西兰, 到 2020 年, 在某些生态资源丰富的地点, 包括大堡礁和昆士兰湿热带地区, 预估会发生生物多样性的显著损失。到 2030 年, 水安全问题会加剧, 农业和林业产量会下降。在欧洲, 预计气候变化会扩大欧洲在自然资源与资产上的地区差异。负面影响将包括内陆山洪的风险增大, 更加频繁的海岸带洪水以及海水侵蚀加重。在欧洲南部, 预估气候变化会使那些已经对气候变化脆弱的地区的

条件更加恶劣(高温和干旱),使可用水量减少、水力发电潜力降低、夏季旅游减少以及农作物生产力普遍下降。此外,拉丁美洲、北美洲、小岛屿、极地地区也均会面临较大的气候灾害风险。

特别受影响的系统、行业和区域。主要有特定的生态系统、陆地:对变暖敏感的苔原、北方森林和山区;降雨减少的地中海类型的生态系统;降雨减少的热带雨林。海岸带:由于受到多重压力的红树林和盐沼。海洋:由于受到多重压力的珊瑚礁;对变暖敏感的海冰生物群落等。面临可用水减少的低纬度地区的农业也将受到影响。受影响的主要区域有北极,由于预估的高速变暖对自然系统和人类社区的影响;非洲,由于适应能力低并受到预估的气候变化影响;小岛屿,由于那里的人口和基础设施非常易于遭受预估的气候变化的影响;亚洲和非洲的大三角洲地区,由于人口众多和易于遭受海平面上升、风暴潮和江河洪涝的影响。

海洋酸化。大气 CO₂ 浓度升高导致海洋进一步酸化。预计海洋的逐步酸化对由海洋壳体形成生物(如珊瑚)及其对依附物种产生不利的影晌。

极端事件。预计极端天气事件的频率和强度的变化以及海平面上升将对自然系统和人类系统大都产生不利的影晌。

随着对气候变化带来灾害的认识加深,人们意识到有必要通过全球的努力来减缓气候变化趋势,协调人类文明可持续发展。

1.1.1 背景

1.1.1.1. 碳减排的政治背景——推进碳减排是缓解后德班时代巨大碳减排压力的重要措施

1979 年召开的第一次世界气候变化大会标志着气候气候变化问题正式进入国际政治议程。1990 年 IPCC 第一次评估报告通过,开始了“气候变化公约”的谈判,1992 年 5 月《联合国气候变化框架公约》获得通过,同年 6 月 155 个国家签署了该公约。1997 年《京都议定书》(Kyoto Protocol, KP)在《联合国气候变化框架公约》下制定并通过,首次明确了发达国家温室气体减排数量与时间,要求发达国家在 2008~2012 年间使其温室气体排放量与 1990 年相比至少削减 5% (各国具体减排指标有所差异),并在 2005 年正式成为了具有约束力的国际法律,开创了在气候变化方面采取全球共同行动的先例,是人类首次以法规的形式限制温室气体的排放^[14]。

《京都议定书》虽未明确规定中国必须承担的减排任务,但随着中国经济的高速发展和能源需求的不断增大,CO₂ 排放量增长较快,中国在近 20 年的高速发展以及工业化、城市化进程的联合作用下,已成为温室气体排放量最大的国家

^[15]。面对国际外交谈判的压力，中国迟早要承担温室气体的减排任务。作为一个负责任的大国，中国自 2005 年起就开始摸索适合本国的低碳模式。2010 年，中国在五省八市启动了低碳试点工作，探索符合中国国情的低碳发展模式。

在 2009 年的哥本哈根气候会议上，中国政府承诺，到 2020 年单位国内生产总值 CO₂ 排放比 2005 年下降 40%~45%，这个减排目标已作为约束性指标纳入国民经济和社会发展的中长期规划。我国十二五规划纲要中提出要“控制温室气体排放”^[16]，到 2015 年单位国内生产总值 CO₂ 排放比 2010 年降低 17%、非化石能源占一次能源比重达到 11.4% 以及增加森林蓄积量 6 亿立方米、森林覆盖率增加到 21.66% 等约束性指标，并提出“合理控制能源消费总量”、“建立完善温室气体排放统计核算制度，逐步建立碳排放交易市场”^[17]。这彰显了中国政府推动低碳发展、积极应对气候变化的决心^[18]。

2011 年的联合国气候变化框架公约第 17 次缔约方会议(以下简称德班会议)在德班召开，中国代表团团长、国家发展改革委副主任解振华在出席德班气候大会高级别会议时指出，中国政府本着对本国人民和世界人民负责的态度，历来高度重视气候变化问题，把积极应对气候变化作为中国经济社会发展的重大战略和坚定不移的政策取向。

然而在德班会议上，发达国家对“共同但有区别的责任原则”一直颇有微词，并以“全球环境整体性”为由，不时发出坚持责任共同性、抹杀责任区别性的声音。广大发展中国家则认为，根据“共同但有区别的责任”原则，发达国家应当继续承担应对气候变化的主要责任，并在资金及技术开发和转让方面提供帮助。可以说，发达国家与发展中国家各自坚持的立场截然相反，双方之间的矛盾难以调和^[19]。此外，发展中国家的内部也面临分化的危险。

最终，德班会议通过的决议是发达国家和发展中国家两大阵营互相妥协的结果。支持 2013 年开始实施《京都议定书》第二承诺期，启动绿色气候基金，体现了发展中国家的基本诉求；启动 2020 年之后全球减排框架谈判进程，则满足了美国、欧盟等发达国家的根本愿望。相对于发达国家继续《京都议定书》第二承诺期减排义务，发展中国家在 2020 年之后开始承担全球减排责任的压力更大。届时，虽然“共同但有区别的责任原则”犹在，但更强调“共同的责任”，“区别的责任”开始淡化了^[20]。在接下来不到 10 年的时间里，发展中国家要努力提高自身低碳经济发展水平，为承担全球减排责任打下坚实基础。

2011 年，邢冬梅曾通过对 IPCC 的“曲棍球门”事件的分析得出^[21]，在气候变化研究领域，气候科学模型本身无法消除的不确定性、计算机模拟的局限性与不同学术传统的差异，目前在发达国家政治与经济利益的强权干预下被极度放大，使气候科学模型成为了“政治化科学”。并由此得到了一个很重要的启示：中国

应该加强相对独立自主的气候科研，以争取更多的气候科学的“话语权”，努力赢得国际气候与环境外交的主动权。

1.1.1.2 碳减排的经济背景——以碳减排为特征的低碳经济是中国寻求可持续发展发展的必然选择

以低碳能源为核心的经济发展模式又被称作低碳经济发展模式。狭义的“低碳经济”是以减少碳排放为主要目标，构建以低碳技术、低碳产品为竞争手段的新型低碳市场及其贸易规则与财税体系。从广义的理解看，“低碳道路”的核心应该是把减少碳排放的理念整合到社会经济的各项活动中，通过建立经济高效、能源节约、低碳排放的生产方式和消费方式，形成可持续的低碳能源系统、技术体系和产业结构，实现经济增长、能源安全、节能、环保与温室气体减排等多重目标。

由于各国社会经济技术条件的差异，实现低碳经济或低碳道路所选择的途径、优先顺序和时间表也应有所不同。中国当前的发展理念是科学发展观，即坚持以人为本，树立全面、协调、可持续的发展观，促进经济社会和人的全面发展。因此发展低碳经济是科学发展观的题中之义。事实上，发展低碳经济也与我国的国情有关：当前的经济发展方式难以长期为继，必须寻求突破。

数据显示，2001-2009 年我国能源消费总量一直高于国内能源生产总量，并且这种供需缺口在“十一五”期间呈缓慢扩大态势，平均每年能源缺口量占到当年能源消费量的 10%，见图 1.4。

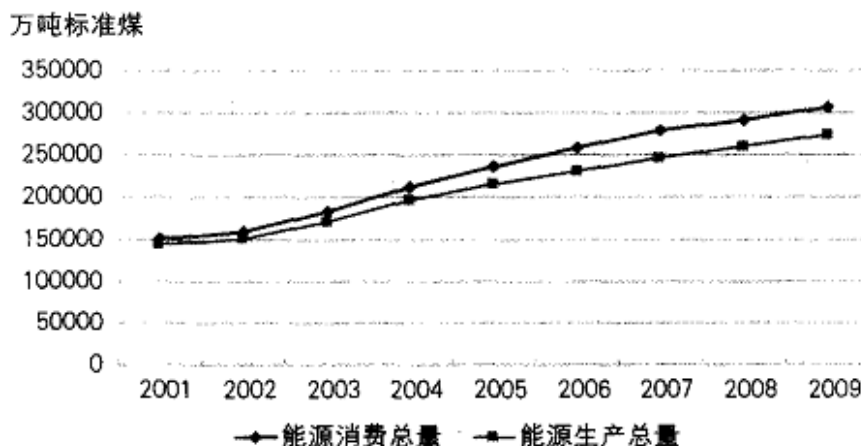


图 1.4 2001-2009 年我国能源消费和能源生产缺口

过去 30 年的经济发展，特别是进入 21 世纪以来，主要依靠投资和外需共同拉动，并以高能耗为主的工业部门迅速扩张为特征，这种经济发展方式虽然短期内取得较高的经济增长速度，却是难以长期为继的，一旦外需萎缩，经济发展就

会陷入停滞，1998 年的亚洲金融危机以及美国次贷危机引发的金融海啸都对中国的经济发展产生了较大影响。目前中国钢铁产量、水泥产量已经高居世界首位，占世界总产量的 40%左右，今后钢铁、水泥产量在当前庞大规模的基础上成倍增长难度已经很大。如果长期延续当前的经济发展方式，中国化石能源消费规模将是惊人的。从资源可供能力看，中国煤炭的开采受到地质条件、生产安全、环境破坏、水资源、土地占用多种因素制约，煤炭最大可持续开采能力不会超过每年 35 亿 t，煤炭需求缺口高达 30 亿 t；中国远期石油年产量不会超过 2 亿 t，高达 11 亿 t 的石油需求将使中国石油进口依存度高达 80%，国家能源安全很难保障^[22]。

因此，我国十二五规划中明确提出：面对日趋强化的资源环境约束，必须增强危机意识，树立绿色、低碳发展理念，以节能减排为重点，健全激励与约束机制，加快构建资源节约、环境友好的生产方式和消费模式，增强可持续发展能力，提高生态文明水平。

另一方面，面对气候变化对人类发展的挑战，没有哪个国家能够独善其身，也没有哪个国家能够独立应对，而且气候变化对发展中国家的冲击比发达国家更甚。因此发展低碳经济是发展中国家的必由之路^[23]。

发展低碳经济中，对国际经济关系影响最突出的是碳关税问题。所谓“碳关税”，是指对高耗能产品进口征收二氧化碳排放关税。自 2005 年 2 月《京都议定书》正式生效之后，欧盟曾几度主张要对来自履行减排义务的国家(主要是美国，但也包括中印等主要发展中国家) 的进口产品征收“Border Tax Adjustment”。欧盟提出的“边境调节税”的核心内容就是碳税，虽然当时欧盟提出的主张未得到国际社会的充分重视，但毕竟反映了承担减排的主要国家的态度——即以征收碳税维护进口产品和欧盟产品的平衡竞争关系。2009 年 6 月底，美国众议院通过一项征收进口产品边境调节税法案，其实质就是从 2020 年起开始实施“碳关税”，即对进口的排放密集型产品，如铝、钢铁、水泥和一些化工产品，征收特别的二氧化碳排放关税。

无论如何，美欧的“碳关税”都是谋取其经济利益最大化，以低碳经济推动经济复苏，加快经济发展，形成新一轮产品出口、技术出口和投资的新优势，从而遏制中国等新兴市场化国家的崛起。显然，我国作为全世界的制造工厂，以碳关税为代表的低碳壁垒必然会对我国的工业品出口造成重大影响。因此，中国作为发展中国家首先应当通过自身的发展来解决发达国家所创设的低碳壁垒^[24]。

1. 1. 1. 3 碳减排的入手工作——碳源碳汇核算研究是碳减排政策的基础

全球气候变化框架公约和谈判协议的通过，一定程度上促进了各国进行节能

减排以及全球碳循环研究的开展。在此背景下，定量研究全球温室气体的收支平衡及其控制机制已成为各国众多重大环境科学研究计划关注的热点问题，如国际地圈-生物圈计划(International Geosphere-Biosphere program, IGBP)、世界气候研究计划 (World Climate Research Program, WCRP)、国际全球环境变化人文因素计划 (International Human Dimensions program on Global Environmental Change, IHDP)和全球变化与陆地生态系统 (Global Change and Terrestrial Ecosystems, GCTE)等。2002 年 IGBP、IHDP 和 WCRP 共同制定了“全球碳项目(GCP)——全球碳循环国际合作研究框架”。在这一框架下，动员全世界的科学家从三个科学主题(即碳循环模型和变量、碳循环过程 and 控制的相互作用、碳循环的未来动态)入手，用十年时间完成框架确定的研究内容。

当前，出于对全球变暖的担忧及应对全球气候变化挑战的推动，碳循环与碳排放研究成为 20 世纪末以来国内外学术界研究的热点问题^{[25][26][27]}。其中，定量分析和评价碳源/汇状况是碳循环研究的重要科学问题之一^[28]。因为它与“京都议定书”的执行紧密联系，所以不仅是一个科学命题，也成为国际社会广泛关注的焦点。

从管理层面看，碳核算是碳排放管理的起点，当了解自身导致的温室气体排放以后，才有可能识别在哪一个环节可以采取什么样的措施，实现节能减排、降低成本的目标，才有可能制定可行的低碳政策。此外，由于“十一五”的节能工作更多的是有赖于结构性减排，即依靠关闭高能耗企业来实现，因此后续的减排工作可能将面临技术性减排的压力。这时，对决策者来说，碳核算将更为重要。

从市场层面看，随着气候变化背景下碳约束的加剧，国际碳市场将受到高度关注，可能会成为影响国际货币体系和国际金融秩序的重要因素。因此，我国急需建立一套量化能源使用和温室气体排放的系统。

因此，从现在开始，应切实加强碳排放统计、核算等基础能力建设，从基础数据开始，做好减排能力、潜力及减排对经济发展影响的研究与评估，准确判断我国在 2020 年之后的减排形势，既努力承担责任，也坚持量力而行，做出符合自身发展阶段的减排行动^[29]。

1.1.1.4 碳减排的入手单位——地方政府是实施碳减排的基本单元

考虑碳管理应首先考虑中国当前决策层所隶属的中国政治制度。中国政治制度是指 1949 年 10 月中华人民共和国成立以来，在中国大陆实行的，规范中华人民共和国国家政权、政府制度、国家与社会关系等一系列根本问题的法律、体制、规则和惯例。我国是单一制国家，国家行政机构从中央到地方一般为五级，即中央人民政府国务院、省（自治区、直辖市）、市（自治州、盟）、县（自治旗）和

乡（镇）政府。我国地域辽阔，自然环境差异大，经济发展不平衡，因此设立地方行政制度，地方行政制度是国家为了方便行政管理的实施，而划分行政区域、设立地方分治机构的制度和惯例^[30]。在推进节能减排的工作中，碳减排的目标也是据此逐级分解，因此有关基层的碳减排研究具有重要的现实指导意义。

而作为中国面积最大、人口最多、在国民经济各项指标中均占有相当大比重的甚至占绝对比重的县域，如何改变其原有高碳经济增长模式，破解日益突出的人口资源和环境矛盾，全面推进小康社会和两型社会建设，达成县域持续发展的低碳经济，是应该解决也是必须解决的难题^[31]。

1.1.2 国内外研究进展

1.1.2.1 碳源核算研究进展

温室气体清单方法学的发展过程中，经历了空气污染物清单、包含温室气体的混合清单、专门性的温室气体清单三个过程。

20 世纪八九十年代，出现了一系列国家、区域和城市层面的排放清单的方法学，主要用于估算典型的大气污染物。其中欧盟大气排放数据库指南 EMEP/CORINAIR 和美国环保署（EPA）发布的排放指南是应用最广泛的两种方法。EMEP/CORINAIR 是欧盟环境保护署 1985 年启动的“环境信息协调计划”的成果之一。最初仅考虑 8 种重要工业活动排放的 3 种大气污染物（二氧化硫、氮氧化物和持久性有机化合物）。经过不断的改进和扩容，EMEP/CORINAIR 核算范围扩展至气候变化、温室气体排放、酸雨、臭氧层破坏等全球环境问题，涵盖的排放活动多达 260 余种。

美国环保署在美国公共卫生局在 1968 年发布的《AP42 空气污染排放系数汇编》基础上，经过多次修订发布了《空气污染物排放系数手册》（AP-42,第 5 版,2008）。美国 AP42 排放因子旨在建立排放污染物对周边大气环境的数量关系。1993 年，美国环保署联合了国土大气污染管理局和当地大气污染控制署，成立了排放清单改进计划，其目的是建立标准化的编制程序。报告分为 10 卷，其中第 8 卷为温室气体计算相关方法和技术报告。

与欧盟和美国的环保署不同，IPCC 是一个专责研究由人类活动所造成的气候变化的机构，在众多的温室气体研究中，最权威且影响力最大。它的特别报告、技术报告和排放因子数据库等已经成为气候变化、清单编制领域的标准参考著作，现已被广泛使用。它的作用是在全面、客观、公开和透明的基础上，对世界上有关的最好的现有科学、技术进行评估。IPCC 设有三个工作组和一个国家温室气体清单专题组，第一工作小组负责评估气候系统和气候变化的科学问题，第二工

作小组评估气候变化对生态系统、社会经济和人类健康的影响，第三工作小组评估减缓气候变化的方案，其中国家温室气体清单专题组负责研究与清单有关的方法与准则。该组织分别在1990年、1996年、2001年和2007年四次发布了综合科学评估报告以及一系列特别报告和技术报告，代表了国际上在气候变化领域最成熟的理论。其中《IPCC国家温室气体账户1996修订指南》（1997），《国家温室气体账户优良作法指南及不确定因素管理》（2000），《土地利用、土地利用变化及林业优良作法》（2003），《IPCC国家温室气体账户2006指南》（2006）等有关温室气体清单编制的指南和方法论已经成为气候变化、温室气体清单编制领域的标准参考著作，被决策者、科学家等广泛使用。

然而，地区政府是实现碳排放管理的最直接行政单位，IPCC方法学对于地区层面来说较为复杂，因此如何针对地区层面的碳排放核算已经成为日益关注的话题。

20世纪90年代开始，涌现了许多城市温室气体保护组织和行动计划，其中最为著名的是国际地方环境行动理事会（The International Council for Local Environmental Initiatives, ICLEI）组织发起的城市气候保护行动（Cities for Climate Protection Campaign, CCP）。地方政府在加入该行动后签署协议，承诺通过政府行动在当地社区减少温室气体排放量。该城市气候保护运动起源于1992年6月里约热内卢举行的“环境与发展”大会，并于1993年在纽约召开的联合国城市领导人峰会上正式启动。该行动不仅能够增强地方城市对气候变化的鉴别能力，降低气候变化对地方城市的影响，而且能够提高和改进基础设施或内部风险管理系统以应对气候变化。它所提供的城市温室气体清单编制体系和方法已经被国际上的大城市广为接受，截止目前，已有1200多个城市 and 地方政府加入了ICLEI国际地方环境理事会，其中包括了纽约、伦敦和东京等国际大都市，中国方面，目前只有沈阳市及台湾的11个地区成为该组织成员。纽约、伦敦和东京也已发布了多年温室气体排放清查数据，并确定了碳减排目标和措施。ICLEI于2008年发布了《国际地方政府温室气体排放分析议定书》草案（International Local Government GHG Emissions Analysis Protocol, IEAP），并于2009年发布了完整版^[19]。该议定书提供的温室气体编制体系和方法服务于城市及区域尺度，目前已经为国际上的大城市广为接受。它依据“组织边界”和“地理边界”分别提出了基于政府资产和服务的政府部门温室气体排放清查方法和基于社区（城市）地理范围内的社区温室气体排放清查方法。该议定书同样根据碳排放因子和活动数据的详细程度将核算方法分成了三个层级，这点与IPCC的一致。“方法一”中的碳排放因子同样采用IPCC推荐的缺省值。对水运和航运碳排放的处理也基本相同，即仅要求进行披露，但无需计入温室气体排放总量，主要区别在于IPCC指南扣除的是国际间

水运和航运碳排放量，ICLEI议定书除了扣除国际水运和航运碳排放量外，还需扣除城市间水运和航运的碳排放量。此外，该议定书还要求计算电力和热力（包括市内和市外）碳排放因子，并将发电和产热排放的温室气体分配到终端用能部门。《国际地方政府温室气体排放分析议定书》为世界地方政府设定了一个核算温室气体排放量的通用框架，然而并没有对特定国家的活动数据和排放因子作出详细说明。特定国家的排放因子可以从IEAP国家补充文件中获得。2008年9月，加州空气资源委员会（The California Air Resources Board, CARB）、美国加州气候行动注册处（The California Climate Action Registry, CCAR）、ICLEI和气候注册处（The Climate Registry, TCR）发布了IEAP美国补充文件——《地方政府操作议定书》（Local Government Operations Protocol, LGOP），这是第一个也是目前唯一一个IEAP国家补充文件。此处需要指出的是，尽管ICLEI方法学以及软件逐渐成为城市量化温室气体排放的标准，然而其仅对CCP成员提供。由于气候框架公约并没有对目前的发展中国家提出减排约束，大部分发展中国家不愿意主动承担减排承诺而制约社会经济发展，所以发展中国家城市大都难以满足CCP行动减排要求，因此也无法获取和使用该组织提供的内部核算软件。

