

鄂尔多斯盆地合水地区长 6 致密砂岩储层现今地应力分布特征及其开发建议

刘 建^{1,2}, 惠 晨^{2,3}, 樊建明¹, 吕文雅^{2,3}, 王继伟¹, 尹 陈², 王浩南²
LIU Jian^{1,2}, HUI Chen^{2,3}, FAN Jianming¹, LYU Wenya^{2,3}, WANG Jiwei¹, YIN Chen², WANG Haonan²

1. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018;

2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

3. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249
1. *Petroleum Exploration and Production Research Institute, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018, Shaanxi, China;*

2. *College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;*

3. *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China*

LIU J, HUI C, FAN J M, et al. , 2021. Distribution characteristics of the present-day in-situ stress in the Chang 6 tight sandstone reservoirs of the Yanchang Formation in the Heshui Area, Ordos Basin, China and suggestions for development [J]. Journal of Geomechanics, 27 (1): 31 – 39. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.01.004

Abstract: Tight reservoirs feature poor physical properties and strong heterogeneity. The distribution of present-day in-situ stress affects tight reservoirs in the drilling operation, well pattern deployment, fracturing transformation and water injection management. The microseismic monitoring method and the hydraulic fracturing data were used respectively to analyze the direction of present in-situ stress of single well in the Chang 6 reservoirs and the magnitude of present-day in-situ stress of single well in the study area. Combining the analysis with the characteristics of structure, sedimentation and lithofacies in the study area, we built a three-dimensional heterogeneous geological model. Based on the triaxial rock mechanics test and operation data, we identified the physical parameters of different facies, and built a three-dimensional mechanical model. Also the Ansys finite element numerical simulation was applied to build a three-dimensional present-day in-situ stress distribution model of the Chang 6 reservoirs. The simulation results showed that the maximum horizontal principal stress ranged from 34 MPa to 42 MPa, the minimum from 25 MPa to 36 MPa, and the horizontal differential stress from 3 MPa to 10 MPa. The simulation results of the wellpoint stress had a less than 10% margin of error compared with the actual measurement, proving the simulation results are reliable. It was inferred from the simulation results that the present-day in-situ stress distribution in the study area was mainly affected by the difference in rock physical and mechanical properties, but less by the tectonic framework. On the basis of the result analysis, it is suggested that natural fracture should also be considered as an influencing factor when wells are deployed in the study area. Meanwhile, in order to reduce development cost as much as possible, industrial wells should be generally deployed in the place with low stress as for the area with equal differential stress.

Key words: present-day in-situ stress; 3D numerical simulation; tight reservoir; Heshui area; suggestions for development

基金项目: 中石油勘探与生产分公司重大专项 (kt2018-13-03); 中国石油大学 (北京) 青年拔尖人才科研启动基金项目 (2462017YJRC057)

第一作者简介: 刘建 (1983-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事油田开发地质相关工作. E-mail: liuj2011_cq@petrochina.com.cn

通讯作者: 惠晨 (1995-), 女, 在读硕士, 研究方向为油气田开发地质. E-mail: abrac741@sina.com

收稿日期: 2020-06-09; **修回日期:** 2020-08-28; **责任编辑:** 范二平

引用格式: 刘建, 惠晨, 樊建明, 等, 2021. 鄂尔多斯盆地合水地区长 6 致密砂岩储层现今地应力分布特征及其开发建议 [J]. 地质力学学报, 27 (1): 31–39. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.01.004

摘要: 致密油藏物性差, 非均质性强, 现今地应力分布特征影响着致密油藏钻井施工、井网部署、压裂改造和注水管理等方面。文章根据微地震监测法分析了鄂尔多斯盆地合水地区长 6 储层单井现今地应力的方向, 利用水力压裂资料分析了研究区单井现今地应力大小。在单井现今应力分析的基础上, 结合合水地区长 6 储层构造、沉积、岩相特点建立了三维非均质地质模型, 通过室内三轴岩石力学试验与施工数据, 得到不同岩相的岩石物理参数, 由此建立三维力学模型。利用 Ansys 进行有限元数值模拟, 得到了研究区长 6 储层三维现今地应力分布模型, 模拟结果表明水平最大主应力范围为 34~42 MPa; 水平最小主应力范围为 25~36 MPa; 水平差应力范围为 3~10 MPa, 并将结果与实际测量的井点应力大小进行对比, 误差小于 10%, 模拟结果可信。分析模拟结果可知研究区现今地应力的分布主要受到了岩石物理力学性质差异的影响, 而构造格架的影响较小。在结果分析的基础上, 建议研究区布井时, 不仅考虑地应力的影响, 还应将天然裂缝作为影响因素考虑, 同时, 为尽可能地降低开发成本, 在差应力相等的区域, 油气工业井一般部署在应力值低的地方。

关键词: 现今地应力; 三维数值模拟; 致密储层; 合水地区; 开发建议

中图分类号: P618.13 **文献标识码:** A

0 引言

空气渗透率小于 1 mD 的储层被称为致密储层 (邹才能等, 2015), 致密油气是继页岩气之后全球非常规油气勘探开发的新热点 (贾承造等, 2012)。致密储层物性差, 利用常规开采技术开发难度大, 针对该类储层, 需采用大型压裂改造进行投产, 而地应力对压裂增产效果具有重要影响 (张斌等, 2012), 同时, 地应力还影响致密油藏井网部署、注水管理和压裂改造方案等方面 (曾联波, 2008; 万晓龙等, 2009; 翁剑桥, 2020)。因此地应力的研究在致密油气开发过程中扮演着十分重要的角色。

