



## 生态脆弱煤矿区水体中微生物群落特征及矿井充水指示

范立民 李涛 高颖 白如鸿 孙强

### 引用本文：

范立民, 李涛, 高颖, 等. 生态脆弱煤矿区水体中微生物群落特征及矿井充水指示[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 255–266.  
FAN Limin, LI Tao, GAO Ying. Characteristics of microbial communities in water bodies of ecologically fragile coal mining areas and indications for mine water filling[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 255–266.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2023-1798>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 我国西部生态脆弱矿区煤 – 水共采问题分析

Analysis of coal and water co-mining in ecologically fragile mining areas in Western China  
煤炭科学技术. 2021, 49(12): 225–232 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ce5f7c91-ac67-49ea-befb-3321580191fe>

##### 煤矿区复垦土壤的生物改良研究进展

Research progress of biological improvement of reclaimed soil in coal mining area  
煤炭科学技术. 2020, 48(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d826881c-0a94-4ffa-813f-243f87a03a9e>

##### 生态脆弱矿区地表裂缝动态变化对土壤含水量的影响

Influence of dynamic variation of ground cracks on soil water content in ecological-fragile coal mining areas  
煤炭科学技术. 2020, 48(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a5b898e5-f10f-4669-9690-af07549dd972>

##### 基于GT-ANP理论的生态脆弱区煤–水协调绿色开采度评价

Evaluation of coal water coordinated green mining degree in ecologically fragile area based on GT-ANP theory  
煤炭科学技术. 2021, 49(8): 203–210 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4414e8d9-978c-428c-bcb0-d36e3b8a3d99>

##### 基于保障生态地下水位的露天煤矿主动保水技术研究

Research on active water conservation technology in open-pit coal mine based on ecological protection groundwater level  
煤炭科学技术. 2021, 49(4): 49–57 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.04.006>

##### 保水采煤技术规范的技术要点分析

Analysis on technical points of water-preserving coal mining technical specifications  
煤炭科学技术. 2020, 48(9): 81–87 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7c8064bf-3c45-40fb-8099-9271ccecf50e>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

范立民, 李 涛, 高 纶, 等. 生态脆弱矿区水体中微生物群落特征及矿井充水指示[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 255-266.

FAN Limin, LI Tao, GAO Ying, et al. Characteristics of microbial communities in water bodies of ecologically fragile coal mining areas and indications for mine water filling[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 255-266.

## 生态脆弱矿区水体中微生物群落特征及矿井充水指示

范立民<sup>1</sup>, 李 涛<sup>2</sup>, 高 纶<sup>2</sup>, 白如鸿<sup>3</sup>, 孙 强<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 六盘水师范学院 矿业与机械工程学院, 贵州 六盘水 553004;

3. 陕西榆林能源集团有限公司, 陕西 榆林 719000)

**摘要:** 我国生态脆弱矿区水资源整体匮乏, 但局部地区矿井涌水却异常巨大。对生态脆弱矿区异常矿井充水水源识别, 对矿区生态环境保护意义重大。研究以涌水量超过  $1000 \text{ m}^3/\text{h}$  的榆树湾煤矿为背景, 在分析矿井涌水量特征的基础上, 采集了研究区主要含水层和矿井涌水点的 30 个水样, 开展了水样高通量微生物测序研究。对测序结果采用 Alpha 多样性分析、Beta 多样性分析及微生物构成差异分析, 系统研究了矿井水体中微生物群落特征, 分析了矿井充水来源。研究结果表明: 高通量测试结果通过了 Coverage 指数检验, 验证了其用于矿井充水识别的可行性。但人类活动密切接触的水样显示出微生物更加丰富, 需要在取样中有效规避。榆树湾煤矿浅表松散含水层中微生物丰富度和多样性都较高, 以新鞘脂菌属(*Novosphingobium*)、梭杆菌属(*Fusobacterium*)和硫属(*Sulfuricum*)等微生物丰度最高; 直罗组为代表的基岩含水层微生物丰富度较低, 但微生物多样性较高, 以丛毛单胞菌属(*Comamonas*)、蛲虫属(*Vermiphilaceae*)和巴氏杆菌(*Paeniglutamicibacter*)等微生物丰度最高。所有水样中最为优势的门类为变形菌门, 占比达到 35.5%~89.7%。Alpha 多样性、PCoA 和 NSDM 分析揭示了榆树湾矿井充水水源主要来自松散含水层和直罗组含水层。但 Beta 多样性分析发现, 随着直罗组静储量的释放, 松散层中离石组黄土充水比例进一步增大。综合分析显示, 榆树湾煤矿目前为基岩含水层快速释水+离石组含水层持续释水模式的充水模式, 矿井涌水统计分析结果验证了这一结论。研究为相似化学成分含水层充水识别, 提供了新的方法。

**关键词:** 保水采煤; 高通量测序; 矿井充水; 微生物群落; 涌水规律

**中图分类号:** TD32    **文献标志码:** A    **文章编号:** 0253-2336(2024)01-0255-12

## Characteristics of microbial communities in water bodies of ecologically fragile coal mining areas and indications for mine water filling

FAN Limin<sup>1</sup>, LI Tao<sup>2</sup>, GAO Ying<sup>2</sup>, BAI Ruhong<sup>3</sup>, SUN Qiang<sup>1</sup>

(1. School of Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mining and Mechanical Engineering, Liupanshui Normal University, Liupanshui 553004, China; 3. Shaanxi Yulin Energy Group Co., Ltd., Yulin 719000, China)

**Abstract:** The overall water resources in ecologically fragile mining areas in our country are scarce, but in some areas, mine water inflow is exceptionally large. The identification of abnormal mine water sources in ecologically fragile mining areas is of great significance for the protection of the ecological environment in the mining areas. This study takes the Yushuwan coal mine with a water inflow exceeding  $1000 \text{ m}^3/\text{h}$  as the research background. Based on the analysis of the characteristics of mine water inflow, 30 water samples were collected from the main aquifers and mine water inflow points in the study area, and high-throughput microbial sequencing of water samples was

收稿日期: 2023-11-28    责任编辑: 周子博    DOI: 10.12438/cst.2023-1798

基金项目: 国家自然科学基金联合重点资助项目(U23B2091); 陕西秦创源“科学家+工程师”创新团队建设项目(2024QCY-KXJ-055); 贵州省科技计划资助项目(黔科合基础-ZK[2022]一般 529)

作者简介: 范立民(1965—), 男, 山西曲沃人, 教授。E-mail: 498518851@qq.com

通讯作者: 李 涛(1984—), 男, 江苏沛县人, 教授。Email: qazwdx521@163.com

conducted. The sequencing results were analyzed using Alpha diversity analysis, Beta diversity analysis, and differential analysis of microbial composition to systematically study the characteristics of microbial communities in mine water bodies and analyze the sources of mine water filling. The research results indicate that the high-throughput test results have passed the Coverage index test, verifying its feasibility for identifying mine water filling. However, water samples that have close contact with human activities show a greater abundance of microorganisms, which need to be effectively avoided in sampling. The abundance and diversity of microorganisms in the shallow loose aquifer of Yushuwan Coal Mine are relatively high, with the highest abundance being found in genera such as *Novosphingobium*, *Fusobacterium*, and *Sulfuricum*. The microbial richness of the bedrock aquifer represented by the Zhiluo Formation is relatively low, but the microbial diversity is high, with the highest microbial abundance being found in genera such as *Comamonas*, *Vermiphilaceae*, and *Paeniglutamicacter*. The most dominant phylum among all water samples is *Proteobacteria*, accounting for 35.5% to 89.7%. Alpha diversity, PCoA, and NSDM analysis revealed that the water inflow in the Yushu Bay mine is mainly composed of loose layers and Zhiluo Formation. However, Beta diversity analysis found that with the release of static reserves in the Zhiluo Formation, the water source for filling the loose layer of Lishi loess further increases. Comprehensive analysis shows that the Yushuwan coal mine currently adopts a water filling mode of rapid release of bedrock aquifer and continuous release of Lishi Formation aquifer. The statistical analysis results of mine water inflow confirm this conclusion. The statistical analysis results of mine water inflow confirm this conclusion. This study provides a new method for identifying water filling in aquifers with similar chemical compositions.

