



典型库区断层对水库蓄水及水位变化的动态 应力响应——以紫坪铺水库为例

罗钧¹ 赵翠萍¹ 汪荣江²

1 中国地震局地震预测研究所, 北京, 100036, 中国

2 德国波茨坦地学研究中心, 波茨坦, D-14473, 德国



1. 引言

1.1 紫坪铺水库

➤ 汶川地震的震中距离紫坪铺水库的大坝不足 10km

➤ 初始蓄水时间:
2005年9月10日

坝 高: 156 m

库 容: 11.2 亿 m³

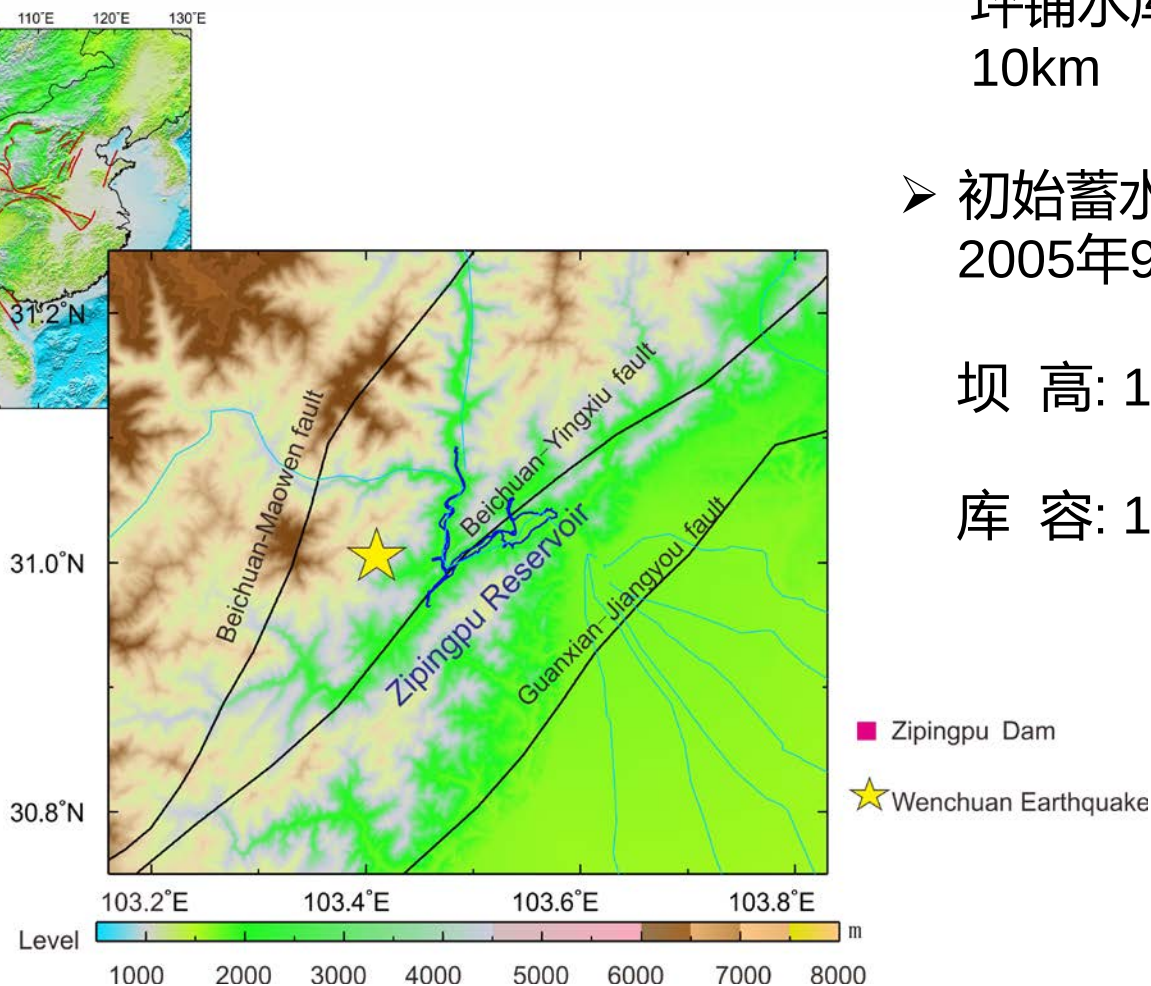


Fig.1 The tectonic background map of the Wenchuan earthquake



□库水对汶川地震发生的关系**未达成统一共识**

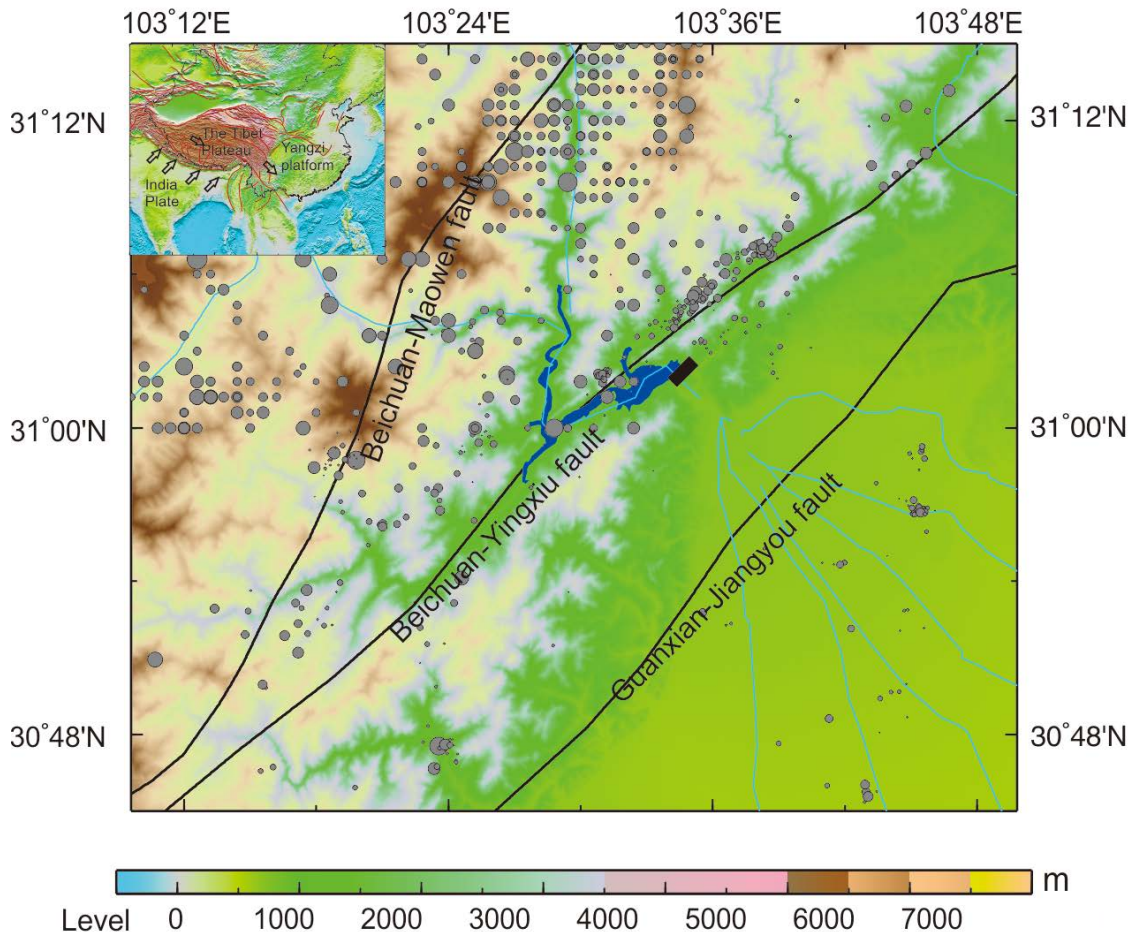
□库区发生的小地震的发生机制研究**空白**



2. 库区的地质构造和地震活动性

2.1 地震活动空间分布特征 - 蓄水前的库区地震活动

(a) The seismicity before the impoundment

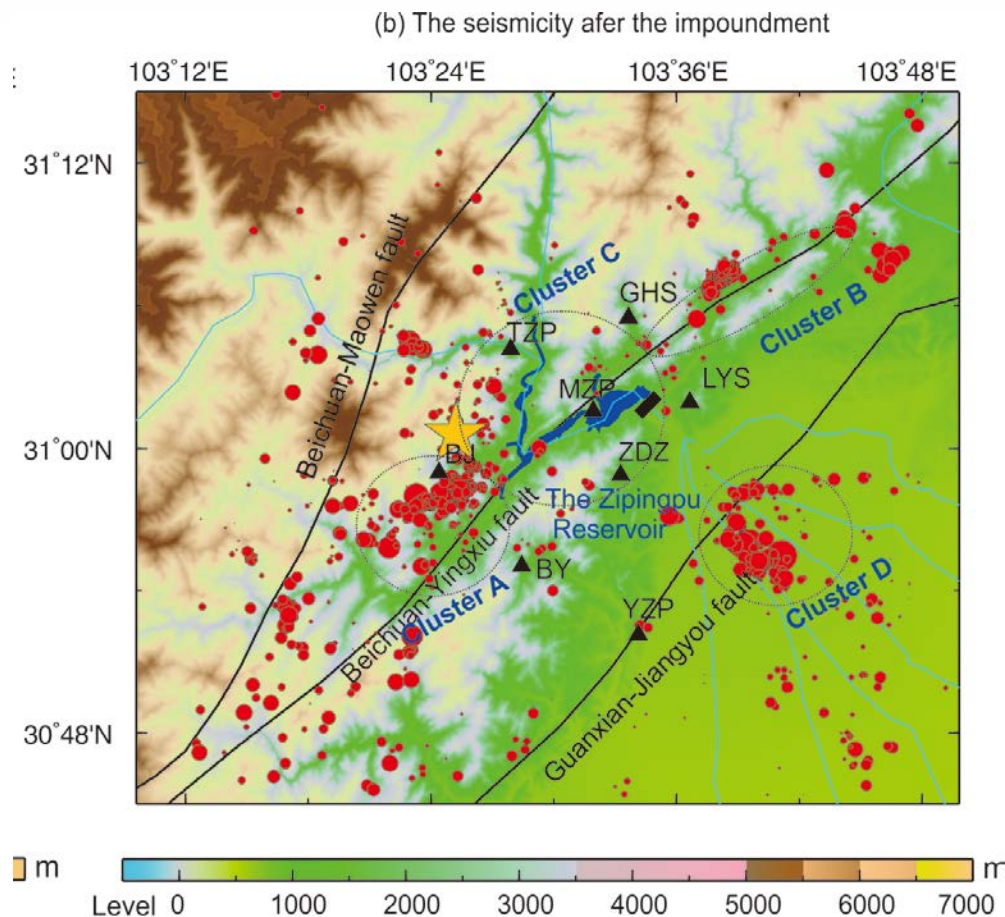


1988.1 至 2004.8紫坪铺库区地震活动的分布



2. 库区地质构造和地震活动性

2.2 地震活动的空间分布特征 --- 蓄水后的地震活动



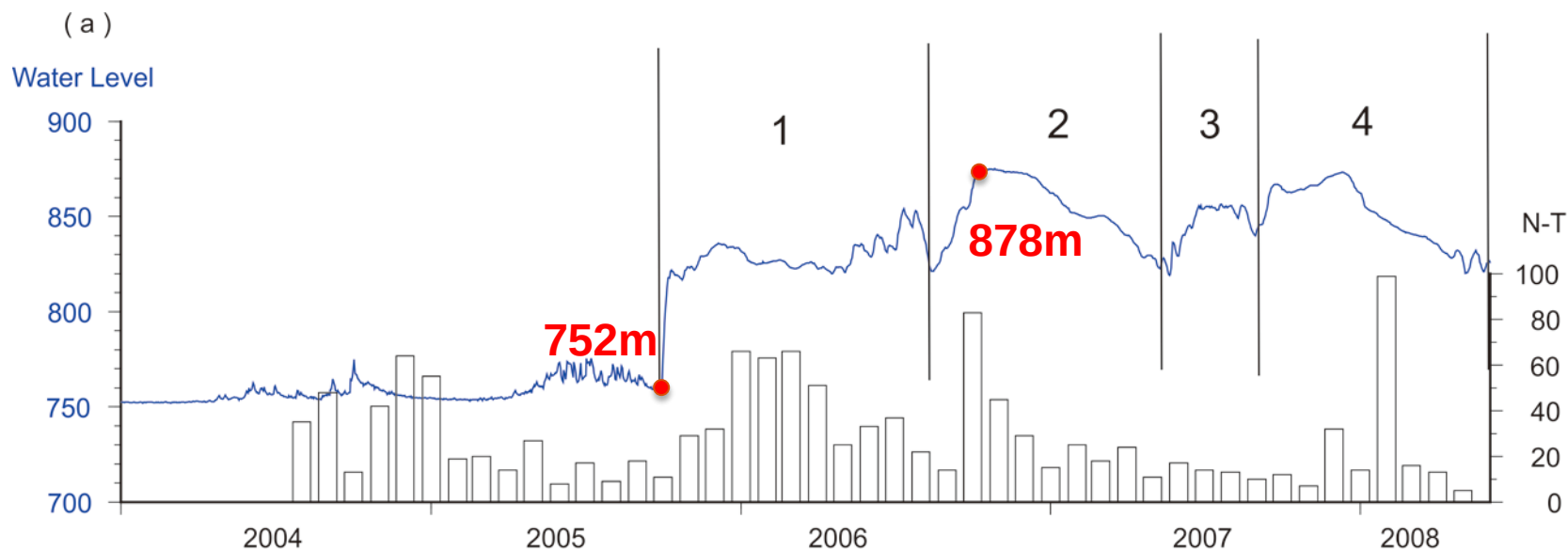
2005年9月30日水库蓄水后至汶川地震发生前库区的地震活动空间分布



2. 库区的地质构造和地震活动性