《市长盟约》（Covenant of Mayors）2009年由欧盟委员会发起，每年召开一次大会。签署《市长盟约》的各欧洲城市承诺将通过倡导节能、发展可持续能源、增强市民节能意识等手段，到2020年将其城市的温室气体排放量在1990年的基础上至少减少20%。签署方可根据市长盟约提供的方法（由欧盟委员会认可的ECORegion软件），准备并公示其温室气体清单。至此，共有3701个城市（相关居民达157百万多人）签署了《市长盟约》^[20]。

“EU CO₂ 80/50 project”活动是欧洲都市为于2050年前减排80%而参加的一项活动。主要的领导城市是汉堡。该项目提供的温室气体清单议定书是GRIP模型。GRIP模型由University of Manchester为欧盟所推荐，但只提供签约方使用^[21]。

此外较为活跃的城市碳减排组织还有C₄₀^[22]。C₄₀的前身为C₂₀，成立于2005年10月，全球最重要20个城市首脑齐聚伦敦参加第一届世界大城市气候变化峰会，讨论联手应对气候变暖。2006年8月，城市行动倡议得到进一步加强。前美国总统克林顿和前伦敦市长利文斯通宣布一项合作伙伴关系，大城市气候变化领导小组与克林顿基金会（Clinton Climate Initiative, CCI）建立合作货币关系，C₂₀组织更名为C₄₀。该组织发起的主要工作有，实施大型减排项目，鼓励使用清洁技术和购买绿色能源，开发工具度量减排进度等。中国北京、上海、香港等城市先后参加了2005年和2007年组织的大城市气候变化峰会。中国作为发展中国家，出于对发展和环境关系积极而谨慎的态度，中国同各与会城市均为联系成员，而非核心成员。

2010年, 联合国环境规划署发布了《国际城市温室气体排放计算标准》(International Standard for Determining Greenhouse Gas Emissions for Cities)^[23], 给出了城市报告温室气体的方法和报告表格, 发展了IPCC在城市层面的应用。

国际方面, 尽管有许多地区已相继发布CO₂排放的报告, 然而核算范围并不统一, 存在可比性较差的问题。其次, 在地区级温室气体研究的地域分布上, 欧美发达国家城市占据绝大多数, 亚洲和非洲等国家的研究成果较少。虽然目前在碳核算流域较为活跃的NGO虽然较多, 如ICLEI、市长盟约、EU CO₂ 80/50 project和C₄₀等, 但其核算软件只提供给组织本身的签署方。所以现有核算方法的公开性较差。

国内有关清单的研究多集中在国家层次, 地区级能源碳排放研究尚刚刚起步。

2004年, 钱杰^[32]以上海市的碳源碳汇作为研究实例, 研究了1994-2003年, 上海处于经济高速增长时期和城市化进程发生较大变化的历史阶段, 人口、能源消耗、土地利用和城市植被的变化所引起的城市碳源碳汇变化。通过对1995年、2000和2003年航空遥感资料解译, 借助GIS技术分析了人口和植被的空间变化。

2008年国家发展和改革委员会启动中国省级应对气候变化方案项目, 其基础的工作就是要求各省(自治区、直辖市)对城市温室气体排放进行核算, 而目前最大的困难就是缺乏中国特色的城市尺度上的研究体系。

2009年蔡博峰等出版了《城市温室气体清单研究》, 该书比较系统地介绍了城市温室气体清单研究的思路、方法、原则和目前新思想、新理论、新动向, 针对当前主流城市温室气体研究组织和机构, 介绍并对比了城市温室气体清单研究方法和特征, 同时选择纽约、伦敦、丹佛、多伦多、东京、巴塞罗那等大城市系统, 系统介绍了这些城市温室气体清单研究方法、排放情况和减排模型及对策。2009年朱世龙在《中国软科学》发表了“北京市温室气体排放现状及减排对策研究”一文, 分析了北京市温室气体排放现状^[33]。2010年4月北京环境科学学会召开“北京市低碳经济发展”学术研讨会, 陈操操的“北京市温室气体排放核算”从项目背景情况、国内外城市温室气体研究进展、北京市温室气体排放核算案例等3个方面作了介绍。

2010年, 曹晓静^[34]引入国际通用的城市能源碳排放核算方法对2007年上海市能源碳排放进行了核算, 并将上海市碳排放现状与东京、伦敦和纽约等国际都市进行了对比分析, 并借助LEAP模型, 运用情景分析法尝试性地对2050年前上海市可能的能源碳排放趋势进行了模拟。此外, 王昕^[35], 陈飞^[36]等均曾对上海市能源碳排放进行了核算。

然而, 作为行政单元最基础的县级单位, 相关研究则少之又少。崇明方面,

李风亭^[37]曾对上海各区县用部门估算法进行了核算,结果表明,2005年排放量不到100万tC-eq,人均碳排放量为1.17tC-eq/人,为上海各区县碳排放量最少的地区。但是,该方法中,产业部门的单位增加值能耗系数、生活能耗系数引用的是上海市的平均数,对崇明远低于上海市的经济水平来说,针对性不强。国内研究来看,在县级层面,缺乏系统、规范的城市温室气体研究方法和操作流程。

综上所述,温室气体清单方法学源于大气污染核算,随着全球气候变化成为人们的关注焦点,温室气体排放逐渐成为大气污染物核算的一部分,现有国际较为权威和公开的清单方法学主要有欧盟的EMEP/CORINAIR、美国EPA以及IPCC方法学指南,但是这些方法学和准则多适用于国家层面分析,在城市层面上可能存在一定差异而不能完全适用。ICLEI温室气体量化方法逐渐成为城市计算标准,参加行动的全球城市日益增多。

我国现有的节能减排工作是以自上而下的方式推进的,即由上级政府确定目标和考核方式,层层分解落实。这一方式能够有效地发挥我国的政治优势,集中资源实现国家重大目标,有着不可否认的作用和价值。但是,在具体落实过程中,该方式也存在着不可忽视的粗放性。为促进应对气候变化和节能减排政策的有效实施,有必要将节能减排工作建立在基本事实和科学数据的基础之上,即建立与排放主体相关的碳核算体系。但目前我国尚未开展系统的碳核算工作,县域温室气体研究刚刚起步,研究成果很少,缺乏系统、规范的县域温室气体研究方法和操作流程,同时中国和西方的区域划分存在很大差异,这些不足和困难都使得中国县政府难以科学有效的开展温室气体的研究和核算。

1.1.2.2 碳汇核算研究进展

植被是地球上陆地碳的主要储存库,通过光合作用每年固定大气中的CO₂约为100PgC^[38]。森林是主要的陆地碳库,储存了陆地生态系统地上部分有机碳的80%,地下部分的40%,其土壤碳储量约占全球土壤碳储量的73%。全球陆地的大部分碳储存在森林生态系统,全球的森林植被及土壤共储存了1146PgC^[39],占全球陆地总碳库的46%,其余的碳储存在草地、耕地、湿地等生态系统中^[40]。作为全球气候系统的组成部分之一,完整的和破坏较少的森林是CO₂的汇。植物对现在和未来的气候变化、碳平衡都具有重要意义。

中国在碳汇领域的研究起步较晚,但在借鉴国外研究成果、理论的基础上,有了长足的发展。方精云等2002年利用材积源生物量方法推算中国森林植被碳库,采用土壤有机质含量估算我国土壤碳库,结果表明:我国陆地植被的总碳量为 6.1×10^9 tC,全国44种土壤类型总碳库量为 185×10^9 tC^[41]。徐新良等2007年研究发现中国森林植被碳贮量自上世纪80年代以来增加了1.8104PgC。朴世龙

等 2009 年研究表明, 中国陆地生态系统每年净接收 0.19-0.26 亿 t 的碳, 主要来自当地气候变化、大规模植树工程和植被恢复。

现有碳汇核算方法主要包括样地清查法, 通量观测法和模型模拟法等。

A 样地清查法

样地清查法是设立典型样地, 通过收获法精确测定生态系统中植被生物量、凋落物和土壤等碳库的碳储量。根据计算基础的不同, 样地清查法分为生物量法、蓄积量法以及材积源-生物量法。2002 年方精云等在《植物生态学报》发表的“中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 Science 一文(Science, 2001, 291: 2320. 2322)的若干说明”对这三种方法在中国的具体运用做了详细的说明^[42]。

生物量法的通常做法是构建预测模型, 即伐倒少许树木, 确定生物量与胸径或树高的回归关系, 然后利用回归关系和所有树木的实测胸径或树高推算样地的生物量, 多用于森林资源清查。该方法在国际生物学计划(IBP)期间被广泛应用。生物量法技术简单, 直接明确, 但耗时耗力, 误差较大。

蓄积量法根据森林主要树种抽样后的实测数据, 计算出森林中主要树种的平均容重(t/m^3), 由森林的总蓄积量求出生物量, 再根据生物量与碳量的转换系数求森林的固碳量。该方法使区域尺度的森林生物量、碳储量的推算精度得到了改善, 常用于估算国家尺度的森林生物量及碳储量。康惠宁等采用蓄积量法对中国森林固碳的现状和潜力进行了估计和预测, 结果表明, 中国目前的碳积累高于碳释放^[43]。蓄积量法虽然继承了生物量法的优点, 操作简便, 但是在使用时仍然存在很大的误差。在转换系数的选择上, 蓄积量法只区分了树种, 而对其它因素却并没有加以考虑, 可能忽略了森林生态系统内诸多其他要素, 如土壤呼吸、非同化器官呼吸、地下生物量增加对总体通量的影响等。

材积源-生物量法是将生态学调查资料和森林普查资料结合起来进行, 以建立生物量与蓄积量关系为基础的估算方法。该方法可以更准确地估算国家或地区尺度的森林生物量, 近几年来得到了广泛应用。方精云等对大量森林实测生物量与蓄积量的研究发现在各林分类型中二者之间存在着良好的回归关系^{[44][45]}。

B 通量观测法 (涡相关法)

涡相关法是采用一种微气象技术, 主要是在林冠上方直接测定 CO_2 的涡流传递速率, 从而计算出森林生态系统吸收固定 CO_2 量的方法。这一方法首先是应用于测量水汽通量, 20 世纪 80 年代已经拓展到 CO_2 通量研究中^[46]。涡相关技术在一个参考高度上对 CO_2 浓度以及风速风向进行监测。大气中物质的垂直交换往往是通过空气的涡旋状流动来进行的, 这种涡旋带动空气中不同物质包括

CO₂ 向上或者向下通过某一参考面，二者之差就是所研究的生态系统固定或放出 CO₂ 的量。涡旋相关法被广泛地应用于估算陆地生态系统中物质和能量的交换，据全球通量研究网络的统计，截止到 2005 年 8 月，全世界有超过 300 个涡度通量塔在连续工作。中国在这方面刚刚起步，2002 年，中科院正式启动了中国陆地生态系统碳通量观测项目，已经分别在长白山、千烟洲、鼎湖山和西双版纳设立了 4 个典型森林生态系统 CO₂ 通量定位观测站。

涡旋相关法的特点是直接对森林与大气之间的通量进行计算，能够直接长期对森林生态系统进行 CO₂ 通量测定，同时能够为其他模型的建立和校准提供基础数据。但是，这一方法需要较为精密的仪器，实际运用中受一些技术和环境条件的影响。

C 模型模拟法

模型模拟法是通过数学模型估算生态系统的生产力和碳储量的方法。在研究过程中，产生了很多种模型，这些模型依据建模思路的不同主要有 3 类：经验模型、过程模型和混合模型。经验模型属于统计回归性模型，过程模型为机理性或半经验半机理性模型，混合模型则是将经验模型和过程模型结合在一起的综合性模型^[47]。

经验模型一般是从具体的生态学现象入手，通过大量的观测，使用统计学的方法排除随机因素的干扰而得到所需要的规律，如 MIAMI 模型以年降水量或年均温为驱动变量模拟全球自然植被的净初级生产力。Chikugo 模型是另一个用于计算陆地初级生产力的统计模型

过程模型主要被用来描述生态系统过程或者模拟水、碳循环对大量的相互作用过程(如光合作用、蒸腾、蒸发、呼吸作用、分解作用和营养循环等)的依赖性。此类模型在理解和描述生态现象所共有的一般性质上是有效的，如 CENTURY 模型、BIOME-BGC 模型以及 TEM 模型等过程模型。

混合模型具有很好的应用前景，它在经验模型和过程模型之间架起了一座桥梁。在一定程度上，混合模型可以克服这上述种方法的缺点。即混合模型把经验模型和过程模型方法中的关键要素合并成一个综合的生态系统模型方法，这个模型能够预测短期和长期的森林生长、产量和水、碳循环，如 TRIP-LEX 模型和 CASTANEA 模型等经验过程模型。

模型模拟法适于推算在一个理想条件下的区域生物量及碳储量的变化情况，但基于数据缺或理想条件下的参数设定也存在着明显缺陷。

D 遥感估算法

遥感观测技术提供了大尺度范围检测、定量化以及调查植被在人类活动和气候变化下响应的机会及手段。利用遥感手段获得各种植被状态参数,结合地面调查,完成植被的空间分类和时间系列分析,随后可分析森林生态系统碳的时空分布和动态,并估算大面积森林生态系统的碳储量以及土地利用变化对碳储量的影响。遥感估算法以碳通量与碳循环过程的综合网络观测、生物过程的适应性实验研究以及河流碳输运过程研究为支撑系统的自下而上途径,与以土地利用/土地覆被变化和对地观测数据生态参量反演为基础的自上而下途径,经过相互验证并与尺度转换模型实现有机结合,开展综合观测、调查、比对分析、模拟和评价研究,把握生态系统碳循环的格局与过程规律,辨析自然和人为因素对碳循环过程的影响,以探讨全球气候变化条件下生态系统碳循环过程的演变趋势^[48]。

应用较多的遥感数据是植被指数(VI),叶面积指数(LAI),归一化植被指数(NDVI)和植被吸收的光合有效辐射分量(FPAR)。其中应用最广泛的是 NDVI,它为研究大尺度的植被动态及其空间分布提供了有效信息。NDVI 与地表植被覆盖程度及生物量,植被生产力等具有良好的相关性,它的大小能很好的反映绿色植物的状况,对地表植被变化反应灵敏,是研究地表植被变化的一个重要指标,也可以作为植被生物量以及植被生产力的指标,用于计算陆地生态系统净生产力。目前,作为大尺度碳通量的过程(机制)模型比较成功的有 GLO-PEM (the Global Production Efficiency Model)、简单的生物圈模型 SiB2 (Simple Biosphere Model Version 2)、CASA(Carnegie-Ames-Stanford approach)模型等。近年来,遥感手段在陆地生态系统的研究中运用的越来越广泛,如车生泉和宋永昌利用卫星遥感信息对上海的绿地尽管进行了解译^[49]。但目前还未见有关崇明碳汇的遥感估算研究。

当前,中国县域温室气体研究刚刚起步,研究成果很少,缺乏系统、规范的县域温室气体研究方法和操作流程,同时中国和国际主流方法存在很大差异,这些不足和困难都使得中国县级政府难以科学有效的开展温室气体的研究和核算。

本研究将对崇明碳源碳汇状况进行科学定量核算,不仅有助于政府机构、研究人员等清晰地掌握崇明温室气体排放结构、排放量和排放特征,跟踪温室气体增减变化及发展趋势,更有利于切实开展减排跟踪,实时分析与评估减排措施的技术、经济和政策上的可行性。同时,对崇明开展清洁发展机制(CDM)和低碳经济,促进节能减排都具有重大的现实意义。

1.2 研究区概况

1.2.1 行政区划

崇明县目前由崇明、长兴、横沙等三岛组成，三岛陆域总面积 1411 平方公里，见图 1.5。

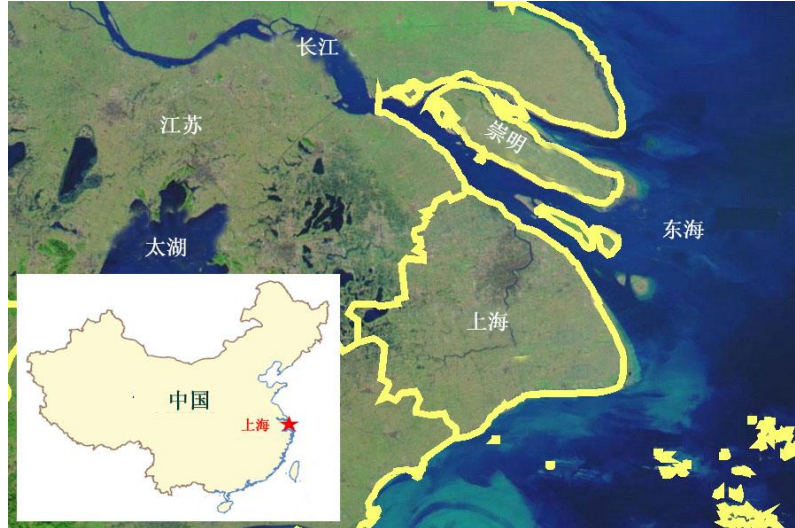


图 1.5 崇明县的地理位置

其中崇明岛位于西太平洋沿岸中国海岸线的中点地区，地处中国最大河流长江入海口，是世界上最大的河口冲积岛，也是中国仅次于台湾岛、海南岛的第三大岛屿，有“长江门户、东海瀛洲”之称。全岛三面环江，一面临海，西接滚滚长江，东濒浩瀚东海，南与浦东新区、宝山区及江苏省太仓市隔水相望，北与江苏省海门市、启东市一衣带水。全岛面积 1267 平方公里，东西长 80 公里，南北宽 13 至 18 公里。岛上地势平坦，无山岗丘陵，西北部和中部稍高，西南部和东部略低。90%以上的土地标高（以吴淞标高 0 米为参照）在 3.21 米至 4.20 米之间。岛屿地理位置在东经 121°09'30" 至 121°54'00"，北纬 31°27'00" 至 31°51'15"，地处北亚热带，气候温和湿润，年平均气温 15.2℃，日照充足，雨水充沛，四季分明。岛上水土洁净，空气清新，生态环境优良，居民平均寿命 76.7 岁。

长兴岛位于吴淞口外长江南水道，东邻横沙岛，北伴崇明岛。岛呈带状，东西长 26.8 公里，南北宽 2~4 公里。面积 88 平方公里，其中滩涂面积 8.5 平方公里，可耕地面积 26.2 平方公里（不包括前卫农场）。南沿有深水岸线近 20 公里，一般水深-12 米至-16 米，最深处-22 米，可停靠 30 万 t 级轮船。

横沙岛是长江入海口最东端的一个岛屿，三面临江，一面临海。背靠长兴，北与崇明岛遥相呼应，南与浦东隔江相望。岛呈海螺形，南北长 12 公里左右，东西宽 8 公里左右。平均海拔 2.8 米。总面积 56 平方公里，其中可耕地面积 26.8 平方公里。目前尚有滩涂资源 0 米以上 20 万亩、-5 米以上 67 万亩。周边岸线

30 余公里，其中南端约有 2 公里深水岸线，水深-12 米左右。

2009 年 1 月，崇明县新海镇、东平镇成立。目前，崇明县已建制的乡镇共有 18 个，包括 15 个镇和 3 个乡，即：城桥镇、新河镇、堡镇、陈家镇、绿华镇、三星镇、庙镇、港西镇、建设镇、竖新镇、港沿镇、向化镇、中兴镇、东平镇、新海镇和新村乡、长兴乡、横沙乡。县政府所在地城桥镇是全县的政治、经济和文化中心。

1.2.2 社会和经济

2011 年，崇明三岛户籍人口 68.95 万人，人口密度为 489 人/平方公里，不到上海市平均人口密度的四分之一，其中城镇人口 20.8 万人，城市化水平为 30.1%。近年来，崇明岛人口规模总体呈负增长趋势。从人口分布来看，崇明岛南部是城镇的相对集中区，人口密度相对较高，其中，人口规模在 5 万以上的有城桥镇、堡镇、庙镇、陈家镇和港沿镇 5 个，均分布于此区域内；其余城镇规模相对比较小。

2000-2009 年间，崇明经济保持持续稳步增长，经济总量不断增加，年均 GDP 增速为 12%，国民经济发展较快；产业结构趋于优化，三次产业呈现同步、协调发展的格局，见图 1.6。2000 年三次产业结构 24.81:34.45:34.75，2009 年三次产业结构比为 25.11:34.25:40.63，可见全县产业结构调整力度加大，第三产业比例显著增大。

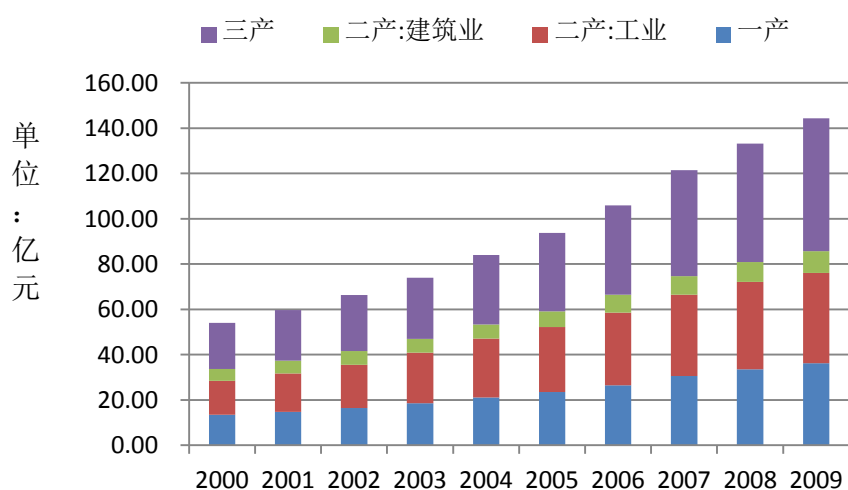


图 1.6 崇明县三次产业 GDP 增长值（2000 年不变价）

1.2.3 基础设施

2010年前，崇明到上海的交通主要依靠水运。2008年年末三岛对外水运航线16条，全年水运旅客1482万人次；渡运车辆168万辆次。2009年10月31日，上海长江隧桥东线工程正式通车，起自上海浦东五号沟，与郊环线相接，经长兴岛，止于崇明陈家镇，接陈海公路，全长约25.5公里。2012年，连接崇明和江苏省启东市的崇启大桥（又称崇启通道工程）建成通车，进一步为崇明实现跨越式发展提高了强大的动力。2008年全县公交覆盖率达98.2%，年末共有公交线路31条，线路长度914公里，全年运送旅客2055万人次。

