

# 煤矸石污染物释放及影响机理

——以陕西韩城为例

颜 林, 韩珍珍, 甄晓彤, 符湘杭, 阿卜杜艾则孜·努尔买买提, 孙亚乔\*

长安大学水利与环境学院, 陕西 西安  
Email: 1174145251@qq.com, \*48161587@qq.com

收稿日期: 2021年1月2日; 录用日期: 2021年2月2日; 发布日期: 2021年2月10日

## 摘 要

本次试验是为了解释煤矸石污染物释放及煤矸石渗出液对土壤, 地表水和地下水污染的强度。本文通过静态浸泡和动态淋滤, 利用统计分析方法研究了煤矸石中可溶性物质的释放特征和释放能力, 评价了污染物释放对环境的影响。研究得出在动态淋滤下煤矸石中有机物释放的能力远大于静态下煤矸石中的有机物释放能力。但在动态淋滤下煤矸石中可溶性固体释放的能力小于静态下煤矸石中的可溶性固体的释放能力。煤矸石的粒径以及时间对煤矸石的污染物释放能力贡献较大, 淋滤试验对比浸泡试验, 煤矸石粒径大小对煤矸石中物质的释放影响更大。

## 关键词

煤矸石, 浸泡试验, 淋滤试验, 污染物释放, 影响评价

# Release of Coal Gangue Pollutants and Its Influence Mechanism

—Taking Hancheng in Shaanxi Province as an Example

Lin Yan, Zhenzhen Han, Xiaotong Zhen, Xianghang Fu, Abdouazizi Nurmamet, Yaqiao Sun\*

School of Water Resources and Environment, Chang'an University, Xi'an Shaanxi  
Email: 1174145251@qq.com, \*48161587@qq.com

Received: Jan. 2<sup>nd</sup>, 2021; accepted: Feb. 2<sup>nd</sup>, 2021; published: Feb. 10<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

The purpose of this experiment is to explain the release of pollutants from coal gangue and the

\*通讯作者。

文章引用: 颜林, 韩珍珍, 甄晓彤, 符湘杭, 阿卜杜艾则孜·努尔买买提, 孙亚乔. 煤矸石污染物释放及影响机理[J]. 环境保护前沿, 2021, 11(1): 39-50. DOI: 10.12677/aep.2021.111005

**pollution intensity of coal gangue exudate on soil, surface water and groundwater. In this paper, through static immersion and dynamic leaching, the release characteristics and release capacity of soluble substances in coal gangue were studied by statistical analysis method, and the impact of pollutant release on the environment was evaluated. The results show that the release capacity of organic matter in coal gangue under dynamic leaching is much greater than that in static state. However, the release capacity of soluble solid in coal gangue under dynamic leaching is less than that in static state. The particle size and time of coal gangue contribute greatly to the pollutant release capacity of coal gangue. Compared with immersion test, the particle size of coal gangue has a greater impact on the release of pollutants from coal gangue.**

## Keywords

Coal Gangue, Soaking Experiment, Leaching Experiment, Pollutant Release, Impact Assessment

Copyright © 2021 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

煤矸石是煤矿开发过程中产生的固体废弃物, 每年煤矸石的排放量相当于当年煤炭产量的 10%~20% [1] [2]。露天堆放的煤矸石不仅侵占林地、耕地和居民用地, 造成土地资源的浪费; 破坏自然景观及局部地区生态环境; 自然时释放出来的 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 及氮氧化物等气体严重污染矿区空气; 特别是在长期风化、淋溶作用下, 煤矸石会释放大量可交换态的微量有害元素, 污染周围的土壤和水体, 严重威胁矿区居民的健康与安全[3] [4] [5]。煤矸石中含有多种有毒有害物质, 在风化作用下, 煤矸石中的有害物质会释放出来, 污染环境并对生态系统产生破坏[6] [7] [8] [9] [10]。灰尘中的 As、Co、Cr、Cu、Hg、Mn、Ni、Pb、V、Zn 10 种金属元素来自煤矸石的碎屑粉末 As、Cr、Ni 均存在一定程度致癌风险[11] [12]。国外如美国、英国、巴西等, 国内如贵州、焦作、宁夏等的矿区周边环境都受到了煤矸石释放的污染物的影响[13] [14] [15] [16]。它的长期堆放占用了大量的土地, 而且污染了矿区周边的水源、土壤和周围的空气, 严重破坏矿区的生态环境和生态景观, 研究其对地下水的影响就显得十分有价值 and 意义[17] [18]。

目前研究有害微量元素从煤矸石中析出的方法有很多, 如葛银堂等[19]采用静态和加温两种方式进行淋溶试验研究, 研究结果表明, 所测微量元素中砷的溶出并未受到温度影响。周辰昕[20]等采用静态浸泡和动态淋溶法对煤矸石中重金属元素的析出行为进行了研究, 其中砷的静态浸泡溶出最大浓度为 0.0548 mg/L, 动态淋滤溶出最大浓度为 0.0682 mg/L。武旭仁[21]等采用生命周期的理论研究了煤矸石中微量元素的析出规律。柱淋滤能够提供有关流速、环境 Eh 微小变化动态浓度、二次相等对有害元素可溶性影响的信息[22]。王晖, 徐龙君等[23] [24]分别在自然酸度和模拟酸雨条件下对煤矸石中重金属的动态淋滤特征进行了研究, 揭示了不同地区煤矸石中污染物对土壤、地表水和地下水污染的强度; 肖利萍[25]等通过室内土柱动态模拟试验, 研究揭示了煤矸石淋溶液主要污染组分总硬度(Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>)、硫酸根(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)、钠离子(Na<sup>+</sup>)在地下水系统中的多组分运移机理和污染规律: 总硬度(Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>)的运移速度很快, 硫酸根(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)次之, 而钠离子(Na<sup>+</sup>)的运移速度最慢; 张燕青等[26]等通过试验室模拟大自然降雨的过程, 并控制试验中的浸泡时间、pH、固液比等, 揭示了污染物浸出量随浸泡时间的延长而增大, 随初始 pH 的降低而增大; 贾兰[27]等通过单因素试验分别考察了固液比和 pH 对煤矸石浸出液中金属和酸根离子含量的影响, 结果表明金属离子含量随固液比的增加而增加, 随 pH 的增大而减小, 酸根离子的含量随固液