2.2 地震活动时间分布特征

➤ 地震月频次统计结果显示：第一、二、四蓄水阶段库水的抬升降落与地震月频次的相关性良好



地震月频次与水位的关系



2. 库区的地质构造和地震活动性

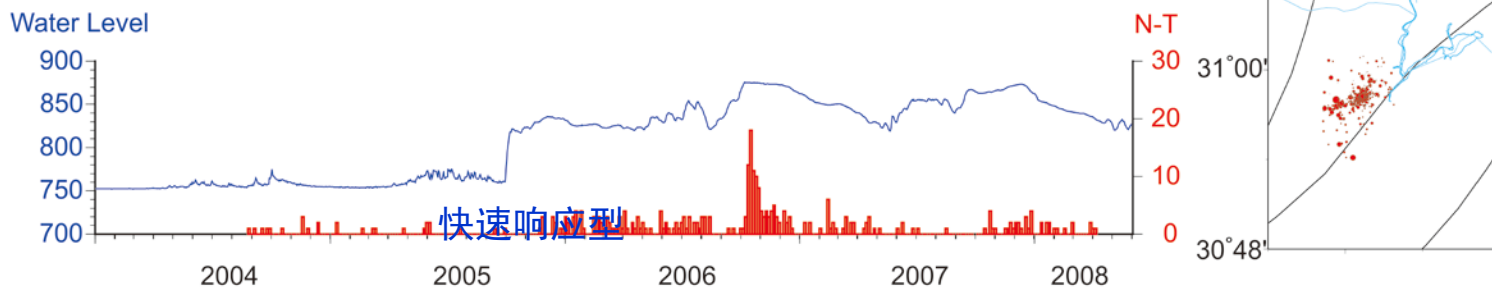
延迟响应型

丛集 A

快速响应型

丛集 B

(b)



丛集 C

(c)





3. 方法

断层面的上的
介质强度

$$\Delta s = \mu_f (\Delta \sigma_n - \Delta p) - \Delta \tau$$

摩擦系数

有效正应力

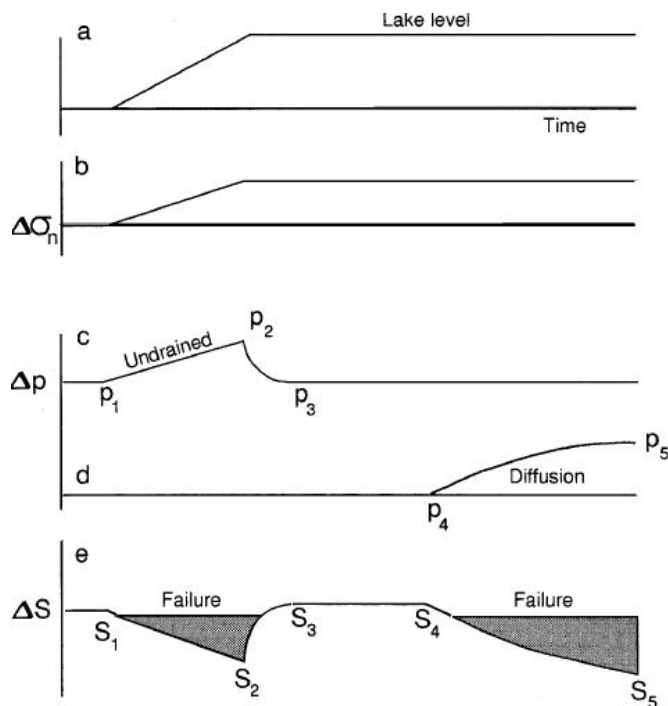
沿断层滑动方向
的剪应力

水位

正应力

孔隙压

介质强度变化



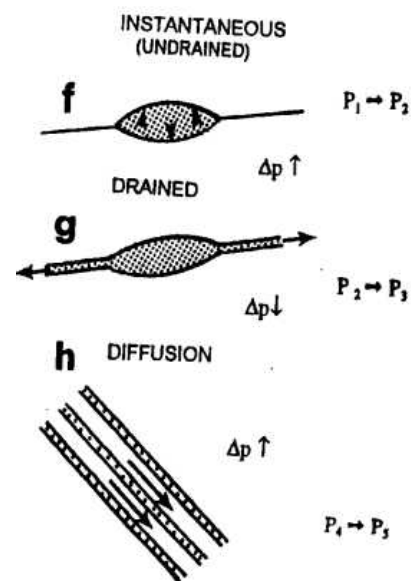
I 弹性效应

II 非排水效应

III 排水效应

P1-P2
P2-P3

P4-P5



水库蓄水引起的孔弹耦合效应 (Talwani,1997)



3. 方法

- (1) **水体载荷**引起的弹性应力变化: $\Delta\sigma_n \quad \Delta\tau$
- (2) **水体载荷**引起的非排水孔隙压变化: Δp_u
- (3) **排水作用**引起的扩散孔隙压变化: Δp_{diff}

$$\begin{cases} \Delta CFS = \Delta\tau + \mu\Delta\sigma_n' \\ \Delta\sigma_n' = \Delta\sigma_n + \Delta p \end{cases}$$