**Key words:** water conservation coal mining; high throughput sequencing; mine water filling; microbial community; water inrush pattern

## 0 引言

煤炭资源开采必然发生矿井充水,有效识别矿井充水水源是矿井水害防治及水资源保护的重要一环<sup>[1-4]</sup>。特别在我国生态脆弱的西北地区,煤炭资源丰富,水资源却普遍缺少,但局部地区矿井涌水量大,对这些区域充水水源的精准识别,对于区域水资源保护和利用意义重大<sup>[5-7]</sup>。现有煤炭开采矿井充水水源识别的方法主要包括2种类型。第一类为通过矿井充水的表观特征进行识别,包括水文常规孔水位、矿井水的水温、水压及涌水量等方面。曾一凡等<sup>[8]</sup>研究了我国矿井不同充水水源的主要特征,并提出了相关的防治措施。顾爱民<sup>[9]</sup>基于水动力学和水化学联合开展了突水水源识别的研究,有效提升了突水水源识别准确率。第二类为通过矿井充水水质的特征进行识别,又包括2个方面的研究,一方面关注矿井水中的各种化学组成<sup>[10-13]</sup>,即常规水化学、微量元素水化学、同位素水化学、有机元素水化学等;另一方面关注水源识别算法的研究,即各类统计学方法<sup>[14-17]</sup>。大量的研究发现,以上方法对于水质比较相近的含水层识别成功率相对较低,算法的研究虽然可以提升,但仍需要更多的矿井水相关数据对水源识别进行有效支持。

近年来,微生物高通量测序技术取得了突破,一个水样或者土样就可以获取其中大量的微生物信息,弥补了化学成分相似的含水层矿井充水水源识别度的不足。矿业相关的研究者开始将该技术应用到矿井水污染机制方面的研究。李涛等<sup>[18]</sup>提出了一种基于微生物场特征突水水源判别方法,得到了突水水

源微生物判别模式。张莉等<sup>[19]</sup>采用高通量测序技术研究了鄂尔多斯某煤矿不同功能区微生物群落特征,分析了采矿对微生物群落的影响,揭示了采矿对微生物群落的影响规律。朱璐璐<sup>[20]</sup>研究了门克庆矿微生物群落对矿井水水质的影响,获取了影响矿井水水质形成与演化的微生物群落特征及环境影响因素。孙亚军等<sup>[21]</sup>研究了微生物场、水化学场、水动力场对矿井水水质的综合作用,阐释了矿井水水质形成的多场耦合作用机制。李文博等<sup>[22]</sup>研究了700 m矿井中各类巷道微生物分布特征,发现了煤矿各类巷道拥有丰富的微生物多样性。康小兵等<sup>[23]</sup>研究了微生物数量识别闭坑矿井充水水源方法,提出了4种闭坑矿井充水模式。陈家玉等<sup>[24]</sup>研究了淮北煤田微生物群落特征,为矿井充水水源分析提供了新方法,发现了不同充水水源拥有不同的微生物群落特征。

高通量测序技术带来了大量微生物场数据,但已有的研究认为pH、离子种类、数量、含氧量及生物活动等均会影响水中微生物群落结构<sup>[18-24]</sup>,单一方法识别矿井水源存在局限性。为此,以榆树湾煤矿涌水量异常巨大为研究背景,开展了含水层和矿井水微生物场特征统计分析,结合矿井充水水文地质条件,综合研究了榆树湾矿井充水模式。

## 1 研究区概况

### 1.1 研究区范围

研究区选择处于大规模开采阶段的陕北侏罗纪煤田榆神矿区一期规划区水文地质类型复杂的榆树湾煤矿。研究区属于生态脆弱区,地处毛乌素沙漠与

陕北黄土高原接壤地带, 以风沙滩地地貌为主, 浅表水资源相对丰富, 煤炭开采水资源保护意义重大。

## 1.2 研究区采矿地质条件

1) 研究区水文地质条件概况。榆神一区综合地层如图1所示, 其中煤层主要赋存延安组, 上覆直接充水含水层为直罗组(榆树湾煤矿非古河道区<sup>[25]</sup>, 弱富水), 直罗组上为100 m以上巨厚的保德组和离石组土层(无天窗, 整体相对隔水层, 但离石组弱富水),

地层系统		层号	岩性描述	厚度/m
统	组			
全新统	风积沙	$Q_4^{col}$	风成沙地 $Q_4^{col}$ 为主	0~30
上更新统	萨拉乌苏组	$Q_3s$	岩性为浅灰黄色、土黄色粉砂质亚砂土、亚黏土	0~107
中更新统	离石组	$Q_2l$	岩性为浅褐-土黄色砂质黏土	0~220
上新统	保德组	$N_2b$	棕红色黏土及亚黏土	0~182
侏罗系 中统	直罗组	$J_2z$	岩性以灰、灰绿色中粗粒砂岩为主	0~250
	延安组	$J_2y$	岩性为灰白色粗粒长石砂岩、细砂岩, 深灰色、灰色粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩, 夹有炭质泥岩、煤层	103.71 ~394.38

图1 研究区综合柱状图

Fig.1 Comprehensive column chart of strata in study area

风积沙和萨拉乌苏组构成了潜水含水层(中等富水)。此外, 区内民井统一揭露离石组、萨拉乌苏组和风积沙含水层, 称之为松散含水层。

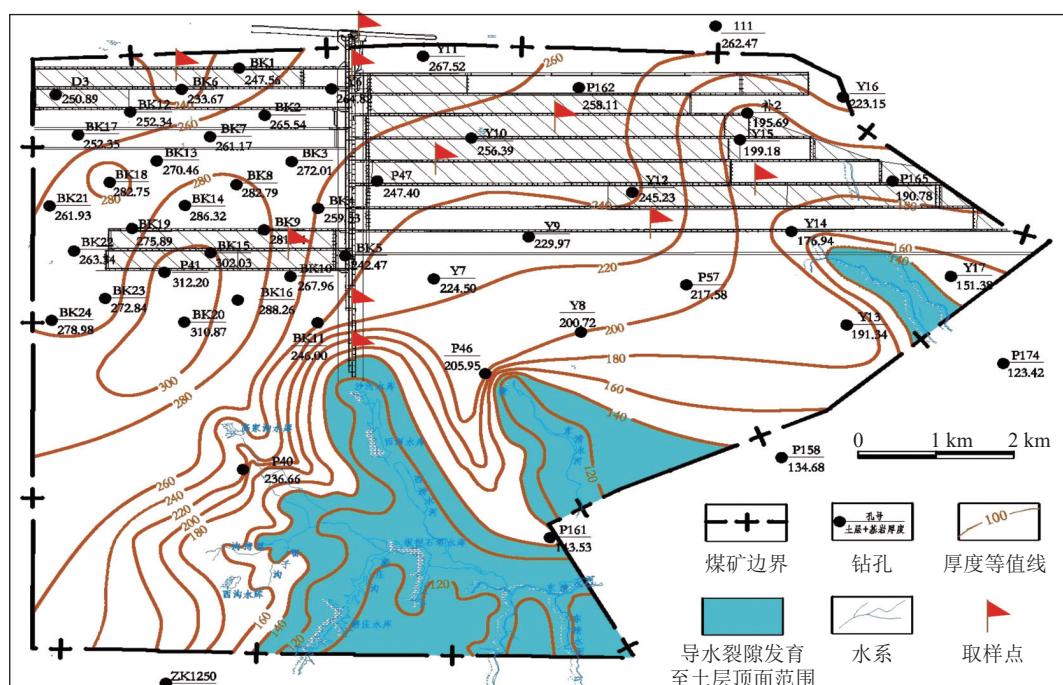
2) 研究区采矿概况。榆树湾煤矿首采2<sup>2</sup>号煤, 采用分层开采方法, 目前开采上分层采厚为5 m。煤矿生产规模1000万t/a, 已经开采了15 a。榆树湾煤矿矿涌水量近3 a保持在1000 m<sup>3</sup>/h左右, 其中老采空区(一盘区已经开采的10余个工作面)的涌水量约占总涌水量70%。本矿导水裂隙带发育高度实测发现: 已开采区域导水裂隙带仅发育到离石组黄土的底部(图2, 按照28倍裂采比计算), 未波及萨拉乌苏组(距离萨拉乌苏组50 m以上)。如图3所示, 布置在萨拉乌苏组的常规孔显示: 3 a潜水位随着降雨有所波动, 同期未发现明显的水位下降(最大幅度下降约1 m)。

