

# 地质矿产资源开发碳足迹核算方法

王云

山西豪正森资源环境规划设计有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v8i5.2319

**[摘要]** 在全球应对气候变化与我国实施“双碳”战略的宏观背景下,地质矿产资源开发作为基础原材料与能源的供给源头,其自身过程的碳排放精准核算是推动行业绿色低碳转型的首要科学问题。本文紧扣地质矿产资源开发活动的独特自然与工程属性,系统构建了以“地质过程驱动”为核心的碳足迹核算方法学体系。研究聚焦于矿产资源开发中因岩体破裂、矿物暴露与氧化、地下水系统扰动等直接诱发的碳排放过程,包括地应力释放伴生 $\text{CO}_2$ 、硫化矿物氧化、碳酸盐岩分解、矿井水排放溶解碳以及煤层气( $\text{CH}_4$ )逸散等关键地质源汇。论文详细阐述了这些基于地质机理的排放源的识别原则、形成机制、定量核算模型与关键参数的本地化获取途径。针对露天与井下开采、金属矿与非金属矿、煤矿等不同开发场景,辨析了其主导排放源的差异性与核算边界特殊性。

**[关键词]** 地质矿产资源开发; 碳足迹核算; 地质过程排放; 岩体破裂; 矿物氧化; 煤层气

中图分类号: P5 文献标识码: A

## Carbon Footprint Accounting Methods for Geological Mineral Resource Development

Yun Wang

Shanxi Haozhengsen Resource and Environmental Planning and Design Co., Ltd.

**[Abstract]** Against the backdrop of global climate change mitigation and China's implementation of the "Dual Carbon" strategy, the accurate accounting of carbon emissions from the geological mineral resource development process—serving as the source of basic raw materials and energy—has become a primary scientific issue in promoting the green and low-carbon transformation of the industry. This paper closely aligns with the unique natural and engineering attributes of geological mineral resource development activities and systematically constructs a methodological framework for carbon footprint accounting centered on "geological process-driven" principles. The study focuses on carbon emission processes directly induced by rock mass fracturing, mineral exposure and oxidation, groundwater system disturbances, and other mechanisms during resource development. These include key geological sources and sinks such as  $\text{CO}_2$  release associated with crustal stress relief, sulfide mineral oxidation, carbonate rock decomposition, dissolved carbon emissions from mine water discharge, and coalbed methane ( $\text{CH}_4$ ) escape. The paper elaborates on the identification principles, formation mechanisms, quantitative accounting models, and localized approaches for obtaining key parameters for these emission sources based on geological mechanisms. It also analyzes the differences in dominant emission sources and the specificity of accounting boundaries across various development scenarios, including open-pit and underground mining, as well as metal, non-metal, and coal mining operations.

**[Key words]** geological mineral resource development; carbon footprint accounting; geological process emissions; rock mass fracturing; mineral oxidation; coalbed methane

### 1 前言

地质矿产资源开发行业,涵盖煤炭、金属、非金属等各类矿产的勘查与采选活动,是国民经济的基础产业。精确量化该开发活动自身的碳足迹,系统识别其关键排放源,对于推动矿业绿色低碳转型、优化能源结构乃至降低全产业链的碳排放强度,均具

有至关重要的意义。然而,与火力发电、钢铁、水泥等点源排放特征清晰的行业相比,地质矿产资源开发的碳足迹核算面临着显著的复杂性与特殊性。这种复杂性主要体现在多个维度:其一,开采作业面具有空间动态性,随着工程推进而不断移动,相应的主要排放源也随之迁移;其二,不同矿种的地质条件、开采

方式及选矿工艺差异巨大,导致煤炭、金属矿与非金属矿的排放源结构与强度迥然不同,工艺体系极为复杂;其三,排放源具有伴生特殊性,除常规的燃料燃烧排放外,还存在如碳酸盐矿物分解、煤矿瓦斯逸散等由地质条件和工艺直接引发的非燃烧过程排放;其四,核算的系统边界存在模糊性,对于矿山所用重型设备、火工品等重要耗材在其生产阶段的隐含碳排放应如何界定与计入,直接影响核算结果的完整性与可比性。因此,构建一套真正适用于本行业的碳足迹核算方法,必须将核算的基石从通用的“能源与物料消耗清单”转向紧扣行业本质的“地质扰动过程清单”。

