

团 体 标 准

T/S*****

城市空间复合碳储量及碳汇价值评价 技术规程

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

(公示稿)

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

辽宁省土木建筑学会 发布

前 言

本文件按照 GB/T1.1-2020《标准化工作导则 第1部分:标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。。

本文件由辽宁省土木建筑学会提出并归口。

本文件主要起草单位：

本文件参加起草单位：。

本文件主要起草人：

本文件发布实施后，任何单位和个人如有问题和意见建议，均可以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，根据实际情况依法进行评估及复审。

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储量核算与碳汇价值评价工作，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持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储量与碳汇价值评价技术体系，对于准确量化城市碳汇贡献、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储量核算与碳汇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碳汇家底，显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	1
3 术语和定义	2
3.1 碳汇 carbon sink	2
3.2 城市空间复合碳储量 composite carbon storage in urban space	2
3.3 自然碳汇空间 natural carbon sink space	2
3.4 人工碳汇空间 artificial carbon sink space	2
3.5 碳汇价值 carbon sink value	2
3.6 土壤有机碳储量 soil organic carbon pool	2
3.7 土壤有机碳密度 soil organic carbon density	2
4 总体原则	3
4.1 科学性原则	3
4.2 系统性原则	3
4.3 实用性原则	3
4.4 动态性原则	3
5 工作流程	4
6 城市复合碳储量核算	5
6.1 城市复合碳储量核算流程	5
6.2 城市碳汇要素分类与选取	5
6.3 基础数据调查与采集	6
6.4 碳储量核算方法选取	12
7 城市复合碳汇价值评价	17
7.1 城市复合碳汇价值评价流程	17
7.2 碳汇价值要素判断	17
7.3 碳汇价值评价模型	17
7.4 碳汇价格计算依据选取	18
附录 A: 常见树种异速生长方程参数表（规范性附录）	19
附录 B: 碳化速率系数（K）参考值（规范性附录）	20

附录 C：土壤有机碳测定方法对比表（资料性附录）21

附录 D：城市碳汇要素调查表示例（资料性附录）23

附录 E：碳汇价格计算方法与参考数据（资料性附录）27

附录 F：辽宁省典型城市——沈阳碳汇价值核算案例（资料性附录） 29

Contents

1 Scope	1
2 Normative References	1
3 Terms and Definitions	2
3.1 Carbon sink	2
3.2 Composite carbon storage in urban space	2
3.3 Natural carbon sink space	2
3.4 Artificial carbon sink space	2
3.5 Carbon sink value)	2
3.6 Soil organic carbon pool	2
3.7 Soil organic carbon density	2
4 General Principles	3
4.1 Scientific Principle	3
4.2 Systematic Principle	3
4.3 Practical Principle	3
4.4 Dynamic Principle	3
5 Workflow	4
6 Urban Composite Carbon Storage Accounting	5
6.1 Urban Composite Carbon Storage Accounting Process	5
6.2 Urban Carbon Sink Element Classification and Selection	5
6.3 Basic Data Investigation and Collection	6
6.4 Carbon Storage Accounting Method Selection	12
7 Urban Composite Carbon Sink Value Assessment	17
7.1 Urban Composite Carbon Sink Value Assessment Process	17
7.2 Carbon Sink Value Element Determination	17
7.3 Carbon Sink Value Assessment Model	17
7.4 Basis for Carbon Sink Price Calculation	18
Appendix A: Parameter Table for Allometric Growth Equations of Common Tree Species (Normative Appendix)	19

Appendix B: Reference Values for Carbonation Rate Coefficient (K) (Normative Appendix).....	20
Appendix C: Comparison Table of Soil Organic Carbon Measurement Methods (Informative Appendix).....	21
Appendix D: Example Survey Forms for Urban Carbon Sink Elements (Informative Appendix).....	23
Appendix E: Carbon Sink Price Calculation Methods and Reference Data (Informative Appendix).....	27
Appendix F: Carbon Sink Value Accounting Case Study for a Typical City in Liaoning Province—Shenyang (Informative Appendix).....	29

1 范围

本文件规定了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—2016 团体标准化 第1部分:良好行为指南

GB/T 43648-2024 主要树种立木生物量模型与碳计量参数

LY/T 3253-2021 林业碳汇计量监测术语

LY/T 2988-2018 森林生态系统碳储量计量指南

LY/T 3330—2022 森林土壤碳储量调查技术规程

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

NY/T 4606-2025 土壤中总碳和有机质的测定元素分析仪法

HJ 501-2009 水质 总有机碳的测定 燃烧氧化—非分散红外吸收法

DB21/T 4051—2024 土壤碳储量调查与核算方法

3 术语和定义

3.1 碳汇 carbon sink

通过自然或人工过程吸收、储存大气中二氧化碳的生态系统或工程设施。

（LY/T 3253-2021《林业碳汇计量监测术语》）

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

城市区域内植被、土壤、水体及人工设施（如绿色建筑、透水铺装）等不同介质中碳储量的总和。（参考 IPCC《国家温室气体清单指南》）

3.3 自然碳汇空间 natural carbon sink space

城市建成区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。

3.4 人工碳汇空间 artificial carbon sink space

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。

3.5 碳汇价值 carbon sink value

各类要素发挥其碳汇功能的货币价值。（参考 T/LNSES 005-2022《辽宁省生态产品总值（GEP）核算技术规范》）

3.6 土壤有机碳储量 soil organic carbon pool

在特定面积和深度土体中有机碳总量。（参考 LY/T 3330—2022，3.2）

3.7 土壤有机碳密度 soil organic carbon density

单位面积指定深度土层的土壤有机碳的储量。（来源：LY/T 3330—2022，3.3）

4 总体原则

4.1 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。

4.2 系统性原则

应统筹城市建成区与非建成区的碳汇功能关联性,应构建复合碳汇评价指标体系,兼顾碳汇与生态功能的协同增效,应覆盖规划、设计、建设、运营全周期管理。

4.3 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

4.4 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、气候变化等影响。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 1。

