

文章编号:1001-6112(2012)03-0325-05

一种改进后的断裂封堵性研究方法

——以龙门山冲断带为例

吕志洲,李旻,田军,黎青

(中国石化西南油气分公司勘探开发研究院,成都 610081)

摘要:保存条件是前陆冲断带油气成藏的关键因素,其中断层的封堵性能起到至关重要的作用。由于断层两盘岩性对接关系在三维空间上的差异,致使同一断层在不同走向或者不同深度上封堵性存在差异。该文应用改进后的 Allen 剖面研究断层侧向封堵性,应用断面压力联合断移地层砂比评价断层垂向封堵性。将同一断层垂向与侧向封堵性相结合,从而实现半定量综合评价。在低勘探程度尤其是无井地区,应用此方法可以初步判断断层封堵性。在勘探程度相对较高地区,可以充分应用勘探资料,将评价结果由半定量向量化推进。

关键词:断面剖面分析法;断裂封堵性;油气保存;油气成藏;龙门山冲断带

中图分类号:TE122.3⁺⁴

文献标识码:A

An improved research method on fault sealing capacity:

taking Longmenshan thrust belt as an example

Lü Zhizhou, Li Min, Tian Jun, Li Qing

(Exploration and Production Research Institute of Southwest Branch Company, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract: Preservation condition is a key element of oil and gas accumulation in foreland thrust belt, and fault sealing capacity plays a vital function. Due to the difference of lithologic interface of fault plates in three-dimensional space, the sealing capacity of the identical fault is different along different orientations or at different depths. The improved Allen section was applied in this paper to study the lateral sealing capacity of fault. The vertical sealing capacity of fault was evaluated based on the pressure of fault section and the net-to-gross ratio of displaced layers. Semi-quantitative comprehensive evaluation was made by means of the studies of vertical and lateral sealing capacity of fault. This method might be used to judge the fault sealing capacity initially in the places with low exploration degree, especially in those places without wells. And the places with high exploration degree, we could develop the results of evaluation from semi-quantitation to quantification based on exploration data.

Key words: analysis method of fault section; sealing capacity of fault; petroleum reservation; petroleum accumulation; Longmenshan thrust belt

保存条件是前陆冲断带油气成藏的关键因素。龙门山冲断带经历构造变革期次多,形变强度大,断裂极其发育。勘探成果证实了龙门山冲断带虽然蕴含丰富的油气聚集,但广泛分布的油气苗同时也证实了油气渗漏、油气藏的破坏具有普遍性,大量发育的断层无疑对油气藏的保存条件有重大的影响^[1-4]。因此冲断带独特的构造地质条件,决定了断裂封堵性对油气藏保存具有至关重要的作用。

1 断裂封堵性机理及研究方法

1.1 断裂封堵性机理

油气运移过程中遇到断层面,继续运移主要有

2种情况,一是穿越断层面从断层一侧运移到另一侧,二是沿断层面运移至不同的地层之中;前者称侧向运移,后者称垂向运移。Smith的断层封闭性模型从断层封闭性的本质入手给出了定义^[5],认为目的盘岩层的排替压力小于对盘地层排替压力时,断层是封闭的。Dewney通过对断层的封闭机理研究^[6],认为断层封闭具备双向性,即侧向封闭和垂向封闭。陈发景在前人研究的基础上,又进一步研究了断层封闭机理^[7],指出断层侧、垂向封闭能力大小取决于目的盘储层与对置盘地层、断裂充填物及盖层内裂缝排替压力差的大小。因此断层的封闭性是由侧向封闭性和垂向封闭性所共同决定的。

收稿日期:2011-10-02;修订日期:2012-04-13。

作者简介:吕志洲(1977—),男,工程师,从事龙门山冲断带构造研究。E-mail:youngfour4@163.com。

基金项目:中国石化油田事业部勘探先导项目“龙门山前带勘探目标评价与关键技术研究”(10KT-07)资助。

断层的侧向封闭机理分为3种形式:砂泥对接封闭;断裂带高排替压力封闭;泥岩涂抹形成的侧向封闭。而断层的垂向封闭机制分为紧闭愈合垂向封闭和成岩胶结垂向封闭^[6-7]。

