

团 体 标 准

T/LNCEAS 003-2025

城市空间复合碳储量及价值评价技术规程

Technical specification for integrated urban spatial
carbon storage and carbon sink value assessment

2025-12-20 发布

2025-12-20 实施

辽宁省土木建筑学会 发布

前 言

本规程是根据辽宁省土木建筑学会的《关于拟予立项编制学会团体标准的意见》的要求,由沈阳建筑大学、中国二十二冶集团有限公司和中国建筑第八工程局有限公司会同有关单位,经广泛调查研究和深入试验分析,在参考国内、外相关标准,并认真总结经验和广泛征求意见的基础上,制定本规程。

本规程共7章和9个附录,主要技术内容是:1 范围;2 规范性引用文件;3 术语和定义;4 总体原则;5 工作流程;6 城市空间符合碳储量核算;7 城市空间复合碳汇价值评价;附录A:辽宁省常见树种异速生长方程参数表;附录B:土壤有机碳测定方法对比表;附录C:碳化速率系数(K)参考值;附录D:碱性固废CaO转化为CaCO₃的比例;附录E:常见矿物溶解速率(Wr)参考值;附录F:城市空间碳汇要素调查表示例;附录G:建筑碳储量核算模型;附录H:碳汇价格依据与市场参考数据;附录I:辽宁省中心城市-沈阳碳汇价值核算案例。

本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利和商标,本规程的发布机构不承担识别这些专利和商标的责任。

本规程由辽宁省土木建筑学会负责管理,由沈阳建筑大学负责具体技术内容的解释。本规程执行过程中如有意见或建议,均可通过来电和来函等方式进行反馈,我们将及时答复并认真处理(沈阳建筑大学,通讯地址:辽宁省沈阳市浑南区浑南中路25号,邮编110168,联系电话:024-24692688)。

本规程主编单位:沈阳建筑大学

中国二十二冶集团有限公司

中国建筑第八工程局有限公司

本规程参编单位:中国科学院沈阳应用生态研究所

天津科技大学

沈阳大学

沈阳工程学院

辽宁省城乡建设规划设计院有限责任公司

本规程起草人:石铁矛 王 迪 石 羽 李沛颖 白 羽

潘城乡 汤 煜 初亚奇 王娇月 李殿生

贾 岱 孔令杰 黄士宾 刘建鑫 姜 迎

胡琴琴 马铭婧 王 力 梁 毅 张佳荣
周 宇 高 杨 李振兴 汪静涵 谭家升
马晶椿

主要审查人：宋有涛 郑凤明 高文斌 张九红 彭晓烈
张 铁 李春林

引言

为贯彻落实国家关于“碳达峰、碳中和”的重大战略决策，推动城市绿色、低碳、高质量发展，规范城市空间内复合碳汇及价值评价工作，特制定本规程。

城市是人口、产业和能源消耗的集中地，也是开展碳汇管理、提升生态效益的关键区域。传统的碳汇研究多集中于森林、草原等自然生态系统，对城市这一复合生态系统内部，特别是人工碳汇的碳储存与固碳能力的系统性核算与价值评估尚缺乏统一的技术标准。建立一套科学、实用、可操作的城市空间复合碳汇及价值评价技术体系，对于准确量化城市空间碳汇贡献、服务国土空间规划、支撑生态产品价值实现、引导城市空间低碳建设与更新具有重要意义。

本规程在编制过程中，力求做到：

紧密对接政策：积极响应国家发改委、住房和城乡建设部等主管部门在应对气候变化、城乡建设和生态保护领域的相关政策与规划要求，确保规程内容与国家宏观战略同频共振。

立足区域特色：充分考虑辽宁省作为重要老工业基地的城市类型多样性及地理特征，增强在辽宁省范围内的适用性与指导性。

强化实践应用：注重规程的落地性与可操作性，明确工作流程、技术方法、参数选取与价值核算路径，为城市管理者、规划设计师、科研人员及相关企业开展碳汇评估与应用提供明确的技术指引。

本规程规定了城市空间复合碳汇与价值评价的总体原则、工作流程、碳库选择、数据调查与采集方法、碳储量核算方法及碳汇价值评价方法。规程的制定与实施，将有助于系统摸清城市空间碳汇家底，量化城市生态资产的货币价值，为将碳汇纳入城市发展决策、碳排放交易、生态补偿以及绩效考核提供技术支撑，助力城市空间实现人与自然和谐共生的现代化发展目标。

目 次

| | |
|--|----|
| 1 范围 | 1 |
| 2 规范性引用文件 | 2 |
| 3 术语和定义 | 3 |
| 4 总体原则 | 5 |
| 5 工作流程 | 6 |
| 6 城市空间复合碳储量核算 | 7 |
| 6.1 城市空间复合碳储量核算流程 | 7 |
| 6.2 城市空间碳汇要素分类与选取 | 7 |
| 6.3 基础数据调查与采集 | 9 |
| 6.4 碳储量核算方法选取 | 18 |
| 7 城市空间复合碳汇价值评价 | 29 |
| 7.1 城市空间复合碳汇价值评价流程 | 29 |
| 7.2 碳汇价值要素判断 | 29 |
| 7.3 碳汇价值评价模型 | 29 |
| 7.4 碳汇价格计算 | 30 |
| 附录 A 辽宁省常见树种异速生长方程参数表（规范性附录） | 31 |
| 附录 B 土壤有机碳测定方法对比表（资料性附录） | 32 |
| 附录 C 碳化速率系数（K）参考值（规范性附录） | 34 |
| 附录 D 碱性固废 CaO 转化为 CaCO ₃ 的比例（规范性附录） | 35 |
| 附录 E 常见矿物溶解速率（Wr）参考值（资料性附录） | 36 |
| 附录 F 城市空间碳汇要素调查表示例（资料性附录） | 37 |
| 附录 G 建筑碳储量核算模型（资料性附录） | 40 |
| 附录 H 碳汇价格依据与市场参考数据（资料性附录） | 41 |
| 附录 I 辽宁省中心城市-沈阳碳汇价值核算案例（资料性附录） | 43 |

CONTENTS

| | |
|---|----|
| 1 Scope | 1 |
| 2 Normative References | 2 |
| 3 Terms and Definitions | 3 |
| 4 General Principles | 4 |
| 5 Workflow | 5 |
| 6 Urban Composite Carbon Storage Accounting | 6 |
| 6.1 Urban Composite Carbon Storage Accounting Process | 6 |
| 6.2 Urban Carbon Sink Element Classification and Selection | 6 |
| 6.3 Basic Data Investigation and Collection | 8 |
| 6.4 Carbon Storage Accounting Method Selection | 18 |
| 7 Urban Composite Carbon Sink Value Assessment | 29 |
| 7.1 Urban Composite Carbon Sink Value Assessment Process | 29 |
| 7.2 Carbon Sink Value Element Determination | 29 |
| 7.3 Carbon Sink Value Assessment Model | 29 |
| 7.4 Basis for Carbon Sink Price Calculation | 30 |
| Appendix A Parameter Table for Allometric Growth Equations of Common Tree Species in Liaoning Province (Normative Appendix) | 31 |
| Appendix B Comparison Table of Soil Organic Carbon Measurement Methods (Informative Appendix) | 32 |
| Appendix C: Reference Values for Carbonation Rate Coefficient (K) (Normative Appendix) | 34 |
| Appendix D Proportion of CaO Converted to CaCO ₃ in Alkaline Solid Waste (Normative Appendix) | 35 |
| Appendix E Reference Values for Common Mineral Dissolution Rates (Wr) (Informative Appendix) | 36 |
| Appendix F Example Survey Forms for Urban Carbon Sink Elements (Informative Appendix) | 37 |
| Appendix G Calculation Model for Building Carbon Storage (Informative Appendix) | |

| | |
|---|----|
| | 40 |
| Appendix H Carbon Sink Price Basis and Market Reference Data (Informative Appendix)..... | 41 |
| Appendix I Carbon Sink Value Accounting Case Study for a Central City in Liaoning Province—Shenyang (Informative Appendix)..... | 43 |

1 范围

本文件规定了辽宁省城市空间人工与自然碳汇碳储量核算与碳汇价值评价的总体要求、碳库选择、数据与样品采集处理、碳储量核算方法、碳汇价值评价方法的技术内容。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T1.1 标准化工作导则 第1部分:标准的结构和编写

GB/T20000.1 标准化工作指南 第1部分:标准化和相关活动的通用术语

GB/T20004.1 团体标准化 第1部分:良好行为指南

GB/T 43648 主要树种立木生物量模型与碳计量参数

GB/T 42277 水泥胶砂碳化性试验方法

LY/T 3253 林业碳汇计量监测术语

LY/T 2988 森林生态系统碳储量计量指南

LY/T 3330 森林土壤碳储量调查技术规程

HJ 1176 生态调查 遥感数据质量控制与集成 技术规范

HJ 501 水质 总有机碳的测定 燃烧氧化—非分散红外吸收法

HJ 613 土壤 干物质和水分的测定 重量法

HJ 615 土壤 有机碳的测定 重铬酸钾氧化-分光光度法

HJ 658 土壤 有机碳的测定 燃烧氧化-滴定法

HJ 695 土壤 有机碳的测定 燃烧氧化-非分散红外法

NY/T 4606 土壤中总碳和有机质的测定元素分析仪法

DD 2013-12 遥感数据 多光谱数据预处理 技术规程

TD/T 1055 国土调查 遥感数据预处理 技术规程

DB21/T 4051 土壤碳储量调查与核算方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.0.1 城市 city

以非农产业和非农业人口聚集为主要特征的居民点。包括按国家行政建制设立的市和镇。

3.0.2 城市空间 urban space

城市空间是城市人口、产业经济和基础设施等相对集中布局而形成的建成区地域空间，是城市各种社会生产、生活活动的场所空间和城市景观的地域载体。

3.0.3 城市建成区 urban built-up area

城市行政区内实际已成片开发建设、市政公用设施和公共设施基本具备的地区。

3.0.4 碳汇 carbon sink

碳汇是指能够从大气中吸收二氧化碳，并将其输送并长期储存于特定碳库的生态系统或工程设施。碳库则是碳在地球系统中存在的各种形态的储藏载体或场所。

3.0.5 自然碳库 natural carbon pool

城市空间中由自然要素构成的碳储存载体，具体包括植被碳库、土壤碳库、水体碳库，是城市空间复合碳储量核算中自然要素的核心归类单元。

3.0.6 人工碳库 artificial carbon pool

城市空间中由人工设施构成的碳储存载体，具体包括建筑与基础设施碳库、采矿废弃物碳库、工业碳库，是城市空间复合碳储量核算中人工要素的核心归类单元。

3.0.7 城市空间复合碳储量 composite carbon storage in urban space

指在以人工建成环境为主导的城市空间内，其自然-半自然-人工碳库通过复杂交互作用所固定的碳总量。它主要包括城市绿地植被（绿碳）、水体与湿地（蓝碳）、土壤（黑碳）中的碳储存，以及建筑材料、固体废弃物等人工载体中封存的碳（灰碳）。

3.0.8 自然碳汇空间 natural carbon sink space

城市空间内以自然植被或生态系统为主的区域，包括森林、湿地、绿地、公

园等，具有通过自然过程固定并储存碳的功能。

3.0.9 人工碳汇空间 artificial carbon sink space

城市空间内通过人工设计或技术改造形成的具有碳汇功能的建成环境区域，包括建筑物、构筑物及人工干预形成的碳封存设施。

3.0.10 碳汇价值 carbon sink value

各类碳汇要素发挥其碳固定与碳积蓄功能所对应的货币价值，是碳汇功能经济属性的量化体现。

3.0.11 项目级 project-level

针对单一工程项目或特定地块开展的精细化碳汇核算尺度。

3.0.12 片区级 area-level

针对城市内部功能区或街道等开展的系统性碳汇核算尺度。

3.0.13 城区级 urban-level

针对整个城市建成区或市辖区开展的宏观碳汇核算尺度。

3.0.14 碳化速率系数 (K) carbonation rate coefficient (K)

