

文章编号:1001-4810(2010)02-0205-07

应用化学示踪技术探查深部岩溶发育特征研究

虎维岳¹, 郑刚¹, 闫兰英²

(1. 煤炭科学研究总院西安研究院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学化工学院, 陕西 西安 710054)

摘要:基于岩溶发育的基本特征与化学示踪剂在岩溶含水介质中的运移扩散规律,提出了几种常见的示踪剂浓度分布曲线类型,并研究了它们与岩溶含水介质结构之间的对应关系。在此基础上,为了检验化学示踪技术探查岩溶发育特征的有效性和实用性,以山东丘集煤矿为例,通过地面钻孔投放示踪剂,利用井下放水孔作为示踪接收点,研究了煤层下伏奥陶系灰岩含水层隐伏岩溶的发育特征与分布规律。试验结果表明,煤矿区深部奥陶系灰岩强岩溶发育带呈现出由西北分别向东和向东南延伸的“人字”型分布规律,矿区其它区域则以相对均匀的裂隙溶隙弱岩溶发育特征为主。通过与已有水文资料对比,矿区岩溶的发育与分布与奥陶灰岩含水层钻孔涌水量大小及其分布相吻合,从而验证了该技术的实用性和有效性。

关键词:化学示踪;浓度变化曲线;深部岩溶;分布特征

中图分类号:P641.73 **文献标识码:**A

0 引言

深部岩溶水是我国华北主要煤层开采过程中威胁矿井安全的水害含水层^[1,2],建国以来,多次灾难性的矿井突水灾害都源自深部岩溶水(特别是与奥陶系含水层中发育的强岩溶水径流带和地下岩溶暗河有密切关系),如1984年发生于开滦矿务局范各庄矿突水淹井灾害、2005年发生于邢台矿务局东庞矿突水淹井灾害、2010年发生于乌海能源骆驼山矿突水淹井灾害都与深部厚层岩溶含水层中发育的强地下水径流带有着直接的关系,查明和探知矿区深部隐伏岩溶含水层的富水性规律和强地下水径流带分布特征已成为有效防治矿井岩溶水害的重要任务。长期以来,针对煤矿区深部岩溶发育特征及其岩溶水循环运动特征,相关学者作了大量的研究工作,王梦玉,李金凯,项远法等教授研究了岩溶陷落柱发育条件、岩溶矿井水害形成机理等^[3~6],B. A. Luke、Ford D. C. 等

研究了岩溶发育特征的探测技术方法等^[7~9]。大量研究和工程实践表明,对于深部岩溶水害防治的关键问题是正确探测和确定岩溶发育的形态特征及其岩溶充水空洞的分布规律,而水文地球化学方法是研究探测深部岩溶的主要途径。应用化学技术进行含水层水文地质特征探查,其内容主要包括天然状态下地下水中化学组分的分析研究、地下水稳定同位素分析研究和人工激发化学离子的监测与分析研究(示踪试验研究)^[10]。本文通过一工程实例,分析研究了在人工放水试验激发流场条件下,利用化学示踪技术有效探测深部岩溶含水层地下水径流带的基本原理和技术方法,取得了满意效果。

1 化学示踪法探查岩溶发育特征的基本原理

化学示踪试验技术是指采用稳定的易溶性的盐类离子作为示踪剂,通过地面钻孔等将溶解后的示踪

基金项目:国家973计划项目(2006CB202205)资助

第一作者简介:虎维岳(1963-),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事水文地质工程地质及矿山安全技术的科学研究、教学和技术咨询工作。E-mail: xiantiger@sohu.com。

收稿日期:2009-12-11

剂投放至目标含水层,溶解于水中的示踪剂在放水激发流场的作用下随地下水进行运移和浓度扩散,在含水层不同位置的井下水孔等排出的地下水中定时取样接收,在实验室内测定接收水样中示踪剂的离子浓度值,并根据示踪剂浓度大小来监测和分析研究放水条件下地下水的运动规律,进而反分析岩溶含水介质中岩溶发育特征。