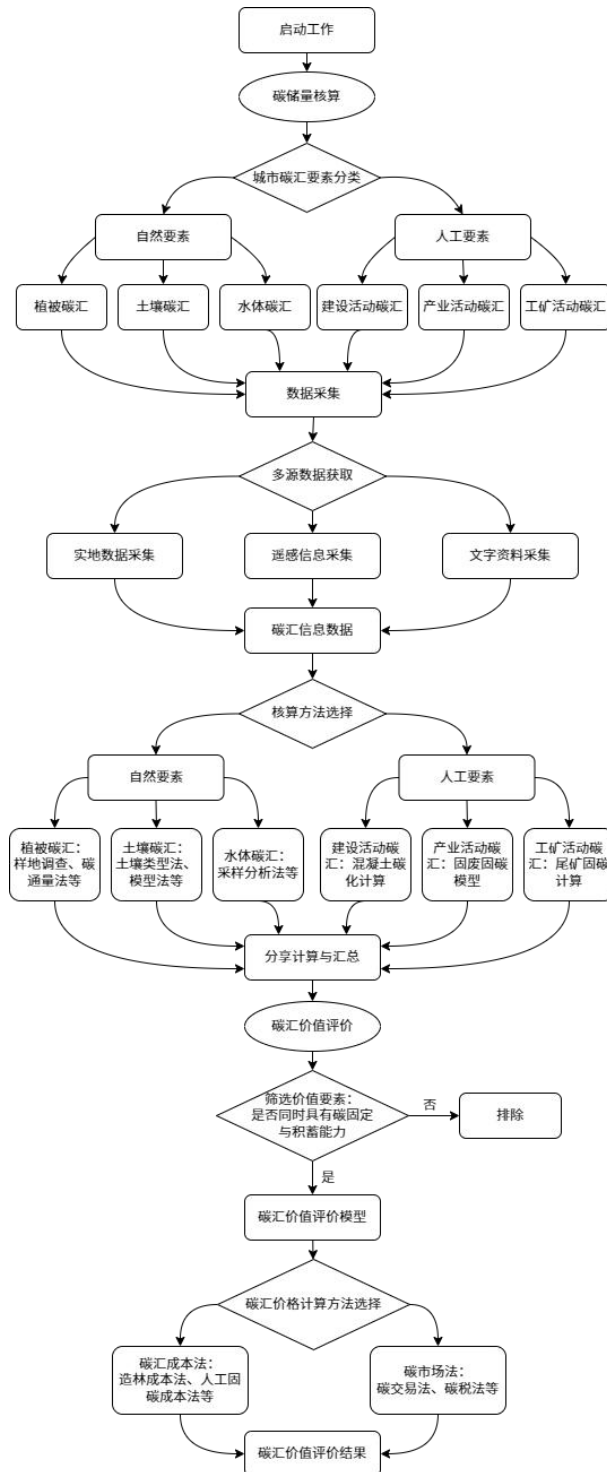


图 1 城市空间复合碳储量核算及碳汇价值评价基本流程

6 城市复合碳储量核算

6.1 城市复合碳储量核算流程

6.1.1 碳汇要素分类：将城市碳汇要素分为两大类：自然要素与人工要素，根据城市特征筛选合适的要素进行计算。

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、遥感信息采集、文字资料采集等。最终整合为统一的碳汇信息数据库。

6.1.3 核算方法选择：根据要素类型匹配具体核算方法。

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，形成城市碳储量总报告。

6.2 城市碳汇要素分类与选取

6.2.1 城市生态系统碳库

表 6.2.1 城市生态系统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、垂直森林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	碱性废石、硅酸盐尾矿、碱性尾矿
	工业碳库	碳捕捉与封存技术、工业副产品

6.2.2 城市碳汇要素选取与分类

不同城市依功能、典型性选取要素，用于精准评价。

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：建构筑物、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：建构筑物、混凝土基础设施、尾矿库。	自然要素：植被、土壤、内陆水系； 人工要素：建构筑物、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：混凝土构筑物、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：混凝土构筑物、混凝土基础设施、尾矿库。	自然要素：植被、土壤、内陆水系、滨海湿地； 人工要素：建构筑物、混凝土基础设施
---	------	---	---	--

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、常驻性碱性垃圾等。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 遥感数据收集与预处理（参考 HJ 1166—2021 全国生态状况调查评估技术规范——生态系统遥感解译与野外核查）

a) 收集获取待解译区域的多源遥感影像数据，自然要素分辨率不大于 30 m，人工要素分辨率不大于 1m。

b) 通过对获取的遥感数据进行辐射校正、几何精校正、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。

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（GB/T30363—2013《森林植被状况监测技术规范》）

(1) 标准地调查:对每个图斑或者每一类图斑,分别乔木层、灌木层和草本层设置标准地,进行生物量和碳储量调查。

a) 乔木调查:记载优势树种(组)、起源、龄组等属性因子。其中,胸径 $\geq 5\text{cm}$ 的乔木,应调查每株林木的树种、胸径、树高和冠幅等;胸径 $< 5\text{cm}$ 、树高 $\geq 2\text{m}$ 的乔木,应调查树种名称、树高和胸径;树高 $< 2\text{m}$ 的乔木,应调查主要树种名称、株数、平均高和平均地径。

b) 灌木和草本调查:记载起源、灌木建群种和草本建群种等属性因子,测量灌木盖度、平均高、平均地径、株数,以及草本盖度和平均高。

c) 植被生物量:乔木、灌木和草本的地上生物量与地下生物量之和:

乔木(不含树高 $< 2\text{m}$ 的乔木)的地上生物量,根据每木调查结果,按各自的立木

生物量模型进行计算;

树高<2m 的乔木、灌木和草本的地上生物量,根据样方调查结果,分别类型按各自的生物量模型进行计算;

地下生物量由根茎比模型与地上生物量的估计值或地下生物量模型进行计算。

d) 绿地植被碳储量:各绿地植被类型面积与各自单位面积的碳储量之积。

各绿地植被类型单位面积碳储量,由各类型中乔木、灌木和草本的单位面积生物量乘以各自的含碳系数进行计算。

(2) 抽样调查:在研究区域范围内,按照系统抽样精度要求设置样地,对乔木、灌木和草本生物量和碳储量进行调查。

6.3.2.2 土壤调查与采样 (HJ/T 166-2004《土壤环境监测技术规范》)

(1) 样方设置

a) 简单随机

将监测单元分成网格,每个网格编上号码,决定采样点样品数后,随机抽取规定的样品数的样品,其样本号码对应的网格号,即为采样点。随机数的获得可以利用掷骰子、抽签、查随机数表的方法。关于随机数骰子的使用方法可见 GB 10111《利用随机数骰子进行随机抽样的办法》。简单随机布点是一种完全不带主观限制条件的布点方法。

b) 分块随机

根据收集的资料,如果监测区域内的土壤有明显的几种类型,则可将区域分成几块,每块内污染物较均匀,块间的差异较明显。将每块作为一个监测单元,在每个监测单元内再随机布点。在正确分块的前提下,分块布点的代表性比简单随机布点好,如果分块不正确,分块布点的效果可能会适得其反。

c) 系统随机

将监测区域分成面积相等的几部分(网格划分),每网格内布设一采样点,这种布点称为系统随机布点。如果区域内土壤污染物含量变化较大,系统随机布点比简单随机布点所采样品的代表性要好。