1.2 断裂封堵性研究方法

1.2.1 主要的定性评价方法

(1)断面剖面分析法^[8],也被称为Allan图解法,通过断层两盘岩层对接关系分析侧向封闭性,该方法在国内外应用比较广泛。

(2)综合地质分析法,主要有断移地层砂地比法评价侧向封闭性^[9],压力系数法评价垂向封闭性,地温梯度分析法评价垂向封闭性。

(3)非线性映射分析法研究区域上断层封闭性^[10]。非线性映射分析法是一种“几何图形降维”的数学方法,在二维平面上分析断层封闭性能与已知“样本”的相似性。

(4)逻辑信息法综合判断断层封闭性。此方法是以数理逻辑、组合分析及数理统计为基础的一种综合数学分析方法,通过一系列复杂的数学转化将地质工作者的学识、经验和基本判断(类似于专家打分)表达为对象权(I_i)参数,过程复杂,需要几乎所有的石油地质基础资料才能得到较准确的综合评判结果,因此该方法应用较少。

1.2.2 主要的半定量—定量评价方法

半定量—定量评价方法主要有:(1)SSF泥岩涂抹指数法^[11]及断层泥刮削比(SGR)^[12];(2)砂泥岩对接概率模拟分析法^[13];(3)断面压力法。

由于断面压力是造成断层在垂向上紧闭愈合的最重要因素,此方法得到广泛应用。常用的断面压力计算公式有2个:

断面正压力计算公式^[13-14]:

$$P = P_1 + P_2 = Z(\rho_1 - \rho_2) \cos\alpha + \sigma_1 \sin\alpha \sin\beta \quad (1)$$

式中: P 为断层受到的正压力; P_1 为上覆地层重量对断层产生的静岩压力; P_2 为区域主压应力对断层产生的压力; Z 为断层埋深; ρ_1 为上覆地层的平均密度; ρ_2 为上覆地层水的密度; α 为断层倾角; σ_1 为区域主压应力; β 为断层主应力与断层走向之间的夹角。

断面的剩余压力计算公式^[15]:

$$P_{IA} = S_u \cos\theta - P_b \quad (2)$$

式中: P_{IA} 为断面某处的剩余压力; S_u 为断面某点处垂直应力; θ 为断面倾角; P_b 为断面某点处地层压力。

2 方法改进及应用

上述方法从影响断层封闭性不同因素和方面建立了模型和评价标准。但有些方法有较严格的使用要求和条件,具有局限性;有些方法数理性太强,实际应用较困难,操作性不强。综合地质分析法、逻辑信息法或非线性映射分析法,无论断层的发育规模、特点如何,均给予“封闭”与“不封闭”绝对性的判断^[13],忽略了三维空间上封闭能力由于各种地质因素造成的差异性。由于龙门山冲断带地质客体特征的特殊性、与上述方法实例客体的差异性和本身勘探资料程度的不同,在断裂封闭性研究过程中,需要对研究分析方法进行优选,并加以改进。

2.1 “改进后的Allan剖面法”分析断层侧向封闭性

由于勘探程度的不同,断面剖面上的地层展布可能只是概括地反映总体变化,不可能像钻井揭示的地层那样实际、细致;加之陆相地层横向岩性变化较快,研究区内断层沿走向延伸较远。虽然砂泥岩对接概率法可以弥补这个缺陷,但在实际操作过程中,需要建立数学统计模型,进行大量的反复模拟才能得出可靠的砂泥岩厚度分布规律,对地质研究人员的数理分析能力要求较高,操作难度较大。因此借鉴砂泥岩对接概率的思路,充分利用砂地比值参数,将沉积相平面展布成果在断面剖面上表现出来,用Allan剖面联合砂地比值(改进后的Allan剖面)作为分析断层侧向封闭性研究的方法。

