

团 体 标 准

T/GSC XXX—XXXX

露天矿山生态修复碳汇评估技术指南

Technical Guidelines for Carbon Sink Assessment of
Ecological Restoration in Open-pit Mine

(征求意见稿)

XXXX-xx-xx 发布

XXXX-xx-xx 实施

中国地质学会 发 布

中国地质学会（GSC）是组织开展国内、国际标准化活动的全国性社会团体。制定中国地质学会团体标准，满足市场需要，增加标准的有效供给，促进科技创新，是中国地质学会的工作内容之一。中国境内的团体和个人，均可提出制、修订中国地质学会团体标准的建议并参与有关工作。

中国地质学会团体标准按《中国地质学会团体标准管理办法》进行制定和管理。

中国地质学会团体标准草案经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议的 3/4 以上的专家、成员的投票赞同，方可作为中国地质学会团体标准予以发布。

在本文件实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料寄给中国地质学会团体标准秘书处，以便修订时参考。

本文件版权为中国地质学会所有，除了用于国家法律或事先得到中国地质学会的许可外，不得以任何形式或任何手段复制、再版或使用本文件及其章节，包括电子版、影印件，或发布在互联网及内部网络等。

中国地质学会地址：北京市西城区百万庄大街 26 号

邮政编码：100037 电话：010-68999018 传真：010-68995305

网址：www.geosociety.org.cn 电子信箱：zgdzxh@geosociety.org.cn

目次

前言..... V

引言..... VI

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 1

4 总则..... 2

 4.1 目的..... 2

 4.2 任务..... 2

 4.3 评估原则..... 2

5 评估流程..... 3

 5.1 基础资料收集与处理..... 3

 5.2 评估边界的确定..... 3

 5.3 实地调查与样品采集..... 3

 5.4 碳储量计算..... 4

 5.5 评估报告编写..... 4

6 评估方法..... 4

 6.1 林地碳储量..... 4

 6.2 耕地碳储量..... 8

 6.3 园地碳储量..... 9

 6.4 草地碳储量..... 9

 6.5 湿地碳储量..... 10

 6.6 矿山生态修复过程碳汇计算..... 10

7 评估报告编制..... 10

附录 A （规范性） 矿山基本信息调查、植被样方（带）调查及现场填写表格..... 11

附录 B （规范性） 无人机遥感与样方（带）调查计算植被地上部分碳储量方法..... 19

附录 C （规范性） 土壤取样及实验测试方法..... 23

附录 D （资料性） 《露天矿山生态修复碳汇成效评估技术报告》编写提纲..... 24

附录 E （资料性） 主要优势树种基本木材密度值、树种含碳量及生物量转换系数..... 25

附录 F （资料性） 土壤碳密度参考值..... 26

附录 G （规范性） 枯落物生物量比..... 27

附 录 H （资料性） 草地枯落物相关参数	28
参考文献	29

前 言

本文件按照GB/T 1.1—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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国地质学会提出并归口。

本文件起草单位：中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心，中国地质调查局成都地质调查中心（西南地质科技创新中心），中国地质调查局军民融合中心，云南省地质环境监测院，云南省地图院。

本文件主要起草人：陈庆松，李怡颖，涂春霖，马一奇，张连凯，和成忠，陶兰初，张宇，吕爽，胡文君，李胜伟，王波，巴仁基，李奇，朱广毅，申曦，杨明花，高旭焦，尹林虎，姜昕，寸得欣，刘振南，栗倩倩，柳璟，时雨，王倚玥，祝家能，张秋玉，黄安，杨金国，李睿。

本文件首次制定。

引 言

露天开采在为我国经济社会发展提供重要矿产资源保障的同时，也留下了大面积生态受损区域，矿区生态系统结构与功能严重退化，碳循环过程发生显著改变。在国家“碳达峰、碳中和”重大战略部署背景下，加快推进露天矿山生态修复，不仅是恢复区域生态安全格局的关键举措，也是挖掘陆地生态系统碳汇潜力的重要路径。

近年来，各地陆续实施了大规模矿山生态修复工程，并在植被恢复、水土保持、生物多样性提升等方面取得积极成效。然而，矿山生态修复过程中的碳源与碳汇变化机制尚未得到系统揭示，修复工程的固碳增汇贡献仍缺乏科学、统一、可量化的评估手段。当前实践中普遍存在三方面突出问题：一是对修复前、修复中、修复后全过程的碳动态演化规律认识不足，固碳增汇成效尚不清晰；二是针对矿山特殊立地条件的碳汇评估方法尚未建立，缺乏系统性的指标体系与技术规范；三是现有碳汇核算多直接沿用林业碳汇方法，忽视了边坡稳定性、土壤基质异质性等关键因子，导致评估结果存在较大不确定性。

为规范和指导露天矿山生态修复过程中的碳汇评估工作，提高评估结果的科学性、可比性与可操作性，本标准在充分借鉴国内外相关研究成果与实践经验的基础上，结合矿区生态特征与修复实际，明确了碳汇评估的基本原则、技术流程、核心指标与计算方法，旨在为矿山生态修复工程的减碳增汇效果量化、修复模式优化及“双碳”目标考核提供科学依据和技术支撑。

露天矿山生态修复碳汇评估技术指南

1 范围

本文件规定了露天矿山生态修复碳汇成效调查和评估的基本原则、评估流程、评估方法、评估报告编制等要求。

本文件适用于露天矿山开采破坏后经人工生态修复的地块碳汇计量与评估，其他生态修复评估工作可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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/T 21010—2017 土地利用现状分类
- GB/T 36197—2018 土壤质量 土壤采样技术指南
- HJ 615—2011 土壤有机碳的测定重铬酸钾氧化—分光光度法
- 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
- HJ 1167—2021 全国生态状况调查评估技术规范—森林生态系统野外观测
- HJ 1311—2023 自然保护区生态环境调查与观测技术规范
- LY/T 2988—2018 森林生态系统碳储量计量指南
- LY/T 3253—2021 林业碳汇计量监测术语
- DB1304/T 475—2024 露天矿山生态修复区碳储量调查技术规程
- DB 1502/T 029—2025 草原碳储量核算指南
- TD/T 1070.1—2022 矿山生态修复技术规范 第1部分：通则
- T/NAIA 070—2021 植物全碳含量的确定
- T/CQSES 05—2023 山地城镇碳汇评估技术指南

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

露天矿山生态修复 ecological restoration of open-pit mine

指依靠自然力量或通过人工措施干预，对因矿产资源开采活动造成的地质安全隐患、土地损毁和植被破坏等矿山生态问题进行修复，使矿山地质环境达到稳定、损毁土地得到复垦利用、生态系统功能得到恢复和改善。

[来源：TD/T 1070.1-2022,3.1，有修改]

3.2

评估单元 investigation unit

修复区中植被群落类型、土壤现状和场地特征相对一致的区域。

[来源于 DB 1304/T 475-2024，3.3]

3.3

碳储量 carbon stock

一个库中碳的数量，单位：吨碳（tC）。

[来源：LY/T 3253—2021，2.2.33]

3.4

碳密度 carbon density

单位面积的碳储量。

[来源：LY/T 3253—2021，2.2.30]

3.5

碳储量变化 carbon stock change

碳库中的碳储量由于碳增加与碳损失之间的差别而发生变化。当损失大于增加时，碳储量变小，因而该碳库为源；当损失小于增加时，该碳库为汇。

[来源：LY/T 3253—2021，2.2.34]

3.6

生物量 biomass

生态系统中植物地上、地下、活和枯死的有机干物质，例如树木、作物、草及其枝叶、根等。

[来源：LY/T 3253—2021，2.2.15]

3.7

地上生物量 above-ground biomass

土壤层以上以干重表示的植被所有活体的生物量。

[来源：LY/T 3253—2021，2.2.17]

3.8

地下生物量 below-ground biomass

所有活根生物量。

[来源：LY/T 3253—2021，2.2.18]

4 总则

4.1 目的

提出露天矿山生态修复碳汇计量与评价技术方法，开展露天矿山生态修复过程的碳汇评估，完善露天矿山生态修复成效评估指标体系，为矿山生态修复方案编制与标准制定提供依据，支撑矿山生态修复工程碳汇价值核算和碳交易。