$$\Delta p = \Delta p_u + \Delta p_{diff}$$

$$\Delta p_{diff} \quad ?$$



3. 方法

层状半无限空间孔弹耦合解析解:

(Wang and Kümpel, 2003)

$$(\lambda + 2\mu)\nabla(\nabla \cdot \vec{u}) - \mu\nabla \times (\nabla \times \vec{u}) - \alpha\nabla p = 0$$

$$Q^{-1} \frac{\partial p}{\partial t} + \alpha \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot \vec{u} - \chi \nabla^2 p = q(\vec{x}, t)$$

扩散孔隙压增加
引起的孔隙体积变化

固体的压实作用
引起的孔隙
体积变化

单位时间单
位面积流过的
库水流量

单位时间的
注水量

未知量:

$\vec{u}$ p

λ, μ Lam'e 常数

Q^{-1} 压缩模量 (Biot, 1941)

χ 达西渗透率

α 有效压缩系数

实际计算中:

μ Lam'e 常数

B Skempton系数

D 孔压的扩散系数

ν, ν_u Poisson 泊松比



3. 方法

半空间的 弹性理论

A

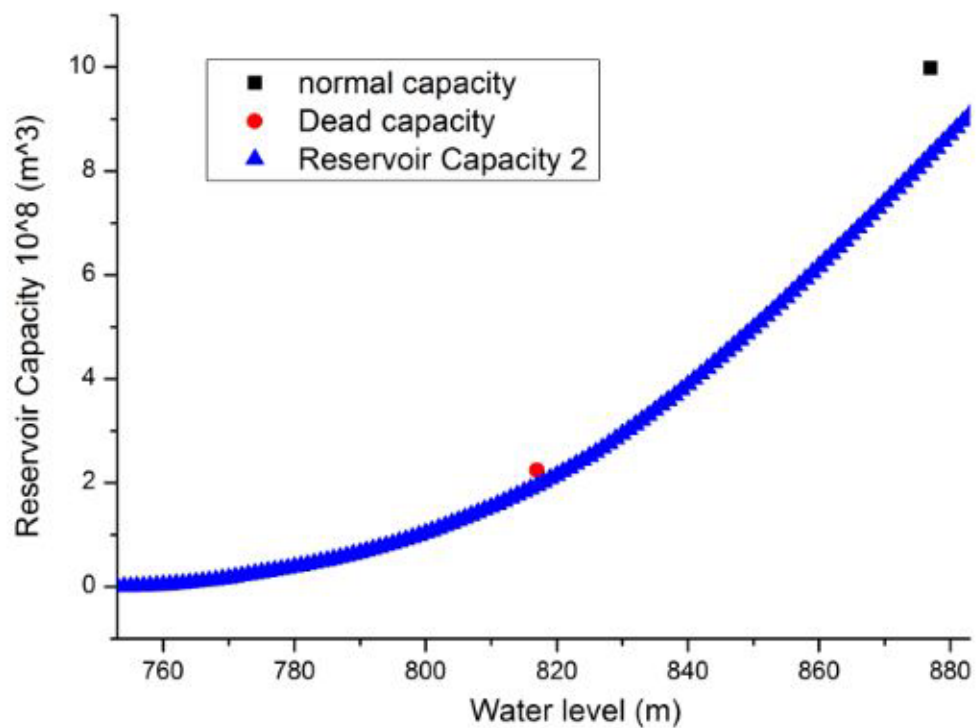
Boussinesq 方程
(Jaeger and
Cook, 1969) 求解
正应力和剪应力的
变化量