由于榆树湾煤矿未发现其他特殊导水通道(断层、天窗等), 现有技术发现直接充水含水层为弱富水直罗组基岩含水层<sup>[26]</sup>, 但矿井涌水量异常巨大。因此本次研究采用高通量测序技术对榆树湾矿井充水水源进行进一步识别。

## 2 研究方法

### 2.1 水样采集

对研究区范围设置了10个取样点, 每个取样点采集水样3个, 共计采取30个样品, 各水样的取样来源见表1。水样原位获取存储在无菌瓶,



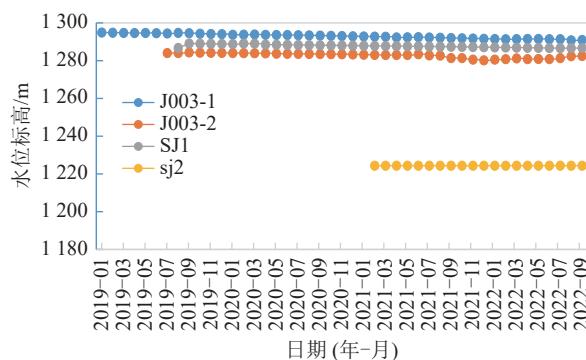


图3 榆树湾煤矿萨拉乌苏组水位动态观测曲线

Fig.3 Dynamic observation curve of water level in Sarawusu Formation of Yushuwan Coal Mine

表1 研究区水样点

Table 1 Water sampling points in research area

序号	水源点	备注
S1	20101采空区	老采空区涌出混合水
S2	2号风井地面民井	松散层
S3	20113回采面	新采煤面涌出混合水
S4	20119地面民井	松散层
S5	20118井下钻孔	直罗组
S6	20104地面民井	松散层+直罗组
S7	斜井土层涌水点	离石组
S8	二号副斜井涌水点	离石组
S9	综采6井	老采空区涌出混合水
S10	地面水源井	松散层+直罗组

在榆林水文实验室进行初步过滤处理,初步处理后的样品送西安生物实验室开展水样微生物高通量测序。

## 2.2 高通量微生物测序原理及方法

### 2.2.1 高通量测序技术

高通量测序技术区别于传统 Sanger(双脱氧法)测序,是能够一次并行对大量核酸分子进行平行序列测定的技术,通常一次测序反应能产出不低于100 MB的测序数据。

### 2.2.2 高通量测序方法

高通量测试流程如图4所示,主要包括样品采集(本次采集30个样品)、微生物DNA提取(采用Nanodrop对DNA进行定量)、目的片段扩增、扩增产物纯化回收、测序文库的制备(采用TruSeq Nano DNA LT Library Prep Kit制备测序文库)、上机高通量测序(图5)、拼接质控、序列聚类及数据分析。其中数据分析又包括常规分析、高级分析和个性化分析(图4),研究主要采用常规分析。

