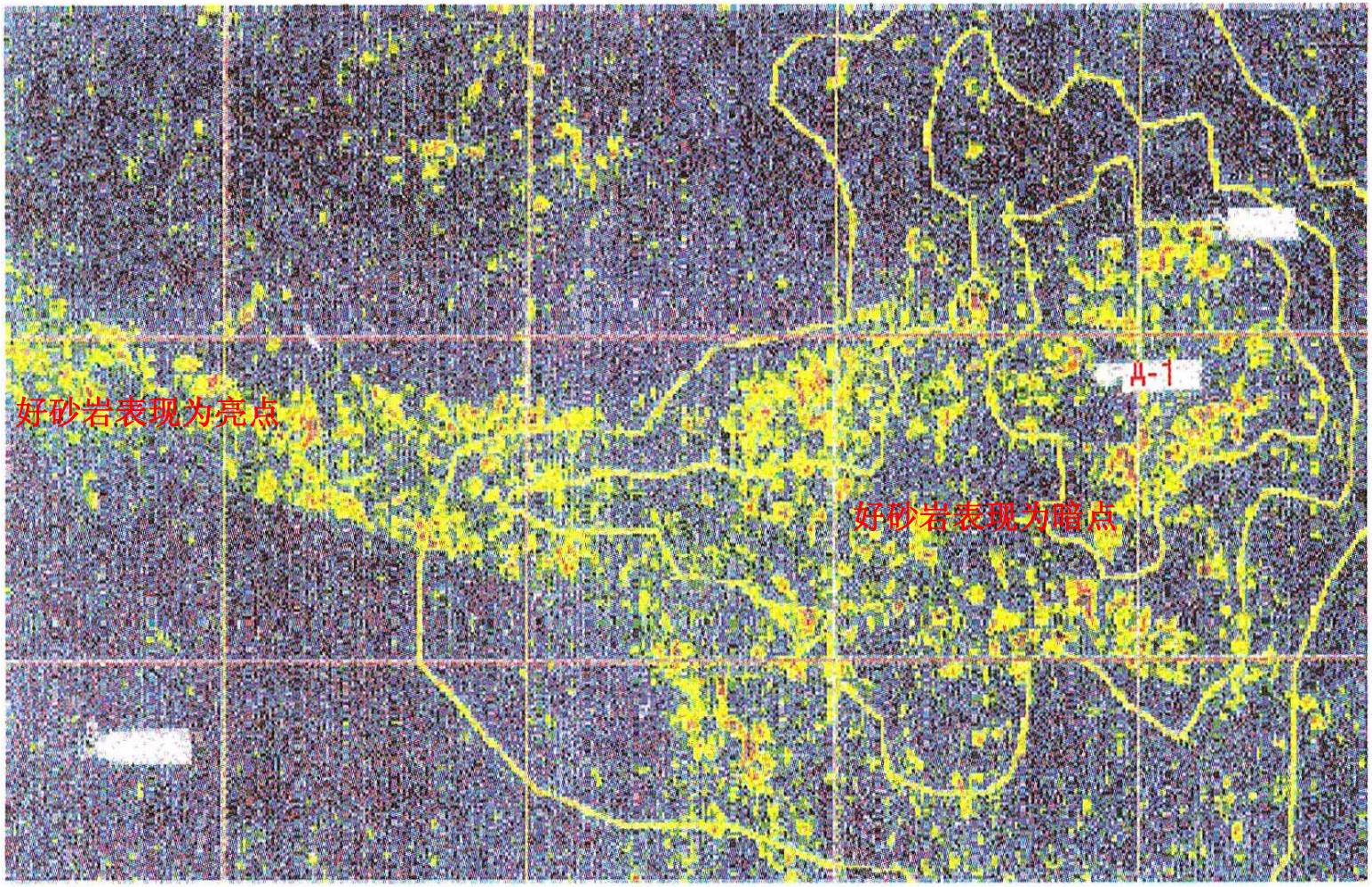
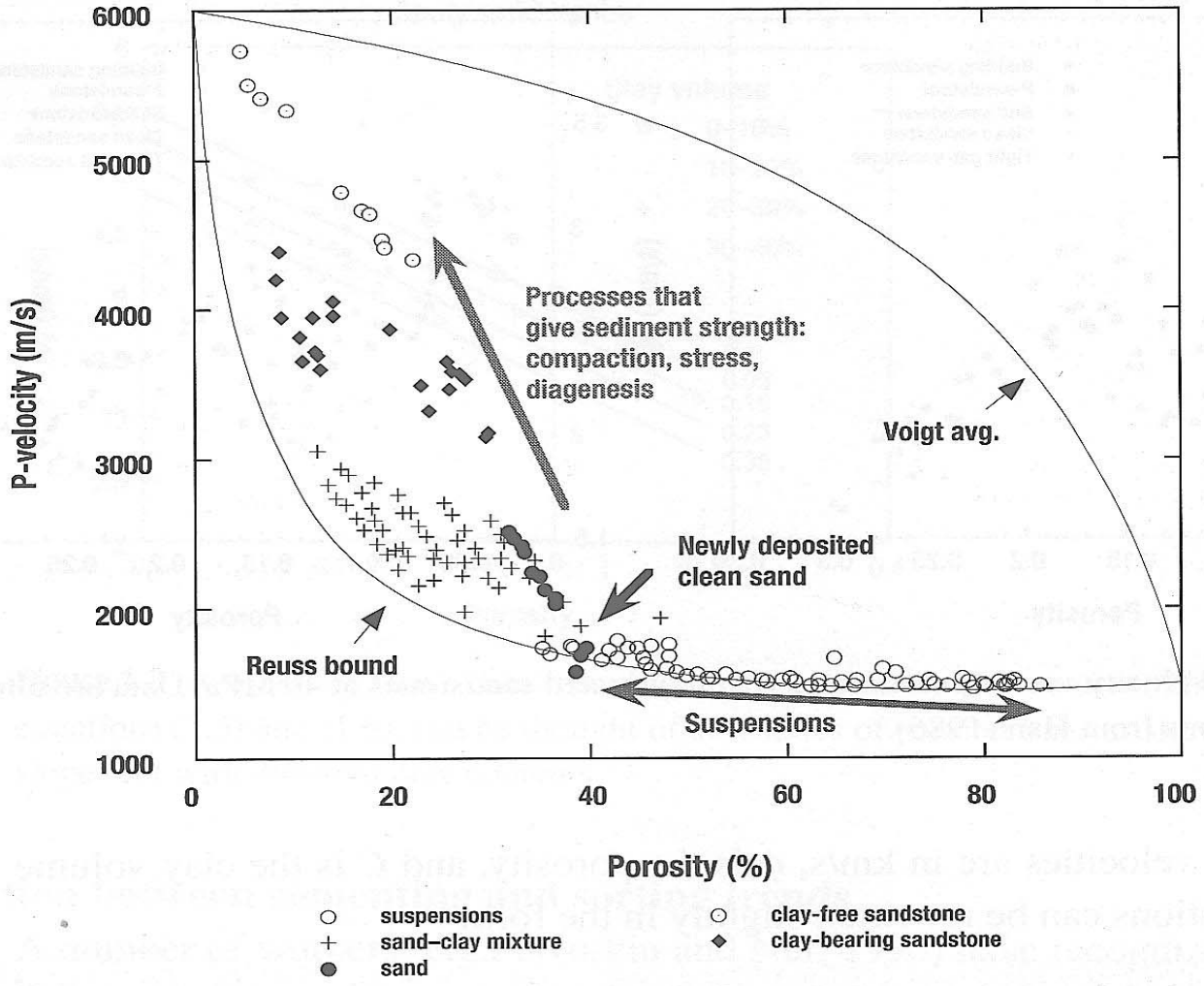
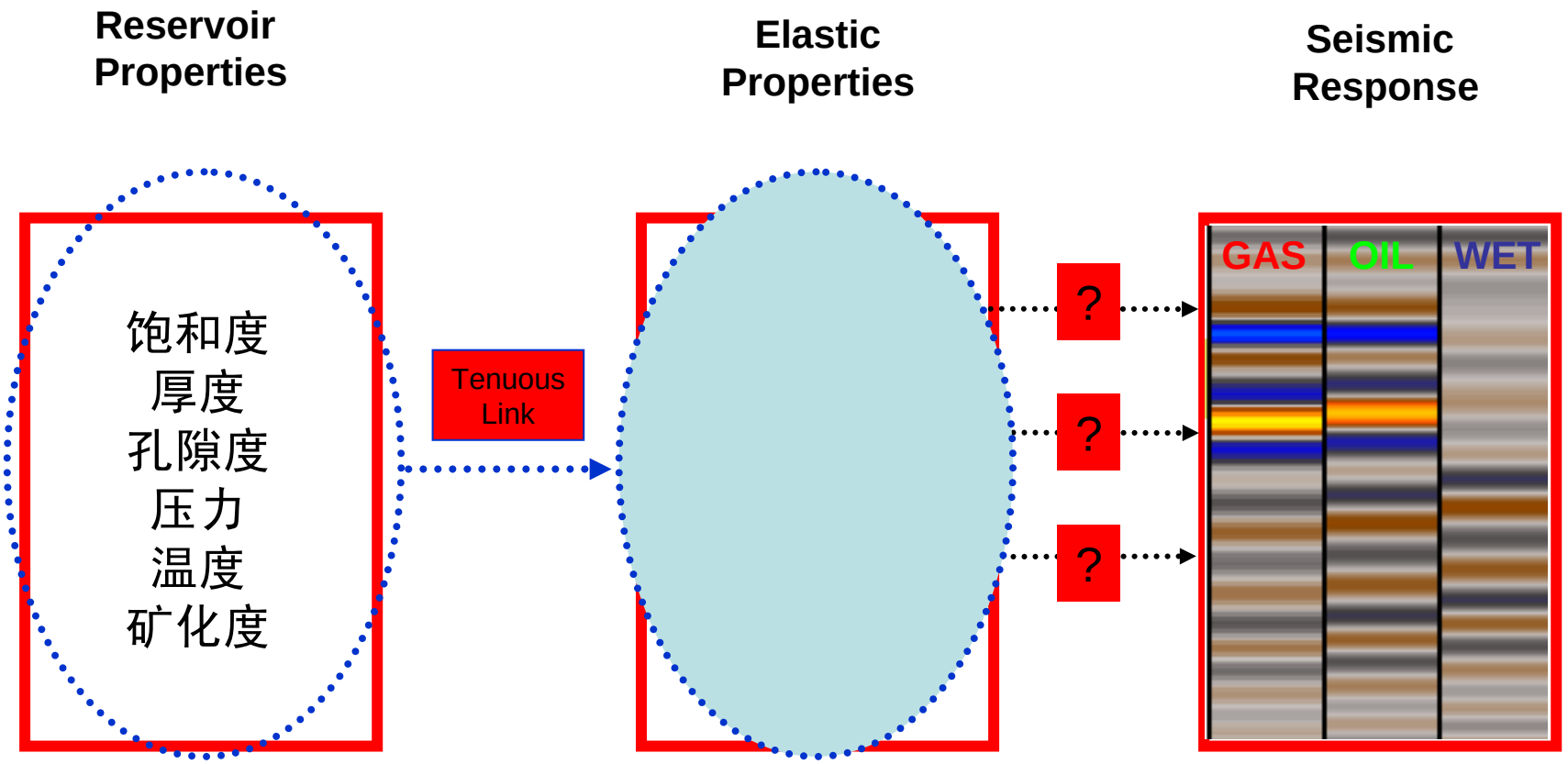


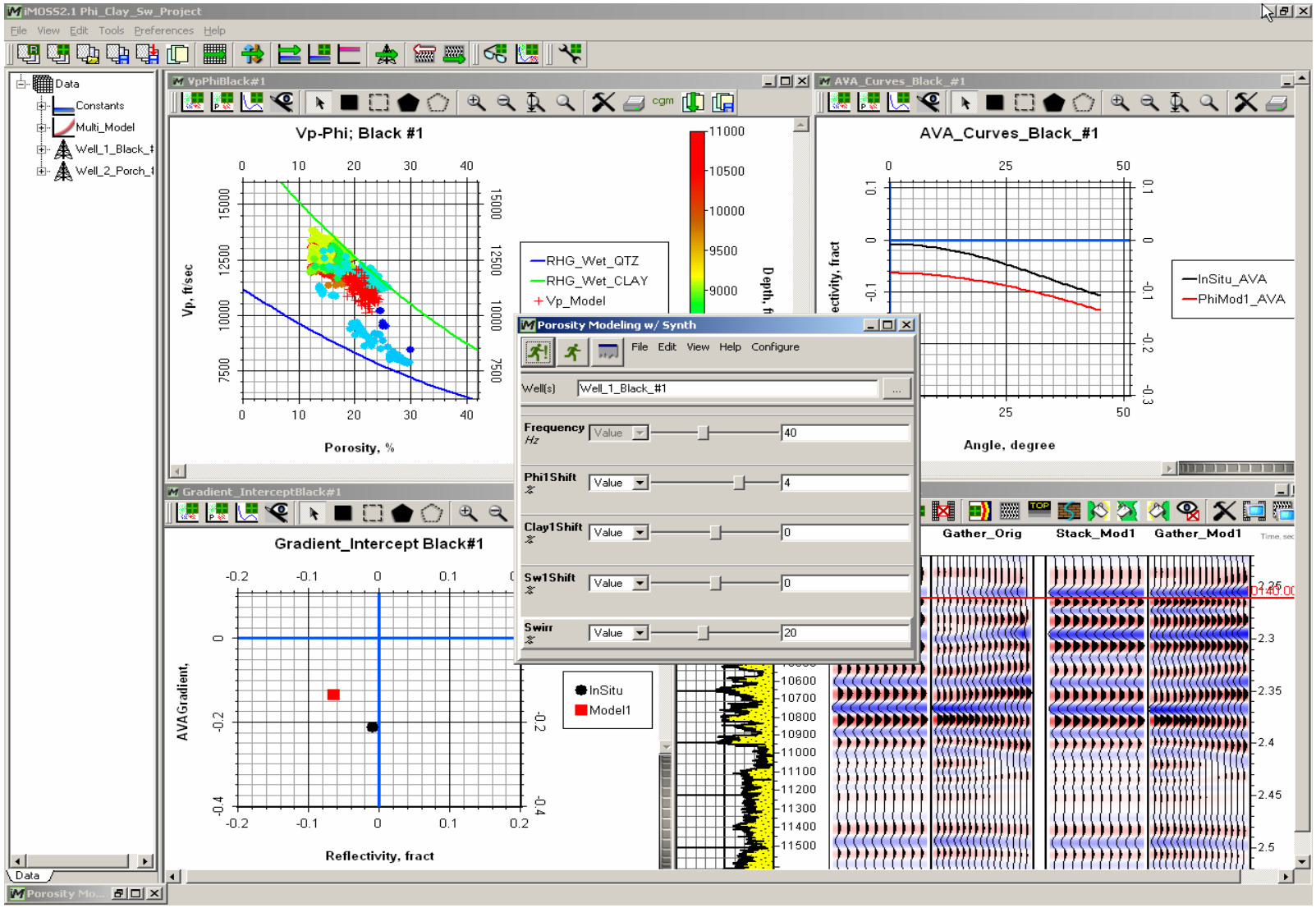
海底扇PP振幅图，振幅对岩相和流体比较敏感，但由于沉积和成岩作用相互影响，振幅与岩相和流体之间的关系是变化的。蓝色代表低振幅，黄色和红色代表强振幅



饱和水沉积物纵波速度和孔隙度关系图

传统的地震模拟是模拟弹性参数，而不是油藏特征参数




iMOSS2.1 Phi_Clay_Sw_Project
File View Edit Tools Preferences Help
Data
Constants
Multi_Model
Well_1_Black_#
Well_2_Porch_#
VpPhiBlack#1
Vp-Phi; Black #1
Vp, ft/sec
Porosity, %
RHG_Wet_QTZ
RHG_Wet_CLAY
Vp_Model
Depth, ft
AVA_Curves_Black_#1
AVA_Curves_Black_#1
Angle, degree
InSitu_AVA
PhiMod1_AVA
Porosity Modeling w/ Synth
File Edit View Help Configure
Well(s)
Well_1_Black_#1
Frequency
Hz
Value
40
Phi1Shift
%
4
Clay1Shift
%
0
Sw1Shift
%
0
Swirr
%
20
Gradient_InterceptBlack#1
Gradient_Intercept Black#1
AVAGradient,
Reflectivity, fract
InSitu
Model1
Gather_Orig
Stack_Mod1
Gather_Mod1
Data
Porosity Mo...

地震岩石物理基础

一、基本概念

二、理论模型

三、经验关系

四、流体替代

五、实际应用

定 义

"**Petrophysics** as pertaining to physics of particular rock type. …Study of physical properties of rock related to pore &fluid distribution…"

——G.E.Archie(1950)

"**Petrophysics** is the study of rock properties and their interactions with fluids(gases,liquid hydrocarbons,and aqueous solutions)"

——Djebbar Tiab and Erle C. Donaldson(1996)

以岩石为研究对象，以物理学为研究手段的新学科称为岩石物理，主要研究在地球内部特殊环境下岩石的各种行为及其物理性质。摘自《岩石物理学》

——Chen Yong(2001)

定 义

地震岩石物理（学）

关于petrophysics

《简明英汉字典》	n. [地]岩石学
《英汉地质大词典》	n. 岩石物理学, 储油岩石物理学, 岩石物性
《新英汉石油技术词典》	n. 岩石物理学
《英汉石油大词典》	n. 岩石物理学

The science of **rock physics** addresses the relationship between the physical properties of rocks and geophysical observations

——Gray Mavko (1998)

Rock physics describe a reservoir rock by physical properties , such as porosity,rigidity,compressibility,that will affect how seismic waves physically travel though the rock.

——Jan Dewar (2002)

定义：地震岩石物理学是研究与地震特性有关的岩石物理性质以及这些物理性质与地震响应之间关系的一门科学。

岩石物理学与地震岩石物理学的区别

	地震岩石物理（Rock Physics)	岩石物理（Petrophysics)
使用数据	地震岩石物理使用声波测井、密度测井，若有偶极声波，也用横波速度。	岩石物理使用各种测井、岩心资料以及生产资料,并综合所有合适有用的信息
研究目标	对于给定的岩性和流体，地震岩石物理的目的是建立纵横波速度和密度与弹性模量、孔隙度、孔隙形态、孔隙流体、温度、压力等参数的关系。	目的在于获得与生产参数相关的物理性质,例如孔隙度、饱和度以及渗透率。
研究内容	地震岩石物理讨论速度与弹性参数,正是通过它们把岩石物理性质与地震响应联系起来	岩石物理很少涉及地震,而是更关注使用测井方法来进行油气藏描述
研究成果	地震岩石物理可能使用岩石物理学家提供的信息，如泥质含量、饱和度和孔隙度等来建立岩性之间的关系或进行流体置换分析。	岩石物理可以提供孔隙度、饱和度、渗透率、净产层、流体界面、泥质含量和油藏范围等
适用人群	地球物理学家(或者物理学家)感兴趣的领域。	是石油工程师、测井专家、岩心专家、地质学家以及地球物理学家共同关心的问题。

研究目标、内容与方法

研究目标：1）建立与岩石弹性性质有关的物理性质，如弹性参数、密度、孔隙度、饱和度等与地震响应之间的关系；
2）提出利用地震响应预测这些物理性质的理论与方法；

研究内容：1）岩石骨架和孔隙流体的弹性性质研究；
2）岩石与流体相互作用的模型研究及其对弹性性质的影响；

研究方法：1）模型理论—在一定的假设条件下，通过内在的物理学原理建立通用的关系；
其缺点是当假设条件不满足时会导致失败。
2）经验关系—利用实际样品的实验室测量、数据分析，拟合出数学关系；
其缺点是推广难、物理成因解释难。
3）理论模型＋经验关系

数据基础：1）岩心分析结果
2）测井资料
3）综合—岩心、测井和地震

地震岩石物理涉及的参数

1、油藏参数

岩石格架（含孔隙）、流体性质、环境参数

2、弹性参数

纵横波速度、密度、纵横波阻抗、体积模量、剪切模量、杨氏模量、平面波模量、速度比、泊松比、拉梅系数，及其组合；

吸收系数、品质因子等；
各项异性参数， Thomsen参数等；

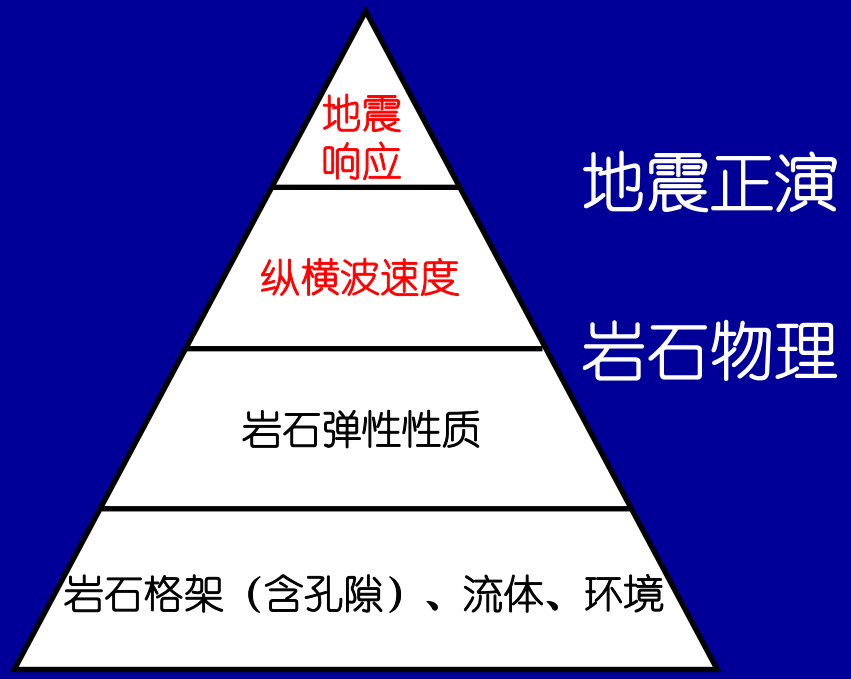
3、地震参数

振幅、频率、相位以及AVO等地震属性

地震岩石物理学研究的意义

Rock Physics – opening the door to quantitative interpretation

1、评估新区价值
2、确定勘探策略
3、使风险最小化
4、节省探井开支
5、圈定剩余油气
6、优化加密井位



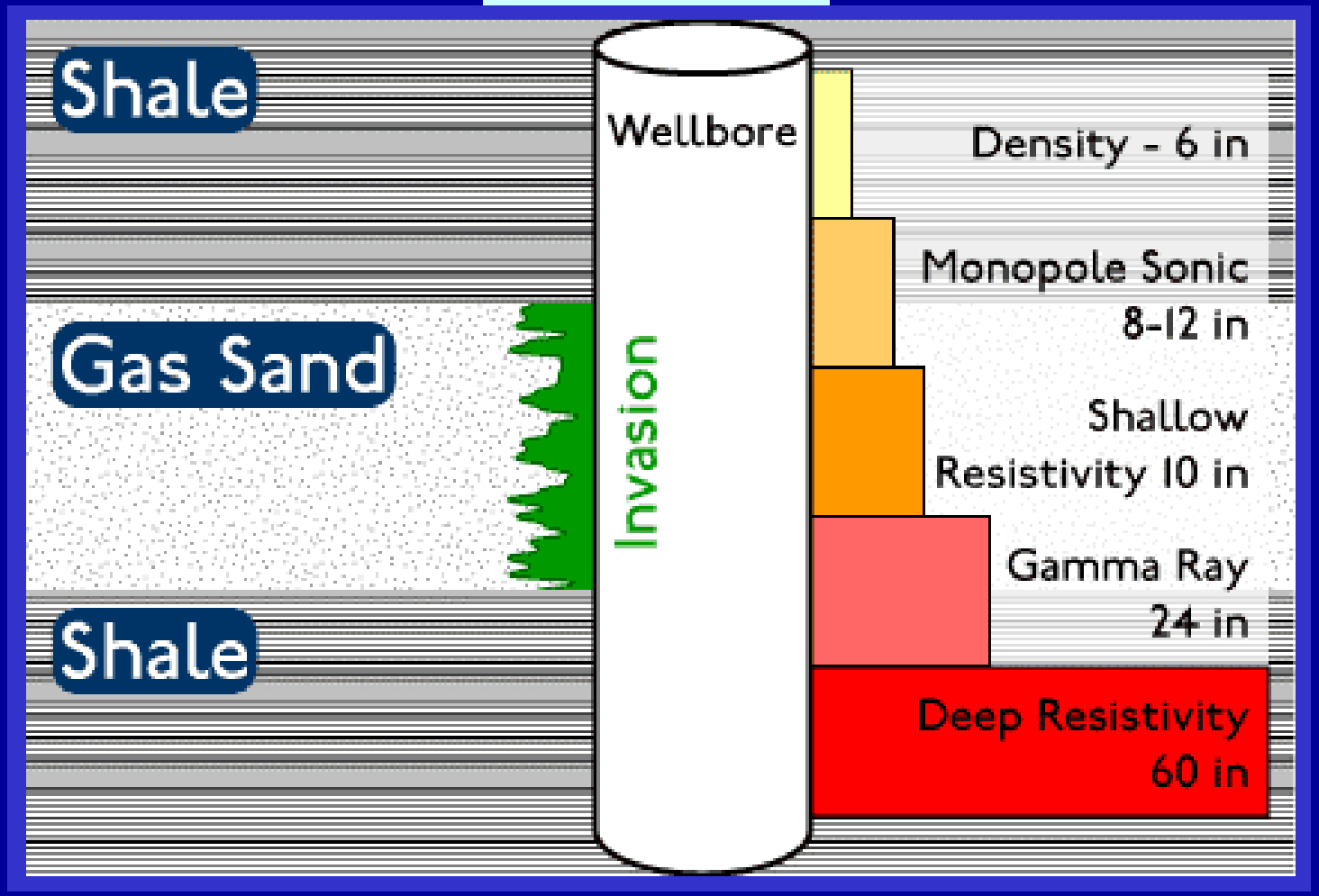
地震岩石物理学研究面临的问题

尺度不同，高频获得的结果，哪些可以外推到地震频带，哪些不行，应该如何处理

	分辨率	使用的频率
岩心	几厘米	100kHz-1MHz
测井	几十厘米	约10kHz
地震	几十米	10-100Hz

地震岩石物理学研究面临的问题

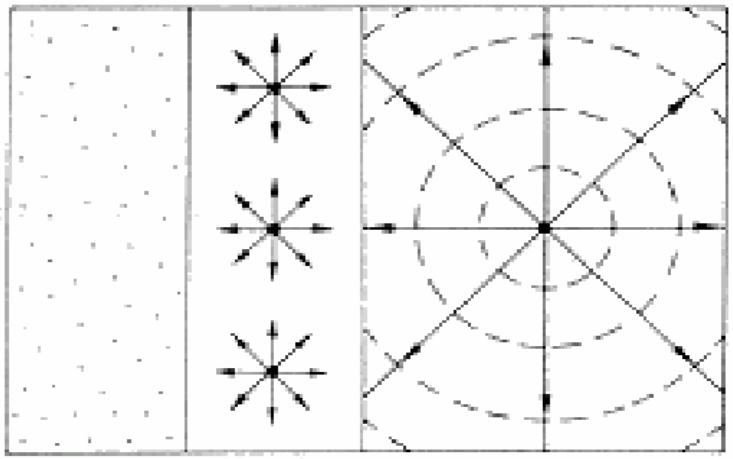
资料问题



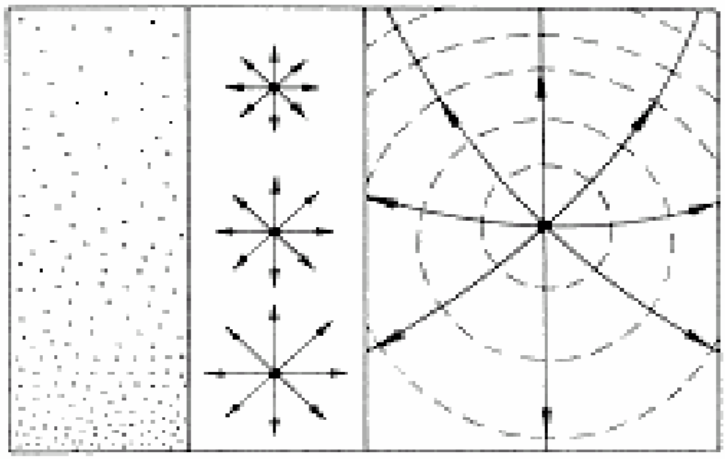
地球物理方法与岩石的性质

物理方法	岩石物理特性
磁法	磁化率、磁导率
重力	密度
电法	电导率和介电特性
地震法	地震波速度、衰减和密度
地热	热导率、比热和热扩散系数
核变	放射性参量