表征混凝土在特定温湿度、环境暴露条件下吸收二氧化碳速率的参数，是建筑碳汇核算中计算碳化深度的核心系数。

3.0.15 含碳率 (CF) carbon fraction (CF)

生物量中碳元素所占的质量百分比，是将植被生物量转换为碳储量的关键系数。

3.0.16 产业活动碳汇 industrial activity carbon sink

城市工业生产过程中产生的碱性固体废弃物通过碳化反应固定大气中二氧化碳的过程，是人工碳汇的重要组成部分。

3.0.17 采矿活动碳汇 mining activity carbon sink

采矿活动中产生的碱性废石与尾矿通过碳化、风化反应形成稳定碳酸盐，从而固定大气中二氧化碳的过程。

4 总体原则

4.0.1 科学性原则

应以多源数据融合技术为基础，采用国际通用碳核算方法，结合本地化参数修正，确保数据权威性和模型适用性。应区分自然碳汇与人工碳汇的核算方法，通过第三方验证、多模型对比等技术手段，确保核算结果的客观性和可重复性。

4.0.2 系统性原则

应统筹城市建成区内与人工碳汇与自然碳汇功能的关联性，构建复合碳汇评价体系，兼顾碳汇功能与城市发展的协同增效，应覆盖规划、设计、建设、运营全周期管理。

4.0.3 实用性原则

应提供分级分类核算模板与碳汇价值货币化工具，适配不同项目规模和政策需求。应推荐低成本高效技术，优先干预高碳排放区与生态脆弱区。应与国土空间规划、碳市场交易等政策衔接，确保评价结果可直接用于审批与考核。

4.0.4 动态性原则

应支持建立碳储量动态监测平台，定期更新数据与基准值，反映植被生长、城市建设等影响。应支持多情景模拟，评估碳汇弹性并提出动态优化建议。

5 工作流程

城市空间复合碳储量核算包括：城市空间碳汇要素分类、多源数据获取、核算方法确定；碳汇价值评价包括：碳汇要素价值判断、碳汇价格计算方法选择。城市空间复合碳储量核算及碳汇价值评价基本流程见图 5.1。

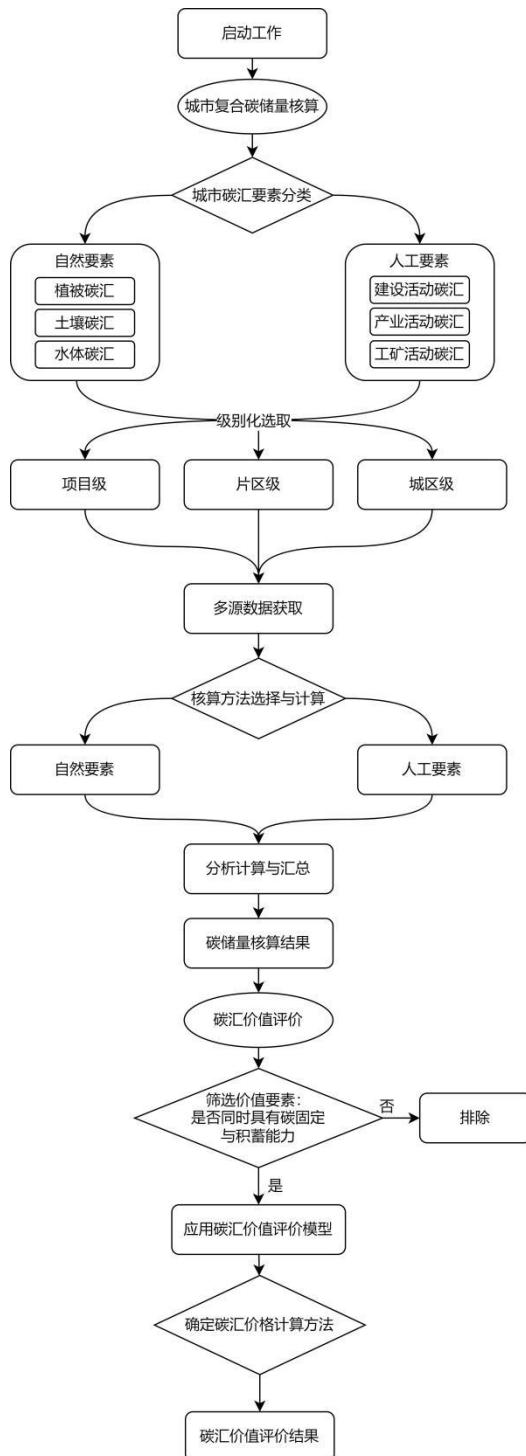


图 5.1 城市空间复合碳储量核算及碳汇价值评价基本流程

6 城市空间复合碳储量核算

6.1 城市空间复合碳储量核算流程

6.1.1 碳汇要素分类

基于城市特征，将城市空间碳汇要素分为两大类：自然要素与人工要素，最终整合为统一的碳汇信息数据库，根据城市空间特征筛选合适的要素进行计算。明确要素对象如下：

自然要素包括以绿地植被为主导的绿碳要素，以城市水生生态系统为主导的蓝碳要素，以城市土壤为主导的黑碳要素；人工要素包括以人工固碳载体为主导的灰碳要素。

6.1.2 碳汇信息采集

通过多源数据获取方式收集碳汇基础信息包括实地数据采集、空间数据采集、文字资料采集等。最终整合为统一的碳汇信息数据库。具体流程：

实地数据采集：绿碳（含碳率实测等）、蓝碳（湿地植被、土壤采样等）、黑碳（土壤剖面采样等）、灰碳（建筑材料用量统计与固废排放量等）。

空间数据采集：遥感影像，地形数据、土地利用类型图。

文字资料采集：规划文本、统计年鉴，本地化研究成果等。

数据库整合：统一数据格式、坐标系统，建立“空间位置-属性参数-数据来源”关联索引。

6.1.3 核算方法选择

根据要素类型匹配具体核算方法，具体见：6.4 碳储量核算方法选取。

6.1.4 计算、汇总形成成果

基于选定方法进行碳储量核算。整合自然与人工要素的计算结果，形成碳储量分布图与碳储量核算报告。

6.2 城市空间碳汇要素分类与选取

6.2.1 城市空间碳库

自然碳库聚焦城市生态系统固碳潜力，其中植被碳库通过城市绿地、社区花园、屋顶绿化等植物光合作用固定碳元素；土壤碳库以城市绿地、湿地、棕地等区域的土壤有机碳与无机碳为核心储存形式；水体碳库则涵盖城市河湖、湿地及滨海生态系统中的溶解碳、沉积物碳与水生生物碳。

人工碳库侧重城市人工载体的固碳功能，建筑与基础设施碳库储存于建筑材料、交通设施等人工构筑物中；采矿废弃物碳库通过废石、尾矿等碱性无机材料实现碳封存；工业碳库则依托碳捕捉与封存技术、工业副产品完成碳的吸收与储存，共同构成城市复合碳储存体系。

表 6.2.1 城市空间碳库类型与碳汇要素

| 碳库类型 | | 碳汇要素 |
|------|-----------|--------------------------------|
| 自然碳库 | 植被碳库 | 城市绿地、社区花园、屋顶绿化等植物通过光合作用固定的碳 |
| | 土壤碳库 | 城市绿地、湿地、棕地等区域的土壤有机碳与无机碳 |
| | 水体碳库 | 城市内河湖、湿地、滨海生态系统的溶解碳、沉积物碳及水生生物碳 |
| 人工碳库 | 建筑与基础设施碳库 | 建筑材料、交通设施中吸收、储存的碳。 |
| | 采矿废弃物碳库 | 碱性无机材料废石与尾矿封存的碳。 |
| | 工业碳库 | 碳捕捉与封存技术、工业副产品封存的碳。 |

6.2.2 城市类型与碳汇要素选择

碳汇要素选择需结合城市性质与地理位置差异化适配，以提升评价精准性：

内陆城市：核心选取植被、土壤、内陆水系等自然要素，及建筑物、混凝土基础设施等基础人工要素；其中重工业城市额外纳入工业废弃物碳库，资源型城市补充废石与尾矿库人工碳汇要素，契合产业固废富集特征。

滨海城市：在陆内要素基础上，新增滨海湿地这一特色蓝碳自然要素；人工要素延续对应城市性质的核心载体（重工业城市含工业废弃物，资源型城市含废石与尾矿库，其他城市保留基础人工要素），适配滨海生态与产业布局特点。

表 6.2.2 城市类型对应碳汇要素选择

| | | 城市性质 | | |
|-------|------|---|--|-----------------------------------|
| | | 重工业城市 | 资源型城市 | 其他城市 |
| 城市地理位 | 内陆城市 | 自然要素：植被、土壤、内陆水系；人工要素：建筑物、混凝土基础设施、工业废弃物。 | 自然要素：植被、土壤、内陆水系；人工要素：建筑物、混凝土基础设施、废石与尾矿库。 | 自然要素：植被、土壤、内陆水系；人工要素：建筑物、混凝土基础设施。 |

| | | | | |
|---|------|---|--|---|
| 置 | 滨海城市 | 自然要素：植被、土壤、内陆水系、滨海湿地； 人工要素：混凝土建筑物、混凝土基础设施、工业废弃物。 | 自然要素：植被、土壤、内陆水系、滨海湿地； 人工要素：混凝土建筑物、混凝土基础设施、废石与尾矿库。 | 自然要素：植被、土壤、内陆水系、滨海湿地； 人工要素：建筑物、混凝土基础设施 |
|---|------|---|--|---|

6.2.3 核算尺度分级与要素选取精度

城市空间碳储量核算应根据评价范围和应用目的划分为三个尺度，其尺度描述及要素选取精度要求如下：

表 6.2.3 城市空间碳储量核算级别的尺度描述与精度要求

| 核算级别 | 项目级 | 片区级 | 城区 |
|------|--|---|---|
| 尺度描述 | 针对单一工程项目或特定地块（如单个公园、居住小区、工业厂区）进行的精细化核算。 | 针对城市内部的功能区或街道、开发区进行的系统性核算。 | 针对整个城市建成区进行的宏观核算。 |
| 精度要求 | <p>极高精度：</p> <ol style="list-style-type: none"> 植被碳库：每木检尺覆盖率为$\geq 95\%$，或采用 0.5m 级别极高分辨率遥感单体识别，株数识别误差$\leq 3\%$； 土壤碳库：网格布点密度$\leq 20\text{m} \times 20\text{m}$，采样深度 0-100cm，每个样点重复采样$\geq 3$ 次； 人工碳库：基于竣工图纸/实地测绘，建筑占地面积、层数、建材类型等参数误差$\leq 2\%$ | <p>高精度：</p> <ol style="list-style-type: none"> 抽样调查：典型地块抽样覆盖率$\geq 10\%$，每个类型抽样地块数量≥ 3 个； 遥感解译：采用 2-5m 级别高分辨率遥感影像，土地利用分类精度$\geq 85\%$； 模型精度：生物量/有机碳储量回归模型 $R^2 \geq 0.75$，建筑碳储量模型预测误差$\leq 10\%$ | <p>标准精度：</p> <ol style="list-style-type: none"> 遥感分类：采用 10-30m 级别分辨率遥感影像，土地利用/覆盖分类精度$\geq 75\%$； 抽样验证：抽样地块覆盖所有主要碳汇类型，验证样本数量≥ 50 个； 结果误差：整体碳储量核算误差$\leq 15\%$ |

6.3 基础数据调查与采集

基础数据调查采集需明确多源信息。针对自然碳汇，调查植被、土壤、水体相关数据；人工碳汇则聚焦混凝土建筑、交通设施、碱性大宗固体废弃物等。运用实地踏勘、卫星遥感、数据库检索等手段，按统一规范，获取精准且全面的数据，为碳储量核算筑牢根基。