4.2 任务

4.2.1 开展露天矿山生态修复区植被样方（带）调查和无人机遥感调查；

4.2.2 明确露天矿山生态修复碳汇计量与评价技术方法；

4.2.3 开展露天矿山生态修复过程碳汇评估。

4.3 评估原则

4.3.1 客观性

评估所有数据来源于国家或行业主管部门公开发表的数据；按照行业规范的数据质量控制和标准处理的数据；评估数据和评估技术方法公开透明，评估结果可验证、可核实、可报告。

4.3.2 一致性

在不同时间对同一评估单元再次或多次评估时，需采用相同评估方法、参数和数据标准；

4.3.3 连续性

矿山生态修复过程中受气候、土地利用变化和人为干扰等因素的影响，碳汇的年际波动较大，应进行动态评估。

5 评估流程

矿山生态修复过程碳汇评估流程具体如图1。

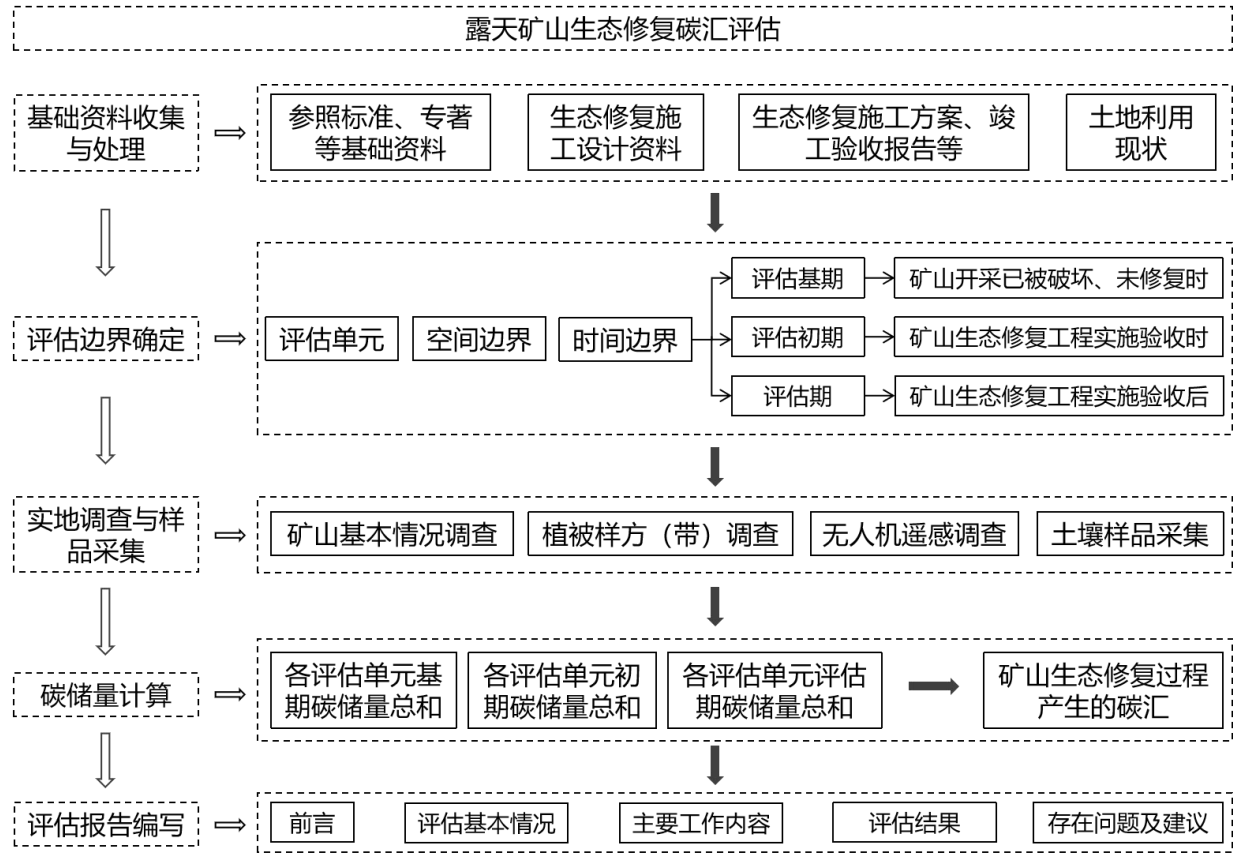


图 1 矿山生态修复过程碳汇评估流程图

5.1 基础资料收集与处理

基础资料收集应包括矿山生态修复设计资料、施工方案、竣工验收报告、土地利用现状资料等，以确定矿山基本情况、图斑范围、修复类型、覆土来源及厚度、植被种类等信息。

5.2 评估边界的确定

5.2.1 空间边界

根据评估目的，确定矿山生态修复碳汇成效评估边界，评估单元为矿山开采后经人工生态修复的图斑或地块。

5.2.2 时间边界

根据矿山生态修复实施情况确定评估基期、评估初期和评估期，评估基期为矿山开采后开展生态修复前的时间节点，评估初期为矿山生态修复工程竣工验收完成时的时间节点，评估期为矿山生态修复工程实施验收完成以后的时间节点。

5.2.3 评估单元划分

根据不同的矿山生态修复地类划分评估单元并确定面积。根据TD/T 1070.1-2022矿山生态修复地类分为林地、耕地、草地、园地、湿地、其他用地6类，详细参照GB/T 21010。

5.3 实地调查与样品采集

5.3.1 矿山基本情况调查

矿山基本信息调查应记录修复区内植被现状、土壤现状和场地特征等。其中，植被现状应包括植被树种（或优势种）及栽植密度、生长状况等信息；土壤现状应包括土壤质地、土壤厚度及土源情况等信息；场地特征应包括土地利用类型、坡度、坡向、高程等信息，现场调查时完成表A.1记录。

5.3.2 植被样方（带）调查

植被样方（带）调查旨在获取用于计算碳储量的植被地上生物量、地下生物量、枯落物现存量等信息，具体参照附录A，如果一个拟评估矿山内存在多种修复地类，则样方（带）调查须覆盖所有修复地类。

5.3.3 无人机遥感调查

碳储量计算根据样方（带）调查或样方（带）调查结合无人机遥感的方式计算得到。其中，无人机遥感调查主要用于植被地上部分碳储量的计算，如果矿山面积较小（ $\leq 1000\text{m}^2$ ），样方（带）调查能覆盖矿山整个评估区，则直接利用样方（带）调查计算植被地上部分碳储量；如果矿山面积较大（ $> 1000\text{m}^2$ ），单独采用样方（带）调查覆盖矿山全区域的难度较大，则建议使用样方（带）调查与无人机遥感相结合的方式计算植被地上部分碳储量。无人机遥感调查及地上部分碳储量的计算方法参照附录B。

5.3.4 土壤样品采集

土壤样品采集用于计算土壤有机碳储量，具体参照附录C完成采样和分析测试。

5.4 碳储量计算

5.4.1 计算矿区内各评估单元基期碳储量总和。基期碳储量指露天矿区内地块经矿山开采已完全破坏，生态修复工程尚未实施，表现为裸露边坡或硬化土地，缺少土壤和植被，此时的碳储量可定义为基准值（ 0tC ）。

5.4.2 计算矿区内各评估单元初期碳储量总和。初期碳储量指生态修复工程实施验收后，地块已覆盖一定土层并开展植被种植，该地块生态修复过程的碳储量为土壤有机碳、植被碳储量和死亡有机碳储量总和，此时的碳储量值定义为评估初始值，代表生态修复工程结束后的碳储量值。

5.4.3 计算矿区内各评估单元评估期碳储量总和。评估期碳储量指生态修复工程实施验收完成后产生的碳储量。

5.4.4 通过计算评估期碳储量总和与初期碳储量总和、基期碳储量总和之间的差值得到生态修复过程产生的碳汇。

5.4.5 修复地类中如果有商服用地、住宅用地等其他用地，则将其他用地的碳储量值取 0 值，不纳入计算范围。

5.5 评估报告编写

评估报告的内容可参照附录D，可根据实际情况修改完善。

6 评估方法

6.1 林地碳储量

6.1.1 乔木林地碳储量

乔木林地碳储量计量考虑植被碳储量（包括地上部分生物质碳及地下部分生物质碳）、土壤有机碳储量、死亡有机碳储量。

计算公式如式（1）：

$$C_{\text{乔}} = C_{\text{乔植被}} + C_{\text{乔土壤}} + C_{\text{乔死亡}} \cdots \cdots (1)$$

