

地下水流场三维流线分布可视化研究及应用

赵颖旺,武强,陈时磊,李学渊,边凯

中国矿业大学(北京)水害防治与水资源研究所,北京 100083

摘要 研究区地质条件的复杂性与三维流线的视觉叠加性在一定程度上降低了三维流线的可读性。通过分析地下水流线的生成过程,将其分布控制归结为流线初始点的布置问题,在探讨地下水流场特征点的基础上,结合流线初始点局部布置方法,制定了流线初始点的整体布置原则。以内蒙古自治区鄂托克前旗上海庙矿区鹰骏一号井田为例,利用其水文地质资料对流线布置原则进行检验,获得的流线图清晰地描述了地下水运动规律且有效地揭示了地质特征点(天窗)对地下水径流的控制作用,证明了流线布置原则的合理性与有效性。

关键词 流场可视化;流线分布;流场特征点

中图分类号 P641.2

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.04.005

Three-dimensional visualization of streamline placement for groundwater flow field: Research and applications

ZHAO Yingwang, WU Qiang, CHEN Shilei, LI Xueyuan, BIAN Kai

Institute of Mine Water Disaster Preventing and Controlling & Water Resources, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract The complexity of geological conditions and the occlusion of 3D streamlines reduce the readability of the streamline charts. After discussing the constructing process of streamlines, we narrow down the problem to placement of initial particles. Considering the geological properties of groundwater flow and the local placement method, we propose the principle for global placement, which was checked based on the hydrogeological conditions of Yingjun No. 1 Mine of Shanghaimiao mining area in Etookeqian Banner, Inner Mongolia. The obtained streamline charts clearly represent the groundwater flow and uncover the control action of a window. The results demonstrate the rationality and validity of the global principle and provide visual and scientific data for mine water research and management decision.

Keywords flow visualization; streamlines placement; flow feature point

地下水流场的三维流线可视化技术可以清晰地揭示地下水运动规律,为地下水研究提供形象、直观的地下水动态信息。国内外学者应用地下水流场三维流线可视化技术进行了大量实例研究。Yidana^[1]利用可视化流线研究了加纳南沃尔特系含水层的地下水运动规律,描述了地下水运动的

补、径、排关系,为地下水源地区的划定及保护和水源井的合理布局及开采量的设置等提供了科学依据。Frind等^[2]研究了加拿大滑铁卢冰碛含水层的地下水运动规律,针对复杂多层含水层模型,准确描绘了井截获区,为水源地保护提供了技术支持。在中国,武强等^[3]研究了北京市平原地区的地下水

收稿日期:2014-11-03;修回日期:2015-01-19

基金项目:国家自然科学基金项目(41430318,41272276,51174289,41102180);国家科技重大专项(201105060-06,2012BAB12B03);国土资源大调查项目(水[2012]-01-035-036);教育部创新团队项目(IRT1085);中央高校基本科研业务费资助项目(2010YD02)

作者简介:赵颖旺,博士研究生,研究方向为地下水流数值模拟和地下水流场可视化,电子邮箱:yingwangzhao@163.com;武强(通信作者),教授,研究方向为矿井水害防治,电子邮箱:wuq@cumt.edu.cn

引用格式:赵颖旺,武强,陈时磊,等.地下水流场三维流线分布可视化研究及应用[J].科技导报,2015,33(4):33-36.

运动规律,绘制了地下水渗流场的三维可视化流线。李国敏等^[4]研究了北京市平谷区的水源地地下水运动规律,绘制了井截获区。

可视化流线技术在实验室研究很广泛,但在实际地下水工程中却很少应用。流线分布与流线清晰表达是限制其应用的两个主要问题^[5]。这两个问题在所有流场可视化领域普遍存在。基于特征提取^[6,7]的三维流线分布算法是解决这两个问题的基本算法,具有普遍应用性。但由于地下水主要以非紊流形态流动,且其流动规律受到复杂地质体的约束,地下水流动的特征点全部集中在小构造及不同渗透性介质边界周围,使得特征提取在地下水流场分析中的应用受到限制。流线可视化技术在石油领域的应用主要讨论含油地层注、采井间的区域,二维模型是其研究的主要对象。侯健等^[8]研究了石油注采区的流线分布,杨建敏^[9]利用流线技术进行了井间示踪剂的解释研究。虽然有一些针对三维流线技术的讨论,但并没有形成三维流线分布与可视化的理论及实现。本文针对地下水运动规律的特点,提出完整的三维流线分布原则。

