

Source Identification of Water Bursting in Tongting Coal Mine Based on Multivariate Matrix Model

Jun Zhang^{1,2*}, Duoxi Yao²

¹School of Civil Engineering, Wanjiang University of Technology, Ma'anshan Anhui

²School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Email: *szxyzj@sina.cn

Received: Jun. 7th, 2019; accepted: Jun. 21st, 2019; published: Jun. 28th, 2019

Abstract

Even in the context of the country's energy structure adjustment, coal is still one of the major energy sources in China for a certain period of time. The task of coal mine safety production is still arduous. As one of the five disasters of coal mine, water disaster seriously threatens the production safety of coal mine. In order to reduce the occurrence of water disaster accidents in coal mines, the most important thing is to identify the source of water inrush effectively. Based on 7 kinds of conventional hydro-chemical indexes of $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , and TDS from four aquifers of Tongting coal mine, a multivariate matrix model for identification of water inrush in mine is established and the possibility of the water inrush samples belonging to each aquifer can be determined by the combination of ions. Taking the combination of $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Mg^{2+} and Ca^{2+} as an example, the possibility of water inrush belonging to fourth aquifer, coal bearing sandstone aquifer, Taiyuan formation limestone aquifer and Ordovician limestone is -0.2978 , -0.0396 , 0.1101 , 0.8486 respectively. Therefore, the ion combination shows that the source of water inrush samples is Ordovician limestone water. Through the calculation results of other groups of ions, the source of water inrush can be judged similarly. The results show that there are 0 groups of water inrush from coal bearing sandstone, 2 groups from Taiyuan formation limestone aquifer, 4 groups from the fourth aquifer, 29 groups from Ordovician limestone aquifer, and the average value of each group is also shown as Ordovician limestone aquifer. Accordingly, it can be considered that the source of water inrush is Ordovician limestone aquifer water. Results show that the principle is simple, and less limited by water samples and the index number, and has good recognition effect, and water recognition rate can reach 82.86% in Tongting coal mine, which can provide a reference for prevention and control of water disasters in coal mine.

Keywords

Multivariate Matrix Model, Mine Water Inrush, Water Source Identification, Tongting Coal Mine

*通讯作者。

基于多元矩阵模型的童亭煤矿突水水源识别

张俊^{1,2*}, 姚多喜²

¹皖江工学院土木工程学院, 安徽 马鞍山

²安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

Email: *szxyj@sina.cn

收稿日期: 2019年6月7日; 录用日期: 2019年6月21日; 发布日期: 2019年6月28日

摘要

即便是在国家能源结构调整背景下, 未来一定时期内, 煤炭仍是我国主要能源之一, 煤矿安全生产的任务依然艰巨。水害作为煤矿五大灾害之一, 严重威胁煤矿安全生产, 为了减少煤矿水害事故的发生, 最重要的就是对其突水水源进行有效识别。本文以皖北矿区童亭煤矿四个含水层的 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、TDS共7种常规水化学指标为基础, 建立矿井突水水源识别的多元矩阵模型, 并利用各离子组合来判定待测突水水样属于各含水层的可能性大小。以 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 为例, 突水水样属于四含的可能性为-0.2978、属于煤系的可能性为-0.0396、属于太灰的可能性为0.1101、属于奥灰水的可能性为0.8486, 因此, 该离子组合显示突水水样的来源是奥灰水。通过对其他各组离子的计算结果, 同理可以判断其突水水源。结果显示, 该矿井突水来源于煤系水的有0组, 来源于太灰水的有2组, 来源于四含的有4组, 来源于奥灰的有29组, 且各组平均值也显示为奥灰水。据此, 可以认为突水水源为奥灰水。该模型原理简单, 受到水样和指标数量限制较小, 且具有较好的识别效果, 对于皖北地区童亭煤矿的水源识别率可以达到82.86%, 可以为矿区煤矿水害防治提供参考。

