

文章编号: 1007-4619 (2001) 01-0062-07

# 川南区域构造变形及应力场遥感图像定量解析

杨武年

(中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 成都理工大学 遥感与地理信息系统研究所, 四川 成都 610059)

**摘 要:** 采用区域构造变形及应力场遥感图像分层解析法, 利用遥感 TM 图像对研究区宏观构造及有关的横张大节理系统进行详细解译, 结合物探资料并应用力学方法对区域构造变形场和应力场进行了计算与分析, 建立了该区构造变形场和应力场的三维彩色定量解析模式图, 通过综合分析研究, 对该区构造组合的空间格局及其控矿(油气)规律进行了探讨。

**关键词:** 遥感信息场分层解析; 图像图形处理; 应力场; 变形场; 三维彩色定量解析构造模式图; 四川南部

**中图分类号:** TP79/P56 **文献标识码:** A

## 1 引 言

四川盆地东南部是多组构造线复合的典型地区, 油气资源丰富。对于这种多轴向多组系褶皱的受力方式和变形期次, 许多地质工作者作过研究并提出不同成因认识, 观点不一<sup>[1-8]</sup>。该区油气聚集主要受裂缝系统控制, 而裂缝又与各组系褶皱及其构造应力场密切相关。因此, 深入研究该区构造变形特征及其成生演化规律并反演其构造应力场, 对深化该区构造地质研究和指导找矿具有重要的理论意义和实用价值。本文研究中采用区域构造变形及应力场遥感图像分层解析法<sup>[9]</sup>, 利用 Landsat TM 图像对该区宏观构造及有关的横张大节理系统进行了详细解译, 应用力学方法对区域构造变形场和应力场进行了定量计算与分析, 建立了该区构造变形和应力场的三维彩色定量解析模式, 通过综合分析研究, 对该区构造组合的空间格局及其控矿(油气)规律进行了探讨。

## 2 区域构造组合及其变形场遥感图像解析

川南地区的构造以褶皱为主。一群直线状或弧形褶皱成束成带分布, 空间上构成一典型的三角形

构造格局, 各弧束向三角形顶点收敛, 向三角形中心撒开, 形成一边界清楚、总体协调统一的构造单元(图版 I 图 1)。

### 2.1 区域构造的边界断裂带

川南区域构造的边界由 3 条主要断裂带交错衔接, 围成直角三角形构造格局。其一为走向北东-南西的华蓥山-青山岭断裂带, 构成直角三角形构造的斜边; 其二为长寿-遵义断裂带, 位于研究区东界, 构成川南三角形构造的南北向直角边, 向南延伸纵贯贵州东部并进入广西; 其三是古蔺-盐津断裂带, 构成川南三角形地块的南部直角边, 为一条隐伏大断裂。以上 3 条断裂在遥感图像上均显示为特殊的线状影像异常, 断裂带两侧色调或色彩和影纹图案及其构造形态均有较大差异(图版 I 图 1 和图版 I 图 2)。

### 2.2 三角形弧系构造遥感图像解译

川南的盖层构造以褶皱为主, 从地下震旦系至侏罗系、白垩系(泥盆系、石炭系缺失)都卷入统一的褶皱变形。虽褶皱组系及其方位变化较为复杂, 但构造组合规律性很强, 形成以直角三角形地块三边为弦的 3 套弧形褶皱束: ①东区近南北向展布的重庆弧形褶皱束; ②北西部以三角形斜边为弦的永川-宜宾双行雁列褶皱束; ③南部轴线东西向的纳溪-赤

收稿日期: 1999-12-03; 修订日期: 2000-02-01

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目和教育部“骨干教师”基金资助项目。

作者简介: 杨武年(1954—), 男, 教授, 博士生导师。1994年毕业于成都理工学院, 获博士学位。主要研究方向为遥感、GIS和GPS技术应用研究。发表论文 50 余篇, 出版专著 1 部。