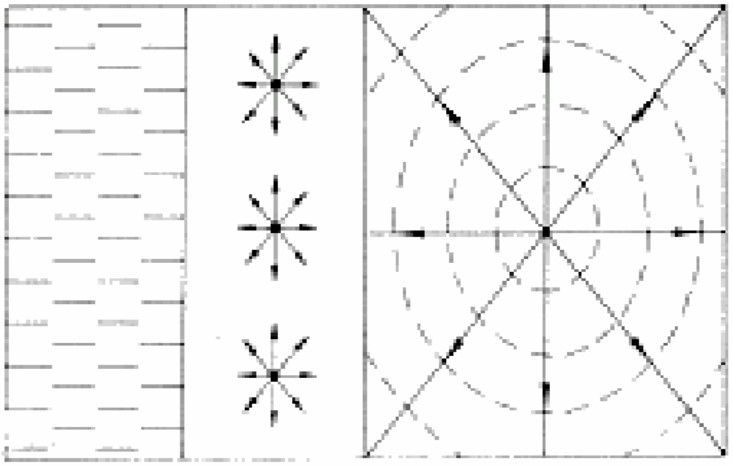
非均匀性与各项异性



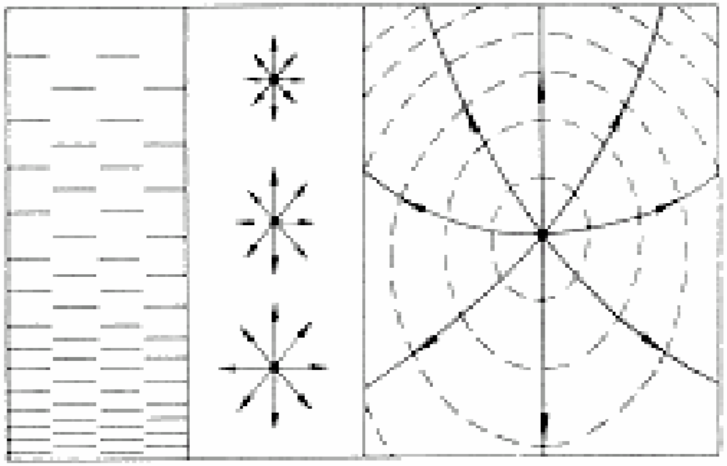
isotropic-homogeneous



isotropic-inhomogeneous

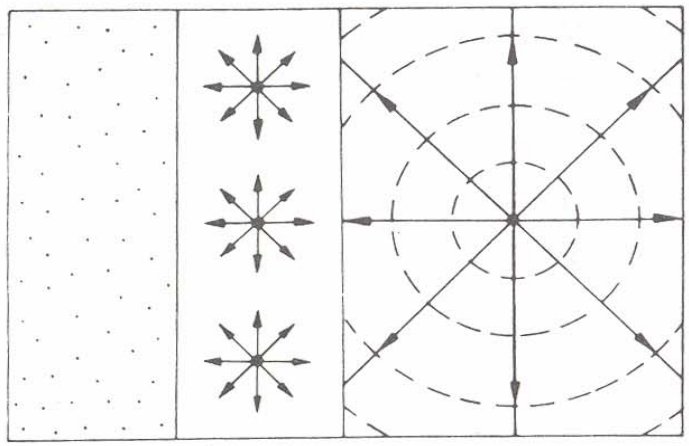


anisotropic-homogeneous

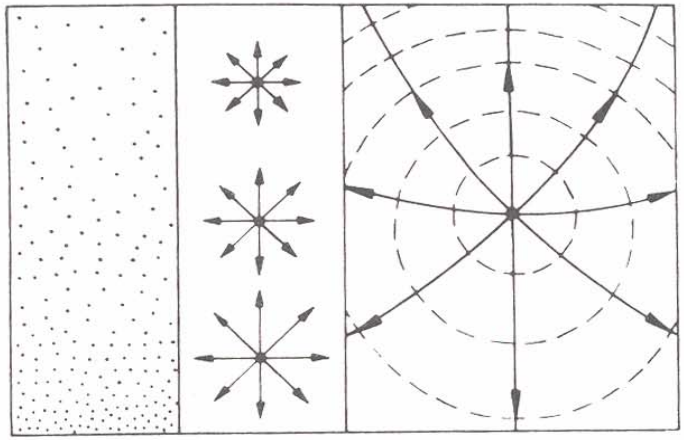


anisotropic-inhomogeneous

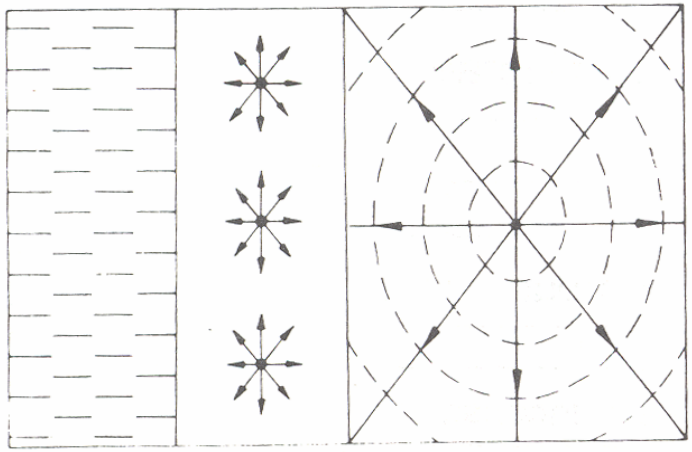
非均匀性与各项异性



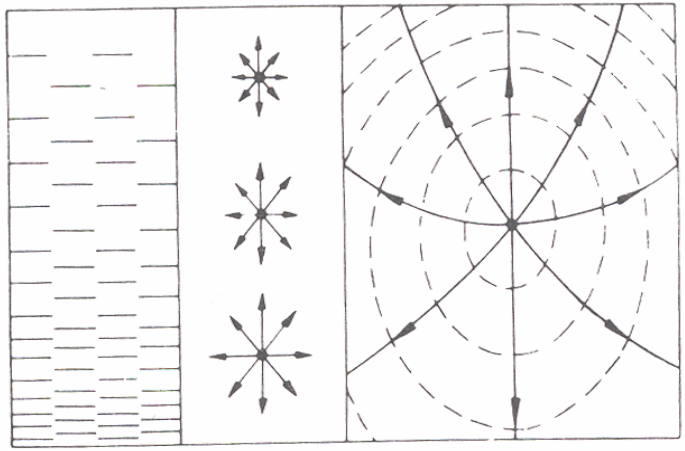
isotropic-homogeneous



isotropic-inhomogeneous

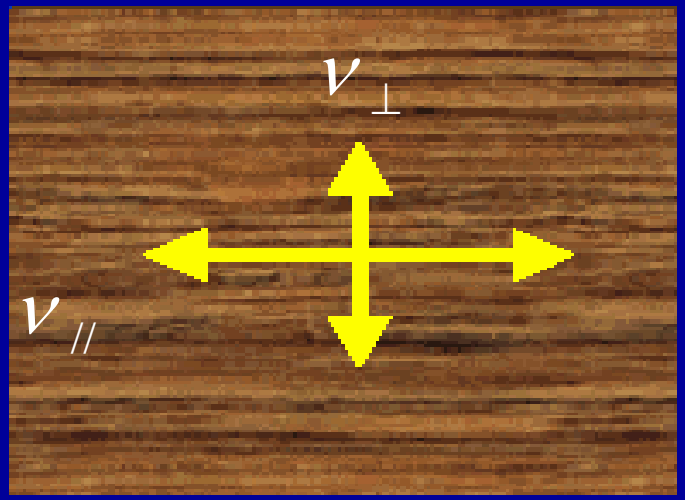


anisotropic-homogeneous



anisotropic-inhomogeneous

各向异性



各向异性比：

$$A_v = \frac{v_{//}}{v_{\perp}}$$

各向异性系数：

$$A^*_v = \frac{v_{//} - v_{\perp}}{v_{\perp}} = A_v - 1$$

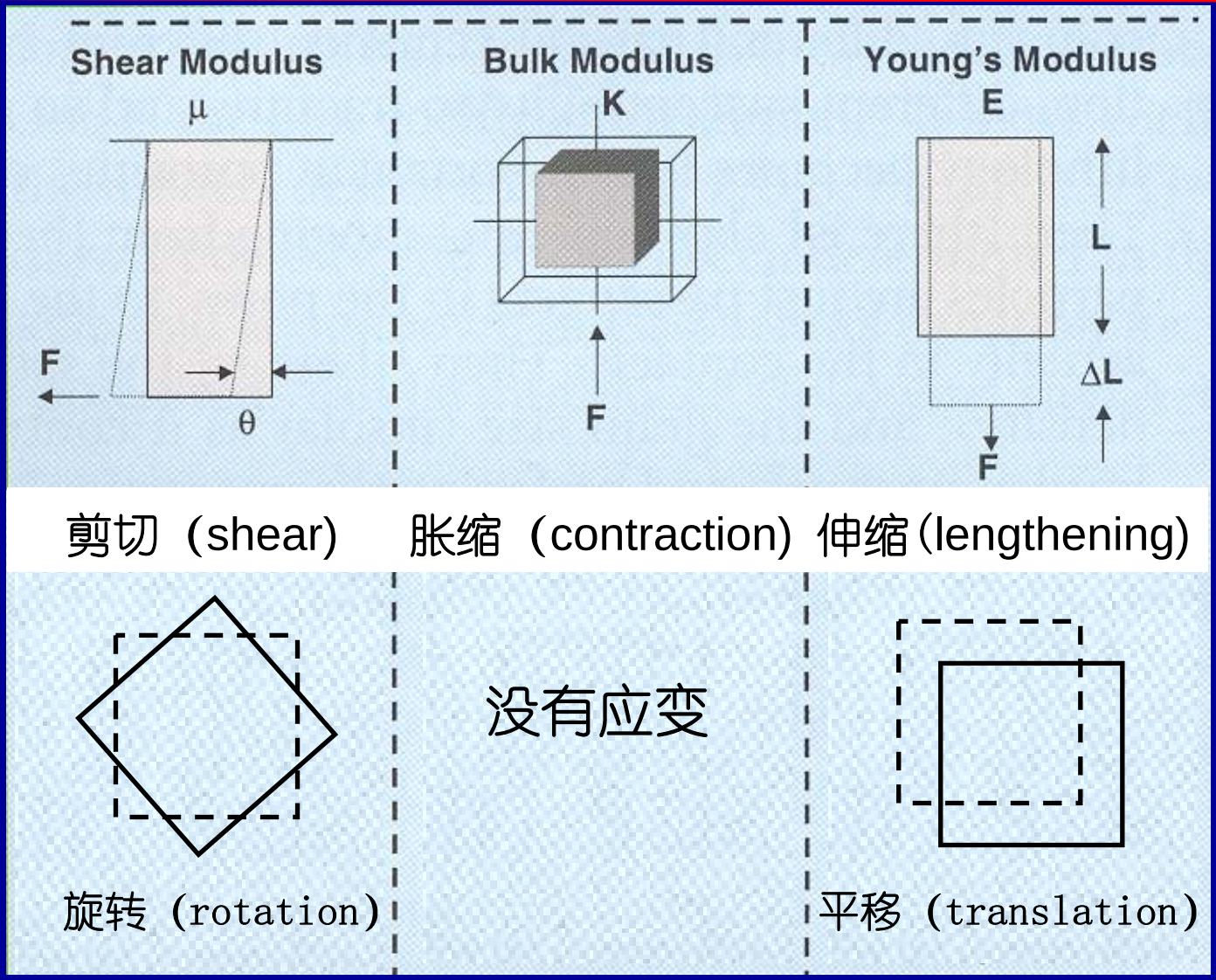
$$\varepsilon = \frac{c_{11} - c_{33}}{2 \cdot c_{33}}$$

$$\delta = \frac{(c_{13} + c_{44})^2 - (c_{33} - c_{44})^2}{2 \cdot c_{33} \cdot (c_{33} - c_{44})}$$

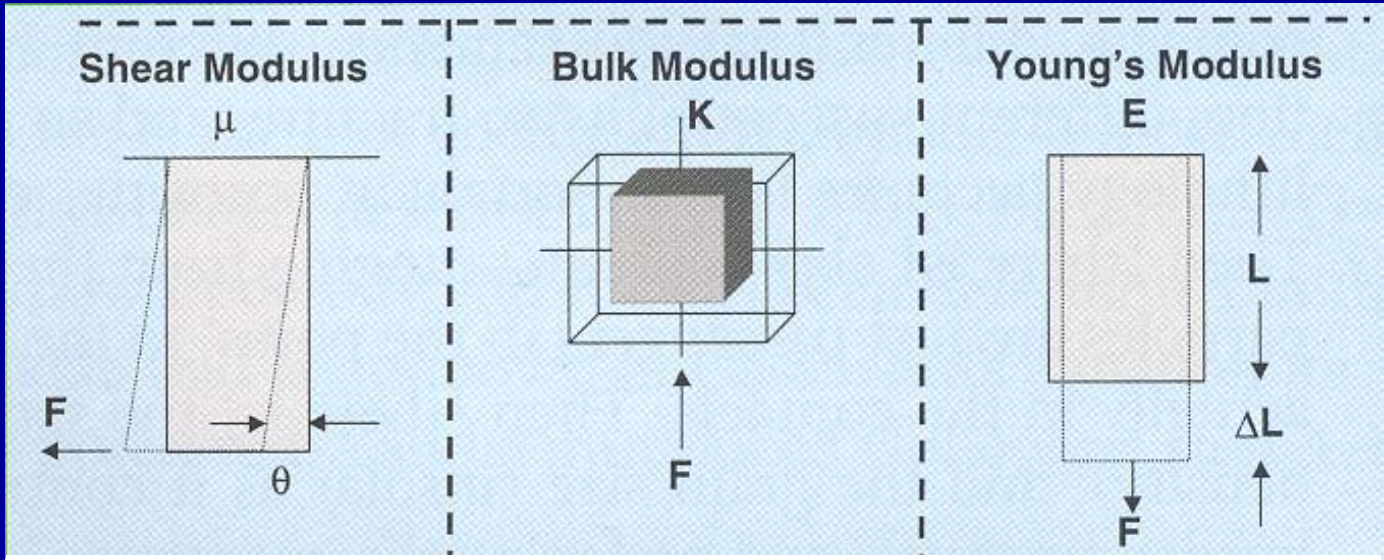
$$\gamma = \frac{c_{66} - c_{44}}{2 \cdot c_{44}}$$

TI介质中的
Thomsen参数

应变的类型


Shear Modulus
μ
F
θ
Bulk Modulus
K
F
Young's Modulus
E
L
ΔL
F
剪切（shear）
胀缩（contraction）
伸缩（lengthening）
没有应变
旋转（rotation）
平移（translation）

虎克定律



剪切（shear）　胀缩（contraction）伸缩(lengthening)

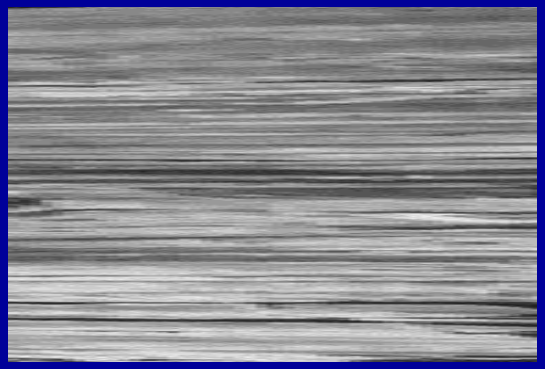
$$\text{应力} = \mu\theta$$

$$\text{应力} = K\frac{\Delta VOL}{VOL}$$

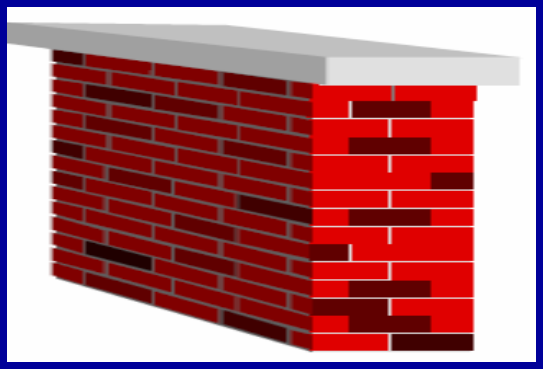
$$\text{应力} = E\frac{\Delta L}{L}$$

弹性模量的示意图





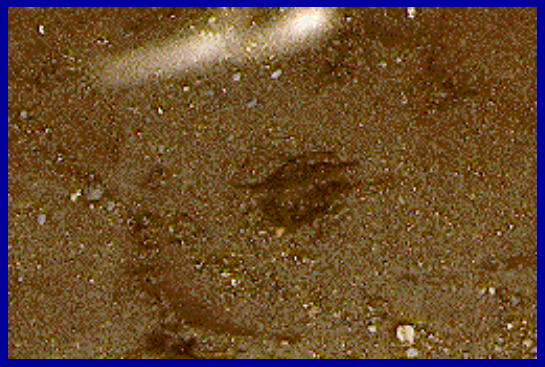
上－纸牌与泥岩
相互之间易滑动，剪切模量低；





中－砖墙与石灰岩
难于相互滑动，且不易压缩，体积模量与剪切模量都高；





下－海绵与海滩砂
易压缩，所以体积模量低

纵横波速度

$$V_P = \sqrt{\frac{M}{\rho}} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \qquad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

常见矿物的纵横波速度与密度

矿物	$V_P(m/s)$	$V_s(m/s)$	ρ（g/cm³)
石英	6050	4100	2.65
方解石	6400	3350	2.71
白云石	7100	4100	2.87
高岭石	1440	930	1.58
泥岩	3400	1600	2.55

密度定义

$$\text{密度} = \frac{\text{质量}}{\text{体积}}$$

单位：g/cm^3或kg/m^3

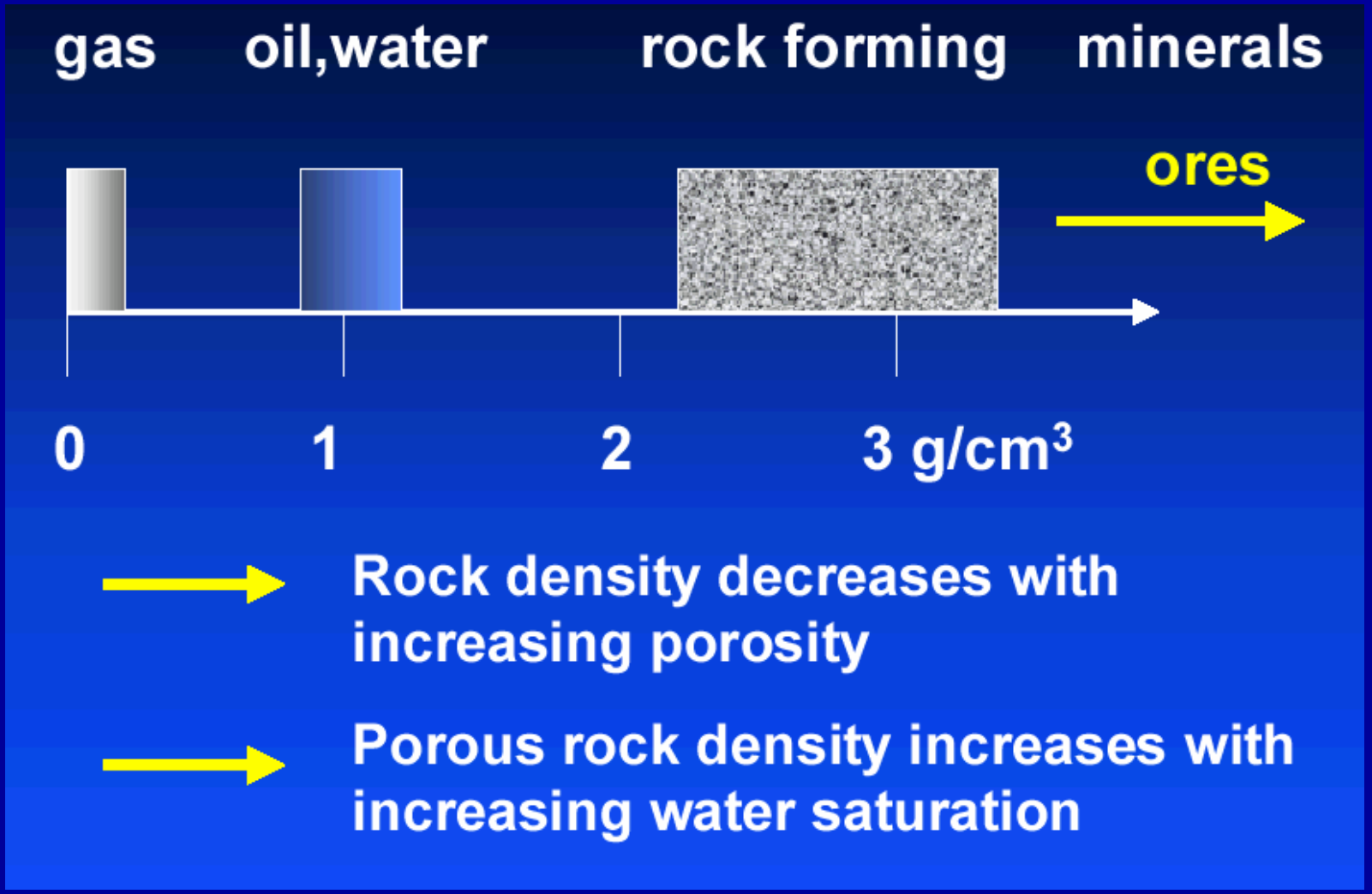
注意区别以下几个密度

岩石密度，如砂岩等

矿物密度，如石英等

孔隙流体密度，如水等

岩石组分的密度

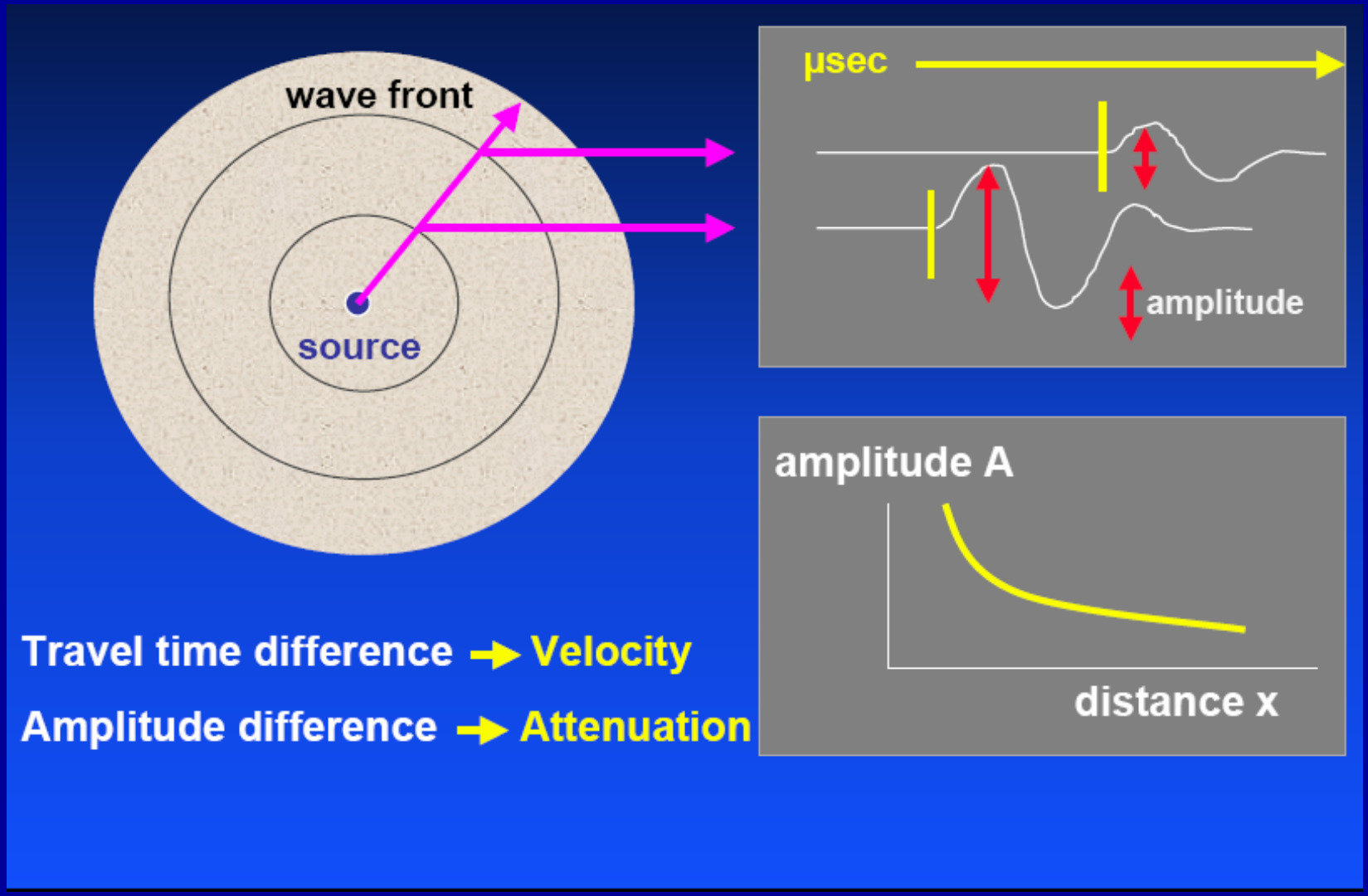


- Rock density decreases with increasing porosity
- Porous rock density increases with increasing water saturation

弹性参数之间的关系

K	E	λ	ν	M	μ
$\lambda+2\mu/3$	$\mu\dfrac{3\lambda+2\mu}{\lambda+\mu}$		$\dfrac{\lambda}{2(\lambda+\mu)}$	$\lambda+2\mu$	
	$9K\dfrac{K-\lambda}{3K-\lambda}$		$\dfrac{\lambda}{3K-\lambda}$	$3K-2\lambda$	$3(K-\lambda)/2$
	$\dfrac{9K\mu}{3K+\mu}$	$K-2\mu/3$	$\dfrac{3K-2\mu}{2(3K+\mu)}$	$K+4\mu/3$	
$\dfrac{E\mu}{3(3\mu-E)}$		$\mu\dfrac{E-2\mu}{(3\mu-E)}$	$E/(2\mu)-1$	$\mu\dfrac{4\mu-E}{3\mu-E}$	
		$3K\dfrac{3K-E}{9K-E}$	$\dfrac{3K-E}{6K}$	$3K\dfrac{3K+E}{9K-E}$	$\dfrac{3KE}{9K-E}$
$\lambda\dfrac{1+\nu}{3\nu}$	$\lambda\dfrac{(1+\nu)(1-2\nu)}{\nu}$			$\lambda\dfrac{1-\nu}{\nu}$	$\lambda\dfrac{1-2\nu}{2\nu}$
$\mu\dfrac{2(1+\nu)}{3(1-2\nu)}$	$2\mu(1+\nu)$	$\mu\dfrac{2\nu}{1-2\nu}$		$\mu\dfrac{2-2\nu}{1-2\nu}$	
	$3K(1-2\nu)$	$3K\dfrac{\nu}{1+\nu}$		$3K\dfrac{1-\nu}{1+\nu}$	$3K\dfrac{1-2\nu}{2+2\nu}$
$\dfrac{E}{3(1-2\nu)}$		$\dfrac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$		$\dfrac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$	$\dfrac{E}{2+2\nu}$

衰减定义


wave front
source
μsec
amplitude
amplitude A
distance x
Travel time difference → Velocity
Amplitude difference → Attenuation