水化学示踪试验方法是示踪剂随地下水的运移到达接收点并在接收点取样检测,与地下水的压力传导的联通条件不同,地下水中的示踪剂需要一定的水动力条件,才能够运移到接收点并验证两点之间是否存在水力联系通道及其通道的基本特征^[11],因此在放水试验条件下往往可在较短的时间段内获得较好的结果。

在进行化学示踪试验过程中,为了获得反映含水层中岩溶发育特征的重要信息,应重点关注接收到示踪剂的如下主要信息:

(1)示踪剂到达时间。主要指从试剂投放到初次接收到试剂所经过的时间长短,它不仅反映了化学试剂在含水层的运行距离,也反映了该距离段内地下水

流动的速度,从而反映出含水介质中岩溶裂隙的大小和分布轨迹。

(2)示踪剂到达后的峰值强度。主要指接收到的化学示踪剂峰值与背景值之差,它主要反映了示踪剂在含水层中的运移形式,即可能是集中管道式的快速流动,也可能是沿裂隙网络的缓慢渗流和扩散流动,进而反映出含水介质中岩溶空隙的结构特征。

(3)示踪剂到达后的峰值分布类型。一般情况下,由于含水介质结构类型的不同,化学试剂随地下水运动的轨迹和路径不同,流经不同路径的化学试剂到达接收点的时间也不同,常见的试剂峰值类型有单峰型、多峰型、平台型、尖锥型、平缓型和陡跳型。不同的峰值类型会反映出不同的岩溶结构形态。

(4)试剂到达后持续时间。是指接收到试剂高于背景值的持续时间,持续时间越短说明试剂流经接收的速度越快,试剂在含水层中扩散范围越小。反之,说明试剂在含水层中流经的速度较慢,且在含水层中具有一定的扩散范围。常见的接收到的试剂分布特征与含水层中岩溶裂隙发育特征具有图1所示对应关系。