水褶皱束。它们在空间上构成典型的三角形弧系构造格局, 3 套弧系褶皱束均伴生发育了相应的横张大节理系统, 遥感图像上其变形图案十分壮观(图版 I 图 2 及图 3)。

### 2.3 三角形地块内部行列状复合横跨构造格局图像解译

本区的遥感图像上显示出另一引人注目的构造变形特征: 在三角形构造的中南部泸州、纳溪、合江和叙永一带, 成排分布的东西向背斜带上常常发育向南或向北伸出的鼻状构造, 形成一系列大体平行成排展布的串珠状构造高点或穹隆, 许多单个小穹

隆和向斜盆地也沿东西和南北两个方向相间排列, 构成复杂的干扰格局(图版 I 图 4)。这一构造变形图案是东西向和南北向两组褶皱相继发育, 发生复合叠加而成的“行列式”横跨构造格局<sup>[8]</sup>。与两组褶皱有关的横张大节理普遍发育, 与东西向褶皱有关的一组节理(走向南北)发育密度较大, 且在两端随褶皱弯曲改变方向, 空间上与三角形弧系构造协调一致。与南北向褶皱有关的一组节理(走向东西)因受东西向褶皱及其节理系限制轨迹线特征不太明显, 但空间上仍发育几个南北向展布的密集带(图版 I 图 4)。

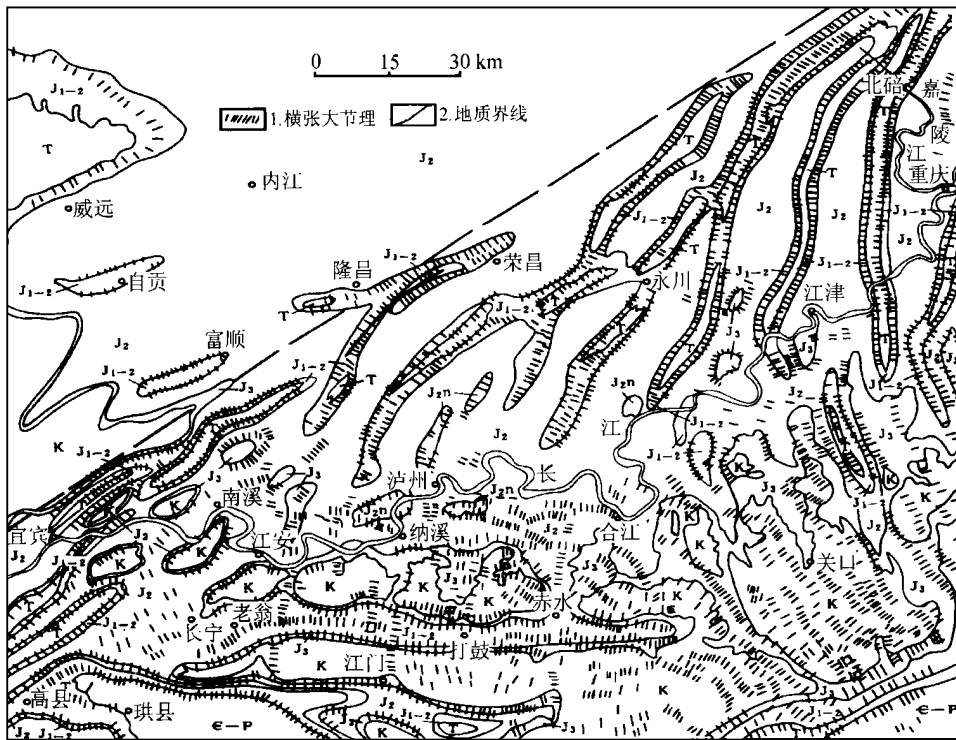


图 3 川南三角形构造的横张大节理分布(据卫星遥感图像解译)

Fig. 3 Transverse tensional joint systems of the triangular block, southern Sichuan, China, interpreted from Landsat TM images