式中：

$C_{\text{乔}}$ —乔木林地碳储量，单位为吨碳（ tC ）；

$C_{\text{乔植被}}$ —乔木林地植被碳储量，单位为吨碳（ tC ）；

$C_{\text{乔土壤}}$ —乔木林地土壤有机碳储量，单位为吨碳（ tC ）；

$C_{\text{乔死亡}}$ —乔木林地死亡有机碳储量，单位为吨碳（tC）。

6.1.1.1 乔木林地植被碳储量

乔木林地植被碳储量计算公式如式（2）：

$$C_{\text{乔植被}} = C_{\text{乔地上}} + C_{\text{乔地下}} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$C_{\text{乔地上}}$ —乔木林地地上部分生物质碳，单位为吨碳（tC）；

$C_{\text{乔地下}}$ —乔木林地地下部分生物质碳，单位为吨碳（tC）。

6.1.1.1.1 乔木林地地上部分生物质碳

乔木林地地上部分生物质碳应根据组成乔木林地各树种的平均单位面积地上生物量、树种含碳率及乔木林地地上面积，采用以下公式计量：

$$C_{\text{乔地上}} = \sum_{k=1}^n (B_{\text{乔地上},k} \times CF_{\text{乔地上},k}) \times S_{\text{乔}} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$k=1,2,3,\dots,n$ —组成乔木林地的树种；

$B_{\text{乔地上},k}$ —乔木林地中树种k的平均单位面积地上生物量，单位为吨干物质/公顷（t.d.m/hm²）；

$CF_{\text{乔},k}$ —乔木林地中树种k的含碳率，单位为吨碳/吨干物质（tC/t.d.m）；

$S_{\text{乔}}$ —乔木林地面积，单位为公顷（hm²）。

其中 $B_{\text{乔地上}}$ 可选择以下方式获得：

- a) 已在 GB/T 43648 中发布立木生物量模型与碳计量参数的树种，按照 GB/T 43648 中确定的二元模型计算；
- b) 未在 GB/T 43648 中发布立木生物量模型与碳计量参数的树种，应按顺序选择以下方法获得：
 - 1) 参照 GB/T 43648，按照同类（属）已发布立木生物量模型与碳计量参数的树种二元模型来计算；
 - 2) 采用样地调查及测定获得乔木平均单位面积地上生物量；
 - 3) 采用样地调查及测定获得的单位面积蓄积量、乔木林地平均木材密度以及林地生物量扩展系数计算，计算公式如式（4）：

$$B_{\text{乔地上},k} = V_{\text{乔},k} \times SVD_{\text{乔},k} \times BEF_{\text{乔},k} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$V_{\text{乔},k}$ —乔木林地中树种k的单位面积蓄积量，单位为立方米/公顷（m³/hm²）；

$SVD_{\text{乔},k}$ —乔木林地中树种k的平均基本木材密度，单位为吨干物质/立方米（t.d.m/m³）；

$BEF_{\text{乔},k}$ —乔木林地中树种k的生物量扩展系数，无量纲。

- 4) 采用样地调查及测定获得的各树种单位面积蓄积量，并根据树种选择附录 E 中表 E.2 提供的 SVD 和 BEF 值，采用上述公式（4）计算得到；

公式（4）中的 $CF_{\text{乔},k}$ 应按顺序选择以下方式获得：

- a) 采用样地调查及表 C.2 中的方法测试得到；
- b) 根据树种选择附录 E 中表 E.1 提供的 CF 值；
- c) 采用缺省值 0.5tC/t.d.m。

6.1.1.1.2 乔木林地地下部分生物质碳

乔木层地下部分生物质碳应根据组成乔木林地各树种的平均单位面积地下生物量、树种含碳率及乔木林地面积，采用以下公式计量：

$$C_{\text{乔地下}} = \sum_{k=1}^n (B_{\text{乔地下},k} \times CF_{\text{乔地下},k}) \times S_{\text{乔}} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$B_{\text{乔地下},k}$ —乔木林地中树种k的平均单位面积地下生物量，单位为吨干物质/公顷（t.d.m/hm²）。

其中 $B_{\text{乔地下},k}$ 可选择以下方式获得：

- a) 采用样地调查及测定获得乔木林地地下部分单位面积生物量；

b) 根据树种选择附录 E 中表 E.2 提供的 RSR 值, 通过以下公式:

$$B_{\text{乔地下},k} = B_{\text{乔地上},k} \times RSR_{\text{乔},k} \quad (6)$$

式中:

$RSR_{\text{乔},k}$ —树种 k 的地下生物量与地上生物量的比值, 无量纲, 当评估区实际值不可获得的情况下, 采用缺省值 0.236 作为 RSR 值。

6.1.1.2 乔木林地土壤有机碳储量

乔木林地土壤有机碳储量根据土壤有机碳密度及乔木林地面积, 采用以下公式获得:

$$C_{\text{乔土壤}} = SOCC \times S_{\text{乔}} \quad (7)$$

式中:

式中, $C_{\text{乔土壤}}$ —乔木林地中土壤碳储量, 单位为吨碳 (tC);

$SOCC_{\text{乔}}$ —乔木林地土壤有机碳密度, 单位为吨碳/公顷 (tC/hm²)。

公式 (7) 中的 $SOCC_{\text{乔}}$, 可按顺序采用以下方式获得:

- 采用样地调查及表 C.1、表 C.2 的方法测试得到;
- 根据乔木林地类型选择附录 F 中表 F.1 提供的 $SOCC$ 值。

6.1.1.3 乔木林地死亡有机碳储量

乔木林地死亡有机碳储量通过以下计算方式获得:

$$C_{\text{乔死亡}} = C_{\text{乔枯落物}} + C_{\text{乔枯死木}} \quad (8)$$

式中:

$C_{\text{乔枯落物}}$ —乔木林地中枯落物碳储量, 单位为吨碳 (tC);

$C_{\text{乔枯死木}}$ —乔木林地中枯死木碳储量, 单位为吨碳 (tC)。

6.1.1.3.1 乔木林地枯落物碳储量

乔木林地枯落物碳储量应根据林地枯落物平均单位面积生物量、枯落物含碳率以及林分面积采用以下公式计算:

$$C_{\text{乔枯落物}} = \sum_{k=1}^n (B_{\text{乔枯落物},k} \times CF_{\text{乔枯落物},k}) \times S_{\text{乔}} \quad (9)$$

式中:

$B_{\text{乔枯落物},k}$ —乔木林地中树种 k 的枯落物平均单位面积生物量, 单位为吨干物质/公顷 (t.d.m/hm²);

$CF_{\text{乔枯落物},k}$ —乔木林地中树种 k 的枯落物平均含碳率, 单位吨碳/吨干物质 (tC/t.d.m)。

公式 (9) 中的 $B_{\text{乔枯落物},k}$ 和 $CF_{\text{乔枯落物},k}$ 应按顺序选择以下方法获得:

- 采用样地调查及表 C.2 中的方法测试得到;
- $CF_{\text{乔枯落物},k}$ 采用缺省值 0.37tC/t.d.m, $B_{\text{乔枯落物},k}$ 根据乔木林地类型选择附录 G 中表 G.1 提供的估计值, 并采用以下公式计算获得:

$$B_{\text{乔枯落物}} = \sum_{k=1}^n (B_{\text{乔地上},k} \times DF_{\text{乔枯落物},k}) \quad (10)$$

式中:

$DF_{\text{乔枯落物},k}$ —树种 k 的枯落物生物量占地上生物量的比例 (%)。

6.1.1.3.2 乔木林地枯死木碳储量

乔木林地枯死木碳储量应根据林地枯死木平均单位面积生物量、枯死木含碳率以及林分面积采用以下公式计算:

$$C_{\text{乔枯死木}} = \sum_{k=1}^n (B_{\text{乔枯死木},k} \times CF_{\text{乔枯死木},k}) \times S_{\text{乔}} \quad (11)$$

