

一种基于大数据分析的地层水判断方法

蒋婉雪¹, 刘朝武¹, 吴立强¹, 宫航¹, 冯汉斌², 华斌¹

1. 中国石油渤海钻探工程有限公司井下作业分公司 河北任丘 062552

2. 中国石油天然气股份有限公司华北油田分公司勘探事业部 河北任丘 062552

通讯作者: Email: 490314543@qq.com

项目支持: 中国石油集团渤海钻探工程有限公司井下作业分公司 2024 年研发类项目“饶阳凹陷地层出水鉴定技术研究”(2024-03F)

引用: 蒋婉雪, 刘朝武, 吴立强, 等. 一种基于大数据分析的地层水判断方法[J]. 油气井测试, 2024, 33(6): 17-21.

Cite: JIANG Wanxue, LIU Chaowu, WU Liqiang et al. A method for determining formation water based on big data analysis [J]. Well Testing, 2024, 33(6): 17-21.

摘要 为了准确判断试油期间地层是否出水,对饶阳凹陷武强区块以往试油地层出水样品进行筛选,对地层水化学参数进行统计研究,利用专用软件绘制储层地层水各项化学参数分布图版,在图版上可以根据试油井的坐标得出各项离子含量的数据范围,不仅可以准确判断试油井排液过程中地层是否出水,还可以直观研究区域地层水各项离子的分布规律。经 Q50-10X 井现场应用,预测值与水分析拟合良好,误差小于 10%。图版法需要试油井到排液后期,液性稳定才能得出准确结论,为储层的流体性质研究提供了一种新的思路,实验证明效果好,适用性强。

关键词 饶阳凹陷;地层水;大数据;等值线图版;离子当量百分比;水分析;试油

中图分类号: TE273

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.06.003

A method for determining formation water based on big data analysis

JIANG Wanxue¹, LIU Chaowu¹, WU Liqiang¹, GONG Hang¹, FENG Hanbin², HUA Bin¹

1. Downhole Services Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Renqiu, Hebei 062552, China

2. Exploration Department of Petrochina Huabei Oilfield Company, Renqiu, Hebei 062552, China

Abstract: To accurately determine whether formation water is present during oil testing, historical formation water samples from oil tests in the Wuqiang block of the Raoyang sag were selected and analyzed. A statistical study of the chemical parameters of the formation water was conducted. A distribution map of the chemical parameters of the formation water in the reservoir was plotted by using specialized software. This map enables the identification of the range of ion concentrations based on the coordinates of the oil test wells, allowing not only accurate determination of whether formation water is present during the oil test well fluid discharge process but also intuitive study of the distribution patterns of various ions in the regional formation water. Applied in the well Q50-10X, the predicted values matched well with water analysis, with an error of less than 10%. The map method requires the oil testing wells to reach the late stage of fluid discharge, where the fluid properties stabilize, to draw accurate conclusions. This provides a new approach for studying the fluid properties of the reservoir, with experimental results demonstrating good effects and strong applicability.

Keywords: Raoyang sag; formation water; big data; contour map; ion equivalence percentage; water analysis; oil testing

在试油过程中准确判断地层是否出水不仅关系到液性的落实,也影响后续措施方案的制定;另一方面,随着勘探开发逐步延伸到非常规储层领域,储层改造的难度也逐步增加,水力喷射、快钻桥塞等分簇射孔工艺开展了现场试验,具备了“十方排量、千方砂、万方液”施工能力^[1],在大措施液影响下,地层返排过程中如何准确的判断地层是否出水成为新的难题。

关云梅等^[2]针对酸液、钻井液对地层污染造成

地层水判断造成影响的难题,利用水样 pH 值、阴阳离子匹配状况及水中离子含量等多项指标,总结归纳酸后排液、钻井液污染等问题下地层出水应当存在的特征指标,从而判断水样是否能反映地层出水。封猛等^[3]针对准噶尔盆地试油过程中存在测试产液少、压后排液时间长、使用射孔液及压井液等因素影响地层水的准确判断,造成试油周期长、措施无法有效指定的难题,引用 D 函数用来反映阳离子或阴离子之间的比例关系,利用区块 D 函数实