比的增大先增加后减少, 随 pH 的增加而呈现出先增加后减小再增加的趋势; Peng B [28]对山西阳泉煤矸石在不同 pH 和不同浸出时间的条件下进行浸出试验, 研究表明当酸度逐渐增加时 CI 可在较短时间内浸出。有研究证明煤矸石露天堆放形成的矸石山在雨水或酸雨的淋溶作用下, 也会迫使周围的生态环境发生改变甚至造成人为的二次污染, 最明显的污染情况是土壤重金属的严重富集[29] [30]。煤矸石中释放的钙、镁、铁浓度随化学溶液酸度的降低而降低, 并随碱度的增加呈现由高到低的趋势[31]。

目前, 国内外学者采用静态浸泡及动态淋溶法对煤矸石中有害微量元素析出规律及煤矸石重金属迁移释放规律进行了深入研究, 但之前的研究缺乏将静态浸泡和动态淋滤进行系统分析, 本研究进行了不同粒径下煤矸石静态浸泡和模拟自然酸度条件下对煤矸石进行动态淋滤, 并对浸出液和淋出液结果进行分析, 探究煤矸石污染物及影响机理。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 样品采集与处理

陕西省韩城市位于关中平原东北隅, 陕西省东部, 黄河西岸。北依宜川, 西邻黄龙, 南接合阳, 东隔黄河与山西省河津、乡宁、万荣等县市相望。地理位置坐标为北纬  $35^{\circ}18'50''\sim 35^{\circ}52'08''$ , 东经  $110^{\circ}7'19''\sim 110^{\circ}37'24''$ 。韩城处于暖温带半干旱区域, 属大陆性季风气候, 四季分明, 气候温和, 光照充足, 雨量较多。平均年降水量 559.7 毫米, 但雨量不均, 多集中于 7、8、9 月份。韩城蕴含的煤炭资源位于渭北煤田东部, 煤田南北走向长约 60 公里, 东西倾斜宽 15~20 公里, 面积 1116 平方公里, 占市域面积 69%, 煤炭总储量 103 亿吨, 其中已探明储量 26.79 亿吨, 占渭北煤田的 35.5% [32]。矿区周边大量堆积的煤矸石在长期的雨水淋溶和浸泡作用下释放出大量的污染物并对土壤和地表水产生严重的污染 [33]。本次实验煤矸石样品采自韩城矿区, 在矸石堆放场采取, 采集的为采掘矸石, 将采掘煤矸石进行粉碎后过 100 目筛。

### 2.2. 试验流程

试验流程见图 1。

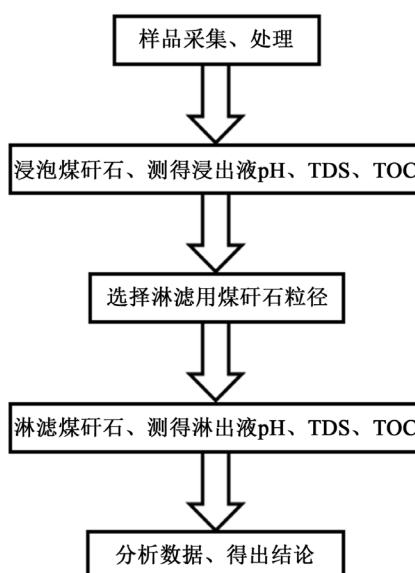


Figure 1. Experiment with flowcharts

图 1. 试验流程图

### 2.3. 浸泡试验

试验步骤:

1) 煤矸石浸泡: 保持固液比为 1:10, 在塑料瓶中分别装入 10 克 0.075 mm、0.15 mm、0.5 mm、1 mm、2 mm 煤矸石样品与 100 克超纯水。

2) 取样: 每天早上 10 点取样, 取一组煤矸石浸泡液上清液(0.075 mm、0.15 mm、0.5 mm、1 mm、2 mm 样液各一瓶)进行过滤操作, 并检测记录过滤后样液的 pH、TDS、TOC, 连续 12 天。

测试方法:

在浸泡试验中, 每日取 20 ml 浸出液进行测量, 浸出液的 pH、和 TDS 值使用便携式 pH 计(Seven2Go pH 计), 电导率仪(DDSJ-308F 型, 上海雷磁)当天测定。TOC 值使用德国 Elementarvario TOC select TOC/TN<sub>b</sub> 水质分析仪进行测量。