现今地应力主要由重力、构造应力、孔隙流体压力和热应力耦合而成 (廖新武等, 2015), 是多期构造作用和新构造活动共同影响而成 (张浩等, 2020)。文中的地应力指现今地应力状态, 通常泛指第四纪中更新世以来的地应力 (曾联波和田崇鲁, 1998)。地应力的研究已经有上百年的历史, 国内外学者在地应力测量和计算方面开展了大量的研究工作 (Fairhurst, 1964; Hast, 1969; Bell and Gough, 1979; 许忠淮, 1990), 提出了许多测量和计算地应力的方法。每种方法都有其优缺点, 应根据实际情况选择较合理的方法。除此之外, 数值模拟也在地应力研究中被广泛应用, 应力场数值模拟开始于 20 世纪中期, 随着计算机技术的发展, 中国在 20 世纪 70 年代将该方法应用在地学领域 (张胜利, 2011)。数值模拟常用的方

法为离散元与有限元方法, 常用的软件有 Petrel, Ansys, PFC, FLAC, ABAQUS 等 (毛哲等, 2018)。其中, 有限元数值模拟法具有很高的适应性, 可以模拟地质演化过程、阶段等, 对受力复杂、加载特殊的模拟问题也可以实现 (权凯, 2014)。由于三维地质建模复杂繁琐 (刘爱华等, 2013), 目前大多学者进行二维应力场数值模拟, 但其只能展示平面的应力分布, 三维应力场数值模拟相比之下对空间的应力变化就有更好地展示, 但需要考虑的因素和参数也更多, 其精度主要取决于地质模型的建立和岩石力学参数的确定, 目前三维应力场数值模拟多存在将同一地层赋予相同的岩石物理参数, 对于层内存在透镜体、砂泥岩互层等现象, 无法体现单层内垂向上非均质性及平面非均质性对地应力的影响等问题 (刘爱华等, 2013; 权凯, 2014; 刘洪涛等, 2016; 毛哲等, 2018; 徐珂等, 2018)。

众多学者从单井应力测量、二维应力场数值模拟并结合生产动态等方面对鄂尔多斯盆地的地应力特征、地应力的应用进行了研究 (周新桂等, 2009; 杜玮暄等, 2010; 徐磊, 2016)。研究表明, 由于鄂尔多斯盆地的构造变化较弱, 地应力方向的变化较弱; 同时, 水平最大主应力的方向与差应力的方向对压裂缝的展布和复杂程度有很大的影响, 从而对压裂生产有重要的影响。总体来说, 目前对鄂尔多斯盆地地应力分布规律研究以二维地应力数值模拟为主, 对地应力分布的影响因素研究较少, 同时对合水地区长 6 致密储层现今地应力研究工作开展较少, 缺少对该地层现今地应力

分布的认识,一定程度上制约了该地区井网部署及压裂施工等工作的进程。

文章以鄂尔多斯盆地合水油田长6致密砂岩储层为研究对象,在对单井地应力分析和区域地应力特点综合分析的基础上,结合研究区实际构造特点、沉积特点、岩相特点建立三维非均质地质模型;通过高温高压三轴岩石力学实验和研究区压裂施工的实际数据,确定不同岩相的岩石物理参数,建立符合研究区实际的三维力学模型;利用 Ansys 有限元数值模拟软件开展三维现今应力场数值模拟。以研究区实测的地应力为验证依据,通过不断调整模型和边界条件,进行反复模拟,得到研究区的地应力分布规律。在此基础上,探讨了研究区地应力分布的影响因素及地应力对研究区井网部署和压裂施工的影响,为致密油藏的高效开发提供地质依据。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地地处中国中部,是一个叠合的克拉通盆地,即中生代发育的盆地叠加在古生代盆地之上(吕文雅等,2020)。自三叠系地层沉积以后,该区中新生代构造应力场可以分为4期,分别为印支期、燕山期、喜马拉雅期、新构造期,其中,新构造期为中更新世以来的构造应力场,即现今应力场。该区以现今最大主应力为北东东—南西西方向挤压和最小主应力方向为北北西—南南东方向拉张为主,现今最大主应力方位约为 $NE70^{\circ}$ — $NE80^{\circ}$,且随着深度增加,现今最大、最小主应力呈线性增加(曾联波,2008)。研究区合水油田位于鄂尔多斯盆地的西南部(图1),是三叠系延长组和侏罗系延安组两个含油层组的叠合发育区。构造上位于伊陕斜坡(图1),总体为向西倾的单斜,倾角不足 1° (吴松涛等,2015)。三叠系延长组自下而上分为10个油层组:长10—长1。研究区主要发育长10—长2储层(邓胜徽等,2018),此次的研究主力层为三叠系延长组长6油层,属于湖泊环境下的辫状河三角洲前缘亚相沉积,主要发育水下分流河道、河口坝、分流间湾和席状砂微相(白蕾等,2012)。研究区长6储层岩性主要为灰色细—中粒岩屑长石砂岩夹泥岩、细—中粒长石岩屑砂岩和细—中粒长石砂岩等,平均孔隙度为8.47%,平均渗透率为0.11 mD(鞠玮等,2014),属于典型的致密砂岩储层。

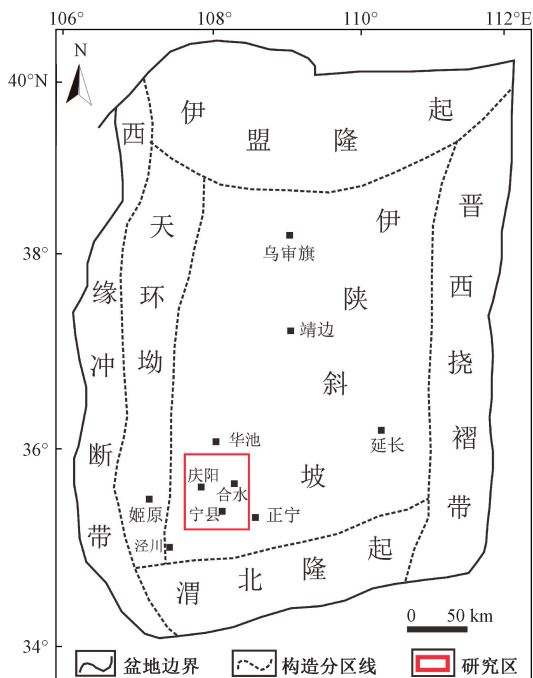


图1 研究区所处构造位置示意图(据赵向原等,2015修改)

