

# T/GRM

## 中关村绿色矿山产业联盟团体标准

T/GRM 142—2026

### 煤炭矿区森林地上碳储量监测与评估方法

Methods for monitoring and assessment of aboveground forest carbon stock in coal  
mine area

2026-01-28 发布

2026-01-29 实施

中关村绿色矿山产业联盟 发布

目 次

前言 ..... II

1 范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语和定义 ..... 1

4 范围与对象 ..... 2

5 样地碳储量监测 ..... 2

6 地上碳储量监测 ..... 3

7 森林地上碳储量评估 ..... 4

8 报告编制与数据管理 ..... 7

附录 A （资料性） 森林地上碳储量估算的遥感特征变量 ..... 8

附录 B （资料性） 特征变量筛选方法 ..... 12

附录 C （资料性） 矿区森林地上碳储量模型精度评价指标 ..... 14

附录 D （资料性） 煤炭矿区森林地上碳储量监测与评估报告编制大纲及内容要求 ..... 15

参考文献 ..... 17

## 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。

本文件由中关村绿色矿山产业联盟提出并归口。

本文件起草单位：中国矿业大学（北京）、北京林业大学、中国林业科学研究院。

本文件主要起草人：李晶、黄华国、庞勇、霍江润、余海霞、于强、闫星光、赵艳玲、苏怡婷、郭伟、梁佳欣。

本文件为首次发布。

# 煤炭矿区森林地上碳储量监测与评估方法

## 1 范围

本文件规定了煤炭矿区森林地上碳储量监测与评估的范围与对象、样地碳储量监测、地上碳储量监测、森林地上碳储量评估、报告编制与数据管理等。

本文件适用于煤炭矿区森林地上碳储量监测与评估。

## 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 15663.1 煤矿科技术语 第1部分：煤炭地质与勘查
- GB/T 36100 机载激光雷达点云数据质量评价指标及计算方法
- GB/T 43647 中国森林认证 森林碳汇
- GB/T 43648 主要树种立木生物量模型与碳计量参数
- GB/T 43934 煤矿土地复垦与生态修复技术规范
- CH/Z 3017 地面三维激光扫描作业技术规程
- CH/T 3020 实景三维地理信息数据激光雷达测量技术规程
- CH/T 3023 机载激光雷达数据获取成果质量检验技术规程
- HJ 1166 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 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 1176 全国生态状况调查评估技术规范——数据质量控制与集成
- HJ 1340 生物多样性（陆域生态系统）遥感调查技术指南
- LY/T 3253 林业碳汇计量监测术语

## 3 术语和定义

LY/T 3253界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**煤炭矿区** coal mining district

在煤田范围内，根据地质、地形、交通和生产管理等因素，划分的若干个采矿区域。

[来源：GB/T 15663.1—2025，10.1]

### 3.2

**矿林复合区** overlapped area of mineral and forest resource

煤炭及其共伴生矿产资源开发活动与森林生态系统在空间上重叠的区域。

### 3.3

**森林地上碳储量** aboveground forest carbon stock

截至某一个时间点，森林生态系统各碳库中所积累的碳量，本文件指乔木层地上部分（包括干、桩、枝、皮、种子、叶）的碳储量。

[来源：GB/T 43647—2024，3.4，有修改]

### 3.4

**森林地上碳储量评估** assessment of aboveground forest carbon stock

对煤炭矿区生产活动或生态修复措施影响下森林地上碳储量及时空变化进行评价估算和分析的过程。

### 3.5

**碳储量累积效应** carbon stock cumulative effects

以煤炭及其共伴生矿产资源开采为主的、过去及现在的各种人类行为等对矿区及周边森林地上碳储量造成的连续、多样和综合的影响。

4 范围与对象

- 4.1 监测评估范围应包括采矿权范围和周边可能受开采影响区域。周边可能受开采影响区域应根据实际踏勘、开采沉陷预计等方法确定。
- 4.2 监测评估对象为矿林复合区范围内自基期年以来持续存在、曾经存在和新增形成的针叶林、阔叶林和针阔混交林等乔木林。
- 4.3 监测与评估单元分类应符合表 1 的规定。

表 1 监测与评估单元分类

一级监测评估单元		二级监测评估单元		含 义
代码	名称	代码	名称	
1	持续森林区	—	—	未受或受人类活动影响不明显，具有常年连续稳定冠层覆盖、完整林分结构的森林，包括自然林和长期稳定经营的人工林等。
2	拟损毁森林区	—	—	根据开采计划和采煤损毁预计，在未来一段时间内将要受到扰动的森林。
3	已损毁森林区	—	—	因煤炭开采活动造成原有生态功能部分或全部丧失的森林，且生态修复或复垦措施尚未实施。
		31	挖损区	因露天开采或土石方作业清除森林植被及土壤的区域。
		32	塌陷区	煤矿地下开采引起上覆岩层移动及地表变形的森林区域。
		33	压占区	煤矸石、粉煤灰等固体废弃物堆场或工业场地占用的森林区域。
4	已复垦森林区	—	—	煤矿开采活动造成原有生态功能部分或全部丧失后，通过实施生态修复或复垦措施恢复或新增形成的森林。
		41	已复垦挖损区	原挖损区经过充填、覆土、整地、造林等复垦措施新增形成的森林。
		42	已复垦塌陷区	原塌陷区经过充填、土地平整、植被恢复等措施新增的森林。
		43	已复垦压占区	原压占区经过清障、土壤改良及植被恢复等新增形成的森林。
5	其他扰动区	—	—	受交通建设、城市扩张、火灾、病虫害侵袭等非煤炭开采活动影响的森林。