### 2.4. 淋滤试验

组装淋滤柱, 从上到下依次为定量滤纸、3~5 mm 高纯石英砂、定量滤纸、200 克 0.5 mm 煤矸石、定量滤纸、3~5 mm 高纯石英砂、定量滤纸。淋滤装置见图 2, 从上到下分别为输液管、淋滤柱、橡胶管、娃哈哈矿泉水瓶。配置淋滤液, 根据大气降水 pH 值通常的变化范围, 采用高浓度盐酸和氢氧化钠按不同的配比配制 pH 分别为 4、5、6、7、8 的淋滤液。用一次性输液器向输液管中注入 250 mL 淋滤液, 控制流速为 250 mL/d, 每天早 9 点取样, 过滤, 测量淋出液的 pH、TDS、TOC 等。持续淋滤, 直至 pH 和 TDS 值趋于稳定时结束试验。



Figure 2. Filter test device diagram  
图 2. 淋滤试验装置图

## 3. 数据分析

### 3.1. 煤矸石浸出液基本特征

浸泡试验统计值见表 1, 不同粒径煤矸石浸泡所得浸出液 pH 平均值变化不大, 平均值范围为 8.0~8.5, 浸出液呈碱性, 浸出液 pH 平均值随浸出液粒径的增大而增大, pH 方差变化不大。煤矸石浸出液 TDS 平均

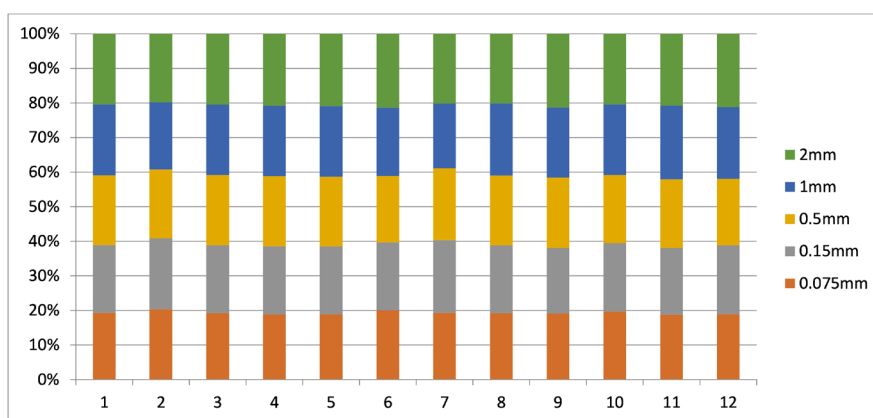
值范围为 97.3~152.8 mg/L, 浸出液 TDS 平均值随煤矸石粒径的增大而减小, TDS 方差变化较大, 波动性较强。煤矸石浸出液 TOC 平均值范围为 8.8~17.0 mg/L, 浸出液 TOC 平均值总体随煤矸石粒径的增大而减小。

**Table 1.** Table of immersion test statistics

**表 1.** 浸泡试验统计值表

	统计值	0.075 mm	0.15 mm	0.5 mm	1 mm	2 mm
pH	中位数	8.1	8.2	8.3	8.5	8.7
	众数	8.1		8.2	8.8	
	最大值	8.3	8.5	8.8	8.9	9.0
	最小值	7.3	7.4	7.3	7.4	7.6
	平均值	8.0	8.2	8.3	8.4	8.5
	方差	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
TDS (mg/L)	中位数	164.0	123.0	110.7	100.6	97.7
	众数			110.9	98.9	
	最大值	183.1	156.7	116.4	112.4	108.7
	最小值	89.3	96.3	90.7	76.1	80.0
	平均值	152.8	123.5	108.7	99.1	97.3
	方差	758.2	196.4	49.2	105.1	65.2
TOC (mg/L)	中位数	12.4	15.4	7.5	10.3	10.3
	众数					
	最大值	46.3	29.9	14.4	12.6	16.1
	最小值	6.1	5.7	5.9	0.9	5.5
	平均值	16.0	17.0	9.0	8.8	10.8
	方差	11.3	8.2	3.1	3.4	2.8

根据每天实测 pH、TDS、TOC 数据绘制图 3~5, 浸出液 pH 随时间的变化如图 3, 各粒径各时段浸出液均呈碱性。总体上浸出液呈碱性, pH 在 7.5~9.0 区间内, 各粒径浸出液基本稳定在一个确定值周围, 煤矸石中的氢氧根离子溶解到浸出液中, 随着时间的推移, 煤矸石和浸出液中的氢氧根离子浓度达到平衡, 淋出液的 pH 趋于稳定。部分样品存在缓慢下降的趋势, 曲线呈现较强波动性。但在开始浸泡时 PH 出现上升情况, 相对来说大粒径煤矸石淋出液碱性更强, 波动性更强, 而小粒径煤矸石较稳定。



**Figure 3.** The percentage change of the immersion test pH is stacked with histograms

**图 3.** 浸泡试验 pH 变化百分比堆积柱状图

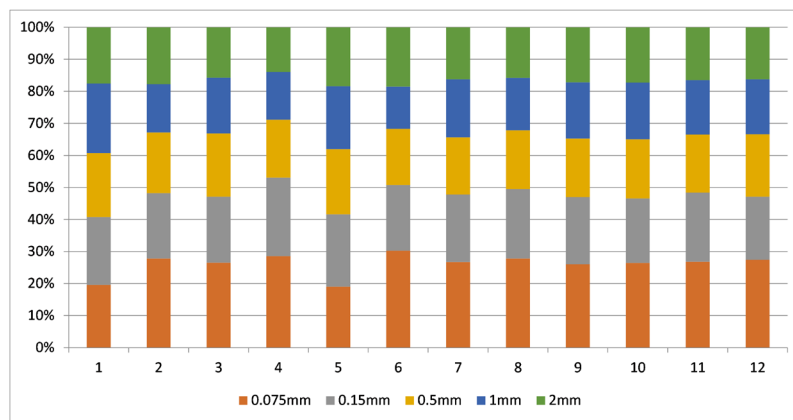


Figure 4. The percentage change in the immersion test TDS is stacked with histograms  
图 4. 浸泡试验 TDS 变化百分比堆积柱状图