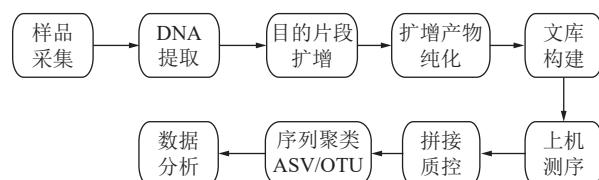


图4 高通量扩增子测序流程

Fig.4 High throughput amplicon sequencing process

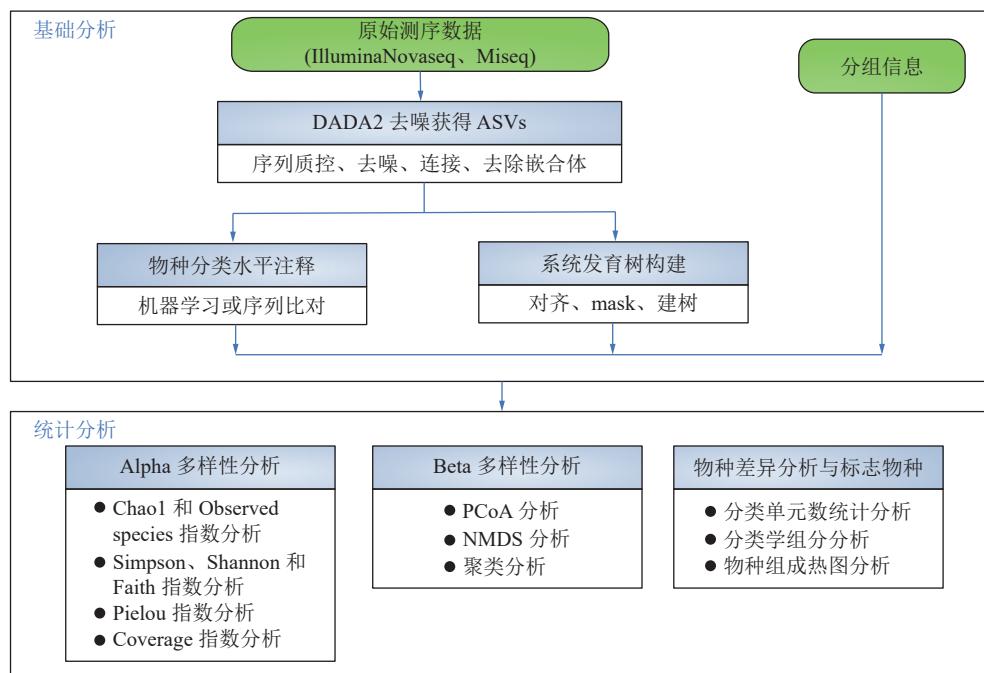


图5 高通量测试数据分析

Fig.5 High flux test data analysis

### 3 结果及分析

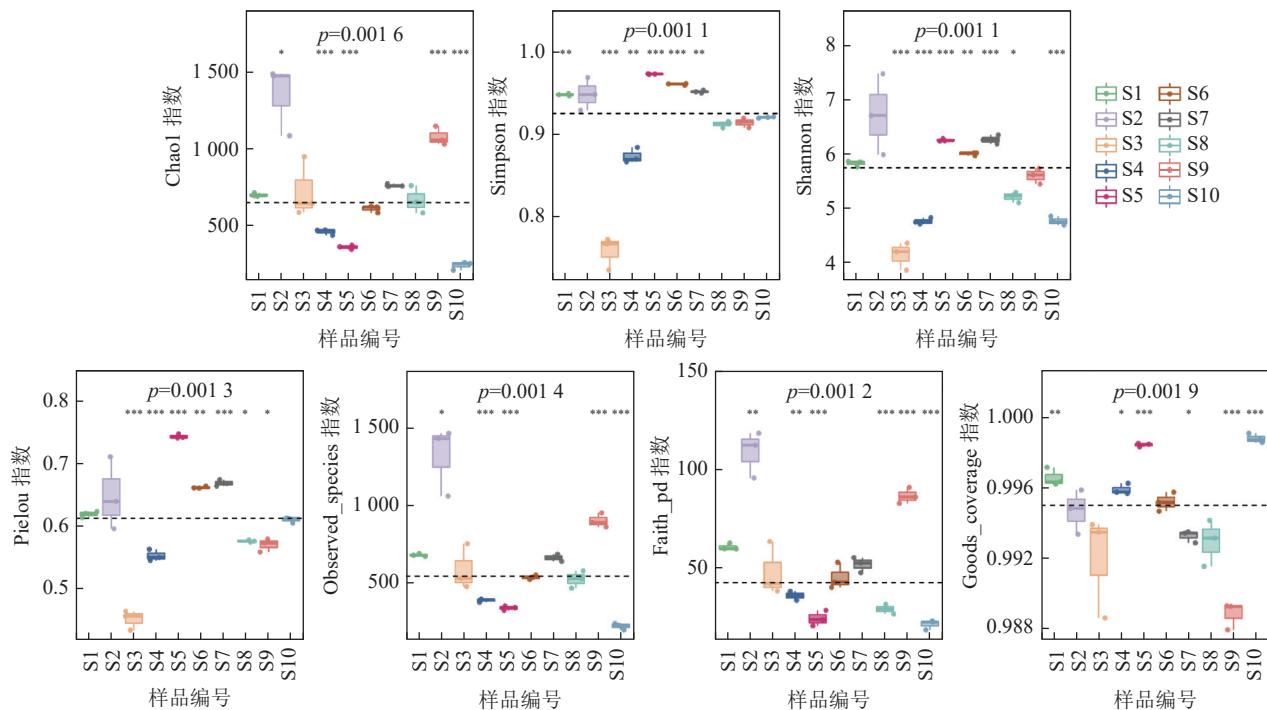
#### 3.1 微生物多样性分析

微生物多样性分析以 Alpha 多样性分析和 Beta 多样性分析为主,两者分别表征物种在生境内和生

境间的多样性。

##### 3.1.1 Alpha 多样性分析

本次测定的结果如图 6 所示,包括了 7 种多样性指数,其中不同指数表征信息主要包括丰富度、多样性、均匀度和覆盖度,合并叙述如下:



注: 箱线图中: 箱的上下端线, 上下四分位数 (Interquartile range, IQR); 中位数, 中位数; 上下边缘, 最大最小内围值 (1.5 倍的 IQR); 在上下边缘外部的点, 表示异常值。多样性指数标签下的数字为 Kruskal-Wallis 检验的  $P$  值。

图 6 Alpha 多样性分析结果  
Fig.6 Alpha diversity analysis results

1) 细菌 Chao1 和 Observed species 指数分析(丰富度)。①S2 样品(松散层)微生物丰富度最高, S10 和 S5(直罗组)水样微生物丰富度最低。说明松散层微生物较直罗组中微生物更丰富。②矿井水微生物丰富度(S1、S3、S8、S9)位于中线附近,与矿井充水最为接近的水样为 S6(松散层+直罗组),表明矿井充水中微生物多样性与松散层混合直罗组含水层微生物多样性相似。③对比 S2(松散层)和 S7(离石组),可以看出 S7 更为接近榆树湾矿井充水,因此可见矿井水中松散层中的水样主要来源为松散层中的离石组黄土。

2) 细菌 Simpson、Shannon 和 Faith 指数分析(多样性)。①Simpson 指数总体规律明显与 Chao1 指数有差异,说明微生物丰富性和多样性存在差异。②所有水样的 Simpson 指数集中在 0.73~0.97,说明矿区水中微生物多样性较高。③S1 样品来自榆树湾煤矿最大的矿井涌水点,该水样微生物多样性与 S2 水样最为接近,其次接近 S7、S5,说明现有榆树湾矿

井涌水主要受到松散层和直罗组的影响。

3) 细菌 Pielou 指数分析(均匀度)。Pielou 指数仅反映均匀度,数值越大,越均匀。图 6 可以看出 S5(钻孔取出的天然地下水)的 Pielou 指数最大,即其最为均匀。S3(正在开采人为扰动的工作面涌出水)的 Pielou 指数最小,即其最不均匀。由此可见,人类活动对矿井水的微生物群落影响很大,这与前人研究结果相似<sup>[21]</sup>。

4) 细菌 Coverage 指数分析(覆盖度)。所有水样的细菌 Coverage 指数普遍大于 0.988,说明覆盖度很大,说明本次测序结果代表了微生物的真实情况。

5) Alpha 多样性综合分析。①测试的结果通过了 Coverage 指数检验,总体可信。②丰富度分析表表明:松散含水层水样中微生物种类最多,直罗组水样中微生物种类最少,榆树湾矿井涌水介于两者之间,即榆树湾煤矿充水水源除直罗组外还有松散层中的离石组黄土含水层参与。③测试的多样性分析表明: S3 水样(榆树湾煤矿 20113 工作面涌水)多样性指数

最大,受人类活动影响最为显著,因此表现出复杂的微生物多样性。S5水样(直罗组含水层)的Shannon指数最小,微生物类型最少。榆树湾煤矿S1(最大矿井涌水点)的微生物多样性与S2、S7和S5接近,也说明榆树湾矿井涌水主要由松散层和直罗组组成。

### 3.1.2 Beta多样性分析

通过主坐标分析(Principal Coordinate Analysis, PCoA),非度量多维尺度分析(Nonmetric Multidimensional Scaling, NMDS)等非约束排序手段对多维微生物数据进行降维,并通过样本在连续排序轴的分布,展示数据变化的主要趋势;同时也可通过聚类分析的手段识别环境中不连续对象的子集,对数据进行分类。采用以上3个分析方法分别分析如下:

1)PCoA分析。对10个点30个样品进行了PCoA分析,结果如图7所示,可以得到以下结果:①同一取样点测试的3个样品距离很近,说明重复性很强。②同一含水层的不同地点取样测试结果显示,黄土层、松散层有较好的重复性,但直罗组和矿井水重复性较差,即水中微生物群落影响因素较多。③矿井涌出水与直罗组和离石组有交叉区域,说明矿井水中有一定的直罗组和离石组水,研究区矿井水充水表现出多水源特征。④矿井涌出水中S1与松散层最为接近,说明直罗组静储量释放后,矿井涌出水中松散层(萨拉乌苏组+离石组黄土)有所增加。

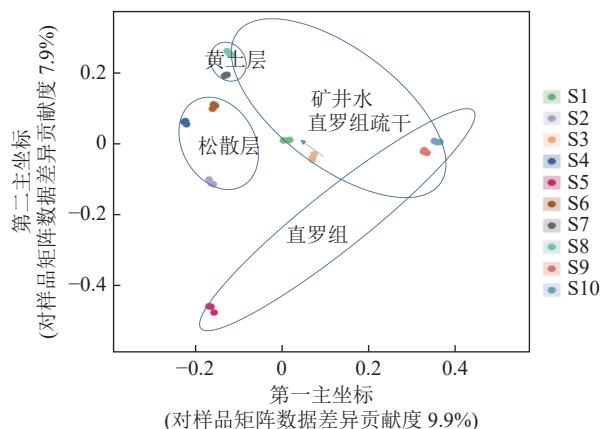


图7 PCoA分析的样本二维排序

Fig.7 Sample two-dimensional sorting chart for PCoA analysis

2)NMDS分析。NMDS结果的Stress值越小越好(小于0.2),NMDS分析的结果较可靠。本次分析结果如图8所示,其Stress值为0.0589,可见分析结果可靠。对NMDS结果分析,可以得到以下结果:①榆树湾煤矿松散层S2水样同一地点的取样测试有一定距离,说明重复性不强。这可能与S2人类活动密集有一定的相关性(风井建设中大量工程作业)。

