

ICS 13.020.30

A 21

CSF

团 体 标 准

T/CSF 02-2022

露天矿山植被重建生态效益

评估指南

Guidelines for ecological benefit assessment of vegetation restoration in

open-pit mine

2022- 04 - 06 发布

2022- 04 - 06 实施

中国林学会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 基本术语	1
3.1 露天矿山	1
3.2 贴近度	1
3.3 相对近似度	2
4 评估指标体系	2
5 评估指标计算方法	2
5.1 植被	2
5.2 水土保持	4
5.3 土壤质量	6
5.4 净化环境	9
6 生态效益综合评估	11
附录 A（资料性） 地上生物量碳储量测算	12
附录 B（资料性） 枯死木和枯落物碳储量测算	13
附录 C（资料性） 生态效益综合评估方法	14
附录 D（资料性） 露天矿山植被重建生态效益等级划分标准	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。

本文件包括正文与附录，其中正文包括6章，第1章，范围；第2章，规范性引用文件；第3章，基本术语；第4章，评估指标体系；第5章，评估指标计算方法；第6章，生态效益综合评估。附录包括碳储量计算方法、生态效益综合评估方法以及等级划分。

本文件由中国林学会归口。

本文件起草单位：中煤湖北地质局集团有限公司、中煤湖北地质勘察基础工程有限公司、中煤建工集团有限公司、中国煤炭地质总局、北京林业大学、北京师范大学、中煤（安徽）地质环保科技有限公司、北京市科学技术研究院资源环境研究所、中煤紫光湖北环保科技有限公司、安徽省通源环境节能股份有限公司。

本文件主要起草人：程昊、占传忠、肖泉、张才、程金花、王永琼、姚晶晶、杨明、余慎军、程彦、臧建军、夏建军、吴桂芹、孟凡鑫、孙富海、纪星全、段育强、蔡瑛芙。

露天矿山植被重建生态效益评估指南

1 范围

本文件规定了露天矿山植被重建生态效益评估的指标体系，指标计算和综合评估的方法。

本文件适用于露天矿山植被重建的生态效益评估工作。

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，仅所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。

HJ479 环境空气 氮氧化物（一氧化氮和二氧化氮）的测定 盐酸萘乙二胺分光光度法

HJ481 环境空气 氟化物的测定 石灰滤纸采样氟离子选择电极法

HJ482 环境空气 二氧化硫的测定 甲醛吸收-副玫瑰苯胺分光光度法

LY/T 1271 森林植物与森林枯枝落叶层全氮、磷、钾、钠、钙、镁的测定

LY/T 2253 造林项目碳汇计量监测指南

LY/T 2497 防护林体系生态效益监测技术规程

LY/T 2988 森林生态系统碳储量计量指南

DB11/T 953 林业碳汇计量监测技术规程

3 基本术语

3.1

露天矿山 open-pit mine

通过采取剥离围岩、表土或砾石等开挖措施，直接从地表开挖区采出矿产资源的采矿场及其排土场、尾矿库。

3.2

贴近度 closeness degree

表征植被重建后的露天矿山与矿区最佳恢复状态生态效益的差距。贴近度值越小，植被重建状况越

理想。

3.3

相对近似度 relative approximation degree

表征植被重建后的露天矿山与矿区最佳恢复状态生态效益的相对近似程度。贴适度相同时，相对近似程度的值越小，植被重建状况越理想。

4 评估指标体系

露天矿山植被重建生态效益评估指标体系，如表1所示。

表1 露天矿山植被重建生态效益评估指标体系

功能类型指标	基本指标
植被	植被覆盖率
	Shannon-Wiener 多样性指数
	生物量
水土保持	土壤侵蚀量
	蓄水量
	水质
	固碳量
土壤质量	土壤孔隙度
	土壤肥力
	土壤重金属含量
净化环境	滞尘量
	大气污染物吸收量
	负氧离子产生量