现在试油初期判别储层是否出水的目的。沈俊超等^[4]针对试油水性鉴别存在困难的问题,通过将试油过程中产出液量、水分析化学参数及其变化趋势进行总结,归纳出二连盆地阿尔凹陷泥浆滤失液、地层水、压裂返排液等的化学特征,从而落实试油过程中地层是否出水。王鹏等^[5]提出首先应当判断研究区产出水的类别,才能准确判断地层是否出水。国内各油田针对地层水特征及分布规律做了大量研究工作^[6-8],总结归纳出对应的地层水判别标准^[9-11]。通过以上方法均能在试油过程中判断地层是否出水,但无法明确此时排出水的性质能够代表储层水性。

因此通过筛选地层出水样品,采用大数据分析的方法,利用专业的绘图软件获得储层地层水性质及分布特征,可以明确反映地层真实液体性质变化规律。

1 地层水判断方法

目前华北油田水分析化验主要采用的是简易分析法,分析项目少,精度要求低,方法快速简便,分析项目除测定必要的物理性质外,还需定量分析七个常量离子和两个微量元素离子,即阳离子 $K^+ + Na^+$, Mg^{2+} , Ca^{2+} , 阴离子 Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- 及 CO_3^{2-} , 微量元素 I^+ 和 B^+ , 同时计算出总矿化度值^[12-13]。

对于试油过程中地层水产量 $10\text{ m}^3/\text{d}$, 累计产水量多的井,其水分析数据将直接采用。以这类数据为基准,作为离子当量百分比的基准数据,可以很好的得到区域地层水性趋势与标准,有利于鉴别日产水量小及累计产水量少井的水性分析数据。

1.1 离子当量百分比法

地层水中含有大量的阴阳离子,其相互作用是按毫克当量化合反应的,不同的离子间的毫克当量比就会产生不同趋势化合物,由此就可以确定地层水的水型。

采用离子当量百分比方法,以准地层产水的水性作为标准,判断地层产水,但水性不确定的井,剔除异常数据,使所选取的数据更加准确。

离子毫克当量百分比($\text{mg-r}\%$) =

$$\frac{\text{该离子毫克当量数}}{\text{阴(阳)离子毫克当量总数}} \times 100\%$$

$$Cl^- = \frac{Cl^-}{Na^+ + K^+ + Mg^{2+} + Ca^{2+} + Cl^- + CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-}} \quad (1)$$

$$Na^+ + K^+ \text{ 当量百分比} = (\text{Na}^+ + \text{K}^+ \text{ 摩尔浓度}) / (\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} + \text{Cl}^- + \text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} \text{ 各离子摩尔浓度}) \quad (2)$$

其他离子当量百分比计算公式与上述相同。

该分析井对应的离子当量曲线形态与区域地层水对应的离子当量曲线形态进行对比,若曲线形态基本一致,则可判断地层有出水迹象。

1.2 等值线图版法

等值线图版法是通过大数据采集,通过 Surfer 软件分析处理得到研究区块的某个或某些参数等值线图版,从而判断某研究对象是否能与图版参数吻合的方法。针对某个区块某个层位,可以利用软件绘制参数等值线图版。在图版中,利用颜色变化反应参数数值的大小,通过图版,可以大致判断参数在地层中的分布及变化。根据选取的区域水分析,制作区域地层水参数等值线图版,利用图版可以判断新井试油或措施返排过程中是否有地层水产出。同时可以直观的看出该区块该层位地层水各项离子浓度的分布情况^[14-16]。

2 应用案例

Q50-10X 井是冀中拗陷饶阳凹陷武强油田的一口开发井。本井优选沙三段 263、264、267、268、270、273、274、275 号层采用泵送桥塞分段压裂工艺,措施总液量措施液 $2\,512.68\text{ m}^3$,如图 1 所示,压后放喷两个月,累计放液 236.22 m^3 ,返排率仅达 9%。在返排率较低的情况下,为落实地层是否出水,可以通过离子当量百分比法以及等值线图版法。