1.2.4 低碳发展相关政策

崇明县在节能减排的政策推进方面经历了：定位生态发展、入手节能工作和节能减排并举共三个发展阶段。

1) 定位生态发展

2005年10月，上海市政府出台《崇明三岛总体规划》^[50]，首次明确了崇明县建成现代化生态岛区的目标：崇明的发展要以科学发展观为统领，按照构建社会主义和谐社会的要求，围绕建设现代化生态岛区的总目标，大力实施科教兴县主战略，坚持三岛功能、产业、人口、基础设施联动，分别建设综合生态岛、海洋装备岛和生态休闲岛，依托科技创新，推行循环经济，发展生态产业，努力把崇明建成环境和谐优美、资源集约利用、经济社会协调发展的现代化生态岛区。

在这一时期，虽未提出有关节能减排的发展内容，但已确立了世界级现代化生态岛的发展目标，明确了自身践行可持续发展的思路。

2) 入手节能工作

2006年9月，《崇明县国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》（以下简称“十一五”规划）中的“十一五”期间主要发展指标中，首次提出有关节能减排的约束性目标，指出万元增加值能耗要比“十五”期末降低20%左右^[51]。

为保障“十一五”规划中该指标的顺利完成，崇明县政府出台了一系列的政策。例如，2007年7月，《崇明县关于加强节能减排工作的实施意见》中明确了节能减排工作的指导思想和主要目标；为加强节能减排工作的组织领导，成立县节能减排工作领导小组；为落实节能减排工作，制定了加强节能减排基础工作、优化调整产业结构、推进节能管理、推进节能技术的应用、推进节能项目建设、强化节能政策引导及加大节能宣传和表彰等保障措施。初步形成了较为全面的节能管理体系。

2009年4月，《崇明县2009年节能降耗工作安排》中进一步明确了以上工作的落实，为分解和落实年度节能目标，结合市节能降耗目标任务和本县2009年节能工作目标，根据县政府和各乡镇、园区以及重点耗能企业签定的目标责任

书要求，继续以统计部门确定的规模以上企业全年能耗情况为基础，将 2009 年度节能指标分解落实到每个乡镇、园区和重点耗能单位。除此，尝试推进重点企业节能管理，加大节能工作投入力度，足额安排落实节能专项资金，加强重点用能企业的节能降耗管理，建立 5000 t 标准煤以上重点用能企业的网上平台。继续推进燃煤工业锅炉的热工测试工作。在对能耗万吨标准煤以上企业进行能源审计的同时，开展能耗在 5000t 标准以上企业的能源审计工作。继续推进合同能源管理，开展企业对标活动，有序推进重点节能工程。同时进一步落实《崇明县关于加强节能减排工作的实施意见》中的相关要求。随后，颁布了《2009 年度崇明县产业结构调整工作方案》和《崇明县 2009 年度乡镇、园区、有关单位节能降耗工作考核办法》等政策。崇明县对县内第二产业和第三产业进行了考核，2006-2009 年，全县增加值综合能耗下降 18.59%^[52]。

总体来看，崇明县政府颁发了一系列相关节能减排的政策，但是偏重节能部分，碳减排涉及得很少。

3) 节能减排并举

2010 年 1 月，《崇明县生态岛建设纲要（2010-2020 年）》中首次指出，建设崇明生态岛的战略思想之一是坚持低碳型的发展观，在能源利用和节能减排方面，须优化能源结构和构建绿色能源体系、推进能源高效利用与节能和加强绿色建筑与建筑节能。

2010 年，崇明成为以“低碳”为主题的国家可持续发展试验区。2011 年 2 月，崇明县政府颁布《国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》（以下简称“十二五”规划），指出了崇明县在十二五期间的发展目标：根据市委、市政府对崇明的战略定位和要求，按照《崇明生态岛建设纲要（2010—2020 年）》明确的目标，积极探索低碳发展模式，到 2015 年，初步形成支撑现代化生态岛建设的绿色产业体系，基本形成与现代化生态岛相匹配的生态环境体系、基础设施体系和民生保障体系，努力形成与现代化生态岛相适应的社会建设与管理新格局。

在这一时期内，崇明县将低碳发展作为自己的发展目标，注重节能与减排的并举，以期达到世界级现代化生态岛的建设目标。

1.3 研究目的、内容和方法

1.3.1 研究目的

崇明生态岛的建设 and 国家级可持续发展试验区的建设需要提供准确的碳源碳汇清单，但目前尚缺乏系统性的基准数据。本研究试图解决上述困难和问题，

以 IPCC2006 清单指南为基础,大量借鉴 ICLEI、世界资源研究所(World Resource Institute, WRI)等国际机构和组织的温室气体方法学,致力于在消化吸收低碳经济发展理论和碳源碳汇核算相关理论和最新实践成果的基础上,通过集成创新,建立适合崇明生态岛的碳源碳汇核算方法学体系,为崇明的低碳发展决策提供支持。

通过本课题的实施,带动我国农村地区碳源碳汇核算关键技术的突破,并实际应用于崇明生态岛的气候变化缓解与适应决策中,实现我国农村地区低碳经济发展模式与快速城镇化进程中重要优先领域资源能源节约高效利用的耦合,为建设我国节能减排重大宏观战略目标下的农村低碳经济发展提供有力的科学支撑。

1.3.2 研究内容

本研究内容包括如下四个方面:

a)崇明社会经济及生态环境调研:在国内外文献调研基础上,重点针对碳源碳汇的识别要求,对崇明社会经济发展、能源消耗、生态环境、废物处理等多个方面的历史发展轨迹和现状展开深入调研,并对调研成果进行整理评价。

b)崇明碳源清单建立及量化研究:在调研成果基础上,结合 IPCC 的温室气体排放清单指南方法,开发符合崇明特征的碳源清单方法;并通过对各类碳源的量化,识别出崇明主要的碳源类型,提出需要优先控制的部门清单。

c)崇明碳汇识别及量化研究:在调研成果基础上,结合现有的碳汇监测和评估方法,开发符合崇明特征的碳汇核算方法;并通过对各类碳汇的量化,识别出崇明主要的碳汇类型,提出需要优先保护的碳汇类型清单。

d)崇明碳平衡核算研究及低碳发展策略建议:以崇明碳源及碳汇核算成果为基础,进行崇明碳平衡评价研究,判断崇明的碳中性程度;结合已经开发出碳源优先控制清单和碳汇优先保护清单,提出崇明实现低碳经济发展的战略建议。

1.3.3 研究方法

1) 理论和实践相结合的方法

碳系统核算是一个跨学科的研究领域,涉及到能源工程管理、能源经济学、生态学、地球物理学、环境科学等多学科理论知识。本研究以崇明为例,对其碳排放和碳吸收现状与因素进行了深入的实证研究,在此基础上进一步完善碳核算理论方法学,具有重要的方法学意义。

2) 空间分析和历史分析相结合的方法

对研究对象进行历史分析可以帮助人们把握事物的发展动态,而空间分析则

有助于人们认清碳排放的空间分布现状。历史分析与空间分析相结合才能抓住事物的本质，因此本研究不仅对崇明碳源碳汇进行了历史分析，更借助 ArcGIS 软件和遥感技术，对崇明碳源碳汇进行了基于镇级单元和土地利用类型的空间分析，从而更全面地把握崇明碳源碳汇特征，为更有效的碳管理提供技术支持。

3) 整体与部门分析方法相结合

整体的发展目标需要各部门的共同努力才能达成，也就是说各部门的表现决定了城市整体的发展态势。因此，本研究不仅对整体的碳源碳汇状况进行评估，更对各类碳源碳汇特征进行了系统的分析，识别出碳管理的优先领域。

1.3.4 研究范围和核算对象

1.3.4.1 研究时空范围

时间范围：2000-2009 年。

空间范围：由于崇明在 2005 年 5 月 18 日经历了行政区划调整，因此 2000-2004 年的数据仅为崇明岛范围内的数据，而 2005-2009 年的数据包括了崇明岛、长兴岛及横沙岛的统计数据。在进行各乡镇空间分析时，以崇明县 16 个乡镇（镇）为主要研究对象，即城桥镇、新河镇、堡镇、陈家镇、绿华镇、三星镇、庙镇、港西镇、建设镇、竖新镇、港沿镇、向化镇、中兴镇、新村乡、长兴乡和横沙乡。而对 2009 年新成立的新海镇、东平镇仅针对已有数据做简单分析。

1.3.4.2 核算对象范围

根据崇明县的实际情况和数据可得性，本研究中的碳源核算对象包括 CO_2 和 CH_4 ，核算部门包括能源活动和非能源活动两大部分；碳汇核算对象为 CO_2 ，核算类型包括林地，农田和湿地生态系统，详见图 1.7。

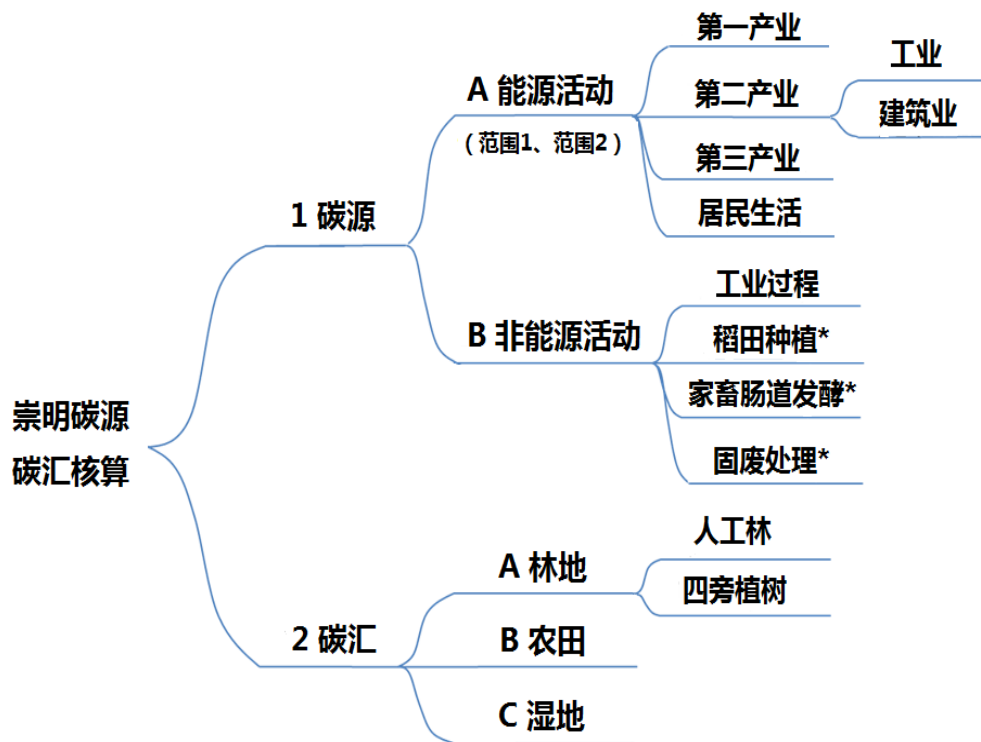


图 1.7 崇明碳源碳汇核算范围划分

注：带*部分的核算对象为 CH_4 ，未标注部分的核算对象均为 CO_2

1.3.5 技术路线

在文献调研和实地考察的基础上，将国际主流温室气体核算方法、分解分析、GIS 技术、RS 技术等结合起来，提出了崇明生态岛碳源碳汇核算研究技术路线，见图 1.8。

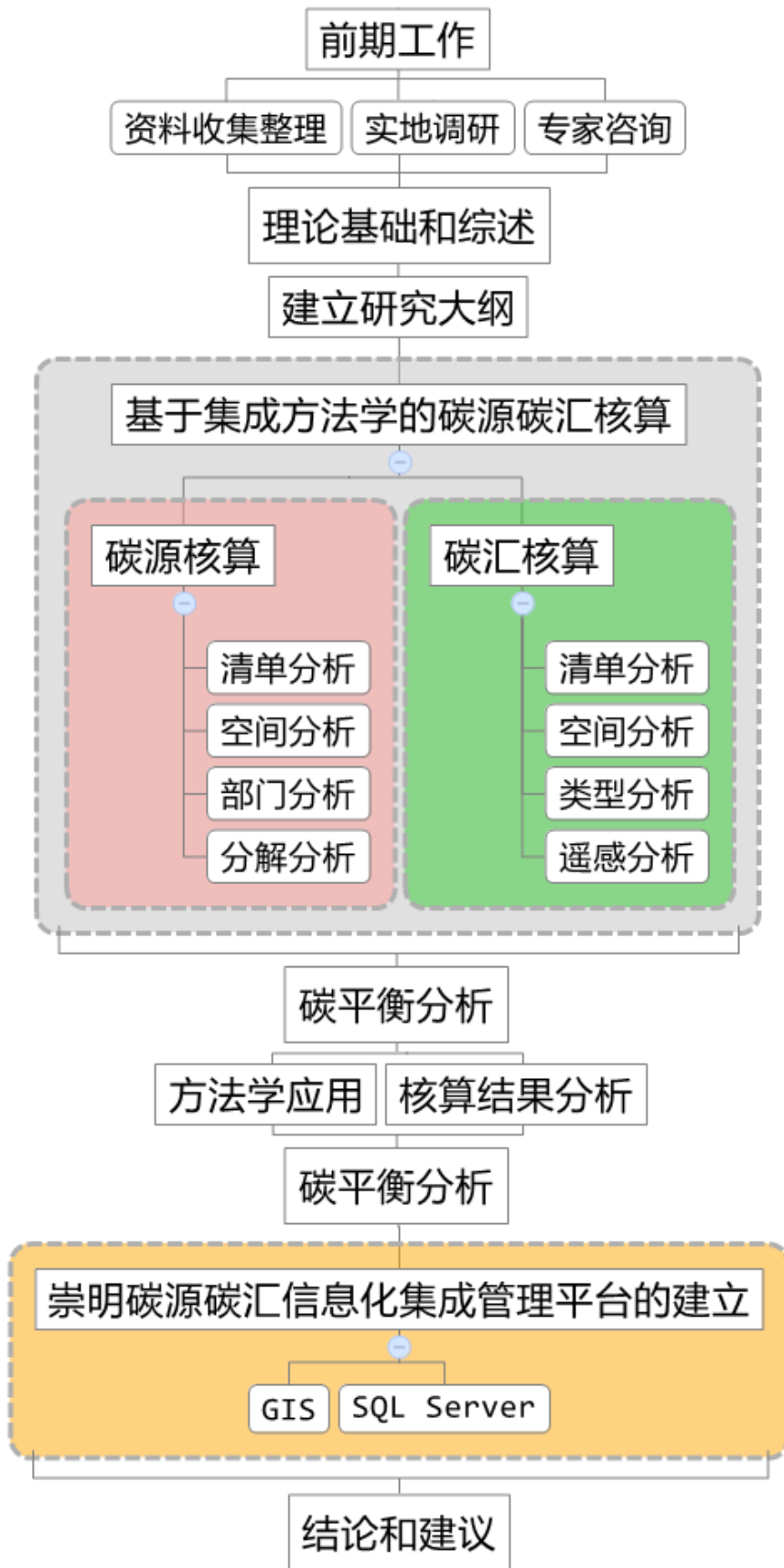


图 1.8 研究技术路线图

1.4 创新点

崇明县是一个开放的系统，如何界定研究边界和明确核算原则，如何进行中国地区温室气体排放因子的本地化、行业化和精细化都是本研究所关注的难点。研究以《IPCC2006 清单指南》为基础，大量借鉴 ICLEI、WRI、国际能源署（International Energy Agency, IEA）等国际机构和组织的地区温室气体方法学和排放因子数据库，借鉴研究国际地区温室气体清单案例，参考中国国家和城市级温室气体清单研究方法，结合崇明的实际特征，建立了一套系统、科学的研究方法和技术路线，并且对部分排放因子进行了改进和修订，确保了碳源碳汇清单计算方法的科学性、可靠性和先进性。本研究的主要创新点包括：

1.4.1 基于集成清单法的碳源核算

由于国际通用的温室气体清单方法适用于国家层面，而且多为指导性方法，缺乏具体的参数，无法直接应用于崇明。同时，崇明的统计基础相对薄弱，尤其缺乏能源及温室气体相关的统计数据，这也是我国广大农村区域普遍存在的现象。因此，崇明碳源清单的建立及各类碳源的量化成为本课题的一大亮点。本研究提出了碳源核算方法既较全面的囊括了现有的碳排放来源，又有效避免了在核算电力这一能源形式导致的碳排放时可能引起的重复计算。该方法考虑外来电力的跨界碳排放，将每个行业的能源碳排放来源划分为两部分，即燃料燃烧导致的直接排放和由于购买电力导致的间接排放。此外，该方法对行业的划分更为本地化，与现行的统计体系一致。选取的排放因子也尽可能符合区域特征，同时尽可能的利用所有的现有数据源，为数据匮乏地区实施碳源核算提供了参考。

1.4.2 基于清单法和遥感分析的碳汇核算

崇明具有较多的碳汇类型，但相关统计基础较为薄弱，并缺乏系统整合与集成。本研究以崇明县的行政区划为边界进行系统分析，识别出崇明县的主要用地类型为城镇建设用地、工业用地、现代服务业用地、农田、林地、湿地及滩涂、公路和湖泊河流等。其中能发挥碳汇功能的用地类型为林地，农田和湿地滩涂，从而识别出崇明的主要碳汇类型为林地，农田和湿地生态系统。基于温室气体CO₂被吸收和存储的过程，对崇明地区的碳汇进行清单编制，掌握崇明地区碳汇的来源和组分，明确不同类型碳汇吸收规律和特征，从而对崇明陆地生态系统固定CO₂情况的变化和趋势进行跟踪。将碳汇清单法与遥感监测法结合起来，对崇明地区陆地生态系统碳汇量时间序列和空间分布进行研究。其中遥感监测法中

NDVI 值年变化趋势所得到的结论，与碳汇清单法的定量计算结果具有一致性。

1.4.3 基于镇级单元的碳平衡分析

结合碳源碳汇核算成果，提出碳中和系数的概念，并利用 ArcGIS 软件对崇明县整体以及镇级单元进行了全面的碳平衡分析，识别出崇明县及各镇的碳中和状态发展变化趋势，为碳管理提供科学依据和数据基础。研究结果和崇明实际情况具有一致性。

1.4.4 碳源碳汇信息化集成管理平台

将现代信息技术与碳源碳汇核算成果结合起来，构建基于 GIS 和面向对象的崇明生态岛碳源碳汇信息化集成管理平台，实现碳源碳汇空间信息和属性信息的集成管理，并可通过网络实时连接国际碳交易市场价格信息，为崇明生态岛可持续碳管理提供便捷高效的工具，具有新颖性和实用性。

第2章 碳源碳汇核算方法

2.1 碳源核算方法(略)

2.1.1 能源活动

2.1.2 非能源活动

2.1.2.1 工业生产过程

2.1.2.2 稻田 CH₄ 排放

2.1.2.3 牲畜 CH₄ 排放

2.1.2.4 固废 CH₄ 排放

2.1.3 碳源总量

2.2 碳汇核算方法(略)

2.2.1 林地

2.2.2 农田

2.2.3 湿地

2.2.4 碳汇总量

第3章 碳源碳汇核算结果与分析

3.1 碳源核算结果

3.1.1 能源活动

2000至2009年，崇明的能源碳排放呈波动上升趋势，由175.05万t（CO₂当量）增至490.45万t，年均增长率为12.13%，见图3.1。

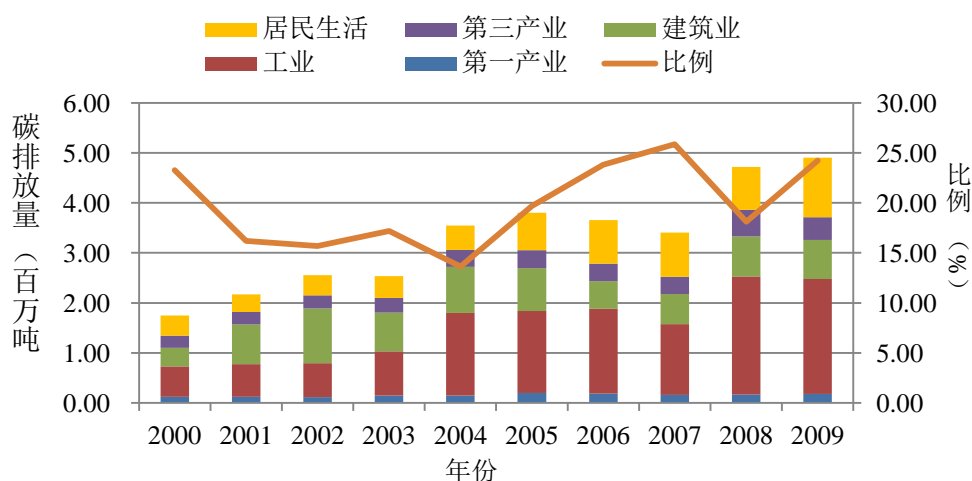


图 3.1 2000-2009 年崇明分部门碳排放状况

注：比例为居民生活碳排放量与总碳排放量之比

研究表明，崇明的碳排放主要来自三大部门（占总排放量的 84.44%）：工业、建筑业和居民生活。崇明的碳排放总量和工业的碳排放量有相关性较高（96.46%），可见，工业是崇明能源碳排放的关键排放源；从累积排放量来看，建筑业是第二大排放源，但其排放贡献率由 2000 年的 21.15% 降至 2009 年的 15.95%；第三产业能源碳排放呈现增长趋势；第一产业的碳排放贡献由 6.86% 降低至 3.63%。居民生活导致的碳排放由 2000 年的 23.27% 增至 2009 年的 24.24%。

