

T/GRM

中关村绿色矿山产业联盟团体标准

T/GRM XXXX—2025

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 stocks in coal
mine area

(征求意见稿)

在提交反馈意见时, 请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 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	1
5 样地碳储量监测	2
6 地上碳储量监测	3
7 碳储量评估	4
8 报告编制与数据管理	7
附录 A (资料性) 碳储量估算中常用的遥感特征变量	8
附录 B (资料性) 矿区森林、林型及树种(组)识别方法	11
附录 C (资料性) 特征变量筛选方法	13
附录 D (资料性) 矿区森林地上碳储量模型精度评价指标	15
附录 E (资料性) 煤炭矿区森林地上碳储量监测与评估报告编写提纲	16
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：

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及对象、样地碳储量监测、地上碳储量监测、碳储量评估、和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 36100	机载激光雷达点云数据质量评价指标及计算方法
GB/T 38590	森林资源连续清查技术规程
GB/T 42251	采矿沉陷区生态修复技术规程
GB/T 43648	主要树种立木生物量模型与碳计量参数
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 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 2988	森林生态系统碳储量计量指南
LY/T 3128	森林植物分类、调查与制图规范
LY/T 3253	林业碳汇计量监测术语
DD 2013—12	多光谱遥感数据处理技术规程

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

矿林复合区 overlapped area of mineral and forest resource

矿产资源开发活动与森林生态系统在空间上重叠的区域。

注：即地表为森林资源，地下埋藏有矿产资源的区域，包含矿产资源开采可能影响到的森林区域。

3.2

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的时空变化特征进行评估的过程。

3.3

碳储量累积效应 carbon stock cumulative effects

以矿产资源开采为主的、各项过去及现在的人类行为对矿区及周边森林地上碳库造成的影响，以碳累积变化量表征。

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确定，宜按采矿权范围为中心区域向外缓冲 100 m~500 m 确定。

4.2 监测评估对象应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、针阔混交林和稀疏林等乔木林。

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	—	—	未受或受轻度煤炭开采活动影响, 具有常年连续稳定冠层覆盖、完整林分结构的森林, 包括原生林地和长期稳定经营的人工林等。
2	拟损毁森林	—	—	受煤炭开采活动影响可能会损毁的森林。
3	已损毁森林	—	—	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挖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, 造成森林生态系统受损的区域。
		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区域。
		—	—	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。
4	已复垦森林	41	复垦挖损区	原挖损区经过覆土、整地、造林等复垦措施新增形成的森林。
		42	复垦塌陷区	原塌陷区经过土地平整、生态修复等恢复或新增形成的森林。
		43	复垦压占区	原压占区经过清障、土壤改良或植被恢复新增形成的森林。
5	其他扰动	—	—	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和典型性, 除应反映树种(组)、龄(组)等调查总体情况外, 还应兼顾煤炭矿区对森林植被的损毁类型, 应避免仅在健康、聚集的区域选择样地。

5.1.2 样地数量应按代表性、经济性和可行性, 根据各区域生产活动和生态修复措施的阶段特征确定, 已损毁区域应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 样地选择方法应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 和 5.1.2 的规定随机取点, 每个监测评估单元样地数量不应少于 3 个。

5.1.4 样地布设形状宜为方形, 样地面积应为 30 m×30 m。

5.2 样地指标监测

5.2.1 样地监测指标

样地监测指标应包括样地位置信息、森林类型、树种(组)和单木胸径、单木树高。

5.2.2 样地监测技术

监测技术应采用三维激光扫描和每木检尺, 并应符合下列规定:

——根据作业环境和精度要求, 可选择使用便携式激光雷达、地面固定站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, 每木检尺指标应为胸径和树高, 每木检尺方法可参照 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应通过处理点云数据获取，并应按下列步骤执行：

- 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。
- 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。
- 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。
- 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。
- 确定单木胸径及单木分割。对胸径高度（1.2~1.4 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。
- 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。
- 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应按下列步骤执行：

- 单木地上碳储量应采用二元立木生物量模型及含碳系数转换法，按下列公式计算：

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

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

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—2024；
 a_0, a_1, a_2 ——模型参数，取值参考GB/T 43648—2024；
 D ——单木胸径，单位为厘米（cm）；
 H ——单木树高，单位为米（m）。