2.1.1 方法改进及应用实例

(1)龙门山北段安县地区位于龙门山前缘的强形变区域,经历多期构造运动,断裂极为发育。选取香水断层(图1)进行断层侧向封闭性研究。

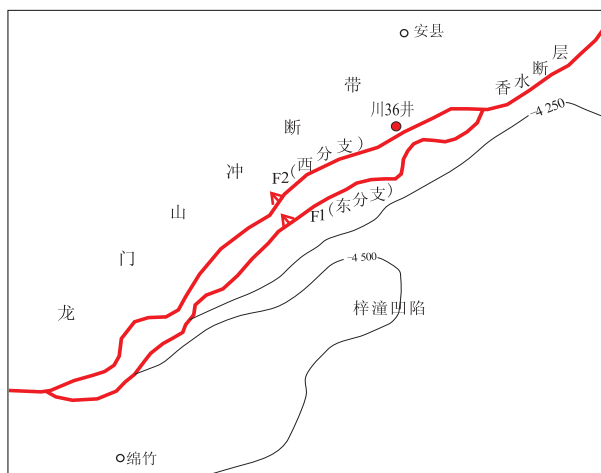


图1 四川盆地安县地区香水断层平面位置示意

Fig. 1 Planimetric position of Xiangshui Fault in Anxian area, Sichuan Basin

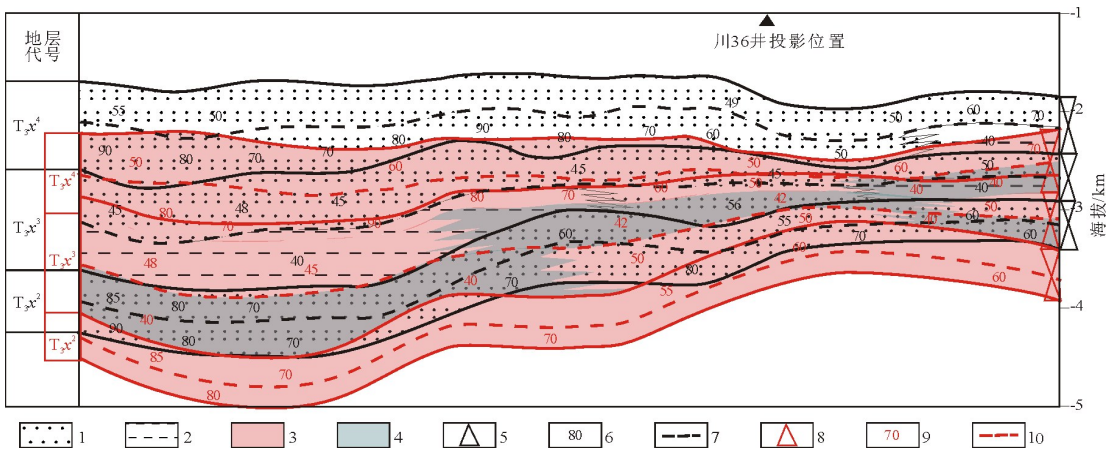


图2 四川盆地安县—绵竹地区香水断层 Allen 剖面

- 1. 上盘砂岩;2. 上盘泥岩;3. 下盘砂岩;4. 下盘泥岩;5. 上盘旋回;
- 6. 上盘砂地比值;7. 上盘半旋回分界线;8. 下盘旋回;9. 下盘砂地比值;10. 下盘半旋回分界线

Fig. 2 Allen section of Xiangshui Fault, Anxian-Mianzhu area, Sichuan Basin

从香水断层 Allan 剖面(图2)可以看出以下几个特点:断层上盘的须二砂体发育较好,而与之对接的则是下盘须三段的大套泥页岩,因此香水断层对上盘须二气藏具有良好的侧向封堵条件。虽然断层下盘的须二砂体同样发育,但是与之对接的主要是上盘须二段的砂岩以及海相地层,岩性对接情况差导致香水断层对下盘气藏的封堵性较差。

从整体上看,香水断层对安县—绵竹地区上盘的须二段气藏具有一定的侧向封堵性。由于在砂地比值上存在差异,因此,断层在绵竹地区的侧向封堵条件优于安县地区。

(2)龙门山中段鸭子河地区,选取关口断层,仍然采用此方法进行断层封堵性的评价。

从图3可以看出,与下盘须二砂体对接的上盘地层主要是雷口坡组海相地层。但在关口断层东北部的小部分地区,下盘须二砂体对接的是上盘马鞍塘和小塘子组的泥页岩,而且这部分泥页岩段的砂地比值较低,主要在30%以下。因此,关口断层东北部分地区对于下盘须二砂体具有一定封堵性。