### 2.4 川南三角形弧系构造的横张大节理系统及其空间分布

川南地区与构造变形有关的横张大节理十分发育。研究中对褶皱变形有关的节理系进行了详细解译(图 3)。按其组合特征可分为 3 套节理系统: (1) 与三角形弧系构造有关的横张大节理系统; (2) 与南北向叠加褶皱有关的横张大节理系统; (3) 与北西向褶皱有关的横张大节理系统。其特征简述如下。

(1) 与三角形弧系构造有关的横张大节理系统:

以在高背斜近核部最明显, 方向多变, 但随褶皱弯曲而改变方向, 呈冲沟槽谷相对负地形, 成排成带分布。总体在空间上形成以三角形构造的三个角顶点为中心的 3 套同心弧形展布的节理系统(图 3, 图版 I 图 5)。节理发育密度以三角形边部及顶点处最强, 向三角形中心部位呈弧形减弱。局部地段由于受早期或晚期褶皱及有关节理系统影响发生异常, 与三角形弧系褶皱不协调一致; 如南东角点由于受先成北东向褶皱及其北西向节理系影响, 与三角形弧系褶皱有关的北东向大节理不明显; 而在泸州以

南,与纳溪-赤水弧有关的近南北—北北西向横张节理因受南北向叠加褶皱及有关节理系(近东西向)复合干扰,局部轨迹线方位偏转,但总体分布与三角形弧系构造协调一致。

(2)与南北向叠加褶皱有关的横张大节理系统:主要发育在纳溪-赤水褶皱弧束北中部褶皱平缓区及南北向叠加褶皱上,大多数走向东西,切割先成南北向节理或受其限制,与三角形弧系褶皱明显不协调,形成独立的南北向节理组系(图版 I 图 2 及图 3)。这类节理因受早期褶皱及有关节理影响显示相对较弱,但仍发育几个明显的南北向展布的密集带。这类节理及其相关的南北向褶皱是在三向侧压力联合作用下,三角形弧系构造形成后期自东向西推进的南北向褶皱相继到达(东西向侧压力为主导)而成的复合叠加构造形迹。

(3)与北东向褶皱有关的横张大节理系统:主要发育在三角形南东端角点处北东向褶皱上,走向北西,明显可见被三角形弧系构造有关节理切割,并限制其发展。从区域构造分布,此处北东向褶皱及有关节理属古蔺山字型构造的成分,形成时间早于三角形弧系构造。

### 3 川南区域构造变形场及应力场定量解析

#### 3.1 区域构造变形场定量分析

研究中图像图形处理与 GIS 技术相结合,对川南地区燕山-喜山期褶皱层(地震数据)进行了量化处理,结合地质、物探、地震及遥感解译等资料给定绘图空间坐标有关参数,建立了川南地区晚侏罗世构造变形场的二维和三维彩色定量解析模式图(图版 I 图 6)。图版 I 图 6 上方的立体图反映晚侏罗世岩层受力变形场的三维图形( $Z$  轴坐标单位为  $m$ ),图上不同颜色代表岩层垂向褶皱幅度( $m$ ),其数值可从色标上读得;各点平面分布及其应变数值也可由对应其下方的二维图所示。空间位置可据  $X$ ,  $Y$  轴上坐标查得(本图为假设坐标)。该图像形象地显示出川南联合-复合构造格局喜山期的变形场特征:以上侏罗统褶皱层顶变形幅度为例(相对标志,其下伏地层变形幅度可据地层厚度推算),东部华蓥山-重庆褶皱束变形强度最大,现今构造层高度一般在海拔  $-1000-2000m$ ,南部最低为  $-2000m$ ,北东可达  $3000m$  以上,褶幅一般  $2000-3000m$ ,最大  $4000m$  以上,总体变形特征东强西弱、北强南弱;永川-宜宾