1 流线分布

1.1 流线生成

流线生成算法主要有流函数法和质点追踪算法,其中质点追踪算法因其灵活性和普适性而被广泛应用。这两种算法生成流线都与地下水模拟方法直接相关,不同的模拟方法对应不同的流线生成算法。有限单元算法和有限差分算法是求解地下水流模型最普遍应用的算法,而有限差分法以其高精度而被广泛应用在流线可视化研究中。因此,选取美国地质调查局的开源软件 Modflow 和 Modpath 作为地下水流的模拟与流线生成计算的工具。

质点追踪算法是在给定流线初始点的基础上,计算该质点所在位置的地下水流速,追踪质点在地下水流场的迁移路径,如图1所示。

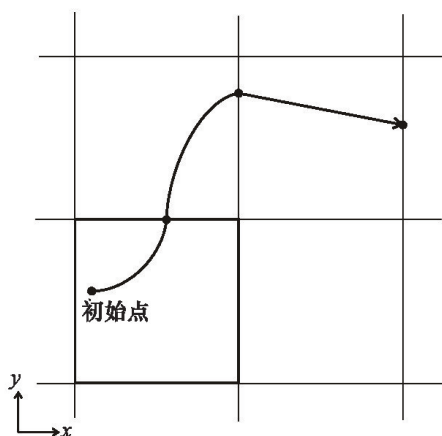


图1 质点追踪过程

Fig. 1 Process for particle tracking

质点追踪算法分为向前质点追踪和向后质点追踪。向前质点追踪算法为在给定初始点的基础上,向前示踪得到与水流方向相同的流线,以描述源项(注水井、补给边界等)对地下水运动规律的影响。向后质点追踪算法是在给定初始点的基础上,向后示踪得到与水流方向相反的流线,以描述汇项(抽水井、排泄边界等)对地下水运动规律的影响。地下水可视化流线的分布实质上就是流线初始点的布置。

1.2 流线初始点局部布置

交互式的流线初始点布置方法有3种:给定离散初始点、给定折线分布的初始点和给定圆形分布的初始点。其中,后两种算法需要指定给定初始点的个数及初始点分布规律(包括等流量分布和等距离分布)。

等流量分布是通过计算给定折线或圆形曲线的单宽流量来布置初始点,以保证任意相邻初始点间通过的流线是相等的。这样的初始点设置保证了任意相邻流线间的流量是相等的。进而,流线的疏密表现了地下水的流动速度的快慢。等距离分布是指按照相等距离来布置初始点。这种布置方法生成的流线无法刻画地下水的流动速度。但由于其布置方法简单,可以快速生成地下水流线图而被广泛应用。图2为二维地下水流场直线分布初始点的示意图。

在三维地下水流场中,只有断面才对应流量,所以等流量分布算法便无法通过给定折线或圆形曲线来使用。等距离分布算法则依然可以使用。

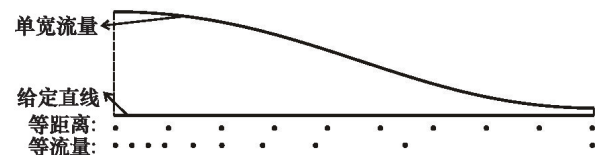


图2 二维流线初始点布置算法

Fig. 2 Two-dimensional streamline placement algorithm

1.3 流线初始点整体布置

地下水运动以非紊流为主,流动规律受到复杂地质体的约束,水文边界条件和地质体特征直接决定了地下水的运动形态。为研究地下水运动规律,本文将地下水流场特征点归结为区域补排边界、点源汇和地质构造特征点,其中地质构造特征点包括天窗、透镜体、地下暗河、岩溶洞穴、断层和侵入岩等。地下水流场特征点可以通过水文地质概念模型直接得到。

将流线初始点布置在模型的补排边界处可以生成描述整个区域地下水流场运动规律的流线。将流线初始点布置在抽注水井等点源汇项周围可以生成描述点源汇对地下水流场影响的流线。但由此生成的流线对地质构造作用的描述很有限。加密流线能够加强对地质构造的研究,同时也增加了流线的遮挡和杂乱,影响流线的可读性。为保证流线图可读性,本文提出围绕地质构造布置流线初始点的

原则,然后利用这些初始点同时进行向前质点追踪算法和向后质点追踪算法来绘制由源至汇的完整地下水流线。针对地下水流场特征点绘制专题流线图,保证了流线的可读性,也最大限度地揭示了地下水的运动规律特征。