2.2 断面压力法联合断移地层砂地比研究断层垂向封闭性

断层的垂向封闭性除与断面压力有关外,还受断移地层泥岩层含量的影响。因此,评价断层垂向封闭性时,必须兼顾断移地层的砂地比值^[13]。

用公式(2)计算了安县地区香水断层东西分支断层的断面压力(图4,5)。求取区域最大水平主应力值最精确的方法是钻井水力压裂原地测量,或用气田开发初期加砂压裂增产措施相关数据计算近似值。根据构造特征,区域水平主应力方向为125°,参考川东地区应力计算成果,水平主压应力

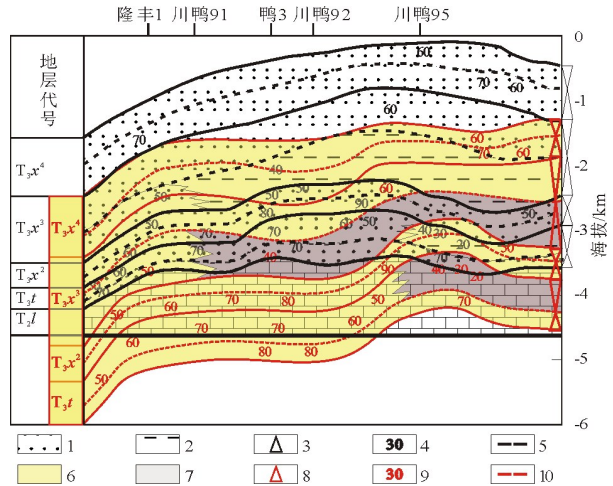


图3 四川盆地鸭子河—白鹿地区关口断层 Allen 剖面

- 1. 上盘砂岩;2. 上盘泥岩;3. 上盘旋回;4. 上盘砂地比值;
- 5. 上盘半旋回分界线;6. 下盘砂岩;7. 下盘泥岩;8. 下盘旋回;
- 9. 下盘砂地比值;10. 下盘半旋回分界线

Fig. 3 Allen section of Guankou Fault, Yazihe-Bailu area, Sichuan Basin

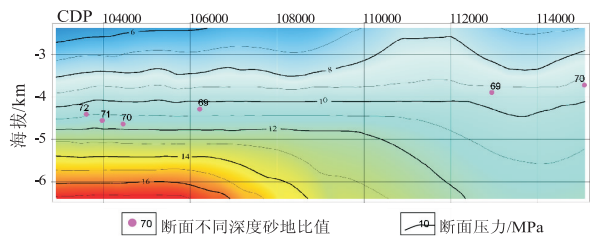


图4 四川盆地安县地区F1断层(香水断层东分支)断面压力与砂地比剖面投影

Fig. 4 Fault section pressure and net-to-gross ratio projection of F1 Fault (eastern branch of Xiangshui Fault), Anxian area, Sichuan Basin

值取7 MPa^[16]。根据实验测试,泥质岩变形强度在10~25 MPa之间^[14],前期相关研究成果在研究区

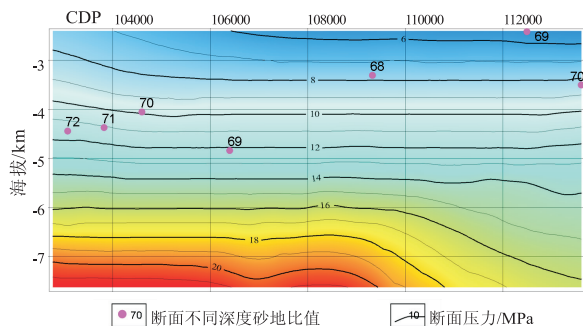


图5 四川盆地安县地区 F2 断层
(香水断层西分支) 断面压力与砂地比剖面投影

Fig. 5 Fault section pressure and net-to-gross ratio projection of F2 Fault (western branch of Xiangshui Fault), Anxian area, Sichuan Basin

表1 断层垂向封堵性评价标准简表

Table 1 Evaluation criterion of vertical sealing capacity of fault

砂地比/%	断面压力/MPa		
	<13	13 ~ 20	>20
<50	较差	中	好
50 ~ 60	差	中	较好
60 ~ 70	差	较差	中
70 ~ 80	差	较差	较差
>80	差	差	差