(2) 样点数量

土壤监测的布点数量要满足样本容量的基本要求,即上述由均方差和绝对偏

差、变异系数和相对偏差计算样品数是样品数的下限数值，实际工作中土壤布点数量还要根据调查目的、调查精度和调查区域环境状况等因素确定。一般要求每个监测单元最少设 3 个点。

(3) 样品采集

样品采集一般按 3 个阶段进行。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，用于初步验证污染物空间分异性和判断土壤污染程度，为制定监测方案(选择布点方式和确定监测项目及样品数量)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。

面积较小的土壤污染调查和突发性土壤污染事故调查可直接采样。

(4) 参数测定

a) 土壤 pH 值测定

测定方法依据 NY/T 1121.2-2006 执行。

b) 土壤容重的测定

土壤湿容重的测定，采用环刀法测定样品湿容重，现场测定原状样品的质量，样品湿容重应按下式计算：

$$\rho_0 = m_0 / V \quad (6.3.2-1)$$

式中：

ρ_0 ——样品的湿容重，单位为克每立方厘米(g/cm³)；

M_0 ——样品质量，单位为克(g)；

V ——环刀体积，单位为立方厘米(cm³)。

土壤干容重的测定，将样品密封转运至实验室测量含水率，计算样品干容重，样品干容重应按下式计算：

$$\rho_d = \rho_0 / (1 + 0.01\omega_0) \quad (6.3.2-2)$$

式中：

ρ_d ——样品的干容重，单位为克每立方厘米(g/cm³)；

ω_0 ——含水率，单位为(%)。

c) 土壤有机碳含量的测定

土壤有机碳采用重铬酸钾--外加热法进行测定。测定方法依据 HJ615-2011 执行。

d) 土壤砾石含量的测定

将各层次风干的土壤样品依次放入塑料或金属容器内，向容器内注入水，没过样品，搅拌土体，使得砾石和土壤分离，待砾石沉至容器底部后，倒掉泥水，如此反复至土和砾石彻底分离，用干毛巾或吸水纸吸干表面水分，用 2mm 筛网将砾石直径>2mm 的石砾筛选出来。石体积可用量筒采用排水法测得。

6.3.2.3 水体与海岸带调查与采样（参考 DB44_T+2607.1-2025《滨海蓝碳碳汇能力调查与核算技术指南 第 1 部分：通则》）

（1）样方设置

常用的样方设置方法有以下三种，样线取样法、随机取样法、基于概率的栅格取样法。样线取样法：当样方特征随着距离某一特定地点（如河流、海岸或潮沟）的远近而呈现规律性变化时，宜采用此方法；不能依据样方之间的距离进行随机取样时，也可采用该方法。这一方法获得的样方不一定能真实反映生态系统的异质性。随机取样法：在每个分区中随机选择样方，以捕获不同分区之间和各小区内真实异质性。基于概率的栅格取样法：使用正方形或六边形的栅格覆盖被定义的小区，从每一个栅格内随机选取一个点作为样方。这既保证了取样的随机性，又使取样的位置平均分布到整个小区中。

（2）样方数量

异质性较高的区域会增加碳汇核算的不确定性。在理想状态下，应预先评估研究地点现存的碳储量和测量方法带来的误差。若资源（预算和时间）允许，首次测量宜增加样方数量，后续的测量可利用这些原始数据调整样方数量。

（3）调查时间与频次

测定频率应考虑当地法规、管理或资金的需求，资源的可用性；也取决于被测定的碳库。对于生物量碳的测定，宜每年在地上生物量达到峰值的时候（例如每年 8 月-9 月）进行测量；重复测定宜在每年的同一时间进行。

（4）植被碳储量野外监测方法

参考 6.3.2.1。

(5) 土壤碳储量野外监测方法

参考 6.3.2.2.

(6) 有机碳沉积速率监测方法

a) 土柱采集深度：土壤碳汇评估的采集标准深度宜为 100 cm。

b) 土柱采集步骤：去除采样土壤表面凋落物层和活体组织。

稳稳地将土壤碳汇采样器垂直插入土壤中，直至采样器的顶部与土壤表面齐平。采样器插进土壤时应稳而慢（可轻敲锤子），采样器尽量不挤压土壤。遇见大的根系或者珊瑚礁碎片，采样器无法深入时，避免蛮力推压，应另选一个位置采样或者更换采样工具切断阻碍物。

到达所需深度后，扭转采样器将残留的细根切断，顶部端口密封（真空可以防止样品丢失）。然后缓慢拔出采样器，拔出同时注意不要踩踏采样位置，取 0 cm~50 cm 土壤样品。

分割完 0 cm~50 cm 样品后，打开采样器泥斗，在原位插入采样器至泥斗与土壤表面齐平。旋转闭合泥斗，取出采样器，打开并清理泥斗内采集的土壤（去除 0 cm~50 cm 的土壤淤积）。

再次在同样位置插入采样器，直至采样器的顶部与土壤表面齐平。采样器插进土壤时应稳而慢（轻敲锤子），采样器尽量不挤压土壤。遇见大的根系或者珊瑚礁碎片，采样器无法深入时，不宜用蛮力推压，应更换采样工具切断阻碍物。

到达所需深度后，扭转采样器将残留的细根切断，闭合泥斗（防止样品流失）。然后缓慢拔出采样器，取得 50 cm~100 cm 土壤样品。

c) 土柱分层取样：在进行土壤碳汇采样时，对土壤取样采用高密度集的采样技术，深度范围为 0 cm~100 cm。将其细分为 0 cm~30 cm 范围内，每 2 cm 取一个样品；在 30 cm~100 cm 范围内，每 10 cm 取一个样品，共 22 个样品。采集样品时，样品应当单独放置在有编号的塑料容器或袋子中，记录包括采样地点、样方编号、土柱识别号、土壤深度、日期、采样装置及其他相关信息。

6.3.2.4 建筑与构筑物调查与采样

(1) 样方设置

城市建筑与构筑物样本的抽取应采用按比例分层抽样方法，确保样本覆盖不同类型、区位、功能的建筑单元，真实反映城市空间结构特征，可根据城市空间

特征按建筑主要功能、空间区位或建造年代划分。避免样本在空间上聚集，需保证空间均匀性。

（2）数据记录

详细记录基础地块属性、建筑核心指标、空间形态指标、时间维度指标，构筑物独立记录。基础地块属性包括：地块编码、地块性质、地块面积。建筑核心指标包括建筑数量、建筑基底总面积、建筑总建筑面积、建筑容量等。空间形态指标包括建筑平均层数、建筑平均高度、建筑总外轮廓周长。时间维度指标包括建筑平均建成时间。桥梁、管廊等构筑物按线性构筑物表单独填报。