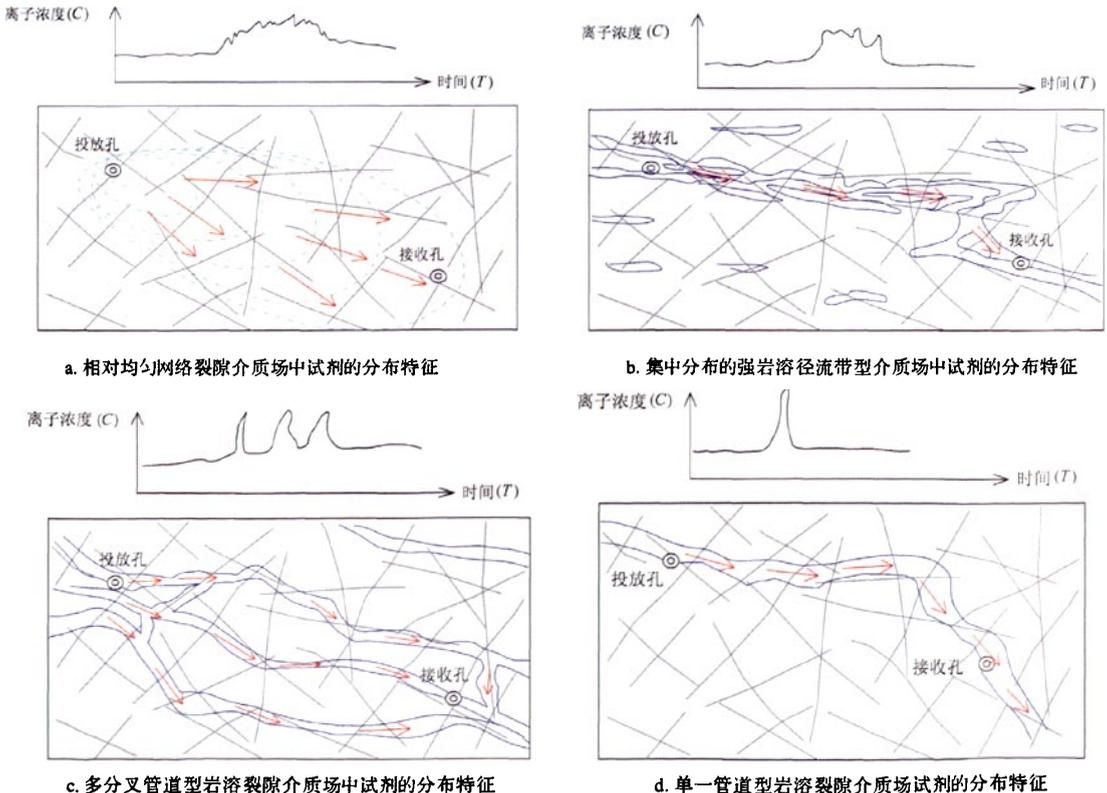


图1 示踪剂浓度变化与含水层岩溶发育特征关系示意图

Fig. 1 Sketch map showing the relationship between tracer concentration and the developing features of the aquifer

对于相对均匀,岩溶发育强度较差的含水层而言,地下水主要以缓慢的渗流运移为主,沿着水流方向,投放的示踪剂以渗流运移和扩散运移两种方式为主,试剂在流场介质中扩散范围较大,接收到的示踪剂峰值强度比较弱,峰值持续时间相对比较长,峰值的出现和消失具有缓慢渐变的特征,而不是陡起陡落的突变型(如图1中a所示)。

对于集中分布的强岩溶径流带型介质场,往往是多个岩溶管道或岩溶空洞组合而成,地下水流运动速度相对较快,示踪剂主要在强径流带中运移,横向扩散范围比较小,在运移过程中受到地下水的稀释程度相对较弱,接收到的示踪剂峰值强度比较强,峰值持续时间相对比较短,峰值的出现和消失较快,峰值具有平台状分布特征(如图1中b所示)。

对于多分叉管道型岩溶裂隙介质场,往往是多个岩溶管道同时存在,不同岩溶管道之间又具有相对独立性,地下水分别沿不同岩溶管道流动且速度比较快,示踪剂主要沿不同管道分叉运移,横向扩散范围小,受到地下水的稀释程度也比较弱,接收到的示踪剂峰值因不同管道到达时间的不同而出现多峰现象,每个峰值的强度比较强且持续时间较短,峰值具有尖峰状分布特征(如图1中c所示)。

对于单一管道型岩溶裂隙介质场,地下水流主要沿岩溶管道流动,水流运动速度很快,示踪剂几乎没有出现横向扩散的可能,接收到的峰值强度高,持续时间长,出现和消失快,具有陡起陡落的尖峰状分布特征(如图1中d所示)。

2 化学示踪技术探查岩溶发育特征的工程试验研究

为了检验化学示踪技术探查岩溶发育特征的有效性和实用性,作者结合矿井井下水试验工程项目,在山东丘集矿区进行了工程实验研究。丘集矿区为全隐蔽式煤田,主要开采煤层底板之下发育厚层奥陶系灰岩含水层,灰岩含水层在矿区埋藏深度达600 m以上,含水层在远离矿区数十公里以外的隐伏露头区接收第四系潜水的补给,矿区位于灰岩含水层中深部的径流区段。试验中选择在矿区西南部 WO1 孔和东南部 WO2 孔(见后文图5)两个地面奥灰钻孔

投放不同的示踪剂,在 WO1 孔中投放了碘示踪剂,在 WO2 孔中投放了铍示踪剂,目的是对不同方向奥灰层位地下岩溶发育特征进行示踪研究。示踪剂接收水样分别从矿井井下 3、5、15、20、24、26、28、31、37 放水孔中采集。示踪剂投放孔与接收孔位置分布及其孔间距离如后文中的图 5 所示。