6.3.1 遥感数据收集与处理

a) 收集获取待解译区域的多源遥感影像数据，自然要素分辨率建议不超过

30m，人工要素分辨率建议不超过1m。对于透水铺装、小型绿地等难以在1m分辨率影像中准确识别的人工要素，应采用航拍或现场抽样验证方式进行补充，抽样比例不低于该类型要素总量的5%。

b) 通过对获取的遥感数据进行辐射校正、几何校正、大气校正、图像配准、图像融合、波段合成、图像增强、拼接与裁剪等一系列处理，形成适用于开展解译的影像数据，遥感数据质量控制具体依据HJ 1176的相关要求执行，预处理方法可参考DD 2013-12和TD/T 1055的相关要求执行。

c) 核心信息提取：基于预处理后的遥感影像，解译并提取用于后续碳储量核算的关键信息与参数，主要包括：

——碳汇要素空间分布与面积：识别并划定各类自然碳汇空间与人工碳汇空间的边界，生成土地利用/覆盖分类图，为地面调查数据收集样地的确定提供基础，为各类碳储量的面积计算提供基础数据。

——光谱指数：计算归一化植被指数（NDVI）、增强型植被指数（EVI）等关键植被指数，作为在样地碳储量计算结果的基础上估算区域碳储量的重要指标。

——建筑与构筑物参数：提取建筑基底面积与轮廓；通过阴影分析等方式获取建筑高度，用于估算建筑体积、容量。

——动态变化信息：利用多期历史遥感数据，监测土地利用、植被覆盖和建筑存量的时空变化，用于分析碳储量的时空演变趋势，支撑估算与评价的动态性。

6.3.2 地面调查数据收集：获取野外调查样本和地面采集数据等。

6.3.2.1 植被调查与采样

(1) 样方设置

植被调查的样方设置方法需与核算尺度的目标相匹配，样方大小宜与采用的遥感数据分辨率一致。

a) 全面普查：该方法是对评价范围内所有植被进行无遗漏的每木调查或全覆盖样方调查。项目级核算的首选方法，适用于单个公园、居住小区、厂区等特定地块的精准调查。

b) 标准地法：在代表性植被类型内设置固定面积的样方，进行每木调查或分盖度调查。数据详实，适用于片区级和城区级核算，同时对于面积较大、全面

普查有困难的项目级核算的也可适用。

c) 系统网格法：将研究区划分为均匀网格，在每个网格中心或固定位置设置样方。适用于片区级和城区级的系统性抽样调查。

d) 分层随机法：首先根据土地利用、植被类型等将区域分为若干层，然后在各层内随机布设样方。适用于片区级和城区级核算。

（2）样点数量

样点数量应满足不同核算级别对精度的基本要求。

a) 项目级：原则上应对评价范围内的所有植被单元进行全面调查或接近全面的抽样。对于乔木，应尽可能进行每木检尺；对于灌木和草本，应保证足够数量的样方以代表其空间变异。样方数量由项目边界和植被分布决定，无固定下限，但需确保能精确代表该地块。

b) 片区级：样方数量应满足中精度核算要求。采用分层随机或系统网格法时，每个主要的植被类型或功能分区内，有效样方数不应少于 3~5 个。总样方数需能支撑建立可靠的统计模型或遥感反演模型。

c) 城区级：样方数量以满足宏观摸底的统计显著性为原则。总有效样方数最低不应少于 100 个。对于植被覆盖类型复杂、空间异质性高的特大城市，应酌情增加至 150~200 个或更多，并确保样方在各主要植被类型和空间区域均有分布。

（3）核心参数

各级别调查均需获取用于碳储量计算的核心参数。

a) 乔木：树种、胸径、树高、冠幅、株数。

b) 灌木：建群种、盖度、平均株高、平均地径、株数。

c) 草本：优势种、盖度、平均株高。

d) 空间信息：样方位置（经纬度）、面积、所属碳汇空间类型。

6.3.2.2 土壤调查与采样

（1）样方设置

a) 简单随机：将监测单元分成网格并编号，随机抽取规定数量的样品作为采样点。该方法适用于土壤空间变异相对较小、或进行宏观初步摸底的情景。在城区级核算中，可采用此法进行大范围、低成本的基础数据采集。

b) 分块随机：根据已有的资料，将监测区域划分为若干相对均质的块，在

每个块内再随机布点。该方法适用于片区级核算。

c) 系统随机：将监测区域划分为面积相等的网格，在每个网格内布设一个采样点。该方法适用于土壤空间异质性较高的区域。项目级核算推荐采用此方法；在片区级和城区级核算中，也可在核心区域或典型样带上采用系统布点，以建立遥感反演模型或验证抽样代表性。

（2）样点数量

土壤布点数量应在满足统计学样本容量基本要求的基础上，根据核算级别、调查精度目标、区域环境异质性及资源条件综合确定。

a) 项目级：应执行最高精度的加密布点。在满足每个监测单元最少设 3 个点的基础上，对于面积较大或土壤空间异质性高的地块，需显著增加样点密度。建议采用统计方法计算所需样点数，或采用高密度网格进行系统布设。

b) 片区级：应满足中等精度的代表性布点。在以功能区或土壤类型划分的每个单元内，样点数量必须不少于 3 个。对于面积较大或异质性高的核心功能区，应酌情增加样点至 5 个或以上，以确保对该单元的代表性。

c) 城区级：以满足宏观统计与趋势分析为目标。在采用简单随机或系统网格布点时，全区有效土壤样点总数不应少于 80 个。对于地域广阔、土壤类型复杂的城市，应酌情增加至 100~150 个或更多，并确保样点覆盖所有主要土地利用类型和地理区域。

（3）样品采集

样品采集一般按 3 个阶段进行。采样深度建议超过 30cm。

——前期采样：根据背景资料与现场考察结果，采集一定数量的样品分析测定，用于初步验证土壤有机碳的空间分异性，为制定监测方案提供依据，前期采样可与现场调查同时进行。

——正式采样：按照监测方案，实施现场采样。

——补充采样：正式采样测试后，发现布设的样点没有满足总体设计需要，则要进行增设采样点补充采样。

（4）核心参数

土壤采样需获取以下关键参数，用于公式 6.4.2-2 计算土壤有机碳密度：

a) 土壤容重：采用环刀法测定。

b) 土壤有机碳含量: 测定方法应遵循 HJ 615、HJ 658、HJ 695 等规范性引用文件的规定, 根据实验室条件与土壤特性选择适用方法(方法对比见附录 B)。

c) 砾石含量: 测定直径超过 2mm 的砾石所占体积百分比。

d) 土层厚度: 记录各采样层的厚度。

e) 土壤 pH 值: 依据 NY/T 1121.2 执行, 作为土壤性质的辅助记录。

6.3.2.3 水体调查与采样

(1) 样方设置

a) 样线取样法: 通过沿一条或多条预设样线布设采样点, 能有效捕获与梯度相关的变异信息。主要适用于项目级核算, 用于精细刻画单一水体内部从岸向水体的碳汇梯度变化。在片区级核算中, 可作为对特定典型梯度带的补充调查方法。

b) 随机取样法: 该方法在目标区域内完全随机地选择采样点, 确保每个点位被选中的概率相等。能有效捕获区域内的真实异质性。城区级核算中, 可作为获取背景值与总体特征的基础方法。片区级核算中, 若区域内水体类型相对均质或缺乏明确分区, 也可采用此法。

c) 基于概率的栅格取样法: 该方法使用正方形或六边形栅格覆盖研究区域, 从每个栅格内随机选取一个采样点。是项目级精细化核算和片区级系统性核算的首选方法。在城区级核算中, 适用于建立标准化的监测网络和支撑遥感模型验证。

(2) 样方数量

样方数量应综合考虑核算级别所要求的精度、水体的空间异质性以及资源条件来确定。

a) 项目级: 样方数量应最高, 以满足精细化评估需求。对于均质水体, 样方数不应少于 5 个; 对于异质性高的水体(如大型湖泊、复杂河道), 应根据预调查设置的置信水平和允许误差, 通过统计方法计算确定, 通常需要 10 个以上有效样方。

b) 片区级: 样方数量应满足中精度核算要求。每个主要的水体类型或功能分区内, 有效样方数不应少于 3 个。对于片区内的核心或典型水体, 应适当增加样方数量。

c) 城区级: 样方数量以满足宏观趋势判断和价值估算为原则。总样方数应

覆盖所有主要水体类型，且在每个类型中均有分布。最低数量不应少于 30 个有效样方，对于水系发达、类型复杂的特大城市，应酌情增加至 50 个或更多。

（3）样品采集

水体碳汇样地的样品采集，应针对水体生态系统的不同碳库进行。采集对象主要包括水生植物、水体（水样）、沉积物三大类，具体采集方案应根据核算级别与调查目的确定。

a) 水生植物样品：采样对象包括挺水植物、浮叶植物、沉水植物及大型藻类等。在样方内收割全部植株或采用样方框定量收割。分别收集地上与地下部分（根系），冲洗干净。用于测定生物量、含碳率，核算植被碳库储量。项目级需按物种分类采集、称重。片区级和城区级可采集优势种混合样或依赖已有参数。

b) 水体样品：主要选取表层水、特定深度的水样，用于实验室测定 DOC、POC 浓度。使用采水器采集水样，立即用预处理的玻璃瓶或棕色瓶盛装，避免气泡。水样需经 $0.45 \mu\text{m}$ 或 $0.7 \mu\text{m}$ （玻璃纤维滤膜）过滤，以区分溶解性有机碳（DOC）和颗粒有机碳（POC）。项目级需采集不同深度水样，并现场测定水温、pH、电导率等辅助参数。片区级和城区级：可主要采集表层水样（如 0.5 米深处）。

c) 沉积物样品：采样对象为水体底泥，用于测定沉积物有机碳含量、密度，并计算沉积物碳库储量。使用抓斗式采泥器、重力钻或活塞钻等工具采集。表层沉积物：采集顶部 0-10 cm 或 0-15 cm 样品，用于评估近期碳输入。沉积柱：采集深度为 100 cm 的完整沉积柱，用于计算长期碳积累速率和储量。采集后应在实验室进行分层切片。项目级必须采集沉积柱，并进行高分辨率分层。片区级以采集沉积柱为主，可适当降低分层分辨率。城区级可采集表层沉积物混合样进行宏观估算，但对典型水体应保留沉积柱采样。

6.3.2.4 建筑与构筑物调查与采样

（1）样方设置

a) 全面普查：该方法是对评价范围内的所有建筑单体进行逐一调查、记录与测量，不存在抽样过程。其优势在于能获取完全精确的碳汇核算基础数据。适用于有限范围内的精细评估。适用于项目级核算，单个工程项目、特定地块或建筑群的全要素精准调查。

b) 按比例分层抽样：首先依据建筑的核心特征将其划分为若干同质层，然后按照各层区在总体中的规模比例分配样本数量，最后在各层区内随机抽取具体建筑样本。此法能有效保证各重要类别均按其权重得到充分代表，显著提高抽样效率与代表性。适用于片区级核算。

c) 系统网格抽样：将整个研究区划分为若干面积相等的规则网格，在每个网格内选取一个或多个代表性建筑作为样本。该方法能确保样本在空间上的均匀分布，避免聚集性，尤其适用于在缺乏先验分层信息的情况下，构建一个无偏的、空间覆盖度高的样本框架。主要适用于城区级宏观核算。

d) 分层系统抽样：首先进行宏观分层，然后在每个层区内采用系统抽样选取建筑样本。它兼具了分层抽样的结构代表性和系统抽样的空间均匀性优点。适用于城区级和大型片区级核算。