（3）碳化速率测定

根据 GB/T 50082-2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》对不同类型混凝土进行碳化试验，过程包括：

a) 试件处理：

标准试件尺寸为 100mm×100mm×400mm 棱柱体，测试面为浇筑侧面，养护至 28 天后，60±5℃烘 48h 至含水率≤6%。

b) 碳化箱参数：

碳化箱中输入 CO₂浓度保证 20.0±0.5%，温度保持在 20.0±0.5℃，相对湿度保持在 70±2%。

c) 碳化深度测量

采用数字剖面扫描法，将劈裂试件喷 1%酚酞乙醇溶液；使用 0.01mm 精度扫描仪记录变色界面；沿深度方向每 10mm 取 1 点测量，取均值。

d) 碳化速率系数计算

碳化速率系数计算式如下：

$$K=1/n \sum_{i=1}^n (d_i \times \sqrt{t_i}) \quad (6.3.2-3)$$

式中：

K——碳化速率系数；

d_i——第 i 个时间点碳化深度（mm）；

t_i——碳化天数（d）

6.3.2.5 工业废弃物与尾矿库调查与采样

（1）目标识别

筛选碳汇潜力区，重点调查钢厂渣场、电厂粉煤灰库、铝厂赤泥坝、金属矿尾矿库；利用高光谱遥感圈定高活性区域。收集堆存年限、废弃物化学组分、年新增量等历史资料。

（2）采样点布设规则

分层网格法：按堆体深度分三层：表层（0-20cm）、过渡层（50-80cm）、深层（>150cm）；每层按 50m×50m 网格布点，活性区加密至 25m×25m。

（3）样品采集方法

固体样品：用碳钢钻筒（避免污染）取 1kg 原状样，密封于铝箔袋；

原位 pH/电导率测定：插入式探头读数（精度±0.1）。

渗滤液样品：0.45μm 滤膜过滤，加 HgCl₂抑制微生物，4℃避光保存。

（4）采样深度校正因子

对深层样品引入碳酸盐化衰减系数：

$$C_{adj}=C_m \times e^{-k \times d} \quad (6.3.2-4)$$

式中：

C_{adj} ——碳酸盐化衰减系数；

C_m ——实测碳酸盐含量（%）；

d ——采样深度（m）；

k ——衰减常数（钢渣：0.15/m；尾矿：0.08/m）。

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

植被碳储量计算公式为：

$$C=B \times CF \quad (6.4.1-1)$$

式中：

C ——碳储量（t）；

B ——生物量（t）；

CF ——含碳率（%）。

其中单木生物量计算可以使用异速生长方程法：

$$B_{\text{单木}} = a \times D^b \times H^c \quad (6.4.1-2)$$

式中：

$B_{\text{单木}}$ ——单木生物量；

D ——胸径；

H ——树高；

a 、 b 、 c ——树种特定参数，常见树木的异速生长方程见附录。

6.4.2 土壤碳储量核算方法（DB21/T 4051.1—2024）

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：

$$D_{\text{soc}} = \sum_{i=1}^n C_i \times D_i \times H_i \times (1 - G_i) \times 10 \quad (6.4.2-1)$$

式中：

D_{soc} ——土壤有机碳密度，单位为吨每公顷（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（g/kg）；

D_i ——容重，单位为克每立方厘米（g/cm³）；

H_i ——土层厚度，单位为厘米（cm）；

G_i ——直径大于 2mm 砾石含量所占体积百分比（%）。

该生态系统土壤碳储量为：

$$C_{\text{SOC}} = D_{\text{soc}} \times A \quad (6.4.2-2)$$

式中：

C_{SOC} ——土壤有机碳储量（t）

A ——该生态系统面积（hm²）

6.4.3 水体与海岸带碳储量计算方法（参考 DB44/T 2607.1-2025《滨海蓝碳碳汇能力调查与核算技术指南 第1部分：通则》）

水体碳汇主要存在于水生植物、水体有机碳、水体沉积物有机碳，滨海蓝碳的主要类型包括红树林、滨海盐沼、海草床，主要碳库类型土壤碳库和植被碳库。水体有机碳浓度一般通过采样获得，利用元素分析仪测定。水生植物与水体沉积物使用植被与土壤碳储量计算方法。具体步骤可参照 DB44/T 2607.1-2025。

6.4.4 人工碳储量计算方法

人工碳储量计算方法可以分为建设活动碳汇、产业活动碳汇和工矿活动碳汇。

6.4.4.1 建设活动碳汇

主要指建设过程中混凝土吸收二氧化碳的过程，混凝土建筑的全生命周期包含 4 个阶段：建设阶段-使用阶段-拆除阶段-二次使用阶段，建筑在其生命周期内，混凝土的碳汇大多集中于建筑的使用阶段，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 SPSS、MATLAB 等软件分别对各类建筑进行建筑碳汇量计算的构建。建设使用阶段混凝土碳汇量计算过程包括：

(1)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。

(2)计算碳化深度。根据菲克第二定律，碳化深度计算公式如下：

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

式中：

d——碳化深度；

K——碳化速率系数；

t——建筑结构的设计使用年限。

(3)计算暴露面积。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 ）。

(4)计算混凝土体积。根据碳化深度与表露面积计算混凝土碳化体积（V），公式如下：

$$V=\sum A_1 d+A_2 d+\dots+A_i d \quad (6.4.4-2)$$

(5)计算单位体积碳汇量。单位体积内碳化的混凝土吸收量计算公式如下：

$$Q_{CO_2}=C \cdot V_{CaO} \cdot M_{CO_2} / M_{CaO} \quad (6.4.4-3)$$

式中：

Q_{CO_2} ——CO₂ 吸收量；

C——单位体积内水泥熟料用量；

V_{CaO} ——水泥熟料中 CaO 的体积分数；

M_{CO_2} 、 M_{CaO} ——CO₂ 和 CaO 的相对分子质量。

拆除与二次使用阶段的混凝土碳汇量计算方法与建设使用阶段一致，但暴露面积则需要根据拆除与二次利用方式进行具体分析。

6.4.4.2 产业活动碳汇

产业活动碳汇是指城市工业生产过程产生的碱性固体废弃物固碳的过程，其计算步骤为确定碱性固废量、碱性固废处理方式确定、碱性固废量计算。碱性固废产生量计算方法为：

$$M_{Si}=m_{Si} \cdot r_{Si} \quad (6.4.4-4)$$

式中：

M_{Si} ——i 年产生的不同碱性固废量；

m_{Si} ——i 年生产原料量；

r_{Si} ——碱性固废产生率。

碳化程度可以通过热重试验获取，碱性固废 CO_2 吸收率 (ω_{CO_2}) 计算方法为：

$$\omega_{CO_2}=\Delta m_{CaCO_3}/m_0 \cdot 100\% \quad (6.4.4-5)$$

式中：

Δm_{CaCO_3} ——碳酸盐分解重量损失分数；

m_0 ——高炉渣的起始重量。

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：

$$C_1=M_{Si} \cdot (1-f_1) \cdot \Delta R_{Si} \cdot \varepsilon_s \quad (6.4.4-6)$$