褶皱束变形幅度次之,现今构造层高度一般在海拔  $-200-1400m$ ,南西部最低,为  $-1200m$ ,北东局部可达  $2000m$  以上,褶幅一般在  $1500-2500m$  左右。纳溪-赤水褶皱束变形相对较弱,现今构造层高度一般在海拔  $-1000-0m$  左右,南部最低,为  $-2000m$ ,局部在  $400m$  以上,褶幅一般  $1000m$  以下,总体变形特点边部较强,向三角形中心逐渐减弱。南部地区岩层在变形过程中由于各组系褶皱递进扩展速率不同而相继产生的行列状复合叠加构造格局,在模式图下方的平面图上显示很清楚,总体形成“井”字格局,此处变形幅度相对更弱。

#### 3.2 区域构造应力场反演

根据前述川南地区构造变形场特征及横张大节理空间分布规律,应用区域构造应力场遥感图像分层角析新方法<sup>[9]</sup>,分两个层次对本区构造应力场进行反演。先据图 3 将与弧系褶皱有关的代表性横张大节理挑选出来,按一定间隔将其轨迹线断续相连,此线代表最大主压应力( $\sigma_1$ )轴迹线;同时将主要褶皱轴迹线标在图上,大体平行褶轴,垂直横张节理按一定间隔勾绘出最小主压应力( $\sigma_3$ )轴迹线。图版 I 图 5 是由图 3 横张大节理反演的川南弧系构造的主压应力轴迹线网络图,该图清楚地揭示出本区构造格局是在直角三角形边界控制下,三边受到垂直于边界的侧压力同时的联合作用,各组系构造变形由三角形边缘向中心呈弧形递进发展的联合构造应力场特点。

图版 I 图 5 所示主应力迹线网络与该区实际构造分布情况吻合;与直角三角形联合构造格局的泥巴模拟实验及其联合构造应力网络的计算结果<sup>[8]</sup>相一致,可互为佐证。

鉴于本区盖层自震旦系至侏罗系均卷入褶皱,各时代地层间未有较明显角度不整合,并考虑到四川盆地区域构造演化特征,认为川南弧系构造形成时间为燕山-喜山期。

对于川南地区南部发育的行列状构造格局,据其构造组合的图像特征和伴生的横张大节理分布,认为仍为统一的联合应力场中由于各组系褶皱扩展速度和变形强度不同而造成的局部构造复合现象。纳溪-赤水一带的行列状穹隆构造明显保持着东西和南北向两个方位,与其有关的横张大节理直交,各发育相应的节理系统(图 3),而且东西向褶皱的翼、顶部及轴面都同步卷入南北向褶皱之中,充分说明南北向褶皱晚于东西向褶皱。据此对本区复合构造格局的

变形场和应力场反演如下: 川南地区的构造变形在统一的直角三角形边界控制下三边受力的联合应力场中, 各组系褶皱由三角形边缘向三角形中心不均匀波动推进发育, 由于它们推进扩展的速度和变形强度不等, 若二组褶皱同时到达某一地区, 就形成联合构造形迹, 如靠近三角形端点处, 3 个方向的弧形褶皱显著合拢, 合二为一; 若各组系褶皱先后或相继到达某一地区, 则形成复合叠加构造形迹, 此时波峰与波峰相遇, 便形成构造穹隆, 波谷与波谷相遇, 便形成向斜盆地, 从而在空间上构成行列状构造穹隆格局。

### 3.3 区域构造应力场定量分析

研究中应用川南区域构造变形场(图版 I 图 6)的数据, 根据弹性力学理论, 采用应力法对该区构造应力场进行了计算和反演<sup>[10]</sup>。应力法以研究区某一层(如油气储层)构造高程图为基础资料, 计算该层古构造应力场, 得出区内最大、最小张应力、剪应力及其空间分布, 从而可以据此分析张裂缝、剪裂缝的理论发育带及其延伸方向。一般褶皱的力学模型为, 岩层水平受力发生弯曲而成褶皱, 类似于弹性薄板受到沿其平面的侧压力作用而发生弯曲(图 7A); 若考虑上覆和下伏地层对褶皱的作用, 则代表褶皱层的板相当于放置在弹性基础上(图 7B), 因此, 除侧向受力外, 薄板还同时受到基础的弹性反力作用。因而地层褶皱的力学模式应是一块在水平力和垂直力(弹性反力)共同作用下处于弯曲平衡状态的薄板。如图 7C, 板的中面取  $x-y$  平面, 板发生挠曲后, 其挠度  $W(x, y)$  应满足挠曲微分方程:

$$D \left[ \frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} \right] - \left[ N_x \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} + N_y \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right] + KW = 0$$

