

前 言

天然水体中溶解有机质(dissolved organic matter, DOM)广泛分布,含有丰富的活性官能团且具有高迁移性和反应活性,显著影响水生生态系统生物地球化学过程,在全球碳循环中扮演着重要角色。目前在地表水体和土壤领域,关于 DOM 特征开展了广泛研究。但是,在煤矿区并未有 DOM 特征及环境行为的系统研究。近几年,作者课题组研究发现,煤矿矿井水环境独特,具有埋藏深、深部含水层淋滤及受煤炭开采环境影响等特点,因此,煤矿矿井水 DOM 组成特征和来源复杂,致使 DOM 的环境行为难以刻画。

煤炭是我国能源安全的压舱石,在国家能源结构中持续发挥主导作用。我国煤炭资源以井工开采为主,其产量占煤炭总产量的 85%以上。煤矿开采产生大量的矿井水,据统计,我国吨煤开采产生的矿井水约为 1.87 m^3 ,按照目前的煤炭生产规模,每年产生的矿井水约 68.8 亿 m^3 。根据《煤炭工业“十四五”高质量发展指导意见》要求,2025 年实现矿井水完全利用与达标排放,政策导向充分体现了国家对矿井水资源化利用的高度重视。因此,厘清煤矿矿井水环境中 DOM 特征和环境行为,可为煤矿区污染治理和资源利用提供支撑。

全书共分十章,第 1 章绪论,综述过去 20 年煤矿矿井水研究热点和趋势,并就煤矿矿井水水质特征、矿井水痕量元素及 DOM 与痕量元素结合特性进行综述;第 2 章对我国 9 个煤炭基地的矿井水 DOM 组成特征和痕量元素组成特征进行剖析研究;第 3 章着重分析某煤矿不同工作面矿井水 DOM 组成的异质性;第 4 章模拟矿井淋滤作用下水-岩作用对矿井水 DOM 组成的影响;第 5 章利用索氏抽提试验研究不同成熟度煤提取液中 DOM 的组成特征,重点阐述不同煤质对矿井水 DOM 组成的影响;第 6 章研究煤矿不同来源 DOM 与痕量元素 Fe 的结合特征,阐释煤矿矿井水环境中 DOM 如何协控 Fe 的迁移转化;第 7 章针对含高硫酸盐矿井水的矿井,划分 4 个高硫酸盐梯度矿井水,查明不同硫酸盐条件下 DOM 组成特征,并阐明微生物驱动碳硫循环;第 8 章阐明室内模拟条件的微生物驱动的矿井水 DOM 转化的特征;第 9 章阐明不同煤田矿井水胶体有机质的组成特征;第 10 章论述矿井排水对河流有机质与痕量元素(主要是 Cu)迁移转化的影响。

本书相关研究工作及出版得到了国家重点研发计划项目(2019YFC1805400)、江苏省自然资源保护利用专项资金(矿地融合试点)项目、新疆维吾尔自治区煤

炭领域重大科技专项项目（2025A01003）及江苏高校优势学科建设工程项目等的联合资助。感谢山东新巨龙能源有限责任公司吕伟魁、永煤集团股份有限公司段李宏和山西省煤炭地质勘查研究院有限公司屈晓荣等领导和专家的大力支持；感谢中国矿业大学孙亚军教授、朱炎铭教授、徐智敏教授和张莉副教授，中国科学院南京地理与湖泊所秦伯强研究员、张运林研究员、周永强研究员和汤祥明副研究员等在野外样品采集与实验测试等方面提供的支持及帮助；感谢科学出版社沈旭编辑对书稿质量提升上的帮助；感谢我的研究生孙梦养、汪成梁、齐璞玉、张雨晴及钟梦卿在煤矿矿井水 DOM 组成、胶体有机质组成、DOM-金属元素结合特征及微生物驱动碳循环等方面的研究及对本书的支撑；也感谢我的研究生逢仁昊、徐青纯、胡志茹、陈欣怡、武毅、邓文博、张晓琪、吕姝萌、尚育培等在野外采样、实验测试与图件绘制等方面给予的协助。在本书出版之际，谨向给予支持和帮助的单位与个人表示最诚挚的谢意！

本书力求结构合理、内容丰富、图文并茂、表述简洁，期望所呈现的成果和认识既能丰富水体溶解有机质的相关理论研究，又能深入煤矿矿井水溶解有机质的特征研究，为我国煤矿区污染治理提供新视角。因作者研究水平及编著经验有限，在煤矿矿井水溶解有机质的认识、分析和总结以及书稿的写作上必然存在不足，恳请广大读者批评指正。