## 2 系统边界

科学、清晰的系统边界界定,是确保地质矿产资源开发碳足迹核算结果准确性、可比性与完整性的前提。矿产开发的碳足迹源于对地质体的强烈扰动,其排放空间广泛、时间效应持久、来源机理复杂。因此,其系统边界的划定必须紧密围绕“地质扰动”这一核心,从空间、时间与过程三个维度进行精准锚定,形成逻辑严密的核算框架。

(1)在空间维度上,核算边界应超越传统的行政权属或固定场地限制,以“地质扰动影响域”为准。这不仅包括直接的采掘作业面(如露天采场、井下巷道),更涵盖受其物理力与化学效应波及的整个动态地质系统,如因开挖形成的围岩破裂带与采空区、因疏干排水改变的地下水影响区、以及堆存新揭露岩矿的排土场与尾矿库。划定此边界的核心逻辑在于:任何因“开挖、揭露、卸载、排水”等工程活动导致其原有温压条件、化学平衡或封闭状态被根本改变的地质空间,都应被视为潜在的碳排放源区。

(2)在时间维度上,需兼顾管理核算的周期性与地质过程的持续性。以年度为周期的核算报告是管理常态,但必须认识到,许多地质排放具有显著的时滞性与长期性。例如,采空区煤层气的涌出可延续数十年,硫化矿废石的氧化反应可持续数百年。因此,年度核算不仅要计量当年新开采活动激发的瞬时排放(如爆破分解),还必须估算往年活动所诱发、在本年度内仍在持续发生的排放通量。这要求对关键排放过程建立时间衰减模型,实现从静态年度统计向动态生命周期评估的延伸。

(3)在过程维度上,为确保核算的完整性与层次性,采用“核心-外围”的递进式边界划定。核算的核心是“直接地质过程排放”,即开采活动直接导致地质体中封存或活动的碳(以 $\text{CO}_2$ 或 $\text{CH}_4$ 等形式)向大气释放的过程,如应力释气、矿物氧化分解、地下水脱气等。这是矿业特有的、源于其地质本质的排放。为实施开采而消耗的现场燃料(直接能源排放)以及外购电力对应的排放(间接能源排放),作为驱动地质扰动和维持矿山运行的“能量代价”,构成必要的外围补充层。而为矿山建设提供的大型设备、关键材料的隐含碳排放,则可视为更外围的、选择性纳入的延伸边界。这种分层界定,确保了方法既能聚焦核心机理,又能灵活适应不同精度的核算需求。

## 3 关键地质碳排放源的识别、机理与核算方法

### 3.1 岩体破裂与地应力释放伴生 $\text{CO}_2$ 排放

机理阐述:深部岩体在高地应力环境下,往往在微裂隙或特定矿物(如碳酸盐矿物、含有流体包裹体的矿物)中封存 $\text{CO}_2$ 。采矿开挖导致围岩应力解除、卸荷回弹并产生大量新生裂隙网络(爆破与机械破碎加剧此过程),破坏了原有的封存平衡,促使岩体内部封存的 $\text{CO}_2$ 向采空空间释放。此外,应力变化可能改变局部岩石的孔隙压力与渗透率,影响地下流体的运移与脱气。

核算方法:(1)实测法(首选但成本高)。在代表性巷道或采场工作面,使用密闭箱法或通量舱,直接监测新暴露岩壁单位面积、单位时间的 $\text{CO}_2$ 逸出通量。结合年度新暴露岩壁总面积进行估算。(2)地质类比与因子法。基于矿区地质勘查资料(岩芯气体成分测试、地应力测量、岩石力学参数)与类似开采条件的文献报道,确定一个“单位体积岩石破裂 $\text{CO}_2$ 释放因子”(如, $\text{gCO}_2/\text{吨矿石}$ 或 $\text{m}^3\text{CO}_2/\text{m}^3\text{岩体}$ )。核算公式为: $E=\text{矿石开采量}\times\text{剥采比(对于露天矿)}\times\text{释放因子}$ 。该因子的确定需要多学科(工程地质、地球化学)协作研究。