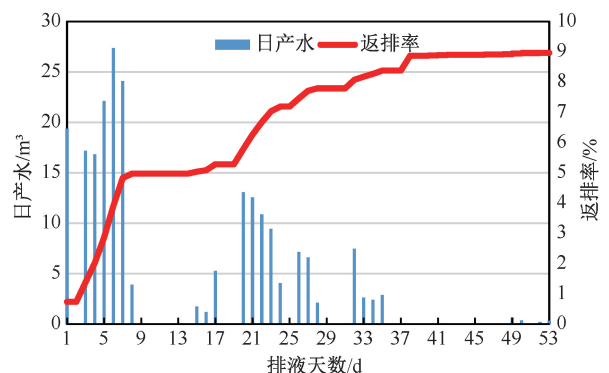


图 1 Q50-10X 井压后排液及返排率曲线图

Fig. 1 Drainage after fracture and return rate of well Q50-10X

本井共计排液 53 d, 分别与排液初期、排液中期、排液末期取放喷出口水样共计四个, 水分析化验数据见表 1。从数据可以看出, 随着排液的进行, 放喷液的各项离子矿化度都在逐渐变化, 最为明显

的是钠钾离子与氯离子, 将近增长一倍。由于返排率过低, 排液后期产量较低, 未达到稳定水平, 同时水分析化验数据也未达到稳定条件, 因此可以采用上述两种方法判断该试油层是否地层出水。

表 1 Q50-10X 井及区域地层水分析数据表

Table 1 Formation water analysis data of well Q50-10X and its area

井号	层序	层位	深度/m	pH	Na ⁺ +K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	I ⁺	B ⁺	总矿
Q50-10X	1 压	Es ₃ ^F	3 959.2~4 004.0	5.7	14 955.0	1 643.3	170.1	25 878.5	192.1	762.8	0	6.8	6.5	43 601.8
	1 压	Es ₃ ^F	3 959.2~4 004.0	6.5	16 202.2	2 104.2	60.8	28 005.5	192.1	1 266.2	0	3.0	7.6	47 831.0
	1 压	Es ₃ ^F	3 959.2~4 004.0	6.5	16 975.8	2 204.4	36.5	29 689.4	144.1	665.1	0	5.7	7.4	49 715.3
	1 压	Es ₃ ^F	3 959.2~4 004.0	6.8	26 421.3	4 529.0	48.6	47 857.5	480.3	1 174.6	0	9.9	9.7	80 511.3
Q19-24x	1	Es ₃	3 153.0~3 161.0	6.0	22 898.0	2 485.0	486.0	40 413.0	672.4	366.1	0	16.1	4.3	67 320.5
Q19-39x	1	Es ₃	2 983.8~2 986.8	6.2	23 231.4	1 503.0	218.7	38 374.6	72.0	1 189.9	0	15.7	25.6	64 589.6
Q19-45x	1	Es ₃	3 982.0~4 039.6	6.2	28 841.0	5 611.2	607.5	54 947.5	1 440.9	274.6	0	1.1	7.0	91 722.7
Q19-19	1	Es ₃	3 296.0~3 299.0	6.0	28 266.0	2 846.0	365.0	48 212.0	1 249.0	946.0	0	18.39	4.33	81 884.0

2.1 离子当量百分比法判断地层出水情况

为准确落实产水性能, 采用离子当量百分比法, 将 Q50-10X 井压后放喷出液水分析化验数据与同一构造同一层系具有典型地层水特征的水分析数据通过计算并绘制离子当量百分比曲线图, 如图 2 所示。通过离子当量百分比曲线形态对比分析, Q50-10X 井该试油层放喷出液对应离子当量曲线(红色、紫色)形态与区域地层水一致, 说明具有地层水特征。

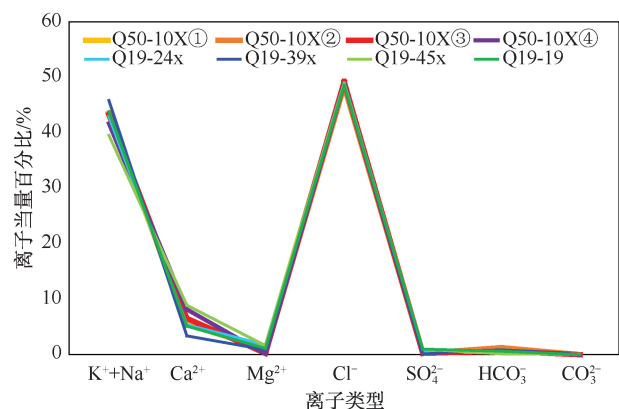


图 2 Q50-10X 井与区域地层水离子当量百分比对比曲线图
Fig. 2 Correlation curve of formation water ion equivalent percentage in well Q50-10X and its area