B

非排水孔隙压



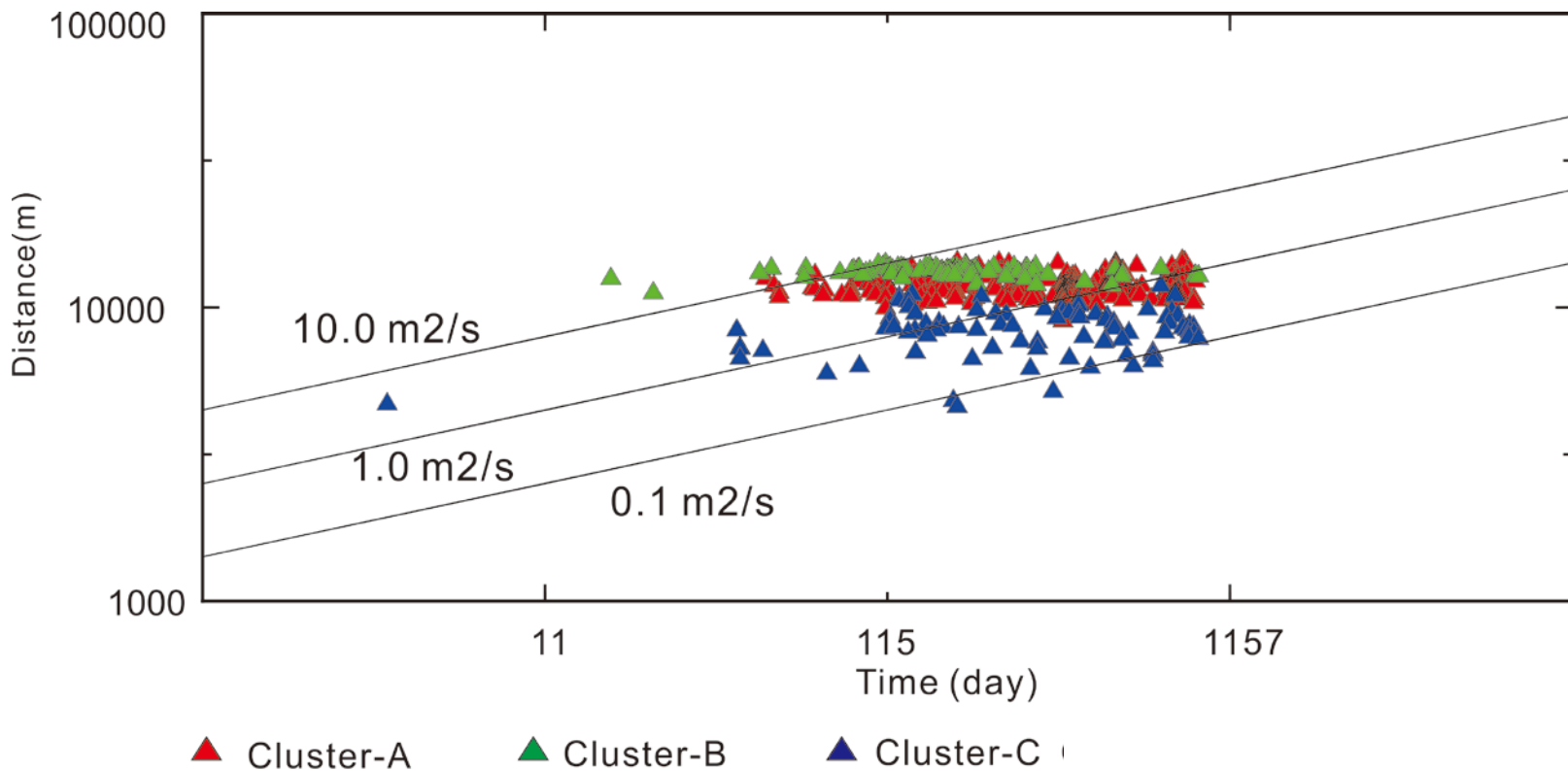
➤ STRM30 模型
网格尺度 $0.0008^{\circ} \times 0.0008^{\circ}$





