Advances in Environmental Protection 环境保护前沿, 2026, 16(11), 1675-1680
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/aep
https://doi.org/10.12677/aep.2026.1611168

Hans汉斯

陕北地区煤矸石绿色处置与资源化利用研究

黄永亮[1*]，张龙年[1]，王鹏超[2*]，祁宁邦[2]

[1]国家能源集团神东煤炭集团有限公司，陕西 榆林
[2]宁夏庆华煤化集团有限公司，宁夏 吴忠

收稿日期：2026年9月30日；录用日期：2026年10月29日；发布日期：2026年11月6日

摘　要

煤矸石露天堆存引发土地侵占、扬尘污染、酸性渗滤液下渗、矸石山自燃等环境风险，叠加陕北黄土高原－毛乌素沙地过渡带生态本底脆弱的先天条件，传统填埋、简单堆存处置模式已无法满足黄河流域生态保护与高质量发展战略要求。本文通过系统研究陕北神府、榆横、子长三大矿区煤矸石空间分布、年产量、资源分类体系，对生态修复基质制备、煤矸石基催化剂载体、建筑骨料与采空区回填三大煤矸石资源化路径进行分析，结果可为陕北地区煤矸石的资源化利用提供技术参考。

关键词

煤矸石，绿色处置，资源化利用，生态修复，催化剂载体

Research on Green Disposal and Resource Utilization of Coal Gangue in Northern Shaanxi Region

Yongliang Huang[1*], Longnian Zhang[1], Pengchao Wang[2*], Ningbang Qi[2]

[1]National Energy Group Shendong Coal Industry Co., Ltd., Yulin Shaanxi
[2]Ningxia Qinghua Coal Chemical Group Co., Ltd., Wuzhong Ningxia

Received: September 30, 2026; accepted: October 29, 2026; published: November 6, 2026

Abstract

The open storage of coal gangue poses environmental risks such as land occupation, dust pollution, acidic leachate infiltration, and spontaneous combustion of gangue piles. Coupled with the inherently fragile ecological background of the transition zone between the Loess Plateau and the Mu Us

*通讯作者。

文章引用: 黄永亮, 张龙年, 王鹏超, 祁宁邦. 陕北地区煤矸石绿色处置与资源化利用研究[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(11): 1675-1680. DOI: 10.12677/aep.2026.1611168

Sandy Land in northern Shaanxi, traditional landfill and simple storage disposal methods have been unable to meet the strategic requirements for ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin. This paper systematically studies the spatial distribution, annual production, and resource classification system of coal gangue in Shenfu, Yuheng, and Zichang mining areas in northern Shaanxi. It analyzes three major resource utilization pathways of coal gangue: preparation of ecological restoration substrates, coal gangue-based catalyst carriers, construction aggregates, and backfilling of mined-out areas. The results can provide technical references for the resource utilization of coal gangue in northern Shaanxi.

Keywords

Coal Gangue, Green Disposal, Resource Utilization, Ecological Restoration, Catalyst Carrier

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

黄河流域中游陕北地区(榆林、延安)富集侏罗纪优质煤炭资源，神府、榆横、子长矿区构成国家 14 个大型煤炭基地的陕北基地核心板块，原煤产量长期处于高位。煤炭开采与洗选加工过程剥离的围岩、夹矸形成煤矸石，占原煤开采量 10%~20%，是我国排放量最大的矿山固体废弃物之一。榆林地区原煤年产量约 6 亿吨，年新增煤矸石(CG)排放量超过 6000 万吨，历史累计堆存煤矸石存量已达数亿吨规模，大量矸石山沿沟谷、坡面堆存，占用大量黄土高原稀缺土地资源[1]-[3]。

陕北地处黄土高原与毛乌素沙漠南缘交错地带，水土流失强烈，水资源匮乏，生态承载力极低。露天堆放煤矸石的危害体现在多个维度：其一，矸石山松散堆积体稳定性差，暴雨条件下极易诱发滑坡、泥石流地质灾害；其二，煤矸石内黄铁矿氧化产酸，形成酸性渗滤液，携带重金属离子向下迁移污染土壤与地下水；其三，含碳煤矸石发生氧化自燃，释放 SO_2、CO、颗粒物等大气污染物，加剧区域大气污染；其四，扬尘随风扩散，进一步恶化周边农田与草场生态。过去数十年，陕北煤矸石处置以井下简单回填、露天排矸场堆存为主，资源化利用率整体偏低，大量固废长期被动存放，固废环境风险持续增加。