式中  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $N_{xy}$  为薄板中面内力的 3 个分量, 表示薄板单位宽度上中面应力的合力。设  $\sigma_x^c$ ,  $\tau_{xy}^c$ ,  $\sigma_y^c$  表示中面的 3 个应力分量,  $t$  为板厚, 则有

$$N_x = t\sigma_x^c, N_y = t\sigma_y^c, N_{xy} = t\tau_{xy}^c$$

$-KW$  代表上、下约束层对褶皱的弹性反力, 其中  $K$  为常量, 称为约束层的弹性阻抗, 其值可由 M. Biot 公式<sup>[11]</sup> 根据上、下约束层的弹性参数和褶皱尺度来估算;  $D = Et^3/12(1-\nu^2)$ , 为板的挠弯刚度;  $E$ ,  $\nu$  分别为板的弹性模量和泊松比。

本次计算中  $t = 1.0$ ,  $E = 6000\text{MPa}$ ,  $\nu = 0.312$ 。通过图形图像处理, 建立了川南区域(包括北西部威远穹隆)最大张应力场的三维和二维彩色定量解析

模式图(图版 I 图 8)。图上  $X, Y$  轴坐标与图版 I 图 6 一致,  $Z$  轴代表张应力数值大小(单位为  $0.1\text{MPa}$ )。

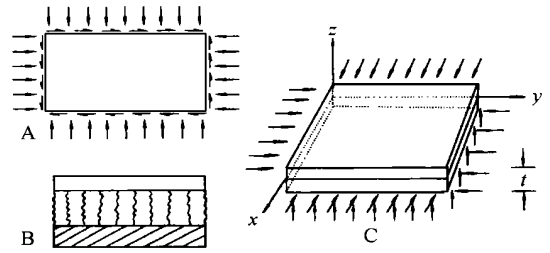


图 7 薄板受力的力学模型

Fig. 7 Mechanics pattern of a plate acted on by forces

图版 I 图 8 清楚地展示出了川南直角三角形联合-复合构造格局的区域构造变形场(图版 I 图 6)的理论最大拉(张)应力分布及其量的变化, 总体特征与遥感图像解析应力场(图版 I 图 5)吻合。由于最大主拉(张)应力(即前述的最小主压应力)方位与褶皱主曲率一致且量成正比, 因此最大主拉应力高值带方位及其量的大小可代表褶皱轴向及褶皱幅度相对高低。总体特征是, 呈线性展布的最大拉(张)应力以直角三角形的三个边为弦向三角形内部呈弧形波动扩展, 变化量以三角形边缘及端点最大(东部边缘及北东端点最大, 可达到  $1000\text{MPa}$  以上; 南东端因受到早期北东向褶皱限制例外), 逐渐向三角形内部呈弧形扩展递减(最大拉应力  $0-100\text{MPa}$ , 变化量可以从图像上相应颜色的色标上读得), 在三角形内部形成相对低值区。南部泸州(LZ)以南显现的“井”字形拉应力密集带, 揭示出三角形弧系构造在递进变形过程中存在南北向构造与东西向构造复合叠加的现象。理论上, 最大张应力密集带呈“井”字形交汇的部位将是出现构造穹隆和张节理发育的地段, 可作为预测含油气局部构造的有利区块。又由于横张节理轨迹线与最大主拉应力高值带方位垂直, 发育程度与最大拉应力成正比, 因此, 据此可预测张裂隙发育密集带。本区三角形弧系构造的最大拉应力(应力场)三维和二维彩色模式图的建立, 使遥感图像解析的构造应力场得到理论和实际验证, 同时也为该区含油气局部构造评价、油气远景预测提供了定量构造依据。