注:断面压力以 20 MPa 为下限,区域地层压力取 7 MPa,断面剩余压力下限 13 MPa。

泥岩极限抗压强度取 20 MPa^[17],建立了断层垂向封堵性评价标准(表 1)。

通过图 4 和图 5 可以看出,深度达到 5 000 ~ 5 200 m 左右,底部边界小部分压力大于 13 MPa,因此,我们认为深度小于 5 200 m 断层基本不具备封堵能力;而深度大于 5 200 m,虽然断层剩余压力大于 13 MPa,但是由于断面砂地比值介于 69% ~ 72% 之间,所以 F1、F2 断层在垂向上对须二油气藏的封堵能力并不理想。

2.3 断层封堵性综合评价

结合龙门山北安县地区地震资料解释及川 29 井、川 36 井等钻探成果,可以看出彰明断层主要断开了须二段泥岩盖层和须家河组顶部的区域盖层,断距约 500 ~ 800 m,但是上盘缺失须家河组顶部盖层,须二段泥岩已经错断,断层两盘为砂—砂对接。由此可以认为,安县地区香水断裂封闭性较差。但断层下盘深部雷口坡组从地下水(总矿化度 120.66 g/L,水型为 CaCl₂ 型)及压力剖面分析,说明受雷口坡组膏盐封闭影响,海相油气保存条件相对较好。

对于龙门山中段,根据本次所做的鸭子河地区

Allan 剖面,结合前人用压力剖面法所做的垂向封堵性研究^[17],可以看出关口断层对下盘的须家河组五段以下是封堵的,断层上盘不封堵。根据关口断层侧向封闭性研究(图 5)发现,该地区总体上砂岩含量较高,须二段砂地比略高于须四段。但是,由于断面压力随深度增加呈现不断变大的趋势,关口断层下盘须二段的断面压力明显高于须四段,表现出更有利于断面附近泥页岩塑性流动的条件,从而通过泥岩涂抹形成较好的断层封堵。同时,关口断层下盘的川鸭 92 井须二段显示油气层 2 层、气层 1 层、含气层 2 层,须二段获工业气流 3×10⁴ m³/d,为高压气藏,压力系数 1.70;须二段地层水为高矿化度 CaCl₂ 水型,反映出良好的封盖保存条件。因此,关口断层对下盘的须二段气藏具有较好的封堵条件。

3 结论

1) 以 Allan 剖面为基础,结合区域沉积相研究成果,用改进后的 Allan 剖面研究断层侧向封闭性,可以克服低勘探程度地区单一使用 Allan 剖面地层岩性及厚度展布的概略性,同时避免了单纯砂泥岩对接概率法复杂的数理建模及模拟计算等过程,该方法操作简单,易于实现。同时该方法在高勘探程度地区有应用拓展的空间,可以将小层对比及波阻抗反演成果充分反映到改进后的 Allan 剖面中,使分析结果更加深入和精细。

2) 断层垂向封闭性往往决定着断层的总体封闭特征。

4 研究设想

断层封闭性研究是目前油气地质理论中的一大难题,断层封闭性在油气运、聚、散过程中起着举足轻重的作用,但因其研究难度较大,研究进展与其它成熟的油气地质理论相比还存在着不小的差距。

断层切片技术是 Brown 等(1987)开发的一项研究断层相关褶皱的人机交互技术^[18]。从三维地震数据体中平行某一条已解释好的断层面等间距提取一系列地震剖面,它们是与断层面形态相同的倾斜曲面。倾斜曲面上的地震信息保留了原三维数据中的地震反射特征,可以将它们按水平切片方式投影显示。张永华等^[19]应用此技术对焉耆盆地某油田的控制圈闭的断层做了断层封闭性研究。近年来关于断层封闭性研究方法及应用文献鲜有此种方法的介绍。因此提出断层切片技术方法尝试与改进后的 Allan 剖面联合分析设想。

龙门山前鸭子河—大邑地区三维地震资料已连片,为该方法的应用提供了资料基础;目前地震资料三维可视化技术飞速发展,该方法从实现原理上并非异常困难,为我们提供了技术支撑。此方法若与改进后的 Allan 剖面结合起来,可以实现断层封闭性研究地质与物探的完美结合,使断面及两盘的地质、地球物理信息同时展现在断面剖面上,大大增强断层封堵性研究的直观性、可信度,具有较高的实用性。