衰减定义

$$A(x) = A(x_0) \bullet (\frac{x_0}{x})^n \bullet \exp[-\alpha(x - x_0)]$$

其中：

$A(x)$为x处振幅，$A(x_0)$为x_0处振幅；

$(\frac{x_0}{x})^n$几何扩散造成的振幅降低，平面波n=0；

$\exp[-\alpha(x - x_0)]$为衰减造成的振幅降低，α为衰减系数。

衰减系数

plane wave $A(x) = A(x_0) \cdot \exp[-\alpha \cdot (x - x_0)]$

$$\alpha = \frac{1}{x - x_0} \cdot \ln\left(\frac{A(x_0)}{A(x)}\right)$$ a in Nepers/m or m^{-1}

$$\alpha = \frac{1}{x - x_0} \cdot 20\log\left(\frac{A(x_0)}{A(x)}\right)$$ a in dB/m

Conversion

α (dB/m) = 8.686 α (Nepers/m)

α (Nepers/m) = 0.115 α (dB/m)

品质因子与衰减系数

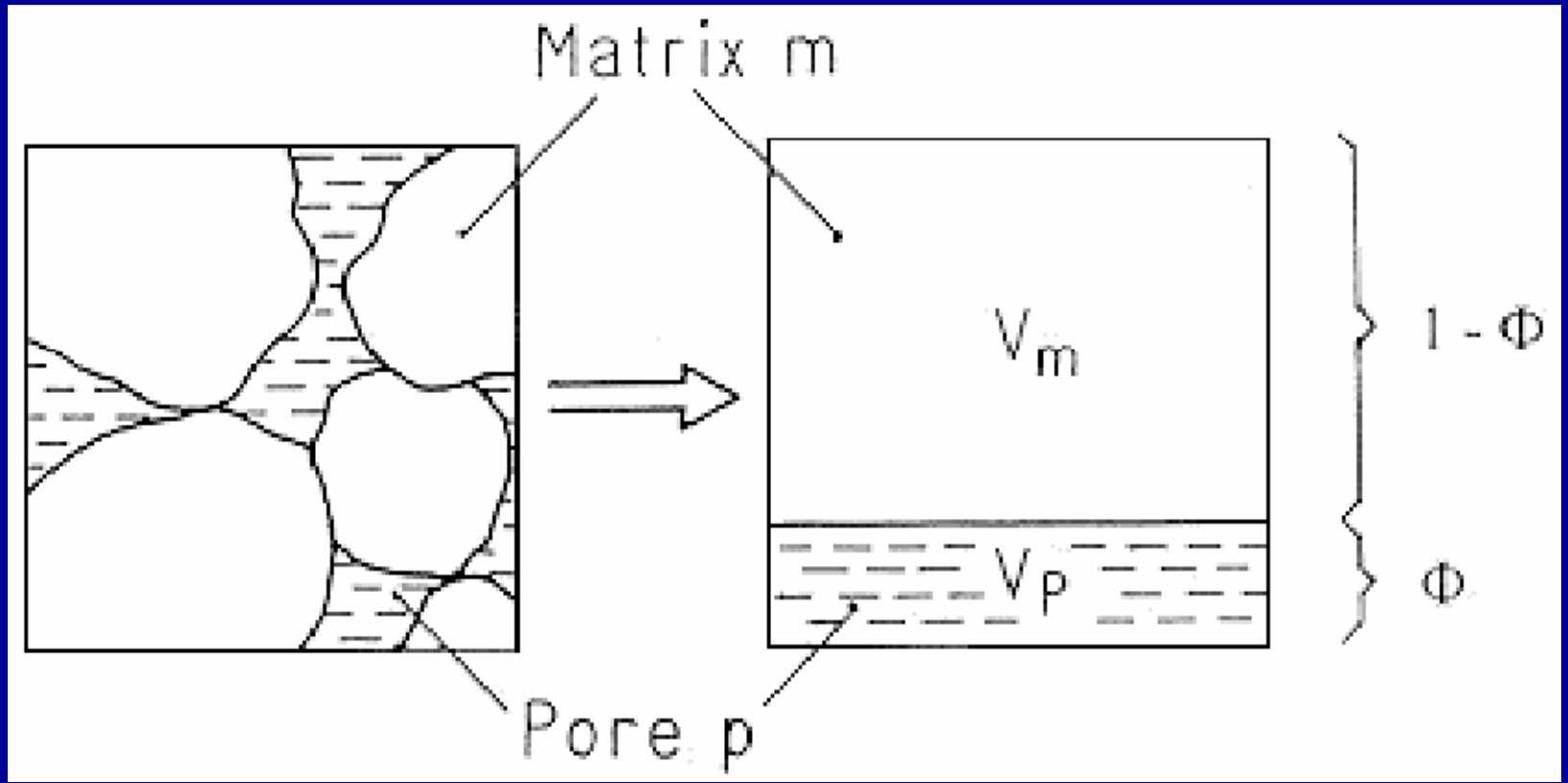
- Seismic quality factor **Q** (Knopoff, 1964)
- Dissipation factor its inverse Q^{-1}

$$Q^{-1} = \alpha \cdot \frac{V}{\pi \cdot f}$$

where: ***V*** - velocity; ***f*** - frequency

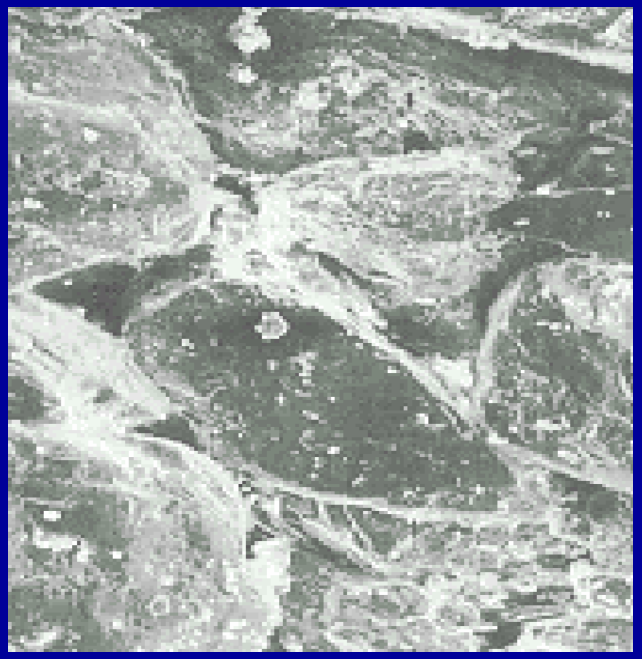
Q is dimensionless

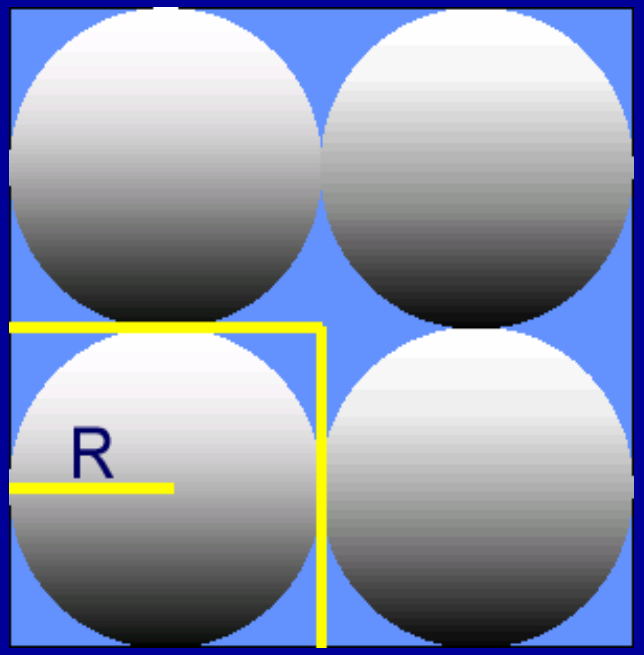
孔隙度定义



$$\text{porosity} = \frac{\text{volume of pores}}{\text{total volume of sample}} \qquad \Phi = \frac{V_{pores}}{V_{sample}}$$

球状颗粒充填时的孔隙度





孔隙度：$\Phi = \dfrac{(2*R)^3 - \dfrac{4}{3}\pi * R^3}{(2*R)^3} = 1 - \dfrac{\pi}{6} \approx 0.4764$

孔隙度的类型(sheriff,2002)

Total porosity= Primary porosity + Secondary porosity

Primary porosity

refers to the porosity remaining after the sediments have been compacted but without considering changes because of subsequent chemical action or flow of water through the sediments.

Secondary porosity

is additional porosity created by subsequent changes, specially fissures, fractures, solution vugs, and porosity created by dolomitization.

Effective porosity

is the porosity available to free moveable fluids, excluding unconnected porosity and space occupiedby bound water and disseminated shale

饱和度定义

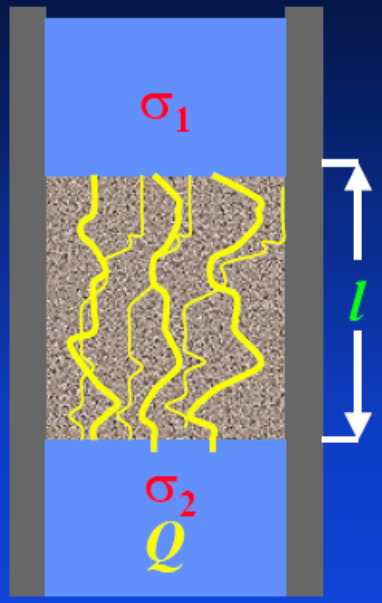
$$\text{saturation}_{\,i} = \frac{\text{volume fluid i}}{\text{pore volume}}$$

a volumetric model



渗透率定义

Permeability



Henry Darcy, 1856 - Laminar flow:

$$u = \frac{Q}{A \cdot t} = \frac{k}{\eta} \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{l} = \frac{k}{\eta} \cdot \frac{\Delta\sigma}{l} = \frac{k}{\eta} \cdot grad$$

$$k = \eta \cdot \frac{u}{grad\ \sigma}$$

k permeability

u volume flow density

V fluid volume

t time

A cross section

η dynamic viscosity

渗透率定义

Absolute & relative permeability

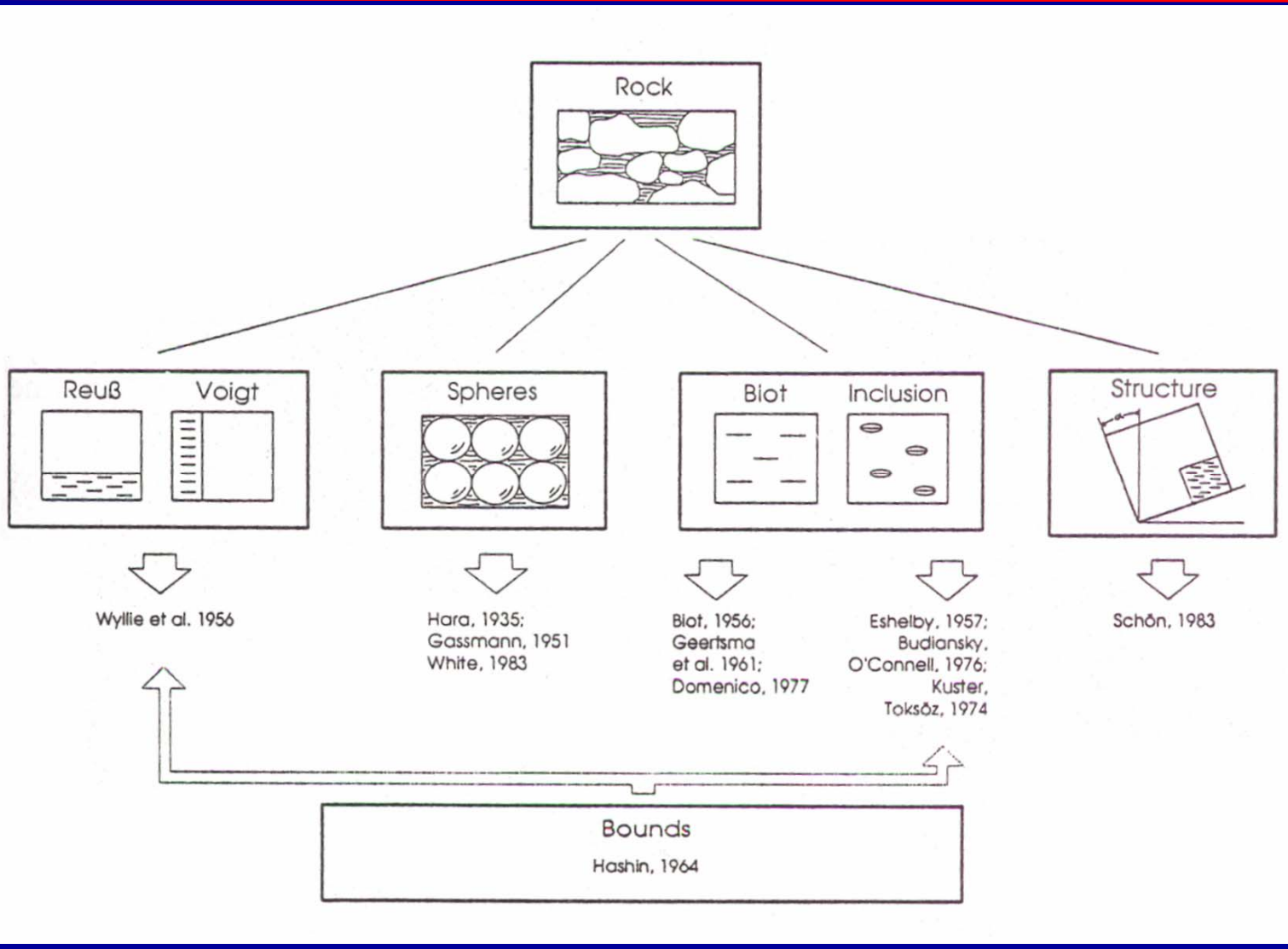
absolute permeabilty **- single fluid**

effective permeability **- two or three fluids**

$$\textit{relative permeability} = \frac{\text{effective permeability}}{\text{absolute permeability}}$$

二、理论模型

分　类


Rock
Reuß
Voigt
Spheres
Biot
Inclusion
Structure
Wyllie et al. 1956
Hara, 1935;
Gassmann, 1951
White, 1983
Biot, 1956;
Geertsma
et al. 1961;
Domenico, 1977
Eshelby, 1957;
Budiansky,
O'Connell, 1976;
Kuster,
Toksöz, 1974
Schön, 1983
Bounds
Hashin, 1964

Voigt与Reuss模型

要预测岩石与孔隙组成的混合物的有效弹性模量，必须已知：

1）各种组成成分的体积含量

1）各种组成成分的弹性模量

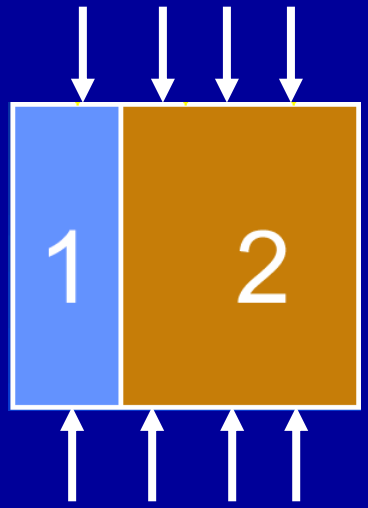
3）各种组成成分的空间几何分布

缺乏这些信息，只能预测上下边界，Voigt与Reuss就属于这类模型，前者预测上限，后者预测下限。

Voigt模型的假设条件：各种组成成分是各项同性、线性、弹性的。在该模型中各种组成成分所受的应变相同，所以也称为等应变模型

$$K_V = \sum_{i=1}^{N} K_i * f_i \qquad \mu_V = \sum_{i=1}^{N} \mu_i * f_i$$

其中：$\sum_{i=1}^{N} f_i = 1$

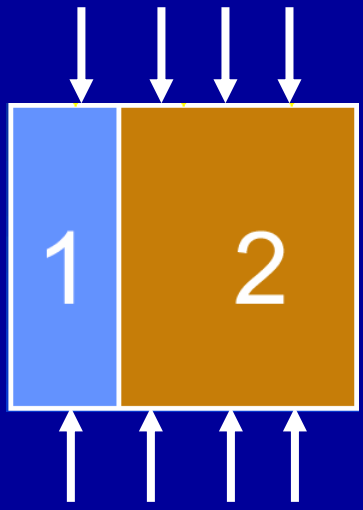


Voigt与Reuss模型

Voigt模型修改形式 (Alexandrov and Eisenberg, 1966)

$$\ln K_A = \sum_{i=1}^{N} (\ln K_i) * f_i \qquad \ln \mu_A = \sum_{i=1}^{N} (\ln \mu_i) * f_i$$

其中: $\sum_{i=1}^{N} f_i = 1$

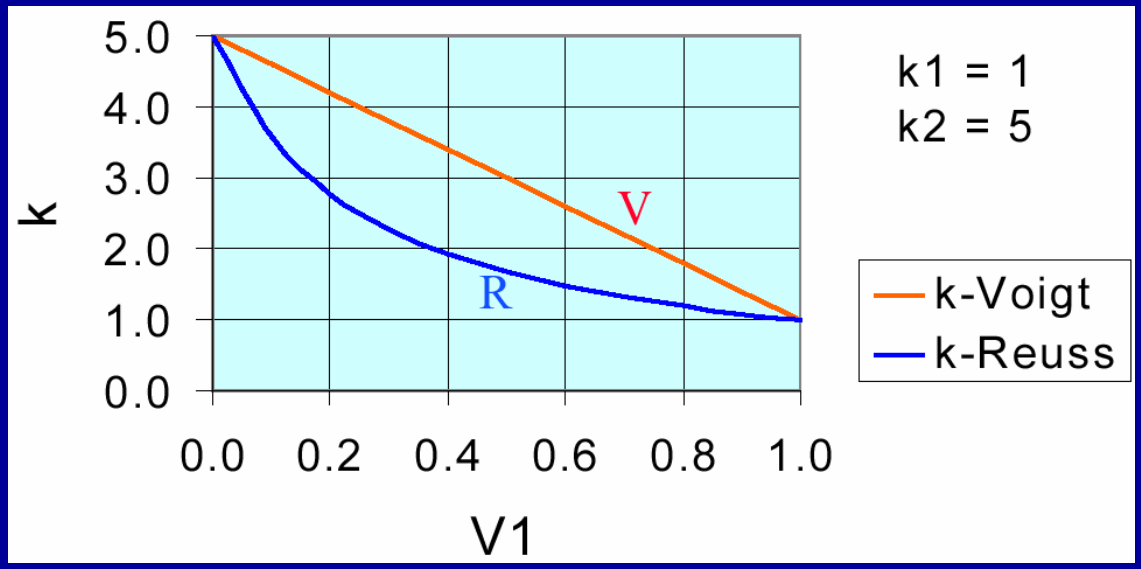


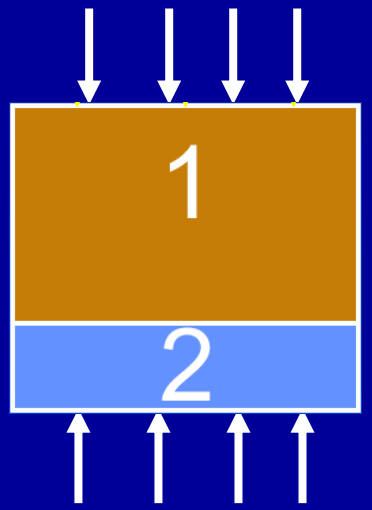
Voigt与Reuss模型

Reuss模型的假设条件：各种组成成分是各项同性、线性、弹性的。
在该模型中各种组成成分所受的应力相同，所以也称为等应力模型

$$K^{-1}{}_R = \sum_{i=1}^{N} K^{-1}{}_i * f_i \qquad \mu^{-1}{}_R = \sum_{i=1}^{N} \mu^{-1}{}_i * f_i$$

其中：$\sum_{i=1}^{N} f_i = 1$





Hill与Kumazawa模型

Hill对Voigt和Reuss的上下边界进行了数学平均，得到：

$$K_{VRH} = \frac{1}{2}(K_V + K_R) \qquad \mu_{VRH} = \frac{1}{2}(\mu_V + \mu_R)$$

Kumazawa模仿Hill对Voigt和Reuss的上下边界进行了几何平均，得到：

$$K_{VRK} = (K_V * K_R)^{1/2} \qquad \mu_{VRK} = (\mu_V * \mu_R)^{1/2}$$

Wood模型

适用于流体悬浮物和流体混合物中

假设条件：各种组成成分是各项同性、线性、弹性的。

$$V = \sqrt{\frac{K_R}{\rho}}$$

$$\frac{1}{K_R} = \sum_{i=1}^{N} \frac{f_i}{K_i}$$

$$\rho = \sum_{i=1}^{N} f_i \rho_i$$

饱和多孔岩石模型

- Gassmann (1951) - Related fluid, frame and matrix strengths.
- Biot (1956) - Extended Gassmann to include viscosity. Applicable for various frequency ranges.
- Kuster & Toksöz (1974) - Handled fractures, low porosity.
- Xu & White (1995) - Combined Gassmann & Toksöz for shaly sandstones.
- Etc ...

Gassmann模型的假设

假设	物理含义
(1) 岩石(基质和骨架)宏观上是均匀各项同性的	确保了波长大于颗粒和孔隙尺寸。地震频率到实验室频率的波一般能符合这个假设
(2)所有孔隙都是连通或相通的	意味着岩石是高孔、高渗的，它确保在半个波周期的时间内波传播引发的孔隙流体流动的充分均衡。该假设与频率有关，对于地震波来说，只有未固结的砂层能近似地符合这个假设，对于测井和实验室所用频率，大多数岩石不满足这个假设条件，因而，测井或实验室测量的速度常常高于用Gassmann方程计算出的结果。
(3)所有孔隙都是充满流体(液体、气体或混合物)	意味着饱和和流体的粘度是零 ，它确保孔隙流体流动的充分均衡。该假设也与频率有关，如果是零频率（无限波长），任何粘度的流体将在半波长的时间框架(无限时间)内均衡。如果孔隙流体的粘度为零将很容易均衡。实际上，由于所有的流体都具有限定的粘度，同时所有的波都有限定的波长，大多数情况都将违反这个假设。
(4)研究中的岩石-流体系统是封闭的(不排液)	意味岩石-流体系统在边界上是封闭的，在边界的表面上没有流体能够流进流出。
(5)当波通过时，流体与骨架之间的相对运动可以忽略	这也要求无限波长
(6)孔隙流体不对固体骨架产生软化或硬化的相互作用	消除了岩石基质和孔隙流体之间的任何化学/物理相互作用的影响。实际上，孔隙流体将不可避免地与岩石的固体基质发生相互作用。

二、理论模型

Gassmann模型

饱和多孔岩石模型

$$K_s = K_d + \frac{(1 - K_d / K_m)^2}{\frac{\varphi}{K_f} + \frac{1-\varphi}{K_m} - \frac{K_d}{K_m^2}}$$

$$\mu_s = \mu_d$$

$$V_p = \sqrt{\frac{M}{\rho_s}} = \sqrt{\frac{K_s + \frac{4}{3}\mu_s}{\rho_s}}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu_s}{\rho_s}}$$

式 中：K_s是 饱和岩石的体积模量

K_d是 干燥岩石格架的 体 积积模

K_m是 岩石固体 基 质 的 体 积积模

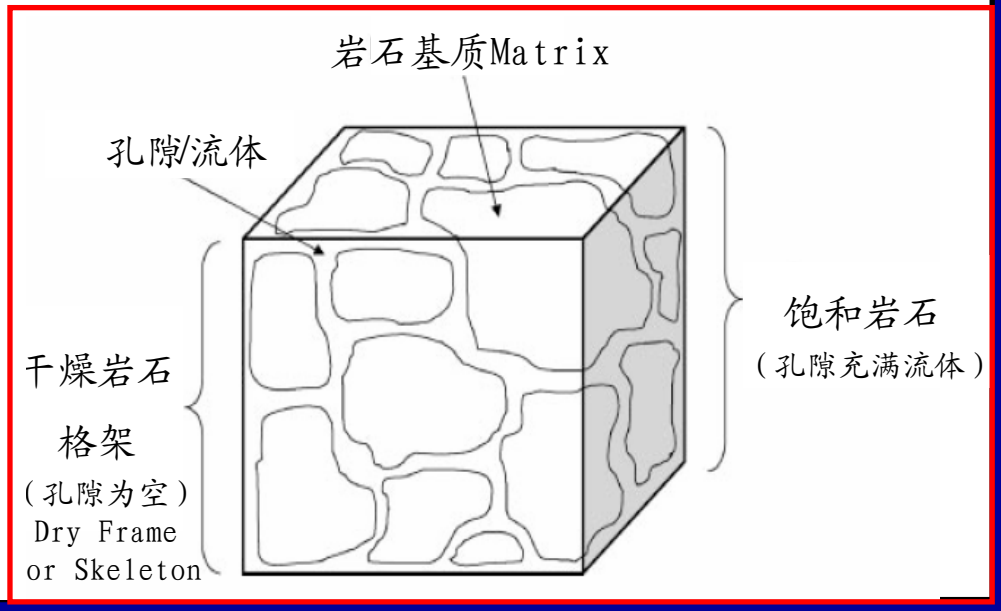
K_f是孔隙流体的体积模量

φ是孔隙度

μ_s是 饱和岩石的 剪切 模量

μ_d是干燥岩石格架 的 剪切 模量

ρ_s是 饱和岩石的 的密度



Gassmann模型的变形(1)

White(1983)引入平面波模量 $M(M=\lambda+2\mu)$而得到

$$M_s = M_d + \frac{\left(1-K_d/K_m\right)^2}{\dfrac{\varphi}{K_f}+\dfrac{1-\varphi}{K_m}-\dfrac{K_d}{K_m^2}} \qquad \mu_s = \mu_d$$

式 中：M_s是饱和岩石的 平面波 模量

M_d是干燥岩石格架的平面波 模量

$$V_p = \sqrt{\frac{M_s}{\rho}}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu_s}{\rho}}$$

式 中：ρ是饱和岩石的 密度

Gassmann模型的变形(2)

Mavko (1998)推导了更加简洁 *Gassmann* 方程的形式

$$\frac{K_s}{K_m - K_s} = \frac{K_d}{K_m - K_d} + \frac{K_f}{\phi * (K_m - K_f)}$$

$$K_s = K_d + \frac{(1 - K_d / K_m)^2}{\frac{\varphi}{K_f} + \frac{1-\varphi}{K_m} - \frac{K_d}{K_m^2}}$$

$$K_s = \frac{\varphi(\frac{1}{K_m} - \frac{1}{K_f}) + \frac{1}{K_m} - \frac{1}{K_d}}{\frac{\phi}{K_d}(\frac{1}{K_m} - \frac{1}{K_f}) + \frac{1}{K_m}(\frac{1}{K_m} - \frac{1}{K_d})}$$

$$\frac{1}{K_s} = \frac{1}{K_m} + \frac{\phi}{\frac{K_d K_m}{K_m - K_d}\phi + \frac{K_m K_f}{K_m - K_f}}$$

$$K_d = \frac{K_s(\frac{\phi K_m}{K_f} + 1 - \phi) - K_m}{\frac{\phi K_m}{K_f} + \frac{K_s}{K_m} - 1 - \phi}$$

Biot模型及其近似

Biot（1956）扩展了Gassmann模型，提出了与频率有关的饱和岩石的速度模型。在他的模型中考虑了流体的粘度以及流体与固体之间的相对运动造成的能量损失。他的结果表明了两种纵波的存在，一种是常见的纵波，也称一类纵波；一种是二类纵波，这是一种低频衰减极快的波。1980年，Plona(1980)通过试验的方法证实了二类纵波的存在。以Biot理论为基础，Geertsma&Smit(1961)得到了Biot模型的近似表达式：

$$V_p^2 = \frac{V_{p\infty}^4 + V_{p0}^4 \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}{V_{p\infty}^2 + V_{p0}^2 \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}$$

$$V_s^2 = \mu^* \left(\rho^* - \rho_f \frac{\phi}{a}\right)$$

假设条件

1）岩石是各项同性的；
2）组成岩石的所有矿物具有相同的体积与剪切模量；
3）岩石是完全饱和的；
4）波长，即使是高频端要比颗粒与孔隙的尺度大的多

Biot模型及其近似

$$f_c = \frac{\phi\eta}{2\pi\rho_f\kappa}$$

$$V_{p0} = \left(\frac{K^* + \frac{4}{3}\mu^*}{\rho^*} \right)$$

$$V_{p\infty} = (\rho^* - \rho_f * \frac{\phi}{a})^{-1} \left((K_d + \frac{4}{3}\mu^*) + [\frac{\phi}{a}\frac{\rho^*}{\rho_f} + (1 - \frac{K_d}{K_m})(1 - \frac{K_d}{K_m} - 2\frac{\phi}{a})][\frac{1 - K_d / K_m - \phi}{K_m} + \frac{\phi}{K_f}]^{-1} \right)^{1/2}$$