碘在自然界中的含量是非常少的,在一般石灰岩地层的地下水中,含量也很稀少。鉴于碘离子在自然界中本底背景浓度很低,因此,它通常是大范围的人工示踪试验的首选示踪剂。碘离子是一种无毒性,分析简单,且比较灵敏的示踪离子,分析灵敏度达 $0.02 \text{ mg/L}^{[12]}$,只要人为投放少量的剂量,就会得到很大的检出峰值,所以投放示踪剂的试剂碘化钠(或碘化钾)用量很少,在测量时也可以很清楚的判断出检测结果。

地下水中的铍离子是水体自净的中间产物,未受污染的地下水中铍离子一般含量很少,特别对于深部岩溶含水层而言,铍离子的背景值很低。与碘离子相比,铍离子示踪剂的灵敏度相对要低,但考虑到铍离子易于检测,所以也被用来作示踪剂。和碘离子示踪剂不同,铍离子因地下水含量中的本底浓度相对较高,稳定性稍差,示踪试剂的投放量一般较大。

鉴于示踪试验是人为投放试剂,难免会对地下水产生污染,示踪试验中既要求示踪剂在试验中有良好的灵敏度即检出率,又要求投放量适中,避免造成地下水的大面积污染,因此所选择的试剂种类和数量必须对地下水的污染程度最低。

丘集矿区奥陶系灰岩水矿化度较高,多介于 $2\ 852.58 \sim 2\ 972.81 \text{ mg/L}$,其水质类型为 $\text{SO}_4 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 水。随含水层埋藏由浅变深,灰岩水矿化度由低变高,水质类型也由 $\text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Mg} \rightarrow \text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Ca} (\text{Mg} \cdot \text{Na}) \rightarrow \text{SO}_4 (\text{HCO}_3) - \text{Ca} \cdot \text{Na} (\text{Mg})$,反映了地下水径流条件的差异。根据示踪剂的选择原则和矿井的水质背景资料,本次试验采用 I^- 和 NH_4^+ 作为示踪离子,选用碘化钠和氯化铍为示踪剂,投放量分别为 20 kg 和 400 kg,以保证在本次试验中的检测灵敏度,即所投放的示踪剂在被地下水充分稀释的情况下,仍有高于地下水本底值数倍的检出浓度。各接收钻孔中接收和检测到的不同示踪剂浓度、到达时间、过程及其分布特征如图2、图3和图4所示。