$$C_2=M_{Si} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \Delta R_{Si} \cdot \varepsilon_s \quad (6.4.4-7)$$

式中：

C_1 ——垃圾填埋碱性固废固碳量；

C_2 ——回填处理碱性固废固碳量；

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} ——固碳速率；

ε_s ——碳化因子。

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；

6.4.4.3 工矿活动碳汇

尾矿中 CaO、MgO、Na₂O、K₂O、SO₃ 等化合物具有固碳功能，其固碳能力的计算方式可以借用碱性固废固碳能力计算方法：

$$C_i = M_{ti} \cdot \omega_i = M_{ti} \cdot t_i \cdot \delta_i \quad (6.4.4-8)$$

式中：

C_i——第 i 种尾矿固碳量；

M_{ti}——第 i 种尾矿砂的堆存量；

t_i——第 i 种尾矿砂 CO₂ 的理论单位固定量；

δ_i——第 i 种尾矿的碳转化率。

7 城市复合碳汇价值评价

7.1 城市复合碳汇价值评价流程

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碳积蓄能力，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，碳汇成本法包括：造林成本法、人工固碳成本法等。碳市场法包括：碳交易法、碳税法等。

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

并非所有的城市碳汇要素都具有碳汇价值，在分析城市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；城市空间碳汇要素的碳蓄积能力，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。

表 7.2.1 城市复合碳汇价值组成

城市碳汇要素		碳固定能力	碳蓄积能力	城市复合碳汇价值组成
自然要素	城市植被	光合作用	稳定-枝干根系	城市植被碳汇价值 城市土壤碳汇价值 城市建构筑物碳汇价值
	城市农作物	光合作用	不稳定-收割	
	城市土壤	微生物	稳定-重要碳库	
	城市海岸带与水系	水生植物 沉积物与土壤 溶解碳 自养微生物	部分水生植物及沉积物、土壤较为稳定；溶解碳和自养微生物在水体中并不稳定，且为	
人工要素	城市建构筑物	碳化反应	稳定-运行期长	
	工业碱性垃圾	碳化、水化反应	不稳定-垃圾处理	
	采矿尾矿	碳化、水化反应	不稳定-暂存性	

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/tCO₂);

S_i ——第 i 种要素总碳积蓄量, 即该要素的碳储量;

44/12——碳转换为二氧化碳的系数。

7.4 碳汇价格计算依据选取

目前在碳汇的经济价值方面, 学界以不同角度形成了以成本出发和以市场出发两类碳汇价格计算方法。

7.4.1 市场价值法

碳交易机制的核心在于通过市场化手段配置碳排放权(配额)。该机制形成的交易价格具有公开透明性、真实反映供需关系、且为最佳可得基准等特征, 因此可直接作为市场价值法的估值基准。当采用碳交易市场价格作为市场价值法的估值基准时, 应注意时间匹配性、流动性优先、加权计算要求。优先选取与评估期时间窗口匹配的市场交易数据。价格数据来源需基于连续、活跃、透明的交易市场, 排除异常波动及低流动性时段。采用时间加权平均价格, 计算周期不宜超过 6 个月, 按每日成交量加权处理。

7.4.2 造林成本价值法

造林成本价值法反映了非城市土地经营者的最低期望收益价值。然而, 城市空间土地决策涉及因素复杂、成本高昂, 因此该方法通常不适用于城市区域的碳汇价值评估。例外情况存在于城市边缘地带大面积分布的森林生态系统。此类森林虽受显著人工干预, 但仍以自然生态过程为主导。在与自然生态系统进行价值比较时, 可适用造林成本价值法进行评价。

附录 A：常见树种异速生长方程参数表（规范性附录）

树种	叶生物量	枝生物量	干生物量	总地上生物量
蒙古栎	$W_L=0.529D^{0.920}$	$W_{BS}=0.021 (D^2H)^{0.715}$		$W_T=2.155D^{1.152}$
色木槭	$W_L=0.052H^{0.998}$	$W_{BS}=0.005D^{0.959}H^{1.299}$		$W_T=0.007H^{1.729}$
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	$W_L=14.646C^{1.164}$	$W_B=26.332 (CH)^{0.666}$		

注：式中 C 表示冠幅，D 表示基径，H 表示树高，

附录 B：碳化速率系数（K）参考值（规范性附录）

混凝土强度等级	水胶比（参考）	环境条件	K 值范围 (mm/d ^{1/2})
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<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
≥ C60	< 0.40	各类环境	0.026~0.131

附录 C：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
方法原理	在加热条件下，用过量的重铬酸钾-硫酸溶液氧化土壤有机碳，剩余的重铬酸钾用硫酸亚铁标准溶液滴定，根据消耗的重铬酸钾量计算有机碳含量。	样品在高温富氧条件下燃烧，有机碳转化为二氧化碳，被装有氢氧化钠溶液的吸收瓶吸收，用钡盐沉淀过量碱后，以盐酸标准溶液滴定剩余的碱，计算有机碳含量。	样品在富氧条件下高温燃烧，有机碳转化为二氧化碳，由载气携带流经水分吸收剂和卤素吸收剂后，进入非分散红外检测器(NDIR)进行浓度测定。
不适用土壤类型	不适用于氯离子(Cl ⁻)含量大于 2.0×10 ⁴ 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%。
精密度与准确度	精密度尚可，但操作步骤繁多，人为误差（如滴定终点判断）可能影响准确度。	高精度、高准确度。自动化进样和检测减少了人为误差，具有良好的重复性和再现性。	精密度和准确度较高，但操作步骤比 HJ 658 繁琐，存在滴定误差风险。
分析效率	低。样品前处理（研磨、称量、消解）和滴定过程耗时较长，批量分析能力弱。	中。燃烧过程快，但后续的吸收和滴定步骤耗时，效率低于 HJ 695-2014。	高。自动化程度高，单个样品分析时间短（通常几分钟），适合大批量样品快速分析。

