

基于叠前反演的岩石力学参数预测

汇报人：李双贝

中国石油东方物探公司物探技术研究中心
中油油气勘探软件国家工程研究中心

2026年03月

GeoEast



CONTENES
目录

01 **研究背景**

02 **基于叠前反演的岩石力学参数预测**

方法原理

反演界面及参数

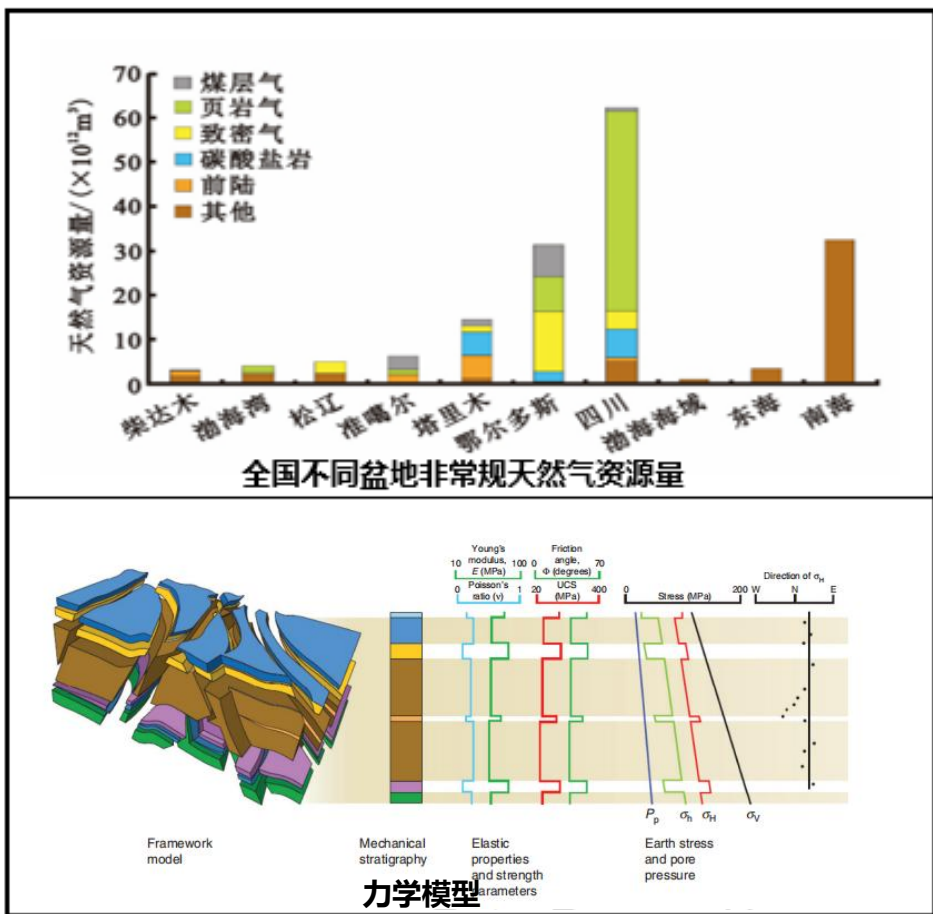
应用案例

03 **注意事项**



1、研究背景

中国陆相**致密油**、**页岩油**主要发育于中、新生代湖盆背景，沉积环境变化剧烈，不同盆地间矿物组成差异大，裂缝发育，纵向薄层较多，非均质性强。面对如此复杂的工程条件，需要对岩石力学参数有一定的认识，才能实现降本增效。



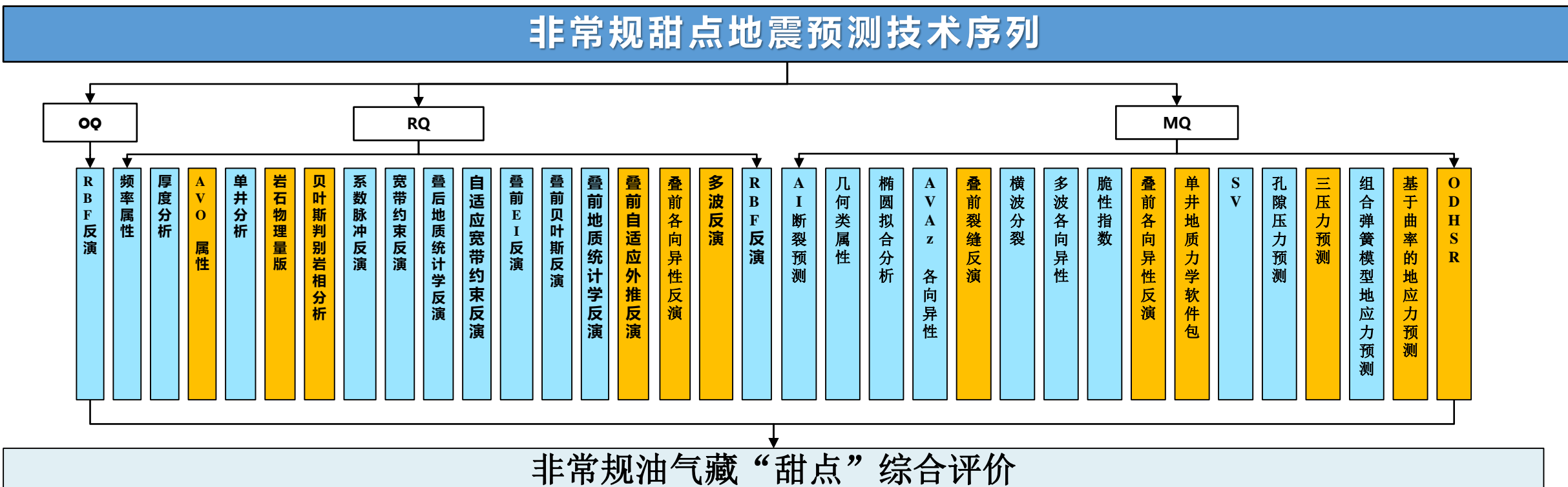
储层类型	定量评价参数	文献
页岩储层	地应力、岩石脆性、脆性矿物含量、黏土矿物含量、页岩强度、天然裂缝、成岩作用	Gale等 (2007)
	杨氏模量、泊松比、内摩擦角	Breyer等 (2010)
	岩石矿物组成、力学性质、温压条件、流体、天然裂隙	琚宜文等 (2014)
	岩石力学参数、地应力特征、脆性特征、天然裂缝	王濡岳等 (2015)
致密砂岩储层	矿物组成、脆性指数	Cipolla等 (2010)
	矿物组分、脆性指数、天然裂缝、地应力	石道涵等 (2014)
	岩石脆性、水平应力差、天然裂缝	程振兴 (2016)
煤层	煤层及顶底板岩石力学特征、地应力分布	朱宝存等 (2009)
	煤层及顶底板岩石力学特征、原岩应力、裂隙分布	颜青等 (2014)
	煤体结构、构造条件、地应力、埋深	谢楠等 (2016)

非常规储层可改造性评价参数



1、研究背景

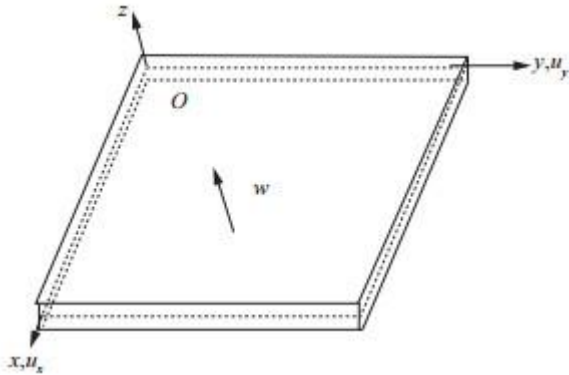
地震“甜点”预测技术可实现非常规储层的平面分布刻画。目前，GeoEast 软件在非常规油气藏地震甜点预测方面，已配备属性分析、储层参数预测、叠前裂缝预测、叠前/叠后属性反演、储层岩石力学分析、地应力预测及多源数据分析工具，基本满足非常规甜点预测需求。





1、GeoEast现有三维地应力预测技术

在现有基于曲率属性的地应力预测技术、基于组合弹簧模型的地应力预测技术基础上，**新增**基于各向异性岩石物理模型的地应力预测技术，以裂缝型岩石物理为桥梁，利用地震反演与各向异性岩石力学模型估算地应力。



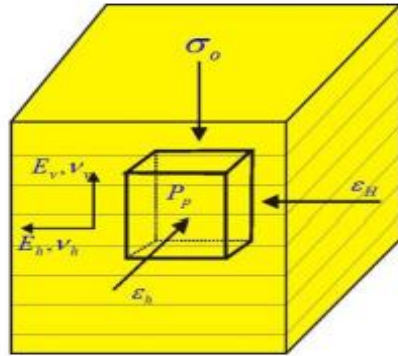
薄板模型

$$\sigma_x = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - p) + p - k \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{1}{r_x} + \nu \frac{1}{r_y} \right)$$

$$\sigma_y = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - p) + p - k \frac{E}{1-\nu^2} \left(\nu \frac{1}{r_x} + \frac{1}{r_y} \right)$$

$$\tau_{xy} = -k \frac{E}{1+\nu} \left(\frac{1}{r_{xy}} \right)$$

基于曲率属性的地应力预测

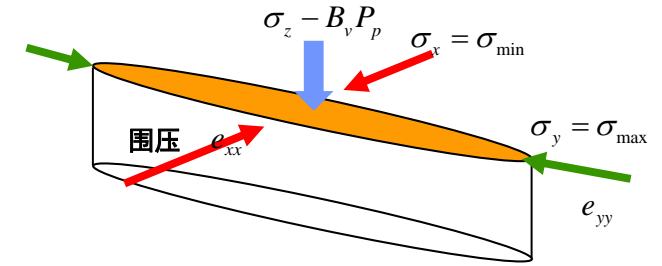


弹性介质应变模型

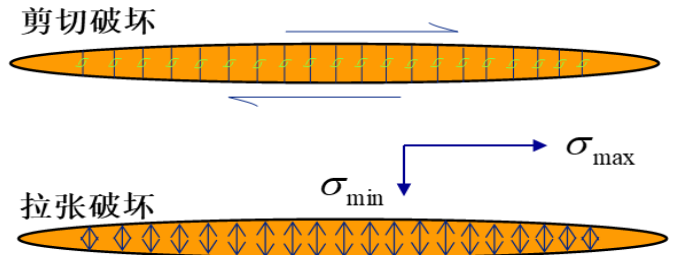
$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - \alpha p) + \alpha p + \frac{E}{1-\nu^2} \epsilon_H + \frac{E\nu}{1-\nu^2} \epsilon_h$$

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - \alpha p) + \alpha p + \frac{E}{1-\nu^2} \epsilon_h + \frac{E\nu}{1-\nu^2} \epsilon_H$$

基于组合弹簧的地应力预测



垂直裂缝的地应力状态



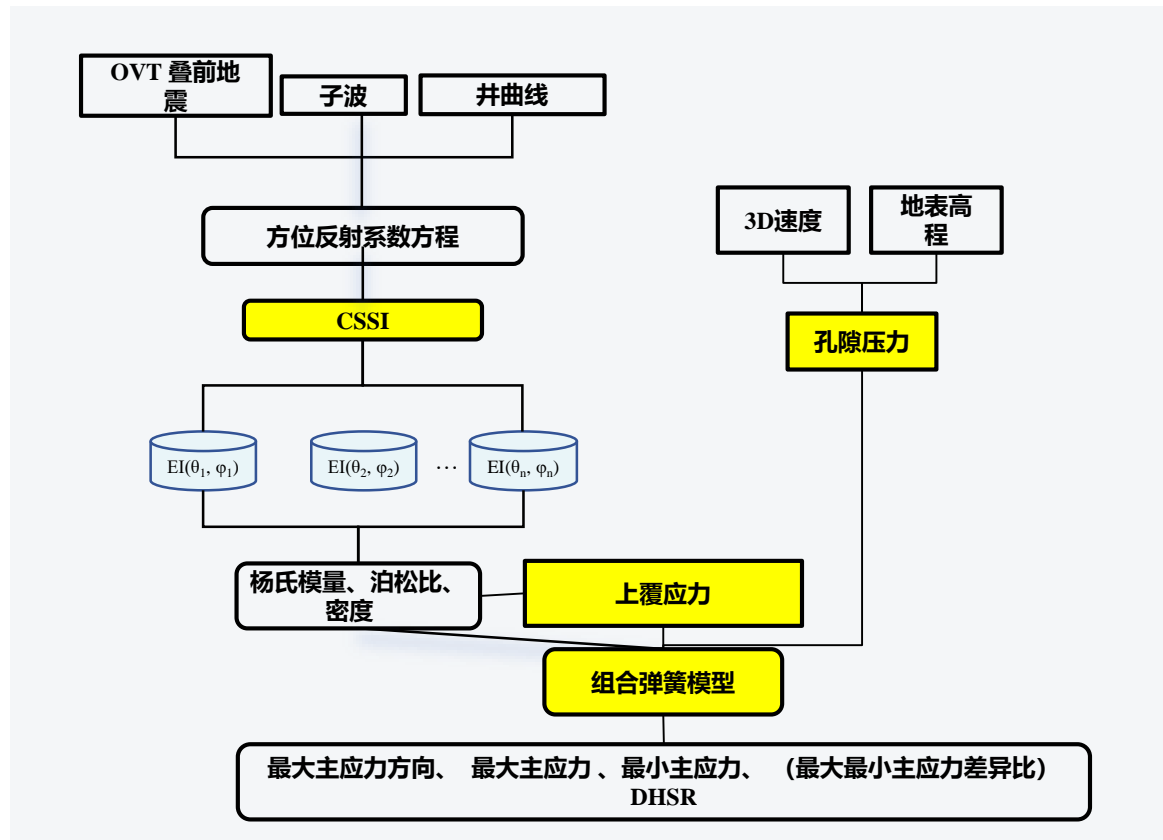
岩石在地应力状态下的成缝模式

基于各向异性岩石物理模型的地应力预测

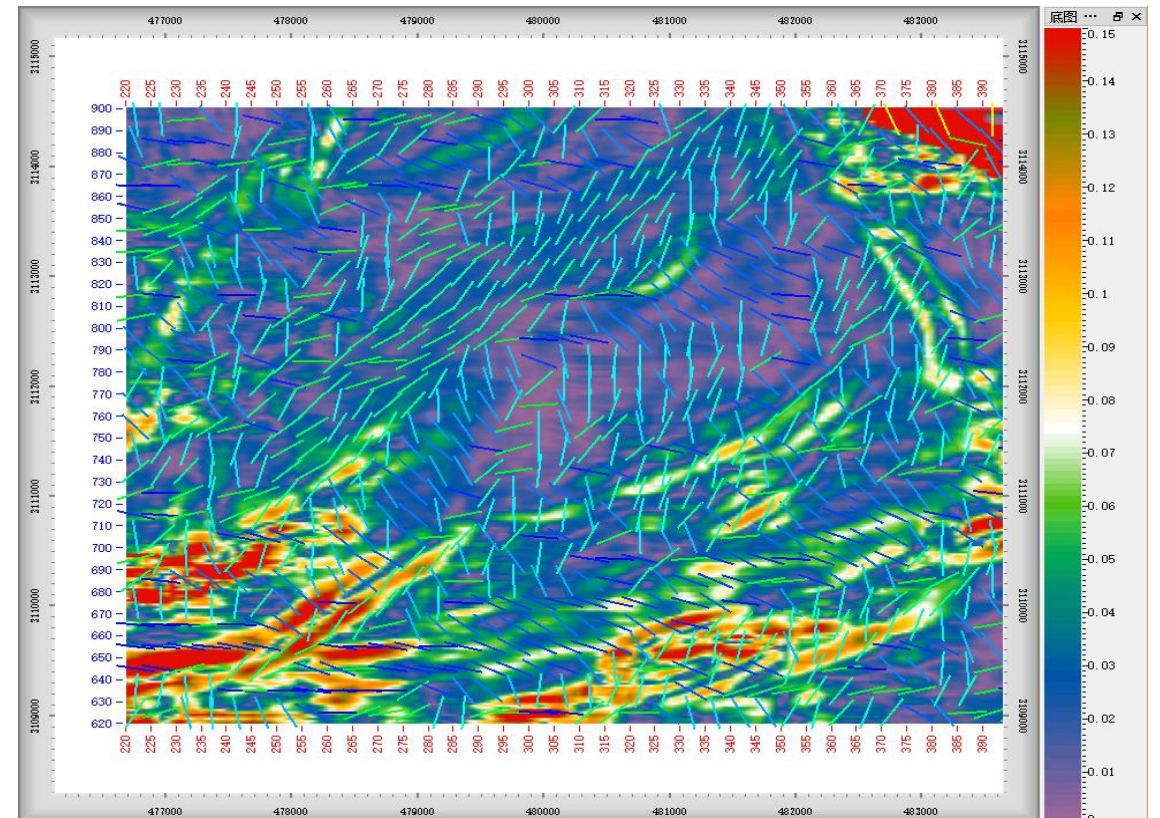


1、GeoEast现有三维地应力预测技术

基于组合弹簧理论的地应力预测技术：将地层简化为平行板间的弹簧组合，忽略非线性弹性效应，是测井计算地应力的常用方法；本研究将其拓展到地震反演得到三维数据体，实现三维地应力预测。