丁艳青

2025 年 10 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究进展	3
1.2.1 煤矿矿井水研究热点与趋势	3
1.2.2 我国煤矿矿井水水质特征	15
1.2.3 煤矿矿井水痕量元素来源	16
1.2.4 溶解有机质的组成与来源	17
1.2.5 溶解有机质的环境行为	19
第 2 章 我国煤矿矿井水中 DOM 和痕量元素的组成特征	22
2.1 样品采集与测试分析方法	23
2.1.1 采样点布设及水文地质条件	23
2.1.2 矿井水化学测试分析方法	24
2.1.3 矿井水 DOM 测试分析方法	25
2.2 不同类型煤矿矿井水化学特征	26
2.2.1 矿井水理化性质差异	26
2.2.2 矿井水痕量元素组成特征	27
2.3 不同类型煤矿矿井水 DOM 的紫外光谱特征	29
2.4 不同类型煤矿矿井水 DOM 的三维荧光特征	30
2.5 煤矿环境对矿井水 DOM 组成的影响	34
2.6 本章结论	35
第 3 章 某煤矿矿井水 DOM 组成的空间异质特征	37
3.1 工作面采样分布与样品测试分析	37
3.2 某煤矿矿区样品理化特征	38
3.2.1 煤和岩石组分分析	38
3.2.2 矿井水化学特征	39
3.3 不同工作面矿井水 DOM 紫外光谱特征	40
3.4 不同工作面矿井水 DOM 三维荧光特征	43

3.4.1	DOM 荧光组分特征	43
3.4.2	DOM 荧光参数特征	45
3.5	本章结论	46
第 4 章	动态淋滤下水-煤作用强度对 DOM 组成影响特征	47
4.1	动态淋滤试验设置	47
4.2	样品测试与分析	48
4.2.1	分析测试方法	48
4.2.2	傅里叶变换离子回旋共振质谱	49
4.3	不同粒径煤淋滤液的水化学特征	49
4.4	不同粒径煤淋滤液 DOM 光谱组成特征	50
4.4.1	DOM 紫外光谱特征	50
4.4.2	DOM 三维荧光特征	51
4.5	不同粒径煤淋滤液 DOM 分子组成特征	53
4.5.1	DOM 分子类型特征	53
4.5.2	DOM 杂原子分子特征	55
4.5.3	DOM 化合物组成特征	57
4.6	本章结论	60
第 5 章	不同成熟度煤提取液中 DOM 组成差异特征	61
5.1	煤样采集与预处理	61
5.2	索氏抽提试验设置	62
5.3	煤提取液测试与分析方法	63
5.4	不同成熟度煤提取液的水化学特征	63
5.4.1	煤提取液理化特征	63
5.4.2	煤中痕量元素溶出特征	64
5.5	不同成熟度煤提取液 DOM 光谱组成特征	67
5.5.1	DOM 紫外光谱特征	67
5.5.2	DOM 荧光光谱特征	68
5.5.3	DOM 荧光组分特征	69
5.6	不同成熟度煤提取液 DOM 分子组成特征	71
5.6.1	DOM 分子类型特征	71
5.6.2	DOM 杂原子分子特征	72
5.6.3	DOM 化合物组成特征	75
5.7	本章结论	78

第 6 章 煤矿不同来源 DOM 与 Fe (Ⅲ) 的结合特征	80
6.1 样品测试与分析方法	80
6.2 不同类型煤矿矿井水 DOM 与 Fe (Ⅲ) 的结合特征	81
6.2.1 不同类型煤矿矿井水 DOM-Fe (Ⅲ) 结合序列	81
6.2.2 Fe (Ⅲ) 添加对不同类型煤矿矿井水 DOM 荧光的影响	82
6.3 不同粒径煤淋滤液 DOM 与 Fe (Ⅲ) 的结合特征	84
6.3.1 不同粒径煤淋滤液 DOM-Fe (Ⅲ) 结合序列	84
6.3.2 Fe (Ⅲ) 添加对不同粒径煤淋滤液 DOM 荧光的影响	85
6.3.3 不同粒径煤淋滤液 DOM 作用下 Fe (Ⅲ) 的转化特征	86
6.4 不同煤质提取液 DOM 与 Fe (Ⅲ) 的结合特征	87
6.4.1 不同煤质提取液 DOM-Fe (Ⅲ) 结合序列	87
6.4.2 Fe (Ⅲ) 添加对不同煤质提取液 DOM 荧光的影响	88
6.4.3 不同煤质提取液 DOM 作用下 Fe (Ⅲ) 的转化特征	90
6.5 DOM-Fe (Ⅲ) 结合能力的影响因素	92
6.6 本章结论	93
第 7 章 高硫酸盐矿井水中 DOM 与微生物群落组成特征	95
7.1 高硫酸盐矿井采样点布设	95
7.2 样品测试与分析方法	96
7.2.1 水化学和 DOM 测试分析方法	96
7.2.2 DNA 提取、PCR 扩增和 16S rRNA 基因测序	96
7.2.3 序列处理和分类单元功能注释	97
7.2.4 数据统计与分析	97
7.3 高硫酸盐矿井水水体理化特征	97
7.4 高硫酸盐矿井水 DOM 光谱组成特征	100
7.4.1 DOM 紫外光谱特征	100
7.4.2 DOM 三维荧光特征	100
7.5 高硫酸盐矿井水微生物的组成特征	102
7.5.1 矿井水微生物群落特征	102
7.5.2 理化性质对微生物群落的影响	106
7.6 不同硫酸盐浓度对微生物群落分布的影响	108
7.7 不同硫酸盐浓度对 DOM 荧光组成的影响	110
7.8 不同硫酸盐浓度矿井水 DOM 和微生物的相互作用	111
7.9 本章结论	113