（2）数据记录

不同级别下，建筑与构筑物数据记录的详细程度应有所不同，其核心区别在于参数精度是否足以支持碳汇量的直接精确计算，还是仅用于模型估算。

a) 项目级：应依据竣工图纸、设计文件或通过实地详细测绘，获取可直接用于碳汇公式计算的底层参数。记录地块编码、性质、面积、结构类型、建成年代、设计使用年限，应分类测量或从设计图纸获取基础、梁、板、柱、墙、楼梯、阳台、散水等不同构件的几何尺寸与暴露表面积。应调查或根据设计资料确定不同构件所用混凝土的强度等级、水胶比、单位体积水泥用量、水泥熟料中 CaO 的体积分数。

b) 片区级：在抽样调查中，对每个样本建筑应确保记录一套标准化的核心参数包括：建筑功能、结构类型、总建筑面积、基底总面积、体积（容量）、平均层数、平均高度、建筑总外轮廓周长、建成年代、混凝土强度等级。

c) 城区级：从抽样建筑中获取建筑功能、建筑面积、建筑高度、建成年代等关键信息。

（3）碳化速率测定

碳化速率系数（K 值）的获取方式依级别精度而异。

a) 项目级：优先进行现场取样、规范制样与实验室测定；无法取样时，可基于设计制作模拟试件。依据 GB/T 50082-2009 《普通混凝土长期性能和耐久性

能试验方法标准》进行碳化试验，直接测定其 K 值。对于无法进行现场取样的已建重要建筑，可采用基于原始设计配合比制作模拟试件进行测定的替代方法。必须严格依据该建筑竣工图纸或原始设计文件中所明确的混凝土强度等级、水胶比及水泥品种等关键信息。宜根据建筑实际所处的室内或室外环境，进行适当的温湿度养护周期模拟，使试件状态更接近建筑中混凝土的实际情况。

b) 片区级：采用本地化参考值与抽样验证相结合。首先采用附录 C 提供的 K 值参考范围。同时，应在片区内选择不同年代、不同类型的典型建筑进行抽样测定，建立适用于本片区特定环境条件和主流建筑材料的修正 K 值数据库。

c) 城区级：采用标准参考值。直接采用附录 C 或其他权威文献中提供的，与城市气候分区和主流混凝土强度等级相对应的 K 值参考范围进行宏观估算。

6.3.2.5 工业废弃物与尾矿库调查与采样

(1) 目标识别与调查范围

a) 项目级：针对单一的、特定的废弃物堆场或尾矿库进行精细化调查。调查前应精确收集其堆存年限、废弃物来源、化学组分、年新增量等历史资料，明确其边界与堆存体积。

b) 片区级：针对片区内的多个典型废弃物点源进行调查。首先通过高光谱遥感、行业分布数据圈定重点调查区域(如钢厂渣场集中区、电厂粉煤灰库集群)，选择具有代表性的场址进行抽样。

c) 城区级：进行宏观类型识别与总量摸底。利用工业普查数据、环境统计报表等，识别城区范围内主要碱性废弃物的类型、年产生量、历史堆存总量及集中分布区域。调查侧重于获取宏观参数，而非单个场地的细节。

(2) 样方设置

工业废弃物与尾矿库的采样点布设应基于其空间异质性和堆存结构特征，选择适宜的方法以获取具有代表性的样品。

a) 分层网格法：首先依据堆体深度进行垂直分层（如划分为表层、过渡层、深层），然后在每一层内按固定的网格间距（如 $50m \times 50m$ ）系统布设采样点。其优势在于能够系统性地捕获碳化反应随深度和水平位置的时空变异，数据维度丰富，精度最高。但实施成本高，工作量大。主要适用于项目级核算，用于对单一特定堆场或尾矿库进行精细化的碳汇能力评估与空间表征。

b) 系统网格法：在堆场表面布设统一尺寸的规则网格（如 $100m \times 100m$ ），在每个网格内布设采样点。该方法操作相对简便，能确保采样点在空间上的均匀覆盖，避免主观选择带来的偏差，适合评估堆场的整体平均状况。适用于片区级核算，用于对片区内多个代表性场址进行系统性调查与对比，以获取能够代表该片区废弃物特性的参数。

c) 典型抽样法：在对整个区域（城区）进行类型识别的基础上，针对每种主要的废弃物类型，选取 1-3 个最具规模、历史或工艺代表性的堆场进行抽样。其核心目标是“以点代面”，通过有限的关键样本获取宏观估算所需的典型参数。主要适用于城区级宏观核算，是在资源有限条件下实现全域碳汇潜力摸底的有效方法。

d) 分区随机法：若一个大型堆场内存在明显不同的功能区（如新旧堆存区、不同废弃物混合区），可先将其划分为若干相对均质的区域，然后在每个区域内随机布设采样点。此法结合了分层与随机的优点，提高了复杂堆场的采样效率与代表性。适用于大型项目级或复杂片区级的调查，当单一堆场内部异质性极高时，可采用此法。

（3）样品采集与分析要求

a) 项目级：执行最高精度的采样与全项分析。使用碳钢钻筒取 1kg 原状样，密封保存；同时采集渗滤液样品过滤保存。必须实验室测定关键参数，包括碳酸盐含量（核心）、pH 值、矿物组成（XRD）、化学组分（XRF），并可通过热重试验（TGA）直接测定 CO_2 吸收率。

b) 片区级：执行标准化采样与核心参数分析。方法同项目级，但样本数量可适当减少。核心测定碳酸盐含量和 pH 值。化学组分等参数可部分依赖历史资料，但需通过本次采样进行验证。

c) 城区级：执行关键参数抽样分析。采集表层和过渡层混合样为主要依赖历史资料和文献中的典型值。本次采样的核心目的是测定表层碳酸盐含量，用于校准宏观估算模型。

（4）核心参数与核算方法

表 6.3.2 工业废弃物与尾矿库调查的核心参数

| 参数类别 | 核心参数 | 项目级 | 片区级 | 城区级 |
|------|----------------------------|---------|-------------|------------|
| 堆存信息 | 堆存量、堆存年限、年产生量 | 精确调查与核实 | 资料收集与现场核实结合 | 宏观统计资料为主 |
| 化学特性 | 碳酸盐含量、pH、化学组分 | 实验室全项分析 | 核心参数实测，其余验证 | 典型值参考与抽样校准 |
| 固碳参数 | CO ₂ 理论固定量、碳转化率 | 实测或精细计算 | 本地化参数估算 | 通用参数与经验系数 |

6.3.2.6 其他辅助数据收集：收集区域内自然地理、地形地貌、社会经济等其他辅助信息和相关资料。

6.4 碳储量核算方法选取

6.4.1 植被碳储量核算

1 植被碳储量计算公式为：

$$C_V = B_V \times CF \quad (6.4.1-1)$$

式中：C_V —— 植被碳储量（吨，t）；

B_V —— 植被生物量（吨，t）；

CF —— 含碳率（百分比，%）。

2 单木生物量计算：

a) 单株植被生物量计算可以使用异速生长方程法：

$$B_V = a \times PM^b \quad (6.4.1-2)$$

式中：B_V —— 单木生物量（千克，kg）；

PM —— 形态指标；

a —— 比例常数；

b —— 异速生长指数（常见树木的异速生长方程见附录A）。

b) 乔灌草形态指标选择

乔木（树高 $\geq 2m$ ）：首选指标为胸径（D）和株高（H），备选指标为基径（DB）。

乔木（树高 $< 2m$ ）与灌木：乔木与单茎或主茎明显灌木应选择基径（DB）与株高（H），丛生灌木应选择冠幅（C）、株高（H）、枝干数（N）。

草本植物：密集草本群落应选择株高(H)与盖度(C)，大型草本参考灌木指标选择。

3 异速生长方程确定方法的级别化选取：

a) 项目级：采用本地化模型，在全面普查或标准地调查的基础上，进行每木检尺，精确获取每类植被的对应参数。优先建立或采用经过本地化验证的模型，也可选用附录 A 或国家标准推荐模型。

b) 片区级与城区级：选用附录 A 或国家标准推荐模型。

4 含碳率数据的级别化选取：

项目级含碳率应采用实测值，片区级与城区级优先采用实测值，无实测数据时可参考 IPCC 默认值或国家标准推荐值。

5 区域植被碳储量计算方法的级别化选取：

a) 项目级：应采用下列方法之一：

样方累加法：当评价范围内全部植被单元完成全面普查或高密度抽样调查时，区域植被碳储量应通过直接累加所有调查样方的碳储量获得。

高精度空间插值法：当需要获取碳储量的空间连续分布数据时，宜基于调查样方的碳密度数据，采用空间插值方法，生成高分辨率碳密度分布栅格图。区域总碳储量应通过计算栅格像元值之和获得。

b) 片区级：宜采用基于植被类型分区的碳密度赋值法。该方法的应用应符合下列规定：应依据遥感解译与地面核查，生成覆盖整个片区的植被类型或土地利用类型分布图。根据野外抽样调查结果，分别计算各类植被样方的单位面积碳储量算术平均值，作为该植被类型的区域平均碳密度。区域植被碳储量应按下式计算：

$$C_V = \sum (A_{Vi} \times D_{Vi}) \quad (6.4.1-3)$$

式中： C_V —— 片区植被碳储量总量（吨， t）；

A_{Vi} —— 第 i 种植被类型的分布面积（公顷， hm²）；

D_{Vi} —— 第 i 种植被类型的区域平均碳密度（吨/公顷， t /hm²）。

c) 城区级：宜采用基于遥感反演模型的碳储量赋值法。应收集覆盖城区范围的中等分辨率遥感影像，精度不应低于 30m*30m，并计算归一化植被指数（NDVI）、增强型植被指数（EVI）等关键参数。利用空间分布均匀的地面验

证样方数据,建立植被碳储量与遥感参数之间的统计学回归模型。将回归模型应用于遥感影像,反演得到每个像元的植被碳储量,并通过累加所有像元的碳储量获得城区植被碳储量总量。反演模型的拟合度(R^2)按场景差异化要求:常规城区应用不宜低于0.6,工程实践类应用不低于0.7。

6.4.2 土壤碳储量核算方法¹

1 土壤碳储量计算公式:

$$C_s = D_s \times A \quad (6.4.2-1)$$

式中: C_s —— 土壤有机碳储量(吨, t)

A —— 该生态系统面积(公顷, hm²)

土壤有机碳的平均碳密度计算,如果某一土壤剖面由n层组成,则该生态系统土壤平均有机碳密度为:

$$D_s = \sum_{i=1}^n C_i \times D_i \times H_i \times (1-G_i) \times 0.1 \quad (6.4.2-2)$$

式中: D_s —— 土壤有机碳密度,单位为吨每公顷(吨/公顷, t/hm²) ;

i —— 土层代号;

C_i —— i 层土壤有机碳含碳率,单位为克每千克(克/千克, g/kg) ;

D_i —— 容重,单位为克每立方厘米(克/立方厘米, g/cm³) ;

H_i —— 土层厚度,单位为厘米(厘米, cm) ;

G_i —— 直径超过2mm砾石含量所占体积百分比(百分比, %)。

2 区域土壤碳储量核算方法的级别化选取:

a) 项目级:采用空间插值法,将离散采样点的土壤有机碳密度转换为评价单元内连续的土壤有机碳密度空间分布图,再与地块边界图叠加,通过面积加权平均或像素累加得到总碳储量 C_s 。

b) 片区级:建立“土壤类型/土地利用类型—平均土壤有机碳密度”查找表。将片区划分为不同的土壤类型或土地利用类型图斑,将野外抽样测算得到的各类型土壤有机碳密度平均值赋予对应的所有图斑,根据各图斑面积和其对应的土壤

¹ 本标准所指土壤碳储量特指土壤有机碳(SOC)储量,核算逻辑符合 GB/T 42490-2023《土壤质量 土壤与生物样品中有机碳含量与碳同位素比值、全氮含量与氮同位素比值的测定 稳定同位素比值质谱法》的技术框架。不计算土壤无机碳(SIC)储量的核心原因:一是无机碳(如碳酸盐、碳酸氢盐)主要富集于碱性土壤,对多数区域土地利用与管理措施的响应显著弱于有机碳,且长期被视为相对稳定的碳库;二是其储量变化与站点水文条件、土壤矿物组成强相关,需通过长期水文地球化学追踪分析才能精准核算,目前缺乏适用于多区域的 Tier 1/Tier 2 通用核算方法,IPCC 指南亦默认无机碳库净通量为零;三是有机碳作为土壤碳库的活性核心,与植被生长、农业管理措施及气候变化的关联更直接,是当前碳汇核算、生态系统功能评估的核心指标,优先核算有机碳可兼顾标准的通用性与实践可操作性。