其中：V_{p0}和$V_{p\infty}$分别为*Biot*低频和高频率时的速度；

f_c为特征频率，当$f \le f_c$时为*Biot*低频，反之为*Biot*高频；

η为孔隙流体的粘度；

κ为岩石的绝对渗透率

a=1～∞，当孔隙流体与固体格架没有耦合时为1，完全耦合时为无穷；

其他参数与前面相同。

速度的影响因素

沉积岩石地震特性的影响因素(其重要性从上到下递增，wang, 2001)

岩石特性	流体特性	环境
压　实	粘　性	频　率
固结史	密　度	应力史
时　代	可湿性	沉积环境
胶　结	流体成分	温　度
结　构	相　位	强化油藏过程
体积密度	流体类型	开采历史
粘土含量	气-油，气-水比	地层几何形态学
各向异性	饱和度	净油藏压力
裂　缝		
孔隙度		
岩　性		
孔隙形状		

三、经验关系

速度的影响因素

地震特性和岩石特性之间的关系 （wang, 2001）

压实作用	由于连接性/接触性更好，压实好的岩石具有更高的地震特性(纵波、横波和波阻抗)。
固结作用	由于连接性/接触性更好，固结好的岩石具有更高的地震特性。
地质年代	因为压实作用更有效，年代老的岩石具有更高的地震特性。
胶结作用	由于颗粒间的连接性和接触性更好，胶结岩石具有更高的地震特性。
结构特征	结构特征包括颗粒大小、分选情况、圆度等等。一般情况下，颗粒尺寸大的砂层和颗粒分选性差的砂层由于具有更好的接触关系和更低的孔隙度，因此具有更高的地震特性。
体积密度	从统计意义上看，体积密度高的岩石具有更高的地震特性。
粘土含量	粘土对地震特性的影响取决于粘土微粒在岩石内部的位置。从统计意义上看，粘土含量高的岩石具有更低的地震特性和更高的Vp/Vs。
各向异性	存在两种类型的各向异性：固有各向异性和诱发各向异性。几乎所有页岩都具有固有各向异性，平坦页岩各向异性地层的一种好的近似是垂向的横向各向同性，固结页岩老地层的地震各向异性程度通常更高；应力各向异性是诱发各向异性的主要起因。除薄互层外的大多数储层岩石能被近似看着是固有各向同性的。
裂　　缝	裂缝使地震特性趋于减小。当偏振波穿过裂缝时，纵波特性所受裂缝影响比横波大得多。波的偏振正交于裂隙时会降低Vp/Vs；线状排列裂缝也引起地震各向异性。
孔 隙 度	从统计意义上看，随着孔隙度的增加地震特性减小；Vp/Vs通常对孔隙度没有很强的依赖关系。
岩　　性	白云岩具有高的地震特性，其后为石灰石和砂层；页岩可能具有比砂层高或比砂层低的地震特性。石灰石具有高Vp/Vs，其后为白云岩和砂层；页岩总是具有比砂层高的Vp/Vs。未固结砂层也可能具有高Vp/Vs。
孔隙形状	孔隙形状是影响地震特性的最重要因素，也是最难以量化的参数。一般说来，具扁平孔隙的岩石具有较低的地震特性。孔隙形状差异是引起速度-孔隙度交会图发散的主要原因。

注：地震特性随着岩石的弹性和微连通性而增高。请注意，在这里对每一个因素进行评述时都假定其它的因素固定不变。真实的情况是许多这样的因素共同相互作用。

速度的影响因素

地震特性与流体特性之间的关系 （wang, 2001）

粘　　度	含高粘度原油的岩石趋于具有更高的地震特性。当原油粘度极高时，原油可以在岩石中充当半固体的作用，导致更高的地震特性。
密　　度	高密度原油具有更高的体积模量(更低的可压缩性)。从而，含高密度原油的岩石有更高的纵波特性和横波阻抗，但横波速度可能更低。
可 湿 性	可湿性会改变岩石和饱和流体之间的表面能量(表面张力使可湿性流体与固体表面之间产生吸力，非可湿性流体和固体表面之间产生斥力)。与含可湿性流体的同样岩石相比，以非可湿性流体全饱和的岩石具有稍高的地震特性。大多数砂层是水可湿的，所以当将水加入一块干燥的岩石时(软化影响)，地震特性有所减低。
流体组分和类型	较重的原油包含较高碳分子数的碳氢化合物，因此其体积模量较高。其结果是重油饱和岩石显示出更高的纵波特性。横波特性所受影响要少得多，只是其波阻抗稍有增高，且横波速度稍有降低。一般说来，高含盐浓度的盐水具有最高的体积模量，其后为低含盐浓度盐水、淡水、原油及气体。但是有些重油可能具有与水一样甚至更高的体积模量。
流体相态	岩石以其饱和流体的气体相态(天然气、蒸汽、CO_2气)而依次具有更低的纵波地震特性和横波波阻抗，但是，由于流体的高可压缩性和低体积密度，其横波速度只稍有增高，导致岩石的Vp/Vs降低。当含气饱和度在5%至100%之间时，地震特性几乎与气体的含量无关。
气-油比和气-水比	原油中的溶解气量越大，原油的体积模量越低。一些高气-油比(GOR)的原油在地震学上的作用与气体一样，也会在油-水接触面产生“亮点”。与无气原油饱和的相同岩石相比，以高GOR原油所饱和的岩石具有更低的纵波地震特性。由于水的独特分子结构，水中溶解气对体积模量几乎没有影响，在水中也很少有气体能被溶解。
饱 和 度	岩石中流体的完全饱和将增高纵波地震特性和横波阻抗而降低Vs，导致Vp/Vs增高；当将气体加入到流体完全饱和岩石中时，将降低纵波地震特性和横波阻抗而增高Vs，从而导致Vp/Vs降低。饱和度量级大小的影响对具有软骨架和/或平孔隙(裂缝、裂隙)的岩石将有所增高。

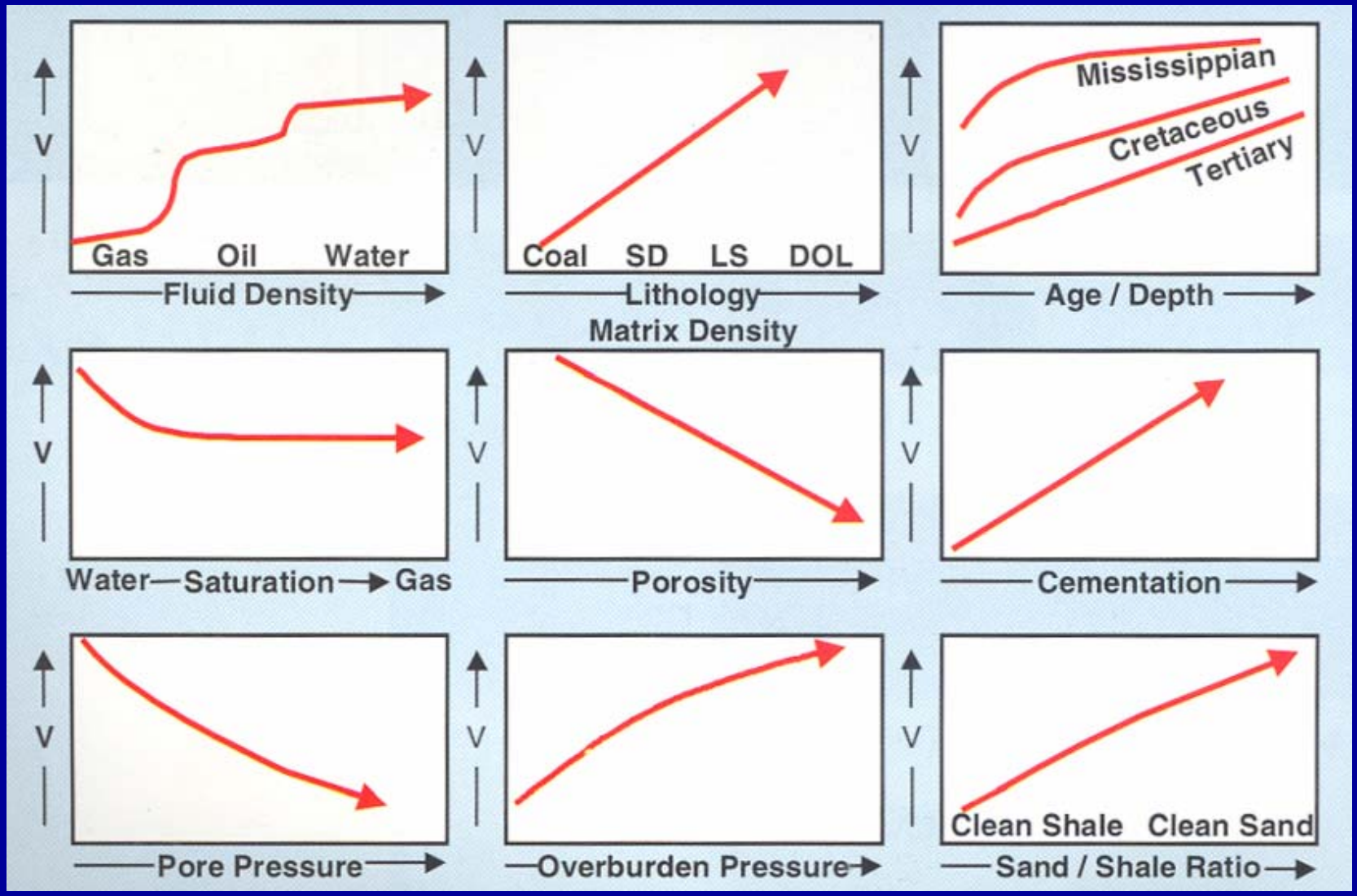
速度的影响因素

地震特性与环境之间的关系 （wang, 2001）

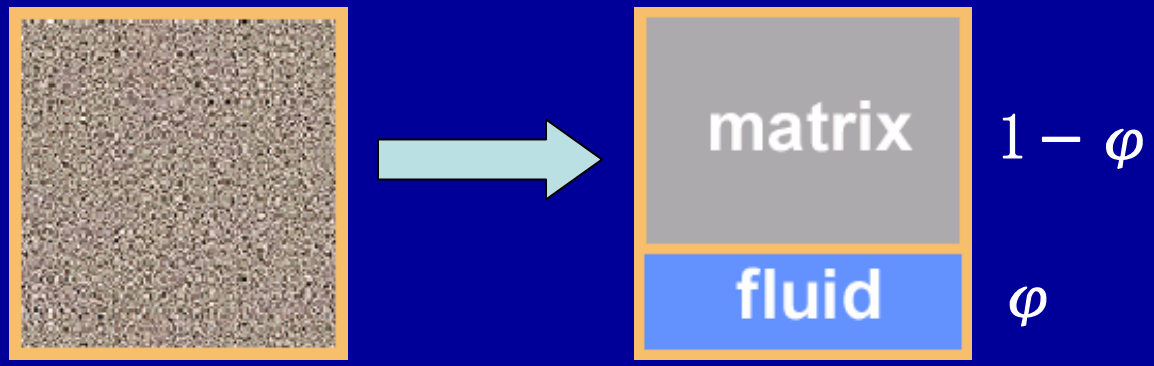
频　　率	通常在高频(弥散)处地震特性更高，然而弥散的大小是难以评估的，因为很难测定地震特性在整个地震频段(10-200Hz)、测井频段(大约10kHz)及实验室频段(100kHz-2MHz)内的变化。
应 力 史	通过测量弄清岩石的应力史有助于数据采集规划和解释。坚硬的岩石通常很脆，如果岩石处于很大的应力之下，应力的释放将在岩石中产生微裂隙，微裂隙会降低地震速度。只要把岩石恢复到原来的应力状态就可能消除所引发的微裂隙。压力释放引发的微裂隙有助于现场确定最大/最小水平应力方向。
沉积环境	沉积环境对地震特性有多方面的影响。例如自生粘土和碎屑粘土对地震特性有不同的影响。沉积速率、沉积来源和沉积能力也影响地震特性(例如砂泥岩层序是沉积能力、速率和来源交替变化的结果)。
温　　度	随着温度的增加地震特性减小。干燥的(空孔隙)和水饱和的岩石随温度增加通常显示小的地震特性；而重油饱和岩石(尤其是软砂层)随温度增加显示出大的地震特性。
强化采油过程	在地震油藏描述和4D地震油藏监测中，了解储层处理是极为重要的。例如，注水增加了储层的含水饱和度和压力，同时也使温度稍有降低。一般说来，储层处理对地震特性的影响是若干因素的结合，这些因素可以相互抵消或增长对地震特性的影响。
开 采 史	开采史的影响类似于强化采油过程对地震特性的影响。在地震油藏描述中，开始地震数据采集的同时就要仔细地收集生产数据和储层参数(流体、饱和度、压力、温度)，以便更好地解释地震数据。
净储层压力	净储层压力是上覆地层压力与储层压力之差。因为上覆地层压力不变(或变化很小)，净储层压力的影响正好与储层压力对地震特性的影响相反。随着净储层压力的增加，所有岩石的地震特性都增高。这种增高的量级取决于若干其它的因素(孔隙形状、孔隙度、孔隙流体、岩性等等)。它只能通过测量方法来量化表示。

速度的影响因素

沉积岩石地震特性的影响因素()



Wyllie时间平均方程



	距离	速度	时间
骨架	$1-\varphi$	Δt_m^{-1}	$(1-\varphi)*\ \Delta t_m$
流体	φ	Δt_f^{-1}	$\Phi*\ \Delta t_f$
岩石	1	Δt^{-1}	Δt

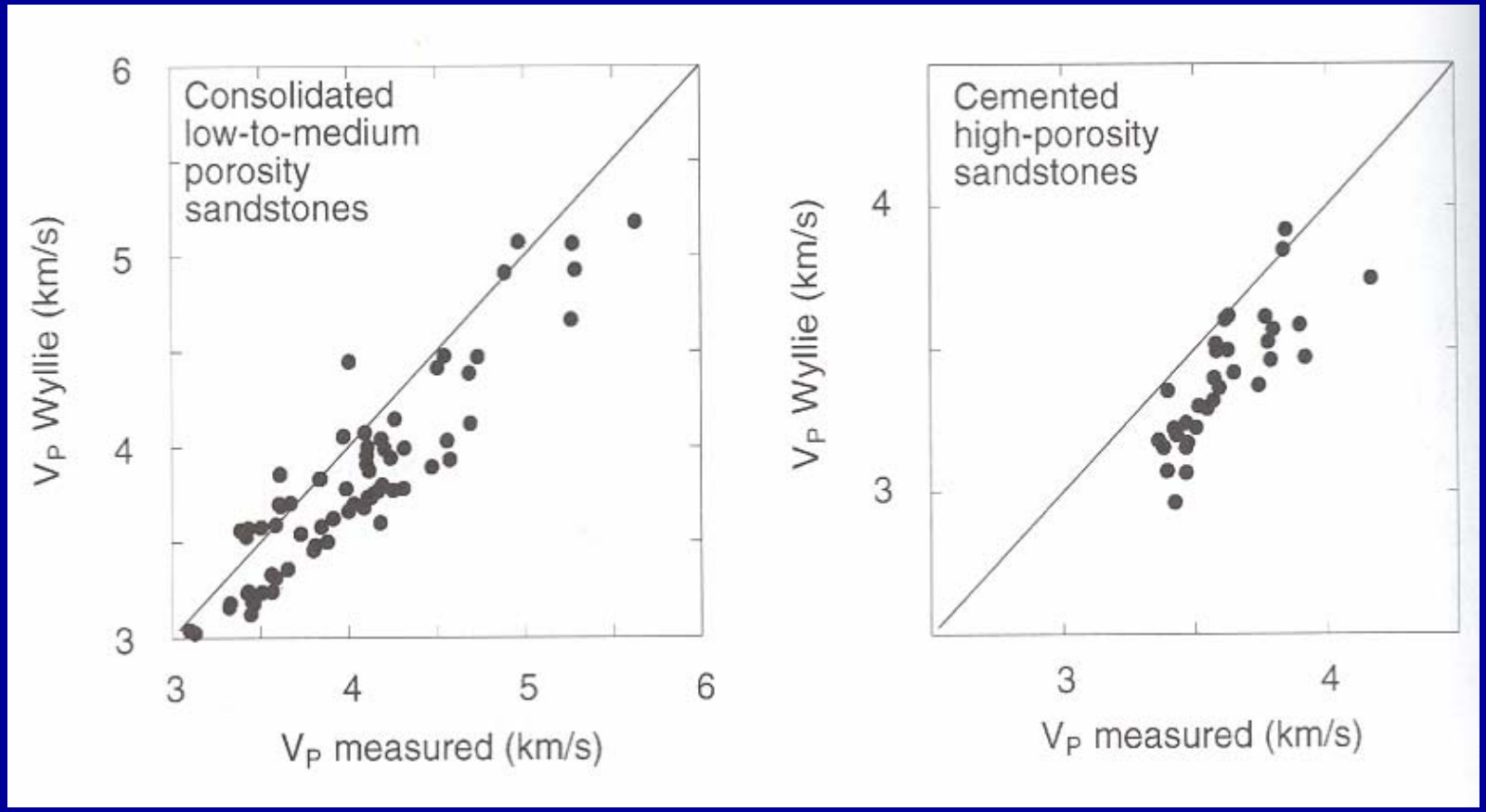
$$\Delta t=\ (1-\varphi)*\ \Delta t_m+\Phi*\ \Delta t_f$$

Wyllie时间平均方程 －假设条件

1）岩石是各项同性的；
2）岩石必须是流体饱和的；
3）只适合中等孔隙度，低孔隙度和高孔隙度时预测的速度偏低；
4）不适合疏松的没有胶结的岩石；
5）只适合原生孔隙，不适合此生孔隙，对此生孔隙必须进行经验校正；
6）只适合于均匀的单矿物岩石，多矿物混合物，如泥质必须加以校正；
7）只适合于较高的有效压力（即充分的压实），如30MPa，在低压和欠压实时，Wyllie方程预测的速度和孔隙度偏高，必须进行校正。

Wyllie时间平均方程 －假设条件

3）只适合中等孔隙度，低孔隙度和高孔隙度时预测的速度偏低；



速度－孔隙度

Raymer-Hunt-Gardner经验关系

$$V = (1-\varphi)^2 V_m + \varphi V_f \qquad \varphi < 37\%$$

$$\frac{1}{\rho V^2} = \frac{1-\varphi}{\rho_m V_m^{\ 2}} + \frac{\varphi}{\rho_f V_f^{\ 2}} \qquad \varphi > 47\%$$

$$\frac{1}{V} = \frac{0.47-\varphi}{0.1}\frac{1}{V_{37}} + \frac{\varphi-0.37}{0.1}\frac{1}{V_{47}} \qquad 37\% \le \varphi \le 47\%$$

其中：V_{37}为第一个公式计算的孔隙度为37%的速度；

V_{47}为第二个公式计算的孔隙度为47%的速度；

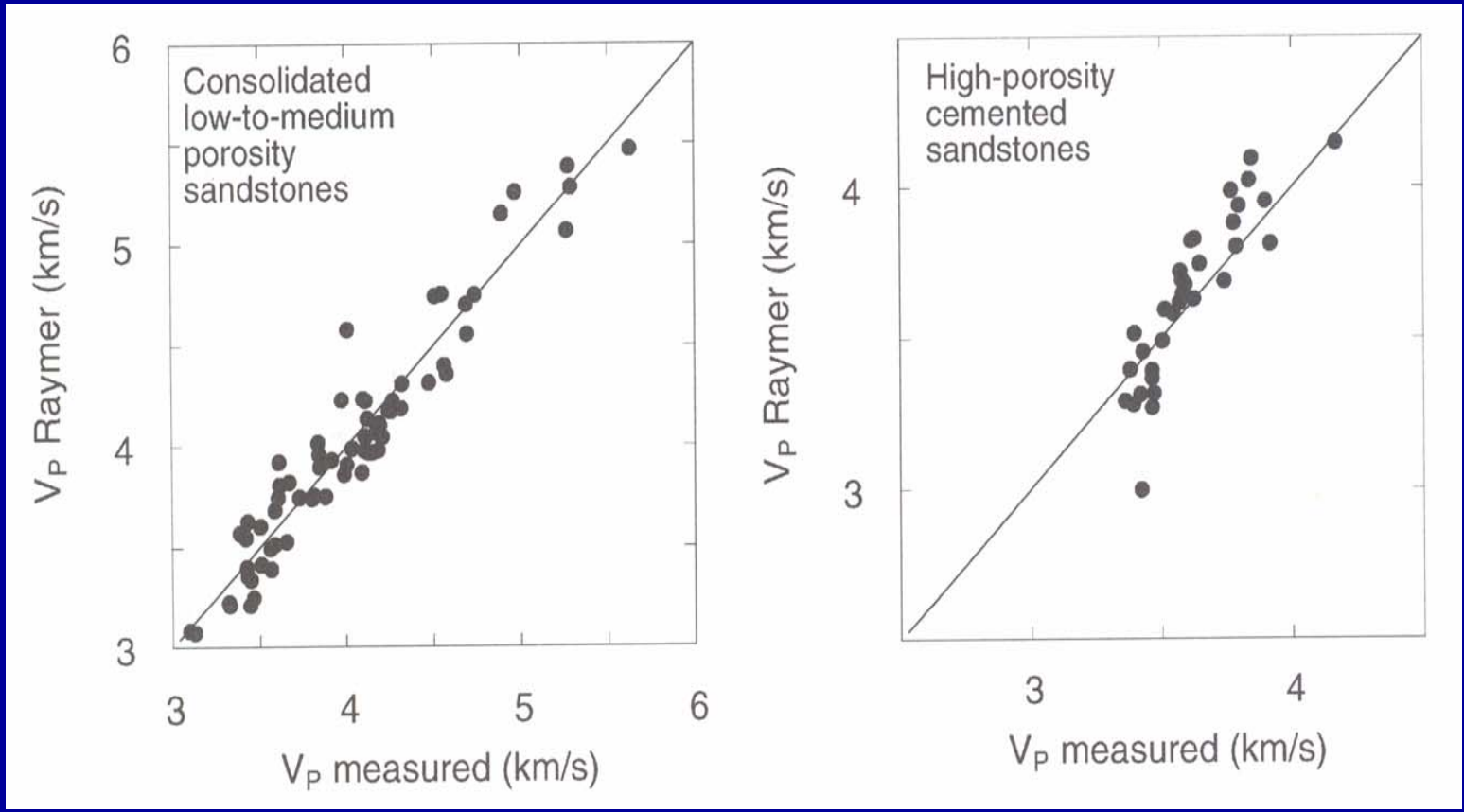
Raymer-Hunt-Gardner经验关系－假设条件

1）岩石时各项同性的；
2）岩石必须是流体饱和的；
3）组成岩石的所有矿物具有相同的速度；
4）只适合于较高的有效压力（即充分的压实），如30MPa，在低压和欠压实时，Wyllie方程预测的速度和孔隙度偏高，必须进行校正。
5）不适合疏松的没有胶结的岩石；
6）是一种经验关系，限制条件如同Wyllie公式