5 评估指标计算方法

5.1 植被

5.1.1 植被覆盖率

植被覆盖率的计算如公式（1）：

$$P_{VC} = A_{VC} / A \times 100\% \quad (1)$$

式中：

P_{VC} —植被覆盖率，无量纲；

A_{VC} —植被重建地面积，单位为 hm^2 ；

A —裸露矿山总面积，单位为 hm^2 。

P_{VC} 值越大，则植被重建效果越好；反之，则较差。

5.1.2 Shannon-Wiener 多样性指数

Shannon-Wiener 多样性指数的计算如公式（2）：

$$H = -\sum_{i=1}^s p_i \ln p_i \quad (2)$$

式中：

H —Shannon-Wiener 多样性指数，无量纲；

S —植被重建地植物种数量，单位为个；

p_i —第 i 种植物的个数在总体中所占的比例，无量纲。

H 值越大，则植被重建效果越好；反之，则较差。

5.1.3 生物量

生物量的计算如公式（3）：

$$B = B_{TREE} + B_{SHRUB} + B_{HERB} \quad (3)$$

式中：

B —植被重建地生物量，单位为 t.d.m；

B_{TREE} —植被重建地乔木层地上部分和地下部分生物量，单位为 t.d.m，具体测定方法见 LY/T2988；

B_{SHRUB} —植被重建地灌木层地上部分和地下部分生物量,单位为t.d.m,具体测定方法见LY/T2988;

B_{HERB} —植被重建地草本层地上部分和地下部分生物量,单位为t.d.m,具体测定方法见LY/T2988。

B 值越大,则植被重建效果越好;反之,则较差。

5.2 水土保持

5.2.1 土壤侵蚀量

土壤侵蚀减少量的计算如公式(4):

$$Q = A_{VC}(X_0 - X) \quad (4)$$

式中:

Q —植被重建地土壤侵蚀减少量,单位为t/a;

A_{VC} —植被重建地面积,单位为 hm^2 ;

X —植被重建地土壤侵蚀模数,单位为 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;

X_0 —基础对照区土壤侵蚀模数,单位为 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

Q 值越大,则植被重建效果越好;反之,则较差。

5.2.2 蓄水量

蓄水量的计算如公式(5):

$$G_w = 10A_{VC}(P - E - C) \quad (5)$$

式中:

G_w —植被重建地蓄水量,单位为 m^3/a ;

A_{VC} —植被重建地面积,单位为 hm^2 ;

P —降雨量,单位为 mm/a ;

E —单位面积植被重建地蒸发量,单位为 mm/a ;

C —单位面积地表径流量,单位为 mm/a 。

G_w 值越大,则植被重建效果越好;反之,则较差。

5.2.3 水质

水质改善的计算如公式（6）：

$$G_{wQ} = G_w (W_0 - W) \quad (6)$$

式中：

G_{wQ} —水质改善指标，单位为kg/a；

G_w —植被重建地蓄水量，单位为 m^3/a ；

W —植被重建地单位水体积污染物含量，单位为 kg/m^3 ，具体包括溶解性固体、悬浮性固体、总氮、总磷、总有机碳；

W_0 —基础对照区单位水体积污染物含量，单位为 kg/m^3 。

G_{wQ} 值越大，则植被重建效果越好；反之，则较差。

5.2.4 固碳量

植被重建后的固碳量计算如公式（7）：

$$\Delta C_{cu} = \Delta C_{AB} + \Delta C_{BB} + \Delta C_{DW} + \Delta C_{LI} + \Delta C_{SC} \quad (7)$$

式中：

ΔC_{cu} —区域内固碳量，单位为t/a；

ΔC_{AB} —区域内地上生物量碳储量的变化量，单位为t/a，按附录A的方法进行计算；

ΔC_{BB} —区域内地下生物量碳储量的变化量，单位为t/a，为植被重建地土壤层以下所有活根的生物量，细根（直径 ≤ 2 mm）不纳入本部分计算，具体测定方法见DB11/T953；