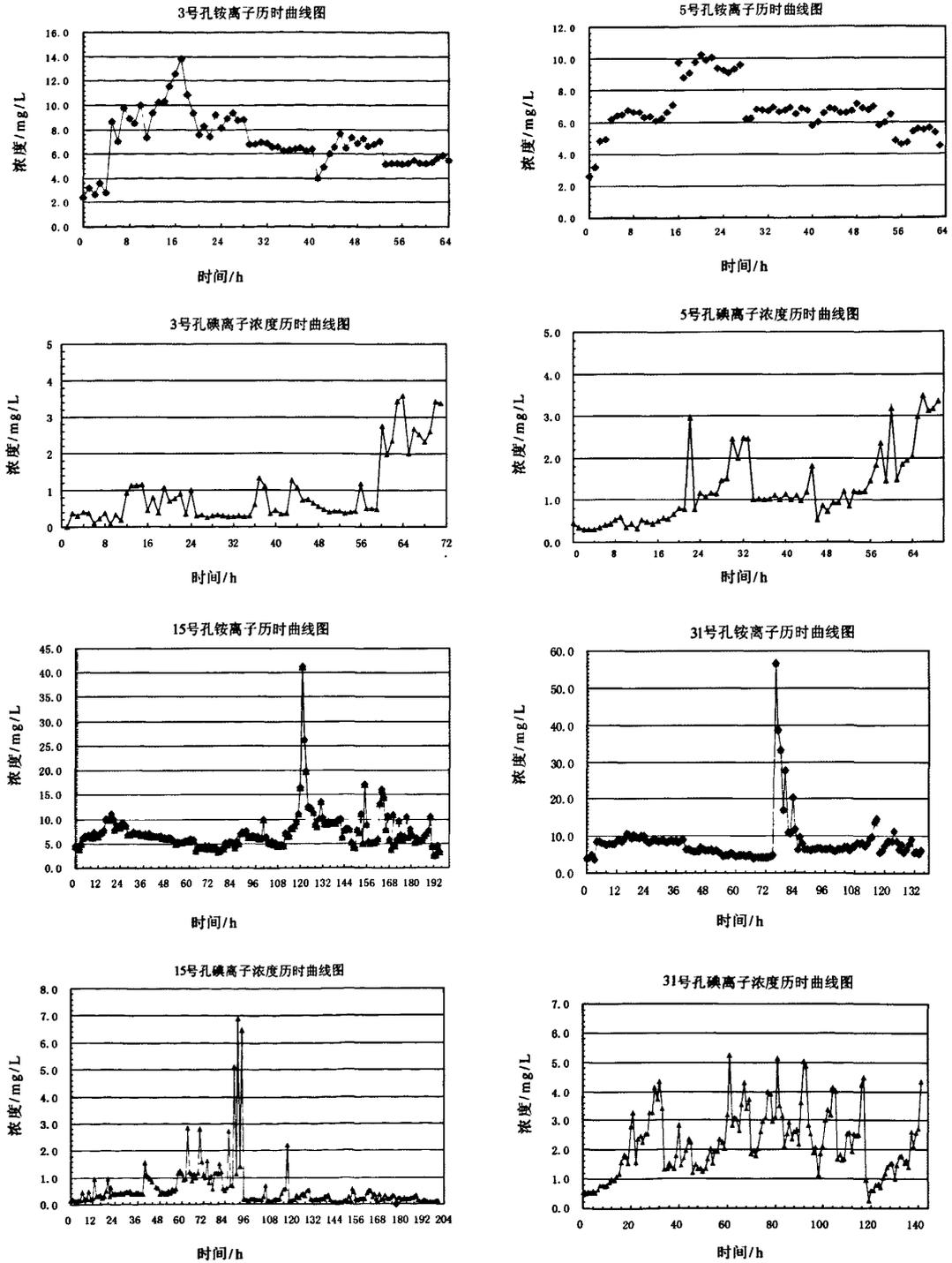


图2 3、5、15和31号钻孔示踪剂浓度变化曲线

Fig.2 Curves of tracer concentration with time in borehole 3, 5, 15 and 31

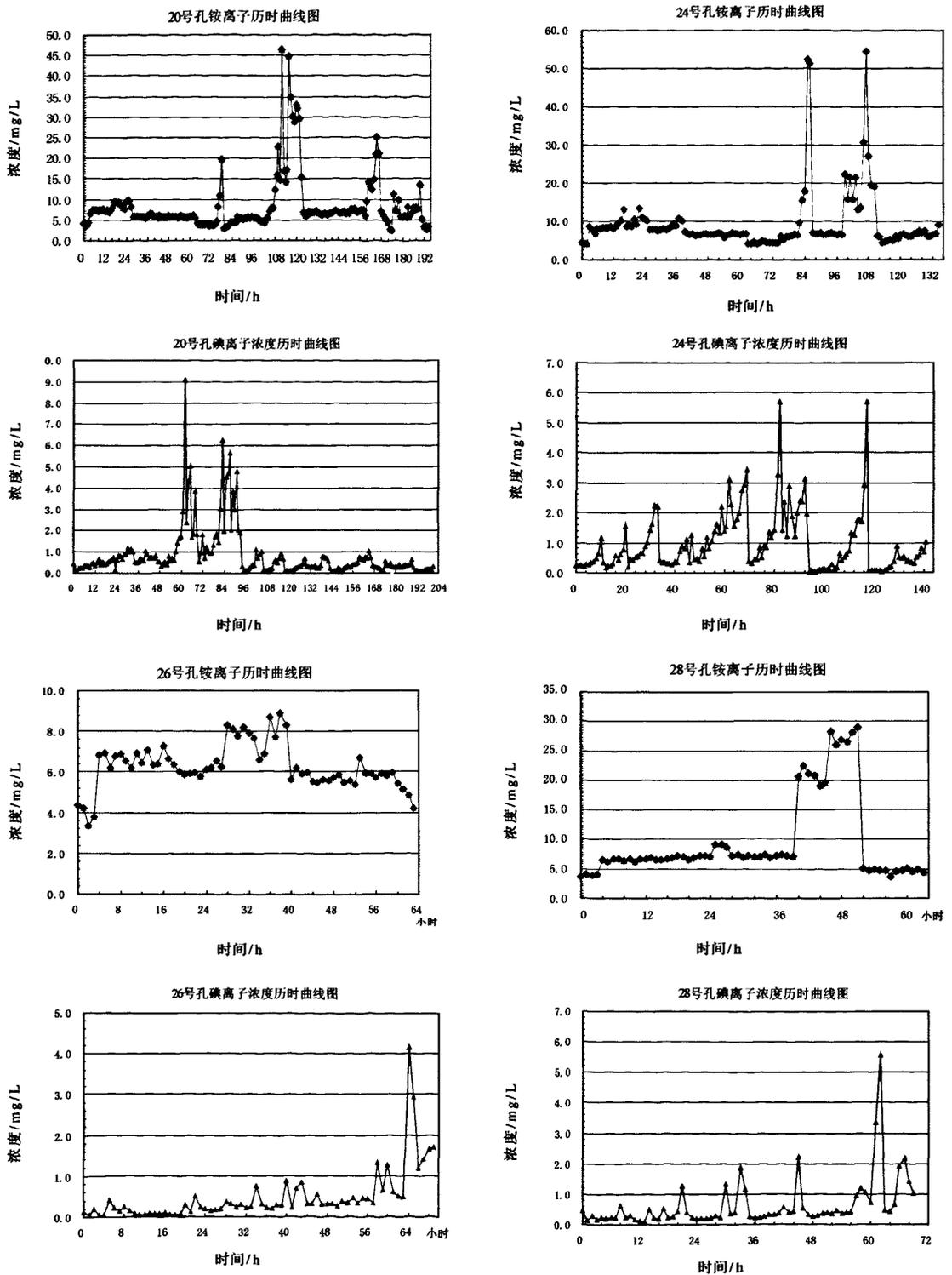


图3 20、24、26和28号钻孔示踪剂浓度变化曲线

Fig. 3 Curves of tracer concentration with time in borehole 20,24,26 and 28

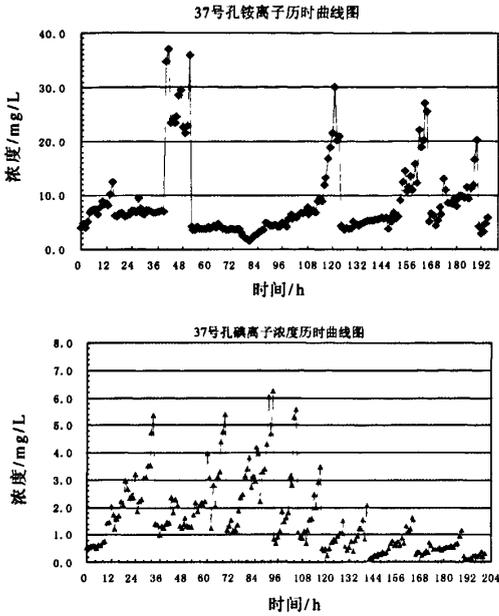


图4 37号钻孔示踪剂浓度变化曲线
Fig. 4 Curves of tracer concentration with time in borehole 37