第 8 章 氧化还原条件对矿井水 DOM 与微生物演化的驱动机制	114
8.1 试验设置与预处理	114
8.2 样品测试与分析方法	115
8.3 氧化还原条件对水体理化性质与 DOM 组成的影响	115
8.3.1 水体理化性质变化特征	115
8.3.2 SO_4^{2-} 浓度变化特征	117
8.3.3 DOC 浓度变化特征	117
8.3.4 DOM 紫外光谱特征	118
8.3.5 DOM 三维荧光特征	119
8.4 氧化还原条件对矿井水微生物组成的影响	122
8.4.1 细菌群落多样性变化	122
8.4.2 细菌群落组成特征	123
8.4.3 细菌群落功能预测	126
8.4.4 细菌群落对水中硫酸盐的影响	127
8.4.5 氧化还原环境下的微生物活动差异	127
8.5 本章结论	128
第 9 章 不同煤田矿井水胶体有机质组成特征	130
9.1 样品采集与测试分析方法	130
9.1.1 样品采集与预处理	130
9.1.2 胶体有机质的提取	130
9.1.3 水化学和 COM 测试分析方法	132
9.2 不同煤田矿井水水化学特征	132
9.2.1 矿井水理化性质	132
9.2.2 矿井水化学类型	133
9.2.3 矿井水痕量元素组成特征	136
9.3 矿井水 COM 组成特征	137
9.3.1 COM 紫外光谱特征	138
9.3.2 COM 三维荧光特征	140
9.3.3 COM 荧光强度分布	142
9.4 COM 与环境因子的相互关系	144
9.5 本章结论	145
第 10 章 矿井排水对河流胶体有机质与痕量元素迁移转化的影响	147
10.1 样品采集与预处理	147

10.2 测试与分析方法·····	148
10.2.1 COM 的分离和提取·····	148
10.2.2 荧光猝灭滴定实验·····	148
10.3 矿井排水对河流理化特征的影响·····	148
10.3.1 矿井排水对河水化学特征的影响·····	148
10.3.2 矿井排水对河流常规离子与痕量元素的影响·····	149
10.4 矿井排水对河流 COM 组成的影响·····	150
10.4.1 河流 COM 组成特征·····	150
10.4.2 矿井排水对 COM 组成的影响·····	152
10.5 河流 COM 与 Cu 的结合特征·····	154
10.6 矿井排水对 COM 与 Cu 结合行为的影响·····	157
10.7 本章结论·····	159
参考文献·····	160



扫一扫，看彩图

第1章 绪 论

1.1 研究背景与意义

煤炭在我国能源结构中持续发挥主导作用，是保障国家能源安全的基石。最新能源统计数据显示，煤炭占我国一次能源消费比重虽然逐年下降，但在相当长时期内仍将保持在 50%以上（袁亮，2023）。这种能源结构的特殊性决定了煤炭开采在我国经济发展中的关键地位。我国煤炭资源以井工开采为主，其产量占煤炭总产量的 85%以上（孙亚军等，2024）。在开采过程中，采掘活动破坏了岩体原始的应力平衡，导致岩层变形和移动，形成导水裂缝带，破坏底板隔水层，活化地质构造，并引发地表塌陷等一系列地质环境问题（孙亚军等，2021）。采矿工程扰动为地下水、地表水及大气降水提供了进入开采空间的优势通道，成为煤矿矿井水的主要来源。煤矿开采产生大量矿井水，2020 年我国煤炭开采和生产造成的废水排放量约 14.21 亿 t，占全国工业废水排放量的 8.02%（宁凯亮，2021）。据统计，我国吨煤开采产生的矿井水为 1.87 m^3 ，按照目前煤炭生产规模，每年产生矿井水约 68.8 亿 m^3 （顾大钊等，2021），因此矿井水资源再利用具有巨大潜力。