Fig. 1 Structural location of the study area (modified after Zhao et al., 2015)

2 单井地应力特征

2.1 单井地应力方向

地应力方向对井网的部署具有重要影响,判断地应力方向的方法包括波速各向异性法、差应变法、井壁崩落法和微地震法等(戴俊生等,2014)。其中,微地震监测人工裂缝技术常用于测试深部的地应力信息,测试结果可以反映地下较大范围的地应力信息(图2),被认为是目前现今地应力测试的有效方法(戴俊生等,2016)。根据研究区两口井的微地震监测结果,得到人工裂缝的延伸方向大致为 $NE70^{\circ}$ — $NE80^{\circ}$,即可推断水平最大主应力的方位为 $NE70^{\circ}$ — $NE80^{\circ}$ 。

2.2 实测单井地应力大小

单井地应力大小的测量方法有很多种,包括水压致裂法、应力解除法、声发射法、差应变法等(景锋等,2008;解东亮,2013)。其中,水压致裂法的应用十分普遍,其显著的优点为操作简单、原位测量、测量深度可达数千米等(邬立等,2009;朱琳琳等,2018)。利用水压致裂法来判断地应力的原理为:在注水压裂过程中,压裂段孔壁会出现裂隙,停止注水后,裂隙会立即停止延

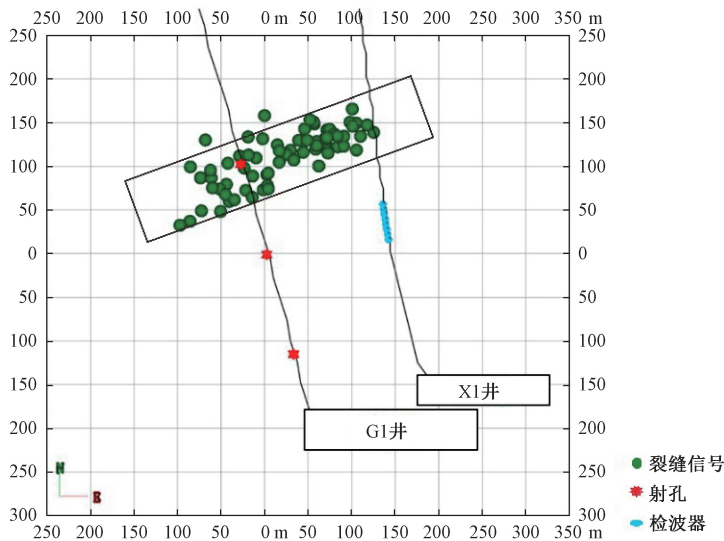


图 2 研究区 G1 井、X1 井微地震监测示意图

Fig. 2 Diagram of the microseismic monitoring on the wells G1 and X1 in the study area

伸，在地应力场作用下被高压液体涨破的裂隙会趋于闭合，把保持裂隙张开时的平衡压力称为瞬时关闭压力，它与垂直裂隙面的最小水平主应力大小相同（李振刚等，2018；曹金凤等，2012；印兴耀等，2018），由此可得到最小水平主应力的

大小。根据研究区 3 口井的水力压裂资料分析，通过水力压裂得到该井点长 6 储层的单井水平最大主应力值在 34~37 MPa 之间，平均值为 35.29 MPa，水平最小主应力在 27~32 MPa 之间，平均值为 29.33 MPa，水平差应力在 3~7 MPa 之间，平均值为 5.96 MPa（表 1）。

表 1 水力压裂法测得单井应力值

Table 1 Values of the present-day in-situ stress in the single wells measured by the hydrofracturing method

井号	层位	顶界 深度/m	最小水平 主应力/MPa	最大水平 主应力/MPa	水平差 应力/MPa
N1 井	长 6	1601.00	28.65	34.81	6.16
N1 井	长 6	1646.00	28.01	34.77	6.75
N2 井	长 6	1656.00	27.89	34.86	6.97
N2 井	长 6	1686.00	28.02	35.02	7.00
Z1 井	长 6	1649.00	31.85	37.07	5.22
Z1 井	长 6	1659.40	31.54	35.19	3.65
	平均值		29.33	35.29	5.96

3 应力场数值模拟及地应力分布规律

3.1 应力场三维有限元数值模拟

应力场数值模拟是研究构造应力场的一种重

要手段，包括了有限元法、有限差分法、边界元法、离散元法等（李玉江等，2009）。其基本原理为：将地质体离散成有限个连续的单元，单元之间以结点相连，用离散的结构模型去逼近实际的油气储层结构，建立以结点位移或单元内力为未知量，以整体刚度矩阵为系数的联立方程组，可求取各节点主应力值的大小和方向，即储层应力场（刘广峰等，2009）。有限元数值模拟在其发展过程中由二维模拟发展到三维模拟，相比较于二维模拟，三维模拟能更好地体现区域地应力场在垂向上的特征。

为了明确研究区低渗透储层地应力的空间特征，文章利用 Ansys 软件对合水地区延长组长 6₃₋₁ 小层进行了三维有限元数值模拟。首先根据研究区实际构造特点、沉积特点、岩相特点建立三维非均质地质模型，研究区发育湖泊环境下的辫状河三角洲前缘亚相沉积（白霁等，2012），主要发育水下分流河道和少部分分流间湾微相，构造上研究区整体表现为一个西倾的单斜（吴松涛等，2015），构造变形较弱，且无断层，因此研究区三维非均质地质模型主要体现在岩性和砂体厚度的差异上（图 3），在建立三维非均质地质模型的基础上，通过高温高压三轴岩石力学实验和研究区压裂施工的实际数据，确定不同岩性及不同砂体厚度的岩石力学参数（表 2），研究区的主要岩性为厚层细砂岩、中层粉砂岩、薄层粉砂质泥岩和泥岩，其中，对厚层细砂岩赋值泊松比 0.28，杨氏模量 35.70 GPa；中层细砂岩泊松比为 0.30，杨