式中:

$B_{\text{乔枯死木},k}$ —乔木林地中树种 k 的枯死木平均单位面积生物量, 单位为吨干物质/公顷 (t.d.m/hm²);

$CF_{\text{乔枯死木},k}$ —乔木林地中树种 k 的枯死木平均含碳率, 单位吨碳/吨干物质 (tC/t.d.m)。

公式 (11) 中的 $B_{\text{乔枯死木},k}$ 和 $CF_{\text{乔枯死木},k}$ 应按顺序选择以下方法获得:

- a) 采用样地调查及测定结果；
 b) $CF_{\text{乔枯死木},k}$ 采用缺省值 0.37tC/t.d.m, $B_{\text{乔枯死木},k}$ 根据所在地区选择附录 G 中表 G.1 中提供的 DF_{DW} 值, 并采用以下公式获得:

$$B_{\text{乔枯死木}} = \sum_{k=1}^n (B_{\text{地上},k} \times DF_{\text{乔枯死木},k}) \cdots \cdots (12)$$

式中:

$DF_{\text{乔枯死木},k}$ —树种k的枯死木生物量占地上生物量的比例(%)。

6.1.2 灌木林地碳储量

灌木林地碳储量计量考虑植被碳储量(包括地上部分生物质碳和地下部分生物质碳)、土壤有机碳储量、死亡有机碳储量的计算。计算公式如式(13):

$$C_{\text{灌}} = C_{\text{灌植被}} + C_{\text{灌土壤}} + C_{\text{灌死亡}} \cdots \cdots (13)$$

式中:

$C_{\text{灌}}$ —灌木林地碳储量, 单位为吨碳(tC);

$C_{\text{灌植被}}$ —灌木林地植被碳储量, 单位为吨碳(tC);

$C_{\text{灌土壤}}$ —灌木林地土壤有机碳储量, 单位为吨碳(tC);

$C_{\text{灌死亡}}$ —灌木林地死亡有机碳储量, 单位为吨碳(tC)。

6.1.2.1 灌木林地植被碳储量

$$C_{\text{灌植被}} = C_{\text{灌地上}} + C_{\text{灌地下}} \cdots \cdots (14)$$

式中:

$C_{\text{灌地上}}$ —灌木林地地上部分生物质碳, 单位为吨碳(tC);

$C_{\text{灌地下}}$ —灌木林地地下部分生物质碳, 单位为吨碳(tC)。

6.1.2.1.1 灌木林地地上部分生物质碳

灌木林地地上部分生物质碳应根据灌木地上部分平均单位面积生物量、灌木含碳率以及灌木面积, 采用以下公式计量:

$$C_{\text{灌地上}} = B_{\text{灌地上}} \times CF_{\text{灌}} \times S_{\text{灌}} \cdots \cdots (15)$$

式中:

$B_{\text{灌地上}}$ —灌木林地平均单位面积地上生物量, 单位为吨干物质/公顷(t.d.m/hm²);

$CF_{\text{灌}}$ —灌木林地平均含碳率, 单位为吨碳/吨干物质(tC/t.d.m)。

$S_{\text{灌}}$ —灌木林地面积, 单位为公顷(hm²)。

其中 $B_{\text{灌地上}}$ 可通过以下方式获取:

- a) 参照《中国常见灌木生物量模型手册》中生物量模型, 根据样方(带)调查所获得的灌木参数代入生物量模型中计算得到;
 b) 《中国常见灌木生物量模型手册》未规定的树种, 采用以下方式获取生物量:
 1) 采用灌木样地调查及测定获得灌木林地地上部分单位面积生物量;
 2) 采用附录 E 中的方式获取;
 3) 采用缺省值 12.51t.d.m/hm²。

$CF_{\text{灌}}$ 可通过以下方式获取:

- a) 采用样地调查及表 C.2 中的方法测试得到;
 b) 采用缺省值 0.47tC/t.d.m。

6.1.2.2 灌木林地地下部分生物质碳

灌木林地地下部分生物质碳应根据灌木地下部分平均单位面积生物量、灌木含碳率以及林分面积, 采用以下公式计量:

$$C_{\text{灌地下}} = B_{\text{灌地下}} \times CF_{\text{灌}} \times S_{\text{灌}} \cdots \cdots (16)$$

式中：

$B_{\text{灌地下}}$ —灌木林地平均单位面积地下生物量，单位为吨干物质/公顷（t.d.m/hm²）；

其中 $B_{\text{灌地下}}$ 可选择以下方式获得：

- 根据样方（带）调查获得的灌木平均单位面积地下生物量；
- 采用缺省值 6.721t.d.m/hm²。

$CF_{\text{灌}}$ 可选择以下方式获得：

- 采用样地调查及表 C.2 中的方法测试得到；
- 采用缺省值 0.47tC/t.d.m。

当 $B_{\text{灌地下}}$ 和 $CF_{\text{灌}}$ 均不易获取时，利用地上部分碳储量乘以系数0.75计算地下部分碳储量。

6.1.2.3 灌木林地土壤有机碳储量

灌木林地土壤有机碳储量根据土壤有机碳密度及灌木林地面积，采用以下公式获得：

$$C_{\text{灌土壤}} = SOCC_{\text{灌}} \times S_{\text{灌}} \quad (17)$$

式中：

$C_{\text{灌土壤}}$ —灌木林地中土壤碳储量，单位为吨碳（tC）；

$SOCC_{\text{灌}}$ —灌木林地土壤有机碳密度，单位为吨碳/公顷（tC/hm²）。

公式（18）中的 $SOCC_{\text{灌}}$ ，可按顺序采用以下方式获得：

- 采用样地调查及表 C.1、表 C.2 的方法测试得到；
- 根据灌木林地类型选择附录 F 中表 F.1 提供的 $SOCC$ 值。

6.1.2.4 灌木林地死亡有机碳储量

灌木林地死亡有机碳储量主要指枯落物碳储量，计算方式为：

$$C_{\text{灌枯落物}} = B_{\text{灌枯落物}} \times CF_{\text{灌枯落物}} \times S_{\text{灌}} \quad (18)$$

式中：

$B_{\text{灌枯落物}}$ —灌木林地中枯落物单位面积生物量，单位为吨干物质/公顷（t.d.m/hm²）；

$CF_{\text{灌枯落物}}$ —灌木林地枯落物平均含碳率，单位吨碳/吨干物质（tC/t.d.m）。

公式（19）中的 $B_{\text{灌枯落物}}$ 和 $CF_{\text{灌枯落物}}$ 应按顺序选择以下方法获得：

- 采用样地调查及表 C.2 中的方法测试得到；
- $CF_{\text{灌枯落物}}$ 采用缺省值 0.37tC/t.d.m， $B_{\text{灌枯落物}}$ 根据灌木林地类型选择附录 G 中表 G.1 提供的估计值，并采用下公式获得：