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
成本	初始成本低。主要仪器为分光光度计或常规滴定装置，设备投入小。但试剂消耗和人力成本相对高。	初始成本中。需要管式炉等燃烧装置和滴定设备，成本介于二者之间。试剂和人力成本中等。	初始成本高。需要专用的总有机碳（TOC）分析仪或元素分析仪，设备昂贵。运行成本低，人力投入少。
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。	主要干扰：无机碳酸盐。	主要干扰：无机碳酸盐（在测定总碳时）、水分、卤素。
	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。	消除：测定前需用酸处理样品以去除无机碳。	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。	特点：经典的干烧法，准确可靠，是 HJ 695 之前的重要方法。	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：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。	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	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。

本附录对比了城市碳汇能力评估中常用的三种土壤有机碳测定标准方法。这些方法在原理、适用范围、精度和成本上存在差异。用户应根据检测目的、土壤特性、实验室条件及数据质量要求选择最适宜的方法。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 D：城市碳汇要素调查表示例（资料性附录）

D.1：植物采样记录单

采样人：	1	时间：	地点	
地块坐标：	A		B	
	C		D	
乔木（M）：	株 种类：	高	胸径	树冠半径
灌木（B）：	株 种类：	高		树冠半径
草地/作物	面积： 种类：			
备注：				

D.2: 土壤采样记录单

采样人

编号	经度	纬度	地理位置	采样时间

D.3: 土壤实验记录单

序号	土样编号	称取重量 (g)	吸光度值	备注
1	XXX-1			
2	-2			
3	-3			
4	-1			
5	-2			
6	-3			
7	-1			
8	-2			
9	-3			
10	-1			
11	-2			
12	-3			
13	-1			
14	-2			
15	-3			
16	-1			
17	-2			
18	-3			
19	-1			
20	-2			
21	-3			
22	-1			
23	-2			
24	-3			
25	-1			
26	-2			
27	-3			

D.4: 建筑采样记录单

地 块 编号	地 块 性质	地 块 面 积 (hm ²)	建 筑 数 量	建 筑 平 均 高 度	平 均 建 成 时 间 (年)	平 均 层 数	建 筑 总 周 长 (m)	建 筑 基 地 面 积 (m ²)	建 筑 容 量 (m ³)	建 筑 总 面 积 (m ²)
-----------	-----------	-------------------------------------	------------	-------------------	--------------------------	------------	------------------------	--	---------------------------------	--------------------------------------

附录 E：碳汇价格计算方法与参考数据（资料性附录）

E.1 基于造林成本法的碳汇价格

森林碳汇成本模型最早由 Benitez 等提出，该模型通过综合考虑林地净现值、木材价格、林业收益率和放弃农业生产的土地机会成本等多个因素，探讨土地最终是适合造林固碳抑或是农业生产。根据理性经济人的基本假设，营林主体会选择收益更高的方案进行经营，也就意味着只有当该地区碳汇市场的碳交易价格足够高，即碳汇收益大于农业生产收益时，营林主体才会进行造林固碳。因此，本文假定营林主体能够自由地决定其土地的经营方式，不受政策等因素的限制，同时也假定其经营决策仅限于农业生产与固碳造林两种选择。

利用碳汇成本模型，综合考虑杉木轮伐期、贴现率、立地条件、木材价格、土地净现值及土地机会成本等固碳成本的影响因素，基于裸地造林的前提假设，从理性经济人假设出发，计算固碳造林替代农业生产的最低碳价格，具体推导公式如下：

$$NPV_f = NPV_t + NPV_c = \frac{\delta Q(t)e^{-rt}P_t - C + \int_0^t \alpha P_c Q(t)e^{-rt}dt - P_c \alpha (1-\beta)Q(t)e^{-rt}}{1-e^{-rt}} \quad (E1.1)$$

式中：NPV_f为该土地用于固碳造林的永久净现值；NPV_t为木材收益净现值；NPV_c为碳汇收益净现值； δ 为木材蓄积与材积的转换比例，根据营林主体经验与相关研究，一般为 70%； t 是林木的轮伐期； $Q(t)$ 为第 t 年林木蓄积量； P_t 为木材价格； C 是营林成本的贴现值，包括造林成本、管护成本以及采运成本； r 为连续贴现率，国家规定的营林业基准收益率设定为 8%； α 为碳转换系数，当 $\alpha=0$ 时，说明林木中的碳在采运时就通过燃烧等方式全部进入了大气中；当 $\alpha=1$ 时，说明木材固定的碳全部长期地贮存在了木制品中，并没有通过燃烧、腐烂等方式释放到大气中； P_c 是碳汇价格， β 是历年来未腐烂且固定下来的木材所占的比重。

农业收益净现值计算公式为：

$$NPV_a = a_i \sum_{t=1}^{\infty} (1+r)^{t-1} = \frac{a_i}{r} \quad (E1.2)$$

式中：NPV_a表示该土地用于农业生产的永久净现值； a_i 为单位面积农地每年的生产净收益现值，本文假定单位面积土地的年农业收益利润率与贴现率相等，即单位面积农地的永久收益净现值等于其每年的农业总产值。

当土地用于造林的永久净现值等于该土地用于农业生产活动的永久净现值，即 $NPV_f = NPV_a$ 时，森林碳汇价格即固碳成本最低，碳汇成本（固碳成本）模型如下：

$$P_c = \frac{NPV_a(1-e^{-rt}) - [\delta Q(t)e^{-rt}P_t - C]}{\int_0^t \alpha Q(t)e^{-rt}dt - \alpha(1-\beta)Q(t)e^{-rt}} \quad (E1.3)$$

式（4.3）所得到的结果即为单位固碳的最低价格。值得注意的是，当前国际和国内的碳交易市场均以每吨二氧化碳的价格为计量单位，也就是说，1 吨碳等价于 3.67 吨二氧化碳，式（4.3）所得到的碳汇价格还要再除以 3.67 才能得到交易价格。

E.2 基于碳税法的碳汇价格

碳税一般被解释为对化石燃料碳含量或二氧化碳排放量征收的税种。在计税依据上有两种碳税实现方式：一是以燃料为依据的方式，即以化石燃料的消耗量（实践中为销售量等）作为计税依据，如每吨煤炭、每立方米天然气、每升汽油等。燃料燃烧是二氧化碳排放的主要方式，因而对二氧化碳排放的征收可间接转换为对化石燃料碳含量的征收。二是以排放为依据的方式，即直接以二氧化碳（或温室气体）排放量作为计税依据，如每吨二氧化碳（或二氧化碳当量）。目前征收碳税的国家中有 17 个国家采用以燃料为依据的方式，有 9 个国家采用以排放为依据的实现方式。