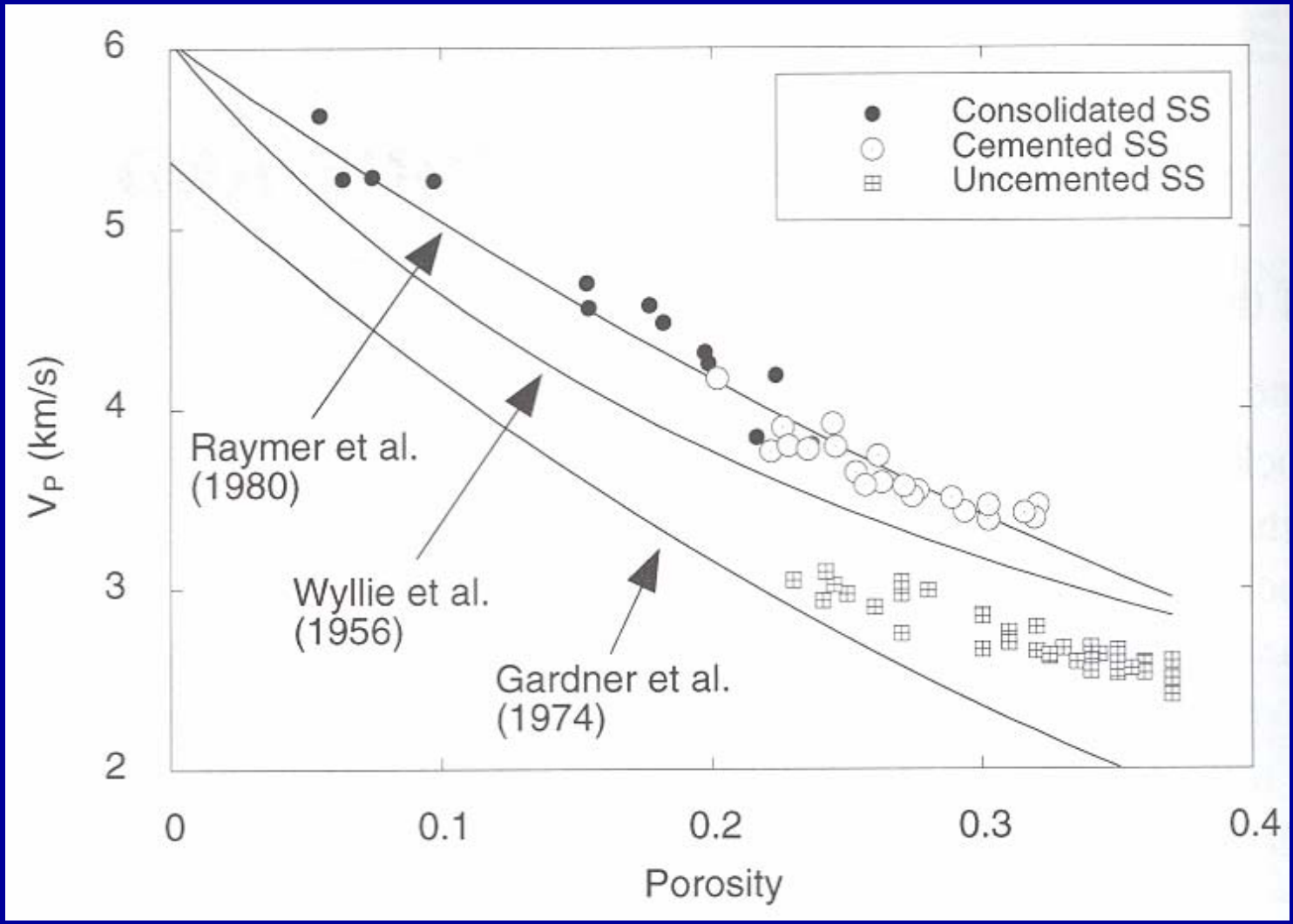
Raymer-Hunt-Gardner经验关系－假设条件

速度－孔隙度

只适合中等孔隙度，低孔隙度和高孔隙度时预测的速度偏低（不存在）



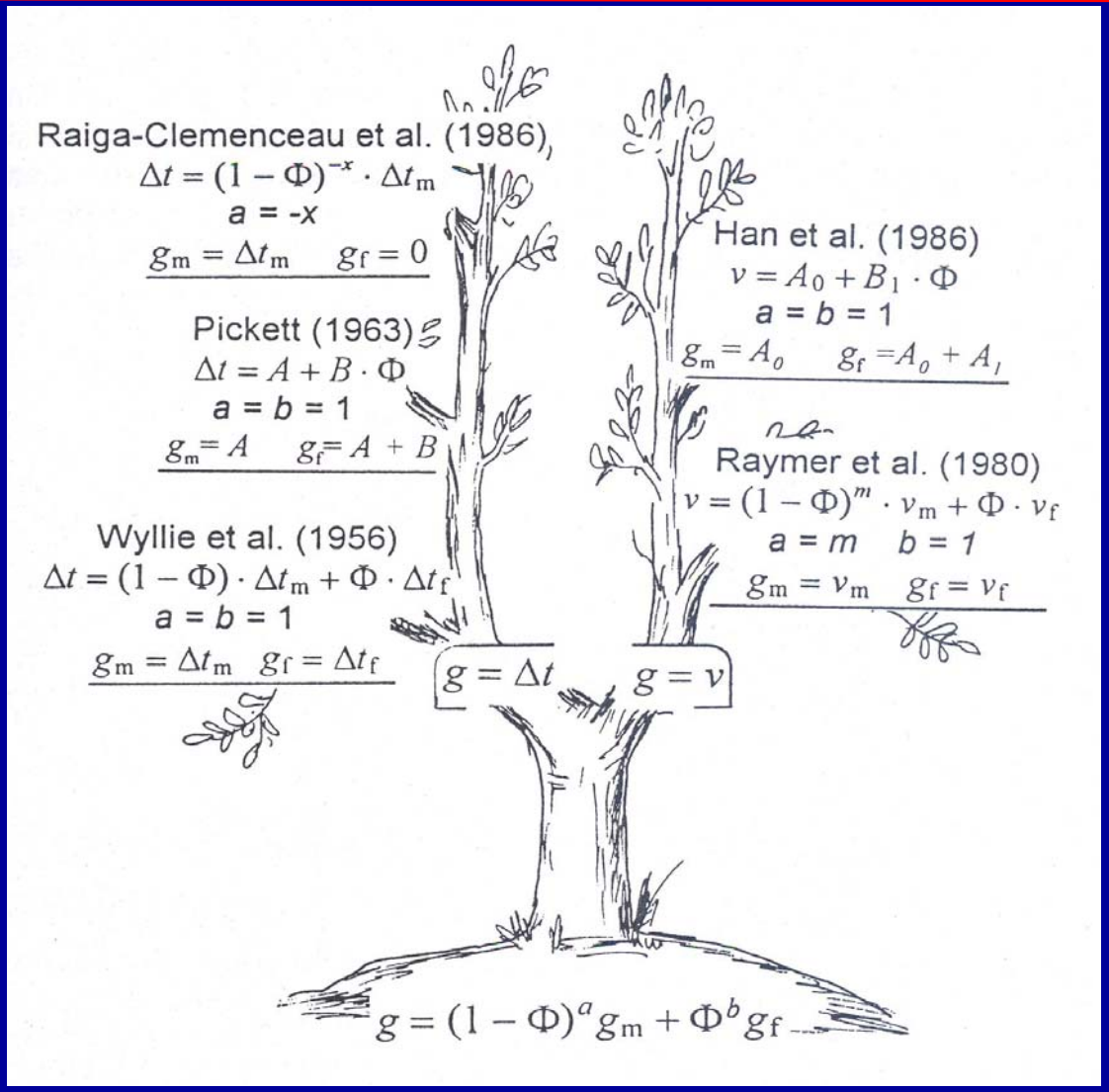
Raymer、Wyllie和Gardner的比较



三、经验关系

速度－孔隙度

总结



三、经验关系

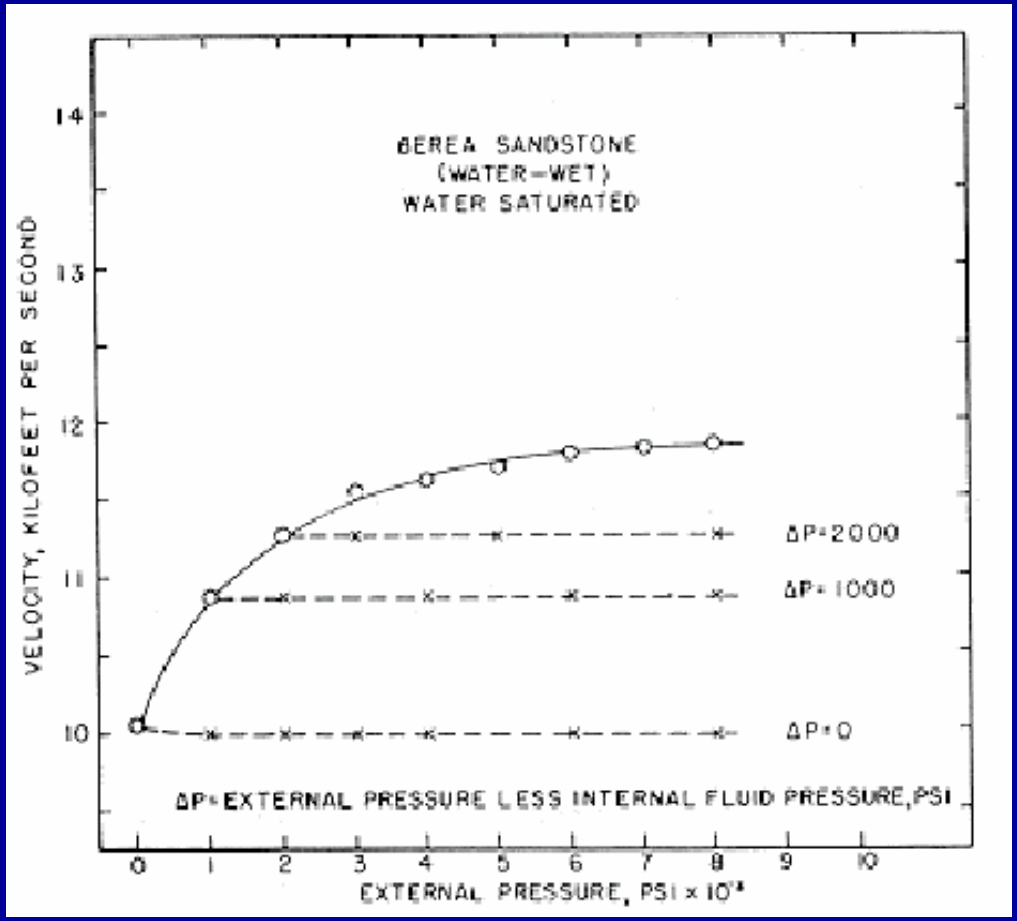
速度－孔隙度－泥质含量

水饱和、干燥泥质砂岩

作者	纵波速度	横波速度	条件
Tosaya(1982)	$V_p = 5.8 - 8.6\varphi - 2.4C$	$V_s = 3.7 - 6.3\varphi - 2.1C$	水饱和，40Mpa有效压力，实验室
Kowallis(1984)	$V_p = 5.6 - 9.2\varphi - 5.7C$		
Castagna(1985)	$V_p = 5.81 - 9.42\varphi - 2.21C$	$V_s = 3.89 - 7.07\varphi - 2.04C$	Frio层泥质砂岩，测井
Han(1986)	$V_p = 5.59 - 6.93\varphi - 2.18C$	$V_s = 3.52 - 4.91\varphi - 1.89C$	水饱和，40Mpa有效压力，实验室
Han(1986)	$V_p = 5.55 - 6.96\varphi - 2.18C$	$V_s = 3.47 - 4.84\varphi - 1.87C$	水饱和，30Mpa有效压力，实验室
Han(1986)	$V_p = 5.49 - 6.94\varphi - 2.17C$	$V_s = 3.39 - 4.73\varphi - 1.81C$	水饱和，20Mpa有效压力，实验室
Han(1986)	$V_p = 5.39 - 7.08\varphi - 2.13C$	$V_s = 3.29 - 4.73\varphi - 1.74C$	水饱和，10Mpa有效压力，实验室
Han(1986)	$V_p = 5.26 - 7.08\varphi - 2.02C$	$V_s = 3.16 - 4.77\varphi - 1.64C$	水饱和，5Mpa有效压力，实验室
Han(1986)	$V_p = 5.41 - 6.35\varphi - 2.87C$	$V_s = 3.57 - 4.57\varphi - 1.83C$	干燥，40Mpa有效压力，实验室
甘利灯（1990）	$V_p = 5.37 - 6.33\varphi - 1.82C$	$V_s = 3.15 - 3.51\varphi - 1.25C$	中国东部，水饱和泥质砂岩，测井
Gist(1991)	$V_p = 5.30 - 6.00\varphi - 2.43C$	$V_s = 3.29 - 3.97\varphi - 2.39C$	

速度－压力

机理与结论



成因

1）造成孔隙度降低

2）颗粒之间接触的弹性变化

结果

速度随压力的增加而增加，它们之间的关系是非线性的，起主控作用的是有效压力，即总压力与孔隙压力的差。

经验关系

a) power law

Faust, 1957: 500 data from shale & sandstone

$$V_p = L\,(A\,z)^{1/6}$$

V_p (m/s); z depth (m); A geological age (years);

L lithological factor (46.6, Bourbie et al., 1987)

Unconsolidated sediments $V_p = V_0^{1/6\ldots1/4}$

(Domenico, 1977, Schön, 1983)

Generalized: $V = a + b \cdot p^c$

经验关系

b) exponential law

Eberhart-Philips, 1989: 64 sandstone samples

Porosity Φ = *0.046 … 0.294*

Clay content *C = 0 … 0.4*

V (km/s)

$$v_p = 5.77 - 6.94 \cdot \Phi - 1.73 \cdot C^{1/2} + 0.446 \cdot \left[p_{eff} - \exp(16.7 \cdot p_{eff}) \right]$$

$$v_s = 3.70 - 4.94 \cdot \Phi - 1.57 \cdot C^{1/2} + 0.360 \cdot \left[p_{eff} - \exp(16.7 \cdot p_{eff}) \right]$$

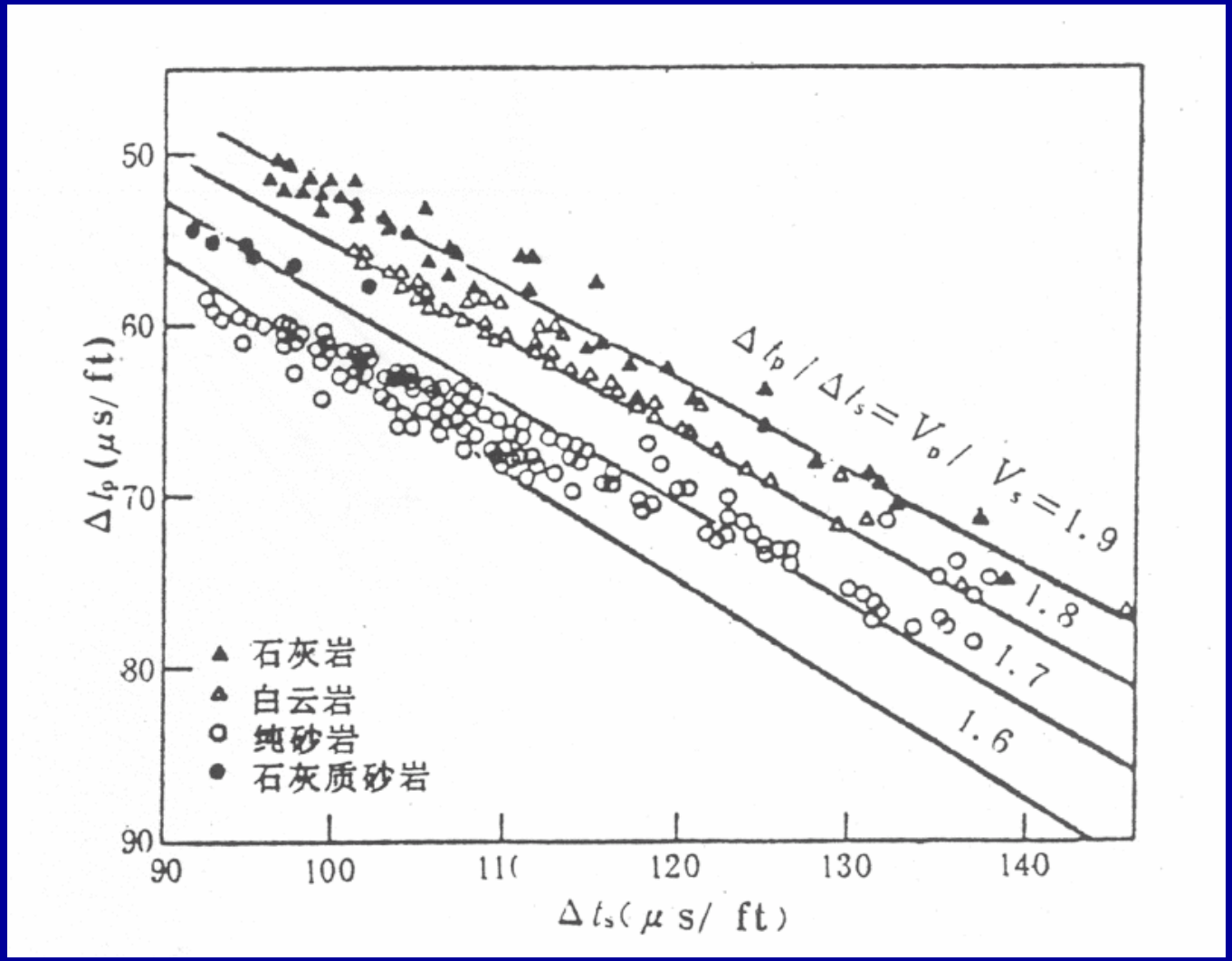
Generalized:

$$v = v_0 - a \cdot \Phi - b \cdot C^{1/2} + c \cdot \left[\frac{p_{eff}}{p_0} - \exp(d \cdot \frac{p_{eff}}{p_0}) \right]$$

三、经验关系

Pickett(1963)

纵横波速度



Castagna(1993)

Lithologies	$Vs=aVp^2+bVp+c$	#Samples	MinVp	MaxVp
Limestone	$Vs=-0.055Vp^2+1.017Vp-1.030$	129	1.5	6.5
Dolomite	$Vs=0.583Vp-0.078$	37	4.0	7.0
Sandstone	$Vs=0.804Vp-0.856$	136	1.5	6.1
Shale	$Vs=0.770Vp-0.867$	32	1.5	5.9
Coal	$Vs=-0.232Vp^2+1.542Vp-1.214$	143	1.5	3.5

速度－密度

Castagna（1993）

Lithologies	$\rho = aVp^2+bVp+c$	$\rho = dVp^f$	MinVp	MaxVp
Limestone	$\rho = -0.0296Vp^2+0.461Vp+0.963$	$\rho = 1.5Vp^{0.225}$	3.5	6.4
Dolomite	$\rho = -0.0235Vp^2+0.390Vp+1.242$	$\rho = 1.74Vp^{0.252}$	4.5	7.1
Sandstone	$\rho = -0.0115Vp^2+0.261Vp+1.515$	$\rho = 1.66Vp^{0.261}$	1.5	6.0
Shale	$\rho = -0.0261Vp^2+0.373Vp+1.458$	$\rho = 1.75Vp^{0.265}$	1.5	5.0
Anhydrite	$\rho = -0.0203Vp^2+0.321Vp+1.372$	$\rho = 2.19Vp^{0.160}$	4.6	7.4

流体替代基础 —Gassmann方程

$$K^* = K_m \frac{K_d + Q}{K_m + Q} \qquad Q = K_f \frac{K_m - K_d}{\varphi\left(K_m - K_f\right)}$$

$$\mu^* = \mu_d$$

$$V_p^* = \sqrt{\frac{M_s}{\rho^*}} = \sqrt{\frac{K_s + \frac{4}{3}\mu_s}{\rho^*}}$$

$$V_s^* = \sqrt{\frac{\mu_s}{\rho^*}}$$

流体替代基础 —Gassmann方程

式中：V_p^*、V_s^*、ρ^* 分别为饱和岩石的纵横波速度和密度。

K^*、μ^* 为饱和岩石的体积模量和剪切模量；

K_d、μ_d 为干噪岩石的体积模量和剪切模量；

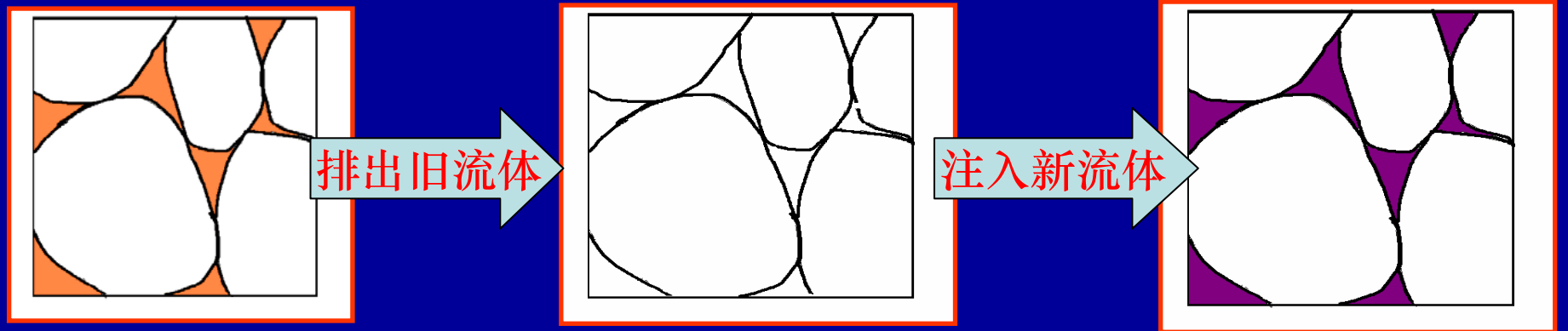
（也称为格架体积模量和格架剪切模量）；

K_m 为岩石基质体积模量；

K_f 为岩石孔隙内流体的体积模量；

φ 为孔隙度。

流体替代：



四、流体替代

参数确定

V_p^*－纵波速度

V_s^*－横波速度

ρ^*－密度

φ －孔隙度

K_m －固体骨架体积模量－V-R-H平均

K_f －孔隙中流体体积模量－Batzle-Wang方程计算

K_d －干燥岩石格架体积模量

μ_d －干燥岩石格架剪切模量

四、流体替代

已知与未知－全波测井

已知一种饱和状态1的纵横波速度与密度
求饱和状态2时的纵横波速度

已知变量如下：

V_p^*－饱和岩石纵波速度

V_s^*－饱和岩石横波速度

ρ^*－饱和岩石密度

φ －孔隙度

K_m －固体基质体积模量－利用V-R-H模型计算

K_f －孔隙中流体体积模量－Batzle-Wang等方法计算

未知个数（2）
方程个数（2）
直接计算

未知变量：

K_d －干燥岩石格架体积模量

μ_d －干燥岩石格架剪切模量

岩石格架不变－> K_d、μ_d不变，且$\mu^* = \mu_d$

已知与未知－常规测井

已知一种饱和状态1的纵波速度与密度
求饱和状态2时的纵横波速度

对于常规测井资料，已知变量如下：

V_p^*－饱和岩石纵波速度

ρ^*－饱和岩石密度

φ －孔隙度

K_m －固体基质体积模量－利用V-R-H模型计算

K_f －孔隙中流体体积模量－Batzle-Wang等方法计算

未知变量：

V_s^*－横波速度

K_d －干燥岩石格架体积模量

μ_d －干燥岩石格架剪切模量

未知个数（3）
多于方程个数（2）

结论：必须附加方程

岩石格架不变－> K_d、μ_d不变，且$\mu^* = \mu_d$

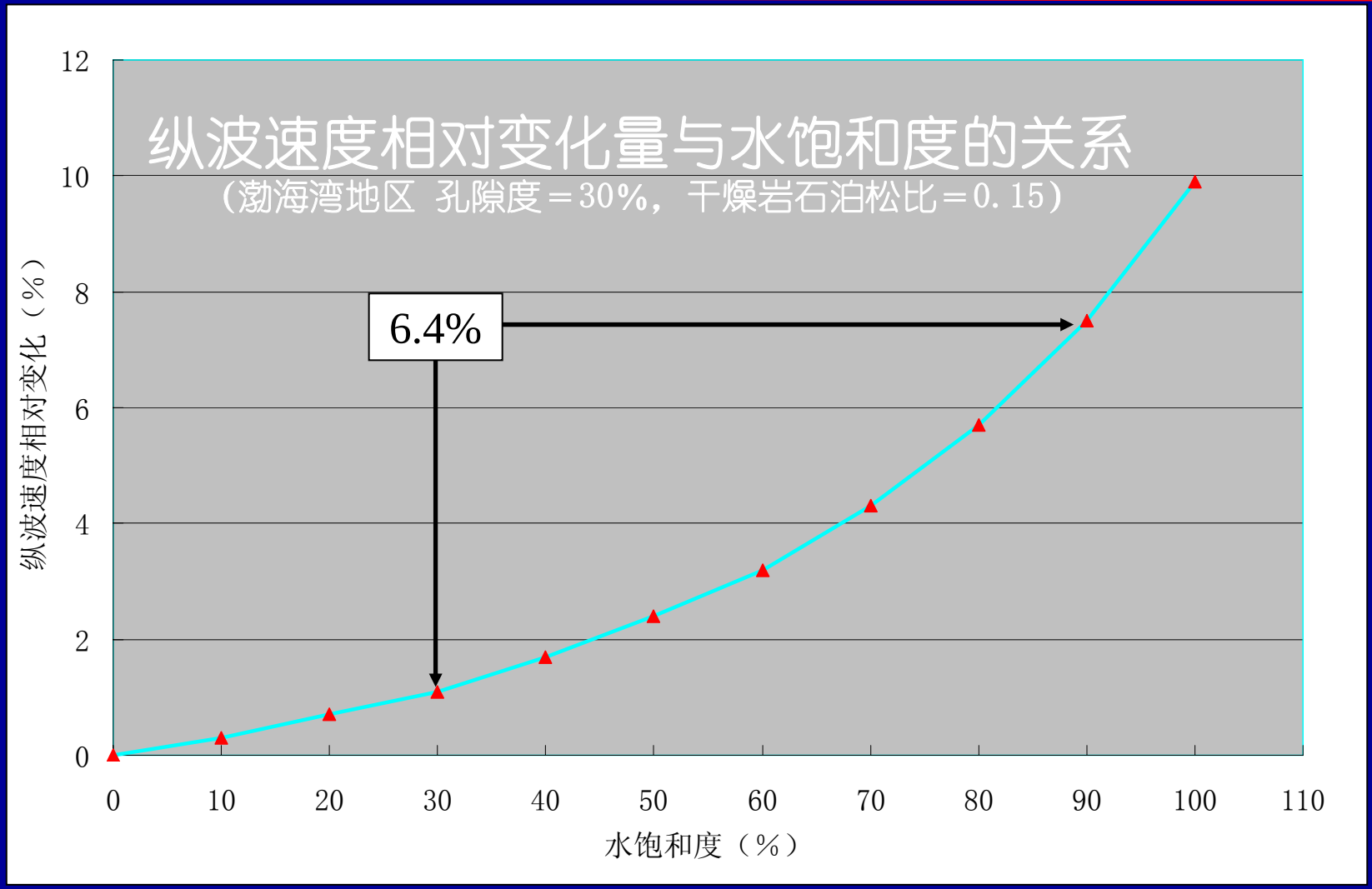
常规测井－附加方程

V_s^*= f （V_p^*）-如Greenberg&Castagna变换等

干燥岩石模量与基质模量的关系
(Biot系数与孔隙度的关系)

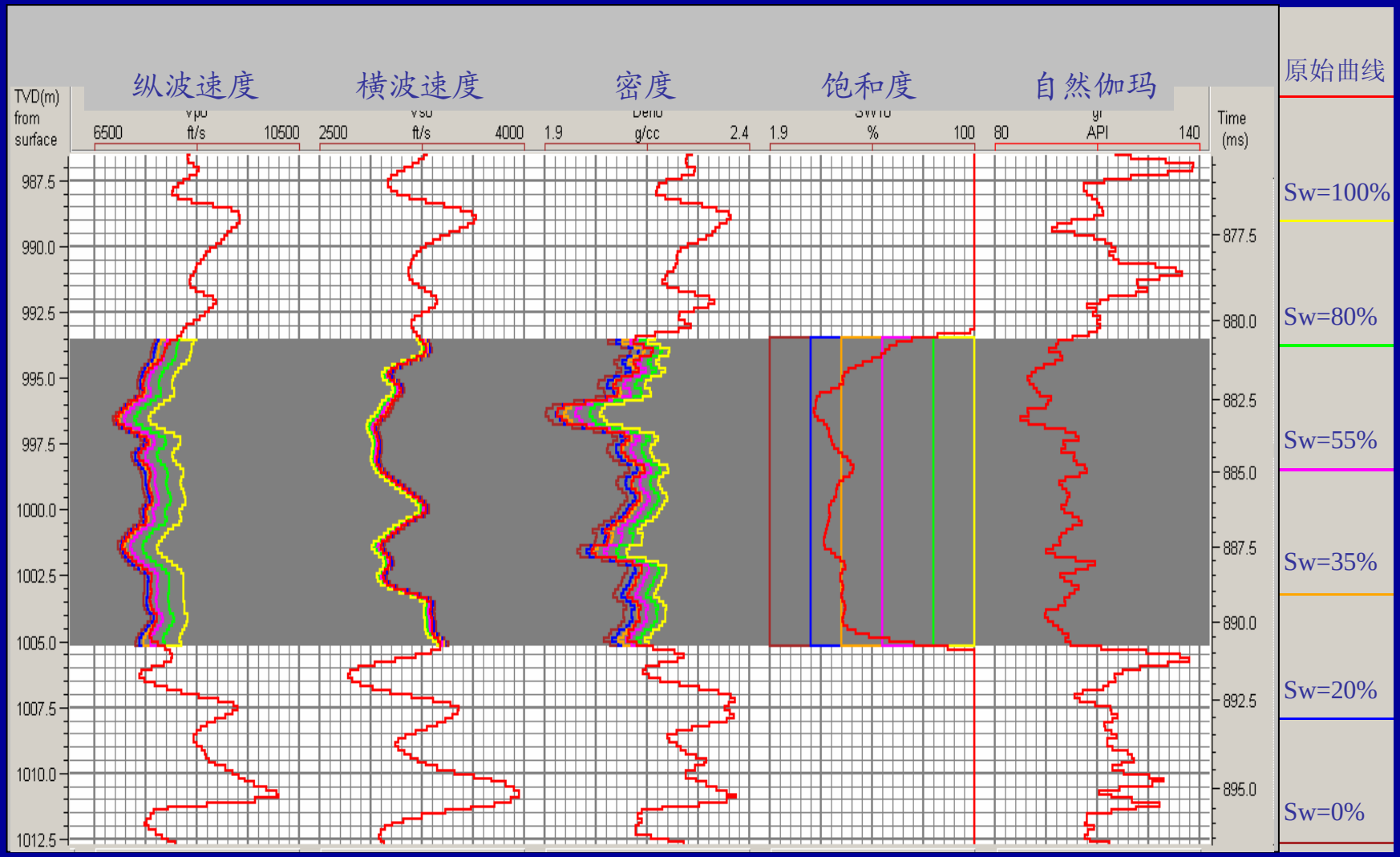
K_d / μ_d=2(σ_d+1)/(3-6σ_d) －干燥岩石泊松比的估计

实例----常规测井附加方程3，渤海湾



四、流体替代

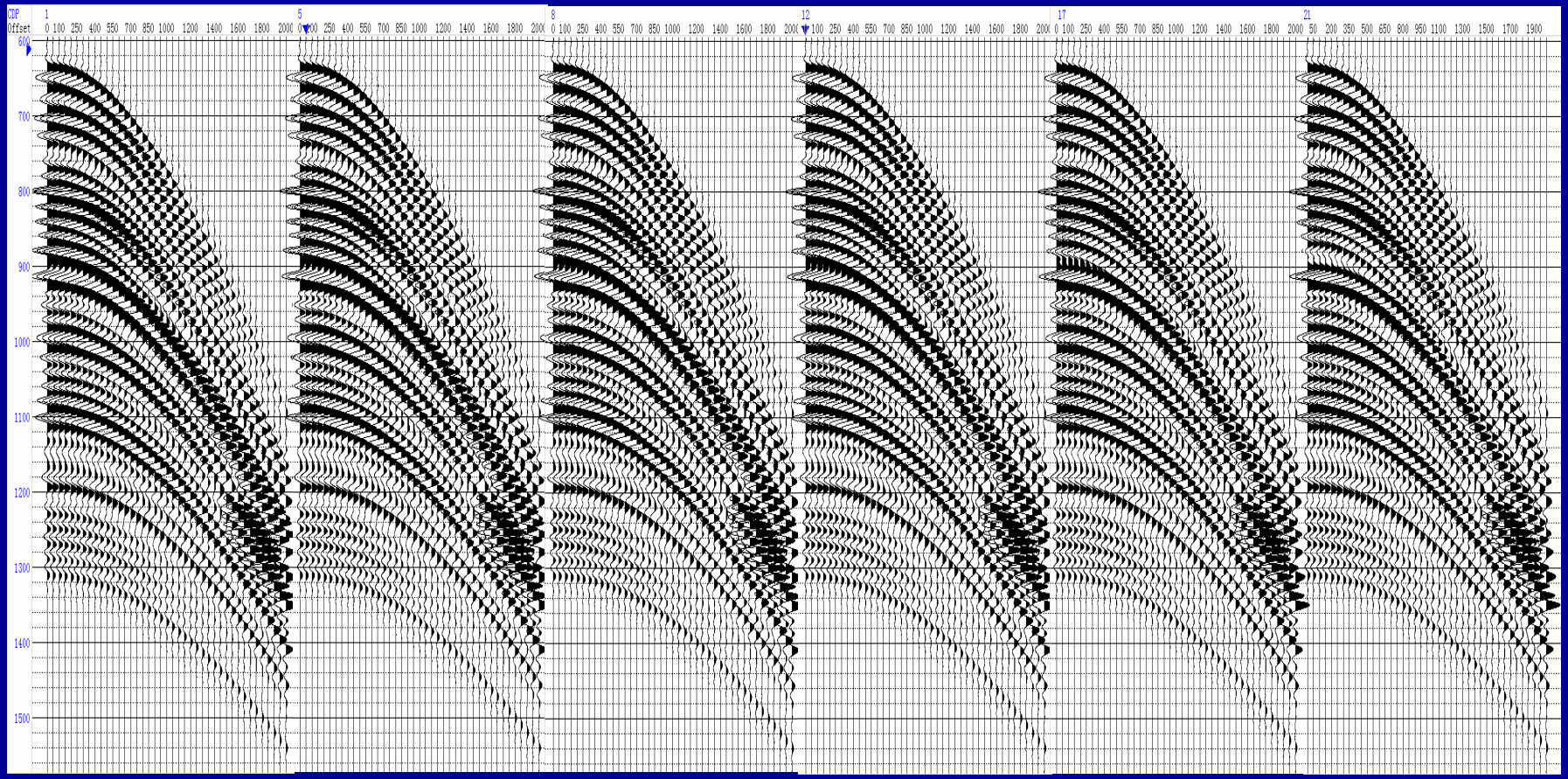
实例----全波测井，渤海湾



四、流体替代

实例----全波测井，渤海湾

Sw=0%　Sw=20%　Sw=35%　Sw=55%　Sw=80%　Sw=100%



横波速度预测方法

方法

1、经验关系法－利用统计的Vp-Vs关系

2、理论模型法

Gassmann模型

已知干燥岩石泊松比(给定、统计关系、模型－临界孔隙度或Krief模型)
给定饱和水时纵横波速度关系 (如Greenberg-Castagna模型)