②矿井水与直罗组和离石组有明显的交集,说明矿井水构成中有直罗组和离石组水源,研究区矿井水充水表现出多水源特征。③矿井水中S1与松散层最为接近,说明直罗组静储量释放后,矿井涌出水中松散层(包括黄土层)有所增加。

3)聚类分析。对10个点30个样品进行了聚类分析,结果如图9所示,可以得到以下结果:①整体上聚类分析对各类水源有较好的区分,但松散层中的S2较为离群,这与前面的Alpha多样性分析结果一致。结合取样点分析,该点受人类活动扰动有所变化。②聚类分析对矿井水和天然含水层有较好的区分,而矿井水没有跟某一类水源有较好的聚类关系,说明矿井水的水源是多种天然地下水的集合。③矿井水短期内与天然含水层更为接近,而在采空区内相对封闭环境和基岩含水层的疏干,微生物菌落发生了进一步的变化。

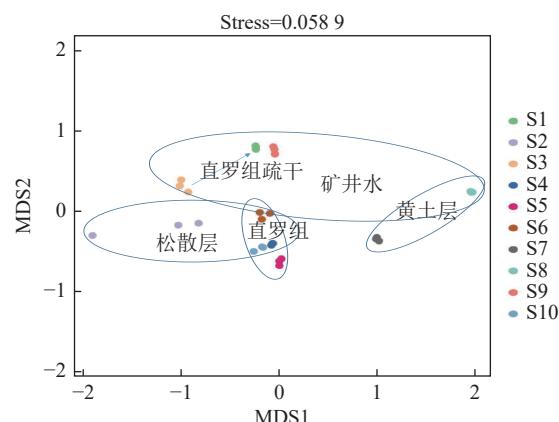


图8 NMDS二维排序

Fig.8 NMDS 2D sorting diagram

### 3.2 微生物构成差异分析

微生物构成差异分析包括多种类型,本次开展分类单元数统计分析、分类学组分分析和物种热成像图分析。

#### 3.2.1 分类单元数统计分析

计算不同样本在各分类水平所含有的分类单元的数目,并绘制成柱状图,结果如图10所示,可以看出:

1)分类单元数目最少的是S5和S10,说明受人类活动扰动影响较小。分类单元数目最多的是S2,该水样前面已经提及受人类活动扰动影响显著。

2)榆树湾最大涌水点S1平均由30个门、78个纲、136个目、158个科、180个属、41个种的微生物群落构成。这与直罗组天然含水层微生物分类单元数目相差较大。由此可见,榆树湾煤矿矿井充水由

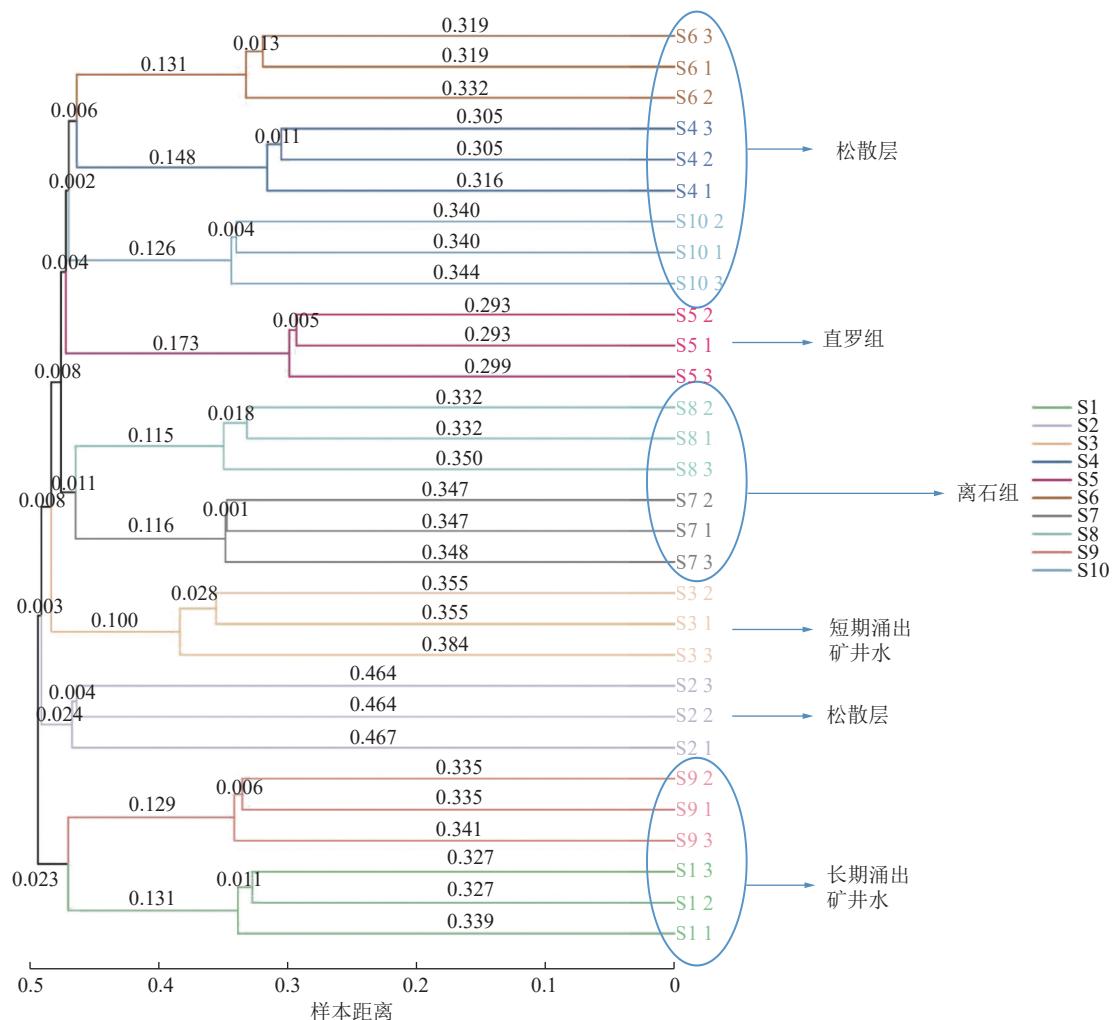


图 9 基于样本距离矩阵的聚类树  
Fig.9 Cluster tree based on sample distance matrix

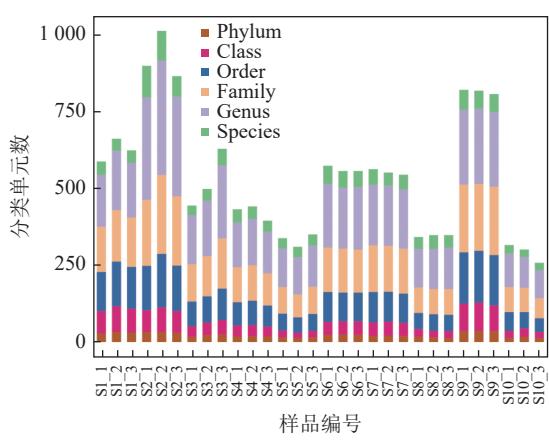


图 10 各水平微生物分类单元数统计

Fig.10 Statistical of number of microbial classification units at different levels