国外优先采用井下充填减少地面排矸量，煤矸石多用于矿区土地复垦、路基填料，部分高铝煤矸石用于提取氧化铝、分子筛材料。在催化领域，国外学者研究高岭石基矿物经煅烧活化制备多孔载体，负载金属氧化物用于高级氧化、CO_2 催化转化，但针对煤矸石直接作为催化剂载体的研究较少，多选用提纯高岭土原料。国外矿区生态修复重视矸石基质改良，通过添加有机质、微生物菌剂改善矸石基质保水保肥能力，适配干旱半干旱矿区植被恢复。目前国内煤炭科学研究总院、中科院过程工程所等单位针对陕北煤矸石矿物学特性开展系统研究，开发煤矸石生物解矸制备生态功能土中试工艺，榆林建成 5 万吨/年中试生产线，实现煤矸石向植被生长基质转化，可替代外购客土用于沙化土地修复，解决陕北复垦客土来源不足的难题。在高值化方面，煤矸石煅烧活化制备多孔硅铝载体，负载铋系、铁基氧化物构建复合光催化剂，用于有机废水降解；煤矸石制备沸石、吸附材料研究，以及用于 CO_2 矿化充填煤矿采空区也有较多报道[4]-[7]。

现有研究仍存在不足：① 陕北不同矿区煤矸石岩性、元素组分差异显著，多数研究选取单一矿区样品，缺少区域横向对比；② 煤矸石基催化剂载体研究多局限实验室小试，活化能耗高、批次稳定性差，难以规模化；③ 生态修复应用中，煤矸石硫钝化、重金属长期浸出风险评估体系不完善；④ 缺少统筹大规模消纳(回填、生态土)和高值利用(催化、吸附材料)的梯级利用方案。

2. 陕北地区煤矸石资源现状

2.1. 空间分布与产量特征

陕北煤炭资源集中分布在榆林市神木、府谷、榆阳、横山以及延安市子长、宝塔等区域，划分为神府矿区、榆横矿区、子长矿区三大片区(表 1)。神府矿区(大柳塔、南梁等矿井)属于侏罗纪煤田北部，煤层埋藏浅，开采强度大，煤矸石排放量巨大；榆横矿区(大海则等矿井)煤矸石以砂岩类为主；子长矿区煤矸石黏土岩占比更高，铝含量相对偏高。

陕北煤矸石产生分为两类：一是井工开采巷道掘进剥离围岩，属于掘进矸；二是原煤洗选加工产生的洗选矸。掘进矸岩块粒径大，岩石原生结构保留完整；洗选矸粒度细小，含碳量波动更大，更容易发生自燃。从排放时序看，新建矿井掘进矸产量占比高，生产中后期洗选矸成为主要来源。历史堆存矸石山多分布在沟谷两侧，距离矿井较近，矸石堆体规模大，是陕北生态环境重点管控对象。随着保水采煤、井下充填技术推广，部分矿井实现井下就地消纳掘进矸，地面排矸量逐步下降，但存量矸石治理任务依然繁重。

Table 1. Types and characteristics of coal gangue in major mining areas of northern Shaanxi
表 1. 陕北主要矿区煤矸石类型与特征

矿区	煤矸石岩石类型	主要排放形式	煤矸石特点
神府矿区	砂岩质矸石为主	掘进矸 + 洗选矸	SiO_2 含量高，岩石强度高，含碳量中等
榆横矿区	砂岩矸，少量黏土岩矸	掘进矸为主	块体完整，抗风化性能较好
子长矿区	黏土岩矸为主	洗选矸占比较高	Al_2O_3 含量偏高，易风化破碎