ΔC_{DW} —区域内枯死木碳储量的变化量，单位为t/a，按附录B的方法进行计算；

ΔC_{LI} —区域内枯落物碳储量的变化量，单位为t/a，按附录B的方法进行计算；

ΔC_{SC} —区域内土壤有机碳储量的变化量，单位为t/a，通过公式 $\Delta C_{DW} = A_{VC} Q_{\Delta C}$ 计算，其中 A_{VC} 为植被重建地面积，单位为 hm^2 ； $Q_{\Delta C}$ 为植被重建地单位面积土壤中有机碳含量年际变化值，单位为t/ $(hm^2 \cdot a)$ 。

ΔC_{cu} 值越大，则植被重建效果越好；反之，则较差。

5.3 土壤质量

5.3.1 土壤孔隙度

5.3.1.1 土壤总孔隙度变化率

土壤总孔隙度变化率的计算如公式（8）：

$$P_{TP_i} = \frac{TP_i - TP_0}{TP_0} \quad (8)$$

式中：

P_{TP_i} —第*i*种植被重建类型土壤总孔隙度变化率，无量纲；

TP_i —第*i*种植被重建类型土壤总孔隙度，无量纲；

TP_0 —基础对照区土壤总孔隙度，无量纲。

P_{TP_i} 值越大，则植被重建效果越好；反之，则较差。

5.3.1.2 土壤毛管孔隙度变化率

土壤毛管孔隙度变化率的计算如公式（9）：

$$P_{CP_i} = \frac{CP_i - CP_0}{CP_0} \quad (9)$$

式中：

P_{CP_i} —第*i*种植被重建类型土壤毛管孔隙度变化率，无量纲；

CP_i —第*i*种植被重建类型土壤毛管孔隙度，无量纲；

CP_0 —基础对照区土壤毛管孔隙度，无量纲。

P_{CP_i} 值越大，则植被重建效果越好；反之，则较差。

5.3.1.3 土壤非毛管孔隙度变化率

土壤非毛管孔隙度变化率的计算如公式（10）：

$$P_{NCP_i} = \frac{NCP_0 - NCP_i}{NCP_0} \quad (10)$$

式中：

P_{NCP_i} —第 i 种植被重建类型土壤非毛管孔隙度变化率，无量纲；

NCP_i —第 i 种植被重建类型土壤非毛管孔隙度，无量纲；

NCP_0 —基础对照区土壤非毛管孔隙度，无量纲。

P_{NCP_i} 值越大，则植被重建效果越好；反之，则较差。

5.3.2 土壤肥力

5.3.2.1 土壤有机质

土壤有机质的计算如公式（11）：

$$G_{\Delta C} = A_{VC} Q_{\Delta C} \quad (11)$$

式中：

$G_{\Delta C}$ —土壤有机质含量，单位为 t/a；

A_{VC} —植被重建地面积，单位为 hm^2 ；

$Q_{\Delta C}$ —植被重建地单位面积土壤有机质含量年际变化值，单位为 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

$G_{\Delta C}$ 值越大，则植被重建效果越好；反之，则较差。

5.3.2.2 土壤固氮量

土壤固氮量的计算如公式（12）：

$$G_{\Delta N} = A_{VC} Q_{\Delta N} \quad (12)$$

式中：

$G_{\Delta N}$ —土壤固氮量，单位为 t/a；

A_{VC} —植被重建地面积，单位为 hm^2 ；

$Q_{\Delta N}$ —植被重建地单位面积土壤中全氮含量年际变化值，单位为 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

$G_{\Delta N}$ 值越大，则植被重建效果越好；反之，则较差。

5.3.2.3 土壤固磷量

土壤固磷量的计算如公式（13）：

$$G_{\Delta P} = A_{VC} Q_{\Delta P} \quad (13)$$

式中：

$G_{\Delta P}$ —土壤固磷量，单位为 t/a ；

A_{VC} —植被重建地面积，单位为 hm^2 ；

$Q_{\Delta P}$ —植被重建地单位面积土壤中全磷含量年际变化值，单位为 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