多种水源共同构成。

### 3.2.2 分类学组分分析

使用去除 singleton 后的特征表, 实现各样本在门分类水平上的组成分布的可视化, 分析结果如图 11

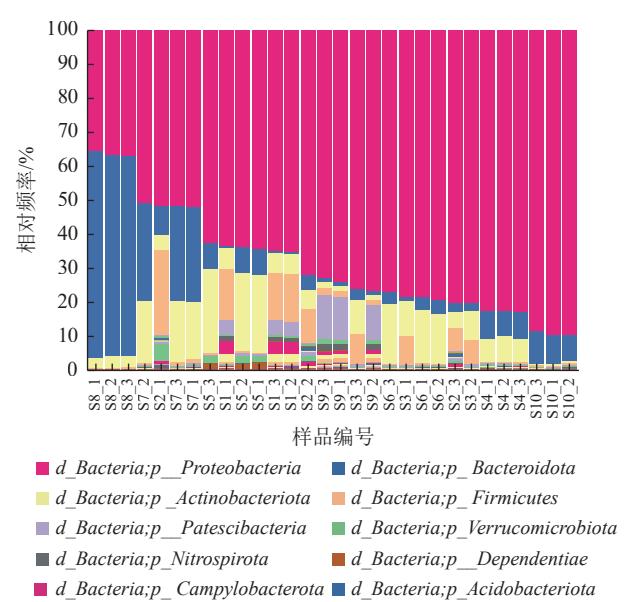


图 11 门分类水平物种组成柱状图  
Fig.11 Bar chart of species composition at the phylum classification level

所示,可知以下3点结论:

1)所有水样中最为优势的门类为变形菌门,占比达到35.5%~89.7%,这类微生物最少出现在离石组中。榆树湾矿井最大涌水点S1中的变形菌门介于离石组和直罗组之间。

2)放线菌门在直罗组中占比最高,达到29.0%~29.1%。这与正在开采的工作面涌出水中的含量占比最为接近,其占14.7%~15.9%。

3)基岩含水层静储量疏干后的S1水样,除最为优势的变形菌门以外,还有厚壁菌门占比最高,达到14.1%~15.2%。这与松散含水层S2该类菌门的含量最为接近。

### 3.2.3 物种组成热图分析

一般常使用属水平的分类单元组成作为分析对象,因此默认使用平均丰度前50位的属的丰度数据绘制热图,结果如图12所示,可以看出:

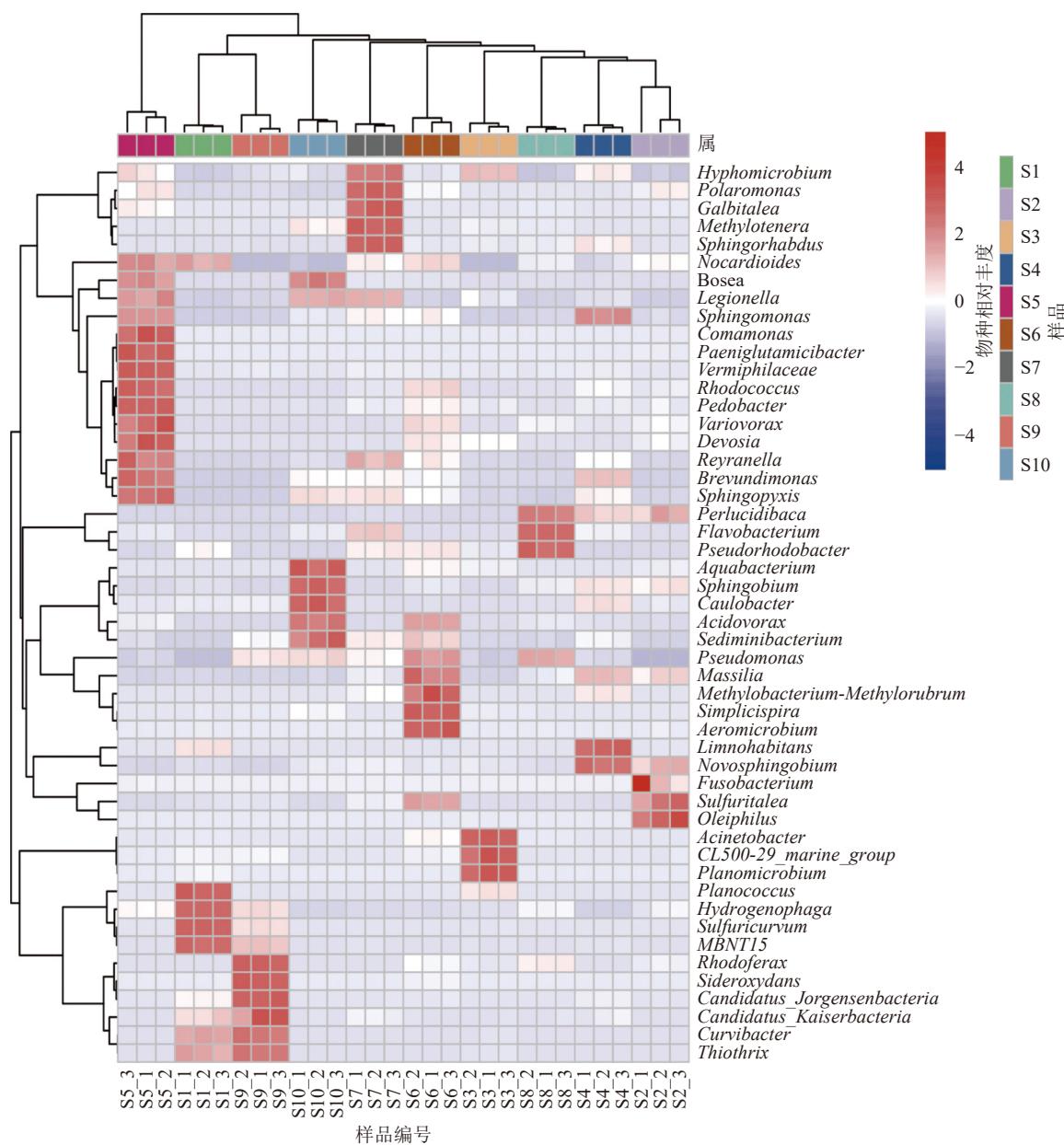


图12 双聚类的属水平物种组成热图

Fig.12 Genus level species composition heatmap of biclusters

1)采空区稳定后涌出水的S1和S9微生物丰度最为接近,以扁平球菌属(*Planococcus*)、噬氢菌属(*Hydrogenophaga*)、硫属(*Sulfuricum*)等微生物丰度最高。

2)正在开采的采煤工作面涌出水S3与采空区稳定后的涌出水较为接近(横向聚类为统一类型),以不动杆菌属(*Acinetobacter*)、动性杆菌属(*Planomicrobium*)等微生物丰度最高。

3)松散层 S2 和 S4 距离矿井充水水样最远, 以新鞘脂菌属(*Novosphingobium*)、梭杆菌属(*Fusobacterium*)、硫属(*Sulfuricum*)等微生物丰度最高。

4)直罗组 S5 水样最接近最新涌出的矿井涌水样, 以丛毛单胞菌属(*Comamonas*)、蛲虫属(*Vermiphilaceae*)、巴氏杆菌(*Paeniglutamicibacter*)等微生物丰度最高。

### 3.3 榆树湾煤矿充水特征综合分析

1)榆树湾煤矿充水微生物特征分析。榆树湾煤矿最大的矿井涌水点 S1 水样的 Shannon 指数、Faith 指数、Simpson 指数和 Pielou 指数与 S2、S7 和 S5 水样相近, 说明现有榆树湾矿井涌水主要来自松散含水层和直罗组含水层, PCoA 和 NSDM 分析佐证了这一结论。Beta 多样性分析显示榆树湾煤矿老采空区涌出水与松散层最为接近, 说明直罗组含水层静储量释放后, 榆树湾矿井充水水源构成中离石组黄土层的水有所增加。为进一步剖析充水水源, 结合矿井充水因素分析如下。

2)榆树湾煤矿充水通道分析。榆树湾煤矿充水水源主要受充水通道影响, 充水通道主要包括采煤导水裂隙带和其他导水构造或天窗。

关于导水裂隙带: 榆树湾煤矿已有的导水裂隙带高度实测结果显示裂采比最大为 28 倍, 以 28 倍裂采比计算的导水裂隙带发育结果如图 2 所示。可以看出, 目前已采区导水裂隙带直接沟通延安组含水层、直罗组含水层及部分离石组含水层, 富水性中等萨拉乌苏组含水层未导通。