### 3.2 硫化矿物氧化排放

机理阐述:金属矿床(如铜、铅、锌、镍矿)开发中,揭露的硫化物矿物(如黄铁矿 $\text{FeS}_2$ 、黄铜矿 $\text{CuFeS}_2$ )在空气、水和微生物(氧化亚铁硫杆菌等)作用下发生氧化反应。以黄铁矿为例,其完全氧化的总反应可简化为: $4\text{FeS}_2+15\text{O}_2+14\text{H}_2\text{O}\rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3+8\text{SO}_4^{2-}+16\text{H}^+$ 。此过程产生酸性矿山排水(AMD),并伴随大量 $\text{CO}_2$ 的生成(来自空气中或水中碳酸的参与)。更重要的是,该过程是持续的,在排土场、废石堆、尾矿库中长期进行。

核算方法:(1)化学计量法。基于处理的矿石/废石量、其中硫化物硫的平均品位、以及假定特定硫化物矿物的氧化比例进行估算。需要详细的工艺矿物学资料。(2)现场监测与模型结合:在废石场、尾矿库设立监测点,测量表面 $\text{CO}_2$ 通量及渗滤水化学(pH、 $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度、酸产量),利用地球化学模型(如PHREEQC)反推与酸产生相伴的 $\text{CO}_2$ 消耗/生成量。核算需考虑温度、湿度、微生物活性等环境控制因素。

### 3.3 碳酸盐岩分解排放

机理阐述:当开采活动涉及碳酸盐岩(灰岩、白云岩)作为围岩或脉石,并在爆破产生的高温(部分炸药反应温度超过 $2000^\circ\text{C}$ )、或后续选冶酸浸工艺中,会导致碳酸盐矿物热分解或化学溶解,释放 $\text{CO}_2$ 。 $\text{CaCO}_3\rightarrow\text{CaO}+\text{CO}_2$ 。这与水泥生产中的石灰石煅烧本质类似,但发生在矿山现场。

核算方法:(1)工艺关联法。对于酸浸工艺, $\text{CO}_2$ 释放量可通过酸耗量与矿石碳酸盐含量进行化学计量精确计算。(2)热分解估算。对于爆破诱发的热分解,需确定爆破区域内碳酸盐岩的体积、其在爆破高温作用下的有效分解率。分解率是高度不确定参数,可通过实验室模拟爆破热场或对比爆破前后岩石的烧失量(LOI)变化进行研究。公式: $E=\text{爆破区域内碳酸盐岩质量}\times\text{碳酸盐矿物含量}\times\text{分解率}\times(44/100)$ 。

### 3.4 矿井(坑)水排放溶解碳脱气

机理阐述:深部地下水通常富含溶解无机碳(DIC,以 $\text{HCO}_3^-$ 、

CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>为主),处于与围岩矿物平衡的高压封闭环境。矿山疏干排水将这类地下水抽至地表,压力骤降、温度变化并暴露于大气,导致CO<sub>2</sub>从水中大量逸出(脱气),水体pH升高。这是一个常被忽略的重要碳源。

核算方法:(1)水化学计算法。定期采集排放口水样,分析其DIC浓度(或碱度、pH、温度,通过计算得到DIC)、溶解CO<sub>2</sub>分压(pCO<sub>2</sub>)。对比排放口与当地大气平衡状态下水体的DIC(或pCO<sub>2</sub>)差异,结合年度总排水量,计算因脱气释放的CO<sub>2</sub>量。可使用水化学平衡软件(如CO2Calc)辅助计算。(2)直接通量测量。在排水明渠或沉淀池水面,使用漂浮通量舱直接测量水-气界面的CO<sub>2</sub>交换通量。

### 3.5 煤矿煤层气(CH<sub>4</sub>)逸散排放

机理阐述:煤炭开采打破了煤储层的原始压力封闭系统,导致吸附在煤基质微孔隙中的CH<sub>4</sub>解吸,并通过裂隙网络逸散至开采空间和大气中。这是煤矿最具行业特征且量级巨大的温室气体排放源。

核算方法:(1)实测法(最准确)。在矿井回风巷、抽采管道安装连续浓度和流量监测装置,直接积分计算全矿井CH<sub>4</sub>绝对涌出量。(2)排放因子法(实用)。采用基于矿井瓦斯等级、煤层气含量、开采深度等地质开采参数本地化的吨煤CH<sub>4</sub>排放因子。E<sub>CH<sub>4</sub></sub>=原煤产量×EF<sub>CH<sub>4</sub></sub>×(1-抽采利用率)。关键在于EF<sub>CH<sub>4</sub></sub>的本地化,应基于矿井多年瓦斯地质资料、通风报表和实测数据反算确定,而非简单采用国家平均值。