由图 2 可以看出, 本井四个水样的离子当量百分比曲线形态均与地层水的曲线形态一致, 但排液早期的水样的化学参数不能体现区域地层水的化学性质。说明在排液过程中, 当离子含量未接近区域水离子含量时, 通过离子当量曲线形态即可分析出地层是否有出水迹象, 但此时的水分析数据不能作为区域地层水真实数据。

2.2 等值线图版法操作方法

首先针对该油田 Q19-Q50 断块筛选沙三段试油后期明确地层出水, 且水分析化验能够代表地层水特征的各项参数, 包括对应试油井井底坐标、水化验分析各项离子参数, 再利用 Surfer 软件绘制地层水分析各项离子区域等值线分布图版, 图 3 为绘制的钠钾离子与氯离子等值线图版。

根据图版, 可以确定 Q50-10X 井坐标对应地层的各项离子浓度分布区间。表 2 表明, 对比水分析化验结果, 第四个水分析化验结果完全落在区间内, 由此判断本井地层出水。本井四个水样, 只有第四个水样对应的化学参数能够与图版阈值吻合, 说明图版法需要一个较长的试油周期才能准确判断地层出水。

通过表 2 可以看出, 地层水分布等值线图版可以直观的展示某坐标位置对应处地层水各项离子数据分布区间, 从而实现对某井对应层段地层水各项离子含量的预测, 预测值与水分析拟合良好, 误差小于 10%。

2.3 两种方法对比

本井共计取水样化验分析 4 个, 利用离子当量百分比法, 第一个水样的曲线形态已有地层水的特征, 可以更早的预测地层是否有出水迹象, 但该水样无法代表地层水分析的特征。

在利用等值线图版法进行地层水判断时, 通过前三个水样化验数据无法判断地层是否出水, 直到第四个水样才能与区域地层水特征相吻合, 确定地层出水, 此时水分析数据可以作为区域地层水的代表水样使用。