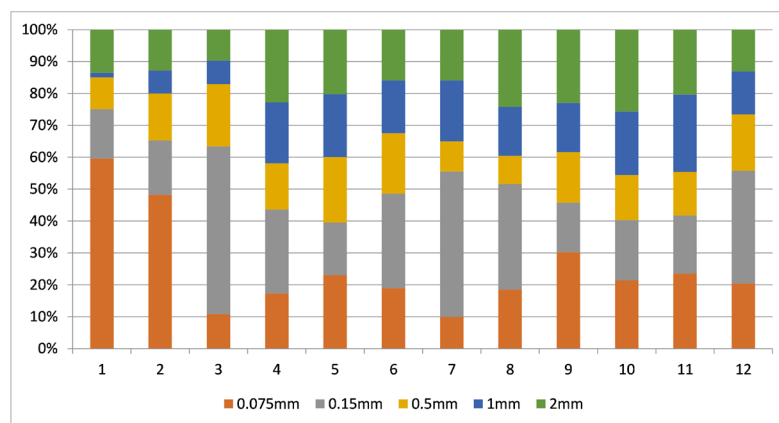


Figure 5. The percentage change of the immersion test TOC is stacked with histograms  
图 5. 浸泡试验 TOC 变化百分比堆积柱状图

从 TDS 释放变化来看, 随着时间的增长, 前期 TDS 的波动性较强, 而后期则基本在某一确定值附近波动, 粒径越大, 这一确定值就越小。说明大粒径煤矸石溶解物的释放能力较弱, 小粒径煤矸石溶解物释放能力较强。

从 TOC 角度来看, 随着浸泡时间增大, 1 mm, 2 mm 煤矸石呈缓慢上升趋势, 0.5 mm、0.075 mm 煤矸石在 10~15 mg/L 附近稳定, 而 0.15 mm 煤矸石波动则较大。在浸泡 4 天后, 除 0.5 mm 粒径煤矸石外, 其他粒径煤矸石总机碳含量趋于稳定, 且稳定值较为接近。

煤矸石浸出液基本特征: 不同粒径煤矸石浸出液 pH 在 7.5~9 之间, 呈弱碱性, pH 值波动较大且随粒径的不同 pH 值变化不明显。TDS 随浸泡时间的延长变化较小且 TDS 值随粒径的减小而变大。TOC 值总体起伏较大且随粒径的不同变化不明显。同时粒径对煤矸石可溶性固体释放率有较大影响, 计算各粒径煤矸石可溶性固体释放率平均值可知随着粒径的增大, 煤矸石可溶性固体释放率逐渐降低, 释放能力减弱。计算各粒径煤矸石有机物释放率平均值可知随粒径的变化, 煤矸石有机物释放率变化规律不明显。

### 3.2. 煤矸石淋出液基本特征

淋滤试验统计值见表 2, 使用不同 pH 淋滤液淋滤煤矸石所得淋出液 pH 平均值变化不大, 平均值范围为 9.3~9.5, 淋出液呈碱性, pH 方差变化不大。煤矸石淋出液 TDS 平均值范围为 106.8~112.3 mg/L, 淋出液 TDS 平均值随淋滤液 pH 变化不大, TDS 方差变化不大。煤矸石淋出液 TOC 平均值范围为 43.0~47.6



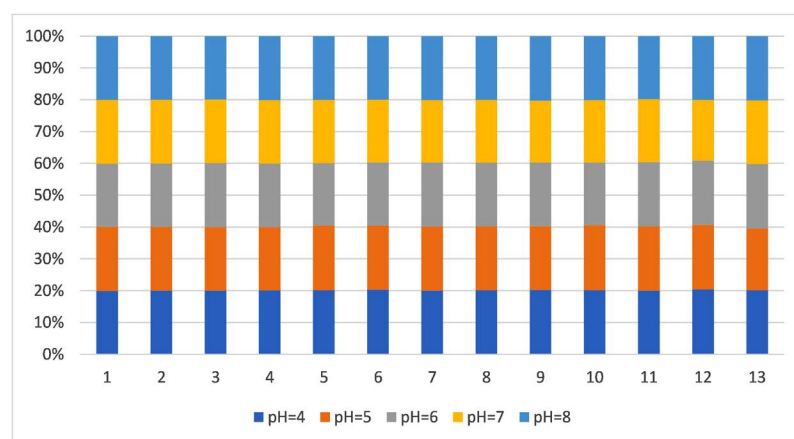
mg/L, 淋出液 TOC 平均值随淋滤液 pH 变化不大, TOC 方差变化不大。

**Table 2.** Table of statistics for the leaching test

**表 2.** 淋滤试验统计值表

	统计值	pH = 4	pH = 5	pH = 6	pH = 7	pH = 8
pH	中位数	9.6	9.5	9.5	9.4	9.6
	众数	9.6		9.6	9.4	
	最大值	9.9	9.8	9.8	9.8	9.8
	最小值	8.8	8.5	8.9	8.6	8.9
	平均值	9.5	9.5	9.5	9.3	9.5
	方差	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
TDS (mg/L)	中位数	84.6	85.9	92.9	103.3	84.2
	众数					
	最大值	237.0	246.0	247.0	187.2	213.0
	最小值	48.4	52.8	48.0	62.4	52.3
	平均值	108.2	108.7	112.3	109.1	106.8
	方差	56.6	54.0	58.0	35.6	48.5
TOC (mg/L)	中位数	31.6	33.7	36.3	41.7	33.6
	众数					
	最大值	95.5	91.8	94.0	92.1	93.5
	最小值	17.9	22.3	20.5	24.0	21.3
	平均值	43.0	44.0	46.6	47.6	44.3
	方差	22.6	19.9	22.6	18.1	20.1