氏模量赋值为 32.80 GPa; 薄层泥质粉砂岩/粉砂质泥岩赋值泊松比 0.32, 杨氏模量 30.00 GPa; 对泥岩赋值泊松比 0.35, 杨氏模量 28.00 GPa; 属性赋值结束后建立适合研究区实际的三维岩石力学模型。

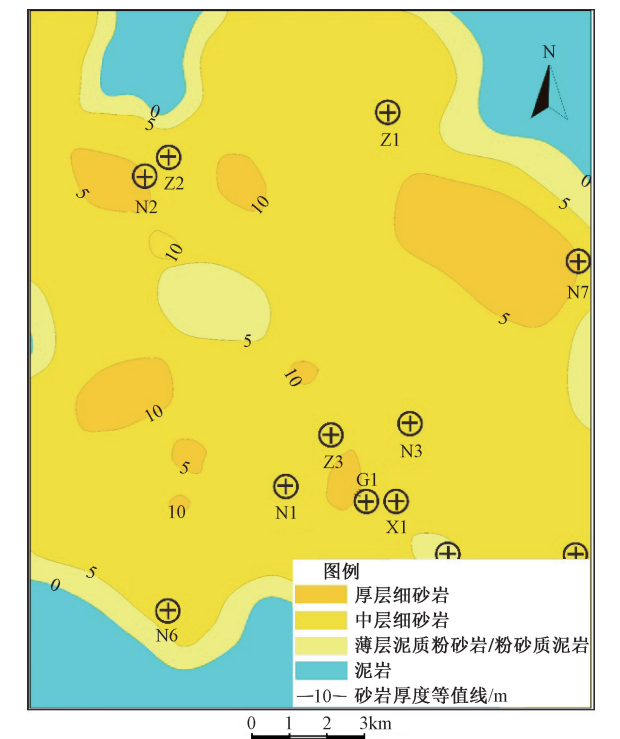


图 3 研究区岩性分布图 (据长庆勘探开发研究院, 2020 修改)

Fig.3 Diagram of the lithologic distribution in the study area (modified after Petroleum Exploration and Production Research Institute of Changqing Oilfield Company, 2020)

表 2 研究区岩石力学参数施加值

Table 2 Assignment of values to rock mechanics parameters in the study area

岩性	泊松比	杨氏模量/GPa
厚层细砂岩	0.28	35.70
中层细砂岩	0.30	32.80
薄层泥质粉砂岩/粉砂质泥岩	0.32	30.00
泥岩	0.35	28.00

在三维非均质地质模型和三维力学模型建立的基础上, 对模型进行网格划分, 得到三维有限元网格模型 (图 4)。由震源机制解研究可得, 研究区水平最大主应力方向为北东东—南西西向 (盛书中等, 2015), 同时结合单井地应力大小和方向的研究, 对三维力学模型施加边界条件 (表 3), 其中, 将水平最大主应力方向设为 NE70°, 大小为 36 MPa; 将最小水平主应力方向设为 NW20°, 大小为 28 MPa; 垂向应力在铅垂方向随着深度的增加应力大小也会增加, 由于研究区为一向西倾的单斜, 构造变形及起伏较弱, 且岩性主要以细—粉砂岩为主, 因此对于垂向应力采用依照密度施加, 根据密度资料得到研究区岩石的平均密度为 2.3 g/cm³。在边界条件施加完成之后, 利用 Ansys 有限元数值模拟软件开展三维现今应力场数值模拟。以研究区实测的地应力为验证依据, 通过不断调整模型和边界条件, 进行多次反复模拟, 得到研究区的地应力分布规律。

大小为 28 MPa; 垂向应力在铅垂方向随着深度的增加应力大小也会增加, 由于研究区为一向西倾的单斜, 构造变形及起伏较弱, 且岩性主要以细—粉砂岩为主, 因此对于垂向应力采用依照密度施加, 根据密度资料得到研究区岩石的平均密度为 2.3 g/cm³。在边界条件施加完成之后, 利用 Ansys 有限元数值模拟软件开展三维现今应力场数值模拟。以研究区实测的地应力为验证依据, 通过不断调整模型和边界条件, 进行多次反复模拟, 得到研究区的地应力分布规律。

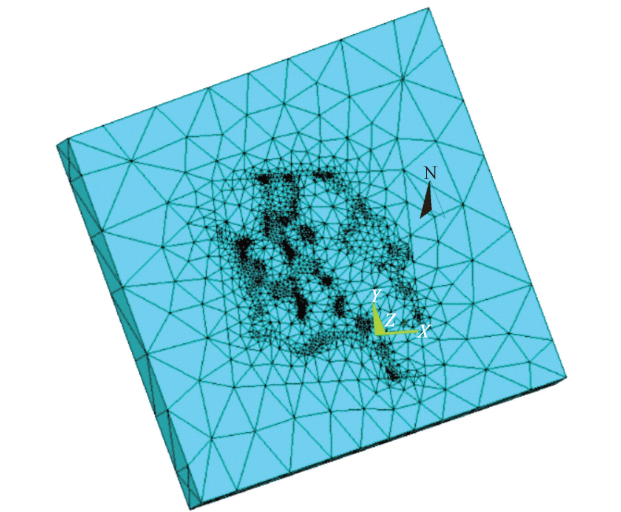


图 4 研究区三维有限元网格模型

Fig.4 Diagram of the 3D finite element mesh model of the study area

表 3 边界条件施加值

Table 3 Assignment of values to boundary conditions

边界	方向	大小
水平最大主应力	NE70°	36 MPa
水平最小主应力	NW20°	28 MPa
垂向应力	铅垂方向	取重力加速度 9.8 g/cm ³ , 密度取 2.3 g/cm ³

3.2 地应力的空间展布规律

通过三维应力场数值模拟, 得到研究区长 6₃₋₁ 层的地应力分布图 (图 5—图 7), 从模拟结果来看, 水平最大主应力范围为 34~42 MPa; 水平最小主应力范围为 25~36 MPa; 水平差应力范围为 3~10 MPa。平面上水平最大、最小主应力的高值主要分布在细砂岩区域, 而粉砂岩区域和粉砂质泥岩区域应力值较低, 研究区边缘泥岩区域应力值最低。垂向上呈现出与平面上较一致的规律, 在厚度较大的细砂岩区域, 水平最大主应力值较高, 而在厚度小的细砂岩和薄层的粉砂质泥岩及