煤矿矿井水的形成是一个多因素共同作用的复杂水文地球化学过程，其物质组成受氧化还原条件、水-岩相互作用、微生物活动和采动效应等多因素的显著影响。在这些因素的共同作用下，矿井水常表现出高悬浮物、高矿化度、高硫酸盐和酸性“三高一酸”的特征（孙亚军等，2025），导致矿井水利用率低，2018 年全国平均利用率仅为 35%（顾大钊等，2021）。尤其是高矿化度矿井水的处理成本较高，技术上存在一定难度，这进一步制约了其资源化利用效率的提高。为推进矿井水资源化利用进程，国家能源局等部门于 2013 年联合印发《矿井水利用发展规划》，提出 2015 年煤矿矿井水利用率达 75%；《煤炭工业“十四五”高质量发展指导意见》进一步要求 2025 年实现矿井水完全利用与达标排放。政策导向充分体现国家对矿井水资源化利用的高度重视。我国煤炭资源主产区与水资源分布存在显著的空间异质性，主要煤炭基地分布在西北和华北等缺水区域，而水资源则相对集中在南方地区，其中黄河流域最具典型性（武强等，2025），矿井水的高效再利用对缓解缺水危机有特别重要的意义。

长期的煤炭开采引发的区域水环境及水生态问题日益突出 (Morrison et al., 2019; 武强和李松营, 2018), 其中金属污染比较普遍。我国煤矿矿井水中常见的痕量元素有铁 (Fe)、锰 (Mn)、砷 (As)、镉 (Cd)、铬 (Cr)、铅 (Pb)、铜 (Cu)、锌 (Zn) 和汞 (Hg), 其中 Fe、Mn 和 Zn 的检出率和浓度普遍较高 (王甜甜, 2020)。区域分布特征研究表明, 我国云贵、宁东和晋北矿区的 Fe 和 Mn 超标率高达 75%, 淮南地区煤矿的 Fe 和 Mn 超标率分别为 16.95% 和 27.12% (Zhang et al., 2019), 贵州东南部和内蒙古东部部分矿区存在 Zn 污染 (王甜甜, 2020), 特别是在酸性矿井水中, 多种痕量元素共存的复合污染问题尤为突出 (张瑞雪等, 2021)。含有大量痕量元素的矿井水, 可通过导水通道形成串层污染, 或者通过排放泄漏至地表, 造成地表土壤和水体的污染, 进而破坏矿区的生态环境 (孙亚军等, 2020; 王慧和吕英英, 2019)。

溶解有机质 (dissolved organic matter, DOM) 是水体中溶解态有机化合物的总称, 具有重要的生态和地球化学特性, 并可与无机和有机污染物结合 (Ming et al., 2014; Wang et al., 2014)。DOM 含有羧基、羟基、氨基和芳香环等反应性官能团, 具有高迁移性和化学活性 (Chen et al., 2022)。矿井水 DOM 主要源于采动过程中有机质的水解释放、微生物代谢产物及地表有机质的输入 (Nakajima et al., 2005)。这些有机质可通过络合、还原和吸附等作用显著影响痕量元素的迁移转化、生物有效性和毒性 (Hirose, 2007; Nguyen et al., 2004), 是控制矿区痕量元素环境行为的关键因子 (Impellitteri et al., 2002; Li and Gong, 2021), 其在矿区污染治理中占有特殊地位。因此, 深入研究煤矿区 DOM 与痕量元素的相互作用机制, 对于煤矿矿井水的处理与资源化利用具有重要指导意义。

综上所述, 系统研究我国煤矿矿井水 DOM 的组成特征与来源, 对阐释矿区“水-岩-煤-微生物”复合系统中的生物地球化学循环具有关键意义, 可为矿井水污染治理与资源化利用提供理论支撑, 并对推动煤炭绿色开采与矿区生态修复具有重要的学术价值与现实意义。特别是在当前推进煤炭工业绿色发展的背景下, 开展矿井水 DOM 特性及其环境行为研究, 不仅有助于解决煤矿区的环境污染问题, 还能为矿井水污染修复提供科学依据, 对煤炭绿色高效开发和生态环境修复均具有重要的理论与现实意义, 对实现煤炭工业的可持续发展也具有重大战略价值。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 煤矿矿井水研究热点与趋势

文献计量学方法是基于大量文献的统计分析,以定量和统计方法刻画某一学科或领域所发表文章的特点,进而解析某一学科或领域的研究进展、研究热点及未来发展趋势的方法(郭忠录和蔡崇法,2019)。本章采用 HistCite Pro(芦晓和刘国庆,2021)和 CiteSpace(陈悦等,2015)两种科学计量软件,以 Web of Science 核心合集中的 SCI-Expanded 数据库为数据源,以“mine water”、“coal mine water”、“coal drainage water”和“coal mine”为主题,将出版时间跨度设置为2003年1月1日到2022年12月31日,最终得到44945篇文献,构成研究样本。利用 Web of Science 数据库检索煤矿矿井水领域的文献,针对检索结果进行数据分析及可视化研究,构建文献共被引网络,解译该领域文献的发文量、被引用次数、研究前沿、研究热点及突现词等5个方面的情况,剖析过去二十年煤矿矿井水研究领域的热点,探究煤矿矿井水研究领域的发展趋势,为煤矿区水环境研究提供思路或潜在指导。