根据每天实测 pH、TDS、TOC 数据绘制图 6~8, pH 随时间的变化如图 6, 采用不同初始 pH 值的溶液进行动态淋溶时, 对淋出液的最初 pH 值并无较大影响。淋出液的 pH 值在整个试验期间总体呈现先上升后下降的趋势。在不同起始 pH 的条件下, 淋出液的 pH 范围为 8.00~10.00, 表现为碱性, 这与煤矸石的主要组成有关, 溶液与煤矸石反应消耗淋溶液中的氢氧根离子, 随着反应的进行, 淋溶液的氢氧根离子浓度降低, 碱性减弱, 所以淋出液的 pH 呈现下降趋势。



**Figure 6.** Filter test pH change percentage bar stacking chart

**图 6.** 淋滤试验 pH 变化百分比柱状堆积图

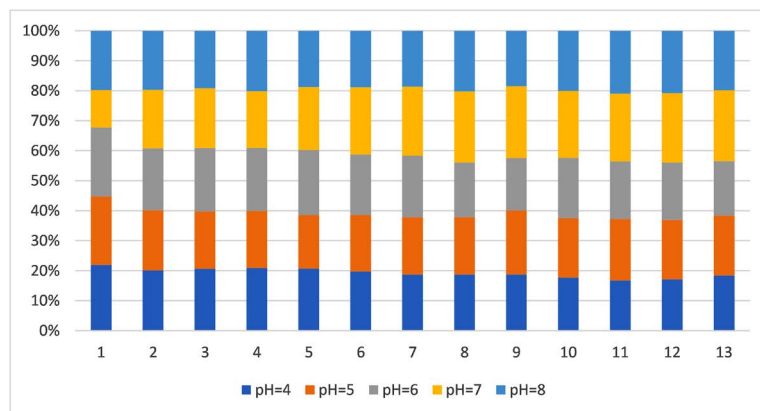


Figure 7. Filter test TDS change percentage bar stacking chart

图 7. 淋滤试验 TDS 变化百分比柱状堆积图

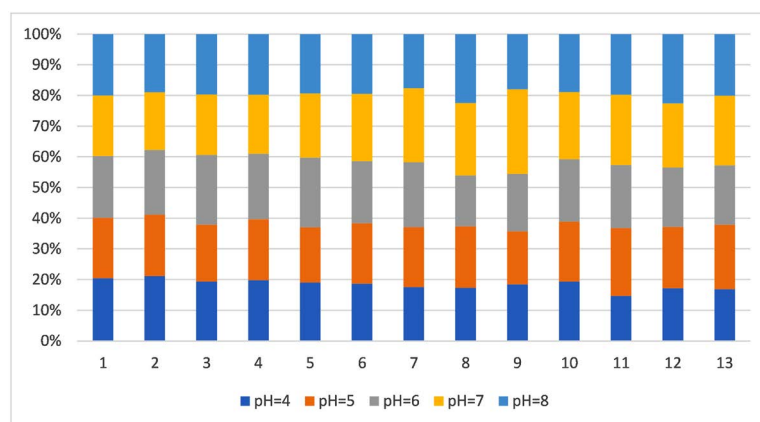


Figure 8. Filter test TOC change percentage bar stacking chart

图 8. 淋滤试验 TOC 变化百分比柱状堆积图

淋滤试验 TDS 值随着淋滤时间的增加总体上呈现递减趋势，但淋滤初期有些样品先增加再减小，如使用 pH = 7 的淋滤液淋滤所得曲线，其后呈震荡式下降。在浸泡试验中随着时间的增长变化 TDS 值变化不明显，在淋滤试验中开始 TDS 值大于浸泡试验 TDS 值，随着时间的增长逐渐变小至小于浸泡试验 TDS 值，主要与淋出物质随淋出液淋出有关。

从图 8 中可以看出，整体上 5 种不同 pH 淋滤液中总有机碳的含量随着淋滤时间增大而减小，总有机碳的含量范围在 10~100 mg/L。在淋滤开始时，淋滤液中溶解性有机碳含量最大。使用不同 pH 淋滤液淋滤对 TOC 值影响不大。在淋滤 11 天后，不同 pH 淋滤液淋滤煤矸石总机碳含量趋于稳定，且值较为接近。对比浸泡试验，淋滤作用使有机质从煤矸石中迁移出来进而降低煤矸石 TOC 值。由相关性分析可知不同 pH 淋滤液与淋出液 TOC 相关性较差，在同样 pH 淋滤液淋滤条件下，淋出液 TOC 与时间与淋滤时间呈负相关关系。

煤矸石淋出液基本特征：不同粒径煤矸石浸出液 pH 在 8.5~9.9 之间，呈弱碱性。其中淋出液 TDS 值随着淋滤时间的增加总体上呈现递减趋势，淋出液 TDS 稳定在 60 ml/L，淋出液 TOC 值随着淋滤时间的增加总体上也呈现递减趋势。由上述分析可知使用不同 pH 淋滤液对煤矸石进行淋滤，对淋出液 pH、TDS、TOC 值影响不大，煤矸石粒径大小对煤矸石中物质的迁移释放影响更大。同时淋滤液 pH 对煤矸石可溶性固体释放率影响不大，计算各粒径煤矸石有机物释放率平均值可知随淋滤液 pH 的增大，煤矸石有机物释放率逐渐变大，当 pH = 8 时释放率反常降低。