基于组合弹簧模型的地应力预测技术

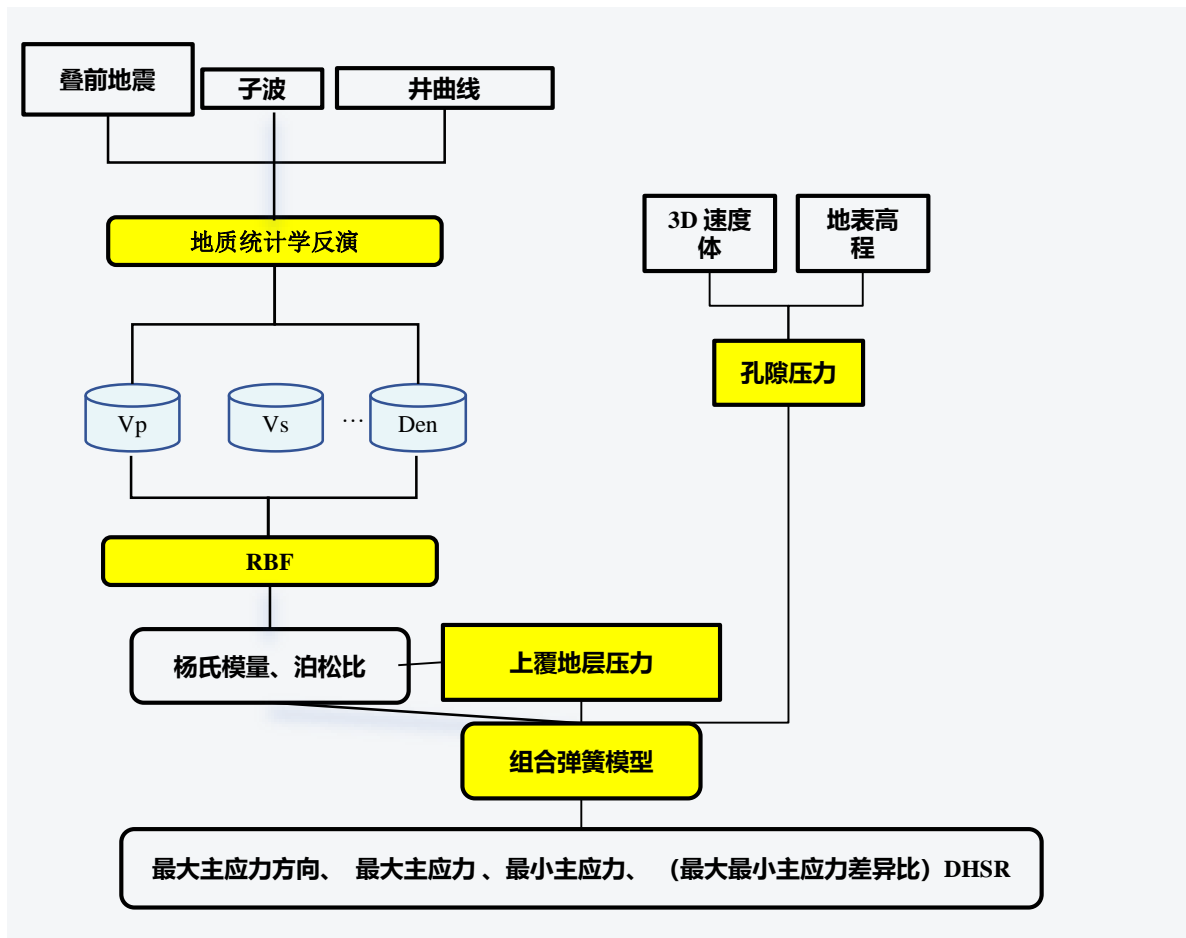


应力矢量与DHSR

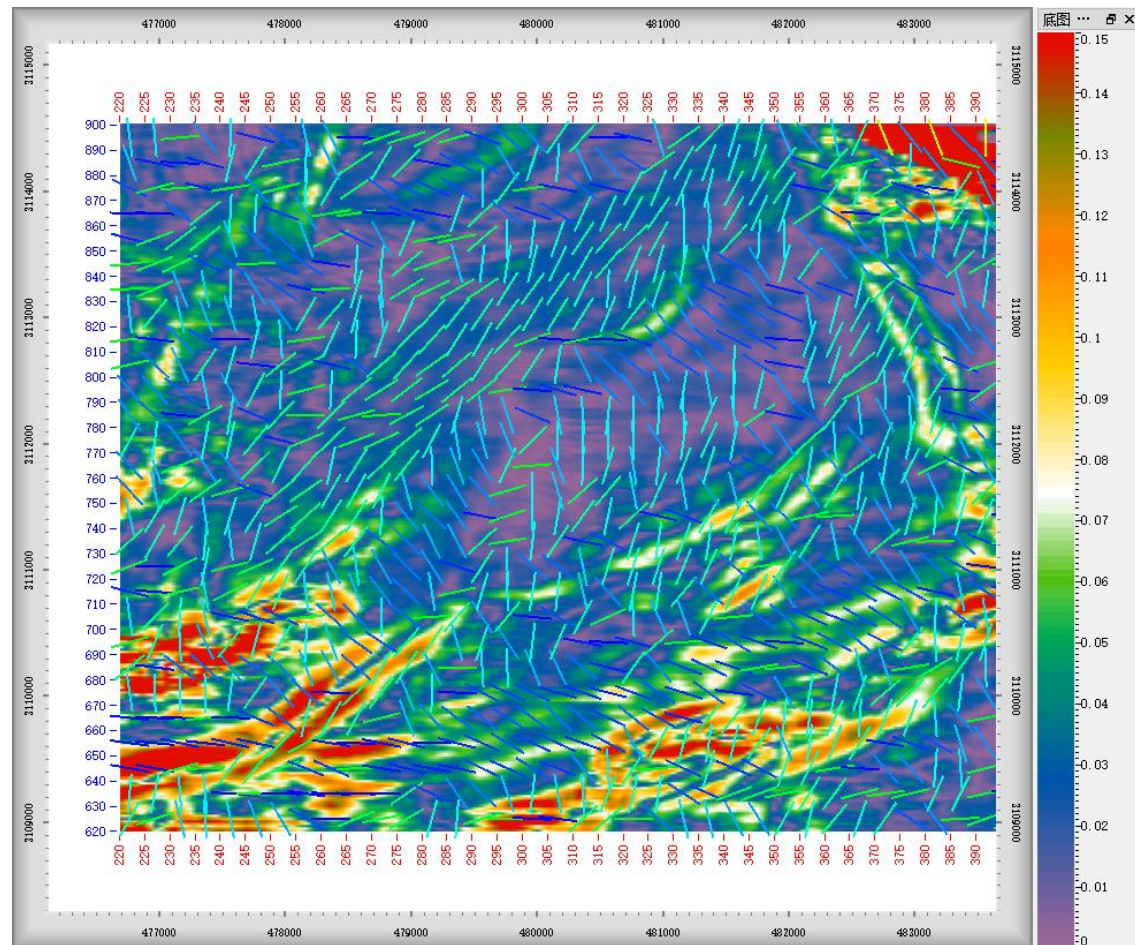


1、GeoEast现有三维地应力预测技术

基于组合弹簧理论的地应力预测技术：该应用流程中杨氏模量和泊松比通过地质统计学和RBF得到。



基于组合弹簧模型的地应力预测技术

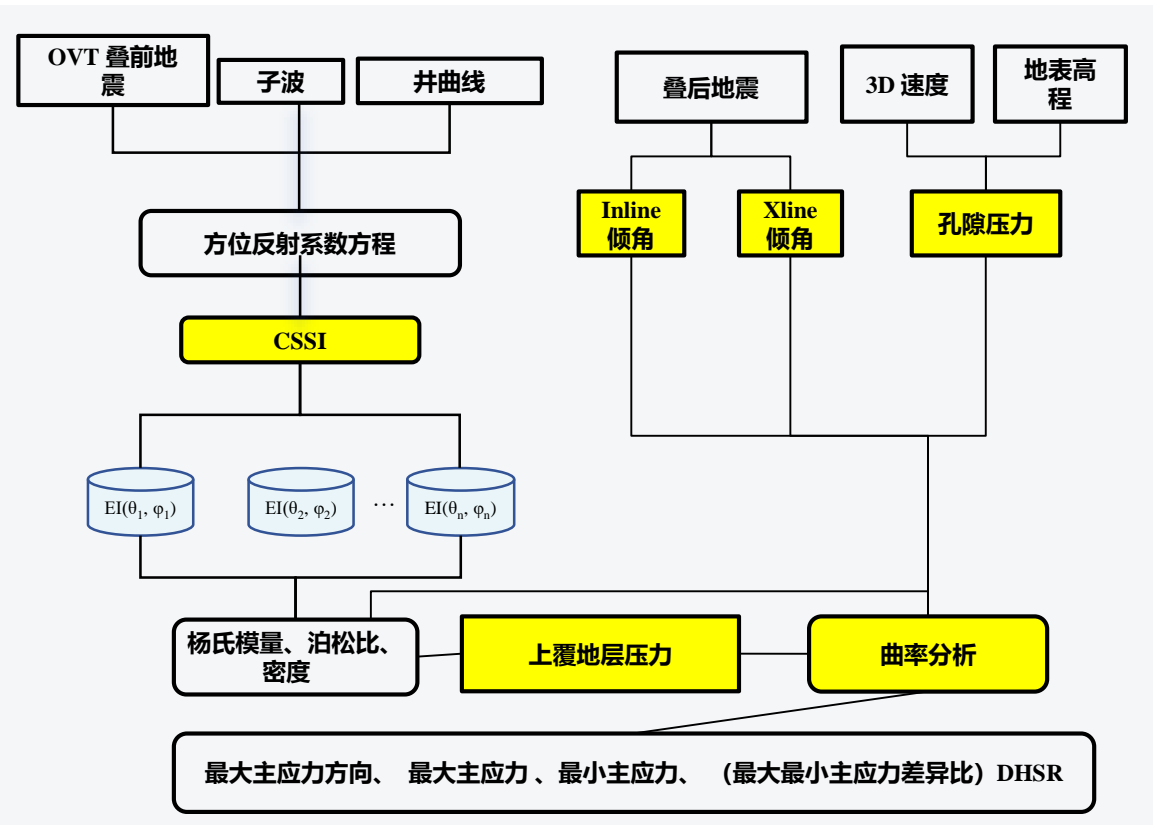


应力矢量与DHSR

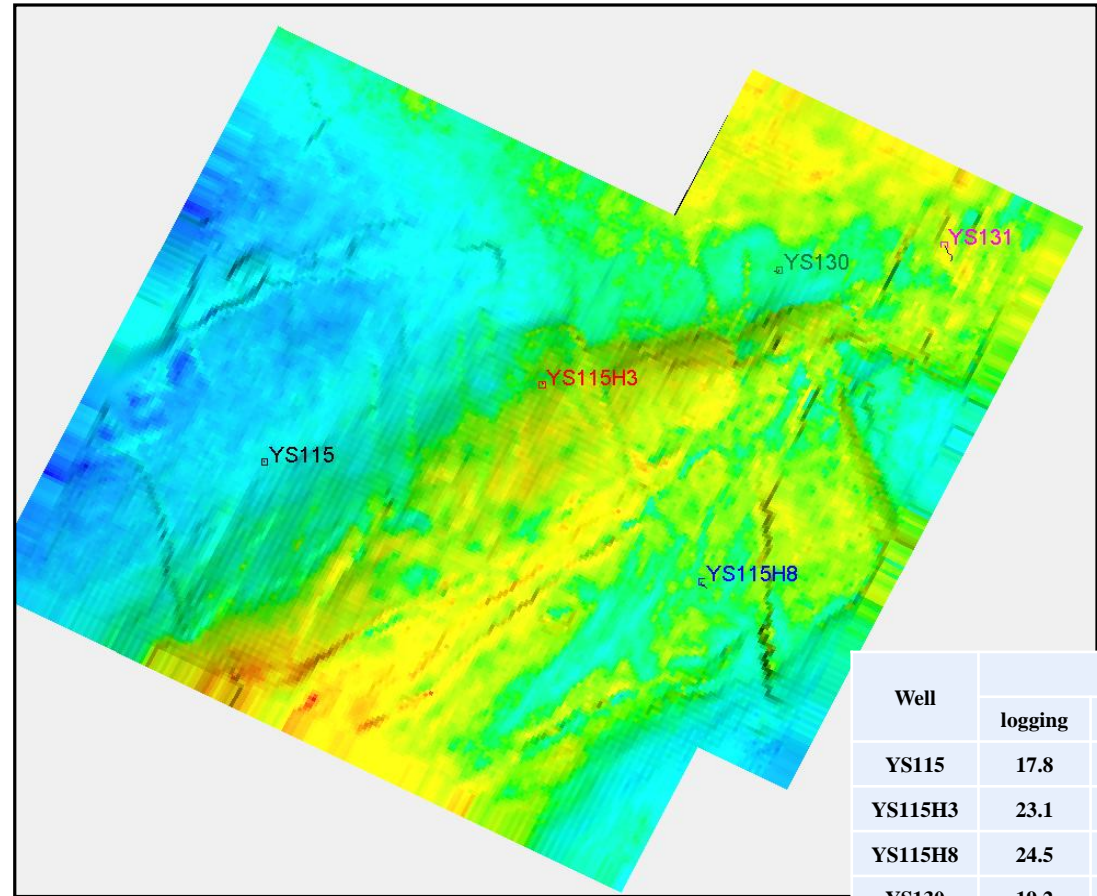


1、GeoEast现有三维地应力预测技术

基于曲率的地应力预测技术：引入曲率属性表征三维层位构造应变的影响，突破传统**构造应变为常数**的假设，实现地应力的精准预测。



基于曲率的地应力预测技术



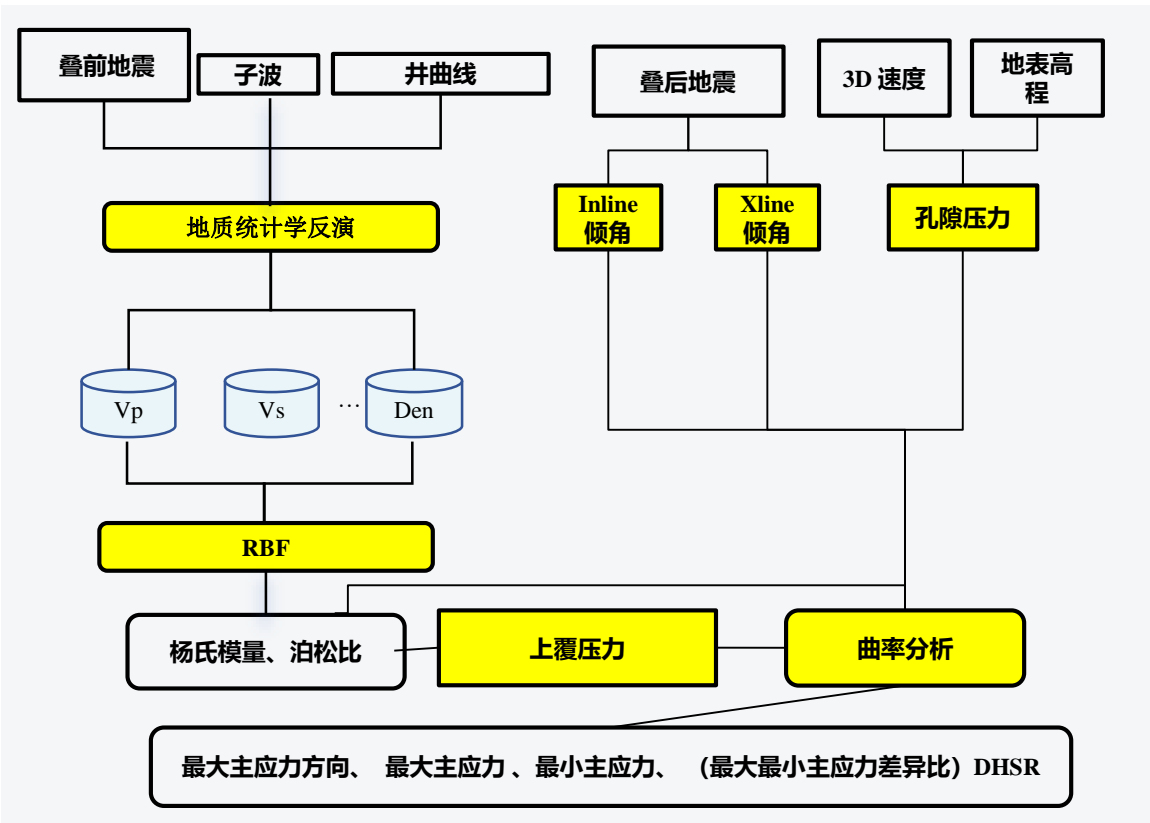
DHSR (四川紫金坝)

Well	DHSR		
	logging	predict	err
YS115	17.8	16.4	1.4
YS115H3	23.1	24.7	-1.6
YS115H8	24.5	23.6	0.9
YS130	19.2	20.8	1.6
YS131	23.5	25.8	2.3

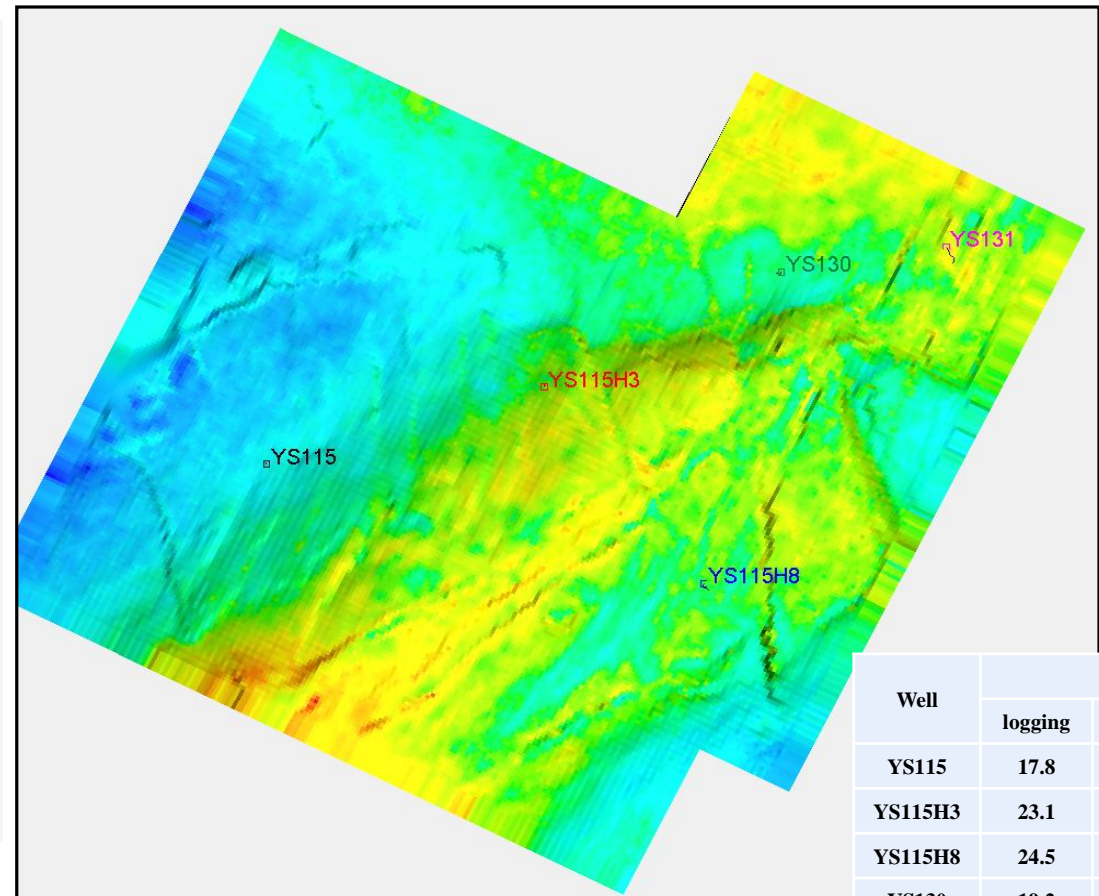


1、GeoEast现有三维地应力预测技术

基于曲率的地应力预测技术：该应用流程中杨氏模量和泊松比通过地质统计学和RBF得到。



基于曲率的地应力预测技术