1. 文献出版物的特点

分析一个领域的文献年产出量,能发现该领域的发展规律。在 Web of Science 数据库中,2003~2022年煤矿矿井水相关研究领域共计发表科研论文44945篇(图1-1)。

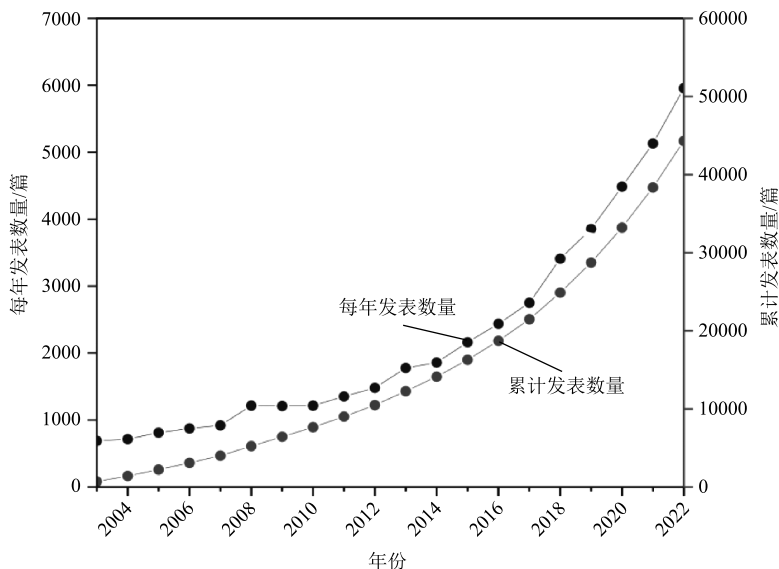


图 1-1 煤矿矿井水相关领域发表论文情况

近二十年,文献的年度发表数量和累计发表数量均稳步增长,年均发文量为 2247 篇,年度发表数量从 2003 年的 689 篇增加到 2022 年的 5953 篇。统计的文章主要发表在 3497 种期刊上。表 1-1 列出了发表文章最多的 20 种期刊,占发表文献总数的 24%。其中, *Science of the Total Environment* 发表文章最多 (1135 篇; 占 2.5%), 其次是 *Environmental Earth Sciences* (818 篇; 占 1.8%) 和 *Environmental Science and Pollution Research* (781 篇; 占 1.7%)。

表 1-1 发表文章数量排在前 20 位的期刊总发表数量占比、5 年影响因子和总被引频次

期刊	Recs	TPN/%	5 年影响因子 (排名)	TGCS
<i>Science of the Total Environment</i>	1135	2.5	9.6 (4)	45479
<i>Environmental Earth Sciences</i>	818	1.8	3.1 (14)	14487
<i>Environmental Science and Pollution Research</i>	781	1.7	5.4 (9)	12878
<i>Mine Water and the Environment</i>	663	1.5	3.2 (13)	8456
<i>Energies</i>	611	1.4	3.3 (12)	5392
<i>International Journal of Coal Geology</i>	609	1.4	6.8 (8)	30348
<i>Applied Geochemistry</i>	606	1.3	3.8 (11)	22755
<i>Chemosphere</i>	547	1.2	8.3 (5)	18897
<i>Sustainability</i>	529	1.2	4.0 (10)	4495
<i>Minerals</i>	498	1.1	2.7 (17)	4587
<i>Geofluids</i>	496	1.1	1.9 (20)	1799
<i>Fuel</i>	475	1.1	7 (7)	16153
<i>Journal of Cleaner Production</i>	473	1.1	11.0 (3)	18120
<i>International Journal of Mining Science and Technology</i>	432	1.0	8.2 (6)	10757
<i>Environmental Monitoring and Assessment</i>	407	0.9	3.1 (15)	8474
<i>Environmental Science & Technology</i>	388	0.9	12 (2)	18942
<i>Advances in Civil Engineering</i>	380	0.8	2.0 (18)	2004
<i>Arabian Journal of Geosciences</i>	360	0.8	2.0 (19)	5048
<i>Journal of Hazardous Materials</i>	351	0.8	12.7 (1)	20690
<i>Water, Air and Soil Pollution</i>	344	0.8	2.9 (16)	6194

注: Recs 为发文量 (records); TPN 为总发表数量 (total publication number); TGCS 为全球总被引频次 (total global citation score)。