关于其他导水通道: 根据目前榆树湾煤矿钻孔、地震及采掘工程揭露可知井田范围内无断距大于 5 m 的断层。此外, 榆树湾煤矿土层厚度十分稳定, 为榆神府矿区已经开采范围内厚度最大的矿井, 其厚度普遍超过 100 m, 且矿井未发现天窗存在。分析榆树湾 2015—2022 年开采面积与矿井涌水量关系(表 2), 两者有较好的线性关系(式(1),  $R^2=0.93$ ), 而榆神矿区另一个典型天窗充水矿井(锦界煤矿, 涌水量巨大)开采面积和矿井涌水量的相关性较差<sup>[27]</sup>, 这与锦界煤矿天窗区和非天窗区充水条件差异较大有关。综合说明了榆树湾矿井充水条件相对稳定, 未受突变性较大的构造或天窗影响。

$$Q = 38.43F + 302.24 \quad (1)$$

式中,  $Q$  为矿井涌水量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $F$  为累计采空区面积,  $\text{km}^2$ 。

3)榆树湾矿井充水模式。综合榆树湾充水水文地质和微生物群落特征分析, 可以看出: 榆树湾煤矿

表 2 榆树湾煤矿矿井涌水量与采空区面积关系  
Table 2 Relationship between water inflow and goaf area in Yushuwan Coal Mine

年份	累计采空面积/ $\text{km}^2$	涌水量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )
2015	10.37	703
2016	11.88	719
2017	13.36	857
2018	14.66	889
2019	16.27	931
2020	16.81	947
2021	18.10	940
2022	19.92	1 096

的充水模式为基岩含水层快速释水+离石组含水层持续释水模式。其中主要论据有 2 个方面。

一方面, 通过矿井各涌水点的统计如图 13 所示, 可以看出: 矿井正在回采的工作面涌水量仅占总矿井涌水量的 4.13%, 挖进过程产生涌水量占总矿井涌水量的 3.16%, 井筒涌水量占总矿井涌水量的 16.31%, 而老空水量则占总矿井涌水量的 76.40%。说明榆树湾矿井总的涌水量主要来自持续释放的离石组松散含水层, 而榆树湾煤矿“三带”探查钻孔揭露到采空区上方直罗组基岩含水层水消失即为佐证。

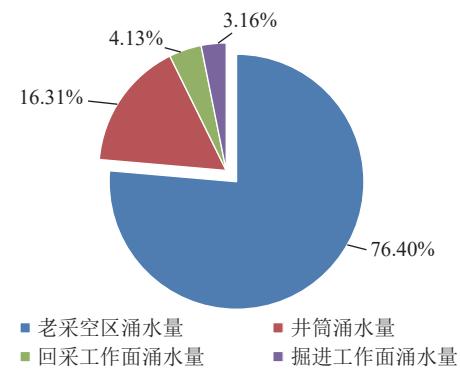


图 13 矿井涌水量构成  
Fig.13 Composition of mine water inflow

结合图 7 PCoA 分析结果, S1(老采空区涌水点水样)与 S7(离石组黄土含水层)接近, 说明目前榆树湾煤矿总的矿井涌水与离石组含水层持续释水密切相关。水样微生物群落分析验证了这一结论。

另一方面, 对开采工作面的涌水量的持续观测结果如图 14 所示, 可以看出: 煤炭开采过程中以直罗组等基岩含水层快速衰减的含水层为主。采煤工作面推进约 800 m 位置时, 工作面涌水量开始快速衰减, 最终工作面涌水量衰减到巅峰时期涌水量的 41.86%。说明榆树湾矿井总的涌水量中仅有回采的

工作面中有明显的基岩快速释水。结合图8 NSDM分析结果, S3(正在开采工作面涌水点水样)与 S5(直罗含水层)最为接近, 证明了这一结论。

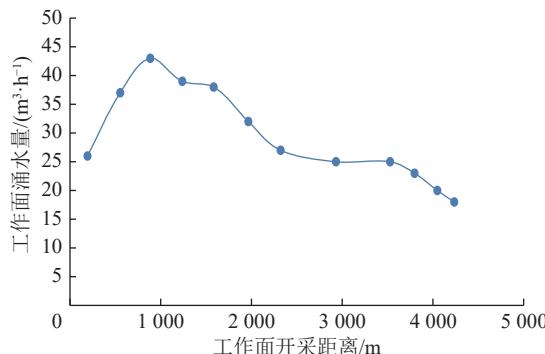


图 14 矿井工作面涌水量动态观测

Fig.14 Dynamic observation of water inflow in mining face

综合以上两点, 榆树湾煤矿充水模式可以概括为基岩含水层快速释水+离石组含水层持续释水模式。其中松散层持续充水原理与我国东部矿区土层持续释水相似(土层发生了持续固结释水)<sup>[28]</sup>。

## 4 结 论

1)关于高通量测序用于矿井充水识别的研究方面:将含水层和矿井涌水水样进行高通量测试, 测试结果通过了 Coverage 指数检验, 相关识别结果被矿山水文监测和导水裂隙带观测结果佐证, 说明高通量测序可用于矿井充水分析。但人类活动密切接触的水样显示出被污染特性, 需要在取样中有效规避。

2)关于矿井水中微生物群落特征方面:榆树湾煤矿浅表松散含水层中微生物丰富度和多样性都较高, 以新鞘脂菌属(*Novosphingobium*)、梭杆菌属(*Fusobacterium*)和硫属(*Sulfuricum*)等微生物丰富度最高;直罗组为代表的基岩含水层微生物丰富度较低, 但微生物多样性较高, 以丛毛单胞菌属(*Comamonas*)、蛲虫属(*Vermiphilaceae*)和巴氏杆菌(*Paeniglutamicibacter*)等微生物丰富度最高。所有水样中最为优势的门类为变形菌门, 占比达到 35.5%~89.7%。

3)关于榆树湾煤矿矿井充水模式方面:Alpha 多样性分析显示, 榆树湾矿井涌水主要来自松散含水层和直罗组含水层, PCoA 和 NSDM 分析佐证了这一结论。Beta 多样性分析显示, 榆树湾煤矿老采空区涌出水与松散层最为接近, 直罗组含水层静储量释放后, 榆树湾矿井充水水源构成中离石组黄土层的水有所增加。因此, 榆树湾煤矿为基岩含水层快速释水+离石组含水层持续释水的充水模式, 这