2.2. 煤矸石分类体系

煤矸石分类可以按照岩石类型、含碳量、灰分、硅铝组分多重维度划分。

(1) 按岩石类型：陕北煤矸石分为砂岩型煤矸石、黏土岩型煤矸石、炭质页岩矸石三类。砂岩矸石英含量高，结构致密，抗压强度高，风化速度慢，适合路基、充填骨料；黏土岩矸富含高岭石、伊利石，遇水易软化破碎，热活化后易形成多孔结构，适合制备生态基质、催化载体；炭质页岩矸含碳量较高，自燃风险突出，必须优先做脱硫、控碳钝化处理，不宜直接露天用于表层生态修复。

(2) 按照资源属性分类：一类煤矸石，高灰、低含碳，适合建材、充填；二类煤矸石，中灰，含有一定热值，可用于低热值发电或提取铝硅组分；三类煤矸石含碳高、硫含量高，环境风险大，优先井下封存，谨慎地面资源化利用。

2.3. 煤矸石堆存带来的环境问题

土地资源占用：陕北可利用土地稀缺，矸石山压占土地，破坏原生植被，加剧水土流失。酸性渗滤液污染：煤矸石内黄铁矿氧化生成硫酸，pH 降低，重金属(Mn、Cr 等)溶出，污染地表水与地下水。矸石山自燃风险：含碳矸石堆体孔隙发达，氧气渗透，发生低温氧化自燃，排放 SO_2、烟尘，造成区域空气污染。地质灾害风险：松散堆积矸石抗冲刷能力弱，强降雨条件下容易出现滑坡、泥石流，威胁下游村落。

3. 陕北煤矸石物理化学性质表征与分析

3.1. 元素与化学组分特征

采集神府、榆横、子长矿区代表性煤矸石样品，采用 X 射线荧光光谱(XRF)测定化学组成(表 2)。陕

北侏罗纪煤矸石化学组分主体为 SiO_2、Al_2O_3，二者总质量分数 53.13%~91.50%，属于典型硅铝质固废；次要组分包括 Fe_2O_3、CaO、MgO、TiO_2 等；同时含有微量 S、重金属元素。不同矿区组分差异明显：榆横、神府砂岩矸 SiO_2 可达 60%以上；子长黏土岩矸 Al_2O_3 含量更高；部分样品 Fe_2O_3 含量较高，铁氧化物可以作为催化活性位点，为煤矸石基催化材料提供基础。

Table 2. Chemical composition of coal gangue from a typical mining area in northern Shaanxi (mass fraction/%)
表 2. 陕北典型矿区煤矸石化学组成(质量分数/%)

样品编号	采样矿区	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	TiO_2
S1	神府矿区	62.15	20.42	5.36	2.11	0.78	0.89
S2	榆横矿区	58.64	23.75	4.12	3.25	1.03	0.74
S3	子长矿区	48.37	29.66	6.73	2.46	0.92	1.05

煤矸石中硫元素主要赋存于黄铁矿(FeS_2)，是煤矸石环境风险核心来源。高硫煤矸石直接露天使用，黄铁矿氧化产酸，重金属溶出，因此生态修复材料制备前有必要开展脱硫钝化预处理。

3.2. 矿物组成

图 1 的 X 射线衍射(XRD)结果表明，陕北煤矸石主要晶相矿物：石英、高岭石、长石等，伴生矿物伊利石、黄铁矿、方解石等。砂岩矸石英、长石占主导(见表 3)；黏土岩矸高岭石、伊利石含量显著提升。高岭石属于层状黏土矿物，在 400℃~700℃煅烧条件下，晶体结构脱水坍塌，转变为无定形偏高岭石，活性大幅提升，孔隙结构发育，比表面积增大，是制备多孔载体、活性矿物基质的核心物相。黄铁矿属于有害矿物相，在资源化利用前需要预处理脱除或者稳定固化。

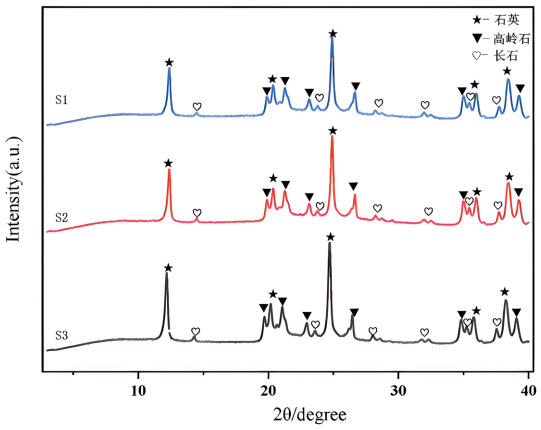


Figure 1. The main crystal phase structure of coal gangue
图 1. 煤矸石主要晶相结构

Table 3. The relative content of the main minerals in the coal gangue from northern Shaanxi (mass fraction/%)
表 3. 陕北煤矸石主要矿物相对含量(质量分数/%)