本地总被引频次 (total local citation score, TLCS) 指当前数据集中文献的被引频次之和, 全球总被引频次 (TGCS) 指在整个 Web of Science 数据库中所有文献被引频次之和。TLCS 和 TGCS 的变化趋势, 可以分为两个阶段: 2003~2017 年为高速发展阶段, 2018~2022 年为衰退阶段。TLCS 和 TGCS 最高的年

份分别为 2018 年和 2019 年（图 1-2）。在政策与市场的双重引导下，煤矿矿井水处理和再利用等问题受到政府和学者的高度关注，发文数量稳步增加，被引频次也随之增加，但在衰退阶段被引频次逐年下降。表 1-1 列出了发表文章数量排在前 20 种期刊的 5 年影响因子以及总被引频次，其中文章发表数量最多的期刊是 *Science of the Total Environment*，它的 5 年影响因子为 9.6（排名第四），TGCS 为 45479（排名第一）。

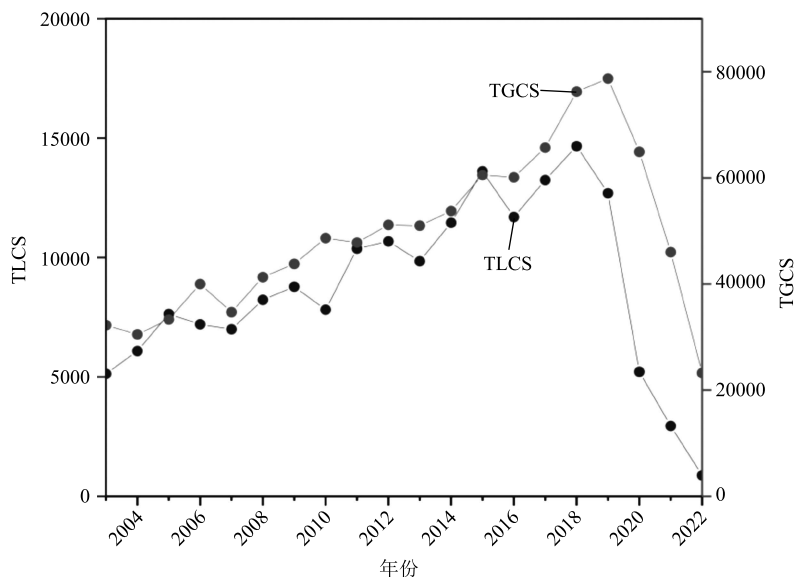


图 1-2 煤矿矿井水相关领域被引用频次情况

2003~2022 年发表文章数量最多的 20 个机构见表 1-2，其中 13 个机构位于中国，其余分别位于波兰（2 个）、俄罗斯（1 个）、美国（1 个）、澳大利亚（1 个）、西班牙（1 个）。在中国的研究机构中，中国矿业大学发表相关论文数量高居第一，占总发表文献的 9.3%；其次是中国科学院，占总发表文献的 3.1%。而每篇文章总引用数（global citation score, GCS）最高的是中国科学院大学，为 42.85 次；其次是西班牙高等科研理事会（38.49 次），中国矿业大学仅排在第 8 位。国内机构发文量（Recs）较高，但 GCS 排名不够靠前。从发表文献的国家和研究机构统计数据可知，中国重视煤矿矿井水研究，发表论文数量最多，但文章被引率有待提升。

表 1-2 2003~2022 年发表文章数量排在前 20 的机构

机构	国家	Rees	TLCS	TGCS	GCS
中国矿业大学	中国	4193	29363	84121	20.06
中国科学院	中国	1391	5401	41534	29.86
山东科技大学	中国	1157	7322	23920	20.67
中国矿业大学（北京）	中国	1017	3324	12963	12.75
安徽理工大学	中国	756	3128	10589	14.01
西安科技大学	中国	748	1621	8673	11.59
河南理工大学	中国	744	2078	7134	9.59
中国地质大学	中国	569	2706	12869	22.62
Russian Academy of Sciences	俄罗斯	559	1875	7957	14.23
重庆大学	中国	527	2631	10001	18.98
太原理工大学	中国	491	1494	5730	11.67
中国科学院大学	中国	477	4641	20438	42.85
United States Geological Survey	美国	462	972	8858	19.17
The University of Queensland	澳大利亚	436	2109	10357	23.75
辽宁工程技术大学	中国	396	912	4450	11.24
北京科技大学	中国	367	645	3061	8.34
AGH University of Science and Technology	波兰	354	1502	6656	18.80
University of Alberta	加拿大	332	1372	8065	24.29
Polish Academy of Sciences	波兰	294	847	4292	14.60
Spanish National Research Council	西班牙	291	2302	11202	38.49