依据上述示踪试验资料,通过反分析,接收到的铵离子在钻孔15、31中呈尖峰状分布,在37、20、和24号孔中呈多峰状分布,结合试剂到达时间早晚,可得出沿WO2—24—15—31孔一线为强渗透通道。接收到的碘离子在钻孔26、15中呈尖峰状分布,在20、24和31号孔中呈多峰状分布,结合试剂到达时间早晚,可得出沿WO1—26—20—24—15—31孔一线为强渗透通道。31号孔接收到示踪剂较快,而3、5号孔对示踪剂反映迟钝。通过综合分析,得到研究区含水层岩溶裂隙发育特征及其主要岩溶分布规律如图5所示。

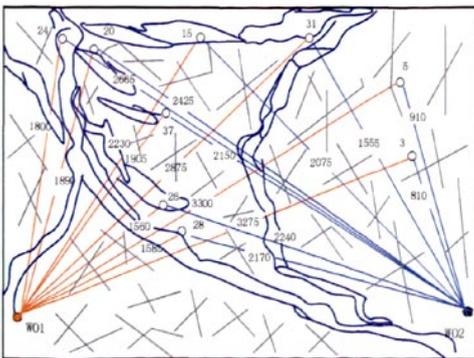


图5 示踪分析推测的强岩溶带平面分布图
Fig. 5 Plane of strong-developed karst distribution inferred with tracing

由图5可见,研究区灰岩岩溶发育的不均匀性明显,主要岩溶管道沿28、26、24、15、和31号孔一线呈弧状分布,在26、28、37、24和20号钻孔分布区域为强岩溶化区,其他区域岩溶发育强度较弱,特别是5、3号钻孔区域基本以裂隙为主,强岩溶管道基本没有。