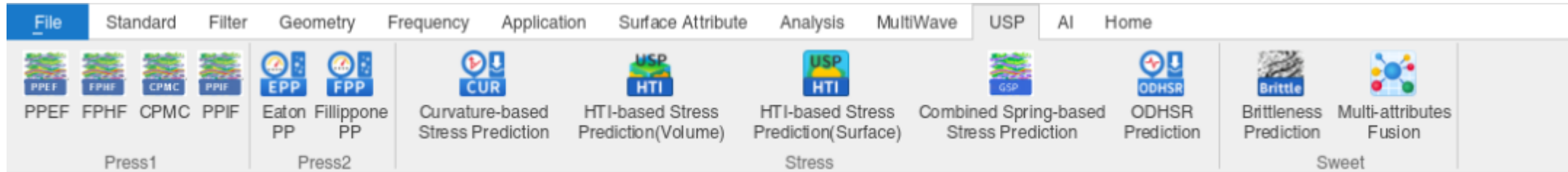
DHSR (四川紫金坝)

Well	DHSR		
	logging	predict	err
YS115	17.8	16.4	1.4
YS115H3	23.1	24.7	-1.6
YS115H8	24.5	23.6	0.9
YS130	19.2	20.8	1.6
YS131	23.5	25.8	2.3



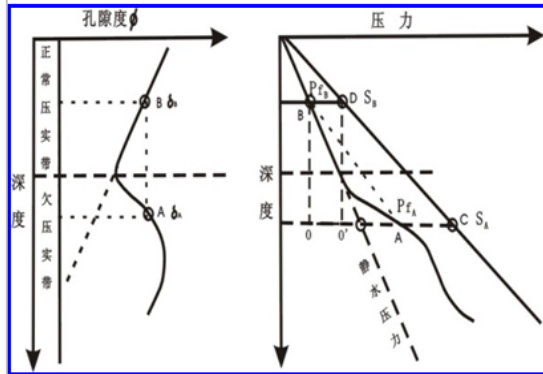
1、GeoEast现有三维地应力预测技术

GeoEast也内置了Eaton和Fillippone的孔隙压力预测算法，需要输入纵波速度和密度的三维结果



基于速度的孔隙压力预测（Eaton Fillippone 及其变式）、FPHF(破裂压力)、CPMC(坍塌压力)

1) 等效深度法 (Magara,1968)



$$P_{pA} = S_A - S_B + P_{pB}$$

假设条件：孔隙度相同同时有效应力也相同

2) Eaton法 (Eaton,1975)

$$P_p = P_c - (P_c - P_{pNormal}) \left(\frac{v}{v_{Normal}} \right)^n$$

前提条件：建立准确正常压实速度趋势线

3) Fillippone法 (Fillippone,1979)

$$P_p = \frac{V_{max} - V_{int}}{V_{max} - V_{min}} \cdot P_c$$

假设条件：地层压力与地层速度呈直线关系

4) Bowers法 (Bowers,1995)