- 样地森林地上碳储量应按下式计算：

$$C_S = (\sum_{k=0}^n W) / S \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

式中：

C_S ——样地森林地上碳储量（tC/hm²）；
 n ——样地内单木总株数；
 W ——含义同式（1）；
 S ——样地面积（hm²）。

6 地上碳储量监测

6.1 森林地上碳储量应采用遥感反演法结合样地森林地上碳储量数据获取，监测步骤应包括遥感影像获取与预处理、遥感特征变量计算、关键森林结构参数获取、估算模型构建及碳储量反演。

6.2 数据获取与预处理

6.2.1 碳储量监测与评估过程涉及的遥感影像数据应包括光学遥感影像、合成孔径雷达数据、地形数据产品。遥感影像数据质量控制指标与评价方法可参照HJ 1176执行。

6.2.2 光学遥感影像预处理过程应包括辐射校正、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DD 2013—12执行。

6.3 遥感特征变量计算

遥感特征变量应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。

6.4 关键森林结构参数获取

6.4.1 碳储量监测与评估过程可使用已有的森林类型或树种（组）空间分布数据，或采用分层分类方法反演获取，见附录B。

6.4.2 森林植被分布图制作可参照LY/T 3128执行。

6.5 估算模型构建

6.5.1 特征变量筛选

常用特征变量筛选方法可包括有相关系数法、主成分分析法及随机森林重要性排序等，计算公式与方法见附录C。

6.5.2 机器学习最优模型及超参数

常用机器学习模型可包括随机森林（Random Forest, RF），梯度提升决策树（Gradient Boosting Decision Tree, GBDT）算法，支持向量机（Support Vector Regression, SVR），极端梯度提升（eXtreme Gradient Boosting, XGBoost）等。模型构建应按下列步骤执行：

- 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，选择适量样本对目标模型训练；
- 采用k折交叉验证法对比模型精度；
- 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。

6.5.3 模型精度评价指标

常见模型精度评价指标可包括决定系数、均方根误差等，计算公式见附录D。

6.6 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 碳储量评估

7.1 地上碳储量评估应包括下列内容：

- 时序变化特征评估指标应为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应为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应按公式（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i年相对j年森林地上碳储量的变化量，单位为吨碳每公顷（tC/hm²）；
 $C_{S,i}$ 、 $C_{S,j}$ ——像元分别在i年和j年的森林地上碳储量，单位为吨碳每公顷（tC/hm²）；
 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应按公式（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i年相对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应采用Sen+MK趋势检验法，并应按下列步骤执行：

- 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；

$\Delta C_{S,ij}$ 、 $C_{S,j}$ 、 t_1 、 t_n ——含义同式 (4)。

- b) 采用 Mann-Kendall (MK) 检验法对时间序列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 ——统计量趋势；

S ——检验统计量；

$V_{ar}(S)$ ——检验统计量 S 的方差；

$\text{sgn}()$ ——符号函数；

$\Delta C_{S,ij}$ 、 $C_{S,j}$ 、 n ——含义同式 (4)。

- c) 碳储量变化趋势评估等级应符合表 2 的规定。

表 2 碳储量变化趋势评估等级

序号	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 碳储量累积变化量

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 (Actual Carbon Stock Cumulant, ACSC)，应按公式 (11) 计算：

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

式中：

A_{CSC} ——像元的实际碳累积量，单位为吨碳每公顷 (tC/hm²)；

$C_S(t)$ ——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，单位为吨碳每公顷 (tC/hm²)。

- b) 理想碳累积量 (Ideal Carbon Stock Cumulant, ICSC) 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, 应按下列公式计算:

$$I_{\text{CSC}} = \int_{t_1}^{t_n} I_{\text{CS}}(t) \, dt \quad \dots \dots \dots \quad (12)$$

式中：

$I_{CS}(t)$ ——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, 单位为吨碳每公顷 ($t\text{C}/\text{hm}^2$) ;

a_1, a_2, b_1, b_2, e ——待定系数;

——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；

I_{CSC} ——像元的理想碳累积量，单位为吨碳每公顷 (tC/hm²)。

- c) 碳累积变化量 (Change of Carbon Stock Cumulant, CCSC) 计算, 应按公式 (14) 计算:

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

式中：

C_{CSC} ——像元的碳累积变化量, 单位为吨碳每公顷 (tC/hm²);

A_{CSC} 、 I_{CSC} ——同公式 (11)、(13)。

- d) 累积变化量评估。采用自然断点法将 CCSC 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

- a) 空间聚集程度评估指标应为 Getis-Ord Gi* 统计量, 按下列公式计算:

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

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

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

式中：

G_i^* —— Gi^* 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;

$w_{i,k}$ ——空间权重，表示第 i 个像元和第 k 个像元的关系强度，常见计算方法可包括领接权重法、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 森林地上碳储量空间聚集程度评估等级

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

序号	G_i^*	聚集区域判断
5	$G^* < -2.58$	极显著高值聚集区域

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、拟损毁森林、已损毁森林、已复垦森林及其他扰动区域确定。

7.7.2 统计内容应包括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, 统计指标应包括算数平均值、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 监测评估报告应包括矿林复合区基本情况、矿产资源开发基本情况、监测范围、监测点布设情况、样地森林地上碳储量监测情况、森林地上碳储量模型构建过程与模型优选结果、森林地上碳储量反演结果、森林地上碳储量时空变化特征评估指标与结评估结果。应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见附录 E。

8.2 数据管理

8.2.1 监测评估数据应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。

附录 A
(资料性)
碳储量估算中常用的遥感特征变量

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	CIre	$CIre=(Re4 / Re1)-1$
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	标准化烧迹比率指数	NBR	$NBR=(NIR-S2) / (NIR+S2)$
12	标准化烧迹比率指数2	NBR2	$NBR=(S1-S2) / (S1+S2)$
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 为土壤线斜率
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	$ARVI=(NIR-RB) / (NIR+RB)$; $RB=R-\gamma \times (B-R)$ γ 为光学路径效应因子
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 、 $S1$ 、 $S2$ 、 $Re1$ 、 $Re2$ 分别代表红波段、绿波段、蓝波段、近红外波段、短波红外1、短波红外2、红边1波段、红边2波段的表观反射率或地表反射率, μ 、 σ 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 ⁺	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	$DI = TCB_{\tau} - (TCG_{\tau} + TCW_{\tau})$ $TCB_{\tau} = (TCB - TCB_{\mu}) / TCB_{\sigma}$ $TCG_{\tau} = (TCG - TCG_{\mu}) / TCG_{\sigma}$ $TCW_{\tau} = (TCW - TCW_{\mu}) / TCW_{\sigma}$

注: μ 、 σ 分别代表纯净森林像元相应变量的均值及标准差。

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	$COR = \{[\sum_i \sum_j (i, j)p(i, j)] - \mu_x \mu_y\} / \sigma_x \sigma_y$

A.5 地形变量

地形变量应包括高程、坡度和坡向。常用高程数据包括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：

$$Aspect = 180^\circ + \arctan\left(\frac{\partial z}{\partial u}/\frac{\partial z}{\partial v}\right) \dots \quad (A.2)$$

武中：

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)
矿区森林、林型及树种(组)识别方法

林地、林型和树种(组)的空间分布可采用分层分类法结合时间序列遥感影像获取,按下列步骤执行:

- a) 调查研究区域树种(组)基本信息,包括类别数量、样本分布、物候节律等;
- b) 提取林地范围,利用线性光谱混合模型对煤炭矿区密集长时序多光谱遥感影像进行土地利用分类;
- c) 在林地范围基础上,采用 RVI(比值植被指数)阈值法结合混合像元分解法识别常绿和落叶林;
- d) 在常绿和落叶林分布基础上,采用随机森林算法识别树种(组)。

B.1 线性混合模型 (LSMM)

线性光谱混合模型指像元在某一波段的光谱反射率,是构成像元的各成分的反射率以其面积比例作为权重系数的线性组合,按公式(B.1)计算:

$$\begin{cases} R_{i\lambda} = \sum_{k=1}^n f_{ki} r_{k\lambda} + \zeta_{i\lambda} \\ \sum_{k=1}^m f_{ki} = 1 \end{cases}, \quad 0 \leq f_{ki} \leq 1 \quad (\text{B.1})$$

式中:

- $R_{i\lambda}$ ——像元 i 在 λ 波段的光谱反射率;
 $r_{k\lambda}$ ——第 k 个基本组分在 λ 波段的光谱反射率;
 f_{ki} ——像元 i 中第 k 端点元素的丰度;
 $\zeta_{i\lambda}$ ——残差值;
 n ——末端元素个数;
 m ——构成像元的基本组分的数量。

B.2 RVI 阈值法

基于 RVI 阈值法的常绿林和落叶林识别按下列步骤执行:

- a) 随机选取野外实测调查数据中落叶林冬季和夏季两期影像样点的 RVI 值进行比值处理,得出两幅影像 RVI 比值较为稳定的最小值作为分离阈值,按公式(B.2)计算:

$$RVI_S = RVI_{sum}/RVI_{win} \quad (\text{B.2})$$

式中:

- RVI_S ——参考样本的分离阈值;
 RVI_{sum} ——常绿林样本夏季 RVI 值;
 RVI_{win} ——常绿林样本冬季 RVI 值。

- b) 获取落叶林的参考样本的均值和标准差,按公式(B.3)和公式(B.4)计算:

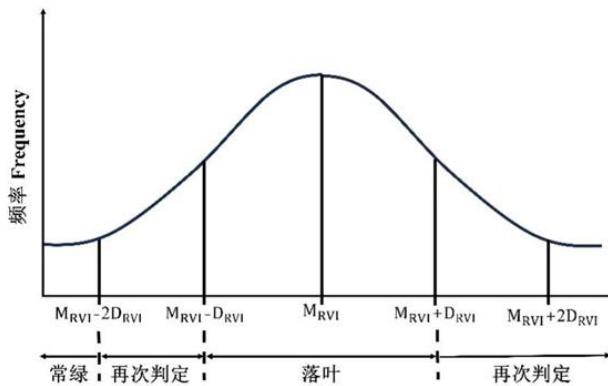
$$M_{RVI} = (\sum_{i=1}^n RVI_S)/n \quad (\text{B.3})$$

$$D_{RVI} = \sqrt{[\sum_{i=1}^n (RVI_S - M_{RVI})^2]/(n-1)} \quad (\text{B.4})$$

式中:

- M_{RVI} ——常绿林样本 RVI_S 的均值;
 D_{RVI} ——常绿林样本 RVI_S 的标准差;
 n ——样本数量。

- c) 依据均值 M_{RVI} 和标准差 D_{RVI} 以及多个参考样本 RVI_S 的频率绘制频率直方图,得到服从正态分布的参考样本 RVI_S 的频率与 RVI_S 正态分布曲线,具体可参考图 B.1。

图 B.1 基于参考样本 RVI_S 频率直方图

- d) 依据 RVI_S 的频率与 RVI_S 正态分布曲线设定判别规则, 通过判别规则判定落叶林和常绿林, 见表 B.1。

表 B.1 RVI 阈值法判断林型规则

序号	判定规则	判定结果
1	$RVI_S \in [M_{RVI} - D_{RVI}, M_{RVI} + D_{RVI}]$	落叶林
2	$RVI_S \in [M_{RVI} - 2D_{RVI}, M_{RVI} - D_{RVI}]$ 或 $RVI_S \in [M_{RVI} + D_{RVI}, +\infty]$	再次判定
3	$RVI_S \in [0, M_{RVI} - 2D_{RVI}]$	常绿林

注: 再次判定的区间根据已经确定类别的像素作为训练样本采用混合像元分解方法结合纹理特征再次进行分类。

B.3 随机森林算法识别树种 (组)

以时序光谱指数、Savitzky-Golay滤波处理后的植被指数时序曲线、植被指数时序曲线的一阶微分变换作为自变量, 以树种 (组) 样本作为因变量, 对两种林型分别训练随机森林模型并进行超参数调优, 优选模型识别研究区域树种 (组)。时序光谱指数参考附录A。

一阶光谱微分变换按公式 (B.5) 计算:

$$R(\lambda_i)' = [R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_i)] / \Delta\lambda \quad (B.5)$$

式中:

$R(\lambda_i)'$ ——波段 i 和 $i+1$ 之间的光谱一阶数值;

$R(\lambda_{i+1})$ 、 $R(\lambda_i)$ ——波段 i 和 $i+1$ 处光谱反射率值;