关键词

多元矩阵模型, 矿井突水, 水源识别, 童亭煤矿

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着国家能源结构的调整, 煤炭资源在我国能源结构中的消费比重将逐步降低。但在一定时期内, 煤炭仍是我国主要的能源之一, 所以煤矿安全生产工作的任务依然艰巨。水害作为煤矿五大灾害之一, 严重威胁煤矿安全生产, 当矿井发生突水时, 会淹没井巷、损坏生产设备、导致人员伤亡、造成巨大的经济损失等。对于煤矿水害事故的预防关键就是准确地识别矿井突水水源[1]。国内外诸多学者从水文地球化学的角度对矿井突水水源的识别进行了大量研究, 而常规水化学方法由于测试简单、速度快、成本低, 加之煤矿多年的开采, 积累了大量的常规水化学数据, 因此, 常规水化学方法在判别煤矿突水水源中得到了广泛的应用[2] [3] [4] [5] [6]。多元矩阵模型由于原理简单, 受样品数量以及每个样品的指标种

类限制较小, 且模型的可靠度较高, 在生物学、生态学、系统工程、动力工程、爆炸安全理论与技术等领域都已经得到了广泛使用[7] [8] [9]。然而利用多元矩阵模型对矿井突水水源识别的报道较少[10] [11]。本文在上述研究的基础上, 以皖北矿区童亭煤矿常规水化学数据为研究对象, 利用多元矩阵方法建立矿井突水水源识别模型, 以期为煤矿防治水工作提供参考。

2. 矿井水文地质特征

童亭煤矿位于淮北煤田临涣矿区, 位于童亭背斜西翼北端, 童亭背斜倾伏部位, 为一轴向 NW 不对称宽缓向斜构造。北以次赵口断层为界, 南以孟集断层为界, 东部以煤层隐伏露头为界[12]。含煤地层为石炭系和二叠系, 上覆为新生界松散层, 下伏太原组灰岩和奥陶纪灰岩。根据地层特性、地下水的埋藏条件、区域富水条件等, 可将矿区分为 4 个新生界松散层含水层(又可细分为第一、第二、第三、第四 4 个含水层)、煤系地层砂岩裂隙含水层(简称“煤系水”)、太原组灰岩岩溶裂隙含水层(简称“太灰水”)和奥陶纪灰岩含水层(简称“奥灰水”)。由于第一、二、三含水层底板均有稳定的隔水层, 使得上部含水层与第四含水层(简称“四含水”)之间不存在水力联系; 而四含水直接与煤系地层接触, 是上部煤系地层开采的主要补给水源; 下伏太原组灰岩和奥陶纪灰岩岩溶发育, 其本身与煤层开采不存在直接的水力联系, 倘若遇到岩溶陷落柱或断层切割形成导水通道时, 灰岩含水层地下水便可涌入矿井。因此, 该矿井主要突水水源为四含水、煤系水、太灰水、奥灰水。

3. 研究方法

多元矩阵模型的原理是利用多个未知数建立矩阵方程, 再根据实测数据和矩阵的运算方法来求出未知数, 其实质近似多元一次方程组, 它是矩阵方程在实际工程当中的一种特殊应用[11]。根据矿井突水的一般规律, 其水源一般由地下岩层水构成。因此, 矿井水源识别的多元矩阵模型以各含水层对矿井突水的影响程度为未知研究对象, 根据实测数据来判识待测水样的来源。多元矩阵模型在矿井水源识别中的数学矩阵可以表示如下:

$$CF = P, \quad C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n-1,1} & C_{n-1,2} & \cdots & C_{n-1,n} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_{n-1} \\ F_n \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_{n-1} \\ P_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中, 矩阵 C 为各含水层对应的水化学指标矩阵, P 矩阵为待测水样的水化学指标矩阵, F 矩阵为各含水层对矿井突水的影响程度矩阵。 C_{ij} ($i=1,2,\dots,n-1; j=1,2,\dots,n$) 为各含水层中不同水化学指标的实测值; P_i 为待测突水水样各水化学指标的实测值, F_i ($i=1,2,\dots,n$) 为各含水层对矿井突水的影响程度(即待测突水水样属于各含水层的可能性大小), F_i 最大者代表的含水层即可能就是矿井突水的主要来源。

4. 模型的构建及应用

模型构建过程当中, 选取合适的水化学指标对于精确识别矿井突水水源尤为重要。矿井各含水层中有多种水化学成分, 考虑到各成分的重要性、测试难度、数据有效性及便于测试等因素, 本文选取 $\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{TDS}$ 共 7 种常规水化学指标对矿井突水水源进行识别。童亭矿常规水化学指标见表 1, 样品 TT1-5 数据来源于文献[13], 依据 TT1-4 建立多元矩阵模型, 为检验模型可靠度, 样品 TT5 数据用作训练样本。