4. 扩散孔隙压的作用

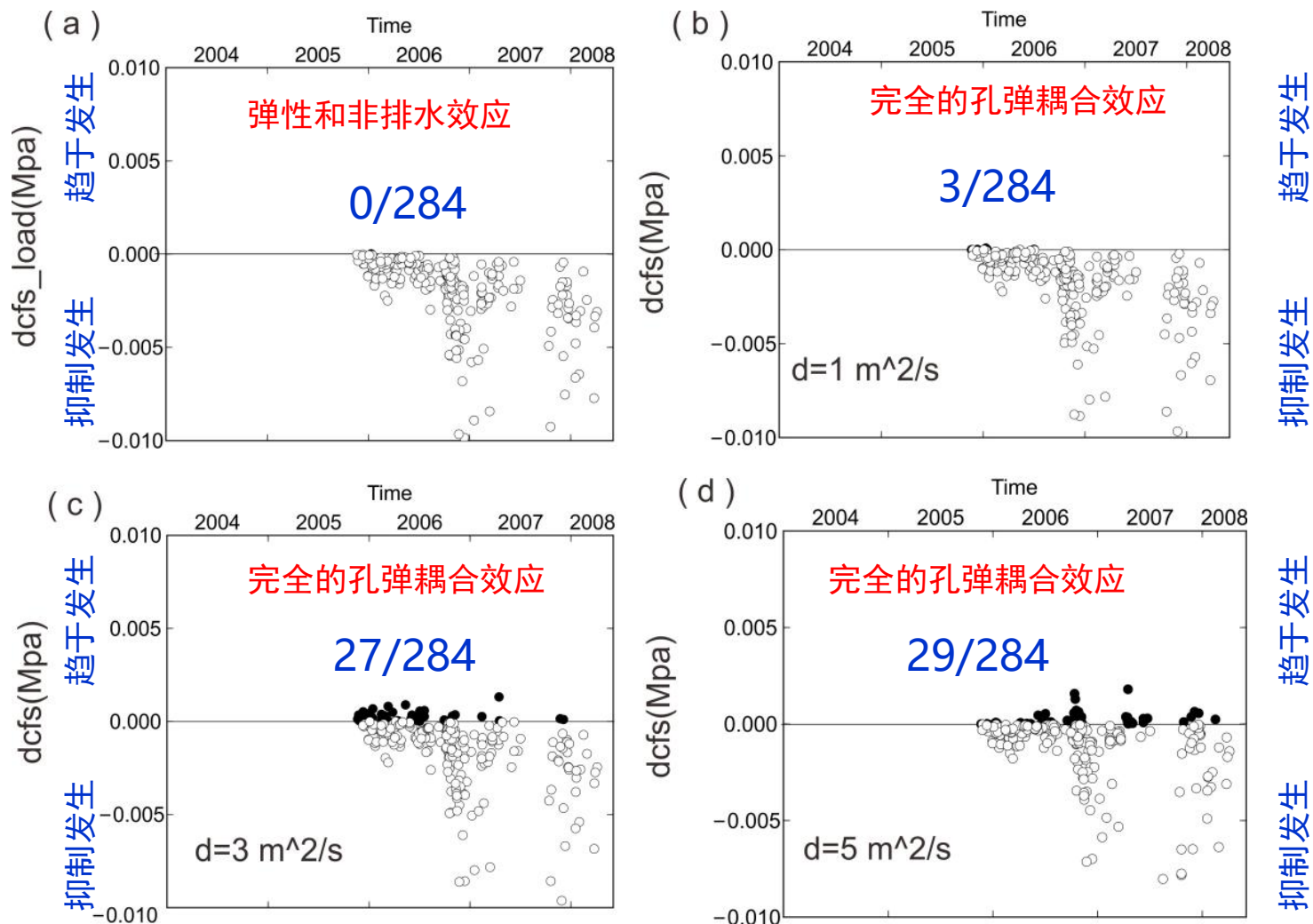
4.1 水利扩散系数D 的估算



$$D = r^2 / 4\Delta t \text{ (Talwani, 1997 et al)}$$

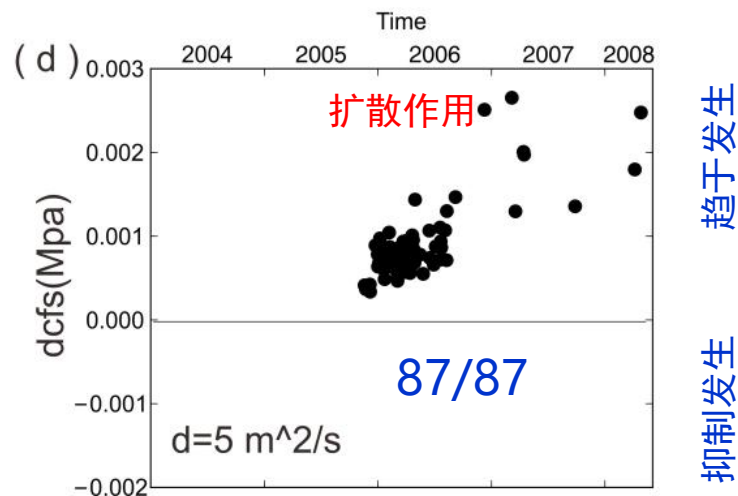
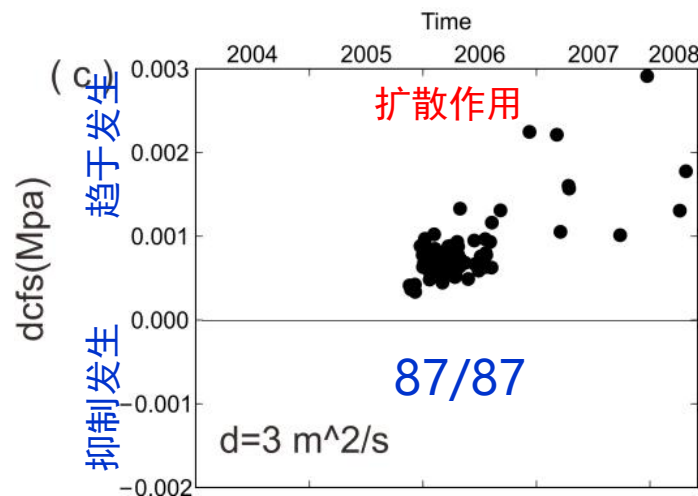
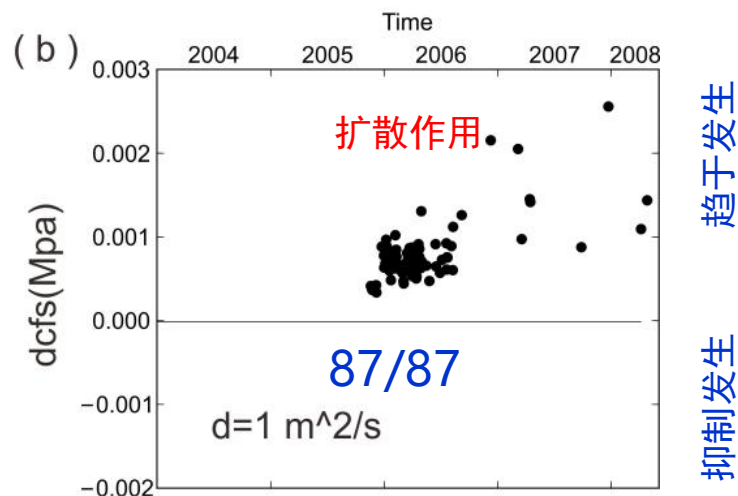
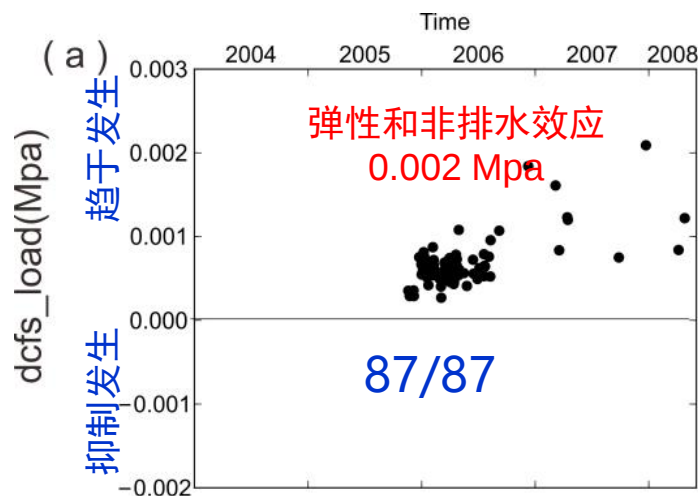
5、三个丛集地震震源处的库仑应力变化量