$G_{\Delta P}$ 值越大，则植被重建效果越好；反之，则较差。

5.3.2.4 土壤固钾量

土壤固钾量的计算如公式（14）：

$$G_{\Delta K} = A_{VC} Q_{\Delta K} \quad (14)$$

式中：

$G_{\Delta K}$ —土壤固钾量，单位为 t/a ；

A_{VC} —植被重建地面积，单位为 hm^2 ；

$Q_{\Delta K}$ —植被重建地土壤中全钾含量年际变化值，单位为 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

$G_{\Delta K}$ 值越大，则植被重建效果越好；反之，则较差。

5.3.3 土壤重金属含量

5.3.3.1 土壤重金属减少量

土壤重金属减少量的计算如公式（15）：

$$G_{M_k} = A_{VC} (M_{k_0} - M_k) \quad (15)$$

式中：

G_{M_k} —植被重建地土壤重金属*i*减少量，单位为kg/a，具体包括Ni、Pb、Cu、Zn、Cr、Cd、Hg和As，共计8种，得出8个重金属减少量值；

A_{VC} —植被重建地面积，单位为 hm^2 ；

M_k —植被重建地土壤重金属*i*含量，单位为 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ；

M_{k_0} —基础对照区土壤重金属*i*实测值，单位为 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

G_{M_k} 值越大，则植被重建效果越好；反之，则较差。

5.3.3.2 单因子污染指数

单因子污染指数的计算如公式（16）：

$$P_{M_k} = M_k / S_k \quad (16)$$

式中：

P_{M_k} —土壤重金属元素*k*的单因子污染指数，无量纲，与5.3.3.1对应，得出8个单因子污染指数值；

M_k —植被重建地土壤重金属元素*k*的实测值，单位为 mg/kg ；

S_k —金属元素*k*土壤环境质量标准值，单位为 mg/kg 。

P_{M_k} 值越小，则植被重建效果越好；反之，则较差。

5.4 净化环境

5.4.1 滞尘量

植被滞尘量的计算如公式（17）：

$$G_D = A_{VC} Q_D \quad (17)$$

式中：

G_D —植被滞尘量，单位为t/a；

A_{VC} —植被重建地面积，单位为 hm^2 ；

Q_D —植被重建地单位面积滞尘量，可采用气溶胶发生器等专业仪器直接测定，单位为 $\text{t}/(\text{hm}^2 \text{ a})$ 。

G_D 值越大，则植被重建效果越好；反之，则较差。

5.4.2 大气污染物吸收量

大气污染物吸收量计算如公式（18）：

$$G_{AP} = A_{VC} (Q_{SO_2} + Q_{NO_x} + Q_{F-}) \quad (18)$$

式中：

G_{AP} —大气污染物吸收量，单位为 kg/a ；

A_{VC} —植被重建地面积，单位为 hm^2 ；

Q_{SO_2} —植被重建地单位面积 SO_2 吸收量，具体测定方法见 HJ 482，单位为 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \text{ a})$ ；

Q_{NO_x} —植被重建地单位面积氮氧化物吸收量，具体测定方法见 HJ 479，单位为 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \text{ a})$ ；

Q_{F-} —植被重建地单位面积氟化物吸收量，具体测定方法见 HJ 481，单位为 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \text{ a})$ 。

G_{AP} 值越大，则植被重建效果越好；反之，则较差。

5.4.3 负氧离子产生量

5.4.3.1 负氧离子浓度

通过仪器测定植被重建地和基础对照区负氧离子浓度，具体测定方法见照 LY/T 2497。

5.4.3.2 负氧离子产生量计算如公式（19）：

$$G_{O_N} = 5.256 \times 10^5 \times A_{VC} H (Q_{O_N} - Q_{0O_N}) / L \quad (19)$$