$$B_{\text{灌枯落物}} = B_{\text{灌地上}} \times DF_{\text{灌枯落物}} \quad (19)$$

式中：

$DF_{\text{灌枯落物}}$ —枯落物生物量占地上生物量的比例（%）。

6.1.3 其他林地碳储量

其他林地碳储量计量考虑植被碳储量（包括地上部分生物质碳和地下部分生物质碳）、土壤有机碳储量、死亡有机碳储量。计量方式同乔木林地碳储量计量。

6.2 耕地碳储量

耕地碳储量仅考虑土壤有机碳的计算，计算公式如下：

$$C_{\text{耕}} = SOCC_{\text{耕}} \times S_{\text{耕}} \quad (20)$$

式中：

$C_{\text{耕}}$ —耕地碳储量，单位为吨碳（tC）。

$SOCC_{\text{耕}}$ —耕地土壤碳密度，单位为吨碳/公顷（tC/hm²）；

$S_{\text{耕}}$ —耕地面积，单位为公顷（hm²）。

式（20）中 $SOCC_{\text{耕土壤}}$ 应按顺序选择以下方式获得：

- 通过实际采样测定，方法见附录 C 中表 C.1、表 C.2；

b) 通过参考本指南附录 F 中表 F.1 给出的碳密度值确定。

6.3 园地碳储量

园地碳储量计量考虑植被碳储量（包括地上部分生物质碳和地下部分生物质碳）、土壤有机碳储量、死亡有机碳储量。计量方式同乔木林地碳储量计量。

6.4 草地碳储量

草地碳储量考虑草地植被碳储量（包括地上部分生物质碳和地下部分生物质碳）、枯落物碳储量和土壤有机碳储量的计算。计算公式如式（22）：

$$C_{\text{草}} = C_{\text{草植被}} + C_{\text{枯落物}} + C_{\text{草土壤}} \quad (21)$$

式中：

$C_{\text{草}}$ —草地碳储量，单位为吨碳（tC）；

$C_{\text{草植被}}$ —草地植被碳储量，单位为吨碳（tC）；

$C_{\text{枯落物}}$ —草地枯落物碳储量，单位为吨碳（tC）；

$C_{\text{草土壤}}$ —草地土壤有机碳储量，单位为吨碳（tC）。

6.4.1 草地植被碳储量

草地植被碳储量通过以下方式获得：

$$C_{\text{草植被}} = C_{\text{草地上}} + C_{\text{草地下}} \quad (22)$$

式中：

$C_{\text{草地上}}$ —草地上部分生物质碳，单位为吨碳（tC）；

$C_{\text{草地下}}$ —草地地下部分生物质碳，单位为吨碳（tC）。

草地上部分生物质碳、地下部分生物质碳应根据草地上部分碳密度、地下部分碳密度及草地面积采用以下公式获得：

$$C_{\text{草地上}} = (CD_{\text{草地上}} + CD_{\text{草地下}}) \times S_{\text{草}} \quad (23)$$

式中：

$CD_{\text{草地上}}$ —草地上部分平均碳密度，单位为吨碳/公顷（tC/hm²）；

$CD_{\text{草地下}}$ —草地地下部分平均碳密度，单位为吨碳/公顷（tC/hm²）；

$S_{\text{草}}$ —草地面积，单位为公顷（hm²）。

其中 $CD_{\text{草地上}}$ 、 $CD_{\text{草地下}}$ 应按照以下方式获取：

a) 通过样方（带）调查和实际采样测定，方法见附录 A、附录 C 中表 C.2；

b) $CD_{\text{草地上}}$ 使用缺省值 2.2tC/hm²， $CD_{\text{草地下}}$ 使用缺省值 2.52tC/hm²。

6.4.2 草地枯落物碳储量

草地枯落物碳储量根据枯落物碳密度和草地面积，采用以下公式获得：

$$C_{\text{枯落物}} = B_{\text{枯落物}} \times CF_{\text{枯落物}} \times S_{\text{草}} \quad (24)$$

式中：

$B_{\text{枯落物}}$ —枯落物平均单位面积生物量，单位为吨干物质/公顷（t.d.m/hm²）；

$CF_{\text{枯落物}}$ —枯落物平均含碳率，单位为吨碳/吨干物质（tC/t.d.m）， $B_{\text{枯落物}}$ 、 $CF_{\text{枯落物}}$ 可按照附录 C 的方法实测得出或直接取附录 H 中的值。

6.4.3 草地土壤有机碳储量

草地土壤有机碳储量根据土壤有机碳密度及其他草地面积，采用以下公式获得：

$$C_{\text{草土壤}} = SOCC_{\text{草}} \times S_{\text{草}} \quad (25)$$

式中：

$C_{\text{草土壤}}$ —草地土壤有机碳储量，单位为吨碳（tC）；

$SOCC_{草}$ —草地土壤有机碳密度，单位为吨碳/公顷（ tC/hm^2 ）。

草地土壤有机碳密度应按照顺序选择以下方式获取：

- a) 通过实际采样测定，方法见附录 C 表 C.2；
- b) 通过参考本指南附录 F 中表 F.1 的碳密度值确定。

6.5 湿地碳储量

湿地碳储量考虑湿地植被碳储量、土壤有机碳储量，计算公式为：

$$C_{湿} = C_{湿植被} + C_{湿土壤} \dots\dots\dots (26)$$

式中：

- $C_{湿}$ —湿地碳储量，单位为吨碳（ tC ）；
- $C_{湿植被}$ —湿地植被碳储量，单位为吨碳（ tC ）；
- $C_{湿土壤}$ —湿地土壤有机碳储量，单位为吨碳（ tC ）。

6.5.1 湿地植被碳储量

湿地植被碳储量根据植被碳密度和湿地面积，采用以下公式获得：

$$C_{湿植被} = CD_{湿植被} \times S_{湿} \dots\dots\dots (27)$$

式中：

- $CD_{湿植被}$ —湿地植被碳密度，单位为吨碳/公顷（ tC/hm^2 ）；
- $S_{湿}$ —湿地面积，单位为公顷（ hm^2 ）。
- $CD_{湿植被}$ 按顺序选择以下方式获得：
- a) 通过样方（带）调查和实际采样测定，方法见附录 A、附录 C 中表 C.2；
- b) 使用缺省值 $6.89tC/hm^2$ 。

6.5.2 湿地土壤有机碳储量

湿地土壤有机碳储量根据土壤有机碳密度和湿地面积，采用以下公式获得：

$$C_{湿土壤} = SOCC_{湿} \times S_{湿} \dots\dots\dots (28)$$

式中：

- $SOCC_{湿}$ —湿地土壤有机碳密度，单位为吨碳/公顷（ tC/hm^2 ），按顺序选择以下方式获得：
- a) 通过样方（带）调查和实际采样测定，方法见附录 C 中表 C.2；
- b) 通过参考本指南附录 F 中表 F.1 给出的碳密度值确定。

6.6 矿山生态修复过程碳汇计算

根据评估基准期、评估初期、评估期的碳储量变化，评估露天矿山生态修复过程碳汇情况。计算公式如式（30）：

$$C = \sum_{i=1}^n C_{i 评估期} - \sum_{i=1}^n C_{i 评估初期} - \sum_{i=1}^n C_{i 评估基准期} \dots\dots\dots (30)$$

式中：

- C —区域碳汇总量，单位：吨碳（ tC ）；
- i —不同的评估单元， $i=1,2,3\dots n$ ；
- $C_{i 评估基准期}$ —第*i*个评估单元评估基准期碳储量，单位为吨碳（ tC ）；
- $C_{i 评估初期}$ —第*i*个评估单元评估初期碳储量，单位为吨碳（ tC ）；
- $C_{i 评估末期}$ —第*i*个评估单元评估末期碳储量，单位为吨碳（ tC ）。

7 评估报告编制

评估报告内容应包括矿山生态修复的基本情况、施工及验收情况、现场调查情况、样方（带）设置及样品采集情况、无人机遥感调查情况、评估结果、存在问题及建议等，可根据实际情况修改完善。

附 录 A
(规范性)

矿山基本信息调查、植被样方（带）调查及现场填写表格

A.1 矿山基本信息调查

现场踏勘矿山时需调查修复矿山基本情况，记录主要调查矿山的位置信息、修复地类、修复年限等信息，完成表A.1填写。

表 A.1 评估矿山基本信息调查记录表

记录人：_____ 审核人：_____ 日期：_____

矿山名称					总面积/m ²	
地理位置	省		市（州）		县（区）	乡（镇）村
坐标位置	E:		N:		修复年限/a	
修复地类						
现场调查样方（带）概述						
样方（带）编号	坐标	面积/m ²	植被现状	土壤现状	备注	

注：1. “修复地类”根据GB/T 21010-2017《土地利用现状分类》填写矿山修复地类；2. “现场调查样方（带）概述”详细填写调查样方（带）的坐标位置、面积、植被和土壤现状，其中：“植被现状”详细描述样方（带）内优势树种、植被垂直群落结构、树高、树龄、种植间距、长势等“土壤状况”详细描述土壤类型、土壤质地、覆土厚度及来源等；“备注”内填写坡度、坡向、高程等现场调查人员认为有必要记录的其他信息。