5 样地碳储量监测

5.1 样地布设

- 5.1.1 样地选择应具备代表性，除应反映起源、树种组成和林龄等森林基本情况外，还应覆盖煤炭矿区不同的森林植被损毁类型及损毁程度区域，应避免仅在健康、聚集的区域选择样地。
- 5.1.2 样地数量确定应遵循代表性、经济性和可行性原则，结合各区域生产活动和生态修复措施的阶段特征，已损毁区域可按原有植被类型增加样地或根据可能修复方向提前布设样地，拟损毁区域可适当增加样地数量。
- 5.1.3 样地选择方法宜根据监测评估单元分层抽样，每个监测评估单元应按 5.1.1 的代表性原则和 5.1.2 的数量要求，结合单元面积、植被异质性确定抽样比例随机取点，每个监测评估单元样地数量一般宜不少于 3 个。
- 5.1.4 样地布设形状应为方形，样地面积宜为 900 m<sup>2</sup>。在地形破碎或林分异质性高的监测评估单元（如已复垦森林区），为保证样地内部的均质性，可采用面积更小的样地（如 400 m<sup>2</sup>~600 m<sup>2</sup>），并相应增加样地数量，以确保统计的代表性。

## 5.2 样地监测

### 5.2.1 样地监测指标

样地监测指标包括样地位置信息、起源、林分类型、树种、胸径（5cm以上）和树高。

### 5.2.2 样地监测技术

监测技术采用三维激光扫描和每木检尺，并应符合下列要求：

- 根据作业环境和精度要求，可选择使用便携式激光雷达、地面固定式激光雷达或机载激光雷达等设备。点云数据获取技术流程、质量评价应符合 GB/T 36100、CH/T 3023、CH/T 3020、CH/Z 3017 的规定。
- 每木检尺样地数量宜为每监测评估单元 1~2 个，每木检尺指标为胸径和树高，每木检尺方法可参照 HJ 1167 执行。
- 样地监测时间可结合南北方差异及树种差异，在生长旺盛期开展，原则上为 7-9 月，可参照 HJ 1167 执行。

### 5.2.3 样地点云数据处理

样地内单木胸径和树高通过处理点云数据获取，并按下列步骤执行：

- a) 数据筛选与裁剪。确定样地中心点坐标，裁剪点云数据至匹配遥感影像像元；
- b) 重采样。对点云数据抽稀处理，采用最小点间距、采样率、八叉树等重采样；
- c) 点云去噪。对高位粗差或低位粗差移除，可采用基于距离统计的滤波方法；
- d) 地面点分类和归一化处理。对地面点云分类，可采用渐进加密三角网滤波方法，然后根据地面点归一化，消除地形起伏；
- e) 确定单木胸径及单木分割。对胸径高度（1.2 m~1.4 m）的点云数据进行聚类拟合获取胸径，确定种子点，然后基于种子点进行单木分割；
- f) 单木属性统计。检查并修正单木分割结果，重新拟合并统计单木的胸径、树高等信息；
- g) 精度验证。利用每木检尺的样地数据，进行精度验证。

## 5.3 样地森林地上碳储量计算

样地森林地上碳储量计算按下列步骤执行：

- a) 单木地上碳储量采用二元立木生物量模型及含碳系数转换法，使用与相应树种（组）对应的模型系数，按公式（1）和公式（2）计算：

$$W = M_A \times CF \quad (1)$$

$$M_A = a_0 D^{a_1} H^{a_2} / (1 \times 10^3) \quad (2)$$

式中：

$W$  ——单木地上碳储量估算值，单位为吨碳（tC）；

$M_A$  ——单木地上生物量估算值，单位为吨（t）；

$CF$  ——含碳系数，取值参考 GB/T 43648；

$a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$  ——模型参数，取值参考 GB/T 43648；

$D$  ——单木胸径，单位为厘米（cm）；

$H$  ——单木树高，单位为米（m）。

- b) 样地森林地上碳储量根据公式（3）计算：

$$C_S = \sum_{k=1}^n W \quad (3)$$

式中：

$C_S$  ——样地森林地上碳储量（tC）；

$n$  ——样地内单木总株数；

$W$  ——含义同式（1）。

## 6 地上碳储量监测

森林地上碳储量采用遥感反演法结合样地森林地上碳储量数据获取，监测步骤包括遥感影像数据获取与预处理、遥感特征变量计算、估算模型构建及碳储量估算。

## 6.1 遥感影像数据获取与预处理

6.1.1 碳储量监测与评估过程涉及的遥感影像数据包括光学遥感影像、合成孔径雷达数据、地形数据产品。遥感影像数据时相选择宜参考样地监测时间。遥感影像数据质量控制指标与评价方法可参照 HJ 1176 执行。

6.1.2 光学遥感影像预处理过程包括辐射校正、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，预处理方法可参照 HJ 1340 和 HJ 1166 执行。

## 6.2 遥感特征变量计算

遥感特征变量包括光学遥感影像原始波段变量、光谱指数变量、缨帽变换及其派生指数变量、纹理特征变量和地形变量，计算公式见附录A。

## 6.3 估算模型构建

### 6.3.1 特征变量筛选

特征变量筛选可采用相关系数法、主成分分析法或随机森林重要性排序等，计算方法见附录B。

### 6.3.2 机器学习最优模型

机器学习模型可采用随机森林、梯度提升决策树、支持向量机、极端梯度提升等。模型构建按下列步骤执行：

- 以实测样地森林地上碳储量为因变量，以筛选后的特征变量为自变量，采用样本训练集对目标模型训练；
- 采用 k 折交叉验证法评估模型训练精度，对比不同模型的预测性能；
- 在优选最佳模型的基础上，采用网格搜索法确定模型超参数；
- 将训练好的最优模型应用于独立测试集，评估模型预测精度；若预测精度较低，可通过增加样本量等以提高预测精度。