有机碳密度平均值，计算片区总碳储量。

c) 城区级：主要采用遥感反演模型法。利用中分辨率遥感影像提取植被指数、亮度指数等遥感参数，与样点土壤有机碳密度数据建立统计回归模型，从而生成整个城区的土壤有机碳密度空间分布图。进而计算城区总碳储量。

6.4.3 水体碳储量计算方法

核算方法的级别化选取：

a) 项目级：核算应采用直接测定法，对评价水体内的各碳库进行系统采样与实验室测定。

——水生植物碳库：应采用样方收割法获取各类水生植物的生物量，按 6.4.1 规定计算其碳储量。

——水体碳库：应采集不同深度的水样，经 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后，分别测定溶解性有机碳 (DOC) 与颗粒性有机碳 (POC) 浓度。水体碳储量按下式计算：

$$C_W = (C_{DOC} + C_{POC}) \times V \times 10^{-6} \quad (6.4.3-1)$$

式中： C_W —— 水体碳储量 (吨，t)；

C_{DOC} —— 溶解性有机碳 (毫克/升，mg/L)；

C_{POC} —— 颗粒性有机碳浓度 (毫克/升，mg/L)；

V —— 水体体积 (立方米， m^3)。

——沉积物碳库：应采用沉积物采样器采集超过 100cm 的沉积柱，按 2cm 间隔分层测定有机碳含量、容重等参数，按 6.4.2 规定计算其碳储量。

b) 片区级：宜采用分类测算法，结合实地抽样与模型估算。将片区内水体划分为不同类型（如河流、湖泊、水库等）。对各类型水体进行代表性抽样，测定其单位面积或单位体积碳储量。区域总碳储量应按下式计算：

$$C_W = \sum (A_{Wi} \times D_{Wi}) \quad (6.4.3-2)$$

式中： C_W —— 片区水体碳储量总量 (吨，t)；

A_{Wi} —— 第 i 类水体的面积或体积 (公顷或立方米， hm^2 或 m^3)；

D_{Wi} —— 第 i 类水体的单位面积/体积碳密度 (吨/公顷或吨/立方米， t/hm^2 或 t/m^3)。

c) 城区级：宜采用分类测算法或空间插值法，在利用现有资料与文献的基础上，优先采用本地抽样数据进行校准与估算。

——分类测算法：参考片区级核算方法。

——空间插值法：应基于样点测定的碳储量数据，采用空间插值方法，生成城区范围的碳储量分布图。区域总碳储量应通过计算各像元碳储量之和获得。

6.4.4 建设运行碳汇

主要指建筑运行过程中混凝土吸收二氧化碳的过程。建设使用阶段混凝土碳汇量计算过程包括：确定混凝土及砂浆的等级型号、计算碳化深度、计算暴露面积、计算混凝土体积、计算单位体积碳汇量。

在计算区域建筑碳汇量时，由于规划与用地条件的影响，计算模型更加复杂，需要以单体建筑碳汇量计算方法为基础，对区域建筑进行样地调查，确定建筑参数，并利用统计分析软件分别对各类建筑进行建筑碳汇量计算的构建。

1 单体建筑建设使用阶段混凝土碳汇量计算过程包括：

a) 确定混凝土及砂浆的等级型号。不同等级型号的混凝土、砂浆的水泥量不同。

b) 计算碳化深度。根据菲克第二定律，碳化深度计算公式如下：

$$d=K \times t^{1/2} \quad (6.4.4-1)$$

式中：d —— 碳化深度（毫米， mm）；

K —— 碳化速率系数（毫米/年^{1/2}， (mm/a^{1/2})）；

t —— 建筑结构的设计使用年限（年， a）。

c)计算构件暴露面积。不同建筑构件暴露条件不同，因此，按照基础、梁、板、柱、墙、楼梯、阳台、散水分别计算暴露面积（ A_i ）（平方米， m²）。

d)计算构件碳化混凝土体积。根据碳化深度与表露面积计算混凝土碳化体积（ V_i ）（立方米， m³）， 公式如下：

$$(6.4.4-2)$$

$$V_i = A_i \times d_i / 1000$$

e)计算建筑碳储量。单体建筑碳储量计算公式如下：

$$C_B = \sum (CD_i \times V_{CaO_i} \times M_{CO_2} / M_{CaO} \times V_i) / 1000 \quad (6.4.4-3)$$

式中： C_B —— 单体建筑碳储量（吨， t）；

CD_i —— 第 i 类构件单位体积内水泥熟料用量（千克/立方米， kg/m³）；

V_{CaO_i} —— 第 i 类构件水泥熟料中 CaO 的体积分数（无量纲）；

M_{CO_2} 、 M_{CaO} —— CO₂ 和 CaO 的相对分子质量（克/摩尔， g/mol）。

2 区域核算方法的级别化选取：

a) 项目级：应采用基于建筑信息模型的精细核算法。该方法要求获取单体建筑的完整设计或竣工资料，对核算区域内所有建筑精细化计算，区域的碳储量应为每个建筑碳储量核算结果的加和。

b) 片区级与城区级：宜采用基于抽样调查的模型估算法。通过建立建筑参数与碳储量的统计关系进行估算，应按建筑功能进行分层抽样，样本量应满足统计显著性要求。建立建筑碳储量与建筑参数的回归模型。基于建筑普查数据或遥感解译建筑数据，将抽样建筑的碳储量按模型推广至区域所有建筑，汇总得到片区或城区建筑总碳储量，各类型建筑参考估算模型见附录 G。

6.4.5 产业活动碳汇

产业活动碳汇指城市工业生产过程中产生的碱性固体废弃物（如钢渣、粉煤灰、赤泥等）通过碳化反应固定二氧化碳的过程。其核算方法应根据不同级别的数据基础、调查精度与应用目标进行差异化选择。

1 项目级核算方法

项目级核算应采用基于物料衡算与实验测定的精细核算法。该方法适用于对单一工业企业或特定废弃物处理场进行核算。

a) 数据要求：应全面收集核算年份内企业的原料消耗量、生产工艺流程及废弃物产出台账，明确固废的化学组分、堆存年限与堆存体积。

b) 碱性固废产生量计算：废弃物产生量应按下式计算：

$$M_{Si} = m_{Si} \cdot r_{Si} \quad (6.4.5-1)$$

式中： M_{Si} —— i 年产生的不同碱性固废量（吨/年，t/a）；

m_{Si} —— i 年生产原料量（吨/年，t/a）；

r_{Si} —— 碱性固废产出率（无量纲）。

c) 碳化程度估算：碳化程度（ $R_{s,i}$ ）的估算方法主要分为以下两种，具体公式及适用条件如下：

方法一：热重分析法

基于热重分析法测定碱性固废的 CO₂ 吸收率（ ω_{CO_2} ），计算碳化程度，具体公式为：

$$\omega_{CO_2} = \Delta m_{CaCO_3} / m_0 \cdot 100\% \quad (6.4.5-2)$$

$$R_{s,i} = \frac{\omega_{CO_2} / (1 - \omega_{CO_2})}{f_{s,i}^{CaO}} \times \frac{M_{CaO}}{M_{CO_2}} \times 100\% \quad (6.4.5-3)$$

式中: Δm_{CaCO_3} —— 碳酸盐分解重量损失质量 (克, g) ;

m_0 —— 碱性固废干物质的起始质量 (克, g) ;

$R_{s,i}$ —— 碱性固废的碳化程度;

$f_{s,i}^{\text{CaO}}$ —— 钢铁渣中氧化钙含量 (%) 。

方法二: 菲克第二定律推导法

基于菲克第二定律, 先参照公式(6.4.4-1)计算碳化深度, 不同类型碱性固废的碳化速率详见附录 C, 然后通过以下分段公式计算碳化程度。

$$R_{s,i} = \begin{cases} 100\% - \int_a^b \frac{\pi}{6} (D - D_{sm,i})^3 dD / \int_a^b \frac{\pi}{6} D^3 \times 100\% dD & (a \geq D_{sm,i}) \\ 100\% - \int_{D_{sm,i}}^b \frac{\pi}{6} (D - D_{sm,i})^3 dD / \int_a^b \frac{\pi}{6} D^3 \times 100\% dD & (a < D_{sm,i} \leq b) \\ 100\% & (b < D_{sm,i}) \end{cases} \quad (6.4.5-4)$$

式中: D 为碱性固废的粒径 (mm) ;

a 为碱性固废在给定粒径分布范围的最小粒径 (mm) ;

b 为碱性固废在给定粒径分布范围的最大粒径 (mm) 。

d) 二氧化碳的实际封存量计算:

$$Cs = M_{Si} \times f \times R_{s,i} \times \varepsilon_s \quad (6.4.5-5)$$

式中: f —— 不同碱性固废处置方式占比 (%) ;

ε_s —— 碳化因子 (无量纲)。基于碱性固废中碱性成分, 如 CaO 含量, 以及 CaO 转化为 CaCO₃ 的比例 (附录 D) 计算得出。

一般来说, 碱性固废处理方式有 3 种, 垃圾填埋处理、作为回填材料以及作为水泥辅助胶凝材料。不同处理方式的固碳速率不同, 因此年固碳量计算方式也不同:

$$C_1 = M_{Si} \cdot (1 - f_1) \cdot \Delta R_{Si} \cdot \varepsilon_s \quad (6.4.5-6)$$

$$C_2 = M_{Si} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \Delta R_{Si} \cdot \varepsilon_s \quad (6.4.5-7)$$

式中: C_1 —— 垃圾填埋碱性固废固碳量 (吨/年, t/a) ;

C_2 —— 回填处理碱性固废固碳量 (吨/年, t/a) ;

f_1 —— 碱性固废利用率 (%) ;

f_2 —— 利用的碱性固废工程回填的比例 (%) ;

ΔR_{Si} —— 碱性固废年碳化比例 (%/年, %/a) ;

ε_s —— 碳化因子 (无量纲)。

作为水泥辅助胶凝材料的碱性固废的固碳量, 可以结合水泥材料固碳计算方

法；

2 片区级核算方法

片区级核算宜采用基于抽样调查的系数核算法，适用于对工业园区或特定产业聚集区进行系统性核算。

a) 抽样要求：应在片区内依据 6.3.2.5 中片区级采样布设规则，选取典型企业与场址进行抽样调查，建立本地化的核算参数数据库。

b) 碳储量计算：应以环境统计与抽样数据为基础，采用经过本地化校正的固碳系数进行计算：

$$C_{\text{区域}} = \sum (M_{ij} \times F_j) \quad (6.4.5-8)$$

式中： $C_{\text{区域}}$ —— 片区产业活动总碳储量（吨，t）；

M_{ij} —— 第 i 个企业第 j 类碱性固废的产生量（吨，t）；

F_j —— 第 j 类碱性固废基于本地抽样确定的固碳系数（吨二氧化碳/吨， $t \text{ CO}_2/t$ ）。

（3）城区级核算方法

城区级核算宜采用基于宏观统计的参数估算法，适用于全市层面的碳汇潜力宏观摸底。

a) 数据基础：应收集工业普查数据、环境统计年报等宏观资料，识别主要碱性废弃物的类型、年产生量与分布。

b) 参数确定：应结合 6.3.2.5 中城区级典型抽样获得的表层碳酸盐含量等关键参数，对文献中的行业固碳系数参考值进行区域性校准。

c) 碳汇量计算：城区产业活动碳汇总量应按下式计算：

$$C_{\text{城区}} = \sum (G_k \times R_k) \quad (6.4.5-9)$$

式中： $C_{\text{城区}}$ —— 城区产业活动碳汇总量（吨，t）；

G_k —— 第 k 个行业的碱性固废产生量（吨，t）；

R_k —— 经本地化校准的第 k 个行业的固碳系数参考值（吨二氧化碳/吨， $t \text{ CO}_2/t$ ）。

6.4.6 采矿活动碳汇

采矿活动碳汇指采矿活动中产生的碱性废石与尾矿，通过风化反应固定的碳。其核算目标是量化评估特定时间点下，废石与尾矿库实现的固碳量。

1 项目级核算方法

项目级核算应采用基于实地采样与化学分析的直接核算法,适用于对单一尾矿库或废石堆场进行精确的碳储量普查。

a) 样品采集: 应依据 6.3.2.5 中项目级的分层网格法进行系统采样, 确保样品在堆体深度和水平方向上的代表性。

b) 核心参数测定: 对采集的样品, 实验室应核心测定其岩相组成、粒径分布。

c) 固碳量计算:

首先计算采矿废弃物中矿物的溶解比例:

$$X(i, k, j) = \frac{D_k^3 - (D_k - 2W_{r,i} \cdot V_{m,i} \cdot t_j)^3}{D_k^3} \quad (6.4.6-1)$$

式中: $X(i, k, j)$ —— 堆存年限 j 的采矿废弃物第 k 径级中第 i 种岩相的溶解比例

(%) ;

$W_{r,i}$ —— 采矿废弃物中第 i 种岩相的溶解速率 (摩尔/平方米秒,

$\text{mol(mineral)}/\text{m}^2/\text{s}$) ;

$V_{m,i}$ —— 采矿废弃物中第 i 种岩相的摩尔体积 (立方米/摩尔, m^3/mol) ;

D_k —— 采矿废弃物第 k 径级的平均粒径 (米, m) ;

t_j —— 采矿废弃物的堆置时间 (秒, s) ;

各采矿废弃物的固碳量计算如下:

$$C_{\text{尾砂},j} = \sum_{i,j} \sum_k m_{\text{尾砂},j} \times f_{\text{尾砂},k} \times f_{\text{尾砂},i} \times E_{\text{pot},i} \times X_{\text{尾砂},i,k,j} \times \frac{12}{44} \quad (6.4.6-2)$$

$$C_{\text{废石},j} = \sum_{i,j} \sum_k m_{\text{废石},j} \times f_{\text{废石},k} \times f_{\text{废石},i} \times E_{\text{pot},i} \times X_{\text{废石},i,k,j} \times \frac{12}{44} \quad (6.4.6-3)$$

场址总固碳量应按下式计算:

$$C_{M,j} = C_{\text{尾砂},j} + C_{\text{废石},j} \quad (6.4.6-4)$$

式中: $C_{M,j}$ —— 堆置 j 年的采矿废弃物固碳量 (吨, t) ;

$C_{\text{尾砂},j}$ —— 堆置 j 年的采矿尾砂固碳量 (吨, t) ;

$C_{\text{废石},j}$ —— 堆置 j 年的采矿废石固碳量 (吨, t) ;

j —— 采矿废弃物堆存年限;

$m_{\text{尾砂},j}$ —— 堆置 j 年的采矿尾砂质量 (吨, t) ;

$m_{\text{废石},j}$ —— 堆置 j 年的采矿废石质量 (吨, t) ;

$f_{\text{尾砂}_i}$ —— 堆置 j 年的采矿尾砂中第 i 种岩相的占比（百分比，%）；
 $f_{\text{废石}_i}$ —— 堆置 j 年的采矿废石中第 i 种岩相的占比（百分比，%）；
 $f_{\text{尾砂}_k}$ —— 采矿尾砂中第 k 种径级的占比（百分比，%）；
 $f_{\text{废石}_k}$ —— 采矿废石中第 k 种径级的占比（百分比，%）；
 $E_{\text{pot},i}$ —— 采矿废弃物中第 i 种岩相的固碳潜力（吨二氧化碳/吨岩相或千克二氧化碳/千克岩相，tCO₂/t 或 kgCO₂/kg）；
 $X_{\text{尾砂},i,k,j}$ —— 堆存年限 j 的采矿尾砂第 k 径级中第 i 种岩相的溶解比例（%）；
 $X_{\text{废石},i,k,j}$ —— 堆存年限 j 的采矿废石第 k 径级中第 i 种岩相的溶解比例（%）。

2 片区级核算方法

片区级核算宜采用基于抽样调查的类型赋值法，适用于对矿区集中区进行系统性碳汇量估算。

- a) 抽样与分类：依据 6.3.2.5 中片区级的系统网格法或分区随机法进行抽样。将片区内同一矿种采矿废弃物划分为不同类型。
- b) 碳汇量计算：片区总碳汇量应按下式计算：

$$C_{\text{区域}} = \sum_m C_{\text{尾砂},m} + C_{\text{废石},m} \quad (6.4.6-5)$$

式中： $C_{\text{区域}}$ —— 片区采矿总固碳量（吨，t）；

$C_{\text{尾砂},m}$ —— 片区内第 m 个矿区或尾矿库内尾砂的固碳量（吨，t）；

$C_{\text{废石},m}$ —— 片区内第 m 个矿区或排岩场内废石的固碳量（吨，t）；

$C_{\text{尾砂},m}$ 与 $C_{\text{废石},m}$ 计算参考项目级核算方法中公式 6.4.6-1~6.4.6-4。

3 城区级核算方法

城区级核算宜采用基于宏观统计的参数估算结合实地抽样调查法，适用于全市采矿碳汇量的宏观摸底。

- a) 数据基础：收集矿业统计年鉴，获取主要尾矿与废石的历史累计堆存量
- b) 参数确定：采用通过城区级典型抽样校准后的各岩相组分与粒径作为核算参数（按不同矿种进行抽样调查，需要覆盖所有矿种的各岩相组分与粒径

采样分析)。

c) 碳汇量计算: 城区采矿固碳总量应按下式计算:

$$C_{\text{城区}} = \sum_l C_{\text{尾砂},l} + C_{\text{废石},l} \quad (6.4.6-6)$$

式中: $C_{\text{城区}}$ —— 城区采矿总固碳量 (吨, t);

$C_{\text{尾砂},l}$ —— 城区内第1类矿山产生的尾砂固碳量 (吨, t);

$C_{\text{废石},l}$ —— 城区内第1类矿山产生的废石固碳量 (吨, t);

$C_{\text{尾砂},l}$ 与 $C_{\text{废石},l}$ 计算参考项目级核算方法中公式 (6.4.6-1) ~ (6.4.6-4)。

7 城市空间复合碳汇价值评价

7.1 城市空间复合碳汇价值评价流程

城市空间复合碳汇价值评价应按照"要素筛选→评估模型建立→价格计算→评价结果输出"的统一流程开展。在不同核算级别下，各环节的技术方法与应用深度应满足相应的精度要求。

7.1.1 筛选价值要素：判断碳汇是否同时具备碳固定能力和稳定的碳积蓄能力，通常要求可预见的稳定蓄积周期 ≥ 5 年，若无法同时满足这两个要素，将该要素排除。

7.1.2 碳汇价值评价模型：对符合条件的碳汇要素建立价值评估模型。

7.1.3 碳汇价格计算方法选择：根据实际情况选择方法进行价格计算。

7.1.4 碳汇价值评价结果：最终输出碳汇的经济价值评价结果。

7.2 碳汇价值要素判断

并非所有的城市空间内的碳汇要素都具有碳汇价值，在分析城市空间复合碳汇价值的组成时，需要考虑两个方面：城市空间碳汇要素的碳固定能力和在其所在空间内稳定的碳蓄积能力，二者缺一不可。在综合分析的基础上筛选具体有碳汇价值的要素。下表列出了城市空间内推荐计算碳汇价值的各类要素，但不同项目、片区或城区需要根据实际情况进行判断。

表 7.2.1 城市空间复合碳汇价值组成

| 城市空间碳汇要素 | | 碳固定能力 | 碳蓄积能力 |
|----------|-----------|----------------|--------------------|
| 自然要素 | 城市植被 | 光合作用 | 稳定-枝干根系 |
| | 城市土壤 | 微生物 | 稳定-重要碳库 |
| | 城市水系 | 水生植物 沉积物与土壤 | 部分水生植物及沉积物、土壤较为稳定； |
| 人工要素 | 城市建筑物 | 碳化反应 | 稳定-运行期长 |
| | 工业碱性固体废弃物 | 碳化反应 | 稳定性需要根据实际情况评估 |
| | 采矿废石尾矿 | 碳化、风化反应 | 稳定性需要根据实际情况评估 |

7.3 碳汇价值评价模型

对相关研究进行分析总结，提出碳汇价值评价的模型。碳汇价值评价模型计算式如下：

$$V_c = P_c \sum_{i=1}^n S_i 44/12, \quad (7.3.1-1)$$

式中： V_c —— 研究区碳汇价值(元)；

P_c —— 碳价格或碳单价(元/吨二氧化碳, 元/tCO₂);

S_i —— 第 i 种要素总碳积蓄量, 即该要素的碳储量 (吨, t);

44/12 —— 碳转换为二氧化碳的系数。

7.4 碳汇价格计算

7.4.1 碳汇价格计算方法选取

本规程选取碳市场价格法, 作为碳汇价格计算依据。

碳市场价格法是指采用国内外公开碳交易市场中, 碳排放配额或核证减排量的交易价格, 作为碳汇经济价值的评估基准。该方法直接反映市场供需关系, 是评估碳汇当前经济价值最客观、最权威的依据。

碳市场价格应优先来源于国内外依法设立、运行规范的碳排放权交易市场。其价格依据主要包括两类:

- a) 碳排放配额: 指政府分配给重点排放单位的温室气体排放权凭证, 如全国碳排放权交易市场的 CEA。
- b) 核证减排量: 指经官方核准签发的、可交易的温室气体减排量, 如中国核证自愿减排量 (CCER) 、清洁发展机制下的核证减排量 (CER) 等。

7.4.2 价格选取与应用原则

a) 数据来源优先序: 应优先采用评估对象所在司法管辖区内的碳市场价格。中国境内项目, 应优先采用全国碳排放权交易市场配额 (CEA) 价格或中国核证自愿减排量 (CCER) 价格。

- b) 时间匹配性: 选取的价格数据时间窗口应与碳储量核算的基准期相匹配。
- c) 流动性考量: 应优先选取交易连续、活跃度高、成交量大的交易品种价格, 避免使用异常波动或流动性极差时段的价格。
- d) 级别化处理: 项目级应采用与项目期高度匹配的特定时间段 (如季度) 的成交量加权平均价。片区级与城区级可采用半年或年度的成交量加权平均价, 或经论证认可的长期碳价趋势值。