研究表明，从 2000 年至 2009 年，崇明的碳排放强度由 3.24 增至 3.40 tCO₂-eq/万元。如图 3.2，工业和建筑业均为高碳密集部门，而第一产业和第三产业则相对较低。不容忽视的是，作为 GDP 总量仅占崇明总 GDP 的 29% 的部门，工业的能源碳排放比例居于首位，达 40.14%（2000 至 2009 年均值），这表明，崇明的产业结构亟待优化。2006 年，工业碳排放强度出现下降，这可能是因为 2006 年起，随着“崇明三岛总体规划(2005-2020)”的发布，当地政府对节能工作开始重

视所致。在该规划中，能源强度首次被定为约束性指标：需从 2004 年 0.749t 标煤/万元降至 2012 的 0.7t 标煤/万元，并于 2020 年达到 0.5t 标煤/万元；建筑业的碳排放强度在 2000-2002 年间以年均 89.37% 的速度增长，从 2002 年起以年均 9.05% 的速度下降；第三产业的碳排放强度虽有轻微下降，但其碳排放量仍以年均 7.37% 的速度增长。该部门碳排放的高速增可能与当地的政策导向有关，如“十一五规划”指出，崇明第三产业的生产总值应该于 2000 年达到崇明总产值的 40%。《崇明生态岛建设纲要 2010-2020 年》（摘要）则指出，第三产业的比例应该于 2012 年达到 45%，2020 年达到 60% 以上。“十二五规划”中指出，其产值的年均增长率不应低于 14%；工业的碳排放强度则相对较为稳定。

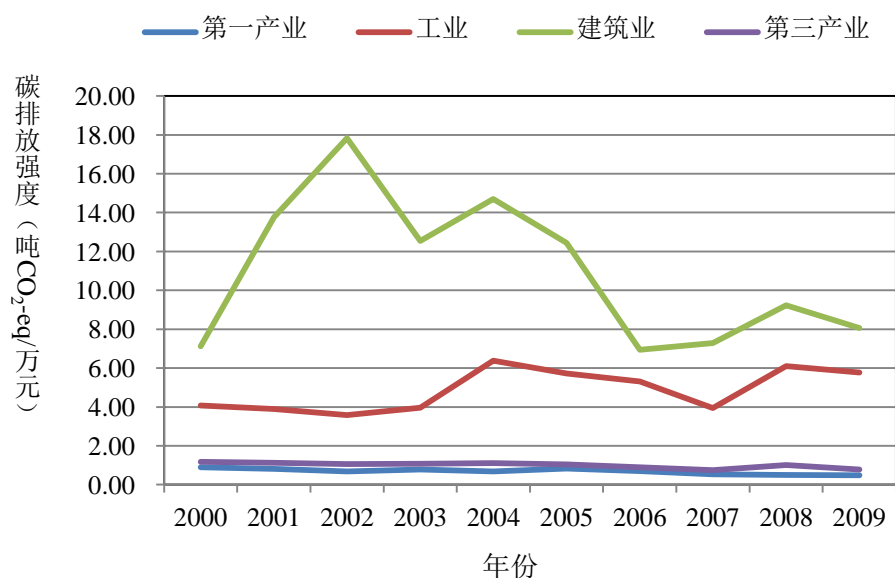


图 3.2 2000-2009 年崇明不同生产部门的碳排放强度

从排放范围的角度看（图 3.3），2000 年至 2009 年，因购买电力导致的碳排放（scope2）比例呈增长趋势，于 2009 年增长至 22.51%。可见，scope2 在碳排放总量中占有不容忽视的比率，这反映了实施碳减排时考虑外来电使用比例的必要性。研究同时表明，scope2 的排放量与外来电的清洁程度（外来电排放因子的大小）密切相关，外来电越清洁，scope2 的排放量也会相对较小。

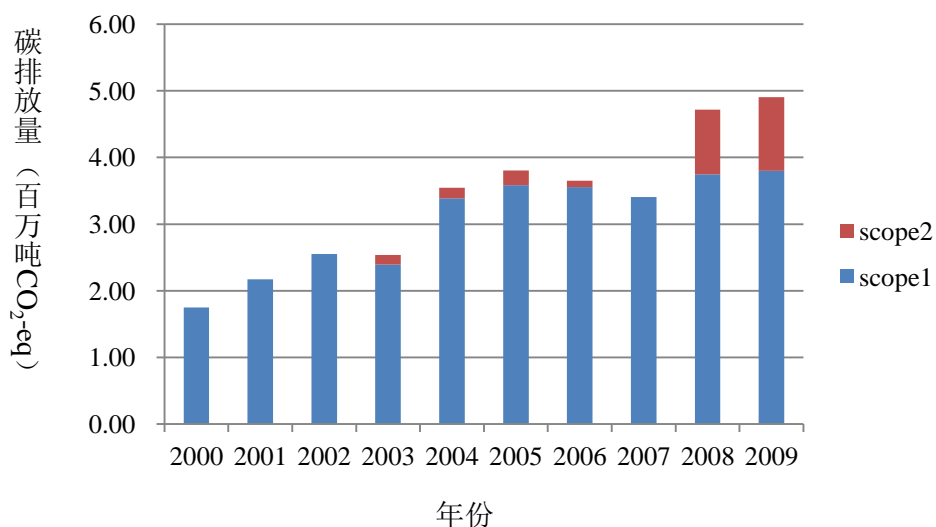


图 3.3 2000-2009 年崇明范围 1 (scope1) 和范围 2 (scope2) 的碳排放状况

从当地人均状况来看, 2000 年至 2009 年, 人均能源碳排放为 4.87 tCO₂-eq, 2000 年时不到上海的 1/2, 但 2008 年则将近上海的 2/3, 并超过了中国和世界平均水平(见图 3.4), 可见其增长速度明显高于上海其它区县。和美国相比, 崇明的人均碳排放较低。可以预见, 崇明紧邻上海这个中国最重要的经济中心城市, 具有独特的区位优势; 另一方面, 崇明的生态资源得到了比较好地保护, 生态环境相对优越, 因此无论在自然资源、政策导向还是经济保障方面都存在很大的减排潜力。

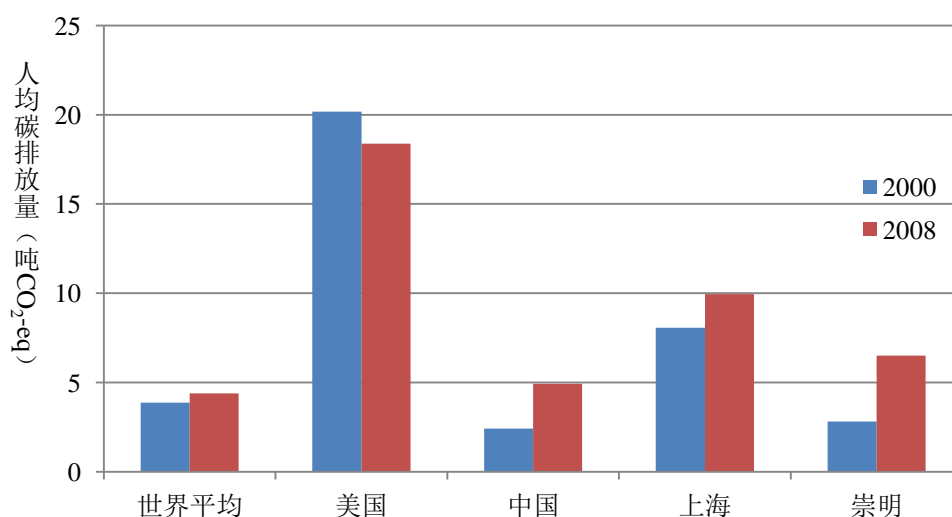


图 3.4 崇明与不同地区人均碳排放量对比 (2000 年和 2008 年)

数据来源: International Energy Agency (IEA), 2010; 曹晓静, 2010; 李风亭等, 2009.

3.1.2 非能源活动

3.1.2.1 工业生产过程

崇明县的水泥生产行业导致的碳排放有急速增长趋势,但自 2007 年被关停,使崇明县生产过程导致的碳排放得以有效控制。钢铁生产导致的碳排放量先增后降,2000 年至 2004 年间处于增长阶段,2004 年起有了稳步的大幅下降。崇明工业生产过程碳排放核算结果如下:

表 3.1 2000-2009 年崇明县工业生产过程碳排放核算结果 (t CO₂)

| 年份 | 水泥生产 | 钢铁生产 |
|------|----------|----------|
| 2000 | 3444.52 | 37269.15 |
| 2001 | 3828.93 | 26138.91 |
| 2002 | 6463.94 | 49416.34 |
| 2003 | 9137.67 | 79998.12 |
| 2004 | 7232.83 | 91887.19 |
| 2005 | 9887.12 | 70527.58 |
| 2006 | 11175.65 | 50182.52 |
| 2007 | 0.00 | 35452.89 |
| 2008 | 0.00 | 22574.33 |
| 2009 | 0.00 | 5178.342 |

3.1.2.2 稻田 CH₄ 排放

表 3.2 2000-2009 年崇明县水稻 CH₄ 排放量

| 年份 | 水稻种植面积 hm ² | 水稻甲烷排放 t |
|------|------------------------|----------|
| 2000 | 24516 | 5506.29 |
| 2001 | 23964 | 5382.31 |
| 2002 | 23528 | 5284.39 |
| 2003 | 21279 | 4779.26 |
| 2004 | 24237 | 5443.63 |
| 2005 | 27036 | 6072.29 |
| 2006 | 26776 | 6013.89 |
| 2007 | 26246 | 5894.85 |
| 2008 | 25459 | 5718.09 |
| 2009 | 25917 | 5820.96 |

3.1.2.3 牲畜 CH₄ 排放

表 3.3 2000~2009 年崇明县牲畜甲烷排放量 (单位: t)

| 年份 | 奶牛 | 水牛 | 山羊 | 猪 |
|------|--------|-------|---------|--------|
| 2000 | 191.70 | 90.50 | 4990.68 | 295.73 |
| 2001 | 203.94 | 90.50 | 5276.88 | 296.23 |
| 2002 | 206.78 | 90.50 | 7247.86 | 303.83 |
| 2003 | 199.06 | 90.50 | 6860.96 | 298.81 |
| 2004 | 225.15 | 90.50 | 5328.59 | 253.64 |
| 2005 | 260.37 | 90.50 | 4913.66 | 289.04 |
| 2006 | 280.50 | 90.50 | 4989.19 | 310.45 |
| 2007 | 333.15 | 90.50 | 5050.49 | 296.87 |
| 2008 | 358.13 | 90.50 | 4064.36 | 301.90 |
| 2009 | 388.09 | 90.50 | 4152.01 | 313.78 |

3.1.2.4 固废 CH₄ 排放

表 3.4 2000-2009 年崇明县生活垃圾甲烷排放量

| 年份 | 生活垃圾 (万 t) | 甲烷排放 (10 ¹⁰ g) |
|------|------------|---------------------------|
| 2000 | 19.40 | 0.62 |
| 2001 | 19.95 | 0.64 |
| 2002 | 20.51 | 0.66 |
| 2003 | 21.08 | 0.67 |
| 2004 | 21.67 | 0.69 |
| 2005 | 22.28 | 0.71 |
| 2006 | 22.82 | 0.73 |
| 2007 | 23.38 | 0.75 |
| 2008 | 23.94 | 0.77 |
| 2009 | 24.52 | 0.78 |

3.1.3 碳源总量

计算结果见下表 3.5。

表 3.5 2000-2009 年崇明碳源清单 (单位: CO₂-eq)

| 年份 | 能源 | | | | | 工业过程 | | CO ₂ 总量 | 水稻 | 牲畜 | 固废 | CH ₄ 总量 | 碳排放量 |
|------|-------|--------|--------|-------|--------|------|------|--------------------|-------|-------|-------|--------------------|--------|
| | 第一产业 | 工业 | 建筑业 | 第三产业 | 居民生活 | 水泥生产 | 钢铁生产 | | | | | | |
| 2000 | 12.01 | 61.23 | 37.02 | 24.06 | 40.74 | 0.34 | 3.73 | 179.12 | 11.56 | 67.25 | 13.04 | 91.85 | 270.97 |
| 2001 | 12.03 | 65.57 | 79.36 | 25.11 | 35.16 | 0.38 | 2.61 | 220.23 | 11.3 | 65.83 | 13.4 | 90.54 | 310.77 |
| 2002 | 11.37 | 68.01 | 109.35 | 26.43 | 39.98 | 0.65 | 4.94 | 260.72 | 11.1 | 64.71 | 13.78 | 89.59 | 350.31 |
| 2003 | 14.57 | 88.33 | 77.90 | 29.11 | 43.57 | 0.91 | 8 | 262.38 | 10.04 | 58.93 | 14.17 | 83.13 | 345.51 |
| 2004 | 14.56 | 165.56 | 92.08 | 34.03 | 48.33 | 0.72 | 9.19 | 364.47 | 11.43 | 66.54 | 14.56 | 92.53 | 457.00 |
| 2005 | 19.56 | 164.08 | 85.82 | 36.14 | 74.86 | 0.99 | 7.05 | 388.50 | 12.75 | 73.74 | 14.97 | 101.46 | 489.96 |
| 2006 | 18.51 | 169.80 | 54.78 | 35.19 | 87.03 | 1.12 | 5.02 | 371.45 | 12.63 | 73.07 | 15.34 | 101.04 | 472.49 |
| 2007 | 16.19 | 141.59 | 59.87 | 34.87 | 88.07 | 0 | 3.55 | 344.14 | 12.38 | 71.71 | 15.71 | 99.8 | 443.94 |
| 2008 | 16.83 | 235.89 | 80.20 | 53.32 | 85.38 | 0 | 2.26 | 473.88 | 12.01 | 69.69 | 16.09 | 97.79 | 571.67 |
| 2009 | 17.80 | 229.87 | 78.24 | 45.64 | 118.90 | 0 | 0.52 | 490.97 | 12.22 | 70.87 | 16.48 | 99.57 | 590.54 |
| 年均 | 15.34 | 138.99 | 75.46 | 34.39 | 66.20 | 0.51 | 4.69 | 335.59 | 11.74 | 68.23 | 14.75 | 94.73 | 430.32 |

3.1.3.1 部门分析

从碳排放来源的角度，崇明县的碳排放来源结构图如下：

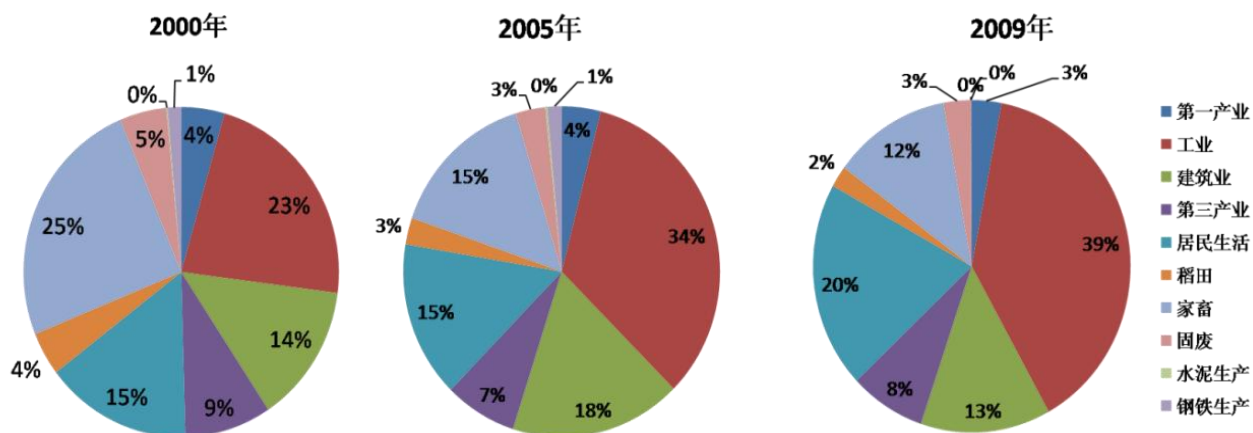


图 3.5 2000-2009 年崇明县年均碳源分布情况 (单位: 万 tCO₂-eq)

3.1.3.2 空间分析

本研究的时间范畴为 2000 年-2009 年。2009 年的崇明县各镇碳排放图如下：

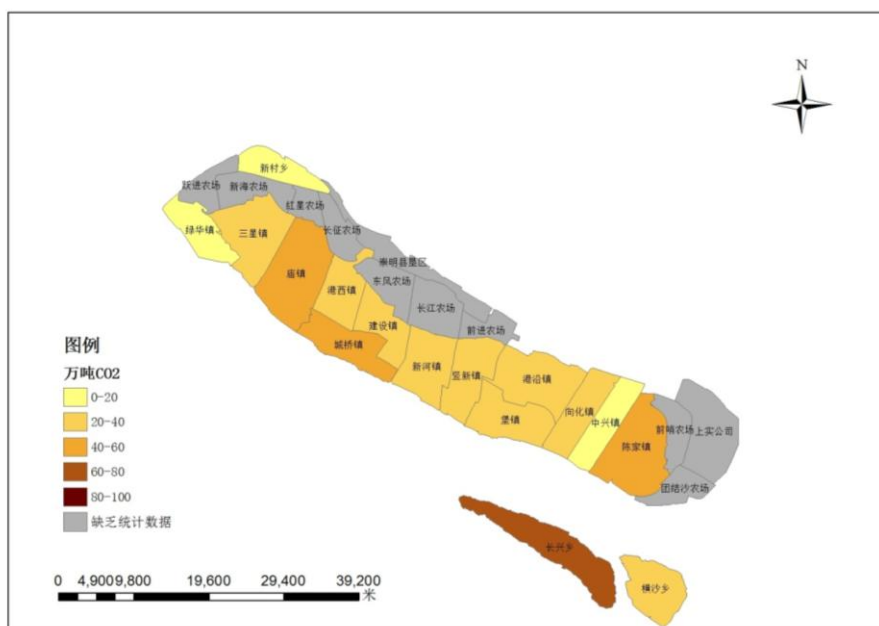


图 3.6 2009 年崇明各乡镇能源碳排放分布图 (单位: 万 tCO₂-eq)

3.1.2.3 时间分析

(略)

3.2 碳汇核算结果

3.2.1 林地

近十年来，崇明的社会经济得到了飞速的发展，其国民生产总值在 2009 年达到 170.65 亿元，与 2003 年 53.99 亿元相比增长了 316%。在经济高速发展的同时，崇明的环境建设尤其是林业建设有了长足的发展。2000 年以前，崇明的森林覆盖率不足 10%；到 2009 年崇明森林覆盖率已达到 20.8%，人均公共绿地面积 14.5m²，林地面积 39.4 万亩。与之相对应的是崇明林地生态系统碳汇量的不断增长。

3.2.1.1 总量

根据碳汇清单的计算，2000-2009 年崇明地区林地碳汇总量量增长较快，见图 3.25。林地碳汇总量 2000 年为 23.5 万 t CO₂-eq，2009 年为 114.5 万 t CO₂-eq。2009 年相比 2000 年碳汇量增长了 386.95%，年均碳汇量增速为 43%。根据图 3.25，可以将 2000-2009 年的十年分为 2000-2002 年的平稳阶段、2003-2006 年的快速增长阶段以及 2007-2009 年的调整发展阶段三个时期。

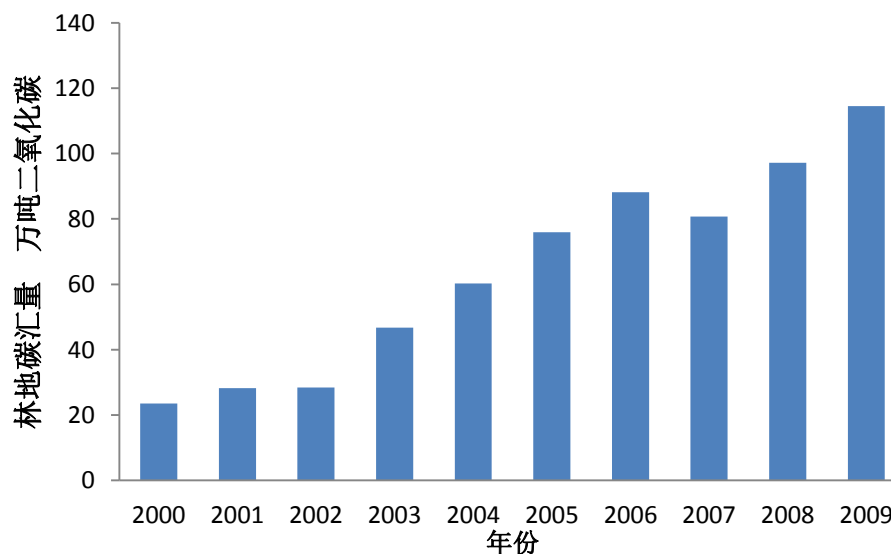


图 3.25 2000-2009 年崇明林地生态系统碳汇量变化 (万 t CO₂)

2000-2002 的三年间，林地碳汇总量稳中有升。2002 年碳汇量 28.47 万 t，相比 2000 年增长了 21.1%。这一时期，崇明延续了上一世纪的造林工作，积极营造包括公益林、沿海防护林、农田林网在内的人工林地；并在原有四旁植树保有的基础上积极植树。