2 应用实例

2.1 研究区域水文地质条件

研究区域为内蒙古自治区鄂托克前旗上海庙矿区鹰骏一号井田,依据含水介质的空隙形式,地下水的赋存条件和水力性质,可划分为松散岩类孔隙水、碎屑岩类孔隙裂隙水^[10]。如图3所示,井田内含水层主要包括:延安组八煤至四煤间的Y1砂岩裂隙含水层(简称Y1含水层)、四煤至二煤间的Y2砂岩裂隙含水层(简称Y2含水层)、侏罗系直罗组底部Z1碎屑岩孔隙裂隙含水层(简称Z1含水层)、侏罗系直罗组下部隔水层之上Z2碎屑岩孔隙裂隙含水岩段(简称Z2含水岩段)、白垩系底部K1碎屑岩裂隙孔隙含水层(简称K1含水层)、古近系底部碎屑岩裂隙孔隙含水层及第四系砂砾孔隙含水层。本文所研究的地下水流模型模拟了K1含水层以下的碎屑岩裂隙孔隙承压含水层^[11]。

地层	含水层	柱状	厚度/m	平均距离/m
第四系	砂砾孔隙含水量		5.55-29.75	
清水营组	碎屑岩裂隙孔隙含水层		1.74-20.44	
	碎屑岩裂隙孔隙含水层(K1)		0-167.88	
志丹群				
安定组	碎屑岩裂隙孔隙含水层(Z2)		0-400.19	
	碎屑岩裂隙孔隙含水层(Z1)		0-160.90	
	二煤		平均6.63	
直罗组	碎屑岩裂隙孔隙含水层(Y2)		0-19.62	
	四煤		平均3.24	
	碎屑岩裂隙孔隙含水层(Y1)		0-107.95	
	八煤		平均3.22	

图3 主要含水层及地层柱状图

Fig. 3 Major aquifers and stratigraphic column

碎屑岩类孔隙裂隙承压含水层主要通过基岩裸露区及剥蚀区风化裂隙带间接得到上覆孔隙含水层的渗透补给。2[#]煤层顶板至直罗组之间各层在清水营背斜,新上海庙背斜核部均被冲刷剥蚀,在剥蚀天窗处,延安组含水层直接与上覆岩层直接接触,接受上覆孔隙裂隙水的渗透补给。另外含水层之间越流补给及经断层破碎带补给也是其主要补给来源。侏罗系含煤地层各含水层,由于埋藏深,上覆有较厚的

隔水层,含水层砂岩与泥岩、粉砂岩等隔水岩层呈互层状,径流方向受褶皱构造的影响,基本由背斜轴部向背斜两翼方向运移。

2.2 区域地下水运动规律

为研究整个区域的自然流场地下水运动规律,在区域补给边界等距离布置初始点,然后通过向前质点追踪算法生成流线。将初始点布置在K1含水层的补给边界,生成的流线如图4所示。图4中,流线颜色表示地下水流动时间。在清水营背斜东侧,流线有全蓝色流线和彩色渐变流线。表明在这区域的地下水流动有一部分透过天窗,一部分穿越弱透水层向下伏含水层补给。在清水营背斜西侧,流线全部为全蓝色流线。该区域内,K1含水层水主要以层内流动为主,并没有向下越流补给。其他含水层地下水运动规律可以通过在相应补给边界设置流线初始点并进行向前质点追踪得到完整流线进行分析。

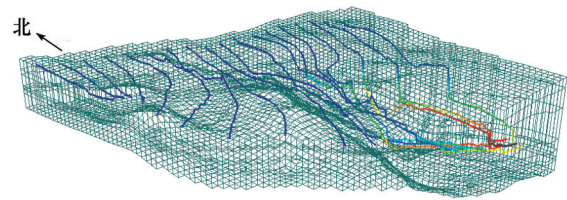


图4 补给边界流线

Fig. 4 Streamlines controlled by recharge boundaries

2.3 天窗对地下水运动规律的约束作用

在研究区域中,由于清水营背斜和新上海庙背斜被剥蚀,形成了两个天窗区域,增加了上下含水层间的水力联系。本文以K1含水层底板的天窗为研究对象,在天窗范围内设置流线初始点,并通过向前质点追踪算法和向后质点追踪算法同时进行生成由源至汇的完整流线,如图5所示。

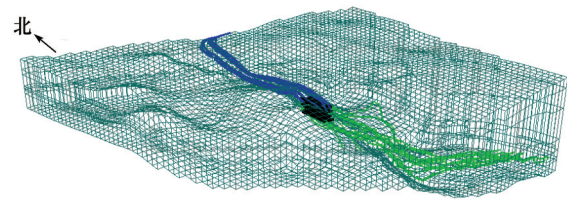


图5 天窗流线专题图

Fig. 5 Streamlines controlled by a window

图5中,黑色区域即为天窗区域。绿色流线是由初始点向前质点追踪得到的与水流方向相同的流线。蓝色流线为由初始点向后质点追踪得到的与水流方向相反的流线。图5清晰地描述了K1含水层底板天窗对地下水运动规律的约束作用。天窗连通了上层K1含水层和下伏含水层。流经天窗的地下水由K1含水层补给边界补给,向下越流至下伏含水层,并由向下层含水层排泄边界流出研究区域。具体的排泄