Table 1. Routine hydrochemical indexes of Tongting mine (mg/L)**表 1.** 童亭矿常规水化学指标(mg/L)

编号	Na ⁺ + K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TDS	实际层位
TT1	175.64	72.36	80.04	124.50	540.00	107.04	1046.10	四含
TT 2	752.93	11.94	24.80	104.10	1220.00	368.46	2315.90	煤系
TT 3	431.09	150.90	255.40	165.40	168.40	256.46	2815.00	太灰
TT 4	154.34	11.34	2.86	170.00	30.00	26.66	410.90	奥灰
TT 5	154.75	8.51	6.81	171.90	29.78	107.70	425.00	奥灰

如前所述, 童亭矿突水来源主要是四含、煤系、太灰、奥灰, 即 $n = 4$, 多元矩阵模型可以表示如下:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由多元矩阵模型的原理可以清楚, 该模型为四元模型, 选择合适的指标作为中间变量对于提高模型的准确率非常关键。孙希奎认为受井田开采区域限制, 矿井涌水的矿化度变化不大, 选取了 TDS 以及与其呈显著线性关系的离子指标作为中间变量来求解[11]。考虑到各矿区地下水含水层系统复杂多变, 若按照这种方法, 可能造成一定的误判。通过计算不难发现, 童亭矿 TDS 含量的方差最大, 即数据离散程度非常高, 因此对于该矿来说, 不能直接将其作为中间变量。同时, 为提高模型的可靠性, 此处根据矩阵模型的原理, 每组选择 3 种常规水化学指标, 每个指标由 Na⁺ + K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、TDS 这 7 组数据, 这样就可以组成 35 组计算数据。以 Na⁺ + K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺为例, 则可以得到如下矩阵:

$$\begin{bmatrix} \rho_1(\text{Na}^+ + \text{K}^+) & \rho_2(\text{Na}^+ + \text{K}^+) & \rho_3(\text{Na}^+ + \text{K}^+) & \rho_4(\text{Na}^+ + \text{K}^+) \\ \rho_1(\text{Mg}^{2+}) & \rho_2(\text{Mg}^{2+}) & \rho_3(\text{Mg}^{2+}) & \rho_4(\text{Mg}^{2+}) \\ \rho_1(\text{Ca}^{2+}) & \rho_2(\text{Na}^+ + \text{K}^+) & \rho_3(\text{Na}^+ + \text{K}^+) & \rho_4(\text{Na}^+ + \text{K}^+) \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 、 ρ_4 分别表示 Na⁺ + K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺ 在四含水、煤系水、太灰水、奥灰水中的含量; P_1 、 P_2 、 P_3 为待测水样 Na⁺ + K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺ 的含量; F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 为待测突水水样属于各含水层的可能性大小。至此, 取 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 中最大值者所代表的含水层对矿井突水的影响程度最大, 也即突水水源来源该含水层。以此类推, 可以选取其他指标进行组合分别求解(表 2), 综合所有判别结果, 从而完成对矿井突水水源的识别。

据表 2, 可以利用各离子组合来判定待测突水水样属于各含水层的可能性大小。同样以 Na⁺ + K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺ 为例, 突水水样属于四含水的可能性为 -0.2978、属于煤系的可能性为 -0.0396、属于太灰的可能性为 0.1101、属于奥灰水的可能性为 0.8486, 因此, 该离子组合显示突水水样的来源是奥灰水。通过统计各组离子的计算结果可以发现, TT5 号训练样品来源为煤系水的有 0 组, 来源为太灰水的有 2 组, 来源于四含的有 4 组, 来源于奥灰的有 29 组, 且各组平均值也显示为奥灰水。据此, 可以认为该样品来源为奥灰水。

Table 2. Influence of aquifer on water bursting water sample and water source discrimination in Tongting coal mine
表 2. 童亭矿各含水层对突水水样的影响程度及水源判别