根据世界银行出版的《2023 年碳定价现状与趋势》，目前碳税最高的国家是乌拉圭

（160 美元/吨 CO₂），最低的是波兰（0.08 美元/吨 CO₂）。

当前我国运行中的碳定价机制仅有全国碳市场，碳税仍处于研究制定阶段，CCER 市场也还未重启。但我国自提出“双碳”战略以来，已于多份文件中提及推动碳税制度落地。2022 年 1 月 21 日，国家发改委等七部门联合印发《促进绿色消费实施方案》，提到“更好发挥税收对市场主体绿色低碳发展的促进作用”，再一次明确了国家通过财税工具，促进绿色低碳发展的工作思路。碳税制度作为法律约束性极强、政策约束力极高的碳减排机制，正式出台的进程加快。众多学者对我国最佳碳税税率进行了分析与研究，吕雁琴（2023）认为我国碳税初始税率可采用 12.26 元/吨 CO₂ 的标准，随着经济增长，经济社会承受力不断提高，税率应逐步向上调节 24.32 元/吨 CO₂。范允奇（2012）认为我国开征碳税时，不宜超过 15 元/吨 CO₂，最终碳税水平应该在 30 元/吨 CO₂ 以下。财政部建议，碳税在起步时，每吨二氧化碳排放征税 10 元，后续碳税的税率可提高到 40 元/吨 CO₂。环保部规划院课题组建议，每吨二氧化碳排放征税 20 元，后续可以提高到 50 元/吨 CO₂。本规程推荐取各项研究最终税率的平均值即 36 元/吨 CO₂ 作为碳税计价。

E.3 基于碳交易的碳汇价格

中国从 2011 年 10 月开始碳排放权交易探索，北京、天津、上海、重庆、湖北、广东、深圳七省市碳交易试点市场在 2013 年到 2014 年陆续启动，2016 年 12 月四川省和福建省也启动了试点工作，2017 年 12 月全国碳市场宣布启动。2021 年 7 月 16 日，全国碳排放权交易市场正式开启上线交易，全国碳市场建设采用“双城”模式，即：上海负责交易系统建设，湖北武汉负责登记结算系统建设。至此，我国长达七年的碳排放权交易市场试点工作终于迎来了统一。

根据碳交易网（<http://www.tanjiaoyi.com/>）数据全国碳市场建立以来，总交易额为 162.08 亿元，交易量为 46707 万吨 CO₂。平均单价为 34.70 元/吨 CO₂。2013 年是碳交易市场正式启动的第一年交易量较低，但单价较高。后续由于交易机制尚不健全，价格持续走低，近年来随着碳交易市场的不断完善，价格逐渐升高，到 2022 年达到 55.02 元/吨 CO₂，但仍远低于国际碳价格 61—122 美元/吨 CO₂，折合人民币 430-860 元/吨 CO₂。说明我国碳价格仍有较大的上升空间。

表 F.3.1 我国碳交易市场发展情况

碳交易	成交量（万吨）	成交额（亿元）	均价（元/吨）
2022	5089	28	55.02
2021	17900	76.61	42.80
2020	4340.09	12.67	29.19
2019	3081.28	9.49	30.80
2018	2780.45	7.59	27.30
2017	4900.31	7.68	15.67
2016	4345.22	7.93	18.25
2015	2660.12	7.02	26.39
2014	1578.59	4.89	30.98
2013	31.94	0.2	62.62

附录 F：辽宁省典型城市——沈阳碳汇价值核算案例（资料性附录）

F.1 基础数据

本案例以沈阳市四环区域为研究对象（122°25'E~123°48'E，41°11'N~43°02'N），总面积约 1254km²，属温带半湿润大陆性气候，年均气温 6.2~9.7℃。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，数据来源及核心信息如下：

F.1.1 遥感数据

数据来源：美国地质调查局 EarthExplore 网站下载的 Landsat 系列遥感影像；
时间跨度：2003 年、2008 年、2013 年、2018 年、2023 年（均为 7—8 月植被生长季，覆盖稳定且完整）；
分辨率：30m×30m；
处理方式：使用 ENVI5.6 软件完成辐射定标、大气校正、影像裁剪，提取 NDVI（归一化植被指数）、RVI（比值植被指数）等关键参数。

F.1.2 样地调查数据

通过分层抽样、空间分层抽样等方法，针对自然碳汇（植被、土壤）和人工碳汇（建筑）设置样地，核心信息如下：

表 F.1.2 样地信息情况

碳汇类型	样地数量	调查内容	关键指标
绿地植被	211 个（30m×30m 样方）	每木调查（种类、株数、胸径、冠幅、株高）	样地碳储量 0.08~2.33tC, 碳密度 0.08~2.58kg/m ²
土壤	180 个（3km×3km 网格中心，含增设采样点）	土壤芯采集（直径 3.3cm，0~20cm 层混合）、环刀法测容重 /pH	聚焦土壤有机碳（SOC）储量
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	覆盖 9812 座建筑，类型含住宅、工业、商业等 5 类

F.1.3 其他辅助数据

建筑高度 / 基底面积：百度地图截取（MapCatcher 软件处理）；
用地类型：遥感影像解译 + 地面实测验证；
农业数据：《沈阳市国民经济和社会发展统计公报》（种植业总产值、单位面积产值）；
成本/价格数据：《2023 年度全国苗木供需分析报告》（苗木成本）、碳交易网（全国碳市场平均价格 34.70 元 /tCO₂e）。

F.2 计算步骤

本案例围绕“碳汇要素界定→碳储量核算→碳汇价格确定→复合价值计算”四步开展，核心方法如下。

F.2.1 城市复合碳汇要素界定

基于碳固定能力与碳积蓄能力双重标准，排除碳积蓄不稳定的要素（农作物、水体、碱性垃圾），最终确定：自然碳汇：城市绿地植被（地上碳积蓄）、土壤（有机碳积蓄）；人工碳汇：城市混凝土建筑（碳化反应固碳，长期积蓄）。

F.2.2 碳储量核算模型

1.自然碳储量

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

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

其中，Y 为 AGC（t），X₁ 为 NDVI，X₂ 为 RVI，X₃ 为 MSAVI，模型拟合度 R²=0.838；核算范围：NDVI>0.2 的像元（排除农田）。