2. 研究的热点

关键词是在文章中起着关键作用的词语，是文章的高度凝练和总结，反映文章的核心内容。高频次和高中介中心性的关键词代表着该领域内研究者共同关注的热点问题。本书选择关键词为节点类型（node types），阈值为 50，绘制关键词共现图谱（图 1-3），图中节点颜色和大小分别代表关键词出现的时间和频次，节点之间连线的颜色表示两个关键词最早的共现时间，连线的粗细表示关键词共现次数的高低（陈超美和陈悦，2014）。在煤矿矿井水关键词共现图谱中，共有节点 1386 个，连线 18316 条，网络整体密度为 0.0191，关键词共现网络结构紧密，密度较高。煤矿矿井水研究出现频次最高的 20 个关键词有 water、coal mine、mine、model、heavy metal、acid mine drainage 和 impact 等（表 1-3），出现频次分别为 4145 次、3882 次、2489 次、2174 次、2025 次、1997 次和 1600 次等。关键词 water

的中介中心性最高，其次是 acid mine drainage、coal mine 和 heavy metal。由此可见，煤矿矿井水领域研究的主流方向为酸性矿井水和重金属污染。

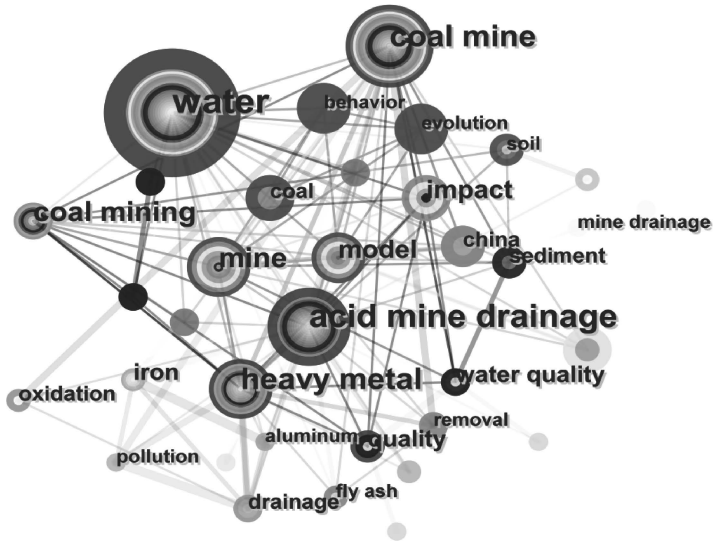


图 1-3 关键词共现图谱

表 1-3 关键词共现频次、中介中心性及年份

频次	中介中心性	年份	关键词	频次	中介中心性	年份	关键词
4145	0.65	2003	water	1463	0	2016	China
3882	0.2	2004	coal mine	1354	0	2022	evolution
2489	0.07	2008	mine	1307	0	2022	behavior
2174	0.04	2012	model	1269	0.02	2004	water quality
2025	0.19	2003	heavy metal	1264	0.01	2006	soil
1997	0.38	2004	acid mine drainage	1201	0.02	2003	iron
1600	0.02	2014	impact	1045	0.01	2012	sediment
1585	0.06	2005	coal mining	1039	0	2007	drainage
1576	0	2021	coal	1037	0	2005	fly ash
1466	0	2019	numerical simulation	989	0.12	2005	quality

关键词聚类分析可以从大量样本数据中发现共有的模式和规律，呈现各个关键词之间的内在逻辑，揭示研究领域的热点主题。利用 CiteSpace 软件对关键词进行聚类分析，得到关键词聚类图谱，如图 1-4 所示。聚类网络中聚类模块值（modularity, Q 值）和聚类平均轮廓值（silhouette, S 值）能够表征聚类效果的好

坏。一般 Q 值 >0.3 表示聚类结构显著； S 值 >0.5 表示聚类合理， S 值 >0.7 表示聚类具有可信性。图 1-4 中聚类分析 Q 值为 0.6739， S 值为 0.8659，说明该聚类图谱的聚类结构十分显著，且结果可信。