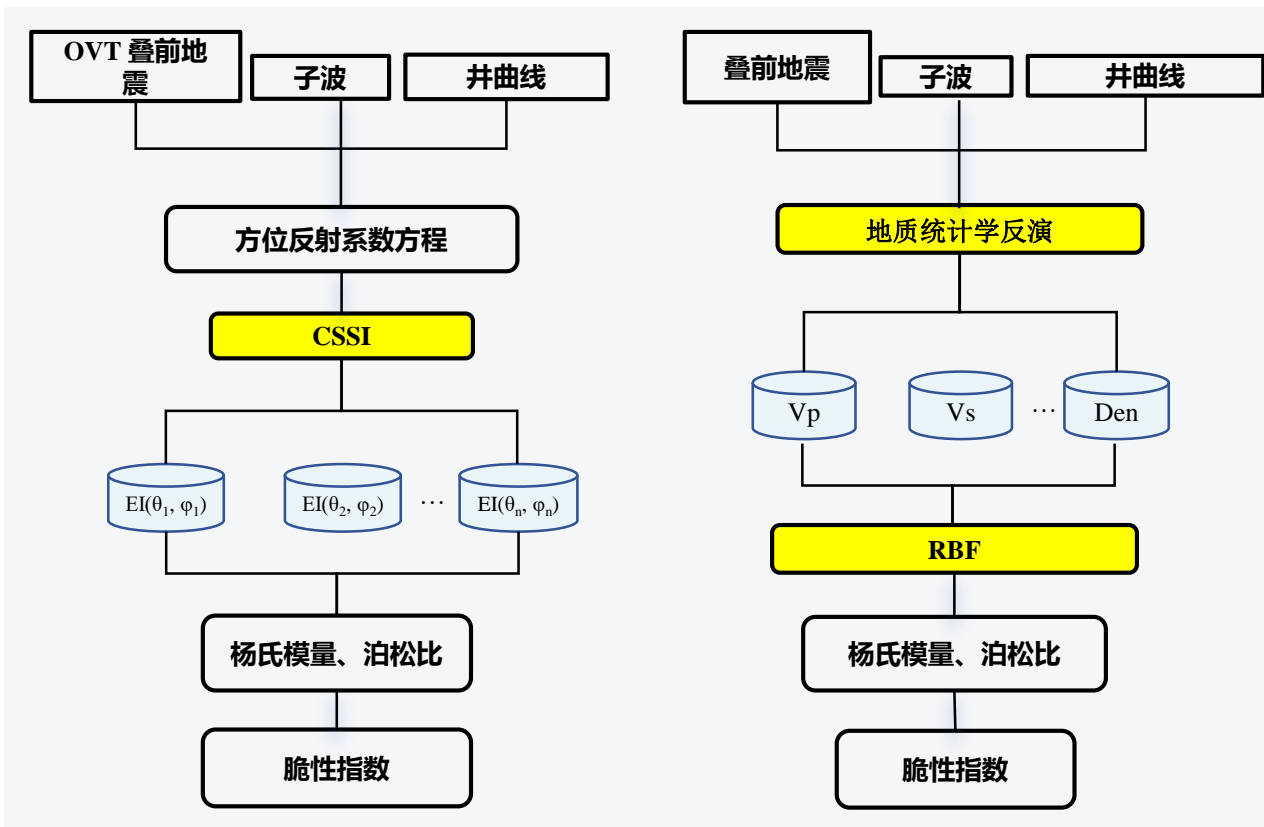
$$V_p = V_0 + a\sigma^b$$

以不平衡压实和流体膨胀为理论基础，适合泥页岩

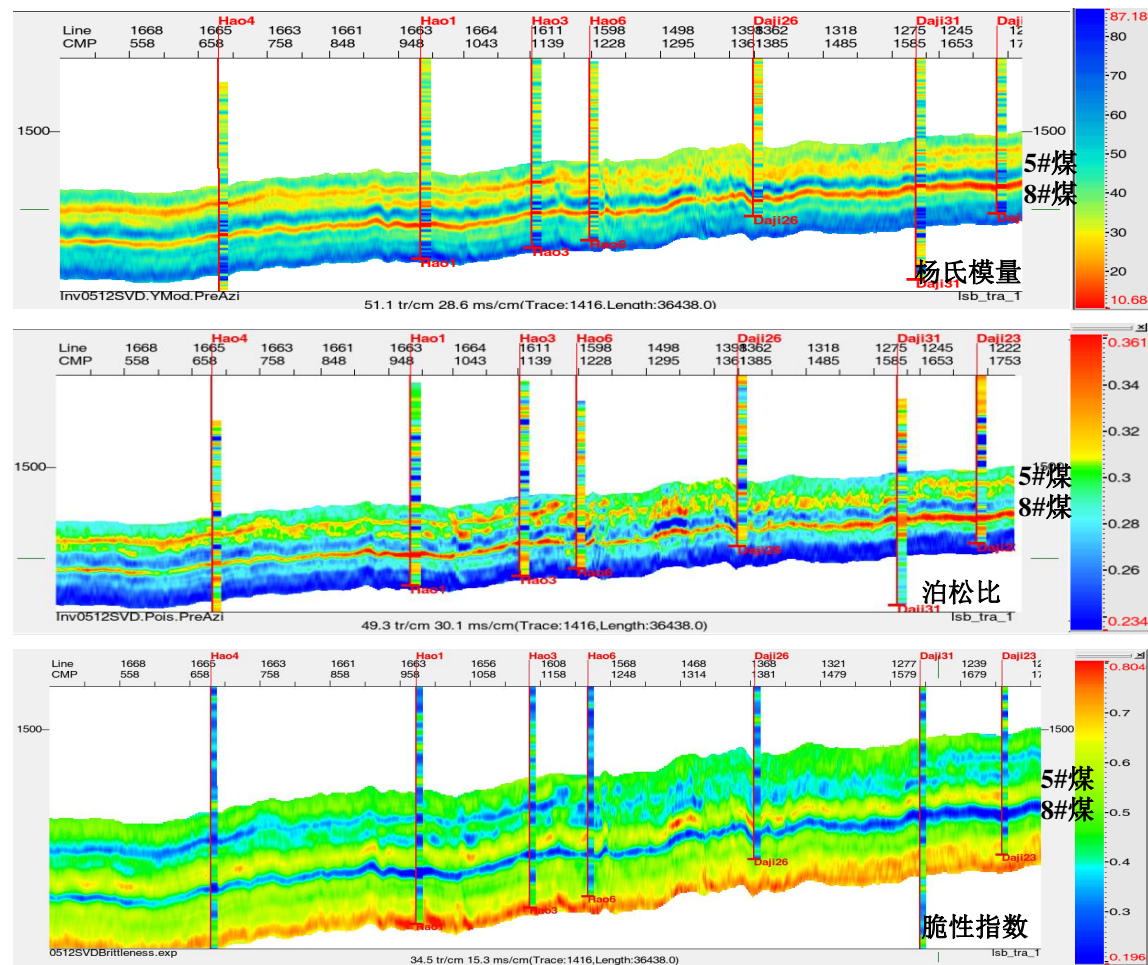


1、GeoEast脆性指数预测技术

脆性指数：主要表征了地层脆性发育特征，是评价储层是否易压裂的关键参数。



GeoEast脆性指数预测



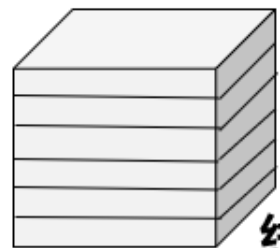




2.1、方法原理

地下应力场通常是各向异性的 (Sayers, 2010) , 采用线性滑动理论 (Schoenberg) , 根据Hooke定律可以简化成如下形式, 假设地下岩石在地下水平应变为零, 于是有最大最小主应力的表达式。

$$\varepsilon_i = \{S_b + S_f\} \sigma_j \quad \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_h = 0 \\ \varepsilon_H = 0 \end{array} \right. \quad (\text{Schoenberg and Sayers, 1995})$$

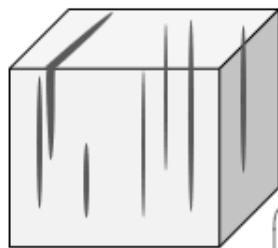


VTI背景 S_v

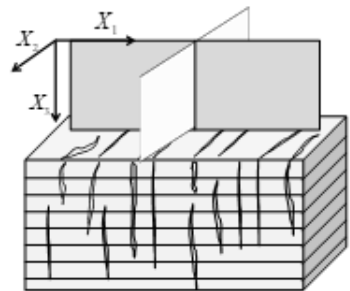
+

线性滑动理论

↓



竖直裂缝 S_f



OA介质 S

OA介质柔度矩阵 = VTI背景介质柔度矩阵 + 扰动裂缝柔度矩阵

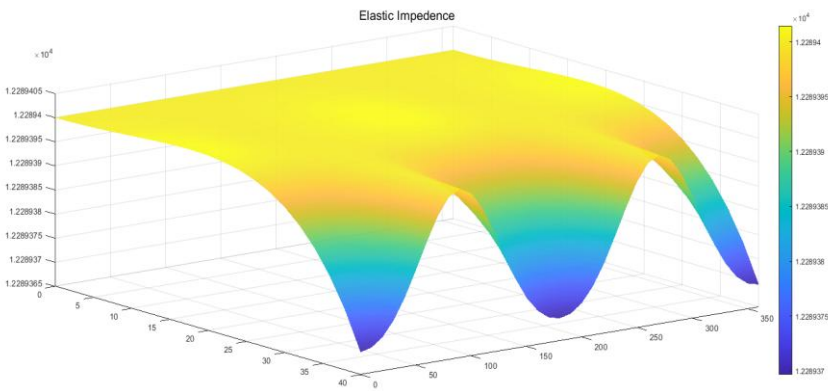
$$S = S_v + S_f = \begin{pmatrix} \frac{c_{11b}c_{33b} - c_{13b}^2}{4c_{66b}(c_{11b}c_{33b} - c_{33b}c_{66b} - c_{13b}^2)} & \frac{2c_{66b}c_{33b} + c_{13b}^2 - c_{11b}c_{33b}}{4c_{66b}(c_{11b}c_{33b} - c_{33b}c_{66b} - c_{13b}^2)} & \frac{-c_{13b}c_{66b}}{2c_{66b}(c_{11b}c_{33b} - c_{33b}c_{66b} - c_{13b}^2)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2c_{66b}c_{33b} + c_{13b}^2 - c_{11b}c_{33b}}{4c_{66b}(c_{11b}c_{33b} - c_{33b}c_{66b} - c_{13b}^2)} & \frac{c_{11b}c_{33b} - c_{13b}^2}{4c_{66b}(c_{11b}c_{33b} - c_{33b}c_{66b} - c_{13b}^2)} & \frac{-c_{13b}c_{66b}}{2c_{66b}(c_{11b}c_{33b} - c_{33b}c_{66b} - c_{13b}^2)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-c_{13b}c_{66b}}{2c_{66b}(c_{11b}c_{33b} - c_{33b}c_{66b} - c_{13b}^2)} & \frac{-c_{13b}c_{66b}}{2c_{66b}(c_{11b}c_{33b} - c_{33b}c_{66b} - c_{13b}^2)} & \frac{c_{11b}c_{66b} - c_{66b}^2}{c_{66b}(c_{11b}c_{33b} - c_{33b}c_{66b} - c_{13b}^2)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{c_{44b}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{c_{44b}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{c_{66b}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Z_N & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_T \end{pmatrix}$$



2.1、方法原理



基于各向异性岩石物理理论的地应力预测：结合各向异性岩石物理模型，推导方位反射系数方程，直接建立岩石力学参数、各向异性参数与地震数据的关联，通过观测方位地震反映裂缝性岩石的各向异性特征，进而表征地应力（ODHSR）（马妮, 2016）特征。



$$R(\phi, \theta) = \frac{\Delta Z}{2\bar{Z}} + \frac{1}{2} \left(\left[\frac{\Delta V_P}{\bar{V}_P} - \left(2 \frac{\bar{V}_S}{\bar{V}_P} \right)^2 \frac{\Delta G}{\bar{G}} \right] + \left[\Delta \delta^{(v)} + 8 \left(\frac{\bar{V}_S}{\bar{V}_P} \right)^2 \Delta \gamma \right] \cos^2(\phi - \phi_{sym}) \right) \sin^2 \theta + \left(\frac{\Delta V_P}{2\bar{V}_P} + \frac{1}{2} (\Delta \epsilon^{(v)} \sin^2(\phi - \phi_{sym}) + \Delta \delta^{(v)} \cos^2(\phi - \phi_{sym})) \sin^2(\phi - \phi_{sym}) \right) \sin^2 \theta \tan^2 \theta \quad (Ruger, 1998)$$

仍需与井上的静态应力的测量值进行校准，工业界也常用构造应变来进行校准（Blanton and Olson, 1999）

$$\sigma_x = \sigma_z \frac{V_{P0}^2 \sqrt{2f\delta + f^2} - V_{S0}^2}{Z_N \left[V_{P0}^4 \rho (1 + 2\epsilon) - \rho \left(V_{P0}^2 \sqrt{2f\delta + f^2} - V_{S0}^2 \right)^2 \right] + V_{P0}^2}$$

$$\sigma_y = \sigma_z \frac{\left(V_{P0}^2 \sqrt{2f\delta + f^2} - V_{S0}^2 \right) \left[1 + 2V_{S0}^2 \rho (2\gamma + 1) Z_N \right]}{Z_N \left[V_{P0}^4 \rho (1 + 2\epsilon) - \rho \left(V_{P0}^2 \sqrt{2f\delta + f^2} - V_{S0}^2 \right)^2 \right] + V_{P0}^2}$$

地应力指示因子-水平应力差异比

$$ODHSR = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{\sigma_y} = \frac{2V_{S0}^2 \rho (2\gamma + 1) Z_N}{1 + 2V_{S0}^2 \rho (2\gamma + 1) Z_N}$$