2003-2006 的四年是崇明林地碳汇量的快速增长期。到 2006 年林地碳汇量已达 88.2 万 t，相比 2003 年 46.7 万 t 增长了 88.68%。四年中碳汇量的平均增速为 33.8%，以 2003 年增长速度最快，达到 64.12%。

这一时期的林地碳汇的增长与崇明发展规划的制定以及实施息息相关。崇明、长兴、横沙三岛是上海可持续发展的重要战略空间。2002 年，上海市第八次党代会提出“积极做好崇明开发准备”，并随后编制了《崇明岛域总体规划纲要》。2004 年，国家主席胡锦涛视察上海市，对把崇明岛建设成现代化综合性生态岛的规划给予了肯定。《崇明岛域总体发展规划》提出 2020 年，崇明将基本建设成为以优美的生态环境为品牌，以闻名的游乐度假为主导，以发达的清洁生产为支撑，环境优美、经济发达、文化繁荣、保障健全、城乡融合的海上世界级城市的生态岛区和最优美的“海上花园”，成为国内领先、国际一流的人类生态环境与生态活动示范岛区。其中一项规划功能定位是基本建成国际高标准的以森林、水系、湿地、田园风光为主体的森林花园岛，大力推进崇明生态森林的建设，森林面积规划达到 600 平方公里。在此基础上崇明县制定了《崇明岛林业发展规划》（2003-2020），将提高森林覆盖率作为崇明岛生态建设的主要部分。

按照《崇明林业发展规划》，崇明积极构筑城乡绿化生态网络体系，重点兴建环岛防护林带，兴建总面积为 100 平方公里东西部两个重点生态建设区，兴建环岛运河、陈海公路及环岛防护林带。2003 年到 2006 年间，全县完成工程化造林面积 11 万亩，形成沿海防护林、生态林、经济林和苗木基地为一体的绿化产业新格局。至 2006 年，全县林地面积达 36 万亩，森林覆盖率在 17% 左右。全县先后建成了港东景观生态林、种种生态林、明珠湖水源涵养林及县级万亩苗木基地等一批林业重点工程。

2007-2009 的三年，崇明林地碳汇量在经历了一个谷底后迅速增长。2007 年崇明林地碳汇量 80.8 万 t，相比 2006 年下降了 7.4 万 t；2007 年后林地碳汇量迅速恢复了增长，2008 年、2009 年林地碳汇量分别为 98.2 万 t 和 114.46 万 t，其中 2009 年相对 2007 年增长了 41.71%。

为了稳定粮食生产，保护耕地，近年来国家加强了基本农田的保护。2007 年国家实行耕地保护责任目标考核，对各地的耕地实行强制性保护。国务院发出《关于坚决制止占用基本农田进行植树等行为的紧急通知》，要求坚决制止占用基本农田进行植树等行为，遏制一些地方滥占滥用耕地致使基本农田面积不断减少的现象。对耕地的强制性保护以及“退林还耕”等政策在一定程度上影响了崇明的林业建设。

此后，崇明转变传统林业建设模式，着力解决林业发展和耕地保护的矛盾。林业建设在大型森林建设外，加快了道路、水系和沿岸林带建设，确立以小面积、多品种、多规格混交的近自然方式进行造林。此后大规模实施公益林建设渐渐退

出，取而代之的则是经济林及四旁林建设的不断扩大。同时当地加强了对新建林地的林业管理和养护，共成立了 21 个林业养护社，有上岗林业养护员 4700 余名。到 2009 年底，崇明有林地面积近 38 万亩，森林覆盖率达 21%，比上海市高出 9 个百分点。

崇明县自本世纪初，在造植树造林方面的投入不断加大，年增林地面积保持比较高的水平。按照 2010 年发布的《崇明生态岛建设纲要(2010-2020)》，崇明的森林覆盖率将在 2020 年达到 28%。从崇明现有林地来看，中、幼龄林的比重很大，这部分林地具有巨大的固碳潜力。可以预计在未来的 10 年，崇明的林地将发挥越来越大的碳汇功能。

3.2.1.2 分类型

在崇明的林地碳汇由人工林和四旁植树的碳汇组成。2000-2009 十年间，人工林碳汇和四旁植树碳汇均有不同程度的增长，而人工林的增长速度明显高于四旁植树，见图 3.26。与林地碳汇总量的变化近似，也可以分为 2000-2002，2003-2006，2007-2009 三个时期来看人工林和四旁植树的变化。

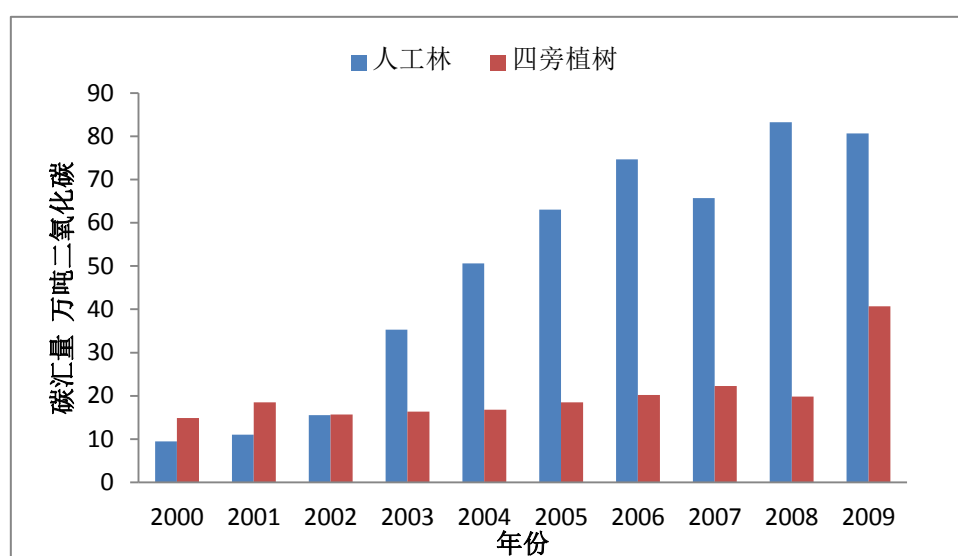


图 3.26 2000-2009 年崇明人工林和四旁植树碳汇量变化 (万 tCO₂)

2000-2002 年，人工林碳汇逐渐赶超四旁植树碳汇量。2000 年，人工林碳汇量 9.4 万 t (CO₂-eq)，当年四旁植树的碳汇量为 14.9 万 t；到 2002 年，人工林碳汇量达到 15.5 万 t，已和与四旁植树基本持平。

2003-2006 年，人工林碳汇量增长迅猛，远超四旁植树的碳汇量。四年中，人工林碳汇量由 35.3 万 t 增长至 74.7 万 t，其碳汇量平均增长速率为 53.41%；与之形成对比的是四旁植树碳汇量从 2003 年的 16.4 万 t 增长到 2006 年的 20.2 万 t，平均增长速率为 6.50%。崇明在确定生态岛发展的方向后，加大了林业建

设的力度。根据《崇明岛林业发展规划》(2003~2020),至 2020 年崇明森林覆盖率要达到 55%,届时崇明岛将有一半以上的土地被森林覆盖。林业建设中,以生态林、公益林、防护林等大规模的森林建设为主,如崇明庙镇地区生态林种植总面积近 4000 亩,总投资 4460 万元。

2007-2009 年,人工林经历了波动调整,四旁植树碳汇增长开始加快。人工林碳汇量在 2007 年和 2009 年都相比上一年出现了下降,但碳汇量仍保持在比较高的水平上。2009 年人工林碳汇量 80.7 万 t,相对 2007 年 65.7 万 t 仍有 22.78% 的增长,这明显小于 2003-2006 年间的增长。而四旁植树在经历了连续多年的缓慢增长,在 2009 年增长速率达到了峰值 105.42%。这与 2007 年后林业建设调整有关系,大规模造林受到了耕地强制保护政策的影响,崇明将林业建设的重心转到了四旁植树,四旁植树的种植株数以及成活率都有了极大的提高。

从未来的林业发展趋势来看,人工林的碳汇量增长速率可能放缓,但仍将保持较高的水平。大规模造林占碳汇增量的比例会下降,而来自林分结构调整、树种优化的林地生产力的增长将可能成为未来碳汇增长的重要内容。为避免造林造成耕地资源的占用,四旁植树在未来的一段时间将可能成为林业建设的重心,其增长速率极有可能继续提高,带来四旁植树碳汇量的进一步增长。

3.2.2 农田

崇明县是上海传统的农业大县,是上海市粮油果肉和水产的主要产地和供给基地,在上海农业发展中占有重要地位。2000 年崇明县的农业总产值 32.54 亿元,2009 年增长至 50.56 亿元,增长了 55.38%。崇明县不仅是上海耕地资源最多、最集中的地区,也是农业生态环境质量最好的,有着极其丰富的农业资源:崇明的香糯白米,大红袍赤豆、大白菜、芦笋、金瓜、甜玉米、蔺草等优良品种,是国内市场享有盛誉的特色产品。2000-2009 的十年间,崇明地区以生态农业为发展方向,不断调整农业结构,促进农业种植业结构优化,从种植业的种植面积和耕地面积来看,近年来崇明地区虽然略有波动,但十年中基本维持稳定。

根据碳汇核算,2000 年-2009 年崇明地区农田碳汇总量不断波动,呈微弱的增长趋势,见图 3.27。农田碳汇总量 2000 年为 74.66 万 t (CO₂-eq),2009 年为 79.49 万 t。2009 年相比 2000 年碳汇量增长了 6.47%。根据图 3.27,可以将 2000-2009 年的十年分为 2000-2003 年的下降阶段、2004-2006 年的调整阶段以及 2007-2009 年的增长阶段三个时期。

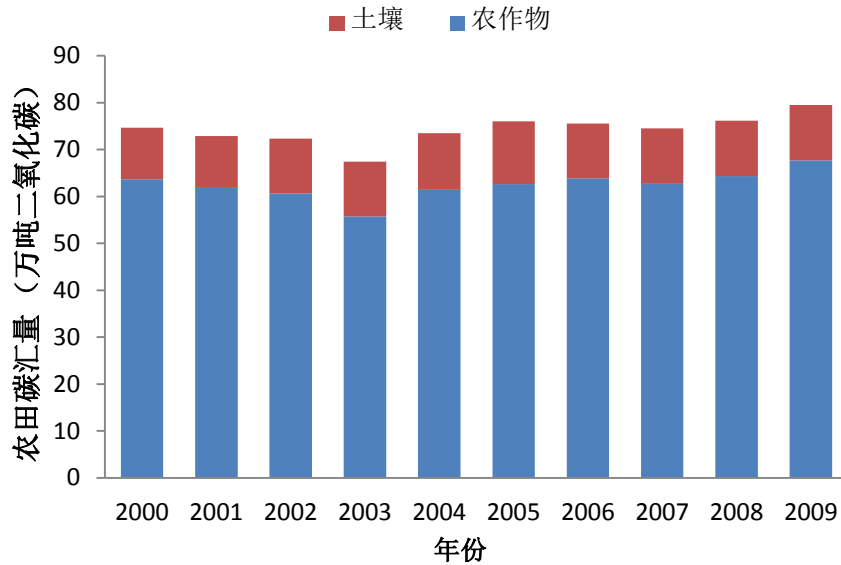


图 3.27 2000-2009 年崇明农田生态系统碳汇量变化 (万 t CO₂)

2000 年到 2003 年，崇明农田碳汇量不断下降。2000 年农田碳汇总量 74.66 万 t，2003 年下降至 67.44 万 t，下降了 9.7%；2003 年也是十年中崇明农田碳汇量最低的一年。虽然由于促淤和荒地开垦，崇明耕地面积在本世纪初有所上升，但这期间农田碳汇总量有所下降，主要是由于当地粮食产量的下降，受农业结构调整、病虫害危害等因素的影响。其中 2003 全年粮食种植面积为 63.14 万亩，相比上一年减少了 9.6%，粮食产量 23.57 万 t，同比减少 14.2%。不过蔬菜及其他特色经济作物种植面积达到 60 万亩次，同比增长 5%。

2004 年至 2006 年，农田碳汇量在 75 万 t 上波动。2005 年为波峰，当年农田碳汇量为 76.57 万 t。

2007 年至 2009 年，农田碳汇量微弱的上升。2009 年农田碳汇量 79.49 万 t，相比 2007 年 74.49 万 t 上升了 26.56%。这一期间，为了稳定粮食生产，国家对耕地出台了强制型保护政策，崇明县耕地面积稳定在 5 万公顷上下。同时崇明积极推广优质粮食作物品种，自 2004 年来，粮食作物播种面积不断扩大，2009 年全县粮食作物播种面积 85.7 万亩，以“寒优湘晴”等优质水稻为主种植面积达到 38 万亩，占水稻总面积 95% 以上，加之农业机械使用的推广和农业技术的进步，粮食产量明显上升。

2002 年编订的《崇明岛域总体规划纲要》已明确提出了崇明建设生态岛的目标，生态农业是其中十分重要的内容。其后《崇明三岛总体规划》(2005 年版)进一步明确了大力推进以高效生态农业为主的现代农业，重点发展绿色种养业、观光农业。崇明已被列为农业部生态农业试点县，在生态农业建设方面采取了一系列措施。如在绿肥种植补贴政策的引导下推进绿肥生产，实施种地和养地相结

合，促进耕地地力提高。在化肥农药施用方面，当地政府一方面推广测土配方技术，根据土壤养分丰缺指标，使肥料施用结构合理化，帮助农民走出“施肥用药”的误区，减少化肥农药的使用量；另一方面通过补贴政策，鼓励农户使用生物农药和有机肥，推广商品有机肥料，减少氮化肥施用。在秸秆资源化利用方面，一方面推广秸秆直接还田，包括机械粉碎还田以及秸秆覆盖还田；一方面将秸秆制作食用菌培养料，实现资源循环利用，或是用作产沼气。此外崇明还建设了各类粮食示范基地，推广先进技术和生态农业理念，如位于崇明的上海良裕有机农业示范基地，是近两年新建起来的全市最大的现代化有机循环农业基地。它主要通过改良土壤、实施科学化管理，生产无公害绿色有机食品，一期工程 7000 亩农田改造已完成，种植的 5000 多亩“寒优湘晴”有机水稻获得了丰收，并已通过有机食品的认证，约有 250 万斤有机大米投放了市场。基地配套设施有机大米加工厂、万头猪场、养鸡场和有机肥料厂等生态产业链工程，正在陆续兴建。目前，崇明正在规划占地面积 9.3 万亩的北部现代高效生态农业实验区，该项目有望今年启动。根据崇明县“十二五”规划纲要，未来五年，崇明将加快发展高效生态农业，成为全市优质农产品的重要生产基地，在保证粮食生产的同时，提高有机农产品的比例。在推进产业化方面，崇明将强化农业区域布局，巩固崇明岛东部河蟹和特色蔬菜、中部优质大米、西部白山羊和经济林以及北部现代高效生态农业实验区为重点的农业生产格局。

随着优良品种的推广、机械水平提高和农田管理技术的进步，崇明当地的粮食作物产量有望进一步提高；随着崇明特色蔬菜及有机蔬菜种植面积的不断扩大，蔬菜田将提供更高的碳汇量。在农田管理措施方面，按照《崇明生态岛建设纲要(2010-2020)》的发展目标，2020 年秸秆资源化利用率、农田薄膜回收率和畜禽粪便资源化利用率均达到 95% 以上。在此基础上继续推广使用有机肥，休免耕等土地管理措施，崇明县农业土壤的固碳能力将进一步提升，碳汇潜力十分巨大。

3.2.3 湿地

崇明岛是是湿地滩涂的产物，它由长江口的两个沙洲湿地逐渐推挤演变成世界上最大的河口冲击岛。崇明岛形成、发展、壮大的演变过程也是河口湿地形成开发、利用和保护的过程。近年来随着日益加剧的人类活动和资源开发，崇明地区的滩涂湿地都出现了一系列变化，如盐水入侵、水质恶化，生物多样性下降等。湿地保护对崇明建设生态岛有着十分重要的意义。

2005 年，出于长江口“三岛联动”发展的规划，原隶属于宝山区的长兴乡、横沙乡正式划转崇明县管理。长兴岛和横沙岛周围的湿地如中央沙、青草沙、横沙东滩等，也并入了崇明县范围内，2005 年前后崇明地区的湿地数量和面积变

化较大。目前崇明三岛的自然湿地由崇明北支边滩、崇明南沿边滩、崇明东滩、崇明北港北沙、横沙东滩、横沙其他边滩、中央沙和青草沙、长兴其他边滩组成。为保证结果的可比性，本研究自 2005 年区划调整后开始估算崇明县的湿地生态系统碳汇量，见图 3.28。

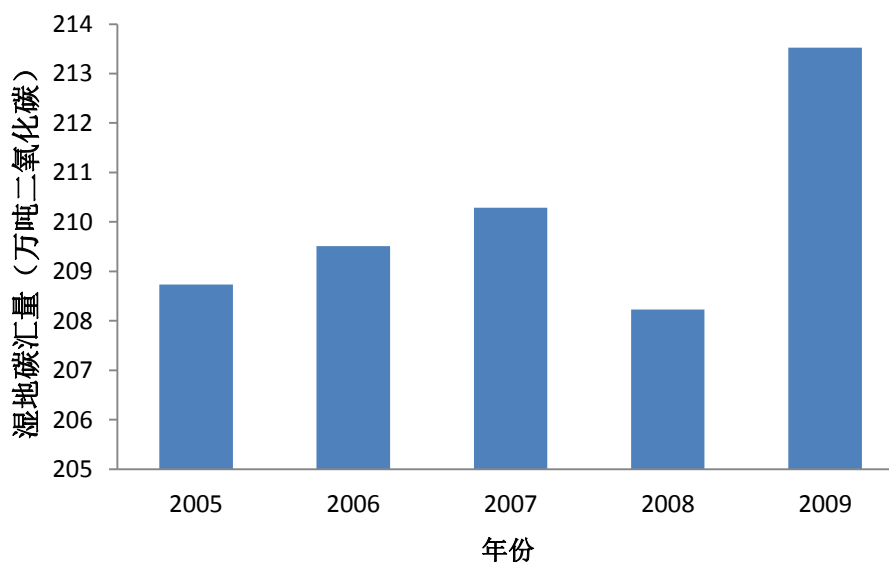


图 3.28 2005-2009 年崇明湿地生态系统碳汇量变化 (万 t CO₂)

2005-2009 的 5 年中，崇明地区湿地碳汇量基本稳定，微有升高。2005 年，崇明县湿地碳汇总量 208.73 万 t (CO₂-eq)，-5m 等深线范围内湿地滩涂面积 1324.4 平方公里；到 2009 年碳汇总量 213.52 万 t，比 2005 年增长了 2.53%，-5m 等深线范围内湿地滩涂面积 1308.3 平方公里。

从 2005-2009 的 5 年崇明地区湿地面积变动来看，见图 3.29，由于长江大量的泥沙来源，并且当地实行促淤养滩、滩高成陆和动态保护的原则，造地面积与湿地的增长面积基本能得到平衡，湿地面积变化不大。主要湿地中，崇明东滩、横沙东滩、崇明北支边滩的呈淤涨态势；崇明北港以及崇明三岛的其他边滩面积略有下降。

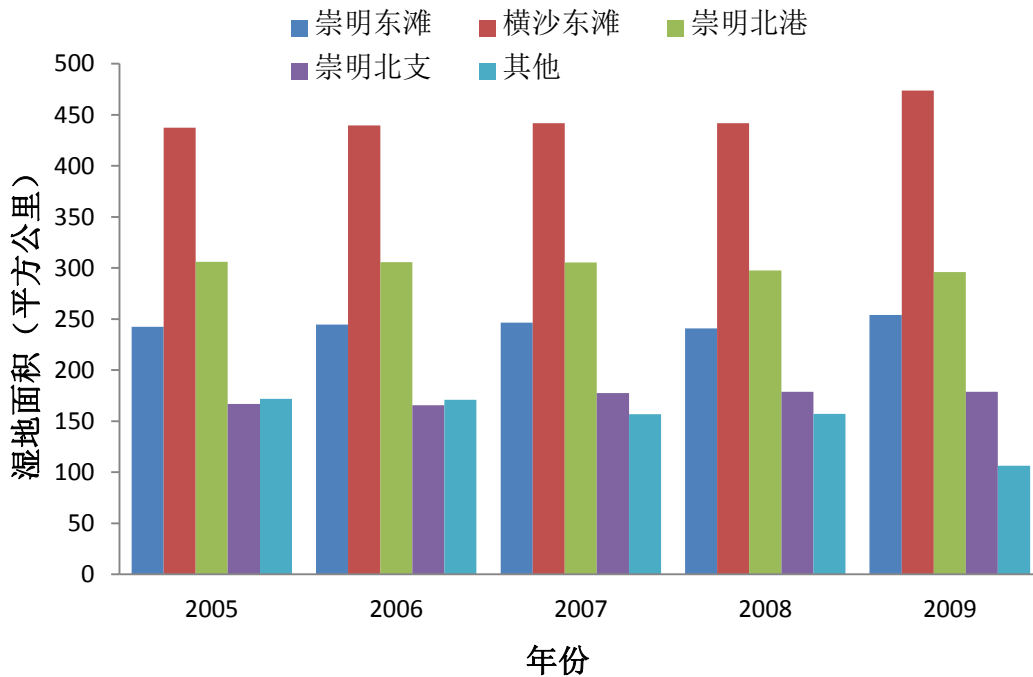


图 3.29 2005-2009 年崇明地区湿地面积变化

其中崇明东滩淤涨放缓。上世纪 80-90 年代是崇明东滩自然淤涨和人工围滩速率最快的年代，平均每年外伸约 100 m，最高曾经超过 200 米/年。由于长江上游三峡大坝和南水北调工程拦截了 70% 的泥沙，长江每年的输沙量锐减至 1.47 亿 t，崇明岛东滩淤涨速率大大降低，预计这种趋势还会加剧，长此以往将可能从淤涨转为侵蚀。横沙东滩的形成与扩大和深水航道建设以及人为促淤圈围有很大的关系。2003 年底开始，横沙东滩进行了较大范围的促淤围垦，共实施了五期促淤和圈围，至 2009 年 6 月，共造地 12420 公顷，横沙东滩-5m 等深线内面积增加了 15%。