5.1 丛集 A



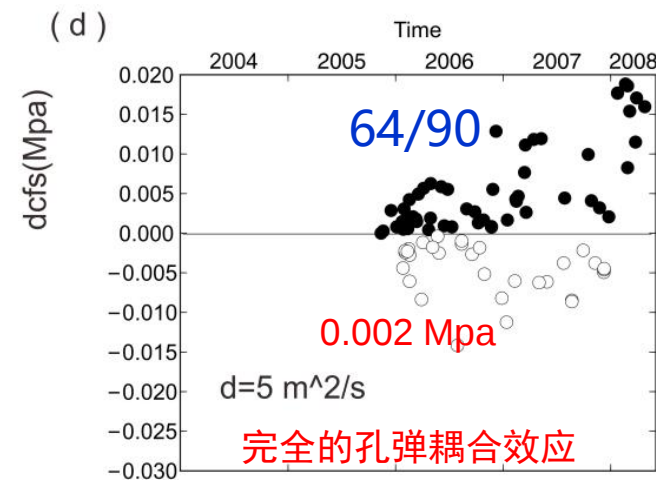
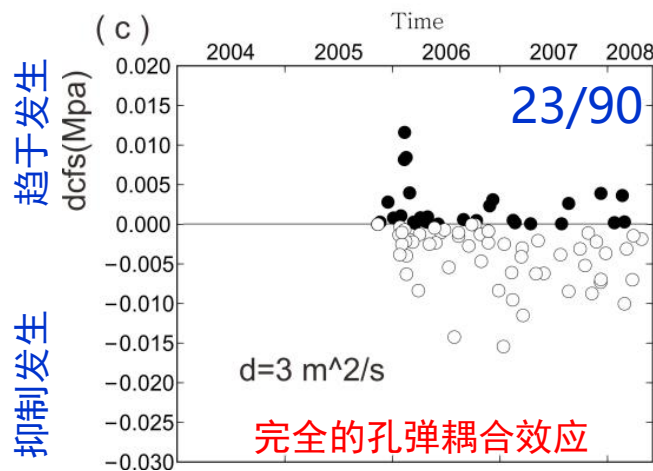
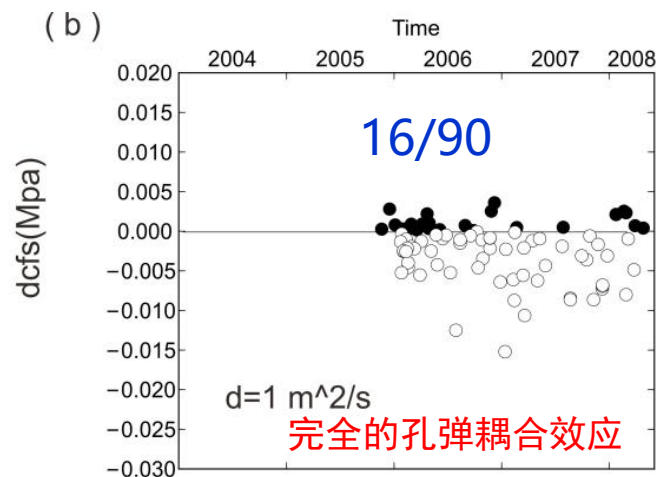
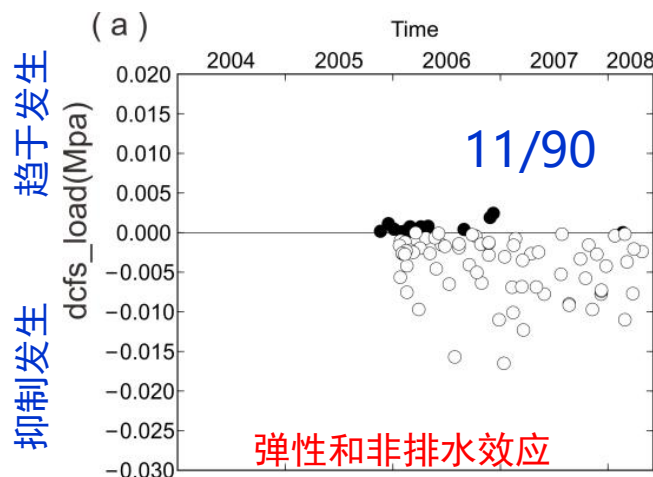
5、三个丛集地震震源处的库仑应力变化量