## 4 川南三角形联合-复合构造演化与油气聚集关系

从川南区域构造动态发展角度分析, 川南三角

形构造格局在不同发展时期对油气生、储、盖地层建造及后期油气演化、富集的控制作用也不同。加里东晚期,川南处于川中隆起和黔中隆起之间,三角形边界断裂已经出现,三角形地块已具雏形。此时在区域应力作用下,三角形地块(相当于一块三角形薄板)三边受力失稳,变形从边缘向中心逐渐下拗,形成三角形拗陷,接受沉积。加里东运动使四川盆地总体抬升,川南缺失泥盆系和石炭系。直到早二叠世,海水才广泛入侵川南,形成川南主要生油层之一的阳新灰岩。之后,川南在四川盆地构造运动影响下,曾表现出隆升和下陷的波动性特点,但三角形内局部构造的隆升和拗陷仍受三角形边界控制。

川南地区自震旦纪以来长期处于稳定的地质环境。地壳演化的多旋回性,在纵向上形成了碳酸盐岩和泥质岩或膏岩多旋回岩性组合的良好生储盖组合。目前已获得的众多层工业气藏中,以阳新和嘉陵江组海相碳酸盐岩储层为主,有机质含量丰富,也是良好生油层。阳新灰岩 3 段之上有乐平(龙潭)煤系作为盖层;嘉陵江组气藏多由碳酸盐岩——膏盐、岩盐的韵律层组成,由膏盐和岩盐构成盖层,形成多层气藏,区域上又有巨厚的侏罗系和白垩系作为盖层。据研究,虽然阳新、嘉陵江组气藏生成条件和盖层条件均较好,但其原始孔隙度较差,渗透率小于  $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔隙度 0.5%—3.3%,平均仅 1%,孔隙喉道半径只有 0.063  $\mu\text{m}$ ,总体储集性能差。尽管成岩后生作用增加了溶合孔洞,但储集性能仍不理想。川南能形成现在这样工业气藏在于后期构造作用产生大量裂隙;川南阳新灰岩顶部发育的古岩溶也与当时(东吴期)泸州古隆起伴生的裂隙有关。裂隙的发育不但增大了储层的有效孔隙度,而且起到沟通原始孔隙和孔洞的作用,有利于油气的二次运移,也大大增加了储集空间和储集性能。

据研究(曾运昌等,1987),四川盆地印支早期是古生界大多数生油岩系成熟生油阶段。燕山中、晚期是古生界大多数生油岩系进入成熟气阶段,中生界三叠系和中下侏罗统大多数生油岩系进入高成熟湿气阶段或成熟生油阶段。因此,印支期和燕山-喜山期构造作用形成的圈封具有特殊控油气意义。

前已述及,川南地区从震旦系至白垩系地层,全部卷入褶皱,各地层之间不存在角度不整合,说明各褶皱系都是中生代晚期燕山运动及以后的喜山期形成。燕山-喜山期川南地区在直角三角形边界控制下,三边受力联合持续作用,在统一的区域构造应力场和变形场中,不但决定了川南三角形——复合构

造的空间格局,也控制了本区油气藏的分布。由于变形过程中应力和变形强度都从三角形边缘和项点向内部波动递进发展,而且各组系褶皱在空间上的扩展速率和变形强度不等。运动中可能同时到达三角形的某一地段形成联合构造,也可能相继运动到达某一地段形成复合构造,总体形成统一的联合构造格局,而局部又相继变形干扰,形成复合叠加构造格局,如南部行列状构造穹隆便是实例。由于川南此时主要生油层已进入成熟干气阶段,在上述构造波动递进变形发展过程中,理论上,油气(液态或气态)物质在高压驱动下将随变形由三角形边缘向中心推进运移,在中部有利构造部位聚集。发育在三角形近中部的构造圈闭以及南西的行列状构造穹隆是最有利的储气构造;三角形中心的小三角形折衷部位因应力推进至此强度大为减弱,裂隙相对不发育(图 3)是一不利因素,但仍比三角形边部条件好,是较有利储气区。从目前川南已发现的油气田空间分布看,与上述理论分析吻合一致,绝大多数高产气田分布在靠近三角形中心(折衷区)附近的三角形构造复合区(图 9)。该区集中了川南天然气储量的 90%,高产气田基本上分布在复合构造穹隆位置。