序号	离子组合	P1	P2	P3	P4	判别结果
1	Na ⁺ + K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺	-0.2978	-0.0396	0.1101	1.2273	奥灰水
2	Na ⁺ + K ⁺ , Mg ²⁺ , Cl ⁻	-0.0453	0.0025	-0.0005	1.0433	奥灰水
3	Na ⁺ + K ⁺ , Mg ²⁺ , SO ₄ ²⁻	-0.0146	0.0077	-0.0140	1.0208	奥灰水
4	Na ⁺ + K ⁺ , Mg ²⁺ , HCO ₃ ⁻	2.2364	0.3834	-0.9998	-0.6199	四含水
5	Na ⁺ + K ⁺ , Mg ²⁺ , TDS	-0.4389	-0.0630	0.1717	1.3301	奥灰水
6	Na ⁺ + K ⁺ , Ca ²⁺ , Cl ⁻	-0.0297	-0.0101	0.0256	1.0143	奥灰水
7	Na ⁺ + K ⁺ , Ca ²⁺ , SO ₄ ²⁻	0.0094	-0.0057	0.0132	0.9831	奥灰水
8	Na ⁺ + K ⁺ , Ca ²⁺ , HCO ₃ ⁻	0.0378	-0.0027	0.0043	0.9606	奥灰水
9	Na ⁺ + K ⁺ , Ca ²⁺ , TDS	-0.1365	-0.0219	0.0595	1.0993	奥灰水
10	Na ⁺ + K ⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	-0.1365	0.0760	-0.1526	1.2129	奥灰水
11	Na ⁺ + K ⁺ , Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻	0.4012	-0.3578	0.7445	0.2121	太灰水
12	Na ⁺ + K ⁺ , Cl ⁻ , TDS	-0.0326	-0.0078	0.0208	1.0197	奥灰水
13	Na ⁺ + K ⁺ , SO ₄ ²⁻ , HCO ₃ ⁻	0.5385	-0.3023	0.6141	0.1498	太灰水
14	Na ⁺ + K ⁺ , SO ₄ ²⁻ , TDS	0.0038	-0.0026	0.0068	0.9916	奥灰水
15	Na ⁺ + K ⁺ , HCO ₃ ⁻ , TDS	1.9333	0.2609	-0.7119	-0.4826	四含水
16	Mg ²⁺ , Ca ²⁺ , Cl ⁻	-0.2051	0.1079	0.0690	1.0281	奥灰水
17	Mg ²⁺ , Ca ²⁺ , SO ₄ ²⁻	-0.2195	0.0851	0.0753	1.0590	奥灰水
18	Mg ²⁺ , Ca ²⁺ , HCO ₃ ⁻	-0.1195	0.2444	0.0309	0.8442	奥灰水
19	Mg ²⁺ , Ca ²⁺ , TDS	-0.2924	-0.0311	0.1075	1.2155	奥灰水
20	Mg ²⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	-0.1049	0.0417	0.0254	1.0376	奥灰水
21	Mg ²⁺ , Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻	-0.3878	0.2286	0.1484	1.0109	奥灰水
22	Mg ²⁺ , Cl ⁻ , TDS	-0.0689	0.0181	0.0099	1.0410	奥灰水
23	Mg ²⁺ , SO ₄ ²⁻ , HCO ₃ ⁻	-0.5706	0.2178	0.2283	1.1245	奥灰水
24	Mg ²⁺ , SO ₄ ²⁻ , TDS	-0.0517	0.0218	0.0024	1.0279	奥灰水
25	Mg ²⁺ , HCO ₃ ⁻ , TDS	1.3594	0.3316	-0.6161	-0.0749	四含水
26	Ca ²⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	-0.1016	0.0383	0.0434	1.0200	奥灰水
27	Ca ²⁺ , Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻	-0.4218	0.2539	0.1225	1.0456	奥灰水
28	Ca ²⁺ , Cl ⁻ , TDS	-0.0223	-0.0153	0.0238	1.0136	奥灰水
29	Ca ²⁺ , SO ₄ ²⁻ , HCO ₃ ⁻	-0.6639	0.2616	0.1959	1.2065	奥灰水
30	Ca ²⁺ , SO ₄ ²⁻ , TDS	0.0259	-0.0122	0.0089	0.9775	奥灰水
31	Ca ²⁺ , HCO ₃ ⁻ , TDS	2.8209	0.1516	-0.8598	-1.1128	四含水
32	Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , HCO ₃ ⁻	-0.0358	-0.0330	0.4143	0.6546	奥灰水
33	Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , TDS	-0.1096	0.0474	-0.0026	1.0652	奥灰水
34	Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , TDS	-0.9011	0.6100	-0.2396	1.5305	奥灰水
35	SO ₄ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ , TDS	-1.5867	0.6941	-0.1251	2.0172	奥灰水
36	1~35 平均值	-0.0445	0.1376	-0.0684	0.8486	奥灰水