泥岩区域，应力值降低。将模拟结果与压裂所得的N1井、N2井和Z1井的地应力结果进行对比(表4)，结果表明误差在10.00%以内，说明模拟的可信度相对较好。

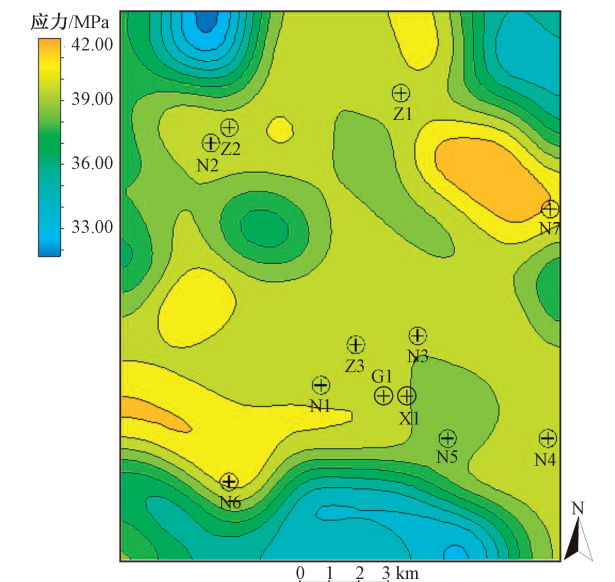


图5 长6₃₋₁层最大水平主应力分布图

Fig. 5 Distribution diagram of the maximum horizontal principle stress in the Chang 6₃₋₁ Formation

一般来说，地应力分布主要受三个因素的影响：一是构造格架，包括断层产状和地层厚度变化；二是区域应力场；三是岩石物理力学性质(谭成轩等，2006)；由于研究区构造变形较弱，断层不发育，构造格架对现今地应力的影响并不大。主要影响研究区现今地应力分布的因素为岩性与砂体厚度。岩性对地应力的影响主要体现在岩石的矿物组分、结构及胶结程度等方面。其中，细砂岩主要为厚层、中层发育，泥质粉砂岩/粉砂质泥岩为薄层发育。由于岩性的不同，其岩石力学性质也不同，主要表现为细砂岩的杨氏模量值最大，泊松比最小，而泥岩的杨氏模量最小，泊松比最大，进而造成了研究区现今地应力分布的差异，结果显示为细砂岩区域应力值都高于粉砂

表4 长6₃₋₁层单井应力测量值与应力场数值模拟值对比表

井名	最大主应力/MPa				最小主应力/MPa				水平差应力/MPa			
	测量值	模拟值	绝对误差	相对误差	测量值	模拟值	绝对误差	相对误差	测量值	模拟值	绝对误差	相对误差
N1井	34.70	38.00	3.30	9.50%	28.30	31.00	2.70	9.50%	6.40	7.00	0.60	9.40%
N2井	34.90	36.00	1.10	3.10%	27.90	29.20	1.30	4.70%	7.00	6.80	0.10	1.40%
Z1井	36.13	39.50	3.37	9.30%	31.70	35.00	3.30	10.40%	4.43	4.50	0.07	1.60%

岩、粉砂质泥岩及泥岩区。这表明影响研究区地

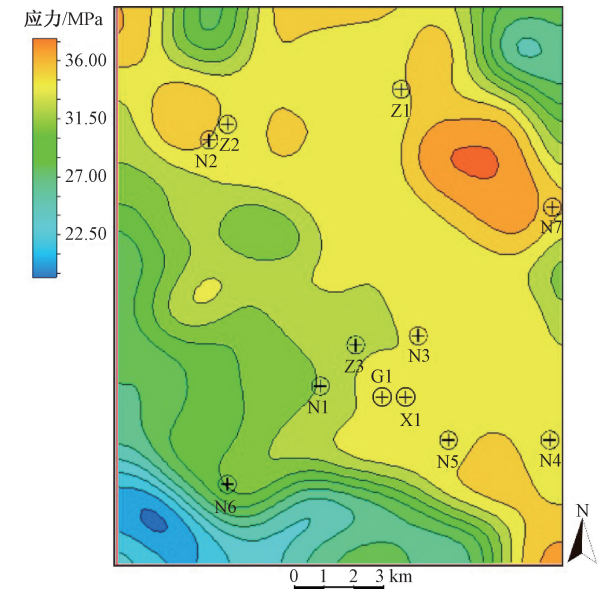


图6 长6₃₋₁层最小水平主应力分布图

Fig. 6 Distribution diagram of the minimum horizontal principle stress in the Chang 6₃₋₁ Formation

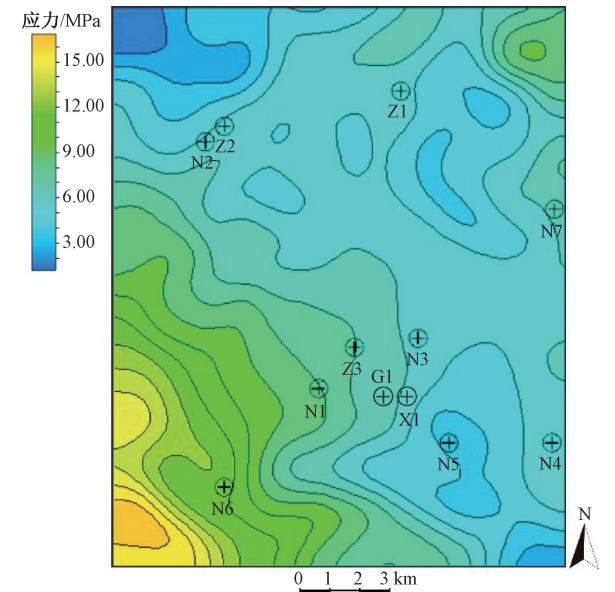


图7 长6₃₋₁层水平差应力分布图

Fig. 7 Distribution diagram of the horizontal differential stress in the Chang 6₃₋₁ Formation