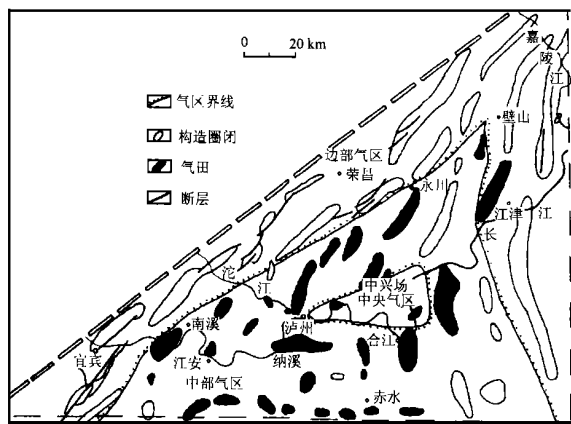


图9 川南气田分布图(据龙学明图改编)

Fig. 9 Distribution of natural gas fields, southern Sichuan, China  
 根据上述规律,三角形地块中部(包括中心折衷区)是寻找隐伏构造圈闭气田的区域。尤其在图版 I 图 6 和图 8 所示不同方向构造叠加部位,有望找到新的较大隐伏构造圈闭及气田。

### 5 结论与讨论

遥感图像真实地记录了地质构造形迹的总体和个体的地表几何形态及其物理特征,信息密度大且连续性好,具高度的概括性,其中含有大量隐伏地质

构造的信息特征。因此,用遥感图像研究构造变形及其动力学特征,可弥补传统地质方法点线观测的局限性,获得连续、系统、大量的信息,有助于将破裂系统与区域构造变形乃至地质建造等有机地联系起来进行综合分析研究,得出与客观实际相吻合的结论。

遥感图像显现的地质构造形迹是地史以来地壳运动的最终结果,包含有历次构造变形的特征信息。因此,构造复合区不同期次构造应力场的图像解析,可将宏观构造(褶皱和断裂)和与其密切相关的微观构造(遥感大节理)有机联系起来进行构造变形组合的分解,即分不同构造层次(期次)建立其变形场,然后通过构造变形场特征的综合分析研究反演各时期应力场。