点可以由流线终止点数据确定。图4中也有流线经过K1含水层底板天窗,但是由于流线条数少,不足以表达整个天窗对地下水径流的约束作用。

3 结论

地下水在地质体内的流动受到被补排边界条件、点源汇及地质构造等因素的共同作用,主要以非紊流形态流动。本文提出了围绕地下水流场特征点布置流线初始点的原则和针对不同地下水流场特征点分别绘制专题流线图的原则。并基于该原则进行了实例研究,结果表明,该流线分布方法既清晰表达了区域地下水的运动规律,又详细刻画地质构造对地下水径流的约束作用,最大限度地提高了流线图的可读性。

参考文献(References)

- [1] Yidana S M. Groundwater flow modeling and particle tracking for chemical transport in the southern Voltaian aquifers[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 63(4): 709-721.
- [2] Frind E O, Matanga G B. The dual formulation of flow for contaminant transport modeling 1. Review of theory and accuracy aspects[J]. Water Resources Research, 1985, 20(2): 159-169
- [3] 武强, 徐华, 赵鹏, 等. 地下水渗流场可视化动态模拟与应用研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(15): 4841-4844.
Wu Qiang, Xu Hua, Zhao Peng, et al. Dynamic Simulation for groundwater seepage field and its application[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(15): 4841-4844.
- [4] Dong Y, Xu H, Li G. Wellhead protection area delineation using multiple methods: A case study in Beijing[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(1): 481-488.
- [5] 武强, 赵颖旺, 徐华, 等. 地下水流场三维流线可视化模拟与实现[J]. 中国煤炭地质, 2012, 24(1): 21-25.
Wu Qiang, Zhao Yingwang, Xu Hua, et al. Simulation and visualization of the streamline for groundwater flow field[J]. Coal Geology of China, 2012, 24(1): 21-25.
- [6] 吴晓莉, 史美萍, 贺汉根. 基于特征提取的三维流线分布算法[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(2): 102-106.
Wu Xiaoli, Shi Meiping, He Hangen. Feature extracting based 3D streamline placement algorithm[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2008, 30(2): 102-106.
- [7] 鲁大营, 朱登明, 王兆其. 三维流场的流线提取算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 25(5): 666-673.
Lu Daying, Zhu Dengming, Wang Zhaoqi. Streamline selection algorithm for three-dimensional flow fields[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 25(5): 666-673.
- [8] 侯健, 王玉斗, 陈月明. 复杂边界条件下渗流场流线分布研究[J]. 计算力学学报, 2003, 20(6): 335-338, 345.
Hou Jian, Wang Yudou, Chen Yueming. Seepage flow line distribution in complicated boundary conditions[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2003, 20(6): 335-338, 345.
- [9] 杨建敏. 基于三维流线模拟的井间示踪剂解释方法研究[D]. 东营: 中国石油大学, 2008.
Yang Jianmin. The research of 3D streamline-based simulation for well-to-well tracer interpretation method[D]. Dongying: China University of Petroleum, 2008.
- [10] 李春行, 王磊. 内蒙古自治区鄂托克前旗上海庙矿区鹰骏一号井田煤炭勘探报告[R]. 银川: 宁夏矿产地质调查院, 2012.
Li Chunhang, Wang Lei. Coal prospecting report for the Yingjun no. 1 mine of Shanghaimiao mining area in Etokeqian banner Inner Mongolia [R]. Yinchuan: Ningxia Mineral Geology Investigation Institute, 2012.
- [11] 武强. 内蒙古自治区鄂托克前旗上海庙矿区鹰骏一号井田水文地质条件评价及防治水技术的研究与应用[R]. 北京: 中国矿业大学(北京)水害防治与水资源研究所, 2013.
Wu Q. Hydrogeological condition evaluation and research & application of the technology of water-disaster prevention and cure for the Yingjun No. 1 mine of Shanghaimiao mining area in Etokeqian banner Inner Mongolia [R]. Beijing: Institute of Mine Water Disaster Preventing and Controlling & Water Resources, China University of Mining & Technology (Beijing), 2013.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·



2015年世界工程师大会将于2015年11月29日在日本举行

由世界工程组织联合会(WFEO)、联合国教科文组织(UNESCO)共同主办,主题为“工程:创新与社会”的2015年世界工程师大会将于2015年11月29日至12月2日在日本京都举行。

本次大会设立可持续增长和经济社会发展的创新、创新工程研究和发、工程为社会及社会中的工程3个讨论领域。

中国科协鼓励和支持全国学会积极参与2015年世界工程师大会。届时中国科协国际联络部将根据中国专家参与大会的层次和活动内容,提供一定的经费支持。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35488/16211029.html>。