### 6.3.3 模型精度评价

模型训练和预测精度常见评价指标可采用决定系数、均方根误差等，计算公式见附录C。模型在独立测试集样本上的预测精度（ $R^2$ ）应不低于0.60。

## 6.4 碳储量估算

监测评估时段内逐年煤炭矿区森林地上碳储量空间分布数据，应根据森林类型或树种（组），采用最优模型及最佳超参数反演获取。

## 7 森林地上碳储量评估

### 7.1 评估内容

森林地上碳储量评估包括下列内容：

- 时序变化特征评估指标包括静态时点间森林地上碳储量的变化量和变化度，特定时段内的变化趋势和累积变化量；
- 空间分布特征评估指标包括监测评估单元内目标值的分区统计量、聚集程度。

### 7.2 碳储量变化量

单个像元碳储量变化量根据公式（4）计算：

$$\Delta C_{S,ij} = C_{S,i} - C_{S,j}, t_1 \leq j < i \leq t_n \quad (4)$$

式中：

$\Delta C_{S,ij}$  ——像元在第  $i$  年相对第  $j$  年森林地上碳储量的变化量，单位为吨碳（tC）；

$C_{S,i}$ 、 $C_{S,j}$ ——像元分别在第  $i$  年和第  $j$  年的森林地上碳储量，单位为吨碳（tC）；  
 $t_1$ 、 $t_n$ ——分别为监测评估的起始年和结束年， $n$ 为时间序列总长度。

### 7.3 碳储量变化度

单个像元碳储量变化度根据公式（5）计算：

$$R_{CS,ij} = [\Delta C_{S,ij} / C_{S,j}] \times 100\%, t_1 \leq j < i \leq t_n \quad (5)$$

式中：

$R_{CS,ij}$ ——像元在第  $i$  年相对第  $j$  年森林地上碳储量的变化度；  
 $\Delta C_{S,ij}$ 、 $C_{S,j}$ 、 $t_1$ 、 $t_n$ ——含义同式（4）。

### 7.4 碳储量变化趋势

单个像元碳储量变化趋势评估采用Sen+MK趋势检验法，并按下列步骤执行：

- a) 采用 Theil-Sen Median（Sen）趋势分析法逐像元评估时序碳储量数据的趋势斜率，按公式（6）计算：

$$S_{lope} = \text{median}[(C_{S,i} - C_{S,j}) / (i - j)], t_1 \leq j < i \leq t_n \quad (6)$$

式中：

$S_{lope}$ ——像元森林地上碳储量的变化趋势斜率；  
 $\text{median}()$ ——中位数函数；  
 $C_{S,i}$ 、 $C_{S,j}$ 、 $t_1$ 、 $t_n$ ——含义同式（4）。

- b) 采用 Mann-Kendall（MK）检验法对时序数据的单调趋势进行显著性检验，按下列公式计算：

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{V_{ar}(S)} & , S > 0 \\ 0 & , S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{V_{ar}(S)} & , S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(C_{S,i} - C_{S,j}) \quad (8)$$

$$V_{ar}(S) = [n(n-1)(2n+5)]/18 \quad (9)$$

$$\text{sgn}(C_{S,i} - C_{S,j}) = \begin{cases} 1 & , C_{S,i} - C_{S,j} > 0 \\ 0 & , C_{S,i} - C_{S,j} = 0 \\ -1 & , C_{S,i} - C_{S,j} < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中：

$Z$ ——趋势统计量；  
 $S$ ——检验统计量；  
 $V_{ar}(S)$ ——检验统计量  $S$  的方差；  
 $\text{sgn}()$ ——符号函数；  
 $C_{S,i}$ 、 $C_{S,j}$ 、 $n$ ——含义同式（4）。

- c) 碳储量变化趋势评估等级可参考表 2。

表 2 碳储量变化趋势评估等级

情况	$S_{lope}$	$Z$	碳储量变化趋势评估等级
1	$S_{lope} > 0$	$Z > 2.58$	极显著上升
2	$S_{lope} > 0$	$1.96 \leq Z < 2.58$	显著上升
3	$S_{lope} > 0$	$0 \leq Z < 1.96$	不显著上升
4	$S_{lope} = 0$	$Z = 0$	基本不变
5	$S_{lope} < 0$	$-1.96 \leq Z < 0$	不显著下降
6	$S_{lope} < 0$	$-2.58 < Z < -1.96$	显著下降
7	$S_{lope} < 0$	$Z < -2.58$	极显著下降



## 7.5 碳储量累积效应

碳储量累积效应的强度通过碳储量的累积变化量表征，单个像元碳储量累积变化量计算应按下列步骤执行：

- a) 实际碳累积量按公式（11）计算：

$$A_{\text{CSC}} = \sum_{t_1}^{t_n} C_S(t) \quad (11)$$

式中：

$A_{\text{CSC}}$  ——像元的实际碳累积量，单位为吨碳（tC）；

$C_S(t)$  ——用于描述像元的实际森林地上碳储量随年份  $t$  ( $t=t_1, t_2, \dots, t_n$ ) 变化情况的离散函数，单位为吨碳（tC）。