湿地保护是崇明生态岛建设的重要内容。《崇明生态岛建设纲要》(2010-2020) 中提出到 2012 年，占全球种群数量 1% 的水鸟物种数达到 7 种，自然湿地保有率上升为 43%。到 2020 年，全球种群数量 1% 的水鸟物种数将达到 10 种以上，自然湿地保有率稳定控制在 43%。依赖上海市雄厚的科研实力，崇明当地与上海市的许多大学、科研机构等联手合作，开展湿地的研究和保护工作。在崇明东滩和西沙，将湿地保护与生态休闲旅游结合起来，如崇明西沙湿地生态修复实验基地引鸟工程等，收到了一定的成效。不过在合理促淤养滩，获取土地资源同时不影响湿地生态系统功能以及盐水入侵防护和减少人为活动污染等方面，湿地保护的工作仍然任重道远。

3.2.4 碳汇总量

崇明县碳汇总量为该地区林地生态系统，农田生态系统，湿地生态系统三部分碳汇量的总和。根据数据可得性，对 2005 年-2009 年的崇明陆地生态系统碳汇总量进行了估算，见图 3.30。

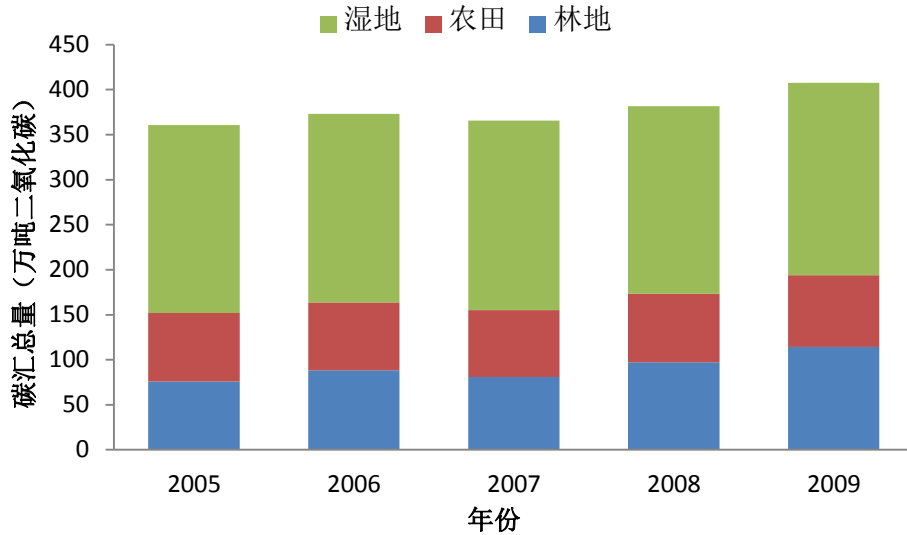


图 3.30 2005-2009 年崇明碳汇总量变化 (万 t CO₂)

2005-2009 的 5 年间，崇明陆地生态系统碳汇总量呈现增长的趋势。2005 年碳汇总量为 360.68 万 t (CO₂-eq)，到 2009 年碳汇总量上升为 407.48 万 t，增长了 13.53%。

从陆地生态系统碳汇总量组成结构来看 (图 3.31)，2005-2009 的 5 年中，湿地生态系统碳汇量占陆地生态系统碳汇总量的比重最大，始终保持在 50% 以上，2009 年为 53.32%；森林生态系统碳汇量比重次之，2009 年为 28.59%；农田生态系统碳汇量比重最低，2009 年为 28.09%。

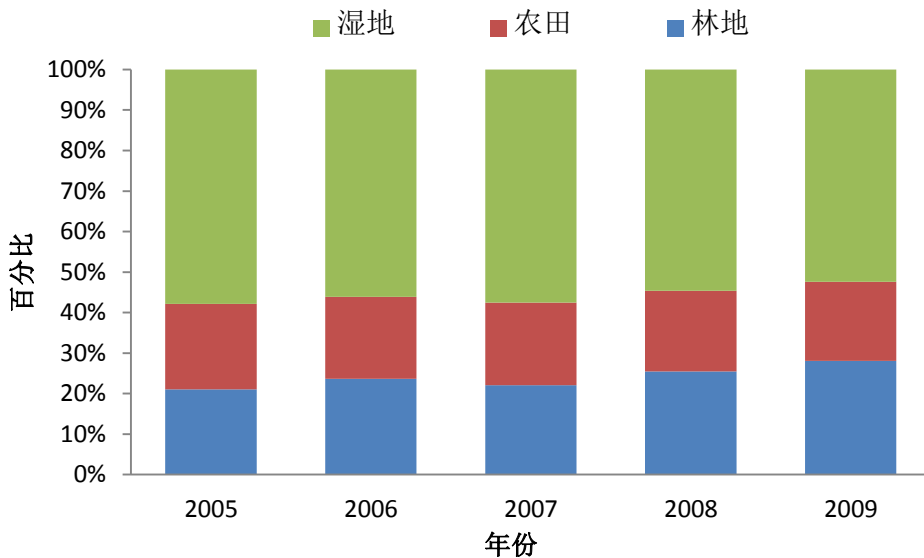


图 3.31 2005-2009 年崇明碳汇总量组成

从碳汇量增长的角度来看，林地、农田、湿地三大生态系统碳汇量都呈现增长趋势。增长最快的是林地生态系统碳汇量，2000-2009 的十年中碳汇量平均增长速率为 43.00%，占碳汇总量的比值由 2005 年的 21.53% 增长到 2009 年的 28.59%；农田和湿地生态系统碳汇量增长缓慢，平均增长速率分别为 0.72% 和 0.63%，它们占碳汇总量的比值都有所下降。

从对碳汇增长的贡献量看（图 3.32），2005-2009 的 5 年中，陆地生态系统碳汇量共增长了 46.79 万 t：其中林地生态系统的增长占全部的 82%；湿地生态系统次之，为 10%；农田为 8%。故而林地生态系统在崇明陆地生态系统碳汇量增长中发挥了主要作用。

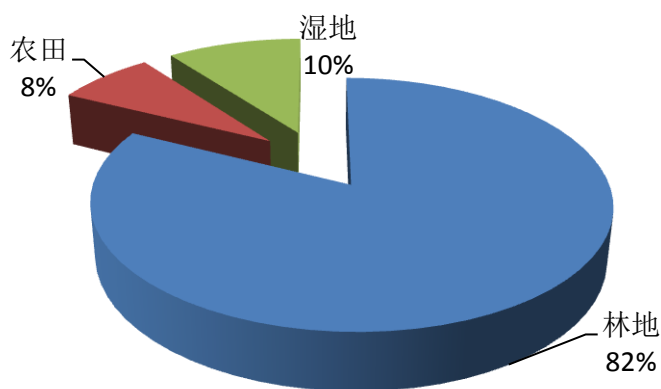


图 3.32 2005-2009 年崇明碳汇增量组成

崇明陆地生态系统碳汇总量的增加反映出了崇明在生态岛建设中，保护和利用林地、土地、湿地等自然资源所采取的一系列政策和措施取得了较好的效果，其中林业建设成果显著，这为最终实现生态岛建设的战略目标打下了基础。

需要指出的是，本研究是在可获取数据基础上对崇明陆地生态系统碳汇能力的初步估算。由于文献报道的经验系数并不能代表所有区域，因此估算结果存在一定的不确定性。但是研究结果可以反映崇明当地政府实施的一系列农业、林地相关政策的效果，具有一定的可靠性。此外，目前对区域综合碳汇评估的研究较少，本研究结果在量级上具有较好的参考意义。

3.2.4.1 空间分析

在乡镇一级统计数据的基础上，本研究对崇明的 16 个乡镇 2001 年至 2009 年间的碳汇量进行了估算，其中长兴乡和横沙乡 2005 年后才并入崇明县，从 2005

年后开始估算。此外包括跃进农场、红星农场、长征农场、东风农场在内的国有农场，不受当地行政部门管辖，崇明的统计部门不对这些国有农场的情况进行统计，因而未将国有农场列入核算范围。由于现有数据的局限性，没有乡镇一级的湿地面积统计，故而乡镇碳汇量核算范围仅包括林地和农田生态系统碳汇核算。根据各乡镇的碳汇量核算结果，可以得到 2009 年崇明地区各乡镇碳汇总量，见图 3.33。

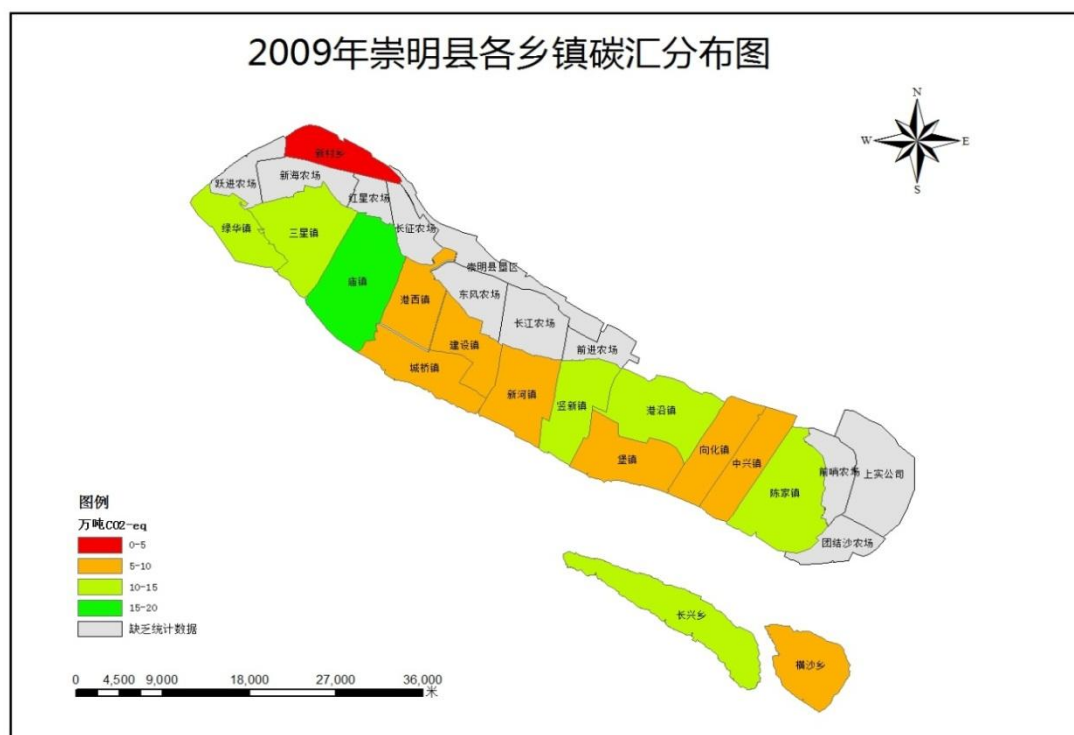


图 3.33 2009 年崇明县各乡镇碳汇量分布

其中碳汇量最大的是庙镇，达到 17.56 万 t CO₂-eq；而碳汇量最小的是新村乡，碳汇量为 4.51 万 t，仅为庙镇的 25.68%。其余各乡镇中，横沙乡、城桥镇以及建设镇得碳汇量在 5.5 万-7.3 万 t C-eq 之间；堡镇、新河镇、港西镇碳汇量在 7.3 万-9.2 万 t CO₂ 之间；中心镇、向化镇、绿华镇以及陈家镇碳汇量在 9.2 万-11 万 t 之间；港沿镇、三星镇、竖新镇、长兴乡的碳汇量在 11 万-14.7 万 t 之间。从整体趋势看，崇明北部碳汇较高，中东部次之；东部地区碳汇量略少于中东部，中北部地区碳汇量最低。

由于各乡镇面积不同，仅从碳汇量大小的角度不能很好的比较各乡镇的碳汇能力。根据崇明各乡镇的面积，计算各乡镇的单位面积碳汇量，即各乡镇碳汇密度，见图 3.34。

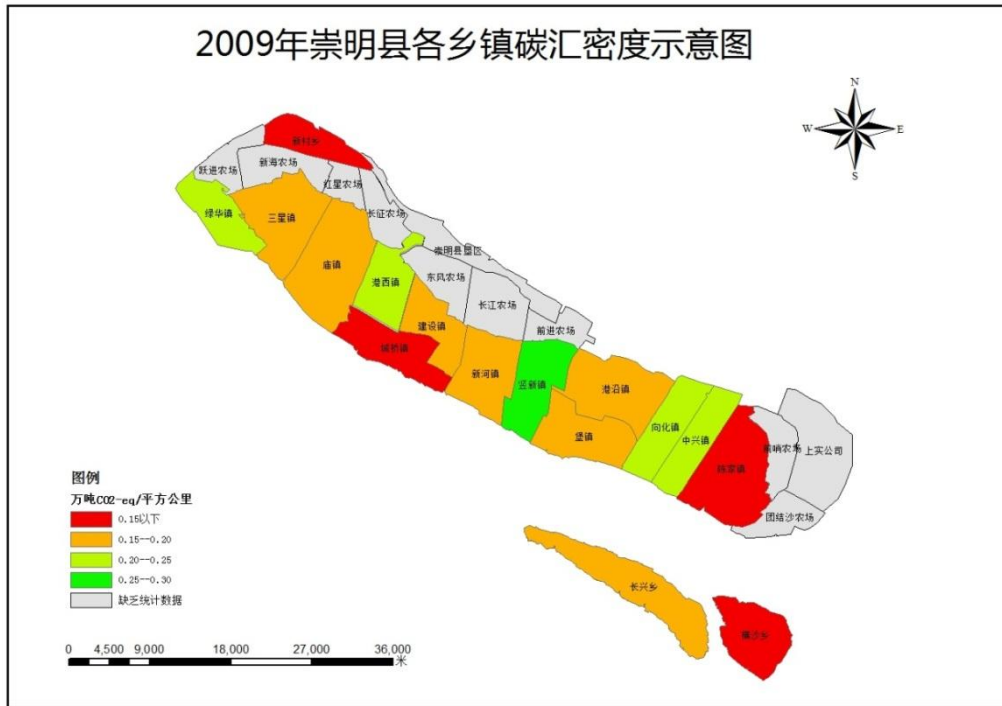


图 3.34 2009 年崇明县各乡镇碳汇密度

从图中可以看出，竖新镇的碳汇密度最高，在 $2500-3000 \text{ tCO}_2\text{-eq km}^{-2}$ 之间，其碳汇增长速率也排在各个乡镇的前列；绿华镇、向化镇、中兴镇以及港西镇碳汇密度次之，在 $2000-2500 \text{ tCO}_2\text{-eq km}^{-2}$ 之间，其中庙镇面积广阔，碳汇总量在各乡镇中排名第一；堡镇、港沿镇、长兴乡、新河镇、建设镇以及三星镇碳汇密度在 $1500-2000 \text{ tCO}_2\text{-eq km}^{-2}$ 之间；城桥镇、陈家镇、新村乡和横沙乡的碳汇密度最低，在 $1500 \text{ tCO}_2\text{-eq km}^{-2}$ 以下。城桥镇和陈家镇是崇明城镇化程度最高的两个镇，一个是县城所在地，一个是长江隧桥坐落处，较早的进行了开发，影响了它们的植被覆盖（核算陈家镇碳汇未包括东滩湿地）；而横沙乡因为成岛时间较短，大规模植树造林开始的比较晚，农业强度也不高，因而碳汇密度较低。

3.2.4.2 时间分析

（略）

3.3 核算结果的不确定性

本研究估算崇明地区碳源和碳汇时存在以下不确定性：

（1）一些乡（镇）、年份的统计数据比较缺乏，如 2005~2009 年崇明县水牛的饲养情况、2005 年各个乡镇的农业用电量情况等，对于这些残缺的数据本

研究按照耕地面积或 GDP 按比列分配得来，导致估算结果的不够准确。

(2) CH_4 和 CO_2 之间可能相互影响，在计算碳源总量时直接采用加和的方法，可能为核算结果带来误差。

(3) 由于缺乏详细的统计资料，有部分温室气体未计算，如出栏家禽的粪便管理系统排放、滩涂湿地排放的 CH_4 和 CO_2 等，可能会使农业碳源的估算结果偏小。

(4) 由于缺乏针对崇明县的实际观测数据资料，部分排放因子采用 IPCC 默认值或长江中下游地区的平均值，这与崇明县实际情况可能有出入，但是缺乏相关的观测资料。

(6) 部分参数（如农作物的经济系数、含氮率、干重比，林木的碳吸收速率，滩涂湿地和海洋的碳吸收率等）在不同的操作条件和不同的环境下有一些差别，而这方面资料有限，只能是采用整个区域统一的数据来估算。

3.4 碳平衡分析

碳平衡是指碳的排放和吸收两方面在数量或质量上相等或相抵，是低碳发展的理想状态。因此，在崇明县碳源碳汇核算结果的基础上，进一步碳平衡的分析是十分有必要的，可以更加全面合理地评估崇明县当前的低碳水平。

分析思路采取先总体后局部，以年份作纵向比较，各乡镇之间作横向比较。

为了简单明了地衡量和表征崇明县的低碳程度，本研究引入了“碳中和系数”（Coefficient of Carbon Neutral, CCN），将其定义为：“研究区域当年的 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 的吸收量与 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 的排放量之比，当 $\text{CCN}=1$ 时，碳源与碳汇相互平衡，不需要再采取其它的措施，也就是实现了碳中和。”对区域的具体评价对应的 CCN 系数数值越高，代表研究区域的低碳化程度越好。

3.4.1 数据来源

本节各乡镇的碳中和系数计算对应的碳源、碳汇的数据来源于前两章崇明 2001-2009 年的各乡镇碳源、碳汇核算结果。

3.4.2 结果

3.4.2.1 计算结果

(略)

3.4.2.2 碳平衡分析

从图 3.52 可以看出，2005-2007 年，崇明县碳中和系数逐年上升，但 2008 出现下降，2009 年又有所回升。2008 年碳中和系数的下降与工业碳源的大幅度增长有关。虽然碳中和系数没有超过 1，但相比于上海市其他区域，崇明县的碳中和程度处于较高水平，表明了崇明在低碳建设和发展方面的卓有成效。

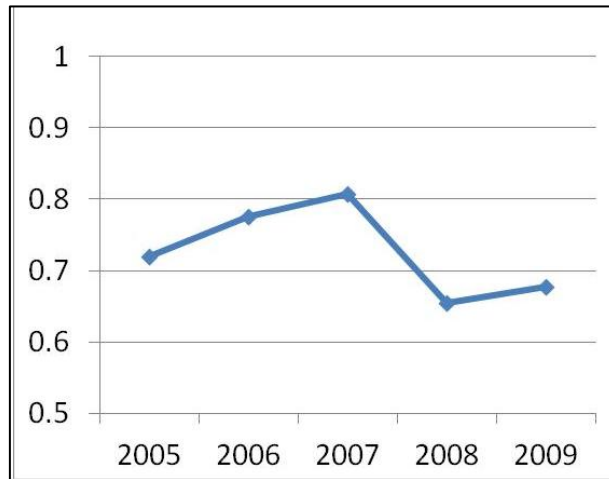


图 3.52 崇明县 2005-2009 年碳中和系数变动趋势图

其次是各乡镇与崇明县的历年碳中和系数的分析，曲线如图 3.53 所示。可以直观地发现，只有绿华镇的碳中和系数较高，基本超过碳中和水平，说明绿华镇的低碳水平较高，在崇明各乡镇中处于领先地位。同时，该镇在一定时段内碳中和系数呈现较大幅度增长，说明该镇在减源增汇的工作上具有很好的实践经验，值得研究与借鉴。

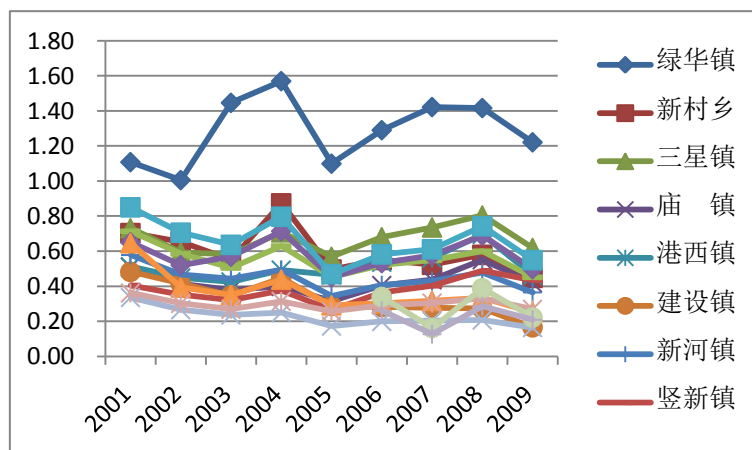


图 3.52 崇明县各乡镇 2001-2009 年碳中和系数变动趋势图

由图中多条图线的叠加中可以看出各乡镇大致的发展趋势：在 2004 年与 2008 年各出现了一次碳中和系数的峰值，2003 年与 2005 年则各出现了一次探底，

而2002年至2006年出现了持续的波动,2005年至2008年则出现了持续的增长。

除了主观上的图线趋势归纳分析,对各年度碳中和系数增长的乡镇做一个统计,也能够大致得出同样的结论,如表3.9中,可以清晰看出2006、2007、2008四个年份出现增长的乡镇数大大超过其他年份,接近乡镇总数,这与2005年至2008年的持续增长是相符合的。