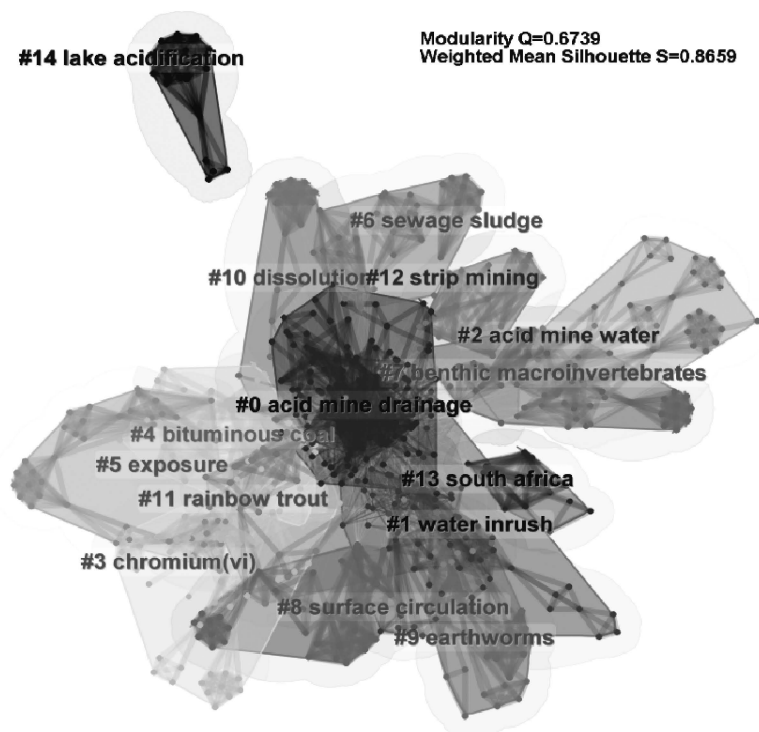


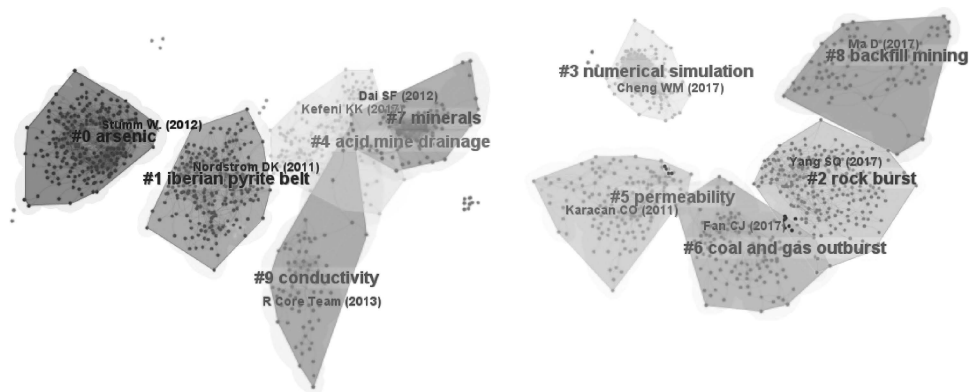
图 1-4 关键词聚类图谱

利用 CiteSpace 的对数似然比 (log-likelihood ratio, LLR) 寻径算法生成知识图谱，可以得到 15 个关键词类簇，反映当下煤矿矿井水研究领域的热点话题。从煤矿矿井水的来源方面看，关键词类簇包括 bituminous coal、exposure 和 strip mining；从煤矿矿井水造成的影响方面看，关键词类簇包括 water inrush、chromium (VI)、sewage sludge、lake acidification 和 dissolution；从生态保护方面看，关键词类簇包括 benthic macroinvertebrates、surface circulation 和 rainbow trout。

突现词指关键词在短时间内突然激增变成热点。利用 CiteSpace 软件的突现性探测功能，可分析数据库中频次变化率高的关键词，并按突现强度进行排序，关键词的突现强度与其所代表主题的活跃度成正比，可以多层次、多角度地全展现某一研究领域的变化趋势，回顾不同时期的研究热点（王娟等，2016）。对煤

续表					
关键词	年份	突现强度	开始	结束	2003~2022 年
ecosystem	2007	8.77	2014	2016	
quality	2003	7.54	2014	2016	
China	2005	19.64	2016	2018	
simulation	2011	6.94	2018	2020	
coal spontaneous combustion	2020	7.75	2020	2022	

利用 CiteSpace 软件绘制文献共被引聚类图谱 (图 1-5), 剖析煤矿矿井水领域的关键文献, 图中的节点代表煤矿矿井水领域的参考文献, 图中网络节点数为 2493 个, 节点之间的连线数为 10872 条, 网络密度为 0.0035。在文献共被引聚类分析中, 聚类主题设为关键词, 聚类算法选择 LLR, 聚类模块值 (Q 值) = 0.8224 > 0.3, 表明聚类结果十分显著, 聚类平均轮廓值 (S 值) = 0.935 > 0.7, 表明结果是可信的。图 1-5 中标签即聚类的命名, 序号越小, 说明聚类规模越大, 类簇中的节点数量越多。2017 年 Kefeni 等发表的论文 “Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review”, 共被引频次最高, 为 216 次, 中介中心性为 0.03。2012 年中国矿业大学 (北京) 代世峰发表的论文 “Geochemistry of trace elements in Chinese coals: A review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization” 中介中心性最高, 其值为 0.29 (>0.1), 属于关键文献。



利用 HistCite Pro 软件生成煤矿矿井水文献的引证关系图(图 1-6),根据本地引用次数(local citation score, LCS)对文献排序,选择排名前 30 的文献。图 1-6 中一