- b) 理想碳累积量计算。对照基准为调查区域自身，建立基期年森林地上碳储量与气温、降水等环境要素的回归关系，按下列公式计算：

$$I_{\text{CSC}} = \sum_{t_1}^{t_n} I_{\text{CS}}(t) \quad (12)$$

$$I_{\text{CS}}(t) = a_1 P_{w,t} + a_2 P_{x,t} + b_1 T_{y,t} + b_2 T_{z,t} + e \quad (13)$$

式中：

$I_{\text{CSC}}$  ——像元的理想碳累积量，单位为吨碳（tC）；

$I_{\text{CS}}(t)$  ——用于描述像元的理想森林地上碳储量随年份  $t$  ( $t=t_1, t_2, \dots, t_n$ ) 变化情况的离散函数，单位为吨碳（tC）；

$a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $e$  ——待定系数；

$P_{w,t}$ 、 $P_{x,t}$  ——像元在  $t$  年与  $C_S(t)$  相关性最高（第  $w$  月）和次高（第  $x$  月）的月度降水值；

$T_{y,t}$ 、 $T_{z,t}$  ——像元在  $t$  年与  $C_S(t)$  相关性最高（第  $y$  月）和次高（第  $z$  月）的月度气温值。

- c) 碳累积变化量计算，按公式（14）计算：

$$C_{\text{CSC}} = A_{\text{CSC}} - I_{\text{CSC}} \quad (14)$$

式中：

$C_{\text{CSC}}$  ——像元的碳累积变化量，单位为吨碳（tC）；

$A_{\text{CSC}}$ 、 $I_{\text{CSC}}$  ——同公式（11）、（12）。

- d) 累积变化量评估。采用自然断点法将  $C_{\text{CSC}}$  分为高度负向、低度负向、无明显、低度正向和高度正向等级，根据累积变化量评估结果可分区制定相应管理措施。

## 7.6 碳储量空间聚集程度

区域碳储量空间聚集程度评估采用热点分析法（Getis-Ord  $G_i^*$ ），按下列步骤执行：

- a) Getis-Ord  $G_i^*$  统计量按下列公式计算：

$$G_i^* = \frac{\sum_{k=1}^N w_{i,k} \cdot C_{S,k} - \bar{C}_S \sum_{k=1}^N w_{i,k}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{k=1}^N w_{i,k}^2 - (\sum_{k=1}^N w_{i,k})^2}{N-1}}} \quad (15)$$

$$\bar{C}_S = \frac{\sum_{k=1}^N C_{S,k}}{N} \quad (16)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N C_{S,k}^2}{N} - (\bar{C}_S)^2} \quad (17)$$

式中：

$G_i^*$  —— $G_i^*$  统计量，代表聚集趋势和聚集显著性；

$N$  ——监测评估单元的像元总数；

$C_{S,k}$  ——第  $k$  个像元的森林地上碳储量；

$w_{i,k}$  ——第  $i$  个像元和第  $k$  个像元间的空间权重，计算方法可采用距离权重法和高斯权重法；

$\bar{C}_S$  ——监测评估单元森林地上碳储量值的均值；

- $S$  ——监测评估单元森林地上碳储量值的标准差。
- b) 碳储量空间聚集程度评估等级可按表 3 确定。

表 3 碳储量空间聚集程度评估等级

情况	$G_i^*$	聚集区域判断
1	$G^* > 2.58$	极显著高值聚集区域
2	$1.96 \leq G^* < 2.58$	显著高值聚集区域
3	$-1.96 \leq G^* < 1.96$	无明显聚集趋势区域
4	$-2.58 < G^* < -1.96$	显著低值聚集区域
5	$G^* < -2.58$	极显著低值聚集区域

7.7 碳储量分区差异

- 7.7.1 碳储量分区统计分析应根据监测与评估单元分类体系，分别按持续森林区、拟损毁森林区、已损毁森林区、已复垦森林区及其他扰动区域确定。
- 7.7.2 统计内容可采用监测评估单元碳储量及其变化量、变化度、变化趋势和累积变化量，统计指标可采用算术平均值、最大值、最小值及方差。
- 7.7.3 对于空间分布上相互独立的同类型二级监测评估单元，宜根据实际需要分别设定为独立的统计分析单元。

8 报告编制与数据管理

8.1 报告编制

- 8.1.1 监测评估报告内容应包括矿林复合区与矿产资源开发基本情况、监测评估范围与监测点布设概况、样地森林地上碳储量监测、森林地上碳储量模型构建与反演结果、森林地上碳储量时空变化评估与分析。可结合监测与评估结果提出管理建议。
- 8.1.2 碳储量监测评估报告编制大纲及内容要求见附录 D。

8.2 数据管理

- 8.2.1 监测评估数据包括指标采集的原始数据和经规范化处理后的数据，遥感数据集可参照 GB/T 34514 执行。
- 8.2.2 各阶段工作产生的数据应及时分类整理、编目、存档。除保存原始纸介质资料外，应建立监测数据集对数据资料管理。数据格式可参照 HJ 1176 执行。

附 录 A

(资料性)

森林地上碳储量估算的遥感特征变量

A.1 光学遥感影像原始波段变量

光学遥感影像原始波段变量见表A.1。

表 A.1 光学遥感影像原始波段变量

变量名称	Landsat 5/7 (TM/ETM+) 对应波段编号	Landsat 8/9 (OLI/OLI-2) 对应波段编号	Sentinel-2 (MSI) 对应波段编号
Blue	B1	B2	B2
Green	B2	B3	B3
Red	B3	B4	B4
Red Edge 1	/	/	B5
Red Edge 2	/	/	B6
Red Edge 3	/	/	B7
NIR	B4	B5	B8
Red Edge 4	/	/	B8A
SWIR1	B5	B6	B11
SWIR2	B7	B7	B12