### 3.3. 煤矸石污染物释放能力分析

#### 3.3.1. 粒径对煤矸石污染物释放的影响

在相同的固液比、时间条件下,煤矸石浸出液的 pH 随粒径的增大而逐渐增大,浸出液的 TDS 随粒径的减小而增大,随着煤矸石粒径的减小,比表面积增大,使得溶解性固体释放量增大。浸出液的 TOC 随粒径的不同变化不明显。

#### 3.3.2. 时间对煤矸石污染物释放的影响

在相同的固液比、粒径条件下,煤矸石浸出液的 pH 随时间波动变化,总体上呈缓慢下降趋势,浸出液的 TDS 在前六天变化较大,由于浸出液中物质的沉淀析出达到平衡,第七天以后趋于一个稳定值,0.075 mm、0.15 mm、0.5 mm、1 mm、2 mm 粒径 TDS 稳定值分别为 164.55 mg/L、127.53 mg/L、112.77 mg/L、105.97 mg/L、101.47 mg/L。浸出液的 TOC 在浸泡四天后,除 0.5 mm 粒径煤矸石外,其余粒径煤矸石 TOC 趋于稳定,且稳定值较为接近,稳定值为 12.59 mg/L。

#### 3.3.3. 动态淋滤对煤矸石污染物释放的影响

静态浸泡时,0.5 mm 粒径煤矸石浸出液 pH 平均值为 8.26,而动态淋滤时同一粒径的煤矸石淋滤液 pH 平均值为 9.32,这是因为淋滤加快了煤矸石中 Ca、Mg 等碱性物质的溶解速率;静态浸泡条件下 0.5 mm 粒径煤矸石平均可溶性固体释放率 0.11%,而淋滤条件下同一粒径的煤矸石可溶性固体平均释放率为 0.086%,两者差别不大;静态浸泡条件下 0.5 mm 粒径煤矸石有机物平均释放率 0.009%,而淋滤条件下同一粒径的煤矸石有机物平均释放率 0.039%,这是因为淋滤加速了煤矸石中有机物的溶解。

### 3.4. 煤矸石污染物释放的污染评价

单因子指数评价:单因子是水质评价的最简单的表达方式,也是其他各种评价方法的基础。单因子环境质量指数表达式为[34]:

$$I_i = C_i/S_i \quad (1)$$

式中:  $I_i$  为第  $i$  种污染物的环境指数;

$C_i$  为第  $i$  种污染物的环境浓度;

$S_i$  为第  $i$  种污染物的环境评价标准。

多因子评价指数:因为此次参与评价的因子数为 3,分别为 pH、TDS、TOC,故采用多因子评价环境质量指数。计权型多因子环境评价指数计算公式如下[34]:

$$I = \sum_{i=1}^n W_i I_i \quad (2)$$

式中:  $W_i$  对应于第  $i$  个因子的权系数

浸泡试验多因子评价指数计算结果见表 3:

**Table 3.** Multifactor evaluation index of immersion test (standard pH = 6 to 9)

**表 3.** 浸泡试验多因子评价指数(标准 pH = 6~9)

时间/天	0.075 mm	0.15 mm	0.5 mm	1 mm	2 mm
1	4.59~4.62	1.22~1.24	0.80~0.87	0.21~0.32	1.05~1.12
2	5.93~5.97	2.12~2.13	1.77~1.79	0.9~0.96	1.54~1.58
3	0.81~0.82	3.84~3.86	1.41~1.45	0.59~0.68	0.75~0.83
4	1.24~1.25	1.87~1.88	1.03~1.09	1.33~1.38	1.57~1.6
5	1.05~1.06	0.76~0.78	0.94~1	0.9~0.98	0.93~1

## Continued

6	1.87~1.88	2.91~2.92	1.79~1.81	1.57~1.6	1.52~1.56
7	0.84~0.86	3.78~3.8	0.81~0.88	1.53~1.56	1.3~1.34
8	1.61~1.62	2.83~2.84	0.79~0.81	1.3~1.36	1.99~2
9	1.78~1.79	0.93~0.95	0.94~1.01	0.92~0.99	1.32~1.38
10	1.62~1.63	1.44~1.45	1.06~1.1	1.46~1.49	1.85~1.87
11	1.53~1.54	1.18~1.2	0.9~0.96	1.52~1.57	1.29~1.34
12	2.03~2.04	3.49~3.51	1.7~1.72	1.31~1.36	1.28~1.33

根据《地表水环境质量标准 GB 3838-2002》、《地下水质量标准 GB 14848-2017》以 pH = 6~9、TDS 为  $\leq 1000$  mg/L、COD  $\leq 20$  mg/L 为标准, 利用多因子评价方法, 分析所得数据特征, 大粒径煤矸石评价指数较小, 且基本稳定在 1 附近, 对于环境影响程度小、影响范围小、可恢复性较高。而小粒径煤矸石评价指数规律不明显。

淋滤试验多因子评价指数计算结果见表 4:

**Table 4.** Multifactor evaluation index of leaching test (standard pH=6 to 9)

**表 4.** 淋滤试验多因子评价指数(标准 pH = 6~9)

时间/天	pH = 4	pH = 5	pH = 6	pH = 7	pH = 8
1	12.353~12.402	11.806~11.867	12.174~12.217	11.887~11.956	12.093~12.145
2	10.01~10.047	9.432~9.477	9.980~10.013	8.856~8.902	8.968~9.003
3	8.452~8.481	8.077~8.113	9.919~9.952	8.591~8.635	8.597~8.629
4	7.292~7.315	7.32~7.351	7.858~7.881	7.079~7.112	7.302~7.327
5	6.4~6.419	6.007~6.029	7.65~7.673	7.0157.047	6.493~6.514
6	5.415~5.429	5.664~5.683	5.863~5.878	6.332~6.359	5.643~5.66
7	3.921~3.927	4.356~4.367	4.719~4.728	5.385~5.406	3.944~3.951
8	3.38~3.383	3.891~3.899	3.225~3.228	4.599~4.614	4.366~4.375
9	3.622~3.627	3.386~3.391	3.662~3.677	5.401~5.422	3.528~3.533
10	4.105~4.112	4.122~4.132	4.307~4.315	4.636~4.651	4.005~4.013
11	2.565~2.566	3.83~3.838	3.594~3.599	3.975~3.986	3.446~3.451
12	2.631~2.632	3.038~3.0342	2.958~2.96	3.191~3.196	3.446~3.451
13	2.334~2.335	2.892~2.896	2.671~2.672	3.126~3.131	2.777~2.779

分析所得数据特征, 同一 pH 条件下, 煤矸石评价指数随时间变化由大变, 最后基本稳定在 2~3 附近, 对于环境影响程度由大变小、影响范围由远及近。不同 pH 对评价指数影响有限, 不同 pH 在同一时间, 评价指数接近。

#### 4. 结论

1) 通过浸泡试验和淋滤试验, 由释放率计算结果可知, 随着粒径的增大, 煤矸石的可溶性固体释放率逐渐降低, 释放能力减弱。随着时间的增大, 浸泡实验中, 煤矸石有机物释放率变化不明显; 淋滤试验中, 煤矸石有机物释放率逐渐降低, 释放能力减弱。pH 对煤矸石可溶性固体释放率、有机物释放率影响不大。

2) 在动态淋滤下煤矸石中有机物释放的能力远大于静态下释放能力, 但可溶性固体释放能力小于静态下释放能力。

3) 煤矸石的粒径和时间对煤矸石的污染物释放能力贡献较大, 对比两个试验, 粒径大小影响更大。

4) 对比浸泡试验和淋滤试验的污染物的释放率以及其多因子评价指数, 可知煤矸石在动态淋滤下对环境的影响更大。

## 基金项目

本研究受大学生创新创业训练计划项目(S201910710434)资助。

## 参考文献

- [1] 丁伟, 黄智龙, 周家喜, 谷静. 贵州水城地区煤矸石中微量元素综合利用评价[J]. 矿物学报, 2011, 31(3): 502-508.
- [2] Fan, J.S., Sun, Y.Z., Li, X.Y., Zhao, C.L., Tian, D.X., Shao, L.Y. and Wang, J.X. (2013) Pollution of Organic Compounds and Heavy Metals in a Coal Gangue Dump of the Gequan Coal Mine, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, **32**, 241-247. <https://doi.org/10.1007/s11631-013-0628-0>
- [3] 梁宏伟. 煤矸石堆放地周边地下水环境污染特性及评价[J]. 江西煤炭科技, 2019(4): 79-83. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1006-2572.2019.04.021>
- [4] 丛鑫, 张偌溪, 胡峰, 郑力, 李雅, 王思蕾. 矿业城市煤矸石山周边土壤重金属分布特征与影响因素研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26(3): 479-485. <http://dx.chinadoi.cn/10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.03.017>
- [5] Li, D., Wu, D., Xu, F.G., Lai, J.H. and Shao, L. (2020) Assessment of Soil and Maize Contamination by TE Near a Coal Gangue-Fired Thermal Power Plant. *Environmental Monitoring and Assessment*, **192**, Article No. 541. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08510-z>
- [6] Sahoo, P.K., Equeenuddin, S.M. and Powell, M.A. (2016) Trace Elements in Soils around Coal Mines: Current Scenario, Impact and Available Techniques for Management. *Current Pollution Reports*, **2**, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s40726-016-0025-5>
- [7] Li, D.Y., Pang, S.P., Xu, X.Y., et al. (2015) Morphology Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils around Coal Gangue Heap. *Journal of Henan Polytechnic University*, **34**, 722-729.
- [8] Jiang, X., Lu, W.X., Yang, Q.C. and Yang, Z.P. (2014) Potential Ecological Risk Assessment and Prediction of Soil Heavy Metal Pollution around Coal Gangue Dump. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, **14**, 1599-1610. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1599-2014>
- [9] 胡荣涛. 浅谈煤炭开采对矿区及周边生态环境的影响[J]. 山东煤炭科技, 2020(8): 163-165. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1005-2801.2020.08.053>
- [10] 安广楠, 曹晓红, 黄德彬, 李敏. 煤矸石纳入排污许可管理的初步思考[J]. 环境与发展, 2020, 32(8): 198-199. <http://dx.chinadoi.cn/10.16647/j.cnki.cn15-1369/X.2020.08.114>
- [11] 赵亚楠, 李小平, 杨涛, 孙薛梦, 刘东英, 吴婷, 等. 典型能源开发区灰尘金属元素的空间分布特征、来源与健康风险[J]. 环境科学学报, 2018, 38(1): 350-362. <http://dx.chinadoi.cn/10.13671/j.hjkxxb.2017.0303>
- [12] 刘硕, 吴泉源, 曹学江, 王集宁, 张龙龙, 蔡东全, 周历媛, 刘娜. 龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 270-279. <http://dx.chinadoi.cn/10.13227/j.hjkx.2016.01.035>
- [13] 韦霞, 潘月鹏, 竺夏英, 谢雨竹, 王丙春, 罗庆仙. 云南思茅地区近20年(1993-2012)酸雨及酸沉降量变化规律[J]. 环境化学, 2014(8): 1361-1365.
- [14] 滕吉艳, 史贵涛, 薛文杰, 宋国贤, 汤臣栋. 崇明东滩大气湿沉降酸性特征[J]. 环境化学, 2010, 29(4): 649-653.
- [15] Li, Z.Y., Ma, Z.W., van der Kuijp, T.J., Yuan, Z.W. and Huang, L. (2014) A Review of Soil Heavy Metal Pollution from Mines in China: Pollution and Health Risk Assessment. *Science of the Total Environment*, **468-469**, 843-853. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.090>
- [16] Liu, Y., Lei, S.G. and Chen, X.Y. (2016) Assessment of Heavy Metal Pollution and Human Health Risk in Urban Soils of a Coal Mining City in East China. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, **22**, 1359-1374. <https://doi.org/10.1080/10807039.2016.1174924>
- [17] 吴松, 李修好, 胡新, 衡强强, 汪银梅. 基于不同煤矸石的成分分析及堆存区地下水污染特征研究[J]. 环境科技, 2019, 32(3): 28-33. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1674-4829.2019.03.006>
- [18] Qureshi, A.A., Kazi, T.G., Baig, J.A., Balal Arain, M. and Afridi, H.I. (2020) Exposure of Heavy Metals in Coal Gan-