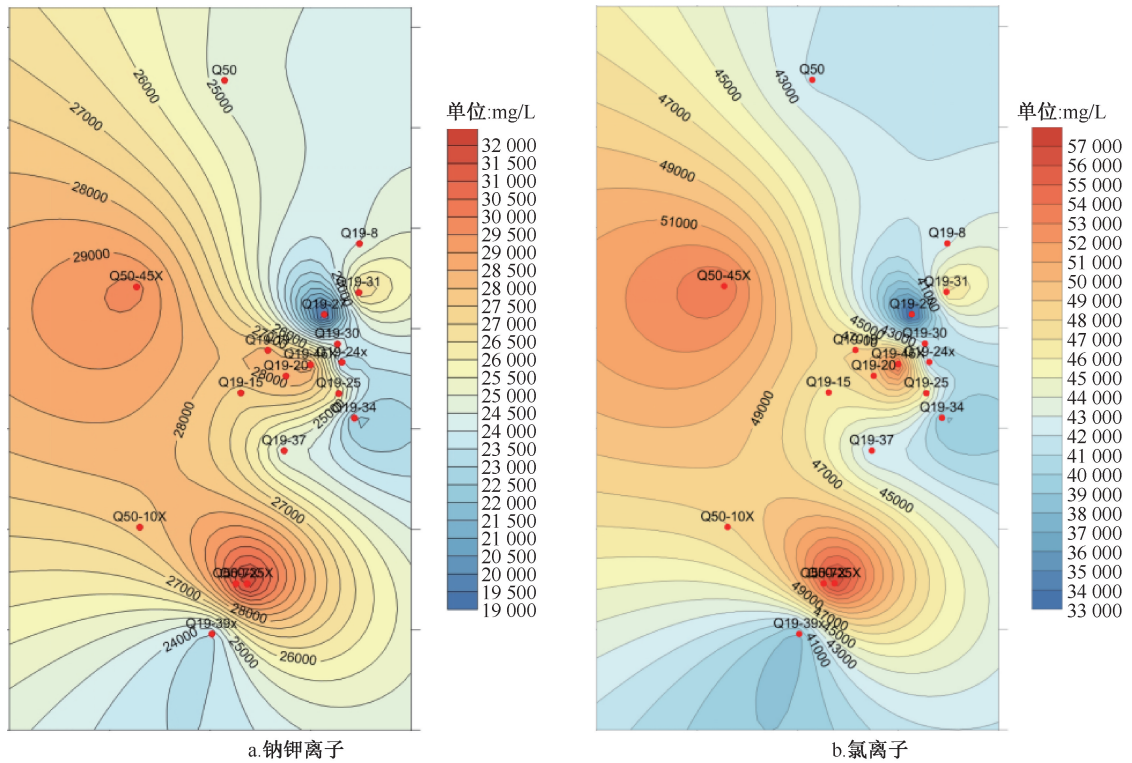


图3 Q19-Q50断块地层水分布等值线图版

Fig. 3 Contour map of formation water plan of Q19-Q50 block

表2 Q50-10X井沙三段水分析数据判别表

Table 2 Water analysis data discrimination table in the third member of Shahejie formation for well Q50-10X

参数	阳离子/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)			阴离子/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)			总矿化度 /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
	钾+钠	镁	钙	氯根	硫酸根	重碳酸根	
Q50-10X④	26 421.3	4 529.0	48.6	47 857.5	480.3	1 174.6	80 511.3
图版域值	27 000~27 500	4 500~5 000	50~100	47 500~48 000	450~500	1 000~1 100	72 000~74 000
吻合程度	误差 2%	符合	误差 3%	符合	符合	误差 6%	误差 8%

3 结论

(1) 地层水等值线图版法是判别地层水的一种新方法, 该方法是基于大数据的前提下, 将地层水各项离子含量进行地层等值线图版绘制, 其优点是图版可以直观展现地层水各项离子的数值变化情况, 明确地层水储层分布规律, 适用于各个构造各个储层。利用地层水等值线图版可以对未试油储层地层水性进行提前预判, 达到试油过程中判别地层是否出水的目的, 同时为施工方案的选择提供依据。

(2) 绘制地层水等值线图版需要提前对研究区域进行数据采集与处理, 前期需要收集大量有效数据, 再通过软件绘制完成。该方法的不足是试油周期较长, 需要到排液后期, 液性趋于稳定, 各项离子接近区域地层水离子含量时, 才能利用等值线图版法判别出地层出水, 此时的水分析化验数据可以反

映区域地层水真实情况。

致谢:感谢华北油田第三采油厂同意本文公开发表。感谢杨春华、郑立军、甘惠娟等专家对论文的研究成果进行指导分析。

参考文献

- [1] 郑新权, 何春明, 杨能宇, 等. 非常规油气藏体积压裂 2.0 工艺及发展建议[J]. 石油科技论坛, 2022, 41(3): 1-9. ZHENG Xinquan, HE Chunming, YANG Nengyu, et al. Volumetric fracturing 2.0 process for unconventional oil and gas reservoirs and R&D suggestions[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2022, 41(3): 1-9.
- [2] 关云梅, 王兰生, 张鉴, 等. 地层水与残酸、钻井液混合液特征分析[J]. 天然气勘探与开发, 2011, 34(2): 62-64. GUAN Yunmei, WANG Lansheng, ZHANG Jian, et al. Characteristics analysis of formation water mixed with residual acid and drilling fluid[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2011, 34(2): 62-64.
- [3] 封猛, 肖辉, 胡广文, 等. 基于 D 函数鉴别地层水的方法