一结论得到了矿井涌水规律的证实。

## 参考文献(References):

- [1] 范立民, 孙强, 马立强, 等. 论保水采煤技术体系[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 196~204.  
FAN Limin, SUN Qiang, MA Liqiang, et al. Technological system of water-conserving coal mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 196~204.
- [2] 李涛, 高颖, 闫敬旺, 等. 采煤地裂缝 MICP 修复规律及影响因素实验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(11): 99~108.  
LI Tao, GAO Ying, YAN Jingwang, et al. MICP restoration law of coal mining induced ground fissures and its influencing factors[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(11): 99~108.
- [3] 范立民, 马雄德, 蒋泽泉, 等. 保水采煤研究 30 年回顾与展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(7): 1~30.  
FAN Limin, MA Xiongde, JIANG Zequan, et al. Review and thirty years prospect of research on water-preserved coal mining[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(7): 1~30.
- [4] 张东升, 李文平, 来兴平, 等. 我国西北煤炭开采中的水资源保护基础理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 36~43.  
ZHANG Dongsheng, LI Wenping, LAI Xingping, et al. Development on basic theory of water protection during coal mining in northwest of China[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 36~43.
- [5] 李文平, 王启庆, 李小琴. 隔水层再造: 西北保水采煤关键隔水层 N<sub>2</sub> 红土工程地质研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 88~97.  
LI Wenping, WANG Qiqing, LI Xiaoqin. The engineering geological study of N<sub>2</sub> laterite located in key aquifuge concerning coal mining with water protection in northwest China[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 88~97.
- [6] 李涛, 王苏健, 韩磊, 等. 生态脆弱矿区松散含水层下采煤保护土层合理厚度[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 98~105.  
LI Tao, WANG Sujian, HAN Lei, et al. Reasonable thickness of protected loess under loose aquifer in ecologically fragile mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 98~105.
- [7] 胡振琪, 袁冬竹. 黄河下游平原矿区采煤塌陷地治理的若干基本问题研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1392~1403.  
HU Zhenqi, YUAN Dongzhu. Research on several fundamental issues of coal mining subsidence control in plain coal mining area of the Lower Yellow River[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1392~1403.
- [8] 曾一凡, 武强, 赵苏启, 等. 我国煤矿水害事故特征、致因与防治对策[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 1~14.  
ZENG Yifan, WU Qiang, ZHAO Suqi, et al. Characteristics, causes, and prevention measures of coal mine waterhazard accidents in China[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 1~14.
- [9] 顾爱民. 基于水力学与水化学耦合的矿井涌(突)水水源识别技术研究[D]. 廊坊: 华北科技学院, 2023: 53~68.  
GU Aimin. Research on mine water inrush water source identification

- tion technology based on the coupling of hydraulics and hydrochemistry [D]. Langfang: North China Institute of Science and Technology, 2023: 53–68.
- [10] 付成祥. 基于统计分析法的唐山矿水害规律及防治技术[J]. 煤矿安全, 2022, 53(3): 208–212.
- FU Chengxiang. Water disaster law and prevention technology of Tangshan Mine based on statistical analysis[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(3): 208–212.
- [11] 杨飞, 石志远, 郑士田, 等. 基于Piper图的离子库分区和突水水源动态转化及判别[J]. 现代矿业, 2022, 38(7): 250–254, 262.
- YANG Fei, SHI Zhiyuan, ZHENG Shitian, et al. Partition of ion bank based on the Piper diagram and dynamic transformation and discrimination of mine water inrush source[J]. Modern Mining, 2022, 38(7): 250–254, 262.
- [12] 贺亮亮, 吕广罗, 胡安焱, 等. 基于水化学特征分析的矿井突水水源判别[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(6): 34–39.
- HE Liangliang, LYU Guangluo, HU Anyan, et al. Mine water bursting water source discrimination based on hydrochemical features analysis[J]. Coal Geology of China, 2022, 34(6): 34–39.
- [13] 赵静. 基于水化学和模糊综合评判的突水水源判别[J]. 陕西煤炭, 2022, 41(4): 99–103.
- ZHAO Jing. Discriminant of mine water inrush source based on water chemistry and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Shaanxi Coal, 2022, 41(4): 99–103.
- [14] 朱赛君, 姜春露, 毕波, 等. 基于组合权-改进灰色关联度理论的矿井突水水源识别[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(4): 165–172.
- ZHU Saijun, JIANG Chunlu, BI Bo, et al. Identification of mine inrush source based on combination weight theory of improved grey relational degree[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(4): 165–172.
- [15] 段李宏, 戴磊, 张金陵. 基于Fisher判别模型的煤层底板突水水源预测[J]. 工矿自动化, 2022, 48(4): 128–134.
- DUAN Lihong, DAI Lei, ZHANG Jinling. Prediction of water inrush source of coal seam floor based on Fisher discriminant model[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(4): 128–134.
- [16] 郝谦, 武雄, 穆文平, 等. 基于随机森林模型判别矿井涌(突)水水源[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(16): 6411–6418.
- HAO Qian, WU Xiong, MU Wenping, et al. Groundwater source determination of mine inflow or inrush using a random forest model [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 20(16): 6411–6418.
- [17] 苏玮, 姜春露, 查君珍, 等. 基于客观组合权-改进集对分析模型的矿井突水水源识别[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(4): 156–164.
- SU Wei, JIANG Chunlu, CHA Junzhen, et al. Identification of mine inrush source based on objective combined weights-improved set pair analysis model[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(4): 156–164.
- [18] 李涛, 高颖, 马杰, 等. 一种基于微生物测试的煤矿突水
- 水源判别方法[P]. 中国: ZL112881627B, 2022.
- [19] 张莉, 徐智敏, 孙亚军, 等. 鄂尔多斯某煤矿不同功能区水化学与微生物群落特征及环境响应[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 180–196.
- ZHANG Li, XU Zhimin, SUN Yajun, et al. Hydrochemistry and microbial community composition characteristics and their environmental response in different zones of a coal mine in Ordos[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 51(12): 180–196.
- [20] 朱璐璐. 门克庆矿井水水质形成的微生物驱动机制与应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023: 18–50.
- ZHU Lulu. Microbial driving mechanism and application of the mine water quality formation in Menkeqing CoalMine [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2023: 18–50.
- [21] 孙亚军, 张莉, 徐智敏, 等. 煤矿区矿井水水质形成与演化的多场作用机制及研究进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 423–437.
- SUN Yajun, ZHANG Li, XU Zhimin, et al. Multi-field action mechanism and research progress of coal mine water quality formation and evolution[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 423–437.
- [22] 李文博, 冯启言, 高波, 等. 徐州权台煤矿井下700 m水平微生物群落分布特征[J]. 生态学杂志, 2021, 40(2): 442–452.
- LI Wenbo, FENG Qiyan, GAO Bo, et al. Distribution characteristics of microbial communities at a depth of 700 m level of Quantai coal mine in Xuzhou[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(2): 442–452.
- [23] 康小兵, 李晓雪, 饶丽芳, 等. 重庆松藻矿区关闭煤矿涌水来源与模式判识研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 220–230.
- KANG Xiaobing, LI Xiaoxue, RAO Lifang, et al. Source identification and pattern study of closed coal mines water inflow in Songzao Mining Area, Chongqing City[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 220–230.
- [24] 陈家玉, 桂和荣, 郭艳, 等. 淮北煤田深层地下水微生物群落特征及其水源示踪意义[J]. 煤炭学报, 2023, 48(9): 3503–3512.
- CHEN Jiayu, GUI Herong, GUO Yan, et al. Microbial community characteristics of deep groundwater inhuabei coalfield and its significance in water source tracing[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(9): 3503–3512.
- [25] 范立民, 迟宝锁, 王宏科, 等. 鄂尔多斯盆地北部直罗组含水层研究进展与水害防治建议[J]. 煤炭学报, 2022, 47(10): 3535–3546.
- FAN Limin, CHI Baosuo, WANG Hongke, et al. Research progress of aquifer of Zhiluo Formation in Northern Ordos Basin and suggestions on water hazard prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(10): 3535–3546.
- [26] 孙魁, 苗彦平, 陈小绳, 等. 鄂尔多斯盆地北部直罗组赋存特征及富水性研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(10): 3572–3598.
- SUN Kui, MIAO Yanping, CHEN Xiaosheng, et al. Occurrence

- characteristics and water abundance of Zhiluo Formation in northern Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(10): 3572–3598.
- [27] 靳德武, 刘基, 许峰, 等. 榆神矿区浅埋煤层减水开采中预疏放标准确定方法[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 220–229.
- JIN Dewu, LIU Ji, XU Feng, *et al.* Method of determining of pre-drainage standard in water-decrease mining of shallow seam in Yushen mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 220–229.
- [28] 李涛, 李文平, 常金源, 等. 陕北浅埋煤层开采隔水土层渗透性变化特征[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1): 127–131, 137.
- LI Tao, LI Wenping, CHANG Jinyuan, *et al.* Permeability features of water-resistant clay layer in Northern Shaanxi Province while shallowly buried coal mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(1): 127–131, 137.