式中：

G_{O_N} —植被负氧离子产生量，单位为个/a；

A_{VC} —植被重建地面积，单位为 hm^2 ；

H —植被平均高度，单位为 m；

Q_{O_N} —植被重建地负氧离子浓度，单位为个/ cm^3 ；

Q_{0O_N} —基础对照区负氧离子浓度，单位为个/cm³；

L —负氧离子寿命，单位为min。

G_{O_N} 值越大，则植被重建效果越好；反之，则较差。

6 生态效益综合评估

6.1 贴近度

6.1.1 应首先采用贴近度 T_i 来表征与矿区最佳恢复状态生态效益的差距。 T_i 值小者表示植被重建区域生态效益为优；反之，则为劣。贴近度 T_i 具体计算方法详见附录 C 中公式 C.8。

6.1.2 当采用贴近度 T_i 值评估露天矿山植被重建生态效益优劣等级时，可参考附录 D。

6.2 相对近似度

当贴近度 T_i 值相等时，则应采用相对近似度 α_i 来表征与矿区最佳恢复状态生态效益的差距。 α_i 值最小者为优。相对近似度 α_i 具体计算方法详见附录 C 中公式 C.9。

附录 A

(资料性)

地上生物量碳储量测算

指标	计算公式和参数说明
乔木层碳储量	$\Delta C_{TREE,AB} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_{TREE,AB,t_2} - C_{TREE,AB,t_1}}{t_2 - t_1} \right)$ <p>$\Delta C_{TREE,AB}$ 为乔木层地上部分碳储量变化, 单位为 t/a; i 为碳层(1,2,3...n); C_{TREE,AB,t_2} 为在 t_2 时间时乔木层地上部分的碳储量, 单位为 t; C_{TREE,AB,t_1} 为在 t_1 时间时乔木层地上部分的碳储量, 单位为 t。</p>
灌木层碳储量	$\Delta C_{SHRUB,AB} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_{SHRUB,AB,t_2} - C_{SHRUB,AB,t_1}}{t_2 - t_1} \right)$ <p>$\Delta C_{SHRUB,AB}$ 为灌木层地上部分碳储量变化, 单位为 t/a; i 为碳层 (1,2,3...n); C_{SHRUB,AB,t_2} 为在 t_2 时间时灌木层地上部分的碳储量, 单位为 t; C_{SHRUB,AB,t_1} 为在 t_1 时间时灌木层地上部分的碳储量, 单位为 t。</p>
草本层碳储量	$\Delta C_{HERB,AB} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_{HERB,AB,t_2} - C_{HERB,AB,t_1}}{t_2 - t_1} \right)$ <p>$\Delta C_{HERB,AB}$ 为草本层地上部分碳储量变化, 单位为 t/a; i 为碳层 (1,2,3...n); C_{HERB,AB,t_2} 为在 t_2 时间时草本层地上部分的碳储量, 单位为 t; C_{HERB,AB,t_1} 为在 t_1 时间时草本层地上部分的碳储量, 单位为 t。</p>

注: 各部分地上部分的碳储量监测方法见 LY/T 2253 和 DB11/T 953。

附录 B
(资料性)

枯死木和枯落物碳储量测算

指标	计算公式和参数说明
枯死木碳储量	$\Delta C_{DW} = DF_{DW} \times (\Delta C_{TREE,AB} + \Delta C_{TREE,BB})$ <p>ΔC_{DW} 为枯死木碳储量变化, 单位为 t/a; DF_{DW} 为区域枯死木碳储量与活立木生物质碳储量的比值; $\Delta C_{TREE,AB}$ 为乔木层地上部分碳储量变化, 单位为 t/a; $\Delta C_{TREE,BB}$ 为乔木层地下部分碳储量变化, 单位为 t/a。</p>
枯落物碳储量	$\Delta C_{LI} = DF_{LI} \times (\Delta C_{TREE,AB} + \Delta C_{TREE,BB})$ <p>ΔC_{DW} 为枯死木碳储量变化, 单位为 t/a; DF_{LI} 为区域枯落物碳储量与活立木生物质碳储量的比值; $\Delta C_{TREE,AB}$ 为乔木层地上部分碳储量变化, 单位为 t/a; $\Delta C_{TREE,BB}$ 为乔木层地下部分碳储量变化, 单位为 t/a。</p>