A.2 光谱指数变量

光谱指数变量计算公式见表A.2。

表 A.2 光谱指数变量

序号	变量名称	缩 写	公 式
1	比值植被指数	RVi	$RVi = NIR / R$
2	红绿比值指数	RGRI	$RGRI = R / G$
3	差值植被指数	DVI	$DVI = NIR - R$
4	红边叶绿素指数	CI <sub>re</sub>	$CI_{re} = (Re4 / Re1) - 1$
5	绿叶色素植被指数	GCVI	$GCVI = (NIR / G) - 1$
6	归一化差值植被指数	NDVI	$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$
7	蓝波归一化植被指数	BNDVI	$BNDVI = (NIR - B) / (NIR + B)$
8	绿波归一化植被指数	GNDVI	$GNDVI = (NIR - G) / (NIR + G)$
9	归一化差值含水指数	NDMI	$NDMI = (NIR - S1) / (NIR + S1)$
10	结构不敏感色素指数	SIPI	$SIPI = (NIR - B) / (NIR - R)$
11	归一化燃烧比率	NBR	$NBR = (NIR - S2) / (NIR + S2)$
12	归一化燃烧比率2	NBR2	$NBR2 = (S1 - S2) / (S1 + S2)$
13	可视化大气阻抗指数	VARI	$VARI = (G - R) / (G + R - B)$
14	绿蓝标准化差异植被指数	GBNDVI	$GBNDVI = (NIR - B - G) / (NIR + B + G)$
15	红蓝标准化差异植被指数	RBNDVI	$RBNDVI = (NIR - B - R) / (NIR + B + R)$

表A.2 光谱指数变量（续）

序号	变量名称	缩 写	公 式
16	垂直植被指数	PVI	$PVI=(NIR-a \times R-b) / \sqrt{1+a^2}$ $a$ 为土壤线斜率, $b$ 为土壤线截距
17	土壤调节植被指数	SAVI	$SAVI=(NIR-R) \times (1+L) / (NIR+R+L)$ $L$ 为土壤调节参数
18	大气阻抗植被指数	ARVI	$ARVI=(NIR-RB) / (NIR+RB)$ ; $RB=R-\gamma \times (B-R)$ $\gamma$ 为光学路径效应因
19	增强型植被指数	EVI	$EVI=2.5 \times (NIR-R) / (NIR+6 \times R-7.5 \times B+1)$
20	双波段增强型植被指数	EVI2	$EVI2=2.4 \times (NIR-R) / (NIR+R+1)$
21	全球环境监测指数	GEMI	$GEMI=\eta \times (1-0.25 \times \eta) - \frac{R-0.125}{1-R}$ $\eta=\frac{2(NIR^2-R^2)+1.5 \times NIR+0.5 \times R}{NIR+R+0.5}$
22	红边简单比值指数	SRre	$SRre=NIR / Re2$
23	归一化红边植被指数1	NDVIre1	$NDVIre1=(Re4-Re1) / (Re4+Re1)$
24	归一化红边植被指数2	NDVIre2	$NDVIre2=(Re4-Re2) / (Re4+Re2)$
25	归一化红边植被指数3	NDVIre3	$NDVIre3=(Re4-Re3) / (Re4+Re3)$
26	归一化红边指数1	NDre1	$NDre1=(Re2-Re1) / (Re2+Re1)$
27	归一化红边指数2	NDre2	$NDre2=(Re3-Re1) / (Re3+Re1)$
28	归一化红边差异植被指数	NREDVI	$NREDVI=1+(Re4-Re1-Re2-Re3) / (Re4+Re1+Re2+Re3)$
29	红边三角植被指数	RTVICore	$RTVICore=100 \times (NIR-Re1)-10 \times (NIR-Green)$
30	综合森林特征指数	IFZ	$IFZ=\sqrt{(R_{\tau}^2+S1_{\tau}^2+S2_{\tau}^2)/3}$ $R_{\tau}=(R-R_{\mu})/R_{\sigma}$ $S1_{\tau}=(S1-S1_{\mu})/S1_{\sigma}$ $S2_{\tau}=(S2-S2_{\mu})/S2_{\sigma}$

注:  $R$ 、 $G$ 、 $B$ 、 $NIR$ 、 $S1$ 、 $S2$ 、 $Re1$ 、 $Re2$ 、 $Re3$ 、 $Re4$ 分别代表红光、绿光、蓝光、近红外、短波红外1、短波红外2、红边1、红边2、红边3、红边4波段的地表反射率,  $\mu$ 、 $\sigma$ 分别代表纯净森林像元相应波段的均值及标准差。

## A.3 缨帽变换及其派生指数变量

缨帽变换变量转换系数见表A.3, 缨帽变换派生指数变量见表A.4。

表 A.3 缨帽变换变量转换系数

卫星传感器	缨帽变换变量	波 段					
		Blue	Green	Red	NIR	SWIR1	SWIR2
Landsat 5 TM	TCB	0.2909	0.2493	0.4806	0.5568	0.4438	0.1706
	TCG	-0.2728	-0.2174	-0.5508	0.7221	0.0733	-0.1648
	TCW	0.1446	0.1761	0.3322	0.3396	-0.6210	-0.4186
Landsat 7 ETM <sup>+</sup>	TCB	0.3561	0.3972	0.3904	0.6966	0.2286	0.1596
	TCG	-0.3344	-0.3544	-0.4556	0.6966	-0.0242	-0.2630
	TCW	0.2626	0.2141	0.0926	0.0656	-0.7629	-0.5388
Landsat 8 OLI	TCB	0.3029	0.2786	0.4733	0.5599	0.5080	0.1872
	TCG	-0.2941	-0.2430	-0.5424	0.7276	0.0713	-0.1608
	TCW	0.1511	0.1973	0.3283	0.3407	-0.7117	-0.4559
Sentinel-2 MSI	TCB	0.3510	0.3813	0.3437	0.7196	0.2396	0.1949
	TCG	-0.3599	-0.3533	-0.4734	0.6633	-0.0087	-0.2856
	TCW	0.2578	0.2305	0.0883	0.1071	-0.7611	-0.5308