A.2 植被样方（带）调查

植被样地调查可按照《陆地指标与规范生态系统生物观测》《区域陆地碳汇评估技术指南》，在矿山内开展乔木层、灌木层、草本层等的特征调查。

A.2.1 调查单元划分

在恢复为林地、园地等含乔木层或灌木层的矿山区域中，不同树种、栽植密度、树龄及生长状况的区域应划分为单独调查单元；在恢复为草地、湿地的矿山区域，不同草本优势种

及生长状况的区域应划分为单独调查单元；在恢复为耕地的矿山区域，按照不同的覆土类型划分单独调查单元。

A.2.2 样方（带）设置

A.2.2.1 布设原则

- a) 每个调查单元内皆应布设样方（带），且应选择植物生长均一的区域布设样方（带）；
- b) 斜坡等面状区域布设样方，在台阶、道路等带状区域布设样带；
- c) 样方（带）布设应涵盖整个矿区修复单元，包括排土场、矸石场、尾矿库、地面塌陷区等；
- d) 样方（带）应涵盖修复区全部植被群落类型（乔木、乔木+灌木+草地、灌木、灌木+草地、草地）。

A.2.2.2 设置数量及规格

- a) 乔木层：每个调查单元样方（带）数量应≥1，若调查单元面积≥500m²，则设置1个以上20m×20m的样方（带），若调查单元面积<500m²，则根据实际面积设置样方（带）规格，但样方（带）内乔木株数应≥50株；
- b) 灌木层：每个调查单元样方（带）数量应≥3，规格5m×5m；
- c) 草本层：每个调查单元样方（带）数量应≥3，规格1m×1m；
- d) 枯落物层：每个调查单元样方（带）数量应≥3，规格1m×1m；
- e) 土壤层：每个调查单元土壤剖面数量应≥3，按照GB/T 36197-2018要求分层取样。

A.2.3 植被样方（带）调查记录及取样

开展植被样方（带）调查时需同时完成记录和取样工作，填写完成表A.2~A.7，其中：

- a) 乔木层：调查时对样方（带）内所有活立木（胸径≥3cm）进行每木检尺，记录胸径（DBH）、树高（H）等，并计算各树种平均株高和胸径；
- b) 灌木层：按树种分别测定样方（带）内每丛（株）灌木地径、冠幅、株高，并计算各树种相应的平均值；
- c) 草本层：记录草本样方（带）内草本层的物种、盖度、平均高度等信息。

表 A.2 乔木层样方（带）调查记录表

样方（带）编号：_____ 记录人：_____ 审核人：_____ 日期：_____

矿山名称						样方（带）编号			
样方（带）坐标位置		E:_____ N:_____		样方（带）规格		_____×_____m			
样木号	树种名称	胸径 /cm	树高/m	郁闭度	树龄/a	冠幅/m		胸高断面积 /m²	生长状况
						东西	南北		
1									
2									
3									
4									

5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
...									

注：1. 表格对《全国生态状况调查评估技术规范—森林生态系统野外观测》HJ 1167-2021中表格进行修改；2. 胸径测量时，如果树干在1.3m以下分枝，测定所有分枝胸径，并记录相应株数；如果在1.3m以上分枝，在胸高处测定，只记录1株；3. 测量树高时，如果树木已经倒伏但仍然存活，则将测杆放在倒伏树的根部测量树高，且必须按照树木的自然倾斜角度测定；4. “生长状况”填写：长势较好、长势一般、长势较差、濒死；表中涉及数字记录的均保留两位小数。

表 A.3 乔木层样方（带）标准木采样记录表

样方（带）编号：_____ 记录人：_____ 审核人：_____ 日期：_____

树种	部位	样段/m	总鲜重/kg	鲜样重/g	干样重/g	干物质率/%	总干重/kg	标准木胸高断面积/m ²	生物量转换因子 BEF	根茎比 RSR
	干									
	枝									
	叶									
	根									
	...									
	合计									
	干									
	枝									
	叶									
	根									
	...									
	合计									

注：1. 样段、总鲜重、鲜样重、干样重、干物质率、总干重记录时单位应保留两位小数；2. 标准木胸高断面积、生物量转化因子、根茎比记录时单位应保留两位小数。

表 A.5 灌木层采样记录表

记录人：_____

审核人：_____

日期：_____

样方(带) 编号	样本 编号	灌木类型 (单株/丛生)	株高/m	总鲜重/g	样品鲜质量/g				样品干质量/g			
					枝	干	叶	根	枝	干	叶	根

注：株高、总鲜重、样品鲜质量、样品干质量记录时均保留两位小数。

表 A.6 草本层样方（带）调查及采样记录表

记录人：_____

审核人：_____

日期：_____

样方（带） 编号	坐标位置	样方（带）规格	草本种类	盖度/%	平均高度 /cm	总鲜重/g		样品鲜质量/g		样品干质量/g		干物质率/%	
	E: N:	× m											
	E: N:	× m											
	E: N:	× m											
	E: N:	× m											
	E: N:	× m											
	E: N:	× m											
	E: N:	× m											
	E: N:	× m											
	E: N:	× m											
	E: N:	× m											
	E: N:	× m											
	E: N:	× m											
	E: N:	× m											
平均值													

注：盖度、平均高度、总鲜重、样品鲜质量、样品干质量、干物质率记录时均保留两位小数。

附 录 B
(规范性)

无人机遥感与样方（带）调查计算植被地上部分碳储量方法

无人机遥感与样方（带）调查计算植被地上部分碳储量方法，是指综合利用无人机多光谱遥感数据和机载激光雷达点云数据，结合地面实测的地物生长参数，开展基于无人机载主被动遥感手段相结合的露天矿山碳储量反演调查（图B.1）。

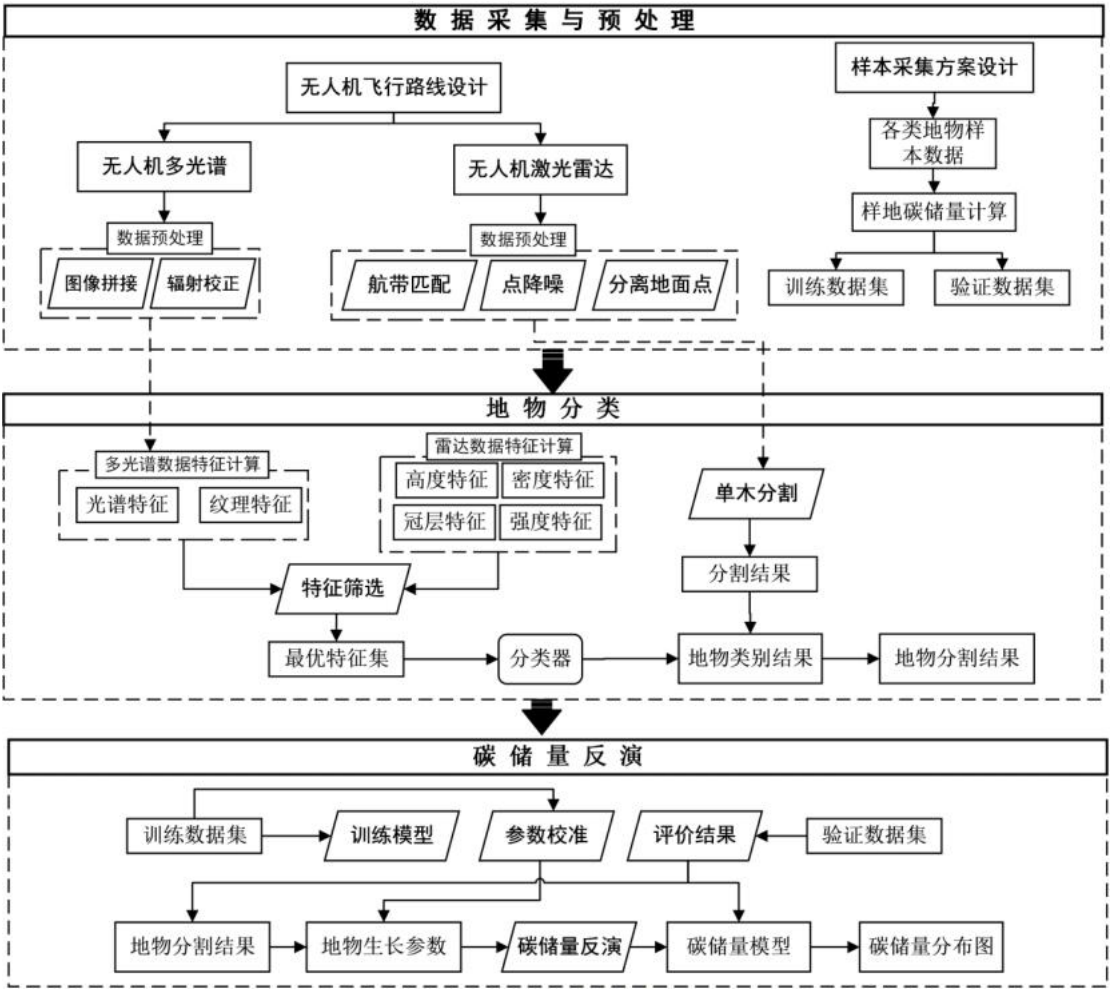


图 B.1 无人机遥感调查工作流程图

B.1 数据采集与预处理

B.1.1 无人机数据采集与预处理

将无人机设置一定的航向重叠度、旁向重叠度，利用无人机同步获取覆盖整个矿山区域的高精度多光谱遥感和点云数据，分别对多光谱数据进行图像拼接、辐射校正，对激光雷达数据进行航带匹配、噪声点去除等预处理，并将经过预处理的激光雷达数据进行分离地面点与非地面点。