- gue Soil, in and outside the Mining Area Using BCR Conventional and Vortex Assisted and Single Step Extraction Methods. Impact on Orchard Grass. *Chemosphere*, **255**, Article ID: 126960.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126960>
- [19] 葛银堂. 山西煤矸石中的微量元素及其对环境的影响[J]. 中国煤田地质, 1996, 8(4): 58-62.
- [20] 周辰昕, 李小倩, 周建伟. 广西合山煤矸石重金属的淋溶试验及环境效应[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 135-141.
- [21] 武旭仁, 郝启勇, 范士彦. 煤矸石中潜在有害微量元素析出过程探讨[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(4): 43-46.  
<http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1001-1986.2009.04.011>
- [22] 赵峰华, 任德贻. 燃煤产物中有害元素淋滤试验的研究现状[J]. 煤田地质与勘探, 1998(4): 14-17.
- [23] 王晖, 郝启勇, 尹儿琴. 煤矸石的淋溶、浸泡对水环境的污染研究——以充济滕矿区塌陷区充填的煤矸石为例[J]. 中国煤田地质, 2006, 18(2): 43-45. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1674-1803.2006.02.013>
- [24] 徐龙君, 刘成伦, 潘宏清. 煤矸石酸雨淋滤特征的研究[J]. 四川环境, 2000, 19(3): 34-37.  
<http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1001-3644.2000.03.010>
- [25] 肖利萍, 梁冰, 金显廷. 煤矸石淋溶液在地下水系统中的多组分运移规律——试验研究[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(3): 90-95. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1004-4574.2008.03.016>
- [26] 张燕青, 黄满红, 戚芳方, 杜勇立. 煤矸石中金属和酸根离子的淋溶特性[J]. 环境化学, 2014, 33(3): 452-458.
- [27] 贾兰, 梁冰, 王兴, 周铎. 煤矸石中金属和酸根离子的静态淋溶特性研究[C]//中国环境科学学会. 第六届重金属污染防治及风险评价研讨会暨重金属污染防治专业委员会 2016 年学术年会论文集: 2016 年卷. 北京: 中国环境科学出版社, 2016: 6.
- [28] Peng, B.X., Li, X.R., Zhao, W.H. and Yang, L. (2018) Study on the Release Characteristics of Chlorine in Coal Gangue under Leaching Conditions of Different pH Values. *Fuel*, **217**, 427-433.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.123>
- [29] 张治国, 胡友彪, 郑永红, 陈孝杨. 煤矸石堆存对土壤盐分空间分布特征的影响及主要因子的研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(4): 1118-1126.
- [30] Liu, B.W., Tang, Z.H., Dong, S.G., Wang, L.X. and Liu, D.W. (2018) Vegetation Recovery and Groundwater Pollution Control of Coal Gangue Field in a Semi-Arid Area for a Field Application. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **128**, 134-140. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.01.032>
- [31] Xue, Q., Lu, H.J., Zhao, Y. and Liu, L. (2014) The Metal Ions Release and Microstructure of Coal Gangue Corroded by Acid-Based Chemical Solution. *Environmental Earth Sciences*, **71**, 3235-3244.  
<https://doi.org/10.1007/s12665-013-2743-y>
- [32] 傅永贞, 卫晓燕. 金融支持煤炭资源型城市经济转型升级探析——以陕西韩城市为例[J]. 西部金融, 2013(11): 60-63. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1674-0017.2013.11.017>
- [33] 邓为难, 伍昌维. 煤矸石模拟浸泡和淋溶试验污染物释放特点的研究[J]. 煤炭技术, 2013, 32(5): 142-144.  
<http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1008-8725.2013.05.069>
- [34] 刘培桐. 环境学概论(第二版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1995: 162-164.