为了检验这一分析的正确性,统计分析了本区分布的主要钻孔的出水量规律^[1,3],钻孔出水量等值线分布如图6所示。由图可见,水量丰富的钻孔正好分布于强岩溶条带区,证实了利用化学示踪方法获得的岩溶发育特征及其分布规律的有效性。

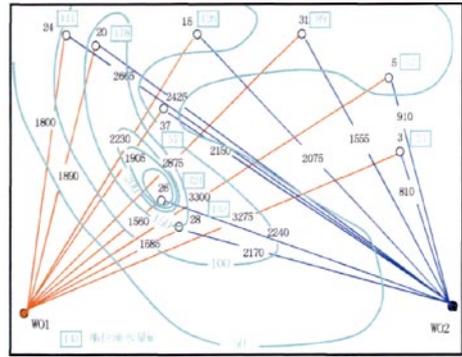


图6 钻孔出水量等值线分布图
Fig. 6 Isogram of water yield from drilling

3 结论

隐伏岩溶特别是深埋藏岩溶的发育特征及其空间分布,是控制岩溶地下水富水性及其水循环径流特征的重要因素,对深埋岩溶发育特征的探测很难通过有限钻探资料实现,长期以来,对隐伏或深埋藏岩溶探测度依赖于地球物理勘探技术,而对大理深岩溶,物探技术因浅部覆盖层屏蔽或深度信号衰减的因素的影响,探测效果和探测精度都会受到极大限制,而利用化学示踪技术对深埋藏岩溶探测可取得较好的效果。