## 4 核算的数据基础、整合与不确定性管理

### 4.1 多源地质与工程数据融合

地质过程碳足迹核算本质上是一项数据密集型工作,其结果的准确性高度依赖于对矿山全生命周期内多元异构数据的系统性集成与综合分析。支撑核算的数据体系是一个多层次架构:基础地质数据层源于勘查阶段,包括详述岩性、矿物组合的勘探报告,刻画水文地质条件的调查报告,以及瓦斯地质图件,为识别潜在排放区域提供本底依据。开采工程数据层将静态地质条件与动态扰动关联,涵盖开采顺序、爆破参数、年度采剥量及新暴露岩面估算,从而将地质潜力转化为可量化的活动水平。动态监测数据层来自生产运营期,如连续记录的通风瓦斯数据、排水流量与水化学参数、采空区气体成分监测等,这些时序数据直接刻画排放通量的动态规律,是校准与验证模型的核心。实验分析数据层则通过室内实验获取,包括气体吸附/解吸参数、矿物氧化速率及岩石热分析数据,用以揭示微观机理、确定关键模型参数,并弥补现场监测的时空局限。这四层数据互为补充,共同构成从地质本底推演至排放通量的完整证据链。

### 4.2 不确定性分析与处理

地质过程碳排放核算结果普遍存在显著的不确定性,其根源主要在于三个方面:地质体固有的空间异质性使得有限的取样与监测数据难以全面表征整体行为;排放涉及应力释放、水-岩反应、气体迁移等多个物理化学过程的复杂耦合,在核算中难以完全解耦与独立量化;关键模型参数,如岩石破裂CO<sub>2</sub>释放因子与爆破热分解率,多依赖经验估计,缺乏普适的精准值。为有效管控这些不确定性,提升核算结果的可靠性,需采取系统性的应对策略。首先,通过实施分层级核算,明确区分基于直接监测的高置信度“一级核算”与基于模型或因子的“二级核算”,并透明披露各部分的置信水平。继而,采用敏感性分析,定量评估关键参数在其合理范围内的变动对总排放结果的影响程度,以识别优先改进环节。在此基础上,对于绝对值不确定性高的排放源,管理重点可转向追踪其在开采周期内的变化趋势,以此作为减排成效的评判依据。最终,建立持续改进机制,通过长期专项监测与研究,逐步积累本地化实测数据,替代经验参数,从而系统性缩小不确定性边界,推动核算精度与实用性的不断提升。

## 5 结论与展望

本文系统论证了地质矿产资源开发碳足迹核算必须回归其地质本质的观点,构建了一套以地质扰动过程为核心的直接碳排放核算方法学框架。该框架将岩体破裂、矿物氧化、地下水脱气、煤层气逸散等由开采工程直接激发的地质碳释放过程置于核算的中心位置,突破了传统以能源消耗为纲的核算模式,更能真实反映该行业的碳排放特征与减排责任。

展望未来,本领域研究需在以下方向深化:(1)加强典型矿床类型、开采方式下的原位排放通量监测研究,建立中国特色的地质排放因子数据库;(2)发展融合地质模型、开采模拟与地球化学反应传输的耦合数值模型,用于预测排放;(3)推动将地质过程排放纳入国家或行业温室气体核算报告指南,形成标准化方法;(4)探索基于地质封存原理的矿山井下CCUS(碳捕集、利用与封存)技术,变“排放源”为“封存汇”。

### [参考文献]

- [1]彭苏萍.煤炭开采碳排放机理及核算方法研究进展[J].煤炭学报,2022,47(4):1419-1431.
- [2]王恩营.煤层气开发与煤炭开采温室气体协同减排机制探讨[J].中国矿业,2021,30(10):1-7.
- [3]刘汉斌.金属矿山硫化矿物氧化产酸及碳排放估算方法初探[J].地球科学与环境学报,2019,41(05):654-662.

### 作者简介:

王云(1986—),男,汉族,山西大同人,大学本科,地质矿产高级工程师,研究方向为地质矿产。