$\Delta\lambda$ ——相邻波段的步长。

附录 C
(资料性)
特征变量筛选方法

C.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。常用 Pearson's 相关性分析法, 按公式 (C.1) 和公式 (C.2) 计算:

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

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

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、响应变量样本观测值;

\bar{x} 、 \bar{y} ——特征变量、响应变量样本均值;

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 α 通常取 0.05。

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

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

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

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

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 个特征值, $i=1, 2, \dots, n$, $j=1, 2, \dots, m$;

μ_j 、 σ_j ——第 j 个特征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:

$$\mathbf{C} = \mathbf{X}_c^T \mathbf{X}_c / (n-1) \quad (C.6)$$

式中:

\mathbf{C} ——协方差矩阵, $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^{m \times m}$;

\mathbf{X}_c^T 、 \mathbf{X}_c ——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 \mathbf{C} 是对称矩阵, 其对角化就是找到一个正交矩阵 \mathbf{P} , 满足 $\mathbf{P}^T \mathbf{C} \mathbf{P} = \mathbf{A}$ 。其中, 对 \mathbf{C} 进行特征分解, 得到特征值矩阵 $\mathbf{A} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$, 得到的特征向量矩阵并进行正交化即为 \mathbf{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:

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

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

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；

λ_i ——第 i 个主成分的特征值, 由特征值矩阵 A 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 $\Lambda_1 \in \mathbb{R}^{p \times p}$, 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:

式中：

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

X ——原始样本矩阵；

\mathbf{P}_1 ——新特征向量矩阵, $\mathbf{P}_1 \in \mathbb{R}^{m \times p}$ 。

C. 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 D
(资料性)
矿区森林地上碳储量模型精度评价指标

常用的模型精度评价指标及其计算公式见表D.1。

表 D.1 常用模型精度评价指标

序号	名称	缩写	公式
1	决定系数	R ²	$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})(a_i - \bar{a})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}}$
2	均方根误差	RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - a_i)^2}{n}}$
3	平均绝对误差	MAE	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i - a_i $
4	相对误差	RE	$RE = \frac{(p_i - a_i)}{a_i} \times 100\%$

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{p} 和 \bar{a} 分别为森林地上碳储量预测值和观测值的平均值。

附录 E
(资料性)
煤炭矿区森林地上碳储量监测与评估报告编写提纲

煤炭矿区森林地上碳储量监测与评估报告的编写提纲可参考图E.1。

XXX煤炭矿区森林地上碳储量监测与评估报告	
第一章 前言	1.1 任务由来 1.2 编制目的 1.3 编制工作概况
第二章 矿区基本情况	2.1 矿区简介 2.2 矿区范围及拐点坐标 2.3 开采历史及现状
第三章 矿区基础信息	3.1 自然地理 (包括气象、水文、地形地貌、森林植被和土壤等) 3.2 地质环境背景 (包括地层岩性、地质构造、水文地质、工程地质和矿体地质特征等) 3.3 社会经济概况 3.4 土地利用现状 3.5 地质环境治理与土地复垦措施及实施情况
第四章 样地森林地上碳储量监测	4.1 样本点布设 4.2 野外调查方法与调查结果 4.3 样地森林地上碳储量监测方法与结果
第五章 矿区森林地上碳储量监测	5.1 遥感影像数据概况及预处理 5.2 遥感特征变量计算方法与结果 5.3 矿区森林植被分布数据概况 5.4 矿区森林地上碳储量模型构建 5.5 矿区森林地上碳储量监测结果与制图
第六章 矿区森林地上碳储量评估	6.1 森林地上碳储量的变化量 6.2 森林地上碳储量的变化度 6.3 森林地上碳储量的累积变化量 6.4 森林地上碳储量的分区差异 6.5 森林地上碳储量的空间聚集程度
第七章 结论与建议	7.1 结论 7.2 建议

图 E.1 煤炭矿区森林地上碳储量监测与评估报告编写提纲

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 1320—2023 生态遥感地面观测与验证技术导则
- [4] 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
- [5] DB 4403/T 534—2024 城市森林碳储量与碳汇量评估技术规范
- [6] 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(国资规(2016)21号). 2017年1月
- [7] 自然资源部. 自然资源部关于进一步加强生产矿山生态修复监管工作的通知(征求意见稿)(自然资源部公告2024年第53号). 2024年10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] BAI G 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.