注: TCB、TCG、TCW分别代表亮度分量（Tasseled Cap Brightness）、绿度分量（Tasseled Cap Greenness）和湿度分量（Tasseled Cap Wetness）。

表 A.4 缨帽变换派生指数变量

序号	变量名称	缩 写	公 式
1	缨帽距离	TCD	$TCD=\sqrt{TCB^2+TCG^2}$
2	缨帽角	TCA	$TCA=\arctan(TCG/TCB)$
3	扰动指数	DI	$DI=TCB_{\tau}-(TCG_{\tau}+TCW_{\tau})$ $TCG_{\tau}=(TCG-TCG_{\mu})/TCG_{\sigma}$ $TCB_{\tau}=(TCB-TCB_{\mu})/TCB_{\sigma}$ $TCW_{\tau}=(TCW-TCW_{\mu})/TCW_{\sigma}$
注：μ、σ分别代表纯净森林像元相应变量的均值及标准差。			

A.4 纹理特征变量

纹理特征变量可采用灰度共生矩阵计算，纹理特征变量计算公式见表A.5。

表 A.5 纹理特征变量

序号	变量名称	缩 写	公 式
1	平均值	MEA	$MEA=\sum_i\sum_j[i\times p(i,j)]$
2	方差	VAR	$VAR=\sum_i\sum_j[(i-MEA)^2\cdot p(i,j)]$
3	均匀性	HOM	$HOM=\sum_i\sum_j\{p(i,j)/[1+(i-j)^2]\}$
4	对比度	CON	$CON=\sum_{n=0}^{N_g}n^2\left\{\sum_{i=1}^{N_g}\sum_{j=1}^{N_g}p(i,j)\middle   i-j =n\right\}$
5	非相似性	DIS	$DIS=\sum_{n=1}^{N_g-1}n\left\{\sum_{i=1}^{N_g}\sum_{j=1}^{N_g}p(i,j)\middle   i-j =n\right\}$
6	信息熵	ENT	$ENT=-\sum_i\sum_j\{p(i,j)\log[p(i,j)]\}$
7	二阶矩	SEC	$SEC=\sum_i\sum_j[p(i,j)]^2$
8	相关性	COR	$COR=\{[\sum_i\sum_j(i,j)p(i,j)]-\mu_x\mu_y\}/\sigma_x\sigma_y$
注：p(i,j)为灰度共生矩阵中第 i 行第 j 列处元素的值，N <sub>g</sub> 为量化图像中不同灰度级的数量，μ <sub>x</sub> 、σ <sub>x</sub> 、μ <sub>y</sub> 和σ <sub>y</sub> 分别为灰度共生矩阵行、列的均值和标准差。			

A.5 合成孔径雷达数据

合成孔径雷达数据波段变量见表A.6。

表 A.6 合成孔径雷达数据波段变量

序号	数据源	空间分辨率	时间分辨率	极化方式	波段
1	PALSAR/PALSAR-2	25 m	60-90天	单极化（HH、HV）、双极化（HH+HV、VV+VH）	L波段
2	Sentinel-1 A/B	5×20 m	6-12天	单极化（HH、HV）、双极化（HH+HV、VV+VH）	C波段

A.6 地形变量

地形变量包括高程、坡度和坡向。高程数据可采用SRTM DEM、ASTER GDEM、NASA DEM、ALOS World 3D等。根据高程数据计算坡度和坡向，坡度按公式（A.1）计算，坡向按公式（A.2）计算：

$$Slope=\arctan\left(\sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}\right)\cdots\cdots\cdots (A.1)$$

$$Aspect=180^{\circ}+\arctan\left(\frac{\partial z}{\partial y}/\frac{\partial z}{\partial x}\right)\cdots\cdots\cdots (A.2)$$

式中：

*Slope* ——坡度，值域为 $(0^\circ, 90^\circ]$ ;

*Aspect* ——坡向，值域为 $(0^\circ, 360^\circ]$ ;

$\frac{\partial z}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial z}{\partial y}$  ——分别为DEM中相邻像素点之间的高度差与水平距离之比。

## 附录 B (资料性) 特征变量筛选方法

### B.1 相关系数法

计算特征变量与目标变量的相关性强度和显著性，选择强显著相关性变量建立碳储量估算模型。可采用 Pearson's 相关性分析法，按公式 (C.1) 和公式 (C.2) 计算：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (\text{C.1})$$

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad (\text{C.2})$$

式中：

- $r$  —— 相关系数，其值越接近1，表明正线性相关性越强；越接近-1表明负线性相关性越强；
- $n$  —— 样本数量；
- $x_i$ 、 $y_i$  —— 特征变量、目标变量样本观测值；
- $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$  —— 特征变量、目标变量样本均值；
- $t$  —— 显著性检验统计量。若  $|t| > t_{\alpha/2, n-2}$ ，说明存在线性关系；若  $|t| \leq t_{\alpha/2, n-2}$ ，说明无线性关系。