样品	石英	高岭石	长石	伊利石	黄铁矿	方解石
S1	41.2	11.5	22.4	10.3	2.1	3.5
S2	35.7	18.6	17.8	13.2	1.8	4.2
S3	26.4	32.7	12.1	15.5	2.7	3.9

3.3. 比表面积与孔隙结构

原煤矸石致密程度高，通过比表面积测试法(BET)，测试数值普遍偏低(表 4)，未经活化样品比表面积一般仅为 3~12 m^2/g，孔隙以大孔为主，微孔、介孔数量少，吸附能力弱，直接作为催化剂载体性能差。采用热活化(煅烧 600℃，保温 2 h) + 机械球磨复合改性后，黏土岩型煤矸石样品 S3 比表面积提升至 68.4 m^2/g，介孔数量显著增加；砂岩矸 S1 活化后比表面积提升幅度有限，仅提升至 21.7 m^2/g。原因在于砂岩矸石英稳定性强，煅烧很难破坏晶体结构；而高岭石煅烧转变为偏高岭石，层状结构解离，产生大量介孔孔隙。由此可见：黏土岩型煤矸石更适合制备多孔催化载体；砂岩型煤矸石优先用于充填、路基骨料，不推荐作为高值催化材料原料。

Table 4. System resulting data of standard experiment
表 4. 标准试验系统结果数据

样品	原煤矸石比表面积/(m^2/g)热活化	热活化 + 球磨改性后/(m^2/g)
S1 (神府砂岩矸)	7.2	21.7
S2 (榆横混合矸)	8.5	39.2
S3 (子长黏土岩矸)	10.6	68.4

4. 煤矸石资源化利用路径研究

4.1. 煤矸石用于矿区生态修复

陕北黄土高原矿区生态修复最大痛点：优质种植土短缺，外购客土成本高昂，远距离取土会破坏异地原生生态。煤矸石生态修复，是通过破碎、分选、脱硫钝化、生物活化，制备煤矸石基生态功能土，用于采煤塌陷区、排矸场边坡植被重建；此外，还有较多矿区利用煤矸石与 CO_2 封存协同作用，用于采空区充填固化，以上都是适合陕北地区大规模消纳煤矸石的路径。中科院过程工程所在榆林建成中试线，采用相分离分选耦合生物解矸工艺，将煤矸石转化为生态基质，基质保水保肥能力提升，可替代客土，种植沙棘、沙柳、苜蓿等陕北本土耐旱植物[8] [9]。

4.2. 煤矸石改性制备催化剂载体

煤矸石富含硅铝矿物，含有 Fe、Ti 过渡金属组分，经热活化后形成多孔结构，可作为催化剂载体，负载活性组分，用于高级氧化、光催化降解有机污染物，属于煤矸石高值化利用方向。原料优先选用子长矿区黏土岩型煤矸石：破碎筛分→球磨→酸洗除杂(脱除部分可溶性钙、硫)→600℃~700℃煅烧活化→成型造粒，得到多孔硅铝载体。煅烧高岭石转化为偏高岭石，孔隙增加，载体表面存在羟基位点，有利于金属活性组分固定。将制备的煤矸石载体负载 $BiVO_4$，制备 CG/$BiVO_4$ 复合光催化剂，用于模拟有机废水(黄药)降解。试验结果：20%负载量 CG/$BiVO_4$ 可见光催化降解性能最优，降解反应符合一级动力学模型；最优 pH = 7 条件下，黄药降解率可达 94.14%，循环 5 次降解率维持 90%以上，催化剂稳定性良好。煤矸石载体中的铁组分可以协同光生载流子分离，提升催化效率。除光催化外，煤矸石基载体还可负载铁基材料活化过一硫酸盐，降解水体有机污染物。