表 3.9 崇明县 2001-2009 年度全县碳中和系数核算结果

| 年份 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 增长个数 | 0 | 2 | 14 | 0 | 13 | 12 | 14 | 0 |

综上可知,各乡镇在2005年到2008年的低碳建设工作总体上是有效的。

考虑到各乡镇年际碳中和系数波动的相对幅度较小,且规律性较差,因此研究单个乡镇各年度的变化趋势无法得出有效的结论。本研究采用首末年份的碳中和系数的直接比较来概括这期间的低碳建设成果,见下表。

表 3.10 崇明县各乡镇 2001 年与 2009 年碳中和系数变化百分比

| 绿 华 镇 | 新 村 乡 | 三 星 镇 | 庙 镇 | 港 西 镇 | 建 设 镇 | 新 河 镇 | 竖 新 镇 | 港 沿 镇 | 向 化 镇 | 中 兴 镇 | 陈 家 镇 | 城 桥 镇 | 堡 镇 |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 10.2 2% | -36. 29% | -15. 36% | -17. 59% | -9.4 8% | -65. 51% | -36. 90% | 7.3 0% | -36. 73% | -23. 49% | -35. 38% | -60. 92% | -51. 03% | -25. 66% |

注: 由于长兴乡与横沙乡只有2007~2009三年的数据,故未作分析。

由上表可知,除了绿华镇与竖新镇实现了碳中和系数的增长,其余各乡镇均呈现10%以上的负增长。其中,建设镇以65.51%的负增长位列第一,陈家镇以60.92%位列第二,城桥镇以51.03%位居第三,其余乡镇的负增长均在50%以下。

空间分析结果见图3.53。从地理位置来分析增长率小于-50%乡镇的分布,可以发现城桥镇是崇明县政府所在地,是崇明县城镇化水平较高的地区,同时境内拥有崇明工业园区,工业发展水平较高。此外,陈家镇2004年2月确定为全国重点建设城镇,也是上海市试点建设的一城九镇之一,发展力度较大。虽然陈家镇立足于建设上海生态示范城镇的目标,全面贯彻体现国际先进水平的生态城镇规划理念,但是碳中和系数总体下滑幅度很大。从陈家镇的例子可以得出以下结论: 尽管低碳建设引入了许多低碳的概念与思路,但是在高速的城镇化建设过程中这些概念与思路是否能够发挥出良好的效果,仍然需要管理部门进一步落实。

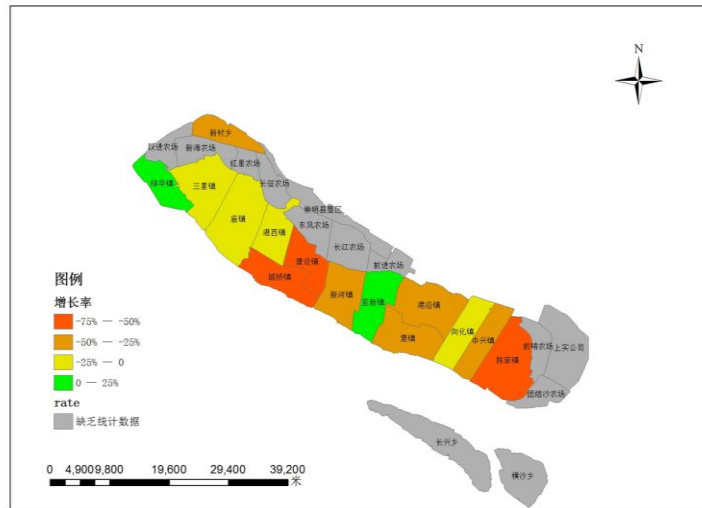


图 3.53 2001-2009 年崇明县各乡镇碳平衡系数增长率

最后对崇明县各乡镇的碳平衡进行现状分析，2009 年碳中和系数现状如下图 3.54 所示，绿华镇的碳平衡水平领先于其他乡镇，而城桥镇、建设镇、堡镇、陈家镇、长兴乡、横沙乡属于碳平衡失衡的地区。总体而言，呈现西北优于东南的态势，这或许是因为东南部地区更接近上海中心地区，集中了相对更多的投资，例如陈家镇的新城建设、长兴乡的船舶制造业发展等。因此，为了提高东南地区的碳平衡水平，一方面应当加强其他地区的基础设施建设，吸引一部分投资转移，另一方面应当加强碳平衡失衡地区的碳汇建设，提高企业准入门槛，遏制碳排放的进一步增加。同时可考虑区域碳交易机制和碳补偿机制的设计与实施，以提升碳排放控制的效率和成效。

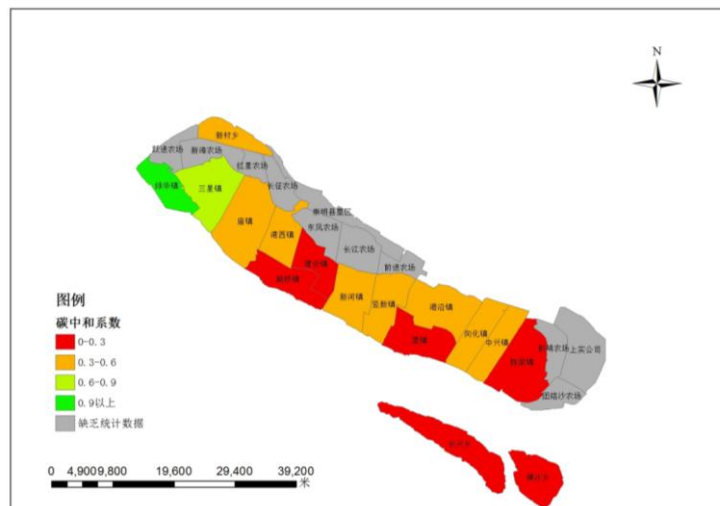


图 3.54 崇明县各乡镇 2009 年度碳中和系数现状图

值得注意的是，本研究中的碳平衡分析仍存在着局限与不足：

首先，数据来源具有不确定性。本研究对碳平衡进行了分乡镇的研究，但是碳源的分乡镇数据是采用部门估算法从全县的碳源总值中计算得到的，该结果中的碳源估算量为保守估计，仅计算了能源相关的碳排放量，不包括土地利用变化、水泥生产、生态系统呼吸产生的碳源。因此在进行分乡镇的碳平衡讨论时，碳中和系数整体上会偏大一些。

其次，碳平衡趋势研究的数据量不足。本研究对各乡镇及全县的 2001-2009 的碳平衡发展趋势做了分析，但是由于年份太少，特别是横沙乡与长兴乡的数据是从 2005 年才开始的，因而分析结果呈现出波动性强、趋势性弱的特点，只能对各年度碳平衡提高的乡镇个数进行统计，从而得出全县尺度上的大致发展趋势，对单个乡镇的发展趋势则只能比较 9 年间增长的绝对值来评价。因此趋势分析的结果较为粗略，不足以有效支撑各乡镇的低碳建设工作。

最后，本研究缺乏对于碳中和系数的评价标准。虽然碳平衡系数为 1 时表示实现碳平衡，但是各乡镇的实际值普遍低于 1。如果能对 1 以下的数值进行分段评价，将有助于碳平衡建设的分阶段管理。然而，确定评价标准需要综合考虑社会经济发展与气候变化等多方面因素，本研究目前尚未能提出合理的评价标准。

3.5 基于 LMDI 的碳源分解分析

能源是经济社会发展的重要驱动因素^[53]。据国际能源署的情景分析预测，中国将以 2.2% 的能源增长率于 2030 年达到 38.19 亿 t（石油当量）^[54]。而 IPCC 的统计数据表明，由于工业革命以后大量化石能源的利用，人类生产、生活活动导致的温室气体排放约占全球温室气体排放总量的 90% 以上^[55]，探索节能模式无疑对气候变化这一议题至关重要。

对数平均迪式指数方法（Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI）可以帮助决策者分析能源消耗的影响因素，从而选择合适的能源发展战略。国内研究方面，Chunbo Ma, David I. Stern 运用 LMDI 方法对 1980 到 2003 年间中国的能源强度变化进行了分解分析，发现技术变化是能源强度变化的主要贡献者，结构变化增长了工业及部门内的能源强度^[56]。Wenchao Wang, Hailin Mu, Xudong Kang 等运用 LMDI 方法对中国 1980-2006 年期间的能源消耗进行了分解，借以分析其影响因素^[57]。国际层面上，Nicolas Mairret, Fabrice Decellas 运用 LMDI 方法分解了法国服务业于 1995-2006 年间的能源消耗变化，并发现这期间经济增长为主要的影响因素，结构、生产力、替代和能源强度降低能耗，但作用微小^[58]。Subhes C. Bhattacharyya, Arjaree Ussanarassamee^[59], Volkan S. Ediger, Ozkan Huvaz^[60]，郭运功，林逢春等^[61]也曾运用 LMDI 方法对能源消耗或者能源强度的变化做过

相关的分解分析。

本研究尝试运用 LMDI 方法对崇明县 2000-2009 年间的能源碳排放变化量进行分解,剖析各产业部门分别在经济产出、经济结构和碳排放强度三方面的贡献率,以期为崇明县能源发展战略提供参考依据。

3.5.1 方法

许多学者曾运用指标分解方法来量化能源消耗的不同影响因素。B.W.ANG^[62]指出,它已经成为能源领域被广泛接受的分析工具。现有的能源指标分解方法中,主要的为 Laspeyres 分解方法和 Divisia 分解方法两种。在前期研究中,B.W.ANG^[63]比较了不同的指标分解方法,并指出,考虑理论基础、可适性、使用方便性等方法特性,对数平均迪式指数法更为优良,应为首选。

基本的碳排放总量 (E) 可做如下分解:

$$E = \sum_i E_i = \sum_i G \cdot \frac{Q_i}{G} \cdot \frac{E_i}{Q_i} = \sum_i G \cdot S_i \cdot I_i$$

其中,

G: 总的经济产出值;

S_i: i 产业的经济产出份额, i 为行业分类;

I_i: i 产业的碳排放强度。

依据 LMDI 方法^[64], 得到:

$$\Delta E_{act} = \sum_i \frac{E_t^i - E_o^i}{\ln E_t^i - \ln E_o^i} \ln \left(\frac{G_t}{G_o} \right)$$

$$\Delta E_{str} = \sum_i \frac{E_t^i - E_o^i}{\ln E_t^i - \ln E_o^i} \ln \left(\frac{S_t^i}{S_o^i} \right)$$

$$\Delta E_{int} = \sum_i \frac{E_t^i - E_o^i}{\ln E_t^i - \ln E_o^i} \ln \left(\frac{I_t^i}{I_o^i} \right)$$

其中, 变量定义如下,

E_t : 第 t 年总的碳排放量;

E_t^i : i 产业第 t 年的碳排放量;

E_o^i : 基准年 i 产业的碳排放量;

G_t : 第 t 年总的经济产出值(以 2000 年不变价为准);

G_o : 基准年总的经济产出值(以 2000 年不变价为准);

S_t^i : i 产业第 t 年的经济产出份额 ($=G_t^i/G_t$);

S_0^i : 基准年 i 产业的经济产出份额= G_0^i/G_0);

I_t^i : i 产业第 t 年的碳排放强度($=E_t^i/G_t^i$);

I_0^i : 基准年 i 产业的碳排放强度($=E_0^i/G_0^i$)。

ΔE_{act} ΔE_{str} 和 ΔE_{int} 分别代表经济产出效应、产业结构效应、碳排放强度效应。

因此, 基准年至目标年之间总的碳排放变化 (ΔE_{tot}) 即为:

$$\Delta E_{tot} = E_t - E_0 = \Delta E_{act} + \Delta E_{str} + \Delta E_{int}$$

按照中国统计年鉴对 GDP 的划分原则, 本研究将 GDP 分为: 第一产业、工业、建筑业、第三产业。

3.5.2 数据来源

崇明县 2000-2009 年间的三次产业的 GDP 数据来自崇明统计年鉴 (2001-2010), 且 GDP 数据以 2000 年不变价计算。

3.5.3 结果

3.5.3.1 分解效应分析

利用 2000-2009 年的数据, 并以 2000 年为基年, 采用 LMDI 法对崇明县能源碳排放量的变化进行分析。每一年的经济产出效应、产业结构效应、碳排放强度效应的贡献结果见图 3.55。

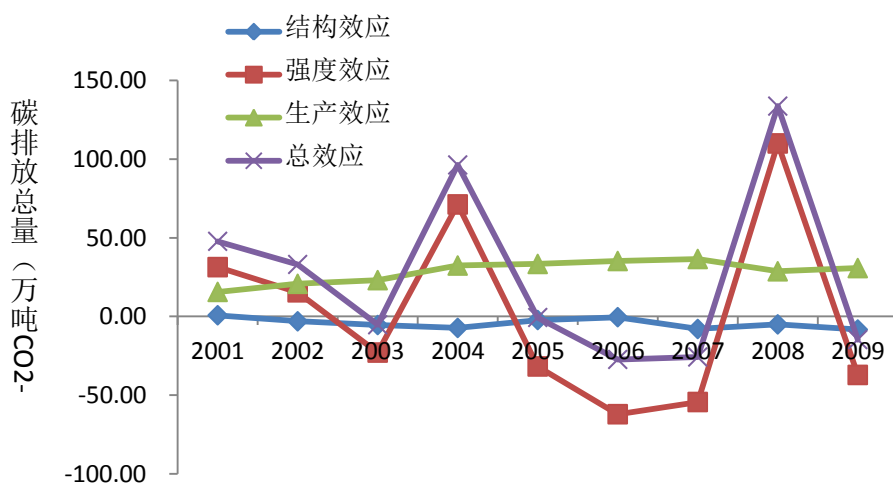


图 3.55 经济产出、产业结构和碳排放强度效应对崇明县能源碳排放变化的影响 (2000-2009)

通过上图可知, 2001-2009 年间, 碳排放的增长主要来自于经济产出的影响,

崇明县碳排放量（即图中总效应曲线）总体呈现不断增加的趋势，经济因素对碳排放起促进作用，能源结构对碳排放起抑制作用，碳排放强度对崇明县的碳排放量变化影响较大，总体对碳排放起促进作用。

自 2001 年起，经济增长对崇明县碳排放的贡献在不断增大，10 年间使能源碳排放增长了 256.61 万 t，对 10 年碳排放增长量的贡献率达 108.17%，是最大的促进因素；结构效应曲线一直处于基线以下且总体呈下降趋势，说明产业结构调整对碳排放具有持续的抑制作用，这也与崇明县优化产业结构的政策相吻合，但其贡献值较小，潜力还没有发挥出来，10 年间共使能源碳排放减少了 38.98 万 t；整体碳排放曲线与碳排放强度变化曲线基本重合，说明碳排放强度的抑制作用对碳减排的贡献较小（使能源碳排放增长了 19.61 万 t），且整体波动较大，说明崇明能源利用水平具有不稳定性。

通过分析，崇明县碳排放的下降主要是产业结构的优化引起的。可是，随着经济的发展，经济因素的拉动作用越显突出，仅靠优化产业结构的抑制作用已明显不够，还需大力降低碳排放强度，充分发挥碳排放强度对碳排放增长的抑制作用。经济规模总量的扩张是崇明县碳排放继续高速增长的最主要原因，考虑到未来一段时间内崇明县经济还将继续保持高速增长态势，因此，试图通过调整经济发展速度方法来控制二氧化碳排放是不现实的。由于崇明县仍处于发展状态，当前各种产业都有其存在发展的空间，因此，短时间内试图通过调整产业结构来显著降低二氧化碳排放也是不可能的，但是，在产业内部大力推进产业内升级，特别是工艺创新、工艺升级达到节能减排的目的则是可能的，这实际上是提高能源利用效率以降低碳排放强度的有效途径。

3.5.3.2 部门效应分析

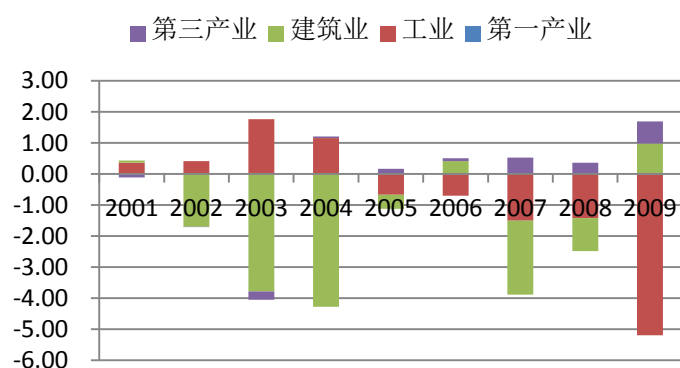


图 3.56 崇明县各产业部门的结构效应贡献率（2000-2009）

产业结构效应在 2000—2009 年减少 CO₂ 排放增量 38.98 万 tCO₂，主要因为此期间崇明生产总值中，二产占比下降，三产占比上升，经济结构优化所致。但

在 2000—2001 年却增加 CO₂ 排放增量 0.77 万 t,这是由于此期间二产占比上升,三产占比下降,重工业化所致。在总结构效应中,建筑业和工业的贡献远远超过一产和三产,为 74.12%、35.30%,可见,调整生产总值结构中二产的比例对控制 CO₂ 排放非常重要。

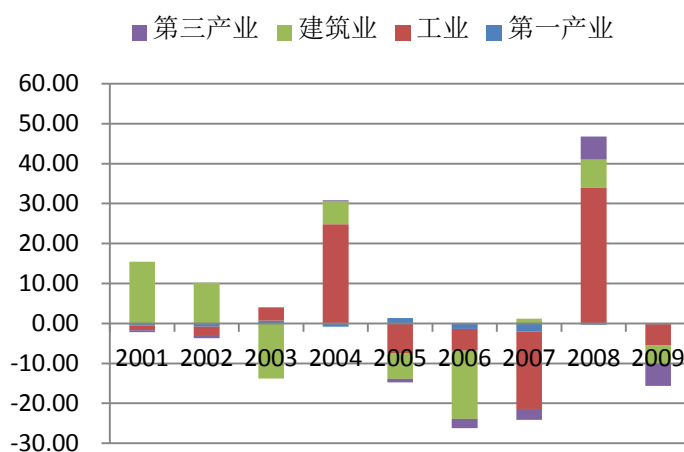


图 3.57 崇明县各产业部门的碳排放强度效应贡献率 (2000-2009)

碳排放强度是单位生产总值的 CO₂ 消耗量,该指标可以综合反映经济系统的碳生产效率。2000—2009 年,崇明碳排放强度增幅为 4.94%(以 2000 年不变价核算)。在总碳排放强度效应中,工业的碳排放强度贡献高达 251.65%,说明 1995—2005 年的碳排放强度升高主要来源于工业碳排放强度的提高。

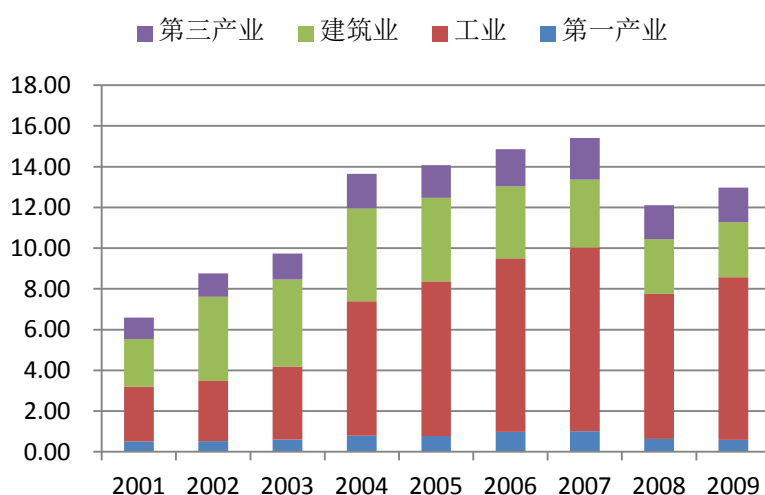


图 3.58 崇明县各产业部门的产出效应贡献率 (2000-2009)

由于经济增长依赖能源为之提供动力,而 CO₂ 是能源部门主要排放气体,经济的高位增长必然导致 CO₂ 排放的快速增长。在总产出效应中,工业、建

筑业的贡献高达 51.85%、29.29%，说明工业和建筑业生产规模的扩张是 CO₂ 增长的主要驱动因素。

3.6 基于遥感的碳汇分析

遥感观测技术提供了大尺度范围检测、定量化以及调查植被在人类活动和气候变化下响应的机会及手段。利用遥感手段获得各种植被状态参数，结合地面调查，完成植被的空间分类和时间系列分析，随后可分析森林生态系统碳的时空分布和动态，并估算大面积森林生态系统的碳储量以及土地利用变化对碳储量的影响。遥感估算法以碳通量与碳循环过程的综合网络观测、生物过程的适应性实验研究以及河流碳输运过程研究为支撑系统的自下而上途径，与以土地利用/土地覆被变化和对地观测数据生态参量反演为基础的自上而下途径，经过相互验证并与尺度转换模型实现有机结合，开展综合观测、调查、比对分析、模拟和评价研究，把握生态系统碳循环的格局与过程规律，辨析自然和人为因素对碳循环过程的影响，以探讨全球气候变化条件下生态系统碳循环过程的演变趋势^[65]。

植被指数是一种利用卫星探测数据的线性或非线性组合来反映植被的存在、数量、质量、状态及时空分布特点的指数，是利用卫星影像不同波段探测数据组合而成的，能反映植物生长状况的指数。植被指数有助于增强遥感影像的解译力，并已作为一种遥感手段广泛应用于土地利用覆盖探测、植被覆盖密度评价、作物识别和作物预报等方面，并在专题制图方面增强了分类能力。大量研究表明，植被指数与多种植被参数具有很好的相关性，可用来诊断植被的一系列生物物理参量，如叶面积指数(LAI)、植被覆盖率、生物量、光合作用有效辐射吸收系数，反过来又可用于分析植被生长过程：净初级生产力(NPP)和蒸散(蒸腾)等。