5.2 丛集 B

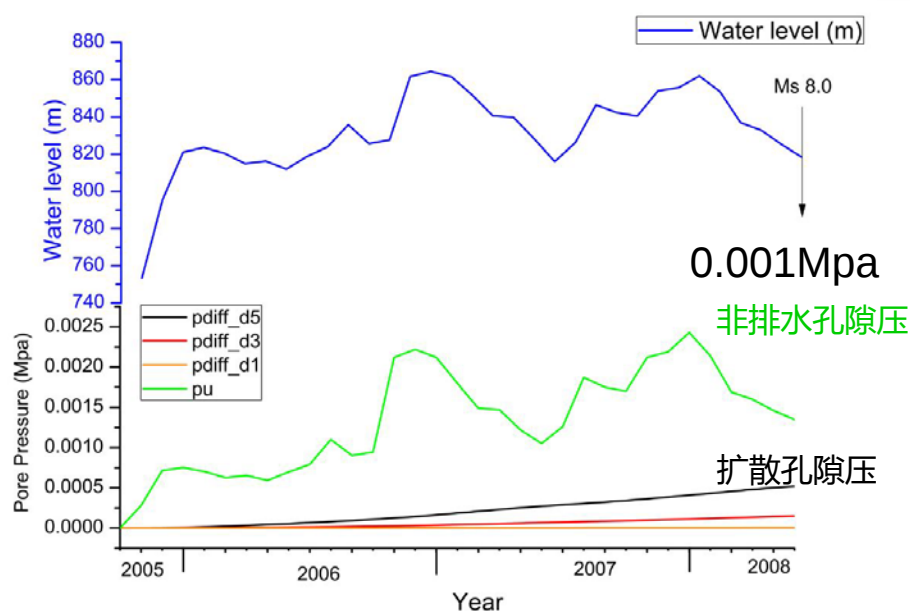


5、三个丛集地震震源处的库仑应力变化量

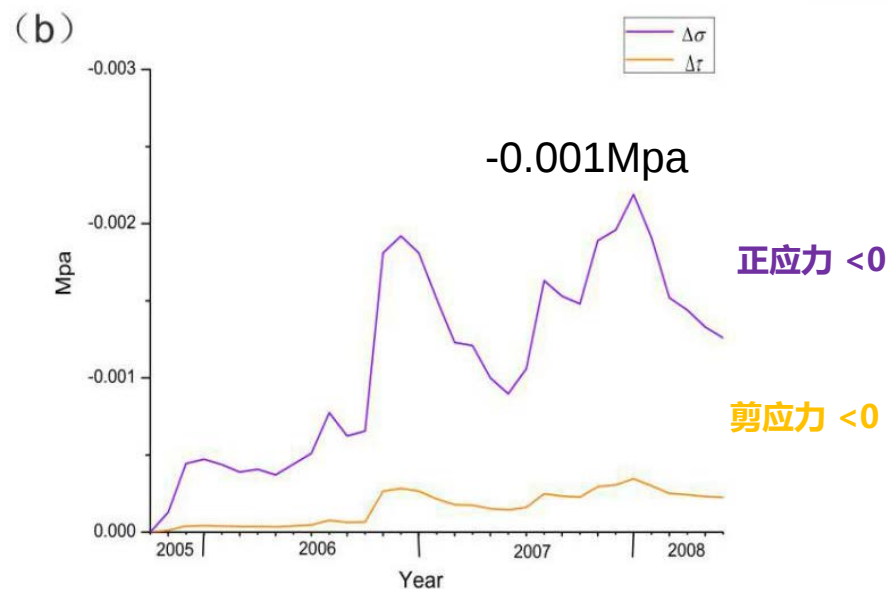
5.3 丛集 C



6、汶川地震震源处的应力变化



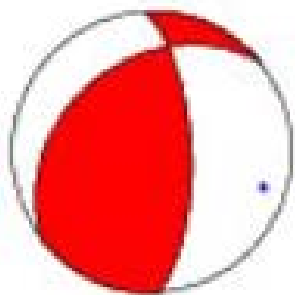
➤ 汶川地震震源处扩散孔隙压随时间的变化



➤ 汶川地震震源处正应力和剪应力随时间的变化

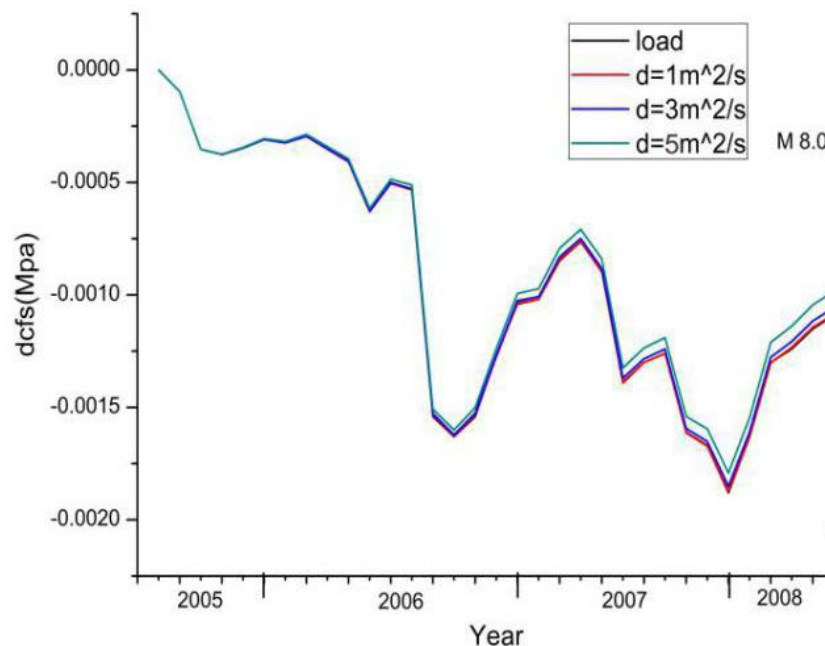
6、汶川地震震源处的应力变化

哈佛大学的CMT解



(strike: 231° dip: 35° rake: 138°)

(c)