置信水平  $\alpha$  通常取 0.05。

### B.2 主成分分析法

主成分分析包括五个步骤。如下所示：

- a) 对样本矩阵  $X = (x_{ij})_{n \times m}$  ( $X \in R^{n \times m}$ ,  $R^{n \times m}$  表示实数组成的  $n$  行  $m$  列矩阵) 进行中心化和标准化得到  $X_c = (x_{c,ij})_{n \times m}$ ，按公式 (C.3) - (C.5) 计算：

$$x_{c,ij} = (x_{ij} - \mu_j) / \sigma_j \quad (\text{C.3})$$

$$\mu_j = (\sum_{i=1}^n x_{ij}) / n \quad (\text{C.4})$$

$$\sigma_j = \sqrt{[\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \mu_j)^2] / (n-1)} \quad (\text{C.5})$$

式中：

- $x_{c,ij}$  —— 中心化后的矩阵元素；
  - $x_{ij}$  —— 原始矩阵元素，代表第  $i$  个样本的第  $j$  个特征变量值， $i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m$ ；
  - $\mu_j$ 、 $\sigma_j$  —— 第  $j$  个特征变量的样本均值和标准差，即原始矩阵第  $j$  列数据的均值和标准差。
- b) 计算协方差矩阵，按公式 (C.6) 计算：

$$C = X_c^T X_c / (n-1) \quad (\text{C.6})$$

式中：

- $C$  —— 协方差矩阵， $C \in R^{m \times m}$ ；
  - $X_c$ 、 $X_c^T$  —— 转置前后的中心化矩阵。
- c) 协方差矩阵的对角化计算：由于矩阵  $C$  是对称矩阵，其对角化就是找到一个正交矩阵  $P$ ，满足  $P^T C P = A$ 。其中，对  $C$  进行特征分解，得到特征值矩阵  $A = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$ ，得到的特征向量矩阵并进行正交化即为  $P$ 。
- d) 计算各主成分贡献率与累积贡献率，贡献率按公式 (C.7) 计算，累计贡献率按公式 (C.8) 计算：

$$cr_i = \lambda_i / \sum_{k=1}^m \lambda_k \quad (\text{C.7})$$

$$acr_i = \sum_{k=1}^i \lambda_k / \sum_{k=1}^m \lambda_k \quad (\text{C.8})$$

式中:

$cr_i$  ——第  $i$  个主成分的贡献率,  $i=1, 2, \dots, m$ ;

$acr_i$  ——前  $i$  个主成分的累积贡献率;

$\lambda_i$  ——第  $i$  个主成分的特征值, 由特征值矩阵  $\Lambda$  获取。

- e) 根据需要选取最大的前  $p$  ( $p < m$ ) 个特征值对应的维度, 这  $p$  个特征值组成新的对角阵  $\Lambda_1 \in \mathbf{R}^{p \times p}$ , 对应的  $p$  个特征值组成新的特征向量矩阵  $P_1$ , 将原始样本矩阵  $X$  投影到新的特征向量矩阵  $P_1$  上, 得到降维后的新样本矩阵  $X_1$ , 按公式 (C.9) 计算:

$$X_1 = XP_1 \quad (\text{C.9})$$

式中:

$X_1$  ——降维后的新样本矩阵,  $X_1 \in \mathbf{R}^{n \times p}$ ;

$X$  ——原始样本矩阵;

$P_1$  ——新特征向量矩阵,  $P_1 \in \mathbf{R}^{m \times p}$ 。

### B.3 随机森林特征筛选

采用随机森林算法中提供的平均不纯度减少方法, 对所有特征变量重要性排序, 筛选重要性排序较高的特征变量。



附 录 C

(资料性)

矿区森林地上碳储量模型精度评价指标

模型精度评价指标及其计算公式见表D.1。

表 D. 1 模型精度评价指标

序号	名称	缩写	公式
1	决定系数	$R^2$	$R^2=1-\sum(a_i-p_i)^2/\sum(a_i-\bar{a})^2$
2	均方根误差	RMSE	$R_{MSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(p_i-a_i)^2}{n}}$
3	平均绝对误差	MAE	$M_{AE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n p_i-a_i $
4	相对误差	RE	$R_E=\frac{(p_i-a_i)}{a_i}\times 100\%$
注： $p_i$ 为森林地上碳储量预测值， $a_i$ 为森林地上碳储量观测值， $n$ 为样本数量， $\bar{a}$ 为森林地上碳储量观测值的平均值。			

## 附录 D (资料性)

### 煤炭矿区森林地上碳储量监测与评估报告编制大纲及内容要求

#### D.1 前言

##### D.1.1 编制目的

简述报告编制任务的由来与目的。涉及持续监测评估的，说明前期工作成果、存在问题及经验，并概述本期监测评估的主要内容。

##### D.1.2 编制工作概况

简述报告编制的时间安排、主要阶段及人员组织情况。

#### D.2 矿区基本情况

##### D.2.1 矿区地理位置与区域概况

说明矿区位置与交通状况，与周边城镇、村庄、公路、铁路、河流、相邻矿山、大型基础设施的位置关系，提供矿区位置图。

##### D.2.2 矿区自然条件

简述矿区所在的流域地形地貌、水文气象条件，以及土壤、植被、地下水基本状况，提供矿区遥感影像图。参照GB/T 43934中6.1.2条款相关要求执行。

##### D.2.3 矿区地质环境背景

简述采矿权范围及采矿活动可能影响范围的地质环境条件。参照GB/T 43934中6.1.5条款相关要求执行。

##### D.2.4 矿区土地利用现状

简述采矿权范围及采矿活动可能影响范围的土地利用现状，重点说明森林分布情况，以及未损毁、已损毁、已复垦修复土地的调查情况。参照GB/T 43934中6.1.6条款相关要求执行。附矿区土地利用现状表、矿区土地利用现状图。