应力分布的主要因素为岩性，高强度的岩石较低

强度的岩石应力值高。

4 开发建议

在低渗透储层压裂施工过程中,地应力对体积压裂的影响主要体现在:①最大主应力方向影响了单一压裂缝的延伸方向和长度(张志强等,2016);②水平差应力大小是压裂的关键因素,其值较小时,才能形成复杂的缝网,否则易形成延伸方向与最大主应力方向一致的单一压裂缝(徐珂等,2018)。因此,结合研究区布井情况分析,Z1井、Z2井、N5井所处位置的水平差应力大致在2~4 MPa,对这几口井进行体积压裂更容易形成复杂的缝网,而N1井、N6井所处位置水平差应力较高,为8~10 MPa,更容易形成单一的压裂缝,这些单一的压裂缝延伸的方向受到水平最大主应力方向的控制,推断其大致朝着NE70°的方向延伸。但同时,压裂缝的延伸也受到天然裂缝的影响,因此在布井时,也要考虑到研究区天然裂缝的发育情况。

另一方面,在水平应力差相等的情况下,所处地区的水平最大应力值越低,压裂缝形成所需的起裂压力就越低(张来功,2016);因此为尽可能地降低开发成本,在差应力相等的区域,油气工业井一般部署在应力值低的地方。如N7井与N1井所在地区,差应力大致相等,而N1井所在地区的最大主应力值较低,因此开发成本相对N7井较低一些。

5 结论

(1) 根据井下微地震监测分析表明,研究区水平最大主应力的优势方向为NE70°—NE80°。

(2) 通过应力场三维数值模拟得到,水平最大、最小主应力的高值主要分布在研究区的中部,即砂岩区域,而研究区边缘区为泥岩区域,应力值较低,也证明了研究区的应力分布主要受岩石力学性质的影响。

(3) 在差应力相等的区域,尽量选择水平最大主应力值低的地区,其所需起裂压力较低,可以一定程度上降低开发成本。

(4) 在实际进行布井时,不仅需要考虑现今地应力的方向和大小,同时要结合研究区天然裂

缝的发育情况综合考虑。

References

- BAI R, ZHANG J G, LI W, 2012. Reservoir geological model of lithological reservoir of Chang 6₃ in Heshui Area, Ordos basin [J]. Journal of Jinlin University (Earth Science Edition), 42 (6): 1601-1609. (in Chinese with English abstract)
- BELL J S, GOUGH D I, 1979. Northeast-southwest compressive stress in Alberta Evidence from oil wells [J]. Earth and Planetary Science Letters, 45 (2): 475-482.
- CAO J F, KONG L, WANG X C, 2012. Numerical simulation of hydraulic fracturing technique in Geostress measurement [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 8 (1): 148-153. (in Chinese with English abstract)
- DAI J S, LIU J T, YANG H M, et al., 2016. Numerical simulation of stress field of Fu-2 member in tongcheng fault zone and development suggestions [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 40 (1): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- DAI J S, SHANG L, WANG T D, et al., 2014. Numerical simulation of current in-situ stress field of Fengshan formation and distribution prediction of effective fracture in Futai buried hill [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 21 (6): 33-36. (in Chinese)
- DENG S H, LU Y Z, LUO Z, et al., 2018. Subdivision and age of the Yanchang Formation and the Middle/Upper Triassic boundary in Ordos Basin, North China [J]. Science China Earth Sciences, 48 (10): 1293-1311. (in Chinese with English abstract)
- DU W X, ZHANG H L, LIU G F, et al., 2010. Finite element simulation of the present ground stress field of Chang 8₂ reservoir in wellblock Zhuang 19 of Heshui area [J]. Journal of Oil and Gas Technology (Journal of Jiangnan Petroleum Institute), 32 (5): 210-213, 408-409. (in Chinese with English abstract)
- FAIRHURST C, 1964. Measurement of in situ rock stresses, with particular reference to hydraulic fracturing [J]. Rock Mechanics and Engineering Geology, 2: 129-147.
- HAST N, 1969. The state of stress in the upper part of the earth's crust [J]. Tectonophysics, 8 (3): 169-211.
- JIA C Z, ZOU C N, LI J Z, et al., 2012. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 33 (3): 343-350. (in Chinese with English abstract)
- JING F, SHENG Q, ZHANG Y H, et al., 2008. Statistical analysis of geostress distribution laws for different rocks [J]. Rock and Soil Mechanics, 29 (7): 1877-1883. (in Chinese with English abstract)
- JU W, HOU G T, FENG S B, et al., 2014. Quantitative prediction of the Yanchang formation Chang 6₃ reservoir tectonic fracture in the Qingcheng-Heshui area, Ordos basin [J]. Earth Science Frontiers, 21 (6): 310-320. (in Chinese with English abstract)
- LI Y J, CHEN L W, YE J Y, 2009. Application and development of numerical simulation in stress field evolvement and seismology [J]. Progress in Geophysics, 24 (2): 418-431. (in Chinese with English abstract)
- LI Z G, FANG J H, 2018. Analysis of geostress test results by hydraulic fracturing method [J]. Sichuan Building Materials, 44 (2): 87-88. (in Chinese with English abstract)