为验证多元矩阵模型结论的正确性, 对童亭矿四个含水层的常规水化学成分进行 R 型聚类分析(图 1)。由图 1 可知, 聚类效果很理想, 四个含水层划分清晰, TT4 与 TT5 被聚为一类, 同为奥灰水。据此, 可以认为该突水水样主要来源于奥灰水, 判别率可以达到 82.86%。

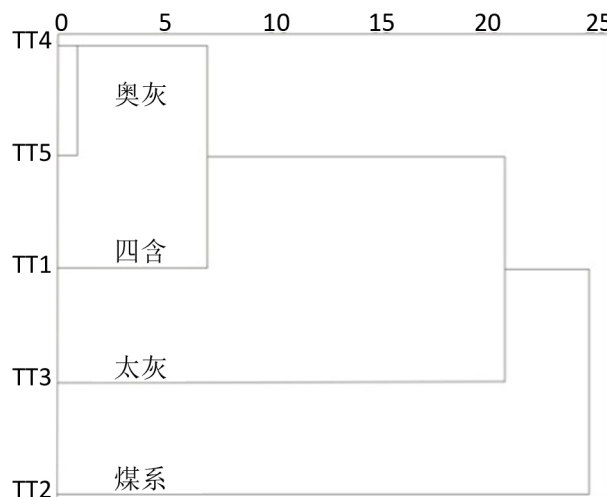


Figure 1. R cluster analysis of Tongting mine

图 1. 童亭矿 R 型聚类分析

5. 结论

本文以皖北矿区童亭煤矿四个含水层的 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、TDS 共 7 种常规水化学指标为基础, 构建了矿井突水水源识别的多元矩阵模型, 利用各离子组合来判定待测突水水样属于各含水层的可能性大小。该模型原理简单, 受到水样和指标数量限制较小, 且具有较好的识别效果, 对于皖北地区童亭煤矿的水源识别率可以达到 82.86%, 可以为煤矿水害防治工作提供参考。

基金项目

国家自然科学基金(51474008)、2019 年度安徽省高校优秀青年人才支持计划项目(gxyq2019151)、皖江工学院科研项目(WG18026)。

参考文献

- [1] 温廷新, 张波, 邵良杉. 矿井突水水源识别预测研究——以新庄孜矿为例[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(2): 100-106.
- [2] Sun, L.H. and Gui, H.R. (2012) Establishment of Water Source Discrimination Model in Coal Mine by Using Hydro-geochemistry and Statistical Analysis: A Case Study from Renlou Coal Mine in Northern Anhui Province, China. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, **18**, 385-389. <https://doi.org/10.1007/s12404-012-0409-0>
- [3] Sun, L., Chen, S. and Gui, H. (2016) Source Identification of Inrush Water Based on Groundwater Hydrochemistry and Statistical Analysis. *Water Practice & Technology*, **11**, 448-458. <https://doi.org/10.2166/wpt.2016.049>
- [4] 桂和荣. 矿区地下水水文地球化学演化与识别[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [5] 陈松. 基于三维地质结构模型的宿南矿区地下水演化与识别[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- [6] 张俊, 李余生, 林曼利, 等. 淮南张集矿水文地球化学特征及水源识别[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(6): 32-37.
- [7] 李法胜, 于政中. 矩阵模型在最优树种组成研究中的应用[J]. 北京林业大学学报, 1992, 14(2): 23-30.
- [8] 蔡笃程, 程立生. 二斑叶螨实验种群的矩阵模型及其应用[J]. 热带农业科学, 1997(3): 28-32.

-
- [9] 胡华进, 徐治皋. 电站热力系统循环组合法及其矩阵模型[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(1): 12-15.
- [10] 刘剑民, 王继仁, 何治良. 基于多元混合模型的煤矿矿井突水水源分析[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(12): 95-100.
- [11] 孙希奎, 施现院, 梁丽鹏, 等. 矿井涌水水源分析的多元矩阵模型及应用[J]. 煤炭技术, 2016, 35(12): 167-169.
- [12] 谢中华, 何健. 童亭井田 10 煤层底板灰岩水的水文地质条件分析[J]. 淮南职业技术学院学报, 2002, 2(3): 58-61.
- [13] 刘鑫. 临涣矿区主要突水含水层的水文地球化学研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ag@hanspub.org