Xu－White模型

通过修改参数不断迭代使得计算的饱和水岩石的纵波速度和
密度与测量的相同

3、综合法－模型＋经验关系

结论

基于神经网络的经验关系法和综合法效果较好

五、应用

纵横波速度经验关系法

横波速度预测

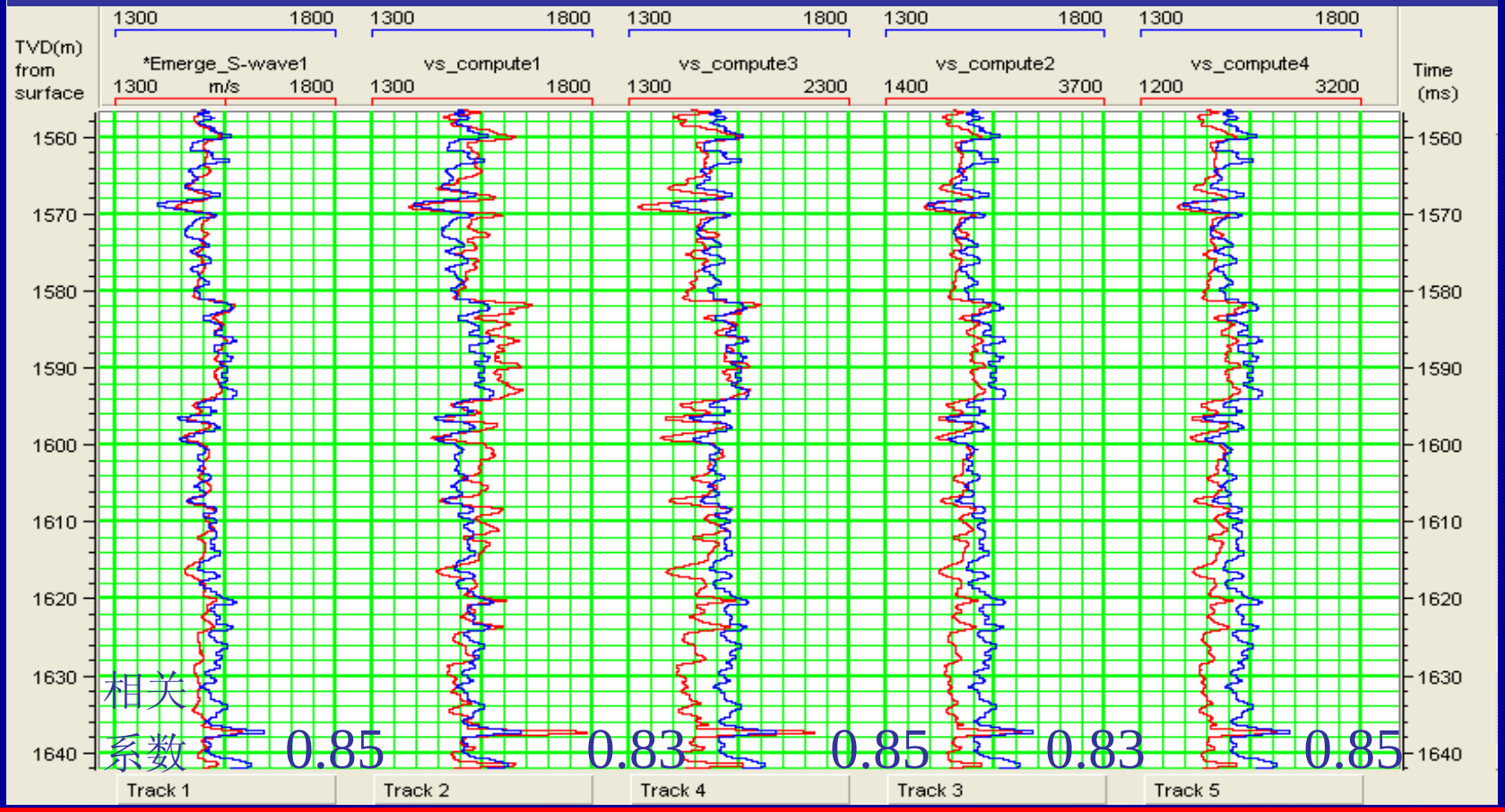
岩性		$Vs=aVp^2+bVp+c$	样品数	最小 Vp	最大 Vp
灰岩（岩心，饱和水，Castagna，1993）		$Vs=-0.055Vp^2+1.017Vp-1.030$	129	1.5	6.5
白云岩（岩心，饱和水，Castagna，1993）		$Vs=0.583Vp-0.078$	37	4.0	7.0
砂岩	全部（岩心，饱和水，Castagna，1993）	$Vs=0.804Vp-0.856$	136	1.5	6.1
	泥岩含量大于25%（岩心，水饱和，Han，1986）	$Vs=0.842Vp-1.099$			
	泥岩含量小于25%（岩心，水饱和，Han，1986）	$Vs=0.754Vp-0.657$			
	孔隙度大于15%（（岩心，水饱和，Han，1986）	$Vs=0.756Vp-0.662$			
	孔隙度小于15%（岩心，水饱和，Han，1986）	$Vs=0.853Vp-1.137$			
泥岩（岩心，饱和水，Castagna，1993）		$Vs=0.770Vp-0.867$	32	1.5	5.9
煤（Castagna，1993）		$Vs=-0.232Vp^2+1.542Vp-1.214$	143	1.5	3.5
泥岩线（测井数据，Castagna，1983）		$Vs=0.862Vp-1.172$			
砂岩（岩心，水饱和，Han，1986）		$Vs=0.794Vp-0.787$			
砂泥岩（岩心，饱和水，Han，1986；Blangy，1992；Yin，1992）		$Vs=0.790Vp-0.790$			

横波速度预测-经验公式法

神经网络　线性—扫描　非线性—扫描　线性—常规　非线性—常规

RMS=15　RMS=52　RMS=126　RMS=526　R=256

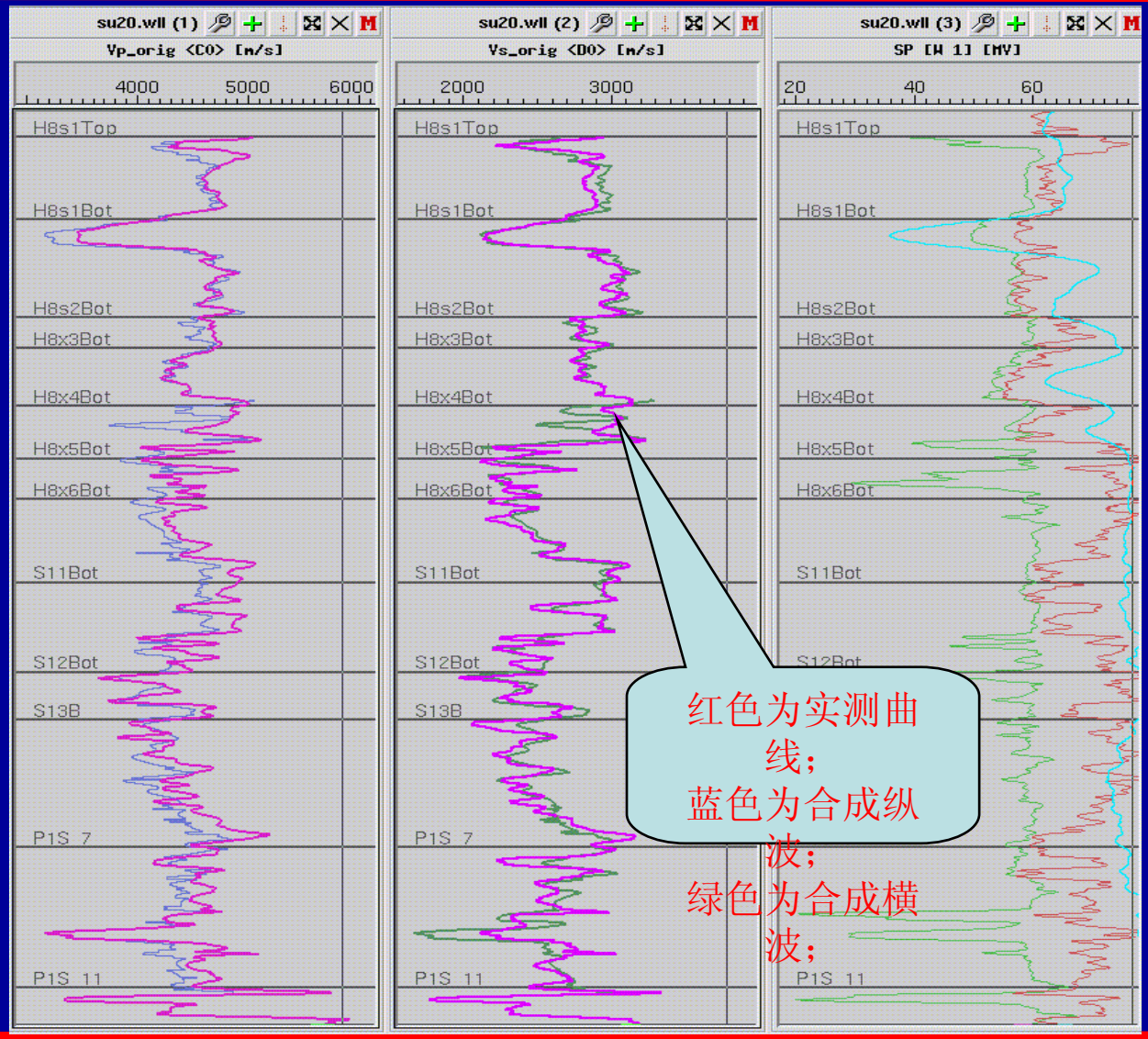
线性：$V_S = a*V_P + b$;　　非线性：$V_S^2 = c*V_P^2 + d$;