利用化学示踪技术探测深埋藏岩溶需要注意的问题,一是务必选择本底浓度低、检出率高且无毒害性或污染作用小的材料作为示踪剂;二是注意收集示踪剂初现时间、峰值强度大小、峰值形态类型及示踪剂持续时间的长短等关键信息,以根据它们综合判断深部岩溶形态特征。比较而言,强度弱、持续时间长、出现和消失缓慢的峰值,含水介质的岩溶通常比较均匀,发育程度较差;而强度高、持续时间短、出现和消失较快,并具有平台状分布的峰值,岩溶非均一性明显,含水介质多属集中分布的强岩溶径流带;如果示

踪剂浓度出现多峰状且峰值强度较大、持续时间较短,峰形尖锐,含水介质岩溶多属分叉管道型裂隙;如果示踪剂峰值强度强,峰值持续时间短,峰值的出现和消失快,峰形陡起陡落,岩溶含水介质则多为单一管道型。

参考文献

- [1] 袁道先主编. 岩溶学词典[M]. 北京:地质出版社,1988:12-35.
- [2] 安润莲,宁永香. 岩溶研究现状及发展趋势[J]. 煤炭技术,2002, 5:55-57.
- [3] 《中国北方岩溶地下水资源及大水矿区岩溶水的预测、利用与管理的研究》项目综合组. 中国北方岩溶含水介质研究[J]. 中国岩溶,1990,9(4):318-329.
- [4] 王梦玉,章至洁. 北方煤矿床充水与岩溶水系统[J]. 煤炭学报, 1991,16(4):1-13.
- [5] 李金凯,周万芳. 华北型煤矿床陷落柱作为导水通道突水的水文地质环境及预测[J]. 中国岩溶,1989,8(3):192-199.
- [6] 项远法. 陷落柱突水力学模型[J]. 煤田地质与勘探,1993,21(5):36-39.
- [7] B. A. Luke, D. S. Chase. Detecting caves using seismic surface waves: A Feasibility study, The engineering geology and hydrogeology of karst terranes [M]. Netherlands, A. A. Balkema Publishers,1997:419-425.
- [8] J. N. Jennings. Karst Geomorphology [M]. Basil Blackwell, 1985:322-326.
- [9] Ford D. C., Ewers, R. O.. The development of limestone caves in the dimensions of length and depth[J]. Can. J. Earth Sci., 1978,15:1783-1798.
- [10] P. E. Lamoreaux, Associates, INC. Engineering geology and hydrogeology of karst terranes [M]. Netherlands, A. A. Balkema Publishers,1997:401-409.
- [11] 朱学愚,钱孝星. 地下水水文学[M]. 中国环境科学出版社, 2005:55-102.
- [12] 郑刚. 丘集矿水化学示踪试验报告[R]. 2006.
- [13] 郑刚. 丘集矿水文地质补充勘探研究报告[R]. 2006.

Study on detecting deep karst developing features by chemical tracing

HU Wei-yue¹, ZHENG Gang¹, YAN Lan-ying²

(1. Xi'an Branch, CCRI, Xi'an, Shanxi 710054, China;

2. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shanxi 710054, China)

Abstract: Common received tracer concentration curve types are put forth and the corresponding relation between the received tracer distributing form and the karst features is studied in the paper according to karst developing features and the chemical tracer removing and diffusing regulation in karst aquifer. On this basis, in order to test the validity and practicability of chemical tracing in detecting karst developing features, the developing and the distributing features of the hidden karst in Ordovician limestone aquifer under the coal seam of Qiuji Mine, Shandong are analysed, by putting the chemical tracer in surface drilling and receiving them from dewatering orifice under the mine. The results show, the strong-developed Ordovician deep karst which spreads out along the direction of east and southeast from the northwest Qiuji Mine shows herringbone distribution patterns. The weak-developed and evenly-distributed fissure karst takes dominant place in other area of the Qiuji Mine. It is found that karst developing distribution in the mine is conform to the water inrush from drilling hole in Ordovician limestone by compare hydrological data already made, which test the applicability and effectiveness of this technology.

Key words: chemical tracing; concentration curve; deep karst; distribution characteristics