参考文献:

- [1] 罗啸泉,李书兵,赵锡奎. 川西龙门山构造特征与油气关系[J]. 石油实验地质,2011,33(4):384-387.
- [2] 罗啸泉,李书兵,何秀彬,等. 川西龙门山油气保存条件探讨[J]. 石油实验地质,2010,32(1):10-14.
- [3] 杨长清,岳全玲,燕继红,等. 龙门山北段构造变形特征与物理模拟[J]. 断块油气田,2010,7(6):686-689.
- [4] 金文正,汤良杰,杨克明,等. 龙门山冲断带前缘地区侏罗系出露与油气分布关系[J]. 断块油气田,2010,17(4):385-388.
- [5] Smith D A. Theoretical consideration of sealing and nonsealing faults[J]. AAPG Bulletin,1966,50(2):363-374.
- [6] Downey M W. Evaluating seals for hydrocarbon accumulations[J]. AAPG,1984,68(11):1752-1763.
- [7] 陈发景,田世澄. 压实与油气运移[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1989.
- [8] Allan U S. Model for hydrocarbon migration and entrapment within faulted structures[J]. AAPG Bulletin,1989,73(3):803-811.
- [9] 吕延防,李国会,王跃文,等. 断层封闭性的定量研究方法[J]. 石油学报,1997,17(3):39-45.
- [10] 吕延防,陈章明,陈发景. 非线性映射分析判断断层封闭性[J]. 石油学报,1995,16(2):36-41.
- [11] Lindsay N G, Murphy F C, Walsh J J. Outcrop studies of shale smears on fault surfaces[C] // Flint S S, Bryant I D, eds. The geological modeling of hydrocarbon reservoir and outcrop analogues. The International Association of Sedimentologists Special Publication 15,1993:113-123.
- [12] Yielding G, Freeman B, Needham D T. Quantitative fault seal prediction[J]. AAPG Bulletin,1997,81(6):897-917.
- [13] 吕延防,付广. 断层封闭性研究[M]. 北京:石油工业出版社,2002.
- [14] 陈章明,吴元燕,吕延防,等. 油气藏保存与破坏研究[M]. 北京:石油工业出版社,2003.
- [15] 周文,黄辉. 盖层及断裂带的封堵作用评价[M]. 北京:科学技术出版社,1999.
- [16] 李智武,罗玉宏. 川东北地区岩石声发射试验及历史构造应力研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2005,32(6):614-620.
- [17] 李书兵,罗啸泉. 四川盆地西缘逆冲推覆带油气保存条件研究[R]. 成都:中国石化西南油气分公司勘探开发研究院,2008.
- [18] 王强,李玲. 地震资料人机交互解释[M]. 北京:石油工业出版社,1995:131-177.
- [19] 张永华,贾曙光. 断层封堵性的应用研究[J]. 石油物探,2001,40(4):83-88.

(编辑 徐文明)

(上接第324页)

- [17] 严德天,王华,王清晨. 中国东部第三系典型断陷盆地幕式构造旋回及层序地层特征[J]. 石油学报,2008,29(2):185-190.
- [18] 高德章,赵金海,薄玉玲,等. 东海及邻近地区岩石圈三维结构研究[J]. 地质科学,2006,41(1):10-26.
- [19] 何丽娟,熊亮萍,汪集咏. 拉张盆地构造热演化模拟的影响因素[J]. 地质科学,1998,33(2):222-228.
- [20] He Zhiyong, Crews S G, Corrigan J. Rifting and heat flow: why the McKenzie Model is only part of the story [C] // Basin Modeling Perspectives: Innovative Developments and Novel Applications. AAPG Hedberg Conference, Hague, Netherlands, 2007.
- [21] Lin Changsong, Zhang Yanmei, Li Sitian, et al. Quantitative modeling of multiphase lithospheric stretching and deep thermal history of some Tertiary rift basins in eastern China [J]. Acta Geologica Sinica, 2002, 76(3): 324-330.
- [22] McKenzie D P. Some remarks on the development of sedimentary basins[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 40(1): 25-32.
- [23] 全志刚,贺清,何仕斌,等. 东海西湖凹陷地温场及其对烃源岩的作用[J]. 石油实验地质,2009,31(5):466-471.

(编辑 黄娟)