土壤有机碳储量（SOC）：基于遥感参数与土样数据，构建多元回归模型：

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

其中，Y 为 SOC（t），X₁ 为亮度指数（BI），X₂ 为 RVI，模型拟合度 R²=0.681；精度验证：通过 RMSE、MAE、MRE 检验，模型可信度高。

2.人工碳储量

按建筑功能分 5 类构建回归模型（自变量：建筑容量 X₁、建成时间 X₂（T^{1/2}），核心模型如下：

表 F.2.2 建筑碳储量回归模型

建筑类型	碳储量模型（单位：g）	拟合度 R ²
居住建筑	$Y_R=0.081X_1^{1.69}X_2$	0.76
工业建筑	$Y_M=(0.203X_1+86.707)X_2$	0.999
商业建筑	$Y_B=0.011X_1^{1.457}X_2$	0.901
公共服务建筑	$Y_A=0.008X_1^{1.456}X_2$	0.89
其他建筑	$Y_O=(0.291X_1+2.597)X_2$	0.995

E.2.3 碳汇价格确定

采用 3 类主流方法，覆盖成本端与市场端：

（1）造林成本法：基于土地农业 / 林业决策均衡，计算结果：2003—2023 年碳价从 33.41 元/tCO₂e 升至 104.12 元/tCO₂e。

（2）碳税法：取国内学者研究最终税率平均值，确定为 36 元/tCO₂e。

（3）碳交易法：基于全国碳市场历史数据，交易额 162.08 亿元，交易量 46707 万 tCO₂e，取平均价 34.70 元/tCO₂e。

E.2.4 复合碳汇价值计算

采用统一公式整合碳储量与价格：

$$V_c=P_c\sum_{i=1}^nS_i44/12$$

其中，V_c为复合碳汇价值（元），44/12 为 C→CO₂ 转换系数，P_c为碳汇价格（元/tCO₂e）， $\sum_{i=1}^nS_i$ 为第 i 类碳汇要素储量（t）。

F3 结果分析

F.3.1 总体碳汇价值规模

2003—2023 年沈阳市四环区域复合碳汇价值（UCV）呈现显著差异，具体范围如下：

表 F.3.1 2003-2023 年复合碳汇价值（UCV）对比

核算方法	UCV 区间（亿元）	2023 年 UCV（亿元）	与 2003 年相比增幅
造林成本法	5.99~25.00	25	317.36%
碳税法	6.46~8.64	8.64	33.75%
碳交易法	6.23~8.33	8.33	33.71%

F.3.2 时间变化特征

总量增速差异：

造林成本法：2003—2013 年快速增长（年均 1.22 亿元），2013—2018 年放缓（年均 0.90 亿元），2018—2023 年恢复（年均 1.28 亿元）；

碳税法 / 碳交易法：增速平稳，年均增长 0.05~0.18 亿元（反映碳储量实际增长）。

要素贡献演变（以碳税法为例）：

植被碳汇价值（VCV）：占比从 43.61% 降至 34.70%，年均增加 90.99 万元（波动变化）；

土壤碳汇价值（SCV）：占比从 46.15% 降至 36.62%，年均增加 91.87 万元（波动滞后于 VCV）；

建筑碳汇价值（BCV）：占比从 10.24% 升至 28.68%，年均增加 908.61 万元（持续快速增长，为 UCV 上升核心动力）。

表 F.3.1 研究区碳汇价值核算结果

评价方法	年份	自然碳汇				人工碳汇		城市复合碳汇	
		VCV/ 亿元	地均* VCV/ 元·hm ⁻²	SCV/ 亿元	地均 SCV/ 元·hm ⁻²	BCV/ 亿元	地均 BCV/ 元·hm ⁻²	UCV/ 亿元	地均 UCV/ 元·hm ⁻²
造林成本法	2003	2.61	2 116.99	2.77	2 240.16	0.61	497.22	5.99	4 854.37
	2008	4.86	3 937.98	4.69	3 799.44	1.67	1 350.32	11.22	9 087.74
	2013	6.85	5 549.12	7.36	5 963.36	3.93	3 185.77	18.15	14 698.25
	2018	7.37	5 971.55	6.40	5 184.35	4.82	3 906.55	18.60	15 062.45
	2023	8.67	7 182.99	9.15	7 103.06	7.17	6 663.08	25.00	20 949.13
碳税法	2003	2.82	2 281.11	2.98	2 413.82	0.66	5 35.76	6.46	5 230.69
	2008	3.19	2 582.75	3.08	2 491.89	1.09	885.62	7.36	5 960.26
	2013	2.87	2 324.24	3.08	2 497.74	1.65	1 334.35	7.60	6 156.33
	2018	3.25	2 635.48	2.83	2 288.05	2.13	1 724.11	8.21	6 647.64
	2023	3.00	2 483.55	3.16	2 455.92	2.48	2 303.79	8.64	7 243.27
碳交易法	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
--	------	------	----------	------	----------	------	----------	------	----------

E.3.3 空间分布特征

自然碳汇（VCV/SCV）：中心城区低、外围高（南北 / 北东南区域高，核心区、浑河公园带低）；

人工碳汇（BCV）：核心区高、周边低（与城市建成度正相关）；

复合碳汇（UCV）：北、东南区域高，浑河沿线低；地均 UCV 则呈现“中心城区 + 浑南新城 + 棋盘山周边高，铁西经开区低”（铁西经开区工业用地集中，自然碳汇少）。

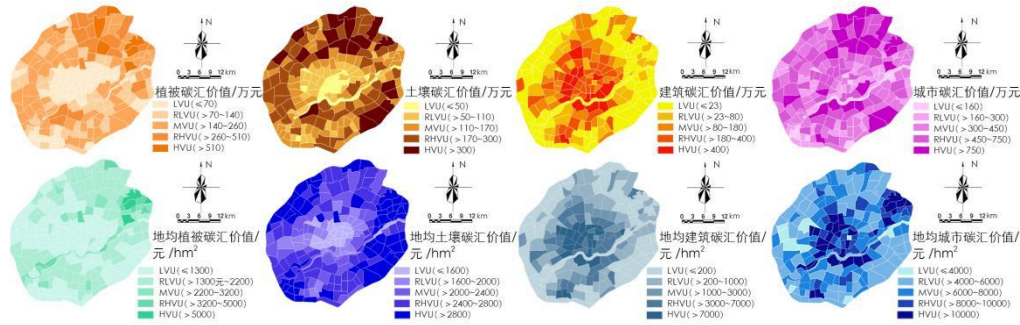


图 E.3.3 2023 年研究区不同要素碳汇价值空间分布