五、应用

XuWhite模型法

横波速度预测

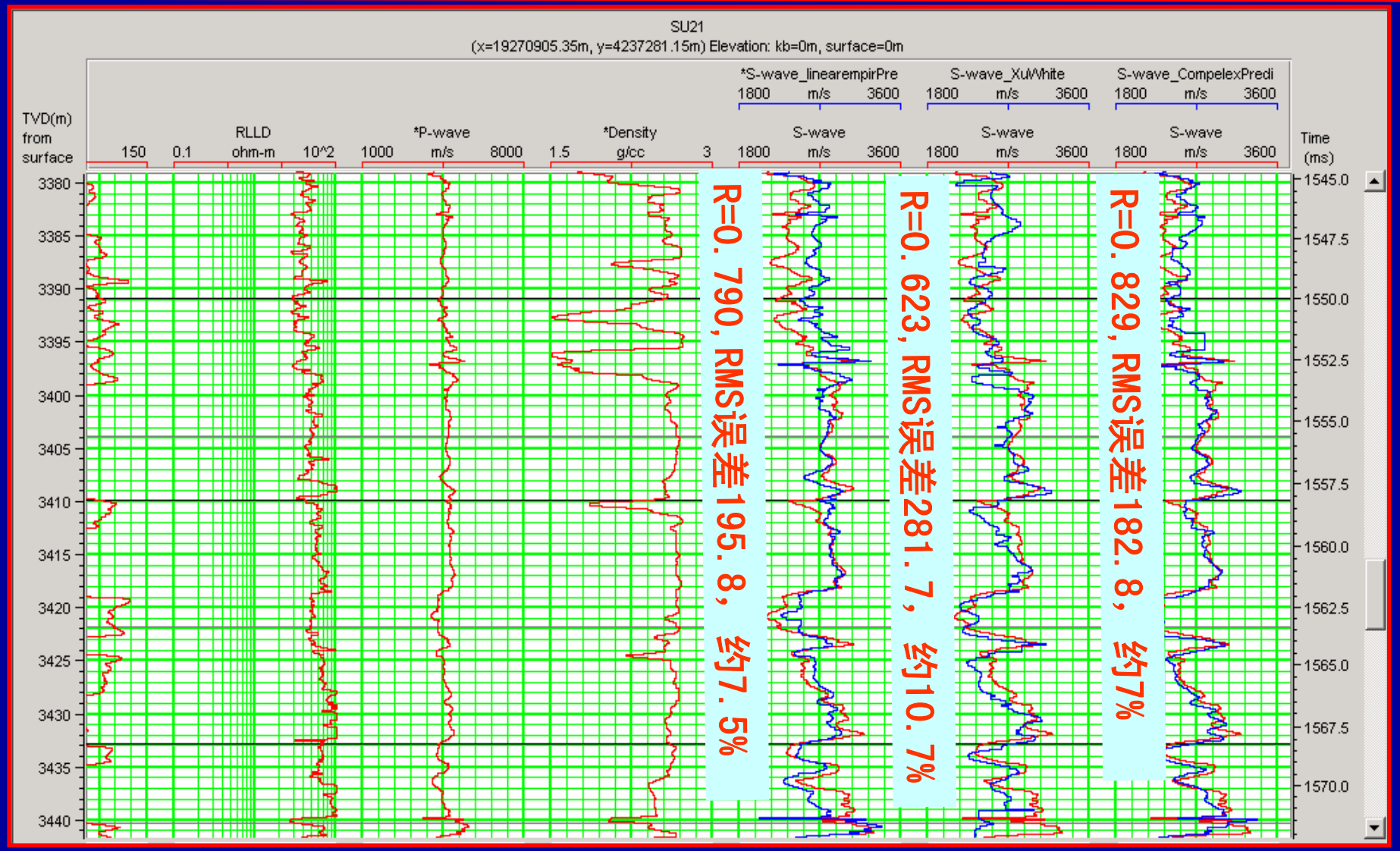


Su20　纵波相关系数0.83　横波相关系数0.88

五、应用

横波速度预测-不同方法比较

横波速度预测

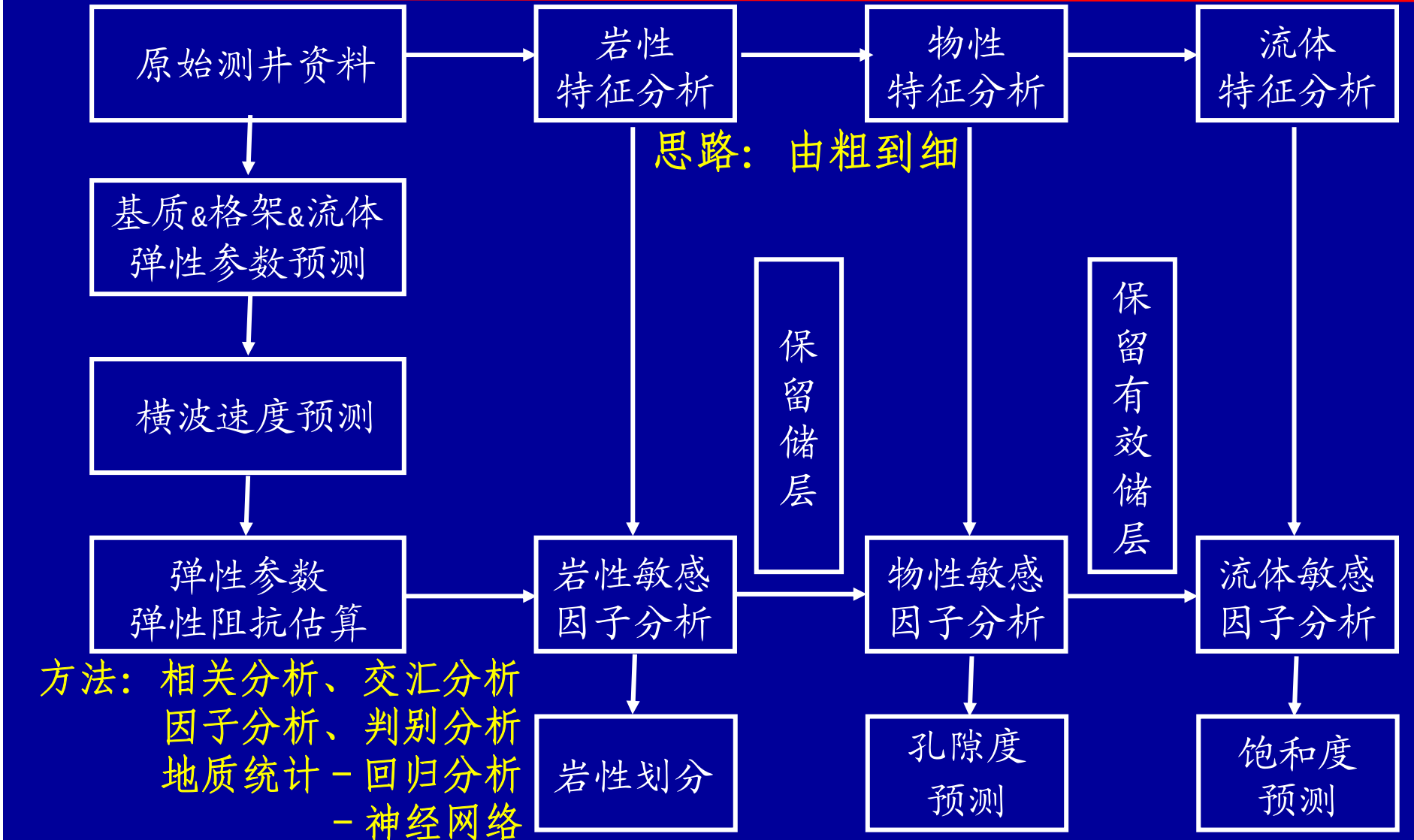


常规线性回归、XuWhite和Gassmann模型法比较

五、应用

思路、流程与方法

敏感因子分析



五、应用

思路、流程与方法

敏感因子分析

交会分析

对弹性参数之间两两交会，定性描述各种参数组合方式对岩性的区分能力，初步筛选出一些较好参数组合方案

判别分析

对初步筛选的组合方案进行定量风险评估，优选出最佳组合方案

- 定性识别储层的最佳方案

相关分析

分析各弹性参数与储层参数之间的相似性，初步筛选出一些较好的弹性参数

因子分析

- 分析初选出的弹性参数之间的相似性，找出少数几个能代表原来多个参数的综合因子，对原来参数进行数据压缩
- 对回归分析进行指导

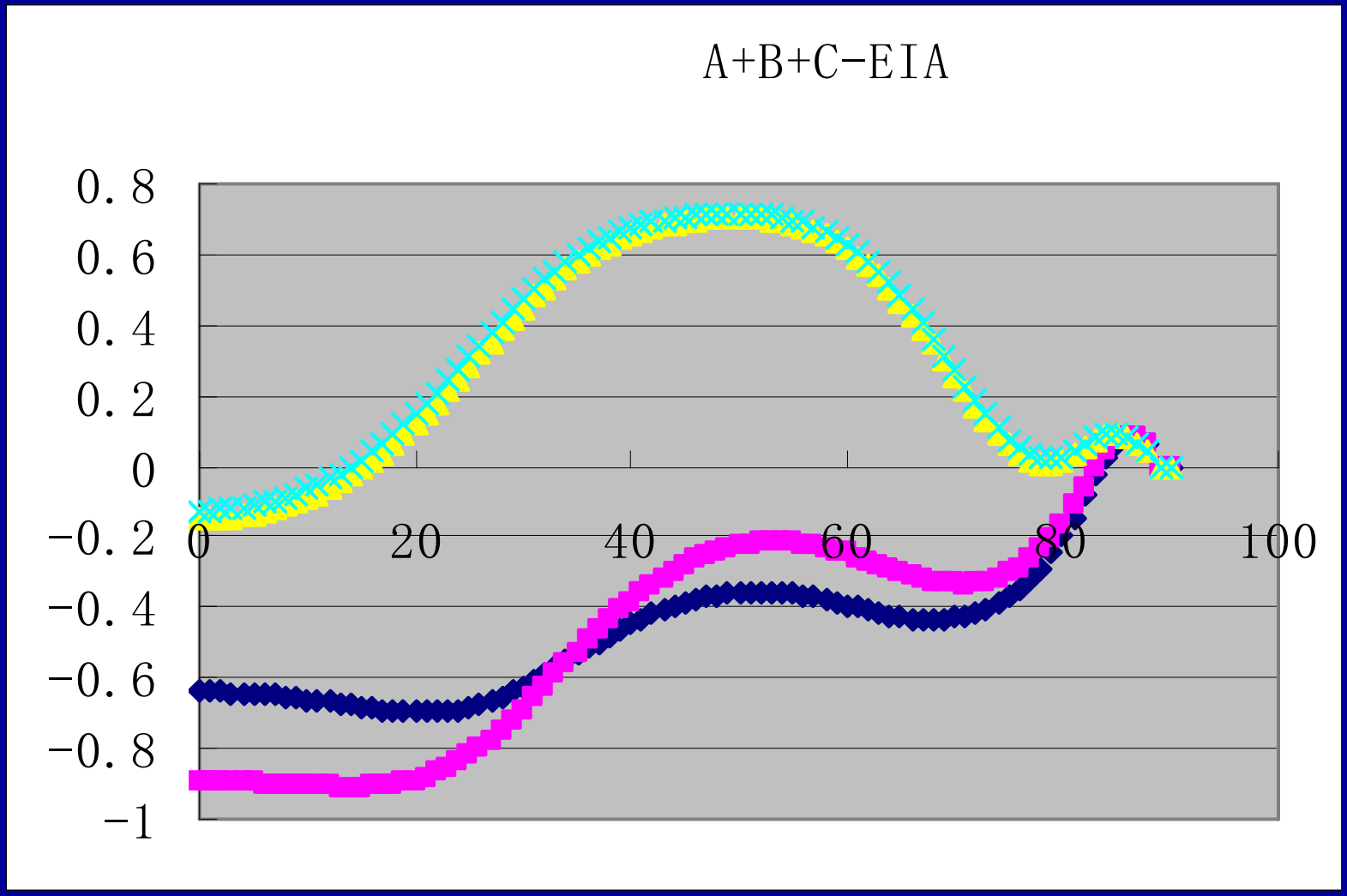
回归分析

分析多个弹性参数对定量的储层参数（自然伽玛、泥质含量）的相似性

- 定量描述储层的最佳方案

不同炮检距信息的含义

敏感因子分析

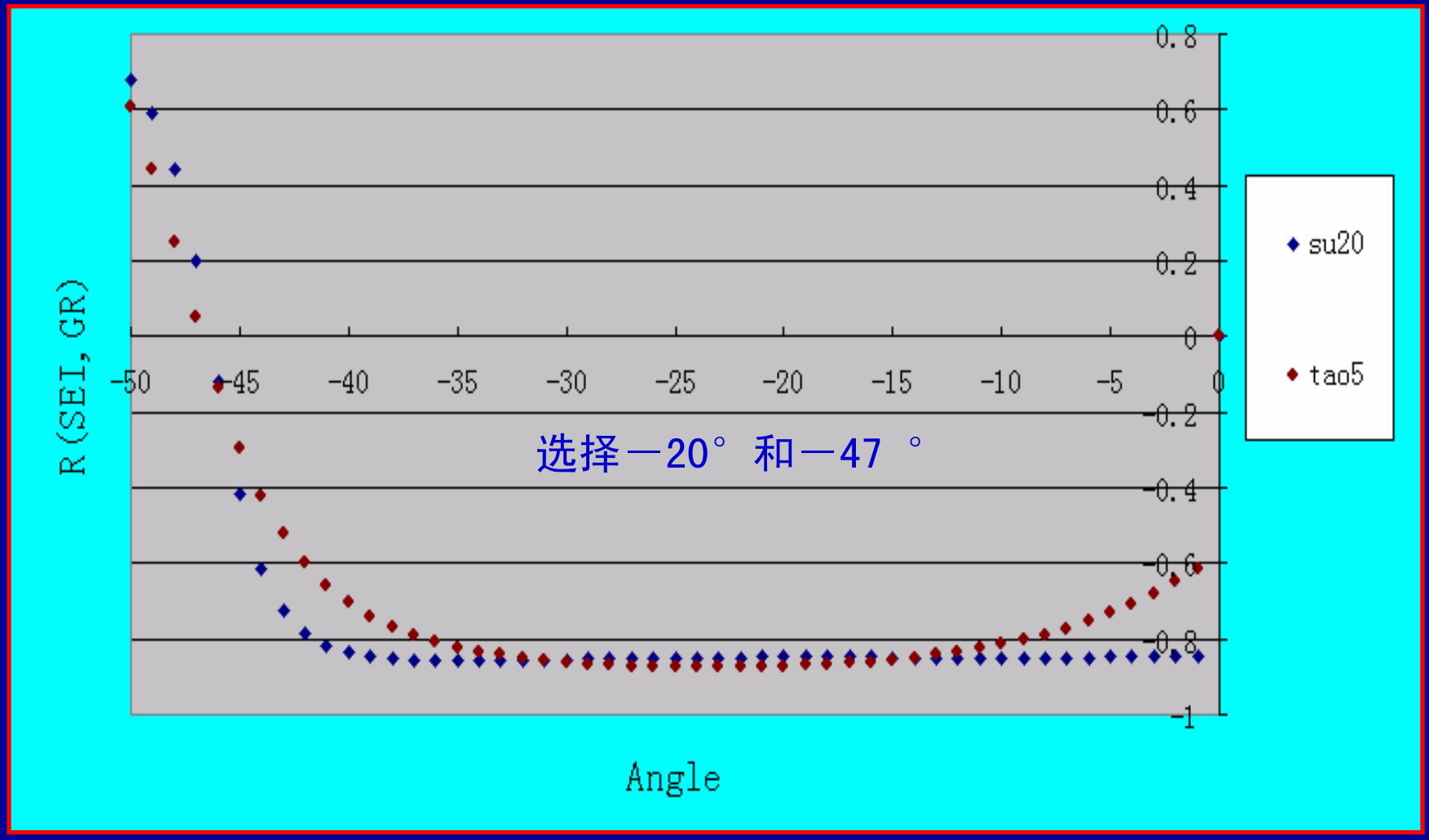


五、应用

不同炮检距信息的含义

敏感因子分析

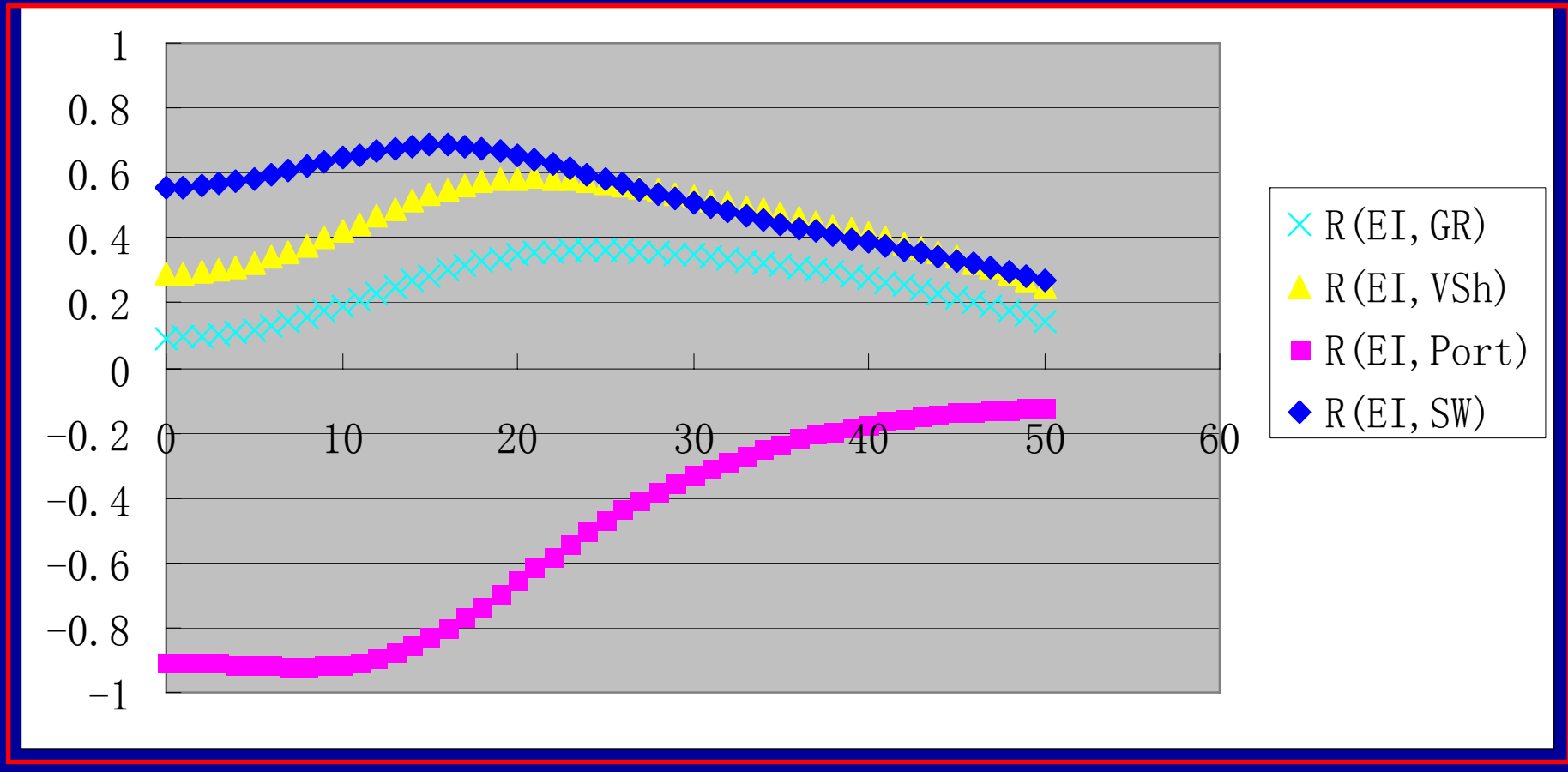
转换波波弹性阻抗与自然伽玛曲线相关系数与角度的关系



岩性参数初选－转换波波弹性阻抗优选

不同炮检距信息的含义

敏感因子分析



五、应用

岩性因子分析-交汇分析

敏感因子分析

Su20井



弹性参数组合对岩性分辨能力分级三角图

经过定性分析初步优选出以下11个弹性参数组合：

A: Rho-Vp/Vs **B: Rho-Vp/Is** **C: Rho-EI(20)** **D:Rho-SEI(-20)**

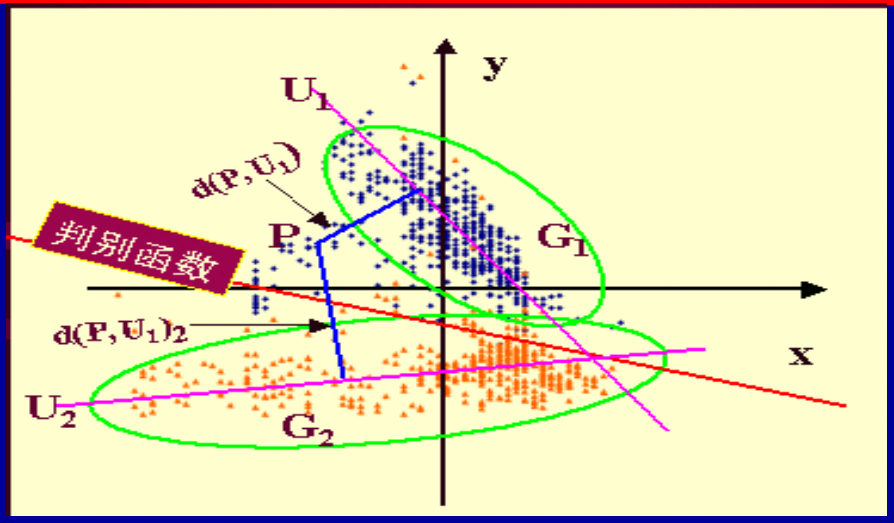
E: Rho-EI(20)/SEI(-20) **F:Ip-Lamda** **G:Ip-sqrt(Vp*Vs)** **H:Vp/Vs-Vp/Is**

I: Vp/Is-EI(20) **J: Vp/Is-SEI(-20)** **K:LamdaRho-MuRho**

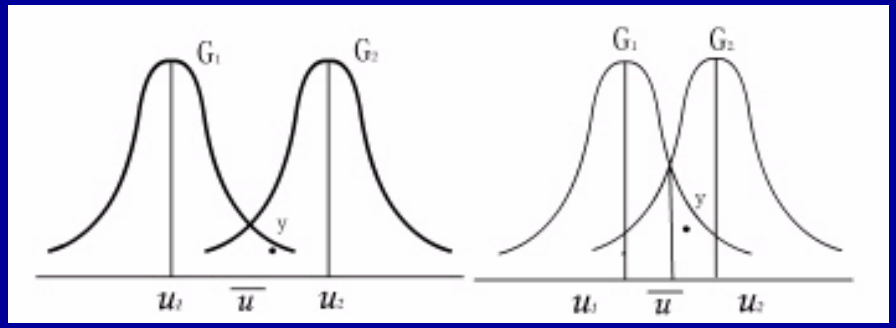
五、应用

岩性因子分析-判别分析

敏感因子分析



判别分析是多元统计分析中用于判别样品所属类型的一种统计分析方法。



当**G1**和**G2**十分接近时无论用什么样的方法误判概率都很大，即存在较大风险。

- 对**6**口关键井的**11**个弹性参数组合方式进行了判别分析。统计了这些方案在区分岩性时对各种岩性的判对率和错判率。以这两个指标为依据对各种组合方案用于区分岩性时的风险进行了定量评估。

岩性因子分析-判别分析

敏感因子分析

弹性参数组合的优选

优选标准：

判错率低

判对率高

可操作性

方案优选：

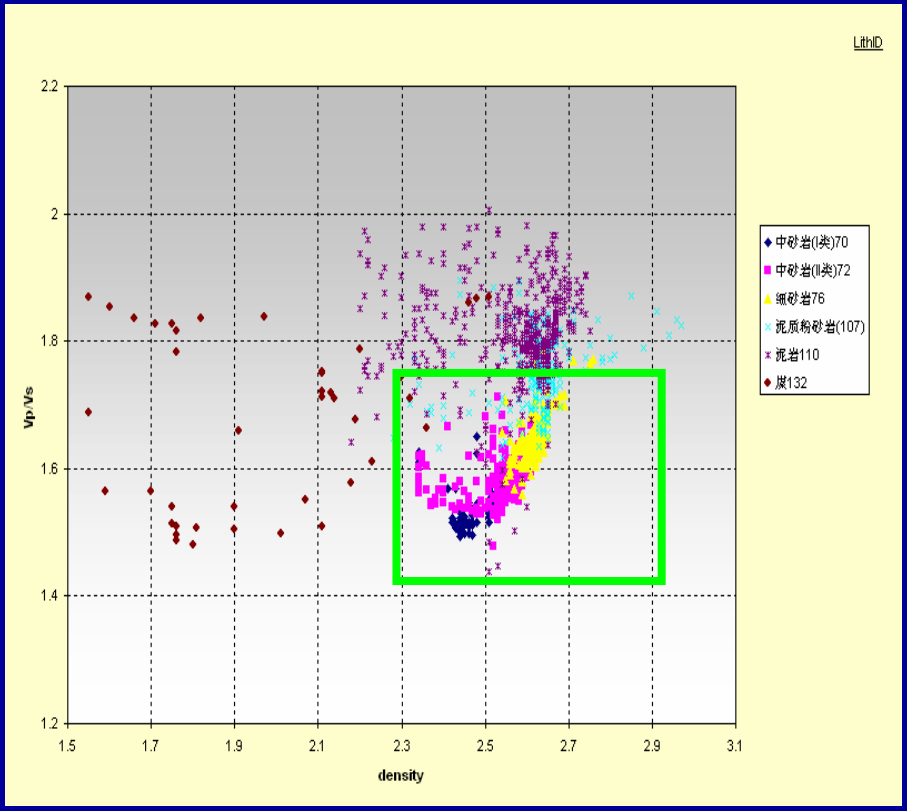
1. 在没有转换波资料的情形下，方案D,E,J的应用条件不成熟；
2. 其余方案按判对率从高到低的顺序为：A,H,B,C;按判错率从低到高的顺序为：F,K,B,H,A,I；
3. 最优方案为A；次优方案为F（可操作性不强）

五、应用

岩性因子分析-判别分析

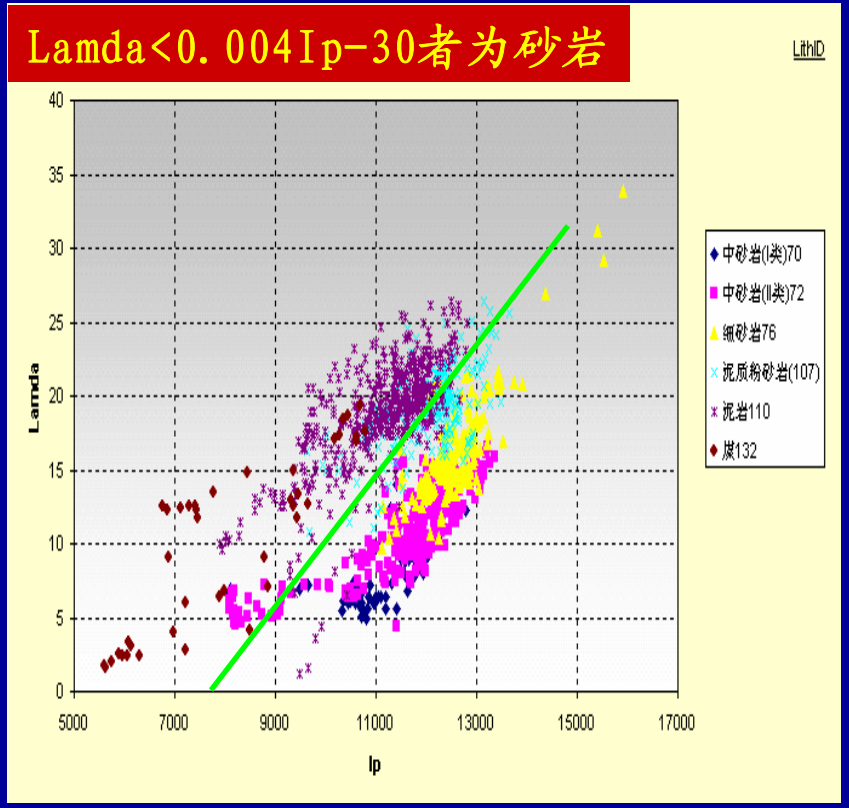
敏感因子分析

方案A:Rho-Vp/Vs



方案F:Ip-Lamda

Lamda<0.004Ip-30者为砂岩

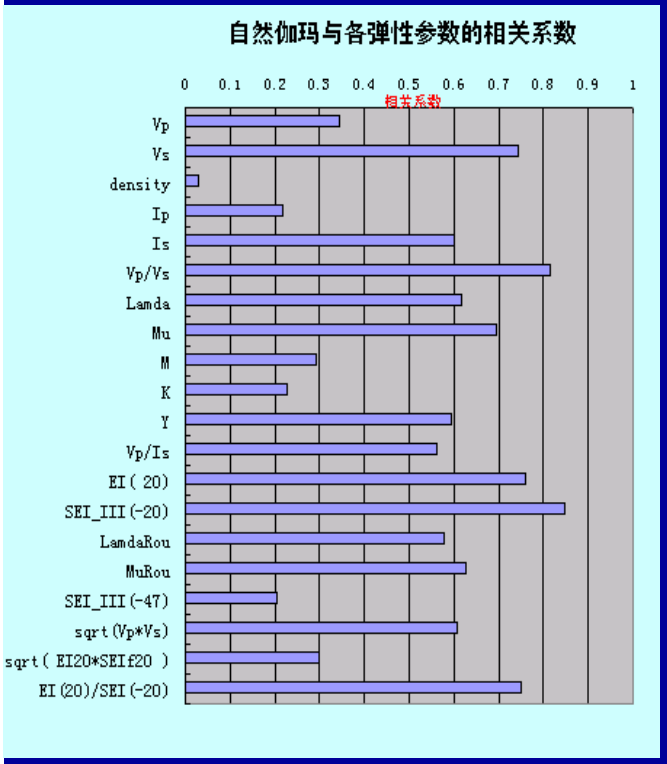


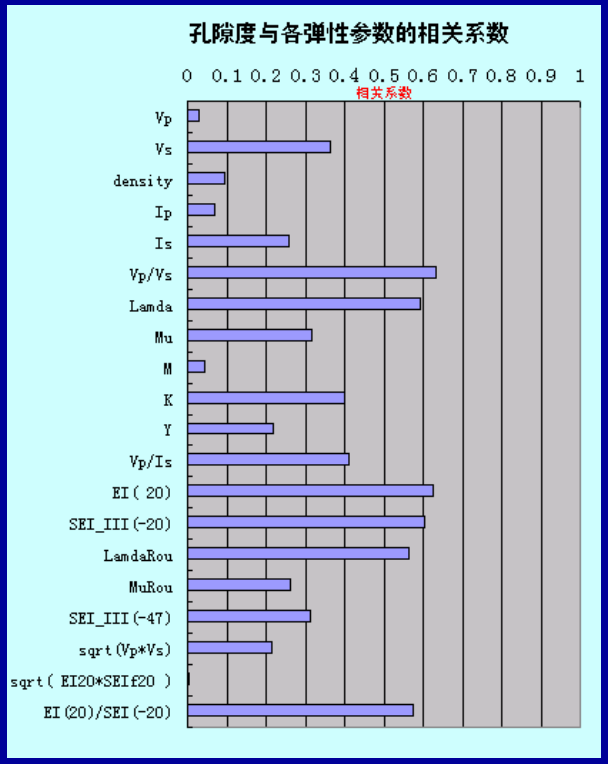
用方案A识别岩性时易于操作，方案F则可操作性不强

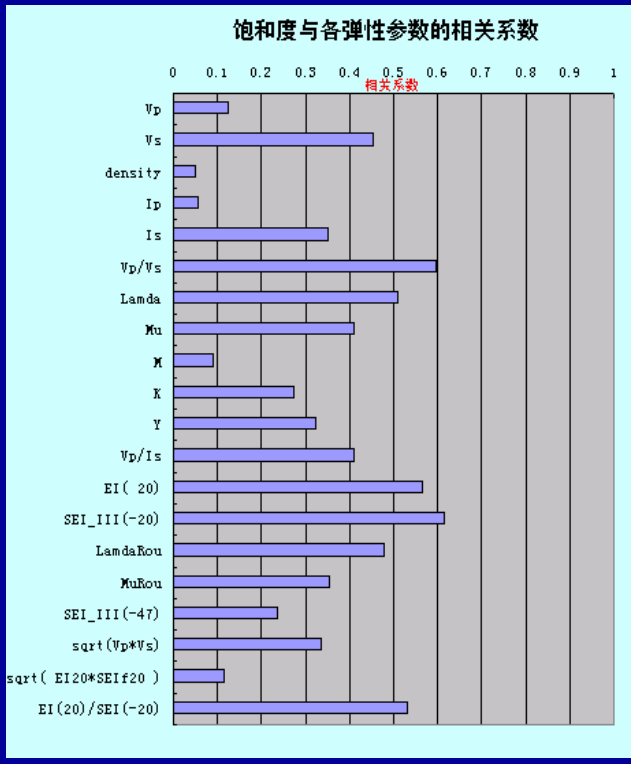
五、应用

岩性因子分析-相关分析

敏感因子分析







反映岩性最好的弹性参数为SEI（-20）,Vp/Vs，EI20及Vs;

反映孔隙度较好的弹性参数为Vp/Vs和EI20;

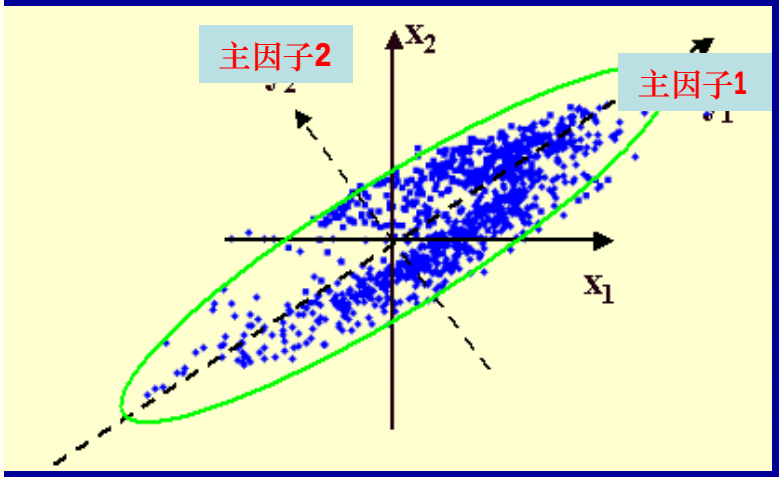
反映饱和度较好的弹性参数为Vp/Vs和SEI（-20）.

五、应用

岩性因子分析-因子分析

敏感因子分析

因子分析图解



因子分析是一种降维方法：从多个因素设法找到少数的几个综合因素（主因子）来代表原来众多因素的一种多元统计方法，而这几个较少的综合因素（主因子）既能尽可能多的反映原来因子的信息，它们之间又是彼此独立的。

对6口关键井，以交会分析和判别分析优选出的两参数组合中涉及到 8 个弹性参数:

Vp,Vs,Rho,Vp/Vs,Vp/Is,EI(20),SEI(-20),Lamda

和4个储层参数： 自然伽玛,泥质含量,孔隙度,含水饱和度

共12个变量为输入变量进行了因子分析

五、应用

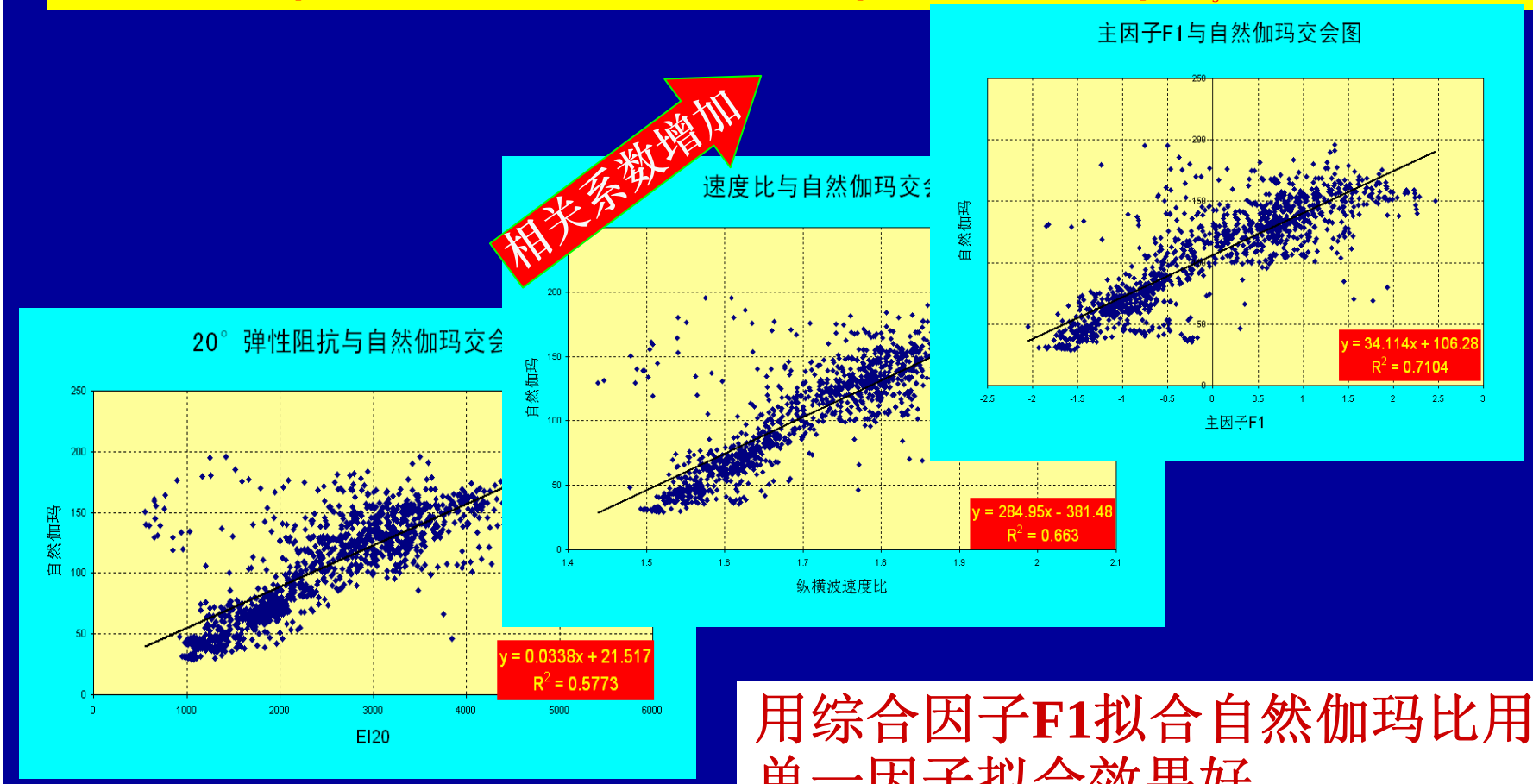
岩性因子分析-因子分析

敏感因子分析

因子分析得到的主因子F1与七个输入变量中间的关系为：

$$F_1 = -0.088V_p - 0.225V_s + 0.011\rho + 0.269(V_p / V_s) + 0.188(V_p / I_s) + 0.254EI_{20} + 0.207\lambda$$

相关系数增加



用综合因子F1拟合自然伽玛比用单一因子拟合效果好

五、应用

岩性因子分析-回归分析

敏感因子分析

回归分析：将一些变量作为自变量，另外一些随自变量变化的变量作为因变量，研究它们之间存在的非确定因果关系的一种统计分析方法

对6口关键井用16个弹性参数：

Vp,Vs,Rho,Ip,Is,Vp/Vs,Lamda,Mu,M,K,Y,Vp/Is,EI(20),LamdaRho ,MuRho, sqrt(Vp*Vs);