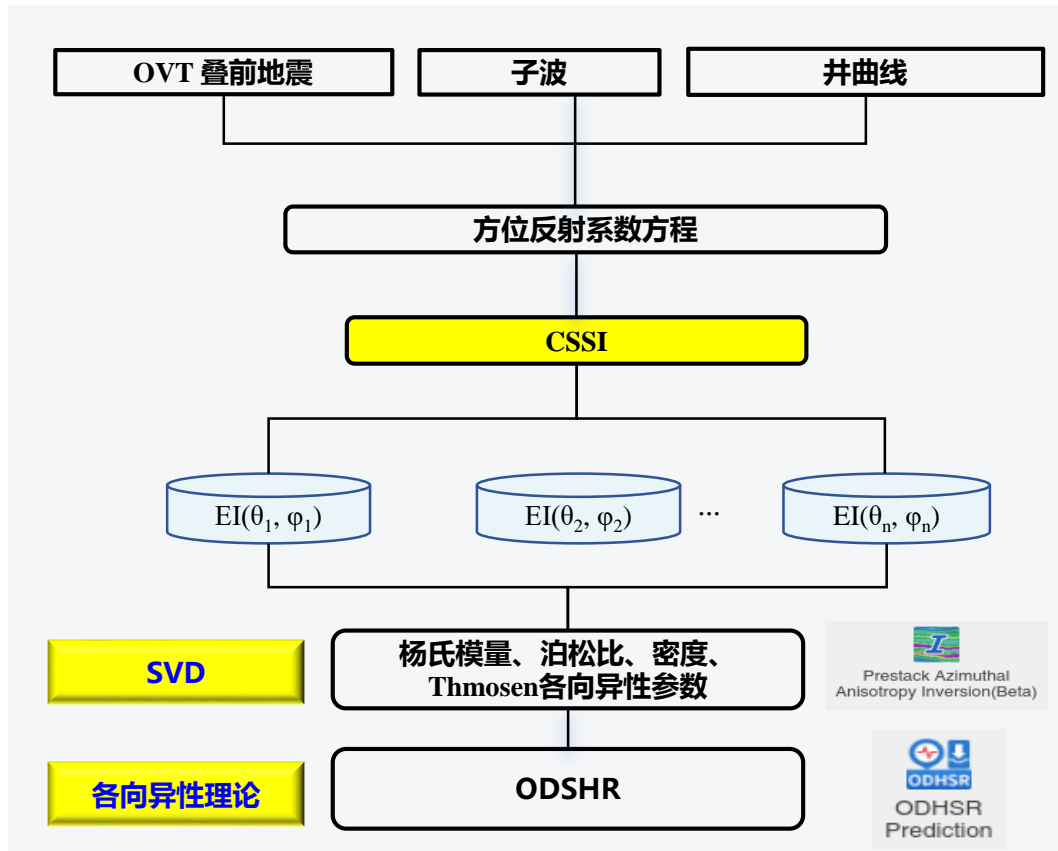
水平应力差异比



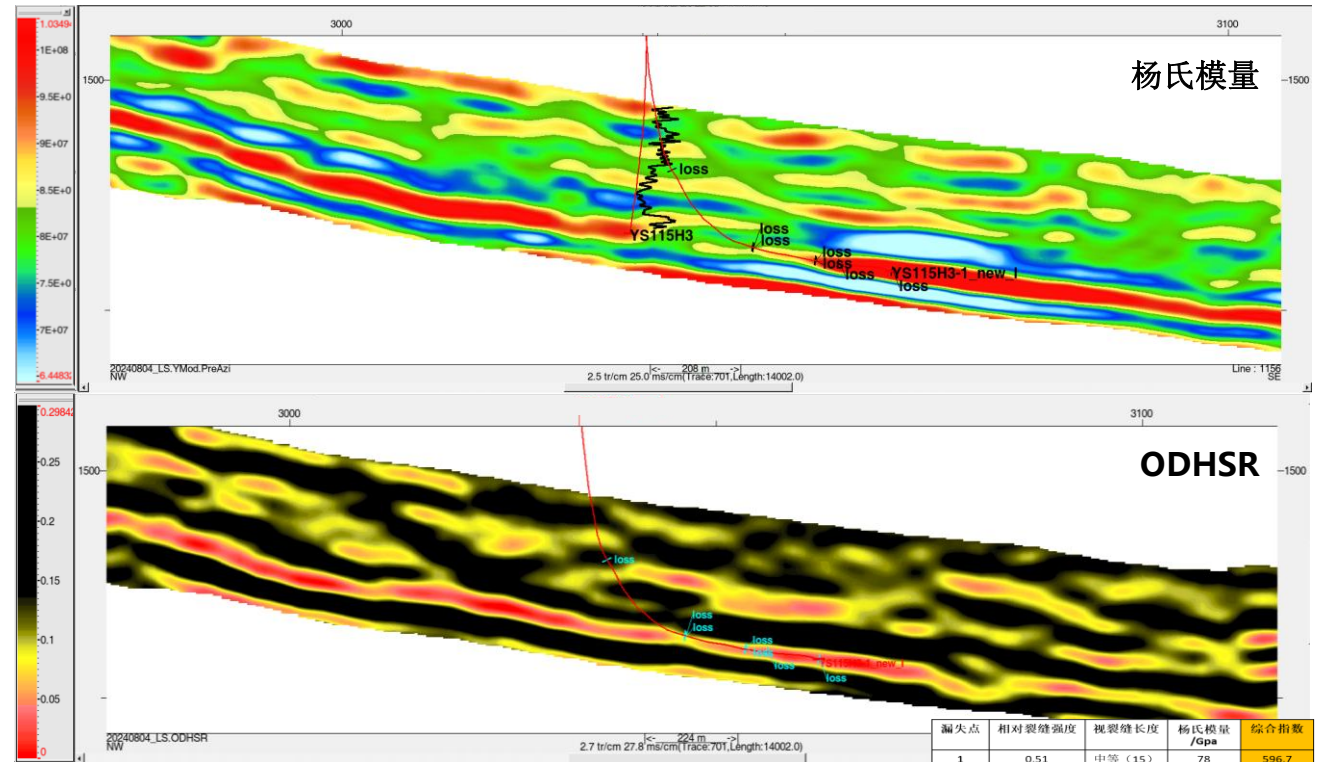
2.1、方法原理



DHSR：水平应力差异比系数是评价地层是否可压裂成网的关键参数，水平应力差异比高的区域，水力压裂易形成平行裂缝；水平应力差异比低的区域，更易形成裂缝网络。

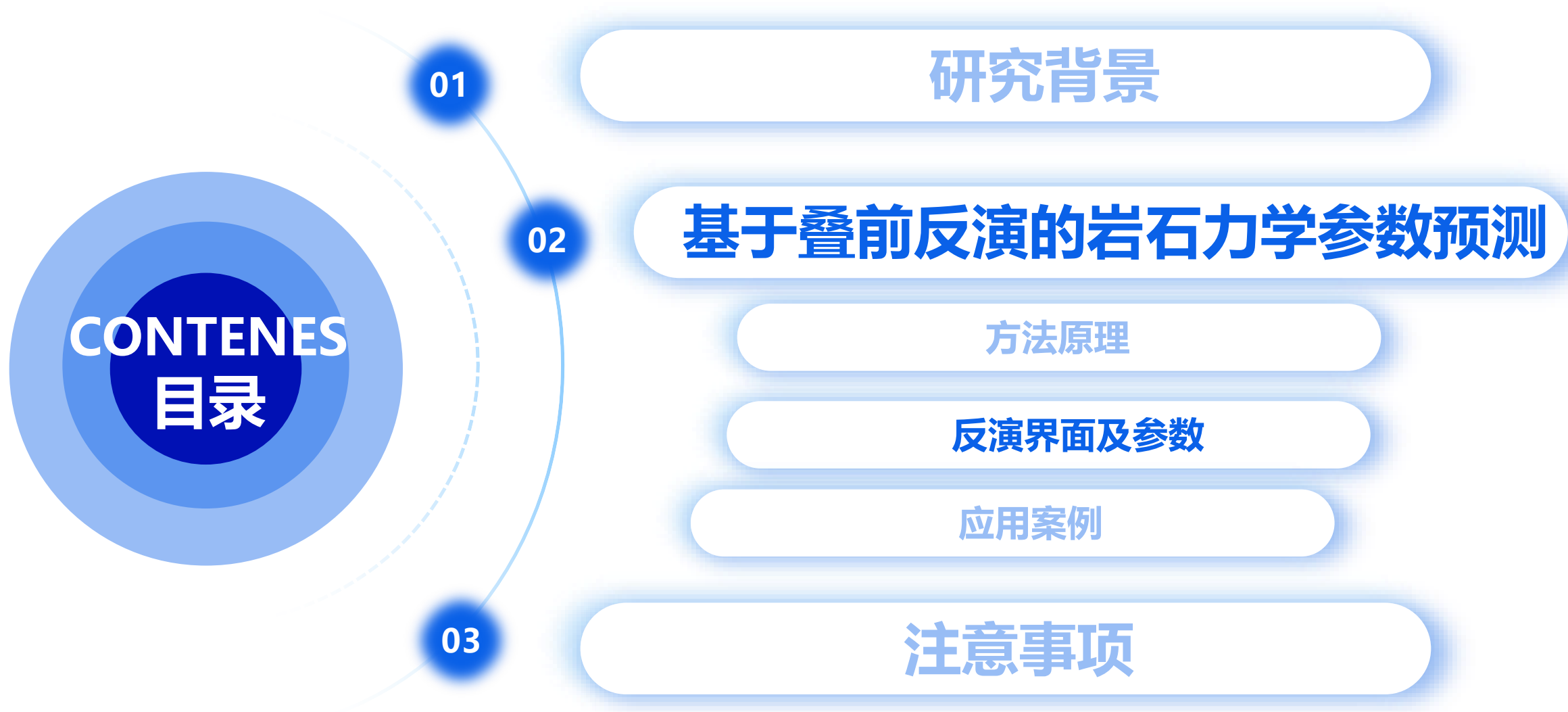


基于各向异性岩石物理理论的力学参数预测



预测结果与测井曲线有很好的 consistency，除此之外，进一步结合预测的力学参数与裂缝参数开展漏失分析（漏失综合指数）。（四川紫金坝）

漏失点	相对裂缝强度	视裂缝长度	杨氏模量 /Gpa	综合指数
1	0.51	中等 (15)	78	596.7
2	0.52	大 (30)	81	1263.6
3	0.51	大 (30)	86	1315.8
4	0.52	大 (30)	92	1435.2
5	0.52	大 (30)	100	1560





2.2、反演界面及参数



输入-输出:

Prestack Azimuthal Anisotropy Inversion(Beta) (JIMuSaEr)

Input Volume Parameters Wells Output

	Selsmic	Angle	Azimutha	Wavelet
1	AZ1_AVO1_1ms	16	45	ly9_aver_AVO1_AZ1_shift_edit
2	AZ1_AVO2_1ms	24	45	ly9_aver_AVO2_AZ1_shift_edit
3	AZ1_AVO3_1ms	32	45	ly729_aver_AVO3_AZ1_edit
4	AZ4_AVO1_1ms	16	135	lyedit_Isb_ave_ang16_azi4
5	AZ4_AVO2_1ms	24	135	lyedit_Isb_ave_ang24_azi4
6	AZ4_AVO3_1ms	32	135	lyedit_Isb_ave_ang32_azi4

Model

Young's Modulus: Model_min_Volume_YOUNGS_MODULUS [Select... View]

Poisson Ratio: 730_1ms_Volume_POISSON_RATIO_cut.sub [Select... View]

Density: Isb0807_1ms_Volume_DEN [Select... View]

Epsilon: ly730_1ms_Volume_ECHO_cut.sub [Select... View]

Delta: ly730_1ms_Volume_D2EC_cut.sub [Select... View]

Gama: ly730_1ms_Volume_GAZF_cut.sub [Select... View]

Save... Load... Run... Close

Prestack Azimuthal Anisotropy Inversion(Beta) (JIMuSaEr)

Input Volume Parameters Wells Output

Range Control

Area Traverse Boundary

Start Line: 1940 [Slider: 1940 to 2470]

End Line: 2470 [Slider: 1940 to 2470]

Start CMP: 825 [Slider: 825 to 1280]

End CMP: 1280 [Slider: 825 to 1280]

Load Range...

Window

Mode: Horizon - Horizon [Auto Interpolation]

Top Horizon: Cal_JI305_TP3wt_Time_20220424.ip.ip.smo.ly4*4.ip.smo [Shift -5]

Bottom Horizon: Cal_JI305_TP2127_Time_20220424.ip.ip.smo [Shift -5]

Save... Load... Run... Close

Prestack Azimuthal Anisotropy Inversion(Beta) (JIMuSaEr)

Input Volume Parameters Wells Output

Prefix Name: [Select...]

10-15Elastic Impedance(*.Imp10-15.PreAzi) 10-105Elastic Impedance(*.Imp10-105.PreAzi)

20-15Elastic Impedance(*.Imp20-15.PreAzi) 20-105Elastic Impedance(*.Imp20-105.PreAzi)

30-15Elastic Impedance(*.Imp30-15.PreAzi) 30-105Elastic Impedance(*.Imp30-105.PreAzi)

Density(*.Rho.PreAzi) YMod(*.YMod.PreAzi)

Pois(*.Pois.PreAzi) Delta(*.Delta.PreAzi)

Epsilon(*.Ep.PreAzi) Gama(*.Gama.PreAzi)

P-Impedance(*.Ip.PreAzi) P-Velocity(*.Vp.PreAzi)

S-Impedance(*.Is.PreAzi) S-Velocity(*.Vs.PreAzi)

Vp/Vs(*.Vp_Vs.PreAzi) Fluid Factor(*.FFac.PreAzi)

Save... Load... Run... Close



2.2、反演界面及参数



参数界面:

Prestack Azimuthal Anisotropy Inversion(Beta) (JIMuSaEr)

Input Volume Parameters Wells Output

Maximum of Iterations 30 1 100

Sparse Constrain Factor 8.0 1.0 80.0

Model Constrain Factor 2.00 0.01 10.00

Wavelet Factor 1.0 0.2 5.0

Vs/Vp 0.42 0.00 1.00

Inversion Method

Least Square SVD

Run Date & Time 2026-03-16, 21:45:22 Thread Num (1-10) 2 QC

Save... Load... Run... Close

最大迭代次数

稀疏约束因子

模型约束因子

子波缩放

纵横比

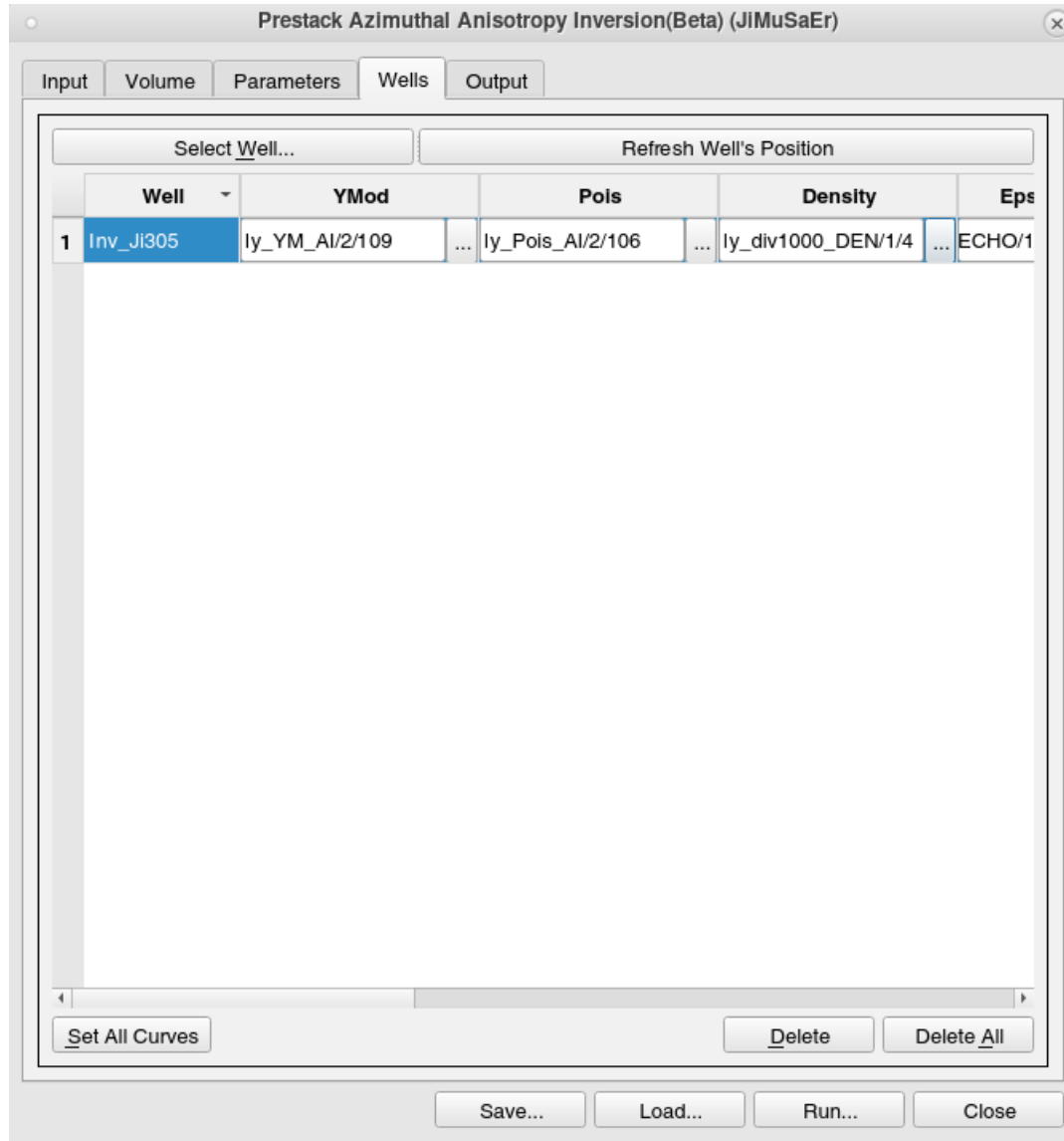
计算方法

较大-稀疏性, 细节变少 较小-吻合性, 噪音增多

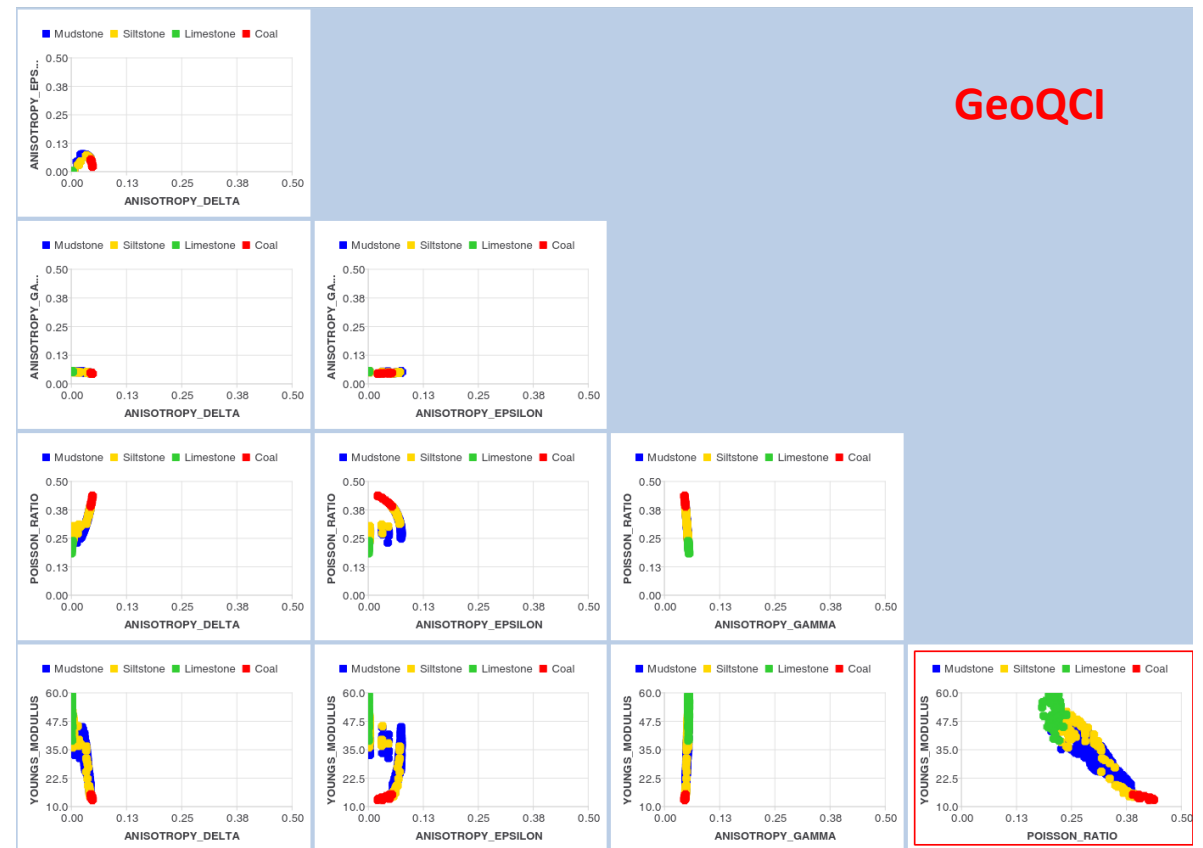
较大-接近模型 较小-接近地震



2.2、反演界面及参数



- 井段选取 尽量选择标志井，目的层段，便于抓取弹性参数之间的多元线性关系







2.3、应用案例-基于叠前反演的岩石力学参数预测



难点:

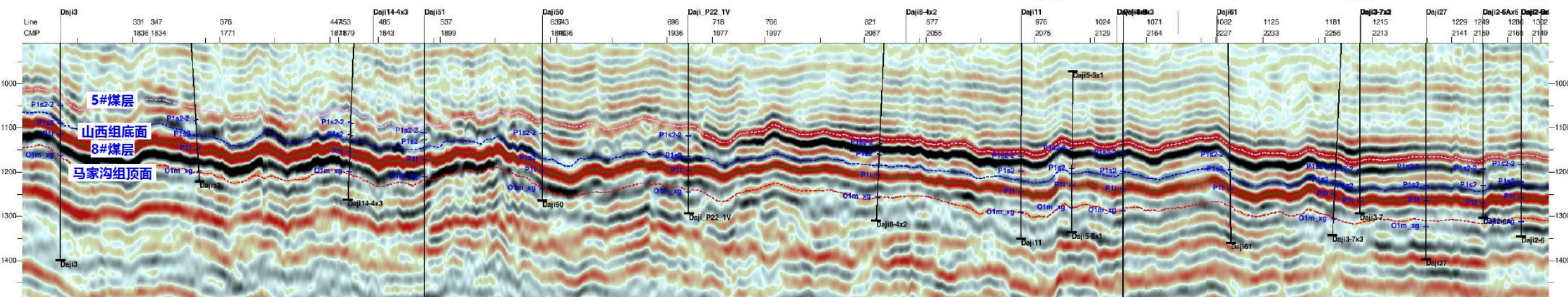
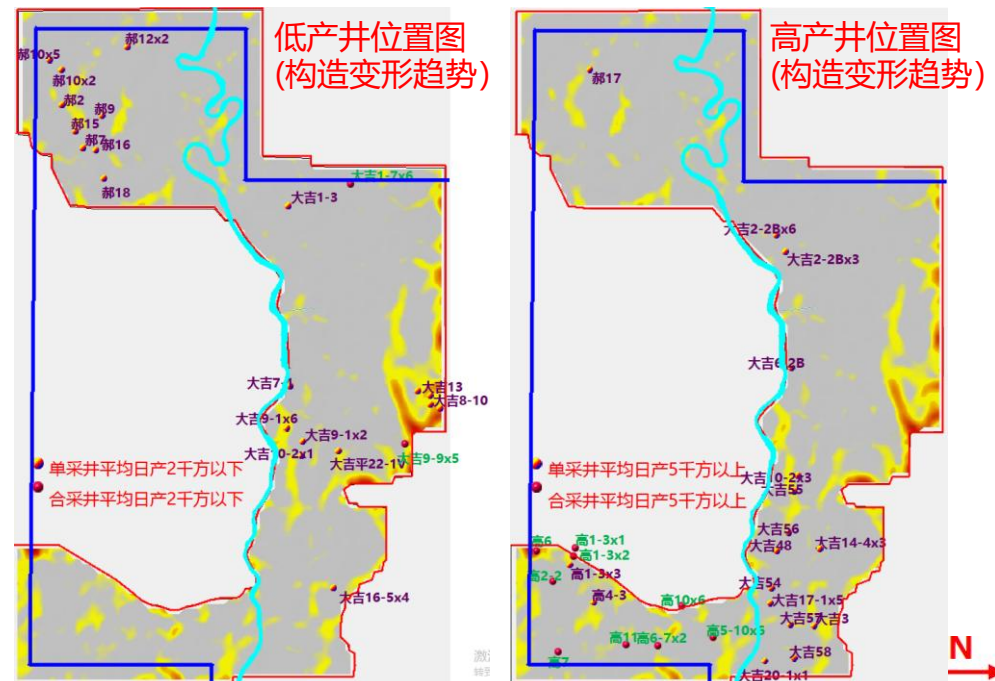
8# 煤层分布稳定, 但存在局部高产 / 低产差异, 需明确主控因素。

技术措施:

构造特征: 断裂

地质甜点预测: 煤层厚度、裂缝特征

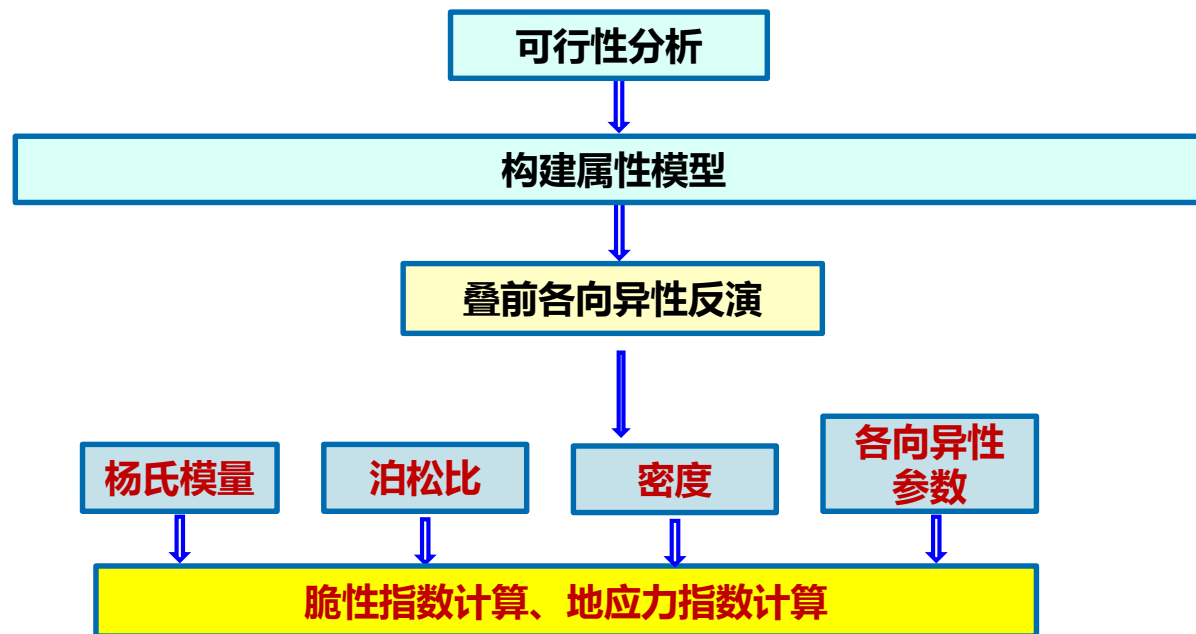
工程甜点预测: 脆性、地应力





2.3、应用案例-基于叠前反演的岩石力学参数预测

工程甜点：开展脆性指数、地应力指数，为水平井压裂提供有力的指导。

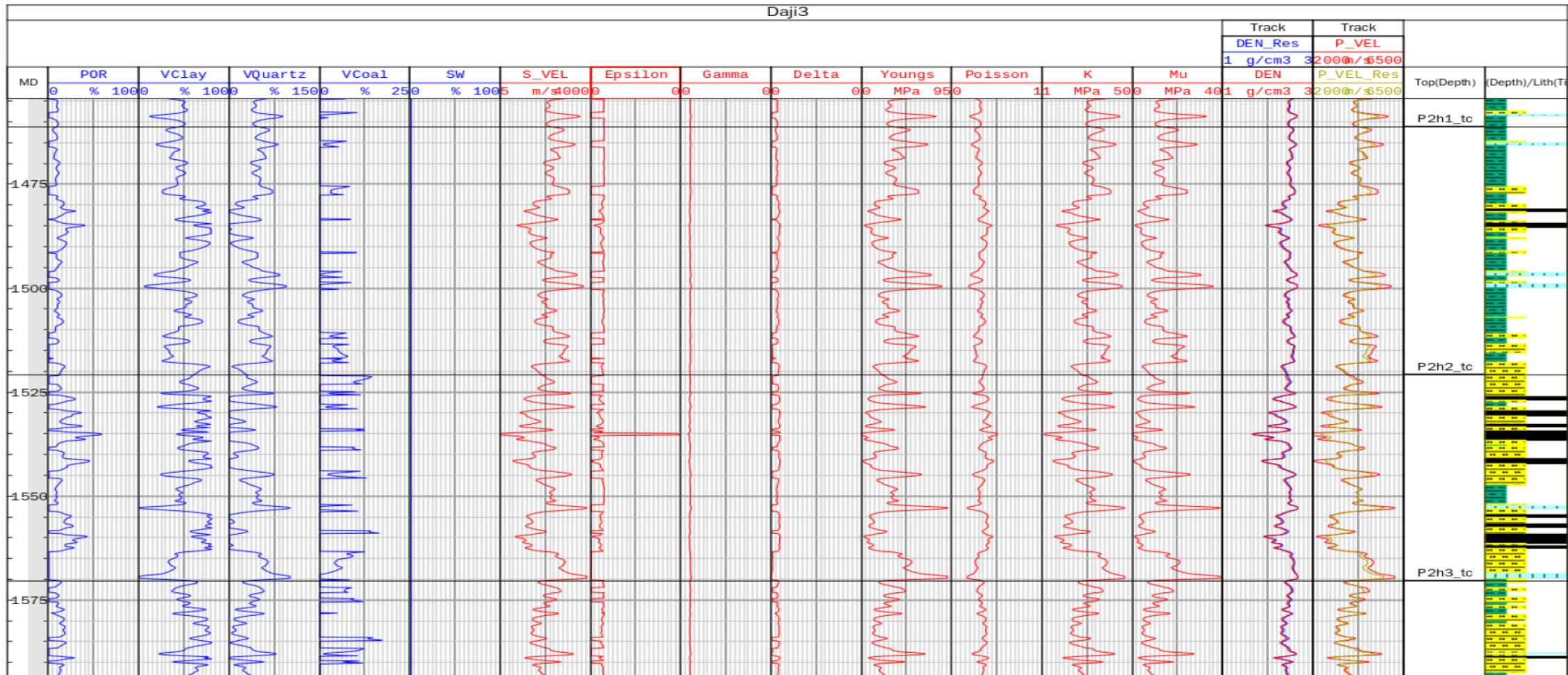




2.3、应用案例-基于叠前反演的岩石力学参数预测



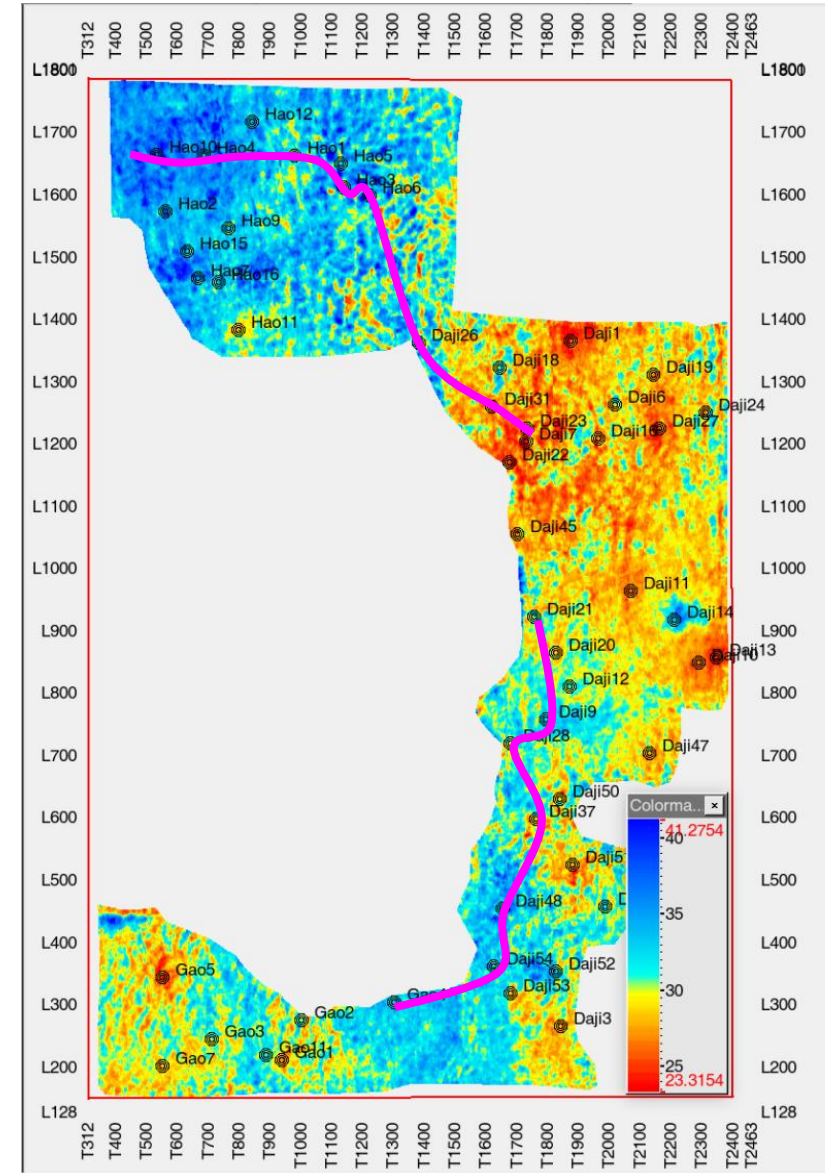
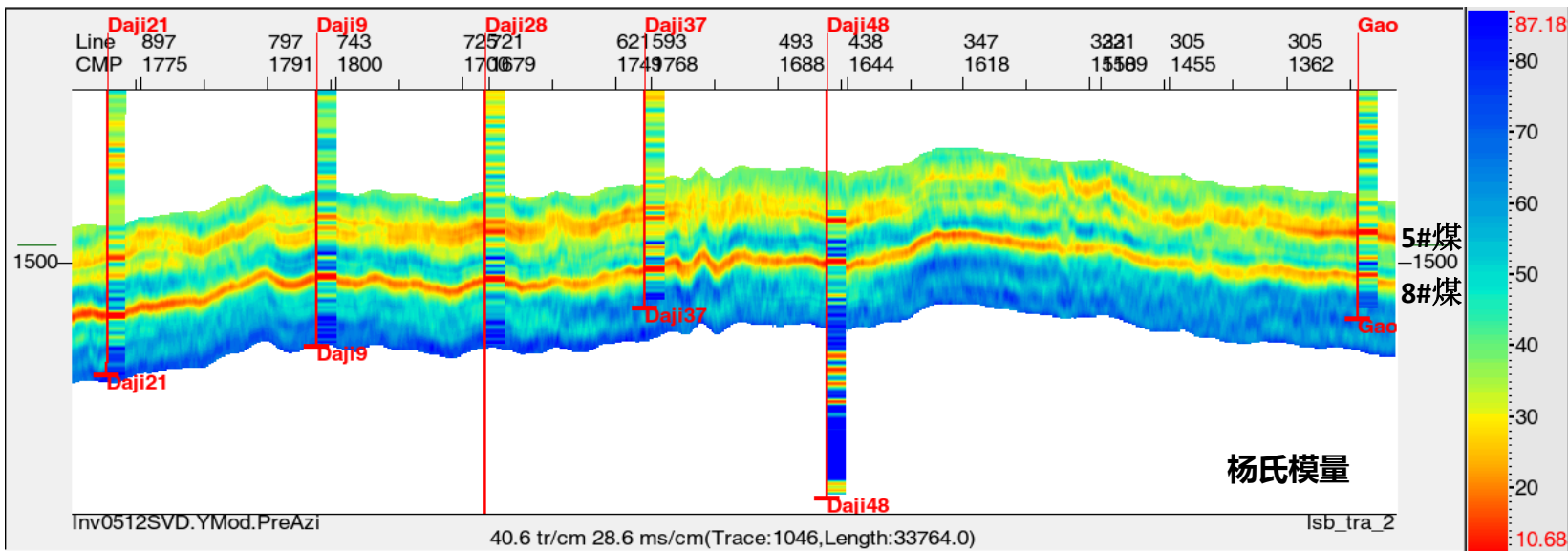
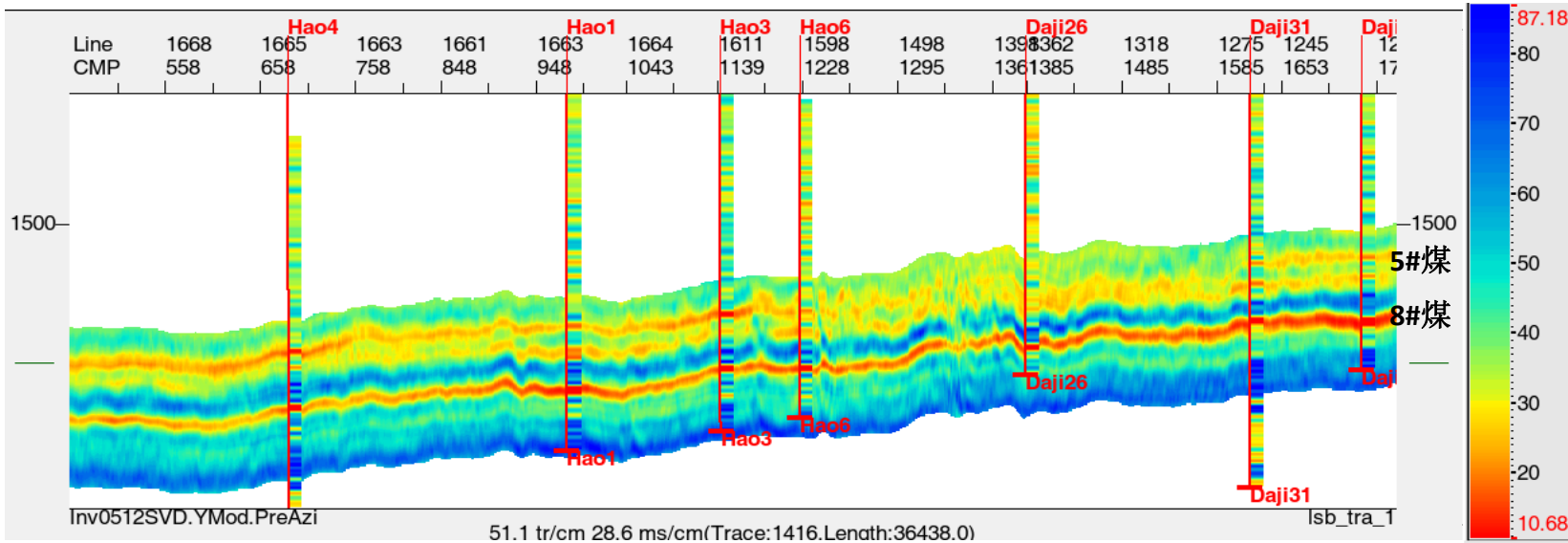
基于人工智能的矿物含量预测 + 线性滑移理论的岩石物理建模