4.3. 煤矸石作为充填骨料与建材利用

(1) 井下采空区充填：砂岩煤矸石破碎分级后作为膏体充填骨料，就地回填采空区，从源头减少地面排矸，同时控制地面塌陷，是源头减碳、减污技术。膏体充填将煤矸石、粉煤灰、胶凝材料配制成料浆泵

送入井下，实现煤矸石井下封存，适合矿井大规模消纳。

(2) 路基材料：合格砂岩煤矸石破碎分级后用作公路路基填料，承载指标满足规范要求，陕北矿区道路工程已有应用案例。

(3) 煤矸石烧结砖：煤矸石替代黏土制备烧结砖，减少黏土开采破坏耕地；但陕北人口密度低，建材市场容量有限，消纳规模有限。

5. 结论

陕北神府、榆横、子长矿区煤矸石分为砂岩型、黏土岩型、炭质页岩矸三大类，化学组分以 SiO_2、Al_2O_3 为主，砂岩矸力学性能强，适合充填、路基骨料，黏土岩矸富含高岭石，活化后孔隙发达，适合制备生态基质和催化剂载体，黄铁矿是煤矸石最主要环境风险来源，高硫煤矸石资源化前必须钝化处理。煤矸石生态功能土制备技术适配陕北脆弱生态区[10] [11]，可替代天然客土，大规模消纳黏土岩煤矸石，用于塌陷区植被重建；煤矸石改性制备催化剂载体，用于协同 CO_2 矿化并填充采空区也极具备可行性。针对陕北煤矸石治理，推荐分质分选、梯级就地消纳绿色处置模式：砂岩掘进矸优先井下膏体充填；低硫黏土岩矸制备生态修复基质；少量优质黏土岩矸开发催化、吸附等高值材料。该模式兼顾固废减量、生态保护与资源价值提升，契合黄河流域生态保护战略。

基金项目

2025 年宁夏自然科学基金项目(2025AAC030068)。

参考文献

[1] 马炜迪, 李蕾蕾, 冯泽平, 等. 陕西榆林某矿区煤矸石制备砂石骨料工艺研究[J]. 煤炭加工与综合利用, 2026(9): 154-157+163.

[2] 蒙庆君, 吴翠兰. 高硫煤矸石污染胁迫下先锋植物的抗氧化系统与形态响应特征[J]. 广东化工, 2025, 52(13): 49-52.

[3] 王文才, 张修园, 王鹏, 等. 西北干旱区煤矸石风化崩解的粒级效应与机理[J]. 科学技术与工程, 2026, 26(14): 5904-5911.

[4] 惠迎新, 张诜, 袁化强, 等. 煤矸石在中国路基路面工程中的应用研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2026, 43(1): 112-137.

[5] 李京, 鲁肃, 刘佳鑫, 等. 煤矸石矿化 CO_2 研究进展[J]. 现代化工, 2026, 46(3): 37-42.

[6] 汪洋洋, 杜娟, 孟凡会, 等. 煤矸石高温发泡法制备不同主晶相泡沫陶瓷及其性能研究[J]. 无机盐工业, 2026, 58(3): 96-105.

[7] 韩玉琴, 武文粉, 赵峥, 等. 煤矸石碱性浸提过程中镓连续吸附分离工艺研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2026(2): 402-412.

[8] 王泽惠, 宋子恒, 姜林青, 等. 寒旱矿区煤矸石土壤化利用与生态修复: 关键过程、工程模式与区域适配性[J]. 中国矿业, 2026, 35(8): 207-218.

[9] 胡振琪, 毛缜, 赵艳玲.《煤矸石山生态修复技术规范》解读与技术发展[J]. 中国煤炭, 2026, 52(7): 1-8.

[10] 牛之建, 王登红, 陈振宇, 等. 新《矿产资源法》框架下煤矸石资源化利用的长效机制构建[J]. 中国矿业, 2026, 35(8): 74-85.

[11] 田兵, 陈亭雨, 邱尚锟, 等. 煤矸石活化利用现状及发展趋势[J]. 煤炭转化, 2026, 49(2): 104-114.