其中均一化植被指数(NDVI)运用十分广泛，它为研究大尺度的植被动态及其空间分布提供了有效信息。NDVI与地表植被覆盖程度及生物量，植被生产力等具有良好的相关性，它的大小能很好的反映绿色植物的状况，对地表植被变化反应灵敏，是研究地表植被变化的一个重要指标，也可以作为植被生物量以及植被生产力的指标，用于计算陆地生态系统净生产力。

3.6.1 方法

绿色植被反射光谱的突出特点是对红光(R)的高吸收率和对近红外光(NIR)的高反射率，NDVI以植被叶绿素为基础，由绿色植被强反射的近红外波段和绿色植被强吸收的红波段生成，应用时由遥感影像的4波段与3波段生成NDVI：

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

该指数值介于-1 与 1 之间，0 代表该区域基本没有植被生长，土壤和岩石在这两个波段的反射率基本相同，因此其 NDVI 值接近 0。取值 0~1 之间，数字越大代表植被的量越多。负值代表非植被覆盖的区域，云、水体和冰雪在红色及近红外波段均有较大反射，其 NDVI 值为负值。

本研究主要运用了 ERDAS IMAGINE 9.2 软件对卫星影像进行处理并计算 NDVI 指数。ERDAS IMAGINE 以其先进的图像处理技术、友好的用户界面、灵活的操作方式、服务于不同层次用户的模型开发工具以及高度的遥感图像处理和 GIS 集成功能，为遥感及其应用领域的用户提供了功能强大的图像处理软件。同时运用 ArcGIS 软件对处理好的遥感影像进行分析和信息提取，并制图输出。

ERDAS IMAGINE9.2 的具体处理步骤见附录 2。

3.6.2 数据来源

针对植被指数计算时，本研究选取了来自 Landset-7 ETM+的 2003、2006、2007、2008 以及 2009 年末到第二年年年初的冬季遥感影像数据，见表 3.11。

表 3.11 2003-2009 年崇明卫星遥感资料

| 数据类型 | 成像日期 | 季节 | 云量覆盖 |
|------|------------|----|------|
| ETM+ | 2003/12/16 | | |
| | 2006/02/07 | | |
| | 2007/01/09 | 冬季 | 0% |
| | 2008/02/29 | | |
| | 2009/01/14 | | |

2003 年后的 Landset-7 遥感影像数据出现了 25% 条带损失，但按照崇明陆域区域裁剪后，图像中条带缺失部分仅占全部面积的 5.69%，且不同时相的遥感影像条带损失的面积和性质相同，进行植被指数计算后，条带缺失部分以 0 值出现，不影响不同时相影像之间的横向比较。因此可以采用条带缺失后的 Landset-7 遥感影像进行碳汇的定性分析。在时相的选择时，因为大气状况对指数的运算有影响，本研究选取平均云量为 0，成像质量较高的影像。

遥感数据源 Landset-7 ETM+的详细介绍见附录 3。

3.6.2 结果

本研究对 2003-12-16、2006-02-07、2007-01-09、2008-02-29 以及 2009-01-14 五个时相的 Landset-7 ETM+遥感影像进行了预处理，然后分别计算植被指数 NDVI，从而得到五个时相的 NDVI 分布图。以 2009 年冬季 NDVI 图为例，见图 3.59。

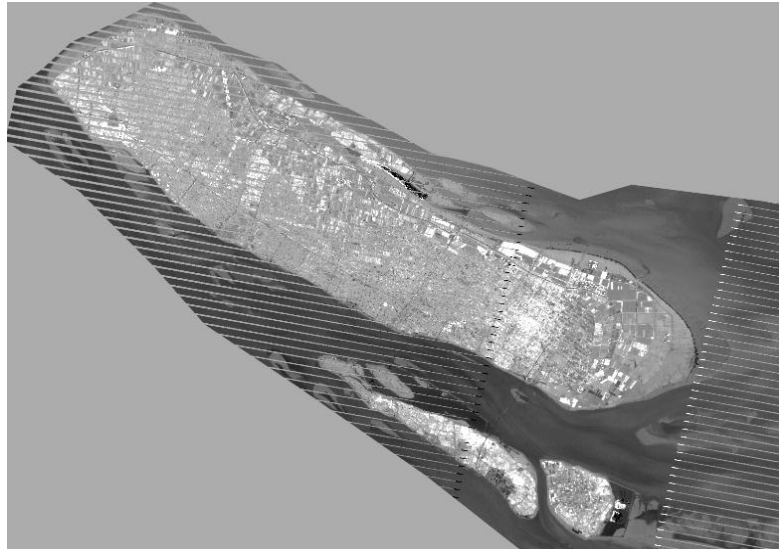


图 3.59 2009 年冬季崇明地区 NDVI 图

图中黑色暗沉部分为湖泊、水系覆盖，NDVI 值小于 0；灰色部分为空闲农田、建设用地或荒地，NDVI 近于 0；明亮部分为植被覆盖区域，NDVI 为正值，且随着植被覆盖度的增大而增大。根据植被覆盖密度的实际情况，可将植被覆盖类型分为低覆盖度植被 ($0 < NDVI \leq 0.15$)，中覆盖度植被 ($0.15 < NDVI \leq 0.30$) 和高覆盖度植被 ($NDVI > 0.30$) 三大类。值得注意的是，图中条带损失部分为灰色，NDVI 值为 0。不同时相间条带损失位置一致，面积相同，损失面积仅占全部的 5.69%，且 NDVI 值均为 0，因此条带损失不会影响 NDVI 的趋势分析。

最终得到 2003~2010 年的崇明地区 NDVI 变化，见表 3.12。

表 3.12 2003-2010 年崇明地区 NDVI 值变化

| 植被覆盖度 | 像元数 | | | | |
|---------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 2003-2004 年冬季 | 2005-2006 年冬季 | 2006-2007 年冬季 | 2007-2008 年冬季 | 2008-2009 年冬季 |
| 低覆盖度 $0 < NDVI \leq 0.15$ | 172384 | 341308 | 382576 | 369984 | 43636 |
| 中覆盖度 $0.15 < NDVI \leq 0.30$ | 24464 | 86184 | 87948 | 92964 | 103184 |
| 高覆盖度 $NDVI > 0.30$ | 6024 | 9132 | 44528 | 45180 | 40116 |

| | | | | | |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| NDVI 平均值 | 0.0594 | 0.0946 | 0.1194 | 0.1229 | 0.1108 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|

对 2003-2009 年崇明地区 NDVI 的时间序列做线性回归分析, 见图 3.60。2003-2009 年冬季的 NDVI 值随时间波动, 其中 2003 年末的 NDVI 值最小, 2007 年初的 NDVI 值最大。2003-2007 年的 NDVI 值呈现明显的上升趋势, 2008-2009 年冬季的 NDVI 值与上一年相比有微弱下降。但从整体趋势来看, 2003-2009 年崇明地区的 NDVI 呈现上升趋势, 增长趋势线的斜率为 0.0117, 相关性为 0.7562。

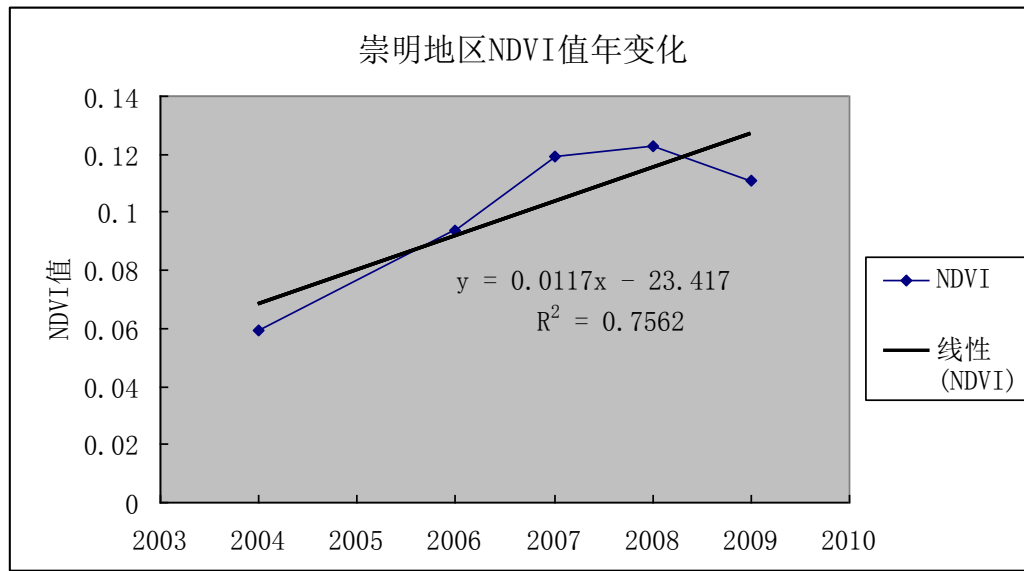


图 3.60 崇明地区 NDVI 值年变化图

基于卫星遥感的归一化植被指数(NDVI)虽然并不是对生物量或初级生产力的直接测量, 但由于它与生物量之间良好的相关关系, 可以较好地反映植被的盖度和产量信息, 因此 2003-2009 年的 NDVI 值年变化趋势, 可以反映出 2003-2009 年崇明地区的植被覆盖度有明显的增加, 植被的初级生产力也有较大水平的提高。

虽然植被的初级生产力并不等同于碳汇, 但 NPP 与植被生态系统的碳汇也有良好的正相关性。将某一类型植被每单位 NPP 产生的碳汇量定义为植被的碳汇效率(carbon sink efficiency, CSE), 方精云等计算得到中国森林的 CSE 为 0.057, 草地的 CSE 为 0.015。这表明碳汇随着 NPP 的增加而逐渐增加。

在此基础上分析得到, 2003-2009 年的 NDVI 值的上升趋势可以反映出这一时期崇明地区植被生态系统碳汇量呈增长趋势。前文对 2005-2009 年崇明地区的碳汇量运用清单法进行了核算, 5 年中, 碳汇量出现增长。NDVI 年变化趋势的分析结论与碳汇清单法计算得到的结果相吻合, 这两个方法分别从定性和定量的角度肯定了崇明地区在近一段时间中碳汇量呈增长的趋势, 具有一致性。

需要提出的是, 本研究所计算 NDVI 值并非这一时间崇明地区的真实 NDVI 值。受到条带损失以及直方图匹配的影响, 本研究所计算的 NDVI 会低于真实值。

第4章 结论与建议

4.1 结论

在崇明县科委和相关部门的大力支持和配合下，课题组通过两年多的研究，在文献调研和实地考察基础上，建立了基于集成方法学的崇明生态岛碳源碳汇核算体系，完成了碳源碳汇时空间分布评价和碳平衡评价，建立了基于 GIS 和面向对象技术的崇明生态岛碳源碳汇信息化集成管理平台。研究获得的主要结论总结如下：

4.1.1 碳源核算

2000 年至 2009 年间，崇明的碳排放主要来自能源活动（76.78%）。在能源活动碳排放中，工业是主要来源，2000-2009 年累积碳排放量占累积碳排放总量的 32%；在非能源活动中，牲畜肠道发酵是主要来源，2000-2009 年累积碳排放量占累积碳排放总量的 15.86%。从年度核算结果来看，2009 年，崇明县能源活动中的主要排放源仍然为工业，占碳排放总量的 38.93%；其次为居民生活碳排放，所占比例为 20.13%。非能源活动中，主要排放来源为牲畜肠道发酵，占碳排放总量的 12.00%。

空间分析表明，2009 年崇明县的长兴乡、城桥镇和陈家镇碳排放较高，分别占整个崇明县碳排放的 14.94%、8.81%和 8.78%。总的来看，崇明县各乡镇碳源总量的空间区域分布与实际情况较为一致。例如，长兴岛是国家重点扶持的海洋装备中心，拥有上海江南长兴重工有限责任公司、江南造船(集团)有限责任公司、上海江南长兴造船有限责任公司等大型重工业企业；城桥镇拥有上海市崇明电力公司、上海运良锻造实业有限公司、上海三江精密锻造有限公司等工业企业；陈家镇是近年来崇明县重点开发的区域，因此碳排放总量相对较高。

针对各镇的分析结果表明，2000-2009 年，长兴乡累积碳排放量最高，其次为庙镇和陈家镇。这三个乡镇是崇明县最大的碳排放区域，且其碳排放主要来自于产业能源活动引起的碳排放，因此促进产业部门的碳减排，尤其是工业部门的碳减排依然具有重要意义。

分解分析表明，2001-2009 年间，崇明县碳排放总量（即总效应曲线）呈现不断增长的趋势。其中，产业结构效应对崇明县的碳排放增长起到了抑制作用，而经济产出效应和碳排放强度效应则促进了崇明县的碳排放增长。

4.1.2 碳汇核算

2005-2009年，崇明陆地生态系统碳汇量整体呈现增长趋势。2009年碳汇总量上升为407.48万t，比2005年增长了46.79万t，年均增速达到6.23%。

2005-2009年，湿地碳汇量占碳汇总量的比重最大，始终保持在50%以上，2009年为53.32%；林地碳汇量比重次之，2009年为28.59%；农田生态系统碳汇量比重最低，2009年为28.09%。

从不同类型碳汇增长速率来看，林地、农田、湿地三大生态系统碳汇量都呈现增长趋势。增长最快的是林地生态系统碳汇量，2000-2009年的十年中碳汇量平均增长速率为43.00%；农田和湿地生态系统碳汇量增长缓慢，平均增长速率分别为0.72%和0.63%。从碳汇增长量来看，2005-2009年的五年中，林地生态系统对碳汇增长量的贡献率为82%；湿地生态系统次之，贡献为10%；农田贡献率为8%。故而林地生态系统在崇明陆地生态系统碳汇量增长中发挥了主要作用。进一步分析表明，林地碳汇中，人工林的碳汇量增长速率正在放缓，但仍将保持较高的水平。大规模造林对碳汇增量的贡献比例正在下降，而来自林分结构调整、树种优化的林地生产力的增长将可能成为未来碳汇增长的重要内容。

在乡镇统计数据基础上，对崇明16个乡镇2001-2009年的林地生态系统和农田生态系统碳汇量进行了核算，其中横沙乡和长兴乡从2005年开始核算。结果表明16个乡镇中，除陈家镇外，其余各乡镇碳汇量都保持增长趋势。其中绿华镇碳汇平均增速最高，为9.67%。2009年各乡镇中，庙镇碳汇量最高；新村乡碳汇量最低。2009年单位面积碳汇量（即碳汇密度）以竖新镇最高；城桥镇、陈家镇、新村乡和横沙乡的碳汇密度较低。

遥感分析结果表明，2003-2009年崇明地区NDVI值呈增长趋势，反映出这一时期崇明地区植被生态系统碳汇量呈增长趋势。

4.1.3 碳平衡分析

2005-2007年，崇明县碳中和系数逐年上升，但2008年出现下降，2009年又有所回升。2008年碳中和系数的下降与工业碳源的大幅度增长有关。虽然碳中和系数没有超过1，但相比于上海市其他区域，崇明县的碳中性程度处于较高水平，表明了崇明在低碳建设和发展方面的卓有成效。

空间分析结果表明，绿华镇的碳中和系数最高，2000-2009年大部分都超过碳中和水平，说明绿华镇的低碳水平在崇明各乡镇中处于领先地位。除了绿华镇，竖新镇也实现了碳中和系数的增长，而其余各乡镇均呈现10%以上的负增长。

2009年绿华镇的碳平衡水平领先于其他乡镇，而城桥镇、建设镇、堡镇、

陈家镇、长兴乡、横沙乡属于碳平衡失衡的地区。总体而言，呈现西北优于东南的态势。需要指出的是，横沙乡由于其丰富的湿地资源，往往被认为是碳平衡的，但是本研究结果却与之相反，主要原因是横沙乡丰富的湿地资源未被纳入横沙乡的碳汇计算结果中。之所以如此，是为了体现湿地资源的公共性，同时也为了更好地促进横沙乡的低碳建设。各乡镇与崇明县的历年碳中和系数的分析表明，除了绿华镇与竖新镇实现了碳中和系数的增长，其余各乡镇均呈现 10% 以上的负增长。其中，建设镇以 65.51% 的负增长位列第一，陈家镇以 60.92% 位列第二，城桥镇以 51.03% 位居第三，其余负增长的乡镇则均在 50% 以下。

4.2 建议

4.2.1 碳源控制

4.2.1.1 优化产业结构、提高能效

2000 年至 2009 年间，崇明的碳排放主要来自能源活动，然而当前工业化水平仍然远低于上海，因此产业升级是崇明的首要选择。“十一五”期间，崇明已经关闭了部分高能耗的工厂，下一步的工作则需通过调整产业结构、提高技术水平等途径来实现能源效率的提升。此外，应该对第三产业碳排放给予足够的重视，以防止该行业碳排放随社会经济的发展而急剧增长。

此外，由于缺乏化石资源，崇明当地使用的煤、石油和天然气都依赖外界供给^[66]。本研究中，2000 年至 2009 年崇明的电力碳排放因子在 6.90-10.10 tCO₂-eq/10⁴kWh 之间，处于相对较高水平。因此，可以通过提高当地的可再生能源使用比例、引入更多的外来绿电等方式来降低电力碳排放因子。

4.2.1.2 强化居民生活碳排放管理

居民生活部门导致的碳排放增长较快，2009 年的碳排放量已达 2000 年的 3 倍以上。因此，应通过加快优化居民生活耗能的燃料结构，提供集中供气以替代烹饪用直接燃煤等措施来提高燃料的使用率。除此，应提高住房的热力保存能力，以减少热力损失来降低取暖所需能耗。

除此，政府应通过多种宣传教育途径，引导大众建立低碳节能意识。由于当地经济的快速发展和生活水平的不断提高，私人交通导致的汽油消耗很有可能在一段时期内仍会继续增长，因此应鼓励当地居民采用公共交通和步行、减少私人交通工具的拥有率等。

4.2.1.3 完善国内地方级统计体系

研究过程中发现，中国县级层面的能源消耗和碳排放统计数据基础较差。数据的不易获取导致当地政府难以采取有效的相关决策。碳减排工作依赖可靠而及时的数据，因此当地政府应采取有效措施，例如加强对工作人员的培训，促进监管和开发信息系统平台等，这将有助于对碳排放现状的掌握，从而提高当地碳管理水平。

4.2.2 碳汇建设

根据湿地、林地、农田在碳汇建设的不同特点与作用，提出下列三条结论与建议。

4.2.2.1 转变林业碳汇建设工作重心

林业碳汇作为碳汇增长的主力，应当继续致力于植树造林，但侧重点将会有所变化。从未来的林业发展趋势来看，人工林的碳汇量增长速率可能放缓，但仍将保持较高的水平。大规模造林对碳汇增量的贡献会下降，而来自林分结构调整、树种优化的林地生产力的增长将可能成为未来碳汇增长的重要内容。为避免造林造成耕地资源的占用，四旁植树在未来的一段时间将可能成为林业建设的重心，其增长速率很有可能保持上身趋势，四旁植树碳汇量也将继续增长。

4.2.2.2 发挥农田碳汇巨大潜力

农田虽然在碳汇总量与碳汇增长上比重均较小，但是农田生态系统作为人工生态系统，人为因素对碳汇能力的影响较大。随着优良品种的推广，机械水平提高和农田管理技术的进步，崇明当地的粮食作物产量有望进一步提高；随着崇明特色蔬菜及有机蔬菜的种植面积的不断扩大，蔬菜田将提供更高的碳汇量。在农田管理措施方面，按《崇明生态岛建设纲要(2010-2020)》的发展目标，2020年秸秆资源化利用率、农田薄膜回收率和畜禽粪便资源化利用率均要达到95%以上。在这基础上继续推广使用有机肥，休免耕等土地管理措施，崇明县农业土壤的固碳能力将进一步提升，碳汇潜力巨大。

4.2.2.3 加强湿地碳汇保护

湿地碳汇所占比例最高，因此湿地保护是崇明生态岛建设的重要内容。《崇明生态岛建设纲要》(2010-2020)中提出到2012年，占全球种群数量1%的水鸟物种数达到7种，自然湿地保有率上升至43%。到2020年，全球种群数量1%的水鸟物种数将达到10种以上，自然湿地保有率稳定控制在43%。崇明当地与上

海市的许多大学、科研机构等联手合作，依赖上海雄厚的科研实力，开展湿地的研究和保护工作。在崇明东滩和西沙，将湿地保护与生态休闲旅游结合起来，如崇明西沙湿地生态修复实验基地引鸟工程等，收到了一定的成效。不过在合理促淤养滩，获取土地资源同时不影响湿地生态系统功能以及盐水入侵防护和减少人为活动污染等方面，湿地保护的工作仍然任重道远。

4.2.3 碳平衡推进

碳中和系数是衡量区域碳平衡状态的重要工具，应进一步完善方法学和统计数据基础，定期更新估算结果，为生态岛建设提供预警信号。

对于城镇化水平较高、进程较快的地区，根据其特征，有针对性的提出低碳建设策略。例如县政府所在地城桥镇、发展快速的陈家镇，因土地开发建设而引起的碳中和系数下降。考虑到这些地区土地资源较为紧张，不适合开展成片的林地建设，建议加强四旁植树的栽植，提高密度，在改善城镇环境的同时改善碳平衡，此外管理部门应当进一步严格城镇建设过程中的低碳指标，保证城镇化进程中产生的碳源增量维持在一个可控的范围。

附录 1 崇明碳源碳汇信息系统

(略)

附录 2 基于遥感的崇明土地覆盖/利用监测

(略)

参考文献

(略)