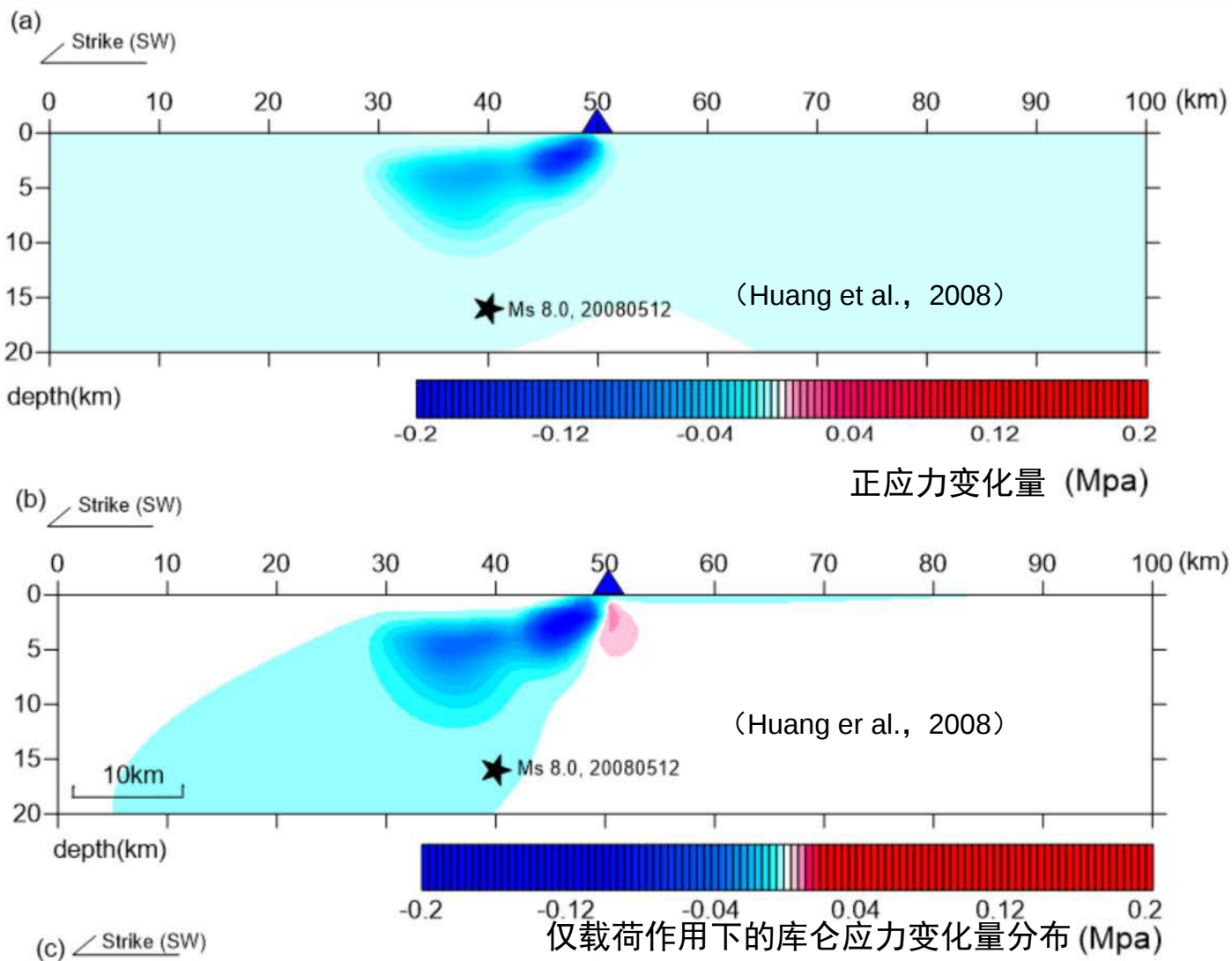


仅考虑载荷作用的库仑应力变化量
 $dcfs_{load} = -0.002 \text{ Mpa}$

孔弹耦合下的库仑应力变化量
 $dcfs = -0.001 \text{ Mpa}$

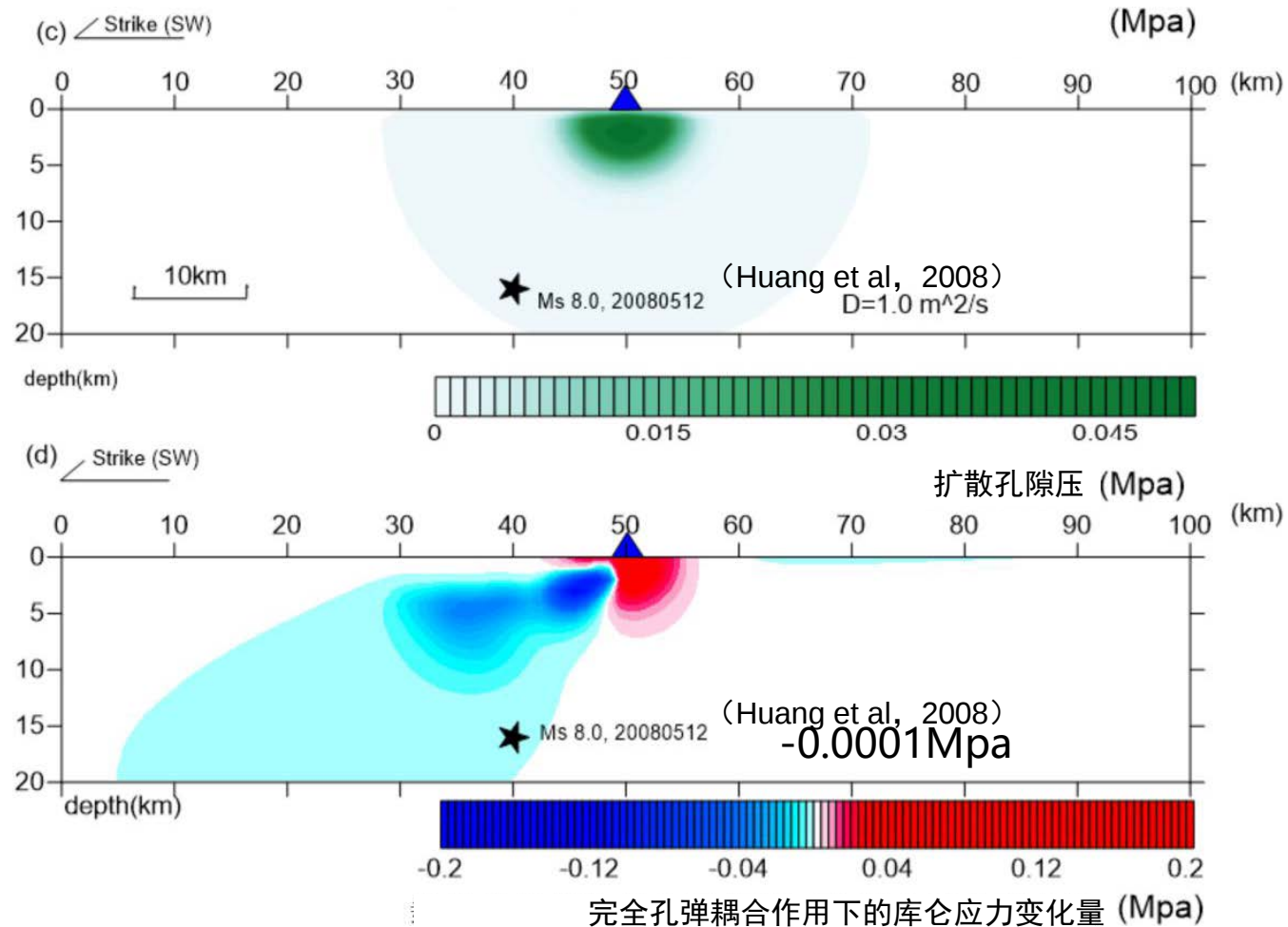
➤ 汶川地震震源处的库仑应力变化量随时间的分布

6、汶川地震震源处的应力变化



汶川地震发生时北川-映秀断裂带上正应力、仅荷载作用下的库仑应力变化量的分布

6、Stress Variance of the Wenchuan Hypocenter



汶川地震发生时北川-映秀断裂带上扩散孔隙压、完全孔弹耦合作用下的库仑应力变化量的分布



7 结论

- 紫坪铺水库西南缘的地震丛集中，约10% 的地震活动与水库蓄水有较强的联系，其中扩散孔隙压的影响是主要的致震因素；
- 紫坪铺水库东北缘的地震丛集中，几乎所有的地震活动均和水库蓄水有较强的联系，库水的重力载荷是主要的致震因素；
- 紫坪铺水库水体正下方的丛集中，接近71%的地震活动与水库蓄水有关，扩散孔隙压的影响是使断层失稳致震因素；
- 汶川发生前地震震源处的库仑应力变化量小于-0.001Mpa量级，一定程度上表明紫坪铺蓄水并未引起汶川地震的发生。



INSTITUTE OF EARTHQUAKE
FORECASTING, CEA

The issue of the International Conference for the Decade Memory
of the Wenchuan Earthquake with the 4th International Conference
on Continental Earthquakes (The 4th ICCE)

PAGEOPH (under reviewing)

谢 谢!

敬请各位老师批评指正!

3.5 扩散孔隙压计算模型

■ 地质模型选取： 参照周斌等(2009)的结果

➤ 渗水层厚度

北川-映秀断裂直接出露地表，宽约5m

➤ 渗水层(断层)东西两侧岩性分布：

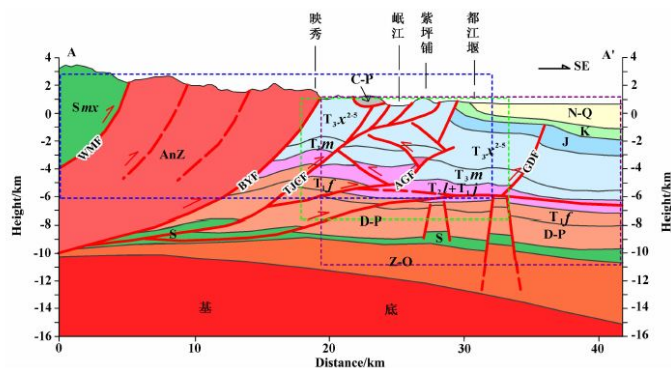


图2 紫坪铺库区二维地质构造剖面(位置见图1)

周斌等(2009)

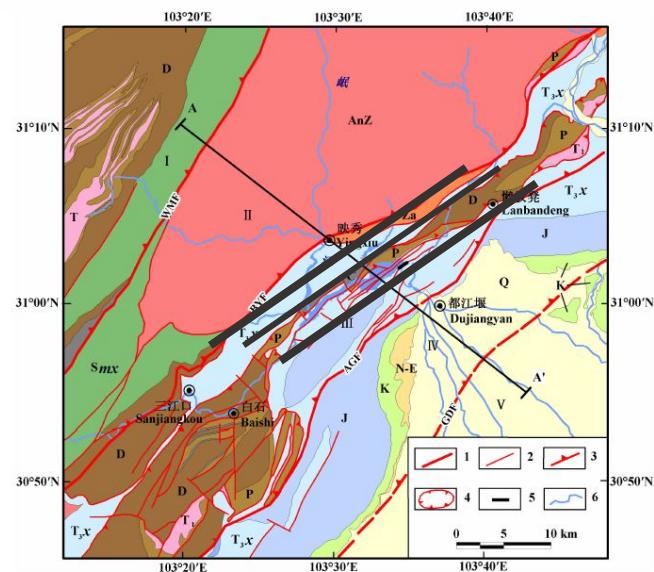


图1 紫坪铺库区地质构造略图(据灌县幅1:20万区域地质图修改^[33])

周斌等(2009)

东侧	粉砂岩、砂质岩、泥岩为主
西侧	花岗岩、斜长石、石英

Diffuse pore pressure in the hypoepicenter in three clusters