#### D.3 煤炭资源开采与生态修复情况

##### D.3.1 煤炭资源及开采概况

简述矿区煤炭资源与开采历史、现状和未来开采计划情况，开采历史包括各时期开采范围、开采方式、开采规模、采深采厚等。

##### D.3.2 矿区生态修复工作情况

简述矿区以往开展的生态修复工作情况，包括实施措施、取得成效、存在的问题等。

##### D.3.3 监测评估范围与对象

简述矿区监测评估范围、监测评估对象及监测评估单元划分情况等。

#### D.4 样地森林地上碳储量监测

##### D.4.1 样本点布设

简述样本点布设原则与依据，包括样本点数量确定原则、分层抽样依据、样地设计与布局等。

##### D.4.2 野外调查方法与调查结果

简述样地调查的时间与设备、样地调查的指标与技术（样地基本信息记录、每木检尺等）。附样地调查表。

#### D.4.3 样地森林地上碳储量监测方法与结果

简述样地点云数据预处理过程及相关参数、单木属性统计情况、使用每木检尺数据对点云数据的验证结果、样地碳储量计量参数。附样地单木属性统计表、样地碳储量计算结果。

#### D.5 矿区森林地上碳储量监测

##### D.5.1 遥感影像数据概况及预处理

简述遥感数据来源、选择依据与数据预处理流程，包括数据清单、数据获取时间与质量说明。

##### D.5.2 遥感特征变量计算方法与结果

简述遥感特征变量计算过程、特征变量筛选方法与结果。

##### D.5.3 矿区森林植被分布数据概况

简述矿区森林植被分布数据来源、分类体系与数据质量说明。附矿区森林植被分布图。

##### D.5.4 矿区森林地上碳储量模型构建

简述矿区森林地上碳储量模型构建、参数优化、精度评价流程与结果。

##### D.5.5 矿区森林地上碳储量监测结果与制图

简述矿区逐年森林地上碳储量监测结果。附矿区森林地上碳储量时空分布图。

#### D.6 矿区森林地上碳储量评估

##### D.6.1 森林地上碳储量的变化趋势与强度

基于特定时点间森林地上碳储量空间分布数据，计算年度或阶段性的变化量、变化度，根据变化量和变化度分析各监测评估单元在特定时点间的变化趋势与强度；基于长时序森林地上碳储量空间分布数据，计算趋势斜率与单调显著性，分析各监测评估单元的长期变化趋势。

##### D.6.2 森林地上碳储量的累积变化量

基于长时序森林地上碳储量空间分布数据，计算森林地上碳储量的累积变化量，分析有无煤炭开采活动影响下的森林地上碳储量累积差异。

##### D.6.3 森林地上碳储量的空间分布

基于森林地上碳储量空间分布数据，计算Getis-Ord  $G_i^*$  统计量，分析矿区森林地上碳储量的空间聚集分布情况；计算各监测评估单元的变化量、变化度、变化趋势与累积变化量的统计量，分析各监测评估单元森林地上碳储量空间分布差异。

#### D.7 结论与建议

##### D.7.1 结论

简要说明各章节结论性内容，系统总结矿区森林地上碳储量的现状特征、变化规律及空间分布模式。

##### D.7.2 建议

根据监测与评估结果，提出科学合理的管理与政策建议，包括矿区生态修复优化方向、森林碳汇提升措施、长期监测体系建设及数据更新机制等。

## 参 考 文 献

- [1] GB/T 34514—2017 陆地观测卫星遥感数据分发与用户服务要求
- [2] GB/T 43935—2024 矿山土地复垦与生态修复监测评价技术规范
- [3] HJ 1272—2022 生态保护修复成效评估技术指南(试行)
- [4] HJ 1320—2023 生态遥感地面观测与验证技术导则
- [5] LY/T 2988—2018 森林生态系统碳储量计量指南
- [6] DB 4403/T 534—2024 城市森林碳储量与碳汇量评估技术规范
- [7] 国土资源部办公厅. 国土资源部办公厅关于做好矿山地质环境保护与土地复垦方案编报有关工作的通知(国土资规〔2016〕21号). 2017年1月
- [8] 梁佳欣, 李晶, 殷守强, 等. 半干旱草原露天矿区生态累积效应: 评估模型与应用 [J]. 煤炭学报, 2024, 49 (7): 3199-3215.
- [9] YAN X G, LI J, SMITH A R, et al. Evaluation of machine learning methods and multi-source remote sensing data combinations to construct forest above-ground biomass models [J]. International Journal of Digital Earth, 2023, 16 (2): 4471-4491.
- [10] SHI T T, XU H Q. Derivation of tasseled cap transformation coefficients for Sentinel-2 MSI at-sensor reflectance data [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12 (10): 4038-4048.
- [11] BAIG M H A, ZHANG L F, SHUAI T, et al. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance [J]. Remote Sensing Letters, 2014, 5 (5): 423-431.
- [12] HUANG C, WYLIE B, Yang L, et al. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23 (8): 1741-1748.
- [13] CRIST E P, LAURIN R, CICONE R C. Vegetation and soils information contained in transformed thematic mapper data [C]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Society. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing 86 Symposium, Paris: European Space Agency, 1986: 1465-1470.