- 利用纵波速度、横波速度、自然伽马预测矿物含量，三条常规曲线的计算结果与原始曲线相似，得到矿物含量预测结果。
- 利用岩石物理建模得到各向异性参数的结果。

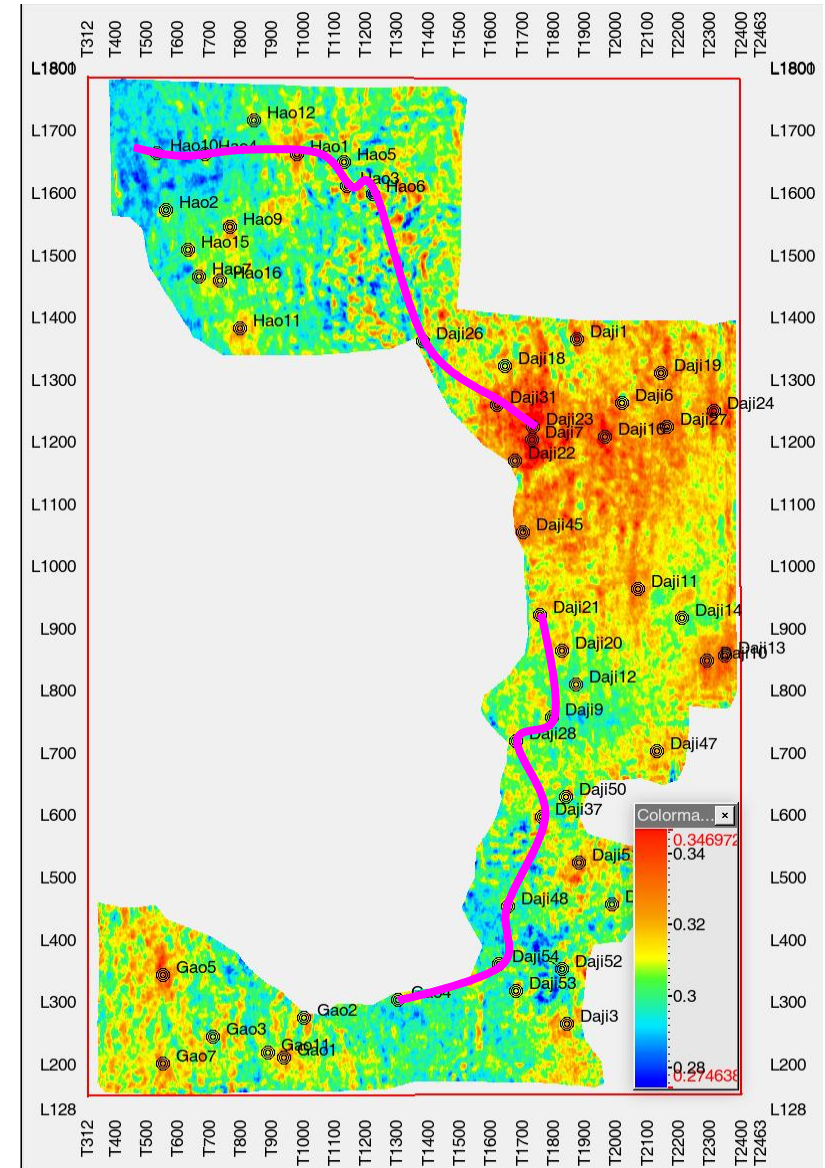
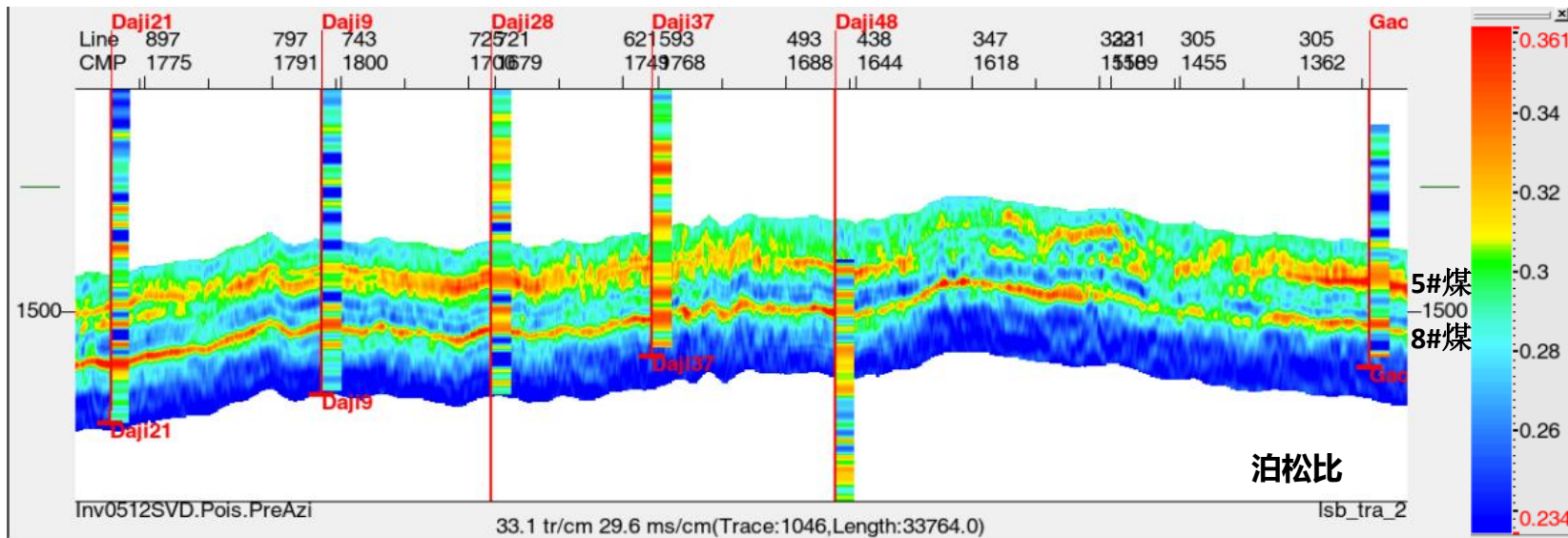
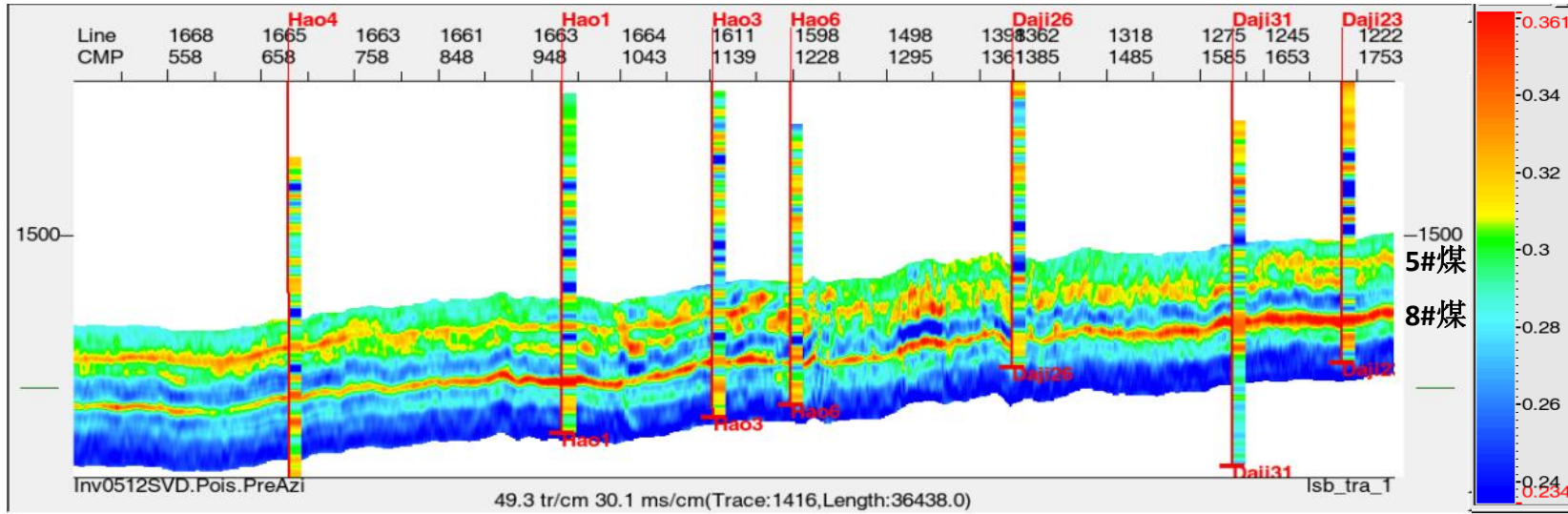