表 B.1 无人机遥感数据参数参考表

参量	类型	
传感器	多光谱	LiDAR
数据特征	蓝光、绿光、红光，红边和近红外波段	320kHz
空间分辨率	4cm	<100点/m ²

B. 1. 2 实测数据采集与预处理

在矿区内设置一定数量的样方（带），获取实施生态修复工程后的矿山内植物生长参数，主要包括：

- （1）乔木层：样方大小设置为20m×20m，获取样方（带）内单木树种、树高、胸径、冠幅、坐标等；
 - （2）灌木层：样方大小设置为5m×5m，获取样方（带）内灌木地径、冠幅、灌高、坐标等；
 - （3）草本层：样方大小设置为1m×1m，获取样方（带）内草本高度、盖度、坐标等。
- 样方布设应选取位置准确、边界清晰、与无人机影像同时间或近时间获取的样方（带），剔除受阴影、边缘效应、定位偏差或样地内部异质性过强的样方。将获取到的实测数据按照地物类别进行分类整理，按照各类地物的碳储量计算方法计算碳储量，并生成附带生长参数和碳储量信息的空间坐标点，最后按照7：3的比例将坐标点数据集分为训练数据集与验证数据集，即70%用于建模，30%用于验证划分原则为：按样地/空间块分层来划分，让测试集所在的空间单元完全不出现在训练集中，避免因为地理学第三定律“地理环境越相似，地理目标特征越相近”而造成的信息泄露，评估结果更接近模型应用到新地块/新区域时的真实表现。

B. 2 地物分类

B. 2. 1 雷达数据特征计算

利用预处理后的点云数据生成雷达数据特征集，包括高度特征、密度特征、冠层特征、强度特征。其次，利用预处理后的点云数据生成数字表面模型（DSM,Digital Surface Model），基于地面点生成数字地形模型（DEM,Digital Elevation Model），随后将数字表面模型和数字地形模型做差值得到冠层高度模型（CHM, Canopy Height Model）。

B. 2. 2 多光谱特征计算

基于无人机多光谱遥感获取多光谱数据（红光、绿光、蓝光、近红外波段），用来计算多光谱特征集，其中包括光谱特征集（如归一化植被指数（NDVI）、增强植被指数（EVI）、比值植被指数（RVI）、调整土壤亮度的植被指数（SAVI）等）与纹理特征（如8个典型灰度共生矩阵）。

B. 2. 3 地物最优分类结果

将上述生成的雷达数据特征集与多光谱特征集利用递归特征消除法进行特征筛选以选出最优特征集。并将最优特征集、训练数据集输入到分类器（如随机森林、支持向量机）中识别矿区内的地物，并基于网格搜索法对分类器的参数进行调参。最后，基于混淆矩阵法利用验证数据集对分类结果进行精度评价以选出最优分类结果，混淆矩阵法的具体指标包含：总体精度OA（Overall Accuracy）、制图精度PA（Producer Accuracy）、用户精度 UA（User Accuracy）、Kappa系数、漏分误差OE（omission errors）与错分误差CE（commission errors）。

式中：

$$\text{Kappa} = \frac{x \sum_{i=1}^k x_{ii} - \sum_{i=1}^k x_i + x_j}{x^2 - \sum_{i=1}^k x_i x_j} \quad (\text{B.1})$$

$$\text{OA} = \frac{\sum_{i=1}^k x_{ii}}{x} \times 100\% \quad (\text{B.2})$$

$$\text{UA} = \frac{x_{ii}}{x_i} \times 100\% \quad (\text{B.3})$$

$$\text{PA} = \frac{x_{ii}}{x_j} \quad (\text{B.4})$$

$$\text{CE} = 1 - \text{UA} \quad (\text{B.5})$$

$$\text{OE} = 1 - \text{PA} \quad (\text{B.6})$$

式（E.2）～（E.6）中：

x 代表样本像元总数， x_i 代表分类结果中类别 i 的像元数， x_j 代表验证数据中类别 j 的像元数， k 代表分类类别数， x_{ii} 代表分类正确的像元数。

B.3 碳储量反演

B.3.1 获取生长参数

基于最优分类结果对各类地物选择合适的阈值进行单木分割以提取单木的空间信息和生长参数，其中包括：

①乔木：具有明显的垂直分层结构，点云呈现“伞状”分布，通常冠层高度（CHM）>5m，郁闭度高（>0.6），冠幅面积大（单株冠幅>10m²）。主要提取的参数有单木树高、胸径、冠幅等；

②灌木：点云集中在低空（1~5m），冠层呈“团状”，通常冠层高度（CHM）约1~5m，郁闭度中等（0.3~0.6），冠幅面积中等（单株冠幅1~10m²）。主要提取的参数有冠层高度、冠幅、地径等；

③草地：点云高度接近地面（<1m），分布稀疏，仅少量点云来自草茎顶部，通常冠层高度（CHM）<1m，冠幅面积小（以群落为单位，无明显单株边界）。主要提取的异速生长参数有草本高度、盖度等。

B.3.2 参数校准

将地面样方（带）调查的生长参数与对应的遥感提取生长参数数据集通过线性回归模型（如最小二乘法）进行参数校准，计算各植被参数间的转换系数，如：

$$H_{\text{实测}} = \alpha \cdot H_{\text{提取}} \quad (\text{B.7})$$

式中：

$H_{\text{实测}}$ 为样方（带）调查实测单木参数，单位：m； $H_{\text{提取}}$ 为基于无人机遥感提取的单木参数，单位：m； α 为转换系数，无量纲。

B.3.3 碳储量反演

参照第六章的碳储量计算方法，将地面样方（带）调查计算得到的地上碳储量作为样地尺度参考真值，无人机遥感数据提取的冠层结构参数作为模型自变量用于区域尺度碳储量反演。首先将地面样地与无人机遥感信息进行空间配对，利用地面样方（带）调查计算得到的训练数据集构建样地碳储量估算模型，利用未参与建模的验证数据集来评价碳储量反演结果，评价指标体系利用决定系数（ R^2 ）与均方根误差（RMSE）来衡量碳储量的反演精度， R^2 越接近1，RMSE越小，预测结果越精确。

当评价指标处于可接受范围内时，利用经校准和验证后的模型对整个研究区进行露天矿区碳储量反演；反之则进一步检查样地定位、时相一致性、尺度匹配、特征提取及模型参数设置，并在修正后再基于碳储量模型分别计算整个露天矿区的地上部分碳储量。

B.3.4 模型训练及测试

基于未参与建模的实测测试样本碳储量数据，对比模型的决定系数（ R^2 ）与均方根误差（RMSE）来衡量碳储量的反演精度， R^2 越接近1，RMSE越小，预测结果越精确。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_{i\text{预测}})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_0)^2} \quad (\text{B.8})$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y_{i\text{预测}})^2} \quad (\text{B.9})$$

式中：

R^2 为决定系数；RMSE为均方根误差； y_i 为真实值； $y_{i\text{预测}}$ 为预测值； $\bar{y}_0$ 为真实值的平均数； N 为样本数量。