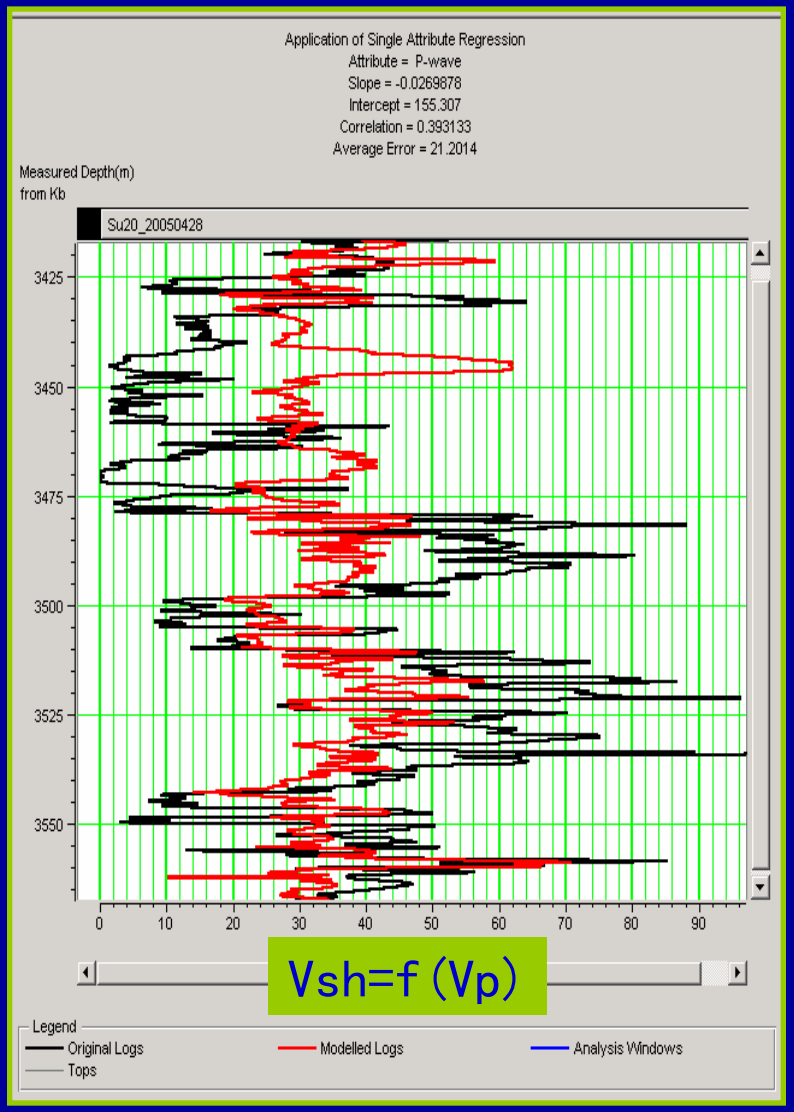
对自然伽玛，泥质含量进行了多元回归和神经网络分析

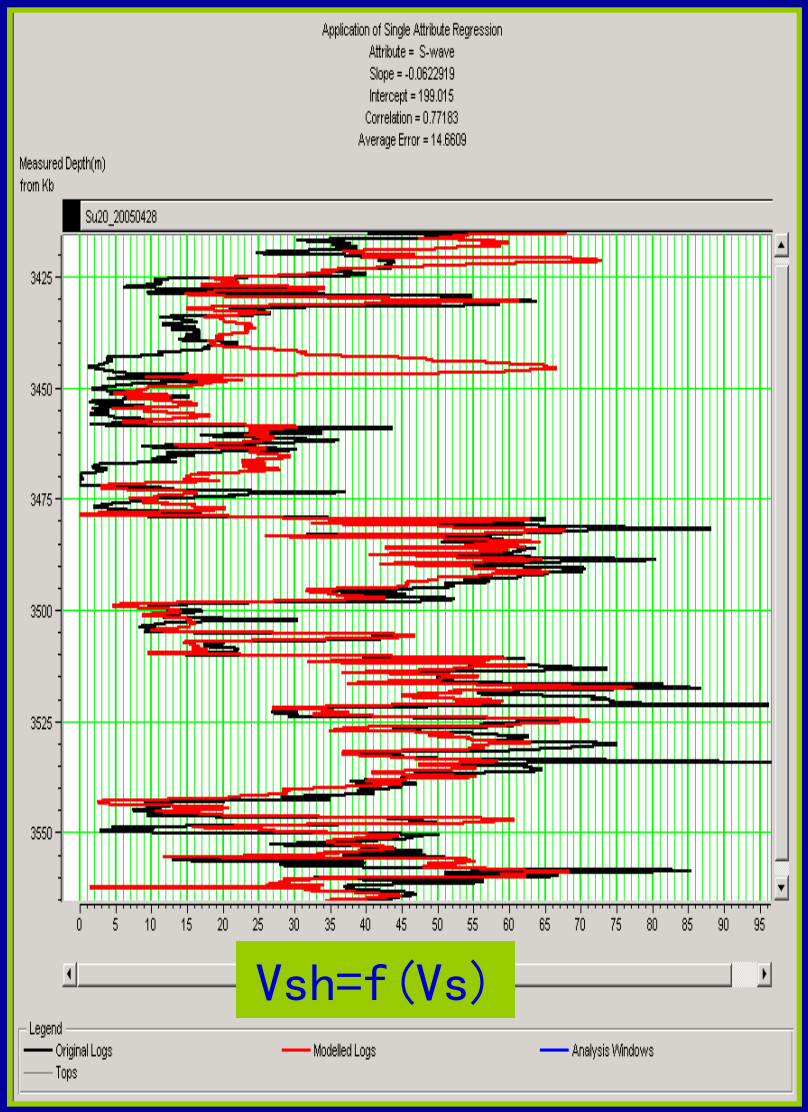
并对以下7个弹性参数重点进行了分析

Vp,Vs,Rho,Vp/Vs,Vp/Is,EI(20),Lamda

岩性因子分析-回归分析

敏感因子分析

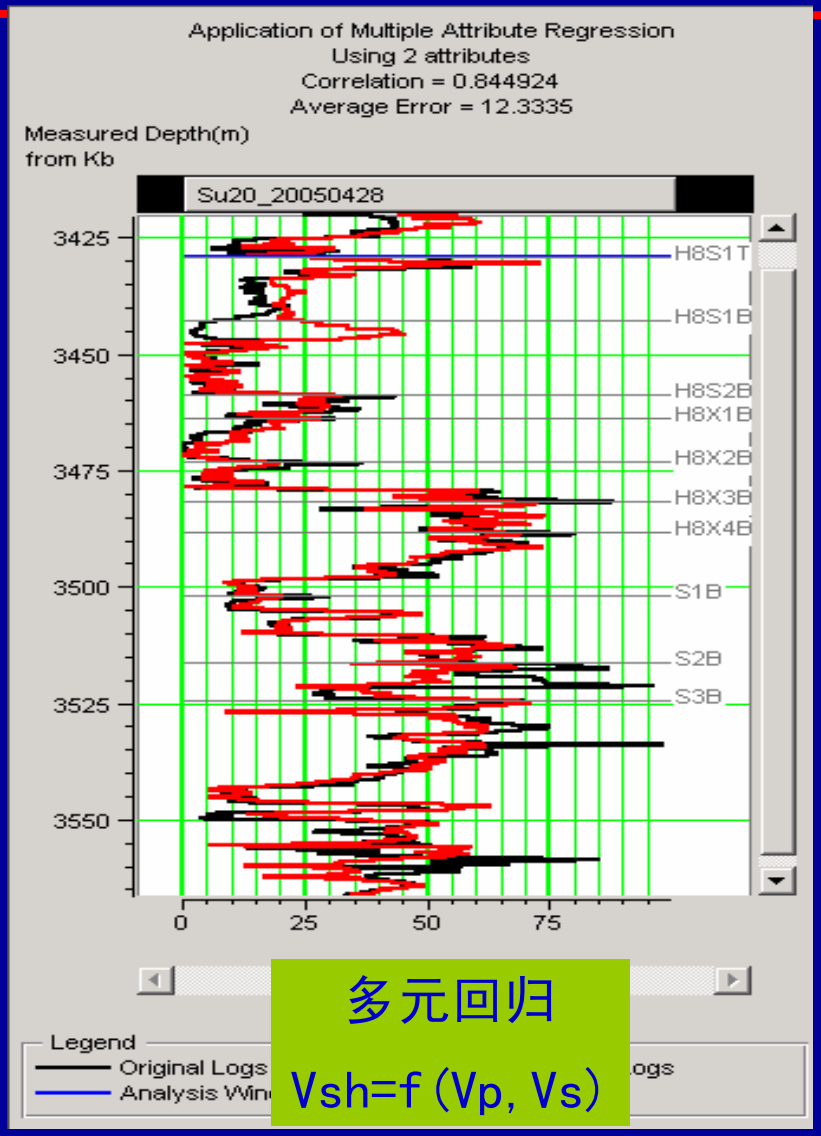




五、应用

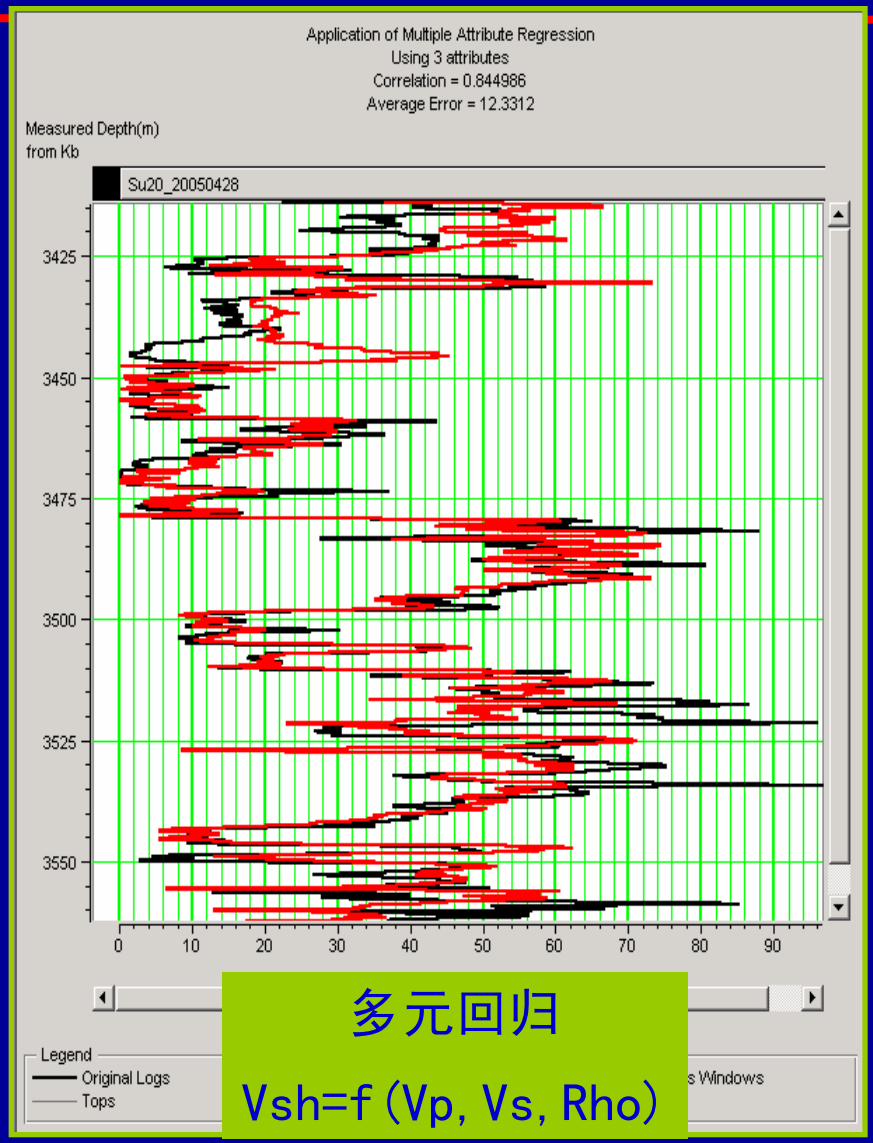
岩性因子分析-回归分析

敏感因子分析



多元回归

Vsh=f (Vp, Vs)



多元回归

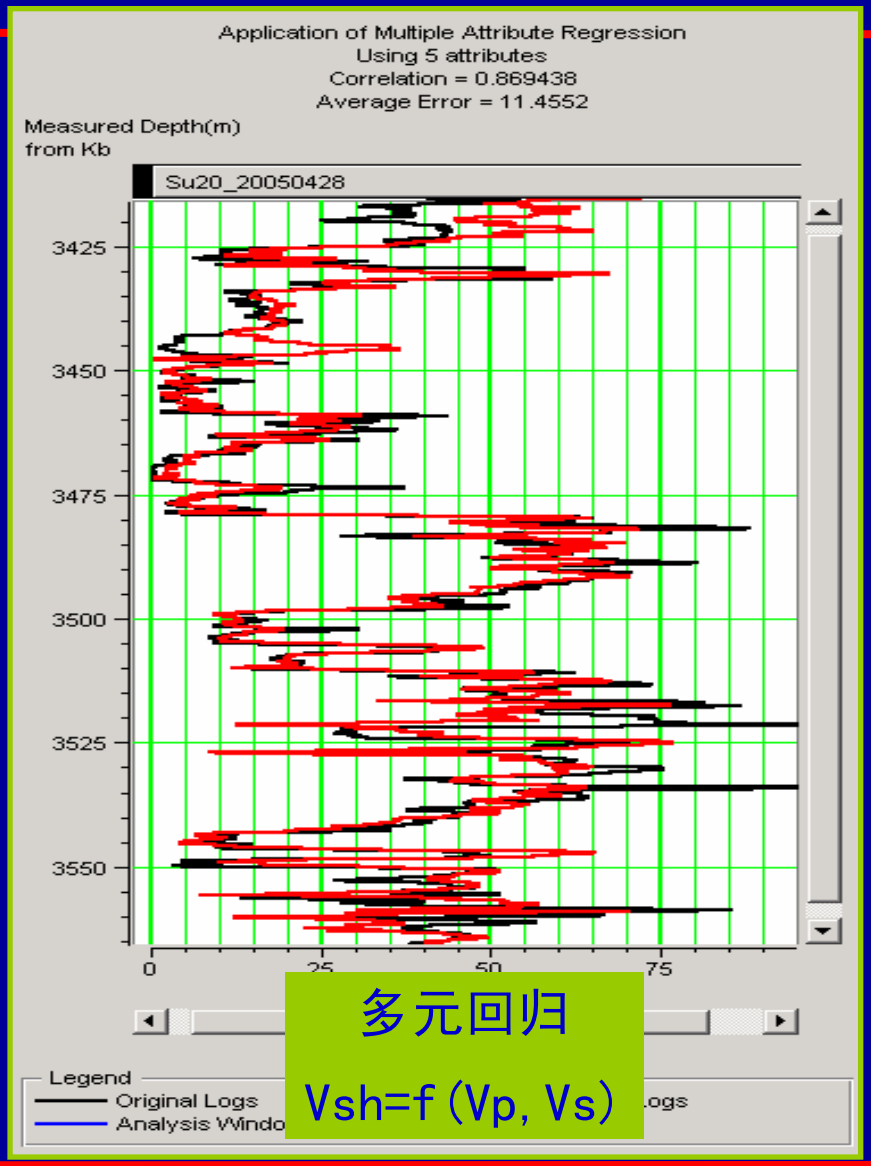
Vsh=f (Vp, Vs, Rho)

地质统计（多元回归与神经网络分析）－结论

五、应用

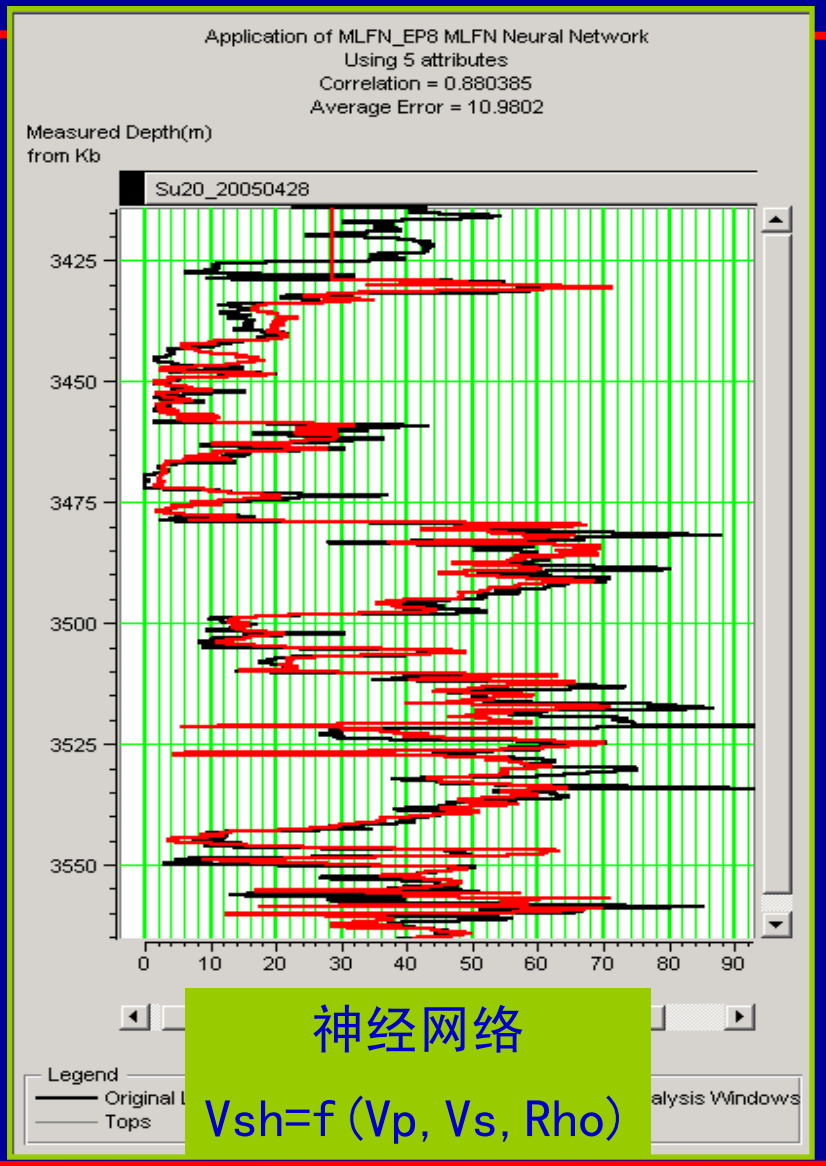
岩性因子分析-回归分析

敏感因子分析



多元回归

Vsh=f (Vp, Vs)



神经网络

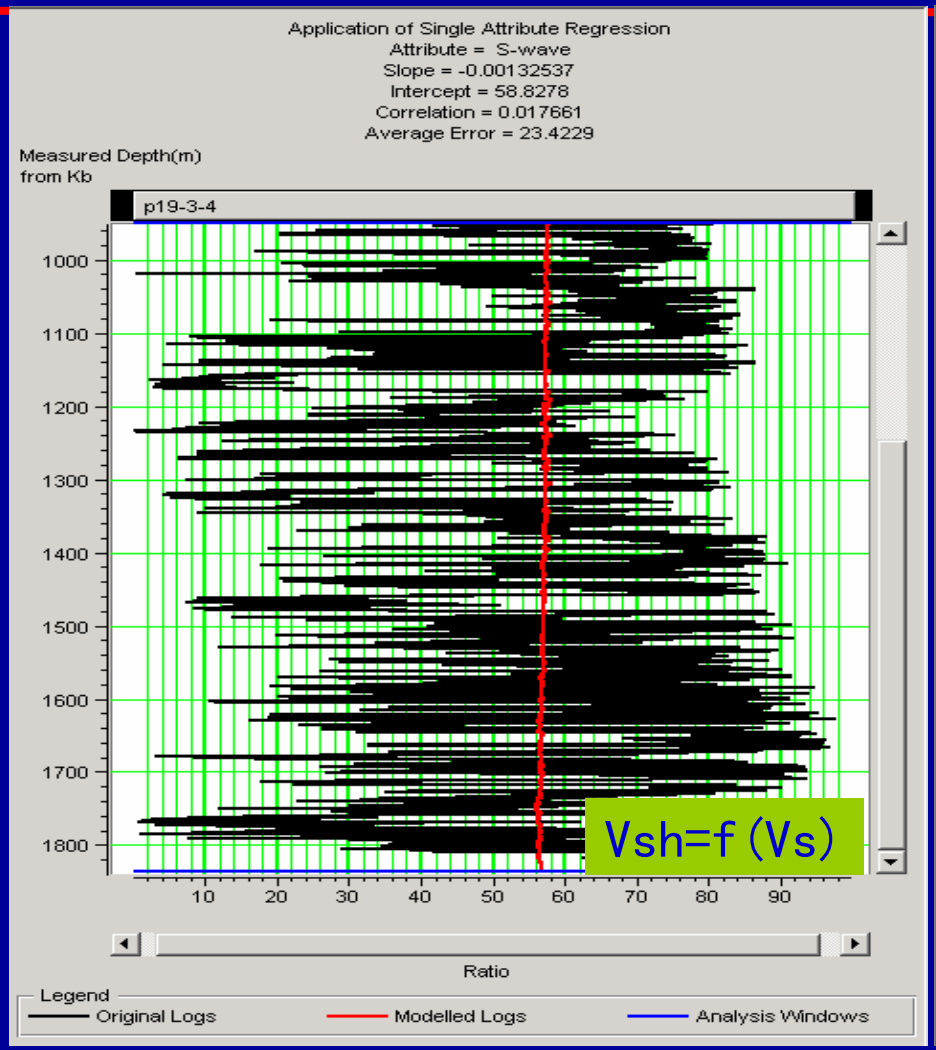
Vsh=f (Vp, Vs, Rho)

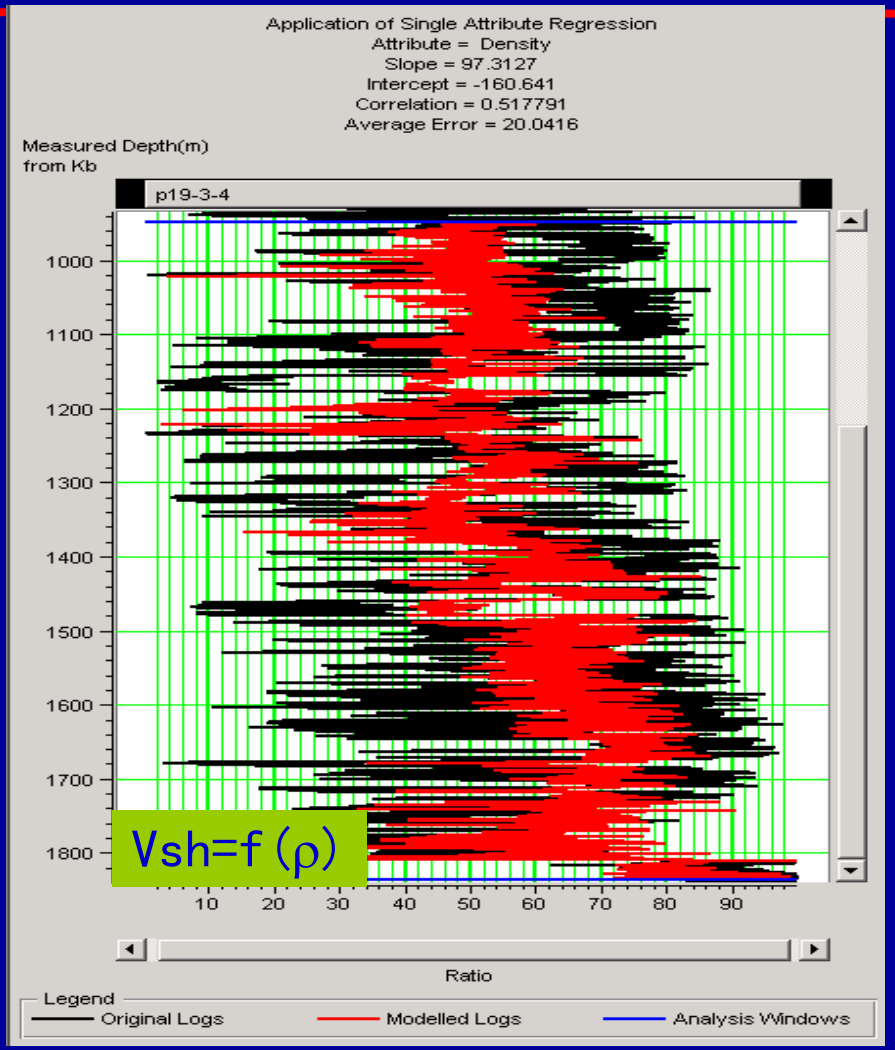
地质统计（多元回归与神经网络分析）－结论

五、应用

岩性因子(渤海湾)

敏感因子分析

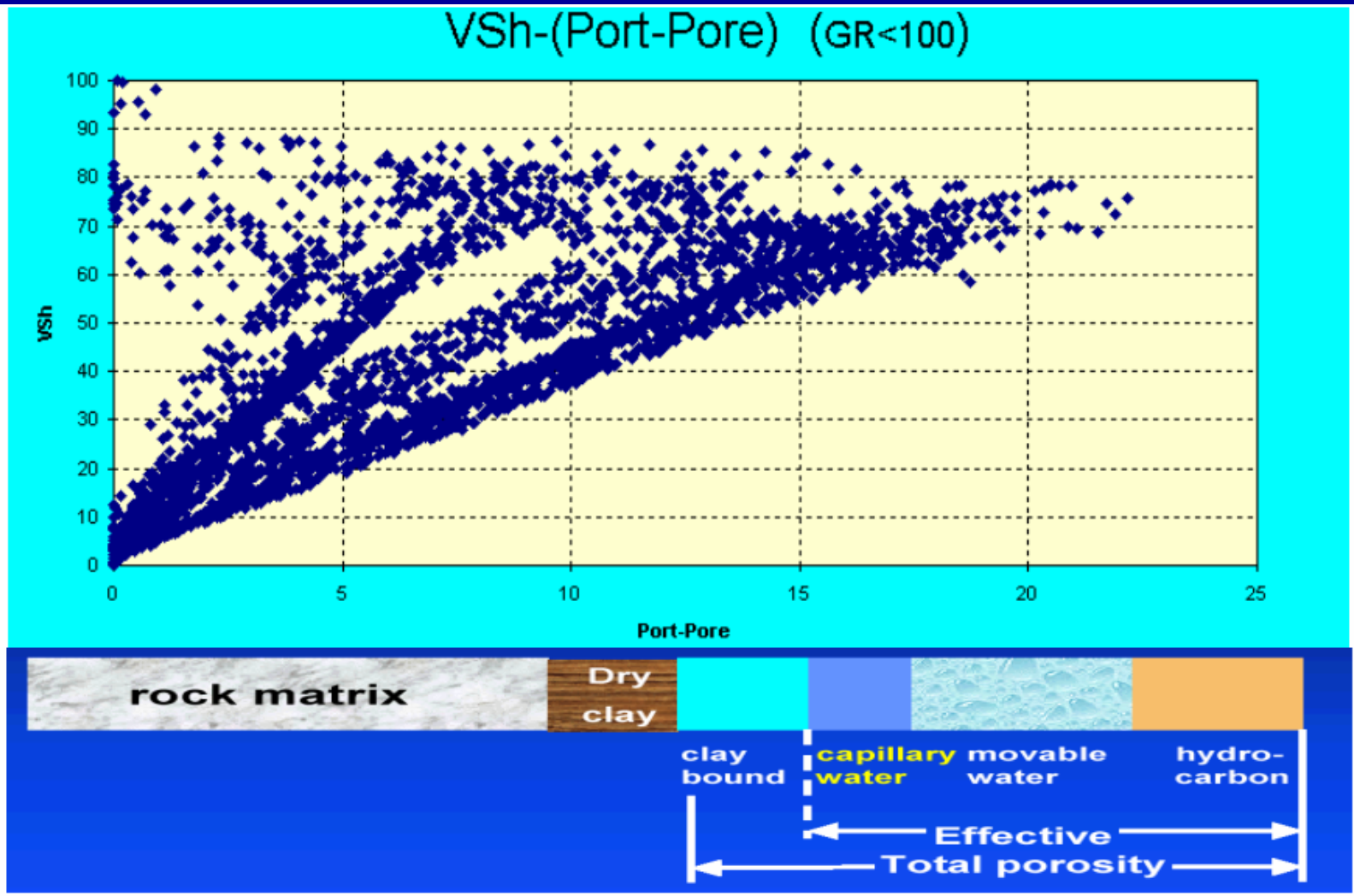




高孔高渗储层中横波速度与泥质含量几乎没有关系，但密度与泥质含量关系密切

岩性因子(渤海湾)

敏感因子分析

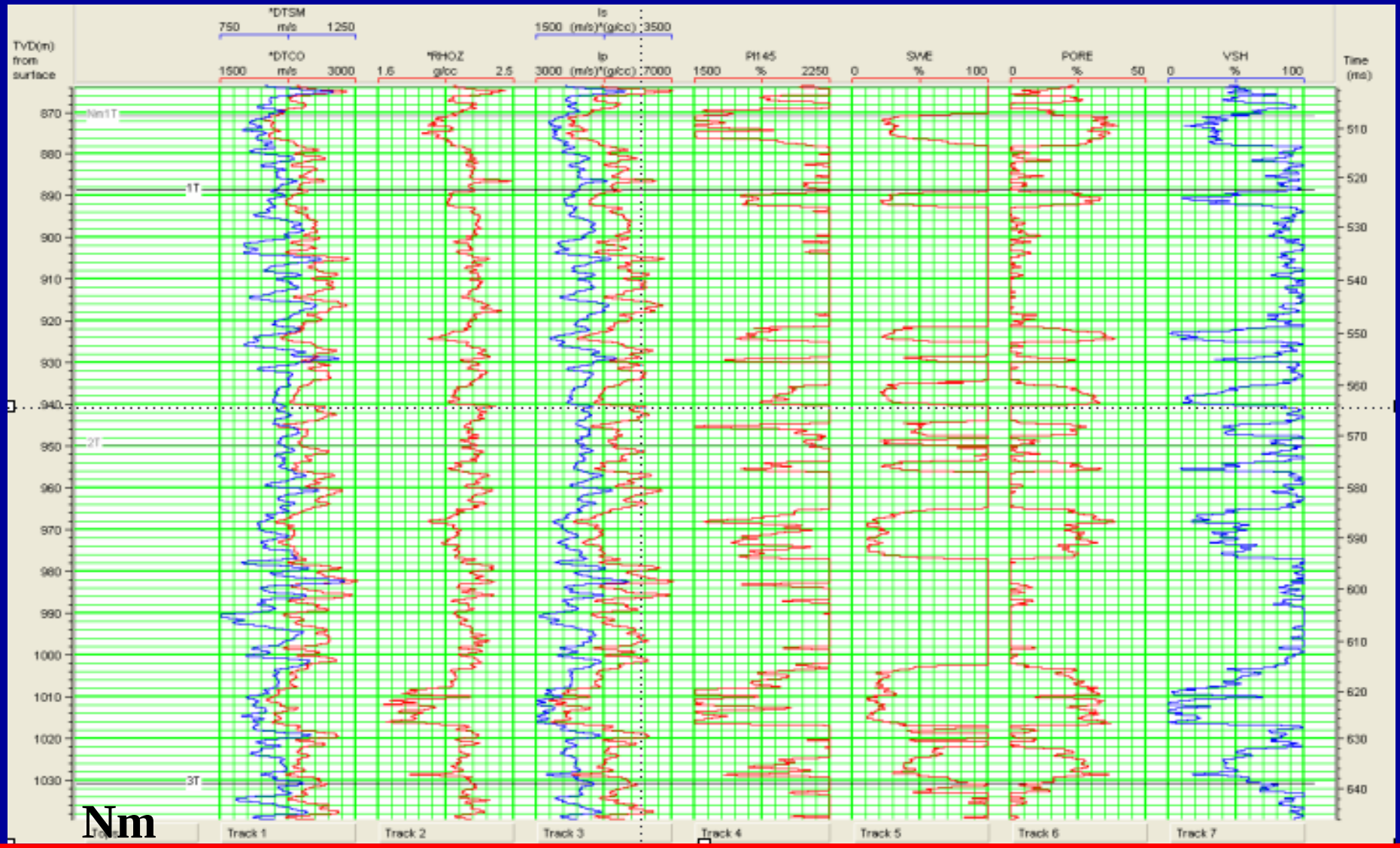


泥质含量对横波速度的影响模式可能与泥质的分布有关

五、应用

岩性因子(渤海湾)

敏感因子分析



五、应用

岩性因子(渤海湾)

敏感因子分析