**致谢:** 对研究中给予帮助的乐光禹教授、朱章森教授表示衷心感谢!

## 参考文献 (References)

- [1] Li Siguang. *Conspectus of geomechanics* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1973. [李四光. 地质力学概论[M]. 北京: 地质出版社, 1973.]
- [2] Zhang Wenyou. *Introduction of fracturing-block tectonics* [M]. Beijing: Science Press, 1984. [张文佑. 断场构造导论[M]. 北京: 科学出版社, 1984.]
- [3] Zhao Congjun. The character of regional tectonic systems and their relation to enrichment of petroleum and natural gas in the south of Sichuan province [A]. *The corpus of geomechanics (the sixth volume)*. [C] Beijing: Geological Publishing House, 1982. [赵从俊. 川南区域构造体系特征与油气富集关系[A]. 地质力学文集, 第6集[C]. 北京: 地质出版社, 1982.]
- [4] Zhong Dalai, Ma fuchen, Zhong Jiayou. The historical analysis and the mechanics analysis of compound tectonics in Yanshanian period in the south of Sichuan province [A]. *The corpus of fracturing-block tectonics* [C]. Beijing: Science Press, 1983, 36—53. [钟大赉, 马福臣, 钟嘉猷. 川南地区燕山期复合构造的历史分析和力学分析[A]. 断块构造文集[C]. 北京: 科学出版社, 1983, 36—53.]
- [5] Wu Guijie. A discuss of evolutionary history and forming mechanism of the arc-tectonics belt in the contiguous region of Hunan, Hubei, Sichuan and Guizhou province [A]. *Journal of Yichang Institute of Geology and Minerals*, Chinese Academy [C]. 1984, 8, 79—81. [吴贵捷. 湘鄂川黔毗邻地区弧形构造带的演变历史和形成机理的探讨. 中国科学院宜昌地质矿产研究所所刊. 1984, 8, 79—81.]
- [6] Zhang Yuehua. The function of tectonic superposition in the East of Sichuan province [J]. *Journal of Petroleum*, 1986, 7(4): 25—30. [张月华. 川东地区构造叠加作用[J]. 石油学报, 1986, 7(4): 25—30.]
- [7] Yue Guangyu. Combined structures and concerned tectonic types [A]. *The corpus of tectonic geology (1)* [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1981, 127—138. [乐光禹. 联合构造及有关的构造类型[A]. 构造地质论丛(1)[C]. 北京: 地质出版社, 1981, 127—138.]
- [8] Yue Guangyu, Du Siqing, Huang Jijun, Yang Wunian. Principle of structural compounding-combine; analysis of structural association-superposition in Sichuan basin and Guizhou Plateau, China [M]. Chengdu: Press of Chengdu University of Science and Technology, 1996. [乐光禹, 杜思清, 黄继钧, 杨武年. 构造复合联合原理——川黔构造组合叠加分析[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1996.]
- [9] Yang Wunian, Yue Guangyu, Du Siqing, Huang jijun. New method of restoring regional tectonic stress field [J]. *Science Bulletin*, 1991, 36(12): 931—934. [杨武年, 乐光禹, 杜思清, 黄继钧. 恢复区域构造应力场的新方法[J]. 科学通报, 1991, 36(12): 931—934.]
- [10] Zeng Jinguang. Theoretical analysis of tectonic cracks [A]. *The corpus of new area in oil-gas prospect in the south of China*. Beijing: Geological Publishing House [C]. 1989, 200—211. [曾锦光. 构造裂缝的理论分析研究[A]. 中国南方油气勘查新领域论文集[C]. 北京: 地质出版社, 1989, 200—211.]
- [11] Johnson A M. *Physical Processes in Geology* [M]. Freeman, Cooper & Company, California. 1970.

## Quantitative Analysis of Remote Sensing Images on Tectonic Deformation and Stress Fields, Southern Sichuan, China

YANG Wu-nian

(*Institute of Mountain Hazard and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041; IRSGS, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China*)

**Abstract:** Structural pattern on the remote sensing image is a synthetic result since geological history, including much feature information of previous tectonic deformation. Therefore, the tectonic stress fields of different stages in a complex deformation area can be reconstructed by the following steps: (1) Geological structures in different stage and time are decomposed with remote sensing images; (2) Tectonic deformation fields in different time are established by analyzing relationship between the micro structures (joints/fractures) and the macro tectonics (folds and faults) related; and (3) tectonic stress field in different time are respectively recovered with a synthetic study of the features of structural deformation fields in different periods.

In this paper, macro tectonics (folds and faults) and related transverse tensional joint systems in the studied region are interpreted with the method of phase-separation analysis of remote sensing information field which was proposed by the author. Based on the theory of elastic mechanics, tectonic deformation and stress fields are quantitatively calculated, and 3-dimensional color structural block diagram for quantitatively analyzing tectonic deformation field and stress field are established. Finally, a relation of the structural patterns to the reserves of petroleum and natural gas are discussed.

**Key words:** phase-separation analysis of remote sensing information field; digital image processing, stress field; deformation field; 3-dimensional color structural block diagram for quantitative analysis; southern Sichuan