- 与应用[J].石油地质与工程,2012,26(4):117-119.
FENG Meng, XIAO Hui, HU Guangwen, et al. Method and application of formation water identification based on D function[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2012, 26(4):117-119.
- [4] 沈俊超,张芳菲,郑立军,等.二连盆地阿尔凹陷地层水化学特征与试油水性鉴别[J].油气井测试,2015,24(6):28-32.
SHEN Junchao, ZHANG Fangfei, ZHENG Lijun, et al. Chemical characteristics of formation water and identification of oil test water in Aer depression, Erlian basin [J]. Well Testing, 2015, 24(6):28-32.
- [5] 王鹏,陈刚,范厚江.川西坳陷中段须家河组产出水判别及地球化学差异[J].宜宾学院学报,2019,19(6):1-4.
WANG Peng, CHEN Gang, FAN Houjiang. Distinguish and geochemical difference of produced water of the Xujiahe formation in middle part of western Sichuan depression[J]. Journal of Yibin University, 2019, 19(6):1-4.
- [6] 李雯霞,张西营,苗卫良,等.柴达木盆地北缘冷湖三号构造油田水水化学特征[J].盐湖研究,2016,24(2):12-18.
LI Wenxia, ZHANG Xiying, MIAO Weiliang, et al. Hydrochemical characteristics of oilfield waters in Lenghu No. 3 structure area of north edge of Qaidam basin[J]. Journal of Salt Lake Research, 2016, 24(2):12-18.
- [7] 孙厚云,毛启贵,卫晓锋,等.哈密盆地地下水系统水化学特征及形成演化[J].中国地质,2018,45(6):1128-1141.
SUN Houyun, MAO Qigui, WEI Xiaofeng, et al. Hydrogeochemical characteristics and formation evolutionary mechanism of the groundwater system in the Hami basin [J]. Geology in China, 2018, 45(6):1128-1141.
- [8] 张林,徐铜浩,杨智凯,等.苏东区块地层水水化学特征分析[J].非常规油气,2021,8(5):27-33.
ZHANG Lin, XU Tonghao, YANG Zhikai, et al. Analysis on hydrochemical characteristics of formation water in Sudong block[J]. Unconventional Oil & Gas, 2021, 8(5):27-33.
- [9] 周新平,邓秀芹,李士祥,等.鄂尔多斯盆地延长组下组合地层水特征及其油气地质意义[J].岩性油气藏,2021,33(1):109-120.
ZHOU Xinping, DENG Xiuqin, LI Shixiang, et al. Characteristics of formation water and its geological significance of lower combination of Yanchang formation in Ordos basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(1):109-120.
- [10] 丁鼎.海拉尔盆地地层水分析[J].中国新技术新产品,2015,(7):169.
DING Ding. Formation water analysis in Hailaer basin[J]. New Technology & New Products Of China, 2015, (7):169.
- [11] 严黎,汪旭东,蒋曙光.长兴组气藏地层水判别标准及早期水侵识别研究[J].计量与测试技术,2021,48(9):50-52.
YAN Li, WANG Xudong, JIANG Shuguang. Study on formation water discrimination standard and early water invasion identification of Changxing formation gas reservoir [J]. Metrology & Measurement Technique, 2021, 48(9):50-52.
- [12] 康志勇,李晓涛,田文,等.地表水/地层水水型分类及其划分方法[J].地球科学与环境学报,2022,44(1):65-77.
KANG Zhiyong, LI Xiaotao, TIAN Wen, et al. Type classification of surface water/formation water and its classified method [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(1):65-77.
- [13] 关云梅.油气田水分析方法的优选及应用[J].天然气工业,2022,42(2):49.
GUAN Yunmei. Optimization and application of oil and gas field water analysis methods [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(2):49.
- [14] 王颖,解同川,呼桂艳,等.地层水判定方法及数学模型应用研究[J].石油化工应用,2019,38(10):81-86.
WANG Ying, XIE Tongchuan, HU Guiyan, et al. Study on the method of formation water determination and the application of mathematical model [J]. Petrochemical Industry Application. 2019, 38(10):81-86.
- [15] 郑志利.基于 Sufer 软件的区域地下水埋深等值线图绘制应用分析[J].地下水,2012,34(6):27-28.
ZHENG Zhili. Application analysis of regional groundwater depth contour map drawing based on Sufer software [J]. Ground Water, 2012, 34(6):27-28.
- [16] 陈欢欢,李星,丁文秀. Surfer 8.0 等值线绘制中的十二种插值方法[J].工程地球物理学报,2007,4(1):52-57.
CHEN Huanhuan, LI Xing, DING Wenxiu. Twelve interpolation methods in Surfer 8.0 contour drawing [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2007, 4(1):52-57.

编辑 吴志力

第一作者简介:蒋婉雪,女,1993年出生,本科,工程师,2015年获中国石油大学(北京)石油工程专业工学学士学位,现主要从事油气田开发研究及管理工作。电话:0317-2739593;Email:490314543@qq.com。通信地址:河北省任丘市会战南道井下作业分公司,邮政编码:062552。