- LIAO X W, LIU Q, LI C, et al., 2015. Distribution of the present stress in low permeability oilfield of Bozhong 25-1 and its effect on development [J]. *Journal of Geomechanics*, 21 (1): 30-37. (in Chinese with English abstract)
- LIU G F, LU H J, HE S L, 2009. Application of finite element analysis in reservoir in-situ stress research [J]. *Science Technology and Engineering*, 9 (24): 7430-7435. (in Chinese with English abstract)
- LIU H T, XIE B, YANG X T, et al., 2016. The FEA numerical algorithm for 3D modern crustal stress field [J]. *Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Sciences Edition)*, 17 (4): 71-75. (in Chinese with English abstract)
- LIU L H, YANG Q, QU J P, 2013. A practical Ansys 3-D numerical simulation method for in-situ stress field [J]. *Journal of Geomechanics*, 19 (2): 133-142. (in Chinese with English abstract)
- LÜ W Y, ZENG L B, ZHOU S B, et al., 2020. Microfracture characteristics and its controlling factors in the tight oil sandstones in the southwest Ordos Basin: Case study of the eighth member of the Yanchang Formation in Honghe Oilfield [J]. *Natural Gas Geoscience*, 31 (1): 37-46. (in Chinese with English abstract)
- MAO Z, ZENG L B, QIN L B, et al., 2018. Research on ground stress distribution rules of deep tight volcanic rock reservoirs in the huoshiling formation, xujiaweizi fault depression [J]. *Journal of Geomechanics*, 24 (3): 321-331. (in Chinese with English abstract)
- NIU L L, FENG C J, ZHANG P, et al., 2018. In situ measurements in the southern margin of the Ordos block [J]. *Journal of Geomechanics*, 24 (1): 25-34. (in Chinese with English abstract)
- QUAN K, 2014. Numerical Study on the Tectonic Stress Field of Longmenshan Fault Zone and assessment of the regional crustal stability [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- SHENG S Z, WAN Y G, HUANG J C, et al., 2015. Present tectonic stress field in the Circum-Ordos region deduced from composite focal mechanism method [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58 (2): 436-452. (in Chinese with English abstract)
- TAN C X, SUN W F, SUN Y, et al., 2006. A consideration on in-situ crustal stress measuring and its underground engineering application [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80 (10): 1627-1632. (in Chinese with English abstract)
- WAN X L, GAO C N, WANG Y K, et al., 2009. Coupled relationship between created and natural fractures and its implication to development [J]. *Journal of Geomechanics*, 15 (3): 245-252. (in Chinese with English abstract)
- WENG J Q, ZENG L B, LYU W Y, et al., 2020. Width of stress disturbed zone near fault and its influencing factors [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (1): 39-47. (in Chinese with English abstract)
- WU L, ZHAO L, WU K, 2009. Study on 3-D geostress measuring with hydraulic fracturing method [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 16 (4): 104-107, 110. (in Chinese with English abstract)
- WU S T, ZOU C N, ZHU R K, et al., 2015. Reservoir quality characterization of upper Triassic Chang 7 shale in Ordos basin [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geoscience*, 40 (11): 1810-1823. (in Chinese with English abstract)
- XIE D L, 2013. Review of in-situ stress measurement methods [J]. *Science & Technology Information* (6): 150-153. (in Chinese with English abstract)
- XU K, DAI J S, FENG J W, et al., 2018. Prediction of 3D heterogeneous in-situ stress field of northern area in a Gaoshen, Nanpugang, Bohai Bay basin, China [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 47 (6): 1276-1286. (in Chinese with English abstract)
- XU L, 2016. The logging evaluation of Chang 7 member of Yanchang formation tight oil in Heshui oilfield [D]. Qingdao: China University of Petroleum (Hua Dong). (in Chinese with English abstract)
- XU Z H, 1990. Current status and prospects of in-situ stress research [J]. *Advances in Earth Science* (5): 27-34. (in Chinese)
- YIN X Y, MA N, MA Z Q, et al., 2018. Review of in-situ stress prediction technology [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 57 (4): 488-504. (in Chinese with English abstract)
- ZENG L B, 2008. Formation and distribution of fractures in low permeability sandstone reservoirs [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- ZENG L B, TIAN C L, 1998. Tectonic stress field and the development of low permeability oil fields [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 25 (3): 91-93. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H, SHUI G, WU H, et al., 2020. In-situ stress measurement in the shallow basement of the Shanghai area and its structural geological significance [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (4): 583-594. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG B, YANG J L, XIE Q, et al., 2012. Application of ground stress analysis to shale-gas development in western Hubei and eastern Chongqing region [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 35 (3): 33-36. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG L G, 2016. The effect of stresses and natural fractures in tight-sandstone of hydraulic fracturing [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- ZHANG S L, 2011. The modeling of the tectonic stress field-theory, method and related research progress on the finite element method [J]. *Process in Geophysics*, 26 (1): 52-60. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Z Q, SHI Y M, BU X Q, et al., 2016. A study of in-situ stress direction change during waterflooding in the low permeability reservoirs [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 52 (5): 861-870. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO X Y, ZENG L B, LIU Z Q, et al., 2015. Differences of natural fracture characteristics and their development significance in Chang 6, Chang 7 and Chang 8 reservoir, Ningxian-Heshui area, Ordos Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 50 (1): 274-285. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU X G, ZANG L Y, FAN K, et al., 2009. Measurement of the present earth stress of Ordos Basin and its applications in oil and gas exploitation [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 24 (3): 7-12. (in Chinese with English abstract)
- ZOU C N, ZHU R K, BAI B, et al., 2015. Significance, geologic Characteristics, resource Potential and future challenges of Tight Oil And Shale Oil [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34 (1): 1-17. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

白霁, 张金功, 李渭, 2012. 鄂尔多斯盆地合水地区延长组长 6₃ 岩性油藏储层地质建模 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 42 (6): 1601-1609.

曹金凤, 孔亮, 王旭春, 2012. 水压致裂法地应力测量的数值模拟 [J]. 地下空间与工程学报, 8 (1): 148-153.

曾联波, 2008. 低渗透砂岩储层裂缝的形成与分布 [M]. 北京: 科学出版社.

曾联波, 田崇鲁, 1998. 构造应力场与低渗透油田开发 [J]. 石油勘探与开发, 25 (3): 91-93.

戴俊生, 刘敬寿, 杨海盟, 等, 2016. 铜城断裂带阜二段储层应力场数值模拟及开发建议 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 40 (1): 1-9.

戴俊生, 商琳, 王彤达, 等, 2014. 富台潜山凤山组现今地应力场数值模拟及有效裂缝分布预测 [J]. 油气地质与采收率, 21 (6): 33-36.