附 录 C
(规范性)
土壤取样及实验测试方法

C.1 土壤样品采集方法和测试指标

在群落调查样方（带）内采集土壤样品，土壤样品采集技术按照 GB/T 36197-2018 执行。采用土钻法进行样品采集，土壤取样分 0cm~10cm、10cm~30cm、30cm~50cm、50cm~100cm 四层进行土壤取样，取样量约 500g 左右，取样现场填写表格见表 C.1。

取得的土壤样品和植物样品风干后送往专业实验室进行有机碳的测定，测定方法见表 C.2-2。

表 C.1 土壤采样记录表

记录人：_____ 审核人：_____ 日期：_____

样品 编号	坐标	土层厚度 /cm	采样深度 /cm	砾石含量 /%	容重 /(g/cm ³)	有机质含量/ (g/kg)
	E: N:					
	E: N:					
	E: N:					
	E: N:					
	E: N:					
	E: N:					
	E: N:					
	E: N:					
	E: N:					

表 C.2 土壤和植物样品测定指标和方法

测定指标	分析方法	方法来源
土壤有机碳	重铬酸钾氧化法	HJ 615-2011
植物样品含碳率	重铬酸钾氧化法	T/NAIA 070-2021

附 录 D

(资料性)

《露天矿山生态修复碳汇成效评估技术报告》编写提纲

D.1 前言

简要说明露天矿山生态修复碳汇评估的工作背景与意义、组织形式、工作过程及评估结果等。

D.2 评估基本情况

简述矿山生态修复的基本情况，包括施工和验收情况、修复总面积、修复地类、修复年限、植被生长状况、土壤现状等。

D.3 主要工作内容

详细说明评估矿区内评估单元划分情况、样方（带）设置情况、样品采集及送样情况等。

D.4 评估结果

D.4.1 遥感调查及分析测试结果

详细说明无人机遥感调查结果（可选）及植物样品、土壤样品等分析测试结果。

D.4.2 碳储量计算结果

详细说明各个评估时期（评估基准期、评估初期、评估期）各个评估单元碳储量计算结果和各个评估期各个评估单元的碳储量总和。

D.4.3 碳汇量计算结果

详细说明矿山生态修复过程产生的碳汇评估结果。

D.5 存在的问题和建议

D.5.1 主要问题

根据评估结果和评估过程中发现的问题，总结归纳矿山生态修复工程实施与管理方面存在的问题。

D.5.2 相关建议

根据评估结果与评估中发现问题，提出矿山生态修复工程实施与管理的意见与建议。

D.6 附件

评估方法等其他支撑材料。

附 录 E
(资料性)

主要优势树种基本木材密度值、树种含碳量及生物量转换系数

表 E.1 主要优势树种基本木材密度值（吨干物质/立方米）及树种含碳量（吨碳/吨干物质）

树种名称	基本木材密度值 (SVD)	树种含碳量 (CF)	树种名称	基本木材密度值 (SVD)	树种含碳量 (CF)
桉树	0.578	0.525	阔叶混	0.482	0.490
柏木	0.478	0.510	冷杉	0.366	0.500
檫木	0.477	0.485	栎类	0.676	0.500
池杉	0.359	0.503	楝树	0.443	0.485
赤松	0.414	0.515	云杉	0.373	0.499
椴树	0.420	0.439	云南松	0.483	0.526
枫香	0.598	0.497	杉木	0.307	0.513
高山松	0.413	0.501	针叶混	0.390	0.518
黑松	0.493	0.515	针阔混	0.475	0.507
红松	0.396	0.511	其他硬阔类	0.606	0.482
华山松	0.396	0.523	其他软阔类	0.422	0.473
桦木	0.541	0.491			

表 E.2 主要优势树种生物量转换系数（无量纲）

树种名称	生物量扩展因子 (BEF)	根茎比 (RSR)	树种名称	生物量扩展因子 (BEF)	根茎比 (RSR)
桉树	1.263	0.221	阔叶混	1.514	0.262
柏木	1.732	0.220	冷杉	1.316	0.174
檫木	1.483	0.270	栎类	1.355	0.292
池杉	1.218	0.435	楝树	1.586	0.289
赤松	1.425	0.236	云杉	1.271	0.238
椴树	1.407	0.201	云南松	1.098	0.169
枫香	1.765	0.398	杉木	2.109	0.235
高山松	1.651	0.235	针叶混	1.613	0.209
黑松	1.551	0.280	针阔混	1.579	0.222
红松	1.510	0.221	其他硬阔类	1.839	0.213
华山松	1.785	0.170	其他软阔类	1.774	0.209
桦木	1.424	0.248			

注：表E.1、表E.2数据来源：1.中华人民共和国林业行业标准《森林生态系统碳储量计量指南》LY/T 2988—2018；2.侯瑞萍,夏朝宗,陈健等.长江经济带林地和其他生物质碳储量及碳汇量研究[J].生态学报,2022,42(23):9483-9498.

附 录 F
(资料性)
土壤碳密度参考值

表 F.1 土壤碳密度参考值 (单位: 吨碳/公顷)

地类		土壤碳密度平均值	95%置信区间	
			下限	上限
林地	乔木林地	62.87	52.16	73.58
	灌木林地	53.08	41.16	64.99
	其他林地	53.08	41.16	64.99
草地		41.34	33.83	48.86
耕地		43.63	41.44	65.47
园地		53.08	41.16	64.99

注：数据来源：侯瑞萍,夏朝宗,陈健等.长江经济带林地和其他生物质碳储量及碳汇量研究[J].生态学报,2022,42(23):9483-9498.

附 录 G
(规范性)
枯落物生物量比

表 G.1 我国各林地类型的枯落物生物量占地上生物量的比例

森林类型	DF 估计值(%)	样本数	标准差	95%置信区间	
				下限	上限
云冷杉林	9.575	21	9.316	5.334	13.815
落叶松林	26.997	22	24.610	16.085	37.909
红松林	12.814	8	13.922	1.175	24.453
油松林	22.107	26	16.834	15.308	28.907
马尾松林	6.024	36	5.053	4.314	7.733
其他松类-亚热带	9.815	13	5.325	6.598	13.033
其他松类-温带	12.814	8	13.922	1.175	24.453
杉木林	5.086	171	3.735	4.523	5.650
柏木林	3.874	16	5.748	0.811	6.937
栎类	8.874	20	11.653	3.420	14.328
桦木林	22.976	15	40.363	0.624	45.328
其他硬阔类	7.138	30	5.832	4.961	9.316
刺槐林	9.883	9	5.792	5.431	14.335
桉树林	13.100	24	9.360	9.148	17.053
相思林	9.462	10	3.636	6.861	12.063
其他软阔类	8.574	27	6.975	5.815	11.333
针叶混	15.466	5	9.146	4.110	26.822
阔叶混	11.414	31	14.111	6.238	16.590
针阔混-亚热带	7.309	33	4.649	5.660	8.957
针阔混-温带	12.077	6	7.275	4.442	19.711
毛竹林	6.630	12	2.699	4.915	8.345
杂竹林	17.728	5	12.068	2.744	32.713
经济林	13.940	10	12.772	4.803	23.077
灌木林	32.049	60	50.935	18.891	45.207

注：数据来源：中华人民共和国林业行业标准《森林生态系统碳储量计量指南》LY/T 2988—2018。

附 录 H
(资料性)
草地枯落物相关参数

表 H. 1 草地枯落物相关参数

草原类	$B_{枯落物}$ (kg/m ²)	$CF_{枯落物}$ (%)
低地草甸类	0.141	45.71
山地草甸类	0.063	46.29
温性草原类	0.071	45.17
温性荒漠草原类	0.045	44.34

注：数据来源：《草原碳储量核算指南》DB 1502/T 029-2025。

参考文献

- [1] 侯瑞萍,夏朝宗,陈健等.长江经济带林地和其他生物质碳储量及碳汇量研究[J].生态学报,2022,42(23):9483-9498.
- [2] 吴冬秀、张琳、宋创业等著.陆地生态系统生物观测指标与规范[M].北京:环境科学出版社,2019.
- [3] 谢宗强、王杨、唐志尧等著.中国常见灌木生物量模型手册[M].北京:科学出版社,2018.
-

ICS 号

中国标准文献分类号

关键词: 露天矿山、碳汇评估