注: 各部分的碳储量监测方法见 LY/T 2253 和 DB11/T 953。

附录 C

(资料性)

生态效益综合评估方法

C.1 评估流程

C.1.1 指标标准化

采用阈值法进行指标标准化。

C.1.1.1 极大型指标

极大型指标标准化的计算如公式 (C.1)：

$$y_i = \frac{x_i - \min x_i}{\max x_i - \min x_i} \quad (\text{C.1})$$

式中：

y_i —指标评估值；

x_i —指标实际值。

C.1.1.2 极小型指标

极小型指标标准化的计算如公式 (C.2)：

$$y_i = \frac{\max x_i - x_i}{\max x_i - \min x_i} \quad (\text{C.2})$$

式中：

y_i —指标评估值；

x_i —指标实际值。

露天矿山植被重建生态效益评估指标中，单因子污染指数 (P_{M_k}) 应采用极小型指标进行标准化，其他指标均采用极大型指标进行标准化。

C.1.2 构建生态效益指标矩阵

不同重建植被重建类型区评估指标标准化后，构成指标矩阵：

$$Y = (y_{ij})_{m \times 33} \quad (\text{C.3})$$

式中， m —参与评估的植被重建类型数量。

C.1.3 确定指标权重

对不同植被重建类型区生态效益指标的原始数据进行标准化后，根据公式（C.4）计算各评估指标的熵（ H_j ），根据公式（C.5）计算出各评估指标的权重（ w_j ）。

$$H_j = -k \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad (\text{其中 } i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{C.4})$$

式中：

$$f_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}}, k = \frac{1}{\ln m} \quad (\text{假定 } y_{ij}=0 \text{ 时, } y_{ij} \ln y_{ij}=0);$$

n —指标数量，为 33。

$$w_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \quad (\text{C.5})$$

不同指标的权重组成对角矩阵 W 。

C.1.4 决策矩阵 Y' 构建

决策矩阵 Y' 的构建如公式（C.6）：

$$Y' = Y * W = (y'_{ij})_{m \times 33} \quad (\text{C.6})$$

C.1.5 构建近似理想决策方案

把决策矩阵 Y' 中每列的取值进行比较，以确定其最大值 V_k^* ，即近似理想点，构建近似理想决策方案，记为 I^* ：

$$I^* = (V_1^*, V_2^*, \dots, V_n^*) = (y'_{i1\max}, y'_{i2\max}, \dots, y'_{i33\max}) \quad (\text{C.7})$$

C.2 生态效益综合评估指标测算

T_i 和 α_i 的计算如公式（C.8）和公式（C.9）：

$$T_i = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n y'_{ij} V_j^*}{\sum_{j=1}^n (V_j^*)^2} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (\text{C.8})$$

$$\alpha_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y'_{ij} - V_j^*)^2} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (\text{C.9})$$

附录 D
(资料性)

露天矿山植被重建生态效益等级划分标准

T_i 值	生态效益等级	等级描述
[0-0.2)	优秀	植被物种丰富，生长状况良好；水土流失可能性很低；土壤质量显著提高；矿区环境得到显著改善。
[0.2-0.4)	良好	植被物种较丰富，生长状况较好；水土流失可能性较低；土壤质量有较明显的提升；矿区环境明显改善。
[0.4-0.7)	中等	植被物种数量有一定程度的增多，生长状况中等；水土流失可能性降低；土壤质量得到一定程度的提升；矿区环境得到一定改善。
[0.7-1]	一般	植被物种数量变化不明显，生长状况一般；水土流失可能性存在；土壤质量改善不显著；矿区环境改善不明显。