邓胜徽, 卢远征, 罗忠, 等, 2018. 鄂尔多斯盆地延长组的划分、时代及中-上三叠统界线 [J]. 中国科学: 地球科学, 48 (10): 1293-1311.

杜玮暄, 张红玲, 刘广峰, 等, 2010. 合水地区庄 19 井区长 8₂ 储层现今地应力场有限元模拟 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 32 (5): 210-213, 408-409.

贾承造, 邹才能, 李建忠, 等, 2012. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景 [J]. 石油学报, 33 (3): 343-350.

解东亮, 2013. 地应力测量方法综述 [J]. 科技资讯 (6): 150-153.

景峰, 盛谦, 张勇慧, 等, 2008. 不同地质成因岩石地应力分布规律的统计分析 [J]. 岩土力学, 29 (7): 1877-1883.

鞠玮, 侯贵廷, 冯胜斌, 等, 2014. 鄂尔多斯盆地庆城—合水地区延长组长 6₃ 储层构造裂缝定量预测 [J]. 地学前缘, 21 (6): 310-320.

李玉江, 陈连旺, 叶际阳, 2009. 数值模拟方法在应力场演化及地震科学中的研究进展 [J]. 地球物理学进展, 24 (2): 418-431.

李振刚, 方君涵, 2018. 水压致裂法地应力测试结果分析 [J]. 四川建材, 44 (2): 87-88.

廖新武, 刘奇, 李超, 等, 2015. 渤中 25-1 低渗透油田地应力分布特征及对开发的影响 [J]. 地质力学学报, 21 (1): 30-37.

刘爱华, 杨清, 吴均平, 2013. ANSYS 三维地应力场数值模拟方法应用研究 [J]. 地质力学学报, 19 (2): 133-142.

刘广峰, 陆红军, 何顺利, 2009. 有限元法开展油气储层地应力研究综述 [J]. 科学技术与工程, 9 (24): 7430-7435.

刘洪涛, 谢兵, 杨向同, 等, 2016. 三维现今地应力场有限元数值计算 [J]. 长春工程学院学报 (自然科学版), 17 (4): 71-75.

吕文雅, 曾联波, 周思宾, 等, 2020. 鄂尔多斯盆地西南部致密砂岩储层微观裂缝特征及控制因素: 以红河油田长 8 储层为例 [J]. 天然气地球科学, 31 (1): 37-46.

毛哲, 曾联波, 秦龙卜, 等, 2018. 徐家围子断陷深层火石岭组致密

火山岩储层地应力分布规律研究 [J]. 地质力学学报, 24 (3): 321-331.

牛琳琳, 丰成君, 张鹏, 等, 2018. 鄂尔多斯地块南缘地应力测量研究 [J]. 地质力学学报, 24 (1): 25-34.

权凯, 2014. 龙门山断裂带构造应力场数值模拟及区域地壳稳定性分析 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京).

盛书中, 万永革, 黄骥超, 等, 2015. 应用综合震源机制解法推断鄂尔多斯块体周缘现今地壳应力场的初步结果 [J]. 地球物理学报, 58 (2): 436-452.

谭成轩, 孙炜锋, 孙叶, 等, 2006. 地应力测量及其地下工程应用的思考 [J]. 地质学报, 80 (10): 1627-1632.

万晓龙, 高春宁, 王永康, 等, 2009. 人工裂缝与天然裂缝耦合关系及其开发意义 [J]. 地质力学学报, 15 (3): 245-252.

翁剑桥, 曾联波, 吕文雅, 等, 2020. 断层附近地应力扰动带宽度及其影响因素 [J]. 地质力学学报, 26 (1): 39-47.

郭立, 赵璐, 郭坤, 2009. 水压致裂法测量三维地应力研究 [J]. 安全与环境工程, 16 (4): 104-107, 110.

吴松涛, 邹才能, 朱如凯, 等, 2015. 鄂尔多斯盆地上三叠统长 7 段泥页岩储集性能 [J]. 地球科学—中国地质大学学报, 40 (11): 1810-1823.

徐珂, 戴俊生, 冯建伟, 等, 2018. 南堡凹陷高深北区三维非均质应力场精细预测 [J]. 中国矿业大学学报, 47 (6): 1276-1286.

徐磊, 2016. 合水地区延长组长 7 致密油藏测井评价 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东).

许忠淮, 1990. 地应力研究现状与展望 [J]. 地球科学进展 (5): 27-34.

印兴耀, 马妮, 马正乾, 等, 2018. 地应力预测技术的研究现状与进展 [J]. 石油物探, 57 (4): 488-504.

张斌, 杨佳玲, 解琪, 等, 2012. 地应力分析在鄂西渝东地区页岩气开发中的应用 [J]. 天然气勘探与开发, 35 (3): 33-36.

张浩, 施刚, 巫虹, 等, 2020. 上海地区浅部地应力测量及其构造地质意义分析 [J]. 地质力学学报, 26 (4): 583-594.

张来功, 2016. 地应力及天然裂缝对致密砂岩水压致裂的影响研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京).

张胜利, 2011. 构造应力场模拟—有限元理论、方法和研究进展 [J]. 地球物理学进展, 26 (1): 52-60.

张志强, 师永民, 卜向前, 等, 2016. 低渗透油藏注水开发中地应力方向变化的研究分析 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 52 (5): 861-870.

赵向原, 曾联波, 王晓东, 等, 2015. 鄂尔多斯盆地宁县-合水地区长 6、长 7、长 8 储层裂缝差异性及其开发意义 [J]. 地质科学, 50 (1): 274-285.

周新桂, 张林炎, 范昆, 等, 2009. 鄂尔多斯盆地现今地应力测量及其在油气开发中的应用 [J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 24 (3): 7-12.

邹才能, 朱如凯, 白斌, 等, 2015. 致密油与页岩油内涵、特征、潜力及挑战 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 34 (1): 1-17.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 听到作者的语音介绍及分享的文章彩图