附录 A 辽宁省常见树种异速生长方程参数表（规范性附录）

| 树种 | 叶生物量 (千克, kg) | 枝生物量 (千克, kg) | 干生物量 (千克, kg) | 总地上生物量 (千克, kg) |
|------|---------------------------|----------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| 蒙古栎 | $W_L=0.529D^{0.920}$ | $W_{BS}=0.021(D^2H)^{0.715}$ | $W_S=2.155D^{1.152}$ | |
| 色木槭 | $W_L=0.052H^{0.998}$ | $W_{BS}=0.005D^{0.959}H^{1.299}$ | $W_S=0.007H^{1.729}$ | |
| 紫椴 | $W_L=0.002H^{1.611}$ | $W_{BS}=0.001D^{0.954}H^{1.508}$ | | $W_T=0.002D^{0.875}H^{1.481}$ |
| 槐树 | $W_L=0.0149D^{1.700}$ | $W_B=0.0050D^{3.055}$ | $W_S=0.1370D^{2.198}$ | |
| 银中杨 | $W_L=0.0017D^{2.5459}$ | $W_B=0.0011D^{3.2079}$ | $W_S=0.1073D^{2.3450}$ | $W_T=0.0885D^{2.5379}$ |
| 榆树 | $W_L=0.0326D^{1.7038}$ | $W_B=0.0490D^{2.0328}$ | $W_S=0.0692D^{2.4413}$ | |
| 油松 | $W_L=0.0060D^{2.475}$ | $W_B=0.0139D^{2.527}$ | $W_S=0.0339D^{2.582}$ | |
| 樟子松 | | | | $W_T=0.2425D^{1.9938}$ |
| 红松 | $W_L=0.082(D^2H)^{0.655}$ | $W_{BS}=0.016(D^2H)^{0.809}$ | | $W_T=0.111(D^2H)^{0.704}$ |
| 红皮云杉 | $W_L=0.0289D^{1.9801}$ | $W_B=0.0253D^{2.1926}$ | | $W_T=1.438D^{1.240}$ |
| 丁香 | $W_L=0.683(D^2H)^{0.715}$ | $W_B=0.876(D^2H)^{0.894}$ | | |
| 连翘 | $W_L=0.187(D^2H)^{0.868}$ | $W_B=0.385(D^2H)^{1.025}$ | | |
| 小叶女贞 | $W_L=14.646C^{1.164}$ | $W_B=26.332(CH)^{0.666}$ | | |
| 银杏 | $W_L=0.008D^{2.310}$ | $W_B=0.012D^{2.850}$ | $W_S=0.215D^{2.470}$ | $W_T=0.235D^{2.520}$ |
| 垂柳 | $W_L=0.003H^{2.015}$ | $W_B=0.002D^{3.100}$ | $W_S=0.098D^{2.530}$ | $W_T=0.103D^{2.610}$ |
| 白蜡 | $W_L=0.015D^{1.890}$ | $W_B=0.032D^{2.240}$ | $W_S=0.087D^{2.380}$ | $W_T=0.134D^{2.310}$ |
| 樱花 | $W_L=0.006D^{2.150}$ | $W_B=0.009D^{2.980}$ | $W_S=0.075D^{2.560}$ | $W_T=0.090D^{2.670}$ |
| 碧桃 | $W_L=0.004H^{1.980}$ | $W_B=0.007(D^2H)^{0.950}$ | $W_S=0.062(D^2H)^{1.010}$ | $W_T=0.073(D^2H)^{0.980}$ |
| 榆叶梅 | $W_L=0.215(D^2H)^{0.780}$ | $W_B=0.428(D^2H)^{0.960}$ | | $W_T=0.643(D^2H)^{0.870}$ |
| 金银木 | $W_L=0.326(D^2H)^{0.810}$ | $W_B=0.517(D^2H)^{0.930}$ | | $W_T=0.843(D^2H)^{0.970}$ |
| 珍珠梅 | $W_L=0.198C^{1.320}$ | $W_B=0.305(CH)^{0.750}$ | | $W_T=0.503(CH)^{0.935}$ |
| 紫叶李 | $W_L=0.005D^{2.240}$ | $W_B=0.011D^{2.790}$ | $W_S=0.082D^{2.450}$ | $W_T=0.098D^{2.530}$ |
| 水蜡 | $W_L=8.762C^{1.240}$ | $W_B=15.321(CH)^{0.710}$ | | $W_T=24.083(CH)^{0.875}$ |
| 红瑞木 | $W_L=0.256(D^2H)^{0.760}$ | $W_B=0.418(D^2H)^{0.920}$ | | $W_T=0.674(D^2H)^{0.840}$ |

注：式中 C 表示冠幅（米, m）， D 表示基径（厘米, cm）， H 表示树高（米, m）。

附录 B 土壤有机碳测定方法对比表（资料性附录）

| 标准号与名称 | HJ 615-2011 土壤有机碳的测定 重铬酸钾氧化-分光光度法 | HJ 658-2013 土壤有机碳的测定 燃烧氧化-滴定法 | HJ 695-2014 土壤有机碳的测定 燃烧氧化-非分散红外法 |
|-----------|--|---|---|
| 不适用土壤类型 | 不适用于氯离子(Cl^-)含量超过 $2.0 \times 10^4 \text{ mg/kg}$ 的土壤(如滨海盐土)。 | 不适用于油泥污染土壤中有机碳的测定。 | 不适用于油泥污染土壤中有机碳的测定。 |
| 检测限 | 当样品量为 0.5g 时, 该方法检出限为 0.06%(以干重计), 测定下限为 0.24% (以干重计) | 当样品量为 0.50g 时, 本标准的方法检出限为 0.004%, 测定下限为 0.016%, 测定上限为 4.00%。样品中有机碳含量较高时, 可减少取样量, 但最低不能低于 0.050g | 当样品量为 0.050g 时, 本标准的方法检出限为 0.008%, 测定下限为 0.032%。 |
| 主要干扰及消除 | 主要干扰: 氯化物、亚铁盐、锰化物等还原性物质。 消除: 对含氯化物高的样品需进行预处理(如加 Ag_2SO_4), 操作复杂。 | 主要干扰: 无机碳酸盐。 消除: 测定前需用酸处理样品以去除无机碳。 | 主要干扰: 无机碳酸盐(在测定总碳时)、水分、卤素。 消除: 可通过酸处理去除无机碳后测定有机碳; 仪器自带吸收管可有效去除水分和卤素干扰。 |
| 方法特点与选用建议 | 特点: 经典湿化学方法, 设备要求简单。 适用: 预算有限、样品量少、有机质含量不高的常规调查; 可作为比对验证的备用方法。 | 特点: 经典的干烧法, 准确可靠, 是 HJ 695 之前的重要方法。 适用: 对准确度要求高但暂无 HJ 695 所需仪器的实验室; 可作为向自动化方法过渡期间的使用方法 | 特点: 推荐方法。快速、准确、高效, 抗干扰能力强, 数据质量高。 适用: 大规模城市碳汇普查、高精度科研项目、需要快速获取数据的场景。 |

| 标准号与名称 | HJ 615-2011 土壤有机碳的测定 重铬酸钾氧化-分光光度法 | HJ 658-2013 土壤有机碳的测定 燃烧氧化-滴定法 | HJ 695-2014 土壤有机碳的测定 燃烧氧化-非分散红外法 |
|--------|--------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
|--------|--------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|

注：本附录对比了城市空间碳储量核算中常用的三种土壤有机碳测定标准方法。在无特殊要求的情况下，HJ 695-2014（燃烧氧化-非分散红外法）因其高效、准确和自动化程度高，推荐作为城市碳汇评估的首选方法。

附录 C 碳化速率系数 (K) 参考值 (规范性附录)

C.1 混凝土碳化速率系数

| 混凝土强度等级 | 水胶比 (参考) | 环境条件 | K 值范围 (毫米/年 1/2, mm/a1/2) |
|-----------|-------------|---------------------|---------------------------|
| C20 ~ C25 | 0.60 ~ 0.70 | 室内正常环境 (长期湿度 ~60%) | 0.314~0.628 |
| | | 潮湿室外环境 (雨淋, 干湿交替) | 0.157~0.366 |
| | | 干燥室外环境 (长期湿度小于 50%) | 0.523~0.942 |
| C30 ~ C35 | 0.50 ~ 0.60 | 室内正常环境 | 0.209~0.419 |
| | | 潮湿室外环境 | 0.105~0.262 |
| | | 干燥室外环境 | 0.366~0.733 |
| C40 ~ C50 | 0.40 ~ 0.50 | 室内正常环境 | 0.105~0.236 |
| | | 潮湿室外环境 | 0.052~0.157 |
| | | 干燥室外环境 | 0.209~0.419 |
| 不小于 C60 | 小于 0.40 | 各类环境 | 0.026~0.131 |

C.2 不同类型碱性固废碳化速率系数

| 碱性固废类型 | K 值范围(毫米/年 1/2, mm/a1/2) | | |
|----------|--------------------------|------|------|
| | 平均值 | 最大值 | 最小值 |
| 钢铁渣 | 0.23 | 0.36 | 0.11 |
| 镁渣 | 0.09 | 0.15 | 0.04 |
| 城市垃圾焚烧底灰 | 0.17 | 0.27 | 0.13 |
| 废弃混凝土 | — | 5 | 1 |
| 废弃砂浆 | 19.6 | 39.4 | 4.2 |

附录 D 碱性固废 CaO 转化为 CaCO₃ 的比例（规范性附录）

| 碱性固废类型 | CaO 转化为 CaCO ₃ 的比例 (%) | | |
|-----------|-----------------------------------|-------|------|
| | 平均值 | 最大值 | 最小值 |
| 钢渣 | 83.5 | 93.5 | 75.0 |
| 高炉渣 | 78.0 | 97.0 | 67.0 |
| 镁渣 | 40.0 | 44.0 | 37.0 |
| 废弃混凝土 | 86.0 | 90.0 | 50.0 |
| 水泥窑灰/石灰窑灰 | 92.0 | 100.0 | 50.0 |
| 城市垃圾焚烧底灰 | 45.6 | 56.5 | 34.2 |
| 其他固废 | 66.0 | 74.4 | 57.4 |

附录 E 常见矿物溶解速率 (Wr) 与岩相摩尔体积参考值 (资料性附录)

| 岩相 | Wr/(摩尔/平方米/秒, mol/m ² /s) | Vm/(立方米/摩尔, m ³ /mol) |
|------|--------------------------------------|----------------------------------|
| 钠长石 | 1.20226×10^{-12} | 1.00000×10^{-4} |
| 钙长石 | 5.01187×10^{-13} | 5.01187×10^{-13} |
| 钙铁榴石 | 1.99526×10^{-11} | 1.99526×10^{-11} |
| 磷灰石 | 3.60000×10^{-11} | 1.65000×10^{-4} |
| 普通辉石 | 5.16977×10^{-12} | 6.50000×10^{-5} |
| 黑云母 | 2.81838×10^{-13} | 1.41000×10^{-4} |
| 斜绿泥石 | 3.01995×10^{-13} | 3.05000×10^{-4} |
| 透辉石 | 3.08400×10^{-11} | 6.40000×10^{-5} |
| 顽火辉石 | 5.50000×10^{-12} | 6.50000×10^{-5} |
| 镁橄榄石 | 9.12011×10^{-11} | 4.20000×10^{-5} |
| 伊利石 | 1.41250×10^{-12} | 2.90000×10^{-4} |
| 利蛇纹石 | 3.98107×10^{-13} | 7.40000×10^{-5} |
| 角闪石 | 3.09030×10^{-13} | 3.09030×10^{-13} |
| 云母 | 8.51138×10^{-13} | 1.93000×10^{-4} |
| 正长石 | 1.98105×10^{-12} | 1.09000×10^{-4} |
| 金云母 | 3.98107×10^{-13} | 1.48000×10^{-4} |
| 斜长石 | 2.51189×10^{-12} | 9.80000×10^{-5} |
| 蛇形的 | 2.51189×10^{-12} | 1.10000×10^{-4} |
| 蒙脱石 | 1.65959×10^{-13} | 2.55000×10^{-4} |
| 滑石 | 1.00000×10^{-12} | 1.40000×10^{-4} |
| 透闪石 | 2.51189×10^{-11} | 2.57000×10^{-4} |
| 硅灰石 | 1.58489×10^{-10} | 1.58489×10^{-10} |
| 方解石 | 1.54882×10^{-6} | 3.70000×10^{-5} |
| 白云石 | 8.60994×10^{-9} | 6.50000×10^{-5} |
| 菱镁矿 | 4.57088×10^{-10} | 2.79070×10^{-5} |
| 黄铁矿 | 2.81838×10^{-5} | 2.40000×10^{-5} |

附录 F 城市空间碳汇要素调查表示例（资料性附录）

F.1 植物采样记录单

| 采样人: | | 时间: | 地点 | |
|---------|------------|-----|----|------|
| 地块坐标: | A | | B | |
| | C | | D | |
| 乔木 (M): | 种类: | 株高 | 胸径 | 树冠半径 |
| 灌木 (B): | 种类: | 株高 | | 树冠半径 |
| 草地/作物 | 面积: 种类: | | | |
| 备注: | | | | |