2.3、应用案例-基于叠前反演的岩石力学参数预测





2.3、应用案例-基于叠前反演的岩石力学参数预测

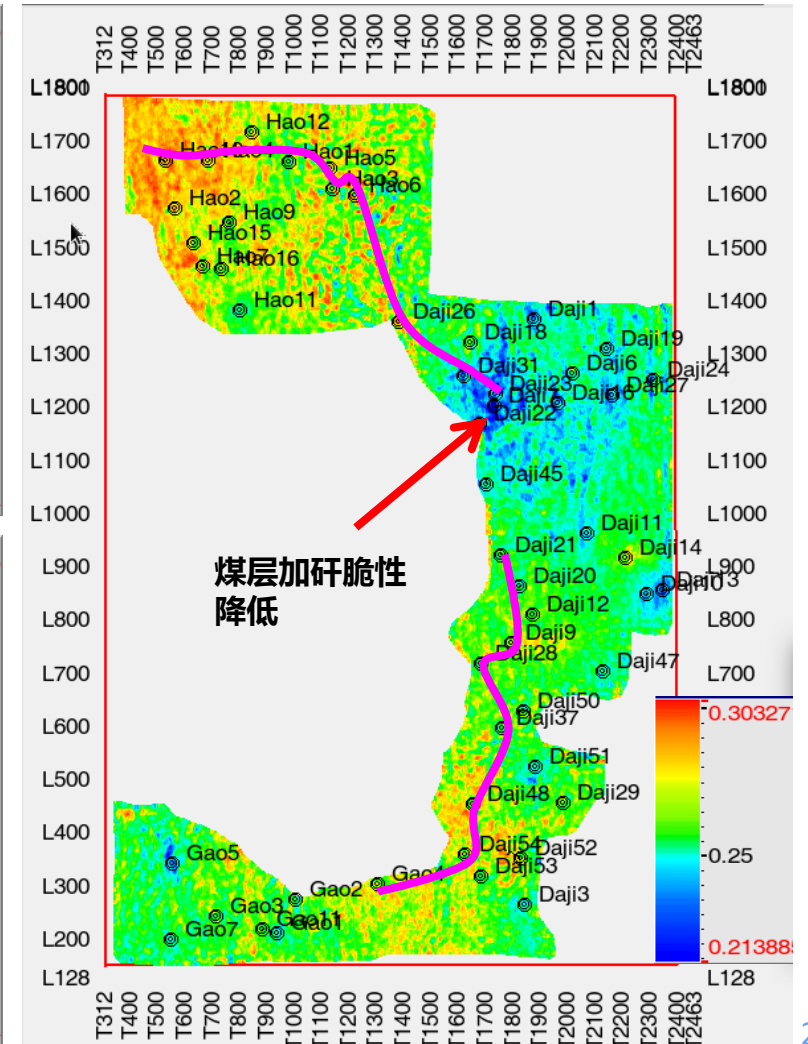
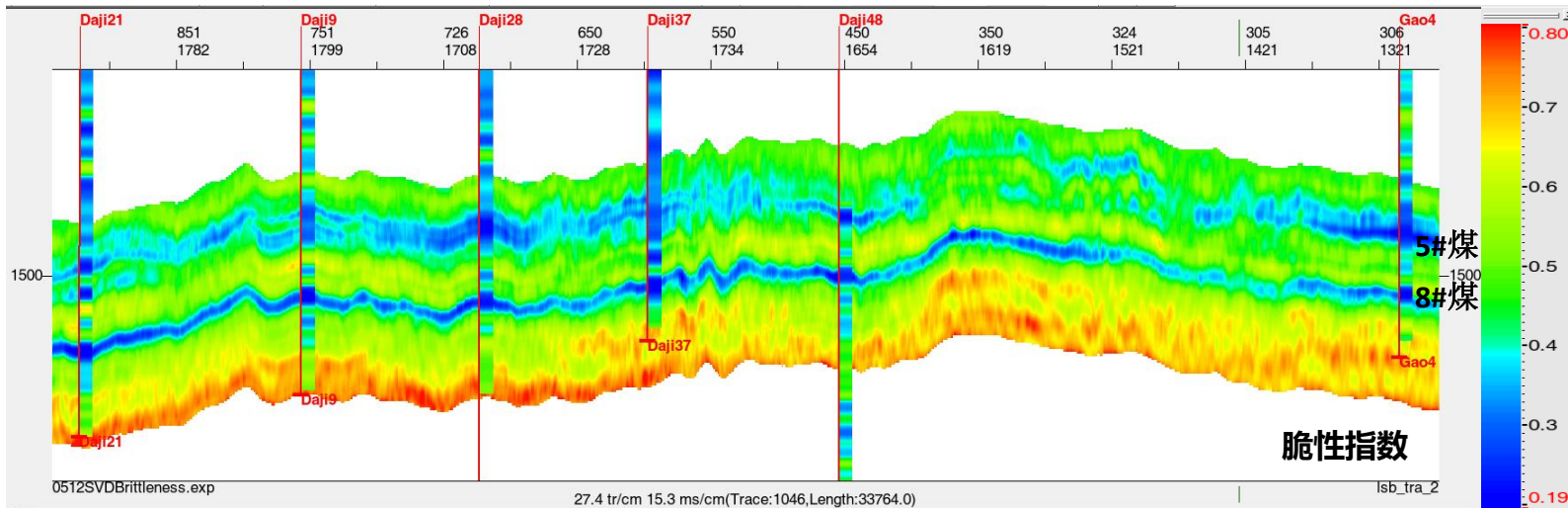
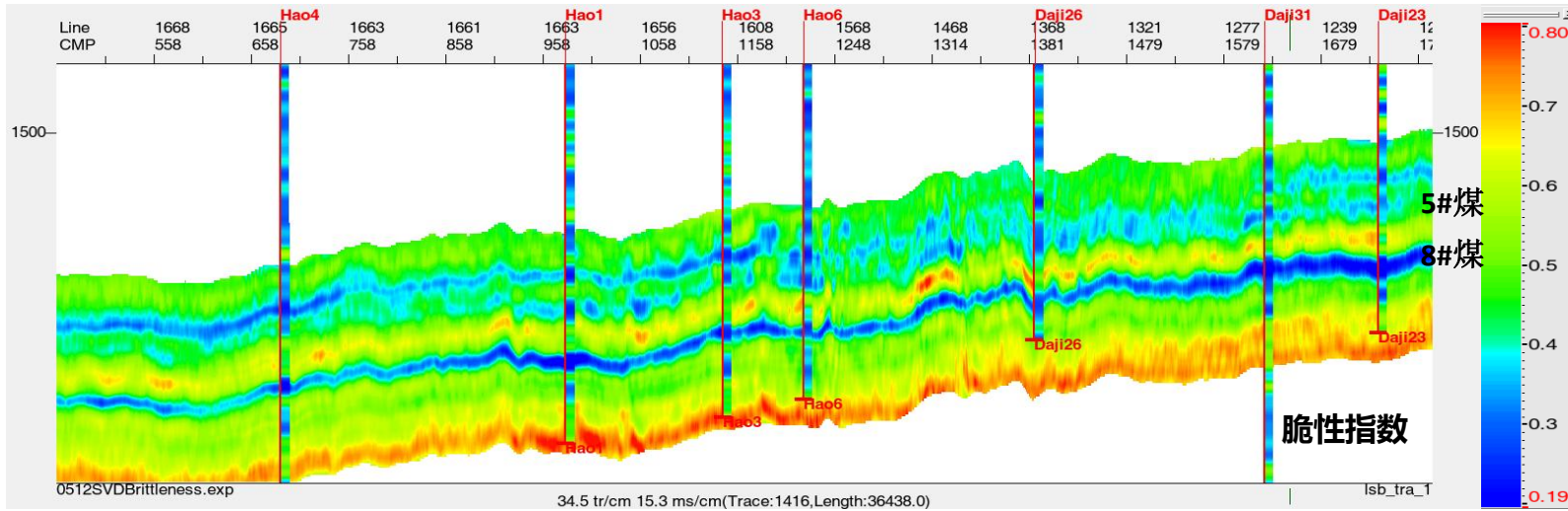




2.3、应用案例-基于叠前反演的岩石力学参数预测



与井上统计的脆性矿物含量保持一致，平面分布规律也与实际地质特征相似，整体应用成果较好。

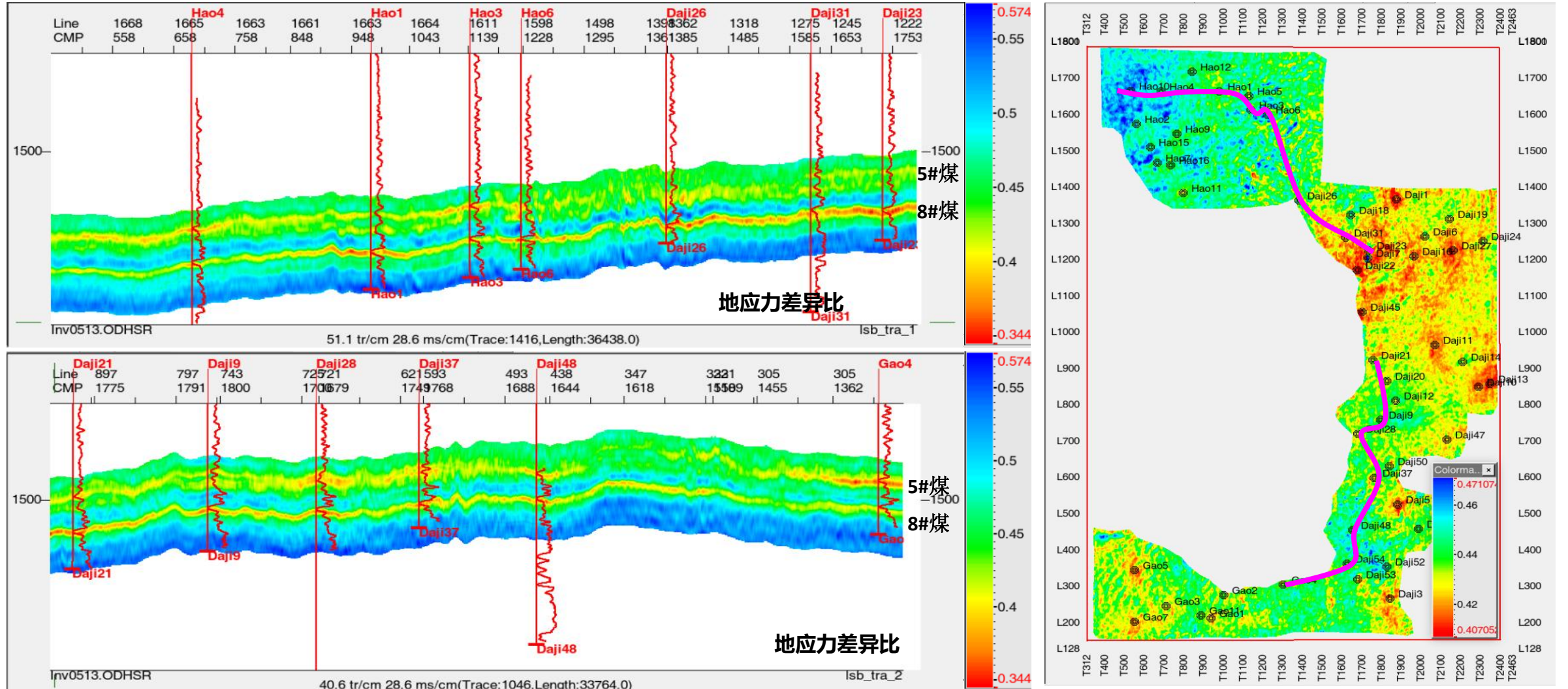




2.3、应用案例-基于叠前反演的岩石力学参数预测



与井上应力特征保持一致，平面分布规律也与实际地质特征相似，整体应用成果较好。



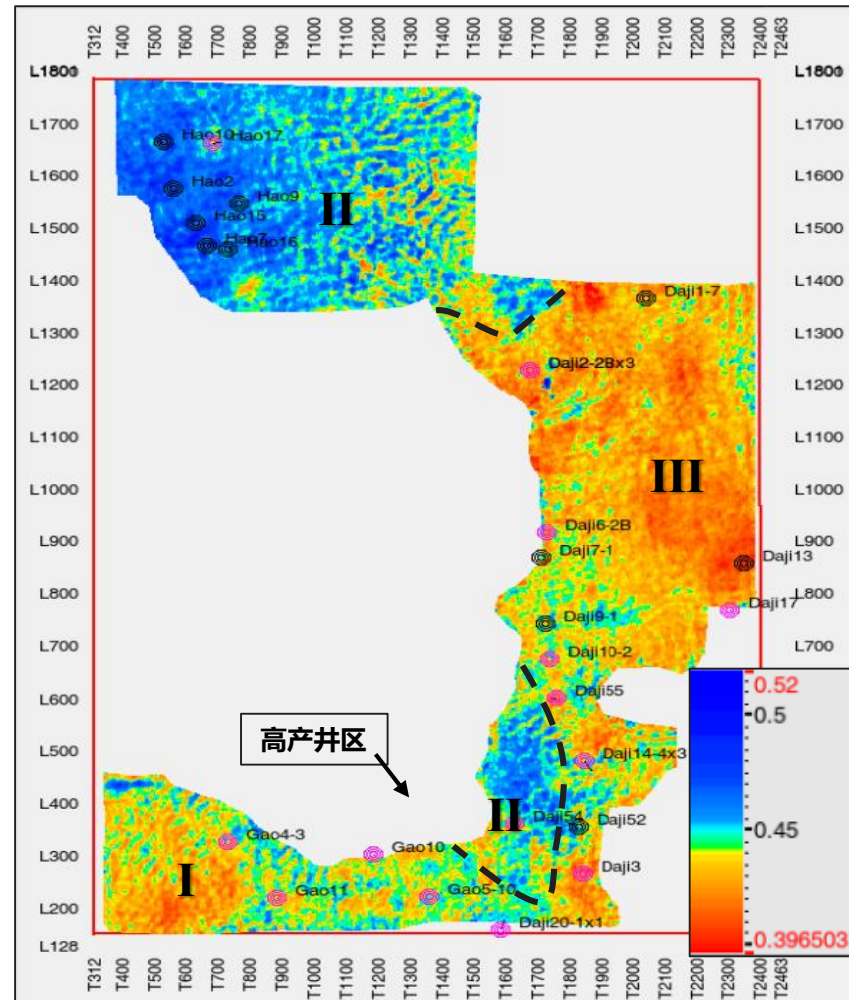
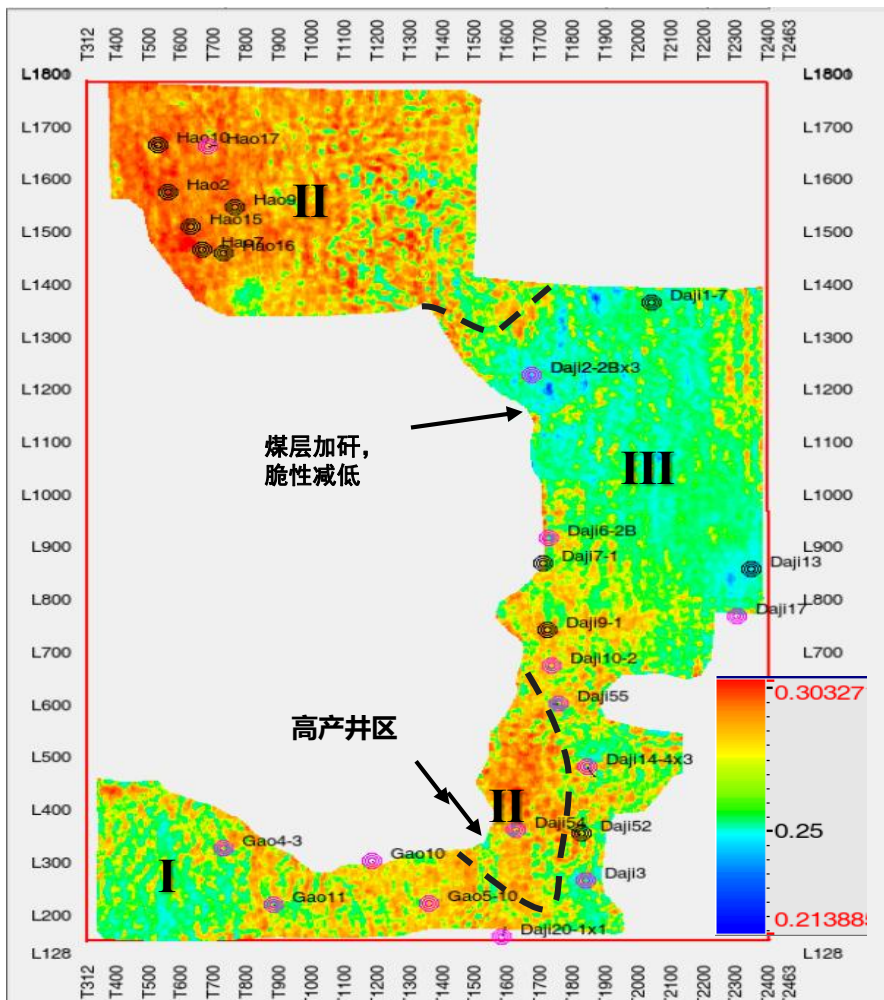


2.3、应用案例-基于叠前反演的岩石力学参数预测



通过对全工区开展叠前各向异性反演 (PreAzi) 实现井震结合的地应力预测, 能够对工程甜点区域进行分级, 实现区带的优选, 有效指导压裂方案的形成。

➤ **一类甜点区: 高脆性+小应力差; 二类甜点区: 高脆性+大应力差; 三类甜点区: 低脆性+小应力差**







3、注意事项



- ① 井段的选取需要质控和调整，该方案的地应力预测只是一个定性的指导。
- ② 至少一口井有各向异性的参数信息。
- ③ 如果有低频各向异性模型可以选用，如果没有可以不选取各向异性的模型参与反演过程。
- ④ 该方法是一种获得地层力学参数的直接手段，如果在实际生产应用中需要对地应力准确的评估，还需要结合井上的地质力学开展进一步的分析工作。

感谢大家对GeoEast软件的 信任和支持!

更多详情请关注



GeoEast微信公众号



解释技术支持QQ群



Bilibili视频教程

服务电话: (解释系统) 0312-3824999 (市场销售) 0312-3737213/0312-3824774

服务邮箱: geoeast@cnpc.com.cn 官网网址: <http://www.gs.com.cn>