F.2 土壤采样记录单

采样人

F.3 建筑采样记录单

附录 G 建筑碳储量核算模型（资料性附录）

| 建筑类型 | 碳储量模型 | 模型说明 |
|--------|--|---|
| 居住建筑 | $C_R = 0.081 \times BD^{1.69} \times \sqrt{T}$ | 式中： CR——居住建筑碳储量，单位：克，g； CM——工业建筑碳储量，单位：克，g； CB——商业建筑碳储量，单位：克，g； CA——公共服务建筑碳储量，单位：克，g； CO——其他建筑碳储量，单位：克，g； BD——建筑容量，单位 m ³ ； T——建成时间，单位：年。 |
| 工业建筑 | $C_M = (0.203 \times BD + 86.707) \times \sqrt{T}$ | |
| 商业建筑 | $C_B = 0.011 \times BD^{1.457} \times \sqrt{T}$ | |
| 公共服务建筑 | $C_A = 0.008 \times BD^{1.456} \times \sqrt{T}$ | |
| 其他建筑 | $C_O = (0.291 \times BD + 2.597) \times \sqrt{T}$ | |

附录 H 碳汇价格依据与市场参考数据（资料性附录）

H.1 基于碳交易市场的碳汇价格

根据碳交易网（<http://www.tanjiaoyi.com/>）数据，全国碳市场启动以来，总交易额为 511.41 亿元，总交易量为 8.76 亿吨 CO₂，平均单价为 58.38 元/吨 CO₂。2013 年作为启动首年，交易量较低但单价较高；随后因机制不健全，价格持续走低。近年来随着市场完善，价格逐步回升，2024 年达 95.84 元/吨 CO₂。当前国内碳价仍远低于国际水平（61–122 美元/吨 CO₂，约合人民币 430–860 元/吨 CO₂），显示较大上升空间。

表 H.1.1 中国碳交易市场年度交易情况

| 年份 | 成交量（亿吨） | 成交额（亿元） | 年度均价（元/吨） |
|------|---------|---------|-----------|
| 2013 | 0.12 | 3.25 | 27.08 |
| 2014 | 0.25 | 6.18 | 24.72 |
| 2015 | 0.31 | 7.59 | 24.48 |
| 2016 | 0.36 | 8.85 | 24.58 |
| 2017 | 0.47 | 10.42 | 22.17 |
| 2018 | 0.39 | 9.13 | 23.41 |
| 2019 | 0.42 | 9.85 | 23.45 |
| 2020 | 0.38 | 9.21 | 24.24 |
| 2021 | 1.79 | 76.61 | 42.80 |
| 2022 | 0.44 | 24.60 | 55.91 |
| 2023 | 1.94 | 164.58 | 84.84 |
| 2024 | 1.89 | 181.14 | 95.84 |

备注：1.2013-2020 年数据为全国 8 个地方试点碳市场累计交易汇总值，2021-2024 年为全国碳排放权交易市场（CEA）核心数据，均不含自愿减排（CCER）交易数据。

2.年度均价=年度成交额/年度成交量，保留两位小数，四舍五入取整；2024 年数据截至当年底，来源为生态环境部及上海环境能源交易所公开信息。

3.2021 年全国碳市场仅运行 114 个交易日（7 月 16 日开市），成交量、成交额为当年实际交易数据，未折算全年规模。

H.2 中国核证自愿减排量（CCER）市场参考

中国核证自愿减排量（CCER）是国家认可的温室气体自愿减排量，可用于抵销重点排放单位的配额清缴，是碳市场的重要组成部分。CCER 重启后，其价格受供需关系、项目类型、地域、签发年份等因素影响。

历史数据（2015-2017 年）：首个 CCER 交易期，价格范围约为 10-30 元/吨 CO₂ e。

重启后市场（2023 年后）：随着市场机制完善和抵销需求释放，主流项目类型的

CCER 预期价格区间可参考同期全国碳市场配额(CEA)价格的一定比例(如 50%-90%),或根据上海、北京等地方试点碳市场的实际交易数据进行判断。评估时应密切关注国家碳市场主管部门发布的最新政策与市场行情。

注: CCER 价格具有多样性, 评估时应根据拟评估碳汇项目的类型, 尽可能选取同类型、同地域的 CCER 交易数据作为参考。

附录 I 辽宁省中心城市-沈阳碳汇价值核算案例(资料性附录)

I.1 案例定位与适用范围

I.1.1 定位

本案例以沈阳市四环区域为具体研究对象,将正文规定的碳汇要素界定标准、碳储量核算模型、碳汇价值计算逻辑落地为实操流程,直观展示温带城市空间碳汇及价值核算的全环节,为同类区域的碳汇评估提供参考范例。

I.1.2 适用范围

适用于温带半湿润大陆性气候下的综合型城市建成区及近郊区域,其他气候带或地貌类型区域需结合当地植被生长特性、土壤类型、建筑结构特点调整模型参数后参考使用。

I.2 基础数据

I.2.1 研究区概况

研究范围为沈阳市四环区域(地理坐标: $122^{\circ} 25' E \sim 123^{\circ} 48' E$, $41^{\circ} 11' N \sim 43^{\circ} 02' N$),总面积约 $1254 km^2$,属温带半湿润大陆性气候,年均气温 $6.2 \sim 9.7^{\circ}C$;依据沈阳市控规单元划分标准,将研究区划分为 203 个控规单元,覆盖城市建成区、近郊绿地、农业用地等典型地块。

I.2.2 核心数据来源与参数

I.2.2.1 遥感数据

- 1 数据来源:美国地质调查局 EarthExplore 网站下载的 Landsat 系列遥感影像;
- 2 时间跨度:2003 年、2008 年、2013 年、2018 年、2023 年(均选取 7—8 月植被生长季影像,数据覆盖稳定且完整);
- 3 分辨率: $30m \times 30m$;
- 4 处理方式:使用 ENVI5.6 软件完成辐射定标、大气校正、研究区影像裁剪,提取 NDVI(归一化植被指数)、RVI(比值植被指数)、MSAVI(修正土壤调整植被指数)、BI(亮度指数)等关键参数,用于构建碳储量回归模型;
- 5 数据用途:支撑植被地上碳储量、土壤有机碳储量的模型拟合与空间分布分析。

I.2.2.2 样地调查数据

采用分层抽样、空间分层抽样方法设置样地,覆盖自然碳汇与人工碳汇核心要素,具体信息见表 I.2.1。

表 I.2.1 样地调查信息表

| 碳汇类型 | 样地数量 | 调查内容 |
|------|--------------------------------------|--|
| 绿地植被 | 211 个($30m \times 30m$ 样方) | 每木调查(种类、株数、胸径、冠幅、株高) |
| 土壤 | 180 个($3km \times 3km$ 网格中心,含增设采样点) | 土壤芯采集(直径 $3.3cm$, $0 \sim 20cm$ 层混合)、环刀法测容重 /pH |

| | | |
|----|----------------|------------------------------|
| 建筑 | 255 个（按建筑类型分层） | 记录建筑数量、基底面积、高度、层数、结构、功能、建成年代 |
|----|----------------|------------------------------|

I.2.2.3 其他辅助数据

建筑基础参数：建筑高度、基底面积；

用地类型数据：基于遥感影像解译，结合地面实测验证确定。

I.3 核算步骤

I.3.1 城市空间复合碳汇要素界定

基于“碳固定能力稳定、碳积蓄周期长”双重标准，排除碳积蓄不稳定的要素（如农作物、季节性水体、碱性垃圾），最终确定核算范围：

自然碳汇：城市绿地植被、土壤；

人工碳汇：城市混凝土建筑。

I.3.2 碳储量核算模型

I.3.2.1 自然碳储量核算

1 植被地上碳储量（AGC）结合 Landsat 遥感参数与样地调查数据，构建逐步回归模型：

$$Y = -118.280 - 804.227X_1 + 115.531X_2 + 320.405X_3$$

式中：Y —— AGC（吨，t），

X_1 —— NDVI，

X_2 —— RVI，

X_3 —— MSAVI。

模型拟合度 $R^2=0.838$ ，核算范围：NDVI>0.2 的像元（排除农田）。

2 土壤有机碳储量（SOC）基于遥感参数与土壤样地数据，构建多元回归模型：

$$Y = 3.110 - 0.015X_1 + 0.0351X_2$$

式中：Y —— SOC（吨，t），

X_1 —— 亮度指数（BI），

X_2 —— RVI，

模型拟合度 $R^2=0.681$ ；精度验证通过 RMSE、MAE、MRE 检验，模型可信度高。

I.3.2.2 人工碳储量核算

人工碳储量模型参考附录 E：建筑碳储量核算模型。

I.3.3 碳汇价格确定

采用评价期前一年稳定的全国碳市场历史交易数据（2022 年），总交易额 162.08 亿元，交易量 46707 万 tCO₂e，平均价 34.70 元 /tCO₂e。

I.3.4 复合碳汇价值计算

模型见公式(7.3.1-1)

I.4 核算结果与分析

I.4.1 总体结果

2003—2023 年沈阳市四环区域复合碳汇价值（UCV）随核算方法不同呈现差异，总体呈增长趋势，具体见表 I.4.1。

表 I.4.1 2003-2023 年复合碳汇价值 (UCV) 对比

| UCV 区间 (亿元) | 2023 年 UCV (亿元) | 与 2003 年相比增幅 |
|-------------|-----------------|--------------|
| 6.23~8.33 | 8.33 | 33.71% |

I.4.2 分要素碳汇价值明细

表 I.4.2 研究区碳汇价值核算结果

| 年份 | 自然碳汇 | | | | 人工碳汇 | | 城市空间复合碳汇 | |
|------|-------------|--|-------------|---|-------------|---|-------------|---|
| | VCV (亿元) | 地均* VCV (元/公顷, 元/hm ²) | SCV (亿元) | 地均 SCV (元/公顷, 元/hm ²) | BCV (亿元) | 地均 BCV (元/公顷, 元/hm ²) | UCV (亿元) | 地均 UCV (元/公顷, 元/hm ²) |
| 2003 | 2.72 | 2 198.73 | 2.87 | 2 326.66 | 0.64 | 516.41 | 6.23 | 5 041.8 |
| 2008 | 3.07 | 2 489.49 | 2.97 | 2 401.91 | 1.05 | 853.64 | 7.09 | 5 745.04 |
| 2013 | 2.77 | 2 240.31 | 2.97 | 2 407.55 | 1.59 | 1 286.17 | 7.33 | 5 934.03 |
| 2018 | 3.14 | 2 540.31 | 2.72 | 2 205.43 | 2.05 | 1 661.85 | 7.91 | 6 407.59 |
| 2023 | 2.89 | 2 393.87 | 3.05 | 2 367.23 | 2.39 | 2 220.60 | 8.33 | 6 981.70 |

I.4.3 空间分布特征

2023 年研究区碳汇价值空间分异显著, 具体特征如下 (见图 I.4.1) :

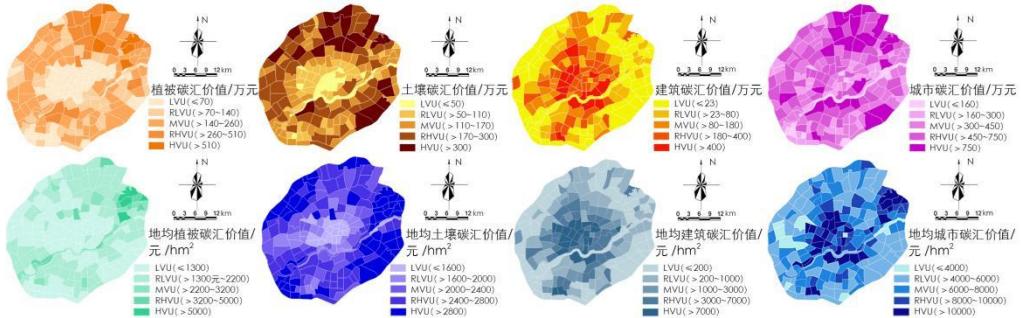


图 I.4.1 2023 年研究区不同要素碳汇价值空间分布